

Lidia BUDA-OŻÓG
Politechnika Rzeszowska

ANALIZA PORÓWNAWCZA ZMIANY PARAMETRÓW MODALNYCH BELEK ŻELBETOWYCH O RÓŻNYCH POZIOMACH WYŁĘŻENIA NA PODSTAWIE BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH I NUMERYCZNYCH

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych i numerycznych, zmian częstotliwości drgań belek żelbetowych na skutek uszkodzenia. Badania eksperymentalne przeprowadzono na 12 belkach żelbetowych. Belki poddawano stopniowemu obciążeniu, aż do zniszczenia. W belkach tych mierzono odkształcenia i ugięcia podczas obciążania i po odciążeniu. Po każdym etapie obciążeń (w belkach odciążonych) w momencie stabilizacji mierzonych odkształceń i ugięć wyznaczano zmiany częstotliwości drgań badanych belek. Aby porównać otrzymane wyniki doświadczalne z numerycznymi, zbudowano model belki żelbetowej metodą elementów skończonych. Na belce tej wykonano symulację numeryczną procesów obciążania i odciążania belki, a następnie wyznaczenia parametrów dynamicznych.

1. Wprowadzenie

Ciągła ocena stanu technicznego konstrukcji inżynierskich o szczególnym znaczeniu, takich jak mosty, wszelkiego typu zbiorniki, platformy wiertnicze, obiekty użyteczności publicznej itp., jest bardzo istotna i stanowi temat wielu prac badawczych ostatnich lat [1÷2]. Szczególną rolę w tym procesie odgrywa rozwój globalnych, nieniszczących metod diagnozowania stanu konstrukcji. Metody globalne dostarczają ogólnych informacji o kondycji badanego obiektu, natomiast metody lokalne informują bardziej szczegółowo o wielkości i miejscu uszkodzenia. Do globalnych metod oceny stanu konstrukcji można zaliczyć metody dynamiczne oparte na analizie sygnałów czasowych lub parametrów dynamicznych opisujących przebieg rozchodzenia się fali sprężystej lub drgań konstrukcji.

Dynamiczne zachowania konstrukcji inżynierskich są badane za pomocą metod analitycznych lub doświadczalnych. Ze względu na wysokie koszty, pracochłonność, ewentualne trudności techniczne związane z wykonywaniem pomiarów doświadczalnych w niektórych warunkach istotne znaczenie ma możliwość symulacji procesów badanych analitycznie. Symulacje analityczne stają się

również niezbędne do odtworzenia parametrów stanu pierwotnego badanej konstrukcji. Jednym z takich parametrów wykorzystywanych podczas oceny stanu konstrukcji, na podstawie zmiany parametrów dynamicznych (modalnych), są wartości częstotliwości drgań elementu lub konstrukcji w stanie pierwotnym (niezarysowanym, nieuszkodzonym).

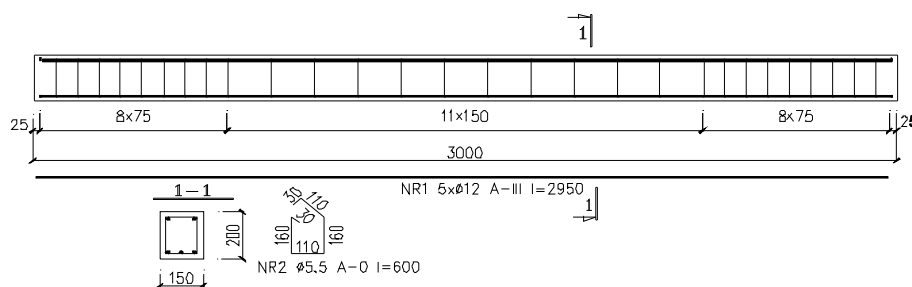
W niniejszym artykule, będącym wstępem do dalszych prac związanych z diagnostyką stanu konstrukcji na podstawie zmiany parametrów modalnych, przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych prowadzonych na belkach żelbetowych. Podjęto również próbę sprawdzenia zgodności modelu w zakresie statycznej i dynamicznej pracy elementu z rzeczywistymi wynikami otrzymanymi podczas badań eksperymentalnych. Uzyskanie zgodności modelu analitycznego z rzeczywistymi wynikami eksperymentu pozwoliłoby w przyszłości na diagnozowanie stanu konstrukcji na podstawie pomierzonych parametrów modalnych, bez uprzedniej znajomości stanu pierwotnego.

