

Beton mierzy bardzo wysoko – Burj Dubai

Rewolucja w budownictwie wysokim, polegająca na zdecydowanym zastępowaniu stali konstrukcyjnej przez beton, dojrzała od blisko 20 lat. Jednak od roku 1992 najwyższym budynkiem z całkowicie betonową konstrukcją jest ciągle Central Plaza w Hongkongu (374 m). Wielkie budynki ostatniej dekady miały ustroje nośne mieszane, ze znaczącym zastosowaniem zespolonej konstrukcji stalowo-betonowej.

Były to:

- Jin Mao w Szanghaju (1998 r.), o wysokości 421 m, z zespolonymi megastupami
- Petronas Towers w Kuala Lumpur (1998 r.), o wysokości 452 m, w którym już jedynie stropy były zespolone, a cała pozostała konstrukcja nośna – żelbetowa
- Taipei 101 na Tajwanie (2004 r.) – z częściowym jedynie zastosowaniem zespolonych megastupów, wypełnionych betonem tylko do 52. kondygnacji.

Na obecny odwrót od stalowej konstrukcji złożyły się trzy podstawowe przyczyny:

- 1) postęp w technologii betonu i szybkości wznoszenia budynków monolitycznych

- 2) nacisk na ognioodporność budynków wysokich (po 11 września 2001)

- 3) wymagania w odniesieniu do sztywności konstrukcji.

Budynek, który jest bohaterem tej prezentacji – Burj Dubai – ustanawia podwójny rekord: jest już od marca 2008 najwyższą budowlą wzniesioną kiedykolwiek przez człowieka, a zarazem najwyższą konstrukcją z betonu (fot. 1). Warto przypomnieć, że stanowi to pobicie polskiego rekordu światowego – masztu radiowego wysokości 646 m z lat 1974-1991 oraz dotąd istniejącego najwyższego masztu świata w Płn. Dakocie (628 m).

O ile ostateczna wysokość Burj Dubai jest utrzymywana w tajemnicy (prawdopodobnie około 810 m), o tyle już wiadomo, że wysokość części żelbetowej – 586 m i 156 kondygnacji, to rekord konstrukcji z betonu. Tę wysokość osiągnięto 28 października 2007 r. Wyżej już tylko stropy z betonu uzupełniają konstrukcję stalowej iglicy (fot. 2).

„Wieża” Dubai jest zlokalizowana w centralnym punkcie nowoczesnego założenia miejskiego (fot. 3). Na zespół ten składają się liczne budynki wysokie (200-300 m), luksusowa niska zabudowa tradycyjna oraz tereny rekreacyjne z dużym jeziorem.

Jest to budynek o olbrzymiej powierzchni użytkowej 460.000 m² i bardzo złożonej funkcji – obejmuje część mieszkaniową (górne ok. 100 kondygnacji), luksusowy hotel Armani (zwany tak na razie od nazwiska włoskiego projektanta wszystkich wnętrz Giorgio Armaniego), funkcje rekreacyjne, handlowe, 50.000 m² powierzchni biurowej i wielkie parkingi na 3000 samochodów. Na poziomie 442 m znajduje się najwyższa na świecie platforma obserwacyjna.

Fot. 1. Smukły kolos w całej okazałości – marzec 2008



fot. Archiwum



Fig. 2. Triumfujący beton prawie 600 m nad terenem

fot. Archiwum

Konkurs na projekt wygrało najbardziej doświadczone na świecie w budownictwie wysokim biuro projektów *Skidmore, Owings & Merrill* (SOM) z Chicago. Wykonawcą jest konsorcjum *Samsung Engineering and Construction* z Korei Płd., we współpracy z firmami z Belgii (*Besix*) i Dubaju (*Arabtec*). Budowę rozpoczęto w 2004 r., a wzniesienie części nadziemnej w 2005 r. W marcu 2008 zaawansowany był już montaż szczytowej konstrukcji iglicy stalowej.

