

Badania doświadczalne i numeryczne beleczek betonowych wzmocnianych włóknami przy zginaniu czteropunktowym

Experimental and numerical study of fiber reinforced concrete beams in four-point bending

R. Tuğrul Erdem

Department of Civil Engineering, Manisa Celal Bayar University, 45140, Manisa, Turkey

e-mail : tugrul.erdem@cbu.edu.tr

Streszczenie

W niniejszej pracy zbadano zachowanie się beleczek betonowych z włóknami i bez nich. W części doświadczalnej wykonano łącznie 16 próbek beleczek o różnych wymiarach przekroju. 12 próbek zostało wzmocnionych włóknami syntetycznymi, które nadają betonowi twardość, udarność i wytrzymałość zmęczeniową. Stosunek masowy włókien w próbkach wynosi od 0% do 0.20%. Próbki poddawane są próbie czteropunktowego zginania w celu uzyskania maksymalnych wartości obciążenia i przemieszczenia, aż do osiągnięcia stanu zniszczenia. Następnie próbki belek są modelowane w programie do analizy elementów skończonych Abaqus. Ze względu na porównanie wartości doświadczalnych i numerycznych oraz rozkładów naprężeń w próbkach widać, że analiza numeryczna może być rozwiązaniem przy badaniu zachowania się beleczek o różnych wymiarach w zginaniu czteropunktowym.

Słowa kluczowe: Abaqus, beleczka, zginanie, beton, włókno

Summary

In this study, the behavior of concrete beams with and without fiber was investigated. In the experimental part, a total of 16 beam specimens were manufactured having different section sizes. 12 specimens were reinforced with synthetic fibers, that provide toughness, impact, and fatigue strength to concrete. The fiber ratios of the samples varied between 0% and 0.20% by mass. The samples were subjected to a four-point bending test to obtain the maximum load and displacement values, until they reached the failure modes. Subsequently, the beam samples were modelled in the Abaqus finite element analysis software. Due to the comparison of experimental and numerical values and stress distributions of the specimens, it is seen that numerical analysis could be an option when investigating the behavior of beams with different dimensions in four-point bending.

Keywords: Abaqus, beam, bending, concrete, fiber

1. Wprowadzenie

Beton jest materiałem złożonym, który składa się z cementu, kruszywa, wody i domieszek, jeśli jest to konieczne. Beton posiada szereg zalet, takich jak wysoka wytrzymałość na ściskanie, ognioodporność, trwałość, sztywność i niskie koszty otrzymania. Dzięki tym zaletom, beton jest najczęściej stosowanym materiałem budowlanym na świecie. Zbrojenie jest włączone do betonu, gdy uwzględnia się naprężenia rozciągające (1).

W celu poprawy urabialności i wydajności, inżynierowie i badacze stosują różne rodzaje materiałów w mieszance betonowej. Bada-

1. Introduction

Concrete is a composite material which is composed of cement, aggregate, water, and admixtures, if necessary. Concrete has several advantages such as high compression strength, fire resistance, durability, stiffness, and low maintenance. Because of these advantages, concrete is the most widely used construction material, in the world. Reinforcement is included into concrete, when tensile stress is taken into consideration (1).

Different types of materials have been used in concrete mix to improve workability and performance, by engineers and rese-

jąc wpływ włókien w betonie, zauważa się, że włókna generalnie zmniejszają przepuszczalność betonu i ograniczają pękanie, spowodowane skurczem plastycznym i wysychaniem. Ponadto, włókna są tanie oraz szybko i łatwo można je wprowadzić do betonu. Oprócz zmniejszenia szerokości rys i wymagań dotyczących zbrojenia stalowego, włókna poprawiają plastyczność, wytrzymałość i odporność na zamrażanie i rozmrażanie. Z tych powodów w ostatnich latach wzrosło zastosowanie różnych włókien w betonie (2-5).

Istnieje wiele rodzajów zbrojenia włóknami, które dodaje się do mieszanki betonowej w określonych proporcjach. Włókna stalowe, syntetyczne, szklane, azbestowe i węglowe mogą być podane jako przykłady zbrojenia włóknami. Integralność konstrukcyjna jest zapewniona przez włókna w elementach konstrukcyjnych. Niemniej jednak, geometria, rozmieszczenie, stosunek i gęstość włókien są istotnymi parametrami w betonie. Ogólnie rzecz biorąc, włókna zwiększają wytrzymałość, elastyczność i ciągliwość betonu. Ze względu na to, że zachowanie się betonu z włóknami staje się bardziej skomplikowane, w literaturze (6-9) pojawiają się prace badawcze dotyczące tego zagadnienia.

Przeprowadzono badania zachowania się beleczek przy zginaniu. W tym celu badacze przeprowadzili eksperymentalne i numeryczne badania różnych próbek wzmocnionych włóknami, poddanych zginaniu. Nośność i plastyczność badanych próbek porównano na podstawie wyników analizy numerycznej. Ponadto, rozkłady pęknięć, wzory uszkodzeń i sposób zniszczenia symulowano za pomocą zaawansowanej analizy numerycznej, w celu weryfikacji wyników badań doświadczalnych (10-12).

Jak przedstawiono powyżej, w literaturze można znaleźć prace badające zachowanie się beleczek betonowych z różnymi rodzajami włókien przy zginaniu. Jednakże celem niniejszej pracy jest zbadanie właściwości użytkowych beleczek o różnych wymiarach, które są wzmocnione włóknami syntetycznymi. Dodatkowo, nieliniowa analiza numeryczna jest wykorzystywana do porównania zachowania się próbek betonowych. W programie doświadczalnym niniejszej pracy zastosowano zbrojenie makrowłóknami. Ten rodzaj zbrojenia składa się z syntetycznych włókien o długości 40 mm, o smukłości 90. Podano wytrzymałość, udarność i odporność zmęczeniową betonu. Dodatkowo, dzięki zastosowaniu zbrojenia rozproszonego, zwiększa się wytrzymałość na zginanie i zapewnia ograniczenie pęknięć. Włókna syntetyczne Strux 90/40, które są używane do wzmocniania belek betonowych są wykorzystywane w wielu dziedzinach budownictwa, np. kiedy zbrojenie stalowe nie może zostać prawidłowo rozmieszczone, zapewniając właściwości antykorozyjne oraz ograniczając pęknięcia spowodowane skurczem plastycznym i wysychaniem.

Niniejsza praca obejmuje zasadniczo dwa główne tematy. W części doświadczalnej badań, w laboratorium wykonano 16 próbek beleczek o różnym stosunku zawartości włókien. Próbkę poddawane są próbie zginania czteropunktowego przy użyciu stanowiska badawczego. Dla każdej próbki uzyskano wartości obciążenia i przemieszczenia w punkcie środkowym, aż do osiągnięcia

archers. When the effect of fibers in concrete is investigated, it is seen that fibers generally reduce the permeability of concrete and control cracking, caused by plastic and drying shrinkage. In addition, fibers are economical, and they are quick and easy to add into concrete. While crack widths and steel reinforcement requirement are reduced, fibers improve ductility, strength, and freeze-thaw resistance. For these reasons, the use of different fibers in concrete has increased in recent years (2-5).

There are many types of fiber reinforcement that are added to the concrete mix in specific ratios. Steel, synthetic, glass, asbestos, and carbon fibers can be given as examples of fiber reinforcement. Structural integrity is provided by fibers in the structural members. However, the geometry, distribution ratio, and density of fibers are significant parameters in concrete. Generally, fibers increase the strength, flexibility, and ductility properties of concrete. Because the behavior of concrete with fibers becomes more complicated, researchers have investigated this subject in the literature (6-9).

