

Mirosław J. LIPIŃSKI, Małgorzata K. WDOWSKA, Anna WUDZKA

Katedra Geoinżynierii
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

WPLYW TARCIA NA KOŃCACH PRÓBKII BADANEJ W APARACIE TRÓJOSIOWYM NA CHARAKTERYSTYKĘ NAPRĘŻENIE - ODKSZTAŁCENIE

Streszczenie. Zmniejszenie tarcia na końcach próbki badanej w aparacie trójosiowego ściskania zasadniczo poprawia założoną jednorodność rozkładu naprężenia. W artykule zwrócono szczególną uwagę na określenie efektywności lubrykacji zastosowanej na końcach próbek w ocenie wybranych parametrów geotechnicznych, a w szczególności rozkładu modułów. Zastosowanie wewnątrzkomorowego systemu pomiaru deformacji o rozdzielczości 1 μm pozwoliło na porównanie przemieszczeń bocznych próbki dla układów z lubrykacją i bez niej. Otrzymane charakterystyki jednoznacznie wskazują, że zastosowanie lubrykacji zasadniczo zmienia rozkład wyznaczonej w aparacie trójosiowego ściskania sztywności gruntu. Zredukowanie tarcia sprawia, że skorygowana charakterystyka naprężenie – odkształcenie wykazuje znacznie większą nieliniowość w zakresie małych odkształceń, aniżeli to wynika ze standardowych badań.

INFLUENCE OF END RESTRAINT ON STRESS-STRAIN CHARACTERISTICS DETERMINED IN TRIAXIAL TESTS

Summary. Uniformity of stress and strains in triaxial test is much more enhanced when lubrication of top and bottom at the ends of a specimen is applied. In the paper a particular attention was drawn to a control of lubrication efficiency by comparison of radial deformation in specimens with lubricated and regular ends. The obtained characteristics prove that friction at the ends of a specimen can considerably change distribution of soil stiffness. The reduction of friction reveals that actual stress strain characteristic of soil is more nonlinear than it results from conventional triaxial tests.

1. Wstęp

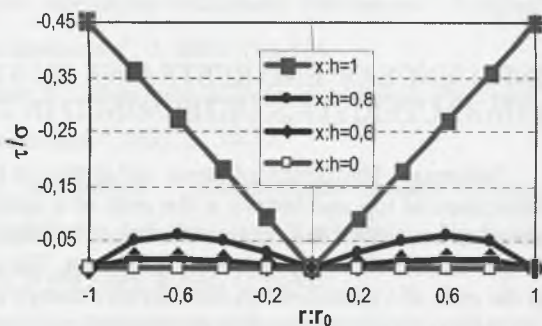
Aparat trójosiowego ściskania jest najbardziej popularnym i uniwersalnym urządzeniem stosowanym do określania właściwości mechanicznych gruntu. Jednakże pomimo wielu zalet,

badanie to ma swoje ograniczenia. Jedno z istotniejszych związane jest z powstającym tarcieniem pomiędzy końcami próbki a sztywną kopułką i podstawą aparatu trójosiowego ściskania. Skutkiem obecności tego tarcia są zasadnicze zmiany stanu naprężenia i odkształcenia w próbce, które znacząco utrudniają właściwą interpretację wyników badań. Większość przeprowadzonych na świecie prac dotyczących tarcia powstającego na końcach próbki podczas badań trójosiowych koncentrowało się na jego wpływie na wytrzymałość gruntów [2]. Dużo mniej uwagi poświęcono wpływowi tego tarcia na parametry odkształceniowe gruntów, które są podstawą do opisu konstytutywnych równań ośrodka gruntowego. Jedynie nieliczne prace związane są z tą tematyką (np. [6]). Dotychczas niewiele wiadomo o wpływie tarcia powstającego na końcach badanej próbki na rozkład sztywności gruntu, szczególnie odniesiony do zakresu małych odkształceń.

