

WŁAŚCIWOŚCI GEOTECHNICZNE WYBRANYCH GRUNTÓW POLSKI

UKD 624.131(438-13)

Przez wiele lat w Zakładzie Mechaniki Gruntów i Fundamentowania Wydziału Geologii UW wykonywano geotechniczne badania właściwości gruntów Polski dla potrzeb budownictwa, górnictwa, hydrotechniki. Zespołowo bądź indywidualnie powstawały prace naukowe, których celem było rozwiązanie konkretnego, praktycznego zadania lub też potrzeba stworzenia wzorców metodycznych ułatwiających interpretację wyników badań dla celów projektowania. Bibliografię tych prac zawierają materiały konferencji „Mechanika gruntów w zastosowaniach inżynierskich” poświęconej 40-leciu pracy naukowej profesora

Zygmunta Glazera (7). Te wieloletnie doświadczenia trudno ująć według jednolitego schematu zarówno ze względu na różnorodność właściwości gruntów, jak i na cele badawcze, dla których je analizowano.

W tej sytuacji, chcąc na konferencji naukowej poświęconej 25-leciu powstania SIT Górnictwa na Wydziale Geologii przedstawić pewne zbiorcze dane dla przebadanych przez zespół zakładu gruntów Polski, wybrano kilka najbardziej typowych i na ich podstawie starano się podsumować zebrane w ciągu lat doświadczenia.

Za najbardziej poznane, szeroko w Polsce rozprzestrze-

nione, a jednocześnie ciekawe pod względem poznawczym uznano: spoiste grunty mioceńskie zapadliska przedkarpackiego, gliny zwałowe zlodowacenia środkowo- i południowopolskiego, wybrane grunty zwietrzelinowe oraz grunty antropogeniczne, obejmujące głównie odpady przemysłowe.

GRUNTY MIOCEŃSKIE ZAPADLIKA PRZEDKARPACKIEGO (tab. I)

Grunty mioceńskie niezwiertzałe. Grunty mioceńskie osiągnęły obecny stan w trakcie złożonej historii geologicznej. Szczególnie ważnymi czynnikami w tym formowaniu, oprócz ciężaru warstw nadległych, były okresy obciążenia (np. transgresja lodowca) i odciążenia (np. erozji, regresji lodowca). A więc grunty te w swej historii były bardziej obciążane aniżeli to wynika z obecnego obciążenia geologicznego. Podczas takiej historii przeszły one w stan przekonsolidowany (nie odprężony do końca), w którym – poza niewielkiej miąższości strefą przypowierzchniową – pozostają do dzisiaj.

Występują w nich liczne nieciągłości oraz wyraźnie wykształcona pozioma laminacja. Można w nich ogólnie wyróżnić nieciągłości typu ciosu i zlustrowań. Laminacja utworów mioceńskich jest związana z naprzemianległym występowaniem drobnych warstewek ilastych, ciemnych, zawierających siarczki żelaza oraz rzadziej występujących cieńszych i jaśniejszych warstewek piaszczysto-pylastych. Pod względem granulometrycznym grunty mioceńskie są wykształcone jako: ily pylaste, ily, gliny pylaste zwięzłe, podrzędnie jako gliny, pyły oraz piaski pylaste i drobne, przy czym największe zróżnicowanie wykazują w sferach

brzeżnych zbiornika, stając się bardziej jednorodne w jego środku (7).

Właściwości fizyczne i mechaniczne gruntów niezwiertzałych dotyczą gruntów spoistych o zawartości frakcji iltowej powyżej 15%. Pod względem statystycznym ustalono parametry dla gruntów o składzie granulometrycznym odpowiadającym iltom i współczynniku aktywności koloidalnej Skemptona $A < 1,25$. O znacznym skonsolidowaniu tych gruntów świadczą również wskaźnik naturalnego skonsolidowania Priekłoskiego równy średnio 1,20 (wykazują stan półzwarty $w_s < w_n < w_p$). Cykliczne wysuszenie i nawilgacanie rozkruszonego w pierwszych cyklach gruntu prowadzi do całkowitej przemiany tekstury i struktury – „rozlasowania”.

Podczas badań wytrzymałościowych iltów zauważa się, że większość z nich ulega zniszczeniu po wyraźnych powierzchniach poślizgu (4). Po osiągnięciu maksymalnej wartości naprężenia dewiatorowego obserwuje się bardzo wyraźny spadek naprężeń ścinających. W przypadku pionowego obciążenia grunty te wykazują stosunkowo wysokie parametry wytrzymałościowe, a zwłaszcza spójności.

Zwietrzeline grunty mioceńskich. Stropowe partie gruntów mioceńskich są zwietrzałe. Dotyczy to przede wszystkim stref ich wychodni. Są to grunty niezwykle wrażliwe na oddziaływanie czynników egzogenicznych (6). Obserwacje terenowe pozwalają wydzielić w profilu wietrzynowym dwie główne strefy: I – iltów o całkowicie zmienionych cechach pierwotnych, II – iltów zwietrzałych.

W strefie I nie obserwuje się tak typowej dla tych gruntów laminacji. Górne partie są najczęściej odwapnione, dolne wzbogacone w węglan wapnia. Miąższość tej strefy

