

PEWNE WŁASNOŚCI OŚRODKÓW ZIARNISTYCH PODDANYCH WYSOKIM CIŚNIENIOM

JERZY SUPPEL (WARSZAWA)

Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych nad określeniem deformacji plastycznych materiału ziarnistego (klinkieru cementowego) pod działaniem wysokich ciśnień (do 60 MN/m^2). Programy badań obejmują czyste hydrostatyczne ściskanie oraz trójosiowe ściskanie osiowo-symetryczne realizowane w komorze trójosiowego ściskania z automatyczną rejestracją siły, przemieszczenia i zmiany objętości. Uzyskane wyniki pozwoliły wyznaczyć w przestrzeni naprężeń izolinie stałych wartości odkształceń objętościowych. Szczególną uwagę poświęcono zmianom objętościowym, będącym wynikiem kruszenia pojedynczych ziarn.

1. WSTĘP

Większość badaczy zajmujących się problemami rozdrabniania minerałów wyodrębnia pojedyncze ziarno i dokonuje analizy jego obciążenia. Siła obciążająca maszynę rozdrabniającą jest sumą sił działających na pojedyncze ziarna. Pomijane są zwykle oddziaływania między ziarnami. Dla szerokiej klasy maszyn, rozdrabniających przez zgniatanie, typowym procesem jest grupowe zgniatanie ziarn oraz związany z tym wzrost sił koniecznych do kruszenia.

Grupę ziarn w procesie rozdrabniania przez zgniatanie można idealizować jako ośrodek ziarnisty, poddany złożonemu stanowi naprężeń. Osiągnięcie stanu granicznego naprężeń, przy których zachodzi odkształcenie bez dalszego przyrostu naprężeń można utożsamiać ze stanem plastycznym rozdrabnianego ośrodka. W zależności od stanu naprężenia można rozróżnić dwa podstawowe mechanizmy deformacji plastycznych: a) przez zmianę położenia ziarn (zarówno objętościowe jak i postaciowe) bez podziału (kruszenia) ziarn; b) przez kruszenie pojedynczych ziarn i jednoczesną zmianę ich położenia.

Wymienione mechanizmy deformacji mogą być rozpatrywane pod kątem ich przydatności w procesach rozdrabniania. Bardziej interesujący z punktu widzenia technologii rozdrabniania jest mechanizm b). Powoduje on kruszenie ziarn i jednocześnie zmianę ich upakowania (gęstości), co jest przygotowaniem do następnej fazy kruszenia. Mechanizm a) nie daje rozdrobnienia, nie można go jednak pominąć, ponieważ jest stanem przejściowym do stanu b). Pewne modele ośrodka rozdrobnionego, w którym zachodzą plastyczne odkształcenia objętościowe i występuje efekt wzmocnienia, realizujące mechanizm a), zostały przedyskutowane w pracach [1, 2, 3 i 4]; weryfikację doświadczalną takich ośrodków przeprowadził DRESCHER [4 i 5].

Zbadanie zachowania się ośrodków ziarnistych uplastyczniających się przez kruszenie ziarn wymaga zastosowania dużych sił w procesie obciążenia i specjalnych przyrządów.

2. MECHANIZM KRUSZENIA W PROCESIE GRUPOWEGO ZGNIATANIA ZIARN

Grupa ziarn, poddana na brzegu obciążeniu ciśnieniem hydrostatycznym ulega odkształceniom objętościowym. Odkształcenia te spowodowane są pokruszeniem pewnej liczby ziarn i zmianą ich upakowania. Mimo hydrostatycznego obciążenia na brzegu poszczególne ziarna obciążone są w sposób nierównomierny i część z tych ziarn znajduje się pod działaniem układu sił wystarczających do ich zniszczenia. Odpowiednie dowody na nierównomierne obciążenie ziarn można znaleźć w pracy [6]. Rozpad jednego ziarna pociąga za sobą zmianę obciążenia sąsiednich ziarn, co może prowadzić do ich zniszczenia. Następują związane z tym przesunięcia i zmiana objętości, ponieważ części pokruszonych ziarn wpasowują się w luki między innymi ziarnami. Zmieniają się także warunki podparcia ziarn jeszcze nie pokruszonych. Proces kruszenia ustaje z chwilą wyeliminowania ziarn niekorzystnie obciążonych.

Należy zaznaczyć, że nawet stosunkowo niewielkie obciążenie hydrostatyczne może powodować kruszenie i zagęszczanie, co niekoniecznie oznacza podział ziarn na równe i zbliżone wymiarami części; kruszeniu mogą wtedy podlegać części ziarn (występujące poza regularny kontur, np. kuli). Dodatkowe siły tarcia między ziarnami powodują ich nieregularne upakowania i luki. Przyłożenie nawet niewielkich obciążeń powoduje zagęszczenie ziarn bez ich kruszenia.

