

Wstępne badania parametrów dynamicznych i materiałowych elementów żelbetowych z dodatkiem tufów zeolitowych

Jacek Szulej¹, Michał Pieńko², Wojciech Franus³

^{1,2} *Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: ¹j.szulej@pollub.pl, ²m.pieńko@pollub.pl*

³ *Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: w.franus@pollub.pl*

Streszczenie: Celem artykułu jest przedstawienie wyników pierwszego etapu badań parametrów tłumienia drgań oraz cech materiałowych konstrukcji żelbetowych z dodatkiem tufów zeolitowych. Część pierwsza artykułu opisuje właściwości zeolitów oraz wpływ jego dodatku na parametry betonu. Część główna artykułu przedstawia częściowe wyniki badań parametrów tłumienia drgań żelbetowych modeli płytowych. Modele posiadają zmodyfikowane spoiwo, w którym część cementu zastąpiono zeolitem (badano modele i próbki zawierające 0%, 10%, 20%, 30%, 40% dodatek zeolitu). Wartości współczynników tłumienia drgań określano metodą kolokacyjną i uwzględniano tylko pierwszą częstość drgań własnych modeli. Określono również cechy materiałowe zmodyfikowanego betonu takie jak: wytrzymałość na ściskanie (po 3, 7, 14, 28, 56 i 90 dniach), mrozoodporność, nasiąkliwość, ścieralność oraz wartości modułu Younga.

Słowa kluczowe: parametr tłumienia drgań, cechy materiałowe, zeolit, klinoptylolit, beton

1. Wprowadzenie

Obecne trendy projektowania coraz bardziej skomplikowanych konstrukcji o znacznych rozpiętościach i małej sztywności wymuszają poszukiwanie nowych lub modyfikację znanych już materiałów o lepszych cechach dynamicznych i parametrach materiałowych. Podążając tym tokiem myślenia postanowiono rozpoznać cechy dynamiczne i materiałowe zmodyfikowanego betonu. Modyfikacja polega na zastąpieniu części cementu zeolitem, czyli stosunkowo nowym składnikiem mieszanki betonowej. Cechy wytrzymałościowe betonów z dodatkiem różnych rodzajów zeolitu znajdującego się w różnych regionach świata są już częściowo rozpoznane, brakuje jednak badań odnoszących się do tufów zeolitowych pochodzących ze złóż zlokalizowanych na Ukrainie. Następnym argumentem skłaniającym do stosowania tufów zeolitowych jako suplement cementu jest przyjazny środowisku sposób ich pozyskiwania.

Do badań poziomu tłumienia drgań wykorzystano żelbetowe modele płytowe. Badania polegały na wzbudzeniu drgań wymienionych modeli i określeniu wielkości tłumienia drgań na podstawie analiz przebiegów czasowych drgań (metoda kolokacyjna). Wzięto pod uwagę pierwszą postać drgań własnych modeli. Identyfikację parametrów dynamicznych modeli przeprowadzono wykorzystując program MES Algor. W obliczeniach rozpatrywano tylko zakres małych drgań swobodnych. W badaniach cech materiałowych wykorzystano normowe próbki sześciennie i walcowe.

Badania są kontynuacją tematu podjętego na ubiegłorocznej konferencji krynickiej.

2. Informacje wstępne o właściwościach i zastosowaniu tufów zeolitytowych

Zeolity to grupa glinokrzemianów o unikalnych właściwościach fizykochemicznych, przez co znajdują bardzo liczne zastosowania praktyczne. Właściwości te wynikają w głównej mierze z ich specyficznej budowy wewnętrznej. W przestrzennym glinokrzemianowym szkielecie istnieją wolne przestrzenie w postaci komór i kanałów o ściśle określonych rozmiarach molekularnych. Jeśli dodamy do tego odporność chemiczną, wysoką termostabilność, bardzo dobre właściwości katalityczne, sorpcyjno-jonowymiennie i molekularno sitowe to nie dziwi fakt, iż zeolity są niezwykle istotnym materiałem posiadającym liczne zastosowania w technologiach chemicznych, inżynierii i ochronie środowiska, rolnictwie i budownictwie [1-6].