Tabela I

PARAMETRY FIZYCZNO-MECHANICZNE GRUNTÓW MIOCEŃSKICH ZAPADLIKA PRZEDKARPACKIEGO

PARAMETR	KOMPLEKS GRUNTÓW	GRUNTY MIOCEŃSKIE (NIEZWIERTZALE)	ZWIERTZELINY GRUNTÓW MIOCEŃSKICH		GRUNTY NIEPEŁNIAJĄCE ZAGŁĘBIENIA (RYWNY REJON PIASCZCZYSTO-MACHÓW - KAZIMÓW)		BENTONITY (REJON JAWORA)	GRUNTY ZWAŁOWANE Z IŁÓW KRAKOWIECKICH (DLA REJONU MACHOWIA)
			STREFA I	STREFA II	SERIA a	SERIA b		
1	PODSTAWOWY SKŁAD CHEMICZNY	% $SiO_2=53, Al_2O_3=15, Fe_2O_3=6, CaO=7, MgO=2, K_2O=2, Na_2O=1$ STR.PR=13	SKŁAD CHEMICZNY I MINERALOGICZNY JEST ZBLIŻONY DO SKŁADU GRUNTÓW MIOCEŃSKICH, OBSERWUJE SIĘ PODWYŻSZONA HYDROFILNOŚĆ		PIASKI DROBNE ŚREDNIE WŁADKI PYLEW I PIASKÓW PYLASTYCH		$SiO_2=56, Al_2O_3=18, Fe_2O_3=35, CaO=5, MgO=3, K_2O=0,8, Na_2O=1$, STR.PR=14	SKŁAD CHEMICZNY I MINERALOGICZNY GENERALNIE JEST ZBLIŻONY DO SKŁADU IŁÓW KRAKOWIECKICH
2	GLÓWNE MINERAŁY FRAKCJI IŁOWEJ	ILLIT + MONTHORYLOHIT					MONTHORYLOHIT I ILLIT	
3	ZANARCIŚCIE FRAKCJI IŁOWEJ f_i	15-60 DLA IŁÓW O $A < 1,25$ ŚR 38,5	15-45				4-10	14-55
4	ZANARCIŚCIE FRAKCJI PYLWEEJ f_{ip}	35-60	30-70				40-80	30-50
5	GĘSTOŚĆ WŁAŚCIWA ρ_s	2,65-2,74 DLA IŁÓW O $A < 1,25$ ŚR 2,70	2,65-2,75		ŚR 2,65		2,63-2,72 ŚR 2,67	2,10-2,44
6	GĘSTOŚĆ OBJĘTOŚCIOWA ρ_n	1,85-2,36 DLA IŁÓW O $A < 1,25$ ŚR 2,12	1,60-1,95	1,75-2,00	1,72-1,77 ŚR 1,74	1,89-2,09 ŚR 2,05	1,46-1,75	1,51-2,09
7	POROWATOŚĆ n	22-45 DLA IŁÓW O $A < 1,25$ ŚR 33	40-60		35-55		ŚR 37	55-57
8	AKTYWNOŚĆ w_j SKEMPTONA A	0,71-1,41 DLA IŁÓW O $A < 1,25$ ŚR 0,87	0,6-1,5		0,8-1,95		1,1-1,5	1-2,5
9	WILGOTNOŚĆ TIKSTROPONNA w_{1s}	100-200	70-150		HSPÓŁCZYNNIK FILTRACJI ŚR $5 \cdot 10^{-8}$ m/s		HSPÓŁCZYNNIK FILTRACJI	50-115
10	POWIERZCHNIA WŁAŚCIWA S	68-258	50-250	200-300	HSPÓŁCZYNNIK KAPILARNE ŚR $7 \cdot 10^{-6}$ m/s		DO 820	50-300
11	WILGOTNOŚĆ NATURALNA w_n	8,8-37,0 DLA IŁÓW O $A < 1,25$ ŚR 19,8	25-45	20-35	15,3-22,5 ŚR 21,1		52-67	13-43
12	GRANICA PLYWNOŚCI w_L	33,0-82,1 DLA IŁÓW O $A < 1,25$ ŚR 64,6	45-85		HSPÓŁCZYNNIK OBSZCZALNOŚCI 0,10-0,17		28,7-54,8	22-63
13	GRANICA PLASTYCZNOŚCI w_p	21,9-39,0 DLA IŁÓW O $A < 1,25$ ŚR 28,2	20-35		21,3-26,2		38-68	15-38
14	GRANICA SKURCZU w_s	—	—		—		—	10-18
15	STOPIEŃ PLASTYCZNOŚCI J_L	0,25 DO -0,50 DLA IŁÓW O $A < 1,25$ $J_L = 0,0$ DO -0,50	0,9-0,0	0,1 DO -0,1	—		< 0,1	0,05-0,50
16	STOPIEŃ WILGOTNOŚCI S_r	0,90-1,0	0,8-1,0		—		—	0,5-1,0
17	EDOMETRYCZNY MODUŁ ŚCISNIALNOŚCI PIERWOTNEJ M_0	5,9-146,0 DLA IŁÓW O $A < 1,25$ $J_L = -0,25$ DO 0,0, $M_0 = 20-106$	1-10	5-20	—		DO 10	5-30
18	STOPIEŃ SKONSOLIDOWANIA w_j PRIEKŁOSKIEGO K_d	1,0-1,80 DLA IŁÓW O $A < 1,25$ ŚR 1,20	0,1-1,0	0,9-1,1	—		—	0,4-1,5
19	SPÓJNOŚĆ C_u	0,015-0,426 DLA IŁÓW O $A < 1,25$ ŚR 0,15, $J_L = -0,25$ DO 0,0	0,005-0,05	0,02-0,10	—		0,010-0,020	0,001-0,15, ŚR 0,030
20	KĄT TARCIA NIEWNĘTRZNEGO ϕ'_u	11,5-29 DLA IŁÓW O $A < 1,25$ ŚR 19	2,5-15	5-15 ŚR 9	27-35 ^a 23-33*		27-33,5	4,5-9,0
21	LICZBA OZNAZEŃ	75 KOMPLETÓW OZNAZEŃ PRAM. FIZYCZNYCH 300 PRÓBEK W BADAANIACH MECHANICZNYCH	25-35 KOMPLETÓW BADAŃ		55 KOMPLETÓW OZNAZEŃ		10 KOMPLETÓW BADAŃ	40 KOMP. OZNAZEŃ PRAM. FIZYCZNYCH 325 PRÓBEK W BADA. MECHANICZNYCH

* WARTOŚCI NAJ CZĘŚCIEJ SPOTYKANE

WARTOŚCI ŚREDNIE ZOSTAŁY OBLICZONE, GDY WSPÓŁCZYNNIK ZMIENNOŚCI $V < 25\%$

wynosi maksymalnie do 1,5 m. Strefa II obejmuje zwietrzałe iły, przy czym stopień zwietrzenia w pionie jest niejednakowy. Często poszczególne okruchy iłów zachowują swoje pierwotne cechy. Procesy wietrzeniowe najbardziej uwidaczniają się na powierzchni laminacji (warstwowań), wzdłuż których w pierwszym etapie grunty ulegają rozwarstwieniu. Najczęściej rozpadają się one na płytki lub blaszki. Całkowita miąższość zwietrzelin wynosi na ogół kilkadziesiąt centymetrów, dochodzi do (2–3 m), a niekiedy do 5 m.

