

Mikropalowe posadowienie dużego obiektu mostowego na słabym podłożu – cz. II

mgr inż. **Jakub Sierant**

Kontynuacja artykułu z poprzedniego numeru.

Wnioski z obliczeń

Na podstawie analizy wyników obliczeń można przedstawić następujące wnioski dotyczące stateczności łąwy fundamentowej dla wszystkich wariantów obliczeniowych:

- maksymalne siły osiowe w palach wynoszą (w zależności od wariantu) od 404,1 kN (14,8% obciążeń dopuszczalnych) do 580,8 kN (21,3% obciążeń dopuszczalnych),
- dla wszystkich wariantów siły poprzeczne w palach przyjmują wartości poniżej 1 kN i nie wpływają w znaczący sposób na nośność pali,
- dla wszystkich wariantów momenty zginające w palach przyjmują wartości rzędu kilku kNm (momenty skręcające w palach praktycznie są równe zero) i nie wpływają w znaczący sposób na nośność pali,
- maksymalne przemieszczenia poziome w kierunku osi x przyjmują wartości od 6,49 do 14,8 mm, zaś w kierunku osi y – od 1,51 do 6,71 mm – wartości przemieszczeń mieszczą się w zakresie dopuszczalnych z punktu widzenia stateczności łąwy,
- maksymalne przemieszczenia pionowe przyjmują wartości od 2,34 do 4,18 cm – wartości przemieszczeń mieszczą się w zakresie dopuszczalnych z punktu widzenia stateczności łąwy,
- maksymalne odkształcenia postaciowe w podłożu przyjmują wartości rzędu od 1,68 do 3,41 mm/m, zaś odkształcenia objętościowe – rzędu od 0,85 do 1,58 mm/m – takie wartości odkształceń nie wpływają

w sposób istotny na deformację łąwy podpory.

Fundament mikropalowy zapewnia w pełni stateczność łąwy dla takiej kombinacji obciążeń.

We wszystkich wariantach obliczeniowych (poza wariantem zerowym) występuje nieregularny rozkład przemieszczeń pionowych wywołany złożonym obciążeniem. Przyjęcie korzystnego, wachlarzowego układu mikropali w znaczący sposób redukuje i ogranicza nieregularność przemieszczeń pionowych oraz poziomych.

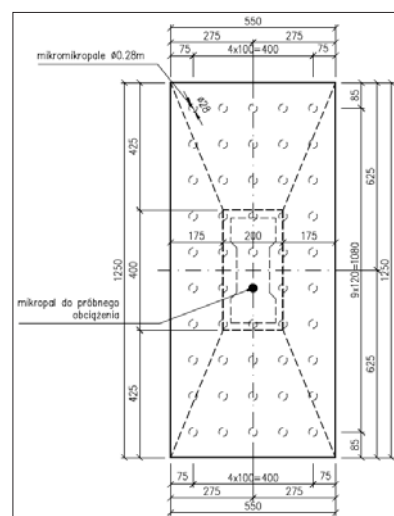
W rzeczywistości przemieszczenia łąwy podpory mogą być jeszcze mniejsze, ponieważ w modelowaniu nie uwzględniono częściowej petyfikacji podłoża gruntowego, wywołanej instalacją mikropali. Podane wartości można zatem traktować jako maksymalne, które wystąpią w najbardziej niekorzystnych przypadkach obciążeń. Występowanie niewielkich momentów zginających w palach wynika z kilku przyczyn. Główną z nich jest korzystny, wachlarzowy (nieco przypominający pale kozłowe) układ mikropali połączonych z łąwą fundamentową. Taki układ zbrojenia prowadzi do powstania zmonolityzowanej konstrukcji z gruntu zbrojonego mikropalami, co znacząco redukuje możliwość występowania momentów zginających. Kolejne powody to sam rodzaj zbrojenia (są to mikropale o niewielkiej średnicy) oraz mała sztywność kontaktu wynikająca ze współpracy mikropala z gruntem o niskich właściwościach wytrzymałościowych i odkształceniowych.

