

KSZTAŁTOWANIE WŁAŚCIWOŚCI BETONU ZWYKŁEGO NA BAZIE CEMENTÓW Z DODATKIEM WŁÓKIEN STALOWYCH I POPIOŁU LOTNEGO

Gabriela Rutkowska, Piotr Wichowski, Aneta Mroczkowska
Szkola Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości (konsystencji, gęstości, wytrzymałości na ściskanie, zginanie oraz rozciąganie przy rozłupywaniu) betonów zwykłych oraz betonów zawierających w swoim składzie włókna stalowe i popioły lotne. Do wykonania betonu wykorzystano cementy CEM I o klasie wytrzymałości 32,5R, 42,5R, 52,5R. Dla każdego rodzaju cementu wykonano beton z włóknami stalowymi w ilości 0,7% oraz włóknami stalowymi w ilości 0,7% i popiołem lotnym w ilości 5% masy cementu. Po wykonaniu badań stwierdzono, że dodanie włókien stalowych i popiołu lotnego poprawia właściwości na zginanie i rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałość na ściskanie ulega pod ich wpływem spadkowi.

Słowa kluczowe: beton, włókna stalowe, popiół lotny

WSTĘP

W Polsce według danych Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych w oczyszczalniach w 2015 roku wytworzone będzie 662 tys. Mg s.m. komunalnych osadów ściekowych [KPOŚK 2012]. Ilość ich w porównaniu do 2010 roku wzrośnie o 25%. Jest to efekt dynamicznej rozbudowy sieci kanalizacyjnej i zwiększenia ilości ścieków komunalnych dostarczanych do oczyszczalni ścieków. Zgodnie z Ustawą z dnia 27 kwietnia 2001 roku o odpadach [Ustawa 2001] powstające osady ściekowe powinny być zagospodarowane w sposób przyjazny dla środowiska. Jedną z możliwości zagospodarowania popiołów lotnych powstałych z utylizacji osadów ściekowych przez termiczne przekształcenie jest ich wykorzystanie do produkcji materiałów konstrukcyjnych, jakim jest beton zwykły. Takie rozwiązanie daje korzyści ekonomiczne oraz ekologiczne. Zastąpienie popiołem lotnym pewnej ilości cementu przynosi korzyści finansowe. Popiół

Adres do korespondencji – Corresponding author: Gabriela Rutkowska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Inżynierii Budowlanej, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: gabriela_rutkowska@sggw.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

lotny pochodzący z termicznego przekształcenia osadów ściekowych jest składnikiem znacząco tańszym niż klinkier portlandzki stosowany do produkcji cementu portlandzkiego, ponieważ jest odpadem.

Proces produkcji klinkieru wiąże się z dużą emisją dwutlenku węgla (szacuje się, że na 1 kg wyprodukowanego klinkieru przypada emisja 1 kg CO₂) oraz dużym zużyciem energii, ponieważ w technologii produkcji cementu klinkier jest prażony w temperaturze 1450°C. Wprowadzone przez Unię Europejską ograniczenia emisji dwutlenku węgla [Kępyś i in. 2013] zachęcają do badań nad materiałami nowej generacji zawierającymi mniejszą ilość klinkieru. Celem zrealizowanych badań było poznanie wpływu włókien stalowych i popiołów lotnych, pochodzących z termicznego przekształcania osadów ściekowych (dodanych w czasie sporządzenia mieszanki betonowej), na wybrane właściwości techniczne betonu. Próbkę betonu do badań zaprojektowano jako beton zwykły, zgodnie z normą PN-EN 206:2014-04.

