

Małgorzata JASTRZĘBSKA

Katedra Geotechniki
Politechnika Śląska

ROZBUDOWA STANOWISKA DO BADAŃ TRÓJOSIOWYCH W ŚWIETLE POTRZEB IMPLEMENTACYJNYCH MODELU NAHOS

Streszczenie. W pracy przedstawiono stopniową rozbudowę stanowiska do badań trójosiowych i związany z tym rozwój jednopowierzchniowego sprężysto-plastycznego modelu NAHOS o wzmocnieniu kinematycznym. Nowe rozwiązania konstrukcyjne komory trójosiowej oraz zastosowany system nawadniania próbek i wewnętrznego pomiaru odkształceń pozwoliły na rzetelną kalibrację i weryfikację modelu NAHOS. Ponadto umożliwiły przeprowadzenie badań cyklicznych przy różnych prędkościach zadawanych obciążeń.

DEVELOPMENT OF TRIAXIAL TESTS STATION UNDER THE IMPLEMENTATION NECESSITY OF NAHOS MODEL

Summary. The gradual extension of the test-stand for triaxial investigations and the connected with it creation of the single surface elasto-plastic model NAHOS with kinematic hardening are presented. New solutions of the triaxial cell construction and the systems used for irrigation of samples and internal measurement of strains make the reliable calibration and verification of model NAHOS possible. Realistic cyclic tests by various rates of generated loads were possible to perform as well.

1. Wstęp

Grunty, jako materiały odznaczające się nie tylko złożoną budową strukturalną, ale i również olbrzymią niejednorodnością, wymagają szczególnego podejścia w celu ustalenia ich właściwości. Na to postępowanie składają się nie tylko dynamicznie rozwijające się badania terenowe, ale również badania doświadczalne, przeprowadzane na coraz bardziej precyzyjnej aparaturze pomiarowej. W ślad za nimi pojawiają się wyrafinowane modele konstytutywne materiału, wykorzystujące komputerowe metody obliczeniowe. Oczywisty wydaje się fakt, iż

dla coraz bardziej skomplikowanych modeli konstytutywnych procedura określenia parametrów materiałowych staje się coraz trudniejsza, co automatycznie pociąga za sobą większą dbałość o warunki przeprowadzania badań eksperymentalnych oraz ostrzejsze kryteria w ich spełnianiu.

W tym miejscu należałoby się zastanowić, który z wymienionych elementów jest nadrzędnym wobec innego? Czy badania zarówno terenowe, jak i laboratoryjne są tłem dla modeli konstytutywnych, czy może na odwrót? Sądzę, że nie ma jednoznacznej odpowiedzi na tak postawione pytanie. Wszystkie te trzy ścieżki postępowania są ze sobą sprzężone i wzajemnie się uzupełniają.

W świetle powyższych uwag w dalszej części artykułu zostaną przedstawione podstawowe założenia modelu NAHOS i związany z nim rozwój stanowiska badawczego w Katedrze Geotechniki Politechniki Śląskiej.

2. Model NAHOS

Wśród powszechnie stosowanych modeli wyróżniamy modele sprężyste, hiposprężyste, sprężysto–plastyczne oraz hipoplastyczne. Wybór między tymi podstawowymi klasami modeli konstytutywnych jest w każdym przypadku wyrazem kompromisu między prostotą opisu a uwzględnieniem ekstremalnie skomplikowanego zachowania się gruntu. Potrzeby współczesnej praktyki geotechnicznej związane są z coraz to nowymi, większymi i trudniejszymi inwestycjami, takimi jak wysokie zapory ziemne i betonowe, kopalnie odkrywkowe, wysokie zbiorniki i składowiska, ciężkie budynki przemysłowe, pełnomorskie platformy wiertnicze, autostrady czy duże mosty. Również urbanizacja terenów czynnych sejsmicznie czy też górniczych, bądź budownictwo na podłożach silnie i nierównomiernie odkształcalnych wymusza rozwój konstytutywnego modelowania. Inspiruje to badaczy do ciągłego poszukiwania modelu zdolnego do możliwie najwierniejszego opisu cech gruntu, zwłaszcza zależności od ścieżek naprężenia, zachowania się ośrodka w stanie prekonsolidacji i w warunkach obciążeń cyklicznych, a ostatnio także silnej nieliniowości w zakresie małych odkształceń. Trend ten znajduje odzwierciedlenie w implementacji modelu NAHOS, odpowiadającego na powyższe wyzwania. Jednocześnie z problematyką identyfikacji parametrycznej (kalibrowania) modelu wraz z jego weryfikacją ściśle związana jest modernizacja oraz ciągły rozwój stanowiska do badań trójosiowych w Katedrze Geotechniki

