

PIASKOBETONY SPECJALNE NA BAZIE PIASKU ODPADOWEGO MODYFIKOWANE MIKROKRZEMIONKĄ I ZBROJENIEM ROZPROSZONYM

Jacek Katzer

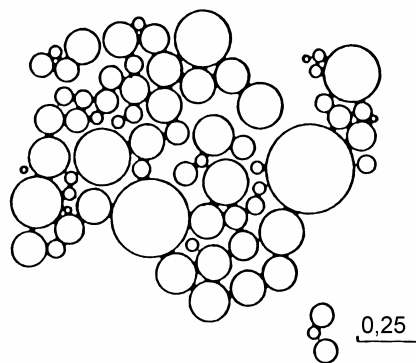
Katedra Budownictwa i Materiałów Budowlanych, Politechnika Koszalińska, Koszalin

1 WSTĘP

Słowo pucolanowy pochodzi od nazwy włoskiej miejscowości Pozzuoli, gdzie podobno starożytni Rzymianie pierwszy raz zmieszali rozdrobniony kamień wapienny z pyłem wulkanicznym. Uzyskane w ten prosty sposób spoiwo służyło do wytwarzania zapraw murarskich oraz prymitywnych mieszanek betonowych tak potrzebnych do budowy Rzymu. Pozzuoli dało początek dziejom cementu. Wytrzymałość i odporność na czynniki atmosferyczne antycznych zapraw możemy ciągle podziwiać zwiedzając ruiny rzymskich budowli. Dobrym przykładem prawie 2000 letniej trwałości jest rzymskie Koloseum.

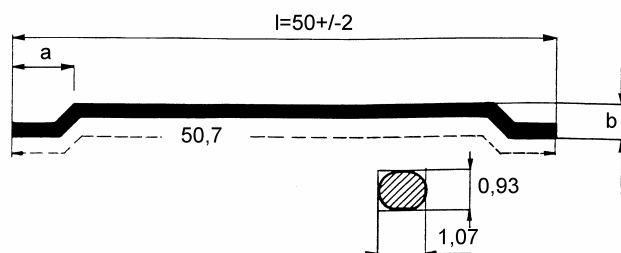
Nowożytny beton znany jest od chwili wyprodukowania w Anglii na przełomie lat 1824/1825 spoiwa hydraulicznego nazywanego cementem portlandzkim. W Niemczech i Francji rozpoczęto produkcję tego rodzaju cementu w 1850 roku, w Polsce w 1853 roku, a w USA dopiero w 1875 roku w Coplay w Pensylwanii. Beton jest od kilkudziesięciu lat głównym materiałem budowlanym i pozostanie nim zapewne nadal ze względu na wszechstronność zastosowania, stosunkowo niski koszt i powszechność występowania jego podstawowych składników, a także prostą technologię wytwarzania w porównaniu z innymi materiałami konstrukcyjnymi. Duże znaczenie betonu w budownictwie nie oznacza bynajmniej, że pozostaje on w niezmięnionej postaci. Nowoczesne tendencje do ulepszania betonu i dostosowywania tego materiału do rosnących wymagań obejmują poza stosowaniem dodatków i domieszek oraz różnych zabiegów technologicznych komponowanie materiałów bardziej złożonych przez

wprowadzenie dodatkowych składników [1]. Koszt betonu jest istotnym czynnikiem jego stosowania. Okazuje się jednak, że w licznych przypadkach użycie nawet stosunkowo drogiego dodatków jest opłacalne, zwłaszcza przy uwzględnieniu wszystkich składników kosztu. Z obserwacji wynika, że niektóre konstrukcje betonowe zachowują wystarczającą trwałość przez bardzo długi okres czasu, natomiast inne ulegają stosunkowo szybkiemu zniszczeniu. Stosując beton o zwiększonej odporności lub trwałości, zwiększamy jednostkowy koszt inwestycji ale jednocześnie znacząco obniżamy koszt eksploatacji dzięki rzadszym naprawom, mniejszym stratom z powodu przerw w ruchu czy produkcji i dłuższemu okresowi technicznej żywotności samej konstrukcji [12]. Dobrym przykładem użycia dodatku o dużej cenie jednostkowej którego zastosowanie do betonu w pełni się kalkuluje po uwzględnieniu wszelkich kosztów i zysków jest mikrokrzemionka (MK) przedstawiona na rys. 1.



Rys. 1. Kształt i wielkość ziaren mikrokrzemionki (skala w μm) wg [14].

Dodatek 15% mikrokrzemionki do betonu podnosi cenę 1m^3 od kilku do kilkunastu procent (w zależności od rodzaju) ale otrzymujemy za to beton niskonasiąkliwy, o zwiększonej wytrzymałości na ściskanie oraz szczelności kilkudziesięciokrotnie większej niż produkt wyjściowy [3,8,9]. Uzyskanie takiego wzrostu szczelności betonu innymi metodami jest praktycznie niemożliwe. Podobnie ma się rzecz z włóknami stalowymi (ZB) zobrazowanymi na rys. 2.



