

Analiza numeryczna przemieszczeń przyczółka mostu wspornikowego posadowionego na palach

Piotr Kanty, Krzysztof Sternik

Posadowienie przyczółków mostu wspornikowego wymaga wykonania dokładnego oszacowania ich przemieszczeń, a zwłaszcza różnic osiadań. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń przemieszczeń przyczółka mostu o rozpiętości 200 m. Most składa się z dwóch wsporników o długości 70 m każdy oraz przęsła zawieszonego o rozpiętości 60 m. Ze względu na duży wysięg wsporników niekontrolowana różnica osiadań przyczółków może spowodować znaczące przemieszczenia całego układu.

Analizy wykonano dwoma sposobami: stosując „metodę uogólnioną” obliczania ustrojów palowych wg Koseckiego oraz metodą elementów skończonych. Szerzej omówiono drugie podejście. Zwrócono uwagę na ważne aspekty modelowania numerycznego, jak i obliczeń pali w takim podejściu. W zorientowanym geotechnicznie programie MES wykonano obliczenia z wykorzystaniem sprężysto idealnie plastycznego opisu gruntów. Stworzone modele uwzględniają kolejne etapy realizacji posadowienia i wykonania samego przyczółka, a następnie etapy pracy docelowej mostu (stan użytkowy i bezużytkowy).

Analizy wykonano dla warunków gruntowych występujących w podłożu projektowanego mostu w ciągu drogi ekspresowej S-7.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW data zgłoszenia do redakcji: 26.03.2012 data akceptacji do druku: 15.06.2012



mgr inż. Piotr Kanty
Katedra Geotechniki
Wydziału Budownictwa
Politechniki Śląskiej
piotr.kanty@polsl.pl



dr inż. Krzysztof Sternik
Katedra Geotechniki
Wydziału Budownictwa
Politechniki Śląskiej
Krzysztof.Sternik@polsl.pl

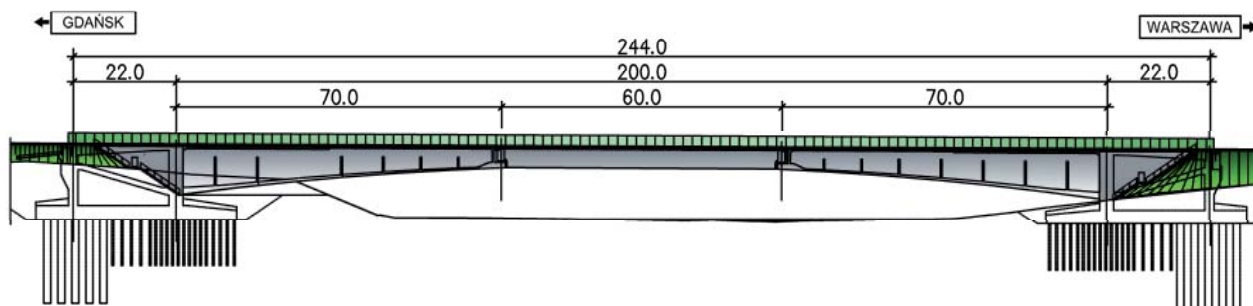
Wykonanie obliczeń posadowienia przyczółka jest istotnym elementem każdego projektu obiektu mostowego. Waga takich obliczeń jest tym większa, im większa jest rozpiętość przęsła. Szczególnym przypadkiem są obiekty o konstrukcji wspornikowej. Posadowienie przyczółków takich mostów wymaga wykonania dokładnego oszacowania ich przemieszczeń, a zwłaszcza różnic osiadań. Prezentowany już w kraju [5], jak i za granicą [6], przykład to jednoprzęsłowy most o rozpiętości 200 m. Obiekt w ciągu drogi ekspresowej S-7 składa się z dwóch wsporników o długości 70 m każdy oraz przęsła zawieszonego o rozpiętości 60 m (rys. 1). Konieczność zastosowania tak dużego przęsła wynika z warunków formalnych zawartych w „Decyzji o Warunkach Środowiskowych” [5].

Głównym zadaniem każdego z przyczółków stanowiących zamocowanie wsporni-

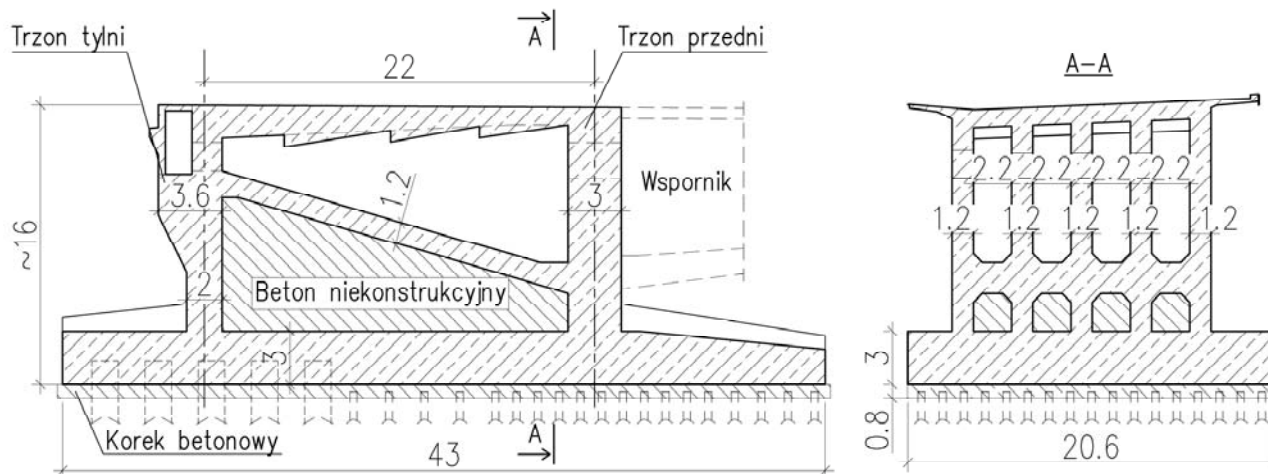
ków jest przeniesienie momentu zginającego (wynikającego ze schematu statycznego) wynoszącego 2,3 GNm. Aby spełnić to wymaganie podpory muszą być ciężkie (stanowią przeciwwagę) oraz solidnie połączone z podłożem. Ciężar zapewniono gabarytem przyczółka (16x20x43 m), natomiast zakończenie w podłożu – palami wierconymi i wbijanymi (rys. 2).

