



foto: Bartłomiej Wójcicki

Metropolitan w trakcie realizacji.  
 Autorzy projektu Foster and Partners, Jems Architekci, projekt konstrukcji Waterman International, Biuro Projektów A i B, konstrukcja budynku (aneks) BWL Projekt, generalny wykonawca HOCHTIEF Polska, ściany szczelinowe i stalowe słupy podziemia Soletanche Polska, Inwestor HINES

# Posadowiony na pierścieniach

Za parę miesięcy zostanie ukończona realizacja budynku Metropolitan na placu Piłsudskiego w Warszawie. Usytuowanie w sąsiedztwie Teatru Wielkiego i Opery, w niedużej odległości od Grobu Nieznanego Żołnierza, w sąsiedztwie przyszłej zabudowy Pałacu Brühla oraz Saskiego stawia przed architekturą, a szczególnie formą przestrzenną tego budynku, bardzo poważne wyzwanie. Przedstawiamy metodę pierścieniową głębokiego posadowienia gmachu Metropolitan.

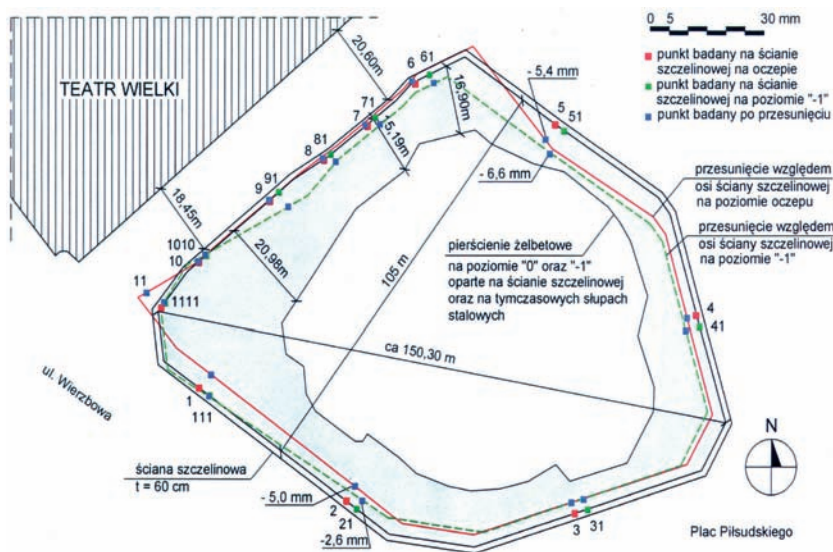
ponad 600 obiektów biurowych. W latach 70. był inwestorem wieżowca One Shell Plaza w Houston o wysokości 217,0 m – najwyższego w tym czasie budynku żelbetowego na świecie. Metropolitan, o łącznej powierzchni ca 33.600 m<sup>2</sup> biur oraz 4000 m<sup>2</sup> usług i handlu na parterze, posiada siedem kondygnacji naziemnych oraz dwie podziemne. Budynek został ukształtowany w formie trzech owalnych części z wewnętrznym okrągłym dziedzińcem o średnicy 50,0 m. Posiada konstrukcję żelbetową, słupowo-płyтовую, usztywnioną w każdej z trzech części trzonami obudowy pionów komunikacyjnych i instalacyjnych. Siatka słupów o maksymalnym rozstawie

ca 9,0 m stwarza elastyczne, podatne na zmiany funkcjonalne wnętrza. Przedmiotem specjalnej troski inwestora była bezpieczna dla otoczenia realizacja budynku. Problemem był budynek Teatru Wielkiego i Opery (TWiO) usytuowany w odległości 18,45 m od ściany szczelinowej Metropolitanu. Znaczne wysokości obu kondygnacji podziemnych sprawiły, iż Metropolitan został posadowiony 9,53 ÷ 10,13 m poniżej zera parteru. Wysoki poziom wód gruntowych oraz ich spływ w kierunku skarpy zwiększał skalę trudności.

