

Serkan Subasi¹, Mehmet Emiroglu², Yilmaz Kocak¹

¹Düzce University, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, Duzce, Turkey

²Düzce University, Technical Education Faculty, Department of Construction Education, Duzce, Turkey

Wpływ popiołu lotnego na wiązanie prętów zbrojeniowych w betonie lekkim z kruszywem z ekspandowanej gliny

Effect of fly ash on rebars bond strength in the expanded clay aggregate lightweight concrete

1. Wprowadzenie

Sztuczne kruszywa, takie jak ekspandowane gliny, łupki, diatomit, perlit, obsydian i wermikulit są stosowane do produkcji lekkich betonów. Kruszywo otrzymywane z ekspandowanej gliny (KEG) wytwarzane jest przez prażenie odpowiednio zestawionej mieszanki surowców w piecu obrotowym w zakresie temperatur od 1000 do 1200°C. W tym zakresie temperaturowym rozpoczyna się proces topnienia, a w wyniku wydzielania składników gazowych, ulegających uwięzieniu w lepkiej, pyroplastycznej masie, ma miejsce ekspansja materiału. Kruszywo otrzymywane z ekspandowanej gliny stosowane jest do produkcji betonu o gęstości zawartej zazwyczaj w zakresie od 1400 do 1800 kg/m³, chociaż otrzymuje się także materiały o tak małej gęstości, jak 800 kg/m³. Betony produkowane z ekspandowanej gliny wykazują większą wytrzymałość w porównaniu z innymi kruszywami lekkimi (1).

W celu uzyskania betonów o specjalnych właściwościach stosuje się materiały pucolanowe, takie jak popioły lotne (PL), pyły krzemionkowe, żużle itp. Prawidłowe wprowadzenie takich dodatków do mieszanki betonowej jest korzystne z uwagi na ich aktywność hydrauliczną i pucolanową. Dodatkowo, stosując pucolany produkuje się mieszankę betonową w sposób bardziej oszczędny, przy jednoczesnym zmniejszeniu jej przepuszczalności, zwiększeniu wytrzymałości i poprawie trwałości (2-4).

1. Introduction

Artificial aggregates such as expanded clay, shale, slate, diatomaceous shale, perlite, obsidian and vermiculite are used for production of lightweight concrete. Expanded clay aggregate (ECA) is obtained by heating suitable raw materials in a rotary kiln at the temperature range from 1000 to 1200°C, when expansion of the material takes place due to the generation of gas which become entrapped in a viscous pyroplastic mass. ECA gives the possibility to produce concrete with a density usually within the range of 1400 to 1800 kg/m³, although values as low as 800 kg/m³ have been obtained. Concrete made with ECA generally has higher strength comparing to any other lightweight aggregate (1).

To develop some special properties of concrete, pozzolans such as fly ash (FA), silica fume, slag, etc. were widely used. The correct use of these pozzolans offers some positive effects because of their hydraulic and pozzolanic activities. Eventually, use of these pozzolans results in more economical concrete mixtures, reduce permeability, increase strength and improve the durability of concrete (2-4).

Bond of rebars is due to the adhesion force binding cement matrix to the reinforcement in concrete. This bond of the reinforcement in concrete is essential in ensuring safe and serviceable structural members, as the reinforcement is responsible for carrying tensile

Wiązanie prętów zbrojeniowych spowodowane jest siłami adhezji, które łączą matrycę cementową ze zbrojeniem w betonie. To wiązanie zbrojenia z matrycą ma podstawowe znaczenie dla bezpiecznego stosowania elementów konstrukcyjnych, gdyż zbrojenie przenosi naprężenia rozciągające w betonie (5). W betonie konstrukcyjnym naprężenia w strefie przejściowej są naprężeniami ścinającymi na granicy kontaktu zbrojenie – beton, przenoszonymi obciążenia pomiędzy prętami zbrojenia i otuliną betonową (6). Głównym zadaniem strefy przejściowej jest przekazywanie siły rozciągającej od prętów do otuliny lub vice-versa. Ogólna zależność jest po prostu taka, że bez naprężeń w strefie wiążącej zbrojenie z betonem nie byłoby wymiany obciążeń, a bez niej nie można by wytwarzać sprężonego betonu. Trzy składowe decydują o wytworzeniu powiązania pomiędzy betonem i zbrojeniem: adhezja chemiczna, tarcie i mechaniczne przenoszenie naprężeń przez występy i żebra od wyprofilowanej w określony sposób powierzchni pręta zbrojenia do przylegającego betonu (7).

Właściwości wiązania, jakie powstaje pomiędzy matrycą betonową i prętami zbrojenia zależą od wielu czynników: wytrzymałości betonu i zbrojenia, geometrii zbrojenia, grubości otuliny, długości strefy kontaktowej, średnicy prętów, właściwości środowiska, temperatury, stopnia korozji zbrojenia. Xiao i Falkner (8) badali wpływ zarówno betonu z recyklingu zastosowanego jako kruszywo, jak też powierzchni prętów zbrojeniowych na wytrzymałość wiązania matrycy cementowej z prętami. Nie stwierdzono wyraźnej zależności wytrzymałości wiązania matrycy cementowej z prętami zbrojeniowymi od udziału kruszywa z recyklingu (8).

Haddad i Numayr (2007) badali wpływ naprężeń i spękań wywołanych reakcją alkalia – krzemionka, jak również wpływ zamrażania i rozmrażania na przyczepność i stwierdzili, że zmniejszenie siły wiązania pomiędzy matrycą i zbrojeniem wynikające z reakcji alkalia – krzemionka było znaczne w betonie o mniejszej wytrzymałości i większej zawartości kruszywa reaktywnego. Cykliczne zamrażanie i rozmrażanie spowodowało znaczny spadek krytycznej i granicznej wartości naprężenia, odpowiednio o 100% i 55%, jak również uszkodzenie wolnej powierzchni badanego elementu. Ani reakcja alkalia – krzemionka, ani działanie mrozu nie wpływały na kształt krzywych przedstawiających zależność pomiędzy naprężeniem i poślizgiem swobodnego końca elementu zbrojącego, w próbie „pullout” (9). Lee i inni (2008) badali wytrzymałości wynikające z przyczepności na granicy rozdziału pomiędzy otuliną i zbrojeniem złożonym z materiału polimerowego z włóknem szklanym w betonie wysokiej wytrzymałości i wskazali na wzrost siły działających na granicy rozdziału z wytrzymałością na ściskanie. Jednakże wzrost przyczepności po wprowadzeniu tego rodzaju zbrojenia był o wiele mniejszy, w porównaniu z wytrzymałością betonu, niż w przypadku zbrojenia prętami stalowymi (10). Campione i inni (2005) analizowali wyniki eksperymentów odnoszących się do występujących zależności pomiędzy miejscową przyczepnością i poślizgiem prętów zbrojeniowych w betonie z kruszywem z ekspandowanego materiału ilastego, w warunkach monotonicznego wzrostu i cyklicznego działania obciążeń. Wymienieni autorzy badali wpływ takich czynników, jak wymiary próbki, średnia długość

stress in the concrete (5). In the case of structural concrete, bond stress, refers to the shear stress at the steel bar-concrete interface which modifies the steel stresses by transferring load between the bar and the surrounding concrete (6). The main purpose of bond is to transfer shear force from the reinforcing bar to the surrounding concrete, or vice-versa. The overall relationship is simply that without bond stress there can be no load transfer, and without effective load transfer, non-prestressed reinforcement in concrete will be useless. Bond is made possible through three components: adhesion, friction, and the interlocking action of the ribs of deformed bars onto the adjacent concrete (7).

