

## Numeryczna symulacja badania Osterberga

Mgr inż. Michał Baca, dr hab. inż. Włodzimierz Brząkała, prof. PWr  
Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Spośród wielu metod badania pali fundamentowych szczególne miejsce zajmują próbne obciążenia statyczne, gdyż na całym świecie są one uważane za najbardziej miarodajną metodę oceny zachowania się pali pod obciążeniem. Obok wielu oczywistych zalet, metoda ta ma również wady, a główną z nich jest złożoność konstrukcji oporowej dla siłowników hydraulicznych, a zatem i duże koszty jej budowy. Tak jest w szczególności przy palach wielkośrednicowych, które przenoszą siły osiowe rzędu kilkunastu meganiutonów, a nawet dużo większe. Alternatywę dla tradycyjnych badań statycznych pali zaproponował około 30 lat temu J. O. Osterberg, [10, 12] – i to z myślą o zadaniu najtrudniejszym, jakim są badania pali wielkośrednicowych.

U podstaw badania Osterberga stoi zaskakujący pomysł, aby rolę dodatkowych pali kotwiących pełnił sam pal badany, a kon-

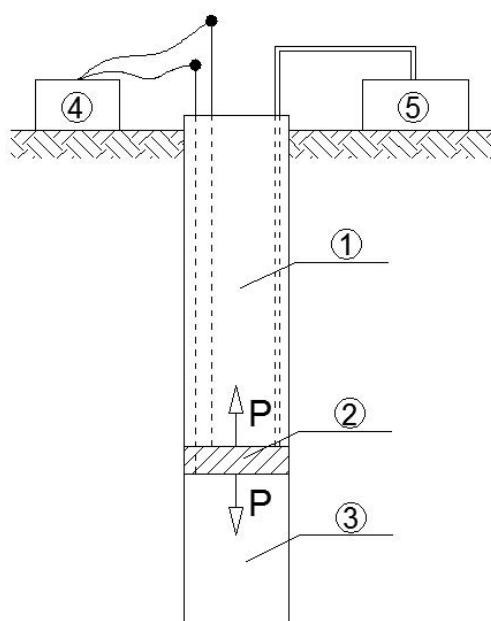
kretnie jego pobocznica (lub tylko górna jej część). Ponadto, obciążenia próbne przykładane do pala mogą być wówczas zredukowane nawet o połowę w stosunku do tradycyjnego badania. Koncepcję obciążenia próbnego przedstawiono na rys. 1.

Pal jest zatem nieciągły, a głównym elementem badawczym jest specjalna komora ekspansywna, zwana komorą Osterberga, w skrócie O-cell, składająca się z odpowiednio ułożonych siłowników hydraulicznych (element nr 2 na rys. 1). Komora jest umieszczana wewnątrz badanego pala w czasie jego wykonywania. Do badania można przystąpić po wykonaniu pala i związaniu betonu. W trakcie badania ciśnienie w komorze jest stopniowo zwiększane, co powoduje jej rozpieranie w kierunku pionowym. W dolnej części pala pojawiają się zatem dwie siły pionowe, równe co do wartości (samozrównoważone), ale przeciwnie zwrócone, działające w górę i w dół. Jednocześnie jest prowadzony pomiar przemieszczeń obu części pala w zależności od przyłożonego obciążenia, na podstawie którego sporządza się dwie krzywe rodzaju Q-s, jedną dla górnej części pala (podnoszonej), a drugą dla części dolnej (wciskanej). Badanie jest prowadzone aż do wyczerpania nośności przez jedną z tych dwóch części pala albo do osiągnięcia maksymalnej nośności komory.

Po zakończeniu badania nie ma możliwości odzyskania oprzyrządowania komory Osterberga, ale może być ona zabetonowana, co – dla pali pracujących na wciskanie – eliminuje ujemne skutki nieciągłości pala. Specjalistyczna firma LoadTest przeprowadza w różnych częściach świata obciążenia próbne rodzaju O-cell [12, 14], ale w Polsce tego rodzaju badania prawdopodobnie nie były jeszcze wykonywane.

