

Osiadanie grup palowych – analiza posadowienia obiektów inżynierskich na Trasie Sucharskiego w Gdańsku

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

Fundamenty w postaci grup palowych są wykorzystywane powszechnie do posadowienia budowli na terenach o niekorzystnych warunkach gruntowych oraz w przypadkach, gdzie konieczne jest przeniesienie bardzo dużych, skoncentrowanych obciążeń. Z prawidłowym zaprojektowaniem fundamentów palowych jest związanych wiele aspektów, takich jak: rozpoznanie podłoża gruntowego, analizy obliczeniowe i projektowanie, zagadnienia wykonawstwa, badania terenowe, monitoring. W celu omówienia problematyki osiadania grup palowych oraz aspektów związanych z ich realizacją przedstawiono analizę posado-

wienia wybranych obiektów inżynierskich na Trasie Sucharskiego w Gdańsku.

Celem inwestycji „Połączenie dróg krajowych – Trasa Sucharskiego” była poprawa dostępności transportowej portu gdańskiego oraz usprawnienie funkcjonowania układu komunikacyjnego miasta. Trasa przebiega od Węzła Olszynka do ul. Elbląskiej, dalej przez istniejący most podwieszony im. Jana Pawła II i od Węzła Wosia Budzysza wzdłuż ulicy Sucharskiego do Węzła Ku Ujściu. Następnie od Węzła Ku Ujściu do Terminalu Promowego Westerplatte. Projekt wykonawczy opracowała firma Europrojekt Gdańsk S.A. [5].

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 wiaduktu WD-7 i WD-8, których osiadania i rozwiązania projektowe przedstawiono w artykule.

WARUNKI GEOTECHNICZNE I PRZYJĘTE ROZWIĄZANIA PROJEKTOWE

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



Rys. 1. Wiadukty WD-7 oraz WD-8 na Trasie Sucharskiego w Gdańsku [7]

poziom terenu znajduje się na rzędnej około 3,7 m n.p.m. Grunty słabonośne występują stosunkowo głęboko w postaci ciągłych warstw o miąższościach około 2,3 i 2,5 m. Poziom zwierciadła wody gruntowej stabilizuje się na rzędnej 0,6 m n.p.m.

W pierwotnym projekcie posadowienia przyczółków wiaduktów WD-7 i WD-8 przyjęto posadowienie na palach wielkośrednicowych o średnicy 1500 mm i długościach około 27 m. Ostatecznie przyjęto rozwiązanie zamienne, w którym fundamenty przyczółków o niezmienionej geometrii posadowiono na palach Vibro-Fundex o średnicy nominalnej 508 mm. Zastosowano większą liczbę pali pod każdym fundamentem, jak również przyjęto mniejsze długości pali [4].

Zmiana technologii palowania była możliwa po uwzględnieniu skorygowanego obciążenia przyczółków wiaduktu, po uprzednim wykonaniu nasypów najazdu i wzmocnieniu warstw gruntów słabonośnych, na skutek czego udało się zmniejszyć oddziaływanie tarcia negatywnego i ograniczyć jego wpływ na późniejsze osiadanie konstrukcji.

TECHNOLOGIA WZMOCNIENIA PODŁOŻA

W celu redukcji osiadań nasypu dojazdowego zaprojektowano wzmocnienie warstw gruntów słabonośnych za pomocą

wgłębnych kolumn betonowych MMC (*Modified Menard Columns*), będących zaawansowanym technicznie wariantem kolumn betonowo-żwirowych. Wykonanie kolumn MCC odbywa się z poziomu platformy roboczej, penetrując w głąb specjalną końcówką wibracyjną przez zagęszczone warstwy gruntów niepoistych oraz grunty o małej wytrzymałości (namuły), aż do osiągnięcia stropu gruntów nośnych. Kolejnym etapem jest wtłaczanie mieszanki betonowej, której objętość jest monitorowana, przy jednoczesnym podciąganiu wibrokończówki do góry, dzięki czemu otrzymuje się trzon betonowy o pożądanej średnicy. Po osiągnięciu stropu warstwy gruntów nośnych następuje odcięcie dopływu mieszanki betonowej i podciąganie wibrokończówki z jednoczesnym wykonaniem zasypania i zagęszczenia (przez wibrowanie) powstałego otworu roboczego. Pomiędzy trzonem betonowym a zawibrowanym gruntem wykształca się głowica żwirowo-betonowa, która umożliwia dystrybucję obciążeń na trzon betonowy [6].