Badania eksperymentalne przeprowadzono na 12 belkach żelbetowych o takich samych wymiarach, zbrojeniu i klasie zastosowanego betonu. Belki poddawano stopniowemu obciążeniu, aż do zniszczenia. W belkach mierzono odkształcenia i ugięcia podczas obciążania i po odciążeniu. Dla poszczególnych etapów obciążeń w belkach odciążonych pomierzono zmiany częstotliwości drgań. Aby porównać otrzymane wyniki doświadczalne z numerycznymi, model belki żelbetowej zbudowano metodą elementów skończonych. Na belce tej wykonano symulację numeryczną procesów obciążania i odciążania belki, a następnie wyznaczenia parametrów modalnych.

2. Opis badań doświadczalnych

2.1. Obiekt badań

Obiektem badań były żelbetowe belki o wymiarach i sposobie zbrojenia przedstawionym na rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie i moduł sprężystości zastosowanego betonu określono zgodnie z normą [3] i szczegółowymi wytycznymi zawartymi w instrukcji [4], na kostkach betonowych 150 x 150 x 150 mm



Rys. 1. Wymiary i sposób zbrojenia belki żelbetowej

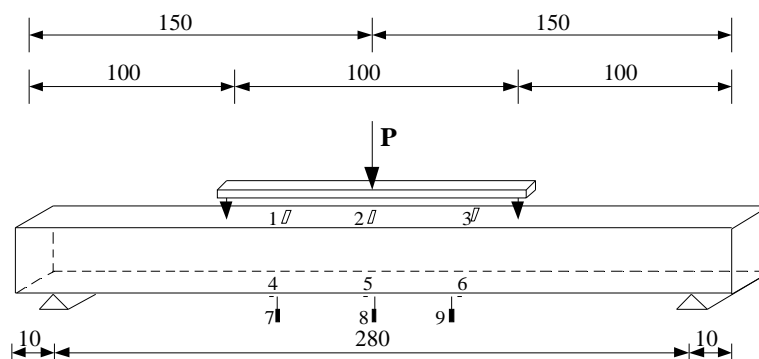
(próbki typu B). Otrzymaną średnią wytrzymałość betonu na ściskanie, średni moduł sprężystości oraz średnią gęstość objętościową betonu dla poszczególnych partii betonu zestawiono w tab. 1.

Tabela 1. Przyjęte oznaczenia belek, wyznaczona na podstawie badań średnia wytrzymałość na ściskanie f_{cm} , moduł sprężystości E_{cm} oraz gęstość objętościowa dla poszczególnych partii betonu ρ

Oznaczenie belki	Wytrzymałość f_{cm} , N/mm ²	Moduł E_{cm} , N/mm ²	Gęstość ρ , kg/m ³
B1, B2	30,3±1,7	brak pomiaru	2187±5
B3, B4	30,0±2,4	brak pomiaru	2197±22
B5, B6	31,0±0,7	brak pomiaru	2211±17
B9, B10	32,0±4,4	20200	2328±6
B7, B8	30,1±3,1	18600	2264±6
B11, B12	29,7±2,4	17900	2237±3

