

Innowacyjne prefabrykaty łukowe o podwyższonej trwałości przeznaczone dla budownictwa komunikacyjnego

Cz. III. Badania zmęczeniowe prefabrykatu z betonu lekkiego z prętami kompozytowymi



Rys. 1. Przykład wykorzystania prefabrykatów łukowych do budowy wiaduktu

mgr inż. Bogumiła Strzyżyk

OPTEM Sp. z o.o.

dr inż. Ewa Michalak

dr inż. Bartosz Piątek

Politechnika Rzeszowska

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 prefabrykatów wykonanych z betonu lekkiego ze zbrojeniem z prętów GFRP. W pierwszej części artykułu, w numerze 2/20 magazynu „Mosty”, przedstawiono badania prefabrykatu żelbetowego [1]. W drugiej części artykułu, w numerze 3/20 magazynu „Mosty”, zaprezentowano wyniki badań statycznych prefabrykatu wykonanego z betonu lekkiego ze zbrojeniem z prętów GFRP [2]. W niniejszej części artykułu zostaną przedstawione wyniki badań zmęczeniowych innowacyjnego prefabrykatu.

Program badań

Przedmiotem badań były prefabrykowane elementy łukowe przeznaczone do budowy małych mostów i wiaduktów (rys. 1). 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 (rys. 2).

I SUMMARY

Innovative prefabricated arched components of increased durability for transportation engineering

Part III. Fatigue tests of a light concrete precast element reinforced with composite bars

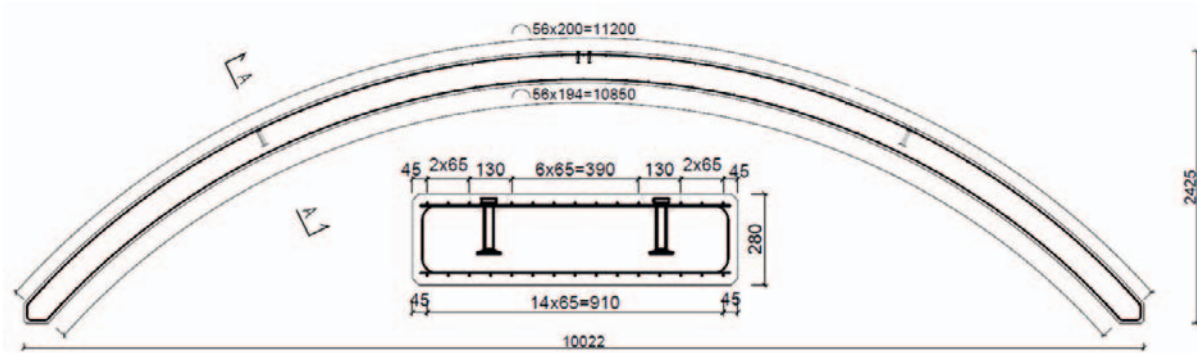
From July 2018 to November 2019, the OPTEM company together with the Department of Roads and Bridges of the Rzeszów University of Technology were implementing a research project „Innovative prefabricated arched components of increased durability for transportation engineering”, the aim of which was to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

Keywords: cracking, fatigue testing, loading

Wyniki badań statycznych modelu z betonu zwykłego z konwencjonalnym zbrojeniem stalowym (LS1) oraz modelu z betonu lekkiego ze zbrojeniem kompozytowym (LG1) zaprezentowano w poprzednich częściach artykułu [1, 2]. W niniejszej części zaprezentowano wyniki badań zmęczeniowych modelu LG2 oraz ich porównanie z wynikami badań modelu LS1. Początkowo zakładano, że model LG2 będzie poddany badaniom zmęczeniowym przy takiej samej sekwencji obciążeń jak w przypadku modelu LS1 [1]. Jednak ze względu na uszkodzenia powstałe w trakcie badań poszczególne etapy obciążania zostały zmodyfikowane. Program badań zmęczeniowych modelu LG2 przedstawiono w tab. 1.