Politechniki Śląskiej [4]. Podstawowe założenia modelu NAHOS można odnaleźć w wielu publikacjach, m. in. Jastrzębskiej [4], Sternika [12] oraz Łupieżowca [10].

3. Stanowisko badawcze

Stanowisko do badań trójosiowych, którym aktualnie dysponuje Katedra Geotechniki Politechniki Śląskiej, powstawało zasadniczo w latach 1999 – 2001. W tym czasie istniejące dotychczas oprzyrządowanie wymieniono, zmodernizowano bądź uzupełniono całkiem nowymi elementami. W wyniku tych starań otrzymano stanowisko badawcze, odpowiadające aktualnym standardom przodujących laboratoriów europejskich. Zrealizowany program zmian objął:

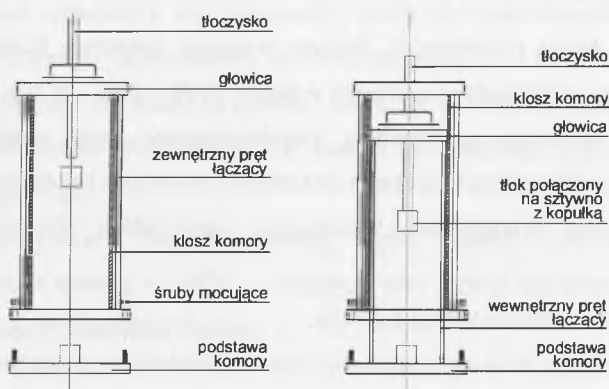
- modernizację komory aparatu trójosiowego,
- wprowadzenie układu do nasączania próbek metodą ciśnienia wyrównawczego,
- elektroniczny pomiar odcieku wody (podczas konsolidacji i w testach „z drenażem”),
- zastosowanie wewnętrznego układu do pomiaru odkształceń próbki,
- komputerową rejestrację pomiarów.

Podczas badania w tak zmodernizowanej aparaturze mierzone są w sposób ciągły: ciśnienie wody w komorze σ_3 , ciśnienie wody w porach u , wartość siły ścinającej P , zmiany objętości ΔV na podstawie odcieku wody lub wewnętrznego pomiaru odkształceń, przemieszczenia osiowe Δh_i (pomiar wewnętrzny - Δh_{int} lub zewnętrzny - Δh_{ext}) oraz promieniowe Δr_i (pomiar wewnętrzny - Δr_{int}).

3.1. Podstawowy aparat trójosiowego ściskania

Zmodyfikowany aparat trójosiowego ściskania Katedry Geotechniki Politechniki Śląskiej spełnia niemal wszystkie warunki wysokiej jakości badania. Brak mu tylko możliwości ciągłej automatycznej realizacji dowolnej ścieżki naprężenia. Jego podstawowym elementem jest zmodyfikowana komora zaprojektowana przez Lipińskiego [9]. Na rysunku 1 przedstawiono schematy komór aparatu trójosiowego ściskania: standardowej i zmodyfikowanej TX 93. Zaletą tej drugiej jest możliwość wyeliminowania pojawiających się błędów w kontrolowaniu stanu naprężenia i odkształcenia podczas badania, których najczęstszą przyczyną jest brak współosiowości między próbką a tłokiem komory. W ramach wspomnianej modyfikacji zastosowano wewnętrzne pręty łączące. Taka konstrukcja

umożliwia dostęp do próbki na każdym etapie jej przygotowania. Drugą zasadniczą innowacją było sztywne połączenie kopułki z tłoczyskiem, eliminujące błędy spowodowane ich wzajemnym niedokładnym przyłożeniem do siebie oraz pozwalające na dokładne określenie wartości naprężenia pionowego, działającego na próbkę.