Pomimo iż w przyrodzie znanych jest ponad 100 odmian różnego rodzaju minerałów zeolitytowych to nagromadzenia złożowe tworzą nieliczne. Najbardziej rozpowszechnionym minerałem zeolitytowym i zarazem najczęściej wykorzystywanym jest klinoptilolit. Krystalizuje on w układzie jednoskośnym o grupie przestrzennej $C2/m$ i parametrach komórki elementarnej: $a=1,766$ nm, $b=1,726$ nm, $c=0,720$ nm, $\beta=116,4^\circ$. Najczęściej podawana formuła krystalograficzna wzoru klinoptilolitu ma postać $(K_2,Na_2,Ca)_3[Al_6Si_{30}O_{72}] \cdot 24H_2O$.

Zeolity naturalne a zwłaszcza klinoptilolit wchodząc w reakcje z $Ca(OH)_2$ jest w stanie utworzyć typowe żelowe produkty hydratacji (C-S-H, C-A-H). Zawartość $Ca(OH)_2$ w produktach hydratacji zmniejsza się znacznie, co jest przyczyną zwiększonej odporności chemicznej i niższej porowatości układów z cementem zawierającym klinoptilolit. Dlatego też minerał ten stanowi naturalny cenny dodatek pucolanowy do produkcji betonu.

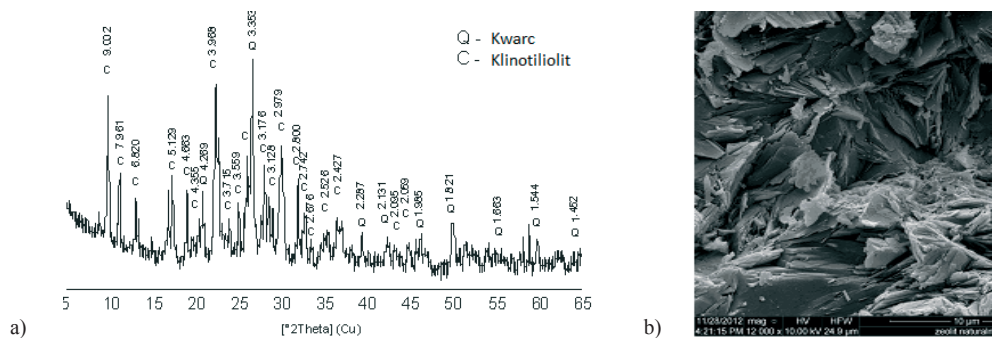
Dostępne w literaturze wyniki badań próbek betonowych z dodatkiem zeolitu [7-10] dowodzą znacznej efektywności naturalnego zeolitu oddziałującego pozytywnie między innymi na:

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

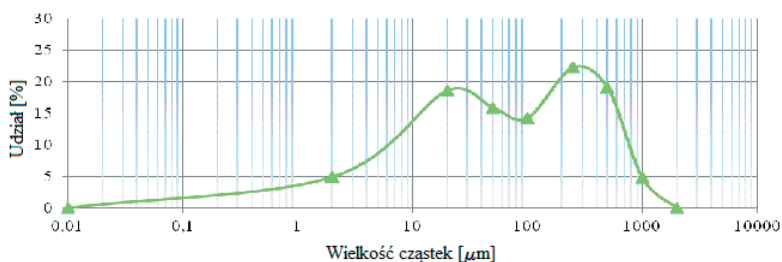
3. Badania na modelach

Do badań wpływu zeolitu na cechy dynamiczne i materiałowe zmodyfikowanego betonu wybrano klinoptilolit pochodzący ze złoża tufów zeolitytowych w Sokyrnytsya (obwód Zakarpacki, Ukraina). Dyfraktogram składu mineralnego tej skały przedstawia Rysunek 1a. Dominującym składnikiem jest klinoptilolit, rozpoznany po charakterystycznych i najmocniejszych refleksach $d_{hkl} = 8,95; 7,94; 3,96; 3,90$ Å. Jego zawartość ilościowa wynosi około 75%. Skład mineralny tufu uzupełniają niewielkie ilości opalu CT, kwarcu i skaleni potasowych. Klinoptilolit występuje w postaci cienkich płytek o wielkości 25-30 μm , które niekiedy posiadają heksagonalny pokrój (Rys. 1b).

Rozkład wielkości ziaren klinoptilolitu wybranego do badań przedstawia rys. 2. Krzywa uziarnienia zeolitu reprezentuje rozkład bimodalny. Dominują czasteczki zeolitu o wielkości z zakresu od 10 do 100 μm z maksimum 25 μm , a drugi przedział wielkości ziaren to od 100 do 1000 μm z największym udziałem cząstek o wymiarach 300 μm .