MATERIAŁ I METODYKA

W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano beton zwykły, klasy C20/25, o konsystencji gęstoplastycznej – K2. Ilość składników mieszanki betonowej obliczono metodą trzech równań według Bukowskiego [Jamroży 2005]. Do przygotowania próbek betonu wykorzystano kruszywo naturalne o uziarnieniu 0, 125–16 mm, cement portlandzki CEM I o trzech klasach wytrzymałości 32,5R, 42,5R oraz 52,5R, włókna stalowe Dramix 3D długości 60 mm, średnicy 0,75 mm oraz popiół lotny jako drobno uziarniony pył, pochodzący z termicznego przekształcania osadów ściekowych oczyszczalni „Czajka”, zawierający przede wszystkim SiO₂ i Al₂O₃, przy czym zawartość reaktywnego SiO₂ wynosi co najmniej 25% masy [PN-EN 450-1:2009].

Badania polegały na porównaniu właściwości betonów zwykłych wytworzonych jako beton porównawczy (referencyjny) oraz betonów sporządzonych z różnych cementów zawierających w swoim składzie same włókna stalowe oraz włókna stalowe i popiół lotny. Przygotowano następujące rodzaje próbek:

- bez dodatków, beton zwykły porównawczy z CEM I 32,5R, CEM I 42,5R, CEM I 52,5R,
- beton z dodatkiem włókien stalowych w ilości 0,7% masy cementu,
- beton z dodatkiem włókien stalowych w ilości 0,7% i popiołu lotnego w ilości 5% masy cementu.

Mieszanki betonowe przygotowano w laboratorium budowlanym Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW w Warszawie. Zgodnie z obowiązującymi normami sprawdzono właściwości mieszanki betonowej: gęstość objętościową według PN-EN 12350-6:2011, konsystencję według PN-EN 12350-2:2011 metodą stożka opadowego, zawartość powietrza metodą ciśnieniową według PN-EN 12350-7:2011, oraz sprawdzono właściwości betonu: wytrzymałość na ściskanie według PN-EN 12390-3:2011, zginanie według PN-EN 12390-5:2011 i rozciąganie przy rozłupywaniu według PN-EN 12390-6:2011 w 28. dniu dojrzewania betonu. Badania wytrzymałości na zginanie i rozciąganie przy rozłupywaniu przeprowadzono w maszynie ZD-40, a wytrzymałości na ściskanie – w maszynie MATEST.

WYNIKI BADAŃ MIESZANKI BETONOWEJ I BETONU

Założenia

Wykazano wpływ dodania włókien stalowych i popiołu lotnego na właściwości betonów zwykłych. Zarówno w próbkach niezawierających dodatku, jak i w próbkach z dodatkiem włókien stalowych oraz włókien stalowych i popiołu zachowano stały skład granulometryczny kruszywa dobranego metodą iteracji – kolejnych przybliżeń (tab. 1).

Tabela 1. Skład ziarnowy kruszywa
Table 1. Aggregate size composition

Frakcja Fraction	Procentowy stosunek zmieszania frakcji Percentage ratio of aggregate fractions [%]			Skład ziarnowy piasku Aggregate size composition of sand [%]	Skład ziarnowy żwiru Aggregate size composition of gravel [%]
	Etap I Stage I	Etap II Stage II	Etap III Stage III		
	0,0÷0,125				
0,125÷0,25				17,82	6,772
0,25÷0,5			38	39,62	15,054
0,5÷1				34,32	13,043
1÷2				7,31	2,778
2÷4	–	32			19,840
4÷8	45		62		18,972
8÷16	55	68			23,188

Do przyjętych założeń projektowania mieszanki betonowej betonu zwykłego przy użyciu metody trzech równań ustalono recepturę mieszanki betonowej na jeden zarób (tab. 2).

