

## **Wytrzymałość wysokowartościowego siatkobetonu w dwuosiowym ściskaniu–rozciąganiu**

### **Strength of high performance ferrocement composite in biaxial compression–tension**

#### **1. Wstęp**

Siatkobeton jest kompozytem budowlanym o zróżnicowanych właściwościach, złożonym z rozmieszczonych przestrzennie siatek z drutu o małej średnicy w matrycy cementowej (ACI Komitet 549, 1993, IFS Komitet 10, 2001) (1, 2). Obecność siatek z drutu o małej średnicy, rozmieszczonych równomiernie i blisko siebie w objętości matrycy cementowej polepsza wiele właściwości, a mianowicie plastyczność, odporność na kruche pękanie i wytrzymałość pomimo zarysowania, w porównaniu z klasycznym zbrojonym betonem (3, 5). Jest on więc bardzo przydatnym materiałem do budowy tradycyjnych konstrukcji takich jak sklepienia, powłoki, kopuły i podwójnie zakrzywione konstrukcje nazywane także łupinowymi. Element wydzielony z tego rodzaju konstrukcji jest elementem dwuwymiarowym, poddawany dwóm normalnym naprężeniom w jednej płaszczyźnie i jednemu naprężeniu ściskającemu (6). Ponieważ przyłożone obciążenia są głównie przenoszone poprzez przegrodę, trzeba zbadać właściwości siatkobetonu poddanego naprężeniom występującym w płaszczyźnie. Oprócz licznych badań przeprowadzonych dotychczas, obejmujących różne aspekty projektowania szeregu zastosowań konstrukcyjnych siatkobetonu (7), to ważne zagadnienie wzbudziło małe zainteresowanie. Naprężenie punktowe w takich konstrukcjach może rozkładać się na dwuosiowe ściskanie-rozciąganie. Przeprowadzenie badań zachowania tego betonu przy równoczesnym ściskaniu i rozciąganiu jest więc niezbędne dla racjonalnego projektowania. Zastosowanie zapraw o wysokich właściwościach jako matrycy w siatkobetonie zapewnia lepsze właściwości w porównaniu ze zwykłym siatkobetonem lub żelbetem, szczególnie z punktu widzenia wytrzymałości i trwałości (5, 8, 9). Gęstsze i równomierne rozmieszczenie zbrojenia przekształca kruchą zaprawę w zupełnie inne tworzywo w porównaniu z żelbetem (10-12). Zwykle stosowane kształtki do badań dwuosiowych naprężeń obejmują kostki, walce, walce wydrążone i płytki. W prezentowanych badaniach zastosowano walce wydrążone w celu pomiaru wytrzymałości siatkobetonu o wysokich właściwościach podczas dwuosiowego ściskania-rozciągania.

#### **1. Introduction**

Ferrocement is a versatile composite construction material, consisting of small diameter wire meshes dispersed spatially in the mortar matrix (ACI committee 549, 1993, IFS committee 10, 2001) (1, 2). The presence of small diameter steel wires closely and uniformly spaced in the volume of cement mortar improves many properties like ductility, toughness and crack resistance as compared to conventional reinforced concrete (3, 5). It has a good potential for use in the construction of traditional structures like arches, vaults, domes and doubly curved structures, also called funicular shells. An element isolated from such type of structures, is a two dimensional element subjected to two in-plane normal stresses and one in-plane shear stress(6). As the applied loads are primarily carried through the development of membrane action, the behavior of ferrocement under in plane stresses needs to be established. In spite of extensive investigations carried out in the past on various aspects of ferrocement design, construction and possible applications (7), this important aspect has received very little research attention. The stress at a point in such structures can be in biaxial compression-tension. A study on the behaviour in compression-tension is needed to establish a rational design. The use of high performance mortar as the matrix for ferrocement ensures a performance superior to ordinary ferrocement and other reinforced products, particularly in respect of strength and durability (5, 8, 9). The closer distribution and uniform dispersion of reinforcement transform the brittle mortar into a distinctly different material from RCC (10-12). The commonly adopted specimens for conducting tests in biaxial stress states are: cubes, solid cylinders, hollow cylinders and plates. In the present investigation, hollow cylindrical specimens were used to investigate the strength of high performance ferrocement in biaxial compression-tension.

#### **2. Experimental Program**

Hollow cylinders can be tested easily in all biaxial stress combinations. The test specimens were of height 200 mm, outer radius 75

## 2. Program doświadczeń

Różne dwuosiowe kombinacje naprężeń można łatwo badać stosując wydrążone walce. Badane próbki miały wysokość 200 mm, zewnętrzną średnicę 75 mm i grubość ścianki 20 mm. W celu przygotowania zapraw o wysokich właściwościach stosowano cement hutniczy, piasek o uziarnieniu mniejszym od 1,8 mm, korzystny dodatek pyłu krzemionkowego i domieszkę. W mieszance utrzymano stosunek cementu do piasku 1:1, a wskaźnik w/c 0,34. Pył krzemionkowy dodawano zastępując 10% masowych cementu (8, 9). W związku ze wzrostem powierzchni właściwej spowodowanej dodatkiem pyłu krzemionkowego pogorszyła się urabialność. Jednak dodatek superplastyfikatora zmniejszył wodożądność (8). Zaformowano szereg walców o średnicy 50 mm stosując tę samą zaprawę, która posłużyła do wykonania wydrążonych walców. Wytrzymałość zapraw po 28 dniach wynosiła 60 MPa, a właściwości stosowanych siatek z drutu podano w tabelicy 1. Główną zmienną w badaniach stanowiła powierzchnia właściwa ( $S_F$ ), którą modyfikowano zmieniając liczbę warstw siatki z drutu. Traktowano tę zmienną jako parametr wpływający znacznie na wytrzymałość siatkobetonu na ściskanie (13-15).

Czynnik powierzchni właściwej jest dany wyrażeniem:

$$S_F = s \cdot \sigma_y / \sigma_p \quad [1]$$

gdzie:

$s$  jest stosunkiem powierzchni właściwej,

$\sigma_y$  jest wytrzymałością graniczną drutu w kierunku działania siły,

$\sigma_p$  jest wytrzymałością samej zaprawy na ściskanie.

Stosunek powierzchni właściwej jest całkowitą powierzchnią właściwą drutu zbrojącego odniesioną do objętości zaprawy przypadającej na jednostkę długości kształtki o danej średnicy i grubości.

Stosunek powierzchni właściwej:

$$s = \frac{\pi d \times n \times N}{b \times h} \quad [2]$$

gdzie:

$d$  – średnica drutu,

$n$  – ilość drutów w jednej warstwie,

$N$  – ilość warstw siatki z drutu,

$b, h$  – średnia średnica i grubość kształtki.

W prowadzonych doświadczeniach czynnik powierzchni właściwej przypadał w przedziale od 8 do 12. Zaformowano 72 kształtki i przeprowadzono pomiary: w przypadku 36 próbek przy stałej sile rozciągającej w kierunku poprzecznym do osi kształtki i wzrastającej osiowej sile ściskającej aż do zniszczenia próbki, a w przypadku następnym 36 przy stałej sile ściskającej osiowo i rosnącej sile rozciągającej w kierunku wydrążenia aż do zniszczenia próbki.

