

Interpretacja sondowania statycznego w pełnym zakresie głębokości

Dr hab. inż. Lech Bałachowski, prof. PG

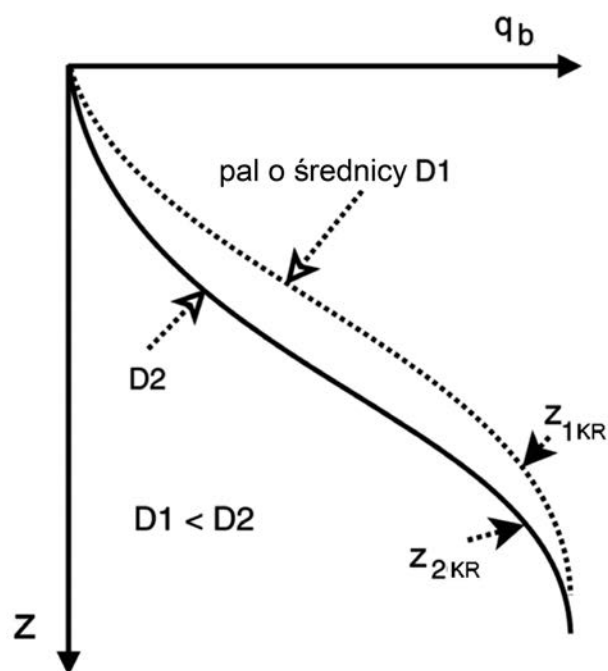
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Interpretacja sondowań statycznych w pełnym zakresie głębokości stanowi ciekawe zagadnienie badawcze o dużym znaczeniu praktycznym. Projektowanie posadowień platform pełnomorskich, pali wbijanych oraz zakotwień wymaga głębokiego rozpoznania podłoża gruntowego i odpowiedniej interpretacji sondowań z wykorzystaniem badań modelowych w komorze kalibracyjnej w zakresie przekraczającym głębokość krytyczną. Intensywny rozwój geotechniki morskiej związany z projektowaniem rurociągów podmorskich, kabli energetycznych i telekomunikacyjnych posadowionych na dnie morskim stwarza zapotrzebowanie na wykonanie rozpoznania geotechnicznego w strefie przypowierzchniowej. Istotna jest tu zatem właściwa interpretacja wyników sondowań w zakresie głębokości, nie przekraczających głębokości krytycznej. Pełny opis procesu penetracji stożka powinien zatem uwzględniać interpretację badań w strefie przypowierzchniowej i w zakresie głębokości odpowiadającym pracy fundamentu głębokiego. Właściwa interpretacja wyników badań powinna opierać się na odpowiednio przeprowadzonych badaniach modelowych oraz pomiarach terenowych. Badania modelowe wymagają odpowiednio przygotowanego masywu gruntowego oraz możliwości kontroli stanu zagęszczenia, poziomu naprężenia oraz warunków brzegowych.

Pierwsze badania modelowe dotyczące sondowań statycznych, spełniające powyższe kryteria, przeprowadzono w Uniwersytecie Grenoble [18] w wielkowymiarowym zbiorniku o głębokości 7 m wypełnionym średnio zagęszczonym lub zagęszczonym piaskiem. Pozwoliły one na rejestrację oporu stożka w pełnym zakresie procesu ciągłej penetracji, do uzyskania wartości granicznej oporu stożka, po przekroczeniu głębokości krytycznej. Tak uzyskana wartość graniczna oporu stożka lub oporu podstawy pala rośnie nieznacznie z głębokością w miarę dalszego zagłębiania modelu. Badania prowadzone na palach modelowych o różnej średnicy wciskanych z powierzchni masywu gruntowego (rys. 1) wykazały [18], że przy zadanym za-

gęszczeniu gruntu głębokość krytyczna jest osiągnięta wcześniej w przypadku pali o mniejszej średnicy.