Aby sprostać postawionemu celowi – realizacji obiektu w czasie 48 miesięcy – przyjęto następujące założenia strategiczne:

- 3-dniowy cykl wykonania konstrukcji jednej kondygnacji
- optymalizację transportu z zastosowaniem wysokowydajnego wyposażenia
- zastosowanie optymalnych deskowań do realizacji złożonych kształtów konstrukcji
- ścisłe trzymanie się założeń organizacyjnych i logistycznych
- uwzględnienie wszystkich technologii wznoszenia wysokich budynków, dostępnych w okresie budowy.

Koncepcja projektowa

Rzut budynku w przyziemiu stanowi centralny rdzeń i trzy promieniście rozchodzące się skrzydła (rys. 1). Rzut ten jest oryginalny w odniesieniu do budynków, bo jedyne podobieństwo trójramiennej gwiazdy można znaleźć w wieży telewizyjnej CNN w Toronto (od 1976 r. najwyższej dotąd budowli betonowej na świecie – 553 m).

Istotą koncepcji jest stopniowe zmniejszanie się skrzydeł, przy czym te redukcje (co 21 kondygnacji w każdym skrzydle) przebiegają wzdłuż linii spiralnej na wysokości, nie powodując nagłych zmian sztywności zginania całego budynku. Wreszcie na poziomie 586 m konstrukcja żelbetowa kończy się samym rdzeniem (patrz rys.1), który stanowi fundament dla szczytowej, bardzo smukłej części stalowej (fot. 4).

Najwięcej uwagi na etapie koncepcji poświęcono problemom wpływu wiatru. Dla mieszkańców jak i gości hotelowych kwestia ograniczenia drgań wywołanych wiatrem ma oczywiście zasadnicze znaczenie. Z tej racji model obiektu był długo badany – na niespotykaną dotąd skalę – w tunelu aerodynamicznym (najpierw w skali 1:500, po-



fot. Archiwum

Fot. 3. Widok budowy nowego centrum DBD (Downtown Burj Dubai) – styczeń 2008



fot. Archiwum

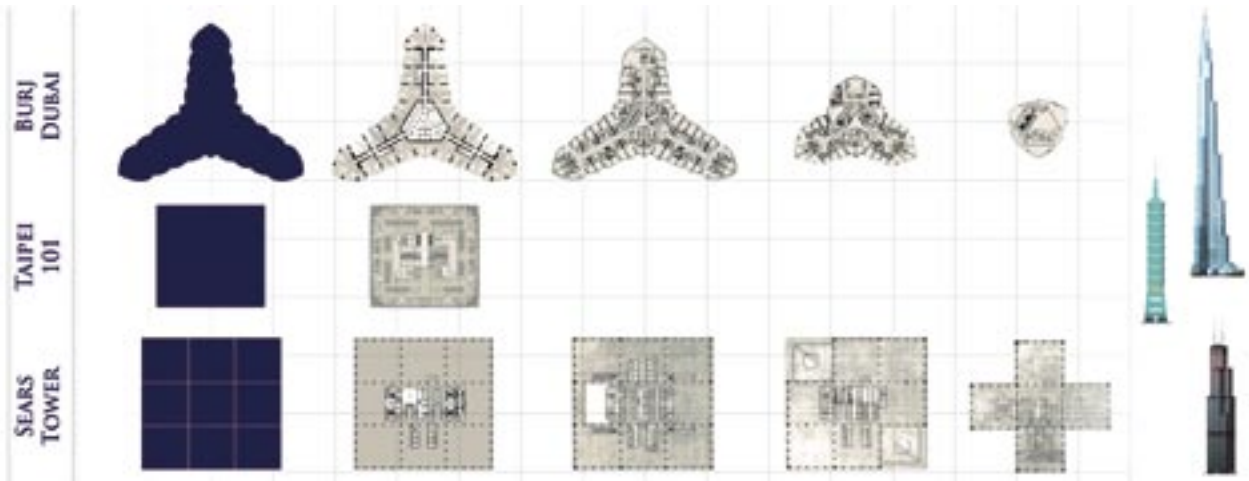
Fot. 4. Najwyższa część konstrukcji żelbetowej (do poziomu 586 m) to już niemal sam „bezkrzydły” rdzeń



