

WPŁYW METAKAOLINITU, JAKO CZĘŚCIOWEGO ZAMIENNIKA CEMENTU, NA WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI BETONU (ASTRA MK40)

Gabriela Rutkowska, Karolina Pieńkosz

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Metakaolinit (ASTRA MK40) jest pucolanowym dodatkiem do betonu. Najczęściej stosowany jest jako częściowy zamiennik cementu portlandzkiego. W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości (konsystencji, gęstości, wytrzymałości na ściskanie i zginanie oraz mrozoodporności) betonów zwykłych oraz betonów zawierających w swoim składzie różną ilość metakaolinitu. Do wykonania betonu użyto cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/B-M (V-LL) 32,5R. Beton z dodatkiem metakaolinitu wykonano w trzech partiach, gdzie metakaolinitem zastępowano odpowiednio 5, 10 i 15% masy cementu. Po wykonaniu badań stwierdzono, że dodatek metakaolinitu zmniejsza nasiąkliwość betonu, zwiększa wytrzymałość na ściskanie i zginanie w 28. dniu dojrzewania betonu. Beton z dodatkiem metakaolinitu nie jest mrozoodporny.

Słowa kluczowe: metakaolinit – dodatek pucolanowy, cement portlandzki wieloskładnikowy, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie

WSTĘP

Dbłość o środowisko zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju wprowadza możliwość i potrzebę stosowania produktów budowlanych, które są ekologicznie. Beton, materiał kompozytowy złożony z kruszywa, wody, cementu ewentualnie domieszek, to nie tylko produkt zrównoważony, ale także bezpieczny i stabilny, dający trwale budowle. Ważnym zadaniem jest, aby w betonie zastąpić cement innym materiałem. Dzięki zmniejszeniu ilości cementu i dodaniu domieszek można zmniejszyć wpływ produkcji betonu na środowisko naturalne. Jest to ważne, ponieważ przy produkcji cementu zużywa się dużo energii, a w ciągu roku emitowane jest około 1,6 miliarda ton CO₂ [Elahi i in. 2010].

Już w czasach starożytnych Rzymianie odkryli, że dodając popiół wulkaniczny, można polepszyć właściwości betonu. Obecnie największe zastosowanie w jego produkcji

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

mają popioły lotne i pył krzemionkowy, określane terminem pucolany. Pucolany są materiałami bogatymi w krzemionkę i tlenek glinu, które łączą się z wapnem w obecności wody. Tworzą w ten sposób związki identyczne jak w procesie hydratacji cementu [Maca i in. 2014]. Innym składnikiem spoiwowym przyjaznym dla środowiska jest metakaolinit. Jest to pucolana, którą wytwarza się, prażąc kaolin w temperaturze 600–700°C [Pavlikova i in. 2009]. W zależności od pochodzenia może ona zawierać różną ilość tlenków żelaza, tytanu i potasu. Jin i Li [2003] podają, że częściowe zastąpienie cementu przez metakaolinit wpływa nie tylko na hydratację cementu, ale również na właściwości betonu zwykłego, jego wytrzymałość, pęcznienie, porowatość oraz trwałość.

Celem przeprowadzonych badań było poznanie wpływu dodania metakaolinitu w czasie sporządzania mieszanki betonowej betonu zwykłego na jego wybrane właściwości techniczne. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie wytrzymałości badanego materiału przy różnej zawartości metakaolinitu i ocenienie jego roli jako dodatku do betonu. Próbkę betonu do badań zaprojektowano jako beton zwykły zgodnie z normą PN-EN 206-1:2003.

MATERIAŁ I METODYKA

W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano mieszanki betonowe (beton) klasy C20/25 o konsystencji gęstoplastycznej – F2. Ilość składników mieszanki betonowej obliczono metodą trzech równań według Kluza-Eymana. Do przygotowania próbek betonu wykorzystano kruszywo naturalne o uziarnieniu 0,125–16 mm oraz cement CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R. Jest to cement, który zawiera 65–79% klinkieru portlandzkiego. Łączna zawartość popiołu lotnego krzemionkowego (V) i wapienia (LL) waha się od 21 do 35% masy. W tabeli 1 przedstawiono wymagania dla cementu. Metakaolinit ASTRA MK40 pochodził ze Straszyna koło Gdańska (rys. 1).

