

Pierre-Claude Aïtcin, William Wilson

Faculty of Engineering, Sherbrooke, Canada

Niebo jest ograniczeniem – rozwój technologii betonu spowodowany budową drapaczy chmur

The Sky's the Limit – Evolution in construction of high-rise buildings

1. Wprowadzenie

W ciągu ostatnich 50 lat nastąpił wielki rozwój technologii betonu, głównie ze względu na opanowanie reologii tego kompozytu poprzez zastosowanie dwóch rodzajów domieszek: zmniejszających dodatek wody oraz lepkość mieszanek betonowych. Zatem reologia betonu nie zależy już tylko od stosunku w/c, ale raczej od rozsądnej proporcji tego stosunku i ilości domieszki.

Zmniejszanie stosunku w/c, lub stosunku woda-spoivo (w/b), oznacza gęste upakowanie ziaren cementu w stwardniałym zaczynie cementowym, w związku z czym wytrzymałość na ścislenie może przekraczać 100 MPa, pomimo że te betony nie zawierają wystarczającej ilości wody do pełnej hydratacji cementu. Wytrzymałość na ścislenie wzrasta wraz ze zmniejszeniem stosunku w/c lub w/b, ponieważ wytrzymałość na ścislenie betonu zależy w większym stopniu od odległości ziaren cementu w zaczynie niż od zawartości uwodnionego cementu. Prawo Fereta dla zaczynu cementowego i prawo Abramsa dla betonu zachowują ważność nawet wtedy, gdy cement nie uległ w pełni hydratacji.

Przed rokiem 1970 produkcja betonów o stosunku w/c mniejszym od 0,40 i równoczesnym opadzie stożka wynoszącym 100 mm była niemożliwa. Domieszki zmniejszające ilość wody, składające się z lignosulfonianów, które stanowiły jedyne dostępne wówczas domieszki dyspergujące ziarna cementu w zaczynie, nie mogły zapewnić odpowiednich właściwości reologicznych zaczynu cementowego. W drugiej połowie lat siedemdziesiątych w Niem-

1. Introduction

During the last 50 years, concrete technology has made great progress, largely due to the control of concrete rheology through the use of high-range water-reducing admixtures (HRWRAs) and viscosity-modifying admixtures (VMAs). Thus, concrete rheology no longer depends only on water, but rather on a judicious balance between water and dosages of HRWRA and VMA.

Reducing the water-cement ratio (w/c) or water-binder ratio (w/b) means getting cementitious particles closer to each other in the hardened cement paste so that compressive strength can increase up to over 100 MPa – in spite of the fact that such concretes do not contain enough water to fully hydrate all of the cementitious particles. Compressive strength continues to increase as the w/c or w/b decreases because concrete compressive strength is related more to the closeness of the cement particles in the cement paste rather than to the amount of hydrated cement. Feret's law for cement paste and Abrams' law for concrete continue to be valid even when not all of the cement particles are hydrated.

Before the 1970s, it was impossible to produce concretes having both a w/c lower than 0.40 and a slump of 100 mm. The lignosulfonate-based water-reducing admixtures (WRAs) that were the only dispersing admixtures then available on the market were not capable of sufficient dispersal to provide such performance. But as soon as the very efficient dispersing properties of polymelamine sulfonates and polynaphthalene sulfonates were discovered in Germany (1) and Japan (2), respectively, it became possible to

czech (1) i w Japonii (2) zaczęto stosować domieszki złożone z poli(sulfonianów melaminowych i naftalenowych), które pozwalały na produkowanie mieszanek betonowych o właściwościach reologicznych zapewniających opad stożka wynoszący 200 mm, przy stosunku w/c mniejszym niż 0,40.

Możliwość produkcji betonu o dużej wytrzymałości zapewniła jego przewagę w stosunku do stali, przy budowie drapaczy chmur. Nie jest już konieczne stosowanie dźwigów do transportu i wylewania betonu na dużych wysokościach – beton może być pompowany od pierwszego do najwyższego piętra. Tak więc na przykład w trakcie budowy Burj Khalifa w Dubaju beton pompowano na wysokość 586 m, przy zastosowaniu jednej pompy. W niedalekiej przyszłości przewiduje się pompowanie betonu na wysokość 1000 m, a do podnoszenia stalowych belek i kolumn na duże wysokości w dalszym ciągu trzeba będzie stosować dźwigi.

W tym artykule opisano jak budowa wieżowców ewoluowała od konstrukcji niemal w całości złożonych ze stali do prawie wyłącznie zrealizowanych w żelbecie, omawiając budowę niektórych z nich stanowiących przełom w technologii budowy drapaczy chmur, wybudowanych od 1968 roku do chwili obecnej.

