ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: BUDOWNICTWO z. 98 Nr kol. 1574

Jędrzej WIERZBICKI
Akademii Rolnicza w Poznaniu

WYKORZYSTANIE METOD IN SITU DO WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA PARCIA SPOCZYNKOWEGO GRUNTÓW NIESPOISTYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono rezultaty zastosowania czterech terenowych metod badań do oceny współczynnika parcia spoczynkowego (K_0). W tym celu wykorzystano zarówno metody stosowane już w praktyce inżynierskiej, jak i rozwiązania oparte na prototypowych urządzeniach pomiarowych. W pracy zawarto również krótki opis zastosowanych metod oraz dyskusję wynikającą z porównania uzyskanych wyników.

THE USE OF IN SITU TESTS TO EVALUATE THE COEFFICIENT OF EARTH PRESSURE AT REST IN THE CASE OF NON COHESIVE SOILS

Summary. The results of four in situ tests to evaluate a coefficient of earth pressure at rest (K_0) of non-cohesive soils are presented in this paper. For this purpose methods commonly used in geotechnical practice and prototype solutions and techniques were used. A short description of those methods and the discussion on obtained results were also given.

1. Wstęp

Współczynnik parcia spoczynkowego K_0 jest istotną cechą charakteryzującą podłoże gruntowe. Jako stosunek składowej pionowej do składowej poziomej stanu naprężenia in situ w sposób podstawowy i niezależny od innych cech opisuje ośrodek gruntowy. Tym samym współczynnik ten stanowi często zmienną niezależną, którą należy uwzględnić precyzując inne parametry podłoża, takie jak moduły ściśliwości i kąt tarcia wewnętrznego. Znajomość K_0 jest także nieodzowna przy przeprowadzaniu nowoczesnych laboratoryjnych badań wytrzymałościowych.

Trudności w wyznaczeniu współczynnika parcia spoczynkowego wywodzą się z samej definicji pojęcia, zakładającej stan naprężenia in situ. O ile składową pionową można obliczyć znając ciężar i miąższość nadkładu, to w wypadku składowej poziomej nie istnieje możliwość wyznaczenia jej metodą analityczną. Do dyspozycji badacza pozostają więc testy, w mniej lub bardziej bezpośredni sposób, pozwalające na ocenę składowej poziomej stanu naprężenia. Ze względu na bardzo wyraźną i trudną do sprecyzowania zmianę stanu naprężenia próbki gruntu na skutek jej pobierania, a następnie transportu i umieszczania w przyrządzie laboratoryjnym, od wielu lat prowadzone są prace nad wykorzystaniem technik terenowych do oceny współczynnika K_0.

Głównym ograniczeniem dla metod terenowych są trudności ze zidentyfikowaniem ścieżek naprężenia i odkształcenia powstałych podczas penetracji końcówki pomiarowej. Z tego powodu bezpośrednie rezultaty pomiarów in situ nie powinny być traktowane jako rzeczywiste, lecz, poprzez zindywidualizowane procedury interpretacyjne, muszą być odnoszone do danego przyrządu badawczego oraz określonych warunków gruntowych.

2. Cel

Celem pracy jest zaprezentowanie rezultatów badań oraz analiza porównawcza wartości współczynnika K_0, wyznaczonego różnymi technikami in situ w osadach niespoistych. Wykorzystane zostały w tym celu zarówno metody szerzej znane (presjometr, dylatometr Marchettiego), jak i prototypowe (stożki CPT z czujnikami do pomiaru składowej poziomej stanu naprężenia oraz z elementem pomiarowym typu dylatocone). W tym ostatnim przypadku zastosowano nową metodę wyznaczania K_0, uwzględniającą wpływ na otrzymywane wyniki również innych cech podłoża.