### 2.1. Przygotowanie kształtek

Do sporządzania kształtek stosowano metalowe formy walcowe o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm z solidnym walcem drew-

mm and thickness 20 mm. Slag cement, sand passing through 1.18 mm sieve, optimum dosages of silica fume and chemical admixture were used in the preparation of high performance mortars. The mix proportion was cement to sand 1:1 with a water-cementitious ratio 0.34. The silica fume was used as a partial replacement of 10% by weight of cement (8, 9). Due to the increased surface area owing to the presence of silica fume the workability has reduced. The water-reducing admixture (superplasticizer) compensated the water demand (8). A number of 50 mm diameter mortar cubes were cast with the same mortar as used for ferrocement hollow cylindrical specimens. The 28-day strength of the mortar was 60 MPa. The properties of the wire mesh used are given in Table 1.

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI STOSOWANEJ SIATKI

PROPERTIES OF MESH WIRE USED

Axial direction of the specimen Kierunek osiowy kształtki	
Diameter of wire Średnica drutu, mm	0.47
Yield strength Wytrzymałość graniczna, MPa	510
Ultimate strength Wytrzymałość rzeczywista, MPa	524
Hoop direction of the specimen Obwodowy kierunek kształtki	
Diameter of wire Średnica drutu, mm	0.47
Yield strength Wytrzymałość graniczna, MPa	512.5
Ultimate strength Wytrzymałość rzeczywista, MPa	536

The principle variable in the investigation was specific surface factor ( $S_F$ ) and was achieved by varying the number of layers of wire mesh. It was identified as an effective parameter influencing the mechanical properties of ferrocement in compression (13-15).

The specific surface factor is given by the expression

$$S_F = s \cdot \sigma_y / \sigma_p \quad [1]$$

where,  $s$  is the specific surface ratio,  $\sigma_y$  is the yield strength of the wires in the direction of force and  $\sigma_p$  is the plain mortar strength in compression. Specific surface ratio is the total surface area of contact of the reinforcement wires present in the direction of application of force to the volume of the mortar per unit length of the specimen, in the direction of loading of the given width and thickness of the specimen.

The specific surface ratio:

$$s = \frac{\pi d \times n \times N}{b \times h} \quad [2]$$

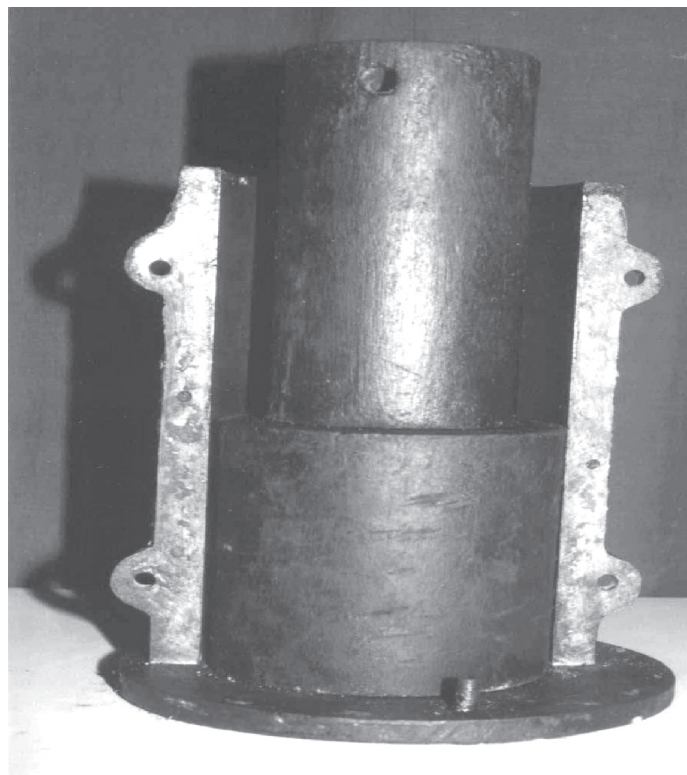
where  $d$  is the diameter of wire,  $n$  the number of wires in one layer,  $N$  is the number of layers of wire mesh,  $b$  and  $h$  represent the mean diameter and the thickness of the specimen.

nianym o wysokości 150 mm, na spodzie. Jeszcze jeden walec drewniany o średnicy równej wewnętrznej średnicy wydrążenia w walcowej kształtce z siatkobetonu i o wysokości o 50 mm większej od wysokości próbki umieszczano w środkowym zagłębieniu dolnego walca aby zapewnić jednolitą przestrzeń pierścieniową o wysokości 150 mm. Typową formę stosowaną do sporządzania próbek pokazano na rysunku 1.

Potrzebną siatkę o szerokości 145 mm i o długości nieco większej od koniecznej do uzyskania założonej liczby warstw odcinano z rolki. 145 mm – długość poprzeczna drutów składała się na druty ułożone w kierunku pionowym, to jest zgodnym z pionową osią kształtki. Siatkę zwijano starannie aby zapewnić walcowy kształt próbki. Przygotowaną siatkę (rysunek 2) umieszczano w przestrzeni pierścieniowej formy. Między warstwami siatek umieszczano pręty dystansujące, a płytki przykrywające były rozmieszczone na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni kształtek. Zaprawę wprowadzano pomiędzy warstwy siatki z równoczesną wibracją form. Po około czterech godzinach od zaformowania kształtki zabezpieczano wilgotną tkaniną aby uchronić je przed wysychaniem. Kształtki wyjmowano z form po 28 dniach i przechowywano w powietrzu przed badaniami. Dodatkowo formowano pełną kształtkę walcową w celu pomiaru wytrzymałości na ściskanie.

## 2.2. Stanowisko pomiarowe

Kształtkę poddawano osiowej sile ściskającej w sposób konwencjonalny, natomiast ciśnienie promieniowe wywierano na jej wewnętrzną powierzchnię, za pomocą gumowej rurki. Schemat stanowiska pomiarowego pokazano na rysunku 3. Stanowisko pomiarowe można wykorzystywać w obu metodach to znaczy



Rys. 1. Forma

Fig. 1. Mould

In the present investigation, the specific surface factor was in the range of 8 to 12. A total of 72 specimens were cast and tested, 36 for constant tensile force in hoop direction and increase in the axial compressive force till failure and 36 for constant force in axial compression and increase in the force in hoop tension till failure.

## 2.1. Preparation of specimen

The standard 150 mm diameter and 300 mm cast iron cylindrical mould was fitted with a solid 150 mm height teak wood cylinder at the bottom. One more wooden cylinder of diameter equal to the inner diameter of the ferrocement hollow cylindrical specimen and height equal to 50 mm more than the height of the specimen was placed in the central recess of the bottom cylinder to get the required uniform thick annular space over a height of 150 mm. A typical mould used for casting the specimens is shown in Fig. 1.

The required size of mesh 145 mm wide and of length slightly more than that required to get the number of layers was cut from the standard mesh roll. The 145 mm length transverse wires formed the wires in the vertical direction i.e. the vertical axis of the specimen. The mesh was wound tightly to confirm the cylindrical shape of the specimen. The fabricated mesh (Fig. 2) was placed in the



Rys. 2. Przygotowanie siatki

Fig. 2. Fabricated mesh



zwiększając osiowe ściskanie aż do zniszczenia próbki przy stałej sile pierścieniowej [metoda (a)], lub zwiększając naprężenie pierścieniowe aż do zniszczenia kształtki przy stałej sile osiowo ściskającej [metoda (b)].

