

Zastosowanie technologii jet grouting przy wzmocnianiu budynków w zwartej zabudowie miejskiej

tekst: mgr inż. ZOFIA WALISZEWSKA, mgr inż. MARCIN ŻAK, mgr inż. GRZEGORZ DZIK, Keller Polska Sp. z o.o.

Rozwój cywilizacyjny coraz częściej wymusza konieczność poszukiwania technologii umożliwiających efektywne zagospodarowanie dostępnej przestrzeni miejskiej. Na terenach silnie zurbanizowanych przebudowa istniejących budynków oraz rewitalizacja obiektów zabytkowych może okazać się jedynym możliwym i rozsądnym rozwiązaniem. Tworzenie dodatkowych kondygnacji podziemnych lub pogłębianie istniejących piwnic umożliwia uzyskanie dodatkowej kubatury obiektu.

Wprowadzenie

Przykładem takiego działania jest gmach Auditorium Maximum Uniwersytetu Warszawskiego, zabytkowy budynek poddany rewitalizacji, położony w ścisłym centrum miasta, w którym podchwyciono fundamenty przy użyciu iniekcji strumieniowej jet grouting. Obiekt został wzniesiony w tradycyjnej technologii murowanej, z podłużnym układem ścian nośnych, oraz posadowiony bezpośrednio na gruncie za pośrednictwem łąw fundamentowych. Z upływem lat zmieniało się przeznaczenie budynku, pełnił on różne funkcje, a działania wojenne odcisnęły na nim swój ślad. W wyniku tego gmach był wielokrotnie przebudowywany.

W ostatnich latach budynek podlegał kolejnej modernizacji, która miała na celu przywrócenie obiektowi wyglądu z czasów jego świetności – rozbiórkom uległy wszystkie dobudówki zakłócające czystość formy budynku. Projekt rewitalizacji zakładał ponadto m.in. obniżenie poziomu posadzek piwnic w częściach podpiwniczonych oraz wykonanie dodatkowej kondygnacji podziemnej w części środkowej budynku, wcześniej niepodpiwniczonej. Duży zakres robót modernizacyjnych oraz warunki gruntowe charakteryzujące teren inwestycji wykluczały w zasadzie możliwość tradycyjnego podbijania fundamentów, polegającego na odcinkowym wykonaniu łąw betonowych. W tym przypadku zaprojektowano wykonanie podbicia fundamentów za pomocą iniekcji strumieniowej, której celem było zwiększenie podstawy posadowienia fundamentów, a także przeniesienie obciążenia na głębiej zalegające warstwy gruntu. Podchwytująca fundament bryła cementogruntu miała również za zadanie zapewnić stateczność konstrukcji w sytuacji zwiększonych wartości obciążeń użytkowych działających na podłoże.

W artykule autorzy przedstawili kolejne etapy procesu wzmocniania fundamentów, począwszy od projektowania, przez wykonawstwo, aż po kontrolę jakości wykonania gotowych elementów iniekcyjnych.

Rys historyczny budynku

Gmach audytorijny został wzniesiony w latach 1820–1822 według projektu Michała Kado i Piotra Aignera jako bliźniaczy

do tzw. Gmachu Sztuk Pięknych, a obecnie Wydziału Historii Uniwersytetu Warszawskiego, obydwa w stylu klasycystycznym. W pierwotnym projekcie na parterze znajdowała się duża sala „uroczystości uniwersyteckich” – audytorium. W drugiej połowie XIX w. (ok. 1865 r.) budynek został gruntownie przebudowany, a na parterze zmieniono kształt okien – z półkolistych na prostokątne. W wyniku bombardowań we wrześniu 1939 r. została częściowo zburzona południowa ściana szczytowa i uszkodzeniu uległo pokrycie dachu. Gmach jednak nie spłonął.

Budynek wzniesiono w technologii tradycyjnej, murowanej, z podłużnym układem ścian nośnych. Ściany poprzeczne pełnią funkcję usztywnień. Gmach posadowiony był bezpośrednio na gruncie za pośrednictwem murowanych łąw fundamentowych o szerokości ok. 100 cm. Poziom posadowienia murów piwnic znajdował się 50 cm poniżej posadzki piwnicy, a w części niepodpiwniczonej ok. 165 cm poniżej poziomu terenu.

Prace przygotowawcze poprzedzające wzmocnienie budynku

Firma Keller Polska Sp. z o.o. została wybrana do pełnienia funkcji generalnego wykonawcy rewitalizacji budynku audytorijnego Uniwersytetu Warszawskiego w trybie przetargu nieograniczonego i odpowiadała za wykonanie I etapu prac, tj. wyburzenie niepotrzebnych elementów konstrukcyjnych w piwnicach oraz wzmocnienie podłoża za pomocą technologii jet grouting zgodnie z przekazaną dokumentacją projektową.



