

Nowy sposób zwiększenia nośności na ścinanie belek żelbetowych siatką z drutu

A new way of using welded wire mesh [WWM] for enhancing the shear strength in reinforced concrete beams

D. Rama Seshu*, Ch. Manjula, T.D.G. Rao, C.B.K. Rao

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

*corresponding author email: drseshu@nitw.ac.in

Streszczenie

Belki żelbetowe wzmacnia się na ścinanie stosując strzemiona na obrzeżach przekroju poprzecznego. Strefa rdzeniowa przekroju, w której występuje duże naprężenie ścinające, jest zazwyczaj niezbrojona. Prowadzi to do nagłego pojawienia się i rozprzestrzeniania pęknięć oraz do kruchych uszkodzeń pod wpływem ścinania. W artykule przedstawiono badania nowego sposobu wzmocnienia elementów żelbetowych na ścinanie za pomocą siatki spawanej z drutu stalowego, umieszczonej wzdłuż belki w strefie rdzeniowej przekroju. Wyniki wskazują na to, że zastosowana siatka bardziej skutecznie przenosi ścinanie, zmieniając zarazem mechanizm zniszczenia z kruchego na plastyczny.

Słowa kluczowe: belka żelbetowa, wytrzymałość na ścinanie, rdzeń przekroju, zbrojenie podłużne, spawana siatka stalowa

Summary

The present practice of using shear reinforcement in the form of stirrups, which go round near to the periphery in reinforced concrete beams, leaves the core zone of the cross-section, where there is the existence of high shear stress, un-reinforced. This leads to sudden appearance and propagation of cracks, leading to brittle failures under shear. This paper presents an experimental study on the new way of using the welded wire mesh [WWM] for resisting shear in reinforced concrete members. The method consists of using a prefabricated mesh such as welded wire mesh as core zone reinforcement, placed longitudinally apart from conventional rectangular stirrups/ties. The study indicated improved performance compared to the shear resistance of RC beams with conventional stirrups.

Keywords: RC beam, shear performance, core zone, longitudinal reinforcement, welded wire fabric

1. Wprowadzenie

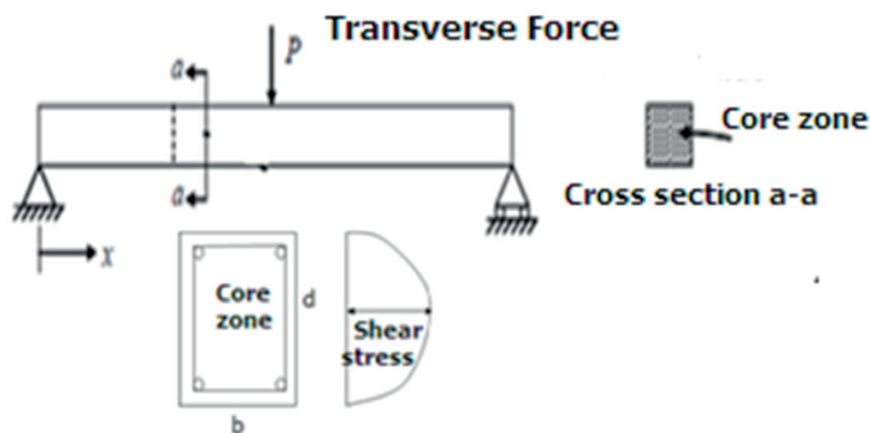
Jednym z głównych wymagań projektowania konstrukcji żelbetowych jest bezpieczeństwo. Konstrukcje muszą mieć odpowiedni zapas nośności na wypadek różnego rodzaju awarii. Przy projektowaniu elementu żelbetowego rozmiar przekroju oraz wielkość i rozmieszczenie zbrojenia wynikają z warunków użyteczności i nośności. Sprawdza się też belki na ścinanie. Mechanizm uszkodzenia na ścinanie zależy od geometrii, w tym wymiarów przekroju, rodzajów obciążenia i innych właściwości elementu (1, 2). Awarie ścinania wiążą się z tworzeniem ukośnych pęknięć, w obszarach silnego ścinania, np. w pobliżu podpór w belce swobodnie podpartej, i rozciągają się w kierunku strefy ściskania. Jest zrozumiałe, że jakiegokolwiek prawidłowo zakotwione zbrojenie, przecinające

1. Introduction

One of the primary objectives in the design of reinforced concrete [RC] structures is safety. The RC beams must have an adequate safety margin against different types of failures. In the design of a reinforced concrete member, flexure is usually considered first, leading to the size of the section and the arrangement of reinforcement to provide the necessary resistance for moments. Beams are then designed for shear. The shear failure mechanism varies depending upon the cross-sectional dimensions, the geometry, the types of loading, and the properties of the member (1, 2). The shear failures are normally characterized by the formation of inclined or diagonal cracks, near regions of high shear i.e. near the supports in simply supported beams and extend toward the

te ukośne zarysowania, będzie współpracować w przenoszeniu sił ścinających (3-5). Mechanizm awarii ścinania jest kruchy i zachodzi bez wyraźnego ostrzeżenia.

Pod wpływem obciążenia poprzecznego w przekroju belki żelbetowej powstają naprężenia normalne i styczne. W prostokątnym przekroju rozkład naprężenia ścinającego jest zmienny po wysokości przekroju: zerowy w skrajnych włóknach i maksymalny w osi obojętnej, w strefie rdzeniowej przekroju, rys. 1. Przekrój belki żelbetowej zawiera zwykle prostokątne strzemiona, wykonane z prętów o wymaganej średnicy, odstępach i akiej liczbie pionowych prętów, aby skutecznie przenieść siłę ścinającą (6, 7).



