

Spektrá seizmickej odozvy

Jozef Viskup¹, Blažej Pandula², Igor Leššo³ a Kamila Jelšovská⁴

Seismic response spectra

A computation of 1D and 3D seismic motion parameters was made and the influence of input parameters on these parameters were analysed. A modelling was realised on the examples of sedimentary structures geotechnical models. This comparison provides different spectral and frequencial values and spectral accelerations. The differences in seismic response spectra are influenced not only by properties of geological structures but also by the methodics of the soil structure interaction modeling and input time history spectral composition. However, the influence of geotechnical properties of geological structures on the output results are apparent. The modelling results of different input time history spectral composition, the Ricker impuls and the Gabor function were compared.

In the area of cement factory in Rohožník, the new rotary kiln furnance is planned to be build. In the sense of STN 73 0036 the expert seismic judgment has been claimed. The standard and local seismic response spectra is computed for the place where the rotary kiln will be situated. The application of the local spectral acceleration in seismic load computations enables to save costs in comparing with the standard acceleration.

Key words: geotechnical profiles, input motion, seismic response spektra, accelerogram

Úvod

Zaujímavou oblasťou spracovania signálov v časovej a frekvenčnej doméne je oblasť seizmológie, t.j. vedy o zemetraseniach a ich vplyvoch na stavby rôzneho druhu. Zemetrasenie je vyvolané náhlym pohybom zemskej kôry a tiež tektonickou činnosťou v zemskej kôre, čo následne vyvolá mechanické vlnenie, šíriace sa od epicentra do okolia desiatky, stovky až tisíce kilometrov. Toto šíriace sa mechanické vlnenie vyvoláva na zemskom povrchu charakteristické prejavy - otrasy.

Zemetrasenie ako seizmická udalosť je charakterizované polohou epicentra (miesto a hĺbka), epicentrálnou intenzitou a vypočítaným magnitúdom. Parametre sprievodného šíriaceho sa mechanického vlnenia sú determinované inžinierskogeologickými vlastnosťami prostredia, ktorým sa vlnenie šíri. Prenosové vlastnosti prostredia určujú, ktoré vlnové dĺžky prostredím prechádzajú s akým útlmom a ktoré sa dokonca vplyvom vlastnej frekvencie (rezonancie) určitých štruktúr v zemskej kôre zosilnia. Hlavným parametrom tohto seizmického vlnenia v danom mieste je jeho rýchlosť, resp. zrýchlenie (Blaško et al., 2002, Viskup, 1987).

Pre posúdenie príslušnej predmetnej lokality zo seizmického hľadiska je potrebné vychádzať z charakteru konkrétneho zemetrasenia, ktoré môže byť vyjadrené nameraným akcelogramom. Nakoľko takéto akcelogramy zemetrasení z minulosti nie sú k dispozícii, používajú sa akcelogramy zo svetovej banky akcelogramov. Vyberajú sa akcelogramy, ktoré svojimi parametrami najviac vyhovujú pre posudzovanú oblasť. Na základe vstupného akcelogramu zemetrasenia a na základe seizmickej mikrorajonizácie sa vypočítajú parametre seizmického pohybu – základné a návrhové seizmické zrýchlenie, spektrum seizmickej odozvy a to normové aj lokálne. Spektrum seizmickej odozvy vyjadruje závislosť dynamickej odozvy jednodymotového systému na jeho vlastnej frekvencii. Spektrá seizmickej odozvy poskytujú dôležitú informáciu o extrémoch odozvy, ktoré sa môžu vyskytnúť pri seizmickom zaťažení objektu (Leššo, 2004).

Významný vplyv na výpočet niektorých parametrov seizmického pohybu, ktorý geologickým prostredím prechádza, má modelovanie seizmickej odozvy. Geotechnické vlastnosti štruktúr ovplyvňujú ich prenosové vlastnosti a formujú výsledný priebeh seizmickej odozvy na povrchu prostredia.