Rys. 1 Dyfraktogram i mikrofotografia zeolitu użytego w badaniach, a) Dyfraktogram składu mineralnego tufu zeolitowego, b) Mikrofotografia skupień ziaren klinoptilolitu



Rys. 2. Rozkład wielkości cząstek zeolitu

W składzie chemicznym dokminują: SiO_2 68,02 % i Al_2O_3 12,92 % tworzące szkielet struktury klinoptilolitu, którym towarzyszą: CaO 3,71 %; K_2O 3,36 %; MgO 0,75 % Na_2O 0,69 % - pełniące rolę kationów jonowymiennych kompensujących nadmiar ładunku szkieletu. Wybrany materiał zeolitowy charakteryzuje także wartość powierzchni właściwej, która w przypadku klinoptilolitu wyniosła 18,3 m^2/g (około 50-krotnie większa niż powierzchnia właściwa cementu). Ze zważywszy na to, iż decydujący udział w powierzchni rozwiniętej mają mezopory 10,65 m^2/g , w stosunku do mikroporów, których powierzchnia wynosi 7,68 m^2/g , materiał ten reprezentuje teksturalnie materiał mezoporowaty.

Zakres badań, jakie planuje się wykonać pokazuje tabela nr 1. Wszystkie modele będą zawierały te same ilości kruszywa i wody. Będą się różnić ilością zeolitu, cementu i plastyfikatora. Badania modelu nr 1 do 5 zostały już zrealizowane, zaś pozostałe modele są na etapie wykonywania. Interesujące będą zwłaszcza wyniki modeli z zawartością plastyfikatora, który zapewni prawidłową urabialność mieszanki betonowej, zawierającej zeolit.

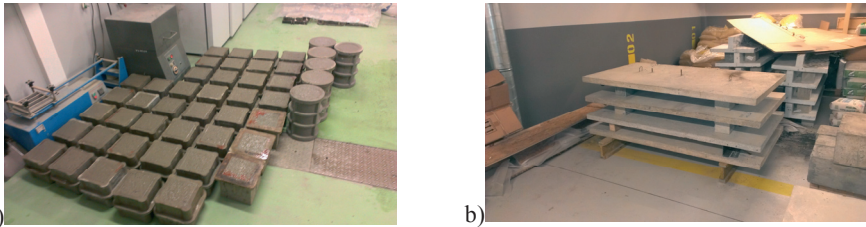
Tabela 1. Zestawienie modeli wykonanych i w toku realizacji

Nr modelu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Rodzaj Cementu	II 32.5	I 32.5	I 32.5	I 32.5	I 32.5	I 32.5	I 32.5	I 32.5	I 32.5	I 32.5	I 32.5
Udział zeolitu (%)	0	0	10	20	30	40	0	10	20	30	40
Udział plastyfikatora (%)	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Wykonano sześć modeli płytowych, różniących się składem mieszanki betonowej, tj. 0% (cem I 32,5R), 0% (cem II 32,5R), 10%, 20%, 30%, 40% udziałem zeolitu zamiast

cementu. Każdy model składał się z płyty o grubości 6cm, o wymiarach 2m x 1m, podpartych przegubowo w czterech punktach (rys. 3b).

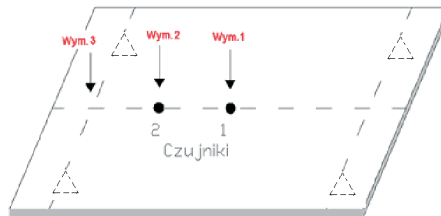
W celu uzyskania charakterystyk materiałowych zmodyfikowanego betonu przeprowadzono badania na betonowych próbkach sześciennych (15cm x 15cm x 15cm) i walcowych (15cm x 30cm) pokazanych na rysunku 3a. Na podstawie przeprowadzonych badań otrzymano między innymi wytrzymałości betonu na ściskanie (po 3, 7, 14, 28, 56, 90 dniach) i modułu Younga.



Rys. 3 Zdjęcia z badań laboratoryjnych, a) próbki betonowe, b) modele płytowe użyte w badaniach

Poziom tłumienia drgań modeli określano wykorzystując metodę kolokacyjną, opisaną w pracach [11, 13]. 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 gumowym młotkiem.

