

dr hab. inż. Ryszard Chmielewski^{1)*}

ORCID: 0000-0001-5662-9180

mgr inż. Jacek Sankowski²⁾

ORCID: 0000-0002-5712-267X

mgr inż. Kamil Sobczyk¹⁾

ORCID: 0000-0002-5929-757X

Wpływ niewłaściwego rozpoznania podłoża gruntowego na realizację inwestycji na terenie zamkniętym

The impact of inadequate exploration of the subsoil on the implementation of investments in a closed area

DOI: 10.15199/33.2023.02.10

Streszczenie. W artykule przedstawiono problemy powstałe na wstępnym etapie realizacji obiektu budowlanego, wynikające z niedostatecznego rozpoznania podłoża gruntowego. Inwestycje na terenach zamkniętych często dotyczą obiektów infrastruktury krytycznej bądź obiektów specjalnych, które wymagają indywidualnych, specjalnych rozwiązań projektowych, a ich posadowienie właściwego rozpoznania podłoża gruntowego, adekwatnego do kategorii geotechnicznej obiektu budowlanego.

Słowa kluczowe: rozpoznanie podłoża gruntowego; głęboki wykop; tereny zamknięte.

Abstract. The article presents the problems that arise at the initial stage of construction of a building, resulting from inadequate identification of the subsoil. Investments in closed areas often involve critical infrastructure facilities or special facilities that require individual, special design solutions. The development of appropriate design solutions for their foundation requires proper reconnaissance of the subsoil, adequate to the geotechnical category of the building object.

Keywords: subsoil investigation; deep excavation; closed areas.

W celu spełnienia wymagań urbanistycznych, ekonomicznych oraz zapobiegania niedrożności komunikacyjnej konieczne stało się korzystanie z przestrzeni podziemnej [1, 2]. Dotyczy to również inwestycji na terenach zamkniętych. Budowa nowych obiektów często prowadzona jest w bezpośrednim sąsiedztwie otaczających je budynków i elementów architektury oraz obiektów zabytkowych [3]. Bezpiecznej przebudowie poddawane są również obiekty zabytkowe, które wymagają szczególnej ostrożności ze względu na rozwiązania konstrukcyjne. Przykładem takiego wyzwania, zakończonego sukcesem bez awarii obiektów pobliskich, była przebudowa Hali Koszyki w śródmieściu Warszawy [4].

Wykonawstwo głębokich wykopów w terenie zabudowanym, poza problemem zapewnienia odpowiednio nośnej obudowy, wiąże się z koniecznością dodatkowego zabezpieczenia budynków

w sąsiedztwie wykopu przed uszkodzeniami na skutek nierównomiernego osiadania podłoża gruntowego, występującego poza obudową. Niewątpliwie, w zależności od głębokości posadowienia budowli, wykop w mniejszym lub większym stopniu narusza naturalny stan gruntu, wpływa na położenie podziemnych wód gruntowych i oddziałuje na otoczenie. Wynika z tego realne ryzyko uszkodzenia obiektów pobliskich, a nawet awaria sąsiedniego obiektu budowlanego przez zmianę warunków wodno-gruntowych [5, 6] lub przemieszczeń podłoża spowodowanego odciążeniem głębokim wykopem. W skrajnym przypadku może wystąpić szkoda mienia materialnego oraz ryzyko utraty życia ludzi w wyniku katastrofy budowlanej w postaci zniszczenia sąsiedniego obiektu budowlanego [7, 8, 9]. Kluczowym zagadnieniem jest wykrywanie uszkodzeń i ocena budynków przez rozmieszczenie czujników w istotnych miejscach ze względu na bezpieczeństwo konstrukcji oraz rozważenie oceny warunków miejscowych i określenie zakresu kontroli. Zaawansowana technologia czujników i metoda systematycznego monitorowania budynku w czasie

rzeczywistym pozwala przewidzieć uszkodzenia budynku [10]. W reakcji na występowanie takich zdarzeń powstały prace naukowe koncentrujące się na ocenie ryzyka uszkodzenia budynku, wywołanego głębokim wykopem, oraz opracowano uproszczone metody szacowania ruchów podłoża gruntowego powstałych w wyniku wykopów, w celu oceny potencjalnych uszkodzeń sąsiednich budynków.

