

WYKORZYSTANIE SONDOWAŃ STATYCZNYCH DO WYZNACZENIA PARAMETRÓW MECHANICZNYCH GRUNTÓW SILNIE PREKONSOLIDOWANYCH

DETERMINATION OF MECHANICAL PARAMETERS ON THE BASES OF IN SITU TESTS

Alojzy Szymański¹, Massoud Farag¹, Jan Myszewski²

¹ Katedra Geotechniki SGGW

² Katedra Zastosowań Matematyki SGGW

Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska SGGW w Warszawie

Wstęp

Metodyka badań gruntów dla potrzeb projektowania i budowy obiektów inżynierskich oparta jest na kompleksowej analizie wyników uzyskanych w laboratorium oraz badań *in situ* przy zastosowaniu techniki pomiarowej wykorzystującej sondę statyczną CPT, dylatometr Marchettiego DMT oraz próbniki SHELBY i NESGI. Z uwagi na fakt, że wymienione wyżej techniki badań są pośrednimi metodami oceny parametrów geotechnicznych podłoża budowli powinny być oparte na lokalnych związkach empirycznych opracowanych na podstawie wyników terenowych i laboratoryjnych badań gruntów.

W artykule przedstawiono wyniki badań *in situ* wykonanych z zastosowaniem sondy statycznej CPT oraz wyniki badań laboratoryjnych służące poszukiwaniu związków empirycznych stosowanych w interpretacji wyników sondowań. Na wybranych poligonach doświadczalnych zlokalizowanych na terenie Warszawy wykonano serię badań terenowych i laboratoryjnych na próbkach o nienaruszonej strukturze NNS.

Porównanie uzyskanych w terenie wyników sondowań z wynikami badań laboratoryjnych pozwoliło na przeprowadzenie weryfikacji istniejących związków empirycznych stosowanych do wyznaczania parametrów mechanicznych gruntów oraz na podanie propozycji nowych modeli empirycznych dla gruntów silnie prekonsolidowanych.

Badania przeprowadzono w Katedrze Geotechniki SGGW w ramach projektu badawczego KBN Nr 7T07E01713.

Charakterystyka badanych gruntów

Budowa geologiczna terenu Warszawy i historia obciążeń gruntu powoduje, że warunki geologiczne podłoża w tym rejonie są zróżnicowane. Powierzchniową warstwę w mieście stanowią nasypy często z gruzem, o grubości dochodzącej do kilku metrów. Głębiej najczęściej występują grunty pochodzenia lodowcowego, zwykle o zaburzonym układzie warstw i przeważnie silnie prekonsolidowane. Tworzą je głównie gliny w stanie twardoplastycznym do zwartego oraz piaski i żwiry zagęszczone.

Prekonsolidowane gliny morenowe są gruntami odznaczającymi się dużą wytrzymałością i małą odkształcalnością. Nie wykazują one najczęściej właściwości pęczniących i nie są zaliczane do gruntów wrażliwych.

Prekonsolidowane ły, występujące pod warstwami lodowcowymi, są gruntami wrażliwymi i zwykle pęczniącymi. Jednorodne ły (np. plioceńskie) są słabo przepuszczalne i nie ulegają łatwo zawilgoceniu, zwłaszcza w złożu. ły te mogą być spękane, co powoduje zmniejszenie wytrzymałości gruntu w masywie w stosunku do określonej na nienaruszonych próbkach, a także ułatwia przepływ wody gruntowej.

Obserwowane zjawiska glacitektoniczne gruntów w rejonie Warszawy powstały w wyniku statycznego lub dynamicznego oddziaływania lodowca na jego podłoże w czasie rozwoju i zaniku zlodowacenia. W podłożu lodowca uformował się układ naprężenia, który stał się podstawowym czynnikiem deformacji glacitektonicznych. Z uwagi na fakt, że miąższość lodowca była zmienna w przestrzeni i w czasie to naprężenie boczne będące sumą składowej poziomej naprężenia glacistatycznego i glacidynamicznego powodowało deformacje glacitektoniczne i powstawanie efektu silnej prekonsolidacji gruntu wyrażającego się znacząco wyższą wartością składowej poziomej, naprężenia od składowej pionowej po cofnięciu zlodowaceń.