Rys. 1. Rozkład naprężeń tnących w przekroju prostokątnym

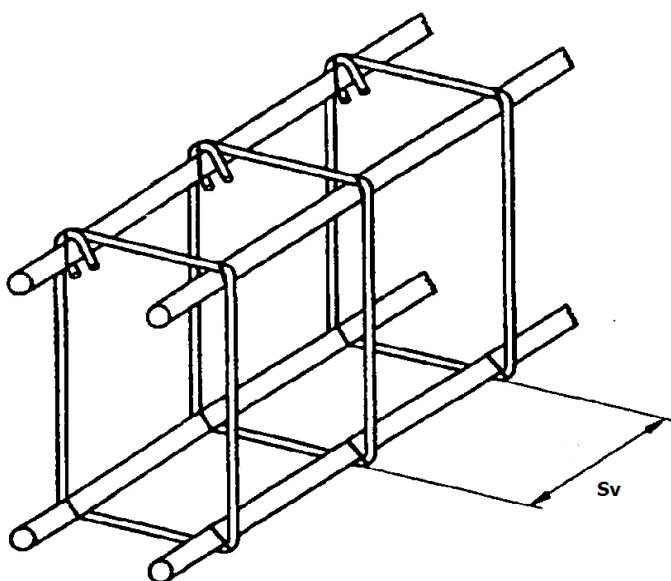
Fig. 1. Shear stress distribution across the rectangular beam cross-section

Prefabrykowane siatki z drutu są stosowane jako główne zbrojenie płyt żelbetowych oraz jako wzmocnienie na ścinanie w belkach teowych o węższym średniku (8, 9). Badania doświadczalne zastosowania spawanej siatki drucianej, umieszczonej poza strefą rdzeniową przekroju w połączeniu z konwencjonalnymi strzemionami, wykazały, że takie zbrojenie na zginanie i ścinanie zapewnia jedynie nieznacznie większą wytrzymałość belki (10, 11). Inne badania skuteczności spawanej siatki drucianej na obrzeżach przekroju również wskazują na zwiększenie wytrzymałości belek (12-14). We wszystkich wyżej wymienionych badaniach wykorzystano siatkę spawaną tylko na peryferiach przekroju. Zbrojenie na ścinanie w postaci strzemion umieszczonych na brzegu przekroju, rys. 2, pozostawia rdzeń przekroju, z dużymi naprężeniami tnącymi, niewzmocniony. Dodatkowo, działanie strzemion jest dyskretne [nieciągłe] i ogranicza się do określonych przekrojów. Prowadzi to do nagłego pojawienia się i rozprzestrzeniania pęknięć oraz powstawania kruchych uszkodzeń pod wpływem ścinania. Nasuwa się więc wniosek, że działanie elementów żelbetowych pod wpływem naprężeń poprzecznych ulegnie poprawie, jeśli strefa

compression zone. It is understood that any form of effectively anchored reinforcement that intersects these diagonal cracks will be able to resist the shear forces to a certain extent (3-5). Further, shear failures are brittle with little or no advanced warning.

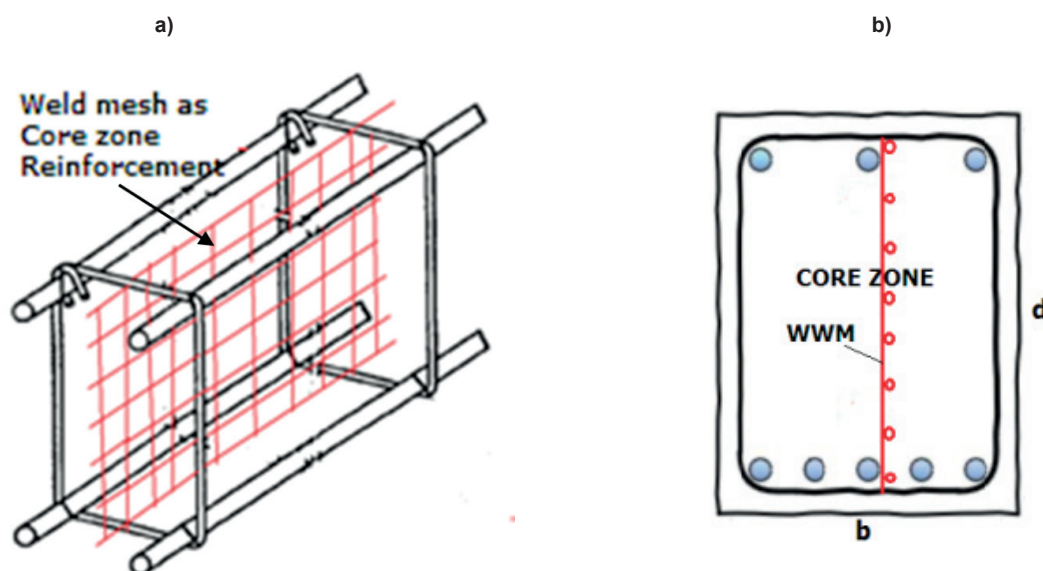
Under the influence of transverse loading, the RC beam cross-sections experience the normal and flexural shear stresses. In the rectangular cross-sections, the flexural shear stress is distributed non-uniformly across the depth of the cross-section. In homogeneous rectangular cross-sections, the intensity of flexural shear stress becomes zero in the outer edges and reaches the maximum at the neutral axis i.e. near the core zone of the cross-section, as shown in Fig.1. At present the RC beams are provided with rectangular stirrups, having a required diameter, spacing, and the number of vertical legs, for resisting shear force (6, 7).

Further the prefabricated reinforcement, such as welded wire mesh [WWM], also has been used as main reinforcement in RC slabs and as shear reinforcement in thin webbed concrete beams (8, 9). The experimental investigations reported of the use of welded wire mesh as flexural/shear reinforcement, placed near the periphery of the cross-section, indicated that the combination of weld mesh with conventional stirrups provide marginally higher strength and cracking resistance (10, 11). Further the investigations on the effectiveness of welded wire mesh as jacketing material indicated the improvement in the strength of damaged beams (12-14). All the above-mentioned investigations have used the WWM in the periphery of the cross-section only. The shear reinforcement in the form of stirrups placed near to the periphery of the beam cross-section [Fig. 2], leaves the core of the cross-section, where there is the existence of high transverse stress, unreinforced. Further, the stirrups provide resistance against diagonal tension due to shear only in a discrete manner. This produces sudden appearance and propagation of cracks, leading to brittle failures under shear. Hence in this investigation, it is thought that the performance of the reinforced concrete elements, under the influence of transverse stresses, will get improved if such core zone is also reinforced. The published literature on the use of such core zone reinforcement, where the intensity of shear stresses is large, is very scanty.



