

## **Analiza wpływu rozmieszczenia prętów zbrojeniowych na deformacje i obraz zarysowania belki żelbetowej**

**Barbara Goszczyńska<sup>1</sup>, Wiesław Trąmpczyński<sup>2</sup>, Paweł Tworzewski<sup>3</sup>**

*<sup>1,2,3</sup> Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Betonowych, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska,*

*e-mail: <sup>1</sup>b.goszczyńska@tu.kielce.pl, <sup>2</sup>wtramp@tu.kielce.pl, <sup>3</sup>ptworzewski@tu.kielce.pl*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono analizę wpływu niesymetrycznego rozmieszczenia prętów zbrojeniowych w przekroju belki żelbetowej na deformacje w kierunku prostopadłym do powierzchni bocznej badanych elementów, którą przeprowadzono na podstawie wyników badań uzyskanych ze skanera optycznego 3D oraz inwentaryzacji zbrojenia. Uzyskane wyniki przemieszczeń i zarysowania środkowego odcinka belek żelbetowych, obciążanych do zniszczenia dwoma siłami skupionymi, potwierdzają duży wpływ niesymetrycznego rozmieszczenia prętów zbrojeniowych w przekroju belek na ich deformację i zarysowanie podczas obciążania. W pracy przedstawiono, iż przemieszczenia prostopadłe do powierzchni bocznej są wynikiem nieprawidłowości w rozmieszczeniu zbrojenia głównego, spowodowanego błędami na etapie wykonywania belek w zakładzie prefabrykacji.