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. Późniejsze badania przeprowadzone na próbkach rdzeniowych pobranych z modeli wykazały, że rzeczywista wytrzymałość obu betonów była wyższa, niż zakładano. Beton lekki w modelu LG2 osiągnął wytrzymałość odpowiadającą klasie LC55/60 ($f_{cm} = 70,1$ MPa, $f_{c,min} = 68,3$ MPa). Opracowana recepta umożliwia zatem produkcję betonu lekkiego o wytrzymałości na ściskanie odpowiadającej wytrzymałości betonu prefabrykatów obowiązującej obecnie na kon-



Rys. 2. Zbrojenie modelu prefabrykatu z prętami kompozytowymi LG2

traktach infrastrukturalnych. Moduł sprężystości betonu lekkiego określony na podstawie wyników badań próbek pobranych podczas betonowania modelu LG1 wykonanych po 41 dniach wynosi 34,6 GPa. Zbrojenie modeli LG1 i LG2 stanowiły pręty kompozytowe z włókien szklanych (GFRP) o charakterystycznej wytrzymałości na rozciąganie 1190 MPa i module sprężystości 53 GPa. Parametry mechaniczne prętów zbrojeniowych określono na podstawie badań doświadczalnych wykonanych w ramach projektu. Na zbrojenie podłużne dolne i górne przewidziano odpowiednio po 15 i 13 prętów ϕ 8 mm. Strzemiąca zostały wykonane z prętów Regular 8 mm w rozstawie 200 mm. Zbrojenie modeli prefabrykatów z prętami kompozytowymi przedstawiono na rys. 2.

Ze względu na fakt, że obecnie nie ma konkretnych wytycznych do projektowania elementów z betonu lekkiego ze zbrojeniem kompozytowym na zmęczenie, do badań przyjęto takie same parametry prefabrykatu jak dla elementu LG1 podlegającego obciążeniom statycznym. Przyjęte zbrojenie zapewnia spełnienie stanów granicznych (wykorzystanie nośności granicznej na poziomie 80%) wg normy PN-91/S-10042 [3] przy założeniu obciążeń użytkowych klasy A wg normy PN-85/S-10030 [4] i wysokości naziomu równej 1,0 m [2].

Schemat badań

Model LG2, analogicznie jak poprzednie modele [1, 2], został przebadany w schemacie trójpunktowego zginania. Model ustawiono na 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. Widok modelu ustawionego w hali laboratoryjnej przedstawiono na rys. 3. W badaniach zmęczeniowych stała opisująca niesymetryczność cyklu (R) wynosiła 0,1, co oznacza, że dolny poziom obciążenia (F_{min}) odpowiadał 10% wartości górnego poziomu obciążenia (F_{max}). Obciążenie zmęczeniowe przykładano w sposób sinusoidalnie zmienny od wartości 12 do 120 kN zgodnie z rys. 4. Częstotliwość przykładania obciążenia zmęczeniowego wynosiła 1,5 Hz dla całego przebiegu badania modelu LS1 i w początkowej fazie badania modelu LG2. W przypadku modelu LG2 po ok. 290 tys. cykli obciążenia wystąpiło pęknięcie w środku rozpiętości łuku (o szerokości rozwarcia ok. 8 mm przy obciążeniu 120 kN). Wskutek pęknięcia zmniejszyła się sztywność elementu. Podczas kolejnych cykli obciążania redukcja sztywności propagowała. Wpływało to na zwiększanie amplitudy przemieszczenia siłownika, co z kolei wymusiło zmniejszenie częstotliwości obciążania (ze względu na wydajność siłownika). Przy ok. 350 tys. cykli obciążania amplituda przemieszczenia wzrosła na tyle, że konieczne było zmniejszenie częstotliwości obciążania do 1 Hz,

a następnie przy ok. 374 tys. cykli ponownie zmniejszono częstotliwość, tym razem do 0,5 Hz i taką utrzymywano do końca badania.

