

Kierunki dalszego rozwoju konstrukcji z betonów prefabrykowanych – od B15 do C 110/115

W ubiegłym roku obchodziliśmy 100-lecie Hali Stulecia we Wrocławiu. Jubileusz niezwykle – jak na owe czasy – budowli z betonu projektu wybitnego architekta Maxa Berga stał się okazją do interesującej refleksji na temat technologii jej wznoszenia. Z pewnością niewielu spośród nas zauważyło, że jedną z głównych metod wznoszenia tego obiektu była prefabrykacja... a cały obiekt zrealizowano w zaledwie 16 miesięcy.

Ostatnie dziesięciolecia XX wieku oraz początek wieku XXI charakteryzują się niezwykle dynamicznym rozwojem technologii w zakresie konstrukcji maszyn i urządzeń oraz elektroniki. Proces ten umożliwia osiągnięcie kolejnego stopnia rozwoju w zakresie technologii projektowania i wytwarzania betonu. To z kolei stwarza coraz większe możliwości

Rys. 1. Zależność wytrzymałości betonu względem stosunku w/c [1]

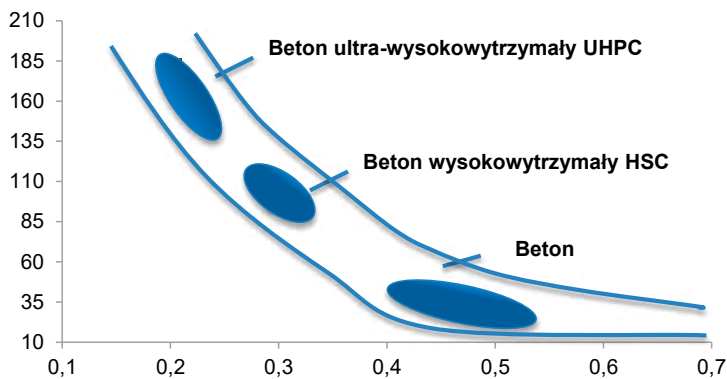


Tabela 1. Typowe receptury współczesnych betonów dla prefabrykatów

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	
Mączka krzemionkowa	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	Superplastyfikator	Superplastyfikator
Zawartość	% C	0,6	1,5	6,2

twórcze dla projektantów (zarówno architektów jak i konstruktorów) w kształtowaniu obiektów budowlanych. Mamy do czynienia z niezwykle twórczym procesem wzajemnego oddziaływania; z jednej strony realizacji najbardziej wysublimowanych produktów wyobraźni projektanta, a z drugiej (w odpowiedzi na to zapotrzebowanie) wzrastających możliwości technologicznych realizacji tych wizji. Obie przybierają obraz spirali, która rozwija się coraz szerzej począwszy od początku ludzkiej cywilizacji.

1. Ciągła innowacja

1.1. Pytania bez odpowiedzi – czy odpowiedzi bez pytania

W zagadnieniu konstrukcji z betonu największy postęp ma miejsce w projektowaniu i produkcji różnego rodzaju elementów prefabrykowanych. Prefabrykacja – dzięki podstawowemu miejscu wytwarzania prefabrykatu – jakim jest przemysłowo zakład produkcyjny – umożliwia wdrożenie najnowszych mieszanek betonowych i technologii ich wytwarzania. Konieczność osiągnięcia w krótkim czasie stosunkowo wysokich wytrzymałości betonu celem uzyskania powtarzalności procesu inicjuje kolejne potrzeby badań i projektowania nowych mieszanek.

Proces ten można nazwać ciągłym poszukiwaniem odpowiedzi na stawiane pytania powstałe w wyniku kolejnych odpowiedzi...

2. Materiał prefabrykatu

2.1. Przegląd

Idealny materiał dla prefabrykatu to urabialna mieszanka lepsza i wypełniacza, która po szybkim stwardnieniu będzie charakteryzować się następującymi właściwościami:

- wysoka wczesna wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie
- niska gęstość
- wysoki moduł odkształcalności liniowej Younga (E)
- wysoka szczelność.

