

VLIV CYKlickÉHO DYNAMICKÉHO ZATĚŽOVÁNÍ NA ZMĚNU MODÁLNÍCH CHARAKTERISTIK ŽELEZOBETONOVÉHO PRVKU

INFLUENCE OF DYNAMIC LOADING ON CHANGE OF MODAL CHARACTERISTICS OF A REINFORCED CONCRETE ELEMENT

Tomáš Plachý¹

Abstract:

The paper deals with an influence of dynamic loading of reinforced concrete beam on changes of its modal characteristics. The RC-beam was loaded by dynamic cyclic fatigue loading but also by static loading in several steps. After each step a complete experimental modal analysis was performed to determine modal parameters (eigenfrequencies, eigenmodes and damping) of the beam. Then the comparison of modal characteristics in dependence on the step of loading of the beam was done.

Klíčová slova: železobetonový nosník, únava, modální analýza, frekvence vlastního kmitání, tvary vlastního kmitání

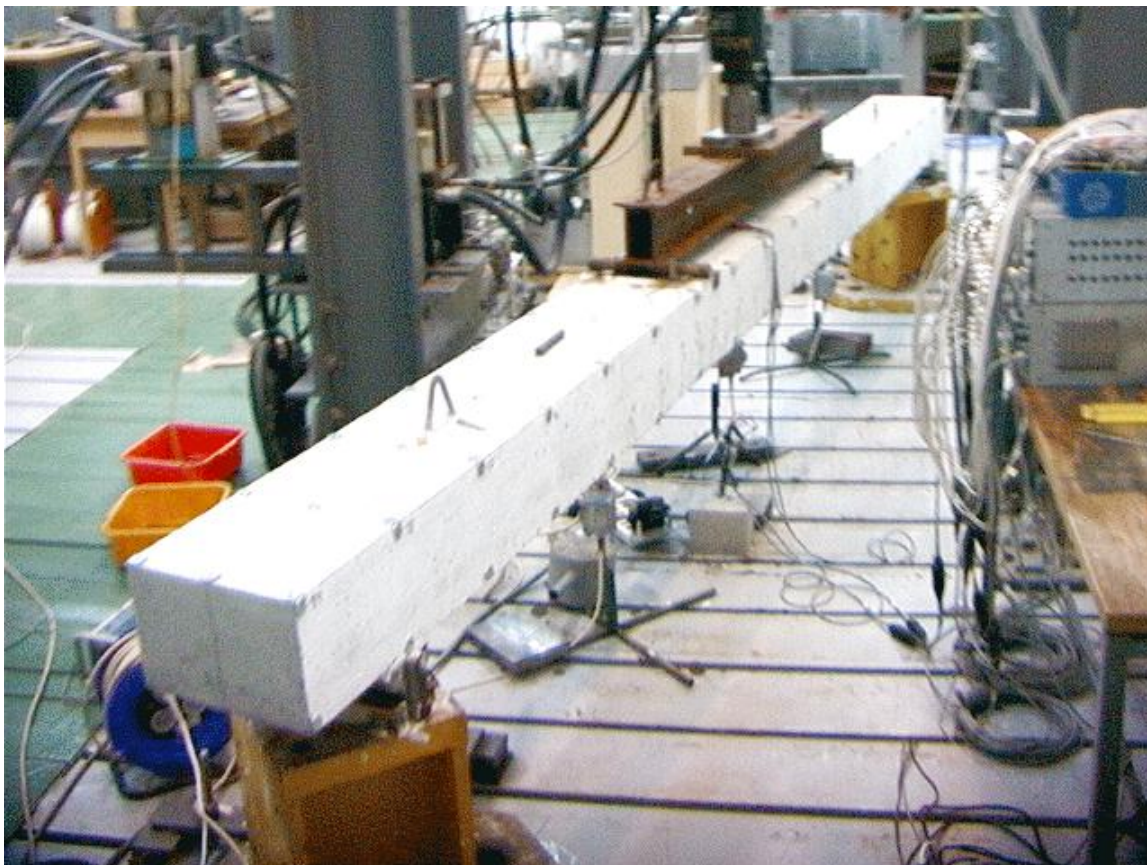
1. Úvod

Hlavním cílem popsaného experimentu bylo zjištění vlivu dynamického únavového namáhání trámu na změnu jeho modálních charakteristik (frekvencí, tvarů vlastního kmitání a jím příslušného útlumu). Zatěžování probíhalo celkem v šesti stupních. Nejprve byl trám zatěžován ve čtyřech stupních staticky a pak ve dvou dynamicky. Při jednotlivých stupních zatěžování byl podrobně sledován a dokumentován vznik a poškození trámu trhlinami. V článku jsou uvedeny výsledky porovnání vlastních frekvencí trámu pro jednotlivé stupně zatěžování. Změna tvarů vlastního kmitání je popsána korelačním koeficientem shody vlastních tvarů MAC.

2. Popis zkoušeného prvku

