

dr hab. inż. Mariusz Żółtowski^{1*)}

ORCID: 0000-0003-0305-2378

dr inż. Gabriela Rutkowska¹⁾

ORCID: 0000-0003-1047-6195

dr inż. Norbert Dąbkowski¹⁾

ORCID: 0000-0001-8350-6098

dr inż. Katarzyna Jeleniewicz¹⁾

ORCID: 0000-0002-7109-2737

dr Dorota Kula¹⁾

ORCID: 0000-0002-7445-2822

dr inż. Olga Szlachetka²⁾

ORCID: 0000-0002-1195-3603

Diagnostyka uszkodzeń elementów murowych na podstawie miar liczbowych procesu drganiowego

Failure diagnostics of masonry elements based on vibration process numerical measures

DOI: 10.15199/33.2022.05.04

Streszczenie. Konstrukcje budowlane i ich elementy muszą spełniać wymagania dotyczące stateczności, sztywności i nośności. Są to warunki decydujące o bezpieczeństwie konstrukcji zarówno w okresie budowy, jak i eksploatacji. Ocena bezpieczeństwa odbywa się na podstawie badań diagnostycznych mających na celu kontrolę jakości wykonania wznoszonych obiektów lub zlokalizowanie uszkodzeń elementów konstrukcji powstałych podczas eksploatacji. W artykule skupiono się na eksperymentalnej analizie modalnej SISO ceramicznych elementów murowych. Doświadczenie przeprowadzono na dwudziestu próbkach cegły pełnej, z czego celowo uszkodzono połowę z nich, aby możliwa była ocena przydatności zastosowanej metody w postawionym problemie badawczym.

Słowa kluczowe: analiza modalna; częstotliwości drgań; diagram stabilizacyjny; cegła pełna.

Abstract. Building structures and their elements must meet the requirements related to stability, stiffness and strength. These are the conditions that determine the safety of the structure both during construction and operation. The safety assessment is carried out on the basis of diagnostic tests aimed at checking the quality of the erected objects or locating damages to structural elements caused during operation. The work focuses on the experimental SISO modal analysis of ceramic masonry elements. The experiment was carried out on twenty samples of solid and perforated bricks, half of which were deliberately damaged and thus to be able to assess the suitability of the method used in the research problem posed.

Keywords: modal analysis; vibration frequencies; stabilization diagram; solid brick.

Analiza modalna znajduje zastosowanie w diagnostyce, modyfikacji i monitorowaniu konstrukcji, a także w walidacji oraz kontroli modeli analitycznych i numerycznych. Nie obserwuje się w niej bezpośrednio efektów uszkodzeń czy zużycia, a jedynie ich oznaki w postaci wartości wielkości pomiarowych, takich jak funkcja odpowiedzi częstotliwościowej (ang. *Frequency Response Function, FRF*), diagramy stabilizacyjne czy towarzyszące estymatory drganiowe [1 – 2]. Dopiero odpowiednia analiza (interpretacja) mierzonych sygnałów drganiowych umożliwia rozpoznanie stanu technicznego elementów maszyn lub konstrukcji, wykrycie (zlokalizowanie) i określenie zaawansowania uszkodzeń oraz określenie ich przyczyn i miar. Możliwe było przeprowadzenie eksperymentalnej analizy modalnej metodą SISO i potwierdzenie jej przydatności w identyfikacji uszkodzeń elementów murowych na podstawie porównania przebiegu funkcji odpowiedzi częstotliwościowej FRF oraz funkcji koherencji w obiekcie uszkodzonym i nieuszkodzonym [3].