W ekspertyzie\* opracowanej w marcu 2001 roku zaproponowałem realizację głębokiego posadowienia metodą stropową. Koncepcja polegała na wykonaniu, na poziomie parteru oraz pierwszej kondygnacji podziemnej, dwóch zewnętrznych, stropowych pierścieni płytowych opartych na ścianie szczelinowej oraz na tymczasowych słupach stalowych. Wymiary i kształty pierścieni wynikały z układu ściany szczelinowej oraz usytuowania realizowanych później słupów żelbetowych. Szerokości pierścieni 18,0 m do 21,0 m oraz bardzo duże wymiary zewnętrzne (rys. 1), dochodzące do 150,0 m stwarzały poważne problemy konstrukcyjne. Pierścienie nie mogły być dylatowane, problemem stało się zatem przeniesienie sił wynikających z wpływu skurczu oraz zmian temperatury. Pierścienie tworzyła żelbetowa płyta stropowa o grubości 35 cm usytuowana, ze względów funkcjonalnych, na różnych poziomach. Uskoki płyt pierścieni wynosiły średnio 60 ÷ 80 cm, maksymalnie dochodziły do 120 cm.

Zastosowanie dwóch zewnętrznych pierścieni miało na celu radykalne ograniczenie przemieszczeń poziomych ściany szczelinowej, które w wyniku analizy przeprowadzonej w ekspertyzie winny wynieść ca 4 mm. Ścianę szczelinową wykonano z betonu B30 W8 zbrojonego stalą ST500S. Oba pierścienie zostały oparte na ścianie szczelinowej oraz na 75 tymczasowych słupach stalowych, z których 26 zaprojektowano z profili stalowych HEB400, a 49 z HEB300. Stalowe słupy oparto na baretach lub palach żelbetowych o średnicy 63 cm i 88 cm. Po wykonaniu słupów żelbetowych, słupy stalowe zostały odcięte na poziomie górnej płaszczyzny płyty fundamentowej i usunięte. Konstrukcję pierścieni stanowił beton B40, a zbrojenie stal BST500. Betonowanie płyty górnej odbyło się na reglamentowanych deskowaniach opartych

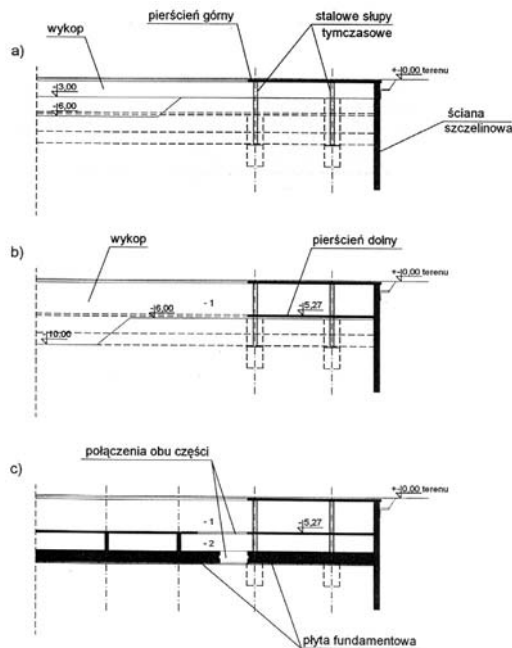
Rys. 1. Kształt i wymiary pierścieni. Odształcenia ściany szczelinowej i zewnętrznych krawędzi pierścieni



PRZEMIESZCZENIE FINALNE ŚCIANY SZCZELINOWEJ  
 Wymiary pierścieni na poziomie "0" oraz "-1".  
 Znak (-) oznacza przemieszczenie ściany szczelinowej do wykopu.

