

## **Badania modelowe w komorze kalibracyjnej**

**Dr hab. inż. Lech Bałachowski**

**Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska**

Konstrukcja i rozwój nowych stanowisk do badań modelowych w geotechnice, takich jak komory kalibracyjne i wirówki geotechniczne wiąże się przede wszystkim z upowszechnieniem nowoczesnych metod badań podłoża gruntowego *in situ* [2, 14, 24, 29] obejmujących, między innymi sondowania statyczne, badania dylatometryczne i presjometryczne, oraz z nowymi

technologiami wzmocnienia podłoża [1, 9, 30] i fundamentowaniem konstrukcji pełnomorskich [3]. Wymagają one przeprowadzania badań w ściśle określonych warunkach brzegowych i początkowych przy kontrolowanym stanie naprężenia lub odkształcenia w gruncie. Podstawową zaletą badań modelowych jest możliwość przeprowadzania ich w jednorodnym

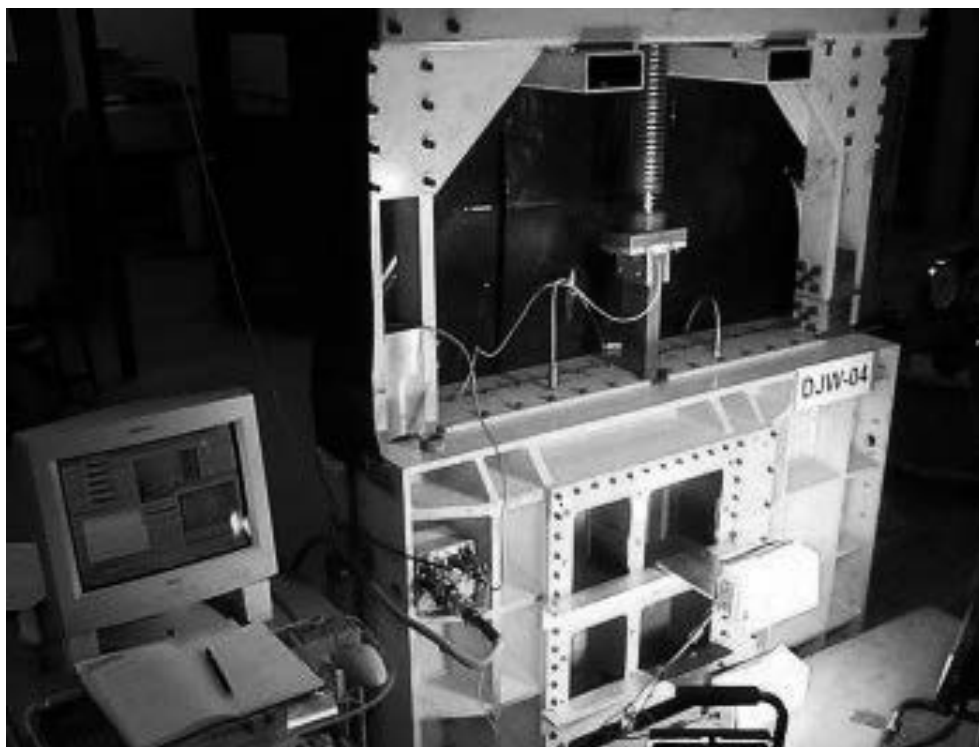
bądź uwarstwionym masywie gruntowym, o ściśle określonych parametrach. Zachowanie prototypu jest analizowane na modelu, zazwyczaj w zmniejszonej skali, spełniającym warunki podobieństwa modelowego. Można również przeprowadzać symulacje, stosując modele w skali rzeczywistej, np. końcówki do badań podłoża *in situ*, wyznaczając ich odpowiedź w ściśle określonych warunkach gruntowych, zdefiniowanych poprzez początkowy stan naprężenia i wskaźnik porowatości, oraz przy określonych warunkach początkowych i warunkach brzegowych wokół masywu gruntowego. Cechowania końcówek do badań *in situ* przeprowadza się zazwyczaj w komorze kalibracyjnej. Zminiaturyzowane końcówki, takie jak: stożek CPTU, pręt T, penetrometr kulisty, mini-presjometr, mogą być również wykorzystywane w badaniach modelowych w wirówce geotechnicznej do sprawdzenia jednorodności masywu gruntowego, badań parametrycznych oraz do weryfikacji teorii badań modelowych [11, 17, 19, 20].

Formowanie masywu odbywa się zazwyczaj z zastosowaniem różnych wariantów metody deszczu piaskowego, dostosowanych do granulometrii i mineralogii materiału, zawartości frakcji drobnych i ziaren podatnych na kruszenie. Stosuje się grunt modelowy o znanych cechach fizycznych oraz wyznaczonych w laboratorium parametrach wytrzymałościowych. W niektórych badaniach jest niezbędna również znajomość takich parametrów jak: współczynnik filtracji i konsolidacji, szorstkość kontaktu czy kąt tarcia między badanym elementem (inkluzją) a gruntem.

Pierwszą komorę kalibracyjną o podatnych ściankach bocznych skonstruowano w 1969 roku w laboratorium drogowym *Country Road Boards* (CRB) w Melbourne (Australia) [21] w celu cechowania końcówki sondy statycznej CPT w piaskach o różnym zagęszczeniu i przy zadanym poziomie naprężenia wokół masywu gruntowego. Komora ta, w odróżnieniu od

zbiorników o nieodkształcalnych ścianach, umożliwia kontrolę i sterowanie 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. W późniejszych latach skonstruowano szereg komór kalibracyjnych w Stanach Zjednoczonych [28], Włoszech [15, 16], Japonii, Norwegii [27], Wielkiej Brytanii [14], Francji [18] i na Tajwanie [23]. Pierwotnie skoncentrowano się na badaniach gruntów niespoistych, a zwłaszcza piasków kwarcowych. Mniejsze, odpowiednio dostosowane komory zaprojektowano do badań w gruntach o większej odkształcalności, zawartości frakcji drobnych, ziaren podatnych na kruszenie [16, 19], czy gruntów spoistych [22, 26]. W pracy [10] dokonano przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych komór kalibracyjnych z osiowo-symetrycznym masywem gruntowym z uwzględnieniem stosowanych warunków brzegowych oraz różnego rodzaju gruntów. Innym ciekawym rozwiązaniem jest komora kalibracyjna, z masywem gruntowym w formie prostopadłościanu, umożliwiająca badania w płaskim stanie odkształcenia, skonstruowana na Uniwersytecie w Cambridge (rys. 1) [30]. Służy ona do modelowania penetracji w gruncie, technologii wglębnego mieszania, oceny stateczności czoła drążonego tunelu oraz analizie metod oczyszczania gruntów. Dodatkową zaletą tej komory jest szyba pozwalająca na obserwację zjawisk oraz rejestrację pola przemieszczeń w gruncie.