### ZASTOSOWANIE BADANIA OSTERBERGA – WADY I ZALETY

Komora Osterberga, dzięki możliwości umieszczenia kilku siłowników obok siebie na jednym poziomie, pozwala oceniać osiadania i nośność pali o średnicy nawet kilku metrów [12]. W praktyce jednak badanie Osterberga jest często wykorzystywane jako badanie kalibrujące – w miejscu, gdzie docelowo



Rys. 1. Schemat badania Osterberga

1 – górna część pala (kotwiąca), 2 – komora Osterberga, 3 – dolna część pala (wciskana), 4 – aparatura kontrolno-pomiarowa przemieszczeń, 5 – hydraulika siłowa (pompy oleju)

ma być wykonany fundament palowy, formuje się pal testowy i przeprowadza się badanie, którego wyniki służą optymalnemu zaprojektowaniu właściwych pali. Pal testowy ma czasem mniejsze wymiary, ale dzięki istniejącym związkom korelacyjnym można prognozować osiadania i nośność pala docelowego. Istnieje również możliwość umieszczenia kilku poziomów komór w jednym palu, co pozwala na analizę poszczególnych stref wzdłuż pobocznicy pala.

Badania Osterberga są metodą stosunkowo mało znaną w naszym kraju, a publikacje na ten temat w krajowej literaturze są nieliczne [8]. Niemniej jednak, istnieje w Polsce wieloletnia tradycja korzystania z komór iniekcyjnych w podstawie pala (patenty kilku krajowych jednostek naukowych i badawczych), których idea koncepcyjnie odpowiada idei badania Osterberga. Komora iniekcyjna jest umieszczana w dnie badanego pala. Po częściowym związaniu betonu w palu jest wykonywana iniekcja zaczynu cementowego, głównie pod podstawę pala, co można kontrolować przez pomiar podniesienia pala. Wykorzystanie kotwiącej funkcji pobocznicy pala jest w tym przypadku podobne jak w badaniu Osterberga. Należy jednak podkreślić, że komora iniekcyjna rodzaju *post-grouting* nie pełni roli badania nośności pala, ale stanowi narzędzie pozwalające wstępnie zwiększyć naprężenie w gruncie pod podstawą pala, zwiększając w konsekwencji jego nośność w podstawie.

Komora Osterberga pozwala na generowanie bardzo dużych obciążeń, według [12] nawet do 160 MN. Nie jest wymagane żadne dodatkowe obciążenie przykładane do pala, stąd obszar badawczy jest zredukowany, a przeprowadzane badania są stosunkowo bezpieczne, gdyż energia jest skumulowana głęboko pod powierzchnią terenu. Również same badania są z reguły tańsze, pomimo utraty komory. Oszczędności wynikają z redukcji czasu przeznaczonego na pełne przygotowanie stanowiska badawczego i prostoty samego badania. Szacuje się, że dla pali o nośności ponad 10 MN badanie Osterberga jest bardziej opłacalne od badań tradycyjnych, a ta różnica szybko rośnie wraz z wymaganą nośnością pali [3]. Dla pali o nośności rzędu kilku meganiutonów koszty badań Osterberga są zbliżone do kosztów metod tradycyjnych. Badania Osterberga mogą być przeprowadzone w sytuacjach, gdy zastosowanie standardowych obciążeń statycznych jest trudne, np. brak jest miejsca na system kotwiący lub balastujący. Sama komora oraz specjalistyczna instalacja wewnątrz pala są tracone w każdym badaniu, a ich zastosowanie ogranicza się generalnie do pali betonowanych w gruncie. Przygotowania wymagają wstępnej analizy nośności podstawy i pobocznicy pala, na podstawie której szacuje się głębokość odpowiedniego umieszczenia komory. Określenie miejsca, gdzie umieścić komorę, powinno być przeprowadzone ostrożnie i z rozwagą, gdyż później nie ma już możliwości żadnych zmian i może okazać się, że badania nie są miarodajne. W palach o dominującym udziale pobocznicy w przenoszeniu obciążeń na podłoże (tj. „stosunkowo długich”), komora Osterberga jest zazwyczaj usytuowana wyraźnie powyżej podstawy (rys. 1), w przeciwniej sytuacji jest ona umieszczana jak najniżej.

