

## **Badania wstępne parametrów dynamicznych w konstrukcjach wielomateriałowych z dodatkiem zeolitu**

**Jacek Szulej<sup>1</sup>**

*1 Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: j.szulej@pollub.pl*

**Streszczenie:** Celem artykułu jest przedstawienie wyników wstępnych badań parametrów tłumienia drgań w konstrukcjach z dodatkiem zeolitu. Część pierwsza artykułu opisuje właściwości i zastosowanie zeolitów. Opisano głównie wpływ dodatku zeolitu na parametry betonu. Część główna artykułu przedstawia wyniki badań parametrów tłumienia drgań trzech modeli płytowo-belkowych. Modele posiadają zmodyfikowane spoiwo, w którym część cementu zastąpiono zeolitem (z ponad 85% zawartością Klinoptylolitu). Wartości współczynników tłumienia drgań określano metodą kolokacyjną i metodą opartą na szacowaniu energii kinetycznej drgającego układu. Określano współczynniki tłumienia trzech pierwszych postaci drgań własnych modeli.

**Słowa kluczowe:** parametr tłumienia drgań, zeolit, klinoptylolit, beton.

### **1. Wprowadzenie**

Projektując coraz bardziej złożone, mosty, kładki, wiadukty, o znacznej rozpiętości i małej sztywności, ważne jest prawidłowe określenie dynamicznej odpowiedzi konstrukcji. Istotny jest również okres użytkowania konstrukcji, a zwłaszcza jej stan, który może znacznie zwiększać efekty dynamiczne (np.: ubytki w jezdni). Dlatego projektując konstrukcje złożone z wielu materiałów (najczęściej ze stali, żelbetu, drewna i innych), oraz określając wartości współczynnika tłumienia drgań należy umiejętnie te materiały łączyć, ale jednocześnie szukać nowych materiałów i modyfikować już stosowane. Podążając tym tokiem myślenia postanowiono rozpoznać cechy dynamiczne zmodyfikowanego żelbetu. Modyfikacja polega na zastąpieniu części cementu zeolitem, czyli nowym składnikiem mieszanki betonowej. Cechy wytrzymałościowe takich betonów są już częściowo rozpoznane, brakuje jednak badań cech dynamicznych, takich jak wcześniej wspomniany współczynnik tłumienia drgań. Do badań poziomu tłumienia wykorzystano złożone modele żelbetowo-stalowe. Badania polegały na wzbudzeniu drgań wymienionych modeli i określeniu wielkości tłumienia drgań na podstawie analizy przebiegów czasowych drgań (metoda kolokacyjna). Druga metoda określa współczynnik tłumienia drgań na podstawie szacowania energii kinetycznej związanej z danym materiałem modelu. Wzięto pod uwagę trzy pierwsze postacie drgań własnych modeli. Identyfikację parametrów dynamicznych modeli przeprowadzono wykorzystując program MES Algor. W obliczeniach rozpatrywano tylko zakres małych drgań swobodnych.

### **2. Informacje wstępne o zastosowaniu zeolitu jako dodatku do betonu**

Właściwości zeolitu i możliwości jego zastosowania opisano w takich pracach jak [1, 2, 3, 4, 5]. Nazwy „zeolit”, (z greckiego: wrzący kamień) użył w 1765 roku szwedzki mineralog Freiherr Axel von Cronstedt. Zeolity są to krystaliczne, uwodnione glinokrzemiany przede wszystkim takich metali, jak: Ca, Mg, Na, K, Sr i Ba. Wyróżnić można zeolity naturalne, modyfikowane oraz syntetyczne.

Zeolity naturalne powstają głównie jako utwory hydrotermalne. Najczęściej występują

w szczelinach i pustych przestrzeniach wśród skał wylewnych (np. bazaltów) lub jako produkty przeobrażenia skałeni i skałenoidów. W naturalnych warunkach proces tworzenia

zeolitów z popiołów wulkanicznych, przy podwyższonej temperaturze i ciśnieniu, trwa kilka tysięcy lat.

Grupa zeolitów naturalnych to około 40 minerałów, wśród których najczęściej występujące i wykorzystywane to:

- klinoptylolit  $\text{Na}_6[(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_{30}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ ,
- chabazyt  $\text{Ca}_2[(\text{AlO}_2)_4(\text{SiO}_2)_8] \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ,
- mordenit  $\text{Na}_8[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{40}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ .

