

ZASTOSOWANIE METODY ŚCIEŻKI OBCIĄŻENIA DO BADAŃ GRUNTÓW

UKD 624.131.53/54:624.131.383

Wykaz oznaczeń:

- σ — naprężenie całkowite (FL-²),
 σ' — naprężenie czynne (FL-²),
 K_0 — współczynnik parcia gruntu w spokoju,
 $\left. \begin{array}{l} \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \\ \sigma'_1 > \sigma'_2 > \sigma'_3 \end{array} \right\}$ — naprężenia główne, całkowite
 i czynne (FL-²),
 τ — naprężenie ścinające (FL-²),
 ϵ_1 — odkształcenie w kierunku naprężenia,
 φ — kąt tarcia wewnętrzznego,
 c — spójność (FL-²),
 A, B — współczynniki Skemptona,
 u — ciśnienie porowe (FL-²),
 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = q$ — naprężenie dewiatorowe
 (FL-²),
 $\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} = p'$ (FL-²),
 $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = p$ (FL-²),

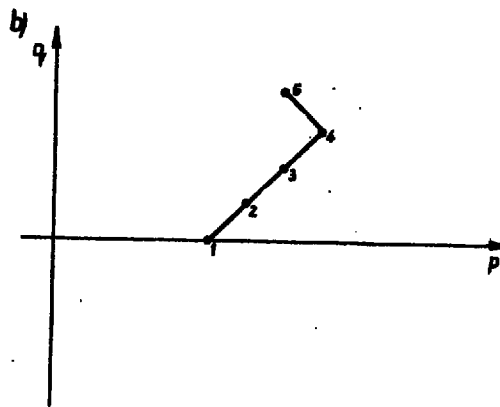
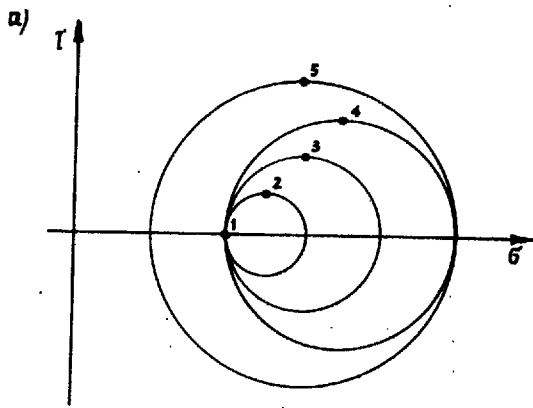
Dla obliczeń stateczności zboczy niezbędne jest wyznaczenie wielkości parametrów wytrzymałościowych gruntów — spójności i kąta tarcia wewnętrzznego. Zarówno spójność, jak i kąt tarcia wewnętrznego nie są wartościami stałymi dla danego gruntu, a ich wartości uzyskane z badań laboratoryjnych, obarczone są szeregiem błędów. Na pewne niedostatki techniki prowadzenia badań parametrów wytrzymałościowych w Polsce była zwracana uwaga

w publikacji (1). Na uzyskiwane wartości parametrów wywiera wpływ szereg różnych czynników, m.in. znaczny rozrzut wyników uzyskuje się, prowadząc badania wytrzymałościowe dla wielkości naprężeń, znacznie odbiegających od stanu naprężenia panującego w ośrodku gruntowym. Zagadnienie to nabiera szczególnego znaczenia przy analizie zboczy o znacznych wysokościach. Z tych względów, aby uzyskać w trakcie badań laboratoryjnych wartości parametrów wytrzymałościowych, niezbędna jest analiza stanów naprężenia i odkształcenia, jakie istnieją lub mogą wystąpić w analizowanym zboczach.

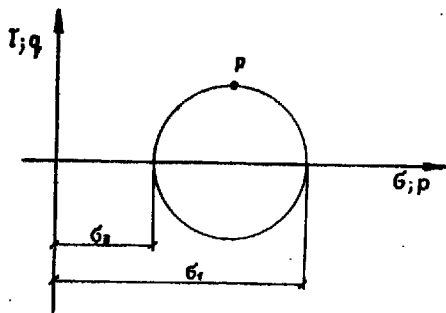
Badania wytrzymałościowe powinny być przeprowadzone w warunkach zgodnych z tymi stanami naprężenia i odkształcenia. Wymaga to wielokrotnie prowadzenia żmudnych i skomplikowanych prac, ale dla szeregu przypadków jest to sprawa niezbędna. Takie specjalne badania zostały m.in. przeprowadzone w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej UW przy analizie stateczności 100-metrowej skarpy stałej kopalni odkrywkowej w Machowie. Dla ustalenia przebiegu zmian naprężenia i odkształcenia wybranego elementu gruntu, przeprowadzenia w prawidłowy sposób badania oraz wykonania analizy obliczeniowej, celowe było zastosowanie metody ścieżki obciążenia.

