

Andrzej TEJCHMAN<sup>1</sup>  
Kazimierz GWIZDAŁA<sup>2</sup>  
Ireneusz DYKA<sup>3</sup>

## **NOŚNOŚĆ I OSIADANIE PYLONU MOSTU PODWIESZONEGO PRZEZ MARTWĄ WISŁĘ W GDAŃSKU**

### **1. Wstęp**

Most zlokalizowany jest w Gdańsku w ciągu ulicy Sucharskiego i stanowi element przeprawy przez Martwą Wisłę. Obiekt ten prezentowany był między innymi w artykule [1].

Projektantem mostu było Biuro Projektów Budownictwa Komunalnego S.A. w Gdańsku. Most zaprojektowano o konstrukcji podwieszanej z jednym pylonem. Pomost mostu składa się łącznie z sześciu przęseł, z których najdłuższe przęsło nr 2 ma długość 230 m. Pozostałe przęsła mają następujące długości: przęsło nr 1 - 25 m, przęsło nr 3 - 39 m oraz przęsła 4, 5 i 6 - po 26 m. Pomost jest konstrukcją zespoloną w postaci płyty żelbetowej na stalowych belkach.

Fundamenty wszystkich podpór zaprojektowano jako masywne bloki żelbetowe, posadowione na palach wierconych  $\phi$  1800 mm i  $\phi$  1500 mm o długości  $L = 26-30$  m. Pod podstawami pali zaprojektowano komory iniekcyjne do przyspieszenia mobilizacji oporów gruntu pod podstawami pali i zmniejszenia osiadań [2]. Część podpór wraz z palami pracuje na siły wyciągające.

Podporę główną (podpora nr 3) stanowi pylon. Pylon usytuowano na wschodnim brzegu rzeki. Konstrukcja pylonu jest żelbetowa o wysokości 99,89 m. Fundament pylonu stanowi masywny blok żelbetowy (rys. 1) posadowiony na palach wierconych  $\phi$  1800 mm i długości 30 m. Pale rozmieszczono w dwóch siatkach kwadratowych po 25 pali w rozstawach osiowych 4,8 m.

Pale zostały wykonane przez Przedsiębiorstwo Robót Mostowych „Mosty Łódź” S.A. wiertnicą Bauer BG 36 C w rurze obsadowej wwiercanej do poziomu podstaw pali. Po wywierceniu otworu, opuszczano do niego zbrojenie wraz z komorą i urządzeniami

---

<sup>1</sup> Prof. dr hab. inż., Wydział Budownictwa Wodnego i Inżynierii Środowiska Politechniki Gdańskiej

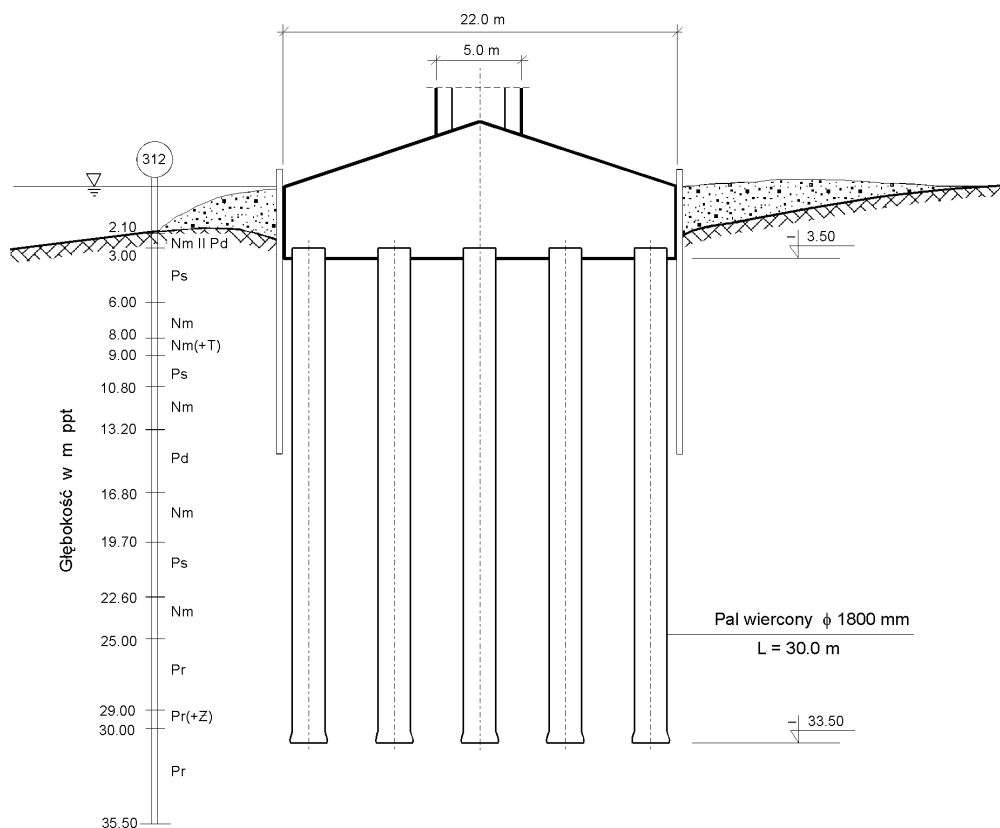
<sup>2</sup> Prof. PG, dr hab. inż., Wydział Budownictwa Wodnego i Inżynierii Środowiska Politechniki Gdańskiej