Rys. 1. Różnice w budowie komory: a) tradycyjnej, b) zmodyfikowanej TX 93 [4]
Fig. 1. Differences in structure of the cells: a) traditional, b) modified TX 93 [4]

3.2. Pomiar elektryczny za pomocą wewnętrznych czujników bezkontaktowych

Znaczenie precyzji pomiaru bardzo małych odkształceń ma związek z silną nieliniowością związków „naprężenie-odkształcenie” w tym właśnie zakresie, odkrytą i potwierdzoną wieloma doświadczeniami w ostatnich dwóch dekadach, np. [3].

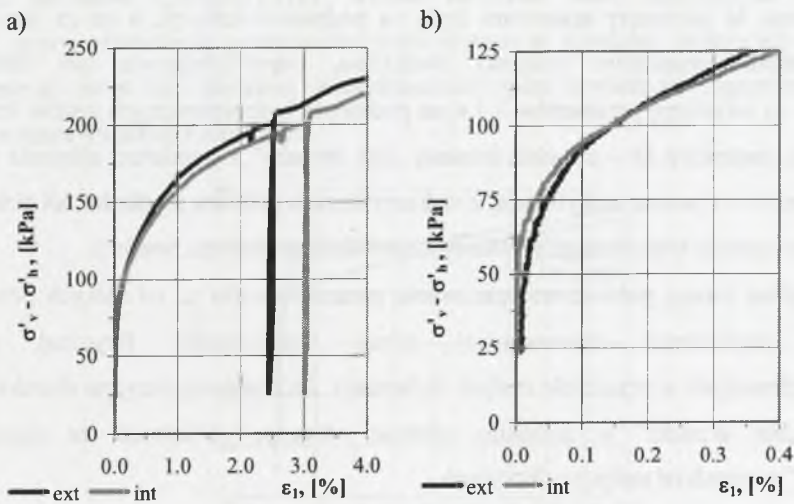
Dotychczas najczęściej stosowany zewnętrzny pomiar pionowych odkształceń z wykorzystaniem czujnika opartego ruchomą końcówką na pokrywie aparatu trójosiowego ściskania i zamocowanego do tłoka nie spełnia wymagań, związanych z precyzją pomiaru małych i bardzo małych wartości składowych odkształcenia ($\varepsilon_1=10^{-4}\div 10^{-5}$). Mierzone wartości przemieszczeń obarczone są znacznymi niepewnościami pomiarowymi.

Na rysunku 2, na podstawie badań własnych, [5], przedstawiono rozbieżności w charakterystyce „naprężenie-odkształcenie”, wynikające z różnego sposobu pomiaru przemieszczenia próbki: zewnętrznego bądź wewnętrznego. Badania te dowodzą konieczności stosowania wewnętrznego pomiaru odkształceń próbki.

Na świecie rozwinięto i udoskonalono kilkanaście metod wewnętrznego pomiaru odkształceń próbki [11], jednak nie wszystkie znalazły szerokie zastosowanie, choćby ze względu na ich koszt, skomplikowanie i specjalne wymagania.

Jednym z rozwiązań cieszącym się dużą popularnością są tzw. zbliżeniowe przetworniki, których początki przypadają na lata siedemdziesiąte, np. [1], a kolejne udoskonalenia na lata dziewięćdziesiąte, m. in. [2].

Obecnie w Katedrze Geotechniki Politechniki Śląskiej pomiar małych odkształceń próbki gruntu także realizowany jest przy użyciu bezkontaktowych czujników mikroprzemieszczeń, których rozdzielczość pomiarowa wynosi 1 mikron przy bardzo wysokiej powtarzalności i stabilności odczytów. Zasada pomiaru opiera się na zmianie natężenia pola prądów wirowych powodowanego przez przemieszczenie elementu aluminiowego w tym polu. Sztynny element aluminiowy jest przymocowany do próbki, co pozwala na rejestrację najmniejszych zmian jej położenia. W przypadku pomiaru odkształceń osiowych tarczki aluminiowe zlokalizowane są w 1/3 i w 2/3 wysokości próbki, natomiast w celu pomiaru odkształceń radialnych znajdują się one w połowie wysokości próbki. Zmiana obwodu próbki rejestrowana jest przez zmianę jej średnicy.



