

# Zmiany przekroju poprzecznego próbek badanych w aparacie trójosiowego ściskania a wartości parametrów wytrzymałościowych gruntu

Dr inż. Krzysztof Wilk

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

Głównym celem badań prowadzonych w aparacie trójosiowego ściskania jest określenie wartości podstawowych parametrów wytrzymałościowych gruntu, takich jak kąt tarcia wewnętrznego  $\phi$  i spójność  $c$ . Podczas standardowych badań próbka jest ściskana ustalonymi wartościami ciśnienia wody w komorze  $\sigma_3$  (w układzie współrzędnych kartezjańskich ciśnienie boczne w kierunkach prostopadłych należy opisać jako  $\sigma_2 = \sigma_3$ ) oraz dodatkowo obciążana przyrastającą siłą osiową, która ostatecznie powoduje zniszczenie gruntu. Wspomniana działająca pionowo siła  $Q$  odniesiona do powierzchni przekrojów poprzecznych próbki powoduje w nich wzrost naprężenia o wartość  $q$ , co wraz z ciśnieniem  $\sigma_3$  wywołuje w przekrojach poprzecznych badanej próbki składową normalną naprężenia o wartości  $\sigma_1$ . Określenie efektywnych wartości naprężenia pionowo i radialnie obciążającego próbkę wymaga uwzględnienia wpływu ciśnienia wody w porach gruntu  $u$ .

Wartość naprężenia  $\sigma_1$  w konkretnym momencie badania opisuje się wzorem:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{Q}{A} \quad (1)$$

gdzie:

$\sigma_1$  – wartość naprężenia osiowego działającego na badaną próbkę gruntu w danym momencie,

$\sigma_3$  – wartość naprężenia radialnego działającego na badaną próbkę gruntu w danym momencie (w układzie współrzędnych kartezjańskich osiowo symetrycznych ciśnienie boczne  $\sigma_2 = \sigma_3$ ),

$Q$  – wartość dodatkowej siły osiowej w analizowanym momencie badania,

$A$  – pole powierzchni przekroju próbki gruntu w danym momencie badania.

Zarówno wartość naprężenia  $\sigma_3$ , jak i siły  $Q$  są parametrami mierzalnymi. Zastrzeżenia można mieć natomiast do sposobu określenia aktualnego pola powierzchni przekroju poprzecznego badanej próbki gruntu.

Podczas badania w aparacie trójosiowego ściskania, w wyniku działania obciążenia, próbki gruntu doznają odkształceń. Skróceniu ulega ich wymiar osiowy, generując jednocześnie wzrost odkształceń radialnych. Należy zaznaczyć, że zwiększenie przekroju poprzecznego nie jest jednakowe na wysokości próbki. Zakładając tzw. „beczkowy” kształt zniszczenia próbki, jej średnica osiąga przeważnie maksymalną wartość w pobliżu połowy wysokości. Niejednakowa zmiana wymiaru radialnego powoduje, że stała wartość siły ściskającej próbkę, w poszczególnych przekrojach będzie wywoływać inne stany naprężenia.

Zarówno w polskiej normie PN-88/B-04481 [7], jak i w normie PKN-CEN ISO/TS 17892-8:2009 [5] oraz PKN-CEN ISO/TS 17892-9:2009 [6] zaleca się uwzględnianie zmian wymiarów poprzecznych próbek gruntu, które są spowodowane zmniejszeniem ich wysokości. Niemniej jednak rzeczywisty maksymalny wzrost powierzchni przekroju poprzecznego jest znacznie większy niż wynikający z zależności podanych w normatywach. Przedstawiona sytuacja budzi wątpliwości dotyczące wartości rzeczywistych sił wewnętrznych decydujących o wytrzymałości

gruntu podczas badań w aparacie trójosiowego ściskania. Konsekwencją tych wątpliwości jest pytanie o znaczenie takiego zjawiska przy wyznaczanych tą metodą parametrów wytrzymałościowych podłoża.

