

SPÓJNOŚĆ I KĄT TARCIA WEWNĘTRZNEGO

UKD 624.131.439:624.131.412:624.131.371/372

1. WSTĘP

W ostatnich latach można obserwować olbrzymi postęp zarówno w badaniach, jak i w opracowaniach teoretycznych, dotyczących zagadnienia spójności i kąta tarcia wewnętrznego. Uzyskane osiągnięcia nie są jednak w sposób należyty wprowadzane do codziennej praktyki geologiczno-inżynierskiej i często można stwierdzić brak znajomości podstawowych wiadomości odnośnie do wytrzymałości gruntu na ścinanie. Wykonywane w dużym zakresie badania dla wyznaczenia wielkości spójności i kąta tarcia wewnętrznego obarczone są tak poważnymi błędami, że należy jedynie zastanowić się nad sensem ich prowadzenia. W tej sytuacji niezbędne jest dokonanie znacznego przełomu w tej dziedzinie, gdyż dalsze prowadzenie badań, z których nie można uzyskać żadnych danych jest bezcelowe.

Wykaz oznaczeń

| | | |
|-------------|------------------------------------|------------------|
| c | — spójność pozorna | FL ⁻² |
| c' | — spójność czynna | FL ⁻² |
| c_r | — spójność właściwa | FL ⁻² |
| φ | — pozorny kąt tarcia wewnętrznego | — |
| φ' | — czynny kąt tarcia wewnętrznego | — |
| φ_r | — właściwy kąt tarcia wewnętrznego | — |
| τ_f | — wytrzymałość gruntu na ścinanie | FL ⁻² |
| σ | — naprężenie normalne całkowite | FL ⁻² |
| σ' | — naprężenie normalne czynne | FL ⁻² |
| e | — wskaźnik porowatości | — |
| p | — obciążenie konsolidujące | FL ⁻² |
| u | — ciśnienie porowe | FL ⁻² |

2. OKREŚLENIA OGÓLNE

Należy podkreślić, że właściwie brak jest dotychczas ścisłej definicji spójności, związanej z chemicz-

nymi i fizycznymi własnościami cząstek gruntu. Pojęcie spójności, posiadające podstawowe znaczenie dla podziału gruntów, przyjmowane jest intuicyjnie lub przedstawiane w sposób obrazowy bądź też, jak to czyni norma, określane na podstawie wartości wskaźnika plastyczności.

Pojęcie kąta tarcia wewnętrznego zostało przyswojone w mechanice gruntów w oparciu o określenia i prawa tarcia podane w fizyce, dotyczące ciał stałych. Oczywiście w mechanice gruntów, przy rozpatrywaniu ośrodka wielofazowego złożonego z cząstek lub ziarn, zagadnienie tarcia wewnętrznego jest bardziej skomplikowane niż dla fizyki ciała stałego, dlatego wiele zagadnień związanych z kątem tarcia wewnętrznego gruntów wymaga dalszego prowadzenia prac i badań.

Jednym z podstawowych wzorów w mechanice gruntów jest wzór Coulomba, podający zależność pomiędzy wytrzymałością na ścinanie τ_f a naprężeniem normalnym do powierzchni ścięcia:

$$\tau_f = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad [1]$$

Wzór ten podany w 1776 r., a następnie przyjęty w mechanice gruntów, wymaga dokładnego omówienia przy jego stosowaniu.

