

ANALÝZA ČETNOSTI CYKLŮ ODEZVY PŘI SEIZMICKÉM ZATÍŽENÍ KONSTRUKCÍ

Sh. Urushadze^{*}, O. Fischer^{**}

Abstrakt: Moderní technologie a zdokonalení měřících přístrojů a záznamových zařízení umožňuje registrovat seismické chvění země velmi přesně, včetně jeho časového průběhu. Shromáždění a zpracování takových záznamů dává možnost podrobně analyzovat a posuzovat vliv zemětřesení na stavební konstrukci.

Při zemětřesení hraje rozhodující roli malý počet cyklů, při kterých dochází v konstrukcích k značným plastickým deformacím. K získání představy o velikostech a četnosti namáhání v konstrukci při působení reálných seismických otřesů v numerickém výpočtu byla vyčíslována odezva jednoduchého rámu se dvěma stupni volnosti na akcelerogramy známých silných zemětřesení, kde opakované cykly jsou tříděny podle velikosti metodou rain – flow. Rozměry tohoto rámu jsou vždy voleny tak, aby jeho vlastní frekvence byly blízké frekvencím, které převažují v budícím akcelerogramu. Pro výpočet byly použity akcelerogramy z výrazně velkých reálných zemětřesení, kde maximální vodorovné zrychlení dosahovalo až 0,5 g. Pro vybírání těchto akcelerogramů hrály rozhodující roli především výrazně velké amplitudy otřesu. Záznamy se lišily dobou trvání otřesu a převažující frekvencí.

Ve sledované analýze však nešlo jen o získání maximální hodnoty odezvy, ale o celý průběh odezvy konstrukce během zemětřesení v čase. Proto pro výpočet byla použita přímá integrace, která umožnila získat celý průběh odezvy během otřesu a roztřídit ji podle velikosti dosažených amplitud metodou rain-flow.

Klíčová slova: Metoda rain-flow, zemětřesení, odezva konstrukce, nízkocyklická únava.

1. Četnost cyklů při reálných zemětřeseních

Analýza účinku zemětřesení ukazuje, že při silném seismickém působení nelze nosné konstrukce považovat za lineární, protože v nich vzniká plastická deformace. Touto plastickou deformací lze vysvětlit, že konstrukce jsou schopny silným otřesům vzdorovat.

Základním vstupem pro řešení seizmické bezpečnosti konstrukcí je časový průběh pohybu, kterému je konstrukce vystavena, tento pohyb je zpravidla vyjádřen v měřítku zrychlení jako akcelerogram. Akcelerogramy silných zemětřesní mají

^{*} Ing. Shota Urushadze, CSc., Akademie věd České republiky - Ústav teoretické a aplikované mechaniky; Prosecká 76,190 00 Praha 9. E-mail: urushadze@itam.cas.cz

^{**} Prof. Ing. Ondřej Fischer, DrSc., Akademie věd České republiky - Ústav teoretické a aplikované mechaniky; Prosecká 76, 190 00 Praha9. E-mail: fischero@itam.cas.cz

stochastický charakter a často se uvažuje o pravděpodobnostním pojetí celého problému: je snaha najít výslednou pravděpodobnost výskytu zemětřesení určité intenzity a určitého pravděpodobného chovaní konstrukce a materiálu.

Při kmitání konstrukcí zpravidla pro určení bezpečnosti nestačí znát maximální namáhání konstrukce, protože svou roli hraje i opakování namáhání, tzv. únava. Znalost četnosti maximálních hodnot v opakovaném namáhání hraje vážnou roli v úlohách o únavové pevnosti, o životnosti a spolehlivosti konstrukcí. V úlohách seizmické odolnosti jde o únavu nízkocyklickou, kdy napětí daleko překračující mez průtažnosti se opakují v malém počtu cyklů (desítky). Jsou různé metody pro třídění extremních hodnot náhodného procesu analyzující četnosti výskytu některého charakteristického parametru. Náhodný proces v tomto případě převádíme na proces, sestávající ze skupin stejné velikostní třídy, vytváříme tzv. spektrum, které vyjadřuje, kolik cyklů se v každé třídě během trvání procesu vyskytlo.

Výpočetní technika umožňuje řešit odezvou konstrukcí na reálné akcelerogramy na základě MKP a matematicky namodelovat faktory, které charakterizují pohyb základu i chování staveb při zemětřesení [2]. V současné době se setkáváme s řadou špičkového softwaru, který používá analýzu MKP. Takový postup má široké uplatnění pro seizmický návrh konstrukcí různých složitostí a moderní výpočetní technika je schopna řešit problém velmi přesně.

V poslední době se pro vyhodnocování výrazně asymetrického namáhání proměnného v čase často používá metoda "stékající vody" (rain flow method), protože pomocí této metody lze třídit rozkmity napětí, které ovlivňují vznik poškození únavou [3], [4], [5]. Metoda stékající vody počítá úplné cykly, které odpovídají uzavřeným smyčkám v diagramu vyjadřujícím závislost napětí na deformaci.