**Słowa kluczowe:** konstrukcje żelbetowe, belki żelbetowe, przemieszczenia, zbrojenie, skaner optyczny, system ARAMIS

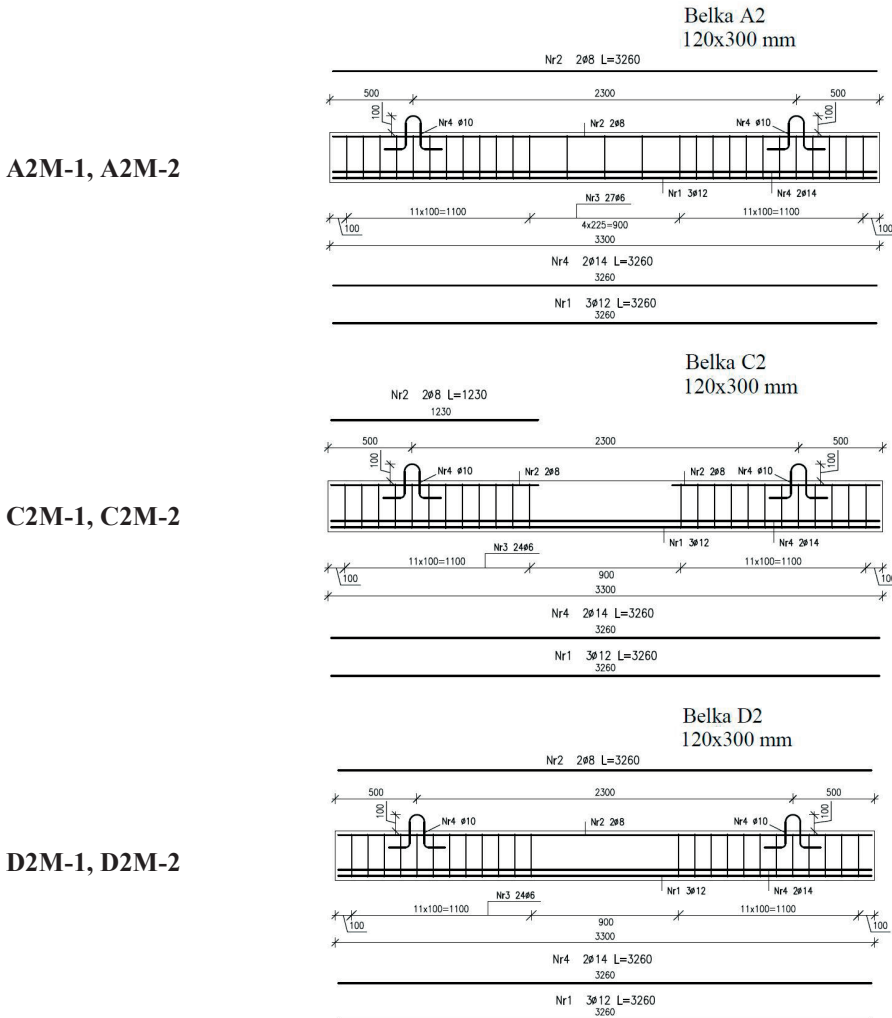
### **1. Wstęp**

Na trwałość konstrukcji żelbetowych mają wpływ trzy fazy: projektowa, wykonawcza oraz eksploatacyjna. Błędy projektowe oraz wykonawcze wiążą się często z wysokimi kosztami ich usuwania [1]. Nieprawidłowe rozmieszczenie zbrojenia jest dość częstym błędem, pojawiającym się na etapie wykonywania żelbetowych elementów konstrukcyjnych. W skrajnych przypadkach, w elementach o niewielkich wymiarach przekroju poprzecznego przesunięcia w położeniu prętów względem zaprojektowanego, w dość istotny sposób wpływają na jego zachowanie pod wpływem działania obciążenia. Mogą one między innymi wpłynąć na deformację oraz obraz zarysowania tych elementów. W niniejszym artykule przedstawiono analizę wpływu błędów wykonawczych powodujących niesymetryczne rozmieszczenie zbrojenia podłużnego w belkach żelbetowych, na ich deformacje w procesie obciążania. Analizę tę wykonano na podstawie wyników badań laboratoryjnych sześciu belek żelbetowych wykonanych w zakładzie prefabrykacji. Niedokładności w rozmieszczeniu zbrojenia nie były celowym zabiegiem projektowym; były one skutkiem błędów popełnionych na etapie wykonawstwa belek.

### **2. Opis badań**

Badania realizowane były w ramach projektu badawczego, którego celem było opracowanie metody monitoringu i oceny stanu technicznego konstrukcji żelbetowych [2]. Elementami badawczymi były belki żelbetowe o wymiarach przekroju 120x300mm i długości 3300mm wykonane w zakładzie prefabrykacji. Wszystkie elementy wykonane

zostały z betonu planowanej klasy C40/50, zbrojone stalą BS500. Konstrukcję zbrojenia poszczególnych belek przedstawiono na rys 1. Wykonano także badania wytrzymałościowe materiałów zastosowanych do wykonania belek, stali na podstawie próby rozciągania pobranych próbek prętów zbrojeniowych oraz wytrzymałości na ściskanie betonu na pobranych podczas betonowania belek próbkach sześciennych i walcowych. Oszacowane z badań wytrzymałości średnie, to:  $f_{cm}=68,6$  MPa dla betonu i  $f_{yk} = 580,5$  MPa dla stali zbrojeniowej.