Rozpoznanie procesów syntezy zeolitów w warunkach naturalnych, stworzyło możliwość podjęcia działań w skali laboratoryjnej. Początkowo stosowano w tym celu popioły wulkaniczne. Później podjęto próby wykorzystania popiołów lotnych z procesów spalania węgla.

Zeolity wyróżnia szereg wyjątkowych cech fizyczno-chemicznych, wśród których należy wymienić:

- wysoką pojemność adsorpcyjną,
- zdolność molekularno-sitową,
- selektywność,
- pojemność jonowymienną,
- odporność na działanie kwasów i podwyższonej temperatury.
- bardzo rozwiniętą powierzchnię, dochodzącą do  $1,5 \text{ tyś. m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ .

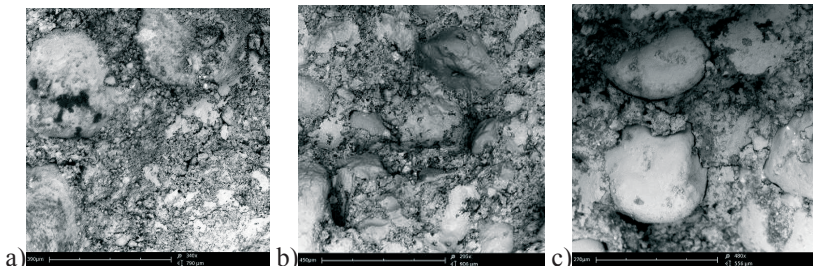
Przeprowadzone badania próbek betonowych z dodatkiem Zeolitu dowodzą znacznej efektywności naturalnego zeolitu oddziałującego na:

- penetrację wodną i jonów chlorku,
- stopień korozji oraz skurcz betonu,
- zwiększenie wytrzymałości i trwałości,
- odporność na korozję.

### 3. Badania na modelach

Wykonano trzy modele płytowo-belkowe, różniące się składem mieszanki betonowej, tj. z 5%, 20% i 40% udziałem zeolitu zamiast cementu. Stosowano zeolit o frakcji do  $200 \mu\text{m}$  z ponad 85% zawartością klinoptylolitu. Każdy model składał się z płyty o grubości 8cm, o wymiarach poziomych 2,64m na 2,64m, opartych na dwuteownikach o wysokości 100mm o rozstawie 2m. Belki stalowe podparto przegubowo na końcach.

W celu uzyskania charakterystyk materiałowych zmodyfikowanego betonu przeprowadzono badania na betonowych próbkach sześciennych ( $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$ ). Na podstawie badań otrzymano między innymi wytrzymałości betonu na ściskanie i moduły Younga. Zdjęcia próbek betonowych z mikroskopu skaningowego, przedstawiono na rys. 1a (5% zeolitu), rys 1b (20% zeolitu), 1c (40% zeolitu), zaś parametry betonu zestawia tab.1.



Rys. 1. Zdjęcia próbek betonowych (z 5%, 20% i 40% zawartością klinoptylolitu)

Tabela 1. Parametry materiałowe sześciennych próbek betonowych

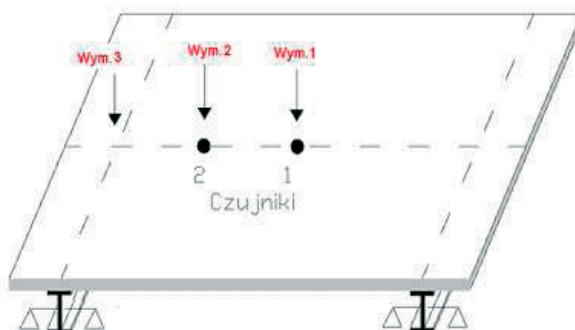
Nr próbki modelu (% zawartość Zeolitu)	$f_{c,cube}$ (MPa)	$E_{cm}$ (GPa)
1 (5%)	13,24	28,0
2 (20%)	15,76	30,6
3 (40%)	9,96	23,4

Poziom tłumienia drgań modeli określano wykorzystując metodę kolokacyjną, opisaną w pracy [10]. Metoda kolokacyjna wymaga przeprowadzenia pomiarów drgań swobodnych modeli. W tym celu wykonano badania przy użyciu sprzętu HBM: akcelerometrów B200, analizatora Spider i programu sterującego Catman 5.0. Drgania wymuszano przez uderzenie drewnianą belką, a modele użyte w badaniach przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Modele wykorzystane w badaniach

