

Prof. Rama Seshu. D.

Professor of Civil Engineering, National Institute of Technology, Warangal, Telangana, India

Badania przyczepności betonu zwykłego i geopolimerowego do pręta stalowego

A comparative study on bond strength of normal and geopolymer concrete to steel bar

Słowa kluczowe: geopolimer, beton, przyczepność, poślizg pręta zbrojeniewego

Keywords: geopolymer, concrete, bond strength, bond slip

1. Wprowadzenie

Beton zawierający cement portlandzki dodawany w roli spoiwa jest najpowszechniej stosowanym materiałem budowlanym na całym świecie. Globalne zużycie betonu rośnie również wraz ze wzrostem potrzeb w zakresie poprawy infrastruktury w takich krajach jak Indie czy Chiny. Zanieczyszczenie środowiska jest obecnie jednym z głównych problemów. Produkcja jednej tony cementu portlandzkiego obejmująca prażenie surowców, w tym dekarbonizację kamienia wapiennego wiąże się z emisją około 0,8 tony CO₂, co prowadzi do globalnego ocieplenia.

Popiół lotny to odpad powstający podczas spalania węgla, natomiast mielony granulowany żużel wielkopiecowy to produkt uboczny powstający podczas produkcji żelaza. W związku z ich dostępnością na całym świecie, ich utylizacja pozostaje wyzwaniem. Zrównoważone budownictwo ma na celu wykorzystanie tych odpadów jako materiałów budowlanych. W celu ochrony środowiska naturalnego przed globalnym ociepleniem oraz zapobiegania dalszemu wyczerpywaniu zasobów naturalnych, jako materiał alternatywny można stosować beton geopolimerowy, w którym takie materiały odpadowe jak popiół lotny czy granulowany żużel wielkopiecowy całkowicie zastępują cement.

1. Introduction

The most commonly used construction material in the world is concrete which traditionally uses ordinary Portland cement (OPC) as the binding agent. Also concrete consumption is higher and higher worldwide as infrastructure need in countries like India and China is increasing. Environmental pollution is one of the major problems today. The production of one ton of Portland clinker by burning of fuel and decomposition of limestone emits around 0.8 ton of CO₂ on one ton of clinker, thus leading to global warming. Fly ash is produced as a residue of coal combustion and the granulated blast furnace slag [GBS] is obtained as a byproduct from iron production. Due to its availability worldwide, disposal remains a challenge. Sustainable construction practice aims at utilizing these waste materials as construction material. To save the environment from global warming and to prevent further depletion of natural resources, geopolymer concrete [GPC] is an alternative as it can totally replaces cement with waste materials such as fly ash and ground granulated blast furnace slag [GGBS].

Non-reactive silicate and alumina used for the binder production are activated applying alkaline liquids such as NaOH and Na₂SiO₃ or KOH and K₂SiO₃ and they are reacting with these water solutions. These geopolymer binder by mixing with aggregate and water can

Niereaktywne krzemiany i gliny w spoiwie aktywowane są roztworami alkalicznymi NaOH i Na₂SiO₃ lub KOH i K₂SiO₃, dzięki czemu otrzymuje się spoiwo geopolimerowe reagujące z tymi roztworami wodnymi. Spoiwo to, reagując w mieszaninie z kruszywem, powoduje powstawanie hydratów spajających kruszywo tworząc beton geopolimerowy. Ten rodzaj betonu ma większą wytrzymałość na ściskanie, wykazuje mniejsze pęcznienie, mniejszy skurcz, a także lepszą odporność na korozję kwasową w porównaniu do betonu z cementu portlandzkiego. Aby zapobiec ograniczeniom w stosowaniu geopolimerów, a przede wszystkim konieczności stosowania podwyższonej temperatury podczas twardnienia lub przyspieszenia wiązania, dodaje się granulowany żużel wielkopiecowy, który daje także większą wytrzymałość w wyniku powstawania fazy C-S-H. W celu poprawy urabialności można również dodać superplastyfikator.

W dotychczasowych pracach (1-6) wykazano, że beton geopolimerowy można skutecznie stosować jako materiał budowlany. Jego skład fazowy różni się od składu betonu zwykłego, co z kolei rodzi potrzebę oceny wytrzymałości wiązania betonu geopolimerowego ze stałą zbrojeniową, w przypadku stosowania go w konstrukcjach zbrojonych. Przyczepność betonu do stali jest czynnikiem determinującym nośność betonowych konstrukcji zbrojonych. Powstało wiele prac dotyczących przyczepności różnych rodzajów betonu i zbrojenia (7-12). Niemniej jednak niewiele z nich dotyczy przyczepności stali do betonu geopolimerowego (13-14). W niniejszej pracy opisano wyniki badań przeprowadzonych metodą „pull-out” w celu oceny wytrzymałości wiązania stal-beton geopolimerowy.

2. Wytrzymałość połączenia stal-beton

Naprężenia przyczepności to naprężenia ścinające działające na granicy pręta i betonu, które biorą udział w przenoszeniu obciążeń z betonu do stali poprzez adhezję, opór tarcia oraz zazębianie mechaniczne. Przyczepność określają takie czynniki jak stan powierzchni pręta, wytrzymałość betonu oraz efektywna długość wiązania. Połączenie stal-beton obejmuje dwie składowe – siłę zginającą i siłę przyczepności. Stal i beton oddziałują wzajemnie poprzez siłę zginającą, która działa wzdłuż długości pręta. Wiązanie w punkcie odcięcia pręta, które zapobiega poślizgowi między stalą a betonem, jest siłą przyczepności. Długość zakotwienia pręta zbrojeniowego w betonie, która pozwala na efektywne przenoszenie naprężeń z pręta do betonu to długość efektywna [*l_d*]. Zgodnie z normą indyjską IS 456-2000 (20) można ją zapisać jako wzór [1].

$$l_d = \Phi \times f_{st} / 4 \tau_{bd} \quad [1]$$

gdzie: Φ = nominalna średnica pręta, f_{st} = dopuszczalne naprężenie rozciągające w pręcie stalowym, τ_{bd} = założone naprężenie przyczepności.