Obrázek 1 ukazuje příklad časového průběhu zemětřesení, který je roztříděn metodou stékající vody.

2. Numerické metody řešení pohybových rovnic

Pohybové rovnice typu (1), popisující kmitání diskrétních soustav s konečným počtem stupňů volnosti vynucené časově proměnnou silou $\mathbf{F}(t)$ můžeme řešit přibližné metodami numerické integrace.

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{u}(t)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{u}(t)\} + [\mathbf{K}]\{u\} = \{\mathbf{F}(t)\}$$
(1)

kde: [M] je matice hmotnosti konstrukce

[C] – matice tlumení konstrukce

[K] – je matice tuhosti konstrukce

 $\{\ddot{\mathbf{u}}(t)\}, \{\dot{\mathbf{u}}(t)\}, \{\mathbf{u}(t)\}$ – vektor zrychlení, vektor
rychlosti a vektor posunutí odezvy konstrukce

V případě seizmického buzení znamená síla $\mathbf{F}(t)$ sílu setrvačnou, danou součinem hmoty a zrychlení konstrukce při zemětřesení

$$\left\{\mathbf{F}(t)\right\} = -\left[M\right]a(t) \tag{2}$$



Obr. 1 Časový záznam vodorovné (a) a svislé (b) složky zrychlení při zemětřesení (Western Washington 1949) a jejich roztřídění podle velikosti rozkmitu.

Pro řešení odezvy dále popsaného modelu konstrukce byla použita numerická integrace. Tato metoda se používá i při řešení nelineárních diferenciálních rovnic

popisujících chování složitých konstrukcí řešených MKP. Ve výpočtovém systému ANSYS jde o Newmarkovu metodu řešení je velmi obtížné nebo je nemožné. Newmarkova integrační metoda výpočtu je aplikována ve výpočtovém programu ANSYS pro řešení metodou konečných prvků [1].

3. Výpočtový a MKP model

Při běžném výpočtu budov na seizmické buzení se dynamické výpočtové modely většinou předpokládají jako diskrétní soustava s omezeným počtem hmot. Pro vodorovné kmitání se uvažuje výpočtový model jako svislá nehmotná konzola se soustředěnými hmotami případně jako smyková konzola. Pro svislé kmitání se používá většinou totéž schéma jako pro řešení účinku ostatních svislých zatížení tíhou stálého a nahodilého zatížení. Pro účely porovnání výsledků byl v této kapitole vybrán systém se dvěma stupni volnosti citlivý na vodorovné i svislé buzení, protože je nejjednodušší a při tom všeobecné principy a zákonitosti mohou být přeneseny na složitější soustavy.

Pro tuto analýzu byl zvolen co nejjednodušší model rámu se dvěma stupni volnosti podle obrázku 2.



Obr. 2 Soustava se dvěma stupni volnosti.

Modální charakteristiky takové soustavy je snadné přizpůsobit budícímu akcelerogramu - určit vlastní frekvence podle převažující frekvence otřesu.

Při použití klasických technologií pro řešení velkých MKP modelů se naráží na limity dané zejména hardwarovým vybavením (procesor, RAM, velikost disku atd.) a na omezeni vlastním programem (maximální počtu uzlů, elementů a stupňů volnosti, schopnost softwaru využít množností hardwaru atd.). Významnou roli hraje také časové omezení a opakovaní výpočtu v různých úpravách. Tato soustava umožňovala ušetření výpočetního času a tím provedení velikého počtu příkladů a jejich snazší zpracování.

Vlastní a vynucené kmitání soustavy bylo řešeno metodou konečných prvků (MKP). K výpočtu byl použit komerční software ANSYS v 5.7 firmy Swanson Inc. běžně používaný pro výpočet konstrukcí metodou konečných prvků [1]. Pro diskretizaci byly použity prvky BEAM 4 a Mass 21. BEAM 4 je jednoosý prvek s tahovými,

tlakovými, kroutivými a ohybovými vlastnostmi. Prvek má v každém bodu I,J 6 stupňů volnosti. Mass 21 je bodový prvek se 6 stupni volnosti: pohybovými a otáčivými schopnostmi ve směru X,Y,Z.

4. Výsledky výpočtů

Pro výpočet byly vybrány zápisy akcelerogramů. Při výběru těchto akcelerogramů hrály rozhodující roli především výrazně velké amplitudy otřesu. Záznamy se lišily dobou trvání otřesu a převažující frekvencí. Z každého záznamu bylo odstraněno dokmitávání kdy amplitudy byly malé, z důvodu, že tato část by nemohla ovlivnit hlavní část výpočtu, zaměřeného na četnosti výskytu velkých amplitud.