Te cztery podstawowe własności stanowią dzisiaj permanentny przedmiot badań i prób. Dzięki rozwojowi chemii do betonu (plastyfikatory i upłynniacze), umożliwiających zmniejszenie stosunku w/c oraz stosowaniu wypełniaczy mineralnych możliwe jest uzyskiwanie coraz to wyższych wytrzymałości betonu i długotrwałości.

2.2. Beton wysokowartościowy (HSC) i beton ultrawysokowartościowy (UHPC)

Wysokie wytrzymałości osiąga się dzięki zmniejszeniu stosunku w/c przy stosowaniu plastyfikatorów i pyłów krzemionkowych. Przyczepność pomiędzy ziarnami wypełniaczy i cementem jest większa. Można to zaobserwować podczas prób niszczą-

cych betonu, w których obserwuje się przebieg rys ukośnych przez ziarna wypełniaczy, bez odłupywania się całych ziaren. Betony wysokowartościowe (HSC) osiągają wytrzymałości do 115 MPa; powyżej klasyfikuje się betony ultrawysokowartościowe (UHPC) o wytrzymałości na ściskanie od 150 MPa do 800 MPa (przy pielęgnacji cieplnej). Moduł odkształcalności liniowej Younga E osiąga wartości od 40 000 MPa do ponad 70 000 MPa [2].

Największe korzyści osiąga się przy zastosowaniu betonów wysokowartościowych i ultrawysokowartościowych w elementach prefabrykowanych słupów i dźwigarów. Prezentując poniższe przykłady dla słupów obciążonych siłą pionową $N_{Rd} = 39\ 000$ kN wymiarowanych dla różnych klas betonu (od C35/45 do C 160/185), można zauważyć możliwość oszczędności stali zbrojeniowej rzędu 75% przy zmniejszeniu przekroju słupa o 50%.

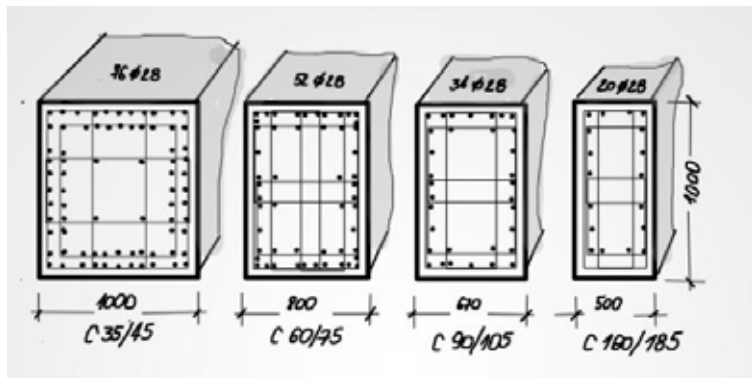
W przypadku stosowania tych betonów przy produkcji dźwigarów strunobetonowych podstawową zaletą jest przede wszystkim zmniejszenie ich wysokości konstrukcyjnej nawet o 55%.

W ostatnich latach wzrasta ilość standardowych zastosowań betonów wysokiej wytrzymałości w konstrukcjach prefabrykowanych w Polsce. Wymieniając tylko kilka przykładów ich zastosowań, jak Galeria Victoria w Wałbrzychu, Galeria Bronowice w Krakowie czy też obiekt chłodni kominowej w Kozienicach, można zauważyć, że wszędzie tam, gdzie poszukuje się zmniejszenia przekroju poprzecznego elementu prefabrykowanego (z uwagi na transport, montaż lub ograniczenia kubaturowe obiektu), istotne zastosowanie znajdują betony wysokowartościowe. Kilka zakładów prefabrykacji w Polsce opanowało już seryjną obróbkę tego typu prefabrykatów i zauważając oszczędności w ilości m^3 produktu, stosuje tę technologię coraz częściej.

Na poniższym rysunku prezentowany jest przekrój poprzeczny dźwigara – podciągu konstrukcyjnego w Galerii Bronowice. Podciąg ten o rozpiętości 16 mb wg założeń projektu przejmuje obciążenia użytkowe od ciężaru własnego stropów obustronnych o rozpiętości również 16 mb; obciążenie użytkowe stropów powyżej 10 kN/m².

