

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

Rozprawy
nr 34

MACIEJ K. KUMOR

Zmiana mikrostruktury iłów
monomineralnych i iłu plioceńskiego
pod wpływem cyklicznego
przemrażania i odmrażania

BYDGOSZCZ – 1989

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

Rozprawy
nr 34

MACIEJ K. KUMOR

Zmiana mikrostruktury iłów
monomineralnych i iłu plioceńskiego
pod wpływem cyklicznego
przemrażania i odmrażania

BYDGOSZCZ – 1989

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
doc. dr hab. Juliusz Skonieczny

OPINIODAWCY

prof. dr hab. Barbara Grabowska-Olszewska
prof. zw. dr hab. inż. Julian Pałka
prof. dr hab. inż. Kazimierz Pietrzyk

REDAKTOR NAUKOWY

doc. dr hab. inż. Edward Kujawski

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE

mgr Halina Klupczyńska, Zbigniew Gackowski



Wydano za zgodą Rektora
Akademii Techniczno-Rolniczej
w Bydgoszczy

ISSN 0709-0597

WYDAWNICTWO UCZELNIANE AKADEMII TECHNICZNO-ROLNICZEJ
W BYDGOSZCZY

Wyd. I. Nakład 150 egz. Ark. aut. 9,55 ark. druk. 8,75. Papier kl. III, 80 g, 70 × 100
Oddano do druku w lipcu 1989 r. Druk ukończono w sierpniu 1989 r.

Cena 363 zł

Prasowc Zakłady Graficzne RSW „Prasa-Książka-Ruch” w Bydgoszczy, ul. Dworcowa 13.
Zamówienie nr 2529/89. TR E-3

S p i s t r e ś c i

	str.
WSTĘP	7
1. OMÓWIENIE ZAGADNIEŃ DOTYCZĄCYCH MIKROSTRUKTURY I PRZEMRAŻANIA SPOISTEGO OŚRODKA GRUNTOWEGO	9
2. CEL I ZAKRES PRZEPROWADZONYCH BADAŃ I STUDIÓW	17
2.1. Cel pracy	17
2.2. Metodyka i zakres badań	18
3. PRZEPROWADZONE BADANIA I ICH WYNIKI	23
3.1. Charakterystyka badanych gruntów	25
3.2. Przygotowanie prób do badań	28
3.3. Przebieg procesu zamrażania i odmrażania	29
3.4. Badania nad strukturą	38
3.4.1. Redystrybucja wody w ilach cyklicznie mrożonych i od- mrażanych	38
3.4.2. Pęcznienie mrozowe	41
3.4.3. Próba rozmakania w wodzie	43
3.4.4. Skład mikroagregatów	48
3.4.5. Zmiana struktury ilów w wyniku zamrażania i odmraża- nia	52
3.5. Badania mikrostruktury	57
3.5.1. Test sorpcyjny - WSTest	57
3.5.2. Badania w elektronowym mikroskopie skaningowym - SEM	62
4. MROZOWE TRANSFORMACJE MIKROSTRUKTURY ILÓW	85
4.1. Mechanizm zmian mikrostruktury	86
4.2. Efekty i trwałość zmian mikrostruktury	91
5. WPŁYW MROZOWYCH ZMIAN MIKROSTRUKTURY NA WYBRANE WŁASNOŚCI FIZYCZ- NO-MECHANICZNE ILÓW	99
5.1. Granice konsystencji	99
5.2. Wytrzymałość na ścinanie	106
5.3. Geotechniczne aspekty mrozowych zmian mikrostruktury	114
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	121
LITERATURA	125
STRESZCZENIA	135

Ważniejsze oznaczenia stosowane w pracy

BW	- bentonit węgierski MAD,
Ch	- chemizm, stężenie i rodzaj jonu roztworu porowego,
c_u	- spójność,
d	- odległość między cząstkami,
f, f_0	- liczba cykli przemrażania - odmrażania,
f_i	- frakcja ilowa,
f_p	- frakcja piaskowa,
f_{π}	- frakcja pyłowa,
F	- typy i liczba kontaktów między cząstkami,
h	- wysokość próbki,
I_L	- stopień plastyczności,
IN	- ił naturalny, pliociński z Bydgoszczy,
I_p	- wskaźnik plastyczności,
K	- kształt i wymiary agregatów,
K_n	- kształt, forma i wymiary porów,
KS	- kaolin z Sedlec,
k_{10}	- współczynnik wodoprzepuszczalności,
M	- skład mineralny,
n	- porowatość, udział faz budujących grunt,
n_p	- porowatość między mikroagregatowa,
n_w	- porowatość wewnątrz mikroagregatowa,
O	- orientacja i stopień orientacji cząstek,
PA	- ciśnienie przyciągania Londona - van der Waalsa,
q_f	- obliczeniowy opór jednostkowy,
S	- powierzchnia właściwa gruntu,
SEM	- skaningowy mikroskop elektronowy,
t_f	- czas wewnętrznej równowagi izotermicznej gruntu zamrażanego,
t_o	- czas odmrażania,
$t_{obl}, t_{0,01}$	- wartość statystyki t,
t_{odmr}	- czas odmrażania,
t_p	- czas pęcznienia,
t_{rt}	- czas równoważenia termicznego gruntu odmrażanego,
t_s	- czas schładzania gruntu niezamarzniętego,
t_{so}	- czas szybkiego ogrzewania próbki zamrożonej,
t_{wm}	- czas szybkiego wyrównywania się temperatury gruntu i otoczenia, zamrażanego
t_{wo}	- czas wyrównywania się temperatury odmrożonego gruntu,
t_z	- czas zamrażania,
$t_{zamr.}$	- czas zamrażania,
V_A	- energia przyciągania Londona - van der Waalsa,
V_p	- wskaźnik pęcznienia,

V_{pm}	- wskaźnik pęcznienia mrozowego gruntu mrożonego,
V_R	- elektrostatyczna energia odpychania,
V_T	- całkowita energia oddziaływania między elementami strukturalnymi,
w	- wilgotność układu gruntowo-wodnego,
w_L	- granica płynności,
w_n	- wilgotność naturalna,
w_o	- wilgotność wyjściowa, początkowa,
w_p	- granica plastyczności,
w_s	- granica skurczalności,
WSTest	- test sorpcyjny,
α	- poziom istotności,
δ	- grubość cząstki,
Δ	- przyrost wartości,
\emptyset	- średnica próbki,
ϕ_u	- kąt tarcia wewnętrzznego,
θ_f	- temperatura zamarzania gruntu,
θ_o	- temperatura odmarznięcia gruntu,
θ_{po}	- temperatura początkowa rozmarzania gruntu,
θ_s	- temperatura przechłodzenia wody,
θ_t	- temperatura odmrażania,
θ_z	- temperatura mrożenia,
ξ_s	- gęstość właściwa szkieletu gruntowego,
σ_n	- naprężenia normalne, pionowe,
τ_f	- wytrzymałość na ścinanie,
I do VII	- etapy procesu zamrażania - odmrażania.

WSTĘP

Mikrostruktura^{*} jest jedną z ważniejszych cech determinujących właściwości fizyczno-mechaniczne gruntów spoistych.

Na konieczność badania mikrostruktur pierwszy zwrócił uwagę K. Terzaghi w 1925 roku. W ciągu kilkudziesięciu lat studiów nad zagadnieniami mikrostruktury gruntów spoistych zakres badań i problemów znacznie się poszerzył. Prace wielu autorów, głównie w ostatnich latach, przyczyniły się do lepszego poznania szeregu zależności i prawidłowości między mikrostrukturą a właściwościami gruntów. Opracowano również interesujące metody bezpośredniego badania mikrostruktur wykorzystujące najnowsze osiągnięcia techniki (np. SEM).

Złożona budowa ośrodka gruntowego powoduje jednak, że uzyskane wyniki trudne są do uogólnienia. Szczególne problemy badawcze dotyczą zmian mikrostruktury gruntów spoistych w procesach epigenetycznych, z rezultatami których spotykać się można w codziennej praktyce inżynierskiej. Jednym z takich procesów jest np. przemienne przemrażanie i odmrażanie. Z różnych przyczyn prace w tym zakresie podejmowane są sporadycznie.

Mało zbadany jest wpływ przemiennego zamrażania i odmrażania na właściwości fizyczno-mechaniczne gruntów bardzo spoistych, tj. o zawartości ponad 30 % frakcji iłowej, klasyfikowanych wg Polskich Norm jako iły.

Podczas zamrażania gruntów bardzo spoistych osiąganiu stanu równowagi termodynamicznej zamkniętego układu gruntowego towarzyszy również, obok innych procesów, powstawanie nowych typów struktury i mikrostruktury.

Z praktyki znane są częste w naszej strefie klimatycznej negatywne skutki spowodowane nieprzewidzianym przemrożeniem podłoża budowlanego. Do tej pory nie można skutecznie wyeliminować z działalności inżynierskiej ujemnego wpływu mrozu na grunty budowlane. Prace badawcze z zakresu przemrażania podłoża, prowadzone dla potrzeb budownictwa nie tylko w krajowych ośrodkach naukowych, koncentrują się przede wszystkim na poznaniu i identyfikacji procesów wysadzinowości i pęcznienia mrozowego gruntów mało i średnio spoistych, na analitycznym modelowaniu wysadzinowości, bądź opracowywaniu składu mieszanek wzmacniających odporność gruntów na działanie mrozu.

Poznanie mrozowych zmian mikrostruktury i towarzyszących im zjawisk aktualnie staje się niezbędne w nowoczesnym ujęciu kryteriów wysadzinowości gruntów spoistych. Również potrzebne jest przy rozpatrywaniu np. w górnictwie zasięgu strefy zamrożonej sztucznie mrożonego górotworu, a także głębokości sezonowego przemrażania podłoża budowlanego oraz przy ocenie

^{*} Używany w pracy przedrostek mikro- odnosi się do badań struktury z zastosowaniem SEM. Przedrostek makro- dotyczy cech budowy gruntu dobrze rozpoznawalnych gołym okiem.

odporności mrozowej gruntów.

Wspomniane wyżej kwestie dotyczące wpływu procesu przemrażania i odmrażania na mikrostrukturę gruntów bardzo spoistych skłoniły autora do przeprowadzenia na ten temat studiów.

1. OMÓWIENIE ZAGADNIENIŃ DOTYCZĄCYCH MIKROSTRUKTURY I PRZEMRAŻANIA SPOISTEGO OŚRODKA GRUNTOWEGO

Rozważania nad mikrostrukturą i strukturą łąw leżą u podstaw mechaniki gruntów. Pierwszą próbę opisu mikrostruktury łąw podał K. Terzaghi (1925)^{*}. Zaproponował on model „plastra miodu”, w którym cząstki łąwe stykają się ze sobą tworząc układ podobny do struktury plastra miodu. Nieco później V. M. Goldshmidt (1926)^{*} wskazał na istnienie struktury typu „domek z kart” dla wrażliwych łąw, podczas gdy łąy o mniejszej wrażliwości wykazują bardziej upakowany układ cząstek. A. Casagrande (1932)^{*} zaproponował złożoną strukturę plastra miodu dla łąw wrażliwych, podobną do modelu Terzaghiego. T. W. Lambe (1953)^{*} przedstawił dwa modele: jeden dla osadów sedymentujących w słodkiej wodzie, zbliżony do „domku z kart”, drugi zaś w środowisku słonowodnym „domek z książek”. Obok ułożenia cząstek do pojęcia struktury gruntu łąwego wprowadzone zostały siły działające między cząstkami koloidalnymi łąu. T. K. Tan (1957) wysunął przypuszczenie, że cząstki łąu tworzą trójwymiarową sieć stykając się ze sobą:

- a) naroże do powierzchni płaskiej,
- b) krawędź do powierzchni płaskiej,
- c) powierzchnia płaska do powierzchni płaskiej.

H. van Olphen (1963) analizując wszystkie teoretycznie możliwe zmiany zachodzące między cząstkami łąu nazwał wyznaczone struktury: dyspersyjną, agregatową, sflokulowaną i deflokulowaną, w której brak było więzi między agregatami. T. W. Lambe (1958) przedstawił teorię struktury gruntów zagęszczonych, w którym to pojęciu rozumiał on ułożenie cząstek i siły między cząstkami.

Przedstawione modele oparte były w większości na przypuszczalnych wyobrażeniach mikrostruktur. Pierwsze potwierdzenie eksperymentalne tych modeli uzyskano za pomocą elektronowego mikroskopu transmisyjnego.

J. T. Rosenqvist (1959) wykonał w mikroskopie elektronowym zdjęcia łąw morskich, stwierdzając słuszność hipotetycznych struktur Lambego i Tana. Wykazał, że cząstki mogą tworzyć domeny, w których ich ułożenie jest równoległe względem siebie.

Wielu badaczy poświadczyło w swoich badaniach istnienie hipotetycznych struktur, np. F. A. Bowels (1968), R. Pusch (1970) strukturę „plastra miodu”.

L. Sides i G. Barden (1971) badając sztucznie sedymentowany materiał pod mikroskopem elektronowym zaobserwowali strukturę turbostatyczną i zdyspergowaną, podobną w powiększeniu do struktury „domku z kart”.

N. K. Tovey (1971) opublikował mikroskopowe badania typowych struktur domenowych.

^{*} za: E. M. Sergeyev i inni (1980)

Badania identyfikacyjne mikrostruktur gruntów spoistych wykonane były jednak dla modelowych ośrodków, sztucznie sedymentowanych, bądź młodych, słabo zdiagenezowanych osadów naturalnych.

Badania i studia nad strukturą ilów o różnym składzie mineralnym, wieku i stopniu zdiagenezowania prowadzone są od wielu lat w Polsce i za granicą. Publikacje takich autorów, jak E. M. Sergejev, B. Grabowskiej-Olszewskiej i innych (1978, 1979, 1980), również K. Collinsa i A. Mc Gown (1974), L. Barden (1972), E. T. Stępkowskiej (1966, 1982) i innych, wykazały, że mikrostruktury ilów naturalnych są o wiele bardziej urozmaicone i złożone, niż wskazywałyby to przyjęte modele. Szereg prezentowanych modeli charakteryzował sztucznie sedymentowane iły nie mające z reguły cech analogicznych z ilami naturalnymi. Jednakże wszystkie te prace są niezbędne do generalnej analizy i potrzebne w klasyfikacji mikrostruktury ilów. Dlatego nadal wiele uwagi poświęca się tym badaniom bowiem praca mechaniczna układu woda - ił, a więc i jego właściwości ważne z punktu widzenia inżyniera, zależą w zasadniczy sposób od mikrostruktury i jej zmian.

Wiele prac wskazuje i potwierdza jednoczesne występowanie różnych form mikrostrukturalnych w gruncie spoistym. W badaniach E. T. Stępkowskiej (1980, 1982) np. obserwowano trzy typy mikrostruktury w naturalnym, powietrznie suszonym, bentonicie Woburn i bentonicie aktywowanym Berkent (kłaczkowa, klastrowa, równoległa). Analizując siły działające między cząstkami stwierdzono, że trzy typy mikrostruktury odpowiadają albo przewadze odpychania, równoważonego przez ujemne ciśnienia wody w porach, albo maksimum lub minimum na krzywej $V_T = V_T(d)$, gdzie V_T - całkowita energia oddziaływania między elementami strukturalnymi, d - odległość między cząstkami.

Badania nad zawiesinami bentonitowymi E. T. Stępkowskiej, S. A. Jefferis (1983), przygotowanymi w różnych stężeniach, energiach mieszania i czasach mieszania, suszonych w temperaturze pokojowej lub $+45^{\circ}\text{C}$, pozwoliły stwierdzić, że nastąpił rozdział zawiesiny na dwie lub trzy fazy mikrostrukturalne: mikrostrukturę równoległą, klastrową i kłaczkową. Stwierdzono również, że mechaniczne mieszanie zawiesiny zwiększa jednorodność mikrostruktury oraz przyspiesza delaminację cząstek (zmniejsza ich grubość). Ze wzrostem stężenia zawiesiny zwiększała się również szybkość delaminacji. Badania te wykazały, że mikrostruktura nie jest stała i może ulegać zmianom w wyniku różnych czynników (np. szybkość mieszania, czas przechowywania).

W celu prowadzenia badań mikrostruktury układu woda - ił z różnych punktów widzenia i dla różnych celów, opracowano semi-teoretyczny, semi-empiryczny model fizyczny układu woda - ił, E. T. Stępkowska (1984a). Model ten uwzględnia oddziaływanie kontaktowe i oddziaływania dalekiego zasięgu (przyciąganie van der Waalsa i odpychanie warstw dyfuzyjnych) między elementami struktury oraz rozpatruje stan równowagi tych oddziaływań i geometryczny układ cząstki.

Elementami strukturalnymi w układzie woda - il są:

- cząstki (krystality, domeny), najczęściej o kształcie płytek i o grubości 20 nm - 30 nm (od 10 nm do 100 nm),
- domeny składające się z równoległych cząstek w odległości wzajemnej $2d$,
- klastry składające się z domen stykających się lub zorientowanych, krawędź do powierzchni,
- agregaty składające się z klastrów, tworzące mniej lub bardziej regularną strukturę, tzw. „sieć klastrową” oraz sieć agregatową z wakancjami (makroporami).

Model ten zakłada stopniową agregację cząstek na poszczególnych poziomach występowania, analogiczną do sieci krystalicznej, tworzącą większe agregaty, aż do utworzenia superstruktury makroagregatów widocznych gołym okiem, E. T. Stępkowska (1984a).

Istnieje wiele dowodów, że takie „książeczki” kaolinitów i innych mieszanek polimineralnych, I. Kisiel (1981), mogą łączyć się w agregaty mające wymiary i postać zbliżoną do ziarenek pyłu, np.: prace K. M. Skarżyńska (1985), E. T. Stępkowska (1985), P. Delage i F. Pellerin (1984), B. Grabowska-Olszewska i inni (1984) oraz badania autora.

K. M. Skarżyńska (1985) obserwowała po kilkukrotnym przemrożeniu stopniowy rozpad agregatów pyłu naturalnego z Krakowa (less zdegenerowany). E. T. Stępkowska (1985) badając namuły z dna Bałtyku stwierdziła niestabilność ich mikrostruktury ujawnioną w procesie mrożenia oraz powstawanie struktury agregatowej.

Autor podczas próby rozmakania zaobserwował agregację w cyklicznie zamrażanej glinie pylastej, tzn. powstawanie większych (o średnicy $1+3$ mm), trwałych po 12 godzinach rozmakania w wodzie agregatów, których nie było w próbce nie mrożonej. Efekty także potwierdzone zostały przy pomocy SEM.

W badaniach przeprowadzonych do chwili obecnej, które dotyczyły mikrostruktur gruntów spoistych, można wyróżnić zasadniczo dwie grupy rozważanych problemów: pierwszą teoretyczną - obejmującą ustalenie związków między elementami gruntu w oparciu o interdyscyplinarne studia teoretyczne, precyzujące nowe modele i typy struktur, drugą - doświadczalną, najczęściej dla modelowych ośrodków wodno-łowych, weryfikującą i systematyzującą rozwiązania teoretyczne z wynikami eksperymentów. W ostatnim czasie coraz powszechniej prowadzone są odpowiednie studia i badania mikrostruktur dla naturalnych gruntów spoistych, uzasadniając ich nie tylko teoretyczną przydatność.

Zagadnienia klasyfikacji i systematyki typów mikrostruktur łąw były przedmiotem rozpraw i tematem obrad wielu międzynarodowych sympozjów, np. Madryt - 1978.

Jedną z pierwszych prób uogólnienia systematyki jest klasyfikacja mikrostruktur łąw Polski i ZSRR opracowana przez B. Grabowską-Olszewska, V. Osipova, V. Sokolova (1984), przedstawiona w monografii pt. „Atlas mikrostruktur gruntów łąwowych”. Na monografię złożyły się wyniki szerokich studiów poznawczych zespołu badawczego, E. M. Sergejev, B. Grabowska-Olsze-

ska, V. Sokolov, N. Kolomenski (1978, 1979, 1980), prowadzone w Uniwersytecie Warszawskim i Uniwersytecie Moskiewskim w kilku ostatnich latach. Na podstawie charakterystycznych cech morfologicznych, udziału zawartości poszczególnych frakcji, stopnia orientacji, rodzaju kontaktów między elementami itp. scharakteryzowano i opisano typowe mikrostruktury. Wydzielono typy mikrostruktur skał ilastych odnosząc je do wieku skał, składu mineralnego i granulometrycznego, pochodzenia itd. Podano np. dla jeziornych ilów mikrostruktury typów: plastra miodu, szkieletową, matrycową, turbulentną oraz laminarną. W ilach eluwialnych i pochodzenia hydrotermalnego: domenową, pseudoglobularną i gąbczastą. Jednocześnie podkreślono, że w naturalnych warunkach ilły mogą charakteryzować mikrostruktury mieszane, które zawierają elementy morfologiczne głównych typów mikrostruktur.

W literaturze dotyczącej badań mikrostruktury napotkać można nieliczne prace traktujące o zmianach mikrostruktury ilów pod wpływem czynników epigenetycznych. Wiadomo na podstawie ustaleń, że w epigenezie w podłożu budowlanym następuje obok transformacji mikrostruktury zmiana właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów, w tym szczególnie spoistych. Doświadczenia dowodzą, że w warunkach klimatycznych Polski bardzo kłopotliwe dla budownictwa lądowego są skutki działania czynników epigenetycznych wywołujące przemienne zamrażanie i odmrażanie gruntów. Proces zamrażania jest także istotny w dziedzinach techniki wykorzystujących sztuczne mrożenie podłoża, np.: w górnictwie, drążenie szybów, tunele itp. oraz przy analizowaniu nietypowych w naszym klimacie zagadnień geotechnicznych, tj. przypadków utrzymywania stanu zamrożenia gruntu w okresie dłuższym niż wyznaczają to sezonowe zmiany temperatur (podłoża chłodni, sztucznych lodowisk, rurociągów itp.).

Wyniki prowadzonych dotychczas prac poszukiwawczych nad właściwościami przemrażanych w różny sposób gruntów spoistych określiły i uściśliły najważniejsze związki pośród zdefiniowanych w trakcie wstępnego rozpoznania, głównie te, które najbardziej interesują praktyków. Stwierdzono, że nie tylko zamrażanie, ale w dużym stopniu odmrażanie wpływa na obniżenie przydatności gruntów spoistych w budownictwie, przy czym najwyraźniej zaznaczone to jest w pierwszych kilku ($f \approx 5 + 8$) cyklach mrożenia - odmrażania, np. prace: B. B. Broms, L. Y. C. Yao (1964), E. J. Chamberlain, A. Gow (1978), R. N. Yong i zespół (1982, 1984, 1985), K. M. Skarżyńska (1983, 1985), czy też badania autora, M. K. Kumor (1985c, 1987b). W pracach tych ustalono, że po cyklicznym działaniu mrozu na grunty spoiste, wytrzymałość na ścinanie spada, obniżone są wartości granic konsystencji, wzrastają: wodoprzepuszczalność, wartość pęcznienia i ciśnienie pęcznienia mrozowego, jak również rośnie głębokość penetracji mrozu.

W badaniach poligonowych, T. G. Krzewiński, R. G. Tart (1985), określono rozkłady temperatur w cyklicznym mrożeniu w odmarzającej zmarzlinie, ustalono istotny wpływ roślinności tzn. zmniejszenie strefy przemarzania w obszarach porośniętych drzewami, zaproponowano również modele obliczeniowe do przewidywania osiadania odmarzania.

Podobnie w szerokim zakresie są badane laboratoryjnie procesy determinujące przebieg przemrażania i odmrażania iłów nasyconych roztworami o różnym i zmiennym zasoleniu. Przesunięte efekty egzo- i endotermiczne zaobserwowali D. M. Anderson i A. R. Tice, D. M. Anderson, P. I. Williams (1985), przy oznaczaniu zawartości wody niezamarzniętej w iłach montmorillonitowych i nontronitowych.

Na obecnym etapie poszukiwań z konieczności większość badań wykonywana jest na gruntach modelowych. Dla naturalnych iłów problemami badawczymi są: ustalenie przedziału zmian wartości poszczególnych parametrów gruntu potrzebnych do projektowania lub wykonawstwa konkretnych konstrukcji inżynierskich np. ropociąg na Alasce, budowa metra pod Sekwaną w Paryżu itp. W prawie wszystkich pracach badawczych zwraca się uwagę na związek istniejących zmian wartości parametrów dla różnych typów iłu ze zmianami ich mikrostruktur, które najczęściej dotyczą pierwszego zamrożenia, np. E. J. Chamberlain, A. Gow (1978), R. N. Yong i zespół (1984), M. K. Kumor (1987a) i inni. Prace nad określeniem właściwości przemrażanych i odmrażanych cyklicznie iłów podejmuje się stosunkowo rzadko i w zawężonym zakresie.

Z przeglądu problemów przemrażania podłoża gruntowego wynika, że właściwości gruntów w stanie zamrożonym są znacznie lepiej poznane, a szersze ich omówienie przedstawiono w monografiach np. N. A. Cytowicz (1975), P. I. Mielnikov, N. I. Tolstichin (1974), S. S. Vialov i inni (1976), G. P. Mazurov (1975), O. B. Andersland, D. M. Anderson (1978), L. T. Roman (1987) i inni.

W ostatnim czasie opublikowano również interesującą propozycję klasyfikacji i metodyki badań gruntów zamrożonych, F. H. Sayles i inni (1987), H. Youssef (1988), uwzględniającą w szerokim zakresie specyficzne właściwości gruntów w stanie zamrożonym.

Ważkość zagadnień przemrażania gruntów w inżynierii lądowej podkreślano na specjalistycznych spotkaniach badaczy z różnych krajów. Pośród wielu problemów dyskutowanych na międzynarodowych konferencjach przemrażania podłoża gruntowego, spotyka się nieliczne prace analizujące odrębnie zmiany mikrostruktury iłów w wyniku wielokrotnego mrożenia i odmrażania, np. sympozja w Bochum - 1978, patrz: H. L. Jessberger (1979), Trondheim - 1980, Hanover - 1982, Sapporo - 1985.

W literaturze krajowej publikacje z zakresu zmian mikrostruktury gruntów spoistych pod wpływem zamrażania cyklicznego i odmrażania przedstawili: K. M. Skarżyńska (1985), E. T. Stępkowska (1985), oraz referaty prezentowane na I i II sympozjum polsko-francuskim w Warszawie 1985 i w Paryżu 1987 roku przez U. Wojtowicz (1985) i autora.

K. M. Skarżyńska (1985) analizując zmiany struktury lessu krakowskiego (zawartość frakcji iłowej $f_1 \approx 5\%$) w cyklicznym mrożeniu stwierdziła, że zmiany struktury wiążą się z powstałymi pęknięciami i szczelinami w gruncie, wywołanymi przez soczewki i mikrosoczewki lodu. Pęknięcia i szczeliny tworzące łączną, przestrzennie rozwiniętą sieć, wydzielają w masie gruntu makro- i mikroagregaty o zróżnicowanych wymiarach. Za pomocą obserwacji w elektronowym mikroskopie skaningowym i innych badań ustalono dwa rodzaje charakterystycznych agregatów: większe o średnicy od 0,5 do 4 mm i mniej-

sze o średnicach 0,05 i 0,1 mm. Wymiary mniejszych agregatów wiążą się prawdopodobnie z siłami działającymi w powierzchni granicznej lód - szkielet gruntowy podczas mrożenia cyklicznego. Powodują one między innymi wzrost grubości cząstki o około $\Delta\delta = 32\%$, mierzonej przy pomocy WSTest.

E. T. Stępkowska (1985) badając namuły o naturalnej wilgotności pobrane z dna Bałtyku poddawane cyklicznemu zamrażaniu do $f = 10$ cykli, uzyskała wzrost grubości cząstki w obszarze struktury równoległej.

W pracach analizujących genezę i warunki sedymentacji gruntów, np. I. P. Coutard, H. I. Mucher (1985), podkreśla się istotny wpływ na właściwości fizyczno-mechaniczne osadu takich procesów jak mrożenie oraz zmian mikrostruktury wywołanych faktem przemiany fazowej wody w lód.

Omawiane mrozowe zmiany mikrostruktury ilów wiążą się, zdaniem autora, przede wszystkim ze specyfiką procesu zamrażania wody porowej zawartej w gruncie. Szczególne znaczenie ma owa odmiennosc przemiany fazowej roztworu porowego w lód w gruntach o wysokim stopniu dyspersji frakcji ilowej, budowanej z minerałów aktywnych w stosunku do wody, co wcześniej stwierdzali między innymi P. I. Mielnikov, N. I. Tolstichin (1974), N. A. Cytovicz (1975) i inni. W mrozowej przebudowie struktury gruntów spoistych znaczny udział mają, według autora, również inne czynniki, aktualnie trudne do jednoznacznego scharakteryzowania i ilościowego opisu. Wiążą się one, jak sądzą poszczególni badacze, np. K. M. Skarżyńska (1969), z problemem nukleacji (zarodkowania), zmianami objętości wody i lodu na granicy faz, temperaturą zamrażania, migracją molekuł wody z różnych poziomów energetycznego wiązania w trakcie i po zakończonym procesie krystalizacji wody słabozwiązanej, temperaturą przechłodzenia wody itd. Dużą uwagę zwraca się przy zamrażaniu na rolę sił kapilarnych w porach ośrodka gruntowego, D. H. Everett, J. M. Haynes (1965), B. A. Savelev (1971), K. Pietrzyk (1981), na hydrofilne własności lodu i na chemizm wody porowej, Z. Wiłun (1976). Również istotnym czynnikiem jest dyspersja frakcji ilowej i skład granulometryczny gruntu, I. Jary (1961), K. Pietrzyk (1968a, 1984), oraz histereza właściwości i zawartość wody niezamrożonej podczas zamrażania i odmrażania, D. M. Anderson, N. R. Mongenstern (1973), ponadto ważne są właściwości i rodzaj stanów fazowych wody, G. K. Tyszynski (1971), S. S. Vialov i inni (1976).

Autor przypuszcza, że nie mniej ważnym czynnikiem w analizowaniu zjawiska mrozowych zmian struktury jest początkowy typ mikrostruktury ilów, który zależy w dużym stopniu od historii geologicznej danej warstwy. Ponadto istotny jest prawdopodobnie rozkład ciśnień krystalizującej „kropki wody” podczas zamrażania gruntu, a po odmrożeniu ruch cząsteczek wody powstałej po wytopionych kryształkach lodu.

Przy rozwiązywaniu praktycznych zagadnień przenikania frontu przemrażania powszechnie wykorzystuje się metody numeryczne w celu określania prędkości i głębokości przemrażania w ośrodkach makroporowatych, np. D. Blanchard, M. Fremond (1982), M. Fremond (1981), A. Dupas (1985), M. Jagiełło (1985). Podawane również są odpowiednie modele oparte na prawie zachowania

wania energii i masy w funkcji zmian temperatury i wilgotności (wg równań Fouriera i Darcy). Dają one zadowalające rezultaty i dobrą z teorią zgodność w pewnych konkretnych rozwiązaniach inżynierskich. Jednak pomiar współczynnika przewodzenia ciepła i innych stałych charakteryzujących przenikanie frontu przemrażania w gruncie nadal wraca do badań modelowych ośrodków (np. szklane kule, piasek srebrny różnych wilgotności i w różnych temperaturach mrożenia, np. I. A. van Heneghem, F. J. Leij (1984)). Bowiem jednoznaczne ustalenie wartości parametrów termicznych jest bardzo trudne dla rzeczywistych gruntów. Niektóre prace poszukiwawcze potwierdziły rozwiązania bliskie wynikom otrzymywanym w badaniach weryfikujących. Dotyczyło to szczególnie gruntów makroporowatych (lessów), przy założeniu, że struktura w trakcie przemrażania nie ulega zmianie.

Problem przenikania frontu przemrażania w iłach jest o wiele bardziej skomplikowany niż w ośrodkach makroporowatych. Grunty te, jak wiadomo z praktyki, sprawiają najwięcej kłopotów inżynierom-projektantom i wykonawcom, J. Sysak (1962), K. Pietrzyk (1968b), B. Rossiński (1978), przez co wymagają zwrócenia szczególnej uwagi ze strony badaczy. Dlatego też prace badawcze dla potrzeb budownictwa koncentrują się nad ustalaniem zespołu istotnych czynników, które pozwolą na opracowanie odpowiedniego kryterium oceny wrażliwości gruntów na przemrażanie. Kryteria, które stosuje się aktualnie w gruntoznawstwie, Z. Wiłun (1976), na podstawie uziarnienia, przynoszą według różnych autorów różniące się informacje, np. K. Pietrzyk (1981, 1985), K. Pietrzyk, J. Pałka (1978), S. Rolla (1970). Także i inne próby, J. Livet (1981), E. Caniard, A. Dupas (1985), klasyfikacji gruntów na działanie mrozu budzą podobne wątpliwości.

Z wniosków prezentowanych w literaturze dotyczącej omawianego zagadnienia wynika, że nie ma aktualnie jednolitego podejścia i poglądu wśród badaczy na temat cyklicznego przemrażania i odmrażania gruntów spoistych, uwzględniającego zmiany ich mikrostruktury. Uzasadnia to celowość prowadzenia prac zmierzających do spojrzenia na problem przemrażania ośrodka gruntowego od strony zachodzących zmian mikrostruktury.

W Polsce problemami przemrażania podłoża gruntowego zajmuje się nieliczne grono pracowników, głównie zespół prof. K. M. Skarżyńskiej w AR Kraków i zespoły prof. Z. Grabowskiego z Politechniki Warszawskiej i prof. K. Pietrzyka z Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach.

W niniejszej pracy szczegółowo nie analizowano metod badania mikrostruktury iłów. Literatura dotycząca tego zagadnienia jest stosunkowo bogata i dostępna. Odpowiednie informacje można znaleźć w pracach: J. K. Mitchell (1976), B. Grabowska-Olszewska (1975, 1976, 1984), V. I. Osipov (1983), R. H. Foster (1981), R. Pusch (1966, 1967, 1968) i inni. Podobnie nie omawia się problemów nukleacji zwykłego lodu, które znajdują się w wielu publikacjach, np. T. G. Gzirisvili i inni (1984), jak również problematyki mrozoochronności, I. Makowski (1980), J. Pachowski (1980).

2. CEL I ZAKRES PRZEPROWADZONYCH BADAŃ I STUDIÓW

2.1. Cel pracy

Znaczenie terminu - struktura - oznaczającego budowę wewnętrzną skały jest wielorakie, gdyż specjaliści z różnych dziedzin nadają mu różny sens. Świadczy o tym bogata literatura, z której część zestawiono w publikacji V. Cotecchia i inni (1982). Pośród zbieżnych poglądów wielu autorów, między innymi T. K. Tan (1957), H. van Olphen (1963), R. Pusch (1966), E. T. Stępkowska (1966, 1984b), J. K. Mitchell (1976), B. Grabowska-Olszewska i inni (1984), autor w niniejszej pracy stosuje termin - struktura - według J. K. Mitchell'a (1976), który w sposób uproszczony można wyrazić następująco:

struktura = febrlik + siły międzycząsteczkowe.

Na podstawie wniosków ze studiów literaturowych i powyższych założeń, autor uważa, że strukturę ilów można scharakteryzować funkcją w postaci:

$$F(n, n_w, n_p, S, \delta, K_n, K, F, O, V_T, w, Ch, M) = 0 \quad (1)$$

gdzie:

- n - porowatość, udział faz budujących grunt,
- n_w - porowatość wewnątrz mikroagregatowa,
- n_p - porowatość między mikroagregatowa,
- S - powierzchnia właściwa gruntu,
- δ - grubość cząstki,
- K_n - kształt, forma i wymiary porów,
- K - kształt i wymiary agregatów,
- F - typy i liczba kontaktów między cząstkami,
- O - orientacja i stopień orientacji cząstek,
- V_T - całkowita energia oddziaływania między elementami mikrostruktury,
- w - wilgotność układu gruntowo-wodnego,
- Ch - chemizm, stężenie i rodzaj jonu roztworu porowego,
- M - skład mineralny,

Podane wyżej czynniki i cechy charakteryzujące strukturę ilów należy w przypadku gruntów zalegających w naturalnych warunkach uzupełnić o grupę czynników epigenetycznych, które działając na podłożu niewątpliwie zmieniają właściwości, w tym i mikrostrukturę ośrodka gruntowego. Czynnikiem epigenetycznym - jak wspomniano - jest również klimat z charakterystycznymi w naszej strefie wahaniami temperatury. Niektóre z czynników epigenetycznych zostały przeanalizowane w odniesieniu do mikrostruktury, inne, w

tym wartość temperatury zamrażania, jej zakres zmian przy wielokrotnym przejściu przez 0°C , w dalszym ciągu stanowią problem otwarty.

Nie wyjaśnione są do chwili obecnej złożone mechanizmy powodujące zmiany struktury iłów w procesie mrożenia i odmrażania, jak również brak jest bezpośrednich obserwacji w skali mikroskopowej, które w iłach są rezultatem przemian fazowych roztworu porowego.

Nie poznano bliżej wpływu mrozu i odmrażania na zmiany poszczególnych czynników i cech charakteryzujących mikrostrukturę, które przedstawiono funkcją (1), np. porowatości wewnątrz i między mikroagregatowej, grubości cząstki itd. ... analizowanych w odniesieniu do wyjściowej mikrostruktury iłu i powstałej po wielokrotnym zamrażaniu i odmrażaniu.

Celem pracy jest określenie zmian mikrostruktury wybranych typów iłów pod wpływem przemiennego działania mrozu oraz odmrażania, badanych w zamkniętym systemie gruntowo-wodnym.

2.2. Metodyka i zakres badań

Wychodząc z założenia, że grunt spoisty jest układem rzeczywistym, którego mikrostrukturę charakteryzują ujęte funkcją (1) cechy i czynniki, autor postawił tezę, że w zamkniętym systemie wodnym mikrostruktura iłu zależy od warunków zamrażania zdeterminowanych temperaturą i liczbą cykli mrożenia - odmrażania. Przedmiotem pracy jest stwierdzenie i przeanalizowanie zmian mikrostruktury cyklicznie przemrażanych iłów oraz ocena wpływu tych zmian na wybrane właściwości fizyczno-mechaniczne. Z treści postawionej tezy, wobec braku jednolicie ustalonej metodyki badań gruntów przemrażanych, wynikają szczegółowe zadania dotyczące między innymi założenia warunków mrożenia i odmrażania, które przedstawiono w tabelicy 1, oraz zakresu przeprowadzonych badań, podanych w tabelicy 2. Z konieczności stosunkowo szerokie badania wykonywano etapami w celu otrzymania możliwie prostych i jednoznacznych zależności oraz sprowadzenia do minimum liczby zmiennych parametrów. Wyniki, jakie uzyskano dla cyklicznie przemrożonych próbek w poszczególnych badaniach, porównano z właściwościami iłów, które określono przed zamrażaniem.

Cel rozprawy określono w podrozdziale 2.1, założone warunki badań przedstawiono w podrozdziale 2.2, a materiał badawczy jako przedmiot badań scharakteryzowano w podrozdziale 3.1.

Przy wyborze materiału badawczego kierowano się występowaniem typowych cech i właściwości fizyczno-chemicznych, charakterystyką mineralogiczną i wrażliwością mrozową głównych gruntów spoistych występujących w Polsce. Podstawowe badania zmian mikrostruktury przeprowadzono na dwóch modelowych monomineralnych iłach o różnych własnościach. Porównawczo badano naturalny ił pliczeński z Bydgoszczy.

Tablica 1

Założone warunki badania mrożenia i odmrażania ilów

L.p.	Założenia	Materiał badawczy		
		KaoLin z Sedlec **(KS)	Bentonit MAD **(BW)	Il płoceński (IN)
1.	Główny minerał gruntu	kaolinit	montmorillonit	kaolinit, illit, montmorillonit
2.	System mrożenia	zamknięty *		otwarty
3.	Temperatura mrożenia	$\theta_z = -20^\circ\text{C}$ (253 K)		$-0,5^\circ\text{C}, -5,0^\circ\text{C}, -$
4.	Temperatura odmrażania	$\theta_0 = +20^\circ\text{C}$ (293 K)		
5.	Stopień plastyczności iłu	$I_L = 0,5$		$I_L = 0,06$ (naturalny)
6.	Kierunek mrożenia	wszechstronnie od góry w dół próbki		
7.	Wymiary próbek	średnica 90 lub 45 mm, wysokość 42 mm		
8.	Liczba cykli mrożenia- odmrażania	$f = 0,1,5,10,20$		$f = 0,1,2,3,4$
9.	Czas mrożenia - odmrażania	$t_z = t_0 = 24$ godz		
<p>* - możliwa redystrybucja wilgoci wewnątrz iłu zarówno podczas zamrażania jak i po odmrożeniu przy zachowaniu stałej średniej wilgotności próbek</p> <p>** - grunt homogenizowany</p>				

Przygotowanie gruntów modelowych do badań mikrostruktury wykonano w sposób (podrozdział 3.2), który zapewniał możliwie najmniejsze zaburzenia struktury i mikrostruktury wyjściowego układu woda - il, a otrzymane właściwości ośrodka modelowego bliskie były izotropowym.

Na podstawie wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych kolejno analizowano czynniki o istotnym znaczeniu dla studiów nad mrozowymi transformacjami struktury (podrozdział 3.4) i mikrostruktury (podrozdział 3.5). Badano podczas mrożenia i odmrażania zmianę temperatury w próbkach (podrozdział 3.3), mrozową redystrybucję wilgotności (podrozdział 3.4.1) oraz pęcznienie mrozowe i pęcznienie po rozmrożeniu (podrozdział 3.4.2). Przeprowadzone obserwacje mikrostruktury ilów przed i po zamrożeniu, zarejestrowane na fotografiach (podrozdział 3.4.5), oraz podczas próby rozmazania w wodzie (podrozdział 3.3.4) i wyniki z analizy mikroagregatowej (podrozdział 3.4.4) wykazały wyraźnie zmianę struktury iłu. Analiza jakościowa wyników potwierdzała, że liczba cykli może w głównej mierze determinować zakres zmian właściwości i struktury przemrażanych ilów.

Stwierdzone różnice w ilach przed i po procesie cyklicznego mrożenia świadczyły, że główną przyczyną powstałych zmian jest nie tylko mrozowa zmiana struktury, lecz, że analizowane różnice są w ścisłym związku przyczynowym z przemianami mikrostrukturalnymi.

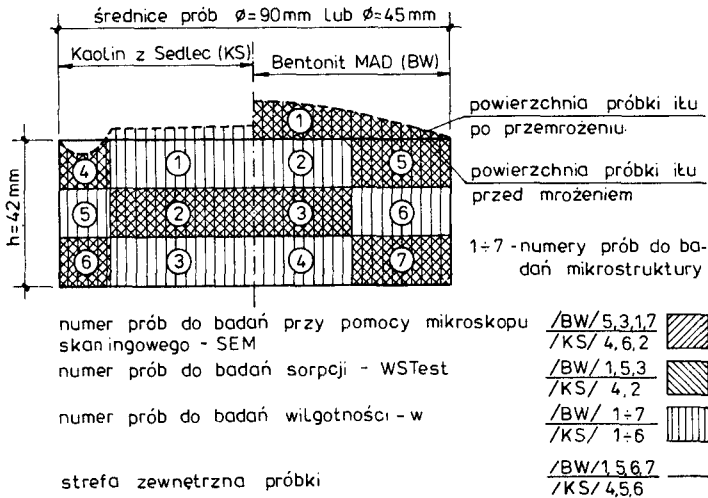
Zmiany mikrostruktury ustalono eksperymentalnie (podrozdział 3.5) stosując bezpośrednie obserwacje uzyskane przy pomocy elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) i metodą pośrednią testu sorpcyjnego (WSTest).

Tablica 2

Program i zestawienie przeprowadzonych badań

Programowane badania	Rodzaj gruntu*	Liczba badanych próbek	Warunki realizacji badań
A Charakterystyka materiału badawczego: właściwości fizyczno - chemiczne skład mineralny	KS, BW, IN	wg założeń instrukcji	oznaczenia wg instrukcji stosowanych w Laboratoriach geotechn. i specjalistycznych
	KS, BW, IN		
	KS, BW	48	
B Badanie charakterystyki termicznej procesu zamrażania - odmrzania			pomiar temperatury termistorami w środku próbki badanej, t=0 do 20 cykli, podczas zamrażania i odmrzania
C Zmiany struktury : rozkład wilgotności	KS, BW IN	336 392	dla kolejnych cykli: f=0 do 20
	KS, BW	48	f=1 do 20, próby po zamrożeniu i odmrzanie
	KS, BW, IN	24	dla f=0,1,5,10, czas rozmakania w wodzie ~220h
	KS, BW, IN	52	metoda areometryczna, zmodyfikowana
	KS, BW	30	próby zamrożone, powiększenie do x3
D Zmiany mikrostruktury : elektronowy mikroskop skaningowy (SEM)	KS, BW, IN	ok 250	powiększenie od x5 do x5000 struktura nienaruszona, przygotowanie prób wg specjalnego sposobu (Kumor, 1986) (Liofilizacja)
	KS, BW, IN	250	próbki o strukturze nienaruszonej suszeniem, przygotowanie prób j.w.
E Właściwości fizyczno - mechaniczne : granice konsystencji w _s , w _p , w _L	KS, BW, IN	250	wg Polskich Norm i instrukcji laboratoryjnych
	75% mieszanki:	(25%)	
	50% KS+BW	50% (75%)	kierunek wymuszonego ściska równoległy do frontu przemarzania
wytrzymałość na bezpośrednie ścinanie	BW+piasek kwarc	150	
peczętnie wg Wasiliewa	KS, BW	48	
* KS - Kaolin z Sedlec, BW - Bentonit MAD, IN - lt płocięński			

Badania mikrostrukturalne łąw wykonano dla obszarów próbek o stwierdzonych w badaniach wstępnych największych zmianach mikrostruktury pod wpływem zamrażania (rys.1).



Rys.1. Obszary próbek łąw przeznaczone do badań mikrostruktury

Wyniki badań pozwoliły zauważyć w różnej skali specyficzne procesy towarzyszące mrozowym zmianom struktury po osiągnięciu nowego stanu równowagi termodynamicznej zamkniętego układu woda - łą, w zależności od kolejnego cyklu mrożenia i typu gruntu. Stwierdzone zjawiska umożliwiły ustalenie zasadniczych przyczyn i prawdopodobnego mechanizmu mrozowych zmian mikrostruktury łąu. Na ich podstawie można było ocenić związek z powstającą i utrwalaną ze wzrostem liczby przemrożeń soczewkową mikrostrukturą łąu (rozdział 4).

Drogą eksperymentu laboratoryjnego zbadano wpływ mrozowych zmian mikrostruktury na wybrane właściwości łąw (rozdział 5) ważne dla inżyniera.

Zależność między badanymi cechami fizyczno-mechanicznymi łąw a liczbą cykli przemrożeń określono numerycznie. Z przyjętych do aproksymacji funkcji najlepiej przybliżała uzyskane wyniki doświadczalne funkcja opisana równaniami:

$$Y = AX + B \quad (2)$$

$$Y = \exp (AX + B) \quad (3)$$

Otrzymane wyniki wykonanych badań oraz ich analizę podsumowano w rozdziale 6. Podano końcowe wnioski i uogólnienia oraz wykaz literatury (rozdział 7).

Badania specjalistyczne, takie jak derywatograficzne, rentgenograficzne, składu chemicznego, zlecono do wykonania Instytutowi Geochemii, Mineralogii i Petrografii Uniwersytetu Warszawskiego oraz Katedrze Gleboznawstwa ATR w Bydgoszczy.

Zdjęcia mikroskopowe z zastosowaniem SEM autor wykonał w Środowiskowym Laboratorium Analiz Fizykochemicznych i Badań Strukturalnych Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz w Instytucie Geochemii, Mineralogii i Petrografii Uniwersytetu Warszawskiego.

Badania zmian struktury i mikrostruktury przemrażanych iłów oraz badania właściwości fizyczno-mechanicznych przeprowadził autor w Zakładzie Geotechniki ATR w Bydgoszczy oraz w Zakładzie Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziemnego AR w Krakowie. Parametry poszczególnych doświadczeń oraz stosowana aparatura zostały omówione w skrócie przy opisie każdego rodzaju badań.

Wyniki wykonanych eksperymentów, pomiarów i obserwacji zestawiono w tablicach oraz przedstawiono na rysunkach i fotografiach.

