

W drodze nad Bałtyk przez obiekt MS-13

w ciągu trasy S-3, czyli jak uszyć geotechniczny garnitur skrojony na miarę

Około 2500 lat temu grecki filozof, Heraklit z Efezu, powiedział „*Panta rhei*” – „wszystko płynie”, co oznacza, że świat ulega ciągłym zmianom i my, ludzie, nie jesteśmy w stanie tego procesu zatrzymać. Można śmiało powiedzieć, że historia ludzkości to ciągłe dążenie do zmian, wieczna pogoń za ideałami, których zwykle sami jesteśmy autorami. Postęp technologiczny nabrał szczególnego znaczenia w ostatnich latach. Wszyscy mówimy o zrównoważonym rozwoju, dbałości o środowisko, redukcji emisji CO₂, zielonych źródeł energii. Znaczących zmian naszego świata doświadczamy szczególnie w ostatnich kilku latach. Najpierw pandemia COVID-19, później wojna tuż za naszą wschodnią granicą przypominały nam, że nic nie jest na zawsze. Przykładowo: w czasie pandemii zmniejszone zużycie energii z uwagi na *lockdown* spowodowało braki popiołów na rynku, co oczywiście miało przełożenie na ceny niektórych mieszanek betonowych. Natomiast po wybuchu wojny w Ukrainie praktycznie z dnia na dzień przekonaliśmy się, że cena stali może nie grać żadnej roli, jeśli jej dostępność jest praktycznie zerowa! Kto by pomyślał, że w XXI wieku będziemy zmuszeni zmierzyć się z takimi problemami?

W Keller Polska zrozumieliśmy, że w dzisiejszym świecie o sile przetrwania firmy na rynku będzie decydować głównie jej umiejętność adaptacji do aktualnych warunków rynkowych. Organizacje muszą być jak kameleon, dostosowując swoje struktury i sposób działania do warunków brzegowych, jakie stawia nam rynek. Dziś praktycznie każda oferta jest skrojona pod wymagania Klienta, dostosowana do rodzaju projektu, jego lokalizacji i oczywiście budżetu. Nie stosuje się rozwiązań typowych, ponieważ rynek i konkurencja wymagają od nas ciągłej aktywności, innowacji i optymalizacji kosztów. I właśnie o tym chcielibyśmy dziś opowiedzieć, a dokładnie o tym, jak biuro Szczecin Keller Polska dostosowało się w tych trudnych czasach do sytuacji rynkowej, by pozyskać bardzo ważny i trudny projekt.

W geotechnice ciągły rozwój technologii spowodowany jest głównie względami ekonomicznymi, nieco rzadziej poszukujemy rozwiązań optymalizujących harmonogram, bo nawet jeśli, to tylko po to, by w finalnym rozrachunku optymalizować koszty. Aczkolwiek zdarzają się projekty, w których pewność rozwiązania, względy technologiczne czy jakościowe z uwagi na charakterystykę projektu powodują, że koszty spychane są na drugi plan. W dzisiejszych czasach poszukuje się coraz

częściej rozwiązań szytych na miarę, umożliwiających bezpieczne posadowienie obiektów mostowych, kubaturowych czy konstrukcji drogowych w sposób optymalny w ujęciu ekonomicznym i czasowym. Klasyczne posadowienia pośrednie obiektów mostowych na palach wielkośrednicowych coraz częściej są zastępowane przez nowsze technologie palowe czy rozwiązania równoważne, takie jak kolumny DSM, CSC czy nawet zagęszczenie impulsowe w technologii IC.

Jak już wspominaliśmy, sytuacja związana z pandemią COVID-19 oraz w późniejszym czasie wojna w Ukrainie bardzo mocno zmodyfikowały łańcuchy dostaw materiałów budowlanych, a ich ceny poszybowały ostro w górę. Na naszym rynku w pewnym momencie pojawił się ogromny problem z dostępnością zbrojenia (czy to w formie profili stalowych, czy też gotowych koszy prefabrykowanych). Stare przysłowie mówi: „Potrzeba jest matką wynalazków” i to właśnie takie sytuacje wymuszają konieczność podejścia do tematu w sposób kompletnie innowacyjny, spojrzenia na problem geotechniczny z perspektywy i znalezienia rozwiązania „*out of the box*”.