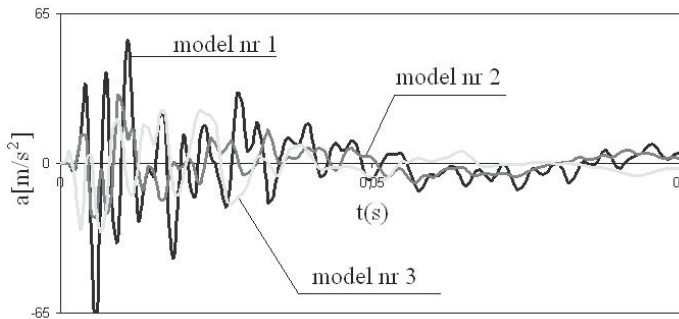
Na każdym modelu zamocowano dwa akcelerometry (w 1/2 i 1/4 rozpiętości pomiędzy dwuteownikami). Wykonano pomiary przyspieszeń od wymuszeń w trzech miejscach. Miejsce zamocowania czujników i miejsca wymuszenia pokazuje rys. 3.



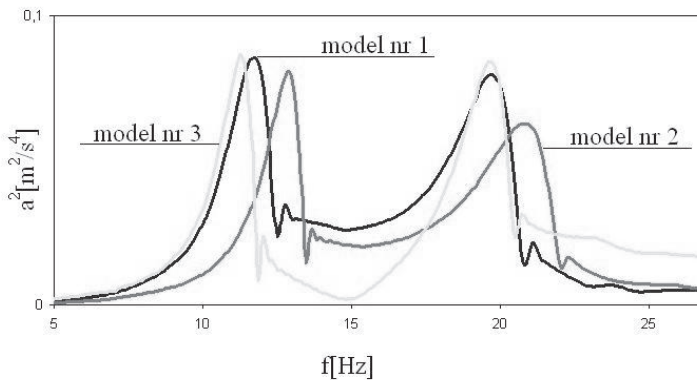
Rys. 3. Rozmieszczenie czujników przyspieszeń i miejsc wymuszeń drgań

Wynikami pomiarów są przyspieszenia drgań w czasie, próbkowane z częstotliwością 1200 Hz o szerokości pasma 150 Hz dla każdego z trzech modeli. Na podstawie przebiegów czasowych wykonano analizę widmową drgań – programem Catman 5.0, FFT: Auto Power Spectrum – Amplitudowe.

Na następnej stronie przedstawiono przykładowy przebieg czasowy przyspieszeń (rys. 4) oraz widmo amplitudowe (rys. 5).



Rys. 4. Przykładowy przebieg czasowy drgań



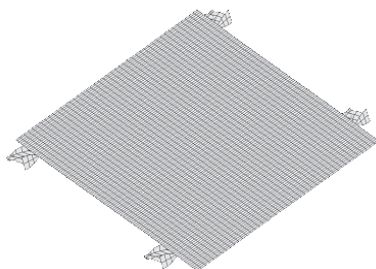
Rys. 5. Przykładowy widmo amplitudowe przyspieszeń drgań

Częstotliwości drgań własnych uzyskane z badań zweryfikowano przez obliczenia programem Algor (program MES). Uzyskano bardzo zbliżone formy drgań i wartości częstotliwości własnych z niewielkim rozbieżnościami. Częstotliwości własne uzyskane z badań i obliczeń pokazano w tab. 2.

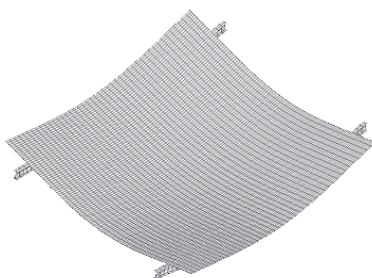
Tab. 2. Porównanie uzyskanych częstotliwości własnych

Mode	$f$ (Hz) badania	$f$ (Hz) Algor	Numer / forma drgań
Nr 1	11,62	12,23	1 / obrót belki i przemieszczenie pionowe płyty
	19,63	19,94	2 / zginanie symetryczne belki i płyty
	32,17	36,31	3 / zginanie antysymetryczne płyty i belki
Nr 2	12,92	12,65	1 / obrót belki i przemieszczenie pionowe płyty
	20,90	22,43	2 / zginanie symetryczne belki i płyty
	33,87	38,13	3 / zginanie antysymetryczne płyty i belki
Nr 3	11,36	12,09	1 / obrót belki i przemieszczenie pionowe płyty
	19,85	20,68	2 / zginanie symetryczne belki i płyty
	-	35,03	3 / zginanie antysymetryczne płyty i belki