METODA ŚCIEŻKI OBCIĄŻENIA

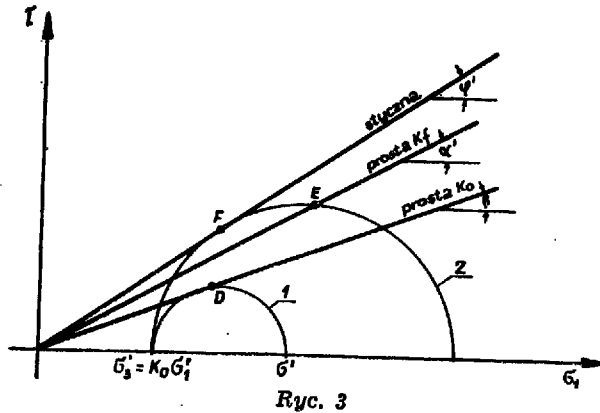
Metoda ta stosowana już była przez wielu badaczy (Taylor, Sokołowski, Halter i in.). W naszych badaniach, jako najbardziej celową, zastosowano do analizy metodę ścieżki obciążeń opracowaną przez T. W. Lambego (3). Metoda w ujęciu Lambego posiada bardzo duże zalety przy rozwiązywaniu zagad-



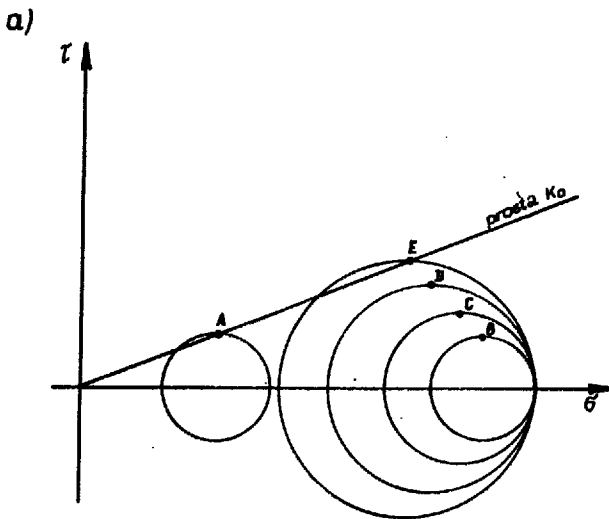
Ryc. 2.



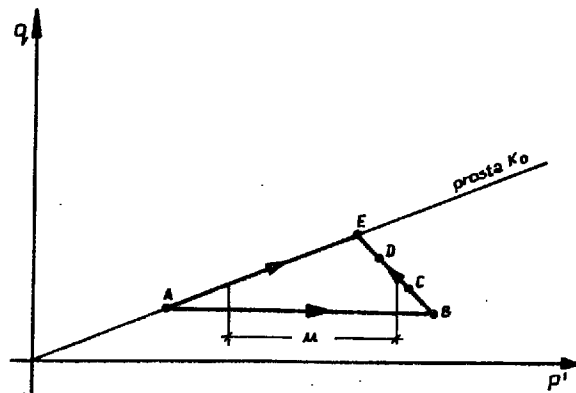
Ryc. 1



Ryc. 3



b)



