

Badania wytrzymałości na ścinanie dwóch warstw betonu zespolonego

A study on the behaviour of interfacial shear bond strength between the concrete layers

1. Wprowadzenie

W dzisiejszych czasach, coraz częstszymi przyczynami pogorszenia jakości betonu są zakłócenia w procesie wiązania, korozja stali zbrojeniowej, gorsza jakość stosowanych materiałów, a także kiepski poziom jego wykonania. Pogorszenie jakości betonu prowadzi do zmniejszenia jego wytrzymałości, a tym samym powoduje konieczność zastosowania odpowiednich metod naprawczych. Niektóre techniki naprawy/wzmacniania konstrukcji betonowych obejmują często uzupełnianie nowym betonem uszkodzonych elementów budowli. Właściwości wiązania betonu „pierwotnego” z uzupełniającym odgrywają ważną rolę w efektywności wzmocnienia konstrukcji. Do uzyskania lepszego efektu naprawczego, beton do uzupełnień, powinien mieć dobrą przyczepność do elementu już istniejącego podłoża, lub do jego części. Nawet jeśli podłoże betonowe nie jest uszkodzone, zazwyczaj zwiększa się chropowatość jego powierzchni w celu poprawy przyczepności pomiędzy dwoma warstwami betonu. Zwykle w tym celu stosuje się obróbkę powierzchni polegającą na szczotkowaniu za pomocą szczotki drucianej, piaskowaniu, wtryskiwaniu wody pod wysokim ciśnieniem, nawiercaniu powierzchniowemu, itd. W tym kontekście ważna jest znajomość mechanizmu wytrzymałości na ścinanie pomiędzy powierzchniami betonu stanowiącego podłoże i nowego betonu. Konieczne jest także stosowanie strategii zrównoważonego rozwoju i dotyczy to również materiałów naprawczych.

Zrównoważone budownictwo ma na celu wykorzystanie materiałów odpadowych jako materiału budowlanego. W celu ochrony środowiska przed globalnym ociepleniem oraz spowolnienia dalszego wyczerpywania się zasobów naturalnych, korzystnym jest zastosowanie betonu geopolimerowego [GPC], dzięki czemu dodatek cementu można całkowicie zastąpić takimi surowcami odpadowymi jak popiół lotny i mielony granulowany żużel wielkopiecowy [GGBS] (6). Ponadto w ostatnich latach, coraz częściej wykorzystuje się także beton samozagęszczający się [SCC], którego zastosowanie ułatwia betonowanie w trudno dostępnych szalunkach. Beton SCC wykazuje dużą płynność oraz dobrą spoiłość, a wykorzystanie

1. Introduction

Now-a-days the deterioration of concrete is more prevalent due to various reasons like improper bonding, corrosion of steel, inferior quality of materials as well as improper workmanship. The deterioration of concrete leads to reduction in useful strength of concrete and thus necessitates the adoption of proper repairing methods. Some repairing / strengthening techniques of concrete structures frequently involve adding new concrete to an existing concrete element. The bond performance between the existent and repair concretes plays an important role on the efficacy of this strengthening strategy. For better repairing the material used for repair should have good adherence to the existing structure / substrate, or a part of it. Even when the concrete substrate is not damaged, it is usual to increase the roughness of its surface with the purpose of improving the bond between both materials. Surface treatments like wire-brushing, sandblasting, water jetting, chipping, etc., are usually adopted. In this context it is important to understand the shear strength mechanism at the interface between the old (substrate) and new concrete surfaces. It is also necessary that even the repair materials satisfy the norms of sustainability.

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 totally replaces cement with waste materials such as fly ash and ground granulated blast furnace slag GGBS(6). Also in recent years, self-compacting concrete (SCC) has gained wide use for ease of placement in difficult casting conditions. The SCC possesses high fluidity and good cohesiveness and uses the fine materials such as fly ash which can ensure the required concrete properties.

The present study is conducted on assessment of the shear bond strength between concrete layers to investigate the influence of the type of overlaid concrete on normal concrete substrate. The overlaid concretes adopted are Geopolymer concrete (GPC) and self-compacting concrete (SCC). The values of design coefficients

dotyków mineralnych, na przykład popiołu lotnego może zapewnić uzyskanie wymaganych właściwości betonu.

Przeprowadzone badania mają na celu ocenę wpływu betonu naprawczego na wytrzymałość na ścinanie poszczególnych warstw betonu zespolonego. Jako betony uzupełniające zastosowano beton geopolimerowy [GPC] oraz beton samozagęszczający się [SCC]. Przyjęto wartości współczynników kohezji oraz tarcia dwóch warstw złożonych z betonu naprawczego i betonu stanowiącego podłoże, a mianowicie GPC-NC oraz SCC-NC, w których GPC i SCC zastosowano jako betony naprawcze, a zwykły beton NC stanowił podłoże. Inne zmienne właściwości to wytrzymałość na ściskanie oraz kąt nachylenia płaszczyzny kontaktu.

2. Wytrzymałość na ścinanie dwóch warstw betonu

Wytrzymałość na ścinanie dwóch warstw betonu definiuje się jako maksymalne naprężenie ścinające oddziałujące na zespoleniu podłoża betonowego z betonem wzmacniającym.

Wytrzymałość na ścinanie dwóch warstw betonu zależy od chropowatości podłoża, która z kolei jest spowodowana kohezją oraz tarciami na granicy dwóch warstw zespolonego betonu. Teoria dotycząca zagadnienia ścinanie-tarcie zakłada, że wytrzymałość na ścinanie powierzchni dwóch elementów zespolonych, obu z betonu poddanych jednoczesnemu działaniu sił ścinających i ścisających jest tylko wynikiem tarcia między tymi powierzchniami. Zaproponowano kilka funkcji stosowanych w projektowaniu (1-2, 4-5, 7) pozwalających obliczyć maksymalne podłużne naprężenie ścinające występujące na powierzchni dwóch elementów zespolonych z betonu. Kilka norm projektowych podaje także wzory określające tarcie przy ścinaniu na styku pomiędzy zwykłym betonem stanowiącym podłoże a betonem naprawczym. Główna różnica pomiędzy poszczególnymi normami dotyczy oceny chropowatości oraz proponowanych współczynników tarcia i kohezji w przypadku takiego samego stanu powierzchni próbek. Niezgodność ta jest prawdopodobnie największą wadą wzorów i norm projektowych, o których mowa.