<sup>3</sup> Dr inż., Wydział Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie

iniekcijnymi przymocowanymi do zbrojenia. Szczegóły stosowanej metody iniekcji pod podstawy pali oraz przedstawiono między innymi w [2]. Po zabetonowaniu pala i związaniu betonu przeprowadzano iniekcję, w trakcie której kontrolowano: czas, ciśnienie zaczynu cementowego, objętość wprowadzonego zaczynu oraz podniesienie głowicy pala [3].

## 2. Charakterystyka geotechniczna podłoża

Podłoże omawianego fundamentu pylonu jest silnie uwarstwione, składające się z warstw piasków drobnych i średnich na przemian z warstwami namulów. Podstawy pali znajdują się w zagęszczonych piaskach średnich ze żwirem;  $I_D = 0,73$ . Szczegółowa analiza warunków posadowienia pylonu dokonana została w pracy [4].



Rys. 1. Przekrój fundamentu pylonu wraz z przekrojem geotechnicznym

## 3. Badania nośności pali

Pylon posadowiono na 50 palach o długości 30 m.

Wg projektu, maksymalne obciążenie obliczeniowe na pojedynczy pal wynosi  $Q_r = 12600$  kN (obciążenie charakterystyczne  $Q_n = 9600$  kN). Pod pylonem wykonano jedno próbne obciążenie statyczne. Szczegóły badania prezentowane były w artykule [3].

Konstrukcja stanowiska do próbnego obciążenia składała się ze stalowej belki głównej o wysokości 2,0 m i długości 12,0 m, dwóch belek poprzecznych i czterech pali kotwiących, które połączono z belkami poprzecznymi za pomocą stalowych cięgien, rys. 2.

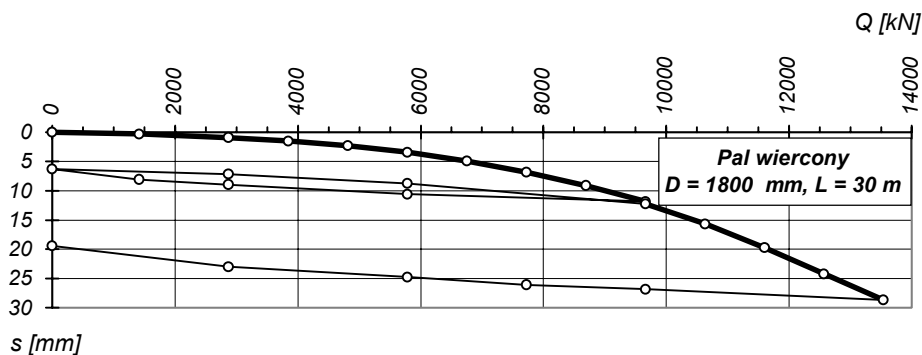
Dodatkowo konstrukcja została dociążona balastem w postaci płyt i bloków żelbetowych, których ciężar wraz z ciężarem konstrukcji stalowej wynosił około 2000 kN.



