14. ZASTOSOWANIE LOKALNEGO PLANOWANIA SYMPLEKSOWEGO DO OCENY WŁAŚCIWOŚCI BETONU Z KRUSZYWEM Z RECYKLINGU

1. WPROWADZENIE

Przemysł betonowy ma duży wpływ na degradację środowiska naturalnego. Kruszywo stanowi największy udział w składzie betonu i istotnie wpływa na właściwości techniczne finalnego produktu. Możliwość zastosowania kruszywa pochodzącego z rozbiórki do przyjaznych środowisku konstrukcji betonowych zyskuje coraz większe zainteresowanie i może przyczynić się do przekształcenia tradycyjnego betonu w zrównoważony materiał. Co więcej, kurczące się zasoby kruszyw naturalnych wymuszają wykorzystanie kruszyw z recyklingu (KR) jako alternatywnego źródła surowca do produkcji betonu. Kwestia wykorzystania przerobionego gruzu z rozbiórki budowli w przemyśle betonowym była poruszana w licznych badaniach [3, 4, 12].

Wyniki badań dotyczące betonu z KR są bardzo zróżnicowane, jako że jakość takiego betonu zależna jest od jakości oryginalnego betonu poddanego przeróbce. Potencjalne korzyści i zagrożenia płynące ze stosowania kruszywa wtórnego zostały szeroko przebadane [5, 6, 10, 15]. Nawet jeżeli niektóre wyniki są sprzeczne, można wysnuć ogólne wnioski dotyczące wpływu grubego KR. Uzyskanie betonu o niskiej do średniej wytrzymałości na ściskanie jest możliwe do uzyskania niezależnie od jakości KR [1, 11, 16]. W większości przypadków jakość KR jest gorsza niż kruszyw naturalnych. Z powodu pozostałości zaprawy cementowej gęstość kruszyw wtórnych jest niższa a nasiąkliwość wyższa w porównaniu z kruszywami naturalnymi. Dlatego konieczne jest prawidłowe projektowanie składu betonu w celu uzyskania pożądanych właściwości finalnego materiału [9].

Celem niniejszej pracy jest ocena wpływu proporcji trzech kruszyw, a mianowicie kruszyw naturalnych (grubego i drobnego) i grubego kruszywa z recyklingu w określonych zakresach zmienności, na właściwości próbek stwardniałego betonu cementowego. KR pochodziło z rozbiórki słupów żelbetowych szkieletowej konstrukcji zakładu produkcyjnego (fabryka Przyrządów i Uchwytów „Bison-Bial" w Białymstoku). Do zoptymalizowania tych proporcji wykorzystano plan sympleksowy dla trzech zmiennych. Planowanie sympleksowe było przykładowo wykorzystane do optymalizacji wielu zmiennych przy projektowaniu składu betonu zawierającego dodatki i domieszki [17].

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU I WYBÓR PLANU EKSPERYMENTU

Zgodnie z przyjętym celem pracy 28-dniową wytrzymałość na ściskanie f_i (odpowiedź Y_1) oraz nasiąkliwość wagową n_i (odpowiedź Y_2) postanowiono zbadać w zależności od trzech czynników: udziału naturalnego kruszywa frakcji 4/16 (czynnik z_1), kruszywa z recyklingu frakcji 4/16 (czynnik z_2) i naturalnego kruszywa drobnego frak-

WALERY JEZIERSKI, DOROTA MAŁASZKIEWICZ
Politechnika Białostocka

cji 0/4 (czynnik z_3). Eksperyment został realizowany według planu sympleksowego w układzie „skład-własność" dla trzech zmiennych, zawierającego $N = 7$ prób (tab. 1) [2]. Ten plan przewiduje określony układ realizacji pomiarów i opracowanie modelu w postaci niepełnego wielomianu trzeciego stopnia dla trzech zmiennych z_1, z_2, z_3:

$$\hat{Y}_i = a_1z_1 + a_2z_2 + a_3z_3 + a_{12}z_1z_2 + a_{13}z_1z_3 + a_{23}z_2z_3 + a_{123}z_1z_2z_3 \quad (1)$$

