

Badanie właściwości mechanicznych betonu z dodatkiem pyłu marmurowego

Experimental study on mechanical properties of concrete with marble dust

Aryan Bazrafkan¹, Alireza Habibi^{2*}, Arash Sayari¹

¹ Department of Civil Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

² Department of Civil Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

*Corresponding author, A. Habibi, e-mail: ar.habibi@shahed.ac.ir

Streszczenie

Praca opiera się na analizie obszernego zbioru danych doświadczalnych dotyczących projektowania betonu i jego właściwości, w którym część kruszywa drobnego zastąpiono pyłem marmurowym. Przygotowano 30 rodzajów betonów, w sumie 180 próbek sześciennych. W badaniach zastosowano zmienne stosunki: woda/cement: 0,4, 0,45 i 0,5, pył marmurowy/piasek: 0, 0,05, 0,1, 0,15 i 0,2, superplastyfikator/cement: 0, 0,25, 0,5, 0,75 i 1 oraz dwa moduły uziarnienia piasku: FM = 2,4 i FM = 3,0. Zbadano 28-dniową wytrzymałość na ściskanie i głębokość penetracji wody. Wyniki badań wykazują, że zaproponowane składy można wykorzystać do projektowania betonów różnych klas, w zależności od oczekiwanych właściwości betonu.

Słowa kluczowe: beton, pył marmurowy, projektowanie mieszanki betonowej, wytrzymałość na ściskanie, trwałość

Summary

This study aims to investigate the extensive test data on the mix design and mechanical properties of concrete by replacing parts of fine aggregates with marble dust. A full factorial experiment with 180 cubic samples of 30 mixes was used. The effects of water/cement ratio: 0.4, 0.45 and 0.5, marble dust/sand ratio: 0, 0.05, 0.1, 0.15 and 0.2, superplasticizer/cement ratio: 0, 0.25, 0.5, 0.75 and 1, and fineness modulus of sand [FM = 2.4 and FM = 3] on slump, 28-day compressive strength and depth of water penetration were determined. The results indicate that the proposed ratios can be used to enable the design of a concrete mix that corresponds to its required performance.

Keywords: concrete; marble dust; mix design; consistency; compressive strength; durability

1. Wprowadzenie

Pył marmurowy [PM] jest jednym z głównych składników stosowanych w tworzywach ceramicznych. Materiał ten jest stosowany jako wypełniacz w wielu gałęziach przemysłu, w materiałach takich jak: guma, tworzywa sztuczne, detergenty, a nawet leki. W ostatnich latach PM stosowano jako wypełniacz mineralny, poprawiający właściwości mechaniczne i trwałość betonu. Pucolony naturalne to popioły wulkaniczne, które nie są hydrauliczne, ale po dodaniu do mieszanki betonowej reagują z wodorotlenkiem wapnia z utworzeniem głównego produktu hydratacji cementu – fazy C-S-H. Niektóre drobnoziarniste materiały, na przykład proszek szklany i proszek z przetwórstwa gumy, stosowano jako dodatki mineralne do betonu (1, 2). Zbadano właściwości betonów przyjaznych dla

1. Introduction

Marble dust [MD] is one of the main ingredients used in ceramics, tiles, and earthenware. This powder with different aggregates is used as filler in many industries such as rubber, plastic, leatherette, detergents, and drugs. In recent years, MD has been used as a mineral filler powder, in order to improve the mechanical properties and durability of concrete. A pozzolan is the volcanic ashes that are not cementitious by itself, but when added to the concrete mix it reacts with calcium hydroxide, to form the cement main hydrate—calcium silicate hydrate, C-S-H phase. Some powders, such as glass powder and rubber powder, have been used as mineral additives in concrete (1, 2). The structural performance of environmentally friendly concretes, made with self-cementitious

środowiska, wykonanych z hydraulicznych popiołów lotnych oraz mielonego szkła, które zastosowanego jako kruszywo. Potwierdzono możliwość zastosowania standardowych równań nośności do betonów z popiołem lotnym i kruszywem szklanym, a wytrzymałość betonów spełniała założone wymagania lub nawet je przekraczała (3). Wykorzystanie kruszyw pochodzących z recyklingu w znacznych ilościach, zwykle pogarsza właściwości betonu. Ku i in. (3) zmniejszyli negatywny wpływ stosowania tych kruszyw, prezentując wyniki dotyczące wpływu dodatku popiołu lotnego klasy F na właściwości betonu z kruszywem pochodzącym z recyklingu. Wyniki pokazały, że możliwe jest wykorzystanie kruszyw pochodzących z recyklingu w betonie konstrukcyjnym w dużych ilościach, jeżeli w jego skład wchodzi 25-35% popiołu lotnego, ponieważ wady konstrukcyjne zostają zminimalizowane (4). Nas i Kurbetci (5) badali wpływ naturalnego zeolitu na wytrzymałość i trwałość betonu. Cement portlandzki został zastąpiony naturalnym zeolitem w ilości 10, 15 i 20%. Oprócz wytrzymałości na ściskanie i zginanie, oznaczono mrozoodporność, nasiąkliwość kapilarną, odporność na wysoką temperaturę i wykonano badania przepuszczalności chlorków. Wyniki badań wykazały, że betony zawierające 10% zeolitu mają największą wytrzymałość na ściskanie i zginanie. Przepuszczalność chlorków i nasiąkliwość zmniejszyły się wraz ze zwiększeniem dodatku naturalnego zeolitu. Odporność na cykle zamrażania-rozmrażania również uległa znacznej poprawie, wraz ze wzrostem udziału zeolitu w składzie betonu. Pod wpływem wysokiej temperatury dodatek naturalnego zeolitu do betonu o mniejszej zawartości spoiwa, zwiększył jego wytrzymałość na ściskanie [5]. Zrealizowano obszerny projekt badawczy dotyczący zastosowania mielonego szkła jako dodatku mineralnego. Badania dowiodły, że właściwości mechaniczne betonów wykonanych z kruszywa betonowego z recyklingu [KBR] i mielonego szkła, są podobne do właściwości normalnego betonu. Zgodnie z otrzymanymi wynikami stwierdzono, że możliwe jest użycie betonu z 20% mielonego szkła do budowy zrównoważonych konstrukcji budowlanych [6]. Właściwości mechaniczne i trwałość betonu geopolimerowego o małej zawartości popiołu lotnego z dodatkiem alkofofiny zostały zbadane przez Jindal i in. (7). Wykazano, że dodatek Alcofine [komercyjny produkt składający się głównie z drobno zmielonego żużla wielkopieczowego] znacznie poprawia właściwości mechaniczne betonu geopolimerowego, zawierającego popiół lotny. Przedstawiono korzystny wpływ na głębokość penetracji wody, wytrzymałość na ściskanie i przepuszczalność (7). Wyniki badań wytrzymałości na zginanie i ścinanie belek żelbetowych pokazują, że możliwe jest zastosowanie KBR jako zamiennika kruszywa grubego. Przegląd literatury i liczne badania potwierdzają, że metody oparte na normach dla betonu zwykłego można również zastosować do betonów z KBR [8]. Przeprowadzono badania statycznego modułu Younga dla betonu zwykłego i o dużej wytrzymałości, następnie wyznaczono empiryczne równanie modułu Younga za pomocą komputerowej analizy regresji metodą najmniejszych kwadratów (9). Zbadano quasi-statyczne i dynamiczne właściwości mechaniczne próbek betonu dojrzewających w roztworach siarczanu sodu i chlorku sodu (10). Analizowano zmiany właściwości próbek w trakcie badania trwałości w środowisku korozyjnym. W artykule pokazano, że ubytek masy próbek betonowych jest spowodowany ekspansją

