

Nośność belek żelbetowych obciążanych cyklicznie

Barbara Goszczyńska¹, Wiesław Trąmpczyński², Magdalena Bacharz³,
Kamil Bacharz⁴

^{1,2,3,4} Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Betonowych, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, e-mail: ¹bgoszczyńska@tu.kielce.pl, ²wtramp@tu.kielce.pl, ³mbacharz@tu.kielce.pl, ⁴kbacharz@tu.kielce.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wpływ obciążeń zmiennych cyklicznie na nośność belek żelbetowych (maksymalną siłę obciążenia w danym schemacie statycznym) z uwzględnieniem statycznej wyznaczalności elementów. Badania przeprowadzono na 28. belkach żelbetowych, w tym 12 dwuprzęsłowych - statycznie niewyznaczalnych i 16. jednoprzęsłowych swobodnie podpartych, różniących się konstrukcją i stopniem zbrojenia podłużnego (dwa stopnie zbrojenia) oraz programami obciążania (trzy programy), w tym obciążenie, modelujące przejazd pojazdu, przyjęte jako sinusoidalnie cyklicznie zmienne po 100 tys. cykli realizowanych dla trzech zakresów wartości sił obciążających. Na podstawie analizy porównawczej zarejestrowanych sił niszczących i nośności teoretycznej, można stwierdzić, że obciążenie zmienne cyklicznie już po 300 tys. cykli powoduje zniszczenie belek statycznie niewyznaczalnych na poziomie ponad 20% niższym niż nośność teoretyczna, natomiast nie wpływa na zmniejszenie nośności belek statycznie wyznaczalnych. Zaobserwowana zależność powinna być uwzględniona przy opracowaniu metody oceny stanu technicznego konstrukcji żelbetowej, a szczególnie metody oceny jej trwałości.

Słowa kluczowe: żelbet, belki, obciążenie zmienne, nośność, zmęczenie

1. Wprowadzenie

Rozwój metod projektowania nowoczesnych konstrukcji żelbetowych umożliwia tworzenie obiektów o elementach coraz bardziej wyężonych, zaprojektowanych w sposób zmniejszający zużycie materiałów i zanieczyszczenie środowiska. Jest to możliwe zarówno dzięki stosowaniu coraz bardziej wytrzymałych materiałów: betonu i stali zbrojeniowej, jak i coraz doskonalszym metodom obliczeniowym pozwalającym na uwzględnienie wielu czynników, w tym rodzaju obciążenia. Dlatego też, prowadzone są prace zarówno określające własności materiałów, jak i oceniające wpływ obciążenia na te własności. Jednym z istotnych czynników wymagających uwzględnienia jest rodzaj obciążenia, w tym wpływ obciążeń cyklicznych na zachowanie się elementów konstrukcji (np. związanych z ruchem pojazdów po moście).

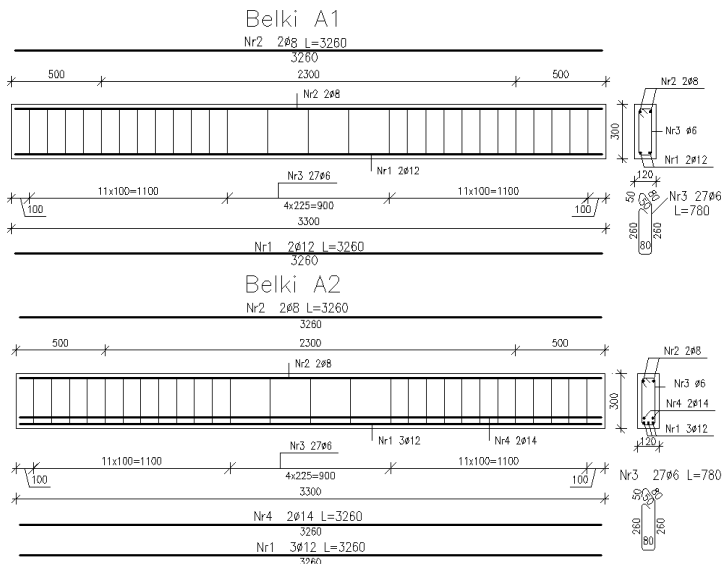
W ramach programu badawczego dotyczącego opracowania metody diagnozowania konstrukcji żelbetowych opartej na analizie emisji akustycznej przeprowadzono badania laboratoryjne mające między innymi na celu analizę wpływu schematu statycznego i obciążeń zmiennych cyklicznie na nośność belek żelbetowych. Badania obejmowały 12 dwuprzęsłowych belek żelbetowych o wymiarach przekroju 120x300mm oraz długości w osiach przęseł 2x3000mm, różniących się konstrukcją zbrojenia oraz programem obciążania. Porównawczo do analizy włączono wyniki wykonanych badań 16 belek żelbetowych jednoprzęsłowych o wymiarach przekroju 120x300mm i długości w osiach

