

Innowacyjne prefabrykaty łukowe o podwyższonej trwałości przeznaczone dla budownictwa komunikacyjnego

Cz. I. Badania porównawcze prefabrykatu żelbetowego

Innowacyjny prefabrykat łukowy, którego opracowanie i badania laboratoryjne były celem projektu, łączy zalety prefabrykacji, betonu lekkiego oraz zbrojenia kompozytowego. Jest rozwiązaniem unikatowym w skali kraju, a prawdopodobnie również świata. Korzyści płynące z prefabrykacji są nie do przecenienia. Dzięki produkcji elementów prefabrykowanych w wytwórni uzyskuje się:

- wysoką jakość z uwagi na kontrolowane warunki do produkcji betonu, betonowania prefabrykatów i ich pielęgnacji,
- niezależnienie od warunków atmosferycznych,
- skrócenie czasu prac prowadzonych bezpośrednio na obiekcie (w warunkach terenowych),
- obniżenie jednostkowego kosztu produkcji ze względu na powtarzalność procesów,
- uproszczenie prac projektowych z uwagi na możliwość stosowania rozwiązań systemowych.

Elementy prefabrykowane wykonane z betonu lekkiego zbrojonego prętami kompozytowymi są o ok. 28% lżejsze niż elementy wykonane tradycyjnie. Obniżenie ciężaru wpływa na obniżenie kosztów transportu i montażu prefabrykatów. Dodatkowym atutem jest wysoka trwałość konstrukcji. Zastosowanie zbrojenia kompozytowego (z prętów GFRP), a tym samym wyeliminowanie zagrożenia korozją, występującego w przypadku zbrojenia stalowego, pozwoli obniżyć koszty utrzymania obiektu w czasie jego użytkowania poprzez uniknięcie kosztownych napraw, nieodzownie związanych z utrzymaniem obiektów zbrojonych prętami stalowymi.

W ramach projektu przeprowadzono badania innowacyjnego prefabrykatu wykonanego z betonu lekkiego ze zbrojeniem kompozytowym oraz, dla porównania, badania tradycyjnego prefabrykatu z betonu zwykłego ze zbrojeniem stalowym.

Przeprowadzono badania statyczne i zmęczeniowe prefabrykatu żelbetowego (z betonu zwykłego) oraz dwóch

SUMMARY

Innovative prefabricated arched components of increased durability for transportation engineering

Part I. Comparative tests of the reinforced concrete precast element

From July 2018 to November 2019, OPTEM company together with the the Department of Roads and Bridges at Rzeszow University of Technology implemented a research project „Innovative prefabricated arched components of increased durability for transportation engineering”, the aim of which was to develop a new optemARCH prefabricated arch. As a result, a significantly improved construction product of lower weight and totally corrosion resistant was obtained.

Keywords: prefabricated arched components, reinforced concrete, innovative prefabricated arched components

prefabrykatów wykonanych z betonu lekkiego ze zbrojeniem z prętów GFRP.

W pierwszej części przedstawiono badania prefabrykatu żelbetowego. Wyniki badań pozostałych elementów zostaną przedstawione w kolejnych częściach artykułu.

Program badań

Przedmiotem badań były prefabrykowane elementy łukowe przeznaczone do budowy małych mostów i wiaduktów. Badania obejmowały modele prefabrykatów w skali 1:1 o rozpiętości 10,0 m, szerokości 1,0 m i wysokości w kluczu 2,4 m. Grubość elementów wynosiła 0,28 m. Geometrię modeli badawczych przedstawiono na rys. 1.

