

Prefabrykaty z betonów o wysokiej i ultra wysokiej wytrzymałości – teraz – czy dopiero jutro?

PREFABRICATED BUILDING ELEMENTS OF HIGH-STRENGTH CONCRETE AND ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE – LEADERS OF TOMORROW?

Streszczenie

Rozwój technologiczny w obrębie budownictwa postępuje dużo wolniej niż np. w informatyce czy motoryzacji. Tymczasem ostatnie lata przynoszą nam nie tylko coraz to nowsze wyniki badań nad poszukiwaniem nowych lub zmodyfikowanych materiałów budowlanych, dla realizacji konstrukcji budowlanych, ale przykłady praktycznych – seryjnych aplikacji z ich zastosowaniem. W obszarze naszego zainteresowania – konstrukcji z betonowych elementów prefabrykowanych – mamy do czynienia wręcz z eksplozją praktycznych rozwiązań z udziałem prefabrykatów wykonanych z betonów wysokiej wytrzymałości (HSC) oraz coraz odważniejszymi przykładami realizacji z betonów ultra wysokiej wytrzymałości (UHPC).

Jesteśmy świadkami procesu o narastającej dynamice zmian, będących odpowiedzią na współczesne oczekiwania architekta, inwestora nacechowanych ciągłym odkrywaniem kolejnych cech materiału jakim jest beton. Praktyczna aplikacja wprowadzanych modyfikacji powoduje, że oczekiwania te wzrastają i wpływają na kolejne zmiany i modyfikacje. Procesy te wykorzystując dzisiejsze narzędzia do projektowania, zaplecze badawcze wielu instytutów i uczelni i wreszcie bogactwo materiałów mineralnych i ich chemicznych modyfikacji tworzą ciągłą spiralę rozwoju technologii betonu.

Wysokowytrzymałe betony w klasach wytrzymałości od 85 do 115 MPa stanowią już dzisiaj stan techniki. Odstęp pomiędzy nimi a stalą staje się coraz mniejszy. Umożliwia to realizację smuklejszych słupów, niższych i bardziej filigranowych dźwigarów. Zyskujemy wiele ekologicznych zalet związanych z ich wytwarzaniem, dzięki oszczędności surowców i energii.

Abstract

The progress of technological development within the building area proceeds much slower nowadays in comparison to IT or motorization. Meanwhile, the last couple of years bring not only the latest research results of new or modified building materials dedicated to building constructions, but also the practical and serial examples of building applications.

Within the area of our concern – mainly the prefabricated concrete constructions – we deal with an explosion of practical solutions to the High-Strength Concrete and to more and more courageous applications of Ultra-High Performance Concrete.

We are extremely lucky to become the witnesses of a highly dynamical process being an answer to the contemporary expectations of architects and investors aimed at constant exploration of concrete used as a building material. Practical application of implemented modifications causes that real expectations increase and influence the following changes and variations. Those processes, using in particular contemporary design instruments, as well as sources of research of many institutes and universities, plus mineral materials wealth with their chemical modifications, create a constant spiral of concrete technology development.

High-Strength Concretes with compressive strength classes from 85 to 115 Mpa can be meant nowadays as the state of engineering. Moreover, the gap between them and steel material decreases, which enables production of constructions with slender pillars and shorter, dainty beams. Taking into consideration the above mentioned, we gain many ecological advantages related to the production processes mainly through raw materials and energy savings.

