

Doświadczenia z realizacji budowy tunelu pod Martwą Wisłą w Gdańsku

Niniejszy referat prezentuje doświadczenia z aplikacji rozwiązań w obszarze technologii betonu zebrane z dotychczasowej realizacji inwestycji pn. „Połączenie Portu Lotniczego z Portem Morskim Gdańsk – Trasa Słowackiego. Zadanie IV. Węzeł Marynarki Polskiej – Węzeł ku Ujściu” w Gdańsku. Zadanie to obejmuje między innymi budowę tunelu o długości 1377,5 m, w tym odcinka wierconego: 1072,5 m. Jest to pierwszy w Polsce przykład drogowej przeprawy podwodnej, realizowanej metodą TBM w bardzo trudnych warunkach geotechnicznych (grunty nawodnione), z wykorzystaniem tarczy o dużej średnicy.

Tunel czynny od kwietnia 2016 r.
Tunel pod Martwą Wisłą w Gdańsku otwarto 25 kwietnia br. Budowa trwała cztery i pół roku i kosztowała około 900 milionów złotych. Tunel łączy dzielnicę Nowy Port z Trasą Sucharskiego.

Lokalizacja

Tunel znajduje się w strefie przybrzeżnej oraz w strefie przemysłowej, stanowiąc połączenie tras Sucharskiego i Słowackiego. Łączy on port gdański z DK7 i jednocześnie zapewnia alternatywny dojazd do dzielnic Gdańska, takich jak Zaspa, Żabianka i Przymorze. Podlega on wpływom wód gruntowych zawierających, szczególnie w części od strony Marynarki Polskiej, znaczne zanieczyszczenia substancjami agresywnymi pozostałymi w gruntach po okresie intensywnej działalności przemysłowej. Nadto występują tu oddziaływania wód z Zatoki Gdańskiej. W konsekwencji położenia oraz standardowych wymagań dla obiektów inżynierskich dokonano specyfikacji środowiska, w którym ma pracować konstrukcja. Dla betonów przylegających do ciągu głównego przyjęto klasy ekspozycji XC4, XS3, XD3, XF4, XA3. W części zamkniętej, zgodnie z przepisami, konstrukcja musi spełniać wymagania odporności pożarowej R240. Nadto, zgodnie z obowiązującym rozporządzeniem, betony muszą spełniać określone wymagania trwałościowe w zakresie nasiąkliwości, wodoszczelności oraz mrozoodporności. Dodając do ww. wymagania wynikające ze sposobu betonowania, geometrii elementów i stopnia zbrojenia, stosowane mieszanki muszą charakteryzować się mnogością cech technicznych.

Fot. 1. Betonowanie sekcji ściany szczelinowej



Ściany szczelinowe

W ramach zadania, w obrębie części tunelu realizowanych w wykopie, w pierwszej kolejności przystąpiono do wykonania ścian szczelinowych, w celu wydzielenia przestrzeni tunelu z gruntu rodzimego i odcięcia napływu wód gruntowych. Poza względami statycznymi, o głębokości ścian zdecydowało położenie warstw gruntów nieprzepuszczalnych. W konsekwencji rzędna posadowienia ścian dochodziła do blisko 32 m p.p.t. Wydzielenie dna stanowiła naturalna warstwa gruntów spoiwistych, a od strony ul. Marynarki Polskiej warstwa doszczelniona, kolumnami jet-grouting.

W specyfikacjach kontraktu przewidziano wykonanie konstrukcji szczelinowych z betonu C30/37 o stopniu wodoszczelności W8 wg PN-B-06250:1988. Zależnie od umiejscowienia ściany charakteryzowały się zmienną grubością: 80, 100 oraz 120 cm, realizowane były sekcjami o długości od 5 do 6 m (rozstaw osiowy przegród rozdzielających). Zbrojenie sekcji stanowiły kosze zbrojeniowe składające się z podwójnej siatki od strony gruntu oraz 3 siatek zbrojeniowych od strony wykopu. Wymiary średnic prętów zbrojeniowych wynosiły 25 oraz 32 mm. Sekcje ścian szczelinowych w obrębie szybów startowych, znajdujące się na trasie maszyny TBM, zostały zbrojone specjalnymi prętami z włókna szklanego, w celu ułatwienia wiercenia przez betonową przegrodę. Całość prac betonarskich prowadzona była w osłonie z zawiesziny bentonitowej.

