ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2007
Seria: BUDOWNICTWO z. 111 Nr kol. 1756

Jacek PIECZYRAK

Katedra Geotechniki
Politechnika Śląska

IDENTYFIKACJA PARAMETRYCZNA MODELI GRUNTÓW

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób określania parametrów przyjętego modelu gruntu, na podstawie wyników próbnego obciążenia gruntu fundamentem (symulującego konkretne zadanie geotechniczne). Parametry te wyrażają obiektywną odpowiedź gruntu (nie są obciążone systematycznymi niepewnościami pomiarowymi), właściwą dla rozważanego zadania. Warunkiem jest tu użycie komputera i programu mającego aplikację danego modelu gruntu.

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF SOILS MODELS

Summary. In the paper the method of parameters estimation of the soil model on the basis of trial tests is presented. The trial tests are carried out for the foundation which simulate the specific geotechnical task. These parameters give the answer for the soil behaviour. They are not under the uncertain measurements. Using the computer with the application of the selected soil model is the condition for the parametric identification.

1. Wprowadzenie

Projektowanie geotechniczne wymaga przyjęcia modelu gruntu, a następnie określenia jego parametrów (Gryczmański, 2005). Dążność do uzyskania dokładniejszego opisu gruntu prowadzi do nowych, bardziej złożonych, jego modeli. Jednakże nawet najbardziej wyrafinowany model może okazać się mało przydatny, o ile jego parametry nie będą odzwierciedlały natury modelowanego gruntu. Tak więc wartości parametrów geotechnicznych (parametrów modelu) przyjmowanych do projektowania geotechnicznego nabierają istotnego znaczenia.

W najczęstszym użyciu jest model sprężysto-idealne plastyczny z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra (zwykle skrótowo nazywany modelem Coulomba-Mohra). Jest to dość prosty model, którego parametry nie tylko są „łatwo" wyobrażalne przez projektanta, ale jest on z nimi dobrze „oswojony". Kąt tarcia wewnętrznego ϕ i spójność c są

parametrami oporu gruntu na ścinanie. Wyznaczamy je w aparacie bezpośredniego ścinania lub w aparacie trójosiowego ściskania. Oba aparaty stanowią podstawowe wyposażenie standardowych laboratoriów geotechnicznych. Pozostałe dwa parametry modelu, moduł odkształcenia E_o i współczynnik Poissona ν, są parametrami odkształcenia gruntu. W zastosowaniach praktycznych, z powodu trudności określenia współczynnika Poissona (rozszerzalności bocznej), posługujemy się edometrycznym modułem odkształcenia M_o, który związany jest z modułem odkształcenia E_o i współczynnikiem Poissona ν następującą relacją:

$$Eo=\delta Mo\,, \tag{1}$$

gdzie

$$\delta=\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}, \tag{2}$$

$$\nu=\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}. \tag{3}$$

Edometryczny moduł odkształcenia gruntu wyznaczamy w edometrze. Na przykładzie tego parametru warto zwrócić uwagę na relację miedzy warunkami badań a warunkami pracy ośrodka gruntowego. Otóż, w edometrze mamy trójosiowy stan naprężenia i jednoosiowy stan odkształcenia. Tymczasem grunt w podłożu fundamentu poddany jest trójosiowemu stanowi naprężenia i podlega trójosiowemu stanowi odkształcenia. W efekcie, edometryczny moduł odkształcenia gruntu jest zdeformowanym modułem odkształcenia. Deformacje powoduje błąd systematyczny, wynikający z warunków badań, które nie są adekwatne do rzeczywistej pracy gruntu obciążonego fundamentem.

Notabene każde badanie laboratoryjne obarczone jest błędem systematycznym, bowiem żaden aparat nie jest w stanie wiernie odzwierciedlić rzeczywistych warunków pracy gruntu w podłożu, ogólnie rozumianego fundamentu.

Z rzeczywistymi warunkami pracy gruntu mamy do czynienia tylko w przypadku rzeczywistych fundamentów. Ponieważ realizacja badań w skali 1:1 nie jest możliwa, zarówno ze względów technicznych, jak i ekonomicznych, staramy się tak zmniejszyć fundament, aby zachować dużą skalę badań. W ten sposób dochodzimy do badań, zwanych próbnymi obciążeniami.