Podpory zaprojektowano jako skrzynie podzielone pionowymi ścianami oraz ukośną płytą przecinającą je w płaszczyźnie do nich prostopadłej. Przestrzeń poniżej ukośnej płyty zaprojektowano jako wypełnioną betonem niekonstrukcyjnym w celu zwiększenia ciężaru oraz usztywnienia całej bryły. Grubość płyty fundamentowej (3 m) dobrano tak, aby możliwie mocno wyrównać siły przekazywane na poszczególne pale.

Ze względu na wspornikowy schemat statyczny każda różnica w osiadaniach może



1. Elewacja obiektu z widoczną zasypaną częścią przyczółków



2. Przekroje przez przyczółek

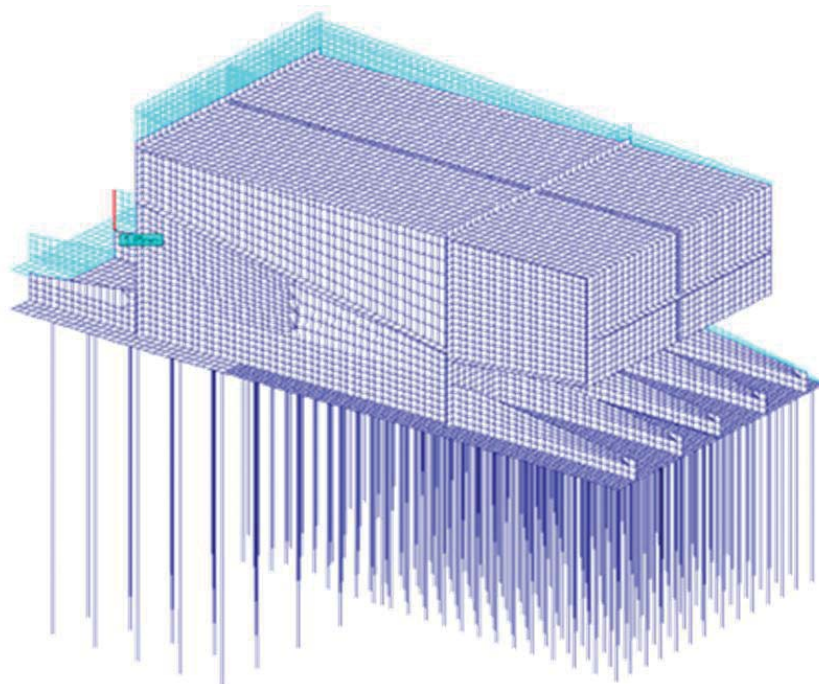
wywołać niepożądane przemieszczenia całego mostu. Z tego też względu najważniejszym problemem projektowym było oszacowanie przemieszczeń przyczółków. Obliczenia wykonano dwoma sposobami: stosując „metodę uogólnioną” obliczenia ustrojów palowych wg Koseckiego [4] oraz za pomocą geotechnicznie zorientowanego programu metody elementów skończonych (Z_Soil).

Wykonane na potrzeby projektu wiercenia oraz sondowania dynamiczne wykazały, że podłoże do głębokości 17,0 m poniżej poziomu terenu zbudowane jest głównie z piasków drobnych przewarstwionych piaskiem średnim i pospółką w stanie średniozagęszczonym ($ID=0,45 \div 0,60$) oraz pyłem w stanie plastycznym. Poniżej zalegają piaski (od drobnych po grube) w stanie zagęszczonym ($ID=0,70$). Pełny opis warunków gruntowodnych zawiera dokumentacja geologiczno-inżynierska [1].

Zestawienie wartości parametrów rozpoznanych gruntów znajduje się w tabeli 1. Warstwy gruntowe zidentyfikowane są również na modelu dyskretnym (rys. 4). W tabeli 1 przedstawiono dodatkowo wartości parametrów pozostałych materiałów (zasyпка fundamentu, beton) zastosowanych w przeprowadzonych analizach.

Metodyka wykonanych analiz – metoda uogólniona

Metoda uogólniona obliczania ustrojów palowych służy do wyznaczania modułów reakcji pionowych i poziomych gruntu (czyli do szacowania odpowiedzi gruntu na obciążenie). Daje ona możliwość budowy modelu przyczółka posadowionego na palach razem z gruntem wokół nich. Grunt odzwierciedla podpory o podatności obliczonej według tej metody. Podpory podatne zakłada się co 0,5 m na pierwszych pięciu metrach pala, a niżej co 1,0 m. Metoda zakłada liniowo-sprężystą odkształcalność gruntu. Więcej



3. Widok modelu trójwymiarowego wykonanego w programie ABC - Obiekt 3D

informacji na temat tej metody można znaleźć w [3] i [4].

