

AEROELASTIC BALANCE FOR TALL BUILDING MODEL TESTS

J. Král*

Summary: *An aeroelastic balance has served as an effective tool for the response prediction of tall buildings. A three-degree of freedom aeroelastic balance were designed and manufactured. Model tests of the stiff building model and the aeroelastic balance system were performed in a boundary layer wind tunnel. The mean and standard deviation of base bending moments were presented as a function of the wind direction. Root-mean-square coefficients of base bending moments were calculated from the response of the Shiran Tower building in the period of strong winds and compared with the results of the model tests.*

1. Úvod

Stanovení odezvy vysokých a velmi vysokých aeroelastických budov na zatížení větrem vyžaduje znalost jejich dynamických vlastností, součinitelů tlaků nebo sil (závisí na tvaru průřezu) a dalších charakteristik zatížení. V jednoduchých případech je postup popsán v literatuře nebo i v normách. Pokud mají budovy neobvyklý tvar nebo jsou v jejich okolí srovnatelně velké budovy, jsou pro posouzení skutečných účinků větru obvykle nutné modelové zkoušky ve větrném tunelu. V první řadě je nutné vyloučit možnost vzniku některého ze známých jevů aeroelastické nestability. Dále je nutné získat podklady pro návrh nebo kontrolu nosného systému a prvků obvodového pláště nebo střechy. Neméně důležité je posouzení dynamické složky odezvy např. z hlediska účinků na osoby v budově.

Pro kmitání vysokých budov jsou zpravidla nejvýznamnější základní tvary ohybového (popř. smykového) a torzního kmitání. Extrémní hodnoty momentů od zatížení větrem a setrvačných sil kmitající budovy lze efektivně stanovit modelovým měřením ve větrném tunelu pomocí tzv. aerodynamické váhy. Tuhý geometrický model budovy je upevněn na univerzální váhy, které mu dodávají dynamické vlastnosti modelované budovy (vlastní tvary kmitání, vlastní frekvence a útlum). Z odezvy modelu lze posoudit možnost vzniku jevů aerodynamické nestability. Velikost momentů se měří tenzometry. Z maximálních momentů lze zpětně odvodit součinitel momentu pro ekvivalentní statické zatížení konstrukce.

Příspěvek popisuje realizaci dynamické váhy, měření odezvy modelu budovy ve větrném tunelu a porovnání naměřených hodnot odezvy skutečné budovy a jejího modelu.

2. Konstrukční řešení vah

V literatuře je popsána celá řada typů vah, které se dělí např. podle funkce na aerodynamické a aeroelastické nebo podle počtu měřených veličin. Měřicí systémy aerodynamických vah (HFBB) mají vysoké vlastní frekvence a jsou vhodné jak pro modely tuhé, tak pro modely

* Ing. Jaromír Král, CSc., ČVUT Kloknerův ústav, Šolínova 7, 166 08 Praha, e-mail: jkral@klok.cvut.cz

aeroelastické. U tuhých modelů se obvykle měří aerodynamické síly působící na model a případné vlastní kmitání soustavy „model+váha“ (dále jen SMV) je nežádoucí. Při použití aeroelastického modelu lze změřit aerodynamické i setrvačné síly, způsobené kmitáním modelu. Aerodynamické váhy mají obvykle dva až šest stupňů volnosti.

Aeroelastické váhy připouštějí kmitání tuhého modelu, přičemž vlastní tvary, vlastní frekvence a útlum SMV modelují dynamické vlastnosti skutečné budovy. Pro určité typy konstrukcí (např. vysoké budovy) je tato soustava ekvivalentem tzv. aeroelastického modelu I. typu. Odezva modelu se určuje měřením momentů zatížení k osám kývání nebo otáčení. Dynamickou složku odezvy lze stanovit také měřením zrychlení vrcholu modelu. Lineární tvary kmitání SVM a rovnoměrné rozdělení hmoty po výšce tuhého modelu jenom aproximují skutečné tvary kmitání a skutečné rozdělení hmotnosti po výšce modelované budovy. Dopad na přesnost modelového měření a metody korekce naměřených momentů analyzují např. (Holmes, J., Rofail, A. & Aurelius, L., 2003). Použití aerodynamických vah je efektivní při experimentálním vyšetřování vlivu okolní zástavby na odezvu budovy. Nejčastější konstrukční varianty aeroelastických vah jsou:

1. váhy s modelem upevněným na pružných závěsech;
2. váhy s centrálním sloupem, kloubem, šroubovými pružinami a tlumícími prvky;
3. váhy s centrálním sloupem, kloubem, plochými pružinami a tlumícími prvky.

