

Mieczysław M. KANIA, Antoni FLORKIEWICZ

Instytut Inżynierii Lądowej
Politechnika Poznańska

NOŚNOŚĆ FUNDAMENTÓW PASMOWYCH POSADOWIONYCH W WARSTWIE GRUNTU SPOCZYWAJĄCEJ NA POCHYLONYM SZTYWNYM PODŁOŻU

Streszczenie. W artykule zaprezentowano porównanie dwóch metod szacowania nośności granicznej sztywnego fundamentu pasmowego, posadowionego na warstwie gruntu idealnie spoiстого, spoczywającej na pochylonym sztywnym podłożu. Zadanie wciskania płaskiego stempla rozwiązano z zastosowaniem metod teorii nośności granicznej oraz metody elementów skończonych w ujęciu sprężysto-plastycznym.

BEARING CAPACITY OF STRIP FOUNDATIONS ON SOIL LAYER OVERLYING INCLINED RIGID BED

Summary. In the paper, the comparison of two methods of estimation of ultimate bearing capacity of a stiff strip foundation resting on an ideal cohesive soil layer, underlain by inclined rigid subsoil, is presented. The problem of indentation of a flat punch was solved with use of the limit analysis theory methods and the elasto-plastic finite element method.

1. Wprowadzenie

Problem oceny nośności fundamentów pasmowych posadowionych w warstwie gruntu, poniżej której znajduje się podłoże o znacznie większej wytrzymałości i o tak małej odkształcalności, że można je traktować jako całkowicie sztywne, jest złożony. W przypadku poziomego położenia stropu warstwy sztywnego podłoża podstawą do analizy problemu mogą być rozwiązania uzyskane przy użyciu różnych metod: metody charakterystyk, metod oszacowań teorii nośności granicznej oraz badań doświadczalnych. Obszerną bibliografię tej problematyki zawierają prace [1, 2, 3, 4, 5]. Niezależnie od wymienionych metod, do poszukiwania rozwiązań zadania nośności silnie niejednorodnego podłoża, wykorzystywane są symulacje numeryczne, realizowane za pomocą metody elementów skończonych (MES)

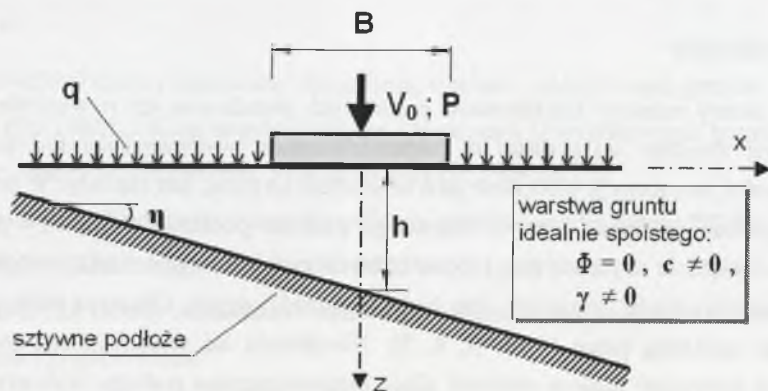
lub metody różnic skończonych [6, 7, 8]. Podstawową zaletą metod numerycznych jest w tym wypadku możliwość odwzorowania praktycznie dowolnych niejednorodności budowy ośrodka gruntowego oraz warunków kontaktu fundamentu i gruntu [9].

Prezentowane w cytowanych pracach zależności dotyczą zagadnienia nośności granicznej warstwy ośrodka o stałej grubości. W wielu zagadnieniach praktycznych, zwłaszcza przy posadawianiu obiektów na terenach z płytko występującym podłożem skalistym, równie ważne jest zadanie z ukośnie przebiegającym stropem podłoża nieodkształcalnego. Obszerną analizę teoretyczną problemu oceny nośności fundamentu dla dowolnego położenia stropu warstwy sztywnego podłoża zamieszczono w pracy [4].

Przedmiotem artykułu jest opis i porównanie dwóch sposobów rozwiązania zadania wciskania płaskiego, sztywnego stępła (ławy fundamentowej), w warstwę gruntu spoczywającą na nieodkształcalnym podłożu, nachylonym pod pewnym kątem. Rozwiązanie pierwsze uzyskano stosując metodę oszacowań teorii nośności granicznej. W drugim sposobie nośność graniczną dla badanych zadań brzegowych uzyskano z symulacji numerycznej MES.