Investigations have been carried out about the flexural behavior of the beams. For this purpose, experimental and numerical studies have been performed by researchers for different specimens reinforced by fibers under bending. The load bearing capacities and ductility properties of the tested specimens have been compared by the results of the numerical analysis. In addition, crack distributions, damage patterns, and failure modes have been simulated by advanced numerical analysis, to verify experimental results (10-12).

As outlined above, studies investigating the bending behavior of concrete beams with different fibers have been found in the literature. However, this study aims to examine the performance of the beams with different dimensions, which are reinforced by synthetic fibers. In addition, non-linear numerical analysis is utilized to compare the behavior of concrete specimens. In the experimental program of this study, specific ratios of macro fiber reinforcement are used, in the production of test specimens. This type of reinforcement consists of synthetic macro fibers having 40 mm length, with an aspect ratio of 90. Toughness, impact, and fatigue resistance of concrete are provided. In addition, the flexural strength values are increased and crack control is provided by using fiber reinforcement. Strux 90/40 synthetic fibers that are used to strengthen concrete beams are utilized in several construction areas, because of eliminating the proper positioning of steel reinforcement, providing corrosion resistant properties, and controlling plastic and long-term, drying shrinkage cracks.

This study has two main subjects in general. In the experimental part of the study, 16 beam specimens having different fiber ratios, were produced in the laboratory. The specimens were subjected to a four-point bending test, using a test setup. The load and mid-point displacement values were obtained for each test specimen, until the maximum capacity was reached. In the finite elements analysis part of the study, Abaqus finite elements analysis software (13) that is widely used by researchers, was utilized to validate the test results. First of all, the specimens were modelled in the software. Afterwards, material properties were assigned to the

obciążenia maksymalnego. W części opracowania dotyczącej analizy elementów skończonych, do walidacji wyników badań wykorzystano oprogramowanie do analizy metodą elementów skończonych Abaqus (13), które jest powszechnie stosowane przez naukowców. W pierwszej kolejności, próbki były modelowane w programie komputerowym. Następnie do geometrii przypisywane są właściwości materiałowe, a analizy przeprowadzane są przy czteropunktowym zginaniu. Na koniec porównano wyniki badań i analizy numerycznej oraz zaproponowano sugestie.

2. Badania doświadczalne

W programie doświadczalnym w pierwszej kolejności wykonano 4 próbki beleczek betonowych o różnych wymiarach przekroju. Następnie wykonano 12 próbek dla różnych proporcji włókien syntetycznych. Numery i wymiary próbek podano w tablicy 1, natomiast szczegóły dotyczące włókien w próbkach przedstawiono w tablicy 2.

Przed przystąpieniem do przygotowania mieszanki betonowej należy podjąć decyzję co do stosowanych materiałów. Wytrzymałość na ściskanie określono na trzech próbkach sześciennych dla każdego składu betonu. Mieszankę betonową przygotowano czterokrotnie dla różnych zawartości włókien. Kruszywo stanowiła mieszanka żwiru i piasku. Maksymalna średnica ziarna piasku wynosiła 5 mm, maksymalna średnica ziarna żwiru wynosiła 15 mm. Składy mieszanek dla 1 m³ betonu podano w tablicy 3.

Mieszankę betonową przygotowano z użyciem wolnospadowej mieszarki do betonu. W celu wykonania próbek betonowych zbrojonych włóknami, do mieszanki betonowej dodaje się zbrojenie z włókien syntetycznych pokazane na rys. 1, w różnych ilościach podanych w tablicy 3.

Tablica 1 / Table 1

WYMIARY PRÓBEK

SIZES OF THE SPECIMENS

Specimen denotation Oznaczenie próbki	Dimensions / Wymiary, mm
S1, S2, S3, S4	150x150x570
S5, S6, S7, S8	100x200x570
S9, S10, S11, S12	125x250x570
S13, S14, S15, S16	150x250x570

Tablica 2 / Table 2

ZAWARTOŚĆ WŁÓKIEN W PRÓBKACH

FIBER CONTENT IN THE SPECIMENS

Specimen denotation Oznaczenie próbki	Fiber content Zawartość włókien, kg/m ³	Fiber ratio Udział włókien, %
S1, S5, S9, S13	0	0
S2, S6, S10, S14	2.0	0.08
S3, S7, S11, S15	3.6	0.15
S4, S8, S12, S16	5.8	0.20

geometries and the analyses were performed under four-point bending. Finally, test and numerical analysis results are compared and suggestions are proposed.

2. Experiments

In the experimental program, 4 concrete beam specimens having different section sizes, are produced in the first place. Afterwards, 12 test specimens are also manufactured for different synthetic fiber ratios. While numbers and sizes of the specimens are given in Table 1, fiber details of the specimens are presented in Table 2.

Three cubic samples are used for each concrete set, to determine the compression strength of concrete. Concrete mixture is prepared four times for different fiber contents. Aggregates are composed of gravel and sand. Sand maximum diameter was 5 mm, maximum diameter of gravel was 15 mm. Mix proportions of concrete are given in Table 3.

The concrete mixture was prepared using the concrete mixing machine. To produce fiber reinforced concrete specimens, synthetic fiber reinforcement that is shown in Fig. 1 was added in the concrete mixture in different amounts, as mentioned in Table 3.

Because of the shape and high modulus of elasticity properties, crack control was provided by synthetic fiber reinforcement. Characteristics of the fiber reinforcement are given in Table 4.

12 cubic samples from each concrete set, were cured in water for 28 days. Afterwards, each cubic sample was tested in hydraulic press machine having 2000 kN capacity as shown in Fig. 2. The peak point is recorded by the system with the breaking of the sample and the hydraulic pressure automatically stops at the same time (14).



Rys. 1. Zbrojenie włóknami w mieszance betonowej

Fig. 1. Fiber reinforcement in the concrete mix

Tablica 3 / Table 3

SKŁADY MIESZANEK

MIX PROPORTIONS

Material / Składnik	Content / Zawartość, kg	Ratio / Udział, %
CEM I 42.5R	400	16.71
Gravel / Żwir	930	38.86
Sand / Piasek	860	35.94
Water / Woda	200	8.36
Chemical admixture	3	0.12
Fiber Reinforcement	0; 2; 3.6; 5.8	0; 0.08; 0.15; 0.20



Rys. 2. Przygotowanie i badanie próbek sześciennych

Fig. 2. Preparation and testing of the cubic samples

Ze względu na kształt i duży moduł sprężystości, ograniczenie pęknięć zostało zapewnione przez zbrojenie włóknami syntetycznymi. Charakterystykę zbrojenia włóknami podano w tablicy 4.

Z każdego zestawu betonu wykonano po 12 próbek sześciennych, które dojrzewały przez 28 dni w wodzie. Następnie każdą próbkę sześcienną poddano badaniu w prasie hydraulicznej o nacisku maksymalnym 2000 kN, jak pokazano na rys. 2. Naprężenie szczytowe było rejestrowane przez system wraz z przełamaniem próbki, a pompa hydrauliczna automatycznie wyłączona w tym samym momencie (14).

Po przebadaniu w prasie 12 próbek sześciennych otrzymano wartości wytrzymałości na ściskanie z uwzględnieniem obciążenia granicznego i wymiarów próbek sześciennych. W ten sposób określono średnie wartości wytrzymałości próbek betonu dla każdego betonu, jak podano w tablicy 5.

Próbę zginania czteropunktowego przeprowadzono na belkach w celu zrozumienia ich zachowania tylko przy zginaniu. W tej próbie obciążenie przykładane było z dwóch punktów próbki beleczki. Tak więc, maksymalny moment występuje w określonym obszarze. Ponieważ siła ścinająca jest równa zero, w tym obszarze uwzględniany jest tylko efekt zginania. Dzięki temu można dokładnie określić zachowanie się belek pod wpływem zginania.