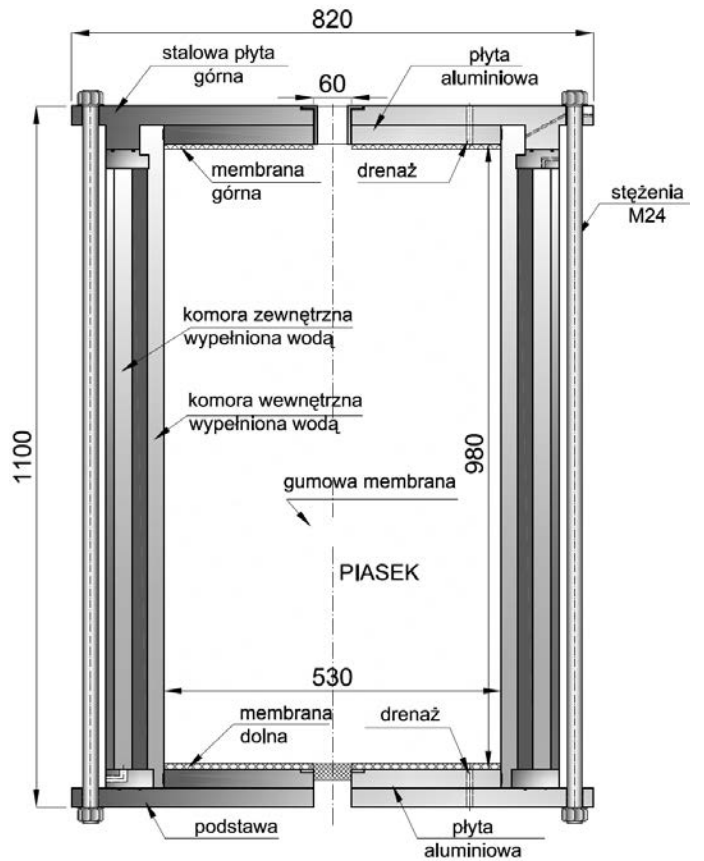
Pierwszą polską komorę kalibracyjną skonstruowano w ubiegłej dekadzie w Katedrze Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego Politechniki Gdańskiej [4, 5, 10]. Zasadniczym tematem niniejszego artykułu jest przybliżenie badań modelowych realizowanych w komorze kalibracyjnej z uwzględnieniem cechowania końcówek do badań *in situ* oraz wykorzystania komory jako wielkowymiarowego aparatu trójosiowego ściskania [9].



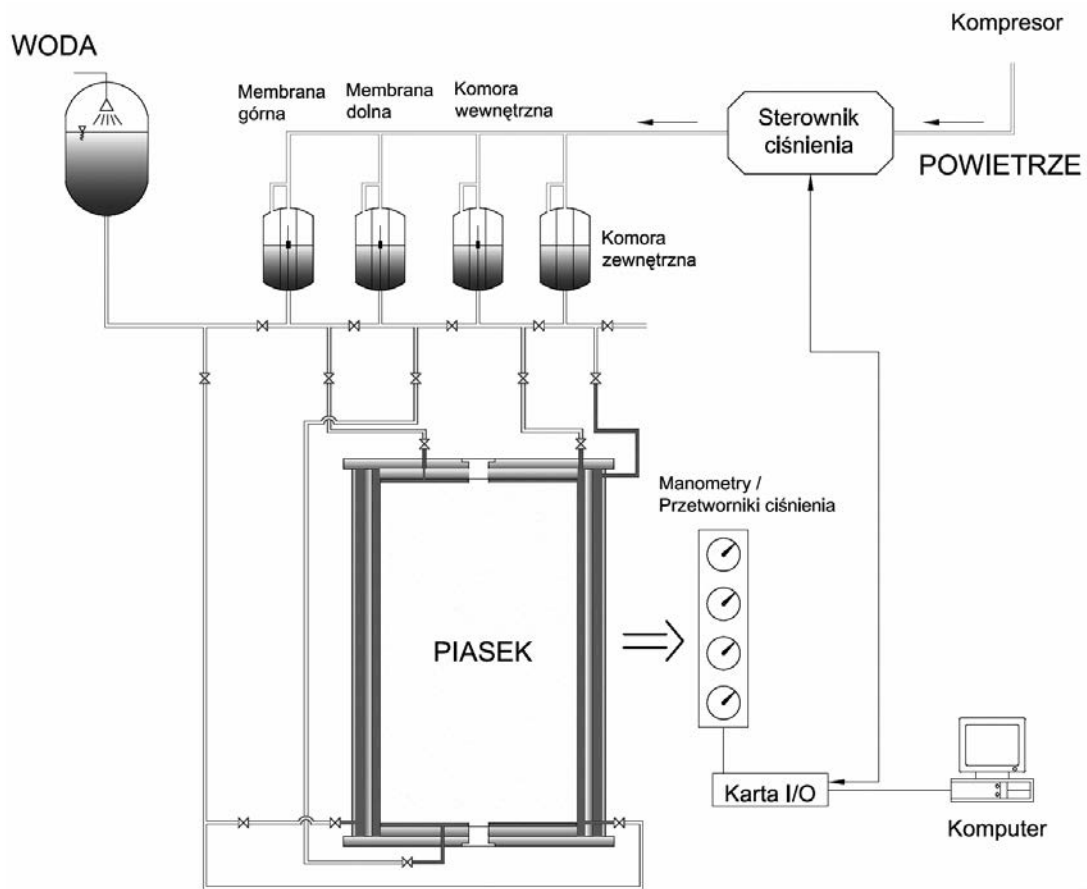
Rys. 1. Komora kalibracyjna w płaskim stanie odkształcenia [30]



Rys. 2. Widok stanowiska badawczego z wsuniętym lejem zasypowym [5]



Rys. 3. Przekrój przez komorę kalibracyjną [13]



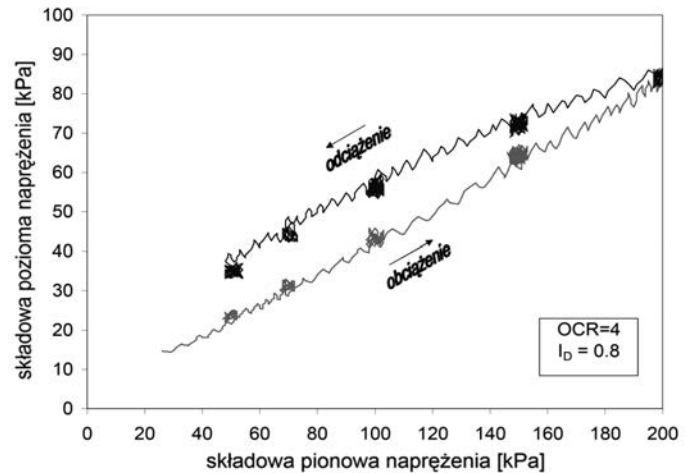
Rys. 4. Schemat układu sterującego ciśnieniami w komorze

Komora kalibracyjna umieszczona jest w stalowej zamkniętej ramie nośnej spawanej z ceowników (rys. 2). Konstrukcja komory o podwójnych ściankach bocznych umożliwia pełną regulację składowej poziomej naprężenia wokół masywu gruntowego (rys. 3). Pneumatyczno-hydrauliczny układ sterujący ciśnieniem wody jest zbudowany z czterech kolumn wypełnionych wodą i powietrzem (rys. 4). Precyzyjne, magnetostrykcyjne, pływakowe czujniki przemieszczeń zamontowane w kolumnach umożliwiają pomiar zmian objętości wody w membranach oraz w komorze wewnętrznej aparatu. Możliwe jest przygotowywanie masywu gruntowego o średnicy 53 cm i wysokości 100 cm.