## NOŚNOŚĆ W BADANIACH OSTERBERGA

Korzystna ekonomicznie i w pełni zasadna jest taka głębokość umieszczenia komory, aby nośność części górnej i części

dolnej pala były w przybliżeniu równe (częścią górną jest pobocznica powyżej komory, częścią dolną jest fragment pobocznicy poniżej komory oraz podstawa pala). Można to uzasadnić następująco: badania Osterberga pozwalają *de facto* na szacowanie tylko jednego składnika nośności, tego mniejszego spośród dwóch – nośności unoszonej części górnej i nośności wciskanej części dolnej; nośność drugiej z tych części nie jest mniejsza od tej minimalnej wartości, a zatem ich suma nie jest mniejsza od podwojonej minimalnej wartości. W ten sposób określa się maksymalną dopuszczalną siłę, która może wystąpić w komorze, czyli „nośność w badaniu Osterberga”. Sprawą o podstawowym znaczeniu jest związek tej siły z nośnością pala – otóż przyjmuje się, że nośność w badaniu Osterberga jest równa nośności rzeczywistego pala pracującego w warunkach wciskania, a ściślej jest jej bezpiecznym (zaniżonym) oszacowaniem. To zagadnienie ma co najmniej trzy aspekty.

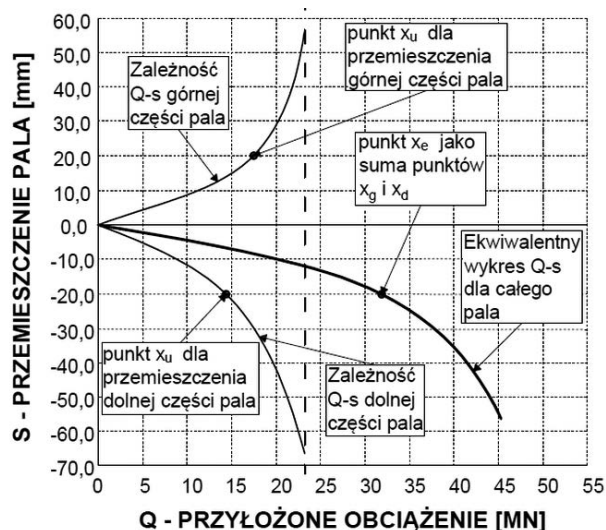
Po pierwsze, sprawa nośności w geotechnice wymagałaby w ogóle szerokiego odrębnego omówienia i zapewne nie zakończyłaby się jednoznacznymi wnioskami. Można odnieść wrażenie, że tradycyjny podział na stany graniczne nośności (ULS) i stany graniczne użytkowości (SLS) staje się anachroniczny i pochodzi z czasów, gdy przemieszczenia szacowano wyłącznie za pomocą modeli liniowo sprężystych, a siłę graniczną w sposób statycznie wyznaczalny. Nie przystaje to do zaawansowanej numerycznej analizy sprężysto-plastycznej, opartej o nieliniowe związki konstytutywne. Coraz większą uwagę poświęca się stanom SLS, a mniejszą stanom ULS, niejednokrotnie wyrażając nawet umowny ULS za pomocą SLS (np. osiadania ławy równe 2% jej szerokości B czy osiadania pala równe 10% jego średnicy D). O ile łatwo wyobrazić sobie utratę stateczności fundamentu posadowionego na koronie skarpy, utratę stateczności fundamentu bezpośredniego na przesunięcie po stropie mocnego gruntu lub utratę zdolności kotwiącej (pal wyciągany), to rzadko obserwuje się „osiągnięcie nośności” i wypieranie gruntu spod fundamentu bezpośredniego, a jeszcze rzadziej „osiągnięcie nośności” wielkośrednicowego pala wciskanego. Temu ostatniemu stoją na przeszkodzie głównie bardzo duże ograniczenia przemieszczeń narzucone przez obiekty budownictwa komunikacyjnego. Szczególnie w przypadku pali wielkośrednicowych pracujących na wciskanie nośność jest pojęciem bardzo umownym i mało precyzyjnym.