Rys. 2. Stanowisko do próbnego obciążenia pala

W trakcie próbnego obciążenia kontrolowane były również pale kotwiące aby nie dopuścić do ich nadmiernego wyciągnięcia. Badanie nośności wykonano do maksymalnego obciążenia 13,5 MN. Wykres przedstawiono na rys. 3.

Dla maksymalnego obciążenia obliczeniowego uzyskano osiadanie  $s = 25$  mm, dla maksymalnego obciążenia charakterystycznego uzyskano osiadanie  $s = 12$  mm.



Rys. 3. Wynik próbnego obciążenia pala

#### 4. Pomiary osiadań podpory pylonu

Przemieszczenia fundamentów takich odpowiedzialnych obiektów jak podpory mostów powinny być bezwzględnie monitorowane. Odpowiednie pomiary powinny być prowadzone już w trakcie budowy, jak również w trakcie normalnej eksploatacji.

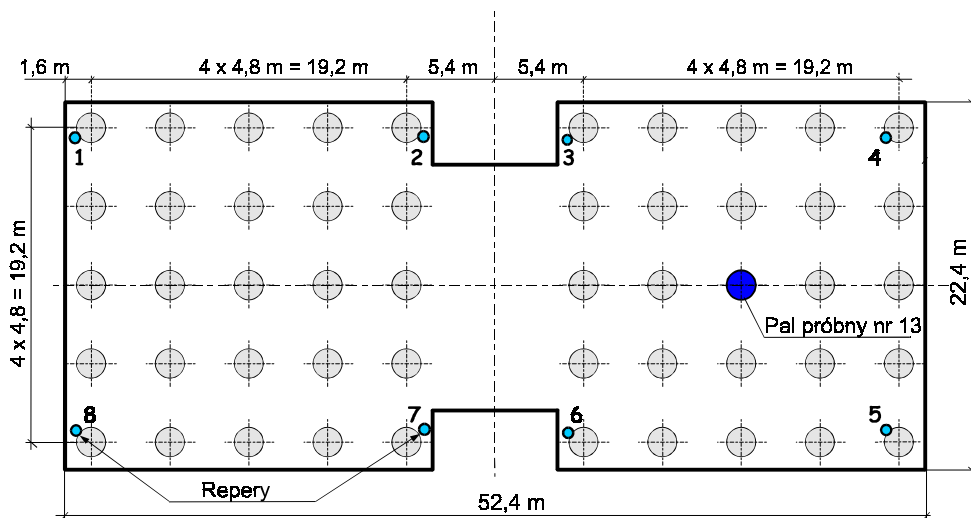
W przypadku opisywanego obiektu opracowano program badań przemieszczeń wszystkich podpór mostu. Pomiary wykonywano przy współpracy z Katedrą Geodezji Politechniki Gdańskiej metodami geodezji precyzyjnej (mgr inż. M. Chmielecki z Zespołu prof. A. Żurowskiego). Wyniki pomiarów służą nie tylko do bieżącej kontroli osiadań, ale stanowią również niezwykle cenny materiał służący pracom naukowym. Obliczanie osiadania fundamentów palowych jest dla inżynierów wciąż zadaniem trudnym i jednocześnie niezwykle ważnym. Uzyskane wyniki pomiarów osiadań fundamentów tego obiektu, jak również wielu innych [5], umożliwiły opracowanie metody obliczania osiadania pali pojedynczych i w grupie [4].

Badania wykonywano od stanu początkowego budowy poszczególnych podpór (po zabetonowaniu fundamentu) i są prowadzone już ponad 4 lata.

Na rys. 3 przedstawiono rozmieszczenie ośmiu specjalnych reperów geodezyjnych na fundamencie pylonu. Zainstalowane repery wraz z aparaturą do pomiarów precyzyjnych umożliwiają pomiar geodezyjny z dokładnością 0,3 mm.

