

Właściwości betonów zwykłych oraz wysokiej wytrzymałości – porównanie wyników doświadczalnych z wytycznymi normowymi

PROPERTIES FOR NORMAL AND HIGH STRENGTH CONCRETE –
COMPARISON BETWEEN EXPERIMENTAL RESULTS AND GUIDELINES
CONTAINED IN STANDARDS

Streszczenie

Obecnie na rynku betonu towarowego najpowszechniej stosowaną klasą betonu jest C30/37. Jednak zmniejszająca się w miastach powierzchnia terenów pod zabudowę spowodowała powstanie trendu budowania obiektów wysokich tzw. „drapaczy chmur”. Trend ten wymusza na konstruktorach stosowanie materiałów o coraz wyższych parametrach technicznych. Przykładami takich materiałów są betony o niestandardowo wysokich wytrzymałościach oraz stal wysokiej wytrzymałości, których zastosowanie pozwala na wznoszenie obiektów wielokondygnacyjnych przy jednoczesnym zmniejszeniu przekrojów elementów konstrukcyjnych, a co za tym idzie zwiększenie powierzchni użytkowej budynków.

W artykule przedstawiono opis i wyniki badań dwóch betonów wysokiej wytrzymałości oraz betonu zwykłego klasy C30/37. Przeprowadzono pomiary wytrzymałości na ściskanie na walcach i kostkach, wytrzymałości na rozciąganie osiowe, wytrzymałości na rozłupywanie na walcach i kostkach, wytrzymałości na zginanie oraz modułu Younga, nasiąkliwości, nasiąkliwości i mrozoodporności w solach. Otrzymane wyniki badań doświadczalnych porównano ze wzorami i metodami analitycznymi zawartymi w normach i wytycznych (Eurokod 2, Model Code 2010, ACI 318-14). Referat jest próbą połączenia teorii z praktyką, wartości tabelarycznych z wartościami uzyskiwanymi z badań.

Abstract

Currently concrete class C30/37 is a most commonly used type of concrete in the building industry. However, a constant decrease in the development land available in urban areas has spurred an increasing trend towards the construction of high rise and skyscraper buildings. Owing to this, engineers are often faced with the need to use high-strength class of materials with high-quality parameters. Examples of such materials include non-standard high-strength concrete classes and high-strength steel –whose application allows the construction of high rise buildings, with a simultaneous reduction in cross-section areas of structural elements, and finally –leads to an increase in the usable area of the building.

This paper describes the results of own analyses of three examined concrete samples, two high-strength concrete samples and one normal C30/37 class sample. Performed analyses included the compressive strength test (both cylinder and cube tests), axial tensile strength test, bending strength, Young modulus, water absorption and frost resistance (in saline conditions). Test results were summarised and compared with formulae and guidelines contained in standards (Eurocode 2, Model Code 2010, ACI 318-14). The goal of the paper is to combine theoretical approach with empirical evidence - i.e. normative values with actual test results.

1. Wstęp

Technologia projektowania i wykonywania betonów o wysokich wytrzymałościach jest dobrze znana i opisana, jednakże niewiele jest informacji o tym, jakimi, istotnymi z perspektywy projektanta konstrukcji, parametrami, poza wytrzymałością na ściskanie, charakteryzują się te materiały. Aktualnie obowiązujące normy i wytyczne, dotyczące projektowania konstrukcji, opisują korelacje pomiędzy klasą betonu, a wieloma innymi parametrami materiału, takimi jak: moduł sprężystości, czy wytrzymałość na rozciąganie osiowe. Szybki rozwój technologii betonu, objawiający się wykonywaniem materiałów o coraz wyższych parametrach wytrzymałościach, osiąganych m.in. dzięki stosowaniu zaawansowanych dodatków i domieszek chemicznych, sprawia, że zasadne staje się pytanie o aktualność zawartych w normach zależności, szczególnie tych dotyczących betonów wysokich klas.

W niniejszym artykule zostały przedstawione podstawowe badania wytrzymałościowe dwóch betonów wysokiej wytrzymałości C60/75 oraz C70/85 i jednego betonu zwykłego C30/35. Wyniki z badań doświadczalnych zostały porównane ze wzorami i metodami analitycznymi zawartymi w normach i wytycznych (Eurokod 2, Model Code 2010, ACI 318-14).

2. Wytyczne normowe

2.1. Wytrzymałość na ściskanie

Europejskie normy do projektowania konstrukcji żelbetowych w tym Eurokod 2 [11], jak i najnowsza wersja ModelCode [2] oraz norma PN-EN 206 [12] podają podstawowe wartości cech wytrzymałościowych betonu w zależności od przyjętej klasy. Poniżej przedstawiono fragment takiej tabeli. Polska wersja Eurokodu 2 [11] ogranicza się do klasy C90/105 natomiast w normie PN-EN 206 [12] i najnowszym ModelCode [2] występują klasy wyższe, odpowiednio do C100/115 i do C120/140.

