

WYTRZYMAŁOŚĆ GRUNTÓW NA ŚCINANIE W WARUNKACH WYSOKICH CIŚNIEŃ

UKD 624.131.439.5:539.89:624.131.377:624.131.212 + 624.131.221(438) Bełchatów, Machów

Wraz z wyczerpywaniem się surowców mineralnych łatwo dostępnych obserwuje się zwiększenie głębokości strefy zainteresowań i badań geologii oraz górnictwa. Budowa głębokich kopalń odkrywkowych sprawia, że jednym z najistotniejszych zagadnień staje się stateczność wysokich skarp oraz podłoża zwałowiska. Dla rozwiązywania zagadnień stateczności niezbędną jest znajomość parametrów pozwalających na określenie stanu równowagi granicznej ośrodka gruntowego. W klasycznej mechanice gruntów jako warunek stanu granicznego przyjmuje się przeważnie równanie Coulomba-Mohra, w którym kąt tarcia wewnętrznego i spójność stanowią stałe równania prostej przedstawiającej linię wytrzymałości na ścinanie.

Ekstrapolacja linii wytrzymałości na ścinanie, określonej przy niskich wartościach naprężeń, na zakres wysokich naprężeń może prowadzić do znacznych błędów. Jako niskie i wysokie wartości naprężeń (określenia względne) rozumie się odpowiednio: wartości naprężeń do 10 kG/cm² (badania standardowe w budownictwie), a jako wysokie — wartości 10—100 kG/cm². Zakres tak znacznych naprężeń może być wywołany wykonaniem wykopu (zwałowiska) o głębokości (wysokości) powyżej 50—100 m (np. Bełchatów, Machów).

Stosowanie wysokich ciśnień wynika nie tylko z obecnie działających naprężeń w masywie gruntowym lub obciążeń związanych z gospodarczą działalnością człowieka, ale również z obciążeń, które występowały w historii geologicznej gruntu: np. obciążeń lodowcami, zerodowanymi warstwami nadległych

kiedyś gruntów itp. Zagadnienia dotyczące zachowania się gruntów w warunkach wysokich ciśnień nie zostały do tej pory w pełni rozwiązane i wymagają intensywnych badań.

PRZEGLĄD WYNIKÓW BADAŃ

Badania laboratoryjne, ze względu na ograniczoną możliwość stosowania wysokich ciśnień w warunkach polowych, nabierają szczególnej wagi jako jedyne, które pozwalają na wywołanie wysokich i bardzo wysokich ciśnień. Oczywiście laboratoryjne oznaczanie wytrzymałości na ścinanie nastęrcza wiele kłopotów technicznych. Rozwiązania aparaturowe stosowane dla skał (1, 2, 7, 12, 16, 19, 20, 22, 23), ze względu na małą dokładność pomiaru sił i brak możliwości pomiaru ciśnienia porowego, są przeważnie mało przydatne do badania gruntów. Brak też uniwersalnej aparatury spełniającej wymogi nowoczesnych badań.

W badaniach gruntów przy wysokich ciśnieniach stosuje się różne aparaty: konsolidometry, prasy filtracyjne, aparaty trójosiowego (i hydrostatycznego) ściskania (23). Aparaty trójosiowego ściskania stanowią konstrukcję pozwalającą w najbardziej zbliżony sposób modelować realizowaną w podłożu drogę obciążenia. Rozwiązania takich aparatów przystosowanych do wysokich ciśnień podają prace (3, 6, 14, 15, 17, 25). Należy podkreślić, że ciśnienie boczne w komorach nie przekraczało 70 (4, 5) — 140 kG/cm² (21) dla gruntów spoistych (70 o strukturze nienaruszonej i 140 naruszonej) i 700 kG/cm² (25) dla syp-

PODSTAWOWE PARAMETRY FIZYCZNE BADANYCH GRUNTÓW

Miejscowość	Seria	Lp.	Rodzaj gruntu	Głębokość pobrania [m] ppt	Wilgotność naturalna W_n [%]	Ciężar objętości naturalny γ_n [G/cm ³]	Ciężar objętości szkieletu γ_d [G/cm ³]	Stopień wilgotności S_r
Bełchatów	Gliny zwałowe zlodowacenia środkowo—polskiego	1	gliny piaszczyste, półzwarte	30	9.0—12.1 śr. 10.5	2.23—2.28 śr. 2.25	1.99—2.09 śr. 2.04	0.85—0.92 śr. 0.89
	ity nadwęglowe	2	gliny pylaste twar doplast.	60	15.8—16.3 śr. 16.1	2.12—2.16 śr. 2.14	1.83—1.86 śr. 1.84	0.91—0.96 śr. 0.93
	węgiel brunatny	3		90	14.1—14.7 śr. 14.5	2.18—2.22 śr. 2.20	1.90—1.94 śr. 1.92	0.90—0.97 śr. 0.94
	ity podwęglowe	4	węgiel brunatny, ziemisty	140	115	1.25—1.26	0.58	0.98
		5	gliny pylaste zwięzłe, półzwarte	190	13.2—14.0 śr. 13.5	2.21—2.24 śr. 2.23	1.95—1.98 śr. 1.97	0.92—0.96 śr. 0.96
Machów	ity krakowieckie	6	ity pylaste, półzwarte	50	16.8—18.3 śr. 17.3	2.14—2.17 śr. 2.15	1.81—1.86 śr. 1.83	0.95—1.00 śr. 0.97

kich. Poza tym do ścinania ukośnego gruntów sypkich stosowano (13, 8) tzw. aparat przekątniowy, którego konstrukcja umożliwiła badania do 100 kG/cm², bez pomiaru ciśnienia porowego.