Ryc. 1 i 2. Budynek przed remontem – miejsce na zaplecze budowy (UW)

Budynek audytoralny położony jest w centrum Warszawy, na terenie kampusu uniwersyteckiego, co stanowiło duże przedsięwzięcie logistyczne dla wykonawcy wzmocnienia. Kampus jest ograniczony ulicą Krakowskie Przedmieście, zabudowaniami klasztoru siostr Wizek, ulicą Obożną i parkiem Kazimierzowskim oraz jest wpisany do rejestru zabytków. Na etapie prac przygotowawczych, pomimo udostępnienia posiadanej przez inwestora dokumentacji konstrukcji budynku oraz dokumentacji geologicznej, wykonawca musiał zadbać o dodatkowe informacje, które pozwoliły mu bezpiecznie wykonać prace:

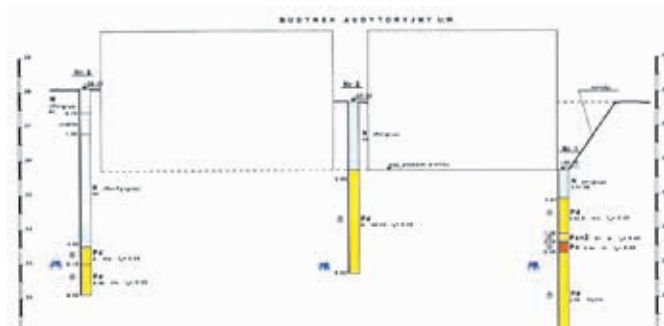
- pozyskać wiedzę dotyczącą kierunków przebiegu stropów, rodzaju wieńców, miejsc występowania podciągów, obciążeń fundamentów, występowania i rozmiarów odsadzek fundamentowych;
- uzupełnić przekroje fundamentów o dodatkowe poziomy, np. terenu i posadzki w piwnicach oraz poziomy posadowienia budynków istniejących w bezpośrednim sąsiedztwie obiektu;
- uzupełnić informacje o materiałach, z których zbudowane są ściany i fundamenty (kamienie, cegła, beton, żelbet), materiałów i konstrukcji posadzek (piasek, wylewka, beton) z grubościami warstw, obciążeniami od posadzki;
- wykonać uzupełniające badania geotechniczne;
- uzupełnić informacje o etapach i technologii wykonywania wykopu, metodach zabezpieczenia niepodbijanych ścian, możliwościach wykonania kotew lub rozpór;
- pozyskać informacje o instalacjach znajdujących się w zasięgu prac pod budynkiem, jak woda, kanalizacja, c.o., kable elektryczne, telefoniczne, światłowodowe oraz różnego typu drenaże, inwentaryzacja rys i spękań zabezpieczanych budynków;
- uzgodnić harmonogram dostaw materiałów, wielkość sprzętu dostawców, możliwość zajęcia terenu pod zaplecze, trasy dojazdu, możliwe godziny pracy;
- uzgodnić monitoring sąsiednich budynków oraz monitoring sieci kanalizacyjnej w kampusie.

Analiza warunków gruntowo-wodnych została przeprowadzona na podstawie udostępnionych przez inwestora wyników badań z lipca 2010 r., badań uzupełniających oraz profili odkrywek fundamentów wykonanych w październiku 2014 r. Otwory badawcze oraz sondowania wykonano do głębokości 6,00 m pod poziomem terenu lub pod poziomem posadzki w piwnicach. W podłożu stwierdzono występowanie nasypu z mieszaniny gruzu z humusem, zalegającego do głębokości 0,80÷2,00 m. Poniżej warstwy nasypu stwierdzono występowanie warstwy rodzimych piasków drobnoziarnistych, piasków średnich, pospółek i żwiru w stanie średnio zagęszczonym, o wartościach stopnia zagęszczenia $I_p = 0,40$. Poziom wody gruntowej o swobodnym zwierciadle stwierdzono w warstwie piasków drobnoziarnistych na głębokości ok. 4,80 m poniżej poziomu powierzchni terenu. Zgodnie z rozporządzeniem MSWiA w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadowienia obiektów budowlanych, dla inwestycji ustalono II kategorię geotechniczną, uwzględniając warunki gruntowe, czynniki konstrukcyjne charakteryzujące możliwości przeniesienia odkształceń, stopień złożoności oddziaływań, stopień zagrożenia życia i mienia awarią konstrukcji, a także wartość zabytkową.



Ryc. 3. Lokalizacja inwestycji na planach

Na podstawie badań geotechnicznych stwierdzono, że ze względu na ok. 180-letnią historię budynku audytoralnego i możliwość zmiennego użytkowania obiektu zaleca się opracowanie szczegółowej ekspertyzy technicznej gmachu. Przyjęto również, że osiadania konstrukcji nośnej zostały zakończone. Ekspertyza określiła stan budynku jako dobry. Wykazała m.in., że obecne naprężenia w poziomie posadowienia wynoszą ok. 200 kPa. Na podstawie wykonanych badań geotechnicznych stwierdzono, że odpory graniczne w gruncie pod ścianami murowanymi nie mogą przekroczyć 300 kPa po zwiększeniu obciążeń w ramach przebudowy.



