

# Realizacja tunelu w otwartym wykopie – strona Ku Ujściu, strona Marynarki Polskiej wraz z węzłem drogowym

Budowa tunelu pod Martwą Wisłą w Gdańsku jest inwestycją, w której wyzwania postawione zespołowi inżynierów są wyjątkowe i niespotykane dotąd na budowach realizowanych w Polsce. Celem niniejszego artykułu jest omówienie najważniejszych i najciekawszych zagadnień geotechnicznych i konstrukcyjnych występujących na budowie oraz przedstawienie zastosowanych rozwiązań.

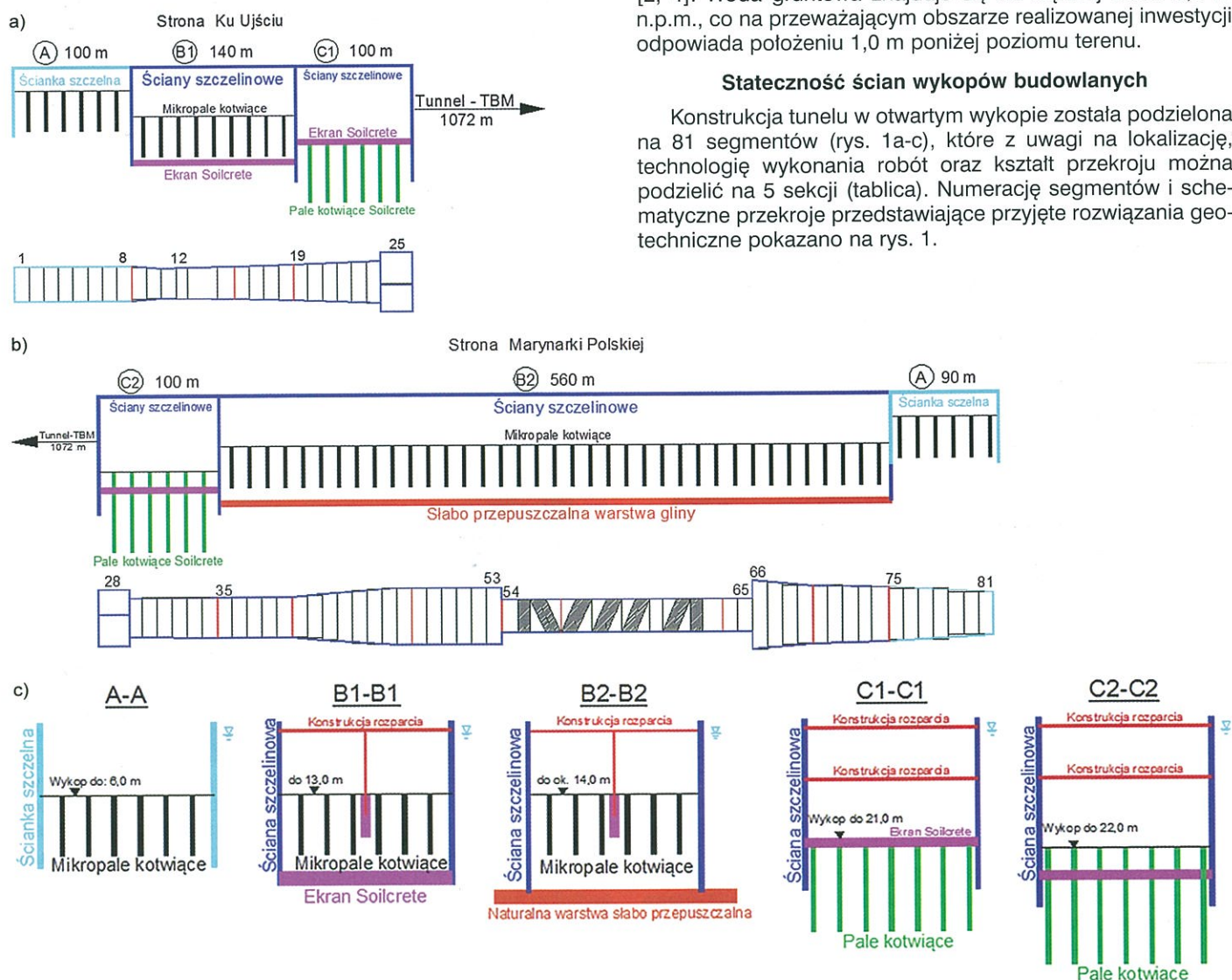
Z punktu widzenia zagadnień geotechnicznych w realizacji tunelu w otwartym wykopie można wyróżnić trzy najważniejsze kwestie, które wymagały zaprojektowania i zrealizowania. Dotyczą one:

- a) stateczności ścian wykopów budowlanych;
- b) zabezpieczenia wykopów przed napływem wody gruntuwej oraz zapewnienia stateczności dna;
- c) posadowienia płyt fundamentowych tunelu.

Warunki geotechniczne na terenie realizowanej inwestycji są skomplikowane, jednak bardzo dobrze rozpoznane i szczegółowo udokumentowane [2÷4, 7]. Należy podkreślić, że podłoże gruntuwe w strefie realizowanych wykopów jest zbudowane głównie z piasków przewarstwionych miękkoplastycznymi namułami oraz torfami. Na głębokości od około -23,0 m n.p.m. zalega warstwa słabo przepuszczalnych glin pylastych [2, 4]. Woda gruntuwa znajduje się na rzędnej około 0,5 m n.p.m., co na przeważającym obszarze realizowanej inwestycji odpowiada położeniu 1,0 m poniżej poziomu terenu.