Grunty wypełniające rynny i zagłębienia. W stropowych partiach gruntów mioceńskich niekiedy są obserwowane rynny i zagłębienia wypełnione innymi litologicznie utworami, głównie są to utwory pylaste warstwowane (seria a). W stropie często występuje kolejne mniejsze wcięcie wypełnione przeważnie materiałem piaszczystym (seria b). Geneza tych osadów nie jest jeszcze precyzyjnie ustalona (7). Utwory serii a to: piaski drobne i średnie, kwarcowe, jasnoszare warstwowane równoległe i przekątne. Zawierają przewarstwienia piasków pylastych i pyłów. Maksymalna miąższość dochodzi do 18 m. Utwory pylaste (seria b) są wykształcone w postaci pyłów i pyłów piaszczystych laminowanych piaskiem pylastym i ilem. Pyły są jasnoszare do ciemnoszarych, występują głównie w stanie twaroplastycznym lub półzwarłym. Maksymalna miąższość tej serii wynosi ok. 30 m. Grunty te są wrażliwe na zmiany reżimu hydrogeologicznego. Grunty pylaste są szczególnie podatne na deformacje filtracyjne oraz wrażliwe na wszelkie naruszenia ich pierwotnej struktury.

Bentonity. W profilu pionowym gruntów mioceńskich spotyka się często wkładki i przewarstwienia bentonitów oraz tufów jako przejawów aktywnej działalności wulkanicznej, zachodzącej w zapadlisku w trzeciorzędzie (7). Zwiększoną liczbę i miąższość tych wkładek obserwuje się w rejonie południowego obrzeżenia Gór Świętokrzyskich. W okolicach Chmielnika i Jawora występują bentonity w postaci warstw o miąższości 0,2–2,0 m do głęb. 10 m ppt. Głównym składnikiem bentonitów jest montmorillonit Ca, w mniejszym stopniu illit, domieszka węglanu wapnia i uwodnionych tlenków żelaza. Bentonity są najbardziej hydrofilnymi gruntami wśród gruntów mioceńskich; powinny być traktowane jako osobna grupa gruntów, szczególnie wrażliwych na zmianę swoich właściwości pod wpływem nawilgacania. Wymagają one stosowania badań metodami nienormowymi.

Grunty zwałowane z iłów krakowieckich. Właściwości gruntów zwałowanych powstałych w wyniku różnych oddziaływań naturalnych i sztucznych znacznie różnią się od właściwości iłów krakowieckich (1). Podczas urabiania iły ulegają odspojeniu i rozdrobnieniu, następnie w postaci brył są transportowane taśmociągami na zwałowisko. Po zwałowaniu, które powoduje najczęściej segregację transportowanego gruntu zaczyna się okres kształtowania właściwego nowego ośrodka. Z czasem, wskutek zagęszczania pod wpływem obciążenia, punktowe kontakty przekształcają się w wyraźne styki powierzchniowe, w efekcie dążąc do objęcia całkowitej powierzchni brył. Praktycznie grunt zwałowany może zatracać swą pierwotną strukturę, co prowadzi do jego ujednorodnienia.

Na podstawie obserwacji terenowych ścian przekrojów i wykonanych wierceń w zwałowiskach o okresie istnienia do 10 lat, można wyróżnić makroskopowo 3 rodzaje makrostruktur gruntu zwałowanego:

- I – pojedyncze okruchy o rozmiarach do 0,5 m, otoczki tkwiące w cieście ilastym,
- II – liczne okruchy przeważnie mniejsze od 0,10 m w masie iłowej,

III – okruchy i otoczki przeważnie powyżej 0,10 m z tkwiącym między nimi materiałem ilastym.

Charakterystyka geotechniczna obejmuje jedynie grunty zwałowane o makrostrukturze I i II, które są najbardziej niekorzystne pod względem wytrzymałościowym. Odkształcalność gruntów zwałowanych w stosunku do iłów *in situ* jest znacznie wyższa. Badania wytrzymałościowe wskazują, że są one wrażliwe na szybkie obciążenia o stałej wartości (2). Utrata warunków równowagi zależy od wilgotności (stanu) gruntu (3). Grunty zwałowane w fazie kilkuletniego (do 10 lat) istnienia wykazują znacznie niższą spójność w stosunku do niespękanych iłów krakowieckich, a podobną średnią wartość kąta tarcia wewnętrznego. Grunty w stanie plastycznym i miękkoplastycznym, zwałowane pod wpływem obciążeń dynamicznych, mają wyraźnie mniejszą wytrzymałość na ścinanie, nawet ok. 50–60%. Natomiast przy wilgotnościach poniżej 30% i prędkościach drgań poniżej 1 cm/s praktycznie nie obserwuje się mierzalnych odkształceń (5).

GLINY ZWAŁOWE ZŁODOWACENIA ŚRODKOWOPOLSKIEGO I POŁUDNIOWOPOLSKIEGO

Kompleksowe badania glin zwałowych złodowacenia południowopolskiego i środkowopolskiego prowadzone w Zakładzie Mechaniki Gruntów i Fundamentowania od 1962 r. wskazują na nieznaczne różnice ich właściwości, mimo że w cząstkowych opracowaniach często opisuje się różnice barwy, składu granulometrycznego, stopnia skonsolidowania itp. poszczególnych ich poziomów. Podobieństwo genetyczne i obfitość opracowań pozwala, w świetle badań standardowych, uznać ich właściwości geotechniczne za dobrze rozpoznane. Istotną jednak cechą glin zwałowych, często zbyt mało analizowaną, jest punktuwa zmienność ich właściwości, wynikająca z dużej pionowej i poziomej zmienności facjalnej i wilgotnościowej. Pokrywy, zwane ogólnie glinami zwałowymi, mogą być zbudowane lokalnie z materiału o różnych frakcjach, gdzie wśród utworów spoistych wystąpią wciśnięte przez lodowiec gniazda utworów syplikich bądź resztkowe nagromadzenia kamienistego reziduum. W ślad za tym zmienna jest lokalnie dystrybucja wilgotności w masywie. Strefy uplastycznienia i nawodnienia towarzyszą soczewkom i gniazdom zawodnionych utworów syplikich lub deniwelacjom stropu materiału spoistego.

W glinach zwałowych trudno zatem mówić o jednoznacznych warstwach geotechnicznych lub o podobnym skonsolidowaniu czy odkształcalności gruntu w obrębie jednego poziomu stratygraficznego. Występuje natomiast powtarzalność wielu cech, wspólnych dla różnych poziomów glin.

