

GOSZCZYŃSKA Barbara¹
 TRĄMPCZYŃSKI Wiesław²
 BACHARZ Magdalena³
 TWORZEWSKA Justyna⁴
 TWORZEWSKI Paweł⁵

Zastosowanie skanera optycznego 3D do analizy belek wzmocnionych taśmami FRP

WSTĘP

W ostatnich latach kompozyty, dzięki swoim dobrym właściwościom wytrzymałościowym i fizycznym, coraz częściej wypierają tradycyjne materiały stosowane do wzmocnień istniejących konstrukcji. Powstaje wiele nowych sposobów wzmocnień belek żelbetowych, różniących się właściwościami i sposobem wykonywania oraz kształtem profili kompozytowych [2,3]. Problemem w dalszym ciągu pozostaje kwestia efektywności wzmocnienia, np. przy jakiej klasie betonu, stopniu zbrojenia prętami stalowymi, opłacalne i bezpieczne będzie zastosowanie kompozytu. Jakże dodatkowo, oprócz odpowiedniej wytrzymałości betonu na odrywanie, cechy powinien spełniać wzmocniany element, żeby uzyskać pożądane mechanizmy zniszczenia i tym samym uniknąć tych niebezpiecznych? Ogólnie rozróżnia się trzy mechanizmy zniszczenia wzmocnionych elementów żelbetowych. Pierwsza grupa obejmuje belki, w których doszło do odspojenia zbrojenia kompozytowego - ICD (intermediate crack debonding). Drugi mechanizm polega na rozerwaniu wzmocnienia kompozytowego w środkowej części elementu - R (rapture). Trzeci mechanizm jest nietypowy dla elementów zginanych, a zatem jest niebezpieczny. Elementy w tej grupie niszczą się na ścinanie (pomimo pracy na zginanie) lub poprzez zmiżdżenie betonu w strefie ściskanej (niewykorzystane w pełni wzmocnienie) - CC (concrete crushing) lub utratę zakotwienia końców kompozytu (ED - end debonding, CCS - concrete cover separation, A - anchorage failure) [4]. Z tego też względu kryterium uzyskanych mechanizmów niszczenia jest najczęściej podstawą podziału elementów badawczych w analizie efektywności wzmocnienia, stąd analiza tego kryterium jest bardzo istotna. Zastosowanie skanera optyczny 3D typu Aramis, przy realizacji badań elementów wzmocnionych kompozytami, pozwala na prowadzenie szczegółowych analiz mechanizmu zniszczenia. Zarejestrowany proces zniszczenia może być analizowany we wszystkich fazach, od początku tego procesu do jego zakończenia. Skaner optyczny 3D typu Aramis jest urządzeniem pomiarowym wyposażonym w program komputerowy umożliwiający dokonywanie pomiarów odkształceń polowych, w sposób ciągły (bez potrzeby wykonywania przerw na pomiary przykładowo szerokości rys) również w momencie utraty nośności badanego elementu. Taka rejestracja pozwala na weryfikację nietypowego zniszczenia belki oraz przeprowadzanie szerokiego zakresu analiz.

1 ELEMENTY BADAWCZE

W pracy przedstawiono wyniki badań 4-ech swobodnie podpartych, jednoprzęsłowych belek żelbetowych o długości całkowitej 3300 mm i przekroju prostokątnym o wymiarach 300 x 120 mm. Dwie belki wzmocniono i oznaczono symbolem **W**, a dwie pozostałe referencyjne oznaczono symbolem **N** (niewzmocnione). Belki różniły się stopniem zbrojenia stalowego. Konstrukcję zbrojenia pierwszej pary belek (belki **N1** i **W1**) przedstawiono na rysunku 1, a konstrukcja zbrojenia drugiej pary (belki **N2** i **W2**) została pokazana na rysunku 2. W belkach typu 1 zastosowano, jako zbrojenie

¹ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, 25-314 Kielce, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, tel.: +48 41 34-24-752, b.goszczyńska@tu.kielce.pl