Przeprowadzone badania na gruntach sypkich i spoistych stwierdzają zmniejszenie się wartości kąta tarcia wewnętrznego w szerokim zakresie ciśnień (krzywo liniowość zależności: wytrzymałość na ścinanie — naprężenie normalne; połowa naprężenia dewiatorowego — połowa sumy efektywnych naprężeń głównych). Spadek ten następuje dla gruntów sypkich już przy ciśnieniach około 7—10 kG/cm². Analizy składu granulometrycznego i obserwacje mikroskopowe próbek przed i po badaniach wskazują na wyraźne strukturalne zmiany (przebudowę) w gruncie. Następuje nie tylko zmiana orientacji układu, ale w dużym stopniu kruszenie (zniszczenie) poszczególnych ziarn. Stopień kruszenia jest znacznie większy dla materiału równoziarnistego niż dla różnoziarnistego, najłatwiej i najwcześniej ulegają kruszeniu ziarna polimineralne (11). Podkreśla się również znaczny wpływ na uzyskiwane wyniki stosowanego sposobu obciążeń oraz początkowego zagęszczenia osrodku.

Odnosnie do badań gruntów spoistych w zakresie wysokich ciśnień istnieje bardzo mało danych. W zasadzie są znane wyniki wytrzymałości na ścinanie, wyrażonej w efektywnych naprężeniach, dla iltu londyńskiego (4, 5); gliny zwałowej (17) i zagęszczonego iltu kaolinitowego (22). Dla iltu londyńskiego efektywny kąt tarcia wewnętrznego osiągał wartość 10°, dla kaolinitowego 12°, natomiast dla gliny zwałowej nie uzyskiwano zmniejszenia tego kąta. Dla gruntów polskich brak publikowanych wyników takich badań. Niska liczba przeprowadzonych do tej pory badań dla gruntów spoistych, przy złożoności oddziaływających czynników podczas ścinania, nie stwarza możliwości prognozowania wielkości zmian cech mechanicznych przy wysokich ciśnieniach. Wynika to bezpośrednio ze stanu wiedzy w zakresie własności gruntów pod wielkimi ciśnieniami przedstawionego w pracy (9).

CHARAKTERYSTYKA LITOLOGICZNA
I PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE
BADANYCH GRUNTÓW

Badania wytrzymałości na ścinanie w warunkach wysokich ciśnień przeprowadzono dla gruntów występujących w rejonie Bełchatowa (gliny zwałowej, węgla brunatnego, iltów nad- i podwęglowych) i Machowa (ity krakowieckie). Próbki gruntów z Bełchatowa były wycinane z rdzeni wiertniczych, a z Machowa z monolitu pobranego we wkopie. W obrębie pojedynczego rdzenia lub monolitu grunt makrosko-

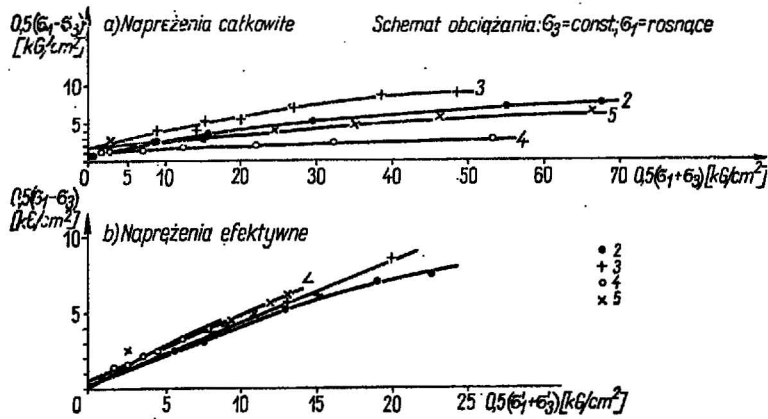
powo był jednorodny. Badane grunty reprezentują najbardziej typowe rodzaje gruntów w poszczególnych seriach. Głębokość występowania pobranych do badań gruntów wahała się w granicach 30—190 m ppt. Krótka charakterystyka litologiczna serii i podstawowych właściwości fizycznych badanych gruntów przedstawia się następująco.

Czwartorzędowe (plejstocen) gliny zwałowe zlodowacenia środkowopolskiego są wykształcone przede wszystkim jako gliny piaszczyste (podrzednie gliny piaszczyste zwięzłe, piaski gliniaste), szarobrazowe z otoczkami skał wapiennych i północnych. Obserwuje się w nich wyraźne spękania.

