

Prof. dr hab. inż. MICHAŁ TOPOLNICKI
Mgr inż. OSKAR MITROSZ
Keller Polska Sp. z o.o.

Zabezpieczenie wykopu na potrzeby budowy Narodowego Muzeum Morskiego w Gdańsku

W miejscu usytuowania wcześniejszego budynku Składu Kolonialnego powstał nowoczesny ośrodek Narodowego Muzeum Morskiego (NMM). Inwestycję zrealizowano w ramach współpracy polsko-norweskiej, przy wsparciu mechanizmu finansowego europejskiego obszaru gospodarczego, który w 85% miał udział w kosztach inwestycji, wynoszącej 7 851 566 euro. Pozostałe środki pochodziły z Ministerstwa Kultury i Dziedzictwa Narodowego, a także miasta Gdańska i własnych środków Muzeum. Uroczyste otwarcie obiektu nastąpiło w kwietniu 2012 r.

Przed przystąpieniem do budowy Muzeum rozpoczęto w grudniu 2008 r. prace archeologiczne, które na terenie Starego Miasta są obligatoryjne (rys. 1). Podczas tych prac na placu między Żurawem a hotelem Hanza znaleziono wiele cennych kulturowo obiektów, które poddano gruntownej konserwacji (rys. 2). Duża liczba odnalezionych fragmentów takielunku, wykonywanych metodą toczenia drewna, może świadczyć o istnieniu w tym miejscu warsztatu tokarskiego, od którego ulica przy Żurawiu otrzymała swoją nazwę [1]. W wykopie archeologicznym odnaleziono także XVI-wieczny zabytkowy mur obronny stanowiący fragment fortyfikacji dawnego Głównego Miasta, który po przeprowadzeniu zabiegów wzmacniających i konserwatorskich stanowi obecnie stałą ekspozycję w holu nowego budynku.

Po powierzchniowym oczyszczeniu placu budowy przygotowano platformę roboczą do wykonania robót fundamentowych. W tej fazie projektu w podłożu gruntowym wciąż pozostawało wiele przeszkód (rys. 3), znacząco utrudniających



Rys. 2. Schemat usytuowania zainwentaryzowanych podczas badań archeologicznych przeszkód w gruncie, w tym: starych fundamentów, murków ceglanych, pali *Wolfsholza*, otoczaków, elementów drewnianych



Rys. 1. Rejon ul. Tokarskiej w czasie badań archeologicznych (z archiwum NMM; fot. *Bernadeta Galus*)



Rys. 3. Głazy narzutowe wykopane spod starych fundamentów

wykonanie zabezpieczenia i uszczelnienia wykopu o powierzchni około 1050 m² i głębokości 4,5 m.

Warunki geotechniczne

Na obszarze inwestycji podłoże gruntowe jest uwarstwione, a pod względem morfologicznym stanowi fragment niziny Żuławy Wiślanych. Od powierzchni terenu, na rzędnej około 3,0 m n.p.m., zalega warstwa niekontrolowanych nasypów antropogenicznych do poziomu około 0,0 m n.p.m. Poniżej zalegają grunty organiczne akumulacji delty Wisły, obejmujące torfy i namuły o miąższości do 3,0 m, a głębiej piaski o różnej granulacji oraz zagęszczone żwiry z otoczkami (tablica). Woda gruntowa, o zwierciadle swobodnym, stabilizuje się na rzędnej około 0,3 m n.p.m., a więc około 3,0 m powyżej docelowego poziomu dna wykopu.

Parametry geotechniczne

Warstwa	γ_{sr} kN/m ³	ϕ [°]	c kPa	M MPa
Nasypy niekontrolowane (nN)	18,0	22	5	22,0
Torfy (T)	11,5	7	8	0,25
Namuły (Nm)	14,1	10	10	1,0 ÷ 2,0
Żwiry (Ż+K)	21,0	40	–	196,0
Piaski (Pd)	20,0	31	–	86,0

W związku z wysokim poziomem zwierciadła wody, w dokumentacji geotechnicznej zalecono zapewnienie szczelności konstrukcji części podziemnej budynku przed napływem wód gruntowych. Jednocześnie zalecono bezpośrednie posadowienie obiektu na warstwie żwirów lub gruntów mineralnych, po wcześniejszej wymianie gruntów nienośnych, zalegających do około 0,8 m poniżej poziomu posadowienia. W związku z sąsiedztwem zabytkowego Żurawia Gdańskiego oraz hotelu Hanza wykluczono zastosowanie sposobów realizacji powodujących wstrząsy i vibracje w czasie robót.