Podsumowując, można stwierdzić, że dla żadnego z rozpatrywanych

wariantów obciążenia nie została przekroczona nośność graniczna fundamentu palowego, zaś zarówno przemieszczenia poziome, jak i pionowe mieszczą się w zakresie dopuszczalnych z punktu widzenia stateczności łąwy.

Rozwiązanie projektowe

Wyniki przestrzennego modelowania numerycznego potwierdziły możliwość wykonania fundamentu mikropalowego. Analizując wyniki modelowania oraz obliczeń analitycznych, bazujących na nośnościach pojedynczych mikropali, ustalono rozwiązanie projektowe dla poszczególnych podpór. Ustalono, iż każda podpora otrzyma fundament oparty na układzie 50 mikropali rozmieszczonych w pięciu rzędach po 10 sztuk (rys. 1). Dla przyczółka północnego zaprojektowano układ składający się z ośmiu rzędów mikropali po 10 sztuk, natomiast fundament przyczółka południowego oparto na układzie sześciorzędowym.

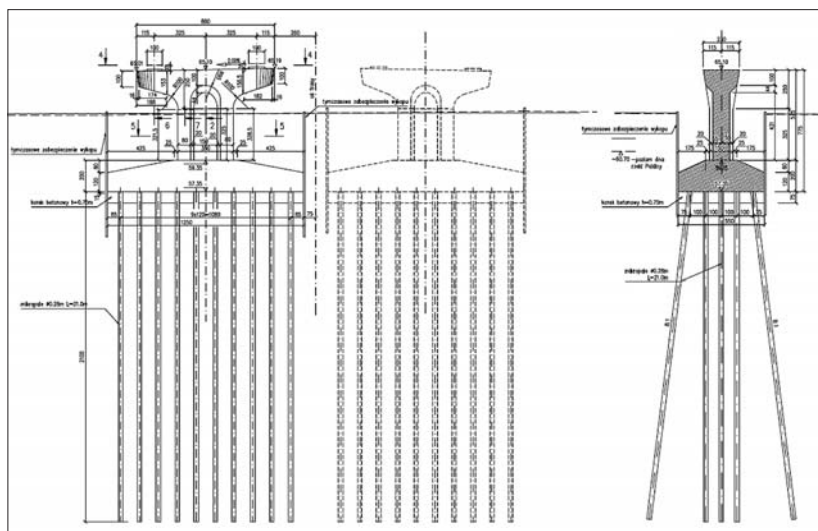


Rys. 1 | Rozmieszczenie mikropali w łąwie podpory

Długości mikropali dobrano stosownie do profilu geotechnicznego, z warunków nośności podłoża dla każdej z podpór (rys. 2). Właściwy typ zbrojenia mikropali ustalono kierując się nośnością pojedynczego elementu w warunkach maksymalnego obciążenia podpory. Zasadniczo rozwiązanie oparto na mikropalach TITAN 103/78, z wyjątkiem podpory F, dla której zastosowano mikropale TITAN 103/51. Nominalna średnica wiercenia dla mikropali TITAN 103 wynosi 280 mm. Z uwagi na wyjątkowo niskie charakterystyki wytrzymałościowe utworów w podłożu podpór B, C, D i E, zdecydowano się na zastosowanie w ich fundamentach mikropali wykonywanych w technologii TITAN Mono-Jet. Jest to modyfikacja technologiczna, polegająca na zastosowaniu systemowych końcówek wiertniczych wyposażonych w dysze o średnicy 3,5 mm. Pozwala to na zwiększenie ciśnienia iniekcji wstępnej i końcowej do ok. 200 bar. Zestaw pozostałych elementów systemu TITAN nie ulega zmianie. Zachowana jest również procedura wykonawcza właściwa technologii. Zwiększenie ciśnienia umożliwia uzyskanie mikropali o większej średnicy, pozwalając na uzyskanie projektowanej nośności nawet w skrajnie niekorzystnych warunkach, przy zachowaniu korzyści płynących ze stosowania systemu samowierzącego. Ostateczny kształt fundamentów mikropalowych przedstawiono w tabeli 1.