Trzeciorzędowe grunty serii nadwęglowej, burówkowej i podwęglowej należą do śródlądowych osadów mioceńskich zdeponowanych w rowie tektonicznym. Grunty serii nadwęglowej są bardzo niejednorodne, wykształcone na ogół jako ily z gniazdami (wtaracieniami) węgla wapnia, czasami zawierają substancję węglistą. Miejscami przechodzą one w gliny pylaste, niekiedy piaszczyste, lub pyły barwy od szarej do zielonej. Próbki węgla brunatnego reprezentowały węgiel ziemisto-lignitowy, przy czym lignit występował w formie przewarstwień lub okruców. Charakteryzują się one wysoką wilgotnością, są kruche i łatwo ulegają rozwarstwieniu i rozdrobieniu. Niekiedy występują ily piaszczyste i ily z substancją węglistą. Serię podwęglową stanowią głównie grunty szeregu ilt pylasty — pył piaszczysty.

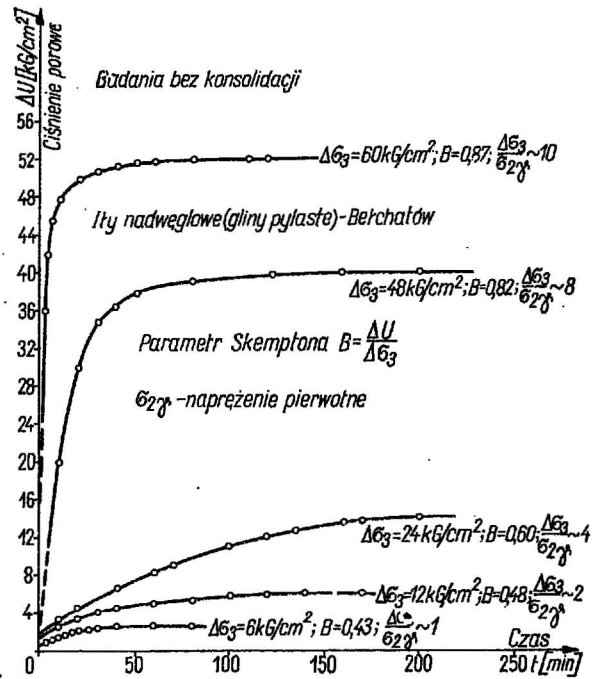
Ily krakowieckie należą do trzeciorzędowych (miocen-sarmat) morskich iltów rytmicznie laminowanych, illitowych (z domieszką montmorillonitu), marglistych, skonsolidowanych. Podstawowym elementem teksturalnym jest ich dobrze wykształcona pozioma laminacja lub warstwowanie. Megaskopowo laminacja wyrażona jest w postaci naprzemianległych, przeważnie ciemnych, lamin i warstewek ilastych o zmiennej zawartości siarczków, żelaza i substancji organicznej o miąższości od części milimetra do kilku centymetrów oraz, na ogół rzadziej występujących, lamin i warstewek piaszczysto-pylastych barwy jaśniejszej i mniejszej grubości. W obrazie SEM wykazują one flokulacyjną strukturę złożoną z zespołów różnowymiarowych i anizotropowych agregatów minerałów ilastych. W iltach obserwuje się zaburzenia mikrotektoniczne w postaci deformacji ciągłych i nieciągłych. W swej historii były one poddawane kilkakrotnym cyklom obciążania i odciążania.

Rodzaj, głębokość pobrania i podstawowe parametry fizyczne badanych gruntów przedstawia tabela. Bliższą charakterystykę właściwości fizyczno-mechanicznych serii, z których pochodzą badane grunty zawierają prace (14, 18).



Ryc. 1. Obwiednie wytrzymałości na ścinanie (badania bez konsolidacji).

Fig. 1. Shear strength envelopes (tests without consolidation).



Ryc. 2. Przyrost ciśnienia porowego w czasie dla różnych wartości ciśnienia bocznego.

Fig. 2. Increase in pore pressure in time for different values of lateral pressure.

STOSOWANA APARATURA I METODYKA BADAŃ

Badania zostały wykonane w specjalnie skonstruowanym zestawie aparatury, w skład którego jako najważniejsze części wchodziły:

— komora ciśnieniowa (prod. Hydrokopu) wyposażona w dodatkowy tłok posiadający wyjście do odpływu oraz podstawkę do umocowania próbki gruntu,

— podawacz ciśnienia (o zróżnicowanym zakresie wartości ciśnień), przyrząd do pomiaru wysokich ciśnień porowych wraz z węzownicą łączącą podstawę tłoka,

— prasa hydrauliczna ZD-10 z automatycznym zapisem siły i przemieszczenia w trakcie badania.

Dodatkowo zastosowano czujnik do pomiaru przemieszczenia tłoka z dokładnością 0,01 mm. Komora pozwala badać próbki gruntu przy ciśnieniach bocznych do 400 atm, a przyrząd — mierzyć ciśnienie porowe w wartościach do 50 atm. W przeprowadzonych badaniach wartości ciśnień bocznych nie przekraczały 200 atm.