Wyniki badań

Model LG2 był poddany badaniom zmęczeniowym zgodnie z procedurą przedstawioną w tab. 1. Podczas badań zmęczeniowych model LG2 ulegał stopniowej degradacji, co jest widoczne na wykresach przedstawiających wartości przemieszczeń zarejestrowanych w kolejnych etapach badań statycznych (rys. 5). Degradacja sztywności elementu postępowała od pierwszego etapu badań zmęczeniowych. Redukcję sztywności w kolejnych etapach badań można zaobserwować na podstawie zmian wartości amplitudy przemieszczeń przedstawionych w tab. 2. Amplituda przemieszczeń pionowych w L/2 wzrosła z 2,91 mm w etapie 3. do 4,57 mm w etapie 7. (przy 250 tys. cykli obciążenia), czyli o 57%. W etapie 9. nie prowadzono już pomiarów czujnikami indukcyjnymi ze względu na ryzyko ich zniszczenia, a zarejestrowana amplituda przemieszczeń tłoka siłownika w tym etapie była niemal trzykrotnie większa w stosunku do etapu 3. i powiększała się wraz ze wzrostem liczby cykli w etapie 9. O stopniowej degradacji sztywności elementu świadczą również zarejestrowane w kolejnych etapach badań przyrosty szerokości rozwarcia rys (tab. 4). Stopniową degradację sztywności modelu LG2 pod obciążeniem zmęczeniowym można zaobserwować także na podstawie pomiarów odkształceń (tab. 3). Już w etapie 2. obciążenia (do 120 kN przed badaniem zmęczeniowym) w środku rozpiętości łuku ukształtowała się rysa, która sięgała niemal górnej krawędzi przekroju, a w górnych prętach zbrojeniowych w tym przekroju zarejestrowano rozciąganie. W kolejnych etapach obciążenia rysa propagowała, a jej maksymalna szerokość powiększała się (tab. 5). Propagacja rysy odbywała się głównie

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 optem-ARCH. W rezultacie otrzymano znacząco ulepszony wyrób budowlany charakteryzujący się mniejszym ciężarem oraz podwyższoną odpornością na korozję.

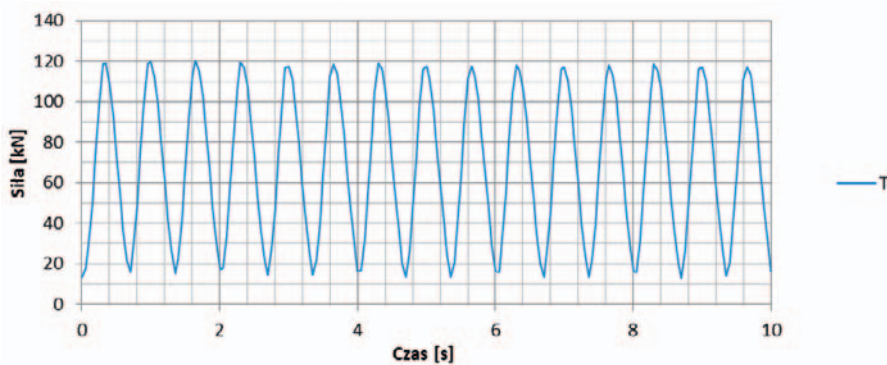
Etap	Opis	Liczba cykli obciążenia	Obciążenie maksymalne F_{max} [kN]	Obciążenie minimalne F_{min} [kN]
1.	Obciążenie statyczne do 33% F_{max}	1	40	0
2.	Obciążenie statyczne 3 cykle do F_{max}	3	120	0
3.	Obciążenie zmęczeniowe	100 000	120	12
4.	Obciążenie statyczne po 100 tys. cykli	1	120	0
5.	Obciążenie zmęczeniowe	150 000	120	12
6.	Obciążenie statyczne po 250 tys. cykli	1	120	0
7.	Obciążenie zmęczeniowe	40 000	120	12
8.	Obciążenie statyczne po 290 tys. cykli	1	120	0
9.	Obciążenie zmęczeniowe (zmiany częstotliwości)	100 000	120	12
10.	Obciążenie statyczne po 390 tys. cykli (do zniszczenia)	3	48	0