Pro účely tohoto projektu byl vyroben železobetonový trám o rozměrech 0,2 m x 0,3 m x 4,5 m (viz. Obr. 2.1). Nosníky byly vyrobeny z betonu B25. Hlavní výztuž sestávala ze čtyř tyčí (typu R) průměru 12 mm. Prvek byl uložen na ocelolitinová ložiska, aby bylo dosaženo co nejvěrněji teoretických okrajových podmínek. Ložiska byla uspořádána tak, aby trám působil jako prostý nosník o rozpětí 4,00 m s převýšenými konci 0,25 m na obou stranách.

¹ Ing. Tomáš Plachý, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, ČVUT Praha, Thákurova 7, Praha 6, 166 29 Česká republika, email: plachy@fsv.cvut.cz



Obr. 2.1 Zkoušený železobetonový trám

3. Zatěžování trámu

Zkoušení bylo provedeno v laboratořích Fakulty stavební ČVUT Praha.

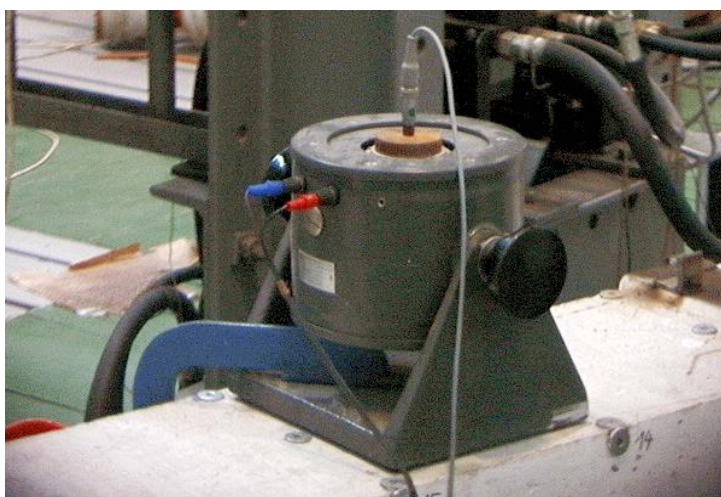
Poškození trámu, jehož vliv na změnu chování zkoušeného prvku byl sledován, bylo vyvoláno statickým a dynamickým zatěžováním provedeným v šesti stupních. Statické zatěžování bylo provedeno ve čtyřech stupních (zatížení vlastní tíhou, zatížení do teoretické meze vzniku trhlin, zatížení do skutečného vzniku trhlin a zatížení do poloviny mezního momentu únosnosti). Poté bylo provedeno dynamické únavové zatěžování, které proběhlo ve dvou stupních (zatěžování do 1/2 teoretické únavové životnosti a do konce únavové životnosti) (viz. Tab. 3.1.).

Přenos statické i dynamické síly na zkoušený trám byl uspořádán pomocí vahadel tak, aby ve střední třetině rozpětí zkoušeného trámu bylo dosaženo namáhání pouze ohybovým momentem konstantní velikosti.

Únavové namáhání trámu bylo vyvoláno harmonickou silou sinusového průběhu, amplituda této síly byla zvolena tak, aby vyvolaný rozkmit napětí ve výztuži způsobil únavové porušení trámu podle ČSN P ENV 1992-2 zhruba při 500 000 cyklech. Po ukončení každého zatěžovacího stupně byla k vyvolání dynamické odezvy trámu použita především budící síla náhodného charakteru, ale i síla s harmonickým průběhem.