Kolejnym przełomem w interpretacji wyników sondowań statycznych była konstrukcja komory kalibracyjnej umożliwiającej badania modelowe w ściśle określonych warunkach stanu naprężenia i odkształcenia. Pierwszą komorę kalibracyjną o podatnych ściankach bocznych skonstruowano w 1969 roku w laboratorium drogowym Country Road Boards (CRB) w Melbourne (Australia) [19]. Komora ta, w odróżnieniu od zbiorników o nieodkształcalnych ścianach, umożliwia kontrolę i sterowanie



Rys. 1. Głębokość krytyczna w przypadku wciskania pali o różnej średnicy

składową poziomą naprężenia w gruncie. Możliwe jest zatem niezależne przykładanie składowych poziomej i pionowej stanu naprężenia wokół masywu gruntowego, odpowiadającym modelowanej głębokości w gruncie i historii naprężenia. Badania przeprowadzone w szeregu komór kalibracyjnych skonstruowanych w Stanach Zjednoczonych [23], Włoszech [10], Japonii, Norwegii [19], Wielkiej Brytanii, Francji [13], na Tajwanie i w Polsce [3, 8] pozwoliły na opracowanie zależności do interpretacji wyników sondowań statycznych w piaskach o różnej mineralogii i granulometrii, tj. cechujących się różną ściśliwością, z uwzględnieniem wpływu składowej poziomej lub średniego naprężenia w gruncie [4, 9, 17, 23]. W badaniach modelowych w komorze kalibracyjnej, przeprowadzanych zazwyczaj przy składowej pionowej stanu naprężenia efektywnego nie mniejszej niż 50 kPa, zakłada się, że stożek odwzorowuje pracę fundamentu głębokiego. Uzyskane zależności korelacyjne poprawiano ze względu na wpływ warunków brzegowych [6, 7, 22], jednakże biorąc pod uwagę istotny wpływ warunków brzegowych na opór stożka, zależności te nie powinny być stosowane [15, 17], gdy składowa pionowa naprężenia efektywnego w gruncie jest mniejsza niż 50 kPa.

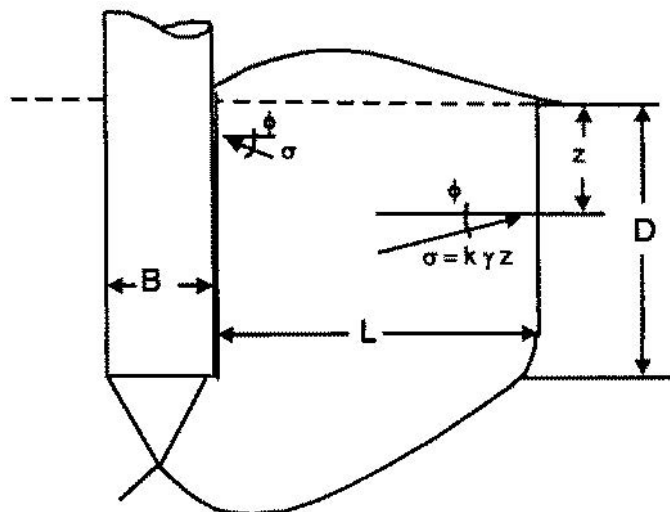
Kolejny impuls w interpretacji sondowania statycznego jest związany z rozwojem badań modelowych w wirówce geotechnicznej. Interpretacja sondowania statycznego wykonywanego „w locie” uwzględnia pełny proces wciskania stożka począwszy od małych i pośrednich głębokości do głębokości znacznie przekraczających wartość krytyczną. Badania takie są realizowane z zastosowaniem mini-stożka, a zachowanie prototypu jest analizowane na podstawie pomiarów na modelu, spełniającym warunki podobieństwa modelowego [12, 14, 16]. Badania są wykonywane w celu sprawdzania jednorodności masywu gruntowego, analizy parametrycznej oraz oceny wpływu warunków brzegowych [12, 16].

OPIS WCISKANIA STOŻKA/PALA

Sondowanie statyczne w średnio zagęszczonych i zagęszczonych gruntach niespoistych jest procesem złożonym, który przebiega w trzech fazach. W fazie początkowej odpowiadającej pracy fundamentu bezpośredniego zagłębianie stożka powoduje wyraźne wypieranie gruntu na powierzchni terenu w sąsiedztwie fundamentu. W drugiej fazie jest formowana cylindryczna powierzchnia zniszczenia (rys. 2) z liniami poślizgu dochodzącymi do powierzchni terenu [11], a opór stożka przyrasta parabolicznie z głębokością wciskania. Po przekroczeniu głębokości krytycznej (faza trzecia) linie poślizgu nie dochodzą już do powierzchni terenu, a opór zagłębianego stożka nieznacznie wzrasta wraz z poziomem naprężenia w gruncie. Opór stożka można wyznaczyć analitycznie metodą rozszerzającej się sfery [21] lub ścieżki odkształcenia.