The bond of cement matrix with rebars is affected by many factors, as follows: concrete and steel strengths, geometry of reinforcement, concrete cover thickness, embedment length, bars diameter, environmental aspects, temperatures effects and rusting of steel. Xiao and Falkner (8) investigated the influence of both recycled concrete aggregate replacement and the rebars surface on the bond strength between cement matrix and steel rebars. It was pointed out that the bond strength of cement matrix with steel rebars had no obvious relation with the recycled aggregate replacement percentage (8). Haddad and Numayr (9) investigated the effect of stress and cracks caused by alkali-silica reaction (ASR) and freeze and thawing (F/T) on bond between reinforcing steel and concrete. They reported that the loss in bond due to the ASR was high in concrete with lower concrete strength and higher percentage of reactive aggregate. F/T action caused a significant reduction in critical bond stress and ultimate bond strength that reached as high as 100% and 55%, respectively, and an increase in free-end slip at failure. Neither ASR nor F/T cycles affected trends in the behavior of bond stress versus free end slip curves (9). Lee et al. (10) studied interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars in high-strength concrete cube. They indicated that the interfacial bond strength of the GFRP bars increased as the compressive strength of concrete increased. However, the increasing rate of the bond strength of the GFRP bars with respect to the concrete strength was much lower than that of the steel bars (10). Campione et al. (11) studied experimentally the local bond stress-slip relationship of reinforcing bars embedded in lightweight concrete reinforced with ECAs under uniform and cyclic actions. They investigated some of the parameters such as dimension of specimen, average length, percentage of hooked steel fibers, geometrical ratio of transverse reinforcement and confinement external transverse pressure on the bond strength (11). Tang et al. (12) investigated the bond performance of GFRP bars in polystyrene aggregate concrete (PAC) by the proposed concentric pullout test. They reported that the bond strength was increased with the compressive strength and concrete density of PAC (12). Teo et al. (13) reported that the bond strength of the oil palm shell concrete with plain rebars was approximately 10–24% of the compressive strength. For deformed bars, the bond strength was 24–42% of the compressive strength (13).

The aim of this study is to determine the effects of the FA addition on bond strength in the lightweight concrete which was produced from ECA.

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE KRUSZYWA

PHYSICAL PROPERTIES OF ECA AND RIVER AGGREGATE

Frakcja Aggregate size mm	Gęstość Specific gravity	Gęstość nasykowa Loose unit weight, g/cm ³	Gęstość w stanie utrzesionym Compact unit weight, g/cm ³	Woda zaabsorbowana Water absorption %
0-2 NS	2.70	1.49	1.64	1.20
0-2 ECA	0.96	0.82	1.04	22.40
2-4 ECA	1.22	0.62	0.70	18.00
4-8 ECA	1.47	0.68	0.74	20.20

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI CHEMICZNE CEMENTU I POPIOŁU LOTNEGO

CHEMICAL COMPOSITION OF THE CEMENT AND THE FLY ASH, %

Cement		Popiół lotny* / Fly ash*
SiO ₂	20.32	48.53
Al ₂ O ₃	5.59	24.61
Fe ₂ O ₃	3.09	7.59
CaO	62.50	80.73
MgO	1.74	9.48
SO ₃	3.29	2.28
Na ₂ O	0.34	2.48
K ₂ O	0.91	2.51
Strata prażenia Loss on ignition	1.18	1.69
Cl	–	0.005
Wolne / Free CaO	0.93	0.11
Reaktywny / Reactive SiO ₂		34.06
Reaktywny / Reactive CaO		7.58

*Właściwości fizyczne popiołów lotnych / Physical properties of fly ash:
ciężar właściwy / specific gravity 2.08
powierzchnia właściwa / specific surface, 4290 cm²/g

i udział włókien stalowych (zbrojenie rozproszone w postaci haczykowatych włókien), jak również uwzględnili udział zbrojenia poprzecznego i działania, w ograniczonym zakresie, zewnętrznego obciążenia poprzecznego na kształtowanie przyczepności (11). Tang i in. (12) badali zachowanie strefy kontaktowej w belkach zbrojonych włóknem szklanym z kruszywem polistyrenowym za pomocą metody „pullout”. Stwierdzili wzrost przyczepności ze wzrostem wytrzymałości i gęstości tego polistyrenowego betonu (12). Teo i in. (13) ustalili, że przyczepność zbrojenia do matrycy w betonie z kruszywem w postaci łupinek orzechów palmy kokosowej wynosiła dla prętów prostych w przybliżeniu 10–24% wytrzymałości na ściskanie. W przypadku prętów profilowanych przyczepność stanowiła 24–42% wytrzymałości na ściskanie (13).

Celem prezentowanej pracy jest określenie wpływu dodatku popiołu lotnego na siłę wiązania zbrojenia w betonie lekkim z kruszywa, z ekspandowanego materiału ilastego.

2. Material and methods

2.1. Materials

The following materials were used in this study: Portland cement CEM I 42.5 R, 0-2 mm natural sand (NS), 0-2, 2-4 and 4-8 mm ECA, F class FA, polycarboxylate superplasticizer (SP) and water. The ECA used in this study was supplied by Germany Liapor Company and the natural sand was obtained from Melen River.

The physical properties of natural sand and ECA are depicted in Table 1. Physical, chemical and mechanical properties of the cement and the FA are presented in Tables 2 and 3.

2.1.1. Mix Proportions and Preparation of samples

For the mixes preparation, three different reference concrete batches having 350, 400 and 450 kg/m³ cement content were selected. Then the three different FA additions namely 10% and 20% by mass of cement content were used for preparing the remaining concrete batches. Totally 9 different batches of the concrete were used of which the specimens were prepared. Mixes composition of all concrete batches are shown in Table 4.

2.2. Methods

2.2.1. Unit weight test

Hardened concrete unit weight values were performed in accordance with principles indicated in ASTM C138 standard on 15x15x15mm cube specimens after being cured in water for 28 days (14).

2.2.2. Compressive and split tensile strength tests

Concrete samples were cured in water during 28 days. After removing of the samples from the cure tank they were dried in room condition before the compressive and the split tensile strength tests. For each concrete batches (Table 4) 6 cube specimens hav-

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE CEMENTU

PHYSICAL PROPERTIES OF CEMENT

Początek czasu wiązania Initial Setting Time, h/m.	01:58
Koniec czasu wiązania Final Setting Time, h/m.	02:57
Ciężar właściwy Specific Gravity	3.15
Powierzchnia właściwa Specific Surface, cm ² /g	3170
Właściwości mechaniczne Mechanical Properties	
Wytrzymałość na ściskanie Compressive Strength, MPa	
2 nd Dni/Days	30.8
7 th Dni/Days	39.5
28 th Dni/Days	56.0

2. Materiały i metody badań

2.1. Materiały

W pracy zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5R, piasek, sztuczne kruszywo lekkie (oznaczone jako ECA, produkt otrzymany w wyniku spiekania materiału ilastego) zawierające frakcje 0-2, 2-4 i 4-8 mm, popiół lotny klasy F (FA), superplastyfikator polikarboksylanowy (SP) i wodę. Kruszywo dostarczone zostało przez Germany Liapor Company, piasek pochodził z rzeki Melen. Materiały zastosowane w charakterze kruszywa pokazano na rys. 1. Właściwości fizyczne piasku i kruszywa lekkiego przedstawiono w tabelicy 2, natomiast właściwości cementu i popiołu w tabelicy 2.