### FORMOWANIE MASYWU GRUNTOWEGO

W badaniach stosowano drobny ( $d_{50} = 0,21$  mm) równoziarnisty ( $U = 1,41$ ) piasek kwarcowy Lubiatowo w stanie zagęszczonym lub średnio zagęszczonym. Stacjonarny pluwiator podwieszony do ramy stanowiska (rys. 2) służy do formowania masywu z gruntu zagęszczonego. Zasypanie w stanie średnio zagęszczonym uzyskuje się, sypanie gruntu z rury zakończonej dyfuzorem zamkniętym metalową siatką [5]. Badania prowadzono w piasku suchym. Możliwa jest izotropowa oraz anizotropowa konsolidacja masywu, jak również jego prekonsolidacja i wyznaczenie współczynnika parcia spoczynkowego (rys. 5). Podczas konsolidacji masywu gruntowego mierzone są jego zmiany objętościowe.

W badaniach stosowano typowe końcówki CPT oraz DMT. Ze względu na niewielką średnicę komory i potencjalny wpływ warunków brzegowych na opór stożka dodatkowo użyto mini-stożka CPT o średnicy 13,4 mm (rys. 6). Przeprowadzono też badania wciskania pali modelowych [4] o średnicy 20 mm i 32,8 mm. Badania penetracyjne z wykorzystaniem modeli o różnej średnicy pozwoliły na oszacowanie wpływu warunków brzegowych i średnicy komory na opór stożka czy opór podstawy pala w danym piasku modelowym.



Rys. 5. Przykład prekonsolidacji masywu gruntowego [6]

**CPT**



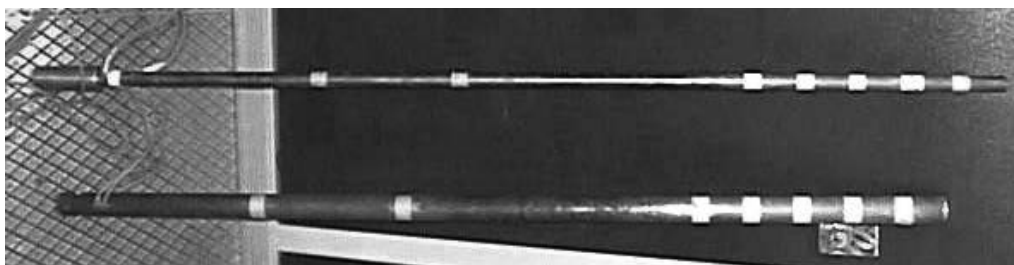
**mini-stożek**



**DMT**



**Pale fundamentowe**



Rys. 6. Modele stosowane w badaniach [13]



## WPLYW WARUNKÓW BRZEGOWYCH

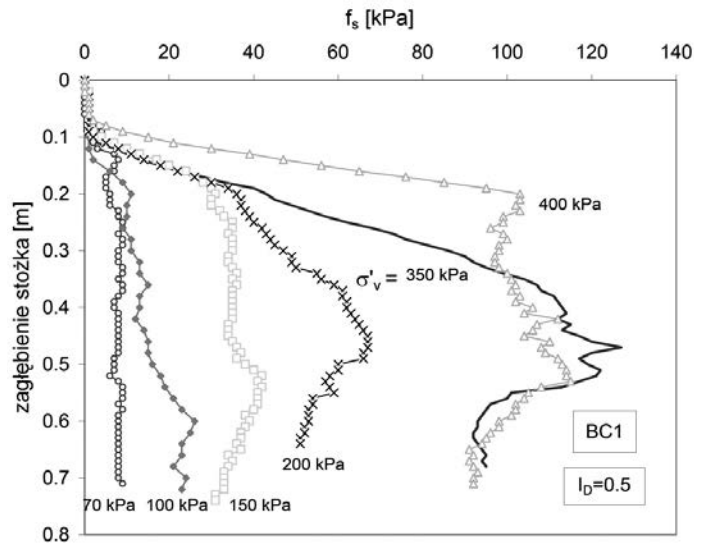
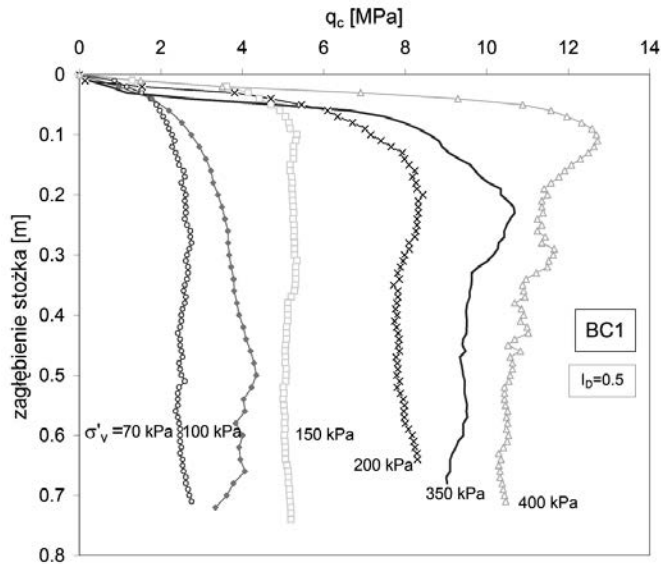
Podczas badania istnieje możliwość doboru czterech typowych warunków brzegowych oraz dodatkowo zadawania regulowanej sztywności bocznej na brzegu masywu (tabl. 1). Poprzez wyrównywanie ciśnień w obu komorach bocznych (wewnętrznej i zewnętrznej) jest możliwe zapewnienie warunku braku odkształceń bocznych wokół masywu gruntowego (patrz rys.