Rys. 2. Porównanie charakterystyk „naprężenie – odkształcenie” z badania w aparacie trójosiowego ściskania w warunkach bez odpływu (TXCIU) dla zewnętrznego (ext) i wewnętrznego (int) pomiaru przemieszczeń: a) w pełnym zakresie przemieszczeń, b) w początkowym zakresie przemieszczeń ($\epsilon_1=0.001 \div 0.004$) [5]

Fig. 2. Comparison of internal and external strains for undrained triaxial test (TXCIU): a) for all range of strains, b) for a beginning range of strains ($\epsilon_1=0.001 \div 0.004$) [5]

4. Przygotowanie próbek

Wszystkie dotychczasowe badania zostały zrealizowane na materiale pochodzącym z Fabryki Porcelitu w Tułowicach, a jego parametry można odnaleźć m.in. w [4]. Wybór materiału został podyktowany jego dużą jednorodnością. Badania przeprowadzono na próbkach o średnicy 50 mm oraz stosunku H/D równym 2. W celu pełnego nawodnienia próbek gruntu zastosowano nasączenie grawitacyjne, a następnie metodą ciśnienia wyrównawczego (tzw. „back pressure”), uzyskano wysoką wartość parametru Skemptona $B = 0.96 \pm 0.99$.

5. Zrealizowane cele

5.1. Kalibracja modelu NAHOS

Kalibrowanie modelu obejmowało oszacowanie 6 parametrów: λ , κ , M , G oraz C i μ .

Założono, że parametry szacowane będą na podstawie definicji, a co za tym idzie, z zastosowaniem programów (ścieżek) obciążenia, odpowiadających tym definicjom. Oznaczało to estymację parametrów λ i κ na podstawie hydrostatycznych testów ściskania i odprężania, parametru M – z badań ścinania „bez drenażu” z pomiarem ciśnienia wody w porach, oraz G – z pewną modyfikacją, z wykorzystaniem pomiaru prędkości fali akustycznej (w komorze aparatu trójosiowego z wbudowanymi elementami typu *bender*).

Szczególną uwagę poświęcono szacowaniu parametrów C i μ , od których oczekiwano dobrego przybliżenia obserwowanej silnej nieliniowości fizycznej gruntów prekonsolidowanych w przedziale małych deformacji. Za podstawę przyjęto charakterystykę ścinania „bez drenażu” w szerokim zakresie wtórnego obciążenia, ze szczególnym „wglądem” w przedział małych odkształceń.

Na podstawie wykonanych badań otrzymano następujące wartości parametrów:

$$\lambda = 0.03; 0.04 \text{ i } 0.05; \quad \kappa = 0.007 \text{ i } 0.012; \quad M = 0.991$$

$$E_{\max}^{pocz} = 195.19 \text{ MPa}$$

$$G_{\max}^{pocz} = 65.06 \text{ MPa}$$

$$E_{\max}^{wtór} = 289.39 \text{ MPa}$$

$$G_{\max}^{wtór} = 96.46 \text{ MPa}$$

i

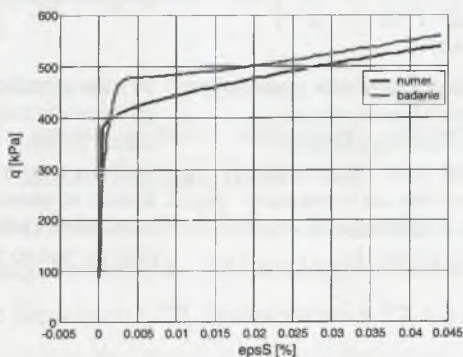
Szacowanie parametrów C i μ odbywało się z zastosowaniem metody najmniejszych kwadratów, ze sprężysto–plastycznym modulem ścinania G_{ep} w roli funkcji regresji. Taka realizacja wymagała postępowania numerycznego, wykorzystującego technikę