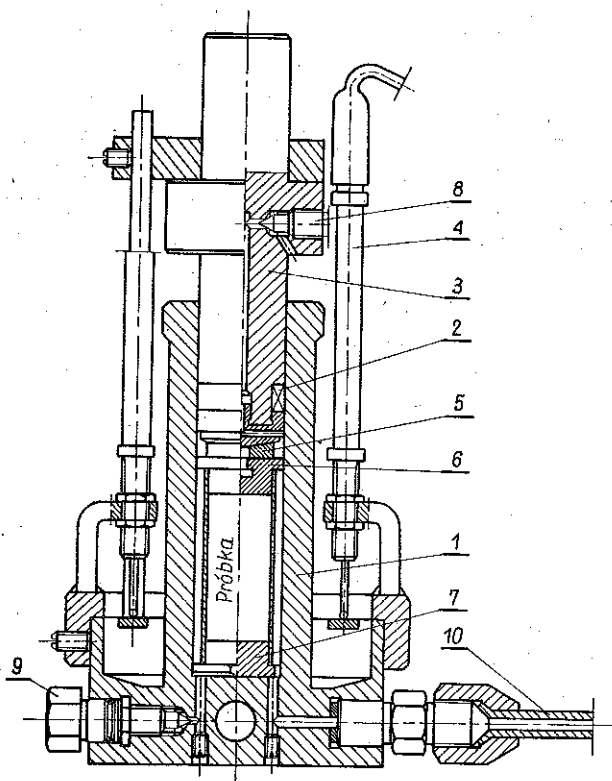
Kruszenie i zagęszczanie ciśnieniem hydrostatycznym w miarę jego wzrostu może teoretycznie odbywać się do chwili uzyskania gęstości równoważnej gęstości jednorodnego materiału ziarn. Po obciążeniu i odciążeniu ciśnieniem hydrostatycznym pozostają odkształcenia trwałe, wynikające z lepszego upakowania i pokruszenia ziarn. Dla wywołania ponownego kruszenia należy przyłożyć ciśnienie hydrostatyczne większe od uprzedniego.

Kruszenie materiału można także osiągnąć przez przyłożenie obciążenia zewnętrznego innego niż hydrostatyczne. Powstaną również odkształcenia objętościowe przez kruszenie i lepsze upakowanie ziarn. Kruszenie i zagęszczenie uzyskane przez takie obciążenie odbywa się do chwili poślizgu ziarn po sobie. Następuje wtedy rozwój odkształceń postaciowych, nie powodujących kruszenia ziarn. Ten stan obciążenia odpowiada warunkowi stanu granicznego Coulomba-Mohra.

3. TECHNIKA DOŚWIADCZENIA

Dla zbadania zależności między stanem naprężenia a rozdrobnieniem i zagęszczeniem ośrodka ziarnistego wykonano aparat trójosiowego ściskania z możliwością stosowania ciśnień bocznych do 100 MN/m^2 . Konstrukcję tego aparatu przedstawia rys. 1. Zasadniczą częścią jest cylinder 1 o średnicy wewnętrznej $\varnothing 36 \text{ mm}$ oraz tłok 3 z teflonową uszczelką 2. Próbką, znajdująca się wewnątrz cylindra, ściskana jest przez nakładki 6 i 7 zapewniające ustawienie próbki wzdłuż osi cylindra i tłoka.

Równomierny nacisk tłoka na próbkę zapewnia kulista podkładka 5. Przestrzeń między próbką a ścianami cylindra wypełniona jest cieczą przenoszącą ciśnienie. Zawory 8 i 9 umożliwiają odpowietrzenie cylindra i zamknięcie dopływu cieczy. Ciśnienie wewnątrz cylindra utrzymywane jest przez manometr obciążnikowo-tłokowy, podłączony przewodem ciśnieniowym 10. Indukcyjne czujniki przemieszczeń 4 typu OT-08 i skoku ± 15 mm umożliwiają pomiar i rejestrację przesunięć tłoka 3 względem cylindra 1. Nacisk na tłok wywierany jest przez dynamometr pałkowy umożliwiający odczyt i zapis chwilowej wartości siły.



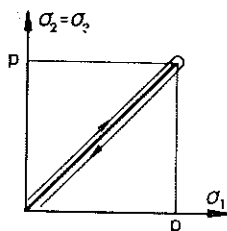
Rys. 1. Konstrukcja aparatu do trójosiowego ściskania

Badano klinkier cementowy o ziarnach od 2 do 3 mm (ziarna przechodzące przez sito o oczkach \varnothing 3 mm, pozostałe na sicie \varnothing 2 mm). Ziarna klinkieru cementowego w zwykłych warunkach zachowują się jak ośrodek idealnie sypki, dlatego kształt próbki nadany był przez winidurową rurkę o pewnej sztywności. Rurkę zaślepiono z obu końców nakładkami 6 i 7 (rys. 1). Przygotowane w ten sposób próbki mogły być obciążone ciśnieniem hydrostatycznym do 60 MN/m^2 , bez przenikania cieczy do wewnątrz. Wysokość próbki była ok. 2,5 raza większa od jej średnicy, a dla łatwiejszej analizy wyników masa każdej próbki była jednakowa.

Przeprowadzono dwa rodzaje doświadczeń: pierwsze — nazywane dalej hydrostatycznym ściskaniem; drugie — polegające na zmianie siły osiowej ściskającej próbkę, przy zachowaniu stałego ciśnienia bocznego, zwane dalej trójosiowym ściskaniem.