Tabela 2. Receptura mieszanki betonowej na jeden zarób
Table 2. Recipe of the concrete mix for one batch

Nr partii No.	Rodzaj użytego cementu Cement type	Kruszywo Aggregate [kg]	Woda Water [dm ³]	Cement [kg]	Włókna stalowe Steel fibers [kg]	Popiół lotny Fly ash [kg]
1	CEM I 32,5 R	65,50	6,87	16,79	–	–
2	CEM I 42,5 R	65,50	6,87	16,79	0,62	–
3	CEM I 52,5 R	65,50	6,87	15,95	0,62	0,84

Badania mieszanki betonowej

Klasa konsystencji. Analizując wyniki badań konsystencji, zauważono, że partie mieszanki betonowej bez dodatków charakteryzują się konsystencją plastyczną (S2), natomiast z dodatkami – konsystencją gęstoplastyczną (S1). Najmniejszy opad stożka

otrzymano dla partii z dodatkami włókien stalowych i popiołu lotnego, natomiast największe – dla partii składających się jedynie z cementu, wody i kruszywa – mieszanek porównawczych.

Gęstość. Wyniki gęstości mieszanek betonowych podano zgodnie z zaleceniami normy z zaokrągleniem do $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Badanie pozwala zauważyć, że gęstość wykazuje nieznaczną tendencję wzrostową wraz ze wzrostem klasy wytrzymałościowej użytego cementu. Dla CEM I 32,5R gęstość jest najmniejsza i po zaokrągleniu wynosi około $2340\text{--}2350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, bez względu na dodatki. Największą gęstość wykazują partie z cementem CEM I 52,5R i wynoszą już około $2390\text{--}2400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. W przypadku każdej partii mieszanki betonowej gęstość mieści się w przedziale charakterystycznym dla betonu zwykłego, który wynosi od 2000 do $2600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Zawartość powietrza. Zawartość powietrza w mieszankach betonowych waha się pomiędzy 2,70 a 4,00%. Najmniejszą zawartością powietrza charakteryzuje się partia mieszanki betonowej z cementem CEM I 32,5R bez dodatków, natomiast największą – z cementem CEM I 52,5R i włóknami stalowymi. Według normy PN-EN 206-1:2003 nie istnieją wymagania minimalnej i maksymalnej zawartości powietrza w mieszance betonowej dla klasy ekspozycji X0. Wymagania takie istnieją jedynie w przypadku klas XF2, XF3, XF4, w których zawartość powietrza powinna wynosić minimum 4%. Wyniki przeprowadzonych badań mieszanki betonowej zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie wyników badań mieszanki betonowej

Table 3. Results of tests of concrete mix

Wyszczególnienie Specification	Mieszanka betonowa bez dodatków Concrete mix without additives		
Rodzaj cementu – Cement type	CEM I 32,5R	CEM I 42,5R	CEM I 52,5R
Opad stożka / konsystencja Slump test [cm] / consistency	65/S2	59/S2	86/S2
Zawartość powietrza [%] – Air content	2,70	3,60	3,00
Gęstość [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] – Density	2350,0	2370,0	2390,0
Wyszczególnienie Specification	Z dodatkiem: włókien stalowych – 0,7% masy cementu Additive: steel fibers 0.7% of cement mass		
Rodzaj cementu – Cement type	CEM I 32,5R	CEM I 42,5R	CEM I 52,5R
Opad stożka / konsystencja Slump test [cm] / consistency	34/S1	4/S1	45/S1
Zawartość powietrza [%] – Air content	3,20	3,50	4,00
Gęstość [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] – Density	2340,0	2350,0	2390,0
Wyszczególnienie Specification	Z dodatkiem: włókien stalowych – 0,7% popiołu lotnego – 5% masy cementu Additive: steel fibers 0.7% and fly ash 5% of cement mass		
Rodzaj cementu – Cement type	CEM I 32,5R	CEM I 42,5R	CEM I 52,5R
Opad stożka / konsystencja Slump test [cm] / consistency	10/S1	2/S1	21/S1
Zawartość powietrza [%] – Air content	3,30	3,40	3,70
Gęstość [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] – Density	2350,0	2360,0	2400,0

