

dr inż. Beata Klimek¹⁾
ORCID: 0000-0002-6967-9766

Wpływ dodatku zmielonej opoki wapnistej jako częściowego zamiennika kruszywa kwarcowego na wybrane właściwości zapraw wapienno-cementowych

Influence of ground lime rock addition as a partial replacement for quartz aggregate on selected properties of lime-cement mortars

DOI: 10.15199/33.2023.10.04

Streszczenie. Wyniki badań wstępnych opisane w artykule pozwoliły na uzyskanie nowej wiedzy na temat możliwości wykorzystania opoki wapnistej jako częściowego zamiennika piasku. Zmieloną opoką wapnistą zastępowany był wypełniacz kwarcowy w ilości 10, 20, 30% mas. Zmiany badanych cech fizycznych zapraw odzwierciedlają charakterystykę materiałową opoki jako skały. Analizując cechy mechaniczne, zauważono, że opoka jako częściowy zamiennik kruszywa powoduje spadek wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wszystkich mieszanek w porównaniu z próbką wzorcową. Natomiast wytrzymałość na ściskanie zapraw wzrasta o 7,67 % przy 20% zamianie kruszywa kwarcowego.

Słowa kluczowe: opoka wapnista; zaprawa wapienno-cementowa; cechy fizyczne; cechy mechaniczne.

Abstract. The results of the preliminary research described in the paper provided new knowledge on the possibility of using lime rock as a partial replacement for sand. Quartz filler was substituted with ground lime rock in the amount of 10, 20, and 30%. The changes in the studied physical characteristics of the mortars reflect the material characteristics of lime rock. When analyzing the mechanical properties, it can be observed that the addition of ground lime rock as a partial replacement for quartz aggregate causes a decrease in flexural tensile strength for all mixes compared to the reference sample. In turn, the compressive strength of mortars increases by 7.67% when 20% of quartz aggregate is substituted.

Keywords: lime rock; lime-cement mortar; physical properties; mechanical properties.

Na Lubelszczyźnie występują licznie obiekty z opoki wapnistej. Większość z nich to obiekty zabytkowe, które ze względu na zły stan techniczny wymagają działań naprawczych [1] i indywidualnego podejścia do naprawianego obiektu. Dobór materiałów naprawczych powinien być uzależniony od wyników badań oraz analiz laboratoryjnych [2, 3].

Opoka jest skałą osadową, będącą formą przejściową między skałami węglanowymi i krzemionkowymi, powstałą w okresie górnej kredy w wyniku odwapnienia skał pierwotnych [4]. Zawartość krzemionki (SiO₂) w opoce wynosi 5 – 75% masy i występuje głównie w postaci opalu, chalcedonu lub kwarcu. W zależności od zawartości wapnia

lub krzemionki, opoki można podzielić na gatunki ciężkie, w których dominuje zawartość węglanów, oraz gatunki lekkie, znane również jako odwapnione, z dominującą w ich składzie krzemionką [5 – 6]. Dzięki właściwościom termicznym i mechanicznym opoki znajdują zastosowanie w produkcji cementu, budownictwie drogowym oraz w produkcji okładzin dekoracyjnych i materiałów ceramicznych [7]. Właściwości sorpcyjne opoki wapnistej są wykorzystywane w procesach oczyszczania wody i ścieków w celu usunięcia fosforu, magnezu i żelaza [8]. Opoka jako materiał mineralny pochodzenia naturalnego była badana jako nowatorski wypełniacz hybrydowy do polimerów [9]. Analizując dostępną literaturę, nie znaleziono natomiast badań określających wpływ zastąpienia kruszywa kwarcowego zmieloną opoką wapnistą w zaprawach i betonach. W celu oceny wy-

dajności zapraw z mieloną opoką wapnistą opracowano program badań eksperymentalnych obejmujący serię testów charakteryzujących zachowanie projektowanych zapraw. W artykule przedstawiono badania wstępne określające konsystencję, gęstość objętościową, porowatość, a także wytrzymałość zapraw na rozciąganie przy zginaniu i ściskanie. Uzyskane wyniki porównano z parametrami próbki referencyjnej bez dodatku opoki.

Materiały i metody badań

W celu określenia wpływu opoki jako częściowego zamiennika kruszywa na wybrane właściwości zapraw przeprowadzono badania czterech serii mieszanek. Do wykonania zapraw zastosowano cement biały CEM I 52,5R i wapno hydratyzowane EN 459 CL 90-S (tabela 1). Zaprawy zostały zróżnicowane zastąpieniem wypełniacza kwarcowego

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury; b.klimek@pollub.pl

Tabela 1. Skład badanych zapraw
Table 1. Composition of tested mortars

| Składnik | Udział masowy [% mas.] |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Cement portlandzki CEM I 52,5R | 15,54 |
| Wapno hydratyzowane CL 90-S | 23,21 |
| Piasek kwarcowy 0,0 – 2,0 mm | 42,88 – 61,25 |
| Zmielona opoka wapnista 0,0 – 2,0 mm | 0,0 – 18,37 |
| Woda zarobowa | 74 – 100 g/1 kg części suchej zaprawy |

mieloną opoką wapnistą dozowaną w ilości 10, 20, 30% mas. Opracowane mieszanki oznaczono: M0 – zaprawa wzorcowa (bez dodatku opoki); M10 – zaprawa z 10% zastąpieniem piasku opoką; M20 – zaprawa z 20% zastąpieniem piasku opoką; M30 – zaprawa z 30% zastąpieniem piasku opoką. Piasek zastępowano zmieloną opoką wapnistą w ilości 0 – 30% mas., mając na uwadze wyniki badań uzyskane przez Dobiszewską [10] i Klimek [11].

