

Problematyka osiadań fundamentów palowych w skomplikowanych warunkach gruntowych i złożonych stanach obciążenia

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Gwizdała, mgr inż. Sylwia Florkowska
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Problematyka oceny pracy grupy pali w różnych warunkach gruntowych była poruszana w licznych publikacjach i pracach naukowych. Początkowo głównym kryterium określającym pracę pali w gruncie było pojęcie „nośności”. W normie polskiej [5] zwrócono uwagę na znaczenie tej wielkości, przedstawiając szczegółowe wytyczne obliczania nośności. Wraz z rozwojem prac badawczych uznano, że pojęcie to nie jest wystarczająco precyzyjne ze względu na możliwość stosowania różnych kryteriów do oceny obciążenia granicznego. W obecnej praktyce projektowej za główny wyznacznik współpracy pali z podłożem gruntowym przyjmuje się zależność osiadania od przyłożonego obciążenia. W Eurokodzie 7 nie podano jednoznacznej metody obliczeniowej osiadania fundamentów palowych. W pierwszej części Eurokodu 7 [6] można znaleźć jedynie zapis „by analiza osiadań obejmowała zarówno osiadania pali pojedynczych, jak i osiadanie grup pali” [4].

Istnieje szereg metod obliczania osiadań grup palowych. W miarę rozwoju wiedzy i narzędzi obliczeniowych mamy do czynienia z ich ciągłą modyfikacją. W celu usystematyzowania metod obliczeniowych wprowadzono następujący podział [1, 2]:

- 1) metoda współczynnika osiadania,
- 2) metoda fundamentu zastępczego,
- 3) metody analityczne opracowane na podstawie rozwiązań teoretycznych, gdzie analizuje się współpracę układu pal – grunt – pal:
 - metody wykorzystujące rozwiązania w ramach teorii sprężystości,
 - metody wykorzystujące zależności rozkładu naprężenia w otoczeniu pala oraz krzywe transformacyjne,
 - metody hybrydowe,
 - metodę współczynników wpływu,
 - metody numeryczne.

Mimo wymienionych metod obliczeniowych w obecnej praktyce projektowej brakuje sprecyzowanego sposobu szacowania osiadania grupy palowej, która umożliwiłaby przyjęcie właściwego schematu obliczeniowego oraz interpretację otrzymanych wyników. Ze względu na powszechne stosowanie fundamentów

w formie grup palowych należy uściślić metody obliczeń ich osiadań. Obecnie fundamenty palowe są stosowane w budownictwie komunikacyjnym oraz znajdują szerokie zastosowanie w budowie podpór obiektów mostowych, wiaduktów drogowych, kolejowych i budowli hydrotechnicznych. Przykładem inwestycji, w której znalazły liczne zastosowanie technologie palowe, jest realizacja zadania „Połączenie dróg krajowych – Trasa Sucharskiego”. Projekt wykonawczy opracowała gdańska firma Europrojekt. Celem inwestycji była poprawa dostępności transportowej Portu Gdańskiego oraz usprawnienie funkcjonowania układu komunikacyjnego miasta. W ramach projektu wybudowano, między innymi, około 8,3 km jezdni dróg klasy GP, odcinki dróg dojazdowych, węzły komunikacyjne oraz 9 wiaduktów drogowych posadowionych na fundamentach palowych, w tym wiadukt WD7, którego wyniki osiadań będą zaprezentowane w celu analizy omawianego zagadnienia.

ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE I TECHNOLOGIA WYKONANIA WIADUKTU

Wiadukt WD-7 umożliwi bezkolizyjne przeprowadzenie ciągu komunikacyjnego łącznicy WKU-5 nad istniejącą drogą dojazdową do terminalu kontenerowego Z-5 oraz łącznicą kolejową do Portu Północnego.