Materiały i metody badań

Przedmiotem badań były ceramiczne elementy murowe w postaci pełnej cegły ceramicznej typu L (licówka) B (bez otworów) klasy 20, co odpowiada wytrzymałości na ści-

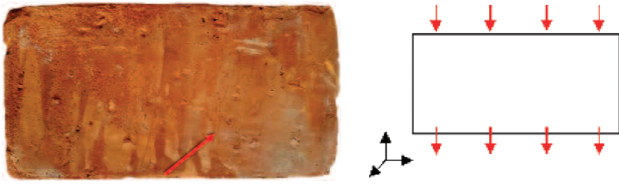
skanie 20 MPa. Jej wymiary geometryczne: długość 25 cm, szerokość 12 cm i wysokość 6,5 cm. Ma ona jednolitą barwę, nie posiada żadnych spękań i wyszczerbień. Badano 10 nieuszkodzonych i 10 uszkodzonych próbek. Uszkodzenia próbek wymuszono za pomocą maszyny wytrzymałościowej, przykładając do próbki osiowo coraz większą siłę ściskającą aż do momentu pojawienia się pierwszych rys. Test modalny zrealizowano przez wymuszenie drgań próbek za pomocą uderzenia młotkiem modalnym. Wykorzystano metodę SISO, w której uderzenia wykonuje się w jednym punkcie, natomiast zmienia się miejsce pomiaru odpowiedzi. Odbiór sygnału odbywał się dzięki podklejonnemu czujnikowi piezoelektrycznemu od dołu próbki. Wyznaczono 3 punkty pomiaru odpowiedzi i w każdym z nich wykonywano pomiar dziesięciokrotnie, co pozwoliło uzyskać uśrednioną nieobciążoną wartość charakterystyk częstotliwości. Do pomiaru przebiegów czasowych wymuszenia i odpowiedzi układu, określenia funkcji FRF oraz funkcji koherencji wykorzystano aparaturę pomiarową Sigview [4].

Przeprowadzono badanie pełnej cegły ceramicznej, stosując eksperymentalną analizę modalną. W metodzie tej za pomocą młotka modalnego (PCB 086C03) wzbudzano drgania strukturalne w próbce, rejestrując je za pomocą jednoosiowego piezoelektrycznego czujnika drgań (PCB 333B50). Punkty pomiarowe rozmieszczono zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1.

¹⁾ Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego; Katedra Mechaniki i Konstrukcji Budowlanych

²⁾ Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego; Centrum Wodne

*) Adres do korespondencji: mariusz_zoltowski@sggw.pl



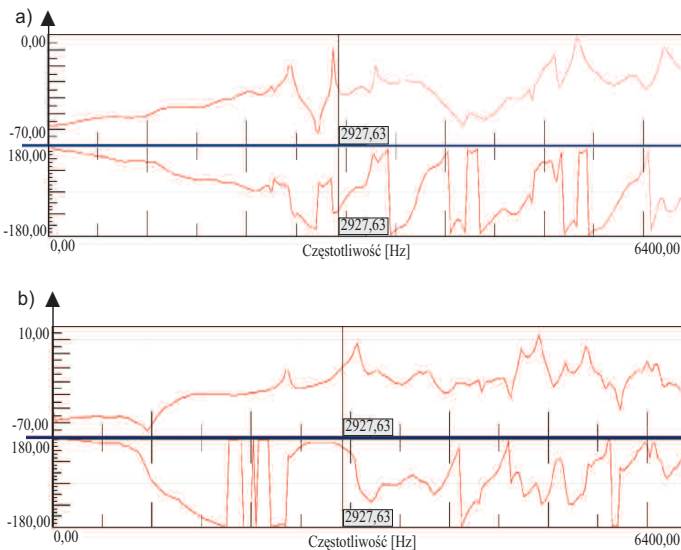
Rys. 1. Jedna z badanych próbek i rozmieszczenie punktów pomiarowych

Fig. 1. One of the tested samples and the distribution of measuring points

W eksperymencie rejestrowano dwa przebiegi czasowe: jeden pochodzący z młotka modalnego oraz drugi z czujnika drgań przymocowanego do próbki. W wyniku zarejestrowanych przebiegów czasowych uzyskiwano widmowe funkcje przejścia FRF. W każdym z punktów pomiarowych przebieg FRF był wynikiem uśrednienia siedmiu kolejnych uderzeń młotkiem modalnym. Na tej podstawie otrzymano tzw. diagram stabilizacji, z którego wyestymowano poszczególne parametry modalne w postaci: częstości drgań własnych; współczynników tłumienia modalnego oraz postaci drgań [5]. Na podstawie tych parametrów utworzono **model modalny nieuszkodzonej cegły ceramicznej**.