F_{max} – maksymalny poziom obciążenia w badaniach zmęczeniowych modelu LG2

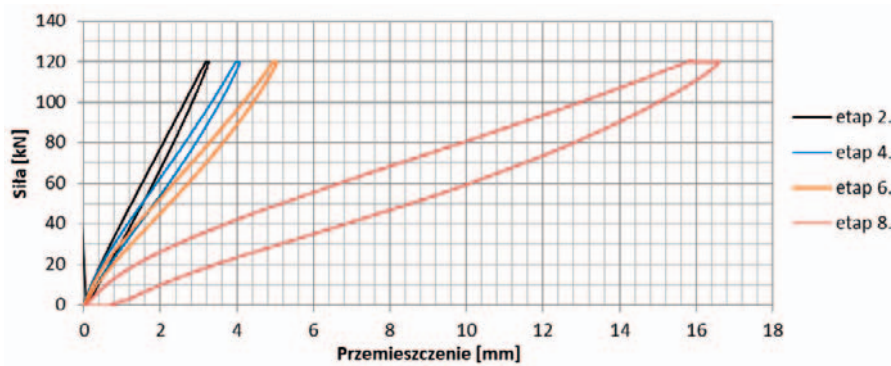
Tab. 1. Program badań zmęczeniowych modelu LG2



Rys. 3. Widok modelu LG2 na stanowisku badawczym



Rys. 4. Przebieg siły w czasie podczas badań zmęczeniowych



Rys. 5. Porównanie przemieszczeń modelu LG2 w kluczu łuku w kolejnych etapach badań

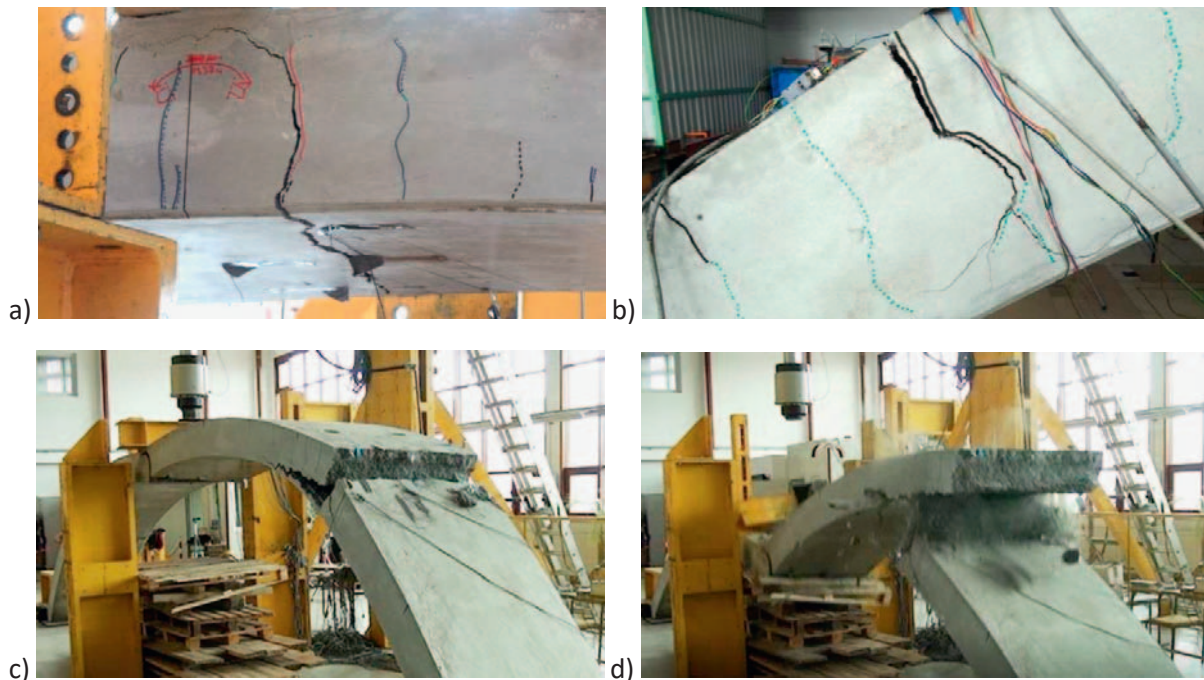
- ▶ w górnej części przekroju i po szerokości elementu. W etapie 6. maksymalna szerokość rozwarcia rysy wynosiła 1,0 mm. Wraz z propagacją rysy następował wzrost wartości odkształceń rozciągających w górnych prętach zbrojeniowych w L/2. Degradacja modelu LG2 jest widoczna także w zmianach wartości amplitud odkształceń. Amplituda odkształceń górnych prętów zbrojeniowych w L/2 wzrosła z 0,05‰ w etapie 3. do 0,47‰ w etapie 7. (przy 250 tys. cykli obciążenia), czyli niemal 10-krotnie, a w etapie 9. wynosiła już 2,63‰. Amplituda odkształceń dolnej krawędzi betonu wzrosła z 1,53‰ do 3,44‰, natomiast amplituda odkształceń górnej krawędzi betonu pozostawała w przybliżeniu na stałym poziomie przez całe badanie (od 0,22‰ do 0,27‰). W tab. 2 przedstawiono porównanie przemieszczeń pionowych wyznaczonych w 1/2 i 1/6 rozpiętości łuku oraz przemieszczeń poziomych w L/6 dla modeli LS1 i LG2. Podano także stosunki przemieszczeń zmierzonych dla modelu LG2 do wartości dla modelu LS1. Różnice