Badania betonu poddawane ścinaniu z równoczesnym ścisaniem, czyli tak zwany po angielsku „slant-shear test” przeprowadzono zgodnie z normą brytyjską BS EN 12615:1999: Część 4, dotycząca badania materiałów naprawczych. Norma ASTM C882/C882M-13a także pozwala na przeprowadzane pomiaru wytrzymałości połączenia tą samą metodą. W zmodyfikowanej metodzie „slant test” zamiast próbek w kształcie cylindra, badania wykonuje się na belkach o długości trzy razy większej od szerokości przekroju poprzecznego. Podobnie jak w wielu przypadkach, rzeczywiste naprężenia w konstrukcji przenosi element poddawany ścinaniu, a więc badanie to odpowiada warunkom bardziej zbliżonym do panujących na placu budowy. W metodzie „slant-shear test” zespolenie jest poddawane jednoczesnemu ścisaniu i ścinaniu. Idea leżąca u podstaw tego badania wywodzi się z normowej metody badania wytrzymałości na ściskanie. Podczas ściskania, uszkodze-

for cohesion and friction at the interface are proposed for two overlaid-substrate concrete combinations viz. GPC-NC and SCC-NC i.e GPC or SCC as overlaid concrete and normal concrete as substrate. The other parameters varied are compressive strength of overlaid concretes and interface angle.

2. Shear bond strength

Shear bond strength is the maximum shear stress that acts at the interface of substrate concrete and overlaid concrete.

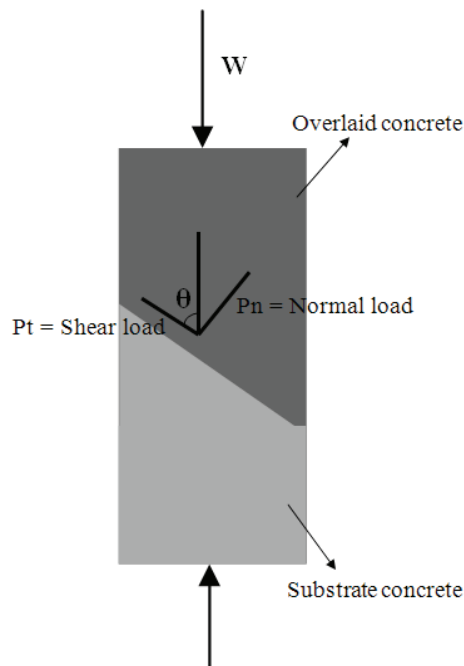
The shear bond strength at the interface depends on roughness of the substrate which in turn depends on cohesion and friction at the interface. The shear-friction theory assumes that the shear bond strength of a concrete-to-concrete interface subjected simultaneously to shear and compression forces is ensured by friction only. Several design expressions (1-2, 4-5, 7) were proposed to predict the ultimate longitudinal shear stress at the concrete-to-concrete interface. Several design codes have included the expressions for the shear friction at the interface between overlaid and substrates of normal concrete. The main difference between codes is the roughness classification and the proposed coefficients of friction and cohesion for the same surface condition. This incongruence is probably the main drawback of the design expressions and of the design codes referred to.

The ‘Slant shear’ test which was standardized in British Standard, BS EN 12615:1999 for testing the repair materials is adopted in the present investigation. ASTM C882/C882M-13a also provides the procedure of bond measurement with the same test method. In the modified slant test the prism with the length three times the cross section dimension is used instead of the cylinder. As in many cases the real stresses in structures have the shear component, this test is representing the situation more close to the construction site. In the “Slant Shear Test” the interface is under combined state of compression and shear stresses. The idea behind the test is to have common testing system for evaluation of both compressive strength and shear strength. In compressive test, concrete failure happens due to the shear cracks in the incline plane. The angle of failure plane with horizontal direction is theoretically between 50° and 70° , so 60° could be a proper assumption. Therefore in this test method the interface is placed inclined with the same angle and a compressive force is applied to the system. The specimen adopted is a standard prism size of 400mm X 100mm X 100mm.

Shear bond strength is determined by factors like surface condition, concrete strength and the angle of interface. Referring to the factor pattern:

nie betonu następuje z powodu pęknięć stycznych w płaszczyźnie nachylonej. Teoretycznie, kąt pomiędzy płaszczyzną zniszczenia a kierunkiem poziomym powinien zawierać się w przedziale od 50° do 70°, założono więc, że 60°, będzie wartością odpowiednią. Zatem w tej metodzie badawczej, powierzchnia łącząca betony jest nachylona pod takim samym kątem, a do próbki przykładana jest siła ściskająca. Próbką jest belka normowa o wymiarach 400 mm x 100 mm x 100 mm.

Wytrzymałość na ścinanie połączenia zależy od takich czynników jak stan powierzchni, wytrzymałość betonu oraz kąt nachylenia płaszczyzny styku. Pokazano to na schemacie.



