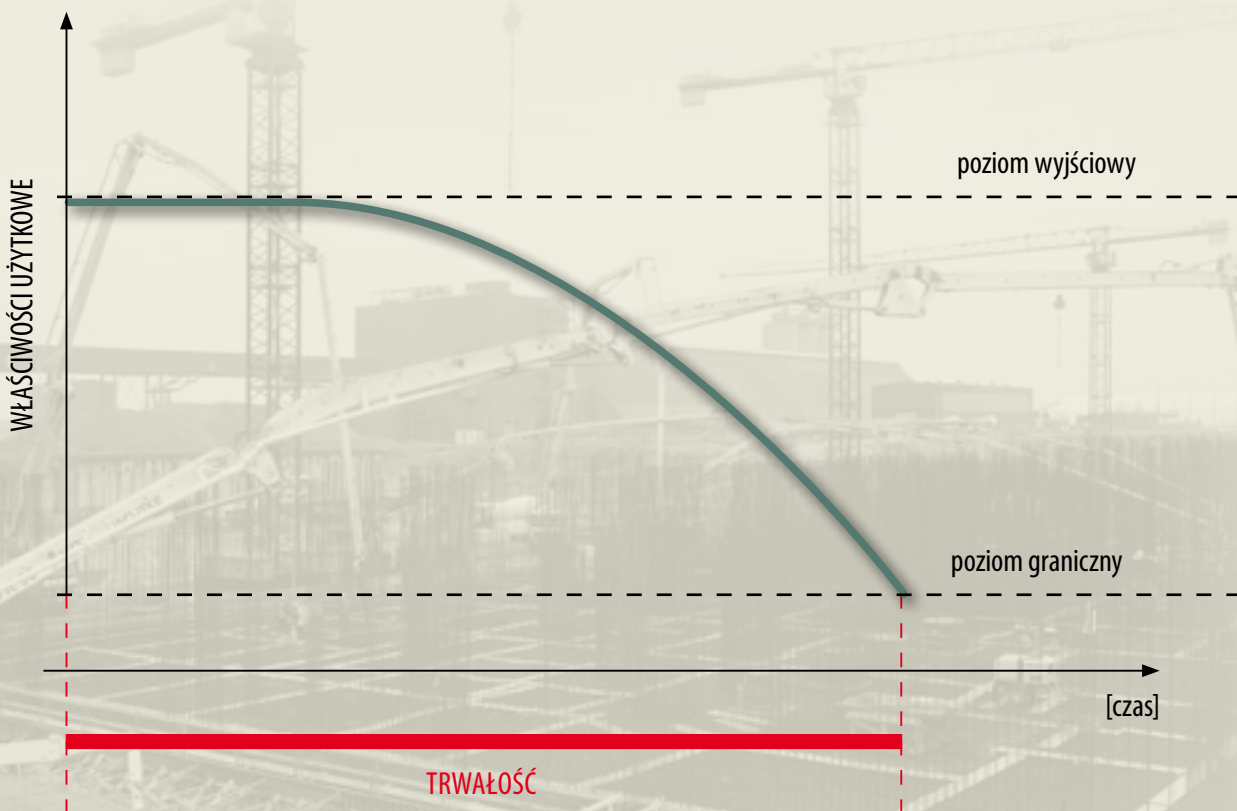


Stosowanie w obiektach inżynierii komunikacyjnej (mosty, wiadukty) betonów cechujących się wysoką wytrzymałością oraz odpornością na korozyjne oddziaływanie środowiska jest konsekwencją konieczności zapewnienia trwałości konstrukcji. Trwałość, definiowana jest jako zdolność konstrukcji/elementu do spełnienia wyznaczonej przez projekt funkcji, w określonym czasie i warunkach środowiska (rys. 1).