Tabela 1. Wymagania normowe dla CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R [PN-EN 197-1:2002]

Table 1. Standard requirements for CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R [PN-EN 197-1:2002]

Wymagania normowe Standard requirements	Jednostka Unit	Wartości wymagane Required values
Wytrzymałość na ściskanie: Compressive strength: po 2 dniach – after 2 days po 28 dniach – after 28 days	MPa	≥ 10,0 32,5–52,5
Czas wiązania (początek) Binding time (beginning)	min	≥ 75
Stołość objętości Stability volume	mm	≤ 10
Zawartość siarczanów (SO ₃) Content of sulphates (SO ₃)	%	≤ 3,5
Zawartość chlorków Content of chlorides	%	≤ 0,10



Rys. 1. Metakaolinit ASTRA MK 40 (fot. K. Pieńkosz)

Fig. 1. Metakaolin ASTRA MK 40 (photo K. Pieńkosz)

Badania polegały na porównaniu właściwości betonów zwykłych wytwarzanych w tradycyjny sposób oraz betonów zawierających w swoim składzie metakaolinit w różnych procentach masowych. Przygotowano cztery rodzaje próbek:

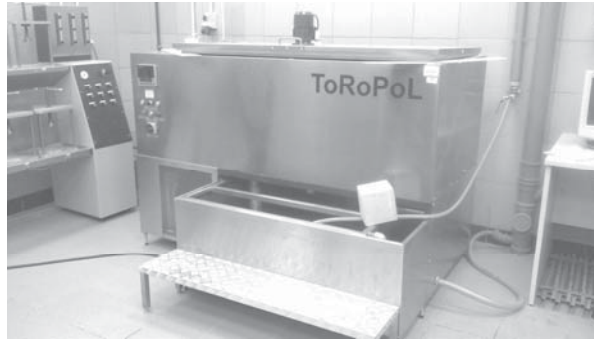
- bez metakaolinitu (partia 1),
- 5% cementu zastępując metakaolinitem (partia 2),
- 10% cementu zastępując metakaolinitem (partia 3),
- 15% cementu zastępując metakaolinitem (partia 4).

Mieszanki betonowe przygotowano w laboratorium budowlanym Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW w Warszawie. Zgodnie z obowiązującymi normami sprawdzono właściwości mieszanki betonowej: gęstość pozorną według PN-EN 12350-6:2011, konsystencję według PN-EN 206-1:2003 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 i wytrzymałość na zginanie według PN-EN 12390-5:2011 w 28. dniu dojrzewania betonu, nasiąkliwość według PN-EN 12390-2:2011 oraz mrozoodporność według PN-88/B-06250. Wytrzymałość na zginanie przeprowadzono w maszynie ZD-40 (rys. 2), a mrozoodporność w komorze „Toropol” (rys. 3).



Rys. 2. Maszyna wytrzymałościowa ZD-40 (fot. K. Pieńkosz)

Fig. 2. Compressive strength of concrete testing machines ZD-40 (photo K. Pieńkosz)



Rys. 3. Komora do badania mrozoodporności „Toropol” [fot. K. Pieńkosz]

Fig. 3. Climatic chamber for testing resistance to frost “Toropol” [photo K. Pieńkosz]

WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

Wykazano wpływ dodania metakaolinitu na właściwości betonów zwykłych wykonanych bezpośrednio na budowie oraz określono możliwość wykonania dobrej jakości betonów bez dodatku oraz z dodatkiem metakaolinitu.

Zarówno w próbkach niezawierających dodatku, jak i w próbkach z dodatkiem metakaolinitu zachowano stały skład granulometryczny kruszywa dobranego metodą kolejnych przybliżeń – iteracji (tab. 2).

Tabela 2. Skład ziarnowy kruszywa (K. Pieńkosz)

Table 2. Composition of granual aggregate

Frakcja Fraction	Procentowy stosunek zmieszania frakcji (piasku i żwiru) Percentage of the mixing fraction (sand and gravel)			Skład ziarnowy Composition of granual	
				piasku sand [%]	kruszywa aggregate [%]
	Etap I Stage I	Etap II Stage II	Etap III Stage III		
0,0–0,125				0,93	0,35
0,125–0,25				17,82	6,77
0,25–0,5			38	39,62	15,06
0,5–1,0				34,32	13,04
1,0–2,0				7,31	2,78
2,0–4,0		32			19,84
4,0–8,0	45		62		18,97
8,0–16,0	55	68			23,19

Do przyjętych założeń projektowania mieszanki betonowej betonu zwykłego przy użyciu metody trzech równań ustalono recepturę mieszanki betonowej na jeden zarób (tab. 3).

