

Porównawcze badania wytrzymałości na odrywanie od powierzchni międzyfazowej jednorodnego betonu geopolimerowego

A comparative study of shear strength of monolithic geopolymer concrete interface

B. Sumanth Kumar, D. Rama Seshu*

Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Warangal, India

*corresponding author: D. Rama Seshu, e-mail: drseshu@nitw.ac.in

Streszczenie

Beton geopolimerowy jest kompozytem, który ma potencjalne możliwości aby zostać alternatywnym materiałem dla tradycyjnego betonu. W pracy przedstawiono doświadczenia związane z odrywaniem od powierzchni międzyfazowej jednorodnego betonu geopolimerowego. Sporządzono do doświadczeń 18 próbek do odrywania powierzchni zbrojonych i niezbrojonych, przechodzących przez powierzchnię międzyfazową. Oznaczona doświadczalnie wytrzymałość na odrywanie betonu geopolimerowego porównano z wytrzymałością na odrywanie stosując dostępne modele analityczne dla betonu zwykłego. Wyniki doświadczeń wykazały, że wytrzymałość na odrywanie od powierzchni międzyfazowej jednorodnego betonu geopolimerowego, wzrastała do pewnej wytrzymałości na ściskanie tego betonu. Większość dostępnych modeli analitycznych stosują znane metody w ocenie wytrzymałości na odrywanie betonu geopolimerowego.

Słowa kluczowe: beton geopolimerowy, wytrzymałość na odrywanie, przenoszenie odrywania na powierzchnię międzyfazową, kohezja, tarcie, działanie Dowela

Summary

Geopolymer concrete is the composite and has prospective potential to become one of the alternatives to conventional concrete. This paper presents an experimental investigation on the shear strength of monolithic geopolymer concrete interface. A total of 18 push-off specimens with and without reinforcement across the interface were cast and tested. The experimental shear strength of geopolymer concrete is compared with the shear strength evaluated, using the available analytical models for normal concrete. The test results indicated that the shear strength of monolithic geopolymer concrete interface has increased up to certain compression strength of geopolymer concrete. Most of the available analytical models are conservative in estimating the shear strength of geopolymer concrete.

Keywords: geopolymer concrete, shear strength, interface shear transfer, cohesion, friction, dowel action

1. Wprowadzenie

Rozwój betonów geopolimerowych [GPB] przedstawia się jako "zielony" materiał i przypuszczalną alternatywę dla normalnego betonu cementowego. W celu zmniejszenia śladu węglowego przemysł cementowy poprawił proces produkcji cementu, jednak nie mógł zmniejszyć emisji CO₂, ponieważ jest integralną składową podstawowego procesu dekarbonizacji wapienia w trakcie prażenia klinkieru. W związku z tym stosowanie odpadów i produktów ubocznych z innych przemysłów w rozwoju alternatywnych materiałów budowlanych wzrasta z dnia na dzień. Początek geopolimerów

1. Introduction

The development of geopolymer concrete [GPC] is being visualized as green material and a probable alternative to the normal cement concrete. To reduce the carbon footprint, cement industry improved the process in cement production, but could not reduce CO₂ emission as it is integral of basic process of the limestone calcination in clinker burning. Thus the usage of waste by-products from the other industries in the developing alternate construction materials is increasing day by day. The beginning of geopolymer was the invention of Kühl (1) which in 1907 patented the binder

był wynalazkiem Kühla (1), który w 1907 roku opatentował materiał wiążący złożony z żużla wielkopieczowego, aktywowanego wodorotlenkiem sodu. Beton geopolimerowy jest materiałem, który wytwarza się przy minimalnej przeróbce naturalnych surowców lub przemysłowych produktów ubocznych, w celu zmniejszenia śladu węglowego i uzyskania produktu, który jest bardzo odporny na różne czynniki.

Geopolimery są materiałem oryginalnym lub produktem ubocznym. Ten nieorganiczny związek glino-krzemianowy jest zbliżony do zeolitu, jest jednak bezpostaciowy i ma tylko mikrostrukturę (2-4). Istniejąca literatura wykazuje, że badania geopolimerów obejmują ich właściwości, a szczególnie ich wytrzymałość (5-8).

Geopolimery, w przypadku zastępowania cementu portlandzkiego [CP], zmniejszają duży ślad węglowy betonu z cementu portlandzkiego CP, jednak kilka przeprowadzonych badań podaje szeroki zakres niedogodności. Różnica przytoczonych wielkości CO₂ dla betonu geopolimerowego porównany z CP jest znaczna i ocenia tę różnicę jako mniejszą od 80% niż w przypadku CP (9, 10) i 26 – 44% niższą niż w przypadku betonu z CP (11, 12). Szczegółowe badania porównawcze podają oszacowaną różnicę CO₂ śladu węglowego (13), która jest około 9% mniejsza dla betonu geopolimerowego niż w przypadku porównywalnego betonu z samego CP, co jest znacznie mniej niż przewidywano we wcześniejszych pracach¹. Kluczowym czynnikiem, który powoduje większą od oczekiwanej emisję betonu geopolimerowego uwzględnia prace górnicze, obróbkę i transport surowców do produkcji aktywatorów dodawanych do geopolimerów, zużycie znacznej ilości energii do produkcji tych aktywatorów oraz potrzebę obróbki w podwyższonej temperaturze betonu z geopolimerów, w celu uzyskania rozsądnej wytrzymałości.

Geopolimerowe cementy [GC] stosowano są często w prefabrykacji, bowiem w wyrobach tych naprężenia koncentrują się w strefach międzyfazowych lub na złączach, blisko belek i połączeń kolumnowych oraz belek nośnych i złącz, a także płyty międzyfazowej. Przekazanie naprężeń odspajających międzyfazowo zachodzi przez tarcie od naprężeń ściskających w związku z kohezją i zażębieniem się szorstkich kruszyw i działaniu Dowela, przecinającego powierzchnie. Różne modele można spotkać w literaturze (14-23) do obliczeń przekazywania przez beton wytrzymałości na odrywanie.