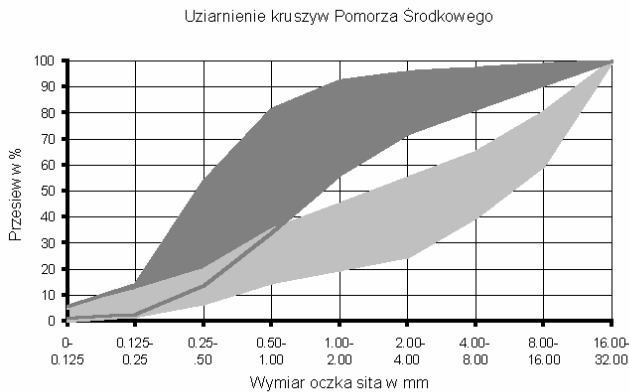
Rys. 2. Kształt włókien EKOMET 50/1.00. Podane przez producenta wartości nominalne a oraz b wynosiły odpowiednio 5 ± 2 i 3 ± 1 mm.

Betony modyfikowane włóknami są droższe od betonów zwykłych ale uzyskana dzięki temu zabiegowi zwiększona odporność na zginanie czy obciążenia dynamiczne całkowicie rekompensują poniesione koszty. Na szeroką skalę badane i stosowane od lat sześćdziesiątych udowodniły swoją przydatność do budowy nawierzchni lotnisk i autostrad, tuneli, kopalń oraz części elementów konstrukcyjnych budowli. Podstawę racjonalnego wykorzystania konstrukcyjnych materiałów budowlanych stanowi zasada odpowiedniości między wymaganiami w zakresie stosowania i użytkowania a właściwościami technologicznymi i użytkowymi tych materiałów. Zastosowanie materiału o właściwościach zaniżonych w stosunku do wymagań jest błędem technicznym, natomiast o właściwościach zawyżonych - błędem ekonomicznym. Realizacja zasady odpowiedniości wymagań i właściwości w odniesieniu do wszystkich materiałów sprowadza się do trafnego wyboru materiału budowlanego i sformułowania zaleceń co do warunków jego użytkowania [2].

Nowoczesne budowle i przedsięwzięcia inżynierskie wymagają coraz większej ilości coraz bardziej wysokowytrzymałych, szczelnych, a jednocześnie mniej nasiąkliwych betonów. Zbudowana ostatnio w Norwegii największa na świecie morska platforma wiertnicza Troll

mająca przez najbliższe 50 lat zaopatrywać Europę Zachodnią w gaz z Morza Północnego jest imponującym przykładem coraz wyższych wymagań konstrukcyjnych stawianych betonom. Na budowę Trolla zużyto $245\ 000\ \text{m}^3$ betonów najwyższej jakości, w których ilość dodatków na $1\ \text{m}^3$ dochodziła do 1000 kg (w tym duże ilości mikrokrzemionki). Szacuje się, że sama budowa polskich autostrad wschód-zachód A2 i A4 pociągnie za sobą realizację sześciuset mostów, kładek i wiaduktów. Coraz szerszy front robót stanowią wszelkiego rodzaju oczyszczalnie ścieków i stacje ujęć oraz uzdatniania wody. Betony o bardzo dużej wytrzymałości, wodoszczelności i odporności na korozję są również potrzebne do realizacji zapór, tam, jazów, płyt lotnisk i specjalistycznych elementów konstrukcyjnych. Szeroko rozumiana ochrona środowiska wymaga stosowania materiałów bardzo wytrzymałych, szczelnych i nienasiąkliwych przez co odpornych na mróz i agresję chemiczną. W dotychczasowej praktyce inżynierskiej betony specjalne (o dużej wytrzymałości, szczelności czy mrozoodporności) były wykonywane na bazie kruszyw żwirowych o normowej krzywej uziarnienia. Niestety złoża kruszyw grubych w przeważającej większości znajdują się na południu Polski, a takie rejony kraju jak na przykład Pomorze Środkowe (dawne woj. Koszalińskie, słupskie, pilskie) obfitują w kruszywa plejstocenne o pochodzeniu lodowcowym lub wodnolodowcowym. Wspólną cechą osadów lodowcowych i wodnolodowcowych jest mała zawartość składników żwirowych i gruboziarnistych, przy jednoczesnej dużej zawartości piasku drobnego. Osady te są drobniejsze od zalecanego uziarnienia kruszywa do betonów zwykłych co przedstawiono na rys. 3. Kruszywa te są w większości przypadków bądź sprzedawane jako pospółka, bądź frakcjonowane na piasek 0-2 mm i żwir 2-32 mm. Żwir, który stanowi 20-25% całości pospółki jest zagospodarowywany, a odsiany nadmiar frakcji piaszkowych pospółki zalega od lat na ciągle powiększających się hałdach przy kopalniach kruszyw. W ciągu ostatnich 30 lat były podejmowane różnorodne próby zagospodarowania tego piasku poprzez wykorzystanie go do produkcji piaskobetonów. Niestety materiał ten ma wiele wad od dużej cementochłonności począwszy a na dużej nasiąkliwości, skurczu i pęczaniu skończywszy. Próby modyfikowania piaskobetonu popiołami lotnymi, mikrosferami

czy plastyfikatorami nie dały w pełni zadowalających rezultatów.



Rys. 3. Uziarnienie kruszyw Pomorza Środkowego (pole górne) na tle wymogów normowych dla kruszyw do betonów (pole dolne) [10,11].

Rosnące koszty transportu oraz przyszłe duże zapotrzebowanie w regionie na betony konstrukcyjne i specjalne związane chociażby z budową drogi ekspresowej Szczecin-Gdańsk karzą poważnie się zastanowić nad możliwością wykorzystania do produkcji betonu miejscowych piasków odpadowych. Duże nadzieje w tej kwestii dają nowe domieszki do betonów takie jak mikrokrzemionka oraz zastosowanie mało jeszcze w Polsce rozpowszechnionego zbrojenia rozproszonego.