Gabaryty oraz stopień zbrojenia zaprojektowanych konstrukcji szczelinowych wymogły specjalne podejście przy opracowaniu składu mieszanki betonowej, uwzględniające jej szczególne właściwości reologiczne. W procesie doboru składników oraz na etapie badań wstępnych należało cały czas brać pod uwagę wysokie ryzyko rozmycia mieszanki przez wody gruntowe lub zmieszanie z cieczą stabilizującą szczelinę. Kluczowe zatem stały się kwestie długiego utrzymania konsystencji, przy jednoczesnym zachowaniu spoiwości mieszanki.

Z uwagi na odległości między prętami zbrojenia górny nominalny wymiar kruszywa grubego został określony na 16 mm. W tym charakterze zastosowano, idealne do mieszanek o znacznym stopniu ciekkości, kruszywa żwirowe wydobywane z dna morskiego, cechujące się niemalże idealnie kulistym kształtem ziarn. Skład przedmiotowych żwirów w ponad 90% stanowią bardzo dobrze obtoczone okrzuchy skał krystalicznych, dzięki czemu kruszywa te charakteryzuje niska nasiąkliwość wagowa – 0,3%, co odróżnia je od żwirów pozyskiwanych w kopalniach śródlądowych. Dodatkowo walor stanowi brak zanieczyszczeń pylistych. Jako kruszywa drobnego użyto lokalnego piasku płukanego 0/2 mm, o zbalansowanym, stabilnym składzie ziarnowym.

W rezultacie wielu testów laboratoryjnych do przedmiotowego zastosowania wskazana została

Składnik	Ilość, kg/m ³
piasek 0/2 mm	712
żwir 2/8 mm	353
żwir 8/16 mm	688
CEM II/B-V 42,5N	350
popiół lotny	50
woda	175
MasterGlenium SKY 686	2,28
MasterSet R 433	0,70

Tabela 1. Skład betonu C30/37 W8 do wykonywania ścian szczelinowych

mieszanka zawierająca cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V 42,5N z cementowni Kujawy, dodatek popiołu lotnego oraz kombinację superplastyfikatora na bazie eterów polikarboksylowych MasterGlenium SKY 686 i domieszki opóźniającej wiązanie MasterSet R 433.

Aplikacja mieszanki betonowej wytwarzanej wg optymalnej receptury gwarantowała konsystencję przy stanowisku betonowania na poziomie min. 600 mm, badanej metodą rozptywu oraz wartości opadu stożka dla klasy S3 po 4 godzinach od produkcji betonu. Spełnione tym samym zostały wymagania PN-EN 1538:2010 dotyczące utrzymania urabialności przy długich betonowaniach ścian szczelinowych. Takie zachowanie mieszanki okazało się szczególnie korzystne i pożądane przy betonowaniach sekcji szybów startowego i końcowego TBM, obejmujących wbudowanie jednorazowo kubatury około 230 m³ betonu, w czasie nierzadko przekraczającym 4 godziny.

Do realizacji ścian szczelinowych po obu stronach Martwej Wisły mieszankę betonową dostarczano z dwóch wytwórni Thomas-Beton Polska oraz dwóch zakładów Górażdzie Beton. Na potrzeby wykonawstwa robót geotechnicznych w zakresie ścian szczelinowych, baret, mikropali oraz pali wierconych dostarczono łącznie kubaturę betonu przekraczającą 65.000 m³.

Wanny dojazdowe do tunelu

Wanny dojazdowe podzielono na 81 segmentów dylatacyjnych o długości od 10 do 12,5 m. Szerokość betonowanych płyt dennych sięgała 32 m, przy grubości dochodzącej do 2,5÷3 m. W przypadku ścian wanien grubość zmieniała się w przdziele od 0,8 do 1,5 m. Wszystkie elementy kon-



Fot. 2. Ściany szczelinowe w obrębie komory startowej TBM

strukcyjne zaprojektowano z betonu klasy C35/45, z zachowaniem wymagań dla przepuszczalności wody (W8), odporności na działanie mrozu (F150) oraz nasiąkliwości, zgodnie z nomenklaturą normy PN-B-06250:1988. Zbrojenie nie odbiegało znacząco od stopnia zbrojenia stosowanego na budowach innych obiektów. W konsekwencji prace w tym zakresie prac betoniarskich odbiegają znacząco od typowych prac w wannach dojazdowych do obiektów inżynierskich lub pod nimi realizowanych poniżej zwierciadła wód gruntowych.