Przygotowano różne rodzaje próbek do badań, a mianowicie przez pęknięcie, przez gzyms wysadzony i wyciąganie, w celu oznaczenia wytrzymałości na odrywanie betonu. Andersen (26) był pierwszym, który zastosował spychanie próbek do oznaczenia międzyfazowego odrywania. Próbkę do odrywania [rys. 1] są powszechnie stosowane w związku z doskonałą wymianą odrywania przez granicę międzyfazową, w odróżnieniu od innych rodzajów próbek, które wywołują oba rodzaje – odrywanie i moment (15, 27).

¹ Uwaga Wydawcy: Dodatek aktywatorów wiąże się oczywiście z emisją CO₂. W przypadku NaOH jest to 1,916 kg CO₂/1 kg NaOH, a dla NaSiO₃ 1,222 kg CO₂/1 kg. Gdy dodatek wynosi 41 kg NaOH to emisja wynosi 79 kg CO₂, a dla 103 kg NaSiO₃ jest 126 kg CO₂.

composed of blastfurnace slag activated with sodium hydroxide. Geopolymer concrete is the material made from minimal processed natural material or industrial by-products to reduce carbon footprint and being very resistant towards durability issues. Geopolymers are the materials of physical origin or by-products. These inorganic aluminum-silicate polymers are similar to zeolite but amorphous in microstructure (2-4). The literature existing indicates that the research on Geopolymer concrete includes its properties, evaluation of mechanical strength (5-8). Geopolymers, when substituted for OPC, have the potential to lower the significant carbon footprint of OPC concrete, however the few past research studies that have been conducted report a wide range of outcomes. The range of reported CO₂ values for geopolymer concrete compared with OPC is considerable, with estimates as high as 80% less than OPC (9,10) to 26–45% lower than OPC concrete (11,12). A detailed comparative study reported CO₂ estimates for both geopolymer and OPC concrete (13), indicating that the CO₂ footprint of geopolymer concrete was approximately 9% less than comparable concrete containing 100% OPC binder: much less than predictions by earlier studies¹. The key factors that led to the higher than expected emissions for geopolymer concrete included the inclusion of mining, treatment and transport of raw materials for manufacture of alkali activators for geopolymers, expenditure of significant energy during manufacture of alkali activators, and the need for elevated temperature curing of geopolymer concrete, to achieve reasonable strength.

The GPC has been significantly used by precast industry where stress is concentrated at interfacial or connective zones associated with corbels, near beam column junctions and beam slab interface. Shear transfer across the interface is transmitted by friction from compressive stresses, cohesion because of aggregate interlocking roughness and Dowel action, crossing the surfaces. Different models (14-23) were available in the literature for calculating the concrete shear transfer strength.

Several types of test specimens like splitting, corbel with moment and pull-off are studied in determining the shear strength of concrete. Anderson (26) was the first to introduce push-off specimen for evaluating interface shear transfer. The push-off specimens (Fig. 1) is the most appropriate and commonly used due to perfect shear transfer across interfaces against other type of specimens, which induce both shear and moment (15, 27).

The outcomes of push-off investigations were used in recommending shear – transfer models for concrete (21-25).

Numerous design expressions were proposed to envisage the shear stress at the concrete interface. Majority of design codes considered the shear-friction theory for concrete structures (21-25). Table 1 presents the Shear strength expressions as per different investigators / Codes of practice.

¹ Editor Remark: The additions of activators is linked with the emission of CO₂. For example for NaOH it is 1.916 kg CO₂/1 kg NaOH and 1.222 kg CO₂/1 kg NaSiO₃. When the addition is 41 kg of NaOH the emission is 79 kg CO₂ and for 103 kg of NaSiO₃ is 126 kg CO₂

