

*Marta Pajak**

WZMACNIANIE FUNDAMENTÓW ZABYTKOWYCH BUDOWLI NA PRZYKŁADZIE STABILIZACJI KOŚCIOŁA POD WEZWANIEM ŚW. ŚW. PIOTRA I PAWŁA W KRAKOWIE

Kraków jest miastem, w którym zachowały się najstarsze zabytki budownictwa sakralnego i świeckiego. W 1978 roku cały zespół urbanistyczno-przestrzenny Krakowa został wpisany przez UNESCO na listę pierwszych dwunastu najcenniejszych zabytków świata. W obrębie Starego Miasta poważnym problemem inżynierskim jest zły stan podłoża gruntowego, który powoduje pogarszanie się warunków posadowień zabytkowych obiektów. Zagrożenia stanu konstrukcyjnego fundamentów oraz osiadania (w szczególności nierównomierne) fundamentów stwarza ryzyko dla całego obiektu i budowli sąsiednich. Stąd konieczne jest rozpoczynanie wszelkich prac rewaloryzacyjnych od fundamentów budynku.

Z upływem czasu obiekty zabytkowe ulegają procesom destrukcyjnym, których postęp i przebieg jest różnorodny i zależy od wielu czynników. Istotną rolę odgrywa czas — wiek budowli — a w związku z tym wydarzenia historyczne i zdarzenia losowe, które miały miejsce w trakcie egzystowania budowli (pożary, powodzie, działania wojenne). Ważne są również warunki pracy obiektu, rodzaj konstrukcji oraz własności fizykochemiczne materiałów, z których wykonano obiekt. Na proces starzenia się i destrukcji materiałów w konstrukcjach zabytkowych ma wpływ długotrwałe działanie czynników zewnętrznych. Jedną z grup takich czynników stanowią wpływy atmosferyczne, takie jak: zmiany wilgotności powietrza i temperatury, bezpośrednie działanie promieni słonecznych, wiatru, deszczu i śniegu. Kolejną grupą są czynniki zewnętrzne, które mają charakter mechaniczny i są spowodowane głównie przeobrażeniami zachodzącymi w podłożu, na którym posadowiona jest budowla. Procesy te zachodzą przede wszystkim z powodu zmian stosunków gruntowych i wodnych oraz naruszenia stanu gruntów zalegających w podłożu. Mechaniczne uszkodzenia budowli są również spowodowane wstrząsami i drganiami wywołanymi działaniami zewnętrznymi. Wyjaśnienie charakteru przyczyn powodujących zagrożenie obiektu zabytkowe-

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

go jest niezbędne w celu wskazania metody wzmocnienia obiektu i jego dalszego użytkowania.

Do najgroźniejszych i najtrudniejszych do wyeliminowania należą zagrożenia budowli związane ze zmianami zachodzącymi w podłożu gruntowym obiektu. Poprawne zidentyfikowanie i usunięcie tych zagrożeń stanowi podstawę do dalszych prac rewaloryzacyjnych wszystkich obiektów zabytkowych. O zagrożeniu stateczności budynku zabytkowego decyduje wiele czynników.

Są to m.in.:

- naturalne zużycie technologiczne materiałów, z których wykonano fundament;
- uszkodzenia wynikające z błędów projektowych lub realizacyjnych przy wznoszeniu obiektu;
- uszkodzenia powstałe w wyniku przeprowadzenia prac modernizacyjnych (przebudowy, nadbudowy, przebiecia instalacyjne);
- zmiana działających obciążeń lub schematu statycznego budowli (zmiana sposobu użytkowania, zaniedbania eksploatacyjne);
- uszkodzenie systemów odwadniających i drenażowych;
- braki konserwacji systemów wodno-kanalizacyjnych, sieci c.o., itp.;
- uszkodzenia wywołane drganiami pochodzącymi od ruchu komunikacyjnego (powstają m.in. spękania pionowe i ukośne);
- wpływ eksploatacji górniczej (pionowe i poziome przemieszczenia powierzchni terenu, zmiany stosunków wodnych, wstrząsy);
- wzrost agresji chemicznej (korozja elementów konstrukcyjnych fundamentów).