fly ashes as the sole binders, and pulverized reused glass as the aggregate was evaluated. With respect to the applicability of the standard capacity equations to fly ash/glass aggregate concretes, observed beam capacities, either closely approached or exceeded predicted capacities (3). The use of high percentages of recycled aggregates in concrete would usually worsen the concrete properties. Ku et al (3) tried to address the deficiency of the use of recycled aggregates by systematically presenting results on the influence of incorporating class F fly ash, on concrete properties. The results showed that one of the practical ways to utilize a high percentage of recycled aggregates in structural concrete is by incorporating 25-35% of fly ash as some of the drawbacks caused by the use of recycled aggregates in concrete, could be minimized (4). Nas and Kurbetci (5) investigated the probability of using the natural zeolite in the production of concrete and its effects on the strength and durability of concrete. Portland cement has been replaced by natural zeolite in the addition of 0, 10, 15, and 20% by mass, in the production of concrete mixtures. In addition to the measurements of compressive and flexural strength, the freezing-thawing and high-temperature resistance were determined. Rapid permeability of chloride and capillary water absorption tests were accomplished on hardened concrete. The juxtaposition of results has shown that the concrete containing 10% zeolite has the highest compressive and flexural strength. The fast chloride permeability and capillary measurements declined with increasing natural zeolite addition. Resistance to freezing-thawing is also improved significantly as the zeolite replacement ratio increased. Under the influence of high temperature, natural zeolite addition in concrete with lower binder content, increased its compressive strength (5). An extensive research project on the use of glass powder [GP] as cementitious material was investigated. The results showed that the structural behavior of columns made of concrete of recycled concrete aggregate [RCA] and GP, is similar to the columns made of normal concrete. According to these results, it is possible to use concrete with 20% GP for the construction of sustainable building structures (6). Amelioration of mechanical properties and durability of low calcium fly ash geopolymer concrete with the Alcofine addition, was studied by Jindal et al. (7). The examination of the obtained results has shown that the addition of Alcofine additive [finely ground blast furnace slag] significantly improves the mechanical properties of low calcium fly ash geopolymer concrete. Good relevance was observed between the depth of water penetration and the compressive strength, permeable voids percentage, and compressive strength, likewise between compressive strength and flexural strength (7). The flexural and shear behavior of reinforced concrete beams has shown that the use of RCA, as a replacement for coarse aggregates, was investigated. In general, the predicted results are reasonably close to the measured trends, indicating that existing analytical models and code-based procedures for conventional concrete, can also be applied to RCA concrete beams (8). Experimental studies were conducted on the static Young's modulus, of normal and high strength concrete. An empirical equation for Young modulus of normal-mass concrete, determined by computer regression analysis using the least square method, as described (9). Quasi-static and dynamic mechanical properties of

produktów korozji. Gwałtowną ekspansję zmierzono szczególnie w pierwszych dniach dojrzewania próbek w środowisku korozyjnym. W trakcie badań korozyjnych quasi-statyczna wytrzymałość na ściskanie uległa znacznemu zmniejszeniu, podczas gdy spadki dla dynamicznej wytrzymałości na ściskanie i absorpcji energii nie były tak duże. Liang i in. (11) badali wpływ wysokiej temperatury na właściwości mechaniczne betonu, zawierającego kruszywo drobne z recyklingu. Wyniki doświadczeń dla próbek betonu z kruszywem z recyklingu wykazują, że ubytek masy, wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości oraz wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu maleją znacznie wraz ze wzrostem temperatury [11]. Gallias i in. (12) ocenili wpływ dodatków mineralnych na wodożądność cementu. Na podstawie wyników uzyskanych przez tych autorów ustalono, że powierzchnia właściwa składników jest głównym czynnikiem wpływającym na wodożądność spoiwa (12).

Kato i in. (13) badali wpływ zawartości pyłu marmurowego na czas wiązania, wytrzymałość i skurcz autogeniczny betonu o konsystencji ciekłej. Użyto cement portlandzki z dodatkiem 10, 20 i 30% masowych pyłu marmurowego. Wyniki badań dowiodły, że beton z dodatkiem pyłu marmurowego wiązał szybciej, ale jego wytrzymałość była mniejsza. Stwierdzono niewielki spadek wytrzymałości na ściskanie po dodaniu 10% pyłu oraz liniowy wzrost wytrzymałości na ściskanie związany ze spadkiem porowatości, zarówno w próbkach z dodatkiem, jak i bez dodatku pyłu marmurowego. Autorzy (13) przedstawili w badaniach efekt zmniejszenia skurczu autogenicznego wraz ze wzrostem dodatku pyłu marmurowego we wczesnym stadium dojrzewania, jednak w późniejszym etapie nastąpił stały wzrost skurczu w przypadku próbek z pyłem marmurowym. Sugerowano, że zwiększenie skurczu autogenicznego w wyniku dodania pyłu marmurowego jest związane z powstawaniem uwodnionego gliniano-węglanu wapnia $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$ (13). Beeralingegowda i Gundakalle (14) zbadali wpływ dodatku pyłu marmurowego na właściwości świeżego i stwardniałego betonu samozagęszczającego się i wykazali, że pył marmurowy powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie betonu, nawet o 20%.

W Iranie pył marmurowy [PM] powstaje jako produkt uboczny w procesie kruszenia marmuru, co oznacza, że jest to materiał tani i łatwo dostępny. W pracy zbadano wpływ pyłu marmurowego stosowanego jako kruszywo drobne na konsystencję, 28-dniową wytrzymałość na ściskanie oraz głębokość penetracji wody, dla betonów o zróżnicowanym składzie. Przeanalizowano obszerną serię danych doświadczalnych.

2. Część doświadczalna

2.1. Materiały

2.1.1. Cement

We wszystkich mieszankach betonowych stosowano cement portlandzki o gęstości $3,15\text{ g/cm}^3$ zgodnego z irańską normą ISIRI 389 (15). Właściwości cementu przedstawiono w tablicy 1.

concrete specimens were investigated, which were immersed in sodium sulfate and sodium chloride solutions (10). The continuous transformation and losing performance of specimens during the corrosive period were analyzed. The test results showed that the concrete specimens mass loss indicates the continuous increase during the corrosion period and increases rapidly in the early days. The quasi-static compressive strength was significantly reduced during the corrosion period, while there were different decrements to dynamic compressive strength and specific energy absorption and strain rate sensibilities. Liang et al (11) investigated the high-temperature effects on the mechanical properties of concrete, containing recycled fine aggregates. The experimental results indicate that mass loss, compressive strength, elasticity modulus, and splitting tensile strength of concrete samples containing recycled fine aggregates, decrease significantly with an increase of temperature (11). Gallias et al. (12) evaluated the influence of mineral additives on the water demand of cement paste. The specific surface of the ingredients, as the main parameter influencing the water demand of cement paste, was established, from results obtained by these authors (12).

Kato et al. (13) studied the influence of marble dust content on setting, strength, and autogenous shrinkage of high-flow concrete. Ordinary Portland cement was used with additions of 10, 20, and 30 mass% of marble dust. Test results showed that the setting of concrete was accelerated by additions of marble dust, but strength decreased with this addition. A slight decrease of compressive strength was found with the addition of 10% by mass and compressive strength increased linearly with decreasing the porosity, with or without the addition of marble dust. These authors (13) observed autogenous shrinkage decrease with increasing the additions of marble dust in the early stage, but kept increasing for a longer time with marble dust. They suggested that the increase of autogenous shrinkage due to the addition of marble dust in the long stage, is related to the formation of monocarbonate $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$ (13).

Beeralingegowda and Gundakalle (14) investigated the effect of marble dust addition on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete and showed that marble dust improves mechanical properties and concrete performance, by up to 20%.

In Iran, considerable amounts of marble dust [MD] are being produced as a by-product of crushed marble. Thus, these powders can be collected at low cost and high availability. The current study considers the comprehensive effects of mix proportion along with replacing parts of fine aggregates by marble dust on consistency, 28-day concrete compressive strength, and depth of water penetration. A large experimental database was analyzed.

2. Experimental program

2.1. Materials

2.1.1. Cement

An ordinary Portland cement [OPC] with a specific gravity of 3.15 was used for all concrete mixes. This cement fulfilled all the rele-

2.1.2. Woda

W badaniach wykorzystano wodę wodociągową zgodną z normą irańską (16).

2.1.3. Kruszywa

Kruszywo grube o uziarnieniu od 5 do 19 mm, gęstości właściwej 2,68 g/cm³ i nasypowej 1619 kg/m³ pochodziło od lokalnego dostawcy. Krzywą uziarnienia kruszywa zaprojektowano zgodnie z normą ASTM C33 (17). Kruszywo łamane składało się z dwóch rodzajów kruszyw o różnym uziarnieniu: G1 i G2 – właściwości podano w tablicy 2. Żwir G1 stanowił 45%, a żwir G2 55% masy kruszywa grubego. Maksymalny wymiar ziarna zarówno G1, jak i G2 to 19 mm. Skład ziarnowy obu żwirów podano w tablicy 2.