Artykuł składa się z dwóch części. Pierwsza część omawia dwa drapacze chmur – Water Tower Place (1968) i CN Tower (1973) – wybudowane z betonu, w którym zastosowano domieszki lignosulfonianowe, w celu zilustrowania poziomu technologii dostępnej przed 1975 rokiem, to znaczy przed wprowadzeniem na rynek polisulfonianów. W drugiej części w skrócie opisano budowę wieżowców z zastosowaniem tych domieszek, a mianowicie – Scotia Plaza (1983), Two Union Square (1989), Petronas Towers (1998), Burj Khalifa (2010), Worli Project (obecnie w budowie) i planowaną budowę Kingdom Tower.

2. Okres technologii betonu z domieszkami złożonymi z lignosulfonianów

2.1. Water Tower Place

W 1960 roku największa wytrzymałość na ściskanie betonu produkowanego w Chicago wynosiła 30 MPa, przy równoczesnym opadzie stożka wynoszącym 100 mm. Był to beton stosowany do budowy betonowych kolumn w drapaczach chmur, do chwili gdy John Albinger wykazał, że starannie dobierając cement, popiół lotny i domieszkę lignosulfonianową można zwiększyć dwukrotnie wytrzymałość na ściskanie (3).

Aby wprowadzić opracowany przez siebie beton o dużej wytrzymałości na rynek John Albinger użył następującej strategii. Podczas budowy wieżowca poprosił architekta – autora projektu i inżyniera realizującego budowę – o zgodę na wykonanie betonowej kolumny o wytrzymałości 41 MPa, której wykonanie nie spowoduje dodatkowych kosztów. Jego propozycja została przyjęta. Następnego dnia nikt nie zauważył żadnej różnicy pomiędzy betonem 41 MPa, a betonem 28 MPa, który został użyty do budowy innych kolumn w tym projekcie.

produce mixtures having both a w/c lower than 0.40 and a slump of up to 200 mm.

These two innovations resulted in a significant advantage for concrete over steel for the construction of high-rise buildings. It is no longer necessary to use cranes to transport and place concrete – with the help of VMAs, concrete can be pumped from the first to the highest floor. Thus, concrete was pumped up to 586 m using a single pump during the construction of Dubai's Burj Khalifa. In the near future, concrete pumping is expected to reach up to 1000 m, yet steel beams and columns will still have to be raised with cranes.

This article shows how the construction of high-rise buildings has evolved from entirely structural steel structures to almost exclusively reinforced concrete structures, by discussing the construction of some landmark structures built from 1968 to the present time.

The article comprises two parts. The first part discusses the high-rise buildings – Water Tower Place (1968) and the CN Tower (1973) – constructed with lignosulfonate WRAs to illustrate the state-of-the-art technology available before 1975 (before the arrival of HRWRAs on the market). The second part briefly reviews the construction of high-rise buildings with HRWRAs – Scotia Plaza (1983), Two Union Square (1989), the Petronas Towers (1998), Burj Khalifa (2010), the Worli Project (presently under construction), and the anticipated Kingdom Tower.

2. The Era of Lignosulfonate WRAs

2.1. Water Tower Place

In the 1960s, the highest compressive strength available in the Chicago, IL, market was 30 MPa for concrete having a 100 mm slump. This was the concrete used to build columns in high-rise buildings until John Albinger found that, by carefully selecting his cement, fly ash, and WRA, he was able to double that compressive strength (3).

To introduce his high-strength concrete to the market, he used the following stratagem. During the construction of a high-rise building, he asked the engineer and the architect for permission to cast a 41 MPa concrete column at no extra cost. His proposal was accepted. The next day, nobody noticed any difference between this 41 MPa concrete and the 28 MPa concrete that was used for the construction of the other columns on the project.

The architect was very pleased to see that it was possible to decrease the size of the columns, so he asked the engineer to design the next high-rise building with a 41 MPa concrete. The engineer was also happy to decrease the dead load of the building. During the construction of the 41 MPa high-rise building, John Albinger repeated his tactics and asked for permission to cast one 52 MPa concrete column, again at no extra cost.

The same approach was employed with 62 MPa concrete, which opened the door for the architect and the engineers to design the next high-rise building – Water Tower Place [Fig. 1(a)] – using



Rys. 1. Drapacze chmur wybudowane przed 1975 r.: (a) Water Tower Place (© Jeremy Atherton); i (b) CN Tower (zdjęcie dzięki uprzejmości Benson Kua)

Fig. 1. High-rise buildings constructed before 1975: (a) Water Tower Place (photo credit: © Jeremy Atherton); and (b) the CN Tower (photo courtesy of Benson Kua)

Architekt był bardzo zadowolony, że udało się zmniejszyć średnicę kolumn, więc poprosił inżyniera o zrealizowanie budowy kolejnego wieżowca z betonu 41 MPa. Inżynier również był zadowolony ze zmniejszenia ciężaru budynku. Podczas budowy drapacza chmur z betonu o wytrzymałości 41 MPa John Albiner powtórzył swoją metodę postępowania i poprosił o pozwolenie na wykonanie kolumny z betonu o wytrzymałości 52 MPa, co także nie spowoduje dodatkowych kosztów.