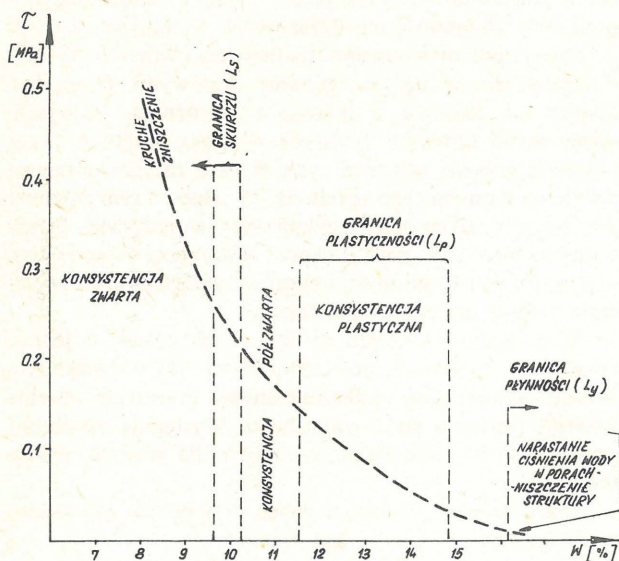
Dla rozwiązań geotechnicznych przy ocenie glin zwałowych szczególnie istotne jest zatem:

- rozpoznanie przestrzennej konfiguracji stropu danego poziomu i jego miąższości, wzajemnego usytuowania poziomów glin, charakteru zaburzeń glacytogenicznych i rodzaju gruntów w bezpośrednim ich kontakcie itp. Jest to często trudne na podstawie wierceń, gdyż młodsze poziomy zalegają stosunkowo ciąglą pokrywą, podczas gdy sfałdowane płyty glin starszych są strukturami trudnymi do zidentyfikowania, co może prowadzić do błędnych interpretacji przekrojów geotechnicznych (ryc. 1);
- rozpoznanie stref zmiennego nawilgocenia masywu, gdyż w glinach zwałowych przy utracie zaledwie kilku procent wilgotności grunt przechodzi ze stanu półzwarłego w zwarty, co powoduje znaczne zmiany wytrzymałości



Ryc. 1. Złożone kontakty kilku generacji glin zwałowych

Fig. 1. Position and contacts of several generations of boulder clays



Ryc. 2. Ogólny schemat zmiany wytrzymałości na ścinanie (τ) glin zwałowych w funkcji wilgotności (w_n)

Fig. 2. Generalized diagram showing the shearing strength (τ) versus water content (w_n) in boulder clays

(ryc. 2). Z plastycznego gruntu, glina zwałowa staje się utworem o charakterze słabej skały, a w wysuszonym materiale pojawia się bloczność, podzielność materiału (8);

– interpretacja wyników badań parametrów ścinania na podstawie odpowiednich kryteriów zniszczenia; zastosowanie bowiem coulombowskich parametrów ścinania,

testowanych przy użyciu standardowej aparatury typu norweskiego, jest prawidłowe w glinach zwałowych dla wilgotności ok. 8–15%, poniżej obserwuje się kruche niszczenie a powyżej silne narastanie ciśnienia wody w porach i niszczenie słabych w tym gruncie wiązań strukturalnych (9);

– szczególnie staranne analizowanie przemienności właściwości tych gruntów, następujące w wyniku ingerencji obiektu inżynierskiego w różnych jego fazach, ze względu na odwadnianie i nawadnianie masywu.

Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że w dużych obiektach, takich jak odkrywki węgla brunatnego czy warszawskie metro, w czasie ich wykonywania następuje wysuszenie masywu, a zatem polepszanie właściwości wytrzymałościowych, przy czym jednocześnie w wysuszonym materiale wzrasta trudność urabiania. Przewycięża to częściowe ujawnianie się bloczności glin, wzrasta jednak trudność interpretacji danych wytrzymałościowych i odkształceniowych. Obecna procedura badawcza w laboratoriach jest jednak tak długotrwała, że wyniki badań pochodzące z etapu rozpoznania odpowiadają na ogół przesuszonemu masywowi (wilgotności kilka do ok. 10%) i ustalają konsystencję glin jako zwartą i półzwartą. Odpowiada to fazie wykonywania obiektu. Ponieważ badania wskazują, że odwodniony masyw glin zwałowych charakteryzuje wilgotność zbliżoną do granicy plastyczności 11–14%, a masyw nie odwodniony – naturalny – ok. 13–19%, dlatego dla prognozy zmian właściwości glin w odpowiednich etapach budowy i eksploatacji obiektu należy je rozpatrywać w odpowiednich przedziałach wilgotności obciążeń (tab. II). Zarówno analiza zmian wytrzymałości, jak i odkształcalności glin zwałowych wskazuje, że zależność tych parametrów od stopnia obciążenia i wilgotności jest większa niż zróżnicowanie tych właściwości między poszczególnymi poziomami glin.

Przykładowo, dla glin z rejonu Warszawy, niezależnie od ich położenia stratygraficznego, stwierdzono dla próbek o konsystencji plastycznej wzrost wartości modułu odkształcenia w konsolidometrze wraz ze wzrostem naprężenia i następnie stabilizację. Przy gruntach o konsystencji zwartej zależność modułu od naprężenia jest prostoliniowa (8). Również wartość współczynnika konsolidacji tych gruntów nie jest stała i zmienia się wraz ze stopniem konsolidacji. Jak niemiarodajną dla glin zwałowych jest średnia wartość parametru, wskazuje także zmienność wytrzymałości na ścinanie (τ) w jednym tylko poziomie gliny zwałowej (głina zlodowacenia Odry w rejonie Warszawy) analizowana bez rozdzielenia na przedziały odpowiadające zmiennej wilgotności. W przedziale wilgotności do 10–16% współczynnik zmienności (V) może dochodzić do ponad 100% (tab. III).

Przy włączeniu do rozważań danych dotyczących konsystencji zwartej rozrzuty byłyby wielokrotnie większe. Prognozując przemienność właściwości glin zwałowych, należy uwzględnić również inne czynniki. Gliny są gruntami o dużej wrażliwości strukturalnej, zwłaszcza gdy ulegną przesuszeniu. Przy wilgotnościach poniżej granicy plastyczności wskaźnik osłabienia strukturalnego $s = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\min}} \geq 4$. Duża, bo 10-krotnie większa niż np. ilów

zastoiskowych, jest podatność glin na rozmakanie; przy przesuszeniu proces ten ulega przyspieszeniu. Dlatego na skarpach odkrywek przesuszone gliny ulegają łatwo erozji. Są to natomiast grunty niebezpieczne. Przy obciążeniach do 10 kPa odkształcenia pęcznienia w glinach dochodzą zaledwie do 2%. Duże zmiany strukturalne zachodzą natomiast w glinach wskutek cyklicznego za-

PRZYKŁAD ZMIENNOŚCI PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCI I ODKSZTAŁCALNOŚCI
W GLINACH REJONU WARSZAWY UŚREDNIONYCH DLA RÓŻNYCH PRZEDZIAŁÓW WILGOTNOŚCI