Prezentovaný príspevok sa zaoberá postupom výpočtu spektra seizmickej odozvy pre cementáreň Rohožník (Viskup, 2003), okrem toho sú v ňom analyzované zmeny vypočítaných parametrov s využitím odlišných metodických prístupov, sú porovnávané výsledky, získané pre rovnaké geotechnické modely s využitím odlišných vstupných akcelogramov. Okrem klasických akcelogramov získaných z databanky, boli pre výpočty využité aj Rickerov impulz a Gáborova funkcia, ktorá sa často používa na popis priestorovej odozvy modelov. Príspevok sa zaoberá aj porovnávaním vplyvov metodiky modelovania

¹ RNDr. Jozef Viskup, CSc., Department of Applied and Environmental Geophysics, Faculty of Natural Sciences, Comenius University, Bratislava

² doc. RNDr. Blažej Pandula, CSc., KLaAG ÚGaET FBERG TU v Košiciach, Letná 9, Košice

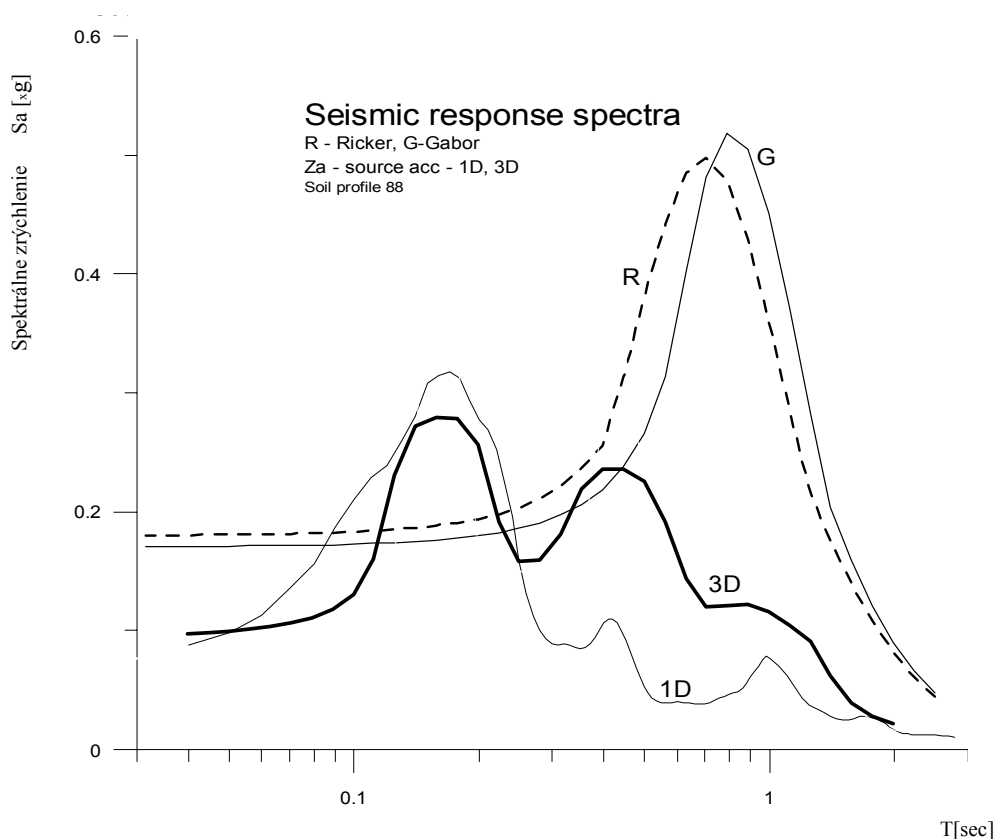
³ prof. Ing. Igor Leššo, CSc., KRVP F BERG TU v Košiciach, Letná 9, Košice

⁴ RNDr. Kamila Jelšovská, CSc., Katedra fyziky FEI TU v Košiciach, Letná 9, Košice
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 12. 12. 2005)

a rôznych vstupných akcelerogramov na výpočet niektorých parametrov seizmického pohybu, ako sú zmeny spektrálnej odozvy, resp. priebeh maximálnych spektrálnych zrýchlení.

Interpretácia výsledkov modelovania

Porovnávané parametre boli vypočítané 1D a 3D modelovaním štruktúr, ktoré môžu svojimi vlastnosťami ovplyvňovať pohyb v oblasti základovej škáry. Jedná sa o tie časti geologického prostredia, ktoré v praxi najviac ovplyvňujú výsledný efekt seizmického pohybu, zaznamenaný na povrchu (Arias, 1970). Pre výpočty bol použitý vstupný akcelerogram z databanky, Rickerov impulz a Gáborovú funkciu (Bardet et al., 1998, Bourke, 2002, Kalab et al., 1994, Ordóñez, 2000).