Taką samą metodę zastosowano w przypadku betonu o wytrzymałości 62 MPa, który otworzył drzwi dla architekta i inżynierów do zaprojektowania następnego wieżowca Water Tower Place [rys. 1(a)]. W realizacji tej budowy zastosowano beton o wytrzymałości 62 MPa w kolumnach na niższych piętrach. Wytrzymałość na ściskanie malała stopniowo do 28 MPa w przypadku kolumn na najwyższych piętrach. Poprzez dostosowanie ilości stali zbrojeniowej inżynier był w stanie utrzymać taką samą powierzchnię przekroju poprzecznego wszystkich kolumn budynku, tak że ten sam zestaw gotowych form ze stali mógł być wykorzystany od pierwszego do ostatniego piętra. Ponadto, z uwagi na to, że wszystkie podłogi miały dokładnie ten sam wzór geometryczny wykończenie wewnątrz stało się powtarzalnym działaniem, prowadzącym do znacznych oszczędności.

2.2. CN Tower

Aż do niedawnej budowy Burj Kalifa, CN Tower, w Toronto, w Kanadzie był najwyższą na świecie wolnostojącą konstrukcją z betonu, o wysokości 482 m, jak to pokazano na rysunku 1(b). Wieżowiec został wybudowany z wykorzystaniem szalunków ślizgowych oraz z betonu napowietrzonego, o średniej wytrzymałości na ściskanie

62 MPa concrete for the columns of the lower floors. The compressive strength was then decreased progressively down to 28 MPa for the columns of the top floors. By adjusting the amount of reinforcing steel, the engineer was able to maintain the same cross-sectional area for all the columns of the building so that the same set of prefabricated steel forms could be used from the first to the last floor. Moreover, as all the floors had exactly the same geometrical pattern, interior finishing became a repetitive operation resulting in significant economies.

2.2. The CN Tower

Until the recent construction of Burj Kalifa, the CN Tower, Toronto, ON, Canada, was the highest freestanding concrete structure in the world at 482 m, as shown in Fig. 1(b). The tower was built using slipforms and an air-entrained concrete having an average compressive strength of 55 MPa (4). The concrete had to be air-entrained to be resistant to freezing and thawing. The tower was built continuously from the beginning of May to the end of November, with ambient temperatures as high as 35°C and as low as -10°C. Because the walls were 2.1 m thick at the base of the tower, cement with a low heat of hydration had to be used to limit thermal gradients. Normal Portland cement was then progressively substituted for the initial low-heat-of-hydration cement as the weather was getting colder and colder while the structure was rising. Accelerated tests were also used to control concrete compressive strength during construction.

55 MPa (4). W celu zapewnienia odporności na zamrażanie i rozmrażanie beton musiał być napowietrzony. Wieżowiec budowano w sposób ciągły od początku maja do końca listopada, w temperaturach otoczenia sięgających od $+35^{\circ}\text{C}$ do -10°C . Ponieważ ściany miały w pierwszej kondygnacji wieżowca grubość 2,1 m więc musiał być stosowany cement o małym cieple hydratacji, w celu zmniejszenia gradientów temperatury w betonie. Gdy pogoda stawała się coraz zimniejsza a konstrukcja postępowała; początkowo stosowany cement o małym cieple hydratacji stopniowo zastępowano zwykłym cementem portlandzkim. Do sprawdzania wytrzymałości betonu na ściskanie dostarczanego na budowę, wykonywano również badania przyspieszone.

3. Okres technologii betonu z domieszkami złożonymi z poli(sulfonianów naftalenowych) i melaminowych

3.1. Scotia Plaza

Scotia Plaza, w Toronto, w Kanadzie jest atrakcyjnym budynkiem biurowym o 68 kondygnacjach (275 m), z elewacją z czerwonego granitu. Jego konstrukcja betonowa została wybudowana przy użyciu metody ślizgowej [rys. 2(a)], z betonu bez domieszki napowietrzającej, o maksymalnej projektowanej wytrzymałości na ściskanie wynoszącej 70 MPa – maksymalnej wytrzymałości dozwolonej w tamtym czasie przez Kanadyjski Kodeks Budowlany (5). Do uzyskania betonu o takiej wytrzymałości na ściskanie zasto-