Po drugie, istnieją wątpliwości wynikające z faktu, że podczas badania górna część pobocznicy pracuje w zasadzie przeciwnie niż w warunkach typowej pracy pala na wciskanie. Inaczej pracuje również grunt w poziomie podstawy pala i poniżej, który nie jest dociążony przez wciskaną pobocznice; dlatego rezultaty uzyskane z badania mogą nie być miarodajne.

Po trzecie, uniesienie się górnego odcinka pala może mieć niekorzystny wpływ na jego późniejszą faktyczną pracę przy wciskaniu, tak jak sygnalizuje to polska norma palowa [11].

## KRZYWE Q-s W BADANIACH OSTERBERGA

Rozważania z poprzedniego punktu przenoszą się na konstrukcję krzywych osiadania Q-s, które przedstawiają znacznie więcej informacji, niż umownie definiowana nośność pala w warunkach wciskania. Krzywe Q-s są podstawą do bezpośredniej analizy zachowania się pala, ale mogą być też wykorzystane do określania



Rys. 2. Dwie składowe krzywe Q-s z pomiarów oraz skonstruowana ekwiwalentna krzywa Q-s (opracowano na podstawie pracy [3])

„nośności”, o ile „zniszczenie” jest wyraźnie widoczne. Częściej jednak są podstawą do ekstrapolacji wyników i prognozy pewnej asymptotycznej wartości zwanej „nośnością” [4, 9].

W wyniku badania Osterberga otrzymuje się dwie krzywe Q-s, tj. dwa wykresy zależności obciążenie-przemieszczenie, osobno dla części pąka znajdującej się nad O-cell (unoszenie,  $s > 0$ ) i pod komorą (wciskanie,  $s < 0$ ), por. dwie cieńsze linie na rys. 2.

Na podstawie tych dwóch krzywych Q-s można wykreślić tzw. ekwiwalentny wykres obciążenie – osiadanie, charakteryzujący tradycyjne próbne obciążenia statyczne. Na przestrzeni lat powstało kilka prac pozwalających opisać to zagadnienie [6, 10]. Proces konstruowania krzywej podzielono na kilka etapów. Na początku obie krzywe otrzymane z badania Osterberga dzieli się na szereg punktów. Następnie wybiera się dowolne dwa punkty z obu krzywych dla takich samych (co do wartości bezwzględnej) wartości przemieszczenia i konstruuje nowy punkt. Ma on taką samą wartość przemieszczenia, natomiast rzędna obciążenia powstaje poprzez zsumowanie wartości obciążenia tych dwóch wybranych punktów. Przykładowo, na rys. 2 na dolnej krzywej Q-s występuje punkt o rzędnych  $s = -20,0$  mm,  $Q = 14,50$  MN, a na górnej krzywej Q-s punkt o rzędnych  $s = 20,0$  mm,  $Q = 17,50$  MN; stąd otrzymuje się punkt  $s = -20,0$  mm,  $Q = 14,50 + 17,50 = 32,00$  MN na ekwiwalentnej krzywej Q-s. Procedura jest powtarzana dla kolejnych punktów, aż uzyska się możliwość wykreślenia ekwiwalentnej krzywej Q-s.

W największym skrócie można powiedzieć, że istotą metody Osterberga są dwa następujące założenia:

- pobocznica pąka przenosi taką samą siłę niezależnie, czy pąk na górnym odcinku jest wciskany, czy wyciągany (niezależność od znaku przemieszczenia  $s$ ),

- dwa przypadki z punktu a) nie różnicują znacząco pracy pąka na dolnym odcinku, w szczególności pod podstawą pąka.