Wyrażenie określające naprężenie przyczepności można opisać następująco

$$\tau_{bd} = P / (\pi \Phi l_d) \quad [2]$$

produce GPC. GPC shows high compressive strength, lower creep, lower shrinkage and better resistance to acid attack than Portland cement concrete. To avoid limitations such as need for heat curing and setting time delay, GGBS is used which also gives higher strength due to the C-S-H phase formation. Also superplasticizer can be added to improve workability.

Researches (1-6) prove effective use of GPC as construction material. As the phase composition of GPC varies from ordinary concrete, there is a need to evaluate the strength of bond between GPC and reinforced steel so that to apply it for reinforced concrete structures. The bond behavior determines load carrying capacity of reinforced concrete structures. Experimental data available on bond strength of various types of concrete and reinforcement are numerous (7-12). However, this bond studies in the case of GPC are very limited (13-14). This paper describes pull out test results which was carried out to determine the bond strength of GPC.

2. Bond strength

Bond stress is the shear stress that acts at the interface of bar and concrete and helps in transfer of load from concrete to steel due to adhesion, frictional resistance and mechanical resistance. Bond strength is determined by factors like surface condition of bar, concrete strength and development length. Flexural bond and anchorage bond are the two types of bond. Steel and concrete act together by flexural bond which acts along the bar length. The bond at bar cut off point that causes slippage between steel and concrete is anchorage bond. The length of the extended bar in concrete to transmit force effectively from bar to concrete is known as development length (*l_d*). As per IS 456-2000 (20):

$$l_d = \Phi \times f_{st} / 4 \tau_{bd} \quad [1]$$

where: Φ = nominal diameter of the bar, f_{st} = allowable tensile stress in the steel bar and τ_{bd} = design bond stress.

The expression for bond stress is given by the formula:

$$\tau_{bd} = P / (\pi \Phi l_d) \quad [2]$$

where: P = applied load, Φ = nominal diameter of the bar, l_d = development length

3. Methods

The aim of this study is to find the bond strength of GPC by using pull-out test. A total of 27 GPC prisms of 100 x 100 x 200 mm³ size each were cast with 16 mm diameter TMT* rod embedded in it to conduct the pull-out test. Three different grades of GPC viz. G20, G35 and G50 were used in the investigation. In each grade 9 prisms were produced. Three different embedment lengths of 16 mm diameter TMT rod into the GPC prisms viz. 75 mm, 100 mm and 125 mm, was used in the investigation. After twenty eight days,

* TMT = thermo-mechanically treated

gdzie: P = przyłożone obciążenie, Φ = nominalna średnica pręta, l_d = długość efektywna.

3. Metody

Badania miały na celu określenie wytrzymałości wiązania betonu geopolimerowego ze stalą poprzez zastosowanie metody „pull-out”. Metodą tą zbadano 27 belek wykonanych z betonu geopolimerowego o wymiarach 100x100x200 mm³, w których zakotwiono pręty po termomechanicznej obróbce o średnicy 16 mm. W badaniach zastosowano trzy różne klasy betonu geopolimerowego, a mianowicie G20, G35 i G50. Przygotowano po 9 belek z każdej z tych klas. Zastosowano także trzy różne długości zakotwienia prętów o średnicy 16 mm w belkach z betonu geopolimerowego, a mianowicie 75 mm, 100 mm i 125 mm. Przyczepność zbadano po 28 dniach twardnienia, stosując metodę „pull-out”. Oznaczono także w przypadku wszystkich trzech klas betonu wytrzymałość na ścislenie – na kostkach o wymiarach 150 x 150 x 150 mm³ oraz wytrzymałość na zginanie przy rozłupywaniu – na walcach o wymiarach 150 x 300 mm³. Opracowano równanie wyrażające wytrzymałość wiązania betonu geopolimerowego ze stalą, którego poprawność potwierdzono przeprowadzając badania metodą „pull-out” na dodatkowej serii belek z betonu geopolimerowego. Wytrzymałość wiązania stali z betonem geopolimerowym porównano z analogicznie przygotowanymi próbkami z betonu zwykłego.

4. Materiały

W badaniach zastosowano cement portlandzki klasy 53 spełniający wymagania normy indyjskiej IS 12269-2013 (16). Stosowano drobne kruszywo należące do kategorii 2, zgodnie z normą indyjską IS 383-2016 (17). Granit kruszony stanowił kruszywo grube. Granit ten otrzymano z przedsiębiorstwa zajmującego się kruszeniem surowców; miał on wymiary ziaren mniejsze od 20 mm. Kruszywo grube przesiano przez sита o wymiarach oczka 20 mm, 16 mm, 12,5 mm, 10 mm oraz 4,75 mm. Kruszywo było zgodne z normą indyjską IS 383.