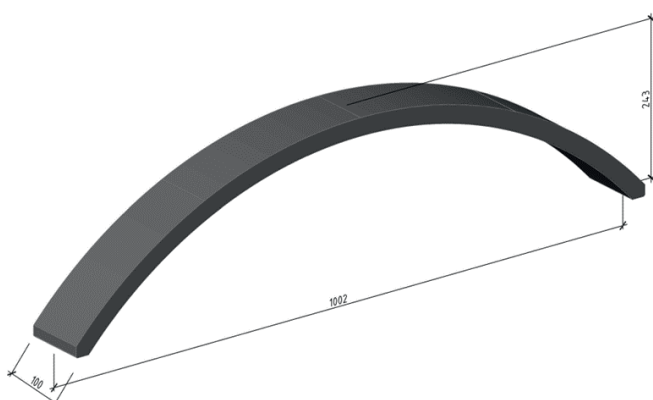
Do badań wykorzystano trzy modele prefabrykatów łukowych. Pierwszy model (LS1), przebadany w celach porównawczych, był wykonany z betonu zwykłego z konwencjonalnym zbrojeniem stalowym. Dwa kolejne modele (LG1 i LG2) zostały wykonane z betonu lekkiego ze zbrojeniem kompozytowym z prętów GFRP. Badania porównawcze prefabrykatów lekkich z prefabrykatem żelbetowym umożliwiły ocenę zachowania się obu typów łuków pod tymi samymi obciążeniami, co pozwoliło na określenie zakresu stosowania nowych prefabrykatów oraz opracowanie wskazówek mających na celu ulepszenie zaproponowanego innowacyjnego rozwiązania. Porównano również koszty wytworzenia obu elementów.

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania statyczne i zmęczeniowe modelu prefabrykatu ze zbrojeniem stalowym (LS1). Zestawienie poszczególnych etapów badań modelu LS1 z wartościami przykładowych obciążeń przedstawiono w tab. 1. Następnie wykonano modele

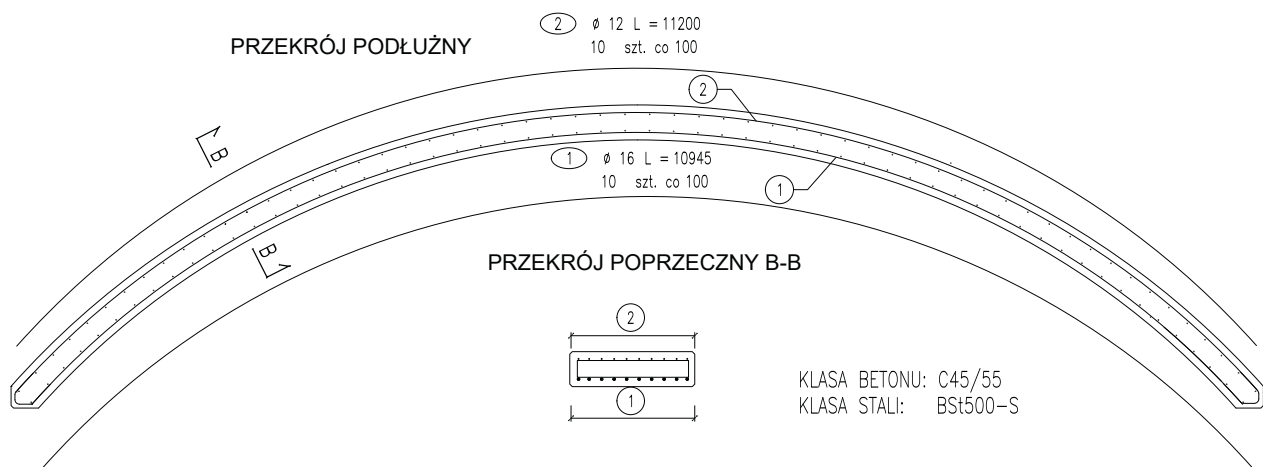
mgr inż. Bogumiła Strzyżyk
OPTEM Sp. z o.o.