První varianta vah byla modelována programem NEXIS 32. Její nevýhodou jsou „nežádoucí“ vlastní frekvence závěsného systému. Druhá varianta je jednoduché řešení pro obě roviny kývání modelu, vyžaduje však velký prostor pod tunelem (není k dispozici) a je obtížně realizovatelná pro vyšší vlastní frekvence SMV. Kompaktní třetí varianta je pro daný tunel pravděpodobně nejvýhodnější. Varianty vah s centrálním sloupem jsou vhodné pro modelování budov s vázanými tvary ohybového nebo ohybového a kroutivého kmitání. Pro všechny varianty platí, že vlastní frekvence SMV by měly být co nejvyšší. Momenty se obvykle měří tenzometry nebo je možné měřit kmitání modelu snímači zrychlení.

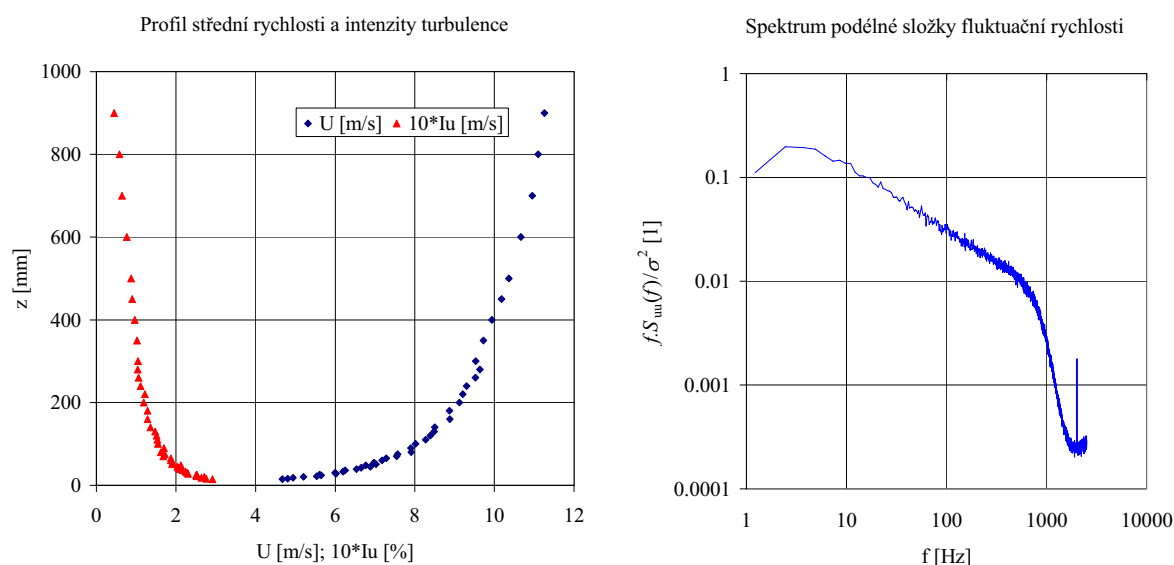
Byla zvolena třetí varianta v provedení pro tři stupně volnosti. Model budovy je otočný kolem svislé osy. Torzní tuhost budovy modelují ploché pružiny. Dvě z nich jsou osazeny tenzometry pro měření odezvy. Osa modelu je přišroubována ke kloubu, který umožňuje kývání modelu kolem dvou vodorovných a navzájem kolmých os přibližně v rovině horní plochy základové desky vah. Ze spodní strany kloubu je připojen centrální sloup, který přenáší kývavý pohyb modelu na pružné prvky pod základovou deskou vah a nese protizávaží. Pružné prvky jsou navrženy tak, aby vlastní frekvence SMV odpovídaly v modelovém měřítku vlastním frekvencím prototypu. Tuhost pružného uložení je možné v určitém rozsahu změnit – to umožňuje doladění vlastních frekvencí modelu. Pružné prvky jsou současně tenzometrické snímače. Byly navrženy také tlumící prvky pro jednotlivé pohyby na principu vířivých proudů. Poslední verze torzního systému nevyžaduje přídavné tlumení, u kyvných systémů tohoto provedení vah je tlumení bez dodatečných tlumících prvků zatím velké (kolem 3%) a vyvíjí se. Proto nebyly tlumící prvky instalovány.