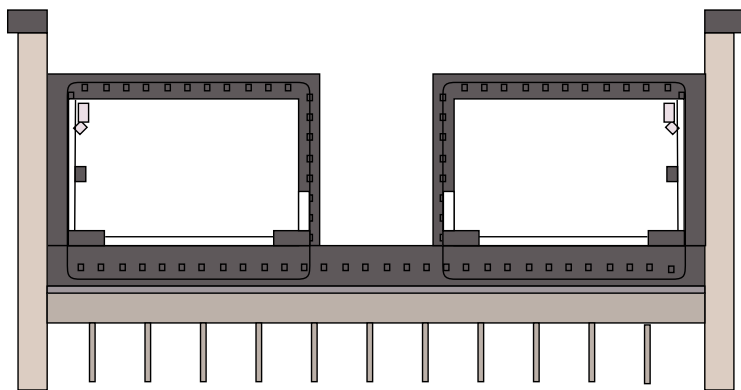
W toku badań kwalifikujących receptury betonu klasy C35/45 W8 F150, przeznaczonego na elementy konstrukcyjne tunelu, wyłoniono konfigurację gwarantującą stabilne, przewidywalne parametry mieszanki betonowej i powtarzalne wyniki dla betonu stwardniałego. Zdecydowano się na użycie cementu CEM I 42,5N SR3/NA z cementowni Kujawy, grysów granitowych Glensanda oraz, podobnie jak w przypadku ścianek szczelinowych, superplastyfikatora na bazie PCE MasterGlenium SKY 686, domieszki napowietrzającej MasterAir

Tabela 2. Skład betonu C35/45 W8 F150 do wykonywania wanien żelbetowych

Składnik	Ilość, kg/m ³
piasek 0/2 mm	695
grys granitowy 2/8 mm	403
grys granitowy 8/16 mm	732
CEM I 42,5N SR3/NA	360
woda	150
MasterGlenium SKY 686	2,16
MasterAir 125	0,54÷0,90
MasterSet R 433	0,72÷1,08



Fot. 3. Betonowanie płyty fundamentowej wanny żelbetowej



Rys. 2. Przykładowy przekrój tunelu w strefie realizowanej w wykopie otwartym

125, jak również, jeśli wymagało tego przeznaczenie betonu, tak jak w przypadku elementów masywnych – domieszki opóźniającej MasterSet R 433. Mieszanka charakteryzowała się konsystencją w klasie S3.

Głównym problemem, jaki pojawił się przy tych elementach, była ich kubatura, która w połączeniu z ograniczeniem możliwości stosowania innych cementów niż CEM I powodowała zagrożenie destrukcją na skutek procesów termicznych. W związku z powyższym podjęto decyzję o etapowaniu betonowań, zastosowaniu domieszek opóźniających czas wiązania i niwelacji wpływu temperatury zewnętrznej poprzez ułożenie mat izolacyjnych. Proces naturalnego wychładzania masywnych elementów wspomagany był stałym monitoringiem temperatury dojrzewającego betonu, prowadzonym dla każdej betonowanej sekcji. Przedsięwzięte środki doprowadziły do obniżenia maksymalnych temperatur w przekrojach o ok. 12°C oraz pozwoliły na utrzymanie gradientu temperatury na bezpiecznym poziomie.

Wyrównane badania defektoskopowe wykonanych płyt potwierdziły monolityczny charakter przekroju. W przypadku betonowania ścian wanien w części otwartej, ich jakość, podobnie jak przy płytach dennych, warunkowana była głównie intensywnością procesów termicznych, ograniczeń odkształceń masywów wynikających ze styku ze „starym” związanym betonem oraz ograniczeń technologicznych nośności stosowanych deskowań. Wszystkie ww. czynniki powodowały konieczność zastosowania betonu o możliwie niskim skurczu, dobrej urabialności i relatywnie szybkim przyroście wytrzymałości. Właściwości te cechowały mieszankę stosowaną do betonowania płyt fundamentowych wanien. W przypadkach wykonywania ścian o większej wysokości, po odpowiedniej modyfika-

Fot. 4. Betonowanie płyty stropowej tunelu w wykopie otwartym



Składnik	Ilość, kg/m ³
piasek 0/2 mm	688
grys granitowy 2/8 mm	454
grys granitowy 8/16 mm	670
CEM I 42,5N SR3/NA	380
woda	154
MasterGlenium SKY 686	2,28
MasterAir 125	0,61
MasterSet R 433	0,76

Tabela 3. Skład betonu C35/45 W8 F150 S4

cji receptury wyjściowej dostarczano mieszankę w klasie konsystencji S4.