Tabela 1. Fragment tabeli przedstawiającej właściwości betonu w zależności od wybranej klasy [11]

Klasa wytrzymałości betonu										
f_{ck} [MPa]	12	16	...	30	35	...	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ [MPa]	15	20	...	37	45	...	75	85	95	105

Norma ACI [1] podaje jedynie ile powinna wynosić minimalna wytrzymałość betonu na ściskanie na elementach walcowych f'_c w zależności od zastosowania (podano w tabeli poniżej) oraz w zależności od wybranej klasy ekspozycji (tab. 19.3.2.1 w [1]). Poprzednie wersje tej normy również podawały takie same kryteria. W normie amerykańskiej nie znajdziemy podziału betonu na klasy, w zmian za to znajdują się kryteria dotyczące mieszanki betonowej, jak np. stosunek w/c w zależności od przeznaczenia.

Tabela 2. Wymogi dotyczące wytrzymałości na ściskanie wg normy amerykańskiej [1]

Zastosowanie	Beton	Minimalne f'_c [psi] / [MPa]	Maksymalne f'_c [psi] / [MPa]
Elementy normalne	Normalny i Lekki	2500 / 17,24	Brak
Elementy specjalne	Normalny	3000 / 20,68	Brak
	Lekki	3000 / 20,68	5000 / 34,47

Eurokod 2 [11] oraz ModelCode [2] podają również, że wytrzymałość średnia na ściskanie $f_{cm} \geq f_{ck} + 8$ MPa. Natomiast norma PN-EN 206 [12] podaje, że $f_{cm} \geq f_{ck} + 4$ MPa. Norma amerykańska nie podaje takich wytycznych.

2.2. Wytrzymałość na rozciąganie osiowe, rozłupywanie i zginanie

Podobnie jak przy wytrzymałości na ściskanie, tak i przy wytrzymałości na rozciąganie Eurokody [11] i ModelCode [2] podają ile powinna wynosić średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie osiowe w zależności od przyjętej klasy betonu. Dodatkowo podane są również dolne (równe $0,7f_{ctm}$) i górne ($1,3f_{ctm}$) wartości wytrzymałości charakterystycznej na rozciąganie osiowe.

Eurokod 2 [11] i ModelCode [2] podają również, że wartość średnią wytrzymałości na rozciąganie można wyliczyć analitycznie, bazując na znanej wartości wytrzymałości na ściskanie na walcu f_{ck} . Poniżej podano odpowiednie wzory:

$$f_{ctm} = 0,3(f_{ck})^{2/3} \quad \text{dla klasy betonu} \leq C50$$

$$f_{ctm} = 2,12 \ln(1 + 0,1(f_{ck} + 8 \text{ MPa})) \quad \text{dla klasy betonu} > C50$$

Norma Amerykańska ACI-318-14 [1] nie podaje wytycznych dotyczących wytrzymałości betonu na rozciąganie osiowe.

Norma Eurokod 2 [11] podaje również, że jeżeli wytrzymałość na rozciąganie określana jest w badaniu poprzez rozłupywanie to wytrzymałość na rozciąganie osiowe f_{ctm} wynosi 0,9 wytrzymałości na rozciąganie przez rozłupywane $f_{ctm,sp}$. Wytrzymałość na rozciąganie osiowe można również wyznaczyć na podstawie wytrzymałości na zginanie $f_{ctm,fl}$. Zależność pomiędzy tymi wartościami podano we wzorze poniżej (wartość h – wysokość elementu należy podać w mm).

$$f_{ctm,fl} = \left(1,6 - \frac{h}{1000}\right) f_{ctm}$$

W ModelCode [2] podane są inne współczynniki. Wytyczne te zakładają, że $f_{ctm} = \alpha_{sp} * f_{ctm,sp}$ (gdzie $\alpha_{sp} = 1$) oraz, że $f_{ctm,fl} = f_{ctm} / \alpha_{fl}$, gdzie:

$$\alpha_{fl} = \frac{0,06 (h)^{0,7}}{1 + 0,06 (h)^{0,7}}$$

W komentarzu do ModelCode [2] podane jest również, że w różnych wytycznych można odnaleźć informację, że wartość α_{sp} przyjmowana jest w granicach od 0,67 do 0,95 oraz, że najnowsze badania pokazują, iż wartość ta może być przyjmowana powyżej 1,0

aż do wartości $2,2 \cdot (f_{cm})^{-0,18}$. W komentarzu tym podana jest również informacja, że dla betonów wysokich we współczynniku α_{ft} powinno się przyjmować wartość nieco niższą niż 0,06, ponieważ betony te są znacznie bardziej kruche. Wytyczne te jednak nie podają ile dokładnie powinno to wynosić.

Norma PN-EN 206 [12] nie podaje ile powinny wynosić wartości wytrzymałości na rozciąganie osiowe, rozłupywanie i zginanie.