Stanowisko badawcze składało się z zamkniętego systemu ramowego. Próbki poddawane były obciążeniu statycznemu za pomocą stalowej płyty obciążeniowej, umieszczonej na stanowisku badawczym. Prędkość monotonicznie narastającego obciążenia statycznego była stała dla wszystkich próbek. Prędkość obciążania była regulowana w celu uzyskania wartości naprężeń w zakresie od 0,04 MPa/s do 0,06 MPa/s. 28-dniowy okres dojrzewania dotyczył zarówno wszystkich belek, jak i próbek sześciennych. Przed wykonaniem próby zginania czteropunktowego, wszystkie próbki ułożono razem w sposób przedstawiony na rys. 3.

Badania przeprowadzono z uwzględnieniem zasad określonych w TS EN 12390-5 (15). Do każdej próbki w programie doświadczalnym przyłożono monotonicznie wzrastające obciążenie statyczne. Próbkę umieszczoną na stanowisku badawczym przedstawiono

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI ZBROJENIA WŁÓKNAMI

PROPERTIES OF FIBER REINFORCEMENT

Specific gravity / Ciężar właściwy	0.92
Modulus of elasticity / Moduł sprężystości	9.5 GPa
Tensile strength / Wytrzymałość na rozciąganie	620 MPa
Melting point / Temperatura topnienia	160°C
Ignition point / Temperatura zapłonu	590°C
Alkali, acid & salt resistance / Odporność na kwasy, zasady i sole	High

Tablica 5 / Table 5

ŚREDNIE WARTOŚCI WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE PRÓBEK SZEŚCIENNYCH

AVERAGE CUBIC COMPRESSION STRENGTH VALUES

Concrete set Seria próbek	Fiber content Zawartość włókien, kg	Average compressive strength Średnia wytrzymałość na ściskanie, MPa
Set 1	0	37.7
Set 2	2.0	38.3
Set 3	3.8	40.8
Set 4	5.6	41.7

After testing 12 cubic samples in the press machine, compression strength values are obtained by considering the ultimate load and sizes of the cubic samples. So, average strength values of concrete samples for each concrete set is determined as given in Table 5.

The four-point bending test was applied to beam specimens to understand the behavior under bending only. The loading was applied from two points of the beam specimens in this test. So, maximum moment occurred in a certain region. Because the shear force equals zero, only the bending effect was taken into consideration in this region. So, the behavior of the beams under the bending effect was accurately determined.

Test setup has a closed frame system. Static loading was applied to the test specimens by means of a steel loading plate in the test setup. The speed of the monotonic increased static loading was kept constant for all test specimens. The loading speed was adjusted to provide stress values between 0.04 MPa/s and 0.06 MPa/s.

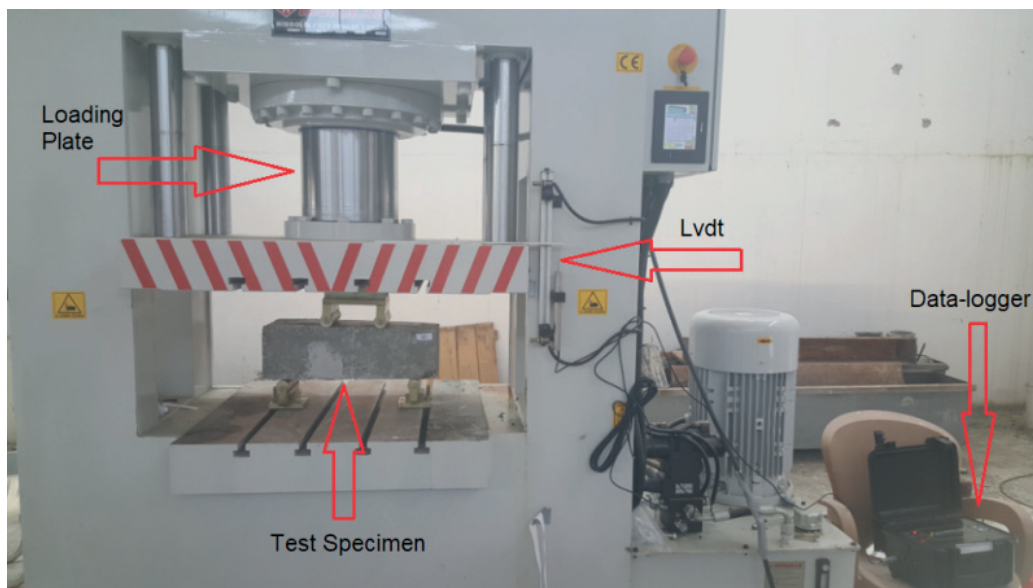


Rys. 3. Próbkki do badań

Fig. 3. Test specimens

A 28-day curing period was also completed for all test specimens, as well as cubic specimens. Before performing four-point bending tests, all specimens were laid together as shown in Fig. 3.

The tests were carried out according to TS EN 12390-5 (15). Monotonically increasing static loading was applied to each test specimen in the experimental program. A test specimen which was placed in the test setup is presented in Fig. 4. While load value was measured by load cell, displacement value was determined by linear variable differential transformer (LVDT). The LVDT, which converts the mechanical movement of an object into electrical signals, was fixed on the test specimen. By this way, displacement values are simultaneously measured as the static loading is applied on test specimens. For this purpose, the spring mechanism of LVDT is utilized to detect the movement of the loading plate, and measured values are transferred to a data logger in the end.



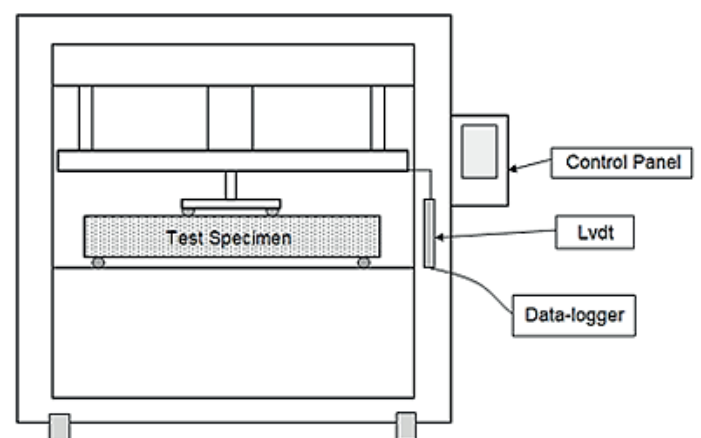
Rys. 4. Stanowisko badawcze

Fig. 4. Test setup

na rys. 4. Podczas gdy wartość obciążenia była mierzona przez czujnik obciążenia, wartość przemieszczenia była określana przez liniowy zmienny transformator różnicowy [LVDT]. Na próbce zamocowane było urządzenie LVDT, które przetwarzało ruch obiektu na sygnały elektryczne. W ten sposób wartości przemieszczeń były mierzone jednocześnie w czasie działania obciążenia statycznego na badane próbki. W tym celu, mechanizm sprężynowy urządzenia LVDT wykorzystywano do wykrywania ruchu płyty obciążającej, a zmierzone wartości ostatecznie przekazywano do rejestratora danych.

W celu zobrazowania mechanizmu działania próby zginania, na rys. 5 przedstawiono schematyczną budowę stanowiska badawczego. W ten sposób przedstawiona została próba zginania czteropunktowego wraz z próbką i niezbędnymi urządzeniami badawczymi.