w zachowaniu elementów LS1 i LG2 pod obciążeniem zmęczeniowym były widoczne od początku badań. Amplituda przemieszczeń pionowych w L/2 na początku etapu 3. dla elementu LG2 wynosiła 2,91 mm i była ponad dwukrotnie wyższa niż w przypadku LS1 (1,29 mm). Różnica pogłębiała się wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia i w etapie 7. amplituda przemieszczeń modelu LG2 była już 3,5 razy większa niż w przypadku LS1 (4,57 mm dla LG2 i 1,32 mm dla LS1). Jeszcze większe różnice były widoczne w 1/6 rozpiętości. W modelu LG2 przemieszczenia pionowe były od 6 do 12 razy większe, a przemieszczenia poziome od 3 do ponad 5 razy większe niż w przypadku LS1.

Przyczyną dużo mniejszej sztywności modelu LG2 jest różnica modułów sprężystości prętów GFRP i zbrojenia stalowego oraz obu użytych betonów. Moduł sprężystości prętów GFRP wynosi 50 GPa i jest 4-krotnie mniejszy niż moduł sprężystości stali zbrojeniowej. Moduł sprężystości betonu lekkiego zastosowanego w modelu LG2 wynosi na podstawie badań 34,6 GPa i jest ok. 15% niższy niż moduł sprężystości betonu zwykłego zastosowanego w modelu LS1 (41 GPa wg [5]).

Podobne zależności jak w przypadku przemieszczeń były obserwowane dla odkształceń prętów i betonu. W przypadku modelu LS1 wartości amplitud odkształceń prętów zbrojeniowych i betonu w większości przypadków ustabilizowały się w 7. etapie obciążenia i pozostawały niezmiennie do końca badania zmęczeniowego. Wartości pomierzonych w etapie 14. odkształceń modelu LS1 były w na podobnym poziomie jak w etapie 2. – przed obciążeniem zmęczeniowym [1]. W tab. 3 zestawiono porównanie amplitud odkształceń górnych i dolnych prętów zbrojeniowych oraz górnej i dolnej krawędzi betonu w L/2 dla modeli LS1 i LG2. Amplitudy odkształceń modelu LG2 były kilkukrotnie większe niż w przypadku modeli LS1. Przykładowo amplituda odkształceń prętów dolnych w L/2 wynosiła na początku badania 0,14‰ dla LS1 i 1,71‰ dla LG2 (12-krotnie więcej), a amplituda odkształceń na górnej krawędzi betonu była równa 0,12‰ dla LS1 i 0,24‰ dla LG2 (2-krotnie więcej).