podpór 3000mm, swobodnie podpartych, różniących się stopniem i konstrukcją zbrojenia podłużnego, a także programem obciążania. W badaniach belek dwuprzęsłowych, zastosowano dwa sposoby realizacji obciążenia oraz dwa programy obciążeń zmiennych: obciążenia z odciążeniami oraz obciążenie zmienne cyklicznie. Belki swobodnie podparte obciążane były dwoma siłami skupionymi równomiernie rozmieszczonymi na długości (w odległości 1m od podpory), z zastosowaniem trzech programów obciążenia: monotonicznego do zniszczenia, zmiennego z odciążeniami oraz cyklicznego. Obciążenie zmienne cykliczne przyjęto jako modelujące ruch pojazdów, zarówno dla belek statycznie wyznaczalnych jak i niewyznaczalnych. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że obciążenia zmienne cyklicznie powodują w przypadku belek dwuprzęsłowych wyraźne zmniejszenie nośności (wartości siły niszczącej), nawet o ponad 20%, czego nie zarejestrowano przy obciążeniach zmiennych z odciążeniami, a także w przypadku belek jednoprzęsłowych. Biorąc pod uwagę, że w rzeczywistych konstrukcjach elementy pracują głównie jako statycznie niewyznaczalne, przy opracowaniu metody diagnozowania konstrukcji żelbetowych konieczne jest przeprowadzenie jej weryfikacji na elementach statycznie niewyznaczalnych, ze szczególnym uwzględnieniem obciążeń zmiennych cyklicznie.

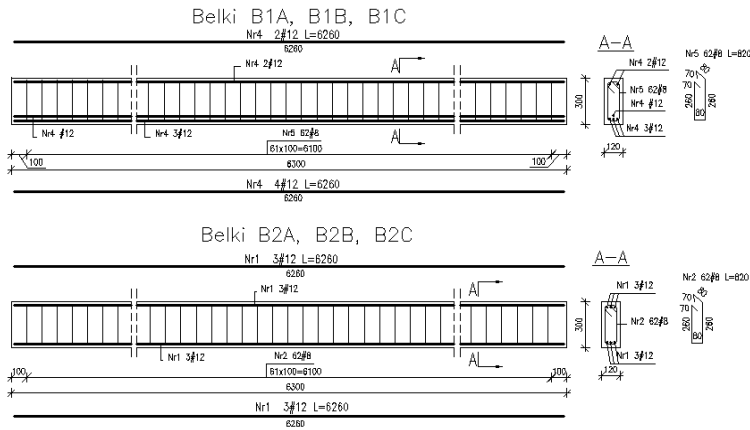
2. Opis przeprowadzonych badań

2.1. Elementy badawcze

Badania przeprowadzono na belkach żelbetowych, z betonu projektowanej klasy C40/50 oraz stali BS500, wykonanych w zakładzie prefabrykacji. W celu określenia rzeczywistej wytrzymałości materiałów, z których wykonane zostały elementy badawcze, dodatkowo zostały przygotowane próbki betonowe o wymiarach: kostki 150x150x150mm i walce 150x300 mm, a ponadto pobrano wycinki prętów ze stali zbrojeniowej. Konstrukcję zbrojenia belek jednoprzęsłowych o dwóch stopniach zbrojenia podłużnego przedstawiono na rys. 1, natomiast dwa sposoby zbrojenia belek dwuprzęsłowych B1 i B2 przedstawiono na rys. 2.