Rys. 2. Zbrojenie z konwencjonalnymi strzemionami

Fig. 2. Reinforcement cage with conventional stirrups



Rys. 3. a) zbrojenie konwencjonalne z podłużną spawaną siatką; b) przekrój belki

Fig. 3. a) reinforcement cage with welded wire mesh (WWM) as longitudinal core reinforcement; b) RC beam cross-section

rdzeniowa przekroju również zostanie wzmocniona. Opublikowana literatura na temat zastosowania takiego wzmocnienia jest jednak bardzo skąpa.

W pracy przedstawiono nowy sposób wykorzystania spawanej siatki drucianej w celu zwiększenia odporności na ścinanie w elementach żelbetowych. Metoda polega na zastosowaniu, obok konwencjonalnych strzemion, siatki jako wzdłużnego zbrojenia [rys. 3], wzmacniającego strefę rdzeniową przekroju żelbetowego. Siatka w sposób ciągły przenosi naprężenia ścinające, opóźniając powstawanie pęknięć ścinających i zwiększając efektywność elementów żelbetowych. Zastosowanie prefabrykowanej siatki jako podłużnego zbrojenia jest prostsze w stosunku do żmudnego gięcia i wiązania prętów na strzemiona.

Głównym celem niniejszego badania jest zbadanie nośności belek żelbetowych, w których spawana siatka druczana jest stosowana jako podłużne wzmocnienie części centralnej przekroju, oprócz konwencjonalnych strzemion, i porównanie z nośnością konwencjonalnych belek żelbetowych, ze strzemionami i bez.

2. Program badań

W ramach programu badań wykonano cztery belki żelbetowe z identycznym podłużnym zbrojeniem głównym a różnie zbrojone na ścinanie. Pierwszą z nich, będącą próbką wzorcową oznaczoną jako C100, wykonano bez strzemion w przęśle. W drugiej belce żelbetowej, oznaczonej jako R160, zastosowano strzemiona z prętów ze stali miękkiej o średnicy 6 mm, w odstępach 160 mm, a więc nieco większych niż zalecany normowo rozstaw 140 mm, co oznacza niedostateczne zbrojenie na ścinanie. Tak więc obie belki, C100 jak i R160, zaprojektowano na zniszczenie poprzez ścinanie. Trzecia belka, oznaczona jako L0, zbrojona była podłużnie na ścinanie siatką stalową umieszczoną w pionowej osi przekroju

This paper presents a new way of using welded wire mesh in enhancing the shear resistance in reinforced concrete members. The method consists of using the WWM as longitudinal core reinforcement apart from conventional rectangular stirrups/ties (Fig. 3), which not only reinforces the core zone of reinforced concrete cross-section but also provides resistance against diagonal tension due to shear in a continuous manner. The continuity in the resistance provided by the prefabricated mesh against diagonal tension due to shear delays the formation of shear cracks and improves the performance of reinforced concrete members. The use of prefabricated mesh as longitudinal core reinforcement will not involve any tedious bar bending work similar to that in making stirrups/ties.

The main objective in the present investigation is to study the performance of RC beams wherein the welded wire mesh is used as longitudinal core reinforcement apart from conventional rectangular stirrups/ties, and compare the same with the shear performance of RC beams, provided with or without conventional stirrups.

2. Experimental program

The experimental program consisted of casting and testing of four numbers of reinforced concrete beams. The first beam was a control beam C100, in which there is no shear reinforcement in the shear span. The second RC beam was R160 in which 2 legged 6mm mild alloy steel bars are used, as the shear reinforcement. The spacing of stirrups adopted in R160 was 160 mm against the required design stirrup spacing of 140 mm, thus making the beam shear deficient. Both C100 and R160 beams were specifically designed to fail in shear. The third RC beam is L0 in which there were no stirrups but consisted of a longitudinally placed welded wire mesh, in the middle of the core zone. The fourth RC beam was L160 consisted of welded wire mesh placed longitudinally in



Rys. 4 (a). Belka C100 - brak strzemion poza punktami obciążenia

Fig.4 (a). The Reinforcement cage with no steel stirrups in the shear span [C100]



Rys. 4 (b). Belka L0 - siatka spawana wzdłuż belki jako wzmocnienie na ścinanie

Fig. 4 (b). The Reinforcement cage with only welded wire mesh placed longitudinally in the core zone [L0]



Rys. 4 (c). Belka R160 - konwencjonalny układ zbrojenia, powiększony rozstaw strzemion

Fig.4 (c). The reinforcement cage with steel stirrups as transverse steel [R160]



Rys. 4 (d). Belka L160 - konwencjonalny układ wzmocniony wzdłużnie siatką stalową

Fig. 4 (d). The reinforcement cage with welded wire mesh placed longitudinally in the core zone [L160]