3.1. Ściskanie hydrostatyczne

Drogę obciążenia w próbie zagęszczania ciśnieniem hydrostatycznym przedstawia rys. 2. Komora aparatu trójosiowego ściskania była odłączona od manometru obciążnikowo-tłokowego. Ciśnienie wewnątrz komory wzrastało w miarę zwiększania nacisku na tłok, który podczas całej próby nie stykał się z próbką. Wartość tego ciśnienia można określić ze wzoru



(3.1)

$$p = \frac{P_n - T}{F_t},$$

Rys. 2. Droga obciążenia w próbie zagęszczania ciśnieniem hydrostatycznym

gdzie P_n oznacza siłę nacisku na tłok, T — siłę tarcia uszczelki tłoka o gładź cylindra, F_t pole powierzchni przekroju cylindra. Wielkość siły P_n była zapisywana przez rejestrator XY jako funkcja przesunięcia tłoka, $P_n = f(x)$. Przesunięcie tłoka było spowodowane głównie zmniejszeniem objętości próbki, ale także ściśliwością cieczy i zmianą objętości komory ciśnieniowej.

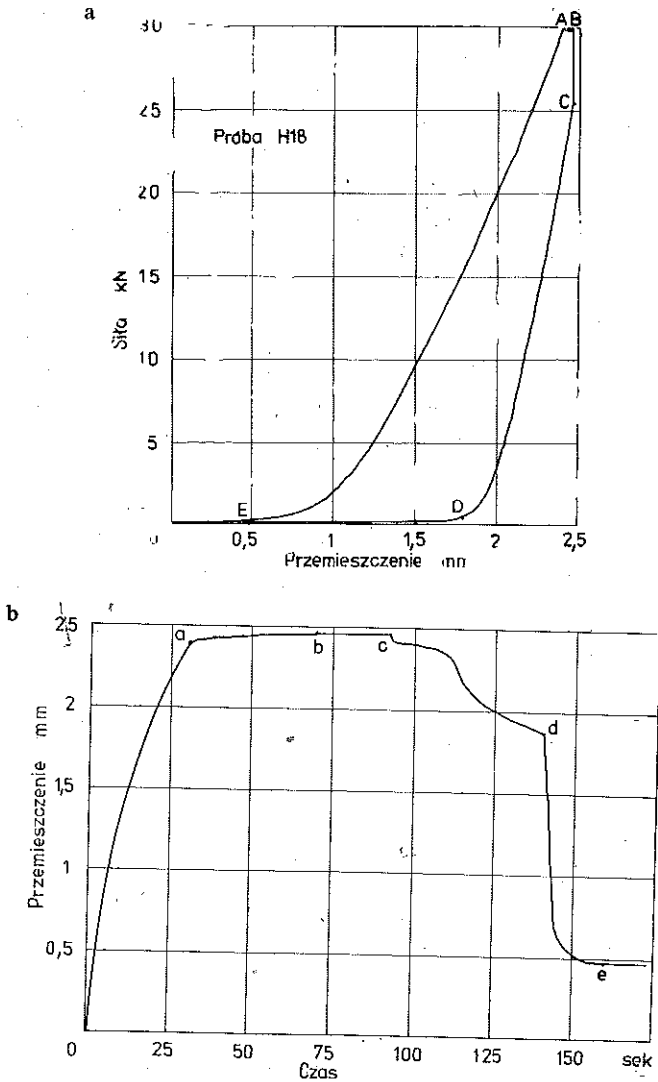
Typowy zapis siły P_n jako funkcji przesunięcia tłoka przedstawia rys. 3. Na odcinku OA w miarę rosnącej siły P_n wzrasta przesunięcie tłoka x . Odpowiada mu odcinek oa przyrostu czasu, z którego obliczyć możemy chwilową prędkość obciążenia \dot{x} lub $\dot{\sigma}$.

Na odcinku AB utrzymywano stały nacisk na tłok przez czas odpowiadający odcinkowi ab . Przesunięcie tłoka przy stałym nacisku w zasadzie nie powinno się zaznaczyć. Możliwy jest jednak niewielki przeciek z komory ciśnieniowej, a także pełzanie próbki i teflonowej uszczelki tłoka. Zjawisko pełzania zdaje się potwierdzać odcinek ab przyrostu czasu, który pokazuje malejącą prędkość odkształcenia. Prędkość przesunięcia tłoka wynikająca z nieszczelności komory ciśnieniowej byłaby wielkością stałą w czasie.

Odcinek BC odpowiada pierwszej fazie odciążania, bez przesunięcia tłoka. Odcinek bc jest równoległy do osi czasu, a prędkość przemieszczania się tłoka jest równa zero. W tym czasie następuje zmiana kierunku siły tarcia T (wyznaczeniem wartości siły T zajmiemy się dalej). Wewnątrz komory ciśnienie jest stałe i równe wartości p obliczonej ze wzoru (3.1).

Na drodze CD następuje druga faza odciążania: zmniejszanie ciśnienia wewnątrz komory. W tym czasie następuje wypychanie tłoka z komory (w przeciwnym kierunku ruchu w stosunku do ruchu obciążania). Wyzwała się energia sprężystego odkształcenia próbki, komory ciśnieniowej i cieczy.

Odcinek DE charakteryzuje się dużym przemieszczeniem tłoka przy niewielkiej różnicy siły. Wytlumaczyć to można sprężystością winidururowej rurki stanowiącej otoczkę próbki, powracającej do pierwotnego kształtu. Przede wszystkim jednak następuje ostateczne rozprężenie powietrza zawartego między ziarnami próbki. Z tego powodu odcinka OE nie można uważać za miarę trwałych (plastycznych) odkształceń badanej próbki.