Pozostałe nieopublikowane dane, ze względu na ich zakres i znaczną liczbę, znajdują się w Zakładzie Geotechniki Wydziału Budownictwa ATR w Bydgoszczy. Część badań porównawczych wykonano również dla mieszanek iłów o zmiennym udziale kaolinu z Sedlec i bentonitu MAD oraz bentonit MAD + + piasek kwarcowy, a także dla jednego kierunku zamrażania postępującego z góry w dół próby (tab.2). Wyniki tych badań będą przedmiotem osobnej publikacji, gdyż tylko niektóre z nich zostały wykorzystane w niniejszej pracy pod kątem rozważanego problemu zmian mikrostruktury iłów.

3. PRZEPROWADZONE BADANIA I ICH WYNIKI

3.1. Charakterystyka badanych gruntów

Obserwacje z praktyki inżynierskiej uczą, że wśród gruntów spoistych stanowiących podłoże budowlane łączy się jednymi z najbardziej wrażliwych na działanie mrozu. Wyniki pierwszych eksperymentów prowadzonych między innymi przez R. E. Grim'a (1952), T. W. Lambe, R. T. Martin'a (1953) wykazały, że podatność gruntów spoistych na przemrażanie w dużym stopniu zależy od składu mineralnego.

Do badań wybrano dwa różne, modelowe łączy, uznane za monomineralne. Analizę zmian mikrostruktury przeprowadzono na próbkach kaolinu z Sedlec, bentonitu MAD oraz porównawczo dla naturalnego łączy płoceńskiego z Bydgoszczy.

Kaolin z Sedlec - (KS), składa się głównie z kaolinitu z domieszkami łączyczyków (rys.2a, 3).

Bentonit węgierski MAD - (BW), jest łączy zbudowanym w przewodzie z montmorillonitu przy udziale kwarcu i kaolinitu (rys.2b, 4).

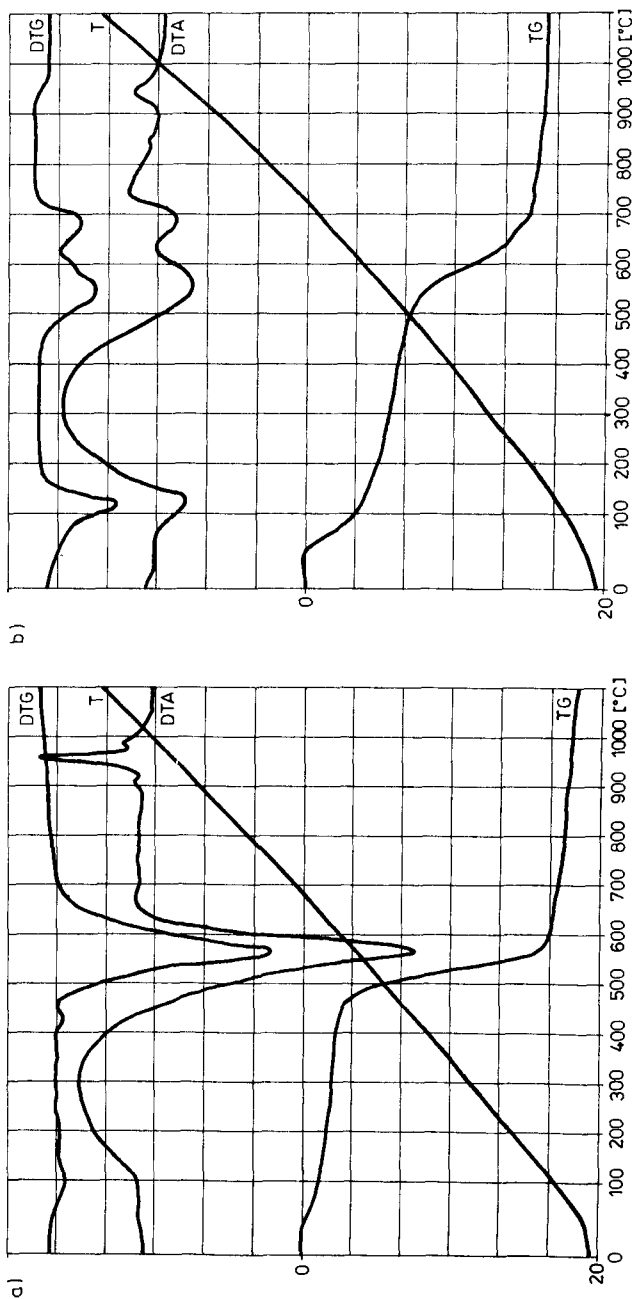
Łączy płoceński - (IN), ma charakter illitowo-montmorillonitowo-kaolinitowy z domieszkami kwarcu pelitycznego oraz wtrąceniami węglanu wapnia CaCO_3 .

Właściwości modelowych łączy znane są z szeregu opracowań, np. E. T. Stępkowska (1977a), Z. Wojnicki (1976), B. Grabowska-Olszewska (1968).

Podstawowe cechy fizyczne i skład chemiczny badanych łączy zestawiono w tablicach 3 i 4.

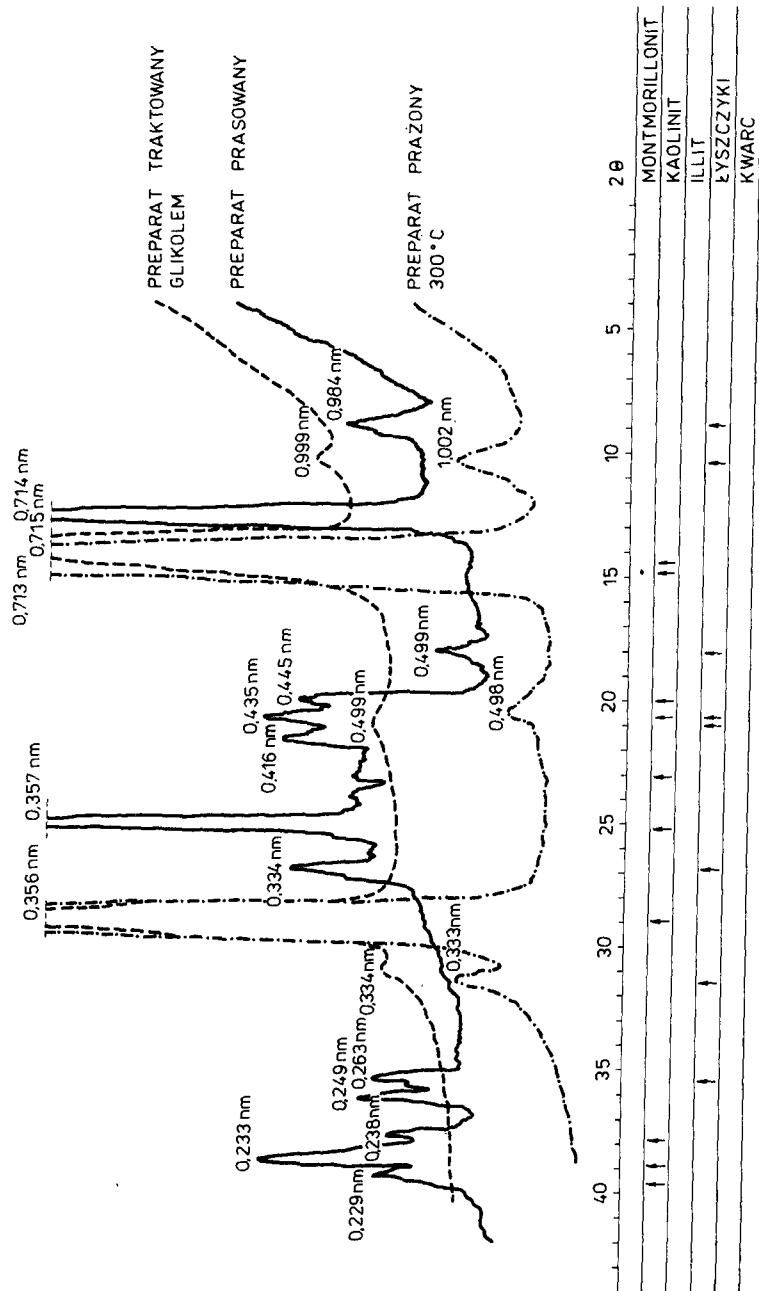
W cytowanych powyżej pracach kaolin z Sedlec traktowany jest jako wzorcowy grunt monomineralny zbudowany z kaolinitu. Kaolin z Sedlec (KS) autor uznaje z pewnymi zastrzeżeniami za łączy monomineralny. Zawartość kaolinitu waha się w granicach 80 - 90 %, zaś udział innych minerałów: łączyczyków, illitu (rys.3), Z. Wojnicki (1976), nie wpływa zasadniczo na kaolinitowe cechy KS. Bentonit MAD (BW) w świetle wykonanych badań rentgenograficznych (rys.4), analizy derywatograficznej (rys.2a) oraz wyników jakie podają Z. Wojnicki (1976) i L. Stoch (1977) nie stanowi idealnego gruntu monomineralnego. Jednakże jest to grunt odznaczający się bardzo szczególnymi własnościami fizycznymi (tab.3), tj. wysokim wskaźnikiem plastyczności, bardzo wysoką wartością granicy płynności i wysokim stopniem dyspersji, ponadto głównym kationem wymiennym w montmorillonicie jest Na^+ , T. Kozłowski (1988). Zatem w przeprowadzonych badaniach bentonit MAD (BW) uznano za wzorcowy łączy monomineralny o typie montmorillonitowym.

Otrzymane wyniki z badań łączy BW mogą być przydatne w szerszej analizie porównawczej łączy polimineralnych o dominującym udziale montmorillonitu.

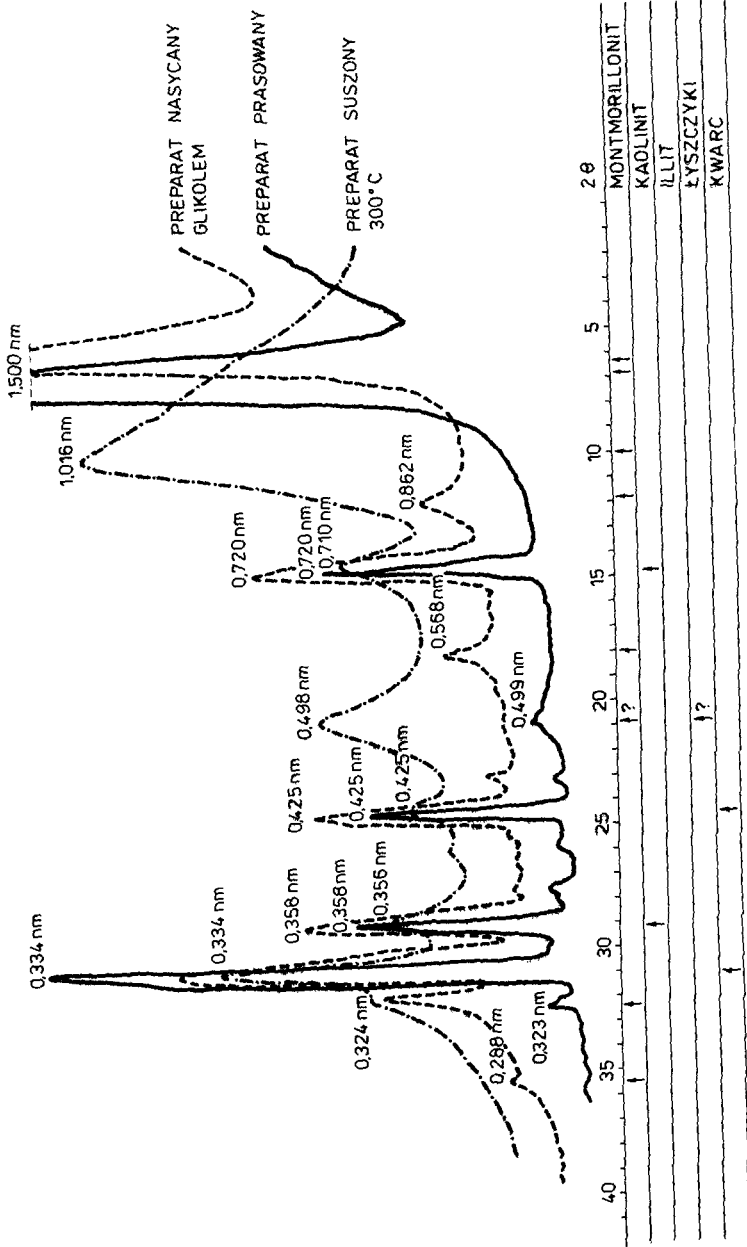


a) KAOLIN Z SEDLEC /KS/
 b) BENTONIT WĘGIERSKI MAD /BW/

Rys.2. Derywatogramy badanych ilów KS i BW



Rys.3. Dyfraktoqramy kaolinu z Sedlec (KS)



Rys. 4. Dyfraktoqramy bentonitu węgierskiego MAD (BW)

Tablica 3

Podstawowe właściwości fizyczne badanych ilów

Materiał badawczy	Gęstość właściwa szkieletu gruntowego ρ_s Mg · m ⁻³	Uziarnienie				Granice konsystencji				Aktyw- ność koloï- dalna A (1)	Powierz- chnia właściwa S /wg WStest p:p ₀ = 0,5/ m ² · g ⁻¹	Rodzaj gruntu wg PN- 86/B-02480
		f _p mm	f _π mm	f ₁ mm	%	w _L	w _p	w _s	%			
		2,0 + 0,05	0,05 + 0,002	< 0,002								
Kaolin z Sed- lec (KS)	2,66 ± 0,03	-	41,0 ± 0,3	59,0 ± 2,3	71,1 ± 2,1	33,9 ± 0,3	29,0 ± 0,3	0,63	7,7 ± 0,6	Ił (I)		
Bentonit wę- gierski MAD (BW)	2,72 ± 0,04	4,1 ± 0,4	17,9 ± 1,7	78,0 ± 0,8	294,5 ± 5,2	27,0 ± 0,3	17,4 ± 0,5	3,43	40,0 ± 1,1	Ił (I)		
Ił plicieński (IN)	2,72 ± 0,04	12,0 ± 0,7	40,0 ± 0,6	48,0 ± 1,1	70,4 ± 0,9	17,5 ± 1,2	15,5 ± 1,2	1,10	26,2 ± 1,2	Ił (I)		

Tablica 4

Skład chemiczny badanych ilów (%)

Materiał badawczy	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Straty prażenia	SiO ₂ R ₂ O ₃
Kaolin z Sedlec (KS) /wg E. T. Stępkowskiej - 1977/	46,40	37,0	1,35	0,20	0,78	0,40	0,90	-	13,0	2,14
Bentonit węgierski MAD (BW) /wg Z. Wojnickiego - 1976/	69,45	14,98	2,80	-	0,88	3,34	0,56	1,64	6,27	7,01
Ił plicieński (IN) /wg auto- ra/	66,61	16,16	3,94	-	1,04	1,69	0,83	0,50	9,17	6,05

* Archiwum Hydrotechniki, t. XXIV, z. 1

Naturalny ił plicieński z Bydgoszczy (IN) wchodzi w skład utworów rozprzestrzenionych na znacznym obszarze Polski. Zasięg występowania wyznaczają granice zbiornika plicieńskiego, który wg B. Arenia (1957) składał się z dwóch basenów, płytszego - zachodniego i głębszego - wschodniego. W okolicach Bydgoszczy iły plicieńskie występują w strefie powierzchniowej podłoża budowlanego. Miąższość ich wynosi od około 10 do 30 m. Są one glacictektonicznie zaburzone z licznymi spękaniem, o charakterystycznej teksturze „brekcjowej”, K. Meissner (1970). Tekstura ta spowodowana jest obecnością rozwiniętego systemu mikroszczelin i zlustrowań powstałych pod wpływem masywu lądolodu i działalności wielokrotnego zamrażania i odmrażania. Jak zauważył K. Meissner (1970), uchwycenie prawidłowości zmian poszczególnych parametrów fizyczno-mechanicznych jest niezmiernie utrudnione. Podobne wnioski wynikają z prac W. Fortunata (1960) oraz badań autora, M. K. Kumor, E. Wojciechowski (1986), M. K. Kumor (1989a).

Analizowany ił plicieński jest gruntem polimineralem zbudowanym z montmorillonitu, illitu, kwarcu i kaolinitu oraz z domieszek wykrytych w mikroporach i szczelinach CaCO_3 , ił-IN ma charakter illitowo-montmorillonitowo-kaolinitowy, M. K. Kumor (1983a), a właściwości fizyczno-chemiczne są bliskie średnim wartościom genetycznie podobnych iłów z obszaru Polski.

Analiza wyników badań przeprowadzonych na iłach, które uznano za monomineralne, może stanowić element porównawczy dla znalezienia prawidłowości rządzących mrozowymi przemianami mikrostruktury polimineralnych gruntów spoistych zbudowanych z montmorillonitu, kaolinitu oraz illitu.

3.2. Przygotowanie prób do badań

Badania mrozowych zmian mikrostruktury iłów wykonano dla odpowiednio przygotowywanych past gruntowych, które otrzymywano z handlowych minerałów (KS) i (EW) w stanie powietrzno-suchych proszków. Ił plicieński (IN) wycinano ze złoża surowca dla Zakładów Ceramicznych w Bydgoszczy na głębokości około 3,5 m do 4,5 m poniżej stropu, w świeżo odsłoniętej warstwie, tj. z głębokości znacznie przekraczającej strefę przemarzania. Głębokość pobierania próbek była także poza zasięgiem tzw. „strefy aktywnej” bliskiej około 3,5 m p.p.t., M. K. Kumor, E. Wojciechowski (1986). W tej strefie odnotowuje się największe zróżnicowanie wartości parametrów mechanicznych i właściwości fizyczno-chemicznych iłów plicieńskich występujących w obszarze granic administracyjnych Bydgoszczy. Z iłu naturalnego sporządzono dla części wykonywanych badań pastę gruntową, którą otrzymano przez rozmakanie okruszków i ich kilkukrotne dokładne roztarcie i przemieszanie. Granulowany kaolin, sproszkowany bentonit lub okruszki iłu plicieńskiego zalewano objętością wody destylowanej, potrzebną do uzyskania wilgotności odpowiadającej zakładanemu stopniowi plastyczności.

Szczegółowo metodę przygotowania materiału gruntowego do badań przedstawiono w pracy, M. K. Kumor (1985b). Sposób przygotowania past oraz co

najmniej 12 miesięczny okres ich przechowywania w komorze klimatycznej w warunkach pełnego nasycenia wodą zapewniał osiągnięcie maksymalnej jednorodności i prawie równomierny rozkład wilgotności w próbkach iłu. Przypuszczalnie w tym czasie możliwa była odbudowa wiązań między agregatami mineralnymi. Praktycznie nie było jednak możliwe uzyskanie pełnej jednorodności i idealnej izotropii ośrodka gruntowego. Wilgotność wyjściowa past iłu do badania mikrostruktury była bliska stopniowi plastyczności $I_L = 0,5$.

Naturalna wilgotność iłu plicieńskiego wynosiła średnio $w_n = 20,0\%$, a jego stopień plastyczności $I_L = 0,06$.

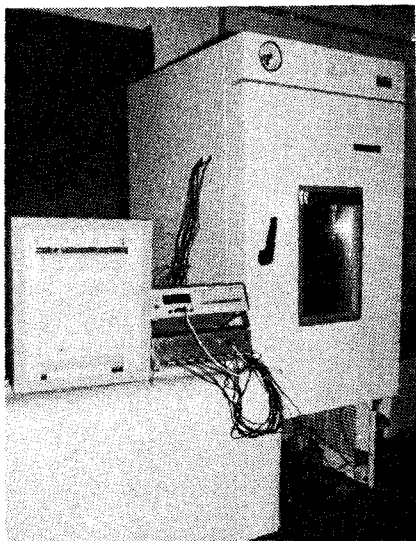
Wymiary próbek iłów poddawanych działaniu mrozu wynosiły: średnica 90 lub 45 mm i wysokość 42 mm.

Proces mrożenia i odmrażania iłów przebiegał w zamkniętym układzie, J. Szargut (1975), tj. bez zmiany masy w zamkniętym systemie gruntowo-wodnym, czyli bez możliwości podciągania wody od spodu przez próbki. Możliwa była wewnętrzna redystrybucja wilgotności iłów (np. grawitacyjna) przy jednoczesnym zachowaniu stałej średniej wilgotności próbek. Zamrażanie, tak jak i odmrażanie, następowało jednocześnie ze wszystkich stron próbki od razu w ustalonej temperaturze.

Na podstawie wyników badań wstępnych autor ustalił, że praktycznie istotne zmiany właściwości cyklicznie przemrażanych iłów ujawniają się w temperaturach zamrażania bliskich $\theta_z = -20^\circ\text{C}$ (253 K). Liczbę cykli (mrożenia - odmrażania) założono $f = 1; 5; 10; 20$, czas trwania cyklu $t_{\text{zamar}} = t_{\text{odmr}} = 24$ godziny. Temperatura odmrażania była równa temperaturze laboratoryjnej $\theta_o = +20^\circ\text{C}$ (293 K). Przyjęte w eksperymencie parametry procesu zamrażania, tj. temperatura $\theta_z = -20^\circ\text{C}$, liczba cykli przemiennego działania mrozu i czas ich działania, mają związek z warunkami klimatycznymi panującymi w Polsce, T. Przychodźień (1981), Z. Wojtowicz (1979). Parametry te spotykane są również w szeregu zagadnieniach związanych ze sztucznym zamrażaniem górotworu np. podczas budowy szybów górniczych, E. Posyłek (1973). Zestawienie założonych warunków mrożenia i odmrażania przedstawiono w tablicy 1.

3.3. Przebieg procesu zamrażania i odmrażania

Do badania temperatury w iłach zastosowano termistorowy zestaw pomiarowy typu Panid, znajdujący się w Zakładzie Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziemi AR w Krakowie oraz specjalny układ termistorowy z ciągłą rejestracją temperatury w Zakładzie Geotechniki ATR w Bydgoszczy (rys.5). Stanowisko badawcze składało się z komory chłodniczej typu Gronland oraz przyrządu do elektronicznego pomiaru temperatury, współpracującego z rejestratorem napięcia. Wyniki pomiarów temperatury będące funkcją napięcia, oprócz rejestracji na taśmie, kontrolowano w sposób ciągły za pomocą odpowiednio wyskalowanego woltomierza elektronicznego.



Rys.5. Widok stanowiska do pomiaru temperatury próbek ilów
(Zakład Geotechniki ATR Bydgoszcz)

Szczegółowy opis stanowiska badawczego w ZMGiBZ AR Kraków przedstawiony jest w pracy, K. M. Skarżyńska (1969).

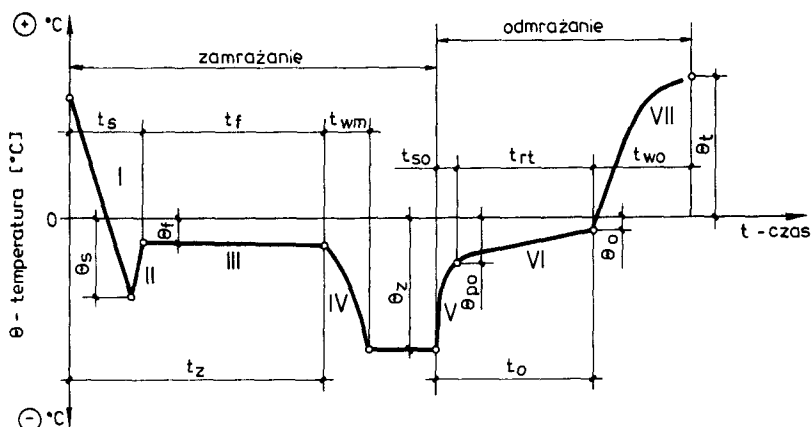
Temperaturę mierzono w środku kołowego przekroju, w połowie wysokości próbki. Dokładność odczytu temperatury stosowanych zestawów pomiarowych wynosiła $\Delta \theta = \pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Wobec braku w literaturze krajowej propozycji ujęcia opisu zmian temperatury w przemrażanym i odmrażanym gruncie spoistym, autor przyjął w niniejszej rozprawie do analizy przemrażania definicje i nazewnictwo na podstawie literatury zagranicznej, wg I. H. Kolain, P. F. Low (1963), N. A. Cytowicz (1975), O. B. Andersland, D. M. Anderson (1978), D. M. Anderson, N. R. Morgenstern (1973). Proces odmrażania omówiono wg propozycji własnej. Poniżej podano w ujęciu schematycznym (rys.6) przyjęty opis charakterystyki zmian temperatury dla zamrażania i odmrażania.

Wyniki końcowe wykonanych pomiarów temperatury, czasu zamrażania i odmrażania mrożonych ilów przedstawiono w tablicy 5 oraz na rysunkach 7, 8, 9 i 10.

Wyniki przeprowadzonych obserwacji próbek podczas mrożenia świadczyły, że po etapie I - schładzania - ły nie uległy zamrożeniu, tzn. pod niewielkim naciskiem odkształcały się plastycznie. Spostrzeżenie powyższe dotyczyło zarówno łu kaolinitowego, jak i bentonitu MAD. Wskazuje to, że w próbce łu w trakcie I etapu nie doszło do przemiany fazowej wody w lód. Na podstawie jakościowej oceny zmian temperatury (rys.7 i 8) oraz stanu zamrożenia próbek można sądzić, że istotnymi dla analizy mrozowych zmian mikrostruktury ilów są etapy II, III i IV, a pominąć można etap I. W częściach etapu II (rys.7 i 8) temperatura próbki osiąga minimum i tzw.

temperaturę przechłodzenia $\theta_s \gg \theta_z$, którą wiąże się z obecnością w gruncie wody przechłodzonej. Woda ta może powstawać w włach, a jej zawartość nawet wzrastać po kolejnych cyklach mrożenia i odmrażania. Zjawisko szczególnie omawia się w dalszej części rozprawy. Wartość temperatury przechłodzenia, jaką otrzymano dla badanych włach, jest różna, zależnie od typu mineralnego i liczby cykli mrożenia. W kaolinie z Sedlec wynosi dla pierwszego cyklu mrożenia $\theta_s = -0,8^\circ\text{C}$ i $\theta_s = -0,6^\circ\text{C}$ dla $f = 5 + 10$ przemrożeń (tab.5), podczas gdy dla bentonitu MAD $\theta_s = -1,9^\circ\text{C}$ dla $f = 10$ cykli i $\theta_s = -1,2^\circ\text{C}$ przy $f > 10$ cykli mrożenia.



- θ_s - temperatura przechłodzenia wody (samoistnej nukleacji)
 θ_f - temperatura zamrażania gruntu
 θ_z - temperatura mrożenia
 θ_{po} - temperatura początkowa rozmrażania gruntu
 θ_o - temperatura odmrażnięcia gruntu
 θ_t - temperatura odmrażania
- t_z - czas zamrażania $\left\{ \begin{array}{l} t_s - \text{czas schładzania gruntu niezamrożonego (etap I+II)} \\ t_f - \text{czas wewnętrznej równowagi izotermicznej gruntu zamrożonego (etap III - izotermiczny)} \end{array} \right.$
- t_{wm} - czas szybkiego wyrównywania się temperatury zamrażanego gruntu i otoczenia (etap IV)
- $t_{wm} + t_z$ - czas osiągnięcia równowagi termodynamicznej - podczas mrożenia układu zamkniętego woda - it
- t_o - czas odmrażania $\left\{ \begin{array}{l} t_{so} - \text{czas szybkiego ogrzewania próbki zamrożonej (etap V)} \\ t_{rt} - \text{czas równoważenia termicznego gruntu odmrażanego (etap VI)} \end{array} \right.$
- t_{wo} - czas wyrównywania się temperatury odmrożonego gruntu (etap VII)
- $t_o + t_{wo}$ - czas osiągnięcia równowagi termodynamicznej - podczas odmrażania układu zamkniętego woda - it
- I-VII - etapy zamrażania - odmrażania na krzywej zmian temperatury w procesie mrożenia - odmrażania

Rys.6. Schematyczny opis przebiegu procesu mrożenia - odmrażania gruntów spoiowych

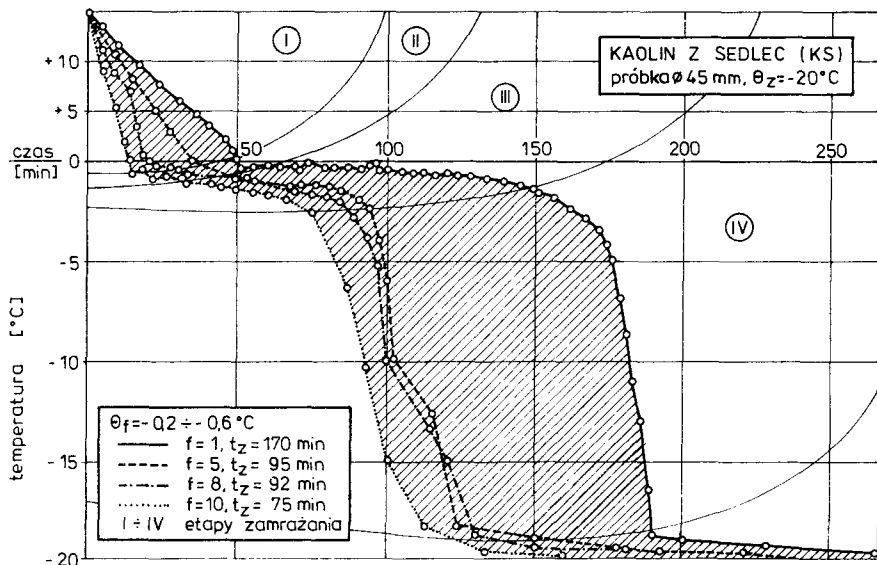
Charakterystyka zamrażania i odmrażania badanych iłów

	Punkt charakterystyczny na krzywej zamrażania - odmrażania	Oznaczenie	Liczba cykli zamrażania - odmrażania - f								Uwagi *
			Kaolin z Sedlec (KS)				Bentonit MAD (BW)				
			1	5	8	10	1	5	8	10	
mrozenie **	czas schładzania	t_s	55	35	28	16	54	34	32	26	etap I + II
	czas wewnętrznej równowagi izotermicznej	t_f	115	60	64	59	104	86	68	74	etap III
	czas zamrażania	t_z	170	95	92	75	158	120	100	100	etap I + II + III
	temperatura przechłodzenia wody	θ_s	-0,8	-0,6	-0,6	-0,6	-1,2	-1,2	-1,2	-1,9	etap I / II
	temperatura zamrażania gruntu	θ_f	-0,2	-0,6	-0,6	-0,6	-1,0	-1,0	-1,2	-1,4	etap III
	temperatura mrożenia	θ_z	-20,0				-20,0				
	czas wyrównywania temperatur zamrożonego gruntu i otoczenia	t_{wm}	25	58	61	83	92	38	57	56	etap IV
odmrażanie **	czas szybkiego ogrzewania	t_{so}	30	30	30	30	30	31	—	30	etap V
	czas równowagi termicznego gruntu odmrażanego	t_{rt}	134	137	112	71	202	228	—	234	etap VI
	czas odmrażania	t_o	164	167	142	101	232	259	—	264	etap V + VI
	temperatura początkowa rozmrażania	θ_{po}	-2,2	-2,5	-2,5	-2,5	-5,8	-6,0	—	-6,0	etap V / VI
	temperatura odmarznięcia	θ_o	-0,5	-1,5	-0,8	-0,5	-4,5	-4,4	—	-4,4	etap VI / VII
	temperatura odmrażania	θ_t	+20,0				+20,0				
* poszczególne etapy oznaczono wg rys. 6 i wydzielono na rys. 7, 8, 9 i 10											
** { mrożenie, próba \varnothing 45 mm odmrażanie, próba \varnothing 90 mm											

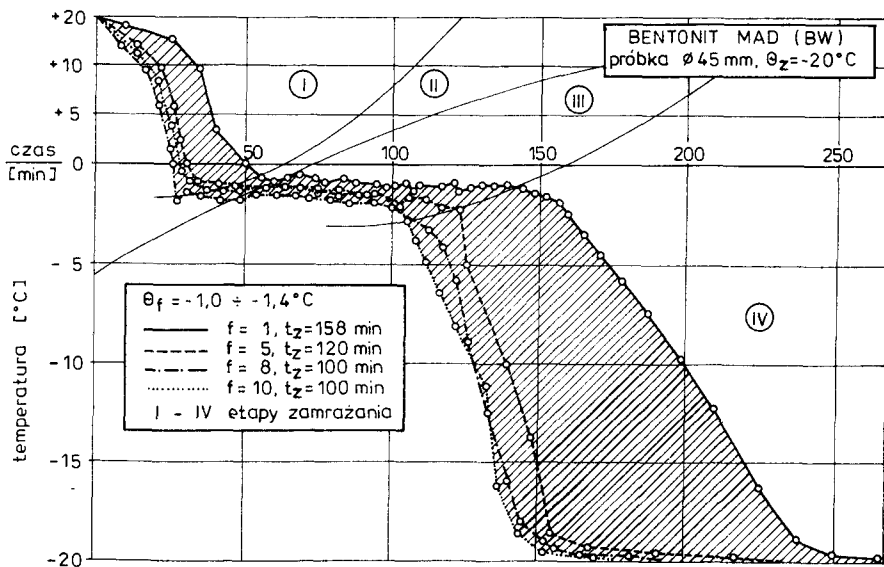
Lokalnie, w niektórych obszarach iłów o większej niż w bezpośrednim otoczeniu koncentracji „drobnych kropelek” wody wolnej, temperatura przechłodzenia, jaką zaobserwujemy w iłach, może być niższa od zarejestrowanej temperatury θ_s . Nie wykluczone jest bowiem, że punkt zamrażania tej wody obniża się z powodu wzrostu stężenia rozpuszczonych soli w pozostałej, nie zamrożonej części roztworu i wiązać się może prawdopodobnie z gradientem temperatury i wymiarami próbek. Dla próbek bentonitu MAD o masie około 1 g w podobnych warunkach uzyskano temperaturę przechłodzenia $\theta_s = -8^\circ\text{C}$, T. Kozłowski (1988).

Po osiągnięciu temperatury przechłodzenia zamraża w pewnej chwili woda przechłodzona, powodując wydzielenie ciepła krystalizacji. W wyniku oddania tego ciepła do otoczenia, temperatura iłów wzrosła o około 0,2 do $0,5^\circ\text{C}$, do wartości temperatury zamrażania θ_f . Pojawienie się na krzywej zamrażania tego efektu rozpoczyna III etap, tzw. „izotermiczny”, w którym osiągniętą wartość temperatury θ_f praktycznie uznaje się za stałą. W kaolinie z Sedlec (tab.5) etap „izotermiczny” przebiega zależnie od analizowanego cyklu mrożenia - odmrażania w temperaturze $\theta_f = -0,2^\circ\text{C}$ do $-0,6^\circ\text{C}$ i

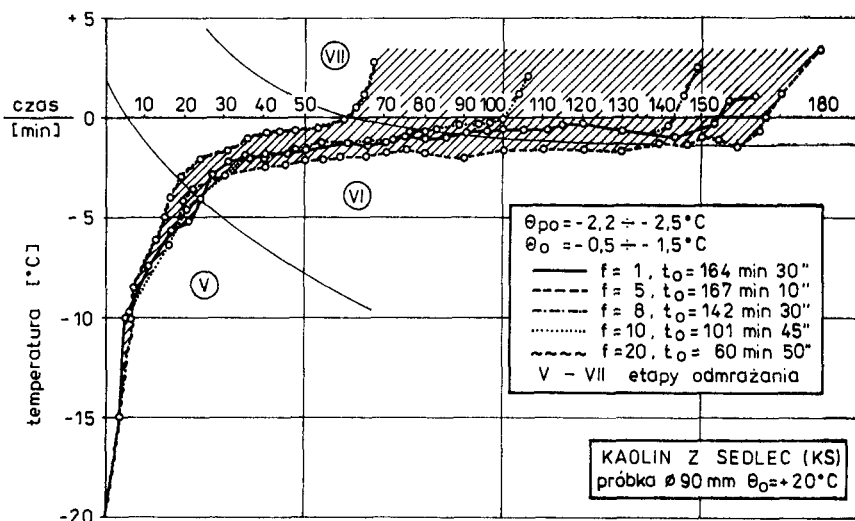
wartość jej jest wyższa, niż w bentonicie MAD, gdzie zarejestrowano $\theta_f = -1,0^{\circ}\text{C}$ do $-1,4^{\circ}\text{C}$.



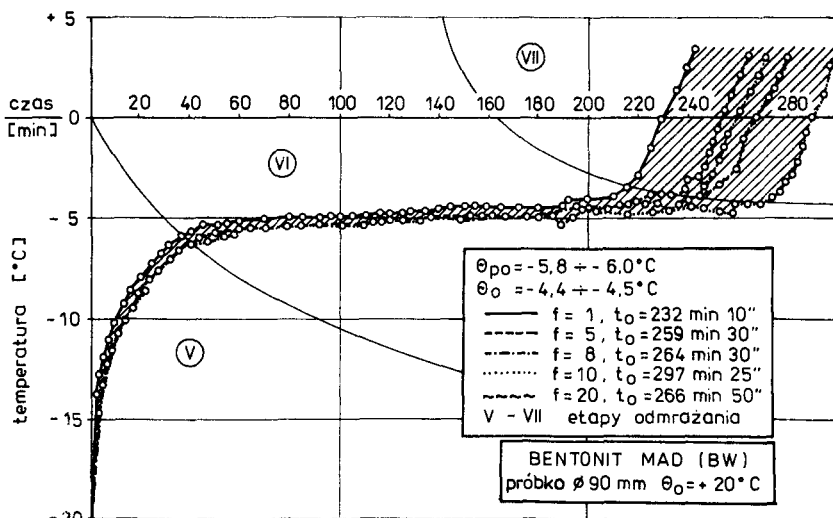
Rys.7. Przykładowe zmiany temperatury w próbce kaolinu z Sedlec w procesie cyklicznego zamrażania ($\theta_z = -20^{\circ}\text{C}$)



Rys.8. Przykładowe zmiany temperatury w próbce bentonitu MAD w procesie cyklicznego zamrażania ($\theta_z = -20^{\circ}\text{C}$)



Rys.9. Przykładowe zmiany temperatury w próbce kaolinu z Sedlec w procesie cyklicznego odmrażania ($\theta_0 = +20^\circ\text{C}$)



Rys.10. Przykładowe zmiany temperatury w próbce bentonitu MAD w procesie cyklicznego odmrażania ($\theta_0 = +20^\circ\text{C}$)

Wartość temperatury zamrażania w etapie III wykazuje niewielkie wahania wokół ustalonej wartości θ_f , np. w kaolinie z Sedlec wynoszą one $\Delta\theta_f = \pm 0,2^\circ\text{C}$, w bentonicie MAD $\Delta\theta_f = \pm 0,5^\circ\text{C}$. Odnotowane tu wahania temperatury w czasie dochodzenia do stanu równowagi termodynamicznej przy temperaturze mrożenia $\theta_z = -20^\circ\text{C}$, oprócz zaznaczonych efektów termicznych pochodzących od przemiany fazowej wody w lód, mogą wiązać się między innymi z kontrakcją sieci krystalicznej w wyniku ubytku molekuł wody międzypakieto-

wej i sukcesywnego jej zamarzania w nowo powstałych wakancjach. Potwierdzają ten proces spostrzeżenia T. Kozłowskiego (1987), uzyskane przy oznaczaniu wody niezamarzniętej w różnych monomineralnych iłach.

Prawie stała wartość temperatury w etapie „izotermicznym” utrzymuje się w próbce iłu przez znaczny okres, tzw. czas wewnętrznej równowagi izotermicznej t_f . Wynosił on średnio od 1 do blisko 2 godzin i wartości te sukcesywnie zmniejszały się z liczbą cykli mrożenia (tab.5). Jednocześnie czas wewnętrznej równowagi izotermicznej t_f dla bentonitu MAD jest dłuższy niż w kaolinie z Sedlec i wyraźnie maleje w obu przypadkach w kilku pierwszych cyklach mrożenia ($f \approx 5$ do 8) w odniesieniu do pierwszego zamrożenia.

W etapie III obserwuje się w iłach równowagę między ciepłem wydzielanym przez stopniowo krystalizujące coraz mniejsze „kropelki” wody, a ciepłem otoczenia. Ustalenie się równowagi między fazami iłu o różnych parametrach termodynamicznych (fazy: stała - lód, szkielec mineralny; ciekła - woda niezamarznięta; gazowa - para wodna i powietrze) zachodzi w III etapie, równolegle, jak sądzi autor, z procesem mrozowych transformacji mikrostruktury układu wodno-iłowego. W tym etapie, szczególnie pod koniec, następują najistotniejsze zmiany właściwości iłu z cech stanu niezamarzniętego na właściwości stanu iłu zamrożonego. Stwierdza się bowiem, że pod niewielkim naciskiem nie doznają one odkształceń plastycznych. Ponadto w tym okresie obserwowano w zamarzniętej próbce licznie powstałe niejednorodności w formie szczelin i pęknięć mrozowych, które wypełnione są nie tylko lodem, ale i powietrzem. Jak wiadomo przemiana fazowa wody w lód powoduje blisko 9 % wzrost objętości nowej fazy. Po zamarznięciu iłu, w porównaniu do wyjściowej próbki, zaobserwowano więc efekt pęcznienia mrozowego iłu. Można przypuszczać, że nie tylko przemiana fazowa woda - lód, ale również mrozowa redystrybucja wody w próbce i np. fakt powstania pęknięć masywu iłu przy jednoczesnym wzroście udziału fazy gazowej w układzie gruntowym, stanowią przyczyny objętościowego wzrostu próbek w procesie mrożenia, a także - analogicznie - transformacji struktury i mikrostruktury spoiwego ośrodka gruntowo-wodnego.

W etapie IV odnotowano duże spadki temperatury w mrożonych iłach, wzrastające z liczbą cykli mrożenia, np. dla kaolinu z Sedlec wynosił średnio od $\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = 0,20 \text{ deg} \cdot \text{min}^{-1}$ w pierwszym cyklu do $\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = 0,31 \text{ deg} \cdot \text{min}^{-1}$ po piątym cyklu. Świadczyć to może o coraz lepszej, związanej ze wzrostem liczby cykli przemrożeń, wymianie ciepła w zamarzniętym ośrodku, wskazującej ponadto na dokonane zmiany struktury iłu. W IV etapie temperatura w próbce nie jest jeszcze w pełni wyrównana. Prawdopodobna może być migracja molekuł wody z obszarów o wyższej, ale ujemnej temperaturze, do powstałych mikrokryształków lodu w strefach próbki o niższej temperaturze, drogą przez istniejące błonki wody niezamarzniętej. Z tej przyczyny nie jest wykluczony dalszy wzrost kryształków lodu oraz objętości próbki iłu. Możliwe są również, zdaniem autora, dalsze zmiany ułożenia cząstek mineralnych, głównie w granicznej strefie ił - woda - lód i w strefach iłu nie zamarzniętego między wykryształizowanym lodem. Po osiągnięciu przez próbkę iłu tem-

peratury mrożenia θ_2 , tj. stanu równowagi termodynamicznej układu ił-woda-lód, pozostaje w iłach jeszcze pewna część wody, która w tej temperaturze nie zamrznie. Jest to woda niezamrznięta, silnie wiązana przez szkielet mineralny w tym i międzypakietowa. Znajduje się ona w równowadze ustalonej z lodem, przy czym prężność jej pary jest równa prężności pary lodu w danej temperaturze ujemnej, B. A. Savelev (1971).

Odmrażanie iłów przebiega etapowo i jak zbadano w temperaturze poniżej 0°C , co jest podobne do procesu zamrażania (rys.6, 9, 10). Początkowo w etapie V, kiedy temperatura w zamrożonych próbkach rośnie w krótkim czasie (30 minut) od 14°C do 18°C , niezależnie od kolejnego cyklu mrożenia (tab.5, rys.9, 10), najprawdopodobniej nie dochodzi w iłach do topnienia kryształków lodu. Przemiana fazowa lodu w wodę zapewne rozpoczyna się w etapie VI. Świadczyć o tym może zmniejszenie przyrostu temperatury w iłach od momentu osiągnięcia temperatury początkowej zamrażania θ_{po} i nieznaczny przyrost w granicach 2°C w czasie kilku godzin do temperatury odmarznięcia iłów θ_o . Przykładowo, tablica 5, w kaolinie z Sedlec rozmrażanie rozpoczyna się w temperaturze $\theta_{po} = -2,2^{\circ}\text{C}$ w pierwszym cyklu i $\theta_{po} = -2,5^{\circ}\text{C}$ w następnych cyklach. Próbka w tym okresie, jak stwierdzono, jest w stanie zamrożonym; rozmrożenie iłu jednoznacznie określono po czasie t_{rt} w nieco wyższej, niż początek rozmrażania, temperaturze, tj. $\theta_o = -0,5$ do $-1,5^{\circ}\text{C}$. Czas równoważenia termicznego odmarzanego iłu $t_{rt} = 134$ minuty dla pierwszego cyklu maleje ze wzrostem przemrożeń blisko o połowę po $f = 10$ cykli mrożenia. Podobnie rozmraża bentonit MAD, przy ogólnie niższych temperaturach: np. $\theta_{po} = -5,8$ do $-6,0^{\circ}\text{C}$ i $\theta_o = -4,4$ do $-4,5^{\circ}\text{C}$ w poszczególnych cyklach zamrażania. Otrzymany dla kolejnych przemrożeń odmienny charakter wzrostu czasu równoważenia termicznego odmarzania t_{rt} oraz niższe odpowiednie wartości temperatur bentonitu MAD w porównaniu do kaolinu z Sedlec (tab.5, rys.10) wskazują na istotny związek przebiegu procesu odmarzania gruntów spoiowych ze składem mineralogicznym i redystrybucją wilgotności.

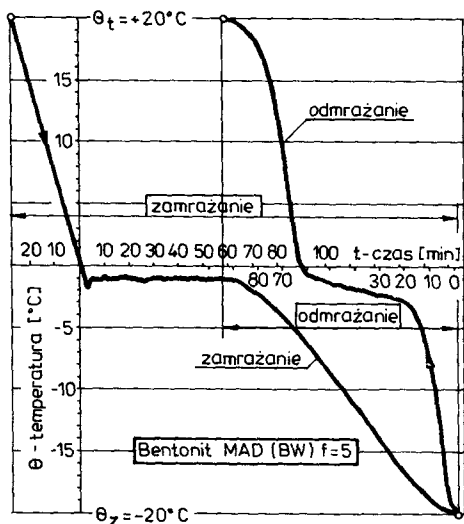
Analizowane podobieństwa charakterystyk odmarzania iłów monomineralnych prawdopodobnie wiążą się również ze stopniową przemianą w wodę powstających podczas zamrażania podobnych form i typów spoiwa lodowego, tj. mikrokryształków i kryształków lodu. Koncentracja ich może być różna i zależna od liczby cykli mrożenia i kolejności zamrażania oraz typu iłu. Dostarczane rozmieszczony, topniejące kryształki lodu, pobierając ciepło od otoczenia powodują, że efekty termiczne przy dążeniu do równowagi termodynamicznej odmarzanego gruntu rozkładają się w pewnym czasie i zachodzą w określonych przedziałach temperatur. Przypuszcza się, że wartości temperatur i czas ich osiągnięcia są warunkowane mineralnym typem iłu, który wyznacza powiązani cząstek wody w stosunku do szkieletu mineralnego, oraz zależność może od typu powstałej przy pierwszym zamrażaniu mikrostruktury i stopnia jej zmian w następnych cyklach mrożenia i odmarzania. Wielkość sił przyciągających cząsteczki wody przez szkielet mineralny w procesie odmarzania decyduwać będzie o rodzaju i ilości powstałej wody oraz jej rozkładzie przestrzelnym w masie iłu (typ mikrostruktury iłu, redystrybucja wilgot-

ności). W następnych cyklach przemrażania efekty te pogłębiają się do chwili, kiedy zostanie utrwalony ostatecznie typ mikrostruktury iłu i będzie ustalony charakter zmian termicznych (rys. 7, 8, 9, 10) towarzyszących przemianie fazowej lodu w wodę i wody w lód. Część cząsteczek wody uwolnionej (wolnej) i nie związanej ponownie po odmarznięciu przez agregaty mineralne, może grawitacyjnie przemieszczać się w dół próbki. Wynika to nie tylko z wewnętrznej redystrybucji wody, ale i z lokalnych przemieszczeń ciepła w próbce odmrożonego iłu. Związane z wewnętrznym przepływem ciepła efekty termiczne mogą być rejestrowane jako wahania temperatury na krzywej odmrażania w etapie VI. Forma kryształków lodu istniejących do etapu VI, wielkość oraz ich przestrzenny rozkład w próbce iłu na przełomie etapu VI i VII, tzn. po rozmarznięciu, wyznaczają strukturę iłu rozmrożonego. Po odmarznięciu pozostałe po wytopionym lodzie pory (mikrokapilary) mogą ulec częściowo zasklepieniu, dając zmniejszenie wysokości próbki. Spowoduje to zwiększenie liczby bezpośrednich kontaktów między elementami szkieletu mineralnego i polepszy wymianę cieplną w ile. Stąd prawdopodobnie otrzymano w kaolinie z Sedlec skrócenie czasu odmrażania ze wzrostem liczby cykli mrożenia, odwrotnie jak w ile montmorillonitowym, w którym uzyskano dłuższy czas rozmrażania. W bentonicie MAD wzrost czasu rozmrażania nastąpił prawdopodobnie w wyniku wzrostu objętości próbki spowodowanego pęcznieniem agregatów montmorillonitu i zmianą udziału faz (wzrost fazy gazowej).