Zagadnienie tarcia na końcach próbki w badaniu trójosiowym występuje już przy rozważaniach teoretycznych, dotyczących teorii ściskania walca. Pierwszy, poprawny opis zachowania się cylindrycznego ciała poddanego działaniu pionowej siły, przy różnych warunkach brzegowych, został przedstawiony przez Filona (1902 za [1]). Następnie tematyka ta była rozwijana przez Ballę [1]. W polskiej literaturze zagadnienie to było poruszane przez Kisiela i Lysika [3], którzy analizowali stan naprężenia i odkształcenia próbki, której stosunek wysokości do średnicy wynosi 2. Wyniki tych prac dają podstawę do określenia rozkładu naprężenia stycznego w próbce gruntu badanej w aparacie trójosiowym. Dogodnie jest to przedstawić w formie pokazanej na rysunku 1 [5], gdzie naprężenie styczne znormalizowane jest ze względu na izotropowe naprężenie normalne w czterech płaszczyznach rozpatrywanej próbki. Płaszczyzny te rozmieszczone są następująco:

- pomiędzy próbką a kopułką aparatu,
- w 90 % wysokości próbki,
- w 80 % wysokości próbki,
- w 50 % wysokości próbki.

Położenie rozpatrywanych punktów opisane jest za pomocą znormalizowanej odległości (ze względu na średnią wysokość x/h i promień próbki r/r_0). Rozkład stycznych naprężeń w zależności od rozpatrywanej płaszczyzny wyraźnie wskazuje, że największe wartości



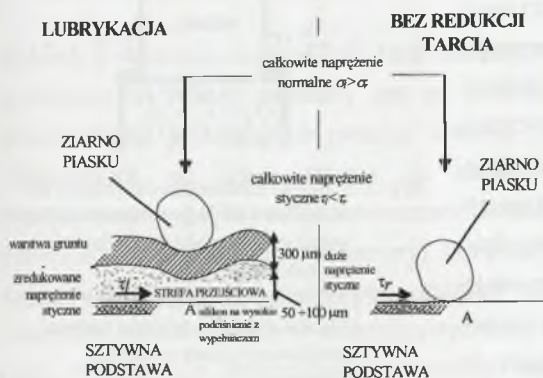
Rys. 1. Rozkład naprężeń stycznych w różnych przekrojach próbki badanej bez lubrykacji
Fig. 1. Shear stress distribution at various parts of triaxial specimen with regular ends

naprężeń stycznych występują w pobliżu obszaru kontaktu próbki z kopułką aparatu trójosiowego. Fakt ten z góry wyklucza możliwość powstania jednorodnego stanu odkształcenia w próbce, co znajduje potwierdzenie w kształtach próbek poddanych ścinaniu.

W niniejszym artykule przedstawiono wpływ tarcia powstającego na końcach próbki na charakterystyki naprężenie-odkształcenie piasków. Szczególną uwagę zwrócono na skuteczność metody zmniejszania tarcia powstającego na końcach badanej próbki poprzez zastosowanie lubrykacji oraz jej wpływ na moduł odkształcenia, w szczególności odniesiony do zakresu małych i średnich odkształceń.

2. Redukcja wielkości tarcia na końcach próbki

Wykres naprężeń stycznych pokazany na rysunku 1 stanowi istotną przesłankę do zbadania zjawiska tarcia pomiędzy próbką gruntu a kopułką i podstawą aparatu trójosiowego. Zastosowanie lubrykacji zwiększa jednorodność stanu naprężenia i odkształcenia w próbce. Efektywność lubrykacji można zbadać jedynie na drodze eksperymentalnej. Tatsuoka i inni [7] stwierdzili, że zastosowanie lateksowych membran ze smarem silikonowym pomiędzy próbką a kopułkami aparatu powoduje zmniejszenie pomierzonych wartości kąta tarcia wewnętrznego nawet o 1° . Inne metody lubrykacji, takie jak zastosowanie warstwy teflonu, szklanej płyty, gładkiej stali nierdzewnej pomiędzy próbką a okładzinami aparatu są mniej efektywne. W przypadku badań, których wyniki przedstawiono w dalszej części artykułu, zmniejszanie tarcia uzyskiwano poprzez zastosowanie lateksowej membrany pomiędzy gruntem a kopułkami aparatu.