Przy zastosowaniu powyższego zestawu aparatury przeprowadzono dwa podstawowe rodzaje badań z

pomiarem ciśnienia porowego: bez konsolidacji i z konsolidacją. W obu rodzajach badań prędkość przemieszczania się tłoka (równa prędkości odkształcenia próbki) była jednakowa, równa 4—5 mm/h.

Przebieg badania bez konsolidacji z pomiarem ciśnienia porowego był następujący. W pierwszym etapie po wytworzeniu ciśnienia bocznego w komorze ($\Delta\sigma_3$) do żądanej wartości odczekiwano aż do stabilizacji wartości ciśnienia porowego (Δu). W ten sposób określano parametr B Skemptona. Po ustaleniu się ciśnienia porowego, w drugim etapie zwiększano obciążenie pionowe (σ_1) przy stałej wartości ciśnienia bocznego (σ_3). Wartości ciśnienia bocznego przyjmowano generalnie równe: 0,5, 1, 2, 5; niekiedy aż do 10—20 wartości σ_3 (obecne obciążenie geologiczne).

Pierwszym etapem badań z konsolidacją z pomiarem ciśnienia porowego była sama konsolidacja. Konsolidacja prowadzona była przy ciśnieniu konsolidacyjnym $\sigma_k = \sigma_3 = \sigma_1$ z odpływem wody z próbki do pomiarowej biurety. Możliwy był również pomiar wysokości i skrócenia próbki po zakończeniu konsolidacji. Czas konsolidacji był zróżnicowany, zależny od wartości ciśnienia bocznego i właściwości filtracyjnych badanego gruntu. Maksymalnie wynosił on dla próbek z węgla brunatnego około 6 dni. Po konsolidacji proces obciążenia próbek był taki sam jak w badaniach bez konsolidacji.

Badania są bardzo kłopotliwe i czasochłonne. Ze względu na stwierdzoną znaczną rozszerzalność cieplną oleju znajdującego się w komorze ciśnieniowej, niezbędne było utrzymywanie stałej temperatury w pomieszczeniu. Ogółem wykonano 25 badań bez konsolidacji i 35 z konsolidacją na próbkach o średnicy 36 mm i wysokości 72 mm. Wszystkie próbki, z wyjątkiem węgla brunatnego, miały strukturę nienaruszoną.

WYNIKI BADAŃ

Badania bez konsolidacji przeprowadzono przede wszystkim na próbkach gruntów występujących w rejonie Bełchatowa. Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresach (ryc. 1a i b), obrazujących zależność $0,5(\sigma_1 - \sigma_3) = f[0,5(\sigma_1 + \sigma_3)]$. Obwiednie wytrzymałości na ścinanie wyrażone w naprężeniach całkowitych są bardzo płaskie (ryc. 1a), ze wzrostem ciśnienia bocznego w komorze kąt nachylenia maleje. W naprężeniach efektywnych obwiednie są zbliżone do linii prostej, nachylenie ich jest znacznie większe (ryc. 1b). W tych badaniach obserwuje się duży udział ciśnienia porowego. Szczególnie wysokie wartości ciśnienia porowego uzyskuje się dla próbek węgla brunatnego o naruszonej strukturze. Dla gruntów o nienaruszonej strukturze ze wzrostem ciśnienia bocznego σ_3 zwiększa się ciśnienie porowe, ale przyrost ciśnienia porowego nie jest jednakowy. Parametr Skempton B ciśnienia wody w gruncie rośnie ze wzrostem σ_3 , przy czym jest on znacznie wyższy po przekroczeniu obciążenia pierwotnego (historycznego).

Przyrost ciśnienia porowego w czasie dla różnych wartości ciśnienia bocznego w komorze przykładowo został przedstawiony na ryc. 2. Większość badanych

Ryc. 3. Obwiednie wytrzymałości na ścinanie (badania z konsolidacją).