## ZASADY UWZGLĘDNIANIA ZMIAN PRZEKROJU POPRZECZNEGO PRÓBEK GRUNTU

W przypadku określania zmian przekroju poprzecznego próbek badanych w aparacie trójosiowego ściskania najczęściej jest stosowane założenie, że zmiany odkształcenia poziomego (radialnego)  $\varepsilon_3$  są proporcjonalne do odkształcenia pionowego (osiowego)  $\varepsilon_1$  próbki. Wymieniona zasada będzie uzasadniona, jeżeli badana próbka będzie składać się wyłącznie z fazy stałej (szkieletu gruntowego) i ciekłej (wody), bez fazy lotnej.

Zmiana powierzchni przekroju przy stałej objętości próbki gruntu badanej w warunkach „bez odpływu” wyniesie zatem:

$$A = \frac{A_i}{1 - \varepsilon_1} \quad (2)$$

gdzie:

$A$  – pole powierzchni przekroju próbki gruntu w danym momencie badania,

$A_i$  – początkowe pole powierzchni przekroju próbki gruntu badanej w ATS,

$\varepsilon_1$  – jednostkowe odkształcenie osiowe próbki w danym momencie badania.

Według Wiłuna [10] jest dopuszczalne uproszczenie powyższej zależności do formy:

$$A = A_i \cdot (1 + \varepsilon_1) \quad (3)$$

Wzór ten uzasadniono następująco (przy założeniu, że objętość próbki gruntu nie zmieni się  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$  oraz  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ ):

$$2\varepsilon_3 = -\varepsilon_1 = \frac{H_i - H}{H_i} \approx \frac{A - A_i}{A_i} \quad (4)$$

gdzie:

$\varepsilon_3$  – jednostkowe odkształcenie radialne próbki w danym momencie badania,

$H_i$  – początkowa wysokość próbki gruntu,

$H$  – wysokość próbki gruntu w danym momencie badania.

Aktualne pole powierzchni przekroju próbki gruntu badanej w warunkach „bez odpływu” według normy PKN-CEN ISO/TS 17892-8:2009 [5] należy ustalić na podstawie wzoru:

$$A = \frac{V_i - \Delta V}{H_i - \Delta H_c - \Delta H} \quad (5)$$

gdzie:

$V_i$  – początkowa objętość próbki gruntu badanej w ATS,

$\Delta H_c$  – zmniejszenie wysokości próbki gruntu przed ścinaniem, związane z zadaniem ciśnienia w komorze (ze względu na badanie przeprowadzane w warunkach „bez odpływu” wielkości tej nie należy wiązać z właściwą konsolidacją próbki),

$\Delta V$  – zmiana objętości próbki gruntu w wyniku procesów, jakim próbka była poddana przed badaniem głównym (ścianiem),

$\Delta H$  – zmniejszenie wysokości próbki gruntu w danym momencie badania w wyniku ściskania.

W przypadku badania próbki w warunkach „z odpływem” odprowadzona objętość wody zmniejszy objętość próbki, a tym samym jej uśredniony przekrój poprzeczny. Fakt ten jest uwzględniany zarówno w PN-88/B-04481 [7], jak i normie PKN-CEN ISO/TS 17892-9:2009 [6].

W polskiej normie PKN-CEN ISO/TS 17892-9:2009 [6] różni się dodatkowo zmiany objętości próbki wskutek wstępnej konsolidacji oraz w trakcie badania wytrzymałościowego, w następujący sposób:

$$A = \frac{V_i - \Delta V_c - \Delta V}{H_i - \Delta H_c - \Delta H} \quad (6)$$

gdzie:

$\Delta V_c$  – zmniejszenie objętości próbki gruntu w wyniku konsolidacji,

$\Delta H_c$  – zmniejszenie wysokości próbki gruntu w wyniku konsolidacji,

$\Delta V$  – zmiana objętości próbki gruntu, odpływ wody z próbki w trakcie badania.

## POMIAR RZECZYWISTYCH ODKSZTAŁCEŃ PRÓBK

W opisanych sposobach określenia zmian przekroju poprzecznego próbki gruntu zakłada się stałą wartość odkształceń na całej wysokości próbki – wówczas kształt badanej próbki pozostaje walcowy. Takie założenie nie jest jednak prawdziwe, gdyż wskutek działania znacznego tarcia na powierzchni kontaktu z kamieniami porowymi oraz ograniczenia odkształceń przez lateksową membranę mocowaną przy końcach próbki największe odkształcenia radialne pojawiają się w okolicy połowy jej wysokości, natomiast przy końcach przekroje pozostają prawie nieodkształcone. Opisaną sytuację została przedstawiono na rys. 1.