dr inż. Ewa Michalak
dr inż. Bartosz Piątek
Politechnika Rzeszowska

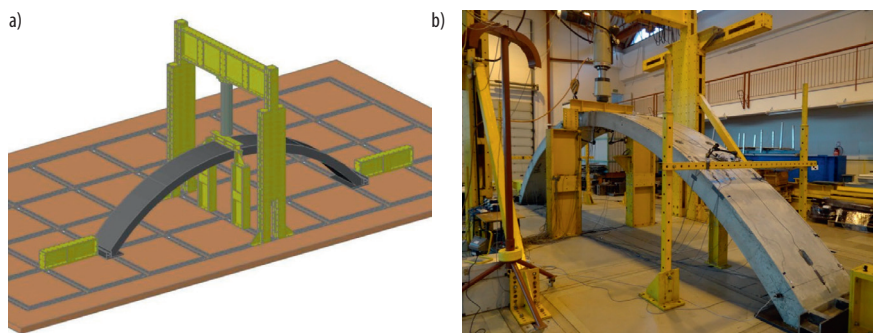
Od lipca 2018 r. do listopada 2019 r. firma OPTEM wraz z Zakładem Dróg i Mostów Politechniki Rzeszowskiej realizowały projekt badawczy pt.: „Innowacyjne prefabrykaty łukowe o podwyższonej trwałości przeznaczone dla budownictwa komunikacyjnego”, którego celem było opracowanie nowego prefabrykatu łukowego optemARCH. W rezultacie otrzymano znacząco ulepszony wyrób budowlany charakteryzujący się mniejszym ciężarem oraz podwyższoną odpornością na korozję.



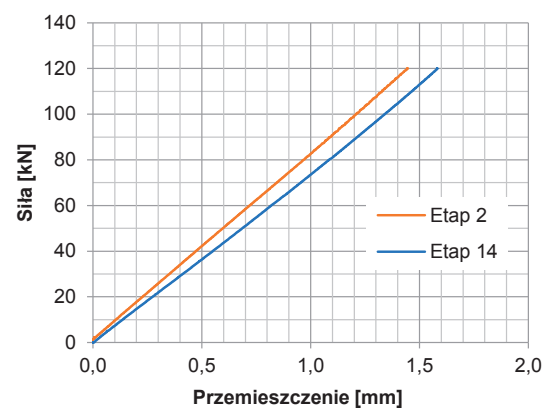
Rys. 1. Geometria modeli badawczych



Rys. 2. Zbrojenie modelu prefabrykatu z prętami stalowymi LS1



Rys. 3. Ustawienie elementu na stanowisku badawczym: a) wizualizacja, b) widok



Rys. 4. Rysy w kluczu łuku pod obciążeniem ok. 600 kN – model LS1

Etap	Opis	Liczba cykli obciążenia	Obciążenie maksymalne F_{max} [kN]	Obciążenie minimalne F_{min} [kN]
1.	Obciążenie statyczne do 33% F_{max}	1	40	0
2.	Obciążenie statyczne 3 cykle do F_{max}	3	120	0
3.	Obciążenie zmęczeniowe	100 000	120	12
4.	Obciążenie statyczne po 100 tys. cykli	1	120	0
5.	Obciążenie zmęczeniowe	150 000	120	12
6.	Obciążenie statyczne po 250 tys. cykli	1	120	0
7.	Obciążenie zmęczeniowe	250 000	120	12
8.	Obciążenie statyczne po 500 tys. cykli	1	120	0
9.	Obciążenie zmęczeniowe	500 000	120	12
10.	Obciążenie statyczne po 1,0 mln cykli	1	120	0
11.	Obciążenie zmęczeniowe	500 000	120	12
12.	Obciążenie statyczne po 1,5 mln cykli	1	120	0
13.	Obciążenie zmęczeniowe	500 000	120	12
14.	Obciążenie statyczne po 2,0 mln cykli	1	120	0
15.	Obciążenie statyczne do 150% F_{max}	1	180	0
16.	Obciążenie statyczne do 200% F_{max}	1	240	0
17.	Obciążenie statyczne do 225% F_{max}	1	270	0
18a.	Obciążenie statyczne do zniszczenia	1	630	0
18b.	Obciążenie statyczne do zniszczenia po wyjęciu blach dystansowych (rozsunięcie podpór łącznie o 2 cm)	1	630	0
18c.	Obciążenie statyczne do zniszczenia po wyjęciu blach dystansowych (rozsunięcie podpór łącznie o 4 cm)	1	630	0
18d.	Obciążenie statyczne do zniszczenia po wyjęciu kształtowników HEB (rozsunięcie podpór łącznie o 28 cm)	1	260	—

