

Wieżowce rekordowych wysokości. Rola betonu w nowych systemach konstrukcyjnych

Fenomen budynków wysokich zastępuje na studia wielodyscyplinarne – socjologiczne, ekologiczne, urbanistyczne, a nawet medyczne. W ciągu ostatnich 10 lat zabudowa wysoka zaczęła dzielić kontynenty. Gwałtowny jej rozwój widoczny jest w Azji, znaczący w Ameryce Północnej i Australii oraz umiarkowany w Europie, słaby w Ameryce Południowej oraz nieliczący się w Afryce.

Powyższy stan wynika z paru przyczyn – nie tylko ekonomicznych. W rozwoju wieżowców przodują niektóre kraje i regiony Azji. Widoczny jest wycięg wysokości między Chinami i Półwyspem Arabskim. W Dubaju (ZEA) zbudowano Burj Khalifa o wysokości 828,0 m, najwyższy obecnie wieżowiec świata. W Changsha (Chiny) rozpoczęto budowę Sky City One, który będzie o 10,0 m wyższy. W Jeddah (Arabia Saudyjska) projektowany jest Kingdom Tower o wysokości 1000,0 m. Wysokości 10 najwyższych w 2014 r. wieżowców (wg CTBUH – Council of Tall Building and Urban Habitat) przedstawia tablica 1.

Porównanie skali wysokości wieżowców USA, Azji i Unii Europejskiej (w tym Polski) daje dużo do myślenia (rys. 1).

Europa (poza Rosją) ogranicza wysokość zabudowy. Można to odczytać jako ochronę zabytkowych miast przed nadmiernym zniekształceniem przestrzeni. Liczą się względy urbanistyczne, historyczne, także ekonomiczne.

Zbudowano lub trwa budowa 26 budynków o wysokości powyżej 500 m – wszystkie w Azji, tylko One World Trade Center w Nowym Jorku. Wieżowiec amerykański to właściwie budynek-pomnik wzniesiony w miejscu zniszczonych dwóch wież WTC.

Wzrost wysokości wieżowców to wyzwanie dla systemów ich konstruowania oraz zastosowanych materiałów konstrukcyjnych. Dominuje stosowany w różnych formach beton. Widoczne jest łączenie żelbetu i stali w nowych systemach konstrukcyjnych. Stosowane są betony najwyższych klas (np. 90 MPa). Rozwijają się technologie betonu, także jego transportu pionowego. Przy budowie wieżowca Burj Khalifa pobito rekord tłoczenia betonu na wysokość 601,0 m przy zastosowaniu ciśnienia 80 MPa.

Konkurujące dwa systemy konstrukcyjne dla wieżowców najwyższych to ustroje powłokowe i megakolumny. Oba systemy opierają się w dużym stopniu na betonie.

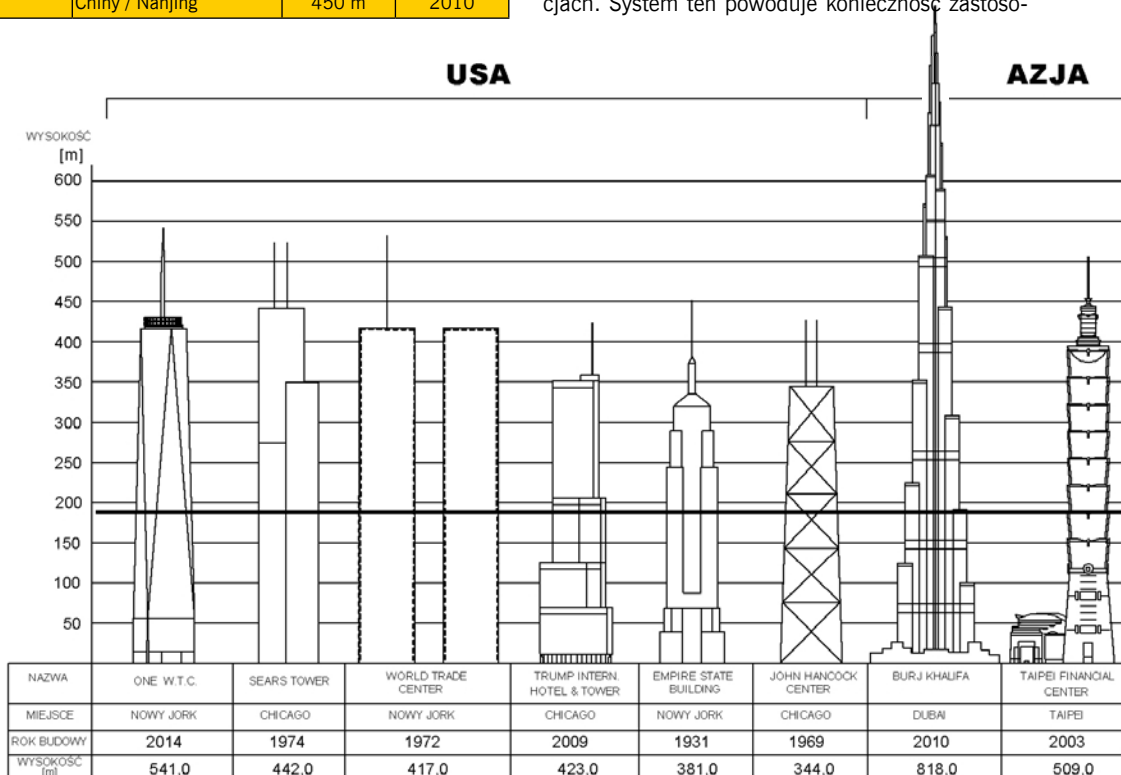
Jakość architektury budynków najwyższych jest dyskusyjna. Systemy powłokowe tworzą zbyt potężne oraz „szczelne” powłoki, utrudniające kształtowanie elewacji.