2. Warunki brzegowe zadania

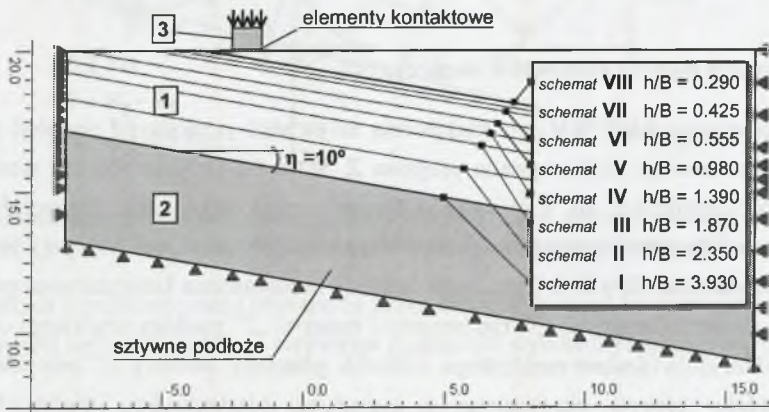
Dla analizy przyjęto, że sztywny stempel o szerokości B jest wciskany z pionową prędkością V_0 w warstwę ważkiego, idealnie spoiestego ośrodka gruntowego o ciężarze objętościowym γ , spójności c i kącie tarcia wewnętrznego $\Phi=0^\circ$. Warstwa ta, o miąższości h pod środkiem stępła, spoczywa na pochyłonym, idealnie sztywnym podłożu, którego strop tworzy kąt η z osią x , wyznaczającą granicę półprzestrzeni (rys. 1). W ogólnym przypadku obciążenie powierzchni terenu po obu stronach stępła jest równe i wynosi q . Warunki kontaktu fundamentu i gruntu zdefiniowano w ten sposób, że siły oporu na ścinanie pomiędzy stępłem a gruntem oraz gruntem a sztywnym podłożem mogą być tak duże, że możliwe jest przeniesienie naprężeń stycznych o wielkości równej spójności warstwy gruntu c .



Rys. 1. Ogólny schemat zadania

Fig. 1. Schematic representation of the problem

Dla rozwiązań MES przyjęto schemat pokazany na rys. 2, dla jednego kąta η nachylenia podłoża sztywnego „2” i różnych głębokości h . Rozważano zadanie z obciążeniem $q=0$ na powierzchni warstwy ośrodka idealnie spoiestego „1”, ze standardowymi ograniczeniami przemieszczeń na brzegach wydzielonego fragmentu półprzestrzeni. Symetryczne obciążenie fundamentu przykładano przyrostowo jako równomiernie rozłożone na całej szerokości B.



Rys. 2. Schemat geometryczny zadania MES z rozpatrywanymi poziomami podłoża sztywnego
Fig. 2. Geometry of the FEM solution, with considered levels of a rigid bed

3. Założenia dotyczące metod obliczeń

3.1. Oszacowanie w ramach teorii nośności granicznej

Przyjęto sztywno-idealnie plastyczny model ośrodka gruntowego, z warunkiem plastyczności Coulomba oraz stowarzyszonym prawem płynięcia [1, 2]. W celu otrzymania górnej oceny wartości obciążenia granicznego zbudowano pole kinematycznie dopuszczalne, określające mechanizm zniszczenia warstwy ośrodka gruntowego. Mechanizmy te można budować, zakładając, że w podłożu powstaje układ sztywnych bloków (pól) ślizgających się po sobie. Powierzchnie poślizgu należy traktować jako powierzchnie nieciągłości prędkości, wzdłuż których składowe wektora prędkości V doznają skoku o wartość $[V_n]$ i $[V_t]$. Po przyjęciu warunku stanu granicznego w postaci:

$$f(\tau_n, \sigma_n) = |\tau_n| - \sigma_n \cdot \tan \Phi - c \quad (1)$$

gdzie: c i Φ są parametrami wytrzymałościowymi warstwy gruntu, a τ_n , σ_n składowymi stanu naprężenia.