2. Próbne obciążenia gruntu

Zachowanie gruntu (odpowiedź na obciążenie fundamentem) zależy od ścieżki obciążenia. W badaniach próbnego obciążenia dość łatwo można zrealizować właściwą ścieżkę obciążenia. Ponadto, tutaj nie obciążamy próbki gruntu, wyciętej z masywu i odprężonej, lecz

cały masyw in situ, który uczestniczy w przejmowaniu przykładanych doń obciążeń. Tak więc wynik próbnego obciążenia jest najbardziej obiektywną odpowiedzią gruntu (Pieczyrak, 1997, 1998, 2000). Niestety, jest to odpowiedź globalna, niepozwalająca na proste odczytanie parametrów geotechnicznych.

Jedynie pale fundamentowe i barety badamy w pełnej skali. Przy znacznych obciążeniach oprócz czterech pali kotwiących niezbędny jest balast (rys. 1). Na rys. 2 pokazane jest próbne obciążenie barety.

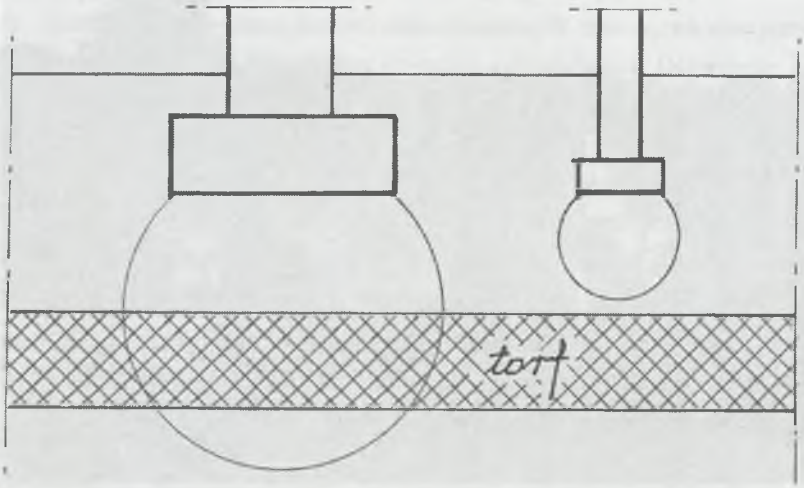
Pozostałe fundamenty, ze względów oczywistych, badamy w skali nieco zmniejszonej. Stopień zmniejszenia zawsze jest kompromisem, uległością wobec ograniczeń wynikających zarówno z praktycznych, jak i finansowych możliwości wykonania badania.

Projektując próbne obciążenie gruntu, należy pamiętać o następujących kardynalnych zasadach.

- Na zmniejszenie skali fundamentu bardziej możemy sobie pozwolić w przypadku podłoża jednorodnego. Jeśli podłoże jest uwarstwione, to przy zbyt dużym zmniejszeniu wymiarów fundamentu, wynik badania nie będzie uwzględniał wpływu warstwy, która znajdzie się poniżej oddziaływań tego fundamentu (rys. 3).

Rys. 1. Wykorzystanie balastu w badaniach próbnego obciążenia pali
Fig. 1. Using ballast in the trial loading tests for the piles

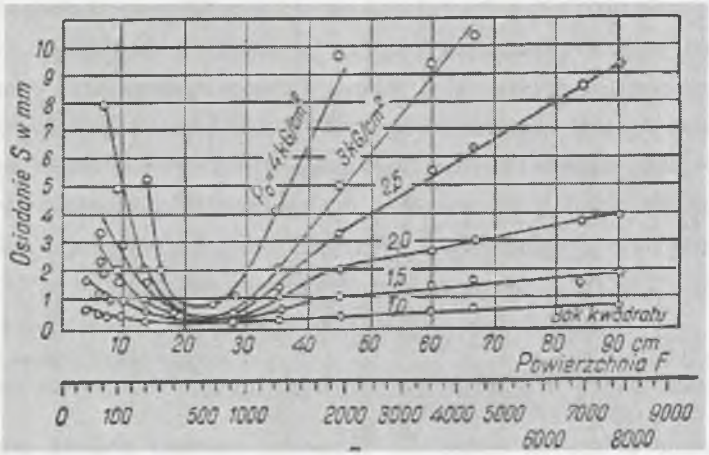
Rys. 2. Próbne obciążenie barety
Fig. 2. Trial loads of baret



Rys. 3. Wpływ szerokości fundamentu na rozmiary strefy pracującego gruntu
Fig. 3. Influence of the width of foundation on the size of the subsoil working area

- Dla stałej wartości obciążenia (p_o=const) osiadania fundamentu najpierw maleją, a następnie rosną (rys. 4). Dla większych wartości obciążenia p_o obserwujemy intensywniejszy wzrost osiadań fundamentu wraz ze wzrostem jego wymiarów podstawy.