Tablica 1 / Table 1

SZCZEGÓŁY BADANYCH PRÓBEK BELEK ŻELBETOWYCH

DETAILS OF RC BEAM SPECIMENS TESTED

Nr / No	Belka Beam	Wymiary Cross section size, mm [b x D x L]	Zbrojenie podłużne Longitudinal reinforcement		Wzmocnienie w strefie rdzeniowej Core zone reinforcement longitudinal	Zbrojenie poprzeczne Transverse reinforcement (in the Shear span)
			Rozciąganie / Tension	Sciskanie / Compres- sion	Siatka stalowa / WWM	Strzemiona / Stirrups
1	C100	140 x 300 x1650	2Φ12 1Φ16	2Φ6	--	--
2	R160				--	2Φ6 long. by 160 cm
3	L0				Siatka stalowa / WWM	--
4	L160				Siatka stalowa / WWM	2Φ6 long. by 160 cm
Beton wytrzymałość na ściskanie = 27,5 MPa Concrete Compression strength = 27.5MPa		Siatka spawana z drutu stalowego Φ2,16 mm, rozstaw drutów: w poziomie = 80 mm, w pionie = 30 mm, granica plastyczności drutu = 267,7 MPa, wytrzymałość drutu na zerwanie = 347 MPa masa nominalna metra kwadratowego siatki = 1,316 kg Welded Wire Mesh Wire Φ2.16 mm, Spacing of wires: vertical = 80 mm, horizontal = 30 mm, Yield strength of wires = 267.7 MPa, Ultimate strength of wires = 347 MPa Nominal mass per square meter = 1.316 kg				Zbrojenie podłużne granica plastyczności = 424 MPa wytrzymałość na rozcz. = 538 MPa
						Zbrojenie poprzeczne granica plastyczności = 285,6 MPa wytrzymałość na rozcz. = 361 MPa / Longitudinal reinforcement Yield strength = 424 MPa Ultimate Strength = 538 MPa Transverse reinforcement Yield strength = 285.6 MPa Ultimate strength = 361 MPa

belki, to jest w jego strefie rdzeniowej. Czwarta belka, oznaczona jako L160, oprócz konwencjonalnych strzemion jak w belce R160, dodatkowo zbrojona była stalową siatką, identycznie jak w belce L0. Oznacza to niewielkie zwiększenie całkowitej masy stali użytej do zbrojenia na ścinanie.

Wymiary wszystkich belek były identyczne: szerokość 140 mm, wysokość 300 mm oraz długość 1650 mm. Stosunek rozpiętości strefy ścinania do efektywnej wysokości dla wszystkich belek wynosił 3. Aby ocenić wytrzymałość betonu na ściskanie, trzy be-

the middle of the core zone of the cross-section, apart from conventional stirrups (2 legged 6 mm dia. @160 c/c). The spacing of wires in the weld mesh was chosen so as not to cause any hindrance to the flow of concrete. There was a small increase in the total mass of steel consumed in using the welded wire mesh as a longitudinal core zone reinforcement, apart from stirrups. The longitudinal steel adopted was maintained constant in all the four RC beams tested. The shear span to effective depth ratio adopted for all the beams was 3. The size of the RC beams adopted

tonowe kostki [150×150×150 mm] zostały odlane i przetestowane wraz z belkami. Szczegóły badanych próbek podano w tablicy 1 a zastosowane układy zbrojenia pokazano na rys. 4.

2.1. Materiały zastosowane w betonie

Zastosowano cement portlandzki klasy 53, wg IS 269-2015. Kruszywo drobne stanowił piasek rzeczny II strefy wg IS 383-2016 o ciężarze właściwym i gęstości nasypowej odpowiednio 2.65 i 1,45 g/cm³, a jako kruszywo grube o uziarnieniu zgodnym z IS 383-2016 i wielkości nominalnej 20 mm użyto granitu, o gęstości 2.80 g/cm³ i gęstości nasypowej 1,5 g/cm³. Jako wodę zarobową wykorzystano wodę pitną. Szczegóły dotyczące klasy betonu, składu mieszanki i ilości użytych materiałów do produkcji betonu podano w tablicy 2.

2.2. Wykonanie i testowanie próbek

Próbki odlano w stalowych formach z elementami dystansowymi, zapewniającymi szerokość belek 140 mm i położenie strzemion dające efektywną wysokość przekroju 265 mm. Materiały mieszano w stanie suchym na platformie, a następnie dodano wodę. Beton wylany do form został zagęszczony za pomocą wibratora. Po 24 godzinach próbki rozformowano i pielęgnowano przez 28 dni. Średnia temperatura i wilgotność względna, mierzone w okresie dojrzewania wynosiły odpowiednio 35 ± 2°C i 75%. Po zakończeniu okresu pielęgnacji próbki trzymane w cieniu.

Tablica 2 / Table 2

ZASTOSOWANE MATERIAŁY KG/M³

MATERIALS USED, KG/M³

Klasa betonu Concrete grade	Proporcja mieszanki Mix proportion	Ilość materiałów do produkcji betonu Quantity of concrete making materials				
		Cement	Kruszywo drobne Fine Aggregate	Kruszywo grube Coarse Aggregate	Woda Water	SP*
M25	1: 1.8: 3.1 w/c 0.45	380	685	1180	170	2.7

* SP: Superplastifikator, SP 430, marka : Fosroc Chemicals / SP: Superplasticizer (SP 430, Make: Fosroc Chemicals)

Na dzień przed badaniem próbki bielono, znaczone markerem położenie podpór oraz pozycje mierników ugięcia. Na ścianie bocznej naniesiono układ punktów służący do późniejszego określenia odkształceń techniką cyfrowej korelacji obrazu. Belki testowano pod dwupunktowym obciążeniem na maszynie testującej TINIUS - OLSEN 200 kN. Ugięcie belek mierzono indukcyjnym czujnikiem przemieszczeń liniowych o układzie różnicowym i czujnikami zegarowymi. Szczegóły konfiguracji stanowiska pokazano na rys. 5. Zadawane przemieszczenia kontrolowano regulując zawór maszyny testującej tak, aby ruch głowicy był utrzymywany na poziomie 1 mm na minutę. W ten sposób odtwarzano obciążenie kontrolowane przemieszczeniem. Testy były kontynuowane do momentu osiągnięcia obciążenia maksymalnego albo zniszczenia elementu, w zależności od tego, co nastąpiło wcześniej. Zauważone pęknięcia belek oznaczono markerem w celu porównania wzorów pęknięć i oceny charakteru awarii.

was 140mm wide, 300 mm overall depth, and 1650 mm in length. Three concrete cubes [150×150×150 mm] were cast and tested along with the RC beams, to determine the concrete compressive strength. The details of the specimens tested are given in Table.1. The reinforcement cages used are shown in Fig. 4.

