

PODBUDOWY DROGOWO-BUDOWLANE Z BETONÓW POPIOŁOWO-CEMENTOWYCH NA KRUSZYWIE RECYKLINGOWYM

Jacek Mądrowski

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Streszczenie. Kruszywa są ważnym składnikiem mieszanki betonowej, stanowią bowiem około 2/3 jej objętości. Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na beton zmniejszają się zasoby naturalnych złóż kruszyw. Poszukuje się więc rozwiązań alternatywnych wykorzystania kruszyw odpadowych. Zastosowanie kruszywa recyklingowego powoduje jednakże pogorszenie właściwości betonu, w tym między innymi wzrost skurczu i nasiąkliwości oraz zmniejszenie wytrzymałości. Celem badań było określenie możliwości ponownego wykorzystania odpadów budowlanych i popiołów lotnych do produkcji podbudów budowlanych i drogowych.

Słowa kluczowe: kruszywo recyklingowe, podbudowa drogowa

WSTĘP

Kruszeniem gruzu budowlanego zajmują się wyspecjalizowane kruszarnie, posiadające odpowiedni plac oraz specjalistyczny sprzęt [Mądrowski 2003].

W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania budową dróg lokalnych w technologii betonu cementowego. Beblacz [2005] przytacza w swojej pracy przykłady budowy dróg, gdzie stare nawierzchnie drogowe po rozkruszeniu i odpowiednim zagęszczeniu służą jako podbudowa pod nowo układany beton.

W badaniach, których wyniki analizowane są w niniejszym artykule, wykorzystano kruszywa pobrane z firmy Eko-Zec, działającej na terenie Poznania i okolic, oraz popiołów lotny odzyskiwany z miejscowej elektrociepłowni. Możliwości wykorzystania popiołów lotnych do wykonania podbudów drogowo-budowlanych opisują Eitner i inni [1990].

Ze względu na frakcje zastosowane w badaniach kruszywa znajdują się w przedziale 0–16 mm (tzw. podziarno) w trzech grupach materiałowych: betonowe, ceglane oraz mieszany odsiew z przesiewacza.

Zakres badań obejmował: oznaczenie składu granulometrycznego kruszyw, oznaczenie zawartości wody w kruszywie, zaprojektowanie składu mieszanki betonowej oraz określenie wytrzymałości na ściskanie.

METODYKA BADAŃ

Oznaczenie składu granulometrycznego kruszyw

Badanie wykonano zgodnie z normą PN-EN 933-1:2000 Badanie geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie składu ziarnowego. Metoda przesiewania. Zastosowano metodę na sucho, polegającą na rozdzieleniu materiału wysuszonego w temperaturze 105°C za pomocą zestawu sit.

Oznaczenie zawartości wody w kruszywie

Badanie przeprowadzono według normy PN-EN 1097-5:2001 Badanie mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 5: Oznaczenie zawartości wody przez suszenie w suszarce z wentylacją. Procentową zawartość wody w kruszywie obliczono za pomocą wzoru:

$$w = \frac{M_M - M_S}{M_S} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie: w – wilgotność kruszywa [%],

M_M – masa próbki przed suszeniem [g],

M_S – masa próbki po suszeniu [g].

Projektowanie mieszanki betonowej

Do zaprojektowania mieszanki betonowej wykorzystano tzw. metodę trzech równań, uwzględniającą indywidualne cechy kruszyw oraz poprawkę na zawartość wody, wynikającą z porowatości. Założono również, że spoiwo będzie składało się w 70% z cementu i w 30% z popiołu lotnego. Po przekształceniu do obliczenia ilości cementu (C_1), kruszywa (K) i wody (W) równania te przyjmują postać:

$$C_1 = \frac{1000}{\frac{1}{m} \cdot \left(1 + \frac{1 - w_c \cdot m}{w_k \cdot \rho_k} \right) + \frac{1}{\rho_c}} \quad (2)$$

$$K = \frac{C_1 \cdot (1 - w_c \cdot m)}{w_k \cdot m} \quad (3)$$

$$W = \frac{C_1}{m} \quad (4)$$

$$m = \frac{C_1}{W} = \frac{R_{c28}}{A} + 0,5 \quad (5)$$

gdzie: C_1, K, W – ilość cementu, kruszywa, wody [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
 ρ_c, ρ_k, ρ_w – gęstość cementu, kruszywa, wody [$\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$],
 w_k, w_c – wodożądność kruszywa, cementu [$\text{dm}^3\cdot\text{m}^{-3}$],
 R_{c28} – średnia wytrzymałość po 28 dniach twardnienia [MPa],
 A – współczynnik do wzoru Bolomey'a (przyjęty 13,7).