Pochodzenie geologiczne gruntów występujących w rejonie Warszawy (grunty lodowcowe, ły plioceńskie) zmusza do stosowania metod badawczych uwzględniających historię naprężenia. Zjawisko prekonsolidacji gruntu wpływa bowiem na zmianę charakterystyk odkształceniowych i wytrzymałościowych [Borowczyk, Szymański 1995; Szymański 1997].

Zakres i rodzaje wykonanych badań

Biorąc pod uwagę cel prac badawczych t.j poszukiwanie związków empirycznych pomiędzy wynikami badań terenowych i laboratoryjnych prowadzono je łącznie i traktując uzyskane wyniki jako wzajemnie uzupełniające się. Stąd też przeprowadzone badania geotechniczne obejmowały:

a) wiercenia połączone z pobieraniem próbek NNS do badań laboratoryjnych,

- b) sondowania statyczne CPT wykonywane w celu określenia zakresu zmienności parametrów geotechnicznych w badanym profilu,
- c) sondowania dylatometryczne DMT przeprowadzone w bliskim sąsiedztwie sondowań CPT (w odległości ok. 5.0m) dla rozpoznania stanu i historii naprężenia badanych gruntów,
- d) laboratoryjne badania właściwości fizycznych w celu określenia stanu badanych gruntów,
- e) badania edometryczne dla rozpoznania historii naprężenia i parametrów ściśliwości,
- f) badania trójosiowe w celu określenia parametrów wytrzymałościowych.

Celem weryfikacji istniejącej metodyki wyznaczania parametrów z badań *in situ* oraz dostosowania jej do gruntów prekonsolidowanych przeprowadzono prace badawcze na poligonach doświadczalnych zlokalizowanych na terenie Warszawy. Badania wykonano na trasie Metra w Warszawie w rejonie stacji A-11 oraz stacji A-14 i A-15, w podłożu biurowca Daewoo, kompleksu Saski-Business Park, garaży podziemnych na Placu Powstańców Warszawy oraz kompleksu mieszkalno usługowego przy ulicy Słomińskiego i budynku biurowego na Placu Piłsudskiego.

W omawianych poligonach badawczych podłoże zbudowane jest z prekonsolidowanych glin zwałowych w stanie twar doplastycznym oraz silnie prekonsolidowanych iłów plioceńskich w stanie twar doplastycznym lub półzwartym.

Badania *in situ* obejmowały sondowania statyczne sondą HYSON-200kN oraz sondowania płaskim dylatometrem Marchettiego DMT.

Interpretację wyników sondowań przeprowadzono dwuetapowo wykonując ocenę jakościową uzyskanych pomiarów, a następnie interpretację ilościową. Zakres interpretacji jakościowej obejmował: ocenę jednorodności budowy podłoża, określenie miąższości i zasięgu występowania poszczególnych warstw gruntu, wstępną klasyfikację rodzaju gruntu. Do określenia rodzaju gruntu na podstawie badań sondą statyczną wykorzystywany był nomogram Schmertmana [1970] i nomogram Robertsona [1990] oraz propozycje prezentowane przez Młynarka i innych [1991, 1997].

Badania dylatometryczne wykonano dylatometrem Marchettiego celem wyznaczenia parametrów opisujących początkowy stan naprężenia gruntu. Metodyka przeprowadzania badań i interpretacji wyników pomiarów opracowana została przez Marchettiego [1980]; Lacasse i Lunne [1988] oraz Rad i Lunne [1988].

Analiza wyników badań z wykorzystaniem metodyki Kulhawy i Mayne [1990] pozwoliła na wyznaczenie rozkładu naprężenia prekonsolidacji σ'_p i współczynnika parcia spoczynkowego K_o . Obserwacja uzyskanych wyników wykazała, że zalegające w tym rejonie grunty są w większości silnie prekonsolidowane o współczynniku prekonsolidacji mieszczącym się w zakresie $OCR=4-15$ z tendencją

malejących wartości wraz z głębokością. Wartości współczynnika parcia spoczynkowego uzyskano w zakresie $K_0=1,0\div 1,6$.