2.1. Materials used in concrete

The cement used was OPC of 53 grade confirming to IS 269-2015. River sand conforming to Zone-II of IS: 383-2016, was used as fine aggregate. The specific gravity and bulk density of sand were 2.65 & 1.45 g/cm³ respectively. The well-graded aggregate conforming to IS 383-2016 with a 20 mm nominal size of granite was used as coarse aggregate. 2.80 and 1.5 g/cm³ were specific gravity and bulk density respectively. Potable water was used in the experimental work. The details of the concrete grade, mix proportion, and quantity of concrete making materials used are given in Table.2.

2.2. Casting and testing of beams

Steel channels of required height were placed back to back and were tightened by nuts and bolts to maintain the width of the beam as 140 mm. The inner side of the molds was lubricated by grease and cover blocks of proper thickness were placed to maintain the effective depth of the beam as 265 mm. The reinforcement cage was placed on the cover blocks in the molds. The required amount of materials was mixed in the dry state on the platform and then water

was added. The concrete was placed in the molds and compacted with a vibrator. After 24 hours of casting, the beam specimens were de-molded and water cured for 28 days. The average room temperature and relative humidity, measured during the period of curing, were 35±2°C and 75% respectively. After the completion of the curing period, the specimens were kept under the shade.

One day before testing the cured beams were whitewashed and the location of supports, the positions of deflection gauges during the test were marked on it with pencil and kept ready for testing. Further, a speckle pattern was marked on the side face to enable capture of strains using Digital Image Correlation (DIC) technique. The beams were tested under two-point loading after a curing period of 28 days, on the TINIUS – OLSEN testing machine of 200 kN capacity. The deflection of the beam was measured using a linear variable differential transformer (LVDT) and deflection dial gauges. The details of the test setup are shown in Fig. 5. The



Rys. 5. a) szczegóły konfiguracji badań; b) badanie

Fig. 5. a) details of the test setup; b) testing

Tablica 3 / Table 3

WARTOŚCI OBCIĄŻEŃ BELEK

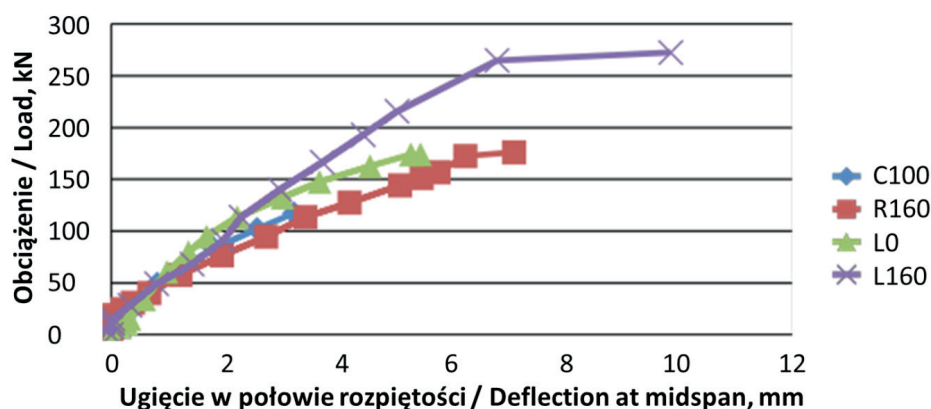
LOADS AND DEFLECTION VALUES OF TESTED BEAMS

Nr / No	Belka Beam	Użytkowe / At service		Graniczne / At ultimate		Charakter zniszczenia Nature of failure at ultimate	Nachylenie rys do pionu Slope of shear crack with vertical
		Ps, kN	Ds, mm	Pu, kN	Du, mm		
1.	C100	78.16	1.65	117.25	3.22	Ścinanie / Shear	60.1°
2.	R160	117.30	3.73	176.04	7.10	Ścinanie / Shear	60.3°
3.	L0	115.98	2.38	173.98	5.47	Ścinanie / Shear	60.9°
4.	L160	181.54	4.08	272.32	9.86	Zginanie / Flexure	--

Oznaczenia: Ps = obciążenie użytkowe, Pu = obciążenie graniczne, ds. = ugięcie przy obciążeniu użytkowym, du = ugięcie w stanie granicznym, dopuszczalne ugięcie zgodnie z IS 456: 2000 = $L/250$

Notation: P = Load at Service, Pu = Load at Ultimate, ds = Deflection at Service, du = Deflection at Ultimate, Allowable deflection at Service, as per IS 456:2000 = $L/250$

Zarejestrowane doświadczalnie graniczne obciążenia niszczące oraz maksymalne ugięcia podano w tablicy 3. Wyniki uzyskane w trakcie badania ilustrują wykresy zależności ugięć od obciążenia, rys. 6. Porównanie obciążenia końcowego badanych belek obrazuje rys. 7. Układ zarysowań próbek pokazuje rys. 8.



Rys. 6. Zależność obciążenia-przemieszczenia

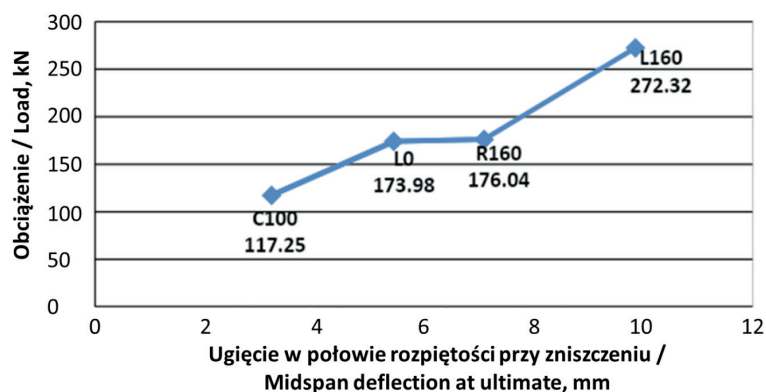
Fig. 6. Load vs Deflection of RC beams

3. Wyniki badań

Podczas badania belka żelbetowa C100, bez strzemion w strefie ścinania, uległa zniszczeniu zgodnie z oczekiwaniem przez ścinanie, przy obciążeniu granicznym 117,25 kN.