System megakolumn z uwagi na zbyt duże wymiary słupów wpływają niekorzystnie na ukształtowanie wnętrza. Konieczne także połączenia słupów i trzonu na kilku poziomach tworzone przez konstrukcje kratowe są często widoczne na elewacjach. System ten powoduje konieczność zastoso-

Tabela 1. 10 najwyższych budynków świata w 2014 r.

Nr	Nazwa	Państwo/Miasto	Wys.	Budowa
1	Burj Khalifa	ZEA / Dubaj	828 m	2010
2	Shanghai Tower	Chiny / Szanghaj	632 m	2014
3	Mekkah Royal Clock Tower	Arabia Saud./ Mekka	601 m	2010
4	One World Trade Center	USA / Nowy Jork	541 m	2013
5	Taipei 101	Tajwan / Taipei	509 m	2004
6	Shanghai World Financial Center	Chiny / Szanghaj	492 m	2008
7	International Commerce Center	Chiny / Hongkong	484 m	2010
8	Petronas Tower 1	Malezja / Kuala Lumpur	452 m	1998
9	Petronas Tower 1	Malezja / Kuala Lumpur	452 m	1998
10	Zifeng Tower	Chiny / Nanjing	450 m	2010

Rys. 1. Porównanie skali wysokości wieżowców USA, Azji i Unii Europejskiej



wania symetrycznego i powtarzalnego rzutu w obrębie megakolumn.

Notujemy rozwój systemu „megakolumn” opartego na konstrukcji żelbetowej ze sztywnym zbrojeniem. Podstawą systemu jest mała liczba podpór (kolumn) o znacznym przekroju, połączonych ze sobą oraz z wewnętrznym trzonem. System stworzony przez amerykańskich konstruktorów Thornton-Tomasetti został szeroko zastosowany w wieżowcach najwyższych (szczególnie w Chinach). Ustrój został z powodzeniem zastosowany w Jin Mao Building w Szanghaju, o wysokości 421,0 m, oraz w Taipei 101 na Tajwanie, o wysokości 509,0 m. Obecnie najwyższe wieżowce budowane i projektowane na Dalekim Wschodzie konstruowane są w systemie megakolumn (tablica 2).

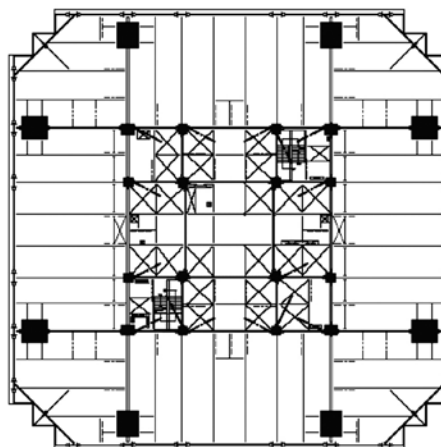
Jednym z pierwszych przykładów zastosowania megakolumn jest Taipei 101 na Tajwanie. Liczący 509,2 m budynek ma 101 kondygnacji nadziemnych oraz 5 podziemnych. Taipei 101 to pierwszy tak wysoki budynek wzniesiony na obszarze aktywności sejsmicznej. Tajwan znajduje się pomiędzy dwoma wielkimi uskokami tektonicznymi, co czyni cały region niestabilnym. Wewnętrzny, żelbetowy „rdzeń” budynku połączony jest z ośmioma zewnętrznymi kolumnami, o znacznych rozmiarach, kratownicami poziomymi na kilku poziomach. Kolumny mają konstrukcję zespoloną, stalowo-żelbetową. Stalowe blachy stanowiące płaszcz zewnętrzny oraz wewnętrzne przepony są zespolone ze specjalnym betonem o wysokiej wytrzymałości do 66 kondygnacji (rys. 2). Na wyższych kondygnacjach, przy malejących obciążeniach, pozostawiono elementy stalowe, rezygnując z żelbetu. Trzon budynku jest stalowo-żelbetowy aż do kondygnacji 118, gdzie zaczyna się stalowa kratownica iglicy.