Rys. 2. Mechanizm redukcji tarcia pomiędzy gruntem a podstawą i kopułką aparatu

Fig. 2. The mechanism of friction reduction between soil grain and rigid platen

Zastosowana metoda lubrykacji nieznacznie różniła się od metody zaproponowanej przez Tatsuokę i innych [7]. Do badań gruntu wykorzystano aparaty trójosiowego ściskania, posiadające kopułki i podstawy wykonane z gładkiej stali kwasoodpornej. Na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań z lateksowymi membranami, zastosowanymi dwuwarstwowo, stwierdzono, że pojedyncza warstwa lateksowej membrany jest wystarczająca, jeśli zastosuje się smar silikonowy na wysokie

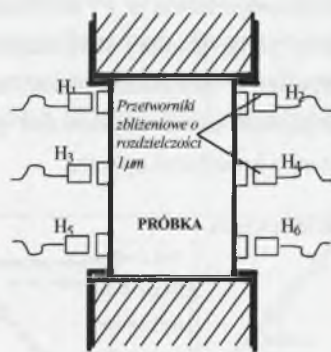
podciśnienia zmieszany z wypełniaczem. Wypełniacz zapobiega wyciskaniu silikonu na zewnątrz membrany podczas zadawania naprężeń rzędu kilkuset kPa.

Mechanizm redukcji naprężenia stycznego obrazuje rysunek 2. W układzie bez lubrykacji bezpośredni kontakt nierównej cząstki gruntu ze sztywną powierzchnią podstawy powoduje koncentrację naprężeń w każdym punkcie styku pomiędzy próbką a płaską powierzchnią. W przypadku zadawania pionowego obciążenia na ziarno gruntu powstają dodatkowo duże naprężenia styczne, wynikające z tarcia pomiędzy ziarnem gruntu a sztywną podstawą aparatu. Zastosowanie lateksowej membrany oraz smaru silikonowego na wysokie podciśnienia pozwala znacznie zredukować powstające naprężenia styczne w strefach kontaktowych. Aby udowodnić efektywność stosowania lubrykacji, przeprowadzono badania, których wyniki przedstawiono poniżej.

3. Efektywność stosowania lubrykacji

Efektywność różnych metod zmniejszania tarcia pomiędzy próbką gruntu a kopułkami aparatu trójosiowego może być sprawdzona jedynie na drodze eksperymentalnej. Najbardziej odpowiednim kryterium oceny jednorodności stanów naprężenia i odkształcenia, na które niewątpliwie wpływa tarcie występujące na końcach próbki, jest obserwowanie przemieszczeń bocznych próbki. W przedstawionych poniżej pomiarach przemieszczeń próbki gruntu wykorzystano wewnątrzkomorowy system pomiaru deformacji. System ten składa się z sześciu czujników zbliżeniowych o wysokiej rozdzielczości (1 mikron), które mierzą bezpośrednio przemieszczenia próbki wewnątrz komory aparatu trójosiowego ściskania. Odpowiednie ustawienie czujników umożliwia obserwację przemieszczeń górnej, środkowej i dolnej części próbki. Zastosowana podczas badań konfiguracja rozmieszczenia tych czujników została pokazana na rysunku 3.

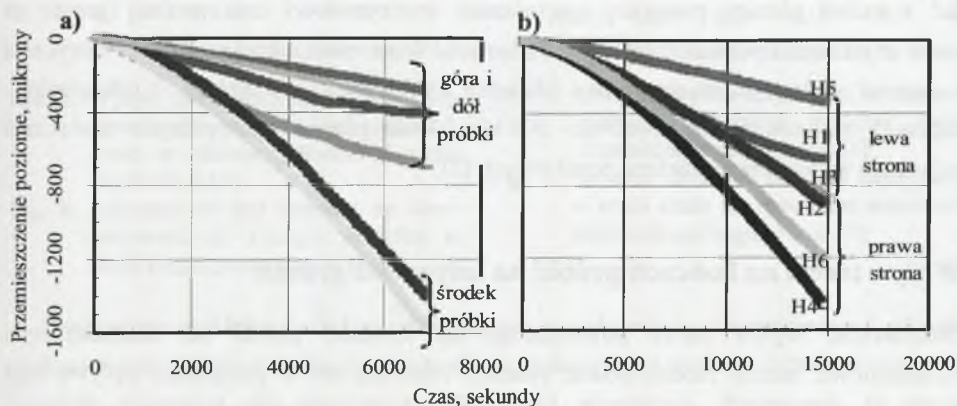
W celu ustalenia efektywności metody lubrykacji porównano powstałe przemieszczenia boczne obciążanej próbki dla układów z lubrykacją i bez niej. Przykładowe porównanie wyników badań przeprowadzonych na grubym piasku ($D_{50} = 0,55$ mm) przedstawiono na