2.3. Moduł Younga

Podobnie jak w poprzednich przypadkach normy Eurokod 2 [11] i ModelCode [2] podają tabelaryczną wartość modułu sprężystości betonu w zależności od przyjętej klasy. Wartość tą można równoważnie wyliczyć ze wzoru $E_{cm} = E_{c,0} \cdot (0,1 \cdot f_{cm})^{0,3}$ gdzie $E_{c,0}$ wg Eurokodu 2 [11] wynosi 22 GPa a wg ModelCodu [2] 21,5 GPa.

Obie normy podają również, że wartość ta odpowiada betonom wykonanym na kruszywie kwarcytowym. Jeżeli beton wykonany jest na kruszywie wapiennym lub piaskowym to wartość tę należy zmniejszyć o odpowiednio 10 i 30%, a jeżeli na bazaltowym to zwiększyć o 20%. ModelCode [2] podaje również, że dla betonów wykonanych na piasku i żwirze wartości wynoszą tyle ile dla betonu na kruszywie kwarcowym. Brak jest w normach wytycznych odnośnie granitu i dolomitu.

Amerykańska norma ACI [1] podaje, że wartość modułu należy wyznaczyć ze wzoru $E_{cm} = 57000 \cdot (f_c')^{1/2}$. Wartość wytrzymałości na ściskanie f_c' należy podstawić w jednostce [psi].

Tak jak w przypadku wytrzymałości na rozciąganie tak i w przypadku wartości modułu norma PN-EN 206 [12] nie podaje ile ta wartość powinna wynosić.

3. Skład betonu użytego do badań

Do badań doświadczalnych zostały wybrane trzy klasy betonów, jedna niska i dwie wysokie. Receptury mieszanek zostały przedstawione w tabelach od 3 do 5. Beton zwykły został wykonany na kruszywie żwirowym, a oba betony wysokiej wytrzymałości na kruszywie bazaltowym. Dokładny skład mieszanki betonowej jest własnością producenta, dlatego w tabelach zostały podane tylko ilości cementu oraz stosunek w/c .

Tabela 3. Receptura mieszanki betonu C30/37

C25/30		
Receptura mieszanki betonowej		Ilość [kg/m ³]
Cement	CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	350
Dodatek 1	Popiół lotny	*
Kruszywo drobne	Piasek 0/2	*
Kruszywo grube 1	Żwir 2/8	*
Woda zarobowa	Woda wodociągowa	*
Domieszka 1	plastyfikator	*
w/c		0,48

Tabela 4. Receptura mieszanki betonu C60/75

C55/67		
Receptura mieszanki betonowej		Ilość [kg/m ³]
Cement 1	CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	210
Cement 2	CEM I 52,5 N-SR3/NA	210
Kruszywo drobne	Piasek 0/2	*
Kruszywo grube 1	Grys bazaltowy 2/8	*
Woda zarobowa	Woda wodociągowa	*
Domieszka 1	plastyfikator	*
Domieszka 2	superplastyfikator	*
<i>w/c</i>		0,35

Tabela 5. Receptura mieszanki betonu 70/85

C60/75		
Receptura mieszanki betonowej		Ilość [kg/m ³]
Cement	CEM I 52,5 N-SR3/NA	600
Kruszywo drobne	Piasek 0/2	*
Kruszywo grube 1	Grys bazaltowy 2/8	*
Woda zarobowa	Woda wodociągowa	*
Domieszka 1	plastyfikator	*
Domieszka 2	superplastyfikator	*
<i>w/c</i>		0,29

4. Badania doświadczalne

4.1. Wytrzymałość na ściskanie

Badanie wytrzymałości na ściskanie wykonuje się na podstawie wytycznych zawartych w normie [8]. Badanie wykonuje się na elementach walcowych i kostkowych. Na poniższych zdjęciach pokazano próbki podczas badania a w tabeli 6 wyniki badań. Badania wykonywano dwa razy, po 28 i 56 dniach. Podane wartości są wartościami średnimi.

Tabela 6. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie na kostkach i walcach

Rodzaj próbki	C30/37		C60/75		C70/85	
	28	56	28	56	28	56
f_{cm} [MPa]	39,6	47,4	74,9	81,1	83,3	87,8
$f_{cm,cube}$ [MPa]	41,6	46,0	79,3	84,1	89,7	93,5