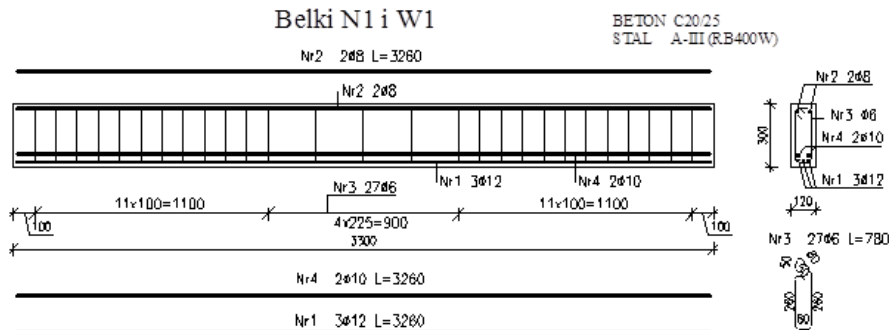
² PŚk, WBiA, adres jak wyżej, tel.: +48 41 34-24-545, wtramp@tu.kielce.pl

³ PŚk, WBiA, adres jak wyżej, tel.: +48 41 34-24-579, mbacharz@tu.kielce.pl

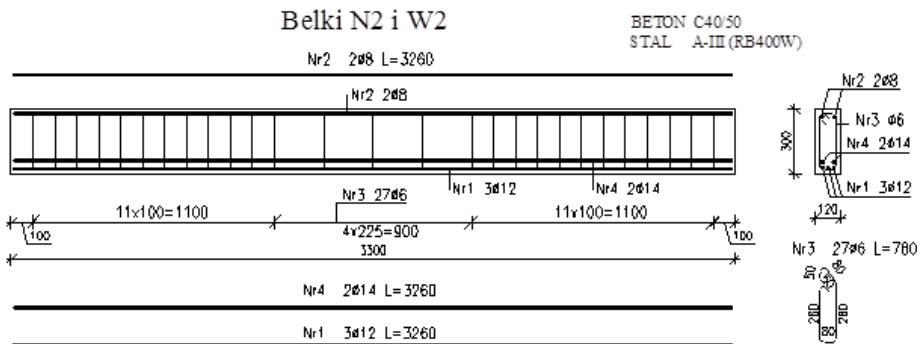
⁴ PŚk, WBiA, adres jak wyżej, tel.: +48 41 34-24-548, j.tworzewska@tu.kielce.pl

⁵ PŚk, WBiA, adres jak wyżej, tel. jak wyżej, ptworzewski@tu.kielce.pl

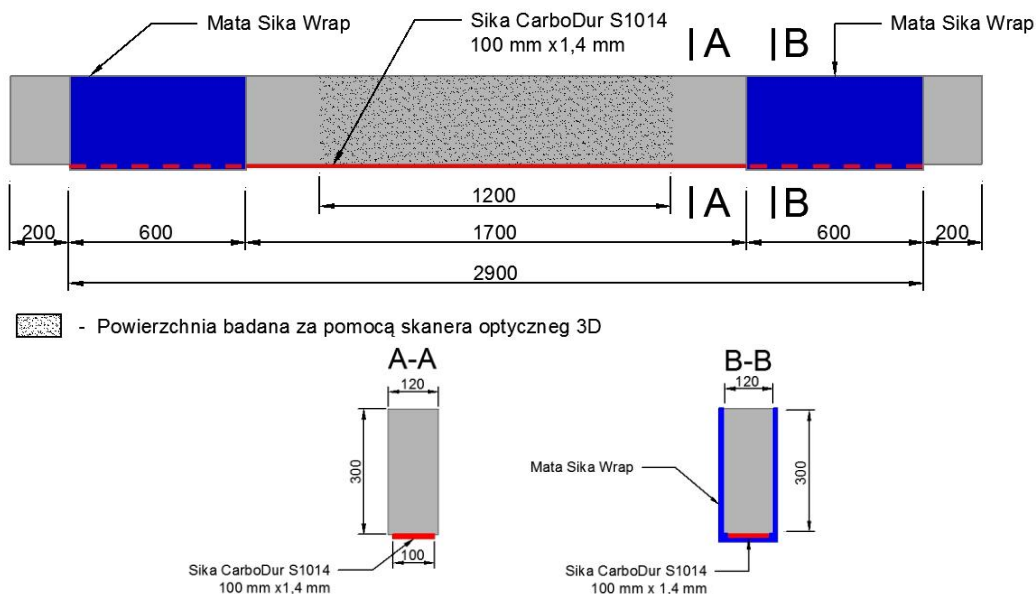
główne, trzy pręty o średnicy $\varnothing 12$ oraz dwa pręty $\varnothing 10$. Natomiast zbrojenie belek typu 2 składało się z trzech prętów o średnicy $\varnothing 12$ i dwóch prętów o średnicy $\varnothing 14$. Stopień zbrojenia prętami stalowymi ρ_s zamieszczono w tabeli 1. Rozstaw i średnica strzemion we wszystkich belkach była jednakowa. Belki z symbolem 1 zostały wykonane z betonu C20/25 natomiast belki typu 2 z betonu C40/50. We wszystkich belkach zastosowano stal RB400W.