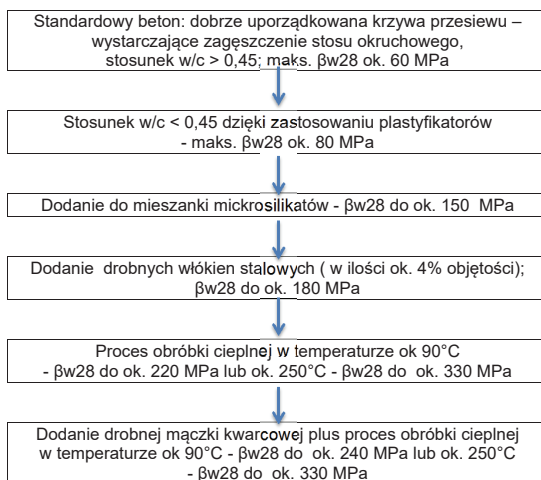
1. Przypomnienie podstawowych informacji w zakresie klasyfikacji betonów

Tradycyjne betony opierają się głównie w zakresie mieszanki na różnego rodzaju kruszywach dobieranych na bazie stosu okruszowego, lepiszcza (cementu), wody oraz dodatków chemicznych poprawiających urabialność lub wpływających na proces wiązania oraz przyrostu wytrzymałości.

Betony wysokowytrzymałe oraz betony ultrawysokowytrzymałe (UHPC) bazują na stosowaniu różnego rodzaju kruszyw mineralnych i ich pochodnych o bardzo małych frakcjach. Istotą uzyskania jak najwyższej wytrzymałości jest między innymi bardzo gęste wypełnienie struktury mieszanki odpowiednimi kruszywami, w połączeniu z cementem oraz dodatkami aktywnymi chemicznie. Rzeczywista mieszanka takiego betonu składa się z bardzo drobnych ziaren piasku oraz różnego rodzaju zmielonych na mączkę kruszyw wypełniających, cementu oraz reaktywnych mączek silikatowych, popiołów, mączek wapiennych i kwarcowych. Stosunek wodno-cementowy w tego typu mieszankach jest bardzo niski i zmierza w kierunku poniżej 0,2. Dla polepszenia urabialności mieszanki oraz dla zwiększenia wytrzymałości betonu stosuje się plastyfikatory i super plastyfikatory. Istotnym zagadnieniem jest odpowiednie – równomierne uporządkowanie w składzie mieszanki produktów aktywnych chemicznie dla uzyskania jej jednorodności.

Dla mieszanek z betonu ultrawysokowytrzymałego stosowane są, dla uzyskania duktylności materiału i wysokich wytrzymałości na rozciąganie – włókna stalowe. Umożliwia to bardziej efektywne wykorzystanie parametrów wytrzymałościowych materiału. Można sobie już dzisiaj wyobrazić betony o standardowej wytrzymałości na ściskanie rzędu 300 MPa, produkowane pod ścisłym nadzorem laboratoryjnym. W połączeniu ze zbrojeniem tekstylnym, włóknami szklanymi, węglowymi czy też stalowymi materiał ten pozwoli w przyszłości na zastosowanie nowych rodzajów elementów konstrukcyjnych w budownictwie.

Jak już wyżej zauważono – technologia wytwarzania betonu ultrawysokowytrzymałego bazuje na wykorzystaniu bardzo gęstego upakowania drobnych ziaren kruszywa i zapewnieniu jak największej powierzchni właściwej dla połączenia pomiędzy materiałem wiążącym oraz innych proszków reaktywnych. Prezentowany poniżej diagram [1] przedstawia kolejne kroki w rozwoju technologicznym mające na celu podwyższenie wytrzymałości betonu na ściskanie:



W dalszej części tego opracowania będziemy się opierać na trzech prostych – przykładowych recepturach mas betonowych użytych do produkcji elementów prefabrykowanych

Tabela 1. Przykładowe wybrane receptury trzech rodzajów betonu (normalnego, wysokowytrzymałego i ultrawysokowytrzymałego)