Dla potrzeb projektowych zbudowano trójwymiarowy model przyczółka oraz dwóch pierwszych segmentów wspornika. Model powłokowo-prętowy wykonano w programie metody elementów skończonych ABC-Obiekt 3D (rys. 3).

Przestrzenna analiza układu „konstrukcja – grunt” pozwala odwzorować rzeczywiste sztywności poszczególnych elementów modelu (np. ścian, pali) i zoptymalizować ich kształt oraz wymiary.

Analizując wartości przemieszczeń oraz sił przypadających na poszczególne pale dobrano ich liczbę, a następnie obliczono nośności wg [7]. Obliczenia nośności wykonano tylko dla pali pojedynczych dobierając ich długość przy ustalonych wymiarach przekroju poprzecznego. Nośności pali pojedynczych

określone zostały przede wszystkim w celu porównania z wynikami przyszłych próbnych obciążeń.

Nośność grupy pali obliczono metodą fundamentu zastępczego [3]. Wyróżniono trzy sytuacje obliczeniowe: etap budowy, stan bezużytkowy i etap pracy docelowej układu [5].

Metodyka wykonanych analiz – model wykonany w programie Z_Soil

W początkowej fazie analiz metodą elementów skończonych w programie Z_Soil założono, że sposób posadowienia przyczółka jest taki, jak rozważany metodą uogólnioną Koseckiego. Przyjęto identyczne wymiary i rozstaw pali. W analizach uzupełniających założono trzy dodatkowe warianty posadowienia, których szczegóły podane zostaną w dalszej części artykułu.

Tab.1: Najważniejsze parametry materiałowe przyjęte do modeli

| Grunty rodzime wg otworu przyjętego do obliczeń | | | | | |
|---|-------------------|------------|---------|---------|-----------|
| Oznaczenie warstwy | Rodzaj gruntu | ϕ [°] | c [kPa] | E [MPa] | ν [-] |
| C9 | Pg | 14 | 16 | 18,5 | 0,19 |
| fgIIIb | Pd,Ps | 30 | 1 | 43 | 0,25 |
| fgIIb | Ps+Ż | 32 | 1 | 73 | 0,25 |
| fgIIIc | Pd | 31 | 1 | 65 | 0,23 |
| C10 | Gπ | 12 | 12 | 21 | 0,19 |
| fgIb | Ż | 40 | 1 | 176 | 0,23 |
| fgIIc | Ps | 34 | 1 | 110 | 0,23 |
| Inne zastosowane materiały | | | | | |
| Materiał | Model | ϕ [°] | c [kPa] | E [MPa] | ν [-] |
| Beton kontr. C50/60 | liniowo-sprężysty | - | - | 41000 | 0,3 |
| Beton niekonstr. C10/12 | liniowo-sprężysty | - | - | 5000 | 0,3 |
| Zasyпка | Coulomb-Mohr | 32 | 1 | 150 | 0,3 |

Tab.2: Osiedzenia tylnej i przedniej części fundamentu w modelu z programu ABC-Obiekt 3D

| Tył fundamentu | | Przód fundamentu | | Różnica osiadań | |
|----------------|---------------|------------------|---------------|-----------------|---------------|
| Etap budowy | Etap docelowy | Etap budowy | Etap docelowy | Etap budowy | Etap docelowy |
| 1,3 cm | 0,1 cm | 0,2 cm | 0,6 cm | 1,1 cm | 0,5 cm |

Obliczenia w programie Z_Soil wykonano w płaskim stanie odkształcenia. Takie postępowanie tymczasowo wymusił stopień skomplikowania zadania. Modele w płaskim stanie odkształcenia szczegółowo odzwierciedlają układ „przyczółek-grunt” (w tym kształt zasypki, skarp wykopów na etapie budowy, wewnętrzny układ płyty skośnej względem innych elementów konstrukcyjnych). Modele te uwzględniają etapowość wykonywania robót budowlanych.

Naprężenia początkowe wygenerowano przy założeniu, że grunty są normalnie skonsolidowane. Współczynnik parcia spoczynkowego wyznaczono ze wzoru:

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (1)$$

gdzie:

ϕ' - kąt tarcia wewnętrznego gruntu.

Pale reprezentowane są przez elementy belkowe o charakterystykach odpowiadających rzeczywistej długości i przekroju.

Przyczółek zamodelowano jako bryłę pełną. W rzeczywistości jest to konstrukcja skrzynkowa, której dolna część wypełniona jest betonem niekonstrukcyjnym (rys. 2). W obliczeniach uwzględniono różnicowaną sztywność wynikającą z powyższych za-

łożeń (pustki w strefie górnej, ukośna ściana wewnętrzna, wypełnienie strefy dolnej). Na rys. 4 pokazano jeden z modeli dwuwymiarowych oraz niektóre z etapów wykonywania przyczółka uwzględnione w programie.

