

GEOTECHNIKA

OPTYMALIZACJA POD PEŁNĄ KONTROLĄ

POSADOWIENIE POŚREDNIE OBIEKTU ŁUKOWEGO

■ **TOMASZ TOPOLIŃSKI**
Keller Polska sp. z o.o.



Starszy projektant w Keller Polska, specjalizujący się w posadowieniach pośrednich, wzmocnieniu podłoża oraz zabezpieczeniach głębokich wykopów dla obiektów infrastrukturalnych, przemysłowych i kubaturowych. Zajmuje się analizami projektowymi oraz optymalizacją rozwiązań geotechnicznych. Autor publikacji branżowych, członek Polskiego Komitetu Geotechniki, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering oraz Komitetu Technicznego nr 254 ds. Geotechniki w Polskim Komitecie Normalizacyjnym.

Z TEKSTU DOWIESZ SIĘ:

- ✓ jak współpracują obiekt inżynierski i wysoki nasyp,
- ✓ jak skutecznie ograniczyć osiadania przy użyciu DSM,
- ✓ jak kontrola umożliwi bezpieczną optymalizację.

WSTĘP

Znamienną cechą realizowanych obecnie w Polsce inwestycji infrastrukturalnych jest optymalizacja rozwiązań projektowych. Niezależnie od przyjętego systemu realizacji (najczęściej „projektuj i buduj”), wykonawcy szukają najlepszych ekonomicznie i organizacyjnie rozwiązań. Przy zastosowaniu odpowiedniego poziomu kontroli, osiągnięcie optymalizacji idzie w parze z zapewnieniem bezpieczeństwa, trwałości i niezawodności konstrukcji. W niniejszym artykule przedstawiono przykład korzystnego rozwiązania posadowienia obiektu inżynierskiego w skomplikowanych warunkach gruntowych.

INWESTYCJA

Najbardziej wyczekiwaną przez mieszkańców Trójmiasta i sympatyków wypoczynku nad Morzem Bałtyckim inwestycją infrastrukturalną ostatnich lat jest Obwodnica Metropolii Trójmiejskiej (OMT). W ramach tej budowy powstanie dwujezdniowy odcinek drogi ekspresowej S6, który połączy dwie ważne istniejące trasy: S6 Słupsk-Gdańsk oraz Obwodnicę Trójmiasta, dalej zapewniając ciągłość z autostradą A1 oraz S7 Gdańsk-Warszawa. Tym samym odciążona zostanie Obwodnica Trójmiasta, której przepustowość została już w pełni wykorzystana, a międzyregionalny tranzyt ominie pomorską metropolię.

OBIEKT ES-15B

W ramach Zadania 1 budowy OMT konieczne jest przeprowadzenie ruchu drogowego nad linią kolejową nr 229. Przejście to zapewni obiekt ES-15B. Jest to jednoprzęsłowa konstrukcja, której ustrój nośny stanowią prefabrykowane żelbetowe sklepienia łukowe współpracujące z gruntem. Dojazdy stanowią nasypy osiągające wysokości do 13 m.

WARUNKI GRUNTOWE I BADANIA GEOLOGICZNE

Na obszarze obejmującym obiekt ES-15B i jego dojazdy, w podłożu od powierzchni terenu występują grunty spoiste



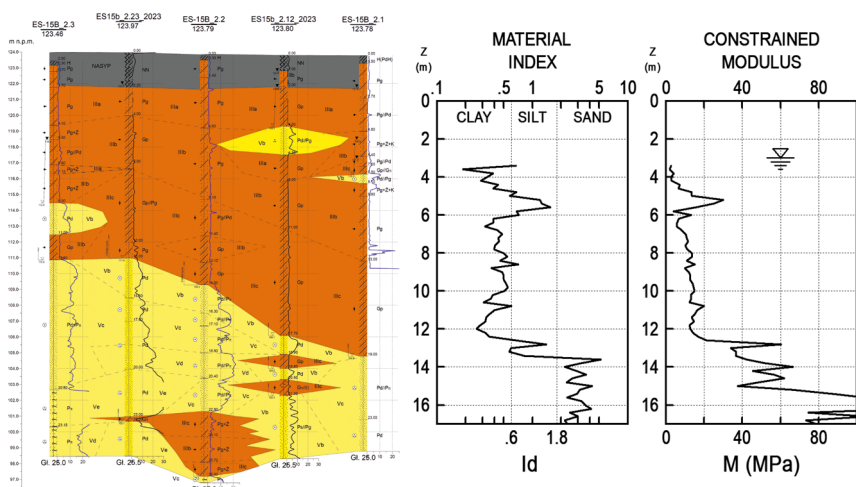
W związku z tym konieczne było zastosowanie posadowienia pośredniego fundamentów.