2.2. Metody badań

2.2.1. Przygotowanie mieszanek betonowych i próbek do badań

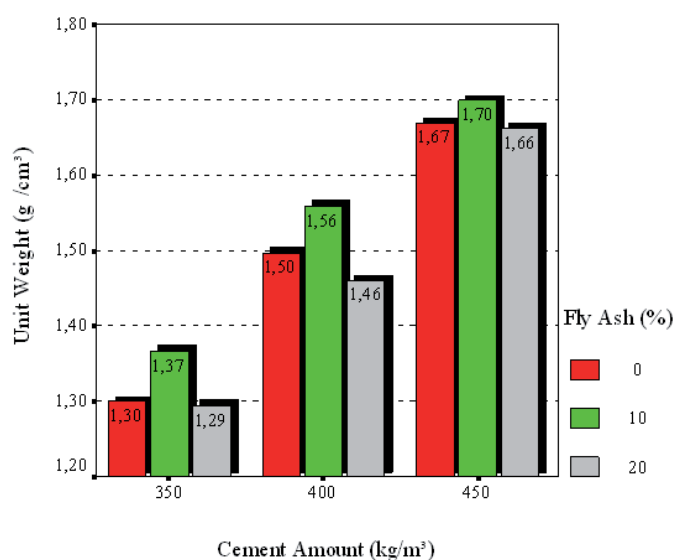
Sporządzono trzy rodzaje mieszanek betonowych jako mieszanki kontrolne, zawierające odpowiednio 350, 400 i 450 kg cementu na m³ betonu. Następnie sporządzono mieszanki z różną zawartością popiołu lotnego jako zamiennika cementu, wynoszącą odpowiednio 10% i 20% masy cementu. W ten sposób powstało 9 różnych mieszanek betonowych, z których zaformowano próbki betonów. Zestawienie składów mieszanek zawiera tabela 3.

2.2.2. Badanie gęstości

Gęstość próbek stwardniałego betonu określano według normy ASTM C 138, na standardowych kostkach 150x150x150mm, dojrzewających 28 dni w wodzie (14).

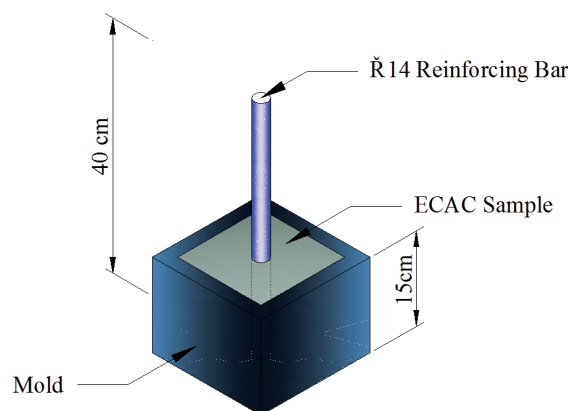
2.2.3. Badanie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu

Próbki betonu dojrzewały w wodzie. Po 28 dniach przechowywania wyjmowano je, suszono w temperaturze pokojowej i badano wy-



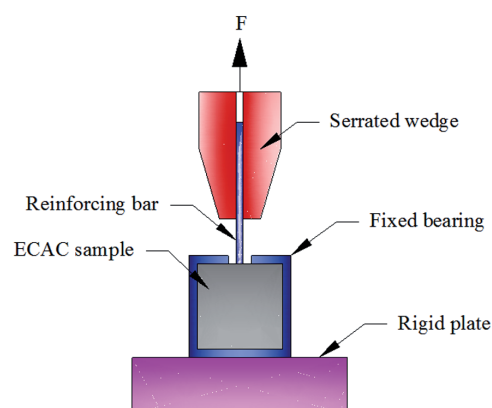
Rys. 3. Średnie wartości gęstości

Fig. 3. Means of unit weight values



Rys. 1. Pręt zbrojeniowy wprowadzony do próbki betonu w metodzie "pullout"

Fig. 1. Embedded rebar in the fresh concrete mix for pullout test



Rys. 2. Stanowisko do badania w metodzie "pullout"

Fig. 2. Pullout test set up

ing 15 x 15 x 15 cm dimensions were prepared for compressive strength and split tensile strength tests. Three cubes were used for compressive strength test, while three other were used for split tensile strength test in accordance with the ASTM C39/C39 M and ASTM C496/C496 M standards respectively (15, 16).

2.2.3. Bond strength test

The bond strength was measured by using pull-out test. 150 x 150 x 150 mm cube concrete specimens and 14 mm diameter steel rebar were used for the pullout test. For determining the bond strength of the specimens the rebar were embedded in the concrete mixture (Fig. 1). The samples for pullout test were cured in water during 28 days. The bond strength test carried out in accordance with ASTM C 234-91a standards (17). The set up for bond strength test is shown in Fig. 2.

The load was applied on the top of the concrete surface at a uniform rate until failure to obtain the ultimate load. Bond strength of the rebar was calculated using equation 1.

$$\tau = \left(\frac{F}{\pi \times d \times \ell} \right) \quad (1)$$

where τ is the bond strength, MPa, F is the applied, N, d is the bar diameter, mm and the ℓ is the embedded length of rebar, mm.

Tablica 4 / Table 4

SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH

MIXTURE PROPORTION OF ECAC

Popiół Fly Ash %	Cement kg	Popiół Fly ash kg	Kruszywo Aggregates proportions				Woda Water liter	Superplastyfikator Superplasticizer liter
			0-2 NS %	0-2 ECA %	2-4 ECA %	4-8 ECA %		
0	350	0	20	26	22	32	157.5	4.2
10	315	35	20	26	22	32	157.5	
20	280	70	20	26	22	32	157.5	
0	400	0	20	26	22	32	180	4.8
10	360	40	20	26	22	32	180	
20	320	80	20	26	22	32	180	
0	450	0	20	26	22	32	202.5	5.4
10	405	45	20	26	22	32	202.5	
20	360	90	20	26	22	32	202.5	

trzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu. Z każdej mieszanki wykonywano 6 kostek o wymiarach 150x150x150 mm, z których trzy poddawano ściskaniu, a trzy pozostałe – rozłupywaniu; badania przeprowadzono zgodnie z metodą podaną w normach ASTM C39/C39M i ASTM C 496/C 496M (15, 16).

2.2.4. Badanie przyczepności

Przyczepność określano metodą „pullout” na kostkach o wymiarach 150x150x150 mm, w których umieszczano pręty stalowe o średnicy 14 mm (rys. 1). Pręty te wprowadzano do świeżego betonu podczas formowania próbek. Próbki te również przechowywano w wodzie przez 28 dni i po tym okresie przeprowadzono badanie, korzystając z normy ASTM C 234-91a (17). Sposób przeprowadzenia pomiarów pokazano schematycznie na rys. 2. Obciążenie przykładano na górną powierzchnię, a następnie zwiększano je ze stałą szybkością – do momentu zaobserwowania zniszczenia – w ten sposób otrzymywano wartość graniczną obciążenia. Siłę wiązania obliczano na podstawie równania 1.

$$\tau = \left(\frac{F}{\pi \times d \times \ell} \right) \quad (1)$$

gdzie τ jest siłą wiązania, MPa, F – obciążeniem N, d – średnicą pręta zbrojeniowego, mm, a ℓ – długością pręta w części otoczonej betonem, mm. Otrzymane w ten sposób wartości odpowiadające granicznym obciążeniom wynotowano i przedstawiono w postaci graficznej.

3. Wyniki badań

W celu statystycznego opracowania wyników badań zastosowano metodę statystyki opisowej, analizy wariancji i testu wielokrotnych porównań Duncana. Wyniki obliczeń parametrów z zakresu statystyki opisowej podsumowano w tablicy 5. Odnoszą się one do wszystkich mieszanek o zawartości cementu, odpowiednio 350, 400 i 450 kg/m³. Ustalenia metodą analizy wariancji pokazano w tablicy 5, a wielokrotnych porównań Duncana – w tablicy 6.

The slip values at ultimate load were obtained during the pullout test and the results were recorded.