Ryc. 4

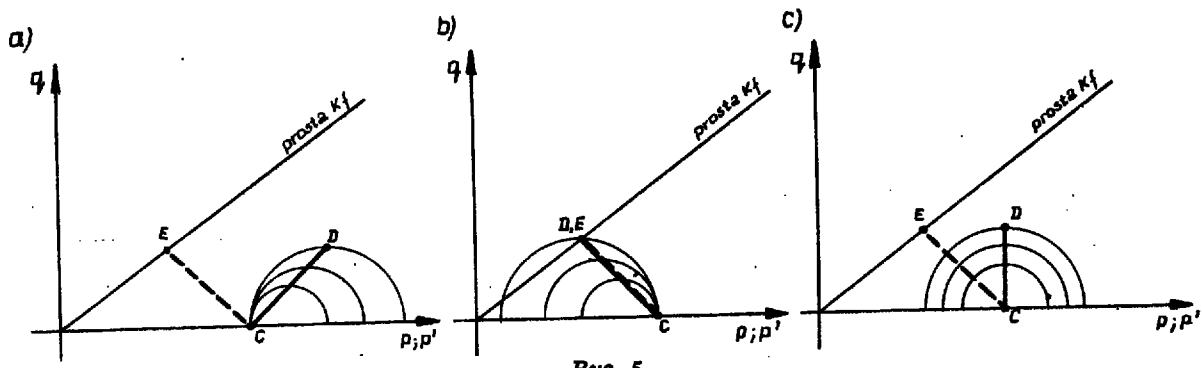
nień praktycznych. Istota tej metody zostanie przedstawiona dla zadania płaskiego, a więc przy uwzględnieniu jedynie naprężeń głównych σ_1 i σ_3 . Wykresy dla trzech naprężeń głównych $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ są znacznie bardziej skomplikowane, a stosowanie ich w praktyce jest ograniczone choćby brakiem w Polsce odpowiedniej aparatury badawczej, pozwalającej na niezależne zmiany trzech głównych naprężeń.

W mechanice gruntów stan naprężenia najwygodniej przedstawia się, wykreślając koło Mohra (ryc. 1). Nie ma jednak potrzeby wykreślania całego koła, gdyż położenie jego jest jednoznacznie określone przez punkt P o współrzędnych $p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$; $q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$

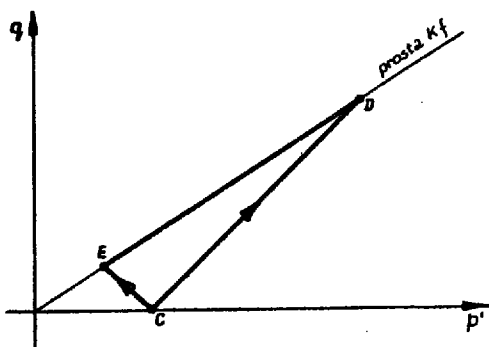
Zmiany stanu naprężenia można więc przedstawić zarówno kreśląc koła Mohra dla kolejnych sta-

nów naprężenia w układzie osi τ, σ lub też nanosząc położenie punktów P o maksymalnej wartości naprężenia ścinającego w układzie osi p, q (ryc. 2).

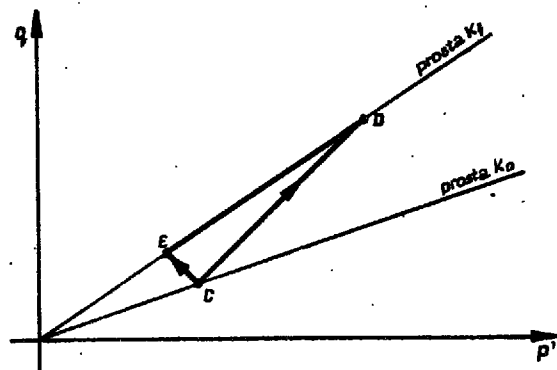
Ryc. 2a przedstawia kolejne stany naprężenia, od wszechstronnego hydrostatycznego ściskania (punkt 1), przez kolejne zwiększanie naprężenia głównego σ_1 (okręgi 2, 3, 4) i wreszcie zmniejszenie naprężenia głównego σ_3 (okrąg 5). Stosując układ osi p, q można kolejne położenie koła Mohra scharakteryzować jednym punktem (ryc. 2b). Jeśli punkty te połączymy linią, to obrazować ona będzie przebieg stanu naprężenia i nazywamy ją ścieżką obciążenia. Można więc zdefiniować ścieżkę obciążenia jako zbiór punktów o maksymalnym naprężeniu ścinającym, jakie występuje w rozpatrywanym elemencie gruntu w przypadku zmiany wywieranych obciążeń, a więc dla zmieniającego się stanu naprężenia.



Ryc. 5



Ryc. 6



Ryc. 7

Przy uwzględnianiu ciśnienia porowego u można wykreślić zarówno ścieżkę obciążenia całkowitego:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \text{ do } \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \text{ tzn. } q \text{ do } p;$$

jak i ścieżkę obciążenia czynnego:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - u \text{ do } \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - u = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \text{ tzn. } q \text{ do } p'$$

Oczywiście w obu przypadkach parametr q zwany również naprężeniem dewiatorowym posiada tę samą wartość.

