ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: BUDOWNICTWO z. 97 Nr kol. 1573

Lidia FEDOROWICZ, Jan FEDOROWICZ
Politechnika Śląska

ADEKWATNOŚĆ NUMERYCZNYCH MODELI OBLICZENIOWYCH KONSTRUKCJA-PODŁOŻE GRUNTOWE

Streszczenie. W zagadnieniu kontaktowym fundament-podłoże przedstawiono efekt nieliniowej pracy materiału w przestrzeni niezmienników (p,q,Θ) oraz funkcje zmian osiadań przy zmianie wymiarów fundamentu.

ADEQUACY OF THE NUMERICAL MODELS FOR BUILDING STRUCTURE-SUBSOIL

Summary. For subsoil-foundation contact the boundary value task effects of the nonlinear material behaviour in (p,q,Θ) space have been presented as well as settlement functions which change with the foundation sizes.

1. Wprowadzenie

Pomimo wielu sposobów interpretowania odpowiedzi podłoża gruntowego na przyłożone obciążenie uznaje się, że najbardziej efektywne oparte są na pojęciach sprężysto-plastyczności w połączeniu z pojęciem tzw. powierzchni stanu (State Boundary Surface) w przestrzeni naprężeń rozdzielającej rzeczywiste stany gruntów – prekonsolidacji (OC) pod powierzchnią od stanu normalnej konsolidacji (NC) realizowanej przez ścieżki naprężeń na powierzchni SBS [1].

Wrażliwość podłoża na ścieżki obciążeń wynikające z działania konstrukcji może dla pewnych gruntów okazywać się na tyle znacząca, że uwzględnienie rzeczywistej sztywności konstrukcji w analizach obliczeniowych potrafi radykalnie zmienić odpowiedź podłoża gruntowego na przyłożone obciążenie [2]. Rozwiązanie zagadnień brzegowych – konstrukcja współpracująca z podłożem – możliwe dzięki metodom numerycznym, realizującym

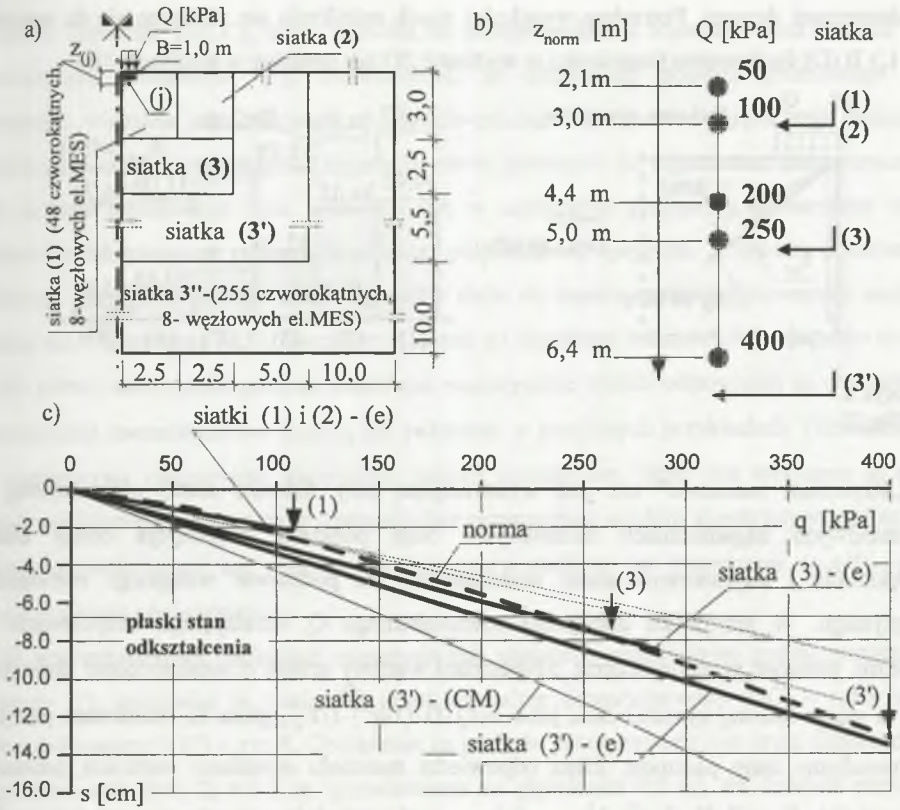
rozbudowane modele konstytutywnego opisu zachowania obu podukładów, ciągle nie znajduje jednak powszechnego inżynierskiego zastosowania. Można to, zapewne, przypisać dużemu poziomowi niepewności związanemu zarówno z oceną adekwatności modelu obliczeniowego zastosowanego dla danego zadania, jak i doborem odpowiednich parametrów modelu.