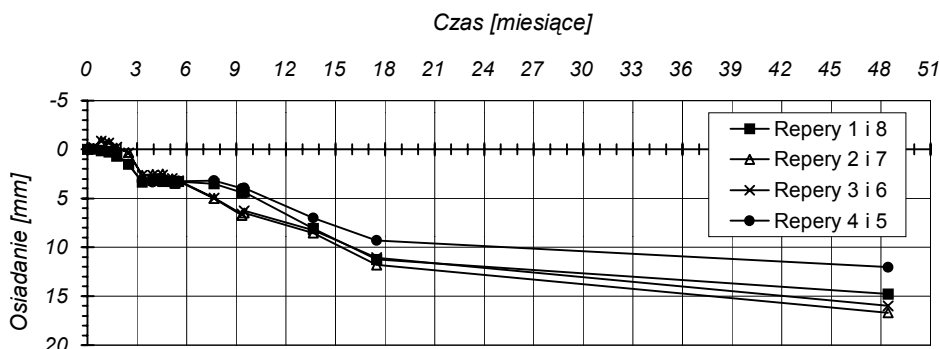
Pierwszy pomiar "0" wykonano 31 marca 2000 roku po zabetonowaniu bloku fundamentowego wieńczącego pale pod pylonem. Zwraca się uwagę, że ciężar masywnego bloku fundamentowego stanowi około 35 % całego obciążenia pali. Z tego względu wyniki pomiarów należy odnosić do stanu częściowego obciążenia pali.

Wyniki pomiarów umożliwiły śledzenie postępu osiadań fundamentów w czasie, a także porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń za pomocą istniejących metod oraz własnej metody obliczeniowej.



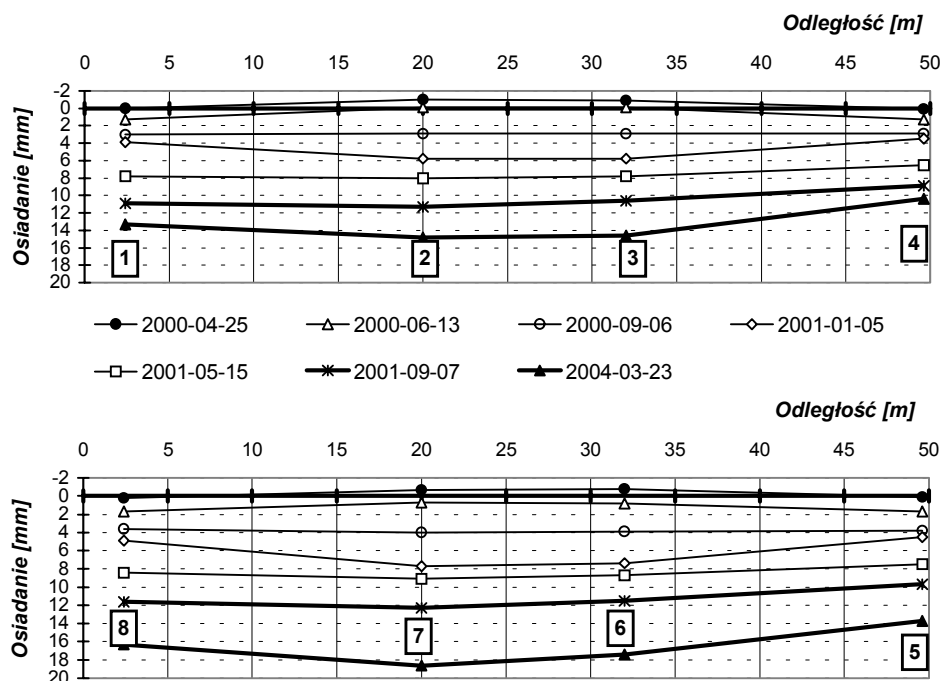
Rys. 3. Plan fundamentu pylonu mostu przez Martwą Wisłę w Gdańsku

Na rys. 4 przedstawiono wyniki pomiarów osiadań fundamentu w czasie. Mierzone osiadania podpory są wartością względną, przedstawiającą przyrost osiadania fundamentu od chwili wykonania pierwszego pomiaru „0”.



Rys. 4. Przebieg osiadań fundamentu w czasie – Pylon Mostu Sucharskiego (wartości średnie dla dwóch reperów, odniesione do pomiaru „0”)

Na rys. 5 przedstawiono wybrane profile podłużne osiadań wzdłuż dłuższych krawędzi fundamentu w trakcie poszczególnych pomiarów.



Rys. 5 Osiadania reperów wzdłuż krawędzi fundamentu podczas poszczególnych serii pomiarowych (w odniesieniu do pomiaru „0” z dnia 2000-03-31)

## 5. Obliczenia osiadań podpory pylonu

Na podstawie dokumentacji geotechnicznej określono parametry do dalszej analizy obliczeniowej.