### Stateczność ścian wykopów budowlanych

Konstrukcja tunelu w otwartym wykopie została podzielona na 81 segmentów (rys. 1a-c), które z uwagi na lokalizację, technologię wykonania robót oraz kształt przekroju można podzielić na 5 sekcji (tablica). Numerację segmentów i schematyczne przekroje przedstawiające przyjęte rozwiązania geotechniczne pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Numeracja segmentów oraz schematy zastosowanych rozwiązań geotechnicznych: a) po stronie Ku Ujściu, b) po stronie Marynarki Polskiej, c) schematyczne przekroje zastosowanych rozwiązań geotechnicznych

Podział na sekcje z uwagi na lokalizację,  
technologię wykonania robót oraz kształt przekroju

Sekcje	Opis sekcji	Długość sekcji [m]	Głębokość wykopu [m p.p.t.]
1	WU – wanna w wykopie otwartym, strona Ku Ujściu (wschodnia), segmenty 1÷12	147,5	0÷8,7
2	TU – tunel w wykopie otwartym, strona Ku Ujściu (wschodnia), segmenty 13÷25	192,5	8,7÷20,2
3	TM – tunel wykonywany w otwartym wykopie, strona Marynarki Polskiej (zachodnia), segmenty 28÷35	112,5	22,0÷13,5
4	WM – wanna wykonywana w otwartym wykopie, strona Marynarki Polskiej (zachodnia), segmenty 36÷53 i 67÷81	175,0	13,5÷0
5	WMP – wanna wykonywana w otwartym wykopie, węzeł Marynarki Polskiej, segmenty 54÷66	459,0	9,2÷10,1

W przypadku pierwszych 8 segmentów projektowanych wanień żelbetowych WU (segmenty nr 1÷8) oraz 7 ostatnich wanień WM (segmenty nr 75÷81) jako tymczasowe zabezpieczenie stateczności ścian wykopów budowlanych zaprojektowano i wykonano stalowe ścianki szczelne. Maksymalna głębokość wykopów w segmentach, gdzie zastosowano takie rozwiązanie, wynosiła 6,0 m po stronie Ku Ujściu oraz 4,30 m po stronie Marynarki Polskiej.

W pozostałych segmentach realizowanych w wykopie otwartym zaprojektowano i zrealizowano ściany szczelinowe grubości 80 – 120 cm z betonu klasy C30/37 (stopień wod szczelności W8). Maksymalna głębokość ścian szczelinowych w komorze startowej i odbiorczej wynosiła 30,5 m.

Zaprojektowano różne sposoby rozparcia ścian szczelinowych:

a. W komorze startowej (segment 25) i odbiorczej (segment 28) zaprojektowano i wykonano rozparcie w 2 poziomach. Na pierwszym poziomie rozparcie stanowi żelbetowy strop tymczasowy z otworami umożliwiającymi montaż i demontaż elementów maszyny TBM. W drugim poziomie rozparcia zastosowano tymczasowe rozpory stalowe, które usunięto po wykonaniu płyty dennej (rys. 2, 3).



Rys. 2. Komora startowa; dwa poziomy rozparcia

b. Żelbetowy strop stanowiący docelową konstrukcję tunelu w wykopie otwartym, tj. w sekcjach TU (segmenty 13÷25) i TM (segmenty 28÷35) wykorzystano jako element rozpierający ściany szczelinowe. W stropie zaprojektowano i wykonano tymczasowe otwory technologiczne umożliwiające realizację wykopu oraz montaż i demontaż maszyny TBM (rys. 4). Jako tymczasowe podparcie stropów, tj. do czasu wykonania ścian konstrukcji wewnętrznej tunelu, zastosowano dwugłęziowe stalowe słupy z dwuteowników o długości całkowitej 24 m.



Rys. 3. Demontaż stalowego rozparcia po wykonaniu płyty fundamentowej w komorze startowej



Rys. 4. Strop rozpierający z otworami technologicznymi oraz podparciem tymczasowym

c. Ściany szczelinowe w sekcjach WU (segmenty 9÷12) i WM (segmenty 36÷53 oraz 67÷74) zaprojektowano i wykonano jako rozpierane rurami stalowymi średnicy głównie 508 i 711 mm. Maksymalna rozpiętość w świetle ścian szczelinowych przekracza 50 m, zatem konieczne było zastosowanie pośrednich elementów wsporczych konstrukcji rozparcia, które wykonano według technologii pali CFA (rys. 5).



Rys. 5. Stalowa konstrukcja rozparcia ścian szczelinowych w sekcjach WU i WM

d. Węzeł drogowy Marynarki Polskiej, tj. skrzyżowanie ulic Marynarki Polskiej, Uczniowskiej i Wielopole, jest elementem projektu, któremu z uwagi na duży zakres występujących tam utrudnień poświęcono wiele czasu na etapie projektowania oraz podczas realizacji robót. Węzeł zaprojektowano w formie ronda ze zjazdami o średnicy około 130 m, na którym ruch samochodowy, pieszy i tramwajowy będzie się odbywać na trzech poziomach. Na rondzie znajduje się siedem obiektów

inżynierskich zlokalizowanych poprzecznie do osi tunelu, które w fazie realizacji robót wykorzystano jako elementy rozpierające ściany szczelinowe, a roboty ziemne prowadzono metodą podstropową. Dodatkowo, w zależności od technologii i kolejności prowadzonych prac, zastosowano również tradycyjne rozpory stalowe montowane pod oraz pomiędzy obiektami inżynierskimi (rys. 6, 7).