Tabela II

Poziom gliny		Przedziały wilgotności												
		poniżej 10%			10–12%			12–14%		14–16%		powyżej 16%		
		c	ϕ	M_o	c	ϕ	M_o	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ	M_o
Złodowacenie środkowopolskie	złod. Warty	0,07	20	30	0,05 do 0,07	15 do 20	7,5 do -10,5	0,035 do 0,05	10 do 15	0,005 do 0,35	5 do 10	0,005	poniżej 5	3–5
	złod. Odry	0,025	20	30	0,025 do 0,05	4 do 20	10 do 13	0,015 do 0,025	3 do 5	0,015 do 0,001	3 do 4	0,001	poniżej 2	2–5

Całkowite parametry ścinania: c – spójność (MPa), ϕ – kąt tarcia wewnętrzznego ($^{\circ}$), M_o – edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej dla obciążenia w zakresie 0,00–0,20 MPa

ZMIENNOŚĆ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE (τ)
DLA GLIN ZWAŁOWYCH ZŁODOWACENIA ODRY

Tabela III

Liczba oznaczeń N	Wytrzymałość średnio MPa	Współ- czynnik zmienności V %	Poziom ufności α %	$\pm t_{\alpha} \frac{\sigma}{N}$ MPa	Wartość τ maksy- malnie MPa	Wartość τ mini- malnie MPa
38	0,143	122	90	0,047	0,190	0,096
			95	0,057	0,200	0,086
			99	0,077	0,220	0,066
			99,9	0,101	0,244	0,042

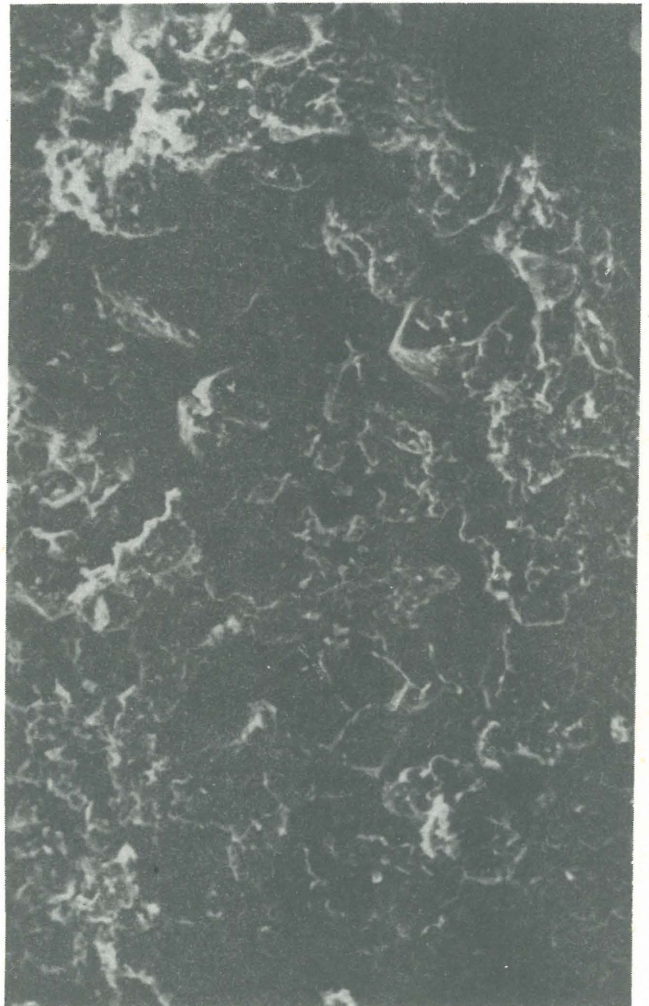
mrażania i odmrażania (ryc. 3); odkształcenia zamrażania dochodzą do 4%. Podatność ta zależy od początkowej wilgotności gruntu i działa destruktywnie na strukturę glin od 10% wilgotności.

GRUNTY ZWIETRZELINOWE

Ogólna charakterystyka problematyki. Grunty zwietrzelinowe są utworami trudnymi do badania w warunkach laboratoryjnych oraz do zunifikowanego przedstawienia ich właściwości. Trudności jednolitego ich opisu wynikają zarówno ze zróżnicowania litologicznego skał macierzystych, z których powstają, jak również ze zmiennego, rozwijającego się w czasie postępu wietrzenia.

Niedostateczna znajomość czynników wietrzeniowych i geny dezintegracji materiału leży często u podstaw wadliwych klasyfikacji zwietrzelin i błędnego poglądu, że zwietrzeliny, niezależnie od ich wykształcenia, należą do gruntów słabych. Często jest również nieuwzględnianie zwietrzelin w opracowaniach (np. kartograficznych), co stwarza pozory, jakoby skała macierzysta występowała bezpośrednio na powierzchni terenu. Uproszczone schematy podziału zwietrzelin znajdują się również w normach branżowych, w tym także w normie PN/84-03020.

Grunty zwietrzelinowe w warunkach klimatu polskiego rozwijają się obecnie na terenie całego kraju i osiągają miąższości od kilku do kilkudziesięciu metrów, można je ogólnie uznać za ośrodek niejednorodny pod względem granulometrycznym, strefowo zmienny, w różnym stopniu skonsolidowany lub nieskonsolidowany, zawierający w sobie zwietrzaliny matrix oraz okruchy skalne. Badania gruntów zwietrzelinowych w Zakładzie Mechaniki Gruntów i Fundamentowania były prowadzone od połowy lat



Ryc. 3. Zmiany strukturalne w glinie zwałowej po 10 cyklach zamrażania. Wilgotność 18%. Powiększenie 500 \times

Fig. 3. Rebuild of structure of a boulder clay after 10 cycles of freezing, water content = 18%, magnification 500 \times

sześciesiątych (1965) i dotyczyły skał i gruntów z różnych rejonów Polski (utwory kredowe Wyżyny Lubelskiej, skały wulkaniczne i metamorficzne Gór Izerskich, Kaczawskich, Niecki Wałbrzyskiej, utwory mioceneskie zapadliska przedkarpackiego). Pewne dane porównawcze stanowiły obserwacje zwietrzelin osadów fliszowych oraz w warunkach tropikalnych – badania łupków Essna i wapieni w rejonie Luksoru w Egipcie.

Z doświadczeń tych wynika, że badania zwietrzelin nie mogą być prowadzone jedynie w zakresie lokalnej oceny ich właściwości geotechnicznych, lecz muszą być rozpatrywane problemowo na tle ich genezy, litologii skał podłoża i stopnia zaawansowania procesu rozpadu skały macierzystej.