Wykonawstwo

Faza realizacji fundamentów mikropalowych rozpoczęła się 8 listopada 2010 r. Do wykonania mikropali wy-



Rys. 2 | Przekrój poprzeczny ustroju nośnego wraz z układem mikropali w fundamencie

korzystano wiertnicę samojezdną na podwoziu gąsienicowym, o masie rzędu 10 ton (fot. 1). W warunkach grząskiego podłoża i wysokiego poziomu wód gruntowych, sięgającego niemalże powierzchni terenu, sprzęt o takiej masie i gabarytach umożliwiał swobodne operowanie bez konieczności specjalnego wzmocnienia podłoża, budowy dróg technologicznych czy formowania platform roboczych. Wykopy pod ławy fundamentowe przyczółków zaplanowano jako szerokokoprzestrzenne. Mikropale w obrębie niektórych ław fundamentowych filarów wykonano z powierzchni terenu rodzimego, ograniczając zakres robót ziemnych.

W trakcie realizowania kontraktu doskonale sprawdziła się organizacja robót polegająca na operowaniu stosunkowo lekką wiertnicą, zapewniającą dostęp do frontu prac praktycznie bez koniecz-

ności specjalnego przygotowania terenu. Wiertnica zasilana była w płuczkę cementową oraz mieszanek iniekcyjnych z zaplecza zlokalizowanego w pobliżu głównej drogi dojazdowej, co znacznie ułatwiało dostawy cementu. W trakcie robót zaplecze iniekcyjne zmieniano swoją lokalizację trzykrotnie, podążając za frontem robót. Możliwość przygotowania zaczynu iniekcyjnego na miejscu uwydatniła zalety mikropali – ciężki transport zapewniający dostawy cementu dla zaplecza iniekcyjnego odbywał się po głównej drodze technologicznej. Następnie przygotowywany na bieżąco zaczyn cementowy (do iniekcji wstępnej i końcowej) podawany był węzami bezpośrednio do wiertnicy operującej w obrębie wykonywanego fundamentu. Konieczność tłoczenia zaczynów iniekcyjnych na znaczne odległości stanowiła pewne utrudnienie, likwidowała jednak problemy logistyczne związane

Tab. 1 | Rozwiązanie projektowe fundamentu mikropalowego dla jednej jezdni

| Podpora | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Typ mikropala | TITAN 103/78 | TITAN 103/78 | TITAN 103/78 | TITAN 103/78 | TITAN 103/78 | TITAN 103/51 | TITAN 103/78 | TITAN 103/78 | TITAN 103/78 | TITAN 103/78 | TITAN 103/78 |
| Długość mikropala [m] | 15 | 18 | 24 | 24 | 24 | 15 | 15 | 15 | 21 | 21 | 21 |
| Średnica nominalna [m] | 0,28 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28 |
| Liczba mikropali | 80 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 60 |



Fot. 1 | Wykonywanie mikropali, w tle zaplecze iniekcyjne



Fot. 2 | Fundament mikropalowy przed betonowaniem

z koniecznością bezpiecznego dojazdu na miejsce i czas betonu towarowego oraz pomp.

Roboty związane z wykonywaniem fundamentów trwały do 18 lipca 2011 r. Realnie prace związane z wykonywaniem mikropali trwały 196 dni. W tym czasie wykonano 23 679 metrów bieżących mikropali, co przekłada się na średnią wydajność na poziomie 140 mb/dzień. Biorąc pod uwagę, że roboty trwały w sezonie zimowym, w okresie silnych mrozów, wynik należy uznać za znakomity.