Etapy wykonania robót budowlanych reprezentowane są przez siedem kroków obliczeniowych podanych poniżej:

- krok 1-2 - wykonanie wykopu,
 - krok 2-3 - wykonanie pali i korka z betonu niekonstrukcyjnego,
 - krok 3-4 - wykonanie dolnej części przyczółka (do płyty skośnej),
 - krok 4-5 - wykonanie górnej części przyczółka,
 - krok 5-7 - wykonanie zasypki za i przed przyczółkiem,
 - krok 7-8 - wykonanie wspornika,
 - krok 8-9 - zadanie obciążeń stałych i zmiennych pochodzących ze wspornika.
- Wielkość modelu obliczeniowego bryły podłoża (115 x 140 m) określono na podstawie wytycznych zawartych w pracy [2]. Dobór rozmiarów modelu jest jednym z najistotniejszych aspektów podczas analiz przemieszczeń układów „konstrukcja – podłoże gruntowe” ponieważ ma wpływ

na uzyskiwane wartości przemieszczeń i sił wewnętrznych w analizowanej konstrukcji.

Do obliczeń przyjęto charakterystyczne wartości parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych gruntów. Zastosowano model materiałowy Coulomba - Mohra z niestowarzyszonym prawem płynięcia. Dla gruntów o kącie tarcia wewnętrznego $\phi \leq 30^\circ$ przyjęto wartość kąta dylatacji $\psi=0^\circ$, natomiast dla materiałów o $\phi > 30^\circ$ przyjęto $\psi=\phi/30^\circ$.

Wartość kąta dylatacji ma wpływ na prognozowane wartości przemieszczeń modelu. Przyjęcie zerowej lub niedużej wartości ψ jest podejściem zachowawczym, skutkującym oszacowaniem większych przemieszczeń. Zaznaczyć należy, że badania zmian objętościowych gruntów podczas ścinania nie są powszechnie wykonywane w krajowej praktyce inżynierskiej, a mają istotne znaczenie dla prognozy przemieszczeń. Autorzy nie dysponowali żadnymi danymi w tym zakresie dla analizowanych gruntów podłoża projektowanych podpór mostu.

Wyniki uzyskane w podejściu uwzględniającym założenia metody uogólnionej

Obliczone w programie ABC-Obiekt 3D deformacje dla etapu budowy i stanu użytkowego pokazano schematycznie na rys. 5. Dokładne wartości osiadań i różnice osiadań dla obu etapów zestawiono w tabeli 2.

Wartości maksymalnych charakterystycznych sił działających w palach zmieniają się w zależności od analizowanego etapu budowy i eksploatacji przyczółka.

W palach zaprojektowanych w tylnej części przyczółka (pale wiercone - rys. 3) maksymalna charakterystyczna wartość siły ściskającej występuje na etapie budowy i wynosi 4980 kN (rys. 5a).

Maksymalna charakterystyczna wartość siły ściskającej pale wbijane w przedniej części przyczółka występuje na etapie eksploatacji (stan użytkowy) i wynosi 1400 kN (rys. 5b).

Natomiast maksymalna charakterystyczna wartość siły wyciągającej pale w tylnej części wyniosła 850 kN na etapie eksploatacji. Dla modelu odzwierciedlającego stan bezużytkowy uzyskano bliskie zeru wartości sił w palach wierconych w tylnej części fundamentu.

Na rys. 5 pokazano w odpowiednich proporcjach wartości sił w poszczególnych palach (na zielono zaznaczono siły wciskające, na żółto - wyciągające). Godne uwagi są duże różnice wartości sił przypadających na poszczególne pale, występujące pomimo zastosowania płyty fundamentowej o grubości 3,0 m.

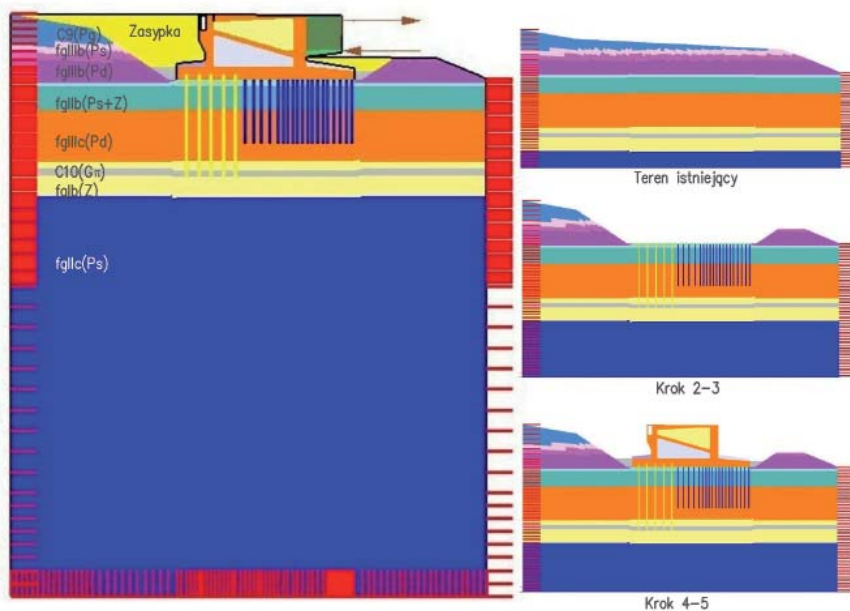
W efekcie wykonania opisanych obliczeń pod przyczółkami zaprojektowano

prefabrykowane pale wbijane o przekroju 0,4x0,4 m i długości 17 m. Pale rozmieszczono w rozstawach od 1,2 m do 2,0 m w zależności od położenia pod fundamentem (rys. 2).

Pale prefabrykowane (które, jak wykazały obliczenia, są wciskane na każdym etapie pracy przyczółka) zaprojektowano jako niepołączone z fundamentem. Rozkuwanie 600 głowic pali w celu połączenia ich z fundamentem byłoby zabiegiem niepotrzebnym i kosztownym.