Wykształcenie zwietrzelin. Proces zwietrzenia skał jest procesem zmiennym w czasie i uzależnionym od rodzaju i intensywności oddziaływania różnych czynników wietrzenia. Ogólnie zwietrzliny pokrywowe, a tymi się przede wszystkim zajmowano, ze względu na ich zmienność uwarunkowaną nachyleniem powierzchni skał wietrzejących, podzielono na zwietrzliny *in situ* i zwietrzliny zboczowe, charakteryzujące się zaburzeniami związanymi z ruchem materiału na zboczu. Dla właściwej oceny zwietrzelin jako podłoża budowli istotny jest zasięg strefy zwietrzenia oraz określenie zmienności materiału w profilu pionowym – wietrzeniowym. Opracowane początkowo dla zwietrzelin skał Wyżyny Lubelskiej profile wietrzeniowe zwietrzelin *in situ* i zwietrzliny zboczowej znalazły zastosowanie dla zwietrzelin innych typów skał osadowych, zwłaszcza tam, gdzie przeważało wietrzenie fizyczne (ryc. 4).

Jako kryteria wydzielenia poszczególnych stref profilu wietrzeniowego uznano stopień i charakter rozdrobnienia skał, cechy strukturalne materiału zwietrzałego i wynikające z nich właściwości fizyczne. Przy charakterystyce poszczególnych stref profilu uwzględniono takie cechy, jak: wymiar ziarn, okruchów i bloków, ich przestrzenne ułożenie, kształt okruchów, zmiany cech fizycznych materiału w okruchach w stosunku do materiału macierzystego, wypełnienie przestrzeni między okruchami, cechy wytrzymałościowe, szczelinowatość. Dla zwietrzelin zboczowych określono dodatkowo cechy związane z przemieszczaniem materiału po zboczu.

Ze względu na ułożenie okruchów i ich kształt w obrębie strefy III można wyróżnić podstrefę gruzu grubego nieregularnego i niezorientowanego i podstrefę gruzu grubego płytkowego zorientowanego. Przy braku wyraźnych różnic w wymiarze okruchów można wydzielić jedynie strefę II–III – gruzową (7).

Czynniki wietrzenia. Doświadczenia prowadzone na różnych skałach wskazują, że z wielu czynników wietrzeniowych na przebieg i intensywność powstawania zwietrzelin mają, poza zamarzaniem i odmarzaniem, powtarzające się zmiany wilgotności skał. Dla skał pęczniejących wpływ tego ostatniego czynnika jest nawet decydujący. Wyniki badań modelowych (7) prowadzonych na skałach kredowych wskazują, że mechanizm ich niszczenia jest

głównie wilgotnościowy. Przy zmianach wilgotności ok. 2–3% są rejestrowane odkształcenia pęcznienia lub skurczu skał, przy czym wyraźna jest, uzależniona od warunków sedymentacji, anizotropia tych odkształceń. Spośród skał kredowych największe odkształcenia pęcznienia $\epsilon_p = 1,2\%$ i naprężenia pęcznienia $\sigma_p = 1,8$ MPa rejestrowano dla margli kredowych. Łupki Essna wykazywały największe odkształcenie pęcznienia ze wszystkich badanych skał i wynosiło ono maksymalnie 6,40%. Zasięg odkształceń wilgotnościowych w maszywie skalnym może osiągać wartość do głęb. ponad 100 m.

Zgodnie z kryterium A. Drągowskiego (7) niszczenia wilgotnościowego skał kredowych (pęczniejących), wyrażonego wskaźnikiem niszczenia

$$z = \frac{\sigma_p \perp}{R_{r \perp w}}$$

gdzie: $\sigma_p \perp$ – naprężenie pęcznienia w kierunku prostym do uławicenia

$R_{r \perp w}$ – wytrzymałość na rozciąganie w kierunku prostym do uławicenia w stanie całkowitego nasycenia wodą,

podział badanych skał, ze względu na niszczenie w wyniku odkształceń wilgotnościowych, jest następujący:

- $z \leq 0,2$ skała słabo niszczone
- $0,2 \leq z \leq 0,5$ skała średnio niszczone
- $0,5 \leq z \leq 0,8$ skała szybko niszczone
- $0,8 \leq z \leq 1$ skała bardzo szybko niszczone
- $1 < z$ skała wyjątkowo szybko niszczone

Podatność na wietrzenie skały macierzystej i zwietrzelin. W celu liczbowej charakterystyki podatności skały macierzystej i materiału występującego w strefach gruzowych profilu, opracowano wskaźniki:

- podatności na wietrzenie fizyczne przy pęcznieniu i skurczu (S_{pw})
- podatności na wietrzenie fizyczne przy zamarzaniu i odmarzaniu (S_{zw})
- ogólny wskaźnik podatności na wietrzenie fizyczne (W).

Pozwalają one na jednoznaczną ocenę roli głównych czynników wietrzenia fizycznego w intensywności oddziaływań na skały poszczególnych stref profilu wietrzeniowego i prognozowania podatności skał na wietrzenie fizyczne. W literaturze najczęściej dla określenia stanu zwietrzenia skały podaje się wskaźniki uwzględniające takie cechy, jak: gęstość objętościowa skały macierzystej i zwietrzliny, porowatość, nasiąkliwość, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na ścinanie. Wskaźników tych jednak nie można często określić dla wszystkich stref profilu wietrzeniowego.

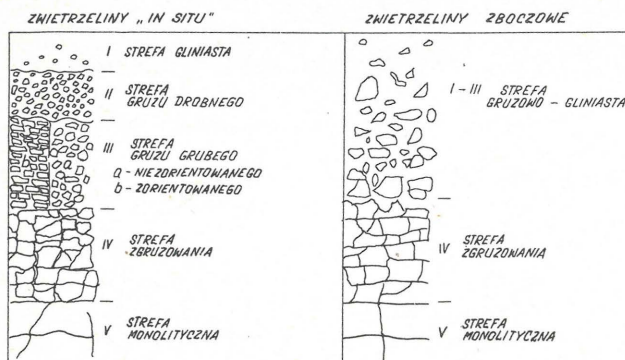
Zaproponowany w zakładzie wskaźnik oparty jest na oznaczeniach wytrzymałości w aparacie skrzynkowym i maszynie wytrzymałościowej (7). Można go stosować dla wszystkich stref profilu wietrzeniowego

$$W_r = \frac{\tau_m - \tau_{zw}}{\tau_m} \cdot 100 (\%)$$

gdzie: τ_{zw} – wytrzymałość na ścinanie dla poszczególnych stref zwietrzenia

τ_m – wytrzymałość na ścinanie skały macierzystej.