Użyty do badań cement portlandzki CEM I 52,5R charakteryzował się następującymi właściwościami: wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach – 36 – 44 MPa; wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach – 53 – 65 MPa; początkowy czas wiązania 110 – 160 min; strata przy prażeniu $\leq 2,77\%$; białość 89,5%; nierozpuszczalna pozostałość $\leq 0,3\%$; zawartość Cl $\leq 0,04\%$; gęstość nasypowa 1,22 kg/dm³. Skład chemiczny CEM I 52,5R [% mas.]: CaO – 64,46; MgO – 0,78; SiO₂ – 20,36; Al₂O₃ – 4,86; Fe₂O₃ – 2,67; SO₃ – 1,8 – 2,3; Na₂O_{eq} – 0,48. Wapno hydratyzowane EN 459 CL 90-S charakteryzowało się gęstością nasypową 0,46 kg/dm³, a jego skład chemiczny [% mas.] był następujący: CaO + MgO ≥ 90 ; CO₂ ≤ 4 ; SO₃ ≤ 1 ; MgO ≤ 1 ; wolna woda ≥ 2 . Naturalny piasek kwarcowy (frakcja 0,0 – 2,0 mm), o gęstości nasypowej 1,66 kg/dm³ i powierzchni właściwej 6000 cm²/g, spełniał w zaprawach rolę kruszywa drobnego i charakteryzował się następującym składem chemicznym [%]: SiO₂ – 95,30; Al₂O₃ – 1,90; Fe₂O₃ – 0,70; CaO – 0,40; pozostałe – 1,70 [12]. Opoka wapnista wybrana do badań to wapień pozyskany w Janowcu nad Wisłą. Skład chemiczny kruszywa z opoki wapnistej, wyznaczony metodą fluorescencji rentgenowskiej (XRF), był następujący [%]: CaO – 53,04; SiO₂

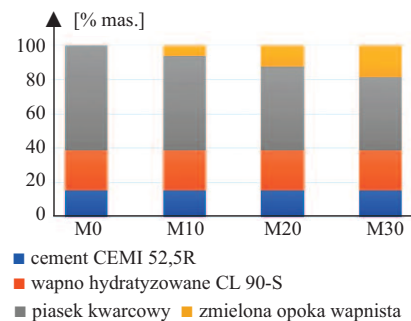
– 41,86; Al₂O₃ – 2,02; Fe₂O₃ – 1,69; MgO – 0,43; TiO₂ – 0,20, SrO – 0,20; K₂O – 0,54 oraz MnO – 0,02. Straty wartości prażenia wynosiły 0,74 – 28%. Główne cechy opoki wapnistej przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Właściwości opoki wapnistej (wartości średnie) [13, 6]
Table 2. Properties of the lime rock (average values) [13, 6]

| Właściwości | Odchylenie standardowe | Współczynnik zmienności [%] | Metoda badania wg |
|---|------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Gęstość nasypowa 1,12 [kg/dm ³] | 0,12 | 4,72 | EN 1097-6:2022-07 [14] |
| Porowatość 44,5 [%] | 0,52 | 5,16 | PN-EN 1936:2010 [15] |
| Absorpcja wody 24,5 [%] | 0,27 | 4,29 | EN 13755:2008 [16] |
| Współczynnik absorpcji wody 15,3 [kg/m ² ·s ^{0,5}] | 2,62 | 5,74 | EN 1925:2001 [17] |
| Wytrzymałość na ściskanie 14,6 [MPa] | 3,19 | 8,47 | EN 1926:2007 [18] |
| Powierzchnia właściwa 6400 [cm ² /g] | 0,14 | 6,65 | metoda BET [6] |

Kruszywem w serii wzorcowej był piasek kwarcowy, a pozostałe trzy serie mieszanek wykonano w uwzględnieniu zamiany piasku zmieloną opoką wapnistą w ilości 10, 20, 30% (rysunek 1). Zmielona opoka wapnista (frakcja 0,0 – 2,0 mm) zastosowana w mieszankach pozyskana została przez mechaniczne rozbicie kamienia na mniejsze fragmenty, a następnie drobniejsze frakcje rozdrobniono za pomocą laboratoryjnej kruszarki szczękowej i młynka kulowego. Wykonano analizę sitową miazgi z opoki wapnistej i piasku kwarcowego. Badania wielkości ziarna kruszywa wykonano standardową metodą sitową wg EN 933-1 [19] z sitami o wielkości oczek: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0 mm. Udział procentowy frakcji ziarnowej w zaprawach przedstawiono na rysunku 1.

Projektowanie zapraw zakończono, określając zawartość wody w każdej mieszance. Przygotowano zestawy próbek o wymiarach 40 × 40 × 160 mm zgodnie z normą EN 1015-2 [20].