Tabela 3. Receptura mieszanki betonowej na jeden zarób
Table 3. Recipe of the concrete mix for one portion

Składniki mieszanki Components of the concrete mix	Receptura robocza Temporary recipe [kg, dm ³]
Kruszywo – Aggregate	38,42
Woda – Water	6,12
Cement – Cement	14,97
Dodatki – Supplements	0,0

WYNIKI BADAŃ MIESZANKI BETONOWEJ

Gęstość mieszanki betonowej

Po przeprowadzeniu badania gęstości mieszanki betonowej według normy PN-EN 12350-6:2011 zauważono nieznaczny spadek gęstości wraz ze zwiększającą się ilością metakaolinitu w mieszance. Mieszanka betonowa bez dodatku metakaolinitu uzyskała największą gęstość, równą 2353 kg·m⁻³, mieszanka zaś z zawartością 15% metakaolinitu – najmniejszą, równą 2339 kg·m⁻³.

Klasa konsystencji

Badanie konsystencji mieszanki betonowej wykonano zgodnie z normą PN-EN 206-1:2003 metodą opadu stożka (rys. 4). Podczas przeprowadzania badania konsystencji opad stożka dla mieszanki betonowej bez dodatku metakaolinitu był największy i wyniósł 6,5 cm, co daje klasę konsystencji S2 (gęstoplastyczna). Wraz z dodatkiem większej ilości metakaolinitu opad stożka malał. Opad stożka mieszanki betonowej z zawartością 5% metakaolinitu wyniósł 5,9 cm, co odpowiada klasie konsystencji S2. Mieszance betonowej z zawartością 10% MK przyznano klasę konsystencji S1 (wilgotna), ponieważ opad stożka wyniósł 3,9 cm. Stożek utworzony z mieszanki betonowej z zawartością 15% MK opadł 2,3 cm, co daje klasę konsystencji S1.



Rys. 4. Badanie konsystencji

Fig. 4. Consistency test

Pozorna zawartość powietrza

Zgodnie z normą PN-EN 12350-7:2011 badanie zawartości powietrza w mieszance betonowej przeprowadzono metodą ciśnieniomierza. Zawartość powietrza w mieszance betonowej z dodatkiem 5% metakaolinitu wyniosła 5,2%. Pomiar ten znacznie różni się od pozostałych. Pozostałe pomiary pozornej zawartości powietrza są do siebie zbliżone. Mieszanka betonowa z zawartością 15% MK uzyskała zawartość powietrza równą 2,9%. Zarówno mieszanka betonowa bez metakaolinitu, jak i z zawartością 10% metakaolinitu wyniosła 2,7%.

Wyniki przeprowadzonych badań mieszanki betonowej zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Zestawienie wyników badań mieszanki betonowej
Table 4. Test results of concrete mix

Rodzaj badania Type of test	Gęstość Density [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Opad stożka Slump [cm]	Klasa konsystencji Consistency class	Pozorna zawartość powietrza Apparent air content [%]
Bez dodatku Without supplement	2353	6,5	S2	2,7
5% MK	2346	5,9	S2	5,2
10% MK	2342	3,9	S1	2,7
15% MK	2339	2,3	S1	2,9

WYNIKI BADAŃ BETONU

Gęstość betonu

Po 28 dniach dojrzewania próbki betonu wyjęto z wody w celu określenia gęstości betonu zgodnie z normą PN-EN 12350-7:2011. Największą gęstość uzyskał beton bez dodatku metakaolinitu, równą $2358 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, najmniejszą – beton z zawartością 10% metakaolinitu, która wynosi $2337 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Wyniki gęstości betonu są zbliżone do siebie. Beton z dodatkiem 5% metakaolinitu uzyskał gęstość $2350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, beton zaś z 10% MK – $2337 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Wytrzymałość na ściskanie

Badanie wytrzymałości próbek betonowych na ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2011 w maszynie wytrzymałościowej. Badanie przeprowadzono na próbkach typu B – kostki sześciennie o boku 150 mm. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że beton zawierający 15% metakaolinitu ma największą wytrzymałość, równą 49,9 MPa. Następnie największą wytrzymałość uzyskał beton z 10% MK, równą 46,6%, a beton z dodatkiem 5% metakaolinitu uzyskał najmniejszą wytrzymałość, która wynosi 44,0 MPa. Niewiele większą wytrzymałość od betonu z zawartością 5% MK uzyskał beton bez dodatku. Wytrzymałość jego wyniosła 44,4 MPa.