Rys. 1. Trwałość konstrukcji

Wymagania w zakresie trwałości konstrukcji/obiektów inżynierii komunikacyjnej zawarte są w ciągle obowiązującym Rozporządzeniu Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz.U. Nr 63/2000, poz. 735), zwane w dalszej części tekstu Rozporządzeniem. W myśl rozporządzenia, przy ocenie trwałości, „należy wziąć pod uwagę nie tylko cechy fizyczne i mechaniczne określone dla poszczególnych wyrobów w Polskich Normach lub Aprobatach Technicznych, lecz również odporność na oddziaływanie środowiska uwzględniająca czynniki określone w Polskich Normach”.

Do niedawna w zapisach specyfikacji technicznych oraz warunków wykonania obiektów funkcjonowały tylko zapisy wprost zaczerpnięte z przywołanego wyżej Rozporządzenia, które w obszarze materiałowym bardzo ograniczały możliwości kształtowania cech i właściwości betonu zastosowanego do konstrukcji inżynierskiej.

Zgodnie z zapisami Rozporządzenia, w obiektach inżynierii komunikacyjnej można zastosować tylko cement portlandzki CEM I niskoalkaliczny NA o odpowiednim składzie mineralnym, tj.:

- zawartość krzemianu trójwapniowego (alitu) $C_3S \leq 60\%$,
- zawartość glinianu trójwapniowego $C_3A \leq 7\%$,
- zawartość sumy składników $(C_4AF + 2 \times C_3A) \leq 20\%$.

Powyższe ograniczenia całkowicie eliminują możliwość stosowania cementów zawierających inne niż klinkier portlandzki, składniki główne, jak np. popioły lotne, granulowany żużel wielkopiecowy, wapien. Z licznych doświadczeń, np. wykonania głównych elementów konstrukcji tunelu w ciągu węzła drogowego „HULANKA” w Bielsku-Białej (rys. 2) w oparciu o cement CEM II/B-S 42,5N, czy mostu Milenium we Wrocławiu (rys. 3), wynika, że cementy z udziałem granulowanego żużla wielkopiecowego, pozwalają korzystnie kształtować trwałość betonu, w kontekście odporności na działanie środowisk agresywnych chemicznie.

Podobne ograniczenia dotyczyły możliwości stosowania kruszyw w obiektach inżynierii komunikacyjnej, w praktyce wskazując tylko dwa dopuszczalne rodzaje kruszywa grubego, tj.: grysy granitowe lub bazaltowe, z jednoczesnym wskazaniem bardzo restrykcyjnych kryteriów, jakie muszą spełnić.



Rys. 2. Węzeł Hulanka w Bielsku-Białej

W ostatnich latach Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, celem wsparcia projektantów i technologów (specyfikujących) w procesie projektowania i wykonawstwa trwałych konstrukcji inżynierskich, opracowała Ogólne Specyfikacje Techniczne *Beton konstrukcyjny* oraz *Nawierzchnia Betonowa*. Wytyczne te w połączeniu z zapisami normy *PN-EN 206+A1:2016 Beton Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność* (na dzień powstania niniejszej publikacji w zapisach OST przywoływana jest jeszcze norma *PN-EN 206-1 Beton - Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*, jednak celem twórców OST było stosowanie aktualnych dokumentów odniesienia), wprowadzają zupełnie nową jakość w dotychczasowym podejściu.



Rys. 3. Most Millenijny we Wrocławiu

OST stanowią podstawę opracowania szczegółowej specyfikacji technicznej stosowanej jako dokument przetargowy i kontraktowy przy i realizacji robót w obrębie obiektów inżynierii komunikacyjnej a w odwołaniach do norm przywołuje normy wzajemnie spójne, aktualne i nie stojące w sprzeczności z obecnym stanem wiedzy w dziedzinie technologii betonu.