Analiza w zakresie małych i pośrednich głębokości penetracji

Gdy głębokość sondowania nie osiąga głębokości krytycznej, w gruncie formuje się walcowa powierzchnia poślizgu w wypiętrzaniu gruntu na powierzchni terenu.



Rys. 2. Cylindryczna powierzchnia zniszczenia [11]

Opór stożka o średnicy B można wówczas opisać [20] wzorem na nośność fundamentu bezpośredniego:

$$q_c = 0,3\gamma'BN_\gamma + \sigma'_v N_q^* \quad (1)$$

$$N_q^* = N_q \left(1 + K \sin \phi' \frac{D}{L} \right) \quad (2)$$

γ' – ciężar objętościowy gruntu z uwzględnieniem wyporu,

ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrzznego,

N_γ – współczynnik nośności fundamentu związany ze średnicą fundamentu,

σ'_v – składowa pionowa naprężenia efektywnego na poziomie stożka,

N_q – współczynnik nośności dla fundamentu bezpośredniego w stanie osiowo-symetrycznym,

N_q^* – zmodyfikowany współczynnik nośności,

K – współczynnik bezwymiarowy związany z tarcie powierzchni walca o otaczający masyw gruntu (rys. 2),

D – zagłębienie stożka,

L – zasięg uformowanej powierzchni walca.

Zasięg powierzchni walca w kierunku poziomym można określić [20]:

$$L = B \cdot e^{\frac{\pi}{2} \cdot \text{tg} \phi'} \cdot \text{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (3)$$

Współczynnik nośności N_q można wyznaczyć w przybliżeniu [20]:

$$N_q = 1,0584e^{6,1679 \cdot \text{tg} \phi'} \quad (4)$$

Pomijając we wzorze na nośność fundamentu (1) wpływ członu związanego ze średnicą stożka, otrzymuje się wyrażenie:

$$q_c = \gamma' DN_q^* \quad (5)$$

$$q_c = \gamma' DN_q \left(1 + K \sin \phi' \frac{D}{L} \right) \quad (6)$$

Wartość współczynnika K określa się w procedurze kalibracyjnej [20] polegającej na dopasowaniu kąta tarcia wewnętrzznego do wyliczonego przyrostu oporu stożka w drugiej fazie penetracji. W analizowanym mechanizmie poślizgu zakłada się, że wartości kąta tarcia wewnętrzznego piasku zmniejszają się ze wzrostem poziomu naprężenia w gruncie, zgodnie z wynikami badań laboratoryjnych w aparacie trójosiowego ściskania. Wy-

znaczony w ten sposób kąt tarcia wewnętrzznego maleje zatem wraz zagłębieniem stożka. W pracy [20] autorzy analizowali wartości współczynnika K w przedziale od 0,5 do 4, a najlepszą zgodność wyników uzyskali przy $K = 0,7$.

Przeprowadzona analiza płytkich sondowań w nawodnionych gruntach piaszczystych [20] wykazała, że głębokość krytyczna w przypadku standardowej końcówki CPTU jest osiągnięta przy zagłębieniu stożka od 0,8 m do 1,8 m, czyli przy penetracji w zakresie od około 22 do 50 średnic stożka. Opór stożka poniżej głębokości krytycznej zależy jedynie od stopnia zagęszczenia i nieznacznie rośnie z głębokością. Przyrost oporu stożka z głębokością jest praktycznie pomijalny w zakresie niewielkich (od 20 kPa do 30 kPa) wartości składowej pionowej naprężenia w gruncie [20], tj. w przypadku płytkich sondowań. Badania w komorze kalibracyjnej oraz w wirówce geotechnicznej wykazały jednak istotny wpływ poziomego naprężenia na opór stożka przy wysokim poziomie naprężenia w gruncie.

