
Zdeněk ČADA¹, Vlastislav SALAJKA², Viktor KANICKÝ³

**ODEZVA STAVEBNÍCH OBJEKTŮ NA SEIZMICKÉ BUZENÍ S VYUŽITÍM
SYNTETICKÝCH AKCELEROGRAMŮ**

**STRUCTURAL SEISMIC RESPONSES USING SYNTHETIC SEISMIC
ACCELERATION-TIME HISTORIES**

Abstrakt

S použitím spekter odezvy seizmických zdrojů byla vytvořena procedura generující syntetické seizmické akcelerogramy. Zkoumány byly podmínky pro dosažení postačující koincidence zpětně generovaného spektra se zdrojovým spektrem odezvy. Analyzována byla shoda syntetických akcelerogramů s naměřenými vstupními daty. Navržená procedura byla testována porovnáním odezvy stavebních objektů na seizmické buzení s využitím spekter odezvy s odezvami při použití syntetických akcelerogramů.

Abstract

Procedure of generating synthetic seismic acceleration-time histories using seismic source response spectra has been designed. The conditions for achieving a satisfactory coincidence of the reversely generated spectrum with the source response spectrum have been investigated. The conformity of the synthetic seismic acceleration-time history with its source seismic motion record has been analyzed. The designed procedure has been tested by comparing structural responses computed using response spectra with responses obtained by applying corresponding synthetic seismic acceleration-time histories.

Úvod

Při navrhování a posuzování stavebních konstrukcí by nemělo být opomíjeno nestacionární dynamické zatížení, jako je seizmický pohyb základu. V našich oblastech lze očekávat s nemalou pravděpodobností výskyt technické seismicity, tak i slabší přírodní seismicity. Při špatném návrhu konstrukce, tento druh zatížení může způsobit až fatální následky.

V národních normách pro posuzování konstrukcí na seizmické účinky lze nalézt různá návrhová lineární spektra odezvy sestavená na základě dlouhodobého sledování seizmických aktivit v daných oblastech. Tato návrhová spektra jsou využívána k získání dynamické odezvy konstrukce při seizmickém ději. Metodika provádění výpočtů s

¹ Ing. Zdeněk Čada, Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, e-mail: cada.z@fce.vutbr.cz

² Doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, 662 37 Brno, e-mail: salajka.v@fce.vutbr.cz

³ Doc. Ing. Viktor Kanický, CSc., Kancelář dynamických výpočtů, Hoblíkova 13, 613 00 Brno, e-mail: kanicky.v@fea.cz

využitím lineárních spekter odezvy je založena na metodě rozkladu podle vlastních tvarů kmitu. Tento efektivní přístup nám bohužel nedává informaci o samotné historii pohybu a napjatosti v čase. Velmi obtížně lze aplikovat metodu lineárních spekter na konstrukce, u kterých je třeba zohlednit jejich nelineární chování. Alternativní metodou pro získání dynamické odezvy je dnes nejčastěji používaná metoda přímé integrace pohybových rovnic, která dovoluje řešit nelineární dynamickou odezvu v čase. Důležitým vstupem při řešení je průběh seizmického zatížení v čase, který není ve většině případů znám. V článku je ukázáno, jak vytvořit syntetické akcelerogramy z návrhových spekter odezvy. S využitím těchto akcelerogramů a výchozích návrhových spekter byla řešena dynamická odezva panelového domu, který byl modelován pomocí MKP ve výpočtovém systému ANSYS.

Syntetické akcelerogramy

Z obecného hlediska, syntetické akcelerogramy, aby byly prakticky použitelné, musí vyhovovat celé řadě podmínek. Základní podmínkou je, aby spektrum odezvy získané ze syntetického akcelerogramu se co nejvíce blížilo výchozímu spektru odezvy. Zavedeme-li předpoklad, že pohyb podloží je součtem harmonických pohybů s různou frekvencí, amplitudou a fázovým posunem, potom aproximaci tohoto pohybu ve zrychleních lze hledat ve tvaru:

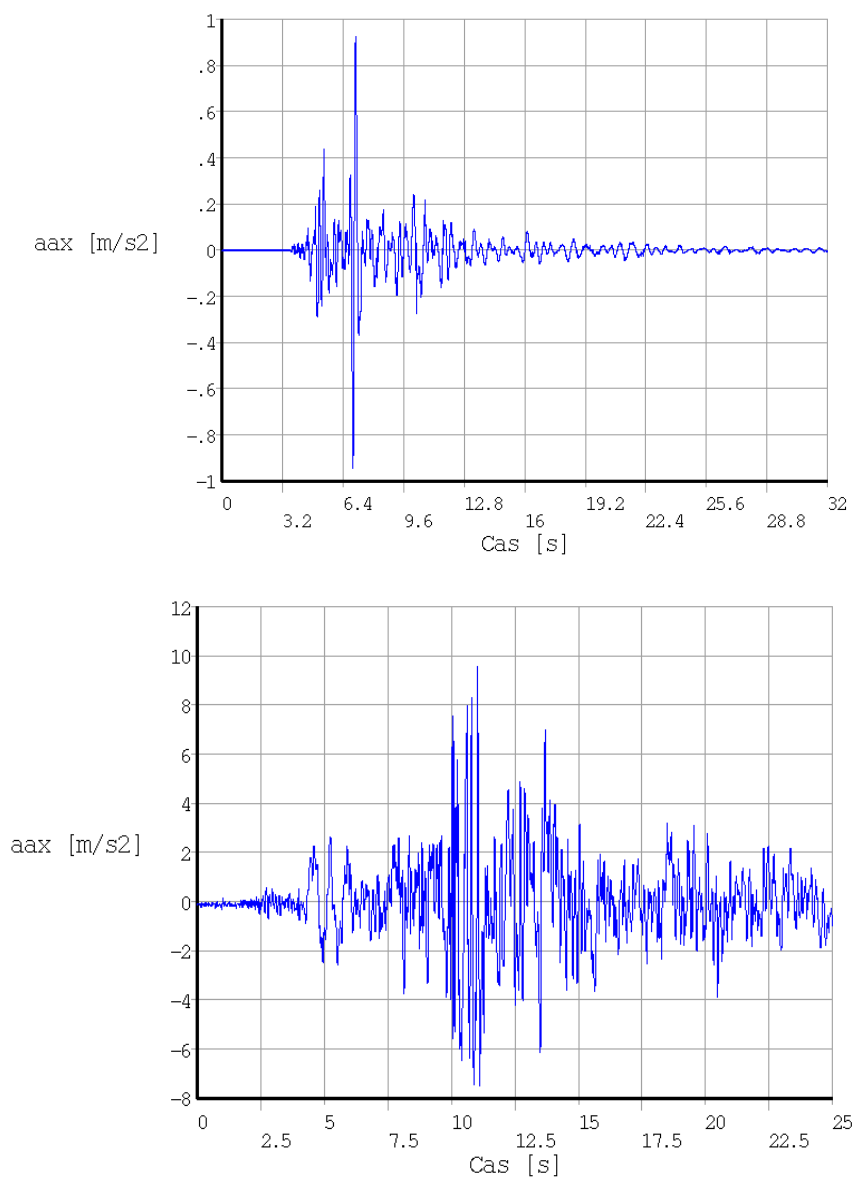
$$a(t) = \sum_k a_k \cos(k\omega t) + \sum_k b_k \sin(k\omega t) = \sum_k c_k \cos(k\omega t - \varphi_k) \quad (1)$$

Uvedená funkce má celou řadu výhod, jako jsou: spojitost, snadná integrace, možnost ovlivnění amplitudy u jednotlivých frekvencí.