Rys. 3. Próba hydrostatyczna ściskania : a) zapis siły naciskającej na tłok w funkcji przemieszczenia tłoka, b) zapis przemieszczenia tłoka jako funkcji czasu

Dla właściwego określenia ciśnienia wewnątrz komory aparatu trójosiowego ściskania należy wyznaczyć siłę tarcia uszczelki 2 o gładź cylindra 1 (rys. 1). Odcinek BC na rys. 3 odpowiada podwojonej sile tarcia, ponieważ następuje tu zmiana kierunku ruchu tłoka i siła tarcia także zmienia swój kierunek. W dowolnym punkcie drogi obciążenia siła tarcia jest wprost proporcjonalna do ciśnienia wewnątrz komory, co wynika z konstrukcji uszczelki dociskanej parciem cieczy znajdującej się pod uszczelką. Dla warunków początkowych $p=0$ także $T \approx 0$. Mamy więc

$$(3.2) \quad T = T_{\max} \frac{P_n}{P_{n_{\max}}}$$

gdzie T i P_n oznaczają wartości chwilowe, T_{\max} i $P_{n_{\max}}$ wartości sił odczytane z zapisu siły w punktach B i C (rys. 3).

W wyniku trudności z oznaczeniem rzeczywistej wartości ciśnienia wewnątrz komory nasuwa się spostrzeżenie, że można by ich uniknąć kontrolując ciśnienie manometrem obciążnikowo-tłokowym. Jednak decydujące znaczenie w wyborze techniki tego doświadczenia miał pomiar zmian objętości próbki — najłatwiejszy i najdokładniejszy, wynikający bezpośrednio z przemieszczenia tłoka (po uwzględnieniu sprężystych odkształceń objętościowych aparatu).

3.2. Ściskanie trójosiowe

Drogę obciążania w próbie trójosiowej przedstawia rys. 4. W pierwszej fazie próbkę obciążano ciśnieniem hydrostatycznym, następnie utrzymując stałe ciśnienie boczne obciążano próbkę siłą osiową. Ciśnienie cieczy w komorze utrzymywane było za pomocą manometru obciążnikowo-tłokowego MT 2500, który także umożliwił wyrównanie zmian objętości cieczy w komorze ciśnieniowej. Wielkość nacisku osiowego na próbkę wynosi

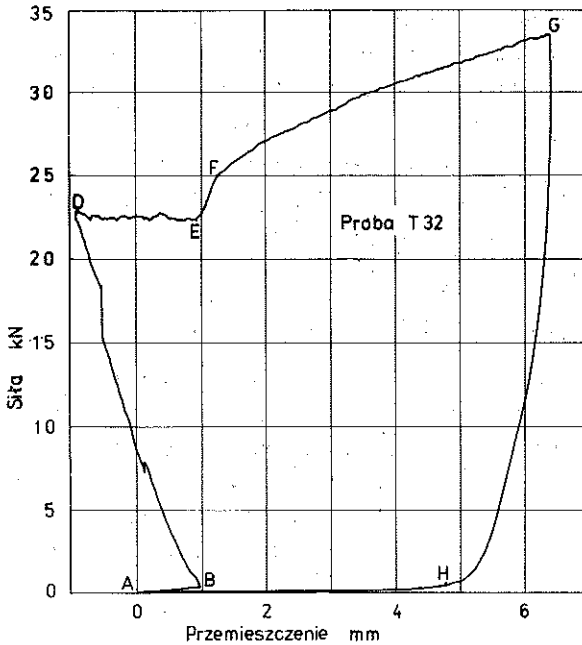
$$(3.3) \quad P = P_t - P_n,$$

gdzie P_t oznacza siłę nacisku na tłok w procesie ściskania próbki, P_n siłę nacisku na tłok w chwili osiągnięcia żądanej wartości ciśnienia hydrostatycznego w komorze, przed zetknięciem się tłoka z próbką. Wielkości tych sił były odczytywane z zapisu rejestratora XY . Do wielkości siły P_t jak i P_n wchodzi siła tarcia T ; kierunek jej jest w obu przypadkach ten sam (przeciwny do ruchu tłoka). Wobec tego nacisk osiowy P na próbkę nie zależy od siły tarcia T . Typowy przebieg nacisku na tłok jako funkcji przemieszczenia tłoka przedstawia rys. 5.

Odcinek AB jest drogą obciążania próbki siłą osiową bez ciśnienia bocznego. Na tym odcinku obciążenia zostały zlikwidowane wszelkie luzy i uzyskano pewność kontaktu tłoka z próbką. Odcinek BO obciążenia przedstawia narastanie ciśnienia hydrostatycznego w komorze. Następuje cofnięcie się tłoka pod wpływem parcia cieczy na jego dno. Tłok traci kontakt z próbką. Próbka znajduje się w stanie hydrostatycznego ściskania.