Tabl. 1. Typowe warunki brzegowe stosowane w komorze kalibracyjnej

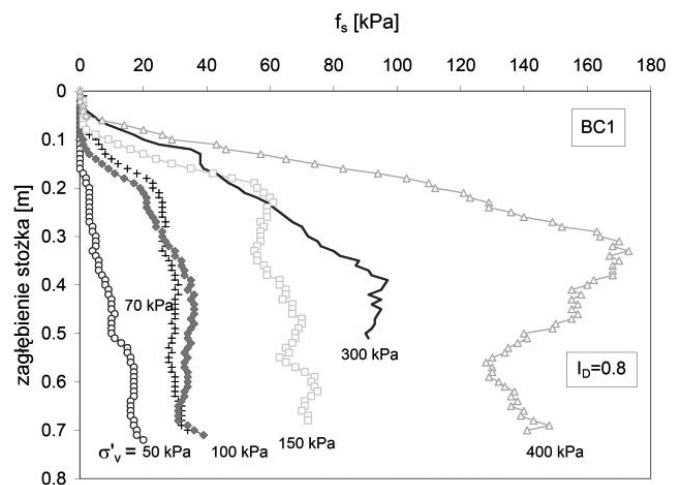
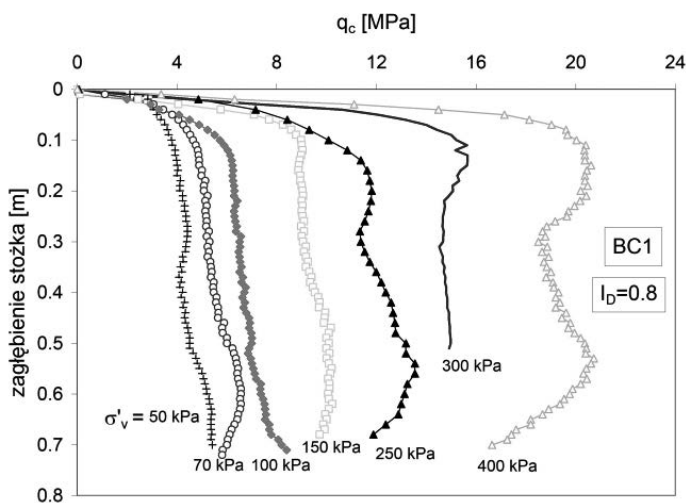
Warunki brzegowe	w kierunku poziomym	w kierunku pionowym
BC1	$\sigma_h = \text{const}$	$\sigma_v = \text{const}$
BC2	$\varepsilon_h = 0$	$\varepsilon_v = 0$
BC3	$\varepsilon_h = 0$	$\sigma_v = \text{const}$
BC4	$\sigma_h = \text{const}$	$\varepsilon_v = 0$
BC5	stała sztywność boczna $k = \text{const}$	$\sigma_v = \text{const}$

3). Zastosowane warunki brzegowe są warunkami globalnymi, tj. odnoszącymi się do całej próbki. Warunek BC3 nie oznacza zatem całkowitego braku odkształceń bocznych masywu gruntowego, ale kompensację tych odkształceń na wysokości próbki.

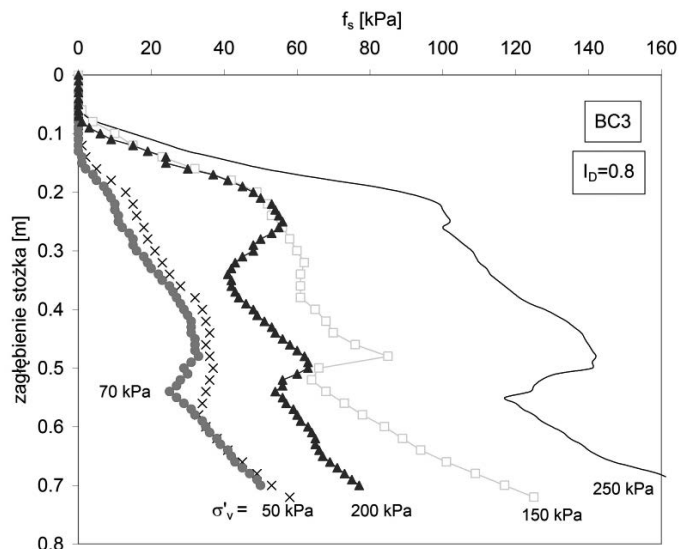
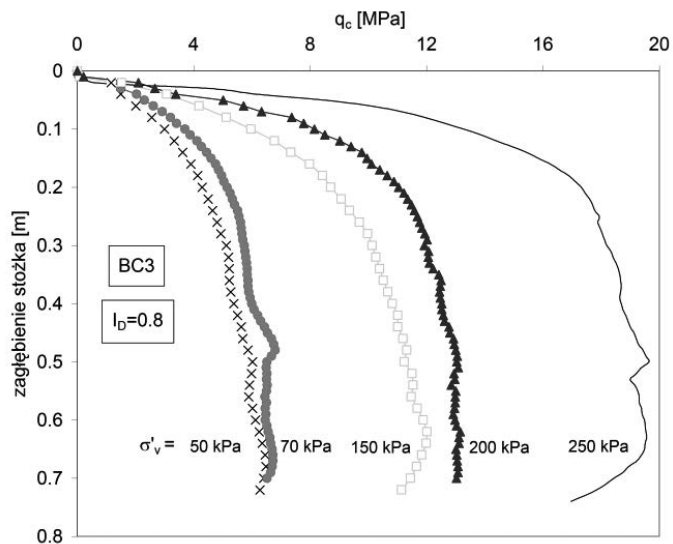
Opór stożka mierzony w komorze kalibracyjnej jest z reguły mniejszy od wartości niezależnej od wpływu warunków brzegowych (ang. *free-field*). Wpływ ścian bocznych komory na wyniki badań modelowych jest tym większy, im mniejszy jest stosunek średnicy komory do średnicy pała/sondy i zależy od tendencji gruntu do dylatacji [14, 18, 19, 27]. Wpływ warunków brzegowych zmniejsza się z wzrostem poziomu naprężenia w komorze oraz z wzrostem ściśliwości gruntu; w piaskach węglanowych, glaukonitowych lub piaskach pylastych jest on zatem mniejszy niż w czystych piaskach kwarcowych [16, 19]. Należy podkreślić, że nawet w piaskach o tej samej mineralogii, np. piaskach kwarcowych i zbliżonej granulometrii (np. Hokksund i Ticino), wpływ warunków brzegowych może być zdecydowanie różny. Niewielki wpływ efektu brzegowego jest obserwowany w piasku Ticino, podczas gdy współczynnik poprawkowy uwzględniający ten wpływ może osiągać wartość 3 w piasku Hokksund



Rys. 7. Opór stożka i tarcie na tulei czarnej w piasku średnio zagęszczonym (warunek BC1)



Rys. 8. Opór stożka i tarcie na tulei czarnej w piasku zagęszczonym (warunek BC1)



Rys. 9. Opór stożka i tarcie na tulei czarnej w piasku zagęszczonym (warunek BC3)

[14] w komorze o średnicy 1,2 m. Wartość tego współczynnika należy zatem oszacować na podstawie wyników sondowań CPT w komorze kalibracyjnej danego gruntu modelowego. Szczegółowe oszacowania wpływu warunków brzegowych na opór stożka w piasku Lubiato w oparciu o badania penetracyjne w komorze kalibracyjnej są zawarte w pracach [8, 12, 13]. Jest on istotny, dochodzący do 3, w przypadku badań modelowych w piaskach zagęszczonych przy składowej pionowej naprężenia w komorze równej 50 kPa. Analiza wyników badań dylatometrycznych DMT w komorze oraz symulacje numeryczne potwierdzają, że w masywie o średnicy 53 cm wpływ średnicy komory na wyniki tych badań jest już pomijalny [7].