Przebudowa lub wzmocnienie fundamentów w zabytkowych obiektach to zagadnienie złożone i skomplikowane. Szczególnie w sytuacjach, gdy układ podziemny budynku musi pozostać zachowany i użytkowany. Prowadzenie tego rodzaju prac wymaga przestrzegania wszelkich zaleceń konstrukcyjnych, architektonicznych i konserwatorskich. Metody wzmocnienia posadowień obiektów zabytkowych obejmują wzmocnienie podłoża gruntowego pod fundamentami i/lub wzmocnienie konstrukcji fundamentów wraz z ich przebudową.

Dobór odpowiedniej metody wzmocnienia lub przebudowy fundamentów zależy od wielu czynników, m.in. od takich, jak:

- rodzaj i nośność podłoża gruntowego pod budynkiem;
- stan techniczny i rozwiązania konstrukcyjne istniejących fundamentów;
- stopień zagrożenia stateczności budynku;
- rodzaj i stan posadowień obiektów sąsiadujących;
- obecność kanałów blokowych, dołów chłonnych, studni w obrębie budowli;
- możliwość wykonania danego sposobu wzmocnienia (ograniczony dostęp, zagrożenie pracowników w czasie prowadzenia prac wmacniających itp.).

Kolejne kryterium, które należy uwzględnić, aby proponowana metoda wzmocnienia zagrożonego fundamentu była skuteczna, jest związane z zaobserwowanymi osiadaniami całej budowli lub jej części oraz z wielkością prognozowanych osiadań i ewentualnym zagrożeniem wystąpienia osiadań nierównomiernych. Dotychczasowy sposób posadowienia bezpośredniego można pozostawić w przypadku niedużych osiadań i dobrego stanu technicznego konstrukcji budynku. W takiej sytuacji, w celu zmniejszenia naprężeń w poziomie posadowienia, niezbędne jest wzmocnienie fundamentów. Natomiast jeżeli mamy do czynienia z dużymi i nierównomiernymi osiadaniami oraz znacznym stopniem uszkodzenia konstrukcji budynku, konieczne jest wykonanie posadowienia pośredniego. Rozwiązanie takie umożliwia przeniesienie obciążeń na grunt nośny, który zalega w głębszych warstwach podłoża.

Uproszczony podział metod wzmocniania fundamentów istniejących w zabytkowych budynkach przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Uproszczony podział metod wzmocniania fundamentów istniejących w budynkach zabytkowych

Wzmocnianie i przebudowa fundamentów	Zachowanie dotychczasowego sposobu posadowienia	Poszerzenie lub/i podbudowa
		Płyty lub wieńce żelbetowe
		Ustrój płytowo-wannowy
	Wykonanie posadowienia pośredniego	Mikropale wiercone
		Mikropale wciskane statycznie
		Mikropale wbijane udarowo
		Pale wiercone
		Pale wciskane statycznie
		Pale wkręcane
		Iniekcja strumieniowa niskociśnieniowa
		Iniekcja strumieniowa wysokociśnieniowa
		Zastrzyki zeskalające podłoże
		Zastrzyki przemieszczeniowe
		Sprężane, wiercone kotwy iniekcyjne
		Ściany szczelinowe (wykonywane obok wzmocnianego fundamentu, łączone z nim lub niezależne)

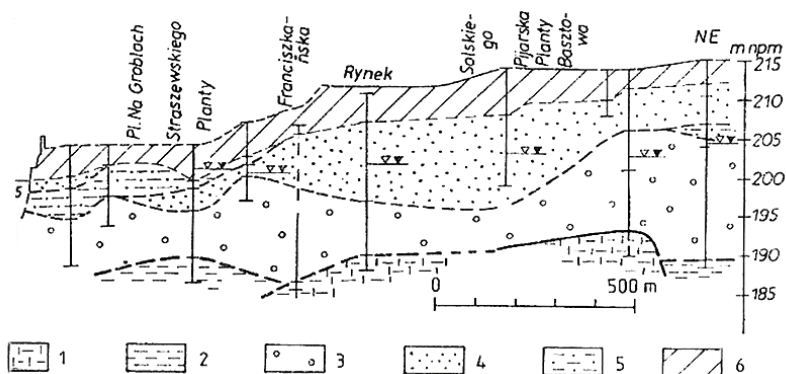
Podstawowe cele, w jakich wykonywane jest wzmocnienie fundamentu, to:

- zwiększenie nośności fundamentów;
- zapewnienie bezpieczeństwa budowli i obiektów sąsiednich;

- zmiana schematu konstrukcyjnego budowli;
- modernizacja obiektu;
- zwiększenie trwałości, ochrona fundamentów przed korozją;
- przywrócenie możliwości użytkowych budynku.

Podczas analizy dokumentów archiwalnych oraz map geologicznych itp., zauważono, że miasta zakładano z uwzględnieniem warunków morfologicznych i geograficznych. Najczęściej były lokalizowane w pobliżu rzek, jezior, mórz lub na terenach naturalnie wzniesionych. Taka lokalizacja nie tylko zapewniała zaopatrzenie w wodę i transport wodny, miała również znaczenie obronne. Informacje na temat geologii i charakterystyki gruntów zalegających w obszarze Starego Miasta w Krakowie dostarczyły badania geotechniczne prowadzone w obszarze doliny Wisły w latach 50. i 60. XVIII wieku. Potwierdziły one, że Stare Miasto posiadało doskonale warunki dla rozwoju osadnictwa. Przyczyniła się do tego złożona rzeźba terenu, którą tworzą formy o różnym kształcie, budowie, pochodzeniu i wieku. Spowodowane jest to tym, że na obszarze miasta stykają się, krzyżują i wzajemnie przenikają trzy regiony geograficzne. Od strony północnej Starego Miasta — Wyżyna Małopolska, od strony południowej — Pogórze Karpackie, a od strony wschodniej — Kotlina Sandomierska.

Typowy przekrój geologiczny z centrum Starego Miasta w Krakowie przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Typowy przekrój geologiczny z centrum Starego Miasta w Krakowie

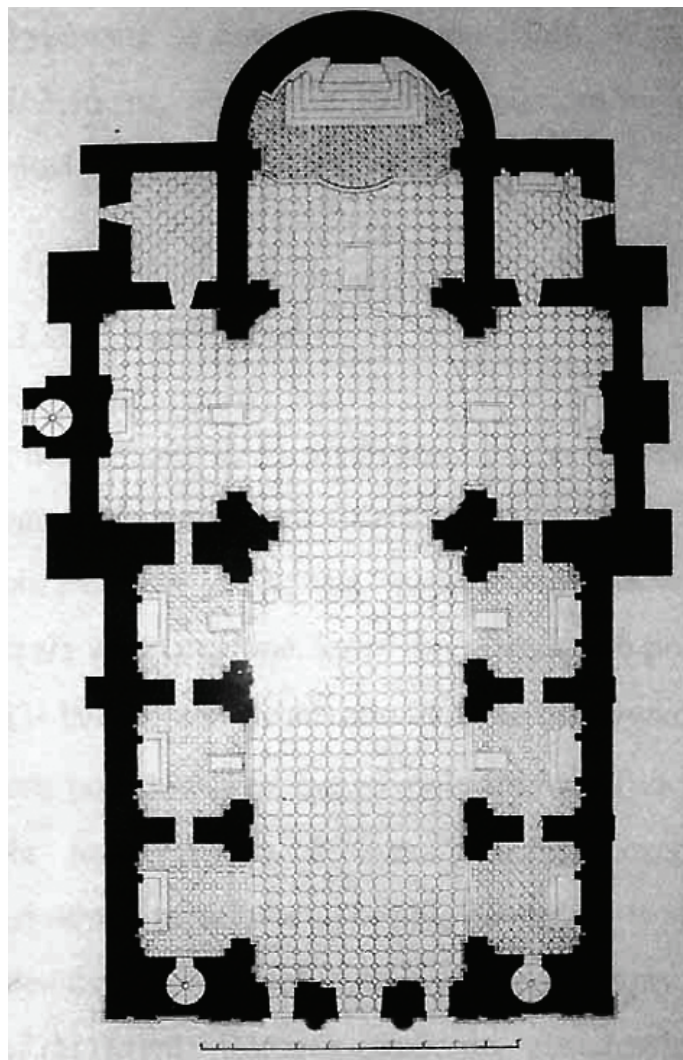
Najstarsze utwory w podłożu Starego Miasta stanowią wapień jurajskie, pokryte miejscami ciałką warstwą margli kredowych. Uskok między utworami jurajskimi zostały wypełnione łami mioceńskimi. Strop ich w obrębie Starego Miasta występuje na rzędnych od 189 do 191 m n.p.m., a miąższość sięga 100 m. Na łach mioceńskich zalegają utwory czwartorzędowe o miąższości około 20 m. Ich dolną warstwę budują żwiry karpackie, a górną żwiry stożka napływowego rzeki Prądnik. Występują one w stanie zagęszczonym. Kolejna warstwa to piaski średnioziarniste zagęszczone o miąższości około 10 metrów, których strop