Rys. 1. Skład zapraw poddanych badaniom

Fig. 1. Composition of tested mortars

Podczas modyfikacji składu zaprawy przez częściową zamianę kruszywa, konieczna była korekta wskaźnika W/S (stosunku wody do spoiwa), a więc zwiększenia ilości wody potrzebnej do wykonania zarobów w celu zachowania

podobnej urabialności i konsystencji, jak w przypadku zaprawy wapienno-cementowej (wzorcowej bez dodatku). Stosunek W/S badanych zapraw określono doświadczalnie: zaprawy wzorcowej M0 wynosił 0,30, a zapraw M10, M20, M30 był równy 0,40. Stosunek składników spoiwo/wypełniacz ustalono jako 1 : 3. Konsystencję zapraw mierzono za pomocą stolika rozpląwu [21]. Po wymieszaniu świeże zaprawy wlewano do form w dwóch w przybliżeniu równych warstwach. Każdą z nich zagęszczano 25 uderzeniami standardowego ubijaka. Do zgarnięcia nadmiaru zaprawy użyto szpachelki, aby powierzchnie były płaskie i wyrównane z wierzchem form. Każdą formę umieszczono następnie w indywidualnej, szczelnie zamkniętej torebce polietylenowej. Norma EN 1015-2 [20] zaleca wyjęcie belek z formy po 48 h, ale nastąpiło to po 72 h ze względu na wolne twardnienie słabych mieszanek. Po wyjęciu z formy belki były ponownie trzymane w workach przez kolejne cztery dni. Następnie przechowywano je w warunkach laboratoryjnych (15 ± 5°C i RH 65 ± 10%).

Badanie wytrzymałości na zginanie i na ściskanie zapraw wykonano zgodnie z normą PN-EN 1015-11:2019 [22] na urządzeniu pomiarowym MTS model 319,25. W przypadku każdego rodzaju próbek wykonano 3 pomiary wytrzymałości na zginanie, a następnie wyznaczono średnią. Próbkę obciążano w schemacie statycznym trójpunktowego zginania z prędkością 0,1 mm/s. Wy-

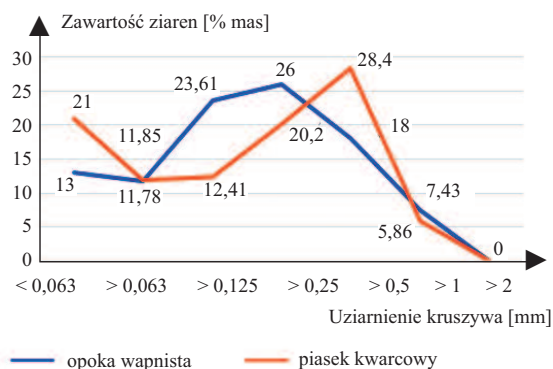
konano 6 pomiarów wytrzymałości na ściskanie, a następnie wyznaczono średnią. Próbkę obciążano z prędkością 1 mm/min. Badania cech mechanicznych zostały wykonywane po 28, 56 i 90 dniach.

Badania porowatości metodą porozymetrii rtęciowej zapraw M0 i M20 wykonano po 90 dniach. Zakres pomiarowy obejmował pory o rozmiarach od 0,003 do 360 μm . Porowatość próbek została wyznaczona na porozymetrze rtęciowym Autopore IV 9510 (Micromeritics, USA). W celu usunięcia z powierzchni fizycznej zaabsorbowanej pary wodnej oraz innych gazów, przed wykonaniem właściwego pomiaru próbki były suszone w temperaturze 105°C [23].

Wyniki badań

Porównano krzywą przesiewu składników podlegających modyfikacji w mieszankach (rysunek 2). Przez sito o oczku 0,063 mm przeszło 13% ziaren opoki, 21% piasku. Więcej ziaren opoki przechodzi przez oczka sita 0,5 mm, a mianowicie 74,39%, a piasku kwarcowego 65,46%.

Konsystencja zaprawy ma istotny wpływ na przyczepność do podłoża [24]. Wraz ze wzrostem ilości zamiennika kruszywa zmniejsza się średnica rozplywu zaprawy. W przypadku zamiany 30% mas. piasku nastąpiło zmniejszenie rozplywu o 13 mm, w porównaniu, gdy ta zamiana wynosiła 10% mas. (tabela 3). Większe zapotrzebowanie na wodę przy utrzymaniu zbliżonej konsystencji (takiej jak próbki wzorcowej) wiąże się z większą chropowatością opoki. Powierzchnia właściwa opoki jest o 400 cm^2/g więk-



Rys. 2. Udział frakcji ziarnowej w zaprawach [24]
Fig. 2. Share of grain fraction in mortars [24]

Tabela 3. Wpływ zmielonej opoki wapienistej na ilość wody zarobowej, konsystencję i gęstość objętościową zapraw

Table 3. Influence of ground lime rock on the proportion of mixing water, consistency and bulk density of mortars

| Zaprawa | Udział opoki zmielonej [%] | W/S | Ilość wody zarobowej [g/kg suchej zaprawy] | Konsystencja na stoliku rozplywu [mm] | Gęstość objętościowa [kg/m^3] |
|---------|----------------------------|-----|--|---------------------------------------|---|
| M0 | 0 | 0,3 | 74,6 | 204 | 2009 |
| M10 | 10 | 0,4 | 99,9 | 208 | 2015 |
| M20 | 20 | 0,4 | 100,2 | 201 | 2018 |
| M30 | 30 | 0,4 | 100,3 | 195 | 2043 |

sza niż piasku, co wiąże się z zwiększoną wodozadržnością modyfikowanych zapraw. Gęstość objętościowa próbki wzorcowej jest mniejsza niż pozostałych próbek modyfikowanych. Prawdopodobnie jest to związane z większą wodozadržnością opoki i występowaniem w większej części drobniejszego uziarnienia opoki w mieszankach, co sprzyja większej gęstości. Większa gęstość objętościowa wiąże się z mniejszą ilością pustek powietrznych, ale wpływa również na morfologię ziaren składników i wodozadržność mieszanki.