Rys.1. Schemat zbrojenia belek typu N1 i W1

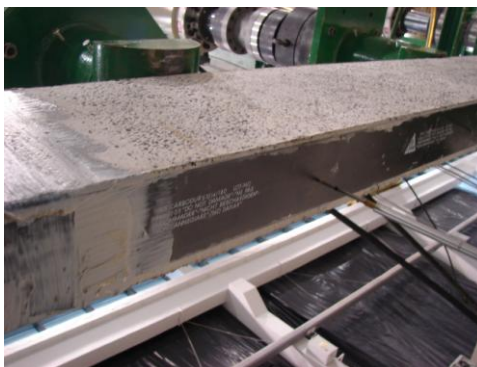


Rys.2. Schemat zbrojenia belek typu N2 i W2



Rys. 3. Schemat wzmocnienia belek

Belki **W** wzmocniono na zginanie taśmami Sika CarboDur S1014 o szerokości 100 mm i grubości 1,4 mm przyklejanymi od spodu belki, w strefie rozciąganej i na ścinanie matami z włókien węglowych. Otrzymany stopień zbrojenia kompozytowego wyniósł $\rho_f=0,4\%$. Taśmy CarboDur charakteryzują się modułem sprężystości o wartości $E_f=165\text{GPa}$. Na rysunku 3 i 4 przedstawiono schemat wzmocnienia belek o symbolu **W**.

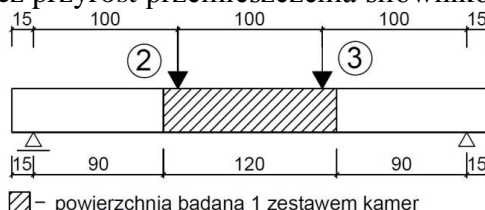


Rys.4. Widok zbrojenia taśmą CarboDur

Natomiast wzmocnienie na ścinanie zrealizowano poprzez maty SikaWrap umieszczone w okolicach podpór. Wzmocnienie belek żelbetowych wykonane zostało przez firmę SIKA Poland.

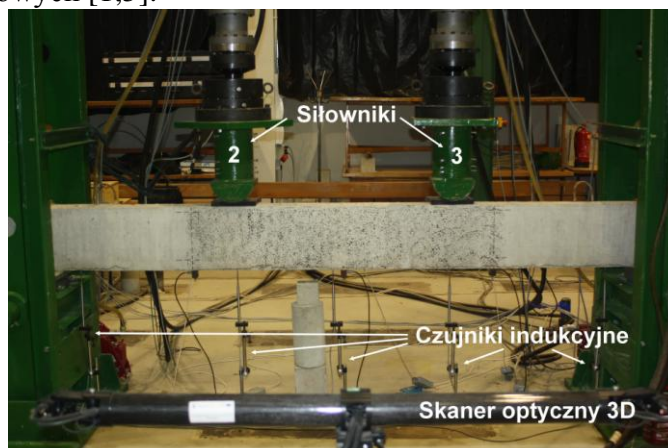
2 STANOWISKO BADAWCZE

Badanie przeprowadzono w laboratorium Konstrukcji Betonowych i Diagnozowania Obiektów Technicznych w Politechnice Świętokrzyskiej. Belki obciążano, za pomocą dwóch sił skupionych, monotonicznie aż do zniszczenia zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 5. Sterowanie obciążeniem realizowano poprzez przyrost przemieszczenia siłowników.



Rys.5. Schemat statyczny belek wraz z zaznaczoną powierzchnią badaną skanerem

Podczas prowadzonych badań, na stanowisku badawczym pokazanym na rysunku 6, wykonywano pomiary ugięć za pomocą 5 czujników indukcyjnych oraz pomiary odkształceń powierzchni bocznej belki za pomocą skanera optycznego 3D typu Aramis. Skaner optyczny umożliwia wykonywanie pomiarów deformacji przestrzennych badanych elementów. Jego działanie opiera się na zasadach fotogrametrii dwuobrazowej. Na podstawie zdjęć powierzchni badanego elementu wykonywanych za pomocą kamer cyfrowych oprogramowanie oblicza odkształcenia oraz przemieszczenia jakich doznaje element. Skaner optyczny jest urządzeniem, które coraz częściej wykorzystywane jest do badań elementów żelbetowych [1,5].