Trzęsienia ziemi to nie jedyne naturalne zagrożenie, jakiemu musieli stawić czoła projektanci wieżowca. Każdego lata nad Tajwan nadciągają potężne huragany, wiatry osiągają prędkość do 200 km/h. Pierwszym sposobem osłabienia niekorzystnego wpływu wiatru było nadanie wieżowcowi odpowiedniego kształtu. Wyglądzone krawędzie,

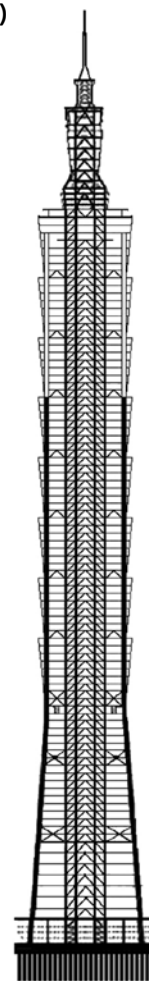
Tabela 2. System „megakolumn” – najwyższe budynki

Nr	Nazwa	Miasto	Wys.	Kond.	Budowa
1	Ping An Finance Center	Shenzhen	660 m	115	w budowie
2	Shanghai Tower	Szanghaj	632 m	121	w budowie
3	Goldin Finance 117	Tianjin	597 m	117	w budowie
4	Lotte World Tower	Seul	555 m	123	w budowie
5	The Chow Tai Fook Guangzhou	Guangzhou	530 m	111	w budowie
6	Busan Lotte Town Tower	Busan	510 m	107	wstrzymano
7	Taipei 101	Taipei	509 m	101	2004
8	Shanghai World Financial Center	Szanghaj	492 m	101	2008
9	International Commerce Center	Hong Kong	484 m	108	2010
10	Suzhou Supertower	Suzhou	452 m	92	w budowie
11	The Wharf IFC	Changsha	452 m	88	w budowie
12	Nanjing Greenland Financial Center	Nanjing	450 m	66	2010
13	Jin Mao Building	Szanghaj	421 m	88	1999
14	Two International Finance Center	Hongkong	415 m	88	2003
15	Yujiapu Yinglan IFC	TianJin	300 m	63	w budowie

a)