Uszkodzenia wywołane wykopami wiążą się ze złożonymi interakcjami grunt-konstrukcja budynku i skomplikowanymi ruchami gruntu, które należy ocenić na głębokości posadowienia sąsiednich budynków. W [11] przedstawiono empiryczne oraz półempiryczne metody uproszczonych równań do prognozowania wartości zarówno osiadania powierzchni terenu, jak i przemieszczeń poziomych obudowy wykopu w pobliżu głębokich wykopów. Do oszacowania wskaźnika potencjału uszkodzeń (ang. *damage potential index* – DPI) wykorzystano modele oceny z uwzględnieniem sztywności strukturalnej i podpowierzchniowych ruchów gruntu lub bez uwzględnienia tych modeli. Natomiast na przykładzie słabono-

¹⁾ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji

²⁾ Ministerstwo Obrony Narodowej, Departament Infrastruktury

* Adres do korespondencji: ryszard.chmielewski@wat.edu.pl

śnego podłoża w Szanghaju zaproponowano w [12] metodę przewidywania profilu osiadania powierzchni terenu na podstawie dużej liczby danych pomiarowych z głębokich wykopów, która okazała się odpowiednia do szacowania osiadania powierzchni terenu oraz przemieszczenia sąsiednich budynków wraz oceną ich uszkodzeń. W celu wykonania poprawnej oceny sytuacji kluczowe jest właściwe dobranie zastosowanych kryteriów uszkodzenia. W [13] pokazano kryteria zniszczenia w przypadku numerycznej analizy stateczności wyrobisk podziemnych, które określają poziom naprężenia (lub poziom odkształcenia) w chwili utraty stateczności ściany wykopu z uwzględnieniem zakresu stosowania różnych kryteriów i praktycznych ograniczeń w ich numerycznej implementacji.

Do najbardziej istotnych czynników w projektowaniu obudów głębokich wykopów (zarówno projektowanych na stałe, jak i tymczasowych z otwartą powierzchnią wykopu) zalicza się właściwe określenie poziomu wód gruntowych, które mogą występować na kilku poziomach i mieć zwierciadło zarówno swobodne, jak i napięte. Konstrukcje oporowe mogą utracić stateczność i spowodować katastrofę budowlaną w wyniku błędnego wyznaczenia parametrów gruntu, niepoprawnego zamodelowania ośrodka gruntowego oraz zaprojektowania poziomych i pionowych elementów oporowych niespełniających wymaganych warunków wytrzymałości. W efekcie w konstrukcjach oporowych mogą wystąpić częściowe lub ogólne uszkodzenia [14].

Omawiane zjawiska występują w różnych częściach świata i stanowią problem dużych miast. W [15] poruszono tematykę metodologii oceny ryzyka uszkodzenia budynków w przypadku głębokich wykopów i prac tunelowych w podłożu na przykładzie projektu podziemnego systemu komunikacji zbiorowej w Bangkoku. Natomiast w [16] skupiono się na zachowaniu głębokich wykopów i uszkodzeń sąsiednich budynków na podstawie wykopu w grubej warstwie piasku w Wietnamie. Przeanalizowano zachowanie się ścian szczelinowych, wód gruntowych, deformacji powierzchni gruntu oraz budynku przylegającego z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

W Polsce do oceny wpływu głębokiego wykopu na obiekty pobliskie opracowana została instrukcja ITB nr 376 [17], która pozwala właściwie ocenić zagrożenie powstałe w tego typu inwestycjach. Istnieje wiele publikacji opisujących problemy niewłaściwego rozpoznania podłoża gruntowego oraz realizacji głębokich wykopów w naszym kraju, przedstawione w [18]. Ciekawe, praktyczne przykłady wpływu technologii wykonania obudowy głębokiego wykopu na czas jego oddziaływania oraz na czas prowadzenia odwodnienia omówiono w [19], gdzie oprócz przykładów krajowych przedstawiono również realizację stacji metra w Paryżu.

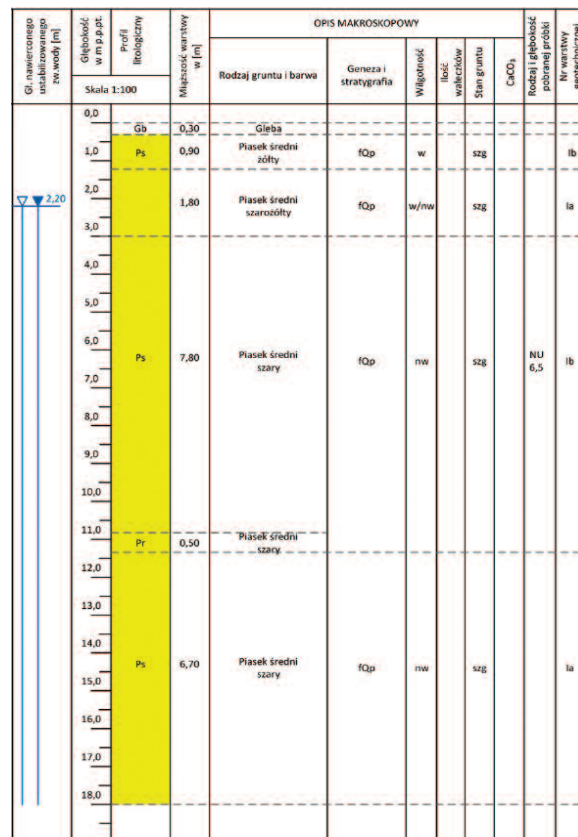
Badanie podłoża gruntowego na potrzeby inwestycji