Klasa wytrzymałości betonu		C20/25	C 80/95 (HSC)	UHPC
Rodzaj cement i klasa wytrzymałości		CEM I 32,5 R	CEM II/A-S 52,5 R	CEM II 52,5 R
Ilość cementu	kg/m ³	270	470	780
Popioły lotne	kg/m ³	80	70	
Pył krzemionkowy	kg/m ³		35	185
Ilość wody	kg/m ³	185	130	110
w/c		0,51	0,29	0,18
Piasek kwarcowy 0/2a	kg/m ³		712	870
Piasek 0/2 mm	kg/m ³	682		
Żwir 2/8 mm	kg/m ³		267	
Żwir 2/16 mm	kg/m ³	1114		
Kruszywo łamane bazaltowe 8/16	kg/m ³		910	
Mączka kwarcowa	kg/m ³			310
Włókna stalowe	kg/m ³			196
Dodatki				
Rodzaj		Uplynnierz	Super plastyfikator	Super plastyfikator
Zawartość	% C	0,6	1,5	6,2

Stosowanie betonów wysokowytrzymałych jest z pewnością zadaniem na dzisiaj. Prześledźmy poniższy prosty przykład dla dwóch słupów wykonanych z różnych rodzajów betonów pod względem koniecznych nakładów na surowce i energie.

Tabela 2. Porównanie zużycia surowców i energii dla słupa wykonanego z betonu klasy C35/45 o średnicy rzędu 100 cm z odpowiadającym mu przekrojem słupa z UHPC o średnicy 50 cm w stalowej rurze osłonowej [2]

Słup z betonu C 35/45; st. zbrojenia 2%	Zużycie energii	Zużycie surowców	Zużycie energii na m ³ żelbetu	Zużycie surowców na m ³ żelbetu
	[MJ/m ³]	[t/m ³]	[MJ]	[t]
Beton C35/45	1,766	2,41	1,766	2,41
Stal zbrojeniowa	85,368	50,24	1,707	1,00
Razem:			3,473	3,41

Tabela 3. Rozpatrywana mieszanka betonu UHPC wg [3]

Cement	Piasek	Bazalt	Pył krzemionkowy	w/c	βw28
542 kg/m ³	596 kg/m ³	1192 kg/m ³	136 kg/m ³	0,18	180 MPa

Tabela 4. Zużycie energii i surowców na wyprodukowanie słupa z UHPC w osłonowej rurze stalowej na m³

Słup z betonu UHPC;	Udział w masie mieszanki	Zużycie energii	Zużycie surowców	Zużycie energii na m ³ żelbetu	Zużycie surowców na m ³ żelbetu
	[t/m ³]	[MJ/m ³]	[t/m ³]	[MJ]	[t]
Cement	0,5415	4,693	1,5	2,541	0,81
Pył krzemionkowy	0,1353	2)	0,20	2)	0,20
Dodatki	1,7876	137	1	245	1,79
Plastyfikator	0,0203	-	-	-	-
Stalowa rura osłonowa ¹⁾	0,126 (1,6% -obj.)	10,875	6,4	1,366	0,80
Razem:				4152	3,60

¹⁾ st. zbrojenia 1,6% (ekwiwalent stalowej rury osłonowej o gr. 3 mm)

²⁾ jako pozostałość z produkcji surowców – bez obciążenia energetycznego

Tabela: 5. Porównanie zużycia energii i surowców na wyprodukowanie słupa z betonu klasy C35/45 ze słupem z UHPC o wytrzymałości na ściskanie ok. 180 MPa (st. wykorzystania nośności przekroju UHPC – 75%)