Rys. 2. Zasady wykonania podziemia:

- a) po wykonaniu ściany szczelinowej i stalowych słupów, betonowanie pierścienia na poziomie „0”
- b) wykonanie wykopu, betonowanie pierścienia dolnego
- c) wykonywanie wykopu, betonowanie konstrukcji części środkowej, betonowanie płyty fundamentowej pod pierścieniami, wykonywanie części środkowej oraz połączenia fundamentów



bezpośrednio na gruncie. W skrajnych przypadkach deskowania były podniesione do ca 100 cm nad poziom terenu. Po usunięciu ziemi spod płyty na poziomie parteru, nastąpiło w analogiczny sposób zabetonowanie pierścienia dolnego. Bardzo duża powierzchnia objęta ścianą szczelinową wynosząca ca 12.000 m<sup>2</sup> oraz usztywnienie ściany pierścieniami pozwoliły na znaczne usprawnienie prac budowlanych w podziemiu (rys. 2). W podziemiu wykonywano niezależnie konstrukcje zewnętrznych pierścieni na tymczasowych słupach oraz w części środkowej konstrukcję betonowaną tradycyjnie. W fazie końcowej obie konstrukcje zostały połączone w jedną całość.

Rozmiary prac budowlanych na powierzchni 1,2 ha, w tym konieczność wywiezienia 120.000 m<sup>3</sup> ziemi, wymagały zorganizowania szerokiego frontu pracy.

Praca statyczna pierścieni została precyzyjnie przeanalizowana zarówno na działanie sił pionowych, jak i sił wywołanych temperaturą i parciem gruntu. Problem skurczu rozwiązano poprzez odcinkowe betonowanie pierścieni. Każdy z pierścieni był betonowany w formie 11 oddzielnych części z niezabetonowanymi pasami o szerokości ca 150 cm. Wszystkie części pierścieni były wykonywane w terminach dogodnych dla wykonawcy. Przerwy między odcinkami betonowano z opóźnieniem w stosunku do betonowania sąsiadujących segmentów, co pozwoliło na wyeliminowanie 80%-90% skurczu betonu. Stosowano także inne znane metody zmniejszania skurczu.

Wpływ temperatury stwarzał bardzo poważne problemy. Została określona możliwa zmiana temperatur  $\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$  (w stosunku do temperatury betonowania), na której wpływ sprawdzono zarówno ścianę szczelinową, jak i oba pierścienie. Określono miejsca występowania ekstremalnych naprężeń, które poddano szczególnym obserwacjom. Na ścianę szczelinową bardziej niekorzystny był wpływ temperatur ujemnych. Odkształcenia pierścieni wywoływały w temperaturach ujemnych powstawanie sił działających niekorzystnie na ścianę. Skierowane do wykopu siły powodowały

w obu pierścieniach (większe w pierścieniu górnym) powstawanie mniej korzystnego schematu statycznego ściany (nierównomierne przemieszczanie się podpór).

Dla zabezpieczenia przed nadmiernymi temperaturami ujemnymi oba pierścienie były, przy niskich temperaturach, na całej głębokości podziemia nakrywane, a wewnątrz ogrzewane. Zabezpieczeniem przed wysokimi temperaturami była ułożona na górnym pierścieniu, przewidziana w projekcie, izolacja termiczna.

Przyrost temperatur powodował rozszerzanie się pierścieni, którego skutkiem było powstawanie sił skierowanych na zewnątrz budynku. Przemieszczeniu ściany przeciwstawił się odpór gruntu. Pomimo tego przy temperaturach wysokich rejestrowano przemieszczanie się ściany na zewnątrz. Równocześnie powstawały w pierścieniach znaczne siły ściskające, większe w pierścieniu górnym. Konstrukcja podziemia była przedmiotem badań i pomiarów geodezyjnych oraz stałej analizy ich wyników. Specjalną uwagę poświęcono badaniom przemieszczeń poziomych ściany szczelinowej, szczególnie w sąsiedztwie budynku TWiO. Ściana szczelinowa była badana w 11 punktach, z których sześć usytuowano w sąsiedztwie TWiO (rys. 1). W każdym punkcie pomiary wykonywano na poziomie górnego oraz dolnego pierścienia. Pomiar wyjściowy przeprowadzono 3.01.2002 roku przy temperaturze  $-1^{\circ}\text{C}$ . Pozostałych 8 pomiarów wykonano w okresie do 4.09.2002 roku, to jest do ukończenia stanu surowego budynku.

Średni błąd pomiaru przemieszczenia poziomego badanej ściany został określony przez autorów pomiarów na  $\pm 0,7$  mm, w związku z czym wielkości przemieszczeń poniżej błędu średniego to jest 1,4 mm „należy uznać za nie wykryte” (według autorów pomiarów).