Pierwotne rozwiązanie projektowe

Obudowę wykopu zaprojektowano w postaci traconej, stalowej ścianki szczelnej długości 12 m, odpowiednio w części typu AZ 18 i AZ 26 – kotwionej i wspornikowej, stanowiącej obudowę zewnętrzną ścian podziemia. Zadaniem ścianki było zabezpieczenie niecki wykopu oraz ograniczenie wpływu odwodnienia planowanego wewnątrz wykopu na sąsiadujące obiekty. W obliczeniach założono na części obwodu wykopu wspornikową pracę statyczną ścianki szczelnej. W pozostałej części przewidziano ściankę kotwioną w poziomie 1,5 m n.p.m. za pomocą 18 kotew kompozytowych, o nośności co najmniej 300 kN, oraz 9 kotew iniekcyjnych, o nośności co najmniej 350 kN. Wszystkie kotwy należało sprężyć siłą odpowiadającą 60% ich nośności.

Zasadniczy poziom posadowienia przyjęto na rzędnej -1,85 m n.p.m.

Płytę fundamentową grubości 60 cm oparto bezpośrednio na stropie podwodnego korka betonowego grubości 100 cm, ułożonego na warstwie zagęszczonych żwirów i kotwionego za pomocą 15 stalowych żerdzi o nośności co najmniej 100 kN, wykonywanych z pontonu pływającego.

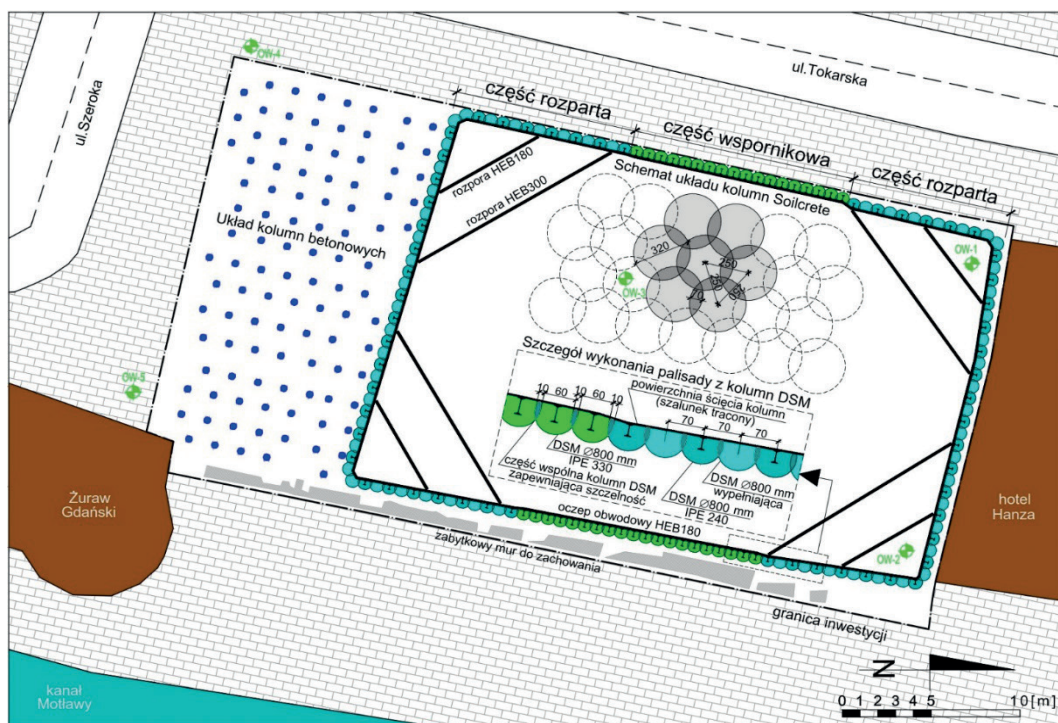
Zaprojektowano także 6 studni wierconych średnicy 50 cm w celu obniżenia ciśnienia hydrostatycznego i odwodnienia wykopu do czasu wykonania płyty fundamentowej. Odwadnianie wykopu powiązane z warunkiem ciągłej kontroli zasięgu leja depresji oraz obserwacją geodezyjną sąsiadujących obiektów budowlanych.