Podstawowym wykresem przedstawiającym zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem jest zależność q od s_1 . W zagadnieniach praktycznych duże znaczenie posiada stosunek naprężenia czynnego minimalnego do maksymalnego $\frac{\sigma'_3}{\sigma'_1}$. W naturalnych warunkach, przy zagęszczaniu gruntu wartość tego stosunku, zwanego współczynnikiem parcia gruntu w spokoju, oznaczamy $K_0 = \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1}$. Dla

takiego zdefiniowania możemy mówić o K_0 dla gruntu, w którym przebiegało jednoosiowe odkształcenie. W badaniach laboratoryjnych taki stosunek naprężeń głównych istnieje przy badaniach edometrycznych. Zgodnie z dotychczasowymi wynikami badań doświadczalnych wartość K_0 dla gruntów pozbawionych spójności, jak i dla spoiistych, ale normalnie konsolidowanych wyraża równanie $K_0 = 1 - \sin \varphi'$.

W zagadnieniach stateczności zboczy analizujemy stany graniczne, dlatego też celowe jest wskazanie niektórych najprostszycch zależności, jakimi posługujemy się w metodzie ścieżki obciążenia. Na ryc. 3 wyrysowano dwa koła Mohra, jedno dla stanu naprężenia w warunkach jednoosiowego ściskania bez możliwości rozszerzania się bocznego (badanie edometryczne — okrąg 1), drugie dla tej samej wartości naprężenia σ'_3 , ale dla wartości σ'_1 , kiedy następuje ściecie (badanie trójosiowe — okrąg 2). Punkty D i E są punktami ścieżki obciążenia. Punkt F jest punktem styczności do prostej Coulomba w momencie poślizgu. Należy podkreślić, że wykres został

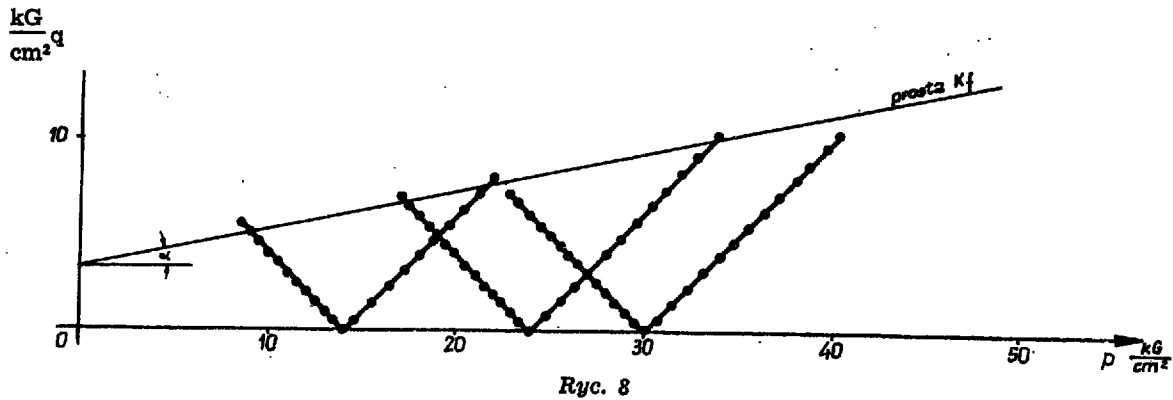
przedstawiony dla gruntów pozbawionych spójności, ale ma również pełne zastosowanie dla gruntów spoiistych po zmianie układu osi τ, σ' na $\tau, \sigma' + c \operatorname{ctg} \varphi'$. Prosta K_f w metodzie ścieżki obciążenia przedstawia warunek poślizgu oparty o kryterium Coulomba — Mohra. Zależność pomiędzy kątami nachylenia: stycznej (φ') i prostej K_f (α') wynosi $\sin \varphi' = \operatorname{tg} \alpha'$. Prosta poprowadzona z początku układu przez punkt D , tzn. przez punkt ścieżki obciążenia dla warunku K_0 nazywa się prostą K_0 , a kąt jej nachylenia określa zależność $\operatorname{tg} \beta = \frac{1 - K_0}{1 + K_0}$.

Ścieżki obciążenia całkowitego i czynnego dla badań edometrycznych przedstawiono na ryc. 4. Stan początkowy przedstawiony za pomocą punktu A obrazuje koło Mohra, gdzie $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} = K_0$.