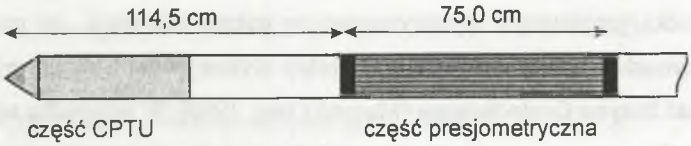
3. Charakterystyka metod zastosowanych do wyznaczenia składowej poziomej stanu naprężenia

W niniejszej pracy wykorzystano pomiary przeprowadzone za pomocą presjometru wciskanego (Cambridge Cone Pressuremeter), standardowego dylatometru Marchettiego oraz

sondowania statycznego z dwoma różnymi końcówkami pomiarowymi: wyposażoną w czujniki do pomiaru składowej poziomej stanu naprężenia (Lateral Stress Sensing CPTU) oraz zaopatrzoną w dodatkową tuleję dylatacyjną (Dylatocone CPT).

3.1. Presjometr wciskany (Cambridge Cone Pressuremeter – CCP)

Schematyczną konstrukcję urządzenia przedstawiono na rys. 1. Urządzenie zostało zaprojektowane i wykonane przez firmę Cambridge In Situ of England, a prototyp oraz zasada jego działania przedstawione przez Withersa i innych (1986). W uproszczeniu można przyjąć, że jest to standardowy stożek do badań CPTU o polu przekroju 10 cm^2, za którym w odległości około 1 m umieszczono presjometr o tej samej średnicy i długości 75 cm. W trakcie badania, przebiegającego jak standardowy test CPTU, końcówka pomiarowa zatrzymywana jest na żądanej głębokości w celu przeprowadzenia testu presjometrycznego. Testy takie wykonywane są w profilu w odstępach głębokości co 2 m. Do celów analizy w niniejszej pracy wykorzystano rezultaty dwóch badań przeprowadzonych przez Norweski Instytut Geotechniczny (Mokkelbost, 1996), opisanych również przez Powella i Shieldsa (1997). Przy wyznaczaniu współczynnika parcia spoczynkowego skorzystano z procedur interpretacyjnych opierających się na wyznaczonym ciśnieniu granicznym Ψ_1 (limit pressure), opracowanych przez Ghionna i innych (1995) oraz Nutta (1993). Pierwsza ze wspomnianych procedur wymagała uwzględnienia dodatkowo oporu stożka z testu statycznego sondowania, druga stopnia zagęszczenia gruntu.

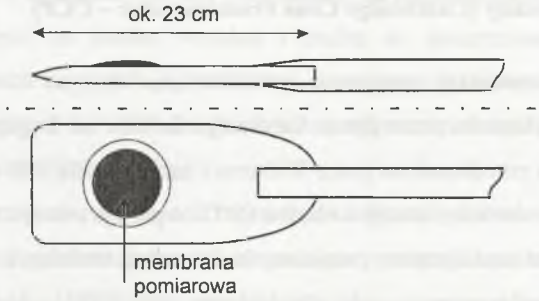


Rys. 1. Schemat budowy presjometru wciskanego
Fig. 1. The scheme of the Cambridge Cone Pressuremeter

3.2. Dylatometr Marchettiego (DMT)

Wykorzystane do badań urządzenie było standardowym przyrządem tego typu (Marchetti 1980) (rys. 2). Zgodnie z przyjętą procedurą badanie podłoża polegało na penetracji poprzez wciskanie do zadanej głębokości, zatrzymanie końcówki pomiarowej i przeprowadzenie właściwego pomiaru (Briaud i Miran, 1992). Pomiary takie były przeprowadzane w profilu

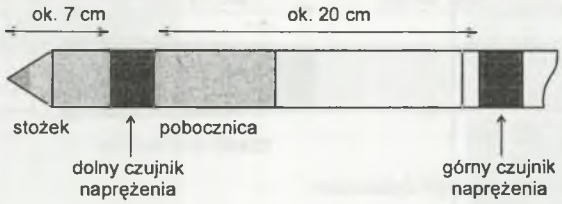
badawczym w odstępach 20–centymetrowych. Przeprowadzoną analizę oparto na testach DMT wykonanych przez autora (Wierzbicki, 2001) oraz Norweski Instytut Geotechniczny (Lacasse i inni, 1985). Interpretację bezpośrednich rezultatów pomiaru przeprowadzono w oparciu o procedurę Schmertmanna (1983).



