

ZEJŚCIE POD ZIEMIĘ

Część 1. technologie

prof. dr hab. inż. Anna Siemińska-Lewandowska
Politechnika Warszawska

Bezpieczne budowanie coraz głębszych części podziemnych budynków lub całych obiektów usytuowanych pod poziomem terenu jest związane z nowymi rozwiązaniami technologicznymi i innowacyjnymi metodami budowy. To z kolei wymaga stosowania nowoczesnych sposobów rozpoznania podłoża oraz zaawansowanych metod obliczeniowych.

Tytułowe „zejście pod ziemię” budynków w miastach stało się dzisiaj standardem zarówno w budownictwie mieszkaniowym, jak i w przypadku budynków użyteczności publicznej.

Dlaczego?

Szukanie dodatkowej powierzchni i przestrzeni w części podziemnej wynika z wielu czynników. Pierwszy i podstawowy powód to konieczność zapewnienia miejsc parkingowych mieszkańcom lub użytkownikom obiektu – najemcom powierzchni biurowej. Obecnie projektuje się 5, a nawet i 6 kondygnacji podziemnych przeznaczonych na garaże oraz wyposażenie techniczne (zbiorniki przeciwpożarowe, podszybia windowe, magazyny). Przy lokalizowaniu tego typu obiektów w zwartej, często zabytkowej tkance miejskiej konieczne jest zapewnienie bezpieczeństwa użytkownika projektowanego budynku oraz jego sąsiadów. Taka sytuacja często wymaga stosowania nowych, niekonwencjonalnych technologii budowy.

Kolejny czynnik to wykorzystywanie istniejącej infrastruktury, np. przemysłowej, i adaptowanie jej na cele kultury, sztuki czy edukacji. Wyśmienitym przykładem tego typu rozwiązania jest Muzeum Sztuki w Katowicach znajdujące się pod ziemią, na terenie dawnej kopalni węgla kamiennego, podziemne Muzeum Rynku Krakowskiego, a także elementy EC1 – Nowego Centrum Kulturalnego w Łodzi.

Powstają też śmiałe projekty, które z założenia lokują duże fragmenty obiektów pod poziomem terenu. Najbardziej spektakularnymi przykładami są Muzeum II Wojny Światowej w Gdańsku, którego prawie cała kubatura znajduje się w głębokim wykopie, oraz Centrum Dialogu Przelomy w Szczecinie, które zdobyło tytuł Budynku Roku 2016 na World Architecture Festival w Berlinie.

W obszarze budownictwa infrastrukturalnego dobry przykład to ostatnio oddany do eksploatacji podziemny Dworzec Łódź Fabryczna. Wybudowano go w wykopie o głębokości 18 m, a perony kolejowe znajdują się na najniższym poziomie dworca.

Wykorzystanie przestrzeni podziemnej w miastach jest obecnie jednym z poważniejszych wyzwań dla urbanistów, architektów, konstruktorów oraz specjalistów z zakresu budownictwa podziemnego i szeroko pojętej geoinżynierii.

Innym zagadnieniem jest wykorzystywanie istniejącej zabytkowej tkanki miejskiej i jej przebudowa związana ze zmianą funkcji obiektu (np. hotel, apartamentowiec) i pogłębianiem piwnic, tak aby stworzyć miejsca parkingowe lub dodatkową powierzchnię np. na cele rekreacji (basen, siłownię itp.).

Wychodząc poza granice naszego kraju i kontynentu, należy spojrzeć na kraje Dalekiego Wschodu oraz Ameryki Południowej. W tzw. *megacities* przestrzeń podziemna jest wykorzystywana do coraz większej głębokości. Oprócz funkcji typowo użytkowej, związanej z mieszkalnictwem, pod poziomem terenu lokuje się transport, magazyny paliw płynnych czy infrastrukturę chroniącą przed skutkami klęsk żywiołowych, głównie powodzi, sztormów lub fal tsunami (Tokio, Hong Kong, Kuala Lumpur lub Bangkok). W gęsto zaludnionych miastach strefy tropikalnej sytuowanie pod poziomem terenu ruchu pieszego, dużych powierzchni handlowych, sal konferencyjnych jest ucieczką i ochroną przed temperaturą oraz opadami deszczu.

Z kolei w krajach Północy, np. w Skandynawii, mimo niewielkiej populacji Finlandii, Norwegii czy Szwecji, w dużych miastach można poruszać się podziemnymi korytarzami od stacji kolejowych, metra do centrów handlowych, kin, hal sportowych czy mieszkań, nie wychodząc na powierzchnię terenu i uciekając od chłodu, śniegu i mrozu.