W mechanice gruntów główne znaczenie posiada rozpatrzenie pracy układu wielofazowego, przy czym w niniejszym artykule zajmiemy się układem trójfazowym, który stanowią cząstki stałe, woda i gazy. Podstawowym problemem, pozwalającym na rozwój mechaniki gruntów było zagadnienie przenoszenia obciążeń przez poszczególne składniki tego układu, a przede wszystkim przez wodę. Jak ogólnie wiadomo, jeśli obciążymy grunt spoisty, którego pory wypełnione są całkowicie wodą (układ dwufazowy — cząstki i woda), to w pierwszym okresie całe obciążenie przejmuje woda, którą traktujemy praktycznie jako nieściśliwą. Dopiero kiedy rozpocznie się odpływ wody z porów gruntu, o ile oczywiście jest on możliwy, to obciążenie zostaje przekazywane na szkielet gruntowy. Naprężenie wywierane na szkielet gruntowy nazywamy naprężeniem czynnym i oznaczamy σ' .

$$\sigma' = \sigma - u \quad [2]$$

Przy obciążaniu gruntu i rozpatrywaniu jego wytrzymałości na ścinanie należy zdawać sobie sprawę z wielkości naprężeń istniejących w szkielecie gruntowym σ' , przy czym wielkość ich, przy możliwym odpływie wody z porów, ulega zmianom w czasie od wartości 0 do pełnej wartości σ . Ma to znaczny wpływ na wartości wytrzymałości gruntu na ścinanie, gdyż woda praktycznie nie przenosi naprężeń ścinających. Jeśli w gruncie występuje również faza gazowa, to przy obciążeniu następuje ściśnięcie pęcherzyków gazowych i szkielet gruntu przejmie część obciążenia od razu, a dalsze obciążenie będzie przyjmowane przez szkielet gruntowy w miarę odpływu wody i wywołanego tym zmniejszaniem się ciśnienia porowego u .

Zgodnie z podanymi powyżej uwagami możemy równanie Coulomba [1] podać w innej postaci:

$$\tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi' \quad [3]$$

Przy rozpatrywaniu spójności i kąta tarcia wewnętrznego należy omówić prace Hvorsleva (1), który badał warunki wytrzymałości gruntów spoistych dla określonej porowatości. Hvorslev stwierdził, zgodnie z uzyskanymi wynikami, że dla gruntów spoistych wartość właściwego kąta tarcia wewnętrznego φ_r jest wielkością stałą, niezależną od porowatości, natomiast wielkość spójności zależna jest od największej wartości naprężenia normalnego czynnego, wywartego w trakcie badania lub jakie mogło panować w gruncie w przeszłości geologicznej. Zgodnie z badaniami Hvorsleva równanie [1] można napisać:

$$\tau_f = c_r + \sigma' \operatorname{tg} \varphi_r \quad [4]$$

Dla gruntów spoistych, które nie były w swej przeszłości poddane obciążeniu lub jeśli wielkość

naprężenia σ' jest większa niż naprężenie, jakie mogło kiedykolwiek wystąpić wskutek obciążenia, wielkość spójności właściwej można wyrazić wzorem:

$$c_r = \kappa \sigma' \quad [5]$$

w którym: κ — współczynnik proporcjonalności,
 σ' — naprężenie normalne czynne w momencie ścięcia.

Należy jeszcze podkreślić, że zgodnie z obowiązującą u nas klasyfikacją gruntów wnioski Hvorsleva mogą być odniesione do gruntów bardzo spoistych i spoistych ciężkich. Natomiast dla gruntów średniospoistych i małospoistych nie można mówić o stałej wartości właściwego kąta tarcia wewnętrznego φ_r niezależnie od porowatości.

3. UWAGI O UZYSKIWANYCH WYNIKACH SPÓJNOŚCI I KĄTA TARCIA WEWNĘTRZNEGO

Przeanalizujmy teraz w świetle danych zawartych w punkcie 2 wartości, jakie możemy uzyskać badając spójność i kąt tarcia wewnętrznego.

3.1. Jeśli badania trójosiowe prowadzone są w warunkach uniemożliwiających odsączenie się wody z próbki, przy czym pory gruntu są całkowicie wypełnione wodą, to oczywiście (równanie 2) wielkości naprężeń głównych czynnych σ'_1, σ'_2 posiadają stałe tę samą wartość, niezależnie od wywieranych obciążeń. Woda nie ma możliwości odsączenia się z próbki gruntu i zmiana obciążenia może powodować jedynie wzrost ciśnienia porowego u . Omawiany przypadek został przedstawiony na ryc. 1.