Tablica 1 /Table 1

WZORY PRZEDSTAWIAJĄCE WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE

SHEAR STRENGTH EXPRESSIONS AS PER DIFFERENT INVESTIGATORS

Reference / Odniesienie	Shear strength expression Wzory opisujące ścinanie	Remarks / Uwagi			
Birkeland and Birkeland (14)	$v_u = \rho f_y \tan \phi = \rho f_y \mu$	$\mu = 1.7$ for concrete placed monolithically / dla betonu zaformowanego jako monolit			
Mattock and Hawkins (15)	$v_u = 1.38 + 0.8[\rho f_y + \sigma_n]$	ρ = reinforcement ratio/ stosunek zbrojenia, f_y = Yield strength of reinforcement across interface, σ_n = normal stress / Wytrzymałość przechodzenia zbrojenia przez granicę międzyfazową σ_n naprężenie normalne			
Mattock (16)	$v_u = 2.76 + 0.8[\rho f_y + \sigma_n]$				
Loov (17)	$v_u = k \sqrt{f_c [\sigma_n + \rho f_y]}$	σ_n is the clamping stress and $k = 0.5$ for initially un-cracked shear interfaces / σ_n jest naprężeniem dociskowym, a $k = 0,5$ dla początkowo niespękanych międzyfazowe ścinanie			
Walraven, Frenay&Prujssers (18, 19)	$v_u = C_1[\rho f_y]^{C_2}$	$C_1 = 0.822f_c^{0.406}$, $C_2 = 0.159f_c^{0.303}$			
Randl (20)	$v_u = C f_c^{1/3} + \mu[\sigma_n + \rho k f_y] + \alpha \rho$ $\sqrt{f_y f_c} \leq \beta v f_c$	C , μ , k , α and β are dependent on the roughness at the interface / C , μ , k , α i β zależą od szorstkości powierzchni międzyfazowej			
ACI 318 Cl. 22.9.4.2 & 3 (21)	$v_u = \mu A_v f_y$ $v_u = A_v f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha)$	$\mu = 1.4\lambda$ For monolithic concrete / dla monolitycznego betonu $\lambda = 1$ for normal-weight concrete / dla betonu o normalnej masie ρ_v = greater of $0.75 \sqrt{f_y f_c}$ and $50/f_y$ (SI Units) / = większy od $0,75 \cdot \sqrt{f_y f_c}$ i $50/f_y$ (jednostki SI)			
Euro code 2 Cl.6.2.5 (22) * Not valid for monolithic Spec	$v_u = C f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_y [\mu \sin \alpha + \cos \alpha] \leq 0.5 v f_{cd}$	Surface Type / Rodzaj powierzchni	Cohesion Coefficient C Współczynnik spójności C, MPa	Friction Coefficient Współczynnik tarcia μ	
		Very Smooth / bardzo gładka	0.025 – 0.10	0.50	
		Smooth / Gładka	0.20	0.60	
		Rough / Szorstka	0.40	0.70	
		Indented / Wgnieciona	0.50	0.90	
FIB Model Code Cl. 6.3.4 (23, 24)	$v_u = \tau_c + \mu(\rho k f_y + \sigma_n) + \alpha \rho \sqrt{f_y f_c}$ $\leq \beta v f_c$	Surface Type/ Rodzaj powierzchni	CMPa	μ	Average Roughness Ra
		Very Smooth/bardzo gładka	0.025	0.50	NA
		Smooth/gładka	0.35	0.60	<1.50
		Rough/Szorstka	0.45	0.70	≥ 1.50
		Very Rough/Bardzo szorstka	0.50	0.90	≥ 3.00
CSA A23.3 Cl. 11.5 (25)	$v_u = \Phi_c \lambda (c + \mu \sigma) + \Phi_s \rho_v f_y \cos \alpha_f$	$c = 1$; $\mu = 1.4$ for monolithic concrete / beton monolityczny $\lambda = 1$ for normal density concrete / beton o normalnej gęstości $\lambda(c + \mu \sigma) \leq 0.25 f_c'$, $\rho_{vmin} = 0.06$ $\rho_{vmin} = 0.06 \sqrt{\frac{f_c'}{f_y}}$			
	$v_u = \lambda k v_u = \tau_c + \mu(\rho k f_y + \sigma_n) + \alpha \rho$ $\sqrt{\sigma f_c'} \leq \beta v f_c + \rho_v f_y \cos \alpha_f$	$\sqrt{\sigma f_c'} \leq 0.25 f_c'$, $k = 0.6$ for concrete placed monolithically / dla betonu ułożonego jako monolit			

Zrezygnowano z badań wypychania zalecając modele z wymianą spychania, dla betonu (21-25).

Zaproponowano liczne modele projektowe w celu przewidywania naprężenia spychającego na powierzchni betonu z wymianą fazową. Większość kodów projektowych rozważało teorię spychanie-tarcie dla betonów (21-25). W tablicy 1 pokazano wzory opisujące spychanie, nazywane przez badaczy „kody praktyczne”.

2. Research significance

In present study the shear strength of monolithically cast GPC interface with and without the reinforcement crossing the shear plane was evaluated by testing push-off specimens. The shear strength obtained was compared with the models proposed by different investigators and codes of practice.

2. Znaczenie badań

W tej pracy oznaczono wytrzymałość na ścinanie monolitycznie ułożonej powierzchni międzyfazowej GPB niezbrojonego i zbrojonego, przy czym zbrojenie przecinało powierzchnię ścinania w trakcie badania próbek na spychanie. Oznaczoną wytrzymałość na ścinanie porównano z modelami, zaproponowanymi przez różnych badaczy i wzorami opisującymi wytrzymałość na spychanie.

3. Program doświadczeń

3.1. Materiały

Stosowano popiół lotny i GC jako spoiwa, które pochodzą z elektrowni w Ramagundam, w Indiach i JSW Cements Pvt Ltd, w Bilakalagudur w Indiach. Gęstość GC i popiołu lotnego wyniosły odpowiednio 2,90 i 2,17. W tabelicy 2 przedstawiono skład chemiczny spoiw.

Drobne kruszywo: Jako kruszywo drobne stosowano piasek rzeczny odpowiadający Strefie 2 według IS: 383-1970 (28). Gęstość oraz masa nasypowa piasku wyniosły odpowiednio 2,65 i 1,45 g/cm³.

Kruszywo grube: Kruszywo grube o dobrze dobranym uziarnieniu, zgodne z normą IS: 383-1970 (28), zawierające ziarna granitu 20 mm, które miało gęstość 2,80 g/cm³ i gęstość nasypową 1,50 g/cm³.

Stosowano **wodę pitną**.

Roztwór zasadowy składał się z roztworów krzemianu sodu i wodorotlenku sodu (o stężeniu 8 moli), w stosunku 2,5:1. Roztwór zasadowy przechowywano 24 h w atmosferze o wilgotności 65%, przed jego zastosowaniem jako wodę zarobową do próbek z GC, do oznaczania wypychania.