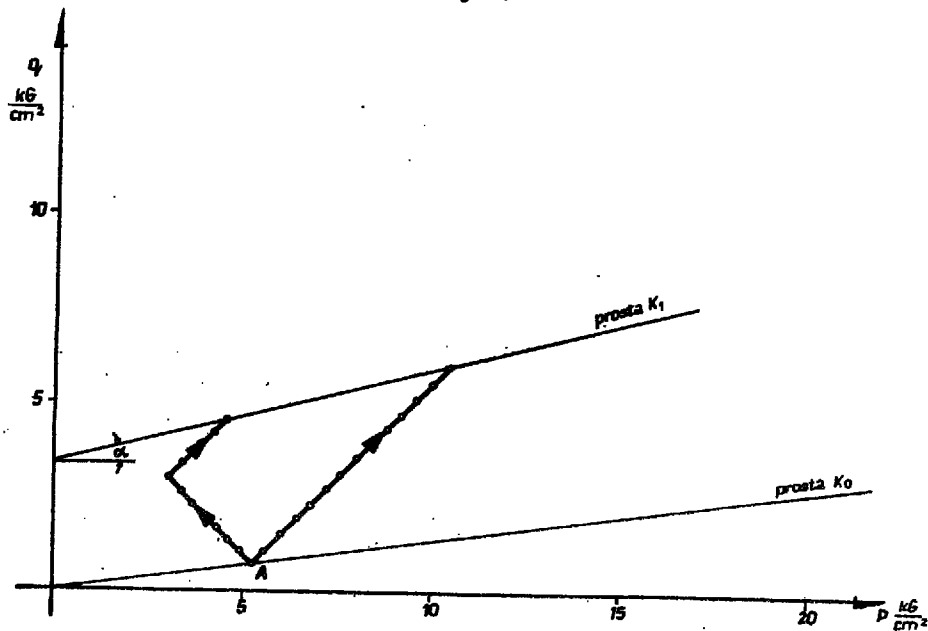
Po zwiększeniu obciążenia, w pierwszym momencie następuje wzrost ciśnienia porowego i koło Mohra o tej samej średnicy przesunięte jest w prawo, o wartość ciśnienia porowego u (współrzędne na osi σ wynoszą $\sigma'_1 + u; \sigma'_3 + u$). W miarę odpływu wody następuje zmniejszenie ciśnienia porowego i odpowiednie koła Mohra o coraz większych średnicach ścieżki obciążenia — C, D, E . Ścieżka obciążenia całkowitego przebiega przez punkty $ABCDE$. Gdyby prowadzić w trakcie badania pomiar ciśnienia porowego, to w warunkach niemożności odkształcenia bocznego musi być zachowana stała wartość stosunku $\frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} = K_0$.

a ścieżka obciążenia czynnego przedstawiona jest odcinkiem AE wzdłuż prostej K_0 . Pomierzona w poziomie odległość między ścieżką obciążenia całkowitego, a ścieżką obciążenia czynnego przedstawia wielkość ciśnienia porowego u , panującego w danym momencie.

Na ryc. 5 podano przykłady ścieżek obciążenia całkowitego i czynnego w badaniach trójosiowych. We wszystkich przypadkach rozpoczynamy od wsteczstronnej konsolidacji — punkt C . Na ryc. 5a odcinek CD przedstawia ścieżkę obciążenia aż do znisz-



Ryc. 8



Ryc. 9

czenia próbki. Wykreślona została również, w oparciu o równanie Skemptona

$$u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

ścieżka obciążenia czynnego CE, przy przyjęciu założenia upraszczającego, że parametry $A=1$ i $B=1$. Ponieważ badanie prowadzone jest przy stałej wartości σ_3 , więc $\Delta u = \Delta\sigma_1$. Dla tych samych założeń wykreślono na ryc. 5b ścieżki obciążenia: czynnego — CD oraz całkowitego — CE, przy czym badanie prowadzone jest przy stałej wartości σ_1 i zmniejszającym się σ_3 . Wreszcie na ryc. 5c przedstawiono ścieżki obciążenia: czynnego i całkowitego przy badaniu prowadzonym za stałą wartość $p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$. Na przedsta-

wionych wykresach widać, że przy przyjęciu wartości parametrów $A=1$ i $B=1$ przebieg ścieżki obciążenia czynnych jest identyczny, niezależnie od zmian naprężeń całkowitych.