Wyniki

Wyniki pomiarów nieuszkodzonej pełnej cegły ceramicznej uzyskano z ośmiu punktów pomiarowych, po 4 punkty pomiarowe na każdą stronę cegły. Na rysunku 2 przedstawiono uśredniony wykres FRF z ośmiu punktów pomiarowych w przypadku uszkodzonych i nieuszkodzonych pełnych cegieł ceramicznych, na którym zaznaczono obliczoną teoretyczną pierwszą częstość drgań własnych. Jak zaobserwowano na wykresie, w przypadku nieuszkodzonego elementu w najbliższej okolicy tej wartości znajduje się wyłącznie jeden pik (2875,97 Hz), który mógłby wskazywać na jakąkol-

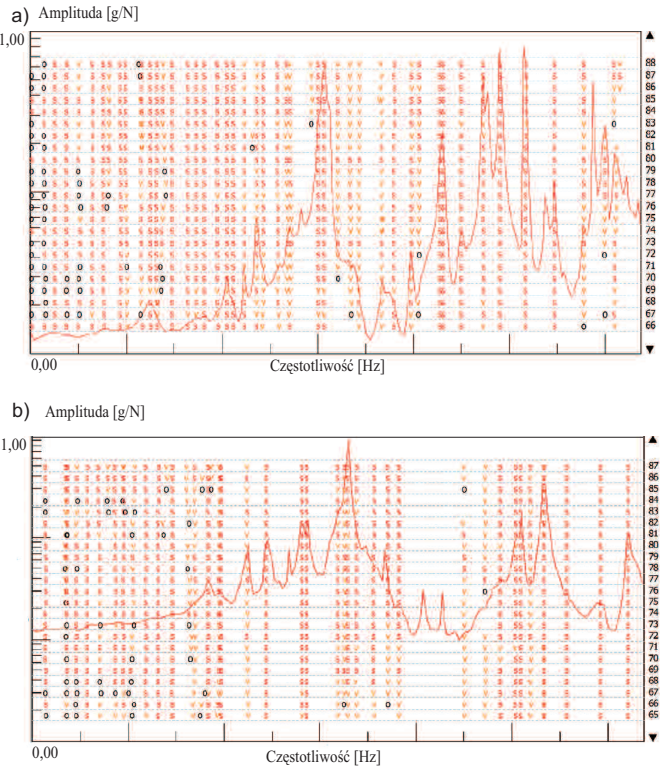


Rys. 2. Uśredniona teoretyczna pierwsza częstość drgań własnych cegły na uśrednionym wykresie FRF: a) cegła nieuszkodzona; b) cegła uszkodzona

Fig. 2. The averaged theoretical first natural frequency of a brick on the averaged FRF diagram: a) undamaged brick; b) damaged brick

wiek zbieżność tych częstości. Na podstawie rysunku 2 można również zaobserwować, że przy tej częstości następuje wyraźna zmiana fazy drgań o ok. 90°, co również wskazuje na występowanie drgań strukturalnych obiektu badań w tym miejscu.

Na podstawie zmierzonych charakterystyk FRF stworzono diagramy stabilizacji z licznymi biegunami stabilnymi, które mogą stanowić potencjalne drgania strukturalne próbki w przypadku nieuszkodzonej i uszkodzonej pełnej cegły ceramicznej (rysunek 3). Rozmiar modelu modalnego ograniczono do 128, przyjmując za opcję Multivariant MIF.