Chcielibyśmy przybliżyć czytelnikom zagadnienie posadowienia jednego z obiektów mostowych w ciągu drogi ekspresowej S-3 na odcinku Świnoujście – Dargobądz, realizowanej przez Generalnego Wykonawcę – firmę Polaqua. Jest nim drogowy obiekt mostowy W-13, przecinający linię kolejową nr LK 401 i LK 996 pod kątem ok. 14 stopni, co dodatkowo komplikowało geometrię posadowienia. Z uwagi na swoją lokalizację fundamenty podpór należało zmieścić pomiędzy trzema nitkami linii kolejowej. Na fot. 1 przedstawiono widok z góry obiektu w trakcie realizacji jego konstrukcji. Całość dość mocno komplikował fakt, że obiekt projektowo uwzględniał



Fot. 1. Obiekt W13, stan na kwiecień 2024 r. Źródło: GDDKiA

awaryjne uderzenie składu kolejowego w konstrukcję wiaduktu, przez co wśród reakcji dla kombinacji wymiarującej dominowały momenty rzędu kilkudziesięciu tysięcy kNm i siły poziome rzędu kilku tysięcy kN na podporę.

Paradoksalnie, warunki gruntowe (patrz rys. 2) nie należały do najtrudniejszych. Prawdopodobnie w warunkach lokalizacji obiektu poza terenami kolejowymi i możliwością zaprojektowania większych gabarytów fundamentów obiekt zostałby posadowiony bezpośrednio. Niestety, w tym przypadku sprawa była nieco bardziej skomplikowana. Kombinacja dużych sił poziomych i momentów zginających oraz ograniczenia gabarytów fundamentów wymuszała na potencjalnych wykonawcach robót geotechnicznych zastosowanie klasycznych rozwiązań palowych. Dodatkowo występowanie na głębokości ok. 13-16 m warstw gruntów organicznych przy klasycznym podejściu palowym wymagało zastosowania pali o znacznych długościach.

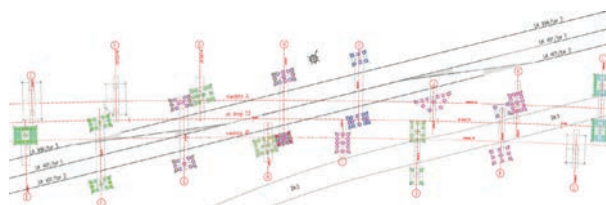
Jeśli ten projekt rozstrzygałby się kilka lat wcześniej, prawdopodobnie skończyłoby się na palach prefabrykowanych lub palach CFA. Jednak w momencie wyboru podwykonawcy robót geotechnicznych ceny stali na rynku osiągnęły maksymalny pułap (ok. 10 zł/kg) i właściwie nikt nie gwarantował żadnych terminów dostaw. My podeszliśmy do tematu, można by rzec „od kuchni” i zadaliśmy sobie proste pytanie, jaki materiał na dziś jesteśmy w stanie zagwarantować? I tak właśnie powstała koncepcja posadowienia obiektu mostowego na kolumnach DSM zbrojonych mikropalami. W naszej koncepcji kolumny DSM stanowią element przestrzennego wzmocnienia podłoża gruntowego, ograniczającego osiadania fundamentów podpór do akceptowalnych wartości przemieszczeń w fazie normalnej eksploatacji obiektu, natomiast elementy mikropalowe zaprojektowano na przeniesienie sił wyciągających z uwagi na ww. siły poziome i momenty dla fazy awaryjnej uderzenia pociągu w filar.

Tak powstał swoisty „garnitur” geotechnicznego posadowienia szyty na miarę czasów, sytuacji na rynku oraz możliwości finansowych Klienta.

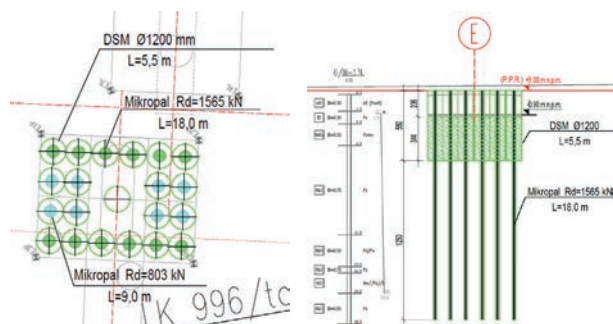
Optymalne projektowanie rozwiązań geotechnicznych zawsze wymaga indywidualnych, bardzo zaawansowanych analiz statycznych. I tak było też w tym przypadku. Szczegółowe analizy MES, skalibrowane poprzez uproszczone modele 2D, dały w wyniku kompletne i optymalne rozwiązanie o nietypowego posadowienia obiektu mostowego. Zastosowaliśmy dwie średnice kolumn DSM oraz trzy rodzaje żerdzi stalowych, tak aby wszystkie elementy zaprojektować optymalnie.