W tabelach 4 i 5 podano średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i wytrzymałości na ściskanie wszystkich typów zapraw w okresie 28, 56 i 90 dni (w nawiasach znajdują się współczynniki zmienności). Uzyskane wyniki pokazują wpływ wypełniacza wapiennego na zachowanie mechaniczne zapraw wapienno-cementowych oraz jak zmieniał się on wraz z czasem utwardzania (rysunki 3 i 4). Wpływ ilości miazgu z opoki na mikrostrukturę otrzymanych zapraw jest dobrze widoczny w wynikach pomiarów porozymetrycznych.

Wraz z dodatkiem 20% mas. miazgu z opoki zwiększa się porowatość, całkowita powierzchnia porów i całkowita objętość porów, natomiast zmniejsza się znacznie średnia średnica porów, a w niewielkim stopniu gęstość pozorna i nasypowa. Całkowita objętość porów zaprawy wzorcowej wynosiła 0,15 [ml/g], natomiast zapraw z dodatkiem 20% mas. miazgu z opoki zwiększyła się do 0,21 [ml/g]. Porowatość badanych zapraw wynosiła 27,15% – M0 i 34,80% – M20. Średnia

Tabela 4. Wytrzymałość zapraw na zginanie (f_{flex}), średnie wartości po 28, 56 i 90 dniach (w nawiasach podano współczynniki zmienności)

Table 4. Flexural strength of mortars (f_{flex}), average values at 28, 56 and 90 days (coefficients of variation shown in brackets)

| Zaprawa | Wytrzymałość na zginanie [MPa] | | |
|---------|--------------------------------|-------------|-------------|
| | 28 dni | 56 dni | 90 dni |
| M0 | 0,94 (10,4%) | 1,93 (7,6%) | 1,64 (5,1%) |
| M10 | 0,95 (1,3%) | 1,46 (2,4%) | 1,4 (3,0%) |
| M20 | 0,88 (3,1%) | 1,31 (7,2%) | 1,29 (8,8%) |
| M30 | 0,65 (12,0%) | 0,82 (3,6%) | 0,97 (6,8%) |

Tabela 5. Wytrzymałość zapraw na ściskanie (f_{comp}), średnie wartości po 14, 28 i 56 dniach (w nawiasach podano współczynniki zmienności)

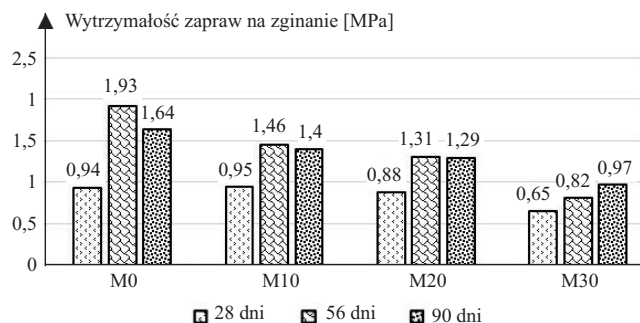
Table 5. Compressive strength of mortars (f_{comp}), average values at 14, 28 and 56 days (coefficients of variation shown in brackets)

| Zaprawa | Wytrzymałość na ściskanie [MPa] | | |
|---------|---------------------------------|-------------|--------------|
| | 28 dni | 56 dni | 90 dni |
| M0 | 2,89 (12,8%) | 4,47 (7,5%) | 3,78 (9,1%) |
| M10 | 2,06 (2,7%) | 3,48 (4,3%) | 3,85 (4,0%) |
| M20 | 1,91 (2,8%) | 3,20 (3,2%) | 4,07 (12,1%) |
| M30 | 1,68 (7,1%) | 2,52 (6,8%) | 2,88 (6,6%) |

średnica porów wyliczona na podstawie pola powierzchni bocznej porów i objętości porów zmniejszyła się z 1475,31 μm (zaprawy wzorcowej) do 439,36 μm zaprawy z dodatkiem 20% mas. miazgu z opoki (rysunek 5, tabela 6). Wyniki te wskazują, że dodatek miazgu z opoki do zaprawy wapienno-cementowej powoduje doszczelnienie jej struktury, co przekłada się na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie.