W = obciążenie ściskające

θ = kąt nachylenia płaszczyzny łączącej dwa betony

P_t = obciążenie ścinające (składowa W równoległa do płaszczyzny połączenia betonów)

$= W \cos(\theta)$

P_n = obciążenie normalne (składowa W prostopadła do w/w powierzchni) $= W \sin(\theta)$

A = pole przekroju poprzecznego belki $= 10000 \text{ mm}^2$

A_s = pole przekroju poprzecznego nachylonej płaszczyzny $= A / \sin(\theta)$

naprężenie ścinające $(\tau) = [P_t - \mu P_n] / A_s$

$\mu = \tan(\phi)$ = współczynnik tarcia

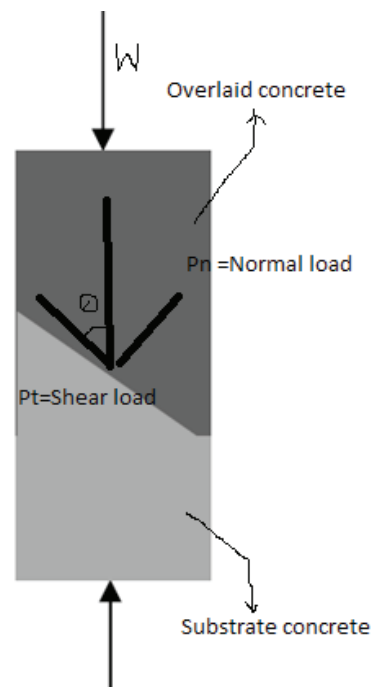
ϕ = kąt tarcia wewnętrznego

c = kohezja = minimalna wytrzymałość na ścinanie

A zatem zależność pomiędzy wytrzymałością na ścinanie $[\tau_u]$, a naprężeniem normalnym $[\sigma_n]$ można wyrazić następująco:

$\tau_u = c + \mu \sigma_n$

$\tau_u = P_t / A_s, \sigma_n = P_n / A_s$



W = compressive load

θ = angle of interface

P_t = shear load (component of W parallel to the interface)

$= W \cos(\theta)$

P_n = normal load (component perpendicular to the interface) $=$

$W \sin(\theta)$

A = cross sectional area $= 10000 \text{ sq.mm}$

A_s = slant cross sectional area $= A / \sin(\theta)$

shear stress $(\tau) = [P_t - \mu P_n] / A_s$

$\mu = \tan(\phi)$ = coefficient of friction

ϕ = angle of internal friction

c = cohesion = minimum shear strength

Hence the relation between the shear strength (τ_u) and normal stress (σ_n) is given by

$\tau_u = c + \mu \sigma_n$

$\tau_u = P_t / A_s, \sigma_n = P_n / A_s$

The above relations are used in determining the cohesion and angle of internal friction at the interface between geopolymer concrete and normal C concrete (GPC-NC) and self-compacting concrete and normal concrete (SCC-NC) combinations from the slant shear tests.

3. Present investigation

The aim is to find the shear bond strength parameters such as cohesion and angle of internal friction at the interface of overlaid-substrate combinations of GPC-NC and SCC-NC by conducting slant shear test. A total of 54 prisms of 100x100x400 mm size each were cast and tested. The 54 prisms consisted of two overlaid –

Wzory te wykorzystano do obliczenia kohezji oraz kąta tarcia wewnętrznego na płaszczyźnie łączącej beton geopolimerowy i zwykły beton stanowiący podłoże [GPC-NC] oraz beton samozagęszczający się i zwykły stanowiący podłoże [SCC-NC] dzięki pomiarom uzyskanym metodą „slant-shear test”.

3. Badania

Celem badań było określenie parametrów związanych z wytrzymałością na ścinanie płaszczyzny łączącej dwa betony, a mianowicie kohezja i kąt tarcia wewnętrznego w przypadku naprawczego i stanowiącego podłoże GPC-NC oraz SCC-NC, badanych metodą „slant-shear test”. Do badań przygotowano 54 belki o wymiarach 100 x 100 x 400 mm. Próbkę tę przygotowano w dwóch seriach złożonych z betonu naprawczego i stanowiącego podłoże, a mianowicie GPC-NC oraz SCC-NC, każdy wariant obejmował 27 belek. W każdej serii rozpatrywano trzy klasy betonu [1, 2 i 3] oraz trzy różne kąty nachylenia płaszczyzny styku [25°, 35° i 45°]. Zbadano zatem po trzy belki o takiej samej charakterystyce w każdej serii. Średnie obciążenie niszczące tych trzech próbek uznawano za reprezentatywny wynik dla danej serii. Tak więc symbol GN-12 oznacza zestaw złożony z betonu naprawczego i stanowiącego podłoże GPC-NC, w przypadku którego zastosowano pierwszą klasę betonu, a kąt nachylenia płaszczyzny wynosił 35°. Podobnie jest w przypadku symbolu SN-21, który oznacza beton naprawczy i stanowiący podłoże SCC-NC, dla którego zastosowano drugą klasę betonu, a kąt nachylenia płaszczyzny styku wynosił 25°. Skład mieszanek badanych metodą „slant-shear test” podano w tablicy 1. Do oznaczenia wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu przygotowano kostki o wymiarach 150 x 150 x 150 mm oraz walce o wymiarach 150 x 300 mm, w przypadku których również zastosowano trzy klasy betonu. Równania analityczne opisujące wytrzymałość na ścinanie dla dwóch serii betonów zespolonych zostały wyznaczone w oparciu o wyniki badań.

