Współpraca projektanta mostowego i geotechnika w procesie projektowania estakady kolejowej E2 w Krakowie

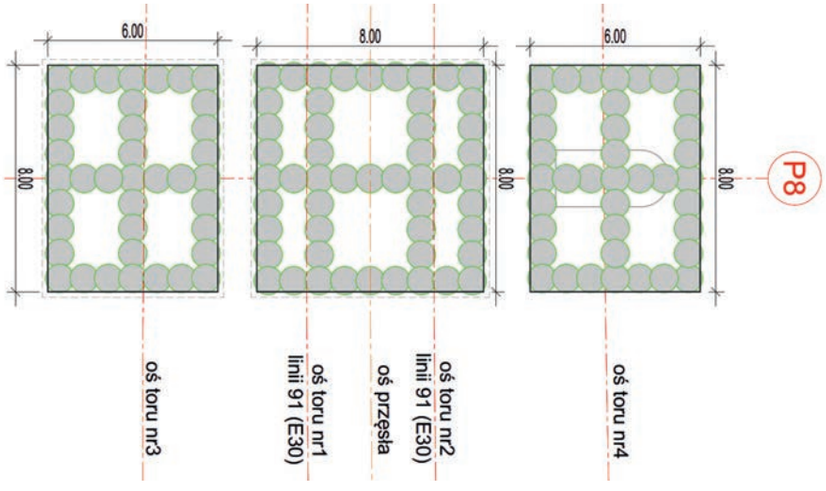
Tomasz Koziarski
Keller Polska
Michał Topolewicz
TOP PROJEKT

Wprowadzenie

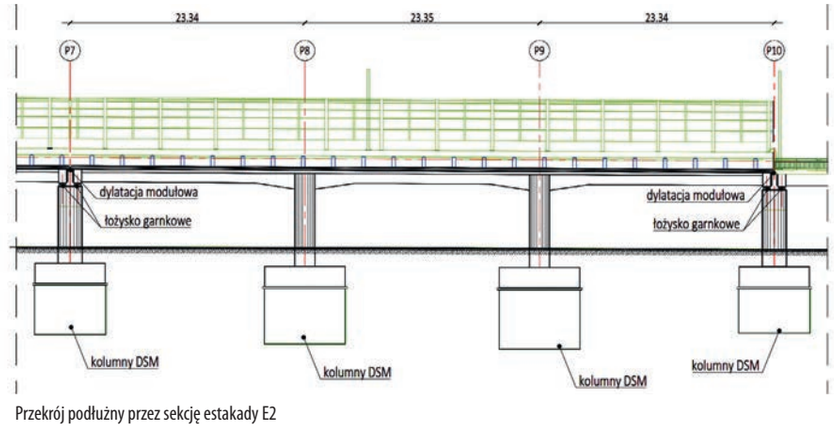
Modernizacja krakowskiego węzła kolejowego wiązała się z realizacją szeregu nowych obiektów inżynieryjnych w ścisłej zabudowie miejskiej. Jednym z nich była estakada kolejowa E2, zlokalizowana na odcinku pomiędzy ul. Grzegórzecką i ul. Miodową. Obiekt zaprojektowano w miejscu istniejącego dwutorowego nasypu kolejowego o wysokości ok. 7-8 m. Składał się z 20 podpór, a jego długość wynosiła 445 m przy rozpiętości przęsła wynoszącej ok. 23 m. Ustrój nośny podzielono na 4 oddylatowane sekcje 4- lub 5-przęsłowe.

Kluczowym wyzwaniem projektowym była konieczność utrzymania ruchu na linii kolejowej nr 91 na wysokim nasypie podczas realizacji inwestycji. W konsekwencji rozwiązania konstrukcyjne i geotechniczne musiały uwzględniać etapową realizację obiektu, zapewniającą nieprzerwaną eksploatację jednego z najważniejszych kierunków wyjazdowych ze stacji Kraków Główny.

