

Nośność, stabilność, trwałość

Przegląd współczesnych metod posadowienia obiektów mostowych na rynku krajowym

Posadowienie obiektów mostowych od lat pozostaje jednym z najważniejszych zagadnień geotechniki i mostownictwa. Współczesne inwestycje infrastrukturalne coraz częściej realizowane są w warunkach, które wymagają indywidualnego podejścia do projektowania fundamentów od terenów podmokłych i dolin rzecznych, przez obszary osuwiskowe, aż po rejony objęte wpływami eksploatacji górniczej. O wyborze technologii decydują dziś nie tylko warunki gruntowo-wodne, ale również wymagania dotyczące trwałości, ekonomiki realizacji, ograniczenia wpływu robót na otoczenie oraz dostępność nowoczesnych metod wykonawczych. O aktualnych wyzwaniach i kierunkach rozwoju fundamentowania obiektów mostowych opowiadają przedstawiciele środowiska naukowego i praktycy realizujący największe inwestycje infrastrukturalne w Polsce.

Jakie technologie posadowienia głębokiego są dziś najczęściej stosowane przy realizacji obiektów mostowych w Polsce i od czego zależy wybór konkretnego rozwiązania?

dr inż. Urszula Tomczak, Politechnika Warszawska

Posadowienie obiektów mostowych stanowi zagadnienie o wysokim stopniu odpowiedzialności, wynikającym zarówno z ograniczenia dopuszczalnych osiadań, jak i z konieczności przenoszenia znacznych obciążeń – obejmujących nie tylko siły pionowe, lecz również siły poziome oraz momenty zginające. Jeszcze kilkanaście lat temu większość konstrukcji mostowych była fundamentowana w sposób zbliżony, z wykorzystaniem standardowych, powszechnie stosowanych technologii palowych, takich jak pale wielkośrednicowe, pale CFA czy prefabrykowane. Rozwiązania te cechowały się wysokim poziomem bezpieczeństwa i konserwatywnością, jednak rzadko były optymalne ekonomicznie. Obecnie coraz częściej projekt fundamentów jest indywidualnie dostosowywany do specyfiki danego obiektu, w ścisłej współpracy z geotechnikami. Pozwala to na dobór technologii adekwatnej do warunków gruntowo-wodnych oraz zoptymalizowanej kosztowo. Zarówno projektanci

mostowi, jak i zamawiający zostali przekonani do zasadności stosowania alternatywnych metod posadowienia. W przypadku obiektów o relatywnie niewielkich obciążeniach oraz korzystnych warunków geotechnicznych wystarczające okazuje się często wzmocnienie podłoża, na przykład poprzez zastosowanie kolumn DSM lub *jet grouting*. Elementy te, wykonane z cementogruntu, charakteryzują się parametrami wytrzymałościowymi niższymi niż beton, a ich właściwości zależą od rodzaju i zmienności podłoża gruntowego. Natomiast dla obiektów przenoszących znaczne obciążenia lub posadawianych na podłożu o obecności warstw słabonośnych coraz częściej stosuje się baretę, czyli pojedyncze elementy ścian szczelinowych. Ze względu na duże wymiary w planie (minimalna długość: 280 cm, szerokość: 60-150 cm) baretę umożliwiają przenoszenie wysokich obciążeń pionowych i poziomych przy jednoczesnej minimalizacji osiadań. Aktualne możliwości technologiczne pozwalają na wykonywanie baret o długości przekraczającej 100 m, w praktycznie wszyst-



kich rodzajach gruntów, a nawet w miękkich skałach. Jak wskazano powyżej, dobór technologii posadowienia zależy w równym stopniu od wielkości obciążeń, jak i od warunków gruntowo-wodnych. Kluczowe znaczenie ma również sposób rozpoznania podłoża – zarówno liczba, jak i właściwy dobór badań geotechnicznych. Na etapie planowania inwestycji warto skonsultować się z projektantem geotechnicznym, który określi zakres parametrów niezbędnych do opracowania odpowiedniego modelu obliczeniowego. Wczesne i właściwe podejście do tego zagadnienia pozwala ograniczyć ryzyko, skrócić czas projektowania oraz zoptymalizować rozwiązania fundamentowe w kolejnych etapach prac.