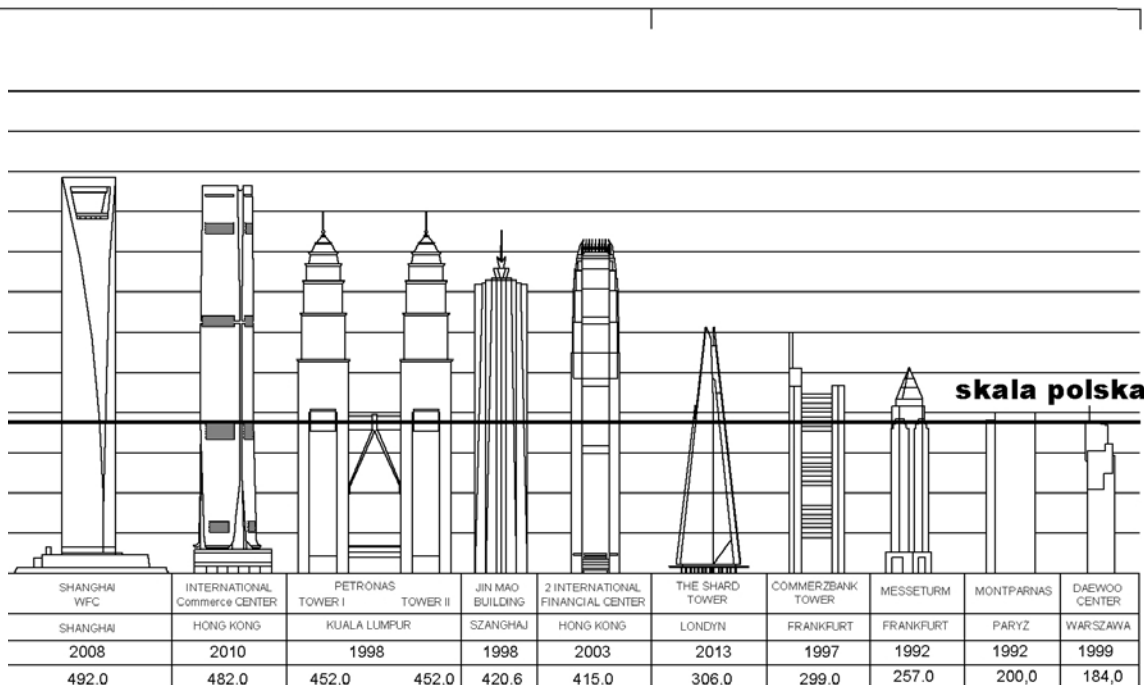


b)



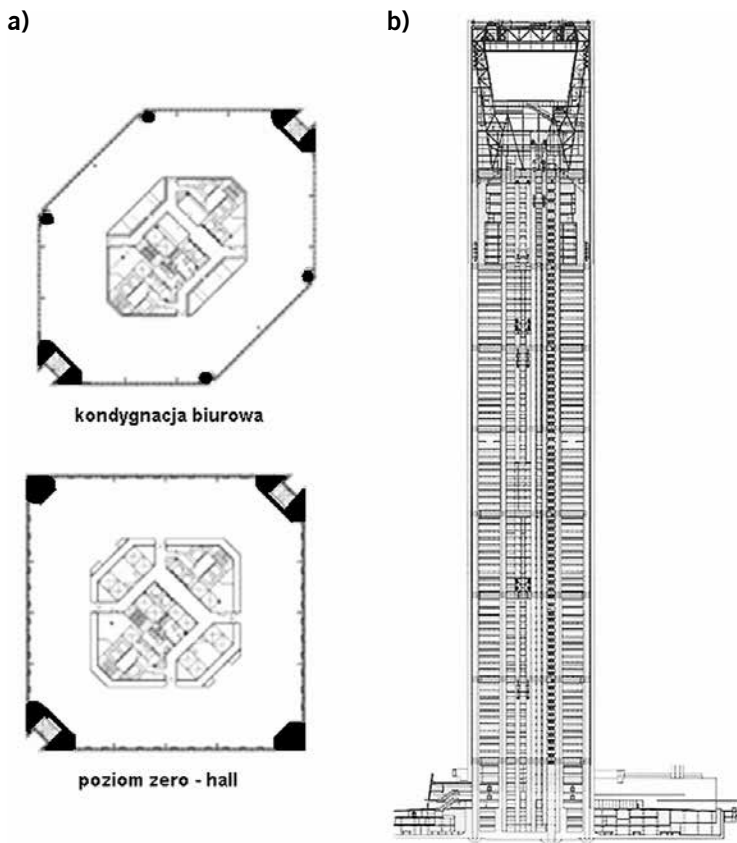
AZJA

EUROPA



Rys.2. Konstrukcja Taipei 101 [A. Zb. Pawłowski, I. Cała – „Budynki wysokie”, Oficyna Wydawnicza PW]

a) Rzut budynku – usytuowanie megakolumn
b) Przekrój konstrukcyjny przez trzon i iglicę



W 1998 roku rozpoczęto budowę Shanghai World Financial Center (SWFC) w Chinach. Zaprojektowany przez architektów KPF (Kohn, Pedersen, Fox) ukończono w 2008 r. Początkowo budynek miał mieć wysokość 460 metrów i 94 piętra, później wysokość zwiększono do 492,3 m i 101 pięter (rys. 3).

Charakterystycznym elementem wieżowca jest otwór w budynku, który najpierw miał być okrągły (nawiązanie do form starych ogrodów chińskich), jednak z powodu protestów, wywołanych skojarzeniami okrągłego otworu z flagą Japonii, w 2005 roku zdecydowano się na otwór w kształcie trapezu o szerokości 50 metrów. Łączna powierzchnia budynku wynosi 377 300 metrów kwadratowych, znajdują się tutaj biura, hotel, a nawet muzeum. SWFC ma najwyższą na świecie przestrzeń dostępną dla publiczności. Obserwatorium jest wysokie na siedem pięter, zajmuje poziomy od 94 do 100. Usytuowana na wysokości 474 m kładka (Sky Walk) stała się jednym z najczęściej odwiedzanych miejsc turystycznych w Szanghaju.