4. Materiały

Skład betonu geopolimerowego jest podobny jak w betonie zwykłym jednak w tym przypadku dodatek cementu zastępuje się innym spoiwem oraz alkalicznym roztworem wodnym. W roli aktywatorów zasadowych wykorzystano roztwór wodorotlenku sodu i krzemianu sodu. W betonie GPC dodatek cementu całkowicie zastąpiono popiołem lotnym i mielonym granulowanym żużlem wielkopiecowym. Stosunek masowy roztworu krzemianu sodu [Na_2SiO_3] do wodorotlenku sodu [NaOH] wynosił 2,5. 320 gramów wodorotlenku sodu w postaci granulatu rozpuszczono w wodzie otrzymując jeden litr 8-molowego roztworu NaOH . Przygotowanie alkalicznego roztworu prowadzi do zajścia reakcji egzotermicznej i z tego powodu roztwór ten sporządzono dzień przed przygotowaniem mieszanki. W celu poprawy urabialności mieszanki do betonu samozagęszczalnego dodano superplastyfikator CONPLAST SP430. Wykorzystano także popiół lotny klasy F, o małej zawartości wapna. Zastosowano również drobne

substrate concrete combinations viz. GPC-NC and SCC-NC with 27 prisms in each combination. In each combination three grades of concrete (1, 2 & 3) and three different angle of interface (25°, 35° and 45°) were considered. There are three identical specimens in each category of tested prisms. The average failure load of these three identical prisms was considered to represent the ultimate load of each category of tested prisms. Thus the specimen whose designation is GN-12 stands for 'GPC-NC' overlaid-substrate combination in first grade of concrete with 35° as angle of interface. Similarly the specimen whose designation is SN-21 stands for 'SCC-NC' overlaid-substrate combination in second grade of concrete with 25° as angle of interface. The details of the prisms tested in slant shear test are given in Table 1. Also cubes of size 150x 150x 150 mm each and cylinders of size 150x300 mm each were cast and tested to find compressive strength and split tensile strength for each of the three grades. The analytical equations for shear strength for two overlaid-substrate combinations were arrived at from the experimental results.

4. Materials

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. GPC was made by total replacement of cement with fly ash and GGBS. The ratio of sodium silicate solution (Na_2SiO_3) 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 aggregates. CONPLAST SP430 was used as superplasticizers to improve workability in case of self-compacting concrete. Low calcium Class F fly ash was used. The fine aggregate conforming to Zone-2 according to IS: 383 were used. Coarse aggregates sieved through sieve sizes of 20 mm, 16 mm, 12.5mm, 10 mm and 4.75 mm were used. The mix proportion details for three different grades of GPC, SCC and NC are given in the Tables 1, 2 and 3 respectively.

The compressive strength (f_c) and split tensile strength (f_t) of geopolymer concrete, self-compacting concrete and that of normal concrete, used in the present investigation, are given in Table 4.

5. Casting and curing of specimens

The casting of required specimens was carried out in two stages. In the first stage the substrate part of the specimen with required inclination were cast using normal concrete. For this purpose a steel plate was placed temporarily at required angle in the middle of the prism mould during casting (Fig. 1). This enabled casting of two substrate parts (i.e half parts of the complete specimen) at a time (Fig. 2). In the second stage the cured substrate part is kept in the prism mould, which occupies only half of the mould.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANEK Z BETONU GEOPOLIMEROWEGO

THE DETAILS OF MIX PROPORTION OF GEOPOLYMER CONCRETE

Concrete grade Klasa betonu	Fly ash Popiół lotny kg/m ³	GGBS Granulowany żużel wielkopiecowy kg/m ³	Fine agg. Kruszywo drobne, kg/m ³	Coarse agg. Kruszywo grube, kg/m ³	Alkaline liquid Roztwór alkaliczny, 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

Tablica 2 / Table 2

PROPORCJE MIESZANEK Z BETONU SAMOZAGĘSZCZALNEGO

MIX PROPORTIONS FOR SELF-COMPACTING CONCRETE

Grade of SCC concrete Klasa betonu SCC	Materials used Składniki							Fresh concrete properties Właściwości świeżego betonu	
	Cement, kg/m ³	Fly ash Popiół lotny, kg/m ³	Fine agg. Kruszywo drobne, kg/m ³	Coarse agg. Kruszywo grube, kg/m ³	Water Woda	w/b ratio Stosunek w/b	SP, ml	Flow table Badanie metodą stolika rozplywowego, mm	V Funnel Badanie metodą V-lejka, s
S20	300	300	744	748	210	0.35	110	674	10
S35	350	230	801	765	192	0.33	150	660	9.8
S60	500	100	827	798	186	0.31	210	650	11

Tablica 3 / Table 3

PROPORCJE MIESZANEK Z BETONU ZYKŁEGO

THE DETAILS OF MIX PROPORTION OF NORMAL CONCRETE

Concrete grade Klasa betonu	Cement, kg/m ³	Fine agg. Kruszywo drobne, kg/m ³	Coarse agg. Kruszywo grube, kg/m ³	Water Woda, l/m ³
N20	385.23	600.96	1221.19	192.62
N35	560.75	482.25	1171.97	235.51
N60	555.55	394.44	1272.22	177.77

Tablica 4 / Table 4

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE BETONU GEOPOLIMEROWEGO, SAMOZAGĘSZCZAJĄCEGO I ZWYKŁEGO

THE COMPRESSIVE STRENGTH OF GEOPOLYMER CONCRETE, SELF-COMPACTING CONCRETE AND NORMAL CONCRETE

Geopolymer concrete Beton geopolimerowy				Self compacting concrete Beton samozagęszczalny				Normal concrete Beton zwykły			
Grade Klasa	f_c , MPa	f_t , MPa	UPV, km/s	Grade Klasa	f_c , MPa	f_t , MPa	UPV, km/sec	Grade Klasa	f_c , MPa	f_t , MPa	UPV, km/s
G20	25.77	1.92	3.35	S20	31.50	3.03	4.42	N20	35.25	2.89	4.00
G35	39.21	2.27	3.22	S35	42.40	3.98	4.59	N35	45.7	3.21	4.26
G50	56.36	2.55	3.10	S60	66.50	4.63	4.48	N60	65.96	4.02	4.30

kruszywo należące do kategorii 2, zgodnie z normą indyjską IS 383. Natomiast kruszywo grube przesiano przez sito o wymiarach oczka 20 mm, 16 mm, 12,5 mm, 10 mm oraz 4,75 mm. Proporcje

The remaining half part of the prism mould is then filled with the required type of overlay concrete. The different overlay concretes used were geopolymer concrete and self-compacting concrete. The completed prism specimen after adding the overlay concrete

mieszanek tych trzech różnych klas betonów GPC, SCC i NC podano kolejno w tablicach 1, 2 i 3.