Bezpośrednie posadowienie na gruncie rodzimym wysokich nasypów stanowiących dojazdy do obiektu spełnia warunki stanów granicznych. Należy jednak wziąć pod uwagę fakt, że w rozpatrywanych warunkach gruntowych obciążenie podłoża budowlą ziemną o tak znacznej wysokości oraz powierzchni wiąże się z istotnym osiadaniami i zasięgiem oddziaływania obejmującym sąsiadujące obiekty. Konieczne jest zastosowanie rozwiązania ograniczającego różnicę przemieszczeń nasypu i przylegających do niego konstrukcji.

TECHNOLOGIA POSADOWIENIA POŚREDNIEGO

Firma Keller Polska zaproponowała posadowienie obiektu ES-15B na kolumnach SCC (*Soil-Cement Column*). Technologia ta stanowi odmianę mieszania w głębokiego gruntu (*Deep Soil Mixing*) (fot. 2). Cechą charakterystyczną SCC jest posadowienie pośrednie na sztywnych kolumnach cementogruntowych, które przenoszą całość obciążeń z konstrukcji na nośne, głębokie warstwy podłoża. W tradycyjnej nomenklaturze jest to posadowienie typu „palowego”. W związku z tym nie wymaga ono dodatkowego zabezpieczenia obrysu fundamentu ściankami szczelnymi, co często ma miejsce w przypadku technologii wzmacniających podłoże przy posadowieniu bezpośrednim.

Kolumny SCC jako posadowienie pośrednie charakteryzują się niewielkim osiadaniami i znajdują zastosowanie w dużych i odpowiedzialnych obiektach budowlanych. Omawiana technologia wykorzystuje zalety wynikające z w głębokiego mieszania gruntu i pozwala tworzyć układy zacinających się kolumn o dużych średnicach. Tego typu przestrzenne układy (panele, skrzynie, bloki) zapewniają wysoką nośność oraz sztywność pionową i poziomą posadowienia. Zbrojenie kolumn profilami stalowymi zapewnia przeniesienie sił rozciągających i ścinających pomiędzy kolumnami a fundamentem.



RYS. 1. | Uzupełniające badania podłoża gruntowego - przekrój geologiczny i wyniki sondowania DMT [2]

(gliny piaszczyste, piaski gliniaste) w stanie od plastycznego do twardeplastycznego. Pod nimi znajdują się grunty niespoiste (piaski drobne, piaski pyłaste) w stanie od średniozagęszczonego do zagęszczonego (rys. 1).

Rozpoznanie warunków gruntowych było wieloetapowe, co jest typowe dla dużych i skomplikowanych pod względem geotechniki inwestycji. Poziomą szczegółowość i rodzaj wykonanych badań był dopasowany do potrzeb danej fazy projektu: od wstępnego rozpoznania układu warstw gruntowych do indywidualnej oceny wybranych parametrów pod konkretnymi fundamentami. W celu weryfikacji danych z etapu przetargowego wykonano: wiercenia badawcze,

sondowania statyczne CPTu, sondowania dylatometrem DMT oraz sondą krzyżakową FVT. Uzupełniające badania pozwoliły dokładnie odtworzyć układ warstw gruntowych, określić ich stan, parametry odkształceniowe i wytrzymałościowe, a także historię naprężeń w gruncie.

SPOSÓB POSADOWIENIA

Pod obiektem ES-15B i jego dojazdami występują grunty spoiste o podwyższonej ściśliwości i obniżonych parametrach mechanicznych. Bezpośrednie posadowienie obiektu inżynierskiego nie spełniłoby warunków stanów granicznych nośności i użytkowości.