Dla mniejszych wartości obciążenia p_o wzrost ten jest mniej intensywny i wcześniej obserwujemy stabilizację osiadań (osiadania wyraźniej dążą do asymptoty poziomej).



Rys. 4. Wyniki badań Pressa (Cytowicz, 1958)
Fig. 4. Tests results of Press (Cytowicz, 1958)

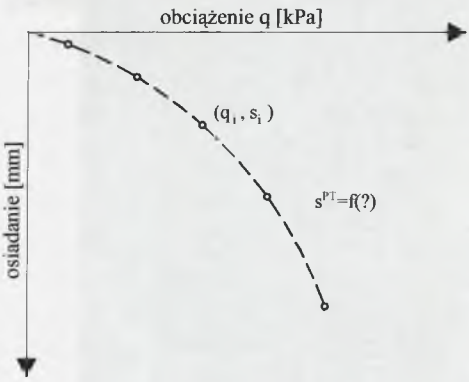
Istota próbnych obciążeń polega na zbudowaniu fizycznego modelu fundamentu (obiektu) i posadowienia go w sposób przewidywany dla fundamentu (obiektu) rzeczywistego. Tak więc model fundamentu powinien być sztywny, mieć właściwy kształt podstawy i być odpowiednio zagłębiony.

W praktyce, stosowane są dwa sposoby przykładania obciążenia. Najczęściej stosowany sposób (bo najłatwiejszy w realizacji) nazywany jest metodą stałych stopni obciążenia. Wartości kolejno przykładanych stopni obciążenia nie muszą być równe. Ważne natomiast jest, aby pod stałą wartością danego stopnia obciążenia nastąpiła „pełna konsolidacja" podłoża gruntowego stempla (fundamentu). Zwykle wprowadza się arbitralne ograniczenie prędkości osiadań tego stempla w postaci:

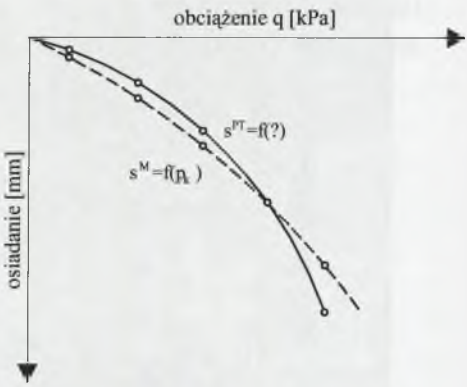
$$\dot{s} \leq V . \tag{4}$$

W ten sam sposób przykłada się drugi i kolejne stopnie obciążenia. Czym większa liczba stopni obciążenia, tym dokładniejszy uzyskujemy przebieg krzywej doświadczalnej q^D-s^D (rys. 5). Zwykle stosuje się 10÷15 stopni obciążenia, przy czym większą liczbę stopni należy stosować w przypadku obciążania podłoża spoistego.

Krzywa doświadczalna q^D-s^D określa wartości spodziewanych osiadań w funkcji nieznanych parametrów geotechnicznych s^{PT}=f(?), natomiast krzywa teoretyczna wyraża osiadania w funkcji już zidentyfikowanego wektora parametrów modelu s^M=f(p_k) (rys. 6).



Rys. 5. Krzywa doświadczalna q^D-s^D
Fig. 5. Experimental curve q^D-s^D



Rys. 6. Krzywa doświadczalna i teoretyczna
Fig. 6. Experimental and theoretical curves

Pełne badanie polega na osiągnięciu granicznej nośności podłoża gruntowego q_{gr}. Niestety, ze względu na trudności techniczne, nie zawsze okazuje się to możliwe (Pieczyrak, 1997).

Drugi, rzadziej stosowany, sposób polega na obciążaniu podłoża gruntowego ze stałą prędkością odkształcenia. Prędkość odkształcenia powinna być tak dobrana, aby była mniejsza od prędkości filtracji. Czym ta prędkość będzie mniejsza, tym w mniejszym stopniu objawi się wartość ciśnienie wody w porach gruntu.