Krzemionkowy popiół lotny spełniający wymagania normy IS 3812 [część-1]-2013 zastosowano jako jeden z podstawowych materiałów (18). Popiół lotny zawierał 64% krzemionki, a suma zawartości tlenków krzemu, glinu i żelaza wynosiła 93%, zawartość tlenku wapnia wynosiła 1,7%, tlenku magnezu 1,0%, SO₃ 0,73%, wody i soli rozpuszczalnych 0,04%, pH = 10, a strata prażenia 2,12%. Zastosowano granulowany żużel wielkopiecowy spełniający wymagania normy IS 12089-1987 (19), uzyskany z cementowni Andhra Cements, Vishakhapatnam w Indiach; jego ciężar właściwy wynosił 2,90 g/cm³. Zawierał on 66% CaO+MgO+SiO₂, 14% tlenku magnezu, 2,0% siarki, 0,1% chlorków, 2,0% manganu, a strata prażenia wynosiła około 3%.

W celu poprawy urabialności mieszanki do betonu dodano superplastyfikator CONPLAST SP430.

The bond strength was determined applying pull-out tests. Also the cubes of size 150 x 150 x 150 mm³ each and the cylinders of size 150 x 300 mm³ each were cast and tested for the compressive strength and split tensile strength measurements, for each of the three grades concrete. The analytical equation for bond strength of GPC was developed and was validated by conducting pull-out tests independent set of GPC prisms. The bond strength of GPC was compared with that of normal concrete [NC].

4. Materials

Cement used in the investigation was 53 Grade Ordinary Portland cement (16) conforming to IS 12269-2013. The fine aggregate conforming to Zone-2 according to IS 383-2016 (17) was used. Crushed granite was used as coarse aggregate. The coarse aggregate was obtained from a local Crushing Unit; it had 20 mm nominal size. 20 mm well graded aggregate according to IS 383 was used in this investigation. In the present experimental work, siliceous fly ash conforming to IS 3812 (part-1)-2013 was used as the base material (18). The chemical composition of this fly ash was as follows:

SiO₂ = 64%,

SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ = 92.7%,

CaO = 1.71% ,

MgO = 1.0%,

SO₃ = 0.73% ,

H₂O = 0.04%,

Loi = 2.12%

The pH value of this fly ash was 10.

GGBS conforming to IS 12089-1987 (19) used in this experiment was obtained from Andhra Cements, Vishakhapatnam, India It has a specific gravity of 2.90.

Its chemical composition was as follows:

CaO + SiO₂ = 52%, MgO = 14%, SO₃ = 2.0% , Cl = 0.1% , Mn₂O₃ = 2.0% , Loi 3.

The mix design of geopolymer concrete is similar to ordinary concrete but cement is replaced by binder and water with alkaline solution. Sodium hydroxide solution and sodium silicate solution was used as alkaline activators. Geopolymer binder was produced by total replacement of cement with fly ash and GGBS. The ratio of sodium silicate solution [Na₂SiO₃] to sodium hydroxide [NaOH] was 2.5 by mass. 320 grams of sodium hydroxide pellets were dissolved in water to make one liter of NaOH solution with concentration of 8 molarities. Preparation of alkaline solution is an exothermic reaction and hence it was prepared one day before mixing with aggregate. The mix proportion details for three different grades of GPC are given in the Table 1.

The mix proportions for three different grades of normal concrete [NC] are given in Table 2.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANEK Z BETONU GEOPOLIMEROWEGO, kg/m³

THE MIX PROPORTION OF GEOPOLYMER CONCRETE, kg/m³

Klasa betonu Concrete grade	Popiół lotny Fly ash	Żużel wielkopieczowy GGBS	Kruszywo drobne Fine aggregate	Kruszywo grube Coarse aggregate	Roztwór alkaliczny Alkaline liquid L/m ³
G20	248.68	106.58	763.68	1076.32	213.16
G35	272.84	181.89	768.42	982.11	204.73
G50	225.27	225.27	761.58	973.16	225.26

Do wykonania pomiarów „pull out” zastosowano stalowe, proste i niepokryte rdzą pręty po termo-mechanicznej obróbce o średnicy 16 mm, poddane termomechanicznej obróbce, których granica plastyczności wynosi 550 N/mm².

Skład betonu geopolimerowego jest podobny jak betonu zwykłego, jednak w tym przypadku dodatek cementu zastąpiono spoiwem geopolimerowym i alkalicznym roztworem wodnym. Jako aktywatory alkaliczne zastosowano roztwór wodorotlenku sodu i krzemianu sodu. W przygotowanym spoiwie dodatek cementu całkowicie zastąpiono mielonym granulowanym żużlem wielkopieczowym i popiołem lotnym. Stosunek masowy roztworu krzemianu sodu [Na₂SiO₃] do wodorotlenku sodu [NaOH] wynosił 2,5. 320 gramów wodorotlenku sodu w postaci granulatu rozpuszczono w wodzie, otrzymując jeden litr 8 M roztworu NaOH. Rozpuszczanie NaOH jest procesem egzotermicznym i z tego powodu roztwór ten sporządzono jeden dzień przed przygotowaniem mieszanki. W tablicy 1 podano składy mieszanek trzech różnych klas betonu geopolimerowego.

W tablicy 2 podano składy mieszanek trzech różnych klas betonu zwykłego.

Wytrzymałość na ściskanie [*f_c*] i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [*f_t*] betonu geopolimerowego oraz zwykłego podano w tablicy 3.

Mieszanka popiołu lotnego i żużla wielkopieczowego zastosowana do przygotowania betonu geopolimerowego zapewniła odpowiednią wytrzymałość bez konieczności stosowania podwyższonych temperatur podczas twardnienia betonu. W badaniach zastosowano trzy klasy betonu, a mianowicie G20, G35 i G50, których skład opracowano metodą prób i błędów. Próbkę wszystkich trzech klas betonu osiągnęły założoną wytrzymałość na ściskanie.

