

Magdalena KOWALSKA*
Politechnika Śląska

KALIBROWANIE MODELI GRUNTÓW METODĄ ŚCIEŻEK NAPRĘŻENIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono problematykę określania parametrów modeli gruntów i zaproponowano do ich wyznaczania metodę ścieżek naprężenia. Podano algorytm metody oraz zagadnienia do rozwiązania.

CALIBRATION OF SOIL MODELS WITH STRESS PATH METHOD

Summary. The paper presents the problem of determining soil models' parameters and suggests the stress path method to solve it. The method algorithm is presented with a list of problems calling for investigation.

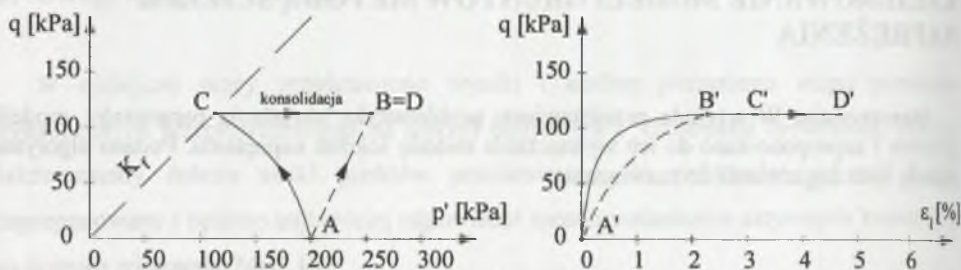
1. Wprowadzenie

W świadomości polskiego inżyniera pokutuje pogląd, że podstawowymi charakterystykami gruntu są spójność c , kąt tarcia wewnętrznego ϕ oraz moduł odkształcenia E . Wartości tych parametrów zwykle brane są z normy PN-81/B-03020, w której podane są jako wartości stałe, zależne jedynie od rodzaju i stanu gruntu. Dla gruntów spoistych prekonsolidacja uwzględniona jest wyłącznie poprzez podział na grupy A, B, C, D. Takie informacje o podłożu gruntowym są w dzisiejszej dobie niewystarczające.

Przed wszystkim mało kto pamięta, że wielkości c , ϕ i E nie opisują w sensie ilościowym rzeczywistego zachowania się gruntu, lecz są parametrami jednego z jego modeli konstytutywnych (sprężysto – idealnie plastycznego o stowarzyszonym prawie płynięcia z warunkiem granicznym Coulomba – Mohra lub Druckera – Pragera). Z założenia c , ϕ i E są więc stałymi materiałowymi. Doświadczenia dowodzą jednak czegoś zupełnie innego. Parametry zależą od historii obciążenia elementów masywu gruntowego, a więc pośrednio od warunków brzegowych i początkowych określonego zagadnienia geotechniki.

* Opiekun naukowy: Prof. zw. dr hab. inż. Maciej Gryczmański

Doskonałym przykładem jest zależność przedstawiona przez Lambe'a w badaniach iltu Lagunillas [1,2] - rys. 1. Próbka poddana szybkiemu obciążeniu w warunkach bez drenażu, a następnie konsolidacji odkształca się prawie dwukrotnie mniej niż po zadaniu prostej ścieżki naprężenia przy obciążaniu z drenażem. Styczny moduł odkształcenia E_0 , określający początkowe nachylenie krzywej $q - \varepsilon_1$, jest większy w wypadku ścieżki obciążeń bez drenażu (ACD) niż dla obciążenia z drenażem (AB).



Rys. 1. Odkształcenia pionowe w warunkach z drenażem (ścieżka AB) oraz bez drenażu (ścieżka ACD) w badaniach iltu Lagunillas [2]

Fig. 1. Vertical strain in drained conditions (AB path) and undrained conditions (ACD path) in Lagunillas clay testing [2]

Historia obciążenia, zarówno związana z dawnymi procesami geologicznymi, jak i współczesna wywołana działaniami inwestycyjnymi, jest inna w każdym punkcie masywu gruntowego. Efekt pierwszej rozważa się zwykle jako specyficzną niejednorodność – wzrost parametrów, zwłaszcza modułu E , z głębokością.