Konstrukcja nośna SWFC składa się z zespolonego trzonu stalowo-żelbetowego oraz układu megakolumn również zespolonych, stalowo-żelbetowych, współpracujących ze sobą. Współpracę osiągnięto stosując kilkunastokondygnacyjne skratowania w płaszczyźnie elewacji oraz połączenia kratownicowe elementów trzonu z konstrukcją zewnętrzną na kilku poziomach na wysokości budynku (rys. 4). Kratownice elewacyjne tworzą zamknięty układ, łącząc się w linii zwieńczenia budynku.

W potężnych kolumnach skrajnych o wymiarach przekraczających 5,0 m umieszczono stalowe blachownice połączone poprzez spawanie z krzyżulcami i kratowymi słupkami na każdej z elewacji potężne „megakraty” tworzące wraz ze stalowo-żelbetowym trzonem wielką przestrzenną megastrukturę (rys. 5). W Hongkongu zbudowano zespół dwóch wieżowców: Two International Finance Center o wysokości 415,0 m oraz International Commerce Center o wysokości 484,0 m, tworzących tzw. Bramę Hongkongu. Oba budynki projektowane były przez amerykańskich architektów: wyższy KPF (Kohn, Pedersen, Fox), a niższy Cesar Pelli. Konstrukcję obu budynków projektowała pracownia Ove Arup & Partners. Konstrukcja budynków jest bardzo podobna, oparta na systemie megakolumn. Składa się z ośmiu słupów zewnętrznych oraz wewnętrznego trzonu. Współpracę kolumn i trzonu zapewniają w wyższym budynku wiązary kratownicowe umieszczone na czterech poziomach (rys. 6). Na dolnym poziomie umieszczono trzykondygnacyjną kratownicę z betonu sprężonego, a pozostałe wiązary wyko-

Rys.3. Shanghai World Financial Center w Chinach [CTBUH Journal Issue 1/2008]

a) Zmieniający się rzut – na wysokości budynku
b) Przekroje z widocznym otworem w konstrukcji

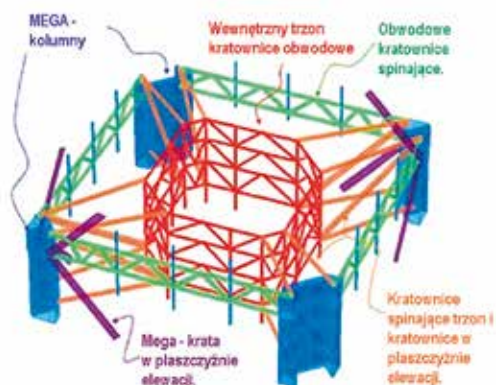
pozwoły o około 30-40% zredukować siłę wiatru. Aby całkowicie wyeliminować nadmierne wychylenia, zaprojektowano specjalny mechanizm stabilizujący.

Tworzy go olbrzymi tłumik drgań harmonicznych (system TMD) zaprojektowany przez amerykańską firmę Thornton-Tomasetti Engineers wspólnie z Evergreen Consulting Engineering. Absorber o wadze powyżej 650 ton zainstalowany został w 2003 roku na 92 piętrze budynku.

Fundamenty wieżowca wymagały specyficznych rozwiązań, aby oprzeć się głęboko pod ziemią, na litej skale. Wielka betonowa platforma spoczywa na systemie 382 długich, na 80 m wbitych w ziemię, wykonanych ze wzmocnionego betonu pali wielkich średnic. Pali są utwierdzone w skale na długości 30 m. Każdy z pali o średnicy 1,5 m ma nośność 1000-1320 ton.

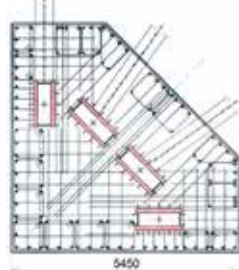
Taipei 101 ma wyraźnie podtekst polityczny w stosunkach z dużym sąsiadem. W skali miasta jego obraz jest negatywny, mimo poszukiwań elementów historycznych i kulturowych w kształtowaniu elewacji.

Rys. 4. Zasada konstrukcji SWFC [P. Katz, L. E. Robertson – „SWFC. Without compromise...” – CTBUH 8th World Congress 2008 r.]



Rys. 5. Konstrukcja zespolona stalowo-żelbetowa SWFC [CTBUH Journal Issue 1/2008]

a) Zasada usytuowania zbrojenia w megakolumnie
b) Widok zespolonego węzła – megakraty



nane zostały ze stali. Rzut budynku zmienia się nieznacznie wraz ze wzrostem wysokości, stałą jego część zajmuje trzon konstrukcyjny, a zmianom podlegają tylko narożniki kwadratowego obrysu.