Wydrążone kształtki walcowe (B) poddawano naprężeniu obwodowemu przykładając ciśnienie promieniowe za pomocą wprowadzonej do przestrzeni pierścieniowej rurki gumowej (C), pomiędzy próbką a rurką stalową (F), pompując do niej olej przez zawór wlotowy (D) i pokazany miernik ciśnienia (E). Dolne i górne płytki stalowe (A) ograniczają rozszerzalność rurki gumowej i w związku z tym siła promieniowa oddziałuje na wewnętrzną powierzchnię walca z siatkobetonu. Umieszczenie rurki gumowej wewnątrz kształtki pokazano na rysunku 4.

Siłę ściskającą próbkę pionowo przykładano za pomocą prasy Tinius Olsena o nacisku 200 ton.

### 2.3. Metoda pomiarowa

Podstawowa metoda badawcza polegała na przyłożeniu stałej siły na jednym z głównych kierunków i zwiększaniu siły w kierunku prostopadłym. Zastosowano cztery wprowadzane stopniowo poziomy zmiany obciążenia co 20%, od 20% do 80% teoretycznej wytrzymałości na ściskanie.

W jednym z głównych kierunków, to znaczy obwodowym lub osiowym, przykładano wstępnie ustaloną siłę i utrzymywano na stałym poziomie. Natomiast obciążenie w drugim głównym kierunku zwiększano stopniowo, aż do zniszczenia kształtki. W opisywanych doświadczeniach zastosowano obie metody badania kształtki z siatkobetonu. Metodę (a) ze stałą siłą w kierunku poziomym (kierunek pierścienia) i metodę (b) ze stałą siłą w kierunku pionowym (ściskanie osiowe). Wzór na maksymalną wytrzymałość na ściskanie siatkobetonu ( $\sigma_u$ ) w kierunku osiowym znaleziono w wyniku doświadczeń z wydrążonymi walcowymi kształtkami z siatkobetonu (5, 12) i ma on następującą formę:

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_p} = 1.0 + 0.0083 S_F \quad [3]$$

gdzie:

$\sigma_p$  jest wytrzymałością samej zaprawy,

$S_F$  jest czynnikiem powierzchni właściwej.

Jednoosiowa wytrzymałość na rozciąganie w kierunku działającej siły jest równa zdolności do przenoszenia obciążenia przez zbrojenia z drutów w tym kierunku (7):

$$\sigma_t A_t = \sigma_{us} A_s \quad [4]$$

gdzie:

$\sigma_t$  jest maksymalną wytrzymałością na rozciąganie siatkobetonu,

$A_t$  jest powierzchnią przekroju poprzecznego siatkobetonu,

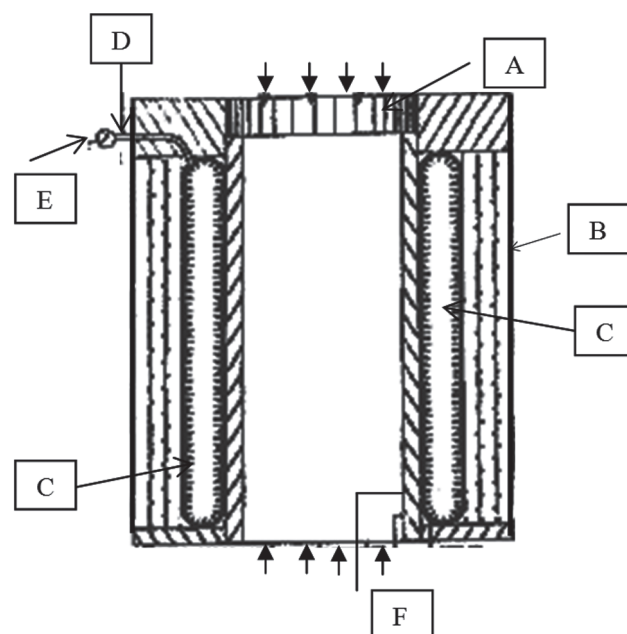
$\sigma_{us}$  jest maksymalną wytrzymałością na rozciąganie zbrojenia,

$A_s$  jest powierzchnią zbrojących drutów w kierunku działania siły.

annular space of the mould. Spacer rods were kept in between the mesh layers and cover pieces were provided on the inner and outer surfaces. The mortar was filled in between the mesh layers, simultaneously vibrating the moulds. After about four hours of casting, the specimens were cured with damp burlap to prevent moisture loss. The specimens were stripped of the moulds 28 days after casting and then air cured before testing. Companion plain hollow cylindrical specimens were cast to obtain direct compression strength.

### 2.2. Test set-up

The axial compressive force was applied by conventional method and the radial pressure was applied on the inner surface of the specimen with the help of a rubber tube. The schematic diagram of the test set up shown in Fig. 3. This set up can be utilized in both the directions viz. increasing the axial compression till failure with constant hoop force [Method (a)] or increasing the hoop tension till failure with constant axial compressive force [Method (b)].



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego

Fig. 3. Schematic diagram of the test setup

The hollow cylindrical specimens (B) were subjected to circumferential tension by applying radial pressure by inserting a rubber tube (C) the annular space between the cast iron pipes (F) and inflating the same by pumping oil through the inlet valve (D) with the pressure gauge shown (E). The top and bottom steel plates (A) restrain the expansion of the rubber tube and thus the radial force was transferred to the inner surface of the of the ferrocement cylinder as a reaction. The arrangement of the rubber tube inside the specimen is shown in Fig. 4.

The compressive force in the vertical direction was applied using a Tinius Olsen testing machine of 200 Tonnes capacity.

Jednoosiową wytrzymałość siatkobetonu w głównych kierunkach to jest: kierunku osiowym ( $\sigma_u$ ) i obwodowym ( $\sigma_{th}$ ) obliczono z podanych wzorów. Wiadomo, że obwodowe naprężenie w przekroju poprzecznym walca o dużej średnicy (grubego) poddanego wewnętrznemu obciążeniu jest niejednorodne. Pomimo tego badane kształtki z siatkobetonu o cienkich ścianach traktowano jako wykazujące jednolite naprężenia, takie że całkowita siła działająca na przekrój była taka sama jak w przypadku niejednorodnego naprężenia. Naprężenie rozciągające w kierunku obwodowym odpowiadające temu założeniu jest dane wyrażeniem:

$$\sigma_{th} = \frac{R_i}{R_o - R_i} P_i \quad [5]$$

gdzie:

$P_i$  – ciśnienie promieniowe,

$R_i$  – wewnętrzny promień,

$R_o$  – zewnętrzny promień walca.

Jednoosiową wytrzymałość na ściskanie w kierunku pionowym obliczono z równania 3, a ciśnienie promieniowe  $P_i$  obliczono z równania (5).