W początkowej fazie badania w aparacie trójosiowego ściskania wskutek intensywnego przyrostu ciśnienia wody w komorze urządzenia średnica próbki przeważnie zmniejsza się nieznacznie. Jest to spowodowane wzrostem ciśnienia bocznego w stosunku do naprężenia wcześniej konsolidującego próbkę. Następnie w wyniku zwiększania siły pionowej zmniejsza się długość próbki i tym samym rośnie jej przekrój poprzeczny.

W związku z faktem, że na wysokości próbki powierzchnie przekrojów nie są takie same, należy uznać, że naprężenie przypisane każdemu z nich również będzie inne. Wartości do-

datkowego obciążenia osiowego próbki w poszczególnych przekrojach poprzecznych na jej wysokości nie ulegną zmianie, natomiast pola powierzchni tych przekrojów będą różnicowane.

Powstaje pytanie, który zatem z przekrojów będzie odzwierciedlał prawidłowo naprężenie decydujące o wytrzymałości gruntu? Wydaje się, że odpowiedni będzie przekrój największy pozwalający określić minimalną wartość naprężenia niszczącego, czy też deformującego próbkę w danym momencie. Takie stanowisko jest przedstawione w normie PN-88/B-04481 [7], gdzie zaleca się bezpośredni pomiar średnicy próbki gruntu w momencie jej zniszczenia. Sugerowany pomiar powinien być wykonany po zakończeniu badania i wyjęciu próbki z komory aparatu. Wydaje się, że lepszym rozwiązaniem jest jednak zastosowanie jednej z technik pomiaru bezpośredniego bądź optycznego, pozwalających na określenie zmian wymiarów próbki gruntu w trakcie wykonywania badania w aparacie trójosiowego ściskania [9]. Bezpośredni pomiar zmian objętościowych można wykonać za pomocą czujników rodzaju LDT, LVDT, PT [8] lub wykorzystujących elektryczny efekt Halla [1]. W technikach wizyjnych aparatura pomiarowa znajduje się poza komorą badawczą i może być realizowana za pomocą klasycznych kamer [2, 3] lub czujników laserowych [4].

## ANALIZA OBLICZONYCH I OBSERWOWANYCH ZMIAN PRZEKROJU

Przedstawione poniżej analizy powstały na podstawie rezultatów własnych (autora) badań w aparacie trójosiowego ściskania, których przedmiotem były pomiary lokalnych odkształceń próbek gruntu. Zaawansowany zestaw pomiarowy opierał się na czujnikach mocowanych bezpośrednio do badanych próbek i wykorzystywał do ustalenia zmian deformacyjnych elektryczny efekt Halla.

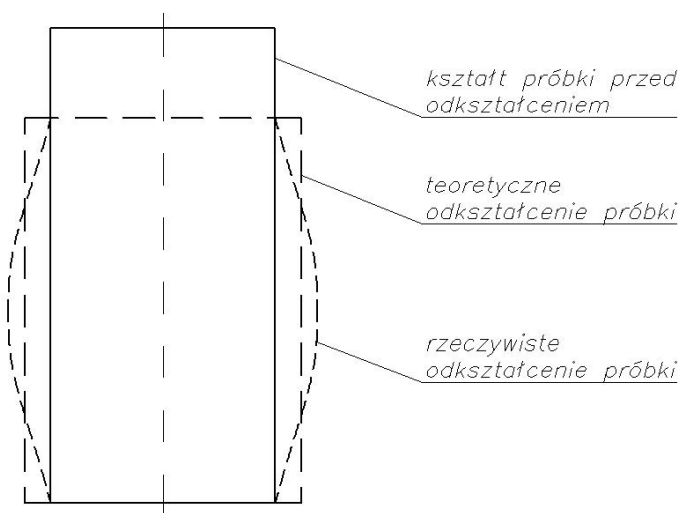
Przedstawione wyniki opisują obserwowane podczas badania w aparacie trójosiowego ściskania metodą CD (ze wstępną konsolidacją i możliwością odpływu wody) odkształcenia próbek gliny piaszczystej. Próbkę pobrano z terasy zalewowej rzeki Wisłoka w miejscowości Podole z głębokości około 1,2 m. Grunt znajdował się w stanie plastycznym ( $I_L = 0,27$ ).