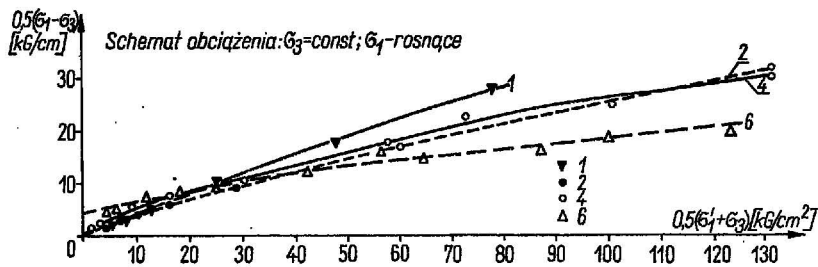
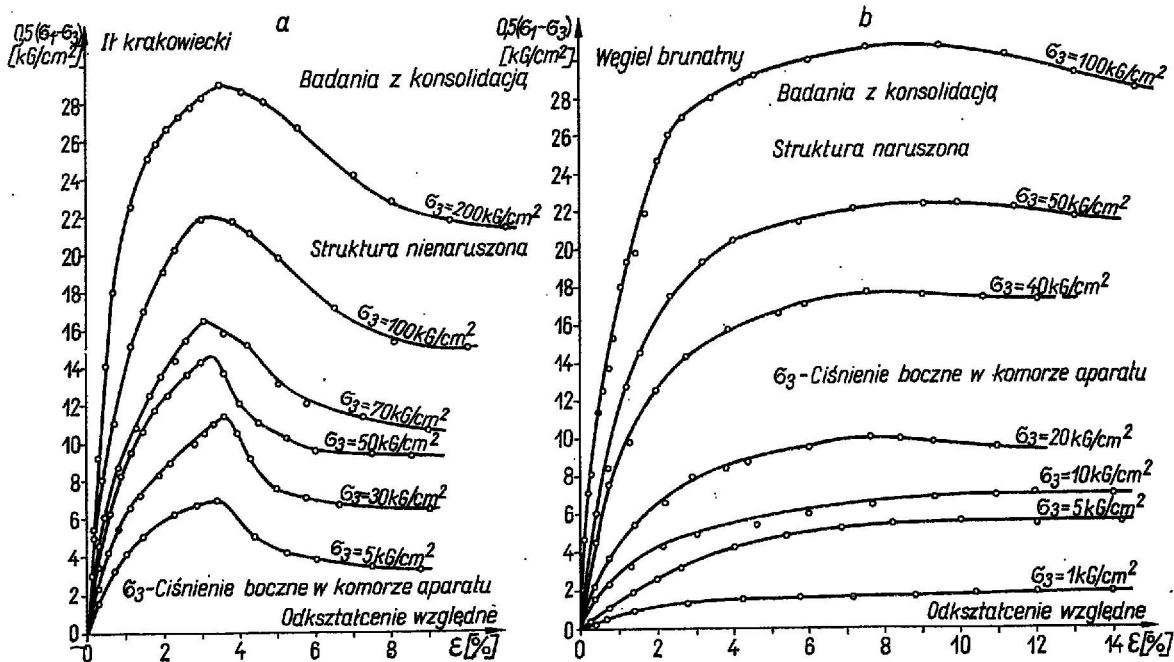


Fig. 3. Shear strength envelopes (tests with consolidation).



Ryc. 4. Zależność naprężenia dewiatorowego od odkształcenia względnego przy różnych ciśnieniach bocznych dla: a — łu krakowieckiego, b — węgla brunatnego.

Fig. 4. Dependence of deviatory stress on relative deformation under various lateral pressures for: a — Krakow clay, b — brown coal.

próbek ulegała zniszczeniu bez wyraźnej powierzchni ścicia, przy stosowanych ciśnieniach bocznych i założonej prędkości obciążenia, deformowały się one w postaci „beczki”. Jedynie przy niskich ciśnieniach w niektórych próbkach obserwowano powierzchnie poślizgu. Podczas ścinania odmiennie zachowywały się próbki węgla brunatnego. Miały one wyraźne rysy, pęknięcia tworzące powierzchnie zniszczenia o wysokich (mierzonych do poziomu) kątach nachylenia. Przebieg zależności naprężenie — odkształcenie po osiągnięciu maksymalnej wartości naprężenia dewiatorowego był prawie równoległy do osi odkształceń. Badania były prowadzone do przekroczenia 10—15% odkształceń względnych.

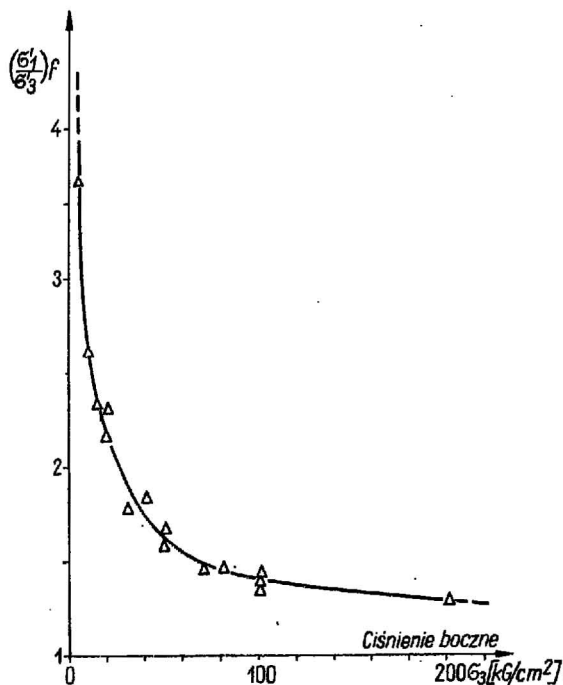
W drugim cyklu badań próbki były poddawane konsolidacji izotropowej. Czas konsolidacji był zróżnicowany, zależny od rodzaju gruntu i stosowanego ciśnienia. Niektóre próbki gruntów przy niskich ciśnieniach pochłaniały wodę z biurety. Tak działo się przede wszystkim w iłach krakowieckich, do wartości 30—40 kg/cm² ciśnienia konsolidacyjnego, ciężar próbki po badaniu był wyższy niż przed badaniem, przykładowo — z tych łą, przy ciśnieniu 200 kg/cm², z próbki o objętości 75 cm³ wypłynęło 3,1 cm³ wody. Znacznie większe zmiany zachodziły podczas konsolidacji w próbkach z węgla brunatnych, na przykład przy ciśnieniu 100 kg/cm² ubyło 20,7 cm³, przy zmniejszeniu wysokości próbki o 1,03 cm, w czasie 140 godzin. W związku z tym konieczne było skorygowanie wymiaru przekroju próbki przy obliczaniu naprężeń. Takie postępowanie było niezależne od wprowadzenia poprawki na zmianę przekroju, ze względu na odkształcanie się próbki w trakcie ścinania, którego przebieg był taki sam jak w badaniach