Rys. 2. Schemat budowy dylatometru Marchettiego
Fig. 2. The scheme of the Marchetti dilatometer

3.3. Stożek do pomiaru składowej poziomej stanu naprężenia (Lateral Stress Sensing Cone Penetrometer – LSSCP)

Przyrząd ten skonstruowano na Uniwersytecie Kalifornijskim w oparciu o pomysł Tsanga (1989). LSSCP jest zmodyfikowanym stożkiem CPTU, wyposażonym dodatkowo w dwa czujniki do pomiaru naprężenia w kierunku horyzontalnym. Jeden z czujników umieszczono tuż za stożkiem pomiarowym, w obrębie pobocznicy, drugi natomiast w pewnej odległości za tuleją cierną (rys. 3). Zasada działania elementów do pomiaru naprężeń pozwala na rejestrację ciśnienia ośrodka gruntowego, wywoływanego w trakcie penetracji, na umieszczoną na obwodzie przyrządu membranę czujnika. W pracy wykorzystano badania przeprowadzone przez Norweski Instytut Geotechniczny (Masood i inni, 1990). W przypadku tego urządzenia współczynnik K_0 wyznaczono, przyjmując składową poziomą bezpośrednio jako odczyt elementów pomiarowych.



Rys. 3. Schemat budowy stożka do pomiaru składowej poziomej stanu naprężenia
Fig. 3. The scheme of the Lateral Stress Sensing Cone Penetrometer

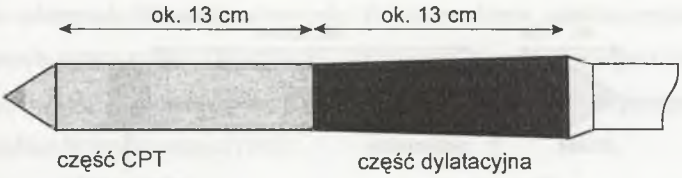
3.4. Stożek typu dylatocone (DCPT)

Prototypową końcówkę pomiarową typu „dylatocone" zaprojektowano i wyprodukowano w firmie A.P. van den Berg z Holandii. Składa się ona ze standardowego stożka CPT wraz z tuleją cierną i umieszczonej tuż za nią, części dylatometrycznej (Wierzbicki 2001a,b) (rys. 4). Zarówno prędkość penetracji, jak i częstość zapisu są takie jak w teście CPT. Podczas testu rejestrowane są trzy wartości: opór stożka, tarcie na pobocznicy i opór dylatacyjny (Wierzbicki i Lunne, 1999; Wierzbicki 2001a, Wierzbicki i inni, 2002). Do celów niniejszego artykułu wykorzystano badania przeprowadzone przez autora (Wierzbicki i Lunne, 1999; Wierzbicki 2001b). Interpretację przeprowadzono w oparciu o dwie procedury zaproponowane przez Wierzbickiego i Wołyńskiego (2002). Umożliwiają one ocenę współczynnika parcia spoczynkowego na podstawie charakterystyk penetracji DCPT oraz znajomości podstawowych cech badanego podłoża (równ. 1 i 2).

$$K_0 = 2{,}75 + 2{,}65I_D - 0{,}08\phi' - 0{,}35(f_{Pr}/f_{Ps}) - 0{,}003Q_t + 3{,}34f_s + 0{,}09Q_d \quad (1)$$

$$K_0 = 3{,}06 + 3{,}29I_D - 0{,}09\phi' - 0{,}54(f_{Pr}/f_{Ps}) - 0{,}003Q_t + 1{,}39f_s + 0{,}2Q_d + \quad (2)$$
$$+ 2{,}23\ 10^{-5}\ [Q_t/(f_Z/f_P)] - 0{,}09[Q_d/(f_{Pr}/f_{Ps})],$$

gdzie: I_D – stopień zagęszczenia; ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego; Q_t, Q_D – opór stożka i opór dylatacyjny znormalizowane o składową pionową stanu naprężenia; f_{Pr}, f_{Ps}, f_Z, f_P – procentowa zawartość frakcji piasku grubego, piasku średniego, żwirowej, piaszczystej.