W artykule omówiono dwa aspekty związane z wykonywaniem głębokich wykopów przy niedostatecznym rozpoznaniu warunków gruntowo-wodnych. Pierwszy z nich dotyczy uszkodzenia obiektu sąsiedniego, natomiast drugi braku skutecznego zabezpieczenia wykopu przed napływem wód gruntowych.

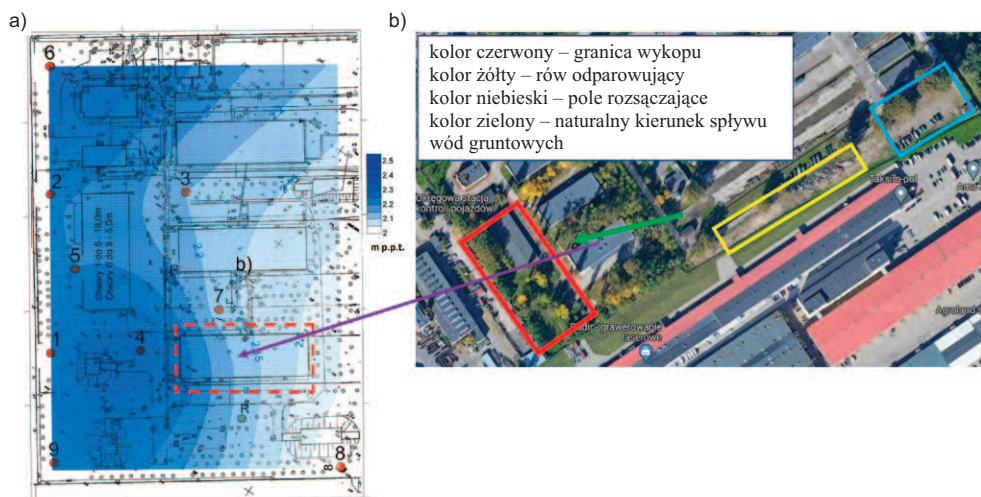
Nowo projektowany budynek to obiekt specjalny, z dwiema kondygnacjami nadziemnymi i jedną podziemną. Wysokość kondygnacji w świetle (od dołu), to 6,30, 5,60 oraz 4,90 m. Powierzchnia zabudowy wynosi ok. 4,5 tys. m², wymiary w planie, to ~94 x ~48 m, a wysokość użytkowa 11,20 m powyżej poziomu terenu. Projektowane posadowienie budynku stanowi płyta fundamentowa o grubości 0,80 m, kotwiona mikropalami w rozstawie 3,50 m.

Przed rozpoczęciem inwestycji, w lipcu 2017 r. opracowana została, w porozumieniu z projektantami, dokumentacja geologiczno-inżynierska [20]. Badania do dokumentacji przeprowadzono w celu określenia warunków gruntowych. Ich zakres obejmował wykonanie dziewięciu otworów badawczych małogabarytową wiertnicą mechaniczną MWG-6 z rurowaniem otworów oraz trzech sondowań ciężką sondą dynamiczną DPH. Pięć otworów wykonano do głębokości 18,0 m p.p.t., nato-

miast cztery do głębokości 5,0 m p.p.t., a sondowania DPH zrealizowano przy trzech otworach na głębokości 6,0 ÷ 9,0 m p.p.t. W otworach badawczych stwierdzono, że pod warstwą nasypów niekontrolowanych o grubości ok. 0,80 m występowały piaski drobne/średnie zagęszczone do pełnej głębokości rozpoznania, tj. do 18,0 m p.p.t. Przykładową kartę dokumentacyjną otworu wiertniczego nr 1 przedstawiono na rysunku 1. Górny poziom wód gruntowych zaczynał się na głębokości 2,00 ÷ 2,48 m p.p.t. Wody te występowały do pełnej głębokości otworów badawczych. Nie rozpoznano podłoża do głębokości warstw nieprzepuszczalnych. Opracowana została również mapa głębokości ustabilizowanego ich poziomu. Na rysunku 2a przedstawiono lokalizację punktów badawczych oraz poziom ustabilizowanego pierwszego zwierciadła wód gruntowych, a kolorem czerwonym obiektu, który uległ awarii. Rysunek 2b pokazuje przyjęty system odwodnienia wykopu, z którego wynika, że zaprojektowano odwodnienie w kierunku przeciwnym do naturalnego kierunku spływu wód gruntowych.