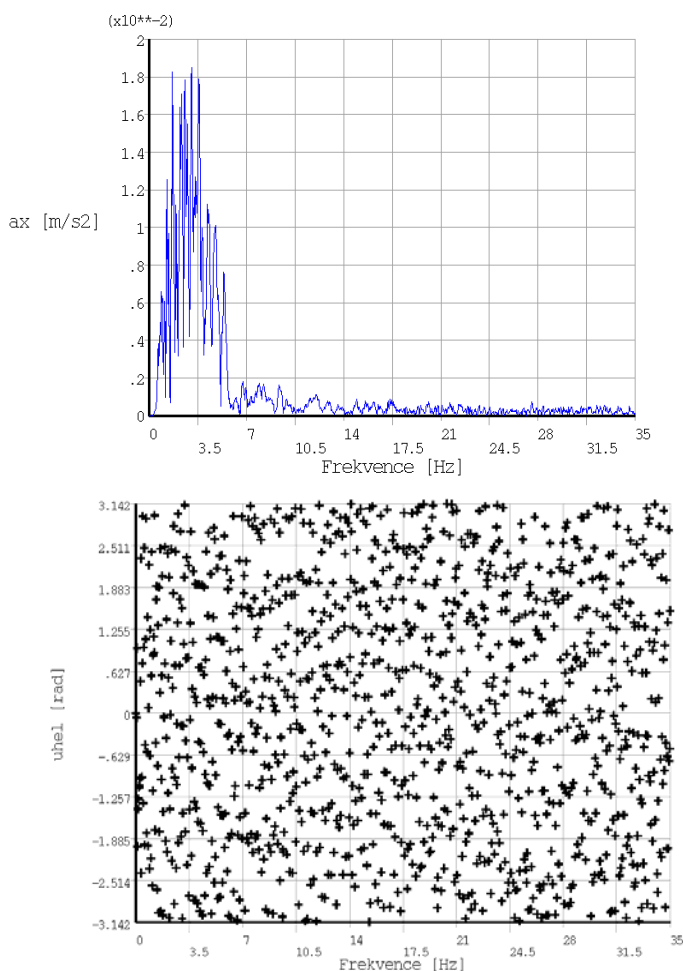
Analýza reálného seizmického jevu

Před samotným hledáním konstant a_k , b_k nebo c_k , φ_k , je vhodné vyšetřit, jakých hodnot tyto konstanty mohou nabývat. Za tímto účelem byly analyzovány dva záznamy skutečného pohybu podloží při seizmickém ději, a to důlně indukovaný jev Karviná (obr. 1 vlevo) patřící do oblasti technické seizmicity a zemětřesení TABAS Irán (obr. 1 vpravo) jako reprezentant přírodní seizmicity. Vzhledem k velmi slabým účinkům na konstrukce při využití záznamu Karviná, které ukázaly předběžné výpočty, byl záznam zrychlení proporcionálně zvětšen tak, aby maximální zrychlení dosahovalo hodnoty 0,1 g.

Diskrétní Fourierovou transformací (dále jen DFT) ze záznamu zrychlení zemětřesení Karviná, byly získány amplitudy c_k (obr. 2 vlevo) a fázové posuny φ_k (obr. 2 vpravo) v závislosti na frekvenci. Z obrázků je zřejmé, že tento jev obsahuje velké amplitudy zrychlení pouze do frekvence 6 Hz a fázový posun je čistě náhodný s rovnoměrným rozdělením na intervalu $-\pi, +\pi$.