Przebieg ścieżki obciążenia dla badania trójosiowego z odplywem przedstawiono na ryc. 6. Próbkę gruntu została początkowo skonsolidowana wszechstronnym obciążeniem, co przedstawia punkt C. Dalej badanie prowadzi się przy zwiększaniu obciążenia σ_1 , tak aby nie powstawało ciśnienie porowe u . W takim przypadku całkowita ścieżka obciążenia pokrywa się z czynną ścieżką obciążenia i przebiega wzdłuż prostej CD nachylonej pod kątem 45° . W punkcie D, znajdującym się na prostej K_1 , następuje zniszczenie próbki. Jeśli badanie prowadzi inaczej, a mianowicie po wszechstronnym obciążeniu (punkt C) utrzymywac stałą wartość naprężenia σ_1 , zmniejszając wartość ciśnienia bocznego, aż do zniszczenia próbki, to dla badań z odplywem, ścieżka

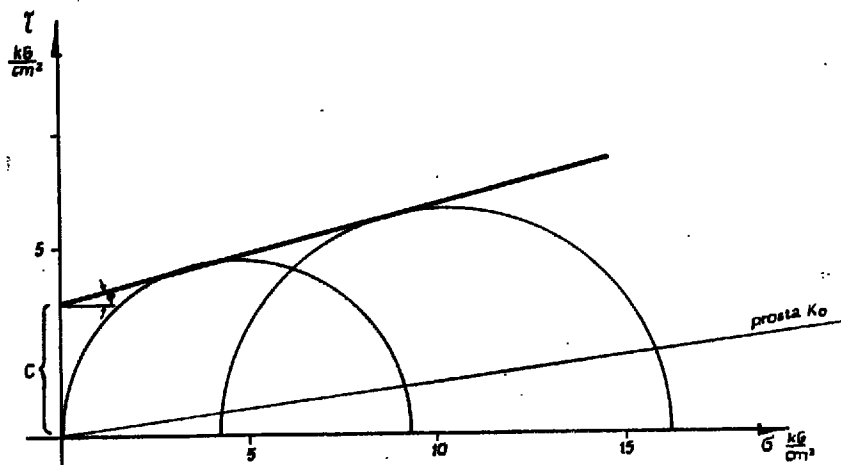
obciążenia przebiega od punktu C do punktu E, przedstawiającego stan naprężenia w momencie zniszczenia.

Podobne wykresy można przedstawić dla początkowej anizotropowej konsolidacji $\sigma'_3 = K_0 \sigma'_1$, w tych przypadkach punkt C będzie znajdował się na prostej K_0 , a ścieżka obciążenia od punktu C będzie przebiegała zależnie od sposobu prowadzenia badania. Dla warunków badania identycznych jak wskazano na ryc. 6 ścieżki obciążenia całkowitego i czynnego zostały przedstawione na ryc. 7.

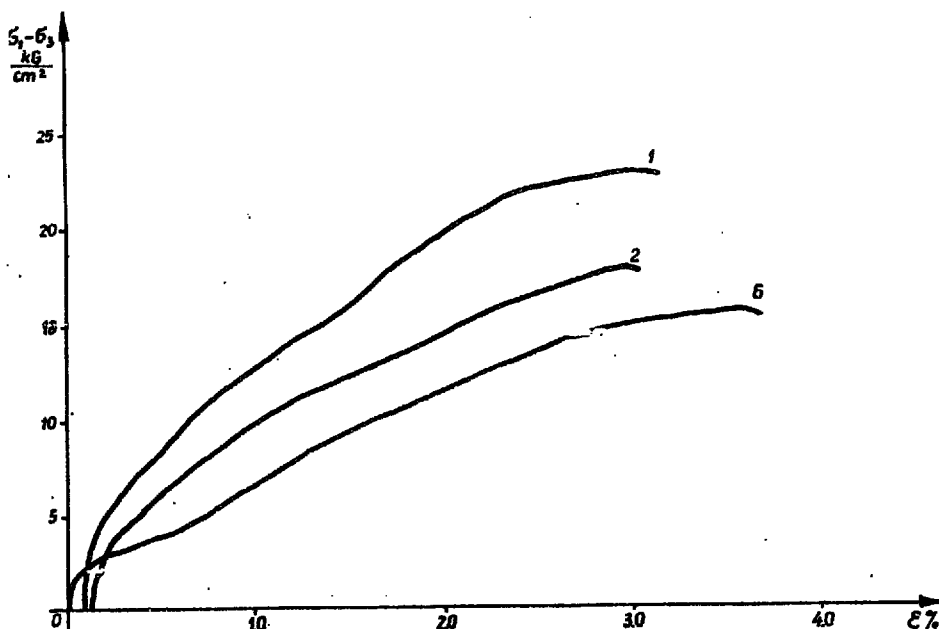
WYNIKI PROWADZONYCH BADAŃ

Zgodnie z przedstawioną metodą ścieżki obciążenia prowadzono badania edometryczne i trójosiowe trzeciorzędowych ilów krakowieckich, należących do serii ilastej nakładu złoża siarki, budujących 100-metrową skarpe kopalni odkrywkowej.