W każdym punkcie takiego planu należy spełniać warunek [2]:

$$z_1 + z_2 + z_3 = 1 \quad (2)$$

Według tego planu każdy z czynników z_1, z_2, z_3 należy rozpatrywać na czterech poziomach: 0; 0,333; 0,5; 1. Ostatni warunek nie odpowiadał przyjętemu celowi, ponieważ nie było zasadne wykonywanie próbek w całym zakresie zmienności wybranych czynników. Praktyczne znaczenie miały jedynie takie zakresy zmienności czynników, które odpowiadały realnym składom mieszanek. Z tego powodu przy realizacji eksperymentu zastosowano lokalne planowanie sympleksowe w warunkach ograniczenia zakresu zmienności wszystkich czynników [18]. Wybrany został podobszar obejmujący preferowane składy kruszywowe o współrzędnych wierzchołków: $A_1(x_1 = 0{,}75,\ x_2 = 0{,}12,\ x_3 = 0{,}13)$; $A_2(x_1 = 0{,}13,\ x_2 = 0{,}75,\ x_3 = 0{,}12)$; $A_3(x_1 = 0{,}12,\ x_2 = 0{,}13,\ x_3 = 0{,}75)$. W tym podobszarze rzeczywiste wartości udziału składników x_i zmieniały się w zakresach: naturalnego kruszywa grubego (x_1) 0,12 – 0,75; grubego KR (x_2) 0,12 – 0,75; naturalnego kruszywa drobnego (x_3) 0,12 – 0,75. Za celowe uznano badanie takich zakresów zmienności czynników pod kątem oceny ich wpływu na właściwości betonu. Wyżej wymieniony podobszar został transformowany do pełnego planu sympleksowego poprzez wprowadzenie pseudoskładników z_1, z_2, z_3, które w każdym u-tym układzie planu są związane z czynnikami rzeczywistymi x_1, x_2, x_3 zależnością:

$$x_i^{(u)} = x_i^{(1)} + z_2^{(u)}(x_i^{(2)} - x_i^{(1)}) + z_3^{(u)}(x_i^{(3)} - x_i^{(1)}) \quad (3)$$

Poziomy zmienności czynników z_1, z_2, z_3 oraz odpowiadających im rzeczywistych czynników x_1, x_2, x_2 przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Plan eksperymentu, poziomy zmienności rozpatrywanych czynników, wariancje i wyniki pomiarów $\bar{Y}_{1i}$, $\bar{Y}_{2i}$

Table 1. Experimental plan, variation levels of the considered factors, variances and experimental results $\hat{Y}_{1i}$, $\hat{Y}_{2i}$

Nr	z_1	z_2	z_3	x_1	x_2	x_3	f_{1i}, MPa	S^2_{o1i}	n_{2i},%	S^2_{o2i}
1	1	0	0	0,748	0,127	0,125	36,38	31,5938	6,65	0,3540
2	0	1	0	0,127	0,748	0,125	23,25	35,3750	8,62	0,4280
3	0	0	1	0,120	0,120	0,760	50,67	13,2667	6,59	0,2812
4	0,5	0,5	0	0,4375	0,4375	0,125	28,05	21,1750	7,50	1,4333
5	0,5	0	0,5	0,434	0,1235	0,4425	48,62	13,3938	6,29	0,5990
6	0	0,5	0,5	0,1235	0,434	0,4425	52,62	14,0417	6,76	0,5288
7	0,333	0,333	0,333	0,3316	0,3316	0,3367	45,20	23,8078	6,79	0,5044
8	0,2	0,35	0,45	0,199	0,348	0,453	51,28	20,1377	7,38	0,6142

$S^2_{o1} = 21{,}8077$; $S^2_{o2} = 0{,}6041$

Po uzyskaniu wyników pomiarów i przeprowadzeniu niezbędnych obliczeń możliwie było opracowanie modeli badanych cech w zależności od pseudoskładników (z_1, z_2, z_3). Aby otrzymać modele matematyczne z czynnikami w postaci naturalnej (x_1, x_2, x_2), należało je odkodować przez podstawienie odpowiednich zależności.

