

prof. dr hab. inż. Adam Zbigniew Pawłowski*
dr inż. Ireneusz Cała*

Konstruowanie podziemia i fundamentów budynków wysokich

Posadowienie budynku wysokiego jest problemem złożonym, w którym dominują: rozwiązania funkcjonalne, zmuszające do budowania kondygnacji podziemnych; zapewnienie stateczności budynku z uwagi na parcie wiatru oraz działanie sił sejsmicznych; przeniesienie na grunt olbrzymich obciążeń pionowych. Reprezentacyjna funkcja parteru, a czasem konieczność jego uwolnienia od funkcji związanych z budynkiem (przestrzeń publiczna), zmuszają do umiejscowienia części pomieszczeń w podziemiu. Są tam projektowane przede wszystkim funkcje techniczne i usługowe (wentylatornie, rozdzielnie i przyłącza, zaplecza wind, zbiorniki ppoż., magazyny, a szczególnie parkingi).

Możliwości zwiększenia liczby kondygnacji podziemnych są związane przede wszystkim z warunkami gruntowymi, a także z wymaganiami stawianymi przez otaczającą zabudowę. W wieżowcach o wysokości 100,0 – 150,0 m rezygnuje się często z pośrednich kondygnacji technicznych, przenosząc pomieszczenia techniczne na kondygnację najwyższą oraz do podziemia. Budowa kondygnacji podziemnych jest droższa od nadziemnych, dlatego też na ogół minimalizuje się wykorzystanie podziemia (stany surowe kondygnacji podziemnych są realizowane średnio 2 – 3 razy dłużej od nadziemnych).

Na podstawie analizy zrealizowanych budynków uważamy, że w wieżowcach wykonywane są najczęściej 2 – 3 kondygnacje podziemne. Budowa większej liczby jest utrudniona w przypadku występowania płytkiego podłoża skalistego lub zwierciadła wody gruntowej będącej pod ciśnieniem. W tych przypadkach koszty głębienia wykopu i zabezpieczenia ścian podziemia przed działaniem wody są bardzo

wysokie. Jednak w przypadku budynków położonych na bardzo drogich gruntach głębienie wykopów nawet na 4 ÷ 5 kondygnacji podziemnych może być opłacalne.

W tabeli podano liczbę kondygnacji podziemnych zrealizowanych w wybranych wieżowcach. W tego typu budynkach bardzo trudny do rozwiązania jest problem dużej liczby potrzebnych miejsc parkingowych, ale można je projektować również w części nadziemnej budynków. Głębokie posadowienie wieżowca może wynikać z konieczności zapewnienia jego stateczności na działanie sił wiatru. Im wyższy budynek, tym wpływ sił poziomych

większy. Stateczność wieżowca zależy od jego formy i wielkości sił pionowych (szczególnie ciężaru stropów oraz trzonów) mających wpływ stabilizujący. Dość często stosuje się poszerzenie rzutu podziemia w stosunku do rzutów kondygnacji nadziemnych. Projektując fundamenty budynków wysokich, trzeba brać pod uwagę specyficzne uwarunkowania, jakie tego typu konstrukcje stwarzają. Dotyczy to przede wszystkim:

- dużych obciążeń punktowych, które mogą osiągnąć wartość nawet 35 000 – 40 000 kN;
- nierównomierności obciążeń wynikającej ze znacznego wpływu sił po-