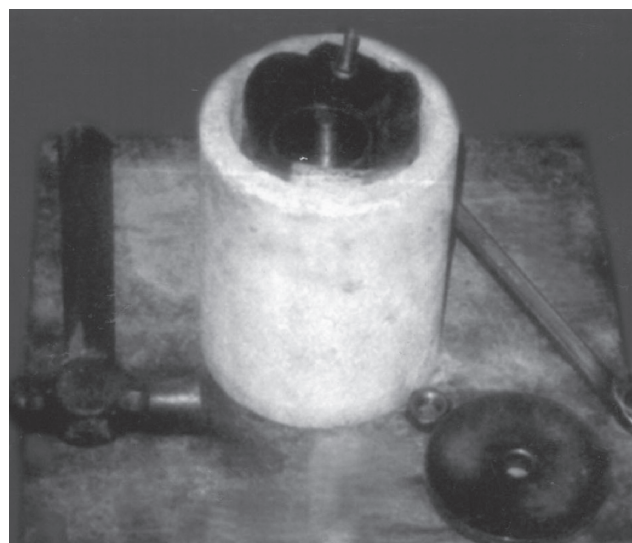
### 3. Właściwości kształtek pod obciążeniem

*Metoda (a) ze stałym obciążeniem w kierunku poziomym.*

Kształtki poddano wyznaczonemu wcześniej obciążeniu w kierunku poziomym (co odpowiadało ciśnieniu oleju), a siłą ściskającą w kierunku pionowym zwiększano stopniowo. Siły w kierunkach pionowym i poziomym mierzono w różnych fazach doświadczenia. W większości przypadków pęknięcia występowały w kierunku pionowym, na środkowej powierzchni kształtek. Ze wzrostem pionowego obciążenia ilość spękań wzrastała. Powstały także nowe pęknięcia, podczas gdy wcześniejsze pęknięcia ulegały wzdłużnej propagacji, aż do osiągnięcia przez pionowe obciążenie prawie 90% maksymalnej wytrzymałości (rysunek 5). Po tej fazie obciążenie wzrastało wolno, a rozwarcie pęknięć powiększało się szybko. Po osiągnięciu maksymalnej wartości obciążenia próba zwiększenia siły w kierunku pionowym powodowała jedynie natychmiastowe zwiększenie obciążenia. Kształtka z siatkobetonu nie wykazywała znaczących odprysków lub szczelin prowadzących do oddzielenia zaprawy od siatki, gdy ilość zbrojenia była mała. Gdy ilość zbrojenia była duża siatki wykazywały tendencję do odkształcenia po osiągnięciu maksymalnego obciążenia. Wielkości osiągnięte w szczytowej fazie stosowano w obliczeniach wytrzymałości przy obciążeniu dwuosiowym.

*Metoda (b) przy stałym obciążeniu pionowym*

Najpierw przykładano wcześniej wyznaczoną siłą ściskającą w kierunku pionowym, a obciążenie w kierunku poziomym (to jest ciśnienie oleju) zwiększano stopniowo. Mierzono naprężenia (siły) w kierunkach poziomym i pionowym w różnych fazach. Notowano fazę, w której pojawiły się pierwsze pęknięcia. Większość spękań występowało w kierunku pionowym w środkowej części powierzch-



Rys. 4. Umieszczenie rurki gumowej

Fig. 4. Arrangement of rubber tube

### 2.3. Method of Testing

The general method of testing was to apply a constant force in one of the principal directions and increase the force in the orthogonal direction. Four discrete levels were taken in steps of 20% ranging from 20% to 80% of the theoretical hoop compressive strength.

A predetermined force in one of the principal directions i.e., circumferential or axial was applied at a particular discrete level and maintained constantly. The force in the other principal direction was then gradually increased till failure occurred. In the present investigation ferrocement specimens were tested by both alternatives; method (a) with constant force in the horizontal direction (hoop direction) and method (b) with constant force in the vertical direction (axial compression).

The model for the ultimate compressive strength of ferrocement ( $\sigma_u$ ) in the axial direction was obtained from the tests conducted on ferrocement hollow cylindrical specimens (5, 12) and is given by the expression

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_p} = 1.0 + 0.0083 S_F \quad [3]$$

$\sigma_p$  is the strength of plain mortar and  $S_F$  is the specific surface factor.

The uniaxial tensile strength in the direction of force is equal to the load carrying capacity of the reinforcing wires in that direction (7).

$$\sigma_t A_t = \sigma_{us} A_s \quad [4]$$

where,  $\sigma_t$  is the ultimate tensile strength of ferrocement,  $A_t$  is the cross-sectional area of ferrocement,  $\sigma_{us}$  is the ultimate tensile strength of the reinforcing wires in the direction of force and  $A_s$  is the area of the reinforcing wires in the direction of force.

The uniaxial strength of ferrocement in the principal directions i.e; axial direction ( $\sigma_{lv}$ ) and circumferential direction ( $\sigma_{th}$ ) have

ni kształtek (rysunek 6). Ze wzrostem ciśnienia oleju ilość spękań wzrastała. Nowe pęknięcia powstawały w dalszym ciągu podczas gdy wcześniejsze pęknięcia ulegały wzdłużnej propagacji, aż do osiągnięcia przez olej ciśnienia wynoszącego prawie 90% wartości maksymalnej. Po przekroczeniu tej fazy ciśnienie oleju wzrastało powoli, a rozwarłość pęknięć wzrastała szybko. Po osiągnięciu maksymalnej wielkości próba zwiększenia ciśnienia oleju powodowała tylko natychmiastowy wzrost ciśnienia. Z tych obserwacji wynika, że kształtki siatkoconu w dalszym ciągu stawiają opór sile rozciągającej, nawet po znacznym popękaniu. Stwierdzono, że siła ściskająca nie była stała po przekroczeniu poziomu 60% naprężenia ściskającego w kierunku pionowym. Wartości osiągnięte w fazie szczytowego obciążenia zastosowano w obliczeniach wytrzymałości przy dwuosowym obciążeniu.

#### 4. Diagramy zależności wzajemnych

Jednoosiową maksymalną wytrzymałość na ściskanie ( $\sigma_{cv}$ ) i rozciąganie ( $\sigma_{th}$ ) w kierunkach pionowym i poziomym kształtek z siatkoconu z czterema warstwami siatki podano odpowiednio w kolumnach 4 i 5 w tabeli 2.

W stanie dwuosowego obciążenia wytrzymałość na rozciąganie w kierunku poziomym ( $\sigma'_{th}$ ) wyliczono z równania 4, a wytrzymałość na ściskanie w kierunku pionowym ( $\sigma'_{cv}$ ) obliczono w sposób klasyczny. Wielkości  $\sigma'_{cv}$  i  $\sigma'_{th}$  podano odpowiednio w kolumnach 6 i 7 tabeli 2. Kształtki o numerach 1-12 w tabeli 2 oznaczają próbki zniszczone przy ściskaniu osiowym, podczas gdy kształtki z numerami 13-24 zostały zniszczone w wyniku naprężeń promieniowych, w kierunku obwodowym. Przedrostki A, B, C, i D oznaczają odpowiednio poziomy 20%, 40%, 60% i 80% maksymalnego naprężenia w kierunku promieniowym, podczas gdy E, F, G i H są tymi samymi poziomami maksymalnych naprężeń ściskających w kierunku osiowym. 41, 42 i 43 oznacza ilość kształtek czterowarstwowych przy tym samym obciążeniu. Podobne wyniki otrzymano także w przypadku kształtek z siatkoconu z pięcioma i sześcioma warstwami siatek. Przykładowo w tabeli podano tylko szczegółowe wyniki badania czterowarstwowych kształtek metodami (a) i (b).

Analiza wyników zebranych w kolumnach 6 i 7 w tabeli 2 dla zbioru kształtek z tymi samymi parametrami, to znaczy z tym samym czynnikiem powierzchni właściwej pokazuje, że  $\sigma'_{cv}$  maleje gdy  $\sigma'_{th}$  dla różnych wybranych poziomów rośnie. W celu ustalenia wariancji pomiędzy  $\sigma'_{cv}$  i  $\sigma'_{th}$  zaznaczono na rysunku wyniki w formie punktów przyjmując  $\sigma'_{th}$  na osi odciętych a  $\sigma'_{cv}$  na osi rzędnych. Średnie współrzędne punktów dla każdej grupy kształtek są zaznaczone i połączone krzywą. Trzy diagramy współzależności pokazano na rysunku 7.

