

BADANIA NIEKTÓRYCH SKAŁ KRAJOWYCH METODĄ TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA

JERZY SUPEL i JAN ZAWADA (WARSZAWA)

Przedstawiono badania metodą trójosiowego ściskania czterech rodzajów skał krajowych. W badaniach tych zastosowano aparat ciśnieniowy wykonany w ramach niniejszej pracy. Uzyskane wyniki doświadczalne, pozwalające na wyznaczenie stałych materiałowych badanych skał, podano w postaci tzw. krzywych granicznych.

1. UWAGI OGÓLNE

Badania trójosiowego ściskania stosowane powszechnie w mechanice gruntów są wykonywane znacznie rzadziej dla ośrodków kruchych, jakimi są skały. Spowodowane to jest trudnościami polegającymi na konieczności stosowania w badaniach wysokich ciśnień rzędu kilkuset atmosfer, co związane jest z odpowiednią konstrukcją komory ciśnieniowej, z którą współpracować muszą dodatkowo inne urządzenia pomocnicze.

Problem wpływu złożonych stanów naprężeń, w jakich znajdują się próbki w doświadczeniach trójosiowych, na własności materiału kruchego nie jest nowy. Zajmowano się nim od strony doświadczalnej już od 1911 r. (KÁRMÁN, 1911; GRIGGS, 1936; BRIDGMAN, 1946). Znane są opublikowane w r. 1969 wyniki eksperymentów trójosiowych, przeprowadzonych przez N. S. PARATE'A [4] dla granitu z okolic Bresse i wapienia z okolic d'Hauteville.

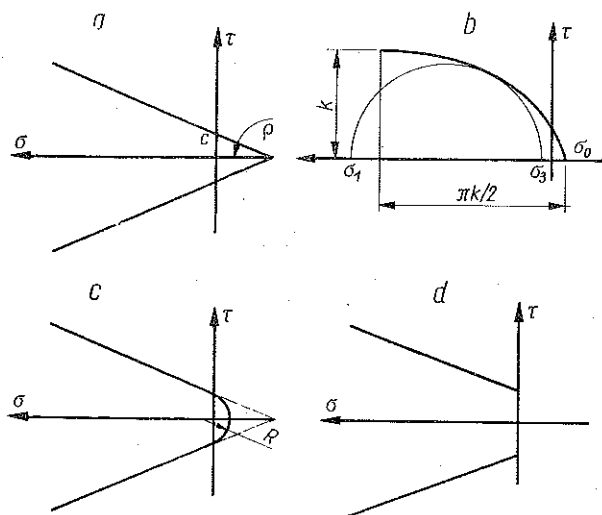
W kraju prawdopodobnie⁽¹⁾ nie przeprowadzono dotychczas trójosiowych badań skał. Przedstawione dalej wstępne wyniki eksperymentów przeprowadzonych przez autorów uzyskano dla czterech rodzajów skał osadowych: wapienia zwartego i wapienia miękkiego — występujących w kieleckim, marmurów — średniokrystalicznego i drobnokrystalicznego — pochodzących z okolic Stronia Śląskiego na Dolnym Śląsku. Wstępne badania trójosiowe przeprowadzono na aparacie, którego projekt techniczny oraz konstrukcję wykonano w ramach niniejszej pracy.

Na podstawie badań przeprowadzonych metodą trójosiowego ściskania można w dokładniejszy sposób wyznaczyć stałe materiałowe skał, kąt tarcia wewnętrznego ρ oraz spójność c .

Badania takie stanowią jednocześnie podstawę do wyznaczania na płaszczyźnie naprężeń τ , σ obwiedni stanu granicznego (tzw. krzywej granicznej). Wykreślenie

⁽¹⁾ Autorom nie znane są odpowiednie publikacje.

rzeczywistej krzywej granicznej ma istotne znaczenie, ponieważ pozwala ocenić, w jaki sposób pewne teoretycznie przyjęte warunki stanu granicznego odpowiadają rzeczywistym materiałom. W najprostszym, zależnym od ciśnienia hydrostatycznego



Rys.1. Różne warunki stanu granicznego:

a - warunek liniowy Coulomba-Mohra, *b* - warunek określony krzywą graniczną w postaci łuku cycloidy, *c* - zastąpienie prostoliniowych obwiedni w obszarze rozciągania łukiem koła o promieniu R , *d* - warunek liniowy nie uwzględniający rozciągania

warunku liniowym Coulomba-Mohra (rys. 1a) przyjmuje się, że graniczne naprężenia styczne τ_n w płaszczyznach poślizgu związane są z działającymi tam naprężeniami normalnymi σ_n w następujący sposób:

$$(1.1) \quad \tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \rho + c.$$

Warunek stanu granicznego można określić również krzywą graniczną w postaci łuku paraboli lub cycloidy. Jeżeli krzywa graniczna jest cycloidą (rys. 1b), to warunek stanu granicznego przyjmiemy za W. W. SOKOŁOWSKIM [5] w postaci

$$(1.2) \quad \frac{\sigma_3 - \sigma_0}{2k} = \sin \left(\frac{\sigma_0}{k} - \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2k} \right).$$

Wiadomo, że materiały kruche mają mniejszą wytrzymałość na rozciąganie niż przewiduje to model Coulomba-Mohra. Można by więc zbudować odpowiednią teorię stanów granicznych, odpowiadającą zastąpieniu prostoliniowych obwiedni Coulomba-Mohra w obszarze rozciągania łukiem koła o pewnym promieniu R (rys. 1c)⁽²⁾.

Można by również w rozważaniach nie uwzględniać naprężeń rozciągających, a warunek stanu granicznego przedstawić jako dwie półproste przecinające oś τ

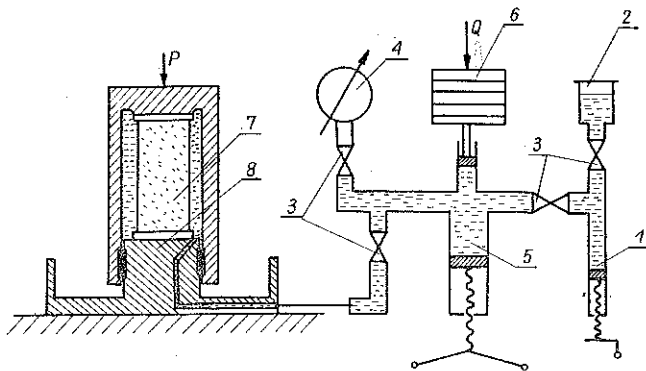
⁽²⁾ Na rys. 1 naprężenia ściskające przedstawione są jako ujemne, w dalszych rozważaniach traktować będziemy naprężenia ściskające jako dodatnie.

w punktach odpowiadających wartości spójności c . Istnieją również propozycje, w których występują bardziej złożone warunki stanu granicznego [3]. Obszerniejsze badania doświadczalne dla różnych rodzajów skał pozwoliłyby na pełną weryfikację stosowalności różnych warunków stanu granicznego.