znajduje się na rzędnych 206÷212 m n.p.m. Obecny poziom terenu na rzędnych 210÷215 m n.p.m. został utworzony przez nasypy o miąższości od 3 do 8 m. Nasypy te są zbudowane z luźnych niespoistych i spoistych gruntów z domieszkami gruzu, drewna, odpadów, śmieci oraz znacznej ilości części organicznych.

Przykładem pomyślnie zakończonych prac wzmacniających istniejące fundamenty jest projekt zrealizowany w zabytkowym kościele pod wezwaniem św. św. Piotra i Pawła w Krakowie.

Budowa kościoła pod wezwaniem św. św. Piotra i Pawła została zainicjowana przez zakon Jezuitów w 1597 roku. Kościół zlokalizowano przy ulicy Grodzkiej w Krakowie, w bezpośrednim sąsiedztwie kościoła św. Andrzeja. Jego konsekracja odbyła się 8 lipca 1635 r. i jest on jedną z pierwszych budowli barokowych w Polsce. Obecnie stanowi zabytek klasy zerowej. Autorem wstępnych prac projektowych był włoski architekt, jezuita Józef Britius (Brizio). Zgodnie z pierwszym założeniem kościół miał być budowlą monumentalną, która swoją architekturą i ogromem miała przyćmić dotychczasowe budowle sakralne w Krakowie. Przekazy historyczne podają, że budowa została rozpoczęta bez rozpoznania warunków gruntowych. Z powodu problemów ze statyką obiektu Britius, po niespełna roku, zrezygnował z prowadzenia budowy. Kolejno prowadzenie budowy przejmowali jezuita Jan Maria Bernardoni z Como, a po jego śmierci Paweł Baudarth z Antwerpii. Po nim zaś królewski budowniczy Jan Trevano Lombardus. Pod ich kierownictwem wybudowano powyżej projektowanej wysokości mury i pokryto budynek dachem. Stwierdzono wtedy niebezpieczne spękanie ścian i zalecono rozebranie spękanych murów i przeprowadzenie prac wzmacniających fundamenty. Okazało się, że pierwotne fundamenty były nie tylko za słabe, ale i zbyt płytko posadowione. Nowe ściany kościoła wzniesiono po pogłębieniu i poszerzeniu fundamentów. W kolejnych latach wykonywano prace inżynierskie, które głównie polegały na korygowaniu wcześniej popełnionych błędów konstrukcyjnych. W 1719 roku wybuchł pożar i częściowo zniszczył kościół. Po likwidacji w 1773 roku zakonu Jezuitów obiekt ulegał stopniowemu niszczeniu. Po III rozbiorze Polski, w 1769 roku, w kościele urządzone zostały magazyny wojskowe. W okresie wojen napoleońskich kościół stał opuszczony, a w latach 1813–1824 pełnił funkcję cerkwi prawosławnej. W 1824 roku ustanowiono w kościele parafię pod wezwaniem Wszystkich Świętych.

