

Za każdym budynkiem

Pionierskie rozwiązania z zakresu fundamentowania



Urszula Tomczak

kierownik działu projektowego Soletanche Polska



Hubert Tomczak

dyrektor zarządzający Soletanche Polska

Ze względu na 100-lecie odzyskania niepodległości oraz przyznaną niedawno przez władze miasta Gdańska nagrodę dla firmy Warbud S.A. za najlepszą realizację architektoniczną, postanowiliśmy uczcić te dwie okazje i przypomnieć o najtrudniejszym etapie budowy Muzeum II Wojny Światowej w Gdańsku, jakim były prace fundamentowe pod tym obiektem. 80% budynku, w tym najcenniejsza ekspozycja główna, jest zlokalizowane na głębokości 14 m pod ziemią w bliskim sąsiedztwie dwóch rzek – Motławy i Raduni. Wysoki poziom wód gruntowych był w tym przypadku największym wyzwaniem

kryje się historia

specjalistycznego pod Muzeum II Wojny Światowej



FOT. 1. Muzeum II Wojny Światowej
(fot. Ireneusz Rek, archiwum Soletanche)

Tytuł tego opracowania nie jest przypadkowy. W kontekście tej realizacji słowo „historia” jest wieloznaczne. Przede wszystkim po każdej budowie oprócz dokumentacji oficjalnej, jak np. dziennik budowy, który jest swego rodzaju pamiętnikiem z czasów prac wykonawczych, pojawiają się różnego rodzaju anegdoty ekipy realizacyjnej i osób związanych z powstaniem danej konstrukcji. W przypadku Muzeum II Wojny Światowej to również historia tak wstrząsająca, że naszym zadaniem jako narodu jest uchronić ją od zapomnienia i przekazać kolejnym pokoleniom, aby już nigdy nie stało się to, o czym opowiada ekspozycja zamknięta 14 m pod ziemią. Ekspozycja muzeum nie bez powodu usytuowana jest tak głęboko. Jest to symbol Polskiego Państwa Podziemnego. Wystawa pokazuje czas wojny

z dwóch perspektyw – zwykłych ludzi oraz wielkiej polityki. Dla nas, jako firmy przystępującej do przetargu, było jasne, że chcemy brać udział w takim projekcie. Rozumiemy ideę architekta (oprócz nas w przetargu wystartowała jeszcze jedna firma) i dlatego zdecydowaliśmy się, mimo ogromnego wyzwania inżynierskiego, podjąć się realizacji fundamentów pod tym obiektem.

Zakres prac budowlanych:

- **pierwszy etap** obejmował wykonanie tzw. suchego wykopu, stanowiącego bazę do rozpoczęcia kolejnego etapu (zadanie Soletanche Polska);
 - **drugi etap** stanowił wzniesienie konstrukcji budynku (zadanie Warbud S.A.);
- Podstawowy zakres prac objętych etapem początkowym budowy zawierał:

- wykonanie niezbędnych przekładek mediów;
- wykonanie ścian szczelinowych;
- wykonanie części robót ziemnych metodą klasyczną – wykop koparkami;
- wykonanie tymczasowych kotwi gruntowych dla zachowania stateczności ścian szczelinowych;
- wypełnienie wykopu wodą;
- wykonanie pozostałych robót ziemnych metodą bagrowania (tzw. refulacji) przy użyciu pogłębiarek – wykop wykonywany metodą mokrą;
- wykonanie mikropali samowierzących, kotwiących korek betonowy oraz przyszłą płytę fundamentową budynku. Mikropale zostały wykonane z jednostek pływających przy współpracy z nurkami, a ich zadanie to tym-

czasowe zakotwienie korka betonowego oraz docelowe zakotwienie płyty fundamentowej budynku dla zrównoważenia wyporu wody;

- wykonanie korka betonowego – jedno z największych betonowań podwodnych na świecie;
- wypompowanie wody gruntowej z obrębu ścian szczelinowych oraz korka betonowego.