Tab.3.1 Popis zatěžovacích stupňů

Označení stupně poškození	Hodnota max. ohybového momentu M [kNm]	Účinnost momentu M k Mu [%]	Popis stupně poškození
A	2.85	8.5	Zatížení vlastní tíhou
B	6.31	18.8	Namáhání rovno teoretické mezi vzniku trhlin
C	10.83	32.4	Vznik prvních trhlin v tažené oblasti trámu
D	18.81	56.2	Namáhání rovno ½ teoretického Mu
E			Cyklické zatěžování do dosažení ½ teoretické únavové životnosti
F			Cyklické zatěžování do dosažení teor. únavové živ.



Obr. 4.1. Elektrodynamický budič ESE 11 076

4. Postup měření a použitý měřicí systém

Při statickém zatěžování byly měřeny průhyby ve čtvrtinách a v polovině rozpětí trámu v závislosti na velikosti zatěžovací síly.

Pro buzení kmitání trámu při určování jeho modálních charakteristik byl použit elektrodynamický budič ESE 11 076 (Obr. 4.1). Budicí síla vyvozovaná budičem byla měřena nepřímo přes zrychlení budící hmoty. Na budící závaží byl umístěn snímač zrychlení B12/200 Hottinger Baldwin. Měření dynamické odezvy bylo provedeno dvěma způsoby. Při prvním způsobu měření budič vyvozoval budicí sílu náhodného charakteru. Kmitání budícího závaží bylo typu růžový šum (tzn. funkce časového průběhu výchylek závaží převedeného do frekvenční oblasti byla prakticky konstantní ve frekvenčním intervalu 5 až 200 Hz) a bylo řízeno signálním generátorem zabudovaným v měřicí ústředně VCS 2550. Poloha budícího bodu byla určena tak, aby z tohoto místa bylo možné vybudit všechny základní tvary vlastního kmitání trámu. Odezva prvku na buzení budičem byla měřena celkem deseti snímači zrychlení B12/200 Hottinger Baldwin ve zvolené síti bodů na horním povrchu a na jedné straně trámu (obr. 4.2). Snímače byly připojeny k zesilovačům KWS 673.A7 Hottinger Baldwin. Odtud byl analogový signál přiveden k měřicí ústředně VCS 2550B fy Spectral

Dynamic. K vyhodnocení frekvencí a tvarů vlastního kmitání byl použit program Star od firmy Spectral Dynamics.

Při druhém způsobu vyvozoval budič sílu harmonického průběhu. Odezva na buzení harmonickou silou byla měřena deseti snímači zrychlení umístěnými na horním povrchu trámu v jeho podélné ose (obr. 4.3).



Obr. 4.2. Umístění snímačů při buzení silou náhodného charakteru.



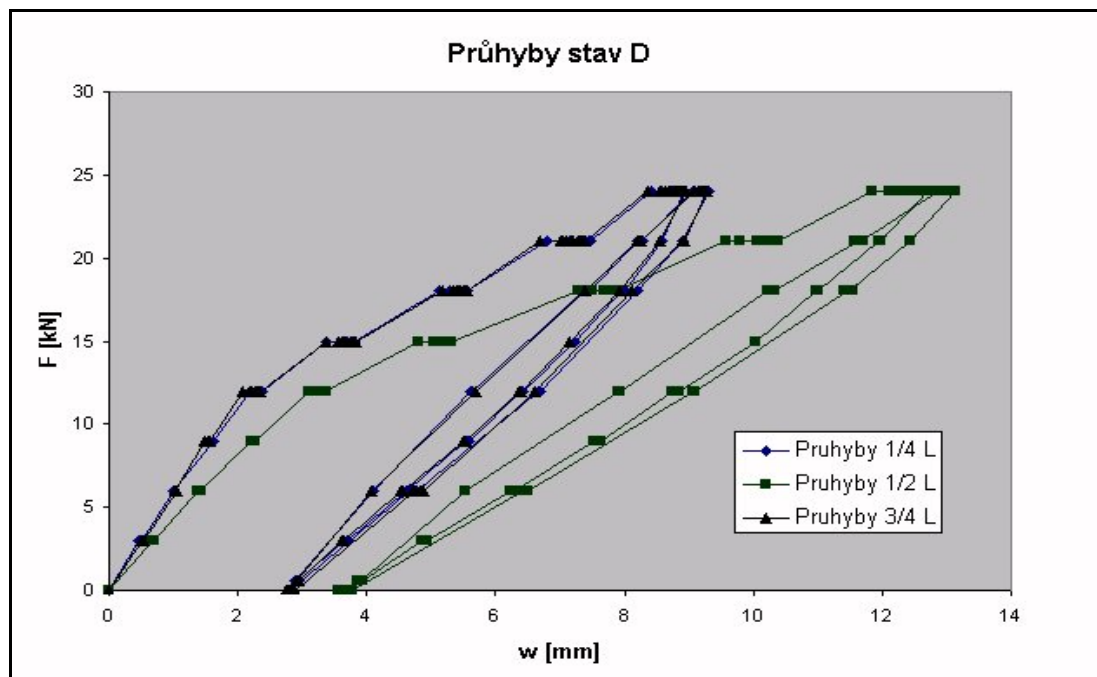
Obr. 4.3. Umístění snímačů při buzení silou s harmonickým průběhem.

