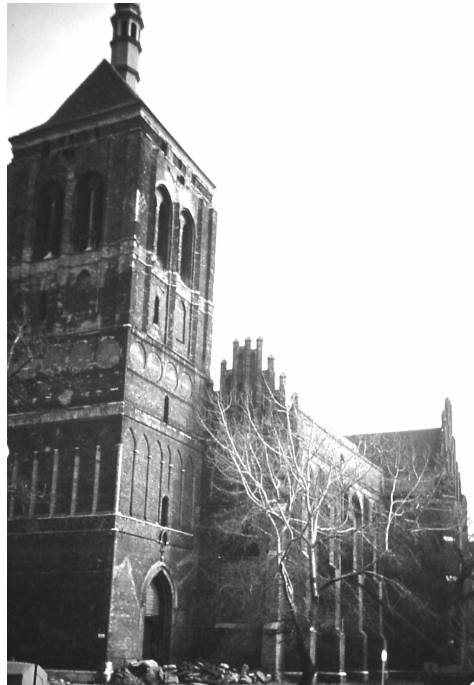


Podchwycenie i wzmocnienie fundamentów kościoła św. Jana w Gdańsku metodą iniekcji strumieniowej

Prof. Dr hab. inż. Michał Topolnicki
Politechnika Gdańska i Keller Polska Sp. z o.o.

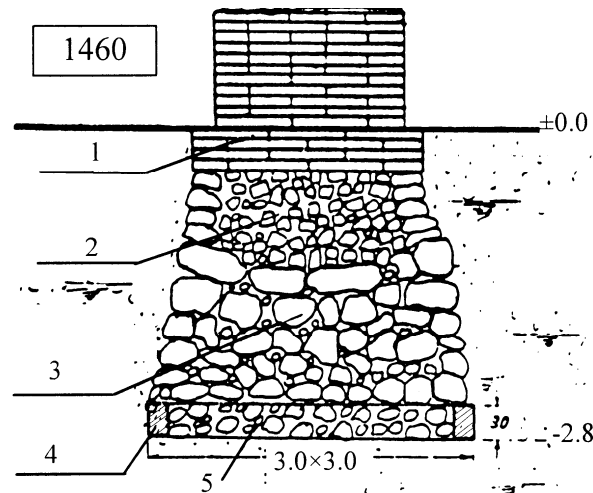
Początki budowy kościoła św. Jana w Gdańsku sięgają XIV wieku. W obecnym kształcie kościół (rys. 1) jest trójnawową konstrukcją murowaną, z krzyżowymi sklepieniami żebrowymi o bogatym gwiazdzystym rysunku. Sklepienia i drewniany dach oparte są na ścianach zewnętrznych, murowanych z cegły robionej ręcznie, o wiązaniu gotyckim, oraz na dwóch rzędach filarów. Od strony zachodniej budowla zwieńczona jest wieżą, która stanowi oddzielny element konstrukcyjny. Od strony wschodniej ściana poprzeczna podparta jest czterema przyporami i zakotwiona górą układem stalowych ściągow.



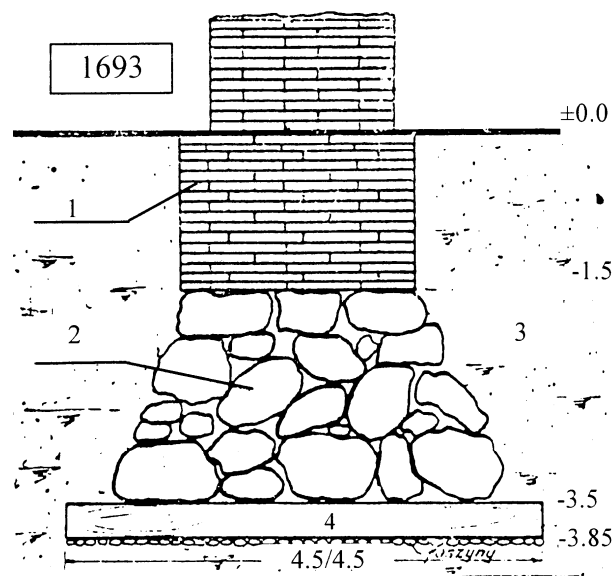
Rys. 1 Widok kościoła św. Jana w Gdańsku od strony zachodniej.