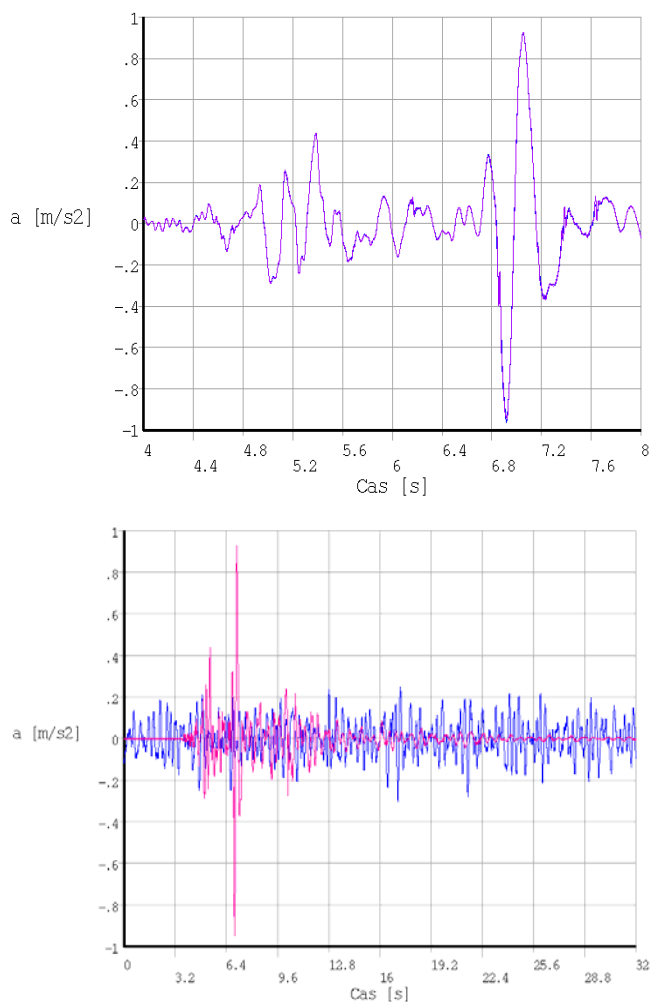


Obr. 1 Záznam seizmologických dat, vlevo Karviná, vpravo TABAS



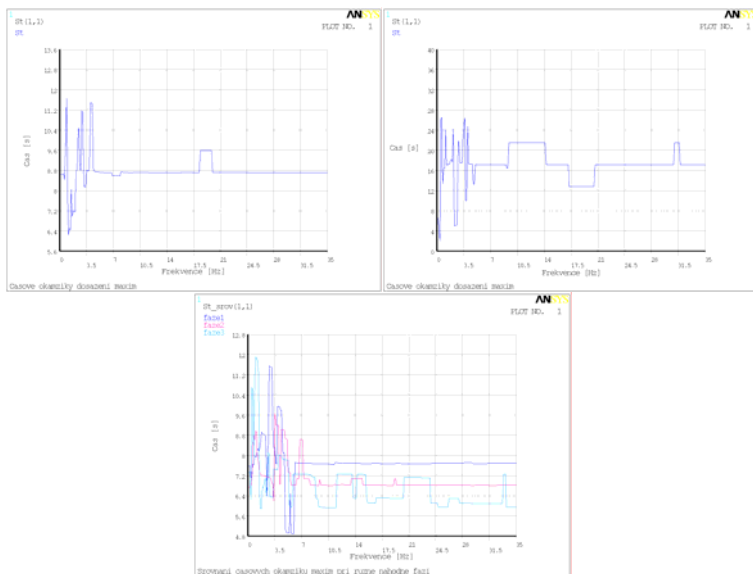
Obr. 2 Konstanty DFT v závislosti na frekvenci záznamu Karviná, vlevo amplituda c_k , vpravo fázový posun ϕ_k

Na obr. 3 vlevo je časový průběh zrychlení Karviná vypočítaného s aproximací funkcí (1) s konstantami získanými pomocí DFT. Hodnoty koeficientů c_k a ϕ_k odpovídají hodnotám na obr. 2. Na obr. 3 vpravo je pro srovnání stejný průběh zrychlení opět s funkcí (1), ale tentokrát hodnoty fázových posunů byly náhodně generovány s rovnoměrným rozdělením na intervalu $-\pi, +\pi$. Z toho vyplývá, že pomocí funkce (1) a při užití DFT lze dobře aproximovat průběh záznamu zemětřesení. Přestože fázové posuny mají zdánlivě náhodný charakter, při jejich skutečném znáhodnění dostáváme jinou funkci, která má přibližně konstantní maximální výchylky během celého časového intervalu. Naproti tomu záznam zemětřesení dosahuje v čase okolo 7 s výrazně větších výchylek než v ostatních časech.



Obr. 3 Průběh zrychlení Karviná v časovém intervalu 4 s až 8 s (fialová - záznam měření, modrá - aproximace DFT), vpravo při náhodně získaném fázovém posunu φ_k

Podobný problém lze sledovat při získání časů, ve kterých byla dosažena maximální odezva pro sestavovaná spektra odezvy. Při generování spektra pro budící funkci Karviná byly dosaženy maximální výchylky kolem 8 s s malou odchylkou v celém frekvenčním rozsahu od 0 do 35 Hz (viz obr. 4 vlevo). Oproti tomu při využití (1) s amplitudami z DFT a se znáhodněnou fází byly maximální výchylky dosaženy až někde kolem 20 s (viz obr. 4 uprostřed).



Obr. 4 Dosažení maximálních výchylek zrychlení při sestavování lineárního spektra odezvy, vlevo Karviná, uprostřed dle (1) s náhodnou fází, vpravo dle (2)

Analýzou záznamu TABAS byly získány analogické výsledky.

Krátkodobá Fourierova transformace

Pro získání realističtějšího průběhu zrychlení při zemětřesení v čase byla na stejné záznamy (viz kap. 2.1) aplikována krátkodobá Fourierova transformace (dále jen STFT). Ostrost amplitud výstupu z STFT je dána volbou počtu časových intervalů. Za optimální se ukázala volba časového kroku 2 s u záznamu Karviná a 1,56 s u záznamu TABAS. Trojrozměrné zobrazení průběhů výsledných amplitud v závislosti na čase a frekvenci je na obr. 5, vlevo ze záznamu Karviná, vpravo TABAS. Průběh amplitudy v čase má podobný průběh jako je průběh výchylek v samotném záznamu (obr. 1). Podobný průběh amplitud lze očekávat i u jiných zemětřesení, jako jsou např. na obr. 6 (tento obrázek je převzat z [6]). STFT ukázala, že dochází ke změnám velikosti amplitud v čase. Proto původní funkce (1) byla upravena o proměnnost amplitudy v čase pomocí funkce $f(t)$, která pro jednoduchost mění velikost amplitudy u všech frekvencí současně:

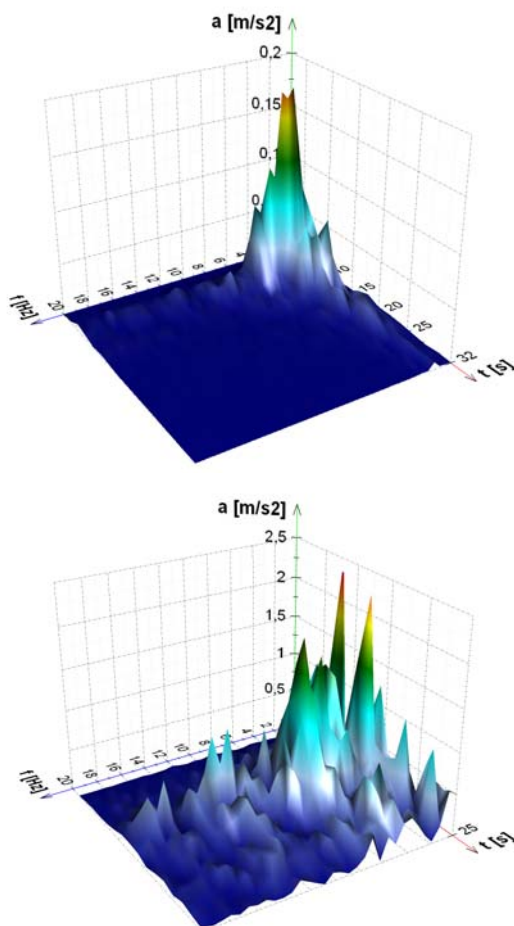
$$a(t) = f(t) \sum_k c_k \cos(k\omega t - \varphi_k) \quad (2)$$

Funkce $f(t)$ může být libovolná i nespojitá funkce. Po analýze záznamů (viz odst. 2.1) se jako vhodná funkce jeví:

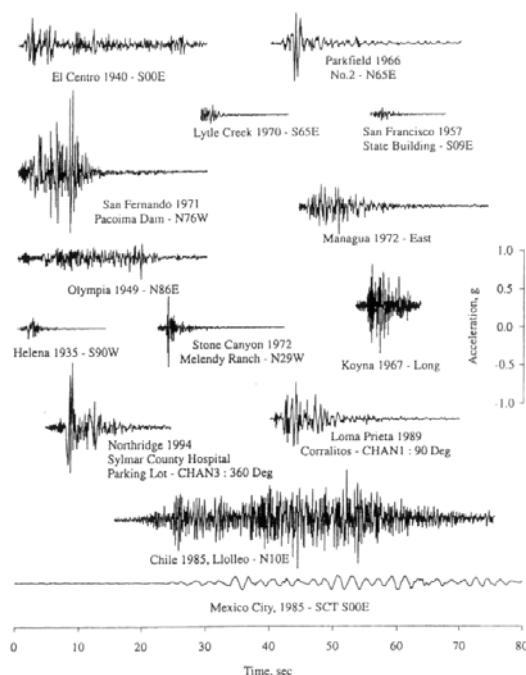
$$f(t) = \frac{1}{x\chi\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \lambda)^2}{2\chi^2}\right)$$

$$\chi = \sqrt{\frac{\ln(\sigma^2 + \mu^2)}{\mu^2}} \quad \text{a} \quad \lambda = \ln(\mu) - \frac{1}{2}\chi^2 \quad (3)$$

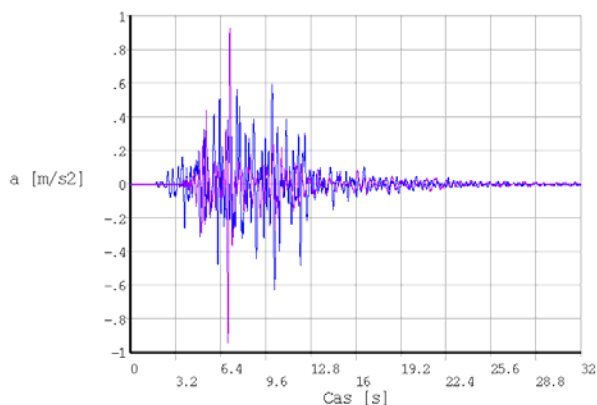
kterou známe jako log-normální rozdělení s parametry μ a σ , které pak nabývají významu těžiště maximálních výchylek seizmického děje a odchylky kolem těžiště. Na obr. 7 je srovnání záznamu Karviná s funkcí (2) při využitím amplitud z DFT s náhodným fázovým posunutím a s parametry funkce (3) $\mu = 10$ s a $\sigma = 5$ s. Časové okamžiky dosažení maxim při generování spekter odezvy jsou vykresleny na obr. 4 vpravo, kdy graf obsahuje tři varianty různé náhodné fáze. Všechny tři varianty se pro maxima zrychlení blíží časům okolo 8 s, tak jak je tomu u záznamu Karviná (obr. 4 vlevo).



Obr. 5 Průběh amplitud zrychlení v závislosti na čase a frekvenci získaných pomocí STFT, vlevo Karviná, vpravo TABAS



Obr. 6 Ukázka záznamů zemětřesení ve zrychlení, vodorovná osa čas, svislá zrychlení (převzato z [6])

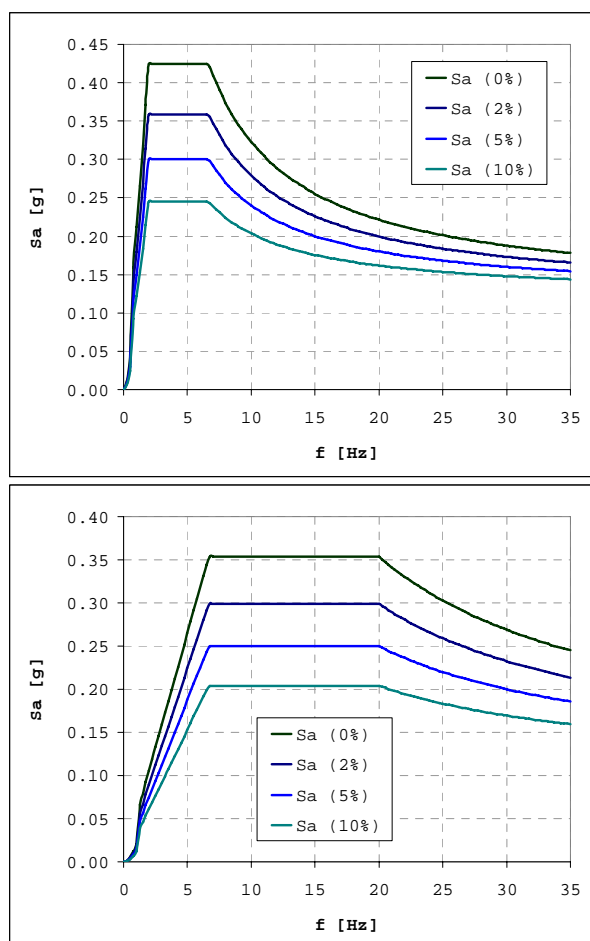


Obr. 7 Srovnání záznamu Karviná se syntetickým akceleroграмem

Zdrojové návrhové spektrum EC8

Získané poznatky o generování syntetických akceleroграмů byly ověřeny na příkladech. Jednou z analyzovaných konstrukcí je panelový dům.

K získání odezvy panelového domu byly využity syntetické akceleroграмы generované na základě návrhových spekter odezvy dle EC8 [2]. Základní zrychlení bylo použito 0,1 g, což vyhovuje rozmezí hodnot dle národní přílohy pro naše území. Horizontální a vertikální návrhové spektra v závislosti na velikosti poměrného útlumu jsou vynesena na obr. 8.



Obr. 8 Návrhové spektra dle EC8 s různým poměrným útlumem, vlevo horizontální, vpravo vertikální

Výpočet syntetických akceleroqramů

Z předchozího je zřejmé, že ze zdrojových návrhových spekter nelze vyčíst některé informace, jako jsou například fázové posuny, časy ve kterých nastaly maximální výchylky, délka nebo průběh samotného seizmického děje. Tedy při různé počáteční volbě těchto parametrů můžeme obdržet různé akceleroqramy, které všechny musí odpovídat návrhovému spektru, pokud jsou korektně generovány.