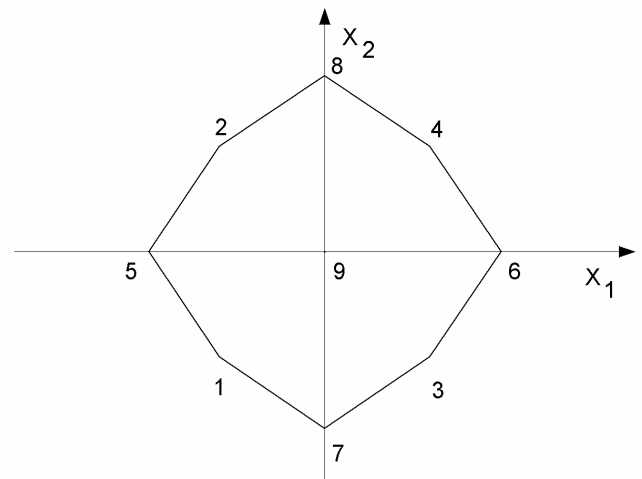
2 TEZA I CEL PRACY

Autor tej pracy uważa, że można skomponować beton na bazie miejscowych piasków odpadowych modyfikowany mikrokrzemionką i zbrojeniem rozproszonym, który będzie w pełni spełniał wymogi konstrukcyjne i eksploatacyjne stawiane betonom zwykłym bądź specjalnym. Badania będą prowadzone przy użyciu tylko i wyłącznie materiałów produkcji krajowej.

3 PROGRAM BADAŃ

Badania zostały zaplanowane jako globalne rozpoznanie możliwości wykonania piaskobetonów specjalnych na bazie piasku odpadowego, mikrokrzemionki i zbrojenia rozproszonego. Wykorzystując doświadczenie zdobyte w trakcie badań zwirowych betonów mikrokrzemionkowych [3, 5, 8, 9] oraz opierając się na studiach

literaturowych autor określił maksymalne zawartości poszczególnych dodatków. Badania prowadzono na zarobach o zawartości MK od 0% do 25% oraz o zawartości ZB od 0% do 2%. Badania obejmowały tak badania świeżej mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu. Oprócz cech wytrzymałościowych badania obejmowały swym zakresem przede wszystkim pomiary odkształceń kompozytu piaskobetonowego jako zjawisko kluczowe do opisu jego struktury, mechaniki zniszczenia i wytrzymałości. Na podstawie analizy rozkładu wyników badań wstępnych jako najbardziej odpowiedni plan eksperymentu wybrany został plan centralny kompozycyjny bazujący na planie Placketta-Burmana, którego punkty pomiarowe są rozmieszczone tak jak to zestawiono w tab. 1. oraz zobrazowano na rys. 4.



Rys. 4. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych (od 1 do 9) dla dwóch czynników wejściowych.

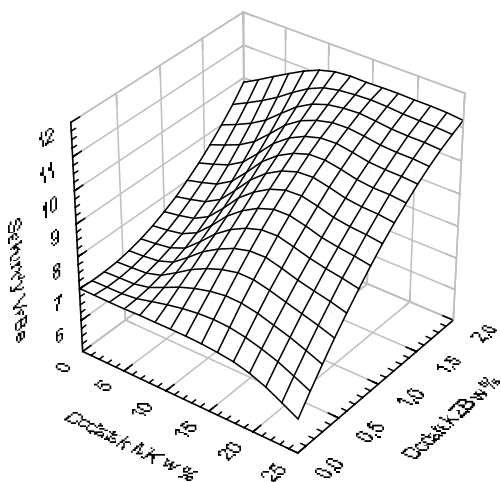
Tabela 1. Plan eksperymentu.

Numer eksperymentu	Czynniki wejścia w wartościach kodowych	
	x_1	x_2
1	-1,00000	-1,00000
2	-1,00000	1,00000
3	1,00000	-1,00000
4	1,00000	1,00000
5	-1,68179	0,00000
6	1,68179	0,00000
7	0,00000	-1,68179
8	0,00000	1,68179
9	0,00000	0,00000

4 WYBRANE WYNIKI BADAŃ

4.1 Konsystencja

Konsystencję świeżej mieszanki piaskobetonowej badano na aparacie Ve-Be. Wyniki badania konsystencji przedstawiono na rysunku nr 5. Dzięki stosunkowo dużemu dodatkowi superplastyfikatora zdołano utrzymać prawie wszystkie zaroby w granicach od 7 do 11 sekund co odpowiada normowej konsystencji plastycznej K-3. Na rys. 5. można zauważyć wyraźne gęstnienie konsystencji wraz z dodatkiem zbrojenia i niezależnie od ilości dodawanej mikrokrzemionki. Dodatek mikrokrzemionki również powoduje gęstnienie konsystencji przy ilościach od 0 do 15%, a w zakresie od 15 do 25% następuje powtórne upłynnienie zarobów. Trzeba tutaj zaznaczyć, że mierzona konsystencja w miarę zwiększania ilości tak mikrokrzemionki jak i zbrojenia w świeżej mieszance betonowej coraz bardziej nie odzwierciedlała urabialności wykonywanego zarobu. Zjawisko to narastało tak gwałtownie, że zaroby o zawartości 20-25% MK i 1,5-2% ZB pomimo plastycznej konsystencji (11sekund) były w ogóle nie urabialne i nie wykonano z nich żadnych próbek.