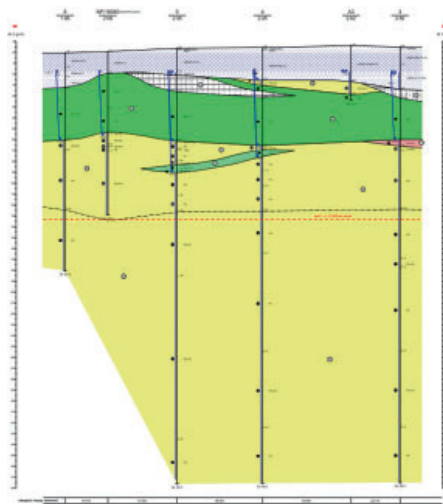
Etap projektowania

Warunki gruntowe

Obiekt został zlokalizowany w delcie Wisły w obrębie Żuław Wiślanych. Przypowierzchniową warstwę tworzą grunty antropogeniczne w postaci nasypów gruzowo-mineralno-organicznych o miąższości do 3,9 m. Poniżej występują holocenijskie osady deltowe, czyli torfy i namuły o dużej miąższości dochodzącej do 9 m. Głębsze podłoże zbudowane jest z holocenijskich utworów aluwialnych, wykształconych jako piaski drobne i średnie przewarstwione sporadycznie warstwami gruntów spoistych o niewielkiej miąższości w postaci piasków gliniastych i glin pylastych. Podścielone one są plejstocenijskim pakietem gruntów piaszczysto-żwirowych o miąższości około 40 m. Strop utworów kredowych wg [1] występuje dopiero na głębokości około 100 m p.p.t.

Wody gruntowe poziomu wodonośnego (piaszczysto-żwirowa seria plejstocenijsko-holocenijska) zalegają poniżej gruntów organicznych, które napinają zwierciadło wód gruntowych. Ustabilizowane zwierciadło wód gruntowych ustalono w dokumentacji [...] na głębokości od 0,10 do 0,25 m n.p.m., co daje wartość 15,78-15,93 m powyżej dna wykopu.

RYS. 1. Typowy przekrój geologiczny



Warunki geologiczno-hydrologiczne wymogły zastosowanie odpowiedniej technologii wykonania wykopu ze względu na brak możliwości typowego wypompowania wody z wykopu bądź zagłębienia spodu ścian szczelinowych w warstwie słabo przepuszczalnej.

Obliczenia i opis zagadnienia

Ze względu na złożoność zagadnienia obliczenia opisanego zamierzenia budowlanego wykonywano etapowo przy użyciu różnorodnego oprogramowania komputerowego, wspomagając się wynikami próbnych testów.

- **W pierwszym etapie** wykonano obliczenia ścian szczelinowych w programie Paroiz009, oceniając przemieszczenia ścian, momenty zginające i siły przekrojowe w ścianach, siły w tymczasowych kotwach gruntowych. W celu sprawdzenia wpływu głębokiego wykopu na otoczenie zamodelowano poszczególne przekroje obliczeniowe przy użyciu metody elementów skończonych (MES) w programie Plaxis 2d. Zainstalowane inklinometry pozwoliły na bieżącą analizę wyników dla poszczególnych faz i odpowiednie skalibrowanie modelu do kolejnego etapu obliczeń. Wyniki przeprowadzanych analiz pozwoliły na prawidłowe określenie przede wszystkim modułów odkształcenia E_0 dla poszczególnych warstw gruntów. Moduł ten jest podstawowym parametrem opisującym ośrodek gruntowy w modelu korzystającym z MES, a wartość jego trudno określić prawidłowo w dokumentacji geologicznej ze względu na ograniczoną ilość badań, a także zmienność modułu wraz z głębokością.

- **Zwymiarowanie elementów kotwiących płytę korka betonowego** poprzedziły testy na mikropalach próbnych. Do obliczeń zastosowano metody zaproponowane przez dostawcę materiału Titan oraz skorelowano je z obliczeniami wg polskiej normy PN-83_B-02482 Nośność pali i fundamentów palowych i wynikami próbnych obciążeń.

- Kolejny najtrudniejszy etap stanowiło **zaprojektowanie betonowej niezbrojonej płyty – korka**. W celu uwzględnienia wpływu kształtu obiektu oraz zmian poziomu płyty zastosowano obliczenia w programie ROBOT, pozwalające na zamodelowanie całego elementu. Na podstawie próbnych obciążeń wyznaczono sztywność podparcia elementu mikropalami zamodelowanymi w odpowiedniej siatce.