Pewne znaczenie w charakterze zmian temperatury, a także i w przebudowie mikrostruktury rozmrażanego iłu może mieć w tym etapie powietrze uwalniane z kryształków lodu oraz powietrze atmosferyczne dostające się do powstałych pęknięć mrozowych próbki, chociaż wydaje się to mniej znaczące. Autor sądzi, że może to być zagadnienie istotne lokalnie w tych strefach iłu, gdzie są zamknięte pory nie całkowicie zapełnione wodą zatrzymaną po roztopieniu lodu.

Pod koniec etapu VI rozpoczyna się, a w etapie VII dokonuje ostateczna redystrybucja wilgotności i osiągnięty zostaje stan równowagi termodynamicznej w procesie odmrażania. Temperatura próby w etapie VII wzrasta stosunkowo szybko wyrównując się z końcem etapu z temperaturą otoczenia. Struktura i mikrostruktura iłu może ulegać pewnym zmianom w etapie VII, a nawet później, w wyniku wiązania molekuł wody wolnej przez agregaty mineralne, szczególnie montmorillonitu. Potwierdzają to wyniki badań omawiane dalej.

Otrzymany charakter zmian temperatury iłów podczas procesu mrożenia w porównaniu do odmrażania, po przedstawieniu w układzie czas - temperatura, wyznaczy histerezę, którą zarejestrowano w każdym badanym przypadku cyklu mrożenia - odmrażania. Przykładowo histerezę temperatury bentonitu MAD pokazano, dla $f = 5$ cykli, na rysunku 11. Problem ten wymaga jednak osobnych badań i tu został jedynie zasygnalizowany, wskazuje bowiem na nieodwracalność powstających zmian.



Rys.11. Przykładowa zmiana temperatury w bentonicie MAD (BW) zarejestrowana podczas $f = 5$ cyklu zamrażania - odmrażania (próbka $\phi = 45$ mm; $h = 42$ mm)

Istotnym faktem w analizowaniu transformacji struktury i mikrostruktury cyklicznie mrożonych iłów jest również to, że czas zamrażania jest prawie zawsze dłuższy od czasu odmrażania w próbkach tej samej wielkości.

Wspomniane wyżej zagadnienia dowodzić mogą, że mrozowe transformacje struktury, nie tylko monomineralnych iłów poddanych cyklicznemu działaniu mrozu, są w części nieodwracalne, dokonują się w określonych etapach i przy różnych charakterystycznych temperaturach. Jak można sądzić z przeprowadzonych pomiarów temperatury, zasadniczymi etapami o istotnym znaczeniu w zmianach mikrostruktury iłów są w mrożeniu etapy: II, III i IV, a podczas odmrażania etap VI. W iłach zawierających montmorillonit znaczący udział będzie miał również etap VII, w którym dochodzić może do zmian mikrostruktury spowodowanych pęcznieniem rozmrożonego iłu.

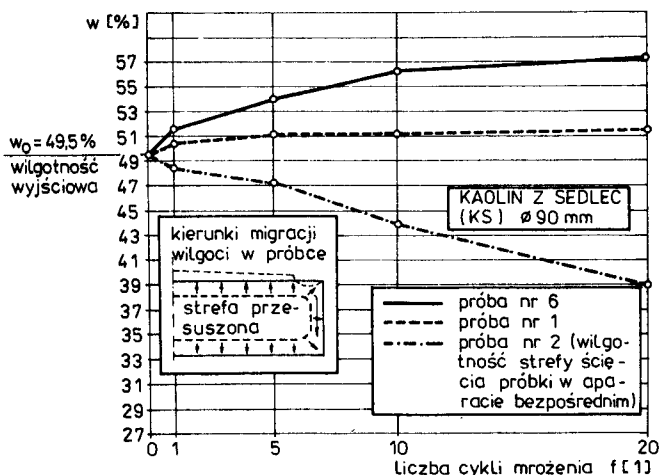
3.4. Badania nad strukturą

3.4.1. Redystrybucja wody w iłach cyklicznie mrożonych i odmrażanych

W zamrożonym iłu efekty migracji mrozowej wody zakumulowanej w formie kryształków lodu są łatwe do stwierdzenia podczas oceny makroskopowej próbki. Dokładniej różnice, rozkład i kierunki migracji wody w iłach wywołane przemiennym zamrażaniem i odmrażaniem zbadano w strefach próbek charakteryzujących obszary największych zmian struktury (w strefie zewnętrznej i strefie wewnętrznej danej próbki, rys.1). Obszary ustalono na wstępnym etapie oddzielnych badań.

Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono przykładowe wyniki badania wilgotności cyklicznie mrożonych ilów, łącznie z zaznaczeniem uogólnionych kierunków migracji wody w kaolinie z Sedlec (KS) i bentonicie MAD (BW).

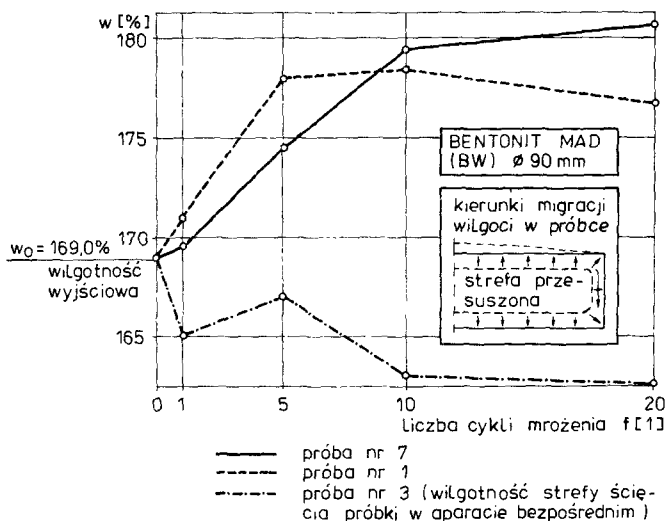
Przedstawione dane obrazują różnice wilgotności prób powstałe pod wpływem działania różnej liczby cykli mrożenia i odmrażania w warunkach jednoczesnego zachowania nie zmienionej średniej wilgotności próbki (układ gruntowo-wodny zamknięty).



Rys.12. Zmiana wilgotności w próbkach kaolinu z Sedlec po cyklicznym mrożeniu (numery próbek wg rys.1)

W kaolinie z Sedlec (rys.12) przemieszczenia wody charakteryzuje wzrost wilgotności dolnej strefy przy jednoczesnym przesuszeniu środka próbki. W strefie zewnętrznej - górnej (próba nr 1) nie odnotowano praktycznie istotnej różnicy w porównaniu do wilgotności wyjściowej. Wyniki badań wykazują, że w pierwszych cyklach mrożenia migruje woda z centralnych (środkowych) części próbki kaolinu w kierunku do postępującego frontu przemrażania i odmrażania. Ze wzrostem liczby przemrożeń w strefach zewnętrznych próbek pojawia się woda, której znaczna część przemieszcza się grawitacyjnie po rozmrożeniu iłu i zostaje zakumulowana w dolnej zewnętrznej strefie.

Zjawisko redystrybucji wody, w tym i grawitacyjnej, nie zostało jednoznacznie stwierdzone w próbkach kaolinu, które mrożono w sposób ciągły. Można więc sądzić, że wielokrotne przemienne zamrażanie i odmrażanie jest istotną przyczyną powstawania w badanym kaolinie wody wolnej oraz jej grawitacyjnej migracji. Częsteczki wody uwalnianej po wytopieniu kryształków lodu nie są bowiem w całości wiązane i zatrzymywane w porach (mikrokapilarach) kaolinu po rozmrożnięciu. Wpływać może na ten fakt między innymi zmiana ułożenia, wymiary nowo powstałych cząstek i agregatów mineralnych oraz ich transport w dolne strefy próbki rozmrożonej, powstałym systemem drożnych mikroporów i porów w masywie iłu kaolinitowego.



Rys.13. Zmiana wilgotności w próbkach bentonitu MAD po cyklicznym mrożeniu (numery próbek wg rys.1)

W bentonicie MAD (rys.13) mrożonym cyklicznie, podobnie jak w kaolinie z Sedlec, zaobserwowano w próbkach wzrost wilgotności w strefie dolnej zewnętrznej (próba nr 7) i górnej zewnętrznej (próba nr 1), tj. zamrażanych i odmrażanych w pierwszej kolejności. Jednocześnie środek próbki został przesuszony (próba nr 3).

Względna maksymalna różnica wilgotności powstała w wyniku zamrażania i odmrażania w bentonicie wynosi $\Delta w_0 = 4,6\%$ i jest znacznie mniejsza niż w kaolinie z Sedlec, gdzie $\Delta w_0 = 21,2\%$. Różnice wilgotności próbek bentonitu są zatem mniej wyraźne niż w kaolinie i wynikają one z przyczyn silniejszego wiązania cząsteczek wody przez cząstki montmorillonitu w porównaniu do kaolinitu, chociaż w niskich temperaturach (-20° do -40°C), T. Kozłowski (1988) sugeruje silniejsze wiązanie cząsteczek wody w kaolinie. Stwierdzone różnice ilościowe wilgotności wiążą się, jak należy przypuszczać, również z powstającą różną strukturą i mikrostrukturą ilów po przemrożeniu; wydaje się, że jest bardziej jednorodna w bentonicie oraz w środkowych strefach próbek ilów i najbardziej przeobrażona w strefach, gdzie nastąpiły duże przyrosty wilgotności. Powyżej $f = 5$ cykli nie jest wykluczone w bentonicie, że rozkład wilgotności będzie silniej zaburzony w obszarach zewnętrznych. Tam bowiem koncentrują się soczewki lodu i powstają mikrokapilary stosunkowo liczne i duże, jednocześnie sąsiadujące z wieloma pęknięciami mrozowymi zapełnionymi powietrzem.

Podsumowując przeprowadzone badania mrozowych zmian wilgotności można sądzić, że w ilach mrożonych i odmrażanych cyklicznie następuje migracja wody ze środka próbek do strefy zamrażanej i odmrażanej w pierwszej kolejności. W ilach ze wzrostem liczby cykli pojawiać się może po rozmarzeniu kryształków lodu woda uwolniona, która nie wiązana siłami kapilarnymi migruje, być może razem z cząstkami mineralnymi, w dół próbki. Różnice roz-

kładu wilgotności w zamrożonej i odmrożonej próbce są istotniejsze w ile kaolinitowym, niż w zawierającym montmorillonit. Stwierdzone różnice wilgotności i określone kierunki migracji cząsteczek w iłach, charakteryzujące wewnętrzne przemieszczenie masy, dowodzić mogą zmian struktury układu woda - ił, w wyniku przemiennego działania mrozu i odmrażania. Można przypuszczać, że pod wpływem mrozu, tj. w wyniku przemiany fazowej wody oraz powstającego ciśnienia wzrostu kryształków lodu, zawarte między cząstkami szkieletu mineralnego molekuly wody mogą być wypierane lub wyciskane, przeksztalcając się po wyższych cyklach mrożenia w wodę wolną migrującą w rozmarzniętym ił. Obok zmian objętości w wyniku przemiany fazowej woda - lód - woda są to prawdopodobnie główne czynniki przebudowujące strukturę ośrodka gruntowego przemrażanego i odmrażanego cyklicznie.

W analizowaniu ilościowym migrującej wody w wyniku zamrażania niewielki udział ma para wodna zawarta w kapilarnych porach gruntowych. Jak stwierdził A. R. Jumikis (1957), migracja pary wodnej do frontu przemrażania powyżej swobodnego zwierciadła wody, w nieznacznym tylko stopniu przyczyniła się do redystrybucji wody w gruncie, podobnie jak i sublimacja lodu porowego w zamrożonym ił, S. L. Huang, N. B. Aughenbaugh (1987).

3.4.2. Pęcznienie mrozowe

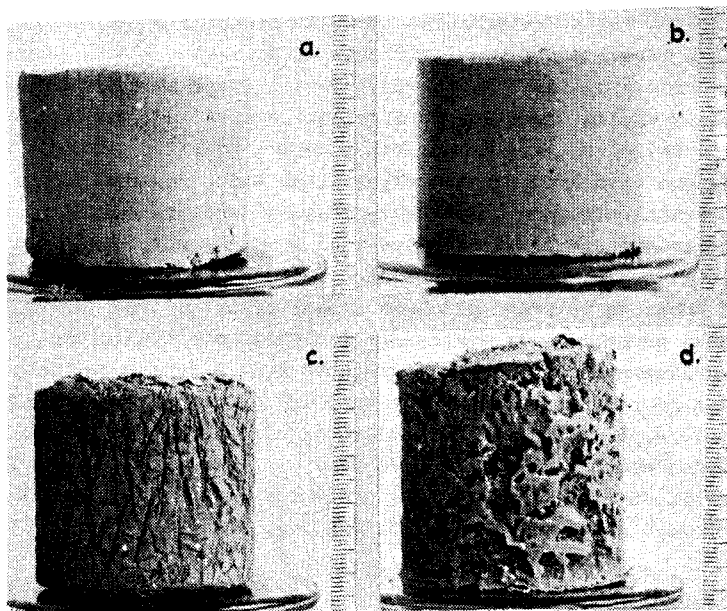
Pęcznienie mrozowe iłów określono jako stosunek przyrostu wysokości Δh , powstałego w wyniku mrożenia, do wysokości próbki h_0 przed mrożeniem ($V_{pm} = \frac{\Delta h}{h_0}$ - wskaźnik pęcznienia mrozowego).

Na rysunku 14 pokazano próbki obydwu iłów monomineralnych przed mrożeniem i przykładowo bentonitu MAD po $f = 20$ cyklach i po $f = 10$ przemrożeniach kaolinu z Sedlec.

Porównując próbki przed zamrażaniem (a, b) i po cyklicznym zamrażaniu (c, d) zauważyć można na prezentowanych zdjęciach istotny przyrost wysokości próbek, który wywołało przemienne działanie mrozu i odmrażania.

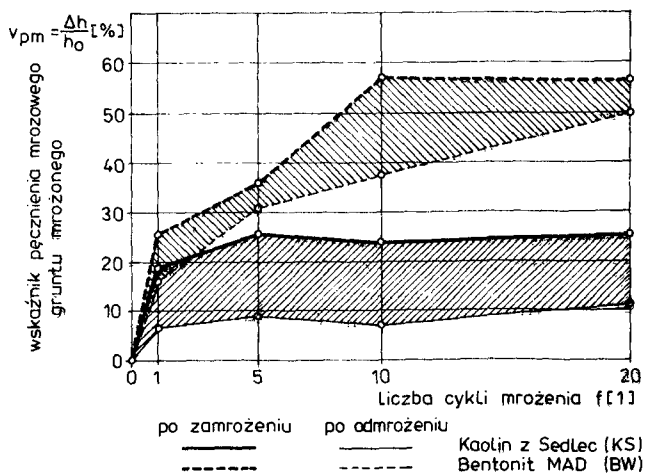
Wyniki końcowe pęcznienia iłu bentonitowego i kaolinitowego pod wpływem cyklicznego mrożenia i odmrażania zilustrowano na rysunku 15. W kolejnych cyklach mrożenia rosnących od $f = 1$ do $f = 20$ stwierdzono przyrost wysokości próbek iłów w odniesieniu do nie zamrażanych oraz w stosunku do próbek zamrożonych w poprzednim cyklu. Po odmrożeniu iłów otrzymano zmniejszenie wysokości próbek w porównaniu do zamrożonych, wskazujące na osiadanie podczas odmrażania i zasklepienie się porów. Wysokość odmrożonych próbek iłów była jednak większa, niż przed procesem mrożenia.

Wskaźnik pęcznienia mrozowego, jak widać na rysunku 15, rośnie z liczbą przemrożeń do pewnej wartości cykli f_0 . W bentonicie MAD: $f_0 \approx 10$, dla kaolinu z Sedlec: $f_0 \approx 5$. Dla dalszych cykli $f > f_0$ nie obserwowano znaczących przyrostów wysokości próbek w wyniku zamrażania. Zwraca uwagę fakt, że zbadane pęcznienie mrozowe bentonitu jest ponad 2-krotnie większe niż kaolinu (dla kaolinu $V_{pm} = 26,3\%$, dla bentonitu MAD $V_{pm} = 56,5\%$), oraz stały wzrost pęcznienia bentonitu MAD po odmrożeniu do $f = 20$ cykli, bez dopływu wody do próby (układ zamknięty).



Rys.14. Widok próbek ilów:

- a) kaolinu z Sedlec
 b) bentonitu MAD
 c) kaolinu z Sedlec po $f = 10$ cyklach mrożenia
 d) bentonitu MAD po $f = 20$ cyklach mrożenia



Rys.15. Pęcznienie mrozowe próbek kaolinu z Sedlec i bentonitu MAD w procesie cyklicznego mrożenia i odmrężania

Możliwe, że w ile bentonitowym podczas odmrężania (etap VI) i w pewnym czasie po odmrózeniu (etap VII) zachodzi proces wiązania wody uwolnionej z

wytopionych kryształków lodu prowadzący do pęcznienia agregatów montmorillonitu. Na możliwość powstania i obecność po rozmrożeniu cząsteczek tej wody w ile bentonitowym zwracają uwagę omówione wyniki z badań redystrybucji wody (podrozdział 3.4.1).

Zjawiska pęcznienia iłów po odmrożeniu próbek nie stwierdzono w kaolinie z Sedlec.

W kaolinie obserwowano stabilizację i brak zmian wysokości odmrożonej próbki, począwszy od $f = 1$ cyklu mrożenia. Należy sądzić, że wykazany przyrost pęcznienia mrozowego w procesie cyklicznego przemrożenia iłów kaolinitowego i montmorillonitowego zależy również od trwałości powstających kontaktów między nowo tworzonymi formami strukturalnymi i nieodwracalnego charakteru mrozowych deformacji, w tym nowych cząstek iłowych powstających w gruncie.

Deformacje mrozowe układu nowych mikroagregatów mogą zanikać od pewnej liczby przemrożeń. Można przypuszczać, że powstałe zmiany będą częściowo odwracalne po usunięciu działania wymuszenia, tj. po odmrożeniu w warunkach pełnej redystrybucji wody w próbce.

Podsumowując można uznać, że w cyklicznym mrożeniu zmiany struktury i mikrostruktury iłów dokonane zostają nie tylko w procesie zamrażania, lecz istotne transformacje zachodzą w okresie odmrażania (etap VI) i przez pewien czas po odmrożeniu (etap VII).

Szczególnie wyraźne zmiany struktury w etapach odmrażania i po odmrożeniu dotyczą iłów zawierających montmorillonit, którego agregaty mogą wiązać uwalniane cząsteczki wody i w stanie odmrożonym pęcznieją, M. K. Kumor (1989b).

3.4.3. Próba rozmakania w wodzie

Bezpośrednich jakościowych obserwacji mrozowych zmian struktury iłów dokonano przy pomocy rozmakania. Badano kostki iłu o wymiarach $30 \times 30 \times 20$ mm, które wycinano z próby wzorcowej (rys.1).

Odmrażanie i rozmakanie próbek prowadzono w wodzie destylowanej o temperaturze $\theta_w = +20^\circ\text{C}$. Wyniki badań rejestrowano na fotografiach w ustalonym czasie obserwacji. Przeprowadzono je przez około 9 dni (220 godzin), tzn. do momentu stwierdzenia braku istotnych zmian.

Na rysunkach przedstawiono przebieg próby rozmakania kaolinu z Sedlec (rys.16), bentonitu MAD (rys.17) i naturalnego iłu płoceńskiego (rys.18) po $f = 0; 1; 5; 10$ cyklach zamrażania.

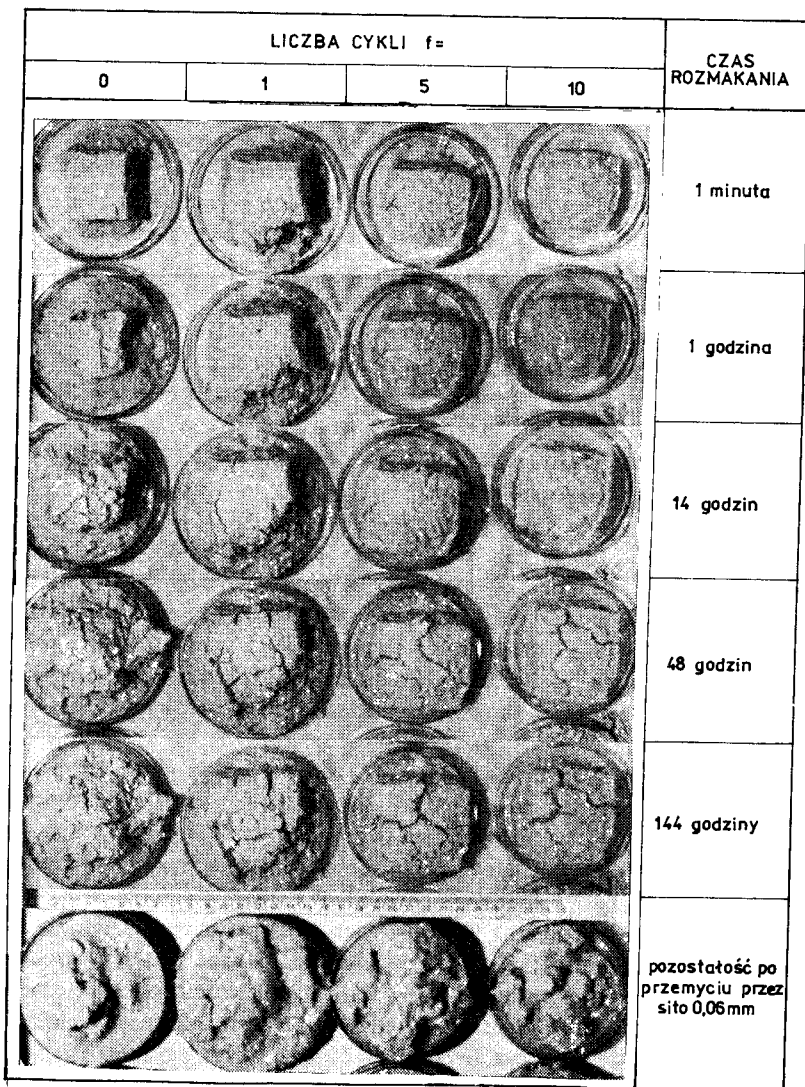
Rozmakanie kaolinu z Sedlec (rys.16) świadczy o mrozowych zmianach struktury, które charakteryzują wymiary agregatów gruntu w kolejnych cyklach mrożenia. Najszybciej rozmakają próbki po $f = 10$ cyklach mrożenia (praktycznie po 10 minutach). Wolniej rozmakają próbki kaolinu z Sedlec, które poddawano niewielkiej liczbie mrożeń. Przykładowo po $f = 5$ cyklach mrożenia rozmakają one dopiero po około 1 godzinie. Jednokrotnie mrożona próbka ($f = 1$) rozmokła po 4 godzinach, podczas gdy nie mrożony kaolin osiąga podobny stan po około 14 godzinach.

LICZBA CYKLI f=				CZAS ROZMAKANIA
0	1	5	10	
				1 minuta
				30 minut
				1 godzina
				14 godzin
				144 godziny
				pozostałość po przemyciu przez sito 0,06 mm

Rys.16. Rozmakanie w wodzie próbek cyklicznie mrożonego kaolinu z Sedlec

Agregaty mineralne powstałe pod wpływem mrożenia i odmrażania obserwowane w tym samym czasie rozmakania są największe dla próbki kaolinu, który nie był mrożony. Ogólnie im większej liczbie cykli mrożenia poddany jest il., tym stwierdzono mniejsze wymiary agregatów.

Bentonit MAD (rys.17) cyklicznie mrożony i odmrażany, poddany próbie rozmakania w wodzie wykazuje zależność odwrotną niż kaolin z Sedlec. Otrzymano w próbie rozmakania szybszy rozpad bentonitu nie mrożonego od poddanego zamrażaniu. Nie mrożony bentonit MAD zaczyna rozmakać po upływie około 1 minuty do maksimum 10 minut od zalania wodą. Podobnie zachowuje się próbka bentonitu po $f = 1$ cyklu mrożenia. W próbie tej, np. po 1 godzinie rozmakania, stwierdzić można powstanie odosobnionych agregatów i początki rozwijającego się na powierzchniach próbki pęcznienia.



Rys.17. Rozmakanie w wodzie próbek cyklicznie mrożonego bentonitu MAD

Rozwój procesu pęcznienia agregatów montmorillonitu obserwowano w czasie 220 godzin, tzn. do zakończenia eksperymentu. Dalszy jego rozwój został potwierdzony podczas swobodnego pęcznienia łą w stanie rozmrożonym, M. K. Kumor (1989b). Próbkę bentonitu MAD mrożone $f=5$ i $f=10$ cykli, mimo niewątpliwego odmrożenia po 14 godzinach (patrz podrozdział 3.3) zachowują się podobnie jak próbki po $f=1$ cyklu w początkowym okresie rozmakania, tzn. nie rozmokły i brak jest wyraźnych oznak desagregacji.

Początki procesu desagregacji zauważa się po upływie około 48 godzin rozmakania. W 144 godzinach rozmakania, makroskopowe różnice między po-

szczególными próbkami po $f=5$ i $f=10$ cyklach mrożenia nie są wyraźne. W tym samym czasie rozmakania próbki niemrożone i próbki po $f=1$ cyklu mrożenia wykazują prawie całkowite zatarcie postaci początkowej. Pęcznienie agregatów montmorillonitu rozwija się prawdopodobnie w całej objętości tych próbek. W końcowym efekcie prowadzi ono do powstania charakterystycznej masy gruntu o nieregularnym zarysie i zmienionej pierwotnej postaci. W próbce po $f=1$ cyklu mrożenia i po 12 godzinach rozmakania można uchwycić niezbyt wyraźnie zaznaczające się powierzchnie osłabień (pęknięć) mrozowych. To odmienne zachowanie w próbce rozmakania bentonitu MAD wynika ze składu mineralnego, ale można przypuszczać, że równie istotnym czynnikiem jest powstała po przemrożeniu różna struktura włók, jak też i selektywność reakcji jonowymiennych, B. Grabowska-Olszewska, E. M. Sergeyev (1977).

Transformacja struktury bentonitu MAD pod wpływem mrożenia przebiega w kierunku powstawania superklastrów (wg N. A. Cytowicza struktura siatkowa). Ten typ struktury uniemożliwia łatwe wnikanie wody do wnętrza próbki. W bentonicie MAD bowiem kanaliki mikrokapilarne po wytopionych mikrosoczewkach lodu w strefach zewnętrznych próbki zamykane są w wyniku pęcznienia montmorillonitu. Staje się to barierą dla cząsteczek wody migrujących do wnętrza ośrodka. Dopiero odpowiednio długi czas rozmakania umożliwia swobodniejsze wnikanie molekuł wody i pęcznienie kolejnych agregatów mineralnych. Wytworzone więzi między agregatami bentonitu MAD w wyniku cyklicznego mrożenia, jak wskazuje rozmakanie, są stosunkowo trwałe w czasie i ustabilizowane. Trwałość ta zaznacza się szczególnie wyraźnie powyżej $f > 5$ cykli mrożenia.

Rozmakanie iłu pliocenińskiego (rys.18) daje bezpośrednią informację o istotnym wpływie mrożenia na strukturę naturalnego iłu o glacytektonicznej historii geologicznej. Na szalkach umieszczono po dwie próbki iłu, które obrazują przebieg rozmakania od strony postępującego z góry frontu przemrażania (kostka leżąca, z prawej strony) i z boku kierunku mrożenia (kostka stojąca, z lewej strony). Podczas rozmakania następuje rozpad iłu na ostrokrawędziste agregaty o nieregularnym kształcie, zbliżonym początkowo do kostek. Agregaty iłu pliocenińskiego, jak widać, różnią się wymiarami w poszczególnych cyklach mrożenia i w obserwowanym czasie rozmakania. Prawie natychmiast ulegają rozpadowi próbki po $f=5$ i $f=10$ cyklach mrożenia (do 1 minuty). Podobny stan rozpadu na agregaty osiągnęła próbka iłu mrożona jednokrotnie po około 96 godzinach rozmakania.

Desagregacja iłu następuje po naturalnych powierzchniach rozdzielności i prawdopodobnie wzdłuż powierzchni granicznych powstałych po wytopionych makrosoczewkach lodu.

Nie mrożony ił po 220 godzinach rozmakania wykazał niewielki stopień rozpadu badanych próbek oraz brak oznak wyraźnej desagregacji w odniesieniu do stwierdzonego w przemrożonych próbkach. Rozpad mrożonych próbek iłu naturalnego na agregaty przebiega wzdłuż prawie płaskich powierzchni osłabień. Różnią się one charakterem od powierzchni osłabień iłu nie mrożonego, rozmakającego po powierzchniach porożrywanych i nieregularnych. Różnice uwidocznione są przy porównaniu wymiarów agregatów otrzymanych po przemy-

ciu przez sito o oczkach 0,06 mm. Próbki obserwowane z boku frontu przemrażania rozmakają znacznie szybciej niż widziane od góry powierzchni przenikania mrozu. Sugeruje to istnienie silniej rozwiniętych i lepiej utrwalonych powierzchni osłabień mrozowych, które są prostopadłe do kierunku przemieszczania frontu, w porównaniu do rozwiniętych przy kierunku zgodnym z frontem przemrażania. Wiąże się ten fakt między innymi z uprzywilejowanym kierunkiem wzrostu soczewek lodowych, zorientowanych dłuższą osią prostopadłe do postępującego frontu przemrażania, K. M. Skarżyńska (1969, 1985).

LICZBA CYKLI $f=$				CZAS ROZMAKANIA
0	1	5	10	
				1 minuta
				10 minut
				2 godziny
				96 godzin
				144 godziny
				pozostałość po przemyciu przez sito 0,06mm

Rys.18. Rozmakanie w wodzie próbek cyklicznie mrożonego iłu pliczeńskiego z Bydgoszczy

Podsumowując należy stwierdzić, że pod wpływem cyklicznego mrożenia i odmrażania następują trwałe zmiany struktury iłów. Mrozowe zmiany struk-

tury jakościowo charakteryzują się powstawaniem w gruncie oddzielnych makroagregatów o początkowo zróżnicowanych wymiarach oraz postępującym - z liczbą cykli mrożenia - ich rozpadem na coraz to mniejsze części. Świadczyć to może o dominującym udziale procesu desagregacji w mrozowych zmianach struktury kaolinu z Sedlec i iłu plioceńskiego.

W bentonicie MAD nie stwierdzono tak wyraźnej przewagi procesów desagregacji i zjawiska podobnego tworzenia makroagregatów w zakresie do $f = 10$ cykli mrożenia. Do $f = 10$ cykli mrożenia najprawdopodobniej zachodzą procesy agregacji i desagregacji. W próbie rozmakania trudno jest jednoznacznie przesądzić, który z tych procesów jest dominujący w mrozowej przebudowie struktury bentonitu MAD. Można przypuszczać, że stwierdzone w próbie rozmakania jakościowe zmiany struktury cyklicznie mrożonych iłów są wypadkowym efektem wielu złożonych procesów strukturotwórczych związanych z przemianami fazowymi wody w lód i lodu w wodę, takich jak np. redystrybucja wody, pęcznienie mrozowe, desagregacja lub agregacja. Jak wykazano, w znacznym stopniu są zależne od typu mineralnego ośrodka gruntowego i prawdopodobnie - w przypadku iłu IN - od historii geologicznej.

3.4.4. Skład mikroagregatowy*

Stwierdzone zmiany struktury przemrożonych iłów w próbie rozmakania oszacowano ilościowo badając skład mikroagregatowy.

Za mikroagregaty autor przyjmuje zgodnie z definicją zawartą w monografii „Atlas of the Microstructure of Clay Soils”, B. Grabowska-Olszewska i inni (1984), zespoły wielu iłowych lub piaskowo-pyłowych elementów, które są trwałe w zawieszynie przy obecności dyspergatora. Wymiary mikroagregatów wynoszą od części mikrometra do kilkudziesięciu mikrometrów. Agregaty to większe elementy mikrostrukturalne skał iłowych, zbudowane z mikroagregatów i oddzielnych ziarn, które nie są trwałe w zawieszynie przy nieobecności wiązań cementacyjnych. Wymiary wynoszą od kilku mikrometrów do dziesiątków a niekiedy do setek mikrometrów. Forma agregatów zwykle jest izometryczna.

Analizę mikroagregatową wykonano wg metody areometrycznej zmodyfikowanej przez N. A. Kaczynskiego, za E. Myślińską (1979). Próbkę iłu po procesach odmrażania i rozmakania w wodzie poddano wibrowaniu. Parametry wibracji ustalił autor drogą oddzielnych badań, stosując:

- częstotliwość $\varphi = 45$ Hz,
- amplitudę $A = 1,5$ mm,
- przyspieszenie $a = 10$ g,
- czas wibracji $t_w = 10$ minut.

Wyniki badań przedstawiono w tablicy 6 oraz na rysunkach 19 i 20. Analiza mikroagregatowa wykazała, że skład mikroagregatowy iłów nie jest stały i zmienia się po kolejnych cyklach działania mrozu i odmrażania.

*

Badania wykonano w ZMGiBZ AR Kraków

Tablica 6

Skład mikroagregatowy mrożonych iłów (%)

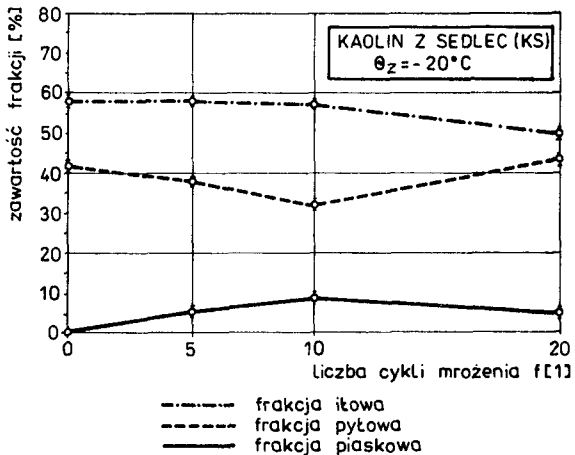
Liczba cykli f	Czas zamra- żania t_z	Fracje	Materiał badawczy		
			kaolin z Sedlec (KS)	bentonit MAD (BW)	ił pliczeński (IN)
$f = 0$	-	f_p	-	$10,7 \pm 0,8$	$12,4 \pm 0,9$
		f_{π}	$41,3 \pm 1,3$	$13,8 \pm 1,1$	$57,6 \pm 0,7$
		f_i	$58,7 \pm 2,0$	$75,5 \pm 0,7$	$30,0 \pm 0,9$
$f = 5$	-	f_p	$4,1 \pm 1,6$	$10,9 \pm 1,3$	$12,4 \pm 0,6$
		f_{π}	$37,6 \pm 0,9$	$20,6 \pm 1,1$	$54,3 \pm 0,5$
		f_i	$58,3 \pm 0,6$	$68,5 \pm 0,7$	$33,3 \pm 0,4$
$f = 10$	-	f_p	$9,3 \pm 1,7$	$13,1 \pm 1,2$	-
		f_{π}	$32,4 \pm 0,9$	$22,9 \pm 0,8$	-
		f_i	$58,3 \pm 0,5$	$64,0 \pm 1,3$	-
$f = 20$	-	f_p	$5,3 \pm 1,3$	$12,2 \pm 0,7$	-
		f_{π}	$44,7 \pm 1,7$	$19,6 \pm 0,9$	-
		f_i	$50,0 \pm 1,1$	$68,2 \pm 1,1$	-
-	60 dni*	f_p	$8,0 \pm 1,4$	$12,6 \pm 2,1$	-
		f_{π}	$37,9 \pm 0,9$	$12,4 \pm 1,2$	-
		f_i	$54,1 \pm 0,7$	$75,0 \pm 0,9$	-
-	60 dni**	f_p	$9,0 \pm 1,0$	$11,2 \pm 1,9$	-
		f_{π}	$48,0 \pm 0,7$	$20,4 \pm 1,3$	-
		f_i	$43,0 \pm 1,3$	$68,4 \pm 0,8$	-

* próby nr 1, 2, 3 (KS)
1, 2, 3, 4 (BW)

** próby nr 4, 5, 6 (KS)
1, 5, 6, 7 (BW)

W kaolinie z Sedlec stwierdzono w wyniku cyklicznego przemrażania powstanie mikroagregatów o średnicy odpowiadającej frakcji piaskowej. Mikroagregatów takich nie było w nie mrożonym ile. Stopniowy wzrost zawartości tej frakcji od 0 do 9,3 % zaobserwowano do $f = 10$ cyklu mrożenia. Po $f = 20$ cyklu mrożenia stwierdzono w porównaniu z $f = 10$ cyklami 43 % względny spadek zawartości mikroagregatów o średnicach cząstek $\phi > 0,05$ mm. Wzrostowi zawartości frakcji piaskowej w kaolinie do $f = 10$ cykli mrożenia towarzyszy jednoczesny spadek zawartości mikroagregatów o średnicach cząstek $0,05$ mm $> \phi > 0,002$ mm. Po 20 cyklu obserwowano wzrost (o 12,3 %, tj. względny przyrost 38 %) zawartości frakcji pyłowej, przy 4 % spadku zawartości frakcji piaskowej i nieznacznym iłowej. Frakcja iłowa do $f = 10$ cyk-

li mrożenia praktycznie nie zmienia swego udziału (dla $f = 0$ $f_1 = 58,7\%$, dla $f = 10$ $f_1 = 58,3\%$).



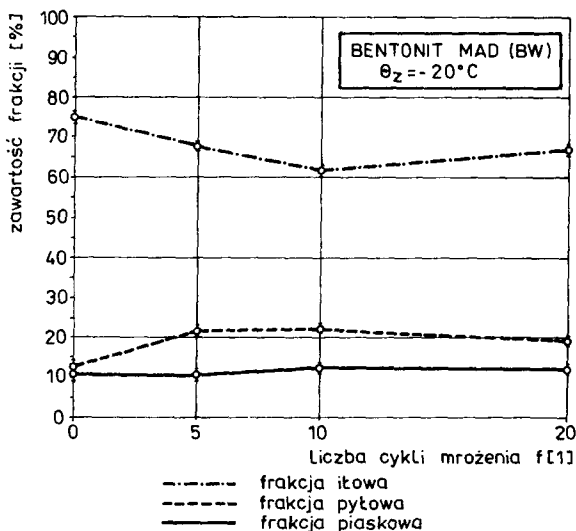
Rys.19. Zmiany składu mikroagregatowego kaolinu z Sedlec po cyklicznym mrożeniu i odmrażaniu

Zbadany charakter zmian składu mikroagregatowego iłu kaolinitowego w wyniku cyklicznego mrożenia i odmrażania świadczyć może o procesie agregacji cząstek o wymiarach $\phi < 0,05$ mm do $f = 10$ cykli mrożenia, który spowodował powstawanie i wzrost zawartości mikroagregatów większych od $0,05$ mm. Jednocześnie ubyło cząstek o wymiarach frakcji pyłowej $0,05 \text{ mm} > \phi > 0,002$ mm. Dla $f > 10$ wyróżnić można agregację cząstek ilowych o wymiarach $\phi < 0,002$ mm i równoczesną desagregację cząstek większych od $0,05$ mm, których łączny efekt dał wzrost zawartości frakcji pyłowej. Względny przyrost frakcji pyłowej w odniesieniu do $f = 10$ cykli wyniósł prawie 38%.

Podobne spostrzeżenia, że mrożenie powodować może agregację bądź desagregację, dają wyniki otrzymane dla próbek mrożonych nieprzerwanie przez 60 dni.

W kaolinie z Sedlec po 60 dniach nieprzerwanego mrożenia uzyskano wzrost udziału frakcji piaskowej z jednoczesnym ubytkiem zawartości frakcji ilowej. Zbadano np., że w zewnętrznych obszarach próbek nastąpił przyrost frakcji piaskowej o 9%, pyłowej o 6,7% i spadek o 15,7% (tj. względny spadek 27%) frakcji ilowej. Świadczyć to może o agregacji w tych obszarach cząstek mineralnych kaolinu głównie o średnicach $< 0,002$ mm.

W bentonicie MAD do $f = 10$ cykli mrożenia, w porównaniu do iłu nie mrożonego, obserwuje się ubytek frakcji ilowej, wynoszący około 11,5% przy jednoczesnym wzroście mikroagregatów o średnicach cząstek odpowiadających frakcji pyłowej i frakcji piaskowej. Zawartość frakcji pyłowej wzrosła o 9,1% (względnie ponad 65%), piaskowej - o 2,4%. Po $f = 20$ cyklu mrożenia otrzymano wzrost frakcji ilowej o 4,2%, w porównaniu z $f = 10$ cyklami, jednocześnie stwierdzając ubytek frakcji pyłowej o 3,3% i frakcji piaskowej o 0,9%.



Rys. 20. Zmiany składu mikroagregatowego bentonitu MAD po cyklicznym mrożeniu i odmrażaniu

Otrzymane wyniki wskazują, że w bentonicie MAD proces agregacji cząstek o wymiarach frakcji ilowej dominuje do $f = 10$ cykli mrożenia, powodując ogólny wzrost udziału mikroagregatów mineralnych średnicy $\phi > 0,002$ mm. Powyżej $f = 10$ do 20 mrożeń możliwe, że rozwija się desagregacja cząstek o średnicach $0,05 \text{ mm} > \phi > 0,002$ mm, która zwiększa udział frakcji ilowej.

Podobne jakościowo wyniki jak dla zewnętrznych obszarów próbek bentonitu MAD do $f = 10$ cykli otrzymano dla łąki mrożonego przez 60 dni (wzrost o 6,6 % frakcji pyłowej, ubytek 7,1 % frakcji ilowej).

W łąki plioceńskim otrzymano po pierwszych 5 cyklach mrożenia niewielki, o 3,3 %, wzrost zawartości frakcji ilowej (względny przyrost 11 %) przy odpowiednim spadku frakcji pyłowej wynoszącym 3,3 %. Potwierdzić to może dominującą rolę procesu desagregacji określającego powstawanie mikroagregatów o średnicach odpowiadających frakcji pyłowej do $f = 5$ cykli mrożenia.

Względny maksymalny ubytek zawartości mikroagregatów o średnicy cząstek $\phi < 0,002$ mm wynosi np.: dla kaolinu z Sedlec: $\frac{\Delta f_1}{f_1} = 14,8$ % po $f = 20$ cyklu; dla bentonitu MAD: $\frac{\Delta f_1}{f_1} = 9,7$ % po $f = 10$ cyklach mrożenia i odmrażania. Świadczyć to może między innymi o większej wrażliwości agregatów kaolinu z Sedlec na działanie cykliczne mrozu w porównaniu z bentonitem MAD.

Przeprowadzone badania sugerują, że zmiany wymiarów mikroagregatów w analizowanych monomineralnych łąkach (rozpad bądź powstawanie) nie zawsze przebiegają proporcjonalnie do liczby cykli mrożenia. Mogą one wykazywać różne tendencje zmian w zależności od liczby cykli mrożenia i odmrażania. Nie jest wykluczone, że trwałość, wymiary i ilość powstających mikroagregatów



gatów w przemrażanych iłach wiązać się będzie z roztworem porowym, który wypełnia pory (mikrokapilary) między agregatami o określonej strukturze przestrzennej. Roztwór ten prawdopodobnie jest wodą niezamarznąłą w temperaturze $\theta_z = -20^\circ\text{C}$.

Wyniki analizy mikroagregatowej świadczą o tym, że w procesie cyklicznego mrożenia zmienia się struktura iłów na drodze agregacji i desagregacji cząstek określonych średnic powodujących powstawanie różnych mikroagregatów, zależnie od składu mineralnego i początkowej struktury (iłu naturalny), kolejnej liczby cykli mrożenia i odmrażania oraz analizowanego obszaru przemrażanej próbki. Stwierdzone ilościowe różnice w składzie mikroagregatowym iłów powstałe w wyniku procesu mrożenia i odmrażania wskazują również na zmianę wartości sił wiążących cząstki w agregaty i mikroagregaty.

Autor sądzi, że w badanych iłach zmiany składu mikroagregatowego mogą zależeć od udziału najmniejszych cząstek, szczególnie o wymiarach frakcji iłowej i pyłowej, zawartych w gruncie przed mrożeniem oraz od zmieniającej się zawartości wody niezamarznąłej.

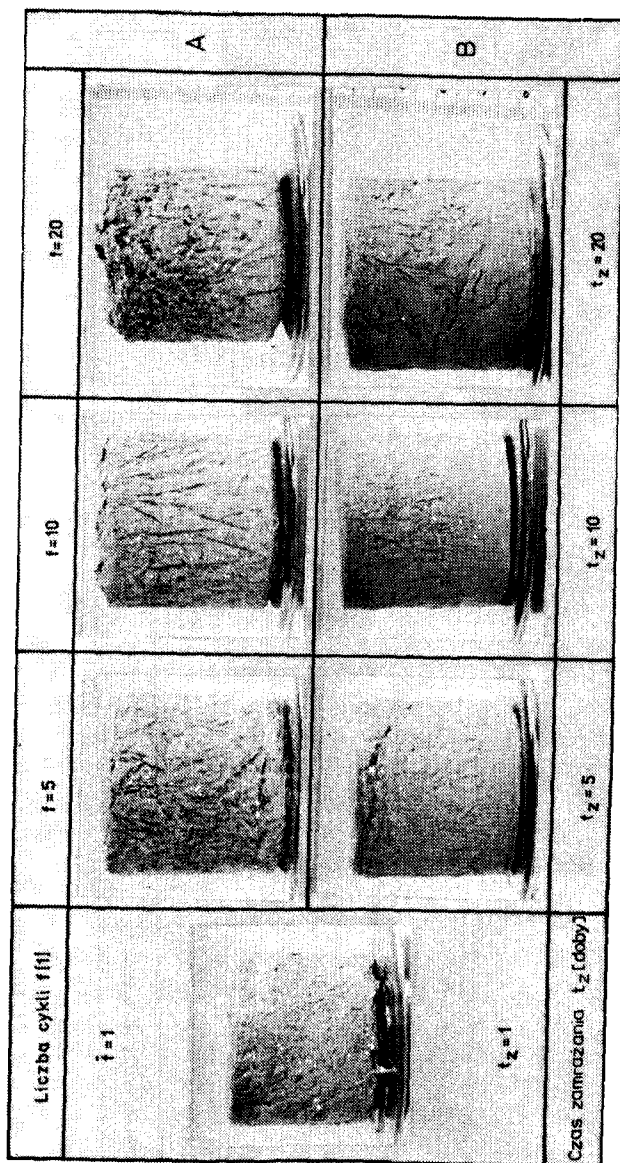
3.4.5. Zmiany struktury iłów w wyniku zamrażania i odmrażania

Mrozowe transformacje struktury iłów zarejestrowano przy pomocy zdjęć fotograficznych i przedstawiono na rysunkach 21 i 22. Zamieszczone zdjęcia bezpośrednio obrazują efekty przemennego mrożenia i odmrażania próbek monomineralnych iłów.

Fotografie wykonano dla próbek, które mrożono do $f = 20$ cykli oraz próbek poddanych działaniu nie przerywanego mrożenia. Czas nie przerywanego mrożenia był równy sumie poszczególnych czasów zamrożeń próbek w cyklicznym mrożeniu ($f = 0, 1, 5, 10, 20$ cykli), tzn. $t_{\text{zamr}} = 0, 1, 5, 10$ i 20 dób.