2.2. Badania statyczne

Badania statyczne przeprowadzono w hali laboratoryjnej Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej. Obciążenie belek realizowano za pomocą układu hydraulicznego typu SCHENCK. Ustawienie założonej siły obciążającej belkę odbywało się poprzez sterowanie przemieszczeniem. Podczas obciążania belki mierzono wartości ugięcia, odkształcenia włókien górnych i dolnych belki oraz ilość, wysokość i szerokość powstających rys. Ugięcia mierzono za pomocą indukcyjnych czujników przemieszczeń, a odkształcenia za pomocą papierowych tensometrów elektrooporowych o bazie pomiarowej 5 cm. Do rejestracji mierzonych odkształceń i ugięć wykorzystano zestaw pomiarowy HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK wraz z oprogramowaniem CATMAN 3.1. Szerokość rys mierzono papierowym szczelino-mierzem. Rozmieszczenie punktów podparcia belki, czujników pomiaru ugięć i odkształceń oraz sposób obciążania belek przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Rozmieszczenie czujników pomiaru ugięć i odkształceń oraz sposób obciążania belki; 1÷6 – tensometry elektrooporowe, 7÷9 – czujniki indukcyjne przemieszczeń

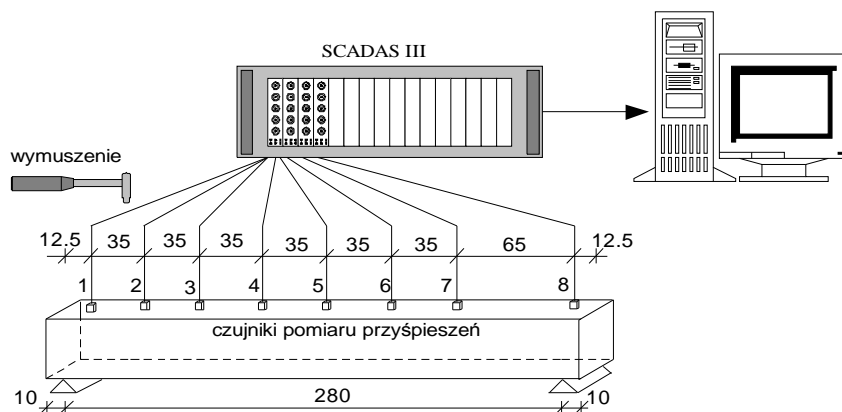
Badania statyczne prowadzono według następującego schematu:

- pięć cykli obciążenia i odciążenia belki siłą o wartości 1 kN i 1,7 kN (obciążenia te wykonano w celu ułożenia belki na podporach),
- obciążenie belki siłą o wartości 3 kN, stabilizacja mierzonych parametrów (15 min); po odciążeniu belki stabilizacja mierzonych ugięć i odkształceń (15 min); pomiar dynamiczny (wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych),
- kolejne etapy obciążania i odciążania belek żelbetowych (analogicznie jak wcześniej) dla sił o wartościach [kN]: 6, 12, 18, 24, 30, 40, 50, 55, 60, 65; zniszczenie oraz pomiar dynamiczny po każdym odciążeniu i stabilizacji ugięć belki.

2.3. Badania dynamiczne

Badania dynamiczne wykonano w odniesieniu do każdej z badanych belek, dla kolejnych etapów obciążania, po odciążeniu w chwili stabilizacji mierzonych ugięć i odkształceń. Prowadziły one do wyznaczenia widm częstotliwościowych, z których odczytano częstotliwości rezonansowe.

Wymuszenie w przeprowadzonym eksperymencie było wymuszeniem impulsowym. Do pomiaru odpowiedzi na zadane wymuszenie wykorzystano 8 czujników przyspieszeń PCB-353 oraz program do rejestracji i analizy danych pomiarowych CADA-X z wielokanałowym analizatorem LMS SCADAS III. Układ pomiarowy wykorzystany podczas badań doświadczalnych oraz rozmieszczenie czujników pomiaru przyspieszenia przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Układ pomiarowy do badań dynamicznych