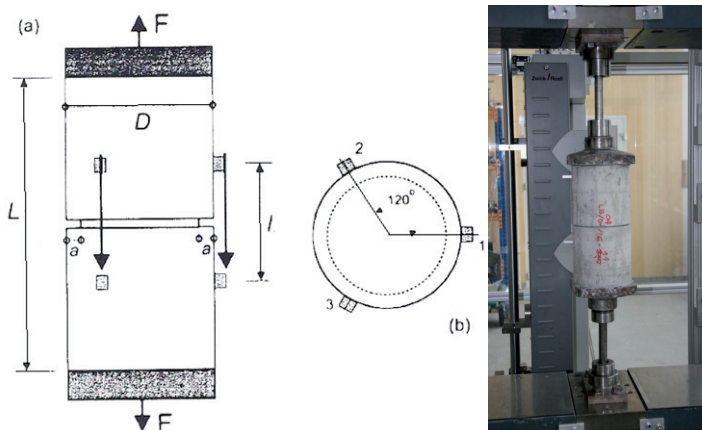


Fot. 1. Próbką kostkowa i walcowa po zniszczeniu w próbie ściskania

4.2 Wytrzymałość na rozciąganie osiowe, rozłupywanie i zginanie

Wytuczne do badania wytrzymałości na rozciąganie osiowe podano w raporcie [13] stworzonym przez organizację RILEM. Na poniższym rysunku podano podstawowe założenia oraz schemat rozkładu czujników do badań. Próbką do badań jest próbką walcową o wymiarach standardowych $\Phi 150 \times 300$ mm. W próbce należy wykonać karb o głębokości $a=0,1 \cdot D$. Na obwodzie próbki umieszcza się 3 czujniki, które mierzą szerokość rozwarcia szczeliny. W trakcie badania obciążenie zadane jest w funkcji szerokości rozwarcia rysy. Rejestrowana jest szerokość szczeliny oraz siła F . Wykonując badanie w taki sposób otrzymujemy całą ścieżkę naprężenie – odkształcenie dla elementu rozciąganego wraz z fazą pokrytyczną.

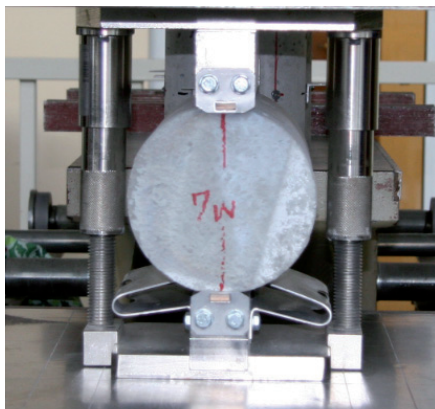
Badanie to można wykonać również w wersji uproszczonej. Chcąc uzyskać tylko maksymalną siłę rozciągającą, można wykonać badanie bez naklejania czujników mierzących rozwarcie rysy. Na podstawie otrzymanej siły F wyznacza się maksymalną wytrzymałość na rozciąganie osiowe f_{ctm} równą F/A (gdzie A to pole przekroju walca w miejscu nacięcia karbu).



Rys. 1. Schemat próbki do badania wytrzymałości na rozciąganie osiowe [13] oraz próbka podczas badania

Badanie wytrzymałości na rozłupywanie opisane jest w normie [10]. W badaniu tym próbka walcowa lub kostkowa jak na zdjęciu poniżej umieszczana jest w ramie pozycjonującej i obciążana aż do zniszczenia. Otrzymując siłę niszczącą, można ze wzoru, jak poniżej, wyznaczyć wartość wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu.

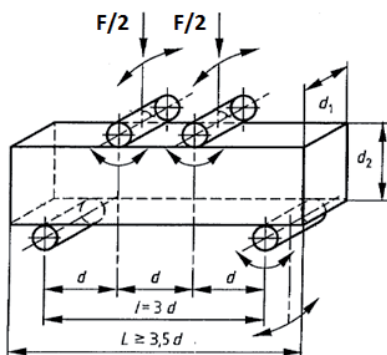
$$f_{ctm.sp} = \frac{2F}{\pi Ld}$$



Fot. 2. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

Badanie wytrzymałości na ściskanie wykonuje się na podstawie wytycznych zawartych w normie [9]. Badanie czteropunktowego zginania wykonywane jest na elementach belkowych o wymiarach jak na poniższym rysunku. Maksymalną wartość wytrzymałości na zginanie oblicza się z podanego w normie wzoru:

$$f_{ctm.fl} = \frac{F * l}{d_1 d_2^2}$$



Rys. 2. Wymiary próbki oraz rozstaw podpór do badania wytrzymałości na zginanie [9]

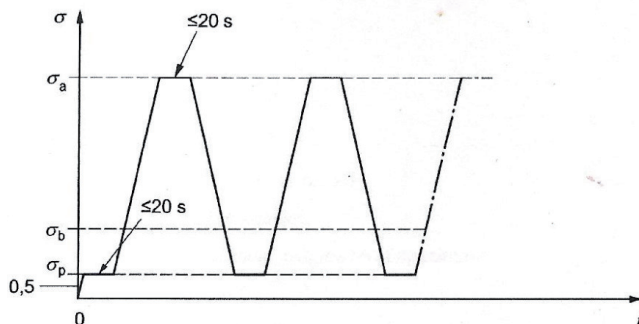
W tabeli 7 zestawiono wyniki badań dla trzech klas betonu. Większość badań wykonywano dwa razy, po 28 i 56 dniach. Podane wartości są wartościami średnimi.