Znajomość zachowania się skał w złożonych stanach naprężenia ma istotne znaczenie w niektórych dziedzinach nauki. Jedną z nich, mechaniką kruszenia, stanowi obok innych dyscyplin podstawę prawidłowej konstrukcji dużej rodziny maszyn rozdrabniających; maszyny te stosowane są w budownictwie, w hutnictwie, górnictwie itp. Dotychczasowe metody obliczeń i konstrukcji tych maszyn opierają się na pewnych hipotezach i danych empirycznych (hipoteza RITTINGERA, 1867; KICKA, 1885; BONDA, 1958 itp.) [1]. Obliczenia te z konieczności noszą charakter niepełny i przybliżony. Na skutek braku dostatecznych podstaw naukowych konstrukcja maszyn rozdrabniających nie odpowiada już z reguły nowoczesnej myśli technicznej. Badania doświadczalne skał, obejmujące m.in. próby trójosiowego ściskania, konieczne w rozwijaniu tych podstaw, mają istotny aspekt praktyczny.

2. METODA TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA

Metodą tą badana próbka w kształcie cylindrycznego walca umieszczona jest w szczelnej komorze wypełnionej cieczą przenoszącą ciśnienie. Dodatkowo przykłada się obciążenie pionowe zgodnie z kierunkiem tworzącej walca. Schemat stanowiska do badań trójosiowych przeprowadzonych w tej pracy przedstawiono na rys. 2.



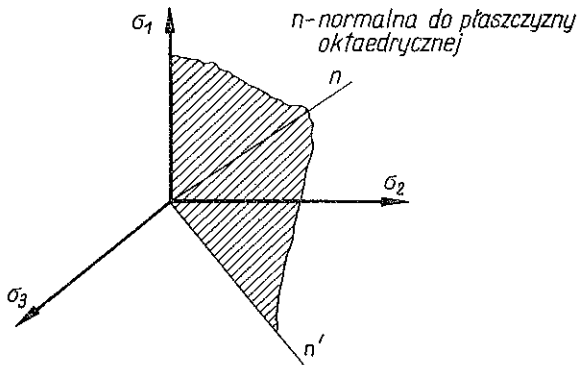
Rys. 2. Schemat stanowiska do badań trójosiowego ściskania próbek walcowych przeprowadzonych w niniejszej pracy:

1 – pompka zasilająca, 2 – zbiornik oleju, 3 – zawór, 4 – manometr kontrolny, 5 – pompa ciśnieniowa, 6 – pompa obciążnikowa, 7 – próbka walcowa, 8 – aparat ciśnieniowy

Przyjęte założenie, że stan naprężenia w próbce jest jednorodny, w rzeczywistości nie jest spełnione. Powodem tego jest występowanie tarcia na obu podstawach próbki. Wpływ tego tarcia można zmniejszyć stosując odpowiednie podkładki i nadając właściwą proporcję wysokości próbki i jej średnicy. Pozwala to na uzyskanie w znacznej części próbki jednorodnego stanu naprężenia; jest on zakłócony jedynie

w okolicach podstaw. Ścisłe ujęcie ilościowe zjawiska odchylenia od jednorodnego stanu naprężenia wskutek występowania tarcia jest dość skomplikowane.

Jak już zaznaczono stan graniczny w próbkach ściskanych trójosiowo można osiągnąć jedynie dla określonej kombinacji wartości naprężeń głównych. Ograniczenie to wynika z osiowej symetrii oraz z możliwości realizowania jedynie naprężeń ściskających. W próbie trójosiowego ściskania punkty odwzorujące graniczny stan naprężeń leżą w przestrzeni naprężeń zawsze na jednej płaszczyźnie (rys. 3). Płaszczyzna ta znajduje się w przestrzeni ograniczonej dodatnimi kierunkami naprężeń głównych, przechodzi przez jeden z tych kierunków i przez normalną do płaszczyzny oktaedrycznej.