W pierwszym etapie wykonano obliczenia za pomocą najczęściej stosowanych metod obliczania osiadań pali w grupie. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 1 i 2.

Szczegóły dotyczące poszczególnych metod obliczeniowych można znaleźć między innymi w pracach [4], [5], [6].

Tabela 1. Zestawienie zbiorcze wyników obliczeń dla metody fundamentu zastępczego

| Metoda obliczeń                      | Warianty       | Osiadanie fundamentu [mm] |
|--------------------------------------|----------------|---------------------------|
| Fundament zastępczy wg PN-83/B-02482 | bez wsp. Fox'a | 71,8                      |
|                                      | ze wsp. Fox'a  | 52,4                      |
| Program OF90                         | bez wsp. Fox'a | 78,7                      |
|                                      | ze wsp. Fox'a  | 57,5                      |
| Fundament zastępczy wg Tomlinsona    |                | 56,7                      |

Tabela 2. Zestawienie zbiorcze wyników obliczeń dla metod teoretycznych

| Metoda obliczeń                                    |                                      | Osiadanie fundamentu [mm] |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Metoda Poulos'a wg PN-83/B-02482                   | moduły odksz. zgodnie z dokumentacją | 133                       |
|                                                    | z uwzgl. wyników próbnego obciążenia | 118                       |
| Wzór Randolph'a                                    |                                      | 93,5                      |
| Metoda Chow'a                                      |                                      | 110                       |
| Metoda współczynników wpływu obliczonych wg Chow'a |                                      | 134                       |

Współczynnik Fox'a w metodzie fundamentu zastępczego uwzględnia zagłębienie fundamentu bezpośredniego odpowiadające głębokości osadzenia pali.

Autorski program Zespołu OF90 – Osiadanie Fundamentów Zastępczych, przeznaczony jest do inżynierskich obliczeń osiadań, przechyłek oraz odkształceń budowli posadowionej na fundamentach bezpośrednich lub fundamentach palowych obciążonych statycznie. Modyfikacja w stosunku do klasycznej metody zastępczego fundamentu bezpośredniego polega na przyjęciu, że poszczególne pale lub elementy fundamentu bezpośredniego traktowane są jak elementarne zastępcze fundamenty bezpośrednie, pod którymi obliczane jest osiadanie.

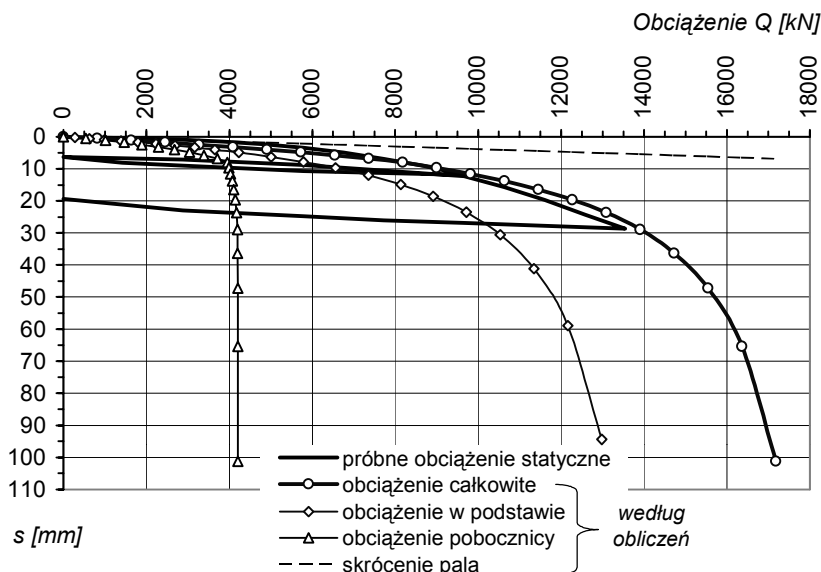
Obliczenia metodami teoretycznymi wymienionymi w tablicy 2 również wymagały opracowania własnych programów komputerowych.