W związku z wysokim poziomem wód gruntowych konstrukcję kondygnacji podziemnej budynku zaprojektowano w postaci „uszczelnianej wanny” monolitycznej i zabezpieczonej bezspoinową izolacją przeciwwodną typu ciężkiego.

Wdrożone rozwiązanie alternatywne

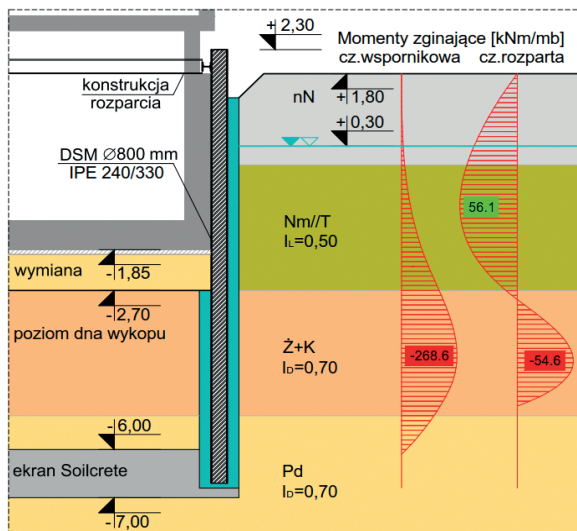
Biorąc pod uwagę dużą ilość niezidentyfikowanych przeszkód w podłożu gruntowym oraz przewidywane trudności z zapuszczeniem ścianek szczelnych do pełnej głębokości, a w konsekwencji z zapewnieniem szczelności i stateczności obudowy wykopu, wykonawca robót geotechnicznych wdrożył rozwiązanie alternatywne, które umożliwiło wykonanie części podziemnej obiektu zgodnie z harmonogramem. Dodatkowo, przewidziano zastosowanie technologii wgłębnego mieszania gruntu na mokro DSM (ang. Deep Soil Mixing) [2] oraz specjalistycznej iniekcji strumieniowej Soilcrete® systemu Kellera [3], które eliminowały drgania, co znacząco ograniczyło oddziaływanie robót na sąsiadujące obiekty o znaczeniu historycznym.

Obudowę i uszczelnienie wykopu zaprojektowano jako elementy tymczasowe, a docelowa konstrukcja podziemna budynku musiała być zwymiarowana z uwzględnieniem pełnego parcia gruntu i wody na ściany oraz wyporu. Zaletą wdrożonego rozwiązania było przede wszystkim łatwiejsze wykonanie obudowy wykopu w przypadku napotkania przeszkód w podłożu, blokujących pograżanie grodzic stalowych do projektowanej głębokości. Wykorzystano większą na części obwodu wykopu – w stosunku do ścianki szczelnej – elastyczność kształtowania linii obudowy za pomocą kolumn DSM/Soilcrete, a także w razie takiej potrzeby możliwość łączenia obu technologii.