FOT. 2. | Wiertnica z osprzętem do wykonania kolumn SCC oraz mieszadło podczas zagłębienia (Fot. Keller)

PRZYJĘTE ROZWIĄZANIE

Jako posadowienie pośrednie obiektu ES-15B zaprojektowano kolumny SCC o średnicy 100 cm – według autorskiej koncepcji Keller Polska (rys. 2). Pod fundamentami przewidziano układ wzajemnie zacinających się kolumn tworzących panele równoległe do osi obiektu. Długości kolumn (od 12,0 m do 20,6 m) dopasowano do głębokości zalegania piasków, w których oparto podstawy kolumn. Kolumny SCC zostały połączone z fundamentem poprzez zbrojenie w postaci profili stalowych, które zastosowano ze względu na fazę przejściową zasypanych ścian monolitycznych, przed montażem prefabrykowanych elementów łukowych.

Nasypy na dojazdach do obiektu zostały posadowione bezpośrednio. W strefach przejściowych pomiędzy fundamentami a nasypem dokonano jedynie lokalnej, przypowierzchniowej wymiany gruntów słabonośnych.

Ważnym elementem rozwiązania Keller Polska była określona w projekcie kolejność prowadzenia robót, w tym etapowe wykonanie robót ziemnych i konstrukcyjnych (rys. 3).

W celu ograniczenia różnicy osiadania i oddziaływania nasypów na posadowienie fundamentów obiektu przewidziano przerwy technologiczne, w czasie których miała realizować się konsolidacja gruntów spoistych.

MODEL OBLICZENIOWY

Obliczenia przeprowadzono metodą elementów skończonych w płaskim stanie

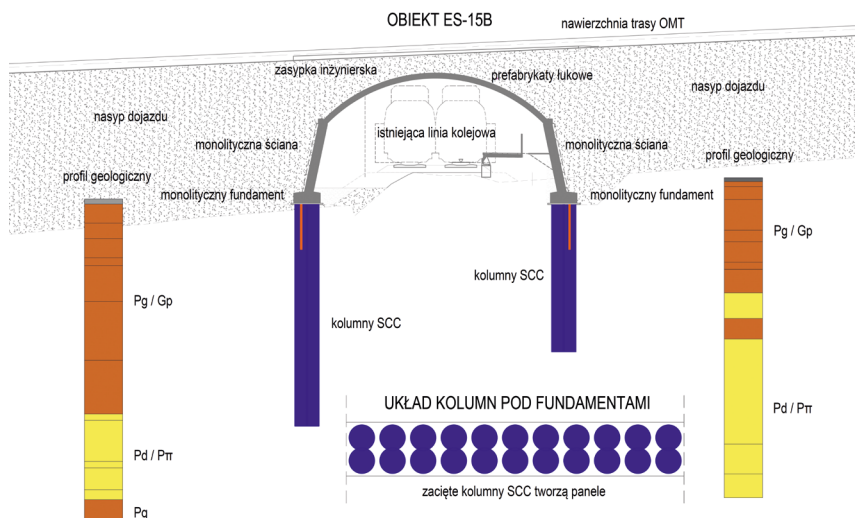
odkształcenia za pomocą programu Plaxis 2D. Reprezentatywny przekrój obejmował obiekt inżynierski (fundamenty, monolityczne ściany oraz prefabrykowane elementy łukowe), nasypy drogowe, posadowienie pośrednie na kolumnach SCC oraz istniejący nasyp kolejowy. W ten sposób uwzględniono

wzajemny wpływ wszystkich oddziałujących na siebie obiektów.

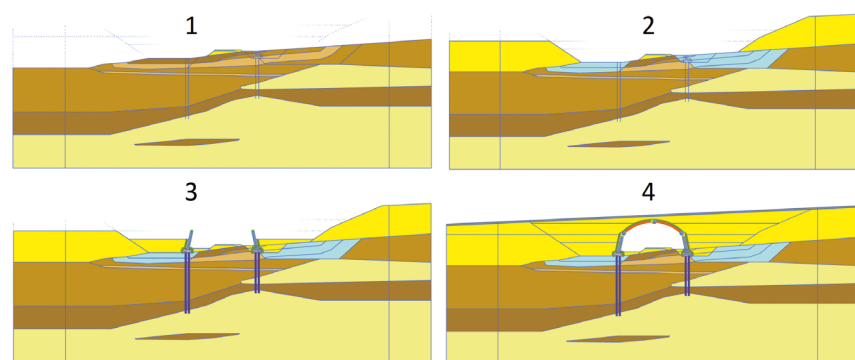
WYNIKI OBLICZEŃ

Podstawowymi wynikami obliczeń były siły wewnętrzne i przemieszczenia (rys. 4). Przyjęte rozwiązanie posadowienia obiektu ES-15B oraz nasypów na jego dojazdach spełniło warunki stanów granicznych nośności i użytkowania [4]. Wyniki obliczeń pozwoliły na weryfikację wszystkich wymagań dla poszczególnych elementów. W projekcie przedstawiono także prognozowane osiadania wybranych charakterystycznych punktów w celu porównania z pomiarami rzeczywistych przemieszczeń podczas realizacji i eksploatacji obiektu.