Zgodnie z wymaganiami ekspertyzy\* wykonawca HOCHTIEF zlikwidował drogę ciężkiego transportu między TWiO oraz wznoszonym budynkiem. Brak obciążeń ciężkim transportem zmniejszył przemieszczenia ściany szczelinowej od strony Teatru. Przemieszczenia ściany od strony TWiO są zdecydowanie małe i wahają się w granicach od  $+0,2 \div -0,5$  mm. Omawiane rezultaty mieszczą się w granicach błędu pomiaru.

Duży wpływ na przemieszczenia miała praca pierścieni, które odkształcając się pod wpływem wzrostu lub spadku temperatur wymuszały odpowiednie odkształcenia ściany szczelinowej.

Największe przemieszczenia ściany na poziomie „0” wystąpiły w miejscach, gdzie na jej obciążenie wpływał ruch ciężkich pojazdów. Maksymalne przemieszczenia wynoszące  $5,0 \div 5,4$  mm są jednak zdecydowanie zaniżone w stosunku do wartości przyjętych w praktyce budowlanej. Według niektórych norm zachodnioeuropejskich przemieszczenia omawianej ściany można dopuścić w granicach  $15 \div 20$  mm. Kolejne badania wznoszonego budynku dotyczyły osiadania jego konstrukcji w sąsiedztwie ściany szczelinowej, pod trzonami oraz pod wewnętrznym dziedzińcem.

Osiadania mierzono poczynając od 21 kwietnia 2002 roku. W wyniku przeprowadzonych sześciu pomiarów największe osiadanie stwierdzono pod trzonami budynku. Osiadania ścian szczelinowych

ciąg dalszy na str. 54



W ostatnich latach zwiększył się ruch samochodowy, zmieniły się normy, i konstrukcja wiaduktu nie zapewniała już bezpieczeństwa swym użytkownikom. Nastąpiły pęknięcia w konstrukcji nośnej, postępowała głęboka korozja, w bardzo złym stanie były wsporniki podtrzymujące chodniki. Nie było większego sensu remontować tak zniszczonej konstrukcji, lepiej wybudować nową. W 2002 roku dokonano więc rozbiórki konstrukcji, przekładając tymczasowo ruch do najbliższego przejazdu kolejowego, co spowodowało niestety tworzenie się dużych korków

Obecnie trwa budowa nowego wiaduktu. Generalnym wykonawcą jest firma Warbud SA z Warszawy. Będzie to obiekt dziewięcioprzęstowy o długości 286 m, z dwoma środkowymi przęsłami podwieszonymi na wantach. Rozpiętość przęseł podwieszonych wyniesie 68 m, a pozostałych od 17 m do 25 m. Konstrukcja ustroju nośnego będzie zespolona. Część stalowa składać będzie się z pięciu dźwigarów (blachownic) o wysokości ok. 0,9 m i rozstawie 3 m. Zespolenie belek nośnych z płytą żelbetową zaprojektowano w postaci sworzni o średnicy 19 mm i 22 mm. Płyta żelbetowa pomostu, o grubości 200-260 mm, wykonana będzie z betonu B40 i stali zbrojeniowej AIIIIN BSt500S. Całkowita szerokość płyty w części dojazdowej wyniesie 14,82 m, a w części podwieszanej, gdzie wsporniki będą zmieniać swój wysięg, osiągać będzie 17,90 m. Nad podporami pojawiają się ciągle żelbetowe poprzecznice przekazujące obciążenia z pomostu na łożyska. Podobnie zaprojektowano poprzecznicę w rejonie podwieszenia want. Ponadto konstrukcja stalowa zostanie usztywniona poprzecznie stalowymi poprzecznkami pośrednimi o konstrukcji blachownicowej. Podwieszenie zrealizowane będzie na py-