W swojej kilkusetletniej historii kościół św. Jana był wielokrotnie przebudowywany, niszczone oraz podlegał procesowi degradacji na skutek nadmiernego osiadania fundamentów, szczególnie po stronie wschodniej, która znajduje się blisko kanału Motławy. Długotrwałe osiadanie wiązało się z posadowieniem budowli na słabych gruntach oraz z niedostosowaniem fundamentów do warunków gruntowych i działających obciążeń. W miejscu budowy kościoła występują w podłożu warstwy torfów i namulów. Są to, jak wiadomo, grunty bardzo ściśliwe. Posadowienie w takich warunkach ciężkiej budowli było dużym wyzwaniem dla budowniczych kościoła, zważywszy na ograniczone możliwości wykonywania fundamentów głębokich, zwłaszcza poniżej poziomu wody gruntowej. Budowę fundamentu rozpoczynano od wykopu, który mógł dojść jedynie do poziomu wody gruntowej ponieważ sposoby lokalnego odwodnienia nie były wówczas znane. W przypadku jeżeli na dnie wykopu znajdowano bardzo słabe grunty, układano obramowanie z belek lub desek drewnianych i wypełniano środek fundamentu kamieniami i żwirem oraz słabą zaprawą i gliną, co powodowało częściowe wypieranie gruntów organicznych i zagłębianie podstawy

fundamentu w podłoże (rys. 2). Ten sposób posadowienia nie wyeliminował niestety dalszych osiadań i kłopotów z posadowieniem kościoła, na co wskazują liczne zapisy w zachowanych dokumentach kościelnych. W XVII wieku bezpieczeństwo kościoła zostało poważnie zagrożone. Z tego powodu w latach 1640-1680 podjęto niezwykle ryzykowne i niespotykane jak na te lata działania naprawcze, które polegały m.in. na całkowitej wymianie fundamentów pod obciążonymi filarami. Nowe fundamenty posadowiono głębiej niż pierwsze. Bale dębowe ułożono na materacu faszynowym oraz nadbudowano głazami polodowcowymi powiązanymi zaprawą wapienną z drobnymi kamieniami (rys. 3). Elementy drewniane znaleziono także w 1995 roku pod niektórymi ścianami.



Rys. 2 Początkowa konstrukcja fundamentów pod filarami kościoła (1- cegły i zaprawa wapienna, 2- małe kamienie, kawałki cegły, zaprawa wapienna, 3- kamienie bez zaprawy, 4- skrzynia drewniana, 5- kamienie z gliną), Bukowski (1948).



Rys. 3 Zmieniona konstrukcja fundamentów pod filarami kościoła (1- cegły i zaprawa wapienna, 2- głazy i zaprawa wapienna, 3- zasyp (piasek i torf), 4- belki dębowe na materacu faszynowym), Bukowski (1948).

Ocenia się, że w trakcie swego istnienia kościół osiadł około 75 cm. Szczególnie duże osiadania wystąpiły pod filarami oraz we wschodniej części kościoła. Ściana wschodnia uległa znacznemu wychyleniu od pionu, wynoszącemu obecnie około 140 cm. Sześć filarów we wschodniej części kościoła doznało dużych przemieszczeń poziomych, dochodzących do 30-40 cm, oraz uległo niebezpiecznemu wyboczeniu. Po II wojnie światowej kilkakrotnie próbowano powstrzymać proces dalszego osiadania fundamentów kościoła, głównie filarów, który nasilił się w związku ze zmianami poziomu wody gruntowej w tej części miasta. Zabiegi te okazywały się jednak mało skuteczne. Zaobserwowano również pękanie podstaw filarów, prawdopodobnie „rozrywanych” przez znajdujące się poniżej głazy narzutowe, działające jak klin (rys. 4).