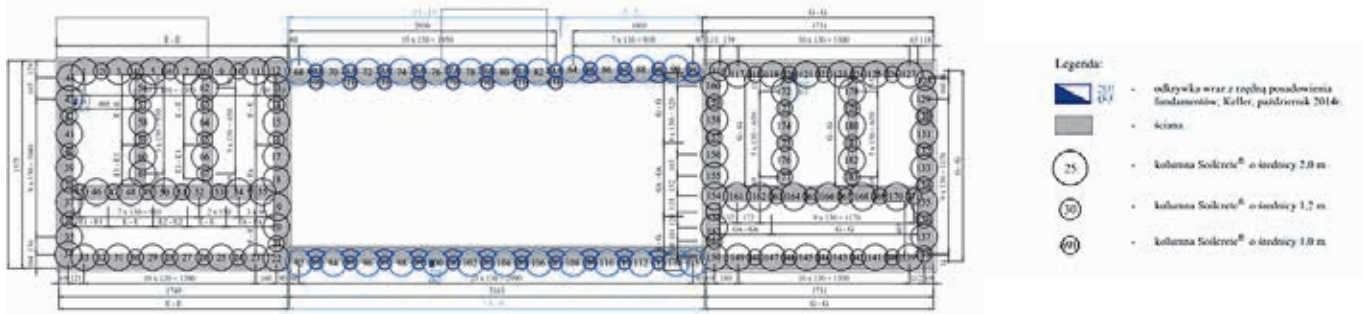
Ryc. 4. Typowy przekrój geologiczny, oprac. Geotechnika Budowli AMD

Proces projektowania podchwycenia fundamentów

Zadaniem wykonawcy robót było doszczegółowienie dostarczonego projektu wykonawczego podbicia, jednak przed przystąpieniem do realizacji prac wykonawca przeprowadził dodatkowo własną analizę stateczności proponowanej konstrukcji podchwycenia fundamentów.

Dodatkowa analiza projektowa dzieliła fundamenty budynku audytoralnego na odcinki pod względem zróżnicowania poziomów posadowienia obiektu, różnic poziomów posadzek piwnic przed planowaną przebudową i po niej oraz planowanej funkcji danej strefy budynku, a także wymiarów minimalnej projektowanej bryły cementogruntu. W programie GGU-Underpin dobrano odpowiednią kubaturę cementogruntu oraz sprawdzono możliwość wystąpienia stanów granicznych zgodnie z Eurokodem 7. W analizie uwzględniono sprawdzenie:

- położenia wypadkowej obciążeń w podstawie fundamentu,
- równowagi statycznej – stateczności konstrukcji na obrót (EQU),
- nośności na wyparcie gruntu (GEO),
- nośności na przesunięcie (GEO),
- nośności konstrukcji cementogruntovej (STR),
- osiadań konstrukcji (ULS).



Ryc. 5. Plan rozmieszczenia kolumn pod fundamentami budynku – projekt technologiczny

Zakres projektu technologicznego obejmował również opracowanie szczegółowego planu rozmieszczenia kolumn jet grouting, ustalenie receptury iniektu, ustalenie etapowania prac i warunków kontroli wykonawstwa. Do wykonania podchwycenia fundamentów budynku wybrana została metoda podwójnej iniekcji strumieniowej (Soilcrete®-D). Wykonanie wydzielonych lub połączonych ze sobą brył cementogruntu, o gabarytach dostosowanych do wymogów projektowych, odbywa się przez wprowadzenie w podłoże rury wiertniczej, zakończonej tzw. monitorem. Z dyszy monitora wydostaje się pod bardzo dużym ciśnieniem, do rzędu 400 at, strumień zaczynu otulony sprężonym powietrzem. Dzięki wysokiej energii strumienia dochodzi do rozluźnienia struktury gruntu. Przy udziale turbulencji zaczynu cementowy miesza się z gruntem i doprowadza do zeskalenia gruntu. Kontrolując w precyzyjny sposób ruch rury wiertniczej (prędkość podciągania i obrót), uzyskuje się pożądany kształt i zasięg zeskalenia. Wykonywanie zeskalonej bryły odbywa się bez wstrząsów.

Uwzględniając warunki gruntowe oraz konieczność wykonywania kolumn zarówno z zewnątrz obiektu, jak i od wewnątrz – w ciasnych pomieszczeniach gmachu, dobrano parametry technologiczne iniekcji strumieniowej podane w tabeli 1.

W środkowej części budynku, po szczegółowym zapoznaniu się z jego konstrukcją i po przeanalizowaniu ewentualnych zagrożeń związanych z brakiem ścian poprzecznych usztywniających konstrukcję, a także ze względu na przybudówki występujące od południowo-zachodniej strony, uniemożliwiające wykonanie iniekcji z zewnątrz obiektu, od nowa zaprojektowano przekrój F-F.

Z uwagi na konieczność wykonania bryły o znacznych rozmiarach oraz stan konstrukcji murew budynku założono następujące niestandardowe etapowanie prac: w pierwszej kolejności zaplanowano wykonane dłuższych kolumn o mniejszej średnicy, zapewniających przeniesienie części sił na niżej położone warstwy mocnych piasków. W drugiej kolejności należało wykonać krótsze kolumny o większej średnicy. Założono również wykonanie w danym obszarze iniekcji co piątej kolumny, chcąc osiągnąć w ten sposób efekt przesklepienia i w jak najmniejszym stopniu osłabić grunt pod ławami fundamentowymi. Kolejność wykonywania elementów iniekcyjnych przedstawiono na rycinach 7 i 8, na przykładach przekrojów F-F i F1-F1.