Stosując tę procedurę, zakłada się, że pąk jest nieodkształcalny – zwykle jego skrócenie nie przekracza  $2 \div 3$  mm, co stanowi około kilku procent osiadań. Oszacowanie ściśliwości samego pąka nie stanowi problemu, w szczególności z uwzględnieniem, że w badaniu tradycyjnym ściskające siły osiowe w pąku są znacznie większe niż w badaniu Osterberga. Istnieją bardziej rozbudowane metody wyznaczania ekwiwalentnego wykresu Q-s, np. metoda zaproponowana w pracy Lee i Parka [6]. Metodę tę opracowano dla pali badanych *in situ* kilkoma rzędami komór. Pozwala to na trójetapowe badanie pąka i pomiar przemieszczeń w kilku jego częściach przy różnie zadanym obciążeniu. Dzięki temu można dokładniej określić skrócenie trzonu pąka i w konsekwencji jest możliwe pełniejsze odwzorowanie ekwiwalentnej krzywej Q-s w stosunku do tradycyjnej metody Osterberga. Tym niemniej uważa się, że stosowanie tej metody jest celowe dla pali o dużym współczynniku smukłości (stosunek długości do średnicy pąka), większym niż 20, por. [6].

## KRZYWE Q-s W OBLICZENIACH SYMULACYJNYCH

Obliczenia wykonano za pomocą programu PLAXIS® v.7.11, w warunkach osiowej symetrii, z zastosowaniem elementów 15-węzłowych. Do modelu Hardening Soil [2] wprowadzono następujące parametry gruntu (odpowiednik jednorodnego piasku drobnego o  $I_d = 0,40$ ):

Parametry ośrodka wyznaczono na podstawie pracy [1], w której autorzy przedstawili empiryczne zależności pozwalające na określenie parametrów gruntu do modelu Hardening Soil w zależności od stopnia zagęszczenia gruntu.

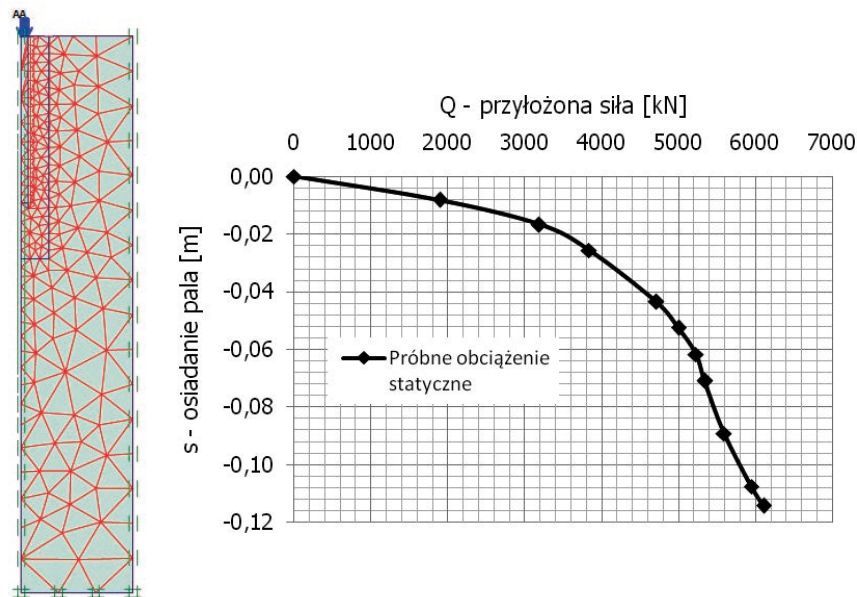
Elementy kontaktowe na styku pobocznicy z otaczającym ośrodkiem cechują się współczynnikiem  $R_{int} = 0,90$  dla elementów kontaktowych na styku ośrodek-pąk. Pąk zamodelowano jako betonowy słup sprężysty. Obliczenia przeprowadzono w sytuacji osiowej symetrii. Obszar obliczeniowy przyjęto jako walec o promieniu 10 m i wysokości 50 m, natomiast pąk jest walcem o promieniu 0,6 m i długości 15 m.

Przebieg krzywej Q-s osiadania pąka przedstawiono na rys. 3.