Uwzględniając korektę ze względu na wodę bierną zawartą w kruszywie, ilość wody całkowitej i kruszywa obliczamy ze wzorów:

$$W = \frac{w_k \cdot \rho_k \cdot \left(1000 - \frac{C}{\rho_c} - \frac{P}{\rho_p} \right) + 0,23 \cdot (C + P)}{1 + w_k \cdot \rho_k} \quad (6)$$

$$K = \frac{\left(1000 - \frac{C}{\rho_c} - \frac{P}{\rho_p} - 0,23 \cdot (C + P) \right) \cdot \rho_k}{1 + w_k \cdot \rho_k} \quad (7)$$

gdzie: ρ_p – gęstość popiołu [$\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$],
 C, P – ilość cementu, popiołu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

Skorygowane ilości wody i kruszywa, uwzględniające wilgotność czynną kruszywa, obliczamy ze wzorów:

$$W_{\text{skor}} = W - \frac{K \cdot \text{Wilg} K}{100} \quad (8)$$

$$K_{\text{skor}} = K \cdot \left(1 + \frac{\text{Wilg} K}{100} \right) \quad (9)$$

gdzie: $\text{Wilg} K$ – wilgotność czynna kruszywa [%].

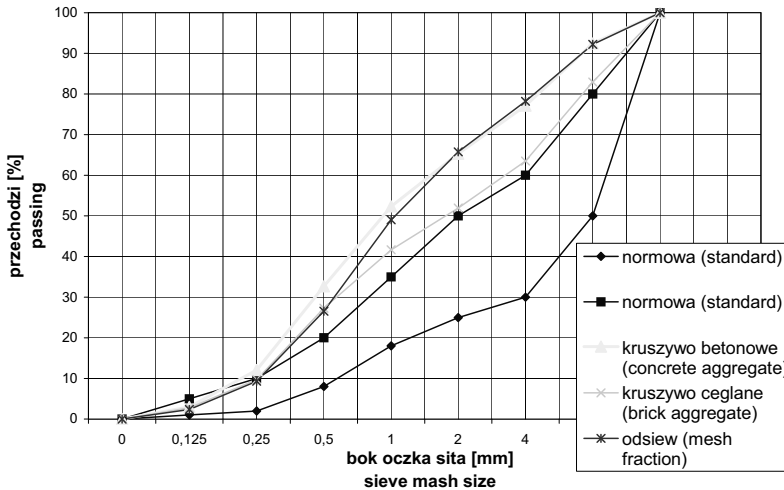
Wytrzymałość betonu na ściskanie

Badanie wykonano zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2002 Badanie betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek. Próbki do badań przygotowano zgodnie z normą PN-EN 12390-2:2001 Badanie betonu. Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.

Badanie wykonywano na seriach liczących po 6 kostek sześciennych, o wymiarach boku 15 cm, po 28 i 90 dniach pielęgnowania w komorze klimatycznej.

WYNIKI BADAŃ

Na podstawie przeprowadzonych badań oznaczenia składu ziarnowego, wykonanych w trzech powtórzeniach dla każdego z badanych kruszyw, opracowano krzywe uziarnienia przedstawione na rysunku 1.



Rys. 1. Krzywe uziarnienia badanych kruszyw recyklingowych

Fig. 1. Granulometric curves of recycled aggregates

Opracowane receptury mieszanek betonowych

Receptury opracowano dla wszystkich badanych kruszyw, zakładając wytrzymałości: 2,5, 5,0 oraz 7,5 MPa. Założono konsystencję wilgotną projektowanych mieszanek. Składy mieszanek przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład mieszanek betonowych

Table 1. Composition of concrete mixture

Składniki [kg·m ⁻³] Component	Kruszywo betonowe Concrete aggregate			Kruszywo ceglane Brick aggregate			Odsiew z przesiewacza Mesh fraction		
	Wytrzymałość na ściskanie [MPa] Compressive strength								
	2,5	5,0	7,5	2,5	5,0	7,5	2,5	5,0	7,5
Cement	69,8	96,5	125,9	63,2	87,6	114,5	65,9	91,2	119,2
Popiół Ash	29,9	41,4	54,0	27,1	37,6	49,1	28,2	39,1	51,1
Kruszywo Aggregate	1898,8	1853,8	1803,1	1910,1	1864,4	1822,5	1910,5	1867,0	1819,3
Woda Water	51,1	59,3	68,2	49,1	56,5	64,7	45,0	52,8	61,4

W celu zagęszczenia mieszanki w formach zastosowano młot udarowy zakończony płytą o wymiarze 80 × 80 mm (rys. 2).