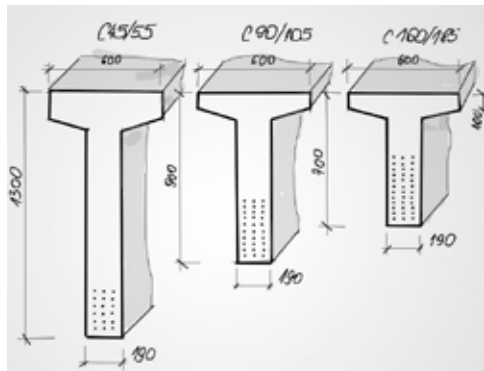
Ze względu na ograniczenia wysokości kondygnacji pierwotny podciąg projektowany jako żelbetowy – wylewany na budowie – o wysokości 1600 mm należało ograniczyć do wysokości 1300 mm. Projektant przyjął element prefabrykowany o przekroju poprzecznym w strefie środkowej wg prezentowanego rysunku. Całkowita objętość dźwigara wyniosła 11,4 m³ i była dwukrotnie mniejsza od objętości równoważnej mu w nośności belki monolitycznej.

3. Węzły pomiędzy elementami prefabrykowanymi wykonanymi z betonów wysokowartościowych
Przy istotnym zmniejszeniu przekroju poprzecznego elementów prefabrykowanych wynikających z zastosowania betonów wysokowartościowych i ultrawysokowartościowych wzrasta znaczenie właściwego wykonania ich wzajemnego połączenia. Ze względu na właściwości tych betonów połączenia spawane przy zastosowaniu marek stalowych lub połączenia monolityzowane na budowie w zasadzie nie mogą być stosowane. Uwarunkowania techniczne budowy nie pozwalają bowiem

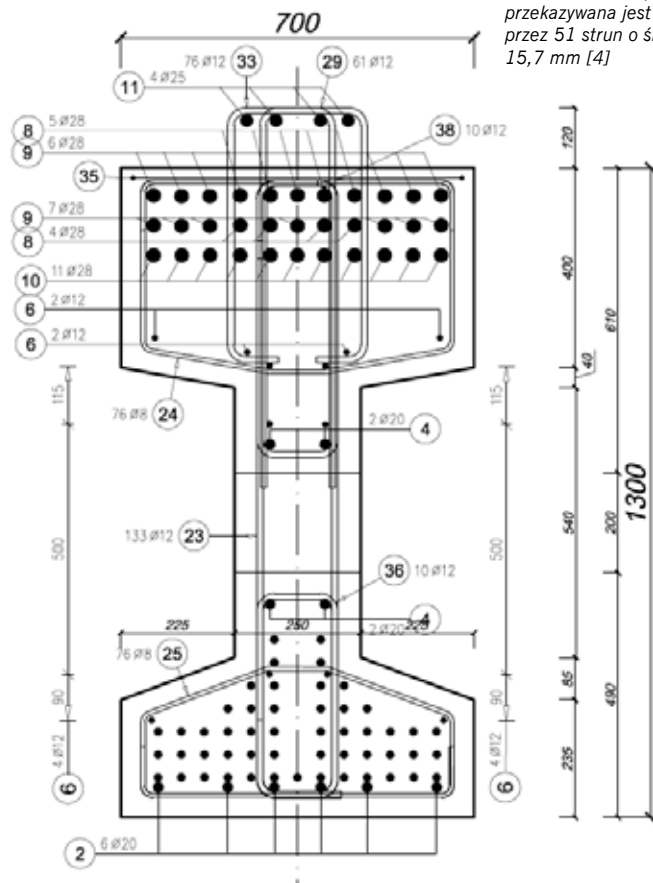


na stosowanie technik spawalniczych, które byłyby neutralne dla elementu prefabrykowanego ani na stosowanie do zmonolityzowania betonów o klasach wyższych niż C70/85. Pozostają zatem wyrafinowane złącza śrubowe i niekurczliwe zaprawy montażowe o wysokich właściwościach wytrzymałościowych.