Wytrzymałość na zginanie

Badanie wytrzymałości próbek betonowych na zginanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN12390-5:2011. Badanie przeprowadzono na próbkach – kostki o wymiarach $100 \times 100 \times 500$ mm, w maszynie wytrzymałościowej ZD-40. Największą wytrzymałość uzyskał beton z dodatkiem 15% MK, równą 6,2 MPa, następnie beton z dodatkiem 10% MK, równą 5,9 MPa, z kolei beton bez dodatku metakaolinitu uzyskał wytrzymałość 5,1 MPa. Najmniejszą wytrzymałość uzyskał beton z dodatkiem 5% MK, równą 4,9 MPa.

Nasiąkliwość

Nasiąkliwość betonów jest zjawiskiem niepożądanym, ponieważ zmniejsza jego odporność i może prowadzić do większej podatności na działanie mrozu. Nasiąkliwość nie powinna być większa niż 5% dla betonów narażonych na działanie czynników atmosferycznych i 9% dla betonów osłoniętych przed działaniem czynników atmosferycznych [Mizera i in. 2000].

W celu sprawdzenia nasiąkliwości przygotowano próbki, które między 3. a 28. dniem twardnienia przebywały całkowicie zanurzone w wodzie, w temperaturze $\sim 20^{\circ}\text{C}$. Zgodnie z normą PN-EN12390-2:2011 badanie nasiąkliwości próbek rozpoczęto bezpośrednio po zakończeniu okresu ich pielęgnacji. Z przeprowadzonych badań wynika, iż nasiąkliwość maleje wraz ze wzrostem ilości dodatku metakaolinitu w betonie. Beton bez metakaolinitu uzyskał największą nasiąkliwość, równą 4,5%, beton zaś z zawartością 15% metakaolinitu – najmniejszą, równą 3,0%. Następnie beton z zawartością 10% MK uzyskał nasiąkliwość 3,2%, a beton z zawartością 5% MK – 3,3%.

Wyniki badań dojrzałego betonu przeprowadzonych w laboratorium zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Zestawienie wyników badań stwardniałego betonu

Table 5. Test results of hardened concrete

Rodzaj badania Type of test	Gęstość / Średnia gęstość / Average density / Average density [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Wytrzymałość na ściskanie / Średnia wytrzymałość Compressive strength / Average compressive strength [MPa]	Wytrzymałość na zginanie / Średnia wytrzymałość Flexural strength / Average flexural strength [MPa]	Średnia nasią- kliwość z pięciu próbek / Average water absorption [%]	Mrozoodpor- ność [-] Frost resi- stance
Bez dodatku Without supplement	2364	45,7	3,9	4,5	tak yes
	2356 / 2358	43,9 / 44,4	5,3 / 5,1		
	2353	43,6	5,9		
5% MK	2340	42,2	4,4	3,3	nie no
	2355 / 2350	44,7 / 44,0	5,0 / 4,9		
	2354	45,2	5,2		
10% MK	2346	43,6	5,7	3,2	nie no
	2347 / 2337	49,5 / 46,6	6,1 / 5,9		
	2318	46,7	6,0		
15% MK	2342	47,0	6,2	3,0	nie no
	2339 / 2345	51,4 / 49,9	5,9 / 6,2		
	2354	51,4	6,6		