3. Modelové zákony

Modelové zákony pro aeroelastické modely publikoval Isyumov, N. (1982). Podle práce (Thepmongkorn, S., Kwok, K.C.S. & Lakshmanan, N., 1999) je možné je podmínky podobnosti shrnout jako podobnost hmotností ρ_s/ρ_a (měrné hmotnosti konstrukce a vzduchu), podobnost tuhostí (poměr modulu pružnosti konstrukce a dynamického tlaku větru)

a podobnost tlumení (shoda poměrného útlumu konstrukce a modelu). Chování SMV se třemi stupni volnosti popisuje soustava tří diferenciálních rovnic, v obecném případě vázaných. Z nich lze odvodit modelová měřítka. Případné korelace mezi kmitáním modelu v různých směrech se použijí pro korekci naměřených momentů. Zvolená varianta dovoluje modelování s budov s vázaným ohybovým a torzním kmitáním.

Vlastnosti mezní vrstvy ve větrném tunelu poskytli autorovi pracovníci VZLÚ a.s. (Zacho, D., 2008). Jsou vyneseny na obr. 1. Profil střední rychlosti lze přibližně popsat exponentem mocninné funkce $\alpha = 0,164$ a nastavenou hodnotou rychlosti $U(400)$ na úrovni vrcholu budovy. Profil intenzity turbulence hodnotou $I_u(400) = 9,7\%$ a exponentem $\alpha = -0,356$. Integrální délka turbulence ve výšce 300 mm je 0,445 m.



Obr. 1 Charakteristiky mezní vrstvy ve větrném tunelu VZLÚ

4. Budova

Byla modelována administrativní budova „Shiran Tower“ na západním okraji Prahy pro svoji vhodnou polohu pro monitorování odezvy na zatížení větrem. Z hlediska současných měřítek nejde ani o vysokou budovu ani není citlivá na dynamické účinky větru. Statická i dynamická složka odezvy na zatížení větrem jsou však dobře měřitelné. Vlastnosti budovy a její odezva při orkánu Kyrill jsou popsány v (Král, J., 2007). Budova má 17 podlaží. Po rekonstrukci obvodového pláště je 63,8 m vysoká, má průřez 31 m \times 14 m a kratší krajní stěny včetně architektonických prvků mají šířku 14,9 m. Nosný systém tvoří dvě stěny 12,4 m dlouhé na krajích budovy tloušťky 0,35 m, orientované ve směru kratšího rozměru, jedna 18 m dlouhá podélná stěna tloušťky 0,2 m ve středu průřezu a montovaná železobetonová rámová konstrukce se třemi řadami sloupů. Budova je založena na skalním masivu a není podsklepena. Fotografie budovy je na obr. 2a. V (Král, J., 2008) uvedeny výsledky výpočtu a poznatky z dlouhodobého sledování odezvy budovy. Modelované vlastní frekvence budovy jsou 0,75 Hz, 1,0 Hz (torzní) a 1,312 Hz. Při dynamické zkoušce před rekonstrukcí pláště budovy byla zjištěna hodnota logaritmického dekrementu útlumu 0,074 (0,83 Hz).

5. Návrh modelu

Váhy jsou koncipovány jako univerzální. Jejich použití pro výše uvedenou budovu „Shiran Tower“ bylo vyvoláno rekonstrukcí plánované budovy v době řešení projektu. Dále tím, že se podařilo změřit dynamickou složku odezvy této budovy při silném větru. Zhotovení SMV, která by splňovala modelové zákony je však v tomto případě prakticky nemožné, protože tato budova má velmi vysokou tuhost a hmotnost. Byla přijata řada kompromisů s cílem využít výsledky měření na budově pro ověření vyvíjených vah. Paralelně se připravuje ověření vah pomocí výsledků modelových měření publikovaných v literatuře.