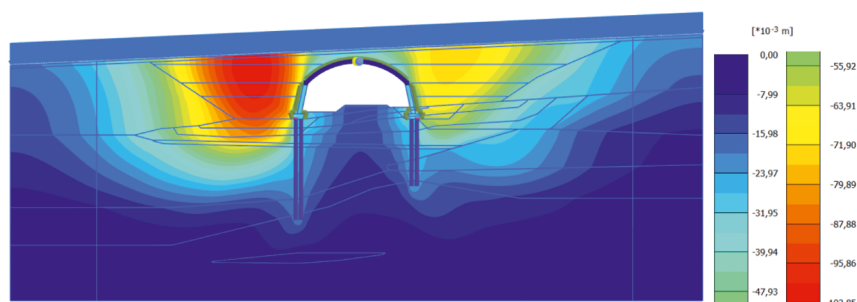
Kluczowym stanem granicznym użyteczności dla fundamentów jest dopuszczalne osiadanie. W przypadku obiektów inżynierskich również istotne znaczenie ma



RYS. 2. | Przyjęte rozwiązanie posadowienia obiektu ES-15B na kolumnach SCC [3]



RYS. 3. | Wybrane kolejne etapy wznoszenia obiektu i nasypów [3]



RYS. 4. | Prognozowane całkowite przemieszczenia pionowe – maksymalna wartość 103,9 mm [3]

Podpora	Faza realizacji		
	Przed ułożeniem łupin [mm]	Przed nawierzchnią drogową [mm]	Całkowite [mm]
P1	7	26	33
P2	6	27	34
Różnica osiadania	1	1	1

TAB. 1. | Prognozowane w obliczeniach osiadanie fundamentów [3]

ograniczenie różnicy osiadania pomiędzy sąsiednimi podporami, które zwykle należy zredukować do wartości 10 mm. Posadowienie obiektu ES-15B na kolumnach SCC pozwoliło skutecznie ograniczyć osiadanie i jego różnicę w kolejnych fazach realizacji (tab. 1). Prognozowane osiadanie nawierzchni drogi również spełniło wymagane kryterium, które wynosiło 10 mm na odcinku o długości 10 m.

W ramach weryfikacji stanów granicznych nośności zaprojektowano wytrzymałość na ściskanie cementogruntu. Na podstawie procedury przedstawionej w wytycznych [5] określono wartość wymaganą po 60 dniach dojrzewania: $f_{ck} = 3,50$ MPa (tab. 2).

$$f_{cd} = 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_m} \quad [1]$$

gdzie:

0,85 - współczynnik redukcyjny ze względu na ewentualne efekty długoterminowe,

γ_m - częściowy współczynnik bezpieczeństwa; przyjmuje się $\gamma_m = 1,5$ dla obciążeń stałych i zmiennych oraz $\gamma_m = 1,3$ dla obciążeń wyjątkowych,

f_{ck} - charakterystyczna wytrzymałość cementogruntu na ściskanie,

f_{cd} - obliczeniowa wytrzymałość cementogruntu na ściskanie.

PILOTOWE BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI

Na etapie prac nad projektem wykonawczym posadowienia na kolumnach SCC wykonano pilotowe badania cementogruntu. Polegały one na sprawdzeniu właściwości materiału, który został przygotowany w laboratorium przy użyciu gruntu pobranego z podłoża pod omawianym obiektem inżynierskim. Głównym celem badań było potwierdzenie osiągnięcia założonej wytrzymałości na ściskanie i ustalenie osta-

tecznego składu zaczynu. W ten sposób zmniejszono ryzyko związane z wykonaniem elementów posadowienia pośredniego w każdorazowo niepowtarzalnych warunkach gruntowych i zoptymalizowano zużycie cementu.