3. Results and discussion

Descriptive statistics, Analysis of Variance (ANOVA), and the Duncan multiple comparisons tests to evaluate the experimental test results statistically were applied. Descriptive statistics of the test results are summarized in Table 5 for each binder content 350, 400 and 450 kg/m³, respectively. The ANOVA analyses of the results are listed in Table 6 and the Duncan multiple comparison tests are demonstrated in Table 7.

3.1. Unit Weight

Descriptive statistics regarding unit weight values of concrete samples are given in Table 5. The plot regarding average unit weight values obtained from experiment result is shown in Fig. 3.

The unit weights of ECAC prepared with different cement contents vary between 1.29 and 1.70 kg/m³. As the cement amount in the mixture increases, so does the unit weight values. The unit weight increases in 10% FA replacement concretes but it decreases in the samples with 20% FA. From the variance analysis, it is evident that there is no significant difference between the groups of the mixtures with 350 and 450 kg/m³ binder content ($p \leq 0.05$) (Table 6). In other words, no significant change was determined in concrete unit weight in the samples with different FA replacement. However, from the Duncan multiple comparison it is evident that the unit weights of the samples with 10% and 20% FA replacement in concrete with 400 kg/m³ binder content were different from each other (Table 6).

It was determined that in the samples with 350, 400 and 450 kg/m³ binder content, the unit weight of the concrete with 10% FA replacement decreased by 5%, 4% and 2%, respectively in comparison to reference concretes. It was seen that the samples with 400 and

Tablica 5 / Table 5

OPRACOWANIE STATYSTYCZNE WYNIKÓW

DESCRIPTIVE STATISTICS OF THE TEST RESULTS

Badanie Experiments	Cement Binder content kg/m ³	Popiół Fly ash* %	Średnia Mean	Odchylenie standardowe Std. deviation	Błąd Std. error	Minimum	Maximum
Gęstość Unit weight, g/cm ³	350	0	1.300	0.014	0.007	1.290	1.320
		10	1.368	0.040	0.020	1.310	1.400
		20	1.295	0.137	0.068	1.170	1.490
	400	0	1.497	0.045	0.023	1.460	1.560
		10	1.560	0.035	0.017	1.510	1.590
		20	1.460	0.045	0.023	1.400	1.500
	450	0	1.670	0.018	0.009	1.650	1.690
		10	1.700	0.029	0.015	1.670	1.730
		20	1.663	0.021	0.010	1.640	1.690
Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa	350	0	16.678	0.818	0.472	16.080	17.610
		10	21.725	0.085	0.049	21.640	21.810
		20	15.573	1.366	0.789	14.180	16.910
	400	0	23.270	2.210	1.276	21.060	25.480
		10	24.775	1.375	0.794	23.400	26.150
		20	16.949	1.705	0.985	15.100	18.460
	450	0	41.273	0.566	0.327	40.870	41.920
		10	44.372	1.623	0.937	42.725	45.970
		20	30.155	0.915	0.528	29.240	31.070
Wytrzymałość na zginanie przy rozłupywaniu Split tensile strength, MPa	350	0	1.784	0.033	0.019	1.751	1.816
		10	1.896	0.093	0.054	1.802	1.989
		20	1.546	0.004	0.002	1.542	1.551
	400	0	2.265	0.005	0.003	2.260	2.269
		10	2.419	0.023	0.013	2.397	2.442
		20	1.680	0.060	0.035	1.620	1.740
	450	0	2.756	0.006	0.003	2.750	2.760
		10	2.937	0.112	0.065	2.840	3.060
		20	2.312	0.025	0.015	2.286	2.337
Wytrzymałość wiązania Bond strength, MPa	350	0	5.217	0.466	0.269	4.680	5.520
		10	6.947	1.432	0.827	6.080	8.600
		20	2.003	0.183	0.106	1.860	2.210
	400	0	5.353	0.984	0.568	4.220	5.990
		10	7.280	2.010	1.160	6.080	9.600
		20	3.557	0.368	0.212	3.240	3.960
	450	0	10.220	1.425	0.823	6.360	7.910
		10	7.007	0.806	0.465	8.600	11.280
		20	5.437	1.129	0.652	4.750	6.740

* Remark: FA was replacing Portland cement

* Uwaga: FA zastępuje cement portlandzki

3.1. Gęstość

Gęstości betonów przedstawiono, wraz z opracowaniem statystycznym wyników pomiarów, w tablicy 5. Gęstości sporządzonych betonów, różniących się zawartością cementu, zawarte są w granicach od 1,29 do 1,70 kg/m³. Im większa zawartość cementu, tym większa gęstość betonu. Można zauważyć, że gęstość betonu wzrasta po wprowadzeniu 10% popiołu lotnego jako zamiennika

450 kg/m³ cement content, without FA replacement, the unit weight was higher of 15% and 28%, respectively, comparing to 350 kg/m³ cement content mixture.

On Fig. 4 the effect of FA replacement and cement content on the changes of unit weight is shown. The unit weight increases for 10% FA replacement, but decreases with higher FA content, however it increases with cement content increase.

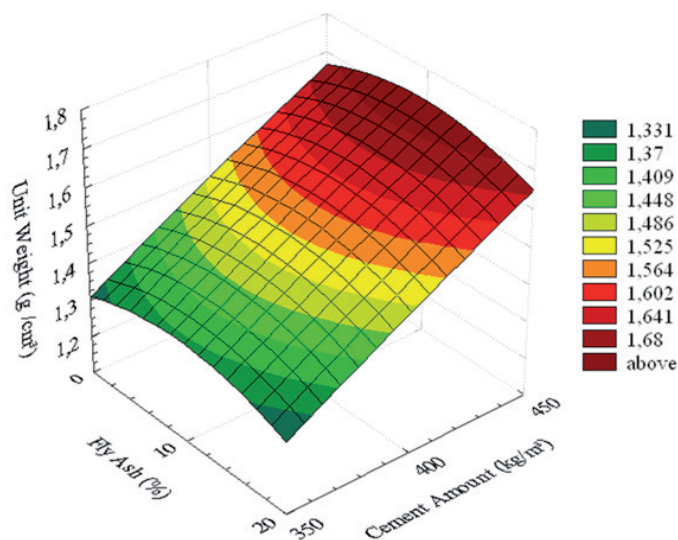
cementu, natomiast maleje przy 20% popiołu. Prawdopodobnie taką można zaobserwować dla betonów o różnej zawartości cementu. Analiza wariancji wykazuje, że różnice gęstości w grupach betonów przygotowanych z 350 i 450 kg cementu na m³ betonu nie są znaczące ($p \leq 0,05$) (tablica 6). Tak więc gęstość betonu nie ulega zmianie przy zastąpieniu pewnej ilości cementu popiołem lotnym. Jednakże testowanie wyników metodą wielokrotnych porównań Duncana prowadzi do wniosku, że gęstości betonów z 10% i 20% popiołu lotnego i 400 kg cementu w m³ betonu różnią się wyraźnie (tablica 6).

Stwierdzono, że w betonach o zawartości cementu, odpowiednio 350, 400 i 450 kg/m³ gęstości, przy zastąpieniu 10% cementu popiołem lotnym, są odpowiednio o 5%, 4% i 2% mniejsze niż gęstości betonów kontrolnych. Stwierdzono też, że w przypadku zawartości cementu odpowiednio 400 i 450 kg/m³ bez udziału popiołu, gęstości wzrastały o 15% i 28% w stosunku do gęstości betonów z 350 kg/m³ cementu. Zależność gęstości od zawartości cementu i popiołu lotnego jako jego zamiennika przedstawiono w formie histogramu na rys. 3. Można zauważyć, że gęstość wzrasta przy zastąpieniu 10% cementu popiołem, ale maleje gdy w składzie mieszanki jest więcej popiołu; widać też że ze zwiększeniem udziału cementu w betonie wzrasta gęstość.