3. The HRWRAs Era

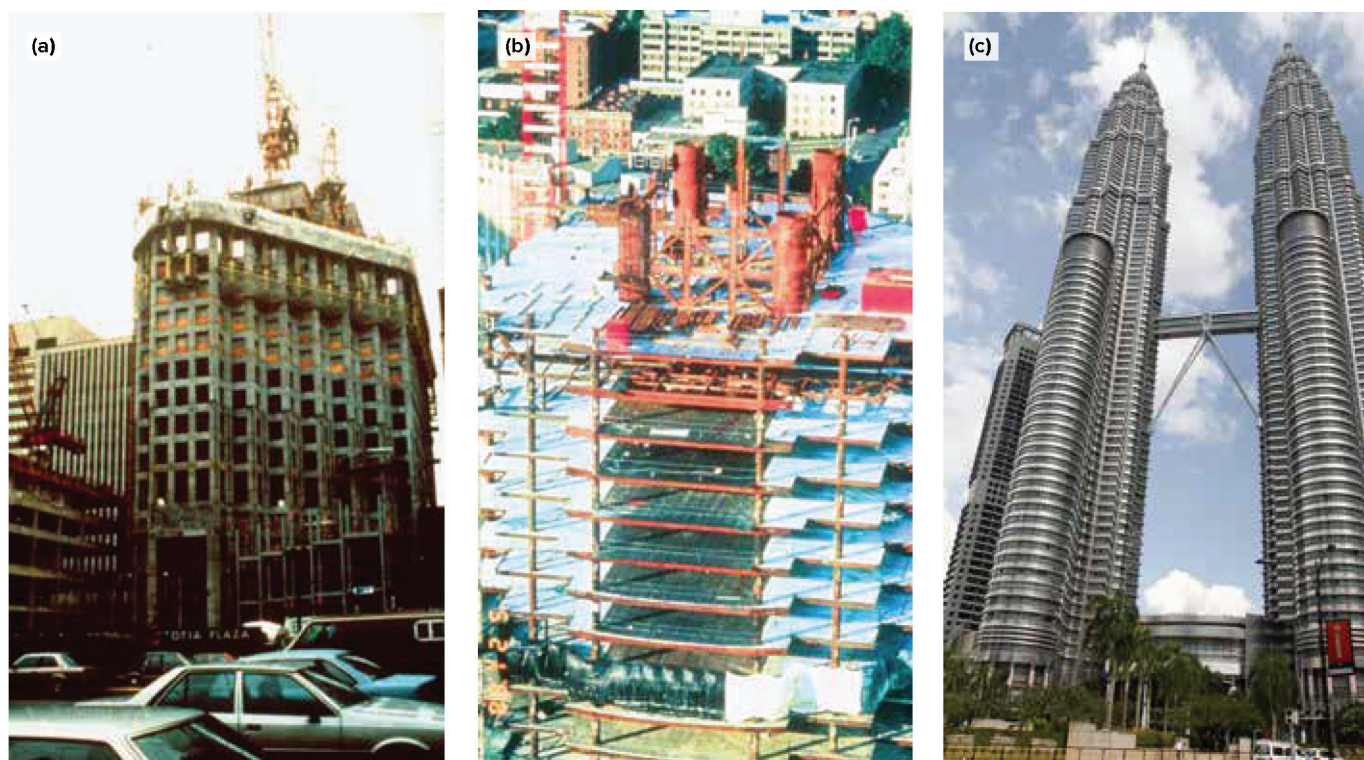
3.1. Scotia Plaza

Scotia Plaza, Toronto, ON, Canada, is an attractive office building 68 stories (275 m) high, clad with red granite. Its concrete structure was built using climbing forms [Fig. 2(a)] and concrete without entrained air having a maximum design compressive strength of 70 MPa – the maximum strength permitted by the Canadian Building Code at that time (5). A ternary blend of portland cement, slag cement, and silica fume was used to obtain such compressive strength. The concrete had a w/b of 0.30 and a 175 mm slump, and it was pumped from the first floor up to the last.

To meet the project's 18°C maximum temperature requirement for the fresh concrete, the concrete had to be cooled with liquid nitrogen during the warm days of July. Accelerated testing and pullout tests were used to monitor concrete compressive strength as the construction progressed.

3.2. Two Union Square

Seattle, WA, is a very windy city. To minimize the lateral deflections, the building's designers decided to build a rigid composite structure with steel tubes confining concrete having a modulus of elasticity of 50 GPa [refer to Fig. 2(b)] (6). To make such concrete, the concrete producer was forced to import aggregate from nearby Canada – a glacial granitic pea gravel having a maximum size of 10 mm. This glacial gravel had several advantages: it was hard



Rys. 2. Drapacze chmur wybudowane z zastosowaniem domieszek złożonych z sulfonianów polimelaminowych i polinaftalenowych: (a) budowa Scotia Plaza (zdjęcie dzięki uprzejmości John Bickley); (b) budowa Two Union Square (zdjęcie dzięki uprzejmości Weston Hester); i (c) Petronas Towers (zdjęcie dzięki uprzejmości Morio i Wikimedia Commons)

Fig. 2. High-rise building constructed with HRWRAs: (a) construction of Scotia Plaza (photo courtesy of John Bickley); (b) construction of Two Union Square (photo courtesy of Weston Hester); and (c) the Petronas Towers (photo courtesy of Morio and Wikimedia Commons)

sowano spoiwo trójskładnikowe złożone z cementu portlandzkiego, cementu żużlowego oraz pyłu krzemionkowego. Mieszanke betonową o stosunku w/b = 0,30 i opadu stożka wynoszącego 175 mm pompowano od pierwszego do ostatniego piętra.