Rys. 2. Urządzenie do ubijania mieszanki

Fig. 2. Concrete mix rammer

Wytrzymałość na ściskanie

Badanie wykonano za pomocą prasy hydraulicznej, stosując sześciennie kostki (po 6 dla każdej serii). Wyniki wytrzymałości 28-dniowej przedstawiono w tabeli 2, natomiast 90-dniowej – w tabeli 3.

Tabela 2. Wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach

Table 2. Compressive strength after 28 days

Zakładana wytrzymałość [MPa] Design strength	Uzyskane wyniki [MPa] Test results						Średnia wartość [MPa] Average value
Kruszywo betonowe Concrete aggregate							
2,5	4,7	4,5	3,2	3,6	4,8	3,6	4,1
5,0	6,0	6,6	6,7	6,4	6,3	5,9	6,3
7,5	8,1	8,3	8,4	8,6	8,0	7,9	8,2
Kruszywo ceglane Brick aggregate							
2,5	3,8	3,6	3,4	3,2	3,7	3,1	3,5
5,0	6,5	6,6	6,8	6,4	6,8	5,8	6,5
7,5	8,5	7,9	8,9	8,2	8,4	8,6	8,4
Kruszywo odsiane z przesiewacza Mesh fraction							
2,5	2,9	3,1	2,3	3,1	2,3	2,4	2,7
5,0	3,9	3,8	3,7	4,4	4,7	4,6	4,2
7,5	4,3	8,2	8,7	8,8	9,0	8,9	8,7

Tabela 3. Wytrzymałości na ściskanie po 90 dniach
Table 3. Compressive strength after 90 days

Zakładana wytrzymałość [MPa] Design strength	Uzyskane wyniki [MPa] Test results							Średnia wartość [MPa] Average value
Kruszywo betonowe Concrete aggregate								
2,5	10,1	10,7	10,1	10,0	9,4	9,6		10,0
5,0	13,6	14,4	7,2	12,9	13,5	13,1		12,5
7,5	18,7	17,4	17,1	17,5	18,4	17,1		17,7
Kruszywo ceglane Brick aggregate								
5,0	11,9	12,7	12,7	13,0	11,8	12,8		12,5
7,5	17,5	18,4	18,0	17,4	18,1	17,8		17,9

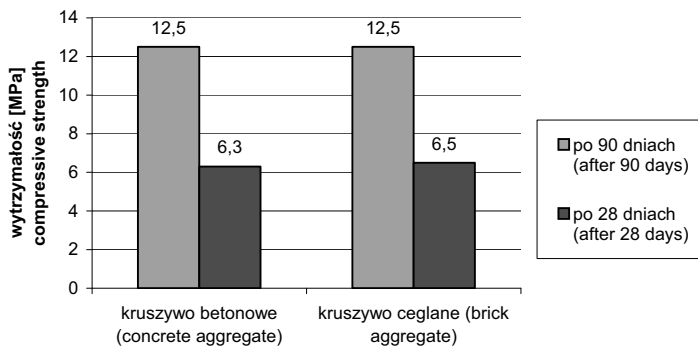
DYSKUSJA WYNIKÓW

Przeprowadzone badania składu granulometrycznego badanych kruszyw recyklingowych wykazały dużą zawartość frakcji do 2 mm. Punkt piaskowy kruszywa betonowego oraz odsiewu wyniósł 65%, ceglano natomiast 52%.