Obiekt zaprojektowano jako pięcioprzęsłową belkę ciągłą o rozpiętościach od 30 do 40 metrów, spiętą w układ ramowy w środkowej podporze. Podpory wiaduktu stanowią dwa żelbetowe przyczółki ze skrzydłami w postaci murów oporowych oraz żelbetowe filary. Filary osi 40 i 50 zaprojektowano jako zestaw słupów o średnicy 1000 mm z żelbetową belką oczepową na łożyskach opartą na ustroju nośnym. W osi 20 zaprojektowano 3 ściany słupowe o długości 2,8 m i grubości 1,0 m. W osi 30 ze względu na połączenie z ustrojem nośnym w układ ramowy zaprojektowano ścianę o grubości 1,0 m. Fundamenty filarów sąsiadujących z torowiskiem wykonano w ściankach szczelnych zabezpieczających torowisko kolejowe. Całkowita długość wiaduktu (bez murów oporowych) wynosi 192,5 m. Posadowienie filarów wiaduktu wykonano w technologii pali typu Vibro-Fundex o średnicy 508 mm zwieńczonych żelbetowym oczepek [9].



Rys. 1. Prace montażowe przy budowie wiaduktu WD-7 na Trasie Sucharskiego w Gdańsku

Roboty palowe wykonywano w sierpniu i wrześniu 2011 roku. Realizację całości zadania zakończono w maju 2012 roku.

Warunki gruntowo-wodne

Na całym terenie stanowiącym obszar inwestycji podłoże jest bardzo silnie uwarstwione. Wykazuje ono charakterystyczną dla tego regionu budowę geologiczną, w której w nawodnionych utworach piaszczystych występują warstwy gruntów

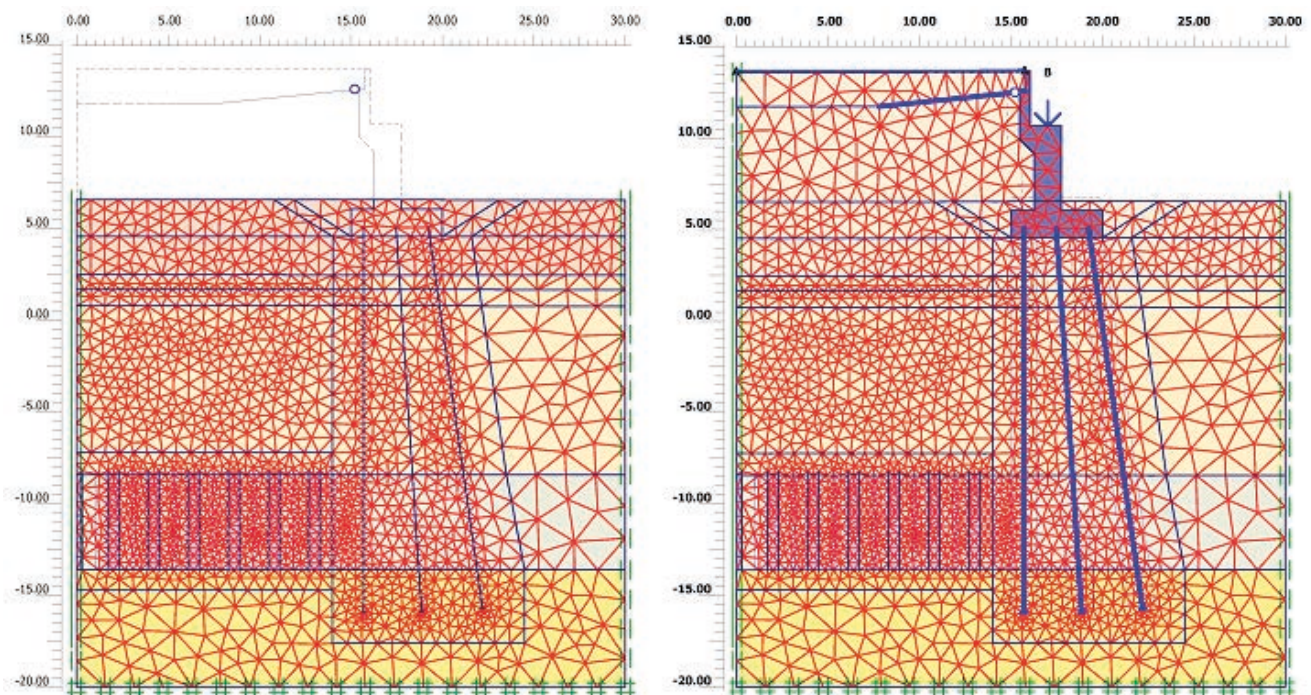
słabonośnych w postaci namulów piaszczystych i pylastych. Warstwy te występują na dwóch poziomach: na głębokości 10 m o miąższości 2 m oraz na głębokości 15 m o miąższości 3 m. Niżej położone warstwy organicznych gruntów drobnoziarnistych występują w postaci soczewek o miąższości do 1,0 m. Pierwotny projekt zakładał wykonanie posadowienia podpór na palach wielkośrednicowych o średnicy 1500 mm i o długości dochodzącej do 28 m. Ostatecznie przyjęto rozwiązanie zamienne, w którym fundamenty przyczółków o niezmiennionej geometrii posadowiono na palach Vibro-Fundex o średnicy nominalnej 508 mm [9]. Zastosowano większą liczbę pali pod każdym fundamentem jak również przyjęto mniejsze długości pali. Wiadukt posadowiono na 78 palach o długości od 16,0 do 18,5 m, w zależności od warunków geotechnicznych oraz obciążeń, które zestawiono w tabl. 1.