3.2. Skład mieszanek

Skład GC stosowano taki jak podano w literaturze (29). Skład mieszanki podany w tabelicy 3 wybrano po przeprowadzeniu róż-

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD GPB

COMPOSITION OF GPC

S.No Numer próbki	Grade of GPC Klasa GPB	Materials						
		Coarse Agg Kruszywo grube, kg	Fine Agg. Kruszywo drobne, kg	Fly Ash Fa, kg	GC, kg	8 M NaOH Solution 8-molowy roztwór NaOH, kg	Sodium Silicate Krzemian sodu, kg	SP* (kg)
1	A25	965	812	294	126	66	165	4.2
2	B35	965	812	252	168	66	165	4.2
3	C45	965	812	210	210	66	150	4.2

*SP: Super plasticizer / superplastyfikator [SP 430, Make: Fosroc Chemicals]

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD CHEMICZNY POPIOŁU LOTNEGO I GC, % MASOWY

CHEMICAL COMPOSITION OF FLY ASH AND GC, % BY MASS

Binder / Spoiwo	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	LOI
Fly ash / Fa	60.11	26.53	4.25	0.35	4.00	1.25	0.22	0.88
GC	37.73	14.42	1.11	0.39	37.34	8.71	--	1.41

3. Experimental program

3.1. Materials

The fly ash and geopolymer cement [GC] are used as binders which are acquired from NTPC power plant, Ramagundam, India and JSW Cements Pvt Ltd, Bilakalagudur, India, respectively. The Specific gravity of GC and fly ash are 2.90 and 2.17 respectively. Table 2, shows the chemical compositions of binders.

Fine Aggregate: River sand conforming to Zone-2 of IS: 383-1970 (28) was used as fine aggregate. The specific gravity and bulk density of sand are 2.65 and 1.45 g/cm³ respectively.

Coarse Aggregate: Well graded coarse aggregate conforming to IS: 383-1970 (28) with 20 mm nominal size of granite, is used as coarse aggregate. 2.80 and 1.50 g/cm³ are specific gravity and bulk density, respectively.

Potable water was used in the experimental work.

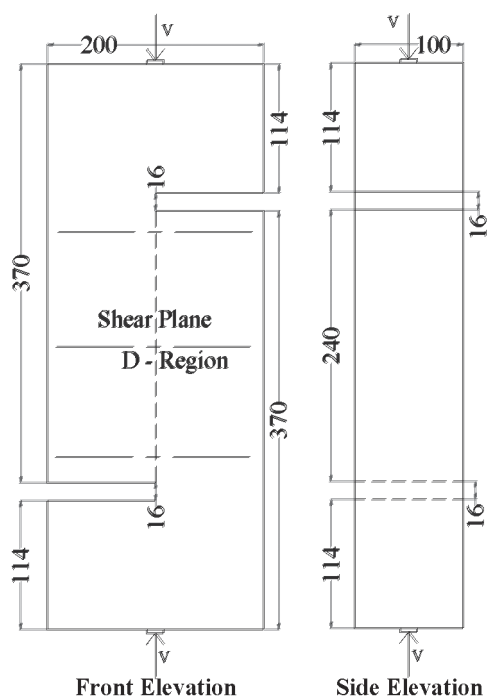
The **Alkaline Solution** consists of the sodium silicate solution to sodium hydroxide solution (8 molarity) as 2.5:1. The alkaline solution is stored at room temperature (25±2°C) for 24 hours and relative humidity of 65% before using it in the casting of GPC push off specimens.

3.2. Mix proportions

The GPC mix proportion procedure reported in literature (29) was adopted. The mix composition shown in Table 3, was considered after making different trials, in casting the GPC push off specimens, having different strengths.

3.3. Casting of GPC Specimens

The dimensions of the push-off specimens used for testing are shown in Fig. 1. The specimens were cast with and without reinfor-



Rys. 1. Próbkę do wypychania

Fig. 1. The Push off Specimen

nych prób, w formowaniu próbek do wypychania z GC, o różnej wytrzymałości.

3.3. Formowanie próbek z GC

Wymiary próbek do badania wypychania pokazano na rysunku 1. Próbkę formowano jako niezbrojone i zbrojone, przez powierzch-

Tablica 4 / Table 4

NAJWIĘKSZE OBCIĄŻNIE, WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE PRÓBEK GPB DO WYPYCHANIA

THE ULTIMATE LOADS, SHEAR STRENGTH OF GPC PUSH OFF SPECIMENS

f_{ck}	With no reinforcement across the shear interface Bez zbrojenia poprzez płaszczyznę międzyfazową				With constant % of reinforcement across the shear interface Ze stałym zbrojeniem poprzez płaszczyznę międzyfazową				$(v_{ur} - v_{up}) / v_{up}$
	Specimen ID	P_u	v_{up}	v_{up} / f_{ck}	Specimen ID	P_u	v_{ur}	v_{ur} / f_{ck}	
27.29	GANRS1	62.30	2.82	0.10	GAWRS1	142.39	6.45	0.24	1.29
32.04	GANRS2	71.20	3.22	0.10	GAWRS2	155.74	7.05	0.22	1.19
35.99	GANRS3	80.10	3.63	0.10	GAWRS3	186.89	8.46	0.24	1.33
37.28	GBNRS1	89.00	4.03	0.11	GBWRS1	213.59	9.67	0.26	1.40
37.77	GBNRS2	93.45	4.23	0.11	GBWRS2	213.59	9.67	0.26	1.29
38.57	GBNRS3	97.90	4.43	0.11	GBWRS3	222.49	10.08	0.26	1.27
41.10	GCNRS1	102.35	4.64	0.11	GCWRS1	226.94	10.28	0.25	1.22
48.11	GCNRS2	106.80	4.84	0.10	GCWRS2	241.39	10.93	0.23	1.26
52.86	GCNRS3	111.25	5.04	0.10	GCWRS3	258.09	11.69	0.22	1.32
			Ave=	0.104			Ave=	0.242	

Notation / Uwagi:

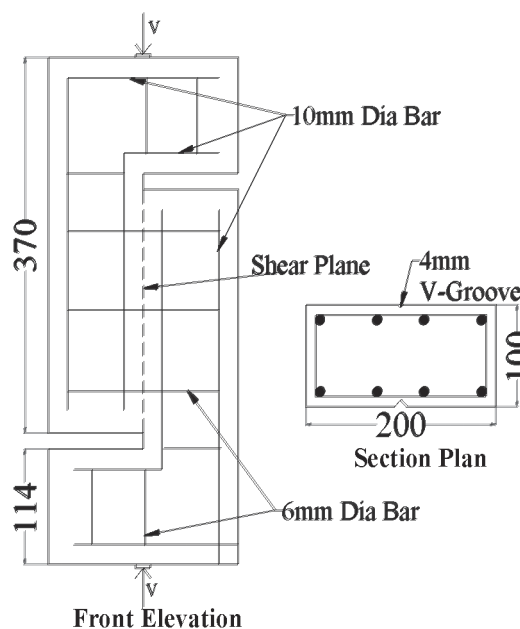
f_{ck} = Concrete Compressive Strength of 150 mm Cube / Wytrzymałość na ściskanie 150 mm kostek z betonu, MPa

P_u = Average Experimental Peak Load / Średni doświadczalny szczyt obciążenia, kN

Bh = Cross sectional area of the interface / Poprzeczna powierzchnia sekcyjna powierzchni międzyfazowej = 92 x 240 mm²

v_{up} = Shear Stress at the unreinforced interface = P_u / bh / Naprężenie ścinania na niezbrojonej powierzchni międzyfazowej, MPa

v_{ur} = Shear Stress at the reinforced interface = P_u / bh / Naprężenie ścinania na uzbrojonej, powierzchni międzyfazowej, MPa



Rys. 2. Zbrojenie próbki do wypychania

Fig. 2. Reinforcement Details for Push-Off specimen

cement through the shear interface. The reinforcement in the form of closed links across the interface consists of 3 No's of 2-legged 6 mm diameter (percentage of steel of 0.77%) mild steel with yield strength of 250 MPa. 10 mm diameter bars and 6 mm diameter links were provided to resist the flexural failure at the loading point. The details of reinforcements are shown in Fig. 2. After 24 hours of casting, specimens were de-molded and are air-cured for a period of 28 days. The room temperature and relative humidity are 35±2°C and 75% are respectively. Before testing V-Grooves

nię międzyfazową. Zbrojenie w formie zamkniętych połączeń poprzez powierzchnię międzyfazową składało się z 3 z dwoma odgałęzieniami o średnicy 6 mm ze stali niskostopowej, o granicy plastyczności 250 MPa. Zastosowano pręty o średnicy 10 mm i połączenia o średnicy 6 mm w celu przenoszenia zginania, w punkcie obciążenia. Szczegóły zbrojenia pokazano na rysunku 2. 24 godziny po zaformowaniu próbki rozformowywano i przechowywano w powietrzu przez 28 dni, w temperaturze pokojowej $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej 75%. Przed badaniem, z każdej strony próbek do wypychania, wykonywano rowki o głębokości 4 mm wzdłuż płaszczyzny ścinania, w celu uniknięcia uszkodzenia na powierzchni rozdziału.

3.4. Badanie próbek GC do wypychania

Stanowisko do badania próbek do wypychania pokazano na rysunku 3. Próbki obciążano osiowo aż do zniszczenia. Obciążenia niszczące i wytrzymałość na ścinanie podano w tablicy 4.

Próbki do wypychania, niezbrojone i zbrojone przez płaszczyznę międzyfazową uległy zniszczeniu w wyniku rozwoju pęknięć wzdłuż tej płaszczyzny. Typowe uszkodzenie próbek do wypychania pokazano na rysunku 4. Na podstawie obciążenia osiowego przy zniszczeniu [obciążenie niszczące] wytrzymałość na ścinanie obliczono dzieląc to obciążenie przez część krzyżującej się powierzchni międzyfazowej.

4. Wyniki i dyskusja

Próbki GC do wypychania ulegały zniszczeniu w wyniku rozwoju pęknięcia wzdłuż powierzchni międzyfazowej. W przypadku próbek niezbrojonych przez powierzchnię międzyfazową zniszczenie następowało nagle, podczas gdy w zbrojonej powierzchni międzyfazowej widoczne pęknięcia wzdłuż płaszczyzny ścinania występowały po około 70 do 80 procentach od niszczącego obciążenia. Dzięki zastosowaniu odpowiedniego zbrojenia w obu połówkach próbek do wypychania, żadna z próbek nie uległa zniszczeniu przedwcześnie, w wyniku zgięcia poziomego lub pionowego ramienia próbki do wypychania. Z obserwacji doświadczalnych wielkości wytrzymałości ścinania podanych w tablicy 4 wynika, że wytrzymałość na ścinanie niezbrojonych GC wynosi około 10% ich wytrzymałości na ściskanie. W przypadku zbrojonych ścinanych

of 4 mm deep were made on either side of the push-off specimen along the shear plane, for ensuring the failure at the interface.

3.4. Testing of GPC Push-off Specimens

The test set up in testing the push-off specimens is shown in Fig. 3. The specimens were loaded axially, until failure. The failure loads and the shear strength values are given in Table 4.

The push-off samples with and without reinforcement through the interface, tested has failed by developing a crack along the interface. The typical failure in the push-off specimens is shown in Fig. 4. From the axial loads at failure [Ultimate load] the shear strength was calculated by dividing the ultimate load with the cross-sectional area of the interface.