Analiza przedstawionych fotografii pokazuje, że w zależności od sposobu mrożenia, a więc od liczby cykli bądź czasu mrożenia w temperaturze $\theta_z = -20^\circ\text{C}$, powstaje w każdym z badanych iłów różna struktura. Wyraźne różnice struktury obserwuje się między próbkami iłu tego samego typu, który był mrożony i odmrażany cyklicznie. Po kolejnych cyklach mrożenia powstają i rozwijają się w badanych iłach makropory (pory o wymiarach większych od $1000 \mu\text{m}$, B. Grabowska-Olszewska, E. M. Sergejev (1977)), różnej formy i wielkości. Makropory wypełnione są lodem, a w poddanych wyższej liczbie cykli mrożenia - również częściowo powietrzem. Lód makroporów występuje w postaci soczewek i igiełek ułożonych bezładnie lub w sposób zorientowany, zależnie od typu iłu i liczby cykli mrożenia i odmrażania. W kaolinie z Sedlec początkowo powstają różnej długości soczewki lodowe w kształcie pojedynczych igiełek i pręcików, wzajemnie skrzyżowanych. Długość ich, równa kilka milimetrów w pierwszych cyklach, wzrasta do kilkunastu i więcej milimetrów z liczbą cykli mrożenia.

Powyżej $f = 10$ cykli zamrażania można makroskopowo obserwować efekty akumulacji migrującej wody uwolnionej i przemieszczeń cząstek mineralnych



Rys.21. Zmiany struktury mrożonego w temperaturze $\theta_z = -20^\circ\text{C}$ kaolinu z Sedlec:
 A - mrożony cyklicznie, B - mrożony w sposób ciągły

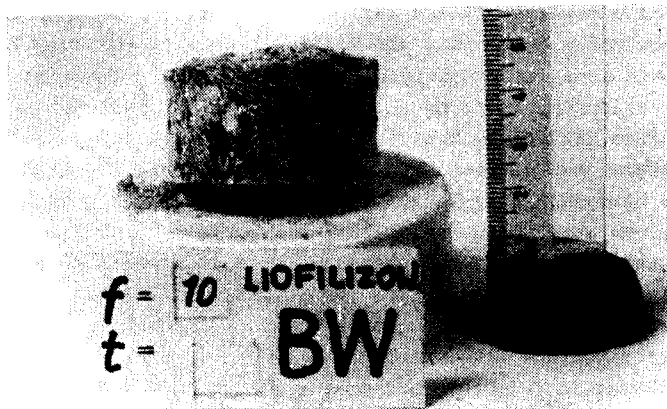
		A				B											
		f = 20				t _z = 20											
		f = 10				t _z = 10											
		f = 5				t _z = 5											
Liczba cykli f [1]		f = 1				t _z = 1											
		f = 20				t _z = 20											
		f = 10				t _z = 10											
		f = 5				t _z = 5											
		f = 1				t _z = 1											
Czas zamarzania t _z [doby]		t _z = 5				t _z = 10											
		t _z = 20				t _z = 20											
		8	7	6	5	4	3	2	1	8	7	6	5	4	3	2	1

Rys.22. Zmiany struktury mrożonego w temperaturze $\theta_z = -20^{\circ}\text{C}$ bentonitu MAD:
 A - mrożony cyklicznie, B - mrożony w sposób ciągły

w dolnej strefie próbek oraz powstanie oddzielnych agregatów mineralnych w górnej strefie. Agregaty mineralne w górnej strefie są oddzielone od siebie siatką przestrzennych porów zawierających głównie fazę gazową. Udział fazy gazowej w układzie gruntowo-wodnym rośnie z liczbą cykli również dlatego, że powstały i rozwijają się liczne pęknięcia mrozowe. Wzrasta do $f = 5$ cykli wysokość cyklicznie mrożonych próbek. Wymienione powyżej efekty zmian struktury nie są obserwowane w próbkach kaolinu z Sedlec mrożonych w sposób ciągły.

Nie odbiegające w charakterze wyniki zanotowano w mrożonym bentonicie MAD. Próbki iłu bentonitowego mrożone i odmrażane cyklicznie, jak można stwierdzić bezpośrednio na rysunku 22, są bardziej zdeformowane niż próbki kaolinu z Sedlec. Większe jest też ich pęcznienie mrozowe, na które składa się, jak stwierdzono, także pęcznienie agregatów montmorillonitu po odmrożeniu.

Struktura przemrożonego bentonitu MAD charakteryzuje się tym, że tworzą się liczne i niewielkie soczewki lodu. Mają one najczęściej kształt pręcików o długości kilku, rzadziej kilkunastu milimetrów. Są naprzemiennie ułożone z dobrze zorientowanymi i zagęszczonymi agregatami mineralnymi. Grubości soczewki lodu i pojedynczej warstwy zagęszczonych agregatów mineralnych są ze sobą porównywalne. Wykazują one dobre wzajemne zorientowanie, przy czym układają się charakterystycznie tworząc szkielet lodowo-gruntowy, zbudowany z kilku do kilkunastu warstwek lodu-minerał. Wyodrębnione pakiety lodowo-gruntowe w bentonicie MAD przylegają do siebie powierzchniami granicznymi, przede wszystkim „powierzchnią płaską” do „krawędzi”, dając strukturę superklastrową; zilustrowana jest ona na oddzielnym zdjęciu (rys.23).



Rys.23. Struktura superklastrowa bentonitu MAD, po $f = 10$ cyklach mrożenia (kontakty pakietów lodowo-gruntowych typu „powierzchnia płaska - krawędzie”)

Zaobserwowano również dla liczby mrożeń powyżej $f = 5$ powstanie w maszywie iłu licznych szczelin i pęknięć mrozowych. Wydzielone agregaty mineralne w próbce bentonitu MAD pod wpływem cyklicznego mrożenia i odmrażania mają stosunkowo regularne kształty, są liczniejsze i wzajemnie lepiej zorientowane niż oddzielne powstałe w kaolinie z Sedlec.

Porównując próbki monomineralnych iłów mrożone w sposób cykliczny z próbkami mrożonymi bez przerw należy zauważyć, że efekty mrozowych transformacji struktury są wyraźniejsze i bardziej istotne w procesie cyklicznym. Podobne dane otrzymał autor dla przemrożonych naturalnych iłów płoceńskich.

Zmiany struktury iłów mrożonych cyklicznie, jak można wnioskować na podstawie wyników badań przedstawionych w podrozdziale 3.4 i omówionych powyżej, dokonują się zarówno podczas pierwszego, jak i kolejnych mrożeń oraz w procesie odmrażania. Główny dla mrozowych przeobrażeń struktury iłów jest prawdopodobnie etap II i przebiegający prawie izotermicznie w temperaturze $\Theta_f < 0^\circ\text{C}$ etap III zamrażania. Charakteryzują się one zachodzącymi zasadniczymi deformacjami próbek iłu obserwowanymi w skali makro. Pod koniec etapu III, kiedy próbka zamarza, stwierdza się brak plastycznych odkształceń. Prawdopodobnie w etapie IV, pod koniec, zostaje osiągnięty stan równowagi termodynamicznej zamkniętego układu ił-woda-lód w procesie zamrażania. Można przypuszczać, że wtedy ustala się ostatecznie podstawowy typ struktury iłu, stanowiący wyjściową dla odmrażania i następnych przemrożeń formę strukturalną.

Odmrożenie iłów następuje pod koniec etapu VI w temperaturze poniżej 0°C . Zmiany struktury iłu w procesie odmrażania charakteryzuje redystrybucja wody, osiadanie odmrażania i inne odnotowane ogólne zmiany postaci próbek.

Podczas odmrażania zmiany struktury iłów zależą od jego typu mineralnego. W przypadku bentonitu, pod koniec etapu VI i w etapie VII, cząsteczki wody uwolnionej z wytopionych kryształków lodu wiązane są przez agregaty montmorillonitu, które pęczniąc dają wzrost wysokości odmrożonej próbki. Natomiast próbki kaolinu po odmrożeniu osiadają, bowiem woda uwolniona wiązana jest w niewielkim stopniu przez kaolinit. Część wody, ta, którą nie utrzymują siły kapilarne w mikrokapilarnych porach, grawitacyjnie przepływa wraz z cząstkami iłu w dolne, zewnętrzne strefy próbek, gdzie zostają zakumulowane i osadzone. Woda zatrzymana po rozmrożeniu iłu w rozwiniętym systemie otwartych porów (mikrokapilar) stanowi wyjściową formę dla nukleacji i wzrostu soczewek lodowych oraz warunkuje zakres przebudowy struktury iłu w następnych cyklach mrożenia - odmrażania.

Analiza zmian struktury przemrażanych iłów dowodzi, że po cyklicznym mrożeniu i odmrażaniu wzrasta niejednorodność spowodowana zmianą udziału faz budujących grunt. Pojawia się nowa faza - gazowa. Powstają strefy osłabień międzyagregatowych dezintegrujące quasi-jednorodny ośrodek wypełniony lodem. Spoiwo lodowe, jak można przypuszczać, jest różnego typu i rodzaju, K. M. Skarżyńska (1969), np. wkładki blaszkowate poziome. Spoiwo to po stopnieniu lodu zanika. W kolejnych cyklach mrożenia, często w tych

miejscach powstają i rozwijają się pęknięcia mrozowe. Tworzą się także w obrębie ich nakładania się i krzyżowania coraz mniejsze agregaty mineralne, które w masie rozmarznętego iku kontaktują się ze sobą bezpośrednio lub przez zatrzymywaną w porach błonkę wodną, bądź też oddzielone są od siebie warstwą powietrza. Powstały przestrzenny system nieregularnych porów, kanalików i pęknięć, które zatrzymały fazę ciekłą lub wypełniane są fazą gazową (powietrze) zmienia warunki wymiany cieplnej.

W kolejnych cyklach mrożenia i odmrażania próbek wyrównywanie temperatur w ile zachodzi szybciej, jako następstwo redystrybucji wody i przeobrażeń mrozowych struktury iku. Zmiana struktury ułatwia rozwój procesów towarzyszących przemienemu przemrażaniu i odmrażaniu, np. pęcznienia, migracji wody, agregacji cząstek mineralnych itp. oraz, jak należy przypuszczać, warunkuje również odpowiednie zmiany mikrostruktury iku, szczególnie w bliskich strefach oddziaływania wzrastających kryształków lodu. Bezpośrednio zarejestrowane, np. w próbie rozmakania, efekty strukturalne działania mrozu na ił, pozwalają ponadto przypuszczać, że mrozowe zmiany struktury mogą w sposób istotny wpływać na kształtowanie wartości parametrów fizyczno-mechanicznych przemrażanych i odmrażanych iłów.

3.5. Badania mikrostruktury

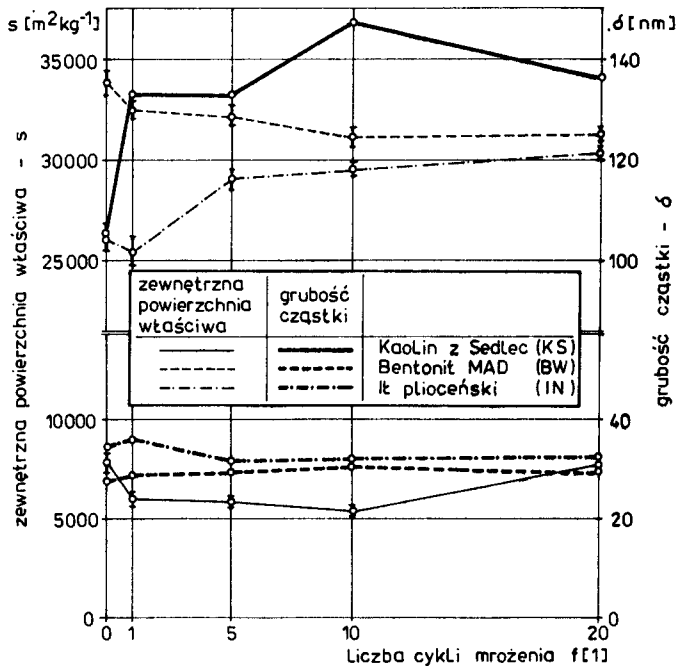
Wyniki badań przeprowadzonych nad ustaleniem mrozowych zmian struktury prezentowane w podrozdziale 3.4 dowiodły zmian struktury iłów oraz wskazały, że ich charakter i zakres jest zależny od liczby cykli działającego mrozu i typu iku. Z otrzymanych wyników badań można wnioskować, że powstała pod wpływem przemrażania i odmrażania struktura iłów wiąże się ściśle z procesami zachodzącymi w ośrodku gruntowym. Procesy te rozwijały się niewątpliwie w wyniku przemiennego działania mrozu. Można sądzić, że stwierdzone zmiany struktury odnotowane zostały jako efekty stopniowego rozwoju szeregu procesów zachodzących szczególnie w mikro skali układu woda - ił. Zmiany mikrostruktury iłów w wyniku mrożenia i odmrażania zbadano przy pomocy testu sorpcyjnego i bezpośrednio elektronowym mikroskopem skaningowym (SEM).

3.5.1. Test sorpcyjny - WSTest

Na podstawie WSTest uzyskuje się dane odnośnie mikrostruktury i przemian fazowych układu gruntowo-wodnego. Wielkościami charakteryzującymi mikrostrukturę oraz zachodzące przemiany są wg WSTest: powierzchnia właściwa S i grubość cząstki δ , E. T. Stępkowska (1977a).

Badanie sorpcji wykonano dla prób iłów o strukturze możliwie najmniej naruszonej przez suszenie. Sposób oraz szczegółowy opis przygotowania i badań mrożonych iłów metodą WSTest zawiera praca, M. K. Kumor (1986b).

Próbki do badań sorpcji wycinano z obszarów o największych zmianach struktury i wilgotności (rys.1) powstałych w wyniku mrożenia.



Rys.24. Zmiana wielkości charakteryzujących mikrostrukturę łąłw cyklicznie mrożonych i odmrażanych wg WSTest

Przedstawiono: zewnętrzną powierzchnię właściwą S , grubość cząstki δ oraz sorpcję liczoną po wysuszeniu w $+200^{\circ}\text{C}$ W_m , jako funkcję liczby cykli mrożenia i odmrażania. Dla porównania podano powierzchnię właściwą S liczoną przy $p : p_0 = 0,95$. Otrzymane wyniki badania sorpcji mrożonych łąłw pozwalają stwierdzić, że sorpcja wody nie jest stała. Inna jest dla poszczególnych gruntów i zależy od liczby cykli mrożenia i odmrażania.

Przeprowadzona analiza statystyczna wpływu efektów mrożenia na wielkość sorpcji wody, zweryfikowana testem t-Studenta, wykazała statystycznie istotne różnice wartości średnich sorpcji.

Wpływ cyklicznego mrożenia na transformacje mikrostruktury nie jest przypadkowy i jest istotny na poziomie ufności $1 - \alpha = 0,99$, W. Volk (1973).

Sorpcja wody W_m określona przy $p : p_0 = 0,5$, na podstawie której ustalono zewnętrzną powierzchnię właściwą i grubość cząstki, maleje od $f = 0$ do $f \approx 10$ w kaolinie z Sedlec i do $f \approx 10$ w bentonicie MAD, zaś rośnie do $f \approx 5$ w łął plicieńskim z Bydgoszczy. Dla $f = 20$ cykli mrożenia w bentonicie i kaolinie otrzymano niewielki (w granicach błędu) wzrost sorpcji w porównaniu z sorpcją przy $f = 10$ cyklach mrożenia.

Grubość cząstki kaolinu z Sedlec rośnie ze wzrostem liczby mrożeń od $\delta = 104,4$ nm próby nie mrożonej, do $\delta = 148,6$ nm po $f = 10$ cyklach. Fakt ten wskazuje na efekty porządkowania mikrostruktury i na tworzenie większych domen. Podobne zjawisko obserwuje się w bentonicie MAD, w którym otrzymano odpowiednio: w niemrożonym łął grubość cząstki $\delta = 28,6$ nm oraz po $f = 10$ i $f = 20$ cyklach mrożenia wzrost do $\delta = 30,5$ nm.

Sorpcję wody mierzono w temperaturze pokojowej w warunkach względnej prężności pary wodnej $p : p_0 = 0,5; 0,95; 1,0$. Następnie próbki suszono w 105°C i ogrzewano w 200°C , 400°C oraz 800°C . Zmiany wagowe próbki obliczono względem jej pierwotnej masy po wysuszeniu w $+200^{\circ}\text{C}$ (W_m). Na podstawie straty masy i wzorów podanych w pracy, E. T. Stępkowska (1977a), obliczono wielkości charakteryzujące mikrostrukturę układu woda - ił. Rezultaty zestawiono w tablicy 7 i na rysunku 24.

Tablica 7

Zmiana wielkości charakteryzujących mikrostrukturę układu woda - ił
po f cyklach mrożenia

Materiał badawczy	Parametr	Liczba cykli f				
		0	1	5	10	20
Kaolin z Sedlec (KS)	W_0 (%)	49,5	51,2	53,5	55,7	57,1
	W_m (%) przy $p : p_0 = 0,5$	$1,32 \pm 0,10$	$1,02 \pm 0,07$	$1,01 \pm 0,07$	$0,91 \pm 0,06$	$0,99 \pm 0,07$
	S ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	$7,7 \pm 0,6$	$6,0 \pm 0,4$	$6,0 \pm 0,4$	$5,3 \pm 0,3$	$5,8 \pm 0,4$
	W_m (%) przy $p : p_0 = 0,95$	$3,74 \pm 0,11$	$3,50 \pm 0,08$	$2,43 \pm 0,14$	$2,27 \pm 0,10$	$2,80 \pm 0,20$
	S^* ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	$14,6 \pm 0,4$	$13,6 \pm 0,3$	$9,6 \pm 0,5$	$8,8 \pm 0,3$	$10,9 \pm 0,7$
	δ (nm)	104,4	133,3	134,5	148,6	137,1
Bentonit MAD (BW)	W_0 (%)	169,0	171,0	177,3	177,8	176,5
	W_m (%) przy $p : p_0 = 0,5$	$5,81 \pm 0,18$	$5,62 \pm 0,11$	$5,49 \pm 0,16$	$5,36 \pm 0,12$	$5,39 \pm 0,09$
	S ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	$40,0 \pm 1,1$	$32,9 \pm 0,6$	$31,1 \pm 0,9$	$31,4 \pm 0,7$	$31,5 \pm 0,5$
	W_m (%) przy $p : p_0 = 0,95$	$14,57 \pm 0,36$	$14,71 \pm 0,23$	$12,76 \pm 0,19$	$12,30 \pm 0,25$	$13,31 \pm 0,34$
	S^* ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	$56,8 \pm 1,4$	$57,4 \pm 0,9$	$37,0 \pm 2,1$	$48,0 \pm 0,9$	$51,9 \pm 3,0$
	δ (nm)	28,6	29,3	29,9	30,5	30,5
Ił plicieński (IN)	W_0 (%)	20,6	20,9	20,5	-	20,5
	W_m (%) przy $p : p_0 = 0,5$	$4,47 \pm 0,21$	$4,23 \pm 0,30$	$4,97 \pm 0,11$	-	$5,17 \pm 0,06$
	S ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	$26,2 \pm 1,2$	$25,4 \pm 1,7$	$29,2 \pm 1,2$	-	$30,3 \pm 0,3$
	W_m (%) przy $p : p_0 = 0,95$	$6,86 \pm 0,24$	$6,47 \pm 0,49$	$6,68 \pm 0,25$	-	$7,88 \pm 0,31$
	S^* ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	$26,7 \pm 0,9$	$25,2 \pm 1,9$	$26,1 \pm 0,9$	-	$30,7 \pm 1,2$
	δ (nm)	35,2	36,1	32,4	-	31,3

$$S = W_m (p : p_0 = 0,5) \times 585 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$$

$$\delta = \frac{7576}{S} + 63 \text{ \AA} (\text{\AA})$$

$$S^* = W_m (p : p_0 = 0,95) \times 390 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$$

Zmniejszenie w kaolinie z Sedlec grubości cząstki po $f = 20$ cyklach mrożenia do $\delta = 137,1$ nm w porównaniu z $\delta = 148,6$ nm po $f = 10$ cyklach mrożenia może sugerować początek desagregacji i delaminację powstałych w poprzednich mrożeniach dużych cząstek iłu, szczególnie mikroagregatów o średnicach większych od 0,05 mm. Potwierdzają to wyniki badania składu mikroagregatowego po $f = 20$ cyklu w porównaniu z $f = 10$ cyklami mrożenia. Otrzymano w nich względny spadek zawartości frakcji piaskowej, wynoszący około 43 % (tab.6).

Nieco inną zależność zmian sorpcji i charakter transformacji mikrostruktury otrzymano dla iłu plioceńskiego. Po pierwszym mrożeniu nastąpił niewielki (o 2,6 %) wzrost grubości cząstki iłu plioceńskiego od $\delta = 35,2$ nm do $\delta = 36,1$ nm. W piątym i dwudziestym cyklu mrożenia otrzymano zmniejszenie grubości cząstki w porównaniu z $f = 1$ o prawie 13,3 %. Nie jest to duża zmiana, jednak istotna i świadcząca o transformacji mikrostruktury naturalnego iłu w wyniku procesu mrożenia i odmrażania.

Zmiany grubości cząstki iłu plioceńskiego nie są tak wyraźne, jak w omawianych monomineralnych iłach KS i BW, również dlatego, że ił naturalny zawiera stosunkowo dużo pelitycznego kwarcu i węgla wapnia, M. K. Kumor (1983a). Stąd sorpcyjne efekty transformacji mikrostruktury pod wpływem mrożenia mogą być ekranowane lub zdominowane udziałem kwarcu. Ziarenka kwarcu być może otaczają agregaty illitu, kaolinitu i montmorillonitu, które orientowane są równolegle do ich powierzchni. Zmniejsza się tym samym czynna w procesie sorpcji powierzchnia agregatów.

Na obniżenie sorpcji iłu naturalnego może również wpływać nierównomierność przestrzennego rozkładu montmorillonitu. Jest to rezultatem dużego zróżnicowania właściwości masywu plioceńskiego oraz specyficznej „brekcjowej” struktury z licznymi nieregularnymi powierzchniami zlustrzeń, między innymi związanych z glacialnym pochodzeniem. Ustalono w iłach plioceńskich z Bydgoszczy wyraźne występowanie powierzchni nieciągłości o podwyższonej w stosunku do otoczenia wilgotności, np. W. Fortunat (1960), patrz również rysunek 39 (podrozdział 3.5.2). Podobne zjawiska stwierdził autor w obszarach zlustrzeń glacitektonicznych, gdzie również obserwował zorientowaną mikrostrukturę iłu zbliżoną do równoległej.

Generalnie na podstawie badań WSTest można stwierdzić, że w procesie mrożenia i odmrażania iłów monomineralnych i iłu naturalnego z Bydgoszczy następuje transformacja i porządkowanie mikrostruktury. Do około 20-go cyklu im wyższa jest liczba cykli mrożenia (wymuszeń), tym stopień uporządkowania agregatów mineralnych jest większy, zwiększa się również grubość cząstki. Transformacja mikrostruktury w wyniku cyklicznego mrożenia prawdopodobnie wywołuje powstanie nowego typu kontaktów między agregatami i mikroagregatami iłów. Powodują one zmniejszenie czynnej powierzchni mikroagregatów i agregatów mogących sorbować na swej powierzchni molekuly wody. Jako skutek wymuszenia zmian odległości między cząstkami i wzrostu grubości cząstki w efekcie zamrażania i odmrażania, zmniejsza się sorpcja (tab.7 i rys.24), ilość wody związanej i wody warstw dyfuzyjnych. Mrozowe transformacje mikrostruktury przesuwiają stan równowagi układu gruntowo-

-wodnego w kierunku zmniejszenia odległości między cząstkami i lokalnego zmniejszenia wilgotności, a więc siły przyciągania (głównie van der Waalsa) zaczynają przeważać nad siłami odpychania, E. T. Stępkowska (1984a).

Na podstawie rozważań i wzorów zawartych w pracy E. T. Stępkowskiej (1977b, 1978) autor wyliczył siły oddziaływania między elementami strukturalnymi*. W tabelicy 8 przedstawiono przykładowo oszacowane wartości ciśnienia przyciągania van der Waalsa - Londona, dla kaolinu z Sedlec po różnych cyklach mrożenia.

Tabela 8

Przykładowe wyniki obliczeń
ciśnienia przyciągania p_A Londona - van der Waalsa
dla kaolinu z Sedlec w zależności od liczby przemrożeń

Parametr	Liczba cykli mrożenia f.						
	0	1	5	10	20	1*	20*
Wilgotność początkowa (%)	49,5	51,2	53,5	55,7	57,1	48,7	39,0
Wilgotność higroskopowa (%)	3,28	3,12	3,12	1,99	3,12	2,09	2,88
Odległość między cząstkami (Å)	370	506	545	679	659	465	335
Ciśnienie przyciągania (Pa)	0,7	2,9	0,9	1,1	1,5	3,6	10,4

* Strefa środkowa próbki (próba nr 2 wg rys.1)

Zamieszczone rezultaty wskazują istotny wzrost wartości ciśnienia przyciągania w stosunku do nie mrożonego iłu, postępujący ze wzrostem liczby przemrożeń do $f \approx 20$ cykli. Możliwe jest, że w przemrażanym cyklicznie kaolinie osiągnięcie stanu równowagi układu woda - ił przebiega głównie na drodze agregacji cząstek do takiej liczby cykli, do której tworzyć się mogą wzrastające do maksymalnych wymiarów mikroagregaty mineralne. Jednocześnie w miarę wzrostu wielkości powstających mikroagregatów z liczbą cykli mrożenia siły przyciągania między budującymi je elementami struktury spadają do minimum. Powyżej pewnej liczby cykli mrożenia (około $5 > f \geq 10$) powstałe wcześniej mikroagregaty zaczną rozpadać się na mniejsze, w następstwie wzrostu wartości sił odpychania między elementami pierwotnymi budującymi te mikroagregaty. Zacznie dominować desagregacja w osiągnięciu stanu równowagi między elementami struktury układu woda - ił.

Podobne wyniki otrzymano dla próbek bentonitu i iłu pliczeńskiego. Nie jest wykluczone, że procesy te powyżej badanej liczby $f = 20$ cykli będą zmieniać się skokowo, zależnie od rozpatrywanego przemrożenia. Sugerować

* Wg programu udostępnionego przez mgr K. Kolendo i mgr A. Olchawę z IBWPAN Gdańsk

to może również okresową zmianę grubości cząstki ze wzrostem liczby cykli mrożenia - odmrażania. Problem ten wymaga jednak odrębnej, szerszej analizy w powiązaniu między innymi do zawartości wody niezamarzniętej oraz wody makroporów.

Otrzymane w badaniu WSTest zmiany wielkości charakteryzujących mikrostrukturę łą zachodzą w początkowych cyklach mrożenia w najbliższym otoczeniu mikrosoczewki lodu. Później zasięg strefy zmian wzrasta i w dalszej kolejności następować będzie utrwalanie efektów przebudowy i typu mikrostruktury. Najprawdopodobniej typu struktury dobrze zorientowanej (bliskiej równoległej), dającej w efekcie końcowym mniejszą sorpcję przeobrażonej strefy łą.

Przedstawione wyniki testu sorpcyjnego i ich analiza wskazują nieprzypadkowy wpływ procesu cyklicznego mrożenia i odmrażania na transformacje mikrostruktury łą, stwierdzony także w sensie statystycznym.

O zachodzących transformacjach świadczą również prezentowane zmiany zewnętrznej powierzchni właściwej badanych gruntów w kolejnych zamrażaniach, którą wyliczono wg sorpcji W_m przy innej względnej prężności pary wodnej ($p : p_0 = 0,95$, tab.7).

3.5.2. Badania w elektronowym mikroskopie skaningowym - SEM

Bezpośrednie obserwacje zmian mikrostruktury mrożonych łą przeprowadzono przy pomocy elektronowego mikroskopu skaningowego typu JEOL JXA50A i TESLA BS-300^{*}.

Próbki do badań SEM pobierano z różnych obszarów łą, przy czym w wyborze szczególną uwagę zwrócono na obszary o strukturze najbardziej zaburzonej w wyniku mrożenia (rys.1).

Do badań mikroskopowych mrożone łą przygotowano metodą liofilizacji, która zapewniała możliwe najmniejsze naruszenie struktury podczas suszenia. Dokładny opis metody przygotowywania prób do badań SEM podał autor w pracy, M. K. Kumor (1985b).

Fotografowano powierzchnie charakterystyczne dla danego łą przy różnych powiększeniach (od $x 50$ do $x 5000$). Do dalszej analizy wybrano jako najbardziej odpowiednie powiększenia $x 3000$ i $x 500$. Powiększenie $x 3000$ pozwala śledzić małe szczegóły, w tym mikrosoczewki oraz umożliwia ustalenie typu kontaktów, wielkości porów, charakter powierzchni itp. Przy powiększeniu $x 500$ obserwować można różnego rodzaju wtrącenia ziarenek pyłu i piasku, główne powierzchnie rozdziału między mikrokryształkami lodu i mikroagregatami, wielkość mikroagregatów itp. Wyniki badania mikrostruktury mrożonych łą dla wybranych warunków zamrażania przedstawiono na kolejnych fotografiach (rysunki 25 + 41).

Opisu mikrostruktury dokonał autor korzystając między innymi z następujących prac: J. K. Mitchell (1976), E. M. Sergejev i zespół (1978, 1979,

^{*} Fotografie wykonali mgr E. Klichowicz, dr P. Dzierżanowski - IGMiP Uniwersytetu Warszawskiego

1980), B. Grabowska-Olszewska i zespół (1984), B. Grabowska-Olszewska (1988). Dla przemrożonych ilów, wobec braku odpowiedniej, zaproponowano nazwę: mikrostruktura soczewkowa. Bliska jest ona laminarnej wg B. Grabowskiej-Olszewskiej i zespołu (1984) i równoległej wg E. T. Stępkowskiej (1982). Szczegółowy opis mikrostruktury soczewkowej zawarto w dalszej części pracy, w rozdziale 4, gdzie została ona dodatkowo zilustrowana na rysunku 43.

Kaolin z Sedlec nie mrożony, $f=0$ (rys.25)

Mikrostruktura typu komórkowego

Opis mikrostruktury: zbudowana z mikroagregatów kaolinitu w formie izometrycznych płytek, bezładnie rozłożonych w objętości masy gruntowej.

Wielkość mikroagregatów kaolinitu od 1 μm do 6 μm .

Kontakt mikroagregatów kaolinitu między sobą typu: powierzchnia płaska - powierzchnia płaska, powierzchnia płaska - krawędź i krawędź - krawędź. Brak wyraźnej dominacji jednego z typów kontaktów. Część kontaktów między mikroagregatami typu: powierzchnia płaska - krawędź zachodzi pod małymi kątami.

Pory międzymikroagregatowe są izometryczne, średnice na ogół od 1 μm do 10 μm , porównywalne z wielkością mikroagregatów. Ścianki porów zbudowane z mikroagregatów o dowolnym typie kontaktów między sobą.

Brak wyraźnej uprzywilejowanej orientacji, ułożenie cząstek mineralnych bezładne.

Kaolin z Sedlec po procesie cyklicznego mrożenia (rys.26, 27, 28, 29)

Mikrostruktura soczewkowa

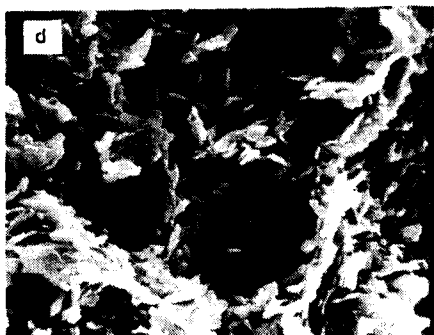
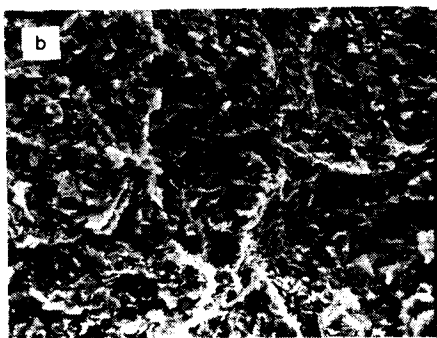
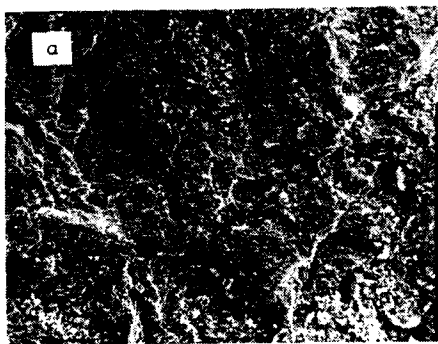
Opis mikrostruktury: zbudowana z mikroagregatów kaolinitu w formie izometrycznych i anizometrycznych mikroagregatów, ułożonych w sposób ściśle zorientowany, równoległy względem siebie (rys.26, 27).

Przeważają kontakty między mikroagregatami kaolinitu typu powierzchnia płaska - powierzchnia płaska.

Mikroagregaty kaolinitu w powierzchni granicznej lód - szkielet mineralny tworzą powierzchnię doskonale wygładzoną z niewielkimi lokalnymi zagłębieniami, gdzieniegdzie poprzecinaną porami międzymikroagregatowymi. Występują pory typu szczelinowego o szerokości $< 0,5 \mu\text{m}$ (rys.28, 29).

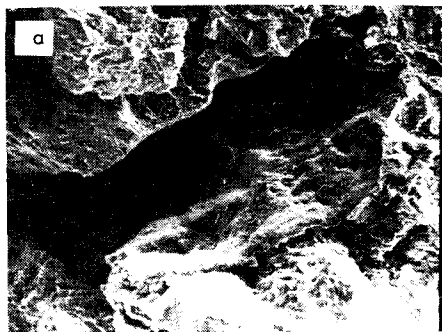
Mikroagregaty kaolinitu w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni granicznej soczewka lodu - szkielet mineralny, są ułożone równoległe do powierzchni granicznej. Uprzywilejowana orientacja mikroagregatów jest bardzo wyraźna, są one zorientowane swą dłuższą osią prostopadle do kierunku działających sił (rys.27, 28, 29).

Pory międzymikroagregatowe i wewnątrz-mikroagregatowe są głównie anizometryczne o szerokości do 1 μm . Można również zaobserwować pory typu szczelinowego o szerokości około 5 μm .

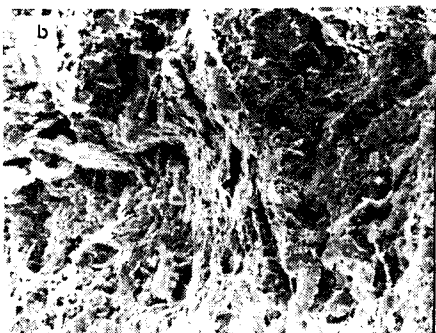


Rys.25. Mikrofotografia kaolinu z Sedlec nie mrożonego:

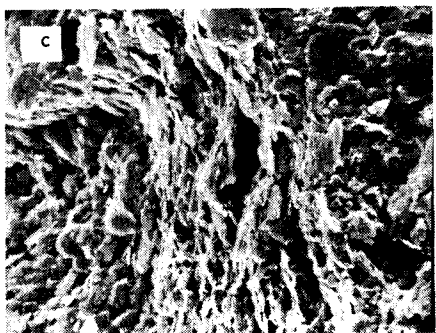
- a - powierzchnia przełamu próbki, widok ogólny,
- b - mikrostruktura komórkowa,
- c - dowolna orientacja i ułożenie cząstek mineralnych,
- d - kontakty typu: powierzchnia płaska - krawędź, powierzchnia płaska - powierzchnia płaska pod dowolnymi kątami, liczne izometryczne porry międzymikroagregatowe



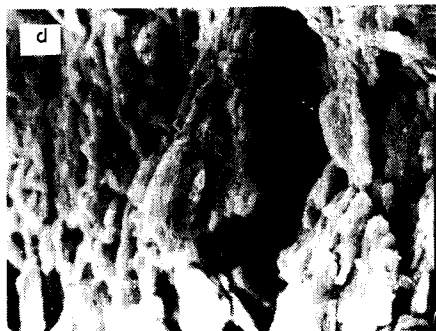
100 μm



20 μm



20 μm



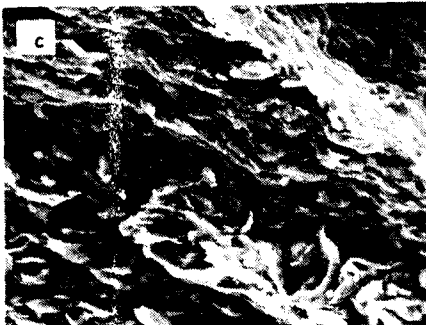
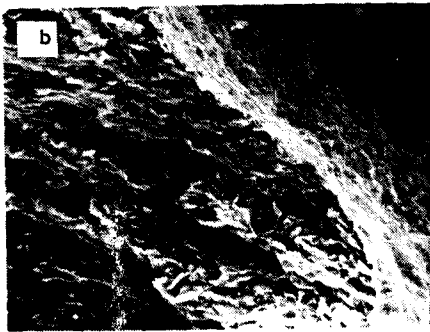
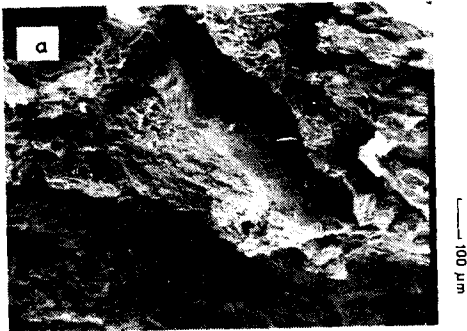
10 μm

Rys.26. Mikrofotografia kaolinu z Sedlec po $f = 20$ cyklach mrozenia w temperaturze $\Theta_z = -20^\circ\text{C}$, powierzchnia prostopadła do soczewki lodowej:

- a - obraz mikrosoczewki lodu,
- b - powierzchnia graniczna lód - szkielec widziana od strony soczewki,
- c - widok mikrosoczewki lodu o osi prostopadłej do soczewki lodu,
- d - kontakty między cząstkami typu: powierzchnia płaska - powierzchnia płaska

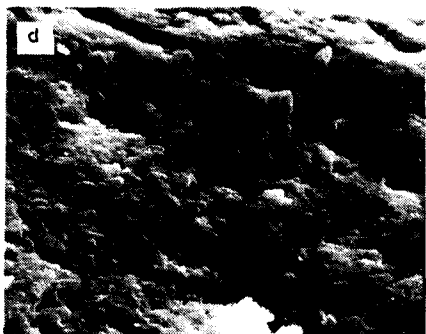
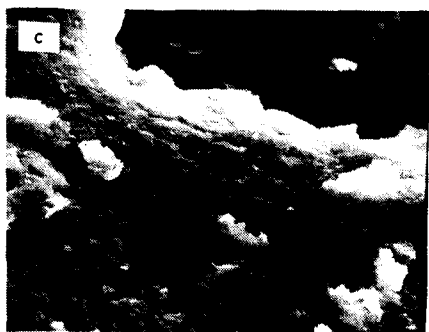
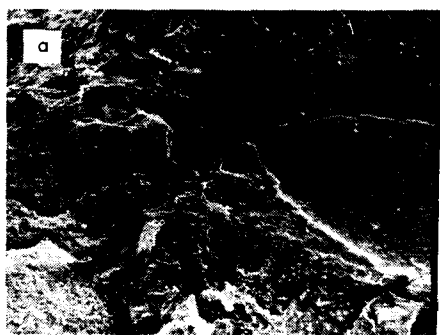
Równoległe ułożenie mikroagregatów kaolinitu w strefie otaczającej mikrosoczewki lodu (mikrostruktura soczewkowa, rys.27) dochodzi do grubości kilkunastu mikroagregatów. Nierzadko występuje przy powierzchni granicznej lodu ułożenie mikroagregatów w równoległy „warkocz” (rys.26). Ułożenie i przebieg „warkocza” zależy przede wszystkim od wielkości i kształtu rozpatrywanej mikrosoczewki lodu.

W strefie gruntu (rys.29) przylegającej do obszaru mikrostruktury soczewkowej, w odległości powyżej kilkunastu grubości mikroagregatów, występuje mikrostruktura typu komórkowego („kraterki” zawierające wewnątrz mikroagregaty kaolinitu w formie sferycznej).



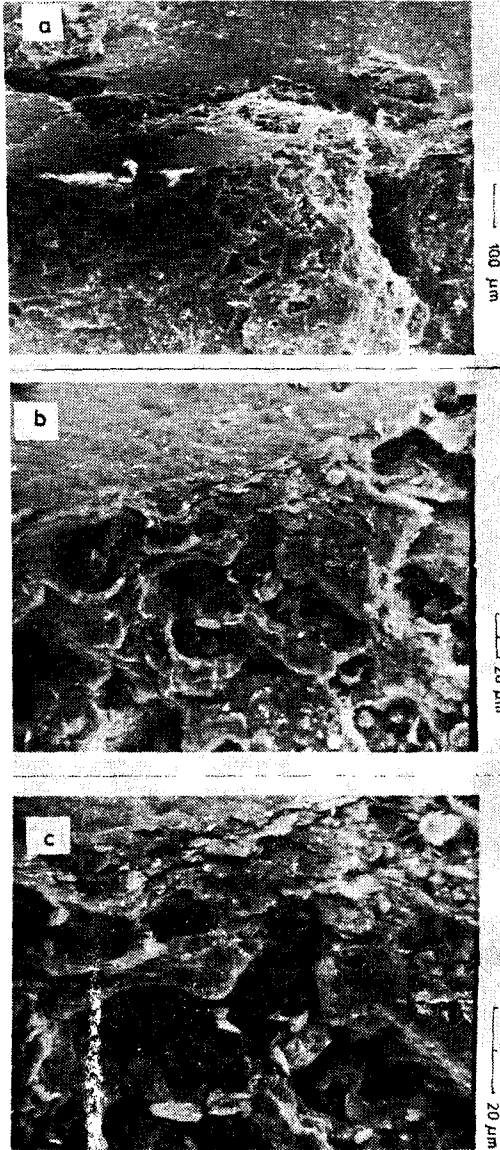
Rys.27. Mikrofotografia kaolinitu z Sedlec po $f = 1$ cyklu mrożenia w temperaturze $\theta_2 = -20^\circ\text{C}$, widok strefy przylegającej do mikrosoczewki lodowej i powierzchni granicznej lód - szkielec mineralny:

- a - obraz mikrosoczewki lodu na tle masy gruntu,
- b - zagęszczenie cząstek mineralnych i ich zorientowane równoległe ułożenie w strefie przy powierzchni granicznej lodu,
- c - obraz mikrostruktury soczewkowej



Rys.28. Mikrofotografia kaolinu z Sedlec po $f = 1$ cyklu mroźnienia w temperaturze $\theta_z = -20^\circ\text{C}$, widok na powierzchnię graniczną szkieletu mineralnego, prostopadłe od strony mikrosoczewki lodowej:

- a - widoczne liczne szczelinowe mikropęknięcia mrozowe w masie gruntu,
- b - różna morfologia powierzchni granicznej i powierzchni przełamu kaolinu,
- c - ułożenie mikroagregatów wokół soczewki lodowej, która kontaktuje się pod kątem prostym z większą mikrosoczewką lodu,
- d - szczegóły w powierzchni granicznej, równoległe ułożenie mikroagregatów kaolinu względem siebie, brak praktycznie porów międzymikroagregatowych, powierzchnia graniczna „idealnie” wygładzona od strony lodu



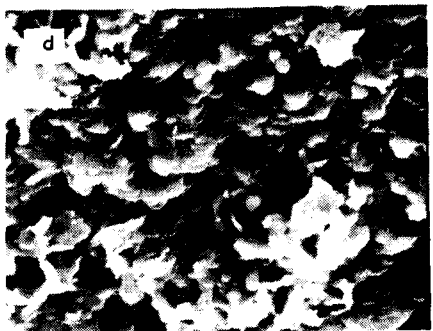
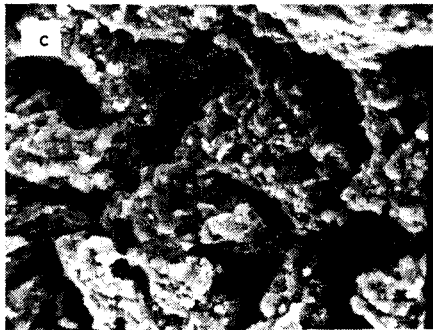
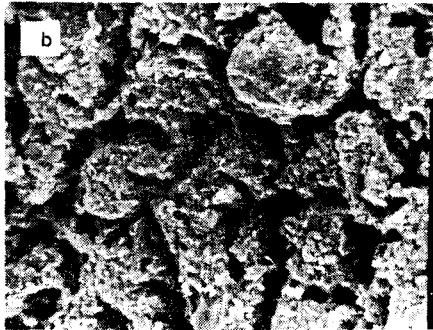
Rys.29. Mikrofotografia kaolinu z Sedlec po $f = 5$ cyklach mrożenia w temperaturze $\theta_z = -20^{\circ}\text{C}$, widok na strefę gruntu przylegającą do dużej mikrosoczewki lodu:
 a - szczelinowe pęknięcie lodu,
 b - zagęszczenie równoległych cząstek mineralnych przy powierzchni granicznej oraz liczne „kraterki” z dobrze wygładzonymi wewnątrz powierzchniami, wypełnione mikroagregatami o koncentrycznym kształcie,
 c - różnica w orientacji cząstek mineralnych przylegających do powierzchni granicznej lodu i w strefie dalszej, widoczne prawdopodobne drogi migracji? wody do dużej mikrosoczewki lodu

Pory i mikroszczeliny w strefie mrozowych zaburzeń mikrostruktury mają postać nieregularną, a końce ich są często otwarte w kierunku do powierzchni granicznej lód - szkielet mineralny.

Bentonit MAD nie mrożony, $f = 0$ (rys.30)

Mikrostruktura typu pseudoglobularnego

Opis mikrostruktury: zbudowana z mikroagregatów montmorillonitu ułożonych w większe zespoły rozmieszczone nieregularnie w masie gruntowej.



Rys.30. Mikrofotografia bentonitu MAD nie mrożonego:

- a - powierzchnia przełamania próbki, widok ogólny,
- b - mikrostruktura typu pseudoglobularnego, wydzielone pojedyncze mikroagregaty w formie pseudoglobul,
- c - pory między mikroagregatami wydzielające odosobnione pseudoglobule w masie gruntu,
- d - pory izometryczne między widocznymi pojedynczymi mikroagregatami

Charakter i typ kontaktów między mikroagregatami jest mieszany i trudny do jednoznacznego ustalenia. Średnica mikroagregatów bliska jest około 1 μm do kilku μm . Między mikroagregatami istnieją pory (rys.30d), wśród których przeważają pory izometryczne, o średnicy 2 μm do maksymalnej 4 μm .

Zespoły mikroagregatów w formie pseudoglobul mają najczęściej średnicę około 60 μm . Pseudoglobule oddzielone są od siebie porami międzymikroagregatowymi, nieregularnie otaczającymi je prawie ze wszystkich stron. Szerokość porów wynosi do 10 μm . Pory międzymikroagregatowe okalające pseudoglobule nie tworzą wspólnie połączonej sieci. Są one przedzielone mostkami ilastymi, łączącymi pseudoglobularne mikroagregaty montmorillonitu między sobą. Szerokość mostków ilastych porównywalna jest z szerokością porów międzymikroagregatowych.

Bentonit MAD po procesie cyklicznego mrożenia (rys.31, 32, 33, 34, 35)

Mikrostruktura typu gąbczastego

Opis mikrostruktury: zbudowana z izometrycznych mikroagregatów montmorillonitu o średnicy od 2 μm do 4 μm (rys.31d, 32d, 33d).

Mikroagregaty tworzą większe zespoły (po kilka), o wymiarach od 20 μm do 30 μm (rys.31c).

Charakter i typ kontaktów między mikroagregatami trudny do ustalenia - mieszany.

Pory wewnątrzmikroagregatowe (rys.31d, 32d, 33d) izometryczne o średnicy około 2 μm , są nieregularnie rozmieszczone. Brak jest wyraźnej orientacji przestrzennej porów.

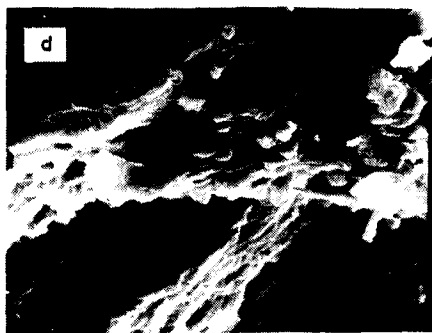
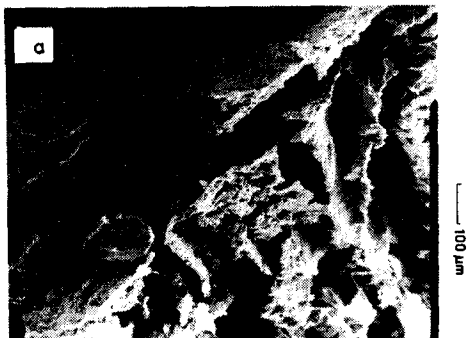
W powierzchni granicznej szkielet gruntowy - soczewka lodu (rys.32, 33c) prawie zupełny brak mikroporów międzymikroagregatowych. Powierzchnia graniczna lód - szkielet gruntowy wygładzona, prawie płaska (rys.31, 32, 33, 34), materiał mikroagregatów rozmieszczany równomiernie na całym obszarze.