W każdym punkcie planu przyjęto powtórne pomiary na 6 próbkach. Ilość pomiarów w całym badaniu, z uwzględnieniem dodatkowego punktu 8 poza planem dla uzyskania wyników do sprawdzenia adekwatności modeli, wynosiła 96. W trakcie realizacji planów eksperymentu przy wyborze kolejności pomiarów w próbach przestrzegano zasad randomizacji [7].

3. ZASTOSOWANE MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Do badań zastosowano cement portlandzki CEM I 32,5 R. Jako kruszywo naturalne drobne zastosowano piasek płukany 0/4 mm o gęstości 2,65 kg/dm³; jako kruszywo grube naturalne – żwir 4/8, 8/16 mm o gęstości 2,65 kg/dm³. Kruszywo z recyklingu frakcji 4/8 i 8/16 mm pochodziło z rozbiórki słupów żelbetowych. Jego gęstość wynosiła 2,33 kg/dm³. Kruszywo dozowane było w stanie powietrznosuchym. Absorpcja wody przez kruszywa wynosiła odpowiednio: żwir 4/8 – 0,33%; żwir 8/16 – 0,30%; kruszywo z recyklingu 4/8 – 3,07%, kruszywo z recyklingu 8/16 – 2,10%.

Przygotowano 7 różnych mieszanek betonowych. Do oceny adekwatności modeli dodatkowo przygotowano jedną mieszankę poza planem eksperymentu. Zawartość cementu oraz współczynnik w/c przyjęto jako stałe we wszystkich seriach badawczych i wynosiły: zawartość cementu 380 kg/m³, w/c = 0,48. Próbki 100x100x100 mm formowano na stoliku Vebe i rozformowano po 24 godzinach, następnie umieszczano je w komorze w temp. 20±2°C i wilgotności względnej 90±5%. W powyższy sposób przygotowano po 12 próbek badawczych z każdej z 8 serii. Połowa z nich została wykorzystana do oznaczenia nasiąkliwości, druga połowa do oznaczenia wytrzymałości na ściskanie. Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono wg normy PN-EN [14], badanie nasiąkliwości wykonano wg normy PN 88/B [13].

4. WYNIKI BADANIA I ICH ANALIZA

Wstępna analiza wyników badania wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach $\bar{Y}_{1i}$ oraz nasiąkliwości $\bar{Y}_{2i}$ (tab. 1) wykazała, że istnieje rozrzut wartości $\bar{Y}_{ij}$ w poszczególnych próbach, jak i przy powtórnych pomiarach. Sprawdzenie jednorodności ocen wariancji powtórnych pomiarów S^2_{oji} z zastosowaniem kryterium Cochrana [8] wykazało, że przy poziomie istotności α = 0,05 obliczeniowe wartości kryterium Cochrana są mniejsze od wartości krytycznych:
dla S^2_{o1i} G_{o1} = 0,2704 oraz dla S^2_{o2i} G_{o2} = 0,3950 przy $G_{kr\,(1,2);\,0,05;\,5;\,7}$ = 0,4447.