Rys.6. Stanowisko badawcze

Skaner optyczny będący na wyposażeniu laboratorium KBiDOT w Politechnice Świętokrzyskiej posiada unikalną w skali Polski konfigurację. Dzięki specjalnie przygotowanym statywom umożliwia

on badanie dużych powierzchni. Jednocześnie możliwe jest wykorzystanie dwóch statywów czyli dwóch zestawów kamer, co pozwala na efektywne badanie obszaru o maksymalnych wymiarach 2800x1400mm. W badaniach wykorzystano skaner optyczny wyposażony w statyw z dwoma kamerami zamocowanymi w rozstawie 1200mm, bez możliwości zmiany ich położenia (rysunek 7). Takie ustawienie kamer pozwoliło na wykonanie pomiarów powierzchni o szerokości 1200mm z dokładnością $\pm 0,025$ mm. Wysokość badanego obszaru ograniczona została do wysokości badanego elementu zgodnie z rysunkiem 5.

Oprogramowanie Aramis, dołączone do skanera optycznego 3D, umożliwia tworzenie map odkształceń na badanej powierzchni (rysunek 13), pozwala na wykonywanie pomiarów deformacji przestrzennych oraz śledzenie powstawania i rozwoju zarysowania wraz z pomiarem ich szerokości. Wyniki te uzyskiwane są na podstawie analizy skali szarości i ich zmian, podczas obciążania, na badanej powierzchni. W związku z tym konieczne jest odpowiednie przygotowanie powierzchni badanej poprzez zakropkowanie czarną farbą. Na podstawie szeregu prób stwierdzono, że malowanie próbki na białe nie jest konieczne, ponieważ kontrast beton-farba jest wystarczający. Przygotowaną do badania powierzchnię belki, na stanowisku badawczym, przedstawia rysunek 6.



Rys.7. Skaner optyczny 3D z lewej: zestaw kamer, z prawej: jednostka sterująca

3 WYNIKI BADAŃ UZYSKANE Z WYKORZYSTANIEM SKANERA OPTYCZNEGO 3D

Na podstawie zarejestrowanych wartości sił, efektywność wzmocnienia η_f określono według wzoru (1) na poziomie 78% dla belki W1 oraz 55% dla belki W2. Wyniki te jednocześnie potwierdziły tendencję [2,3] do zmniejszania się efektywności wzmocnienia wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia belki.

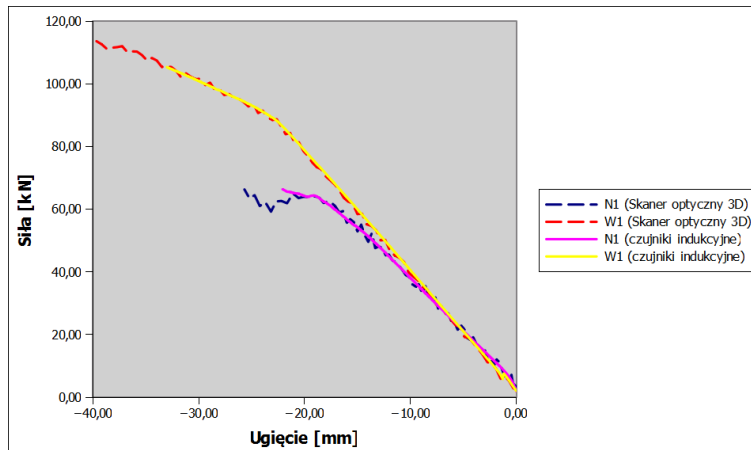
$$\eta_f = \frac{F_u - F_0}{F_0} \times 100\% \quad (1)$$

gdzie:

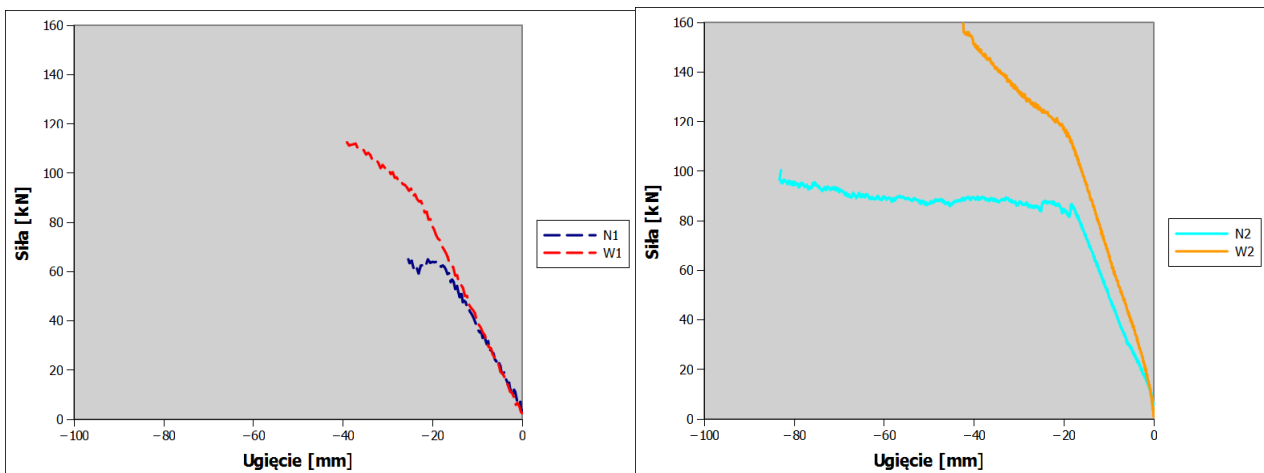
F_u – siła niszcząca dla belki wzmocnionej

F_0 – siła niszcząca dla belki referencyjnej - niewzmocnionej

W celu sprawdzenia poprawności wyników, zestawiono pomiary ugięć ze skanera optycznego 3D z wynikami otrzymanymi za pomocą czujników indukcyjnych. Porównanie wartości ugięć otrzymanych ze skanera optycznego 3D i czujników indukcyjnych, dla pierwszej pary belek, przedstawiono na wykresie zależności siła – ugięcie przedstawionym na rysunku 8. Otrzymano dużą zgodność wyników. Jednocześnie należy podkreślić, że skaner optyczny dzięki bezdotykowym pomiarom umożliwia ich rejestrację aż do zniszczenia elementu, co nie jest możliwe za pomocą czujników indukcyjnych, ze względu na wysokie prawdopodobieństwo ich uszkodzenia.

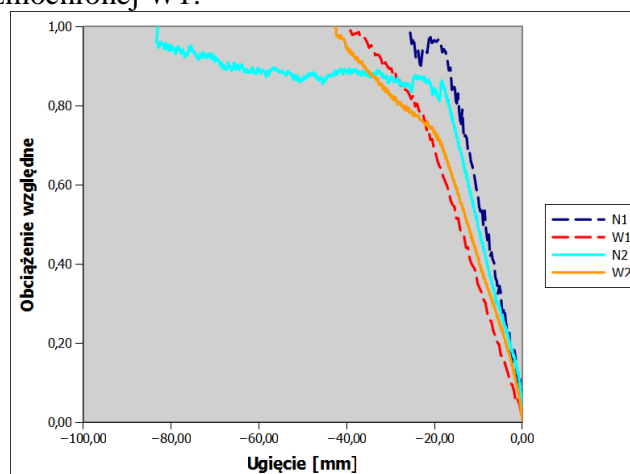


Rys.8. Porównanie wartości ugięcia otrzymanego ze skanera optycznego 3D i czujników indukcyjnych