Wykorzystano kruszywo drobne w postaci oczyszczonego piasku rzecznoego o uziarnieniu od 0 do 2,4 mm, i o gęstości właściwej 2,64 g/cm³ i nasypowej 1722 kg / m³. Wybrano dwa moduły uziarnienia piasku – 2,4 i 3. Moduł uziarnienia [MU] definiuje się

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD I WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE CEMENTU PORTLANDZKIEGO

COMPOSITION AND PHYSICAL PROPERTIES OF THE OPC

Skład chemiczny Chemical composition	Wynik Result	Wymagania normowe Standard requirement	Właściwości fizyczne Physical properties	Wynik/ Result	Wymagania normowe Standard requirement
% SiO ₂	20.7±0.3		Powierzchnia właściwa wg. Blaine / Blaine specific Surface area, cm ² /g	3200±100	Min: 2800
% Al ₂ O ₃	5.2±0.2		Stażność objętości Autoclave method, %	0.08±0.02	Max: 0.8
% Fe ₂ O ₃	4.6±0.2		Początek czasu wiązania Initial setting time, min.	140±20	Min: 45
% CaO	65±0.5		Koniec czasu wiązania Final setting time, min.	240±20	Max: 360
% MgO	1.8±0.2	Max: 5	Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach / 2 days compressive strength, MPa	21±10	Min: 20
% SO ₃	2.2±0.4	Max: 3	Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach 7 days compressive strength, MPa	44±1	
% K ₂ O	0.5±0.06		Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach 28 days compressive strength, MPa	53±1	Min: 42,5
% Na ₂ O	0.15±0.05		Sito / Sieve 0.09 mm	1.2±0.1	
% C ₃ S	59.5		Gęstość / Density, g/cm ³	3.13±0.01	
% C ₂ S	14.5				
% C ₃ A	6				
% C ₄ AF	14				

vant specifications of ISIRI 389, Iran's National Standard (15). The chemical and physical properties of cement are detailed in Table 1.

2.1.2. Water

Water plays an important role in concrete, so using the proper water should always be considered. In the entire process of this research, including the manufacture of samples and their curing, drinking water at the workshop was used. The used water was admitted without additional testing in accordance with clause 9.10.4.2 of the Iran 9th National Building Regulations (16).

2.1.3. Aggregates

The coarse aggregate of sizes 5 to 19 mm and a specific gravity of 2.68 and bulk density of 1619 kg/m³ came from a local gravel provider. In this study, the grain size curve standardization range is specified in accordance with ASTM C33 (17). The gravel used in this study consists of two types of grading including G1 and G2, given in Table 2. 45% of the total gravel is related to G1 and 55%

jako sumę wartości procentowych pozostałości na danym sicie standardowym, podzieloną przez 100. W tablicy 2 przedstawiono wyniki analizy sitowej kruszyw.

2.1.4. Pył marmurowy

Pył marmurowy o gęstości właściwej 2,7 g/cm³ otrzymano przez kruszenie odpadów wapiennych z kamieniołomu DIAKO SANG, położonego w regionie Kurdystanu, w Iranie. Charakterystykę fizykochemiczną stosowanego pyłu przedstawiono w tablicy 3.

2.1.5. Uplynniciacz

Dodanie optymalnej ilości superplastyfikatora poprawia płynność i zmniejsza zapotrzebowanie na wodę, w betonach spełniających wymagania normowe. Zastosowano uplynniciacz zawierający polikarboksylany typu ES firmy ABADGARAN. Stosowanie uplynniciaczy pozwala otrzymać bardziej ciekłą konsystencję betonu i zwiększyć wytrzymałość, przy zachowaniu tej samej ilości cementu w mieszance. Dzięki uplynniciaczom możliwe jest także zmniejszenie ilości cementu przy jednoczesnym zachowaniu jego właściwości. Charakterystykę fizykochemiczną stosowanego superplastyfikatora podano w tablicy 4. Ilość superplastyfikatora wprowadzona do betonu zależała od wielu czynników i zawierała się w przedziale od 0,3 do 0,9% masy cementu, lub całkowitego spoiwa wchodzącego w skład betonu.

2.2. Skład betonów

Projektując beton zgodnie z klasami ekspozycji należy wziąć pod uwagę minimalną wytrzymałość betonu oraz zawartość cementu i wody. Ważne są wymagania dotyczące mrozoodporności i trwałość w warunkach korozyjnych. Kluczowe jest znalezienie kompromisu między wytrzymałością a urabialnością. Składy betonów opracowano zgodnie z normą ACI-211 (18). W celu zbadania wpływu wzajemnych proporcji składników w projektowanych betonach, wykorzystano trzy stosunki masowe wody do cementu 0,4, 0,45 i 0,5, pięć różnych proporcji pyłu marmurowego do piasku wynoszących 0, 0,05, 0,1, 0,15 i 0,2 oraz dwa moduły uziarnienia piasku [MU] - 2,4 i 3,0. Uplynniciacz był dodany z zachowaniem stosunku superplastyfikatora do spoiwa równego 0%, 0,25%, 0,5%, 0,75% i 1%. Część piasku zastąpiono pyłem marmurowym przy

Tablica 3 / Table 3

FIZYKOCHEMICZNE WŁAŚCIWOŚCI PYŁU MARMUROWEGO
CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF MARBLE DUST

Skład chemiczny / Chemical composition	Calcium oxide [CaO], %	99.8
	Magnesium oxide [MgO], %	0.003
	Ferric oxide [Fe ₂ O ₃], %	0.029
	Silicon dioxide [SiO ₂], %	0.137
Rozdrobnienie / Fineness	Pozostałość na sicie 32 μm / Residue on 32 μm sieve, %	0.02
	Maksymalny wymiar / Maximum size, μm	25
	Średni wymiar / Average size, μm	6.0
Właściwości fizyczne / Technical Properties	Gęstość / Specific gravity, g/cm ³	2.7
	Gęstość / Mass density, g/cm ³	1.0

Tablica 2 / Table 2

UZIARNIENIE KRUSZYWA NATURALNEGO, PRZECHODZĄCEGO PRZEZ SITO

PERCENTAGE OF AGGREGATE MIX PASSED THROUGH SIEVE

Sito Sieve No.	Kruszywo / Aggregate			
	Żwir/Gravel		Piasek/Sand	
	G1	G2	FM=2.4	FM=3
1"	100	100	100	100
3/4"	95.7	99.1	100	100
3/8"	53.1	55	100	100
4	0.3	9	100	100
8	0	2	100	90
16	0	0	80	55
30	0	0	50	30
50	0	0	20	15
100	0	0	10	10

of that is related to G2. The maximum size of both G1 and G2 is 19 mm but the passage percentage for each sieve is not the same, due to the different grain size distribution. For example, the percent passing the 9.5 mm sieve is 53.1% for G1 while that is 55% for G2. The percent passing by other sieves is also given in Table 2.

The fine aggregate utilized was the normal river sand, free from pollutions and sizes of 0 to 2.4 mm and specific gravity was found to be 2.64 and bulk density 1722 kg/m³. Two moduli of fineness, 2.4 and 3 are chosen. The fineness modulus [FM] is defined as the sum of the remaining cumulative percentages per standard series of sieve divided by 100. The utility of the modulus of fineness with a common range of values from 2.4 to 3, is to detect minor variations in a rock material source. Table 2 presents the aggregate sieve analysis.

2.1.4. Marble dust

Marble dust with a specific gravity of 2.7 was obtained by crushing the limestone wastes from the quarry of DIAKO SANG, situated in the Kurdistan region of Iran. The chemical and physical characteristics of the used marble dust are presented in Table 3.

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI UŻYTEGO SUPERPLASTYFIKATORA

PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF THE USED SUPER PLASTICIZER

Aktywny składnik / Chemical base	modified polycarboxylic [PC] polymers
Gęstość / Specific gravity	1.08+ 0.05 g/cm ³
Postać / Physical state	Ciecz/ Liquid
Zawartość chlorków / Chloride content	Brak / Nil to BS 5075

założeniu stosunku pyłu do piasku wynoszącego 0, 0,05, 0,1, 0,15 i 0,2. Ilość superplastyfikatora uzależniona była od konsystencji mieszanki betonowej. Skład betonów przedstawiono w tablicy 5. Moduły uziarnienia piasku to 3,0 dla betonów 1-15 oraz 2,4 dla