Jak wynika z rozmieszczenia punktów naniesionych na rysunku 7 zaznacza się taka sama tendencja na trzech diagramach współzależności wytrzymałości w dwóch kierunkach. Oznacza to, że czynnik powierzchni właściwej nie ma wpływu na tendencję współzależności w przypadku siatkoconu, lecz wpływa na samą

była obliczona na podstawie powyższych równań. Jest znane, że naprężenie obwodowe na przekroju grubego cylindra poddanego ciśnieniu wewnętrznemu jest nierówne. Jednakże, cienkościenne próbki ferrocementu badane w niniejszym badaniu były traktowane jako doświadczające równomiernego naprężenia, tak że całkowita siła działająca na przekroju była taka sama jak w przypadku nierównomiernego naprężenia. Naprężenie w kierunku obwodowym spełniające powyższe założenie jest dane wyrażeniem

$$\sigma_{th} = \frac{R_i}{R_o - R_i} P_i \quad [5]$$

gdzie,  $P_i$  jest ciśnieniem promieniowym a  $R_i$  jest promieniem wewnętrznym a  $R_o$  jest promieniem zewnętrznym cylindra. Wytrzymałość jednoosiową w kierunku pionowym jest obliczana za pomocą równania (3) a ciśnienie promieniowe  $P_i$  do zastosowania jest obliczane za pomocą równania (5).

#### 3. Behaviour under Load

##### Method (a) With constant force in the horizontal direction

Przedeterminowana siła w kierunku poziomym (tj. ciśnienie cieczy) była stosowana początkowo a siła ściskająca w kierunku pionowym była zwiększana stopniowo. Siły w kierunku pionowym i poziomym były rejestrowane na różnych etapach. Głównie pęknięcia były obserwowane w kierunku pionowym na środkowej powierzchni próbek. Zwiększenie siły ściskającej powodowało zwiększenie liczby pęknięć. Nowe pęknięcia kontynuowały się powstawać, podczas gdy starsze pęknięcia propagowały się wzdłuż długości, aż do osiągnięcia prawie 90% wartości granicznej (rys. 5). Po tym etapie, siła zwiększana była powoli a pęknięcia były obserwowane do rozszerzania się szybko. Po osiągnięciu wartości granicznej, próby zwiększenia siły ściskającej w kierunku pionowym spowodowały chwilowe zwiększenie siły tylko. Próbkami ferrocementu nie było obserwowane spękanie czy rozwarstwienie prowadzące do oddzielenia zaprawy od siatki, kiedy ilość siatki jest mała. Kiedy siatka jest duża, siatki wykazywały tendencję do wygięcia po osiągnięciu wartości granicznej. Wartości notowane na etapie granicznym były używane do obliczenia wytrzymałości w stanie dwuosowym.

##### Method (b) With constant force in the vertical direction

Przedeterminowana siła ściskająca w kierunku pionowym była stosowana najpierw a siła w kierunku poziomym (tj. ciśnienie cieczy) była zwiększana stopniowo. Siła w kierunku pionowym i poziomym były rejestrowane na różnych etapach. Etap, na którym pojawił się pierwszy pęknięcie, był notowany. Głównie pęknięcia były obserwowane w kierunku pionowym na środkowej powierzchni próbek (rys. 6). Zwiększenie ciśnienia cieczy powodowało zwiększenie liczby pęknięć. Nowe pęknięcia kontynuowały się powstawać, podczas gdy starsze pęknięcia propagowały się wzdłuż długości, aż do osiągnięcia prawie 90% wartości granicznej. Po tym etapie, ciśnienie cieczy zwiększane było powoli a pęknięcia były obserwowane do rozszerzania się szybko. Po osiągnięciu wartości granicznej, próby zwiększenia ciśnienia cieczy spowodowały chwilowe zwiększenie ciśnienia tylko. Z powyższych obserwacji można zobaczyć, że próbki ferrocementu kontynuowały wytrzymać siłę rozciągającą nawet po





Rys. 5. Obraz spękań próbek (metoda a)

Fig. 5. Crack pattern for specimens (method a)



Rys. 6. Obraz spękań próbek (metoda b)

Fig. 6. Crack pattern for specimens (method b)

wytrzymałość. Z tego względu trzeba znormalizować diagramy w celu stworzenia możliwości przewidywania ogólnych właściwości siatkobetonu, poddanego dwuosowemu rozciąganiu – ścisnaniu. W fazie szczytowej wytrzymałość siatkobetonu na ścisnienie zależy od czynnika powierzchni właściwej, a na rozciąganie od drutu stalowego, w dowolnym kierunku w stanie dwuosowym przy ich odpowiedniej maksymalnej wytrzymałości w przypadku obciążenia jednoosiowego.

W celu znormalizowania wpływu czynnika powierzchni właściwej znaleziona doświadczalnie wytrzymałość na rozciąganie w kierunku poziomym (kolumna 7) została podzielona na odpowiadającą jej obliczoną wytrzymałość maksymalną w kierunku poziomym (kolumna 5) to jest  $\sigma'_{th} / \sigma_{th}$ , a doświadczalnie znalezioną wytrzymałość na ścisnienie w kierunku osiowym (kolumna 6) podzielono na odpowiadającą jej obliczoną wytrzymałość na ścisnienie (kolumna 4) to jest  $\sigma'_{cv} / \sigma_{cv}$ .

Ocena otrzymanych wartości pokazuje, że naprężenia rozciągające /ściskające w kierunkach prostopadłych do kierunku przyłożenia wcześniej wyznaczonej stałej siły zawsze maleją gdy zostanie przyłożona siła ścisniająco/rozciągająca, zgodnie z efektem Poissona. Podobną tendencję zanotowano także w przypadku kształtek zawierających pięć i sześć warstw siatki.

Nałożone na siebie znormalizowane wyniki na diagram współzależności  $\sigma'_{th} / \sigma_{th}$  i  $\sigma'_{cv} / \sigma_{cv}$  dla czterech, pięciu i sześciu warstw siatki pokazano na rysunku 8.

extensive cracking. The compressive force was found to be unstable beyond 60% level of compressive force in the vertical direction. The values noted at the peak stage are taken for the calculation of strength in biaxial state.

#### 4. Interaction Diagram

The uniaxial ultimate compressive strength ( $\sigma_{cv}$ ) and tensile strength ( $\sigma_{th}$ ) in the vertical and horizontal directions of a 4 layered ferrocement specimens are given in columns 4 and 5 of the Table 2 respectively. In biaxial state, tensile strength in horizontal direction ( $\sigma'_{th}$ ) is calculated using equation 4 and the compressive strength in the vertical direction ( $\sigma'_{cv}$ ) is calculated conventionally. The values of  $\sigma'_{cv}$  and  $\sigma'_{th}$  are given in columns 6 and 7 of the same table respectively. The specimens with numbers 1-12 in the Table 2 indicate specimens with failure through axial compression, while specimens with numbers 13 through 24 are those that fail by hoop tension in the circumferential direction. The prefixes A, B, C and D indicates the discrete levels of 20%, 40%, 60% and 80% of the ultimate tension in the hoop direction, while E, F, G and H are the discrete levels of the same percentage of maximum compression in axial direction. 41, 42 and 43 indicate the number of layered specimens for the same discrete load respectively. Similar results are obtained for five and six layered ferrocement specimens also. As an example only the details of four layered specimens tested by methods (a) and (b) are presented in the Table.