Badania betonu

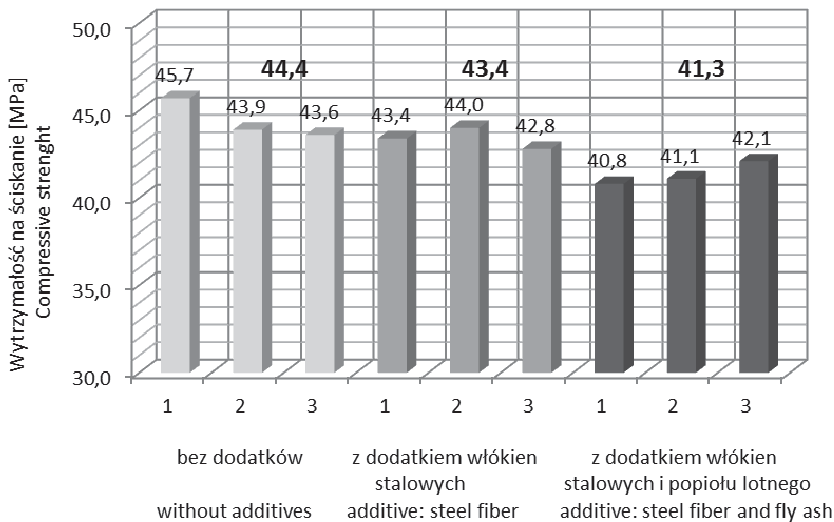
Badanie wytrzymałości na ściskanie próbek betonowych przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2011 w maszynie wytrzymałościowej. Badania przeprowadzono na próbkach typu B – kostki sześciennie o boku 150 mm. Średnie wyniki badań wytrzymałości na ściskanie dla poszczególnych próbek przedstawiono w tabeli 4 oraz na rysunkach 1–3.

Tabela 4. Zestawienie wyników średniej wytrzymałości na ściskanie betonu

Table 4. Test results of average compressive strength of concrete

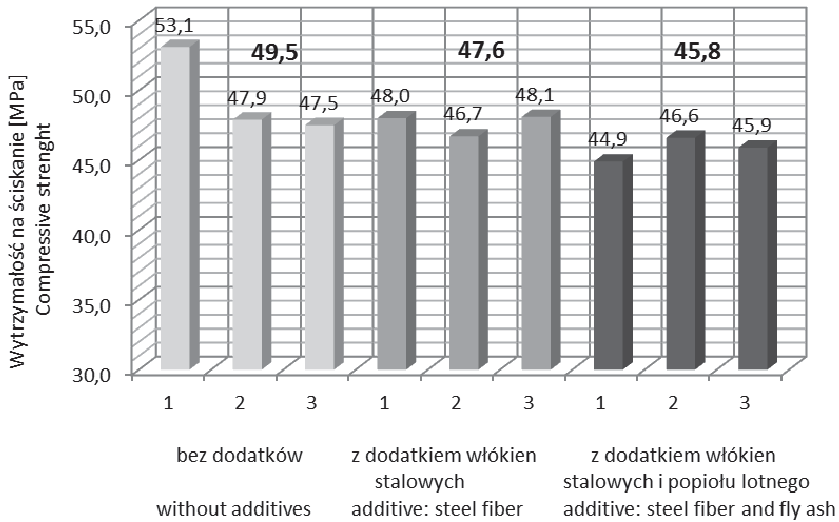
Wyszczególnienie Specification	Średnia wytrzymałość na ściskanie [MPa] Average compressive strength		
	CEM I 32,5 R	CEM I 42,5 R	CEM I 52,5 R
Rodzaj cementu Cement type			
Bez dodatków Without additives	44,4 ±0,1	49,5 ±0,1	52,6 ±0,1
Z dodatkiem włókien stalowych Additive: steel fiber	43,4 ±0,1	47,6 ±0,1	51,5 ±0,1
Z dodatkiem włókien stalowych i popiołu lotnego Additive: steel fibers and fly ash	41,3 ±0,1	45,8 ±0,1	50,4 ±0,1