Inwestor: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad o/Zielona Góra
Generalny Wykonawca: MOTA Engil
Wykonawca mikropali: Soley Sp. z o.o.

Monitoring i weryfikacja metody obliczeniowej

Dla zapewnienia należytej kontroli nad wykonywanymi robotami, w projekcie uwzględniono próbne obciążenia mikropali. Badania wykonywane były dla każdej podpory na jednym z grupy mikropali w obrębie jej ławy. Przykładowe wyniki próbnego obciążenia przedstawiono na wykresach 1 i 2.

Wykresy przedstawiają bardzo korzystną charakterystykę pracy – szybką stabilizację osiadań oraz w znacznej mierze sprężysty charakter notowanych przemieszczeń. Zbiorcze zestawienie wyników dla poszczególnych typów mikropali ujęto w tabeli 2.

W trakcie realizacji jest monitoring geodezyjny, w ramach którego mierzone są przemieszczenia w planie

oraz osiadania każdej podpory podczas poszczególnych faz realizacji obiektu. Z uwagi na postęp robót zakres tych danych jest ograniczony. Wyniki pierwszych pomiarów są obiecujące, wykazują przemieszczenia gotowych filarów o wielkości rzędu 1–4 mm.

Wnioski

Zebrane dotychczas doświadczenia pozwalają na sformułowanie kilku wniosków i uwag podsumowujących dotychczasowe etapy budowy:

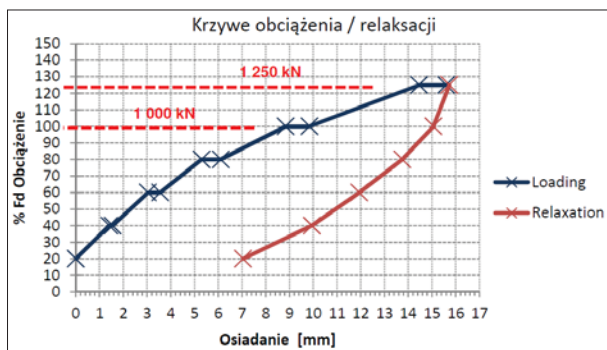
1. Rozwiązanie projektowe posadowienia obiektu z wykorzystaniem fundamentów mikropalowych, wychodzące poza ramy powszechnej praktyki inżynierskiej, okazało się trafne i skuteczne.