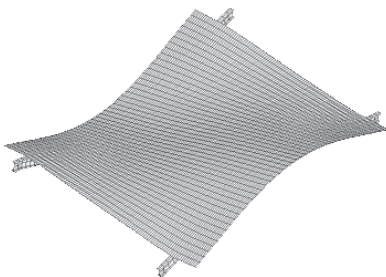
Poniżej pokazano pierwszą, drugą i trzecią postać drgań własnych uzyskaną w programie Algor (rys. 6, 7, 8).



Rys. 6. Pierwsza postać drgań własnych modeli ( $f_1=12,23\text{Hz}$ ,  $12,65\text{Hz}$ ,  $12,09\text{Hz}$ )



Rys. 7. Druga postać drgań własnych modeli ( $f_2=19,94\text{Hz}$ ,  $22,43\text{Hz}$ ,  $20,68\text{Hz}$ )



Rys. 8. Trzecia postać drgań własnych modeli ( $f_3=36,31\text{Hz}$ ,  $38,13\text{Hz}$ ,  $35,03\text{Hz}$ )

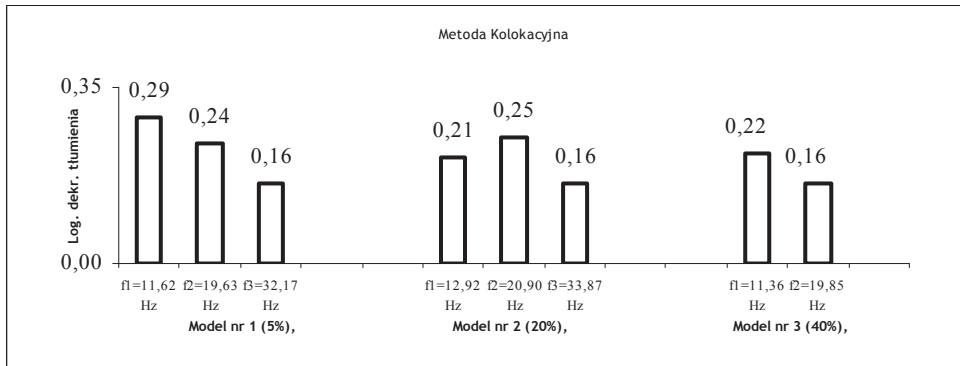
#### 4. Parametry tłumienia drgań

Wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia trzech pierwszych postaci drgań oszacowano wykorzystując metodę kolokacyjną [10] i energetyczną [6, 7, 8, 9]. W metodzie kolokacyjnej otrzymujemy parametr tłumienia związany z formą drgań bez informacji o wpływie konkretnego materiału na poziom tłumienia drgań konstrukcji, dlatego wykorzystano metodę energetyczną, w której można wyodrębnić współczynniki tłumienia związane z konkretnym materiałem składowym konstrukcji. Oczywiście trzeba pamiętać o wpływie tłumienia konstrukcyjnego i zewnętrznego na ogólny wynik parametru tłumienia. Jednak ich wpływ w tych modelach jest niewielki.

Czyli dopiero jednoczesne użycie metody kolokacyjnej i energetycznej pozwoli na określenie parametrów tłumienia związanych z odpowiednim materiałem, w tym przypadku zmodyfikowanym betonem.

### 4.1. Metoda kolokacyjna

W obliczeniach uwzględniano amplitudy pików widm nie różniące się od wartości pików maksymalnych o więcej niż 30 %. Wyniki logarytmicznego dekrementu tłumienia odnoszące się do trzech modeli (z 5%, 20%, i 40% zawartością zeolitu w mieszance betonowej) przedstawia rys. 9. Obróbkę danych, wykorzystywanych w metodzie kolokacyjnej przeprowadzono w programie Catman 5.0. Wyniki trzeciej postaci drgań dotyczące trzeciego modelu odrzucono ze względu na jej znikomy udział w widmach.