W przypadku wykonywania kolumn podchwytujących z wewnątrz budynku, zgodnie ze schematem przekroju F-F, w pierwszym etapie założono wykonanie ćwiartek kolumn iniekcyjnych o promieniu 1,0 m (a₁), ograniczając ruch obrotowy monitora, a następnie bez wyciągania żerdzi iniekcyjnej na powierzchnię ponowne zagłębienie monitora i z tego samego poziomu po-

zątku iniekcji co wcześniejsza kolumna, wykonanie kolumny o promieniu 0,6 m o tej samej długości (iniekcja świeży w świeżym; b₁). Po wykonaniu kolumn zapewniających przeniesienie części sił na niżej położone warstwy gruntu (c₁) kolumny wypełniające o średnicy 2,0 m można będzie wykonywać w dowolnej kolejności (pierwotny – wtórny; d₁), ciągle obserwując osiadania obiektu. Odstęp czasowy pomiędzy dwoma sąsiednimi elementami iniekcijnymi nie może być mniejszy niż czas potrzebny na związanie cementogruntu i osiągnięcie wytrzymałości większej od „wyciętego” gruntu.

Na przekrój F1-F1 składa się kombinacja dwóch kolumn o średnicy 1,0 m (kolumny wykonywane w pierwszej kolejności) i jednej kolumny wypełniającej o średnicy 2,0 m. Na początku przewidziano wykonanie jednej z kolumn o mniejszej średnicy położonej niżej (a₂), a następnie drugiej (iniekcja świeży w świeżym; b₂). Podobnie jak w przypadku kolumn realizowanych zgodnie z przekrojem F-F, po wykonaniu kolumn zapewniających przeniesienie części sił na niżej położone warstwy gruntu (c₂), kolumny o średnicy 2,0 m można było

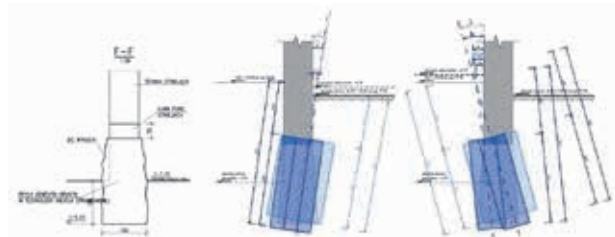
Tab. 1. Zestawienie parametrów technologicznych iniekcji używanych na budowie

Parametry technologiczne		Projektowane rozwiązania
Rodzaj technologii		Soilcrete®-D
Średnica kolumny	[cm]	60÷200
Odstęp elementów	[m]	zmienny
Prędkość podciągania	[cm/min.]	22–62
Prędkość obrotowa	[obr/min.]	3–15
Wydajność pompy iniekcyjnej (maksymalna), Q _z	[l/min.]	320
Ciśnienie zaczynu	[MPa]	40
Współczynnik woda / cement, w/c	[-]	1,0
Gęstość zaczynu, ρ	[t/m ³]	1,5
Kąty wiercenia	[°]	6÷33
Dysze		2 x 4,0 mm lub 1 x 5,5 mm
Wydajność sprężarki, Q _p	[l/min.]	5000
Ciśnienie powietrza	[MPa]	0,5
Rodzaj cementu		CEM I i CEM II 32,5R
Minimalna wytrzymałość cementogruntu	[MPa]	3,5

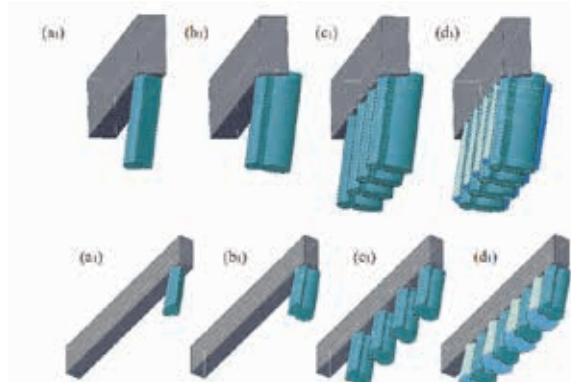
wykonywać w dowolnej kolejności (pierwotny – wtórny; d_2), ciągle obserwując osiadania obiektu.

Po zakończeniu każdej iniekcji konieczne jest ciągle i bardzo staranne wypełnianie otworów wiertniczych zaczynem iniekcyjnym i kontrolowanie poziomu zaczynu w wykonanych otworach, a w przypadku stwierdzenia ubytków natychmiastowe uzupełnienie poziomu zaczynu.

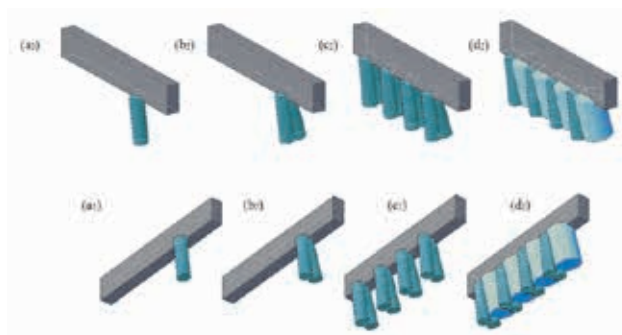
Jak pokazano powyżej, szczegółowe przemyślenie ewentualnych skutków przeprowadzenia procesu iniekcji strumieniowej oraz planowanie kolejnych kroków działania już na etapie projektu technologicznego ograniczają w znacznym stopniu późniejsze problemy z wykonawstwem na budowie oraz poprawiają wynik czasowy i ekonomiczny inwestycji.