Wszystkie próbki badane były pod wpływem czteropunktowego zginania. Próbki swobodnie podparte umieszczano na stanowisku badawczym. Odległość pomiędzy podporami wynosiła 500 mm.



Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 5. Scheme of test setup

To represent the working mechanism of the bending test, a schematic design of the test setup is shown in Fig. 5. By this way, four-point bending test is presented with test specimen and necessary test devices.



Rys. 6. Wybrana próbka w badaniach doświadczalnych

Fig. 6. Selected specimen in the experimental study

Po umieszczeniu próbki na stanowisku badawczym, każda z nich poddawana była próbie zginania czteropunktowego. Badanie było prowadzone aż do osiągnięcia maksymalnej nośności. Wartości obciążeń i przemieszczeń uzyskiwane były za pomocą urządzeń pomiarowych znajdujących się na stanowisku badawczym, podczas badań. Na rys. 6 przedstawiono wybrane próbki przed i po próbie zginania. Wyniki przedstawiono w tabelicy 6. Wykresy na rys. 7 przedstawiają zachowanie próbek podczas badań.

Tablica 6 / Table 6

WYNIKI BADAŃ

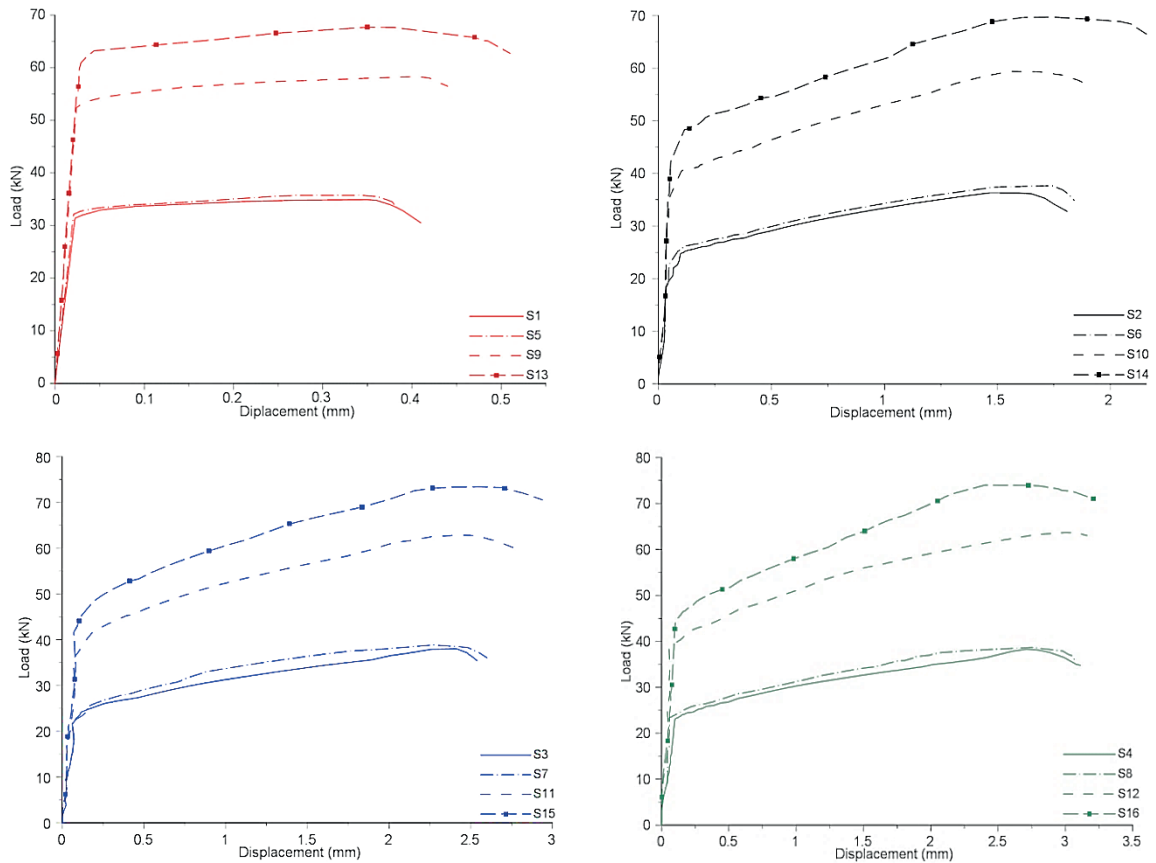
TEST RESULTS

Specimen Próbka	Section sizes Wymiar przekroju, mm	Fiber ratio Udział włókien, %	Peak load Obciążenie szczytowe, kN	Max. displacement Maksymalne przemieszczenie, mm
S1	150x150	-	34.9	0.41
S2	150x150	0.08	36.3	1.81
S3	150x150	0.15	38.1	2.54
S4	150x150	0.20	38.3	3.11
S5	100x200	-	35.7	0.38
S6	100x200	0.08	37.4	1.84
S7	100x200	0.15	38.8	2.60
S8	100x200	0.20	38.7	3.04
S9	125x250	-	58.3	0.44
S10	125x250	0.08	59.4	1.92
S11	125x250	0.15	62.8	2.77
S12	125x250	0.20	63.1	3.16
S13	150x250	-	67.7	0.51
S14	150x250	0.08	69.7	2.16
S15	150x250	0.15	73.4	2.94
S16	150x250	0.20	74.0	3.21

All test specimens were tested under the effect of four-point bending. Simply supported specimens were placed in the test setup. Support conditions were provided at both ends of each test specimen. The distance between supports was taken as 500 mm. After placing all test specimens in the test setup, a four-point bending test was applied for each of them. The tests were continued until reaching the maximum load capacity. Load and displacement values were obtained by measurement devices in the test setup during tests. The selected specimen is presented before and after the bending test in Fig. 6. The results are presented in Table 6. The graphs in Fig. 7 present the behavior of test specimens during the tests.

Using load-displacement curves of the test specimens, a method shown in Fig. 8 was used to determine the behavior of test specimens. Thus, the initial stiffness, displacement ductility ratio and energy capacity values of the specimens were calculated according to the parameters in the figure. To determine the initial stiffness value, slope of the load-displacement curve was calculated for the first inclination change point to the origin of the curve. The failure point was defined where the maximum load value was decreased by 15%. The corresponding displacement value δ_2 was marked for 85% of the maximum load value. The ratio of displacements δ_1/δ_2 gives the value of displacement ductility. Finally, energy capacity is determined by calculating the area of the curve. The region between the point of origin and the failure point, which is the intersection of $0.85P_{max}$ and δ_2 , was considered to calculate the value of the energy capacity.

Initial stiffness, ductility ratio and energy capacity values of specimens were calculated for each specimen according to load-displacement curves. The results are given in Table 7.