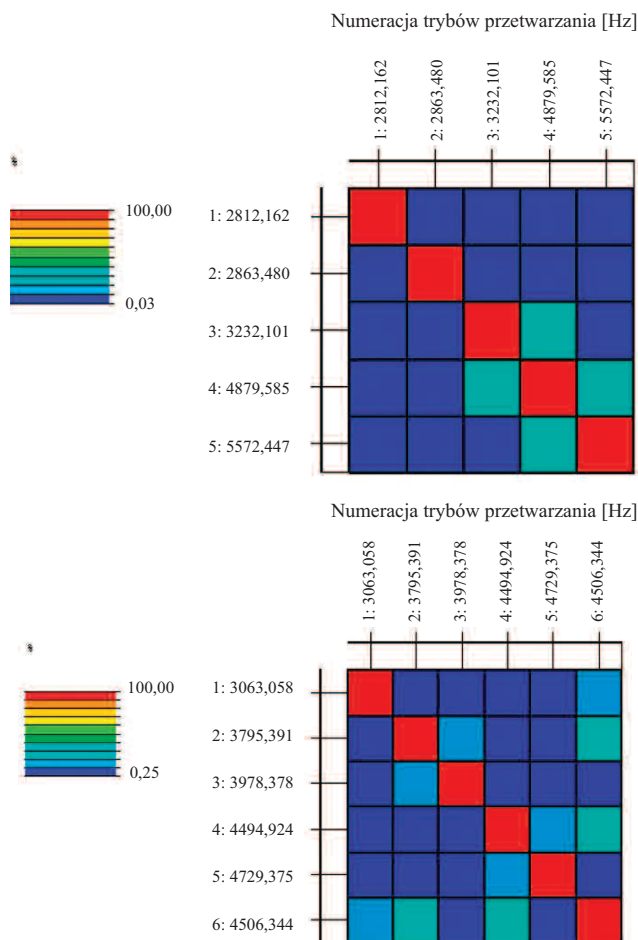
Rys. 3. Diagram stabilizacji stworzony z wykorzystaniem wskaźnika SUM z ośmiu punktów pomiarowych w przypadku: a) nieuszkodzonej; b) uszkodzonej pełnej cegły ceramicznej

Fig. 3. Stabilization diagram created using the SUM indicator with eight measurement points in the case of: a) undamaged; b) damaged full ceramic brick

W celu potwierdzenia prawidłowego wyboru biegunów stabilnych, które przypuszczalnie mogą być drganiami strukturalnymi cegły pełnej, należy przeprowadzić walidację takich biegunów i odpowiadających im poszczególnych postaci drgań własnych. Walidację przeprowadzono, stosując funkcję AutoMAC, której ostateczny wynik przedstawiono na rysunku 4. Na tej podstawie wytypowano pięć charakterystycznych postaci drgań własnych cegieł ceramicznych, które zestawiono w tabelach 1 i 2.

Wnioski

Wartości pól powierzchni funkcji FRF i koherencji wraz z oceną przebiegu tych funkcji pozwalają na identyfikację uszkodzeń badanych elementów. Zauważalna jest kilkakrotna różnica wartości liczbowych pól powierzchni analizowa-



Rys. 4. Walidacja wybranych biegunów stabilnych i odpowiadających im poszczególnych postaci drgań własnych z zastosowaniem funkcji AutoMAC

Fig. 4. Validation of selected stable poles and the corresponding individual modes of free vibrations using the AutoMAC function

nych funkcji w zależności od badanego elementu (uszkodzonego lub nieuszkodzonego). Oznacza to, że mierząc np. funkcję koherencji w różnych czasach życia obiektu (konstrukcji), możliwe jest wykrycie pojawiających się uszkodzeń. Tym samym potwierdzono przydatność analizy modalnej w badaniu degradacji (jakości) konstrukcji budowlanych i ich elementów.