Konstrukcja budynku (trzon i megakolumny) do wysokości 60. kondygnacji wykonane są z betonu o wytrzymałości 90 MPa, powyżej 60 MPa, zespolone stropy na stalowych obetonowanych belkach wykonano z betonu 45 MPa.

Setną kondygnację budynku zajmuje taras widokowy, z którego za pomocą teleskopów i lunet można oglądać całą panoramę miasta.

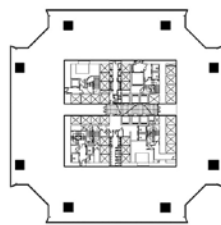
Zwieńczenie budynków rzeźbiarską koroną, podświetlaną nocą, czyni z nich swoistą latarnię morską wskazującą wejście do portu.

Najwyższym obecnie budowanym wieżowcem w systemie megakolumn jest Ping An Finance Center w Shenzhen, o planowanej wysokości 660,0 m (rys. 7). Wieżowiec, którego budowę rozpoczęto w 2010 r., został zaprojektowany przez amerykańskie biuro architektoniczne KPF w współpracy z konstruktorami Thornton-Thomasseti.

Konstruktorzy dla zmniejszenia gabarytów megakolumn i ścian trzonu zastosowali konstrukcję zespoloną, stalowo-żelbetową, we wszystkich elementach konstrukcyjnych budynku. Układy blachownicowe współpracują z elementami żelbetowymi wykonywanymi z betonów wysokiej wytrzymałości.

Kratownice zewnętrzne umieszczono na sześciu poziomach – na trzech znajdują się kratownice dwukon-

a)



Kondygnacja powtarzalna

Rys. 6. Budynek Int. Commerce Center w Hongkongu

[CTBUH Journal Issue 4/2010]

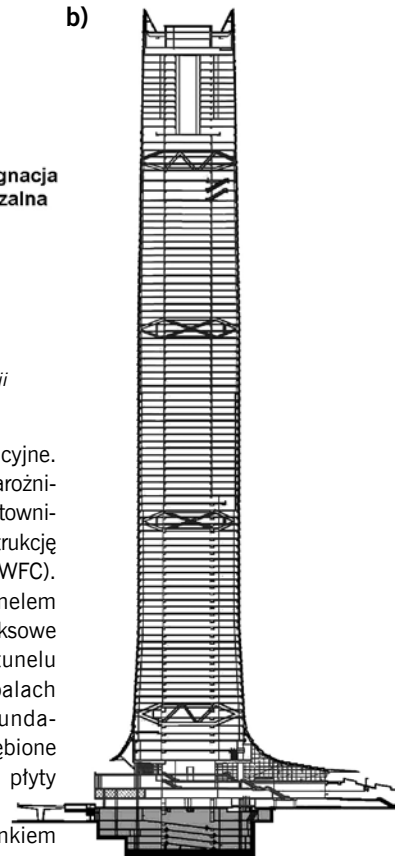
a) Rzut kondygnacji powtarzalnej – zasada konstrukcji

c) Przekrój konstrukcyjny – zasada pracy systemu

dygnacyjne, a na pozostałych jednokondygnacyjne. Kratownice łączą również megakolumny w narożnikach budynku (rys. 8). Elewacja pomiędzy kratownicami jest również skratowana, co tworzy konstrukcję megakratownicy elewacyjnej (jak w budynku SWFC). Część podziemna wieżowca sąsiaduje z tunelem metra. Konstruktorzy przeprowadzili kompleksowe analizy wpływu wieżowca na konstrukcję tunelu metra i zaproponowali posadowienie na palach fundamentowych. Wykonano megapale fundamentowe o średnicy 9,5 metra każdy, zagłębione do głębokości 26-31 metrów poniżej spodu płyty fundamentowej.

Najciekawszym wznoszonym obecnie budynkiem Chin jest Shanghai Tower, o wysokości 632,0 m

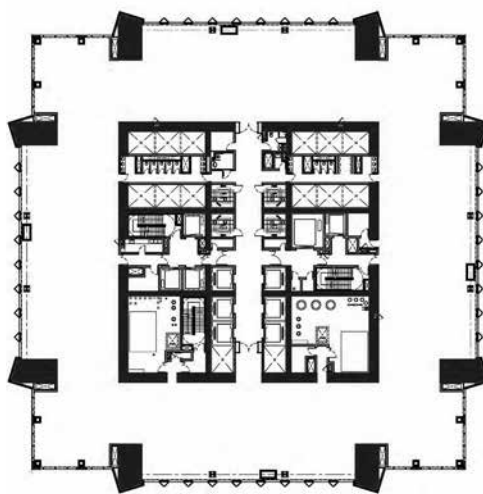
b)



a)



b)