5. Formowanie i dojrzewanie próbek

Mieszanki betonowe przygotowano w obrotowym mieszalniku talerzowym o pojemności 100 kg. Najpierw zmieszano materiały sypkie, czyli kruszywo i spoiwo. Następnie dodano roztwór alkaliczny oraz superplastifikator i kontynuowano mieszanie przez 5 do 7 minut. Pręty o odpowiedniej długości umieszczano w formach, a długość zakotwienia dokładnie kontrolowano. Długość ta wynosiła 75 mm, 100 mm i 125 mm. Poza długością zakotwienia

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD MIESZANEK Z BETONU ZWYKŁEGO, kg/m³

THE MIX PROPORTION OF NORMAL CONCRETE, kg/m³

Klasa betonu Concrete grade	Cement	Kruszywo drobne Fine aggregate	Kruszywo grube Coarse aggregate	Woda Water L/m ³
N20	385.23	600.96	1221.19	192.62
N35	560.75	482.25	1171.97	235.51
N50	555.55	394.44	1272.22	177.77

Tablica 3 / Table 3

WYTRZYMAŁOŚĆ BETONU GEOPOLIMEROWEGO I ZWYKŁEGO, MPa

THE STRENGTH OF GEOPOLYMER CONCRETE AND NORMAL CONCRETE, MPa

Klasa betonu geopolimerowego GPC grade	<i>f_c</i>	<i>f_t</i>	Klasa betonu zwykłego NC grade	<i>f_c</i>	<i>f_t</i>
G20	25.77	1.92	N20	35.25	2.89
G35	39.21	2.27	N35	45.7	3.21
G50	56.36	2.55	N50	54.96	4.02

The compressive strength (*f_c*) and split tensile strength (*f_t*) of geopolymer concrete and of normal concrete used in the investigation are given in Table 3.

The combination of fly ash and GGBS used for GPC production has assured the satisfactory levels of compressive strength without the need for any heat curing. In the present study three grades of concrete of GPC viz. G20, G35 and G50 were developed based on trial and error method. All the three grades were assuring the compressive strength results.

CONPLAST SP430 was used as superplasticizers to improve workability. Low calcium Class F fly ash was used. The fine aggregate conforming to Zone-2 according to IS: 383 was used. Coarse aggregates sieved through sieve sizes of 20 mm, 16 mm, 12.5 mm, 10 mm and 4.75 mm were used. Rust free and straight

uwzględniono także długość niezbędną do zamocowania uchwytu górnego przyrządu do badań wynoszącą 100 mm oraz długość obejmującą dolną płytę dociskową wynoszącą 350 mm. Próbki dojrzewały przez 28 dni w temperaturze pokojowej i wilgotności względnej wynoszącej 60%.

6. Badania próbek

Badania wytrzymałości połączenia stal-beton przeprowadzono zgodnie z normą indyjską IS 2770-1997 (15). W centralnej części betonowych belek umieszczono żebrowany stalowy pręt zbrojeniowy o średnicy 16 mm. Wszystkie próbki badano aż do zerwania połączenia pomiędzy prętem a matrycą cementową. Rejestrowano największe obciążenie przy zerwaniu połączenia oraz maksymalny poślizg. Na rysunku 1 pokazano schemat przenoszenia obciążenia w belce. Wszystkie próbki uległy uszkodzeniu, które obejmowało pionowe pęknięcia wzdłuż długości zakotwienia pręta. Po 28 dniach przeprowadzono badania metodą wrywania na wszystkich próbkach betonu geopolimerowego z zastosowaniem uniwersalnego przyrządu do badań metodą rozciągania o zakresie do 100 ton. Badanie rozciągania pręta o średnicy 16 mm przeprowadzono osobno, mierząc maksymalne wydłużenie pręta [Δe] poprzez ustawienie w centrum pręta tensometru, którego skala obejmuje 200 mm z dokładnością do 0,002 mm. Całkowite przesunięcie ramy przyrządu [Δa] zmierzono za pomocą czujnika pomiarowego o dokładności 0,01 mm umieszczonego w górnej części głównego ramienia przyrządu. Odczyty czujnika następowały przy zmianie obciążenia co 0,1 tony. Obciążenie w postaci statycznej energii jest przenoszone przez pręt do próbki, co powoduje wydłużenie pręta, gdyż absorbuje on taką samą ilość energii. Zatem odczyt czujnika wskazuje zarówno poślizg w próbce, jak i wydłużenie pręta. Tak więc poślizg w próbce [Δs] można zapisać następująco:

$$\Delta s = \Delta a - \Delta e \quad [3]$$

gdzie: Δe = całkowite wydłużenie pręta, Δa = całkowite przesunięcie ramy przyrządu.

7. Wyniki i dyskusja

7.1. Porównanie wytrzymałości połączenia stal-beton w próbkach z betonu geopolimerowego i zwykłego

Wyniki przyczepności betonu do stali zestawiono w tablicy 4 wraz z wynikami wytrzymałości na ściskanie próbek betonu geopolimerowego oraz zwykłego. Długość zakotwienia pręta była stała w przypadku obu rodzajów betonu i wynosiła 100 mm. Uzyskane wyniki wykazały, że wytrzymałość połączenia stal-beton rośnie wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie betonu.

W celu porównania, wartości przyczepności znormalizowano poprzez określenie „współczynnika wiązania [K]”. Współczynnik ten uzyskuje się poprzez podzielenie przyczepności przez pierwiastek kwadratowy z wytrzymałości na ściskanie betonu. W tablicy 5

thermo-mechanically treated TMT 16 mm steel bars having yield strength of 550 N/mm² were used.