Na rys. 2 przedstawiono zmiany przekroju poprzecznego badanych próbek określone zgodnie z zasadami podanymi w [6]. Uwzględniono przy tym zmiany spowodowane odpływem wody z gruntu, jak i zmianą wysokości próbek, zgodnie z wzorem (6).

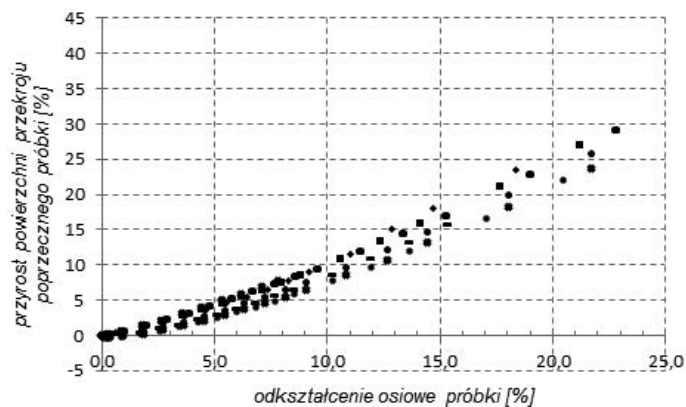
Rzeczywiste zmiany przekroju poprzecznego próbek, określone na podstawie pomiarów bezpośrednich, przedstawiają się jednak inaczej, co zobrazowano na rys. 3.

Identyfikacja odkształceń radialnych towarzyszących zmniejszaniu wysokości próbki gruntu była ograniczona zakresem pomiarowym wykorzystanych czujników. Nie zawsze pozwalało na zarejestrowanie deformacji towarzyszących zniszczeniu.

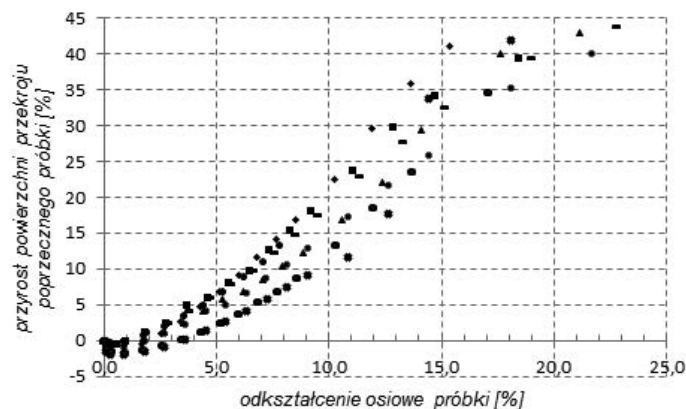
Różnica w przyjętej powierzchni, na którą oddziałuje obciążenie, zmienia wartość dewiatora naprężenia, który należy uwzględnić przy określaniu parametrów wytrzymałościowych. Zmiany parametrów będą tym większe, im większe odkształcenie osiowe będzie towarzyszyć przekroczeniu wytrzymałości gruntu. Przykład zróżnicowania wartości kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności gruntu przedstawiono na rys. 4.