Nieliczne pory anizometryczne szerokości 10 μm (rys.33b, 34c).

Między dwiema równoległymi soczewkami lodu (rys.33a) grubości około 150 μm znajduje się jedna z warstewek szkieletu gruntowego superklastra (patrz rys.23). Mikroagregaty montmorillonitu wykazują w tej warstewce pory szczelinowe o szerokości do 20 μm . Kierunek przebiegu porów jest równoległy względem siebie, często z rozgałęzzeniami prostopadłymi (rys.34a,b).

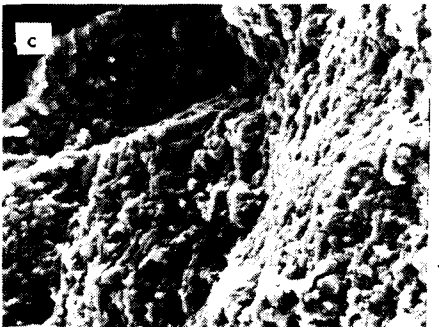
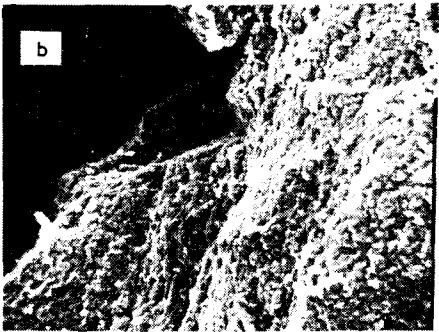
Przełam powierzchni międzysoczewkowej w strefie poza mrozowymi zaburzeniami mikrostruktury, widziany jako prostopadły do powierzchni granicznej lodu, wykazuje większe zespoły cząstek montmorillonitu o średnicach około 10 μm do 30 μm , oddzielone od siebie porami międzymikroagregatowymi (rys.31b,c,d, 35a,c).

Pory izometryczne i anizometryczne są najczęściej szerokości od 1 μm do 10 μm . Asocjacje mineralne, tworzące mikroagregaty, łączą się ze sobą za pomocą mikroagregatów mniejszych wymiarów dając przestrzennie wraz z rozbudowanymi siatkowo mikroporami mikrostrukturę gąbczasta.



Rys.31. Mikrofotografia bentonitu MAD po $f = 20$ cyklach mrożenia w temperaturze $\theta_z = -20^\circ\text{C}$, widok na przełam w obszarze kontaktów soczewek lodu: krawędzie - - powierzchnie płaskie (porównaj z rys.23):

- a - widok ogólny strefy kontaktowej soczewek,
- b - powierzchnia przełamu prostopadła do dwóch wzajemnie równoległych soczewek lodu, widoczne różnice morfologiczne w powierzchni granicznej lodu i w prostopadłej do niej powierzchni gruntu,
- c - zagęszczenie i quasi równoległe ułożenie mikroagregatów mineralnych przy powierzchni granicznej lodu, agregacja pojedynczych cząstek, w strefie dalszej liczne pory izometryczne,
- d - mikroagregat powstały ze złączenia zorientowanych pojedynczych mikroagregatów mniejszych wymiarów



Rys.32. Mikrofotografia bentonitu

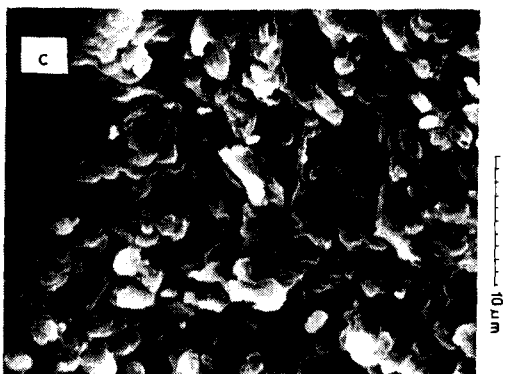
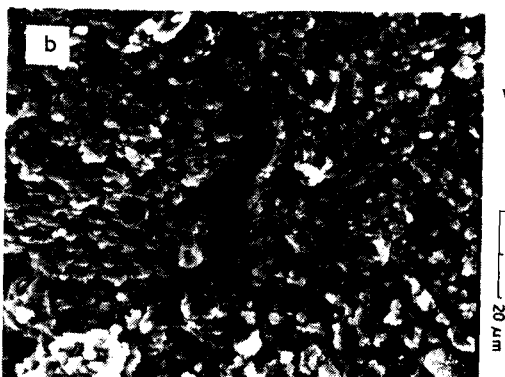
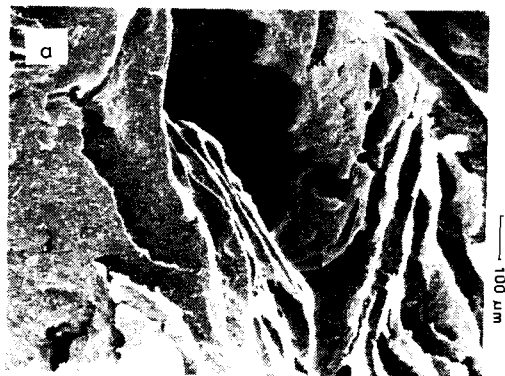
MAD po $f=1$ cyklu mrożenia w temperaturze $\theta_z = -20^\circ\text{C}$, widok na powierzchnię graniczną soczewka lodu - szkielet mineralny:

a - ogólny widok od strony soczewki lodu na strefę kontaktową z agregatami gruntu, znajdującymi się między soczewkami lodu,

b - morfologia powierzchni granicznej od strony lodu, mikrostruktura typu gąbczastej,

c - pojedyncze mikroagregaty szkieletu gruntowego (domeny?), liczne, bardzo małe izometryczne pory międzyagregatowe,

d - izometryczne pory wewnątrz mikroagregatowe

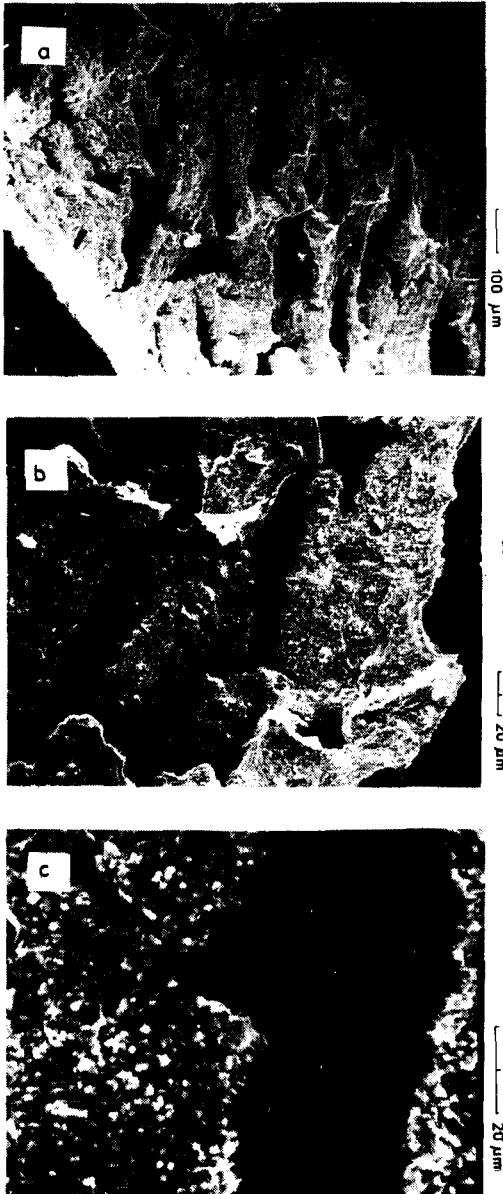


Rys.33. Mikrofotografia bentonitu

MAD po $f = 10$ cyklach mrożenia w temperaturze $\theta_z = -20^\circ\text{C}$, widok prostopadły na powierzchnię graniczną od strony soczewki:
 a - widok ogólny pakietu równoległych soczewek lodowych,

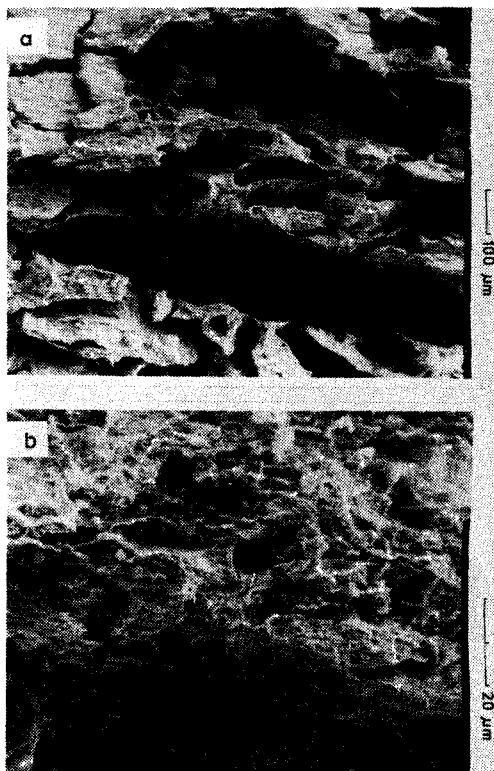
b - mikropor w bardzo cienkiej warstwie szkieletu mineralnego, widoczne pojedyncze izometryczne pory między mikroagregatami, powierzchnia graniczna wygładzona, ułożenie mikroagregatów quasi równoległe,

c - nieliczne pory anizometryczne rozdzielające płasko ułożone zespoły cząstek mineralnych



Rys. 34. Mikrofotografia bentonitu MAD po $f = 10$ cyklach mrozenia w temperaturze $\theta_f = -20^\circ\text{C}$, powierzchnia graniczna soczewka lodu - szkielet mineralny, widok prostopadły do powierzchni granicznej, obraz między dwiema równoległymi makrosoczewkami (porównaj z rys. 23):

- a - liczne mikropory w powierzchni granicznej o prawie równoległym względem siebie ułożeniu,
- b - nieregularny kształt mikroporów,
- c - strefa brzegowa i linia konturu mikropora wyglądająca, nie ostra



Rys.35. Mikrofotografia bentonitu MAD po $f = 10$ cyklach mrożenia w temperaturze $\theta_z = -20^\circ\text{C}$, strefa kontaktowa między dwiema makrosoczewkami lodu, widok powierzchni przełamu:

- a - widok ogólny,
 b - różnice w morfologii powierzchni granicznej lodu i powierzchni przełamu ładu, widoczne liczne pory anizometryczne o wygładzonych ścianach wewnętrznych z quasi równoległym ułożeniem mikroagregatów mineralnych i mikrostrukturą gąbczastą w powierzchni przełamu

Bentonit MAD po procesie cyklicznego mrożenia (rys.36, 37, 38, dół próbki wg rys.1)

Mikrostruktura typu komórkowego

Opis mikrostruktury: zbudowana z połączonych wzajemnie mikroagregatów $20\ \mu\text{m}$ oraz o mniejszych wymiarach, które są utworzone z kilku izometrycznych cząstek montmorillonitu o wymiarach $2\ \mu\text{m}$ do $4\ \mu\text{m}$.

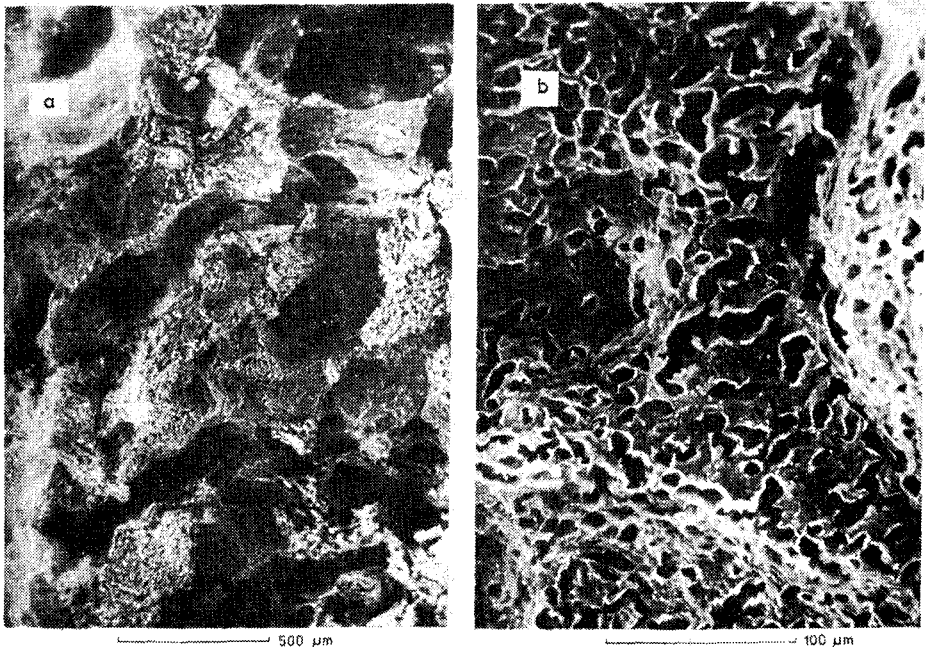
W powierzchni granicznej łąd - szkielek mineralny obserwujemy mikroagregaty wzajemnie stykające się kontaktami typu powierzchnia płaska - powierzchnia płaska lub krawędziami, są to mikroagregaty o równoległym ułożeniu względem powierzchni lodu. Tworzą one regularną, przestrzenną sieć porów międzymikroagregatowych. Mikroagregaty mniejszych wymiarów stykają się ze sobą kontaktami typu: powierzchnia płaska - powierzchnia płaska, powierzchnia płaska - krawędź. Duże mikroagregaty łączą się za pomocą mniejszych mikroagregatów o regularnej formie, zbudowanych z równolegle ułożonych względem siebie cząstek montmorillonitu mniejszych wymiarów (rys.36, 37).

Pory przede wszystkim są izometryczne, o średnicy do $10\ \mu\text{m}$, oraz anizometryczne - najczęściej o szerokości około $50\ \mu\text{m}$. Pory wewnątrz mikroagregatowe (rys.36a,b) są zauważalne dopiero przy powiększeniu $\times 2000$ (rys.37a). Powierzchnia graniczna łąd - szkielek gruntowy (rys.37) wygładzona, o lekko zróżnicowanej konfiguracji. Pory międzymikroagregatowe izo-

metryczne o średnicy około 20 μm wykazują pewną regularność rozmieszczenia w strefie kontaktowej z kryształkiem lodu. Otwarte pory różnych wymiarów tworzą przestrzenną sieć wzajemnie przenikającą się z dowolnie rozmieszczonymi mikroagregatami w masywie iłu.

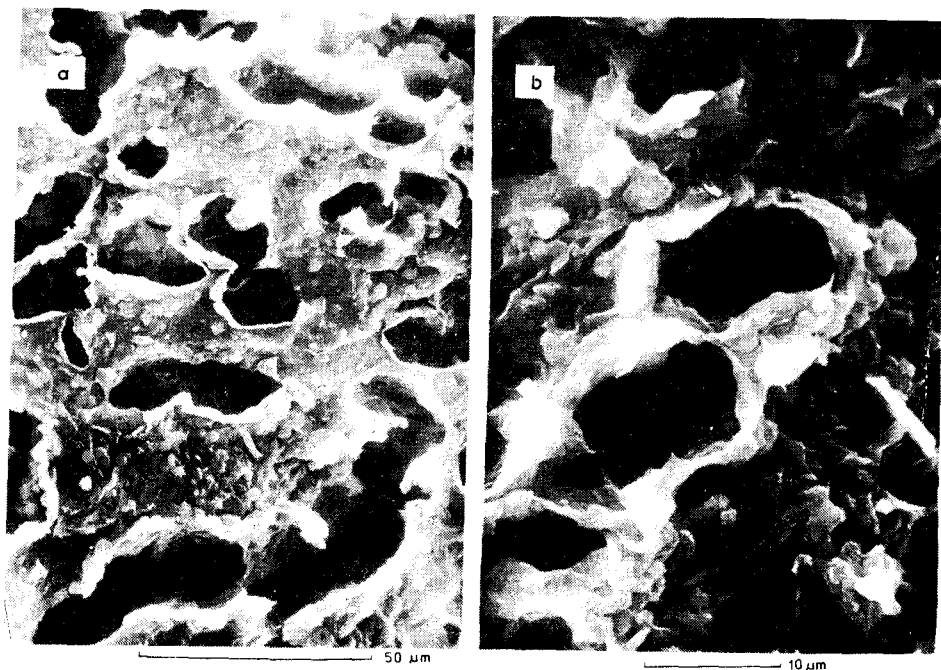
W płaszczyźnie prostopadłej do dwóch sąsiadujących mikrosoczewek lodu (rys.38) widoczna jest mikrostruktura typu komórkowego, którą budują łączące się za pomocą łańcuszków elastycznych mikroagregaty nieregularnego kształtu o wymiarach 20 μm do 30 μm .

Pory między mikroagregatami nieregularne, przeważają anizometryczne o szerokości do 10 μm .



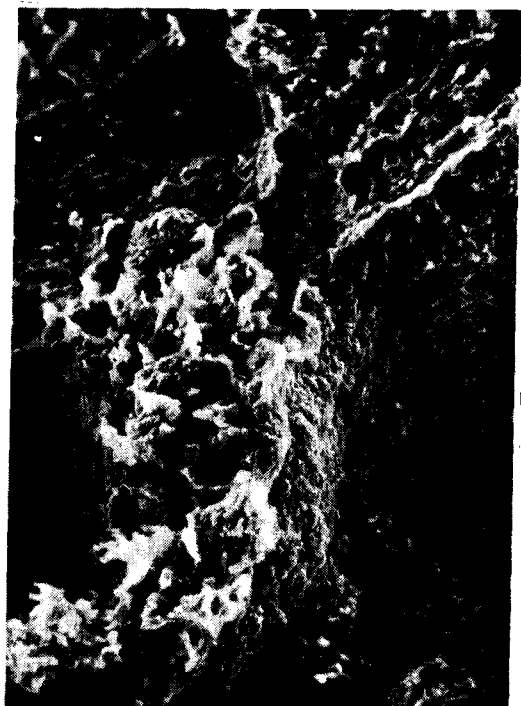
Rys.36. Mikrofotografia bentonitu MAD po $f = 10$ cyklach mrożenia w temperaturze $\theta_z = -20^\circ\text{C}$ (dół próby wg rys.1):

- a - ogólny widok powierzchni granicznej soczewka lodu - szkielet mineralny, widoczne liczne duże soczewki i bardzo liczne mikrosoczewki lodowe,
- b - morfologia powierzchni granicznej widziana od strony soczewki lodu, dobra orientacja mikroagregatów względem siebie i do powierzchni lodu (quasi równoległe ułożenie), liczne pory izometryczne i anizometryczne (struktura komórkowa)



Rys.37. Mikrofotografia bentonitu MAD po $f = 10$ cyklach mrożenia w temperaturze $\theta_z = -20^\circ\text{C}$ (dół próby wg rys.1):

- a - brak porów międzymikroagregatowych, ułożenie równoległe mikroagregatów względem siebie i powierzchni granicznej z lodem,
- b - szczegół przedstawiający ułożenie mikroagregatów wokół izometrycznych mikroporów, nawarstwienie mikroagregatów w kierunku mikrosoczewki lodu



Rys.38. Mikrofotografia bentonitu MAD po $f = 10$ cyklach mrożenia w temperaturze $\theta_z = -30^\circ\text{C}$ (dół próby według rys.1); przełam gruntu rozdzielającego trzy mikrosoczewki lodu

Ił pliceniński nie mrożony (naturalny, rys.39)

Mikrostruktura typu brekcjowego *

Opis mikrostruktury: zbudowana z grubszych mikroagregatów, nieregularnego kształtu, ostrokrawędzistych, o wymiarach około 500 μm . Tworzą one oddzielne elementy, bezładnie ułożone w masie gruntu. Mikroagregaty te zbudowane są prawdopodobnie z materiału ilastego bardziej zwartego niż otoczenie lub możliwe, że na jądrze z ziarna kwarcu, które otoczone zostało w przeszłości geologicznej płytkami znacznie mniejszych mikroagregatów mineralnych ilastych.

Między grubszymi mikroagregatami istnieją pory szczelinowe o szerokości około 10 μm .

Kontakty między mikroagregatami następują przez połączenia ilaste, które tworzą izometryczne płytki mniejszych mikroagregatów ilastych o wymiarach około 10 μm do 20 μm . Połączenia ilaste są typu podpór lub łańcuszków ilastych, układają się równolegle względem siebie i wokół powierzchni granicznej grubszych elementów mikrostruktury. Istniejące w połączeniach ilastych pory wewnątrz mikroagregatów są typu szczelinowego szerokości około 1 μm .

Struktura połączeń ilastych jest typu równoległego.

Mikroagregaty stykają się między sobą kontaktami typu: powierzchnia płaska - powierzchnia płaska, charakter kontaktów koagulacyjny.

Prawdopodobnie zaobserwowane tu spękania typu szczelinowego i ułożone równolegle otoczki ilaste wokół grubszych mikroagregatów mineralnych są strefami osłabień stwierdzonych w naturalnych iłach plicenińskich przy pomocy innych badań (np. patrz podrozdział 3.4.3: Próba rozmakania w wodzie). Mogą one też powodować brekcjową strukturę masywu plicenińskiego wyszczególnioną przez K. Meissnera (1970) i związaną z glacytektoniczną historią utworów geologicznych.

Ił pliceniński mrożony cyklicznie (naturalny, rys.40)

Mikrostruktura typu soczewkowo-brekcjowego

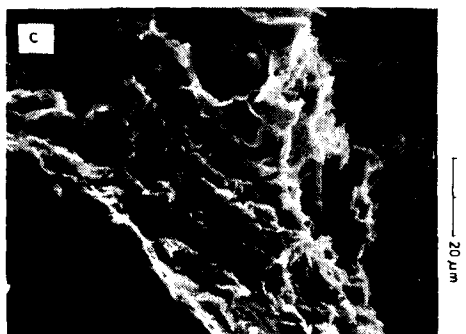
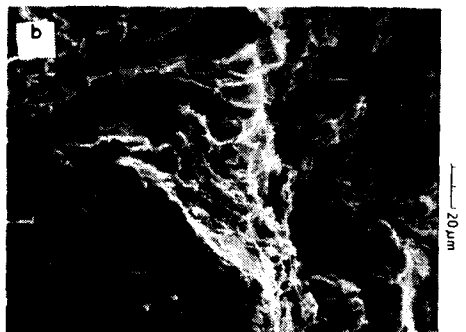
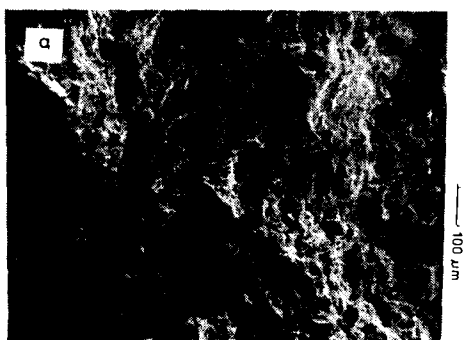
Opis mikrostruktury: zbudowana z oddzielnych mikroagregatów o nieregularnym kształcie, najczęściej ostrokrawędzistych, o wymiarach od około 20 μm do 40 μm , czasem większych.

Mikroagregaty te stanowią w masie iłu grubsze elementy mikrostruktury, które oddzielane są od siebie licznymi, krzyżującymi się wzajemnie, otwartymi porami typu szczelinowego o szerokości 2 μm do około 8 μm , oraz pęknięciami. Przebieg tych porów jest nieregularny, dowolny.

Część porów międzyagregatowych, mniejszych wymiarów, pozostała po wytopionym lodzie. Są to najczęściej pory anizometryczne o długości około 20 μm do 30 μm , a także izometryczne. Wokół tych porów mikroagregaty iłu wykazują w przekroju poprzecznym orientację równoległą w stosunku do po-

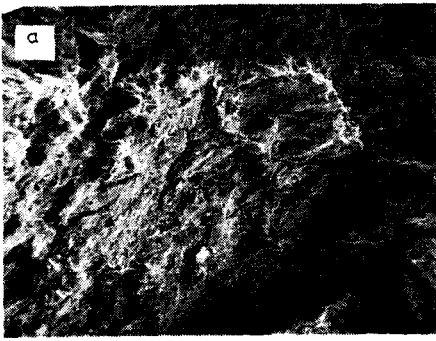
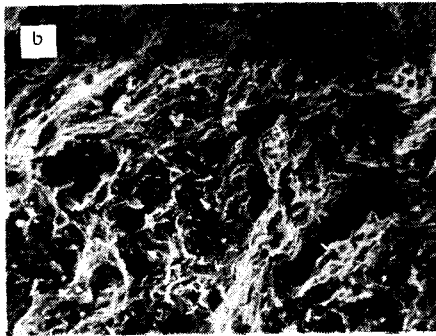
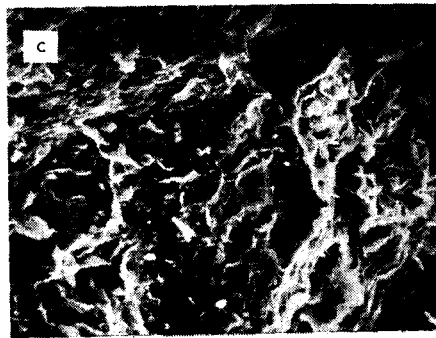
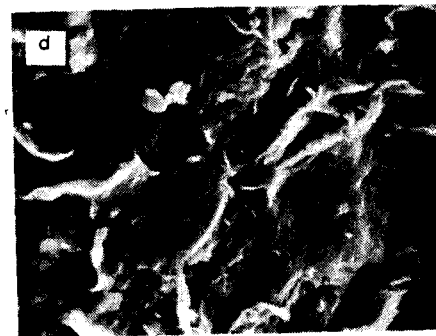
*

termin przyjęty za K. Meissnerem (1970)



Rys.39. Mikrofotografia iłu plicieńskiego z Bydgoszczy nie mrożonego:

- a - widok ogólny z zaznaczającymi się naturalnymi powierzchniami osłabień,
- b - mikroagregat mineralny wydzielony w masie gruntowej pierwotnymi obszarami osłabień, które tworzą pory szczelinowe,
- c - zorientowane ułożenie mikroagregatów mineralnych w strefie bezpośrednio przylegającej do obszaru osłabienia,
- d - nieliczne pory szczelinowe równoległe do zorientowanego ułożenia mikroagregatów

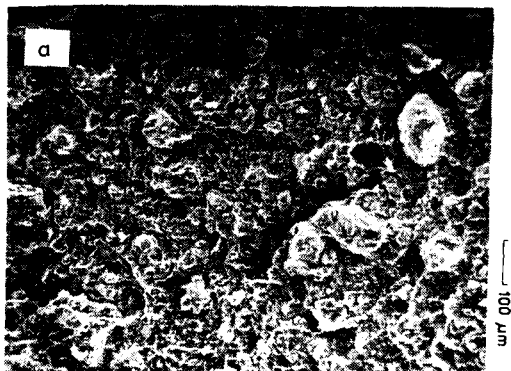
100
µm20
µm20
µm10
µm

rys.40. Mikrofotografia iku pliocenińskiego z Bydgoszczy po $f = 10$ cyklach mrożenia w temperaturze $\theta_z = -20^\circ\text{C}$:
 a - bardzo liczne występujące mikropełnięcia mrozowe o dowolnym kierunku przebiegu,
 b - powierzchnia graniczna mikrosoczewka lodu - - szkielet mineralny widziana prostopadle do powierzchni mikrosoczewki, liczne pory szczelinowe,
 c - dobra, wymuszona orientacja w powierzchni granicznej mikroagregatów mineralnych,
 d - wygładzona „idealnie” powierzchnia graniczna, brak porów międzyagregatowych

wierzchni mikrosoczewki lodu wskazującą na mikrostrukturę soczewkową.

Powierzchnia porów granicząca z lodem jest wygładzona o prawie "idealnej" równoległej orientacji mikroagregatów względem siebie. Dominujące są kontakty między elementami mikrostruktury typu powierzchnia płaska - powierzchnia płaska. Grubsze elementy mikrostruktury spajają połączenia i-laste głównie typu łańcuszków ilastych lub elementy te są nie w pełni "odspojone" od nienaruszonego masywu iłu.

Ił pliczeński mrożony cyklicznie (pasta konsolidowana jednoosiowo, $\sigma_n = 1,2$ MPa, kierunek mrożenia jednocześnie ze wszystkich stron, $\theta_z = -20^\circ\text{C}$, rys.41)

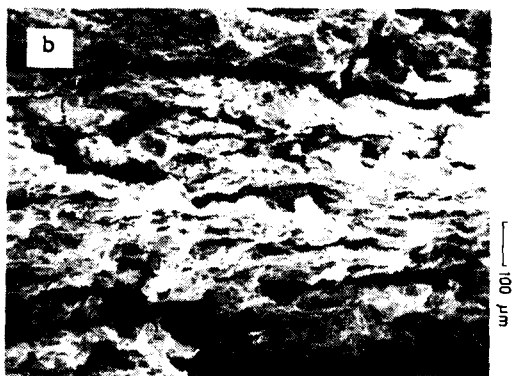


Rys.41. Mikrofotografia pasty iłu pliczeńskiego konsolidowanej anizotropowo i mrożonej ze wszystkich kierunków jednocześnie, $f = 10$ cykli mrożenia - odmrażania:

a - ogólny widok prostopadły do powierzchni działania naprężenia konsolidującego,

b - widok równoległy do powierzchni działania naprężenia konsolidującego, widoczne pory szczelinowe równoległe zorientowane względem siebie i prawie równoległe do powierzchni działania naprężenia konsolidującego,

c - równoległe zorientowanie mikroagregatów względem siebie i powierzchni przylegającej do porów, jednocześnie prawie prostopadła ich orientacja dłuższą osią do kierunku działającego naprężenia konsolidującego



Mikrostruktura typu soczewkowego

Opis mikrostruktury: zbudowana z mikroagregatów iku o maksymalnych wymiarach do 50 μm lub 60 μm .

Mikroagregaty zbudowane są z anizometrycznych płytkowych form minerałów ilastych, które ułożone są dłuższą osią równoległe do powierzchni szczelin i prostopadle do kierunku działania naprężenia. Szerokość szczelin międzymikroagregatowych w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku konsolidacji od 10 μm do 40 μm . Szczeliny, będące miejscami po wysublimowanych mikrosoczewkach lodu, są równoległe względem siebie i zorientowane swą dłuższą osią prostopadle do kierunku działania naprężenia konsolidującego. Mikroagregaty w strefie międzysoczewkowej bardzo zagęszczone i ciasno upakowane, stykają się ze sobą kontaktami typu: powierzchnia płaska - powierzchnia płaska.

Ułożenie cząstek mineralnych w obszarze o mikrostrukturze soczewkowej jest nieco zaburzone, pofalowane, w wyniku najprawdopodobniej nierównomiernego wzrostu mikrosoczewki lodowej. Kształt szczelin między mikroagregatami iku nie odbiega prawdopodobnie od kształtu mikrosoczewek wysublimowanego lodu.

Szerokość porów szczelinowych wewnątrz mikroagregatowych jest mniejsza od 1 μm .

Podsumowując - bezpośrednie obserwacje mikrostruktury mrożonych i odmrażanych iłów, uzyskane przy pomocy SEM, pozwalają stwierdzić, że transformacje mikrostruktury układu woda - ił są wywołane mrożeniem i utrwalone zostają zarówno w etapie mrożenia, jak i odmrażania.

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że transformację mrozową mikrostruktury iłów charakteryzuje zmiana początkowego położenia mikroagregatów, wzrost wymiarów mikroagregatów, zmiana połączeń i typu kontaktów między mikroagregatami, zmiana wielkości porów i ich form oraz dokładniejsza orientacja ułożenia nowo powstałych form mikrostrukturalnych w stosunku do powierzchni granicznej soczewek i mikrosoczewek lodu.

Zanikają pory międzymikroagregatowe, pory izometryczne wewnątrz- i międzymikroagregatowe, transformują się one na szczelinowe oraz rzadziej anizometryczne, o znacznie mniejszych wymiarach, niż przed mrożeniem.

Powstają nowe kontakty międzymikroagregatowe, głównie kontakty typu: powierzchnia płaska - powierzchnia płaska.

Sposób ułożenia i orientacja mikroagregatów iłowych po przemrożeniu zależy od kształtu i wielkości powstającej soczewki lodowej oraz typu iku. Szczególnie dobrze widoczna jest doskonała orientacja cząstek mineralnych w obszarze bezpośredniego kontaktu lód - szkielet mineralny (w strefie granicznej). Cząstki i mikroagregaty mineralne ułożone są w upakowaną szczelnie, niemal jednolitą warstwę, o mało zmiennej konfiguracji powierzchni granicznej. Zorientowane prawie idealnie w stosunku do powierzchni granicznej soczewki lodu, mikroagregaty mineralne dają w tej powierzchni mikrostrukturę typu soczewkowej. W pewnym zakresie odległości od powierz-

chni granicznej obserwuje się natomiast mniejsze zaburzenia i mikrostrukturę typu soczewkowej lub komórkową. Mikrostruktura komórkowa obejmuje prawdopodobnie strefę częściowo odbudowaną lub nieznacznie zaburzoną przeciwnym działaniem mrozu i odmrażaniem.

Obraz mrozowych zmian mikrostruktury badanych iłów wskazuje ponadto na zachodzący w skali mikroskopowej proces agregacji (wzrost wymiarów cząstek, szczególnie monomineralnych iłów KS i BW) oraz na proces desagregacji (rozpad naturalnych agregatów) iłu plioceńskiego. W przypadku iłu plioceńskiego można wiązać to z odmiennym typem mikrostruktury grubszych agregatów i połączeń ilastych, bądź z nieodwracalnym niszczeniem połączeń w cyklicznym zamrażaniu i odmrażaniu, jednocześnie może to wskazywać na związek mikrostruktury z historią geologiczną iłów plioceńskich, K. Meissner (1970).

Na przykładzie próbek jednoosiowo konsolidowanych iłów, które zamrażano jednocześnie ze wszystkich stron, należy przypuszczać, że położenie miejsc krystalizacji wody zależy od typu wyjściowej mikrostruktury iłu. Powstanie i rozwój soczewki lodu może być związane z pierwotnymi porami lub strefami osłabień, które istniały w naturalnych gruntach. Przypuszcza się też, że krystalizujący lód prawdopodobnie przyjmuje w tych porach postać nie izomorficzną.

4. MROZOWE TRANSFORMACJE MIKROSTRUKTURY IŁÓW

W świetle przeprowadzonej w rozdziale 3 analizy wyników badań można stwierdzić, że przyjęte koncepcje badań dla wyjaśnienia mrozowych zmian mikrostruktury były uzasadnione. W trakcie omówienia zależności mikrostruktury i procesu przemennego mrożenia dla przypadku badanych typów iłu przyjęto bowiem, że decydującym o transformacjach mikrostruktury czynnikiem jest cykliczne zamrażanie i odmrażanie. Zapis ujmujący mikrostrukturę iłów, przedstawiony funkcją (1), zawierał szereg cech strukturalnych i czynników. Przeprowadzone badania wykazały, że pod wpływem cyklicznego mrożenia i odmrożenia jakościowej zmianie uległy następujące cechy strukturalne i czynniki:

- n_w - porowatość wewnątrzmikroagregatowa,
- n_p - porowatość międzymikroagregatowa,
- S - powierzchnia właściwa gruntu,
- δ - grubość cząstki,
- K_n - kształt, forma i wymiary porów,
- K - kształt i wymiary agregatów i mikroagregatów,
- F - typy kontaktów między cząstkami,
- O - orientacja cząstek,
- w - wilgotność (lokalnie), przy zachowaniu stałej średniej wilgotności próbki.

Pośrednio, między innymi z wykonanych obliczeń, tablica 8, można również wnioskować o zmianie energii oddziaływania między elementami mikrostruktury V_T , a z innych obserwacji także o porowatości n i zmianie udziału faz układu gruntowo-wodnego (pojawienie się fazy gazowej).

Przeprowadzona analiza potwierdza dla bentonitu MAD istotny wpływ zawartości montmorillonitu, natomiast dla naturalnego iłu pliczeńskiego istnienie związku z zależnym od historii geologicznej typem mikrostruktury wyjściowej. Można także przyjąć, że w przypadku zwiększania udziału montmorillonitu wrażliwość mikrostruktury iłów na cykliczne przemrażanie będzie się zwiększała. Stąd też było uzasadnione określenie zależności pomiędzy warunkami zamrażania i różnymi typami gruntów spoistych.

W procesie zamrażania gruntów spoistych, jak ustalono dotychczas, np. B. A. Savelev (1971) i inni, głównymi przyczynami zmian właściwości ośrodka są: przemiana fazowa wody w lód, dająca przyrost objętości o około 9 % nowej fazy oraz późniejszy wzrost wielkości kryształków i mikrokryształków lodu. Wzrost powstałych mikrokryształków lodu następuje podczas zamrażania gruntów w rezultacie migracji do powierzchni lodu cząsteczek wody. Szczególnie istotna w analizowaniu zmian właściwości jest migracja do frontu przemrażania wody ze strefy podmarzania w tych gruntach spoistych, które zamarzają w otwartym systemie, tj. istnieje pełna możliwość podciągania wody od spodu, K. M. Skarżyńska (1967), B. van Vliet-Lanoe (1985).

W zamkniętym systemie gruntowo-wodnym, tak jak przyjęto w omówionych doświadczeniach (brak możliwości podciągania wody od spodu), migracja wody może mieć mniejsze znaczenie w przemianach właściwości gruntów spoiстых, które raz zamrożone nie odmarzają. Przeprowadzone badania dowiodły, że w analizowaniu mikrozmiian cyklicznie mrożonych i odmrażanych ilów nie można pominąć wewnętrznej migracji wody.

Na podstawie przeprowadzonych studiów i wyników otrzymanych z bezpośrednich badań autor przypuszcza, że o charakterze, zakresie i efektach zmian mikrostrukturalnych zamkniętego układu ilowo-wodnego, wywołanych cyklicznym działaniem mrozu i odmrażaniem decydują następujące grupy czynników:

- czynniki mechaniczne, generowane przez siły pochodzące od przemiany fazowej wody w lód i późniejszego wzrostu kryształków lodu. W zasadniczy sposób kształtują one i są decydujące o przebudowie i stopniu zmian mikrostruktury ilów w procesie zamrażania,
- czynniki determinujące trwałość, po osiągnięciu równowagi termodynamicznej układu odmrożonego, powstałych zespołów strukturalnych, zależne od sił oddziaływania międzycząstkowego układu woda-il,
- inne, np. chemiczne, mineralogiczne, termowilgotnościowe itp., z założenia stałe i nie analizowane w niniejszej pracy.

4.1. Mechanizm zmian mikrostruktury

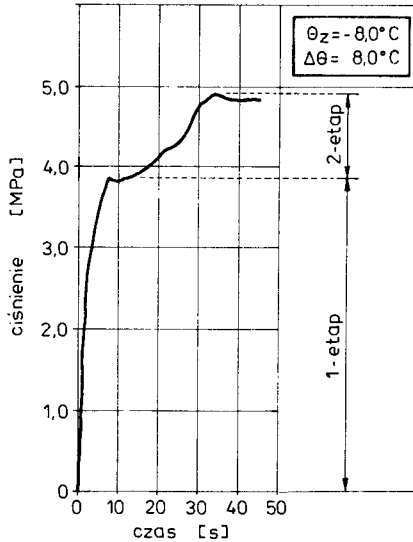
Można przyjąć, że w gruncie ilowym o prawie pełnym nasyceniu porów wodą oddzielne pory i mikropory wypełniają „pewnego rodzaju” krople, które są losowo rozłożone w masie gruntu. Proces zamrażania ilu wiąże się z krystalizacją takich „kropeł” zawartych w wakancjach ośrodka gruntowego w wyniku obniżenia średniej temperatury ośrodka przy dochodzeniu układu do stanu równowagi termodynamicznej. Przy wszechstronnym sposobie mrożenia ilu, przyjętym w badaniach, oddzielne krople wody po osiągnięciu stanu przechłodzenia przemieniają się w lód w warunkach, w których brakuje pełnych możliwości swobodnego wzrostu nowo powstającej fazy.

Jak ustalili Y. Horiuchi, N. Maeno (1985), kropla wody podczas przemiany fazowej woda-lód, zamarzając w podobnym, jak wspomniano wyżej, układzie zamkniętym, generuje bardzo duże ciśnienie tzw. ciśnienie wzrostu kryształka lodu, którego wartość średnio wynosi blisko 50 MPa. Przy czym wzrost ciśnienia następuje w dwóch wyraźnych etapach, w łącznym czasie trwania procesu krystalizacji kropli wody od 50 do 100 sekund (rys.42) u w/w autorów.

Uwzględniając powyższe, oraz biorąc pod uwagę specyficzne właściwości wody zawartej w ilach - malejącą wraz z obniżeniem temperatury zawartość wody niezamarzniętej i jej migrację do kryształków powstającego lodu, a także prawdopodobnie pseudomorficzny wzrost kryształków lodu w wakancjach ilu i uwzględniając otrzymane wyniki zmian temperatury (podrozdział 3.3), redystrybucji wody (podrozdział 3.4.1) i badania SEM (podrozdział 3.5.2),

autor przypuszcza, że podczas zamrażania zmiany mikrostruktury łąd dokonują się pewnymi etapami:

- etap Ia - pierwszorzędnych i szybkich zmian mikrostruktury ośrodka wodno-łowego,
- etap Ib - drugorzędnych i wolnych zmian mikrostruktury,
- etap II - końcowych, długotrwałych zmian obejmujących utrwalenie powstałej mikrostruktury układu łąd - woda - łą.



Rys.42. Przykładowy rozwój ciśnienia zamarzającej w zamkniętej przestrzeni kropli wody (wg Y. Horiuchi, N. Maeno - 1985)

Etap Ia - pierwszorzędnych i szybkich zmian mikrostruktury ośrodka wodno-łowego wiązać się będzie z efektem krystalizacji lub samoistnej nukleacji poszczególnych „kropelek wody”, po osiągnięciu przez nie stanu przechłodzenia w danej temperaturze mrożenia układu wodno-łowego. Etap ten trwa najprawdopodobniej około 10 sekund. Ciśnienie wzrostu kryształków łądu osiągnie w tym czasie blisko 90 % wartości maksymalnej, przy czym łąd i woda zachowują się jak materiały sprężyste, Y. Horiuchi, N. Maeno (1985). Objętość zamarzającej wody wzrasta prawdopodobnie anizotropowo, przy ogólnym kierunku krystalizacji wody postępującym do wnętrza „kropli”. Rozwijające się ciśnienie wzrostu kryształków łądu, poprzez powierzchnię graniczną łądu, zaczyna w sposób mechaniczny oddziaływać na przylegające bezpośrednio do niej elementy szkieletu mineralnego. Pod wpływem parcia wzrastającego kryształka łądu zaczyna się wymuszona, szybka zmiana położenia oraz orientacji poszczególnych elementów mikrostrukturalnych szkieletu gruntowego. Strefa zmian mikrostruktury poszerza się od powierzchni wzrastających kryształków łądu do takiego zakresu, przy którym osiągnięta zostaje równowaga sił działających między elementami struktury gruntu i ciśnienia przekazywanego od wzrastającego kryształka łądu.

Można przypuszczać, że zmieniająca się orientacja cząstek mineralnych, które są coraz bardziej zagęszczane spowoduje, że zawarte między nimi cząsteczki wody będą wypierane ze strefy zmian mikrostruktury. Mogą się przekształcić nawet w wodę wolną lub kapilarną, która zostanie zakumulowana w oddzielne, nowe „kropelki” będące później źródłem dalszych przemian mikrostruktury w swym otoczeniu.

Ten etap zmian mikrostruktury, jak można przypuszczać, pokrywa się z efektem wydzielenia ciepła krystalizacji wody, który jako wypadkowy dla zespołu bliskich sobie kropelek wody zarejestrowano na krzywej zamrażania w temperaturze przechłodzenia wody θ_s (samoistnej nukleacji), w II etapie procesu zamrażania (rys.6, 7, 8).

Etap Ib - drugorzędnych i wolniejszych zmian mikrostruktury. W etapie tym następuje całkowite zamrażanie „kropli wody”. Ciśnienie kryształków lodu wzrasta o dalsze 10 % do wartości maksymalnej osiągając w czasie 40 do 90 sekund wartość końcową, możliwe, że bliską 50 MPa. W tym okresie może dochodzić do pęknięcia skryształizowanej zewnętrznej powierzchni lodu. Tak duże końcowe wartości ciśnień oraz pęknięcia kryształków lodu powodować będą najprawdopodobniej nierównomierne działania sił na stykające się z lodem elementy mikrostruktury iłu. Strefa przebudowanej mikrostruktury poszerzy zasięg, a w zmienionej warstwie iłu wyodrębnią się obszary o zwiększonym zagęszczeniu i upakowaniu dobrze zorientowanych elementów mineralnych, względem siebie oraz względem powierzchni lodu. Być może powstałe mikroagregaty iłu oddzielone będą pęknięciami rozpoczynającymi się przy spękaniach powierzchniowych kryształków lodu.

Etap Ib - wolnych zmian mikrostruktury - prowadzący do zakończenia krystalizacji wody przechłodzonej zawartej w coraz mniejszych „kroplach” daje efekty termiczne zarejestrowane jako niewielkie wahania na krzywej zmian temperatury w izotermicznym zamrażaniu iłu (etap III, rys.6, 7, 8). Pod koniec etapu Ib transformacji mikrostruktury iłu powstaje układ lód - woda - szkielec mineralny oraz rozpoczyna się migracja cząsteczek niezamrażniętej wody do istniejących mikrokryształków lodu.

Etap II - końcowych, długotrwałych zmian oraz utrwalania powstałej mikrostruktury układu lód - woda - ił, przebiega przy postępującym spadku temperatury ośrodka gruntowego (rys.6, 7, 8, etap IV).

Zmiany mikrostruktury iłów pogłębia dalszy wzrost objętości kryształków lodu w wyniku migracji cząsteczek wody do lodu. Migracja cząsteczek wody do powierzchni lodu odbywa się wskutek działania sił adsorpcji i hydrofilnych własności lodu. Nie wykluczone, że cząsteczki tej wody mogą być wyciśnięte spomiędzy zagęszczanych elementów mineralnych podczas poprzednich etapów Ia i Ib. Cząsteczki wody niezamrażniętej przyciągane są przez nowo powstałe kryształki lodu ze wszystkich kierunków swego otoczenia, szczególnie na początku, z najłatwiej dostępnych poziomów wody wolnej.

W gruncie spoistym wzrost mikrokryształków lodu po wyczerpaniu zasobów wody wolnej dokonuje się w drodze odrywania molekuł wody z poziomów silniej wiązanych przez powierzchnie cząstek mineralnych. Dalsze obniżanie

temperatury ośrodka wywołuje wzrost energii powierzchniowej lodu, dającej zwiększenie efektywności sił adsorpcji kryształków lodu zdolnych odrywać molekuly wody związanej, które po przewyciężeniu sił przyciągania cząstki gruntu uzupełnią siatkę krystaliczną mikrokryształków lodu.

W kolejności molekuly wody mogą być odbierane z warstw wody błonkowej, najbliższych powierzchni cząstki iłów, a przy niższych temperaturach - z przestrzeni międzypakietowych. Wzrastające anizotropowo mikrokryształki lodu w wyniku wiązania i krystalizacji migrujących cząsteczek wody dotychczas nie zamrożonej oraz przechłodzonej, oprócz efektów termicznych mogą powodować kierunkowe różnice sił przyciągania i wywołać lokalnie nierównomierny rozkład ciśnień wzrastających kryształków lodu. Inicjuje to pod koniec tego etapu postępujące niszczenie kolejnych kontaktów i więzi między cząstkami iłu.