Trudniejszym, a bardzo istotnym elementem, okazało się określenie sztywności połączenia betonowej płyty korka z wcześniej wykonaną ścianą szczelinową. Analiza obliczeniowa wykazała, że wartość ta ma znaczący wpływ na naprężenia w betonie, a co za tym idzie, konieczność ewentualnego dozbierania płyty korka w rejonach przyściennych lub zmianę klasy betonu.

Etap wykonawstwa

Ściany szczelinowe

Ściany szczelinowe zostały wykonane w technologii CWS® (*Continuous Water Stop*) – z zastosowaniem uszczelki wodoszczelnych na stykach poszczególnych sekcji. Ma to kluczowe znaczenie w przedsięwzięciach charakteryzujących się znacznym poziomem wód gruntowych oraz przy realizacji ścian w bezpośrednim sąsiedztwie istniejących obiektów. W gruncie, po wydrążeniu szczeliny, osadzone są klatki zbrojeniowe oraz elementy rozdzielcze CWS®. Wodoszczelność połączeń zostanie zapewniona taśmą PVC instalowaną w złączu CWS®. Nasza technologia gwarantuje pionowość i licowanie sekcji poprzez prowadzenie chwytaka po prowadnicy, którą jest element rozdzielczy. W tak przygotowaną szczelinę metodą *Contractor* jest podawany beton.

Ściany szczelinowe (pełen obwód, tj. 509 mb do głębokości 27–28 m) zostały zrealizowane w ciągu ośmiu tygodni przy użyciu dwóch maszyn głębiących oraz jednej serwisowej.

Tymczasowe kotwie gruntowe

Dla zapewnienia stateczności ścian szczelinowych w czasie pracy w fazie tymczasowej Soletanche zaprojektowało i wykonało tymczasowe kotwie gruntowe. Były one wykonywane przy użyciu dwóch kotwiarek typu Klemm 806 z zastosowaniem podwójnego systemu wiercenia (orowanie + żerdzie) z przedmuchem powietrza. Nośność kotwi wynosiła 1000 kN.

Roboty ziemne

Faza I robót ziemnych polegała na wykonaniu wykopu klasycznie, przy użyciu koparek do poziomu niezagrażającego przebicciem hydraulicznym przez dno wykopu.

Faza II robót ziemnych obejmowała wykonanie wykopu metodą refulacji – mieszania urobku

z wodą, gdzie transport odbywa się przy pomocy rur na pole refulacyjne, a tam po odsączeniu wody urobek jest wywożony, odzyskana woda wraca do wykopu, uzupełniając poziom wody pomiędzy ścianami szczelinowymi i gwarantując zachowanie odpowiedniego nadciśnienia przy dnie wykopu oraz stabilizując dodatkowo ścianę szczelinową.

Zastosowano dwa typy pogłębiarek:

- do gruntów piaszczystych używano maszyny urabiającej grunt przy użyciu tzw. *water jet*. Grunt był spulchniony poprzez podawanie wody pod bardzo dużym ciśnieniem, a następnie przy użyciu systemu rur i pomp transportowany na pole refulacyjne do odsączenia;
- do gruntów spoiстых (namuły, pierwsza warstwa) używano maszyny urabiającej grunt w sposób mechaniczny.

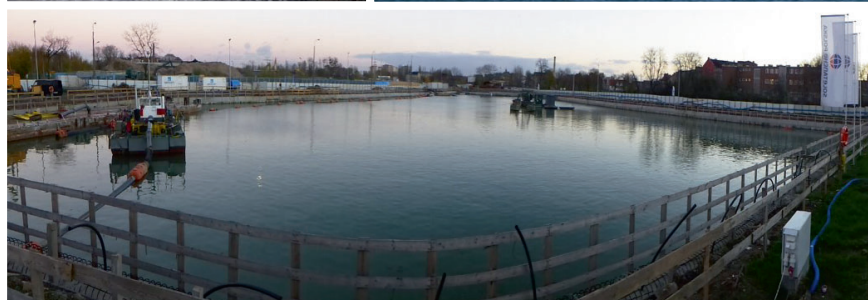
Podczas prowadzenia prac natrafiono na warstwę kamieni, do usunięcia której używana była koparka zainstalowana na pływającej barce i pracująca ciągle z pogłębiarkami w celu zapewnienia odpowiedniej ilości wydobywanego urobku każdego dnia.