Na podstawie wyników badań wytrzymałości na ściskanie partii betonu bez dodatków można stwierdzić, że im wyższej klasy był użyty cement, tym większa była wytrzymałość betonu. Partia z cementem CEM I 32,5 charakteryzowała się najmniejszą średnią wytrzymałością, równą 44,4 MPa. Największą wytrzymałość otrzymano dla betonu z cementem CEM I 52,5, wynoszącą 52,6 MPa. Wytrzymałość partii z CEM I 42,5 jest równa 49,5 MPa.



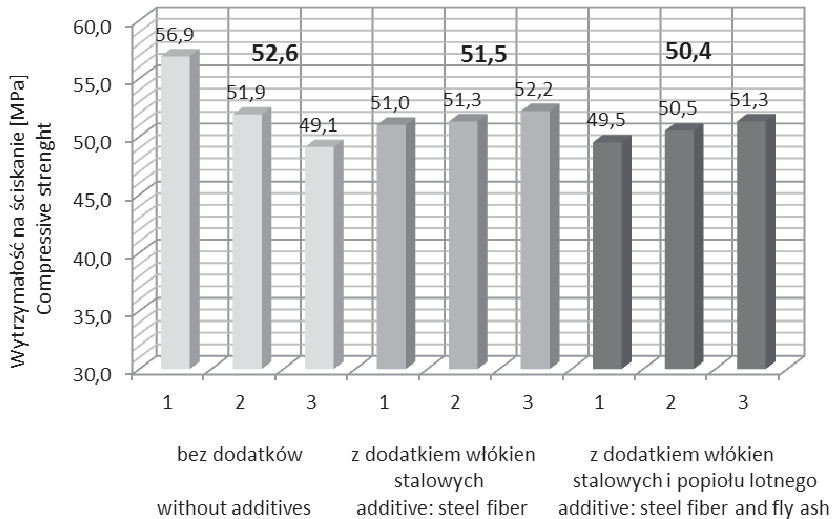
Rys. 1. Rozkład wytrzymałości na ściskanie próbek z cementem CEM I 32,5R

Fig. 1. Distribution of compressive strength of specimens with cement CEM I 32.5R



Rys. 2. Rozkład wytrzymałości na ściskanie próbek z cementem CEM I 42,5R

Fig. 2. Distribution of compressive strength of specimens with cement CEM I 42,5



Rys. 3. Rozkład wytrzymałości na ściskanie próbek z cementem CEM I 52,5R

Fig. 3. Distribution of compressive strength of specimens with cement CEM I 52,5R

Partie betonu z dodatkiem włókien stalowych, podobnie jak partie bez dodatków, wykazują wzrost wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem klasy cementu. Beton z cementem najniższej klasy charakteryzował się średnią wytrzymałością, równą 43,4 MPa, natomiast beton z cementem najwyższej klasy – 51,5 MPa. Średnia wytrzymałość partii z cementem CEM I 42,5 wynosiła 47,6 MPa. Natomiast w stosunku do receptury referencyjnej dodatek włókien stalowych spowodował spadek wytrzymałości na ściskanie.

I tak dla CEM I 32,5 spadek ten wyniósł 2,5%, dla CEM I 42,5 – 3,8%, a dla CEM I 52,5 – 2,1%.

Zastosowanie lepszej klasy cementu spowodowało wzrost wytrzymałości na ściskanie partii z włóknami stalowymi i popiołem lotnym. Beton z cementem o klasie wytrzymałości 32,5 osiągnął najmniejszą średnią wytrzymałość, równą 41,3 MPa, natomiast dzięki zastosowaniu cementu 52,5 wytrzymałość wzrosła do 50,4 MPa. Beton z cementem CEM I 42,5 miał wytrzymałość równą 45,8 MPa. Dodanie włókien stalowych i popiołu spowodowało dalszy spadek wytrzymałości w stosunku do betonu porównawczego. Dla CEM I 32,5 spadek ten wynosił 7,0%, dla CEM I 42,5 – 7,5%, a dla CEM I 52,5 – 4,2%.