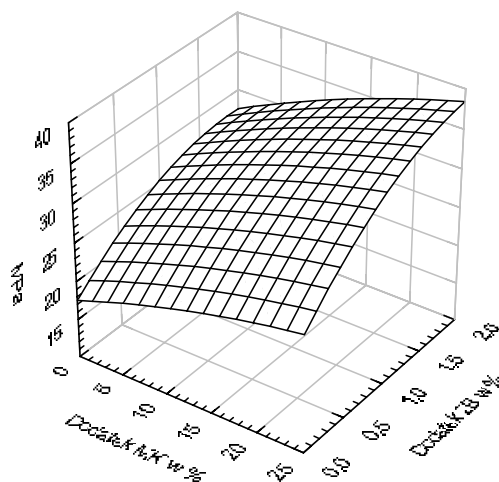


Rys. 5. Konsystencja świeżej mieszanki piaskobetonowej w zależności od dodatku MK i ZB.

4.2 Wytrzymałość na ściskanie

Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na rys. 6. Jak widać na rys. 6. zarówno mikrokrzemionka jak i zbrojenie rozproszone wpływają na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie piaskobetonu a ich wpływ na tą

cechę kumuluje się. Płaszczyzna wytrzymałości na ściskanie podnosi się w obu kierunkach i to prawie z jednakową dynamiką. Wytrzymałość wzrasta od 19,7 MPa dla zarobu porównawczego (bez dodatku MK i ZB) do 36 MPa (co stanowi wzrost o 83%) dla zarobów o zawartości domieszek 20% MK i 1% ZB i większej. Należy jednocześnie zauważyć, że wytrzymałość piaskobetonu modyfikowanego samym zbrojeniem rozproszonym osiąga swoje maksimum przy dodatku 2% i wynosi wtedy 26,7 MPa (co stanowi wzrost o 35%), a modyfikowanego samą mikrokrzemionką przy dodatku 25% i wynosi wtedy 23,9 MPa (co stanowi wzrost o 21%).



Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie kompozytu piaskobetonowego R_{KS28} w zależności od dodatku MK i zbrojenia ZB.

4.3 Wodoszczelność

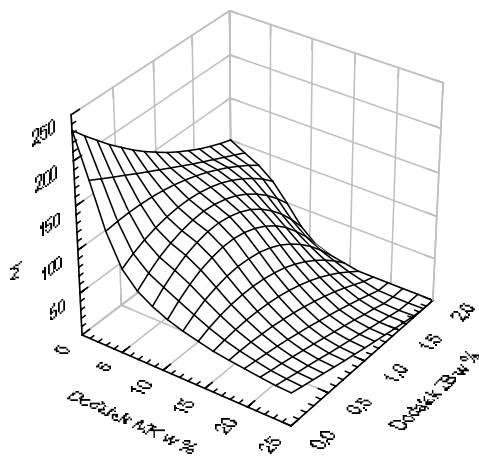
Wodoszczelność piaskobetonu badano na urządzeniu skonstruowanym w ITB. Wyniki badania wodoszczelności przedstawiono na rys. 7. Badania prowadzono pod stałym ciśnieniem 1,2 MPa w ciągu 72 godzin. Po tym czasie próbki rozłupywano i mierzono głębokość wnikięcia wody. Wyniki przedstawiono na rys. 7. za pomocą współczynnika prędkości przepływu k_V [13] obliczonego według zależności (1.):

$$k_V = \frac{x_{\max}}{2 \sum h_i t_i} \quad (1)$$

gdzie:

- x_{max} - maksymalna głębokość penetracji wody w metrach,
- h_i - ciśnienie wody w metrach H_2O ,
- t_i - czas trwania ciśnienia h_i w sekundach.

Wyrażenie wodoszczelności za pomocą współczynnika k_v pozwala na porównywanie wodoszczelności próbek, przez które w trakcie badania przesączyla się woda i tych, które pozostały do końca badania szczelne. Można również porównać wodoszczelność próbek badanych w różny sposób.

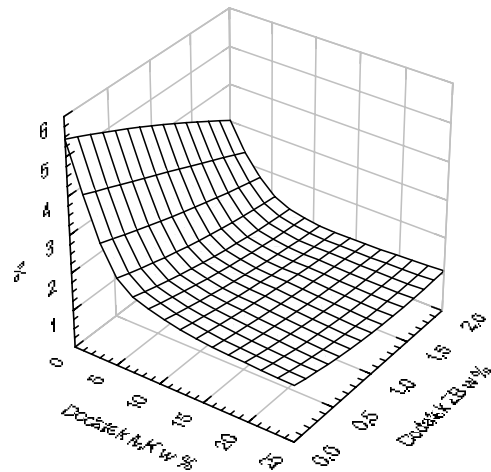


Rys. 7. Wodoszczelność kompozytu piaskobetonowego k_v 10^{-12} m/s w zależności od dodatku MK i ZB.