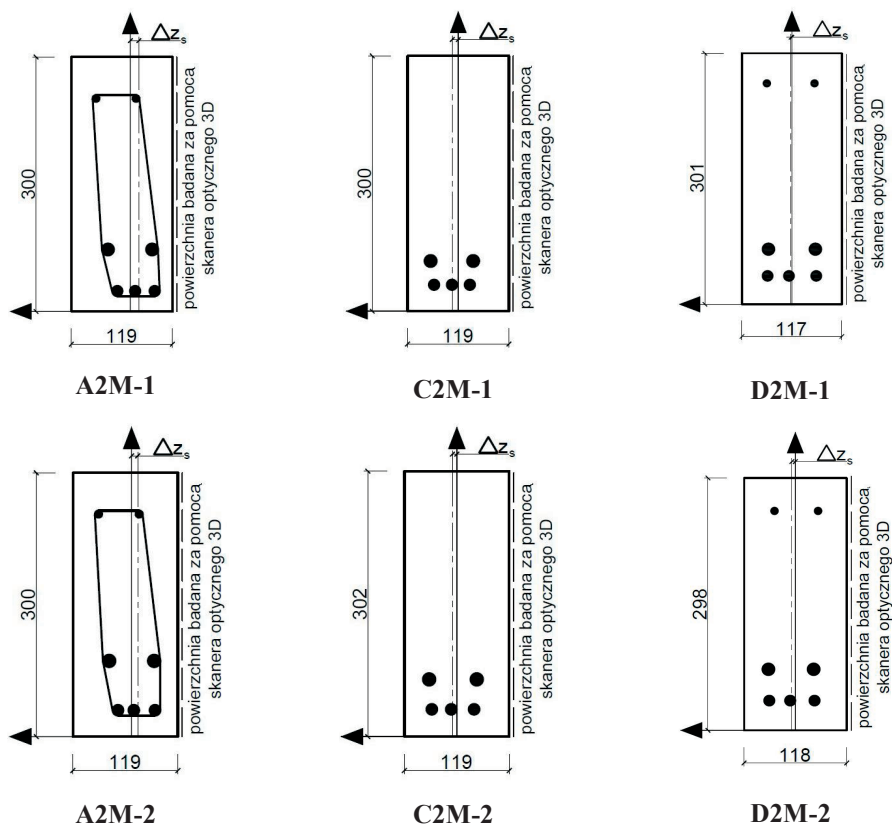
Rys. 1. Schematy zbrojenia

W celu ustalenia rzeczywistego rozmieszczenia prętów, po każdym badaniu rozkuto belki i przeprowadzono inwentaryzację prętów zbrojeniowych w przekroju środkowym belek. Stwierdzono, w ten sposób, jakie błędy zostały popełnione na etapie wykonawstwa tych elementów. Wyniki inwentaryzacji przedstawiono na rys 2.

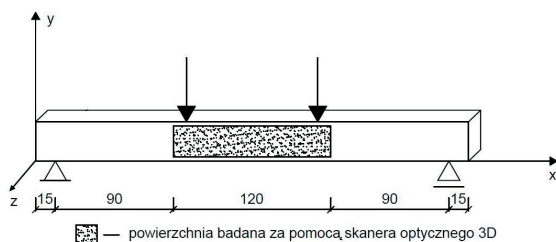
Belki obciążane były monotonicznie, do zniszczenia dwoma siłami skupionymi rozmieszczonymi symetrycznie, w odległości jednego metra od podpory. Badania odkształceń powierzchni bocznej belek na odcinku stałego momentu wykonano przy użyciu skanera

optycznego 3D. Pozwoliło to na zarejestrowanie przemieszczeń elementów w trzech kierunkach oraz pomiar zarysowania na obserwowanym obszarze. Schemat statyczny badanych belek oraz powierzchnię jaką poddano badaniu przedstawiono na rys. 3. Szczegóły dotyczące zastosowania skanera optycznego 3D do badania stanów granicznych użyteczności belek są przedstawione w pracach [3] i [4].

Na podstawie wyników inwentaryzacji prętów zbrojeniowych wyznaczono położenie środka ciężkości zbrojenia i jego przesunięcie w płaszczyźnie poziomej względem projektowanego położenia, dla poszczególnych belek.

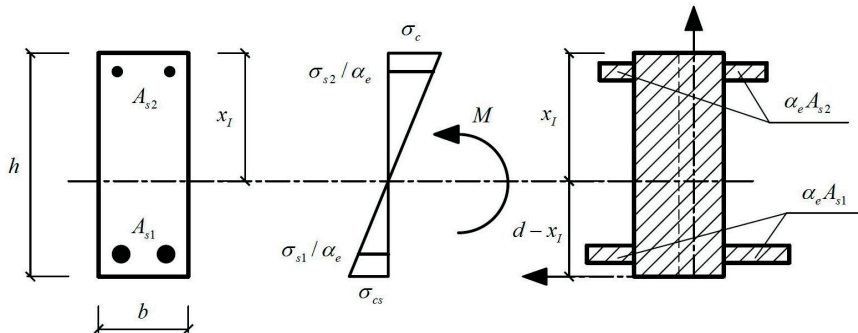


Rys. 2. Schemat rozmieszczenia prętów zbrojeniowych w środkowym przekroju belki po inwentaryzacji



Rys. 3. Schemat badania belek na zginanie z zaznaczonym obszarem badania odkształceń połowych z wykorzystaniem skanera optycznego 3D