Rys. 9. Średnie wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia pierwszej, drugiej i trzeciej postaci drgań uzyskane stosując metodę kolokacyjną

### 4.2. Metoda oparta na szacowaniu energii kinetycznej

Korzystając z podstawowych założeń metody energetycznej [6, 7, 9], określono wartości tłumienia, opierając się na energii kinetycznej układu wg [8]. Współczynnik tłumienia określa się uwzględniając maksymalną energię kinetyczną  $E_{ij}$ . Energia kinetyczna może być wyrażona w następującej formie:

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\varphi}_i^T \mathbf{M}_j \boldsymbol{\varphi}_i \omega_i^2 \quad (1)$$

gdzie:  $\mathbf{M}_j$  - macierz bezwładności  $j$ -tego materiału w konstrukcji (lub fragmentu konstrukcji),  $\omega_i$  - częstość kołowa drgań własnych  $i$ -tej postaci,  $\boldsymbol{\varphi}_i$  - unormowany wektor własny  $i$ -tej postaci drgań.

Wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań w odniesieniu do  $i$ -tej postaci drgań wynosi:

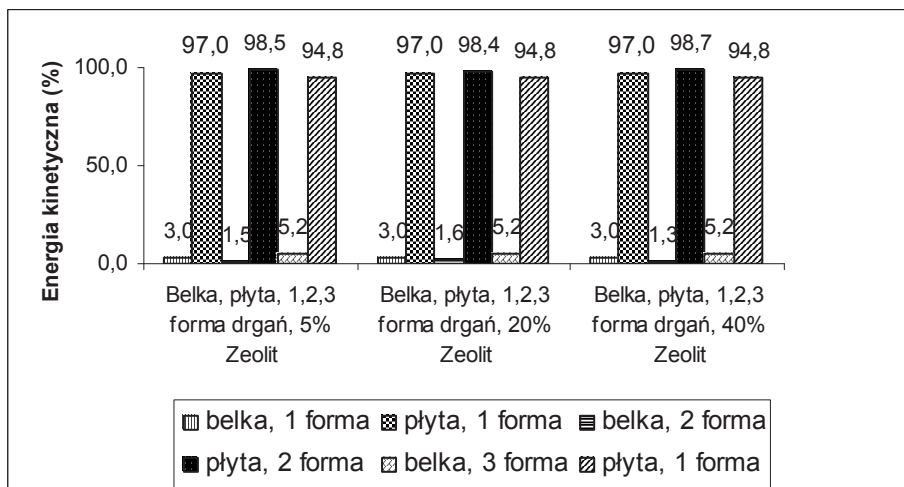
$$\Delta_i = \frac{1}{2} \frac{\sum_j E_{ij} \delta_j}{\sum_j E_{ij}} \quad (2)$$

gdzie:  $E_{ij}$  - udział energii kinetycznej  $j$ -tego materiału w konstrukcji przy  $i$ -tej formie drgań,  $\delta_j$  - logarytmiczny dekrement tłumienia związany z danym materiałem, wg [9].

Logarytmiczne dekrementy tłumienia drgań odpowiadające zmodyfikowanemu betonowi w metodzie energetycznej przyjmowano tak, aby wartości współczynników tłumienia drgań odpowiadające danej postaci drgań liczone uwzględniając dwie metody były zbliżone. Wybrano drugą postać drgań własnych modeli, ponieważ ta forma drgań charakteryzowała się w przeważającym stopniu drganiami płyty żelbetowej. Sytuacja ta odpowiada prawie wyłącznie wpływowi płyty na drgania, a przez to na tłumienie drgań.

Dla dwuteownika stalowego przyjęto  $\delta_1=0,05$ , dla żelbetu  $\delta_2=0,24$  (model z 5% udziałem zeolitu),  $\delta_2=0,25$  (20% udział zeolitu)  $\delta_2=0,16$  (40% udział zeolitu).

Korzystając z zależności (1) otrzymano wartości energii (rys. 10), natomiast w tab. 3 zestawiono wartości  $\delta$  trzech modeli dla drugiej formy drgań własnych.



Rys. 10. Proporcje energii kinetycznej 1, 2 i 3 postaci drgań własnych modeli z 5%, 20% i 40% zawartością zeolitu

Tabela 3. Wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia, drugiej formy drgań trzech modeli płytowych

Model	2 Forma drgań
Nr 1 (5% Zeolit)	0,237
Nr 2 (20% Zeolit)	0,247
Nr 3 (40% Zeolit)	0,158

Jak można zaobserwować ww. zasada określania parametrów tłumienia jest właściwa. W celu dokładniejszego rozpoznania wpływu zeolitu na beton wymagane jest wykonanie większej liczby modeli i przeprowadzenie większej liczby badań.