Właściwości fizyczne i zmienność ich w profilu wietrzeniowym są trudne do określenia i możliwe po odpowiednim dobraniu metody badań i poboru próbek. Znacznie trudniejsze do określenia są właściwości wytrzymałościowe. Z doświadczeń naszych wynika, że w warunkach la-



Ryc. 4. Profile zwietrzelin skał Wyżyny Lubelskiej

Fig. 4. Soil weathering profile, Lublin region

boratoryjnych szczególnie przydatne są tu badania na okruchach skalnych. Przy uwzględnieniu wymiarów okruchów, ich kształtu i ułożenia wypełnienia można wnioskować o nośności i odkształcalności poszczególnych stref profilu. Dla obiektów o specjalnych wymogach jest konieczne prowadzenie badań *in situ*. Przy ocenie zwietrzelin, określeniu ich miąższości i właściwości otwory wiertnicze są mało przydatne, konieczne jest prowadzenie robót ziemnych typu szurfów, szybków, sztolni.

GRUNTY ANTROPOGENICZNE

Zgodnie z proponowanym w 1979 r. przez A. Drągowskiego podziałem (7), wśród gruntów antropogenicznych można wyróżnić:

- utwory powstałe w wyniku niszczenia struktury skał, ich przemieszczania i powtórnego składowania, bez istotnej zmiany wyjściowego składu mineralnego,
- utwory stanowiące obecnie odpady powstające przy produkcji przemysłowej,
- utwory stanowiące odpady technologiczno-budowlane i bytowe w aglomeracjach miejskich.

W obrębie tych grup, ze względu na sposób transportu, można wyróżnić:

- zwały – grunty antropogeniczne powstałe w wyniku transportu mechanicznego, deponowane na zwałowiskach suchych.
- osady – grunty antropogeniczne powstałe w wyniku transportu hydraulicznego, deponowane w środowisku wodnym.

W Zakładzie Mechaniki Gruntów i Fundamentowania zajmowano się już w latach sześćdziesiątych problematyką deponowania gruntów antropogenicznych na składowiskach mokrych. Badania trzeba było prowadzić od podstaw, ze względu na brak jakichkolwiek norm dotyczących gruntów antropogenicznych. Musiały się więc one ograniczyć do wybranych zagadnień, choć uzyskiwane wyniki miały często znacznie szersze znaczenie.

Badania dotyczyły głównie zwałowisk gruntów nadkładu węgla brunatnego i siarki oraz mokrych składowisk odpadów poflotacyjnych siarki, popiołów i żużli elektrowni ciepłych. O znaczeniu prac badawczych dotyczących zwłaszcza tych ostatnich, wdrożonych następnie do działalności praktycznej przez Energoprojekt, najlepiej świadczy fakt, że – jeżeli w chwili rozpoczynania tych prac rejestrowano awarie 90% mokrych składowisk popiołów i żużli, to obecnie składowiska te prawidłowo zaprojektowane i eksploatowane pracują bezawaryjnie.

W 1973 r. zebrano i podsumowano obecny stan wiedzy na sympozjum (10) zorganizowanym przez Zespół Zakładu Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Rozpoczęto w tym zakresie współpracę z Katedrą Gruntoznawstwa i Geologii Inżynierskiej Uniwersytetu Moskiewskiego (7). Działania te poszerzyły bardzo wiedzę o metodach składowania i właściwościach popiołów i żużli.

Popioły i żużle powstają jako odpady w procesie spalania węgla kamiennych oraz brunatnych i jako takie tworzą lekkie spieki skał macierzystych o złożonej – agregatowej i gąbczastej – pumkesowej budowie. Poszczególne ziarna mogą być monoskładnikowe lub stanowić zlepki okruchów różnego materiału, nie spalone okruchy węgla, skał płonnych z otoczenia złoża, bezpostaciowa substancja węglista, kwarc. Zlepki są słabo powiązane, co powoduje, że przy niskich wartościach naprężeń występuje intensywne kruszenie ziarn.

Skład chemiczny popiołów wskazuje dość znaczne zróżnicowanie, co wiąże się zarówno z miejscem eksploata-

cji węgla, jak i pobraniem próbki do badań. Popioły z węgla kamiennego zawierają 35–55% SiO_2 , 15–35% Al_2O_3 , 1–5% MgO , 2–10% CaO i do 3% $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$; straty prażenia wynoszą 3–30%. Popioły węgla brunatnego w swym składzie chemicznym wykazują znacznie większe ilości CaO , dochodzące niekiedy do 40%, co ma podstawowy wpływ na ich dużą aktywność.

Gęstość objętościowa szkieletu i porowatość popiołów pobranych z mokrych składowisk wykazuje dość znaczny rozrzut, zależnie od tego czy próbkę pobrano w strefie zrzutu, czy też ujęcia, wynoszący od 0,74–0,82 g/cm^3 (strefa zrzutu) do 0,59–0,62 g/cm^3 (strefa ujęcia). Namyte popioły mają też znaczną porowatość, wynoszącą 62–71%. Ze względu na wewnętrzną porowatość, istnienie okruchów słabszych, wewnątrz pustych, napotyka się trudności przy oznaczaniu gęstości właściwej. Dlatego też dla popiołów słuszniejsze jest określanie pozornej gęstości właściwej, zdefiniowanej jako stosunek ciężaru szkieletu gruntowego do objętości ziarn i cząstek łącznie z objętością zamkniętych porów. Tak określona pozorna gęstość właściwa waha się od 1,83 do 2,61 g/cm^3 .

Na uwagę zasługuje też zachowanie się popiołów w przypadku przesączającej się wody. Wartość współczynnika filtracji $k = 10^{-4} - 10^{-6}$ m/s pozwala na scharakteryzowanie popiołów jako słabo- do średnio-przepuszczalnych. Popioły są przy tym bardzo podatne na powstawanie w nich deformacji filtracyjnych. W celu określenia wartości krytycznego spadku hydraulicznego, w Zakładzie Mechaniki Gruntów i Fundamentowania opracowano metodę badawczą, dla której zbudowano specjalne przyrządy. Analiza wyników wykonanych badań pozwala na stwierdzenie, że wartości spadku krytycznego powodującego powstanie deformacji filtracyjnych w popiołach są zależne od ich zagęszczenia, a najniższe wartości wynoszą $i_{kr} < 0,3$. Zwraca również uwagę stosunkowo znaczna wysokość podciągania kapilarnego dla popiołów grubych i średnich, sięgająca 2 m, a dla popiołów drobnych dochodząca nawet do 4 m.