Okrąg 1 został wykreślony dla naprężeń głównych σ_1, σ_2 . Uwzględnienie ciśnienia porowego u spowoduje jedynie przesunięcie środka okręgu w kierunku początku układu, przy czym długość średnicy okręgu nie ulegnie zmianie. Na ryc. 1 przedstawione to zostało przez okrąg 2.

Jeśli badania przeprowadzi się przy innej wielkości obciążenia, uzyskamy inne wartości naprężeń głównych całkowitych (okrąg 3), niemniej jednak wielkości naprężeń głównych czynnych σ'_1, σ'_2 nie ulegną zmianie. W takim przypadku korzystając z różnych par wartości naprężeń głównych całkowitych σ_1, σ_2 i kreśląc na tej podstawie koła Mohra oraz styczną do nich uzyskujemy prostą równoległą do osi σ .

Wartość spójności pozornej równa się $c = \frac{\sigma_1 \sigma_2}{2}$; pozornego kąta tarcia wewnętrznego $\varphi = 0$. Wartości c' i φ' uzyskać nie można, gdyż dysponujemy tylko jednym okręgiem, co nie zezwala na wykreślenie stycznej.

3.2. Jeśli badania przeprowadzamy również bez możliwości odsączenia się wody, ale pory gruntu nie są całkowicie wypełnione wodą, to początkowo przy niewielkich obciążeniach następuje zmniejszenie objętości powietrza w porach i naprężenie dewiatorowe ($\sigma_1 - \sigma_2$) wzrasta, w związku z czym wzrasta średnica koła Mohra, a więc styczna nie jest pozioma, lecz tworzy pewien kąt z kierunkiem osi σ . Przy pewnej wartości obciążenia zewnętrznego dojdziemy do stanu, że wszystkie pory będą wypełnione wodą i dalsze zwiększanie obciążeń da obraz identyczny jak w przypadku 3.1. Tak więc styczna do kół Mohra nie będzie stanowiła prostej, lecz krzywą zwróconą wypukłością ku górze (ryc. 2).

Zależnie od tego, które wartości par naprężeń głównych uzyskamy z badań, możemy uzyskać różniące się od siebie wielkości spójności pozornej c i pozornego kąta tarcia wewnętrznego φ . Przeprowadzając pomiar wielkości ciśnienia porowego u , można wykreślić koła Mohra w funkcji naprężeń czynnych i wtedy wykreślona styczna jest linią prostą.

3.3. Przed omówieniem badań trójosiowych z możliwością odsączenia się wody, należy rozpatrzyć zagadnienie wyznaczenia spójności właściwej c_r oraz właś-

ciwego kąta tarcia wewnętrznego φ_r . Zgodnie z badaniami Hvorsleva wartość c_r i φ_r wyznaczyć należy dla określonej porowatości. Dla wyjaśnienia rozpatrzmy krzywą ściśliwości. Na ryc. 3 przedstawiona została zależność pomiędzy obciążeniem konsolidującym p oraz wskaźnikiem porowatości e , przy czym podano zarówno krzywą ściśliwości pierwotnej, jak również krzywe odprężenia i ściśliwości wtórnej. Rozpatrując krzywą ściśliwości pierwotnej uzyskujemy dla każdej wartości obciążenia p jedną określoną wartość wskaźnika porowatości. Niech badania w aparacie trójosiowym zostaną przeprowadzone przy porowatości odpowiadającej obciążeniu konsolidującemu p_1 (wskaźnik e_1) otrzymamy wtedy dla naprężeń głównych czynnych σ_1, σ_2 okrąg, który wykreślimy na ryc. 4 jako krąg 1. Okrąg 2 uzyskano dla porowatości odpowiadającej porowatości (e_2) przy obciążeniu konsolidującym p_2 . Wspólna styczna poprowadzona do okręgów 1 i 2 pozwala na określenie spójności czynnej c' oraz czynnego kąta tarcia wewnętrznego φ' . Jeśli grunt nie był poddany uprzednio obciążeniu, jak to ma miejsce w omawianym przypadku (rozpatrujemy bowiem krzywą ściśliwości pierwotnej), to wspólna styczna przechodzi przez początek układu i $c' = 0$, co jest zgodne z wzorem 5.