Analiza obliczeniowa

Przyjęcie zamiennych rozwiązań technologicznych wykonania obiektu było możliwe dzięki analizie wartości osiadań zawartej w opracowaniu [7]. Na skutek obciążenia przyczółków wiaduktu, po uprzednim wykonaniu nasypów najazdu i wzmocnieniu warstw gruntów słabonośnych, udało się zmniejszyć oddziaływanie tarcia negatywnego i ograniczyć jego wpływ na późniejsze osiadanie konstrukcji. Wartości osiadań w najbardziej obciążonym obszarze (przy przyczółkach) zredukowano o około 30%. Wzmocnienie warstw gruntów słabonośnych wykonano za pomocą wgłębnych kolumn betonowych MMC (*Mo-*

Tabl. 1. Zestawienie uśrednionej wartości obciążeń oddziałujących na pojedynczy pał

Średnia maksymalna pionowa siła charakterystyczna [kN]	Średnia minimalna siła charakterystyczna [kN]	Średnia maksymalna siła pionowa obliczeniowa [kN]	Średnia minimalna siła pionowa obliczeniowa [kN]	Średnia maksymalna siła pozioma charakterystyczna [kN]
2068	780	3027	599	336



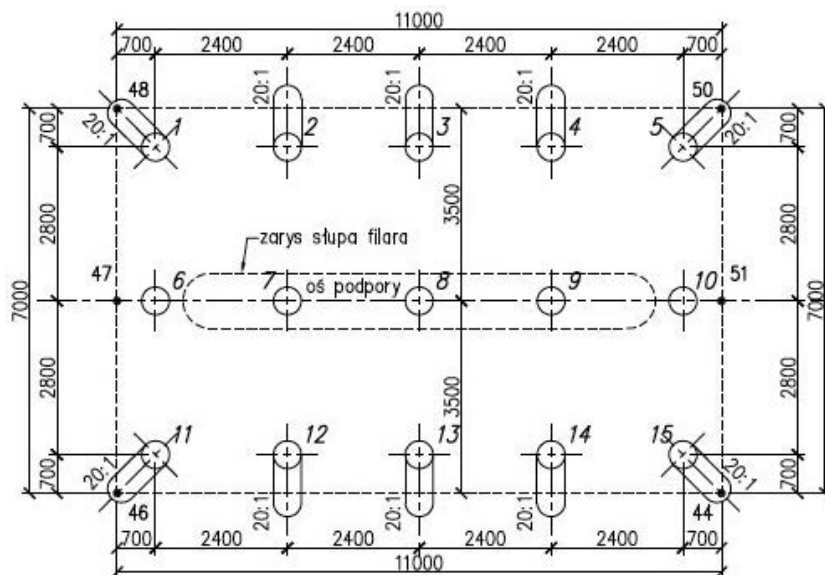
Rys. 2. Model zastosowany w obliczeniach wpływu osiadania nasypu dojazdowego na przyczółek wiaduktu. Układ początkowy po wykonaniu kolumn wgłębnych i nasypu do rzędnej 6,6 m n.p.m. oraz układ ostateczny po wykonaniu i obciążeniu nawierzchni drogowej i przyczółka [7]