Wykorzystanie przestrzeni podziemnej w miastach jest w chwili obecnej jednym z poważniejszych wyzwań dla urbanistów, architektów, konstruktorów oraz specjalistów z zakresu budownictwa podziemnego i szeroko pojętej geoinżynierii. Prognozy demograficzne mówią, że w 2050 r. blisko 70% populacji naszej planety będzie żyło w miastach, co oznacza powstanie wielu wspomnianych powyżej *megacities* z gęstą zabudową wysokimi budynkami o głębokich podziemiach. Na powierzchni terenu po prostu zabraknie miejsca.

Jest to problem, który dostrzega ONZ, działając w ramach programu agencji UN HABITAT i prowadząc ogólnosiwiatową kampanię pod nazwą Better City, Better Life, co w wolnym tłumaczeniu oznacza, że „im lepsza organizacja miasta, tym lepsza w nim jakość życia”. W te działania wpisuje się również Międzynarodowe Stowarzyszenie Budowy Tuneli i Przestrzeni Podziemnej ITA-AITES, które powołało specjalny komitet ITACUS (ITA Committee on Underground Space) propagujący zrównoważony rozwój miast i wykorzystanie w tym rozwoju przestrzeni podziemnej. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w publikacjach [1, 2], a także pod adresem www.ita-aites.org/committees/itacus.



Fot. arch. Warbud

Bezpieczne budowanie coraz głębszych części podziemnych budynków lub całych obiektów usytuowanych pod poziomem terenu jest związane z nowymi rozwiązaniami technologicznymi i innowacyjnymi metodami budowy. To z kolei wymaga stosowania nowoczesnych sposobów rozpoznania podłoża oraz zaawansowanych metod obliczeniowych.

Technologie

Pierwsza dekada XXI wieku w Polsce to dalszy rozwój budownictwa kubaturowego i projekty coraz wyższych oraz głębszych posadowień budynków i budowli. Inwestycje w obiekty biurowe, hotelowe i handlowe, szczególnie w dużych miastach kraju, nadal rosną i są impulsem do ciekawych oraz innowacyjnych rozwiązań. Rozwiązania te dotyczą zarówno technologii wykonania obudowy głębokiego wykopu i części konstrukcyjnej podziemi, jak i działań związanych z ograniczeniem wpływu wody gruntowej czy poprawą warunków geotechnicznych.

Najczęściej stosowane obecnie technologie budowy głębokich podziemi wykorzystują:

- ściany szczelinowe;
- iniekcję strumieniową, tzw. *jet-grouting*;
- mikropale;
- kotwy gruntowe – tymczasowe i trwałe;
- specjalne technologie wzmacniania i uszczelniania podłoża;
- nowoczesne technologie betonowania;
- wzmocnienia skarp, np. gwoździowanie.

Należy dodać, że są to technologie znane i stosowane od lat, jednak stale trwa ich rozwój i pojawiają się coraz ciekawsze rozwiązania techniczne. Poniżej przedstawiono krótki opis wybranych technologii, a w kolejnym numerze, w drugiej części artykułu, omówione będą dwa przykłady zastosowania z ostatnich lat.

Ściany szczelinowe

Technologia wykonywania ścian szczelinowych jest znana i stosowana od lat 60. XX wieku. Szczegółowo opisano ją w publikacjach [3–7] oraz w normie [8]. Ściana szczelinowa to konstrukcja wykonywana w gruncie, którą wykonuje się sekcjami o długości od około 3 m do 6 m. Ściany szczelinowe najczęściej mają grubość 60 cm, 80 cm, 100 cm oraz 120 cm i są jednocześnie elementem konstrukcyjnym podziemnej części obiektu. Głębokość ściany szczelinowej wynosi na ogół od 15 m do 30 m, dla różnych głębokości projektowanej części podziemnej. Obecnie wykonuje się ściany o głębokości 40 m i 50 m, przy czym nie są one zbrojone na całej wysokości. Długości szkieletów zbrojeniowych wynikają z obliczeń statycznych obudowy wykopu, natomiast tak duże zagłębienie jest najczęściej związane z koniecznością ograniczenia napływu wód gruntowych do dna wykopu, np. poprzez posadowienie spodu ściany szczelinowej w nieprzepuszczalnych warstwach gruntu. Również ze względu na parcie wody gruntowej pomiędzy sekcjami instaluje się specjalne elementy roz-