systematycznego przeszukiwania z dogęszczaniem siatki. Korzystając z algorytmu zaprogramowanego w procedurach programu Matlab [6], ostatecznie otrzymano następujące wartości parametrów C i μ , dla których uzyskano najlepsze dopasowanie krzywej teoretycznej do krzywej eksperymentalnej:

$$C = 25 \qquad \mu = 11.5$$

5.2. Weryfikacja modelu NAHOS

Pełne podstawy przyjętej metody weryfikacji zostały szczegółowo przedstawione w pracy [4]. Dotychczas zrealizowano pierwszy etap weryfikacji na poziomie izolowanego otoczenia punktu, czemu służyły konwencjonalne badania trójosiowe z prostymi ścieżkami, różnymi od użytych do kalibrowania. Porównanie charakterystyk „ q - ϵ_s ” (rys. 3) w badaniu “z odciążeniem” wykazało bardzo dobrą zgodność jakościową w całym zakresie odkształceń oraz dobrą zbieżność ilościową krzywych, lecz przede wszystkim w stanie prekonsolidacji (stromych odcinków charakterystyk). Wzdłuż odcinków mało nachylonych występują nieduże, prawie równoległe przesunięcia przewidywań w kierunku mniejszych wartości. Odchylenie to może być skutkiem niedoskonałości opisu powierzchni ograniczającej za pomocą modelu Modified Cam-Clay.

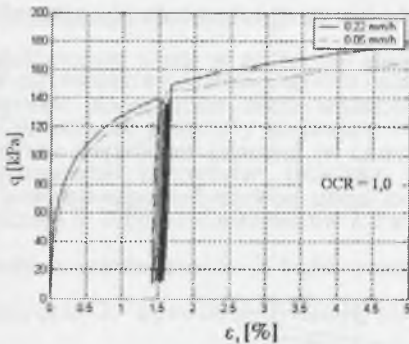


Rys. 3. Seria 6, badanie 1 – krzywa teoretyczna i eksperymentalna (CID)
Fig. 3. Series 6, test 1 – theoretical and experimental characteristics (CID)

5.3. Wpływ prędkości i obciążenia cykliczne

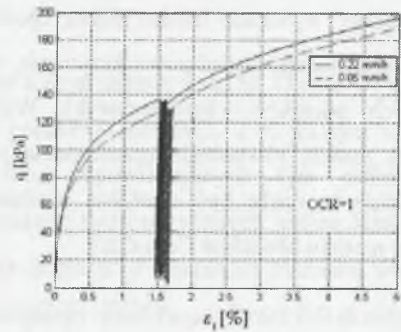
Do opisu obciążeń cyklicznych gruntów konieczne jest zastosowanie nieliniowego modelu konstytutywnego, który jest w stanie opisać silną nieliniowość charakterystyk w stanie prekonsolidacji. Dodatkowo odpowiedź gruntu także zależy od prędkości zadawanego obciążenia.

Mając na względzie powyższe uwagi, w modelu NAHOS, z natury opisującym silną zmienność modułu ścinania w zakresie małych odkształceń (10^{-2} do 10^{-1} %), uwzględniono wrażliwość na prędkość procesu poprzez rozszerzenie równania powierzchni ograniczającej oraz prawa wzmocnienia [7],[8]. Przeprowadzone symulacje numeryczne potwierdziły dobrą zgodność zarówno ilościową, jak i jakościową z wynikami badań laboratoryjnych (rysunki 4 i 5). Jednocześnie wyraźnie można było zaobserwować wpływ prędkości na przebieg procesu.



Rys. 4. Wyniki badań doświadczalnych dla gruntów normalnie skonsolidowanych: charakterystyki q - ϵ_1 dla różnych prędkości zadawanych obciążeń (seria 12-2 i 13-3)

Fig. 4. Experimental results of the test in normally consolidated case: q - ϵ_1 characteristics for test no 12-2 and 13-3 (OCR=1)



Rys. 5. Wyniki symulacji numerycznych dla gruntów normalnie skonsolidowanych: charakterystyki q - ϵ_1 dla różnych prędkości zadawanych obciążeń (seria 12-2 i 13-3)

Fig. 5. Results of numerical simulations: q - ϵ_1 characteristics for normally consolidated state for test no 12-2 and 13-3 (OCR=1)