Zdawać należy sobie sprawę z tego, że inżynier rozbudowując nawet swój warsztat obliczeniowy będzie dążył w analizach układu konstrukcja-podłoże do wprowadzenia wszelkich możliwych uproszczeń. W pracy przedstawiono zatem propozycję oceny adekwatności obliczeń zadania kontaktowego poprzez wstępne numeryczne rozpoznanie zachowania podłoża pod przewidywanym obciążeniem.

Proponowaną analizę można w prostszych przypadkach potraktować jako wystarczającą ocenę zachowania układu konstrukcja (sprowadzona do fundamentu) – podłoże gruntowe, a w bardziej złożonych jako postępowanie wstępne, ułatwiające zbudowanie racjonalnego, numerycznego układu obliczeniowego: rzeczywista konstrukcja współpracująca z podłożem gruntowym, opisanym odpowiednim modelem konstytutywnym.

2. Sposoby oceny dokładności obliczeń wykonanych na dobranej siatce numerycznej

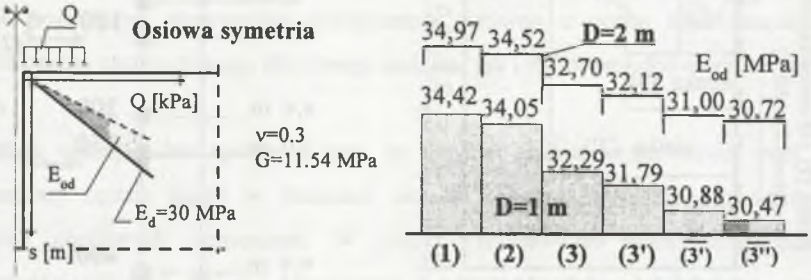
Efekt zwiększenia dokładności obliczeń wraz z odpowiednim zagęszczeniem siatki dyskretnej jest zjawiskiem oczywistym dla użytkowników metod numerycznych. Przyjęcie jednakże obszaru badawczego w modelu podłoża gruntowego, jeżeli warunki brzegowe (dolnego brzegu siatki) nie są ukształtowane w sposób naturalny poprzez nieodkształcalną warstwę gruntu, wpływa w różnym stopniu na ocenę osiadań podłoża. Zależne to jest od rodzaju zagadnienia - przestrzennego lub płaskiego, wymiarów powierzchni obciążanej oraz wartości obciążenia. Godzenie się z oczywistością tego zjawiska nie powinno nas jednak zwalniać z przeprowadzenia wstępnej analizy jego wpływu na poszukiwane rozwiązanie.



Rys. 1.
Fig. 1.