W ramach badań pilotowych określono skład granulometryczny pobranych próbek gruntu, zawartość części organicznych oraz granice płynności i plastyczności. Następnie przygotowano z nich cementogrunt w trzech wariantach zawartości cementu i uformowano 12 normowych próbek do badań wytrzymałościowych. Po 28 dniach dojrzewania i pielęgnacji próbek przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie (tab. 3).

Badania potwierdziły wstępnie założoną na podstawie wytycznych [5] oraz doświadczeń firmy Keller Polska wytrzymałość cementogruntu projektowanych kolumn SCC.

KONTROLNE BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI

Podczas realizacji robót geotechnicznych pobierano cementogrunt ze świeżo wykonanych, losowych kolumn SCC. Z pobranego materiału formowano normowe próbki szkieletowe i przekazano do certyfikowanego laboratorium na czas dojrzewania i pielęgnacji. Następnie przewidziano wykonanie badań wytrzymałości na ściskanie.

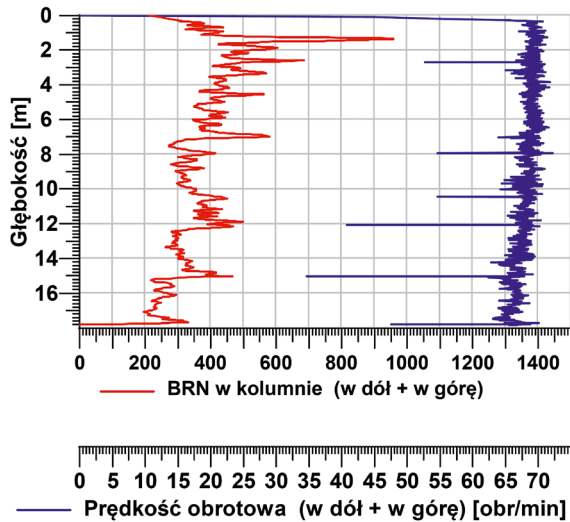
Zgodnie z wymaganiami projektu wykonawczego charakterystyczna wytrzymałość

Podpora	f_{ck} [MPa]	f_{cd} [MPa]	Maksymalne obciążenie obl.	Napężenie w kolumnie SCC [MPa]
P1	3,50	1,98	1504	1,91
P1	3,50	1,98	1509	1,92

TAB. 2. | Sprawdzenie wytrzymałości na ściskanie cementogruntu kolumn SCC [3]

Oznaczenie zarobu	Rodzaj gruntu	Zużycie zaczynu (l/m ³ cementogr.)	Średnia wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]
A	glina piaszczysta	352	3,4
B	glina piaszczysta	387	3,6
C	glina piaszczysta	422	4,2

TAB. 3. | Wyniki pilotowych badań wytrzymałości cementogruntu



RYS. 5. | Wycinek metryki kolumny B52 przedstawiający uzyskaną prędkość obrotową oraz wskaźnik BRN

na ściskanie cementogruntu po 60 dniach powinna wynosić $f_{ck,60} = 3,50$ MPa lub równoważnie po 28 dniach $f_{ck,28} = 2,80$ MPa. Spełnienie warunku wytrzymałości po 28 dniach zwalnia z konieczności badania próbek po 60 dniach. Metodę oceny wytrzymałości cementogruntu w ujęciu statystycznym przy założeniu rozkładu logarymicznonormalnego podano w wytycznych [5].

$$f_{ck} = \min \left\{ \frac{\exp [f_{cm} (\ln f_c) - m s_d (\ln f_c)]}{\leq 12 \text{ MPa}} \right.$$

gdzie:

$f_{cm} (\ln f_c)$ – oznacza średnią z wartości $\ln f_c$,
 $s_d (\ln f_c)$ – oznacza odchylenie standardowe wartości $\ln f_c$, powodujące zmniejszenie wytrzymałości cementogruntu,
 m – parametr statystyczny określający poziom ufności, dla projektowanego obiektu w klasie A przyjęto $m = 1,28$.

Na podstawie przedstawionego powyżej podejścia określono charakterystyczną wytrzymałość na ściskanie dla populacji 52 próbek pobranych podczas realizacji kolumny SCC. Uzyskana już po 28 dniach dojrzewania próbek wytrzymałość była wystarczająca i wyniosła $f_{ck,28} = 2,89$ MPa (przy średniej $f_{cm,28} = 3,69$ MPa).