Na začátku výpočtu byly stanoveny převažující frekvence otřesu a podle toho byla zvolena soustava, která měla vlastní frekvence odpovídající buzení ve svislém a ve vodorovném směru.

Výsledkem výpočtu byl získán pohyb bodu m ve vodorovném směru a momenty v jednotlivých bodech 1,2 na obrázku 2. Tyto odezvy byly roztříděny podle metody stékající vody. Obrázek 3 ukazuje výsledky výpočtu při zemětřesení Western Washington.

Celkové výsledky jsou dány v tabulce 1, kde je uveden souhrn všech výpočtů. V tabulce ke každému uvedenému zemětřesení přísluší jeho charakteristiky: trvání otřesu a převažující frekvence. Dále jsou uvedeny maximální hodnoty rozkmitu ohybných momentů max ΔM .

Ve druhém sloupci každého oddílu v tabulce 1 je uveden počet cyklů, při kterých rozkmit sledované odezvy (ohybový moment v bodech 1 a 2) překročil hodnotu příslušnou polovině maximální hodnoty této odezvy Max $\Delta M/2$. Za předpokladu, že hodnota odpovídající polovině maximální odezvy představuje namáhání na mezi průtažnosti, počet cyklů v tomto třetím sloupci znamená počet cyklů, při kterých během uvažovaného otřesu nastalo střídavé namáhání v plastickém oboru.

5. Závěr

V příspěvku je popsán pokus odhadnout počet cyklů, vyvolávajících destrukci systému, který je frekvenčně naladěn na seizmický otřes. Pro výpočet byla použita MKP ze softwarového systému ANSYS, která umožňovala výpočet jednoduchého rámu z číselného zápisu reálného akcelerogramu. Výpočty ukázaly, že počet cyklů, kde dochází k rozhodujícímu střídavému zplastizování, může být až několik desítek. Toto opakování je třeba uvážit při rozhodnutí, jak velké plastické deformace je možno připustit při stanovené seizmické odolnosti konstrukcí.

Poděkování: Práce vznikla za podpory grantu AVČR č. A2071002/00



Obr. 3 Časový průběh ohybových momentů u rámu podle obr. 2 a při buzení otřesem podle obr. 1 a jejich roztřídění.

Tab.1 Celkové výsledky

Zemětresení	Trvání otřesu	Převaž. frekv.		Odezva			
				M ₁		M ₂	
					Počet cyklů		Počet cyklů
	[s]	[H	łz]	max∆M		max∆M	
	max a _{hor}			[KN.m]	$\Delta M > \frac{max\Delta M}{2}$	[KN.m]	$\Delta M > \frac{max\Delta M}{2}$
	max a _{vert} [cm s ⁻²]	f _{horiz}	f _{vert}	buzení horizontální buzení horizontá		orizontální	
				buzení		buzení	
				horizont.+vertikální		horizont.+vertikální	
1940 r. El Centro	<u>40</u> 349.82 265.34	2.20	2.02	1300	2.5	400	2.5
				1900	18.5	500	17.5
1949 r. Western Washington	<u>30</u> 177.78 105.19	2.20	3.20	850	23.5	600	19
				800	21	550	21
1966 r. Parkfield CA	<u>15</u> 388.40 160.87	2.00	2.00	1600	9.5	600	1.5
				1600	8	800	5.5
1973 r. Managua, Nicaragua	<u>10</u> 244.49 486.10	5.50	5.80	1300	10.5	500	0
				1400	9.5	750	4
1976 r. Gazli UZBEKIS.	<u>13</u> 706.81 1262.70	1.92	1.60	4150	8.5	850	0.5
				3700	9	1550	6
1978 r. Santa Barbara	<u>15</u> 410.60 107.33	1.53	0.75	1500	12	100	0
				1500	11.5	200	1.5
1983 r. Coalinga Pleasant Valley	<u>25</u> 594.76 372.30	2.04	1.36	4900	13	600	0
				4900	13	900	4.5
1986 r. Kalamata GREECE	<u>10</u> 291.07 3.2510	1.60	3.30	1100	7.5	950	7
				1150	7.5	1000	8
1999 r. Kocaeli TURKEY	<u>45</u> 2.9047 229.48	0.29	0.49	850	9	700	8.5
				900	9	800	7.5

Literatura

- [1] ANSYS user's manual. Revision 5.7 VOLUME I, II, III, IV.
- [2] Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E.: Concepts and Applications of Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, New York.(1989)
- [3] Frýba L., Dynamika železničních mostů, Academia, Praha, 1992
- [4] Frýba L., Sláma J.: Třídění náhodných časových záznamů napětí, Stavebnický časopis SAV. 3 (1985) č. 4, 257 273
- [5] Pirner M. a kolektiv: Dynamika stavebních konstrukcí, SNTL, Praha 1989.