5. Casting and curing of specimens

For concrete mix preparation the rotating drum type 100 kg capacity pan mixer was used. All dry materials i.e. aggregate and binder was mixed in pan; then alkaline liquid and superplasticizers were added and mixing continued for 5 to 7 minutes. Bars of suitable length were put in prisms and embedded length was controlled carefully. An embedment length of 75 mm, 100 mm and 125 mm has been adopted. Excluding embedded length a grip length of 100 mm for fixing and 350 mm for lower platen coverage was considered. The specimens were allowed for 28 days ambient curing at room temperature and 60% of RH.

6. Testing of specimens

The bond strength test was carried out according to IS 2770-1997 [15]. A 16 mm diameter deformed steel reinforcing bar was embedded into the concrete prism at centre. All specimens were tested up to failure of bar-cement matrix interfacial bond. The peak load at failure of bond and maximum slip was observed. The pattern of load transfer for prisms is shown in Fig.1. All specimens failed with vertical crack along the embedded length of bar with cracking sound. After 28 days, pull out test was carried out in all GPC specimens using 100 ton capacity universal tensile testing machine. Tension test on 16 mm diameter TMT rod was conducted separately measuring the elongation of rod (Δe) by fixing an extensometer at middle of rod with gauge length of 200 mm and precision of 0.002 mm. Total movement (Δa) of the frame was measured by dial gauge with precision of 0.01 mm by fixing it at the top of main arm. For every 0.4 ton increment of load, dial gauge readings was noted. Load as the static mechanical energy will be transferred through bar to specimen which will cause elongation of bar as it absorbs same amount of energy.

Hence dial gauge reading will give both slip in specimen and free bar elongation.

Thus slip (Δs) is given by

$$\Delta s = \Delta a - \Delta e \quad [3]$$

where: Δe = total bar elongation, Δa = total frame movement.

7. Discussion of test results

7.1. Comparison of bond strength of GPC and NC

The bond strength values presented in Table 4 are for concrete compressive strengths of GPC and NC. But the embedment length of the bar is constant at 100mm in both GPC and NC. These results indicate that the bond strength increased with increase of compressive strength of concrete.

Tablica 4 / Table 4

PORÓWNANIE PRZYCZEPNOŚCI STALI DO BETONU GEOPOLIMERO-
WEGO I ZWYKŁEGO DLA DŁUGOŚCI ZAKOTWIENIA PRĘTA = 100 mm
COMPARISON OF BOND STRENGTH OF GPC AND NC FOR EMBED-
MENT LENGTH = 100 mm

Beton geopolimerowy/GPC		Beton zwykły/NC	
f_c MPa	Naprężenia przyczepności Bond stress, σ_b MPa	f_c MPa	Naprężenia przyczepności Bond stress, σ_b MPa
25.77	7.42	35.25	9.76
39.21	7.59	45.7	10.21
56.36	8.13	54.96	11.09

podano współczynniki wiązania dla betonu geopolimerowego i zwykłego. Zależność między współczynnikiem wiązania a wytrzymałością na ściskanie pokazano na rysunku 2.

Wyniki podane w tablicy 4 i na rysunku 2 wykazały, że beton geopolimerowy ma mniejszą wytrzymałość wiązania ze stalą w porównaniu do betonu zwykłego. Istnieje jednak pewne podobieństwo w zmienności współczynnika wiązania zarówno w przypadku betonu geopolimerowego, jak i zwykłego. Mniejsza przyczepność betonu geopolimerowego wskazuje na konieczność zwiększenia długości efektywnej.

7.2. Przyczepność betonu geopolimerowego dla różnych długości zakotwienia

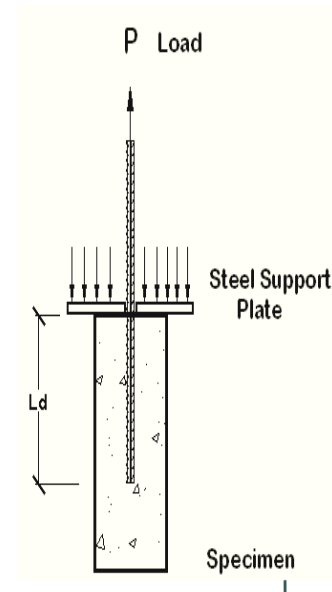
W tablicy 6 podano wyniki wytrzymałości połączenia stal-beton [σ_b] w betonie geopolimerowym uzyskane metodą „pull out”, dla różnych długości zakotwienia. Wyniki podane w tablicy 4 wykazują, że przyczepność betonu geopolimerowego do stali rośnie wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie tego betonu. Tendencja ta utrzymuje się dla wszystkich długości zakotwienia. Niemniej jednak wzrost ten nie jest proporcjonalny do wzrostu wytrzymałości na ściskanie. W związku z tym współczynnik wiązania [K] betonu geopolimerowego obliczono dla różnych długości zakotwienia i różnych wytrzymałości na ściskanie betonu. W tablicy 6 także podano współczynniki wiązania betonu geopolimerowego. Na rysunku 3 pokazano zależność przyczepności od wytrzymałości na ściskanie betonu geopolimerowego, dla różnych długości zakotwienia.

Na rysunku 4 pokazano zależność średniego współczynnika wiązania [K] od wytrzymałości na ściskanie betonu geopolimerowego.