Belka żelbetowa R160, z konwencjonalnymi strzemionami w odstępach 160 mm, t.j. 0.6 wysokości użytkowej przekroju, uległa zniszczeniu przez ścinanie przy obciążeniu granicznym 176,04 kN. Ukośne pęknięcie w strefie ścinania powstało zgodnie z oczekiwaniem, ponieważ belka celowo została niedostatecznie wzmocniona na

displacement control loading was achieved by adjusting carefully the inlet valve of the testing machine so that the movement of the crosshead was controlled and maintained at 1 mm per minute. This nearly simulated the displacement controlled loading. The testing was continued till the ultimate load or the test set up became unstable whichever was earlier. The cracks noted on the



Rys. 7. Porównanie nośności belek

Fig. 7. Ultimate Load Comparison

ścinanie poprzez zwiększenie rozstawu strzemion z wymaganego 140 mm do 160 mm.

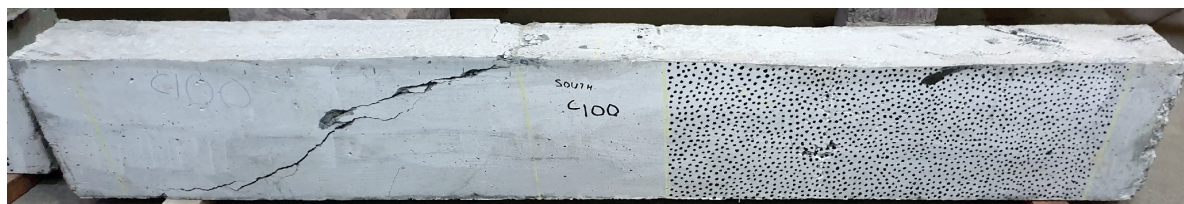
W przypadku belki żelbetowej L0, bez strzemion, ale wzmocnionej w strefie rdzeniowej spawaną siatką stalową, zniszczenie nastąpiło również przez ścinanie, w postaci ukośnego pęknięcia przy

beams were marked for comparison of crack patterns and the nature of the failure.

The experimentally recorded failure loads (ultimate load), maximum deflections are given in Table 3. From the above results, the load-deflection diagrams were drawn and are presented in Fig. 6 and the comparison of the observed ultimate load of the beam for the beams tested is shown in Fig. 7. Also, the failure patterns of the beam specimens are shown in Fig. 8.

3. Results and discussions

During the testing, the beam C100 wherein there are no stirrups in the shear zone has failed in shear, as expected, at an ultimate load of 117.25 kN. Similarly, the beam R160 provided with conventional stirrups at 160 mm spacing – i.e. spacing of stirrups equal to 0.6d, as transverse reinforcement has failed in shear at an ultimate load of 176.04 kN, by developing a diagonal tension crack in shear span, as expected [Fig 8(b)]. This



a) C100 Wzorec pęknięcia belki - zniszczenie przez ścinanie
a) C100 Beam crack pattern at ultimate – failed in shear



b) R160 Wzorec pęknięcia belki - zniszczenie przez ścinanie
b) R160 Beam crack pattern at ultimate – failed in shear



c) L0 Wzorec pęknięcia belki - zniszczenie przez ścinanie
c) L0 Beam crack pattern at ultimate – failed in shear



d) L160 Wzorec pęknięcia belki - zniszczenie przez zginanie
d) L160 Beam crack pattern at ultimate – failed in flexure

Rys. 8. Wzorce uszkodzeń próbek

Fig. 8. The failure patterns of the beam specimens

obciążeniu granicznym 173,98 kN. Obciążenie graniczne było więc niemal równe obciążeniu granicznemu konwencjonalnie zbrojonej belki R160. Wskazuje to na podobieństwo między działaniem podłużnego wzmocnienia strefy rdzeniowej w postaci spawanej siatki drucianej a zwykłymi strzemionami. W obu przypadkach odnotowuje się zwiększenie nośności elementu. Nachylenie do pionu pęknięć ścinających jest mniej więcej takie samo dla belek C100, R160 i L0. Ponadto, zarówno w belce R160 jak i L0, rozwinęło się początkowo kilka pęknięć od zginania w środku przęsła.

W belce L160, o rozstawie strzemion identycznym jak w belce R160 i ze spawaną siatką drucianą jako podłużnym wzmocnieniem strefy rdzeniowej, takim jak w belce L0, zaobserwowano wyraźne pęknięcia od zginania, rys. 8 (d). Nośność graniczna belki osiągnęła wartość 272,32 kN. W belce początkowo pojawiły się pęknięcia na ścinanie przy obciążeniu około 70 do 80% obciążenia granicznego. Kolejne zwiększenie obciążenia nie spowodowało propagacji zarysowania od ścinania, pojawiły się natomiast zarysowania od zginania w środku przęsła, powodując ostatecznie zmiężdżenie betonu w strefie ściskanej.

Choć zastosowanie zbrojenia na ścinanie w postaci strzemion w odstępach 160 mm w belce R160 doprowadziło do zniszczenia na ścinanie, to dodanie wzdłużnego wzmocnienia strefy rdzeniowej w postaci spawanej siatki drucianej zmieniło mechanizm zniszczenia belki L160 na zniszczenie przez zginanie. Ponadto, w belce L160 powstało więcej drobnych pęknięć w porównaniu do pozostałych belek. Wskazuje to na skuteczność wzmocnienia wzdłużnego w strefie rdzeniowej przekroju, przekształcając zniszczenie przez ścinanie na zniszczenie przez zginanie, jednocześnie zwiększając nośność elementu o 54,7% w odniesieniu do R160. Co więcej, biorąc pod uwagę ugięcia przy obciążeniu użytkowym, określanym jako $\frac{2}{3}$ obciążenia granicznego, zastosowanie dodatkowego zbrojenia wzdłużnego spowodowało spełnienie warunków użytkowości, określonych w normie (15).