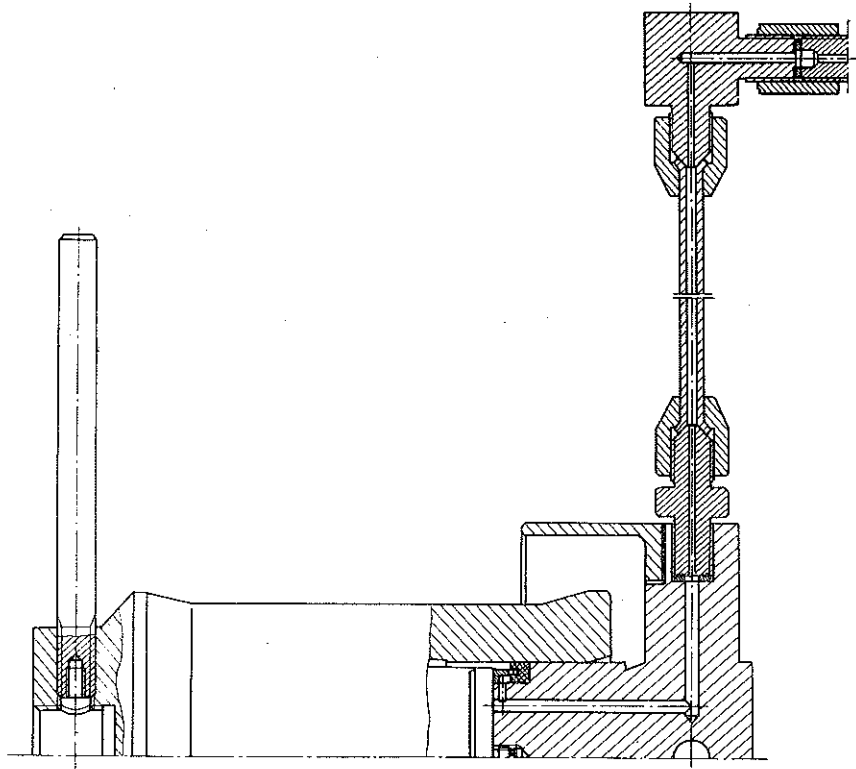


Rys. 3. Płaszczyzna możliwych dróg obciążenia w próbach trójosiowego ściskania

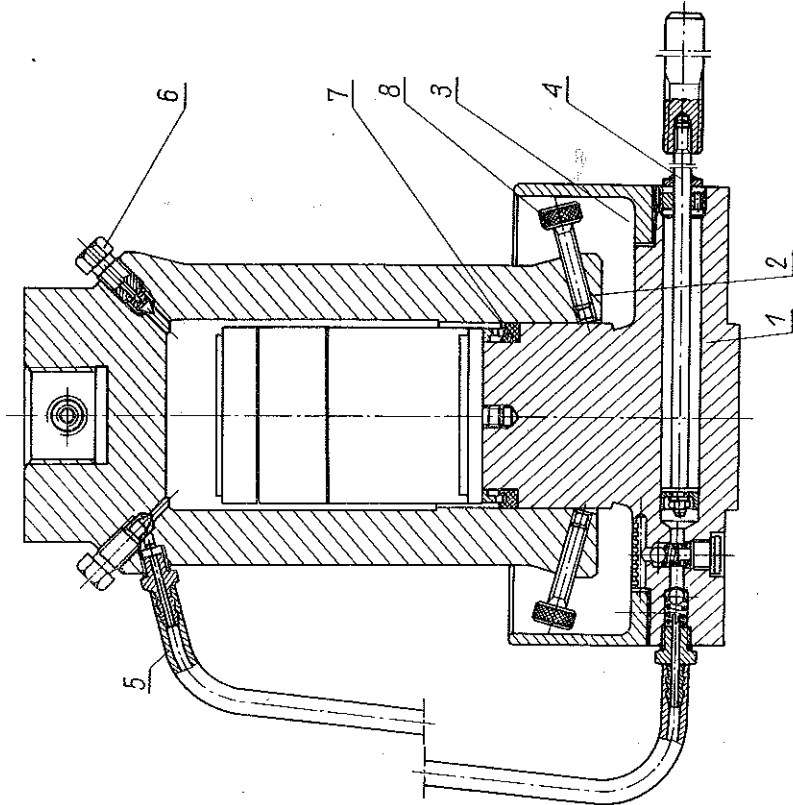
Metodą badań trójosiowych nie można sprawdzić poprawności warunku stanu granicznego Coulomba-Mohra w zakresie dowolnej kombinacji naprężeń. Pełną weryfikację tego warunku można przeprowadzić w przypadku ustalonych wartości ekstremalnych naprężeń głównych i przy różnych wartościach stanu pośredniego. Realizacja dowolnego stanu naprężeń jest o wiele bardziej złożona niż zwykle doświadczenia trójosiowe, choć także i one należą do skomplikowanych i trudnych eksperymentów. Pewne próby w tym kierunku przedstawiono w cytowanej już pracy N. S. PARATE'A [4].

3. APARAT TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA

Projekt techniczny aparatu trójosiowego pokazano na rys. 4. Aparat przeznaczony jest do badań próbek walcowych o maksymalnej średnicy równej 63 mm, wysokości 125 mm i przy ciśnieniu hydrostatycznym nie przekraczającym 1000 at. Można przeprowadzić w nim badania próbek o mniejszych średnicach i wysokościach po zastosowaniu specjalnych podkładek. Na odpowiednio ukształtowaną podstawę 1 nakładany jest cylinder 2, który bezpośrednio opiera się na próbce. W podstawie znajduje się wydrążony otwór służący do połączenia komory ciśnieniowej (znajdują-



b



a

Rys. 4. Aparat trójosiowego ściskania

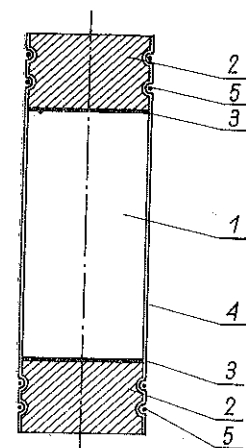
cej się pomiędzy górną powierzchnią podstawy a wewnętrzną powierzchnią cylindra) z pompą tłokową. Pompa umożliwiła wytworzenie i utrzymywanie na stałym poziomie potrzebnego ciśnienia. Mała ręczna pompa tłokowa pozwala na przepompowanie cieczy ze zbiornika 3 przez przewód gumowy 5 do komory ciśnieniowej. Dwa zawory w górnej części komory ciśnieniowej 6 umożliwiają odpowietrzenie cieczy wypełniającej przestrzeń wokół próbki. Gumowa uszczelka⁽³⁾ 7 osadzona w górnej części podstawy spełnia rolę uszczelnienia komory ciśnieniowej. Śruby 8 zabezpieczają cylinder przed odłączeniem od podstawy w czasie przenoszenia aparatu. Przenoszenie to ułatwiają dwa uchwyty. Czynnikiem przenoszącym ciśnienie był olej wrzecionowy⁽⁴⁾.

4. PRZYGOTOWYWANIE PRÓBEK

Do badań użyto próbek wykonanych z czterech wymienionych na początku skał, które w przemyśle poddawane są procesom kruszenia. Wapień miękki jest łatwo obrabialny i pozwala na wykonanie walcowych próbek przez toczenie zwykłym nożem tokarskim. Miały one wysokość $100 \pm 0,5$ mm i średnicę $63 \pm 0,4$ mm. Pozostałe materiały są trudno obrabialne i uzyskanie z nich próbek wymaga dużego nakładu pracy.

Z przygotowanych uprzednio płyt jednorodnego materiału o wymiarach $70 \times 150 \times 300$ mm wycinano diamentowym wiertłem koronkowym rdzenie walcowe o średnicy $24,35 \pm 0,02$ mm i wysokości ok. 70 mm. Następnie podstawy próbki wyrównywano diamentową piłą tarczową; po zabiegu tym próbka miała wysokość $50 \pm 0,2$ mm. Dodatkowo podstawy wygładzono papierem ściernym; powierzchnie boczne nie podlegały dalszej obróbce, gładkość ich bowiem była wystarczająca.