Na rys.1 pokazano efekty zastosowania „kryterium normowego" doboru wymiarów siatki (dla np. numerycznej oceny osiadań fundamentów) wg zalecenia uwzględniania odpowiedniej głębokości przy obliczaniu osiadań $\sigma_{z_{\max} d} \leq 0{,}3 \cdot \sigma_{z_{\max} \rho}$. Dla obciążenia przekazywanego przez fundament sztywny o szerokości B=1 m (posadowiony na głębokości 0,5 m) zestawiono wykresy osiadań dla kolejno rozbudowywanych siatek dyskretnych (rys.1a). Obliczenia przeprowadzono dla modeli: sprężystego (e) oraz Coulomba-Mohra (C-M). Na uwagę zasługuje dość dobra zgodność osiadań normowych oraz wartości numerycznych osiadań końcowych (w modelach (e)) w siatkach o odpowiednio dobranych wysokościach – oznaczenie strzałkami na rys.1c. Oceny w stanie 2D nie można przenieść automatycznie do stanu 3D z uwagi na silne zróżnicowanie potrzebnych wysokości siatek dla obu stanów obliczeniowych. Trudności pojawiające się w ocenie adekwatności obszaru siatki obliczeniowej w numerycznych zadaniach kontaktowych z małym fundamentem – B lub (D)<10 m w analizach 2D lub 3D - zmniejszają się znacznie przy wyznaczaniu osiadań pod

fundamentami dużymi. Potrzebne wysokości siatek stabilizują się zbliżając się do wartości ok. 1,5 B (D) fundamentu (szerokości w analizach 2D lub średnicy w analizach 3D).



Rys. 2.
Fig. 2.

„Kryterium normowe" nie jest wystarczające przy doborze siatki obliczeniowej w kontaktowych zagadnieniach badawczych. Stąd poniższa propozycja oceny efektu zwiększania i zagęszczania siatki obliczeniowej na podstawie wstępnego rozwiązania sprężystego. W przypadku obciążenia równomiernego Q, działającego bezpośrednio na podłoże, pionowe przemieszczenie powierzchni warstwy gruntu o nieskończonej głębokości jest w stanie osiowej symetrii dane jako $s=Q\cdot D\cdot(1-\nu^2)\cdot 1/E_d$, gdzie E_d traktowane jest jako wprowadzany dany parametr. Efekt odpowiedzi materiału określono wartością parametru odpowiedzi $E_{od}=Q\cdot D\cdot(1-\nu^2)\cdot 1/s_n$, gdzie s_n jest wartością numeryczną osiadań punktu środkowego obciążanej powierzchni. Efekt zastosowania „kryterium odpowiedzi materiału" dla siatek z rys.1a oraz siatek zagęszczonych dodatkowo pod obciążeniem $((\overline{3}'),(\overline{3}''))$ pokazano na rys.2.

3. Zadanie kontaktowe konstrukcja-podłoże gruntowe

Rozważymy dwa problemy:

1) współpracę podłoża normalnie skonsolidowanego (NC) i prekonsolidowanego (OC) z konstrukcją sprowadzoną do fundamentu o zmieniających się wymiarach – śledząc efekt zesztywnienia, czyli zwiększenia sztywności podłoża pod fundamentem w miarę jego poszerzania,
2) efekt niesprężystej pracy gruntu w modelu numerycznym.