Ryc. 6. Charakterystyczny przekrój poprzeczny podbicia fundamentów F-F: (po lewej) według projektu wykonawczego, (w środku) według projektu technologicznego realizowany z zewnątrz budynku – F-F, (po prawej) według projektu technologicznego realizowany od wewnątrz budynku – F1-F1



Ryc. 7. Widok 3D fragmentu ławy fundamentowej i podchwytyjących ją elementów iniekcyjnych – kolejność wykonywania iniekcji w przekroju F-F



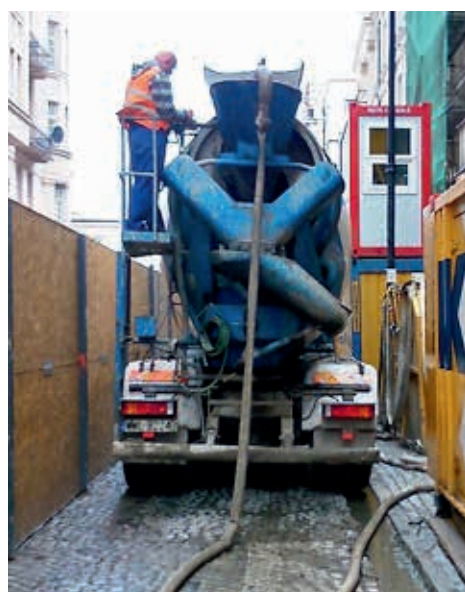
Ryc. 8. Widok 3D fragmentu ławy fundamentowej i podchwytyjących ją elementów iniekcyjnych – kolejność wykonywania iniekcji w przekroju F1-F1

Realizacja prac

Prowadzenie prac w zwartej zabudowie miejskiej niesie ze sobą wiele problemów logistycznych, o których zarówno inwestorzy, jak i generalni wykonawcy na etapie wyboru firmy specjalistycznej woleliby nie mówić lub je przemilczeć. A jednak jest ich niewątpliwie wiele: wąskie uliczki, parkujące samochody, bardzo małe place budowy, brak miejsca na zaplecze i urobek, zieleń, której nie można uszkodzić, niezliczona liczba instalacji zinwentaryzowanej, jak i tej niezidentyfikowanej oraz ograniczona możliwość dostarczenia sprzętu i materiału na budowę.



Ryc. 9 i 10. Widok na zaplecze części technologicznej w kampusie oraz w centrum miasta



Ryc. 11–13. Metody gromadzenia i usuwania urobku: (po lewej) w betonowozach, (w środku) w kontenerach, (po prawej) w dołach na urobek



Ryc. 14–16. Prace zabezpieczające instalacje: (po lewej) wzdłuż ściany, (w środku) na placu budowy, (po prawej) przewiertu rdzeniowe fundamentów

W przypadku omawianej budowy konieczne było wykonanie tymczasowej zmiany organizacji ruchu na ul. Oboźnej oraz uzyskanie odpowiednich zezwoleń dla ciężkiego transportu kołowego. W ciasnych uliczkach kampusu uniwersyteckiego, z reguły zastawionych samochodami, konieczna była współpraca ze strażą uniwersytecką, która koordynowała, zgodnie z wcześniej ustalonym planem, wszelkie dostawy oraz transport. Ze względu na usytuowanie budynku wśród drzewostanu podlegającego ochronie oraz sąsiedztwo stacji meteorologicznej, jak również mocno ograniczoną przestrzeń placu budowy ustawienie zaplecza technologiczno-socjalnego było sporym wyzwaniem.

Standardowe odstojniki kopane w gruncie, służące do gromadzenia urobku powstałego podczas iniekcji, zostały zastąpione przez szczelne kontenery na gruz o pojemności 5,5 m³. Zabieg ten podyktowany był również dużą liczbą różnego rodzaju czynnych instalacji przebiegających pod drogami oraz chodnikami w najbliższym sąsiedztwie budynku, których nie można było czasowo wyłączyć ani też uszkodzić, gdyż obsługiwały kampus i budynki sąsiednie.

