

Jerzy SĘKOWSKI

ANALIZA PRZEBIEGU OSIADAŃ PODŁOŻA SŁABEGO I WZMOCNIONEGO PODUSZKĄ PIASKOWĄ Z ZASTOSOWANIEM RÓŻNYCH MODELI GRUNTÓW

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały zależności "obciążenie-osiadanie" dla słabego i ulepszanego warstwą wzmacniającą podłoża gruntowego, otrzymane z badań modelowych oraz wyniki ich opisu z zastosowaniem różnych modeli ośrodka gruntowego. Do opisu podłoża słabego i ulepszanego wykorzystano model liniowo-sprężysty, sprężysto-idealnieplastyczny Druckera-Pragera i sprężysto-plastyczny ze wzmocnieniem gęstościowym Modified Cam-Clay. Odpowiednie obliczenia numeryczne wykonano w MES wykorzystując pakiet programów CRISP'93. Otrzymane rezultaty wskazują na konieczność uwzględniania plastyczności gruntu do opisu jego zachowania się pod obciążeniem oraz potrzebę precyzyjnego definiowania parametrów modeli obliczeniowych.

SETTLEMENT OF NATURAL AND IMPROVED WITH SAND CUSHION SUBSOIL-AN ANALYSIS USING VARIOUS SOIL MODELS

Summary. In the paper load-settlement relations for weak and sand cushion improved subsoil, obtained in model tests and their theoretical interpretations using various soil models have been presented. For material description of the sand cushion and weak subsoil the linear-elastic, Drucker-Prager elasto-perfectly plastic and critical state Modified Cam-clay models have been applied. Suitable FEM analyses have been carried out with the help of the CRISP'93 package. The results obtained show that the characteristic soil plasticity and optimal selection of model parameters are necessary for realistic predications of the mechanical behaviour of soil systems considered.

ОПИСЬ ОСАДКУ СЛАБОГО ОСНОВАНИЯ И УСИЛЕННОГО ПЕСОЧНОЙ ПОДУШКОЙ ДЛЯ РАЗНЫХ МОДЕЛИ ГРУНТОВОЙ СРЕДЫ

Резюме. В статье представлены зависимости „нагрузка-осадка” для слабого грунтового основания и усиленного песчаной подушкой, получены в модельных испытаниях а также результаты их нумерической описки в МЭС. Для отображения системы фундамент-основание были использованы линейно-упругая, упруго-идеально пластичная Drucker-Prager, а также упруго-пластичная с плотностным усилением типа Modified Cam-Clay модели. Влияние пластичности на полученные результаты оказалось большим.

1. WSTĘP

Do opisu złożonej w swej treści natury wykorzystuje się mniej lub bardziej skomplikowane modele teoretyczne. Przesłanką do ich przyjmowania są wyniki precyzyjnych badań empirycznych lub dociekania czysto teoretyczne. W przypadku gruntu, a mówiąc szerzej podłoża gruntowego, modelem niemal standardowym jest klasyczna półprzestrzeń liniowo-sprężysta. Model ten, pomimo licznych zastrzeżeń, znajduje nadal szerokie zastosowanie w rozwiązywaniu różnorodnych zagadnień inżynierskich. Jednym z nich jest wymiarowanie poduszek żwirowo-piaskowych (poduszek wzmacniających). Wobec rosnącego zainteresowania tą formą uzdatniania słabych podłoży gruntowych z jednej strony, i rozbieżnościami pomiędzy istniejącymi metodami wymiarowania poduszek z drugiej strony (np. [5]), zachodzi niewątpliwie w tym przypadku potrzeba pełniejszego i bardziej wiarygodnego opisu ośrodka gruntowego. Elementem wspomnianej wiarygodności jest m.in. plastyczność gruntu, z natury swej nie przenoszącego rozciągań. Pełniejszy opis ośrodka gruntowego umożliwiają modele sprężysto-plastyczne, znajdujące coraz powszechniejsze zastosowanie w rozwiązywaniu szeregu zagadnień inżynierskich. Zasadniczą trudnością w szerszym wykorzystaniu wspomnianych modeli jest precyzyjne zdefiniowanie i wyznaczenie opisujących je parametrów.