Przy ustalonym ciśnieniu następuje dosunięcie tłoka do próbki, a na odcinku DE średnia siła naciskająca na tłok nie zmienia wartości. W wyniku zmniejszania się objętości komory część cieczy przechodzi do pompy manometru obciążnikowo-tłokowego. W punkcie E następuje zetknięcie się dna tłoka z próbką. Od tego momentu przyrost siły nacisku na tłok przenoszony jest przez próbkę. Na odcinku EF obciążenia następuje odkształcenie próbki, które można nazwać odkształceniem sprężystym. W okolicy punktu F następuje zagięcie krzywej i próbka zaczyna odkształcać się plastycznie. Są to odkształcenia zarówno objętościowe jak i postaciowe.

Odcinek FG obciążenia reprezentuje proces odkształcenia i kruszenia próbki



Rys. 5. Zapis siły naciskającej na tłok w zależności od przemieszczenia tłoka. Ściskanie trójosiowe oraz związane z tym wzmocnienie. W punkcie G przerwano dalsze obciążanie i odkształcanie próbki z powodu wyczerpania zakresu pomiarowego aparatury.

Odcinek *GHA* przedstawia proces odciążania próbki przez wycofanie tłoka z komory ciśnieniowej, co powodowało spadek nacisku osiowego na próbkę i jednocześnie spadek ciśnienia w komorze. Dokładnej analizy odciążania próbki nie przeprowadzono.

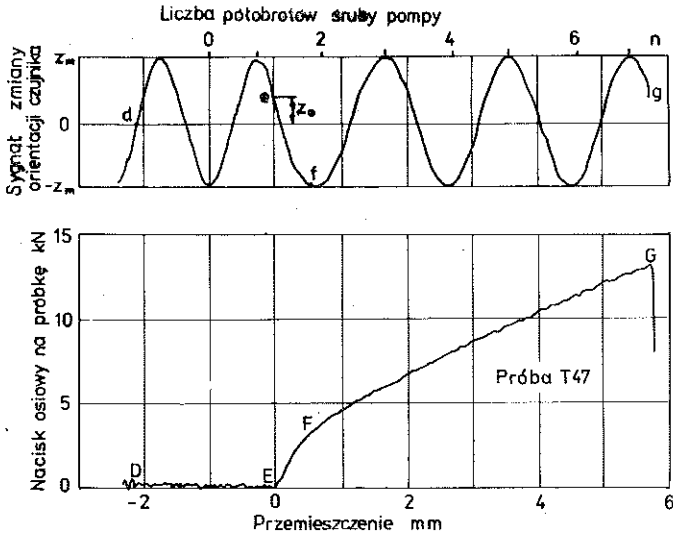
3.3. Wyznaczanie zmian objętości próbki

W procesie hydrostatycznego ściskania, gdy komora aparatu trójosiowego ściskania jest odcięta od zewnętrznych połączeń, wyznaczenie zmian objętości próbki nie przedstawia większej trudności. Wystarczy wykonać cechowanie przyrządu polegające na hydrostatycznym ścisnieniu próbki o możliwie największej sztywności w warunkach zbliżonych do normalnych prób. Pozwala to na dokładne określenie sprężystych odkształceń objętościowych aparatu.

Inaczej przedstawia się sprawa wyznaczania zmian objętości w procesie trójosiowego ściskania, gdy następuje wymiana cieczy między komorą ciśnieniową aparatu a pompą manometru obciążnikowo-tłokowego. Przepływ cieczy jest możliwy w obu kierunkach przy zachowaniu stałego ciśnienia wewnątrz komory. Wydatek pompy jest wprost proporcjonalny do prędkości obrotowej śruby popychającej tłok pompy lub inaczej — ilość przepompowanej cieczy jest wprost proporcjonalna do drogi kątowej śruby (drogi tłoka pompy).

Droga kątowa śruby przesuwającej tłok pompy wskazywana była przez czujnik przyspieszeń. Czujnik ten, znajdując się w polu ciężenia ziemskiego, dawał sygnał

odpowiadający zmianie jego orientacji w stosunku do kierunku linii sił pola ciężenia w sposób ciągły od $-z_m$ do z_m podczas obrotu śruby o 360° , powodując wychylenie pisaka rejestratora w kierunku osi z (rys. 6). Przesunięcie pisaka w kierunku osi x zależne było od ruchu tłoka aparatu trójosiowego ściskania.



Rys. 6. Zapis obrotów pompy manometru obciążnikowo-tłokowego (linia *defg*) oraz siły naciskającej na tłok (linia *DEFG*) w zależności od przesunięcia tłoka aparatu trójosiowego ściskania

Znając położenie śruby pompy oraz tłoka aparatu trójosiowego w dowolnej chwili procesu obciążenia możemy określić ilość przepompowanej cieczy:

$$(3.4) \quad \Delta V_p = \frac{\Delta V_1}{2\pi} \left[2n\pi + \alpha_0 + (-1)^n \arcsin \frac{z}{z_m} \right],$$

a zmianę objętości próbki ze wzoru

$$(3.5) \quad \Delta V = xF_t - \Delta V_p,$$

gdzie poszczególne wielkości oznaczają: ΔV_1 — wydatek pompy przypadający na 1 obrót śruby, n — liczba całkowitych obrotów śruby pompy, α_0 — wartość początkowa kąta określającego położenie śruby, z — wychylenie pisaka, z_m — amplituda wychylenia pisaka, x — przesunięcie tłoka aparatu trójosiowego, F_t — pole powierzchni czynnej tłoka aparatu trójosiowego. W czasie prób stwierdzono, że wielkość ciśnienia przepompowywanej cieczy praktycznie nie ma wpływu na wydajność pompy manometru obciążnikowo-tłokowego.