Obr. 1. Spektrá pre rovnaký geotechnický profil - vstupný akcelerogram
Fig. 1. Spectra for an identical geotechnical profile – input accelerogram

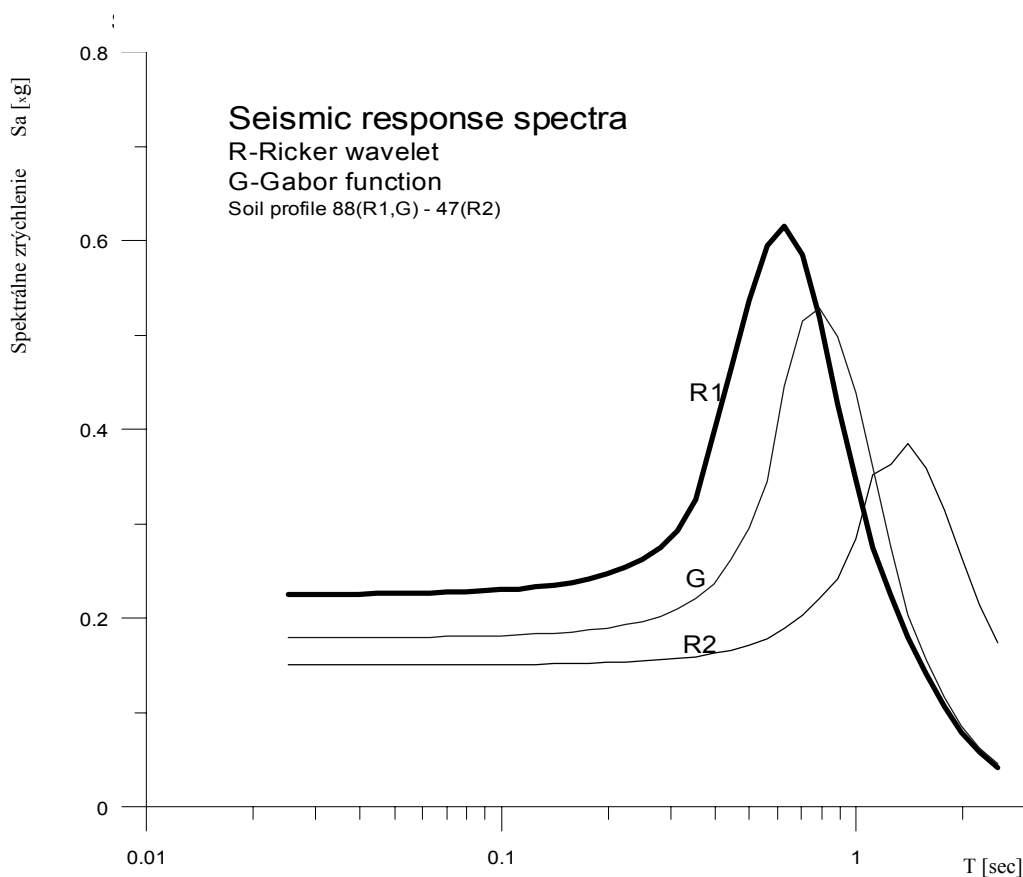
Na obr. 1 je zobrazený nielen frekvenčný posun spektier (od 1 do 3 Hz medzi 1D, 3D a R, G), ale aj rozdiely v tvare a hodnotách spektrálnych zrýchlení. Tieto zmeny sú spôsobené hlavne odlišným frekvenčným spektrom vstupných akcelerogramov, ktorých odozva je k rovnakým vlastnostiam modelu odlišná.

Pre prax je dôležitý fakt, že tvar 3D spektra je komplexnejší, hoci medzi špičkovými hodnotami zrýchlenia 1D a 3D spektier nie sú výrazné rozdiely, pričom rozdiely v náročnosti zostavenia modelov sú značné. Na obr. 2 je evidentný rozdiel medzi spektrami vstupného Rickerovho impulzu pre odlišné geotechnické modely (R1 a R2). Rozdiely sú evidentné hlavne v špičkových hodnotách zrýchlenia, odpovedajúcich rozdielnym geotechnickým vlastnostiam modelov, na ktoré aj tento impulz reaguje veľmi citlivo. Na výsledkoch modelovania, zhrnutých na obr. 1 a 2 môžeme analyzovať dva aspekty zámeru, prezentovaného v úvode. Všetky vypočítané spektrá na obr. 1, odpovedajú rovnakému geotechnickému modelu, zatiaľ čo na obr. 2 spektrálne odozvy označené ako R1 a R2, odpovedajú rozdielnym geotechnickým modelom (Viskup, 1998, Janotka et al., 2004). Na Obr. 2 je možno pozorovať mieru vplyvu zmenených geotechnických vlastností modelov na vstupný Rickerov impulz.