W prezentowanym referacie autor pragnie zwrócić uwagę, na przykładzie doświadczalnie otrzymanych zależności "obciążenie-osiadanie", na ograniczoność liniowo-sprężystego modelu ośrodka gruntowego w opisie zachowania się słabego i ulepszanego podłoża gruntowego pod obciążeniem statycznym (podstawą tych wniosków są wyniki własnych badań modelowych). Przedstawiona została jednocześnie propozycja wykorzystania do opisu wspomnianej zależności dwóch znanych modeli sprężysto-plastycznych ośrodka gruntowego (modelu sprężysto-idealnieplastycznego Druckera-Pragera i modelu sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem gęstościowym Modified Cam-Clay). Uzyskane rezultaty zachęcają do dalszych badań w tym kierunku.

2. WYNIKI BADAŃ MODELOWYCH

• Badania modelowe wykonano na stanowisku badawczym, którego elementami były: średniowymiarowa skrzynia badawcza, materiały modelujące podłoże słabe i wzmacniane oraz układ obciążający i urządzenia pomiarowe. Zasadniczym elementem stanowiska badawczego była skrzynia o wymiarach 100x100x100 cm, o sztywnym szkielecie stalowym i ścianach z płyt pleksiglasowych. Słabe podłoże gruntowe modelowano popiołem elektrownianym o uziarnieniu odpowiadającym równoziarnistym piaskom drobnym. Podłoże to wzmacniano równoziarnistym piaskiem średnim. Podstawowe parametry geotechniczne materiałów modelujących podłoże słabe i wzmacniane przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1

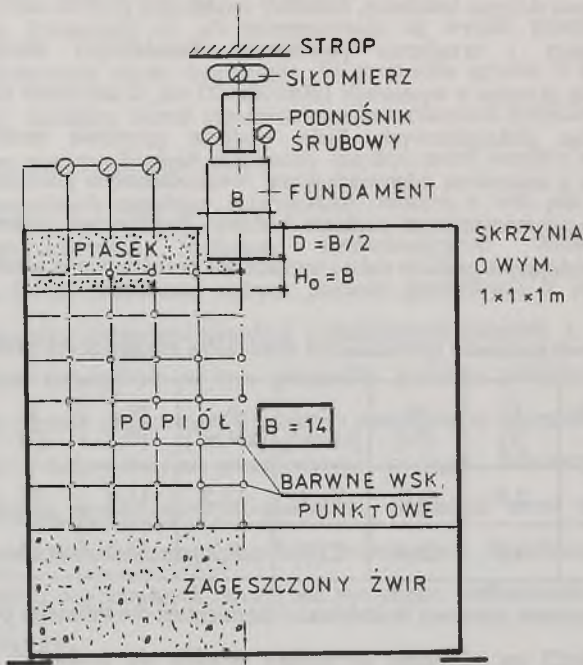
Podstawowe parametry geotechniczne materiałów modelujących podłoże gruntowe

Rodzaj materiału	U [l]	w [%]	ρ_s [kN/m ³]	ρ_{ds} [kN/m ³]	W_{opt} [%]	φ [°]	c [kPa]	M_o [MPa]
Piasek średni	2,9	≈ 0	26,0	17,5	11,0	32	0	83,0
Popiół	3,9	25,0	22,7	8,2	54,0	18	6,2	4,8

• Sztywny fundament pasmowy modelowano fragmentem drewnianego podkładu kolejowego o przekroju 14x23 cm. Na układ obciążający składały się: podnośnik śrubowy sterowany ręcznie o zakresie do 50 kN oraz dynamometr pierścieniowy o zakresie pomiarowym do 100 kN i dokładności odczytu 0,8 kPa. Podnośnik oparto dołem o fundament, górą natomiast poprzez dynamometr o sztywną belkę stalową, utwierdzoną w stropie. Urządzenia pomiarowe obejmowały czujniki zegarowe, zamocowane w sposób niezależny od układu obciążającego. Mierzono nimi przemieszczenia naroży fundamentu. Przemieszczenia wybranych punktów modelu mierzono wzrokowo i fotograficznie za pomocą kolorowych wskaźników punktowych umieszczonych w węzłach siatki 10x10 cm, naniesionej na płycie czołowej skrzyni. Na rys.1 przedstawiono schemat stanowiska badawczego wykorzystywanego do badań modelowych.