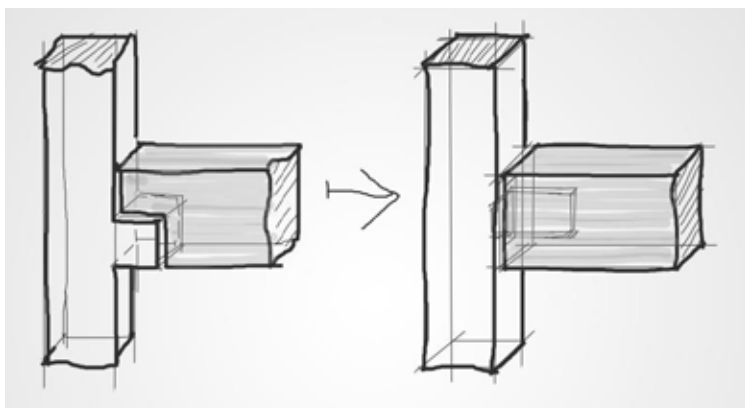
Rys. 2. Możliwości oszczędności przekroju słupa i zbrojenia ściskanego dzięki zastosowaniu betonów wysokowartościowych [3]



Rys. 3. Przekroje poprzeczne dla dachowych dźwigarów strunobetonowych o rozpiętości 27 mb i obciążeniu użytkowym od ciężaru własnego $g = 4,0$ kN/mb i od śniegu $s = 6,0$ kN/mb [3]



Rys. 4. Przekrój podciągu strunobetonowego w klasie betonu C90/105 o rozpiętości 16 mb.; siła sprężająca przekazywana jest na beton przez 51 strun o średnicy 15,7 mm [4]



Rys. 5. Ukryte wsporniki belek w elementach prefabrykowanych

3.1. Istota konstruowania współczesnych połączeń elementów prefabrykowanych

Węzły pomiędzy elementami prefabrykowanymi winny uwzględniać odpowiednie przekazanie obciążeń na elementy podpierające oraz umożliwienie odkształceń tych elementów w projektowanym zakresie lub usztywnienie połączenia.

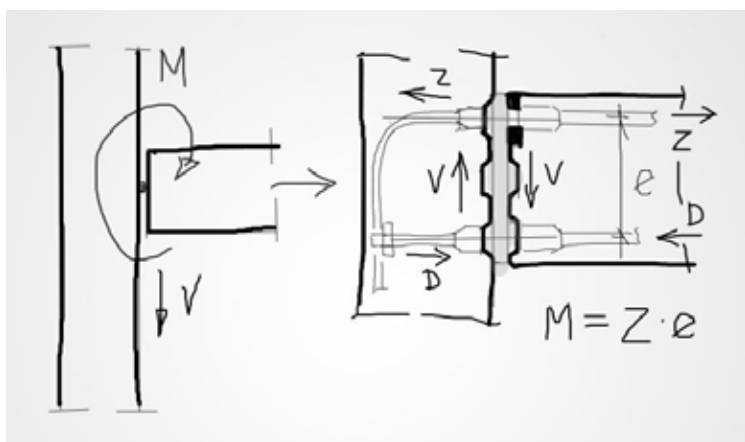
3.2. Połączenia belek i słupów

Klasycznym zagadnieniem jest wykonanie połączenia pomiędzy belką a słupem. W przypadku stosowania betonów o wyższych klasach wytrzymałości zmniejszają się przekroje poprzeczne łączonych elementów przy tych samych lub nawet większych obciążeniach. Z tego względu istotne jest stosowanie inteligentnych rozwiązań połączeń wykorzystujących wysokogatunkowe stale z jednoczesnym zagwarantowaniem zwyczajowej tolerancji montażu elementu prefabrykowanego.