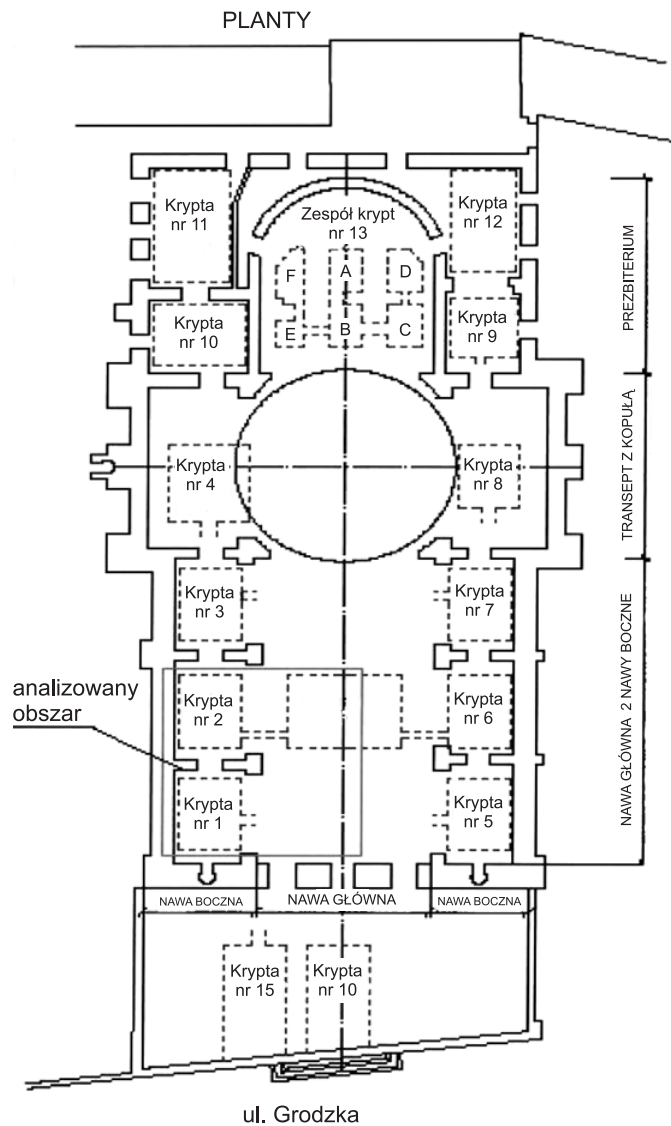
Kościół został wzniesiony na planie krzyża łacińskiego z orientacją na wschód, a jego konstrukcję stanowi hala trójnawowa. Na skrzyżowaniu nawy głównej z transeptem znajduje się kopuła. W nawach bocznych, wydzielonych murami od nawy głównej, znajdują się kaplice. Rzut kościoła przedstawia rysunek 2. Podziemna nośna konstrukcja kościoła to mury wykonane z wapienia jurajskiego łamanego, wiązanego zaprawą wapienną. Pod posadzką znajdują się liczne krypty, usytuowane m.in. pod bocznymi kaplicami i ramionami transeptu. Przekazy historyczne podają informacje o kryptach, które znajdować by się miały pod nawą główną i kopułą, ale do tej pory nie zostały one zinwentaryzowane. Nośną konstrukcję krypt i piwnic stanowią, wykonane z cegły na zaprawie wapiennej mury i sklepienia kolebkowe. Mury fundamentowe wykonane są z łamanych bloków wapienia jurajskiego układanego „na dziko” i wiązanych zaprawą wapienną.



Rys. 2. Rzut kościoła przedstawia pod wezwaniem św. św. Piotra i Pawła w Krakowie

W związku z zaobserwowanymi osiadaniami filara i krypt numer 1 i 2 (rys. 3) konieczne było poznanie charakterystyki gruntów zalegających pod kościołem. W latach 1983–1985 przeprowadzono 18 badań odkrywkowych fundamentów oraz 154 wierceń penetracyjnych i sondowych.