• Każda seria badań wykonywana była z zachowaniem ściśle określonego reżimu technologicznego. Sprowadzało się to zasadniczo do budowania modelu warstwami 2 lub 10 cm starannie i jednakowo zagęszczanymi. Zagłębienie fundament wynosiło B/2, gdzie przez

B oznaczono jego szerokość. Różne były natomiast w danej serii: szerokość i grubość warstwy wzmacniającej oraz szerokość i głębokość układanego w niej zbrojenia w postaci siatki lub przepony.



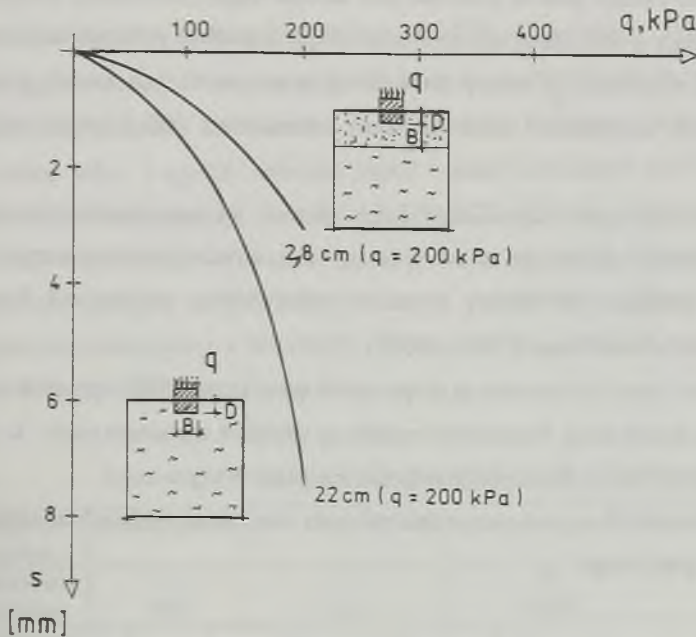
Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 1. Test box schema with equipment

• Na tak opisanym stanowisku autor wykonał szereg badań modelowych, obejmujących podłoże słabe i podłoże ulepszone warstwą wzmacniającą, jak również podłoże słabe ulepszone warstwą wzmacniającą z dodatkowo umieszczonym w niej zbrojeniem w postaci siatek lub przepony. Wyniki tych badań były przedmiotem kilku publikacji (m.in. [3], [4]). Należy nadmienić, że prace te koncentrowały się zasadniczo na ilościowej ocenie efektywności wzmocnienia słabego podłoża gruntowego (warstwą lub warstwą zbrojoną), mierzonej wzrostem jego nośności lub sztywności. Tłem dla wspomnianych porównań była nośność lub sztywność podłoża słabego. Podstawę oceny stanowiły zależności "naprężenie-osiadanie" dla

odpowiednich modeli podłoża. Nie podejmowano natomiast prób opisu otrzymanych zależności lub ich szerszej analizy.

Rezultaty badań modelowych potwierdzają wspomnianą ograniczoność modelu liniowo-sprężystego do opisu podłoża gruntowego poddanego obciążeniu statycznemu. W sposób spektakularny ukazują to zależności "obciążenie-osiadanie", uzyskane zarówno dla podłoża jednorodnego, jak i uwarstwowionego. W przypadku podłoża uwarstwowionego jest to tym bardziej przekonujące, gdyż w strefie stykowej powstają silne rozciągania, których grunt z natury swej nie przenosi - uplastyczniając się. Konieczne staje się zatem uwzględnienie plastyczności w opisie gruntów. Można to uzyskać stosując modele sprężysto-plastyczne, tym bardziej że wiedza na ten temat w ostatnich czasach znacznie się rozwinęła. W prezentowanym referacie



Rys. 2. Krzywe "obciążenie-osiadanie" dla wybranych modeli podłoża

Fig. 2. "Load-settlement" curves for select models of subsoil

autor wykorzystując wybrane wyniki przeprowadzonych badań modelowych podjął taką próbę, przy czym ze względu na zakres ma ona charakter rozpoznawczy. Podstawą analizy

stały się przytoczone na rys.2 zależności "obciążenie-osiadanie" dla podłoża słabego oraz podłoża ulepszanego warstwą wzmacniającą o miąższości równej szerokości fundamentu ławowego ($H_p = B$).

3. MODELE OŚRODKA GRUNTOWEGO STOSOWANE W ANALIZIE NUMERYCZNEJ

W prowadzonych dociekaniach numerycznych wykorzystano trzy rodzaje modeli ośrodka gruntowego: model liniowo-sprężysty (LS), sprężysto-idealnieplastyczny Druckera-Pragera (DP) oraz sprężysto-plastyczny ze wzmocnieniem gęstościowym Modified Cam-clay (MCC).