Tabela 7. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie osiowe, rozłupywanie i zginanie

Rodzaj badania	C30/37		C60/75		C70/85	
	28	56	28	56	28	56
f_{ctm} (osiowe) [MPa]	2,0	2,0	2,9	2,6	3,2	3,2
$f_{ctm,sp,w}$ (walec) [MPa]	2,9	3,3	4,6	-	4,7	5,2
$f_{ctm,sp,k}$ (kostka) [MPa]	-	3,6	5,3	4,7	5,6	5,3
$f_{ctm,fl}$ [MPa]	-	4,3	-	9,3	-	8,6

4.3. Moduł Younga

Badanie modułu sprężystości można wykonać za pomocą trzech metod. Dwie z nich, metody A i B, opisane są w normie [7] i jedna w [11]. Obie normy zakładają, iż badanie należy wykonywać na elementach walcowych o średnicy $\Phi 150$ mm i wysokości 300 mm. Autorzy przedstawiają wyniki badań modułu Younga otrzymanych za pomocą metody B, więc tylko ona zostanie opisana. Na rysunku 3 znajdują się założenia do tej metody.



Rys. 3. Schemat obciążenia próbki do wyznaczenia wartości modułu Younga za pomocą metody B zawartej w [7]

Metoda B zakłada, że do zbadania wartości modułu Younga konieczne jest wyznaczenie wartości odkształcenia dla dwóch poziomów naprężenia, 0,5 MPa i $1/3 \cdot f_c$ (gdzie f_c to średnia wytrzymałość betonu na ściskanie na próbce walcowej). Następnie korzystając z wzoru znajdującego się poniżej należy wyznaczyć wartość modułu sprężystości. We wzorze tym σ i ε z indeksem k oznaczono wartości naprężenia i odkształcenia dla poziomu obciążenia równego $1/3 \cdot f_c$ oraz z indeksem p dla 0,5 MPa.

$$E_{cm} = \frac{\sigma_k - \sigma_p}{\varepsilon_k - \varepsilon_p}$$

Odczyt wartości odkształcenia można wykonać dwoma metodami, ręcznie lub za pomocą czujników. Ręcznego odczytu dokonuje się za pomocą tensometru mechanicznego Demeca. Na próbkę nakleja się dwa repery i mierzy zmieniającą się pomiędzy nimi odległość. Na próbkę można również nakleić czujniki indukcyjne LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Na poniżej fotografii pokazano próbkę z czujnikami LVDT i z naklejonymi reperami.



Fot. 3. Badanie modułu Younga za pomocą czujników LVDT i Demeca

W tabeli 8 przedstawiono wyniki badań dla dwóch betonów wysokich i jednego zwykłego. Badania wykonywano dwa razy, po 28 i 56 dniach dojrzewania. W tabeli symbolem $E_{c,d}$ oznaczona jest wartość modułu, którego wartości odkształcenia odczytywane były za pomocą tensometru mechanicznego Demeca, a symbolem $E_{c,c}$ moduł z odkształceniami z czujników LVDT. Podane wartości są wartościami średnimi.

Tabela 8. Wyniki badania modułu Younga

Klasa betonu	C30/37		C60/75		C70/85	
	28	56	28	56	28	56
$E_{cm,d}$ [GPa]	21,9	23,0	41,0	44,1	41,5	43,4
$E_{cm,c}$ [GPa]	20,8	24,9	42,3	45,4	42,2	42,0

4.4. Nasiąkliwość i mrozodporność

Badanie nasiąkliwości wykonano dla betonów C60/75 i C70/85 wg normy [6] na trzech sześciennych próbkach o wymiarach 150x150x150 mm. W poniższej tabeli zestawiono wyniki badań.

Tabela 9. Wyniki badania nasiąkliwości

Klasa betonu	Próbka	Masa próbek nasyconych wodą [g]	Masa próbek wysuszonych [g]	Nasiąkliwość [%]
C60/75	1	8616	8360	3,03
	2	8471	8217	
	3	8503	8260	
C70/85	1	8352	8064	3,52
	2	8241	7952	
	3	8444	8169	



Fot. 4. Próbką po badaniu mrozoodporności w solach

Badanie mrozoodporności wykonano na betonach C60/75 i C70/85 metodą zwykłą (wg [6]) oraz metodą złuszczeniową (wg [5]). W przypadku obydwu badań materiał nie spełnił wymogów mrozoodporności. Próbkę obydwu betonów badane metodą zwykłą uległy niemal całkowitemu zniszczeniu a w próbkach badanych metodą złuszczeniową powierzchnia betonu uległa całkowitej degradacji (jak na fotografii poniżej).

5. Porównanie wyników

5.1 Wytrzymałość na ściskanie

W tabeli 10 przedstawiono wyniki badań doświadczalnych (w [MPa]) wraz z przydzieleniem betonu do odpowiedniej. Klasa betonu została dobrana ze względu na oba wyniki badań (na walcach i na kostkach).