Rys. 4 Pęknięta podstawa filara we wschodniej części kościoła (na spodzie fundamentu widoczne górne głazy polodowcowe)

Prace remontowe, podjęte w 1994 roku w związku z planem przekształcenia kościoła w Centrum Kultury i Edukacji Teatralnej, rozpoczęto od wzmocnienia posadowienia fundamentów ścian i filarów we wschodniej części kościoła za pomocą iniekcji strumieniowej. Ważnymi kryteriami wyboru tej technologii wzmocnienia, oprócz podstawowych wymogów bezpiecznego i skutecznego wykonania prac oraz konkurencyjnego kosztu robót wzmocniających, było spełnienie warunku możliwie jak najmniejszej ingerencji w zabytkową substancję kościoła oraz zapewnienie wzmocnienia nie tylko samego podłoża ale również spękanych fundamentów.

Technologia iniekcji strumieniowej

Iniekcję strumieniową (ang. jet grouting) opracowano i zastosowano po raz pierwszy w Japonii. W roku 1970 roku zgłoszono w japońskim urzędzie patentowym pomysł na „technologię wykonywania podziemnych kolumn”, polegającą na „wstrzykiwaniu w grunt substancji wzmocniającej za pomocą skoncentrowanego strumienia pod ciśnieniem 350 at.” W Europie iniekcja strumieniowa pojawiła się początkowo we Włoszech (1974) oraz rozwinęła w roku 1979 głównie w Niemczech, gdzie firma Keller wprowadziła nazwę Soilcrete[®], pochodzącą od połączenia angielskich słów: soil=grunt i concrete=beton. Nazwa Soilcrete bardzo trafnie określa zeskaloną mieszaninę gruntu i zaczynu cementowego, a więc cementogrunt jaki powstaje w podłożu po zastosowaniu iniekcji strumieniowej.

Przed przekształceniem w cementogrunt struktura gruntu zostaje rozluźniona w wyniku oddziaływania silnego strumienia, o prędkości wylotowej przy dyszy ponad 100 m/s. Jednocześnie pozostałe cząstki gruntu, wymieszane z zaczynem cementowym przy udziale silnej turbulencji, wypełniają „wyciętą” przestrzeń w podłożu. Nadwyżka powstałej mieszaniny wypływa na powierzchnię przez pierścieniową szczelinę wokół żerdzi wiertniczej. Zasięg oddziaływania strumienia tnącego zależy od rodzaju gruntu oraz zastosowanego wariantu technologii i wynosi od 0,6 do około 4 m (super jet), mierząc w średnicy. Kolumny o średnicach powyżej 2 m stosuje się jednak wyłącznie w specjalnych zastosowaniach. Po związaniu cementogrunt uzyskuje odpowiednie właściwości wytrzymałościowe, które uwzględnia się w obliczeniach statycznych. Warto zwrócić uwagę, że w praktyce budowlanej spotkać się można również z potoczną nazwą „iniekcja wysokociśnieniowa” zamiast iniekcja strumieniowa, co uzasadniane jest wysokim ciśnieniem roboczym iniekcji. Nazwa ta jest jednak mało precyzyjna i może wprowadzać w błąd. Główna różnica między iniekcją klasyczną a strumieniową polega bowiem nie na zastosowaniu wyższego ciśnienia iniekcji, jak sugeruje potoczna nazwa, lecz na wywołaniu zupełnie innego mechanizmu powstawania zeskalonego gruntu. Dzięki temu i w odróżnieniu od klasycznej iniekcji, technologia iniekcji strumieniowej może być z powodzeniem zastosowana zarówno w gruntach rozdrobnionych jak i spoistych oraz organicznych, a więc w podłożu uwarstwionym.