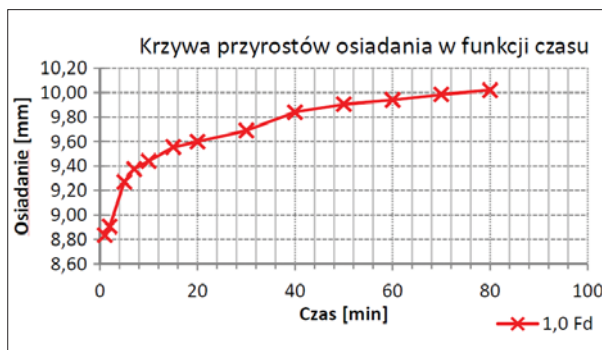
Fot. 3 | Ławy po zabetonowaniu



Fot. 4 | Filary gotowe do betonowania przęsł



Wykres 1 | Wykres krzywych obciążenia i relaksacji



Wykres 2 | Wykres stabilizacji osiadań przy obciążeniu projektowym 1000 kN

- Zastosowana w projekcie technologia wykonywania mikropali pozwoliła osiągnąć szereg korzyści techniczno-ekonomicznych: znaczne uproszczenie logistyki, ograniczenie kosztów poprzez minimalizację zakresu robót przygotowawczych, robót ziemnych, odwodnienia itp. w terenie o trudnej dostępności.
- Znakomity postęp prac, krótki czas realizacji posadowienia.
- Poza aspektem techniczno-ekonomicznym, technologia umożliwiła wykonanie robót z minimalną ingerencją w środowisko naturalne, zachowując walory obszaru chronionego krajobrazu.
- Zastosowanie zaawansowanych metod obliczeniowych znakomicie wspiera proces projektowania, pozwalając na uzyskanie rozwiązań zoptymalizowanych.
- Wyniki kompleksowego monitoringu posłużą do lepszego poznania sposobu pracy fundamentów mikropalowych i do doskonalszego kalibrowania kolejnych modeli numerycznych.
- Rozbudowana sieć reperów i systematyczne pomiary dają szansę na zebranie cennych informacji o funkcjonowaniu fundamentów mikropa-

lowych jako całości, w szczególności o nośności całkowitej i osiadaniach zespolonej grupy mikropali.

- Możliwość weryfikacji wyników modelowania numerycznego w rozwiązaniu pełnoskalowym to przyczynek do poszerzenia świadomości technicznej i budowania bazy wiedzy, dzięki której uda się, w wielu przypadkach, uwolnić od ograniczeń konwencjonalnego podejścia projektowego.
- Fundamenty mikropalowe wykonane w technologii TITAN cechują się bardzo korzystną charakterystyką pracy (niewielkie osiadania, szybka stabilizacja).
- Technologia daje możliwość wykonywania znacznie obciążonych fundamentów w skomplikowanych warunkach gruntowych, trudnym terenie, praktycznie niezależnie od okoliczności pogodowych.
- W tak słabym podłożu ogromną rolę odegrał czynnik technologiczny – wiercenie z jednoczesną iniekcją, co pozwoliło (poza wykonaniem elementów o określonej nośności jednostkowej) na iniekcyjne scalenie, spetryfikowanie podłoża w obrębie wykonywanego układu mikropalowego. To z kolei pozwala trakto-

wać tego rodzaju fundamenty jako włąębnie zmonolityzowane, geokompozytowe bryły, odznaczające się znacznie korzystniejszymi właściwościami, niżby to wynikało z sumy nośności pojedynczych elementów.

- Technologia TITAN doskonale harmonizuje z ideą „pali-korzeni”, umożliwiając przeformułowanie od nowa koncepcji fundamentowania.

Bibliografia

- Fragmety Projektu Wykonawczego Droga Ekspresowa S3 Świnoujście-Lubawka-Granica Państwa, odcinek Węzeł „Międzyrzecz Południe” – Węzeł „Sulechów” km 0+000 – km 42+953,96*, Krakowskie Biuro Projektów Dróg i Mostów „Trasprojekt” Sp. z o.o., R. Słota, J. Jędrychowski, Kraków, czerwiec 2008.
- Modelowanie przestrzenne warunków pracy fundamentu mikropalowego podpory dla estakady w ciągu projektowanej drogi ekspresowej S3, odcinek Międzyrzecz – Sulechów*, M. Cała, M. Kowalski, Kraków, lipiec 2008.

Artykuł pierwotnie opublikowany jako referat w materiałach konferencyjnych „Podłoże i fundamenty budowy drogowych”, IBDiM, Kielce, maj 2012 r.

Tab. 2 | Zestawienie średnich osiadań mikropali

| Typ mikropala | Długość [m] | Nośność projektowa [kN] | Średnie osiadania [mm] |
|---------------|-------------|-------------------------|------------------------|
| TITAN 103/51 | 15 | 1400 | 15,70 |
| TITAN 103/78 | 15 | 1000 | 10,58 |
| TITAN 103/78 | 21 | 1000 | 13,17 |
| TITAN 103/78 | 24 | 800 | 15,37 |
| TITAN 103/78 | 18 | 800 | 13,91 |

TITAN POLSKA

TITAN POLSKA sp. z o.o.
ul. Miłkowskiego 3/702
30-349 Kraków
tel. +48 12 636 61 62
fax +48 12 267 05 25
biuro@titan.com.pl
www.titan.com.pl