Zgodnie z wytycznymi zawartymi w OST projektant identyfikuje i określa środowisko pracy (klasę ekspozycji wg PN-EN 206+A1:2016) konstrukcji (elementu). Klasa ekspozycji –oddziaływanie środowiska na konstrukcję – determinuje:

- dopuszczone do stosowania w składzie betonu rodzaje składników,
- maksymalny współczynnik wodno-cementowy (w/c),
- minimalną zawartość cementu,
- minimalną wytrzymałość na ściskanie betonu – klasa wytrzymałości na ściskanie betonu,
- rodzaj cementu, minimalne napowietrzenie betonu i wymagania dla kruszyw (dla niektórych klas środowiskowych).

Podstawowe wymagania w zakresie składu betonu i cech wytrzymałościowych według wymagań normy PN-EN 206+A1:2016 podano w tabeli 1.

Tabela 1. Klasy ekspozycji i wymagania dotyczące betonu wg PN-EN 206+A1:2016 Beton Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność

| Klasa ekspozycji | | Środowisko | Maks. współczynnik w/c | Min. zawartość cementu [kg/ m ³] | Min. klasa wytrzymałości betonu |
|---|-----|--|------------------------|--|---------------------------------|
| Brak ryzyka korozji lub brak oddziaływania | X0 | nieagresywne | - | - | C12/15 |
| Korozja wywołana karbonatyzacją | XC1 | suche | 0,65 | 260 | C20/25 |
| | XC2 | stałe mokre | 0,60 | 280 | C25/30 |
| | XC3 | umiarkowanie wilgotne | 0,55 | 280 | C30/37 |
| | XC4 | cyklicznie mokre i suche | 0,50 | 300 | C30/37 |
| Korozja wywołana chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej | XD1 | umiarkowanie wilgotne | 0,55 | 300 | C30/37 |
| | XD2 | mokre, sporadycznie suche | 0,55 | 300 | C30/37 |
| | XD3 | cyklicznie mokre i suche | 0,45 | 320 | C35/45 |
| Korozja wywołana chlorkami pochodzącymi z wody morskiej | XS1 | działanie soli zawartych w powietrzu | 0,50 | 300 | C30/37 |
| | XS2 | stałe zanurzenie w wodzie | 0,45 | 320 | C35/45 |
| | XS3 | strefa pływów, rozbryzgów i aerozoli | 0,45 | 340 | C35/45 |
| Agresja mrozowa ^{1,3)} | XF1 | umiarkowane nasycenie wodą | 0,55 | 300 | C30/37 |
| | XF2 | umiarkowane nasycenie wodą ze środkami odładzającymi | 0,55 | 300 | C25/30 |
| | XF3 | silne nasycenie wodą bez środków odładzających | 0,50 | 320 | C30/37 |
| | XF4 | silne nasycenie wodą ze środkami odładzającymi | 0,45 | 340 | C30/37 |
| Środowisko agresywne chemicznie ²⁾ | XA1 | słaba agresja chemiczna | 0,55 | 300 | C30/37 |
| | XA2 | umiarkowana agresja chemiczna | 0,50 | 320 | C30/37 |
| | XA3 | silna agresja chemiczna | 0,45 | 360 | C35/45 |

1) – kruszywo zgodne z PN-EN 12620+A1:2010 o odpowiedniej odporności na zamrażanie/rozmarzanie

2) – powyżej klasy ekspozycji XA1 – w przypadku agresji siarczanowej należy stosować cementy odporne na siarczany SR, HSR

3) – dla klas ekspozycji XF2, XF3, XF4 minimalne napowietrzenie 4,0%

Zakłada się, że beton wykonany według wymagań zawartych w tabeli 1, będzie trwały przez minimum 50 lat w środowisku (klasie ekspozycji) dla którego został zaprojektowany. Gwarantem trwałości betonu jest prawidłowa zabudowa mieszanki betonowej (ułożenie w deskowaniu, zagęszczenie) oraz odpowiednia pielęgnacja. Równie istotne jest przestrzeganie zasad właściwej konserwacji i użytkowania wykonanej konstrukcji (obiektu budowlanego).