Istotną kwestią, na którą należy zwrócić uwagę, jest to, że zapewnienie wzdłużnego wzmocnienia strefy rdzeniowej przekroju w postaci spawanej siatki drucianej wraz z konwencjonalnymi strzemionami ma następujące jednocześnie korzyści:

- i) wzrost nośności elementu,
- ii) zmiana trybu zniszczenia z kruchego [ścinanie] na plastyczny [zginanie],
- iii) tworzenie się większej liczby rys mniejszej rozwartości.

Zwiększenie maksymalnego obciążenia można przypisać ciąglemu wzmocnieniu przez podłużne zbrojenie strefy rdzeniowej spawaną siatką drucianą, w przeciwieństwie do dyskretnego wzmocnienia konwencjonalnymi strzemionami. Ciągłość wzmocnienia na ścinanie, zapewniane przez prefabrykowaną siatkę stalową, opóźnia powstawanie zarysowań od ścinania i usztywnia element. Uzyskane wyniki sugerują zastosowanie belek żelbetowych ze wzmocnieniem strefy rdzeniowej a z mniejszą liczbą strzemion, w rozstawie większym niż określa to norma (15). Jednak niezbędne są dalsze testy belek żelbetowych z różnym rozstawem strzemion,

is because the beam R160 was intentionally designed to fail in shear by keeping the spacing of stirrups [160 mm] larger than that required to avoid shear failure. In the case of the beam L0 wherein there are no stirrups but the core zone was reinforced with welded wire mesh has also failed in shear, by developing a diagonal crack at an ultimate load of 173.98 kN. The ultimate load found in the beam L0 was nearly equal to that of the beam R160, which is conventionally reinforced i.e. by providing stirrups in the shear span. This indicates the similarity between the longitudinal core zone reinforcement in the form of welded wire mesh and the stirrups in enhancing the ultimate load compared to that of the beam C100. The slope of the shear cracks with vertical is more or less is the same in the beams: C100, R160, and L0. Also, both the beams R160 and L0 have initially developed a few flexural cracks near the mid-span region. However when the beam L160 having the spacing of stirrups equal to that of R160 with the welded wire mesh as longitudinal core zone reinforcement, has failed at an ultimate load of 272.32 kN by developing clear flexural cracks [Fig.8(d)]. The beam L160 though has developed shear cracks initially but these shear cracks were stopped extending further at about 70 to 80% of the ultimate load and allowed the flexural cracks near the middle of the span to grow and caused the crushing of concrete in the compression zone at ultimate. Though the use of shear reinforcement in the form of stirrups alone at the spacing of 160 mm has led to shear failure the provision of longitudinal core zone reinforcement in the form of welded wire mesh combined with conventional stirrups at 160mm spacing made the beam L160 fail in flexure. Further, there are more small width cracks in L160 compared to all other beams. This indicates the effectiveness of longitudinal core zone reinforcement in transforming the failure from shear to flexure and simultaneously increasing the ultimate load by about 54.7%, compared to R160. A comparison of the deflection at service load, taken as 0.66 of ultimate load, suggests the use of core zone reinforcement did not violate the serviceability norms prescribed in the codes of practice (15).

Here the significant point to be noticed is that the provision of longitudinal core zone reinforcement in the form of welded wire mesh along with conventional stirrups, has the following simultaneous benefits:

- i) increase in ultimate load,
- ii) change in the mode of failure from brittle (shear) to ductile (flexure), and
- iii) formation of a higher number of smaller cracks.

The increase in the ultimate load may be attributed to the continuous resistance, provided by the longitudinal core zone reinforcement in the form of welded wire mesh. Particularly the mesh placed longitudinally in the core zone continuously provides resistance, unlike the discrete resistance provided by the regular stirrups. The continuity in the resistance, produced by the prefabricated mesh against diagonal tension due to shear, delays the formation of shear cracks and improves the performance of reinforced concrete members. On observing the behavior of RC beams with core zone reinforcement it is possible to use fewer stirrups, i.e to apply

wspomaganych wzmocnieniem strefy rdzeniowej. Potrzeba także zbadania efektywności wzmocnienia strefy rdzeniowej spawaną siatką przy różnych proporcjach rozstawu strzemion do efektywnej wysokości przekroju.

Prostota środków polegających na wzmocnieniu na ścinanie elementów żelbetowych poprzez zastosowanie, oprócz konwencjonalnych strzemion, spawanej siatki drucianej jako podłużnego zbrojenia strefy rdzeniowej, może umożliwić szybkie zastosowanie tej technologii w budownictwie.

4. Wnioski

1. Wzdłużne wzmocnienie strefy rdzeniowej zwiększa nośność na poziomie zbliżonym do konwencjonalnych strzemion.
2. Zastosowanie wzdłużnego wzmocnienia strefy rdzenia wraz z konwencjonalnymi strzemionami zmienia mechanizm zniszczenia ze ścinania na zginanie, jednocześnie zwiększając nośność elementu.
3. Belka żelbetowa ze wzdłużnym wzmocnieniem strefy rdzeniowej i konwencjonalnymi strzemionami wykazuje większą liczbę zarysowań o mniejszej rozwartości, co wskazuje na lepsze właściwości plastyczne.
4. Wzdłużne wzmocnienie strefy rdzeniowej w postaci spawanej siatki stalowej działa w sposób ciągły, w przeciwieństwie do dyskretnego wzmocnienia zwykłymi strzemionami.
5. Ciągłość wzmocnienia na ścinanie prefabrykowaną siatką opóźnia powstawanie zarysowań ścinających.
6. Zastosowanie spawanej siatki stalowej w strefie rdzeniowej przekroju, mimo zmniejszonej liczby konwencjonalnych strzemion, nie narusza normowych warunków użytkowości.
7. Badania belek żelbetowych wskazują na wyższą nośność elementów zbrojonych wzdłużnie spawaną siatką stalową w strefie rdzeniowej przekroju w porównaniu ze zbrojeniem konwencjonalnymi strzemionami.