Poniższe analizy stanowią badanie odpowiedzi układu fundament-podłoże w modelu

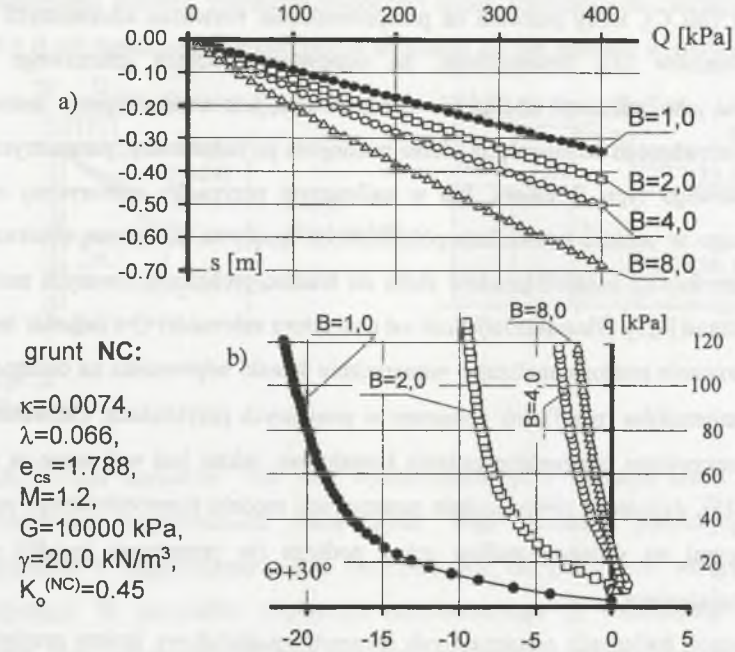
Modified Cam-clay (MCC), który pozwala na przeprowadzenie rozważań adekwatnych do postawionych problemów [3]. Stwierdzenie, że odpowiedź podłoża gruntowego na obciążenie, widziana jako zależność obciążenie-osiadanie Q-s, jest w przybliżeniu liniowa, skłania inżyniera budowlanego do sięgnięcia nieraz pochopnie po najprostszy, parametryczny opis podłoża gruntowego typu Winklera, lub w najlepszym przypadku numeryczny opis zadania kontaktowego w postaci konstrukcja-półprzestrzeń sprężysta. Z opisem obserwacji liniowego charakteru funkcji osiadań gruntów słabo do średnio prekonsolidowanych można spotkać się w literaturze [4,5]. Niezależnie jednak od charakteru zależności Q-s inżynier może ocenić pełniej zachowanie podłoża analizując numerycznie ścieżki odpowiedzi na obciążenie w przestrzeni niezmienników (p,q,θ), jak pokazano w poniższych przykładach. Odtwarzając np. numerycznie rzeczywiste, szczególne zadanie kontaktowe, jakim jest wykonane in situ próbne obciążenie [6], dysponuje równocześnie parametrami modelu konstytutywnego opisu gruntu, pozwalającymi na wstępną analizę pracy podłoża (w przestrzeni (p,q,θ)) pod przewidywanym obciążeniem.

W przedstawionych badaniach numerycznych parametry materiałowe gruntu przyjęto z literatury [7], analizując w stanie 2D grunt normalnie skonsolidowany (NC) – rys.3 oraz prekonsolidowany (OC) – rys.4. Obciążenie na podłoże przekazywane jest przez fundamenty o szerokościach B=1, 2, 4 i 8 m (posadowione na głębokości 0,5 m), dla których przyjęto $E=27\cdot10^3$MPa, $\nu=0{,}17$. Odpowiedź podłoża analizowano w punkcie (j) pod środkiem fundamentu ($z_{(j)}=0{,}75$ m).

Dla gruntu (OC) przyjęto przeciążenie gruntu w przeszłości $q^{*}=15\theta$ kPa, OCR malejące z głębokością, co daje zmianę współczynnika parcia geostatycznego $K_0^{(OC)}$, który wyznaczono wg Wrotha [8] i podano na rys.4d.

Ocena nieliniowej odpowiedzi gruntu (NC) na obciążenie w punkcie (j):