Badania laboratoryjne obejmowały ocenę historii naprężenia i modułu ścisłości gruntu na podstawie badań edometrycznych oraz ocenę wytrzymałości na ścinanie przy wykorzystaniu badań trójosiowych.

Badania edometryczne gruntu przeprowadzono w zakresie naprężenia od 0 do 10 MPa. Grunt do badań pobierano przy użyciu próbników włoskiej firmy NENZI w cylindrach o wymiarach: średnica $\phi=89\text{mm}$, długość $l=606\text{mm}$, stosunek średnicy do grubości ścianki $\phi/t=45$. Przed wykonaniem badań wytrzymałościowych i odkształceniowych, przeprowadzono laboratoryjne badania jakości próbek wykorzystując dwie metody - pomiar odcieku po rekonsolidacji i pomiar naprężeń rezydualnych, [Andersen, Kolstand 1979; Ladd, Lambe 1963]. Próbki nasączone były metodą ciśnienia wyrównawczego, a następnie rekonsolidowane anizotropowo. Ocena uzyskanych charakterystyk wykazała, że próbki gruntu stosowane w badaniach były dobrej jakości.

Analiza wyników badań

W oparciu o wyniki badań przeprowadzonych w laboratorium i *in situ* dokonano próby ustalenia empirycznego modelu zależności OCR, K_0 i M od pozostałych mierzonych parametrów gruntu.

Ocenę istotności wpływu poszczególnych parametrów na modelowane własności OCR, K_0 i M zbadano przy pomocy analizy czynnikowej [Okta 1980]. W analizie przyjęto po dwa poziomy dla każdego z rozpatrywanych czynników. Oceniano efekty proste i główne poszczególnych czynników oraz interakcję pomiędzy parami czynników. Na tej podstawie dokonano selekcji czynników uwzględnionych w modelu.

O jakości budowanego modelu decyduje zgodność pomiędzy wartościami uzyskanymi z obliczeń przy użyciu modelu a wartościami zdobytymi drogą eksperymentalną. Dla zapewnienia porównywalności miar zgodności dla poszczególnych punktów pomiarowych użyto miary względnej.

$$\left| \frac{J_i - J_i^{(\text{mod})}}{J_i} \right| \quad (1)$$

$$MSRD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left| \frac{J_i - J_i^{(\text{mod})}}{J_i} \right|^2} \quad (2)$$

oraz maksymalnego względnego odchylenia (Mean Relative Deviation):

$$MRD = \max \left| \frac{J_i - J_i^{(\text{mod})}}{J_i} \right| \quad (3)$$

Z definicji $MSRD \leq MRD$. Relatywnie duża wartość MSRDR może być podstawą do odrzucenia modelu, a zaś mała wartość MRDR może być podstawą do jego akceptacji. Celowe jest stosowanie obu tych miar jednocześnie gdyż znaczna dysproporcja między nimi może być spowodowana istnieniem kilku (stosunkowo niewielu) punktów w których obliczenia na podstawie modelu są obciążone dużym błędem. Analiza takich punktów może określić ograniczenia modelu albo w szczególnym przypadku wskazać punkty budzące szczególną wątpliwość co do celowości użycia ich do budowy modelu.

Korzystając z modułu SOLVER znajdującego się w programie MS EXCEL wer.5.0 (i wyższe) można zidentyfikować parametry dla różnych modeli należących do znacznie szerszej klasy niż rozpatrywane do tej pory modele liniowe lub dające się sprowadzić do postaci liniowej. Identyfikacja parametrów modelu odbywa się w trakcie rozwiązywania zadania minimalizacji wartości MSRDR obliczonego dla modelu z ustalonej klasy modeli ze zmiennymi współczynnikami, które to współczynniki są dobierane przez wspomniany moduł SOLVER.