Na podstawy próbki 1 (rys. 5) nakładano stalowe podkładki 2 o średnicy 25 mm i wysokości 10 mm z wytoczonymi na powierzchni bocznej dwoma kanalikami. Między podstawy próbki i podkładek stalowych wkładano przekładki z folii polietylenowej 3 o grubości 0,3 mm. Przekładki z folii miały spełniać podwójną rolę: zapewnić równomierny rozkład nacisków między próbką i podkładkami oraz zmniejszyć tarcie na powierzchni kontaktu. Próbka wraz z podkładkami wkładana była do podwójnej złożonej z dwu warstw otoczki z cienkiej gumy 4, mającej zabezpieczyć



Rys. 5. Próbka walcowa przygotowana do badań trójosiowych:

1 – próbka walcowa, 2 – podkładka stalowa, 3 – przekładka polietylenowa, 4 – otoczka gumowa, 5 – drut opasujący otoczkę i podkładkę

próbkę przed olejem. Dodatkowe zabezpieczenie dawało silne opasanie uszczelki i podkładek cienkim drutem stalowym 5 wchodzącym w odpowiednie gniazdo na podkładkach.

⁽³⁾ DTI 63×8, 5×16 produkcji INCO we Wrocławiu

⁽⁴⁾ LUX10

5. APARATURA ZASTOSOWANA W BADANIACH

Nacisk na próbkę wywierano przez prasę hydrauliczną o maksymalnym nacisku 300 t. Siłę maksymalną odczytywano bezpośrednio z dynamometru prasy. Całość prób wykonano przy zakresie pomiarowym od 0 do 50 ton. Chwilową wartość siły rejestrowano za pomocą dynamometru tensometrycznego i mostka tensometrycznego TT-4 produkcji zakładów «Wamel». Pomiaru odkształceń próbki dokonywano za pomocą indukcyjnych czujników przemieszczeń liniowych OT-08 współpracujących z miernikiem wielkości mechanicznych typu N-101 produkcji zakładów ELPO. Obserwacje przebiegu odkształcenia i obciążenia dokonywano przez zapis tych dwóch wielkości na rejestratorze współrzędnościowym X—Y produkcji firmy japońskiej «Jokagawa Electric Works». Ciśnienie w aparacie trójosiowym uzyskiwano dzięki zastosowaniu pompy tłokowej używanej do wzorcowania manometrów; jego wartość odczytywano z manometru zegarowego o zakresie 630 at i klasie 0,5. Niektóre charakterystyczne szczegóły stanowiska badawczego zastosowanego w badaniach trójosiowych pokazano na fotografiach (rys. 6, 7 i 8).

6. SPOSÓB PRZEPROWADZENIA POMIARU

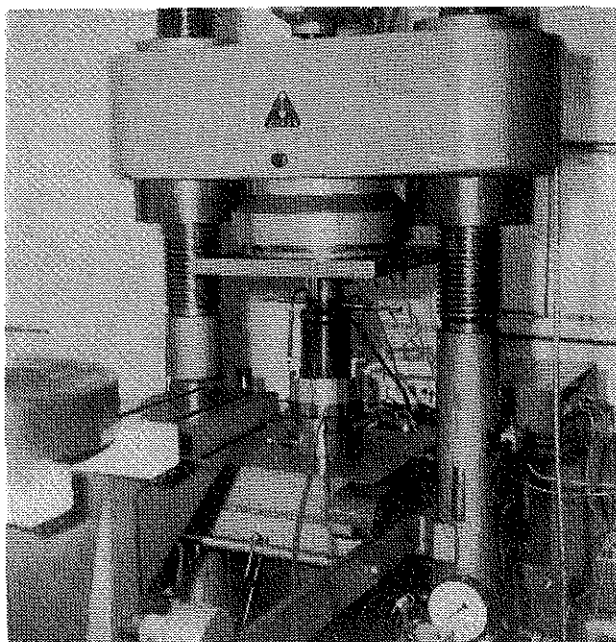
Próbkę przygotowaną zgodnie z opisem podanym w p. 4 wkładano do komory ciśnieniowej. Prasę wywierano wstępny nacisk o wielkości od 0,3 do 0,5 obciążenia niszczonego, odpowiadającego stanowi jednoosiowego ściskania (około 1000 kG). Po napełnieniu komory olejem i jej odpowietrzeniu pompą tłokową wywierano określone ciśnienie wewnątrz komory, co powodowało jednocześnie odciążanie próbki w wyniku parcia oleju na dno komory od wewnątrz.

W tym momencie próbka znajdowała się w stanie wszechstronnego równomiernego ściskania. Dalsze zwiększenie siły przez prasę powodowało ściskanie próbki wzdłuż tworzących. Wraz z ugięciem próbki następowało zmniejszenie objętości komory ciśnieniowej i wzrost ciśnienia. Zmiany ciśnienia kompensowano pompą tłokową (należy podkreślić, że nie był to proces samoczynny jak w manometrach obciążnikowo-tłokowych). Przy stosowanych prędkościach przyrostu siły i odkształcenia kompensacja ciśnienia nie przedstawiała większych trudności. Wahania ciśnienia wewnątrz komory, wynikające z ręcznego stosowania kompensacji ciśnienia, mieściły się w granicach 20 at. Typowe wykresy obciążenia pokazano na zamieszczonych dalej rysunkach (rys. 9 i 10).