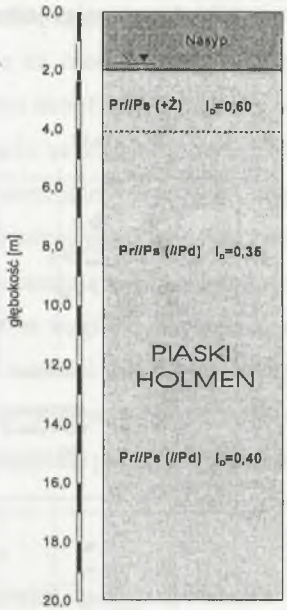
Rys. 4. Schemat budowy stożka typu dylatocone
Fig. 4. The scheme of the dilatocone

4. Charakterystyka miejsc badań

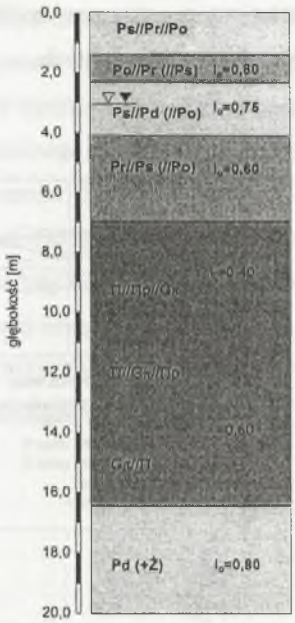
Badania przeprowadzono na dwóch poletkach doświadczalnych: na wyspie Holmen (Wierzbicki i Lunne, 1999) oraz w Toporowie (Wierzbicki 2001b).

W podłożu wyspy Holmen, do głębokości ok. 20 m, występują piaski średnie i grube w stanie luźnym i średniozagęszczonym, znane w literaturze światowej jako piaski z Holmen (Lunne i inni, 1997; Wierzbicki i Lunne, 1999) (rys. 5). Wyniki analizy składu mineralogicznego i stopnia obtoczenia wskazują na dominację kwarcu oraz ziaren zaklasyfikowanych jako półobtoczone. Osady te zostały zdeponowane pod powierzchnią wody około 2 do 3 tysięcy lat temu, jako dystalna część stożka fluwialnego rzeki Drammen. Warstwa powierzchniowa do głębokości około 4 m została sztucznie usypana w celu podwyższenia rzędnej wyspy nad poziom okalającego morza.

Na poligonie w Toporowie w podłożu występują osady dwóch serii niespoistych oraz rozdzielającej je serii spoistej (rys. 6). Dolna seria niespoista zbudowana jest z piasków drobnych, znajdujących się w stanie zagęszczonym, zwanych piaskami międzymorenowymi (Żynda, 1967). Zalegająca powyżej seria spoista zbudowana jest z drobnolaminowanych pyłów i glin pylastych pochodzenia zastoiskowego. Górna seria niespoista jest najsilniej zróżnicowana pod względem granulometrycznym. Składają się na nią osady fluwialne sandru dolinnego, reprezentowane głównie przez piaski grube i średnie z domieszkami oraz przewarstwienia żwirów. W składzie mineralogicznym dominuje kwarc i kwarcyty, a ziarna są półobtoczone. Stan osadów tej serii jest zmienny, oscylujący pomiędzy zagęszczonym i średniozagęszczonym.



Rys. 5. Profil podłoża na wyspie Holmen
Fig. 5. The subsoil profile of Holmen Island



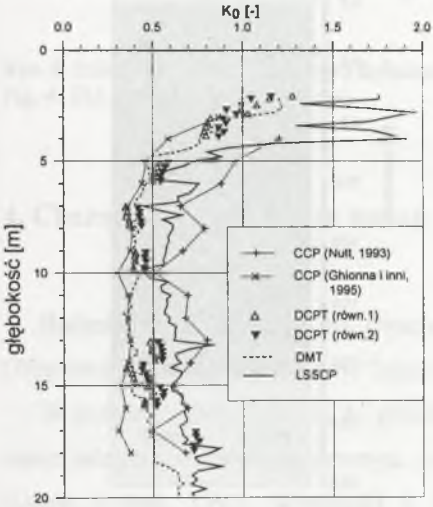
Rys. 6. Profil podłoża w Toporowie
Fig. 6. The subsoil profile of Toporów site