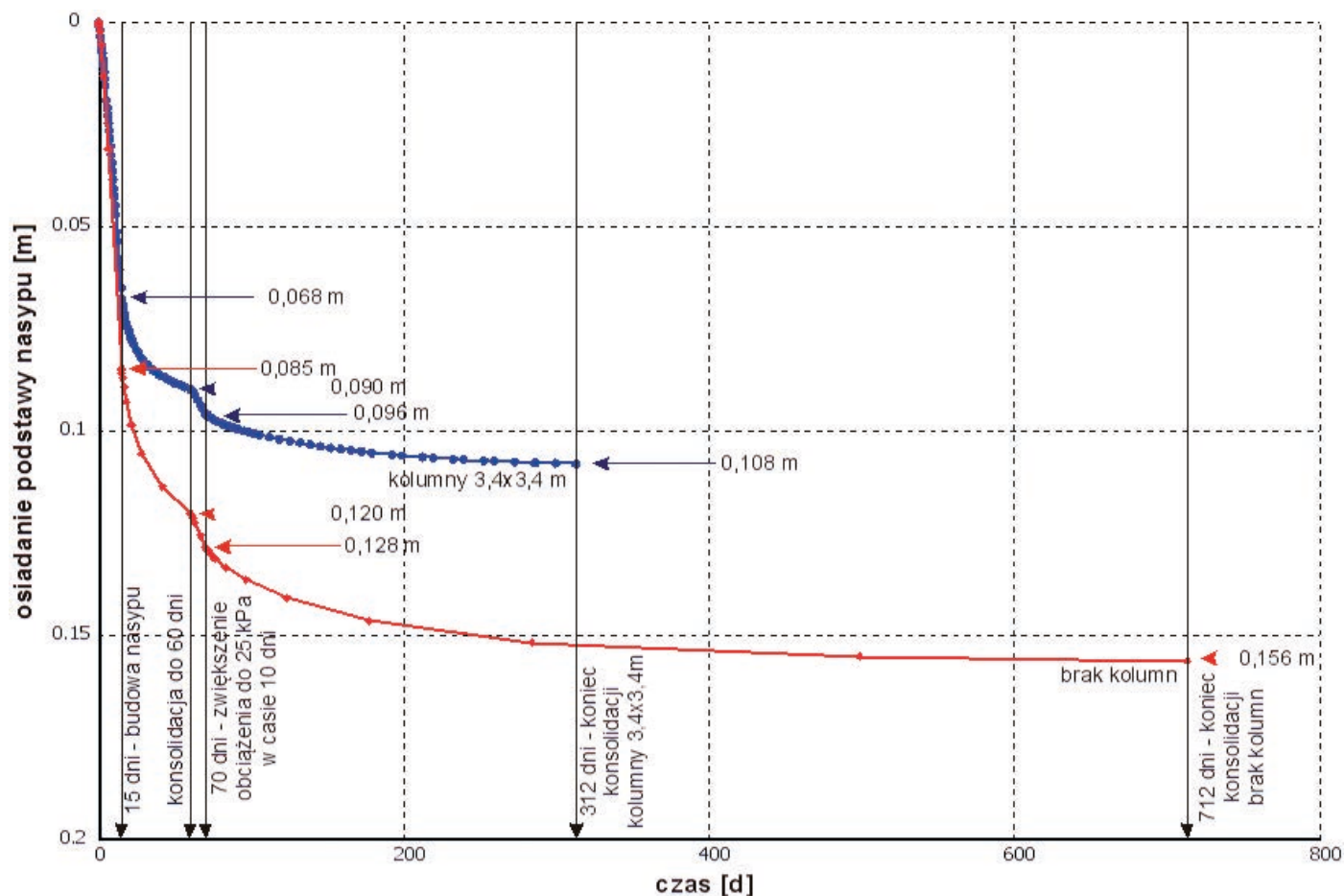
Długość kolumn wgłębných obejmowała dwie warstwy gruntów słabonośnych oraz warstwę gruntów ziarnistych rozdzielającą warstwy słabonośne. Założono, że średnica kolumn w obrębie gruntów słabonośnych będzie wynosić 0,6 m, natomiast w gruntach ziarnistych 0,4 m, to jest równa nominalnej średnicy końcówki wibracyjnej, co jest związane z mniejszą podatnością boczną gruntów ziarnistych (piasków) [3].