Na etapie projektu wykonawczego przeanalizowano rozwiązania przyjęte w dokumentacji przetargowej. W wyniku



Układ kolumn DSM dla podpory 8



Przekrój podłużny przez sekcję estakady E2



Realizacja kolumn DSM dla I etapu prac (pod torem nr 4)

wspólnych prac projektanta mostowego i geotechnika opracowano nową koncepcję. Ponieważ jednym z kluczowych zagadnień projektowania obiektów kolejowych jest przeniesienie sił poziomych od hamowania taboru, zmiana układu statycznego nie ograniczała się jedynie do części mostowej, lecz wymagała również całkowitego przeprojektowania współpracy konstrukcji z podłożem gruntowym oraz ponownego spojrzenia na rolę wzmocnienia podłoża.

Zmiana układu statycznego i jej konsekwencje geotechniczne

Kluczową zmianą projektu było przejście z układu opartego na tradycyjnym łożyskowaniu do układu ramowego. Zaprojektowano trzyprzęsłowe sekcje ramowe, rozdzielone dylatacją. Z punktu widzenia projektanta mostowego oznaczało to efektywniejsze wykorzystanie pracy konstrukcji i możliwość redukcji liczby łożysk (z 267 do 84). Dla geotechnika była to jednak fundamentalna zmiana sposobu przekazywania oddziaływań na podłoże.

Projekt budowlany zakładał posadowienie na palach wierconych o średnicy 120 cm opartych w warstwie iłów mioceńskich, z podstawą poszerzoną do 180-200 cm.

W rozwiązaniu pierwotnym siły poziome od hamowania taboru kolejowego były przenoszone tylko przez podpory z łożyskami stałymi. Duże przemieszczenia z tym związane powodowały konieczność zastosowania przyrządów wyrównawczych (czyli dylatacji toru bezstykowego umożliwiających kompensacje przemieszczeń termicznych toru na obiekcie), jednak ze względu na lokalizacje estakady na łuku z krzywymi przejściowymi ich użycie było niedozwolone. W przypadku toru ciągłego przemieszczenia poziome ustroju musiały zostać znacznie ograniczone, stanowiąc jeden z kluczowych warunków projektowych całego obiektu.

W takiej sytuacji niewystarczające było klasyczne podejście, w którym wzmocnienie podłoża projektowane jest głównie pod kątem nośności pionowej. Konieczne było opracowanie rozwiązania zapewniającego odpowiednią sztywność przestrzenną układu fundamentowego oraz efektywne przejmowanie oddziaływań poziomych. Kluczowym aspek-

tem było zapewnienie ograniczenia przemieszczeń konstrukcji wywołanych hamowaniem pociągu do 5 mm w poziomie ustroju nośnego (tj. od ok. 8 do ok. 11 m powyżej poziomu posadowienia fundamentów). W celu spełnienia tego wymagania zdecydowano się na zastosowanie posadowienia w postaci przestrzennych układów ścian cementogruntowych formowanych z wzajemnie przecinających się kolumn DSM.
Z uwagi na statyczną niewyznaczalność układu i wpływ sztywności podparcia na wyniki obliczeń proces projektowy miał charakter iteracyjny i wymagał uzyskania zbieżności w obliczeniach konstrukcyjnych i geotechnicznych. Ostateczne rozwiązanie zostało wypracowane dopiero po serii analiz prowadzonych równolegle przez obie branże.

Dodatkowe rozpoznanie podłoża jako element procesu optymalizacji

Rozpoznanie podłoża do projektu przetargowego wykonano jedynie u podstawy istniejącego nasypu, od strony zachodniej. W strefie przypowierzchniowej występowały nasypy niekontrolowane o miąższości do 3 m. Poniżej zalegały grunty spoiste (głównie gliny i pyły, lokalnie namuły gliniaste), w stanie plastycznym i miękkoplastycznym, o stropie na głębokości od 3 do 6 m. Głębiej stwierdzono nawodnione piaski w stanie luźnym – średniozagęszczonym. Warstwę nośną stanowiły głównie średniozagęszczone pospółki i żwiry, zalegające na ogół od głębokości 8-9 m p.p.t. Podłoże mioceńskie nawiercono na głębokości ok. 12-14 m.
Zmiana koncepcji obiektu wymagała lepszego rozpoznania warunków gruntowych niż dostępne na etapie przetargu. Szczególny nacisk położono na wiarygodne określenie parametrów odkształcalności podłoża. Wykonano dodatkowe sondowania CPTu pod każdą projektowaną podporą oraz badanie dylatometryczne DMT iłów mioceńskich. Uzyskane wyniki pozwoliły na dokładniejszą ocenę zmienności warunków gruntowych i uszczegółowienie parametrów wykorzystywanych w analizach. Ze względu na występowanie gruntów organicznych wykonano zaroby próbne pozwalające zweryfikować możliwość uzyskania wymaganych parametrów cementogruntu. Uzyskane wyniki posłużyły do doprecyzowania założeń projektowych i wykonawczych jeszcze przed rozpoczęciem robót zasadniczych.