Aby spełnić wymagania projektu, co do maksymalnej temperatury świeżego betonu wynoszącej 18° C, beton musiał być chłodzony ciekłym azotem podczas ciepłych dni lipca. W trakcie postępu budowy sprawdzano wytrzymałość na ściskanie betonu, stosując przyspieszone badania i próbę „pull out”.

3.2. Two Union Square

Seattle, jest położone w bardzo wietrznej okolicy. W celu zminimalizowania odkształceń bocznych projektanci budynku postanowili zbudować sztywną konstrukcję złożoną z rur stalowych krępujących odkształcenia poprzeczne betonu, którego moduł sprężystości powinien wynosić 50 GPa [rys. 2 (b)] (6). Aby uzyskać beton tej klasy producent był zmuszony do importowania kruszywa z niedalekiej Kanady; był to polodowcowy grys granitowy, o maksymalnej wielkości ziarna wynoszącej 10 mm. Kruszywo to miało kilka zalet: było twarde i składało się z zaokrąglonych ziaren, co było szczególnie ważne z punktu widzenia właściwości reologicznych mieszanki betonowej. Jednak w skali mikro te ziarna miały chropowatą powierzchnię, która pozwalała na uzyskanie bardzo dobrego wiązania z zaczynem cementowym. Uzyskanie betonu o module sprężystości wynoszącym 50 GPa wymagało zmniejszenia stosunku w/b do 0,22. Uzyskana wytrzymałość na ściskanie wyniosła 131 MPa, pomimo że projektowana przez technologa betonu wynosiła tylko 90 MPa (7).

Transport betonu o stosunku w/b = 0,22 nie był (i nadal nie jest) łatwym zadaniem, ponieważ czas odgrywa tutaj decydującą rolę. Dlatego podjęto decyzję o transportowaniu betonu nocą w weekendy, aby zminimalizować problemy związane z dużym ruchem samochodowym [korki]. Aby złagodzić niechęć społeczności spowodowanej znajdującą się w mieście wytwórnią betonu inwestor i producent betonu zaproponowali bezpłatną budowę placu zabaw dla dzieci tej społeczności – placu zabaw, którego budowa nie używała od kilku lat akceptacji władz miasta Seattle. Ponadto, dla tych, którzy potrzebowali spokojnego snu w weekendy, w czasie kiedy beton miał być transportowany, zapewniono bezpłatne zatyczki do uszu. Społeczność została usatysfakcjonowana tymi ofertami.

3.3. Petronas Towers

Tuż przed 2000 rokiem Stany Zjednoczone straciły swoją przodującą pozycję w zakresie drapaczy chmur, w związku z decyzją Petronas Corporation z Malezji o budowie w Kuala Lumpur wież bliźniaczych o wysokości 451.9 m, co odpowiada półtorakrotnej wysokości wieży Eiffla. Wieże pokazane na rysunku 2 (c) są głównie wykonane z betonu o różnej wytrzymałości na ściskanie, z której największa wynosi 80 MPa, w kolumnach dolnych kondygnacji (8).

Podczas budowy tych wież inżynierowie z Samsung Corporation stwierdzili, że ze względu na ograniczoną liczbę dostępnych dźwigów transport pojemników z betonem na najwyższe piętra

and had been crushed smoothly by the glacier and not brutally by crushers, it was composed of rounded particles particularly useful from a rheological point of view, and the particles had a rough surface which exhibited very good bonding properties with the cement paste (in contrast to river gravels polished by very fine sediments). To meet the 50 GPa modulus of elasticity requirement, the w/b had to be limited to 0.22. The resulting compressive strength was 131 MPa, in spite of the fact that the design strength used by the engineer was only 90 MPa (7).

Delivering a 0.22 w/b concrete was not (and still is not) an easy task because timing is critical. Therefore, it was decided to transport concrete on weekend nights to minimize traffic problems. To mitigate ill will in the community surrounding the concrete plant, the contractor and concrete producer offered to build, free of charge, a playground for children of that community – a playground that the City of Seattle had been refusing to build for several years. Also, earplugs were provided free for those who needed them to have a quiet sleep during the weekend nights when the concrete had to be delivered. The community was happy to make such a deal.