Najlepiej dopasowane równanie uzyskane dla współczynnika wiązania betonu geopolimerowego opisuje wzór [4].

$$\text{Współczynnik przyczepności [K]} = 4.341(f_c)^{-0.355} \quad [4]$$

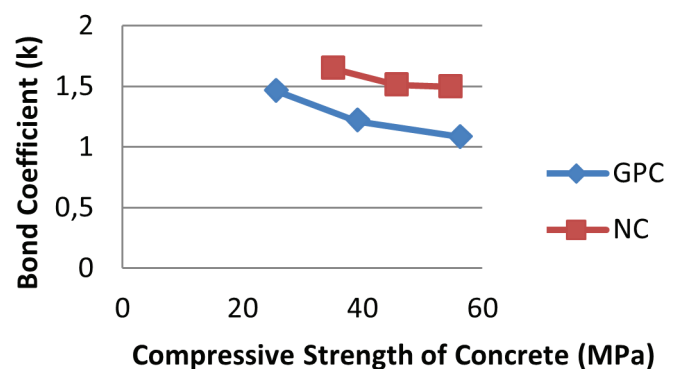
Na rysunku 5 pokazano uszkodzenia badanych próbek. Wystąpiły one w obszarze połączenia stalowych prętów z betonem. Rysunek 6 przedstawia zależność znormalizowanej przyczepności od maksymalnego poślizgu betonu geopolimerowego. Przedstawione



Rys. 1. Schemat przenoszenia obciążenia

Fig. 1. Pattern of load transfer

Bond Coeff. vs Compressive Strength of Concrete



Rys. 2. Zależność współczynnika wiązania od wytrzymałości na ściskanie betonu

Fig. 2. Variation of bond coefficient with compressive strength

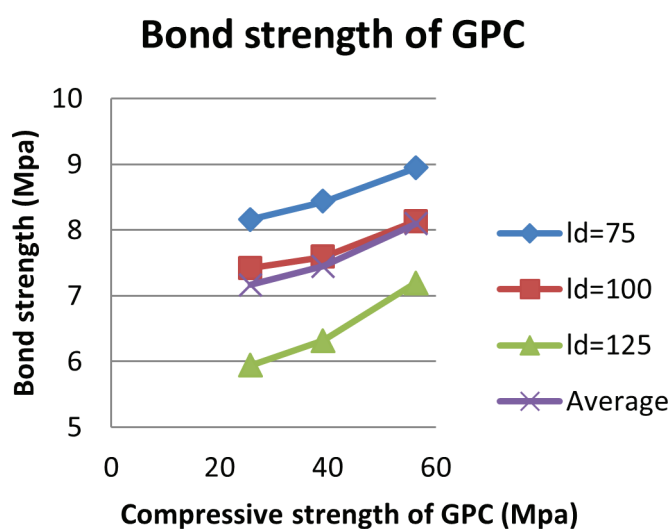
Tablica 5 / Table 5

PORÓWNANIE WSPÓŁCZYNNIKA WIĄZANIA BETONU GEOPOLIMERO-
WEGO I ZWYKŁEGO DLA DŁUGOŚCI ZAKOTWIENIA PRĘTA
= 100 mm

COMPARISON OF BOND COEFFICIENT OF GPC AND NC FOR EM-
BEDMENT LENGTH = 100 mm

Beton geopolimerowy/GPC		Beton zwykły/NC	
f_c MPa	K	f_c MPa	K
25.77	1.46	35.25	1.64
39.21	1.21	45.7	1.51
56.36	1.08	54.96	1.49

Klasa betonu geopolimerowego GPC grade	f _c MPa	Przyczepność dla różnych długości zakotwienia [ld] w MPa Bond strengths for different embedment length [ld] in MPa			Wartość uśredniona Average	
		75 mm	100 mm	125 mm	σ _b	K
G20	25.77	8.16	7.42	5.94	7.17	1.41
G35	39.21	8.43	7.59	6.32	7.44	1.18
G50	56.36	8.94	8.13	7.2	8.09	1.07



Rys. 3. Zależność przyczepności od wytrzymałości na ściskanie betonu geopolimerowego

Fig. 3. The bond strength (σ_b) of geopolymer concrete (GPC)

wyniki wykazały, że poślizg przyjmuje w przybliżeniu formę dwuliniową. Krzywa poślizgu wykazała, że szybkość wzrostu poślizgu maleje aż do około 45% maksymalnego poziomu przyczepności. Poślizg rośnie gwałtownie, gdy naprężenie wiązania przekracza 45% maksymalnego poziomu przyczepności.

8. Potwierdzenie współczynnika przyczepności

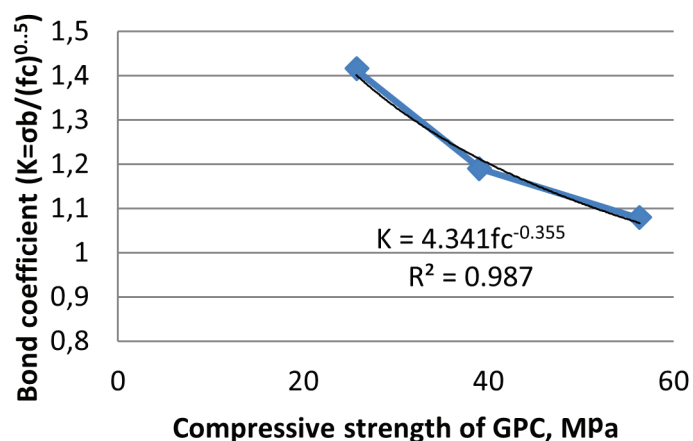
Wzór [4] określający współczynnik przyczepności zweryfikowano poprzez zbadanie trzech niezależnych serii beleczek z betonu geopolimerowego. Naprężenie wiązania otrzymane w tych badaniach zestawiono w tablicy 7. W tej samej tablicy podano także wartość K doliczoną ze wzoru [4] oraz otrzymaną w badaniach przyczepności. Wyniki doświadczalne potwierdzają te obliczone ze wzoru [4] z odchyleniem o 7,8%. Stąd przyczepność [σ_b] betonu geopolimerowego można obliczyć, znając jego wytrzymałość na ściskanie i stosując wzór [5]:

$$\sigma_b = 4.341(f_c)^{0.145} \quad [5]$$

9. Wnioski

Uzyskane wyniki pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków.