Rys. 6. Rozparcie ścian szczelinowych na węźle drogowym Marynarki Polskiej



Rys. 7. Węzeł Marynarki Polskiej; ściany tunelu rozparte konstrukcjami obiektów mostowych

Ściany szczelinowe wykorzystano również w czasie realizacji robót budowlanych do wykonania tymczasowych przegród poprzecznych. Wykonanie 11 poprzecznych przegród technologicznych umożliwiło etapowanie robót oraz prowadzenie odwodnienia w mniejszych sekcjach, co ułatwiło i przyspieszyło prowadzenie prac. Częściowo rozkuta przegroda technologiczna jest widoczna na rys. 6.

Realizacja ścian szczelinowych trwała od maja 2012 r. do kwietnia 2013 r. W czasie największego zaangażowania roboty wykonywano przy użyciu czterech niezależnych zestawów sprzętu i zespołów pracowników.

#### Zabezpieczenie wykopów przed napływem wody gruntowej oraz zapewnienie stateczności dna

W zależności od warunków hydrogeologicznych oraz głębokości wykopów budowlanych zastosowano różne rozwiązania ograniczające napływ wody gruntowej do wykopów.

W segmentach, w których realizowano płytkie wykopy budowlane (segmenty nr 1÷8 i 75÷81), zastosowano stalowe ścianki szczelne zagłębione w słabo przepuszczalną warstwę namułów. Odwodnienie wykopów zrealizowano z wykorzystaniem urządzeń powierzchniowych, płytkich studni pompujących wodę z namułów oraz studni ograniczających ciśnienie napiętego zwierciadła wody gruntowej znajdującej się pod namułami.

Na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [2] oraz wykonanych dodatkowych wierceń [4] określono strefę występowania ciągłej warstwy słabo przepuszczalnych glin pylastych (VIa i VIb według [2, 4]). W tej strefie, zlokalizowanej po stronie ul. Marynarki Polskiej, ściany szczelinowe zostały przedłużone w taki sposób, aby ich zagłębienie w warstwę glin wynosiło co najmniej 1,5 m. W celu potwierdzenia ciągłości warstwy glin oraz kontroli poprawności przyjętego rozwiązania z dna każdej wykopanej sekcji pobrano próbki gruntu do sprawdzenia jego rodzaju.

W strefach, w których warstwa glin słabo przepuszczalnych była nieciągła lub występowała na głębokości niezapewniającej stateczności dna wykopu, wykonano poziomy ekran przeciwniefiltracyjny w technologii Soilcrete. W zależności od warunków hydrogeologicznych oraz głębokości wykopu budowlanego zaprojektowano ekran grawitacyjny lub kotwiony.

Wykonanie ekranów przeciwniefiltracyjnych poprzedzono niżej omówionymi badaniami terenowymi.

- **Badanie zasięgu iniekcji Soilcrete oraz ustalenie parametrów produkcyjnych.** Wykonanie ekranu przeciwniefiltracyjnego polega na uformowaniu w gruncie kolumn z cementogruntu, zachodzących na siebie w taki sposób, że tworzą one ciągłą płytę na wymaganej głębokości. Ustalenie średnicy kolumn oraz parametrów produkcyjnych (ciśnienie iniektu, średnica i liczba dysz iniekcyjnych, prędkość obrotowa i prędkość podciągania żerdzi wiertniczej) jest niezwykle istotnym i koniecznym elementem każdej realizacji z zastosowaniem technologii Soilcrete. W celu potwierdzenia pomiarów realizowanych pod powierzchnią terenu za pomocą specjalnie do tego testu przygotowanych tyczek pomiarowych na budowie wykonywano również terenowe odkrytki próbných kolumn Soilcrete (rys. 8).



Rys. 8. Odkrywka próbnej kolumny Soilcrete

- **Badanie wytrzymałości na ściskanie oraz współczynnika filtracji cementogruntu.** W przypadku ekranów grawitacyjnych, tj. gdy stateczność ekranu na wypór jest zapewniona przez ciężar własny ekranu oraz ciężar gruntu nad ekranem, wymagana wytrzymałość cementogruntu na ściskanie wynosiła 0,5 MPa. W ekranach kotwionych wytrzymałość cementogruntu na ściskanie ma istotne znaczenie z uwagi na wymagania dotyczące współpracy elementu kotwiącego z cementogruntem. Ponadto w komorze startowej (segment 25) uwzględniono ekran przeciwniefiltracyjny grubości 3,5 m w obliczeniach statycznych ścian szczelinowych. Wymagana wytrzymałość cementogruntu ekranu kotwionego wynosiła 5 MPa.

Na podstawie prób terenowych dobrano rodzaj cementu (zastosowano CEM II/B-V 32,5 HSR) oraz parametry produkcyjne (ilość pompowanego zaczynu cementowego i jego gęstość) w sposób zapewniający osiągnięcie wymaganej wytrzymałości.

W badaniach laboratoryjnych uzyskano wartości współczynnika filtracji stwardniałego cementogruntu wynoszące około  $10^{-8}$  m/s.

• **Sprawdzenie przyczepności pomiędzy stalowym elementem kotwiącym a cementogruntem.** Ponieważ wartość granicznej przyczepności pomiędzy żerdzią kotwiącą a cementogruntem jest wartością, którą w sposób precyzyjny w danych warunkach gruntowych można określić tylko na podstawie próbnych obciążeń, przed przystąpieniem do projektowania wykonano terenowe badania z zastosowaniem różnych rodzajów żerdzi kotwiących. Wyniki testów terenowych przyjęto do obliczeń, co pozwoliło na zaprojektowanie optymalnego rozstawu kolumn i pali kotwiących Soilcrete.