3.3. The Petronas Towers

Just before 2000, the United States lost its supremacy in matters of the height of high-rise buildings when the Petronas Corporation from Malaysia decided to build 451.9 m high – 1.5 times the height of the Eiffel Tower – twin towers in Kuala Lumpur, Malaysia. The towers shown in Fig. 2(c) are essentially made of concrete with varying strengths, the strongest having a compressive strength of 80 MPa for the columns of the lower floors (8).

During the construction of this building, Samsung engineers found that it was not practical to raise buckets of concrete up to the top floors because of the limited number of cranes available. Therefore, they started a major research and development program on the pumping of high-performance concrete. This research is still ongoing (9, 10).

3.4. Burj Khalifa

Burj Khalifa, Dubai, the United Arab Emirates (Fig. 3(a)), at 828 m high, is currently the tallest building in the world. It is a reinforced concrete structure up to 586 m. The concrete was transported by a single pump up to this height (11). During the construction of the steel structure on top of the concrete structure, Samsung engineers found that erecting the last 242 m was very painful, time-consuming, and very costly because they had only two cranes to do so. These two cranes operated both night and day to raise pieces of steel, and it was impossible to complete the installation of finishes during this period. Therefore, as steel cannot be pumped, the engineers were asked by Samsung to design all future high-rise buildings entirely with concrete.

3.5. Worli Project

In Mumbai, India, the Samsung Corporation is now supervising the construction of an 83-story concrete structure where all the concre-



Rys. 3. Najwyższe drapacze chmur: (a) Burj Khalifa; (b) budowa Worli Project (zdjęcie dzięki uprzejmości Pierre-Claude Aïtcin); i (c) model Kingdom Tower (Adrian Smith + Gordon Gill)

Fig. 3. Tallest high-rise buildings: (a) Burj Khalifa; (b) construction of the Worli Project (photo courtesy of Pierre-Claude Aïtcin); and (c) model of the Kingdom Tower (credit: Adrian Smith + Gordon Gill)

nie będzie dobrym rozwiązaniem. Dlatego rozpoczęli badania, dotyczące pompowania betonu o dużej wytrzymałości. Prace te są nadal w toku (9, 10).

3.4. Burj Khalifa

Drapacz chmur Burj Khalifa w Dubaju, w Zjednoczonych Emiratach Arabskich [rys. 3 (a)], o wysokości 828 m, jest obecnie najwyższy na świecie. Jest to konstrukcja z żelbetu do wysokości 586 m. Beton był pompowany aż do tej wysokości (11). Podczas realizacji konstrukcji stalowych w górnej części konstrukcji betonowej inżynierowie z Samsung Corporation stwierdzili, że wzniesienie ostatnich 242 m było bardzo trudne, czasochłonne i bardzo kosztowne, ponieważ do dyspozycji mieli tylko dwa dźwigi. Te dwa dźwigi pracowały zarówno w dzień jak i w nocy, przenosząc elementy stalowe, a w tym okresie nie można było ukończyć instalowania wykończenia. Z uwagi na te problemy inżynierowie zostali poproszeni przez Samsunga o projektowanie wszystkich przyszłych drapaczy chmur w całości z betonu.

3.5. Worli Project

W Bombaju w Indiach, Samsung Corporation nadzoruje obecnie budowę osiemdziesięcioletniej konstrukcji betonowej, w której beton jest pompowany od pierwszego piętra aż do

te is pumped from the first floor up to the top. The concrete pump is directly fed by the concrete mixer. The columns in the lowest floors are being built with an 80 MPa concrete having a 200 mm slump, and all the floor slabs with a 30 MPa self-leveling concrete having a 650 mm slump flow (12).

This is the present state of the art for the construction of high-rise buildings [refer to Fig. 3(b)]. We are quite far from the 60 MPa concrete having a 100 mm slump and placed using buckets, as was done for the construction of Water Tower Place in 1968.

3.6. Kingdom Tower

The Saudi Arabian Binladin Group has been considering the construction of a 1.6 km (about 1 mile) high tower—the Kingdom Tower in Jeddah, Saudi Arabia. Their technical team has determined, however, that the transition from the Burj Khalifa's 800 m to 1.6 km is too ambitious. Nevertheless, a 1000 m building is feasible. Two pumping scenarios are presently under study. The first one is the use of a concrete pump able to transport concrete up to 1000 m. If this scenario does not work, the alternative would be to use two pumps in series, with each capable of transporting concrete 500 m. Self-consolidating concrete will be used for the majority of the elements, and compressive strengths of up to 100 MPa are expected for the columns. The firm Advanced Construction Tech-

ostatniej kondygnacji. Beton do pompy jest podawany bezpośrednio z betoniarki. Kolumny w najniższych piętrach są z betonu o wytrzymałości 80 MPa i opadzie stożka 200 mm, a wszystkie płyty stropowe z betonu samopoziomującego się, o wytrzymałości 30 MPa i opadzie stożka 650 mm (12).