Variation of bond coefficient of GPC



Rys. 4. Zależność średniego współczynnika wiązania [K] od wytrzymałości na ściskanie betonu geopolimerowego

Fig. 4. The bond coefficient (K) of geopolymer concrete

For the purpose of comparison the bond strength values were normalized by specifying the 'Bond Coefficient (K)'. The bond coefficient is obtained by dividing the bond strength with the square root of respective concrete compressive strengths. Table 5 presents the bond coefficient of GPC and NC. The variation of bond coefficient with compressive strength is shown in Fig. 2.

The variation of bond coefficient of GPC and NC indicate that the GPC has lower bond strength compared to the NC. However, there is a similarity in the variation of bond coefficient of both GPC and NC. The lower bond strength of GPC indicate increased requirement for development length.

7.2. Bond strength of GPC for different embedment lengths

The bond strength (σ_b) of Geopolymer concrete (GPC) obtained in the pull-out test, for different embedment length are presented in Table 6. It is seen from the results presented in Table 4 that the bond strength of GPC increases with increase in compressive strength of GPC. This behavior is similar for all the embedment lengths. However the increase is not proportional to the increase in compressive strength. Hence the bond coefficient (K) of GPC

Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength f_c MPa	Średnia przyczepność Average bond strength σ_b MPa	Współczynnik przyczepności Bond strength coefficient $K = \sigma_b / (f_c)^{0.5}$ K_{exp}	Współczynnik przyczepności obliczony ze wzoru 1 Bond strength coeff.using Eq.[4] K_{anl}	K_{exp} / K_{anl}
47.57	8.2	1.189	1.102	1.078

1. Mieszanka popiołu lotnego i granulowanego żużla wielkopiecowego zastosowana do przygotowania betonu geopolimerowego pozwoliła na uzyskanie odpowiedniej wytrzymałości, bez konieczności podwyższania temperatury podczas dojrzewania próbek.

2. Przyczepność betonu geopolimerowego do stali jest mniejsza niż w przypadku betonu zwykłego.

3. Przyczepność betonów geopolimerowego i zwykłego do stali rośnie wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie betonu. Jednak wzrost ten nie jest proporcjonalny do wzrostu wytrzymałości na ściskanie betonu.

4. Współczynnik wiązania betonu geopolimerowego maleje wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie betonu geopolimerowego.

5. Przyczepność [σ_b] betonu geopolimerowego można obliczyć z wzoru [5], znając jego wytrzymałość na ściskanie [f_c]:

$$\sigma_b = 4.341(f_c)^{0.145}$$

6. Poślizg stali w betonie geopolimerowym przyjmuje w przybliżeniu formę dwuliniową.

7. Szybkość wzrostu poślizgu maleje aż do około 45% maksymalnego poziomu przyczepności. Poślizg rośnie gwałtownie, gdy naprężenie wiązania przekracza 45% maksymalnego poziomu przyczepności betonu do stali.

Podziękowanie

Autor pragnie podziękować za wsparcie Wydziałowi, pracownikom oraz studentom z Zakładu Konstrukcji, NIT, Warangal.

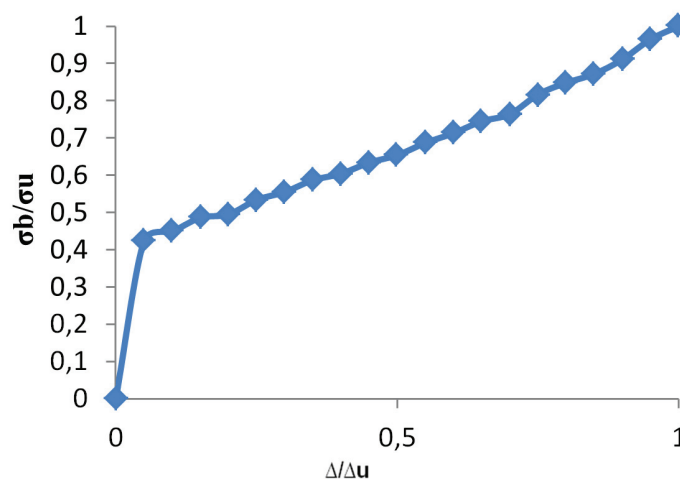
Literatura / References

1. G. Saravanan, C. A. Jeyasehar, S.Kandasamy, Flyash Based Geopolymer Concrete—A State of the Art Review, J of Engineering Science and Technology Review, **6**, 1, 25-32 (2013).
2. M. M. Al Bakri, H. Mohammed, H.Kamarudin, I. K.Niza, Y.Zarina, Review on fly ash-based geopolymer concrete without Portland Cement, J of Engineering and Technology research, **3**, 1, 1-4 (2011).
3. B. V. Rangan, D.Hardjito, S. E.Wallah, D.M. Sumajouw, Properties and applications of fly ash-based concrete. In Mater. Forum, **30**, 170-175(2006).
4. M. Olivia, H. Nikraj, Properties of flyash geopolymer concrete in sea water environment, in Proceedings of the Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13) (pp. D-6). The Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13), September 2013.