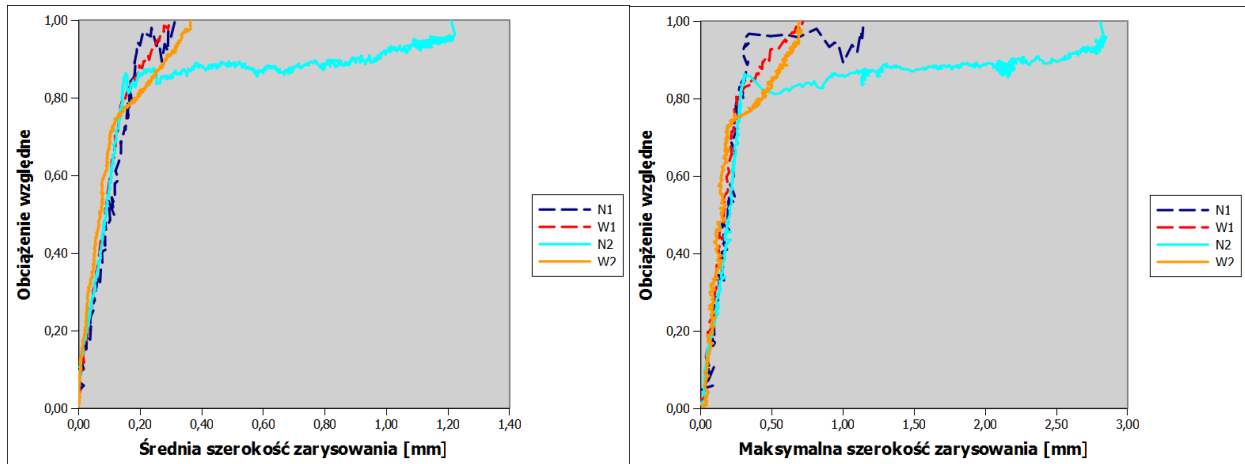
Rys.9. Ugięcie belek w funkcji siły

Wyniki ugięcia belek w połowie rozpiętości, otrzymane ze skanera optycznego 3D, przedstawiono na rysunku 9. Belki wzmocnione charakteryzują się większą sztywnością niż belki niewzmocnione. Uwidacznia się to mniejszą wartością ugięć w belce W2 w porównaniu z ugięciem belki N2. Belka N1 uległa zniszczeniu przy niewielkim ugięciu, co uniemożliwia prawidłowe porównanie z wynikami otrzymanymi dla belki wzmocnionej W1.



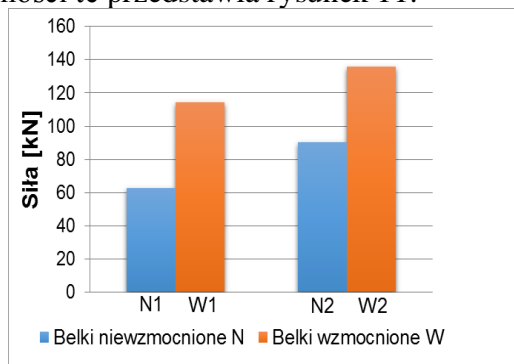
Rys.10. Ugięcie belek w funkcji obciążenia względnego

Wykres przedstawiony na rysunku 10 pokazuje przyrost ugięć w połowie rozpiętości elementów w zależności od względnej, w stosunku do niszczącej, wartości siły. Uzyskane wyniki wskazują na szybszy przyrost ugięć w belkach wzmocnionych W1 i W2 w odniesieniu do względnych wartości obciążenia.



Rys.11. Średnia oraz maksymalna szerokość zarysowania belek w funkcji obciążenia względnego

Przyrost szerokości zarysowania dla wszystkich belek, w odniesieniu do względnych wartości obciążenia, jest niemal identyczny. Znaczne różnice pojawiają się tuż przed zniszczeniem belek, kiedy to wartości szerokości zarysowania w belkach niewzmocnionych szybko przyrastają. Maksymalna szerokość zarysowania w chwili osiągnięcia nośności w belkach N1 i N2 jest zdecydowanie większa niż w belkach W1 i W2. Zależności te przedstawia rysunek 11.