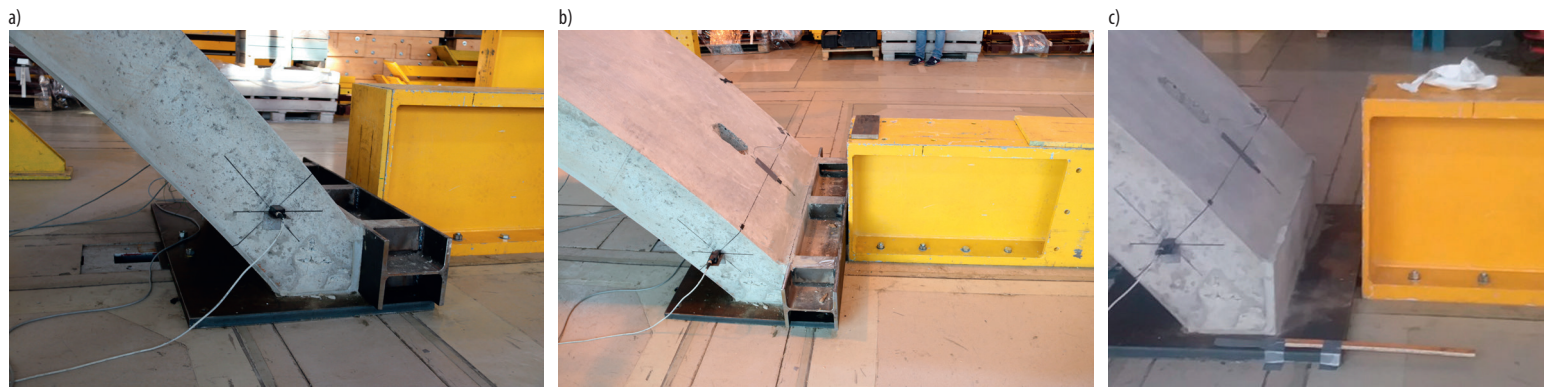
Tab. 1. Program badań modelu LS1 (prefabrykat żelbetowy)

prefabrykatów z betonu lekkiego ze zbrojeniem kompozytowym LG1 i LG2, odpowiednio do badań statycznych i zmęczeniowych. Wyniki badań tych modeli zostaną przedstawione w kolejnych częściach artykułu.

Założenia projektowe

Projekty prefabrykatu żelbetowego oraz prefabrykatu z betonu lekkiego zakładały taki dobór materiałów, aby oba elementy uległy zniszczeniu przy tym samym poziomie obciążenia. Z uwagi na rodzaj dostępnych w Polsce kruszyw lekkich oraz ich parametry wytrzymałościowe, Wytwórnia Pekabex BET zadeklarowała możliwość produkcji betonu lekkiego klasy LC45/50. W projekcie elementu żelbetowego przyjęto klasę betonu C45/55 w celu uzyskania zbliżonej wytrzymałości na ściskanie, pomimo że powszechnie w budownictwie komunikacyjnym stosuje się prefabrykaty o wytrzymałości C50/60. Późniejsze badania przeprowadzone na próbkach rdzeniowych pobranych z modeli wykazały, że rzeczywista wytrzymałość obu betonów była wyższa, niż zakładano. Beton zwykły w modelu LS1 osiągnął klasę wytrzymałości C70/85 ($f_{cm} = 93,5$ MPa, $f_{c,min} = 86,7$ MPa), a beton lekki w modelu LG1 osiągnął wytrzymałość odpowiadającą klasie LC60/66 ($f_{cm} = 77,7$ MPa, $f_{c,min} = 75,2$ MPa). Opracowana recepta umożliwia zatem produkcję betonu lekkiego o wytrzymałości na ściskanie odpowiadającej wytrzymałości betonu prefabrykatów obowiązującej obecnie na kontraktach infrastrukturalnych.