To jest obecny stan technologii dotyczący budowy drapaczy chmur [rys. 3 (b)]. Wyprzedzamy znacznie technologię betonu o wytrzymałości 60 MPa i opadzie stożka 100 mm oraz układanego za pomocą wiadra, tak jak to wyglądało przy budowie Water Tower Place w 1968 roku.

3.6. Kingdom Tower

Grupa Saudi Arabian Binladin rozważa budowę wieżowca o wysokości 1,6 km (około 1 mili) – Kingdom Tower w Jeddah w Arabii Saudyjskiej. Zespół techniczny tej Grupy ustalił jednak, że przejście od 800 m, odpowiadającej Burj Khalifa, do 1,6 km jest zbyt ambitne. Jednakże można zbudować drapacz o wysokości 1000 m. Dwa rozwiązania dotyczące pompowania betonu są obecnie w trakcie badań. Pierwszy z nich zakłada zastosowanie pompy do betonu umożliwiającej jego transport do wysokości 1000 m. W przypadku niepowodzenia tej metody alternatywą byłoby użycie dwóch pomp szeregowo, z których każda byłaby zdolna do transportowania betonu na wysokość 500 m. Dla wykonania większości elementów będzie stosowany beton samozagęszczający się, a oczekiwane wytrzymałości na ściskanie w przypadku kolumn wynoszą 100 MPa. Za zapewnienie dobrej jakości betonu odpowiada firma Advanced Construction Technology Services, a jej laboratorium będzie znajdować się na miejscu budowy (13).

4. Dlaczego tak wysoko?

Po co budować super wysokie konstrukcje? Jednym z powodów jest prestiż ze stwierdzenia: „Zbudowaliśmy najwyższy budynek na świecie!” Ale prestiż ten jest ulotny. Ostatecznie gdzieś indziej zostaną wybudowane nawet wyższe budynki. Trwalszym powodem do kwestionowania granic wysokości konstrukcji będzie przyczyną do rozwoju standardowych praktyk budowlanych. Dzięki pionierskim budowniczym, dostawcom, architektom, inżynierom i naukowcom materiałowym obecnie opanowaliśmy technologię betonu na poziomie, który był nie do pomyślenia 50 lat temu. A beton zaczyna w dużej mierze zastępować stal jako materiał najlepiej nadający się do budowy konstrukcji wysokościowych.

Z dzisiejszą technologią betonu możliwy jest wzrost wytrzymałości betonów do tego samego poziomu co najtwardszych naturalnych skał, pompowanie tych betonów do 600 m, a niedługo do 1000 m oraz poprawa urabialności takich betonów, tak aby podczas układania wibrowanie nie było już potrzebne.

Co więcej, gdy komuś udaje się pompowanie betonu o wysokiej wytrzymałości na wysokość do 600 m konstrukcje budowlane o wysokości 200 do 300 m, z 50 do 80 kondygnacjami stają się relatywnie łatwym ćwiczeniem. Według Clarka (14) w najbliższych latach prawdziwie wielki rynek dla wysokich budynków będą sta-

nology Services has been hired to provide quality control with an on-site laboratory (13).

4. Why So High?

Why build super-tall structures? One reason is the prestige of saying: “We have built the tallest structure in the world!” But this prestige is ephemeral. Eventually, even taller buildings will be constructed somewhere else. A longer-lasting reason to challenge the limits of structure height would be to contribute to the evolution of standard construction practices. Thanks to pioneering builders, suppliers, architects, engineers, and materials scientists, we presently master concrete technology at a level that was unthinkable 50 years ago. And concrete is starting to largely replace steel as the best-suited material for construction of high-rise structures.

With today’s concrete technology, it is possible to increase the strength of concretes at the same level as the strongest rocks found in nature, to pump these concretes up to 600 m—and very soon up to 1000 m—and to improve the workability of these concretes so that vibration is no longer necessary during casting.

Moreover, when one succeeds at pumping a high-strength concrete up to 600 m, building structures 200 to 300 m high with 50 to 80 stories becomes a relatively trivial exercise. According to Clark (14), the real great market for high-rise buildings in the coming years are these 200 to 300 m tall towers. When building such structures, the lateral forces acting on the building can be taken into account relatively easily during the design process. Beyond this height, the design stage becomes more complicated and costly.

5. Conclusions

Due to the development of powerful HRWRAs and VMAs, it is now possible to very efficiently and economically build high-rise concrete structures. Thanks to the entrepreneurs and inventors who challenged the limits of the use of concrete, the industry has progressively learned to pump high-strength concretes higher and higher. Perhaps the sky is the only limit.