- Pierwszy z nich traktuje podłoże gruntowe jako ośrodek ciągły, jednorodny, izotropowy i nieważki, spełniający równocześnie założenia ciała stałego. Zależność pomiędzy naprężeniami i odkształceniami mają charakter liniowy ($\delta\sigma = \mathbf{D} \cdot \delta\epsilon$), przy czym do opisu modelu potrzebne są dwa parametry materiałowe zwane modułem odkształcenia (\mathbf{M}) i współczynnikiem Poissona (ν).

- Model Druckera-Pragera reprezentuje grupę modeli sprężysto-idealnieplastycznych. Powierzchnia plastyczności jest tutaj stożkiem, którego osią centralną jest oś hydrostatyczna p , a parametrami materiałowymi modelu są: moduł odkształcenia, współczynnik Poissona, kohezja i kąt tarcia wewnętrznego (\mathbf{M}, ν, c, ϕ).

- Model Modified Cam-Clay reprezentuje grupę modeli stanu krytycznego. Jego powierzchnia plastyczności ma kształt elipsy. Parametrami modelu są: wielkości oznaczone przez: $\lambda, \kappa, \Gamma, \mathbf{M}, \mathbf{G}$ lub ν (sposób ich określania podaje przykładowo praca [2]).

W pracy tej można też uzyskać szersze informacje na temat poszczególnych teoretycznych modeli podłoża gruntowego.

4. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH I ICH ANALIZA

♦ Jak już wspomniano, przesłanką do uwzględnienia plastyczności w opisie zachowania się słabego i wzmocnionego podłoża gruntowego stały się zależności "obciążenie-osiadanie", jakie autor uzyskał w badaniach modelowych. W niniejszym artykule rozważania te ograniczono jedynie do dwóch wybranych przykładów-modeli, reprezentujących: podłoże słabe i podłoże wzmocnione warstwą piasku o miąższości równej szerokości fundamentu. Analiza numeryczna przeprowadzona została MES z wykorzystaniem pakietu programów CRISP'93, będących w dyspozycji Katedry Geotechniki [1]. Podłoże gruntowe odwzorowano 126 ośmiowęzłowymi elementami prostokątnymi, podpartymi przesuwnie wzdłuż pionowych ścian i poziomej podstawy. Wymiary modelu dyskretnego ($B^* \cdot H^*$) odpowiadały wymiarom skrzyni, pozostając w stosunku do szerokości fundamentu, jak: $B^* \cdot H^* \approx 7B \cdot 3B$ (rys.3). W analizie numerycznej założono, że fundament jest materiałem liniowo-sprężystym o parametrach $E_d=10000$ MPa i $\nu_d=0,1$, natomiast popiół i piasek materiałami spełniającymi postulaty modeli omówionych powyżej, tj. modeli LS, DP, MCC. Wartości parametrów opisujących te materiały w każdym z modeli zestawiono w tabelicy 2 (należy nadmienić, że niektóre z parametrów przyjęto ad hoc lub wyznaczono z zależności analitycznych). Obliczenia numeryczne wykonywano w warunkach pełnego drenażu, a materiały uznano za normalnie skonsolidowane ($OCR=1$).

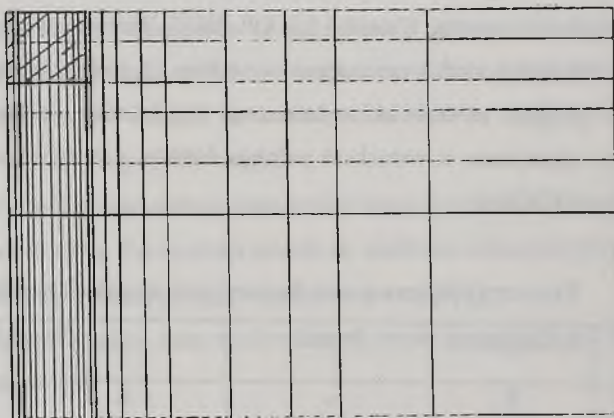
Tabela 2

Parametry opisujące grunty dla przyjętych modeli obliczeniowych

Model gruntu	Rodzaj gruntu		Popiół			Piasek średni				
	E		v			E		v		
Liniowo-sprężysty	4800		0,25			4800		0,25		
Sprężysto-plastyczny Druckera-Pragera	E_o	v	c_o	ϕ		E_o	v	c_o	ϕ	
	4800	0,25	6,2	18		83000	0,25	0	32	
Modified Cam-Clay	λ	κ	M	$\Gamma-1$	v	λ	κ	M	$\Gamma-1$	v
	0,099	0,046	0,687	0,237	0,25	0,099	0,046	0,687	0,237	0,25

Uwaga! Wartości E, E_o , c_o podano w [kPa], ϕ w [°], - pozostałe bezwymiarowe.

