

E x p e r i m e n t á l n í A n a l ý z a N a p ě t í

2004

DAMAGE IDENTIFICATION OF REINFORCED CONCRETE SLAB USING MODAL ANALYSIS

IDENTIFIKACE POŠKOZENÍ ŽELEZOBETONOVÉ DESKY S VYUŽITÍM MODÁLNÍ ANALÝZY

Tomáš Plachý¹, Michal Polák²

The influence of damage increase of a simple reinforced concrete slab on change of its modal characteristics was monitored in this dynamic study. The reinforced concrete slab was tested in four points bending to get a constant bending moment in the mid-section of the slab. The state deterioration of the slab was done by static and dynamic fatigue loads in several steps. Before the test and after each load step the dynamical response of the slab was measured with a separate test arrangement. Modal characteristics of the slab, which were measured after each loading step, were mutually compared. Changes of natural frequencies $\Delta f_{(i)}$ of the slab were computed first. For the comparison of natural modes, the modal assurance coefficients $MAC_{(i,j)}$, coordinate modal assurance criterions $COMAC_{(i)}$, changes of a mode surface curvature $CAMOSUC_{(i),x}$, changes of a modal flexibility matrix $\Delta[\delta]$ and second derivative of changes of diagonal members of a modal flexibility matrix $\Delta[\delta]''$ were used. Tests of the slab were carried out in laboratories of Faculty of Civil Engineering CTU in Prague.

Keywords *Natural mode, natural frequency, MAC, COMAC, modal flexibility matrix, modal surface curvature, , modal analysis, vibration based damage detection.*

Klíčová slova *Vlastní frekvence, tvary vlastního kmitání, MAC, COMAC, matice modální poddajnosti, křivost vlastních tvarů, modální analýza, detekce poškození*

Úvod

Modální charakteristiky stavební konstrukce (vlastní frekvence a vlastní tvary a jim příslušný útlum) definují její dynamickou individualitu ovlivněnou pouze její okamžitou tuhostí a hmotností. Například v [5] bylo zkoumáno ovlivnění modálních charakteristik stavební konstrukce tuhostí zeminy v jejím podloží.

Včasná detekce poškození stavební konstrukce ve stavu, kdy je co možná nejméně poškozena je velmi důležitá. Pro použití současných metod detekce poškození je nutné znát přibližnou polohu poškození a toto místo musí být snadno přístupné. Potřeba metod, které by mohly být použity na konstrukci jako celek vedla k vývoji metod detekce poškození založených na změně

¹ Ing. Tomáš Plachý, Ph.D.: Fakulta stavební ČVUT v Praze; Thákurova 7, 166 29 Praha 6, ČR, tel.: +420224354483, e-mail: plachy@fsv.cvut.cz

² doc. Ing. Michal Polák, CSc.: Fakulta stavební ČVUT v Praze; Thákurova 7, 166 29 Praha 6, ČR, tel.: +420224354476, e-mail: polak@fsv.cvut.cz

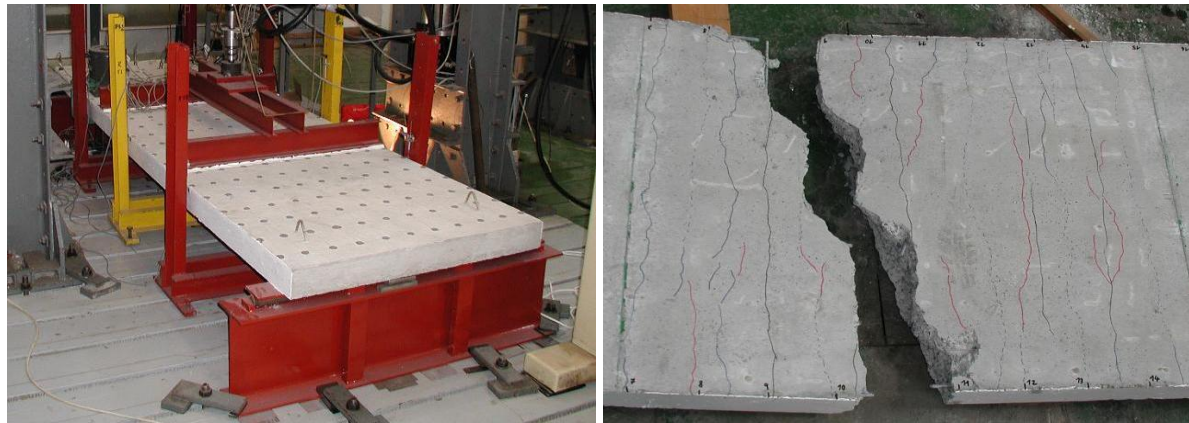
modálních charakteristik stavební konstrukce (např. [1], [2], [3], [4]). Tyto nové metody a postupy je vhodné ověřovat na jednoduchých stavebních prvcích [1], [3], [4]. V rámci popisované studie byly sledovány změny modálních charakteristik železobetonové desky v závislosti na míře jejího poškození.