5. Výsledky experimentu

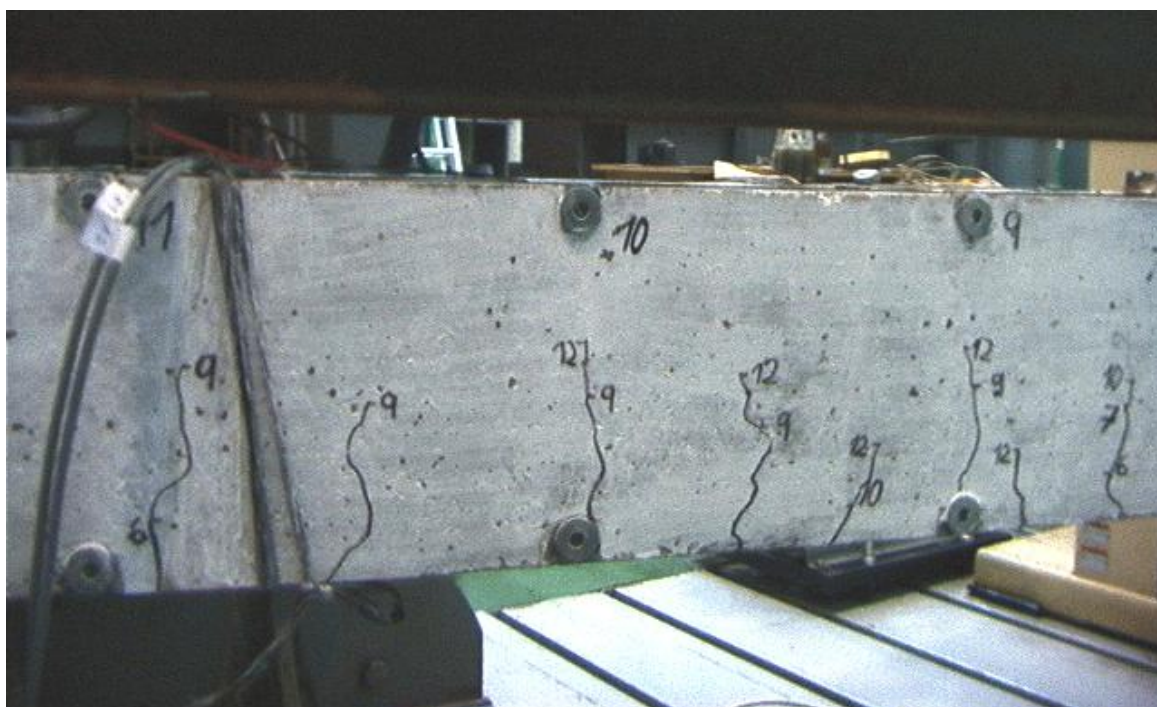
Na obr. 5.1. je vykreslena závislost změřených průhybů na velikosti zatěžovací síly při statickém zatěžování. Při každém stupni zatížení bylo také sledováno a podrobně zaznamenáno poškození trámu (viz. Obr. 5.2). Při stupni zatížení C se objevily první trhliny

uprostřed rozpětí trámu. Při dalším zatěžování docházelo k vzniku nových trhlin ve stále větší vzdálenosti od středu nosníku, zatímco již vzniklé trhliny se příliš neprodlužovaly.