Analiza sondowań poniżej głębokości krytycznej

Przebieg procesu penetracji poniżej głębokości krytycznej, przy wysokim poziomie naprężenia, można modelować w komorze kalibracyjnej lub wirówce geotechnicznej. W pierwszym przypadku modeluje się jedynie część procesu penetracji od zagłębienia odpowiadającego założonej wartości składowej pionowej naprężenia działającego na górnej powierzchni masywu gruntowego w komorze kalibracyjnej. Pomijamy zatem proces wciskania stożka od powierzchni terenu, koncentrując się na wybranym wycinku krzywej penetracji. Większe możliwości daje modelowanie w wirówce geotechnicznej, gdzie można odtworzyć przebieg procesu penetracji stożka w całym zakresie głębokości. Badania są wykonywane przy użyciu modeli stożka w zmniejszonej skali. Przykład sondowania statycznego w zagęszczonym ($I_D = 0,8$) piasku średnim (Hostun) w wirówce geotechnicznej LCPC w Nantes [1] przedstawiono na rys. 3. W badaniach stosowano mini-stożek o średnicy 12 mm. Opis procedury badawczej można znaleźć w pracach [1, 5]. Krzywa przedstawiona na rys. 3 obejmuje fazę małych i pośrednich głębokości, jak i penetrację w zakresie odpowiadającym pracy fundamentu głębokiego, tj. poniżej głębokości krytycznej, gdzie obserwuje się wyraźny przyrost oporu stożka z głębokością. Opór stożka w zależności od względnego zagłębienia (z/B) przedstawiony jest dla tego samego badania na rys. 4. Można zauważyć, że głębokość krytyczną osiągamy już przy zagłębieniu odpowiadającym 13 średnicom mini-stożka.

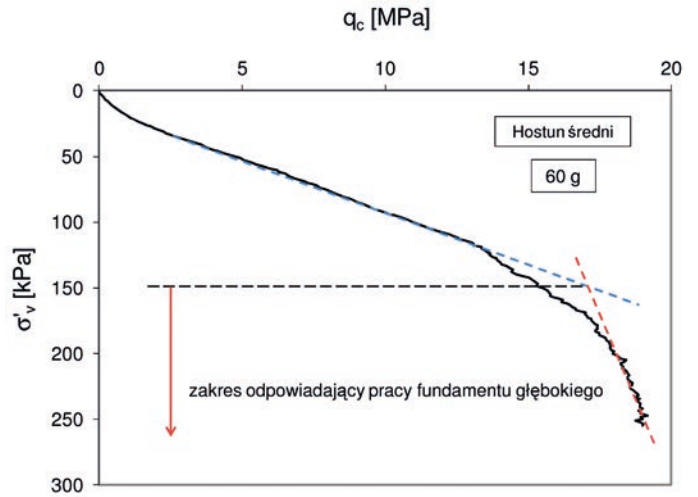
Badania w komorze kalibracyjnej prowadzone przez zespół profesora Jamiolkowskiego wykazały [17], że poniżej głębokości krytycznej stosunek oporu stożka do pierwiastka kwadratowego ze składowej pionowej naprężenia w gruncie pozostaje w przybliżeniu stały. Taka sama zależność będzie również obowiązywać (rys. 5) przy znormalizowanym oporze stożka q_{c1} :

$$q_{c1} = \frac{q_c}{p_a} \sqrt{\frac{p_a}{\sigma'_{v0}}} \quad (7)$$

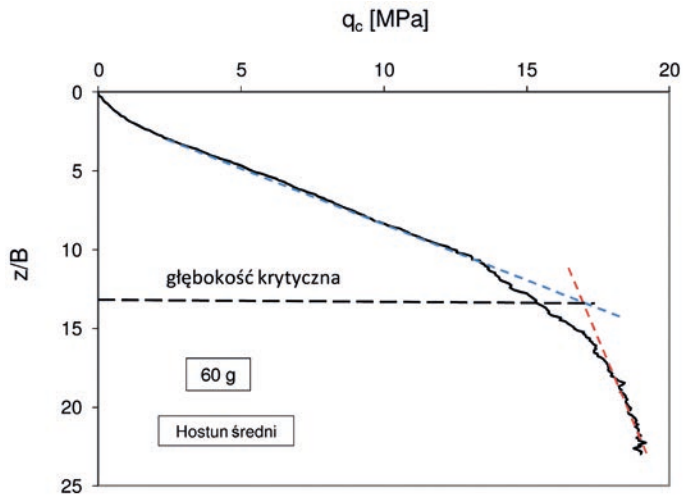
gdzie:

p_a – ciśnienie atmosferyczne równe 100 kPa,

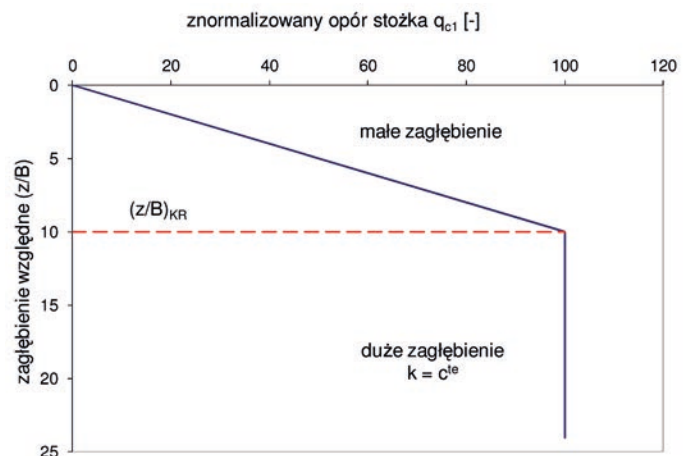
σ'_{v0} – składowa pionowa naprężenia efektywnego na danej głębokości.



Rys. 3. Krzywa penetracji stożka w badaniu modelowym w wirówce geotechnicznej w piasku średnim przy przyspieszeniu 60g



Rys. 4. Opór stożka w badaniu modelowym w wirówce geotechnicznej w piasku średnim przy przyspieszeniu 60g w zależności od zagłębienia względnego (z/B)



Rys. 5. Wyidealizowany schemat oporu stożka w zależności od zagłębienia względnego

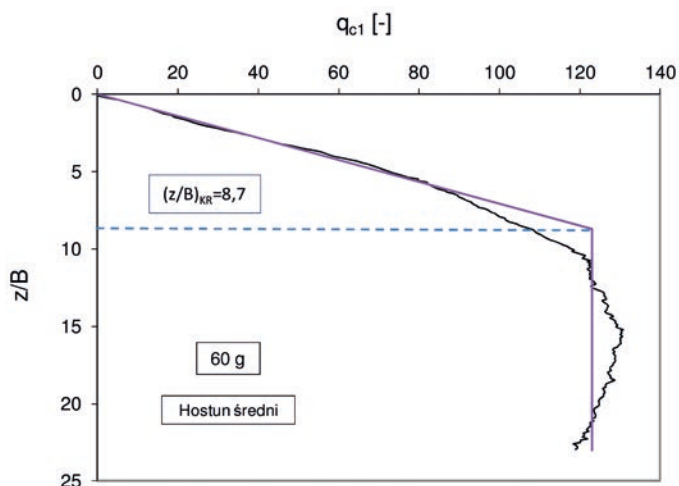
PORÓWNANIE WYNIKÓW UZYSKANYCH W BADANIACH MODELOWYCH W WIRÓWCE I KOMORZE KALIBRACYJNEJ

Taki sposób prezentacji wyników sondowań pozwala uwzględnić i porównać wciskanie standardowego stożka, mini-stożka w badaniach polowych lub modelowych w zmniejszonej skali oraz opór podstawy pali modelowych wciskanych w badaniach w komorze kalibracyjnej [2]. Przyrost oporu stożka w początkowej fazie penetracji, wyrażony krzywą paraboliczną zgodnie z równaniem (6), daje się opisać linią prostą (rys. 5), dzięki zastosowaniu normalizacji według równania (7). Krytyczne zagłębienie względne $(z/B)_{KR}$ zależy głównie od uziarnienia, mineralogii, zagęszczenia i prekonsolidacji gruntu oraz średnicy stożka.