Wytrzymałość na ściskanie poszczególnych próbek pochodzących z tych samych partii jest bardzo do siebie zbliżona. Najlepszą wytrzymałością wykazała się partia betonu bez dodatków. Włókna stalowe spowodowały nieznaczny spadek tej wytrzymałości, podobnie jak popiół lotny. Na podstawie średniej wytrzymałości poszczególnych partii (tab. 4) zauważono, że w miarę dodawania zarówno włókien stalowych, jak i popiołu lotnego wytrzymałość na ściskanie malała. Średnia wytrzymałość partii bez dodatków wyniosła 44,4 MPa, natomiast z włóknami stalowymi – 43,4 MPa. Popiół lotny zmniejszył wytrzymałość w stosunku do partii z włóknami stalowymi o 4,8%, a w stosunku do partii referencyjne o 7,0%.

Podobnie jak w przypadku cementu niższej klasy, wytrzymałość na ściskanie betonu z CEM I 42,5R zmniejszała się wraz z dodawaniem dodatków. Średnia wytrzymałość „czystego” betonu wyniosła 49,5 MPa. Włókna stalowe spowodowały zmniejszenie o 3,8% wytrzymałości – do wartości 47,6 MPa, natomiast dodatek popiołu lotnego zmniejszył wytrzymałość o 7,5% – do wartości 45,8 MPa. Wartości te mieszczą się w przedziale od 42,5 do 62,5 MPa, co zgodnie z normą PN-EN 197-1:2002 odpowiada danej klasie wytrzymałości cementu.

Dodatek zarówno włókien stalowych, jak i popiołu lotnego nie poprawił wytrzymałości na ściskanie, a wręcz ją osłabił. Średnia wytrzymałość bez dodatków wyniosła 52,6 MPa. Dodatek włókien stalowych spowodował zmniejszenie wytrzymałości o 2,1% – do 51,5 MPa, natomiast popiół lotny spowodował zmniejszenie wytrzymałości o 4,2% – do 50,4 MPa.

Wytrzymałość na zginanie. Badanie wytrzymałości na zginanie próbek betonowych przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-5:2011. Badanie przeprowadzono na próbkach o wymiarach 100 × 100 × 500 mm, w maszynie wytrzymałościowej ZD-40. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie przedstawiono w tabeli 5.

W przeciwieństwie do wytrzymałości na ściskanie wytrzymałość na zginanie zwiększa się dzięki użyciu poszczególnych dodatków. Średnia wytrzymałość na zginanie partii z cementem CEM I 32,5 bez dodatków wynosi 5,1 MPa, natomiast po zastosowaniu włókien stalowych wzrasta do 5,4 MPa, (o 5,9%), dodanie popiołu lotnego pozwala uzyskać wytrzymałość równą 5,7 MPa. Podobną tendencję zaobserwowano dla cementu CEM I 42,5. Bez dodatków średnia wytrzymałość wynosi 5,4 MPa, z włóknami zwiększa się do 6,1 MPa (wzrost o 13%), natomiast po dodaniu do tego popiołu lotnego wytrzymałość dalej wzrosła o 4,9%. Wytrzymałość na zginanie dla cementu CEM I 52,5 próbek bez dodatków charakteryzuje się średnią wytrzymałością, równą 5,8 MPa, z włóknami stalowymi wynosi 6,6 MPa, natomiast z dodatkiem popiołu lotnego i włókien wzrasta do

Tabela 5. Zestawienie wyników średniej wytrzymałości na zginanie
Table 5. Test results of average flexural strength