Osiadanie obliczone wyżej wymienionymi metodami jest to całkowite, końcowe osiadanie odpowiadające maksymalnej wielkości obciążenia charakterystycznego. Wartość tego obciążenia oszacowano jako 480 MN. Z danych otrzymanych od projektanta wynika, że sam ciężar bloku żelbetowego wieńczącego pale wynosi około 165 MN, a ciężar pylonu (bez lin) 51 MN.

Na podstawie przeprowadzonej analizy oraz w oparciu o dotychczasowe doświadczenia oszacowano końcowe średnie osiadanie fundamentu pylonu w granicach  $40 \div 60$  mm.

Następnie, po opracowaniu autorskiej metody obliczania osiadań pali w grupie [4], [7] wykonano obliczenia sprawdzające. Opracowana metoda uwzględnia nieliniową pracę pali w gruncie poprzez wprowadzenie zmienności modułu odkształcenia gruntu w funkcji mobilizowanego oporu na pobocznicy i pod podstawą pala.

Za pomocą programu komputerowego opartego na opracowanej metodzie obliczeniowej, stosując metodę analizy wstecznej z wykorzystaniem wyników próbnego obciążenia statycznego, uściślono przyjęte wartości parametrów geotechnicznych. Jako wynik otrzymano krzywą osiadania pala pojedynczego przedstawioną na rys. 6.



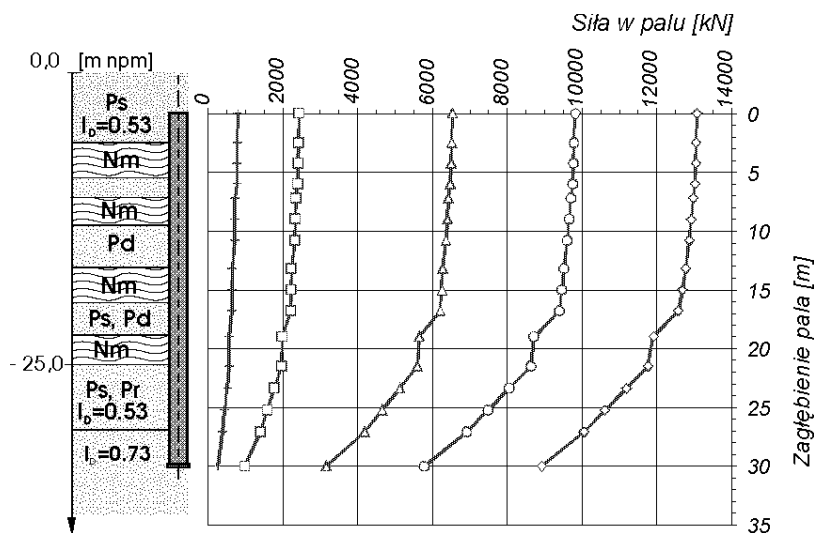
Rys. 6. Krzywe osiadania dla pala pojedynczego, wg próbnego obciążenia i wg obliczeń (rozdział obciążenia na pobocznicy i podstawę)

Opracowana metoda obliczania osiadań pali umożliwia również określenie obciążenia przejmowanego przez pobocznicy i podstawę oraz skrócenie pala, zarówno pala pojedynczego jak i w grupie, rys. 6.

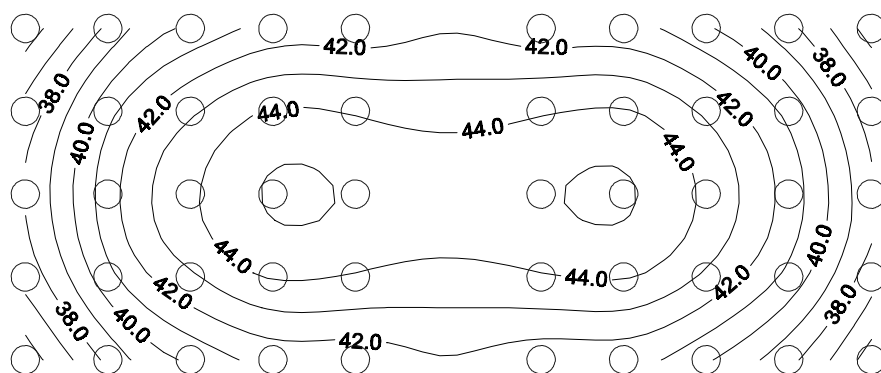
Krzywą obciążenia dla pobocznicy pala charakteryzuje nagłe zakrzywienie w momencie, gdy opór tarcia na pobocznicy zostanie całkowicie zmobilizowany. Można przyjąć, że pełna mobilizacja oporu pobocznicy nastąpiła dla przemieszczenia głowicy 10 mm.