Při dynamickém únavovém zatížení bylo dosaženo únosnosti zkoušeného trámu cca. při 260 000 cyklech. V mezním stavu došlo k přetržení dvou prutů hlavní výztuže ve středu rozpětí trámu (viz. Obr. 5.3).



Obr. 5.1. Graf závislosti průhybů na velikosti zatěžovací síly při statickém zatěžování do stupně poškození D



Obr. 5.2. Stupeň poškození D – Zakreslení trhlin

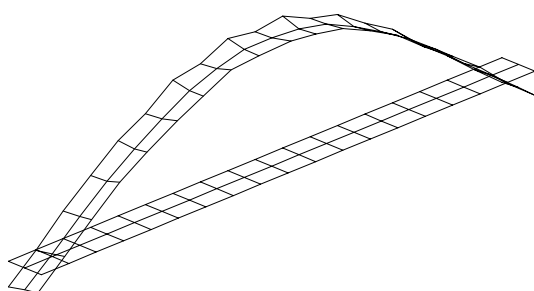


Obr. 5.3. Dosažení mezní únavové únosnosti trámu

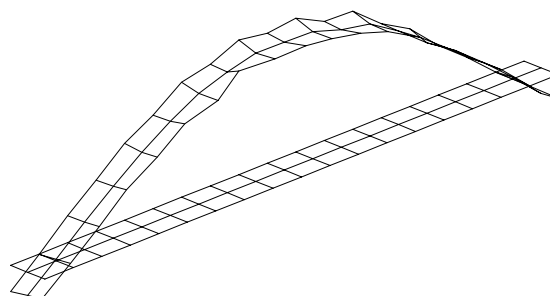
Vzhledem k frekvenčnímu rozsahu provedené dynamické analýzy 0-200 Hz byly pro každý zatěžovací stav naměřeny čtyři základní frekvence a tvary vlastního kmitání trámu. Vyhodnocené frekvence vlastního kmitání pro jednotlivé stupně poškození zkoušeného trámu jsou uvedeny v tab. 5.1. Vybrané změřené tvary vlastního kmitání jsou vykresleny na obr. 5.4. až 5.7.

Tab. 5.1. Frekvence vlastního kmitání trámu pro jednotlivé stupně poškození

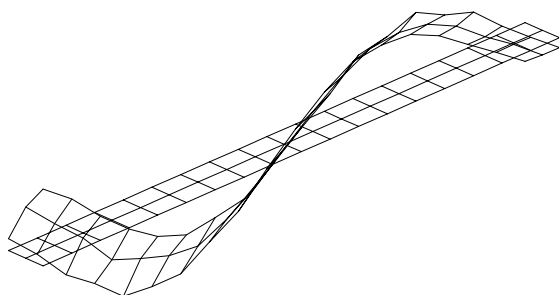
	A	B	C	D	E	Charakteristika vlastního tvaru kmitání
$f_{(1)}$ [Hz]	20.98	20.76	19.89	18.83	17.16	1. svislý ohybový tvar vlastního kmitání
$f_{(2)}$ [Hz]	25.92	26.07	25.74	25.31	22.93	1. vodorovný ohybový tvar vl. kmitání
$f_{(3)}$ [Hz]	87.37	86.97	85.32	82.99	67.18	2. svislý ohybový tvar vlastního kmitání
$f_{(4)}$ [Hz]	164.07	162.96	162.10	158.62	150.16	3. svislý ohybový tvar vlastního kmitání



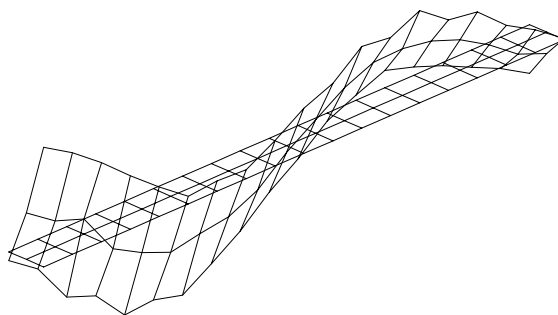
Obr. 5.4. 1.tvar vlastního kmitání
 $f_{(1)}=20,98$ Hz. Stupeň poškození A