(około 0,4) do wartości większej od 1 w przypadku niskiej wartości składowej pionowej naprężenia w komorze ( $\sigma'_v = 50 \text{ kPa}$ ). Przyrost ten maleje z wzrostem poziomu naprężenia wokół masywu gruntowego. Opór stożka podczas penetracji, w warunkach braku odkształceń bocznych, jest zatem większy niż w przypadku zastosowania warunku BC1.

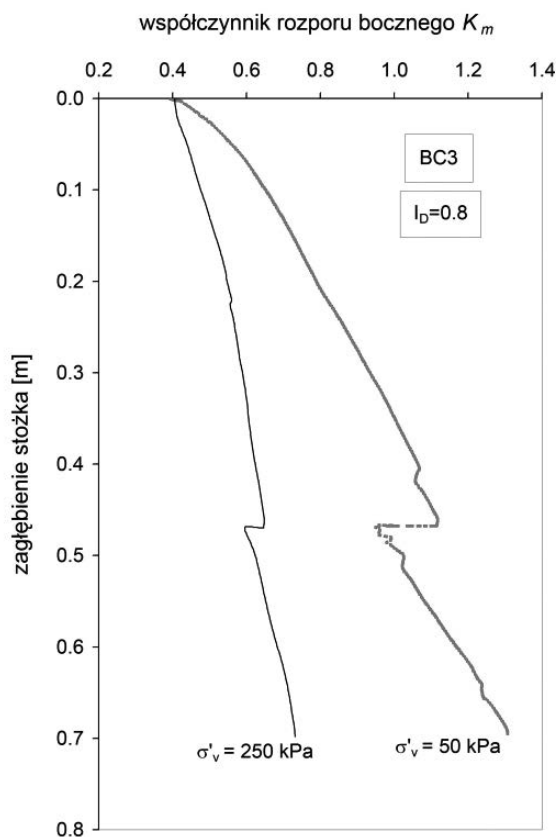
Przyrost składowej poziomej naprężenia wokół masywu gruntowego wskutek penetracji stożka wyrażono poprzez stosunek współczynnika rozporu bocznego  $K_m$  i współczynnika

## PRZEGLĄD WYBRANYCH BADAŃ MODELOWYCH

### Sondowania statyczne metodą CPT w komorze kalibracyjnej

Badania CPT przeprowadzono w warunkach BC1 i BC3 w zakresie składowej pionowej naprężenia w gruncie od 50 kPa do 400 kPa. Badania wykonano w piasku normalnie skonsolidowanym. Krzywe oporu stożka  $q_c$  oraz tarcia na tulei czarnej  $f_s$  w zależności od zagłębienia w piasku średnio zagęszczonym dla warunku BC1, tj. przy stałej składowej poziomej naprężenia wokół masywu gruntowego, przedstawiono na rys. 7. Na rys. 8 przedstawiono analogiczne krzywe dla piasku zagęszczonego. Obserwuje się wyraźny przyrost pomierzonych wielkości z poziomem naprężenia w komorze oraz zagęszczeniem gruntu.

Krzywe oporu stożka w piasku zagęszczonym przy braku zmian objętościowych wokół masywu gruntowego (warunek BC3) przedstawiono na rys. 9. Zablokowanie zmian objętościowych skutkuje przyrostem składowej poziomej naprężenia wokół masywu gruntowego. Przykładowe przyrosty współczynnika rozporu bocznego  $K_m$  podczas wciskania stożka przedstawiono na rys. 10. Przyrost tego współczynnika jest tym większy, im większa jest tendencja gruntu do dylatacji. Współczynnik ten wzrasta od wartości odpowiadającej parciu spoczynkowemu



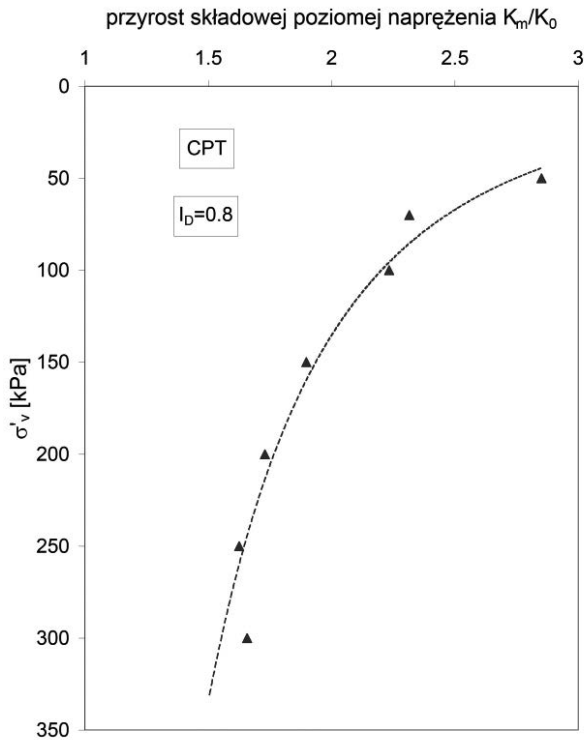
Rys.10. Wzrost wartości współczynnika rozporu bocznego w zależności od zagłębienia stożka i składowej pionowej naprężenia w gruncie [13]

parcia spoczynkowego  $K_0$  po konsolidacji masywu. W piaskach zagęszczonych wartość stosunku  $K_m / K_0$  zbliża się do trzech przy niskiej wartości składowej pionowej naprężenia w komorze i maleje ze wzrostem naprężenia. Ekstrapolacja krzywej przyrostu składowej poziomej naprężenia wokół masywu gruntowego wskutek penetracji stożka (rys. 11) pozwala wstępnie oszacować, że wpływ warunków brzegowych na opór stożka