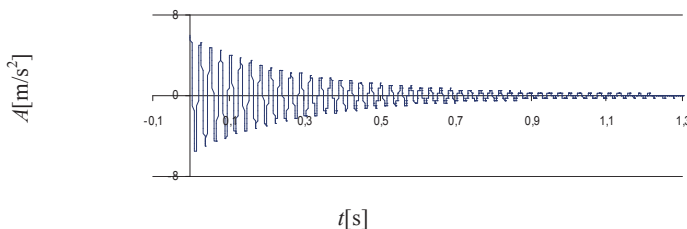
Na każdym modelu zamocowano dwa akcelerometry (w 1/2 i 1/4 rozpiętości). Wykonano pomiary przyspieszeń od wymuszeń w trzech miejscach. Miejsce zamocowania czujników i miejsca wymuszenia pokazuje rys. 4.



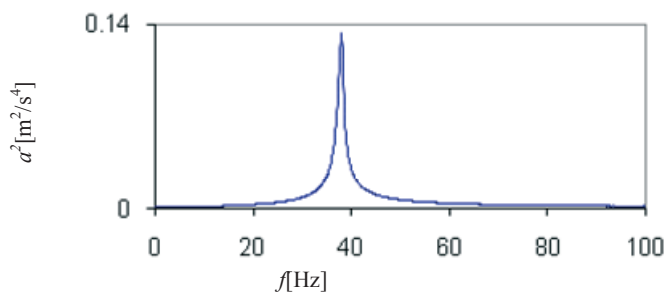
Rys. 4. Rozmieszczenie czujników przyspieszeń i miejsc, w których wymuszano drgania

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. 5) oraz widmo amplitudowe (rys. 6).

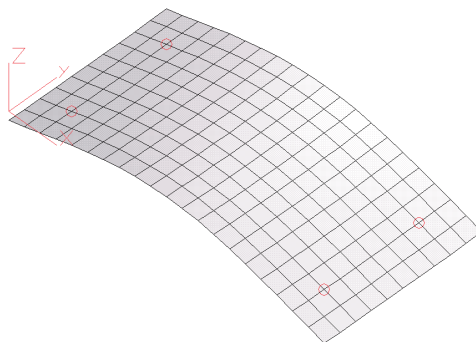


Rys. 5. Przykładowy przebieg czasowy drgań (model z 10% zawartością zeolitu, wymuszenie w punkcie 1)



Rys. 6. Przykładowe widmo amplitudowe przyspieszeń drgań (model z 10% zawartością zeolitu, wymuszenie w punkcie 1)

Częstotliwości drgań własnych uzyskane z badań zweryfikowano przez obliczenia programem Algor (program MES). Uzyskano bardzo zbliżone formy drgań i wartości częstości własnych z niewielkim rozbieżnościami. Poniżej pokazano pierwszą postać drgań własnych uzyskaną w programie Algor (rys. 7).



Rys. 7. Pierwsze postaci drgań własnych modeli ($f_1=28,06\text{Hz}$, $f_2=37,37\text{Hz}$, $f_3=37,95\text{Hz}$, $f_4=33,85$, $f_5=37,37\text{Hz}$)

4. Wybrane parametry materiałowe betonowych próbek

W wyniku realizacji pierwszego etapu badań otrzymano następujące wartości wytrzymałości na ściskanie oraz moduły Younga związane z poszczególnymi modelami (tab. 2) oraz wytrzymałość na ściskanie mierzona po 100 cyklach zamrażania i odmrażania próbek betonowych w porównaniu do próbek bazowych (tab. 3).

Tabela 2. Parametry materiałowe próbek betonowych

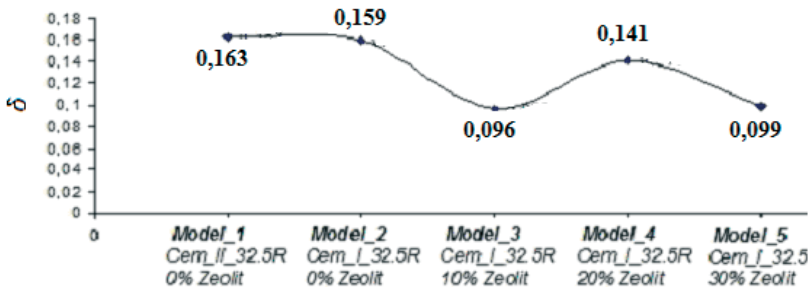
Nr próbki modelu (% zaw. zeolitu, rodzaj cementu)	$f_{c,cube}$ [Mpa] (3, 7, 14, 28 , 56, 90 dni)						E_{cm} [Gpa]
1 (0%, cem II 32.5R)	-	16,65	21,23	23,52	34,92	36,26	22,36
2 (0%, cem I 32.5R)	21,89	28,04	33,69	35,65	44,77	44,09	25,69
3 (10%, cem I 32.5R)	15,96	19,98	21,31	30,46	30,34	31,02	33,99
4 (20%, cem I 32.5R)	8,13	12,84	15,47	23,50	24,31	26,18	27,03
5 (30%, cem I 32.5R)	10,44	11,16	19,74	17,82	23,05	25,05	24,12
6 (40%, cem I 32.5R)	5,88	8,24	10,30	13,80	-	-	19,26