BIĘŻĄCA KONTROLA W TRAKCIE WYKONYWANIA ROBÓT

Poza pobieraniem próbek do badań wytrzymałościowych, podczas realizacji ko-

lumn SCC prowadzono bieżącą kontrolę jakości wykonywanych robót. Dla każdej kolumny rejestrowano parametry pracy wiertnicy i stacji produkcji zaczynu za pomocą zainstalowanej na nich automatycznej aparatury. Najistotniejsze z udokumentowanych danych stanowią powykonawczą metrykę kolumny SCC.

W przypadku posadowienia obiektu ES-15B w projekcie wykonawczym określono wymaganą energię mieszania kolumny SCC. Kontrola tego parametru ma na celu zapewnienie odpowiedniej efektywności wymieszania gruntu i spoiwa, a tym samym zagwarantowanie jej jednorodności i ostatecznie wymaganej wytrzymałości cementogruntu. Jest to wymaganie jeszcze rzadko spotykane w krajowych projektach dotyczących technologii głębokiego mieszania gruntu. Do oceny energii mieszania wykorzystuje się wskaźnik BRN (*Blade Rotation Number*), który określa całkowitą liczbę obrotów belki mieszającej na metr bieżący. W rozpatrywanym przypadku określono minimalne wartości

Rodzaj gruntu	Minimalny zalecany BRN [obr/min]
Piaski	350
Pyły	400
Gliny	430

TAB. 4. | Zalecane wartości wskaźnika BRN [3]

wskaźnika BRN dla występujących w podłożu gruntów na podstawie wytycznych [5] i doświadczeń Keller Polska (tab. 4). Osiągnięta podczas realizacji kolumn energia mieszania spełniała te założenia (rys. 5).

PRÓBNE OBCIĄŻENIA

Najlepszą metodą oceny spełnienia założeń projektowych i jakości wykonania kolumn lub pali są próbne obciążenia statyczne. Jest to najbardziej bezpośredni rodzaj badania, które w wiarygodny sposób określa nośność i sztywność elementów posadowienia pośredniego w rzeczywistych warunkach pracy.

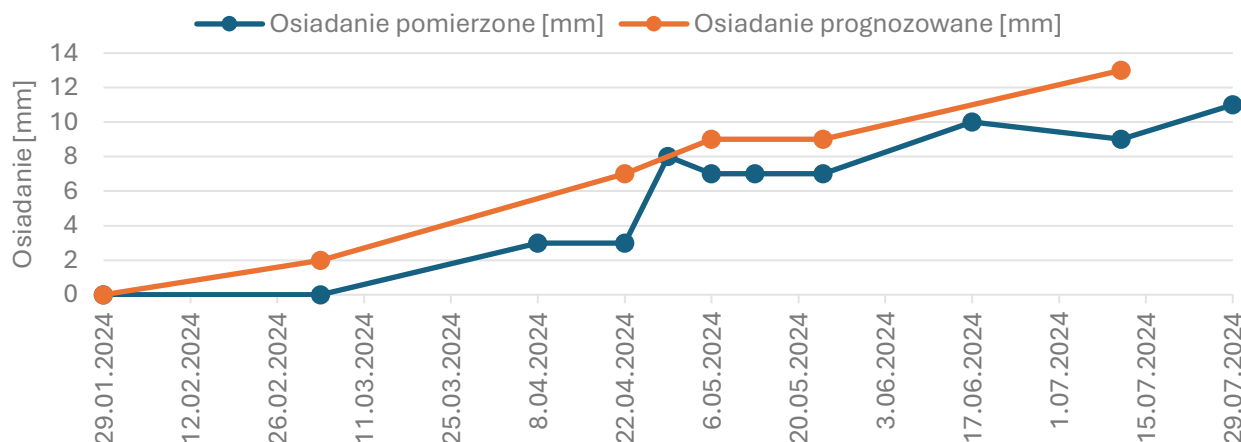
Pod obiektem ES-15B przewidziano wykonanie czterech próbnych obciążeń statycznych. Badania przeprowadzono w dwóch cyklach: I cykl – do siły odpowiadającej 100% obciążenia obliczeniowego (ok. 1500 kN), II cykl – do siły odpowiadającej 150% obciążenia obliczeniowego (ok. 2100 kN) (tab. 5). Wyniki potwierdziły spełnienie założeń projektowych dotyczących nośności i sztywności wykonanych kolumn SCC.