Mikropale

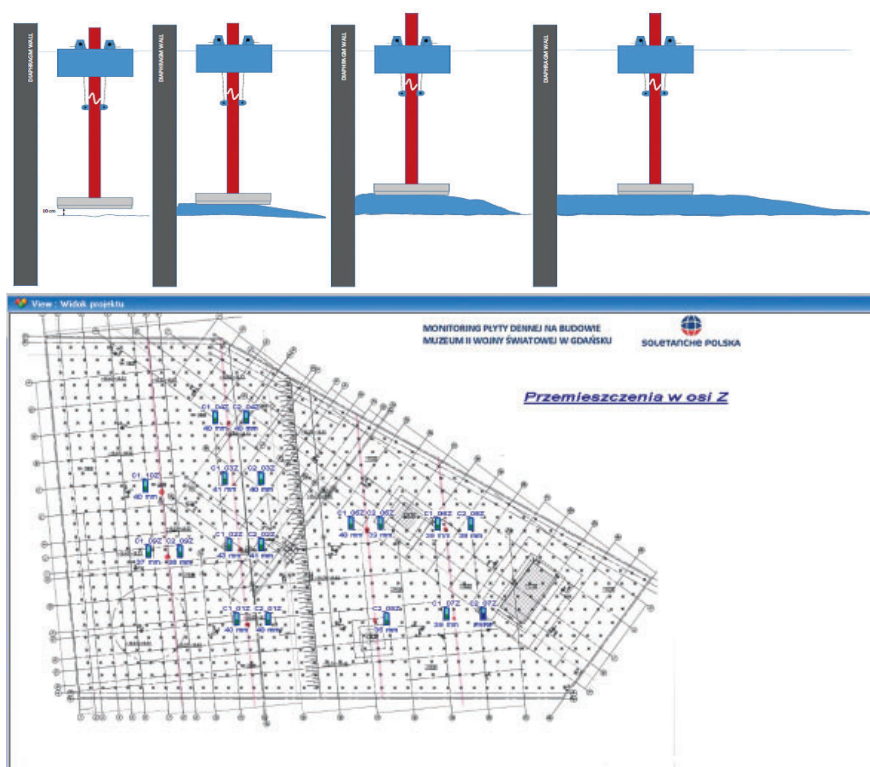
Dla zapewnienia stateczności korka betonowego oraz przyszłej płyty fundamentowej (również narażonej na działanie wyporu wody od spodu) zaprojektowano i wykonano mikropale kotwiące o nośności na wyciąganie ponad 2000 kN każdy. Zastosowano żerdzie systemowe Titan, a wykonanie mikropali powierzono podwykonawcy – firmie Aarsleff, która to zadanie zrealizowała wraz z firmą Soley.

Każdy mikropal wykonywany był z pływających berek przy pomocy nurków z tzw. „pustym przewiertem” przez wodę rzędu 15 m. System samowierzący pozwala osiągnąć znaczne wydajności, a pompowana cały czas płuczka cementowa stabilizuje otwór wiertniczy oraz pozwala uniknąć stosowania orurowania, co znacznie ułatwia i przyspiesza proces wiercenia.

Przed wykonaniem docelowych mikropali wykonano sześć testów wyprzedzających (testy przeprowadzono z poziomu terenu). Natomiast dla ostatecznego potwierdzenia nośności mikropali na wyciąganie wykonano dodatkowe, trzy podwodne testy nośności. Badanie to odbyło się zgodnie z Polską Normą. Wszystkie próby potwierdziły uzyskanie zaprojektowanej nośności mikropali i pozwoliły spokojnie przygotowywać się do betonowania korka podwodnego.