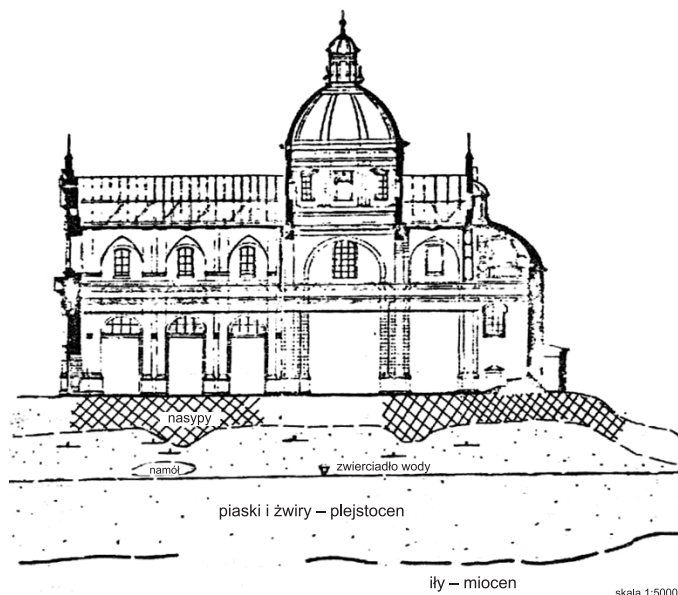
W wyniku zrealizowanych badań geotechnicznych stwierdzono różnice w poziomach posadowienia części południowej kościoła (od 6,1 do 6,9 m poniżej posadzki) i północnej (od 7,1 do 8,1 m poniżej posadzki). Są one spowodowane odmiennymi, dla tych części kościoła, warunkami gruntowymi.



Rys. 3. Rzut poziomy kościoła z zaznaczonym obszarem osiadających krypt

Poglądowy przekrój geotechniczny Starego Miasta w Krakowie przedstawia rysunek 4. Badania wykazały, że warstwę trzeciorzędową w podłożu kościoła budują ropy miocenne. Utwory czwartorzędowe stanowią osady żwirowe Wisły i Prądnika, w których, ze względu na stan i rodzaj gruntu, możemy wyróżnić dziewięć warstw geotechnicznych. Są to piaski drobne o stopniu zagęszczenia $I_D = 0,20$ i $I_D = 0,70$; piaski średnie i grube z domieszką żwiru o $I_D = 0,20$, $I_D = 0,33$, $I_D = 0,45$, $I_D = 0,70$ oraz pospółki i żwiry o $I_D = 0,20$, $I_D = 0,50$,

$I_D = 0,70$. W podłożu zagrożonego legara i krypty rozluźnienie gruntów występuje na styku z nasypami w części stropowej podłoża. Nasypy zalegają pod posadzką kościoła na głębokości od 5,5 do 6,5 m, natomiast pod posadzkami krypt na głębokości od 2,0 do 6,0 m (lokalnie nawet około 0,5 m). Występujące w podłożu kościoła nasypy zawierają duże ilości części organicznych. Zagrożenie stanowią nie tylko części organiczne, ale również soczewka torfów przewarstwionych namułami o miąższości około dwóch metrów. Zalegają one wśród piasków średnich w stanie luźnym. W tym rejonie woda gruntowa miasta tworzy zwierciadło swobodne. Badane podłoże gruntowe w poziomie posadowienia fundamentów kościoła jest w stanie wilgotnym lub mało wilgotnym. W trakcie badań geotechnicznych nie stwierdzono obecności wody w podłożu kościoła.