Wodoszczelność betonu porównawczego, wyrażona za pomocą współczynnika k_v wynosząca $230 \cdot 10^{-12}$ m/s odpowiada stopniowi wodoszczelności W-14 według PN-88/B-06250. Współczynnik $k_v = 150, 100$ i $50 \cdot 10^{-12}$ m/s odpowiada hipotetycznym stopniom wodoszczelności W-18, W-22 oraz W-32 wyznaczonym według zasady opisanej w normie. Modyfikacja piaskobetonu samym zbrojeniem rozproszonym pozwoliła uzyskać szczelność rzędu $103 \cdot 10^{-12}$ m/s, czyli W-20. Modyfikacja zarobu tylko i wyłącznie mikrokrzemionką pozwoliła osiągnąć wielkość $39 \cdot 10^{-12}$ m/s, czyli W-36. Na rys. 7. wyraźnie widać, że dodatek zbrojenia pogarsza szczelność osiągniętą dzięki mikrokrzemionce gdy jej ilość nie przekracza 10%. Przy zwiększaniu ilości mikrokrzemionki szczelność kompozytu piaskobetonowego zwiększa się szczególnie w zarobach o dużej zawartości zbrojenia. Przy dodatku mikrokrze-

mionki większym od 15% wszystkie zaroby wykazują bardzo dużą szczelność, która stabilizuje się na poziomie $25-23 \cdot 10^{-12}$ m/s, czyli odpowiednio W 44÷46.

4.4 Nasiąkliwość



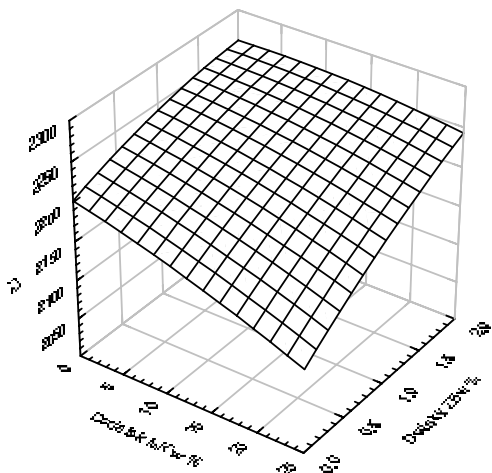
Rys. 8. Nasiąkliwość wagowa N_{wk} kompozytu piaskobetonowego w zależności od dodatku MK i ZB.

Na rys. 8. zobrazowano wyniki badania nasiąkliwości wagowej kompozytu piaskobetonowego. Zarób porównawczy bez dodatku MK i ZB miał największą ze wszystkich badanych zarobów nasiąkliwość wynoszącą 5,5%. Wraz ze wzrostem dodatku mikrokrzemionki nasiąkliwość gwałtownie spada aby ustabilizować się na poziomie poniżej 1,5%. Dodatek samych włókien stalowych spowodował obniżenie nasiąkliwości do 3% przy maksymalnym 2% ich dodatku. Nasiąkliwość zarobów modyfikowanych zarówno mikrokrzemionką jak i włóknami stalowymi kształtowała się na poziomie 1%. Na uwagę zasługuje fakt, że dodatek tylko i wyłącznie 5% MK spowodował spadek badanej cechy do 1,5%. Dalsze zwiększanie dodatku MK do 25% włącznie wpłynęło na zmniejszenie nasiąkliwości zaledwie o 0,5%.

4.5 Gęstość pozorna

Gęstość pozorną stwardniałego kompozytu piaskobetonowego badano po 28 dniach dojrzewania. Wyniki tego badania zobrazowano na rys. 9. Gęstość pozorną stwardniałego kompozytu wyraźnie spada wraz ze wzrostem dodatku MK aby

osiągnąć swoje minimum dla zarobu o maksymalnym 25% dodatku. Dodatek ZB wpływa na zwiększenie gęstości pozornej omawianych zarobów ale nie w tak gwałtowny sposób jak mikrokrzemionka. Gęstość pozorna zarobów o dodatku ZB większym od 1,5% stabilizuje się na poziomie około 2250 kg/m³ i to bez względu na wielkość dodatku MK



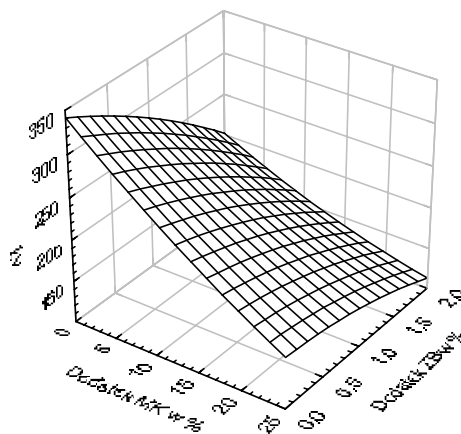
Rys. 9. Gęstość pozorna ρ_{PB} w kg/m³ kompozytu piaskobetonowego w zależności od dodatku mikrokrzemionki MK i zbrojenia rozproszonego ZB.

4.6 Wodoszczelność próbek wstępnie obciążonych

Badanie wodoszczelności próbek po ich rozformowaniu nie odzwierciedla rzeczywistej wodoszczelności kompozytu betonowego w gotowej konstrukcji. Każda nawet najprostsza konstrukcja pracuje w warunkach obciążenia wielokrotnie pojawiającego się i zanikającego w czasie. Wpływ zmienności obciążeń statycznych w czasie na parametry betonu znany jest od dawna w szczególności jeśli chodzi o jego wytrzymałość na ściskanie. Powyższe fakty skłoniły autora do przeprowadzenia badań wodoszczelności kompozytów fibropiaskobetonowych po cyklu obciążeń.

Opierając się na wynikach badań opisanych w [6] próbki poddano obciążeniu do momentu wywołania naprężeń 17,5 MPa, a następnie je odciążano. Taki cykl obciążeń powtórzono ośmiokrotnie dla każdej próbki. Próbki obciążano siłą wzrastającą równomiernie i odpowiadającą prędkości przyrostu naprężeń 0,5 +/- 0,1 MPa/s. Uzyskana w tych warunkach częstotliwość pulsacji wynosiła 1/35 Hz.