Rys. 3. Schemat ustawienia czujników do określenia niejednorodności deformacji próbki podczas badania trójosiowego

Fig. 3. Laboratory set up for determination of nonuniformity of deformation distribution within a triaxial specimen

rysunku 4. Wyniki badań pokazano w postaci przebiegu przemieszczeń bocznych próbki uzyskanych z pomiarów wewnątrzkomorowych w trakcie ścinania. Przemieszczenia poziome próbki gruntu ścinanej bez lubrykacji przedstawia rysunek 4a. Widoczne są wyraźne różnice pomiędzy odczytami czujników przemieszczeń umieszczonych blisko podstaw próbki a odczytami czujników umieszczonych w jej środkowej części. Największe różnice pomiędzy wartościami przemieszczeń uzyskanymi z pomiarów czujnikami umieszczonymi przy podstawach a czujnikami umieszczonymi w środku próbki są duże, już po 7000 sekund



Rys. 4. Porównanie poziomych przemieszczeń próbki podczas badania trójosiowego:

a) bez redukcji tarcia, b) z redukcją tarcia

Fig. 4. Comparison of lateral deformation developed during triaxial test with:

a) regular ends, b) lubricated ends

badania, a obserwuje się je już po 1000 sekundach badania. Zupełnie inny obraz poziomych przemieszczeń próbki pokazany jest na rysunku 4b, na którym przedstawiono wyniki przemieszczeń powstających podczas ścinania próbki z lubrykacją. Odczyty czujników ulokowanych po lewej stronie (z nieparzystymi numerami) wykazały mniejsze przemieszczenia próbki od przemieszczeń pomierzonych przez czujniki znajdujące się po prawej stronie próbki (parzyste numery). Oznacza to, że próbka podczas ścinania przesuwała się w lewą stronę. Nie zauważono istotnych różnic pomiędzy odczytami przemieszczeń czujników umieszczonych w charakterystycznych miejscach (podstawy i środek próbki), co może świadczyć o jednorodności powstałego stanu odkształcenia próbki. Ta obserwacja powinna znaleźć odzwierciedlenie w uzyskanych z tego badania parametrach odkształceniowych.

4. Wpływ tarcia na końcach próbki na wytrzymałość gruntu

Wpływ ograniczeń związanych z powstającym tarcieniem pomiędzy próbką gruntu a okładzinami aparatu trójosiowego na wartości wytrzymałości gruntu został zauważony już w przeszłości. W dalszej części artykułu przedstawione będą wyniki badań bezpośrednio nawiązujące do wcześniejszych publikacji. Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki naprężenie-odkształcenie ze ścinania dwóch próbek w warunkach z odpływem, wykonanych w aparacie trójosiowym. Jedno badanie zostało wykonane z lubrykacją, a drugie bez niej. Nie widać wyraźnej różnicy pomiędzy wartościami wytrzymałości maksymalnej gruntu na ścinanie uzyskanymi w przedstawionych badaniach. Warto również zauważyć, że lubrykacja jest również efektywna w przypadku obciążeń cyklicznych (obciążenie – odciążenie – obciążenie) realizowanych nawet do 600 kPa. Wiarygodność powyższych stwierdzeń potwierdzają wyniki przedstawione przez innych [2].