MONITORING GEOTECHNICZNY

W ramach przewidzianego monitoringu geotechnicznego w trakcie prowadzenia robót budowlanych i podczas eksploatacji obiektu prowadzone były pomiary geodezyjne oraz inklinometryczne. Monitoring

Kolumna	Obciążenie w I cyklu [kN]	Przemieszczenie w I cyklu [mm]	Obciążenie w II cyklu [kN]	Przemieszczenie w II cyklu [mm]
A55	1504	6,52	2256	17,85
B52	1592	11,84	2256	32,44
C55	1509	6,90	2264	14,43
D52	1509	13,61	2264	26,49

TAB. 5. | Wyniki próbnych obciążeń statycznych kolumn SCC



RYS. 5. | Wykres osiadania pomierzonego i prognozowanego dla podpory P1

przemieszczeń wykonywany był cyklicznie i obejmował repery zlokalizowane na podporach obiektu ES-15B oraz repery talerzowe w obrębie nasypów na dojazdach. Uzyskane z pomiarów wyniki rzeczywistych przemieszczeń pionowych i poziomych były porównywane na bieżąco z prognozowanymi w obliczeniach numerycznych. Pozwoliło to na weryfikację założeń projektowych i poprawności wykonania robót. Posiadanie tych danych umożliwiło również podejmowanie świadomych decyzji o każdorazowym przejściu do kolejnego etapu realizacji.

Roboty budowlane związane ze wzniesieniem obiektu i nasypów drogowych są obecnie na ukończeniu, a monitoring jest prowadzony zgodnie z założeniami projektu. Dostępne wyniki pomiarów wskazują, że przyrost rzeczywistych przemieszczeń jest zbliżony z prognozowanymi (rys. 8). Świadczy to o poprawności założeń projektowych.

Prowadzenie rozbudowanego monitoringu geotechnicznego jest ważnym elementem rozwiązania Keller Polska, które umożliwiło posadowienie bezpośrednie na gruncie rodzimym wysokich nasypów. Założenia dotyczące etapowania robót ziemnych i konstrukcyjnych oraz zastosowanie przerw technologicznych na konsolidację gruntów spoistych mają sens tylko pod warunkiem kontroli rzeczywistego zachowania podłoża i obiektów budowlanych. Bez monitoringu geotechnicznego nie można mówić o bezpiecznym posadowieniu w trudnych warunkach gruntowych.

PODSUMOWANIE

Przedstawiony obiekt jest przykładem podejścia do projektowania, które zapewnia optymalne rozwiązanie, jednocześnie gwarantując wysoki poziom bezpieczeństwa. Polega ono na rzetelnej, wieloaspektowej kontroli na kolejnych etapach życia projektu. W tym celu wykonywane są w szerszym niż dotychczas zakresie badania, pomiary i analizy obliczeniowe. Mają one miejsce na etapie przygotowania inwestycji, projektowania, realizacji robót oraz podczas eksploatacji obiektu. Dotyczą zarówno wykorzystywanych danych, materiałów budowlanych, jak i gotowych elementów konstrukcji.

W krajowych realiach branży budowlanej wraz z postępem wiedzy inżynierskiej, wzrostem świadomości inwestorów oraz planowanym rozwojem infrastruktury, przedstawiona w omawianym przykładzie ścieżka może stać się standardem dla projektów w wymagających warunkach gruntowych. Kontrola pozwala na świadomą i bezpiecz-

ną optymalizację. Dodatkowo w przypadku ewentualnych nieprawidłowości pozwala na możliwie wcześnie wdrożenie działań naprawczych. |

LITERATURA

- [1] Strona internetowa inwestycji: metro-politalna-zadanie1.pl
- [2] Dokumentacja badań podłoża gruntowego. Budowa Obwodnicy Trójmiejskiej Zadanie 1. Opracowanie: Ingeo
- [3] Projekt wykonawczy. Budowa Obwodnicy Metropolii Trójmiejskiej. Posadowienie pośrednie obiektu ES-15B na sztywnych kolumnach SCC. Opracowanie: Keller Polska
- [4] PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- [5] TOPOLNICKI M. Dobra praktyka stosowania i projektowania wglębnego mieszania gruntu na mokro. XXXII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, 7-10 marca 2017 r., Wisła

Przedstawiony obiekt jest przykładem podejścia do projektowania, które zapewnia optymalne rozwiązanie, jednocześnie gwarantując wysoki poziom bezpieczeństwa