Rys. 1. Karta dokumentacyjna otworu wiertniczego nr 1
Fig. 1. Documentation sheet of drilling borehole no. 1



Rys. 2. Lokalizacja obiektu: a) mapa hydroizohips ustabilizowanego pierwszego poziomu wód gruntowych [m] od poziomu terenu [17]; b) lokalizacja obiektu, który uległ awarii
Fig. 2. Location of the building: a) map of hydroisohips of the stabilized first groundwater level in [m] from the ground level [17]; b) location of the failed building facility

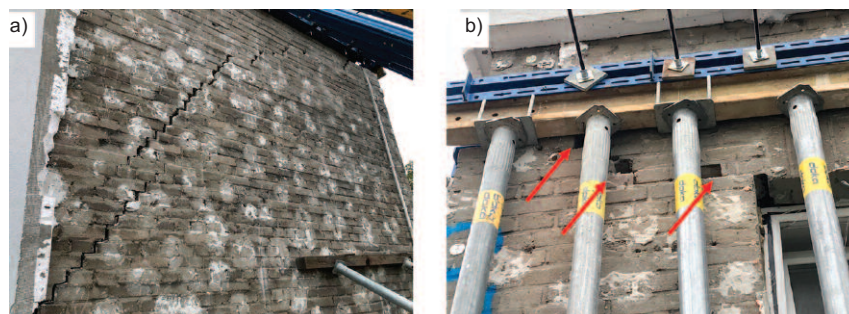
Przy projektowanym poziomie posadowienia obiektu 7,2 m p.p.t. zakres rozpoznania podłoża do głębokości punktów badawczych 6 ÷ 9 należy uznać za niewystarczający. Zgodnie z normą [21] minimalna głębokość badania powinna wynosić 16,4 m p.p.t., czyli głębokość wykopu poniżej jego dna plus dwa metry (załącznik B3, punkt 10 pkt b normy). Zgodnie z rozporządzeniem [22] § 7 pkt 2 w przypadku obiektów budowlanych drugiej kategorii geotechnicznej, w złożonych warunkach gruntowych (co określono w [20]), należy opracować dokumentację badań podłoża gruntowego oraz projekt geotechniczny. W dokumentacji projektowej takie dokumenty nie występują. Badania stanu gruntu sondą DPH wykonano w otworach 2, 3, 5, stąd brak było informacji o stanie gruntów w obszarze punktów badawczych 1, 4, 9. Liczba i głębokość punktów badawczych, określających stan gruntów (sondowań DPH) były niewystarczające do oceny podłoża gruntowego [20].

Na podstawie rozpoznania podłoża postanowiono, że obudowa będzie w postaci ścianki szczelnej zagłębionej wibracyjnie. W trakcie wykonywania tej obudowy doszło do awarii sąsiedniego budynku magazynowego, zaznaczonego na rysunku 2a kolorem czerwonym. Awaria wynikała z przyjętej technologii wibracyjnego zagłębienia ścianki szczelnej w nawodnionych piaskach w stanie luźnym. W wyniku tego doszło

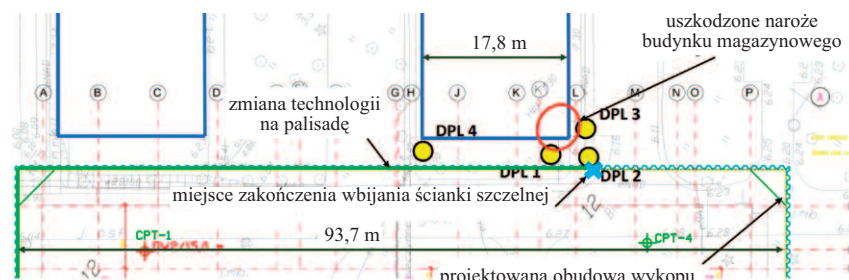
do dogęszczenia gruntu w podłożu, a w efekcie do nadmiernego osiadania i oderwania naroża budynku, które znajdowało się w odległości ok. 5,0 m od zagłębianej obudowy. Stan ścian elewacji uszkodzonego budynku przedstawiono na fotografii 1.