Mrozoodporność

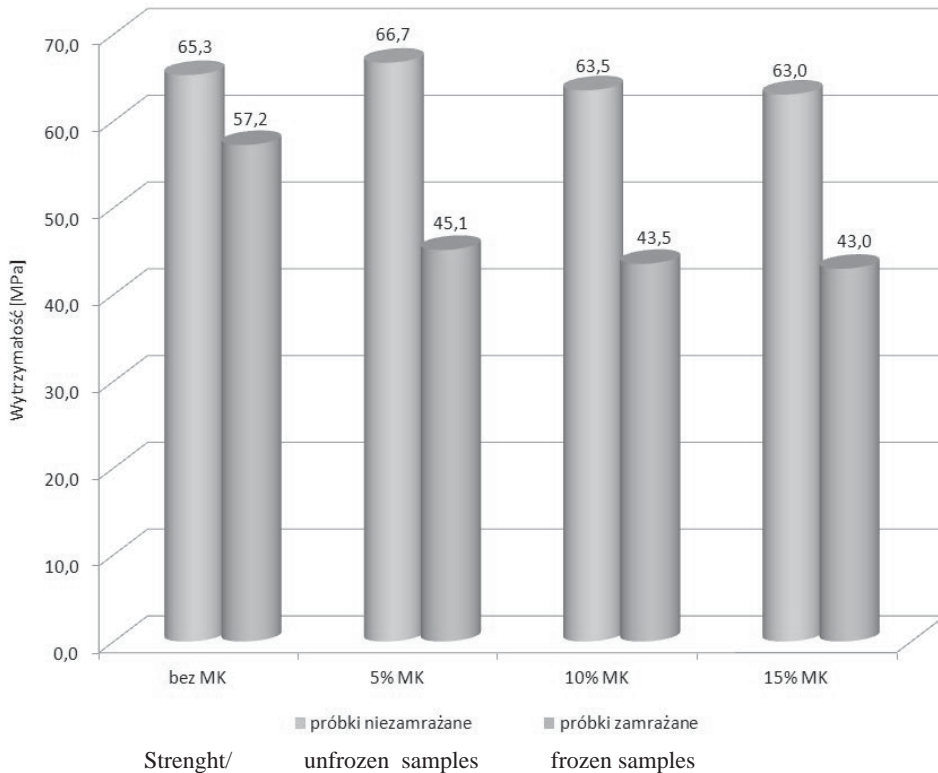
Badanie mrozoodporności polega na określeniu spadku wytrzymałości na ściskanie próbki zamrażanej w stosunku do próbki niezamrażanej. Obniżenie wytrzymałości na ściskanie nie powinno być większe niż 20%. Według normy PN-88/B-06250 próbki poddane zamrażaniu nie powinny mieć pęknięć, a ubytek masy nie powinien przekraczać 5% masy próbek niezamrażanych. Do badania zastosowano sześćienne próbki o wymiarze nominalnym 100 mm. Badanie wykonano na 12 próbkach betonu z jednej partii. Sześć z nich po wyjęciu z wody zważono, wycierając je wcześniej z nadmiaru wody, a następnie umieszczono w komorze zamrażalniczej „Toropol” (rys. 3). Pozostałe sześć próbek posłużyło jako próbki porównawcze do badania wytrzymałości na ściskanie. Na czas badania przeprowadzanego w komorze próbki porównawcze umieszczono w wodzie o temperaturze 18°C. Próbki umieszczone w komorze poddano 150 cyklom. Jeden cykl badania polegał na zamrożeniu próbek w komorze w temperaturze -18°C, a następnie rozmrożeniu ich w wodzie o temperaturze +18°C. Czas jednego cyklu wyniósł 6 godzin. Wszystkie próbki, które były poddane działaniu mrozu, charakteryzowały się delikatną siatką spękań. Nie zauważono żadnych znacznych uszkodzeń próbek betonowych. Kryterium mrozoodporności betonu (tab. 6) są warunki:

- ubytek masy nie większy niż 5%,
- spadek wytrzymałości nie większy niż 20%.

Tabela 6. Kryterium mrozoodporności betonu
Table 6. Criterion of concrete frost resistance

Beton Concrete	Ubytek masy Loss of weight [%]	Spadek wytrzymałości Loss of strenght [%]	Mrozoodporność Frost resistance
Bez dodatku Without supplement	-0,1	12,3	tak yes
5% MK	-0,5	32,3	nie no
10% MK	-0,5	31,5	nie no
15% MK	-0,4	31,9	nie no

Ubytki mas próbek betonowych są ujemne. Świadczy to o tym, że po badaniu przeprowadzonym w komorze zamrażalniczej masy próbek zwiększyły się. Może to być spowodowane tym, że próbki z mikropęknięciami wchłonęły więcej wody. Spadek wytrzymałości na ściskanie betonu bez dodatków jest mniejszy niż 20% i wynosi 12,3%. Oznacza to, że beton jest mrozoodporny. Spadek wytrzymałości na ściskanie próbek z dodatkiem 5% metakaolinitu przekroczył graniczną wartość i wyniósł 32,3%, z dodatkiem 10% MK wyniósł 31,5%, a z zawartością 15% MK – 31,9%. Dodatek metakaolinitu spowodował brak odporności betonu na mróz.