Tablica 5 / Table 5

SKŁAD ZAPROJEKTOWANYCH BETONÓW, kg/m³MIX PROPORTIONS USED IN THIS STUDY, kg/m³

Beton nr Design No.	Żwir / Gravel	Cement	Pył marmurowy / Marble dust	Superplastyfikator Superplasticizer	Piasek / Sand	Woda / Water
1	975.3	410	0	0.41	751.6	204.0
2	975.3	410	35.7	0.82	716.1	204.1
3	975.3	410	68	1.64	683.6	204.1
4	975.3	410	97.3	2.46	654.2	204.1
5	975.3	410	123.9	3.28	627.3	204.2
6	975.3	455.6	0	0.50	713	204.1
7	975.3	455.6	33.9	1.00	679.3	204.1
8	975.3	455.6	64.4	2.01	648.4	204.2
9	975.3	455.6	92.1	3.01	620.5	204.2
10	975.3	455.6	117.3	4.02	595	204.2
11	975.3	512.5	0	0.67	664.9	204.1
12	975.3	512.5	31.5	1.33	633.4	204.2
13	975.3	512.5	60	2.67	604.8	204.2
14	975.3	512.5	85.7	4.00	578.8	204.3
15	975.3	512.5	109	5.33	555.3	204.3
16	1072.8	410	0	0.41	655	204.1
17	1072.8	410	31.1	0.82	624	204.1
18	1072.8	410	59.2	1.64	595.7	204.2
19	1072.8	410	84.6	2.46	570.1	204.2
20	1072.8	410	107.8	3.28	546.6	204.3
21	1072.8	455.6	0	0.50	616.4	204.2
22	1072.8	455.6	29.3	1.00	587.2	204.2
23	1072.8	455.6	55.6	2.01	560.5	204.2
24	1072.8	455.6	79.5	3.01	536.4	204.3
25	1072.8	455.6	101.1	4.02	514.3	204.3
26	1072.8	512.5	0	0.67	568.3	204.2
27	1072.8	512.5	26.9	1.33	541.4	204.3
28	1072.8	512.5	51.2	2.67	516.9	204.3
29	1072.8	512.5	73.1	4.00	494.7	204.3
30	1072.8	512.5	92.9	5.33	474.6	204.4

2.1.5. Plasticizer

Adding an optimum quantity of superplasticizer will improve the flowability and reduce water demanded for meeting the design requirements. A polycarboxylate-based plasticizer type ES of Abadgaran company was used. The recent benefits have a more favorable result for dense and high-strength concrete by a given content of cement. This property is used to save cement while maintaining its resistance. The physical and chemical properties of the used plasticizer are given in Table 4.

The addition of plasticizer is determined by workshops, but depending on the concrete mixing plan – the size and type of aggregates, the cement content, the water-to-cement ratio, and the expected workability, the content of this admixture is about 0.3 to 0.9% of cement mass and of alternative cementitious materials.

betonów 16-30. Betony 1, 6, 11, 16, 21 i 26 zostały zaprojektowane bez pyłu marmurowego [próbki wzorcowe]. W betonach 2-5, 7-10, 12-15, 17-20, 22-25 i 27-30, zastosowano pył marmurowy, zamiast części piasku. W każdej z tych grup utrzymywano stałą zawartość cementu. We wszystkich betonach masa wody była stała i wynosiła 204 kg/m³.

2.3. Przygotowanie próbek

W badaniach zaprojektowano 30 mieszanek betonowych o składach przedstawionych w tabelicy 5. Przed przygotowaniem i wykonaniem próbek żwir był płukany w celu usunięcia gliny. Zbadano wilgotność kruszywa i uwzględniono przy dodawaniu wody do mieszanki. Kolejność dodawania składników i ich uśrednienie odgrywa kluczową rolę w uzyskaniu jednolitego betonu, o pożądanych właściwościach. W tym celu w pierwszej kolejności odważono dokładnie masę cementu, kruszywa, wody i dodatków w postaci pyłu marmurowego oraz superplastyfikatora. Surowce mieszano w typowej mieszarce do betonu. Na początku wprowadzono kruszywo i dodano część wody (10%). Następnie w tym samym czasie dodano pozostałe surowce w postaci stałej. Porcję wody wymieszano z superplastyfikatorem i wiano do mieszalnika. Na koniec po wprowadzeniu wszystkich składników pozostałą część wody (około 15%) dodano do mieszarki. Ustalono taki sam czas mieszania dla wszystkich betonów.

2.4. Pielęgnacja

Próbki rozformowano po 24 godzinach i przechowywano w zbiornikach z wodą o regulowanej temperaturze, przez 28 dni.

2.5. Metody badań

Skład mieszanki projektowany jest w taki sposób aby spełniały wymagania normowe dla betonu zarówno w stanie świeżym, jak i stwardniałym. W prezentowanych badaniach, w pierwszym etapie określono urabialność świeżego betonu oraz przeprowadzono dalsze badania w celu sprawdzenia jego właściwości. Następnie przebadano stwardniały beton pod względem wytrzymałości na ściskanie po 28-dniach i głębokości penetracji wody pod ciśnieniem.

2.5.1. Badania świeżej mieszanki betonowej

Oceniono konsystencję świeżych mieszanek betonowych za pomocą metody opadu stożka. Badanie polega na umieszczeniu mieszanki betonowej w formie w kształcie stożka, a następnie zdjęciu tej formy. Różnica wysokości formy i słupa mieszanki po podniesieniu formy jest miarą konsystencji. Przykład badania dla jednej z mieszanek przedstawiono na rys.1.

2.5.2. Badania stwardniałego betonu

2.5.2.1. Wytrzymałość na ściskanie

Dla każdego rodzaju betonu badano wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach. Wynik to wartość średnia z badania trzech próbek, dla każdego z betonów.

2.2. Mix proportions

In general, the minimum compressive strength and a range of water-to-cement ratios are specified for a given concrete mix. Possible requirements for resistance to freeze-thaw and chemical attack must be considered. Therefore, a balance or compromise must be made between strength and workability. In this study, the mix proportioning is performed according to ACI-211 (18). To study the different levels of materials, three water-to-cement ratios of 0.4, 0.45, and 0.5; five marble dust-to-sand ratios of 0, 0.05, 0.1, 0.15, and 0.2; and two fineness modulus of sand, 2.4 and 3.0; are chosen. Five values for superplasticizer to cement ratios, 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75% and 1% are initially considered for marble dust-to-sand ratios, 0, 0.05, 0.1, 0.15 and 0.2; respectively. The superplasticizer addition is adjusted to produce the desired slump for adjustment of batches. The mix proportions are shown in Table 5. The fineness modulus of sand is 3.0 and 2.4 for mixes 1-15 and 16-30; respectively. As seen in Table 5, mixes 1, 6, 11, 16, 21, and 26 have been designed without marble dust (the reference mixes). In the other mixes including mix groups 2-5, 7-10, 12-15, 17-20, 22-25, and 27-30, marble dust has been used as a replacement of the sand. In each of these groups, the cement content has been kept constant. Also, as can be seen in Table 5, two different values, corresponding to two fineness modulus of sand, have been considered for the gravel. The amount of water has been kept around 204 kg/m³ in all the mixes

2.3. Sample preparation

In this study, to consider a full factorial experiment, the thirty mixes, as shown in Table 5, were tested. Before preparing and manufacturing the samples, the used gravel was washed to remove the clay. The moisture content of the aggregates was determined and the mixed water was modified to reach the moisture content of the aggregates to the saturated state with a dry surface, as they had been used in the mixing plan. On the other hand, the concrete components should be carefully measured and mixed to provide good and uniform concrete. For this purpose, the precise values of cement, aggregates, water and additives, marble dust, and superplasticizer, were measured first. Then, for the mixing of concrete aggregates, a rotary mixer was used. At the time of loading, before introducing the aggregates into the mixer, some water [about 10%] was added to the bowl. Then, the total solids were added uniformly at the same time. Most of the water was poured into the mixer coincident with the solid materials, along with the superplasticizer. In the end, the rest of the water [about 15%] was added to the bowl, after all the materials were brought in. The mixing time was also considered after entering all the ingredients into the bowl.

After making each one of the mixing plans, the pre-lubricated molds were cast in three layers, and by 25 beatings with a rod by 16 mm in diameter for each layer were compacted. Three cubic molds of 150×150 mm were cast for each test. Accordingly, one hundred eighty specimens were prepared in the laboratory for compressive strength and water penetration testing.



Rys. 1. Formowanie próbek i badanie konsystencji mieszanki betonowej

Fig. 1. Moulding and concrete slump test



Rys. 2. Stanowisko do badania głębokości penetracji wody pod ciśnieniem

Fig. 2. The water permeability test set up

2.5.2.2. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

Badanie penetracji wody pod ciśnieniem zgodnie z normą EN12390-8 [19] jest najczęściej stosowane do oceny przepuszczalności betonu. Przeprowadzono badania na próbkach dojrzewających 28 dni. Aby wyznaczyć głębokość penetracji wody zbadano po trzy próbki betonu i obliczono wartość średnią z trzech wyników. Ciśnienie wody działało na obszar testowy o średnicy 75 mm, na powierzchni sześcienniej próbki o boku 150 mm. Ciśnienie wody wynosiło 500 ± 50 kPa, a badanie trwało 72 ± 2 godziny. Po przyłożeniu ciśnienia przez określony czas próbki wyjęto z aparatu. Następnie sześcienną próbkę podzielono na pół prostopadle do powierzchni, na którą przyłożono wodę pod ciśnieniem. Gdy tylko rozłupana powierzchnia wyschła do tego stopnia, że głębokość wnikania wody była wyraźnie widoczna, rejestrowano i mierzono z dokładnością do milimetra maksymalną głębokość penetracji. Na rys. 2 i 3 przedstawiono zestaw do badań wodoprzepuszczalności oraz przykład głębokości penetracji wody, w próbce betonu.