dzielcze wyposażone w gumową uszczelkę, która ma za zadanie zapewnić szczelność styku. Trzeba mieć jednak świadomość, że nie zawsze ściany szczelinowe są szczelne, zarówno na stykach sekcji, jak i w strukturze ściany. Betonowanie sekcji odbywa się metodą betonowania podwodnego Contractor, tzn. mieszanka betonowa układana jest rurą wlewową (najczęściej stosuje się dwie rury na jedną sekcję), począwszy od dna szczeliny wypełnionej zawiesiną ilową zapewniającą stateczność wykopu szczelinowego. Mieszanka ta nie jest wibrowana, co przy szkieletach zbrojeniowych wykonanych z prętów żebrowanych o średnicy powyżej 25 mm, często łączonych na zakład, powoduje zły jej rozptyw. Skład mieszanki betonowej powinien być dobrany w sposób uniemożliwiający jej segregację podczas układania, zapewniający swobodny przepływ mieszanki betonowej wokół zbrojenia i po stwardnieniu uzyskanie materiału zagęszczonego i wodoszczelnego. Wymagania dotyczące wytrzymałości i trwałości stwardniałego betonu powinny być dostosowane do wymagań urabialności. Duże znaczenie ma również uziarnienie kruszywa. W celu uniknięcia segregacji kruszywo powinno mieć ciągłą krzywą uziarnienia. Maksymalny wymiar ziaren nie powinien przekroczyć mniejszej z następujących wartości: 32 mm lub 1/4 odległości w świetle pomiędzy prętami pionowymi. W celu zapewnienia swobodnego przepływu mieszanki betonowej oraz spełnienia wymagań normy [8] projektowana grubość otulenia powinna wynosić co najmniej 75 mm.

Wykonywanie tak głębokich sekcji wymaga stosowania odpowiedniego sprzętu – głębiarki o chwytaku linowym lub hydrofrezu. Jako ciecz stabilizującą najczęściej stosuje się zawiesinę ilową (bentoniową) o odpowiednio dobranych do rodzaju gruntu i poziomu wody gruntowej parametrach [8]. Używanie zawiesiny ilowej wymaga odpowiedniej, większej powierzchni placu budowy, gdzie znajdzie się wytwórnia zawiesiny, stacja oczyszczania, stacja pomp i laboratorium. Plac budowy wokół wykonywanej ściany jest zanieczyszczony gruntem wydobywanym ze szczeliny wymieszany z zawiesiną, który zanim zostanie wywieziony, musi być odpowiednio oczyszczony na sitach wibracyjnych i zutylizowany. Zawiesina po oddzieleniu i oczyszczeniu jest ponownie wykorzystywana. Sprzęt głębiący oraz samochody wywrotki wywożące urobek muszą zostać umyte, zanim wyjadą na ulice miasta.

Dlatego od szeregu lat czynione są próby z zastosowaniem innych cieczy stabilizujących, np. polimerów, które nie stwarzają konieczności utylizacji urobku, są rozpuszczalne w wodzie, ulegają degradacji i są przyjazne dla środowiska. Przełom w stosowaniu polimerów w inżynierii lądowej nastąpił w latach 90. ubiegłego wieku, gdy zaczęto przemysłową produkcję syntetycznych polimerów na bazie częściowo zhydrolizowanych poliakrylamidów PHPAs. Początkowo zawiesiny polimerowe stosowano w wykonawstwie pali wierconych [9–11]. Badania laboratoryjne oraz polowe dowiodły [12], że zawiesina polimerowa (dodatek polimeru wagowo 0,05% w stosunku do 1 m³ zawiesiny) z niewielkim dodatkiem bentonitu (dodatek wagowo 1% na 1 m³ zawiesiny) zapewnia dostateczną stateczność ścian szczeliny

oraz uzyskanie gładziej powierzchni betonowej sekcji ściany. Dzięki temu można zrezygnować z dodatkowego wykończenia wewnętrznej powierzchni ściany, np. tynkowania. Badania te były prowadzone w gruntach niespoistych – silnie nawodnionych piaskach [12]. Stosowanie polimeru wiąże się z oszczędnościami w dozowaniu – 1 g polimeru zastępuje około 40 g bentonitu. Nie ma potrzeby utylizacji urobku, budowy wytwórni produkującej i separującej zawieszinę, a zużyty polimer może być odprowadzany bezpośrednio do kanalizacji. Zawiesiny polimerowe spełniają wymagania ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju. Natomiast dyskusyjny jest ekonomiczny aspekt stosowania tego typu zawieszin ze względu na wysoki (np. w Polsce) koszt polimerów. Z literatury wynika, że są one stosowane częściej w południowo-wschodniej Azji niż w Europie.