W jaki sposób warunki gruntowo-wodne wpływają na projektowanie fundamentów mostów, wiaduktów i estakad? Które parametry geotechniczne mają dziś kluczowe znaczenie?

dr hab. inż. Adam Krasieński,
prof. PG, Politechnika Gdańska

Obiekty mostowe są najczęściej posadawiane na fundamentach palowych, praktycznie niezależnie od warunków gruntowo-wodnych i terenowych. Mimo to spotykane i stosowane są również posadowienia na fundamentach bezpośrednich. Dotyczą one jednak obiektów niewielkich i pod drogami o mniejszym, lokalnym znaczeniu oraz o niewielkim natężeniu ruchu, i oczywiście przy sprzyjających, najczęściej prostych warunkach geotechnicznych. W poprzedniej odpowiedzi wymieniono też najpopularniejsze technologie pali stosowane w mostownictwie i scharakteryzowano ich dobór w zależności między innymi od warunków gruntowych, które mają duży wpływ zarówno na przyjęcie sposobu posadowienia obiektu mostowego, jak i na wybór właściwej i optymalnej technologii palowania. Istnieją warunki gruntowo-wodne, w których jako jedyne możliwe jest posadowienie podpór mostowych na palach. Są to warunki na terenach podmokłych, bagiennych, dolinach i deltach rzecznych, gdzie z reguły występują w podłożu warstwy gruntów organicznych, zastoiskowych ściśliwych i innych niestabilnych. Proces projektowania fundamentów palowych obiektów budowlanych składa się z dwóch elementów: 1 – z przyjęcia rodzaju technologii i układu geometrycznego pali oraz 2 – z wykonania stosownych i niezbędnych obliczeń projektowych (statycznych i wytrzymałościowych). Warunki gruntowo-wodne mają większe znaczenie w pierwszym z wymienionych elementów, tym niemniej mają też wpływ na przebieg obliczeń statycznych, a szczególnie na ich wyniki. Dla każdego obiektu budowlanego, w tym mostowego, należy wykonać standardowe obliczenia projektowe dotyczące posadowienia. Polegają one głównie na wyznaczeniu sił i momentów zginających w palach, oszacowaniu nośności pali w gruncie, oszacowaniu przemieszczeń i osiadań całych fundamentów oraz zwiarytowania konstrukcyjnym pali i oczepów fundamentowych. Wymienione i opisane elementy powinny być przedmiotem projektu

geotechnicznego obiektu. Posadowienie obiektów mostowych na palach wymaga odpowiedniego i dobrego rozpoznania podłoża gruntowego, ale nie aż tak szczegółowego jak przy posadowieniu bezpośrednim. Głównym celem badań jest określenie układów i poziomów zalegania poszczególnych warstw gruntowych, szczególnie stropu warstw nośnych oraz poziomów zwierciadeł wód gruntowych. Pod tym względem bardzo przydatne są sondowania podłoża gruntowego, a przede wszystkim sondowania CPTU, ale z koniecznym i niezbędnym uzupełnieniem w postaci wierceń badawczych. W odniesieniu do parametrów fizycznych i mechanicznych gruntów, to dużą dokładność i skrupulatność należy zastosować przy wyznaczeniu ich wartości dla warstw nośnych, w których osadzone będą pale. Chodzi tu o wartości takich klasycznych parametrów, jak: gęstość objętościowa, kąt tarcia wewnętrznego, spójność oraz moduł ściśliwości i odkształcenia. W przypadku gruntów niespoistych wartości wymienionych parametrów można z wystarczającą dokładnością wyznaczyć metodą pośrednią na podstawie sondowań CPTU. W przypadku gruntów spoistych wskazane jest doprecyzowanie wartości parametrów mechanicznych przez badania laboratoryjne próbek NNS pobranych z wierceń orurowanych – głównie badania trójosiowe i edometryczne. W odniesieniu do warstw gruntów organicznych i innych słabonośnych, w przypadku posadowienia na palach istotne jest zbadanie wytrzymałości tych gruntów na ścinanie w warunkach bez odpływu (c_u lub S_u), np. sondami obrotowymi (FVT). Wytrzymałość ta jest głównie potrzebna do sprawdzenia możliwości zastosowania pali monolitycznych (według ogólnych zaleceń będzie to możliwe przy c_u większym niż 15 kPa). Na dobór parametrów geotechnicznych i dokładność określenia ich wartości wpływ mają również rodzaj i metoda obliczeń projektowych. Obecnie fundamenty palowe podpór mostowych oblicza się statycznie metodą analityczno-numeryczną (tzw. metoda uogólniona) lub metodą numeryczną MES. W przypadku metody analityczno-numerycznej kluczowe znaczenie mają parametry