Krzywą obciążenia dla podstawy pala wierconego charakteryzuje powolny wzrost oporu podstawy (pal z iniekcją pod podstawą).

Przy zastosowaniu tej metody, można także przedstawić rozkład siły w palu wzdłuż jego długości, przy poszczególnych stopniach obciążenia, rys. 7.



Rys. 7. Rozkład siły w palu dla kolejnych stopni obciążenia (wg obliczeń)



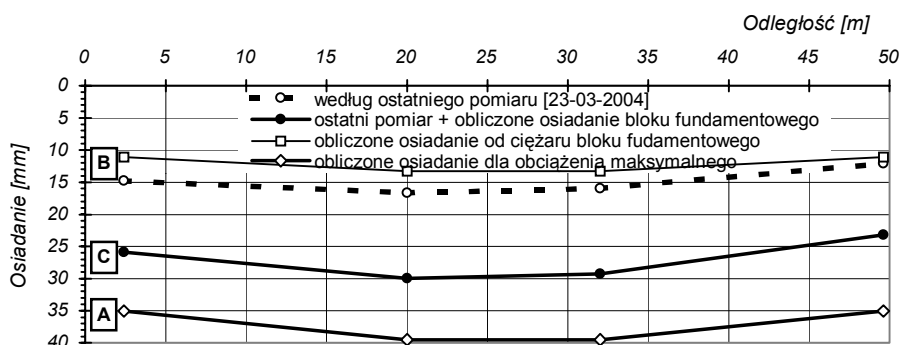
Rys. 8. Mapa osiadań pali pracujących w grupie w [mm] dla maksymalnego obciążenia charakterystycznego (obliczone za pomocą opracowanego programu komputerowego)

Jako wynik obliczeń osiadań pali w grupie uzyskuje się przemieszczenie poszczególnych pali dla określonego poziomu obciążenia. Na rys. 8 przedstawiono mapę osiadań pali w grupie, obliczonych za pomocą opracowanej metody. Podobne mapy można wykreślić dla dowolnego układu obciążenia poszczególnych pali.

Dla danego obciążenia można określić profil podłużny osiadań całego fundamentu. Na rys. 9 przedstawiono profil podłużny osiadań fundamentu wzdłuż dłuższych krawędzi, patrz rys. 3.

Krzywa A przedstawia obliczony profil podłużny osiadań fundamentu dla maksymalnego przewidzianego obciążenia charakterystycznego: 9600 kN/pal.

Profil B przedstawia obliczone osiadanie fundamentu od obciążenia ciężarem bloku fundamentowego.



Rys. 9. Profile podłużne osiadań fundamentu – Pylon Mostu Sucharskiego

Na rysunku przedstawiono również profil wynikający z pomiarów osiadań, pamiętając jednak, że pierwszy pomiar „0” wykonano po zabetonowaniu bloku fundamentowego wieńczącego pale a charakterystyczny ciężar bloku wynosi 165 MN, co stanowi około 1/3 całkowitego obciążenia pali.

Profil C wynika z sumy wartości pomierzonych osiadań i obliczonego osiadania bloku fundamentowego.

Średnia wartość osiadania dla dłuższej krawędzi fundamentu wynosi:

- ♦ według proponowanej metody: **38,0 mm;**
- ♦ według pomiarów geodezyjnych: **29,0 mm.**

Powyższe wyniki świadczą o dostatecznej zgodności między osiadaniami otrzymanymi opracowaną metodą i wartościami pomierzonymi, świadcząc jednocześnie o dokładności metody i poprawności przyjętych założeń.

## 6. Podsumowanie

Na etapie projektowania rzadko wykonuje się obliczenia spodziewanych przemieszczeń obiektu. W przypadku fundamentów palowych weryfikację poprawności projektu oraz kontrolę wykonawstwa stanowią wyniki próbnych obciążeń pali.