Po stronie Ku Ujściu wykonano ekran grawitacyjny w segmentach 9÷18 na powierzchni około 2500 m<sup>2</sup>, ekran kotwiony w segmentach 19÷25 na powierzchni około 3900 m<sup>2</sup>. Po stronie Marynarki Polskiej ekran kotwiony zaprojektowano w segmentach 28÷34, tj. na powierzchni około 3700 m<sup>2</sup>. Do realizacji przyjęto kolumny Soilcrete średnicy od 2,9 do 3,6 m.

Jako elementy kotwiące zastosowano stalowe żerdzie gwintowane, które wprowadzano w świeżo wykonane pale kotwiące średnicy 1,0 m, wykonywane w tym samym cyklu technologicznym co kolumny ekranu przeciwnofiltracyjnego. Ciekawym rozwiązaniem było zastosowanie specjalnego systemu, umożliwiającego wprowadzenie stalowej żerdzi na głębokość kilkunastu metrów (np. w segmencie 25 wynosiła ona 19 m) poniżej poziomu terenu i wypięcie jej w taki sposób, aby powyżej nie pozostał żaden element utrudniający wykonanie wykopów.

Docelowo elementy kotwiące ekran przeciwnofiltracyjny stanowią również zakotwienie płyty fundamentowej tunelu (rys. 9).

Praktyka inżynierska oraz wytyczne dotyczące wykonania zabezpieczeń wykopów przed napływem wody gruntowej określają, że prawidłowo wykonane zabezpieczenie jest szczelne, jeśli napływ wody do wykopu wynosi poniżej 3÷5 l/s na 1000 m<sup>2</sup> powierzchni zwilżonej (tj. mającej kontakt z wodą gruntową). Na podstawie próbnego pompowania wykonanego po stronie Ku Ujściu określono szczelność systemu (tj. ilość wody resztkowej filtrującej do wykopu przez ekran przeciwnofiltracyjny Soilcrete i ściany szczelinowe) na poziomie 0,3 l/s na 1000 m<sup>2</sup>.

Roboty iniekcyjne związane z wykonaniem ekranu przeciwnofiltracyjnego prowadzono w okresie od marca 2012 do kwietnia 2013 r. trzema niezależnymi zestawami sprzętu.

### Posadowienie płyt fundamentowych tunelu

W segmentach, w których zaprojektowano kotwiony ekran przeciwnofiltracyjny Soilcrete, stalowe elementy zakotwienia ekranu stanowią jednocześnie elementy kotwienia płyty fundamentowej (por. rys. 9). W pozostałych segmentach posadowienie płyt fundamentowych tunelu w otwartym wykopie zaprojektowano



Rys. 9. Elementy zakotwienia ekranu przeciwnofiltracyjnego i płyty fundamentowej

wano na mikropalach wykonanych według dwóch technologii, w zależności od obciążeń i głębokości wykopu.

W wykopach płytkich, tj. w obszarach, w których wypór wody jest równoważony ciężarem płyty fundamentowej, mikropale zaprojektowano jako elementy wciskane, redukujące osiadanie płyty. Takie rozwiązanie zastosowano w segmentach 1÷4 oraz 76÷81, gdzie mikropale betonowe średnicy 30 cm wykonano jako przemieszczeniowe (rys. 10).



Rys. 10. Mikropale betonowe pod płytą fundamentową tunelu

Mikropale betonowe średnicy 30 cm zastosowano również jako elementy wzmocnienia podłoża gruntowego pod nasyp drogowy ronda na węźle Marynarki Polskiej. Łącznie pod rondem wykonano 1765 elementów wzmocnienia podłoża.

W segmentach 35÷73 oraz 5÷18 wykonano samowierzące, stalowe mikropale systemowe średnicy 30 cm. W zależności od przyjętego schematu obliczeniowego, mikropale te mogą być obciążone siłą wciskającą lub wyciągającą. Mikropale wykonywano z poziomu dna wykopu fundamentowego pomiędzy stalowymi rozparciami lub pod stropem żelbetowym stanowiącym rozparcie ścian szczelinowych (rys. 11, 12).



Rys. 11. Realizacja mikropali na węźle drogowym Marynarki Polskiej



Rys. 12. Mikropale w segmencie 13

## Kontrola jakości robót geotechnicznych

W ramach kontroli jakości robót wykonano pola badawcze przed rozpoczęciem prac projektowych oraz budowlanych, prowadzono badania w trakcie realizacji robót oraz obserwację zrealizowanych prac.

Na polach badawczych, wykonywanych przed rozpoczęciem projektowania, wykonano:

- a) badania zasięgu iniekcji Soilcrete, wraz z ustaleniem parametrów produkcyjnych,
- b) sprawdzenie przyczepności elementu kotwiącego do cementogruntu (próbne obciążenia),
- c) badania cementogruntu na ściskanie,
- d) sprawdzenie współczynnika filtracji.

W ramach kontroli jakości robót w trakcie realizacji wykonywano:

- a) pomiary inklinometryczne wszystkich kolumn Soilcrete realizowanych w ramach ekranu przeciwnieprzepuszczalnego,
- b) weryfikację wytycznych geodezyjnych za pomocą dodatkowego lokalnego systemu GPS,
- c) bieżące badania zastosowanych materiałów (cement, beton, bentonit),
- d) ciągłą kontrolę parametrów produkcyjnych – komputerowa rejestracja parametrów produkcyjnych.

Kontrola po wykonaniu robót obejmowała:

- a) geodezyjny pomiar przemieszczeń ścian szczelinowych (geodezja precyzyjna),
- b) inklinometryczny pomiar odkształceń ścian szczelinowych,
- c) geodezyjny pomiar przemieszczeń ekranu przeciwnieprzepuszczalnego realizowany w trakcie głębienia wykopów,
- d) pomiar rzeczywistych naprężeń oraz temperatury w elementach rozparcia stalowego,
- e) geodezyjny precyzyjny monitoring żelbetowych stropów stanowiących rozparcie ścian szczelinowych,
- f) pomiar zwierciadła wody gruntowej wewnątrz oraz na zewnątrz wykopów,
- g) próbne obciążenia mikropali kotwiących.