W celu sprawdzenia zmian, jakie wystąpiły w podłożu, zalecono wykonanie czterech dodatkowych sondowań dynamicznych DPL w pobliżu uszkodzonego budynku [23]. Na rysunku 3 pokazano

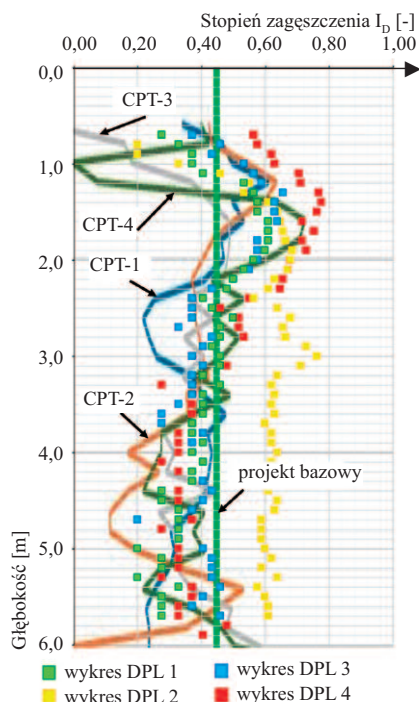
lokalizację dodatkowych punktów badawczych, kolorem czerwonym fragment budynku, który uległ awarii. Natomiast na rysunku 4 przedstawiono dodatkowe badania DPL wraz z wynikami badań wykonanych w trakcie budowy i wartością przyjętą przez projektanta. Zauważyć można zgodność wyników dodatkowych sondowań dynamicznych (DPL 1; DPL 3; DPL 4) z pomiarami sondowań CPT wykonanymi w trakcie budowy. Poniżej posadowienia budynku magazynowego (tj. 1,40 m p.p.t.) występują grunty zagęszczone, głębiej grunty luźne i luźne na granicy z gruntami średniozagęszczonymi o stopniu zagęszczenia ok. $I_D = 0,30$. Wyraźnie różnią się wyniki sondowania DPL 2, które ze względu na najmniejszą odległość od wykonywanej obudowy przedstawiają zagęszczenie powstałe wskutek wibracyjnej metody zagłębienia ścianki szczelnej. Stopień zagęszczenia w tym miejscu zwiększył się do $I_D = 0,60$. Potwierdza to wynik sondowania DPL 4, wykonanego w miejscu, gdzie nie były prowadzone prace związane z wibracyjnym zagłębieniem obudowy. Dalszą część obudowy wykonano w postaci palisady wierconej. Uszkodzony róg budynku rozebrano i odtworzono (fotografia 2). W ramach robót naprawczych wzmocniono posa-



Fot. 1. Naroże budynku magazynowego uszkodzone w wyniku nadmiernego osiadania: a) ściana wzdłuż obudowy wykopu; b) ściana prostopadła do obudowy wykopu
Photo 1. Corner of a warehouse building damaged as a result of excessive subsidence: a) wall along the excavation lining; b) wall perpendicular to the excavation lining



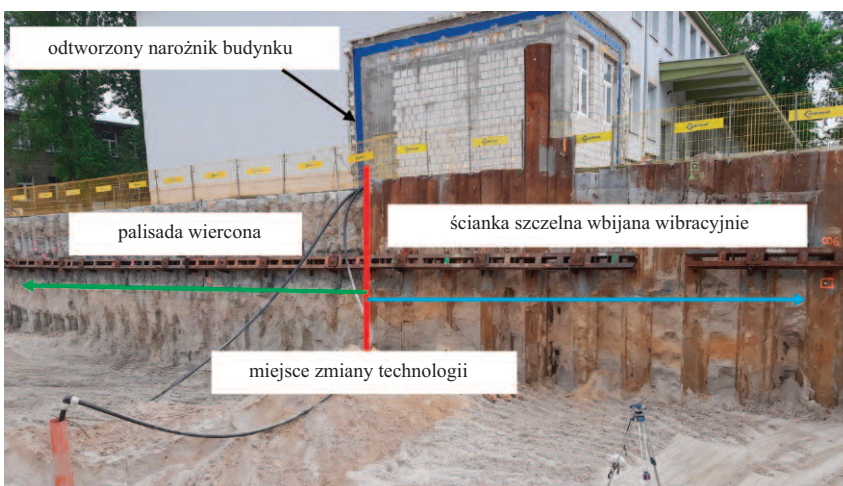
Rys. 3. Lokalizacja dodatkowych punktów badawczych – sondowań DPL [19]
Fig. 3. Location of additional research points – DPL (dynamic penetration light) [19]



Rys. 4. Wyniki dodatkowych badań podłoża w odniesieniu do badań archiwalnych [19]
 Fig. 4. Results of additional subsoil tests in relation to archival research [19]

dowienie za pomocą mikropali, zarówno w części odtwarzanej, jak i wzdłuż całej pozostałej części ściany szczytowej.