Ze stowarzyszonego prawa płynięcia wynika [4,5], że

$$[V_n] = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_n} = -\lambda \tan \Phi \quad [V_t] = \lambda \frac{\partial f}{\partial \tau_n} = \lambda \quad (2)$$

co oznacza, że wektor nieciągłości [V] propagujący się wzdłuż powierzchni poślizgu musi być odchylony od niej o kąt Φ , a λ jest pewnym skalarnym mnożnikiem.

Poszukiwaną wartość górnej oceny obciążenia granicznego (P_k) oblicza się bezpośrednio z równania bilansu mocy, traktowanego jako funkcjonal parametrów geometrycznych pola prędkości, a wartość P_k jako jego minimum globalne [1, 2].

3.2. Rozwiązanie metodą elementów skończonych

Do modelowania MES wpływu zagłębienia sztywnego podłoża na nośność graniczną fundamentu pasmowego wykorzystano program Z_SOIL.PC [10], stosowany wcześniej do analiz nośności granicznej, np. w pracy [11]. Do obliczeń przygotowano zestawy danych dla ośmiu różnych schematów geometrycznych, różniących się stosunkiem h/B , przy jednakowej szerokości fundamentu $B=1.0$ m (rys. 2). W zakresie modelowania konstytutywnego przyjęto następujące założenia: materiał „3” fundamentu i materiał „2” podłoża sztywnego opisano za pomocą modelu ciała idealnie sprężystego. Ośrodek gruntowy warstwy „1” odwzorowano za pomocą modelu sprężysto-plastycznego z warunkiem plastyczności Druckera-Pragera i stowarzyszonym prawem płynięcia.

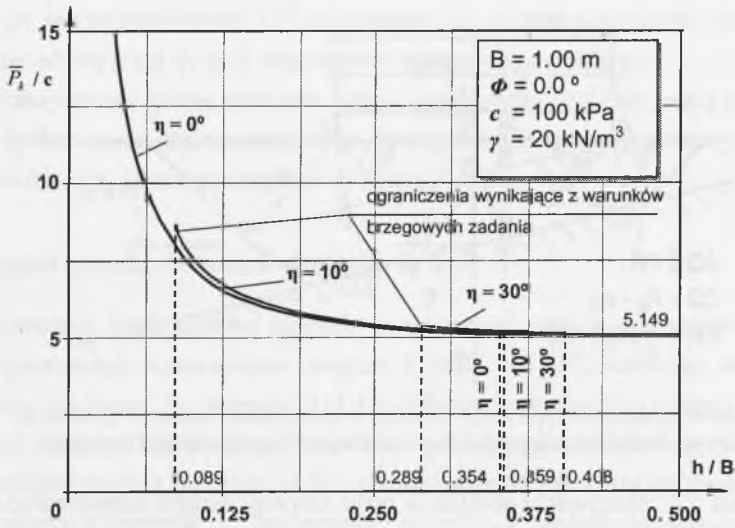
Dla uzyskania dobrej dokładności odwzorowania w modelu MES wprowadzono znaczne zagęszczenie siatki elementów w strefie kontaktu sztywnego fundamentu z podłożem, budując globalną siatkę elementów o 6170 stopniach swobody. Zastosowano także specjalne elementy kontaktowe [10], pozwalające na wystąpienie nieciągłości stanu przemieszczeń na styku fundamentu i warstwy gruntu. Dla elementów kontaktowych przyjęto parametry takie same jak dla warstwy gruntu ($c \neq 0$, $\Phi = 0$). Nie było natomiast możliwości wystąpienia względnych przemieszczeń na styku warstwy „1” i sztywnego podłoża „2”.

4. Górna ocena obciążenia granicznego

Biorąc pod uwagę warunki brzegowe zadania jako mechanizm zniszczenia (odkształcenia) przyjęto mechanizm typu Hilla (rys. 3). Oczywiście jest, że dla przyjętego sztywno-idealnie plastycznego modelu warstwy wpływ sztywnego podłoża na wartość obciążenia granicznego stempla ma miejsce z chwilą rozpoczęcia oddziaływania sztywnego podłoża na kształt mechanizmu zniszczenia. Na rys. 3 pokazano zależności geometryczne niezbędne dla określenia zakresu wartości zmiennych h i η , dla których wpływ ten występuje.