3. Identyfikacja parametrów geotechnicznych

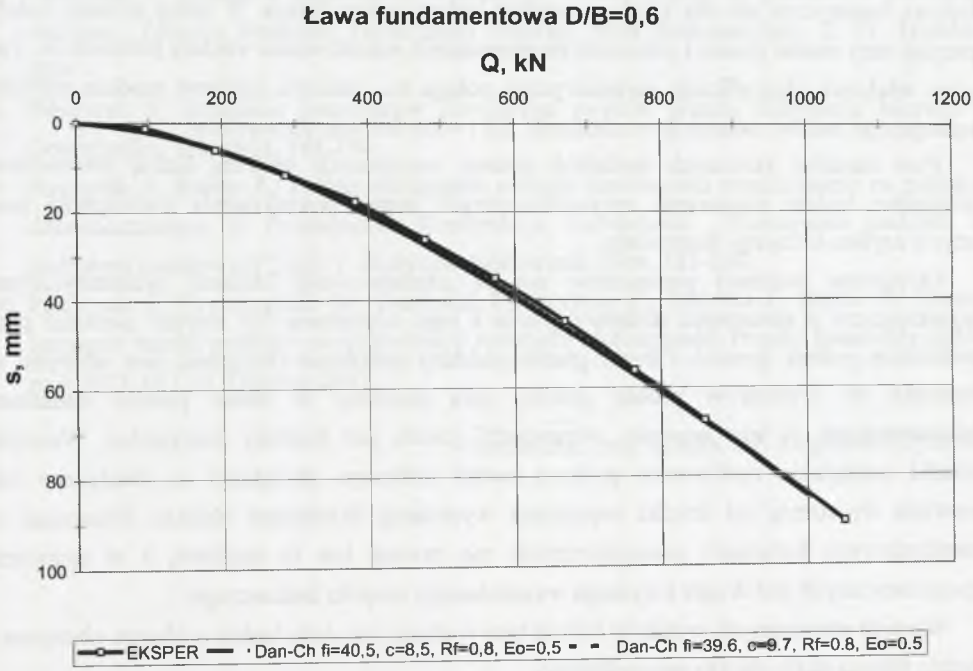
Poszukiwane przez nas parametry modelu gruntu wyrażone są, w sposób uwikłany, poprzez krzywą doświadczalna q^D-s^D. Tak więc występują one tutaj nie w opisujących go związkach „naprężenie – odkształcenie" w punkcie masywu gruntowego, lecz w krzywej budowanej z wyników rozwiązania zagadnienia brzegowego dla układu „fundament – podłoże". Aby ustalić ich wartości, należy rozwiązać zadanie odwrotne (Pieczyrak, 2001, 2003). Wraz z liczbą parametrów modelu gruntu rośnie rachunkowa trudność tego zadania. Jednakże niezależnie od liczby parametrów zawsze będziemy musieli korzystać z pomocy komputera. Przy większej liczbie parametrów czas obliczeń będzie się wydłużał. Po za tym, gdy liczba parametrów jest niewielka (nie przekracza pięciu), można stosować heurystyczną metodę poszukiwań. Natomiast przy większej liczbie parametrów niezbędne będzie stosowanie metod programowania matematycznego, np. metody optymalizacji Boxa (Box, 1965).

W praktyce, nie tyle rozwiązuje się zadanie odwrotne, co wielokrotnie powtarza się analizę klasyczną. Przyjmuje się wektor parametrów p_k i dla niego określa się przebieg

krzywej teoretycznej q^T-s^T. Metodą prób i błędów (podejście heurystyczne) tak dobiera się kolejne wartości wektora parametrów modelu gruntu, aż uzyska się krzywą teoretyczną q^T-s^T, która możliwie dokładnie aproksymuje krzywą doświadczalną q^D-s^D (rys. 6).

Parametry, dla których uzyskano tę najlepiej dopasowaną krzywą teoretyczną, są poszukiwanymi parametrami modelu gruntu. W przypadku stosowania metod optymalizacyjnych droga poszukiwania rozwiązania jest określona strategią danej metody.

Na rys. 7 przedstawiono wynik ustaleń Renkego (Pieczyrak i Renke, 2004; Pieczyrak i in., 2007). Badania próbnego obciążenia gruntu wykonano na poletku doświadczalnym, w podłożu którego występowała jednorodna warstwa średniozagęszczonego piasku średniego o miąższości 3,7 m. Modelem fundamentu była ława fundamentowa (L=2,236 m, B=0,447 m, α=5, A=L·B=1 m^2) posadowiona na głębokości D=0,268 m (D/B=0,6).



Rys. 7. Krzywa doświadczalna i aproksymujące je krzywe teoretyczne
Fig. 7. Experimental curve and its approximating theoretical curves

Stworzony do obliczeń w programie Z_Soil geometryczny model gruntu wraz z fundamentem składał się z 1700 elementów i 2174 węzłów.