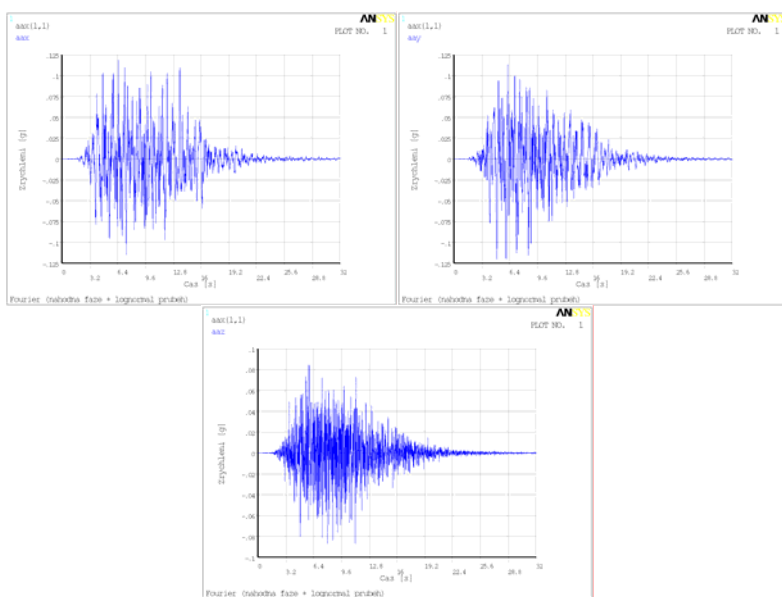
Je skutečností, že například při volbě harmonické funkce obsahující pouze jednu nenulovou amplitudu při určité frekvenci, vznikne spektrum odezvy v celém rozsahu vlastních frekvencí. Samozřejmě maximální odezva na tomto spektru bude u rezonanční frekvence a dále bude postupně klesat s rostoucí a s klesající frekvencí. Neboli jedna diskretní amplituda funkce (1) vytvoří určitou plochu na odpovídajícím spektru odezvy.

Z této plochy nelze poznat, zda bylo buzení pouze jednosložkovou harmonickou funkcí nebo jich bylo více, z čehož vyplývá, že exaktní zpětný postup neexistuje.

Při samotném získávání amplitud pro funkce (1) nebo (2) lze najít v publikacích (např. [3, 8]) postup, kdy amplitudy jsou odhadovány z amplitudy ustálené odezvy jednostupňové soustavy. Tento postup se jeví jako relativně nepřesný, a to z důvodu, že ve většině případů nenastává maximální výchylka v čase, kdy je kmitání ustáleno, ale právě daleko dříve. Proto jsou amplitudy následně upřesňovány iteracním postupem:

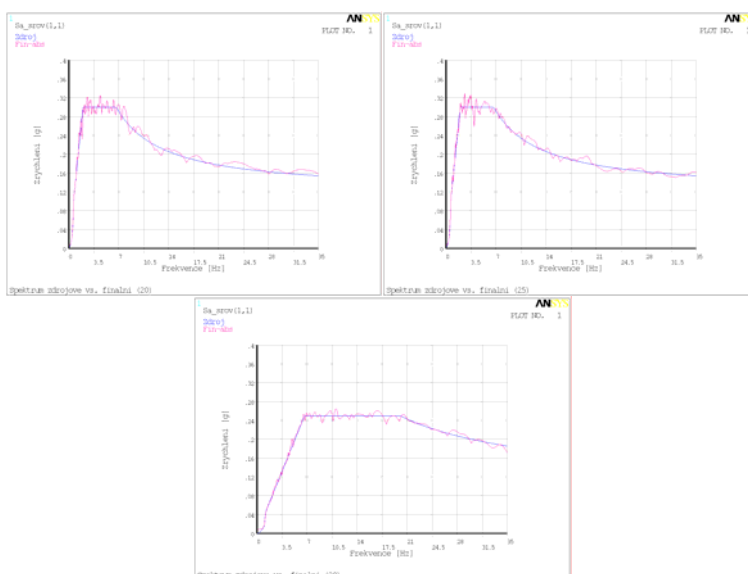
$$c_{k,i} = \frac{S_{a,0}(k)}{S_{a,i-1}(k)} c_{k,i-1} \quad (4)$$

kde $c_{k,i}$ je amplituda pro k -tou frekvenci a pro i -tou iteraci, $c_{k,i-1}$ je amplituda z předchozí iterace, $S_{a,0}(k)$ je spektrální hodnota k -té frekvence na zdrojovém spektru, $S_{a,i-1}(k)$ je spektrální hodnota k -té frekvence na spektru odpovídající amplitudám $c_{k,i-1}$. Tato posloupnost amplitud zprvu konverguje velice rychle k přibližnému odpovídajícímu spektru, ale při upřesňování se konvergence dosti zpomaluje. To je především dáno tím, že amplituda jedné harmonické funkce ovlivňuje celou řadu spektrálních hodnot s různými frekvencemi.



Obr. 9 Syntetické akcelerogramy v časové oblasti 0 až 16 s, vlevo směr x, uprostřed směr y, vpravo směr z

Pro sestavení akcelerogramů (obr. 9), které odpovídají návrhovému spektru v odst. 2.3, byla použita funkce (2) s náhodným fázovým posunem, těžištěm děje $\mu = 10$ s a odchylkou $\sigma = 5$ s, poměrný útlum $\xi = 5$ %. Výpočet amplitud funkce (2) byl pouze iteracemi dle (4), kdy počáteční amplitudy $c_{k,0} = S_{a,0}(k)$. Spektrální hodnoty po 20-ti iteracích $S_{a,20}(k)$ jsou vyneseny ve srovnání s hodnotami $S_{a,0}(k)$ na obr. 10. Horizontální směr x a směr y se liší pouze odlišným náhodným fázovým posunem.



Obr. 10 Srovnání návrhových spekter odezvy a spekter na syntetický akceleroogram, vlevo směr x, uprostřed směr y, vpravo směr z

Výpočtový model stavebního objektu

Funkčnost uvedeného postupu byla zkoumána na řešení konkrétního stavebního objektu. Metodou konečných prvků byl v programovém systému ANSYS sestaven model panelového domu vysokoškolských kolejí včetně nehmotného poddajného základového bloku zeminy. Bylo provedeno srovnání výsledků řešení, kdy byla získána dynamická odezva jak na buzení lineárními spektry odezvy tak i na buzení syntetickými akceleroagramy. Řešení v časové oblasti bylo získáno přímou integrací pohybových rovnic.