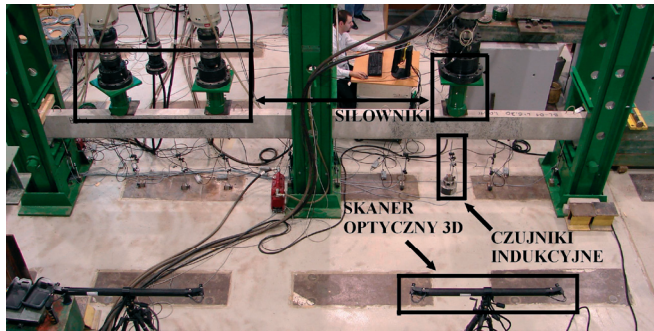


Rys. 1. Konstrukcja zbrojenia belek jednoprzęsłowych A1 i A2



Rys. 2. Konstrukcja zbrojenia belek dwuprzęsłowych B1 i B2

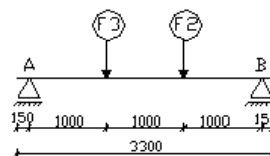
2.2. Stanowisko badawcze



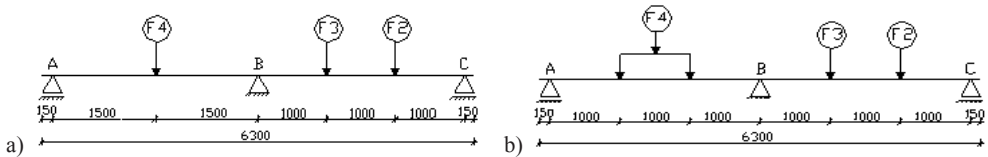
Rys. 3. Stanowisko badawcze

Badania prowadzono na stanowisku (Rys.3) umożliwiającym badanie belek o długości maksymalnej do 20 m, z możliwością zadawania obciążenia przez 5 niezależnie sterowanych siłowników, realizujących zaprogramowany, indywidualny, program obciążeń. Aparatura pomiarowa [1] może być „zsynchronizowana” ze sobą wspólnym impulsem i zapisem realizacji (zaprogramowanego dzięki zastosowaniu sterownika i siłowników) obciążenia w funkcji czasu rejestrowanego w sekundach. Odkształcenia belki mogą być porównawczo mierzone z wykorzystaniem czujników indukcyjnych (max. 60 torów pomiarowych) i skanera optycznego 3D.

W prezentowanych badaniach belki podparte były na łożyskach obrotowo-ślizgowych i obciążane dwoma siłownikami w przypadku belek jednoprzęsłowych i trzema w przypadku belek dwuprzęsłowych, zgodnie ze schematami pokazanymi na rysunkach odpowiednio 4, 5 a i b.



Rys. 4. Schemat statyczny belek żelbetowych jednoprzęsłowych

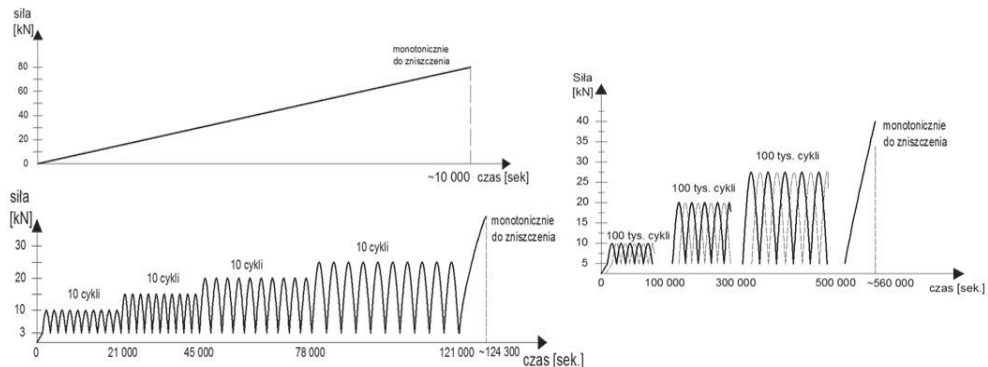


Rys. 5. Schemat statyczny belek żelbetowych a) obciążenia z odciążeniami b) obciążenia cykliczne