Wyszczególnienie Specification	Średnia wytrzymałość na zginanie [MPa] Average flexural strength		
	CEM I 32,5 R	CEM I 42,5 R	CEM I 52,5 R
Rodzaj cementu Cement type			
Bez dodatków Without additives	5,1 ±0,1	5,4 ±0,1	5,8 ±0,1
Z dodatkiem włókien stalowych Additive: steel fiber	5,4 ±0,1	6,1 ±0,1	6,6 ±0,1
Z dodatkiem włókien stalowych i popiołu lotnego Additive: steel fibers and fly ash	5,7 ±0,1	6,4 ±0,1	6,9 ±0,1

6,9 MPa. Włókna stalowe spowodowały wzrost wytrzymałości o 13,8%, popiół lotny – wzrost o kolejne 4,5%.

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek betonowych przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-6:2011 na próbkach sześciennych o wymiarach boków 150 mm w maszynie wytrzymałościowej. W tabeli 6 zestawiono otrzymane wyniki dla poszczególnych próbek.

Tabela 6. Zestawienie wyników średniej wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu
Table 6. Test results of average tensile splitting strength

Wyszczególnienie Specification	Średnia wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa] Average tensile splitting strength		
	CEM I 32,5 R	CEM I 42,5 R	CEM I 52,5 R
Rodzaj cementu Cement type			
Bez dodatków Without additives	23,7 ±0,1	25,7 ±0,1	30,4 ±0,1
Z dodatkiem włókien stalowych Additive: steel fiber	25,4 ±0,1	33,8 ±0,1	36,1 ±0,1
Z dodatkiem włókien stalowych i popiołu lotnego Additive: steel fibers and fly ash	32,0 ±0,1	35,1 ±0,1	36,6 ±0,1

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że użyte dodatki wpłynęły pozytywnie na wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, powodując jej wzrost, w odniesieniu do betonu porównawczego. Średnia wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu partii z cementem CEM I 32,5 bez dodatków była najmniejsza i wyniosła 23,7 MPa. Po zastosowaniu włókien stalowych wytrzymałość wzrosła o 7,2%, dodanie popiołu lotnego spowodowało dalszy wzrost o 26% – do wartości 32 MPa. Średnia wytrzymałość partii betonu z cementem CEM I 42,5 bez dodatków wynosiła 25,7 MPa, z włóknami wzrosła o 31,8% – do wartości 33,8 MPa, natomiast z popiołem wzrosła o 3,8% – do wartości 35,1 MPa. Dla cementu CEM I 52,5 średnia wytrzymałość dla próbek bez dodatków wyniosła 30,4 MPa. Włókna stalowe spowodowały wzrost o 18,7%,

a popiół lotny – o 1,4%. Największy przyrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu zaobserwowano dla próbek wytworzonych na bazie cementu CEM I 42,5.

WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Dodatek włókien stalowych i popiołu lotnego powoduje wzrost wytrzymałości na zginanie i rozciąganie.

2. Wytrzymałość na ściskanie maleje po dodaniu zarówno włókien stalowych, jak i popiołu lotnego. W porównaniu z partiami referencyjnymi dla CEM I 32,5 zmniejszenie wytrzymałości wynosiło 7,0%, dla CEM I 42,5 – 7,5%, a dla CEM I 52,5 – 4,2%. Najmniejszą wytrzymałość uzyskano dla betonu z cementem CEM I 32,5, równą 41,3 MPa, natomiast największą – dla betonu z cementem CEM I 52,5 bez dodatków, wynoszącą 52,6 MPa. Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie w betonie z włóknami stalowymi i popiołem lotnym mogło być spowodowane małą ilością wprowadzonych dodatków.