Zniszczenie elementu LG2 nastąpiło w 10. etapie badań podczas obciążenia statycznego. W wyniku przykładowania obciążeń zmęczeniowych w kolejnych cyklach element ulegał stopniowej degradacji i po ok. 390 tys. cykli nastąpiło pęknięcie w 1/6 rozpiętości łuku. Ze względu na ustawione ograniczenia przemieszczeń program sterujący obciążeniem zmęczeniowym został zatrzymany. Gdyby nie ten fakt, element uległby zniszczeniu podczas badania zmęczeniowego. Zatrzymanie programu pozwo-



Rys. 6. Przebieg zniszczenia modelu LG2: a) inicjacja pęknięcia w L/2, b) inicjacja pęknięcia w L/6, c) rozwój pęknięć pod obciążeniem, d) zniszczenie elementu

liło na poddanie elementu badaniom statycznym (etap 10.) i zniszczenie go podczas tych badań. Jednakże w etapie 10. nie uzyskano już wartości siły powyżej 120 kN (górny poziom obciążenia zmęczeniowego). Nośność elementu LG2 została wyczerpana na etapie badań zmęczeniowych. W etapie 10a, przy sterowaniu obciążeniem, uzyskano maksymalną wartość obciążenia równą 47,7 kN. W etapie 10. łuk pracował z dwoma przegubami, które utworzyły się w 1/2 i 1/6 rozpiętości w wyniku obciążeń zmęczeniowych (rys. 6). W miarę wzrostu przemieszczenia siłownika pęknięcia stopniowo się powiększały. Element na tym etapie wykazywał dużą podatność, przez co niemożliwe było jego zniszczenie, ponieważ wyczerpano zakres przemieszczenia możliwego do wygenerowania przez siłownik (etap 10b). W etapie 10b uzyskano maksymalną siłę równą 37,7 kN. Po odciążeniu i wstawieniu elementu dystansowego pomiędzy belkę trawersową a siłownik łuk obciążono do zniszczenia (etap 10c), uzyskując maksymalne obciążenie równe 11,3 kN. Zniszczenie nastąpiło poprzez złamanie łuku jednocześnie w dwóch miejscach, w których rozwijały się pęknięcia: w 1/2 i 1/6 rozpiętości.

Wnioski

Model LG2 poddano obciążeniom zmęczeniowym w zakresie od 12 do 120 kN z częstotliwością 1,5 Hz, która następnie była stopniowo zmniejszana do 0,5 Hz. W trakcie badań zmęczeniowych element ulegał stopniowej degradacji. Wzrost wartości przemieszczeń i odkształceń w kolejnych cyklach obciążenia świadczył o stopniowym

zmniejszaniu sztywności. Degradacja elementu postępowała od pierwszego etapu badań zmęczeniowych. Już w etapie 2. obciążenia (do 120 kN przed badaniem zmęczeniowym) w środku rozpiętości łuku ukształtowała się pionowa rysa, która sięgała niemal górnej krawędzi przekroju, a w górnych prętach zbrojeniowych w tym przekroju zarejestrowano rozciąganie. W kolejnych etapach obciążenia rysa propagowała, a jej maksymalna szerokość powiększała się. Wraz z propagacją rysy następował wzrost wartości odkształceń rozciągających w górnych prętach zbrojeniowych w L/2. Propagacja rysy w środku rozpiętości doprowadziła po ok. 290 tys. cyklach obciążenia do pojawienia się pęknięcia w tym przekroju. Nastąpił wówczas znaczący spadek sztywności elementu i wzrost amplitudy przemieszczeń i odkształceń. Pęknięcie spowodowało utworzenie przegubu w środku rozpiętości łuku. W takim układzie element został poddany jeszcze 100 tys. cyklom obciążenia i po ok. 390 tys. cyklach pojawiło się kolejne pęknięcie w 1/6 rozpiętości łuku. Doprowadziło to w konsekwencji do zniszczenia elementu. Zniszczenie elementu należy utożsamiać z wyczerpaniem jego wytrzymałości zmęczeniowej (element zniszczono w trakcie badań statycznych w etapie 10., jednak nie osiągnięto już siły powyżej 120 kN). Po pojawieniu się pęknięcia w L/6 element utracił nośność i zdolność do przenoszenia obciążeń w analizowanym zakresie. Na etapie planowania badań określono górny poziom obciążenia zmęczeniowego jako 120 kN. Jest to wartość odpowiadająca w przybliżeniu wyężeniu konstrukcji w kluczu pod charakterystycznym obciążeniem dla obiektu ▶