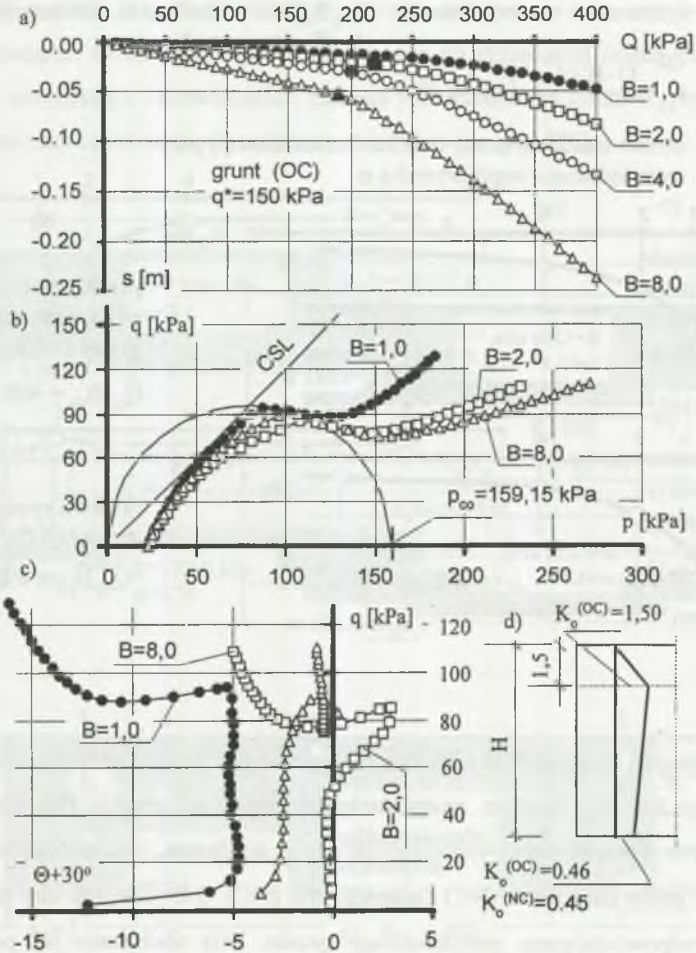
1. Przy pozornej liniowości wykresów $Q\text{-}s_{(j)}$ (rys.3a) zjawisko nieliniowości można ocenić poprzez badanie zmian ich nachyleń (opisane np. jako zmiany nachyleń siecznych), zdecydowanie różnych od otrzymywanych w liniowej sprężystości; dalsza analiza na rys.5.
2. Poprzez zrzutowanie ścieżek naprężeń, odpowiadających punktowi (j) i opisanych w przestrzeni (p,q,θ), na płaszczyznę dewiatorową (rys.3b) – uwidacznia się nieliniowość przyrostów wartości intensywności naprężenia ($dq_{(j)}$) w stosunku do przyrostów obciążenia (dQ).



Rys. 3.
Fig. 3.

Dla gruntów (OC) powyższe uwagi zachowują ważność z zastrzeżeniem, że:

1. Pozorną liniowość wykresów Q-$s_{(j)}$ obserwuje się aż do wejścia analizowanych ścieżek naprężeń na powierzchnię plastyczności (wyróżnione punkty na wykresach Q-$s_{(j)}$ – rys.4a). Na rys.4b, w układzie p-q zakreślono pierwszą powierzchnię plastyczności, odpowiadającą wyznaczonemu ciśnieniu prekonsolidacji p_{co}=159,15 kPa.
2. Wykresy na płaszczyźnie dewiatorowej rozdzielają się na dwie części, odpowiadające stanom: prekonsolidacji oraz normalnej konsolidacji podłoża.



Rys. 4.
Fig. 4.

4. Analizy podsumowujące – wnioski

Praktyka inżynierska wskazuje, że osiadania fundamentów o znacznych wymiarach są nieraz znacząco mniejsze od ich przewidywanych obliczeniowo wartości [9].