Technika wykonywania ścian szczelinowych jest w Polsce znana od lat 70. Obecnie istnieje wiele specjalistycznych przedsiębiorstw wykonawczych, które opanowały tę technologię na poziomie światowym. Ze względu na to, że jest to obudowa sztywna, niewymagająca przy sprzyjających warunkach zewnętrznego odwodnienia terenu, jest to technologia stosowana w Polsce powszechnie jako obudowa wykopu na terenie miejskim. W połączeniu z wykorzystaniem stropów konstrukcyjnych obiektu powstającego w wykopie (tzw. metoda stropowa lub półstropowa) jako elementów zapewniających stateczność obudowy gwarantuje znaczne ograniczenie oddziaływania budowy na sąsiednie objekty i infrastrukturę podziemną. Stosując metodę budowy nazywaną *top&down*, można dodatkowo skrócić czas budowy i ograniczyć odprężenie zarówno dna wykopu, jak i przyległego terenu. Ciężar budowanej jednocześnie z częścią podziemną konstrukcji naziemnej dociąga podłoże i ogranicza zjawisko odprężenia dna wykopu. Wadą tego rozwiązania jest konieczność ścisłego przestrzegania postępu robót oraz reżimów technologicznych. Nawet niewielkie opóźnienia powodują gwałtowne zmiany w harmonogramie prac i zamiast oczekiwanych korzyści wynikających ze skrócenia czasu realizacji obiektu może dojść nawet do znacznych przekroczeń terminu zakończenia robót. W tej metodzie budowy duża odpowiedzialność spoczywa zarówno na generalnym wykonawcy, jak i na podwykonawcach. Dlatego w Polsce nie jest ona powszechnie stosowana.

Iniekcja strumieniowa

Iniekcja strumieniowa, nazywana potocznie technologią *jet-grouting*, jest stosowana w budownictwie do wzmacniania i uszczelniania podłoża gruntowego, do głębokich posadowień, a także do tymczasowego wzmacniania sklepień tuneli. Od szeregu lat kolumny *jet-grouting* są wykorzystywane jako obudowy głębokich wykopów i konstrukcje wzmacniające fundamenty różnego rodzaju obiektów kubaturowych i infrastrukturalnych.

Iniekcja strumieniowa polega na upłynnianiu gruntu strumieniem cieczy o ciśnieniu 30–70 MPa i mieszanii tego gruntu z zaczynem cementowym. W zależności od sposobu upłynniania (wodą, zaczynem cementowym lub wodą i sprężonym powietrzem, ewentualnie zaczynem cementowym i sprężonym powietrzem) rozróżnia się iniekcję pojedynczą, podwójną i potrójną. Żerdź z dyszami jest zagłębianą w gruncie do żądanej głębokości, a następnie ruchem obrotowym skokowo wyciągana z jednoczesną iniekcją. Średnica uzyskiwanej w ten sposób kolumny zależy od sposobu upłynniania, uziarnienia gruntu oraz szybkości unoszenia żerdzi i waha się od 60–70 cm do nawet kilku metrów [13]. Kolumna taka może osiągać wytrzymałości od kilku do kilkunastu MPa (w wyjątkowych przypadkach, np. w gruntach gruboziarnistych, takich jak pospółki – do 30 MPa). Z wzajemnie przyległych kolumn formowana jest ściana tworząca obudowę wykopu. Stateczność jej można zapewnić, montując na oczepach rozporę stalowe lub kotwy gruntowe. Szczegółowe informacje o tej technologii, jak też o innych metodach wzmacniania podłoża, znajdują się w publikacji [14], natomiast wymagania i wytyczne dotyczące wykonywania iniekcji strumieniowej podaje norma [15]. Informacje tech-

niczne można znaleźć na stronach specjalistycznych przedsiębiorstw wykonawczych [16].

Dzięki możliwości wykonywania kolumn *jet-grouting* z poziomu piwnic istniejących budynków można obecnie pogłębiać podziemia istniejących obiektów (np. zabytkowych), wzmacniać fundamenty starych kamienic podczas budowy w sąsiedztwie nowoczesnych biurów czy z głębokimi podziemiami czy też adaptować istniejące budynki do innych funkcji. Przykłady takich zastosowań to rewitalizacje Gmachu Audytorium Uniwersytetu Warszawskiego [17], przedwojennych kamienic w centrum Warszawy przy ul. Poznańskiej i Polnej [18] oraz Foksal 13 i 15 [19]. W każdym z tych przypadków przeprowadzono:

- szczegółową inwentaryzację stanu technicznego budynku, a także budynków sąsiednich;
- badania geotechniczne podłoża pod obiektem oraz w sąsiedztwie;
- analizę oddziaływania głębokiego wykopu na otoczenie;
- analizę wzmocnienia fundamentów;
- dobór parametrów iniekcji strumieniowej, tzn. rodzaju technologii (pojedyncza czy podwójna), rozstawu kolumn, układu kolumn, składu iniektu, stosunku w/c, ciśnienia iniekcji oraz prognozę średnicy kolumny;
- obliczenia stateczności fundamentów po wzmocnieniu;
- projekt monitorowania osiadań fundamentów;
- program badań wytrzymałościowych materiału kolumny.