W zależności od zadania, cementogrunt może działać w podłożu jako materiał wzmacniający lub uszczelniający. Często wykorzystuje się również obie właściwości jednocześnie, co jest dodatkową zaletą tej technologii. Wytrzymałość cementogruntu zależy od rodzaju gruntu i zawartości cementu w mieszaninie. Uzyskiwane wytrzymałości mieszczą się w granicach od około 1 do około 25 MPa, przy czym najniższe wartości uzyskuje się przy domieszce gruntów organicznych i ilastych a najwyższe przy udziale piasku i żwiru. Podwyższoną wodoszczelność cementogruntu osiąga się przez zastosowanie zaczynów o odpowiednim składzie, z dodatkiem np. bentonitu lub mączki wapiennej.

Iniekcję strumieniową można wykonywać w trzech podstawowych wariantach, przy czym o wyborze najodpowiedniejszego wariantu decydują warunki gruntowe, geometria brył i wymagania jakościowe. Wariant pojedynczy (S) wykorzystuje strumień zaczynu cementowego, o ciśnieniu przy pompie 20–40 MPa., do równoczesnego rozluźnienia i cementowania gruntu. W wariantcie podwójnym (D), dla wzmocnienia skuteczności rozluźniania i zwiększenia zasięgu cementowania, strumień zaczynu otulony jest powietrzem, które wydostaje się pod ciśnieniem z pierścieniowej dyszy. Wariant potrójny (T) wykorzystuje do rozluźnienia gruntu strumień wody, o ciśnieniu przy pompie 30–40 MPa., otulony sprężonym powietrzem. Przez dodatkową dyszę, znajdującą się poniżej dyszy wodnej, podawany jest równocześnie zaczyn cementowy pod ciśnieniem około 1,5 MPa. Istnieje też możliwość pracy bez otulenia powietrzem.

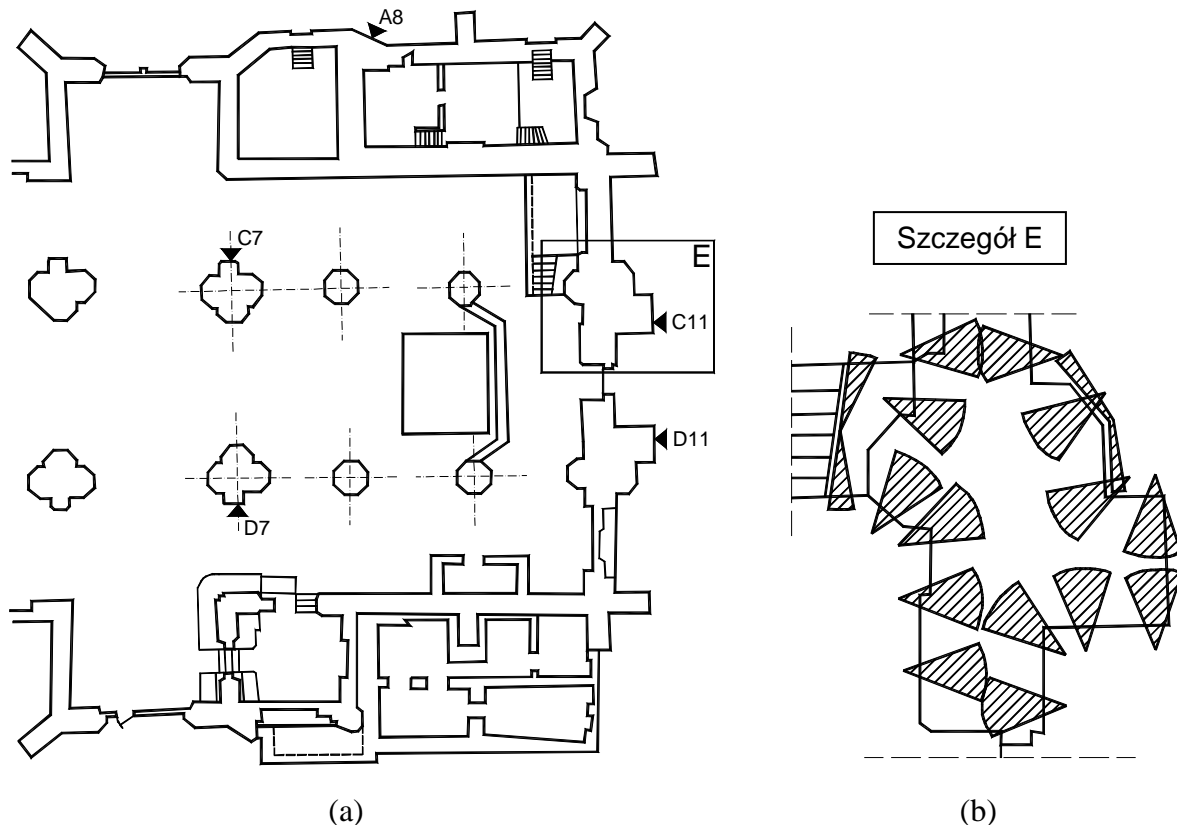
Stacja robocza iniekcji strumieniowej składa się z mieszalników, zbiorników, agregatu i zestawu pomp. Urządzenia stacji połączone są wiązką węży i przewodów elektrycznych z wiertnicą. Wysokość wiertnicy jest dobierana do potrzeb i może wynosić od 2 m, przy pracy w piwnicach, do około 35 m przy robotach w miejscu wolnym od przeszkód. Punkty wiertnicze znajdują się zwykle w wąskich rowkach, w których umieszcza się pompy zasysające wymywany urobek, tj. twardniejąca z czasem mieszaninę wody, gruntu i cementu, pompowaną do osadników lub zbiorników.