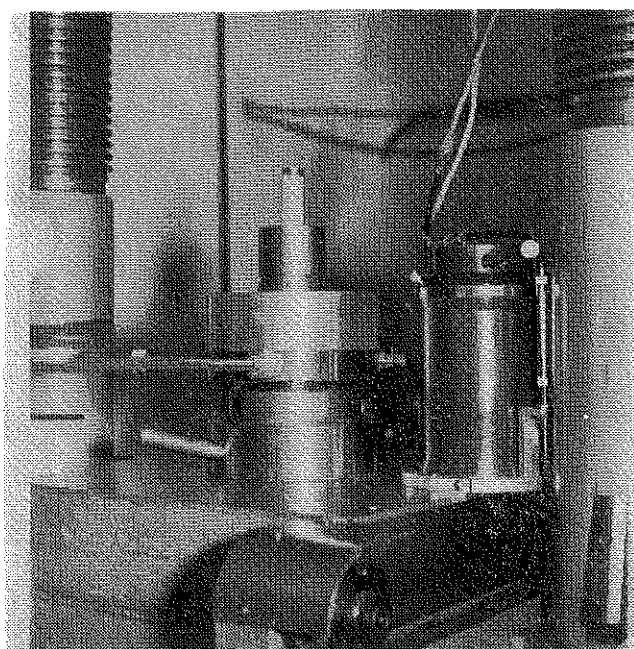
Obciążanie kontynuowano do chwili zniszczenia próbki lub do chwili uzyskania wystarczająco dużych odkształceń plastycznych. Maksymalne ugięcie próbki ograniczone było przez możliwość kompensacji zmian objętości komory ciśnieniowej. Dalsze kontynuowanie obciążenia i odkształcenia wymagało pewnych dodatkowych czynności, co powodowało częściowy spadek ciśnienia w komorze (widoczny na rys. 10 pomiar 66 i 80), wyrównany w dalszym procesie obciążania.

7. METODA OPRACOWANIA WYNIKÓW

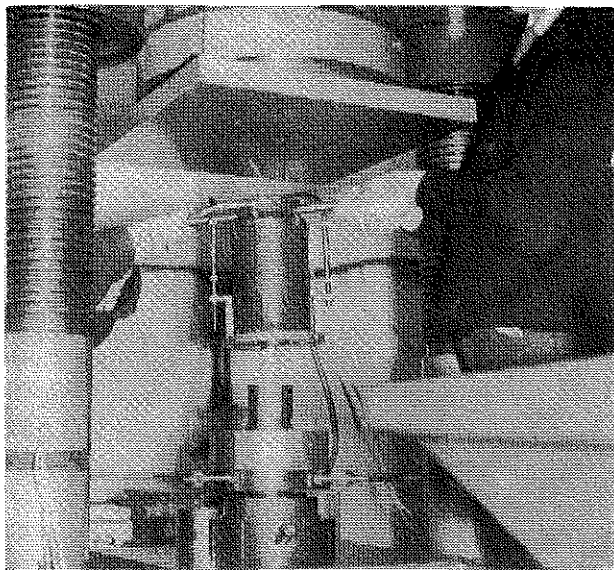
Jako kryterium osiągnięcia stanu granicznego przyjmowano zależnie od rodzaju materiału takie wartości naprężeń, przy których następowało zniszczenie kruche i takie wartości naprężeń, przy których rozpoczynał się szybki wzrost odkształceń



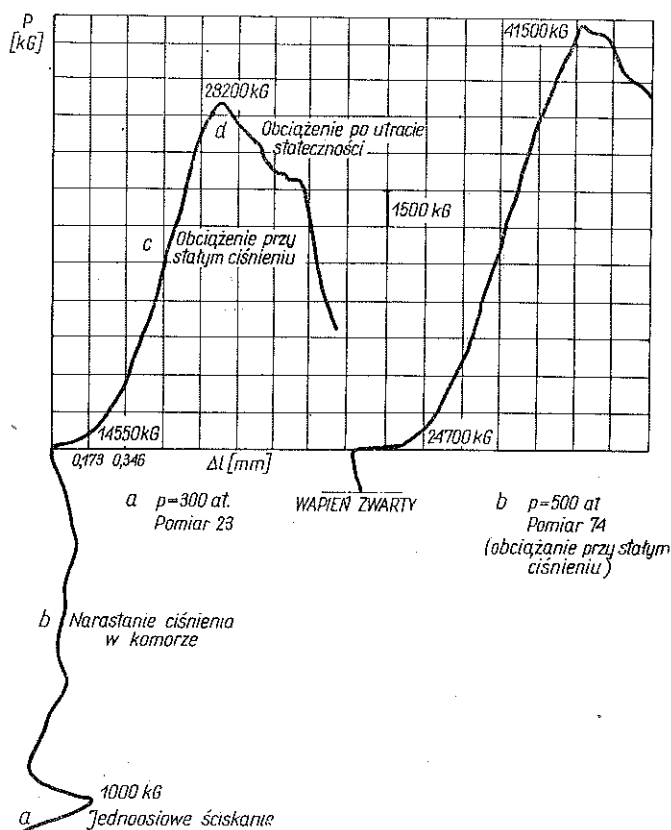
Rys. 6. Stanowisko badawcze do prób trójosiowego ściskania. Aparat trójosiowy, na którego górnej powierzchni znajduje się widoczny na zdjęciu dynamometr tensometryczny, obciążony jest naciskiem prasy o zakresie pomiarowym do 300 ton



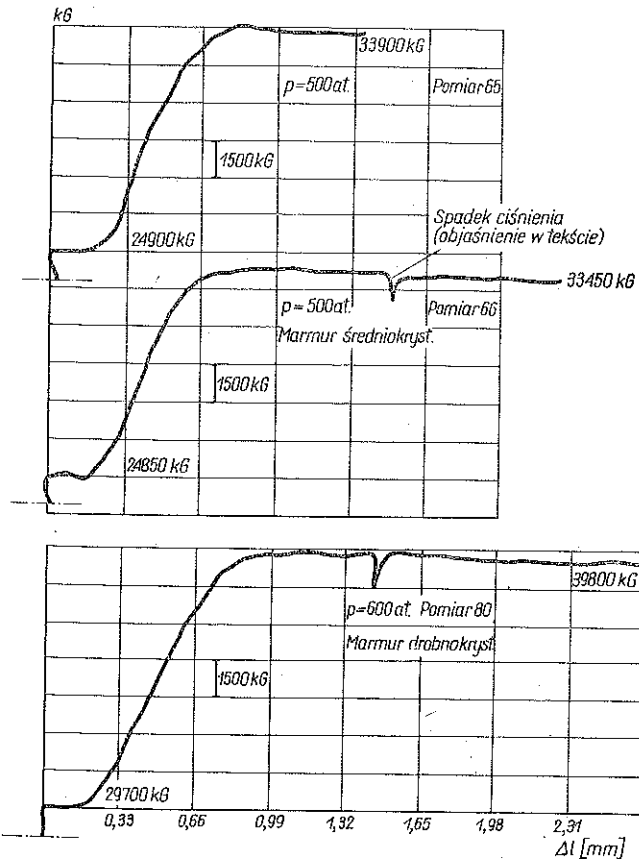
Rys. 7. Próbką walcową przygotowana do kolejnego pomiaru