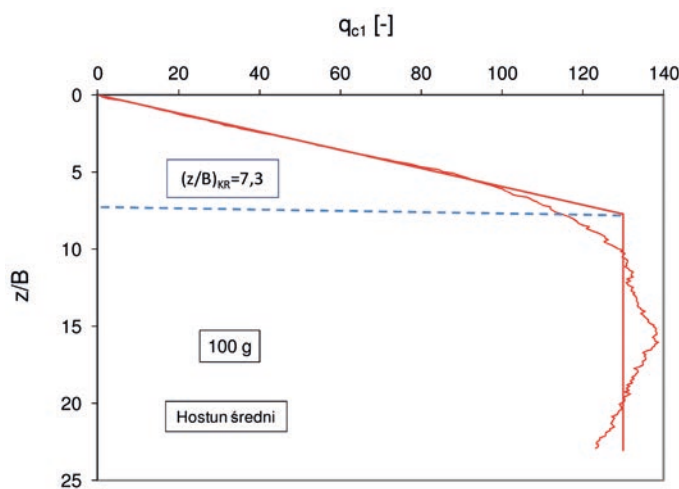
Przykłady interpretacji krzywych penetracji mini-stożka w wirówce geotechnicznej przedstawiono na rys. 6 i 7, z wyrażonym podziałem na część liniową wykresu i w przybliżeniu stałą wartość q_{c1} poniżej krytycznego zagłębienia względnego. Stała wartość q_{c1} oraz krytyczne zagłębienie względnego rzędu $7 \div 8$ są bardzo zbliżone w obu badaniach modelowych. Pewne odstępstwa od wyidealizowanego schematu (rys. 5) można zaobserwować przy przejściu ze stanu przy małym i pośrednim zagłębieniu do fazy odpowiadającej pracy fundamentu głębokiego.

Wyniki sondowań statycznych przeprowadzonych w komorze kalibracyjnej w Grenoble porównano z mobilizacją oporu stożka w badaniu w wirówce geotechnicznej LCPC Nantes [1]. Oba badania wykonano w masywie gruntowym przygotowanym metodą deszczu piaskowego, w gruncie suchym, normalnie skonsolidowanym. W badaniach stosowano piasek średni Hostun ($d_{50} = 0,32$ mm) o stopniu zagęszczenia $I_D = 0,8$.

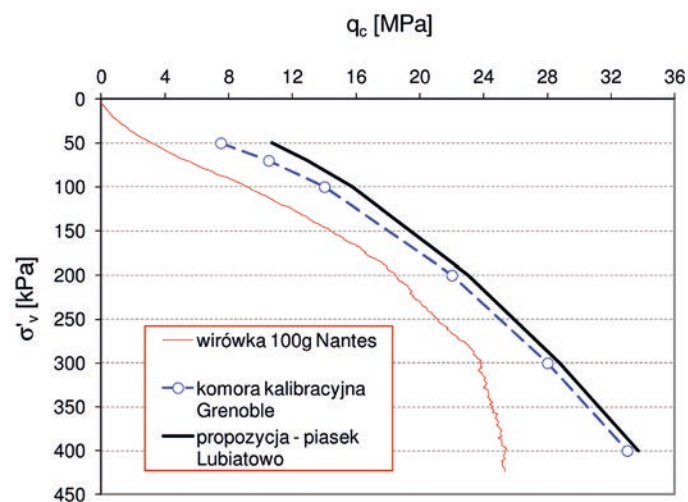
Krzywą ciągłej penetracji stożka przy przyspieszeniu w wirówce równym 100g porównano (rys. 8) z wynikami sześciu badań w komorze kalibracyjnej przy składowej pionowej naprężeniu w zakresie od 50 kPa do 400 kPa. Analizując wyniki w zakresie odpowiadającym pracy fundamentu głębokiego, można stwierdzić, że opór stożka rejestrowany podczas ciągłej penetracji jest systematycznie mniejszy od wartości q_c pomierzonych w komorze kalibracyjnej. Przy wysokim poziomie naprężenia ($\sigma'_v > 300$ kPa) opory stożka mierzone w badaniach w wirówce wykazują tendencję do stabilizacji, podczas gdy w badaniach w komorze kalibracyjnej obserwuje się nadal znaczący przyrost q_c z głębokością. Może to być spowodowane wpływem warunków brzegowych w badaniach w komorze, zwiększonym gradientem naprężenia w badaniu w wirówce, a przede wszystkim różnicą pomiędzy penetracją ciągłą z powierzchni gruntu a rozpoczęciem mobilizacji oporu stożka przy danym poziomie składowej pionowej naprężenia w komorze. Dodatkowo na wykresie umieszczono zaproponowaną krzywą [6] interpretacji sondowań statycznych w piasku drobnym Lubiato ($d_{50} = 0,21$ mm) uzyskaną z badań w komorze kalibracyjnej w Laboratorium Geotechnicznym Politechniki Gdańskiej. Krzywa ta uwzględnia poprawki na wpływ warunków brzegowych na opór stożka otrzymany w badaniach w komorze na piasku Lubiato [6, 7]. Należy podkreślić wysoką zgodność krzywych uzyskanych z badań w komorze kalibracyjnej w Grenoble i Gdańsku, na równoziarnistych piaskach kwarcowych, pomimo nieco innej granulometrii obu piasków modelowych. Pewne różnice obserwowane przy mniejszym poziomie naprężenia w komorze mogą wynikać