Kondygnacje podziemne i nadziemne w wybranych wieżowcach

| Budynek | Miasto, kraj | Liczba kondygnacji | |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------|-------------|
| | | nadziemnych | podziemnych |
| Burj Khalifa | Dubai, ZEA | 163 | 1 |
| Willis Tower (Sears Tower) | Chicago, USA | 110 | 3 |
| Taipei 101 | Taipei | 101 | 5 |
| Princes Tower | Dubai, ZEA | 101 | 6 |
| John Hancock Center | Chicago, USA | 100 | 2 |
| 23 Marina | Dubai, ZEA | 90 | 4 |
| Petronas Towers | Kuala Lumpur, Malezja | 88 | 5 |
| Amoco Building | Chicago, USA | 80 | 5 |
| Central Plaza | Hongkong, Chiny | 78 | 3 |
| Columbia Seafirst Center | Seattle, USA | 76 | 6 |
| First Interstate World Center | Los Angeles, USA | 75 | 2 |
| Allied Bank Plaza | Houston, USA | 71 | 4 |
| Bank of China | Hongkong, Chiny | 70 | 4 |
| Two Prudential Plaza | Chicago, USA | 64 | 5 |
| Rialto Building | Melbourne, Australia | 63 | 2 |
| Messeturm | Frankfurt, Niemcy | 63 | 3 |
| Overseas Union Bank Center | Singapur | 63 | 4 |
| AT&T Corporate Center | Chicago, USA | 61 | 2 |
| First Bank Place | Mineapolis, USA | 56 | 3 |
| Commerzbank | Frankfurt, Niemcy | 50 | 2 |
| Intercontinental | Warszawa, Polska | 44 | 5 |
| Warsaw Trade Tower (WTT) | Warszawa, Polska | 42 | 3 |
| La Societe Generale | Paryż, Francja | 40 | 10 |
| Rondo 1 | Warszawa, Polska | 40 | 2 |
| WCF | Warszawa, Polska | 33 | 2 |

* Politechnika Warszawska, Wydział Architektury

ziomych od działania wiatru oraz sił sejsmicznych.

Sposób fundamentowania budynku zależy przede wszystkim od rodzaju gruntu oraz od warunków hydrologicznych. Najlepszym rodzajem podłoża jest lita skała. W przypadku, gdy grunty nośne znajdują się na większej głębokości, stosuje się fundamenty na palach lub na kesonach. Pale głębione są aż do skały i częściowo się w nią zagłębiają. Sięgają także na znaczną głębokość do warstw gruntów o dużej nośności. Kesonostrowano w rozwiązaniach starszych; obecnie zastępują je z powodzeniem pale o średnicy nawet do 2,4 m oraz baretę.

W budynkach o wysokości nawet do 180,0 m, zlokalizowanych na dobrych gruntach, możliwe jest zastosowanie fundamentu płytowego, posadowionego bezpośrednio na gruncie. Fundament ten można wspomagać ścianami szczelinowymi oraz baretami (fragmenty ścian szczelinowych pod płytą fundamentową). **Płyta fundamentowa** jest z reguły projektowana jako zespolona z baretami lub palami i analizowane jest osiadanie całego zespołu. Analiza statyczna dotyczy układu przestrzennego elementów posadowienia z rygorystycznym uwzględnieniem właściwości technicznych gruntu.

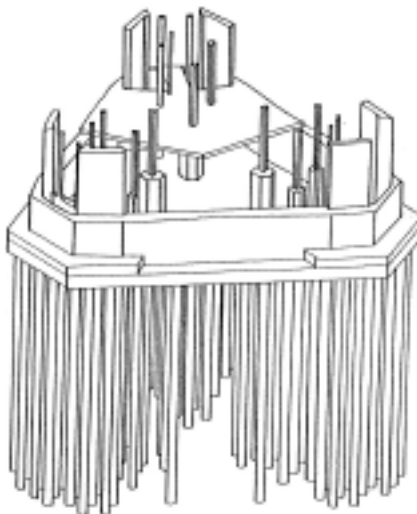
Projekt posadowienia budynku powinien być poprzedzony wyjątkowo dokładnymi badaniami geotechnicznymi. Głębokość badań gruntu jest określana indywidualnie, zależnie od wysokości wieżowca. W zależności od uzyskanych wyników może zachodzić konieczność badań na większej głębokości.