Wytrzymałości na ściskanie [f_c] i rozciąganie przy rozłupywaniu [f_t] betonu geopolimerowego, samozagęszczającego się oraz zwykłego podano w tablicy 4.

5. Formowanie i dojrzewanie próbek

Formowanie próbek odbywało się w dwóch etapach. W pierwszym etapie część próbki stanowiącą podłoże z betonu zwykłego zaformowano zachowując odpowiedni kąt nachylenia płaszczyzny przyszłego zespolenia. W tym celu, podczas formowania belki, na środku formy ustawiono stalową płytkę pod odpowiednim kątem [rysunek 1]. Umożliwiło to zaformowanie dwóch części belek stanowiących podłoże, czyli dwóch połówek belki równocześnie [rysunek 2]. W drugim etapie stwardniałą połowę belki stanowiącej podłoże umieszczano ponownie w formie. Pustą część formy wypełniano natomiast wybranym betonem naprawczym. Jako beton naprawczy zastosowano betony; geopolimerowy oraz samozagęszczający się. Gotową belkę wypełnioną betonem naprawczym pokazano na rysunku 3. 54 belki przygotowano z dwóch zestawów złożonych z betonu naprawczego i stanowiącego podłoże, a mianowicie GPC-NC oraz SCC-NC, każda seria obejmowała 27 belek. Ustalono, że wytrzymałość zwykłego betonu stanowiącego podłoże ma być nieco większa niż betonu uzupełniającego.

Próbki GPC-NC dojrzewały przez 28 dni na powietrzu w temperaturze pokojowej, podczas gdy próbki SCC-NC dojrzewały w tym czasie w wodzie.

6. Badanie próbek

Próbki betonu zespolonego poddawane były ściskaniu aż do momentu zniszczenia w strefie połączenia. Rejestrowano maksymalne obciążenia próbek, przy których następowało ich zniszczenie. We wszystkich zbadanych próbkach występowały pęknięcia wzdłuż płaszczyzny zespolenia. Na rysunku 4 pokazano belkę poddaną ściskaniu.



Rys. 4. Badanie belek poddawanych ściskaniu

Fig. 4. Testing of prism specimen under compression

is shown in Fig.3. A total of 54 prisms cast consisted of two overlaid – substrate concrete combinations viz. GPC-NC and SCC-NC with 27 prisms in each combination. The strength of normal concrete substrate was maintained slightly more than the overlaid concrete.

The GPC-NC specimens were allowed for 28 days ambient curing at room temperature where the SCC-NC specimens were water cured.

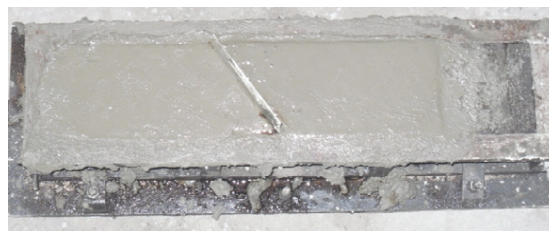


Fig.1 Casting of specimens

Rys. 1. Betonowanie próbek



Rys. 2. Belki stanowiące podłoże zaformowane w pierwszym etapie

Fig. 2. Substrate part cast in the first stage



Rys. 3. Gotowa belka po wypełnieniu betonem naprawczym

Fig. 3. Completed prism specimen after adding overlay

6. Testing of specimens

The substrate-overlaid concrete specimens were tested under compression up to failure of the specimen at the interfacial zone. The peak load at failure of different substrate-overlaid concrete specimens was noted. All specimens failed with crack along the interface. Fig. 4 shows the testing of prism specimen under compression.

7. Discussion of test results

The failure load (W) under compression obtained for different GPC-NC and SCC-NC specimens are presented in Table 5. The following general observations were made from the experimental results.

In general, the loads at failure have increased with increase in interface angle and also with increase in the compressive strength of overlaid concrete. The variation of shear stress with normal stress for GPC-NC is shown in Fig.5 and that of SCC-NC is shown in Fig.