Funkcia Gábor, ako vstupný akcelerogram, sa v prípade rovnakého geotechnického profilu chová obdobne ako R1. Medzi nimi je minimálny frekvenčný posun, ale špičková hodnota zrýchlenia

je v porovnaní s R1, nižšia. Na Obr. 2 je možno pozorovať mieru vplyvu zmenených geotechnických vlastností modelov na vstupný Rickerov impulz.

Funkcia Gábora, ako vstupný akcelerogram, sa v prípade rovnakého geotechnického profilu chová obdobne ako R1. Medzi nimi je minimálny frekvenčný posun, ale špičková hodnota zrýchlenia je v porovnaní s R1, nižšia.



Obr. 2. Spektrá pre Rickerov impulz a Gáborovu funkciu (R1, G) – rovnaký geotechnický profil, pre Rickerov impulz (R1, R2) – rozdielne profily

Fig. 2. Spectra for the Ricker impulse and the Gabor function (R1, G) – identical geotechnical impuls, for the Ricker impuls (R1, R2) – different profiles

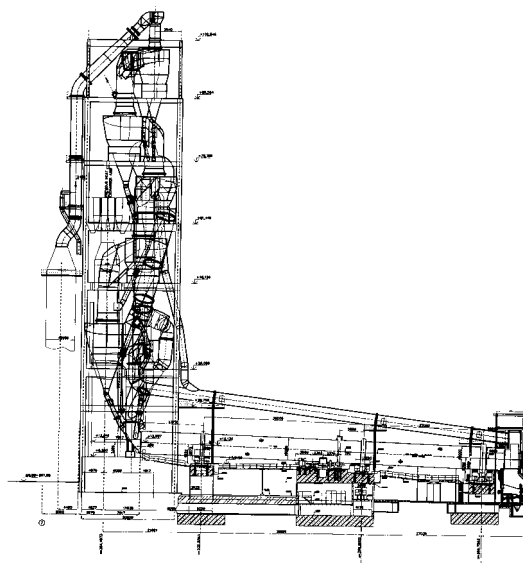
Seizmotektonické pomery v oblasti Rohožník

V mape očakávaných makroseizmických intenzít na území Slovenska sa pre oblasť Rohožníka uvádza maximálna očakávaná makroseizmická intenzita $7^0\text{MSK-64} = 7^0\text{EMS-98}$ (Viskup, 2003). Ohniská zemetrasení vyskytujúce sa v blízkom okolí záujmovej lokality i priamo v nej sú viazané na zlomové tektonické línie nachádzajúce sa v lokalite i v jej širšom okolí. Najvýznamnejšia je zlomová línia nachádzajúca sa v okolí Rohožníka, kde je zlom typu pokles - zdvih, ktorý prechádza práve Rohožníkom. Nachádza sa tu tiež plavecko - dobrovodský zlom, ktorý prechádza uvedenou lokalitou. Napokon na túto lokalitu vplyva aj zdrojová oblasť seizmického rizika viazaná na myjavský lineament a zemetrasenia viazané na zlomové línie v Alpách v širšom okolí mesta Wiener – Neustadt.

V zmysle STN 73 0036 Seizmické zaťaženie stavieb sa Rohožník nachádza v dosahu vplyvu zdrojovej oblasti seizmického rizika 2 v Malých Karpatoch pri Dobrej Vode, v Rakúsku pri Wiener – Neustadt a v dosahu vplyvu zdrojovej oblasti seizmického rizika 3 v Malých Karpatoch pri Perneku. a v okolí Senice nad Myjavou.

V blízkosti lokality sa nerobilo a nerobí monitorovanie seizmickej činnosti ani pri výstavbe a prevádzke blízkej vodnej nádrže v Lozorne, ani pri výstavbe iných nádrží (Kaláb et al., 1994) ani počas prevádzky v blízkom kameňolome v Rohožníku, ako sa to robí v iných lokalitách (Janotka et al., 2004, Kaláb, Knejzlík, 2001, Pandula et al., 2001).

Lokálne spektrá seizmickej odozvy pre cementáreň Rohožník



HOLCIM a.s., Rohožník plánuje v rámci rekonštrukcie cementárne v Rohožníku výstavbu novej 102,545 m vysokej rotačnej pece RP PC-2 (Obr. 3). V zmysle STN 73 0036 bol vypracovaný seizmický posudok, v ktorom boli vypočítané parametre seizmickeho pohybu – základné a návrhové seizmické zrýchlenie, spektrum seizmickej odozvy a to ako normové, tak i lokálne a ďalšie parametre, ktoré sú uvedené v texte.

