National Conference with International Participation
ENGINEERING MECHANICS 2003
Svratka, Czech Republic, May 12 – 15, 2003
paper no. 138

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF EXTREME DYNAMIC LOAD EFFECTS ON BUILDING STRUCTURE

J. Záruba-Pfeffermann*, P. Štemberk*

Sumary: *Diagnostics based on monitoring of response changes in relation to operation load is a method determination of residual service life of building structures, state estimation and service optimisation.*
The goal of this paper is development of the methodology, oriented on the continual evaluation of the probabilistic characteristics of dynamic response of structure like autocorrelation function. This evaluation deals with step by step integration of absolute values of differences response values at separate of paints in time .

1. Úvod:

Pro naprostou většinu stavebních konstrukcí v reálných podmínkách ČR je dynamické přitížení zanedbatelnou záležitostí na úrovni obvyklých nejistot předpokladů pro posouzení rizik vyplývajících z dominantního statického zatížení stavební konstrukce a je tudíž princip zavádění dynamických koeficientů zcela přiměřený úrovni přídavných rizik vyplývajících z reálného dynamického přitížení.
Na druhé straně :

- Selhání staveb vedoucí k její destrukci je téměř vždy iniciováno přídavným (zpravidla mimořádným) dynamickým účinkem. Ať již se jedná o úmyslnou destrukci, přírodní katastrofu, důsledek selhání vnitřního vybavení, nebo jen o pověstné „poslední zrnko písku“.
- Pro celé oblasti stavebnictví (výškové budovy, věže, stožáry a obecně štíhlé konstrukce) je naopak dynamické zatížení, zejména v horizontálním směru, naopak naprosto dominantním rizikem.
- Mimořádné dynamické zatížení může být způsobeno nezvládnutím lidské aktivity nebo úmyslnou snahou o destrukci, ale i výjimečnými, obtížně předvídatelnými přírodními katastrofickými jevy typu tisíciletá voda apod..
- To co je někde považováno za jev s tisíciletou pravděpodobností výskytu může být pro jinou oblast jevem s pravděpodobným intervalem opakovaného výskytu kratším než jeden rok a tedy jevem, kterým je stavba během své životnosti mnohonásobně-krát ohrožena.
- Bohužel jsme generací vážně ohroženou nutností řešit problém terorizmu a to dost pravděpodobně i celosvětovou obtížně definovatelnou válkou, při které neexistuje žádná stavba bez ohrožení mimořádným dynamickým účinkem.

*Ing. Jan Záruba-Pfeffermann, Ing. Pavel Štemberk: Kloknerův ústav, České vysoké učení technické v Praze; Šolínova 7, 166 08 Praha 6; tel.: 02-24353524, fax: 02-24310737; E-Mail: stem@klok.cvut.cz

- Zejména s rozvojem technologií zpraženého a předepjatého betonu se často přesouvá ohnisko únavové poruchy rozhodující o životnosti stavby do vnitřního prostoru monolitického dílu stavby, takže dosud naprosto dominující diagnostické metodiky založené na pozorování změn na povrchu stavby nebo změny odezvy na statické přitížení jsou stále častěji nepoužitelné nebo málo citlivé a nezbývá než obecnou diagnostickou filozofii stavebnictví přiblížit k přístupům již dlouhodobě rozvíjeným a užívaným na př. ve zdravotnictví, nebo-li posuzovat stavby podle výsledku pozorování jejich funkce při provozním zatížení, přičemž jsou snadněji pozorovatelné a analyzovatelné odezvy na dynamické složky provozního zatížení. Mechanické změny související s poškozením a stárnutím mají zpravidla významný vliv na vnitřní tlumení a vlastní frekvence částí stavební konstrukce, které návazně zásadním způsobem ovlivňují charakteristiky experimentálně pozorovatelných změn dynamického zesílení.
- Předpokladem zhroucení nebo závažného poškození stavební konstrukce je její zatěžování blízko mezním stavům, nebo-li zatížením v oblasti výrazných nelinearit obtížně modelovatelných jinak než konstrukcí shodného tvaru a shodných materiálových konstant, tedy přímo na reálnou konstrukcí.
- Realizace takto pojatých experimentů je buď mimořádně nákladná nebo extrémně riziková, takže je zpravidla možná jen snaha maximálně omezit extrapolační míru experimentem upřesňovaného matematického modelu. Na př. monitorovat reálnou konstrukci způsobem, kterému by neunikl případ extrémního zatížení.