Tunel dojazdowy w wykopie otwartym

W strefach dojazdowych, gdzie przekrycie gruntem jest zbyt małe, aby można prowadzić drążenie maszyną TMB wykonano tunel prostokątny w wykopie otwartym.

Ze względów technicznych związanych z pracą maszyny drążącej kolejność robót została odwrócona. W pierwszym kroku wykonano stropy z pozostawieniem otworów technologicznych, a następnie podstropowo wykonano ściany zewnętrzne i między pasami ruchu.

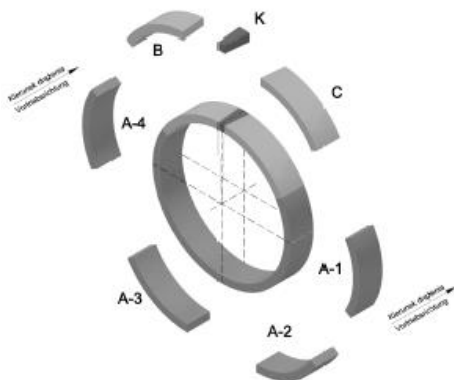
Przy betonowaniu ścian w układzie podstropowym, w związku z brakiem możliwości zastosowania wibratorów pograżalnych, należało zastosować mieszankę betonową zdolną transportować kruszywo na odległość do kilku metrów bez ryzyka segregacji, osiadania ułożonej mieszanki i bleedingu. W większości przypadków wystarczająca okazała się mieszanka bazująca na dotychczas stosowanych składnikach, jednak w klasie S4, o opadzie stożka przy wbudowaniu w górnych jej granicach. Dla odmiany elementy stropowe posiadały obszary o bardzo dużym zagęszczeniu zbrojenia, co wymuszało zastosowanie betonów o bardzo dobrej urabialności w długim czasie. Jednocześnie mieszanka nie mogła zsuwać się po szalunku, ponieważ deskowanie było wykonane ze spadkiem ok. 4–5%.

Swoiste wyzwanie stanowią będą betonowania płyt stropowych w układzie podstropowym, gdzie mieszanka betonowa podawana będzie przez otwory technologiczne. Podobnie jak w przypadku ścian te elementy konstrukcji nie będą mogły być zagęszczane za pomocą wibratorów, mimo zbliżonych do podanych wyżej wymagań. Jedynym rozwiązaniem będzie prawdopodobnie użycie mieszanek samozagęszczalnych.

Tunel drążony maszyną TBM

Tunel w swojej części drążonej składa się z dwóch rur żelbetowych, wykonanych z prefabrykowanych segmentów (tubingów) o szerokości modułowej 2 m. Na każdy tubing składa się 7 łupin. Elementy obudowy wytwarzane były z betonu C45/55 W8 F150, w zakładzie prefabrykacji zlokalizowanym poza placem budowy.

Szczelina pierścieniowa, powstająca po przejściu maszyny drążącej między zewnętrzną stroną pierścieniowej obudowy tunelu a okalającym tunel



Rys. 3. Ideowy układ elementów składających się na pojedynczy pierścień

gruntem była na bieżąco wypełniana specjalną zaprawą iniekcyjną, dostarczaną z wytwórni betonu w postaci gotowej do użycia.

Wewnątrz tunelu znajduje się jezdnia wykonana z elementów prefabrykowanych oraz wylewanych na mokro na budowie. Elementy na mokro to zamki między elementami płyty dennej, ściany oraz płyta jezdni.