Podziękowania

Autorzy doceniają wsparcie studentów studiów podyplomowych Abhinava Ananda i K. Kirana Kumara oraz pracowników inżynierii budowlanej z Wydziału Inżynierii Lądowej, NIT Warangal, w przeprowadzonych badaniach.

Literatura / References

1. M. Słowik., Shear failure mechanism in concrete beams. 20th European Conference on Fracture (ECF20)-Proc. Mater. Sci. **3**, 1977 – 1982, (2014).
2. ACI-318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, ACI, Farmington Hills, MI, USA, p. 510 (2011).
3. M. M. Al-Nasra, Shear failure investigation of reinforced concrete beams with swimmer bars, J. Civ. Eng. Constr. Techn. **4** (2), 56-64 (2013).

higher spacing of stirrups that prescribed by the code of practice (15). However, this aspect requires confirmation by further testing of RC beams with stirrups at different spacing's, along with core zone reinforcement. Also, the performance of welded mesh as core zone longitudinal reinforcement needs to be investigated for the shear span to depth ratios other than 3, adopted in the present investigation. The simplicity in the means of resisting shear in reinforced concrete members by using a welded wire mesh as longitudinal core reinforcement apart from conventional stirrups/ties may enable the fabrication of reinforcement cages in the rapid adoption of technology in the construction field.

4. Conclusions

The following conclusions can be drawn from the study results of the use of the welded wire mesh, as longitudinal core zone reinforcement, apart from the conventional stirrups.

1. The longitudinal core zone reinforcement enhances the resistance at ultimate similar to that of conventional stirrups, compared to the RC beam with no stirrups in the shear zone.
2. The provision of longitudinal core zone reinforcement apart from the conventional stirrups changes the mode of failure from shear to flexure type and simultaneously increases the ultimate load.
3. The RC beam with longitudinal core zone reinforcement, apart from conventional stirrups, produces more cracks of smaller width, indicating enhanced ductility.
4. The longitudinal core zone reinforcement in the form of welded wire mesh continuously provides the resistance against shear, unlike the discrete resistance provided by the regular stirrups.
5. The continuity in the resistance provided by the prefabricated mesh against diagonal tension due to shear delays the formation of shear cracks and improves the performance of reinforced concrete members.
6. The use of weldmesh as longitudinal core zone reinforcement apart from a reduced number of conventional stirrups does not violate the required serviceability norms.
7. The behavior of the RC beams tested indicates the superiority of the weldmesh as longitudinal core zone reinforcement, over the conventional stirrups from the point of performance at ultimate load.

The authors hereby declare that there is no conflict of interest in the publication of this paper.

Acknowledgement

The authors acknowledge the support of PG Students: Mr. Abhinav Anand and K.Kiran Kumar and Structural Engineering staff of the Department of Civil Engineering, NIT Warangal in conducting the experimental investigation.

4. M. Zakaria, T. Ueda, Z. Wu, L. Meng, Experimental investigation on shear cracking behavior in RC beams with shear reinforcement. *J. Adv. Concr. Techn.* **7** (1), 79-96, (2009).
5. A. B. Shuraim, A novel approach for evaluating the concrete shear strength in reinforced concrete beams, *Latin Am. J. Solid. Struct.* **11** (1), 93 – 112, (2014).
6. R. Park, T. Paulay, Strength and Deformation of Members with Shear, in: *Reinforced Concrete Structures*, New York: Wiley, 270–345, (1975).
7. G.N.J. Kani, The riddle of shear failure and its solution, *ACI Struct. J.* **61** (4), 441–468, (1964).
8. H. M. Ibrahim, Experimental investigation of ultimate capacity of wired mesh-reinforced cementitious slabs, *Constr. Build. Mater.* **25**, 251-259, (2011).
9. J. A. Pincheira, S. H. Rizkalla, E. K. Attiogne, Performance of Welded Wire Fabric as Shear Reinforcement under Cyclic Loading, *ACI Struct. J.* **86** (6), 728-735 (1989).
10. S. Gayathri T. Kirthiga, Experimental and Analytical investigation of RC Beam with welded wire mesh as shear reinforcement, *Int. Res. J. Eng. Techn. (IRJET)* **5** (5), 2372-2395 (2018).
11. D. Alexander, S. Ramakrishnan, Design of RC Beam with and without welded mesh as shear reinforcement in flexural and shear behavior. *Int. J. Adv. Eng. Res. Techn. (IJAERT)*, **4** (6), 2348 – 8190 (2016).
12. I. G. Shaaban, Y. B. Shaheen, E. L. Elsayed, O. A. Kamal, P. A. Adesina., Flexural characteristics of lightweight ferrocement beams with various types of core materials and mesh reinforcement, *Const. Build. Mater.* **171**, 802-816 (2018).
13. A. Albidah, A. Abadel, H. Abbas, T. Almusallam, Y. Al-Salloum, Experimental and analytical study of strengthening schemes for shear deficient RC deep beams. *Constr. Build. Mater.* **216**, 673-686 (2019).
14. A. Mansuri, Ch. Patel, M. Patel, T. Tank, S. A. Vasanwala, Behavior of Strengthened RC Beams in Shear, *Int. J. Eng. Develop. Res. (IJEDR)*, **5** (2) 417-423, (2017).
15. IS 456. 2000. Plain and Reinforced Concrete - Code of Practice. Bureau of Indian Standards, New Delhi, pp.3