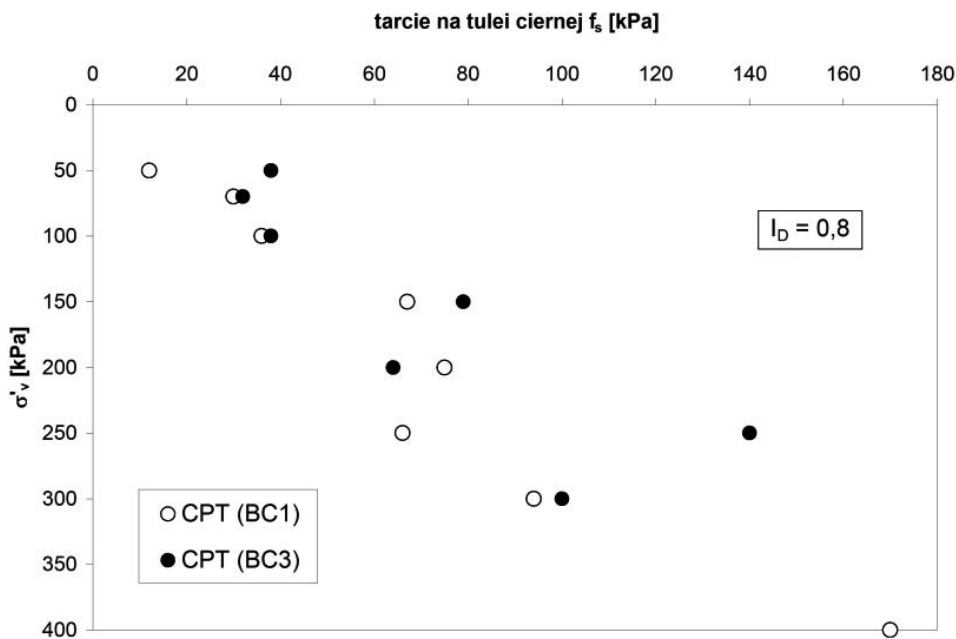
stanie się pomijalnie mały, gdy składowa pionowa naprężenia w gruncie przekroczy 700 kPa. W przypadku piasków średnio zagęszczonych analogiczna składowa pionowa naprężenia będzie odpowiednio mniejsza. W przypadku tarcia na tulei ciernej nie zaobserwowano wyraźnego wpływu warunków brzegowych na pomierzone wartości  $f_s$  w piaskach zagęszczonych (rys. 12).

### Opór stożka poprawiony ze względu na wpływ warunków brzegowych

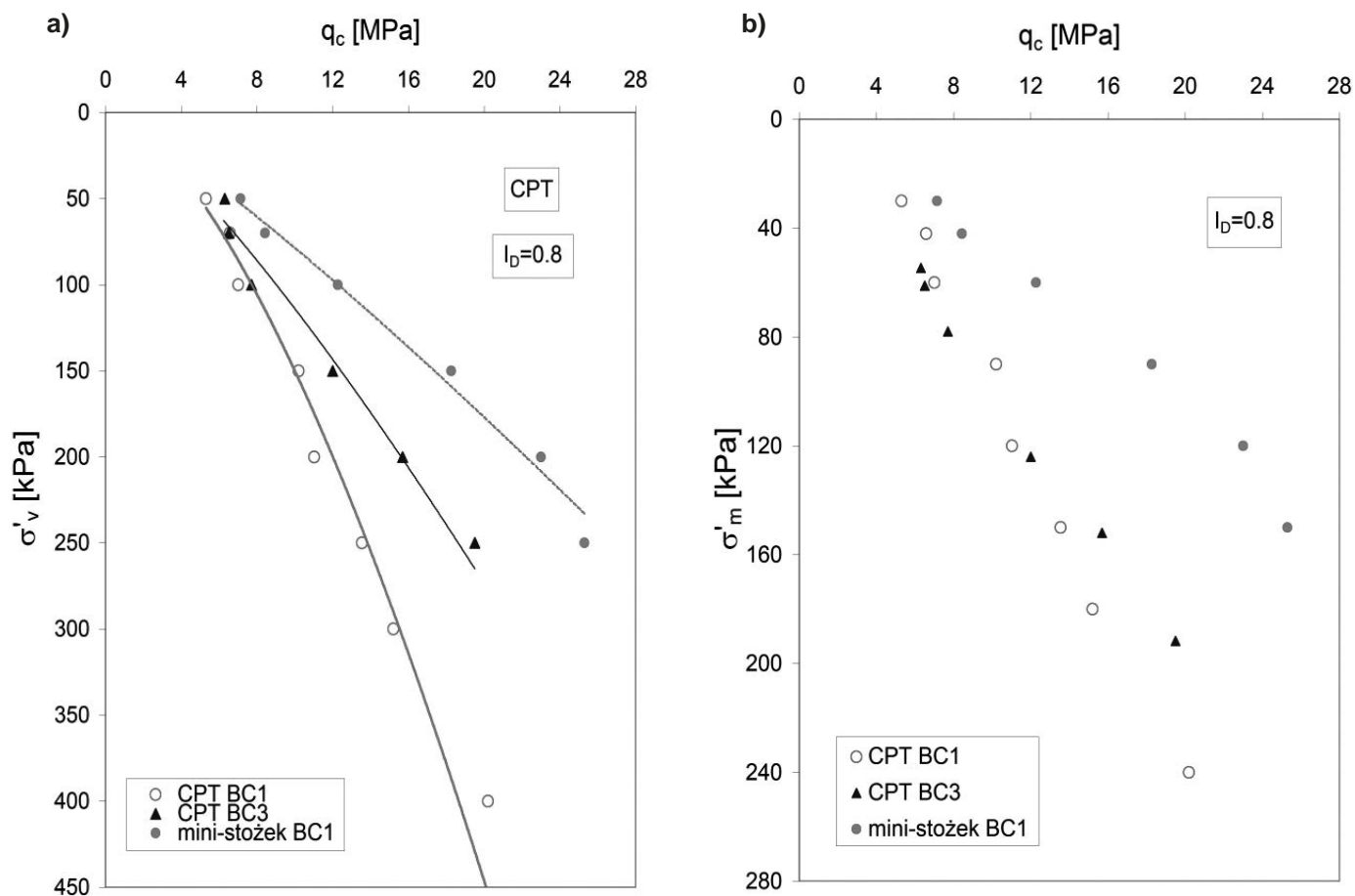
Na podstawie serii badań penetracyjnych z zastosowaniem stożka CPT, mini-stożka, ostrza dylatometru oraz wciskania pali modelowych o różnej średnicy, oszacowano opór stożka poprawiony ze względu na wpływ warunków brzegowych. Przykładowe zależności z sondowań statycznych metodą CPT z zastosowaniem typowego stożka oraz mini-stożka w piaskach zagęszczonych przedstawiono na rys. 13. Przy tej samej wartości składowej pionowej naprężenia (rys. 13a) opór mini-stożka jest wyraźnie wyższy niż standardowej końcówki CPT w przypadku warunku BC1, jak i BC3. Dodatkową wskazówką do oszacowania wpływu warunków brzegowych na opór stożka jest opór ostrza  $q_D$  z badania DMT. Jest on od kilkunastu do 20% wyższy niż opór stożka [12, 13]. Ciekawą obserwacją są zbliżone wartości oporu stożka z badań w warunkach BC1 i BC3 przy tej samej wartości naprężenia średniego w komorze (rys. 13b). Potwierdza to tezę innych badaczy [14, 24, 28], że opór stożka zależy przede wszystkim od wartości naprężenia średniego w gruncie. Interpretację oporu stożka w piasku Lubiatowo poprawionego o wpływ warunków brzegowych przedstawiono (rys. 14) na podstawie wyników badań modelowych. Takie podejście pozwala na interpretację wyników sondowań statycznych na podstawie lokalnych korelacji w gruntach normalnie skonsolidowanych i prekonsolidowanych.