Obr. 3. Narys rotačnej pece cementárne v Rohožníku
Fig. 3. Scheme of rotatory cement kiln furnace in Rohožník

Výpočet normových návrhových spektier seizmickej odozvy

Na základe STN 73 0036 lokalite HOLCIM, a.s., Rohožník bolo priradené základné seizmické zrýchlenie $a_r = 0,6$ g, prislúchajúce zdrojovej oblasti seizmickeho rizika 3, v ktorej sa Rohožník priamo nachádza. Pôda v danej lokalite je kategórie C. Hodnota návrhového seizmickeho zrýchlenia je potom $a_g = 0,075$ g, spektrálne hodnoty zrýchlenia S_a sú v jednotkách gravitačného zrýchlenia g, a to horizontálne S_{a_h} i vertikálne S_a , normové hodnoty návrhového spektra seizmickej odozvy sú na (Obr. 4). Maximálna hodnota horizontálnej zložky spektra seizmickej odozvy pre oblasť HOLCIM, a.s. Rohožník je $S_{a_h}(\max) = 0,15$ g, maximálna hodnota vertikálnej zložky je $S_{a_v}(\max) = 0,0876150$ g. Kontrolné periódy pri zlomových bodoch návrhového spektra $T_A = 0,029$ s, $T_B = 0,125$ s, $T_C = 1$ s, $T_D = 3$ s, normová špičková odchýlka seizmickeho pohybu na povrchu terénu voľného poľa $d_g = 0,10125$ m. Hodnoty a_g , $S_{a_h}(\max)$, $S_{a_v}(\max)$ sú v zmysle normy považované za efektívne hodnoty.

Výpočet lokálnych spektier seizmickej odozvy

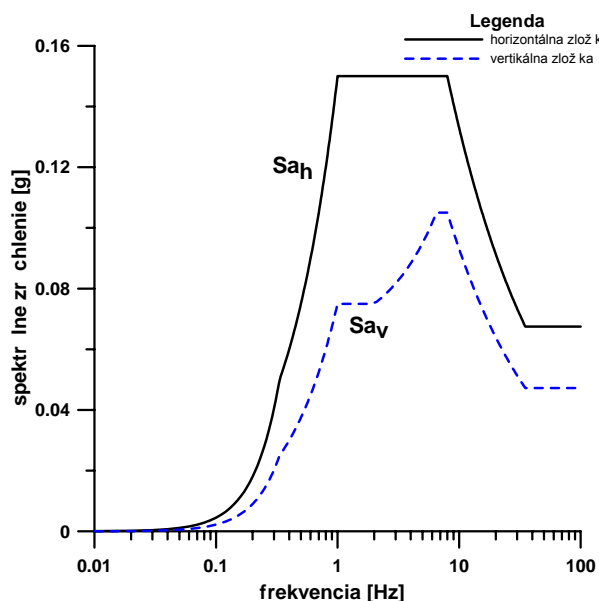
Ako vstupný akcelrogram bol použitý akcelrogram zemetrasenia zaznamenaný na skalnom podklade (Obr. 5), ktorého parametre sú: Earthquake Coyote Lake 1979/08/06 17:05; Magnitude M (5,7) Ml (5,7) Ms (5,6); PGA = 0,0502 g; Sampling 0,05 sec; Number of data points: 8000. Dĺžka trvania seizmickej udalosti je 40 sekúnd, čím prevyšuje požiadavky kladené na dĺžku trvania stacionárnej časti pre umelé akcelogramy v zmysle čl. 4.3.3.2.3 STN 73 0036 (konzervatívnejší prístup). Vstupný akcelrogram bol normovaný na hodnotu 0,066 g.

Následne bol zostavený reprezentatívny geologický profil využívajúc údaje o rýchlosti šírenia priečných vln (Viskup, 1987). Tento profil obsahoval rýchlosti šírenia seizmickeho vlnenia v jednotlivých vrstvách, koeficienty útlmu pre jednotlivé vrstvy, objemovú tiaž jednotlivých vrstiev, materiálové krivky pre zeminy nachádzajúce sa v tejto lokalite. Pre takto zostavený profil bol vypočítaný akcelrogram, velocigram a seizmogram očakávaného zemetrasenia a lokálne spektrá seizmickej odozvy (Obr. 4) použitím programu SHAKE 98 (Bardet, Lin, Idriss, 1988) a SHAKE 2000 (Ordóñez, 2000).

Vypočítané maximálne (špičkové) hodnoty zrýchlenia sú PGA = 0,075 g, rýchlosti kmitania sú PGV = 0,0609 m.s⁻¹ a maximálne hodnoty výchylky sú PGD = 0,005931 m.