4. Results and discussion

The GPC push-off specimens had failed by developing the crack along the interface. In the case of specimens with no reinforcement across the interface the failure occurred suddenly while in the reinforced interfaces the visible cracking along the shear plane was noticed at about 70 to 80 percent of the ultimate loads. Due to the provision of suitable reinforcement in the both halves of push-off specimen, none of the specimens have failed prematurely due to flexure in horizontal or vertical arms of the push-off specimen. From the observation of the experimental shear strength values given in Table 4 indicate that the shear strength of unreinforced GPC is about 10% of its corresponding compression strength. In the case of reinforced shear interfaces the shear strength has increased and is about 24% of the respective compression strength. In general the shear strength of monolithic interface in GPC has increased with an increase in the compression strength of GPC and percent of reinforcement across the interface. In the un-cracked stage, the shear across the interface in push-off specimen is in general expected to be resisted mainly by the cohesion due to aggregate interlock of the concrete. After the cracking at the shear plane, the cohesion of concrete reduces and the other actions such as friction and dowel action of reinforcement across the interface may come into action. At ultimate the load is mainly resisted by the Dowel's action of the reinforcement across the interface.



Rys. 3. Stanowisko badawcze

Fig. 3. Test Setup



Fig. 4. Failure pattern for unreinforced and reinforced across shear plane

Rys. 4. Zniszczone próbki niezbrojone i zbrojone przez płaszczyznę ścinania

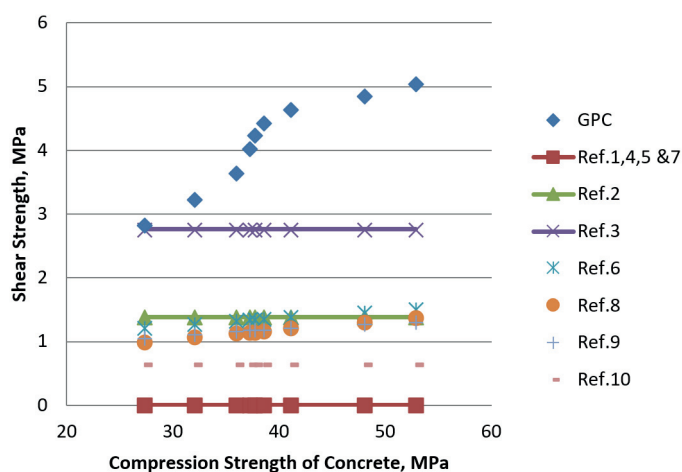
Tablica 5 / Table 5

PORÓWNANIE DOŚWIADCZALNEJ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE GC Z WYTRZYMAŁOŚCIĄ NA ŚCINANIE PRZEWIDZIANĄ PRZEZ KODY PROJEKTOWE / RÓWNANIA
 COMPARISON OF EXPERIMENTAL SHEAR STRENGTH OF GPC WITH THE SHEAR STRENGTH PREDICTED BY THE DESIGN CODES / EQUATIONS

Specimen ID Oznaczenie próbki	GC GPC	Ref.1		Ref.2		Ref.3		Ref.4		Ref.5		Ref.6		Ref.7		Ref.8		Ref.9		Ref.10	
		vu1	vup/ vu1	vu2	vup/ vu2	vu3	vup/ vu3	vu4	vup/ vu4	vu5	vup/ vu5	vu6	vup/ vu6	vu7	vup/ vu7	vu8	vup/ vu8	vu9	vup/ vu9	vu10	vup/ vu10
GANRS1	2.82	--	--	1.38	2.04	2.76	1.02	--	--	--	1.20	2.34	--	--	0.98	2.89	1.05	2.68	0.65	4.34	
GANRS2	3.22	--	--	1.38	2.34	2.76	1.17	--	--	--	1.27	2.54	--	--	1.06	3.05	1.11	2.90	0.65	4.96	
GANRS3	3.63	--	--	1.38	2.63	2.76	1.31	--	--	--	1.32	2.75	--	--	1.12	3.24	1.16	3.14	0.65	5.58	
GBNRS1	4.03	--	--	1.38	2.92	2.76	1.46	--	--	--	1.34	3.02	--	--	1.14	3.53	1.17	3.45	0.65	6.20	
GBNRS2	4.23	--	--	1.38	3.07	2.76	1.53	--	--	--	1.34	3.15	--	--	1.15	3.69	1.17	3.60	0.65	6.51	
GBNRS3	4.43	--	--	1.38	3.21	2.76	1.61	--	--	--	1.35	3.28	--	--	1.16	3.82	1.18	3.75	0.65	6.82	
GCNRS1	4.64	--	--	1.38	3.36	2.76	1.68	--	--	--	1.38	3.36	--	--	1.20	3.87	1.21	3.84	0.65	7.13	
GCNRS2	4.84	--	--	1.38	3.50	2.76	1.75	--	--	--	1.45	3.32	--	--	1.30	3.73	1.27	3.80	0.65	7.44	
GCNRS3	5.04	--	--	1.38	3.65	2.76	1.83	--	--	--	1.50	3.36	--	--	1.36	3.71	1.31	3.84	0.65	7.75	
GAWRS1	6.45	2.69	2.40	2.92	2.21	4.30	1.50	3.24	1.99	4.18	2.54	2.54	2.69	2.40	1.94	3.33	2.39	2.69	2.40	2.69	
GAWRS2	7.05	2.69	2.62	2.92	2.42	4.30	1.64	3.51	2.01	4.52	2.66	2.65	2.69	2.62	2.02	3.50	2.50	2.82	2.40	2.94	
GAWRS3	8.46	2.69	3.15	2.92	2.90	4.30	1.97	3.72	2.28	4.79	2.94	2.88	2.69	3.15	2.08	4.07	2.77	3.05	2.40	3.53	
GBWRS1	9.67	2.69	3.60	2.92	3.32	4.30	2.25	3.78	2.56	4.87	2.96	3.26	2.69	3.60	2.10	4.60	2.80	3.46	2.40	4.03	
GBWRS2	9.67	2.69	3.60	2.92	3.32	4.30	2.25	3.81	2.54	4.91	2.97	3.25	2.69	3.60	2.11	4.59	2.81	3.45	2.40	4.03	
GBWRS3	10.08	2.69	3.75	2.92	3.45	4.30	2.35	3.85	2.62	4.96	2.99	3.37	2.69	3.75	2.12	4.75	2.82	3.57	2.40	4.20	
GCWRS1	10.28	2.69	3.82	2.92	3.52	4.30	2.39	3.97	2.59	5.12	2.99	3.38	2.69	3.82	2.16	4.76	2.87	3.58	2.40	4.29	
GCWRS2	10.93	2.69	4.07	2.92	3.75	4.30	2.54	4.30	2.54	5.54	3.17	3.44	2.69	4.07	2.26	4.85	2.99	3.65	2.40	4.56	
GCWRS3	11.69	2.69	4.35	2.92	4.01	4.30	2.72	4.51	2.59	5.81	3.26	3.59	2.69	4.35	2.32	5.04	3.07	3.81	2.40	4.87	