W celu uwzględnienia przekroju betonowego obliczono również położenie środka ciężkości przekroju sprowadzonego w płaszczyźnie poziomej, gdzie każdy pręt potraktowano jako niezależny przekrój o określonych na podstawie inwentaryzacji współrzędnych [5]. Obliczenia oparto na rzeczywistych parametrach betonu i stali, uzyskanych z badań wytrzymałościowych. Ze względu na prowadzenie analizy na 3 poziomach obciążenia, do obliczeń zastosowano odpowiednio modele przekroju sprowadzonego w fazie I i II pracy elementów żelbetowych. Model dla fazy I przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Sprowadzony przekrój prostokątny w fazie I – oznaczenia wg EC2 [5]

### 3. Wyniki badań i analiz

Podczas badania belek żelbetowych zaobserwowano występowanie przemieszczeń poziomych (w kierunku Z zgodnie z przedstawionym na rys. 3 układem osi), czyli prostopadłych do powierzchni bocznej elementów. Przykładowo przemieszczenia belki A2M-1 osiągnęły w chwili zniszczenia ponad 100 mm, co jest wartością znaczącą i wręcz niebezpieczną.

Wyniki przemieszczeń - w kierunku Z - przekrojów położonych w połowie rozpiętości badanych belek, określone na czterech poziomach obciążenia względnego (w stosunku do rzeczywistej siły niszczącej) z jednoczesnym podaniem błędów w rozmieszczeniu zbrojenia w przekroju danego elementu, jako przesunięcie środka ciężkości zbrojenia i przesunięcie środka ciężkości przekroju sprowadzonego, przedstawiono w Tabeli 1.

Wyniki przeprowadzonej korelacji błędów rozmieszczenia zbrojenia i przemieszczenia w kierunku Z określonego na czterech poziomach obciążenia, pokazano w Tabeli 2.

Otrzymane wartości współczynnika korelacji - Pearsona (przedstawione w Tabeli 2) świadczą o bardzo wysokiej zależności między rozpatrywanymi zmiennymi. Można także zaobserwować, że jest ona wyższa w przypadku rozważania środka ciężkości przekroju sprowadzonego, niż dla środka ciężkości samych prętów zbrojeniowych. Wyniki korelacji pomiędzy środkami ciężkości przekrojów sprowadzonych obliczonych dla fazy I i II oraz przemieszczeniami są bardzo zbliżone. Przykładowy wykres korelacji pomiędzy przesunięciem środka ciężkości przekroju sprowadzonego oraz przemieszczeniem w kierunku Z przedstawiono na rys 5.