Pomiary dynamiczne dla wszystkich etapów obciążania belki wykonano przy wymuszeniu impulsowym w trzech niezależnych punktach: na środku belki i w odległości 15 cm od każdej z podpór. O wyborze punktów wymuszenia zdecydowały przewidywane postacie drgań belek. W analizowanym paśmie charak-

terystyki częstotliwościowej wybrano trzy częstotliwości drgań rezonansowych w procesie stabilizacji. Polegał on na wyborze *a priori* częstotliwości rezonansowej w miejscu występowania maksimum charakterystyki oraz przeszukiwaniu zbioru zmierzonych charakterystyk w celu stwierdzenia, czy wybrany prążek widma powtarza się w pozostałych przebiegach. Prążki widma powtarzające się w większości zmierzonych charakterystyk jako maksimum uznano za częstotliwości własne [5]. Częstotliwości wyższe (ponad 500 Hz) były trudne do zidentyfikowania, dlatego w dalszych pracach pomiarowych ograniczono się do pasma pomiarowego 0÷500 Hz.

3. Opis modelu numerycznego belki żelbetowej

3.1. Modelowanie betonu

Do budowy modelu numerycznego analizowanych belek żelbetowych zastosowano metodę elementów skończonych, z wykorzystaniem programowania MES firmy ADINA R & D [6]. Model numeryczny belek żelbetowych rozważany był w trójwymiarowym stanie naprężeń [7]. Do budowy modelu użyto elementów prostopadłościennych i prętowych [8]. Warunki podparcia modelu numerycznego zrealizowano analogicznie do podparcia zastosowanego w przeprowadzonym eksperymencie, odbierając możliwość przesuwu w kierunku pionowym (na całej szerokości belki) wzdłuż linii odległych 10 cm od początku i końca belki. Dodatkowo w środku rozpiętości belki odebrano punktowo (w dwóch punktach) możliwość przemieszczeń w pozostałych kierunkach. Do rozwiązania zagadnień statycznych zastosowano procedurę obliczeniową, opartą na metodzie iteracyjnej Newtona [6].

W pracy pominięto szczegółowe modelowanie betonu, jego właściwości i prawa zachowania. Do modelu numerycznego wykorzystano model materiałowy „beton”, zaproponowany przez firmę ADINA R & D, w którym dla betonu zakłada się stan sprężysto-plastyczny ze wzmocnieniem w strefie rozciągania, a sprężysto-kruchy przy ściskaniu. Ponieważ beton jest złożonym kompozytem kruszywa, cementu i wody (z mikropustkami nawet przy małych odkształceniach) wykazuje on nieliniowości fizyczne. Beton charakteryzuje się dużą wytrzymałością na ściskanie i małą na rozciąganie. W strefie rozciąganej ma tendencję do zarysowania, w ściskanej do miażdżenia, co zmienia właściwości materiałowe. Beton jest więc materiałem nieliniowym o skomplikowanych prawach zachowania [8]. Bardziej szczegółowe informacje opisujące właściwości betonu można znaleźć w pracach [6, 9, 10].

Podstawowe parametry opisujące zależność naprężenia–odkształcenia, przyjęte do opisu betonu w zaproponowanym modelu numerycznym, wyznaczono na podstawie przeprowadzonych badań cech materiałowych betonu i zależności przedstawionych w pracach [11, 12]:

$$f_{cu} = (0,0051 f_{cm} + 0,38) f_{cm} \text{ MPa} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{cl} = [0,0075 f_{cm} + 0,125 \ln(t_m) + 1,655] 10^{-3} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cu} = [4,51 - 0,1244 f_{cm} + 0,000948 f_{cm} t_m^{0,14} + 2,20] 10^{-3} \quad (3)$$

$$f_{ctm} = 0,3 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (4)$$

gdzie: f_{cm} – średnia wytrzymałość na ściskanie określona na kostkach typu B, MPa,