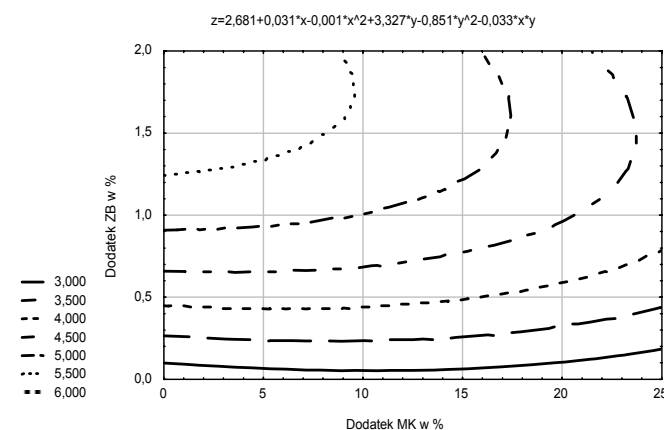
Próbki po cyklu obciążeń były poddane badaniu wodoszczelności.



Rys. 10. Wodoszczelność kompozytu piaskobetonowego k_{VO} 10⁻¹² m/s po wstępnym obciążeniu w zależności od dodatku MK i ZB.

Współczynnik $k_{VO} = 150, 200, 250$ i $300 \cdot 10^{-12}$ m/s odpowiadają hipotetycznym stopniom wodoszczelności W18, W16, W14 i W12. Wodoszczelność badanych kompozytów rośnie tak ze względu na dodatek MK jak i ZB. Przyrosty szczelności są w obu kierunkach równomierne i bardzo zbliżone do zależności liniowej. Zarób porównawczy ma $k_{VO} = 340 \cdot 10^{-12}$ m/s a najbardziej szczelny o maksymalnych dodatkach MK i ZB $k_{VO} = 120 \cdot 10^{-12}$ m/s.

4.7 Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu



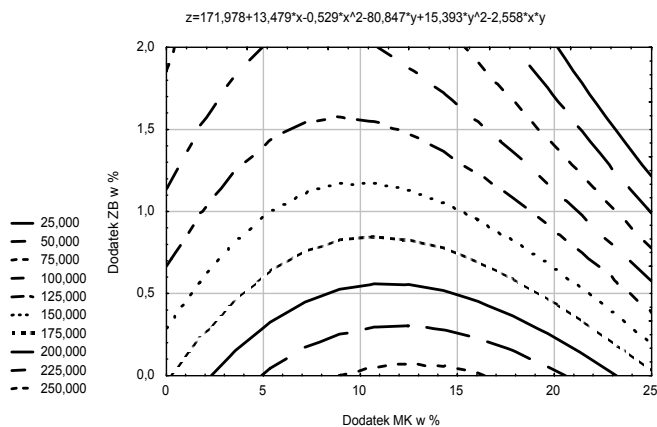
Rys. 11. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 120 dniach dojrzewania w MPa.

Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu przeprowadzone na próbkach 10·10·50 cm zobrazowano na rys. 11.

Kształt omawianej powierzchni najlepiej obrazuje duży wpływ dodatku włókien stalowych na nabieranie przez kompozyt cech quaziplastycznych. Największą wytrzymałość ma beton bez dodatku mikrokrzemionki. Jak wiadomo z badań dodatek mikrokrzemionki w niektórych przypadkach zmniejsza wytrzymałość na rozciąganie kompozytów betonowych, co wyraźnie widać na rys. 11.

4.8 Ugięcie przy zginaniu

Podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu parą sił zmierzono ugięcie przy $2F = 5,5 \text{ kN}$. Wyniki tego badania zobrazowano na rys. 12.



Rys. 12. Ugięcie belek poddanych obciążeniu parą sił $2F = 5,5 \text{ kN}$ w m^{-5} w zależności od dodatku MK i ZB.

5 ANALIZA WYBRANYCH WYNIKÓW

5.1 Wodoszczelność i nasiąkliwość

Wyniki badania nasiąkliwości wagowej kompozytu piaskobetonowego zobrazowano na rys. 8. Zarób porównawczy bez dodatku MK i ZB miał największą ze wszystkich badanych zarobów nasiąkliwość wynoszącą 5,5%. Wraz ze wzrostem dodatku mikrokrzemionki nasiąkliwość gwałtownie spada aby ustabilizować się na poziomie poniżej 1,5%. Dodatek samych włókien stalowych spowodował obniżenie nasiąkliwości do 3% przy maksymalnym 2% ich dodatku. Nasiąkliwość zarobów modyfikowanych zarówno mikrokrzemionką jak i włóknami stalowymi kształtowała się na poziomie 1%. Na uwagę zasługuje fakt, że dodatek tylko i wyłącznie 5% MK spowodował spadek badanej cechy do 1,5%. Dalsze zwiększanie dodatku MK do 25%

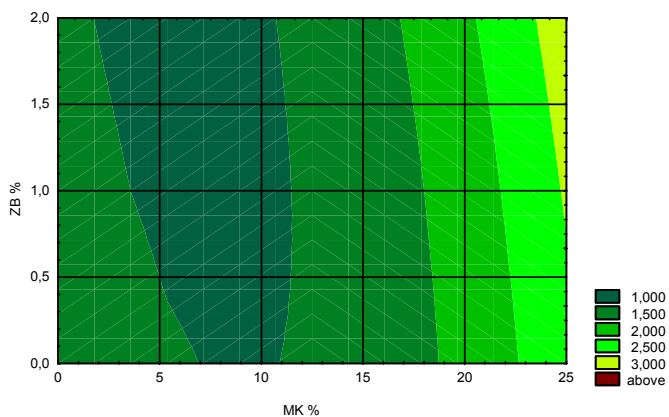
włącznie wpłynęło na zmniejszenie nasiąkliwości zaledwie o 0,5%. Tak mała nasiąkliwość pozwalała spodziewać się dużej wodoszczelności badanych kompozytów piaskobetonowych, co potwierdziły wyniki badań tej cechy.