Coraz większe zastosowanie mają **fundamenty palowe**. Przekazują obciążenia od budynku na grunt przez tarcie między boczną powierzchnią i gruntem oraz przez nacisk ostrza pala na warstwę nośną. Zwykle wykorzystuje się układy wielu pali, często różnej długości i średnicy, usytuowanych zgodnie z rozkładem naprężeń pod budynkiem. Układy palowe połączone są oczepem płytowym lub rusztowym. Do posadowienia budynków wysokich wykorzystywane są często pale średnicy do 2,4 m. Są to zwykle pale żelbetowe, wykonywane przez zabetonowanie otworów w gruncie odpowiedniej średnicy. Fundamenty na palach stosuje się zarówno w budynkach najwyższych, jak i średniowysoko-

kich. Zastosowano je w najwyższym do niedawna wieżowcu świata – Petronas Towers oraz w Taipei 101.

W wieżach Petronas Towers zastosowano pale o różnej średnicy i długości. Spowodował to specyficzny układ warstw gruntu. Poniżej warstw słabszych układały się pokłady skalne o znacznym nachyleniu, co narzuciło konieczność zróżnicowania długości pali. Jako oczep pali zawieszonych wykonano płytę grubości 4,5 m z betonu B60 (waga 32 550 t – pod każdą wieżą). Tak znaczną grubość i wysokiej klasy beton zastosowano, spodziewając się różnicy osiadania pali, którą trzeba było zniwelować pracą zginanej płyty. Pod każdą wieżą wykonano 104 pale długości 60 – 115 m, metodą wiercenia w zawieszinie bentonitowej.

W miastach europejskich podłoża skaliste występują rzadko, przeważają mieszaniny gruntów spoistych gliniastych lub piaszczystych. Fundamentowanie budynków najwyższych na tego typu terenach wymaga zastosowania palowania. Projektowane są najczęściej fundamenty na palach wierconych. Fundamenty palowe zastosowano w Comerzbanku we Frankfurcie nad Menem, posadowionym na nośnych „glinach frankfurckich”, znajdujących się na poziomie ok. 30 m p.p.t. Grunt powyżej poziomu gliny okazał się zbyt słaby dla przeniesienia obciążeń od tak wysokiego budynku. Konieczne było wykonanie wiązek pali na całej powierzchni fundamentu. Płytę fundamentową oparto na 111 palach wierconych długości 45,0 m (rysunek).



Zasada posadowienia budynku Comerzbanku we Frankfurcie

Specyficzny układ konstrukcji budynku (trzy trzony) spowodował konieczność wzmocnienia płyty fundamentowej w obrębie trzonów fragmentami ścian połączonych ze stropami, tworzącymi sztywną, podziemną skrzynię.

Fundamenty palowe ma większość budynków wysokich Frankfurtu (Westend Tower, Messeturm, Main Tower, Torhaus der Messe). Spowodowała to zarówno ich wysokość (należą do najwyższych w Europie), jak i specyficzna budowa geologiczna podłoża. Fundamenty palowe stosowano również w Polsce. Przykładem jest WTT (dawne Daewoo), gdzie ze względu na złe warunki gruntowe zastosowano pale sięgające głębokości 15,0 m.

Fundamenty płytowe są stosowane w przypadku posadowienia na lepszych gruntach lub przy mniejszej wysokości budynków. Często stosowane są płyty różnej grubości, zmienianej zgodnie z wielkością naprężeń przekazywanych na grunt. W budynkach o konstrukcji trzonowej płyty mają największą grubość w obrysie trzonu, zmniejszaną w kierunku ścian zewnętrznych lub poza ich granicami.

Inną metodą ograniczającą zużycie materiału jest zastosowanie **rusztu fundamentowego**. Nie zawsze jest to rozwiązanie ekonomiczne, ze względu na skomplikowane zbrojenie i szalunki rusztu. Komplikacje wykonawcze oraz wzrost zużycia stali powodują, iż notujemy przewagę płyt fundamentowych nad rusztami.