## Realizacja konstrukcji żelbetowych

Na całości zadania wykonuje się różnorodne konstrukcje żelbetowe. Na placu budowy o bardzo ograniczonej powierzchni najtrudniejszym zagadnieniem jest zapewnienie ciągłości produkcji, dostaw i zorganizowanie robót budowlanych w ten sposób, aby każda firma mogła dojechać na miejsce i prawidłowo wykonać swój zakres prac. Pracując w mieście, w sąsiedztwie istniejących zabudowań oraz przy różnorodnym uzbrojeniu terenu napotyka się na wiele kolizji i różnych niespodzianek. Rozwiązuje się dużo problemów logistycznych i stosuje wiele rozwiązań technicznych, których celem podstawowym było i jest wbudowanie 65 000 m<sup>3</sup> mieszanki betonowej w konstrukcje wanień żelbetowych i tuneli w wykopie otwartym.

Projekt zakładał wykonywanie głębokiego wykopu w ścianach szczelinowych bez odwadniania, zabetonowanie podwodnego korka betonowego, odpompowanie wody z wykopu i przystąpienie do realizacji konstrukcji żelbetowych. Postanowiono w tej sytuacji poświęcić więcej czasu na przygotowanie zabezpieczenia wykopów, co w rezultacie pozwalało prowadzić roboty zbrojarsko-ciesielskie na segmentach bezpiecznych i suchych. Wykonując ściany szczelinowe, ekrany uszczelniające i wykorzystując istniejące warstwy nieprzepuszczalne gruntu, wykonano zamknięte i zabezpieczone przed napływem wody obszary, w których wywiercono system studni. Zbudowano rurociągi zrzutowe wody gruntowej i rozpoczęto pompowanie. Po osuszeniu obszaru do odpowiedniej rzędnej można było rozpocząć wykopy i roboty żelbetowe.

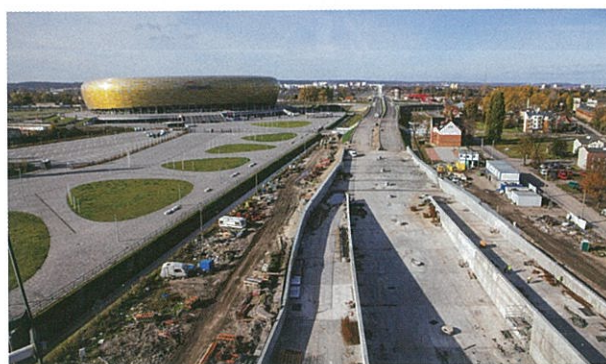
Ze względu na sposób prowadzenia robót konstrukcyjnych można pogrupować występujące zadanie na następujące konstrukcje:

1) wanny żelbetowe wykonywane w wykopie otwartym bez zabezpieczenia wykopu;

2) wanny żelbetowe wykonywane w otwartym wykopie, którego zabezpieczenie stanowią stalowe ściany szczelne;

3) wanny żelbetowe i tunel wykonywane w otwartym wykopie, którego zabezpieczenie stanowią ściany szczelinowe.

Najciekawsze konstrukcje są realizowane w głębokich wykopach zabezpieczonych ścianami szczelinowymi. Poszczególne elementy konstrukcji są wykonywane z betonu klasy C35/45. Sekcje łączą się ze sobą przez zastosowanie styku „pióro-wpust” w czołach sekcji konstrukcji, a uszczelnienie styków oraz przerw dylatacyjnych pomiędzy segmentami zapewniają systemowe dylatacje gumowe. Największymi elementami są płyty denne wysokości od 0,80 do 2,10 m, długości od 9,80 do 25,00 m oraz szerokości od 8,20 do 40,50 m (rys. 13).



Rys. 13. Wanny wjazdowe od ul. Słowackiego; zmieniające się wymiary płyt dennych

W płytach fundamentowych układa się podczas jednego betonowania od 450 do 1100 m<sup>3</sup> mieszanki betonowej, co przy grubości płyty od 0,8 do 2,1 m sprawia, że ma się do czynienia z elementem masywnym. Ponadto mieszanka betonowa jest wykonywana na bazie cementu CEM I 42,5N HSR-NA, który charakteryzuje się dużym ciepłem hydratacji. W celu zmniejszenia dynamiki wydzielania ciepła hydratacji cementu oraz w celu zapewnienia właściwego zawibrowania ułożonych warstw mieszanki betonowej (wydłużenie czasu wiązania cementu) stosuje się m.in. domieszki opóźniające wiązanie. Poziom ich dozowanie jest ustalany w zależności od prognozowanych warunków atmosferycznych przy betonowaniu. Ostatnia, górna warstwa mieszanki betonowej zawiera zredukowaną ilość domieszek względem warstw wcześniej wbudowanych. Podczas betonowania elementów zachowuje się szczególną staranność w kontroli temperatur mieszanki betonowej dostarczonej na plac budowy. Prowadzi się pomiary temperatur wewnątrz płyt fundamentowych, przyjmując odpowiednie zabiegi technologiczne; kontroluje się dojrzewanie betonu płyt w taki sposób, aby nie dochodziło do zbyt dużych gradientów temperatur w przekroju masywu betonowego. Zakłada się wykonanie wanny szczelnej tak, aby nadmierne różnice temperatur nie spowodowały destrukcji betonu oraz powstania rys.