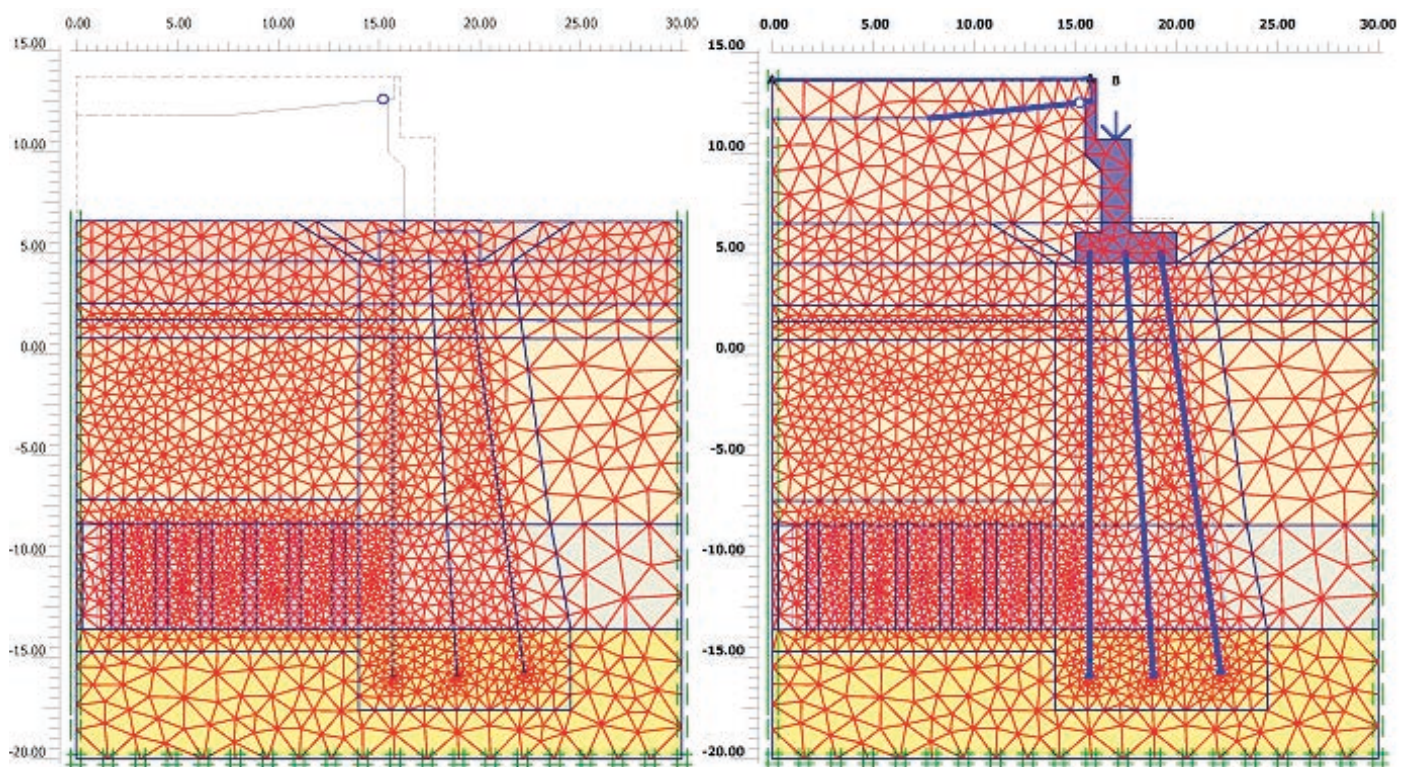
Rys. 2. Schemat wykonywania kolumn MMC

Tabl. 1. Przyjęty profil geotechniczny

Głębokość	Grunt	I_D [–]	γ' [kN/m ³]	Φ' [°]	c' [kPa]	M_0 [kPa]	ν [–]	k [m/d]
3,7 do -0,4 m n.p.m.	piasek drobny	0,50	10,0	29,0	1	65000	0,25	–
-0,4 do -8,2 m n.p.m.	piasek drobny/piasek średni/żwir	0,75	8,5	31,6	1	96000	0,15	–
-8,2 do -10,5 m n.p.m.	warstwa słabonośna (namuły)	–	5,0	18,0	2	4400	0,30	$8,0 \times 10^{-5}$
-10,5 do -12,1 m n.p.m.	piasek drobny	0,75	8,5	31,6	1	96000	0,15	–
-12,1 do -14,6 m n.p.m.	warstwa słabonośna (namuły)	–	5,0	18,0	2	7600	0,30	$8,0 \times 10^{-5}$
Poniżej 14,6 m n.p.m.	piasek drobny/piasek pylasty	0,75	8,5	31,6	1	96000	0,15	–



Rys. 3. Wyniki obliczeń osiadania podstawy nasypu w przekroju bezpośrednio przy przyczółku w osi nr 10. Porównanie osiadań podłoża wzmocnionego kolumnami wgłębnymi w rozstawie $3,4 \times 3,4$ m z osiadaniami podłoża bez wzmocnienia [3]



Rys. 4. 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 [3]

ANALIZY OBLICZENIOWE