An examination of the values in the columns 6 and 7 of the Table 2, for a set of specimens with the identical parameters i.e. the same specific surface factor, shows that the  $\sigma'_{cv}$  decreases as the  $\sigma'_{th}$  for different discrete levels increases. To ascertain the variation between  $\sigma'_{cv}$  and  $\sigma'_{th}$ , the points are plotted on a graph taking  $\sigma'_{th}$  as abscissa and  $\sigma'_{cv}$  as ordinate. The mean coordinates of the points for each group of specimens are marked and joined by curved lines. The three interaction diagrams are plotted as shown in Fig. 7.

An examination of the Fig.7 indicates that the trend in all the three interaction diagrams is same. This means that the specific surface factor does not influence the trend of interaction diagram of ferrocement but influences the actual strength values. Hence, it is required to normalize the diagrams to predict the general behaviour of ferrocement in biaxial tension- compression. At ultimate stage, the behaviour of ferrocement in compression is governed by the specific surface factor and that in tension is governed by steel in each direction under biaxial state with their respective strengths at ultimate in uniaxial state.

To normalize the effect of the specific surface factor, the experimental tensile strength in the hoop direction (column 7) is divided by the corresponding analytical ultimate strength in the hoop direction (column 5) i.e;  $\sigma'_{th} / \sigma_{th}$  and the experimental compressive strength in the axial direction (column 6) is divided by the corresponding analytical uniaxial compressive strength (column 4) i.e;  $\sigma'_{cv} / \sigma_{cv}$ .

An examination of the values obtained shows that the tensile/compressive stresses in the direction orthogonal to the direction

Tablica 2 / Table 2

## WYTRZYMAŁOŚĆ KSZTAŁTEK Z SIATKOBETONU NARAŻONYCH NA DWUOSIOWE ROZCIĄGANIE-ŚCISKANIE

## STRENGTH OF FERROCEMENT SPECIMENS UNDER BIAXIAL TENSION-COMPRESSION

Nr kształtki S.No	Rodzaj obciążeń Specimen desg.	Plain mortar strength Wytrzymałość pełnego walca MPa	Analytical uniaxial strength Obliczona jednoosiowa wytrzymałość, MPa		Experimental biaxial tensile strength Zmierzona dwuosiowa wytrzymałość na rozciąganie, MPa		Non-dimensionalised strength values Bezwymiarowa wytrzymałość	
			Comp. Ściskanie, $\sigma_{cv}$	Tension Rozciąganie, $\sigma_{th}$	$\sigma'_{cv}$	$\sigma'_{th}$	$\sigma'_{cv}/\sigma_{cv}$	$\sigma'_{th}/\sigma_{th}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	TCA41	58.2	62.80	5.62	58.5	1.18	0.932	0.21
2	TCA42				54.3	1.17	0.865	0.21
3	TCA43				56.6	1.21	0.901	0.22
4	TCB41				43.6	2.32	0.694	0.41
5	TCB42				42.6	2.35	0.678	0.42
6	TCB43				46.2	2.36	0.736	0.42
7	TCC41				38.6	3.51	0.615	0.62
8	TCC42				40.1	3.53	0.639	0.63
9	TCC43				36.5	3.34	0.581	0.59
10	TCD41				19.6	4.42	0.312	0.79
11	TCD42				20.4	4.31	0.325	0.77
12	TCD43				18.9	4.51	0.301	0.80
13	CTE41	59.2	64.10	5.62	13.04	5.14	0.20	0.91
14	CTE42				13.26	5.02	0.21	0.89
15	CTE43				12.72	4.68	0.20	0.83
16	CTF41				24.26	3.75	0.38	0.67
17	CTF42				26.89	4.02	0.42	0.72
18	CTF43				25.75	4.68	0.40	0.83
19	CTG41				40.47	2.81	0.63	0.50
20	CTG42				39.15	2.53	0.61	0.45
21	CTG43				37.85	2.42	0.59	0.43
22	CTH41				52.54	1.87	0.82	0.33
23	CTH42				50.64	1.75	0.79	0.31
24	CTH43				51.32	1.62	0.80	0.29

Z przebiegu punktów pomiarowych pokazanych na rysunku 8 wynika, że po znormalizowaniu nie zaznacza się wpływ czynnika powierzchni właściwej lub zawartości zbrojenia na diagramie współzależności. Tendencja występująca na diagramie współzależności jest taka sama w przypadku wszystkich metod badawczych co oznacza, że zachowanie kształtek w dwuosiowym ściskaniu – rozciąganiu lub rozciąganiu – ściskaniu jest symetryczne.

## 5. Model matematyczny

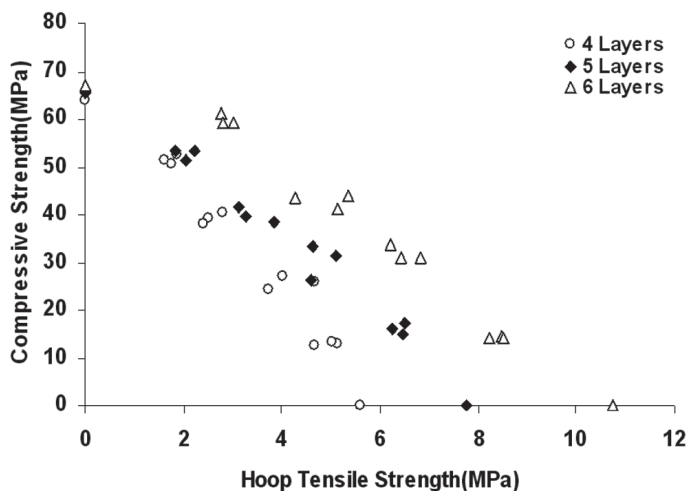
Na znormalizowany diagram współzależności nie ma wpływu zawartość zbrojenia jak to wynika z rysunku 8. Dalej, wydaje się, że występuje określona zależność pomiędzy bezwymiarowym osiowym ściskaniem a promieniowym rozciąganiem. Najlepsze dopasowanie punktów pomiarowych wydaje się dawać parabola.

of application of predetermined constant force always decreases when compression/tension force is applied in that direction owing to the poison's effect. A similar trend was noticed in case of the five and six layered specimens also.

The superposed normalized interaction diagram between  $\sigma'_{th} / \sigma_{th}$  and  $\sigma'_{cv} / \sigma_{cv}$  for four, five and six layers are plotted on a single graph vide Fig. 8.

It can be seen from Fig. 8 that after normalization there is no influence of the specific surface factor or steel content on the interaction diagram. The trend of the interaction diagram was the same in either methods of testing, meaning that the behaviour of specimens in biaxial compression-tension or tension-compression was symmetrical.





Rys. 7. Diagram współzależności

Fig. 7. Interaction diagram

Równanie w formie  $Y = A + BX + CX^2$  daje krzywą pokazaną na rysunku 9.

Otrzymane równanie regresji ma postać:

$$\frac{\sigma'_{cv}}{\sigma_{cv}} = 1,0 - 0,6447 \frac{\sigma'_{th}}{\sigma_{th}} - 0,3301 \left( \frac{\sigma'_{th}}{\sigma_{th}} \right)^2 \quad [6]$$

przy współczynniku R 0,9458.

To równanie może być stosowane do przewidywania właściwości siatkobetonu w dwuosiowym ściskaniu – rozciąganiu.