Grunt „pamięta” swoją historię, a konkretnie największe naprężenie, jakie wystąpiło w podłożu gruntowym. Jego wpływ uwidacznia się we współczynniku parcia gruntu w spoczynku K_0 , który dla gruntów prekonsolidowanych zależy jest od wartości współczynnika prekonsolidacji OCR. K_0 określa się w badaniach in situ, wyjątkowo przy braku takiej możliwości można szacować go analitycznie na podstawie wzorów zebranych np. w referacie [3]. Współczynnik K_0 , ciężary objętościowe gruntów nadkładu γ' oraz głębokość określają jednoznacznie początkowy stan naprężenia w danym punkcie.

Parametry wybranego modelu, tak jak historia naprężenia, będą zatem charakterystyczne tylko dla rozważanego punktu i dla konkretnych warunków brzegowych. Nie bez znaczenia będzie, jakie zadanie rozpatrujemy: czy będzie to fundament płytki, pale, czy ściana oporowa, i jaka głębokość zalegania warstwy słabej, skoro w każdym z tych wypadków rozkład naprężeń w procesie budowlanym będzie inny.

Wrażliwość gruntu na ścieżkę obciążenia wymaga takiego określania parametrów jego modeli, które by tę zależność uwzględniało. Warunki te spełnia znana metoda ścieżek naprężenia (MŚN) opracowana przez Lambe'a w roku 1967 [1,4]. W pierwotnej wersji służyła do bezpośredniego szacowania osiadań gruntu, może jednak być rozszerzona na estymację parametrów modeli konstytutywnych gruntu. Wykorzystanie MŚN do tego celu wymaga jednak jej unowocześnienia. Współcześnie stosuje się zmodernizowane aparaty trójosiowego ściskania oraz metodę elementów skończonych (MES), która pozwala na określenie naprężeń w dowolnym miejscu podłoża gruntowego przy zastosowaniu nie tylko modelu sprężystego stosowanego przez prekursora metody [5], ale również tych uwzględniających plastyczność. Dzięki zastosowaniu MES-u przy określaniu odpowiedzi gruntu na obciążenie uwzględniany jest także wpływ sztywności fundamentu.

2. Koncepcja kalibrowania modeli gruntów metodą ścieżek naprężenia

Ogólna idea wykorzystania metody polega na odtworzeniu w aparacie trójosiowego ściskania ścieżki naprężenia, w interesującym nas punkcie podłoża, na próbce gruntu, a następnie na jak najlepszym dopasowaniu krzywej odpowiedzi wyznaczonej analitycznie za pomocą przyjętego modelu konstytutywnego gruntu, do wyników badań w warunkach laboratoryjnych. Dopasowanie odbywa się poprzez dobór optymalnego zbioru parametrów modelu.

W literaturze dotyczącej podobnych zagadnień [6,7] wyznaczanie parametrów polega zwykle na wykonywaniu testów laboratoryjnych, symulujących proste ścieżki naprężenia, ukierunkowanych w stronę wyznaczenia pojedynczego parametru. Badania przeprowadza się przede wszystkim na próbkach o strukturze przerobionej, a więc pozbawionej historii obciążenia. Na przykład, jak podano w pracy [7], dla modelu NAHOS parametry λ i κ szacowano na podstawie hydrostatycznych testów ściskania i odprężania, parametry M i G – z badań ścinania bez drenażu z pomiarem ciśnienia wody w porach, natomiast C i μ – przy ścinaniu bez drenażu w zakresie wtórnego obciążenia.

Prezentowana koncepcja ma natomiast na celu poszukiwanie zbioru wartości wszystkich parametrów za pomocą analizy wstecznej, na podstawie odpowiedzi gruntu na jedną złożoną ścieżkę odwzorowującą w przybliżeniu zmiany naprężeń od obciążeń budowlanych, w danym punkcie. Wszystkie parametry będą określone dla konkretnych warunków brzegowych, przy uwzględnieniu historii gruntu i przebiegu jego obciążenia w czasie. Pozwoli to na bardziej

kompleksowe i wiarygodne scharakteryzowanie zachowania podłoża w konkretnym zagadnieniu.

Pierwszym zadaniem jest dokładne opisanie zadania brzegowego i wyznaczenie charakterystycznej dla niego ścieżki obciążeń, łącznie z określeniem stanu naprężeń pierwotnych, w rozpatrywanym punkcie podłoża. Wykonuje się to za pomocą programu komputerowego wykorzystującego MES.