Popis zkoušené desky

Pro účely tohoto projektu byla vyrobena železobetonová deska o rozměrech 0,1 m x 1,0 m x 3,2 m. Deska byla vyrobena z betonu B25. Hlavní výztuž sestávala z 11 tyčí (typu R) o průměru 8 mm. Deska byla na dvou protilehlých stranách prostě podepřena 0,1 m od kraje, vzdálenost podpor byla 3 m. (Obr.1)

Zatěžování desky

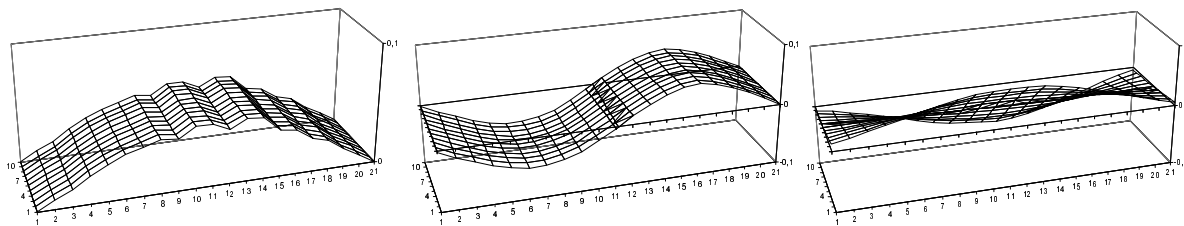
Poškození desky bylo vyvoláváno statickým a dynamickým zatěžováním provedeným v několika stupních. Statické zatěžování proběhlo ve čtyřech stupních (zatížení vlastní tíhou – stav A, zatížení do teoretické meze vzniku trhlin – stav B, zatížení do skutečného vzniku prvních trhlin –stav C a zatížení do poloviny mezního momentu únosnosti – stav D). Poté bylo provedeno dynamické únavové zatěžování, které proběhlo v pěti stupních (zatěžování do 1/2 teoretické únavové životnosti – stav E, zatěžování do konce teoretické únavové životnosti – stav F, zatěžování do 3/2 teoretické únavové životnosti – stav G, zatěžování do dvojnásobku teoretické únavové životnosti – stav H a zatěžování do konce skutečné únavové životnosti – stav I) (Obr.1).



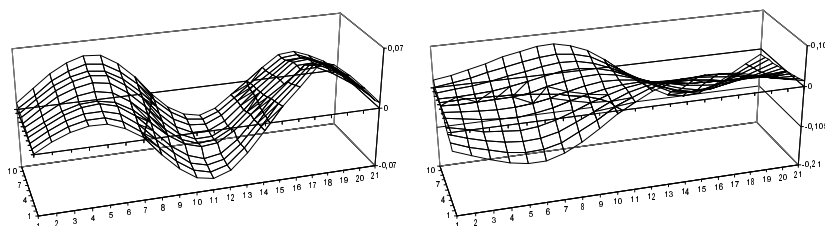
Obr.1 Železobetonová deska. Zakreslení trhlin a závěrečný lom

Lokalizace poškození desky

Po každém stupni statického a dynamického zatěžování byla provedena experimentální modální analýza. Vzhledem k frekvenčnímu rozsahu provedené dynamické analýzy (0 až 200 Hz) bylo pro každý zatěžovací stav určeno celkem pět frekvencí a tvarů vlastního kmitání desky (tři z nich jsou vlastní tvary příslušné k svislému ohybovému kmitání (Obr.2)).