Rys. 5. Rozkład wytrzymałości na ściskanie próbek zamrażanych i niezamrażanych (MK – metakaolinit)

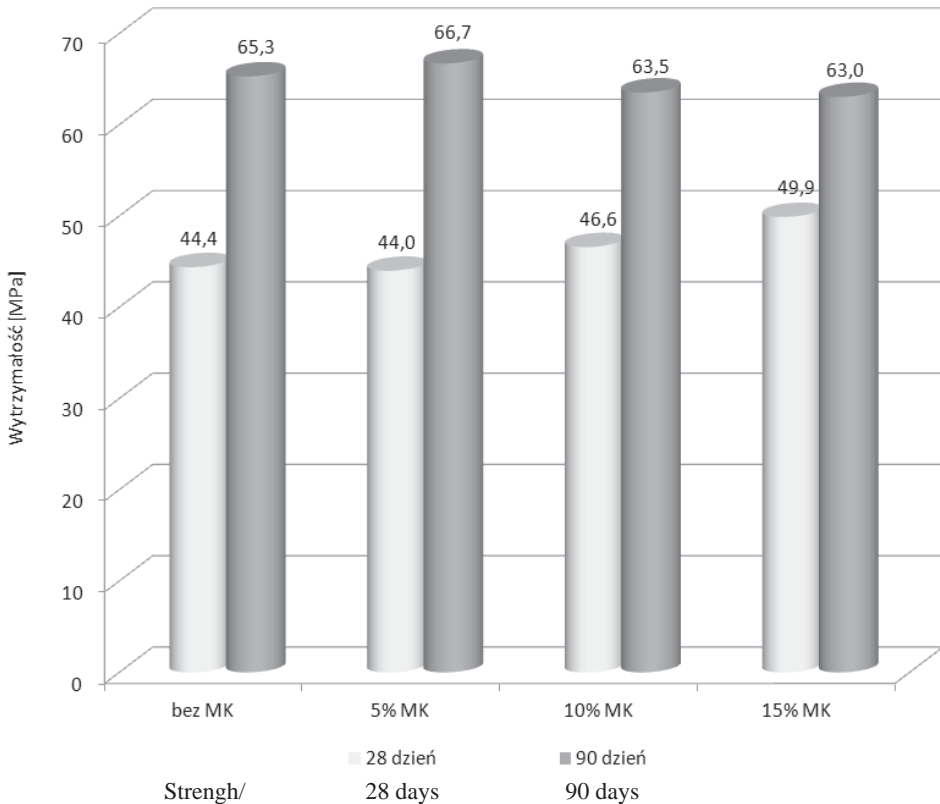
Fig. 5. Distribution of compressive strength frozen and unfrozen samples (MK – metakaolin)

Na wykresie (rys. 5) przedstawiono rozkład wytrzymałości na ściskanie próbek zamrażanych i niezamrażanych, który obrazuje spadek wytrzymałości poszczególnych rodzajów betonu. Wyraźnie widać, że beton bez dodatku metakaolinitu charakteryzuje się najmniejszym spadkiem wytrzymałości na ściskanie.

Wytrzymałość na ściskanie w czasie

Badania wytrzymałości na ściskanie próbek sześciennych wykorzystanych do badania mrozoodporności o wymiarze nominalnym 100 mm przypadły na około 90. dzień dojrzewania betonu. Dzięki tym wynikom można przeanalizować zmianę wytrzymałości na ściskanie w czasie. Na wykresie (rys. 6.) przedstawiono rozkład wytrzymałości na ściskanie badanych próbek w 28. i 90. dniu dojrzewania betonu.

Przyrost wytrzymałości w czasie jest najmniejszy dla betonu z zawartością 15% metakaolinitu i wynosi 26,3%. Dla betonu z 10% MK wzrost wytrzymałości jest równy 36,3%, a dla betonu bez dodatku – o 47,1%. Największym wzrostem wytrzymałości na ściskanie charakteryzuje się beton z dodatkiem 5% metakaolinitu – 51,6%.