3. Wyniki

3.1. Konsystencja świeżej mieszanki betonowej

Wyniki opadu stożka przedstawiono na rys. 4. Moduły uziarnienia piasku wynoszą 3,0 i 2,4 odpowiednio dla betonów 1-15 i 16-30.

2.4. Concrete curing

The specimens were demoulded after 24 h. and kept immersed in heat-controlled water tanks, at the desired temperature level up to 28 days.

2.5. Methods

The mix composition shall satisfy all performance criteria for the concrete in both the fresh and the hardened states. Generally, it is advisable to design conservatively to ensure that the concrete is capable of maintaining its specified fresh properties, despite anticipated variations in raw material quality. In the present study, in the first step, the workability of fresh concrete was determined and laboratory tests were performed, to verify its properties. Then hardened concrete was tested to obtain 28-day compressive strength and depth of water penetration.

2.5.1. Fresh Concrete Experiment

The workability of the fresh mixes was evaluated. A measure of the degree of consistency and extent of workability is the slump. In the slump test, the plastic concrete specimen is formed into a conical metal mold. The mold is lifted, leaving the concrete to “slump,” that is, to spread or drop in height. The slump test on each mix design is shown in Fig. 1.

2.5.2. Hardened concrete testing

2.5.2.1. The compressive strength test

The moistly of the specimens was tested for compressive strength after 28 days of water curing. For each mix design, three specimens were tested and the average of the three compressive strength values was considered as the final value for the mix.

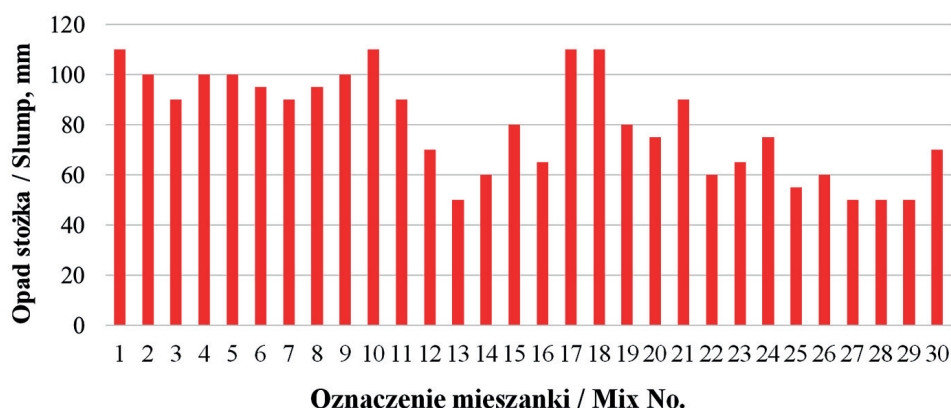
2.5.2.2. The Water Permeability Test

The water penetration test, which is most commonly used to evaluate the permeability of the concrete, was also conducted after 28 days of water curing. To compute the depth of water penetration for each mix design, three samples were tested and the average



Rys. 3. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem – sposób mierzenia odległości od powierzchni próbki

Fig. 3. The depth of water penetration. Measurement from the outer surface and the internal section of the sample



Rys. 4. Wyniki badań konsystencji mieszanek betonowych

Fig. 4. Results of the slump tests for the mixes

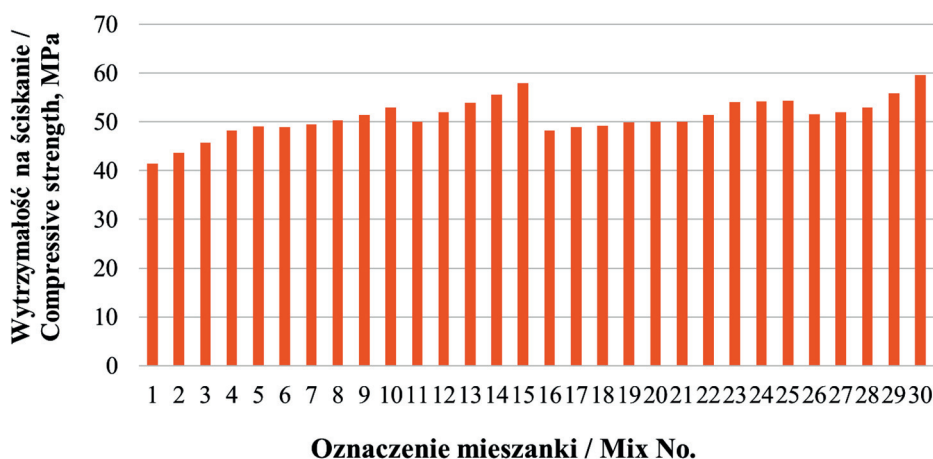
Jak pokazano na rys. 5, minimalna wartość opadu stożka wynosi 50 mm (dla betonów 13 i 27-29) a maksymalna 110 mm (dla betonów 1, 10, 17 i 18). W oparciu o wymagania normy ACI-211 [17] otrzymane konsystencje są odpowiednie dla wykonania żelbetowych belek, słupów i ścian. Superplastyfikator dodawano w ilości zapewniającej właściwą konsystencję dla każdego betonu i stwierdzono, że pył marmurowy ma duży wpływ na konsystencję.

3.2. Wytrzymałość na ściskanie

Rys. 5 przedstawia wyniki badania wytrzymałości na ściskanie. Najmniejszą wytrzymałość wynoszącą 41,5 MPa miał beton 1, natomiast największą beton 30: 59,6 MPa. Beton 1 zawiera najmniejszą ilość cementu i nie zawiera pyłu marmurowego, podczas gdy beton 30 zawiera największą ilość cementu i pyłu. Oznacza to, że w betonie 30 zarówno cement, jak i proszek zostały użyte w większych ilościach, w porównaniu do betonu 1, co spowodowało polepszenie wytrzymałości na ściskanie. W grupach betonów 1-5, 6-10, 11-15, 16-20, 21-25 i 26-30 udział pyłu marmurowego powoduje poprawę wytrzymałości na ściskanie, w porównaniu do odpowiadających

of the three values was calculated as the final value for the mix. In this study, the water permeability test was carried out according to BS EN 12390-8:2019 [19]. For testing, the specimens were placed on the apparatus in such a manner that the water pressure act on the test area which actually is a 75 mm diameter area at the center of the bottom surface of the 150 mm by 150 mm cube. The water pressure of 500 ± 50 kPa for 72 ± 2 hours was applied on this surface. After the pressure had been applied for the specified time, the specimens were removed from the apparatus. The face

on which the water pressure was applied was wiped to remove excess water. The specimen was then split in half, perpendicularly to the face on which the water pressure was applied. As soon as the split face has dried to such an extent that the water penetration front can be clearly seen, the maximum depth of penetration under the test area was recorded and measured to the nearest millimeter. Figs. 2 and 3 show the water permeability test setup, an example of penetration area, and method of penetration depth determination respectively.



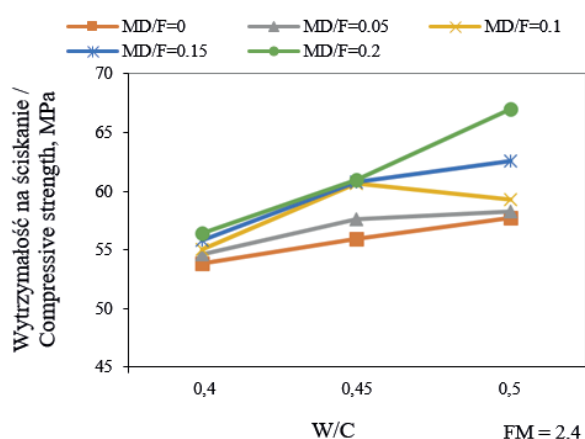
Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie badanych betonów

Fig. 5. Compressive strength of investigated concretes

im betonów referencyjnych, bez pyłu. Zależność wytrzymałości na ściskanie od współczynnika wodno-cementowego pokazano na rys. 6. Wytrzymałości dwudziestoosmioldniowe wzrosły dla wszystkich stosunków MD/F nawet przy zwiększonym współczynniku W/C, z wyjątkiem betonu o MD/F = 0,1 z piaskiem o MU = 2,4. Uzasadnieniem tego wyniku może być duża wodożądność pyłu marmurowego, który wchłonął część wody, bezpośrednio po wymieszaniu.