5. Rezultaty badań i ich analiza

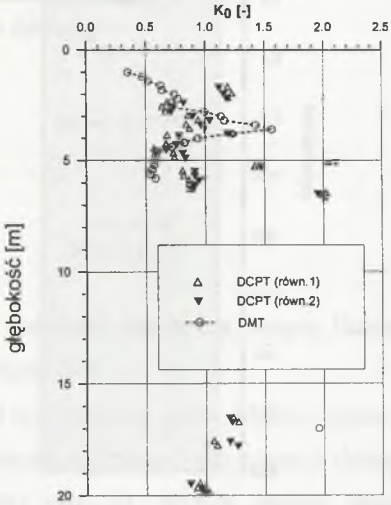
W wyniku pomiarów przeprowadzonych za pomocą presjometru, dylatometru oraz sondowań statycznych typu dylatocone uzyskano spodziewany obraz rejestrowanych charakterystyk testów ze zmianą głębokości. W przypadku badania LSSCP spośród dwóch wykonanych testów do dalszej analizy wykorzystano tylko rezultaty jednego z nich. Podczas pierwszego testu czujnik umieszczony w obrębie pobocznicy wykazywał ujemne wartości naprężenia, a czujnik położony za pobocznicą uległ trwałemu uszkodzeniu. Przyczyną tych niesprawności przyrządu okazały się ziarna piasku dostające się podczas penetracji pomiędzy membranę czujnika i obudowę stożka (Masood, 1990). Porównując jednak dostępne dane z odczytów prowadzonych równolegle za pomocą obu czujników zwraca uwagę brak dających się wytłumaczyć położeniem różnic pomiędzy nimi (Wierzbicki i Lunne, 1999).

Wartości współczynnika parcia spoczynkowego zostały obliczone dla każdej z metod badawczych, oddzielnie dla obydwu miejsc badań. Rezultaty przedstawiono na rys. 7 i 8. W przypadku poletka doświadczalnego w Toporowie w analizie pominięto środkową część

profilu, w której występują grunty spoiste. Zaprezentowane wyniki dotyczą więc jedynie serii górnej i dolnej osadów niespoistych.



Rys.7. Wartości K_0 piasków Holmen
Fig. 7. The K_0 values of Holmen sand



Rys.8. Wartości K_0 podłoża w Toporowie
Fig. 8. The K_0 values of Toporów subsoil

Analizując rezultaty z poligonu doświadczalnego Holmen, należy zwrócić uwagę na dużą zbieżność wyników uzyskanych za pomocą testów presjometrycznych (wg Ghionna i innych, 1995), dylatometrycznych i sondowania statycznego DCPT. Na tym tle wartości K_0 pochodzące z sondowania statycznego z końcówką LSCCP oraz metody interpretacji testów presjometrycznych wg Nutta (1993) są w widoczny sposób większe (różnice dochodzą do ponad 50 %). W przypadku LSCCP wpływ na taki rezultat może mieć bezpośrednie przyjęcie odczytów czujnika za wartości składowej poziomej. Nie uwzględnia się w tej metodzie tym samym wpływu zmiany stanu naprężenia wywołanego przez penetrujący stożek. Wpływ ten jest większy w przypadku warstw gruntów o grubszych ziarnach i bardziej zagęszczonych – „sztywniejszych" (Lunne i inni, 1997). Takie wytłumaczenie znajduje potwierdzenie w przypadku najwyżej leżących warstw piasków Holmen, gdzie różnice w wyznaczonym K_0 są największe. Jednocześnie należy przypuszczać, że niekorzystny wpływ penetracji w trakcie badania na jego rezultaty został w dużej mierze zneutralizowany w przypadku sondowania DCPT. Efekt ten uzyskano poprzez wykorzystanie procedur interpretacyjnych uwzględniających zarówno charakterystyki penetracji, jak i podstawowe cechy podłoża. Jednocześnie zarówno w Toporowie, jak i Holmen nie zauważa się istotnych różnic pomiędzy dwoma stosowanymi metodami interpretacyjnymi tego testu.