Można przypuszczać, że migracja molekuł wody zachodzi głównie w izotermicznym etapie zamrażania iłu (etap III, rys.7, 8) i z czasem ustaje w momencie wyrównania temperatury całego ośrodka gruntowego z otoczeniem, tzn. po osiągnięciu stanu równowagi termodynamicznej z końcem IV etapu zmian temperatury (rys.7, 8). Odpowiednio do zaniku migracji cząsteczek wody zostaje zakończona w całej masie próbki iłu przebudowa mikrostruktury. Osiągnięty jest stan równowagi termodynamicznej zamkniętego układu ił - woda - lód. Powstaje układ równowagi lód - woda niezamrożona (silnie związana) - szkielet mineralny, charakteryzujący końcowe stadium zmiany mikrostruktury zamrożonego ośrodka gruntowego. Z otrzymanych wyników dla badanych iłów, czas potrzebny do osiągnięcia równowagi termodynamicznej wynosi od około 140 minut w kaolinie z Sedlec do około 200 minut w bentonicie MAD podczas pierwszego mrożenia (tab.5). Osiągnięcie stanu równowagi termodynamicznej w temperaturze zamrażania θ_z nie oznacza, że cała woda zawarta w gruncie zamrzała. Według T. A. Litvinovej, za E. M. Sergejevem (1979), woda w gruncie spoistym zamraża całkowicie dopiero w temperaturze $\theta_z = -195,8^\circ\text{C}$.

Autor oznaczając metodą kalorymetryczną, K. Pietrzyk (1965), ilość wody niezamrożonej w temperaturze $\theta_z = -20^\circ\text{C}$, otrzymał np. w kaolinie z Sedlec średnią zawartość wody niezamrożonej $W_{nz} = 2,27\%$, w bentonicie MAD $W_{nz} = 5,48\%$. Podobne dane podaje T. Kozłowski (1987, 1988). Wydaje się więc, że elementy mikrostruktury w zamrożonym gruncie spoistym stykać się mogą między sobą kontaktami typu: minerał - woda - lód (M - W - L), minerał - lód (M - L) ?, minerał - woda (M - W), minerał - minerał (M - M).

Występujące zjawiska migracji cząsteczek wody do kryształków lodu mogą potwierdzać bezpośrednio badania mikroskopowe SEM (np. rys.37b). Na zdjęciu widoczne są asocjacje mikroagregatów iłu o warstwowym ułożeniu wokół każdego z bardzo licznych, izometrycznych mikroporów (mikrokapilar?). Ułożenie mikroagregatów w postaci korony wystającej w stronę lodu ponad wygładzoną powierzchnię graniczną wskazywać może na efekt przebicia warstwy granicznej szkieletu mineralnego i przyciągnięcie migrujących molekuł wody przez kryształki lodu. Można przypuszczać więc, że z końcem II etapu zmian mikrostruktury iłów, po osiągnięciu stanu równowagi termodynamicznej,

powstaje w ile lód, który przyjmuje formę „kolczastej” mikrosoczewki.

Znaczenie etapu II - końcowych długotrwałych zmian mikrostruktury łą, w wyniku przede wszystkim migracji wody, jest duże i ma istotne praktyczne znaczenie w otwartym systemie gruntowo-wodnym, tzn. tam, gdzie rozwinięte siły ssania podciągną wodę do strefy przemarzania. Autor badając modelowe łą w zamkniętym systemie gruntowo-wodnym nie uzyskał dla nieprzerwanego mrożenia wyników potwierdzających migrację wody. Natomiast zanotował istotny wpływ migracji wody i przebudowę struktury łą w przypadkach wielokrotnego zamrażania i odmrażania (podrozdziały 3.4.1 i 3.4.5).

Dalszy rozwój i utrwalanie zmian mikrostruktury łą mrożonych cyklicznie w zamkniętym systemie gruntowo-wodnym, jak dowiodły wyniki badań autora, postępuje zatem po odmrożeniu. Wywołane przez mrożenie zmiany są bowiem niezupełnie odwracalne w łąch w stanie odmrożonym. Podczas odmrażania część molekuł wody nie od razu po odtajeniu lodu jest ponownie wiązana z powierzchnią cząstek łą. Staje się ona wodą niższego energetycznego stopnia wiązania w porównaniu do wyjściowego stanu przed zamrażaniem. Zwiększająca się ilość słabiej wiązanych z powierzchnią minerałów molekuł wody daje ogólny ilościowy i objętościowy wzrost „kropielek” wody w nowo powstającej i rozwiniętej przestrzennej sieci porów gruntowych. Po kolejnych zamrażaniach molekuły tej wody przechodzą w sposób trwały w taką postać, która umożliwia jej krystalizację w bliższych 0°C temperaturach (ujemnych). W konsekwencji po ponownym zamrożeniu tej wody, zwiększa się w otoczeniu coraz większych mikrosoczewek lodu zasięg przebudowanej strefy oraz stopień uporządkowania bezpośrednio sąsiednich elementów mikrostruktury łą.

W wyniku wielokrotnie powtórzonych cykli zamrażania - odmrażania w rozmrożonym łą wzrasta zawartość wody wolnej. Po odtajeniu woda ta, jeżeli nie zatrzymują jej siły kapilarne lub nie jest wiązana przez agregaty montmorillonitu (podrozdział 3.4.2), przemieszcza się grawitacyjnie utrwaloną siecią otwartych porów w dół masywu łą (podrozdział 3.4.1). W procesie odmrażania zasadniczym czynnikiem pogłębiającym przebudowę mikrostruktury cyklicznie mrożonych łą jest zatem wzrost zawartości wody niższego energetycznego stopnia wiązania (np. wody wolnej). Woda ta może łatwiej przemieszczać się rozwiniętym systemem spękań i otwartych porów (mikrokapilar), bądź powodować pęcznienie agregatów mineralnych. Ponadto istotnym czynnikiem wydaje się, że jest występujący wzrost udziału fazy gazowej w masie gruntu, która sukcesywnie zajmuje nie zasklepione pory i pęknięcia mrozowe pozostałe po wytopionych soczewkach lodu.

Jak zaznaczono wcześniej (w etapie Ia i Ib) ciśnienie wzrastających pseudomorficznie mikrokryształków lodu wywołuje w strefach bezpośrednio przyległych do mikrosoczewki parcie powierzchni granicznej lodu na elementy mikrostruktury gruntu. Niektóre z elementów poddane zostaną z tego powodu ścisaniu lub innym procesom mechanicznym. Te generowane siły działając na przyległe mikroagregaty przekazują się na coraz dalsze obszary ośrodka utworzonymi kontaktami między poszczególnymi elementami mikrostruktury (np. kryształit, domena, klaster itp.). Rozwój ciśnienia wzrostu

kryształka lodu powoduje przekroczenie w określonych strefach λ u lokalnej wytrzymałości więzi między elementami i rozpoczęcie transformacji mikrostruktury układu gruntowego, którą charakteryzuje:

- a) zmiana względnego położenia i orientacji poszczególnych elementów (przesunięcie, obrót),
- b) zmiana typu wzajemnych kontaktów (powstawać będą kontakty głównie typu: powierzchnia płaska - powierzchnia płaska, bądź powierzchnia płaska - powierzchnia płaska pod małymi kątami i rzadziej krawędź - krawędź,
- c) zbliżenie poszczególnych elementów do siebie (szczelniejsze upakowanie, większe cząstki, zanikanie porów wewnątrz- i międzymikroagregatowych, powstawanie porów szczelinowych i zanik porów izometrycznych), wypieranie wody z przestrzeni porowej między cząstkami,
- d) zagęszczenie cząstek mineralnych przylegających do powierzchni granicznej lód - szkielec gruntowy i równoległa wzajemna ich orientacja,
- e) powstawanie mikropęknięć.

Proces przebudowy mikrostruktury ośrodka λ owego rozwija się początkowo w najbliższym sąsiedztwie, później strefa transformacji sukcesywnie wzrasta wraz z rozwojem ciśnienia i objętości mikrosoczewki lodowej. Zarówno podczas danego zamrażania, jak i ze wzrostem liczby kolejnych przemrożeń.

Końcowym efektem zmian mikrostruktury λ u jest pewien stan równowagi i wprowadzenie porządku w ułożeniu cząstek mineralnych, ścisłym ich zorientowaniu bezpośrednio w strefie wokół powierzchni granicznej kryształków lodu. Przeobrażona mikrostruktura λ u w obrębie oddziaływania mikrosoczewek lodowych jest „wymuszona” mikrostrukturą o dużym stopniu uporządkowania elementów, którą charakteryzują:

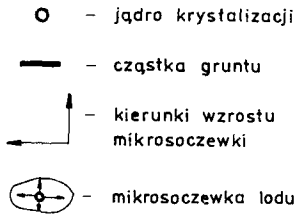
- a) kontakty między elementami, głównie typu: powierzchnia płaska - powierzchnia płaska, rzadziej pod małymi kątami, przy czym elementy mikrostruktury mogą kontaktować się przez typy połączeń: minerał - woda - lód, minerał - lód?, minerał - woda, minerał - minerał,
- b) brak porów międzymikroagregatowych, bądź pory te są typu szczelinowego, równoległe do zorientowanego ułożenia mikroagregatów,
- c) wzrost zagęszczenia cząstek i ich wzajemnie równoległe ułożenie, lokalne zmniejszenie wilgotności strefy zagęszczonej,
- d) powierzchnie kontaktowe szkielec mineralnego z lodem niemal zlustrowane, idealnie wygładzone.

Mikrostrukturę charakteryzującą się powyższymi cechami nazwał autor soczewkową. Powstaje ona zasadniczo w etapie Ia i Ib, a utrwalona zostaje ostatecznie w II etapie - końcowych zmian mikrostruktury λ u. W λ ach zasięgu strefy mrozowej przebudowy mikrostruktury, jak świadczą o tym wyniki badań (patrz podrozdział 3.5.2), wzrasta z liczbą cykli mrożenia i ustala się przy około $f = 10$ cyklach do kilkunastu grubości cząstek. Poza tą strefą mikrostruktura λ u zbliżona jest prawie do wyjściowej, lub jest częściowo odwracalna i nie nosi trwałych oznak działania wzrastających kryształków lodu. Oczywiście nie jednocześnie i nie w każdym mikroprze-

ilu nastąpi krystalizacja zawartej w nich wody. Również nieliczne z wielu powstałych obok siebie mikrokryształków lodu mogą wzrastać w stopniu umożliwiającym z końcem cyklu zamrażania pełny rozwój mikrosoczewki. Można przypuszczać, że wzrastają te mikrosoczewki lodu, które mają najlepszą sposobność rozwoju kosztem innych ze swego najbliższego otoczenia. Jak wspomniano wcześniej, późniejszy wzrost mikrosoczewki zachodzi w wyniku między innymi odrywania molekuł wody od pakietów mineralnych, bądź ich wyciskania spomiędzy cząstek iłów i wiązania przez sieć krystaliczną lodu. Krystalizacja zakumulowanej tym sposobem wody wywoła, oprócz przekazania naprężeń mechanicznych na szkielet mineralny i efektów termicznych wokół każdej mikrosoczewki lodu, dodatkowo szereg innych zjawisk i procesów. Np. wzrost stężenia soli w pozostałej, nie zamrożonej części roztworu, zmianę odległości między pakietami, redystrybucję wody, zmianę grubości cząstki, zmianę sił międzycząsteczkowych itp. Wzajemne oddziaływania na elementy mikrostruktury łu tych różnych czynników oraz konsekwencji ich działania w pewnym obszarze wokół mikrokryształków lodu nałożą się i z czasem osiągnięta zostanie w układzie równowaga. Ze wzrostem liczby mrożeń pogłębia się stopień nieodwracalnych przeobrażeń, a zakres zmian mikrostruktury łu ustala się przy około 5 do 10 cykli mrożenia.

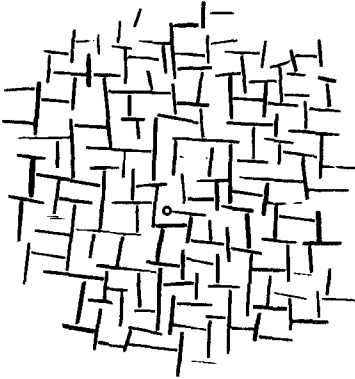
Wystąpienie wspomnianych czynników i ich konsekwencja (np. obniżenie temperatury przechłodzenia i zamrażania wody w łuach, czasu zamrażania) prowadzi do różnej drogi dojścia do stanu równowagi termodynamicznej zamkniętego układu gruntowego, która jest charakterystyczna dla danych warunków zamrażania, tj. liczby cykli, czasu itp. oraz typu mineralogicznego łu. Jak stwierdzono np. czas osiągnięcia stanu równowagi termodynamicznej nowego układu łu - woda - lód maleje z rosnącą liczbą cykli przemrażania.

W celu lepszego zobrazowania w etapie mrożenia procesu transformacji mikrostruktury łów autor przeprowadził weryfikację przebiegu i rozwoju zmian mikrostruktury na płaskim modelu fizycznym zbudowanym z elementów plastikowych dla siedmiu podstawowych typów mikrostruktur ośrodków spoistych, jakie zdefiniowano w literaturze dotyczącej zagadnienia. Modele struktur łów wybrano między innymi z pracy H. van Olphen (1963). Stwierdzono, że niezależnie od typu wyjściowej mikrostruktury układu woda - łu i etapu rozwoju wymuszenia, którego działanie modelowano podobnie do sił pochodzących od wzrastającej objętości mikrokryształka lodu (etap Ia i etap Ib), końcowym efektem transformacji będzie powstanie w strefie przeobrażonej mikrostruktury quasi równoległej nazwanej przez autora soczewkową. Transformację wybranej mikrostruktury modelowego układu sflokulowanego przedstawiono na rysunku 43. Zarejestrowane etapy mogą służyć za ilustrację zmian mikrostruktury ośrodka gruntowego podczas zamrażania w wyniku rozwoju ciśnienia wzrostu mikrokryształka lodu, korespondującą z efektami końcowymi uzyskanymi na zdjęciach mikrostruktur z elektronowego mikroskopu skaningowego (patrz podrozdział 3.5.2) obrazujących mikrostrukturę soczewkową.



(dotyczy rys.43a - f)

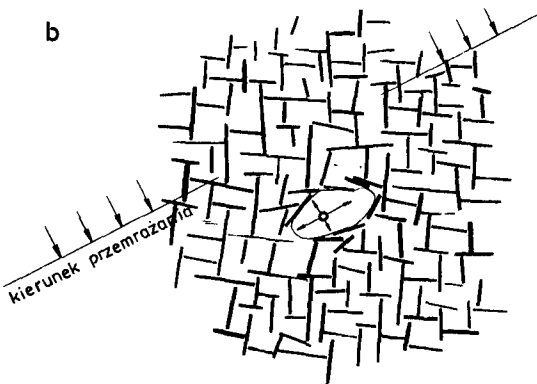
a)



a)

Struktura wyjściowa sflokulowana: kontakty między elementami typu powierzchnia płaska - krawędź, pory izometryczne, elementy pojedyncze, rozdzielone, brak zespołów elementów, duża porowatość układu

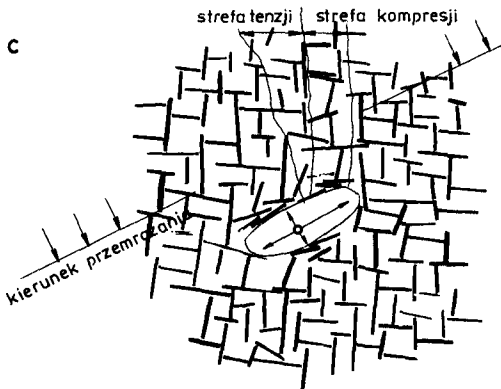
b)



b)

Powstanie centrum krystalizacji i pseudomorficzna krystalizacja wody dająca początek przebudowie ułożenia elementów układu. Następuje zmiana odległości między elementami, obrót i ich przesunięcie oraz zmiana typu wzajemnych kontaktów. Pojawiają się pierwsze kontakty typu powierzchnia płaska - powierzchnia płaska. Wzrasta równoległe zagęszczenie elementów w bezpośredniej strefie przylegającej do mikrosoczewki lodowej

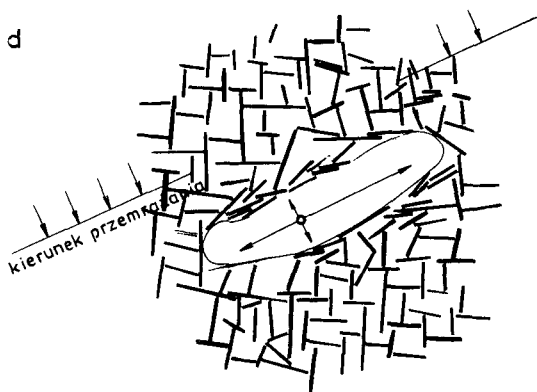
c)



c)

Dalszy rozwój zainicjowanej przebudowy układu elementów: powstawanie mostków przenoszących na dalsze obszary układu parcie od wzrastającego mikrokryształka lodu, zanikanie porów izometrycznych między elementami lub ich transformacja w pory anizometryczne

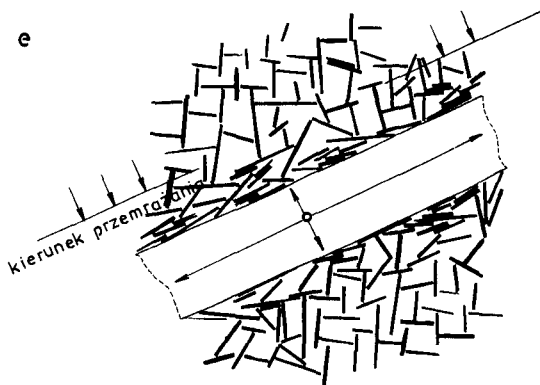
d)



d)

Rozklinowanie elementów układu w wyniku postępującego wzrostu mikrosoczewki lodowej. Zostają zbliżone do siebie poszczególne elementy, powstają zespoły zbudowane z kilku dociskanych elementów (agregacja). Następuje quasi równoległa orientacja względem powierzchni mikrosoczewki lodu i równoległa elementów względem siebie oraz przeobrażenie istniejących porów w anizometryczne i szczelinowe, przy jednoczesnym zmniejszeniu ogólnej porowatości strefy przebudowywanej

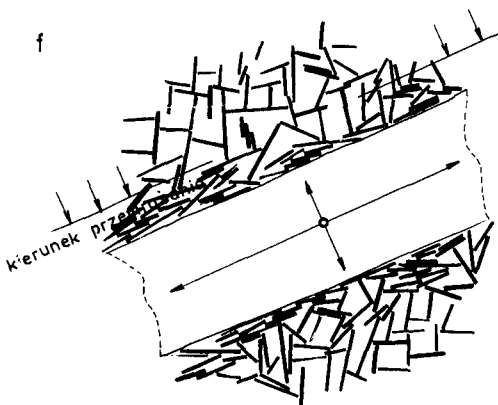
e)



e)

Końcowy etap wzrostu mikrosoczewki lodowej i zmian w ułożeniu oraz orientacji elementów. Utrwalanie przeobrażonego porządku układu, wzrost zagęszczenia, wzrost ilości porów szczelinowych i przewaga kontaktów między elementami typu powierzchnia płaska - - powierzchnia płaska

f)



f)

Zakończony proces wzrostu mikrosoczewki lodu. W strefie przebudowy mikrostruktury układu został utrwalony porządek w ułożeniu poszczególnych elementów. W bezpośredniej strefie oddziaływania wzrastającej mikrosoczewki lodu powstała mikrostruktura soczewkowa, dająca równoległe ułożenie względem powierzchni granicznej lodu oraz wzajemnie między sobą elementów mikrostruktury. Kontakty między elementami głównie typu powierzchnia płaska - powierzchnia płaska, duże zagęszczenie elementów w sąsiedztwie soczewki. Powstały zespoły elementów (agregacja) o wysokim stopniu orientacji: zwraca

uwagę mała porowatość, przeważające pory szczelinowe i ustalony maksymalny zasięg strefy przebudowanej oraz niewielkie zmiany położenia elementów układu w strefie nienaruszonej działaniem wzrastającej mikrosoczewki lodu

Rys.43. Schemat przebudowy mikrostruktury typu „flocculated but dispersed” zgodnie z definicją H. van Olphen (1963), w wyniku rozwoju mikrokryształka lodu w mikrostrukturę soczewkową, wg autora

Dodatkowo należy zauważyć, że nawet modelowany równomierny rozkład sił generowanych przez kryształki lodu w powierzchni granicznej lód-skielet spowoduje powstawanie w ośrodku gruntowym obszarów tensji i kompresji oraz prawdopodobnie lokalnych naprężeń ścinających między elementami na granicy tych obszarów. W rezultacie tych zjawisk wytworzone mogą być miejscowe strefy osłabień (obszar tensji) w układzie gruntowym, dającym mikroszczeliny lub późniejsze powierzchnie rozdziału. Łącznie z nierównomiernym rozkładem ciśnienia wzrostu kryształków lodu tłumaczyć one mogą powstawanie mikropeknięć mrozowych iłu. Mikropeknięcia masywu iłu w obrębie oddziaływania mikrosoczewki lodowej są widoczne wyraźnie na zdjęciach mikroskopowych SEM, np. rysunki 31, 32 i 33. Możliwy ich rozwój w kolejnych cyklach mrożenia i odmrażania prowadzi zapewne do utworzenia makroszczelin (rys. 21 i 22), widocznych po około $f = 5$ przemrożeniach. Dalszy rozwój defektów mrozowych determinuje również wzrastający udział fazy gazowej w cyklicznie mrożonym ile.

W strefach kompresji zaznaczyło się zwiększone zagęszczenie cząstek mineralnych, ściskanych w rezultacie wystąpienia bardzo dużych naprężeń (około 50 MPa). Stąd otrzymana prawie doskonała orientacja mikroagregatów iłu od strony soczewki lodu, które widać na zdjęciach SEM, np. rysunek 28, oraz możliwa ich agregacja. Wspomnianym wcześniej oraz mechanicznym przyczynom przypisywać można dobrą stabilność i powstawanie pod wpływem cyklicznego mrożenia większych mikroagregatów iłu (podrozdziały 3.4.3 i 3.4.4) oraz wzrost grubości cząstki stwierdzony w badaniach sorpcji (podrozdział 3.5.1).

4.2. Efekty i trwałość zmian mikrostruktury

O trwałości efektów i zakresie zmian mikrostruktury iłu decyduje stan osiągniętej po rozmrożeniu równowagi wewnętrznej układu. W odmrożonym ile w danych warunkach termowilgotnościowych siły przyciągania i odpychania, składające się na całkowitą energię oddziaływania między elementami mikrostruktury, są w stanie równowagi, E. T. Stępkowska (1984a).

W cyklicznie mrożonych iłach można przypuszczać, że siłom, które spowodowały zmianę mikrostruktury ośrodka iłowo-wodnego i przesunięcie stanu równowagi, towarzyszyła zmiana sił oddziaływań kontaktowych, tzn. elektrostatycznego przyciągania krawędzi do powierzchni płaskiej, elektrostatycznego przyciągania sieci jonowej, kontaktowego wiązania wartościowości pierwotnej i pobocznej oraz sił oddziaływania dalekiego zasięgu, głównie van der Waalsa - Londona i odpychanie warstw dyfuzyjnych. Jak wiadomo, wszelkim przemieszczeniom elementów w układach rzeczywistych przeciwstawiają się siły tarcia między cząstkami typu M-M, M-W-L, itp., których wpływ na zakres i nieodwracalność powstałych zmian mikrostruktury wydaje się istotny.

Pod wpływem cyklicznego działania mrozu i odmrażania do układu woda-ił przemiennie zostaje dostarczana określona energia zewnętrzna, która wywo-

kuje zmianę stanu równowagi sił wewnętrznych, Z. Strugański (1981).

Osiągnięcie nowego stanu równowagi układu gruntowo-wodnego może być dokonane między innymi przez, E. T. Stępkowska (1984a):

- zmianę grubości cząstki,
- procesy agregacji lub desagregacji,
- rozkład układu na różne fazy mikrostrukturalne.

W wyniku przeprowadzonych badań iłów po cyklicznym mrożeniu oznaczono istotnie wzrost grubości cząstki (podrozdział 3.5.1), stwierdzono procesy agregacji i desagregacji oraz oszacowano zmianę sił oddziaływania dalekiego zasięgu (tab.8). Stwierdzono również obecność mikroagregatów mineralnych nie rozmakających w wodzie, których nie było w nie mrożonym ile (podrozdział 3.4.3). Nie uległy one także rozpadowi pod wpływem wibrowania.

Biorąc pod uwagę otrzymane z przeprowadzonych obliczeń zmiany odległości między cząstkami iłu oraz przyjmując nakładanie się oddziaływań przy dużych odległościach, E. T. Stępkowska (1973), autor przypuszcza, że trwałość struktury po cyklicznym przemrażaniu i odmrażaniu układu dyspersyjnego, jakimi są analizowane układy woda - ił, rozpatrywać można jako wynik nakładania się elektrostatycznej energii odpychania i energii przyciągania van der Waalsa - Londona. Wg teorii DLOV, całkowita energia oddziaływania V_T składa się addytywnie z elektrostatycznej energii odpychania V_R i energii przyciągania van der Waalsa - Londona V_A

$$V_T = V_R + V_A \quad (4)$$

Wyrażając w równaniu (4) energię elektrostatyczną i energię przyciągania za pomocą przybliżonego wzoru, otrzymuje się równanie, które dla cząstek płaskich ma postać, H. Sonntag (1982) :

$$V_T = \frac{64 \cdot n \cdot k \cdot T}{\mathcal{H}} \exp(-\mathcal{H} \cdot d) \left[\frac{\exp\left(\frac{z \cdot e \cdot \psi_\delta}{2 \cdot k \cdot T}\right) - 1}{\exp\left(\frac{z \cdot e \cdot \psi_\delta}{2 \cdot k \cdot T}\right) + 1} \right]^2 + \frac{A}{12 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (5)$$

gdzie:

- n - liczba moli,
- k - stała Boltzmanna ($k = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$),
- T - temperatura w kelwinach,
- \mathcal{H} - odwrotność parametru Debye'a - Hückla,
- d - odległość (nm),
- e - ładunek elementarny ($e = 1,602 \cdot 10^{19} \text{ A} \cdot \text{s}$),
- z - liczba ładunków,
- ψ_δ - wartość potencjału Sterna (mV),
- A - stała Hamakera (J).

Analiza równania (5) ujmującego całkowitą energię z punktu widzenia zasięgu sił międzycząsteczkowych wskazuje, że w związku z wykładniczym zmniejszeniem się sił elektrostatycznych ze wzrostem odległości, przy bardzo dużych i bardzo małych odległościach cząstek, powinny dominować siły przyciągania. W średnim przedziale odległości występuje bariera energetyczna, która hamuje łączenie się cząstek (czyli flokulację), gdy jest większa od energii cieplnej cząstek. Gdy natomiast energia cieplna cząstek jest większa od bariery energetycznej, wówczas zderzenie prowadzi do agregacji cząstek (koagulacji). W wyniku cyklicznego przemrażania i odmrażania siły oddziaływania międzycząsteczkowego zmieniają się w zależności od liczby przemrożeń (np. tab.8), a cząstki zbliżą się na określoną odległość odpowiadającą minimum energii całkowitej. Stąd prawdopodobnie przy wzrastającej odległości między cząstkami po osiągnięciu stanu minimum energii następuje agregacja. W wyniku tych zjawisk prawdopodobnie otrzymano, do około $f = 10$ cykli mrożenia, wzrost zawartości mikroagregatów większych średnic, np. piaskowej w kaolinie z Sedlec. Fakt ten świadczyć może o przesunięciu minimum energetycznego spowodowanego kolejnymi przemrozeniami i odmrozeniami. Być może zostało osiągnięte minimum energii, w którym możliwa jest luźna agregacja mniejszych elementów mikrostruktury układu woda - ił. Dopóki między kontaktującymi się cząstkami występuje warstewka cieczy, w rozpatrywanym przypadku może być to woda przyrównywana do wilgotności higroskopowej (oznaczonej np. wg WSTest, tab.8), cząstki można rozdzielić przez włożenie niewielkiej pracy mechanicznej, np. mieszanie.

Zmniejszająca się do około $f = 10$ cykli mrożenia wilgotność higroskopowa świadczyć może o stopniowym usuwaniu warstewki wody występującej między cząstkami iłów oraz wody międzypakietowej. Potwierdzać ten fakt może również obecność mikroagregatów o mniejszych wymiarach w zakresie frakcji iłowej, których nie obserwowano w nie mrożonych iłach. Mikroagregaty te nie rozpadały się pod wpływem wibrowania, a więc po włożeniu znacznej pracy mechanicznej. Być może nastąpiło nieodwracalne łączenie się pewnych cząstek, wiążące się ze stwierdzonym w badaniach WSTest zmniejszeniem ich powierzchni zewnętrznej. Zostało to zasugerowane również przy omawianiu powyższej mechanicznej grupy czynników transformujących mikrostrukturę przemrażania iłów.

Analiza wspomnianego równania (5), H. Sonntag (1982), wykazuje również, że elektrostatyczna energia odpychania zależna jest od wysokości potencjału. Na różną wysokość potencjału wpływa między innymi zmiana stężenia jonów potencjałotwórczych. Jak wynika z wcześniejszych rozważań, podczas zamrażania wzrasta stężenie jonów w wodzie niezamarzniętej, natomiast po odtażaniu iłu to stężenie jonów maleje. W procesie zamrażania być może zanika bariera energetyczna i bardziej prawdopodobna staje się flokulacja cząstek. Mimo tego, że cząstki mineralne zbliżają się do siebie pod działaniem sił pochodzących od wzrastających kryształków lodu. Przy odmrażaniu następuje zjawisko odwrotne, tzn. zmniejszenie stężenia, bowiem nie wszystkie molekuly wody z roztopionych kryształków lodu są wchłaniane do przestrzeni międzypakietowej lub trwale związane z powierzchnią minerałów.

W tej relacji malejące stężenie jonów w wodzie ułatwiać może rozwój procesu agregacji cząstek ilowych.

Otrzymane po $f = 10$ cyklach mrożenia odmienne efekty, tzn. ubytek zawartości cząstek mineralnych określonych średnic, mimo postępujących dalej zjawisk, wskazuje na desagregację utworzonych wcześniej agregatów i przewagę sił odpychania w wyniku zmniejszenia odległości między cząstkami. Nie jest wykluczone, jak sądzi autor, że powyżej około $f = 10$ cykli mrożenia może występować w sposób przemienny, w granicach pewnego przedziału wielkości cząstek, desagregacja utworzonych agregatów maksymalnych wymiarów, a później agregacja powstałych z ich rozpadu najmniejszych elementów mikrostruktury układu ilowo-wodnego (mikroagregatów). Procesy te przebiegać będą różnie w poszczególnych frakcjach danego łu, np. w bentonicie stwierdzono je wyraźnie dla frakcji ilowej i pyłowej a dla kaolinu z Sedlec we frakcji piaskowej.

Zasygnalizowane problemy związane są być może z oddziaływaniem w minimum wewnętrznym, gdy cząstki mogą pokonywać barierę energetyczną. Dodatkowo w łąch przemrażanych występują oddziaływania między dipolami, wiązania wodorowe, odpychanie atomowe itd. Prowadzić to może do nieodwracalnego łączenia się części cząstek mineralnych w kolejnych cyklach mrożenia i odmrażania. Autor pominął te zagadnienia jako będące poza zakresem omawianych problemów. Zagadnienia te wymagać będą dalszych specjalnych badań poznawczych, bowiem wpływ wymienionych czynników na trwałość zmian mikrostruktury łąów cyklicznie mrożonych wydaje się istotny, tak jak i ich związek z histerezą niektórych właściwości łąów, między innymi wody niezamarzniętej podczas mrożenia i odmrażania łąów oraz związek z właściwościami termicznymi szkieletu mineralnego.

Generalnie można stwierdzić, że wykazana zgodność wyników i omówienie otrzymanych efektów mrozowych transformacji mikrostruktury modelowych łąów i w znacznym stopniu łąu plioceńskiego z Bydgoszczy, w przypadku innych gruntów spoistych, szczególnie charakteryzujących się wysoką zawartością frakcji piaskowej i pyłowej, będzie wymagać korekty. Celowe więc wydaje się przeprowadzenie w przyszłości porównań po wykonaniu doświadczeń z innymi gruntami.

Wobec braku tego typu ustaleń dla gruntów spoistych można uznać, że przyjęta w pracy droga poszukiwań jest uzasadnioną etapową próbą rozwiązania zagadnień mrozowych transformacji mikrostruktury łąów.

5. WPŁYW MROZOWYCH ZMIAN MIKROSTRUKTURY NA WYBRANE WŁASNOŚCI FIZYCZNO-MECHANICZNE IŁÓW

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że przemiany fazowe wody gruntowej w procesie cyklicznego zamrażania i odmrażania przebudowują wyjściową strukturę i mikrostrukturę iłów. Struktura i mikrostruktura są głównymi czynnikami, które determinują własności fizyczno-mechaniczne spoiстого podłoża budowlanego. Dlatego ważne dla inżyniera jest nie tylko stwierdzenie zmian mikrostruktury iłu pod wpływem mrożenia, ale również określenie własności tych iłów, których mikrostruktura ulegała mrozowej transformacji. Badanie wpływu na właściwości fizyczno-mechaniczne mrozowych zmian mikrostruktury wykonano dla iłów monomineralnych i plioceńskiego. Badano między innymi granice konsystencji i wytrzymałość na ścinanie. Wyniki badań innych cech np. wodoprzepuszczalności, ściśliwości przedstawiono szczegółowo w oddzielnych publikacjach autora. Końcowe wyniki wybranych badań przedstawiono skrótowo w podrozdziale 5.3 (Geotechniczne aspekty mrozowych zmian mikrostruktury).

5.1. Granice konsystencji

Określenie stanu gruntów spoiстых wymaga ustalenia wartości granic konsystencji. Oznaczanie granic wykonano metodami stosowanymi w mechanice gruntów wg normy PN-75/B-04481. W tabelicy 9 i na rysunkach 44 + 48 zestawiono wyniki badań granicy płynności w_L , granicy plastyczności w_p , granicy skurczalności w_g mrożonych cyklicznie iłów.

Badania granicy skurczalności iłu plioceńskiego wykonano na próbkach naturalnych i homogenizowanych, pozostałe oznaczenia wykonano na odpowiednich pastach gruntów.

Istotność wpływu liczby cykli mrożenia na wartości granicy płynności, plastyczności i skurczalności zweryfikowano metodami statystycznymi, W. Volk (1973), D. Bobrowski (1980).

Praktycznie w bentonicie MAD stwierdzono statystycznie wpływ procesu mrożenia i odmrażania na wartość granicy płynności, na poziomie istotności $\alpha = 0,01$. W tabelicy 10 zestawiono wyniki końcowe analizy statystycznej (wartości statystyki t_{obl} i $t_{0,01}$).

Granica płynności bentonitu MAD zmniejszyła się po pierwszym mrożeniu do wartości $w_L = 258,3$ % w porównaniu z nie mrożonym iłem, gdzie $w_L = 294,5$ % (przedział zmienności $R = 36,2$ %). W następnych mrożeniach, dla $f > 1$, wartości granicy płynności nie uległy większym zmianom w porównaniu do $f = 1$ (w granicach błędu), przyjmując wartość bliską wartości granicy płynności po pierwszym mrożeniu.

Granice konsystencji cyklicznie mrożonych iłów (%)

Rodzaj iłu	Liczba cykli f	Granica płynności w_L	Granica plastyczności w_p	Granica skurczalności w_s
Kaolin z Sedlec (KS)	0	71,1 ± 2,1	33,9 ± 0,3	29,0 ± 0,3
	1	71,1 ± 2,0	31,7 ± 0,6	30,3 ± 0,8
	5	70,8 ± 1,6	34,1 ± 0,5	28,6 ± 0,4
	10	70,3 ± 0,9	33,7 ± 0,3	29,8 ± 0,2
	20	71,5 ± 1,5	33,5 ± 0,8	30,6 ± 0,5
Bentonit MAD (BW)	0	294,5 ± 5,2	27,0 ± 0,3	17,4 ± 0,5
	1	258,3 ± 1,5	29,3 ± 0,6	18,2 ± 0,4
	5	255,5 ± 2,3	27,9 ± 0,6	17,5 ± 0,4
	10	257,4 ± 1,4	28,1 ± 0,4	18,7 ± 0,5
	20	255,8 ± 1,3	27,5 ± 0,4	19,1 ± 0,7
Ił pliczeński (IN)	0	70,4 ± 0,9	17,5 ± 0,5	15,5 ± 1,0*
	1	70,1 ± 0,8	17,7 ± 0,5	16,2 ± 0,7*
	5	70,4 ± 0,9	17,4 ± 0,4	17,0 ± 0,6*
	10	70,2 ± 1,0	17,8 ± 0,4	16,9 ± 0,9*
	20	69,9 ± 0,8	17,3 ± 0,5	16,7 ± 0,9*

* próba naturalna

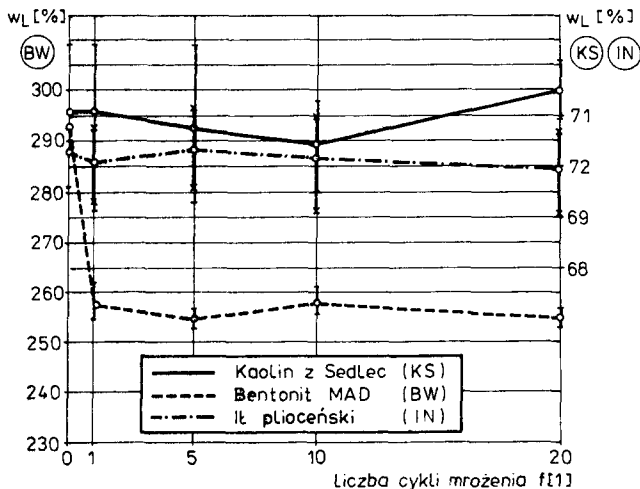
Tablica 10

Wartość statystyki t dla granicy płynności cyklicznie mrożonego bentonitu MAD

Rodzaj iłu	Wartość statystyki t		
	porównanie w_L dla f =	f = 0 z f = 1	f = 1 z f = 10
Bentonit MAD (BW)	t_{obl}	17,70	1,16
	$t_{0,01}$	2,89	2,68

Pierwsze zamrożenie przerobionego bentonitu MAD wywołuje istotną i praktycznie niekorzystną zmianę wartości granicy płynności. Zmniejszenie wartości granicy płynności po przemrożeniu świadczy o pojawieniu się wody wolnej. Jest ona uwalniana z warstw dyfuzyjnych cząstek montmorillonitu oraz z wytopionych mikrosoczewek lodu. W tej postaci stanowi rodzaj błonki wodnej otaczającej utworzone większe mikroagregaty iłu. Powstał z tych przyczyn lokalny wzrost wilgotności, który powodować może zwiększenie odległości między nowo utworzonymi cząstkami tak, że będą przeważać siły odpychania nad siłami przyciągania, E. T. Stępkowska (1984b). Ułatwi to wza-

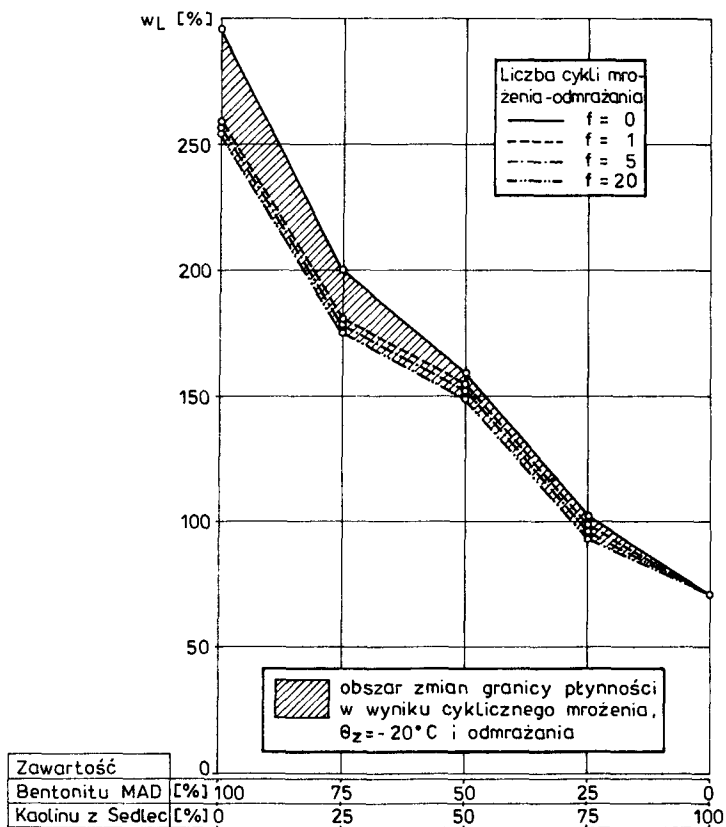
jemny poślizg między wydzielonymi przez działanie mrozu mikroagregatami iłu w czasie badań w aparacie Casagrandego. Wzajemny poślizg również będzie lepszy, gdyż powierzchnie graniczne mikroagregatów iłu charakteryzują się zorientowanym ułożeniem cząstek ilowych (mikrostruktura soczewkowa). W cyklach mrożenia $1 < f \leq 5$ ustala się prawdopodobnie na nowym poziomie stan równowagi, bądź też równowaga jest odwracalna, między wodą uwalnianą podczas mrożenia oraz wiązaną przez szkielet mineralny w czasie i w pewnym okresie po odmrożeniu (etapy VI i VII).



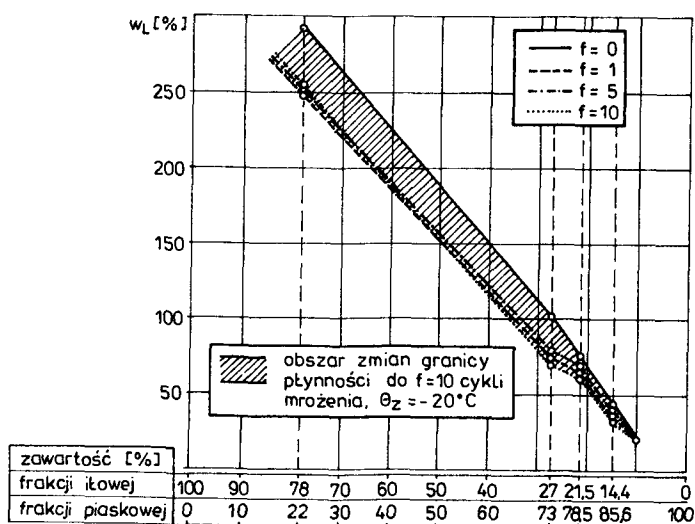
Rys.44. Granica płynności w_L cyklicznie mrożonych iłów ($\theta_z = -20^\circ\text{C}$)

Jak ustalono, mikrostruktura iłu bentonitowego najbardziej zostaje przeobrażona w pierwszym cyklu, a utrwała się w kilku początkowych przemrożeń. Nie stwierdzenie zmiany wartości granicy płynności powyżej $f > 5$ cykli mrożenia wynikać może z niszczenia w trakcie przygotowywania past do badań, późniejszych efektów zmian mikrostruktury soczewkowej oraz gąbczastej i komórkowej oraz rozrywania w procesie pęcznienia powstałych połączeń elastycznych między utworzonymi mikroagregatami montmorillonitu o różnych wymiarach.

Brak istotnego wpływu mrożenia i odmrażania na wartość granicy płynności iłu płoceńskiego i kaolinu z Sedlec wiąże się w dużym stopniu ze składem mineralnym (stosunkiem montmorillonitu do kaolinu oraz zawartością frakcji piaskowej w ile IN, a w KS zawartością kaolinitu). Kaolin z Sedlec nie wykazał praktycznie istotnych zmian wartości granicy konsystencji, co wynika głównie z wysokiej zawartości kaolinitu. W ile płoceńskim natomiast zawartość montmorillonitu nie przekracza 25%. Frakcji piaskowej jest blisko połowa ($f_p = 48,8\%$). Brak zmian wartości granicy płynności po cyklicznym mrożeniu i odmrażaniu w zależności od udziału w gruncie kaolinitu i frakcji piaskowej potwierdzono w badaniach mieszanek bentonit MAD (BW) - kaolin z Sedlec (KS) oraz bentonit MAD (BW) - piasek kwarcowy (rys.45 i 46).



Rys.45. Granice płynności w_L mrożonych cyklicznie mieszanek: bentonit MAD - kaolin z Sedlec ($\theta_z = -20^\circ\text{C}$)



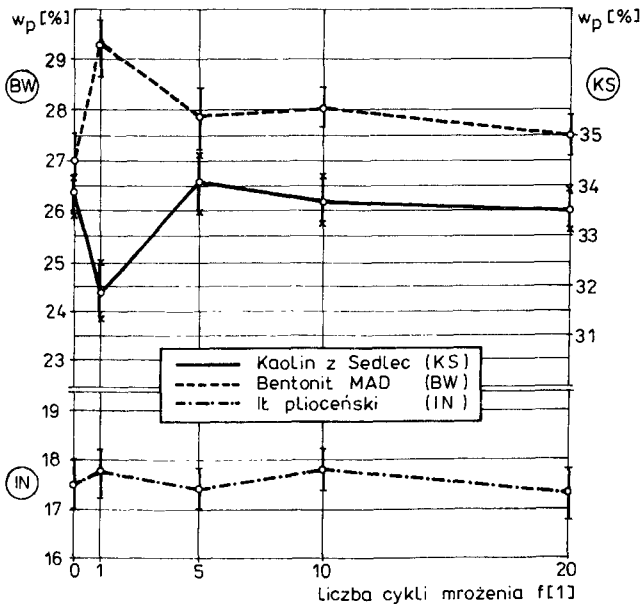
Rys.46. Granice płynności w_L mrożonych cyklicznie mieszanek: bentonit MAD - piasek kwarcowy ($\theta_z = -20^\circ\text{C}$)

W przygotowanej mieszance iłów zawierającej do 50 % bentonitu MAD i ponad 50 % kaolinu z Sedlec (rys.45) nie stwierdzono zmian wartości granicy płynności pod wpływem mrożenia do $f = 20$ cykli w temperaturze $\theta_z = -20^\circ\text{C}$.

Z kolei przy stopniowym dodawaniu do bentonitu MAD max. do około 70 % piasku kwarcowego, frakcji 0,10 mm do 0,30 mm (rys.46), nie otrzymano również zmiany wartości granicy płynności w procesie cyklicznego mrożenia, do $f = 20$ cykli.

Obniżenie dla czystego składnika, tj. bentonitu MAD, wartości granicy płynności pod wpływem zamrażania i odmrażania, średnio o $\frac{\Delta w_L}{w_L} = 12\%$ wskazuje na praktycznie istotne pogorszenie stanu, w warunkach braku zmian średniej wilgotności iłu (układ gruntowo-wodny zamknięty, $\Delta w = 0$). Nastąpiło ono głównie w wyniku mrozowych transformacji mikrostruktury. Stopień plastyczności bowiem dla nie mrożonego bentonitu MAD wynosił $I_L = 0,53$, podczas gdy bez zmian wilgotności po $f = 5$ cyklach otrzymano $I_L = 0,62$.

Zmiany wartości granicy plastyczności iłów w wyniku zamrażania i odmrażania z inżynierskiego punktu widzenia (tab.9, rys.47) nie są duże. W gruntach naturalnych, które budowane są ze znaczną domieszką frakcji piaskowej i prawie nigdy nie są czystymi montmorillonitami, nie należy przewidywać większych i praktycznie znaczących zmian wartości granicy plastyczności, M. K. Kumor (1983b).



Rys.47. Granica plastyczności w_L cyklicznie mrożonych iłów ($\theta_z = -20^\circ\text{C}$)

Brak istotnych zmian wartości granicy płynności i granicy plastyczności w wyniku mrożenia i odmrażania zdeterminowany jest wieloma czynnikami; np. niszczeniem pierwotnej struktury, czasem badania, wilgotnością wyj-

ściową, składem mineralnym itp. Na podobne problemy badania granic konsystencji zwracano wielokrotnie uwagę w pracach, między innymi: Z. Młynarek (1975), A. Piaskowski (1981), M. Szumski (1984).