Etap	Liczba cykli	Przemieszczenie tłoka siłownika			Przemieszczenie pionowe w L/2			Przemieszczenie pionowe w L/6			Przemieszczenie poziome w L/6		
		LS1	LG2	LG2/LS1	LS1	LG2	LG2/LS1	LS1	LG2	LG2/LS1	LS1	LG2	LG2/LS1
		[–] × tys. [mm]	[mm]	[–]	[mm]	[mm]	[–]	[mm]	[mm]	[–]	[mm]	[mm]	[–]
3.	0	1,91	3,65	1,9	1,29	2,91	2,3	0,15	0,88	5,8	0,29	0,88	3,0
5.	100	1,95	4,37	2,2	1,32	3,65	2,8	0,16	1,50	9,6	0,31	1,33	4,3
7.	250	1,91	5,21	2,7	1,32	4,57	3,5	0,18	2,13	11,8	0,31	1,75	5,6

Tab. 2. Porównanie amplitud przemieszczeń modeli LS1 i LG2 w kolejnych etapach obciążeń zmęczeniowych

Etap	Liczba cykli	Odształcenie górnych prętów zbrojeniowych w L/2			Odształcenie dolnych prętów zbrojeniowych w L/2			Odształcenie górnej krawędzi betonu w L/2			Odształcenie dolnej krawędzi betonu w L/2		
		LS1	LG2	LG2/LS1	LS1	LG2	LG2/LS1	LS1	LG2	LG2/LS1	LS1	LG2	LG2/LS1
		[–] × tys.	[‰]	[‰]	[–]	[‰]	[‰]	[–]	[‰]	[‰]	[–]	[‰]	[‰]
3.	0	0,06	0,05	0,8	0,14	1,71	12,2	0,12	0,24	2,1	0,23	1,53	6,6
5.	100	0,06	0,10	1,8	0,17	1,90	10,9	0,12	0,27	2,2	0,28	2,00	7,2
7.	250	0,06	0,47	8,5	0,18	–	–	0,12	0,22	1,8	0,29	3,44	11,9

Tab. 3. Porównanie amplitud odształceń betonu i prętów zbrojeniowych w modelach LS1 i LG2 w kolejnych etapach obciążeń zmęczeniowych

Piśmiennictwo

1. Stryzyk B., Michalak E., Piątek B.: *Innowacyjne prefabrykаты łukowe o podwyższonej trwałości przeznaczone dla budownictwa komunikacyjnego. Cz. I. Badania porównawcze prefabrykatu żelbetowego „Mosty”, 2/2020, s. 39-42.*
2. Stryzyk B., Michalak E., Piątek B.: *Innowacyjne prefabrykаты łukowe o podwyższonej trwałości przeznaczone dla budownictwa komunikacyjnego. Cz. II. Badania statyczne prefabrykatu z betonu lekkiego z prętami kompozytowymi „Mosty”, 3/2020, s. 36-40.*
3. PN-91/S-10042 *Obiekty mostowe – Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Projektowanie.*
4. PN-85/S-10030 *Obiekty mostowe – Obciążenia.*
5. PN-EN 1992-1-1 *Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły budynków.*
6. PN-EN 1991-2 *Oddziaływania na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów.*
7. ACI 440.1R-15 *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars.*

► tów drogowych klasy A wg normy PN-85/S-10030 [4]. Wartość 120 kN odpowiada również obciążeniu przypadającemu na dwa koła modelu obciążenia zmęczeniowego FLM3 wg normy PN-EN 1991-2 [6]. Liczbę cykli obciążenia zmęczeniowego określono na 2 mln.