6. Podsumowanie

Ośrodek gliwicki od wielu lat rozwija sprężysto-plastyczny model NAHOS o silnie nieliniowym wzmocnieniu anizotropowym. Począwszy od podania równań wspomnianego modelu, jego kalibracji i wstępnej weryfikacji, a skończywszy na stopniowym rozszerzaniu jego możliwości implementacyjnych poprzez uwzględnienie wpływu prędkości oraz odpowiedzi gruntu na obciążenia cykliczne. Należy zaznaczyć, że krok w krok za tymi

działaniami podąża stopniowy rozwój stanowiska badawczego, którego kluczowymi elementami stały się zmodyfikowana komora aparatu trójosiowego ściskania oraz zastosowany system nawadniania próbek i wewnętrzny pomiar ich odkształceń. W przyszłości stanowisko do badań trójosiowych zostanie wyposażone w elementy typu bender i nasadkę do automatycznego generowania obciążeń cyklicznych z programowalną amplitudą i częstotliwością. Jednocześnie całość zostanie wzbogacona o system do realizacji dowolnych ścieżek naprężenia. Kolejne etapy kalibracji modelu NAHOS pojawią się w rozprawie doktorskiej Magdaleny Kowalskiej (kalibrowanie lokalne w zakresie szerokiego spektrum ścieżek obciążenia).

Literatura

1. Cole D.M.: A Technique for Measuring Radial Deformation during Repeated Load Triaxial Testing. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, Vol. 15, p. 426-429.
2. Dupas J.M., Pecker A., Bozetto P., Fry J.J.: A 300 mm Diameter Triaxial Cell with a Double Measuring Device, *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP 977, Eds. Robert T. Donaghe, Ronald C. Chaney and Marshall L. Silver, 1988, p.132-142.
3. Jardine R.J., Potts D.M., Fourie A.B., Bourland J.B.: Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil – structure interaction. *Géotechnique*, 1986, 36, 3, p.377-396.
4. Jastrzębska M.: Kalibrowanie i weryfikacja jednopowierzchniowego sprężysto-plastycznego modelu gruntu o silnie nieliniowym wzmocnieniu anizotropowym, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Śląska, Gliwice 2002.
5. Jastrzębska M.: Pomiar małych odkształceń w laboratorium geotechniki Politechniki Śląskiej na tle osiągnięć światowych. XIII KKMGiF, Gliwice-Szczyrk 2003, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, nr 1573, *Budownictwo z. 97*, s. 13-22.
6. Jastrzębska M., Łupieżowiec M.: Estymacja parametrów pola modułu wzmocnienia w obszarze prekonsolidacji. XIV Krajowa Konferencja Naukowa „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”, Korbiewów 2002, s. 207-214.
7. Jastrzębska M., Łupieżowiec M.: The effect of the rate on the cyclic strains in the cohesive soils in the light of theoretical and laboratory tests. The 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka 2005, p.807-810.

8. Jastrzębska M., Sternik K.: Application of elasto-plastic model with anisotropic hardening to analysis of cyclic loading of cohesive soil. International Conference on „Cyclic behaviour of soils and liquefaction phenomena”, Bochum – Germany, 2004, 31 March – 02 April, p. 41-46.
9. Lipiński M.J.: Undrained response of cohesionless soils to monotonic loading. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, 2000.
10. Lupiezowicz M.: Consistent single surface elasto-viscoplastic model with strong nonlinear anisotropic hardening for clay soils. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2004.
11. Scholey G.K., Frost J.D., Lo Presti D.C.F., Jamiolkowski M.: A review of instrumentation for measuring small strains during triaxial testing of soil specimens. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 1995, Vol. 18, No. 2, p. 137-156.
12. Sternik, K.: Analysis of effectiveness and numerical implementation of single surface elasto-plastic model for soil with strongly nonlinear anisotropic hardening law. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2003.

Recenzent: Prof. dr hab. Zbigniew Sikora

Wyniki przedstawione w pracy są częścią projektu nr 4 T07E 019 30 pt. „Modelowanie wpływu wstrząsów technologicznych na otoczenie”, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.