lonie składającym się z dwóch niezależnych słupów stalowych o konstrukcji skrzynkowej (o kształcie prostokąta z zaokrąglonymi ścianami dłuższego boku) i wysokości 26,5 m ponad poziom pomostu jezdni. Usytuowanie zakotwień w pylonie przyjęto wewnątrz korpusu, tym samym ograniczając bezpośredni wpływ warunków atmosferycznych na zakotwienia. Pylon będzie utwierdzony w pomoście. Wszystkie podpory pod płytą pomostu będą żelbetowymi filarami dwusłupowymi o wysokościach od 4,30 do 6,70 m i wymiarach w przekroju poprzecznym 1,2 x 1,9 m, jedynie pod pylonem słupy będą miały wymiary 2x3 m. Zarówno filary jak i tawy wykonane będą z betonu B30 i zbrojone stalą AIIIIN BSt500S, a posadowione będą na palach prefabrykowanych, wbijanych, o długości od 14 do 16 m i przekroju poprzecznym 300 x 300 mm. Budowa ma zakończyć się 30 października 2003 r.

#### Będzie wygodniej

W związku z planowaną budową autostrady A2 z Poznania do granicy państwa, budowane są wiadukty drogowe i autostradowe. W sumie ma powstać około 120 obiektów mostowych na tym odcinku. Będą to głównie konstrukcje żelbetowe płytowe lub dwubelkowe, o długości 60-70 m, przeważnie czteroprzęstowe. Zapewne teraz po ziemi prace budowlane nabiorą większego tempa, co powinno nas cieszyć, ponieważ każdy kolejny most czy wiadukt, każdy dodatkowy kilometr drogi, a tym bardziej autostrady, poprawia komfort jazdy i zwiększa bezpieczeństwo użytkowników czterech kółek.

**inż. Aneta Długosz**

*ciąg dalszy ze str. 52*  
od strony TWiO wyniosły zaledwie  $0,1 \div 4,2$  mm, a pod wewnętrznym dziedzińcem  $2,7 \div 2,5$  mm. Pomierzone osiadania pod trzonami wyniosły odpowiednio 14,20 mm, 14,6 mm i 18,0 mm. Prowadzone równoległe z realizacją Metropolitana badania TWiO dotyczyły ewentualnych przemieszczeń pionowych oraz zmian istniejących od ca 30 lat nielicznych zarysowań ścian zewnętrznych. Uzyskane wyniki mieszczą się w granicach błęd pomiaru, co

pozwała na stwierdzenie, iż budowa Metropolitana nie miała wpływu na stan konstrukcji budynku TWiO. Monolityczna konstrukcja Metropolitana spełniła doskonale swoje zadania, umożliwiając szybkie realizowanie jego skomplikowanej formy. Zarówno w części podziemnej (poza ścianą szczelinową i płytą fundamentową), jak i nadziemnej zastosowano wyłącznie beton B40 i B50. O jakości i wytrzymałości betonu może świadczyć fakt, iż przeprowadzone liczne badania sklerometryczne oraz badania ca 4600 próbek nie wykazały ani jednego przypadku zaniżenia wytrzymałości betonu. Zastosowanie ścian osłonowych wysokiej technologii oraz nowoczesnych rozwiązań instalacyjnych narzuciło dużą dokładność wykonania konstrukcji. Konstrukcja żelbetowa spełniła te wymagania, a największe odchylenia od obrysów teoretycznych nie przekroczyły 10 mm. Przyjęta metoda pierścieniowa wykonania podziemia okazała się skuteczna w eliminacji wpływu budowy Metropolitana na budynek Teatru Wielkiego i Opery. Mimo skomplikowanej geometrii oraz bardzo dużych wymiarów oba pierścienie, dzięki wzorowemu wykonawstwu i zabezpieczeniom przed wpływami atmosferycznymi, spełniły z powodzeniem swoje zadania. Zapewniły bezpieczeństwo dla otoczenia oraz przyspieszyły wykonanie podziemia budynku.

**prof. dr hab. Adam Zbigniew Pawłowski\***  
**Politechnika Warszawska**

\* Autor ekspertyzy i koncepcji pierścieniowej posadowienia Metropolitana, konsultant inwestora HINES oraz generalnego wykonawcy HOCHTIEF Polska

Widok pierścieni w trakcie budowy



foto: Adam Zbigniew Pawłowski