4. WYNIKI POMIARÓW

4.1.

Serię prób hydrostatycznego ściskania wykonano dla różnych ciśnień końcowych. Wyniki tych prób można przedstawić jako zależność zmian objętości od ciśnienia (rys. 7). Przy tym przyjęto konwencję znaków: zmniejszanie objętości związane jest z dodatnim odkształceniem, ściskanie z dodatnim naprężeniem.

Korzystne wydaje się tutaj wprowadzenie pewnej wielkości wskazującej jak dalece gęstość osrodka ziarnistego odbiega od gęstości materiału pojedynczych ziarn. Gęstość osrodka ziarnistego wyraża się zależnością

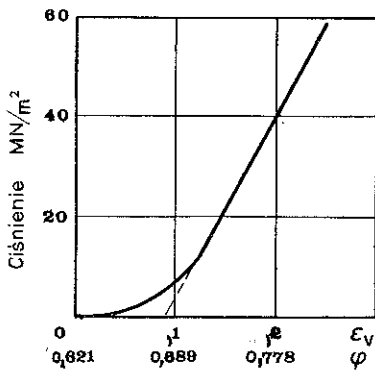
$$(4.1) \quad \rho = \rho_m \varphi + \rho_p w,$$

gdzie ρ_m i ρ_p oznaczają gęstość materiału ziarn i powietrza, a φ i w odpowiednie udziały objętościowe materiału i powietrza, które spełniają zależność $\varphi + w = 1$. Zaniedbując gęstość powietrza jako małą w stosunku do gęstości materiału ziarn możemy napisać

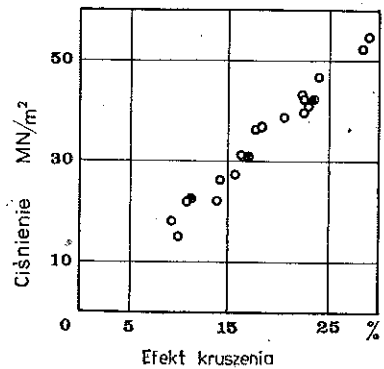
$$(4.2) \quad \rho = \rho_m \varphi.$$

Udział objętościowy φ nazywany będzie dalej współczynnikiem wypełnienia.

Dla prób hydrostatycznych można także łatwo określić stopień pokruszenia ziarn jako skutek procesu obciążenia ciśnieniem. Po każdej próbie przesiewano ziarna przez sito o oczkach $\varnothing 2$ mm. Ziarna przechodzące przez to sito uważano za pokru-



Rys. 7. Zmiana objętości próbki ε_v i współczynnika wypełnienia od ciśnienia hydrostatycznego



Rys. 8. Stopień pokruszenia próbki w zależności od ciśnienia hydrostatycznego

szone. Stosunek wagowy części pokruszonej do całości próbki określono jako procentowy efekt kruszenia. Wyniki tych prób przedstawiono na rys. 8. Należy zaznaczyć, że po obciążeniu próbki ciśnieniem 30 MN/m^2 więcej ziarna zakleszczało się między sobą i całość próbki nabierała pewnej spójności. W trakcie przesiewania całość rozpadała się na pojedyncze ziarna.

4.2.

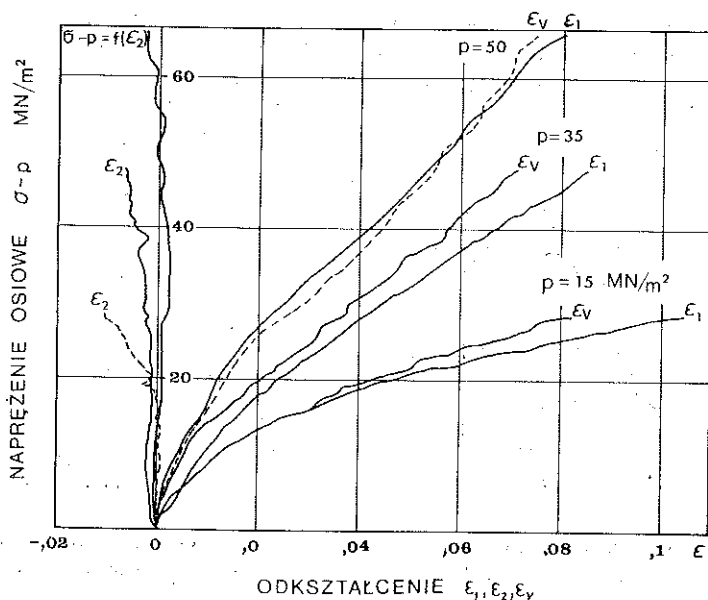
Serię prób trójosiowego ściskania wykonano dla różnego ciśnienia bocznego p zmieniającego się co 5 MN/m^2 w zakresie od 10 do 60 MN/m^2 . Ze względu na symetrię próbki i obciążenie względem pionowej osi z , naprężenia σ_2 i σ_3 są naprężeniami głównymi i równe są ciśnieniu hydrostatycznemu w komorze:

$$(4.3) \quad \sigma_2 = \sigma_3 = p.$$

Wobec powyższego kierunek z też jest kierunkiem naprężeń głównych i σ_1 jest naprężeniem głównym. Taki stan jest z pewnością zachowany w środkowej części próbki. Na podstawach próbki w miejscu styku z podkładkami mogą występować siły tarcia, zmieniające kierunki naprężeń głównych. Mimo tego w dalszej części opracowania będziemy uważać, że cała próbka znajduje się pod działaniem naprężeń głównych o kierunkach pokrywających się z osiami jej symetrii. Naprężenie σ_1 określimy ze wzoru

$$(4.4) \quad \sigma_1 = \frac{P}{F} + p,$$

gdzie P oznacza siłę osiową ściskającą próbkę określoną przez wzór (3.3), p ciśnienie hydrostatyczne wewnątrz komory, F chwilowe pole przekroju próbki.