Analiza danych z monitorowania konstrukcji, ocena projektu wzmocnienia fundamentów kolumnami *jet-grouting* i dalsza nadbudowa oraz rewitalizacja budynków pokazały, że technologia iniekcji strumieniowej umożliwia „zejście pod ziemię” nawet w przypadku obiektów w złym stanie technicznym. ■

Bibliografia

- [1] Sustainable Urban Underground Development, ITACUS, dostępny www.ita-aites.org/en/wg-committees/committees/itacus/downloads.
- [2] Urban Underground Space in a Changing World, ITACUS, dostępny www.ita-aites.org/en/wg-committees/committees/itacus/downloads.
- [3] Grzegorzewicz K., Kloński B., Rychlewski P., Warunki techniczne wykonania i odbioru ścian szczelinowych. Wydawnictwo Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, 2014.
- [4] Kloński B., Wytyczne stosowania ścian szczelinowych, materiały z Seminarium IBDiM ściany szczelinowe 2010, str. 69–77.
- [5] Puller M., Deep excavations, a practical manual. London, Thomas Telford, 1996.
- [6] Siemińska-Lewandowska A., Głębokie wykopy. Projektowanie i wykonawstwo. WKiŁ, 2010.
- [7] Siemińska-Lewandowska A., Metody projektowania ścian szczelinowych, materiały z Seminarium IBDiM ściany szczelinowe 2010, str. 31–56.
- [8] PN-EN 1538:2010 Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Ściany szczelinowe.
- [9] Bustamante M., Gianesselli L., Performance of polymer slurries in large diameter pile, 3th International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, 19–21 October 1998, Balkema, str. 119–127.
- [10] Thasnanipan N., Zaw Zaw Aye et al., Behaviour of Polymer-based Slurry for Deep-seated Bored Piles in Multi-layered Soil of Bangkok, Proceeding of the 4th International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles 2-4 June 2003, Ghent, Belgium, str. 177–184.
- [11] Thasnanipan N., Zaw Zaw Aye et al., Performance of Wet-Process Bored Piles Constructed with Polymer-Based Slurry in Bangkok Subsoil, Proceedings of the International Deep Foundations Congress, Orlando 2002, vol.1 str. 143–157.
- [12] Lam C., Jefferis S.A., The use of polymer solution for deep excavations: lesson from Far Eastern experience, HKIE Transactions, Taylor Francis 2014, <http://dx.doi.org/10.1080/1023697X.2014.970749>.
- [13] T. Michalski, Zastosowanie iniekcji strumieniowej w celu zabezpieczenia ścian głębokiego wykopu, „Inżynieria i Budownictwo”, nr 10/2004, str. 523–526.
- [14] Kirsch K., Bell A., Ground improvement, CRC Press, Taylor & Francis 2013.
- [15] PN-EN 12716:2001 Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Iniekcja strumieniowa.
- [16] www.keller.pl.
- [17] Waliszewska Z., Żak M., Dzik G., Zastosowanie technologii „jet-grouting” przy wzmacnianiu budynków w zwartej zabudowie miejskiej, materiały seminarium IBDiM Wzmacnianie podłoża i fundamentów 2017, str. 87–98.
- [18] Grela M., Traczyński K., Wzmocnienie fundamentów w sąsiedztwie głębokich wykopów, materiały seminarium IBDiM Wzmacnianie podłoża i fundamentów 2017, str. 87–98.
- [19] Barański B., Traciewicz Ł., Budowa wielopoziomowego garażu podziemnego w zabytkowych kamienicach Foksal 13 i 15 w Warszawie, materiały seminarium IBDiM Wzmacnianie podłoża i fundamentów 2017, str. 63–78.

Abstract. Modern solutions arising from the “going underground” of buildings in cities. This article presents the technologies most commonly used today in the construction of deep undergrounds.

Keywords: diaphragm walls, jet-grouting, displacement analysis, underwater concreting