Minimalną grubość warstwy $h = h_0$, dla której ustaje wpływ sztywnego podłoża na obciążenie graniczne stempla, wyrażono wzorem:

$$h_0 = B \frac{\cos \frac{\pi}{4}}{2 \cos \eta} = \frac{B \cdot \sqrt{2}}{4 \cos \eta} \quad (3)$$

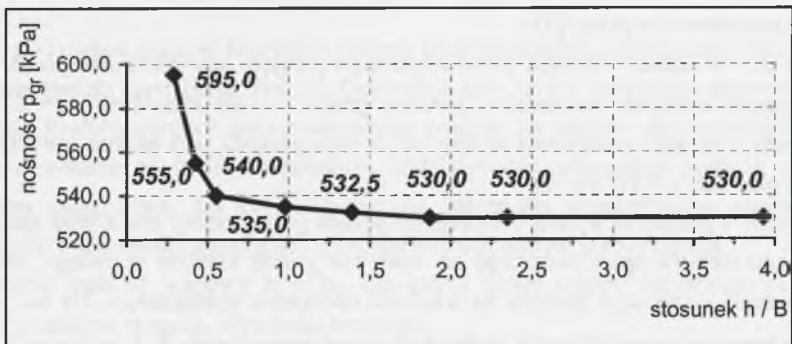


Rys. 4. Wyniki obliczeń metodą teorii nośności granicznej (według [4])

Fig. 4. Results of calculations by the limit analysis theory method (according to [4])

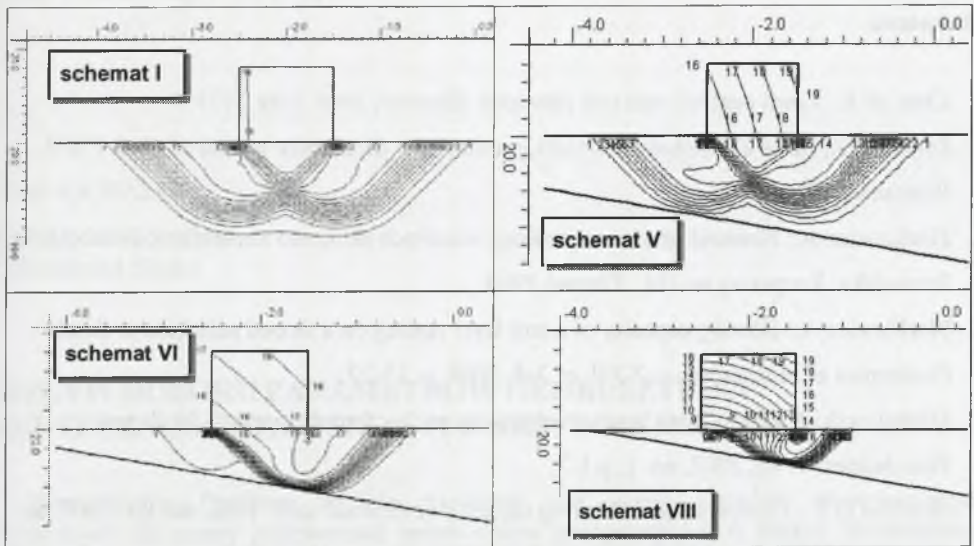
5. Wyniki obliczeń MES

Na rysunkach poniżej zestawiono wyniki obliczeń MES dla rozważanych schematów obliczeniowych, dla ostatniego przyrostu obciążenia p_{gr} , przy którym wystąpił brak zbieżności rozwiązania, sygnalizujący stan graniczny. Na rys. 5 pokazano wykres zależności nośności fundamentu w funkcji zagłębienia stropu warstwy sztywnego podłoża, wyrażonego stosunkiem h/B . Izolinie wypadkowych przemieszczeń węzłów siatki elementów przy wystąpieniu p_{gr} pokazano (rys. 6) dla charakterystycznych stanów rozwoju mechanizmu zniszczenia. Dla pozostałych schematów obraz przemieszczeń miał charakter pośredni.