Rys. 8. Zakładanie cylindra aparatu trójosiowego na podstawę; widoczne są złączone z cylindrem dwa czujniki przemieszczeń



Rys. 9. Przykłady wykresów $P=f(\Delta l)$ otrzymane w próbach trójosiowego ściskania wapienia zwartego. Próbki ulegają zniszczeniu kruchemu



Rys. 10. Przykłady wykresów $P=f(\Delta l)$ otrzymane w próbach trójosiowego ściskania marmurów średniokrystalicznego i drobnokrystalicznego. Materiał próbek ulega plastycznemu płynięciu

przy ustalonym stanie naprężenia. Stan naprężenia w próbce w chwili osiągnięcia stanu granicznego określono za pomocą uzyskanych wykresów siła-przesunięcie. Przyjmując ciśnienie boczne i naprężenia wzdłuż tworzącej jako naprężenia główne, otrzymujemy wzory

$$(7.1) \quad \sigma_2 = \sigma_3 = p, \quad \sigma_1 = \frac{P_{\max} - P_h}{F} + p,$$

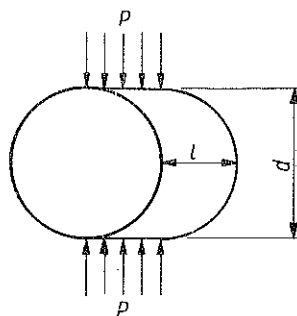
gdzie P_{\max} oznacza maksymalną siłę wywołaną prasą, P_h siłę potrzebną do utrzymania ciśnienia hydrostatycznego w komorze, p ciśnienie w komorze oraz F pole przekroju poprzecznego próbek.

Istotną wielkością jest także siła tarcia uszczelki. Z obserwacji wynikało, że w opisywanym urządzeniu siła tarcia nie ulegała dającym się zauważyć zmianom w zależności od prędkości przesuwu uszczelki po gładzi komory. Wielkość siły tarcia zmieniała się w sposób wyraźny wraz ze zmianami ciśnienia wewnątrz komory. Określenie siły tarcia, możliwe w naszym aparacie, nie było jednak konieczne. Zarówno P_{\max} jak i P_h są powiększone o tę samą wartość siły tarcia, wobec czego

we wzorze (7.1) redukuje się wartość siły tarcia. Wyznaczone wielkości $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ pozwalają wykreślić na płaszczyźnie naprężeń τ, σ koła Mohra, których obwiednia jest graficznym obrazem warunku stanu granicznego.

8. WYNIKI BADAŃ

W zamieszczonych niżej tablicach podano wyniki badań, obejmujące obok trójosiowego ściskania doświadczenia polegające na ściskaniu walców w kierunku radialnym (rys. 11), czyli tzw. próbę brazylijską, oraz na zwykłym jednokierunkowym ściskaniu walców bez ciśnień bocznych. Wszystkie wymienione rodzaje badań stanowią podstawę do wykreślenia krzywych granicznych dla badanych skał (rys. 12). Wytrzymałość na rozciąganie określona na podstawie próby brazylijskiej obliczono ze wzoru $\sigma_r = 2P/\pi dl$, gdzie P jest całkowitą siłą ściskającą, d i l odpowiednio średnicą i długością walca. Ze względu na znaczne trudności techniczne w realizacji doświadczeń polegających na izotropowym rozciąganiu próbek skał w wykreślonych krzywych granicznych przyjęto, że punkty odpowiadające wszechstronnemu i jednoosiowemu rozciąganiu leżą blisko siebie. Na rys. 13 podano wykresy odpowiadające granicznym stanom naprężenia, przedstawionym na płaszczyźnie możliwych dróg obciążenia w próbach trójosiowego ściskania. Części wykresów zaznaczone linią przerywaną otrzymano przy założeniu, że punkt odpowiadający izotropowemu rozciąganiu leży na przecięciu prostoliniowego odcinka obwiedni z osią σ .



Rys. 11. Ściskanie próbki walcowej w kierunku radialnym (próba brazylijska)