2. Diskuze koncepčních přístupů

Podobně, jako ve zdravotnictví je nutné především předcházet nemocem, resp. možnostem vzniku poruchy a věnovat se zejména zajištění dokonalosti a maximální spolehlivosti systému, který uzdravuje nemocné a umožňuje jim návrat do max. dlouhého aktivního věku, resp. systému oprav a údržby, který s max. hospodárností navrací konstrukce do plné funkční způsobilosti a přiměřené úrovně zbytkové životnosti.
Lidskost a úcta ke stáří a solidarita zahrnutá i v přijatých závazných kodexech lidského soužití vede k zajištění speciálních systémů zdravotní péče o starší spoluobčany stejně, jako je chápána péče a opravy historických staveb jako samostatný vědní obor a zaměření stavební obnovy.

Není jen důsledkem respektu k Hippokratově přísaze, že je mimořádná a často i mimořádně nákladná péče věnována pacientům na hranici života a smrti, bez ohledu na reálnost naděje na záchranu života, jelikož se jedná též o jedinou nepochybně z lidského hlediska přijatelnou možnost experimentálního studia lidského organismu v mezním stavu zatížení a jevů blízkých následnému selhání, podobně je ve stavebnictví žádoucí monitoringem podchytit co nejvíce z případů selhání nebo závažného poškození stavební konstrukce, protože destruktivní experimenty většího rozsahu na reálné, funkční stavbě jsou možné jen u staveb, které ztratily morální životnost a jsou proto určeny k demolici.

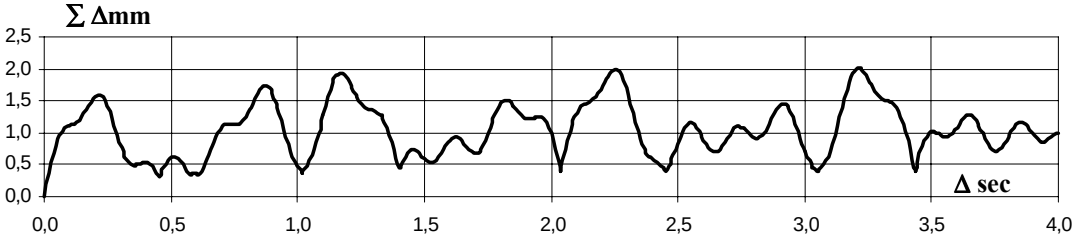
Vypovídací hodnota správnost, spolehlivost a obecná kvalita diagnózy je základním předpokladem užitečnosti lidského zásahu ve všech uvedených případech renovačních aktivit.
Při volbě optimální diagnostické metodiky je prioritním úkolem vyjasnění cílů diagnózy a to zejména hranic kvality výsledků, které ještě diagnóze dávají opodstatnění, dále je třeba nalézt měřitelnou mechanickou odezvu, nebo změnu odezvy, kterou hledaná porucha vyvolá. Je správné si již v této fázi vyjasnit, která část z měřením získaného informačního obsahu je pro diagnózu použitelná a kterou lze vyřadit a nezatěžovat s ní zbytečně paměťové medium

měřicího systému. Tento problém již velmi úzce souvisí s návazným, pro řešení klíčovým problémem, ekonomickou reálností diagnostické metodiky, která si zpravidla vynutí kompromisní zásahy do rozhodnutí učiněných v předchozích fázích výběru optimální diagnostické metodiky.

Z pohledu zájmu zajistit možnost experimentálního ověřování správnosti analýzy rizik zatížení stavební konstrukce mimořádnými a extrémními dynamickými účinky, resp. správnosti příslušného matematického modelu a jeho upřesňování podle experimentálně získaných dat vede aplikace přístupu k následujícím doporučením:

- S ohledem na úroveň nelineárnosti kontrolovaných matematických modelů je žádoucí provádět experimenty výhradně na reálné konstrukci.
- Jelikož přípustnost provedení takovýchto experimentů až do zhroucení konstrukce je naprosto výjimečná, je nutné vyhledávat nejohroženější lokality a cestou průběžného monitoringu zaregistrovat reálné případy zatížení konstrukce co nejblíže extrémní oblasti zájmu a tak prakticky jen upřesňovat matematický model s cílem zmenšovat zájmovou oblast s plně extrapolačním charakterem matematicky modelového popisu funkce stavební konstrukce.
- Při kontrole správnosti předmětného matematického modelu je klíčové potvrzení toho, že model překrývá všechny rizikové, zpravidla frekvenční, oblasti a zda v těchto oblastech souhlasí předpokládaná dynamická zesílení modelové konstrukce.
- I když mnohaparametrová nelinearita dynamicky zatěžované konstrukce vede u zjednodušených modelů zpravidla k předpokladům vyšší úrovně dynamických zesílení než je reálná funkce, zůstává zde riziko obtížně předvídatelných úrovni zpětných vazeb vedoucích k určité synchronizaci druhotných zatížení s reálnými deformacemi zatěžované konstrukce a tím i u nelineárních systémů k možnosti významného ovlivnění charakteristik dynamického zesílení a je proto třeba této problematice věnovat zvýšenou pozornost.
- S ohledem na často velmi malou úroveň vnitřního tlumení stavebních konstrukcí dosahují rozdíly dynamického zesílení pro různé frekvence buzení i řádovou úroveň a tudíž nemusí vždy vést větší průměrná úroveň zatížení k větší úrovni dynamických účinků. Experimentální ověřování odezvy na proměnné zatížení musí být proto přiřazováno k ověřené úrovni zatížení a „normování“ výsledků pro účely srovnání nemusí být oprávněné, resp. není dostatečně spolehlivé.
- Jelikož minimální počty opakovaných odečtů u experimentů s přijatelnou nadějí na dosažení reprodukovatelného výsledku je cca řádu $10^5 \div 10^6$, přičemž počet paralelně monitorovaných průběhů je zpravidla větší než 4 a monitorovaná informace jednoho odečtu má rozsah cca 10 byte, tak je nutné vybavit monitorovací systém paměťovým mediem extrémní kapacity (extrémně nákladné) nebo zajistit předtřídění informačního obsahu odečítaných dat ON-LINE a to zejména, pokud máme zájem o zachování informace v rozsahu plné pozorovací doby a ne jen v období, kdy odezva překročí předem stanovenou mez, nebo-li chceme kontrolovat matematický model v plném rozsahu.
- Jelikož zdrojem neočekávaných rizik jsou zejména rezonanční jevy, jejichž vybuzení je podmíněno delším setrváním parametrů účinků zatížení na kritické úrovni, je zpravidla přijatelné nahrazovat i vstupní budící účinky histogramem a z hlediska odhalení možných nedostatků matematického modelu méně zajímanou problematiku kvasistatických souvislostí vstupního zatížení a deformace konstrukce předpokládat, že lze hledanou kvasistatickou závislost nahradit soustavou dvojic úrovní (zatížení, odezva) se stejnou pravděpodobností že tyto úrovně byly překročeny.

- Stejně jako u naprosté většiny problémů stavební dynamiky, které dosud vedly k požadavku experimentálního ověření, je i zde možné se omezit pouze na pozorování amplitudy a příslušné vlastní frekvence kmitání experimentálně ověřované stavební konstrukce. Z pohledu předpokládané aplikace statistické dynamiky je proto dostačující vyhodnocovat a registrovat pouze autokorelační funkci vibrací konstrukce příslušnou určité úrovni vnějšího zatížení. Čímž je pouze myšlena registrace statické charakteristiky blízkého informačního obsahu jako má autokorelační funkce.
- Jelikož experimentální úloha vede zřejmě k realizaci extrémně dlouhodobého experimentu (srovnatelného s životností stavebního objektu) nebude experiment nikdy pouze záležitostí ověření správnosti matematického modelu, ale též pozorováním změn mechanických parametrů stavební konstrukce v souvislosti s jejím stárnutím a jinými formami poškození na základě změn pozorovaných a registrovaných statistických charakteristik. Takovéto dlouhodobé pozorování je samozřejmě využitelné jako součást bezpečnostního systému ochrany stavby před přetěžováním atd..
- Jako ekonomicky a technicky nejnadějnější se zatím jeví průběžné vyhodnocování průměrné absolutní hodnoty (resp. integrální hodnoty) rozdílu sledované výchylky v závislosti na časovém posuvu pozorovaných odečtů v min. rozsahu cca 30 ti hodnot časových posuvů. Tato volba minimalizuje požadavky na hardware a stabilitu „nulového“ údaje snímačů výchylky (zrychlení apod.) umožňuje dodatečný přepočet na dosud zavedené charakteristiky statistické dynamiky a zviditelňuje nejzávažnější výstupy pozorování v jednom grafickém znázornění viz obr. 1.