Rys. 7. Krzywe obciążenie-przemieszczenie próbek

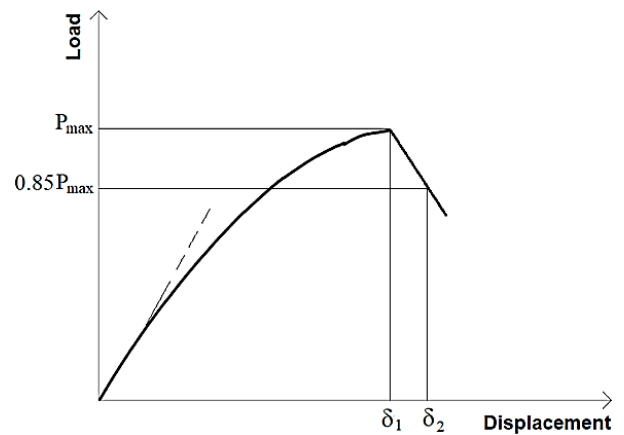
Fig. 7. Load-displacement curves of test specimens

W celu określenia zachowania się próbek zastosowano metodę przedstawioną na rys. 8, wykorzystującą krzywe obciążenia i przemieszczenia próbek. W ten sposób obliczane zostały wartości sztywności początkowej, współczynnika plastyczności przemieszczeń oraz zdolności pochłaniania energii próbek, zgodnie z danymi podanymi na rysunku. Aby określić początkową wartość sztywności, oblicza się nachylenie krzywej obciążenie-przemieszczenie dla pierwszego punktu zmiany nachylenia względem początku krzywej. Punkt zniszczenia definiuje się w miejscu, w którym maksymalna wartość obciążenia zmniejsza się o 15%. Odpowiednia wartość przemieszczenia δ_2 jest zaznaczona dla 85% wartości maksymalnego obciążenia. Stosunek przemieszczeń δ_1/δ_2 daje wartość plastyczności przemieszczeń. Wreszcie, zdolność pochłaniania energii jest określana poprzez obliczenie pola powierzchni pod krzywą. Obszar pomiędzy punktem początkowym a punktem zniszczenia, który jest punktem przecięcia $0.85P_{max}$ i δ_2 jest brany pod uwagę do obliczenia wartości zdolności pochłaniania energii.

Początkowe wartości sztywności, współczynnika plastyczności i zdolności pochłaniania energii próbek zostały obliczone dla każdej próbki na podstawie krzywych obciążenie-przemieszczenie. Wyniki przedstawiono w tabelicy 7.

3. Analiza numeryczna

W części pracy dotyczącej analizy numerycznej, do rozwiązań wykorzystano oprogramowanie do analizy metodą elementów



Rys. 8. Metoda obliczania zdolności pochłaniania energii próbek

Fig. 8. Approach for energy capacities of specimens

3. Numerical analysis

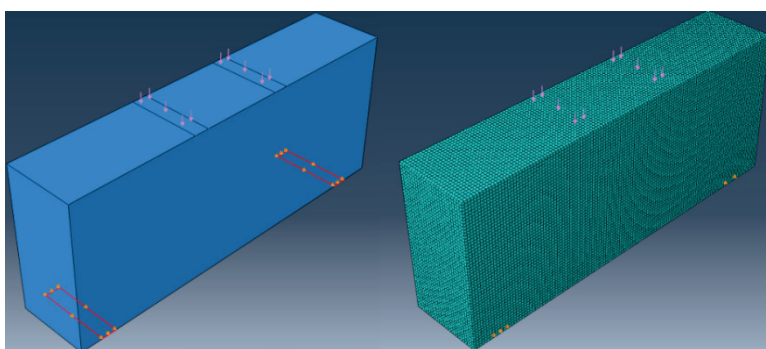
In the numerical analysis part of the study, Abaqus finite elements analysis software was utilized for solutions. Abaqus is widely used by researchers to investigate the behavior of structural members under both static and dynamic loading. The software enables researchers to define several material models in its modules. Numerical analysis results obtained from the software give idea about verification of the experimental study.

To investigate the behavior of concrete specimens, S1, S5, S9 and S13 test specimens were modelled in the software. Three-dimen-

Tablica 7 / Table 7

WARTOŚCI DOŚWIADCZALNE WYNIKAJĄCE Z KRZYWYCH OBCIĄŻENIE- PRZEMIESZCZENIE
EXPERIMENTAL VALUES DUE TO LOAD-DISPLACEMENT CURVES

Specimen Próbka	Initial stiffness Szttywność początkowa, kN/mm	Ductility ratio Współczynnik plastyczności, -	Energy capacity Zdolność pochłaniania energii, kN·mm
S1	1.53	1.74	13.57
S2	2.61	2.11	56.88
S3	2.32	2.01	80.55
S4	1.42	1.86	99.95
S5	1.39	1.43	12.77
S6	2.62	2.46	59.77
S7	2.34	2.76	87.14
S8	1.45	2.22	101.20
S9	2.17	1.67	24.23
S10	3.95	2.10	97.74
S11	3.42	2.03	148.70
S12	2.32	2.47	171.47
S13	2.20	1.75	32.57
S14	4.24	2.36	131.50
S15	3.81	2.26	185.59
S16	2.80	1.74	201.79



Rys. 9. Model elementów skończonych

Fig. 9. Finite element model

skończonych Abaqus. Program Abaqus jest powszechnie stosowany przez naukowców do badania zachowania się elementów konstrukcyjnych, zarówno pod obciążeniem statycznym jak i dynamicznym. Oprogramowanie umożliwia badaczom zdefiniowanie kilku modeli materiałowych w swoich modułach. Wyniki analizy numerycznej uzyskane z programu dają wyobrażenie o weryfikacji badań eksperymentalnych.

W celu zbadania zachowania się próbek betonowych, w oprogramowaniu modelowano próbki S1, S5, S9 i S13. Trójwymiarowe modele elementów skończonych wytworzono za pomocą trójwymiarowego, 8-węzłowego liniowego elementu sześciennego [C3D8R]. Dodatkowo, warunki obciążenia i podparcia były takie same jak w programie doświadczalnym. Linie podporowe oraz warunki podparcia stosowane w modelowaniu były takie same jak te użyte w doświadczeniach. Dodatkowo przyjęto wartość wielkości przyrostu czasu na poziomie 0,005 sek.

sional finite element models were created, using a three-dimensional 8-node linear brick, hexahedron element type [C3D8R]. In addition, load case and support conditions are taken same as the experimental program. Support lines were modelled as sets, and support conditions were applied to these sets in the software. Furthermore, the value of the time increment size was taken as 0.005 s.

After the test setup and the specimens were modeled in the software, the geometries were divided into small pieces to obtain more appropriate results. For this purpose, mesh operation is performed. The size of the finite element was taken as 4 mm for all geometries in the end. Finite element model of S5 specimen before and after mesh operation is presented in Fig. 9. Afterwards, number of nodes and elements occur in the software. The numbers for all finite element models are given in Table 8.

Defining accurate material model is another significant point of the numerical analysis.

The material properties of concrete that are obtained in the experimental part of the study are defined in the software, using the concrete damage plasticity model [CDP]. This model represents the non-linear behavior of concrete, both in compression and tension. The stress-strain relationship of concrete which is defined in the software is represented in Fig. 10.

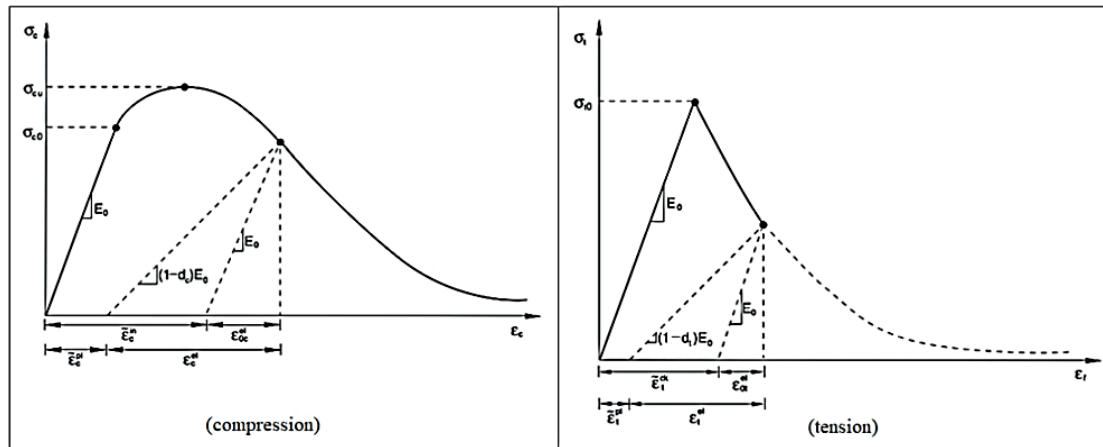
In the concrete CDP model, the response is linear until reaching σ_{co} which is the initial yield value in compression. However, the response is qualified by the stress hardening followed by strain softening beyond the ultimate stress, σ_{cu} in the plastic region. Mander's stress-strain model for unconfined concrete (16) was used to represent the behavior of concrete in compression. E_c representing the modulus of elasticity which is determined by using the formula [1]. In the study of Li et al. (17), while the ultimate strain value of the concrete strain value ϵ_{cu} is defined as 0.003, the tensile strength f_t is calculated according to the formula [2]. The relationship between stress-strain in tension is linear elastic until σ_{to} , which represents