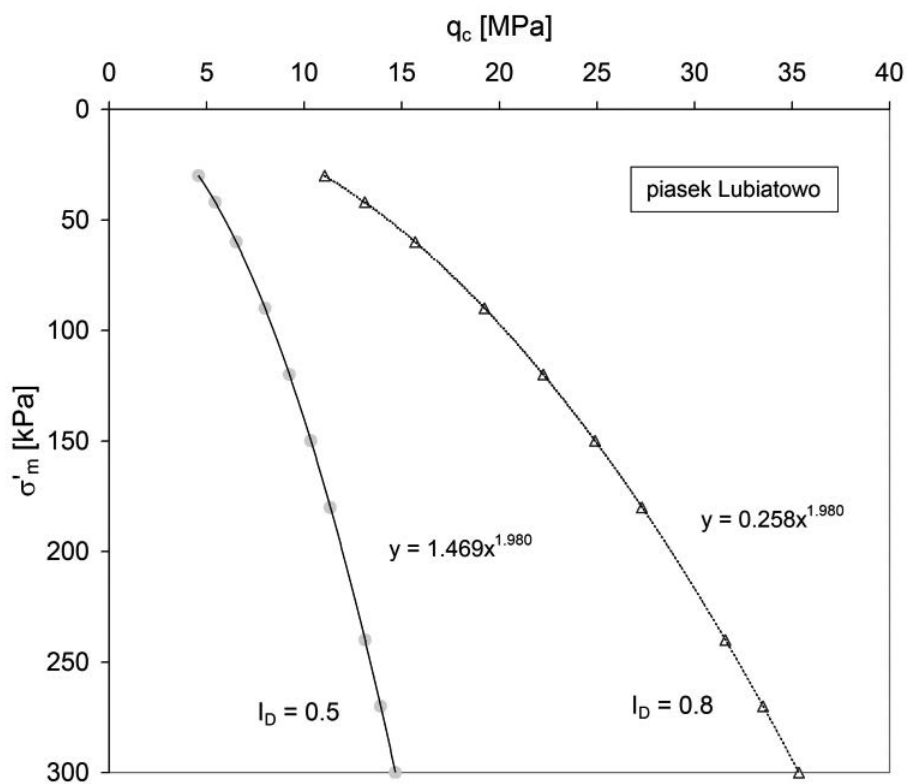
Rys. 11. Przyrost składowej poziomej naprężenia w zależności od składowej pionowej naprężenia stosowanego w komorze [13]



Rys. 12. Tarcie na tulei ciernej w piasku zagęszczonym w zależności od składowej pionowej naprężenia w komorze przy dwóch warunkach brzegowych (BC1 i BC3)

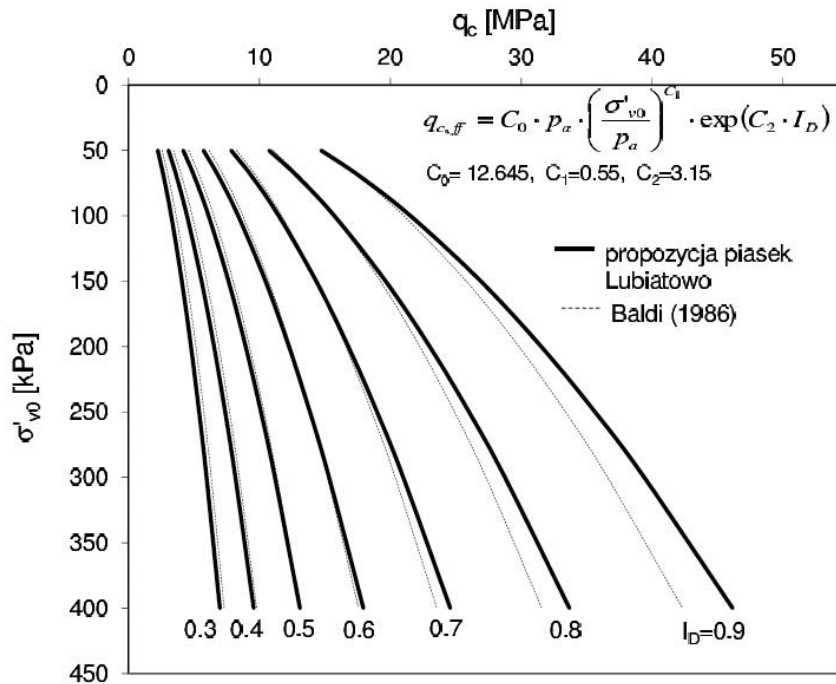


Rys. 13. Opór stożka piaskach zagęszczonych przy warunkach brzegowych BC1 i BC3 w zależności od składowej pionowej naprężenia w gruncie (a) oraz od średniego naprężenia w gruncie (b)

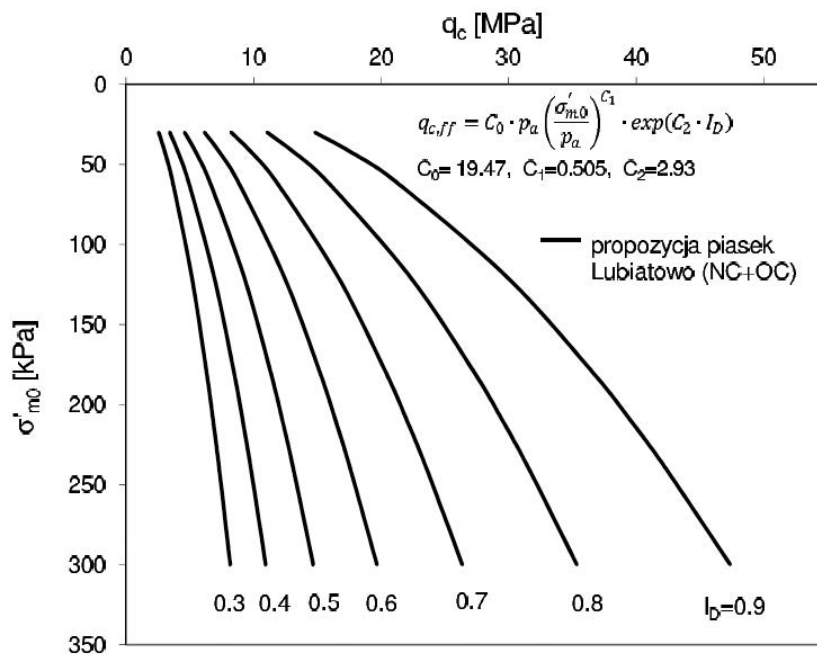


Rys. 14. Opór stożka, poprawiony ze względu na wpływ warunków brzegowych, w zależności od naprężenia średniego w gruncie [13]





Rys. 15. Propozycja interpretacji oporu stożka  $q_c$  w normalnie skonsolidowanych piaskach o umiarkowanej ściśliwości na podstawie badań na piasku Lubiato [25]



Rys. 16. Propozycja interpretacji oporu stożka  $q_c$  w piaskach normalnie skonsolidowanych i prekonsolidowanych o umiarkowanej ściśliwości na podstawie badań na piasku Lubiato [25]

Zmodyfikowano istniejące korelacje do interpretacji sondowań statycznych metodą CPT w piaskach o umiarkowanej ściśliwości [2, 24]. Przedstawiono je na rys. 15 w zależności od składowej pionowej naprężenia efektywnego w gruncie oraz na rys. 16 w zależności od średniego naprężenia efektywnego. Ostatni z wykresów może być stosowany do interpretacji wyników sondowań statycznych w piaskach kwarcowych normalnie skonsolidowanych i prekonsolidowanych występujących na wybrzeżu Bałtyku.