Obr.1.

- Srovnatelně snadno jako z autokorelační funkce lze z této charakteristiky stanovit vlastní frekvence ověřované konstrukce a úroveň reálně vybuzených amplitud kmitání konstrukce v těchto kritických frekvencích. Poměr výchylky odpovídající horní a dolní obálkové křivce zjištěné charakteristiky úzce souvisí s úrovní dynamického tlumení konstrukce a úrovní toho jak se podařilo přizpůsobit mechanické vlastnosti konstrukce reálným podmínkám dynamických zatížení konstrukce v provozu. Z grafu je též na první pohled zřejmé, která z vlastních frekvencí je dominantní (nejrizikovější) a kterou má tedy smysl dodatečným opatřením zatlumit. Pokud se v tomto zobrazení objeví nová dominantní soustava vrcholů je zřejmé, že došlo buď k závažnější poruše konstrukce, nebo přibylo nové dynamické provozní zatížení konstrukce nežádoucí úrovně. Výraznější anomálie těchto charakteristik zjištěných pro různé úrovně zatížení pozorované konstrukce potom signalizují nežádoucí efekt synchronizace přídavného dynamického zatížení s deformacemi zatěžované konstrukce atd..
- Úspěšnost této doporučované experimentální metodiky závisí na jejím masovějším využitím, které je podmíněno ekonomickou reálností a výhodností této metodiky,

nebo-li je nutné minimalizovat pořizovací náklady technického vybavení pro aplikaci této metodiky cestou dostupnosti jednoúčelových aparatur vhodných pro dlouhodobé nasazení.

- I když by bylo systémové a logické, aby aplikaci této experimentální metodiky předcházelo zajištění matematického modelu diagnostikované konstrukce, který by dovolil specifikovat technické parametry příslušné jednoúčelové diagnostické aparatury , dosavadní zkušenosti se zaváděním nových diagnostických metodik ukazují, že minimálně v době jejich rozšiřování mezi potenciálními aplikátory je nutné zajistit i opačný přístup. Nejdříve prokázat účelnost, potřebnost a reálnost aplikace nové metodiky i na konstrukci s předem projektem apod. nepromyšlených rizik vyplývajících z dynamického přitížení nebo využití změn dynamických vlastností konstrukce pro diagnostické účely a tak vyvolat zájem o její dlouhodobou aplikaci.
- Rozšíření této metodiky bude tudíž vyžadovat vývoj univerzálního diagnostického vybavení s nastavitelnými funkčními parametry. S ohledem na nákladnost takovéhoto vývoje je třeba, aby tomuto předcházela připravenost zajistit dodávky jednoúčelových aparatur s parametry, které vyplynou ze studijní aplikace nákladnějšího univerzálního vybavení. Nákladnost vývoje univerzální aparatury vyžaduje též experimentální zkušenosti s aplikací doporučované metodiky získatelné v rámci funkčních vlastností vzorků jednoúčelových aparatur, jejichž rozvoj musí rovněž předcházet vývoji aparatury univerzální.
- Zájem zajistit uvedenou přípravnou etapu rozšíření doporučované diagnostické metodiky vedl k zařazení této problematiky do řešení grantového úkolu GAČR 103/00/0705 při využití podpory na rozvoj strunových aparatur pro aplikaci vyvíjených metodik z prostředků výzkumného záměru ČEZ:J04/98:21000001S

3. Experimentální statistická dynamika v KÚ ČVUT

S blízkým doporučením diagnostického využití experimentálního využití principů statistické dynamiky přišel KÚ ČVUT již v 70-tých letech, nebo-li pro ČR v období počátků integrované digitální výpočetní techniky, kdy ještě dominovala analogová hybridní počítačová technika a byly též činěny pokusy kompletovat výpočtové technologie založené na zpracování dat ve formě přímo úměrné frekvence el. napětí.

Tehdejší snahou bylo využitím dvoustrunových diferenciálních snímačů získat cestou rozdílové frekvence signály s frekvencí přímo úměrnou měřené veličině a využitím čítačů, posuvných registrů a obvodů logického součinu ON-LINE vyhodnocovat zvolené charakteristiky statické dynamiky.