Tablica 8 / Table 8

LICZA WĘZŁÓW I ELEMENTÓW

NUMBER OF NODES AND ELEMENTS

Specimen Próbka	Node number Liczba węzłów	Element number Liczba elementów
S1	194688	183388
S5	171704	160650
S9	260096	246078
S13	319410	304000



Rys. 10. Krzywe naprężenie-odkształcenie betonu

Fig. 10. Stress-strain curves of concrete

Po opracowaniu modelu w oprogramowaniu stanowiska badawczego i próbek, geometria jest dzielona na mniejsze części w celu uzyskania bardziej odpowiednich wyników. W tym celu wykonywana jest operacja siatkowania. Wielkość elementu skończonego przyjęto na poziomie 4 mm dla wszystkich geometrii. Model elementu skończonego próbki S5 przed i po operacji siatkowania przedstawiono na rys. 9. Następnie w programie pojawia się liczba węzłów i elementów. Wartości liczbowe dla wszystkich modeli elementów skończonych podano w tablicy 8.

Zdefiniowanie dokładnego modelu materiałowego jest kolejnym istotnym punktem analizy numerycznej. Uzyskane w części doświadczalnej właściwości materiałowe betonu są określane w programie komputerowym przy użyciu modelu betonu plastycznego, ze zniszczeniem (CDP). Model ten reprezentuje nieliniowe zachowanie betonu, zarówno przy ściskaniu jak i przy rozciąganiu. Zdefiniowana w programie zależność naprężenie-odkształcenie betonu przedstawiona jest na rys. 10.

W modelu CDP odpowiedź betonu jest liniowa do momentu osiągnięcia σ_{c0} , czyli początkowej wartości plastyczności przy ściskaniu. Jednakże, odpowiedź jest opisywana przez stwardnienie naprężeniem, po którym następuje zmiękczenie odkształceniem powyżej naprężenia końcowego, σ_{cu} w obszarze plastycznym. Model naprężenie-odkształcenie Mander'a dla betonu nieograniczonego (16) został wykorzystywany do przedstawienia zachowania się betonu podczas ściskania. E_c oznacza moduł sprężystości, który wyznacza się za pomocą wzoru [1]. W badaniach Li i in (17), podczas gdy wartość odkształcenia granicznego betonu ϵ_{cu} jest określona jako 0,003, wytrzymałość na rozciąganie f_t jest obliczana według wzoru [2]. Zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem przy rozciąganiu jest liniowo sprężysta do momentu σ_{t0} , który stanowi naprężenie niszczące. Po osiągnięciu tego punktu, tworzenie się mikropęknięć jest zależne od zmiękczającej reakcji naprężenie-odkształcenie.

$$E_c = 4700\sqrt{f_c} \quad [1]$$

$$f_t = 0.623\sqrt{f_c} \quad [2]$$

the failure stress. After reaching this point, the formation of the micro-cracks is designed by the softening stress-strain response.

$$E_c = 4700\sqrt{f_c} \quad [1]$$

$$f_t = 0.623\sqrt{f_c} \quad [2]$$

Two damage variables as d_c and d_t are used for degradation of the elastic stiffness in CDP model. The values of these variables differ between $d_c < 1$ and $0 < d_t$. While total loss of strength is represented by 1, undamaged material is represented by 0. Thus, the stress-strain relationships for both compression and tension loading are obtained by formulas [3] and [4]. In these formulas, E_0 , are initial elastic stiffness of the material, equivalent plastic strain in compression and tension respectively (18).

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\epsilon_c - \tilde{\epsilon}_c^{pl}) \quad [3]$$

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\epsilon_t - \tilde{\epsilon}_t^{pl}) \quad [4]$$

Some significant parameters such as dilation angle ψ , flow potential eccentricity ϵ , ratio of initial equibiaxial compressive yield stress to initial uniaxial compressive yield stress σ_{b0}/σ_{c0} , coefficient determining the shape of the deviatory cross-section K_c , and viscosity parameter μ are defined in concrete damage plasticity model. Material properties of concrete in Set 1 are given in Table 9. The other concrete sets are also defined in the software by considering the compressive strength values.

After assigning the material properties to the related geometries, numerical analyses are performed for all specimens. The analyses are continued for 6 seconds with the length of the step interval $\Delta t = 0.01$ sec. So, load and displacement values are determined. Test and analysis results are comparatively given in Table 10. Besides, load-displacement curves of concrete specimens after analyses are presented in Fig. 11.

Von Mises stress distributions which show parallelism with the damage developments of the specimens in the experimental program are also obtained in the software. After the loading is applied, the

Dwie zmienne uszkodzenia d_c i d_t są używane do degradacji sztywności sprężystej w modelu CDP. Wartości tych zmiennych różnią się między $d_c < 1$ i $0 < d_t$. Podczas gdy całkowita utrata wytrzymałości reprezentowana jest przez 1, nieuszkodzony materiał reprezentowany jest przez 0. Zależności naprężenie-odkształcenie zarówno dla obciążenia ściskającego jak i rozciągającego uzyskuje się według wzorów [3] i [4]. W tych wzorach E_0 , $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$, $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ to początkowa sztywność sprężysta materiału, równoważne odkształcenie plastyczne, odpowiednio przy ściskaniu i rozciąganiu (18).

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\epsilon_c - \tilde{\epsilon}_c^{pl}) \quad [3]$$

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\epsilon_t - \tilde{\epsilon}_t^{pl}) \quad [4]$$

W modelu CDP zdefiniowano kilka istotnych parametrów, takich jak kąt dylatacji ψ , mimośród potencjału płynięcia ϵ , stosunek początkowej granicy plastyczności przy ściskaniu dwuosiowym do początkowej granicy plastyczności przy ściskaniu jednoosiowym σ_{bd}/σ_{co} , współczynnik określający kształt przekroju skośnego K_c oraz parametr lepkości μ . Właściwości materiałowe betonu w zestawie 1 podano w tablicy 9. Pozostałe zestawy próbek zostały również zdefiniowane w programie, z uwzględnieniem wartości wytrzymałości na ściskanie.

Po przypisaniu właściwości materiałowych do odpowiednich geometrii, przeprowadzono analizy numeryczne dla wszystkich próbek. Analizowany czas wyniósł 6 sekund z długością interwału krokowego $\Delta t = 0.01$ sek. W ten sposób wyznaczano wartości obciążenia i przemieszczenia. Wyniki badań i analiz porównawczych przedstawiono w tablicy 10. Ponadto na rys. 11 przedstawiono krzywe obciążenia i przemieszczenia próbek betonowych po analizie.