Przyjęcie zamiennych rozwiązań technologicznych wykonania obiektu było możliwe po analizie wartości osiadań. Analiza i opracowanie w formie opinii geotechnicznej były wykonane przez prof. dr. hab. inż. K. Gwizdałę oraz dr. hab. inż. M. Cudnego z Katedry Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego Politechniki Gdańskiej [3]. Do analizy obliczeniowej przyjęto przekrój znajdujący się bezpośrednio przed konstrukcją przyczółków w osi nr 10, gdzie obciążenie od nasypu dojazdowego było największe. Przyjęte w tabl. 1 parametry dotyczą modelu Coulomba-Mohra. Uproszczona charakterystyka materiałowa tego modelu często skutkuje zawyżonymi prognozami osiadań, dlatego obliczenia wykonano również przy zastosowaniu modelu *Soft Soil Creep* (SSC). Model SSC zastosowano do oszacowania naprężeń w kolumnach wglębnych (efekt pełzania gruntu słabonośnego i tarcie negatywne), uwzględniając warunki prekonsolidacji, zmiany sztywności z naprężeniem oraz pełzanie. Kontakt kolumny z gruntem słabonośnym odtworzono za pomocą elementów kontaktowych o obniżonej wytrzymałości na ścinanie. Wszystkie fazy obliczeniowe przeprowadzono jako konsolidacyjne, to znaczy obciążenie gruntu i konsolidacja odbywają się jednocześnie. W analizie przyjęto następujące fazy obliczeniowe:

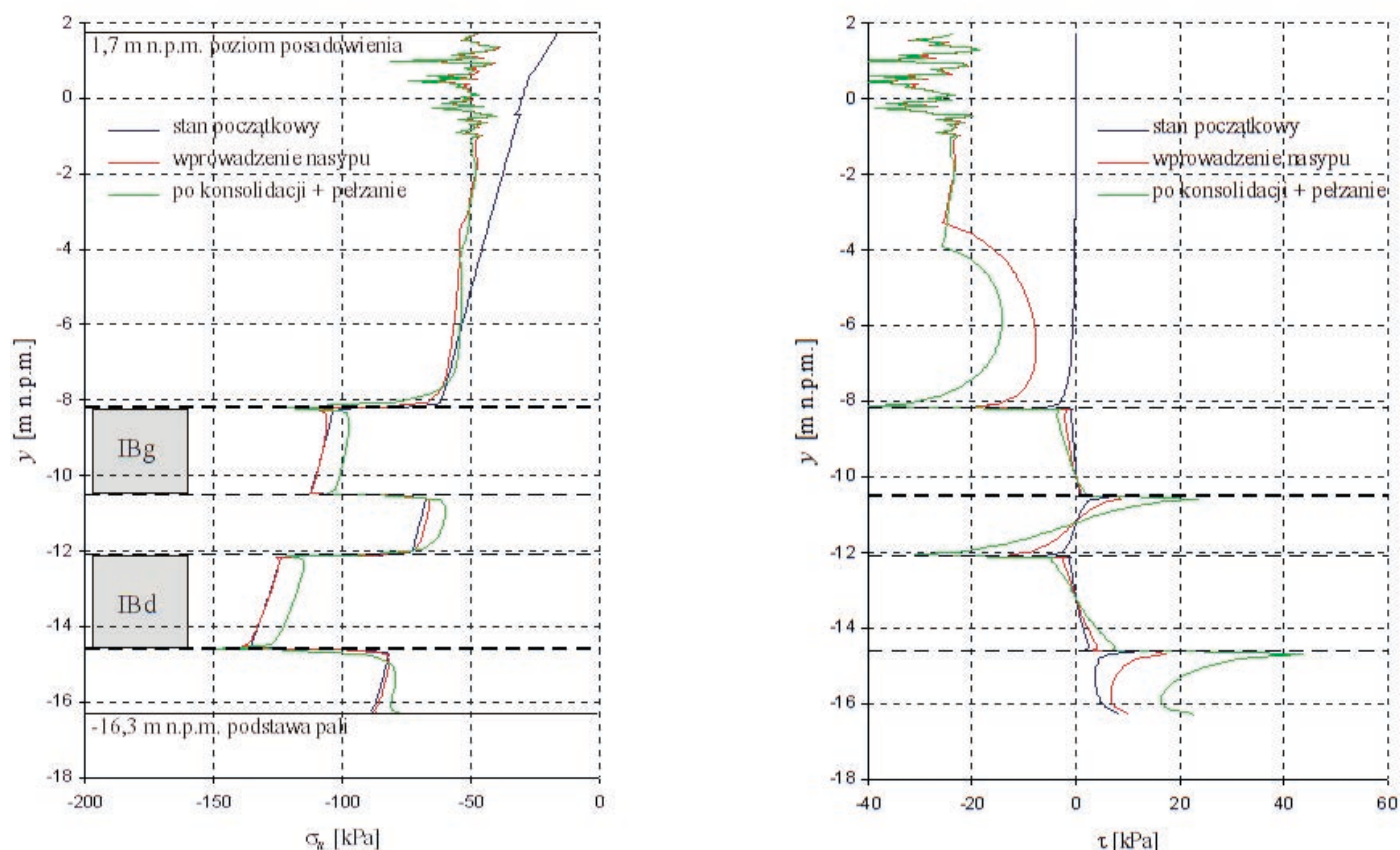
- instalacja kolumn wglębnych,
- wykonanie nasypu,
- instalacja pali Vibro-Fundex,
- wykonanie wykopu do rzędnej posadowienia przyczółka,

- 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.