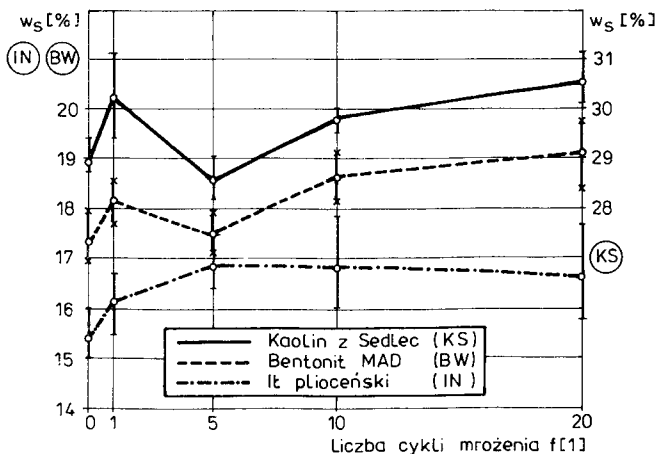
Analiza statystyczna i zmiany wartości granicy skurczalności potwierdzają transformacje mikrostruktury iłów pod wpływem przemrażania i odmrażania (końcowe rezultaty analizy przedstawiono w tablicy 11).

Tablica 11

Wartość statystyki t dla granicy skurczalności mrożonych cyklicznie iłów

Rodzaj iłu	Wartość statystyki t			
	porównanie w_s dla:	$f = 0$ z $f = 1$	$f = 1$ z $f = 5$	$f = 5$ z $f = 10$
Kaolin z Sedlec (KS)	t_{obl}	4,33	5,03	8,26
	$t_{0,01}$	2,68		
Bentonit MAD (BW)	t_{obl}	3,30	3,27	5,25
	$t_{0,01}$	2,68		
Ił płioceński (IN)	t_{obl}	2,15	2,14	0,73
	$t_{0,05/0,01}$	1,77 / 2,65	1,77 / 2,65	1,78 / 2,68

Wartość granicy skurczalności badanych iłów zmienia się wraz z ogólną tendencją wzrostu w kolejnych cyklach mrożenia i odmrażania (tab.9 i rys.48).



Rys.48. Granica skurczalności w_s cyklicznie mrożonych iłów ($\theta_z = -20^\circ\text{C}$)

Otrzymane wyniki świadczą o zaistniałej zmianie orientacji cząstek i niszczeniu wyjściowych kontaktów między mikroagregatami pod wpływem

cyklicznego mrożenia i odmrażania, M. K. Kumor (1983b). Zostały one potwierdzone badaniami WSTest i przy pomocy elektronowego mikroskopu skaningowego. Wahania wartości granicy skurczalności do $f = 5$ cykli zamrażania wskazywać mogą na dokonujące się stopniowo i utrwalone nie od razu efekty porządkowania mikrostruktury. Wzrost wartości granicy skurczalności do $f = 5$ cykli i jej niewielkie zmiany powyżej $f = 5$ cykli mrożenia wiąże się prawdopodobnie z dokonanym już utwaleniem mikrostruktury soczewkowej, szczególnie w tych strefach gruntu, które przylegają bezpośrednio do soczewki lodu. Mikrostruktura soczewkowa daje najmniejszą zdolność układu woda - ił do zmiany objętości podczas suszenia. Jest mikrostrukturą upakowaną o stosunkowo dużych wymiarach cząstki (domeny), mniejszej ich wzajemnej odległości (silniejsze wiązanie wody warstw dyfuzyjnych) oraz utwalonymi, stabilnymi i przeważającymi w masie gruntowej kontaktami typu: powierzchnia płaska - powierzchnia płaska.

W ile plioceńskim wartość granicy skurczalności nie ulega istotnym zmianom, głównie z powodu wysokiej zawartości frakcji piaskowej, relatywnie niskiej zawartości montmorillonitu i naturalnej struktury brekcjowej, związanej z glacialną i postglacialną historią geologiczną. Znaczenie w tym względzie może mieć również zawartość wtrąceń węglanu wapnia w postaci wykryształizowanych konkrecji, Z. Młynarek (1969), lub soli wytrąconych z roztworu porowego podczas cyklicznego mrożenia. Autor badając mieszanke bentonitu MAD z piaskiem kwarcowym stwierdził po przeliczeniu, że średnio powyżej $\sim 73\%$ zawartości piaskowej nie następuje obniżenie wartości granicy skurczalności do $f = 5$ cykli mrożenia. Natomiast dla $\sim 80\%$ i większej zawartości piasku obniżenie wartości granicy skurczalności nie zachodziło w ogóle, nawet w dalszych cyklach mrożenia i odmrażania.

Na podstawie badania granic konsystencji należy stwierdzić, że transformacja mikrostruktury iłów w wyniku mrożenia i odmrażania może mieć istotne, z inżynierskiego punktu widzenia, znaczenie w przypadku analizowania zmian granicy płynności iłów o wysokiej (ponad 50%) zawartości bentonitu MAD lub jego odpowiedników. Stan bentonitu MAD pod wpływem cyklicznego, szczególnie pierwszego mrożenia pogarsza się w warunkach braku przyrostu wilgotności ($\Delta w = 0$). Negatywne efekty mrożenia iłów o typie montmorillonitowym, np. wzrost ich stopnia plastyczności, zanikać mogą w rzeczywistości wraz ze wzrostem zawartości frakcji piaskowej lub przy zwiększonym udziale kaolinitu. W naturalnych iłach budowanych z mieszanek polimineralnych i zawierających dodatkowo frakcję piaskową, praktycznie nie należy spodziewać się znaczących zmian granic konsystencji. Można sądzić, że efekty zmian mikrostruktury są najprawdopodobniej likwidowane w czasie przygotowywania i badania granic konsystencji iłów zgodnie z obowiązującymi aktualnie metodami.

5.2. Wytrzymałość na ścinanie

Badanie wytrzymałości na ścinanie wykonano w aparacie bezpośredniego ścinania typu AB-2a (prod. ZAN UJ Kraków). Grunty do badania wytrzymałości zamrażano przy postępującym kierunku przemrażania od góry w dół i bez możliwości zmian średniej wilgotności ($\Delta w = 0$). Płaszczyzna ścicia orientowana była równoległe do frontu przemrażania i objęła głównie strefę zmniejszonej wilgotności (rys.1, 12, 13). Prędkość przesuwu skrzynki aparatu wynosiła $v = 0,11$ mm/min. Wyniki badania wytrzymałości cyklicznie przemrażanych iłów zestawiono w tablicy 12 oraz zilustrowano na rysunkach 49, 50, 51, 52, 53 i 54.

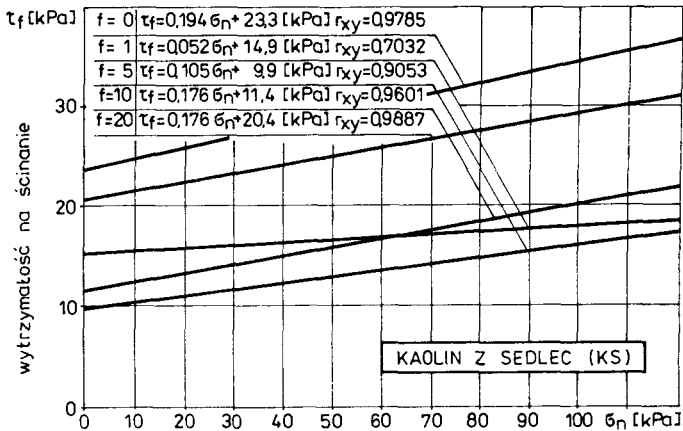
Tablica 12

Parametry wytrzymałości na ścinanie, wytrzymałość dla wybranego σ_n i wilgotność iłów po cyklicznym mrożeniu i odmrażaniu

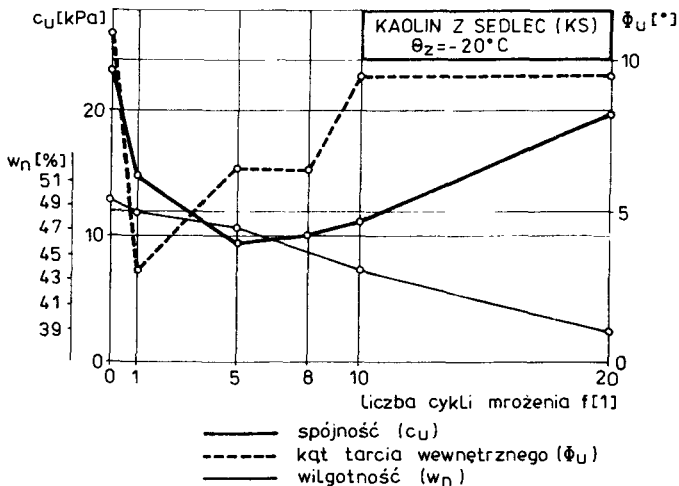
Materiał badawczy	Parametr	Liczba cykli f				
		0	1	5	10	20
Kaolin z Sedlec (KS)	spójność c_u (kPa)	23,3	14,9	9,9	11,4	20,4
	kąt tarcia wewnętrzznego ϕ_u (°)	11°4'	2°54'	6°06'	9°46'	9°44'
	wytrzymałość na ścinanie τ_f (kPa) przy $\sigma_n = 100$ kPa	38,7	19,4	18,1	20,5	21,5
	wilgotność w_o (%)	49,5±1,8	48,7±2,4	47,8±2,2	44,1±2,1	39,0±1,9
Bentonit MAD (BW)	spójność c_u (kPa)	9,3	5,6	7,7	5,7	2,2
	kąt tarcia wewnętrzznego ϕ_u (°)	3°47'	2°46'	1°4'	1°4'	3°35'
	wytrzymałość na ścinanie τ_f (kPa) przy $\sigma_n = 50$ kPa	13,4	6,5	7,8	5,8	4,3
	wilgotność w_o (%)	169±2,6	165±7,8	167±7,5	163±8,1	161±7,8
Ił plicieński (IN)	spójność c_u (kPa)	79,8	106,7	93,4	85,1	69,6
	kąt tarcia wewnętrzznego ϕ_u (°)	16°24'	8°	8°42'	9°20'	12°52'
	wytrzymałość na ścinanie τ_f (kPa) przy $\sigma_n = 125$ kPa	110,6	121,7	107,9	108,1	96,8
	wilgotność w_o (%)	20,6±0,6	20,9±0,3	20,5±0,5	20,7±0,5	20,5±0,4

Niektóre z omawianych rezultatów prezentowano w oddzielnych pracach lub referatach przedstawionych na konferencjach.

Przedstawione dane wskazują na istotny wpływ procesu cyklicznego mrożenia i odmrażania na wytrzymałość iłów. W wyniku działania tych procesów nastąpił spadek wytrzymałości na ścinanie monomineralnych iłów i w pewnym zakresie iłu plicieńskiego w porównaniu do wytrzymałości próbek niemrożonych.



Rys.49. Wytrzymałość na ścinanie cyklicznie mrożonego kaolinu z Sedlec ($\theta_z = -20^\circ\text{C}$)



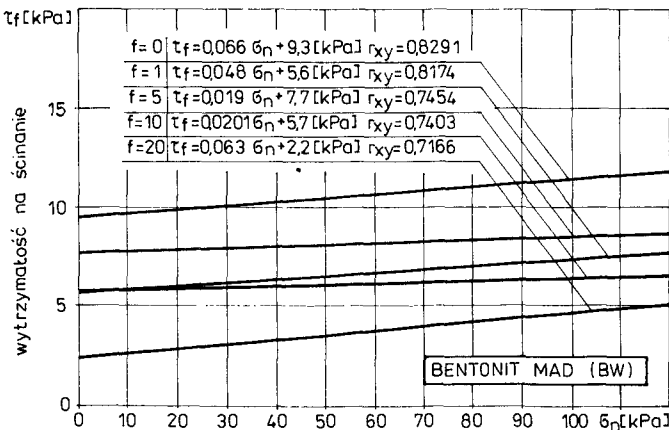
Rys.50. Zmiana kąta tarcia wewnętrznego ϕ_u i spójności c_u kaolinu z Sedlec w zależności od liczby cykli mrożenia (strefa środkowa, próba nr 2, wg rys.1)

Obniżenie wytrzymałości monomineralnych past mrożonych po $f = 1$ cyklu i po $f = 20$ cyklach, w porównaniu do nie mrożonego ($f = 0$), jak wykazała analiza jest statystycznie istotne na wyliczonym poziomie istotności α , np. dla $f = 1$: $\alpha = 0,01$ w kaolinie z Sedlec i $\alpha = 0,05$ w bentonicie MAD; dla $f = 20$ cykli mrożenia: $\alpha = 0,01$ dla kaolinu z Sedlec i $\alpha = 0,01$ dla bentonitu MAD.

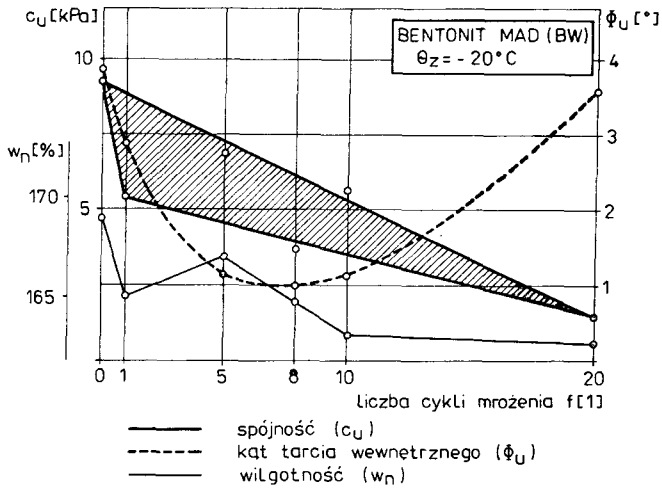
Największe obniżenie wytrzymałości τ_f ilów monomineralnych stwierdzono po pierwszym cyklu zamrażania - odmrażania, np. w kaolinie w Sedlec spadek τ_f wynosi blisko 50 % przy $\sigma_n = 100$ kPa, podobnie jak w bentonicie MAD dla np. $\sigma_n = 50$ kPa (tab.12).

W następnych cyklach w kaolinie z Sedlec wytrzymałość nieznacznie wzrasta w stosunku do otrzymanej dla wcześniejszych cykli mrożenia. W bentonicie MAD natomiast zaobserwować można stałą tendencję obniżania wytrzymałości ze wzrostem cykli w całym obszarze ich oznaczoności. Obniżenie wytrzymałości na ścinanie przemrożonych iłów monomineralnych charakteryzować mogą otrzymane zmiany parametrów ścinania c_u i ϕ_u . Podobnie bowiem jak i wytrzymałość kaolinu z Sedlec i bentonitu MAD, również wartości liczbowe parametrów ścinania są zawsze mniejsze po przemrożeniu, niż zbadane w nie mrożonych iłach oraz zależą od kolejnego cyklu mrożenia i odmrężania. W kaolinie z Sedlec np. spójność (rys.50) maleje maksymalnie po $f = 5$ cyklu mrożenia o blisko 50 %. W kolejnych badanych cyklach, tj. dla $f = 10$ i 20 wzrasta do wartości wynoszącej około 55 % spójności nie mrożonego iłu ($f = 0$). Podobne dane uzyskano dla kąta tarcia wewnętrznego ϕ_u (rys.50), tzn. najniższą wartość ($\phi_u \approx 3^\circ$) i największy spadek wartości liczbowej (o 72 %) otrzymano po pierwszym cyklu mrożenia. Następnie kąt ϕ_u wzrasta, po $f = 10$ i 20 cyklach, do wartości $\phi_u \approx 10^\circ$, tj. wartości około 10 % niższej w porównaniu z niemrożonym iłem.

W bentonicie MAD (rys.51) również w pierwszych kilku cyklach spójność obniża się najwyraźniej. Maksymalny względny spadek spójności $\Delta c_u = 33\%$ odnotowano podczas pierwszego cyklu. W kolejnych, do $f = 10$ cykli, wartość liczbową spójności nie ulega praktycznie dużym zmianom (w granicach 1 kPa). Dopiero po $f = 20$ cyklach wystąpiło blisko 60 % obniżenie spójności do wartości $c_u \approx 2$ kPa. Kąt tarcia wewnętrznego ϕ_u bentonitu MAD (rys.52) ze wzrostem liczby mrożenia charakteryzuje się podobną jak w kaolinie z Sedlec zmiennością. Wartość kąta ϕ_u spada do $f = 10$ cykli mrożenia średnio około 75 % do wartości liczbowej $\phi_u \approx 1^\circ$. Po $f = 20$ cyklach otrzymano wzrost do $\phi_u \approx 3^\circ$, jednakże wartość ta jest niższa niż w nie mrożonym iłu.



Rys.51. Wytrzymałość na ścinanie cyklicznie mrożonego bentonitu MAD (BW)
($\theta_z = -20^\circ\text{C}$)



Rys.52. Zmiana kąta tarcia wewnętrznego ϕ_u i spójności c_u bentonitu MAD w zależności od liczby cykli mrożenia (strefa środkowa, próba nr 3, wg rys.1)

Przedstawione zmiany parametrów wytrzymałości na ścinanie monomineralnych łąw wiążą się z wykazanymi wcześniej mrozowymi transformacjami struktury i mikrostruktury.

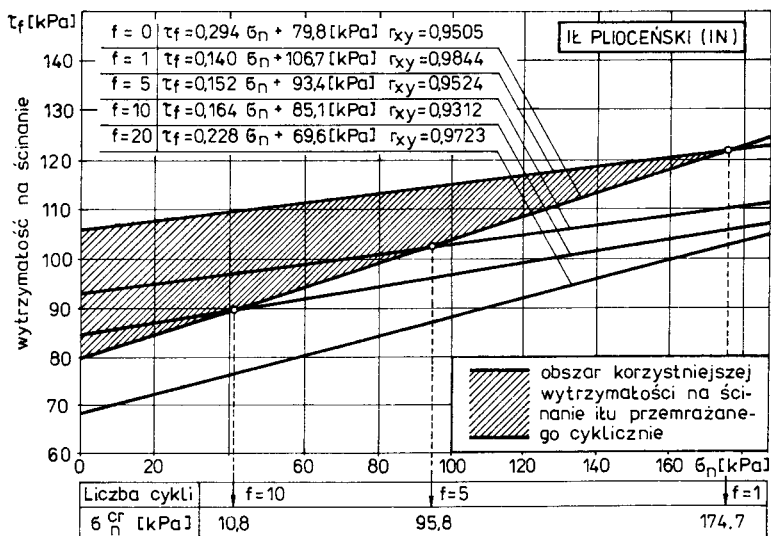
Transformacja wyjściowej mikrostruktury łąw w mikrostrukturę soczewkową, która jest dokonywana podczas pierwszego i utrwalana w następnych cyklach mrożenia, daje w efekcie oprócz redystrybucji wody w próbce również zmiany typów kontaktów i wymiarów mikroagregatów oraz sprzyja powstawaniu w gruncie uprzywilejowanych powierzchni ścinania. Szczególnie dotyczyć to może powierzchni granicznych szkielet grunty - lód, które wygładzone przez lód (rys.28) są równoległe do powierzchni ścinania. Stąd mogą one stanowić najszlubszą i najbardziej prawdopodobną powierzchnię poślizgu. Stwierdzony dla wyższych cykli mrożenia wzrost spójności wiązać się może nie tylko ze względnym obniżeniem wilgotności strefy ścinanej lecz z działającym obciążeniem wstępnym oraz powstałą i dobrze utrwaloną (również w wyniku obciążenia) mikrostrukturą soczewkową. Pod zewnętrznym obciążeniem poprzedzającym ścinanie, w próbce nastąpiło niewątpliwie zasklepienie mikroporów pozostałych po wytopionych kryształkach lodu i częściowe wyciskanie z nich wody. Mogły więc odbudowywać się siły spójności między dociskanymi gładkimi powierzchniami granicznymi agregatów mineralnych. Odbudowie sprzyja także wzajemnie prawie równoległe ułożenie mikroagregatów (rys.28), o kontaktach między cząstkami łąu typu powierzchnia płaska - powierzchnia płaska. Można spodziewać się, że wzrost wartości spójności podczas badań otrzymano w przypadkach, gdy powierzchnia ścinania przebiegała w przebudowanych strefach lub równoległe do uprzywilejowanego kierunku ułożenia cząstek łąu w obrębie utrwalonej mikrostruktury soczewkowej.

Prawdopodobnie w wielu przypadkach zniszczenie nastąpiło w obszarze iłu poza strefą o mikrostrukturze soczewkowej. Stąd też, szczególnie w początkowych cyklach mrożenia, kiedy mikrostruktura soczewkowa jest rozbudowana w niewielkim zakresie i nie do końca utrwalona, otrzymujemy wypadkowy spadek spójności. Również może mieć znaczenie w tym przypadku woda powstała z wytopionych mikrosoczewek lodu, zwłaszcza zatrzymana w zamkniętych porach iłu, oraz zrywanie pierwotnych wiązań i połączeń ilastych między agregatami. Wydaje się to szczególnie istotne w pierwszych cyklach mrożenia, kiedy zachodzące zmiany mikrostruktury są największe, lecz o stosunkowo niewielkim przestrzennym zasięgu i słabiej utrwalonych wiązaniach.

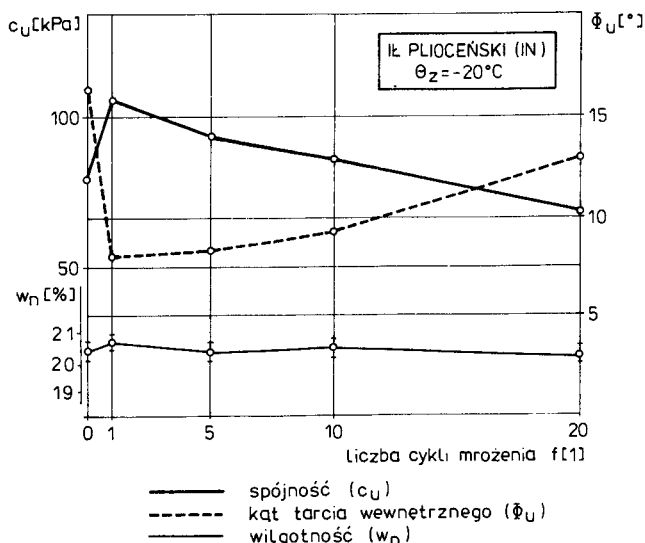
Zakumulowana woda w zamkniętych porach iłu ułatwia prawdopodobnie poślizg ścinanych stref gruntu względem siebie po wygładzonych i bardziej nawilgoconych powierzchniach, dając w efekcie mniejszą spójność, a także obniżenie wypadkowej wytrzymałości na ścinanie. Nie bez znaczenia w kształtowaniu wytrzymałości jest stopień rozwoju porów, tj. pory międzyagregatowe, ich drożność i wielkość, kształt oraz przebieg, zależne, jak wykazano, od liczby cykli mrożenia i odmrażania. Spadek, a następnie po kilku cyklach mrożenia wzrost wartości kąta tarcia wewnętrznego iłów KS i BW należy wiązać początkowo z możliwym niszczeniem i zmianą istniejących kontaktów między cząstkami na nowe typu: powierzchnia płaska - powierzchnia płaska i M-W, lokalnym wzrostem porowatości, a w wyższych cyklach udziału fazy gazowej i trwalszych wiązaniach kontaktowych.

Pojawienie się wody uwolnionej stanowiącej często rodzaj smaru na kontaktach między mikroagregatami może wpływać, szczególnie w początkowych cyklach, na zmniejszenie tarcia i obniżenie wartości kąta ϕ_u . Ważnym czynnikiem późniejszego wzrostu wartości kąta tarcia wewnętrznego może być inicjowana w iłach, podczas przemennego mrożenia i odmrażania, agregacja cząstek mineralnych odpowiadających wymiarom frakcji iłowej (patrz tab.6). Wynikiem mrozowej migracji wody ze strefy centralnej próbek oraz procesu agregacji jest powstawanie stosunkowo trwałych agregatów mineralnych (patrz podrozdział 3.4.3: Próba rozmakania w wodzie) oraz stopniowy wzrost grubości cząstki (patrz podrozdział 3.5.1: Test sorpcyjny - WSTest), które mogą istotnie wpływać na przyrost wartości kąta tarcia wewnętrznego przemrożonych cyklicznie iłów.

Nieco odmienne wyniki zmian parametrów wytrzymałościowych uzyskano przy ścinaniu iłu plicieńskiego z Bydgoszczy. W naturalnym iłu otrzymano po pierwszym przemrożeniu wzrost wartości spójności i jednocześnie spadek kąta tarcia wewnętrznego. Ze wzrostem liczby cykli mrożenia powyżej $f > 1$ spójność maleje, a wartość kąta tarcia wewnętrznego rośnie. Taki charakter zmian wartości parametrów c_u i ϕ_u po pierwszych kilku cyklach daje niewielki obszar korzystniejszej wytrzymałości na ścinanie przemrażanego iłu w porównaniu do nie mrożonego (rys.53, 54, tab.12). Podobne jakościowo zjawisko stwierdzono dla innej serii badań iłu plicieńskiego, M. K. Kumor (1985d), pobranego w tej samej odkrywce, ale nieco głębiej. Zjawisko to nie zostało potwierdzone w gruntach homogenizowanych w świetle uzyskanych wyników dla past iłów KS i BW oraz ich mieszanek (rys.55, 56).

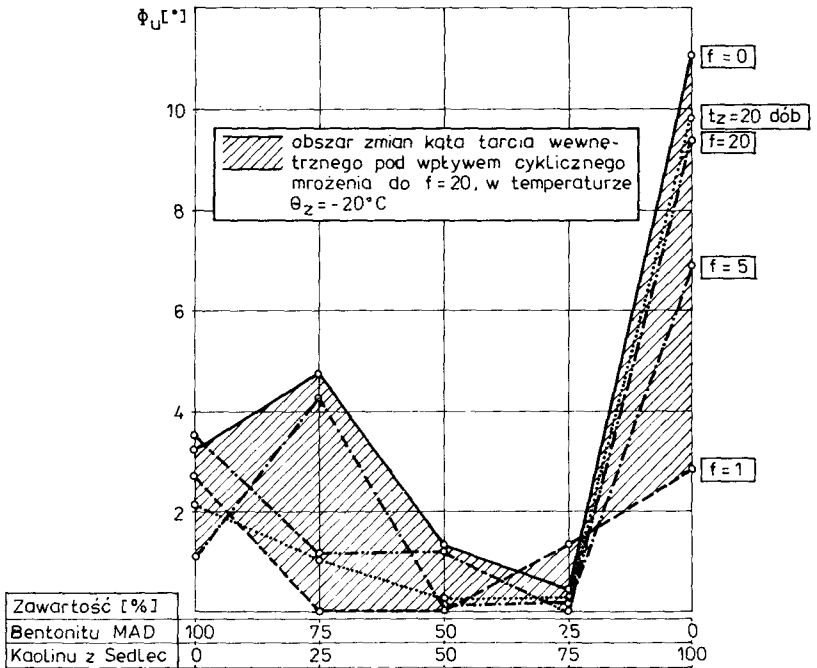


Rys.53. Wytrzymałość na ścinanie cyklicznie mrożonego łyu plioceńskiego (IN), ($\theta_z = -20^\circ\text{C}$)

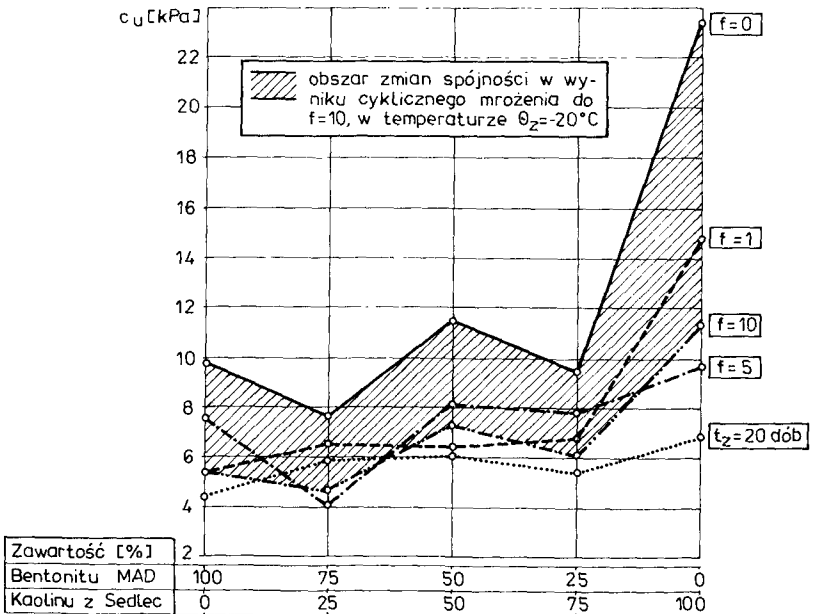


Rys.54. Zmiana kąta tarcia wewnętrzznego ϕ_u i spójności c_u łyu plioceńskiego w zależności od liczby cykli mrożenia - odmrażania

Początkowy wzrost wytrzymałości na ścinanie po przemrożeniu łyu plioceńskiego z Bydgoszczy wiąże się, jak można sądzić, z mrozową przebudową struktury i zmianami mikrostrukturalnymi. Transformacje mikrostruktury zostały wykazane w prezentowanych wcześniej wynikach badań i ich analizie.



Rys.55. Kąt tarcia wewnętrzny ϕ_u mieszanek bentonit MAD - kaolin z Sedlec, zamrażanych w różny sposób



Rys.56. Spójność c_u mieszanek bentonit MAD - kaolin z Sedlec, zamrażanych w różny sposób

Redystrybucja wilgotności w ile pliczeńskim podczas przemrażania jest praktycznie nieistotna (w granicach błędu, tab.12). Przy mrożeniu w temperaturze $\Theta_2 = -20^\circ\text{C}$ iżu o stopniu plastyczności $I_L \approx 0,0$ i o miąższości próbek około 42 mm, zamrażanie następuje stosunkowo szybko, dlatego prawdopodobnie nie stwierdzono ważnych zmian wilgotności w próbkach.

Prezentowane zdjęcia struktury i mikrostruktury (rys.18, 39, 40) iżu pliczeńskiego z Bydgoszczy pokazują wyraźnie wydzielone w masie gruntowej ostrokrawędziste mikroagregaty i agregaty w wyniku cyklicznego mrożenia i odmrażania. Oddzielają je od siebie mrozowe pęknięcia, a łączą kańcuszki ilaste, zbudowane ze zorientowanych cząstek iłowych, które są ułożone prawie równolegle do powierzchni granicznej odosobnionych mikroagregatów.

Jak ustalono, proces zamrażania wywołuje w skali makro dezintegrację istniejących w formie niejawniej agregatów iżu (patrz: próba rozmakania). Mrozowa desagregacja iżu pliczeńskiego jest prawdopodobnie zasadniczym powodem ogólnego wzrostu spójności. Wzrasta bowiem znacznie powierzchnia zewnętrzna agregatów i ich ilość oraz wilgotność agregatów w strefach granicznych. Wydzielone w ile podczas przemrażania agregaty o wysoce uporządkowanej orientacji cząstek w strefie granicznej lepiej dopasowują się wzajemnie po odmrożeniu. Szczególnie dobrze umacniają się wzajemnie więzi między mikroagregatami iżu pliczeńskiego pod działaniem obciążenia pionowego, konsolidującego próbkę przed ścięciem w aparacie skrzynkowym. Postępujący spadek spójności iżu w wyższych cyklach mrożenia ($f > 5$) wiąże się, jak można przypuszczać, z coraz liczniej powstającymi mikropełnięciami, rozrywaniem połączeń ilastych i osłabieniami wewnątrz mikroagregatów iżu. Rozwojowi przestrzennej siatki spękań sprzyja naturalna struktura iżu pliczeńskiego.

Szczególną uwagę zwraca się na licznie występujące płaszczyzny osłabień o dowolnej orientacji, związane z pochodzeniem glacictektonicznym. Wyodrębniają one w masie gruntu charakterystyczne ostrokrawędziste agregaty. Prawdopodobnie znaczącym czynnikiem w powstawaniu brekcjowej struktury iżu pliczeńskiego, K. Meissner (1970), było między innymi lokalne, być może wielokrotne, przekroczenie wytrzymałości na ścinanie pod obciążeniem ruchomego łądολου. Powierzchnie rozdzielnosci między agregatami utrwaliły się w iłach podczas późniejszej historii geologicznej.

Charakterystyczną cechą odosobnionych agregatów jest nieco wyższa wilgotność iżu w zewnętrznej strefie rozdzielnosci oraz uprzywilejowana orientacja cząstek mineralnych (rys.39d), przypominająca mikrostrukturę stwierdzoną na powierzchni przecięcia nożem iżu londyńskiego, E. T. Stępkowska (1982).

Ścinanie iłów pliczeńskich z Bydgoszczy, zbudowanych z agregatów o rosnącym z liczbą cykli mrożenia stopniu ich dezintegracji, może dawać w strefie zniszczenia efekty zbliżone do tarcia toczonego, wywołując wzrost kąta tarcia wewnętrznego, I. Kisiel (1981), co zaobserwowano np. powyżej $f = 5$ cykli. Głównie dlatego, że zdeintegrowane przez mróz agregaty gruntowe mogą być budowane z bardziej zwartego materiału, nierzadko ziarn piasku, niż pierwotne agregaty przed procesem mrożenia. Nie wykluczone, że

najmniejsze, powstałe po kilkukrotnym przemrożeniu agregaty iłu plicieńskiego, mogą być zbliżone formą do elementów strukturalnych o kształcie koncentrycznej globulki, uformowanych po pierwotnym jądrze, np. ziarna kwarcu, podobne do elementów strukturalnych obserwowanych w lessach, B. Grabowska-Olszewska (1983).

Reasumując należy stwierdzić, że mrozowe transformacje mikrostruktury i struktury znajdują odbicie w obniżeniu wytrzymałości na ścinanie iłów, które mrożono w zamkniętym systemie gruntowo-wodnym bez zmiany wilgotności średniej.

W pastach iłów KS i BW następuje obniżenie wytrzymałości, rosnące z liczbą cykli mrożeń. Największe spadki wytrzymałości obserwuje się po pierwszym i kilku początkowych zamrożeniach i odmrożeniach. Należy przypuszczać, że wiążą się one z powstałą i utrwaloną ze wzrostem cykli mikrostrukturą soczewkową tych obszarów iłu, które znalazły się w strefie ścięcia próbek lub w bezpośrednim jej sąsiedztwie.

W naturalnym ile plicieńskim z Bydgoszczy otrzymano obszar większej wytrzymałości przemrożonego iłu w porównaniu do iłu nie mrożonego, o maksymalnym zakresie odpowiadającym $f \leq 10$ cyklom i $\sigma_n \leq 175$ kPa. Powyżej tego zakresu wytrzymałość na bezpośrednie ścinanie iłu była zawsze mniejsza, niż przed zamrożeniem. Otrzymany charakter zmian wytrzymałości na ścinanie wiąże się w dużym stopniu jak można sądzić z naturalną mikrostrukturą brekcyjową, która wynika z historii geologicznej utworów plicieńskich nie tylko rejonu Bydgoszczy.

Zasygnalizowane powyżej związki proponujące wyjaśnienie kształtowania wartości parametrów wytrzymałości naturalnego iłu i iłów modelowych w wyniku mrozowych transformacji mikrostruktury są zapewne bardziej złożone i wieloaspektowe. Wynikają one z jeszcze nie poznanej bliżej strukturotwórczej roli szeregu czynników z konieczności nie badanych, a jedynie zasygnalizowanych w niniejszej pracy. Zaliczyć do nich można np. zawartość wody niezamarzniętej, rozkład ciśnienia wzrastającego kryształka lodu, rolę fazy gazowej, czy też zawartości poszczególnych frakcji i udziału minerałów. Wpływ między innymi tych czynników na właściwości przemrażanych iłów sugerują wyniki przeprowadzonych badań, a dokładne ustalenia wzajemnych relacji wymagać będą dalszych studiów i analiz.

5.3. Geotechniczne aspekty mrozowych zmian mikrostruktury

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że pomiędzy liczbą cykli mrozenia i wielkościami opisującymi parametry geotechniczne oraz mikrostrukturę dla każdego z badanych iłów istnieją zależności, które można oceniać jakościowo.

W budownictwie, przy projektowaniu, powszechną metodą ustalania wartości parametrów geotechnicznych podłoża jest korzystanie z zależności korelacyjnych między wiodącymi parametrami, np. $\phi_u = \phi_u(I_L)$ lub $c_u = c_u(I_L)$.

W stosowanych dotychczas dla łąk zależnościach przyjmuje się stałą wartość parametrów wytrzymałościowych c_u i ϕ_u dla znanej wilgotności. Omówione powyżej wyniki badań oraz rezultaty oznaczeń innych cech, M. K. Kumor (1986a, 1987a, b), pozwalają stwierdzić, że parametry łąk (np. ϕ_u , c_u , I_L , k_{10} , M_0) w wyniku działania mrozu ulegają pogorszeniu w sensie geotechnicznym, z liczbą cykli przemrożeń. Obowiązujące normy projektowe w omawianym zakresie nie podają żadnych informacji o wpływie mrozu na łąki i przedziale zmian właściwości geotechnicznych, które nastąpią wskutek cyklicznego działania mrozu.

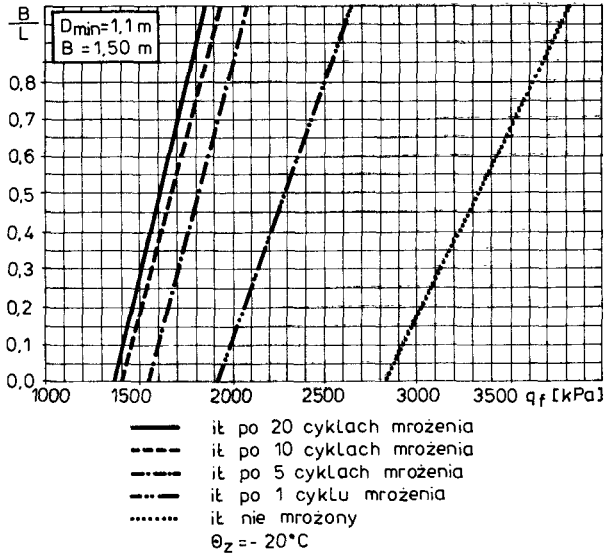
W warunkach klimatycznych środkowo-europejskich, w tym i Polski, w okresie jednej zimy wielokrotnie występują zmiany temperatury od ujemnej do dodatniej. Dlatego grunty wcześniej nie mrożone, szczególnie w przypowierzchniowej warstwie np. w otwartych wykopach, w okresie zimy mogą być przemienne poddane zamrażaniu i odmrażaniu. Z praktyki wykonawstwa znane są przypadki pozostawienia łąk w wykopach lub stanów zerowych posadowionych na łąkach, które niezabezpieczone na okres zimowy kończyły się awariami obiektów, A. Matysiak i inni (1977), O. Puża (1987). Projektując roboty ziemne, drogi, nasypy i rurociągi oraz posadowienie takich obiektów, jak sztuczne lodowiska, hale chłodni itp. niezbędne są również informacje o właściwościach podłoża, które w wyniku normalnych warunków eksploatacji poddane muszą być przemienne zamrażaniu i odmrażaniu. Podobnie, przy pełnej ocenie stateczności zboczy, w których istnieją tendencje do powstawania zsuwów i splayów skarpy. W tym ujęciu brak jest potrzebnych danych w dostępnej krajowej literaturze technicznej.

W literaturze dotyczącej zagadnienia przemrażania podłoża często można spotkać opinie mówiące o małej wrażliwości łąk w stanie półzwarłym na pograniczu twaroplastycznego ($I_L \approx 0,0$) na działanie mrozu. Przeprowadzona w pracy analiza sugeruje, że dotyczyć to może temperatur zamrażania wyższych od krystalizacji wody przechłodzonej w porach ($\theta_z > \theta_p = -1^\circ\text{C}$ do -5°C), a więc kiedy nie nastąpiły jeszcze mrozowe zmiany mikrostruktury łąk.

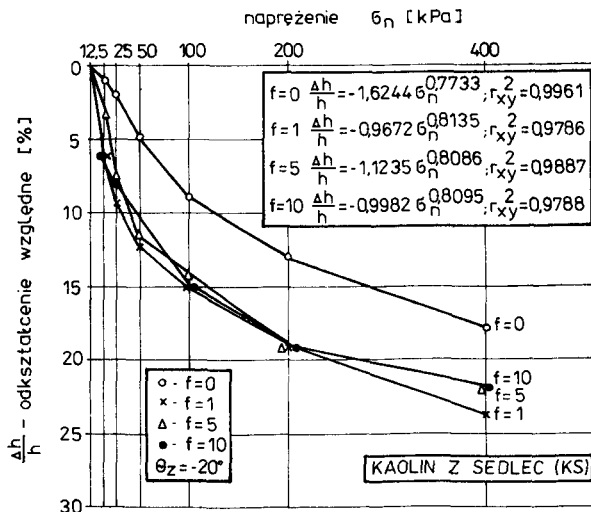
W przypadku zadziaania na łąk o konsystencji plastycznej niższych temperatur, co jest nie do uniknięcia w naszym klimacie, należy przewidywać pogorszenie właściwości fizyczno-mechanicznych podłoża, np. obniżenie nośności łąk pliczeńskiego o korzystnych parametrach wyjściowych w wyniku cyklicznego przemrażania, rysunek 57, M. K. Kumor (1985c). Stwierdzono największy spadek nośności po pierwszym cyklu, a obniżony opór graniczny przemrozonego łąk pliczeńskiego dla przedziału $20 \geq f > 5$ cykli zamrażania osiągnął praktycznie połowę (48 do 49 %) wartości oporu granicznego łąk nie mrożonego.

Ścisłość łąk przemrażanych w zamkniętym systemie gruntowo-wodnym jest zawsze większa, niż przed mrożeniem, rysunki 58 i 59, M. K. Kumor (1987a), a istotny wzrost ścisłości dotyczy pierwszego zamrażania i odmrażania. W pastach łąk pliczeńskich, M. K. Kumor (1986a), mrożonych przy możliwości podciągania wody przez próbkę, ścisłość rośnie stopniowo w pierwszych kilku cyklach, (rys. 60), a różnice praktycznie zanikają powyżej

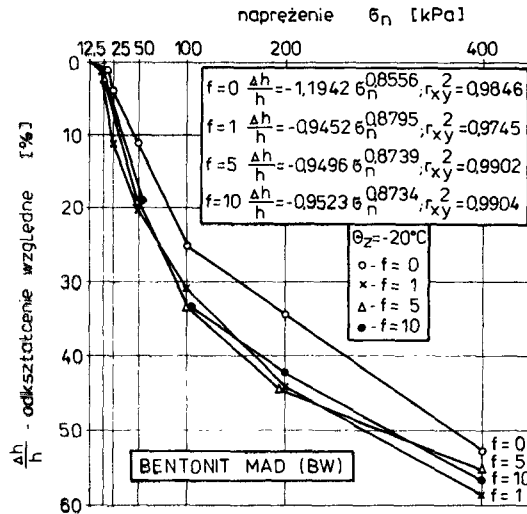
naprężeń normalnych $\sigma_n > 200$ kPa. Np. współczynnik ścisłości a , w zakresie $\Delta\sigma_n = 0 + 50$ kPa po $f = 4$ cyklach mrożenia był większy o około 35 % w odniesieniu do iku nie mrożonego wcześniej. Wykazany wzrost ścisłości ików spowoduje dalsze trwałe osiadania po obciążeniu przemrożonego podłoża.



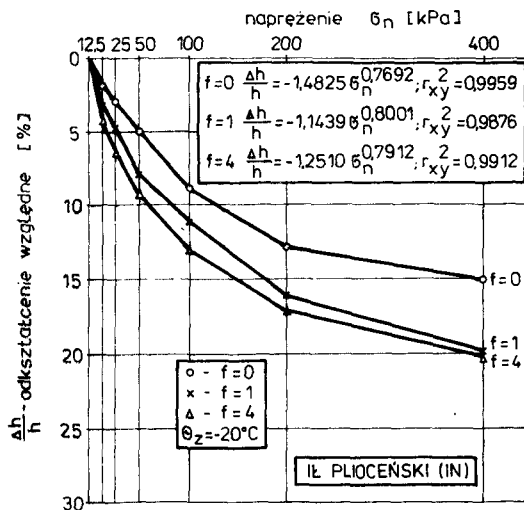
Rys.57. Obliczeniowy opór jednostkowy przemrażanego iłu plicenińskiego w zależności od liczby cykli mrożenia i stosunku boków fundamentu



Rys.58. Krzywe ścisłości cyklicznie mrożonego kaolinu z Sedlec (układ zamknięty, $\Delta w = 0$)



Rys. 59. Krzywe ścisłości cyklicznie mrożonego bentonitu MAD (układ zamknięty)

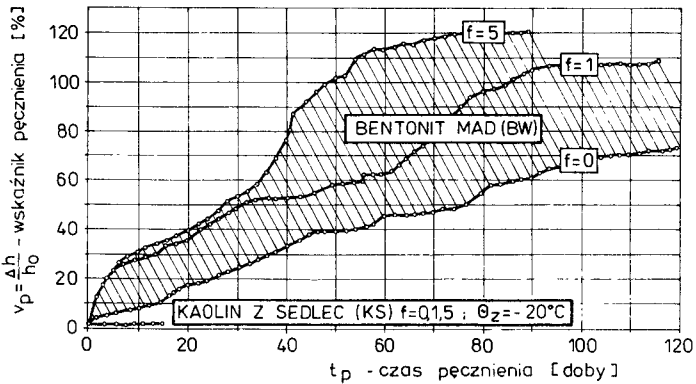


Rys. 60. Krzywe ścisłości cyklicznie mrożonego łą płoczeńskiego (układ otwarty, pasta $I_L = 0,5$)

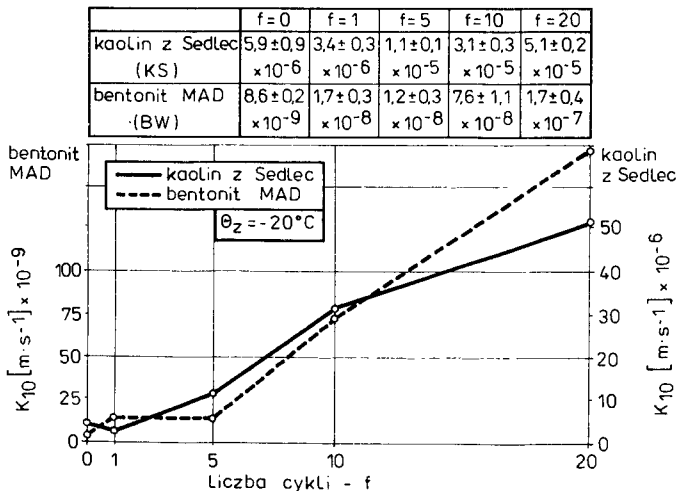
Dla praktyki projektowej i wykonawczej może okazać się niebezpieczne również szacowanie parametrów ϕ_u , c_u i M_0 przemrożonych łą na podstawie stopnia plastyczności, oznaczonego przed zamrażaniem. W wyniku pierwszego i następnych przemrożeń, nawet bez wzrostu wilgotności, stopień plastyczności łą podwyższa się (w rezultacie spadku granicy płynności w_L , podrozdział 5.1). Odczytywane z zależności korelacyjnych wartości ϕ_u , c_u i M_0 przy nie uwzględnieniu wymienionego faktu, nie są adekwatne dla aktualnej wytrzymałości i ścisłości łą i mogą ich ocenę przesuwac w stronę nie-

bezpieczną. Jak bowiem wiadomo, w naturalnych warunkach w strefie przemrożonej łąw wzrasta wilgotność, a więc dodatkowo podwyższony zostaje stopień plastyczności.

Dla oceny stateczności i właściwości sztucznie mrożonego górotworu w przypadkach budownictwa podziemnego istotne znaczenie mogą mieć otrzymane stwierdzenia i charakterystyka pęcznienia mrozowego oraz po rozmrożeniu wzmoczonego pęcznienia łąw (rys.61), zawierających zwłaszcza montmorillonit; pęcznienia przebiegającego głównie na skutek migracji wody do frontu przemrażania w fazie zamrażania i w dół, grawitacyjnego po rozmrożeniu (między innymi w wyniku kilkunastokrotnego wzrostu wodoprzepuszczalności), rysunek 62, M.K.Kumor (1987b). Zwraca to uwagę na możliwość działania obok ciśnienia geostatycznego dodatkowych sił powstających przy przemrażaniu łąw i po odmrożeniu ośrodka gruntowego na obudowę górnica.