Aby uzyskać wartości c_r i φ_r należy grunt skonsolidować, a następnie odciażyć, bowiem jedynie wtedy możliwe jest uzyskanie przy innym obciążeniu p_2 porowatości identycznej, jaką miał grunt przy obciążeniu p_1 (ryc. 3). Jeśli po odciażeniu nastąpi ścięcie gruntu, to możemy uzyskać okrąg 3 wykreślony dla pary naprężeń głównych czynnych, odpowiadający porowatości e_1 . Wspólna styczna do okręgów 1 i 3 otrzymanych przy tej samej porowatości próbki (e_1) pozwala na określenie wartości spójności właściwej c_r i właściwego kąta tarcia wewnętrznego φ_r . Okrąg 2 nie jest w tym przypadku brany pod uwagę. Gdybyśmy chcieli uzyskać dane na podstawie okręgu 2, to należałoby grunt skonsolidować obciążeniem większym niż p_2 , odciażyć aż do uzyskania na krzywej odprężenia punktu, odpowiadającego wskaźnikowi po-

rowatości e_2 i dopiero ściąć w aparacie trójosiowym wyznaczając odpowiednio naprężenia główne czynne i kreśląc koło Mohra.

Zgodnie z badaniami Hvorsleva wspólna styczna do tych dwu okręgów określiłaby wartość c_r i φ_r dla porowatości odpowiadającej wskaźnikowi e_2 . Kąt φ_r byłby taki sam, zmiana uległaby jedynie wartości c_r . Badanie prowadzone w ten sposób jest bardzo żmudne i wymaga specjalnego przygotowania odrębnych próbek, dlatego nie jest w praktyce wykonywane, niemniej jednak wnioski wyprowadzone z tak uzyskanych wyników pozwalają na szerszą analizę zagadnienia.

3.4. Badania trójosiowe na próbkach skonsolidowanych, a następnie ściętych bez możliwości odsączenia się wody są szczególnie często stosowane w laboratoriach, przy czym otrzymywane wyniki mogą być bardzo różne. Tak więc, jeśli obciążenie, przy którym następuje konsolidacja jest większe niż wszelkie dotychczasowe obciążenia, jakim był poddany badany grunt, przy czym pory jego są całkowicie wypełnione wodą, to uzyskany wynik będzie podobny do omówionego w punkcie 3.1. Pozorny kąt tarcia wewnętrznego $\varphi = 0$, natomiast wartość spójności pozornej będzie zależna od wielkości obciążenia konsolidującego, zgodnie z omówieniem podanym w punkcie 3.3. ($c = c_r$ dla danego obciążenia konsolidującego). Oczywiście konieczne jest, aby konsolidacja gruntu została całkowicie zakończona, tak aby grunt mógł uzyskać spójność określoną dla danego obciążenia.

Jeśli obciążenie konsolidujące jest mniejsze niż uprzednie obciążenie, jakiemu mógł być poddany grunt, przy czym pory gruntu są całkowicie wypełnione wodą, to znów uzyskany wynik zgodny będzie z omówieniem podanym w punkcie 3.1., a więc $\varphi = 0$, natomiast spójność pozorna c będzie równa spójności, którą uzyskał grunt w czasie konsolidacji pod największym obciążeniem, jakiemu był poddany w swej przeszłości.