Te stwierdzone właściwości, znaczna porowatość wewnętrzna agregatów i ziarn, stosunkowo niska gęstość objętościowa, podatność na deformacje filtracyjne i znaczna wysokość podciągania kapilarnego wymagają specjalnych rozwiązań technicznych przy zastopowaniu popiołów jako materiału do podwyższania zapor składowisk mokrych. Wymagają one bowiem od projektanta opracowania celowych warstw filtracyjnych dla obniżenia górnej linii prądu w zaporze, tak aby nie tylko uniemożliwić powstanie jakichkolwiek wysięków ze skarpy odpowietrznej, ale również nie dopuścić do powstania niedopuszczalnych spadów hydraulicznych. Warunki te są decydujące dla uzyskania bezawaryjnej pracy, tym bardziej, że wartości parametrów wytrzymałościowych wyznaczonych zgodnie z kryterium Coulomba-Mohra są stosunkowo korzystne i wynoszą: $\varphi = 27-36^\circ$, $c = 5-65$ kPa, $\varphi' = 31-41^\circ$ oraz $c' = 5-45$ kPa.

Prowadzone były również badania nad wpływem mokrych składowisk popiołów na środowisko przyrodnicze. Zajęcie znacznej powierzchni terenu oraz ewentualność powstania awarii stanowią niewątpliwie największe zagrożenie. Innym wpływem o dużym znaczeniu jest możliwość pylenia na tereny przyległe. Ziarna popiołów, ze względu na swą budowę, mogą być łatwo unoszone przez wiatr. Szczególnie podatne na erozję eoliczną są tzw. popioły kuliste. Jest to pęczerykowata, szklista otoczka krzemionkowa z domieszką mullitu, zamykająca przestrzeń wypełnioną gazami (ryc. 5). Gęstość objętościowa szkieletu popiołów kulistych wynosi 0,39–0,53 g/cm^3 .



Ryc. 5. Ziarno popiołu kulistego. Powiększenie ok. 3000 ×

Fig. 5. Spherical grain of a power station dump-ash, magnification 3000 ×

Dlatego też niezbędne jest zabezpieczenie skarp zapór i nie eksploatowanych stawów osadowych przed wywiewaniem z nich popiołów, co można osiągnąć zarówno przez zabudowę biologiczną, jak i przez pokrywanie specjalnymi emulsjami.

Jeśli rozpatrywać wpływ mokrych składowisk popiołów na zmianę chemizmu wód gruntowych, to – jak wynika z własnych danych i publikacji innych autorów – jest on właściwie nieznaczny. Wyraźny spadek zanieczyszczeń stwierdza się już w rowie opaskowym i nie stwierdzono rozprzestrzeniania się szkodliwych zanieczyszczeń wód w studniach położonych w niewielkiej odległości od składowiska, leżących na kierunku spływu wód gruntowych. Wiązać to można z zawartością w popiele okruchów nie spalonego węgla. Sytuacja ta może jednak wyglądać inaczej w przypadku transportowania na składowisko popiołów również i innych odpadów zawierających szkodliwe dla zdrowia związki chemiczne. Dlatego też jest konieczne ciągłe prowadzenie szczegółowych analiz umożliwiających wykrywanie nawet nieznacznych ilości szkodliwych związków.

Rozwijając metody badawcze, konstruując potrzebny sprzęt dla rozwiązywania problemów geologicznych związanych z budową mokrych składowisk odpadów, możliwe było wdrażanie osiągnięć zakładu nie tylko do badań składowisk popiołów i żużli, ale również i innych odpadów.

Pamiętać jednak należy, że przy zwałowiskach, a więc przemieszczeniu gruntu wydobytego z nakładu serii złożowej przy użyciu transportu mechanicznego, występują inne problemy niż przy mokrym składowaniu. Nie wolno przy tym zapominać, że wydobyty grunt zwiększa swą objętość.

1. Głazer Z., Kaczyński R. – Stability of a waste-dump composed of Tertiary Clays. Eur. Conf. SMFE Norymbergia 1986 t. I.
2. Kaczyński R. – Seismic stability on the waste-dump. Int. Symp. Engineering Geology Problems in Seismic Areas. Bari/Italy 1986.
3. Kaczyński R. – Zachowanie się spoistych gruntów zwałowanych pod obciążeniami dynamicznymi. Biul. Geol. UW 1987 t. 31.
4. Kaczyński R. – Zachowanie się wybranych ilów trzeciorzędowych pod wpływem zmian wilgotności i obciążeń dynamicznych. Mat. Symp. Spiętrzenie Wisły pod Włocławkiem a środowisko przyrodnicze. Płock 1985.
5. Kaczyński R. i in. – Opracowanie algorytmów i programów do określania stateczności wkopów i nasypów oraz wstępne wyniki badań wytrzymałości na ścinanie gruntów zwałowanych w warunkach obciążeń dynamicznych. Praca dla Międzyresortowego Inst. Geof. AGH. Arch. Dorawexu Warszawa 1987.
6. Kaczyński R., Muchowski J. – Ruchy masowe na zboczach zbudowanych z ilów krakowieckich na przykładzie dolin rzecznych Wisły i Sanu. Kwart. Geol. 1987 nr 2/3.
7. Mechanika gruntów w zastosowaniach inżynierskich. Pr. zbiorowa NOT Rada Stołeczna 1984.
8. Pinińska J., Dobak P. – Zmienność parametrów geotechnicznych w warunkach budowy metra w Warszawie. Prz. Geol. 1987 nr 2.
9. Pinińska J. i in. – Analiza zmian właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów spoistych w rejonie przebiegu trasy I linii metra w wyniku zawodnienia. Arch. ZPG UW 1986.
10. Sympozjum nt. „Składowania i zagospodarowania odpadów energetycznych i hutniczych”. Częstochowa. Wyd. Geol. 1973.

SUMMARY

The Department of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Faculty of Geology, Warsaw University, has been active in continuous research works on soils of Poland. The most of activity is oriented on consulting and expert's reports. For years many detail expertises and general reports on soil conditions were done, resulting in methodical solutions of engineering problems of siting of hydro. mine and industrial objects in difficult or unusual conditions. The proceedings of the Conference on "Soil Mechanics in Engineering Applications" [7] contain a complete list of research and industrial works executed by the Department till 1984, and authors analyses of a validity and applicability of various research methods in determining soil properties.

In the present paper a synthesis has been made of the topic selected from the wide spectrum of problems resolved. Monographs of soil properties of the three major kinds of soils were prepared, viz: 1 – Miocene soils of the Carpathian foredeep, 2 – Boulder clays of the Southern and Middle Poland glaciations, 3 – weatherings, and 4 – Anthropogenic soils/dump materials, selected for ecological or industrial recycling.

Translated by authors