Można przyjąć, że wariancje prób dla wszystkich badań są jednorodne, a wariancje niedokładności pomiarów w eksperymentach mogą być obliczone jako wartości średnie: S^2_{o1} = 21,8077; S^2_{o2} = 0,6041 przy liczbie stopni swobody ν = 35. Na podstawie wyników badań za pomocą wzorów podanych w [18], opracowano zależności $Y_i = f(z_1, z_2, z_3)$. Wielomian dla wytrzymałości na ściskanie przyjął postać:

$$\hat{Y}_1 = 36{,}38\, z_1 + 23{,}25\, z_2 + 50{,}67\, z_3 - 7{,}06\, z_1z_2 + 20{,}38\, z_1z_3 + 62{,}64\, z_2z_3 - 0{,}18\, z_1z_2z_3 \quad (4)$$

a dla nasiąkliwości:

$$\hat{Y}_2 = 6{,}65\, z_1 + 8{,}62\, z_2 + 6{,}59\, z_3 - 0{,}54\, z_1z_2 - 1{,}32\, z_1z_3 - 3{,}38\, z_2z_3 + 2{,}31\, z_1z_2z_3 \quad (5)$$

Sprawdzenie adekwatności opracowanych modeli wykonano za pomocą testu t-Studenta [8] z wykorzystaniem danych z pomiarów w dodatkowym punkcie 8. Wartości $\bar{Y}_{18}$, $\bar{Y}_{28}$ mierzone w tym punkcie oraz wariancje niedokładności pomiarów w eksperymentach S^2_{o1}, S^2_{o2} podano w tablicy 1. Wartości obliczone z modeli (4) i (5) wynosiły: $\hat{Y}_{18}$ = 49,42 MPa; $\hat{Y}_{28}$ = 6,69%. Wariancje niedokładności przewidzianych wartości dla każdej z funkcji wynosiły $S^2_{(\hat{Y}1)}$ = 18,0655; $S^2_{(\hat{Y}2)}$ = 0,4655. Dla danych w punkcie 8 obliczono wartości *t*-kryterium każdej z dwóch funkcji:

$t_1 = (\bar{Y}_{18} - \hat{Y}_{18})/(S^2_{o1} - S^2_{(\hat{Y}1)})^{0,5} = (51,28 - 49,42)/(20,1377 - 18,0655)^{0,5} = 1,2921;$

$t_2 = (\bar{Y}_{28} - \hat{Y}_{28})/(S^2_{o2} - S^2_{(\hat{Y}2)})^{0,5} = (7,38 - 6,69)/(0,6142 - 0,4655)^{0,5} = 1,7893.$

Wartości t_1, t_2 porównywano z krytyczną wartością *t*-kryterium, która przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ i liczbie stopni swobody $\nu = 7$ jest równa $t = 2,36$ [8]. Ponieważ t_1, t_2 nie przekroczyły wartości krytycznej, to adekwatność modeli (4) i (5) została potwierdzona i uznano ich przydatność do dalszej analizy.

W celu odkodowania opracowano formuły związku pomiędzy naturalnymi współrzędnymi x_i i współrzędnymi z_i. Zastosowano wzory dla przeniesienia współrzędnych z jednego systemu afinicznego do drugiego [18]:

$$z_1 = z_1^{(1)} + x_2(z_1^{(2)} - z_1^{(1)}) + x_3(z_1^{(3} - z_1^{(1)}) \tag{6}$$

$$z_2 = z_2^{(1)} + x_2(z_2^{(2)} - z_2^{(1)}) + x_3(z_2^{(3)} - z_1^{(1)}) \tag{7}$$

$$z_3 = z_3^{(1)} + x_2(z_3^{(2)} - z_3^{(1)}) + x_3(z_3^{(3)} - z_1^{(1)}) \tag{8}$$

Przeniesienie współrzędnych możliwe jest tylko dla zmiennych niezależnych, tj. niezwiązanych warunkiem (2), zatem równania (4) i (5) należy przekształcić, pomijając jedną zmienną, np. z_3. Dlatego wartości $z_i^{(j)}$ wyliczono poprzez rozwiązanie dwóch układów równań:

$$\begin{cases} x_1^{(1)} z_1^{(1)} + x_2^{(1)} z_1^{(2)} + x_3^{(1)} z_1^{(3)} = 1 \\ x_1^{(2)} z_1^{(1)} + x_2^{(2)} z_1^{(2)} + x_3^{(2)} z_1^{(3)} = 0 \\ x_1^{(3)} z_1^{(1)} + x_2^{(3)} z_1^{(2)} + x_3^{(3)} z_1^{(3)} = 0 \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} x_1^{(1)} z_2^{(1)} + x_2^{(1)} z_2^{(2)} + x_3^{(1)} z_2^{(3)} = 0 \\ x_1^{(2)} z_2^{(1)} + x_2^{(2)} z_2^{(2)} + x_3^{(2)} z_2^{(3)} = 1 \\ x_1^{(3)} z_2^{(1)} + x_2^{(3)} z_2^{(2)} + x_3^{(3)} z_2^{(3)} = 0 \end{cases} \tag{10}$$

Rozwiązując układy równań uzyskano wartości $z_i^{(j)}$:

$$z_1^{(1)} = 1,404;\ z_1^{(2)} = -0,206;\ z_1^{(3)} = -0,196;$$
$$z_2^{(1)} = -0,206;\ z_2^{(2)} = 1,404;\ z_2^{(3)} = -0,196.$$

Po podstawieniu wartości $z_i^{(j)}$ do (6) i (7) otrzymano zależności między współrzędnymi naturalnymi x_i i systemem współrzędnych z_i:

$$z_1 = 1,404 - 1,610\, x_2 - 1,593\, x_3 \tag{11}$$

$$z_2 = -0,207 + 1,610\, x_2 + 0,018\, x_3 \tag{12}$$

Korzystając z warunku (2), można zapisać zależność dla z_3:

$$z_3 = 1 - z_1 - z_2 = -0,197 + 1,575\, x_3 \tag{13}$$

Po podstawieniu zależności (11), (12), (13) w (4) i (5) otrzymano równania regresji w naturalnych współrzędnych. Dla wytrzymałości na ściskanie przyjmuje ono postać:

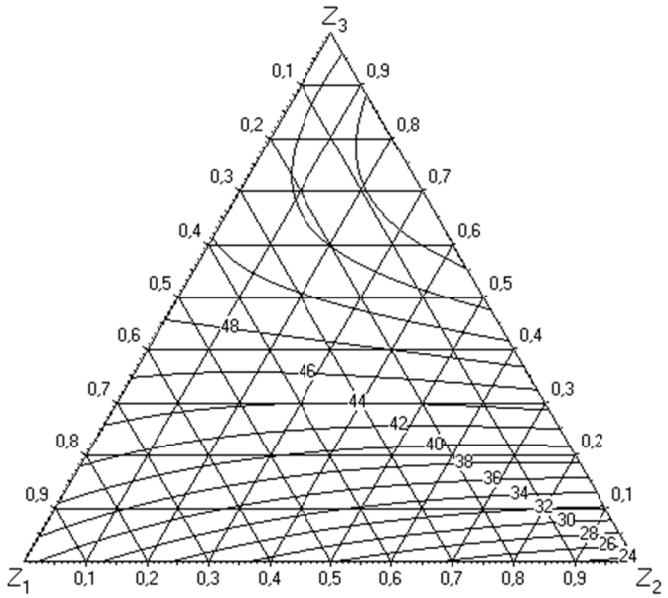
$$\begin{aligned} \hat{Y}_1^* = {} & 35,25 - 52,78\, x_2 + 50,57\, x_3 + 124,75\, x_2 x_3 + \\ & + 18,21\, x_2^2 - 49,15\, x_3^2 + 0,74\, x_2^2 x_3 + 0,74\, x_2 x_3^2 \end{aligned} \tag{14}$$

a dla nasiąkliwości:

$$\hat{Y}_2^* = 6{,}77 + 1{,}24\,x_2 - 3{,}69\,x_3 + 6{,}79\,x_2x_3 + 2{,}58\,x_2^2 + \\ + 4{,}54\,x_3^2 - 9{,}43\,x_2^2x_3 - 9{,}44\,x_2x_3^2 - 0{,}10\,x_3^3 \qquad (15)$$