Reference / Odnosiłniki:

1. Birkeland & Birkeland (13)	5. Walraven et al (17, 18)	9. FIB Model Code (22, 23)
2. Mattock & Hawkins (14)	6. Randl (19)	10. CSA A23.3 (24)
3. Mattock (15)	7. ACI 318 (20)	
4. Loov (16)	8. Euro code 2 (21)	



Rys. 5. Porównanie wytrzymałości na ścinanie i ściskanie GC bez wzmocnienia w płaszczyźnie ścinania

Fig. 5. Comparison of shear strength and compressive strength of GPC unreinforced across the interface

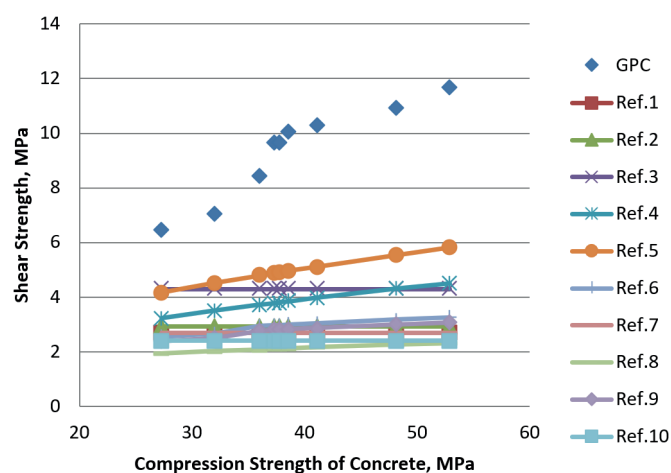
powierzchni międzyfazowych wytrzymałość na ścinanie wzrosła i wynosi około 24% w stosunku do wytrzymałości na ściskanie. Generalnie wytrzymałość na ścinanie monolitycznej powierzchni międzyfazowej GC wzrosła ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie GC i udziału zbrojenia przechodzącego przez powierzchnię międzyfazową. W stanie niespękanym, ścinanie poprzez płaszczyznę międzyfazową próbki do wypychania generalnie oczekuje się, że jest ona wytrzymała głównie dzięki kohezji spowodowanej ząbieniu się kruszywa w betonie. Po popękaniu w płaszczyźnie ścinania, kohezja betonu ulega zmniejszeniu i inne zjawiska takie jak tarcie i akcja Dowela zbrojenia poprzez płaszczyznę międzyfazową mogą mieć miejsce. Ostatecznie obciążenie jest głównie przenoszone dzięki akcji Dowela, przez zbrojenie przechodzące przez powierzchnię międzyfazową.

W tabelicy 5 pokazano porównanie wytrzymałości na ścinanie GC, z wytrzymałością na ścinanie normalnego betonu, przewidywaną na podstawie różnych modeli ścinania/ równania ścinania dostępne w literaturze. Porównania pokazano także na rysunkach 5 i 6 dla niezbrojonego i zbrojonego betonu na płaszczyznach międzyfazowych ścinania. Te porównania wykazały, że w przypadku dostępnych normalnych betonów modele wytrzymałości na ścinanie są bardzo zachowawcze w oszacowaniu wytrzymałości na ścinanie niezbrojonych i zbrojonych, monolitycznych międzyfazowych płaszczyzn ścinania w przypadku GC. Modele Mattocka (15) i Walravena (17) wydają się zapewniać lepsze przewidywania wytrzymałości ścinania GC, w przypadku niezbrojonych i zbrojonych monolitycznych płaszczyzn międzyfazowych.

5. Wnioski

Następujące wnioski wynikają z porównawczych badań wytrzymałości na ścinanie monolitycznych płaszczyzn międzyfazowych GC.

1. Wytrzymałość na ścinanie monolitycznych GC wzrasta ze wzrostem ich wytrzymałości na ściskanie



Rys. 6. Porównanie wytrzymałości na ścinanie i na ściskanie GC wzmocnionego w poprzek płaszczyzny ścinania

Fig. 6. Comparison of shear strength and compressive strength of GPC reinforced across the interface

Table 5 presents the comparison of shear strength of GPC obtained with the shear strength of normal concrete predicted by different shear models/shear equations available in the literature. The comparison is also shown in Figs. 5 and 6 for the unreinforced and reinforced shear interfaces. The comparative study indicates that the available normal concrete shear strength prediction models are highly conservative in estimating the shear strength of unreinforced and reinforced monolithic shear interfaces in GPC. The models by Mattock (15) and Walraven et al (17) seem to give a better prediction of shear strength of GPC in the case of unreinforced and reinforced monolithic interfaces respectively.

5. Conclusions

The following are the conclusions arrived at after the comparative study of shear strength of monolithic GPC interface.