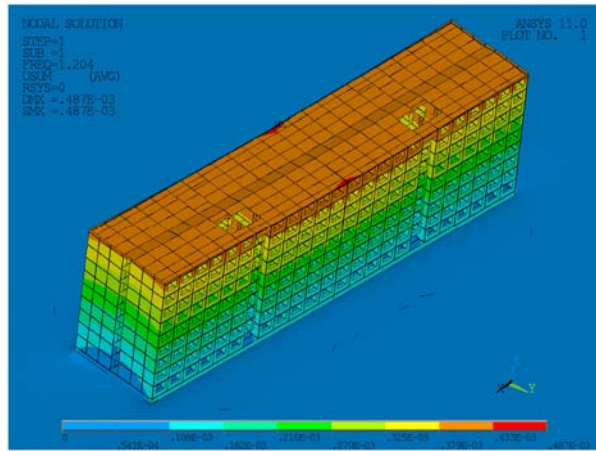
Model panelového domu je vytvořen ze stěnodeskových konečných prvků typu SHELL43, kterými jsou modelovány jednotlivé panely včetně otvorů. Spoje jednotlivých panelů jsou modelovány tak, že bylo dosaženo kloubové uložení v místě spojů.

Panelový dům lze příčně rozdělit na dva symetrické bloky, které jsou vzájemně dilatovány. Dilatace byla modelována pomocí nespojitosti konečnoprvkové sítě.

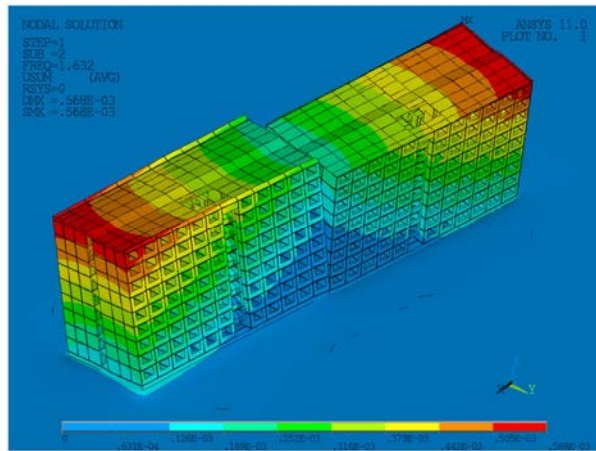
Skořepinový model panelového domu navazuje na objemový model podzákladí, který je sestaven z objemových konečných prvků typu SOLID45.

Vlastní frekvence a tvary kmitu

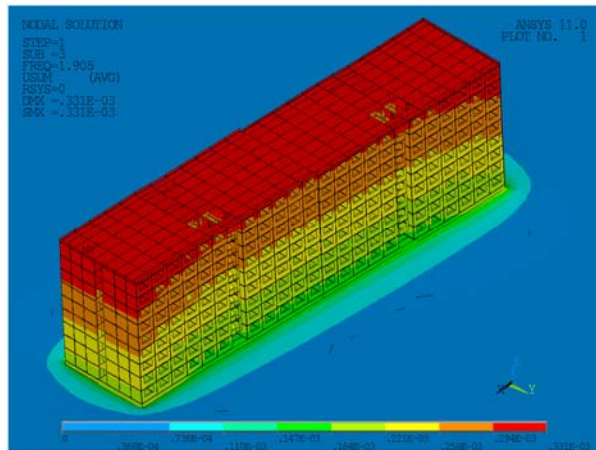
Na obr. 11 jsou zobrazeny první 4 vlastní tvary kmitu, které jsou dominantní při výpočtu pomocí spekter odezvy.



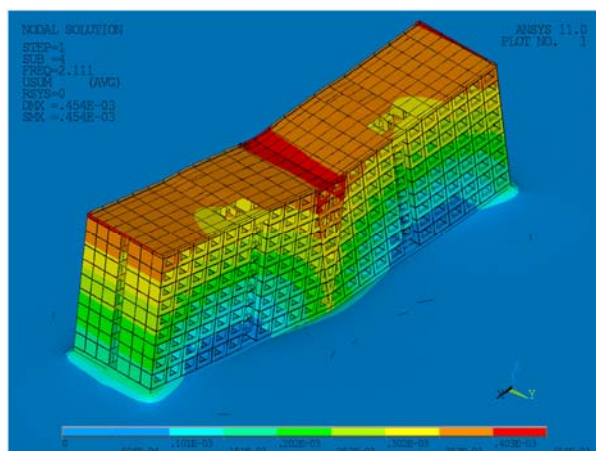
a)



b)



c)



d)

Obr. 11 První čtyři vlastní tvary kmitu při frekvenci, a) $f_1 = 1,20$ Hz, b) $f_2 = 1,63$ Hz, c) $f_3 = 1,91$ Hz, d) $f_4 = 2,11$ Hz

Odezva na seizmické buzení

Odezva na seizmické zatížení byla vyčíslena ve dvou variantách. Byly využity návrhové lineární spektra z odst. 2.3 a generované akcelerogramy odst. 2.4.

Buzení se předpokládá současně pro tři základní ortogonální směry. Útlum modelu odpovídá poměrnému útlumu 5 %.

Odezva při využití lineárních spekter odezvy

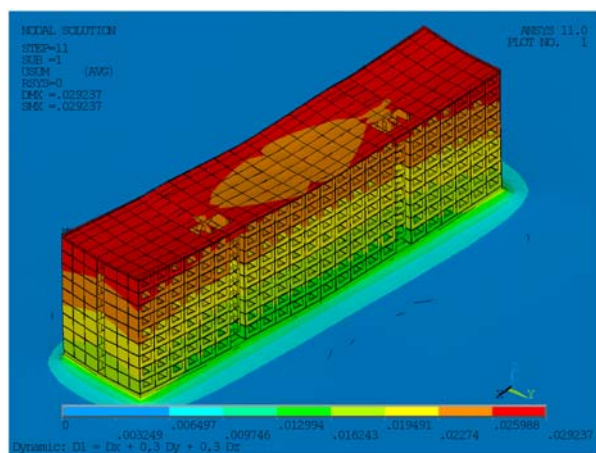
Bylo vypočítáno 750 vlastních tvarů a frekvencí, kdy nejvyšší frekvence měla hodnotu 23,08 Hz. Součet efektivní kmitající hmoty ve všech směrech byl kolem 100 % z celkové hmotnosti konstrukce 17,6.106 kg. Jednotlivé odezvy ve vlastních tvarech kmitu byly pro každý ortogonální směr kombinovány pomocí metody CQC. Z odezev pro jednotlivé směry byly sestaveny kombinace odpovídající EC 8 [2]:

$$\begin{aligned} D_1 &= D_x + 0,3D_y + 0,3D_z \\ D_2 &= 0,3D_x + D_y + 0,3D_z \\ D_3 &= 0,3D_x + 0,3D_y + D_z \\ D_{max} &= \max \{D_1; D_2; D_3\} \end{aligned} \quad (5)$$

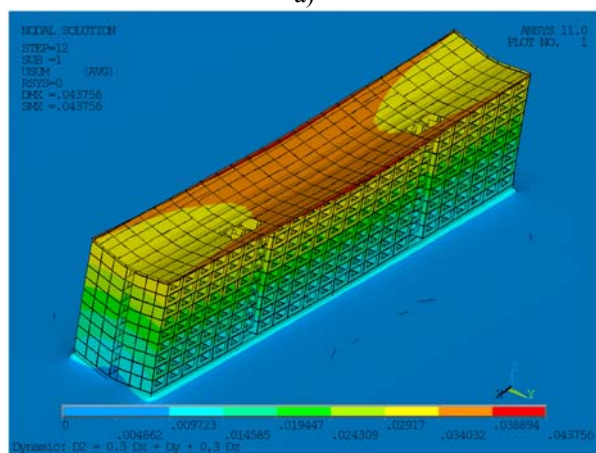
Výsledné celkové posunutí získané z jednotlivých kombinací jsou vykresleny na obr. 12 a celkové maximum z obálky kombinací je na obr. 15 vlevo.