fot. Archiwum

Fot. 5. Pasy wzmocnień poziomych tworzące zarazem piętra techniczne

Rys. 1. Porównanie rzutów najwyższych budynków i zmian rzutów na wysokości



Fot. 6. Kilkaście tysięcy paneli szklanych w oprawie ze stali nierdzewnej stanowi okna na całą wysokość kondygnacji



foto. Archiwum

Fot. 7. Wzmocniona konstrukcja pięter technicznych



foto. Archiwum

Fot. 8. Skomplikowane rzuty szczytowych kondygnacji w części żelbetowej



foto. Archiwum

tem 1:250, a wreszcie górna część w skali 1:50), a także specjalne studium poświęcono wiatrom nad Zatoką Perską. Przy rekordowej smukłości budynku bezpieczne przeniesienie obciążeń poziomych oraz ograniczenie amplitud i przyspieszeń drgań poziomych i skrętnych uzyskano dzięki silnym ścianom stężącym oraz poziomym pasom wzmocnień w obrębie pięter technicznych (fot. 5). Te pasy stężeń obejmują po trzy kondygnacje o odmiennej konstrukcji – przewidziano je w czterech poziomach, na wysokości 76 m, 160 m, 265 m oraz 390 m.

Wpływy wiatru były także ważnym kryterium kształtowania elewacji. Panele zewnętrzne musiały spełniać szereg wymagań w odniesieniu do wytrzymałości i trwałości, ale także niewielkiego ciężaru i odpowiedniej aerodynamiki oraz szybkiego montażu i łatwego zmywania (fot. 6).

Charakterystyka konstrukcji

Główne elementy konstrukcji nośnej stanowią:

- płyta fundamentowa o grubości 3,7 m, oparta na 194 wierconych palach $\varnothing 1,50$ m, sięgających głębokości 43 m; zarówno płytę z betonu C50, jak i pale z betonu C60 wykonano z mieszanki samozagęszczalnej; fundament zabezpieczono membraną wodoszczelną oraz unikalnym systemem ochrony katodowej zbrojenia z użyciem siatki tytanowej pod płytą, ze względu na agresywne wody gruntowe (koncentracja chlorków do 4,5% i siarczanów do 0,6%)
- ściany rdzenia, o grubości zmiennej od 1,30 m do 0,50 m, z betonu C80 do wysokości 126. kondygnacji i C60 powyżej
- ściany w skrzydłach i słupy o różnych przekrojach (w przewadze słupy $\varnothing 0,6$ m), z betonu C80 do wysokości 126. kondygnacji i C60 powyżej
- zespolone belki stężące pomiędzy ścianami a słupami, zapewniające dostatecznie podatne powiązanie konstrukcji przy zmieniających się obciążeniach w czasie wznoszenia
- płaskie stropy, o grubości od 0,20 do 0,30 m, przy rozstawach słupów i ścian do 9,0 m, wszystkie z betonu C50
- wzmocnione belkami stropy w poziomach pięter technicznych (fot. 7).

Kondygnacja w trzy doby

Aby osiągnąć takie tempo, przy dużej zmienności rzutów kondygnacji, zostały między innymi zastosowane następujące rozwiązania technologiczne:

- system samowznoszących deskowań dla słupów i ścian (Doka – ACS)
- system prostych i lekkich deskowań stropów (MevaDec)
- prefabrykacja zbrojenia (ponad 80%)
- beton wysokowartościowy, zapewniający wysoką wczesną wytrzymałość, niską odkształcalność doraźną i opóźnioną oraz spełniający wymagania pompowności
- najbardziej zaawansowane metody pompowania betonu.