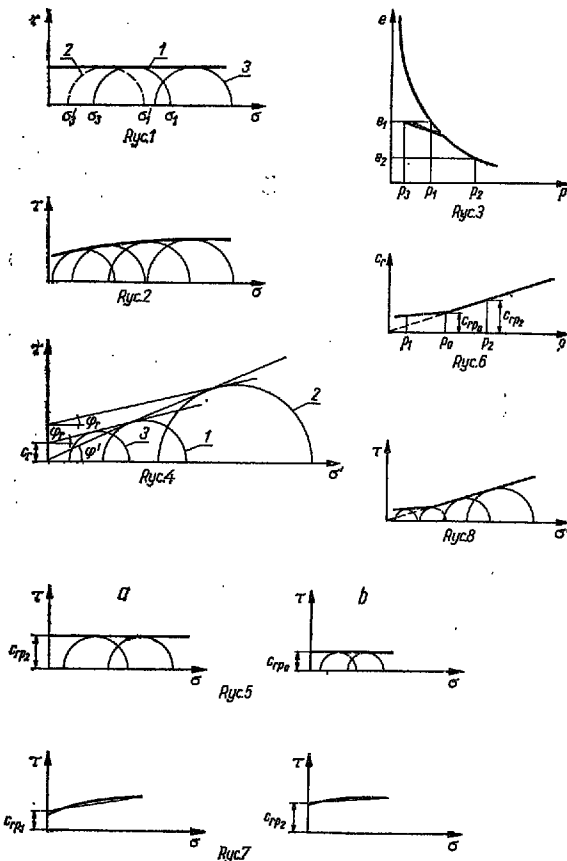
Zależności te graficznie można przedstawić następująco: oznaczymy przez p_0 wielkość ciśnienia, przy którym grunt był kiedykolwiek konsolidowany, a przez p_1 i p_2 odpowiednio ciśnienia, które zastosowaliśmy w badaniach laboratoryjnych. Odpowiadające ciśnieniom konsolidacyjnym wartości spójności właściwej oznaczymy odpowiednio $c_{rp0}, c_{rp1}, c_{rp2}$.

Ryc. 5a przedstawia przypadek kiedy $p_2 > p_0$, ryc. 5b przypadek, gdy $p_1 < p_0$.

Gdy mierzymy wielkość ciśnienia porowego mamy możliwość przedstawienia zależności pomiędzy spójnością właściwą c_r , a obciążeniem konsolidacyjnym. Zależność tę wskazano na ryc. 6.

Wyniki badań są jeszcze bardziej skomplikowane, jeśli badanie prowadzone jest na próbkach gruntu, którego pory nie są całkowicie wypełnione wodą. Grunt taki posiada pewną spójność właściwą, odpowiednio do ciśnienia konsolidacyjnego, któremu był poddany, a poza tym kształt uzyskanego wykresu będzie podobny do przypadku omówionego w punkcie 3.2. Przykładowe kształty wykresów podano na ryc. 7.

3.5. Badanie trójosiowe skonsolidowanych próbek gruntu, a następnie ścianych przy całkowitej możliwości odsączenia się wody dla każdego stopnia obciążenia. Badanie w tym przypadku jest prowadzone w sposób powolny, tak aby przy zastosowanym drenażu nie był możliwy wzrost ciśnienia porowego. Przy typowym badaniu próbka zostaje konsolidowana z możliwością odsączenia się wody, a po zakończeniu konsolidacji podnosi się ciśnienie pionowe σ_1 . Obciążenie należy zwiększać stopniowo w ten sposób, aby przy każdym stopniu nastąpił całkowity spadek powstającego ciśnienia porowego. Konieczny czas, aż do powstania poślizgu można obliczyć według różnych teorii, waha się on od kilku do kilkuset godzin. W tego typu badaniach naprężenia całkowite równają się naprężeniom czynnym. Z odczytanych wielkości naprężeń można wykreślić koła Mohra i poprowadzić do nich styczne. Na ryc. 8 wykreślono przykładowo styczne dla przypadku, gdy grunt był w swej prze-



szłości już konsolidowany (linią ciągłą) i w przypadku, gdy grunt nie był konsolidowany (prosta przechodząca przez początek układu). Należy zwrócić uwagę, że przy tym typie badania następuje zmiana objętości próbki i w badaniach naukowych uwzględnia się w obliczeniach energię zużyta na zmianę objętości.