Odezva při využití syntetických akcelerogramů

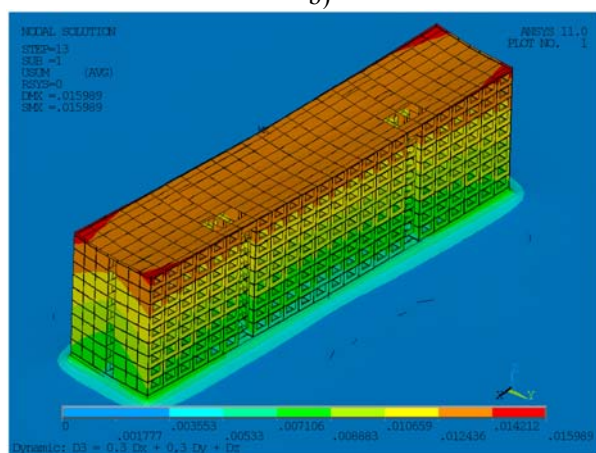
Přibližně stejná odezva v posunutích byla očekávána při výpočtu přímou integrací v časové oblasti s využitím generovaných akcelerogramů. Naprosto stejnou odezvu nelze dosáhnout, protože sčítací metoda CQC pro jednotlivé tvary kmitu je pouze přibližná, neboť se sčítají odezvy v různých časových okamžicích.



a)



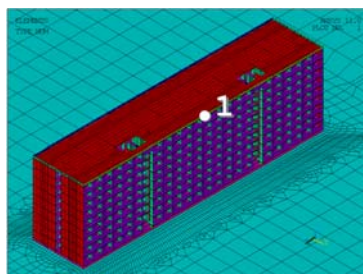
b)



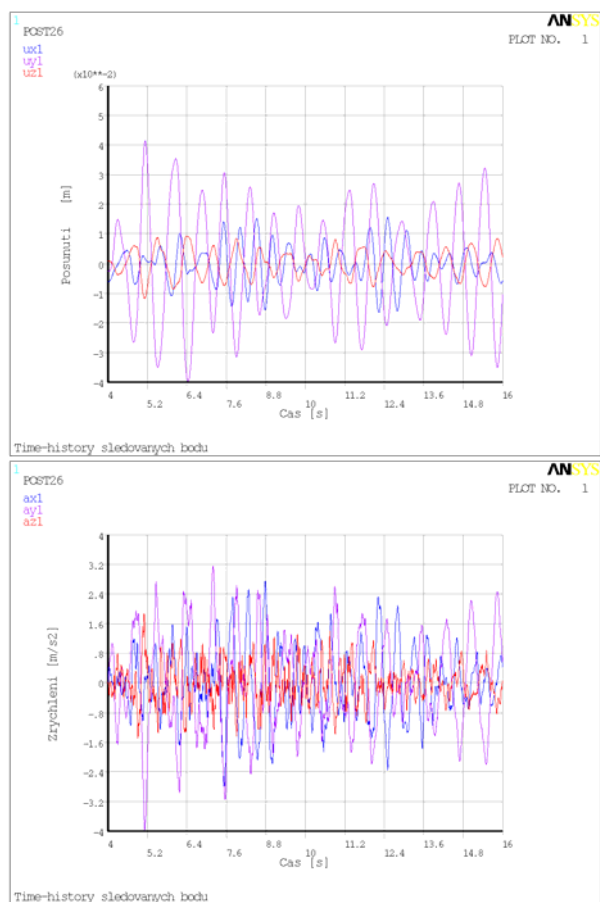
c)

Obr. 12 Dynamické kombinace, pole posunutí, a) směr x, b) směr y, c) směr z

Výpočet přímou integrací pohybových rovnic byl proveden pomocí krokové Newmarkovy metody. Velikost časového kroku byl zvolen 0,005 s. Ve výpočtu byl uvažován Rayleighův model tlumení, který definuje matici tlumení konstrukce jako lineární kombinaci matic hmotností a tuhostí konstrukce. Matice tlumení byla sestavena tak, aby odpovídala poměrnému útlumu 5 %.



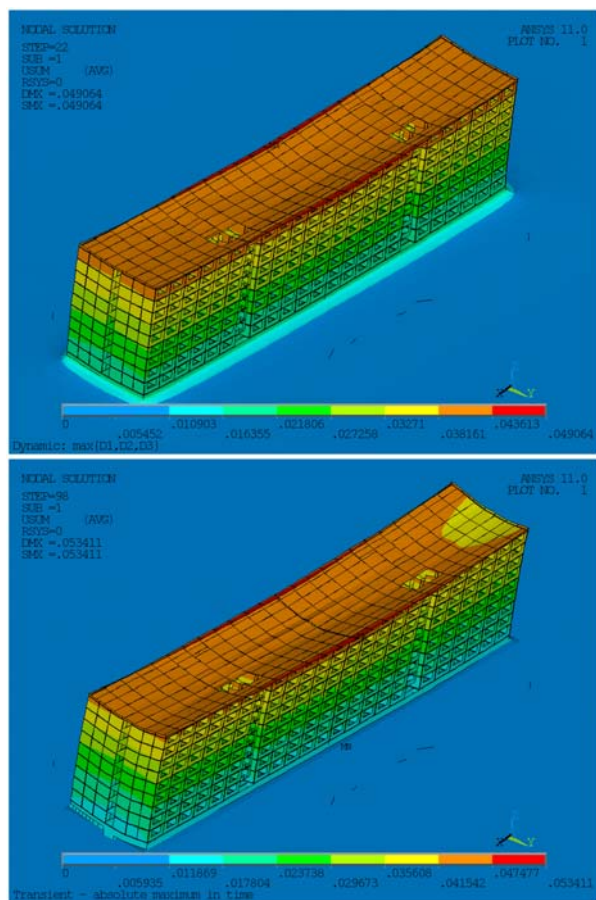
Obr. 13 Sledovaný bod na modelu ve výpočtu přímou integrací