Rys. 6. Znormalizowany opór stożka w zależności od zagłębienia względnego w badaniu modelowym w wirówce geotechnicznej przy 60g



Rys. 7. Znormalizowany opór stożka w zależności od zagłębienia względnego w badaniu modelowym w wirówce geotechnicznej przy 100g



Rys. 8. Porównanie oporu stożka w badaniach modelowych w wirówce geotechnicznej w LCPC Nantes oraz komorze kalibracyjnej w Uniwersytecie Grenoble i na Politechnice Gdańskiej

z nieuwzględnienia poprawki na wpływ warunków brzegowych przy danych otrzymanych z badań w komorze w Grenoble. Założono, że wyniki uzyskane w komorze o średnicy 1,2 m przy zastosowaniu stożka o standardowej średnicy są nieobarczone wpływem warunków brzegowych. Takie założenie może nie obowiązywać w przypadku zagęszczonych piasków badanych przy stosunkowo niedużym ($\sigma'_v \leq 100$ kPa) poziomie naprężenia w komorze kalibracyjnej.

PODSUMOWANIA I WNIOSKI

Przeprowadzona analiza badań modelowych w komorze kalibracyjnej oraz wirówce geotechnicznej umożliwia pełen opis procesu penetracji stożka w szerokim zakresie głębokości. W strefie małych i pośrednich głębokości opór stożka przyrasta parabolicznie z głębokością, poniżej głębokości krytycznej jest obserwowany pewien przyrost oporu stożka z głębokością, widoczny zwłaszcza w badaniach modelowych w komorze i wirówce geotechnicznej. Głębokości krytyczne obserwowane z krzywych penetracji stożka w badaniach w wirówce geotechnicznej są znacznie większe od obserwowanych w badaniach laboratoryjnych i terenowych płytkich sondowań. Zastosowanie w interpretacji znormalizowanego oporu stożka q_{cl} pozwala na liniową aproksymację przyrostu oporu stożka z głębokością w strefie małych i pośrednich głębokości. Przy dużych głębokościach penetracji znormalizowany opór stożka pozostaje w przybliżeniu stały. Wartości oporu stożka z krzywej ciągłej penetracji stożka w badaniach w wirówce geotechnicznej są nieco niższe od otrzymanych z badań w komorze kalibracyjnej w wąskim przedziale składowej pionowej naprężenia w gruncie. Ponadto, opór stożka w badaniach w wirówce geotechnicznej przejawia tendencję do stabilizacji przy wysokim poziomie naprężenia w gruncie. Interpretacja wyników badań modelowych w komorze kalibracyjnej Uniwersytetu w Grenoble i komorze w Laboratorium Geotechnicznym Politechniki Gdańskiej przeprowadzonych na piaskach modelowych o zbliżonej granulometrii i mineralogii wykazuje dobrą zgodność uzyskanych wartości oporu stożka.