Model budovy je navržen v měřítku délek 1:150. Fotografie modelu budovy ve větrném tunelu je na obr. 2b. Hmotnost modelu (cca 0,5 kg včetně mechanismů pro otáčení a měření odezvy) je záměrně vyšší než ideální hmotnost podle modelového měřítka hmotností. Cílem bylo naladit model tak, aby jeho vlastní frekvence byly v pásmu 10-30 Hz. Na měřené momenty to nemá vliv. V současné době realizovaná SMV umožňuje modelování první ohybové a torzní frekvence v požadovaném modelovém měřítku. Třetí modelovaná vlastní frekvence je nižší o 39% než vyžaduje modelová podobnost. Podle provedených měření je to vlastní frekvence samotného modelu. Tuhost modelu není dostatečně vysoká a má to vliv i na tlumení SVM. Tento problém se řeší.

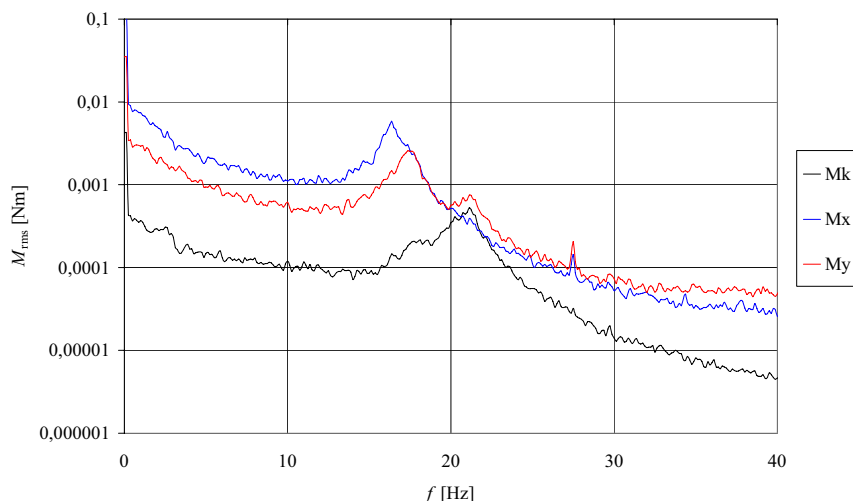


Obr. 2 a) Budova Shiran Tower. b) Model budovy ve větrném tunelu.

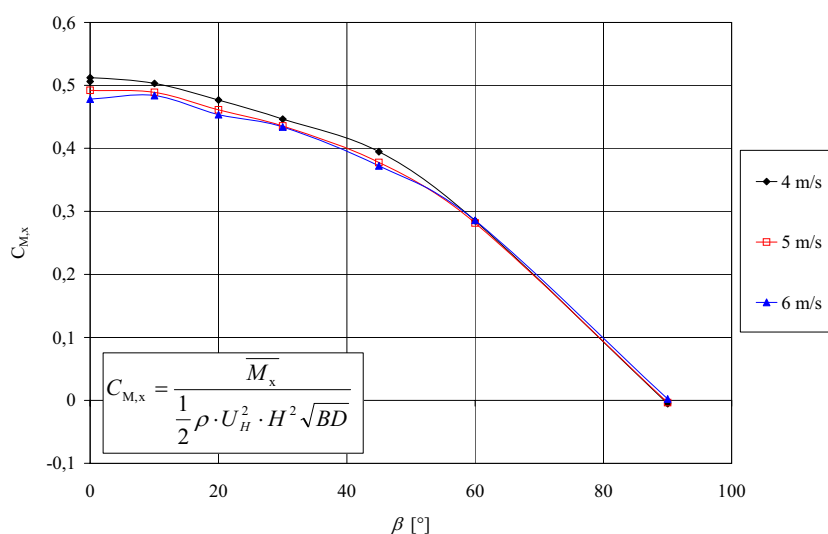
6. Výsledky zkoušek modelu budovy ve větrném tunelu