Rys. 4. Plan rozmieszczenia elementów zabezpieczenia obudowy wykopu

Na podstawie szczegółowej analizy statycznej miarodajnych przekrojów poprzecznych zaprojektowano ciągłą palisadę z zachodzącymi na siebie kolumn DSM średnicy 800 mm w rozstawie osiowym 0,7 m, którą z uwagi na charakter pracy można podzielić na część rozpartą i wspornikową (rys. 4). W części rozpartej, przy założonej konstrukcji rozparcia na poziomie 1,95 m n.p.m., co drugą kolumnę wzmocniono kształtownikiem stalowym IPE 240. W części wspornikowej kształtowniki IPE 330 wprowadzono do każdej kolumny. Zbrojenie kolumn DSM dostosowano do przeniesienia w pełni momentów zginających (rys. 5), pomijając na korzyść bezpieczeństwa udział cementogruntu w przekroju kolumny. Projektowaną wytrzymałość cementogruntu na ściskanie oszacowano jako wynoszącą 1,0 MPa, biorąc pod uwagę wpływ domieszki gruntów organicznych na wytrzymałość materiału kolumny [2].

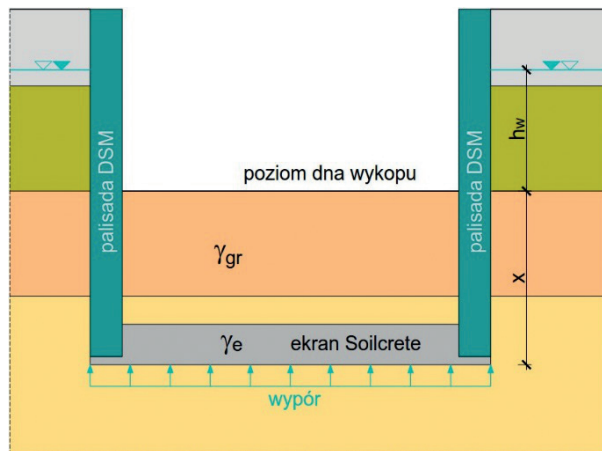


Rys. 5. Przyjęty do obliczeń statycznych przekrój obudowy wykopu; rozkład momentów zginających części wspornikowej obudowy i części rozpartej

Napływ wody gruntowej do wykopu przez dno ograniczony za pomocą poziomego ekranu uszczelniającego średniej grubości 1,0 m, wykonanego metodą iniekcji strumieniowej Soilcrete z zastosowaniem nowej generacji monitorów Super Jet, umożliwiających wykonanie kolumn dużej średnicy. Ekran zaprojektowano wewnątrz obrysu wcześniej wykonanej palisady z kolumn DSM długości 9 m (por. rys. 5). Przyjęto kolumny Soilcrete średnicy 3,2 m, rozmieszczone w siatce trójkątów równobocznych o boku 2,5 m (por. rys. 4) oraz dodatkowe kolumny doszczelniające w pobliżu palisady z kolumn DSM średnicy 2,0 m.

W celu zapewnienia wymaganej szczelności ekranu rozstaw kolumn Soilcrete musi być zawsze dostosowany do możliwej do osiągnięcia, w danych warunkach gruntowych i przy użyciu posiadanego sprzętu, średnicy kolumn. Konieczne jest zatem wykonanie kolumn próbnych, zmierzenie ich średnicy w poziomie ekranu oraz uwzględnienie odpowiedniego zakładu kolumn, który określa się, biorąc pod uwagę tolerancje wykonawcze, związane przede wszystkim z głębokością wiercenia i możliwym odchyleniem żerdzi od pionu wynoszącym 0,5÷1,5% efektywnej długości żerdzi (odchyłki zwiększają się wraz z głębokością). Przy głębokości wiercenia przekraczającej 10 m jest zalecane badanie pionowości każdego odwiertu za pomocą inklinometru, co pozwala na bieżąco wykryć ewentualne przesunięcia kolumn w planie.