3.2.1. Połączenia przegubowe

Zmniejszone wysokości belek z betonów wysokiej wytrzymałości niejednokrotnie nie pozwalają na wykształcenie podcięć do oparcia belki na wsporniku słupa (przy jednoczesnym minimalizowaniu wysokości konstrukcji). Z tego powodu stosowanie standardowych wsporników wykształconych w słupach i ewentualnych podcięć na nie w opieranych na słupach belkach coraz częściej zastępowane jest przez tzw. ukryte wsporniki belek. Elementy te, wykonane ze stali o wyższej granicy plastyczności, zakotwione w końcówkach belek wysuwane są na etapie montażu w zabetonowane przednio gniazdo w słupie. Całe złącze stykowe zalewane jest po zmontowaniu zaprawą wysokiej wytrzymałości, tworząc czysty i czytelny obraz połączenia – chętnie przyjmowany przez architekta.

Rys. 6. Przykładowe rozwiązanie koncepcyjne przekazania momentu zginającego w węzle pomiędzy elementami prefabrykowanymi



3.2.2. Węzły sztywne

W przypadku konieczności przeniesienia w węzle momentów zginających wykorzystujemy tutaj elementy łączące przenoszące tzw. pary sił (rozciągających i ściskających). I tutaj również w sytuacji zmniejszonych przekrojów poprzecznych łączonych elementów zmniejsza się możliwe ramie pary sił. Skompensowanie tej redukcji możliwe jest jedynie przez zastosowanie łączników śrubowych różnego rodzaju o podwyższonych nośnościach na rozciąganie.

4. Spojrzenie w przyszłość – wnioski

Ostatnie 50 lat w technologii prefabrykowanej to zmiana standardowej klasy wytrzymałości betonu elementu prefabrykowanego z 20 MPa do 45-55 MPa. Jak pokazano, w ostatnim dziesięcioleciu sięga się coraz częściej do wytrzymałości powyżej 90 MPa (jakkolwiek krajowe uregulowania normowe nie pokazują, w jaki sposób należy uwzględniać to w wymiarowaniu elementów). Powoduje to konieczność stosowania cementów wyższych klas, stosowania coraz bardziej wyrafinowanych dodatków dla uzyskania minimalnej ilości wody zarobowej przy maksymalnej urabialności i szczelności mieszanki. Daje to jednak konkretne zyski w postaci zmniejszenia przekroju poprzecznego elementu (a więc ciężaru) i ilości zbrojenia konstrukcyjnego. W aspekcie ekologicznym produkcja prefabrykatów staje się mniej energochłonna, a więc następuje zmniejszenie również emisji dwutlenku węgla. Architekt może korzystać z bardziej wytrzymałej, a jednak coraz bardziej filigranowej struktury konstrukcyjnej. Wyzwaniem staje się wykonanie efektywnych i sprawnych połączeń elementów przenoszących większe obciążenia przy zmniejszeniu powierzchni styku.

Zatem poruszamy się w rozwoju technologii prefabrykacji po pewnej spirali rozwoju; w której osiągnięcie kolejnego poziomu otwiera możliwości do dalszego wzrostu. Z pewnością w najbliższych dziesięcioleciach będziemy świadkami kolejnej rewolucji technologicznej w obszarze konstrukcji prefabrykowanych z wykorzystaniem betonów kompozytowych, konstrukcji zespolonych z wielu różnych rodzajów materiałów konstrukcyjnych...

Stawiane pytanie oczekuje swojej odpowiedzi, która umożliwi postawienie kolejnego pytania.

mgr inż. Krzysztof Janczura
Stowarzyszenie Producentów Betonów

Literatura

- 1 Blobner A.; Israel D.; Moeller W, Winzer R.; Silicafreier hochfester Beton mit Dyckerhoff Veridur; Beton – Informationen 2004-1.
- 2 Dehn, F.: Verbundkonstruktionen mit ultrahochfestem Beton fuer den Bruecken- und Hochbau; Ultrahochfester Beton; Leipzig 2004.
- 3 Fertigteilkonstruktionen im Massivbau SS2010; IMB Lehrstuhl und Institut fuer Massivbau, RWTH AACHEN
- 4 Gonczarek Z.: Projekt wykonawczy biura MiW poz. B_B_01_00_503_C; Wrocław 2012

Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych Konferencji Dni Betonu 2014