W tylnej części zaprojektowano pale wiercone o średnicy 1,5 m i długości 24 m. Pale wiercone zaprojektowano w strefie występowania sił wyciągających, które mogłyby przerwać ciągłość pali wbijanych pomimo łączenia ich poszczególnych segmentów stalowymi trzpieniami [5]. Pale wiercone zaprojektowano jako wprowadzone na 2,5 m w płytę fundamentową, co zapewnia ich trwałe połączenie z płytą fundamentową.

W trakcie projektowania powstały obawy o wbicie pali prefabrykowanych na żadaną głębokość. Wynikały one z faktu, że podłoże budują piaski w stanie średniozagęszczonym do zagęszczonego, które w wyniku wbijania pali ulegną dodatkowemu dogęszczeniu. Aby mieć pewność, że zaprojektowane rozwiązanie jest możliwe do wykonania nawiązano współpracę z doświadczonym wykonawcą takich pali wbijanych. Wykonano analizę wbijalności. Mięszkość strefy piasków dogęszczonych w wyniku wbijania pali oceniono na 4 m poniżej ich podstaw. Podczas analizy wbijalności oszacowano, że po uwzględnieniu zagęszczenia piasków w wyniku instalacji



4. Model układu wykonany w programie Z_Soil z wyszczególnieniem wybranych etapów budowy

cji pali, będzie je można wbić jedynie do głębokości 14 m poniżej poziomu posadowienia przyczółka. Obliczenia nośności fundamentu zastępczego powtórzono dla pali o długości 14 m, przy uwzględnieniu strefy dogęszczonych piasków poniżej ich podstaw.

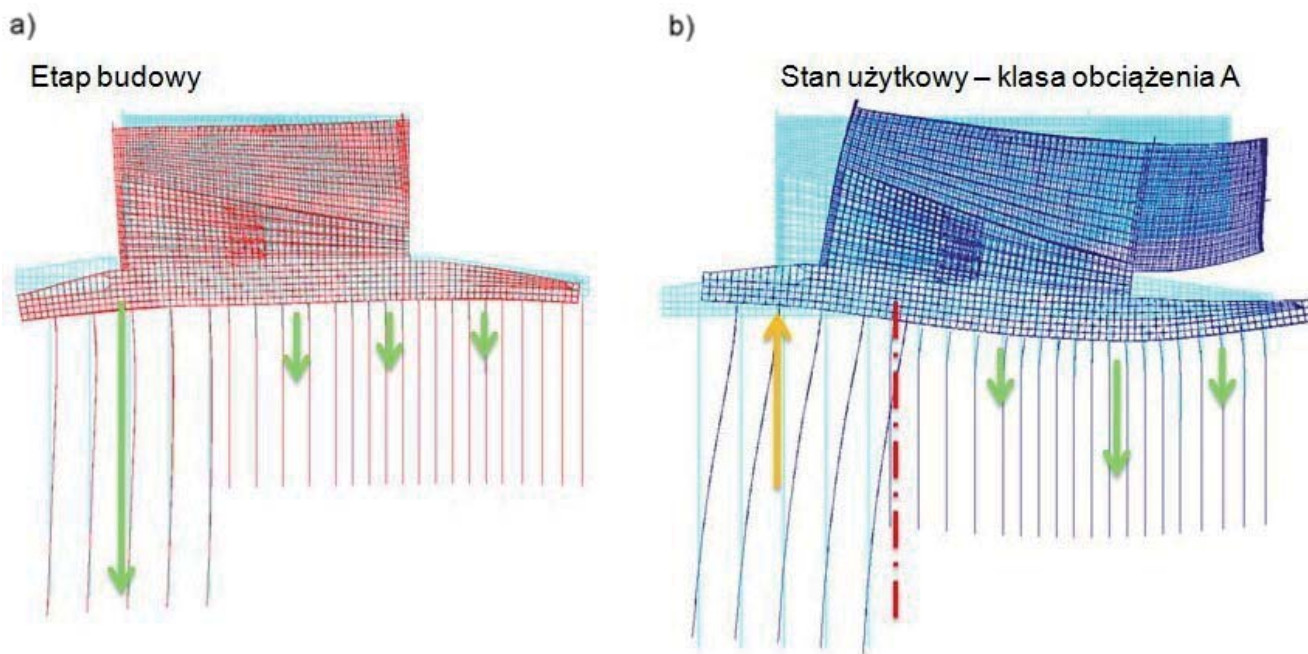
Z obliczeń fundamentu zastępczego uzyskano wartość maksymalnego osiadania równą 1,2 cm oraz różnicę osiadań na etapie docelowej pracy konstrukcji 1,4 cm.

Zarówno wartości różnic osiadań odczytane z modelu trójwymiarowego, jak i te obliczone dla fundamentu zastępczego, są wartościami małymi, nie zagrażającymi nadmiernemu przechyleniu wspornika.

Wyniki uzyskane z analiz w programie Z_Soil

Na rys. 6 pokazano rozkłady przemieszczeń pionowych dla etapu budowy (a) oraz etapu pracy docelowej (b). Wyróżnione zostały punkty charakterystyczne, w których analizowano osiadania. Punkt A odpowiada głowicy skrajnego pala wierconego, a punkt B głowicy skrajnego pala wbijanego.