Stateczność ekranu ze względu na wypór należy sprawdzić w odniesieniu do każdej fazy budowlanej przy różnych możliwych poziomach wody gruntowej. Położenie dolnej krawędzi ekranu uszczelniającego wyznacza się z warunku równowagi wyporu i sił masowych stanu granicznego nośności (UPL)



Rys. 6. Schemat obliczeniowy wykopu z grawitacyjnym ekranem uszczelniającym

zgodnie z PN-EN 1997-1 [4]. Przy praktycznym uproszczeniu $\gamma_e \approx \gamma_{gr}$ [5] wymagane zagłębienie ekranu poniżej poziomu dna wykopu określa zależność (rys. 6)

$$x \geq \frac{\gamma_{G:dst} \gamma_w h_w}{\gamma_{G:stb} \gamma_{gr} - \gamma_w} = \frac{1 \cdot 10 h_w}{0,9 \gamma_{gr} - 10} = \frac{h_w}{0,09 \gamma_{gr} - 1}, \quad (1)$$

w której:

$\gamma_{G:dst}$ i $\gamma_{G:stb}$ – współczynniki częściowe do trwałego oddziaływania destabilizującego i stabilizującego ($\gamma_{G:dst} = 1$, $\gamma_{G:stb} = 0,9$ według tablicy A.15 normy PN-EN 1997-1),

γ_w – ciężar objętościowy wody gruntowej,

γ_{gr} – średni ciężar objętościowy nasyconego gruntu, zalegającego nad ekranem,

γ_e – ciężar objętościowy ekranu uszczelniającego.

Należy stwierdzić, że obliczenia według (1) z uwzględnieniem współczynników częściowych przyjętych według Eurokodu 7 dają porównywalne wyniki z zaleceniami niemieckimi [6], w których przy sprawdzaniu stateczności dna wykopu wykorzystuje się współczynnik bezpieczeństwa $\eta = 1,1$.

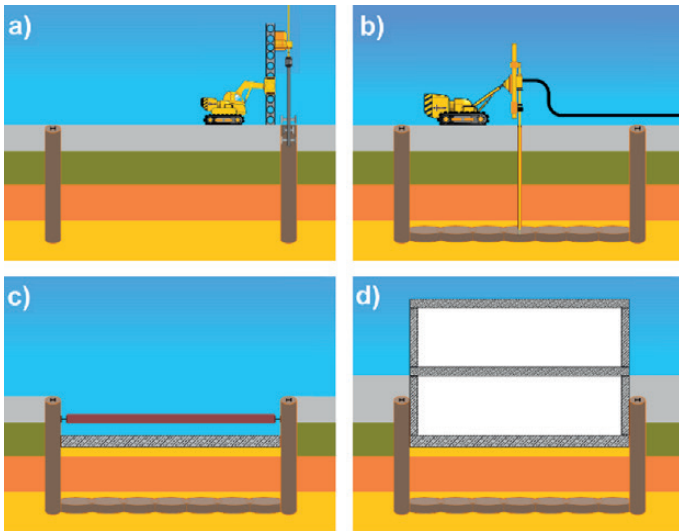
Realizacja zabezpieczenia wykopu

Realizacja zabezpieczenia wykopu obejmowała następujące etapy robót (rys. 7 i 8):

- etap I – wykonanie palisady z kolumn DSM;
- etap II – wykonanie ekranu uszczelniającego z kolumn Soilcrete;
- etap III – wykonanie wykopu wstępnego do rzędnej 1,5 m n.p.m. (zastosowano schemat statyczny ściany wspornikowej utwierdzonej w gruncie), montaż oczepu obwodowego i konstrukcji rozparcia, zagłębienie wykopu do rzędnej docelowej $-2,7$ m n.p.m. (schemat statyczny ściany rozpartej elementami stalowymi utwierdzonej w gruncie), wykonanie płyty fundamentowej i demontaż konstrukcji rozparcia (schemat sta-



Rys. 7. Widok na plac budowy z panoramą Starego Miasta – stan z 30 marca 2010 r. (z archiwum NMM; fot. Bernadeta Galus)



Rys. 8. Etapy wykonania zabezpieczenia wykopu: a) kolumny DSM, b) ekran Soilcrete, c) montaż rozparcia w wykopie wstępnym i wykonanie płyty fundamentowej w wykopie docelowym, d) stan docelowy