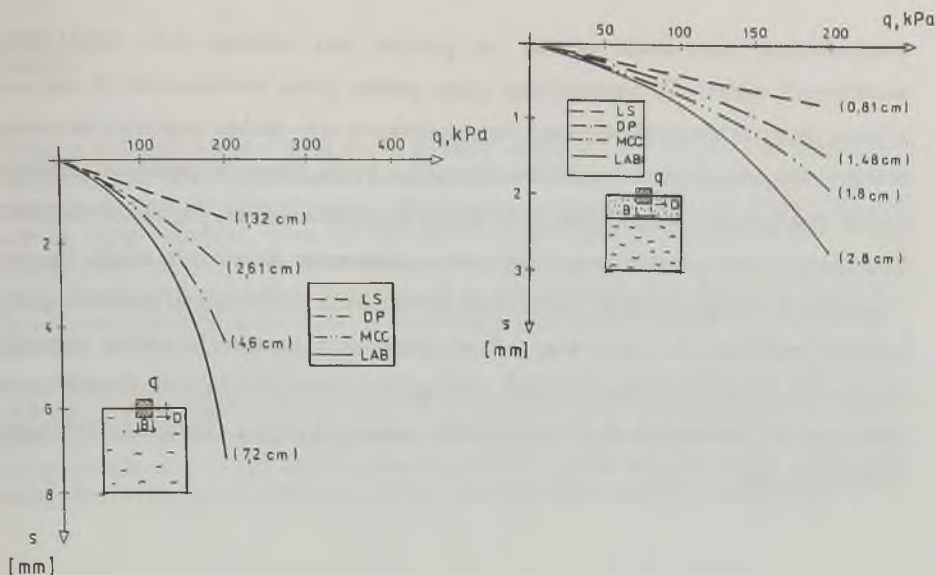
♦ Przeprowadzone obliczenia numeryczne wykazały, że modele sprężysto-plastyczne lepiej opisują zachowanie się podłoża gruntowego poddanego obciążeniu statycznemu. Ilustruje to rys.4a, na którym przedstawiono zależność osiadania sztywnej łąwy fundamentowej w funkcji obciążenia jednostkowego ($s_i = F(q_i)$) dla modeli sprężysto-plastycznych (DP, MCC). Tłem dla nich są odpowiednie zależności uzyskane dla modelu klasycznej półprzestrzeni liniowo-sprężystej oraz wyniki badań modelowych. Wpływ plastyczności obserwowano w badaniach modelowych praktycznie od momentu przyłożenia obciążenia. Efekt ten widoczny jest także w odpowiednich zależnościach uzyskanych dla modeli sprężysto-plastycznych. Wpływ plastyczności na wielkość przemieszczeń zależy od typu modelu (w modelu sprężysto-plastycznym ze wzmocnieniem wyraźnie większy), a także od wartości parametrów opisujących same modele [2]. Wartości te powinny być wyznaczane w precyzyjnych badaniach laboratoryjnych. Dobór wartości wspomnianych parametrów to podstawowa trudność w szerszym stosowaniu w obliczeniach inżynierskich modeli zaawansowanych plastycznie. Zwraca jednocześnie uwagę widoczna rozbieżność odpowiednich zależności uzyskanych z badań i przy stosowaniu modelu liniowo-sprężystego.



Rys.3. Siatka elementów skończonych dla układu fundament - podłoże

Fig. 3. FE mesh for foundation-subsoil system

Na rys.4b przedstawiono podobną zależność $s_i = F(q_i)$, lecz dla podłoża ulepszonych warstwą wzmacniającą. I w tym przypadku zastosowanie modeli sprężysto-plastycznych do odwzorowania pracy układu "fundament-podłoże ulepszone" jest przekonywujące.