Założenie realizacyjne „kondygnacja w trzy doby” jest wyzwaniem już przy monolitycznych, powtarzalnych kondygnacjach, na „zwykłych” wysokościach. Zdumiewające jest, że ten postęp robót

utrzymano także na poziomie bliskim rekordowi 586 m, przy znacznej komplikacji rzutów kondygnacji (fot. 8).

Przygotowania i realizacja betonowania

Dominujące przygotowania o charakterze technologicznym obejmowały dobór mieszanek betonowych oraz doskonalenie ich pompowania.

Masywna płyta fundamentowa wykonana została z mieszanki, w której w dążeniu do obniżenia zjawisk termicznych, 40% cementu zastąpiono pyłami lotnymi, zachowując stosunek w/c na poziomie 0,34. W celu zbadania zjawisk termiczno-skurczowych wykonano dwie olbrzymie kontrolne kostki o boku 3,7 m (czyli o objętości ponad 50 m³), w których beton układano analogicznie jak w konstrukcji płyty.

Główna konstrukcja nośna do wysokości 126 kondygnacji wymagała spełnienia szczególnych wymagań:

- wytrzymałości wczesnej po 10 godzinach co najmniej 10 MPa, niezależnie od zróżnicowanych dobowych i rocznych zmian warunków otoczenia (zmiany temperatury w przedziale 5÷40°C i wilgotności względnej 30÷90%)
- wytrzymałości 28-dniowej co najmniej 80 MPa – zmienne warunki wymagały zastosowania dużego zapasu wytrzymałości w stosunku do specyfikacji projektowej
- modułu sprężystości po 90 dniach co najmniej 44 GPa – z uwagi na ograniczenia odkształceń, przy stopniowo narastających obciążeniach.

Zastosowano różne mieszanki, w których dodatki popiołów wynosiły do 13%, a pyłów krzemionkowych do 10%.

Na wielką skalę prowadzono prognozy teoretyczne skutków zjawisk reologicznych w betonie, przyjmując okresy analizy aż 30 lat. Wykazano w nich m.in., że w słupach i ścianach, w których starano się zachować zbliżone wyężenie od ciężaru własnego w chwili zakończenia budowy, nastąpi redystrybucja sił wewnętrznych między zbrojeniem a betonem w dużym zakresie. O ile w początkowym okresie siły pionowe w betonie i w stali zbrojeniowej będą w przybliżeniu wynosiły jak 85% do 15%, o tyle po 30 latach proporcja ta wyniesie 70% do 30%. Ma to określone skutki w pionowych przemieszczeniach, które należało wziąć pod uwagę w obliczeniach i doborze zbrojenia.

Szczególne znaczenie miały badania i zastosowania pompowania betonu na niespotykaną wysokość. Bazując na doświadczeniach budynku Taipei 101, przy którego realizacji niewielkie masy betonu stosowanego w stropach pompowano na wysokość ponad 450 m, zdecydowano się na pompowanie na pełną wysokość 586 m. Poprzedziły to przygotowania dokonywane w poziomie. Na odległość 600 m pompowano rurami $\varnothing 150$ mm różne mieszanki betonowe przewidziane w Burj Dubai, a w tym C80 z kruszywem 20 mm, C80/14, C60/14 i C50/20. Na długości 600 m stwierdzono zmianę konsystencji odpowiadającą utracie około 25-30 mm podstawowego rozpywu wynoszącego 600 mm, przy wzroście temperatury w wyniku tarcia o 0,8÷1,0°C. Ostatecznie zastosowano 4 pionowe pompowania – w rdzeniu i w trzech skrzydłach. Przewidziano je do pompowania na wymagane poziomy: 390 m w zachodnim skrzydle, 442 m we



fot. Archiwum

wschodnim, 503 m w południowym skrzydle, a na najwyższy poziom 586 m – linia w centralnym rdzeniu. Ciśnienia przy tłoczeniu na najwyższy poziom wynosiły około 210 barów (21 MPa).