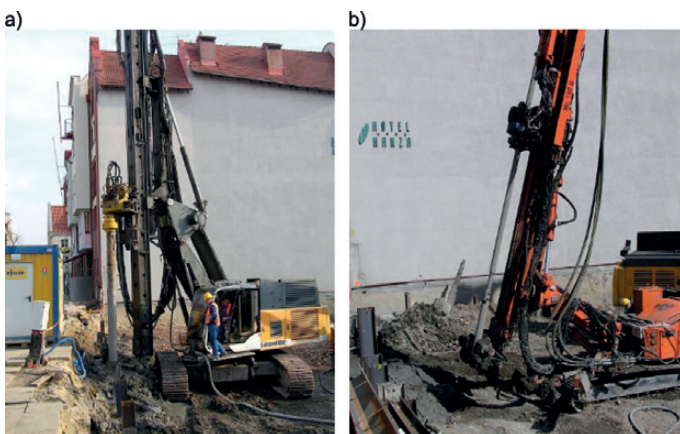
tyczny ściany utwierdzonej w gruncie, podpartej na poziomie płyty fundamentowej);

– etap IV – demontaż rozparcia po wykonaniu kondygnacji podziemnej.

Technologia wgłębnego mieszania gruntu na mokro DSM (PN-EN 14679) polega na wprowadzeniu w podłoże specjalnego mieszadła, które pogrąża się bez wstrząsów i jest wspomagane wypływem zaczynu cementowego. Po osiągnięciu głębokości założonej w projekcie następuje faza homogenizacji kolumny DSM. W tym czasie mieszadło obracane i podciągane do góry zapewnia równomierne wymieszanie zaczynu z gruntem. Cykl mieszania powtarza się kilkakrotnie, a prędkość obrotową i prędkość posuwu mieszadła dostosowuje się do warunków gruntowych.

Podczas wykonywania kolumn DSM prowadzono ciągłą kontrolę jakości robót, polegającą na rejestracji następujących parametrów produkcyjnych: długości kolumny, czasu wykonania, liczby cykli mieszania, prędkości obrotowej i prędkości posuwu mieszadła, objętości i wydatku pompowanego zaczynu oraz gęstości zaczynu cementowego. W świeżo wykonane kolumny wprowadzano kształtowniki stalowe IPE 240/330 do głębokości określonej w projekcie.

Ekran Soilcrete wykonano za pomocą iniekcji strumieniowej systemu D, wykorzystując monitory Super Jet (rys. 9). Przed przekształceniem w cementogrunt grunt zalegający w podłożu zostaje rozluźniony i częściowo wymieniony w wyniku oddzia-



Rys. 9. Wykonywanie zabezpieczenia obudowy wykopu: a) palisada z kolumn DSM, b) ekran uszczelniający dno wykopu realizowany za pomocą iniekcji strumieniowej Soilcrete

ływania skoncentrowanego strumienia o dużej energii i prędkości wylotowej. W systemie D, tzw. podwójnym (ang. Double), wprowadza się otulenie strumienia zaczynu sprężonym powietrzem w celu poprawienia spójności strumienia i skuteczności erodowania gruntu. Cząstki gruntu, wymieszane z zaczynem cementowym przy udziale silnej turbulencji, wypełniają „wyciętą” przestrzeń w podłożu, która ma kształt kolumny. Nadwyżka powstałej mieszanki wypływa na powierzchnię przez pierścieniową szczelinę wokół żerdzi wiertniczej. Swobodny wypływ urobku na powierzchnię ma ważne znaczenie dla szybkiej dyssypacji ciśnienia generowanego w podłożu, ponieważ blokowanie lub brak wypływu może być przyczyną niekontrolowanego podnoszenia powierzchni terenu oraz sąsiadujących obiektów budowlanych.

Parametry technologiczne iniekcji strumieniowej, w tym liczbę i średnicę dysz, gęstość zaczynu cementowego oraz ciśnienie robocze i wydatek pompowanego zaczynu dobrano na podstawie prób terenowych w celu wykonania kolumn o założonej średnicy. Głębokość wiercenia, liczona od poziomu terenu, wynosiła około 9 m. Średnicę wykonanych kolumn kontrolowano za pomocą specjalnych systemów pomiarowych [2].