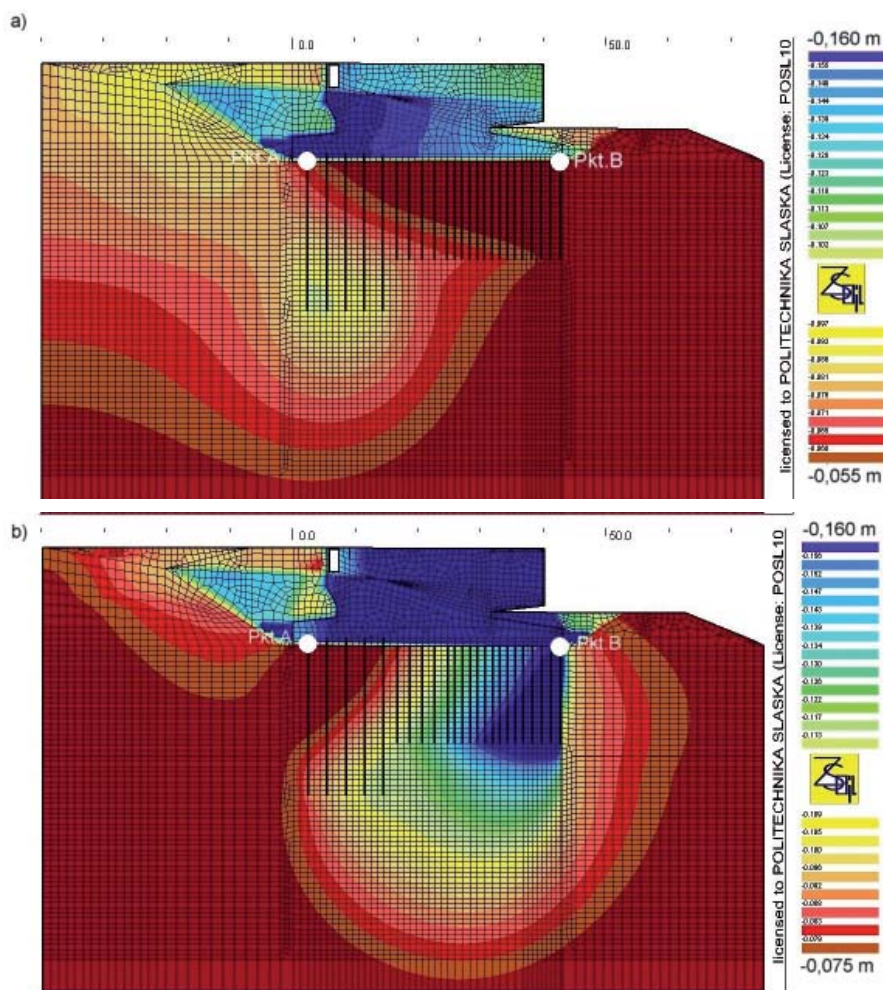
Zarówno podczas budowy przyczółka (wzrastający ciężar własny konstrukcji), jak i po uwzględnieniu działania obciążenia użytkowego, obserwuje się blokową pracę grupy pali. Na etapie budowy ciężki przyczółek wywołuje większe przemieszczenia



5. Schemat pracy przyczółka na podstawie obliczeń wg metody uogólnionej

Tab.3: Osiedzenia pali skrajnych w model Z_Soil [cm] oraz podniesienie wykonawcze [cm]

| | Pkt. A | | Pkt. B | | Różnica osiadań | | Pod. wyk. |
|---------------------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-----------------|---------------|-----------|
| | Etap budowy | Etap docelowy | Etap budowy | Etap docelowy | Etap budowy | Etap docelowy | |
| Zmniejszona liczba pali | 5,3 | 3,7 | 2,2 | 16,3 | 1,5 | 12,6 | 22,1 |
| Przyjęte posadowienie | 6,1 | 4,6 | 3,0 | 16,5 | 1,5 | 13,5 | 23,6 |
| Krótsze pale | 6,0 | 4,5 | 3,2 | 17,9 | 1,5 | 14,7 | 25,7 |
| Posadowienie bezpośrednie | 8,7 | 3,1 | 3,5 | 25,5 | 5,6 | 22,0 | 38,5 |



6. Rozkłady przemieszczeń pionowych układu na etapie budowy (a) i etapie pracy docelowej (b)

tylnej części konstrukcji, natomiast na etapie obciążenia użytkowego bardziej osiadają pale przednie. Na rys. 7 pokazano zmiany przemieszczeń pionowych punktów A i B w kolejnych fazach budowy przyczółka i pod obciążeniem użytkowym. Uzyskane za pomocą programu Z_Soil maksymalne wartości osiadań wynoszą 16,5 cm i znacznie różnią się od wyników uzyskanych w metodzie uogólnionej Koseckiego.

W celu sprawdzenia efektywności przyjętego na podstawie metody uogólnionej posadowienia rozważono trzy alternatywne sposoby posadowienia:

- posadowienie bezpośrednie przyczółka,
- wariant ze zmniejszoną o połowę liczbą pali,
- wariant z palami wbijanymi o długości 14 m (zgodnie z szacunkami w ramach analizy wbijalności opisanej powyżej).

W wariantcie z posadowieniem bezpośrednim wymiar płyty fundamentowej pozostał taki sam, jak w modelu z palami. Wartości obliczonych osiadań zestawiono w tabeli 3. We wszystkich wariantach jako zakończenie etapu budowy przyjęto koniec kroku obliczeniowego 5-7, natomiast jako etap docelowy koniec kroku 8-9.