## Podsumowanie

Określając tłumienie wzięto pod uwagę trzy pierwsze postacie drgań własnych modeli (metoda kolokacyjna). Pierwsza postać cechuje się obrotem dwuteowników i przemieszczeniem pionowym płyty, która deformuje się w małym stopniu. Druga postać drgań to symetryczne drgania dwuteownika i płyty. Trzecia to drgania antysymetryczne płyty i dwuteownika. Rozpatrując wyniki uzyskane stosując metodę kolokacyjną obserwujemy dość znaczny spadek wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań w modelu nr 2 i 3, dotyczy to pierwszej postaci drgań. Rozpatrując drugą postać drgań, która to najdokładniej powinna pokazać wpływ zeolitu na poziom tłumienia drgań widoczny jest wzrost poziomu tłumienia modelu nr 2 i duży spadek tłumienia dotyczący modelu 3. Jak się wydaje ma to związek z nieodwracalnymi zmianami struktury płyty modelu 3 przez udział zbyt dużej ilości zeolitu, co skutkuje większym zapotrzebowaniem na wodę. Jest to także potwierdzone przez spadek wytrzymałości na ściskanie. Model nr 2 wraz ze wzrostem wartości wytrzymałości na ściskanie cechuje nieznaczny wzrost wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań. Podsumowując model 1 i 2 wykazują prawie identyczny poziom tłumienia, czyli wymiana 5% lub 20% cementu portlandzkiego na zeolit cechuje prawie ten sam poziom tłumienia drgań.

Przeprowadzone będą kolejne badania modeli z zawartością Zeolitu, nie tylko jako spoiwo, ale również jako kruszywo.

## Literatura

- 1 Winczaszek B. Analiza możliwości zastosowania zeolitów syntetycznych z popiołów lotnych w procesie oczyszczania ścieków. Rozprawa doktorska (promotor prof. dr hab. inż. Wojciech Adamski), Wrocław 2006,

- 2 Meysam Najimi i inni. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials* 35 (2012) 1023–1033,
- 3 Ahmadi B., Shekarch M. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement & Concrete Composites* 32 (2010) 134–141,
- 4 Yilmaz B. i inni. Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement. *Building and Environment* 42 (2007) 3808–3815,
- 5 Bilim C. Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 3175–3180,
- 6 Yamaguchi H., Ito M. Mode-dependency of structural damping in cable-stayed bridges, 9<sup>th</sup> International Conference on Wind Engineering, New Delhi, India (1995) 928-937,
- 7 Yamaguchi H., Adhikari R. Energy-based evaluation of modal damping in structural cables with and without damping treatment, *Journal of Sound and Vibration* 181 (1995) 71-83,
- 8 Flaga A., Szulej J. Metoda wyznaczania współczynników tłumienia drgań konstrukcji zespolonych. Konferencja naukowa, Krynica (2005) 49-54,
- 9 Bachmann H. i inni. Vibration problems in structures. Practical Guidelines. Wien, Bulletin D'Information, No 209, Lausanne, 1991.
- 10 Flaga A., Szulej J. Metoda kolokacyjna wyznaczania parametrów tłumienia drgań w konstrukcjach budowlanych. Konferencja naukowa Dynkon 2008, Rzeszów-Bystre (2008) 65-72,

## The initial research of dynamic parameters for composite structures containing Zeolite

Jacek Szulej<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: j.szulej@pollub.pl*

**Abstract:** The article aims at presenting the initial results of damping parameters of vibrations in constructions with zeolite. The initial part of the article describes the properties and application of zeolite. The influence of zeolite on concrete parameters was examined. The main part of the article displays the results of the analysis of damping parameters of vibration of three plate-beam models. The models contain modified binder in which the part of cement was replaced by zeolite (containing more than 85% of clinoptilolite). The analyses were based on the induction of vibration of models, the measurements of vibrations, the spectrum treatment of time course as well as the determination of values of damping coefficients of vibration. Hence the collation method was used. Moreover, the damping coefficients of the first three modes of free vibrations of models were determined.

**Keywords:** the damping coefficient of vibration, zeolite, clinoptilolite, concrete.