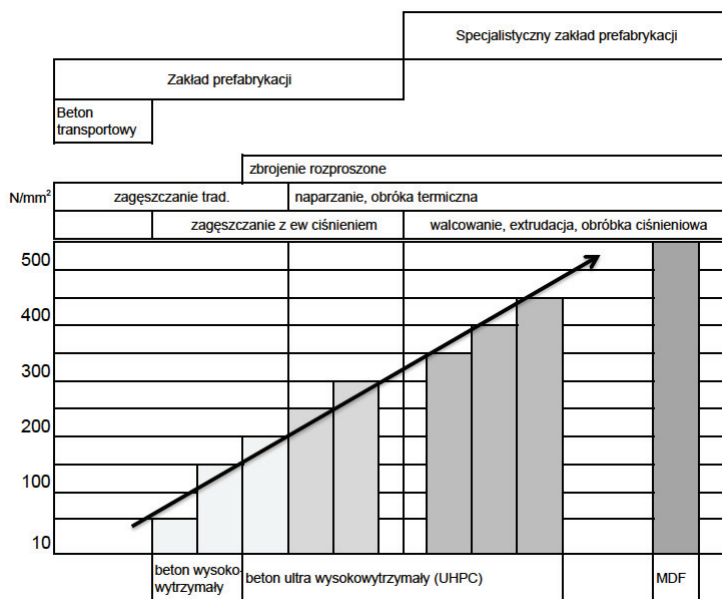
Wariant słupa z betonu:	Średnica	Objętość	Zużycie energii	Zużycie surowców
	[m]	[m ³]	[MJ]	[t]
C35/45	1,0	2,36	8,196	8,0
UHPC	0,5	0,59	2,494	2,10

Powyższe zestawienia w tabelach 2 do 5 wykazują jednoznacznie możliwości realizacji zadania konstrukcyjnego przy zużyciu zaledwie 25% energii i surowców w stosunku do tradycyjnego rozwiązania. Oczywiście należy dla tego porównania wykonać jeszcze dodatkową kalkulację opartą na kosztach wykonania jednostki mieszanki UHPC oraz betonu standardowego. W takim przypadku będziemy mieli ten współczynnik na wyższym poziomie, bowiem koszt wyprodukowania 1 m³ prefabrykatu kształtuje się dla tej klasy na średnim poziomie 1300 zł natomiast dla UHPC to koszt rzędu 3200 zł. Mimo wszystko zaprezentowane porównanie wskazuje kierunek dalszego rozwoju dla budownictwa z betonu.

2. Dzisiaj – wdrożenie przemysłowej produkcji prefabrykatów z betonów wysokiej wytrzymałości

Konstrukcje z betonów wysokowytrzymałych i ultrawysokowytrzymałych znajdują swoje zastosowanie przede wszystkim w realizacji elementów konstrukcyjnych obiektów budowlanych (słupy, dźwigary, płyty stropowe), mostów (przęsła konstrukcyjne, płyty jezdne), elewacje (płyty fasadowe).

W zakresie technologicznym konieczne jest jednak podjęcie pewnych działań przez przemysł w zakresie wdrożenia technologii projektowania i produkcji tych elementów. Poniższy diagram ilustruje istotne aspekty konieczne do uwzględnienia przy uzyskiwaniu wysokich wytrzymałości seryjnej produkcji elementów z betonu.

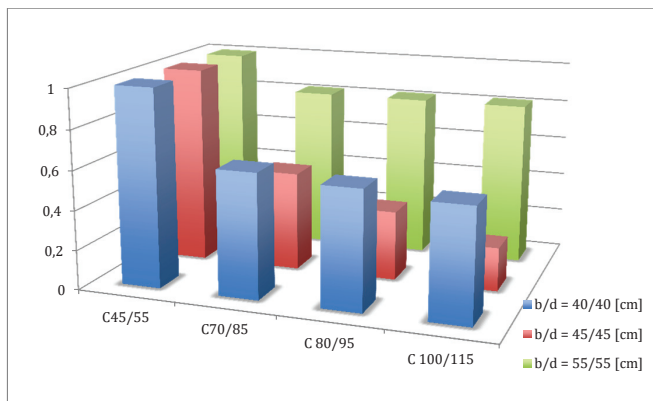


Rys. 1. Technologiczne aspekty związane z wytwarzaniem elementów z betonów wysokiej wytrzymałości

3. Możliwości praktycznego zastosowania betonu wysokiej wytrzymałości w produkcji elementów prefabrykowanych

Nie dla wszystkich elementów prefabrykowanych zastosowanie betonów w wyższych klasach wytrzymałości przynosi wymierne efekty ekonomiczne. Profesor Erhard Gunkler w swojej pracy [4] dokonał porównania dla różnego rodzaju elementów konstrukcyjnych, analizując możliwości np. obniżenia stopnia zbrojenia w przypadku słupów, lub wzrostu nośności w przypadku elementów zginanych.