Rys. 9. Zależność odkształceń próbki od przyrostu naprężeń osiowych

Jako średnicę początkową próbki przyjęto wewnętrzną średnicę otoczki winidulowej, do której wsypywano ziarna klinkieru przeznaczone do próby.

Podobnie, dla odkształceń osie symetrii próbki będą kierunkiem odkształceń głównych

$$(4.5) \quad \varepsilon_1 = -\ln \frac{\Delta x + h_0}{h_0}, \quad \varepsilon_v = -\ln \frac{\Delta v + v_0}{v_0}, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \frac{1}{2}(\varepsilon_v - \varepsilon_1),$$

gdzie h_0 i v_0 oznaczają początkową wysokość i objętość próbki, Δx przesunięcie tłoka aparatu trójosiowego, Δv zmianę objętości próbki obliczoną wg wzorów (3.4) i (3.5).

Wykorzystując zapisy przedstawione na rys. 5 i 6 można dla danej próby wykonać obliczenia przyrostów odkształceń dla odpowiednich przyrostów obciążenia.

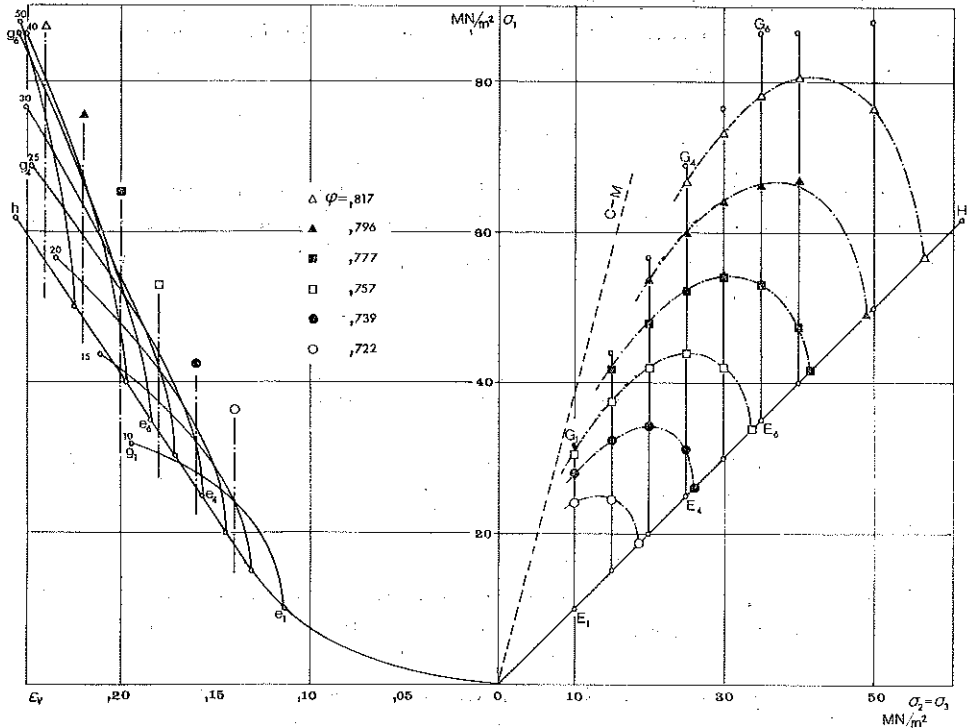
Wyniki tych obliczeń dla pewnych prób różniących się ciśnieniem bocznym p przedstawiono na rys. 9. Stopień pokruszenia ziarn zależy od drogi obciążenia oraz odkształcenia jest możliwy do określenia tylko po zakończeniu próby.

5. OMÓWIENIE WYNIKÓW I WNIOSKI

Zależność między naprężeniami głównymi w ośrodku ziarnistym a jego gęstością ρ (współczynnikiem wypełnienia φ) lub stopniem pokruszenia u wyraża się w postaci funkcji czterech zmiennych. W przypadku szczególnym, gdy $\sigma_2 = \sigma_3$, co odpowiada przeprowadzonym doświadczeniom, można tę zależność przedstawić w postaci powierzchni w przestrzeni trójwymiarowej

$$(5.1) \quad f(\sigma_1, \sigma_2, \varphi) = 0.$$

Powierzchnię taką można nazwać powierzchnią kruszenia przyjmując, że stan naprężenia w ośrodku ziarnistym i jego gęstość (współczynnik wypełnienia) odpowiadają punktom leżącym na tej powierzchni wtedy, gdy ziarna ulegają kruszeniu. Stany naprężeń i gęstości leżące po jednej stronie powierzchni odpowiadają stanom sztywnym (lub sprężystym). Ziarna nie są wtedy kruszone. Stany naprężeń po drugiej stronie powierzchni nie są możliwe do realizacji bez zmiany gęstości (współczynnika wypełnienia).