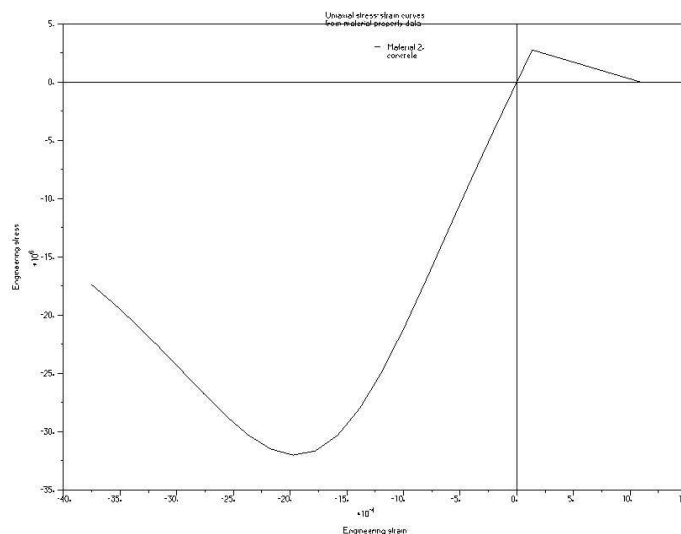
t_m – czas wyrażony w minutach odpowiadający przyrostowi odkształcenia o 1‰,

f_{ck} – wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie, ustalona jako 5% kwantyl rozkładu statystycznego wytrzymałości betonu na ściskanie.

W tabeli 2. zestawiono otrzymane wartości podstawowych parametrów opisujących zależność $\sigma - \varepsilon$ dla badanego betonu, a na rys. 4. przedstawiono krzywą opisującą tę zależność. Model numeryczny betonu zbudowano z 1008 27-węzłowych elementów prostopadłościennych.

Tabela 2. Wartości podstawowych parametrów opisujących zależność naprężenia–odkształcenia betonu

Wytrzymałość betonu przy ściskaniu określona dla poszczególnych próbek betonu f_{ci}, N/mm²	1.	36,4
	2.	32,1
	3.	27,6
Średnia wytrzymałość betonu przy ściskaniu f_{cm} , N/mm ²		32,03
Wytrzymałość betonu przy ściskaniu w jednoosiowym stanie naprężeń odpowiadająca odkształcalności granicznej f_{cu} , N/mm ²		17,40
Wytrzymałość charakterystyczna betonu przy ściskaniu f_{ck} , N/mm ²		27,93
Wytrzymałość betonu przy rozciąganiu f_{ctm} , N/mm ²		2,76
Średni moduł sprężystości betonu E_{cm} , N/mm ²		20200
Odształcenia betonu przy ściskaniu odpowiadające $f_{cm} - \varepsilon_{cl}$, ‰		1,95
Graniczne odkształcenia przy ściskaniu ε_{cu} , ‰		3,75
Średnia gęstość objętościowa betonu ρ , kg/m ³		2327,9
Współczynnik odkształcenia poprzecznego ν		0,2

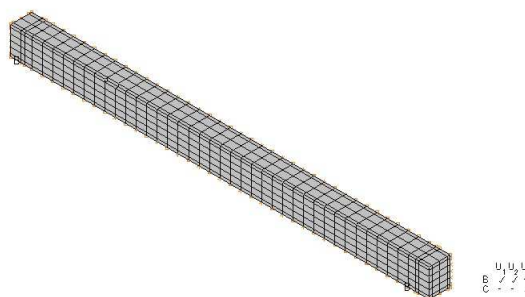


Rys. 4. Zależność naprężenia–odkształcenia betonu

3.2. Modelowanie stali

W normach, jak i w analizie konstrukcji wykonywanej za pomocą MES przyjmuje się, że pręty zbrojenia pracują jako elementy liniowe – występują w nich jedynie siły osiowe. Takie upraszczające założenie pomija m.in. efekt poprzecznej nośności pręta [13]. Do modelowania zbrojenia głównego (podłużnego) belek oraz strzemion zastosowano 3-węzłowe elementy prętowe. Zbrojenie podłużne zamodelowano 210 elementami, a strzemiona 336 elementami.

Przyjęto model materiału sprężysto-plastyczny o charakterystyce odpowiadającej stali 34GS, tj. $E = 2,0 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$, $f_{yk} = 410 \text{ N/mm}^2$ (charakterystyczna granica plastyczności), $f_{tk} = 550 \text{ N/mm}^2$ (charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie), $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0,3$. Rysunek 5. przedstawia przyjętą siatkę elementów skończonych dla opisanej belki żelbetowej.