Element nie przetrwał pełnej próby zmęczeniowej i uległ zniszczeniu po ok. 390 tys. cykli obciążenia. W związku z tym nie spełnił zdefiniowanego powyżej kryterium dla obciążenia zmęczeniowego. Uzyskana trwałość zmęczeniowa przy zdefiniowanym obciążeniu wyniosła 390 tys. cykli. W krajowych i zagranicznych normach brak jest szczegółowych wymagań dotyczących konstrukcji z betonu lekkiego ze zbrojeniem kompozytowym poddawanych obciążeniom zmęczeniowym. Amerykańska norma ACI 440 [7] podaje jedynie ograniczenie naprężeń w prętach FRP przy projektowaniu ze względu na zmęczenie. Ten limit dotyczy zniszczenia prętów kompozytowych spowodowanego zjawiskiem „*creep rupture*” przy długotrwałym obciążeniu. W analizowanym przypadku zniszczenie elementu były spowodowane degradacją betonu.

Należy jednak zaznaczyć, że schemat obciążenia badawczego (pojedyncza siła skupiona) różnił się i był mniej korzystny od schematu obciążeń, jakim w rzeczywistości poddawane są tego typu konstrukcje (dominujące obciążenie równomiernie rozłożone). W przypadku obciążeń równomiernych występujących w rzeczywistości elementy łukowe są dodatkowo stabilizowane przez obciążenie gruntem i mają ograniczoną swobodę odształceń na długości przęsła. W przypadku obciążenia badawczego elementy miały nieograniczoną możliwość odształceń na długości przęsła pomiędzy podporami a punktem przyłożenia obciążenia.

Odwzorowanie rzeczywistych obciążeń w laboratorium było jednak w tym przypadku niemożliwe. W celu ewentualnej dalszej weryfikacji zachowania tego typu konstrukcji pod obciążeniem dynamicznym wskazane byłyby kolejne badania doświadczalne, w tym polowe – pod działaniem rzeczywistego układu obciążenia.

Przyczyn ograniczonej trwałości zmęczeniowej elementu LG2 (390 tys. cykli przy przyjętym poziomie obciążenia) należy upatrywać w:

- niższej klasie wytrzymałości w badanym elemencie wykonanym z betonu lekkiego (LC60/66) niż z betonu zwykłego (C70/85); klasy wytrzymałości betonu zostały określone na podstawie badania próbek rdzeniowych pobranych z prefabrykatów po zakończeniu badań,
- odmiennej strukturze betonu lekkiego (mniejsza gęstość; lekkie, porowate kruszywo),

Etap	Wartość obciążenia F [kN]	Maksymalna szerokość rozwarcia rysy [mm]	
		Przekrój w L/2	Przekrój w L/6
1.	40	0,1	0,1
2.	120	0,5	0,1
4.	120	0,6	0,15
6.	120	1,0	0,25
8.	120	8,0	0,5
10.	0	8,0	7,0

Tab. 4. Maksymalne rozwarcie rys w kolejnych etapach badań elementu LG2

- mniejszej masie elementu z betonu lekkiego (mniejszy udział ciężaru własnego w układzie obciążeń, większa podatność na oddziaływania dynamiczne),
- większej odształcalności zbrojenia kompozytowego (niższy moduł sprężystości), co powoduje powstawanie rys o większej szerokości rozwarcia i szybszą degradację elementu,
- niższej przyczepności zbrojenia kompozytowego do betonu w stosunku do zbrojenia stalowego,
- zbyt małym stopniu zbrojenia na ścinanie – co zainicjowało i ostatecznie doprowadziło do zniszczenia.

Prefabrykаты łukowe z betonu lekkiego ze zbrojeniem kompozytowym mogą być stosowane w budownictwie komunikacyjnym jako ustroje nośne konstrukcji. Na etapie projektowania należy uwzględnić sprawdzenie trwałości zmęczeniowej konstrukcji. Poprawę nośności i wytrzymałości zmęczeniowej można uzyskać przez zwiększenie przekroju zbrojenia na ścinanie oraz odpowiedni dobór mieszanki betonowej. Jednocześnie, mając na uwadze pozytywne doświadczenia zagraniczne w stosowaniu betonów lekkich w obiektach obciążanych dynamicznie, można stwierdzić, że potencjał tkwi również w tym materiale, ale wskazane byłyby dalsze badania zmierzające do wyprodukowania w warunkach polskich betonów lekkich o ulepszonych właściwościach. □

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”.