dified Menard Columns). Grunt ziarnisty znajdujący się bezpośrednio nad kolumną, który w wyniku przejścia rury tworzącej kolumny wgłębne mógł ulegać rozluźnieniu, zagęszczono metodą wibracyjną. Długość kolumn wgłębnych obejmowała dwie warstwy gruntów słaboosnych oraz warstwę gruntów słabosłabych rozdzielającą warstwy słaboosne. W celu oszacowania wpływu osiadań nasypu dojazdowego na pale Vibro-Fundex przeprowadzono dodatkową analizę obliczeniową uwzględniającą kolejność obciążeń przy jednocześnie przebiegającej konsolidacji pierwotnej i wtórnej (pełzanie warstw słaboosnych). Obliczenia wykonano w płaskim stanie odkształcenia w przekroju prostokątnym do przyczółka i rozwiązano metodą elementów skończonych. Elementy wzmocnienia wgłębne przyjęto jako ośrodki ciągły z uśrednioną charakterystyką sztywności zależną od rozstawu kolumn. Pale przyjęto jako elementy belkowe z obustronnymi elementami kontaktowymi z ośrodkiem gruntowym. W elementach kontaktowych obniżono wytrzymałość na ścinanie gruntu w celu uwzględnienia rzeczywistej powierzchni kontaktowej poboczniczy pali z otaczającym gruntem [7].

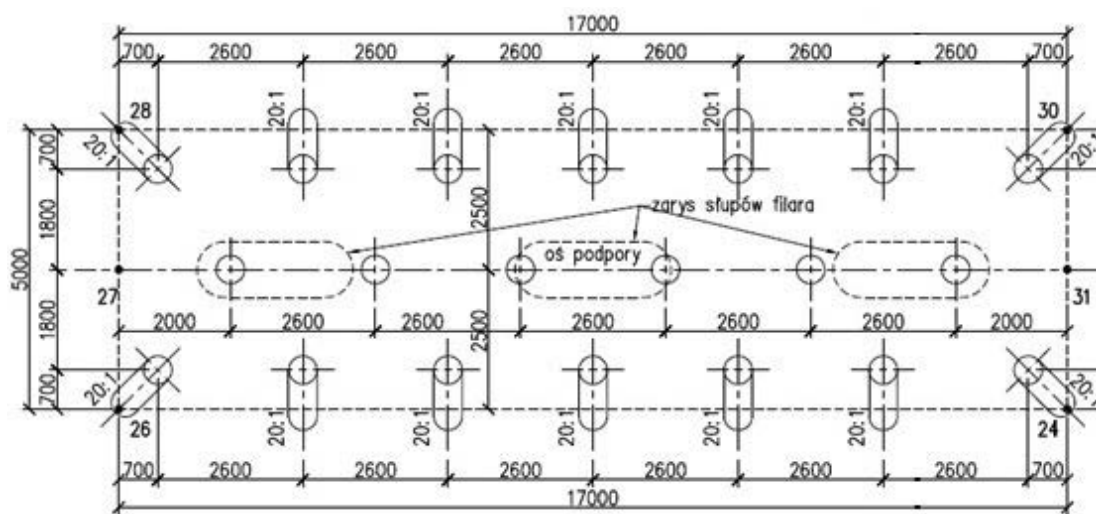
Schemat modelu i jego dyskretyzację przedstawiono na rys. 2.