Tabela 3. Wytrzymałość na ściskanie próbek betonowych mierzona po 100 cyklach zamrażania i odmrażania

Nr próbki modelu (% zaw. zeolitu, rodzaj cementu)	$f_{c,cube}$ [Mpa] po cyklu zamrażania i odmrażania	$f_{c,cube}$ [Mpa] próbki bazowe	Spadek $f_{c,cube}$ [%]
1 (0%, cem II 32.5)	25,66	30,02	14,53
2 (0%, cem I 32.5R)	35,25	38,73	8,97
3 (10%, cem I 32.5R)	28,81	36,17	20,36
4 (20%, cem I 32.5R)	24,52	27,31	10,20
5 (30%, cem I 32.5R)	21,99	23,61	6,83
6 (40%, cem I 32.5R)	15,72	15,56	-1,07

5. Parametry tłumienia drgań

Wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia pierwszych postaci drgań modeli oszacowano wykorzystując metodę kolokacyjną [11, 13]. W metodzie kolokacyjnej otrzymujemy parametr tłumienia związany z formą drgań, nawet w przypadku nierozseparowanych częstości własnych. W obliczeniach uwzględniano amplitudy pików widm nie różniące się od wartości pików maksymalnego o więcej niż 30 %. Wyniki logarytmicznego dekrementu tłumienia odnoszące się do badanych modeli (z 0%, 10%, 20% i 30% zawartością zeolitu w mieszance betonowej) przedstawia rys. 8. Obróbkę danych, wykorzystywanych w metodzie kolokacyjnej przeprowadzono w programie Catman 5.0. Nie przedstawiono wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia modelu z 40% zawartością zeolitu ze względu na uszkodzenie modelu.



Rys. 8. Średnie wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia odnoszące się do pierwszej postaci drgań własnych modeli płytowych

W celu porównania otrzymanych wyników z danymi dostępnymi w literaturze w Tab.4 przedstawiono wartości tłumienia materiałowego żelbetu, drewna i stali wg [12].

Tabela 4. Wartości δ wybranych materiałów

Materiał	Wartość średnia δ
elbet słabo wyteżony (nie zarysowany)	0,054
Żelbet średnio wyteżony (zarysowany)	0,157
Żelbet mocno wyteżony (zarysowany)	0,141
Drewno	0,079
Stal	0,010

Porównując otrzymane wyniki logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań z badań i dane z literatury należy stwierdzić, że w przypadku dodania 10% i 30% zeolitu parametr

tłumienia ma niższy poziom tłumienia od średnio wyteżonego żelbetu, natomiast dodatek 20% zeolitu powoduje bardzo zbliżoną do żelbetu wartość δ .

6. Podsumowanie

Określając tłumienie wzięto pod uwagę tylko pierwsze postacie drgań własnych modeli (metoda kolokacyjna). Postacie te cechuje zginanie podłużne płyty. Rozpatrując wyniki uzyskane stosując metodę kolokacyjną obserwujemy dość znaczny spadek wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań modelu z 10% zawartością zeolitu, zbliżoną do żelbetu wartość tłumienia modelu z 20% udziałem zeolitu i spadek poziomu tłumienia modelu z 30% zawartością zeolitu. Zmniejszenie poziomu tłumienia modelu nr 3 (10% zeolitu) związane jest jak się wydaje ze zwiększeniem sztywności tego modelu objawiające się wzrostem wartości modułu Younga. Dość zaskakujący jest fakt zmniejszenia poziomu tłumienia modelu nr 5 (30% zeolitu), związane to może być ze zbyt dużym udziałem zeolitu w spoiwie mieszanki betonowej. Aby w pełni rozpoznać poziom tłumienia drgań w konstrukcjach tego typu wymagane jest wykonanie badań modeli z dodatkiem plastyfikatora, który jest nieodzownym dodatkiem poprawiającym urabialność mieszanki betonowej zawierającej zeolit. Porównując dodatkowo wyniki otrzymane z badań modeli nr 1 (0% zeolitu, cem II) i nr 2 (0% zeolitu, cem I) można stwierdzić, że nie ma istotnych różnic parametrów wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań.