Wodoszczelność piaskobetonów badano dotychczas sporadycznie wychodząc z założenia, że jego porowata struktura nie daje szans na osiągnięcie wysokich szczelności, a badane dotychczas na wodoszczelność nieliczne zaroby piaskobetonowe nie spełniały stawianych wymogów wodoszczelności.[15]. Wyniki badań wodoszczelności prezentowane na rys. 7. udowadniają fakt, że przy starannie wykonanych zarobach, z piasku o bardzo dobrej jakości i przy użyciu mikrokrzemionki, zbrojenia rozproszonego i superplastyfikatora można uzyskać piaskobeton o wysokiej i bardzo wysokiej wodoszczelności. Wielkość przyrostu szczelności jest tu analogiczna jak w betonach żwirowych modyfikowanych samą mikrokrzemionką [4]. Ponad dziesięciokrotne zmniejszenie prędkości przepływu wody i uzyskanie wodoszczelności na poziomie W 44 należy uznać za wynik więcej niż zadowalający. Tak znaczący przyrost szczelności pozwala z optymizmem myśleć o stosowaniu w przyszłości piaskobetonu w elementach narażonych na silne oddziaływanie czynników atmosferycznych. Piaskobeton był dotychczas uważany za materiał niepełnowartościowy między innymi ze względu na dużą nasiąkliwość a co za tym idzie - małą mrozoodporność [15]. Otrzymanie w trakcie badań piaskobetonów o bardzo dużych wodoszczelnościach pozwala uważać ten problem za rozwiązany. Oczywiście kształt płaszczyzny obrazującej wodoszczelność zmusza do dokładnego zastanowienia się nad wyborem obszaru zarobów optymalnych szczególnie w zestawieniu z wynikami uzyskanymi przy badaniu innych cech.

W celu syntetycznego opisu wodoszczelności kompozytów piaskobetonowych autor sformułował współczynnik, który umownie nazwał współczynnikiem wodnym - w skrócie W_w ;

$$W_w = (N_{wi}/N_{w0})/(k_{vi}/k_{v0}). \quad (2)$$

Zależność współczynnika W_w od dodatku MK i ZB przedstawiono na rys. 13.



Rys. 13. Współczynnik wodny W_w w zależności od dodatku mikrokrzemionki MK i zbrojenia rozproszonego ZB.

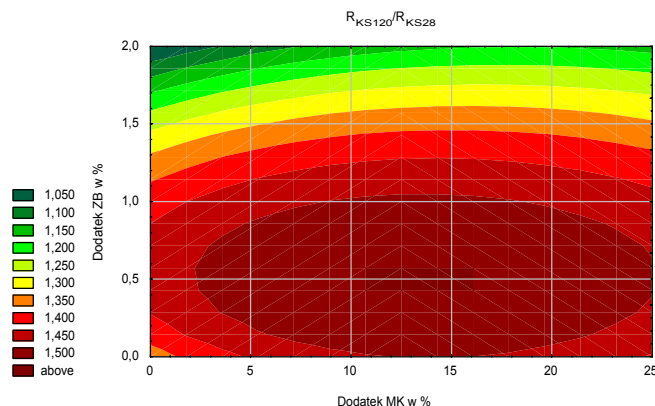
Bezwymiarowy parametr W_w waha się w badanych kompozytach od 1,0 do 3,0. Wartość 1,0 mówi nam, że zmniejszenie się wartości nasiąkliwości oraz zwiększenie wodoszczelności przebiega w takich samych proporcjach. $W_w = 3,0$ wskazuje, że przyrost wodoszczelności nastąpił trzykrotnie szybciej w porównaniu do zarobu zerowego niż zmniejszenie się nasiąkliwości w stosunku do zarobu zerowego. Nasiąkliwość możemy w tym przypadku rozumieć jako miarę bardzo niskociśnieniowej wodoszczelności.

Pozytywny wpływ dodatku włókien stalowych na wodoszczelność kompozytu piaskobetonowego ujawnia się w pełni dopiero przy badaniu wodoszczelności po wstępnym obciążeniu zobrazowanej na rys. 10. Zależność wodoszczelności przyjmuje w tym przypadku kształt bardzo zbliżony do płaszczyzny. Wodoszczelność po wstępnym obciążeniu wzrasta równomiernie tak ze względu na dodatek MK, jak i ZB. Dodatek włókien stalowych ma decydujący wpływ na utrzymanie wodoszczelności przez badane kompozyty po cyklu obciążeń.