Zbrojenie modelu LS1 zostało zaprojektowane z prętów ze stali BSt500-S. Zbrojenie dolne stanowiły pręty $\phi 16$ mm w rozstawie 10 cm, a zbrojenie górne pręty $\phi 12$ mm w rozstawie 10 cm. Zbrojenie rozdzielcze zostało wykonane z prętów $\phi 10$ mm w rozstawie 196 mm. Zbrojenie prefabrykatu z prętami stalowymi przedstawiono na rys. 2. Przyjęte zbrojenie zapewnia spełnienie stanów granicznych (wykorzystanie nośności granicznej na po-



Rys. 5. Widok podpory z blachami dystansowymi – etapy 1-18a (a), po wyjęciu blach – etapy 18b, 18c (b) i po wyjęciu kształtowników HEB – etap 18d (c)

ziomie 80%) wg normy PN-91/S-10042 przy założeniu obciążeń użytkowych klasy A wg normy PN-85/S-10030 i wysokości naziomu równej 1,0 m.

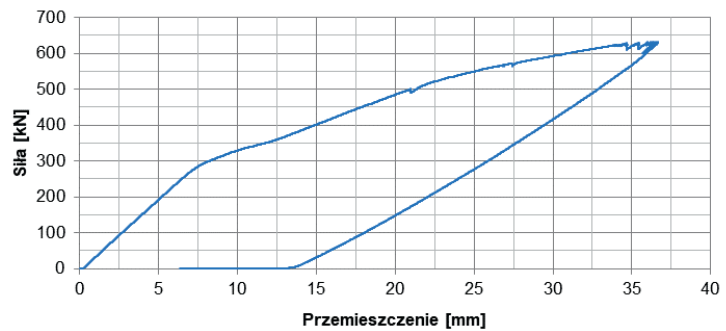
Element prefabrykowany zamodelowano jako powłokę w programie ROBOT Structural Analysis o schemacie statycznym łuku podpartego przegubowo. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń w charakterystycznych punktach modelu wyznaczono siły wewnętrzne i naprężenia w konstrukcji przy dwóch poziomach obciążenia: 315 kN (obciążenie odpowiadające uplastycznieniu zbrojenia w warstwie dolnej prętów w kluczu) oraz 630 kN (maksymalne obciążenie generowane przez siłownik hydrauliczny). Obciążenie przyłożono w kluczu łuku i rozłożono na całej szerokości elementu poprzez belkę trawersową (zgodnie ze schematem badań – por. rys. 3). Maksymalne siły wewnętrzne dla zbrojenia dolnego uzyskano w środku rozpiętości łuku ($L/2$), a dla zbrojenia górnego w $1/6$ jego rozpiętości. Zestawienie wyników uzyskanych w dwóch charakterystycznych przekrojach konstrukcji przedstawiono w tab. 2.

Schemat badań

Elementy zostały przebadane w schemacie trójpunktowego zginania. Model prefabrykatu został ustawiony na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym wyposażonym w rozpory w miejscach węzłowi łuku. Obciążenie było przykładane w kluczu łuku za pomocą siłownika hydraulicznego generującego maksymalne obciążenie o wartości 630 kN. Obciążenie z siłownika było rozkładane na całą szerokość badanego elementu za pośrednictwem belki trawersowej z kształtownika HEA 240. Podczas badań były prowadzone ciągłe pomiary siły w siłowniku oraz przemieszczeń i odkształceń konstrukcji. Wizualizację oraz widok prefabrykatu na stanowisku badawczym przedstawiono na rys. 3.

Wyniki badań

Model LS1 był poddany zarówno badaniom statycznym, jak i zmęczeniowym. Badania statyczne prowadzono pomiędzy kolejnymi seriami cykli badań zmęczeniowych oraz po ich zakończeniu zgodnie z procedurą przedstawioną w tab. 1. Badania zmęczeniowe z maksymalnym obciążeniem równym 120 kN nie spowodowały żadnych istotnych uszkodzeń prefabrykatu ani znacznego spadku jego sztywności. Porównanie wykresów zależności siła – przemieszczenie uzyskane w etapach 2 i 14 przedstawiono na rys. 4. W celu określenia nośności granicznej elementu po zakończeniu badań zmęczeniowych przeprowadzono badania statyczne. Maksymalne obciążenie generowane przez siłownik hydrauliczny (630 kN) okazało się niewystarczające do zniszczenia modelu LS1 w pierwotnym układzie podparcia. Dlatego wprowadzono kolejne etapy badań (18b, 18c), które umożliwiły symulacje przemieszczeń podpór łuku na zewnątrz kolejno o 2 i 4 cm (łącznie dla obu podpór). Przemieszczenia umożliwiono poprzez wyjęcie blach dystansowych znajdujących się pomiędzy kształtownikami HEB a belką oporową przymocowaną do podłogi siłowej (rys. 5a, 5b). Po umożliwieniu prze-