Rys. 4. Poglądowy przekrój geotechniczny Starego Miasta w Krakowie

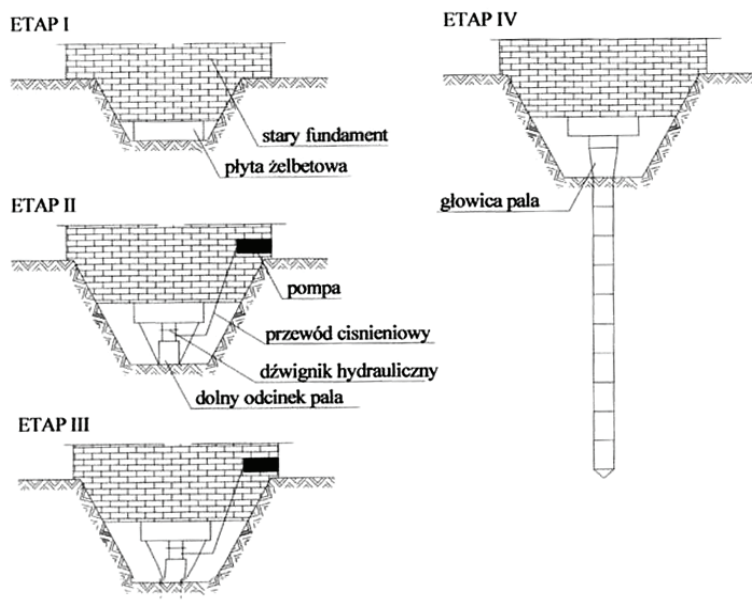
W związku z zagrożeniem bezpieczeństwa konstrukcji, wywołanym zmianą warunków gruntowych, a w konsekwencji osiadaniami filara i części krypt, konieczne było zabezpieczenie jej stateczności. Opracowany został projekt wzmocnienia fundamentu osiadającego filara poprzez wykonanie odcinkowych pali wciskanych Mega.

Wykonywanie pali Mega, w celu wzmocnienia fundamentów obiektów zabytkowych, jest szeroko stosowaną metodą fundamentowania pośredniego. Pale te, relatywnie z innymi technologiami, są łatwe w wykonaniu, a dodatkowo nośność ich jest sprawdzana samoczynnie w trakcie realizacji. Pale Mega to pale prefabrykowane. Składają się z odcinków o długości 60, 80 lub 100 cm, które są wciskane w grunt za pomocą podnośnika hydraulicznego. Przekrój poprzeczny pala to pierścień żelbetowy z osiowym otworem o średnicy $3,0 \div 8,0$ cm. Znaj-

duje się w nim krótki odcinek stalowej rury, ułatwiającej osiowe łączenie segmentów. Pierścień służy także do kontroli pionowego kierunku zagłębienia. Odcinek pała, zagłębiany w gruncie jako pierwszy, zakończony jest stalowym stożkiem o długości 40 cm i kącie wierzchołkowym 60°. W miejscu styku kolejnych elementów pała wykonuje się łączenia stalowymi pierścieniami, a przewód środkowy zostaje zazbrojony i zabetonowany.

Wzmacnianie istniejącego fundamentu palami Mega można podzielić na następujące etapy (rys. 5):

- ETAP I – odkopanie fundamentu na długości około 1 m i umieszczenie płyty żelbetowej w celu uzyskania równomiernego rozkładu nacisku na pale.
- ETAP II – wykonanie wykopu około 1,2 m poniżej żelbetowej płyty i umieszczenia w nim dolnego odcinka pała (odcinek zakończony stalowym ostrzem) oraz dźwignika hydraulicznego, do którego przy użyciu grubościennej miedzianej rurki, podłączona zostaje pompa.
- ETAP III – wtlaczanie pod ciśnieniem kolejnych pali za pomocą pompy, aż do osiągnięcia dwukrotnie wyższego ciśnienia od ciśnienia panującego pod fundamentem.
- ETAP IV – sprawdzenie pionowości pała i wypełnienie betonem środkowego otworu. Po usunięciu dźwignika wprowadza się prefabrykowany żelbetowy zamek.
- ETAP V – zasypanie i ubijanie wykopu gruntem.
- ETAP VI – przeniesienie dźwignika z pompą na następne stanowisko robocze.