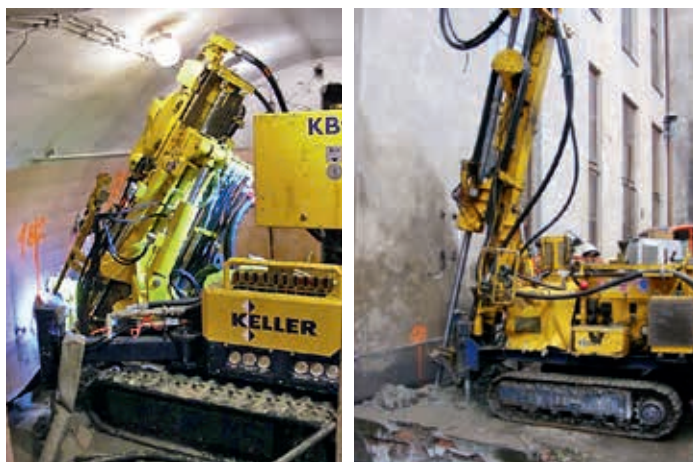
Podczas rewitalizacji budynku audytoryjnego UW prace iniekcyjne były przeprowadzane za pomocą dwóch maszyn. Realizację prac rozpoczęto z poziomu terenu z zewnątrz gmachu za pomocą wiertnicy KB-0. Następnie zmieniono wiertnicę na KB-1 i wprowadzono ją przy użyciu żurawia do wnętrza

obiektu przez otwór technologiczny wykonany w dachu przybudówki. Maszyna KB-1 jest przystosowana do wykonywania iniekcji w szczególności w ciasnych pomieszczeniach o niskich stropach. Dzięki małym rozmiarom i specjalnemu mechanizmowi sterowania maszyny wykonywanie iniekcji było możliwe nawet w niskich pomieszczeniach o sklepieniu łukowym.

Obie wiertnice zostały zaopatrzone w komputery monitorujące M5, które rejestrowały na bieżąco parametry procesu iniekcji, tj. prędkość podnoszenia monitora, prędkość obrotową dyszy, ciśnienie podawania iniektu, przepływ iniektu, objętość mieszanki w metrze kolumny, czas podnoszenia i uzależniały ich zmienność od aktualnej głębokości przeprowadzonych procesów.

Projekt technologiczny zakładał przewiercenie fundamentów dla wykonania podbicia posadowienia budynku. W tym celu podczas wiercenia wykorzystywano specjalny młotek udarowy do przebijania się przez konstrukcję murową. Dodatkowo w ramach kontroli jakości wykonywania iniekcji strumieniowej:

- prowadzono obserwację wizualną cech urobku i wydajności wypływu u wylotu z otworu;
- w trakcie przewiercania fundamentów każdorazowo weryfikowano poziom posadowienia fundamentów w stosunku do danych zawartych w projekcie technologicznym;
- każda kolumna została opatrzona metryką opisującą parametry wykonywania procesu iniekcyjnego;
- w celu uzyskania dodatkowej kontroli wykonywanych elementów iniekcyjnych sprawdzono wytrzymałość na ściskanie próbek formowanych z wypływającego urobku;
- z kolumn iniekcyjnych po 28 dniach od daty iniekcji metodą wiercenia pobrano rdzenie i poddano je badaniom wytrzymałościowym na ściskanie;
- zgodnie z wymaganiami normowymi dokonywano pomiaru gęstości zaczynu iniekcyjnego;
- kontrolowano wymiary wykonywanych elementów iniekcyjnych przez pomiar średnicy świeżo wykonanych kolumn za pomocą parasola pomiarowego;
- na bieżąco kontrolowano geodezyjnie przemieszczenia podchwytywanej konstrukcji budynku;
- uprawniony geodeta dokonał pomiaru zerowego, okresowych kontroli oraz pomiaru końcowego (po zakończeniu robót iniekcyjnych) w celu określenia całkowitych przemieszczeń konstrukcji spowodowanych realizacją podchwycenia;



Ryc. 17 i 18. Wiertnica podczas pracy: (po lewej) wiertnica KB-0 podczas pracy na zewnątrz budynku, (po prawej) wiertnica KB-1 podczas pracy w piwnicach budynku