Kolejnym zagadnieniem do rozwiązania było **zapewnienie odwodnienia wykopu**. Projektant zaproponował wykonanie ścianki szczelnej do głębokości 10,0 m p.p.t. oraz zastosowanie sześciu igłostudni, rozmieszczonych równomiernie wewnątrz obudowy wykopu co ok. 25 m, które przy odprowadzaniu 120 m³ wody na godzinę miały zapewnić możliwość wykonania głębokiego wykopu pod obiekt. Zgodnie z zapisami w dokumentacji [20] ścianka z grodzic stalowych powinna zabezpieczać tereny sąsiednie przed wykroczeniem leja depresji w okresie prowadzenia odwodnienia poza teren należący do inwestora. Podczas wizji lokalnej, wykonywanej na zlecenie inwestora i wykonawcy po naprawie uszkodzenia budynku magazynowego, zwrócono uwagę na oznaki występowania wód gruntowych bezpośrednio pod powierzchnią dna wykopu, który w tamtej chwili miał głębokość ok. 4,0 m p.p.t. Po upływie ok. 30 min pojawiło się w wykopie zwierciadło wód gruntowych, widoczne w postaci śladów podmakania (fotografia 3a) i zwierciadła wód w wykopie (fotografia 3b).

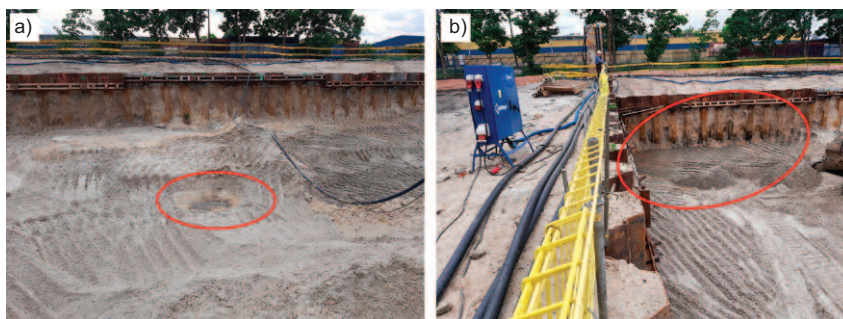


Fot. 2. Odtworzona część budynku oraz obudowa wykopu w zmienionej technologii
 Photo 2. Reconstructed part of the building and the excavation lining in the changed technology

Po sprawdzeniu poziomu wód gruntowych w trzech piezometrach założonych w odległości ok. 15,0 m poza obudowę wykopu okazało się, że ich poziom obniżył się o ok. 2,0 m. Sprawdzenie poziomu wód gruntowych w piezometrach pozwoliło również na weryfikację kierunku ich spływu. Odprowadzenie wód spod dna wykopu realizowane było przez zbiornik rozsączający oraz igłofiltr wgłębne w rejonie punktu badawczego 8, widocznego na rysunku 2. Naturalny kierunek spływu wód gruntowych widoczny jest na rysunku 2b (przebiega z punktu 8 do punktów 4 i 1). Kierunek ten potwierdziły również wskazania w piezometrach, dlatego też woda usuwana z wykopu napływała w jego kierunku.

Wykonawca zwiększył liczbę igłostudni do dwunastu, czyli podwoił ich liczbę, i usuwał do 340 m³ wody z wykopu na godzinę. Nie pozwoliło to jednak na obniżenie wód gruntowych do poziomu umożliwiającego dalsze głębinne wykopu. Poziom wód gruntowych

w piezometrach na zewnątrz wykopu obniżył się o ok. 4,0 m. Dalsze zwiększanie ilości odprowadzanej wody stanowiłoby realne zagrożenie dla obiektów pobliskich, wynikające zarówno z obniżania poziomu wód gruntowych pod nimi, jak również z możliwości powstawania lokalnych rozmyć struktury podłoża gruntowego. W związku z tym podjęto decyzję o czasowym wstrzymaniu robót oraz opracowaniu rozwiązań naprawczych. Rozważano wykonanie przesłony poziomej pod dnem wykopu oraz przesłony pionowej wokół wykopu, od końca obudowy już istniejącej do warstw gruntów nieprzepuszczalnych. Do ustalenia rozwiązania skutecznego i mniej narażonego na niepowodzenie wykonano wokół wykopu dodatkowe 23 otwory badawcze, na podstawie których ustalono, że poziom gruntów nieprzepuszczalnych znajduje się na głębokości 23,5 ÷ 25,8 m p.p.t. W tej sytuacji podjęto decyzję o wykonaniu przesłony pionowej, co w odniesieniu do układu warstw oraz