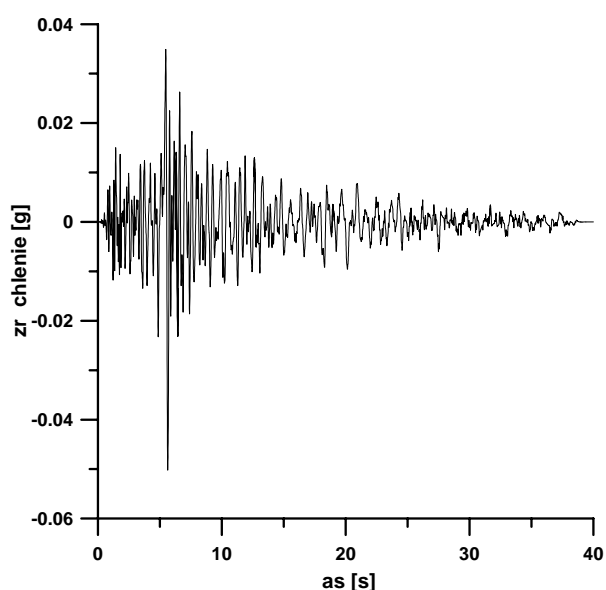
Pre záujmovú lokalitu boli vypočítané lokálne spektrá seizmickej odozvy, ktoré sú uvedené na Obr. 6. Tieto boli vyhladené a na Obr. 7 sú uvedené pre porovnanie spolu s normovými hodnotami spektier. Z normových a vyhladených lokálnych spektier boli zostrojené cieľové ("target") spektrá (Viskup, 1998). Tieto sa zostrojili z vyhladených spektier tak, že spektrálne hodnoty vyššie ako 2,5 násobok zrýchlenia pri nulovej perióde (zero period acceleration, ZPA) boli nahradené hodnotami 2,5*ZPA. Je na rozhodnutí projektanta, či v oblasti frekvencií, v ktorých spektrálne zrýchlenie je vyššie ako 2,5*ZPA (v našom prípade 2,14 Hz – 3,89 Hz) použije vyhladené hodnoty.

Holcim a.s., - Roho n k
rota n pec RP PC-2
Normov spektr seizmickej odozvy



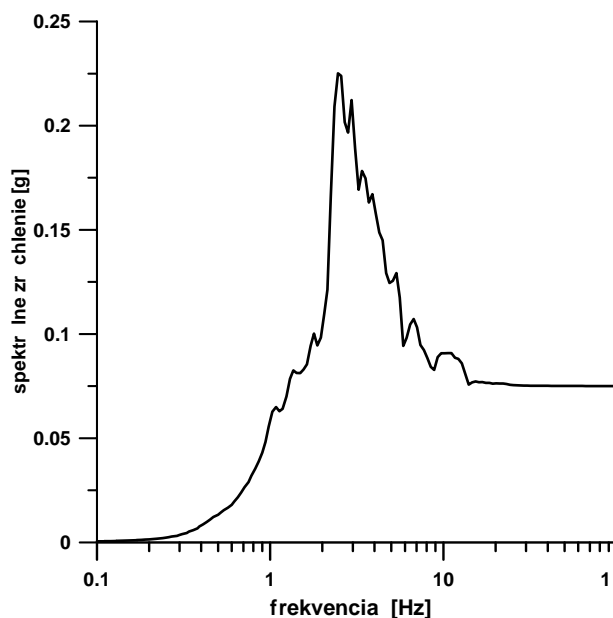
Obr. 4. Normové spektrá seizmickej odozvy
Fig. 4. Exact seismic response spectra

Akcelerogram zemetrasenia
Earthquake Coyote Lake 1979/08/06
M = 5.7 MI = 5.7 Ms = 5.6



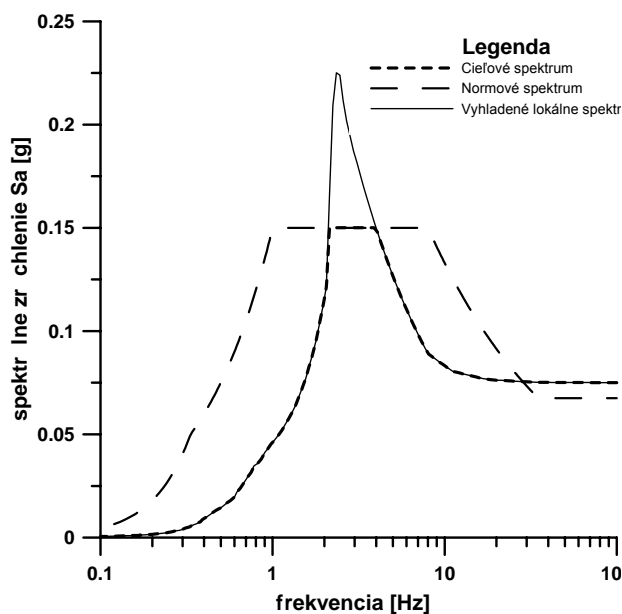
Obr. 5. Vstupný akcelerogram zemetrasenia
Fig. 5. Input accelerogram earthquake