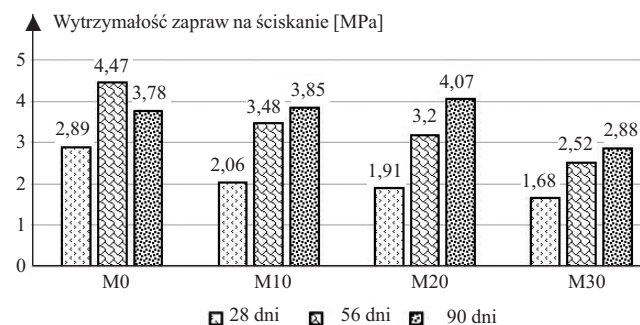
Analiza wyników

Zastosowanie zmielonej opoki wapienistej jako częściowego zamiennika kruszywa kwarcowego ma duży wpływ na urabialność. Drobne dodatki wypełniające w odpowiedniej ilości poprawia-



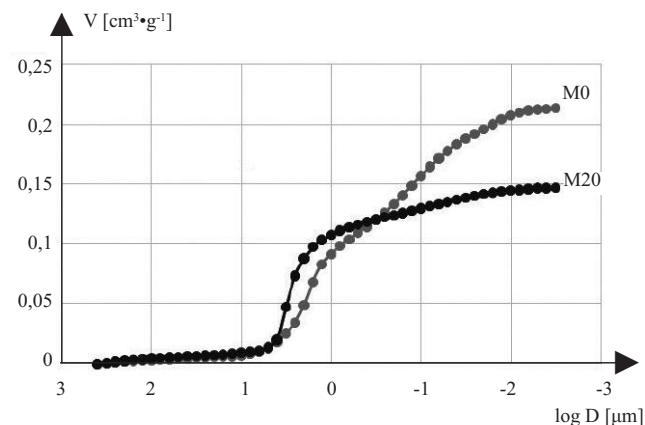
Rys. 3. Wytrzymałość zapraw na zginanie (f_{flex}), średnie wartości po 28, 56 i 90 dniach

Fig. 3. Flexural strength of mortars (f_{flex}), the average values at 28, 56 and 90 days



Rys. 4. Wytrzymałość zapraw na ściskanie (f_{comp}), średnie wartości po 28, 56 i 90 dniach

Fig. 4. Compressive strength of mortars (f_{comp}), the average values at 28, 56 and 90 days



Rys. 5. Krzywa całkowita rozkładu wielkości porów wybranych zapraw

Fig. 5. Cumulative pore size distributions of selected mortar

Tabela 6. Wpływ zmielonej opoki wapienistej na porowatość, gęstość pozorną, gęstość nasypową, średnicę porów, całkowitą powierzchnię porów, całkowitą objętość porów

Table 6. The influence of ground lime rock on porosity, apparent density, bulk density, pore diameter, total pore surface area, total pore volume

| Zaprawa | Porowatość [%] | | Gęstość | | | | Średnia średnica porów Dav [nm] | | Całkowita | | | |
|---------|----------------|-------|----------------|-----------------|-------------|-------|---------------------------------|-------|-----------------------------|-----------------------|------|-------|
| | | | pozorna [g/ml] | nasypowa [g/ml] | psia = 0.51 | | | | powierzchnia porów S [m²/g] | objętość porów [ml/g] | | |
| M0 | 27,15 | 0,22* | 2,54 | 0,02* | 1,85 | 0,02* | 1475,31 | 1,30* | 4,17 | 0,00* | 0,15 | 0,00* |
| M20 | 34,80 | 0,21* | 2,50 | 0,01* | 1,63 | 0,00* | 439,36 | 3,54* | 12,83 | 0,00* | 0,21 | 0,00* |

* odchylenie standardowe

ją urabialność mieszanek wapienno-cementowych i mogą nie zwiększać zapotrzebowania na wodę [25]. Natomiast w przypadku stałego stosunku w/c, gdy stosuje się zbyt dużą zawartość pyłów, potrzeba więcej wody w celu zwilżenia powierzchni ziaren, co skutkuje słabą urabialnością [26]. Pył skalny jest obojętnym wypełniaczem i w ten sposób przyczynia się do wypełnienia większej wolnej przestrzeni międzykrystalicznej w mieszankach cementowych. Prowadzi to do mniejszej porowatości, a tym samym większej wytrzymałości [27]. Powyżej pewnej ilości pyłu kamiennego zastępującego piasek (tj. ok. 30%) obserwuje się jednak spadek wytrzymałości na zginanie. Zwiększona zawartość drobnej frakcji może również zwiększać porę, co wyjaśnia zmniejszenie wytrzymałości na zgi-

nanie. Najważniejszą kwestią jest jednak chropowata faktura powierzchni i nieregularny kształt zastosowanego pyłu skalnego [28].

Po 28 dniach zaprawa M30 była najslabsza zarówno pod względem wytrzymałości na zginanie, jak i ściskanie. Największą wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach sezonowania miała zaprawa wzorcowa M0 – o 38,83% większą od zaprawy M10, o 49,74%, od zaprawy M20 i o 77,64% od zaprawy M30. Różnice między mieszankami M10, M20, M30 były natomiast niewielkie.

Po 56 dniach sezonowania zaprawa wzorcowa M0 miała nadal największą wytrzymałość, tj. o 28,45% większą od M10, o 39,89% od zaprawy M20 i o 77,38% od zaprawy M30. Po 56 dniach przewaga zaprawy wzorcowej M0 nad M10 i M20 jest już mniejsza tylko o 10% w porównaniu z zaprawami po 28 dniach sezonowania. Po 90 dniach sezonowania wpływ dodatku wypełniacza wapiennego znalazł odzwierciedlenie w wytrzymałości na ściskanie. Najmocniejszą zaprawą jest mieszanka M20 z dodatkiem 20% wypełniacza, której wytrzymałość na ściskanie jest większa o 5,71% niż zaprawy M10, o 7,67% większa od zaprawy M0 i o 41,32% większa niż zaprawy M30.