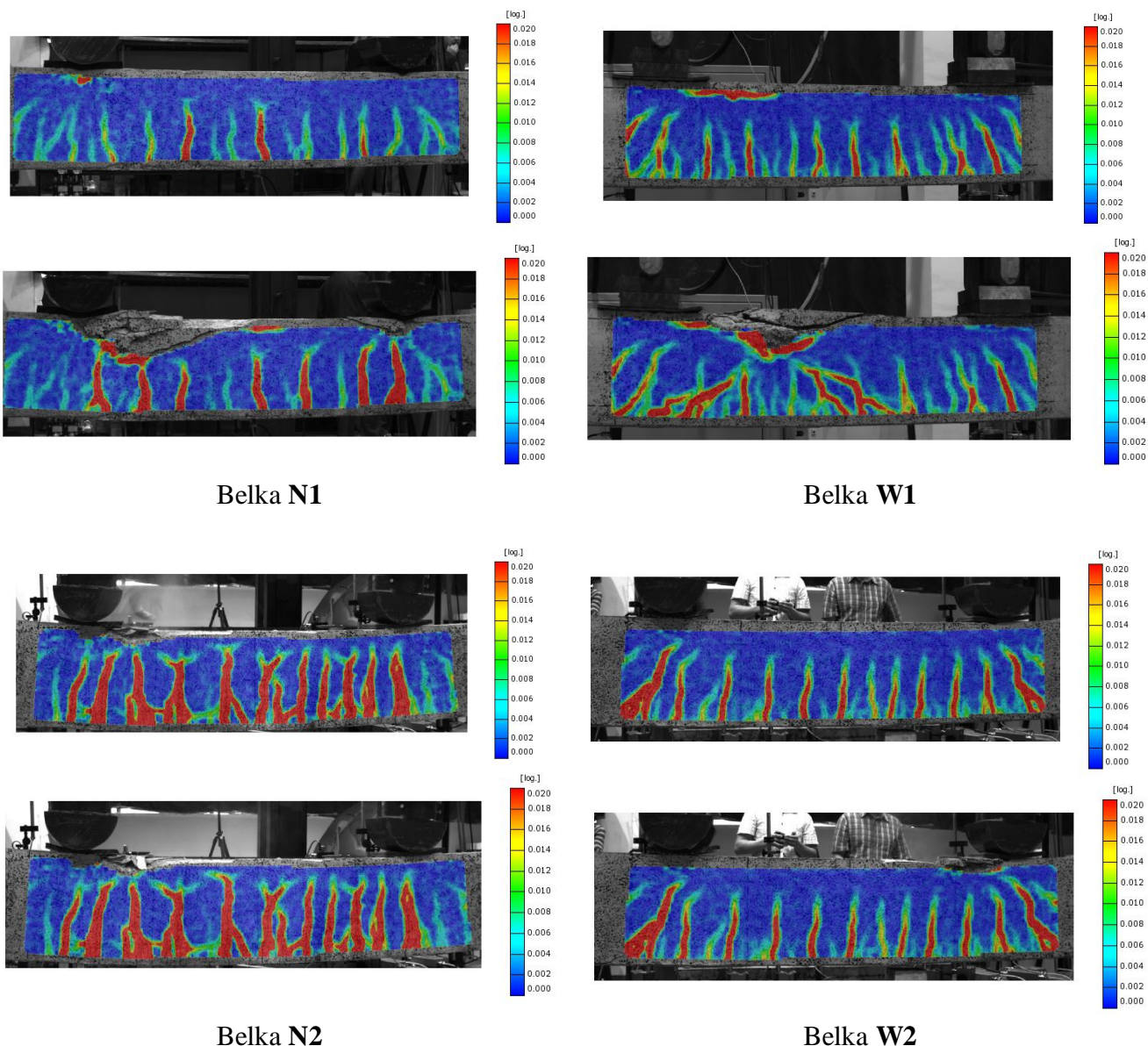


Rys.12. Porównanie nośności przebadanych belek

Obie belki wzmocnione zniszczyły się zgodnie z modelem CC, czyli doszło do zniszczenia betonu w strefie ściskanej. Porównanie nośności przebadanych belek przedstawia rysunek 12. W belce W1 widoczne są rysy ukośne powstałe w części środkowej belki (niszczenie na ścinanie w strefie zginania), nachylone w kierunku zmiądnionego betonu w strefie ściskanej. Świadczy to o dużym przebrojeniu elementu wynikającym z zastosowanego wzmocnienia. Obraz zarysowania dla każdej z belek w momencie zniszczenia przedstawia rysunek 13. Otrzymane wyniki pomiarów i obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Zestawienie wyników pomiarów

	Beton	Siły niszczące [kN]	η_f	ρ_s [%]	ρ_f [%]	Ugięcie [mm]	Max. rysa [mm]	Średnia rysa [mm]
N1	C20/25	64,35	-	1,6	-	25,68	1,15	0,31
W1	C20/25	114,5	78%	1,6	0,4	39,65	0,72	0,3
N2	C40/50	93,18	-	2,1	-	82,97	2,81	1,21
W2	C40/50	144,14	55%	2,1	0,4	42,51	0,7	0,37



Rys.13. Obraz zarysowania powierzchni bocznej belek uzyskany za pomocą skanera optycznego 3D.

WNIOSKI

Przedstawiona w pracy analiza potwierdza znaczną przydatność zastosowania skanera optycznego 3D do badań elementów żelbetowych wzmocnionych z wykorzystaniem kompozytów FRP.