Bryły cementogruntu dają się dowolnie formować, poszerzać i łączyć, zarówno w stanie świeżym jak i po stwardnieniu. Kolejność wykonania można dostosować do specyfiki przedsięwzięcia budowlanego. Bryły powstają z połączenia podstawowych form geometrycznych, którymi są: kolumna, półkolumna (sektor) i lamela. Kolumnę formuje się przez jednoczesne podciąganie i obracanie żerdzi w jednym kierunku. Wyciąganie żerdzi ze skuteczną zmianą kierunku obrotu w wybranym sektorze pozwala uzyskać np. ćwierć- lub

półkolumnę. Jeżeli żerdź jest podciągana bez obrotu, to powstają wąskie elementy zwane lamelami, w zależności od liczby dysz pojedyncze lub podwójne (obustronne). Szeroka paleta możliwych do wykonania form przestrzennych umożliwia rozwiązanie wielu skomplikowanych problemów statycznych.

Wzmocnienie fundamentów wschodniej części kościoła

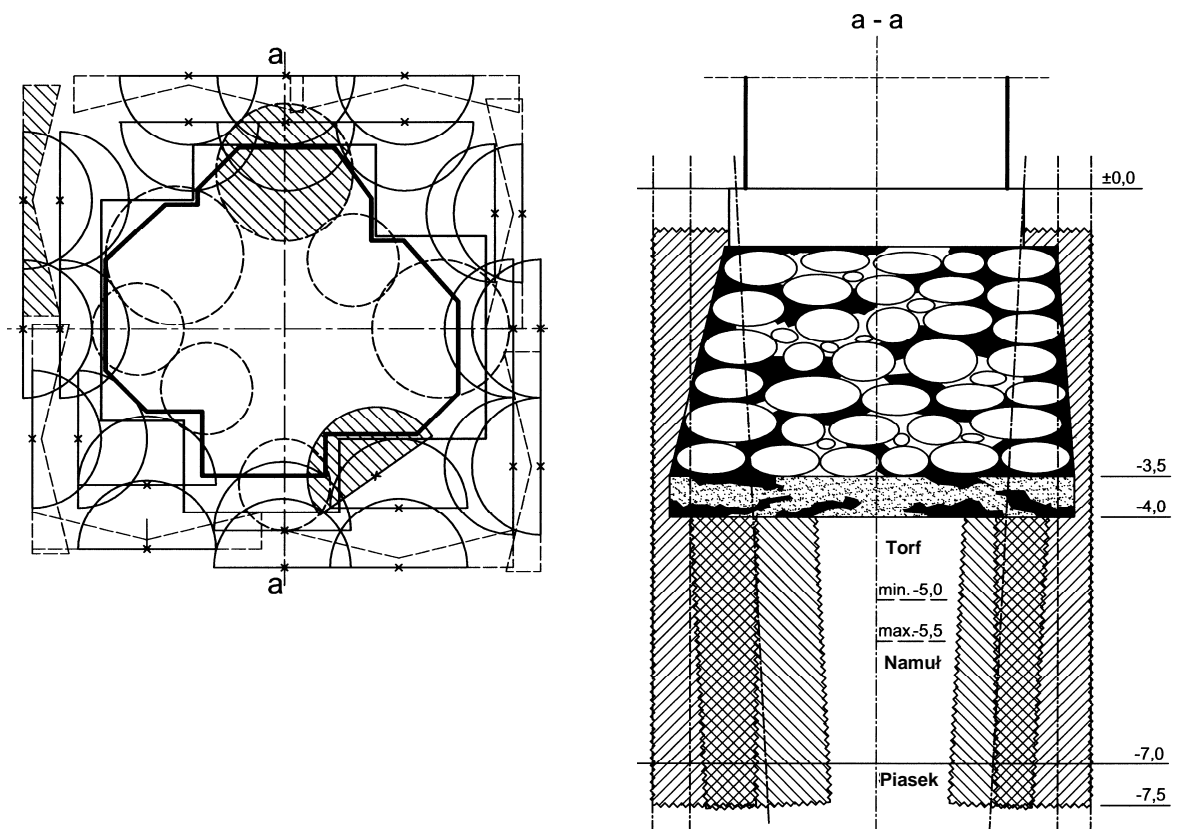
Opracowany i nadzorowany przez autora projekt zakładał podchwycenie i wzmocnienie fundamentów ścian nośnych i 6 filarów we wschodniej części kościoła poprzez układ kolumn sektorowych o kącie rozwarcia od 40° do 60° , rozmieszczonych po obu stronach ścian (rys. 5), oraz kolumn o średnicy 