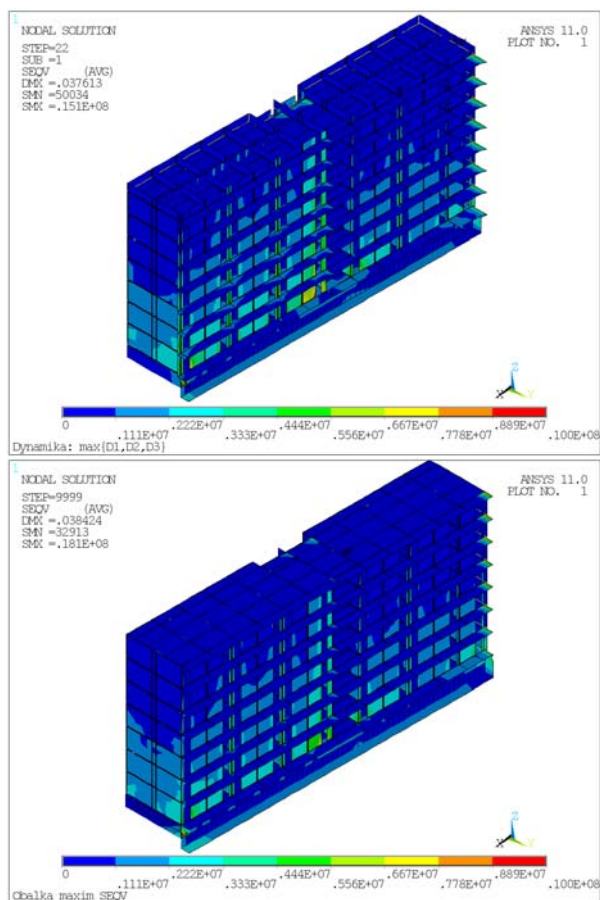
Obr. 14 Dynamická odezva z řešení přímou integrací, vlevo posunutí ve směrech x, y, z, vpravo zrychlení ve směrech x, y, z

Výpočtem byly získány hodnoty přemístění, deformací a napjatosti v celé časové oblasti řešení. Byly sledovány časové průběhy složek posunutí a zrychlení ve vybraných bodech konstrukce. Na obr. 13 je vykreslen jeden ze sledovaných bodů při výpočtu, jehož průběhy posunutí a zrychlení z celé historie je vyneseno v časovém intervalu 4 s až 16 s na obr. 14.

Obálka absolutních maxim pole posunutí je vykreslena na obr. 15 vpravo. Obálka absolutních maxim pole ekvivalentního napětí je v řezech modelu vykreslena na obr. 16 vpravo. Vodorovný řez je veden 7. podlažím, svislý podélný řez je veden spojovací chodbou. Barevná škála udávající meze hodnot napětí je v rozsahu 0 až 10 MPa.



Obr. 15 Srovnání výsledného celkového posunutí při využití návrhových spekter odezvy (vlevo) a při využití výpočtu v časové oblasti buzeného odpovídajícími akcelerogramy (vpravo)



Obr. 16 Pole ekvivalentního napětí v řezech železobetonovou konstrukcí při využití návrhových spekter odezvy (vlevo) a při využití výpočtu v časové oblasti buzeného odpovídajícími akcelerogramy (vpravo)

Závěr

Byl ukázán možný postup jak pro seizmické analýzy generovat syntetické akcelerogramy, které odpovídají výchozím návrhovým spektrům. Důraz byl kladen na to, aby spektra odezvy získané zpětně ze syntetických akcelerogramů dobře odpovídala výchozím spektrům, tak i na to, aby průběh amplitud syntetického akcelerogramu v čase odpovídal průběhu reálných záznamů při zemětřesení. Proto i časové okamžiky, ve kterých při využití syntetických akcelerogramů jsou dosažena maxima odezvy jednostupňové soustavy s různou vlastní frekvencí, nastávají těsně za oblastí s maximální odezvou, jak je tomu i při využití reálných záznamů zemětřesení.

Byly provedeny a vyhodnoceny srovnávací seizmické analýzy konstrukcí pro případy seizmického pohybu bloku podloží s použitím návrhových spekter odezvy a syntetických podkladových akcelerogramů. Srovnání odezev bylo provedeno na výpočtovém modelu panelového objektu s poddajným podložím. Získané poznatky z výpočtů odezev v přemístěních ukazují – v souladu s obecnými poznatky – vyhovující shodu výsledků řešení dle obou výpočtových postupů. Srovnávání výsledků výpočtů odezev v napětích je problematické, neboť v konstrukcích jsou vesměs řádové rozdíly

mezi průměrnou, velmi nízkou úrovní napětí a ostře omezenými, úzce lokálními extrémními napětími silně závislými na čase se zřetelem jak na velikost, tak polohu maxim odezvy. Při zemětřesení na úrovni blížící se horní hranici, kterou udává evropská norma národním dodatkem pro naše území, panelový dům dosáhne hodnot napjatosti, při kterých nelze očekávat celkový kolaps konstrukce.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za finančního přispění Výzkumného záměru MSM 0021630519 – Progresivní spolehlivé a trvanlivé nosné stavební konstrukce a grantového projektu GAČR 103/09/2007 Vliv technické a přírodní seizmicity na statickou spolehlivost a životnost staveb.

Literatura

- [1] ANSYS, Inc.: Release 10.0 Documentation for ANSYS. SAS IP, Inc 2005.
- [2] EN 1998-1, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for building*. Brussels: 2004.
- [3] NOVOTNÝ, J. *Generování akceleroграмů z daných spekter odezvy zrychlení*. Algoritmus
- [4] BITTNAR, Z. & ŘEŘIČKA, P., *Metoda konečných prvků v dynamice konstrukcí*. Praha: SNTL, 1981.
- [5] BREPTA, R., PŮST, L. & TUREK, F., *Mechanické kmitání*. Praha: Sobotáles, 1994.
- [6] CHOPRA, A., *Dynamics of structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall, 2001.
- [7] GUPTA, A. K., *Response Spectrum Method*. In Seismic Analysis and Design of Structures. United States of America: CRC Press, 1992.
- [8] SAHMKAYA M. N. & BURROW C. R., *Generation Of Signals For Seismic Testing*, Department of Mechanical and Offshore Engineering, Glasgow, Scotland
- [9] U.S. Geological Survey <<http://www.usgs.gov>>

Oponentský posudek vypracoval:

Doc. Ing. Robert Kořínek, CSc., VŠB – Technická univerzita Ostrava, FAST