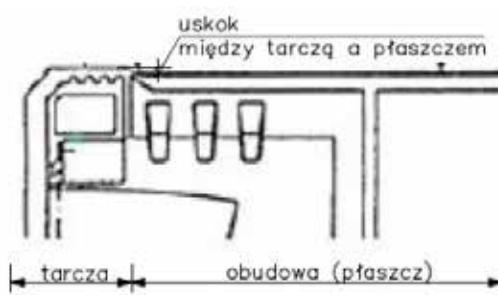
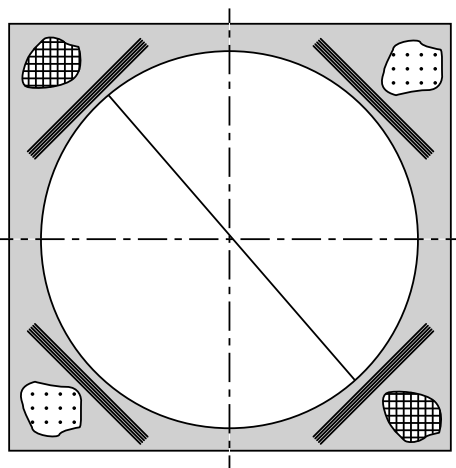
Tunel po Martwą Wisłą znajduje się w strefie ujścia rzeki. W konsekwencji drążony jest w całości poniżej zwierciadła wód gruntowych. Taka sytuacja spowodowała konieczność zastosowania maszyny z tarczą MIX SHIELD. Specyfiką takiego rozwiązania jest fakt, że przodek jest podpierany płuczką wiertniczą od momentu rozpoczęcia drążenia. Powoduje to konieczność wykonania w szybach technicznych na wejściu oraz wyjściu maszyny specjalnych ścian okularowych, które to mają za zadanie przejść siły z tarczy oraz uszczelnić konstrukcję na czas przejścia maszyny.

Betonowanie ścian okularowych szybu startowego

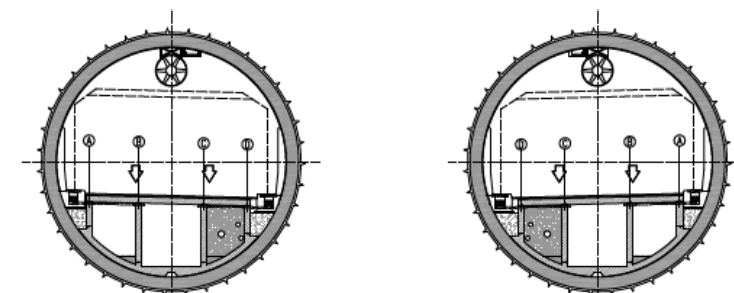
W celu umożliwienia wejścia maszyny TBM w grunt i zachowania przy tym szczelności wykonano ścianę okularową szybu startowego. W przypadku naszego tunelu posiadała wymiary 15000 x 14647 mm i grubość od 1120 do 1505 mm. Ponadto wewnątrz ściany znajdował się otwór o średnicy 12860 mm. W ścianie osadzono pierścień stalowy o szerokości 1120 mm.

Konsekwencją wszystkich wskazanych wyżej warunków była konieczność zastosowania betonu ASCC. Pozwoliło to na betonowanie pierwszego

Rys. 7. Widok ściany okularowej szybu startowego



Rys. 4. Układ geometrii tarczy i płaszczu maszyny TBM



Rys. 5. Przekrój tunelu drążonego poza przejściami poprzecznymi

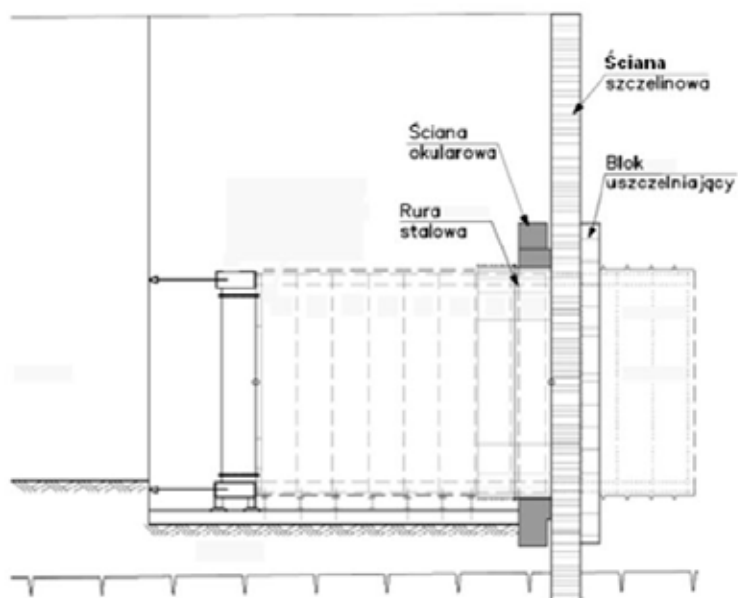
etapu z dwóch pozycji pompy do betonu i przy zachowaniu szczelności.