Rys. 7. Konstrukcja Ping An Finance Center w Shenzhen

a) Schemat przestrzenny konstrukcji

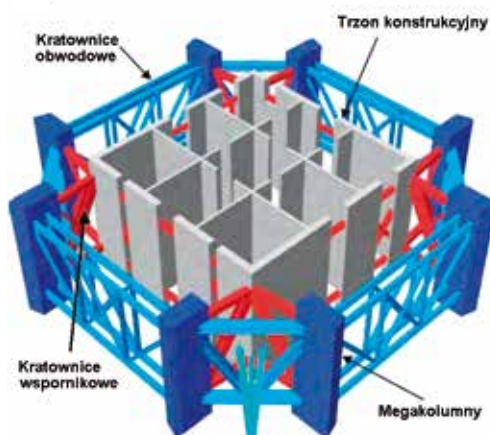
b) Rzut powtarzalnej kondygnacji

Rys. 8. Stalowo-żelbetowa konstrukcja Ping An Finance Center

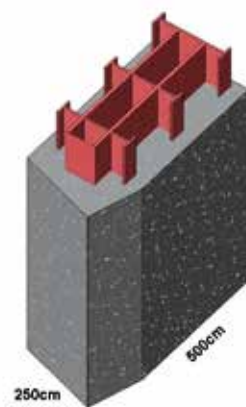
a) Układ kratownic – połączenie z trzonem

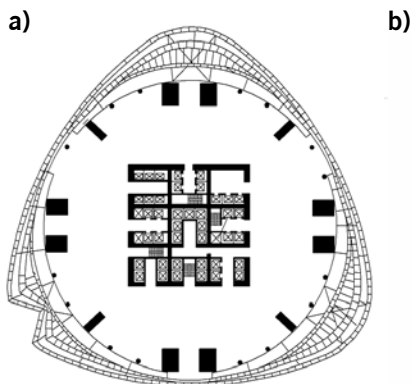
b) Schemat zbrojenia wiotkiego i sztywnego megakolumny

a)

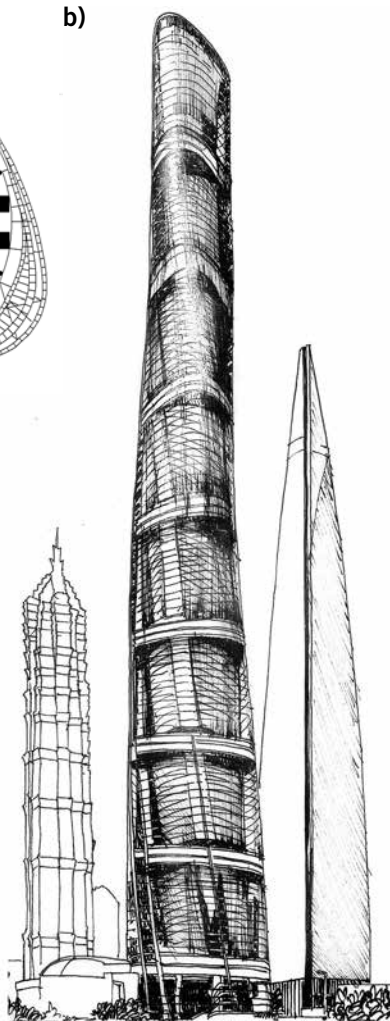


b)

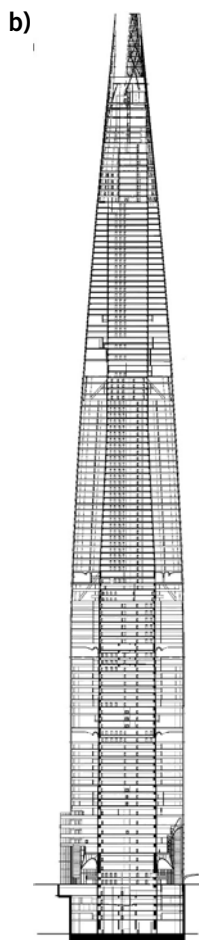




Rys.9. Wieżowiec Shanghai Tower
a) Schemat konstrukcji powtarzalnej kondygnacji
b) Elewacja

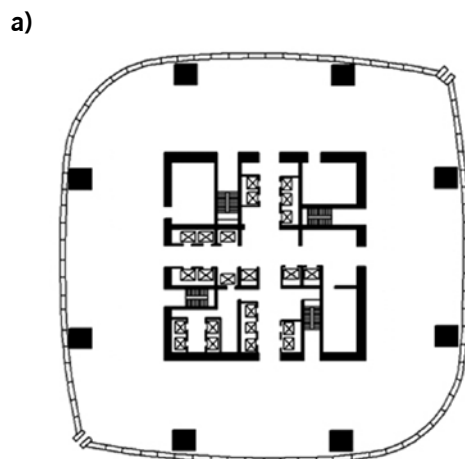


Rys.10. Lotte World Tower w Korei Południowej:
a) rzut powtarzalnej kondygnacji - schemat
b) przekrój



(rys. 9). Autorem budynku jest firma East China Architectural Design & Research Institute z Szanghaju, a konstrukcję zaprojektowali Thornton-Tomasetti.