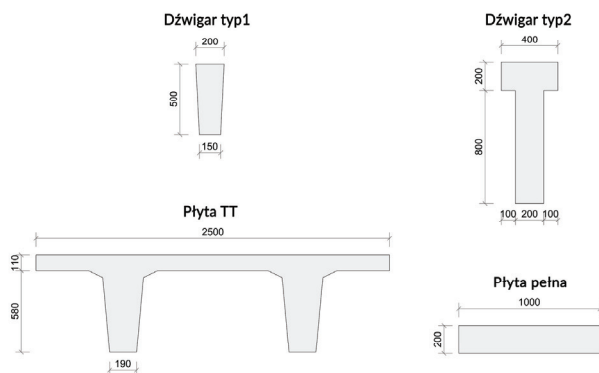
W przypadku słupów obiektów wielokondygnacyjnych o wysokości 6,20 poddanych działaniu sił osiowych rzędu 8 600 kN, przy pomijalnych momentach zginających, istotnie efektywne jest stosowanie betonów wysokiej wytrzymałości z możliwością obniżenia stopnia zbrojenia dla słupów 40x40 cm z betonu C 100/115 nawet do 26% względem elementów z betonu C45/55 (rys. 2).



Rys. 2. Możliwość obniżenia stopnia zbrojenia w przypadku stosowania betonów wyższych klas względem słupów obiektów wielokondygnacyjnych z betonu C45/55 [4]

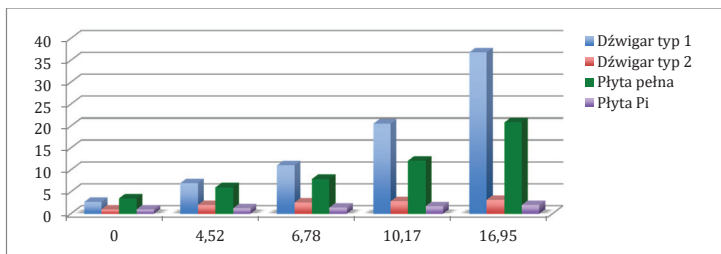
W przypadku natomiast słupów hali jednonawowej o wysokości 12,40 mb obciążonych siłą osiową rzędu 1 340 kN i siłą poziomą w jednym kierunku rzędu 190 kN podobne porównanie nie wykazało żadnych istotnych oszczędności.

W przypadku elementów zginanych (wg programu typowych przekroji prefabrykowanych) mamy natomiast interesujące porównanie w przypadku elementów wykonanych z klasy betonu C 100/115 względem tych samych z betonu C 50/60 (rys. 3).



Rys. 3. Typowe przekroje porównawcze prefabrykatów

W przypadku płatwi (typ1) oraz pełnej płyty stropowej obserwujemy znaczny przyrost nośności przy zastosowaniu betonu wysokiej wytrzymałości wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia sprężającego (rys. 4). Duże mniejsze znaczenie miało to jednak w przypadku dźwigara typ 2 oraz sprężonej płyty PI.



Rys. 4. Procentowy wzrost nośności elementów prefabrykowanych wg rysunku 5 wykonanych z betonu wysokowytrzymałego C100/115 względem elementów o tym samym przekroju oraz ilości stali sprężającej z betonu C50/60 [4]

Zmiany w zakresie projektowania

W zakresie projektowania konstrukcji z betonów wysokowytrzymałych możemy się opierać na przyjętych dzisiaj normach w zakresie wymiarowania konstrukcji z betonu z uwzględnieniem innych (nieopisanych w normach dotyczących betonu) parametrów charakterystycznych dla stosowanych mieszanek (moduł Younga, współczynnika Poissona, wytrzymałości itp.). Te wartości charakterystyczne należy uwzględnić opierając się na wynikach badań laboratoryjnych dla projektowanych mieszanek betonu.