Do betonowania wykorzystano zmodyfikowaną recepturę stosowaną przy betonowaniach wanień żelbetowych – zmieniono udziały procentowe poszczególnych frakcji kruszyw w stosie okruszowym, podniesiono udział spoiwa, jak również skorygowano dozowania w zestawie domieszek. Finalnie wbudowywano mieszankę charakteryzującą się opadem stożka na granicy klas konsystencji S4 i S5.

Składnik	Ilość, kg/m ³
piasek 0/2 mm	707
grys granitowy 2/8 mm	442
grys granitowy 8/16 mm	619
CEM I 42,5N SR3/NA	400
woda	160
MasterGlenium SKY 686	2,80
MasterAir 125	0,60
MasterSet R 433	0,80

Tabela 4. Skład betonu C35/45 W8 F150 S4 do wykonania ściany okularowej

Rys. 6. Typowy układ elementów w komorze startowej maszyny TBM





Fot. 5. Widok ściany okularowej w szybie startowym

Betonowanie ścian okularowych szybu wyjściowego

Podobnie jak w przypadku wejścia maszyny w grunt, tak i przy jej wyjściu potrzebna jest konstrukcja okularowa. Jest ona zdecydowanie bardziej obciążona, a w konsekwencji zbrojenie w porównaniu do konstrukcji wejściowej jest znacznie intensywniejsze.

Ze względu na nasycenie stałą i kształt elementu należało zastosować mieszankę o bardzo dobrej urabialności, odporną na segregację oraz speł-

Fot. 6. Widok zbrojenia ściany okularowej szybu wyjściowego

Fot. 7. Widok ściany okularowej w szybie wyjściowym (dolne zdjęcie)



Składnik	Ilość, kg/m ³
piasek 0/2 mm	719
grys granitowy 2/8 mm	953
CEM I 42,5N SR3/NA	460
woda	180
MasterGlenium SKY 686	3,60
MasterAir 125	0,90
MasterSet R 433	0,90

Tabela 5. Skład betonu C35/45 W8 F150 SCC do wykonania ściany okularowej

niającą wymagania trwałościowe. W wyniku prób laboratoryjnych i betonowań próbnych na budowie opracowana została mieszanka o parametrach klasyfikujących ją jako samozagęszczalną. Wyzwaniem okazała się konieczność zredukowania d_{max} do 8 mm, z uwagi na koncentrację elementów stalowych w przekrojach, przy jednoczesnej niemożliwości skorzystania z dodatku popiołu lotnego do betonu. Potrzebną zawartość drobnych frakcji zapewniono poprzez zwiększenie ilości cementu w jednostce objętości oraz efektywne napowietrzenie mieszanki.

Wykonanie betonu drenażowego w tunelu

Zgodnie z zapisami projektu w najniższej części tunelu drążonego, w komorach bocznych jezdni oraz w wannach dojazdowych przewidziano wykonanie drenażu z wykorzystaniem monofrakcyjnego betonu jamistego, który umożliwi szybkie odprowadzenie wody poprzez system rur drenażowych do pomp.

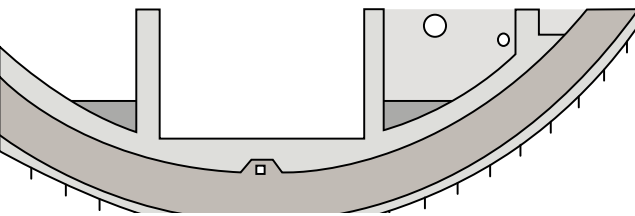
Na etapie realizacji wyspecyfikowano następujące właściwości, oczekiwane od betonu o otwartej strukturze:

- wytrzymałość na ściskanie $f_{cm,28}$ min. 5,0 N/mm²
- przepuszczalność wody – powyżej 200 dm³/m²/minutę.

Ocenę zgodności przeprowadzono wg procedur opracowanych przez dostawcę mieszanki – Thomas-Beton Polska Sp. z o.o.