Kolejnym krokiem jest możliwie najwierniejsze odwzorowanie uzyskanego przebiegu obciążeń w aparacie trójosiowego ściskania na próbce NNS pobranej *in situ* z danego punktu podłoża i odczytanie odpowiedzi gruntu na zadaną ścieżkę. Zadanie może być postawione wielorako. Jako obciążenia zadawane mogą być naprężenia lub odkształcenia, zwykle w postaci niezmienników: efektywnego naprężenia średniego p' i ścinającego q' :

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3), \quad q' = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

lub odkształcenia objętościowego ε_v i postaciowego ε_s :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \quad \varepsilon_s = \frac{\sqrt{2}}{3}[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Możemy więc mieć do czynienia ze ścieżką naprężeń lub ścieżką odkształceń.

Po wybraniu właściwego dla zagadnienia modelu konstytutywnego tworzona jest procedura analityczna, umożliwiająca generowanie wykresów podstawowych zależności: ścieżki naprężeń p' - q , charakterystyki ścinania q - ε_s , charakterystyki ściśliwości p' - ε_v i dylatacji ε_s - ε_v dla zadanych warunków wstępnych. Procedura ta dostosowana jest do warunków konwencjonalnego badania trójosiowego ($\delta\sigma'_2 = \delta\sigma'_3$, $\delta\varepsilon_2 = \delta\varepsilon_3$) i ma postać przyrostowych równań konstytutywnych:

$$\begin{aligned} \delta p' &= K^{ep} \delta \varepsilon_v + 3P^{ep} \delta \varepsilon_s, \\ \delta q' &= 3P^{ep} \delta \varepsilon_v + 3G^{ep} \delta \varepsilon_s, \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie K^{ep} , G^{ep} , P^{ep} są sprężysto - plastycznymi modułami ściśliwości, ścinania i sprężenia, będącymi jednocześnie funkcjami materiałowymi danego modelu konstytutywnego.

Po przekształceniu i scałkowaniu otrzymamy stąd wyrażenia, określające wartości odkształceń zależne od infinitesimalnych przyrostów niezmienników stanu naprężenia

$$\varepsilon_{s(v)} = \int f(\delta q', \delta p') \quad (4)$$

Następnie do programu zostają wprowadzone dane z testów laboratoryjnych, na podstawie których powstaje analogiczny zestaw wykresów. Poprzez zmianę parametrów wykresy analityczne są dopasowywane do krzywych otrzymanych z badań. Kalibrowanie

może odbywać się różnymi metodami analizy regresji [8], np.: najmniejszych kwadratów, największej wiarygodności, metodą Bayesa, metodą filtrowania Kalmana oraz przy użyciu różnych procedur bezpośredniego poszukiwania, jak simpleks, czy kompleks. Przy wyborze najprostszej chyba metody najmniejszych kwadratów kryterium optymalizacji może być minimum dystansu zmodyfikowanego współczynnika determinacji od jedności:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (s_i^E - s_i^T)^2}{\sum (s_i^T)^2 - \frac{(\sum s_i^T)^2}{n}} \quad (5)$$

gdzie: s_i^T , s_i^E są wartościami funkcji otrzymanymi odpowiednio z analizy teoretycznej i z eksperymentów, a n - liczbą rozpatrywanych punktów.

Jako wynik otrzymujemy zestaw parametrów, dla których analityczna krzywa odpowiedzi jest dostatecznie zgodna z tą otrzymaną z badań.

3. Algorytm postępowania

Poszczególne kroki metody kalibrowania modeli podłoża metodą ścieżek naprężenia przedstawiają się następująco:

1. określenie naprężeń pierwotnych w punkcie podłoża gruntowego,
2. skonstruowanie modelu MES podłoża z uwzględnieniem kolejnych etapów budowy,
3. wyznaczenie ścieżki naprężenia w charakterystycznym punkcie,
4. przygotowanie próbki NNS i przeprowadzenie badania w aparacie trójosiowego ściskania przy obciążeniach zgodnych z zadaną ścieżką naprężeń,
5. uzyskanie odpowiedzi gruntu na obciążenia w postaci wartości odkształceń i wykresów w przestrzeni naprężeń i odkształceń,
6. wprowadzenie do programu komputerowego równań konstytutywnych rozpatrywanego modelu gruntu dla założonych parametrów i przy wykorzystaniu wyników badań in situ, oraz wyznaczenie teoretycznych odpowiedzi gruntu,
7. dopasowanie krzywej analitycznej do laboratoryjnej poprzez zmianę parametrów,
8. zestawienie parametrów najlepiej przybliżających wyniki laboratoryjne.