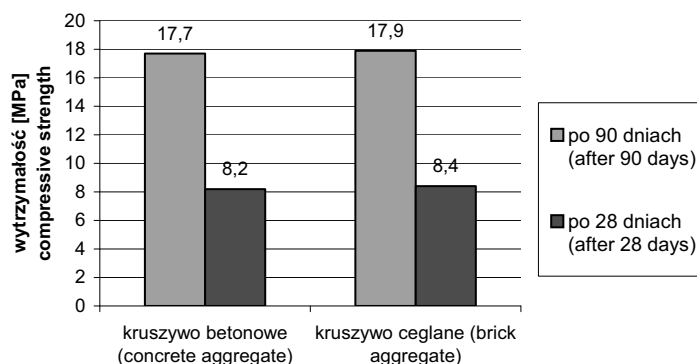
Oznaczono wilgotność badanych kruszyw w celu dokonania korekty wody zarobowej. Zaleca się w projektowaniu mieszanki określić nasiąkliwość 10 min kruszyw i tę wartość odjąć od całkowitej wilgotności. Zaprojektowane mieszanki betonowe spełniły parametry założonej konsystencji wilgotnej, co pozwoliło na właściwe ich zagęszczenie wybranym sposobem, odpowiadającym warunkom budowy.

Wytrzymałość badanych próbek po 28 dniach spełniała założone parametry zarówno betonów wykonanych z kruszywa ceglano, jak i betonowego, w przypadku kruszywa odsianego z przesiewacza wytrzymałość była nieco mniejsza niż projektowana (5 MPa).

Uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie po 90 dniach przekraczają projektowaną wytrzymałość. Porównanie otrzymanych wytrzymałości pokazano na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Wytrzymałości po 28 i 90 dniach przy założeniu wytrzymałości projektowanej 5,0 MPa
Fig. 3. Compressive strength after 28 and 90 days of hardening at design 5,0 MPa strength



Rys. 4. Wytrzymałości po 28 i 90 dniach przy założeniu wytrzymałości projektowanej 7,5 MPa
 Fig. 4. Compressive strength after 28 and 90 days at design 7,5 MPa strength

PODSUMOWANIE

Podstawowym celem przeprowadzonych badań było określenie możliwości wykorzystania kruszyw recyklingowych oraz popiołów lotnych z elektrociepłowni Karolin do produkcji podbudów budowlanych i drogowych.

Badane kruszywa recyklingowe, rozkruszone w firmie Eko-Zec, charakteryzowały się wysokim punktem piaskowym. Jednak na potrzeby badań postanowiono wykorzystać je w pełnym składzie. Uzyskane wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonów wykonanych z kruszyw recyklingowych były zadowalające. Zastosowanie popiołu lotnego pozwoliło zmniejszyć ilość cementu, a w dłuższym okresie zwiększyć wytrzymałość betonu. Zwiększenie wytrzymałości w czasie w przypadku podbudów drogowych ma ogromne znaczenie. Wykorzystanie kruszyw recyklingowych wpływa na ograniczenie degradacji środowiska przez zmniejszenie ilości składowanych odpadów na składowiskach oraz ograniczy wydobycie naturalnych kruszyw ze złóż. Jest jeszcze ważny aspekt ekonomiczny – kruszywo recyklingowe jest znacznie tańsze od naturalnego.

PIŚMIENNICTWO

- Bebłacz D., 2005. Beton w budowie dróg lokalnych. Sympozjum Naukowo Techniczne „Cement – właściwości i zastosowanie. Beton w infrastrukturze wsi i miast”, Poznań, 77–84.
- Eitner K., Schroeder G., Chrzanowski Z., 1990. Popioły z elektrociepłowni-surowiec czy odpady przemysłowe? XXI Poznańskie Dni Techniki „Zorganizowana gospodarka odpadami to czystsze i higieniczne warunki życia naszej społeczności”, Poznań.
- Mądrowski J., 2003. Utylizacja odpadów budowlanych jako element racjonalnego kształtowania środowiska. Rozprawa doktorska. Poznań.
- PN-EN 12390-2:2001 Badanie betonu. Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
- PN-EN 12390-3:2002 Badanie betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek.
- PN-EN 933-1:2000 Badanie geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie składu ziarnowego. Metoda przesiewania.

PN-EN 1097-5:2001 Badanie mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 5: Oznaczenie zawartości wody przez suszenie w suszarce z wentylacją.

ROAD SUBBASES CONSTRUCTED USING FLY-ASH, CEMENT AND RECYCLED AGGREGATES

Abstract. Aggregates are important components of concretes. However, resources of natural deposits of them are decreasing. Use of waste aggregates seems to be alternative solution. The aim of studies was to examine possibilities of repeated use of building by-products and fly-ashes for construction of road subbases.

Key words: recycled aggregate, road subbase

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 15.09.2008