Na obr. 3 je ukázka spekter flukтуаční složky momentů při střední rychlosti 5 m/s na vrcholu budovy a při úhlu náběhu $\beta = 30^\circ$. Jsou zde patrné vrcholy, odpovídající vlastním frekvencím SVM. Obr. 4 ukazuje střední hodnoty součinitele momentu $C_{M,x}$ (moment kolem delší osy půdorysu budovy) pro různé rychlosti proudu ve výšce vrcholu budovy. V rámečku je vztah pro výpočet součinitele momentu, ve kterém je M_x střední hodnota momentu kolem osy x , H

je výška modelu, B a D jsou délky stran průřezu modelu, U_H je střední rychlost na vrcholu modelu a ρ je měrná hmotnost vzduchu. Na obr 5 je příklad závislosti součinitele flukтуаční složky momentu $C_{M,x,rms}$ na úhlu náběhu β . Definice součinitele momentu je uvedena v obrázku. Symbol $\sigma_{M,x}$ označuje efektivní hodnotu momentu kolem osy x .



Obr. 3 Spektra flukтуаční složky momentů ($U(400) = 5 \text{ m/s}$, $\beta = 30^\circ$)

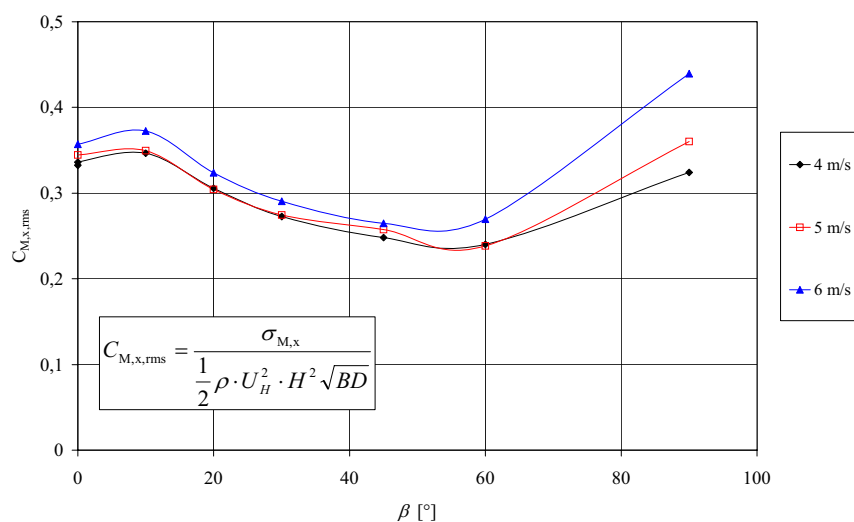


Obr. 4 Závislost střední hodnoty součinitele momentu $C_{M,x}$ na úhlu náběhu β

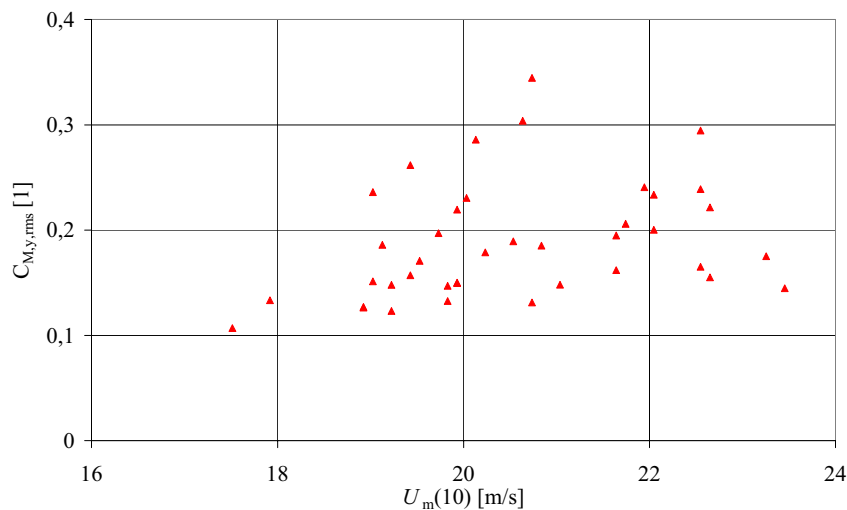
7. Výsledky měření odezvy budovy „Shiran Tower“