2.3. Programy obciążania

2.3.1. Belki jednoprzęsłowe – statycznie wyznaczalne

Belki jednoprzęsłowe obciążano dwoma siłownikami (F3 i F2) ze stałą prędkością przyrostu siły równa 0,4 kN/min, realizując trzy programy obciążania przedstawione schematycznie na rys. 6. Belki o symbolach A1M, A2M, C2M, D2M obciążano monotonicznie do zniszczenia, belki A1O, A2O – z odciążeniami po 10 cyklach na czterech poziomach obciążania, a następnie monotonicznie do zniszczenia, natomiast belki A1C, A2C – poddano obciążeniu sinusoidalnie, cyklicznie zmiennemu na trzech poziomach obciążania, po 100 tys. cykli, po których także nastąpił monotoniczny przyrost sił, aż do zniszczenia.



Rys.6. Przebieg obciążania dla belek jednoprzęsłowych

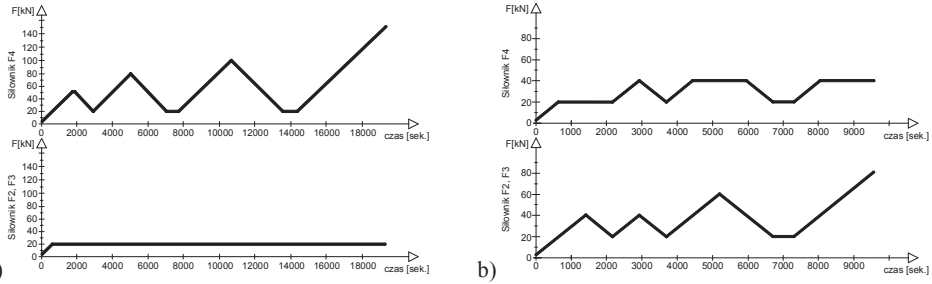
2.3.2. Belki dwuprzęsłowe – statycznie niewyznaczalne

W przypadku belek dwuprzęsłowych realizowano trzy programy obciążania zmiennego A, B i C; programy A i B to obciążania zmienne z odciążeniami na trzech poziomach obciążania i na koniec obciążone monotonicznie do zniszczenia z prędkością 1,6 kN/min, przy czym obciążenie:

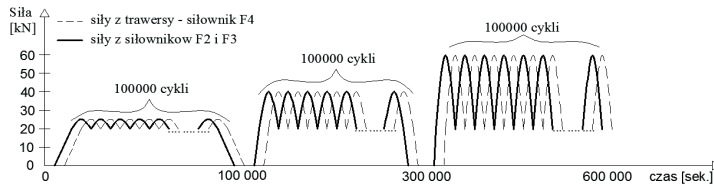
A – powodujące niszczenie przęsła obciążonego jedną siłą skupioną oznaczoną **F4**, a drugie przęsło obciążone dwoma, równej wartości siłami **F2** i **F3** (rys. 7a),

B – powodujące niszczenie przęsła obciążonego dwoma siłami skupionymi **F2** i **F3**; drugie przęsło obciążone stałą siłą skupioną **F4** (rys. 7b), natomiast trzeci program obciążania:

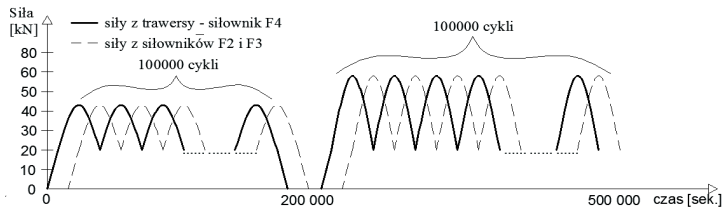
C – obciążenie cykliczne, sinusoidalne, symulujące przejazd samochodu realizowane przez dwie siły na jednym i drugim przęsle, schematycznie przedstawione dla belek o konstrukcji zbrojenia B1 na rys. 8, a dla belek o konstrukcji zbrojenia B2 na rys. 9.