Wyniki przeprowadzonych badań modalnych pełnej cegły ceramicznej przed i po uszkodzeniu wyraźnie obrazują różnice pomiędzy poszczególnymi stanami. Wskazują na to w pierwszej kolejności zmiany modelu modalnego obu cegieł, w którym występują zupełnie inne częstości drgań własnych. Graficzne wizualizacje poszczególnych postaci drgań własnych obiektów również w żadnym przypadku się nie pokrywają. Wprowadzone uszkodzenie wywołało zatem istotną zmianę stanu dynamicznego obiektu badań.

Literatura

[1] Uhl T. The use and challenge of modal analysis in diagnostics. Diagnostyka; 2004.
 [2] Kepczak N, Pawlowski W. Cast Iron Machine Tool Body Analysis. The Theoretical and Experimental Approach. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering. 2018; 1 – 10.

Tabela 1. Wynik przeprowadzonej walidacji (AutoMAC) w postaci tabelarycznej w przypadku nieuszkodzonej i uszkodzonej pełnej cegły ceramicznej

Table 1. The result of the validation (AutoMAC) in a tabular form in the case of undamaged and damaged full ceramic brick

Nieuszkodzona cegła pełna	Postać					
	1 [Hz]	2 [Hz]	3 [Hz]	4 [Hz]	5 [Hz]	
	2812,162	2863,480	3292,101	4879,585	5572,447	
Postać 1 [Hz]	2812,162	100	1,486	6,109	0,026	7,769
Postać 2 [Hz]	2863,480	1,486	100	2,920	7,253	1,910
Postać 3 [Hz]	3292,101	6,109	2,920	100	25,962	0,197
Postać 4 [Hz]	4879,585	0,026	7,253	25,962	100	24,286
Postać 5 [Hz]	5572,447	7,769	1,910	0,197	24,286	100

Uszkodzona cegła pełna	Postać						
	1 [Hz]	2 [Hz]	3 [Hz]	4 [Hz]	5 [Hz]	6 [Hz]	
	3063,058	3795,391	3978,378	4494,924	4729,375	4906,344	
Postać 1 [Hz]	3063,058	100	6,098	0,249	0,449	0,371	16,166
Postać 2 [Hz]	3795,391	6,098	100	18,584	0,760	0,508	31,119
Postać 3 [Hz]	3978,378	0,249	18,584	100	1,671	0,357	3,345
Postać 4 [Hz]	4494,924	0,449	0,760	1,671	100	12,796	22,035
Postać 5 [Hz]	4729,375	0,371	0,508	0,357	12,796	100	2,464
Postać 6 [Hz]	4906,344	16,166	31,119	3,345	22,035	2,464	100

Tabela 2. Zestawienie częstości drgań własnych i współczynników tłumienia w przypadku pełnej cegły ceramicznej

Table 2. List of natural frequencies and damping coefficients in the case of full ceramic brick

Postać drgań własnych	Cegła pełna nieuszkodzona		Cegła pełna uszkodzona	
	częstość [Hz]	tłumienie [%]	częstość [Hz]	tłumienie [%]
Postać 1	2812,162	0,44	3063,058	0,23
Postać 2	2863,480	0,82	3795,391	0,72
Postać 3	3292,101	0,13	3978,378	0,13
Postać 4	4879,585	0,14	4494,924	0,29
Postać 5	5572,447	0,34	4729,375	0,12
Postać 6			4906,344	0,16

[3] De Vivo A, Brutti C, Leofanti J L. Modal shape identification of large structure exposed to wind excitation by operational modal analysis technique, Mechanical Systems and Signal Processing. 2013; 195 – 206.

[4] Zabel V, Gössinger J. Modal analysis and numerical models of a typical railway bridge. Dynamics of Civil Structures. 2014; 351 – 358.

[5] Żółtowski M, Liss M, Żółtowski B, Melcer J. Truss harbor cranes modal design elements research. Polish Maritime Research. 2015; 84 – 92.

Przyjęto do druku: 25.04.2022 r.