Iły krakowieckie stanowią kompleks utworów ilastych sarmatu, o miąższości ok. 65 m. Reprezentowane są przez iły silnie zdiagenezowane (iłowupki), z tym że stopień diagenezy wzrasta wraz z głębokością. Głównym elementem teksturalnym jest ich laminacja. Zbudowane są z lamin i warstewek ilastych o zmiennej miąższości od kilku milimetrów do 12 cm, barwy od szarej do ciemnoszarej lub zielonoszarej oraz cieńszych jasnoszarych warstewek i lamin pylasto-piaszczystych. Laminacja jest często zaburzona, występują liczne mikrouskoki bądź struktury spływowe. W skale zanotowano ponadto wkładki bentonitów, mułowca oraz czarnych ilów o podwyższonej zawartości części organicznych (od 2 do 6%). Bentonity występują najczęściej w strefie 25—40 m ppt,



Ryc. 10



Ryc. 11

w postaci wkładek i lamin o miąższości od 0,5 do 2,0 mm. Charakteryzują się barwą od jasnokremowej do żółtej, strukturą pelitową, teksturą warstwową, są mało wilgotne, zwarte. Występują także w postaci rozproszonej, o czym świadczy znaczny procent zawartości w ilach montmorylonitu oprócz hydromin, które są ich głównym składnikiem. W strefie ilów z wkładkami bentonitu występuje dość licznie poryt bądź w postaci kongrecji, bądź jako pojedyncze kryształki.

Cała seria ilów krakowieckich jest spękana i zlu-strowana, przeważnie ukośnie do laminacji pod ką-tem 50—40°. Obserwuje się także rozwarstwienie wzdłuż wkładek lub lamin pylastych. Ogólnie war-stwy serii ilastej zapadają na E i SE pod kątem 0,5—2°. Próbki poddane badaniom pochodziły z głą-bokości ok. 30 m ppt. Parametry fizyczne serii ilów określone przy opracowaniu prognozy stateczności skarp kopalni wynoszą: ciężar właściwy 2,68 T/cm³, ciężar objętościowy — minimalnie 2,02 T/m³, maksy-malnie 2,37 T/m³, średnio 2,12 T/m³, wilgotność natu-ralna — w granicach od 17,1% do 26,4%, średnio 20,8%, granica płynności 60,5%, granica plastyczności 30,1%, granica skurczu 16,8%.

Badania trójosiowe przy zastosowaniu ścieżki obciążenia prowadzono na cylindrycznych próbkach

ilu o wymiarach: średnica 3,6 cm, wysokość 7,2 cm, zorientowanych w ten sposób, że większe naprężenie główne działało prostopadle do warstwowania. Wilgotność próbek gruntu użytych do badań wynosiła: minimalnie 19,8%, maksymalnie 21,0%. Do badań stosowano komorę wykonaną w Zakładzie Badania Podłoża Budowlanego według projektu R. Kaczyń-skiego, która umożliwia prowadzenie badań trójosi-owych przy stosowaniu ciśnień do ok. 40 at.

W badaniach trójosiowych zastosowano 4 rodzaje ścieżek obciążenia:

1. Ścinanie przez zwiększanie σ_1 przy stałym σ_3 po izotropowej konsolidacji;

2. Ścinanie przez zmniejszanie σ_3 przy stałym σ_1 po izotropowej konsolidacji;

3. Ścinanie przez zwiększanie σ_1 przy stałym σ_3 po anizotropowej konsolidacji, przy wartościach naprężeń głównych odpowiadających warunkowi K_0 dla ba-danego gruntu;

4. Ścinanie przez zmniejszanie σ_3 przy stałym σ_1 po konsolidacji w warunkach K_0 .

Wszystkie badania prowadzono przez powolne ści-nanie z możliwością odpływu i mierzono wielkości odkształceń pionowych.