Tabela 1. Zestawienie otrzymanych wyników dla poszczególnych belek

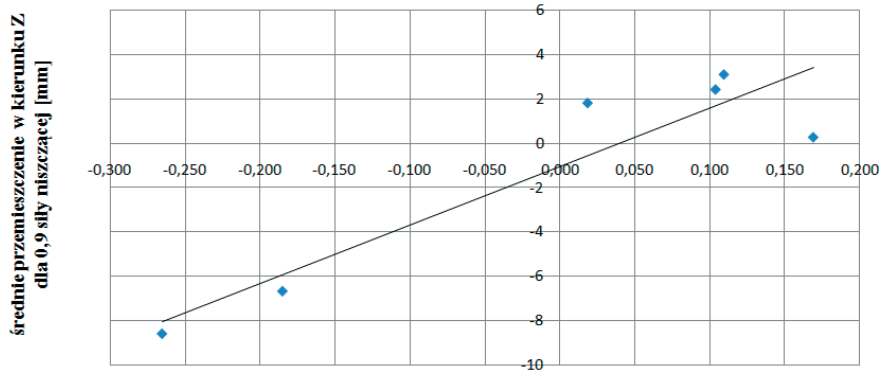
Belka	Siła niszcząca [kN]	Względna wartość siły	Poziom obciążenie - siłownik nr 1 [kN]	Poziom obciążenie - siłownik nr 2 [kN]	Przemieszczenie w kierunku Z [mm]	Przesunięcie poziome środka ciężkości zbrojenia $\Delta z_s$ [cm]	Przesunięcie poziome środka ciężkości przekroju sprowadzonego $\Delta z_c$ [cm]	
							Faza I	Faza II
A2M-1	78,9	0,50	39,4	39,6	-4,07	-1,03	-0,100	-0,265
		0,75	59,3	59,3	-6,39			
		0,91	71,2	71,4	-8,58			
		1,00	78,9	78,9	-102,14			
A2M-2	73,4	0,50	36,7	36,6	-3,29	-0,70	-0,068	-0,185
		0,75	55,1	54,9	-4,82			
		0,89	65,4	65,4	-6,66			
		1,00	73,4	73,3	-10,54			
C2M-1	86,1	0,50	43,2	43,2	0,17	0,75	0,063	0,169
		0,75	64,9	64,8	0,25			
		0,90	77,7	77,7	0,28			
		1,00	86,1	86,1	-0,22			
C2M-2	82,0	0,50	41,2	41,2	1,83	0,48	0,040	0,110
		0,75	61,6	61,6	2,60			
		0,91	74,3	74,3	3,11			
		1,00	82,0	82,0	6,66			
D2M-1	84,4	0,50	42,1	42,1	1,07	0,07	0,007	0,019
		0,75	63,0	63,0	1,68			
		0,90	75,9	76,0	1,83			
		1,00	84,4	84,4	3,07			
D2M-2	79,2	0,50	39,7	39,6	1,12	0,40	0,039	0,104
		0,75	59,5	59,5	2,22			
		0,90	71,2	71,2	2,44			
		1,00	79,2	79,20	4,20			

Tabela 2. Współczynniki korelacji dla przemieszczeń belek żelbetowych

Korelacje wyników dla wszystkich analizowanych belek	Przesunięcie poziome środka ciężkości zbrojenia $\Delta z_s$ [cm]	Przesunięcie poziome środka ciężkości przekroju sprowadzonego $\Delta z_c$ [cm]	
		Faza I	Faza II
Przemieszczenie w kierunku Z dla 0,5 siły niszczącej [mm]	0,90	0,92	0,92
Przemieszczenie w kierunku Z dla 0,75 siły niszczącej [mm]	0,90	0,92	0,92
Przemieszczenie w kierunku Z dla 0,9 siły niszczącej [mm]	0,91	0,93	0,92
Przemieszczenie w kierunku Z dla siły niszczącej [mm]	0,78	0,79	0,79

Przedstawione na rysunku 5 wyniki potwierdzają występowanie zależności pomiędzy przemieszczeniami prostopadłymi do powierzchni bocznej belki a niesymetrycznym rozmieszczeniem zbrojenia w przekroju belki żelbetowej. Takie zachowanie elementu powinno wpływać również na obraz zarysowania. W celu przeprowadzenia analizy zarysowania wykonano pomiary liczby rys oraz ich szerokości maksymalnej i średniej, przy użyciu skanera optycznego 3D. Podobnie jak w przypadku analizy przemieszczeń ograniczono obliczenia do czterech poziomów obciążenia. Wyniki pomiarów zestawiono

w tabeli 3. Powierzchnia belki, na której wykonano analizę zarysowania jest obszarem, na jakim prowadzone były pomiary z wykorzystaniem skanera 3D (Rys.3).



**Przesunięcie środka ciężkości przekroju sprowadzonego  $\Delta z_{zc}$  w fazie II [cm]**

Rys. 5. Wykres korelacji między przesunięciem poziomym środka ciężkości przekroju sprowadzonego dla fazy II oraz przemieszczeniem w kierunku Z - na poziomie 0,9 siły niszczonej