Rys. 5. Zmienność nośności granicznej fundamentu w funkcji zagłębienia sztywnego podłoża (MES)

Fig. 5. Variation of foundation bearing capacity with a depth of the rigid bed (FEM)



Rys. 6. Izolinie przemieszczeń wypadkowych według rozwiązań MES (dla obciążeń granicznych p_{gr})
 Fig. 6. Isolines of resultant displacements according to the FEM solutions (for limit loads p_{gr})

6. Podsumowanie

Zastosowanie metod oszacowań teorii nośności granicznej pozwala na uzyskiwanie rozwiązań zadania nośności granicznej fundamentu posadowionego na warstwie ośrodka spoczywającej na pochylonym, sztywnym podłożu, w zakresie jego górnej oceny. Rezultaty obliczeń przeprowadzonych dla przykładowych danych pokazują, że wpływ kąta nachylenia sztywnego podłoża η , na wzrost nośności granicznej fundamentu jest generalnie nieznaczny.

Dla analizowanego za pomocą MES przypadku z kątem $\eta=10^\circ$ widoczne jest wyraźne podobieństwo jakościowe wykresów pokazanych na rys. 4 i 5. Algorytmy MES oprogramowania systemu Z_SOIL.PC pozwoliły na uzyskanie jednoznacznej zależności charakteru mechanizmów rozwoju stanu granicznego od zagłębienia stropu warstwy sztywnego podłoża. Metoda elementów skończonych w wersji przemieszczeniowej z reguły dostarcza pośrednie oszacowania nośności granicznej między górną i dolną oceną nośności granicznej [8]. W rozpatrywanym przypadku oszacowanie ilościowe nośności granicznej za pomocą MES prowadzi do wielkości większych niż otrzymane z rozwiązania teoretycznego. Stwierdzone różnice mogą wynikać z pewnej odmienności założeń odnośnie do modelowania konstytutywnego, przyjętych w obu zastosowanych metodach. Ponadto, w rozwiązaniu MES wygenerowany został mechanizm zniszczenia typu Prandtla, a w rozwiązaniu teoretycznym założono a priori mechanizm Hilla. Istotne znaczenie dla wyników modelowania MES może mieć też dobór warunków brzegowych rozwiązywanego zadania kontaktowego, co ostatnio zostało wykazane w pracy [12].

Literatura

1. Chen W.E.: Limit analysis and soil plasticity. Elsevier, New York 1975.
2. Izbicki R.J., Mróz Z.: Metody nośności granicznej w mechanice gruntów i skał. PWN, Warszawa 1976.
3. Florkiewicz A.: Nośność graniczna podłoża o cechach skokowo zmiennych. Politechnika Poznańska, Rozprawy nr 224, Poznań 1990.
4. Florkiewicz A.: Bearing capacity of a soil layer resting on a sloped substratum. *Studia Geotecnica et Mechanica*, v. XXII, nr 3-4, 2000, p. 15-27.
5. Michałowski R.L.: Collapse loads over two-layer clay foundation soils. *Soils and Foundations*, v. 42, 2002, no. 1, p.1-7.
6. Griffiths D.V.: Computation of bearing capacity on layered soils. *Proc. 4th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*, Edmonton 1982, p. 163-170.
7. Burd H.J., Frydman S.: Bearing capacity of plane-strain footings on layered soils. *Canad. Geotechnical J.*, 1997, v. 34, no. 2, p. 241-253.
8. Merifield R.S., Sloan S.W., Yu H.S.: Rigorous plasticity solutions for the bearing capacity of two-layered clays, *Géotechnique*, v. 49, 1999, no. 4, p. 471-490.
9. Gryczmański M.: Analiza współdziałania budowli z podłożem – trendy, problemy, perspektywy. *Mat. I Problemowej Konf. Geotechniki „Współpraca budowli z podłożem gruntowym”*, Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok-Wigry 1998, s. 7-34.
10. Z_SOIL.PC v. 6.27, User Manual. ZACE Services, Lausanne 2006.
11. Kania M.M.: Rozszerzone podejście do oceny wpływu głębokości posadowienia na nośność graniczną fundamentu pasmowego. *Mat. XLIV Konf. Naukowej KILiW PAN i KN PZITB*, Krynica '98, t. VII, s. 169-176, Poznań-Krynica 1998.
12. Fedorowicz L.: Zagadnienia kontaktowe budowla-podłoże gruntowe. Część I. Kryteria modelowania i analiz podstawowych zagadnień kontaktowych konstrukcja budowlana-podłoże gruntowe. Politechnika Śląska, Zeszyty Naukowe, nr 1729, Gliwice 2006.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bohdan Zadroga