Tabela 10. Analiza porównawcza wartości wytrzymałości na ściskanie

Rodzaj próbki	C30/37		C60/75		C70/85	
	28	56	28	56	28	56
f_{cm} (b. dośw.)	39,6	47,4	74,9	81,1	83,3	87,8
$f_{cm,cube}$ (b. dośw.)	41,6	46,0	79,3	84,1	89,7	93,5
f_{ck} EC2 [11], MC [2]	31,6	39,4	64,9	73,1	75,3	79,8
$f_{ck,cube}$ EC2, MC	33,6	38,0	71,3	76,1	81,7	85,5
f_{ck} PN-EN 206 [12]	35,6	43,4	70,9	77,1	79,3	83,8
$f_{ck,cube}$ PN-EN 206	37,6	42,0	75,3	80,1	85,7	89,5
kl. EC2, MC	25/30	30/37	55/67	60/75	60/75	70/85
kl. PN-EN 206	30/37	30/37	60/75	60/75	70/85	70/85

Jak widać ze względu na różnice między normą [12] a [11] i [2] w wyznaczaniu wartości charakterystycznych wszystkie trzy betony po badaniach 28-dniowych zakwa-

lifikowano do różnych klas, wynika to z innego podejścia do oceny klasy wytrzymałości – innego „współczynnika bezpieczeństwa”, dla [11] i [2] to 8 MPa, a dla normy betonowej [2] to 4 MPa. Istotną rzeczą, która również wynika z powyższej tabelki, jest fakt, iż klasyfikując beton na podstawie badań tylko na jednym rodzaju próbki za każdym razem otrzymujemy inną klasę betonu. Żadna z norm nie nakazuje wyznaczania klasy betonu na dwóch rodzajach próbek, stąd na przykład pierwszy beton na podstawie wartości f_{ck} PN-EN 206 równej 43,4 MPa powinien zostać zakwalifikowany do klasy C40/50, podczas gdy dla wartości $f_{ck,cube}$ PN-EN 206 powinien zostać zakwalifikowany dwie klasy niżej do C30/37. Wszystkie normy podają, że wartość wytrzymałości na kostce powinna być o około 20% wyższa niż na walcu, a jak widać z przeprowadzonych badań, wartości te są bardzo podobne.

Równie małe różnice w wynikach zaprezentowano w pracy [3] gdzie wytrzymałość średnia badana na walcach i kostkach po 28 dniach wyszła odpowiednio 89,09MPa i 93,13MPa dla pierwszego betonu oraz 87,37MPa i 90,20MPa dla drugiego betonu. W pracy [4] przedstawiono, iż wytrzymałość średnia na walcu 126,4MPa wyszła wyższa niż wytrzymałość średnia na kostce 122,8[MPa].

Dla projektowania konstrukcji najważniejszą cechą materiałową jest wytrzymałość charakterystyczna f_{ck} mierzona na próbkach walcowych. Może być ona utożsamiana z wytrzymałością betonu w konstrukcji w stanie jednoosiowego ściskania i na jej podstawie wyznacza się wartość obliczeniową $f_{cd}=f_{ck}/\gamma_c$. Wytrzymałość $f_{ck,cube}$ nie reprezentuje wytrzymałości w stanie jednoosiowego ściskania (ze względu na geometrię ciała próbnego i sposób badania) – nie jest więc ona miarodajna dla celów projektowych. Uzyskane wyniki doświadczalne świadczą, że sugerowane przez Eurokod 2 [11] i ModelCode [2] relacje pomiędzy f_{ck} i $f_{ck,cube}$ nie odpowiadają rzeczywistości (przynajmniej dla zbadanych betonów oraz zacytowanych wyżej wyników badań). Należy więc dążyć do ustalenia klasy betonu i wytrzymałości obliczeniowej f_{cd} na podstawie doświadczalnie zbadanej wytrzymałości f_{ck} (lub f_{cm}) na próbkach walcowych. Wnioskowanie o klasie betonu na podstawie wyników na próbkach kostkowych $f_{ck,cube}$ (lub $f_{cm,cube}$) nie ma uzasadnienia fizycznego i może prowadzić do znacznego zaniżenia rzeczywistej klasy betonu z uwagi na inne w rzeczywistości, niż podawane w normach, przeliczniki pomiędzy wytrzymałością kostkową a walcową.

5.2. Wytrzymałość na rozciąganie osiowe, rozłupywanie i zginanie

W tabeli 11 zestawiony wyniki badań wraz z porównaniem z wytycznych normowych. Wartości wytrzymałości normowych zostały określone dla wyznaczonych wcześniej klas betonów (wg [11]) w rozdziale 5.1. Przedstawione wyniki są w [MPa].

Z tabeli 11 widać, że żaden beton nie spełnił wymogów normowych wytrzymałości na rozciąganie osiowe. W przypadku betonów wysokich nie została również osiągnięta wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu wg wytycznych z [11], ale wg wytycznych z [2] wytrzymałość ta jest wystarczająca.