5.2 Przyrost wytrzymałości

Porównanie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania z wytrzymałością na ściskanie po 120 dniach dojrzewania przedstawiono na rys. 14. jako przyrost wytrzymałości na ściskanie ΔR . Największy przyrost wytrzymałości na ściskanie $\Delta R=1,5$ mają betony modyfikowane mikrokrzemionką w ilości od 5% do 20% i małą ilością włókien stalowych oscylującą w okolicach 0,5%. Wraz ze wzrostem ilości włókien stalowych w kompozycie maleje przyrost

wytrzymałości aby ostatecznie w niektórych przypadkach spaść do wielkości 1,05. Mając na uwadze kształt obu powierzchni wytrzymałości - 28 i 120 dniowej można stwierdzić, że dodatek włókien stalowych wpływa na zwiększenie wytrzymałości „od razu” i to w wyrażnie zauważalny sposób.



Rys. 14. Przyrost wytrzymałości na ściskanie ΔR po 120 dniach dojrzewania do wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania.

$$\Delta R = \frac{R_{KS120}}{R_{KS28}} \tag{3}$$

Wraz ze wzrostem dodatku włókien stalowych zjawisko to nasila się tak dalece, że przyrost wytrzymałości w czasie samej matrycy piaskobetonowej, jak i matrycy modyfikowanej dodatkiem MK jest mało widoczny, lub wręcz niezauważalny. Tylko w zarobach modyfikowanych małą ilością włókien stalowych można zauważyć znaczący przyrost wytrzymałości w czasie kompozytu piaskobetonowego.

6 WNIOSKI

W oparciu o przeprowadzone badania, analizę otrzymanych wyników, rozważania teoretyczne oraz studia literaturowe można sformułować następujące wnioski:

- ◆ Stosowanie dodatku mikrokrzemionki i zbrojenia rozproszonego do piaskobetonów jest uzasadnione i pozwala na uzyskanie kompozytów o zwiększonej wytrzymałości na ściskanie, bardzo dużej wodoszczelności oraz małej nasiąkliwości.
- ◆ Podstawowym problemem w technologii piaskobetonów modyfikowanych zbrojeniem rozproszonym i mikrokrzemionką jest

- urabialność, która pozostaje w luźnej korelacji z konsystencją.
- ◆ Na podstawie otrzymanych wyników za najbardziej optymalne zaroby można uznać betony o zawartości od 15 do 20% MK i od 1 do 1,5% ZB.
 - ◆ Krajowe surowce i dodatki pozwalają na produkcję pełnowartościowych piaskobetonów do konstrukcji budowlanych.
 - ◆ Włókna stalowe zdecydowanie poprawiają wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu badanych betonów oraz zmniejszają ugięcie i odkształcenia liniowe.
 - ◆ Możliwe jest uzyskanie kompozytów na bazie piasku odpadowego o bardzo wysokich wybranych parametrach.
 - ◆ Plan centralny kompozycyjny bardzo dobrze nadaje się do planowania oraz interpretacji wyników badań piaskobetonów modyfikowanych włóknami stalowymi i mikrokrzemionką.
 - ◆ Zdefiniowany przez autora współczynnik W_w pozwala na szybką i dokładną analizę parametrów wodoszczelnościowych kompozytów fibropiaskobetonowych.

- 12) Praca zbiorowa. 1990. *Materiały budowlane. Współczesne kierunki badawcze i rozwojowe*. Kraków: Politechnika Krakowska.
- 13) Śliwiński, J., Witek, K. Metody oceny parametrów charakteryzujących wodoszczelność betonu. *Inżynieria i Budownictwo*. 10/94.
- 14) Wolska-Kotańska, Cz. Kształtowanie właściwości betonu pyłami krzemionkowymi. *Inżynieria i Budownictwo*. 9/93.
- 15) Zając, B. Wpływ parametrów wibrowania na podstawowe cechy piaskobetonu. 1984. Poznań-Bydgoszcz: Politechnika Poznańska.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Brandt, A., Babut, R., Kasperkiewicz, J., Marks, M. 1983. *Wybrane zagadnienia z mechaniki kompozytów*. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej.
- 2) Czarnecki, L., Broniewski, T., Hennig O. 1995. *Chemia w budownictwie*. Warszawa: Arkady.
- 3) Katzer, J. Szczelny beton z dodatkiem mikrokrzemionki modyfikowany superplastyfikatorem. *Materiały Budowlane*. 11/96.
- 4) Katzer, J. Przyrost szczelności w czasie betonów mikrokrzemionkowych modyfikowanych superplastyfikatorem. *Przeгляд Budowlany*. 5/97.
- 5) Karwacki, J. Dodatki i domieszki do betonów stosowanych w budowie posadzek przemysłowych. *Materiały Budowlane*. 08/96.
- 6) Lenkiewicz, W., Pidek, W. Wytrzymałość betonu na ściskanie w elementach debiutujących. *XVI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii PAN i Komitetu Nauki PZITB - Krynica 1970*.
- 7) Macieik, L., Dondelewski, H. Kruszywa Pomorza Środkowego. *Materiały Budowlane*. 9/80.
- 8) Macieik, L., Katzer, J. Mikrokrzemionka jako dodatek do szczelnych betonów. *Materiały Budowlane*. 11/95.
- 9) Macieik, L., Katzer, J. Beton wodoszczelny z dodatkiem mikrokrzemionki. *Warstwy*. 2/96.
- 10) Marcinkowski, S., Dondelewski, H. Betony piaskowe z kruszyw Pomorza Środkowego. *Materiały Budowlane*. 02/84.
- 11) Praca zbiorowa. 1979. *Beton Piaskowy - rozpoznanie bazy kruszyw piaskowych regionu koszalińskiego*. Koszalin: BPBBO Miastoprojekt.