W przypadku betonów ultrawysokowytrzymałych (UHPC) dodatkowo należy uwzględnić konieczność stosowania dodatkowego zbrojenia włóknami rozproszonymi ze względu na konieczność zapewnienia duktylności przekroju betonowego. Ponadto, zbrojenie podstawowe elementów wykonanych z betonu ultrawysokowytrzymałego powinno być wymiarowane wg odrębnych – dedykowanych dla danego rodzaju elementów modeli. Modele te winny być skalibrowane w oparciu o wyniki badań doświadczalnych – ze względu na brak jakichkolwiek zapisów normowych w tym zakresie.

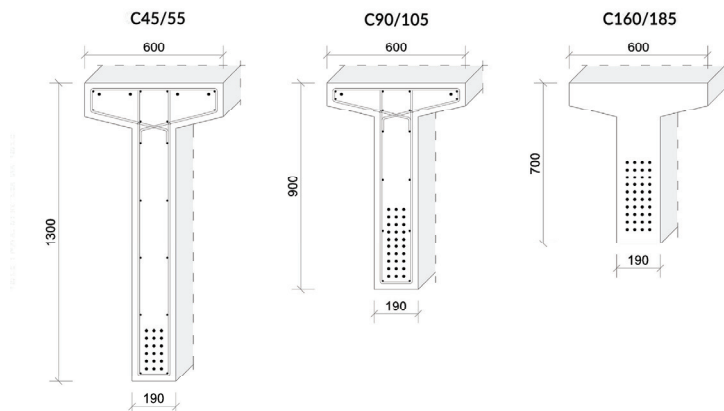
Zmiany w zakresie organizacji produkcji

W obszarze produkcyjnym mamy do czynienia z koniecznością pewnych inwestycji w technologii wytwarzania betonu (dodatkowe silosy na pyły krzemionkowe oraz mączki i drobne frakcje kruszywowe; urządzenia dozujące. Te zadania oznaczają konieczność dodatkowych inwestycji wymagających finansowania. W obszarze bezpośredniego wytwarzania prefabrykatów natomiast mamy do czynienia ze zmniejszeniem kosztów produkcji poprzez stosowanie betonów samozagęszczalnych lub urządzeń o innym charakterze dla celów zagęszczenia mieszanki. Dodatkowe nakłady związane będą z zapewnieniem odpowiedniej obróbki cieplnej betonu, a w przypadku betonów ultrawysokowytrzymałych również stosowanie technologii zagęszczania mieszanki z zastosowaniem ciśnienia (walcowania).

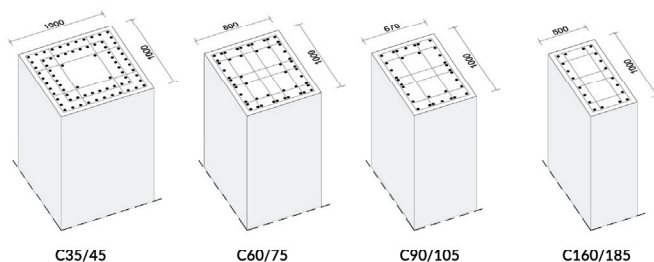
Dzięki produkcji elementów z betonów wysokowytrzymałych można zdecydowanie podnieść poziom produktywności w tych samych przestrzeniach produkcyjnych.. Pro-

duktywność zakładu przy wykorzystaniu tych samych zasobów ludzkich i powierzchni przyczynia się do zwiększenia produkcji a tym samym do zmniejszenia jednostkowego kosztu stałego w kosztach wykonania prefabrykatu.

Przedstawione na rysunkach 5 i 6 za [5] przekroje słupów i dźwigarów dachowych (typowych hal przemysłowych) pokazują możliwości w zakresie zmian gabarytów elementów poddanych takim samym obciążeniom.