Rys.61. Swobodne pęcznienie przemrażanych i odmrażanych próbek bentonitu MAD i kaolinu z Sedlec



Rys.62. Współczynnik wodoprzepuszczalności kaolinu z Sedlec i bentonitu MAD po cyklicznym mrożeniu i odmrażaniu

Przy nowym ujęciu kryteriów określających wrażliwość gruntów na działanie mrozu, jak wynika z analizy literatury, K. Pietrzyk (1981, 1985), Z. Wiłun (1976), W. C. Kowalski i inni (1983, 1985), U. Wojtowicz (1985), oraz przeprowadzonych badań mikrostruktury, autor proponuje, że celowe byłoby uzupełnić dotychczasowe kryteria oznaczeniem składu mikroagregatowego, ustalonym po określonej liczbie cykli mrożenia (np. $f = 1, 5, 10$). Skład mikroagregatowy bowiem uwzględnia nie tylko uziarnienie gruntów, ale i mikrostrukturę, skład mineralogiczny, właściwości adsorpcyjno-kapilarne, a jednocześnie jest łatwy do zastosowania praktycznego i porównań.

W przypadku przewidywania lub modelowania zasięgu strefy przemarzania oraz prędkości przemrażania i odmrażania iłów, ważnych zagadnień nie tylko w robotach ziemnych, T. Przychodzień (1981), wyniki badań mikrostruktury wykazały, że w obliczeniach można by uwzględniać przepływ ciepła drogą przez mikromostki cieplne utworzone przez pakiety ze zorientowanych cząstek mineralnych szkieletu gruntowego w układzie ił-woda-lód.

Autor uważa, że omówione zagadnienia i wyniki przeprowadzonych badań cyklicznie mrożonych iłów mogą być przydatne również do rozwiązywania problemów uzdatniania środkami chemicznymi podłoża gruntowego dla potrzeb drogownictwa, J. Pachowski (1980).

Otrzymane dane, jak dowiedziono to dla iłów, gruntów bardzo spoistych, w przypadku gruntów o mniejszej zawartości frakcji iłowej wymagać będą dalszych studiów weryfikacyjnych nad ustaleniem relacji ilościowych. W okresie niezbędnym do opracowania potrzebnych danych dla podobnych przypadków należałoby wprowadzić korekcję, pamiętając o stwierdzonych w niniejszej pracy niekorzystnych kierunkach zmian, lub wyznaczyć je, o ile to możliwe, drogą oddzielnych badań.



6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły następujące uogólnienia uznawane w literaturze:

1. Mikrostruktura i właściwości fizyczno-mechaniczne iłów pod wpływem przemrażania zmieniają się, a zakres oraz charakter zmian mikrostruktury i wartości parametrów uzależniony jest od składu mineralogicznego, jak również warunków mrożenia. Bardziej istotne zmiany wywołuje proces cyklicznego mrożenia - odmrażania niż nieprzerwane działanie mrozu.

2. Szczegółowa rejestracja temperatury w procesie zamrażania i odmrażania wykazała histerezę zmian temperatury iłów (rys.11). Procesy przebiegają etapowo: zamrażanie następuje w etapie III (izotermicznym) przy temperaturze $\theta_f < 0^\circ\text{C}$ i trwa krócej w kaolinie a dłużej w bentonicie w odniesieniu do odmrażania (etap VI), przy czym odmrażanie iłu zachodzi w przedziale temperatur od θ_{p0} do $\theta_0 < \theta_f < 0^\circ\text{C}$ (podrozdział 3.3).

3. Otrzymane wyniki pęcznienia mrozowego iłów monomineralnych wskazywały, wraz ze wzrostem liczby cykli przemrażania, wzrost wskaźnika pęcznienia mrozowego uzależniony od składu mineralnego (podrozdział 3.4.2). Mimo braku możliwości podciągania wody od spodu przez próbkę, w bentonicie zarejestrowano stały przyrost pęcznienia w badanym przedziale zmienności liczby cykli do $f = 20$. W kaolinie pęcznienie mrozowe było ponad dwukrotnie mniejsze niż w bentonicie, a powyżej $f > 1$ do 5 cykli praktycznie ustaliło się dla niewielkiej wartości (rys.15).

4. Przyjmowany powszechnie pogląd, że cykliczny proces zamrażania i odmrażania posiada istotny wpływ na właściwości fizyczno-mechaniczne, w przypadku badanych iłów został potwierdzony. Wpływ cyklicznego przemrażania jest jednak bardziej skomplikowany aniżeli wskazywałyby dotychczasowe badania. Analizę wpływu cyklicznego przemrażania na właściwości iłów należy bowiem prowadzić przy uwzględnieniu zmian mikrostruktury i towarzyszących im zjawisk w różnej skali, tj. makro-, mikro- i submikroskopowej, w odniesieniu do specyfiki krystalizacji wody i wzrostu kryształków lodu w układzie wodno-iłowym oraz przy uwzględnieniu zachodzących zmian przy odmrożeniu, szczególnie wtedy, gdy ił zawiera montmorillonit.

Rezultaty wykonanych badań doświadczalnych i studiów nad zagadnieniem mrozowych zmian mikrostruktury dowiodły istnienia transformacji mikrostruktury iłów. Na tej podstawie można podane wyżej uogólnienia poszerzyć o następujące wnioski:

5. W wyniku przemiennego działania mrozu i odmrażania następuje transformacja mikrostruktury iłu w nowy typ mikrostruktury, nazwanej przez autora mikrostrukturą soczewkową (rys.27, 43, podrozdział 3.5.2, rozdział 4).

Mikrostrukturę przemrażanego iłu o wysokim i wzrastającym z liczbą przemrożeń uporządkowaniu elementów szkieletu mineralnego charakteryzują:

- wysoka trwałość zmian wywołanych mrożeniem, również po odmrożeniu,
- zmienione kontakty między elementami, głównie na typ powierzchni płaska - powierzchnia płaska, rzadziej pod małymi kątami,
- brak porów międzymikroagregatowych, bądź istnienie nielicznych porów typu szczelinowego i osi podłużnej, równoległej do powierzchni nowo utworzonych mikroagregatów mineralnych,
- wzrost zagęszczenia i wielkości cząstek mineralnych oraz ich równoległe wzajemne ułożenie,
- powierzchnie graniczne szkieletu mineralnego z lodem idealnie wygładzone w wyniku wymuszonej orientacji mikroagregatów,
- powstawanie mikropęknięć i mikroszczelin masywu ilowego.

Można przypuszczać (podrozdział 4.2), że określony jakościowy związek transformacji mikrostruktury iłów z cyklicznym przemrażaniem będzie miał podobny charakter dla spotykanych typów mikrostruktur innych gruntów spolistych, szczególnie o wysokiej zawartości frakcji ilowej.

6. Jak dowiodły badania, zasadnicze transformacje mikrostruktury iłów następują podczas pierwszej przemiany fazowej wody w lód i z liczbą cykli mrożenia - odmrażania wzrasta zakres zmian. Ostateczny charakter przeobrażeń mikrostruktury iłu utrwalony zostaje prawdopodobnie w przedziale $f = 5$ do 10 cykli (podrozdział 3.5). Istotny wpływ na zakres zmian mikrostruktury ma, obok przemiany fazowej: woda - lód - woda, również okres odmrażania (etapy VI i VII, rys.6). Możliwe, że w tym czasie dochodzi w iłach zawierających montmorillonit do częściowo odwracalnych przemian w ułożeniu poszczególnych elementów mikrostruktury, szczególnie dla wyższych ($f > 10$) liczby cykli mrożenia (podrozdział 3.4.2).

7. Dla dalszych studiów nad mikrostrukturą nie mrożonych iłów preparowanych stosowanymi aktualnie metodami (np. mrożenie w ciekłym azocie), bardzo istotne jest stwierdzenie faktu naruszenia i dużego stopnia trwałości zmian mikrostruktury iłu w wyniku pierwszego zamrażania.

8. Przeprowadzone badania wykazały, że w ośrodku iłowo-wodnym transformacji mikrostruktury, na skutek przemiennego działania mrozu i odmrażania, towarzyszą zachodzące w różnej skali wzajemnie powiązania i zjawiska:

- zmiany grubości cząstki,
- procesy agregacji lub desagregacji,
- zmiana sił przyciągania między elementami mikrostruktury (tab.8),

oraz zmiany czynników i cech charakteryzujących mikrostrukturę przedstawione funkcją (1), w stopniu zależnym od liczby cykli. Można przyjąć, że zbadane w różnej skali procesy i zjawiska, a także ich wzajemny związek i tendencje zmian będą słuszne przy rozpatrywaniu transformacji mikrostruktury dla innych iłów, badanych w podobnych warunkach.

9. Czynniki, które mają istotny wpływ na stopień zmian mikrostruktury, obok charakterystycznych efektów krystalizacji wody w wakacjach iłu (podrozdział 4.1), są prawdopodobnie zjawiska odrywania od powierzchni lub

wyciskanie spomiędzy elementów szkieletu mineralnego molekuł wody i migracja ich w stronę kryształków lodu. Po wytopieniu lodu cząsteczki tej wody, o niższym stopniu energetycznego wiązania, nie są w pełni i od razu ponownie związane przez elementy mineralne przeobrażonej mikrostruktury. Można ocenić, że w przypadku łąw kaolinitowych zawartość takiej wody wzrasta z liczbą cykli mrożenia i przy około $1 < f < 5$ cykli rozpoczęta zostaje grawitacyjna redystrybucja w dolne strefy (rys.21, podrozdział 3.4.1, rozdział 5). W łąwach składających się z montmorillonitu po rozmrożeniu wystąpić może pęcznienie (podrozdział 3.4.2), dające częściowo odwracalny charakter powstałych przy zamrażaniu zmian mikrostruktury łąw.

10. Stwierdzony niekorzystny wpływ cyklicznego przemrażania na właściwości fizyczno-mechaniczne łąw (podrozdziały 5.1 i 5.2) potwierdza celowość opracowania odpowiednich danych dla praktyki inżynierskiej, istotnych w nietypowych zagadnieniach i przykładach budownictwa krajowego (podrozdział 5.3). W przypadku omawianych w PN-81/B-03020 zaleceń szczegółowych dotyczących głębokości posadowienia fundamentów wskazane byłoby podać informacje o obniżeniu, w sensie geotechnicznym, wartości parametrów łąw po cyklicznym przemrażaniu, w odniesieniu do gruntu wcześniej nie mrożonego.

11. Zbadane zróżnicowane zachowanie modelowych łąw KS i BW oraz ich mieszanek wskazuje, że łąwy zawierające ponad połowę bentonitu MAD lub jego odpowiednika mogą być bardziej wrażliwe na działanie mrozu niż łąwy składające się w przewadze z kaolinitu (dla warunków, gdy zamrażanie przebiega bez możliwości podciągania wody od spodu ($\Delta w = 0$)). Dowodzić to może istotnego związku odporności mrozowej łąw ze składem mineralogicznym. W warunkach naturalnych, kiedy woda może swobodnie migrować do frontu przemrażania, praktycznie należy spodziewać się szerszego zakresu zmian właściwości fizyczno-mechanicznych takich łąw.

12. Wobec braku pełnych danych, które określały mikrostrukturę łąw po przemrażaniu, prezentowane wyniki wzbogacić mogą opracowany album mikrostruktur łąw (B. Grabowska-Olszewska, V. Osipov, V. Sokolov - 1984) o mikrostruktury powstałe w określonym procesie epigenetycznym, tj. przemienym mrożeniu i odmrażaniu. Na podstawie ustalonych typów mikrostruktury można by dokładniej niż dotychczas badać obecność wieloletniej zmarzliny w podłożu gruntowym, bowiem charakterystyczne cechy morfologiczne mikrostruktury soczewkowej odrzucają możliwość udziału w ich tworzeniu innych niż zamrażanie procesów (np. glacytektoniki, glacydynamiki itp.).

13. Przeprowadzone studia i badania wykazały, że o mrozowych zmianach właściwości fizyczno-mechanicznych łąw decyduje wiele czynników i procesów strukturotwórczych. Dla potrzeb uściślenia kryteriów oceny podatności mrozowej gruntów spoistych niezbędne jest stosowanie prostych metod pozwalających na określenie ilościowych zmian wartości parametrów fizyczno-mechanicznych. Spośród kilku wykorzystanych w eksperymentach, przydatną i bardzo wygodną w ocenie zmian efektów przemrażania może być np. zmodyfikowana analiza mikroagregatowa, czy też badanie sorpcji wg E. T. Stępkowskiej (1977a).

Doprowadzenie do ścisłych ustaleń dla innych gruntów spoistych wymaga dalszych badań poznawczych, które powinny wyjaśnić te kwestie oraz następujące zagadnienia:

- określenie zależności funkcyjnej między liczbą cykli w różnych temperaturach zamrażania a składem granulometrycznym i mikroagregatowym w relacji do zmian właściwości mechanicznych,
- określenie roli kationów wymiennych i wody niezamarzniętej w odniesieniu do różnych systemów gruntowo-wodnych,
- zbadanie proponowanych interpretacji zmian dla naturalnych gruntów w warunkach klimatycznych okresu jesień - zima - wiosna,
- ustalenie ścisłych parametrów dla modelu obliczeniowego umożliwiającego określenie głębokości zmiennego przemarzania i ilościowego związku ze zmianami wartości parametrów geotechnicznych podłoża budowlanego oraz dla kryteriów wrażliwości mrozowej gruntów spoistych,

LITERATURA

- O. B. Andersland, D. M. Anderson (1978) - Geotechnical Engineering for Cold Region. Mc Graw-Hill, New York
- D. M. Anderson, N. R. Morgenstern (1973) - Physics, Chemistry and Mechanics of Frozen Ground. National Academy of Sciences. Washington, p.257-288
- D. M. Anderson, P. I. Williams (1985) - Freezing and Thawing of Soil-Water Systems. American Society of Civil Engineers, New York, p.93
- B. Areń (1957) - Atlas geologiczny Polski. Zagadnienia stratygraficzno-fajalne. Z. 11. Trzeciorzęd I.G. Warszawa
- L. Barden (1972) - The relation of soil structure to the engineering geology of clay soil. Quart. J. Engineering Geology 5, p.35
- D. Blanchard, M. Fremond (1982) - Cryogenic suction in soils. The Third Int. Symposium on Ground Freezing, Hanover 22-24.06.82
- D. Bobrowski (1980) - Probabilistyka w zastosowaniach technicznych. WNT, Warszawa
- A. P. Bozenova, F. G. Bakulin (1957) - Materiały po laboratorynym issledovaniju mierzlych gruntov. Izd. ANUSSR nr 3
- F. A. Bowels (1968) - Microstructure of Sediments: investigation with ultrathin sections. Science 159, p.1236
- B. B. Broms, L. Y. C. Yao (1964) - Shear strength of a soil after freezing and thawing. J. of Soil Mech. and Found. Div. Proc. ASCE 4, vol. 90
- E. Caniard, A. Dupas (1985) - Gelivite des sols. Methode experimentale de classement des sols selon leur degre de gelivite. Symposium franco-polonais „Gel et Genie Civil”, Varsovie 7-8.10.1985
- E. J. Chamberlain, A. Gow (1978) - Effect of Freezing and Thawing on the Permeability and Structure of Soils. Int. Symp. on Ground Freezing, Ruhr University, Bochum, pp.31-34
- K. Collins, A. Mc Gown (1974) - The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. Geotechnique 24, p.223
- V. Cotecchia, A. Federico, R. Trizzino (1982) - Microtessiture di sedimenti argillosi. Analisi delle e terminogie, ed, applicazioni nel campo della geotecnica. Estratto da Geologia Applicata e Idrogeologia, Bari, vol. XVII, p. 34
- I. P. Coutard, H. I. Múcher (1985) - Deformation of laminated silt loam due to repeated freezing and thawing cycles. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 10, pp. 309 - 319

- N. A. Cytowicz (1975) - The Mechanics of Frozen Ground. Mc Graw-Hill Company, New York
- P. Delage, F. Pellerin (1984) - Influence de la lyophilisation sur la structure d'une argile sensible du Quebec; Clay Minerals 19, pp. 151 - 160
- A. Dupas (1985) - La station de gel de Caen. Les experinces de congelation. Symposium franco-polonais „Gel et Genie Civil”, Varsovie 7-8.10.1985, pp. 23 - 38
- D. H. Everett, J. M. Haynes (1965) - Capillary properties of some model pore systems with special reference to frost damage. Bulletin Rilem no 27, pp. 31 - 38
- W. Fortunat (1960) - Charakterystyczne cechy fizyczne trzeciorzędowych ilów Warszawy, Bydgoszczy i Tarnobrzega. Biul. I. Geolog. nr 163
- R. H. Foster (1981) - The Study of Soil Structure. Biuletyn Geologiczny t. 24, ss. 257 - 276
- M. Fremond (1981) - Frost action in soils. Free Boundary Problems: Theory and Applications. Montecatini 18-21.06.1981
- B. Grabowska-Olszewska (1968) - Wpływ własności sorpcyjnych wybranych typów gruntów spoistych na ich hydrofilność. Biul. Geolog. UW nr 10, ss. 5 - 114
- B. Grabowska-Olszewska /red./ (1975) - Metody badań gruntów spoistych. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa
- B. Grabowska-Olszewska (1976) - Mikrostruktury utworów lessowych badane za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM). Biul. Inst. Geolog. 297
- B. Grabowska-Olszewska (1983) - Osiadanie zapadowe lessów w świetle badań mikrostrukturalnych. Przegląd Geologiczny 3, ss. 162 - 165
- B. Grabowska-Olszewska (1988) - Wiązanie strukturalne w lessach i ich wpływ na osiadanie zapadowe. Przegląd Geologiczny 2, ss. 65 - 69
- B. Grabowska-Olszewska, V. Osipov, V. Sokolov (1984) - Atlas of the Microstructure of Clay Soils. PWN, Warszawa
- B. Grabowska-Olszewska, E. M. Sergejev (1977) - Gruntoznawstwo. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa
- R. E. Grim (1952) - Relation of frost action to the clay mineral composition of soil materials. Highway Res. Board Spec. Rep. 2, pp. 167 - 175
- T. G. Gziriszvili, A. I. Karcivadze, A. M. Okudźava (1984) - Gietierogennaja nukleacja lida. Izd. Miecnerba, Tbilisi
- W. M. Haas (1962) - Frost Action Theories Compared with Field Observations. Michigan College

- I. A. van Haneghem, F. J. Leij (1984) - The thermal properties of moist porous media at temperatures below 0°C. 9-th European Conf. on Thermophysics Properties. UMIST, Manchester, no 3
- I. Hoobs (1974) - The Physics of Ice. Clarendon Press Oxford
- Y. Horiuchi, N. Maeno (1985) - Measurements of pressures developed in freezing after the breakdown of supercooling. Fourth Int. Symp. on Ground Freezing, Sapporo 5-7.08.1985, pp. 69 - 75
- S. L. Huang, N. B. Aughenbaugh (1987) - Sublimation of Pore Ice in Frozen Silt. Journal of Cold Regions Engineering, vol. 1, no 4, Dec. ASCE, pp. 171 - 181
- M. Jagiełło (1985) - Rozkład temperatury w zamarzającym gruncie. Drogownictwo 11, ss. 262 - 266
- I. Jary (1961) - Correlation between the frost heave and granulometry of soils. Proc. of Firth Inter. Conf. on Soil. Mech. and Found. Paryż (1) 10, pp. 46 - 50
- H. L. Jessberger (1979) - Ground Freezing. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam - Oxford - New York, DGE no 26
- A. R. Jumikis (1957) - Soil moisture transfer in the vapour phase upon freezing. In: Fundamental and Practical Concepts of Soil Freezing. Highway Res. Board, Bull. 168, pp. 96 - 115
- L. S. Keinonen (1965) - Moisture movement in soil under frost action. Proc. of the Sixth Int. Conf. on Soil Mech. and Found Eng., Montreal
- I. Kisiel (1981) - Współczesne problemy mechaniki ilów. Ossolineum, Wrocław - Warszawa - Kraków
- I. H. Kolain, P. F. Low (1963) - Calorimetric determination of unfrozen water in montmorillonite pastes. Soil Sciences 95, pp. 376 - 383
- W. C. Kowalski, E. Hoffmann (1983) - Tendencje do zmian struktury lessów podczas ich obciążania. Przegląd Geologiczny 11, ss. 598 - 606
- W. C. Kowalski, E. Myślińska (1985) - Trends of the loess grain size and aggregate size distribution changes as the results of the repeats capillary water saturation and the repeats freezing. Abstracts of Papers of the Int. Symp. Problems of the Stratigraphy and Paleogeography of Loesses. Lublin 6-10.09.1985, p. 20
- T. Kozłowski (1987) - Investigation of unfrozen water content in frozen Ca-bentonite. 2^e Colloque „Gel et Genie Civil”, Paris 31.03-2.04.1987
- T. Kozłowski (1988) - Przemiany fazowe wody gruntowej w przemarzających ilach monomineralnych (praca niepublikowana). Politechnika Świętokrzyska, Kielce
- J. Kukiełka (1983) - Badanie laboratoryjne wysadzinowości lessów. Drogownictwo 10, ss. 285 - 290

- M. K. Kumor (1983 a) - Chemiczno-mineralogiczne właściwości wybranych próbek iłu płoceńskiego z Bydgoszczy. Zesz. Nauk. ATR Budownictwo 19, Bydgoszcz, ss. 44 - 54
- M. K. Kumor (1983 b) - Granice konsystencji wybranych próbek iłu płoceńskiego w cyklicznym procesie zamarzania. Archiwum Hydrotechniki, t. XXX, z. 3, ss. 213 - 222
- M. K. Kumor (1985 a) - Change in structure and microstructure of clays due to cyclic freezing-thawing. Symposium franco-polonais „Gel et Genie Civil”, Varsovie 7-8.10.1985, pp. 63 - 72
- M. K. Kumor (1985 b) - Metoda przygotowania zamrożonych iłów do badania struktury elektronowym mikroskopem skaningowym (SEM). Archiwum Hydrotechniki, t. XXXII, z. 2, ss. 309 - 324
- M. K. Kumor (1985 c) - Przemarzanie podłoża płoceńskiego a projektowanie posadowień bezpośrednich. Inżynieria i Budownictwo 7-8, ss. 281 - 283
- M. K. Kumor (1985 d) - Zmiany wytrzymałości i struktury iłu płoceńskiego pod wpływem zamrażania. Archiwum Hydrotechniki, t. XXXII, z. 3/4, ss. 461 - 473
- M. K. Kumor (1986 a) - Ścisłość cyklicznie zamrażanego iłu płoceńskiego. Zesz. Nauk. ATR Budownictwo 23, Bydgoszcz, ss. 69 - 76
- M. K. Kumor (1986 b) - Wykorzystanie testu sorpcyjnego do badania zmian mikrostruktury przemrożonych iłów. Archiwum Hydrotechniki, t. XXXII, z. 4, ss. 499 - 515
- M. K. Kumor (1987 a) - Alternation of mechanical properties and structure of clayey soils due to cyclic freezing and thawing. 2^e Colloque „Gel et Genie Civil”, Paris 31.03-2.04.1987
- M. K. Kumor (1987 b) - Mrozowe zmiany wybranych parametrów geotechnicznych i struktury iłów. VIII Krajowa Konf. Mech. Gruntów i Fundamentowania, t. I, ss. 73 - 78
- M. K. Kumor (1989 a) - Charakterystyczne parametry geotechniczne serii poznajskiej rejonu Bydgoszczy. Seminarium „Geolog.-Inż. Problemy Serii Poznańskiej”, Wrocław 15-16.06.1989
- M. K. Kumor (1989 b) - An increase in clays frost heave resulting from frost change in microstructure. Int. Symp. on FROST IN GEOTECHNICAL ENGINEERING Saariselka, Finland, 13-15.03.1989
- M. K. Kumor, E. Wojciechowski (1986) - Właściwości geotechniczne strefy przepowierzchniowej iłów płoceńskich w Bydgoszczy. Zesz. Nauk. ATR Budownictwo 21, Bydgoszcz, ss. 59 - 66
- T. G. Krzewiński, R. G. Tart Jr. (1985) - Thermal Design Considerations in Frozen Ground Engineering. A State of the Practice Report prepared by the Technical Council on Cold Regions Engineering of the American Society of Civil Engineers, New York, p. 227

- T. W. Lambe (1953) - The structure on inorganic soil. Proc. Amer. Society Civil Eng. 79, sep. 315, p. 49
- T. W. Lambe (1958) - The structure of compacted clay. J. Soil Mech. Found. Division ASCE V 84 PI SM 2
- T. W. Lambe, R. T. Martin (1953) - Composition and engineering properties of soils. Highway Res. Board, Proc. 32, pp. 576 - 590
- J. Livet (1981) - Experimental method for the classification of soils according to their frost susceptibility. France Frost JORD nr 22, pp. 13 - 22
- I. Makowski (1980) - Warstwy mrozochronne torowiska kolejowego. Referat na Konferencji „Geotechnika w Inżynierii Komunalnej”, Poznań NOT Komitet ds. Geotechniki
- B. Manikowska (1985) - Struktura płytkowo-blokowa glin zwałowych okolic Łodzi jako świadectwo wieloletniej zmarzliny. Acta Geographica Łodziensia nr 50, ss. 113 - 124
- A. Matysiak, J. Hajdukiewicz, M. Kumor, A. Zawalski (1977) - Awaria domu studenckiego w Bydgoszczy posadowionego na gruncie ekspansywnym. III Symp. Polit. Szczecińskiej, s. 67 - 74
- G. P. Mazurov (1975) - Fiziko-mechaniczeskije svojstva mierzlych gruntov. Strojizdat, Leningrad
- K. Meissner (1970) - Własności inżyniersko-geologiczne ilów poznańskich rejonu Konina. Biul. Inst. Geolog. 231
- P. I. Mielnikov, N. I. Tolstichin (1974) - Obszczije mierzlotoviedienije. Izd. Nauka, Novosibirsk
- J. K. Mitchell (1976) - Fundamental of Soil Behaviour. New York - London
- Z. Młynarek (1969) - Wpływ właściwości gliny zwałowej zlodowacenia środkowopolskiego (Riss) na granicę płynności. Archiwum Hydrotechniki, t. XVI, z. 1, ss. 105 - 114
- Z. Młynarek (1975) - Granice Atterberga gliny piaszczystej zagęszczonej statycznie i dynamicznie. Roczniki AR Poznań LXXVII, ss. 73 - 83
- E. Myślińska (1979) - Przewodnik do ćwiczeń z gruntoznawstwa. Uniwersytet Warszawski
- Z. A. Nersesova (1961) - Laboratornyje issledovaniya po fizikie i mechanike mierzlych gruntov. Izd. ANUSSR nr 4
- H. van Olphen (1963) - An Introduction to Clay Colloid. Chemistry Interscience Publishers, New York
- V. I. Osipov (1983) - Methods of studing clay microstructure. Geotechnical Testing J. Philadelphia 6.1., pp. 10 - 17
- J. Pachowski (1980) - Podłoże gruntowe i sposoby jego wzmacniania dla potrzeb drogowych. Poznań NOT Komitet ds. Geotechniki

- E. Paszyc-Stępkowska (1966) - Próba fizyko-chemicznej interpretacji procesu ścinania nasyconych gruntów ilowych. *Archiwum Hydrotechniki*, t. XIII, z. 3-4, ss. 479 - 567
- A. Piaskowski (1981) - Nowe zasady określania rodzaju i konsystencji gruntów spoistych. VI Krajowa Konf. Mech. Gruntów i Fundamentowania, Warszawa, ss. 348 - 355
- K. Pietrzyk (1965) - Metoda określania ilości wody niezamarzniętej w gruncie zamarzającym. *Drogownictwo* 12, ss. 297 - 299
- K. Pietrzyk (1968 a) - Analiza wpływu niektórych czynników na pęcznienie przemarzającego podłoża na podstawie badań laboratoryjnych. *Zesz. Nauk. Politechniki Krakowskiej Budownictwo Wodne* 15, Kraków
- K. Pietrzyk (1968 b) - Stateczność budowli inżynierskich i posadowionych w obrębie przemarzającego podłoża. *Inż. i Bud.* nr 10, ss. 335 - 339
- K. Pietrzyk (1981) - An attempt at a new formulation of the criteria of frost heave. *Engineering Geology* 18, pp. 281 - 290
- K. Pietrzyk (1984) - Próba analitycznego ujęcia problemu wysadzinowości gruntów obciążonych. *Zesz. Nauk. Politechniki Świętokrzyskiej, Budownictwo* 19, Kielce, ss. 163 - 186
- K. Pietrzyk (1985) - Próba nowego podejścia do problemu wysadzinowości gruntów. *Archiwum Hydrotechniki*, t. XXXII, z. 2, ss. 299 - 307
- K. Pietrzyk, J. Pałka (1978) - Uogólnione kryterium wysadzinowości gruntów osadowych. *Czasopismo Techniczne* z. 3 i 5-13, Kraków
- E. Posyłek (1973) - Studium optymalizacji parametrów procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości. *Z.B. i D.B.G. Mysłowice Prace Naukowo-Badawcze*, s. 167
- E. Posyłek (1979) - Zamrażanie górotworu do dużych głębokości w LZW. *Proj. Probl. Bud. Węglowego* nr 2, ss. 31 - 36
- Proc. the 2-nd International Symposium on Ground Freezing. Trondheim, June 24-26. Norwegian Institute of Technology
- Proc. the Fourth International Symposium on Ground Freezing. Sapporo 5-7 August 1985
- T. Przychodzień (1981) - Roboty ziemne w zimie. *Arkady*, Warszawa
- O. Puła (1987) - Podłoże gruntowe przyczyną awarii budynku. VIII *KKMGiF* Wrocław, t. II, ss. 725 - 730
- R. Pusch (1966 a) - Investigation of Clay Microstructure by Using Ultra-Thin Sections. *Swedish Geotechnical Institute* no 15
- R. Pusch (1966 b) - Quick-Clay Microstructure: in Recent Quick-Clay Studies. *Engineering Geology* 1 (6), pp. 413 - 413
- R. Pusch (1967) - Investigation of clay microstructure. *Journal de Microscopie*, vol. 6, p. 986

- R. Pusch (1968) - A Technique for Investigation of Clay Microstructure. Swedish Geotechnical Institute, Rapport 28: 1968
- R. Pusch (1970) - Clay Microstructure. National Swedish Building Research. Document D 8
- L. Rafalski (1984) - Warstwy mrozochronne z żywicogruntów. Prace Inst. Bad. Dróg i Mostów nr 3/83, ss. 5-56
- S. Rolla (1970) - Zwalczanie przełomów i wzmacnianie nawierzchni drogowych. WKŁ, Warszawa
- L. T. Roman (1987) - Mierzlyje torfianyje grunty kak osnovanija sooruzeni. Izd. Nauka, Novosybirsk
- J. T. Rosenqvist (1959) - Physico-chemical properties of soils soil-water system. J. Soil Mech. Found. Division, Proc. ASCE V 85 SM 2
- B. Rossiński (1978) - Błędy w rozwiązaniach geotechnicznych. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa
- B. A. Savelev (1971) - Fizyka-chimia i strojenie prirodnych ldov i mierzlych porod. Izd. MGU, Moskva
- F. H. Sayles, T. H. W. Baker, F. Gallavres, H. L. Jessberger, S. Kinoshita, A. V. Sadovskiy, D. Segó, S. S. Vyalov (1987) - Classification and Laboratory Testing of Artificially Frozen Ground. Journal of Cold Regions Engineering, vol. 1, no 3, March, ASCE, pp. 22-48
- E. M. Sergejev (1979) - Inżynierska geologia. Izd. Moskovskovo Universiteta
- E. M. Sergejev, B. Grabowska-Olszewska, V. I. Osipov, V. N. Sokolov (1978) - Types of the microstructures of clayey soils. Proc. of the III Int. Congress I.A.E.G. Sec. II, vol. 1, pp. 319-327
- E. M. Sergejev, B. Grabowska-Olszewska, V. I. Osipov, V. N. Sokolov (1979) - Typy mikrostruktur glinistych porod. Inżynierskaja Geologia nr 2, ss. 48-58
- E. M. Sergejev, B. Grabowska-Olszewska, V. I. Osipov, V. N. Sokolov, N. Kolomenski (1980) - The classification of microstructures of clay soils. J. of Microscopy, vol. 120, Pt 33, Dec., pp. 237-260
- L. Sides, G. Barden (1971) - Sample disturbance in the investigation of clay structure. Geotechnique 21, p. 211
- K. M. Skarżyńska (1967) - Laboratoryjny pomiar rozkładu wilgotności i temperatur przy zamrażaniu próbek gruntu. Referaty w SGGW Warszawa
- K. Skarżyńska (1969) - Wpływ procesu zamarzania na niektóre właściwości fizyko-mechaniczne gruntów spoistych. Zesz. Nauk WSR Rozprawy 18, Kraków
- K. Skarżyńska (1980) - Effect of freezing process on the selected properties of frost susceptible soils. The 2-nd Int. Symp. on Ground Freezing, Trondheim, pp. 70-84

- K. M. Skarżyńska (1983) - Badania zmian własności gruntów zamarzających ze szczególnym uwzględnieniem pęcznienia. ZMGIBZ AR Kraków (materiały niepublikowane)
- K. M. Skarżyńska (1985) - Formation of soil structure under repeated freezing - thawing conditions. Fourth International Symposium on Ground Freezing, Sapporo 5-7.08.1985, pp. 213 - 218
- K. M. Skarżyńska, M. Porębska (1985) - The influence of repeating freezing-thawing conditions on heaving of silty soils. Symposium franco-polonais „Gel et Genie Civil”, Varsovie 7-8.10.1985, pp. 93 - 102
- H. Sonntag (1982) - Koloidy. PWN, Warszawa
- E. T. Stępkowska (1973) - Własności fizyko-mechaniczne minerałów ilowych, w: Problemy fizyko-chemii i dynamiki gruntów. PAN - Ossolineum, Wrocław - Warszawa - Kraków - Gdańsk
- E. T. Stępkowska (1977 a) - Test sorpcyjny i możliwości jego stosowania w różnych badaniach. Archiwum Hydrotechniki, t. XXIV, z. 3, ss. 411 - 420
- E. T. Stępkowska (1977 b) - Physics of shearing process in remoulded bentonite with various exchangeable cations. Archiwum Hydrotechniki, t. XXIV, z. 2, ss. 215 - 235
- E. T. Stępkowska (1978) - Test sorpcyjny dla szacowania oddziaływań między cząstkami w mechanice gruntów. I Konf. Minerale i Surowce Ilaste, Bolesławiec
- E. T. Stępkowska (1980) - Clay hypothesis for interpretation of strength and deformation. Studia Geotechnica et Mechanica no 2, pp. 55 - 90
- E. T. Stępkowska (1982) - Study in physics of clay behaviour. Archiwum Hydrotechniki, t. XXIX, z. 4, ss. 469 - 490
- E. T. Stępkowska (1984 a) - Model fizyczny układu woda - ił. VII Kraj. Konf. Mech. Gruntów i Fundamentów, Poznań, ss. 367 - 373
- E. T. Stępkowska (1984 b) - Problems of particle delamination in clay swelling. Proc. 6th Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Budapest, pp. 265 - 272
- E. T. Stępkowska (1985) - Study in microstructure of a marine clay by freezing. Symposium franco-polonais „Gel et Genie Civil”, Varsovie 7-8.10.1985, pp. 103 - 116
- E. T. Stępkowska, S. A. Jefferis (1983) - Study in microstructures of clay slurries. Archiwum Hydrotechniki, t. XXX, z. 3, pp. 193 - 211
- L. Stoch (1974) - Minerale ilaste. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa
- L. Stoch (1977) - Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Z. Wojnickiego pt. „Wpływ stężenia cieczy porów na własności fizyko-mechaniczne iłów”. AGH Kraków (praca niepublikowana)
- Z. Strugalski (1981) - Struktura wewnętrzna materiałów. WNT, Warszawa

- J. Szargut (1975) - Termodynamika. PWN, Warszawa
- M. Szumski (1984) - O oznaczaniu granic konsystencji plastycznej i ocenie stanu gruntów spoistych. Zesz. Nauk. Politechniki Łódzkiej Budownictwo 425, Łódź, ss. 43-62
- P. A. Szumski (1955) - Osnovy strukturnovo ldoviedienija. Izd. AN SSSR, Moskva
- J. Sysak (1962) - Wpływ wietrzenia na podłoże budowlane. Inż. i Bud. nr 8, ss. 321-325
- T. K. Tan (1957) - Discussion on Structure and Rheological Properties of Soils. Proc. of the Fourth Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engin. London V 3, pp. 87-89
- N. K. Tovey (1971) - A selection of Scanning Electron Micrographs of Clays. CVED (C-soils) TR 5a, University of Cambridge, Department of Engineering
- N. K. Tovey, W. K. Jan (1973) - The preparation of soils and other geological materials for the SEM. Proc. Inter. Symposium on Soil Structure, Gothenburg, pp. 59-68
- E. Tyrkiel (1987) - Termodynamiczne podstawy materiałoznawstwa. PWN, Warszawa
- G. K. Tyszinski (1971) - Inżynierskaja glaciologia. Izd. Moskovskovo Universiteta
- B. van Vliet-Lanoe (1985) - Frost Effects in Soil. Soils and Quaternary Landscape Evolution. Edited by J. Boardman, J. Wiley and Sons Ltd.
- W. Volk (1973) - Statystyka stosowana dla inżynierów. WNT, Warszawa
- S. S. Vialov, V. V. Dokuczajev, D. R. Szejkmán (1976) - Podziemnyje ldy i silnoldistyje grunty kak osnovanija sooruzhenii. Strojizdat., Leningrad
- Z. Wiłun (1976) - Zarys geotechniki. WKiŁ, Warszawa
- I. Z. Wojnicki (1976) - Wpływ stężenia cieczy porów na własności fizyko-mechaniczne iłóv. Praca doktorska, Politechnika Poznańska
- U. Wojtowicz (1985) - Structural changes of loess soil submitted freezing. Symposium franco-polonais „Gel et Genie Civil”, Varsovie 7-8.10.1985, pp. 116-123
- Z. Wójtowicz (1979) - Wykonywanie robót ziemnych i fundamentowanie w okresie zimowym. Seminarium Szkoleniowe Oddziału Krakowskiego NOT, 8-9.11.1979, Kraków
- B. V. Zalevski, K. P. Florenski (1952) - O niekotorych priedposylkach ispytania kamiennych stroitielnych materialov na mrozoustoicivost. Trudy Inst. Geolog. Nauk. AN SSSR, vyp. 146

- R. N. Yong, P. Boonsinsuk, D. Murphy (1982) - Short-Term Cyclic Freeze-Thaw Effect on Strength Properties of a Sensitive Clay. Proceeding of the 3rd Int. Symp. on Ground Freezing USA CRREL Hanover - New Hampshire, pp. 97 - 104
- R. N. Yong, P. Boonsinsuk, A. E. Tucker (1984) - A study of Frost-Heave Mechanics of High-Clay Content Soils. Journal of Energy Resources Technology, vol. 106, pp. 502 - 508
- R. N. Yong, P. Boonsinsuk, C. W. Yin (1985) - Alternation of soil behaviour after cyclic freezing and thawing. Fourth Int. Symp. on Ground Freezing, Sapporo 5-7.08.1985, pp. 187 - 195
- H. Youssef (1988) - Discussion of a paper: Classification and Laboratory Testing of Artificially Frozen Ground. Journal of Cold Regions Engineering, vol. 2, no 3, SEP, ASCE, pp. 137 - 139

ZMIANA MIKROSTRUKTURY IŁÓW MONOMINERALNYCH I IŁU PLIOCEŃSKIEGO POD WPLYWEM CYKLICZNEGO PRZEMRAŻANIA I ODMRAŻANIA

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badania zmian mikrostruktury iłów pod wpływem cyklicznego przemrażania i odmrażania od $f=1$ do $f=20$ cykli. Doświadczenia prowadzono dla dwóch różnych modelowych iłów uznanych za monomineralne, tj. iłu kaolinitowego i iłu montmorillonitowego. Porównawczo badano naturalny ił plioceński z Bydgoszczy o mieszanym typie mineralogicznym, w którym charakterystyczne są cechy strukturalne przypisywane glacytektonice.

Określono niezbędne cechy fizyczno-mechaniczno-mineralogiczne badanych iłów uwzględniane w analizie zmian mikrostruktury.

Rejestrowano w sposób ciągły temperaturę w próbkach gruntu. Wyniki pomiarów umożliwiły wyodrębnienie na otrzymanych krzywych zamrażania - odmrażania charakterystycznych etapów (od I do VII) odnoszących się do powstałych równolegle zmian struktury i mikrostruktury iłów.

Mrozowe zmiany struktury iłów określono przy pomocy następujących badań: redystrybucji wody w próbkach, pęcznienia mrozowego, próby rozmrażania w wodzie oraz składu mikroagregatowego. Bezpośredniego opisu zmian makrostruktury dokonano na podstawie analizy zdjęć fotograficznych, zarówno dla próbek, które mrożono i odmrażano cyklicznie, jak i tylko mrożonych. Otrzymane wyniki badań i ich szczegółowa analiza dowiodły wpływu cyklicznego przemrażania i odmrażania na zmiany struktury, jak również uzasadniały poszukiwanie związku z mrozowymi zmianami mikrostrukturalnymi w układzie woda - ił.

Badanie zmian mikrostruktury przeprowadzono metodą bezpośrednią przy pomocy mikroskopu skaningowego (SEM) typu Jeol JXA 50A i Tesla BS-300 na podstawie wykonanych mikrofotografii powierzchni strukturalnych przy powiększeniach od $\times 50$ do $\times 5000$. Zmiany mikrostruktury potwierdzono również testem sorpcyjnym (WSTest). Przeprowadzona analiza mikrofotografii oraz wyniki testu sorpcyjnego pozwoliły jednoznacznie stwierdzić mrozową transformację oraz ustalić trwałe efekty przebudowy mikrostruktury iłów w wyniku pierwszego i dalszych cykli przemrażania i odmrażania. Zmiany dokonujące się w iłach są najbardziej istotne w pierwszych kilku cyklach procesu ($5 < f \leq 10$). Charakteryzuje je wzrost uporządkowania elementów mikrostruktury, wzrost grubości cząstki, zmiana kontaktów między elementami itp.

Osiągnięcie pełnego zakresu przebudowy mikrostruktury oznaczało powstanie w iłach mikrostruktury o quasi równoległej orientacji cząstek nazwanej przez autora mikrostrukturą soczewkową. Interpretację zjawiska mrozowej transformacji wyjściowego typu mikrostruktury iłów w mikrostrukturę soczewkową przeprowadzono w oparciu o zaproponowany model. Jednocześnie określono efekty i trwałość zachodzących zmian oraz ich zakres w poszczególnych etapach przebudowy.

Dowiedzione zmiany mikrostruktury łąw pod wpływem działania mrozu i odmrażania uzasadniały badanie własności fizyczno-mechanicznych cyklicznie przemrażanych i odmrażanych łąw.

Badano bardzo ważne z inżynierskiego punktu widzenia własności np. granice konsystencji, wytrzymałość na bezpośrednie ścinanie, pęcznienie po rozmrożeniu itd. Analiza zmian otrzymanych wartości parametrów fizyczno-mechanicznych wykazała ścisłą zależność i bezpośredni ich związek z mrozowymi zmianami mikrostruktury, pozwoliła także wnioskować, że w ocenie geotechnicznej łąw podłoża budowlanego, które mogą ulec przemrażaniu, największe znaczenie mają pierwsze cykle procesu ($f = 5 + 10$) zamrażania-odmrażania. Stosowana dotychczas w geotechnice ocena łąw nie uwzględnia w tym zakresie wpływu mrozu na ich właściwości, stąd przyjmowane w praktyce budowlanej oceny stanu łąw mogą znaleźć się po stronie niebezpiecznej.

Wyniki przedstawionych badań mogą być przydatne przy rozwiązywaniu szeregu problemów z zakresu inżynierii lądowej, w których oddziaływać będzie na łąy podłoża budowlanego mróz, praktycznie niemożliwy do wyeliminowania w naszej strefie klimatycznej.

THE CHANGE OF THE MICROSTRUCTURE MONOMINERAL CLAYS AND PLIOCENE CLAY
DUE TO FREEZING AND THAWING PROCESSES

Summary

This study presents the results of microstructure changes on two different monomineral clays: one Sedlec kaoline which considers kaolinic clays and the other one MAD bentonite, represented by montmorillonitic clays, due to frost action.

The number of freezing cycles amounted from 1 to 20. For comparison reasons the natural pliocene clay from Bydgoszcz was also examined. Natural clay has glaciotectionics structure and has a mixed mineralogical character. Initial physico-mechanical and mineralogical parameters of clays were determined before the freezing processes.

The results of temperature study during freezing and thawing resulted in determining I to VII specific stages. The obtained stages in temperature changes were due to the transformation of clay microstructure. The change of the structure was measured by water content distribution, frost swelling, slaking test and microaggregate.

The results and the analysis of structure changes showed relationship with microstructural changes of clay-water system due to freezing-thawing cycles. A scanning electron microscopy was used to study the microstructural changes of clays. The x50 and x5000 magnifications were taken as representing optimum values. The microstructural transformation was also confirmed by water sorption test (WSTest). Microstructural transformation studies resulted in stable effects in reorientation and ordering of microstructure, i.e. change in contact character mutual orientation of aggregates and microaggregates.

Transformation of the microstructure frozen clays tends to the lenses type (named by the author), especially found around the ice lenses. The interpretation of microstructural changes due frost action was illustrated by the model type structure of clay-water system.

Microstructural changes correlated well with the alternation of physico-mechanical properties in monomineral and natural clays.

Shear strength and consistency limits, especially w_L , decrease after successive freezing cycles, and they are always lower than those before the freezing process.

In practical engineering terms we may expect the decrease of geotechnical parameter value of freezing and thawing clays. This decrease will be similar or greater than the one obtained.

This study is significant for engineers in order to determine the secure value of geotechnical parameters and to design constructions in temperature climate.

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МОНОМИНЕРАЛЬНЫХ ГЛИН И ПЛИОЦЕНОВОЙ ГЛИНЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЦИКЛИЧЕСКОГО ПРОМЕРЗАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ

Резюме

В работе представлены результаты исследований изменений микроструктуры глин под воздействием циклического промерзания и оттаивания в интервале $f = 1$ до 20 циклов. Испытания проводились для глин, принятых как мономинеральные: каолиновые и монтмориллонитовые. Для сравнения испытывали натуральную плиоценовую глину из Быдгощи смешанного типа, в котором были характерные структурные особенности ледникового отношения. Определили необходимые особенности физико-механико-минеральные глин, которые приняли во внимание в анализировании изменений микроструктуры. Непрерывно регистрировали температуру образцов. Результаты испытаний дали возможность выделения на кривых замораживание - оттаивание характерных этапов $/I$ до VII/, которые происходили параллельно с изменениями микроструктуры глин.

Изменения структуры определили способом: перераспределения влаги морозного пучения, размокания в воде, а также микроагрегатного состава. Описание изменений структуры было завершено после анализа фотографий для образцов, которые замораживали циклически и после оттаивания. Полученные результаты исследований и их подробный анализ свидетельствовали о влиянии циклического промерзания и оттаивания на изменения структуры, а также обосновали искание связи с морозовыми изменениями микроструктуры системы: вода - глина. Для исследования изменений микроструктуры использовали высокоразрешающий сканирующий электронный микроскоп /СЭМ/. В качестве оптимальных были взяты увеличения $\times 50$ до 5000. Микроструктурные изменения подтвердили также сорбционным тестом /ВСТ/.

Анализ микрофотографий вместе с результатами сорбционного теста подтвердили существенным образом морозовые трансформации микроструктуры, а также позволили установить прочные эффекты перестройки элементов микроструктуры глин, возникшие прежде всего в результате первого и поменьше в последующих циклах промерзания и оттаивания. Главные изменения в глинах наблюдаются до $f = 10$ циклов. Они характеризуются увеличением упорядоченности элементов микроструктуры, увеличением толщины частиц, изменениями контактов между элементами и т.д.

Достижение полной сферы перестройки микроструктуры обозначало образование в глинах микроструктуры, характеризующей почти параллельную ориентацию частиц, по названию автора, линзовую микроструктуру. Интерпретацию явления морозовых трансформаций исходного типа микроструктуры глин в линзовую микроструктуру провели на базе предложенной модели, одновремен-

но определили эффекты и прочность происходящих изменений, а также сферу этапов перестройки. Доказанию изменений микроструктуры глин под воздействием мороза и оттаивания способствовало изучение физико-механических свойств. Исследовали существенные для инженера свойства: пределы раскатывания, параметры срезывания и прочие.

Анализ полученных результатов физико-механических параметров дал точную зависимость микроструктуры глин от морозовых изменений. Результаты проведенных исследований можно рекомендовать для разрешения в тех случаях строительства, в которых наступает циклическое промерзание и оттаивание глинистых грунтов.

Biblioteka Główna ATR
w Bydgoszczy

S

18859/5