Rys. 5. Model belki żelbetowej – przykład siatki elementów skończonych

4. Analiza porównawcza otrzymanych wyników badań doświadczalnych i numerycznych

4.1. Badania statyczne

Symulacje numeryczne badań statycznych polegały na obciążaniu belki dwiema siłami, przyłożonymi analogicznie jak w przeprowadzonych badaniach doświadczalnych, a następnie odciążaniu. Obciążenie i odciążenie realizowano dla następujących łącznych wartości sił [kN]: 3, 6, 12, 18, 24, 30, 40, 50, 54. Siła 54 kN była maksymalną wartością obciążenia, która dla przyjętych parametrów materiałowych wywoływała zniszczenie elementu. Na skutek przyłożenia siły 54 kN w belce następowała propagacja rys, co powodowało gwałtowne zmniejszenie strefy ściskanej. Odształcenia w zbrojeniu rozciągającym osiągały wartość graniczną 10%. Obliczone i pomierzone ugięcia oraz odształcenia dla poszczególnych etapów obciążenia belki numerycznej i belek rzeczywistych B1÷B12 przedstawia tab. 3.

Otrzymane w wyniku obliczeń wartości ugięć są w większości przypadków mniejsze od tych otrzymanych z pomiarów doświadczalnych. Tylko dla wartości obciążenia 3 kN, 6 kN oraz 54 kN (zniszczenia) otrzymane wartości ugięcia mieszczą się w przedziale uzyskanym z pomiarów. Wyliczone odształcenia dla wszystkich przypadków (z wyjątkiem zniszczenia) mieszczą się w przedziale odształceń uzyskanych z pomiarów doświadczalnych belek B1÷B12.

Tabela 3. Porównanie ugięć i odształceń belki numerycznej z wynikami uzyskanymi w badaniach doświadczalnych

Siła	Belka numeryczna		Belki rzeczywiste B1-B12	
	ugięcie	odształcenie	ugięcie	odształcenie
kN	mm	-	mm	-
3	0,41	$4,9 \cdot 10^{-5}$	0,31÷0,45	$(2,5÷4,9) \cdot 10^{-5}$
6	0,82	$9,8 \cdot 10^{-5}$	0,74÷1,02	$(5,3÷13,3) \cdot 10^{-5}$
12	1,75	$20,4 \cdot 10^{-5}$	2,23÷2,88	$(19,9÷30,2) \cdot 10^{-5}$
18	3,29	$34,7 \cdot 10^{-5}$	4,35÷5,23	$(33,1÷44,9) \cdot 10^{-5}$
24	5,42	$50,3 \cdot 10^{-5}$	6,40÷7,47	$(45,5÷61,3) \cdot 10^{-5}$
30	7,47	$63,5 \cdot 10^{-5}$	8,18÷9,82	$(58,8÷78,8) \cdot 10^{-5}$
40	10,64	$83,1 \cdot 10^{-5}$	11,32÷14,10	$(75,8÷109,3) \cdot 10^{-5}$
50	13,94	$108,0 \cdot 10^{-5}$	14,96÷18,35	$(101,9÷144,4) \cdot 10^{-5}$
Zniszczenie	25,10	$122,3 \cdot 10^{-5}$	24,3÷33,50	$(164,9÷263,1) \cdot 10^{-5}$

4.2. Badania dynamiczne

Dla każdego przypadku obciążenia, po odciążeniu w wyniku symulacji numerycznych, uzyskano częstotliwości i formy drgań belki. Z całego zbioru otrzymanych częstotliwości i form drgań odrzucono drgania podłużne. Następ-

nie w wyniku analizy postaci odkształcenia drgającej belki żelbetowej wybrano częstotliwości odpowiadające pierwszej, drugiej i trzeciej częstotliwości uzyskanej z pomiarów. Wartości uzyskane w wyniku symulacji numerycznej i pomierzonych częstotliwości drgań oraz ich procentowe zmiany dla poszczególnych etapów obciążenia zestawiono w tab. 4. i 5.