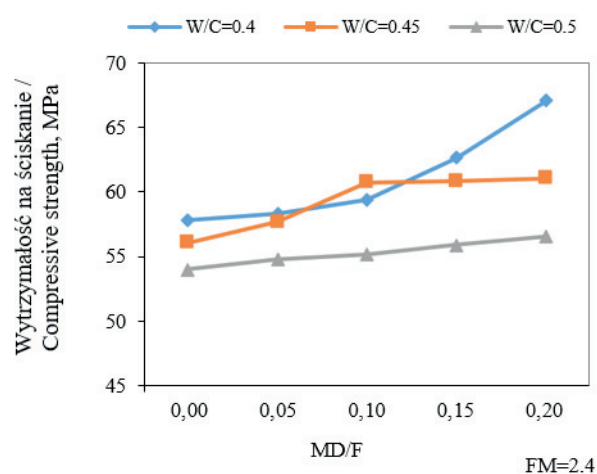
Zastąpienie piasku pyłem marmurowym poprawiło wytrzymałość na ściskanie. Zgodnie z oczekiwaniami, wytrzymałość na ściskanie betonów wzorcowych [1, 6, 11, 16, 21 i 26] dla obu wartości modułu uziarnienia zwiększa się na skutek zmniejszenia stosunku wodno-cementowego z 0,5 do 0,4. Wytrzymałości na ściskanie betonów w zależności od stosunku MD/F przedstawiono na rys. 8.

Zestawienie zależności wytrzymałości na ściskanie od stosunku W/C, w odniesieniu do różnych modułów uziarnienia piasku, przedstawiono na rys. 8. Porównanie betonów referencyjnych z piaskami o różnym module uziarnienia [1 i 16, 6 i 21, 11 i 26] wskazuje na większą wytrzymałość na ściskanie betonów 1, 6 i 11 w porównaniu do betonów 16, 21 i 26. Oznacza to, że użycie



Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie w zależności od stosunku w/c

Fig. 6. The concrete compressive strength as the function of w/c ratios



Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie w zależności od współczynnika MD/F

Fig. 7. The concrete compressive strength as the function of MD/F ratios

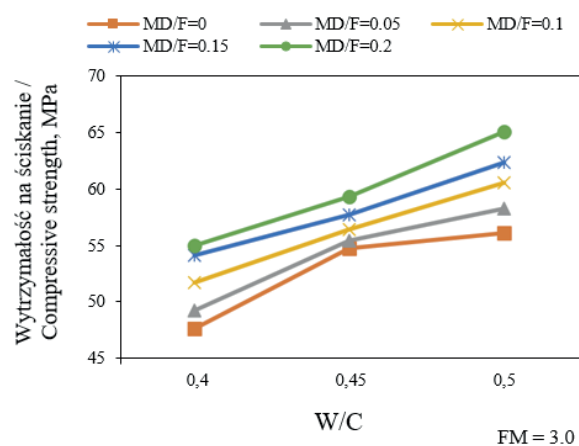
3. Results

3.1. Fresh concrete test results

The slump test results are shown in Fig. 4. The fineness modulus of sand is 3.0 and 2.4 for mixes 1-15 and 16-30; respectively. As shown in Fig. 4, the minimum and maximum values of the slumps are 50 mm [related to mixes 13 and 27-29] and 110 mm (related to mixes 1, 10, 17, and 18). Based on ACI-211 [17], this range of the slump can be appropriate for reinforced concrete beams, columns, and walls. Since superplasticizer dose has been adjusted to achieve proper slump for each mix, it is observed that the limestone powder has a variable effect on the slump.

3.2. Concrete compressive strength

Fig. 5 shows that minimum and maximum values of the compressive strength are 41.5 MPa and 59.6 MPa; which are related to mixes 1 and 30; respectively. Mix 1 contains minimum cement without the powder while mix 30 contains maximum cement with maximum powder. This means that in mix 30, both cement and the powder have increased with respect to mix 1. Thus, it can be concluded that



piasku o niższym MU prowadzi do uzyskania większej wytrzymałości na ściskanie. Zgodnie z rys. 8 ten sam efekt widoczny jest dla betonów zawierających pył marmurowy.

3.3. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

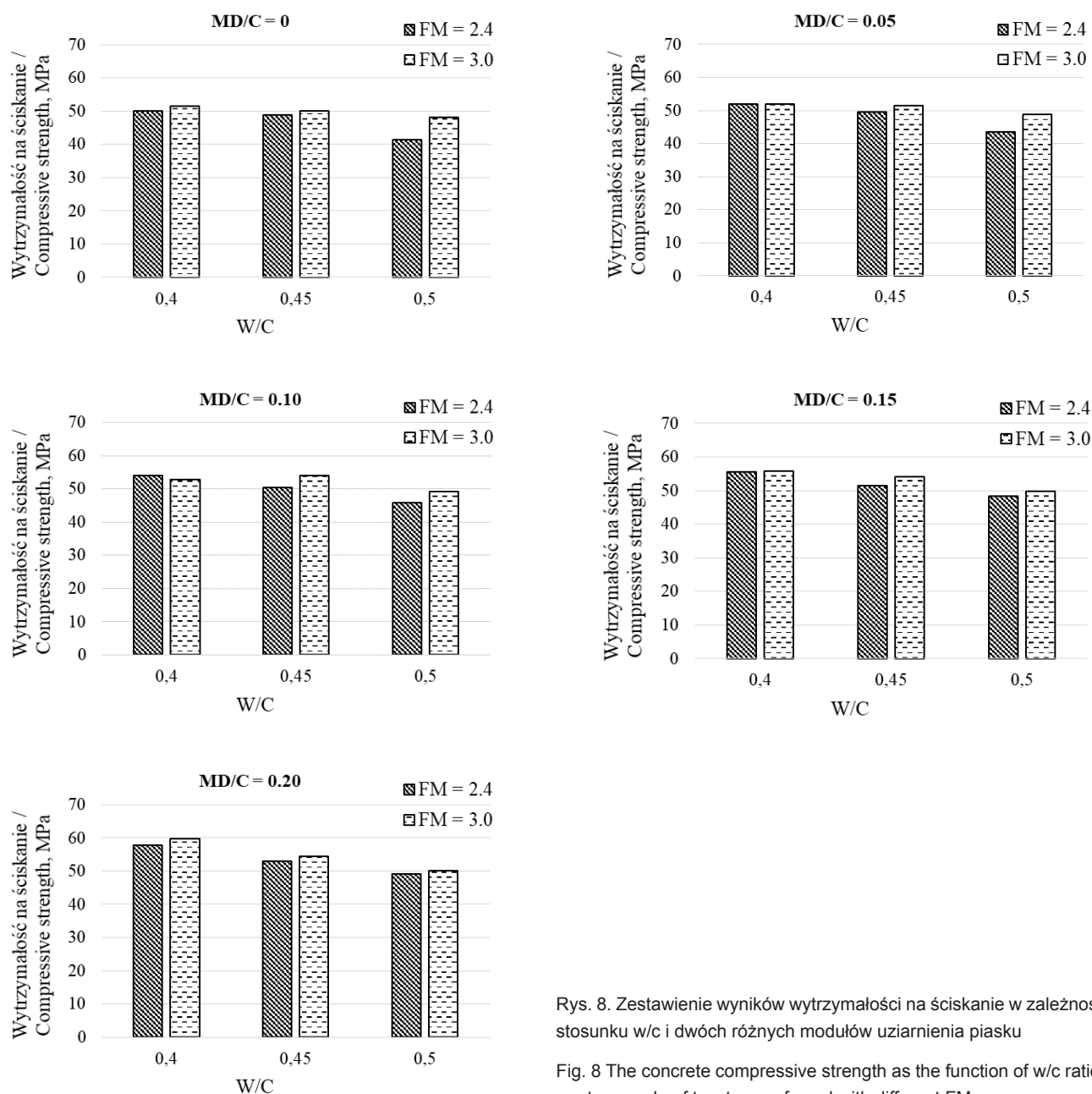
Na podstawie wyników badań pokazanych na rys. 9 można stwierdzić, że minimalne i maksymalne wartości głębokości penetracji wody wynoszą 15 mm i 110 mm; które wyznaczono odpowiednio dla betonów 15 i 16.

Głębokość penetracji wody w zależności od stosunku w/c przedstawiono na rysunku 10. Jak widać, głębokość penetracji zmniejsza się wraz ze zmniejszeniem stosunku masowego wody do cementu w betonach wzorcowych, dla obu rozważanych modułów uziarnienia.