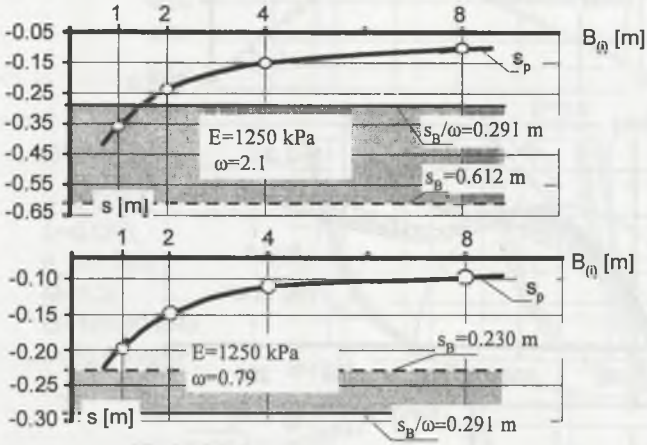
Porównania wartości osiadań fundamentów, określonych klasycznie wg Boussinesqa, z wartościami otrzymanymi jako numeryczna realizacja zagadnienia kontaktowego fundament (o określonej sztywności, modelowany liniowo-sprężyście) – podłoże, realizowane modelem obejmującym rzeczywiste zjawiska gruntowe (znaczące dla odpowiedzi podłoża na przyłożone obciążenie) potwierdzają powyższe stwierdzenie – rys.5 i 6.

Osiadania s_p wyznaczone numerycznie dla: $Q_{(i)} \cdot B_{(i)}$=const (na 1 m dł. fundamentu), $L_{(i)}/B_{(i)}$=const=10

s_p

$s_B = \frac{Q \cdot B \cdot (1-\nu^2)}{E} \cdot \omega$, ν=0.3

obszar możliwej oceny osiadań fundamentu (i) przy uwzględnieniu współczynnika ω



a)

płaski stan odkształcenia, grunt (NC):

$Q_{(i)} B_{(i)} = 400$

b)

osiowa symetria, grunt (NC)

$Q_{(i)} D_{(i)} = 400$

Rys. 5.
Fig. 5.

Przedstawione zależności zbudowano (na podstawie wcześniejszych analiz zachowania gruntu – rys.3 i 4), zgodnie z opisem załączonym na rys.5a. Porównano osiadania analizowanych fundamentów współpracujących z podłożem, dla obciążenia całkowitego Q·B=const., gdzie dla gruntu (NC) Q·B=400, dla (OC) Q·B=200, tak aby nie przekroczyć obciążenia odpowiadającego prekonsolidacji gruntu. Przy obciążeniu jak powyżej analizę uzupełniono zadaniem kontaktowym w stanie osiowej symetrii: fundament o zmieniającej się średnicy (D), podłoże (NC) – rys.5b, podłoże (OC) – rys.6b. Moduły sprężystości E, dla oceny osiadań wg Boussinesqa, określono jako tangens pochyleń początkowych (dQ/ds.) odpowiednich krzywych numerycznych Q-$s_{(i)}$ w stanie osiowej symetrii (przy obciążeniu przekazywanym bezpośrednio na podłoże i D=0,3 m).

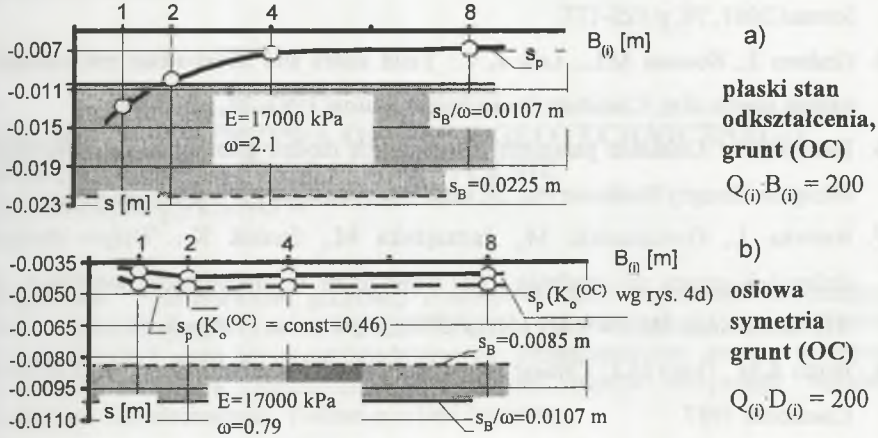
Efekt zagadnienia kontaktowego, czyli włączania się konstrukcji do współpracy z podłożem w stopniu zależnym od rzeczywistych wymiarów (i sztywności) przedstawiony na rysunkach 5 i 6 uwidacznia się oczywiście także w zagadnieniach liniowej sprężystości (rys.7).