Tabela 4. Wartości wybranych częstotliwości drgań oraz ich procentowe zmiany dla poszczególnych etapów odciążenia belki uzyskane podczas symulacji numerycznej

Siła	Obliczone wartości częstotliwości drgań belki żelbetowej i ich zmiany procentowe					
	pierwsza		druga		trzecia	
kN	Hz	%	Hz	%	Hz	%
0	38,5	0,0	138,2	0,0	262,1	0,0
3	38,5	0,0	138,2	0,0	262,1	0,0
6	38,5	0,0	137,2	0,7	262,0	0,0
12	38,0	1,3	136,6	1,2	261,4	0,3
18	37,3	3,1	133,1	3,7	259,4	1,0
24	36,8	4,4	131,1	5,1	255,5	2,5
30	35,6	7,5	126,5	8,5	249,5	4,8
40	34,4	10,6	120,9	12,5	240,7	8,2
50	32,9	14,5	116,8	15,5	236,9	9,6
54	29,3	23,9	104,5	24,4	236,0	10,0

Tabela 5. Wartości wybranych częstotliwości drgań oraz ich procentowe zmiany dla poszczególnych etapów odciążenia belki uzyskane z pomiarów

Siła	Pomierzone wartości częstotliwości belek B1÷B12 i ich zmiany procentowe					
	pierwsza		druga		trzecia	
kN	Hz	%	Hz	%	Hz	%
0	40÷44	0,0	121÷135	0,0	237÷264	0,0
3	40÷44	0,0÷2,3	121÷135	0,0÷2,3	233÷263	0,0÷1,7
6	39÷44	0,0÷2,5	121÷134	0,0÷2,3	237÷262	0,4÷2,8
12	38÷43	2,3÷7,3	121÷131	0÷3,7	229÷257	1,6÷4,1
18	37÷43	2,3÷9,8	121÷131	0,8÷5,9	228÷255	2,9÷5,4
24	37÷42	5,0÷9,8	117÷127	1,6÷6,6	224÷251	3,3÷5,4
30	37÷42	7,5÷11,9	117÷126	1,6÷8,9	222÷251	3,3÷6,3
40	37÷40	7,5÷11,9	117÷125	2,4÷8,9	220÷250	3,7÷11,9
50	36÷40	7,5÷12,2	117÷123	3,3÷10,3	220÷250	4,1÷11,9
60	35÷39	10,0÷15,9	117÷122	4,0÷10,4	219÷247	4,9÷12,6
Zniszczenie	30÷36	22,0÷26,8	109÷115	12,2÷15,5	213÷238	7,7÷15,4

Analizując wyniki symulacji numerycznych i pomiarów eksperymentalnych, można zauważyć, że otrzymane z symulacji numerycznej procentowe zmiany częstotliwości drgań belki na skutek obciążenia (po odciążeniu) w więk-

szości przypadków mieszczą się w przedziale uzyskanym z pomiarów. Największa niezgodność wyników symulacji i pomiarów występuje w przypadku zmian procentowych drugiej częstotliwości drgań belki. Otrzymane z symulacji numerycznych zmiany procentowe częstotliwości dla wartości sił obciążających poprzedzających zniszczenie są zdecydowanie większe od tych uzyskanych z pomiarów doświadczalnych. Siła 54 kN była maksymalną wartością obciążenia, która dla przyjętych parametrów materiałowych wywoływała zniszczenie elementu. W wyniku przyłożenia siły 54 kN w belce następowała propagacja rys, powodująca gwałtowne zmniejszenie strefy ściskanej.