Rys. 5. Kolejne etapy wykonywania pali Mega

Wykonanie przedstawionego projektu wymagałoby zejścia z podkopami roboczymi o 2,0÷2,5 m poniżej poziomu fundamentu. Znajduje się on 7,0 m poniżej poziomu posadzki. W efekcie wykopy sięgałyby około 9,5 m poniżej poziomu posadzki kościoła i ponad 6,0 m poniżej krypt. Prace na tej głębokości byłyby bardzo niebezpieczne. Ponadto za odrzuceniem tego rozwiązania przemawiał również fakt złego stanu całej konstrukcji, przede wszystkim fundamentów. Przez trudności wykonawcze i zagrożenie dla pracowników koncepcja ta została zmodyfikowana. Zgodnie z nową koncepcją wokół fundamentu wykonano opaskę żelbetową o grubości 50 cm i wysokości 250 cm oraz pale Mega wciskane pod opaskę. Do obliczeń projektowych przyjęto obciążenia charakterystyczne przenoszone przez jeden filar, tj. połowę obciążenia dachu i sklepienia nawy głównej oraz cały ciężar górnej części muru nawy głównej do osi obu sąsiadujących łęków. Uwzględniono także ciężar filara wraz z fundamentem zagłębionym do około 7,8 m poniżej poziomu posadzki kościoła.

Wzmacniające prace przeprowadzono w dwóch etapach. Pierwszy obejmował wykonanie 25 pali odcinkowych Mega o średnicy \varnothing 35 cm i długości elementów składowych 60 cm. Zadaniem pali było przejęcie całego działającego obciążenia. Nośność każdego pala została założona na 40 ton, a do wciskania pali użyto podnośnika hydraulicznego o sile 80 ton. Całkowita długość wykonanych pali wynosiła od 4,5 m do 8,0 m (średnio 6,25 m). W czasie realizacji tego etapu prac zaobserwowano wychylenie się wzmacnianego filara w kierunku nawy głównej. W związku z tym palowanie wstrzymano. Wychylenie się filara spowodowało konieczność modyfikacji założeń projektowych. Nowy projekt obejmował połączenie fundamentów filara z pozostałymi konstrukcjami fundamentów. Drugi etap prac polegał na połączeniu fundamentów filara z fundamentami ściany poprzecznej i zewnętrznej północnej. W celu uniknięcia gwałtownej zmiany obciążeń na podłoże zaprojektowano obejmę żelbetową na murze fundamentowym ściany poprzecznej, stykającej się z fundamentem filara oraz wciśnięciu pod obejmę czterech pali Mega — po dwa po obu stronach ściany. W obliczeniach założono, że 30% obciążenia ściany poprzecznej przejmie istniejący fundament, a 70% obciążenia zostanie przejęte przez projektowane pale.

Po zakończeniu prac stabilizacyjnych przeprowadzono serie pomiarów geodezyjnych, kontrolujących osiadania i wychylenia konstrukcji. Wykazały one, że po wzmocnieniu nastąpiła stabilizacja przemieszczeń.

LITERATURA

- [1] *Borusiewicz Wl.*: Konserwacja zabytków budownictwa murowanego. Warszawa, Arkady 1985
- [2] *Ciesielski R., Fuksa M.*: Charakterystyka techniczna i stan zachowania budynków w śródmieściu Krakowa. Przegląd Budowlany, nr 8/9, 1985
- [3] *Fuksa M., Żmudziński Z., Barycz S.*: Charakterystyka podłoża gruntowego i sposoby przebudowy fundamentów zabudowy Starego Miasta w Krakowie. Przegląd Budowlany, nr 8/9, 1985
- [4] *Klich St.*: Analiza warunków geotechnicznych i stanu konstrukcji Kościoła św. Piotra i Pawła w Krakowie. Konferencja Środowiskowa „Problemy geotechniczne w rewaloryzacji zabytków”, Kraków 1986
- [5] *Masłowski E., Spizewska D.*: Wzmacnianie konstrukcji budowlanych. Warszawa, Arkady 2000
- [6] *Wojewódzki Konserwator Zabytków — Kościół św. Piotra i Pawła w Krakowie, dokumentacja historyczno-konserwatorska*