## Wanny żelbetowe na dojazdach do tunelu

Wykop wykonuje się do pierwszego poziomu rozparcia (zejście na rzędną około -3 m n.p.m.). Po założeniu belek stalowych i rozpór rurowych między ścianami szczelinowymi przystępuje się do wykonywania wykopu do poziomu platformy roboczej do wykonania pali kotwiących płytę denną. Wprowadza się sprzęt i wykonuje mikropale pod rozparciami z elementów stalowych. Po uzyskaniu przez beton pali kotwiących odpowiedniej wytrzymałości wykonuje się ostatni etap wykopu do rzędnej spodu warstwy betonu podkładowego. Prace te prowadzi się małymi koparkami, manewrując między wystającymi stalowymi żerdziami. Po wykonaniu betonu podkładowe-

go prowadzi się roboty związane z wykuciem bruzd kotwiących płytę w ścianach szczelinowych, przygotowaniem zakotwienia płyty (montaż blach kotwiących) i rozpoczyna się roboty zbrojarskie. Następnie montuje się gumy dylatacyjne i uszczelniające między elementami konstrukcji oraz taśmy pęczniące w bruzdach kotwiących płytę fundamentową ze ścianą szczelinową. W końcowej fazie zbrojenia płyty jest montowana guma doszczelniająca styk roboczy na połączeniu płyty fundamentowej ze ścianą wanny (rys. 14).



Rys. 14. Zbrojenie płyty fundamentowej; połączenie z Trasą Sucharskiego od strony mostu podwieszonoego

Wysokość ścian w tych segmentach zmienia się od 1,0 do 7,5 m. Ściany zewnętrzne są betonowane z wykorzystaniem deskowania jednostronnego (od strony gruntu znajdują się ściany szczelinowe). Dąży się do ograniczenia ilości styków w konstrukcji żelbetowej, które są potencjalnymi miejscami przecieków. Wykonując ściany w płytkich segmentach, stalowe rozparcie ścian szczelinowych można demontować po zabetonowaniu płyt fundamentowych i uzyskaniu odpowiedniej wytrzymałości betonu. Istnieje wówczas gwarancja minimalnych odkształceń ścian szczelinowych obudowy wykopu, które pracują wspornikowo przy dużym naporze gruntu i wody oraz dodatkowym obciążeniu wynikającym ze składowania materiałów, jak również pracy sprzętu w bardzo bliskiej odległości od wykopu. W przypadku ścian wysokich stosuje się etapowe betonowanie ścian, obejmujące fazę I – betonowanie do poziomu pod rozporami z elementów stalowych i fazę II – dokończenie betonowania ściany z ocepem po demontażu rozpór z elementów stalowych (zdejmuje się rozparcie po uzyskaniu przez beton w poprzedniej fazie odpowiedniej wytrzymałości, unikając wprowadzania dodatkowych obciążeń „świeżej” konstrukcji). Odpowiednie zaplanowanie robót pozwala na wykorzystanie tego samego kompletu rozparć w kilku segmentach i płynne przechodzenie z realizacją konstrukcji żelbetowej od płyty fundamentowej, przez wykonanie fazy I ścian i zakończenie robót żelbetowych na segmencie wykonaniem fazy II ścian z ocepami (rys. 15).



Rys. 15. Zabetonowana płyta fundamentowa i faza I ściany zewnętrznej

Na powyższych odcinkach konstrukcje żelbetowe wykonuje się w następującej kolejności:

- 1) płyta fundamentowa – całe ściany zewnętrzne z gzymsami (przy niskich segmentach do 5 m wysokości ściany);
- 2) płyta fundamentowa – I etap ścian zewnętrznych – II etap ścian zewnętrznych wraz z gzymsami.

#### **Wanny żelbetowe na dojazdach do tunelu, z wjazdami i wyjazdami z ronda WMP**

Inna kolejność wykonywania konstrukcji żelbetowych występuje na segmentach z wannami wjazdowymi na rondo. Poziomą płyt wjazdową, które są po obu stronach ciągu głównego Trasy Słowackiego, podnosi się, aby umożliwić wjazd i wyjazd z ronda do tunelu i z tunelu na rondo (rys. 16).



Rys. 16. Wjazdy i wyjazdy z tunelu na rondo

Odpowiednio roboty dzieli się na etapy i w zależności od potrzeb komunikacyjnych wykonuje się elementy żelbetowe w trzech kombinacjach:

- 1) płyta fundamentowa ciągu głównego – ściany wewnętrzne – płyty wjazdowe – ściany zewnętrzne;
- 2) płyty wjazdowe – ściany zewnętrzne – płyta fundamentowa ciągu głównego – ściany wewnętrzne;
- 3) płyta fundamentowa ciągu głównego – płyty wjazdowe – ściany wewnętrzne i ściany zewnętrzne.

Jest to uwarunkowane położeniem ściany szczelinowej: czy jest ona na zewnątrz wykopu, czy też zamyka wykop na szerokości ciągu głównego, przy czym płyty wjazdowe znajdują się na zewnątrz ścian szczelinowych, oraz przyjętym systemem rozparcia ścian szczelinowych na czas wykonywania wykopów. Podstawowym zagadnieniem w tej części realizacji jest odpowiednie fazowanie wykonywania konstrukcji i takie przygotowanie połączeń, żeby betonować w całości jedną konstrukcję monolityczną.