### Przykłady innych badań modelowych

Ciekawym przykładem możliwości zastosowania komory kalibracyjnej są badania modelowe kolumn sztywnych i podatnych. Możliwe jest badanie zachowania się wycinka kolumny podatnej [9] lub tzw. komórki jednostkowej, gdzie analizuje się współpracę kolumny z otaczającym gruntem oraz platformą roboczą. Jednym z przykładów są tu badania przeprowadzone w komorze kalibracyjnej we Francji [1] w ramach projek-

tu Asiri, gdzie analizowano rozkład obciążeń przekazywanych na kolumnę oraz sąsiadujący grunt w zależności od miąższości platformy oraz sposobu zadawania obciążenia. Zachowanie się wycinka kolumny żwirowej o wymiarach masywu gruntowego w komorze kalibracyjnej, tj. o wysokości 1 m i średnicy 0,53 m, badano [9] przy trzech różnych naprężeniach w komorze. Po konsolidacji izotropowej wycinek kolumny poddano wzrastającemu naprężeniu pionowemu przykładanemu przez membranę górną i dolną komory, analogicznie do obciążenia próbki w wielokowymiarowym aparacie trójosiowego ściskania. Badanie takie umożliwiło symulację zachowania się kolumny żwirowej w gruncie słabonośnym (współczynnik parcia spoczynkowego  $K_0 = 1$ ) oraz oszacowanie kąta tarcia wewnętrznego i modułów sztywności kolumny przy różnym poziomie odkształcenia.

## WNIOSKI

Przedstawiono typowe zastosowania komory kalibracyjnej do badań modelowych w geotechnice. Pierwszoplanowe jest cechowanie urządzeń do badań podłoża *in situ*. Badania wykazały istotny wpływ składowych stanu naprężenia na pomierzone wartości i potwierdziły decydujący wpływ naprężenia średniego na opór stożka. Analiza badań penetracyjnych w komorze pozwoliła na opracowanie poprawek do interpretacji oporu stożka ze względu na wpływ warunków brzegowych. Uzyskano lokalne korelacje do interpretacji wyników sondowań statycznych metodą CPTU w umiarkowanie ściśliwych kwarcowych piaskach morskich wybrzeża Bałtyku w gruntach normalnie skonsolidowanych i prekonsolidowanych.

## LITERATURA

- Asiri National Project: Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvement. Presses des Ponts, 2012.
- Baldi G., Bellotti R., Ghionna V., Jamiolkowski M., Pasqualini E.: Interpretation of CPTs and CPTUs – part II: drained penetration in sands. Proceedings of the Fourth International Geotechnical Seminar on Field Instrumentation and in Situ Measurements, Nanyang Technological Institute, Singapore 1986, 143-156.
- Balachowski 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.
- Balachowski 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 2002.
- Balachowski 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, 2003, 21-26.
- Balachowski L., Kozak P., Dembicki E.: Effect of preconsolidation on pile bearing capacity in model tests. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 27, No 1-2, 2005, 3-11.
- Balachowski L.: Analysis of dilatometer test in calibration chamber. Proceedings of the 2nd International Conference on the Flat Dilatometer. 2-5 April 2006, Washington, 307-312.
- Balachowski L.: Penetration resistance of Lubiatowo sand in calibration chamber tests. *Archives of Hydro-engineering and Environmental Mechanics* Vol. 53, No.4, 2006, 3-21.
- Balachowski L.: Use of calibration chamber as a large triaxial apparatus. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol.6, No.4, 2006, 87-96.
- Balachowski L.: Komory kalibracyjne – przegląd rozwiązań konstrukcyjnych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/2006, 345-350.
- Balachowski L.: Size effect in centrifuge cone penetration tests. *Archives of Hydro-engineering and Environmental Mechanics*, Vol. 54, No.3, 2007, 161-181.
- Balachowski L., Kurek N.: Influence of boundary conditions in calibration chamber. *Archives of Civil Engineering*, LIV, 4, 2008, 653-668.
- Balachowski L.: Physical modeling in sands in a wide range of stress level. Application to the calibration of CPTU and DMT tests. Monografia 88, 2008, Politechnika Gdańska.
- 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.
- 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.
- Bellotti R., Pedroni S.: Design and development of a small calibration chamber for compressible sands, Proceedings of the 1st International Conference on Calibration Chamber Testing, Clarkson Univ. Potsdam, USA, 1991, 91-99.
- 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.
- 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.
- 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.
- Gui M. W., Bolton M. D., Garnier J., Corté J. F., Bagge G., Laue J., Renzi R.: Guidelines for cone penetration tests in sand. Proc. of International Conference Centrifuge'98, Tokyo, Japan, 1, 1998, 155-160.
- Holden J. C.: Laboratory research on static cone penetrometers. University of Florida, Gainesville, Department of Civil Engineering, Internal report 1971, CE-SM-71-1.
- Huang, A.-B., Holtz, R.D., Chameau, J.-L.A.: Calibration Chamber for Cohesive Soils. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 11, No. 1, 1988, 30-35.
- Huang A. B., Hsu H.-H.: Cone penetration tests under simulated field conditions. *Géotechnique* 55, No. 5, 2005, 345-354.
- 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 2001, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Kurek N.: Kontrola jakości zagęszczania wgłębnego gruntów niespoistych. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, 2013.
- Kurup P. U., Voyiadis G. Z., Tumay M. T.: Calibration chamber studies of piezocone test in cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, 1996, No. 1, 81-107.
- Parkin A. K., Lunne T.: Boundary effects in the laboratory calibration of a cone penetrometer for sand. Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, 24-27 May 1982, 2, 761-768.
- Schmertmann J. H.: Guidelines for cone penetration test, performance and design. US Federal Highway Administration, Washington, DC, Report, FHWA-TS-78-209, 1978.
- Yu H. S., Schnaid F., Collins I. F.: Analysis of cone pressuremeter tests in sands. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 122 (8), 1996, 623-632.
- www-geo.eng.cam.ac.uk/directory/facilities/Physical/1-g