W programie uzyskano również rozkłady naprężeń von Misesa, które wykazują zbieżność z rozwojem uszkodzeń próbek w programie doświadczalnym. Po przyłożeniu obciążenia rozkłady naprężeń dla próbek betonowych przedstawiono na rys. 12. Na rysunku jednostką wartości naprężeń jest Pa.

4. Wnioski

W ramach pracy badano zachowanie się próbek beleczek betonowych zbrojonych włóknami syntetycznymi, o różnej zawartości. Praca ta różni się od innych badań w literaturze tym, że zarówno

Tablica 9 / Table 9

WŁAŚCIWOŚCI BETONU W ZESTAWIE 1

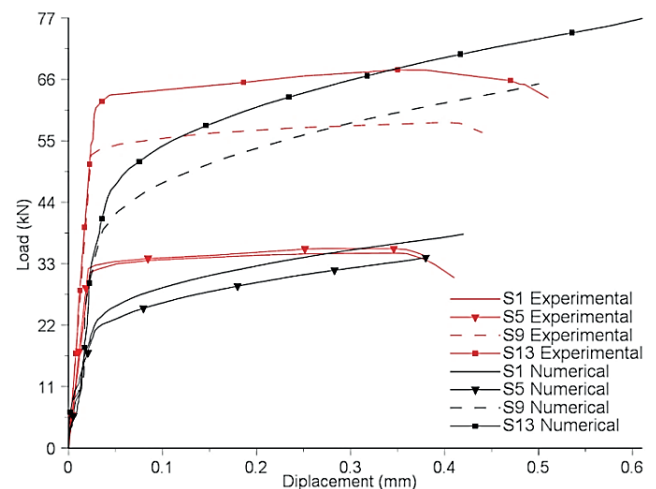
PROPERTIES OF CONCRETE IN SET 1

Poisson's ratio / Współczynnik Poisson'a	0.20
Density	2400 kg/m ³
Modulus of elasticity	28.9 GPa
Compressive strength	37.7 MPa
Tensile strength	3.83 MPa
ψ	30
e	0.10
σ_{bd}/σ_{co}	1.16
K_c	0.6667
μ	0.0001

stress distributions for the concrete specimens are presented in Fig. 12. The unit of the stress values is Pa in the figure.

4 Conclusions

In the scope of the study, the behavior of concrete beam specimens that were reinforced by synthetic fiber reinforcement with different contents, was investigated. The difference of this study from the other studies in the literature is both experimentally and numerically investigating the behavior of fiber reinforced concrete beam specimens, which have different section sizes. For this purpose, 16



Rys. 11. Krzywe obciążenie-przemieszczenie po analizie numerycznej

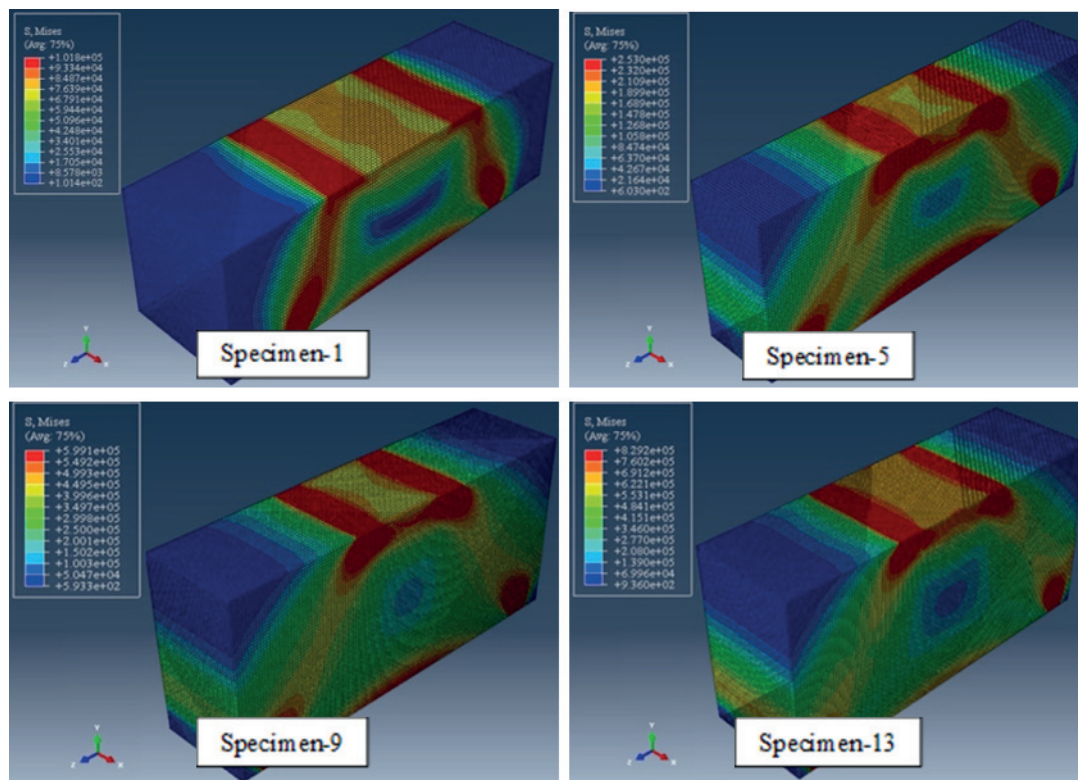
Fig. 11. Load-displacement curves after numerical analysis

Tablica 10 / Table 10

WARTOŚCI OBCIĄŻENIA I PRZEMIESZCZENIA

LOAD AND DISPLACEMENT VALUES

Specimen / Próbką	Loads / Obciążenie, kN			Displacements / Przemieszczenia, mm		
	Test / Badanie	Analysis / Analiza	Test/Analysis Badanie/Analiza	Test / Badanie	Analysis / Analiza	Test/Analysis Badanie/Analiza
S1	34.9	34.1	1.02	0.41	0.38	1.08
S5	35.7	38.3	0.93	0.38	0.42	0.90
S9	58.3	65.2	0.89	0.44	0.50	0.88
S13	67.7	76.9	0.88	0.51	0.61	0.84
Average / Średnia	-		0.93	-		0.92



Rys. 12. Rozkłady naprężeń

Fig. 12. Stress distributions

doświadczalnie jak i numerycznie badano zachowanie się próbek, beleczek betonowych o różnych wymiarach, wzmocnionych włóknami. W tym celu w laboratorium wykonano 16 próbek o 4 różnych wielkościach przekroju. Wartość długości przyjęto jako stałą dla wszystkich próbek. Udział zbrojenia rozproszonego w próbkach wahał się od 0,0% do 0,20%.

Po wykonaniu próbek, każda z nich poddawana była próbie czteropunktowego zginania. Zgodnie z tym celem opracowano stanowisko badawcze z niezbędnymi urządzeniami pomiarowymi. Podczas gdy wartości obciążenia były uzyskiwane za pomocą czujnika obciążenia, przemieszczenia były mierzone za pomocą urządzenia LVDT. Wszystkie wartości były zbierane przez rejestrator danych i na końcu przesyłane do komputera. Próbę zginania czteropunktowego wykonywano dla każdej próbki, aż do osiągnięcia stanu zniszczenia. Po wykonaniu badań określono wartości obciążenia szczytowego i maksymalnego przemieszczenia w punkcie środkowym. W ten sposób otrzymano krzywe obciążenie-przemieszczenie, które dały informacje o właściwościach plastycznych próbek.