Rys. 5. Przekroje dźwigarów ze wskazanym zbrojeniem sprężającym dla C45/55 – $l/h=21$ – 18 strun 12,5; C90/105 – $l/h=30$ – 30 strun 12,5; i C160/185 – $l/h=39$ – 36 strun 12,5 – zbrojony włóknami stalowymi



Rys. 6. Przekroje słupów dla siły ściskającej 39 MN; C35/45 -76 fi 28; C60/75 – 52 fi 28; C90/105 – 34 fi 28; C160/185 – 20 fi 28.

Zwiększenie potencjału produkcyjnego

Modernizacja procesu produkcyjnego umożliwia też zwiększenie zakresu produkcji danej zakładu. Dzięki swoim właściwościom wytrzymałościowym elementy prefabrykowane z betonu wysokowytrzymałego i ultrawysokowytrzymałego są o prawie 40-60% lżejsze niż

elementy tradycyjne. Dzięki temu w wielu zakładach powstają możliwości do produkcji elementów o dotychczas niedostępnych gabarytach. Realizacja niektórych elementów, których masa przekracza możliwości niektórych linii produkcyjnych ze względu na nośność urządzeń dźwigowych, w przypadku betonów wysokowytrzymałych staje się możliwa.

Montaż

Podobne czynniki – zmniejszenie masy elementów – wpływają oczywiście znakomicie na technologię montażu i obniżenie kosztów. Koszty montażu obecnie stanowią prawie 20% kosztów całkowitych konstrukcji prefabrykowanej. W przypadku lżejszych elementów możliwe jest stosowanie dźwigów o niższych udźwigach lub wykonywanie montażu konstrukcji bez potrzeby częstej zmiany usytuowania urządzenia podnoszącego elementy.

Perspektywy smukłych konstrukcji prefabrykowanych

Dzięki zmniejszeniu się przekroju pracującego elementu prefabrykowanego konstrukcja obiektu staje się bardziej efektywnie wykorzystana. W przestrzeni konkretnego obiektu prefabrykowanego pozostaje dużo więcej miejsca dla powierzchni użytkowej, czy też wreszcie istnieje możliwość zmniejszenia kubatury obiektu. Ta ostatnia zaleta tego typu konstrukcji przyczynia się do zmniejszenia zapotrzebowania konkretnej budowli na energię, oraz ilości energii potrzebnej do wyprodukowania konkretnej powierzchni użytkowej. W tabeli 6 przedstawiono wyliczenia porównawcze dwóch obiektów w tej samej konstrukcji szkieletowej, w różnych klasach betonu dla słupów i belek stropowych.

Tabela 6. Porównanie kosztów wykonania konstrukcji biurowca w technologii szkieletowej – prefabrykowanej z dwoma trzonami klatek schodowych i osiach konstrukcyjnych 8,10 x 8,10 – w biurowcu zamieniono słupy 50 x 60 na słupy z betonu wysokowytrzymałego o wymiarach 40 x 35 cm oraz podciągi 20 cm niższe ze względu na zastosowanie wyższych klas betonu

Biurowiec – technologia pref.	Beton standard.	Beton wysoko- wytrzymały	jedn.
Kondygnacja - wysokość brutto	3,50	3,30	m
Szerokość	34	34	m
Długość	74	74	m
Ilość słupów konstrukcyjnych	50	50	szt
Słupy (pow. Jedn.)	0,30	0,14	m ²
Powierzchnia klatek schodowych	38	38	m ²
Powierzchnia konstrukcji	53	45	m ²
Powierzchnia użytkowa	2 441	2 449	m ²
Ilość kondygnacji	8	8	szt
Razem powierzchnia użytkowa netto	19 532	19 596	m ²
Różnica w powierzchni użytkowej		64	m ²
Kubatura obiektu	68 546	64 814	m ³
Różnica w kubaturze		(3 732)	m ³
Jednostkowy koszt wzniesienie m ³ konstrukcji	428,57 zł	429,80 zł	/m ³ kubat.
Oszczędności w kosztach wznoszenia obiektu		1 520 047 zł	
Dodatkowy zysk z tytułu najmu powierzchni użytkowej przez 20 lat (cen najmu 45 zł/m ²)		691 200,00 zł	
Oszczędność w zapotrzebowaniu na energię ogrz.		(35 828)	kWh/ rocznie