W analizie przyjęto następujące fazy obliczeniowe [7]:

- instalacja kolumn wgłębnych,
- wykonanie nasypu,
- instalacja pali Vibro-Fundex,
- wykonanie wykopu do rzędnej posadowienia przyczółka,
- wykonanie fundamentu i korpusu przyczółka,
- wykonanie nasypu do poziomu ławy podłożyskowej,
- obciążenie łożyska konstrukcją wiaduktu i wykonanie płyty przejściowej,
- wykonanie pozostałej części nasypu oraz nawierzchni drogowej,
- obciążenie użytkowe 25 kPa,
- konsolidacja w okresie gwarancyjnym 5 lat.



Rys. 3. Plan palowania podpory A [9]



Rys. 4. Plan palowania podpory B [9]

Obciążenie przyczółka wprowadzone po wykonaniu części nasypu działa korzystnie z punktu widzenia zjawiska tarcia negatywnego, to znaczy obciążenie działa w przeciwnym kierunku niż obciążenie od osiadającego nasypu. Powstające odciążenie poboczniczy jest jednak częściowe, gdyż w dalszym przebiegu konsolidacji gruntów słabonośnych tarcie negatywne może pojawić się ponownie. Najbardziej niekorzystne efekty w obliczeniach uzyskano przy minimalnym obciążeniu łożysk przyczółka w fazie po konsolidacji w okresie gwarancyjnym [7].

PRÓBNE OBCIĄŻENIA DYNAMICZNE ORAZ STATYCZNE

Na potrzeby wiaduktu wykonano 6 próbnych obciążeń pali metodą dynamiczną PDA (*Pile Driving Analysis*), tj. po jednym badaniu w każdej podporze. Ponadto w obiekcje przeprowadzono dwa badania statyczne. W pierwszej kolejności wykonano badanie dynamiczne PDA pograżanej rury stalowej, a następnie na tym samym palu po zabetonowaniu jego trzonu przeprowadzono badanie statyczne. Ponadto na jednym palu po zabetonowaniu trzonu przeprowadzono także badanie dynamiczne DLT, które służyło do kalibracji badań dynamicznych przeprowadzanych na pograżanej rurze stalowej. Badania wykonano na wybranych palach podpór A oraz B.

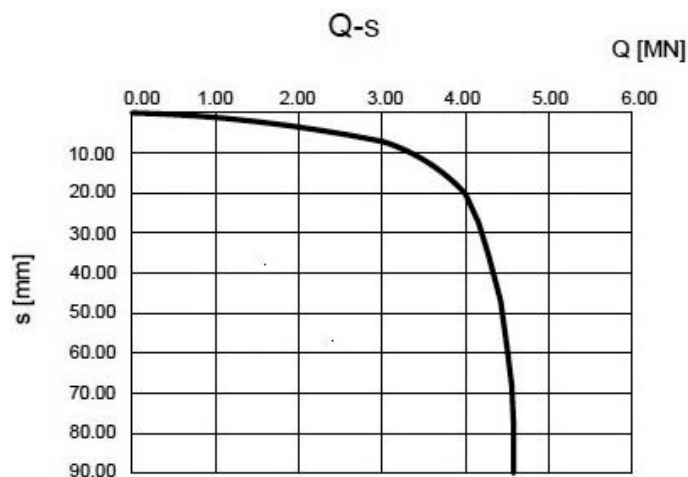
Badanie dynamiczne PDA (*Pile Driving Analysis*)

Badanie dynamiczne wykorzystuje zjawisko rozchodzenia się fali naprężenia w palu podczas jego wbijania albo w przypadku pala wykonywanego w gruncie po jego wykonaniu i uderzeniu w głowicę młotem kafara lub innym ciężarem prowadzonym w prowadnicach.