Tabela 3. Zestawienie wyników pomiarów rys na powierzchni bocznej belek

Belka	Względna wartość siły	Poziom obciążenia -	Poziom obciążenia -	Szerokość rysy maksymalna [mm]	Szerokość rysy średnia [mm]	liczba rys
		siłownik nr 1 [kN]	siłownik nr 2 [kN]			
A2M-1	0,50	39,4	39,6	0,13	0,05	24
	0,75	59,3	59,3	0,14	0,07	
	0,90	71,2	71,4	0,17	0,09	
	1,00	78,9	78,9	0,66	0,18	
A2M-2	0,50	36,7	36,6	0,12	0,06	22
	0,75	55,1	54,9	0,16	0,09	
	0,90	65,4	65,4	0,22	0,13	
	1,00	73,4	73,3	0,76	0,23	
C2M-1	0,50	43,2	43,2	0,23	0,11	17
	0,75	64,9	64,8	0,31	0,18	
	0,90	77,7	77,7	0,51	0,26	
	1,00	86,1	86,1	2,01	0,93	
C2M-2	0,50	41,2	41,2	0,25	0,13	16
	0,75	61,6	61,6	0,30	0,19	
	0,90	74,3	74,3	0,38	0,25	
	1,00	82,0	82,0	2,09	0,89	
D2M-1	0,50	42,1	42,1	0,18	0,09	21
	0,75	63,0	63,0	0,25	0,12	
	0,90	75,9	76,0	0,36	0,20	
	1,00	84,4	84,4	1,98	0,66	
D2M-2	0,50	39,7	39,6	0,16	0,08	19
	0,75	59,5	59,5	0,23	0,13	
	0,90	71,2	71,2	0,33	0,18	
	1,00	79,2	79,2	2,18	0,57	

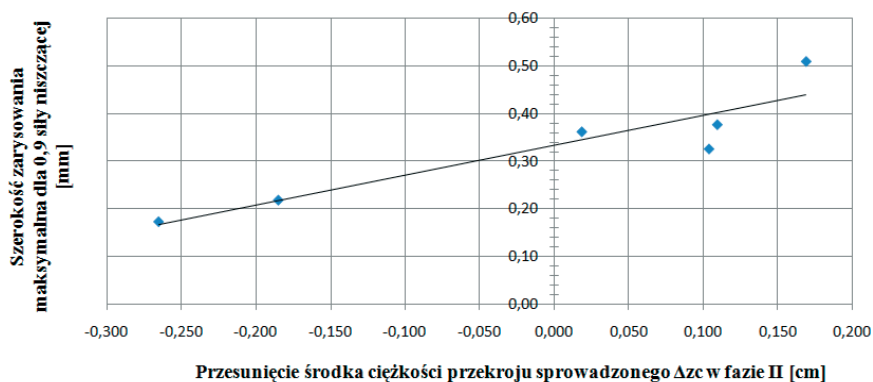
W celu sprawdzenia zależności pomiędzy wyznaczonymi zmiennymi a przesunięciem środka ciężkości przekroju, spowodowanym nieprawidłowym rozmieszczeniem zbrojenia

wykonano analizę korelacji. Wyniki korelacji błędów rozmieszczenia zbrojenia i obrazu zarysowania na czterech poziomach obciążenia pokazano w Tabeli 4. Podobnie jak poprzednio, zależność pomiędzy przesunięciem środka ciężkości zbrojenia oraz przekroju sprowadzonego a średnią i maksymalną szerokością rys, a także ich liczbą jest bardzo silna.

Przykładowy wykres korelacji pomiędzy przesunięciem środka ciężkości przekroju sprowadzonego oraz maksymalną szerokością rysy przy obciążeniu belki odpowiadającemu 0,9 siły niszczącej, przedstawiono na rys 6.

Tabela 4. Wyniki korelacji analizy zarysowania i przesunięcia poziomego środka ciężkości zbrojenia

Korelacje wyników dla wszystkich analizowanych belek	Przesunięcie poziome środka ciężkości zbrojenia $\Delta z_s$ [cm]	Przesunięcie poziome środka ciężkości przekroju sprowadzonego $\Delta z_c$ [cm]	
		Faza I	Faza II
Szerokość rysy maksymalna na poziomie 0,5 siły niszczącej [mm]	0,87	0,85	0,86
Szerokość średnia rys na poziomie 0,5 siły niszczącej [mm]	0,88	0,86	0,87
Szerokość rysy maksymalna na poziomie 0,75 siły niszczącej [mm]	0,95	0,93	0,94
Szerokość średnia rys na poziomie 0,75 siły niszczącej [mm]	0,91	0,90	0,90
Szerokość rysy maksymalna na poziomie 0,9 siły niszczącej [mm]	0,93	0,92	0,92
Szerokość średnia rys na poziomie 0,9 siły niszczącej [mm]	0,95	0,94	0,94
Szerokość rysy maksymalna na poziomie siły niszczącej [mm]	0,95	0,96	0,96
Szerokość średnia rys na poziomie siły niszczącej [mm]	0,95	0,94	0,94
Liczba rys	-0,92	-0,91	-0,91