W przypadku badań wytrzymałości na zginanie po 28 dniach zaprawy M0 i M10 osiągnęły zbliżone wartości i różniły się zaledwie o ok. 1% na korzyść zaprawy M10. Zaprawa M20 była słabsza od M10 o 7,95%, a M30 aż o 46,15% od M10. Po 56 dniach sezonowania zaprawa M0 była mocniejsza o 32,19% od M10, o 47,32% od M20 i aż o 135,36% od M30. Po trzech miesiącach utwardzania zaprawa M0 miała nadal największą wytrzymałość na zginanie, tj. o 17,14% większą od M10, o 27,13% od M20 i o 69,07% od zaprawy M30. Największy wzrost wytrzymałości na ściskanie wykazała zaprawa M20, która w okresie od 28 do 90 dnia zwiększyła się o 113,08%, M10 o 86,89%, a M30 o 71,43%. Wzrost wytrzymałości na zginanie nastąpił pomiędzy 28 a 56 dniem utwardzenia, aby następnie nieznacznie opaść.

Spośród trzydziestu średnich wyników przedstawionych w tabelach 5 i 6 tylko trzy wykazywały dużą zmienność (współczynnik zmienności ok. 13%). Taki współczynnik zmienności występuje często w przypadku zapraw wapiennych [29]. Ponadto jedna trzecia średnich wyników miała współczynnik zmienności mniejszy niż 5%.

Zaobserwowany spadek wytrzymałości niektórych mieszanek został również zarejestrowany we wcześniejszych pracach badawczych [30, 31]. Niektórzy autorzy wskazywali, że takie zachowanie można przypisać rozwojowi mikropęknięć [30] lub zmianom struktury porów [33]. Wprowadzenie dodatku wapiennego może mieć różny wpływ na wytrzymałość zapraw: efekt wypełniacza, który zwiększa gęstość mieszanki i efekt rozcieńczenia działający, gdy spoiwo nie jest w stanie pokryć wszystkich cząstek. Obserwowany ogólny wpływ zależy m.in. od ilości dodanego wypełniacza. Połączenie tych efektów może wyjaśnić wyniki przedstawione w artykule. Jak przedstawiono we wstępie, wprowadzenie drobnego kruszywa wapiennego do zaprawy może mieć różny wpływ na ich wytrzymałość.

Rysunek 6 przedstawia stosunek wytrzymałości na ściskanie (f_{comp}) do wytrzymałości na zginanie (f_{flex}) (f_{comp}/f_{flex}) wszystkich typów zapraw po różnych czasach sezonowania. Wynika z niego,

że wszystkie wartości mieszczą się w przedziale 2,17 – 3,16.

Na rysunku 7 przedstawiono korelację między wytrzymałością na ściskanie a wytrzymałością na zginanie przez połączenie dostępnych danych dotyczących wszystkich typów zapraw niezależnie od czasu sezonowania i dodatku wypełniacza. Nawet jeśli współczynnik determinacji R^2 wynosił 78%, to stosunek 2,55 można uznać za reprezentatywny w przypadku badanych tu rodzajów zapraw. W prowadzonych badaniach Allen [33] wskazał, że stosunek wytrzymałości na ściskanie do wytrzymałości na zginanie jest odwrotnie proporcjonalny do kruchości i bezpośrednio do plastyczności materiału. Kalagri i in. [30] stwierdzili, że stosunek ten jest proporcjonalny do dynamicznego modułu sprężystości. Oszacowana proporcja 2,55 jest zbliżona do proporcji stwierdzonych w innych badaniach zapraw wapienno-cementowych [30]. Dobiszewska i inni zaobserwowali, że w przypadku stosowania pyłu skalnego do substytucji kruszywa drobnego, dominującą rolę w ulepszeniu właściwości odgrywa efekt wypełniacza, podczas gdy skała, z której pochodzi proszek kamienny, ma mniejsze znaczenie. Wynika to z faktu, że analizowany pył skalny jest w każdym razie znacznie drobniejszy niż drobne kruszywo i ma większą powierzchnię właściwą. Optymalna wymiana kruszywa drobnego

wynosi 20 – 30% i zależy bardziej od stopnia rozdrobnienia pyłu skalnego niż od jego pochodzenia geologicznego [34].

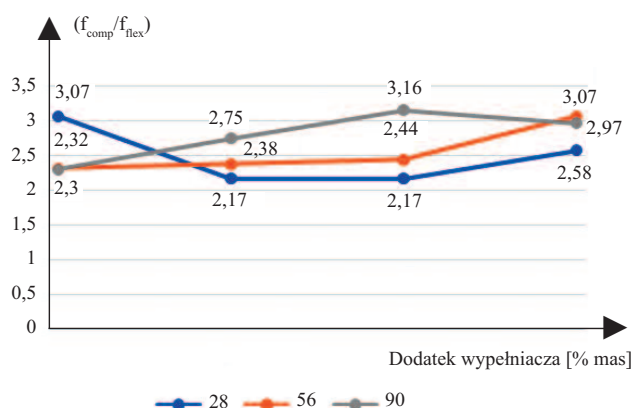
Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- dodatek mielonej opoki wapiastej, jako częściowego zamiennika kruszywa kwarcowego, wpływa na właściwości świeżej zaprawy. Częściowe zastąpienie drobnego kruszywa mieloną opoką prowadzi do zmniejszenia urabialności. Większa powierzchnia właściwa mielonej opoki w porównaniu z kruszywem drobnym powoduje zwiększenie zapotrzebowania na wodę do zwilżenia powierzchni cząstek. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie domieszek redukujących ilość wody w celu poprawy urabialności mieszanki. W związku z tym istnieje potrzeba przeprowadzenia badań dotyczących analizy wpływu domieszek na urabialność zaprawy w przypadku wykorzystywania mielonej opoki do substytucji kruszywa drobnego:

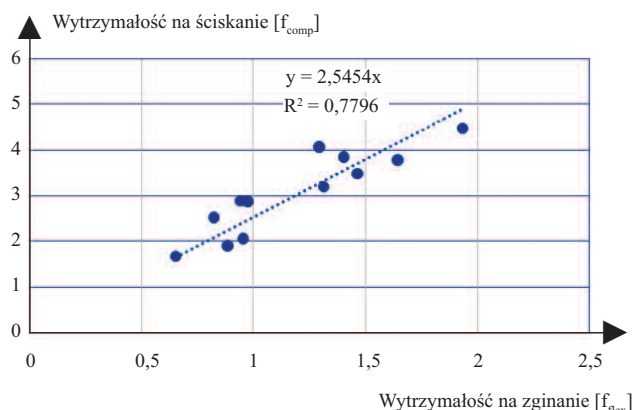
- wraz ze wzrostem ilości miazgi z opoki wapiastej w zaprawach zmniejsza się jej rozplyw, co związane jest z wielkością, kształtem i chropowatością okruchów opoki wapiastej;

- częściowe zastąpienie kruszywa opoką wapiastą zmniejsza liczbę dużych porów kapilarnych i zwiększa zawartość małych porów, co prowadzi



Rys. 6. Stosunek wytrzymałości na ściskanie (f_{comp}) do wytrzymałości na zginanie (f_{flex}) zapraw o różnej zawartości wypełniacza po 28, 56 i 90 dniach sezonowania

Fig. 6. Ratio between compressive (f_{comp}) and flexural strength (f_{flex}) of mortars for each filler content at 28, 56 and 90 days



Rys. 7. Korelacja między wytrzymałością na ściskanie (f_{comp}) a wytrzymałością na zginanie (f_{flex}) przez połączenie dostępnych danych ze wszystkich typów zapraw i czasu sezonowania

Fig. 7. Correlation between compressive (f_{comp}) and flexural strength (f_{flex}) by combining the available data from all types of mortar and ages

do uszczelnienia mikrostruktury stwardniałej zaprawy. Dzięki temu zaprawa wapienno-cementowa z dodatkiem pyłu skalnego charakteryzują się większą wytrzymałością niż bez tego dodatku;

- dodatek opoki powoduje zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wszystkich mieszanek z miałem skalnym w porównaniu z próbką wzorcową;

- wytrzymałość na ściskanie zapraw zwiększa się o 7,67% przy zamianie 20% mas kruszywa kwarcowego na opokę wapińską;

- najbardziej zwiększyła się wytrzymałości na ściskanie zaprawy M20 – o 113,08% w okresie od 28 do 90 dnia sezonowania.

W kolejnych badaniach należy przeprowadzić analizę wpływu mialu z opoki wapińskiej na pozostałe właściwości zapraw. Planowane są badania wykonania wodozgodności opoki, odporności na korozję solną i mrozową. Należy też przewidzieć dodatek superplastyfikatora, którym można regulować konsystencję zapraw.