Rys. 7. Przebieg obciążenia dla 8 belek: a) B1A i B2A (1 i 2) i b) B1B i B2B (1 i 2).



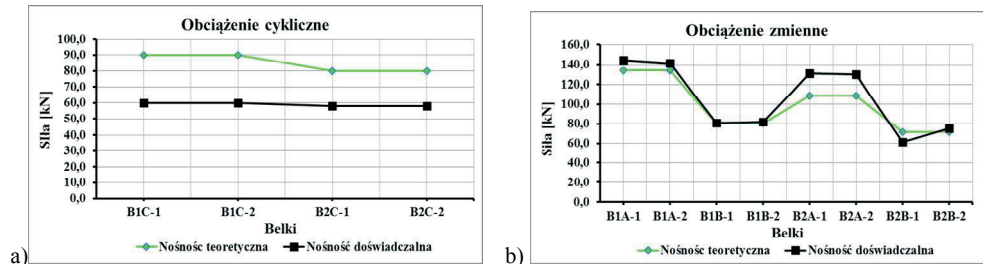
Rys. 8. Przebieg obciążenia dla belek o konstrukcji B1



Rys. 9. Przebieg obciążenia dla belek o konstrukcji B2

3. Wyniki badań

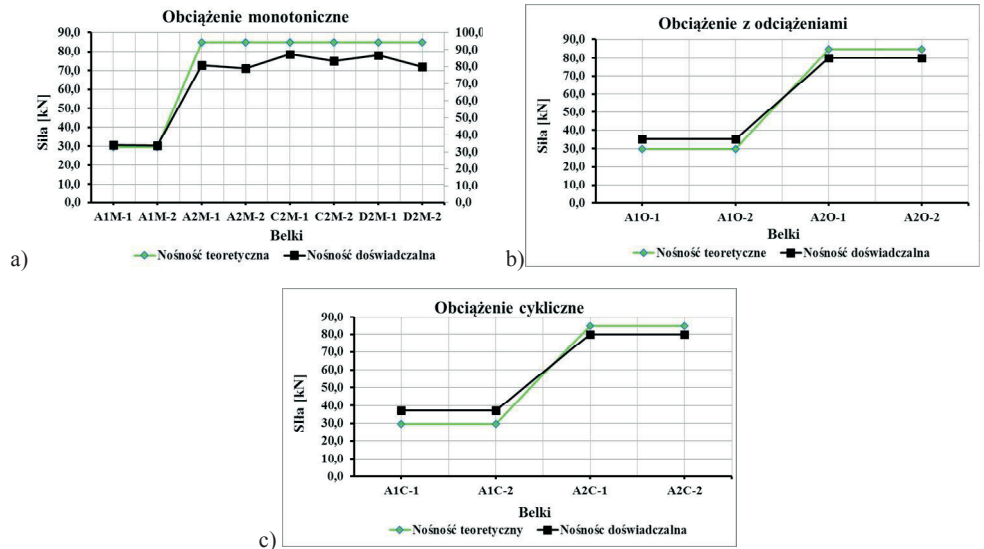
Siły niszczące (nośność) badanych belek obliczono na podstawie oszacowanej nośności na zginanie przekroju żelbetowego metodą uproszczoną, przy czym wytrzymałość betonu i stali przyjmowano zgodnie z uzyskanymi wynikami z badań towarzyszących na pobranych podczas betonowania próbkach oraz wycinkach prętów zbrojeniowych. Siły niszczące dla belek statycznie niewyznaczalnych wyznaczono metodą przegubów plastycznych. Porównanie otrzymanych wyników nośności teoretycznych i doświadczalnych dla belek jednoprzęsłowych przedstawiono w Tabeli 1 oraz na rys. 11a) belki obciążane monotonicznie, na rys. 11b) belki obciążane z odciążeniami i 11c) belki obciążane cyklicznie, natomiast dla belek dwuprzęsłowych w Tabeli 2 i na rys. 10a) belki obciążane cyklicznie oraz rys. 10b) belki obciążane z odciążeniami.