Ogólne Specyfikacje Techniczne dot. betonu konstrukcyjnego zwracają szczególną uwagę na trwałość betonu w 3 klasach oddziaływań środowiska:

1. agresja spowodowana zamrażaniem / rozmrażaniem (bez lub z zastosowaniem środków odładzających), gdzie beton powinien wykazywać odporność na działanie mrozu oznaczoną stopniem mrozoodporności według procedury zawartej w normie *PN-B-06250 Beton zwykły*:
 - \geq F100 w klasie ekspozycji XF1 (wymagana liczba cykli: 100),
 - \geq F150 w klasie ekspozycji XF2 i XF3 (wymagana liczba cykli: 150),
 - \geq F200 w klasie ekspozycji XF4 (wymagana liczba cykli: 200),
2. agresja chemiczna, gdzie beton powinien wykazywać odporność na penetrację wody pod ciśnieniem według *PN-EN 12390-8 Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem* mierzoną maksymalną głębokością penetracji:
 - \leq 60 mm w klasie ekspozycji XA1,
 - \leq 50 mm w klasie ekspozycji XA2,
 - \leq 40 mm w klasie ekspozycji XA3,
3. korozja spowodowana chlorkami w klasach ekspozycji XD3 i XS3, gdzie beton powinien wykazywać odporność na penetrację wody pod ciśnieniem według *PN-EN 12390-8 Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem* mierzoną maksymalną głębokością penetracji nie większą niż 40 mm.

Składniki mieszanki betonowej powinny być dobrane do określonego rodzaju betonu z uwzględnieniem:

- warunków realizacji robót,
- przeznaczenia betonu,
- warunków pielęgnacji,
- wymiarów konstrukcji,
- warunków środowiska, na jakie narażona będzie konstrukcja.

Skład mieszanki betonowej powinien być dobrany w taki sposób, aby przy możliwie najmniejszej ilości wody, zapewnić szczelne ułożenie mieszanki w deskowaniu przy zagęszczaniu przez wibrowanie.

Współczynnik w/c nie powinien być większy niż 0,45 dla klas betonu C30/37 i wyższej oraz nie większy niż 0,50 w przypadku betonu klasy C25/30.

Najistotniejszym elementem wprowadzanym przez OST, w porównaniu do przywołanego Rozporządzenia z 2000r., jest zmiana podejścia w zakresie dopuszczonego do stosowania cementu. Zgodnie z OST dopuszcza się do stosowania cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II oraz cementy hutnicze CEM III (tabela 2) i możliwe jest stosowanie dodatków typu II.

Tabela 2. Wymagania OST odnośnie cementu dla betonu konstrukcyjnego w drogowym obiekcie inżynierskim

| Rodzaj betonu | Wymagania odnośnie cementu |
|---|---|
| Beton konstrukcyjny | Cement portlandzki CEM I o całkowitej zawartości alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ wg PN-EN 196-2 \leq 0,8 % i początku wiązania wg PN-EN 196-3 \geq 120 minut. |
| | Cement portlandzki żuźlowy CEM II/A-S o całkowitej zawartości alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ wg PN-EN 196-2 \leq 0,8 %. |
| | Cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S o całkowitej zawartości alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ wg PN-EN 196-2 \leq 0,9 %. |
| Beton konstrukcyjny sprężony | Powinien być stosowany cement CEM I |
| Beton konstrukcyjny masywny | Zaleca się stosowanie cementów takich jak dla betonu konstrukcyjnego lecz o niskim ciepłe hydratacji LH. Dopuszcza się również stosowanie cementu hutniczego CEM III za wyjątkiem klasy ekspozycji XF4. |
| Beton konstrukcyjny w klasach ekspozycji XA2, XA3, XD3 i XS3 | Cement portlandzki CEM I odporny na siarczany SR wg PN-EN 197-1 lub cement odporny na siarczany HSR – cement hutniczy CEM III/A i cement portlandzki żuźlowy CEM II/A, B-S wg PN-B-19707. |
| Dopuszcza się, w razie potrzeby, zastosowanie cementów o wysokiej wytrzymałości wczesnej (R). | |
| Do betonu klasy wytrzymałości na ściskanie wyższej niż C30/37 powinien być stosowany cement klasy nie niższej niż 42,5. | |

Maksymalna zawartość cementu w mieszance betonowej nie powinna być większa niż:

- 400 kg/m³ dla betonu klasy C25/30,
- 450 kg/m³ dla betonów klasy C30/37 i wyższych.