5. Wpływ tarcia na końcach próbki na sztywność gruntu

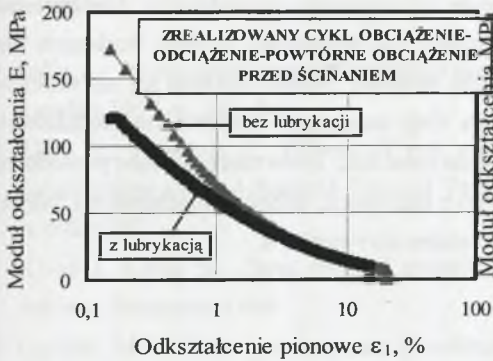
Rozpatrując wpływ tarcia powstającego na końcach próbki na charakterystyki odkształceniowe, można zaobserwować sytuację odwrotną niż w przypadku wpływu tego tarcia na wytrzymałość gruntów na ścinanie. W dalszych rozważaniach brano pod uwagę moduł odkształcenia jako najczęściej wykorzystywany parametr odkształceniowy. Uzyskany



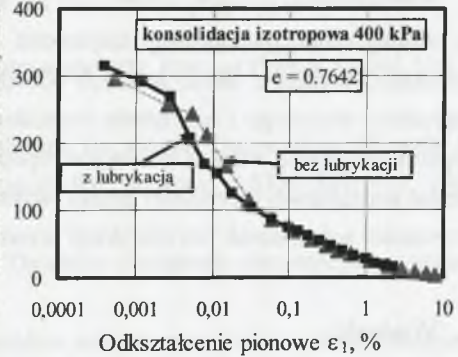
Rys. 5. Porównanie wytrzymałości maksymalnej odniesionej do warunków z odpływem z zastosowaniem lubrykacji i bez niej

Fig. 5. Comparison of drained shear strength determined in tests with lubricated and regular ends

w wyżej omówionych badaniach rozkład modułu odkształcenia w zależności od rozpatrywanych odkształceń pionowych przedstawiono na rysunku 6. Próbką badana bez lubrykacji charakteryzuje się wyższą sztywnością niż próbka badana z lubrykacją. Moduły odkształcenia badanych próbek osiągają zbliżone wartości dopiero przy odkształceniu pionowym równym 2%. Dla pionowego odkształcenia równego 0,15% wartość modułu E uzyskana z badania próbki bez lubrykacji jest o około 45% większa od wartości modułu uzyskanej z badania z lubrykacją.

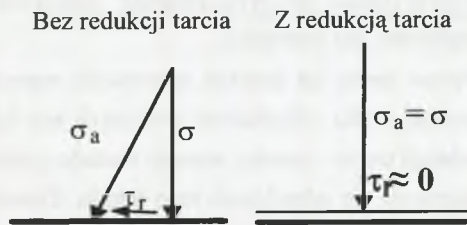


Rys. 6. Wpływ tarcia na końcach próbki na zawyżenie wartości modułu odkształcenia w zakresie odkształceń większych niż 0,1%
 Fig. 6. Influence of end restraint on over-estimation of Young's modulus at strain range greater than 0,1%



Rys. 7. Inwersja trendu sztywności w zakresie małych odkształceń podczas badań z redukcją tarcia i bez niej [4]
 Fig. 7. Reverse trend of stiffness distribution at small strain for specimens tested with lubricated and regular ends [4]

Porównanie rozkładu modułów odkształcenia w zależności od rozpatrywanych odkształceń, uzyskanych z badań bez lubrykacji i z lubrykacją, pokazuje, że większe różnice w wartościach modułów występują dla mniejszych odkształceń pionowych. Porównanie to mogłoby prowadzić do stwierdzenia, że próbki zbadane bez lubrykacji mają zawsze większą sztywność od próbek badanych z lubrykacją, a dodatkowo, różnice sztywności zwiększają się wraz ze zmniejszaniem się odkształceń pionowych. Jednakże, badania przeprowadzone przez Lipińskiego [4] na tym samym gruncie, ale w komorze aparatu trójosiowego umożliwiającej badanie sztywności gruntu w zakresie bardzo małych odkształceń ($4 \cdot 10^{-4}$ %) za pomocą zbliżeniowych czujników przemieszczeń pokazują, że istnieje pewien zakres odkształceń ($< 3 \cdot 10^{-3}$ %), w którym obserwuje się wyższe wartości sztywności z badania z lubrykacją. Badania te, których wyniki przedstawiono na rysunku 7, pozostają w zgodności z badaniami początkowej sztywności próbek gruntu określonej na podstawie pomiaru prędkości fali poprzecznej. Początkowa sztywność próbek zbadanych z lubrykacją jest większa niż próbek badanych standardowo.