Literatura / References

1. A. Meyer, “Experiences in the Use of Superplasticizers in Germany,” *Superplasticizers in Germany*, pp. 21-36, SP-62, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1979.
2. K. Hattori, “Experiences with Mighty Superplasticizer in Japan,” *Superplasticizers in Germany*, pp. 37-66, SP-62, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1979.
3. “Water Tower Place—High Strength Concrete,” *Concrete Construction*, 21, 3, 100-104 (1976).
4. J. A. Bickley, “The CN Tower—A 1970’s Adventure in Concrete Technology,” p. 20, ACI Spring Convention 2012, address at the student lunch meeting, Toronto, ON, Canada 2012.

nowić wieżowce o wysokości 200 do 300 m. Przy budowie takich konstrukcji siły poprzeczne działające na budynek mogą być brane pod uwagę stosunkowo łatwo, w procesie projektowania. Powyżej tej wysokości etap projektowania staje się coraz bardziej skomplikowany i kosztowny.

5. Podsumowanie

Ze względu na rozwój domieszek zmniejszających w/c oraz lepkość mieszanek obecnie możliwe jest bardzo skuteczne i ekonomiczne budowanie betonowych budynków wysokościowych. Dzięki przedsiębiorcom i wynalazcom, którzy zakwestionowali granice stosowania betonu przemysł stopniowo nauczył się pompować betony o wysokiej wytrzymałości wyżej i wyżej. Być może niebo jest jedynym ograniczeniem.

Informacja wydawcy o autorach

Pierre-Claude Aïtcin, Honorowy Członek Amerykańskiego Instytutu Betonu (ACI), jest emerytowanym profesorem Uniwersytetu Sherbrooke, w Sherbrooke, w Kanadzie. Przez 8 lat był dyrektorem naukowym Concrete Canada, the Network of Centres of Excellence on High-Performance Concrete. Przez 9 lat brał również aktywny udział we współpracy Industrial Chair on Concrete technology z 13 partnerami przemysłowymi.

William Wilson, Członek Amerykańskiego Instytutu Betonu (ACI), prowadzi zaawansowane prace badawcze na Uniwersytecie Sherbrooke. Jego zainteresowania badawcze uwzględniają charakterystykę mikrostruktury oraz właściwości inżynierskie bardzo trwałych betonów zawierających dodatki mineralne. Tytuł zawodowy inżyniera uzyskał w Université de Sherbrooke, a magistra w Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

5. J. Ryell, J. A. Bickley, "Scotia Plaza: High Strength Concrete for Tall Buildings," pp. 641-653, Symposium on Utilization of High Strength Concrete, Stavanger, Norway 1987.
6. M. Ralston, R. Korman, "Put That in Your Pipe and Cure It," Engineering News Record, 22, 7, 44-53 (1989).
7. N. L. Howard, D. M. Leatham, "The Production and Delivery of High-Strength Concrete," Concrete International, 11, 4, 26-30 (1989).
8. C. H. Thornton, U. Hungspruke, L. M. Joseph, "Design of the World's Tallest Buildings—Petronas Twin Towers at Kuala Lumpur City Centre," The Structural Design of Tall Buildings, 6, 4, 245-262 (1997).
9. S. H. Kwon, C. K. Park, J. H. Jeong, S. D. Jo, S. H. Lee, "Prediction of Concrete Pumping: Part I—Development of New Tribometer for Analysis of Lubricating Layer," ACI Materials Journal, 110, 6, 647-655 (2013).
10. S. H. Kwon, C. K. Park, J. H. Jeong, S. D. Jo, S. H. Lee, "Prediction of Concrete Pumping: Part II—Analytical Prediction and Experimental Verification," ACI Materials Journal, 110, 6, 657-667 (2013).
11. J. Aldred, "Burj Khalifa—A New High for High-Performance Concrete," Proceedings of the ICE - Civil Engineering, 163, 2, 66-73 (2010).
12. M. L. Nehdi, "Only Tall Things Cast Shadows: Opportunities, Challenges and Research Needs of Self-Consolidating Concrete in Super-Tall Buildings," Construction and Building Materials, 48, 80-90 (2013).
13. "Concrete Quality-Control Lab to be Onsite at Kingdom Tower," Concrete SmartBrief, Feb. 18, 2014.
14. G. Clark, "Challenges for Concrete in Tall Buildings," Structural Concrete, accepted and published online, Nov. 2014. (<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/suco.201400011/full>)

Selected for reader interest by the editors.

ACI Honorary Member Pierre-Claude Aïtcin is Professor Emeritus at the Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada. He was the Scientific Director of Concrete Canada, the Network of Centres of Excellence on High-Performance Concrete for 8 years. He also held an Industrial Chair on Concrete technology for 9 years in collaboration with 13 industrial partners.

ACI member William Wilson is pursuing advanced graduate studies at the Université de Sherbrooke. His research interests include microstructure characterization and properties engineering of highly durable concrete incorporating alternative supplementary cementitious materials. He received his BEng from the Université de Sherbrooke and his MS from Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.