## 6. Kryteria zniszczenia w wyniku ściskania – rozciągania

Rozważono zastosowanie do siatkobetonu koncepcji Nadaia dotyczącej oktaedrycznych naprężeń ścinających, która jest funkcją oktaedrycznych naprężeń normalnych. Stosując teorię Nadaia do siatkobetonu oktaedryczne normalne naprężenie ( $\sigma_o$ ) i oktaedryczne naprężenie ścinające ( $\tau_o$ ) obliczono z danych pomiarowych stosując następujące wzory:

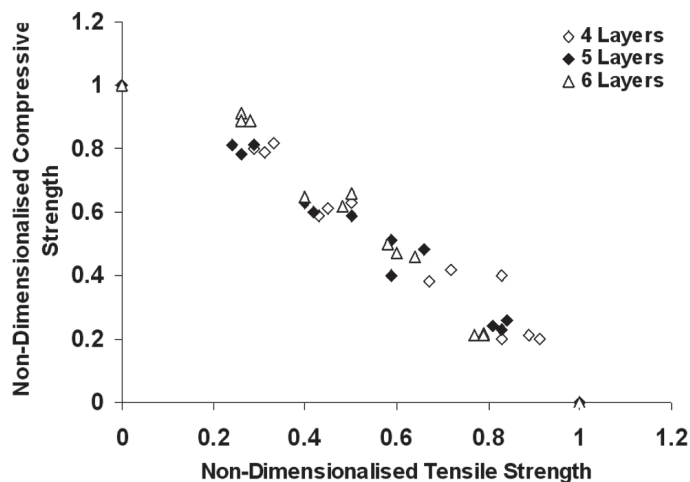
$$\sigma_o = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad [7]$$

$$\tau_o = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad [8]$$

gdzie:  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  są naprężeniami głównymi,  $\sigma_3$  przyjmuje wartość zero jeżeli problem sprowadza się do naprężenia płaskiego. Wartości obejmujące dwuosiowe ściskanie – rozciąganie  $\sigma_o$  i  $\tau_o$  podano w tabelicy 3 dla kształtek z 4, 5 i 6 warstwami siatek.

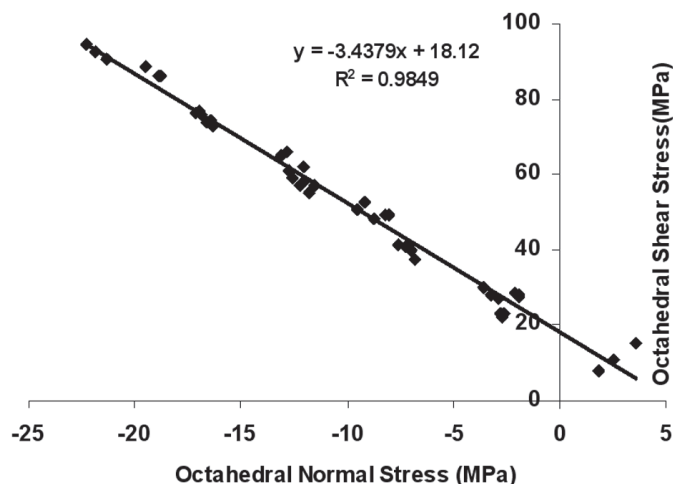
Zbiór wartości  $\sigma_o$  w stosunku do  $\tau_o$  pokazano na rysunku 10. Występuje bardzo dobra korelacja pomiędzy  $\sigma_o$  i  $\tau_o$ . Zależność pomiędzy oktaedrycznym normalnym naprężeniem ścinającym w przypadku dwuosiowego stanu naprężeń przy ściskaniu – rozciąganiu można przedstawić następująco:

$$\tau_o = 18,12 - 3,4379 \sigma_o \quad [9]$$



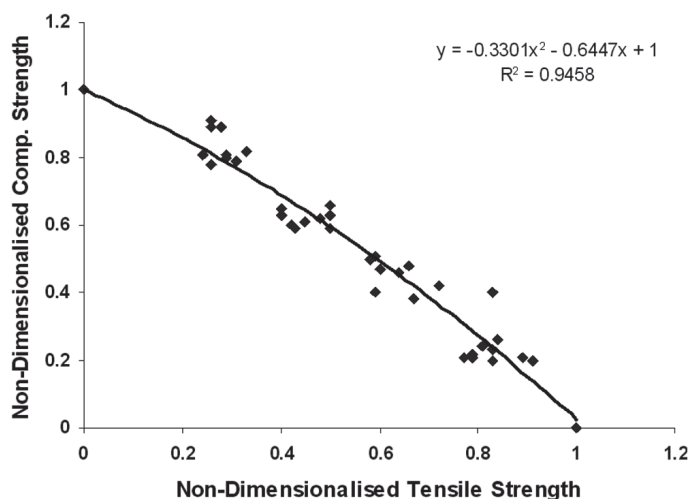
Rys. 8. Diagram nałożonych na siebie znormalizowanych wyników współzależności

Fig. 8. Superposed normalized interaction diagram



Rys. 10. Zależność pomiędzy naprężeniem oktaedrycznym ścinającym a normalnym

Fig. 10. Octahedral shear stress vs normal stress



Rys. 9. Diagram współzależności (najlepsze dopasowanie)

Fig. 9. Interaction diagram (best fit)

Tablica 3 / Table 3

OKTAEDRYCZNE NAPRĘŻENIA NORMALNE I ŚCINAJĄCE KSZTAŁTEK Z SIATKOBETONU W PRZYPADKU DWUOSIOWEGO ŚCISKANIA-ROZCIĄGANIA

OCTAHEDRAL NORMAL AND SHEAR STRESS OF FERROCEMENT SPECIMENS IN BIAXIAL COMPRESSION-TENSION

Oznaczenie Desg.	Oktaedryczne normalne naprężenie Octahedral normal stress $\sigma_o$ , MPa	Oktaedryczne naprężenie ścinające Octahedral shear stress $\tau_o$ , MPa	Oznaczenie Desg.	Oktaedryczne normalne naprężenie Octahedral normal stress $\sigma_o$ , MPa	Oktaedryczne naprężenie ścinające Octahedral shear stress $\tau_o$ , MPa	Oznaczenie Desg.	Oktaedryczne normalne naprężenie Octahedral normal stress $\sigma_o$ , MPa	Oktaedryczne naprężenie ścinające Octahedral shear stress $\tau_o$ , MPa
CX4	-21.37	90.65	CX5	-21.84	92.65	CX6	-22.30	94.63
CTA41	-2.63	22.96	CTA51	-2.83	26.91	CTA61	-2.05	28.61
CTA42	-2.75	23.13	CTA52	-3.22	28.02	CTA62	-1.94	27.58
CTA43	-2.68	22.06	CTA53	-3.58	30.11	CTA63	-1.87	28.01
CTB41	-6.84	37.24	CTB51	-7.23	40.79	CTB61	-8.00	49.18
CTB42	-7.62	41.17	CTB52	-9.54	50.58	CTB62	-8.24	49.24
CTB43	-7.02	40.14	CTB53	-8.75	48.34	CTB63	-9.14	52.54
CTC41	-12.55	59.32	CTC51	-11.51	57.21	CTC61	-12.84	66.17
CTC42	-12.21	57.24	CTC52	-12.07	58.28	CTC62	-12.02	62.16
CTC43	-11.81	55.32	CTC53	-12.79	61.03	CTC63	-13.09	64.85
CTD41	-16.89	75.66	CTD51	-16.98	76.83	CTD61	-19.47	88.50
CTD42	-16.30	72.88	CTD52	-16.45	74.20	CTD62	-18.84	86.00
CTD43	-16.57	73.75	CTD53	-17.11	76.54	CTD63	-18.78	86.15