120-140 cm. Szczególnie trudne było wzmocnienie fundamentów filarów, które przenoszą znaczne obciążenia skupione. Ze względu na bardzo zły stan fundamentów filarów, w których stwierdzono obecność kawern i szczelin (rys. 6), oraz potrzebę zwiększenia współczynnika stateczności bocznej i konieczność bardzo wolnego przejmowania obciążenia zaplanowano nawet do 32 elementów wzmacniających, które objęły wykonanie lamel, półkolumn i kolumn (rys. 7). W pierwszym etapie wykonano wokół fundamentu filara ściankę z połączonych lamel, sięgającą do głębokości około 7.5 m poniżej poziomu posadzki, przechodzących górną w półkolumny dla otulenia fundamentu kamiennego. Ściany z cementogratu, usytuowane równoległe do boków fundamentu, przejęły część obciążenia działającego na filar. Następnie przewiercono fundamenty kamienne. W otwory wpompowano pod ciśnieniem zaczyn cementowego, wypełniając w ten sposób istniejące szczeliny między kamieniami. Po wykonaniu iniekcji fundamentu wykonano główne kolumny nośne pod filarem.



Rys. 5 (a) Rzut fundamentów wschodniej części kościoła św. Jana, (b) szczegół rozmieszczenia elementów sektorowych pod zewnętrzną ścianą nośną.