Obserwujemy jednak, że:

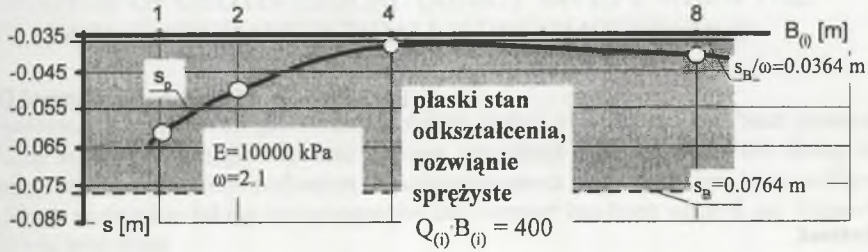
- Rozwiązywanie zadania kontaktowego przy podłożu słabym, modelowanym liniowo

sprężyście (w analizie przyjęto E=10 MPa) jest mało efektywne.

- Obszar rozwiązań Boussinesqa (pasy zaciemnione na rysunkach) ściślej pokrywa się z wynikami sprężystego rozwiązania zadania kontaktowego aniżeli rozwiązaniami otrzymanymi przy opisie podłoża modelem stanu krytycznego MCC.



Rys. 6.
Fig. 6.



Rys. 7.
Fig. 7.

LITERATURA

1. Gryczmański M.: Wprowadzenie do opisu sprężysto-plastycznych modeli gruntów. PAN KILiW IPPT , Warszawa 1995.
2. Gryczmański M.: Analytical and numerical subsoil models for soil-foundation interaction problems. Studia Geotechnica et Mechanica, Vol.XVI, No3-4, 1994, s.29-72.

3. Britto A.M., Gunn M.J.: Crisp'93. User's and programmer's guide. Cambridge University, Eng. Dept., 1990.
4. Sivakumar V., Doran I.G., Graham J., Johnson A.: The effect of anisotropic elasticity on the yielding characteristics of overconsolidated natural clay. Canadian Geotechnical Journal 2001, 38, p.125-137.
5. Graham J., Noonan M.L., Lew K.V.: Yield states and stress-strain relationships in a natural plastic clay. Canadian Geotechnical Journal 1983, 20, p.502-516.
6. Pieczyrak J.: Ustalanie parametrów wybranych modeli gruntu na podstawie próbnych obciążeń. Zeszyty Naukowe Pol, Śl, seria Budownictwo, z.91, Gliwice 2001.
7. Bzówka J., Gryczmański M., Jastrzębska M., Sternik K.: Wpływ plastycznych deformacji gruntu na osiadania i siły wewnętrzne w fundamencie pasmowym. Mater. XLI Konf. Nauk. KILiW PAN I KN PZITB, t.8, Krynica 1995, s.5-12.
8. Britto A.M., Gunn M.J.: Critical state soil mechanics via finite elements. Ellis Horwood. Chichester 1987.
9. Meyer Z., Chruściewicz S.: O obliczaniu osiadania fundamentu sztywnego według teorii Boussinesqa i PN-81/B-03020. Inżynieria i Budownictwo 2001, nr 5, s.305-307

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ryszard IZBICKI

Abstract

The contact boundary value task foundation (which sizes were changed) – subsoil (normally or overconsolidated) has been considered. Effects of the inelastic subsoil behaviour were analysed and were performed as stress paths in (p,q,Θ) space. With the aid of settlement functions, obtained numerically, the cooperation subsoil – foundation (of different sizes) has been evaluated. Numerical analyses for soils normally and overconsolidated were made by using the critical state model modified Cam-clay.