Największa różnica w wartościach wyznaczonego doświadczalnie obciążenia szczytowego wśród wszystkich zestawów została określona jako 9,7%, ze względu na zmianę stosunku włókien w próbce. Po zbadaniu wszystkich wartości widać, że nośność wzrosła wraz ze wzrostem rozmiarów przekroju i udziału włókien. Maksymalną wartość nośności uzyskano dla próbki S16, o największych wymiarach przekroju i największej ilości włókien w mieszance betonowej.

Porównując wartości przemieszczeń w części doświadczalnej stwierdzono, że ilość włókien ma istotny wpływ na maksymalne

test specimens having 4 different section sizes are manufactured in the laboratory. The length value was taken as constant for all specimens. The fiber reinforcement ratio in the samples varied between 0.0% and 0.20% in the experimental program.

After the test specimens were manufactured, each of them was tested under a four-point bending test. In accordance with this target, the test setup was developed with necessary measurement devices. While the load values were obtained by load cell, the displacements were measured by LVDT. All values were collected by data-logger and transferred to computer in the end. Four-point bending test was applied for each specimen until reaching collapse damage situation in the test setup. The maximum load and maximum displacement values at the midpoint were determined, after performing the tests. So, load-displacement curves gave idea about obtained ductility capacities of the specimens.

The load values were measured for each test specimen in the experimental program. The biggest difference in peak load values among all sets was determined as 9.7% due to the change in fiber ratio in the experimental study. When all values are investigated, it is seen that load capacity has increased due to the increase in section sizes and fiber ratio. So, maximum load capacity value is obtained for S16 test specimen having the biggest section sizes and the most fiber amount in concrete mix.

When displacement values are compared by each other in the experimental part of the study, it is obtained that fiber amount has significant effect on maximum displacements. So, the actual effect of adding the fibers is considered to be the change in displacement values. Maximum displacement values are measured for

przemieszczenia. Zatem za rzeczywisty efekt dodania włókien uznaje się zmianę wartości przemieszczeń. Maksymalne wartości przemieszczeń mierzone są dla największego udziału włókien we wszystkich próbkach. Sytuacja ta ujawnia znaczący wpływ zbrojenia włóknami na zdolności plastyczne. Ponadto, większe przemieszczenia uzyskuje się przy zwiększeniu przekrojów próbek, ale przy stałym stosunku włókien. Zastosowano metodę pozwalającą na uzyskanie wartości początkowych sztywności, współczynnika plastyczności i zdolności pochłaniania energii. Widać, że zmiana stosunku włókien ma duży wpływ na wartości zdolności pochłaniania energii. Największą różnicę zanotowano pomiędzy próbkami 13 i 16, które mają największe wymiary przekroju.

Analiza numeryczna zmniejsza nakład pracy w laboratorium, gdy dokładna symulacja jest wykonywana w programie komputerowym. W ten sposób przeprowadza się analizy metodą elementów skończonych dla próbek betonowych, w celu potwierdzenia wyników badań i określenia zachowania się beleczek betonowych. Warunki obciążenia i podparcia w symulacjach były takie same jak w badaniach doświadczalnych, a na końcu otrzymano krzywe obciążenie-przemieszczenie. Maksymalne wartości naprężeń są uzyskiwane wokół punktów obciążenia i rozszerzają się na podpory. Wreszcie widać, że istnieje odpowiedni związek między wynikami pomiarów i analiz. Średni stosunek wartości obciążenia szczytowego w doświadczeniu i symulacji wynosi 0,93, dla maksymalnych przemieszczeń wartość ta wynosi 0,92. Tak więc, niniejsza praca pozwoliła przyjrzeć się zachowaniu beleczek pod wpływem zginania i umożliwiła dalsze badania.

Literatura / References

1. W. Abbass, M.I. Khan, S. Mourad, Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. *Constr. Build. Mat.* **168**, 556-569 (2018).
2. N.K. Krishna, M. Prasanth, R. Gowtham, S. Karthic, K.M. Mini, Enhancement of properties of concrete using natural fibers. *Mat. Today: Proc.* **5**(11), 23816-23823 (2018).
3. X. Wu, S. Wang, J. Yang, S. Zhu, Experimental study on mechanical performances of different fibre reinforced lightweight concretes. *Rom. J. Mat.* **49**(3), 434-442 (2019).
4. V. Guerini, A. Conforti, G. Plizzari, S. Kawashima, Influence of steel and macro-synthetic fibers on concrete properties. *Fibers.* **6**(3), 47-61 (2018).
5. R. Manju, Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of high strength fibre reinforced concrete (hsfrc) beams. *Rom. J. Mat.* **49**(3), 416-423 (2019).
6. I.G. Colombo, M. Colombo, M.D. Prisco, Bending behaviour of textile reinforced concrete sandwich beams. *Constr. Build. Mat.* **95**, 675-685 (2015).
7. I.H. Yang, C. Joh, B.S. Kim, Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending. *Eng. Struct.* **32**(11), 3478-3487 (2010).
8. F.O. Navas, J. Navarro-Gregori, G.L. Herdocia, P. Serna, E. Cuenca, An experimental study on the shear behaviour of reinforced concrete beams with macro-synthetic fibres. *Constr. Build. Mat.* **169**, 888-899 (2018).
9. L. Biolzi, S. Cattaneo, Response of steel fiber reinforced high strength concrete beams: Experiments and code predictions. *Cem. Conc. Comp.* **77**, 1-13 (2017).

the biggest fiber ratio of all test specimens. This situation reveals the significant effect of fiber reinforcement on ductility capacities. Besides, bigger displacements are obtained when section sizes of the specimens increase but fiber ratio is taken constant. A method has been utilized to obtain the initial stiffness, ductility ratio and energy capacity values. It is seen that especially energy capacity values are highly affected by the change in fiber ratios. The biggest difference is obtained between specimens 13 and 16 which have the biggest section sizes.

Numerical analysis reduces work-load in the laboratory, when accurate simulation was performed in the software. By this way, finite element analyses were performed for concrete specimens to validate test results and determine the behavior of concrete beams. Load and support conditions are taken same with the experimental program and load-displacement curves are obtained in the end. Maximum stress values were obtained around loading points and expand to the supports. Finally, it is seen that a good relationship is established between test and analysis results. While the average value for the peak load values is 0.93, the value is 0.92 for maximum displacements. So, this study will shed light on researchers investigating the behavior of beams under bending effect for further studies.

10. D.L. Nguyen, D.J. Kim, G.S. Ryu, K.T. Koh, Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete. *Composites B Eng.* **45**(1), 1104-1116 (2013).
11. S. Yıldız, Z.Ç. Ulucan, An investigation on the effect of glass fiber contents to the top load in the concrete pipes. *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.* **23**(2), 267-271 (2008).
12. T. Jankowiak, T. Lodygowski, Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. *Found. J. Civ. Environ. Eng.* **6**, 53-69 (2005).
13. Abaqus User's Manual Version 6.12, SIMULIA, Dassault Systèmes Simulia Corp (2015).
14. Turkish Standard Testing hardened concrete - Part 4: Compressive strength - Specification for testing machines. TS EN 12390-4 April, (2002).
15. Turkish Standard Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens. TS EN 12390-5 April, (2010).
16. J.B. Mander, M.J. Priestley, R. Park, Theoretical stress-strain model for confined concrete. *J Struct. Eng.* **114**, 1804-1826 (1988).
17. C. Li, H. Hao, K. Bi, Numerical study on the seismic performance of precast segmental concrete columns under cyclic loading. *Eng. Struct.* **148**, 373-386 (2017).
18. S. Demirhan, G. Yıldırım, Q.S. Banyhussan, Ö. Anıl, R.T. Erdem, M. Şahmaran, M Impact behaviour of nanomodified deflection-hardening fibre-reinforced concretes. *Mag. Conc. Res.* **72**(17), 865-887 (2020).