Na budově jsou kromě anemometru instalovány snímače zrychlení, které nepřetržitě monitorují kmitání budovy. Dále jsou zde dva tenzometrické snímače, které měří také střední složku odezvy budovy. Cílem monitorování jsou záznamy odezvy budovy při silném větru. Výskyt silných větrů je velmi řídký. Ze záznamů zrychlení při orkánu Kyrill byly vypočteny hodnoty součinitele flukтуаční složky momentů $C_{M,x,rms}$. Pro výpočet byl použit stejný vztah uvedený na obr. 5. Hodnoty součinitelů jsou vyneseny na obr. 6. Na vodorovné ose jsou střední rychlosti větru ve výšce 10 m (Praha Ruzyně) v době záznamu. Směr větru při

použitých záznamech byl prakticky stejný (248°) a součinitele momentu byly přepočteny na směr kolmý k delší straně průřezu budovy (cca 270°). Velký rozptyl hodnot součinitele momentu pro blízké rychlosti dokládá nestacionární charakter průběhu zatížení a odezvy při dlouhých záznamech (300 s). Z hlediska řešené problematiky je velmi důležitá maximální hodnota součinitele ($C_{M,x,rms} = 0,345$). Je to prakticky stejná jako hodnota tohoto součinitele z měření ve větrném tunelu uvedená na obr. 5 pro $\beta = 0^\circ$.



Obr. 5 Závislost flukтуаční složky součinitele momentu $C_{M,x,rms}$ na úhlu náběhu β



Obr. 6 Budova „Shiran Tower“ – naměřené hodnoty součinitele $C_{M,y,rms}$

8. Závěr

Cílem řešení byl návrh a realizace aeroelastických vah se třemi stupni volnosti, jejich využití pro zjištění odezvy modelu budovy ve větrném tunelu a porovnání naměřených hodnot s odezvou modelované budovy při silném větru. Váhy byly realizovány, jejich využití pro modelové zkoušky zvolené budovy je zatím omezeno na dva stupně volnosti. Probíhá dlouhodobé monitorování odezvy budovy na zatížení větrem a mimo jiné byla zaznamenána

odezva budovy při hurikánu Kyrill v roce 2007. Ze záznamů byly stanoveny hodnoty součinitele flukтуаční složky momentu. Byl vyroben model budovy a při zkouškách ve větrném tunelu byly stanoveny součinitele střední a flukтуаční složky momentu ve směru kolmém na delší stranu průřezu budovy. Maximální hodnoty flukтуаční složky součinitele momentu pro směr kolmý na delší stranu půdorysu budovy z měření na budově a ve větrném tunelu jsou prakticky shodné.

9. Poděkování

Příspěvek byl zpracován základě výsledků řešení projektů GA ČR č. 103/06/1522. Autor touto cestou děkuje za poskytnutí prostředků na řešení projektu. Autor děkuje také vlastníkům, vedení a pracovníkům budovy Shiran Tower za pokračující spolupráci.

10. Literatura

Holmes, J., Rofail, A. & Aurelius, L. (2003) High frequency base balance methodologies for tall buildings with torsional and coupled resonant modes. *11th International Conference on Wind Engineering*, Texas.

Isyumov, N. (1982) The aeroelastic modelling of tall buildings, In *Wind Tunnel Modeling Criteria and techniques in Civil Engineering Applications*, Gaithersburg, MD, Cambridge University Press.

Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures(ed.N.Isyumov), ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.67, ACSE

Král, J. (2007) Dynamic response of a high building in strong wind, IM 2007, Svratka, 12 p.

Král, J. (2008) Dynamické vlastnosti vysoké budovy zatížené větrem, DYNWIND 2008, Papradno, 4 p.

Thepmongkorn, S., Kwok, K.C.S. & Lakshmanan, N. (1999) A two-degree-of-freedom hinged aeroelastic (BHA) model for response prediction, JWEIA 83, pp. 171-181.

Zacho, D. (2008) Vlastnosti modelované mezní vrstvy. (osobní komunikace)