#### **Wanny żelbetowe z obiektami na rondzie WMP**

W okolicy skrzyżowania ul. Marynarki Polskiej z ulicą Uczniowską i Wielopole wykonuje się trzypoziomowy układ komunikacyjny. Prace są prowadzone przy utrzymaniu ruchu na bardzo istotnym w mieście ciągu komunikacyjnym (dojazd do portu). Trasa Słowackiego będzie przebiegała pod ul. Marynarki Polskiej (pierwszy poziom). Ciągi pieszo-rowerowe ul. Marynarki Polskiej zostaną wprowadzone w tunele, które bezkolizyjnie poprowadzą ruch nad Trasą Słowackiego, pod wjazdami i wyjazdami z ronda do tunelu (drugi poziom). Ruch kołowy, tramwajowy i istniejące sieci (ciepłociąg, gazociąg, wodociąg, kanalizacje tłoczne, sanitarne, elektryczne i teletechniczne) zostaną przeprowadzone wiadukami technologicznymi nad Trasą Słowackiego. Realizacja tego etapu budowy wymaga skoordynowania robót wszystkich branż i maksymalnej mobilizacji przy realizacji konstrukcji żelbetowych, aby ograniczyć utrudnienia gestorom sieci i komunikacyjne. Po

wykonaniu ścian szczelinowych rozpoczyna się realizację ustrojów nośnych obiektów. Przeprojektowano przy tym konstrukcję ustrojów, opierając je w układzie tymczasowym na ścianach szczelinowych obudowy wykopu i zastępując filar baretą (rys. 17).



Rys. 17. Wiadukt tramwajowy z ułożoną nawierzchnią torową oparty na ścianach szczelinowych i baretach

Takie rozwiązanie umożliwia przekładanie istniejących sieci zaraz po wykonaniu konstrukcji płyty ustroju oraz na szybsze wyposażanie obiektów drogowych i tramwajowego. Przekłada się to na szybsze dopuszczenie ruchu drogowego, tramwajowego i pieszego w tunelach. Następnie rozpoczyna się wykonanie wykopów w ciągu Trasy Słowackiego i realizację konstrukcji płyt dennych oraz ścian zewnętrznych wanien (rys. 18).



Rys. 18. Wiadukt drogowy – zbrojenie płyty fundamentowej

W konstrukcjach ustrojów są zostawiane otwory technologiczne, umożliwiające betonowanie ścian zewnętrznych pod płytą i spinanie całości w dwuprzęsłowe ramy żelbetowe. W zakresie obiektów ronda etapuje się realizowanie konstrukcji, w której skład wchodzi:

- 1) płyta ustroju nośnego nad Trasą Słowackiego – płyta fundamentowa ciągu głównego Trasy Słowackiego – ściany zewnętrzne wanien pod płytą ustroju;
- 2) konstrukcja tunelu dla pieszych nad Trasą Słowackiego – konstrukcja tunelu dla pieszych pod dojazdami do ronda z trasy (poza ścianami szczelinowymi obudowy wykopu ciągu głównego) – płyta denna ciągu głównego – ściany zewnętrzne wanien pod tunelem.

Podczas realizacji niektórych obiektów ustrój nośny stanowi zarazem element rozparcia ścian szczelinowych. W obiektach, pod którymi trzeba zastosować dodatkowe rozparcia stalowe ścian szczelinowych, betonowanie ścian zewnętrznych jest dzielone na dwa etapy.

## Tunel wykonywany w wykopie otwartym

W przyszłości podczas jazdy Trasą Słowackiego, przed wjazdem do tunelu drążonego TBM, konieczne będzie pokonanie odcinków po 150 m w tunelach realizowanych w otwartych wykopach. Po stronie Ku Ujściu są to segmenty 13÷24, a po stronie Marynarki Polskiej 29÷35. Obecnie segmenty 19÷24 stanowią szyb startowy maszyny TBM. Realizacja tego zakresu była kluczowa do rozpoczęcia drążenia. Zdecydowano się na realizację segmentów, wykorzystując metodę podstropową. Taka metoda została analogicznie przyjęta we wszystkich odcinkach tunelowych. Roboty konstrukcyjne rozpoczynają od wykonania wykopu między ścianami szczelinowymi do poziomu spodu stropu tunelu i przygotowania podłoża pod docelowy strop żelbetowy (rys. 21). Wykonuje się beton podkładowy profilujący spadki stropu tunelu i układa na nim płyty stanowiące deskowanie. Rozkuwane są bruzdy w ścianach szczelinowych, kotwiące strop w konstrukcji ściany (stropy żelbetowe stanowią również rozparcie ścian szczelinowych podczas prowadzenia wykopów do rzędnej posadowienia płyty dennej). Następnie wykonuje się zbrojenie, deskowanie stropu i zakłada elementy systemów uszczelniających na dylatacjach sekcji i betonowanie (rys. 19).



Rys. 19. Zbrojenie stropu w segmencie 30

W stropach pozostawia się dodatkowe otwory w osiach przyszłych ścian, które umożliwiają prawidłowe zabetonowanie ścian wewnętrznych i zewnętrznych tunelu (rys. 20).



Rys. 20. Widok z szybu wyjściowego w segmencie 28 na zabetonowane stropy segmentów 29÷35

Po uzyskaniu przez beton odpowiedniej wytrzymałości są rozpoczynane wykopy metodą podstropową. Na stronie Ku Ujściu (w szybie startowym) wybierano urobek górą, przez pozostawione otwory technologiczne umożliwiające w późniejszym etapie montaż maszyny drążącej wewnątrz szybu. Na

stronie Marynarki Polskiej zaawansowanie robót żelbetowych na pozostałych wannach umożliwiło wprowadzenie koparek od czoła i wywożenie urobku bezpośrednio spod stropu. Przekopano się na całej powierzchni wykopu do szybu odbiorczego (segment 28), schodząc na rzędną góry płyty fundamentowej (rys. 21).