Zrealizowane wieżowce warszawskie przybliżyły nam znacznie specyfikę posadowienia budynków na płycie fundamentowej. Spośród ośmiu wzniesionych ostatnio budynków o wysokości do 192,0 m WTT został posadowiony na palach, natomiast pozostałe, za pośrednictwem płyt fundamentowych na baretach lub bezpośrednio na gruncie. Prawie we wszystkich przypadkach ważnym elementem konstrukcji podziemia i posadowienia była ściana szczelinowa. Należy dużą wagę przykładać do szczelności połączenia ściany szczelinowej z płytą fundamentową. Ważne są też badania gruntu na odpowiedniej głębokości określonej przez normy. W przypadku wieżowców warszawskich, wiercenia powinny być wykonywane do głębokości co najmniej 30 m, a badania gruntu określać jego jakość na głębokości $4 \div 5$ m poniżej

podstaw baret lub pali. Istotną rolę odgrywa ponadto określenie poziomu wody pod ciśnieniem oraz jej cech chemicznych wpływających agresywnie na beton. Zabezpieczenie przed działaniem wody pod ciśnieniem stanowią częściowo ściany szczelinowe. Znane są przykłady warszawskie betonowania płyt fundamentowych odcinkami. Wówczas usuwanie wody z wykopu jest mniej utrudnione oraz mniej kosztowne.

Warszawskie wieżowce są realizowane z reguły w zwartej zabudowie otaczającej. Bardzo ważny staje się wtedy problem zapewnienia bezpieczeństwa budynkom sąsiadującym, zarówno w trakcie realizacji, jak i użytkowania wieżowca. Potencjalne zagrożenia mogą wynikać bezpośrednio z wykonywania głębokiego wykopu, ale także pośrednio z naruszenia równowagi ciśnienia i poziomu wód gruntowych. Zmusza to do poszukiwania rozwiązań technicznych zapewniających maksymalne bezpieczeństwo budowy oraz istniejących otaczających obiektów. Służy temu m.in. **technologia ścian szczelinowych**, wykonywanych do głębokości nawet 55,0 m poniżej poziomu terenu. Ściany szczelinowe grubości 60, 80, a nawet 100 cm, realizowane są przeważnie z betonu szczelnego **B30W8-B37W8**, mają dopracowane detale złączy między segmentami, jak również połączeń z płytami stropów podziemia, szczególnie z płytą fundamentową. Jest to miejsce najbardziej narażone na przenikanie wody. Ściana szczelinowa odpowiedniej głębokości, przy sprzyjającym układzie warstw gruntu, może „zamknąć” wodę gruntową pod ciśnieniem. Zabezpieczenie głębokiego wykopu może odbywać się przez kotwienie ścian na zewnątrz lub zastosowanie tzw. metody stropowej albo kombinowanej. Kotwienie ścian na zewnątrz oznacza „wejście” na teren sąsiada, co może utrudniać zastosowanie takiej metody.

Posadowienie budynków sąsiadujących, różnego rodzaju instalacje podziemne, a także wysoki poziom wód gruntowych utrudniają kotwienie zewnętrzne ścian, dlatego też pewniejsza jest metoda stropowa, polegająca na rozpięciu ścian szczelinowych od wewnątrz. Dobrym jej przykładem jest realizacja wieżowca PZU w Warszawie o czterech kondygnacjach podziemnych.

Zastosowanie metody stropowej polegało w tym przypadku na:

- wykonaniu ścian szczelinowych na całym obwodzie;
- usunięciu gruntu do poziomu -1;
- wykonaniu baret, na których osadzono stalowe słupy stanowiące tymczasowe podparcie konstrukcji stropów;
- zabetonowaniu stropu na poziomie -1 na gruncie i opartego na ścianach szczelinowych i stalowych słupach;
- usunięciu gruntu z kondygnacji -2 oraz -3;
- zabetonowaniu stropu na poziomie -3 (na gruncie oraz na stalowych słupach);
- usunięciu gruntu z kondygnacji -4 oraz z przestrzeni płyty fundamentowej;
- betonowaniu płyty fundamentowej;
- betonowaniu od dołu ścian trzonów oraz słupów żelbetowych;
- usunięciu słupów stalowych po zakończeniu betonowania konstrukcji.