1. The shear strength of monolithic GPC interface has increased with increase in compressive strength of GPC.
2. The average shear strength of unreinforced and reinforced monolithic GPC interface is about 10% and 24% of respective compressive strength of GPC.
3. The available normal concrete shear strength prediction models are highly conservative in estimating the shear strength of unreinforced and reinforced monolithic shear interfaces in GPC.
4. The models by Mattock (16) and Walraven et al (18) seem to give a better prediction of shear strength of GPC in the case of unreinforced and reinforced monolithic interfaces respectively.

Conflict of Interest

On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

2. Średnia wytrzymałość na ścinanie niezbrojonych i zbrojonych monolitycznych płaszczyzn międzyfazowych GC wynosi około 10% i 24%, odpowiednio wytrzymałości na ściskanie GC.
3. Dostępne wytrzymałości na ścinanie normalnego betonu, przewidywane na podstawie modeli, są bardzo konserwatywne w szacowaniu wytrzymałości na ścinanie niezbrojonych i zbrojonych monolitycznych, ścinanych płaszczyzn międzyfazowych GC.
4. Modele Mattocka (16) i Walravena et al (18) wydają się dawać lepsze oszacowanie wytrzymałości na ścinanie GC, w przypadku niezbrojonych i zbrojonych monolitycznych płaszczyzn międzyfazowych.

Konflikt interesów

Jako autor korespondencyjny, w imieniu wszystkich autorów, stwierdzam, że nie ma konfliktu interesów.

Literatura / References

1. H. Kuhl, Zement Chemie. Verlag Technik, Berlin (1952).
2. J. Davidovits, Chemistry of geopolymeric systems, terminology, Geopolymer, **99**(292), 9-39 (1999).
3. A. Palamo, M.W. Grutzeck, M.T. Blanco, Alkali-activated fly ashes, Cem. Concr. Res. **29**(8), 1323-1329 (1999).
4. A.V. Lăzărescu, H. Szilagyi, C. Baeră, A. Ioani, The Effect of Alkaline Activator Ratio on the Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Paste, IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. **209**(1), 012064 (2017).
5. R.R. Lloyd, J.S. Van Deventer, The microstructure of geopolymers synthesized from industrial wastes, in Proc. 1st Int. Conf. on Engineering for Waste Treatment (WasteEng), 17-19 (2005).
6. B.V. Rangan, Fly ash based Geopolymer concrete, Research Report GC 4, Eng Faculty, Curtin University of Technology, Perth, Australia (2008).
7. G.M. Rao, T.G. Rao, Final setting time and compressive strength of fly ash and GGBS-based Geopolymer paste and mortar, Arab. J. Sci. Eng. **40**(11), 3067-3074 (2015).
8. B. Sumanth Kumar, D. Rama Seshu, A Review on Parametric study of Geopolymer Concrete, 2nd Int. Conf. on Advances in Concrete, Structural and Geotechnical Eng (ACSGE-2018), BITS, Pilani, Feb 26-27, 2018, 773-777 (2018).
9. J.S. Van Deventer, J.L. Provis, P. Duxson, D.G. Brice, Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. Waste Biomass Valor. **1**, 145-55 (2010).
10. P. Duxson, J.L. Provis, G.C. Lukey, J.S.J van Deventer, The role of inorganic polymer technology in development of 'green concrete'. Cem. Concr. Res. **37**, 1590-1597 (2007).
11. G. Habert, J.B. d'Espinose de Lacaillerie, N. Roussel, An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. J. Clean. Prod. **19**, 1229-1238 (2011).
12. B.C. McLellan, R.P. Williams, J. Lay, A. van Riessen, G.D. Corder, Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement, J. Clean. Prod. **19**, 1080-90 (2011).
13. L. K. Turner, F. G. Collins, Carbon dioxide equivalent (CO_{2,e}) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete, Constr. Build. Mater. **43**, 125-130 (2013).
14. P.W. Birkeland, H.W. Birkeland, Connections in precast concrete construction, ACI J. Proc. **63**(3), 345-368 (1966).
15. A.H. Mattock, N.M. Hawkins, Shear transfer in reinforced concrete-recent research, PCI J. **17**(2), 5-75 (1972)
16. A.H. Mattock, Shear transfer in concrete having reinforcement at an angle to the shear plane, Special Publication, 42, 17-42 (1974).
17. R.E. Loov, Design of precast connections. In a seminar organized by Compa International Pte, Ltd (1978).
18. J.C. Walraven, Fundamental analysis of aggregate interlock, J. Struct. Div. **107**(11), 2245-2270 (1981).
19. J.W. Frenay, A.F. Puijssers, H.W. Reinhardt, J.C. Walraven, Shear transfer in high-strength concrete, Proc. Symp. on Utilization of High-Strength Concrete', Stavanger, Norway, 225-235 (1987).
20. N. Randl, Investigations on transfer of forces between old and new concrete at different joint roughness', Doctoral dissertation, University of Innsbruck, Austria (1997).
21. American Concrete Institute, Building code requirements for reinforced concrete, ACI 318-14 (2014).
22. CEN, EN 1992-1-2 - Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design (2004).
23. Precast/Prestressed Concrete Institute, PCI Design Handbook, 7th edn. Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, USA (2010).
24. P. Beverly (ed.), Fib model code for concrete structures, 2010, Ernst & Sohn (2013).
25. Canadian Standards Association A23. 3-14: Design of concrete structures (sixth ed.), Mississauga, Ontario (2014).
26. A.R. Anderson, Composite designs in precast and cast-in-place concret, Progress. Archit. **41**(9), 172-179 (1960).
27. J. Xiao, C. Sun, D.A. Lange, Effect of joint interface conditions on shear transfer behavior of recycled aggregate concrete, Constr. Build. Mater. **105**, 343-355 (2016).
28. IS: 383: Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete (1970)
29. G.M. Rao, T.G. Rao, D. Ramaseshu, A. Venkatesh, Mix proportioning of Geopolymer concrete', Cement Wapno Beton, **21**(4), 274-285 (2016).