Fot. 3. Pojawienie się wody gruntowej w wykopie: a) oznaki wysokiego poziomu wód gruntowych pod dnem wykopu; b) wyraźne zwierciadło wód gruntowych w wykopie
 Photo 3. The presence of groundwater in the excavation: a) signs of high groundwater level under the bottom of the excavation; b) visible groundwater level in the excavation

poziomu wód gruntowych jest rozwiązaniem uzasadnionym. W chwili składania tego artykułu uzyskano projektowaną rzędną dna wykopu i rozpoczęto realizację mikropali kotwiących płytę denną. Obecnie na potrzeby realizacji części podziemnej budynku, zgodnie z informacjami uzyskanymi od wykonawcy, wypompowywane jest ok. 240 m³ wody na godzinę. Nadal jest to ilość przeszło dwukrotnie większa od określonej przez projektanta, który takiej przesłony nie przewidywał. Dość znaczna ilość wynika z nieszczelności samej przesłony, ale dodatkowo wpływ ma niepełna nieszczelność na styku przesłony z wcześniej wykonaną obudową. Można byłoby uniknąć tej dodatkowej nieszczelności, gdyby od początku zaprojektowana została szczelna obudowa wykopu sięgająca warstwy gruntów spoiстых, stanowiących wymaganą warstwę utrudnień filtracyjnych.

Podsumowanie

Wykonawstwo głębokich wykopów wiąże się z wieloma zagrożeniami, jakkolwiek istnieją narzędzia [17, 21, 22], które umożliwiają właściwe ich zaprojektowanie i bezpieczne wykonanie nawet w bezpośredniej styczności z obiektami istniejącymi. W przypadku omawianego obiektu projektant określił drugą kategorię geotechniczną w złożonych warunkach gruntowych zgodnie z rozporządzeniem [22], ale nie zalecił opracowania dokumentacji z badań podłoża gruntowego oraz projektu geotechnicznego. Rodzaj obudowy wykopu przewidziany w projekcie okazał się rozwiązaniem niewłaściwym do realizacji inwestycji. Wynika to zarówno z technologii jej wykonania, która doprowadziła do uszkodzenia budynku sąsiedniego, jak i ze względu na zabezpieczenie odprowadzenia wód gruntowych z wykopu w trakcie realizacji samego obiektu. Woda do wnętrza wykopu napływała zarówno spod krawędzi obudowy, jak i od dołu wykopu. Właściwe zaprojektowanie obudowy wymagałoby ustalenia stanu gruntów na pełnej głębokości wykopu i poziomu zalegania warstw nieprzepuszczalnych.

W dokumentacji [20] założono ocenę stanu gruntów niespoistych występujących w podłożu (piasków drobnych/średnich) tylko w ograniczonym rejonie i na głębokości zbliżonej do poziomu po-

sadowienia. Braki w dokumentacji projektowej spowodowały utrudnienia w realizacji inwestycji oraz konieczność dodatkowych badań w trakcie realizacji. Na etapie przygotowywania ofert na opracowanie dokumentacji projektowej projektanci często nie uwzględniają konieczności wykonania dodatkowego rozpoznania podłoża gruntowego, co później powoduje często konieczność ich uzupełniania, wydłuża proces realizacji inwestycji, a czasami może skutkować awarią lub katastrofą budowlaną. Powoduje to również zwiększenie kosztów inwestycji. W opisanym przypadku koszty usunięcia awarii budynku magazynowego oraz koszty zmiany sposobu zabezpieczenia przed napływem wód gruntowych (dodatkowa przesłona pionowa) były ponad dwa rzędy wielkości większe od kosztów dodatkowych badania podłoża gruntowego, a cały koszt inwestycji o 12%, nie uwzględniając kosztów postojów oraz wzrostu cen i inflacji.