Niektóre wyniki ilustrujące zastosowaną metodę będą przedstawione poniżej. Dotyczą one próbek nie

posiadających widocznych zlustrowań ani mikrousoków. Badania próbek ze zlustrowaniami prowadzone były odrębnie. Dla określenia położenia prostej K_f , przedstawiającej w metodzie ścieżki obciążenia kryterium Coulomba-Mohra, przeprowadzono ścięcia próbek przy zwiększaniu σ_1 oraz przy zmniejszaniu σ_3 po konsolidacji izotropowej. Zwiększanie naprężenia σ_1 następowało stopniami co 1,6 kG/cm², natomiast zmniejszanie naprężenia σ_3 — stopniami co 1,0 kG/cm². Ścieżki obciążenia przedstawiające wyniki sześciu badań przedstawiono na ryc. 8. Końcowe punkty ścieżek obciążenia przedstawiające moment ścięcia, pozwalają wykreślić prostą K_f . Z zależności $\sin \varphi = \operatorname{tg} \alpha$ dla badanych próbek it , uzyskano wartość $\alpha = 12^\circ$, $\varphi = 12^\circ 20'$ oraz obliczono wartość $K_0 = 0,7$. Dla określenia parametrów wytrzymałościowych przeprowadzono serię badań przy zastosowaniu ścieżki obciążenia według 3 i 4, przykładowy wynik został przedstawiony na ryc. 9.

Badania trójosiowe rozpoczęto od anizotropowej konsolidacji, stosując ciśnienie $\sigma_1 = 6,0$ kG/cm², równe ciężarowi nadkładu i odpowiadające mu zgodnie z warunkiem $K_0 \sigma_3 = 4,2$ kG/cm². Taki stan naprężeń przedstawia punkt A na ryc. 9. Następnie ścinano próbki, podobnie jak w badaniu z konsolidacją ciśnieniem hydrostatycznym, raz przez zwiększanie σ_1 przy stałym σ_3 , a następnie przez zmniejszanie σ_3 przy stałym σ_1 , jak to pokazują ścieżki obciążenia na ryc. 9. W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano parametry wytrzymałościowe badanego it , jak można odczytać z ryc. 9 i 10 $\varphi = 14^\circ 30'$ $c = 3,5$ kG/cm². Zależności między odkształceniami pionowymi próbek, a naprężeniami dewiatorowymi podczas badania przedstawia ryc. 11.

SUMMARY

The article deals with the stress path method and its use during the elaboration of the programme of soil strength examinations. The stress path method allows us to present the results of these examinations in a considerably simpler form without drawing Mohr's circles in greater number. The use of the stress path method makes possible to understand various problems of soil mechanics. The work presents some principles of using the method considered, and shows the relations between the diagrams obtained from Mohr's circles and from stress path method. In addition, the results are given of the strength measurements made for soils that make an about 100 m high escarpment in an open-cut mine.

WNIOSKI

1. Badania trójosiowe są badaniami pozwalającymi na określenie zależności pomiędzy naprężeniami a odkształceniami.

2. Przy poważniejszych zagadnieniach niezbędne jest przeprowadzenie analizy zmian stanu naprężenia i stosowanie metod laboratoryjnych pozwalających na uzyskanie wyników odpowiadających warunkom panującym w gruncie.

3. Dla przedstawienia zmian stanu naprężenia w gruncie przed wykonaniem konstrukcji, w trakcie jej wykonania oraz po jej wykonaniu najbardziej celowe jest stosowanie w badaniach trójosiowych metody ścieżki obciążenia.

4. Zastosowanie metody ścieżki obciążenia posiada wyższą w stosunku do kreślenia kół Mohra, gdyż jest ona prostsza oraz wskazuje ciągią zmianę stanu naprężenia podczas badania aż do momentu zniszczenia, co jest szczególnie korzystne, a wielokrotnie niezbędne przy rozpatrywaniu zagadnień praktycznych.

LITERATURA

1. Glazer Z. — Spójność i kąt tarcia wewnętrzne-go. Prz. geol. 1966, nr 2.
2. Halter H. — Das Verhalten eines gesättigten, bindigen Bodes unter plötzlich aufgebrachter Last und unter Wechselbelastung. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich. Nr 60. Juris Verlag. Zürich, 1963.
3. Lambe W. T. — Stress Path Methods. Journal of the Soil Mechanic and Foundations Division. Vol. 93, No SM 6, 1967.

РЕЗЮМЕ

В статье рассматривается метод линии нагрузки и его применение в испытаниях устойчивости грунтов. Этот метод позволяет фиксировать результаты испытаний в простой форме, без необходимости вычерчивания большого числа кругов Мора. Применение методов линии нагрузки имеет ряд преимуществ, которые позволяют выяснить целый ряд проблем из области механики грунтов. В работе описаны принципы применения метода и указана связь между графиками, полученными из кругов Мора и методом линии нагрузки. Приведены результаты испытаний устойчивости грунтов, слающих откос карьера, высота которого достигает 100 м.