Jednocześnie, w klasach ekspozycji XD3 i XS3 minimalna zawartość cementu nie powinna być niższa niż 380 kg/m³, a współczynnik w/c nie wyższy niż 0,40.

Ogólne Specyfikacje Techniczne uwzględniają różnice w czasie uzyskania założonych cech trwałościowych betonu przy zastosowaniu w jego składzie cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II i cementów hutniczych CEM III w porównaniu do zastosowania cementu portlandzkiego CEM I. Wprowadzony zostaje czas równoważny (tabela 3), w celu określania właściwości betonu, szczególnie istotnych dla trwałości betonu, takich jak np. mrozoodporność, odporność na karbonatyzację, głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.

Tabela 3. Wymagania dotyczące czasu wykonywania badań (czas równoważny) w zależności od zastosowanego rodzaju cementu.

| Rodzaj cementu | Czas równoważny |
|--|-----------------|
| CEM I (R), CEM II/A-S (R) | 28 dni |
| CEM I (N), CEM II/A-S (N), CEM II/B-S (N, R) | 56 dni |
| CEM III/A | 90 dni |

Do betonu konstrukcyjnego wg OST należy stosować kruszywa naturalne zgodne z wymaganiami *PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu*, przy czym wymagany jest system oceny zgodności 2+. Dopuszcza się do stosowania kruszywo grube o maksymalnym wymiarze ziarna $\leq 31,5$ mm (tabela 4), kruszywo drobne o uziarnieniu ≤ 4 mm (tabela 5).

Kruszywo stanowi około 70% objętości betonu i ma wpływ na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. Kruszywo należy dobrać z uwzględnieniem:

- właściwości geometrycznych,
- właściwości fizykomechanicznych,
- obecności składników szkodliwych,
- agresywności środowiska, w jakim będzie pracować konstrukcja.

Ze względu na geometryczne właściwości kruszywa należy podczas jego doboru uwzględnić geometrię i kubaturę konstrukcji oraz układ zbrojenia w elemencie konstrukcji. OST wskazuje, iż maksymalny nominalny wymiar ziaren kruszywa należy dobrać uwzględniając otulinę zbrojenia oraz minimalną szerokość przekroju elementu. Ziarna kruszywa nie powinny być większe niż:

- 1/3 najmniejszego wymiaru przekroju poprzecznego elementu,
- 3/4 odległości w świetle między prętami zbrojenia leżącymi w jednej płaszczyźnie prostopadłej do kierunku betonowania.

Tabela 4. Wymagania dla kruszywa grubego

| Właściwości kruszywa | | Wymagania |
|--|-----------------------------------|-----------------------------|
| Uziarnienie według PN-EN 933-1 w zależności od wymiaru kruszywa kategoria nie niższa niż: | $D/d \leq 2$ lub $D \leq 11,2$ mm | G_c 85/20 |
| | $D/d > 2$ i $D > 11,2$ mm | G_c 90/15 |
| Tolerancja uziarnienia w zależności od wymiaru kruszywa, kategorie: | $D/d < 4$ | G_T 15 |
| | $D/d \geq 4$ | G_T 17,5 |
| Zawartość pyłów wg PN-EN 933-1 | | $\leq f_{1,5}$ |
| Kształt kruszywa grubego wg PN-EN 933-3 lub PN-EN 933-4 | | $\leq FI_{20} \leq SI_{20}$ |
| Procentowa zawartość ziaren o powierzchni przekruszonej i łamanej w kruszywie grubym wg PN-EN 933-5 | | $\leq C_{100/0}$ |
| Mrozoodporność wg PN-EN 1367-6 w 1 % NaCl, badana na kruszywie o wymiarze 8/16 oraz odporność kruszywa na rozdrabnianie wg PN-EN 1097-2 badana na kruszywie o wymiarze 10/14, rozdz.5, | $\leq 6\%$ | $\leq LA_{25}$ |
| | $\leq 2\%$ | $\leq LA_{40}$ |
| "Zgorzel słoneczna" bazaltu wg PN-EN 1367-3, badana na kruszywie o wymiarze 10/14, kategoria: | | SB_{LA} |