Tablica 5 / Table 5

OBCIĄŻENIA NISZCZĄCE (W) BELEK DLA PRÓBEK Z RÓŻNYCH BETONÓW GPC-NC I SCC-NC PODDAWANYCH ŚCISKANIU

THE FAILURE LOAD (W) UNDER COMPRESSION OBTAINED FOR DIFFERENT GPC-NC AND SCC-NC SPECIMENS

Specimen Próbka	f_{ck} of GPC or SCC f_{ck} dla GPC lub SCC	Interface angle θ Kąt nachylenia płaszczyzny styku $\theta, ^\circ$	Failure load W Obciążenie niszczące W, kN	Pt, kN	Pn, kN	As, mm ²	τ_u , MPa	σ_n , MPa
GPC Overlay-Normal concrete substrate (GPC-NC)								
Beton zespolony z betonu naprawczego GPC i zwykłego stanowiącego podłoże (GPC-NC)								
GN-11	29	25	95	86.10	40.12	23673.25	3.63	1.69
GN-12	29	35	109.7	89.88	62.89	17442.18	5.15	3.60
GN-13	29	45	154	108.93	108.81	14147.77	7.69	7.69
GN-21	39	25	106.8	96.80	45.11	23673.25	4.08	1.90
GN-22	39	35	118.67	97.22	68.03	17442.18	5.57	3.90
GN-23	39	45	127	89.83	89.76	14147.77	6.34	6.34
GN-31	52	25	166	150.46	70.12	23673.25	6.35	2.96
GN-32	52	35	180.5	147.88	103.48	17442.18	8.47	5.93
GN-33	52	45	235	166.23	166.10	14147.77	11.75	11.74
SCC Overlay-Normal concrete substrate (SCC-NC)								
Beton zespolony z betonu naprawczego SCC i zwykłego stanowiącego podłoże (SCC-NC)								
SN-11	31	25	115.7	104.87	48.87	23673.25	4.42	2.06
SN-12	31	35	158	129.45	90.58	17442.18	7.42	5.19
SN-13	31	45	189	133.69	133.59	14147.77	9.44	9.44
SN-21	41	25	176	159.52	74.34	23673.25	6.73	3.14
SN-22	41	35	218	178.61	124.94	17442.18	10.24	7.16
SN-23	41	45	279	197.36	197.20	14147.77	13.95	13.93
SN-31	52	25	226	204.84	95.46	23673.25	8.65	4.03
SN-32	52	35	272	222.85	155.94	17442.18	12.77	8.94
SN-33	52	45	285	201.60	201.44	14147.77	14.25	14.23
Pt = W cos (θ) = shear load [load parallel to interface] Pt = W cos (θ) = obciążenie ścinające [obciążenie równoległe do powierzchni styku] Pn = W sin (θ) = normal load [load perpendicular to interface] Pn = W sin (θ) = obciążenie normalne [obciążenie prostopadłe do powierzchni styku]					As = A / sin(θ) = slant cross sectional area As = A / sin(θ) = pole przekroju poprzecznego nachylonej płaszczyzny, A = cross sectional area of prism = 10000 mm ² A = pole przekroju poprzecznego belki = 10000 mm ²			

7. Omówienie wyników badań

W tablicy 5 podano obciążenia niszczące (W) belek dla różnych zestawów GPC-NC i SCC-NC poddawanych ścisnaniu. Uzyskane wyniki badań pozwalają na następujące podsumowanie.

Obciążenie niszczące wzrasta wraz ze wzrostem kąta nachylenia płaszczyzny połączenia oraz wytrzymałości na ścisnienie betonu naprawczego. Zależność pomiędzy naprężeniem ścinającym i naprężeniem normalnym dla zestawu GPC-NC pokazano na rysunku 5, a w przypadku zestawu SCC-NC na rysunku 6. Na obu tych wykresach zależność liniowa utrzymuje się w przypadku obu betonów: GPC-NC i SCC-NC.

Jednakże, w celu wyeliminowania wpływu wytrzymałości na ścisnienie betonu, naprężenia ścinające i normalne znormalizowano poprzez podzielenie ich przez odpowiednią wartość wytrzymałości na ścisnienie betonu. Na rysunku 7 pokazano porównanie

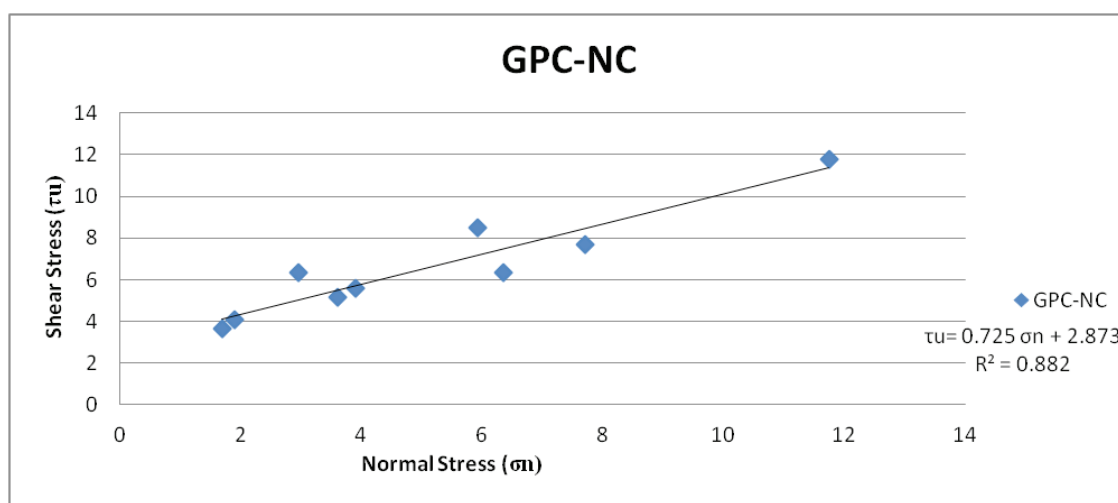
6. These diagrams indicate that the linear relationship holds good for the variation of shear stress with normal stress at the interface for both GPC-NC and SCC-NC overlaid-substrate.

However, to eliminate the effect of compressive strength of concrete the shear and normal stresses are normalized by dividing with the respective concrete compressive strength. Fig. 7. shows the comparison of the variation of normalized shear stress with normal stress for both GPC-NC and SCC-NC overlaid-substrate combination. The normalization has resulted in arriving at better shear and compressive strength relations.

The normalization of shear stress-normal stress variation at interface has yielded the following relations.