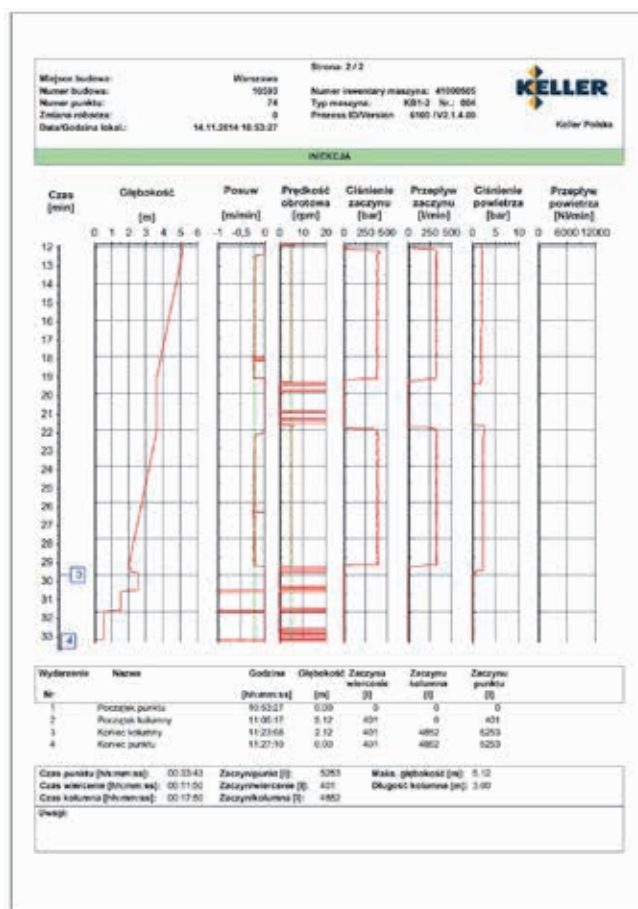
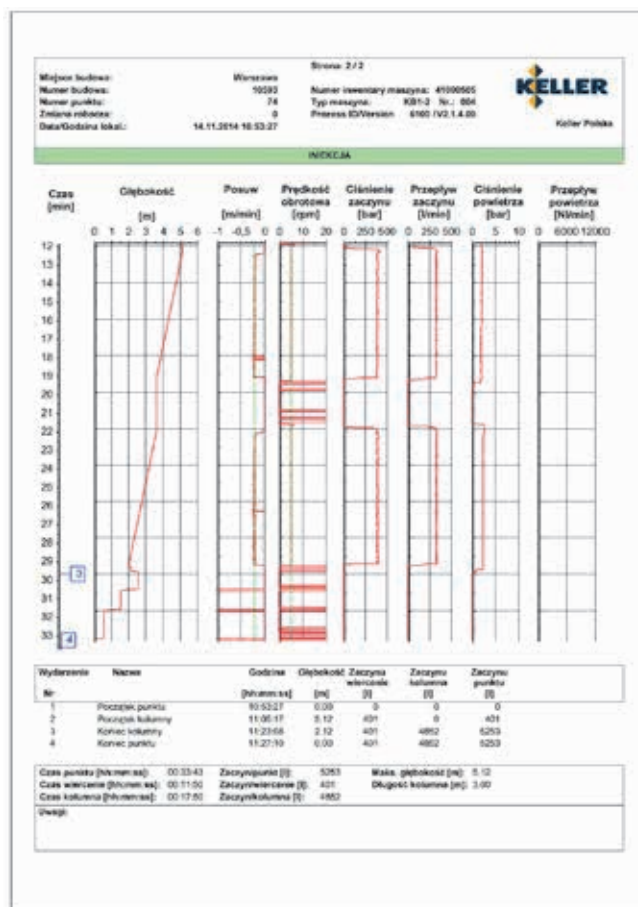


Ryc. 19 i 20. Parasol pomiarowy: (po lewej) pomiar średnicy świeżo wykonanej kolumny, (po prawej) widok urządzenia pomiarowego

dla określenia prędkości wiązania zaczynu cementowego pobierano próbki urobku wydostającego się na powierzchnię otworu iniekcyjnego. Próbki te podlegały kontroli po 12 i 24 godzinach, wykonywanej za pomocą penetrometru. W przypadku stwierdzenia zbyt małej średnicy kolumny lub zbyt wolnego czasu wiązania zaczynu należało odpowiednio skorygować przyjęte parametry technologiczne. Sprawdzenie wytrzymałości na ściskanie pięciu serii próbek formowanych z wypływającego urobku przeprowadzono na próbkach sześciennych o wymiarach 150 x 150 x 150 mm. Wytrzymałość próbek sprawdzano po 28 dniach. Minimalna wytrzymałość cementogruntu po tym czasie została określona jako 3,5 MPa, co stanowi 70% wytrzymałości docelowej, równej 5,0 MPa. Zależność ta została określona na podstawie doświadczenia wykonawcy. Analiza wyników wykazała, że wszystkie próbki uzyskały wytrzymałość wyższą niż minimalna wymagana wytrzymałość po 28 dniach i docelowo wszystkie próbki osiągnęły prawie dwukrotnie wyższą wytrzymałość po 56 dniach niż 5,0 MPa.

Proces wykonania iniekcji strumieniowej podczas realizacji podbicia fundamentów był rejestrowany i udokumentowany w postaci odpowiedniej metryki za pomocą komputera M5. Na każdej metryce widnieje symbol konkretnej kolumny, nazwa budowy i dokładna data wykonania iniekcji wraz z godziną rozpoczęcia i zakończenia procesu oraz informacją o zmienności parametrów danego procesu w miarę postępu prac. Kluczowe, szczególnie przy wykonywaniu iniekcji mającej na celu umożliwienie pogłębienia poziomu piwnicy, jest podanie danych o geometrii kolumny (poziomach rozpoczęcia i zakończenia iniekcji) oraz o ilości zaczynu użytego podczas iniekcji kolumny.

Ze względu na charakter prac niezbędne okazało się prowadzenie ciągłego monitoringu przemieszczeń podbijanych fundamentów. W tym celu zainstalowano układ pomiarowy dowiązany do punktu wysokościowego zero, który nie podlegał przemieszczeniom. Pozostałe punkty wysokościowe rozmieszczono w rejonie robót, tak aby była możliwa ich ciągła obserwacja za pomocą niwelatora. Obserwację prowadzono co najmniej dwa razy dziennie, a uzyskane wyniki protokołowano. W czasie wykonywanych prac maksymalne zanotowane przemieszczenia konstrukcji osiągnęły 5 mm. Zainstalowano 12 punktów do badania przemieszczeń pionowych w postaci łatek kodowych naklejonych na elewację budynku oraz 10 punktów do badania przemieszczeń poziomych budynku, tarcz odbłaskowych zamontowanych na wysokości najwyższej kondygnacji, a także



Ryc. 21. Metryka kolumny iniekcyjnej nr 74: (u góry) proces wiercenia, (na dole) proces iniekcji



Ryc. 22. Wyniki pomiarów przemieszczeń pionowych punktów kontrolnych



Ryc. 23. Wyniki pomiarów przemieszczeń poziomych punktów kontrolnych

dodatkowo 10 punktów odniesienia rozmieszczonych na badanym obiekcie na wysokości ok. 2,0 m nad poziomem terenu. Stabilizację punktów przeprowadzono 9 października 2014 r.