Pierwszym krokiem analizy posadowienia wiaduktu W13 było ustalenie rozkładu i długości elementów pod każdą podporą za pomocą metod analitycznych. Następnie, w celu uszczegółowienia, wykonano modele MES dla fundamentów o najbardziej niekorzystnej charakterystyce obciążeń i geometrii (rys. 3).

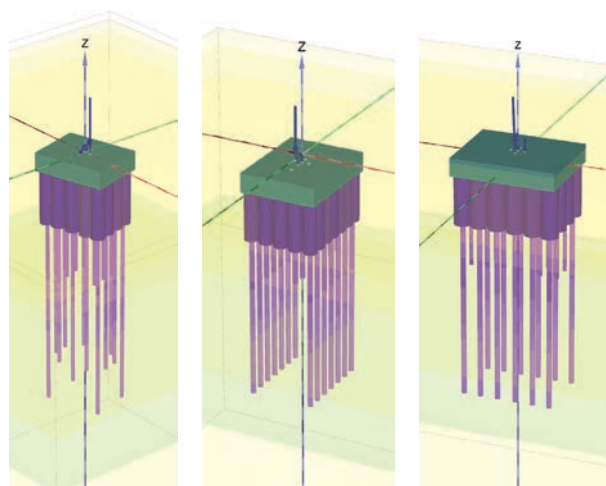
Do modelowania kolumn DSM oraz otulin cementowych mikropali zastosowano elementy objętościowe z wykorzystaniem modelu konstytutywnego Mohra-Coulomba. Żerdzie stalowe mikropali wprowadzono za pomocą elementów bel-



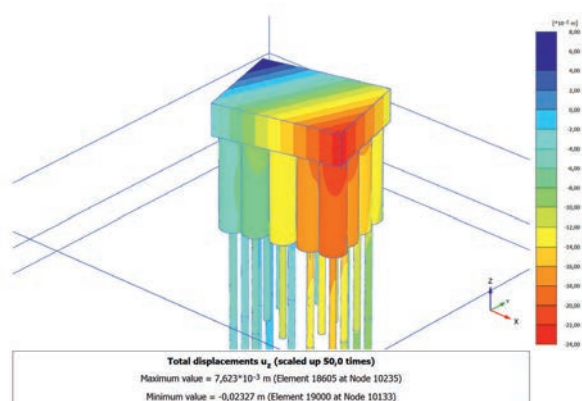
Rys. 1. Fragment planu posadowienia w rejonie przecięcia z torowiskiem i drogą krajową [2]



Rys. 2. Układ elementów wzmocnienia i przekrój poprzeczny przez przykładową podporę [2]



Rys. 3. Modele 3D posadowienia wybranych podpór W13L H-P, L-P i W13P E [2]



Rys. 4. Przykładowa mapa osiadania. Podpora W13L H-P [2]

kowych. Interakcję elementów posadowienia z gruntem zapewniono poprzez elementy kontaktowe typu „Interface”. Oddziaływania od konstrukcji wiaduktu zaimplementowano w formie ►



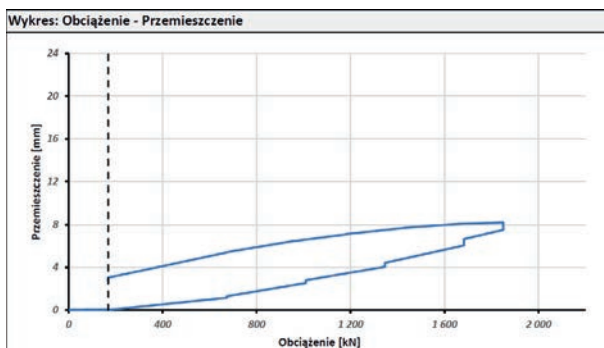
Fot. 2. Ograniczona przestrzeń z uwagi na sąsiedztwo istniejącej linii kolejowej