Dokładne określenie różnicy osiadań jest potrzebne, aby wykonać podniesienie wykonawcze wsporników. Obliczona dla wyjściowo przyjętego modelu posadowienia różnica osiadań wynosi 13,5 cm. Biorąc pod uwagę rozstaw punktów A i B (40 m), wysięg wspornika (70 m) oraz zakładając, że elementy konstrukcyjne są bryłami sztywnymi, można z proporcji obliczyć różnicę przemieszczeń między punktem A a końcem wspornika. W ten sposób określono wartości podniesienia wykonawczego równego 23,6 cm, wynikającego tylko z różnicy osiadań.

Wykonana analiza wykazała, iż przy zmniejszeniu liczby pali o połowę różnica osiadań byłaby minimalnie mniejsza i wyniosłaby 12,6 cm. Może to wynikać z faktu, iż ciężar własny pali jest większy od ciężaru własnego gruntu i zmniejszenie liczby pali powoduje mniejsze obciążenie podłoża, a co za tym idzie prognozowane są nieco mniejsze osiadania.

Mniejsza liczba pali oznacza ich większy rozstaw w obrębie podstawy fundamentu. Pale musiałyby być oddalone od siebie co najmniej o 6 średnic. Jest to dość duży odstęp, który czyni rozważania gruntu i pali jako jednej bryły fundamentu zastępczego kwestią dyskusyjną. Niemniej, wyniki analiz MES w płaskim stanie odkształcenia pokazują, że pomimo takiego rozstawu pale będą pracować jak jeden blok. Należy jednak pamiętać, że przyjęcie płaskiego stanu odkształcenia może wpływać na charakter pracy pali i nie można wyciągać daleko idących wniosków odnośnie związku między liczbą pali i osiadań całego fundamentu.

Dla wariantu z krótszymi palami otrzymano różnicę osiadań 14,7 cm, natomiast w wariantcie z posadowieniem bezpośrednim 22,0 cm. Różnice te korespondują z koniecznym do wykonania podniesieniem wykonawczym. Wartości podniesienia wykonawczego dla wszystkich przypadków zestawiono w ostatniej kolumnie tabeli 3. Według oceny autorów są to wartości akceptowalne zważywszy na gabaryty przyczółka.

Wyznaczone w analizie MES wartości sił w poszczególnych palach wariantu pierwotnego wyniosły:

- 7188 kN we wciskanych palach w tylnej części na etapie budowy,
- 2076 kN w wyciąganych palach wierconych na etapie pracy docelowej,
- 1615 kN we wciskanych palach wbijanych na etapie pracy docelowej.

Analizy wykonane w programie Z_Soil wykazały większe wartości sił w palach w porównaniu do wartości uzyskanych z obliczeń programem ABC-Obiekt 3D odpowiednio: 45%, 240% i 15%.

Analiza uzyskanych wyników

Należy podkreślić, że wartości przemieszczeń uzyskiwanych metodą elementów skończonych uzależnione są od szeregu czynników. Wśród nich wymienić można wymiary bryły podłoża współpracującej z analizowaną konstrukcją, przyjęty model konstytutywny i wartości parametrów modelu.

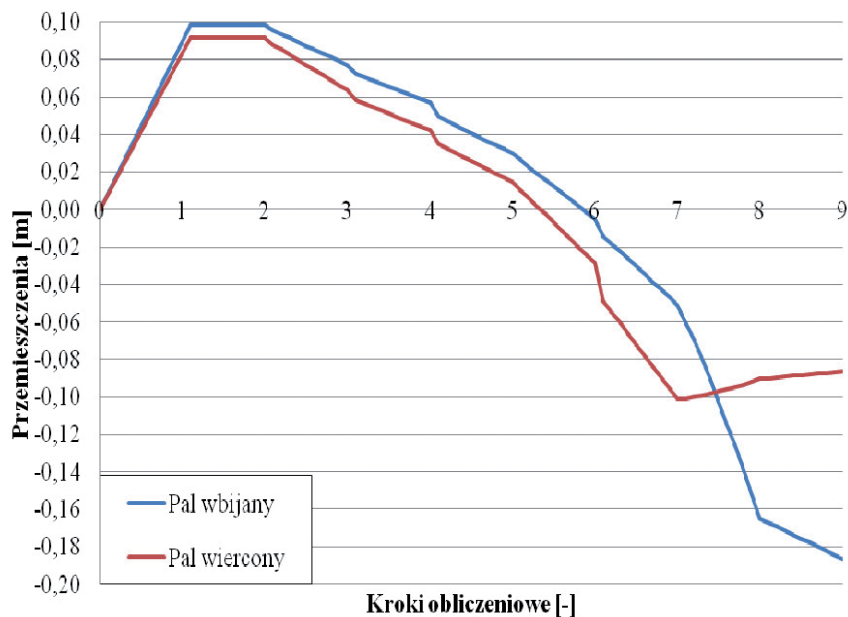
Sformułowanie modelu geometrycznego układu „przyczółek – fundament – podłoże” przytoczonego na rys. 4 i 6 poprzedzone było analizami wstępnymi. Badano w nich wpływ wymiarów modelu bryły podłoża na wielkości prognozowanych przemieszczeń. Na podstawie tych analiz nie można podać jednoznacznie wymiarów bryły podłoża zapewniających uzyskiwanie nie zmieniających się wartości przemieszczeń.