Rys. 6. Wykres zależności siła – przemieszczenie w etapie 18a (obciążenie 630 kN w projektowanym układzie podparcia)

Obciążenie	315 kN		630 kN	
	L/2	L/6	L/2	L/6
Przekrój				
Moment zginający [kNm]	-193	96	-379	186
Naprężenia w zbrojeniu rozciągającym [MPa]	502	430	996	805
Rozstaw rys [mm]	170	170	170	170
Szerokość rys [mm]	0,25	0,21	0,50	0,42

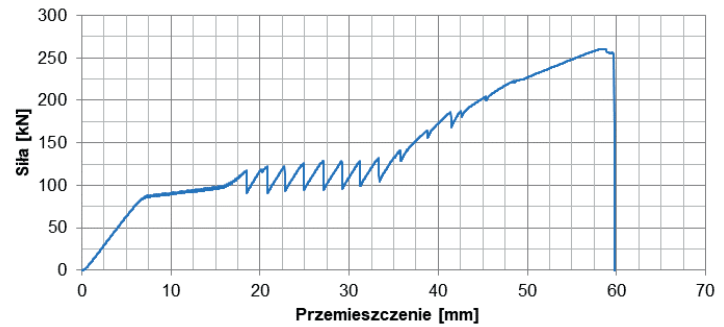
Tab. 2. Zestawienie sił wewnętrznych i parametrów mierzonych w badaniach obliczeniowych dla obciążenia 315 kN i 630 kN

mieszceń równych 4 cm i obciążeniu równym 630 kN element nadal nie uległ zniszczeniu. W związku z tym zdecydowano o zdemontowaniu kształtowników HEB (etap 18d), co spowodowało przemieszczenia węzłowi łuku równe łącznie 28 cm (rys. 5c) i umożliwiło zniszczenie prefabrykatu.

Wykres zależności siła – przemieszczenie uzyskany w etapie 18a (przy projektowym podparciu łuku) przedstawiono na rys. 6. Przy obciążeniu ok. 300 kN można zaobserwować zmianę pochylenia krzywej wykresu. Świadczy to o zapoczątkowaniu uplastycznienia prętów zbrojeniowych (zgodnie z obliczeniami) i kształtowania się przegubu plastycznego w środku rozpiętości łuku oraz związanej z tym redukcji sztywności elementu. Dalszy przyrost obciążenia był możliwy dzięki redystrybucji sił wewnętrznych i jest związany z geometrią elementu łukowego oraz właściwościami stali zbrojeniowej. W przypadku prostoliniowego kształtu elementu dalszy przyrost obciążenia w takim zakresie byłby niemożliwy. Ten efekt dokładnie pokazuje fakt znany już w starożytności – jak doskonałym kształtem dla konstrukcji budowlanych jest łuk oraz jak dużą rezerwę bezpieczeństwa konstrukcji można uzyskać, odpowiednio ją kształtując. Projektowa nośność przekroju była ok. dwukrotnie niższa niż minimalna nośność graniczna elementu uzyskana w trakcie badań. Morfologię zarysowania dolnej powierzchni elementu w kluczu łuku pod obciążeniem ok. 600 kN przedstawiono na rys. 7. Pomierzona szerokość rys w kluczu łuku wynosiła 0,5 mm, co odpowiadało wartości określonej w obliczeniach. Model prefabrykatu ze zbrojeniem stalowym LS1 został