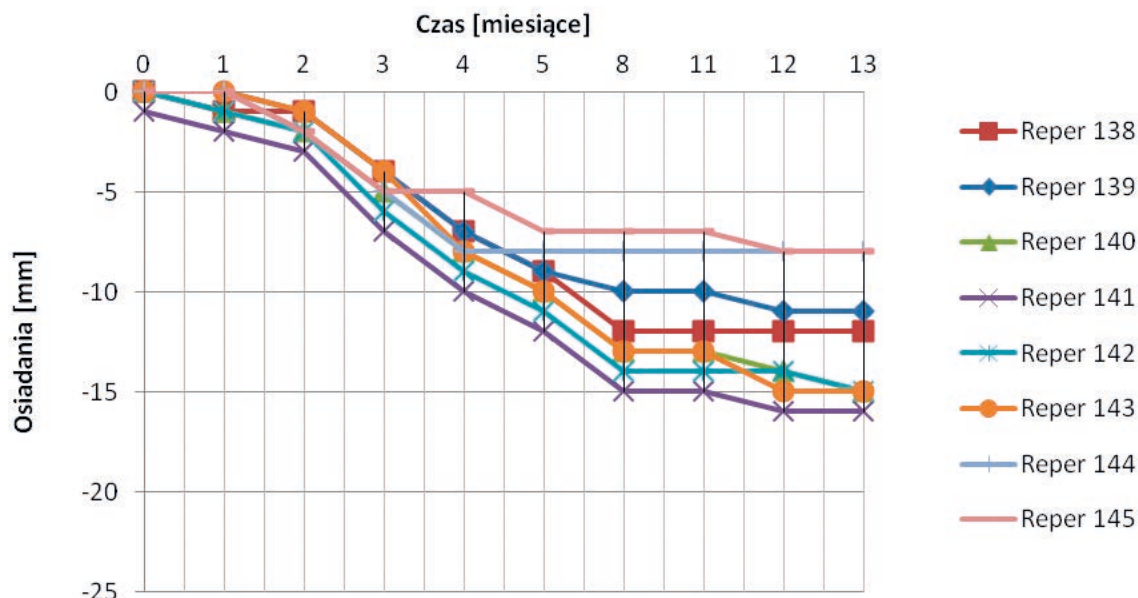
W celach porównawczych wykonano także obliczenia bez wprowadzenia do podłoża słabonośnego kolumn wglębnych, co umożliwiło oszacowanie efektywności wzmocnienia. Otrzymałe wyniki osiadań podstawy nasypu przedstawiono na rys. 3.

Na podstawie przeprowadzonej analizy obliczeniowej wyznaczono całkowite osiadania podstawy nasypu w strefie przy przyczółku, które wynoszą 0,108 m. W przypadku braku kolumn wglębnych osiadania te wyniosłyby 0,156 m (redukcja o około 30%). Osiadania, które powstaną w trakcie budowy nasypu (założono 15 dni), wynoszą 0,068 m, natomiast po upływie 60 dni osiadania osiągają 0,090 m. Dodatkowe osiadania, które powstaną po wykonaniu nawierzchni (założono, że będzie ona wykonana po 60 dniach) wynoszą maksymalnie 0,020 m, co spełnia warunki gwarancyjne (wartość maksymalna 0,05 m).

Ponadto w wyniku analizy z modelem SSC (gdzie otrzymano niższe osiadania) oszacowano maksymalne naprężenia w trzonie kolumn wglębnych. Naprężenia te zmieniają się z przekrojem kolumny, natomiast wartość maksymalna składowej pionowej naprężenia nie przekracza 6 MPa.



Rys. 5. Analiza zmian naprężenia na pobocznicy pali w wyniku osiadania nasypu w bezpośrednim sąsiedztwie przyczółków w osi nr 10 – strona lewa: efektywna składowa normalna naprężenia, strona prawa: składowa styczna (tarcie) [3]



Rys. 6. Przebieg osiadania podpory wiaduktu WD-7 w osi 10 w czasie

W celu oszacowania wpływu osiadań nasypu dojazdowego na pale Vibro-Fundex stanowiące posadowienie głębokie przyczółków przeprowadzono dodatkową analizę obliczeniową. Do analizy zmian naprężenia na poboczniczy pali przyczółków zmodyfikowano model obliczeniowy poprzez wprowadzenie sztywnego elementu ściany w celu symulacji zewnętrznego rzędu pali pionowych. W celu oszacowania zmian naprężenia na poboczniczy w najbardziej niekorzystnym przypadku przyjęto, że pale nie ulegają przemieszczeniu, co zrealizowano w modelu poprzez wprowadzenie podpór w podstawie pali. Osiadaniu podlegał zatem jedynie nasyp przy uwzględnieniu pracy kolumn wglębnych. Obliczona w ten sposób zmiana stanu naprężenia dotyczy tylko wpływu osiadania nasypu [3]. Schemat modelu i jego dyskretyzację przedstawiono na rys. 4, natomiast wyniki obliczeń na rys. 5.