Z próbki kruszywa lekkiego sporządzono polerowany zgląd, który poddano obserwacjom pod mikroskopem optycznym. Porowata struktura ziarna kruszywa jest pokazana na rys. 5. Można się przekonać, że mała gęstość betonu jest pochodną porowatej struktury kruszywa. Można też zobaczyć spieczoną osłonkę zewnętrzną utworzoną w procesie produkcji kruszywa.

3.2. Wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu

Opracowanie wyników badań wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu metodami statystyki opisowej przedstawiono w tablicy 5, a histogramy na rysunkach 6 i 7. Wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu wzrastają z zawartością cementu w betonie. Można zaobserwować, że dla wszystkich badanych betonów z kruszywa lekkiego z ekspandowanego



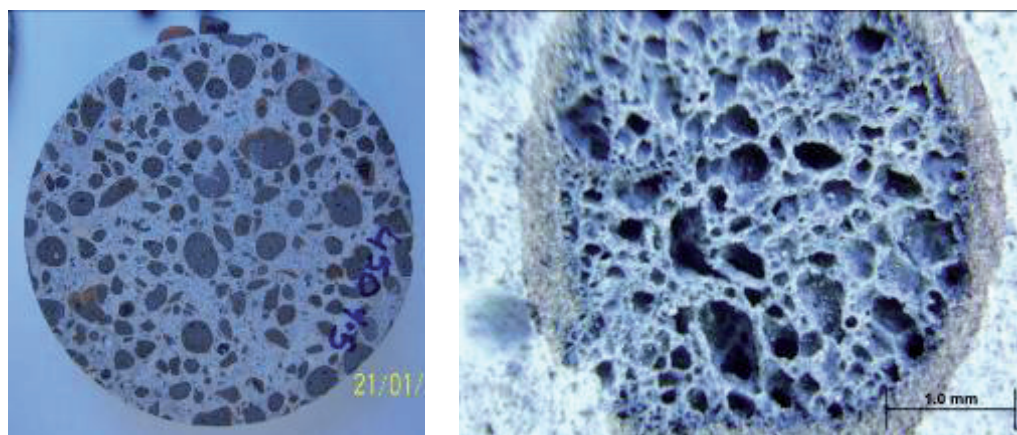
Rys. 4. Gęstość betonu w funkcji zawartości cementu i popiołu lotnego

Fig. 4. The effect of fly ash and cement content on unit weight

The porous internal structure of ECA and the concrete with this aggregate are demonstrated in Fig. 5. It is evident that the unit weight of concrete is low as a result of the ECA porous structure.

3.2. Compressive and split tensile strength

The descriptive statistics of the results of compressive and split tensile strength tests is given in Table 4. The presentation of these results; histograms of compressive strength and of split tensile strength obtained as a result of the experiments are seen in Figs. 6 and 7, respectively. The compressive and split tensile strength increase with the content of cement in concrete. For all cement content, ECAC samples with 10% FA replacement have higher strength than the reference concretes, however, the decrease of strength takes place for the samples with 20% FA replacement. The variance analysis has shown that there is a significant difference between sample groups in statistical aspect ($p \leq 0.05$) with different FA addition (Table 5). In other words, the compressive and split tensile strength change significantly with FA. With the 10% FA replacement, the compressive strength of the concrete



Rys. 5. Obraz przełamu ziarna kruszywa lekkiego

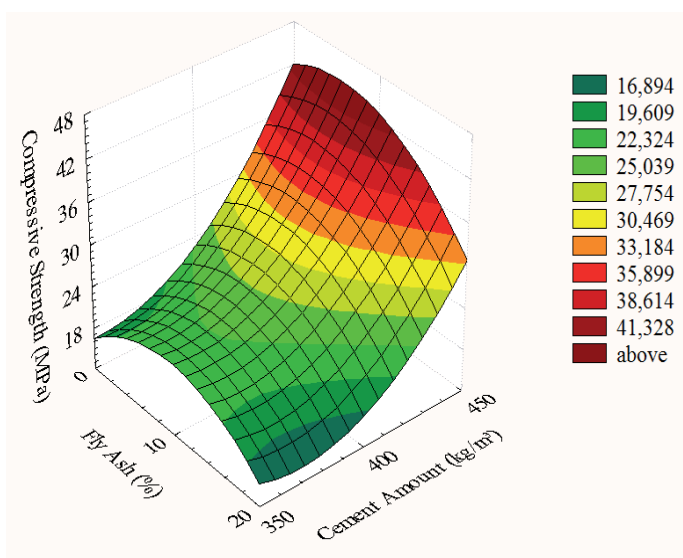
Fig. 5. Light microscope images of ECAC (on left) and ECA with dense layer on the surface, cross sections

materiału ilastego, zastąpienie 10% cementu popiołem przynosi zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu, w porównaniu do wartości stwierdzonych dla betonów kontrolnych, bez popiołu. Natomiast zastąpienie 20% cementu popiołem powoduje zmniejszenie wytrzymałości. Analiza wariancji dla poszczególnych serii próbek betonów różniących się zawartością popiołu wskazuje na statystyczną istotność uzyskanych różnic wyników ($p \leq 0,05$) (tablica 5). Tak więc wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu zależy od zawartości popiołu w próbkach betonów.

Stwierdzono, że przy zastąpieniu 10% cementu popiołem w betonach o zawartości cementu odpowiednio 350, 400 i 450 kg/m^3 , wytrzymałość na ściskanie wzrasta odpowiednio o 30%, 7% i 8% w porównaniu do wartości stwierdzonych dla betonów kontrolnych, bez popiołu. Natomiast przy zastąpieniu 20% cementu popiołem obserwuje się zmniejszenie wytrzymałości o odpowiednio 7%, 27% i 26%. Określając wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu stwierdzono, że zastąpienie 10% cementu popiołem zwiększa wytrzymałość odpowiednio o 6%, 7% i 6% w przypadku betonów o zawartości cementu 350, 400 i 450 kg/m^3 . Natomiast przy zastąpieniu 20% cementu popiołem obserwuje się zmniejszenie wytrzymałości odpowiednio o 13%, 26% i 16%. Histogramy wyników badań wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu pokazano na rysunkach 9 i 10. Można zauważyć, że wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu osiąga największą wartość przy zastąpieniu 10% cementu popiołem, ale maleje w przypadku zastąpienia 20% cementu popiołem; widać też, że w betonach różniących się zawartością cementu wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu wzrasta ze zwiększeniem udziału cementu.

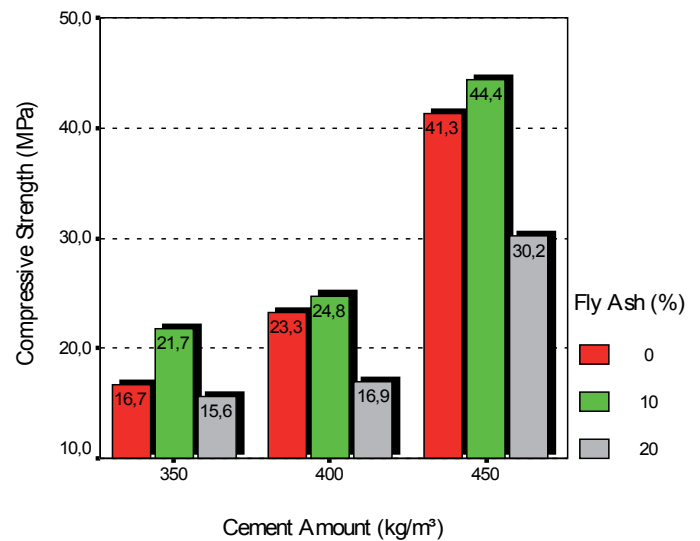
3.3. Przyczepność

Opracowanie wyników badań przyczepność w betonie metodami statystyki opisowej przedstawiono w tablicy 4. Średnie wartości