Możliwe jest pozostawienie konstrukcji stalowych słupów, które po odpowiednim oparciu na płycie fundamentowej oraz obetonowaniu (słupy żelbetowe ze sztywnym zbrojeniem) pełnią funkcję konstrukcji docelowej. Znane są jednak przypadki odchylenia słupów od pionu o kilka, a nawet kilkanaście centymetrów, co eliminuje ich późniejsze wykorzystanie.

Wykonanie ścian szczelinowych oraz wewnętrznego wykopu wymaga pomiarów przemieszczeń poziomych ścian. Praktyczna zasada w krajach europejskich określa dopuszczalne przemieszczenia poziome ścian szczelinowych na ≤ 10 mm. Ściany szczelinowe dużego, otwartego wykopu są narażone na działanie temperatury. Zarówno nadmierna dodatnia temperatura, jak i ujemna wpływa niekorzystnie na zamknięty układ ścian szczelinowych na obwodzie całego wykopu. W związku z tym powinny być one przedmiotem analizy statycznej oraz odpowiedniej ochrony.

Współczesne wieżowce mają z reguły powierzchnię rzutu sięgającą 1800 – 2500 m². Wykonanie płyty fundamentowej o tak dużej powierzchni i o znacznej grubości, np. 2,0 – 2,5 m, wiąże się z wieloma problemami technologicznymi. Jednym z najważniejszych jest betonowanie płyty, a szczególnie zabezpieczenie jej przed uszko-

dzeniami wywołanymi skurczem tak dużej masy oraz wysokiej temperatury w czasie wiązania betonu. Płyty fundamentowe wieżowców nie są z zasady dylatowane. Skurcz betonu jest eliminowany w bardzo dużym stopniu przez betonowanie płyty „w szachownicę”. Po 15 – 20 dniach zabetonowane fragmenty są ze sobą łączone (zabetonowane przerwy między nimi). Wielkość działek zależy od grubości płyty. Z reguły przyjmuje się działki zawierające 600 – 800 m³ betonu. Skurcz oraz nadmierne nagrzewanie betonu jest powodem stosowania w płytach fundamentowych betonu niższej klasy oraz odpowiednich cementów i dodatków pozwalających na spowolnienie wiązania. Na podstawie badań własnych stwierdziliśmy, że temperatura betonu B30 w płycie fundamentowej grubości 2,0 m, betonowanej w okresie letnim, wyniosła w środku jej grubości ok. 55 °C. Taka temperatura może mieć szkodliwy wpływ na zachowanie odpowiedniej struktury betonu. Bardzo ważna jest rola technologa przy określeniu jakości mieszanki betonowej. Wpływ temperatury zewnętrznej na płytę powinien być dokładnie określony i uwzględniony w analizie statycznej płyty.

Projektowanie płyty fundamentowej w przypadku łączenia wieżowca z niską zabudową (np. parokondygnacyjną) jest, przy korzystnych warunkach wodnych, dość proste. Między płytami części wysokiej i niskiej pozostawia się przerwę w betonowaniu, która zostaje zabetonowana po wykonaniu stanu surowego wieżowca, a więc po zakończeniu jego osiadania. W przypadku wysokiego poziomu wody gruntowej konieczne będzie zabezpieczenie przerwy w betonowaniu przed napływem wody do wnętrza podziemia. Przykładem posadowienia na płycie może być WCF w Warszawie.

Skala trudności fundamentowania budynków wysokich zależy od ich wysokości, ale także od przewidywanego programu wykorzystania kondygnacji podziemnych. W budynkach najwyższych posadowienie jest bardzo trudnym problemem konstrukcyjnym i technologicznym. W wieżowcach o wysokości 90,0 – 150,0 m, dominujących w Europie, w tym w Warszawie, problemy posadowienia ulegają znacznemu uproszczeniu.