Związki empiryczne pomiędzy parametrami sondowań a parametrami mechanicznymi gruntu

Analiza wyników badań terenowych i laboratoryjnych, wykazuje możliwości określenia regionalnych związków pomiędzy wynikami sondowań a parametrami uzyskiwanymi w laboratorium. Znaczącą korelację wykazują zależność pomiędzy współczynnikiem prekonsolidacji OCR a znormalizowanym oporem stożka $(q_T - \sigma_{vo}) / \sigma_{vo}'$ (rys 1, i rys2).

Zależność tę można opisać równaniami w ogólniejszej postaci:

- dla gliny morenowej

$$OCR = 0.80 [q_c - \sigma_{vo}]^{0.97} / (\sigma_{vo}')^{0.41} \quad (4)$$

- dla iłu plioceńskiego

$$OCR = 0.46 [q_c - \sigma_{vo}]^{0.97} / (\sigma_{vo}')^{0.84} \quad (5)$$

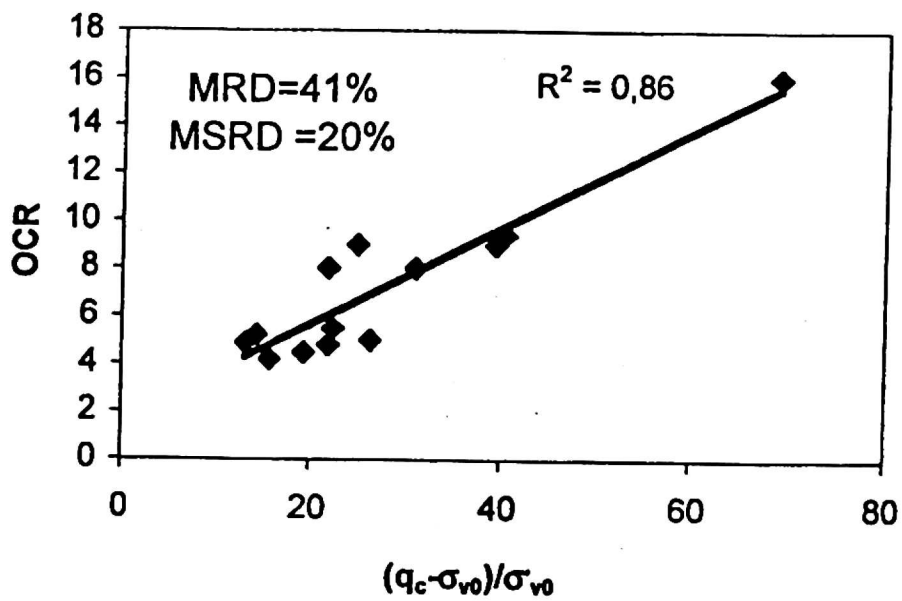
Szczegółowa obserwacja uzyskanych wyników wykazała również wysokie skorelowanie zależności pomiędzy współczynnikiem parcia bocznego K_o , a znormalizowanym oporem stożka $(q_c - \sigma_{vo}) / \sigma_{vo}'$ (rys.3 i rys.4), które może być wyrażone równaniem w postaci:

- dla gliny morenowej

$$K_o = 0.52 [q_c - \sigma_{vo}]^{0.36} / (\sigma_{vo}')^{0.22} \quad (6)$$

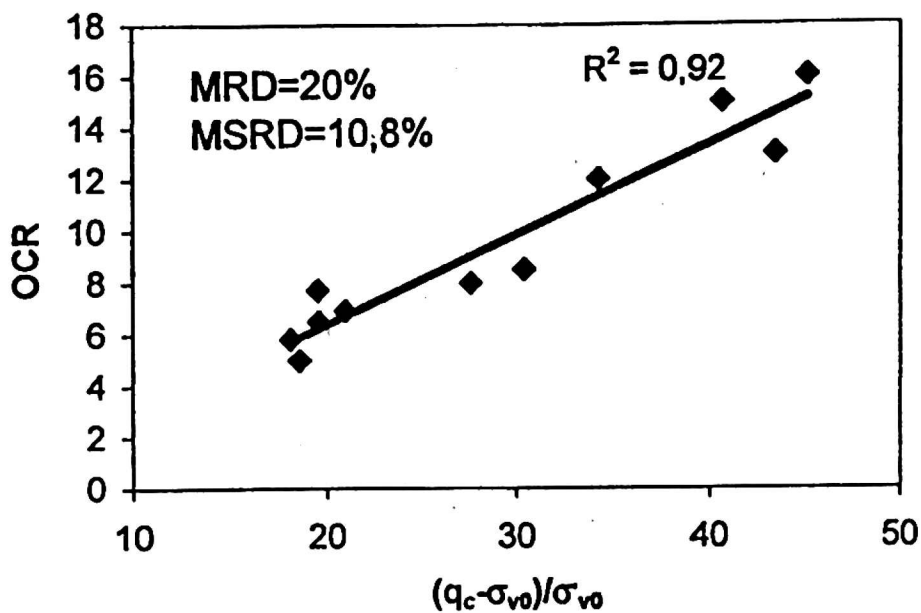
- dla iłu plioceńskiego

$$K_o = 0.77[q_c - \sigma_{vo}]^{0.28} / (\sigma'_{vo})^{0.12} \quad (7)$$



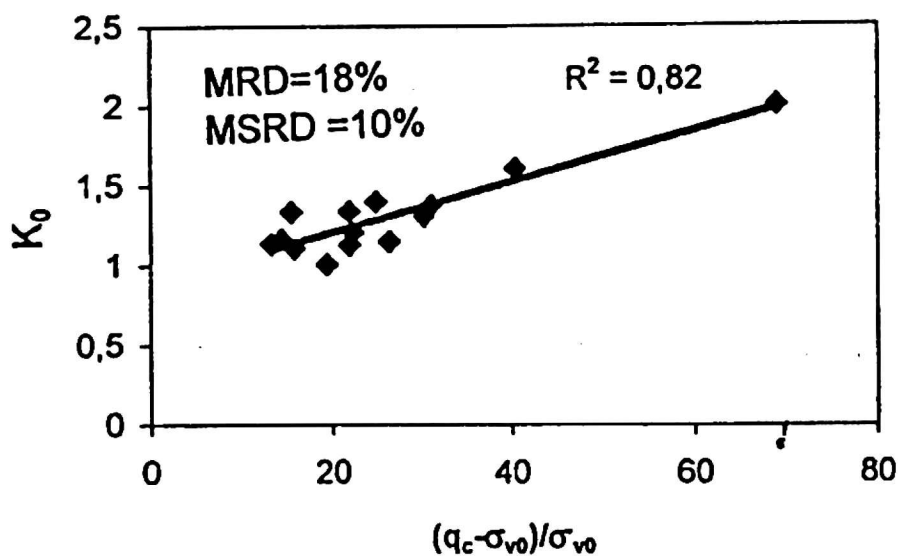
Rys. 1 Zależność współczynnika prekonsolidacji OCR od oporu stożka q_c uzyskana dla gliny morenowej

Fig. 1. Relationship between overconsolidation ratio OCR and cone resistance q_c for boulder clay



Rys 2 Zależność współczynnika prekonsolidacji OCR od oporu stożka q_c uzyskana dla iltu pliocenińskiego

Fig 2. Relationship between overconsolidation ratio OCR and cone resistance q_c for pliocene clay.