- FOT. 2.** Wykonywanie ścian szczelinowych MIIWŚ (fot. Ireneusz Rek, archiwum Soletanche)
- FOT. 3.** Betonowanie sekcji ściany szczelinowej (fot. Ireneusz Rek, archiwum Soletanche)
- FOT. 4.** Wiercenie tymczasowych kotwi gruntowych (fot. Ireneusz Rek, archiwum Soletanche)
- FOT. 5.** Widok budowy w trakcie wykopu klasycznego (archiwum Soletanche)
- FOT. 6.** Widok na pole refulacyjne w trakcie prowadzenia prac (archiwum Soletanche)
- FOT. 7.** Usuwanie kamieni z dna wykopu (archiwum Soletanche)
- FOT. 8.** Widok budowy w trakcie pracy pogłębiarek (archiwum Soletanche)



RYS. 2. Schemat układania betonu korka betonowanego podwodnie (opatentowany system Dobber)

RYS. 3. Plan punktów pomiarowych (archiwum Soldata/Soletanche)

Korek betonowy – podwodne betonowanie

Korek betonowy wykonano metodą betonowania podwodnego w technologii opatentowanej *Dobber*. W opisywanej technologii stalowe rury do betonowania podwodnego typu *Contractor* połączone są w górnej części z płytkami pozwalającym na utrzymywanie ich w pozycji pionowej. Do górnej części rur został zamontowany kosz zasypowy, przez który podawany był beton z pomp na początku betonowania. W kolejnej fazie kołnierz pompy do betonu wprowadzono bezpośrednio do rury wlewowej.

W przypadku miejsc znajdujących się poza zasięgiem pomp ustawionych na lądzie, betonowanie odbywało się z pompy ustawionej na platformie pływającej. W tym przypadku jedna z pomp, znajdująca się na lądzie, podawała beton z betonowozów do pompy ustawionej na platformie pływającej, która przetransportowywała mieszankę w miejsce wbudowania.

W celu zapewnienia ciągłości betonowania pompy ustawione były w odpowiednich miejscach przed przystąpieniem do wykonywania kolejnych fragmentów korka. Budowę obsługiwały cztery węzły betonarskie zapewniające również odpowiednią ilość betonowozów (około 50 beto-

nowozów w ciągłym ruchu) i pomp (pięć–sześć pomp non stop na budowie).

Obsługa na platformie pływającej mierzyła i kontrolowała wysokość betonowania, aby nie przekroczyć docelowej grubości korka. Rury wlewowe przemieszczano w kolejne miejsce przy użyciu wciągarek zakotwiczonych na oczepach ścian szczelinowych. Korek betonowano pasami układanymi przez dwa zestawy betonujące, poruszające się od ścian szczelinowych do środka budowy równomiernie i w sposób zapewniający ciągłe betonowanie oraz jednolitą strukturę betonu.

W trakcie układania mieszanki betonowej kontrolowano:

- poziom wody w wykopie;
- drożność systemu wyrównującego poziom wody w wykopie;
- położenie rur wlewowych;
- szybkość betonowania;
- przyrost wysokości betonu.

Wyprzedzająco przeprowadzono szczegółową analizę receptury betonu korka, dobierając jej składniki tak, aby otrzymać maksymalny efekt układania i czasu wiązania przy ograniczonej temperaturze wiązania. Detal połączenia ściany szczelinowej z korkiem betonowym (sztywność

połączenia) był jednym z decydujących czynników przy dobieraniu mieszanki betonowej i jej wytrzymałości.

Monitoring ścian szczelinowych oraz korka betonowego

W celu sprawdzenia założeń obliczeniowych, jak i dla zachowania bezpieczeństwa okolicy tak dużej budowy, stworzony został projekt monitoringu poszczególnych elementów obudowy wykopu oraz zabetonowanego korka. Opracowanie i przeprowadzenie szczegółowego monitoringu umożliwiło analizę w czasie realizacji obiektu i bieżącą korektę oraz kontrolę zaprojektowanych rozwiązań.

Ściany szczelinowe monitorowane były poprzez:

- standardowy monitoring geodezyjny,
- monitoring przemieszczeń ścian przy użyciu inklinometrów.

Jednym z najważniejszych zagadnień było monitorowanie zachowań korka betonowego od momentu jego zabetonowania, poprzez czas wypompowywania wody gruntowej, aż do momentu docięcia go docelową płytą fundamentową.