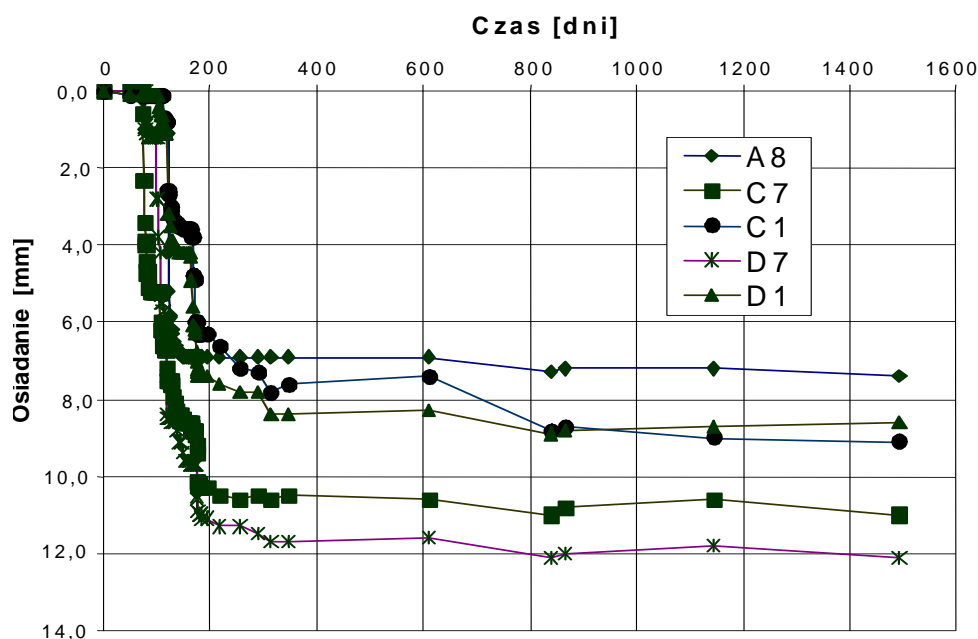
Rys. 6 Pustki i szczeliny wewnątrz kamiennej podstawy filara.



Rys. 7 Rozmieszczenie kolumn, półkolumn i lameli iniekcyjnych pod fundamentem filara C7.

Roboty wykonała firma Keller. Użyto trzech rodzajów wiertnic: KB0, KB1 oraz „Lumesa”. Dużą wiertnicę KB0 zastosowano do prawie wszystkich robót we wnętrzu kościoła oraz przy wzmacnianiu ścian zewnętrznych. Przy użyciu małej wiertnicy, typu KB1, dokonano wzmocnienia fundamentów ścian w kaplicy św. Ducha oraz w piwnicy pod biblioteką. Natomiast prace w krypcie chrzcielnej, w pomieszczeniach kotłowni oraz przy ołtarzu wykonano za pomocą wiertnicy ręcznej „Lumesa”.

W czasie całego cyklu robót i po ich zakończeniu prowadzono geodezyjną obserwację osiadania i przemieszczeń reperów kontrolnych zainstalowanych na podchwytywanych ścianach i filarach kościoła. Wyniki niemal 5-letnich obserwacji dla wybranych reperów, których lokalizację pokazano na rys. 5 a, przedstawiono na rys. 8. W okresie prac, trwających około 100 dni, zanotowano niewielkie osiadania początkowe rzędu 7 mm dla ścian oraz około 11 mm dla dwóch głównych filarów, które podchwytywano bez dodatkowego podparcia tymczasowego. Należy zwrócić uwagę, że osiadania początkowe towarzyszą wszystkim sposobom podchwytywania istniejących fundamentów i wiążą się ze stopniowym przekazywaniem obciążenia na głębiej zalegające grunty nośne. W przypadku iniekcji strumieniowej są one przeważnie najmniejsze. W dalszej fazie obserwacji repery kontrolne wykazują wyraźną stabilizację osiadania.