odkształceniowe gruntów (moduły), natomiast do metody elementów skończonych parametry gruntów dobiera się stosownie do przyjętych modeli konstytutywnych gruntów (bardziej wskazane jest użycie modelu Hardening Soil niż modelu Mohra-Coulomba). Przy obliczaniu nośności i charakterystyk osiadania ($Q-s$) pali coraz popularniejsze stają się metody bezpośrednie na podstawie badań *in situ* podłoża gruntowego, głównie sondowań CPTU, stąd duża przydatność i zasadność tego typu badań. Należy też wziąć pod uwagę, że oddziaływanie fundamentów palowych, szczególnie tych o dużych rozmiarach, sięga głęboko poniżej podstaw pali (do głębokości co najmniej równej szerokości fundamentu B). Wskazane jest zatem rozpoznanie podłoża gruntowego do takiej głębokości, ale niezbyt szczegółowe i głównie w celu sprawdzenia, czy w jej zasięgu nie występują warstwy gruntów o obniżonych parametrach, a niezbędnymi i wystarczającymi parametrami do wyznaczenia z tej strefy są moduły ściśliwości. Podsumowując, rozpoznanie podłoża gruntowego ma istotne znaczenie w doborze sposobu posadowienia obiektu mostowego, a wyznaczone parametry geotechniczne gruntów – istotny wpływ na przebieg i wyniki obliczeń projektowych. Rozpoznanie tego należy dokonać w sposób racjonalny i odpowiedzialny oraz dostosowany do potrzeb projektanta, który według aktualnego prawa budowlanego jest głównym autorem planu i zakresu badań tego podłoża.

Jakie rozwiązania najlepiej sprawdzają się przy posadowieniu podpór mostowych na terenach górniczych w zależności od warunków gruntowych (uwarunkowań geotechnicznych)?

dr inż. Piotr Bętkowski, Politechnika Śląska

Obiekty mostowe to konstrukcje o dużych przęsłach obciążonych nie tylko z ciężarem własnym i wyposażeniem, ale również znacznym obciążeniem użytkowym, takim jak tabor kolejowy czy samochodowy. Podpory mostu to konstrukcje, gdzie na niewielkiej powierzchni skoncentrowane jest bardzo duże obciążenie przenoszone z obiektu na ośrodek gruntowy. Na terenach górniczych ośrodek gruntowy to często grunty słabonośne, plastyczne, ułożone naprzemiennie z warstwami piasków czy glin piaszczystych, ukształtowane przez lodowiec. W wielu takich sytuacjach racjonalnym wyborem jest posadowienie pośrednie. W przypadku terenów górniczych należy pamiętać, że pale fundamentowe muszą przenosić obciążenia związane ze spełnieniem/rozpoznanieniem terenu oraz z górnictwem zmianą krzywizny. Wszelkie rozwiązania w postaci pali prefabrykowanych grożą utratą ciągłości i w przypadku dużych wymuszeń górniczych nie powinny być stosowane. Właściwe są pale wielkośrednicowe o odpowiednim szkieletie zbrojeniowym. W przypadku znacznej krzywizny terenu ten szkielet zbrojeniowy powinien być projektowany z uwzględnieniem górniczych deformacji terenu. Pali tych w przeciwieństwie do rozwiązań stosowanych poza terenami górniczymi nie można kotwić w oczepie, głowica pala musi być oddylatowana do oczepu, najlepiej dodatkowo wykonać warstwę poślizgową w postaci przekładek z papy i blachy cynkowej. Głowica pala musi być odpowiednio wzmocniona, aby w przypadku wymuszeń poziomych nie doszło do jej uszkodzenia, właściwym rozwiązaniem jest zastosowanie odpowiedniej siatki lub prętów zbrojeniowych.

W literaturze zalecane są pewne rozwiązania, ale bez wskazania dodatkowych uwarunko-