Urządzenie to dzięki wykonywaniu bezdotykowych pomiarów badanej powierzchni i ich komputerowej rejestracji w zdecydowany sposób usprawnia prowadzenie badań w całym procesie obciążania, aż do zniszczenia.

Zarejestrowane wyniki dzięki specjalnemu oprogramowaniu umożliwiają pomiar zarysowania, a także pomiar przestrzenny odkształceń badanej powierzchni na każdym poziomie obciążenia już po zakończonym eksperymencie. Możliwość wykonania szerokiej gamy raportów wyników w postaci wykresów, a także w postaci filmów przedstawiających zachowanie elementu aż do zniszczenia, znacznie poszerza zakres możliwych do wykonania analiz, w tym dotyczących mechanizmów niszczenia.

Przedstawiona analiza ma charakter poglądowy, mający na celu przedstawienie możliwości zastosowania nowoczesnej aparatury badawczej. Szerszy program badań, z wykorzystaniem skanera optycznego 3D, obejmujący większą liczbę elementów badawczych będzie realizowany pod kątem analizy efektywności wzmocnienia belek żelbetowych taśmami FRP, w celu określenia granicznego stopnia zbrojenia.

Streszczenie

W pracy przedstawiono możliwość zastosowania skanera optycznego 3D do analizy wyników badań elementów żelbetowych wzmocnionych taśmami FRP. Ze względu na coraz szersze zastosowanie oraz szybki rozwój metod wzmocniania konstrukcji, problem ten ma bardzo istotne znaczenie praktyczne. W szczególności istotną jest analiza procesu zarysowania, co umożliwia określenie mechanizmów zniszczenia, która ma duże znaczenie w ocenie efektywności wzmocnienia. Skaner 3D z oprogramowaniem ARAMIS pozwala na wykonywanie pomiarów przemieszczeń i odkształceń na badanej powierzchni w sposób bezdotykowy i ciągły (z dokładnością do czasu wykonywania kolejnych zdjęć), również w momencie zniszczenia badanych elementów. Utworzone mapy odkształceń łącznie z wykresami ugięć wraz z analizą rozwoju pęknięć oraz szeroki zakres możliwości analizy uzyskanych wyników, jaki daje skaner optyczny 3D, może w znaczący sposób usprawnić badania w tym zakresie.

An application of a 3d optical scanner to reinforced concrete beams strengthened with FRP analysis

Abstract

The paper presents the possibility of using 3D optical scanner for the analysis of the test results of concrete elements strengthened with FRP. The problem of the constructions strengthening becomes more and more important because of fast development and wide employment of such methods. Particularly, analysis of cracking process is important, that allows to identify the damage mechanisms. Such an analysis plays the significant role in estimation of the reinforcement efficiency. Scanner 3D, with ARAMIS software, allows to perform non-contact and continuous measurement of displacements and deformations (including cracks development) within the tested surface, also in the moment of destruction. Deformation maps, graphs of deflections and analysis of cracks development created with ARAMIS software can significantly improve research in this field.

BIBLIOGRAFIA

1. Ajdukiewicz C., Gajewski M., Mossakowski P., *Zastosowanie systemu optycznej korelacji obrazu „Aramis” do identyfikacji rys w elementach betonowych*. Logistyka 2010, nr 6, s.27.
2. Chołostiakow Sz., Kotynia R., *Nośność i odkształcalność żelbetowych belek wzmocnionych na zginanie przy użyciu kompozytowych profili węglowych o przekroju teowym – badania doświadczalne*. Budownictwo i Architektura 2014, nr 13(3), s.71-78.
3. Kamińska M. E., Kotynia R., *Doświadczalne badania żelbetowych belek wzmocnionych taśmami CFRP. Badania doświadczalne elementów i konstrukcji betonowych*, Publikacja pod patronatem sekcji konstrukcji betonowych KILiW PAN, Łódź 2000, zeszyt nr 9.
4. Kotynia R., Staśkiewicz M., *Analiza efektywności wzmocnień żelbetowych elementów zginanych za pomocą wstępnie naprężonych kompozytów CFRP*. Budownictwo i Architektura 2013, nr 12(1), s.131-138.
5. Goszczyńska B., Trąmpczyński W., Bacharz K., Bacharz M., Tworzewska J., Tworzewski P., *Doświadczalna analiza odkształceń przestrzennych belek żelbetowych z zastosowaniem skanera optycznego 3D*. Inżynieria i Budownictwo 2014, nr 3, s. 156-159.