Przemieszczenia są zależne od wielkości modelu. Zastosowanie pionowego wymiaru (miąższości) modelu podłoża o 30% mniejszego niż przyjęte na podstawie wytycznych zawartych w [2] 115 m skutkowało obliczeniem osiadań mniejszych o 40%. Z drugiej strony, zwiększenie wymiaru pionowego o 30% wpłynęło na zwiększenie prognozowanych osiadań o 20%. Różni badacze podają własne propozycje określania wielkości modelu, choć podanie uniwersalnych wytycznych nie wydaje się być możliwe.

W popularnych modelach sprężysto – idealnie plastycznych za wielkość prognozowanych odkształceń odpowiadają zasadniczo trzy parametry: moduł odkształcenia, współczynnik Poissona oraz kąt dyatacji. Zwykle uwaga projektantów skupia się na głównie na wartości modułu odkształcenia E . Nie mniej istotną rolę odgrywa jednak wartość kąta dyatacji charakteryzująca zmiany objętościowe gruntu w fazie plastycznego płynięcia. Często zakłada się, że kąt dyatacji $\psi = 0$, co oznacza, że po uplastycznieniu (w sensie osiągnięcia powierzchni granicznej Coulomba-Mohra) grunt jest nieściśliwy. Jest to podejście najbardziej zachowawcze. Gliny silnie prekonsolidowane i piaski zagęszczone podczas ścinania po wstępnej fazie dodatkowego dogęszczenia zwiększają swoją objętość. To skutkuje mniejszymi wartościami osiadań ostatecznych.

Rozważając wpływ wartości kąta dyatacji na uzyskiwane wartości przemieszczeń stwierdzono, że przyjęcie $\psi = \phi$ stowarzyszone prawo płynięcia plastycznego skutkowało zmniejszeniem osiadań o ok. 10%.

Wyniki uzyskane w płaskim stanie odkształcenia mogą różnić się od wyników otrzymanych w analizie przestrzennej nawet o 70% ([8]). Dlatego autorzy planują wykonanie trójwymiarowego modelu omawianego przyczółka. Bez wątplenia na prognozowane wielkości przemieszczeń i sił ma wpływ zastosowany model konstytutywny gruntu. Zgodnie z wynikami analiz opisanymi w [8] zastosowanie modelu uwzględniającego zależność sztywności grun-



7. Przemieszczenia pionowe spodu skrajnych pali wbijanych i wierconych

tu od naprężenia średniego może zmniejszyć obliczone osiadań kilkakrotnie.

Spostrzeżenia

Podczas wykonywania obliczeń dwiema powszechnie stosowanymi przez projektantów metodami dokonano następujących spostrzeżeń:

- uzyskano bardzo duże różnice w zależności od podejścia. Modele wykorzystujące metodę uogólnioną oraz analityczne obliczenie osiadań fundamentu zastępczego pozwoliły oszacować osiadań na ok. 1 cm. Model numeryczny w płaskim stanie odkształcenia przy zastosowaniu sprężysto – idealnie plastycznego modelu materiałowego z warunkiem zniszczenia Coulomba - Mohra dał wartości rzędu 20 cm,
- wyniki osiadań obliczone za pomocą modelu wygenerowanego w programie Z_Soil są zależne m.in.: od wielkości modelowanego obszaru, przyjęcia wartości kąta dyatacji, zastosowanego modelu materiałowego, uproszczenia rzeczywistego trójwymiarowego zadania do płaskiego stanu odkształcenia,
- założenia projektowe, zwłaszcza dotyczące przyjętego modelu materiałowego, muszą być weryfikowane podczas realizacji obiektu za pomocą kontroli przemieszczeń charakterystycznych punktów wykonanej konstrukcji.

Planowane przez autorów dalsze analizy numeryczne będą nastawione na stworzenie dokładnego modelu trójwymiarowego opisanego układu z uwzględnieniem zmiennej sztywności gruntów w zależności od głębokości zalegania i zmieniających się pod wpływem obciążenia odkształceń w podłożu. Ostateczna weryfikacja wykonanych i planowanych obli-

czeń będzie możliwa jedynie w czasie budowy obiektu, która nie została jeszcze rozpoczęta.

Materiały źródłowe

- [1] Dokumentacja geologiczno – inżynierska dla ustalenia warunków gruntowo-wodnych dla potrzeb budowy drogi ekspresowej S-7 na odcinku Miłomłyn – Olsztynek. Wrocław, 2009.
- [2] Fedorowicz L.: Zagadnienia kontaktowe budowla – podłoże gruntowe. Część 1. Kryteria modelowania i analiz podstawowych zagadnień kontaktowych konstrukcja budowlana – podłoże gruntowe. Rozprawa habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2006.
- [3] Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia. PWN, Warszawa, 2011.
- [4] Kosecki M.: Statyka ustrojów palowych. Wydawnictwo PZITB, Warszawa, 2006.
- [5] Kulawik A., Radziecki A., Adamiec D., Kanty P., Olesiński P.: Jednoprzęsłowy most o rozpiętości 200 m. Seminarium „Aktualne realizacje mostowe”, Wrocław 24-25.11.2011. 63-70.
- [6] Kulawik A., Radziecki A.: One span 200 m long bridge over Natura 2000 area. FIB Symposium Prague 2011 Proceedings, 911-915.
- [7] PN-83/B-02482. Nośność pali i fundamentów palowych.
- [8] Załęski K.: Analizy numeryczne na podstawie różnych modeli konstytutywnych gruntu na przykładzie posadowienia pylonu mostu MA21 (A8). Rozdział w monografii Badania i analizy wybranych zagadnień z budownictwa. Praca zbiorowa pod red. J. Bzówki, Gliwice, 2011, 169-176.