bez konsolidacji. Otrzymane wyniki przedstawiono na ryc. 3.

W zakresie stosowanych ciśnień prawie wszystkie obwiednie wytrzymałości na ścinanie nie są liniami prostymi. Najmniejszy wpływ naprężeń na parametry wytrzymałościowe obserwuje się dla gliny zwalowej, największy dla łą krakowieckich. Zmiana nachylenia obwiedni następuje dla poszczególnych gruntów przy różnych wartościach ciśnień, w przebiegu obwiedni wytrzymałościowej nie obserwuje się gwałtownych załamań. Obserwacje próbek po badaniach wskazują na różny rodzaj sposobu zniszczenia.

Wszystkie próbki łą krakowieckich, niezależnie od wartości ciśnienia (do 200 kg/cm²), ulegały zniszczeniu po bardzo wyraźnych powierzchniach poślizgu. Wytworzone nieciągłości charakteryzowały się gładkimi, błyszczącymi powierzchniami z wyraźnymi rysami poślizgowymi. Zależność naprężenie — odkształcenie wykazuje wyraźne maksimum, po osiągnięciu którego następuje spadek naprężenia do określonej wartości (ryc. 4a). Maksymalną wartość wytrzymałości uzyskuje się przy 3—4% odkształcenia. Pozostałe grunty spoiste deformowały się bez widocznej powierzchni poślizgu, a próbki węgla brunatnego wykazywały rysy i pęknięcia ze ścinania, kształt zależności naprężenie — odkształcenie odpowiadał przedstawionemu na ryc. 4b.

Na ryc. 5 i 6 naniesiono odpowiednie wartości: stosunku naprężeń głównych w momencie zniszczenia i kątów ścicia w zależności od ciśnienia bocznego dla łą krakowieckich. Ze wzrostem ciśnienia obie wielkości maleją. Przy stosowanej maksymalnej wartości ciśnienia 200 kg/cm² stosunek naprężeń głównych był równy 1,27, a kąt ścicia próbki wy-



Ryc. 5. Zależność stosunku efektywnych naprężeń głównych w momencie zniszczenia próbki od wartości ciśnienia bocznego.

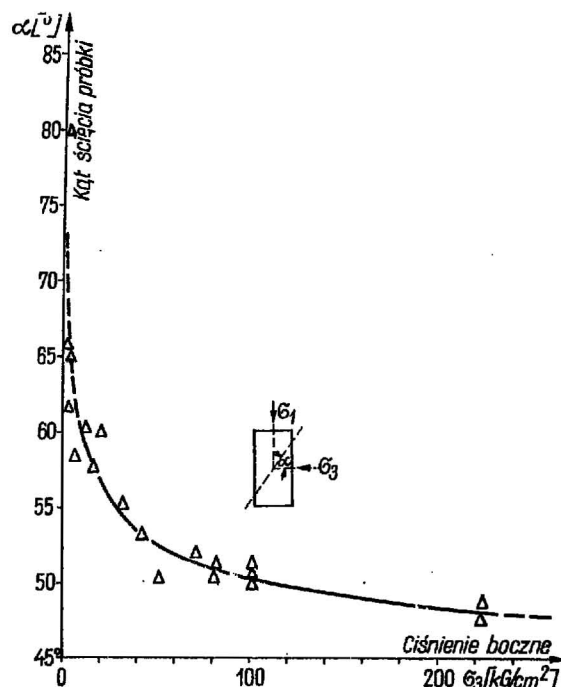
Fig. 5. Dependence of the ratio of effective principal stresses from the moment of destruction of sample on the value of lateral pressure.

nosił 47–48°. Powyższe fakty, szczególnie zmniejszenie kąta ścicia ze wzrostem ciśnienia, wyjaśniają krzywoliniowy przebieg obwiedni wytrzymałościowej. Jakościowo, z wyjątkiem gliny zwałowej, otrzymano obraz zbliżony np. do itu londyńskiego (4, 5). Niewielkie zmniejszenie kąta tarcia wewnętrznego dla gliny zwałowej wynika może z szerszego zakresu ciśnień aniżeli stosowane były w badaniach (17). Uważa się (5), że obniżenie kąta tarcia jest wywołane zmniejszeniem prędkości wzrostu objętości przy ścinaniu, wskutek przebudowy i zniszczenia struktury ośrodka. Zakrzywienie obwiedni, poza wymienionymi już czynnikami, w znacznym stopniu zależy od wartości stosowanych ciśnień w stosunku do obecnie i w przeszłości działających obciążeń.

PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki badań pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków. W zakresie stosowanych naprężeń badane grunty charakteryzują się krzywoliniową obwiednią wytrzymałościową. Ze wzrostem naprężenia normalnego kąt tarcia wewnętrznego zmniejsza się. Zmiana nachylenia obwiedni następuje dla poszczególnych badanych gruntów przy różnych, zależnych od działających w przeszłości, wartościach obciążeń. Najmniejszy wpływ obserwuje się w gruntach o zróżnicowanym składzie granulometrycznym (gliny piaszczyste), największy — w gruntach przekonsolidowanych o znacznej zawartości frakcji ilowej (iły).

Przedstawione wyniki potwierdzają tezę, że parametr B Skempton'a nie jest wielkością stałą. W badaniach w warunkach niskich ciśnień zależy on obok wilgotności od struktury gruntu i dodatkowo od wartości stosowanych ciśnień (10, 24). W warunkach wysokich ciśnień podstawowym czynnikiem wpływającym na zmienność B jest wartość ciśnienia. Szczególnie intensywny wzrost tego parametru następuje przy naprężeniach przekraczających obecne i działające w historii obciążenie geologiczne. Wartości stosunku naprężeń głównych w momencie zniszczenia i kąta ścicia próbki maleją ze wzrostem ciśnienia. Ze względu na zróżnicowany co do wartości wpływ wysokich ciśnień na parametry wytrzymałościowe istnieje konie-



Ryc. 6. Zależność kąta ścicia próbki od wartości ciśnienia bocznego.

Fig. 6. Dependence of angle of shear of sample on value of lateral pressure.

czność wykonywania takich badań nie tylko dla poszczególnego (granulometrycznie) rodzaju gruntu, lecz także dla różnych typów genetycznych gruntów spoistych.

Prowadzone w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej UW badania wytrzymałości gruntów spoistych na ścinanie w warunkach wysokich ciśnień, w powiązaniu z badaniami wykonywanymi w wysokociśnieniowych konsolidometrach, mają na celu nie tylko ustalenie obwiedni wytrzymałościowej w szerokim zakresie naprężeń, ale przede wszystkim określenie wpływu genezy (historii geologicznej) na właściwości mechaniczne ośrodka gruntowego.

Pragnę złożyć gorące podziękowania panu Tadeuszowi Krasnodębskiemu za pomoc podczas przeprowadzania badań. Wyrazy podziękowania składam także prof. Zygmuntovi Głazerowi za krytyczne przeczytanie maszynopisu i życzliwą pomoc w trakcie wykonywania całej pracy.

LITERATURA

1. Awezjan G. M. — Fizyčeskije swojstwa osadocnych porod pri wysokich dawlenijach i temperaturach. Izd. Niedra. Moskwa 1972.
2. Bajdjuk B. H. — Mieczaniczeskije swojstwa gornych porod pri vysokich dawlenijach i temperaturach. Izd. Gostoitiechizdat. Moskwa, 1963.
3. Bishop A. W., Webb D. L., Skinner A. E. — Triaxial test on soil at elevated cell pressures. Proc. 6-th, Inter. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Montreal, 1965, vol. 1.
4. Bishop A. W., Webb D. L., Lewin P. L. — Undisturbed samples of London clay from the Ashford Common shaft. Effective stress relationships. Géotechnique, London, 1965, vol. 15, no. 1.
5. Bishop A. W. — The strength of soils as engineering materials. Sixth Rankine Lecture. Ibidem, 1966, vol. 16.
6. Bishop A. W., Wesley L. D. — A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. Ibidem, 1975, vol. 25, no. 4.
7. Chudek M., Moroz R. — Wytrzymałość skał karbońskich w trójosiowym stanie naprężeń. Arch. Gór., 1971, t. 16, z. 3.