Rys. 4. Krzywe "obciążenie-osiadanie":

a) dla podłoża słabego, b) dla podłoża ulepszonego

Fig. 4. "Load-settlement" curves:

a) for the weak subsoil, b) for the improved subsoil

Autor pragnie jednak zwrócić uwagę na ograniczoną stosowanie modelu MCC w wersji zaproponowanej przez autorów CRISPA. Ze względu na przyrostową formułę programu niemożliwa jest bowiem iteracja obliczeń w momencie "wyjścia ścieżki naprężenia poza powierzchnię plastyczności". Z sytuacją taką mamy do czynienia w przypadku podłoży uwarstwionych, a więc w przypadku ulepszenia słabego podłoża warstwą wzmacniającą. Propozycją alternatywną może okazać się w tym przypadku stosowanie do obliczeń równoległe kilku modeli teoretycznych podłoża gruntowego.

5. WNIOSKI I SPOSTRZEŻENIA

Do opisu zachowania się słabego podłoża lub podłoża ulepszonego warstwą wzmacniającą pod obciążeniem statycznym powinny być szerzej stosowane modele ośrodka gruntowego,

uwzględniające plastyczność gruntów (na potrzebę taką wskazują m.in. wyniki badań modelowych autora). W przedstawionej pracy podjęto próbę wykorzystania do tego celu modelu sprężysto-idealnieplastycznego Druckera-Pragera oraz modelu sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem gęstościowym Modified Cam-Clay. Próba dotyczyła zagadnienia płaskiego i została oparta na przyrostowej opcji MES przy wykorzystaniu pakietu programów CRISP'93. Otrzymane wyniki zdecydowanie lepiej opisują zachowanie się podłoża aniżeli klasyczna półprzestrzeń liniowo-sprężysta. Efekt plastyczności określa rodzaj modelu odwzorowującego podłoże gruntowe, a jego wiarygodność determinują rzetelnie określone parametry. Zagadnienia zasygnalizowane w referacie wymagają przeprowadzenia szerokich badań i analiz numerycznych, realizowanych już od pewnego czasu w Katedrze Geotechniki Politechniki Śląskiej (np. [6]).

LITERATURA

- [1] Britto A.M., Gunn M.J.: Critical State Soil Mechanics via Finite Elements. Ellis Horwood, Chichester 1987.
- [2] Gryczmański M.: Sprężysto-plastyczne modele ośrodków rozdrobnionych. Seminarium nt. "Modele ośrodków rozdrobnionych", Instytut Konstrukcji Budowlanych Politechniki Śląskiej, 1993, materiały seminaryjne (maszynopis).
- [3] Sękowski J.: Badania modelowe nośności podłoża budowli wzmocnionego geosiatką. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, 55, seria Konferencje, 18, 1989, ss. 171-176.
- [4] Sękowski J.: Badania laboratoryjne nad efektywnością wzmocniania słabego podłoża gruntowego geosiatkami. IX Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Kraków, 1991, ss.363-368.
- [5] Sękowski J.: O wymiarowaniu poduszek zwirowo-piaskowych. Inżynieria i Budownictwo, 8, 1994, ss. 380-382.
- [6] Sękowski J.: Analiza sprężysto-plastyczna podłoża wzmocnionego poduszką piaskową. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Budownictwo, 80, 1995, ss.77-92.

Recenzent: Dr hab. inż. Alojzy Szymański
Profesor SGGW

Wpłynęło do Redakcji 6.06.1995 r.

Abstract

Partial or full replacement of weak soil to carefully compacted sand or gravel as material of a loadbearing layer or a cushion under a foundation is one of more widely applied ground improvement methods. Design analysis of subsoils of this kind within the linear theory of elasticity raises objections. Soils are not able to resist tensile stresses and therefore they undergo plastic yielding in the bottom zone of loadbearing cushion even under quite small loads. Thus the application of elasto-plastic soil models becomes simply necessary. One of the reasons for such conclusions are the results of many years' author's model tests carried out in the box of 100x100x100 cm dimensions. These are a.o. load-settlement characteristics attained for weak and improved subsoils in plane strain state under static loading. Valuation of usefulness of some selected elasto-plastic soil models (Drucker-Prager and Modified Cam-clay ones) has been based on the comparisons of theoretical and experimental load-settlement curves. Results of the FEM analyses show significantly better agreement for elasto-plastic models than in the case of elastic one. Further, comprehensive analyses are necessary.