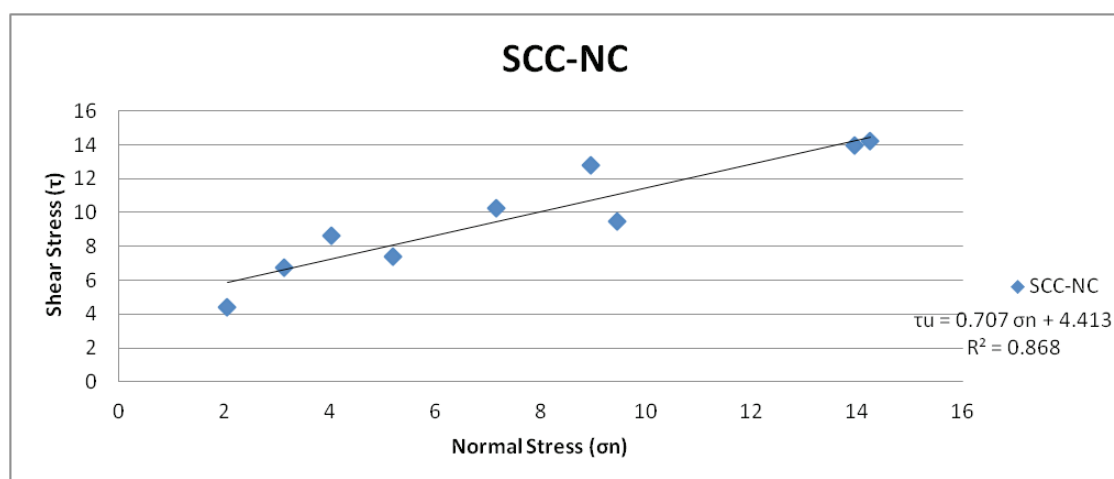
SCC-NC overlay-substrate combination

$$(\tau / f_c) = 0.638 (\sigma_n / f_c) + 0.119 \text{ with } R^2 = 0.953$$



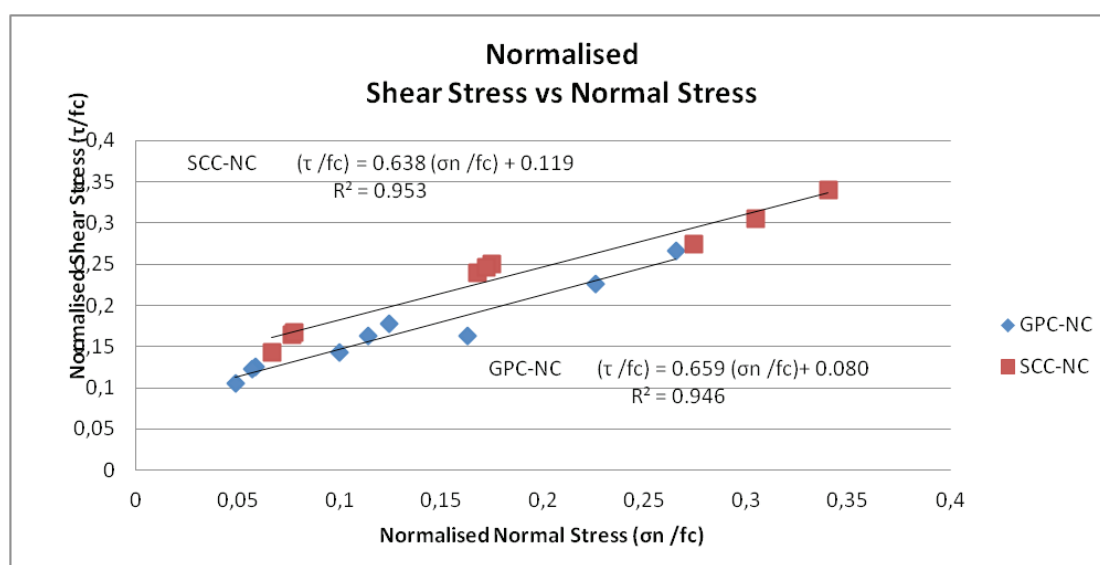
Rys. 5. Zależność pomiędzy naprężeniem ścinającym a normalnym dla GPC-NC

Fig. 5. The variation of shear stress with normal stress for GPC-NC



Rys. 6. Zależność pomiędzy naprężeniem ścinającym a normalnym dla SCC-NC

Fig. 6. The variation of shear stress with normal stress for SCC-NC



Rys. 7. Porównanie znormalizowanej zależności pomiędzy naprężeniem ścinającym i naprężeniem normalnym dla obu zestawów GPC-NC i SCC-NC

Fig. 7. The comparison of the variation of normalized shear stress with normal stress for both GPC-NC and SCC-NC

znormalizowanej zależności pomiędzy naprężeniem ścinającym i naprężeniem normalnym dla obu rodzajów betonu naprawczego GPC-NC i SCC-NC. Znormalizowanie wyników wpłynęło korzystnie na współczynnik ich zmienności.

Normalizacja zależności pomiędzy naprężeniem ścinającym i naprężeniem normalnym na styku pozwoliła na uzyskanie następujących wyników.

Beton zespolony SCC-NC

$$(\tau/f_c) = 0,638 (\sigma/f_c) + 0,119; R^2 = 0,953$$

A więc wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie styku wynosi

$$\tau = 0,638 (\sigma) + 0,119 f_c$$

Kohezja czyli minimalna wytrzymałość na ścinanie styku = $c_{SN} = 0,119 f_c$ MPa.

Kąt tarcia wewnętrznego pomiędzy SCC i NC w płaszczyźnie styku = $\phi_{SN} = \text{tg}^{-1}(0,638) = 32,5^\circ$

Beton zespolony GPC-NC

$$(\tau/f_c) = 0,659 (\sigma/f_c) + 0,080; R^2 = 0,946$$

A więc wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie styku wynosi

$$\tau = 0,659 (\sigma) + 0,080 f_c$$

Kohezja czyli minimalna wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie styku = $c_{GN} = 0,080 f_c$ MPa.