Rys. 6. Wykres korelacji pomiędzy przesunięciem poziomym środka ciężkości przekroju sprowadzonego dla fazy II oraz maksymalną szerokością rysy dla analizowanych belek na poziomie 0,9 siły niszczącej

#### 4. Wnioski

Przedstawione wyniki potwierdzają istnienie silnej zależności pomiędzy niesymetrycznym rozmieszczeniem prętów zbrojeniowych, a przemieszczeniami w kierunku prostopadłym do powierzchni bocznej belki, a także obrazem zarysowania belki.

Na podstawie przedstawionych badań można stwierdzić, że znaczne, wręcz niebezpieczne, przemieszczenia w kierunku prostopadłym do powierzchni belki mogą być spowodowane błędami wykonawczymi elementów w zakładzie prefabrykacji.

Biorąc pod uwagę analizę korelacji, można zauważyć, że na powierzchni bocznej, która podlega rozciąganiu liczba rys jest mniejsza, co skutkuje większą maksymalną szerokością rysy.

Można stwierdzić, że zastosowanie skanera optycznego 3D przy badaniach elementów żelbetowych daje szerokie możliwości prowadzenia analiz zachowania tych elementów pod wpływem działania obciążenia.

### Pracę wykonano w ramach Projektu Rozwojowego N R04 0007 10

### Literatura

- 1 Skarżyński Ł., Majewski T. Stan awaryjny stropu w budynku użyteczności publicznej będący następstwem błędów projektowych i wykonawczych, *Awarie Budowlane* 2013, 2013, s. 735-742,
- 2 Goszczyńska B., Świt G., Trąpczyński W., Krampikowska A., Tworzewska J., Tworzewski P. Experimental validation of concrete crack initiation and location with acoustic emission method, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 12, Nr 1, 2012, s. 23-28,
- 3 Goszczyńska B., Trąpczyński W., Bacharz K., Bacharz M., Tworzewska J., Tworzewski P. Doświadczalna analiza odkształceń przestrzennych belek żelbetowych z zastosowaniem skanera optycznego 3D, *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 3, 2014, s. 156-159,
- 4 Smarzewski P. Stany graniczne użyteczności belek żelbetowych z betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien, *Budownictwo i Architektura* Nr 12, 2013, s. 155-162,
- 5 Łapko A., Jensen B. Ch., *Podstawy projektowania i algorytmy obliczeń konstrukcji żelbetowych*, Arkady, Warszawa 2005.

## An analysis of the influence of the reinforcing bar distribution on the beam deformation during loading

Barbara Goszczyńska<sup>1</sup>, Wiesław Trąpczyński<sup>2</sup>, Paweł Tworzewski<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> *Department of Strength of Materials and Concrete Structures, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology,*  
*e-mail: <sup>1</sup>b.goszczyńska@tu.kielce.pl, <sup>2</sup>wtramp@tu.kielce.pl, <sup>3</sup>ptworzewski@tu.kielce.pl*

**Abstract:** The article presents the analysis of the influence of the rebars distribution, in reinforced concrete beam section, on the perpendicular (to the side surface) deformation of the tested element. The beams were tested under the load of two forces. Displacements and crack formation in middle part of reinforced concrete beams were measured by using 3D optical scanner. Test results confirm the large influence of the asymmetry of the reinforcing bars distribution, within beams cross-sections, on their deformation and crack formation during loading. It is shown that the displacements perpendicular to the side surface are consequent upon irregularities in the distribution of the main reinforcement due to errors in the stage of beams manufacturing in the precast factory.

**Keywords:** reinforced concrete, reinforced concrete beam, displacement, reinforcement, optical scanner, the Aramis system