Rys. 5. Uszkodzenia próbek po badaniach

Fig. 5. Failure pattern of specimens



Rys. 6. Δ/Δ_u w funkcji σ_b/σ_u

Fig. 6. Δ/Δ_u vs. σ_b/σ_u

is calculated for different embedment lengths and for different concrete compressive strength. Table 6 also presents the bond coefficients of GPC.

The variation of bond strength with compressive strength of GPC, for different embedment lengths is shown in Fig. 3.

The variation of average bond coefficient (K) with compressive strength of GPC, is shown in Fig. 4.

5. S. Kumaravel, Development of various curing effect of nominal strength Geopolymer concrete. *J of Engineering Science and Technology Review*, **7**,1, 116-119 (2014).
6. A. M. Rajesh, M. A. Joe, R. Mammen, Study of the Strength of Geopolymer Concrete with Alkaline Solution of Varying Molarity.
7. A. Foroughi-Asl, S.Dilmaghani, H.Famili, Bond strength of reinforcement steel in self-compacting concrete. *Inter. J of Civil Engineering*, **6**,1, 24-33(2008).
8. M. M. Kamal, M. A. Al-gazzar, Experimental Evaluation of Steel–Concrete bond Strength in Low-cost Self-compacting Concrete, *Concrete Research Letters*, **3**, 2(2012).
9. J. Xiao, H. Falkner, Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars, *Construction and Building Materials*, **21**, 2, 395-401(2007).
10. C. Pellegrino, G.Boschetto, D.Tinazzi, C. Modena, Progress on understanding bond behaviour in RC elements strengthened with FRP. In *Proceedings of the international symposium on bond behaviour of FRP in structures*, pp. 7-9, December 2005.
11. K. Nakaba, T. Kanakubo, T.Furuta, H.Yoshizawa, Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete. *ACI Structural Journal*, **98**, 3,(2001).
12. J. Xiao, J. Li, Q. Zha, Experimental study on bond behavior between FRP and concrete. *Construction and Building Materials*, **18**, 10, 745-752(2004).
13. Kim, Jee-Sang, Jong Ho Park, An Experimental Investigation of Bond Properties of Reinforcements Embedded in Geopolymer Concrete.
14. P. K. Sarker, Bond strength of reinforcing steel embedded in fly ash-based geopolymer concrete. *Materials and structures*, **44**, 5, 1021-1030(2011).
15. IS 2770, Methods of Testing Bond Strength in Reinforced Concrete-Part I, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India 1997.
16. IS 12269-2013: Ordinary Portland cement Specification, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, March 2013.
17. IS 383-2016: Course and Fine aggregate for concrete-Specification (Third Revision), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, January 2016.
18. IS 3812 (part-1)-2013: Pulverised fuel ash-specification-Part-1: for use as pozzolana in cement, cement mortar and concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, May 2013.
19. IS 12089 (1987): Specification for granulated slag for the manufacture of Portland slag cement, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, Nov 1987.
20. IS 456-2000: Indian Standard –Plain and Reinforced concrete–Code of practice, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, July 2000.

The best fit equation obtained for the bond coefficient of GPC is given below [Eq. 4].

$$\text{Bond strength coefficient (K)}=4.341(\text{fc})^{-0.355} \quad [4]$$

The failure pattern of specimens is shown in Fig. 5. The failure occurred at the concrete region where steel bar was bonded. The plot between normalised bond strength and ultimate slip of GPC is shown in Fig. 6. This bond slip behavior shown in Figure 6 indicate that bond slip behavior can be idealized as a bilinear behavior. Also the bond slip curve indicates that rate of increase in slip slow up to about 45% of ultimate bond strength level. The slip increases rapidly once the bond stress goes above 45% of ultimate bond strength.

8. Validation of bond strength coefficient

The bond strength equation given as Eq.1 is validated by testing three numbers of another set of independent GPC prisms. The bond stress obtained in these tests is tabulated in Table 7. The K value predicted from Eq.4 and that obtained from the experimental bond strength is shown in the same table. These results validate the Eq. 4 proposed with a variation of 7.8%. Hence the bond strength (σ_b) of GPC can be obtained knowing its compressive strength using Eq.2:

$$\sigma_b = 4.341(\text{fc})^{0.145} \quad [5]$$

9. Conclusions

Based on the experimental results, the following conclusions are drawn.

1. The combination of fly ash and GGBS used for the production of GPC has yielded satisfactory levels of compressive strength without the need for any heat curing.
 2. Bond strength of geopolymer concrete is lower than of normal concrete.
 3. The bond strength of both GPC and NC increased with increase of compressive strength of respective concrete. However, the increase is not proportional to the increase of concrete compressive strength.
 4. The bond coefficient of GPC is decreasing with increase of GPC compressive strength.
 5. The bond strength (σ_b) of GPC can be obtained knowing its compressive strength (fc) from the formula:
- $$\sigma_b = 4.341(\text{fc})^{0.145}$$
6. The bond slip behavior GPC can be idealized as a bilinear behavior.
 7. The rate of increase in slip is slow up to about 45% of ultimate bond strength level. The slip increases rapidly once the bond stress is increasing above 45% of ultimate bond strength.

ACKNOWLEDGEMENT

The author wish to acknowledge the support of faculty, staff and students of Structures division, NIT, Warangal.