Rys. 10. Wykresy porównawcze teoretycznej i rzeczywistej siły niszczącej dla belek dwuprzęsłowych

Tabela 1. Zestawienie nośności badanych belek żelbetonowych jednoprzęsłowych

Symbol belki	Nośność teoretyczna	Nośność doświadczalna	Różnica nośności	Stosunek procentowy nośności
	[kN]	[kN]	[kN]	
OBCIĄŻENIE MONOTONICZNE				
A1M-1	29,6	34,0	4,4	114,8%
A1M-2	29,6	33,8	4,2	114,2%
A2M-1	84,8	81,0	-3,8	95,5%
A2M-2	84,8	79,0	-5,8	93,2%
C2M-1	84,8	87,2	2,4	102,9%
C2M-2	84,8	83,2	-1,6	98,1%
D2M-1	84,8	86,6	1,8	102,1%
D2M-2	84,8	80,1	-4,7	94,5%
ŚREDNIA			-0,4	101,9%
OBCIĄŻENIE Z ODCIĄŻENIAMI				
A1O-1	29,6	35,0	5,4	118,2%
A1O-2	29,6	35,0	5,4	118,2%
A2O-1	84,8	80,0	-4,8	94,3%
A2O-2	84,8	80,0	-4,8	94,3%
ŚREDNIA			0,3	106,3%
OBCIĄŻENIE CYKLICZNE				
A1C-1	29,6	37,0	7,4	125,0%
A1C-2	29,6	37,0	7,4	125,0%
A2C-1	84,8	80,0	-4,8	94,3%
A2C-2	84,8	80,0	-4,8	94,3%
ŚREDNIA			1,3	109,7%



Rys. 11. Wykresy porównawcze obliczeniowej i doświadczalnej siły niszczącej dla belek jednoprzęsłowych

Tabela 2. Zestawienie nośności badanych belek żelbetowych dwuprzęsłowych

Symbol belki	Nośność teoretyczna	Nośność doświadczalna	Różnica nośności	Stosunek procentowy nośności
	[kN]	[kN]	[kN]	
OBCIĄŻENIE ZMIENNE (z odciążeniami)				
B1A-1	133,9	144,0	10,1	107,5%
B1A-2	133,9	141,1	7,2	105,3%
B1B-1	80,4	81,0	0,6	100,7%
B1B-2	80,4	82,0	1,6	101,9%
B2A-1	108,7	131,0	22,3	120,5%
B2A-2	108,7	129,9	21,2	119,5%
B2B-1	71,8	61,6	-10,2	85,8%
B2B-2	71,8	75,2	3,4	104,8%
	ŚREDNIA		7,0	105,8%
OBCIĄŻENIE CYKLICZNE				
B1C-1	89,8	60	-29,8	66,8%
B1C-2	89,8	60	-29,8	66,8%
B2C-1	80,0	58	-22,0	72,5%
B2C-2	80,0	58	-22,0	72,5%
	ŚREDNIA		-25,9	69,6%

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy otrzymanych wyników potwierdzono, że przewidywanie nośności elementów żelbetowych poddanych obciążeniom niskocyklicznym czy zmęczeniowym jest trudne, zwłaszcza dla belek statycznie niewyznaczalnych, gdyż zależy ono od współdziałania dwóch różnych materiałów beton-stal inaczej reagujących na procesy zmęczeniowe [2],[3].