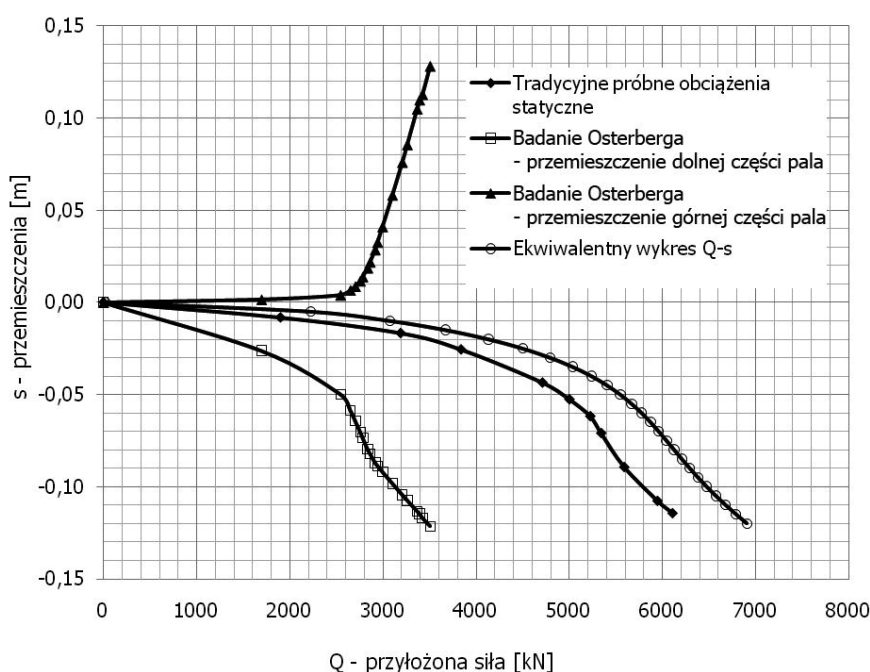
W warunkach poprzedniego przykładu podjęto następnie próbę zamodelowania O-cell i przykładanych na jej poziomie obciążeń – podobnie jak w pracy [7]. Podczas symulacji numerycznych badania komorę zamodelowano jako pojedynczy element o grubości 10 cm umieszczony wewnątrz badanego pąka, na głębokości 20 cm powyżej podstawy pąka. Przy niepracującej komorze Osterberga parametry materiałowe elementu były takie same jak parametry pąka. Po rozpoczęciu symulacji badania materiał komory dezaktywowano, a zamiast tego pojawiły się dwie równe siły działające odpowiednio w górę i w dół. Przykładane obciążenie było stopniowo zwiększane, aż do wyczerpania się

Tabl. 1. Parametry ośrodka do modelu Hardening Soil użyte w obliczeniach

| $\gamma_{unsat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $E_{50}^{ref}$<br>[MPa] | $E_{oed}^{ref}$<br>[MPa] | $E_{ur}^{ref}$<br>[MPa] | m     | $\phi'$<br>[°] | $c'$<br>[kPa] | $\psi$<br>[°] | $R_f$<br>[-] |
|------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------|----------------|---------------|---------------|--------------|
| 16,6                                     | 19,0                                   | 24,0                    | 24,0                     | 72,0                    | 0,575 | 33,0           | 1,0           | 3,0           | 0,9          |



Rys. 3. Siatka MES oraz otrzymany wykres osiadań głowicy pala



Rys. 4. Porównanie wyników obliczeń symulacyjnych

ności pala. Za wyczerpanie nośności uznano takie przyłożone obciążenie, kiedy jedna z badanych części pala osiągnęła osiadania równe 10% średnicy pala. Przeszacowania górnej i dolnej części pala przedstawiono na rys. 4.

## PORÓWNANIE WYNIKÓW. WNIOSKI

1. Krzywe osiadań Q-s pala otrzymano na dwa sposoby: na podstawie procedur Osterberga dla dwóch krzywych pomocniczych oraz bezpośrednio za pomocą modelowania tradycyjnego statycznego wciskania pala. Wyniki zestawione na rys. 4 wykazują dobrą zgodność. Zgodność jest nawet trochę lepsza niż na rys. 4, jeśli ekwiwalentną

krzywą Osterberga Q-s skorygować o zaniżony wpływ ściśliwości własnej pala.