Holcim a.s., - Roho n k
rota n pec RP PC-2
Lokálne spektrum seizmickej odozvy



Obr. 6. Vypočítané lokálne spektrum seizmickej odozvy
Fig. 6. Computed local seismic response spectra

Holcim a.s., Roho n k
rota n pec RP PC-2
Spektr seizmickej odozvy



Obr. 7. Normové a vyhladené lokálne spektrá seizmickej odozvy
Fig. 7. Exact and smoothed local seismic response spectra

Z obr. 7 vyplýva, že vypočítané lokálne spektrálne zrýchlenia sú pre oblasť frekvencií 0,1 – 2,14 Hz a 3,89 – 28,6 Hz nižšie v porovnaní s normovými hodnotami spektrálneho zrýchlenia. V oblasti frekvencií 2,14 – 3,89 Hz a 28,6 - 100 Hz sú normové hodnoty zrýchlenia menšie v porovnaní s lokálnymi, frekvencie 28,6 - 100 Hz sú však veľmi zriedkavé pri stavebných konštrukciách. Závisí na projektantovi, či vo výpočtoch použije normovú hodnotu, alebo nami vypočítanú vyhladenú hodnotu, ktorá je ale presnejšia.

Možno očakávať, že vzhľadom na výšku rotačnej pece bude vlastná frekvencia tejto konštrukcie okolo 1 Hz. Normová hodnota zrýchlenia S_a pre takúto frekvenciu je $S_a(1\text{Hz}) = 0,15\text{ g}$ a lokálna hodnota spektrálneho zrýchlenia je $S_a(1\text{Hz}) = 0,046154\text{ g}$. Normová hodnota spektrálneho zrýchlenia je teda 3,1 krát vyššia v porovnaní s lokálnou hodnotou. Následne teda, ak sa vo výpočtoch použijú normové hodnoty spektrálneho zrýchlenia, budú finančné náklady na výstavbu rotačnej pece podstatne vyššie, než ako sa použijú lokálne hodnoty spektrálneho zrýchlenia.

V tab. 1 sú uvedené hodnoty spektrálneho zrýchlenia pre vybrané nízke frekvencie, ktoré by sa mohli približovať vlastnej frekvencii rotačnej pece, maximálne hodnoty spektrálneho zrýchlenia vypočítané, vyhladené i cieľové (cieľové je v tomto prípade zhodné s normovým) a zrýchlenia pre nulovú periódu ZPA. Rozdiel v hodnotách ZPA medzi normovými a lokálnymi spektrami je nepatrný.

Tab. 1. Hodnoty spektrálneho zrýchlenia pre zvolené frekvencie
Tab. 1. Spectral acceleration values for concrete frequencies

Spektrálne zrýchlenia	0,7 [Hz]	1 [Hz]	1,3 [Hz]	Sa (max)	ZPA
Normové spektrum	0,105g	0,150g	0,150g	0,150g	0,0697g
Lokálne vypočítané spektrum	0,02563g	0,0585g	0,07848g	0,2253g	0,0752g
Lokálne vyhladené spektrum	0,2810g	0,0462g	0,06074g	0,225g	0,0752g
Cieľové spektrum	0,2810g	0,0462g	0,06074g	0,150g	0,0752g

Záver

Pri interpretácii spektrálnych vlastností je evidentné, že seizmický pohyb je ovplyvnený frekvenčným zložením vstupného akcelerogramu, geometriou a vlastnosťami sedimentárnych plytkých štruktúr, ktorými prechádza. Pre modelovanie boli využité zdrojové akcelerogramy z databanky, Rickerov impulz aj Gáborova funkcia, ktorá sa využíva hlavne k porovnaniu priestorových odoziev. Preto aj popísané zmeny v spektrálnych odozvách, ktoré boli analyzované môžu byť využité pri predikcii povrchových seizmických pohybov vplyvom skutočného seizmického vlnenia, ktorého parametre sú súčasťou výpočtu seizmického zaťaženia stavebného diela.