Analizując wyniki przedstawionych pomiarów pionowych, stwierdzono, że maksymalne osiadania konstrukcji wystąpiły w skrajnych częściach obiektu, a różnice osiadań nie przekroczyły zalecanych w Instrukcji ITB wartości granicznych przemieszczeń konstrukcji budynków, ze względu na stan graniczny użytkowania równych 5 mm. Na budynku nie zaobserwowano powstania dodatkowych zarysowań konstrukcji. Obiekt osiadał równomiernie, a osiadania były spowodowane przeprowadzonym procesem iniekcji strumieniowej.

Podsumowanie

W związku z bardzo szybkim rozwojem wielkich miast, skutkującym zmniejszaniem się dostępnych pod zabudowę powierzchni, budownictwo coraz częściej opiera się na zmianie walorów użytkowania i uzyskiwaniu powierzchni w już istniejących obiektach zwartej zabudowy miejskiej. Współczesne technologie, takie jak iniekcja strumieniowa, pozwalają na kształtowanie konstrukcji w sposób dowolny i bezpieczny zarówno dla obiektu przebudowywanego, jak i dla otaczającej go zabudowy. Projektując oraz kontrolując w precyzyjny sposób proces wzmacniania fundamentów metodą iniekcji strumieniowej jet grouting, można uzyskać pożądany kształt i zasięg zeskalenia. Projekt iniekcji powinien szczegółowo określać kryteria kontroli procesu i zakres monitoringu – z uwzględ-

nieniem okresu poprzedzającego prace iniekcyjne, w czasie ich trwania oraz po ich zakończeniu. Założenia projektowe należy weryfikować podczas wykonywania robót, porównując je z uzyskiwanymi wynikami pomiarów, i jeżeli zachodzi taka potrzeba – modyfikować. Takie działania prowadzą do efektywniejszego wykorzystania technologii oraz przestrzeni miejskiej, a także umożliwiają odpowiednią ekspozycję zabytkowej zabudowy.

Literatura

- [1] Waliszewska Z.: *Podbicie fundamentów Budynku Audytoryjnego Uniwersytetu Warszawskiego za pomocą iniekcji wysokociśnieniowej*. Praca magisterska napisana pod kierunkiem dr. inż. Grzegorza Kacprzaka, Politechnika Warszawska, listopad 2015.
- [2] *Ochrona zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów*. Instrukcja ITB nr 376/2002. Warszawa 2002.
- [3] Topolnicki M.: *Iniekcja strumieniowa – podstawy procesu i zastosowanie przy modernizacji Dworca Głównego we Wrocławiu. Podstawy procesu iniekcji strumieniowej Soilcrete*. „Inżynieria Morska i Geotechnika” 2012, nr 4.
- [4] *Wyniki badań geotechnicznych dla Budynku Audytoryjnego na terenie Kampusu Głównego przy ul. Krakowskie Przedmieście 26/28 w Warszawie*. Dokumentacja geotechniczna. Geotechnika Budowli AMD, sierpień 2010.
- [5] *Dokumentacja powykonawcza podchwycenia fundamentów dla rozbudowy (rewitalizacji) Budynku Audytoryjnego na terenie Kampusu Centralnego Uniwersytetu Warszawskiego przy ul. Krakowskie Przedmieście 26/28 w Warszawie w technologii iniekcji strumieniowej Soilcrete®*. Keller Polska Sp. z o.o., Ożarów Mazowiecki, grudzień 2014.
- [6] *Ekspertyza w sprawie oceny stanu technicznego Gmachu Audytoryjnego Uniwersytetu Warszawskiego*. Warszawa, wrzesień 2010.
- [7] *Projekt technologiczny podchwycenia fundamentów dla rozbudowy (rewitalizacji) Budynku Audytoryjnego na terenie Kampusu Centralnego Uniwersytetu Warszawskiego przy ul. Krakowskie Przedmieście 26/28 w Warszawie w technologii iniekcji strumieniowej Soilcrete®*. Keller Polska Sp. z o.o., Warszawa, październik 2014.
- [8] *Rozbudowa (rewitalizacja) Budynku Audytoryjnego na terenie Kampusu Centralnego, Konstrukcja. Tom 2.1.2 rysunek: Rzut Fundamentów, 1997*. Projekt wykonawczy, Pracownia Architektoniczna, sierpień 2012.
- [9] *Raport z pomiaru (25.11.2014) dotyczący monitoringu geodezyjnego budynku podczas rozbudowy*. Dokumentacja powykonawcza, listopad 2014.





global strength and local focus

Tunel pod Martwą Wisłą w Gdańsku



www.keller.com.pl

Centrala:
ul. Poznańska 172,
05-850 Ożarów Mazowiecki

geotechnika bez ryzyka