Rys. 10. Powierzchnie warunku kruszenia w przestrzeni naprężeń głównych i współczynnika wypełnienia

Rysunek 10 pokazuje zestawienie wyników badań w trójwymiarowej przestrzeni $\sigma_1, \sigma_2, \varphi$ jako rzuty na płaszczyznę $\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3$ i płaszczyznę σ_1, φ . Linia *oeh* przedstawia zależność współczynnika φ od ciśnienia hydrostatycznego ($\sigma_1 = p$), a odpowiadająca jej linia *OEH* jest drogą obciążenia w próbie hydrostatycznego ściskania. Droga obciążenia w próbie trójosiowego ściskania składa się z odcinka *OE* i odcinka $E_i G_i$ (indeks *i* oznacza kolejny poziom ciśnienia hydrostatycznego) przy ustalonym ciśnieniu bocznym p . Na płaszczyźnie σ_1, φ linii *OEG* odpowiada odcinek oe_i wskazujący na zmianę współczynnika wypełnienia φ pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego oraz odcinek $e_i g_i$ wskazujący na zmianę φ (lub odkształceń objętościowych) wywołaną obciążeniem próbki siłą osiową.

Wszystkie omawiane linie leżą na jednej powierzchni (5.1). Na rys. 10 dokonano przekrojów omawianej powierzchni płaszczyznami $\varphi = \text{const}$. Uzyskano w ten sposób na płaszczyźnie σ_1, σ_2 linie stałego współczynnika wypełnienia. W przeprowadzonych doświadczeniach nie można było realizować takich dróg obciążenia, przy których nie ma zmiany objętości. Nie ma więc danych do stwierdzenia, czy w procesie neutralnego obciążenia nie zachodzi kruszenie ziarna, a tym samym, że przedstawione izolinie stałych odkształceń objętościowych nie są równoznaczne z izoliniami stałego wskaźnika kruszenia.

Ograniczenie linią *OEH* wynika z technicznych możliwości wykonywania prób. W używanym do doświadczeń aparacie trójosiowego ściskania nie można realizować takich stanów naprężenia, aby

$$\sigma_1 < \sigma_2 = \sigma_3 = p.$$

Na płaszczyźnie σ_1, σ_2 zaznaczono linią przerywaną *OC-M* warunek Coulomba-Mohra dla kąta wewnętrznego $\rho = 35^\circ 13'$ (kąt ρ wyznaczono dla klinkieru w aparacie bezpośredniego ścinania). Jak widać prosta *C-M* może być ograniczeniem przedstawionej powierzchni kruszenia, nie ma jednak pewności, czy leży ona na tej powierzchni

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. A. W. JENIKE, R. T. SHIELD, *On the plastic flow of Coulomb solids beyond original failure*, J. Appl. Mech., Dec. 1959.
2. Z. MRÓZ, K. KWASZCZYŃSKA, *Pewne problemy brzegowe dla ciał rozdrobnionych o wzmocnieniu gęstościowym*, Rozpr. Inżyn., 19, 15-42, 1971.
3. Z. MRÓZ, *On a theory of denisty-hardening media*, Acta Mech. [w druku].
4. Z. MRÓZ, A. DRESCHER, *Podstawy teorii plastyczności ośrodków rozdrobnionych*, Ossolineum 1972.
5. A. DRESCHER, *Zagadnienia doświadczalnej weryfikacji modelu ciała rozdrobnionego o wzmocnieniu gęstościowym*, Rozpr. Inżyn., 20, 351-387, 1972.
6. A. DRESCHER, G. DE JOSSELYN DE JONG, *Photoelastic verification of a mechanical model for the flow of a granular material*, J. Mech. Phys. Solids, 20, 337-351, 1972.

Резюме

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ЗЕРНИСТЫХ СРЕД ПОДВЕРГНУТЫХ ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЯМ

Преставлены результаты лабораторных исследований определения пластических деформаций зернистого материала (цементный клинкер) под действием высоких давлений (до 60 MN/m^2). Программы исследований охватывают чистое гидростатическое сжатие и трехосное осесимметричное сжатие с автоматической регистрацией силы, перемещения и изменения объема. Полученные результаты позволили определить в пространстве напряжений изолинии постоянных значений объемных деформаций. Особенное внимание посвящено объемным изменениям, будучих результатом дробления отдельных зерен.

SUMMARY

CERTAIN PROPERTIES OF GRANULAR MEDIA SUBJECTED TO HIGH PRESSURE

The results of the experimental investigations on determination of plastic deformations for the granular medium (cement clinker) under action of high pressure (up to 60 MN/m^2) are presented. The research programs contain pure hydrostatic pressure and three-axial axi-symmetrical compression realized on the three-axial compression stand with automatic registration of the force, displacement and volume changes. The results obtained allowed evaluating in the stress space the isolines of constant values of volumetric strains. Special attention is paid to volumetric changes which result from crumbling of single grains.

POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI

Praca została złożona w Redakcji dnia 28 stycznia 1977 r.