4. WNIOSKI

Ten krótki przegląd rodzajów badań trójosiowych nie wyczerpuje wszelkich możliwych. Znane są również inaczej prowadzone badania, jak np. zniszczenie próbki przez zmniejszenie ciśnienia bocznego, czy przez wzrost ciśnienia porowego. Do każdego konkretnego problemu inżynierskiego musi być odpowiednio dobrane badanie trójosiowe. Jednocześnie już z przedstawionych powyżej wyników jasno widać, że na uzyskane wartości zasadniczy wpływ ma sposób przeprowadzenia badań. W tej sytuacji należy uznać jako bezwartościowe wyniki badań trójosiowych, kiedy nie są podane dokładnie warunki ich przeprowadzenia: a przede wszystkim: czas badania, sposób zwiększania obciążenia, warunki odsączania się wody z próbki i wielkości powstającego ciśnienia porowego.

Odnosnie do badań trójosiowych dla określenia spójności i kąta tarcia wewnętrznego należy postulować następujące wnioski:

4.1. Przy badaniach trójosiowych należy prowadzić pomiar wielkości ciśnienia porowego i wyniki badań opracowywać z jego uwzględnieniem.

SUMMARY

A considerable process may be observed in the last years in the researches and theoretical elaborations dealing with the problems of cohesion and angle of internal friction. The achievements obtained are, however, not introduced into the everyday engineering-geological practice in a proper way.

The author discusses the method of three-axis examinations applied for different cases during determination of cohesion and angle of internal friction.

4.2. Przy rozwiązywaniu problemów geologiczno-inżynierskich wymagających określenia wielkości spójności i kąta tarcia wewnętrznego należy tak zaprojektować rodzaj przeprowadzenia badania trójosiowego, aby uzyskać parametry, które będą stanowiły najpewniejszą podstawę do przeprowadzenia koniecznych analiz obliczeniowych, uwzględniających późniejszą pracę gruntu.

4.3. Należy pamiętać, iż przy wyznaczaniu spójności pozornej jak i pozornego kąta tarcia wewnętrznego możliwe jest uzyskanie bardzo różnych wartości. Na wielkość uzyskanych wyników, poza innymi czynnikami, ma wpływ rodzaj i szybkość przykładanego obciążenia, jak i możliwość odwodnienia.

4.4. Należy zaprzestać prowadzenia badań i podawania wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego, jeśli nie są jednocześnie dokładnie określone czynniki mające bezpośredni wpływ na uzyskane wartości. Badania takie nie pozwalają na wyciągnięcie żadnych prawidłowych wniosków i powodują jedynie niepotrzebną stratę czasu.

LITERATURA

1. Bishop A. V., Henkel D. J. — The measurement of soil properties in the triaxial test. London 1957.
2. Brinch Hansen J., Lundgren H. — Hauptprobleme der Bodenmechanik. Springer Verlag, 1960.
3. Scott R. F. — Principles of soil mechanics. Addison-Wesley Publishing Company INC, 1963.

РЕЗЮМЕ

За последние годы наблюдается большой прогресс в исследованиях и теоретических объяснениях вопросов когезии и угла внутреннего трения. Однако получаемые результаты не внедряются надлежащим образом в инженерно-геологическую практику.

Автор описывает метод трехосных исследований, применяемых в различных случаях определения когезии и угла внутреннего трения.