Obr. 5.5 1.tvar vlastního kmitání
 $f_{(1)}=18,84$ Hz. Stupeň poškození D



Obr. 5.6. 2.tvar vlastního kmitání
 $f_{(2)}=87,35$ Hz. Stupeň poškození A



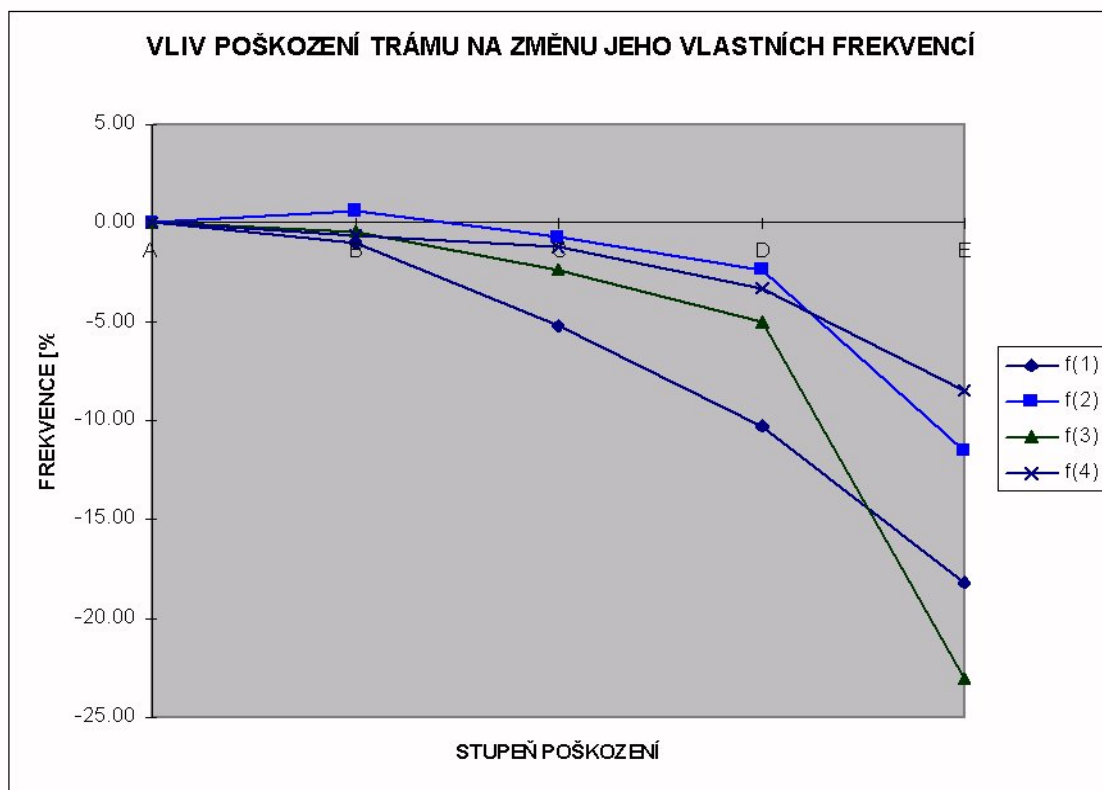
Obr. 5.7. 2.tvar vlastního kmitání
 $f_{(2)}=83,31$ Hz. Stupeň poškození D