3. Wytrzymałość na zginanie zwiększa się po dodaniu włókien stalowych i popiołu lotnego. W porównaniu z betonem bez dodatków dla CEM I 32,5 wzrost wytrzymałości wynosi 11,7%, dla CEM I 42,5 – 18,5%, a dla CEM 52,5 – 19,0%. Najmniejszą wytrzymałość, wynoszącą 5,1 MPa, uzyskano dla betonu z cementem CEM I 32,5, natomiast największą, równą 6,9 MPa, dla partii z cementem CEM I 52,5 oraz włóknami stalowymi i popiołem lotnym.

4. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu zwiększa się w wyniku dodawania dodatków. Najmniejsza wytrzymałość wyniosła 23,7 MPa dla partii z cementem CEM I 32,5 bez dodatków, natomiast największa, równa 36,6 MPa, dla betonu z cementem CEM I 52,5 z włóknami stalowymi i popiołem lotnym. W porównaniu z partią referencyjną 35,0%, dla CEM I 32,5 wzrost wytrzymałości wynosi 35,0%, dla CEM I 42,5 – 36,5%, a dla CEM 52,5 – 20,4%.

5. Dla każdej z trzech partii mieszanek betonowych bez dodatków uzyskano konsystencję plastyczną (S2), natomiast po aplikacji dodatków – konsystencję gęstoplastyczną (S1) zbadaną metodą opadu stożka.

6. Pozorna zawartość powietrza waha się od 2,70% dla mieszanki z cementem CEM I 32,5 R bez dodatków do 4,00% w mieszance z cementem CEM I 52,5 R i włóknami stalowymi.

7. Gęstość mieszanek betonowych zwiększa się wraz ze wzrostem klasy użytego cementu. Najmniejsza gęstość wynosiła $2340,0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, natomiast największa była równa $2400,0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. W każdym przypadku są to wartości charakterystyczne dla betonu zwykłego.

PIŚMIENNICTWO

- Jamroży, Z. (2005). Beton i jego technologie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kępyś, W., Pomykała, R., Pietrzyk, J. (2013). Właściwości popiołów lotnych z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych. Inżynieria Mineralna, styczeń–czerwiec (January–June – Journal of the Polish Mineral Engineering Society), 11–18.

KPOŚK – Krajowy Program Oczyszczania Ścieków Komunalnych (aktualizacja 2010), www.kzgw.gov.pl – pobrano XI 2012 r.

PN-EN 197-1:2002. Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dla cementów powszechnego użytku.

PN-EN 206:2014-04. Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

PN-EN 450-1:2009. Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.

PN-EN 12350-2:2011. Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.

PN-EN 12350-6:2011. Badanie mieszanki betonowej. Część 6: Gęstość.

PN-EN 12350-7:2001. Badanie mieszanki betonowej. Część 7: Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.

PN-EN 12390-3:2011. Badanie betonu. Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badań.

PN-EN 12390-5:2011. Badanie betonu. Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.

PN-EN 12390-6:2011. Badanie betonu. Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań.

Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach. Dz.U. nr 62, poz. 628 z późn. zm.

PROPERTIES OF ORDINARY CONCRETE BASED ON CEMENTS WITH ADDITION OF STEEL FIBERS AND FLY ASH

Abstract. The paper presents results of investigations of properties (consistency, density, compressive strength, flexural strength, tensile strength) of ordinary concretes and concretes containing steel fibers and fly ashes. To make the samples, the Portland cement CEM I 32.5R; 42.5R; 52.5R was used. Each type of cement, was used to prepare concrete with steel fibers in the quantity of 0.7% of cement mass as well as with steel fibers in the quantity of 0.7% and fly ash in the quantity of 5% of cement mass. After the tests, it was concluded that the admixture of steel fibers and fly ash improves the features connected with flexural and tensile strength but the compressive strength decreases.

Key words: concrete, steel fibers, fly ash

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 26.07.2016

Cytowanie: Rutkowska, G., Wichowski, P., Mroczkowska, A. (2016). Kształtowanie właściwości betonu zwykłego na bazie cementów z dodatkiem włókien stalowych i popiołu lotnego. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (3), 71–80.