Wyniki otrzymane na poletku badawczym w Toporowie, w górnej serii niespoistej, wskazują na istotny wpływ, jaki ma rodzaj i stan gruntu na wyznaczone wartości K_0. W przypadku testu DMT dodatkowy wpływ na otrzymane wyniki wydaje się mieć stan gruntu w powiązaniu ze zmianą proporcji składu granulometrycznego, natomiast w przypadku testu DCPT szczególne znaczenie odgrywa wzrost obecności frakcji żwirowej. W bardziej homogenicznej pod względem uziarnienia serii dolnej osadów niespoistych rezultaty testu DCPT prezentują wyraźny trend wraz z głębokością. Jedyny odczyt testu DMT, jaki udało się uzyskać (ze względu na przekroczenie skali pomiarowej urządzenia), wskazuje na wyraźnie wyższe wartości K_0 niż w przypadku badania DCPT. Różnicę tę można wytłumaczyć ponownie istotnym wpływem stanu gruntu na charakterystyki testu DMT, którego zmiany nie są uwzględniane podczas interpretacji testu.

6. Wnioski i podsumowanie

Zestawienie rezultatów oceny współczynnika parcia spoczynkowego wyznaczonego za pomocą różnych metod badań in situ pozwala na dokonanie ogólnej analizy zastosowania tych metod.

Biorąc pod uwagę występowanie w profilach badawczych osadów niespoistych o dużej nieraz zawartości frakcji grubej, mało efektywnym urządzeniem wydaje się być stożek LSSCP. Jest on mało odporny na uszkodzenia mechaniczne, a konstrukcja elementów pomiarowych nie zapewnia pewności otrzymywanych rezultatów. Również przyjęcie za składową poziomą wartości bezpośrednio rejestrowanych sprzyja przeszacowaniu wartości K_0.

Pomimo uwzględnienia podczas interpretacji testu DCPT wpływu zmian frakcji osadu na otrzymywane wartości K_0 nie udało się w wystarczający sposób zniwelować tego wpływu w warstwach zawierających znaczne domieszki frakcji żwirowej (pospółki, żwiry). W miejscu napotkania warstewek żwirowych o niewielkiej nawet miąższości obserwowane są gwałtowne i krótkotrwałe przyrosty wyznaczanych wartości współczynnika.

Z kolei na rezultaty testu DMT istotny wpływ może mieć stan, jak i rodzaj gruntu. Obserwowane przyrosty wyznaczonego współczynnika parcia spoczynkowego w wyraźny sposób pokrywają się z warstwami silniej zagęszczonymi, różnoziarnistymi, zbudowanymi z piasku średniego i grubego.

Podsumowując, należy stwierdzić, że zarówno testy presjometryczne, jak i dylatometryczne są tradycyjnie wykorzystywane do oceny współczynnika parcia spoczynkowego. Przeprowadzone badania potwierdzają pod tym względem wcześniejsze doświadczenia. Spośród dwóch przedstawionych prototypowych technik badawczych, wykorzystujących sondowanie statyczne, badanie za pomocą stożka zaopatrzonego w czujniki pomiarowe (LSCCP) wydaje się być metodą zawodną (uszkodzenia mechaniczne) i mało wiarygodną (przyjęcie bezpośrednich odczytów czujnika za wartości składowej naprężenia). Rezultaty badań uzyskane przy wykorzystaniu drugiej z modyfikacji aparatury do sondowania statycznego, testu DCPT, pozostają w dużej zgodności z wynikami tradycyjnie już stosowanych testów DMT i presjometrycznych.

Podziękowania

Autor dziękuje Norweskiemu Instytutowi Geotechnicznemu i panu Johnowi Powellowi za udostępnienie wyników badań do niniejszej pracy. Wykonanie samodzielnych badań autora było możliwe dzięki finansowej pomocy A.P. v.d. Berga z Holandii, Akademii Rolniczej im. A. Cieszkowskiego w Poznaniu, Norweskiego Instytutu Geotechnicznego oraz firmy Hebo – Poznań.

LITERATURA

1. Briaud J.L., Miran J.: The flat dilatometer test. U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Adm. 1992, Publ. No. FHWA-SA-91-044.
2. Ghionna V.N., Jamiołkowski M., Pedroni S., Piccoli S.: Cone pressuremeter tests in Po river sand. The Pressuremeter and its New Avenues, Proc. 4th Int. Symp. 1995, 471-480.
3. Lacasse S., D'Orazio T.B., Bandis C.: Dilatometer tests in Holmen sand. NGI Internal Report No. 40019-4, Oslo 1985.
4. Lunne T., Robertson P.K., Powell J.: Cone penetration testing in geotechnical practice. E & FN Spon, London 1997.
5. Marchetti S.: In situ tests by flat dilatometer. ASCE Publ. 1980, JGED, v.106, No. GT3, 299-321.
6. Masood T., Mitchel J.K., Vaslestad J., Lunne T., Mokkelbost K.H.: Testing with lateral stress cone, special dilatometer and stepped blade at tree sites in Drammen. NGI Report No. 521600-1, Oslo 1990.
7. Mokkelbost K.H.: The development of semi-empirical design procedures for foundations. NGI factual report No. 521551-10, Oslo 1996.