Porównanie penetracji wody dla różnych grup betonów z pyłem marmurowym [1-5, 6-10, 11-15, 16-20, 21-25 i 26-30] pokazuje,

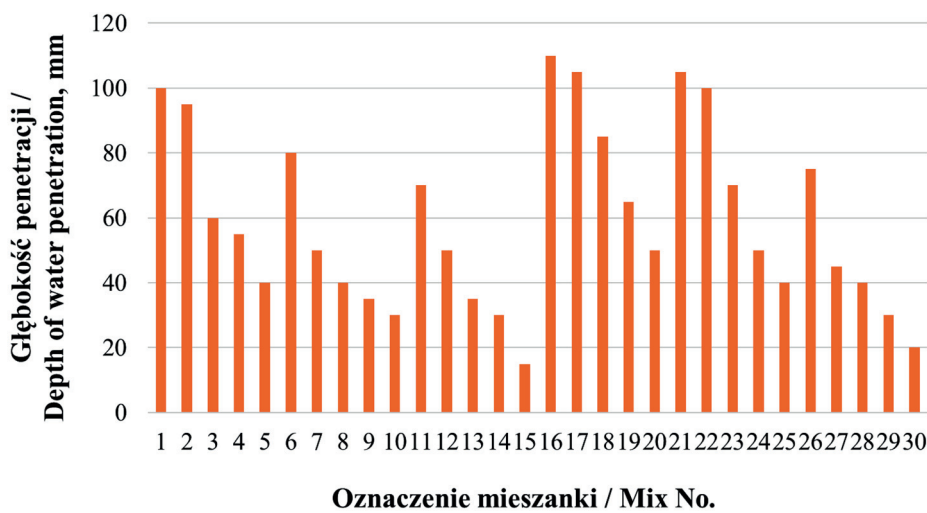
by increasing both cement and powder, the compressive strength has been increased. Also, in the mix groups of 1-5, 6-10, 11-15, 16-20, 21-25, and 26-30, it can be observed that by increasing the marble powder content with respect to the corresponding reference mix, the compressive strength has been increased in all the cases. On the other hand, the variation of concrete compressive strength concerning water to cement ratio is shown in Fig. 6. According to these Fig., the 28-day compressive strengths increased in all MD/F by increasing W/C, except for MD/F = 0.1 and sand with FM = 2.4. The justification of this phenomenon can be attributed to the absorption of some water, by MD, immediately after mixing.

The replacement of sand with marble powder has improved the compressive strength. As expected, the compressive strength of the reference mixes [1, 6, 11, 16, 21, and 26] for both fineness modulus values is increased by decreasing the water-to-cement ratio from 0.5 to 0.4. The concrete compressive strengths with respect to MD/F ratios are presented in Fig. 7.



Rys. 8. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie w zależności od stosunku w/c i dwóch różnych modułów uziarnienia piasku

Fig. 8 The concrete compressive strength as the function of w/c ratios for mortars made of two types of sand with different FM



Rys. 9. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

Fig. 9. Results of the water penetration tests

że zastąpienie piasku pyłem ma duży wpływ na zmniejszenie głębokości penetracji wody. Głębokość wnikania wody w zależności od stosunków MD/F przedstawia rys. 11.

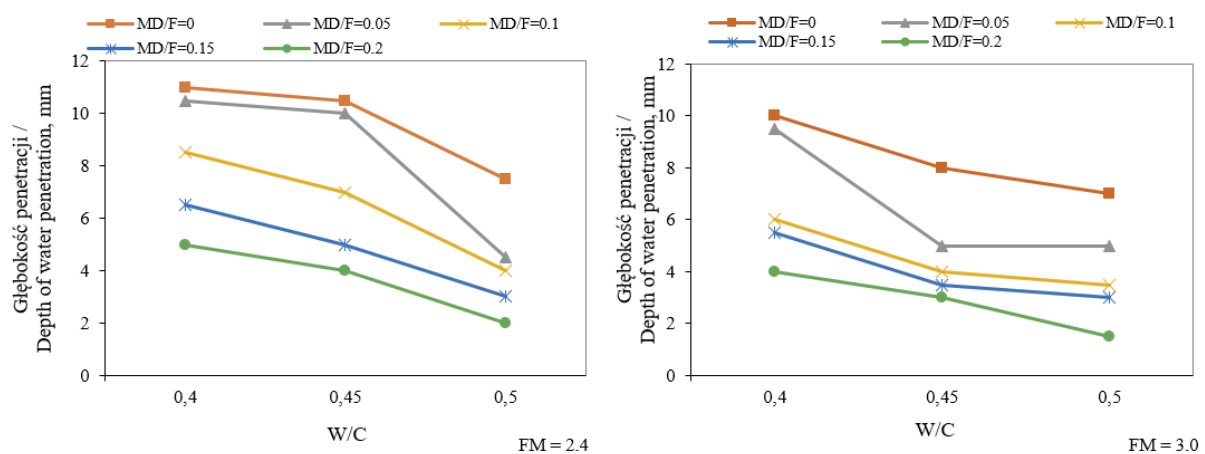
Porównując dwie grupy betonów 1-15 i 16-30, stwierdzono, że we wszystkich przypadkach, z wyjątkiem betonu 12, penetracja wody

The concrete compressive strength with respect to the modulus of sand is shown in Fig. 8. Comparison of similar two reference mixes with different fineness modulus [1 & 16, 6 & 21, 11 & 26] shows that compressive strength of mixes 1, 6, and 11 are greater than one of mixes 16, 21, and 26. This indicates that the use of sand with lower fineness modulus leads to higher compressive strength due to replacing more content of gravel. According to Fig. 8, this result can be easily observed and concluded for other mixes with marble dust.

3.3. Depth of water penetration

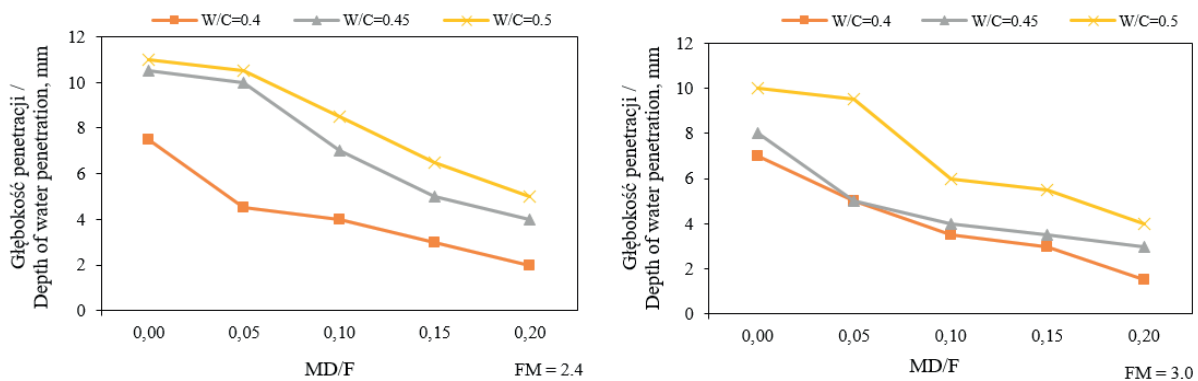
Based on the results of the tests, as shown in Fig. 9, it can be observed that minimum and maximum values of the water penetration are 15 mm and 110 mm; which are related to mixes 15 and 16; respectively.

The depths of water penetration with respect to W/C ratios are shown in Fig. 10. As seen, the depth of water penetration is de-



Rys. 10. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem w zależności od współczynnika W/C

Fig. 10. The depth of water penetration as the function of w/c ratio



Rys. 11. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem w zależności od dodatku pyłu marmurowego

Fig. 11. The depth of water penetration as the function of MD addition

w przypadku betonów z piaskiem o module uziarnienia 3,0 jest mniejsza, w porównaniu do tych o module 2,4. Niewielki wzrost głębokości wnikania wody zmierzono dla betonu 12. Wytrzymałość betonów z drobniejszym piaskiem ulega poprawie, zarówno w przypadku betonów referencyjnych jak i z dodatkiem pyłu marmurowego. Głębokość penetracji wody w przypadku dwóch rodzajów piasków przedstawiono na rys.13.