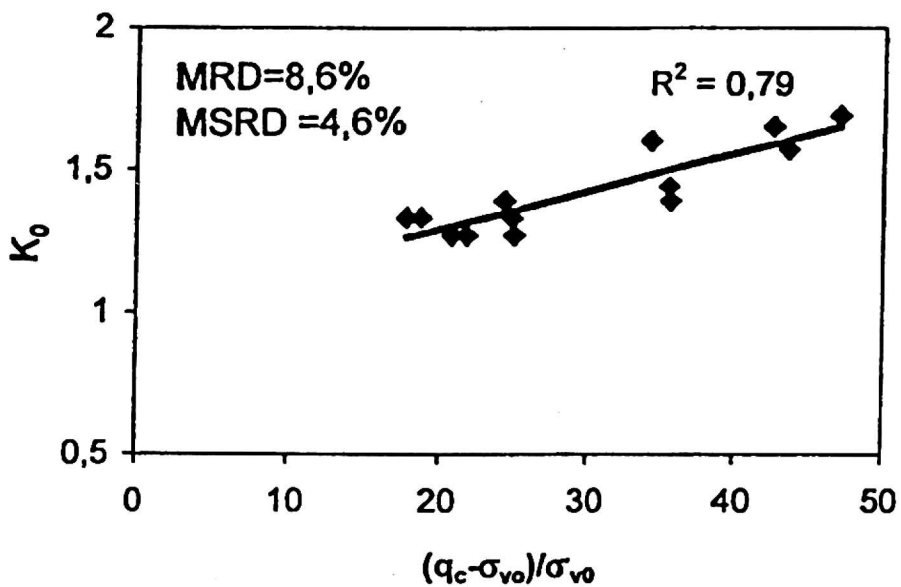


Rys 3 Zależność współczynnika K_0 od oporu stożka q_c uzyskana dla gliny morenowej

Fig 3. Relationship between coefficient K_0 and cone resistance q_c for boulder clay

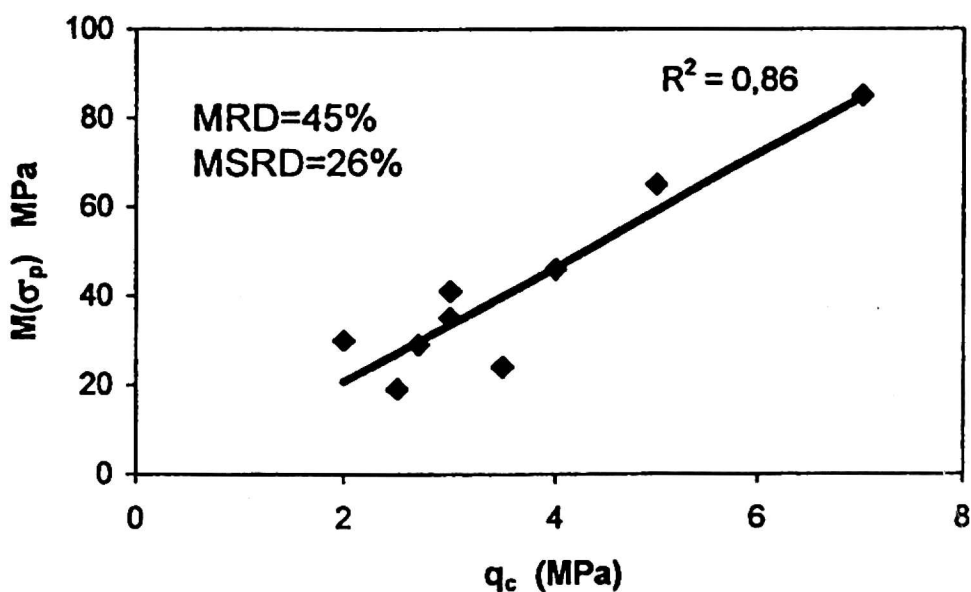
Ponadto analiza porównawcza wyników sondowań statycznych i wyników badań edometrycznych wykazała wysoką korelację pomiędzy wartościami oporu stożka q_c a wartościami modułu ścisłości M otrzymanymi dla zakresu naprężeń odpowiadającemu naprężeniu prekonsolidacji σ'_p (rys. 5). Uzyskaną zależność dla iłu plicieńskiego opisuje równanie w postaci:

$$M = 9,95 \times q_c \quad (8)$$



Rys 4 Zależność współczynnika K_0 od oporu stożka q_c uzyskana dla iłu plicieńskiego

Fig 4. Relationship between coefficient K_0 and cone resistance q_c for plicene clay



Rys 5 Zależność modułu M od oporu stożka q_c uzyskana dla iłu plicieńskiego

Fig 5. Relationship between oedometric modulus M and cone resistance q_c for plicene clay

Przeprowadzona analiza parametrów geotechnicznych otrzymanych z badań laboratoryjnych i terenowych wykazała, że sondowania statyczne mogą być stosowane do wyznaczania charakterystyk gruntów spoistych silnie prekonsolidowanych występujących na terenie Warszawy przy zastosowaniu metodyki interpretacji wyników sondowań opartej na regionalnych związkach empirycznych dostosowanych do lokalnych warunków gruntowych.