Za pomocą zamontowanych na głowicy pala czujników następuje pomiar przyspieszenia i odkształcenia w głowicy pala. Specjalnie zaprojektowany analizator drgań przy współpracy z przenośnym komputerem rejestruje i przetwarza dane. Pomierzone przyspieszenia i odkształcenia pala zarejestrowane podczas uderzenia oraz charakterystyka podłoża opracowana na podstawie rozpoznanych wcześniej warunków geotechnicznych umożliwiają opisanie modelu analitycznego młot – pal – grunt, za pomocą którego określa się nośność pala oraz, ekwiwalentną do statycznej, zależność obciążenie – osiadanie. Rejestracja propagacji fali wywołanej uderzeniem bijaka w głowicę odbywa się za pomocą dwóch czujników odkształceń i dwóch czujników

Tabl. 2. Wyniki badań dynamicznych PDA pala nr 11 (podpora A) i pala nr 8 (podpora B) [8]

Obiekt Podpora Nr pala	Parametry pala	Rodzaj obciążenia	Obciążenie Q [kN]	Osiadanie s [mm]
Podpora A Pal Nr 11	rura ϕ 508 mm $L_r = 19,90$	R_G – opór graniczny pala	~ 4730	–
		N_D – nośność pala z badań dynamicznych	~ 3300	~ 9,50
Podpora B Pal Nr 8	rura ϕ 508 mm $L_r = 19,90$	R_G – opór graniczny pala	~ 4540	–
		N_D – nośność pala z badań dynamicznych	~ 3175	~ 8,50



Rys. 5. Zależność obciążenie – osiadania na podstawie badań PDA pala nr 8 [8]

przyspieszeń przymocowanych do rodzimej powierzchni pala po przeciwległych stronach głowicy [3].

Do zadawania obciążenia na pal wykorzystano młot kafara wbijającego pale rurowe o ciężarze około 30 kN. Wyniki badań dynamicznych PDA wybranych pali przedstawiono w tabl. 2.

Nośność na podstawie badań dynamicznych N_D otrzymano dzięki interpretacji zależności obciążenie – osiadanie zmobilizowanych w czasie badań oporów pali w gruncie (rys. 5).

Na podstawie przeprowadzonych badań sprawdzono warunki stanu granicznego oraz wyznaczono osiadania badanych pali. Osiadania pojedynczego pala nr 11 odpowiadające nośności otrzymanej z badań dynamicznych ($N_D \cong 3300$ kN) wynosi 9,5 mm, natomiast osiadanie pala nr 8 odpowiadające nośności 3175 kN wynosi 8,5 mm.

Badania dynamiczne DLT (*Dynamic Load Test*)

Badanie dynamiczne DLT wykonano między innymi dla pala nr 8 podpory A. Na podstawie uzyskanych wyników badań sprawdzono warunek stanu granicznego pojedynczego pala ($Q_r = 1821$ kN < $N_D \cong 3200$ kN). Osiadanie odpowiadające nośności otrzymanej z badania dynamicznego wyniosło 7,0 mm.