Tabela 4. Wymagania dla kruszywa grubego cd.

| Właściwości kruszywa | Wymagania |
|---|---|
| Gęstość ziaren wg PN-EN 1097-6, rozdz. 7,8 lub 9 | deklarowana przez producenta |
| Gęstość nasypowa wg PN-EN 1097-3 | deklarowana przez producenta |
| Nasiąkliwość wg PN-EN 1097-6 rozdz. 7,8 lub 9 | WA ₂₄ deklarowana przez producenta |
| Skład chemiczny - uproszczony opis petrograficzny wg PN-EN 932-3 | deklarowany przez producenta |
| Reaktywność alkaliczno - krzemionkowa; stopień potencjalnej reaktywności wg PN-B-06714 - 46 | stopień potencjalnej reaktywności 0 ¹⁾ |
| Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie według PN-EN 1744-1, rozdz.12 | ≤ AS _{0,2} |
| Zawartość siarki całkowitej według PN-EN 1744-1, rozdz.11 | ≤ 1% |
| Zawartość chlorków rozpuszczalnych w wodzie według PN-EN 1744-1, rodz.7 | ≤ 0,02% |
| Zanieczyszczenia lekkie według PN-EN 1774-1 p. 14.2 | ≤ 0,1% |
| Zawartość substancji organicznych według PN-EN 1744-1, p.15.1 | barwa nie ciemniejsza niż wzorcowa |
| 1) jeżeli badane kruszywo odpowiada 1 stopniowi potencjalnej reaktywności alkalicznej należy wykonać badanie dodatkowe zgodnie z PN-B-06714-34; dopuszczenie do zastosowania przy spełnieniu wymagań: reaktywność alkaliczna z cementem nie wywołująca zwiększenia wymiarów liniowych większych niż 0,1 % | |

Tabela 5. Wymagania dla kruszywa drobnego

| Właściwości kruszywa | Wymagania |
|--|---|
| Uziarnienie według PN-EN 933-1 ; wymagana kategoria: | G _F 85 |
| Zawartość pyłów według PN-EN 933-1; kategoria | ≤ f ₃ |
| Tolerancje deklarowanego typowego uziarnienia kruszywa drobnego | zgodnie z tablicą C.1 w normie PN-EN 12620 |
| Gęstość ziaren według PN-EN 1097-6, rozdz. 7, 8 lub 9 | deklarowana przez producenta |
| Gęstość nasypowa według PN-EN 1097-3 | deklarowana przez producenta |
| Reaktywność alkaliczno - krzemionkowa; stopień potencjalnej reaktywności według PN-B-06714-46 | stopień potencjalnej reaktywności 0 ¹⁾ |
| Zawartość siarczanów rozpuszczalnych w kwasie według PN-EN 1744-1, rozdz.12; kategoria: | ≤ AS _{0,2} |
| Zawartość siarki całkowitej według PN-EN 1744-1, rozdz.11; | ≤ 1% |
| Zanieczyszczenia lekkie według PN-EN 1774-1, p. 14.2; wartość | ≤ 0,5% |
| Zawartość substancji organicznych według PN-EN 1744-1, p.15.1 | barwa nie ciemniejsza niż wzorcowa |
| 1) jeżeli badane kruszywo odpowiada 1 stopniowi potencjalnej reaktywności alkalicznej należy wykonać badanie dodatkowe zgodnie z PN-B-06714-34; dopuszczenie do zastosowania przy spełnieniu wymagań: reaktywność alkaliczna z cementem nie wywołująca zwiększenia wymiarów liniowych większych niż 0,1 %. | |