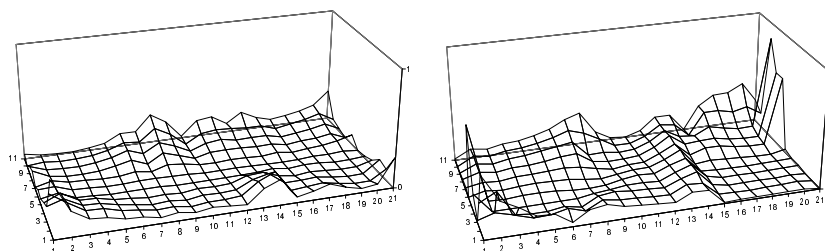
1., 2. a 3. tvar vlastního kmitání, $f_{(1)} = 11,73 \text{ Hz}$, $f_{(2)} = 49,08 \text{ Hz}$, $f_{(3)} = 69,00 \text{ Hz}$



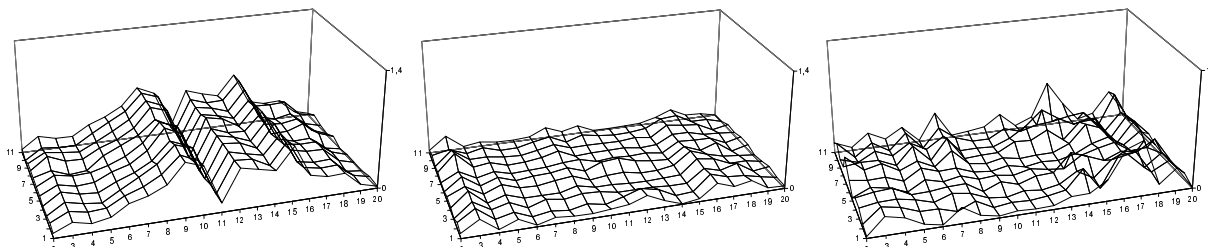
4. a 5. tvar vlastního kmitání, $f_{(4)} = 116,30 \text{ Hz}$, $f_{(5)} = 131,48 \text{ Hz}$

Obr.2 Tvary vlastního kmitání desky – stav H.

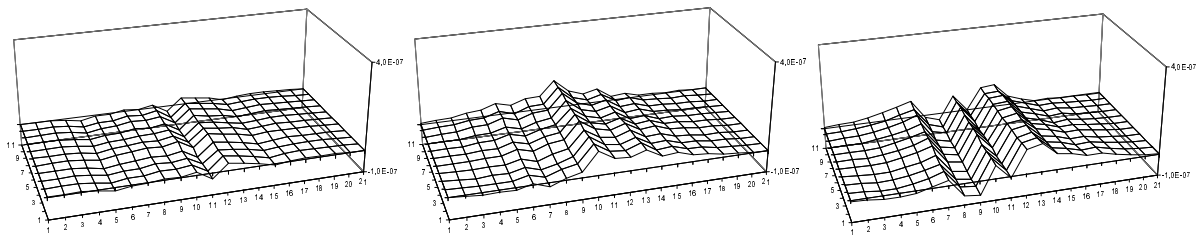
Modální charakteristiky určené při jednotlivých zatěžovacích stupních byly vzájemně porovnány. Kromě výpočtu změny vlastních frekvencí mezi jednotlivými zatěžovacími stupni, koeficientů $MAC_{(i)}$, $COMAC_{(p)}$ a změny matice modální poddajnosti $\Delta[\delta]$ byla k lokalizaci poškození také použita změna křivosti tvarů vlastního kmitání $CAMOSUC_{(i),x}$ definovaná v [2] a druhá derivace změny diagonálních členů matice modální poddajnosti $\Delta[\delta]''$ definovaná v [3]. Na základě rozložení hodnot jednotlivých koeficientů byla provedena identifikace poškození železobetonové desky a výsledky byly porovnány se zaměřenou polohou poruchy (Obr.1).