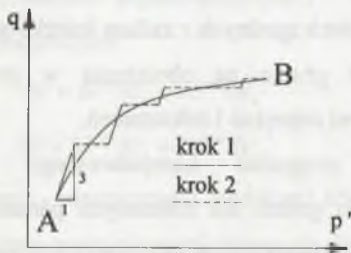
Jeżeli do wyznaczenia ścieżki obciążeń w programie MES wykorzystano taki sam model podłoża jak w pkt. 6, o założonych wstępnych parametrach, to po zakończeniu procesu kalibrowania wskazane byłoby wykonanie kolejnej iteracji. W krokach 1. i 2. należy wówczas przyjąć parametry zoptymalizowane.

4. Problemy do rozwiązania

Po wstępnej analizie opisanej metody kalibrowania modeli podłoża pojawiają się pewne zagadnienia wymagające dalszego opracowania oraz kwestie do rozwiązania, dotyczące przede wszystkim dokładności rozwiązań.

Jednym z problemów towarzyszących proponowanej koncepcji może być niedoskonałość sprzętu laboratoryjnego. Pomiar zachowania próbki w przestrzeni 3D możliwy jest w zasadzie tylko w prawdziwych aparatach trójosiowych [1], są one jednak jeszcze ciągle w fazie budowy i udoskonalania. W tradycyjnym AT próbki obciążane mogą być jedynie stanem naprężeń $\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3$. Ogranicza to więc w zasadzie badania do punktów w podłożu, gdzie kierunki naprężeń σ_v i σ_h są zgodne z naprężeniami głównymi. Taki stan występuje tylko dokładnie w osi fundamentu. W pozostałych miejscach należałoby pobrać próbki pod kątem zgodnym z naprężeniami głównymi, czego z uwagi na trudności techniczne nie wykonuje się. Pozostaje więc założenie, że naprężenia styczne są pomijalne.

Dodatkowo, w aparacie trójosiowego ściskania nie wyposażonym w system umożliwiający ciągłą komputerową realizację dowolnej ścieżki naprężenia obciążenia muszą być zwiększane stopniowo przy podziale zakresu naprężeń średnich w każdym kroku na n części. Wykorzystane mogą być ścieżki proste: standardowego ścinania o nachyleniu 1:3 oraz pozioma ścieżka hydrostatycznego ściskania. Ostatecznie uzyskuje się „zygzakowaty” przebieg naprężeń oplatający właściwą ścieżkę (rys. 2), co utrudnia otrzymanie krzywej odpowiadającej dokładnie założeniom pierwotnym.



Rys. 2. Przybliżenie przebiegu krzywoliniowej ścieżki naprężeń w czterech krokach z wykorzystaniem ścieżek prostych

Fig. 2. Approximation of stress path curve in four steps with use of straight paths

Dokładny pomiar odkształceń nie jest możliwy bez zestawu czułych wewnętrznych czujników do pomiaru odkształceń pionowych ϵ_z i poziomych $\epsilon_r = \epsilon_0$. Dla pominięcia efektu „beczki” należy wyeliminować także zjawisko tarcia na powierzchni tłoka, a odkształcenia

mierzyć w środkowej strefie próbki. Do uzyskania natomiast realistycznego przebiegu deformacji w zakresie małych odkształceń w aparacie trójosiowego ściskania powinien być dodatkowo zamontowany element typu *bender*, który uzupełnia zakres mierzonych lokalnie odkształceń o te mniejsze niż $1 \cdot 10^{-3} \%$.