W takiej postaci modele matematyczne można stosować do prognozowania badanych cech i sterowania numerycznego w procesach technologicznych, pamiętając o spełnieniu warunku dla naturalnych współrzędnych: $x_1 + x_2 + x_3 = 1$. Do interpretacji wyników badania zastosowano jednak modele (4) i (5), na podstawie których opracowano wykresy w postaci izolinii badanych zależności we współrzędnych pseudoskładników z_1, z_2, z_3. Te modele pozwoliły powiększyć badany podobszar do pełnych trójkątów sympleksowych, znacznie ułatwiając interpretację wyników. Natomiast merytoryczną interpretację wykonano w na podstawie naturalnych współrzędnych: x_1, x_2, x_3.

Jak wynika z rysunku 1, najniższą wartość wytrzymałości na ściskanie uzyskano w wierzchołku Z_2 przy proporcjach kruszyw $x_1 = 0{,}13$; $x_2 = 0{,}75$; $x_3 = 0{,}12$. Według zasad planowania doświadczeń na trójkątach sympleksowych, dla składów mieszanki mieszczących się po stronie Z_1Z_2 trójkąta $Z_1Z_2Z_3$, charakterystyczna jest stała zawartość naturalnego kruszywa drobnego na poziomie $x_3 = 0{,}12$ oraz płynna i jednoczesna zmiana udziału kruszyw x_1 z 0,13 do 0,75, a x_2 z 0,75 do 0,13. W wyniku wymiany części KR na grube kruszywo naturalne wytrzymałość na ściskanie wzrosła z 23,25 do 36,38 MPa, tj. o 56,5%.



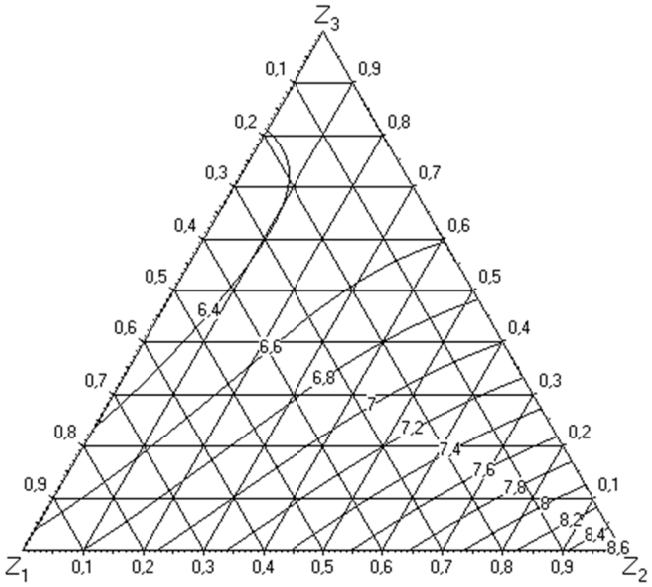
Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie Y_1 w zależności od zawartości kruszyw we współrzędnych pseudoskładników: z_1, z_2, z_3

Fig. 1. Compressive strength Y_1 depending on aggregate content in coordinates of pseudocomponents z_1, z_2, z_3

Dla składów mieszanki mieszczących się po stronie Z_1Z_3 charakterystyczna jest stała zawartość KR x_2 na poziomie 0,12-0,13 oraz płynna i jednoczesna wymiana kruszywa x_1 z 0,75 do 0,12, a x_3 – na odwrót. W wyniku wymiany części grubego kruszywa

naturalnego na kruszywo drobne wytrzymałość na ściskanie wzrosła z 36,38 do 50,67 MPa, tj. o 39,3%. Ten fakt można wyjaśnić poprawą struktury betonu w wyniku zwiększeniu udziału kruszywa drobnego. Wzrost ten miał jednak miejsce tylko do udziału piasku x_3 = 0,63 i kruszywa grubego naturalnego x_1 = 0,24, odpowiadających punktowi Z_1 = 0,25, Z_3 = 0,75 na rysunku 1.