2. Model numeryczny okazał się najbardziej wrażliwy na zmiany współczynnika  $R_{int}$  elementów kontaktowych na styku ośrodek-pal, szczególnie dla małych jego wartości. Można było spodziewać się tego, zważywszy, że w badaniu Osterberga praca pobocznicy ma zawsze fundamentalne znaczenie. Przyjęta wartość  $R_{int} = 0,90$  wydaje się racjonalna dla pali wierconych w osłonie z rur stalowych i betonowanych w suchym gruncie niespoistym, bez użycia zawiesziny bentonitowej. W pracy [5] przeanalizowano wpływ różnych wartości  $R_{int}$  na rezultaty symulacji. Największą zgodność z tradycyjnymi badaniami uzyskano przy wartościach pomiędzy 0,8 a 0,9. W pracy [6] na

podstawie badań polowych i analizy odwrotnej jest rekomendowana nawet wartość  $R_{int} = 1$ , natomiast w [13] użyto do obliczeń wartości  $R_{int} = 0,75$ .

3. Zaprezentowane wyniki należy traktować z pewną ostrożnością i wymagają one jeszcze sprawdzenia w innych sytuacjach geotechnicznych, a także przy zróżnicowanych uwarunkowaniach numerycznych (wpływ siatek MES, modelowanie komory, założona dokładność obliczeń, eliminacja niestabilności wyników itp.). Ogólnie jednak potwierdziła się opinia o dużej przydatności badania Osterberga [3, 7, 10, 12], który w pewnych sytuacjach może stanowić alternatywę dla tradycyjnych obciążeń próbnych pali pracujących na wciskanie.

## LITERATURA

1. Brinkgreve R. B. J., Engin E., Engin H. K.: Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands. Proc. Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Taylor & Francis Group, London (2010), 137-142.
2. Brinkgreve R. B. J., Vermeer P.A.: PLAXIS v. 7.11. Instruction Manual. Plaxis B.V., Delft, 1998.
3. England M.: Review of methods of analysis test results from bi-directional static load tests. Proc. of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Deep Foundation on Bored and Auger Piles, 235-239.
4. Fellenius B. H.: The analysis of results from routine load tests. Ground Engineering, Vol. 13, No. 6, September 1980, 19-31.
5. Khelifi Z., Berga A., Terfaya N.: Modeling the behaviour of axially and laterally loaded pile with a contact model. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 16 (2011), 1239-1258.
6. Lee J.-S., Park Y. H.: Equivalent pile load-head settlement curve using a bi-directional pile load test. Computers and Geotechnics, nr 35 (2008), 124-133.
7. Li Yi: Finite element study on static load testing. A thesis submitted for degree of master of engineering. National University of Singapore, 2004.
8. Meyer Z., Kowalów M.: Statyczny test Osterberga zastosowany dla pali o dużej nośności. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3 (2011).
9. Meyer Z.: Static load test. Short series interpretation. Studia Geotechnica et Mechanica, Vol XXXVI, No. 2, 2014.
10. Osterberg, J. O.: The Osterberg load test method for bored and driven piles – The first ten years. Presented at 7<sup>th</sup> International Conference 7 Exhibition on Piling and Deep Foundations, Deep Foundation Institute, Vienna, Austria, June 1998.
11. PN-83/B-02482. Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
12. Schmertmann J., Hayes J.: The Osterberg cell and bored pile testing - a symbiosis. Proceedings at the Third Annual Geotechnical Engineering Conference, Cairo University, Cairo-Egypt 1997.
13. Sternik K, Kwasecka D.: Analiza wpływu parametrów strefy kontaktowej na współpracę fundamentu palowego z podłożem gruntowym. Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych. Wydawnictwo Uczelniane UTP, Bydgoszcz 2009.
14. [www.loadtest.com](http://www.loadtest.com)