Badania statyczne

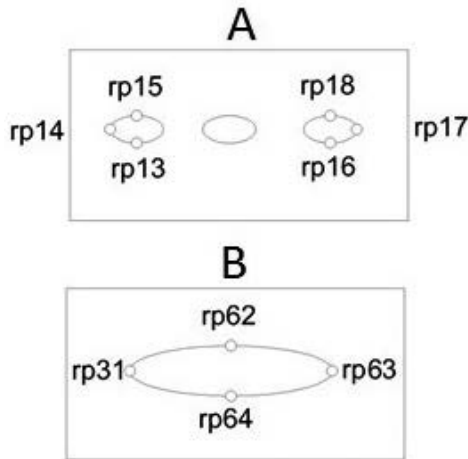
Próbnne obciążenia statyczne przeprowadzono w sierpniu 2011 roku, między innymi dla pala nr 8 podpory B. Próbnne obciążenie przeprowadzono metodą belki odwróconej. Na podstawie uzyskanych wyników określono nośność obliczeniową badanego pala na poziomie $k \cdot N_c^0 = 3165$ kN. Nośność $k \cdot N_c^0 = 3165$ kN mobilizuje się przy osiadanu pala pojedynczego około $s \approx 7,00$ mm. Przy obciążeniu pośrednim $Q_{pos} \cong 1821$ kN osiadanie pala pojedynczego wyniosło około $s \approx 2,85$ mm.

MONITORING GEODEZYJNY

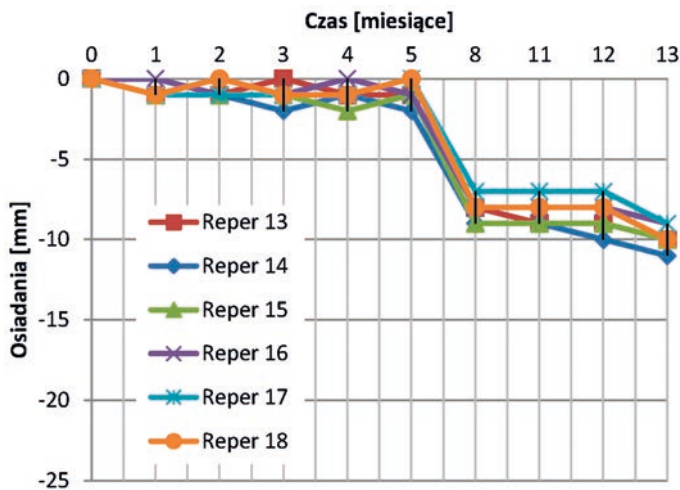
W celu bieżącego monitorowania osiadań fundamentów w czasie zastosowano system reperów geodezyjnych oraz apa-

ratury pomiarowej, które umożliwiają pomiar osiadań z dokładnością do 0,3 mm. Na rys. 6 przedstawiono rozmieszczenie reperów na podporach A oraz B wiaduktu.

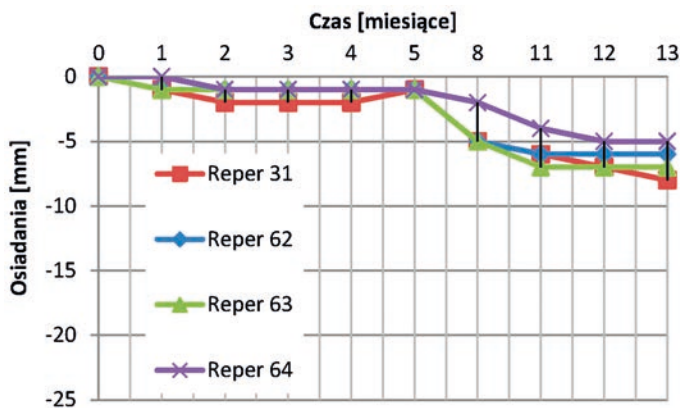
Wartości i przebieg osiadań fundamentów w czasie dla podpory A oraz B przedstawiono na rys. 7 i 8. Mierzone wielkości są wartościami względnymi obrazującymi przyrosty osiadań na przestrzeni 13 miesięcy od momentu wykonania pierwsze-



Rys. 6. Rozmieszczenie reperów na podporach A oraz B



Rys. 7. Przebieg osiadania podpory A w czasie



Rys. 8. Przebieg osiadania podpory B w czasie

go pomiaru „0”. Pierwsze pomiary przeprowadzono w listopadzie 2011 roku po zakończeniu głównych prac konstrukcyjnych (przed wykonaniem murów oporowych, płyty pomostu oraz nawierzchni).