Vedle zkušenosti s psychologickými překážkami při zavádění nového diagnostického přístupu je nejzávažnějším dědictvím této aktivity teoretická příprava nového metodického přístupu a již v té době byla prokázána jeho technická realizovatelnost.

Pozdější aplikace, s prakticky využitým výstupem, se omezily jen na úroveň vyhodnocení statistických charakteristik prvního řádu za účelem průkazu úrovně provozního zatížení, průkazu dostatečnosti frekvence registrovaných odečtů časově proměnné veličiny apod..

K závažnějšímu oživení zájmu a aktivit KÚ za účelem rozvoje předmětného metodického přístupu dochází až nyní v rámci spolupráce na řešení úkolu GAČR-č. 103/00/0705 „Analýza rizika porušení při mimořádném zatížení seismicitou a rázovými tlakovými vlnami“ v rámci něhož došlo k rozběhu dlouhodobého demonstrativního experimentu statistické dynamiky.

Hlavním smyslem této experimentální aktivity je zřízení experimentální lokality, která by umožňovala hospodárné získávání zkušeností s diagnostickými metodikami založenými na aplikaci experimentální statistické dynamiky a dovolující hospodárné ověřování funkčnosti, správnosti a spolehlivosti vyvíjených aparatur pro realizaci těchto metodik.

S ohledem na snadnou dostupnost pro pracovníky ČVUT podílející se na tomto experimentálním programu byla pro experiment zvolena budova „A“ komplexu stavební fakulty ČVUT, která je využívána fakultou architektury ČVUT. Jedná se o 14-ti podlažní budovu, u které je dominantním dynamickým zatížením konstrukce zatížení větrem.

Z pohledu rozběhu experimentu byly výchozí podmínky typické: nebyl k dispozici ani dynamický matematický model stavby a ani žádné informace o předpokládané úrovni dynamických dějů v konstrukci, jako např. odezvy na provozní zatížení této stavby. Bylo tudíž nutné tyto údaje získat experimentální cestou „pokus a chyba“, přičemž v současné době je realizován prototyp jednoúčelového zařízení způsobilý zajistit průběžné testování této stavby textem doporučovanou statistickou metodikou.

Pro KÚ jako registrovaného výrobce měřidel využívajících strunovou měřící metodu je při vývoji nových aparatur nejsnáze dostupné využití měřící techniky tohoto typu , ale vyvíjené metodiky nepředurčují funkční princip použitých měřidel. Jedná se ovšem o určitou změnu významu rizikových jevů. Např. použití dosud při dynamických experimentech nejrozšířenějších principů povede proti aplikaci strunových snímačů ke zvýšenému riziku nežádoucího uplatnění stroboskopiských jevů.

Je možné, že si tento problém např. vynutí potřebu opatřovat tento typ snímačů jakousi mechanickou analogií v elektronice rozšířených pásmových propustí apod..

Tato problematika je teoreticky velmi blízká např. problematice související s velmi aktuální problematikou dynamického ztlumování stavebních konstrukcí atd..

4. Závěr

Doporučovaný metodický diagnostický přístup nemá pro stavebnictví význam jen ve smyslu klasické dynamiky charakterizované respektováním dynamické síly vybuzené setrvačností hmoty, ale i jako možnost diagnostického využití proměnných zatížení stavební konstrukce zatížením souvisejícím s teplotní a vlhkostní dynamikou stavebních konstrukcí.

Zde se ovšem nebude jednat o přínos v oblasti technické realizovatelnosti, ale spíše o přínos v oblasti nákladů na pořízení vstupních dat pro diagnostiku a jejich účelovou archivaci.

5. Poděkování

Předpokládaný text je výstupem spolupráce na řešení výzkumného projektu GAČR č. 103/00/0705, přičemž rozvoj tech. vybavení pro realizaci experimentálních aktivit probíhá pod patronátem výzkumného záměru JO 4/98:210000015.

6.Literatura

Záruba, J. (1972) Metody vyšetřování statistických charakteristik náhodných procesů, dílčí zpráva státního úkolu III-6-4/3, ČVUT Stavební ústav, Praha

Záruba, J. (1973) Metod and apparaturs for deriving the mean value of the product of a pair of analog quntities, Unites States Patent 374,932

Záruba J., švanda J., Bouška P., Štemberk P., (2000) The technical resources in the proces of the stochastic dynamics methods application for the audio frequenci analysis in-situ, Engeering mechanics 2000