Rys. 8 Obserwowane osiadanie reperów kontrolnych pokazanych na rys. 2a w czasie robót iniekcyjnych oraz po ich zakończeniu (pomiarzy wykonane przez prof. A. Żurowskiego z zespołem w latach 1995-2000, Politechnika Gdańska, Wydział Inż. Lądowej i Środowiska).

Podsumowanie

W nawiązaniu do przedstawionych specjalistycznych robót fundamentowych, zrealizowanych z powodzeniem w kościele św. Jana w Gdańsku, na podkreślenie zasługują następujące aspekty projektowe, wykonawcze i środowiskowe technologii iniekcji strumieniowej.

Aspekty projektowe:

- Łatwość wykonania cementogruntu w dowolnej formie geometrycznej, w wymaganym miejscu w podłożu.
- Możliwość zastosowania niemal we wszystkich gruntach, także spoistych. Jest to szczególnie korzystne przy występowaniu nieoczekiwanych przewarstwień w podłożu.
- Wykonywanie robót z otworów wiertniczych o małej średnicy.
- Cementogrunt ściśle przywiera do podchwytywanych fundamentów o dowolnym kształcie, niezależnie od nieoczekiwanych zmian geometrii fundamentu, oraz zespała spękane konstrukcje fundamentów murowanych lub kamiennych.
- Dla obniżenia kosztów materiałowych możliwa jest optymalizacja składu mieszaniny w zależności od żądanej wytrzymałości.
- Przeprowadza się wiarygodne obliczenia statyczne i sprawdzenie stateczności bryły cementogruntu.
- Podchwycenia fundamentów w tej technologii są stosunkowo sztywne i charakteryzują się bardzo małymi przemieszczeniami (osiadaniami) początkowymi.
- Podchwycenia fundamentów mieszczą się w całości pod obiektem i pozwalają na pełne wykorzystanie przestrzeni, np. sąsiadującego wykopu lub piwnic.
- Ściany i przesłony wykonane w tej technologii mogą jednocześnie spełniać rolę uszczelnień.
- Technologia iniekcji strumieniowej została już wielokrotnie sprawdzona, w tym zwłaszcza dla obiektów historycznych.

Aspekty wykonawcze:

- Możliwość wykonania z powierzchni terenu, z poziomu piętra lub piwnicy budynku, a także z wykopów pomocniczych i szybów. Do dyspozycji są m.in. specjalne wiertnice, które mieszczą się w otworach drzwiowych o szerokości 80 cm.
- Mury i fundamenty mogą być w razie potrzeby przewiercane przy pomocy tej samej wiertnicy.
- Stacja robocza może być umieszczona w dużej odległości od punktu wiercenia.
- Przebieg prac jest elektronicznie rejestrowany i sterowany.
- W porównaniu do innych sposobów podchwytywania fundamentów, o ile są wykonalne, czas prowadzenia kompleksowych robót jest stosunkowo krótki.

Aspekty środowiskowe

- Technologię iniekcji strumieniowej zalicza się do technologii przyjaznych dla środowiska ze względu na wykorzystywanie mineralnych substancji wiążących. Z tego powodu nie ma również przeszkód w stosowaniu tej technologii poniżej poziomu wód gruntowych.
- Uszczelnienia z cementogruntu, o ile zajdzie taka potrzeba, mogą zostać „otwarte” metodą iniekcji strumieniowej dla wznowienia swobodnego przepływu wody gruntowej.

Literatura

Bukowski, B. 1948. Fundamentowanie anno domini 1460-1693-1769. Kościół św. Jana w Gdańsku. *Przegląd Budowlany*: 98-101.

Podziękowanie

Pani Jadwidze Kaczyńskiej z NCK w Gdańsku oraz panu mgr inż. Jerzemu Cichoszowi, rzeczoznawcy budowlanemu i inspektorowi nadzoru, składam serdeczne podziękowania za zaangażowanie i merytoryczną współpracę przy tym projekcie.