Mierzone dotychczas wielkości osiadań wybranych obiektów mieszczą się w dopuszczalnych granicach założonych na etapie projektowania. Należy zaznaczyć, że pomiary geodezyjne wykonywano po zakończeniu głównych prac konstrukcyjnych oraz przy znikomym wpływie obciążeń zmiennych. Wprawdzie pomiary obejmują również okres po przekazaniu obiektu do użytku, jednak ze względu na prace trwające na dalszych odcinkach Trasy Sucharskiego wiadukt praktycznie nie był eksploatowany.

PODSUMOWANIE

Prognozowanie osiadania konstrukcji fundamentów wymaga określenia zachowania się całej grupy pali pod wpływem obciążenia. Pomimo tego, że zagadnienie osiadania pali w grupie było analizowane w wielu pracach badawczych, nadal trudno jednoznacznie wskazać praktyczną, a zarazem dokładną metodę szacowania osiadań fundamentów palowych.

Istotne jest właściwe podejście projektowe i weryfikacja projektu na etapie wykonawstwa. Dzięki przyjętej technologii wykonania nasypów zredukowano wpływ tarcia negatywnego i ograniczono jego wpływ na osiadanie konstrukcji. Późniejsze, rzeczywiste wartości osiadań jednoznacznie potwierdzają słuszność i skuteczność przyjętych założeń.

Należy podkreślić znaczenie badań terenowych w projektowaniu fundamentów palowych. Dzięki przeprowadzonym próbnym obciążeniom dynamicznym i statycznym pali oraz pomiarom rzeczywistych osiadań całych podpór palowych nie tylko kontrolujemy ich bieżącą pracę, ale uzyskujemy również dane mogące służyć do weryfikacji metod obliczeniowych stosowanych na etapie projektowania w odniesieniu do przyjętych technologii.

Bieżący monitoring geodezyjny przemieszczeń fundamentu umożliwia kontrolę pracy konstrukcji oraz stanowi cenne źródło informacji jakościowych i ilościowych, które mogą być wykorzystane w analizach teoretycznych do weryfikacji przyjmowanych założeń.

LITERATURA

1. Dyka I., Gwizdała K.: Osiadanie pali i fundamentów palowych. Seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych”, Gdańsk 2004.
2. Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Tom 1. Technologie i obliczenia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Wydanie 2 uzupełnione, Warszawa, 2011.
3. Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Tom 2. Badania i zastosowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
4. Tejchman A., Gwizdała K., Świniański J., Krasiński A., Dyka I.: Nośność i osiadanie fundamentów palowych (monografia). Politechnika Gdańska, 2001.
5. Polska Norma PN-83/B-02482 Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.

6. PN-EN 1997-1:2008 – Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne; część 1: Zasady ogólne.

7. Gwizdała K., Cudny M.: Opinia geotechniczna dotycząca wzmocnienia podłoża kolumnami wgłębnymi (MMC) pod nasypami najazdów na przyczółki wiaduktów WD7 i WD8 w osi nr 10, Trasa Sucharskiego, Zadanie II, odcinek Węzeł Wosia Budzysza – Węzeł Ku Ujściu, Gdańsk 2011.

8. Gwizdała K., Słabek A.: Badania nośności pali Vibro-Fundex ϕ 508 mm wykonanych pod posadowienie podpór wiaduktu WD-7. Projekt próbnych obciążeń dynamicznych, Gdańsk 2011.

9. Projekt wykonawczy Połączenie dróg krajowych – Trasa Sucharskiego. Zadanie II. Odcinek Węzeł Wosia Budzysza – Węzeł Ku Ujściu, Europrojekt, Gdańsk.