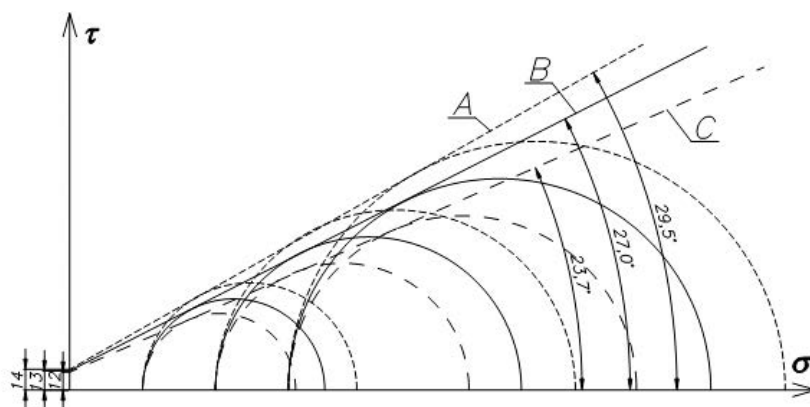
Rys. 1. Schemat teoretycznej i rzeczywistej zmiany kształtu próbki podczas badania w aparacie trójosiowego ściskania



Rys. 2. Zmiany przekroju poprzecznego próbek obliczone podczas badań w aparacie trójosiowego ściskania w warunkach z odpływem



Rys. 3. Zmiany przekroju poprzecznego próbek pomierzone w środku wysokości próbki podczas badań w aparacie trójosiowego ściskania w warunkach z odpływem



Rys. 4. Przykład różnicowania wartości parametrów wytrzymałościowych podłoża gruntowego zależnie od przyjętego przy określeniu naprężenia przekroju poprzecznego próbki: A – pierwotna powierzchnia przekroju (stała podczas badania), B – powierzchnia obliczona na podstawie zaleceń [6], C – powierzchnia pomierzona w środku wysokości próbki

## PODSUMOWANIE

Przedstawione w opracowaniu analizy wskazują na istotne różnice w metodach interpretacji wyników badań w aparacie trójosiowego ściskania. Sposób określania zmian powierzchni przekroju poprzecznego próbek może znacząco wpływać na wartości parametrów wytrzymałościowych, którymi będzie opisane podłoże. Dalej, prowadzić to może do niewłaściwej oceny nośności podłoża gruntowego i jego zachowania pod wpływem obciążenia.

Zastosowana przez autora metodyka pomiaru odkształceń pozwala na rejestrację zmian średnicy próbki tylko w jednym kierunku. Powstaje zatem pytanie, czy deformacje w innych kierunkach są tak samo intensywne? Obserwowany podobny charakter zachowania się wszystkich badanych próbek (rys. 3) wskazuje, że różnice kształtu przekroju nie powinny znacząco odbiegać od kołowego. Niemniej jednak potwierdzenie tego wymaga zwiększenia liczby analiz.

## LITERATURA

1. Clayton C. R. I., Khratush S. A., Bica A. V. D., Siddique A.: The use of Hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 12, No. 1, March 1989, 69-76.
2. Dong J.-J., Shao L.-T., Liu Y.-L.: Study of deformation properties of unsaturated compacted soil in suction-controlled triaxial test based on digital

image measurement method. *Proc. Int. Workshop on Constitutive Modelling – Development, Implementation, Evaluation, and Application*, HongKong, China, 2007, 380-386.

3. Macari E. J., Parker J. K., Costes N. C.: Measurement of volume changes in triaxial tests using digital imaging techniques. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 20, No. 1, March 1997, 103-109.
4. Messerklinger S., Bleiker E., Zweidler A., Springman S.M.: Displacement measurement with laser scanning in triaxial testing apparatuses. *Proc. 16-th European Young Geotechnical Engineers Conference*, Vienna, Austria, 2004, 251-260.
5. Polska Norma PKN-CEN ISO/TS 17892-8:2009 Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 8: Badanie gruntów nieskonsolidowanych w aparacie trójosiowego ściskania bez odpływu wody.
6. Polska Norma PKN-CEN ISO/TS 17892-9:2009 Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 9: Badanie gruntów w aparacie trójosiowego ściskania po nasyceniu wodą.
7. Polska Norma PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
8. Świdziński W.: Kilka uwag odnośnie lokalnego pomiaru przemieszczeń w systemach trójosiowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1756, Budownictwo z. 111*, Gliwice 2007, 411-418.
9. Wilk K.: Przegląd technik pomiaru lokalnych odkształceń próbek gruntu w aparacie trójosiowego ściskania. *Inżynieria Morska i Geotechnika*. Nr 3/2013, s. 210-216.
10. Wiłun Z.: *Zarys geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2000.