Na podstawie krzywej osiadania, którą otrzymujemy z próbnego obciążenia pala, określamy wartość osiadania dla danego obciążenia. W ten sposób otrzymano wartość osiadania pala pojedynczego przy maksymalnej wartości charakterystycznej obciążenia ( $Q_n = 9600$  kN),  $s_{poj} \cong 11,8$  mm. Rozważając pracę pali w grupie należy pamiętać, że pale fundamentu palowego są poddane nie tylko obciążeniu własnemu ale również (w przypadku dużych grup pali przede wszystkim) oddziaływaniu sąsiednich pali. Następuje wzajemne przenikanie się i nakładanie stref naprężeń wokół poszczególnych pali wchodzących w skład grupy. W efekcie dla dużych grup palowych osiadanie grupy jest większe od osiadania pala pojedynczego.

Najważniejszym elementem w obliczeniach stanu granicznego użytkowalności jest właściwe przyjęcie modułów odkształcenia gruntu. W praktyce inżynierskiej wciąż najczęściej korzysta się z metod, w których podstawowym parametrem jest moduł odkształcenia ogólnego o stałej wartości. Takie założenie prowadzi do wyższych wartości osiadań w porównaniu z wartościami obserwowanymi na rzeczywistych obiektach.

Takie wnioski również wypływają z wieloletnich doświadczeń autorów artykułu związanych z obserwacjami istniejących fundamentów palowych [5], [8]. Największe wartości osiadań fundamentu palowego otrzymuje się przy zastosowaniu metod teoretycznych i stałego modułu odkształcenia ogólnego. Bardziej zbliżone do rzeczywistości wyniki otrzymuje się za pomocą metod fundamentu zastępczego.

Porównując wartości osiadań obliczone różnymi metodami (tablica 1 i 2) oraz wartości obliczone opracowaną metodą (rys. 8 i 9) można stwierdzić, że wartości otrzymane za pomocą nowej metody są najbardziej zbliżone do wartości pomierzonych.

Pomiary osiadania prowadzone są w dalszym ciągu i wraz z innymi pomiarami prowadzonymi na różnych obiektach będą służyć dalszym szczegółowym analizom.

### **Literatura**

- [1] KOREJWO Z., PALINKIEWICZ J., WOLAN Z., Budowa mostu podwieszonego przez Martwą Wisłę w Gdańsku. *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 9/2000.
- [2] TEJCHMAN A., GWIZDAŁA K., Zwiększanie nośności pali wierconych. Materiały *XLVII Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB*, Opole-Krynica, wrzesień 2001.
- [3] TEJCHMAN A., GWIZDAŁA K., Badanie nośności pali wielkośrednicowych pod pylonem mostu podwieszonego przez Martwą Wisłę w Gdańsku, *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 12/2000, s. 662-664.
- [4] DYKA I., Analiza i metoda obliczeń osiadania grupy pali, *praca doktorska*, Politechnika Gdańska, czerwiec 2001.
- [5] TEJCHMAN A., GWIZDAŁA K., DYKA I., ŚWINIAŃSKI J., KRASIŃSKI A., Nośność i osiadanie fundamentów palowych. Monografia, Politechnika Gdańska, kwiecień 2001.
- [6] GWIZDAŁA K., DYKA I., Metody obliczeń osiadania dużych grup palowych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 5/1998.
- [7] GWIZDAŁA K., DYKA I., Ocena wielkości osiadań pali w grupie, Materiały *XLVII Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB*, Opole-Krynica, wrzesień 2001.
- [8] DYKA I., GWIZDAŁA K., TEJCHMAN A., Zagadnienie osiadania grup palowych. Materiały *XII Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania*, Szczecin-Międzyzdroje, 18-20 maja 2000.

## **BEARING CAPACITY AND SETTLEMENT OF THE CABLE BRIDGE OVER MARTWA WISŁA RIVER IN GDAŃSK**

### **Summary**

The bridge connecting two sides of Martwa Wisla river is a part of Sucharski route. The bridge was designed and performed as cable bridge with single pylon. The pylon's support was founded on 50 piles of the diameter of 1800 mm and the length of 30 m with the chamber injection to increase the bearing capacity of the piles and to decrease its settlements.

One static load test of single pile was carried out on the site. The settlement of realised pylon foundation was also measured by means of surveying. A detailed analysis of settlements has been carried out on the basis of available data and new proposed method of calculation. The obtained results were compared to general known methods.