Proces zmęczeniowy rozpatruje się, gdy element poddany jest przynajmniej 10^6 cykli obciążenia. W przeprowadzonych badaniach belek żelbetowych poddanych obciążeniom zmiennym cyklicznie, łączna liczba cykli wynosiła maksymalnie $3 \cdot 10^5$, stąd nie powinniśmy mieć tutaj do czynienia z typowymi efektami zmęczeniowymi, a jednak dla belek statycznie niewyznaczalnych takie efekty się pojawiły. Efekt zmęczeniowy [4] objawiający się utratą przyczepności na granicy stal-beton w strefie rozciąganej wraz z wyczerpaniem nośności betonu w strefie ściskanej wystąpił podczas prowadzonych badań belek dwuprzęsłowych, przy zakresie cyklu do ok. 0,7 teoretycznej siły niszczącej, już po 51605 cyklach.

Ogólnie na podstawie przeprowadzonych badań można wnioskować, że:

- nośność teoretyczna i doświadczalna w przypadku belek statycznie wyznaczalnych obciążanych monotonicznie, z odciążeniami oraz cyklicznie, a także belek statycznie niewyznaczalnych obciążonych obciążeniem zmiennym (z odciążeniami) są porównywalne, a niejednokrotnie nośność doświadczalna jest większa niż teoretyczna,
- nośność doświadczalna belek dwuprzęsłowych obciążanych cyklicznie jest mniejsza od nośności teoretycznej,
- zaobserwowana zależność powinna być uwzględniona przy opracowaniu metody oceny stanu technicznego konstrukcji żelbetowej opartej na analizie porównawczej emisji akustycznej [5], a szczególnie metody oceny trwałości obiektu.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”. Pakiet Tematyczny 6 - „Innowacyjne metody tworzenia i wykorzystywania komputerowej reprezentacji wiedzy w inżynierii lądowej, kształtowanie infrastruktury transportowej z uwzględnieniem strategii zrównoważonego rozwoju”, Temat T.6.3.

Literatura

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* 3/2014, 156-159

- 1 Manfredi G., Pecce M. Low cycle fatigue of RC beams in NSC and HSC. *Engineering Structures*, Vol. 19, No 3, (1997) 217-223.
- 2 Godycki-Ćwirko T. *Mechanika Betonu*, Arkady, Warszawa 1982.
- 3 Dyduch K., Dyduch M., *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone komentarz naukowy do PN-B-03264:2002 Tom 2 -Rozdział 17: Stan graniczny zmęczenia konstrukcji żelbetowych i sprężonych*, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2005, 179-192.
- 4 Goszczyńska B., Świt G., Trąmpczyński W., Monitoring of active destructive processes as a diagnostics tool for the structure technical state evaluation, *Biulletin of the Polish Academy of sciences, Technical Sciences*, Vol. 61, No. 1, 2013

A load capacity of cyclic loaded reinforced concrete beams

**Barbara Goszczyńska¹, Wiesław Trąmpczyński², Magdalena Bacharz³,
Kamil Bacharz⁴**

^{1,2,3,4} *Department of Materials Strength and Concrete Structures, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology, e-mail: ¹bgoszczyńska@tu.kielce.pl, ²wtramp@tu.kielce.pl, ³mbacharz@tu.kielce.pl, ⁴kbacharz@tu.kielce.pl*

Abstract: In this paper, an effect of cyclic and variable loads on the capacity of reinforced concrete beams is investigated. The study was conducted on 28 reinforced concrete beams including 12 two-span beams - statically indeterminate and 16 simply supported single-span beams. Those beams were differentiated by the structure and degree of longitudinal reinforcement (two degrees of reinforcement) and load applied programs (three programs types) including the monotonic load, load with unloadings and cyclic load. The last one was taken as a sinusoidal cyclic load with 100,000 cycles carried out for three ranges of loading forces. On the basis of a comparative analysis it can be concluded that in the case of the two-span beams, the imposition of 252,000 load cycles results in 20% drop of the beam capacity. Such an effect is not observed for load with unloadings and in the case of simply supported beams.

Keywords: reinforced concrete beams, cyclic load, single-span and two-span beams capacity