Rys. 21. Wykop podstropowy

Wycofywanie następuje przy pracy małymi koparkami (kopanie między żerdziami do rzędnej spodu betonu podkładowego pod płyty fundamentowe) w kierunku ronda, otwierając fronty robót na kolejnych segmentach. Zwiększa to zdecydowanie tempo prowadzenia robót i otwiera możliwość realiza-

cji płyt dennych. W niektórych stropach pozostawiono dodatkowe otwory technologiczne, które umożliwiają dostarczanie materiałów do realizacji płyt fundamentowych i ścian. Zostaną one uzupełnione betonem po zakończeniu robót żelbetowych w tunelach.

Realizację żelbetowych konstrukcji wianien i tuneli wykonywanych w otwartym wykopie planuje się zakończyć w kwietniu 2014 r.

#### PIŚMIENNICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Projekt wykonawczy: „Połączenie Portu Lotniczego z Portem Morskim Gdańsk – Trasa Słowackiego”. Zadanie IV. Odcinek Węzeł Marynarki Polskiej – Węzeł Ku Ujściu. Europrojekt Gdańsk Sp. z o.o. /SSF Inżynierie GmbH. Gdańsk, styczeń 2011.
- [2] Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla ustalenia geotechnicznych warunków posadowienia projektowanego tunelu pod Martwą Wisłą w ciągu Trasy Słowackiego w Gdańsku. Geoprojekt Szczecin Sp. z o.o. Szczecin, październik 2010.
- [3] Sprawozdanie z badań geotechnicznych wykonanych na terenie budowy zlokalizowanej przy ulicy Kujawskiej i Marynarki Polskiej w Gdańsku. Geoteko. Warszawa, maj 2012.
- [4] Raport z badań geotechnicznych dla uściślenia przebiegu warstwy „V1b” w rejonie projektowanych ścian szczylinowych na odcinku od węzła Marynarki Polskiej do Martwej Wisły. Trasa Słowackiego w Gdańsku – Zadanie IV. Geoprojekt – Poznań, marzec 2012 r.
- [5] Koncepcja technologiczno-wykonawcza zabezpieczenia otwartych wykopów fundamentowych dla budowy tunelu pod Martwą Wisłą oraz węzła Marynarki Polskiej. Rew. 2, Keller Polska, marzec 2012.
- [6] Projekty technologiczno-wykonawcze tunelu pod Martwą Wisłą oraz węzła Marynarki Polskiej. Segmenty 1-81. Keller Polska Sp. z o.o.
- [7] Topolnicki M., Buca R.: Parametry eksploatacyjne i konstrukcyjne wybranego tunelu drogowego wraz z założoną technologią i bezpieczeństwem realizacji tunelu. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 1/2013.

RECENZJE • RECENZJE • RECENZJE • RECENZJE • RECENZJE • RECENZJE • RECENZJE • RECENZJE • RECENZJE • RECENZJE



CZECH M., SIELAMOWICZ I.: Stany sprężysto-plastyczne i nośność graniczna układów prętowych, zagadnienia teoretyczne z przykładami obliczeń. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2013, stron 297.

Co wyróżnia ten podręcznik spośród dotychczas wydanych książek pokrewnych tematycznie i dotyczących nośności granicznej układów prętowych, mechaniki konstrukcji prętowych, teorii sprężystości i plastyczności oraz wytrzymałości materiałów?

Tą wyróżniającą cechą jest wyeksponowanie tematyki dotyczącej stanów sprężysto-plastycznych. W trzech spośród czterech rozdziałów książki szeroko omówiono stany sprężysto-plastyczne prętów i układów prętowych. Teoria nośności granicznej została omówiona w czwartym rozdziale. Jest to zgodne z tytułem książki, w którym stany sprężysto-plastyczne zostały umiejscowione jako pierwsze i obszernie opracowane. Stany te dotyczą prętów statycznie wyznaczalnych poddanych rozciąganiu, skręcaniu i zginaniu. Autorzy w rozwiązaniach licznych przykładów zadań przyjmują uproszczony wykres naprężenie – odkształcenie jako wykres sprężysto-plastyczny (bez fazy wzmocnienia materiałowego) z odciążeniem. Przy przedstawieniu teorii nośności granicznej i w zadaniach w ramach tego tematu Autorzy posługują się sztywno-plastycznym modelem wykresu naprężenie – odkształcenie. We wszystkich rozdziałach rozpatrzono układy statycznie wyznaczalne i statycznie niewyznaczalne.

Ciekawym zagadnieniem przedstawionym w podręczniku jest obliczanie wielkości przy odciążeniu elementu. W kolejnych rozdziałach przedstawiono schematy układów do obliczania sił w prętach po odciążeniu, obliczono przemieszczenia po odciążeniu, a także odkształcenia i naprężenia. Odciążenie konstrukcji pracującej w fazie sprężysto-plastycznej jest problemem interesującym nie tylko studentów, ale też inżynierów projektantów.

W rozwiązaniach układów statycznie niewyznaczalnych stosowano twierdzenie *Menabre'a*, równania kanoniczne metody sił i sposób *Wereszczagina*. Przy omawianiu tematyki nośności granicznej przedstawiono twierdzenie o granicach dolnego i górnego przedziału nośności. W podręczniku zamieszczono liczne zadania, które są podzielone na dwie grupy; są to przykłady rozwiązań i zadania do samodzielnego rozwiązania.

Podręcznik jest przeznaczony przede wszystkim do kształcenia studentów uczelni technicznych na wydziałach inżynierii lądowej i na wydziałach mechanicznych. Może on być też przydatny do samokształcenia inżynierów.

Dr hab. inż. Aniela Glinicka, prof. PW

Zapraszamy do prenumerowania „Inżynierii i Budownictwa” na rok 2014