Rys. 7. Zarysowanie modelu LS1 w kluczu pod obciążeniem ok. 600 kN



Rys. 8. Wykres zależności siła-przemieszczenie w etapie 18d (zniszczenie przy 260 kN po zdemontowaniu kształtowników HEB)



Rys. 9. Postać zniszczenia modelu LS1: a) początkowa faza pęknięcia w środku rozpiętości łuku, b) widok pęknięcia na długości elementu, c) szczegół pęknięcia, d) zmiążdżenie betonu w miejscu przyłożenia obciążenia

zniszczony w etapie 18d. Podczas tego etapu model LS1 stopniowo „dostosowywał się” do nowych warunków podparcia poprzez skokowe przesunięcia wezłowy łuku w stronę belek oporowych, co jest widoczne w postaci załamania na wykresie siła – przemieszczenie (rys. 8). Po oparciu wezłowy o belki oporowe stanowiska badawczego przy sile ok. 130 kN łuk zaczął pracować w nowym układzie podparcia (przy zwiększonej o 28 cm rozpiętości). W tym schemacie był możliwy wzrost obciążenia o kolejne 130 kN. Element uległ zniszczeniu przy obciążeniu równym 260 kN.

Zniszczenie modelu LS1 nastąpiło gwałtownie i zostało zapoczątkowane w miejscu przyłożenia obciążenia. Pęknięcia ukośne, które pojawiło się w środku rozpiętości (rys. 9a), propagowało następnie w stronę wezłowy i przekształciło się w pęknięcie podłużne elementu powyżej dolnej siatki prętów zbrojeniowych (rys. 9b). Strzemiona na długości pęknięcia zostały zerwane i pojawiła się szczelina o szerokości ok. 3 cm (rys. 9c). Beton na górnej powierzchni w miejscu przyłożenia obciążenia uległ zmiążdżeniu (rys. 9d).

Wnioski

Celem pierwszego etapu projektu było wykonanie badań konwencjonalnego prefabrykatu łukowego wykonanego ze zwykłego betonu ze zbrojeniem stalowym. Wyniki badań modelu LS1 stanowiły podstawę do porównań z wynikami badań prefabrykatów innowacyjnych. Badania statyczne potwierdziły wymaganą nośność prefabrykatu, a nawet wykazały jej znaczne przekroczenie. Nośność doraźna modelu LS1, określona na poziomie

elementu, wyniosła minimum 630 kN; była ok. 2-krotnie wyższa niż obliczeniowa nośność przekroju na zginanie. Przyczyną zwiększonej nośności elementu LS1 należy upatrywać przede wszystkim w geometrii elementu, a także w znacznie wyższej klasie wytrzymałości w badanym elemencie (C70/85) niż założonej w projekcie (C45/55); klasa wytrzymałości betonu została określona na podstawie badania próbek rdzeniowych pobranych z prefabrykatów po zakończeniu badań.

W obliczeniach wyznaczono nośność na zginanie. W miejscu występowania największych naprężeń w łuku powstał przegub plastyczny, a następnie wystąpiła redystrybucja obciążeń. Element żelbetonowy był w stanie przenosić dalej obciążenia, co nie było jednoznaczne z jego zwiększoną nośnością. Nadmiar należy traktować jako dodatkową rezerwę bezpieczeństwa konstrukcji. Może to być np. czas na ewentualne działania zabezpieczające w przypadku gdy prefabrykat zostałby znacząco przeciążony. Z projektowego punktu widzenia element uległ zniszczeniu w momencie uplastycznienia zbrojenia w kluczu tzn. przy obciążeniu ok. 300 kN, czyli tak, jak wykazano w obliczeniach. □

Informacja o projekcie

Projekt (POIR.02.03.02-22-0006/18) został zrealizowany dzięki uzyskanemu przez firmę OPTEM dofinansowaniu z Funduszy Europejskich. Zadanie było realizowane w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój. Oś priorytetowa II: Wsparcie otoczenia i potencjału przedsiębiorstw do prowadzenia działalności B+R+I. 2.3 Proinnowacyjne usługi dla przedsiębiorstw. Poddziałanie 2.3.2 Bony na innowacje dla MŚP.