Wraz z firmą Soldata, Soletanche Polska zdecydowała się na całodobowy monitoring poprzez zastosowanie automatycznych cyklopów (pomiar w czasie rzeczywistym) oraz sprawdzanie poziomu wody gruntowej poza obrzeżem ścian. Dla pewności prowadzono również standardowy monitoring geodezyjny korka. Zastosowano specjalne wieże wystające ponad wodę (przed jej wypompowaniem) i na nich założono repery robocze. Wieże zakotwione były do korka betonowego i pozwalały bez problemu badać jego ruchy. Po wypompowaniu wody repery przeniesiono bezpośrednio na powierzchnię korka.

Zaobserwowane ruchy ścian szczelinowych i korka betonowego nie przekroczyły progów alarmowych i potwierdziły prawidłowość obliczeń statycznych.

Po zakończeniu betonowania korka oraz uzyskaniu przez beton odpowiedniej wytrzymałości przystąpiono do wypompowania wody z nad płyty korka, a w następnej kolejności przystąpiono do uszczelniania rys, które pojawiły się w korku oraz oczyszczenia i skucia jego górnej powierzchni do zakładanych rzędnych. Nie bez wpływu na ilość rys i przecieków przez korek

- FOT. 9.** Betonowanie podwodne
- FOT. 10.** Wykonywanie mikropali kotwiących (archiwum Soletanche)
- FOT. 11.** Betonowanie podwodne
- FOT. 12.** Widok na budowę – przepompowywanie betonu z pompy na brzegu do pompy na platformie pływającej (archiwum Soletanche)
- FOT. 13.** Widok korka po oczyszczeniu i uszczelnieniu – widoczne mikropale z płytami kotwiącymi (archiwum Soletanche)
- FOT. 14.** Muzeum II Wojny Światowej (fot. Paweł Paniczko, źródło: <http://kwadrat-gdynia.pl/miwiws>)

były odbywające się zaraz po wylaniu korka prace kafarowe na sąsiedniej działce.

Podsumowanie

Podwodne betonowanie korka betonowego dla wykonania suchego wykopu na budowie Muzeum II Wojny Światowej było jednym z największych betonowań tego typu na świecie. Ilość wbudowanego betonu w tamach „jednego podejścia” (około 25 000 m³) jest nie tylko rekordowa, ale też powodująca, że cała realizacja korka stała się operacją bardzo skomplikowaną logistycznie, wymagającą wielomiesięcznych przygotowań oraz zaangażowania wielu osób w proces przygotowania, jak i samej realizacji.

Przy tak dużej aktywności na placu budowy (przez ponad 70% czasu trwania projektu prace odbywały się z wykorzystaniem barek i pod wodą przy wsparciu nurków) całość robót została wykonana bezpiecznie, bez choćby najmniejszego wypadku na budowie. Dzięki udziałowi w tym procesie budowlanym możemy pochwalić się dzisiaj wieloma innowacjami, pionierskimi rozwiązaniami, ale nie zrobilibyśmy tego sami. Nad tym projektem pracowało całe Soletanche w Polsce, nasi przyjaciele z Francji, jak również świat naukowy. Serdeczne podziękowania należą się świętej pamięci dr. hab. inż. Adamowi Boltowi, prof. nadzw. związanemu z Politechniką Gdańską. Był częstym gościem muzeum w czasie jego powstawania. Jeśli sytuacja tego wymagała, pojawiał się tam również późną nocą, aby coś skonsultować, podpowiedzieć, sprawdzić, jak idą prace. Zdecydowanie był to dobry duch i opiekun tej budowy. Dzięki niemu oraz zaangażowaniu wszystkich stron związanych z powstaniem tego budynku Soletanche Polska może zaliczyć Muzeum II Wojny Światowej w Gdańsku na poczet swoich flagowych realizacji. <



Wybrane dane techniczne

ściany szczelinowe	509 mb
powierzchnia korka	około 14 300 m ²
ilość wydobytego gruntu	około 230 000 m ³
ilość mikropali	ponad 914 szt.
ilość wbudowanego betonu	ponad 24 700 m ³
czas trwania betonowania głównego	7 dni, 24 godz./dobę [odbyły się dwa małe betonowania wyprzedzające – zabetonowano przegłębienia w korku betonowym]