wań może się wydawać, że aplikacja tych rozwiązań nie będzie stwarzała żadnych problemów technicznych ani nie będzie generowała błędów, które mogłyby zagrażać bezpieczeństwu całej konstrukcji. Przykładem jest tu poduszka piaskowa – powinna być ona stosowana w przypadku nieodkształcalnego, np. skalnego podłoża. Może być także stosowana np. w gruntach spoistych, aby zredukować wpływ mocnych wstrząsów górniczych na konstrukcję (silne wstrząsy górnicze obejmują tylko niewielki procent terenów górniczych). Funkcjonuje pogląd, że piasek w poduszce powinien być luźny, niezagęszczony – jest to błąd, ponieważ po wykonaniu fundamentu, przyczółka oraz przęsła dojdzie do konsolidacji ośrodka gruntowego, zagęszczenia piasku i dodatkowo niekontrolowanego osiadania podpory. Problem w przypadku poduszek piaskowych może stanowić zmiana stosunków wodnych wskutek lokalnego górniczego obniżania się terenu, tworzą się niecki, podnosi się poziom wód gruntowych względem poziomu osiadającego terenu i woda może objąć posadowienie. Nawodniony piasek spod fundamentu może być

wyciskany, dlatego ważne jest odpowiednie zagęszczenie i stabilizacja gruntu wokół fundamentu.

Kolejny problem fundamentowania to oddziaływanie ośrodka gruntowego na fundament wskutek zmiany, np. górniczej krzywizny terenu. Intensywność tego oddziaływania zależy od rodzaju ośrodka gruntowego i sztywności samego fundamentu, trudność polega na oszacowaniu interakcji sprężysto-plastycznego ośrodka gruntowego z fundamentem – bo przy dużych wymuszeniach gruntowych dochodzi do trwałych deformacji w podłożu w warstwie kontaktowej grunt-fundament. Odształcenie plastyczne redukuje górnicze oddziaływania na fundament, ale może stwarzać problemy z utrzymaniem np. linii kolejowych, gdy obiekt ramowy wchodzi w interakcję z nasypem kolejowym skutkującą deformacjami toru w przypadku ściskań/spelzań terenu lub rozluźnieniem ośrodka gruntowego pod podkładami kolejowymi w części nasypu przylegającej do obiektu mostowego wskutek górniczych rozciągań/rozpelzań podłoża. Mówiąc o posadowieniu obiektów mostowych na terenie górniczym, należy wspomnieć o płytach przejściowych, płyty te powinny być kotwione do przyczółka, spłaszczone od strony nasypu, od strony nasypu pod płytą powinna być wykonana belka podwalinowa, stanowiąca dodatkowe oparcie płyty.

Są to tylko wybrane istotne problemy techniczne, trudnością jest brak informacji w warunkach technicznych, jak postępować na terenach górniczych oraz brak wytycznych dostosowanych do współczesnych technik fundamentowania. Sposób posadowienia na terenach górniczych zależy od warunków gruntowych i wymuszeń. Każde rozwiązanie wymaga oddzielnych analiz i powinno być projektowane indywidualnie.

Jakie technologie posadowienia głębokiego są dziś najczęściej stosowane przy realizacji obiektów mostowych w Polsce i od czego zależy wybór konkretnego rozwiązania?

**mgr inż. Jacek Szaro, Kierownik Zespołu Projektowego
Główny Projektant w Aarsleff sp. z o.o.**

Współczesne mostownictwo w Polsce opiera się w dużej mierze na technologiach przemieszczeniowych, a w szczególności na wbijanych żelbetonowych palach prefabrykowanych. Są one obecnie najczęściej stosowanym rozwiązaniem przy fundamentowaniu podpór stałych i tymczasowych, niezależnie od skali obiektu – od mostów na ciekach, potokach czy rzekach po największe mosty przez Wisłę czy Odrę. Najpopularniejszym standardem wykonawczym są pale o przekroju 400 x 400 mm. Oprócz nich wykorzystuje się także pale stalowe oraz drewniane, głównie w konstrukcjach tymczasowych lub w specjalnych warunkach wodnych. Wybór konkretnej technologii posadowienia zależy od kilku kluczowych czynników, tj.:

- Warunki gruntowe: wbijane żelbetonowe pale prefabrykowane są bezkonkurencyjne w gruntach niespoistych, przy napiętym zwierciadle wody gruntowej oraz w grubych warstwach gruntów słabonośnych (np. torfy, namuły), gdzie wykonanie pali formowanych w gruncie jest technicznie bardzo trudne.
- Lokalizacja i logistyka: technologia ta jest optymalna przy pracach prowadzonych „z wody” (rzeki, zbiorniki wodne), co potwierdzają realizacje mostów w całej Polsce.
- Ekonomia i czas: prefabrykacja oferuje bardzo dużą wydajność robót i szybkość realizacji. Choć jednostkowy koszt materiału może być wyższy, jest on rekompensowany mniejszą liczbą pali, ograniczonymi wymiarami fundamentów i brakiem urobku.
- Wymagania konstrukcyjne: przy dużych obiektach stosuje się fundamenty zespo-



lone, łączące, np. wbijane pale żelbetonowe z obudową z grodzic stalowych, co pozwala na bezpieczne przenoszenie olbrzymich obciążeń pionowych i poziomych.