Rys. 8. Wyjaśnienie mechanizmu redukcji sztywności początkowej w testach bez lubrykacji i z lubrykacją
 Fig. 8. Conceivable explanation of the existence of greater initial stiffness of soil tested for lubricated ends

Przedstawione powyżej obserwacje zasługują na racjonalne uzasadnienie. Możliwe jest, że zmniejszanie początkowej sztywności gruntu (w przypadku próbek badanych bez lubrykacji) wynika z faktu, że każde obciążenie pionowe próbki rozkłada się na składową naprężenia stycznego i naprężenia normalnego. Gdy naprężenie styczne jest zredukowane poprzez lubrykację, wzrasta działające naprężenie normalne, które może właśnie powodować wzrost początkowej sztywności gruntu badanego z lubrykacją. Schemat mechanizmu redukcji sztywności w badaniach bez lubrykacji przedstawiono na rysunku 8.

6. Wnioski

Przeprowadzone badania doświadczalne dotyczące wpływu tarcia na końcach próbki na wyniki badań w aparacie trójosiowego ściskania pozwalają na sformułowanie następujących spostrzeżeń:

- Tarcie, które występuje pomiędzy okładzinami aparatu a powierzchniami płaskimi badanej próbki, jest przyczyną znacznej niejednorodności w rozkładzie naprężenia i przebiegu deformacji próbki, co może powodować znaczne błędy w wyznaczaniu i interpretacji parametrów geotechnicznych otrzymanych z badań.
- Zastosowanie opisanej w artykule modyfikacji, zmniejszającej tarcie pomiędzy próbką a okładzinami aparatu, powoduje znaczącą redukcję tarcia w zakresie naprężeń najczęściej stosowanych w badaniach, tj. do 600 kPa.
- Wpływ tarcia na wytrzymałość maksymalną odniesioną do warunków z pełnym odpływem jest pomijalny.
- Wpływ tarcia na rozkład sztywności reprezentowany przez moduł odkształcenia jest znaczący. Dla odkształceń większych niż 0,05% stosowanie okładzin zwykłych - bez redukcji tarcia - zawyża wartość modułu, podczas gdy dla mniejszego zakresu odkształceń obserwuje się odwrócenie tego trendu. Zjawisko to można wytłumaczyć poprzez analizę składowych wektora naprężenia normalnego działającego na próbkę badaną z redukcją tarcia i bez. Obserwacja ta dowodzi również, że związek pomiędzy naprężeniem i odkształceniem ma bardziej nieliniowy charakter, aniżeli wynika to z badań bez zastosowania redukcji tarcia.

PODZIĘKOWANIA

Badania wykonane w ramach niniejszej pracy były dotowane w ramach projektu SGGW 504-05280016.

Literatura

1. Balla A.: Stress conditions in the triaxial compression tests. Proc. of IVth ICSMFE, Vol. 1, London 1957, p. 140+143.
2. Goto S., Tatsuoka F.: Effects of end conditions on triaxial compressive strength for cohesionless soils. Advanced Triaxial Testing of Soil in Rock, ASTM STP 977, 1988, p. 692 ÷705.
3. Kisiel I., Lysik B.: Zarys reologii gruntów. Działanie obciążenia statycznego na grunty. Arkady, Warszawa 1966.
4. Lipiński M.J.: Undrained response of cohesionless soils to monotonic loading. Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska, 2000.
5. Lipiński M.J., Wdowska M.K.: Influence of end restraint on stiffness distribution determined in triaxial tests. Annals of Warsaw Agricultural University, 2004, Land Reclamation No. 35a, p.193+201.
6. Ueng T.S., Tzou Y.M., Lee C.J.: The Effects of end restraints on volume change and particle breakage of sands in triaxial tests Advanced Triaxial Testing of Soil in Rock, ASTM STP 977, 1988, p. 679 ÷691.
7. Tatsuoka F., Molenkamp F., Torii T., Hino T.: Soils and Foundations, 1984, Vol. 24, No. 1, p. 113+128.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bohdan Zadroga