Kąt tarcia wewnętrznego pomiędzy GPC i NC w płaszczyźnie styku = $\phi_{GN} = \text{tg}^{-1}(0,659) = 33,4^\circ$

Minimalna wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie styku

Minimalna wytrzymałość na ścinanie, czyli kohezja w płaszczyźnie styku betonu naprawczego i stanowiącego podłoże SCC-NC, wynosi około 48,7% [zgodnie z $(0,119-0,08) \times 100/0,08$], więcej niż w przypadku betonu zespolonego GPC-NC. Może to być spowodowane gorszą spójnością mikrostruktury wewnętrznej betonu GPC w porównaniu do betonu SCC. Gorszą spójność mikrostruktury wewnętrznej betonu GPC potwierdzają także małe wartości uzyskane w badaniu prędkości powierzchniowej fali ultradźwiękowej



Rys. 8. Zerwanie przyczepności w zespolonej belce

Fig. 8. Adhesive failure pattern of specimens

Thus the shear strength at interface is

$$\tau = 0.638 (\sigma) + 0.119 f_c$$

The cohesion i.e the minimum shear strength at the interface = $c_{SN} = 0.119 f_c$ MPa.

The angle of internal friction between SCC and NC at the interface = $\phi_{SN} = \text{tg}^{-1}(0.638) = 32.5^\circ$

GPC-NC overlay-substrate combination

$$(\tau/f_c) = 0.659 (\sigma/f_c) + 0.080 \text{ with } R^2 = 0.946$$

Thus the shear strength at interface is

$$\tau = 0.659 (\sigma) + 0.080 f_c$$

The cohesion i.e the minimum shear strength at the interface = $c_{GN} = 0.080 f_c$ MPa.

The angle of internal friction between SCC and NC at the interface = $\phi_{GN} = \text{tg}^{-1}(0.659) = 33.4^\circ$

Minimum shear bond strength at the interface

The minimum shear bond strength i.e the cohesion at the interface for SCC-NC overlay –substrate combination is about 48.7% (i.e $[0.119-0.08] \times 100/0.08$) more than that in GPC-NC overlay –substrate combination. This may be due to the poor internal structure of GPC compared to SCC. The poor integrity of internal structure of GPC is also evidenced by the low values of ultrasonic pulse velocity measured compared to those of SCC and NC. However this aspect needs further investigation to strengthen the results.

Angle of internal friction at the interface

The angle of internal friction at the interface for both GPC-NC and SCC-NC overlay –substrate combinations is more or less same at 33° . The failure pattern of specimens is adhesive in nature and is as shown in Fig.8. The similarity in the failure pattern of GPC-NC and SCC-NC overlay –substrate combinations indicate constant frictional resistance.

8. Conclusions

From the experimental investigation, the following conclusions are drawn.

1. The ultimate load is increasing with increase in the interface angle in both GPC-NC and SCC-NC overlaid-substrate combinations.
2. The ultimate load is increasing with increase in grade of substrate / overlaid concrete, whichever is less.
3. The linear relationship holds good for the shear stress vs normal stress behaviour at the interface in both GPC-NC and SCC-NC overlaid-substrate combinations.

w porównaniu do zespolonych betonów SCC i NC. Jednakże zagadnienie to wymaga dalszych badań.

Kąt tarcia wewnętrznego w płaszczyźnie styku

Kąt tarcia wewnętrznego w płaszczyźnie styku w przypadku obu betonów zespolonych GPC-NC i SCC-NC wynosi mniej więcej 33° . Uszkodzenie próbek przejawiające się zerwaniem przyczepności pokazano na rysunku 8. Podobny przebieg zniszczenia obu betonów zespolonych GPC-NC i SCC-NC wskazuje na stały opór tarcia.

8. Wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły na wysunięcie następujących wniosków.

1. Obciążenie niszczące rośnie wraz ze wzrostem kąta nachylenia płaszczyzny połączenia obu betonów zespolonych GPC-NC i SCC-NC.
2. Wartość obciążenia niszczącego rośnie wraz ze wzrostem klasy betonu stanowiącego podłoże lub betonu naprawczego, w zależności od tego, która jest mniejsza.
3. Zależność liniowa na wykresach przedstawiających stosunek naprężenia ścinającego do naprężenia normalnego utrzymuje się w przypadku obu betonów: GPC-NC i SCC-NC.
4. Kohezja w płaszczyźnie styku w przypadku betonu zespolonego SCC-NC jest o 48,7%, większa niż w przypadku betonu GPC-NC.
5. Kąt tarcia wewnętrznego w płaszczyźnie styku obu betonów zespolonych GPC-NC i SCC-NC wynosi mniej więcej 33° .

Podziękowanie

Autorzy pragną podziękować za wsparcie Wydziału / pracowników oraz studentów z Zakładu Konstrukcji, NIT, Warangal.

4. The cohesion at the interface in the case of SCC-NC overlaid-substrate combination is 48.7% higher than that of GPC-NC overlaid-substrate combination.
5. The angle of internal friction at the interface for both GPC-NC and SCC-NC overlay-substrate combinations is more or less same at 33° .

Acknowledgement

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

References / Literatura

1. M. Gohnert, Horizontal shear transfer across a roughened surface, Elsevier, Cem.Concrete. Comp., **25**, 3, 379-385 (2003).
2. H. Costa, P. Santos, E. Julio, Bond Strength of Normal-to-Lightweight Concrete Interfaces, part of the research project "Intelligent Super Skin - Enhanced Durability for Concrete Members" funded by the Portuguese Science and Technology Foundation (FCT) with reference PTDC/ECM/098497/2008.
3. IS 2770, Methods of Testing Bond Strength in Reinforced Concrete- Part I, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India 1997.
4. P. Paramasivam, K. C. Ong, W. Xu, "Mechanical Behavior of the Interface between Substrate and Repair Material", pp.71-90, ACI SP-206, April 1, 2002.
5. P. Santos, Assessment of the Shear Strength between Concrete Layers. PhD Thesis. University of Coimbra, Portugal 2009.
6. G. Saravanan, C. A. Jeyasehar, S.Kandasamy, Flyash Based Geopolymer Concrete-A State of the Art Review, Journal of Engineering Science and Technology Review, **6**, 1, 25-32 (2013).