Thornton-Tomasetti, twórcy systemu megakolumn, nieco zmodyfikowali w tym budynku swoje rozwiązanie. W klasycznym ustroju trzon współpracuje z megakolumnami usytuowanymi na liniach jego ścian zewnętrznych. W budynku Shanghai Tower przesunięto je do środka i wprowadzono dodatkowe kolumny połączone z trzonem kratownicami nachylonymi, w rzucie pod kątem 45°. Było to konieczne ze względu na owalny kształt powtarzalnej części rzutu.



W budynku zaprojektowano podwójną elewację o zmiennej grubości. Zewnętrzna „skóra” faluje i obraca się o 120°. Wnętrze pomiędzy ścianami będą zajmować bioklimatyczne wielokondygnacyjne atria na ośmiu poziomach. W atriach posadzone będą drzewa o wysokości do 10,0 m. W atriach przewidziano też turbiny wiatrowe i systemy odzyskiwania wody deszczowej.

Coraz częściej notujemy na świecie, szczególnie w Azji, budynki zakrzywione, o formach trudnych, komplikujące zarówno układy funkcjonalne jak i systemy konstrukcyjne. Moda ta ma zapewne wyróżnić takie budynki w masie powstających wieżowców.

Korea Południowa rozwija ostatnio gwałtownie zabudowę wysoką, nawiązując do rozwoju wieżowców Chin. Najwyższe obecnie wieżowce Nordhrest Asia Trade o wysokości 305,0 m (68 kondygnacji nadziemnych i 3 podziemne) oraz Dossan Haeundae Vere the Zenith (300,0 m – 80 kondygnacji nadziemnych, 6 podziemnych) to budynki mieszkalne.

W budowie znajduje się Lotte World Tower o wysokości 555,0 m i 123 kondygnacjach nadziemnych. Autorzy architektki KPF zaprojektowali połączenie w budynku funkcji mieszkalnych i hotelowych (rys. 10).

Konstrukcję wieżowca (autor Leslie Robertson) zaprojektowano w systemie megakolumn, gdzie osiem żelbetowych słupów ze sztywnym zbrojeniem współpracuje z dużym żelbetowym trzonem. W najwyższych wieżowcach azjatyckich warto zwrócić uwagę na trzy problemy.

W wyniku badań amerykańskich i kanadyjskich ustalono, iż w budynkach mieszkalnych obok ograniczenia maksymalnego wychylenia ogranicza się maksymalne przyspieszenie poziomych przemieszczeń w granicach $(1 \div 3\%)g$ – gdzie g – przyspieszenie ziemskie. Powyższe warunki mają wpływ na komfort zamieszkiwania w budynkach wysokich.

Omawiane ograniczenia nie są w pełni akceptowane w projektowanych wieżowcach azjatyckich. Bardzo korzystnie rozwija się ruch proekologiczny. Zespół różnych działań pozwala już obecnie na zaprojektowanie wieżowca 60 ÷ 80% samowystarczającego energetycznie. Autorzy zrealizowanego wieżowca Pearl River Tower w Guangzhou SOM (Skidmore, Owings, Merrill) twierdzą, iż ich budynek o wysokości 310,0 m jest w pełni samowystarczający energetycznie.

Budynki najwyższe są zdecydowanie nieekonomiczne. Przykładem może być Burj Khalifa, który ma olbrzymie kłopoty ekonomiczne. Takich przykładów jest więcej. Bardzo kosztowne okazuje się wykonanie oraz użytkowanie transportu pionowego. Wpływ wieżowców najwyższych na miasto oceniany jest negatywnie przez większość urbanistów.

Sumując, olbrzymi wpływ na zabudowę wysoką mają względy prestiżowe firm, miast oraz krajów. Widać to szczególnie w ostatnich wyścigach wysokości budynków.

Wieżowce najwyższe wskazują, jak wielkie możliwości mają współcześni projektanci i wykonawcy.

prof. Adam Zbigniew Pawłowski
dr Ireneusz Cała

Wydział Architektury Politechniki Warszawskiej