Pre lokalitu HOLCIM Rohožník, rotačná pec RP PC - 2 boli vypočítané normové, lokálne, lokálne vyhladené a cieľové spektrá v zmysle STN 73 0036. Hodnoty boli vypočítané pre voľný povrch terénu pre štandardný pomerný útlm 5 %. Vypočítané lokálne hodnoty boli porovnané s normovými a vyplýva z nich, že v oblasti frekvencii, ktoré sú blízke vlastnej frekvencii rotačnej pece, lokálne hodnoty spektrálneho zrýchlenia sú niekoľkonásobne nižšie v porovnaní s normovými hodnotami. Ak sa vo výpočtoch seizmického zaťaženia použijú lokálne spektrá seizmickej odozvy, finančné náklady na výstavbu rotačnej pece budú nižšie pri zachovaní seizmickej bezpečnosti konštrukcie.

Z analýzy dosiahnutých výsledkov možno pre prax vyvodit' nasledovné závery:

- presnosť vypočítaných parametrov seizmického pohybu závisí od výberu reprezentatívneho vstupného akcelerogramu
- vypočítané parametre môžu byť ovplyvnené výberom metodiky modelovania,
- je potrebné zväziť požadovanú presnosť a metodickú náročnosť 1D a 3D modelovania.

Literatúra - References

- Arias, A.: A measure of earthquake intensity. Seismic Design for Nuclear Power Plants, Hansen, R., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1970, pp. 438-483.
- Bardet, J., P., Lin, C., H., Idriss, I., M.: SHAKE98. A Computer Program for Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits. Report to US Geological Survey. October 1988, 41 s.
- Blaško, F., Lazarová, E., Krúpa, V.: Vybrané kapitoly z geotechniky. Vysokoškolská učebnica, VLA, Košice 2002.
- Bourke, P.: Gabor function in 1D,2D and 3D, Analysis, Miscellaneous Functions, Swinburne University of Technology, Victoria, Australia 2002.
- Janotka, V., Viskup, J., Blaško, F.: Letiskové stavebné inžinierstvo – porovnanie metodík výpočtu spektier seizmickej odozvy. Acta Avionica ročník VI č. 9/2004, s. 33 – 36.
- Kaláb, Z., Knejzlík, J., Gruntorád, B., Bláha, P.: Provádění trhačích prací v okolí přehradních objektů. In: Kaláb Z. et al (1994): Inženýrská seismologie. Sborník referátů regionální konference, Ústav geoniky AV ČR., Ostrava, 31-36.

- Kaláb, Z., Častová, N., Kučera, R.: The use of discrete wavelet transform for seismological signals induced by mining, *Abstract in: The 29th General Assembly of the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, Thessaloniky, Greece 1997*, p.368.
- Kaláb, Z., Knejzlík, J.: Systematické měření a předběžné vyhodnocení seizmického kmitání vyvolaného důlní seismicitou v karvinské oblasti. In: *Kaláb Z. et al. (2001): Seismologie a inženýrská geofyzika - minulost, přítomnost, budoucnost. Sborník referátů regionální konference, Ústav geoniky AV ČR, Ostrava, 230 – 239.*
- Leššo, I.: Teória signálov pre priemyselnú informatiku. *Vysokoškolská učebnica, ES TU F BERG, Košice 2004.*
- Ordóñez, G., A.: SHAKE2000, A Computer Program for the 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems., *SHAKE2000, User's Manual, March 2004, 316 s.*
- Pandula, B., Mockovčiaková, A., Cehlár, M., Jelšovská, K.: Hodnotenie porušenia horninového masívu pomocou impulzových dynamických metód z pohľadu ekonomickej efektívnosti trhacích prác, *Acta Avionica ročník III/2001 č. 4, VLA Košice s. 116 – 121 ISSN 1335-9479.*
- STN 73 0036 (1997): Seizmické zaťaženia stavebných konštrukcií. *Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR, Bratislava, 68 str.*
- Viskup, J.: Rýchlosti šírenia pozdĺžneho a priečného seizmického vlnenia na území SZ časti Veľkej Bratislavy. In.: *Fyzikální vlastnosti hornin a jejich využití v geofyzice a geologii., Jčs m+f, Praha, 1987, 28 – 31.*
- Viskup, J.: Seizmológia a seizmický hazard. *KAEG PFU. Manuscript., 1998, 32 s.*
- Viskup, J.: HOLCIM a.s. Rohožník, Rekonštrukcia rotačnej pece RC PC - 2 HOLCIM a.s. Rohožník. *Seizmický posudok pre Hutný Projekt a.s., Seiscomp, Bratislava, 2003, 17 s.*