6. Závěr

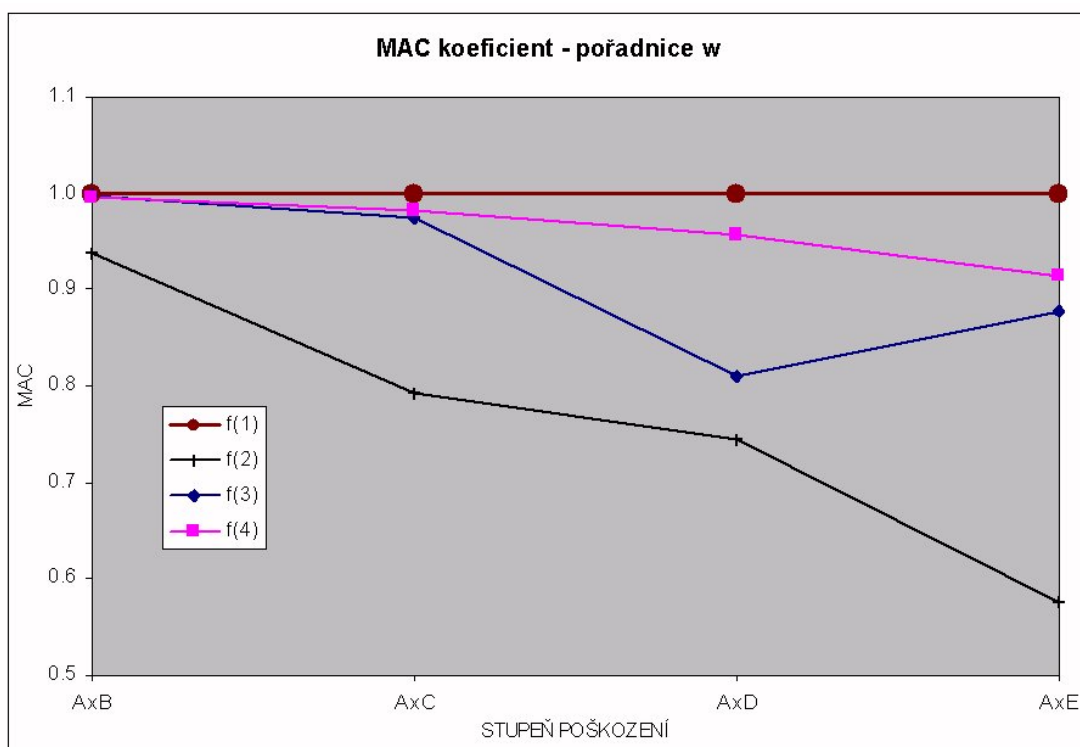
V rámci řešeného projektu byla sledována závislost dynamických vlastností železobetonového trámu na stupni jeho poškození. Poškození trámu mělo jednoznačný vliv na snížení všech změřených vlastních frekvencí (viz. Obr. 6.1) a ke změně vlastních tvarů popsané pomocí korelačního koeficientu modální analýzy MAC došlo především u 2. a 3. tvaru vlastního kmitání trámu (viz. Obr. 6.2).

Při dynamickém únavovém zatížení došlo ke kolapsu trámečku při cca 260 000 cyklech oproti předpokládaným 500 000 cyklů, tedy dříve než je předpokládáno v návrhové normě.

Tato práce byla podpořena Grantovou agenturou České republiky jako grant č. 103/96/K034.



Obr. 6.1. Vliv poškození trámu na změnu jeho vlastních frekvencí. Snížení je vyjádřeno poměrem vzhledem k frekvencím trámu v nepoškozeném stavu.



Obr. 6.2. Vliv poškození trámu na změnu jeho tvarů vlastního kmitání. Změna je vyjádřena pomocí MAC koeficientu.

Literatura:

- [1] Polák, M. – Plachý, T. . – Karásek, P. : The Damage Influence on Frequencies and Modes of Natural Vibration of Reinforced Concrete Beams. *Non-destructive Testing and Experimental Stress Analysis of Concrete Structures. Proceedings of RILEM – IMECO International Conference*. Košice : Expertcentrum . 1998. p. 369-374.
- [2] Slašťan, J. - Pietrzko, S.: Experimental modal analysis of RC-beams damaged by cracks. *Proceedings of the RILEM International Conference*. Expertcetrum Bratislava - T. Javor, Bratislava, 1995.
- [3] Ndambi, J. M. -Peeters, B. - Vantomme, J. - De Visscher, J. - De Wilde, W. P. - De Roeck, G. : Evaluation of structural damage by dynamic system identification. *Proceedings of the 2nd RILEM International Conference*. Expertcetrum Bratislava - T. Javor, Bratislava, 1996.
- [4] Maia, N. – Silva, J. : Theoretical and Experimental Modal Analysis. Research Studies Press Ltd. Taunton, England. 1997
- [5] ČSN P ENV 1992-2 : Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty. 1998