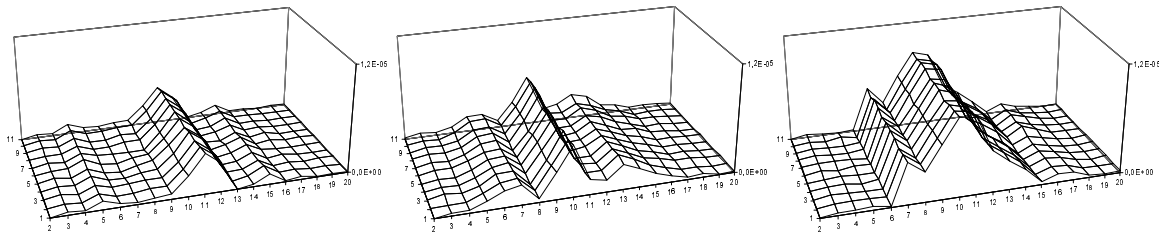
Obr.3 Funkce $(1-COMAC_{(p)})$ AxH a GxH.



Obr.4 Funkce $CAMOSUC_{(1),x}$, $CAMOSUC_{(2),x}$, $CAMOSUC_{(3),x}$ AxH.



Obr.5 Změna matice modální poddajnosti $\Delta[\delta]$ AxB, AxC a AxD.



Obr.6 Druhá derivace změny diagonálních členů matice modální poddajnosti $\Delta[\delta]''$ AxB, AxC a AxD.

Závěr

Použití koeficientu $COMAC_{(x)}$ pro lokalizaci poškození desky se neosvědčilo. Změny hodnot koeficientu $COMAC_{(x)}$ v jednotlivých bodech jsou malé a neshodují se s rozložením trhlin (Obr.3). U funkce $CAMOSUC_{(j),x}$ odpovídá rozložení trhlin pouze $CAMOSUC_{(1),x}$ vypočítaná z 1. tvaru vlastního kmitání. Hodnoty pořadnic $CAMOSUC_{(2),x}$ a $CAMOSUC_{(3),x}$ jsou výrazně menší než u funkce $CAMOSUC_{(1),x}$ a vykazují daleko menší shodu s polohou trhlin (Obr.4). Změna matice modální poddajnosti $\Delta[\delta]$ názorně popisuje rozložení postupného nárůstu poddajnosti (Obr.5) v poškozené oblasti desky, extrémní hodnoty druhé derivace změny diagonálních členů matice modální poddajnosti $\Delta[\delta]''$ vykazují dobrou shodu s polohou trhlin na desce (Obr.6).

Tato práce byla podpořena Ministerstvem školství České republiky jako výzkumný záměr CEZ: J04/98: 210000030.

Literatura

- [1] Frýba, L.-Pirner, M.-Urushadze, S.: *Localization of Damages in Concrete Structures - Proceedings of Computational Methods and Experimental Measurements X*, pp. 417-426, 2001.
- [2] Pirner, M. – Urushadze, S.: *Aplikace dynamické odezvy na identifikaci stavebních konstrukcí a jejich poškození*. - ÚTAM AVČR, Praha, 2001, 50 str.
- [3] Plachý, T.: *Dynamická studie železobetonového trámu poškozeného trhlinami* – FSv ČVUT Praha, 2003, Doktorská disertační práce, 139 str.
- [4] Plachý, T.-Polák, M.: *Influence of Damage of a Reinforced Concrete Beam on Change of Its Behaviour* - Proceedings of the 5th International Conference on Structural Dynamics – EURO DYN2002, Munich, Germany, pp. 1451 –1456, 2002
- [5] Kuchárová, D.: *Vlastné frekvencie dosky na Winklerovom pružnom podklade*. – Proc. of the 1st International Conference DYN-WIND 2000, Vyhne, SR pp 243-246, 2000.