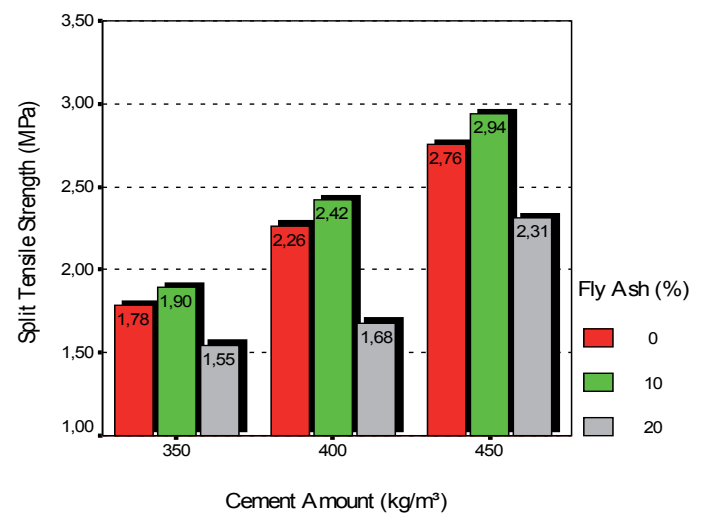
Rys. 8. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji zawartości cementu i popiołu lotnego

Fig. 8. The influence of fly ash and cement content on compressive strength



Rys. 6. Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie

Fig. 6. Compressive strength, means values



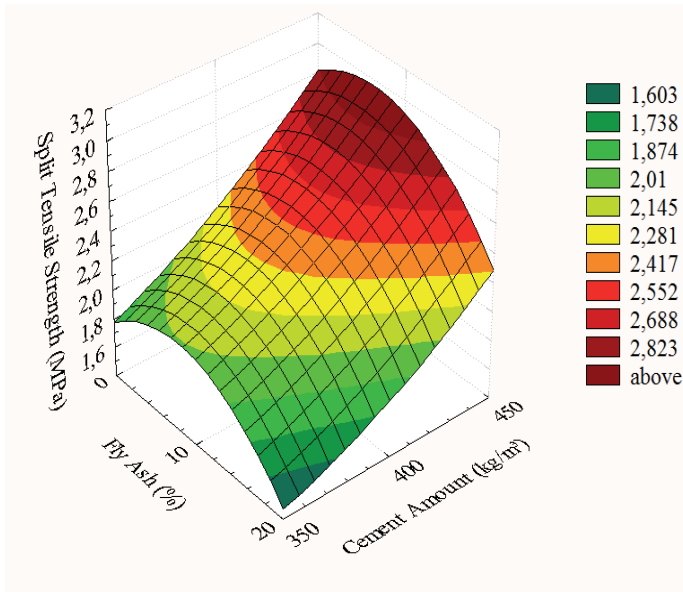
Rys. 7. Średnie wartości wytrzymałości na zginanie przy rozłupywaniu

Fig. 7. Split tensile strength, means values

samples, with 350, 400 and 450 kg/m^3 cement content increase by 30%, 7% and 8%, respectively, relative to reference concretes while those with 20% FA replacement decreased by 7%, 27% and 26%, respectively.

The split tensile strength of the samples with 10% FA replacement with 350, 400 and 450 kg/m^3 cement content increased by 6%, 7% and 6% respectively, in comparison to the reference samples, while those mixtures with 20% FA replacement decreased by 13%, 26% and 16%, respectively.

The curves showing the change of compressive strength depending on FA and cement content is given in Fig. 8 and for the split tensile strength is given in Fig. 9. The curves show that the concrete samples with 10% FA replacement have the highest compressive and split tensile strength, however, the strength of concretes with higher FA addition are decreasing, i.e. already with 20% FA, but the strength increases with cement content.

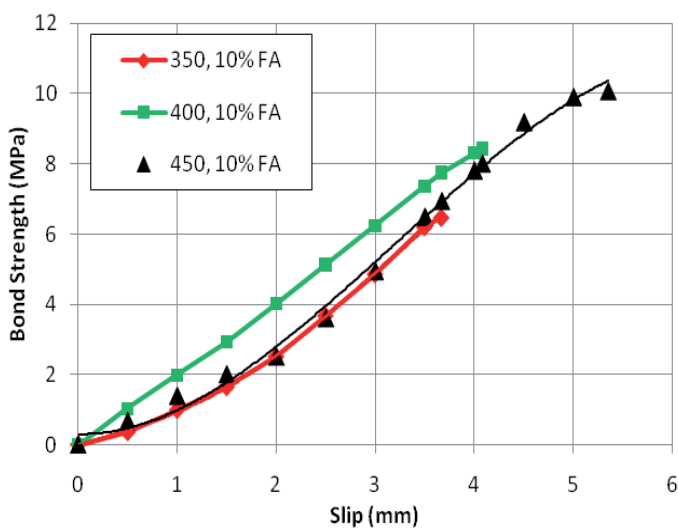


Rys. 9. Wytrzymałość na zginanie przy rozłupywaniu w funkcji zawartości cementu i popiołu lotnego

Fig. 9. The relation graphic of among fly ash, cement amount and split tensile strength

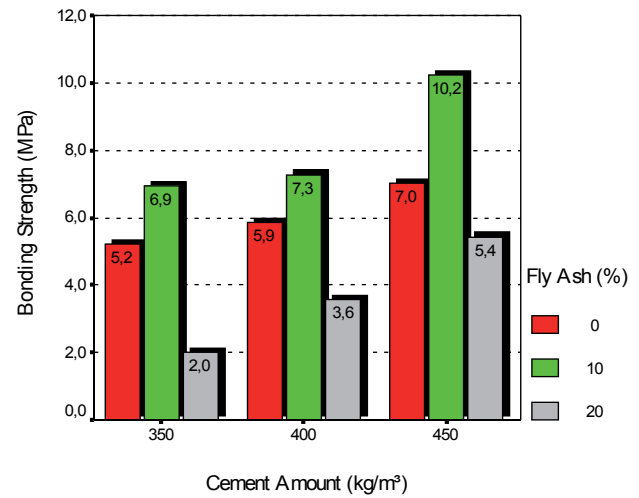
pryczepności pokazano też w postaci graficznej (rys. 10). Pryczepność po 28 dniach dojrzewania próbek betonowych kształtowała się na poziomie od 2 do 10,2 MPa. Widać wyraźnie (rys. 10), że zastąpienie 10% cementu popiołem wpływa na polepszenie przyczepności.

Ważną rolę w kształtowaniu wytrzymałości wiązania odgrywa powierzchnia kontaktu zbrojenia z otuliną. Betony zawierające 10% popiołu jako zamiennika cementu wykazują większą wytrzymałość wiązania niż betony bez popiołu i z 20% zawartością popiołu. Popiół w ilości 10% modyfikuje korzystnie strefę kontaktową, podczas gdy przy większym udziale tego składnika zwiększona wodożądność powoduje zmniejszenie wytrzymałości.