5. Podsumowanie

Otrzymane wyniki pomiarów na obiektach rzeczywistych i symulacji numerycznych wykazują pewne rozbieżności, zarówno w zakresie badań dynamicznych, jak i statycznych. Zniszczenie w obiektach rzeczywistych następowało przy sile 60÷72 kN w zależności od belki. W symulacjach numerycznych zniszczenie następowało przy sile 54 kN, a zatem było ono zdecydowanie mniejsze. Obserwowane zmiany procentowe częstotliwości w symulacji numerycznej i pomiarach eksperymentalnych są zbliżone, natomiast wartości wybranych częstotliwości są zróżnicowane. W belce numerycznej częstotliwość pierwsza jest mniejsza niż uzyskana z pomiarów rzeczywistych, natomiast częstotliwości druga i trzecia są większe.

Przyczyny niezgodności pomiarów na obiektach rzeczywistym i symulacji numerycznych można szukać w zbyt wielu uproszczeniach związanych z modelowaniem konstrukcji. Drugą przyczynę mogą stanowić wyznaczone na podstawie przeprowadzonych badań wartości cech materiałowych betonu. Otrzymane wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że beton w belkach rzeczywistych ma większą wytrzymałość na ściskanie i większy moduł sprężystości od wartości przyjętych w symulacji numerycznej. Pojawia się zatem pytanie: na ile uzyskane na próbkach normowych (próbki typu B) cechy materiałowe są zgodne z cechami materiałowymi w elemencie o zdecydowanie większych wymiarach (rzeczywistym)? Aby więc osiągnąć lepszą zgodność modelu obliczeniowego z rzeczywistością, w dalszych pracach należy dokładniej przeanalizować sposób określania wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości betonu oraz podjąć próbę modyfikacji parametrów materiałowych modelowego obiektu w obszarze mającym wpływ na analizowane zjawisko.

Literatura

1. Ramos L.F., Marques L.: Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: Two case studies, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, s. 1291-1305.
2. Maeck J., De Roeck G.: Damage assessment using vibration analysis on the Z24-bridge, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2003, s. 133-142.

3. PN-88/B-06250: Beton zwykły.
4. Instrukcja ITB: Badanie cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach, 1998.
5. Uhl T.: Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych, Warszawa 1997.
6. ADINA: System Online Manuals, Theory and Modeling Guide, ADINA R&D, 2001.
7. Zienkiewicz O.C.: Metoda elementów skończonych, Warszawa 1972.
8. Rakowski G., Kacprzyk Z.: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji, Warszawa 1993.
9. Crisfield M.A: Non-linear finite element analysis of solid and structures, John Wiley and Sons, England 1997.
10. Godyski-Ćwirko T.: Mechanika betonu, Warszawa 1982.
11. Czkwianianic A., Kamińska M.: Metody nieliniowej analizy żelbetowych elementów prętowych, Warszawa 1993.
12. Łapko A., Jensen Bjarne Ch.: Podstawy projektowania i algorytmy obliczeń konstrukcji żelbetowych, Warszawa 2005.
13. Podleś K., Szarliński J., Truty A.: Analiza konstrukcji 2D z betonu w stanach granicznych dla procesów doraźnych i długotrwałych, XIII Konferencja Naukowa „Metody numeryczne w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych”, Korbiewów 2001.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODAL PARAMETERS CHANGES FOR REINFORCED CONCRETE BEAMS ON THE BASIS OF NUMERICAL AND EXPERIMENTAL TESTS

S u m m a r y

This paper presents the application of dynamic characteristics in the diagnosis of RC beams. Some information about condition of RC structure has been obtained with experimental measurement and numerical analysis. The objects of experimental research are twelve reinforced beams. Damage of beams was produced by a particular stages of loading with value increasing up to the beam failure. During loading and unloading of beams, the strains, displacements and cracking were measured. After every cycle of unloading, when the displacements and strains were stable, the frequency characteristics were measured. In this way we determined the dependence of dynamic parameters on damage. In order to compare the obtained experimental results to numerical tests, the model of reinforced concrete beam by using Finite Element of was built. The numerical beam was loaded and unloaded analogous to the real researched beams. After each stage of static loading, dynamic parameters were calculated.

Wpłynęło do Oficyny Wydawniczej w styczniu 2011 r.