- Trwałość: wybór zależy też od agresywności środowiska (chemicznej, mrozowej). Beton i stal muszą być odpowiednio dobrane do klas ekspozycji, aby zapewnić bezawaryjne użytkowanie przez dziesięciolecia.

Dominacja pali prefabrykowanych wynika z ich wysokiej nośności, sztywności oraz możliwości bieżącej kontroli jakości już w trakcie wbijania poprzez analizę wpędów oraz ostatecznie przez badania dynamiczne/statyczne.

Jakie są obecnie największe wyzwania wykonawcze podczas fundamentowania obiektów mostowych w terenach o wysokim poziomie wód gruntowych?

Daniel Dymek, Dyrektor Techniczny Keller Polska

Wysoki poziom wód gruntowych w większości przypadków nie jest szczególnym problemem podczas fundamentowania podpór mostowych. Jeżeli poziom posadowienia obiektu znajduje się poniżej zwierciadła wody gruntowej, to mamy możliwość zastosowania co najmniej kilku rozwiązań geotechnicznych i odwodnieniowych, w celu czasowego obniżenia tego zwierciadła w rejonie prowadzonych robót. Pionowa obudowa z ewentualną poziomą przesłoną przeciwfiltracyjną, przy ograniczonej ilości wody odprowadzanej z wykopu, pozwalają na sprawną i bezpieczną realizację robót również przykładowo w nurcie rzeki. Szczególnym problemem są natomiast wody artezyskie, których zwierciadło stabilizuje się wysoko ponad istniejącym terenem. Zdarza się, że jest to nawet kilkanaście metrów słupa wody. W takich warunkach wykonanie posadowienia obiektu mostowego obarczone jest dużym ryzykiem, ponieważ przebicie się do warstw wodonośnych może spowodować niekontrolowany wypływ wody i cząstek gruntu, a w konsekwencji znaczne osiadanie pod-

łoża w sąsiedztwie wypływu. W zależności od skali zjawiska może dojść nawet do długotrwałego wstrzymania właściwych robót budowlanych, w związku z koniecznością wprowadzenia nieprzewidzianych wcześniej działań zaradczych i naprawczych. Dobrym przykładem ilustrującym problem wód artezyskich jest posadowienie mostu łukowego o rozpiętości 120 m nad rzeką Łyną wybudowanego w ciągu drogi ekspresowej S16 – obwodnicy Olsztyna. Rejon ten to rozległa dolina, której charakterystyczną cechą jest występowanie wód artezyskich o nadciśnieniu sięgającym nawet 10 m powyżej poziomu fundamentów. W takich warunkach posadowienie podpór mostu staje się prawdziwym wyzwaniem, ponieważ wszelkie próby głębokiego fundamentowania sięgającego wodonośnych piasków mogą spowodować wypływ wody napiętej przez nieprzepuszczalne grunty powyżej. W tym przypadku były to torfy podścielone pyłami i glinami pylastymi. Problem posadowienia obiektu przez rzekę Łynę rozpatrywany był przez wiele zespołów projektowych i naukowych. Propozycje fundamentów posadowionych na palach lub kolumnach, w przeróżnych technologiach sięgających wodonośnych piasków, wydawały



się jednak zbyt niebezpieczne w tym konkretnym przypadku. Rozwiązaniem skutecznie zaprojektowanym i zrealizowanym okazało się ostatecznie posadowienie obiektu na blokach cementogruntowych z kolumn DSM (*Deep Soil Mixing*) o średnicy 2,4 m. Kolumny wykonano po wymianie gruntów organicznych, kończąc je w warstwach glin pylastych. W podobny sposób, na kolumnach DSM w odpowiedniej siatce, zrealizowane zostało wzmocnienie podłoża pod nasypy na dojazdach do mostu. Uzyskano w ten sposób pewnego rodzaju posadowienie pływające zawieszone w gruntach nieprzepuszczalnych o większej ściśliwości, ale pod pełną kontrolą z punktu widzenia osiadania obiektu. Takie podejście wymagało jednak ogromnego zaangażowania projektowego oraz sprawnej współpracy pomiędzy branżą mostową i konstrukcyjną geotechniczną.