Kolejnym zagadnieniem do rozwiązania są niedoskonałości programów służących do tworzenia modelu MES podłoża. Na przykład, w aplikacji Z_SOIL.PC 2005® 2D ver. 6.22 (demo dostępne na stronie www.zace.com) wartości parametrów określa się dla całej strefy materiałowej. W rzeczywistości, charakterystyki gruntu powinny być zmienne przynajmniej na głębokości. Rozwiązaniem problemu mogłoby być budowanie bardzo cienkich warstw elementów o różnych parametrach. Niestety, w większości programów wykorzystujących MES dla liczby stref materiałowych oraz elementów ustalony jest pewien górny limit. Skutkiem tych ograniczeń jest niedokładne określenie ścieżki naprężeń. Na wyniki nie mały wpływ ma również podział bryły podłoża na elementy skończone, należy więc zwracać szczególną uwagę na właściwy dobór kształtu elementów oraz zagęszczenie siatki bezpośrednio pod fundamentem i wszędzie tam, gdzie chcemy określić parametry.

Różnice w wartościach zestawu parametrów mogą być także skutkiem przyjętej ścieżki obciążenia – naprężeń efektywnych lub odkształceń.

Wreszcie, dokładność dopasowania parametrów będzie zależna od przyjętej metody kalibrowania modelu.

5. Uwagi końcowe

Przedstawiona w referacie koncepcja estymacji parametrów modeli gruntów dotyczy jedynie określenia charakterystyki modelu w konkretnym punkcie podłoża. W dalszych rozważaniach zagadnienie powinno być rozszerzone na całą bryłę gruntu w otoczeniu rozpatrywanego fundamentu. Powiązanie lokalnego i globalnego kalibrowania modeli konstytutywnych [8,9] może być osiągnięte np. dzięki powiązaniu badań trójosiowych metodą ścieżek naprężeń z badaniami *in situ*, takimi jak sondowania statyczne (CPTu, SCPTu), czy dylatometryczne DMT. Pozwolą one przede wszystkim na wiarygodne określenie stanu pierwotnego w gruncie. Otrzymany z sondowań pierwotny moduł odkształcenia E_0 lub G_0 oraz wytrzymałość gruntu bez drenażu s_u , określające zależność $\sigma - \epsilon$, dostarczą natomiast dodatkowych punktów charakterystycznych szukanej krzywej dopasowania. Z drugiej strony, wyniki badań laboratoryjnych mogą posłużyć do weryfikacji

wyników otrzymanych z CPTu oraz do kalibracji korelacji między pomiarami ze stożka a wynikami otrzymanych charakterystyk dla danego rodzaju gruntu.

W warstwach słabych natomiast wyniki otrzymane w punkcie przy użyciu MŚN ze względu na swoją precyzję mogą być dostatecznym źródłem danych.

Opisana metoda kalibracji modeli gruntów może być na tyle interesująca i przydatna dla zastosowań praktycznych, że wydaje się autorce, iż może być atrakcyjnym tematem rozprawy doktorskiej. Precyzyjne sformułowanie tematu wymaga jednak jeszcze głębszych studiów nad zagadnieniem.

LITERATURA

1. Gryczmański M.: Wprowadzenie do opisu sprężysto – plastycznych modeli gruntów, IKE, Warszawa 1995.
2. Lambe T.W.: Methods of estimating settlement, J. Soil Mech. Found., ASCE, 90, SM5, 1964, 43-67.
3. Gryczmański M.: Modele podłoża gruntowego stosowane w projektowaniu, XX Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła – Ustroń 2005.
4. Lambe T.W.: The stress path method, J. Soil Mech. Found., ASCE 93 SM6, 1967, 309-331.
5. Lambe T.W., Whitman R.V.: Mechanika gruntów, Arkady, Warszawa 1977.
6. Jastrzębska M.: Kalibrowanie i weryfikacja jednopowierzchniowego sprężysto – plastycznego modelu gruntu o silnie nieliniowym wzmocnieniu anizotropowym; rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2002.
7. Jastrzębska M., Łupieżowiec M.: Estymacja parametrów pola modułu wzmocnienia w obszarze prekonsolidacji, XIV Konf. Nauk., Korbielów 2002.
8. Gryczmański M.: Podstawy teoretyczne geotechniki, XI KKMGiF, Gdańsk 1997.
9. Gryczmański M.: O kalibrowaniu modeli konstytutywnych gruntów, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Budownictwo z. 80, 1995.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Młynarek