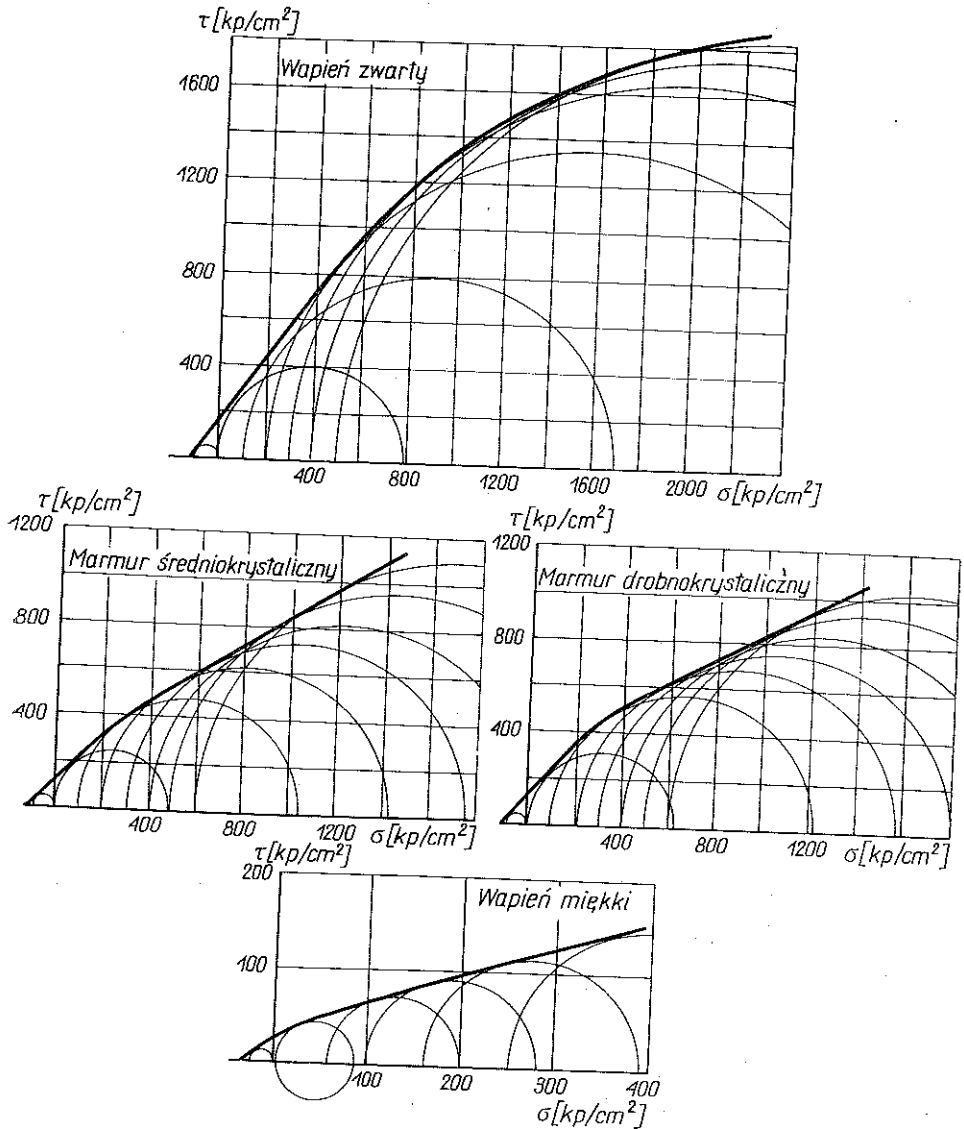
9. WNIOSKI

Ze względu na fakt, że liczba przeprowadzonych pomiarów nie była wystarczająca, przedstawione badania dostarczają jedynie pewnych wstępnych informacji o własnościach niektórych skał krajowych w złożonych stanach naprężenia.

Wiadomo że skały, których własności zmieniają się w szerokich granicach, wymagają badań bardziej obszernych. Zwrócimy przeto uwagę tylko na pewne zaobserwowane zjawiska.

1. Wapień zwarty. W złożonych stanach naprężenia przy ciśnieniach bocznych dochodzących do 500 at wapień zwarty ulega kruchemu zniszczeniu. Otrzymana krzywa graniczna w początkowym swym przedziale jest w przybliżeniu prostoliniowym odcinkiem, odpowiadającym warunkowi Coulomba-Mohra. W dalszej części przedziału obwiednia stanu granicznego przechodzi w łuk krzywej. Należy przypuszczać, że w rozwiązaniach praktycznych dla pewnych podstawowych procesów ściskania materiału kruchego można będzie wykorzystać tę najprostszą prostoliniową postać warunku stanu granicznego.

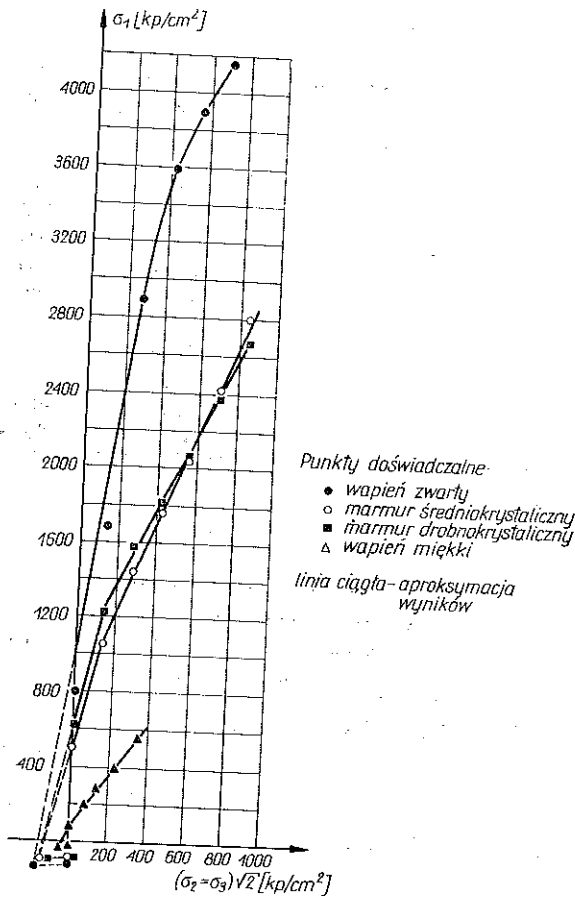
2. Marmury średniokrystaliczne i drobnokrystaliczne. Własności obu skał są na ogół do siebie zbliżone. Poddane wysokim ciśnieniom hydrostatycznym wykazują własności plastyczne. Otrzymane obwiednie stanu granicznego można



Rys. 12. Obwiednie stanu granicznego dla badanych skał

przedstawić w przybliżeniu w postaci dwóch odcinków prostych przecinających oś σ pod różnymi kątami. Wydaje się, że w praktyce, zależnie od charakteru procesu i z pewnym przybliżeniem, będzie można wykorzystać jeden ze wspomnianych odcinków. Wymagać to jednak będzie szczegółowej analizy.

3. Wapień miękki. Wykazuje w warunkach złożonych stanów naprężeń wyraźne własności plastyczne. Obwiednię stanu granicznego można w przybliżeniu sprowadzić do odcinka prostoliniowego przecinającego oś σ pod kątem ok. 12° . Główną wadą takiej aproksymacji jest to, że określone przez odcinek prostoliniowy naprężenia rozciągające osiągają dość znaczne wartości w porównaniu z wyznaczonymi doświadczalnie.



Rys. 13. Graniczne stany naprężenia przedstawione na płaszczyźnie możliwych dróg obciążania w próbach trójosiowych dla czterech rodzajów badanych skał.

Zaplanowane zostały dalsze etapy prac badawczych. Polegać one będą na trójosiowym ściskaniu w aparacie o zmienionej konstrukcji oraz na uzyskaniu dowolnych stanów naprężenia w próbkach prostopadłościennych. Obciążenia realizowane będą na urządzeniu, którego projekt jest już w stadium budowy. Doświadczenia te dostarczą pełniejszych danych o własnościach różnych rodzajów skał krajowych.