Inwestycje na terenach zamkniętych często dotyczą obiektów infrastruktury krytycznej bądź obiektów specjalnych, które wymagają indywidualnych, specjalnych rozwiązań projektowych. Wymaga to właściwego rozpoznania podłoża gruntowego adekwatnego do kategorii geotechnicznej obiektu budowlanego. Projektanci często pomijają rozpoznanie podłoża gruntowego i opracowanie dokumentacji w zakresie wymaganym rozporządzeniem [22], pomimo że to oni ponoszą odpowiedzialność za skutki związane z tym ryzykiem.

Literatura

- [1] Nikolai B. Underground space as an urban indicator: measuring use of subsurface. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016; <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.10.024>.
- [2] Broere W. Urban underground space: solving the problems of today's cities. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016; <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.11.012>.
- [3] Niedostatkiewicz M. Building modernization located in the conservation protection zone in the aspect of technical conditions. *Safety Engineering of Anthropogenic Objects*. 2022; <https://doi.org/10.37105/iboa.133>.
- [4] Chmielewski R, Kruszka L. Ekspertyzy i opinie techniczne z zakresu budownictwa. WAT, 2005–2022.
- [5] Son M, Cording EJ. Responses of buildings with different structural types to excavation-induced ground settlements. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*. 2011; [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000448](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000448).
- [6] Bian Y-H, Huang HW. Risk assessment of building damage induced by deep excavation. *Chinese J. Geotech. Eng.* 2006; 28: 1892–1896.

[7] Yildizlar B, Akcay C, Coşgun T. Damages in adjacent structures due to foundation excavation. Conference: Fourth International Conference on Advances in Civil, Structural and Environmental Engineering – ACSEE 2016; <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-114-6-28>.

[8] Finno RJ, Voss FT, Rossow E. Evaluating Damage Potential in Buildings Affected by Excavations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2005; [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:10\(1199\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1199)).

[9] Yu S, Geng Y. Influence Analysis of Underground Excavation on the Adjacent Buildings and Surrounding Soil Based on Scale Model Test. *Advances in Civil Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6527175>.

[10] Sivasuriyan A, Vijayan DS, Górski W, Wodzyński Ł, Vaverková MD, Koda E. Practical Implementation of Structural Health Monitoring in Multi-Story Buildings. *Buildings*. 2021; <https://doi.org/10.3390/buildings11060263>.

[11] Ou Ch-Y, Teng F, Li Ch-W. A simplified estimation of excavation-induced ground movements for adjacent building damage potential assessment. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103561>.

[12] Wang W-D, Xu Z-H. Simplified analysis method for evaluating excavation-induced damage of adjacent buildings. *Chinese J. Geotech. Eng.* 2010; 32: 32–38.

[13] Heidarzadeh S, Saeidi A, Rouleau A. The damage-failure criteria for numerical stability analysis of underground excavations: A review. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103633>.

[14] Öser C, Sayin B. Geotechnical assessment and rehabilitation of retaining structures collapsed partially due to environmental effects. *Engineering Failure Analysis*. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.eng-failanal.2020.104998>.

[15] Aye ZZ, Karki D, Schulz Ch. Ground Movement Prediction and Building Damage Risk Assessment for the Deep Excavations and Tunneling Works in Bangkok Subsoil. *International Symposium on Underground Excavation and Tunneling*. 2006.

[16] Huynh TQ, Lai VQ, Boonyatee T, Keawsawsvong S. Behavior of a Deep Excavation and Damages on Adjacent Buildings: a Case Study in Vietnam. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. 2020; <https://doi.org/10.1007/s40515-020-00142-7>.

[17] Wysokiński L, Kotlicki W. Instrukcja ITB nr 376. Ochrona zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów. Wytuczne. Instytut Techniki Budowlanej. ISBN 978-83-249-8562-3.

[18] Godlewski T, Niemyjska M. Ryzyko geotechniczne w projektowaniu i realizacji głębokich wykopów. *ACTA SCIENTIARUM POLONORUM – Architectura Budownictwo*. <https://doi.org/10.22630/ASPA.2018.17.3.26>.

[19] Kacprzak G, Daktera T, Stańczyk A, Tomczak U, Bodus S, Werle M. An application of reinforced concrete vaulted slabs and rafts in deep excavation works. *Archives of Civil Engineering*. LXVII. <https://doi.org/10.24425/ace.2021.138043>.

[20] Dokumentacja geologiczno-inżynierska inwestycji. 2017 r.

[21] PN-EN 1997-2, Eurokod 1, Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.

[22] Rozporządzenie ministra transportu, budownictwa i gospodarki morskiej z 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych (Dz. U. 2012 poz. 463).

[23] Opinia techniczna weryfikująca warunki gruntowe i ich stan na terenie budowy. 2020.

Przyjęto do druku: 16.01.2023 r.