Dla składów mieszanki mieszczących się po stronie Z_2Z_3 charakterystyczna jest stała zawartość naturalnego kruszywa grubego x_1 (0,12-0,13) oraz płynna i jednoczesna wymiana KR x_2 z 0,75 do 0,12, a x_3 – na odwrót. W wyniku wymiany części grubego KR na naturalne kruszywo drobne wytrzymałość na ściskanie próbek wzrastała do punktu Z_2 = 0,25, Z_3 = 0,75, któremu odpowiadają zawartości kruszyw x_1 = 0,12, x_2 = 0,27, x_3 = 0,61. W tym punkcie wytrzymałość osiągnęła najwyższą wartość – 55,60 MPa, co w porównaniu z punktem Z_2 oznacza wzrost o 139,1%. Natomiast dalszy wzrost udziału kruszywa drobnego (x_3) powodował zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie próbek do 50,67 MPa, tj. spadek o 8,9%.



Rys. 2. Nasiąkliwość betonu Y_2 w zależności od zawartości kruszywa we współrzędnych pseudoskładników: z_1, z_2, z_3

Fig. 2. Water absorption Y_2 depending on aggregate content in coordinates of pseudocomponents z_1, z_2, z_3

Uzyskanie wysokiej wytrzymałości próbek przy składzie kruszyw (x_1 = 0,12, x_2 = 0,27, x_3 = 0,61) można tłumaczyć tym, że duża absorpcja wody przez KR doprowadziła do obniżenia efektywnej wartości współczynnika w_{ef}/c w porównaniu z betonem bez KR. Z drugiej strony, wysokiej wytrzymałości próbek z KR sprzyjało zastosowanie materiału dobrej jakości, ponieważ zostało ono przerobione z gruzu w warunkach laboratoryjnych i było wolne od zanieczyszczeń. Kształt ziaren był bardziej nieregularny w porównaniu ze żwirem, a ich powierzchnia była chropowata. To zapewniło lepszą przyczepność stwardniałego zaczynu cementowego do kruszywa wtórnego i także pozytywnie wpłynęło na wytrzymałość na ściskanie.

Wykryte istotne obniżenie wytrzymałości próbek przy znacznym udziale KR (x_2 = 0,7 – 0,75) można objaśnić wysoką wodożądnością tego kruszywa oraz powstałym z tego powodu deficytem wody w zaczynie, co pogorszyło urabialność mieszanki betonowej oraz ograniczyło hydratację cementu.

Rysunek 2. przedstawia zależność nasiąkliwości próbek betonowych (Y_2) od proporcji między kruszywami. Najwyższą nasiąkliwość Y_2 = 8,6%, która może świadczyć o porowatej strukturze, ustalono dla próbek z dużym udziałem KR x_2 = 0,75 (wierzchołek Z_2). W miarę wzrostu udziału naturalnych kruszyw nasiąkliwość się zmniejsza. Dodawanie kruszywa drobnego x_3 obniża nasiąkliwość próbek prawie dwukrotnie szybciej niż przy wzroście udziału naturalnego kruszywa grubego x_1. Najniższą wartość Y_2 = 6,3% osiągnięto przy proporcjach kruszyw x_1 = 0,31; x_2 = 0,13; x_3 = 0,56. Zwiększenie udziału KR zawsze zwiększa nasiąkliwość betonu.

5. WNIOSKI

Na podstawie wyników badań oraz analizy modeli matematycznych i wykresów sformułowano następujące wnioski:

1. Stosując do betonowych próbek sześciennych 100x100x100 mm KR dobrej jakości (x_2 = 0,27), grube kruszywo naturalne (żwir) (x_1 = 0,12) oraz drobne kruszywo naturalne (x_3 = 0,61), uzyskano po 28 dniach dojrzewania wytrzymałość na ściskanie około 51 MPa.
2. Istotnym czynnikiem wpływającym na uzyskanie wysokiej wytrzymałości na ściskanie próbek zawierających grube KR jest zróżnicowana w badanych seriach efektywna wartość współczynnika w_{ef}/c; zmienność ta była skutkiem absorpcji części wody zarobowej przez kruszywo z recyklingu.
3. Nasiąkliwość betonu zawierającego KR zawsze jest większa od nasiąkliwości betonów zawierających kruszywo naturalne.
4. Przy zastosowaniu w mieszankach betonowych KR należy uwzględniać jego podwyższoną wodożądność. Podczas projektowania składu takich mieszanek betonowych w celu uzyskania takiej samej konsystencji, ilość wody wynikającą z projektowanego współczynnika w/c należy powiększyć o ilość wody, która zostanie zaabsorbowana przez KR.

Badania zrealizowano w ramach projektów badawczych S/WBiIŚ/1/13 i S/WBiIŚ/2/13.

LITERATURA

[1] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., 2002. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. Cem Concr Comp 24(2), 269-279.
[2] Бродский В.З., Бродский Л.И., Голикова Т.И., Никитина Е.П., Панченко Л.А., 1982. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей (справочное издание). Изд-во Металлургия Москва.
[3] Dhir R.K., Henderson N.A., Limbachiya M.C., 1998. Use of recycled concrete aggregate. Proceedings International Symposium Sustainable Concrete, Thomas London.
[4] Hansen T.C.,1992. Recycling of demolished concrete and masonry. Report of technical committee 37-DRC on demolition and reuse of concrete. E&FN Spon. London.

[5] Kou S-C., Poon C-S., Agrela F., 2011. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. Cem Concr Comp 33, 788-795.
[6] Kou S-C., Poon C-S., Etxeberria M., 2011. Influence of recycled aggregate on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. Cem Concr Comp 33, 286-291.
[7] Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф., 1982. Планирование эксперимента. Мн.: Изд-во БГУ.
[8] Krysicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M., 2003. Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Część II. Statystyka matematyczna. PWN Warszawa.
[9] Lin Y.H., Tyan Y.Y., Chang T.O., Chang C.Y., 2004. An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. Cem Concr Res 34, 1373-1380.
[10] Manzi S., Mazzotti C., Bignozzi M.C., 2011. Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate. Cem Concr Comp 37, 312-318.
[11] Mariankovič S., Radonjanin V., Malešev M., Ignjatovič M., 2010. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. Waste Manage 30, 2255-2264.
[12] Meyer C., 2009. The greening of the concrete industry. Cem Concr Comp 31(8), 601-605.
[13] PN 88/B – 06250: Beton zwykły.
[14] PN-EN 12390-3: 2001 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.
[15] Richardson A., Coventry K., Bacon J., 2011. Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete. Jour Cleaner Product 19, 272-277.
[16] Tabsh S.W., Abdelfatah A.S., 2009. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. Constr Build Mater 23, 1163-1167.
[17] Yeh I-C., 2009. Optimization of concrete mix proportioning using a flattened simplex-centroid mixture design and neural networks. Engineering with Computers, 179-190.
[18] Zedginidze I.G., 1986. Matematićeskoe planirovanie eksperymenta dla issledovania i optimizacii svoistv smiesei. Mecniereba Tbilisi.

APPLICATION OF LOCAL SIMPLEX DESIGN FOR EVALUATION OF PROPERTIES OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE

Summary. This study presents experimental results of the influence of coarse recycled aggregate (RA) content on concrete compressive strength and water absorption. Local simplex design was applied for the optimization. Building rubble, which was a source of RA, was obtained from reinforced concrete columns demolition. Compressive strength and water absorption were tested depending on content of coarse natural aggregate 4/16 (factor z_1), coarse RA 4/16 (factor z_2) and natural fine aggregate (factor z_3). Water/cement ratio and cement content were constant in all tested series: w/c = 0.48 and cement – 380 kg/m^3. Basing on the test results optimum aggregate composition was determined with respect to concrete compressive strength and water absorption.