Wyniki symulacji MES sprzężonej z analizą wsteczną dla wykonanych doświadczeń badania próbnego obciążenia pokazały niedoskonałości wstępnie przyjętego modelu obliczeniowego Druckera – Pragera (D-P). Bardziej odpowiednim modelem gruntu okazał się tu model Duncana – Changa (D-C). Przedstawione na rys. 7 dopasowanie krzywej

teoretycznej do krzywej doświadczalnej można uznać za wystarczająco dokładne. Warto zauważyć, że uzyskano dwa, nieco różniące się, wektory parametrów dających bardzo podobne dopasowanie obu krzywych teoretycznych do krzywej doświadczalnej. Spostrzeżenie to świadczy o możliwym marginesie niejednoznaczności oznaczeń wektora parametrów modelu.

4. Podsumowanie

Dysponując wynikami badań próbnego obciążenia $\left(q_i^D, s_i^D\right)$, symulującego zadanie geotechniczne, można określić parametry dowolnego modelu gruntu. Jednakże należy zdawać sobie sprawę, że niedoskonałości modelu sprawiają, że aproksymacja krzywej doświadczalnej krzywą teoretyczną nie dla każdego modelu będzie zadowalająca. W takiej sytuacji należy przyjąć inny model gruntu i ponownie przeprowadzić poszukiwania wektora parametrów. Tak więc właściwa identyfikacja parametryczna polega na ustaleniu zarówno modelu najlepiej opisującego badane zadanie geotechniczne, jak i wartości jego parametrów.

Przy bardziej złożonych modelach gruntu, wyrażonych większą liczbą parametrów, niezbędne będzie stosowanie optymalizacyjnych metod poszukiwania rozwiązania oraz użycie szybko liczącego komputera.

Otrzymane wartości parametrów nie są zdeformowane błędami systematycznymi wynikającymi z naruszenia struktury gruntu i jego odprężenia (co zawsze zachodzi przy pobieraniu próbek gruntu). Obszar gruntu poddany próbnemu obciążeniu jest olbrzymi w stosunku do wymiarów próbki gruntu, jaką jesteśmy w stanie poddać badaniom laboratoryjnym. Z tego powodu „odpowiedź" gruntu jest bardziej wiarygodna. Wreszcie ścieżki naprężenia realizowane podczas badań próbnego obciążenia są identyczne lub niewiele się różnią od ścieżki naprężenia wywołanej działaniem obiektu. Natomiast w standardowych badaniach geotechnicznych nie zawsze jest to możliwe, a w aparatach specjalistycznych jest drogie i wymaga wyszkolonego zespołu badawczego.

Wartość otrzymanych wyników będzie tym większa, im skala badań próbnego obciążenia będzie bliższa skali obiektu rzeczywistego.

Przy dzisiejszej dostępności do szybko liczących komputerów cała trudność zadania sprowadza się do wykonania rzetelnych badań próbnego obciążenia.

Literatura

1. Box M.J.:: A new method of constrained optimization and comparison with other methods. The Comp. Journal, 8, 1965, 42-52.
2. Cytowicz N. A.: Mechanika gruntów. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1958.

3. Gryczmański M.: Modele podłoża gruntowego stosowane w projektowaniu. XX Jubileuszowa Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. Wisła-Ustroń. Tom I, 2005, 159-208.
4. Pieczyrak J.: Problemy wyznaczania parametrów geotechnicznych na podstawie próbnych obciążeń. XI Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Geotechnika w budownictwie i transporcie. T. II. Gdańsk 1997, 127-131.
5. Pieczyrak J.: Parametry podłoża gruntowego fundamentów ustalane na podstawie wyników próbnego obciążenia. I Problemowa Konferencja Geotechniki pt. Współpraca budowli z podłożem gruntowym". Białystok – Wigry 1998, 253-259.
6. Pieczyrak J.: Trial soil loading as the method of evaluating its model parameters. Studia Geotechnica et Mechanica. Vol. XXII, No 3-4, 2000, 73-93.
7. Pieczyrak J.: Ustalanie parametrów wybranych modeli gruntu na podstawie próbnych obciążeń. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Budownictwo, Z. 91, Gliwice 2001.
8. Pieczyrak J.: Ustalanie parametrów dowolnego modelu gruntu. Inżynieria Morska i Geotechnika, 3/4, 2003, 181-184.
9. Pieczyrak J., Renke P.: Próbne obciążenie modelu fundamentu zrealizowane na poletku doświadczalnym. II Problemowa Konferencja Geotechniki „Współpraca budowli z podłożem gruntowym", tom 1. Białystok-Białowieża 2004, 181-190.
10. Pieczyrak J., Gryczmański M., Dembicki E., Szypcio Z., Bzówka J., Renke P.: Prosty sprężysty model podłoża uwzględniający sprężystą nieliniowość. Projekt badawczy KBN nr 5 T07E 017 25. Gliwice 2007.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Młynarek