Niespełniona została klasa wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu na walcach. Jednakże klasa ta została spełniona na kostkach. Norma [10] podaje, że dopuszczalne jest badanie na kostkach, więc można powiedzieć, że betony te osiągnęły odpowiednią wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu.

Z powyższych wyników widać również, że wytrzymałość na rozciąganie osiowe jest znacznie mniejsza niż wartość wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Norma

Tabela 11. Analiza porównawcza wartości wytrzymałości na rozciąganie osiowe, rozłupywanie i zginanie

Rodzaj badania	C30/37		C60/75		C70/85	
	28	56	28	56	28	56
f_{ctm} (osiowe) (b. dośw.)	2,0	2,0	2,9	2,6	3,2	3,2
$f_{ctm,sp,w}$ (walec) (b. dośw.)	2,9	3,3	4,6	-	4,7	5,2
$f_{ctm,sp,k}$ (b. dośw.)	-	3,6	5,3	4,7	5,6	5,3
$f_{ctm,fl}$ (b. dośw.)	-	4,3	-	9,3	-	8,6
f_{ctm} EC2 [11], MC [2]	2,6	2,9	4,2	4,4	4,4	4,6
$f_{ctm,sp}$ EC2	2,9	3,2	4,7	4,9	4,9	5,1
$f_{ctm,sp}$ MC	2,6	2,9	4,2	4,4	4,4	4,6
$f_{ctm,fl}$ EC2	-	4,4	-	6,6	-	6,9
$f_{ctm,fl}$ MC	-	4,8	-	7,4	-	7,7

podaje, że wartość ta powinna być o 10% mniejsza. W tym przypadku potwierdzają się wytyczne zapisane w komentarzu do [2], że wartość ta jest nawet o 30% mniejsza.

Z powyższej tabeli widać również, że betony wysokie osiągnęły wymaganą wytrzymałość na zginanie. Dodatkowo zauważyć można, że wg wytycznych normowych wytrzymałość na zginanie powinna być około 1,5 razy większa niż wytrzymałość na rozciąganie osiowe. Betony użyte w badaniach osiągnęły nawet 3,5 razy większą wytrzymałość na zginanie.

5.3. Moduł Younga

W tabeli 12 zestawiono wyniki badań doświadczalnych modułu sprężystości wraz z wartościami normowymi. Wartości normowe zostały określone dla wyznaczonych wcześniej klas betonów (wg [11]) w rozdziale 5.1. Przedstawione wyniki są w [GPa].

Tabela 12. Analiza porównawcza wartości modułu Younga

Klasa betonu	C30/37		C60/75		C70/85	
	28	56	28	56	28	56
$E_{cm,d}$ (b. dośw.)	21,9	23,0	41,0	44,1	41,5	43,4
$E_{cm,c}$ (b. dośw.)	20,8	24,9	42,3	45,4	42,2	42,0
E_{cm} (EC2 [11], MC [2])	30,0	32,0	38,0	39,0	39,0	41,0
E_{cm} (EC2, MC z uwzg. kr.)	30,0	32,0	45,6	46,8	46,8	49,2

Analizując wyniki można zauważyć, iż beton o klasie C30/37 nie osiągnął oczekiwanej wartości modułu sprężystości. Pozostałe dwa betony uzyskały wartość wyższą niż podana w normie. Jednakże, gdy weźmiemy pod uwagę, skład mieszanki betonowej i rodzaj zastosowanego kruszywa okazuje się, że żaden z betonów nie osiągnął wyma-

ganej wartości modułu sprężystości. Beton na kruszywie bazaltowym powinien mieć o 20% wyższy moduł sprężystości niż podany w normie [11] w tabeli 3. Jednakże należy pamiętać, że beton użyty w badaniach był wykonany na kruszywie do 8 mm. Należy więc sprawdzić jakie wartości modułu uzyskano by na kruszywie 16 mm. Natomiast w betonie zwykłym wartość ta wyszła mniejsza o około 30%. Osiągnięcie takiej samej wartości modułu dla betonu na kruszywie kwarcytowym i żwirowym jest ciężkie do uzyskania, ponieważ kruszywo kwarcytowe charakteryzuje się większą przyczepnością do matrycy cementowej oraz wyższą twardością samej skały.

W obecnych czasach, przy ciągłej optymalizacji kosztów produkcji (nowe rozwiązania domieszkowe, zwiększanie punktu piaskowego, stosowanie popiołów lotnych, ograniczanie ilości cementu) bardzo ciężko jest uzyskać betonem zwykłym, opartym na kruszywie żwirowym zawarte w [11] kryteria dotyczące minimalnych wartości modułu sprężystości.