Tablica 1. Wapień zwarty

L.p.	Wymiary próbki $\varnothing \times h$ [mm]	Rodzaj doświadczenia	σ_1 kp/cm ²	σ_2 kp/cm ²	$\sigma_3; (\sigma_r)^1$ kp/cm ²
1	$24,35 \pm 0,02 \times 50 \pm 0,2$	Jednoosiowe ściskanie	825	0	0
2			715	0	0
3			770	0	0
4			865	0	0
5	$24,35 \pm 0,02 \times 50 \pm 0,2$	Próba brazylijska			—110
6					
7					—130
8	$24,35 \pm 0,02 \times 50 \pm 0,2$	Trójosiowe ściskanie	1680	100	100
9			1680	100	100
10			3220	200	200
11			2900	200	200
12			2750	200	200
13			2750	200	200
14			4000	300	300
15			3600	300	300
16			3280	300	300
17			3880	400	400
18			3920	400	400
19	4160	500	500		

¹⁾ (σ_r) — próba brazylijska.

Tablica 2. Marmur średniokrystaliczny

L.p.	Wymiary próbki $\varnothing \times h$ [mm]	Rodzaj doświadczenia	σ_1 kp/cm ²	σ_2 kp/cm ²	$\sigma_3; (\sigma_r)$ kp/cm ²
1	$24,35 \pm 0,02 \times 50 \pm 0,2$	Jednoosiowe ściskanie	470	0	0
2			520	0	0
3			550	0	0
4			450	0	0
5	$24,35 \pm 0,02 \times 50 \pm 0,2$	Próba brazylijska			—90
6					
7					—85
8	$24,35 \pm 0,02 \times 50 \pm 0,2$	Trójosiowe ściskanie			—85
9			1100	100	100
10			1010	100	100
11			1010	100	100
12			1070	100	100
13			1500	200	200
14			1330	200	200
15			1490	200	200

Tablica 2. (c.d.)

L.p.	Wymiary próbki $\varnothing \times h$ [mm]	Rodzaj doświadczenia	σ_1 kp/cm ²	σ_2 kp/cm ²	$\sigma_3, (\sigma_r)$ kp/cm ²
16	$24,35 \pm 0,02 \times 50 \pm 0,02$	trójosiowe ściskanie	1820	300	300
17			1690	300	300
18			1780	300	300
19			2040	400	400
20			2040	400	400
21			2370	500	500
22			2450	500	500
23			2440	500	500
24			2800	600	600

Tablica 3. Marmur drobnokrystaliczny

L.p.	Wymiary próbki $\varnothing \times h$ [mm]	Rodzaj doświadczenia	σ_1 kp/cm ²	σ_2 kp/cm ²	$\sigma_3, (\sigma_r)$ kp/cm ²	
1	$24,35 \pm 0,02 \times 50 \pm 0,2$	Jednoosiowe ściskanie	660	0	0	
2			730	0	0	
3			500	0	0	
4	$24,35 \pm 0,02 \times 50 \pm 0,2$	Próba brazylijska			-55	
5					-70	
6					-95	
7					-85	
8					-100	
9					-90	
10			Trójosiowe ściskanie	1280	100	100
11				1260	100	100
12				1150	100	100
13				1620	200	200
14	1560	200		200		
15	1570	200		200		
16	1580	200		200		
17	1850	300		300		
18	1810	300		300		
19	1810	300		300		
20	2040	400	400			
21	2080	400	400			
22	2340	500	500			
23	2500	500	500			
24	2280	500	500			
25	2420	500	500			
26	2620	600	600			
27	2630	600	600			
28	2690	600	600			
29	2800	600	600			

Tablica 4. Wapień miękki

L.p.	Wymiary próbki $\varnothing \times h$ [mm]	Rodzaj doświadczenia	σ_1 kp/cm ²	σ_2 kp/cm ²	$\sigma_3, (\sigma_r)$ kp/cm ²
1	$63 \pm 0,4 \times 100 \pm 0,5$	Jednoosiowe ściskanie	85	0	0
2			95	0	0
3			85	0	0
4	$63 \pm 0,4 \times 100 \pm 0,5$	Próba brazylijska			-18
5					-20
6	$63 \pm 0,4 \times 100 \pm 0,5$	Trójosiowe ściskanie	200	60	60
7			280	100	100
8			385	160	160
9			550	250	250

Tablica 5. Stale materiałowe wg wstępnych badań trójosiowych

L.p.	Skala	Spójność «с» kp/cm ²	Kąt tarcia wewnętrznego
1	Wapień zwarty	160	54°
2	Marmur średniokrystaliczny	100	42°
3	Marmur drobnokrystaliczny	110	49°
4	Wapień miękki	20	22°

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. I. BRACH, *Podstawowe problemy w procesach rozdrabniania minerałów*, Instytut Organizacji i Mechanizacji Budownictwa, Ośrodek Wydawniczy, Warszawa 1963.
2. I. KISIEL, S. DMITRUK, B. LYSIK, *Zarys reologii gruntów*, Arkady, Warszawa 1969.
3. K. KWASZCZYŃSKA, Z. MRÓZ, A. DRESCHER, *Analiza ściskania krótkich walców z materiału Coulomba*, Prace IPPT PAN, 29/1968.
4. N. S. PARATE, *Critère de rupture des roches fragiles*, Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, nr 253, 1959.
5. W. W. SOKOŁOWSKI, *Teoria plastyczności*, PWN, Warszawa 1957.

Резюме

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ПОЛЬСКИХ СКАЛ
МЕТОДОМ ТРЕХОСНОГО ЖАТИЯ

Представлены исследования трехосного сжатия четырех видов местных горных пород. В работе дается описание и конструкция изготовленного в рамках работы специального прибора для измерения сжатия. Полученные экспериментальные результаты позволяют определить постоянные материалы (угла внутреннего трения и когезию) исследуемых горных пород в виде так наз. граничных кривых на плоскости кругов Мора.

SUMMARY

INVESTIGATIONS OF THREE-DIMENSIONAL COMPRESSION OF
CERTAIN POLISH ROCKS

Four types of Polish rocks subject to three-dimensional compression are investigated. The paper describes the construction and application of a special pressure device designed for that purpose. The experimental results obtained, enabling us to determine the values of material constants (angle of internal friction and cohesion), are presented in the form of the so-called "limit curves" on the plane of Mohr circles.

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Praca została złożona w Redakcji dnia 12 listopada 1971 r.