W obawie przed niekorzystnymi wpływami pionowego pompowania i zmian temperatury przewidziano pompę rezerwową w rdzeniu, do ewentualnego przetłaczania na poziomie 442 m – nie musiała być ona jednak uruchamiana.

Podsumowanie

Niektóre przedstawione problemy towarzyszące projektowaniu i wznoszeniu Burj Dubai wskazują, jak taka realizacja wpływa na postęp budownictwa w różnych aspektach. Te i wiele innych problemów z dziedziny wysokiego budownictwa na

Fot. 9 a, b. Ciepłe otoczenie Burj Dubai to wielka budowa



fot. Archiwum



Fot. 10 a, b. Nowe obiekty Dubaju to królestwo betonu

świecie były tematem kolejnego kongresu budownictwa wysokiego (*8th World Congress CTBUH – Council on Tall Buildings and Urban Habitat*), jaki miał miejsce w Dubaju, w dniach 3-5 marca 2008. Kongres odbył się pod hasłem *Tall & Green – Typology for a Sustainable Urban Future*. Na pierwsze wrażenie, hasło przyjaznych dla środowiska i odpowiadających zrównoważonemu rozwojowi budynków wysokich bulwersuje i kojarzy się z zabiegiem „dobierania ideologii do faktów”. Tymczasem, kompleksowe analizy nowoczesnych rozwiązań wskazują, że takie olbrzymie budynki sprzyjają racjonalnym ekologicznie rozwiązaniom. Wprawdzie np. transport użytkowników i wody na duże wysokości prowadzi do oczywistych wydatków energii, ale zyskuje się na koncentracji innych energochłonnych procesów, jak np. klimatyzacji. Wykorzystywany „efekt komina”, przy odpowiednim sterowaniu i wprowadzaniu nowoczesnych ścian zewnętrznych, pozwala na trudne do wyobrażenia korzyści. Koszty rozwiązań zabezpieczeń przeciwpożarowych też wskazują na korzyści w stosunku do średniowysokich obiektów. W budynkach tych dąży się – i to nie tylko w marzeniach – do strategii „potrójnego zera”: zero energii + zero emisji zanieczyszczeń + zero odpadów.

O tym, że budownictwo wysokie w Dubaju jest uznane za ekonomiczne i ekologiczne, mogą świadczyć liczne realizowane równoległe budynki. Choć nie są to tak rekordowe obiekty, to inwestorzy już zrealizowanych lub będących w realizacji wysokośćowców zapewne dobrze skalkulowali efektywność tych inwestycji (fot. 9a, b, fot. 10a, b). Prezentacje kongresowe i lektura prawie 850 stron materiałów pozwalają na uzasadniony optymizm w tych marzeniach. Oczywiście szczególnie korzystnie wypadają tego typu analizy dla wysokiego budownictwa w rejonach o klimacie niesprzyjającym komfortowi życia mieszkańców, gdzie w eksploatacji dominują koszty klimatyzacji. Kongres CTBUH był światowym podsumowaniem bieżących osiągnięć w budownictwie wysokim i okazją do zaprezentowania olbrzymiego postępu w tej dziedzinie. Wskazano wielokrotnie, że nowe osiągnięcia w dziedzinie betonu są jednym z kluczowych czynników tego postępu. Niedawno oddane do użytku centrum kongresowe, w którym odbywał się kongres, jest również dobrą wizytówką nowego budownictwa betonowego w Dubaju (fot. 11).

Fot. 11. Centrum Kongresowe Grand Hyatt

prof. Andrzej Ajdukiewicz
Politechnika Śląska
Wydział Budownictwa