Rys 11. Poślizg swobodny zbrojenia w funkcji naprężenia dla próbek z dodatkiem 10% popiołu lotnego jako zamiennika cementu

Fig. 11. Stress-slip curve of 10% fly ash replacement ECACs



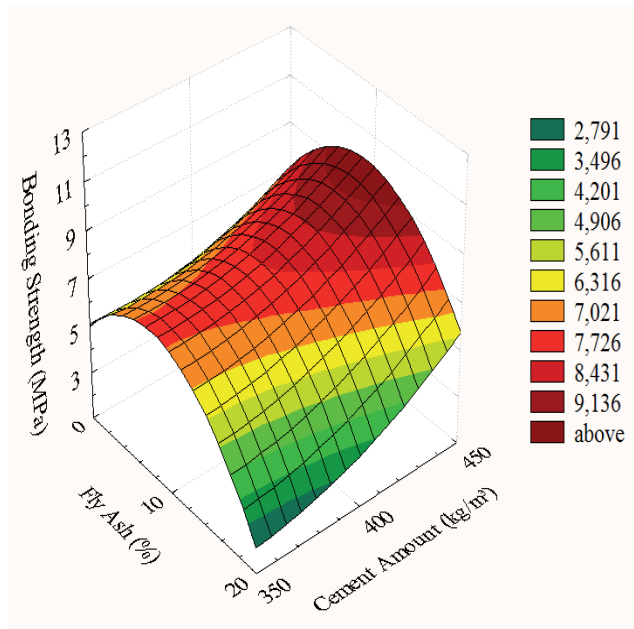
Rys.10. Średnie wartości wytrzymałości wiązania

Fig. 10. Means of bonding strength

3.3. Bond strength

Descriptive statistics of bond strength are given in Table 5. The mean bonding strength is shown in Fig. 10. The bond strength after 28 days of hardening of the samples are in the range from 2 to 10.2 MPa. From the curves presented in Fig. 10 it is evident, that 10% FA replacement positively affects the bond strength of the specimens.

The surface of the deformed bars played an important role in developing the bond strength between them and the ECA concrete. Concrete specimens with 10% FA replacement have higher bond strength than samples with 0% and 20%. FA replacement improves the surface area between rebar and the ECA concrete. But, the higher FA replacement in concrete increasing water demand and thus decreases the strength of the samples. Also the stress-slip



Rys. 12. siła wiązania w funkcji zawartości cementu i popiołu lotnego

Fig. 12. The relation between fly ash and cement content and bond strength

Tablica 6 / Table 6

ANALIZA WARIANCJI - OPRACOWANIE WYNIKÓW

THE RESULTS OF VARIANCE ANALYSIS

Badanie Experiments	Cement Content kg/m ³	Wariancja Source of variance	Suma kwadratów Sum of squares	df	Kwadrat średniej Mean square	F	Sig.
Gęstość Unit weight, g/cm ³	350	Między grupami / Between groups	0.013	2	0.007	0.959	0.419
		W grupach / Within groups	0.062	9	0.007		
		Wartość całkowita / Total	0.075	11			
	400	Między grupami / Between groups	0.020	2	0.010	2.908	0.106
		W grupach / Within groups	0.016	9	0.001		
		Wartość całkowita / Total	0.036	11			
	450	Między grupami / Between groups	0.003	2	0.002	2.908	0.106
		W grupach / Within groups	0.005	9	0.001		
		Wartość całkowita / Total	0.008	11			
Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa	350	Między grupami / Between groups	64.533	2	32.266	38.089	0.000*
		W grupach / Within groups	5.083	6	0.847		
		Wartość całkowita / Total	69.616	8			
	400	Między grupami / Between groups	103.466	2	51.733	16.028	0.004*
		W grupach / Within groups	19.366	6	3.228		
		Wartość całkowita / Total	122.832	8			
	450	Między grupami / Between groups	335.331	2	167.665	132.664	0.000*
		W grupach / Within groups	7.583	6	1.264		
		Wartość całkowita / Total	342.914	8			
Wytrzymałość na zginanie przy rozłupywaniu Split tensile strength, MPa	350	Między grupami / Between Groups	0.191	2	0.096	29.263	0.001*
		W grupach / Within groups	0.020	6	0.003		
		Wartość całkowita / Total	0.211	8			
	400	Między grupami / Between Groups	0.912	2	0.456	330.953	0.000*
		W grupach / Within groups	0.008	6	0.001		
		Wartość całkowita / Total	0.920	8			
	450	Między grupami / Between Groups	0.621	2	0.311	69.968	0.000*
		W grupach / Within groups	0.027	6	0.004		
		Wartość całkowita / Total	0.648	8			
Przyczepność Bond strength, MPa	350	Między grupami / Between Groups	37.755	2	18.877	24.595	0.001*
		W grupach / Within groups	4.605	6	0.768		
		Wartość całkowita / Total	42.360	8			
	400	Między grupami / Between Groups	20.803	2	10.402	6.069	0.036*
		W grupach / Within groups	10.284	6	1.714		
		Wartość całkowita / Total	31.087	8			
	450	Między grupami / Between Groups	35.671	2	17.835	13.525	0.006*
		W grupach / Within groups	7.912	6	1.319		
		Wartość całkowita / Total	43.583	8			

* Różnica znacząca (na poziomie $p \leq 0.05$)* There are significant differences between means (at the level of $p \leq 0.05$)

Na rys. 11 pokazano zależność pomiędzy naprężeniem a wielkością poślizgu pomiędzy prętem zbrojącym i otuliną zmierzone metodą „pullout” dla betonów przy zastąpieniu 10% cementu popiołem. Betony te wykazują największe przyczepności spośród badanych serii.

Można zauważyć, że w przypadku wszystkich badanych serii betonów przyczepność osiąga największe wartości przy zastąpieniu 10% cementu popiołem, a najmniejsze przy zastąpieniu 20% ce-

curve between rebar and the ECA concrete is given in Fig 11. It is obtained concrete samples with 10% FA replacement, which had the highest bond strength.

The results of experiment show that for all series of cement content, bond strength is the highest for samples with 10% FA replacement, however for 20% FA replacement is the lowest. With 10% FA replacement, in the concrete samples with 350, 400 and 450 kg/m³ cement content bond strength increase by 33%,

Tablica 7 / Table 7

WYNIKI TESTU DUNCANA

THE RESULTS OF DUNCAN TESTS

Badanie Experiments	Cement Content kg/m ³	Zastąpienie cement popiołem Replacement fly ash and comparison differences			Rząd wielkości Order of magnitude		
			0%	10%	20%	Popiół Fly Ash	Średnia Means
Gęstość Unit weight, g/cm ³	350	0%				20%	1.295
		10%				0%	1.300
		20%				10%	1.367
	400	0%				20%	1.460
		10%			S [*]	0%	1.497
		20%		S [*]		10%	1.560
	450	0%				20%	1.662
		10%				0%	1.670
		20%				10%	1.700
Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa	350	0%			S [*]	20%	15.573
		10%	S [*]		S [*]	0%	16.678
		20%		S [*]		10%	21.725
	400	0%			S [*]	20%	16.949
		10%			S [*]	0%	23.270
		20%	S [*]	S [*]		10%	24.775
	450	0%		S [*]	S [*]	20%	30.155
		10%	S [*]		S [*]	0%	41.273
		20%	S [*]	S [*]		10%	44.372
Wytrzymałość na zginanie przy rozłupywaniu Split tensile strength, MPa	350	0%			S [*]	20%	1.546
		10%			S [*]	0%	1.784
		20%	S [*]	S [*]		10%	1.896
	400	0%		S [*]	S [*]	20%	1.680
		10%	S [*]		S [*]	0%	2.265
		20%	S [*]	S [*]		10%	2.419
	450	0%		S [*]	S [*]	20%	2.312
		10%	S [*]		S [*]	0%	2.756
		20%	S [*]	S [*]		10%	2.937
Przyczepność Bond strength, MPa	350	0%			S [*]	20%	2.003
		10%			S [*]	0%	5.217
		20%	S [*]	S [*]		10%	6.947
	400	0%			S [*]	20%	3.557
		10%				0%	5.353
		20%	S [*]			10%	7.280
	450	0%		S [*]		20%	5.437
		10%	S [*]		S [*]	0%	7.007
		20%		S [*]		10%	10.220