Badania parametrów materiałowych wykazują nieznaczny spadek wytrzymałości na ściskanie modelu 3 (10% zeolitu) w stosunku do modelu bez dodatku zeolitu. W kolejnych modelach, tj. nr 4, 5, 6 można zauważyć dość znaczny spadek wytrzymałości na ściskanie. Spadek wytrzymałości jest związany z brakiem plastyfikatora, czyli miarodajne wyniki uzyskane będą po przeprowadzeniu badań modeli z zawartością zeolitu (modele nr 7-11). Rozpatrując wpływ zeolitu na wytrzymałość po przeprowadzeniu cyklu zamrażania i odmrażania próbek betonowych można stwierdzić, że największy spadek występuje w modelu nr 3 a najmniejszy w modelu 6.

Ostateczne wnioski zostaną opracowane po przeprowadzeniu badań wszystkich modeli.

Badania zostały sfinansowane z projektu Nr IPBU.01.01.00-06-570/11-00. Pierwszy współautor jest uczestnikiem projektu "Kwalifikacje dla rynku pracy - Politechnika Lubelska przyjazna dla pracodawcy" współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Literatura

- 1 Wdowin M., Franus M., Panek R., Bandura L., Franus W The conversion technology of fly ash into zeolites. Clean Technologies and Environmental Policy - DOI 10.1007/s10098-014-0719-6 (2014).
- 2 Chałupnik S., Franus W, Wysocka M., Gzyl G. Application of zeolites for radium removal from mine water. Environmental Science and Pollution Research, vol. 20 (2013) s. 7900-7906,
- 3 Wdowin M., Franus W, Panek R. Preliminary results of usage possibilities of carbonate and zeolitic sorbents in CO2 capture. Fresenius Environmental Bulletin, vol. 21/12 (2012) s. 3726 - 3734,
- 4 Franus W. Characterization of X-type zeolite prepared from coal fly ash. Polish Journal of Environmental Studies, vol. 21/2, (2012) s. 337-343,
- 5 Franus W, Wdowin M. Removal of ammonium ions by selected natural and synthetic zeolites. Mineral Resources Management, vol. 26/4 (2010) s. 133 -148,

- 6 Franus W, Dudek K. Clay minerals and clinoptilolite of Variegated Shales Formation of the Skole Unit. Polish Flysch Carpathians. *Geologica Carpathica*, vol. 50 (1999) p. 23-24,
- 7 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,
- 8 Ahmadi B., Shekarch M. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement & Concrete Composites* 32 (2010) 134–141,
- 9 Yilmaz B. i inni. Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement. *Building and Environment* 42 (2007) 3808–3815,
- 10 Bilim C. Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 3175–3180,
- 11 Flaga A., Szulej J. Metoda wyznaczania współczynników tłumienia drgań konstrukcji zespolonych. Konferencja naukowa, Krynica (2005) 49-54,
- 12 Bachmann H. i inni. Vibration problems in structures. Practical Guidelines. Wien, Bulletin D'Information, No 209, Lausanne, 1991.
- 13 Flaga A., Szulej J. Metoda kolokacyjna wyznaczania parametrów tłumienia drgań w konstrukcjach budowlanych. Konferencja naukowa Dynkon 2008, Rzeszów-Bystre (2008) 65-72,

Preliminary studies of the dynamic and material parameters of reinforced concrete elements with the addition of zeolite tuffs

Jacek Szulej¹, Michał Pieńko², Franus Wojciech³

^{1,2} *Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: ¹j.szulej@pollub.pl, ²m.pienko@pollub.pl*

³ *Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: j.szulej@pollub.pl*

Abstract: The purpose of this article is to present the results of the first stage of research on the damping parameters of vibration and the material characteristics of reinforced concrete structures with the addition of zeolite tuffs. The first part of the article describes the properties of zeolites as well as its impact on the concrete parameters. The main part of the article shows the partial results of research on damping parameters of vibration of reinforced concrete slab models. The models contain modified binder in which the portion of cement was replaced by zeolite (tested models and samples contained 0%, 10%, 20%, 30%, 40% of zeolite). The values of damping coefficients of vibration were determined by the collocation method, and only the first frequency of free vibration of models was taken into account. Moreover, the material characteristics of modified concrete were determined, i.e. compressive strength (after 3, 7, 14, 28, 56, and 90 days), frost resistance, water absorption, friability, as well as the values of Young modulus.

Keywords: damping parameter of vibration, material characteristics, zeolite, clinoptilolite, concrete