8. Czubaszek J. — Wytrzymałość doraźna ośrodków bez spójności na ścinanie w przypadku znacznych naprężeń. Pr. nauk. Inst. Geotech. P. Wrocł., 1972, nr 9.
9. Dmitruk S. i in. — Dotychczasowy stan wiedzy w zakresie własności gruntów pod wielkimi ciśnieniami, niezbędne dalsze badania oraz zalecenia dla prac bieżących. Raport nr 98 P. Wrocł., Inst. Geotechn., 1974.
10. Ewertowska-Madej Z. — O parametrze B ciśnienia wody w porach gruntu. Rozpr. hydrot. 1973, z. 32.
11. Feda J. — The effect of grain crushing on the peak angle of internal friction of a sand. Proc. 4-th Conf. Soil. Mech. Found. Eng. Budapest, 1971.
12. Frelkiewicz S., Lis J. — Wytrzymałość i sprężystość skał węglanowych w trójosiowym stanie naprężeń. Pr. nauk. Inst. Geotech. P.Wroc., 1975, nr 3.
13. Gergowicz Z. — Badania wytrzymałościowe ośrodków sypkich dla celów budownictwa podziemnego. Zesz. nauk. P.Wroc., Budownictwo 12. 1960, nr 60.
14. Glazer Z. i in. — Badania specjalne wytrzymałościowe i analiza uzyskanych wyników dla gruntów rejonu wkopu otwierającego kopalni Bełchatów. Zakład Prac geol. UW, 1974.
15. Golder H. G., Akroyd T. N. W. — An apparatus for triaxial compression tests at high pressures. Géotechnique, London, 1954, vol. 4, no. 4.
16. Griggs D. T. — Deformation of rocks under high confining pressures. Jour. Geol., Chicago, 1936, vol. 44, no. 5.
17. Insley A. E., Hillis S. F. — Triaxial test characteristics of a compacted glacial fill under unusually high confining pressures. Proc. 6-th. Inter. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Montreal, 1965, vol. 1.
18. Kaczyński R. — Inżyniersko-geologiczna ocena wpływu powierzchni osłabienia w ilach krakowieckich na stateczność zboczy rejonu Tarnobrzega. Biul. geol. UW, 1977, nr 22.
19. Korman S., Dunikowski A., Köhsling J. — Laboratoryjne badania wskaźników fizyko-mechanicznych własności skał w trójosiowym stanie naprężeń. Prz. górń., 1969, nr 11.
20. Köhsling J. — Badania naprężeń filarów solnych. Cz. I. Metryki wytrzymałościowe skał solnych. Odwadnianie Kopalń i Geotech., 1966, z. 1.
21. Lee K. L., Morrison R. A. — Strength of anisotropically consolidated clay. J. Soil Mech. Found. Div. ASCE, New York, 1970, vol. 96. no. 6.
22. Rieke H. H. III, Chilingarian G. V. — Compaction of argillaceous sediments. Developments in sedimentology. Elsevier, Amsterdam, 1974, vol. 16.
23. Sawabini C. T., Chilingarian G. V., Allen D. R. — Design and operation of a triaxial, high-temperature, high pressure compaction apparatus. J. Sedimentary Petrology. Oklahoma, 1971, vol. 41, no. 3.
24. Suchnicka H. — Wpływ drogi obciążenia na wytrzymałość gruntów spoiстых o nienaruszonej strukturze. Arch. Hydrotech. 1972, t. 19, z. 2.
25. Vesić A. S., Clough G. W. — Behaviour of granular materials under high stresses. J. Soil Mech. Found. Eng. ASCE, New York., 1968, vol. 94, no. 3.

SUMMARY

The paper presents results of laboratory tests of shear strength of soils under pressure changing from 0 to 200 kG/cm². The studies were carried out on samples of soils from the blanket of open-cast brown coal mine from Bełchatów and sulphur mine from Machów. They were carried out with the use of a special apparatus to triaxial compression with a possibility of measuring pore pressure during shearing and outflow of water consolidation. Two schemes of tests were chosen: with and without consolidation and with constant lateral pressure and increasing vertical stress. The results obtained have shown that the soils studied are characterized by curved strength envelope in the range of pressures applied. A change in inclination of envelope takes place under pressure specific for each soil. The effect is the lowest in the case of soils characterized by differentiated granulometry and the greatest in the case of overconsolidated clays. This gives further support to the statement that the value of the parameter B is not constant but rather markedly depends on the range of pressures applied, exceeding those acting at present and in the past. Moreover, there was found a marked dependence of the ratio of principal stresses and shearing angle of a sample on the pressures applied.

РЕЗЮМЕ

В статье представлены результаты лабораторных исследований сопротивления сдвигу грунтов в условиях давлений, в пределах 0—200 кГ/см². Исследованиям были подвергнуты грунты залегающие во вскрышах угольной шахты в Белхатове и серного рудника в Махове. В исследованиях применяли специальный набор аппаратуры для трёхосного сжатия, дающий возможность измерения парового давления во время сдвига и истечения воды при консолидации. Исследования были проведены по двух схемах: без консолидации и с консолидацией, при постоянном боковом давлении и возрастающем вертикальным напряжением. Полученные результаты указывают на то, что в пределах применяемых давлений исследованные грунты характеризуются нелинейной огибающей сопротивления. Изменение наклона огибающей для каждого грунта происходит при разных величинах давлений. Самое малое влияние наблюдается в грунтах с неоднородным гранулометрическим составом, самое большое — в пере-консолидированных глинах. Подтверждается факт, что параметр B изменчивый, а на его величину в большой степени влияет предел применяемых давлений, превышающих актуальные и действующие в прошлом нагрузки. Получена зависимость отношения главных напряжений и угла сдвига исследуемой пробы от применяемого давления.