Po zrealizowaniu wszystkich elementów obudowy rozpoczęto wykonywanie wykopu, a następnie zamontowano konstrukcję rozparcia i wykonano wykop docelowy. Wraz z postępem robót ziemnych, w wykopie przygotowywano odsłoniętą powierzchnię palisady DSM jako deskowanie docelowej ściany podziemnej konstrukcji budynku NMM (rys. 10).



Rys. 10. Etap przygotowania do wykonania docelowej ściany konstrukcyjnej podziemia budynku po wyrównaniu powierzchni palisady DSM

Podsumowanie

Przedstawiony przykład dotyczy kompleksowego zabezpieczenia wykopu budowlanego nie tylko w trudnych warunkach gruntowo-wodnych, ale również w szczególnym otoczeniu, jakim jest rejon Starego Miasta w Gdańsku. W takich miejscach występują liczne ograniczenia robót, w tym związane z przeszkodami podziemnymi, które na etapie projektowania są trudne do zidentyfikowania i zlokalizowania. Poza tym jest konieczne unikanie technologii, których zastosowanie wiąże się z emitowaniem wibracji i nadmiernego hałasu, a także ograniczeniem negatywnego oddziaływania odwodnienia gruntu na zabudowę sąsiednią.

W takich przypadkach należy wybrać rozwiązanie zabezpieczenia stateczności i technicznej szczelności wykopu, które w prosty sposób można adaptować do zaistniałych warunków i napotkanych trudności realizacyjnych w trybie projektowania aktywnego. W przedstawionym przypadku podano korzyści, jakie wynikają z umiejętnego łączenia technologii geotechnicznych, które można wzajemnie zastępować, umożliwiając np. pogłębienie lub doszczelnienie kolumn DSM, które uległy odchyleniu od pionu lub przerwaniu ze względu na przeszkody zalegające w gruncie.

Na podstawie doświadczeń uzyskanych z zakończonej budowy można potwierdzić, że obawy o możliwość wykonania ścianki szczelnej zgodnie z pierwotnym projektem były uzasadnione. Istotne znaczenie miało także terminowe wykonanie robót, pomimo licznych przeszkód w podłożu, oraz skuteczne ograniczenie ilości napływającej wody, umożliwiające wykonywanie robót budowlanych w „suchym” wykopie.

Wzniesiony nowoczesny obiekt Narodowego Muzeum Morskiego o unikatowej architekturze wkomponował się w zabudowę Długiego i Rybackiego Pobrzeża (rys. 11), zwiększając listę atrakcji turystycznych Gdańska.

PIŚMIENNICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Biuletyny Informacyjne Centralnego Muzeum Morskiego w Gdańsku: nr 8 (77) sierpień 2009, nr 3 (84) marzec 2010, nr 5 (86) maj 2010, nr 8 (89) sierpień 2010, nr 10 (103) październik 2011.
- [2] *Topolnicki M.*: Wzmacnianie i uszczelnianie gruntu metodą wgłębego mieszania na mokro (DSM). XXIV ogólnopolskie warsztaty projektanta konstrukcji, Kraków 2009.
- [3] *Topolnicki M.*: Podchwytywanie i podnoszenie obiektów budowlanych za pomocą kontrolowanych iniekcji geotechnicznych. XXV konferencja naukowo-techniczna „Awarie Budowlane”, tom I, Międzyzdroje 24–27.05.2011.
- [4] *Dymek D.*: O projektowaniu kompleksowych zabezpieczeń wykopów zgodnie z eurokodami. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 6/2014.
- [5] *Topolnicki M., Mitrosz O., Filbrandt P.*: Kompleksowe zabezpieczenie i uszczelnienie wykopu Teatru Szekspirowskiego w Gdańsku. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 4/2012.
- [6] Recommendations on Excavations EAB. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin.



Rys. 11. Widok zrealizowanego Narodowego Muzeum Morskiego z panoramą Starego Miasta (z archiwum NMM; fot. *Bernadeta Galus*)