Kolumny DSM jako element kształtujący sztywność układu

Technologia *Deep Soil Mixing* została wykorzystana nie tylko jako metoda poprawy nośności podłoża. W analizowanym przypadku jej podstawowym zadaniem było stworzenie układu zapewniającego odpowiednią sztywność fundamentów oraz ograniczenie przemieszczeń poziomych podpór.
W przeciwieństwie do typowych zastosowań, gdzie kolumny pracują głównie pod obciążeniami pionowymi, zaprojektowano przestrzenne układy kolumn wykonywanych w układzie siecznym. Łącząc się wzajemnie, tworzyły one ciągłe ściany oraz zamknięte skrzynie cementogruntowe współpracujące z fundamentem i otaczającym gruntem. Zaprojektowano kolumny DSM o średnicy 100 cm w rozstawach od 86 do 90 cm.
Takie rozwiązanie pozwoliło na efektywne przejmowanie oddziaływań poziomych, pracując jako sztywny, masywny blok. W praktyce kolumny DSM stały się elementem kształtującym sztywność całego systemu fundamentowego.



Estakada E2 po wybudowaniu

Weryfikacja założeń i realizacja

Podczas realizacji oprócz bieżącej kontroli próbek cementogruntu ze świeżego materiału pobieranego z różnych głębokości prowadzono także kontrolę jakości poprzez odwierty rdzeniowe wykonywane w gotowych elementach DSM. Pozwoliło to na ocenę jednorodności cementogruntu oraz weryfikację zgodności parametrów wykonanych elementów z wymaganiami projektowymi. Sztywność poziomą potwierdzono, wykonując badania weryfikacyjne na gotowej konstrukcji.
O wyborze technologii DSM zadecydowały nie tylko możliwości kształtowania siecznych układów kolumn, ale również jej korzystne właściwości wykonawcze. Bezudarowy i bezwibracyjny sposób formowania kolumn umożliwił prowadzenie robót w skarpie czynnego nasypu kolejowego w centrum Krakowa bez negatywnego wpływu na stateczność podłoża i eksploatację linii. Technologia pozwoliła ponadto na wykonanie układów skrzynkowych z wykorzystaniem tzw. wolnego przelotu, co miało kluczowe znaczenie podczas realizacji pierwszego etapu obiektu, gdy podpory pod tor nr 4 wykonywano w obudowie ze ścianek szczelnych, przy poziomie platformy roboczej zlokalizowanym około 7 m powyżej poziomu fundamentów. Istotnym atutem technologii DSM była możliwość magazynowania cementu w silosach na terenie budowy, która pozwalała na realizację dostaw poza godzinami szczytu, ograniczając oddziaływanie inwestycji na ruch miejski, co w centrum Krakowa stanowiło istotną przewagę nad rozwiązaniami wymagającymi bieżących dostaw mieszanki betonowej i wywozu urobku.

Wnioski

Przykład estakady E2 pokazuje, że największy potencjał optymalizacji nie zawsze wynika z zastosowania nowej technologii, lecz z właściwego połączenia rozwiązań konstrukcyjnych i geotechnicznych. Kluczowym elementem projektu była zmiana sposobu myślenia o roli posadowienia. Kolumny DSM nie zostały wykorzystane wyłącznie do zwiększenia nośności podłoża, lecz jako element aktywnie współkształtujący sztywność całego układu konstrukcyjnego.
Ostateczne rozwiązanie było efektem ścisłej współpracy projektanta mostowego i geotechnika, dodatkowego rozpoznania podłoża oraz iteracyjnego procesu projektowania. Takie podejście pozwoliło na opracowanie bardziej efektywnego i zrównoważonego rozwiązania ograniczającego ślad węglowy przy jednoczesnym zachowaniu wymagań konstrukcyjnych i realizacyjnych inwestycji. ❑