Należy również zwrócić uwagę na fakt, iż w analizie obliczeniowej wartość modułu przyjmowana jest jak dla kruszywa kwarcytowego. Chcąc uzyskać odpowiednią wartość modułu, projektant powinien uwzględnić w projekcie skład mieszanki betonowej, a w szczególności rodzaj kruszywa. Wartość modułu sprężystości podobnie jak wytrzymałość na ściskanie na etapie projektowania konstrukcji żelbetowych jest równie ważnym parametrem w analizie obliczeniowej.

5.4. Nasiąkliwość i mrozoodporność

Obydwa betony, dzięki niskim wartościom wskaźnika w/c oraz zastosowaniu wysokiej jakości kruszywa, charakteryzowały się bardzo niskimi wartościami nasiąkliwości. Mimo to materiał nie spełnił wymogów mrozoodporności w badaniu metodą zwykłą wg [6] oraz metodą złuszczeniową wg [5], a poddane cykлом zamarzania i rozmarzania próbki uległy niemal całkowitemu zniszczeniu, świadcząc o wysokiej podatności badanych betonów na destrukcyjny wpływ niskich temperatur.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że nie istnieje korelacja pomiędzy nasiąkliwością a odpornością betonu na działanie mrozów. Wysokie wytrzymałości oraz szczelność betonu, bez wprowadzenia do jego struktury mikroporów powietrznych, będących wynikiem działania domieszek napowietrzających, nie zapewniają właściwej mrozoodporności materiału.

6. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań i analiz wynika, iż:

- wszystkie trzy beton spełniały wymogi normowe dotyczące wytrzymałości na ściskanie. Jednakże, nie zostały spełnione wymogi dotyczące pozostałych cech wytrzymałościowych;
- Betony o wysokich wytrzymałościach uzyskały znacznie niższe wytrzymałości na rozciąganie osiowe niż zakłada norma [11]. Wartości te były o 40% mniejsze;
- Nie została uzyskana odpowiednia wartość modułu sprężystości betonu zwykłego, była ona niższa o 30% od wartości normowej (która odnosi się do betonu na kruszywie kwarcytowym);
- Wysoka wytrzymałość na ściskanie, szczelność i niska nasiąkliwość betonu nie ma żadnego wpływu na jego mrozoodporność. Nawet przy zastosowaniu grysów bazaltowych

nie jest się w stanie uzyskać odpowiedniej mrozoodporności beton bez wprowadzenia do jego struktury mikroporów pochodzących z domieszek napowietrzających.

Artykuł pokazuje również, że należy zastanowić się nad aktualnością zawartych w normach [11] i [2] korelacji obliczeniowych pomiędzy wartościami cech wytrzymałościowych betonów. Korelacje należałoby uaktualnić o używane obecnie surowce wsadowe, stosowane kruszywo o różnych właściwościach fizycznych, stosowanie popiołu lotnego oraz wyższych punktów piaskowych w betonach. Przeprowadzone w artykule porównania jasno pokazują, że otrzymane wyniki badań laboratoryjnych wyraźnie różnią się od wartości przyjętych z wyżej wymienionych norm.

Należy również mieć na uwadze, że badania te prowadzone były tylko na trzech klasach betonu i każda z nich została tylko raz wyprodukowana. Należałoby przeprowadzić więcej badań dla kilku zarobów tej samej klasy betonu. Wyciągnięcie jednoznacznych wniosków na podstawie tak małej populacji wyników badań nie jest możliwe. Na pewno temat jest ciekawy i wymagałaby kontynuacji, ale to nie na miesiące, a na lata badań, nie na setki, ale dziesiątki tysięcy wyników.

Badania zostały przeprowadzone w ramach realizowanej pracy doktorskiej i dofinansowania z L-1/353/2014/DS-M.

Literatura

- [1] ACI 318-14, 2014, Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary – ACI 318R-14, American Concrete Institute, USA, January;
- [2] CEB – FIP 2010, Model Code 2010, Final Draft – Volume 1, FIB Bulletin 65, 2012;
- [3] Dyba M., Wpływ parametrów technologicznych na przyczepność betonu wysokowartościowego do stalowych splotów sprężających. Praca doktorska, Politechnika Krakowska 2014;
- [4] Koziański K., Nośność i odkształcalność dwukierunkowo mimośrodowo ściskanych smukłych słupów żelbetonowych z betonów wysokiej wytrzymałości. Praca doktorska, Politechnika Krakowska 2011;
- [5] PKN-CEN/TS 12390-9:2007 Testing hardened concrete. Part 9: Freeze-thaw resistance – Scaling;
- [6] PN-88/B-06250 Beton zwykły;
- [7] PN-EN 12390-13:2014-02 Badania betonu: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu;
- [8] PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań;
- [9] PN-EN 12390-5:2011 Badania betonu: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań;
- [10] PN-EN 12390-6:2011 Badania betonu: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań;
- [11] PN-EN 1992-1-1:2004 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków;
- [12] PN-EN 206:2014-04 Beton: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność;
- [13] RILEM/CEB/FIP, 1983, Technical recommendations for the testing and use of construction materials, E&FN Spon, U.K.;