Rys. 6. Rozkład wytrzymałości na ściskanie próbek badanych w 28. i 90. dniu dojrzewania (MK – Metakaolinit)

Fig. 6. Distribution of compressive strength samples after 28 days and 90 days of maturation (MK – Metakaolin)

WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Dodatek metakaolinitu powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie i zginanie w 28. dniu dojrzewania betonu.

2. Beton zawierający 15% MK charakteryzuje się najmniejszą gęstością mieszanki betonowej, najmniejszym opadem stożka, najmniejszą nasiąkliwością oraz największą wytrzymałością na ściskanie i zginanie w 28. dniu dojrzewania betonu.

3. Beton z dodatkiem 5% metakaolinitu charakteryzuje się najmniejszą wytrzymałością na ściskanie i zginanie w 28. dniu dojrzewania betonu, a największą wytrzymałością na ściskanie uzyskuje w 90. dniu. Wzrost wytrzymałości wyniósł 51,6%. Niestety przy badaniu mrozoodporności wytrzymałość spadła o 32,3%, co świadczy o braku odporności betonu na działanie mrozu.

4. Metakaolinit nie przyczynił się do wzrostu mrozoodporności. Może to być spowodowane tym, że cement, który użyty był do wykonania betonu, zawierał już w swoim składzie od 21 do 35% popiołów lotnych oraz wapieni i dodanie metakaolinitu spowodowało jeszcze większy udział dodatków w stosunku do czystego klinkieru, co mogło osłabić strukturę betonu.

5. Opad stożka mieszanki betonowej bez dodatku metakaolinitu był największy i wyniósł 6,5 cm, co daje klasę konsystencji S2. Beton bez dodatku metakaolinitu uzyskał (zaraz po betonizacji z 5% MK) najmniejszą wytrzymałość na ścislenie i zginanie w 28. dniu dojrzewania betonu (44,4 MPa) oraz największą nasiąkliwość (4,5%). Wytrzymałość na ścislenie po 90. dniu dojrzewania wzrosła o 47,1%. Przy badaniu mrozoodporności wytrzymałość betonu spadła o 12,4%, co znaczy, że beton bez dodatku metakaolinitu jest mrozoodporny.

PIŚMIENNICTWO

- Elahi A. i in., 2010. Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials. *Constr. Build. Mat.* 24, 292–299.
- Jin X., Li Z., 2003. Effects of Mineral Admixture on Properties of Young Concrete. *J. Mat. Civ. Engrg.* 15, 435–442.
- Maca P., Jandekova P., Konvalinka P., 2014. Wpływ dodatku metakaolinitu na odporność betonu na powstawanie odprysków pod działaniem mrozu. *Cement, Wapno, Beton* 1, 1–7.
- Mizera J. i in., 2000. Ćwiczenia laboratoryjne z materiałów budowlanych i technologii betonu. Politechnika Opolska, Opole.
- Pavlikova M., Brtnik T., Keppert M., Cerny R., 2009. Wpływ metakaolinitu, jako częściowego zamiennika cementu, na właściwości zapraw wysokowartościowych. *Cement, Wapno, Beton* 3, 115–122.
- PN-88/B-06250 Beton zwykły (norma nieaktualna)
- PN-EN 197-1:2002 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dla cementów powszechnego użytku.
- PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- PN-EN 12350-2:2011 Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- PN-EN 12350-6:2011 Badania mieszanki betonowej. Część 6: Gęstość.
- PN-EN 12350-7:2011 Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badanie zawartości powietrza – metody ciśnieniowe.
- PN-EN 12390-2:2011 Badania betonu. Część 2: Wykonanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
- PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badania.
- PN-EN 12390-5:2011 Badania betonu. Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badania.

EFFECT OF METAKAOLIN AS PARTIAL CEMENT REPLACEMENT ON SELECTED PROPERTIES OF CONCRETE (ASTRA MK 40)

Abstract. Metakaolin (ASTRA MK 40) is a pozzolanic addition for concrete. Most commonly used as a partial Portland-cement replacement. This thesis is based on Portland-composite cement CEM II/B-M (V-LL) 32.5R. Concrete with added metakaolin has been made in three batches – replacing 5, 10 and 15% of cement weight. The material has been

tested thoroughly. After measures have been taken the metakaolin decreases absorptivity of concrete, increases flexural and compressive strength in 28 day. It turns out concrete strengthened with metakaolin is not frost resistant.

Key words: metakaolin, pozzolanic additive, Portland-composite cement, compressive strength, flexural strength

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 19.12.2014