OST zwraca uwagę na zawartość w stosie okrucowym frakcji ≤ 2 mm, powinna być możliwie niska, ale jednocześnie musi zapewnić niezbędną urabialność, przy zagęszczeniu przez wibrowanie, tzn.:

- ≤ 42 % w przypadku mieszanki o uziarnieniu do 16,0 mm,
- ≤ 38 % w przypadku mieszanki o uziarnieniu do 22,4 mm,
- ≤ 37 % w przypadku mieszanki o uziarnieniu do 31,5 mm.

W zakresie komponowania stosu okrucowego mieszanki betonowej OST podaje graniczne krzywe uziarnienia, które przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Zalecane graniczne krzywe uziarnienia kruszywa do betonu wg OST

| Sito # [mm] | Ułamek masowy kruszywa przechodzącego przez sito [%] | | |
|----------------|--|-----------------|-----------------|
| | wymiar kruszywa | wymiar kruszywa | wymiar kruszywa |
| | D ≤ 16,0 mm | D ≤ 22,4 mm | D ≤ 31,5 mm |
| 0,25 | 3÷8 | 2÷9 | 2÷8 |
| 0,5 | 7÷20 | 5÷17 | 5÷18 |
| 1 | 12÷32 | 9÷26 | 8÷28 |
| 2 | 21÷42 | 16÷38 | 14÷37 |
| 4 | 36÷56 | 28÷51 | 23÷47 |
| 8 | 60÷76 | 45÷67 | 38÷62 |
| 16 | 100 | 73÷91 | 62÷80 |
| 22,4 | - | 100 | 76÷92 |
| 31,5 | - | - | 100 |

Stosowanie domieszek chemicznych, w betonie konstrukcyjnym według OST, odnosi się bezpośrednio do wymagań i zaleceń normy PN-EN 206+A1:2016 *Beton Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*, głównie w zakresie zalecanego napowietrzenia betonu jako zabezpieczenia strukturalno-materiałowego w klasach ekspozycji XF2, XF3, XF4 (tabela 7).

Tabela 7. Zawartość powietrza w mieszance betonowej wg OST

| Wymiar kruszywa D [mm] | Etap wykonywania badań | | Tolerancja pomiarowa, [%] |
|------------------------|---|--|---------------------------|
| | Projektowanie składu mieszanki betonowej, [%] | Zatwierdzanie recepty, próba technologiczna, kontrola jakości robót, [%] | |
| 16 | 4,5 ÷ 6,0 | 4,5 ÷ 6,5 | -0,5 +1,0 |
| 22,4 | 4,0 ÷ 5,5 | 4,0 ÷ 6,0 | |
| 31,5 | 4,0 ÷ 5,5 | 4,0 ÷ 6,0 | |

Dopuszczalne jest stosowanie domieszek modyfikujących właściwości mieszanki betonowej lub stwardnieńgo betonu, poprawiających właściwości betonu lub zapewniających właściwości specjalne.

Dopuszczalne jest również stosowanie pyłu krzemionkowego (zgodnego z PN-EN 12623) jako dodatku typu II do betonu.

Ogólne Specyfikacje Techniczne dopuszczają do stosowania konsystencję mieszanki betonowej, badaną według metody opadu stożka zgodnie z PN-EN 12350-2:2011 *Badania mieszanki betonowej - Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka*, w klasach S2 (50÷90 mm) lub S3 (100÷150 mm).



Rys. 4. Most Rędziński we Wrocławiu



Rys. 5. Estakada na obwodnicy Kłodzka