Literatura

- [1] Trochonowicz M, Drobek K., Budownictwo z opoki wapińskiej na terenie Lubelszczyzny, Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych. <https://doi.org/10.35784/teka.2845>.
- [2] Barnat-Hunek D. Hydrofobizacja opoki wapińskiej w obiektach zabytkowych Kazimierza Dolnego. Monografie Wydziału Budownictwa i Architektury. 2010. Politechnika Lubelska, Lublin.
- [3] Bralewska E, Penka B, Zasuń H, Gryniewicz M. Badania przyczyn niszczenia odnawialnej elewacji Spichlerza Ulanowskich w Kazimierzu Dolnym oraz możliwości wykonania poprawek. 074/501/037/6/82. Politechnika Warszawska, Warszawa 1983.
- [4] Bus A, Karczmarczyk A. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. 2014. Polska Akademia Nauk.
- [5] Pinińska J. Właściwości geomechaniczne opok. *Górnictwo i Geoinżynieria*. 2008; 32: 293.
- [6] Brogowski Z, Renman G. Characterization of opoka as a basis for its use in wastewater asterwater treatment. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2004; (13) 1: 15 – 20.
- [7] Kotlyar VD, Lapunova KA, Kozłow GA. Wyroby ceramiki ściennej na bazie opoka i węglowych. *Procedia Eng*. 2016; 150: 1452.
- [8] Marzec M, Pieńko A, Gizińska-Górna A. Pytka A, Józwiakowski K, Sosnowska B, Kamińska A, Listos A. Zastosowanie skały węglanowo-krzemionkowej (opoka) do usuwania żelaza, manganu i bakterii wskaźnikowych z wód gruntowych. *Journal of Water and Land Development*. 2017; DOI: 10.1515/jwld-2017-0054.
- [9] Przekop RE, Jakubowska P, Sztorch B, Kozera R, Dydek K, Jałbrzykowski M, Osiecki T, Marciniak P, Martyla A, Kloziński A.; et al. Opoka – Skała osadowa jako nowy typ hybrydowego wypełniacza mineralnego do kompozytów polimerowych. *Appl. Chem*. 2021; 1: 90 – 110.
- [10] Dobiszewska, M. Zastosowanie pyłu bazaltowego, jako substytutu piasku w zaprawie i betonie cementowym. *Budownictwo i Architektura*. 2016; 15 (4): 75 – 85.
- [11] Klimek B. The problem of repairing the stone facades on an example of Donjon fortress Kłodzko. In *Current Issues in Research, Conservation and Restoration of Historic Fortifications*, 9th ed.; Grudziński, Z., Bevs, M., Eds.; Polytechnic National University: Lviv, Ukraine, 2017: 113 – 122.
- [12] Barnat-Hunek D, Grzegorzczak-Franczak, M, Klimek B, Pavlíková M, Pavlík Z. Properties of Multi-Layer Renders with Fly Ash and Boiler Slag Admixtures for Salt-Laden Masonry. *Constr. Build. Mater*. 2021; 278: 122366.
- [13] Pękala A, Puch F. Influence of environmental factors on physical and mechanical characteristics of the opoka-rocks, *Archives of Civil Engineering*. DOI: 10.24425/ace.2021.138503.
- [14] PN-EN 1097-6:2022-07 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości.
- [15] PN-EN 1936:2010 Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczanie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości.
- [16] PN-EN 13755:2008 Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczanie nasiąkliwości przy ciśnieniu atmosferycznym.
- [17] PN-EN 1925:2001 Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczanie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej.
- [18] PN-EN 1926:2007 Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie.
- [19] EN 933-1:2000 Badanie właściwości geometrycznych kruszyw – Część 1: Oznaczanie rozkładu wielkości cząstek.
- [20] EN 1015-2:2000 Metody badań zapraw do murów – Pobieranie i przygotowanie próbek zapraw do badań.
- [21] PN-EN 1015-3:2000 Metody badań zapraw do murów – Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozpluwu).
- [22] PN-EN 1015-11:2000 Metody badań zapraw do murów – Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy.
- [23] Jozefaciuk G, Skic K, Adamczuk A, Boguta P, Lamorski K. Structure and Strength of Artificial Soils Containing Monomineral Clay Fractions. *Materials*. 2021; <https://doi.org/10.3390/ma-14164688>.
- [24] Woźniak Z, Chajec A. Wpływ mączki granitowej na wybrane właściwości zapraw cementowych. *Materiały Budowlane*. 2022; 4: 58 – 61.
- [25] Khan MI, Usman M, Rizwan SA, Hanif A. Self-Consolidating Lightweight Concrete Incorporating Limestone Powder and Fly Ash as Supplementary Cementing Material. *Materials*. 2019; <https://doi.org/10.3390/ma12183050>.
- [26] Selvasofia ASD, Dinesh A, Sarath Babu V. Investigation of Waste Marble Powder in the Development of Sustainable Concrete. *Mater. Today Proc*. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.536>.
- [27] Vardhan K, Siddique R, Goyal S. Strength, Permeation and Micro-Structural Characteristics of Concrete Incorporating Waste Marble. *Constr. Build. Mater*. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.079>.
- [28] Singhal V, Nagar R, Agrawal V. Use of Marble Slurry Powder and Fly Ash to Obtain Sustainable Concrete. *Mater. Today Percent*. 2021; https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.572_bookmark11_bookmark85_bookmark91_bookmark92_bookmark95_bookmark104.
- [29] Costigan A. An experimental study of the physical properties of lime mortar and their effect on lime-mortar masonry, PhD dissertation, University of Dublin, 2013.
- [30] Kalagri A, Karatasios I, Kilikoglou V, The effect of aggregate size and type of binder on microstructure and mechanical properties of NHL mortars. *Constr. Build. Mater*. 2014; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.111>.
- [31] Grilo J, Silva AS, Faria P, Gameiro A, Veiga R, Velosa A, Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions, *Constr. Build. Mater*. 2014; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.045>.
- [32] Forster AM, Razali N, Banfill P, Szadurski E, Torney C, The influence of calcitic filler in hydraulic lime mortars for use in high temperature and high humidity climatic conditions: A preliminary investigation, in: J. J. Hughes, J. Válek, C. Groot (Eds.), *Hist. Mortars*, Springer International, 2019; DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91606-4>.
- [33] Allen G, *Hydraulic lime mortar for stone, brick and block masonry*. Routledge. 2003; <https://doi.org/10.4324/9781315781273>.
- [34] Dobiszewska M, Bagcal O, Beycioğlu A, Goulias D, Köksal F, Niedostatkiewicz M, Ürünveren H. Influence of Rock Dust Additives as Fine Aggregate Replacement on Properties of Cement Composites – A Review. *Materials*. 2022; <https://doi.org/10.3390/ma15082947>.

Badania zrealizowano w ramach działania naukowego finansowanego przez NCN MINIATURA 5, Nr 2021/05/X/ST8/01674/ „Ocena możliwości zastosowania opoki wapińskiej jako kruszywa do zapraw modyfikowanych nanomateriałami do wykonania napraw w obiektach zabytkowych” w Politechnice Lubelskiej

Przyjęto do druku: 20.09.2023 r.