Wartość obliczonego tarcia negatywnego można przyjąć w obrębie warstw gruntów ziarnistych (około 10,0 m) i kształtuje się na średnim poziomie 20 kPa, co daje dodatkową siłę na pojedynczy pal wartości 383 kN. Nośność obliczeniowa oszacowana w projekcie bez uwzględnienia siły T wynosi $m \times N_t = 2064$ kN.

Zmniejszając nośność o wartość T , otrzymuje się siłę 1681 kN, która spełnia warunek nośności z zapasem. Należy ponadto podkreślić, że całkowite obciążenie przyczółków i pali nastąpi w okresie po wystąpieniu osiadań konsolidacyjnych od nasypów dojazdowych i tarcie pozytywne będzie zmobilizowane ponownie. Wpływ osiadań nasypu w obszarze przy przyczółkach wiaduktów WD7 i WD8 w osi nr 10 nie spowoduje problemów z nośnością pali. Prognozowane osiadania nasypu w fazie użytkowej są niskie i są związane również z osiadaniami samego przyczółka. Próbné obciążenia statyczne i dynamiczne potwierdziły bardzo dobrą nośność pali Vibro-Fundex [4].

Rzeczywiste pomiary osiadań za pomocą metod geodezyjnych wykazały prawidłową pracę całego przyczółka. Przebieg osiadań pokazano na rys. 6. Mierzone wielkości są wartościami względnymi, obrazującymi przyrosty osiadań na przestrzeni 13 miesięcy od momentu wykonania pierwszego pomiaru „0”.

PODSUMOWANIE

Przedstawiona realizacja jest przykładem skutecznego wykorzystania innowacyjnych rozwiązań projektowych i technologicznych dostosowanych do rzeczywistych warunków gruntowych. Prognozowanie osiadania konstrukcji fundamentów wymaga określenia zachowania się całej grupy pali pod wpływem obciążenia. Istotne jest uwzględnienie wszystkich aspektów inżynierskich i ciągła weryfikacja założeń projektowych. Przeprowadzone analizy obliczeniowe, z odpowiednio dobranymi modelami numerycznymi i parametrami geotechnicznymi, umożliwiły wyznaczenie osiadań zarówno podłoża wzmocnionego, jak i podłoża bez kolumn wglębnych oraz wpływu osiadania nasypu dojazdowego na przyczółki wiaduktów. Zastosowana technologia wykonania nasypów pozwoliła zredukować oddziaływanie tarcia negatywnego i ograniczyć jego wpływ na osiadanie konstrukcji. Zastosowane wzmocnienie podłoża słabonośnego pod nasypem dojazdowym do wiaduktów spełniło warunki maksymalnych osiadań w okresie gwarancyjnym, a w najbardziej obciążonym obszarze przy przyczółkach udało się zredukować osiadania o około 30%. Rzeczywiste pomiary osiadań uzyskanych w wyniku monitoringu geodezyjnego wykazały prawidłową pracę całego przyczółka, potwierdzając jednocześnie słuszność przyjętych założeń i rozwiązań.

LITERATURA

1. Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia. Tom 1. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2011.
2. Gwizdała K., Florkowska S.: Problematyka osiadań fundamentów palowych w skomplikowanych warunkach gruntowych i złożonych stanach obciążenia. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 1/2015.
3. Gwizdała K., Cudny M.: Opinia geotechniczna dotycząca wzmocnienia podłoża kolumnami wglębnymi (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.

4. Gwizdała K., Słabek A., Blockus M.: Opinia naukowo-techniczna dotycząca nośności pali Vibro-Fundex ϕ 508 mm wykonanych pod posadowienie podpór wiaduktu WD-7 na podstawie próbnych obciążeń statycznych i dynamicznych, Gdańsk, 2011.

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

6. www.menard.pl

7. www.inzynierbudownictwa.pl