LITERATURA

1. Bałachowski L.: Différents aspects de la modélisation physique du comportement des pieux: Chambre d'Étalonnage et Centrifugeuse. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 1995.
2. Bałachowski L., Dembicki E.: Une étude de pieux foncés dans la chambre d'étalonnage. Journées Nationales pour la Géotechnique et la Géologie d'Ingénieurs, Nancy, 8-9 Octobre, pp. 11, 2002.
3. Bałachowski L., Dembicki E.: La construction d'une chambre d'étalonnage à l'Université Technique de Gdańsk. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 25, No 1-2, 21-26, 2003.
4. Bałachowski L.: Penetration resistance of Lubiatowo sand in calibration chamber tests, *Archives of Hydro-engineering and Environmental Mechanics*, Vol. 53, No.4, 2006, 3-21.
5. Bałachowski L.: Size effect in centrifuge cone penetration tests, *Archives of Hydro-engineering and Environmental Mechanics*, Vol. 54, No.3, 2007, 161-181.

6. Bałachowski L., Kurek N.: Influence of boundary conditions in calibration chamber, *Archives of Civil Engineering*, LIV, 4, 2008, 653-668.
7. Bałachowski L.: Physical modeling in sands in a wide range of stress level. Application to the calibration of CPTU and DMT tests, *Monografia 88, Politechnika Gdańska*, 2008.
8. Bałachowski L.: Badania modelowe w komorze kalibracyjnej. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 5/2014, 458-467.
9. Been K., Crooks J. H. A., Becker D. E., Jefferies M. G.: The cone penetration test in sands. Part I. State parameter interpretation. *Géotechnique* 36, No. 2: 1986, 239-249.
10. Bellotti R., Bizzi G., Ghionna V.: Design, construction and use of a calibration chamber, *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, 24-27 May 1982, 439-446.
11. Biarez J., Gresillon J. M.: Essais et suggestions pour le calcul de la force portante des pieux en milieu pulvérulent. *Géotechnique*, September 1972.
12. Bolton M. D., Gui M. W., Garnier J., Corté J. F., Bagge G., Laue J., Renzi R.: Centrifuge cone penetration tests in sand. *Géotechnique*, 49 (4), 1999, 543-552.
13. Foray P.: Scale and boundary effects on calibration tests, *Proceedings of the 1st International Conference on Calibration Chamber Testing*, Clarkson Univ. Potsdam, USA, 1991, 147-160.
14. Garnier J.: Validation of numerical and physical models: Problem of scale effects, *Proceedings of XIV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, 1997, 659-662.
15. Ghionna V. N., Jamiolkowski M.: A critical appraisal of calibration chamber testing in sands, *Proceedings of the 1st International Conference on Calibration Chamber Testing*, Clarkson Univ. Potsdam, USA, 1991, 13-37.
16. Gui M. W., Bolton M. D., Garnier J., Corté J. F., Bagge G., Laue J., Renzi R.: Guidelines for cone penetration tests in sand. *Centrifuge'98*. Tokyo, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 1, 1998, 155-160.
17. Jamiolkowski M., Lo Presti D.C.F., Manassero M.: Evaluation of Relative Density and Shear Strength of Sands from CPT and DMT. *Symposia in Honor of C. C. Ladd. Soil Behavior and Soft Ground Construction. Geotechnical Special Publications No. 119*, 5-6 October, Cambridge, Massachusetts, USA, 2001.
18. Kérisel J., Adam: Fondations profondes, *Annales de l'ITBTP, Série Sols et Fondations*, No. 39, Paris, Novembre 1962.
19. Lunne T., Robertson P. K., Powell J. J. M.: *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Blackie Academic and Professional, 1997.
20. Puech A., Foray P.: Refined model for interpreting shallow penetration CPTs in sands. *Proc. Offshore Technology Conference*, Houston, Texas U.S.A., 6-9 May. Paper No. 14275, 2002.
21. Salgado R., Mitchell J. K., Jamiolkowski M.: Cavity expansion and penetration resistance in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123 (4), 1997, 344-354.
22. Salgado R., Mitchell J. K., Jamiolkowski M.: The effect of chamber size and boundary conditions on penetration resistance measured in calibration chamber. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(9), 1998, 878-888.
23. Schmertmann J. H.: Guidelines for cone penetration test, performance and design. US Federal Highway Administration, Washington, DC, Report, FHWA-TS-78-209, 1978.
24. Yu H. S., Mitchell J. K.: Analysis of cone resistance: review of methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(2), 1998, 140-149.