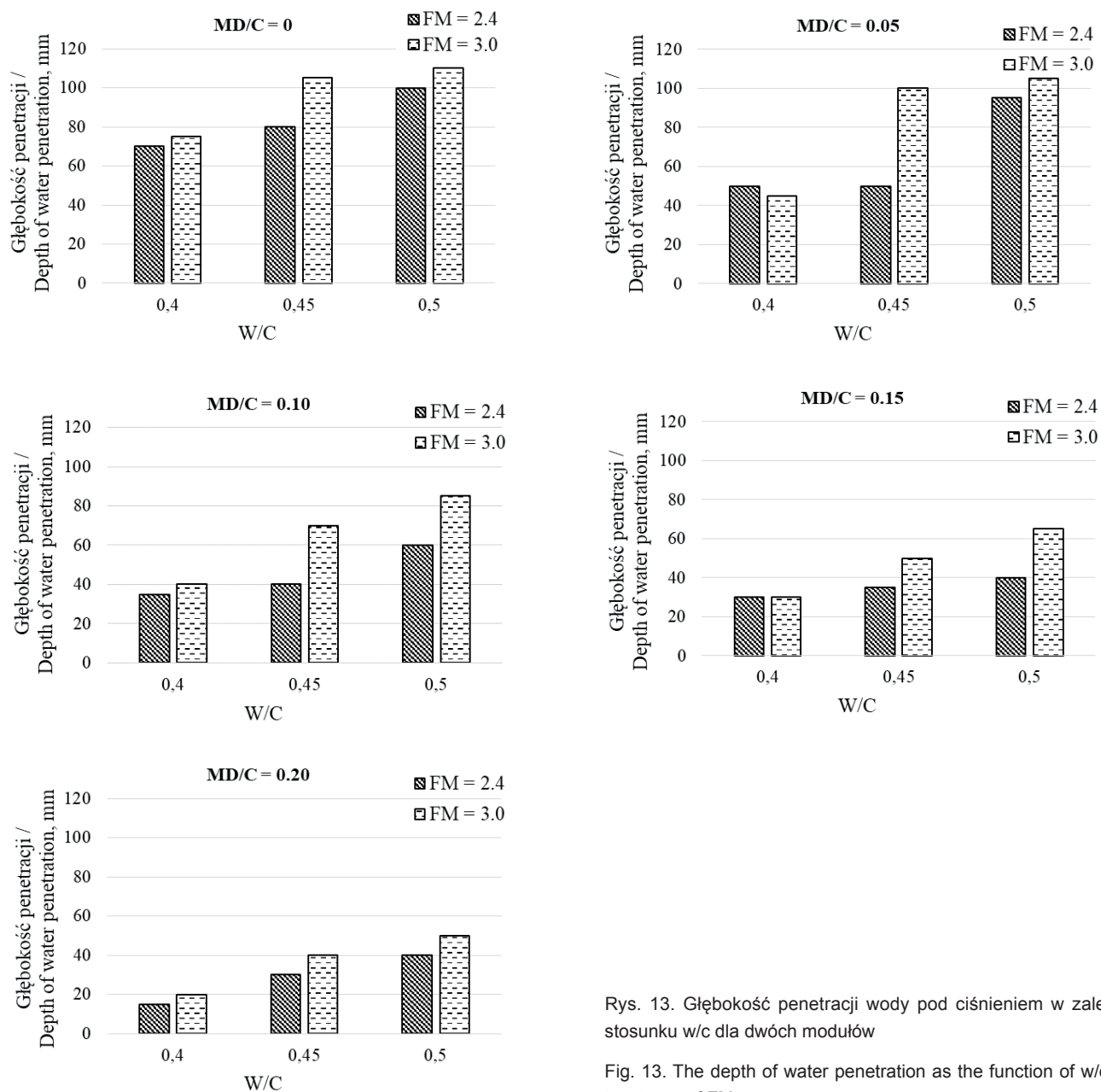
4. Wnioski

W pracy zbadano urabialność, wytrzymałość na ściskanie oraz trwałość betonu z pyłem marmurowym. Wyniki pokazały, że dodatek pyłu marmurowego do betonu zwiększa wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, dla wszystkich badanych betonów, o różnych stosunkach w/c. Stwierdzono zwiększenie wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich stosunków MD/F oraz dla każdego ze stosunków W/C. Wykazano, że beton z drobniejszym piaskiem

increased by decreasing the water-to-cement ratio in the reference mixes for both types of fineness modules under consideration.

Comparison of the water penetration for various mix groups [1-5, 6-10, 11-15, 16-20, 21-25, & 26-30] with different powder values, shows that replacement of sand by the powder decreases the water penetration and has a highly significant influence on it. The depth of water penetration with respect to MD/F ratios are presented in Fig. 11.

By comparing two mix groups 1-15 and 16-30, it can be concluded that in all the cases [except mix 12], water penetrations for the mixes with fineness modulus of 3.0 are lower than ones for those of 2.4. A slight increase of depths of water penetrations is observed for mix 12, when fineness modulus decreases from 3 to 2.4. Accordingly, it can be said that the durability behavior of concrete is improved by increasing the fineness modulus of sand for the mixes without/with marble dust. The depth of water



Rys. 13. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem w zależności od stosunku w/c dla dwóch modułów

Fig. 13. The depth of water penetration as the function of w/c ratios for two types of FM

ma większą wytrzymałość, w porównaniu do betonu z piaskiem grubszym.

Literatura / References

1. S.C. Chang, C.C. Wang, H.Y. Wang, Study on the engineering and electricity properties of cement mortar added with waste LCD glass and piezoelectric powders. *Comp. Concr.* **21**(3), 311-319 (2018).
2. M. Maher Al-Tayeb, B.H. Abu Bakar, H. Md Akil, H. Ismail, Experimental and numerical investigations of the influence of reducing cement by adding waste powder rubber on the impact behavior of concrete. *Comput. Concr.* **11**(1), 63-73 (2013).
3. C. Roskos, T. White, M. Berry, Structural performance of self-cementitious fly ash concretes with glass aggregates. *J. Struct. Eng.* **141**, B4014010 (10) (2015).
4. S.C. Ku, C.S. Poon, D. Chan, Influence of fly ash cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* **9**, 709-717 (2007).
5. M. Nas, S. Kurbetci, Mechanical durability and microstructure properties of concrete containing natural zeolite." *Comp. Concr.* **22**(5), 449-459 (2018).
6. A. Niang, N. Roy, A. Tangit-Hamou, Structural behavior of concrete incorporating glass powder used in reinforced concrete columns. *J. Struct. Eng.* **141**, B4014007 (10) (2014).
7. B.B. Jindal, D. Singhal, S. Sharma, Parveen, Enhancing mechanical and durability properties of geopolymer concrete with mineral admixture. *Comput. Concr.* **21**(3), 345-353 (2018).
8. A.M. Knaack, Y.C. Kurama, Behavior of reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates. *J. Struct. Eng.* **141**, B4014009 (12) (2014).
9. T.S. Shih, G.C. Lee, K.C. Chang, On static modulus of elasticity of normal-weight concrete *J. Struct. Eng.* **115**(10), 2579-2587 (1989).
10. L. Nie, J. Xu, E. Bai, The research on static and dynamic mechanical properties of concrete under the environment of sulfate ion and chlorine ion. *Comput. Concr.* **20**(2), 205-214 (2017).
11. J-F. Liang, E. Wang, X. Zhou, Q-L. Le, Influence of high temperature on mechanical properties of concrete containing recycled fine aggregate. *Comput. Concr.* **21**(1), 87-94 (2018).
12. J.L. Gallias, R. Kara-Ali, J.P. Bigas, The Effect of Fine Mineral Admixtures on Water Requirement of Cement Pastes. *Cem. Concr. Res.* **30**(10), 1543-1549 (2000).
13. H. Kato, A. Nakamura., H. Doi, T. Miyagawa, Strength Development and Autogenous Shrinkage of High-Flow Concrete with Marble dust. *Zairyo/J. Soc. Mater. Sci. Japan*, **50**(5) 543-549 (2001).
14. B. Beeralingegowda, V.D. Gundakalle, The effect of addition of marble dust on the properties of self-compacting concrete. *IJRSET*, **2**(9) 4996 (2013).
15. ISIRI Number 389. Specification for Portland Cement. Institute of Standards and Industrial Research of Iran, 8th Edition, Iran (2017).
16. 9th issue of the national building regulations. Reinforced concrete structures codes. Iran Standard, 4th Edition, Iran (2013).
17. ASTM Standards: C33-03. Standard Specification for Concrete Aggregates. American Society for Testing and Materials (2003).
18. American Concrete Institute (ACI), Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete. ACI 211, American Concrete Institute, USA.
19. BS EN 12390-8:2019. Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure (2019).

penetration with respect to the two types of fineness modulus 2.4 and 3 are shown in Fig. 12.

4. Conclusions

In this research, workability, compressive strength, and durability of concrete with marble dust were evaluated. The results are showing that the addition of marble dust to concrete increased the compressive strength after 28-days and durability at all ratios. Also, the compressive strength and durability increased for all ratios and for each ratio. It was shown that the concrete made with sand of a lower fineness module, has higher compressive strength and lower durability than with the sand with higher fineness modules.

Data Availability Statement

All data, models, and code generated or used during the study appear in the submitted article.