S^{*}: Znaczące różnice pomiędzy wartościami średnimi ($p \leq 0.05$)S^{*}: There are significant differences between means (at the level of $p \leq 0.05$)

mentu popiołem. Stwierdzono, że przy zastąpieniu 10% cementu popiołem w betonach o zawartości cementu odpowiednio 350, 400 i 450 kg/m³, wytrzymałości na ściskanie wzrastają o 33%, 24% i 45%, w porównaniu do wartości stwierdzonych dla betonów kontrolnych bez popiołu. Ponadto, w zależności od zawartości cementu wytrzymałość wiązania wzrasta dla 400 i 450 kg/m³ o odpowiednio 13% i 35% w porównaniu z betonem sporządzonym

24% and 45% respectively, in relation to the reference concretes. Moreover, depending on the cement content, the bond strength of the samples mixtures with 400 and 450 kg/m³ is higher by 13% and 35% respectively in comparison with the mixture containing 350kg/m³ of cement. It was found that bond strength changes are proportional to unit weight, compressive and split tensile strength of concrete. Unit weight, compressive and split tensile strength



Rys. 13. Próbkki betonu poddane badaniu metodą „pullout”

Fig. 13. Picture of some of specimens after the pullout test

nym przy zawartości 350 kg/m³. Stwierdzono, że przyczepność zmienia się analogicznie jak gęstość czy wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu. Właściwości te w znacznym stopniu kształtują przyczepność.

Zależność przyczepności w funkcji zawartości cementu i popiołu pokazane są na rys. 12. Fotografie próbek poddanych testowi metodą „pullout” są przedstawione na rys. 13. W wyniku tego testu w próbkach pojawiają się spękania poprzeczne i następuje fragmentacja na 3 części.

4. Wnioski i zalecenia

W celu określenia wpływu popiołu lekkiego na wytrzymałość wiązania zbrojenia w betonie lekkim z kruszywem w postaci ekspandowanego materiału ilastego sporządzono trzy rodzaje mieszanek betonowych jako mieszanki kontrolne, zawierające odpowiednio 350, 400 i 450 kg cementu na m³ betonu, a następnie sporządzono mieszanki z różną zawartością popiołu lotnego, wynoszącą odpowiednio 10% i 20% masy cementu. Z mieszanek wykonywano próbki do badań w postaci kostek sześciennych 150x150x150 mm; część z nich zbrojono prętami stalowymi. Siła wiązania określano metodą „pullout”, badano gęstość oraz wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu. Wyniki eksperymentów poddano obróbce statystycznej.

Ustalono, że gęstość, wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu, jak również siła wiązania zbrojenia wzrastają z zawartością cementu w betonie. Siła wiązania zbrojenia wzra-

have great influence on bond strength of ECACs. These results are also compatible with the data given in literature (10, 12, 13). The change of bond strength as a function of FA content is shown in Fig. 12 and the specimens after the pullout test are presented on Fig 13. It was seen that, after the pullout test, generally cross-cut cracks are formed in the samples which caused their disintegrating in 3 pieces.

4. Conclusions

The goal of the study was to determine the effect of FA addition to lightweight concrete, produced from expanded clay aggregate on bond strength, of rebars. The concrete mixtures with 350, 400, 450 kg/m³ cement content, which was replaced by 10% and 20% of FA were produced. The unit weight, compressive and split tensile strength tests as well as the rebars bond strength were measured. The statistical analysis was applied for all experimental results.

It was found that unit weight, compressive and split tensile strength as well as bond strength of ECA concrete samples increase proportionally to cement content. It was established that bond strength increases with concrete density and compressive strength, which is compatible with the literature data (10, 12, 13).

The addition of FA, higher than 10% which was replacing cement caused increase of water demand which had the unfavourable influence on concrete density and strength. However, an average increase of 34% of concrete mechanical properties and bond strength with rebars was obtained in the case of 10% FA addition, replacing cement. Thus the FA addition in lightweight concrete with ECA has double effect: a part of cement will be saved and simultaneously the mechanical properties will be improved. In the case of concrete produced of ECA with FA addition, the bond strength of rebars can be also enhanced. For all series of concrete mixtures the addition of 10% FA replacing cement has the advantageous effect, giving the highest unit weight, compressive and split tensile strength as well as bond strength, but the 20% FA addition replacing cement in concrete was giving the worst results.

Literatura / References

1. A. M. Neville, Properties of concrete, Fourth and Final Edition. England: Pearson Prentice Hall 2003.
2. C. W. Tang, “Hydration properties of cement pastes containing high-volume mineral admixtures”, *Computers and Concrete*, **7**, 1, p.17 (2010).
3. B. Uzal, L. Turanli, “Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans”, *Cem. Concr. Res.*, **33**, 11, p. 1777 (2003).
4. I. Demir, H. Yaprak, O. Simsek, “The effect of sea water on the properties of concrete with silica fume admixture”, *Cement Wapno Beton*, p. 22 (2010).
5. D. R. Swanson, Bond strength of corrosion-resistant reinforcing bars. Master of Science Thesis, P. 173, Queen’s University, Kingston, Ontario 2003.
6. R. Park, T. Paulay, Reinforced Concrete Structures. John Wiley & Sons, Inc. N.Y. 1975.
7. B. S. Hamad, Comparative Bond Strength of Coated and Uncoated Bars with Different Rib Geometries. *ACI Mater J.* **92**, 6, p. 579 (1995).

sta z gęstością i wytrzymałością na ściskanie; potwierdzono w ten sposób wcześniejsze doniesienia literaturowe (10, 12, 13).

Zaobserwowano też, że przy większym udziale popiołu lotnego (>10%) zwiększona wodożądność powoduje zmniejszenie gęstości i wytrzymałości. Przy zastąpieniu 10% cementu popiołem obserwuje się polepszenie właściwości mechanicznych o średnio 34%. Tak więc zastosowanie popiołu, który jest odpadem przemysłowym, przyczynia się nie tylko do zaoszczędzenia cementu, ale również do poprawy właściwości mechanicznych betonu.

W pracy ustalono, że dla wszystkich badanych betonów z kruszywem lekkim, w postaci ekspandowanego materiału ilastego, zastąpienie 10% cementu popiołem przynosi zwiększenie gęstości, zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu, jak również siły wiązania zbrojenia, podczas gdy zastąpienie 20% cementu popiołem skutkuje pogorszeniem wymienionych właściwości.

8. J. Xiao, H. Falkner, Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars. *Constr Build Mater.*, **21**, p. 395 (2007).
9. R. H. Haddad, K. S. Numayr, Effect of alkali-silica reaction and freezing and thawing action on concrete-steel bond. *Constr Build Mater.*, **21**, p. 428 (2007).
10. Lee et al., Interfacial Bond Strength of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars in High-Strength Concrete. *Compos Part B: Eng.*, **39**, 2, p. 258 (2008).
11. G. Campione, C. Cucchiara, L. L. Mendola, M. Papia, Steel-Concrete Bond in Lightweight Fiber Reinforced Concrete Under Monotonic and Cyclic Action. *Eng Struct.*, **27**, p. 881 (2005).
12. W. C. Tang, T. Y. Lo, R. V. Balendran, Bond Performance of Polystyrene Aggregate Concrete (PAC) Reinforced With Glass-Fibre-Reinforced Polymer (GFRP) Bars. *Build Environ.*, **43**, p. 98 (2008).
13. D. C. L. Teo, M. A. Mannan, V. Kurian, J. C. Ganapathy, Lightweight concrete made from oil palm shell (OPS): Structural bond and durability properties. *Build Environ.*, **42**, p. 2614 (2007).
14. ASTM Standard C138/C138 M, Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA (2004).
15. ASTM C39/39 M, Standard test method for compressive strength of cylindrical specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA (2004).
16. ASTM Standard C496/C496 M, Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA (2004).
17. ASTM C234-91a Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel, West Conshohocken, PA (2000).