Fot. 3. Palownica Liebherr 125 wraz z zapleczem technologicznym do wytwarzania zaczynu cementowego



Fot. 4. Wykonanie mikropali w świeżych kolumnach cementowo-gruntowych DSM



Rys. 5. Wykres obciążenie – przemieszczenie mikropala najbardziej obciążonego próbnie (wyciąganie)

► sił skupionych, przyłożonych na górze stopy fundamentowej, modelowanej elementem objętościowym. Ośrodek gruntowy podzielono na warstwy i opisano modelem konstytutywnym Hardening Soil. Analizę każdej z podpór przeprowadzono dla sześciu różnych kombinacji obciążeń wymiarujących. Z obliczeń numerycznych uzyskano szczegółowy obraz przemieszczeń fundamentu dla każdej z analizowanych kombinacji. Przykładowy, przeskalowany obraz deformacji i mapę osiadania przedstawiono na rys. 4.

Oczywiście przy rozwiązaniu „szytym na miarę” nie wolno zapomnieć o tym, że przy realizacji takiego zadania nie ma miejsca na typowe, standardowe procedury wykonawcze. Najbardziej istotnym aspektem realizacji zaprojektowanego rozwiązania, łączącego dwie technologie geotechniczne, było formowanie mikropali bezpośrednio w świeżo wykonanych kolumnach DSM. Wyzwaniem stanowiła też ograniczona przestrzeń robocza, wynikająca z bliskiego sąsiedztwa czynnej, zelektryfikowanej linii kolejowej. Wymagało to precyzyjnej koordynacji robót geotechnicznych. Nadzór Keller Polska na tej budowie również musiał dostosować codzienne procedury oraz kontrolę wykonawstwa do nietypowych rozwiązań projektowych. Kontrolne, dodatkowe pomiary geodezyjne, podwojona kontrola próbek zaczynu na ściskanie czy też zwiększona załoga dla utrzymania dbałości o jakość wykonania zostały przewidziane od samego początku świadomie, aby móc zrealizować ten trudny projekt zgodnie z jego założeniami. W celu potwierdzenia przyjętych w projekcie założeń zostały wykonane cztery próbne obciążenia mikropali produkcyjnych do wartości obciążenia maksymalnego od 90 do 185 ton! Wszystkie otrzymane wyniki mieściły się w założeniach naszego projektu, poniżej przedstawiono wykres obciążenie – przemieszczenie dla kolumny najbardziej wyťažonej.

Trasa S-3 na tym odcinku została niedawno oddana do użytku. Mamy nadzieję, że ten artykuł spowoduje, iż w przyszłości, podróżując trasą S-3 na wakacje nad nasze zachodnie wybrzeże Bałtyku, zwrócić uwagę na wiadukt W-13, bo jest to prawdopodobnie pierwszy w Polsce obiekt mostowy posadowiony na kolumnach DSM zbrojonych mikropalami. □

Piśmiennictwo

1. *Projekt Wykonawczy, 119PR, budowa drogi S3 Troszyn-Swinoujście. Odcinek 1. Swinoujście-Dargobądz (bez węzła), TOM III/2.13 – Budowa wiaduktów W-13L i W-13P w ciągu drogi S3.* Opracowanie DATABOUT, Warszawa, maj 2022 r.
2. *Projekt Wykonawczy, Wzmocnienie podłoża gruntowego w technologii kolumn DSM pod fundamentami obiektów W-13L i W-13P.* Opracowanie Keller Polska Sp. z o.o., sierpień 2022 r.
3. *Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla określania warunków geologiczno-inżynierskich inwestycji: budowa drogi S3 Troszyn-Swinoujście. Odcinek 1. Swinoujście-Dargobądz (bez węzła).* Opracowanie GEOCONTROL, Kraków, czerwiec 2021 r.
4. *Bemessung von verfestigten Bodenkörpern – Hergestellt mit Düsenstrahl-, Deep-Mixing- oder Injektions-Verfahren.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, DIN 4093, 2015.
5. Topolnicki M.: *Dobra praktyka stosowania i projektowania wglębnego mieszania gruntu na mokro (DSM).* XXXII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, 7-10 marca 2017 r., Wisła.