W związku z tym, iż woda, która okresowo pojawiać się będzie w tunelu, może nieść substancje ropopochodne, jony siarkowe oraz chlorki z zimowego utrzymania dróg, do wykonania mieszanki użyto materiałów gwarantujących odporność betonu na oddziaływanie środowiska agresywnego chemicznie. Zastosowano cement o wysokiej odporności na działanie agresji siarczanowej CEM I 42,5N SR3/NA, kruszywo grube stanowiła frakcja 8/16 mm grys granitowy. W celu eliminacji niepożądanego zjawiska spływania zaczynu cementowego z ziarn kruszywa (ryzyko zatkania dróg filtracji), skład mieszanki modyfikowano dodatkiem dyspersji polimeru styrenowo-butadienowego oraz specjalną domieszką napowietrzającą do betonów jamistych. Badania laboratoryjne oraz poligonowe potwierdziły osiągnięcie założeń projektowych.

Do wykonania prac zastosowano deskowanie przedstawne w formie koryta z naniesionymi punktami referencyjnymi pozwalającymi na namierzanie się do punktów geodezyjnych utrwalonych wcześniej na obudowie tunelu. Transport mieszanki betonu jamistego na budowę odbywał się betonowozami.



Rys. 8. Typowy przekrój dolnej części jezdni w tunelu drążonym

Betony natryskowe

W ramach węzła Marynarki Polskiej dokumentacja projektowa zakładała podparcie obiektów na baretach. Pierwotnie zakładano wykonanie obudowy żelbetowej, lecz w wyniku uzyskanych, a specyficznych dla ścianek szczelinowych, dokładności wykonawca zaproponował narzut torkretu. W związku z powyższym należało przygotować receptę mieszanki, która pozwalałaby na jej narzut w metodzie mokrej bez ryzyka nadmiernego odprysku, z zachowaniem wymagań materiałowych oraz utrzymaniem parametrów trwałościowych betonu określonych w specyfikacji technicznej. Mieszanka ta jednocześnie powinna utrzymać cechy pozwalające na jej obróbkę po ułożeniu.

Badania wstępne mieszanek prowadzono równoległe z poligonowymi testami ich natrykiwania. Bazę materiałową stanowiły stosowane przy dotychczasowych realizacjach składniki, o potwierdzonej przydatności i kompatybilności. Górny wymiar kruszywa grubego został zredukowany do 8 mm, mieszanka dostarczana była w klasie konsystencji S2. Wykorzystanie w kompozycji receptury superplastyfikatora nowej generacji MasterGlenium SKY 686 ponownie pozwoliło na uzyskanie mieszanki o pożądanym przez wykonawcę właściwościach roboczych oraz betonu o projektowanych parametrach.

Odrębnym opracowaniem zostaną objęte mieszanki natryskowe do wykonania tymczasowej obudowy tuneli poprzecznych, realizowanych w technologii wiercenia w zamrożonym gruncie.

Posumowanie

W niniejszym referacie autorzy chcieli przybliżyć i podzielić się doświadczeniami z budowy tunelu pod Martwą Wisłą w Gdańsku. Cała inwestycja wymagała od każdej ze stron maksymalnego zaangażowania, gdyż tylko takie podejście gwarantowało sukces. Ten tak ogromny sukces można osiągnąć tylko dzięki współpracy wszystkich biorących



Fot. 8. Przestrzeń drenażowa w spodnim prefabrykacji konstrukcji jezdni

udział w realizacji, począwszy od dostawców materiałów poprzez producenta mieszanki betonowej, jak również wykonawcy, nadzoru i odbiorcy.

Również dzięki zastosowaniu najnowszych rozwiązań Master Builders Solutions firmy BASF uzyskujemy korzyści nie tylko podczas produkcji betonu, ale korzyści są również po stronie odbiorcy betonu, jak i wykonawcy na budowie.

mgr inż. Krzysztof Maliszewski
Gdańskie Inwestycje Komunalne Sp. z o.o.
inż. Cezary Krasowski
Thomas-Beton Polska Sp. z o.o.
inż. Konrad Grzesiak
BASF Polska Sp. z o.o.

Autorzy referatu pragną podziękować wszystkim za wkład i zaangażowanie przy budowie tunelu pod Martwą Wisłą w Gdańsku

Składnik	Ilość, kg/m ³
piasek 0/2 mm	1115
grys granitowy 2/8 mm	478
CEM I 42,5N SR3/NA	500
woda	196
MasterGlenium SKY 686	2,50
MasterAir 125	0,50
włókno polipropylenowe	0,6

Tabela 6. Skład mieszanki natryskowej – beton C35/45 W8 F150



Fot. 9. Beton o otwartej strukturze w systemie drenażowym tunelu

Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych Konferencji Dni Betonu 2014