8. Nutt N.R.F.: Development of the Cone Pressuremeter. Phd thesis, University of Oxford 1993.
9. Powell J., Shields C.H.: The cone pressuremeter – a study of its interpretation in Holmen sand. Proc. of the 14th Int. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg 1997, 573-576.
10. Schmertmann J.H.: Reviesed procedure for calculating K_0 and OCR from DMTwith I_D>1,2 and which incorporates the penetration measurements to permit calculating the plane strain angle. DMT Digest No. 1, GPE Inc., Gainsville, USA 1983.
11. Tsang D.: Prediction of cone penetration resistance and its application to liquefation assessment. Disertation presented to the Univ. of California, Berkeley, for the degree of Phd, 1989.
12. Wierzbicki J., Lunne T.: NGI's research site at Holmen, Drammen. NGR Report 972508-1, Oslo 1999.
13. Wierzbicki J., Młynarek Zb., Welling E.: Wyznaczenie stopnia zagęszczenia piasków z Holmen (Norwegia) i Oosterschelde (Holandia) metodą statycznego sondowania typu dylatocone. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, Poznań 2002, 495-505.
14. Wierzbicki J., Wołyński W.: Statistical model determining coefficient of earth pressure at rest by means of static penetration, case of noncohesive soil. Studia Geotechnica et Mechanica (w druku), Wrocław 2002.
15. Wierzbicki J.: Próba wykorzystania stożka dylatometrycznego do wyznaczenia modułów ściśliwości piasków fluwialnych. Przegląd Naukowy SGGW w Warszawie z. 20, Warszawa 2001 (a), 99-107.
16. Wierzbicki J.: Wykorzystanie techniki statycznego sondowania do oceny wskaźnika przekonsolidowania niektórych osadów plejstoceńskich. Rozprawa Doktorska Uniw. im. A. Mickiewicza w Poznaniu 2001(b).
17. Withers N.J., Schaap L.H.J., Dalton C.P.: The development of full displacement pressuremeter. Proc. of Second Int. Symposium on the Pressuremeter and its Marine Applications 1986, ASTM SPT 950, 38-56.
18. Żynda S.: Geomorfologia przedpola moreny czołowej stadiału poznańskiego na obszarze Wysoczyzny Lubuskiej. Prace PTPN-komisji geograficzno-geologicznej, t.8, z.1, Poznań 1967.

Recenzent: Dr hab. inż. Alojzy SZYMAŃSKI, prof. SGGW

Abstract

The coefficient of earth pressure at rest (K_0) is one of the most important features, which describe subsoil. It is impossible to obtain the K_0 by laboratory tests (in non-cohesive soils) or very difficult and problematic (in cohesive soils). The only way in that case is to carry out in situ tests.

The results of four types of in situ tests, carried out in non cohessive soils, have been presented and discussed in this paper. Two of them (Cambridge Cone Pressuremeter and Marchetti Dilatometer) are commonly use to evaluate the K_0. In another two cases (Lateral Stress Sensing Cone Penetrometer and Dilatocone) the solutions are prototype.

Tests were carried out at two test sites: Holmen Island (Norway) and Toporów (Poland). Both of them consisted of sand and some gravel, but at the Holmen test site the subsoil is considered as normally consolidated and at the Toporów site the lower part of sand profile looks strongly overconsolidated.

The results of Dilatocone CPT shows good agreement with the results of the commonly used techniques. The use of Lateral Stress Sensing Cone Penetrometer looks more problematic because of a high probability of the equipment malfunction. The obtained values of K_0 (as the same as in the case of one of Cambridge Cone Pressuremeter calculation methods) also look too high in described example.