Podsumowanie

Analiza wyników badań terenowych i laboratoryjnych gruntów występujących na terenie Warszawy wykazuje, że występujące grunty spoiste są w większości silnie prekonsolidowane. W gruntach takich wyznaczanie parametrów mechanicznych wymaga uwzględnienia stanu i historii naprężenia w badaniach laboratoryjnych.

Stosowanie sondowań statycznych do identyfikacji parametrów gruntu wymaga dostosowania regionalnych związków empirycznych do lokalnych warunków gruntowych poprzez łączne stosowanie badań terenowych i laboratoryjnych jako wzajemnie uzupełniających się.

Przeprowadzone badania wykazały, że dla gruntów spoistych występujących w rejonie Warszawy interpretację wyników sondowań statycznych CPT można przeprowadzić z zastosowaniem związków materiałowych uzależniających wartość parametrów opisujących historię naprężenia OCR i K_0 oraz modułu M od wartości oporów stożka q_c celem wyznaczenia parametrów mechanicznych gruntów.

Literatura

- [1.] ANDERSON A., KOLSTAD P. (1979): The NGI54 mm sampler for undisturbed sampling of clays and representative of coarser materials. Inter. Symp. of Soil Sampling, Singapore, 13-21.
- [2.] BOROWCZYK M., SZYMAŃSKI A. (1995): The use of in situ test for determination of stress history. Proc. of the 11-th Europ Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Copenhagen, 117-123.
- [3.] KULHAVY F.H., MAYNE P.W. (1990): Manual on estimating soil properties for foundation design. EPRI. Palo Alto. Report. EL-6800.
- [4.] LACASSE., LUNNE T. (1988): Calibration of dilatometer corrections. Proc. Int. Sym. on Penetration Testing ISOPT-1, Orlando, 1: 539-548
- [5.] LADD C.C. AND LAMBE T.W., (1963): The strength of undisturbed clay determined from undrained tests. ASTM, STP 361.
- [6.] MARCHETTI S., (1980): In situ tests by flat dilatometer. J. Geot. Eng. Div., ASCE, 106, GT3: 299-321.

- [8.] MŁYNAREK Z. TACHUSCHKE A. NIEDZIELSKI A. (1997): Ocena stanu konsystencji gruntów spoistych metodą statycznego sondowania. IX Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Gdańsk Tom II 113-119.
- [9.] OKTABA W. (1980): Elementy statystyki matematycznej i metodyki doświadczalnictwa, PWN Warszawa
- [10.] RAD.N.S., LUNNE T. (1988): Direct correlations between piezocone tests results and undrained shear strength of clay. Proc. First Inter. Symp. on Penetration Testing, Orlando, Florida.
- [11.] ROBERTSON P.K., (1990): Soil classification using the cone penetration test. Can. Geot. J. Vol. 27.
- [12.] SCHMERTMAN J,K. (1970): Static cone to compute static settlement over sand. Proc. Jour. of the Soil Mech. and Found. Div. ASC
- [13.] SZYMAŃSKI A. (1997): Wykorzystanie badań „in situ” do oceny parametrów geotechnicznych podłoża. IX Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Gdańsk Tom II 175-181

Summary

Determination of mechanical parameters on the bases of in situ tests. The paper presents some results of field and laboratory tests of soils which prevails in the Warsaw. Special attention is drawn to heavily overconsolidated clays which requires relevant - internationally recognised standards for filed tests and refined laboratory technics. Selected CPT and laboratory test results together with interpretation procedures are discussed in details and some suggestion are made with respect to the general methodology which should be applied when dealing with heavily overconsolidated clays.

The results of site and laboratory investigations show that the overconsolidated ratio OCR and modulus M can be determined based on interpretation of cone penetration test results.

Alojzy Szamański
 Katedra Geotechniki
 Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska SGGW
 ul. Nowoursynowska 166,
 02-787 Warszawa