Jak wynika z powyższego porównania inwestor zyskuje na kosztach wzniesienia obiektu ponad 1,5 mln. zł. Ponadto w trakcie 20 lat wynajmu zwiększy swój dochód z tytułu najmu większej powierzchni użytkowej o prawie 0,7 mln. zł. Dodatkowo oszczędzi ponad 35 828 kWh energii rocznie na ogrzewanie obiektu, co przez 20 lat może przynieść sumę kolejnych 300 tys. zł oszczędności.

Zakłady prefabrykacji mogą zatem korzystać z tzw. „zielonych funduszy” na modernizację swojej technologii.

4. Spojrzenie w przyszłość

W świetle przedstawionych wyżej argumentów z pewnością możemy stwierdzić, że realizacja konstrukcji prefabrykowanych z betonów wysokiej wytrzymałości to kwestia dnia dzisiejszego. Konieczne zmiany technologiczne w procesie produkcyjnych nie są bowiem na tyle kosztowne, aby nie gwarantowały szybkiego zwrotu nakładów inwestycyjnych.

Możliwość zwiększenia produktywności zakładu oraz zmniejszone koszty na wykonanie konstrukcji obiektów z prefabrykatów rekompensują zawiązką wyższe koszty składników masy betonowej. Powodują również zmniejszenie użycia stali zbrojeniowej oraz bardziej efektywne wykorzystanie właściwości betonu wysokowytrzymałego.

Potrzeba zatem jedynie zmiany mentalności oraz czasu na refleksję popartą globalną analizą ekonomiczną.

Ten krok pozwoli przygotować się do nowego rozdziału rozwoju technologicznego – jakim jest produkcja elementów z betonów ultrawysokowytrzymałych. Tutaj potrzeba jeszcze wielu prób w skali makro oraz koniecznych uregulowań normowych w stosunku do mieszanek betonowych. Parametry wytrzymałościowe takich betonów pozwolą z pewnością zastąpić w wielu przypadkach konstrukcje stalowe. I choć wydaje się nam, że potrzeba jeszcze tak wiele czasu – to warto sobie przypomnieć standardowe mieszanki betonowe w klasie wytrzymałości 15-20 MPa wykonywane w latach osiemdziesiątych. To było zaledwie 30 lat temu...

Konstrukcje prefabrykowane wykonywane z betonów wysokiej i ultra wysokiej wytrzymałości mogą stanowić dobrą alternatywę dla konstrukcji stalowych. Umożliwiają wdrożenie wizji architektów i uczestników rynku budowlanego nowej jakości i nowego wymiaru przestrzennego obiektu.

Literatura

- [1] M.Schmidt/R. Bornemann: Moeglichkeiten und Grenzen von Hoch- und Ultra-Hochfestem Beton ; 2000
- [2] M.Schmidt u. R. Boing: Rohstoff- und energiesparendes Konstruieren mit Beton. – Beton 47 (1997) H.7. s. 390-393
- [3] R.Bornemann u. E.Fehling: Ultrahochfester Beton – Entwicklung und Verhalten. In. Leipziger Massivbauseminar, Band 10. – s. 1-15, Leipzig 2000.
- [4] E.Gunkler, A.Becke: Tragfaehikeitssteigerung vorgespannter und schlafbewehrter Beton-Fertigteile durch hochfesten Beton, IfKI e.V , Detmold, 08.2000
- [5] Praca zbiorowa : Fertigteilkonstruktionen im Massivbau ss 2010; 1. Einfuehrung – Innovationen im Fertigteilbau; RWTH Aachen.