## 7. Wnioski

Wybrane stanowisko pomiarowe było dobre do przeprowadzenia doświadczeń z wydrążonymi walcowymi kształtkami w przypadku ściskania i rozciągania oraz rozciągania i ściskania. Najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych doświadczeń są następujące:

- 1) Naprężenie jednokierunkowe wpływa na wytrzymałość w kierunku prostopadłym jak to wynika ze znormalizowanego diagramu wzajemnych zależności.
- 2) Na tendencję występujących na diagramie współzależności nie ma wpływu czynnik powierzchni właściwej ( $S_F$ ), podczas gdy poszczególne wyniki wytrzymałości były zależne od  $S_F$ .
- 3) Krzywa współzależności, oraz opracowany w oparciu o nią model matematyczny wysokowartościowego siatkobetonu, może być wykorzystany jako kryterium do projektowania powłok z siatkobetonu poddawanych dwuosiowym naprężeniem rozciągającym i ściskającym.
- 4) Stwierdzono, że hipoteza Nadai'a dotycząca oktaedrycznego naprężenia ścinającego, będąca funkcją normalnego, oktaedrycznego naprężenia może być stosowana do siatkobetonu. Za proponowano występowanie zależności pomiędzy oktaedrycznym normalnym i ścinającym naprężeniem dla siatkobetonu o wysokich właściwościach.
- 5) Siatkobeton o wysokich właściwościach jest idealnym materiałem do wykonywania powłok narażonych na naprężenia dzięki

## 5. Analytical Model

The normalized interaction diagram is not influenced by the steel content vide Fig. 8. Further, there seem to be a definite trend between the non-dimensionalised axial compression and hoop tension. A best fit between these points, seemed to follow the path of a parabola. An equation of the form  $Y = A + BX + CX^2$  was fitted as shown in Fig. 9.

The regression equation obtained is

$$\frac{\sigma'_{cv}}{\sigma_{cv}} = 1.0 - 0.6447 \frac{\sigma'_{th}}{\sigma_{th}} - 0.3301 \left( \frac{\sigma'_{th}}{\sigma_{th}} \right)^2 \quad [6]$$

with a correlation coefficient 0.9458. This equation can hence be used to predict the behaviour of ferrocement in biaxial compression-tension.

## 6. Failure criteria for compression-tension

Nadai's concept of octahedral shear stress, which is a function of octahedral normal stress as a failure criterion was investigated, as it seemed applicable to ferrocement. Applying the Nadai's theory to ferrocement the octahedral normal stress ( $\sigma_o$ ) and octahedral shear stress ( $\tau_o$ ) were computed for the test data using formulae

$$\sigma_o = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad [7]$$

jego lepszym właściwościom w odniesieniu do wytrzymałości, plastyczności i odporności na pękanie.

## Literatura / References

1. ACI Committee 549 (ACI 549.1R-93) Guide for Design, Construction and Repair of Ferrocement, American Concrete Institute, 1993.
2. IFS Committee 10, Ferrocement Model Code, Building Code Recommendations for Ferrocement, 2001.
3. P. Rathish Kumar, D. R. Seshu and C. B. K. Rao, Some Studies on High Performance Mortar Mixes (Part-1 Strength and Flow Characteristics, Journal of Ferrocement, AIT Thailand, Vol 32, No.3, 205-214 (2002).
4. P. Rathish Kumar, D. R. Seshu and C. B. K. Rao, Some Studies on High Performance Mortar Mixes (Part-2 Shrinkage and Sorptivity Characteristics, Journal of Ferrocement, AIT Thailand, Vol 32, No.3, 215-231 (2002).
5. P. Rathish Kumar, Ferrocement with High Performance Mortar in Biaxial States of Stress, *Doctoral thesis* submitted to the National Institution of Technology, Warangal, India 2003.
6. P. Rathish Kumar, Toshiyuki Oshima, Shuichi Mikami, Tomoyuki Yamazaki, Improvement in strength and ductility of reinforced concrete columns with ferrocement jacketing, Proceedings of the International Workshop on Modern Science and Technology, Organized by Kitami Institute of Technology, 302-307, Japan 2004.
7. A. E. Naaman, Ferrocement and Laminated Cementitious Composites, Techno Press-3000, 1<sup>st</sup> Edition (2000).
8. P. Rathish Kumar, D. R. Seshu, M. Sudhakar I, Effect of water-cementitious ratio on the compressive strength of silica fume concrete, Journal of Indian Concrete Institute, Vol. 2, 24-28 (2001).
9. P. Rathish Kumar, Superplasticizers in High Strength Mortars for use on Ferrocement Works 26<sup>th</sup> International Conference on Our World in Concrete and Structures organized by CI-Premier Pte Ltd at Singapore, 2001.
10. P. Rathish.Kumar, G. Rajesh.Kumar, A. K. Rao, "Ferrocement-An Effective way of confining high strength concrete, Journal of Ferrocement, AIT Thailand, Vol.35, No.1 (2005).
11. G. Rajesh Kumar and P. Rathish Kumar "Stress-Strain model for standard concrete confined with ties and ferrocement", International Journal of Ferrocement, AIT, Thailand, Vol.35 No.1, AIT, Thailand, pp 514-525 (2005).
12. P. Rathish Kumar and C. B. K. Rao, "Constitutive Behaviour of High Performance Ferrocement under Axial Compression", International Journal of Magazine of Concrete Research, Scheduled for publication in volume 58, issue 10, pp. 647—656, Dec 2006.
13. P. Rathish Kumar & C. B. K. Rao, "Interaction Curve for High Performance Ferrocement in Biaxial State of Tension", International Journal of Asian Architecture and Building Engineering (JAABE), Vol. 4, No. 2, pp. 475-481, November 2005.
14. C. B. K Rao and A. K. Rao, Stress-Strain relationship for Ferrocement in Tension, Journal of Ferrocement, Vol. 24, No. 4, pp. 309-320, October 1994.
15. P. Rathish Kumar and C. B. K. Rao, Strength of High Performance Ferrocement Composite under Compression-Compression, International Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Research India Publications (In Press).

$$\tau_o = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad [8]$$

where,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  are principal stresses.  $\sigma_3$  is zero since the problem is a plane stress problem. The values of  $\sigma_o$  and  $\tau_o$  are given in Table 3 for biaxial compression-tension for 4, 5 and 6 layered specimens. The plot of  $\sigma_o$  vs.  $\tau_o$  is shown in Fig. 10. There is a good correlation between  $\sigma_o$  and  $\tau_o$ .

The relationship between octahedral normal and shear stress for biaxial stress state in compression-tension can be expressed as

$$\tau_o = 18.12 - 3.4379 \sigma_o \quad [9]$$

## 7. Conclusions

The test setup designed was suitable for testing hollow cylindrical specimens in biaxial compression-tension and tension-compression. Some of the important conclusions obtained from the experimental investigation are

- 1) Stress in one direction was found to be influencing the strength in orthogonal direction as observed from the normalized interaction diagram.
- 2) The trend of the interaction diagram was not affected by the specific surface factor ( $S_F$ ), whereas the individual values of strength were dependent on  $S_F$ .
- 3) An interaction curve and hence a mathematical model was developed for the high performance ferrocement which can be used as a criterion for design of ferrocement surfaces under biaxial tension-compression and compression-tension.
- 4) Nadai's concept of octahedral shear stress being a function of octahedral normal stress is found to be applicable to ferrocement. A relationship between octahedral normal and shear stress for high performance ferrocement is suggested.
- 5) High performance ferrocement is ideal for use in stressed skin surfaces owing to its superior performance in strength, ductility and crack resistance.