

STANOVENÍ VLASTNÍ FREKVENCE BUDOVY A PODLOŽÍ POMOCÍ METOD SPEKTRÁLNÍCH POMĚRŮ

DETERMINATION OF FUNDAMENTAL FREQUENCY OF BUILDING AND SUBSOIL USING SPECTRAL RATIO METHODS

Markéta Lednická¹

Abstrakt

Informace o vlastní frekvenci budov a rezonanční frekvenci podložních vrstev jsou nezbytné pro studium seizmických účinků v zastavěných oblastech s očekávaným seizmickým zatížením. Pro stanovení těchto rezonančních frekvencí se dají využít tzv. metody spektrálních poměrů. V článku je představeno využití těchto metod pro stanovení vlastní frekvence vybrané šestipodlažní budovy a rezonanční frekvence jejího podloží, které je tvořeno vrstvou sedimentů. Naměřené záznamy seizmického neklidu byly zpracovány pomocí dvou různých metod – HVSR a SSR. Z výsledků analýz plyne, že rezonanční frekvence podloží se liší od vlastní frekvence budovy. Nicméně metoda HVSR prokázala, že vibrace způsobené rezonančním kmitáním podložních vrstev se přenášejí z podloží do budovy. Dále byla na staništích v obvodových částech budovy detekována další frekvence, která pravděpodobně odpovídá frekvenci torzního kmitání.

Abstract

Information about the fundamental frequency of buildings and the soil frequency is necessary for the study of seismic effect in urban areas where seismic loading is expected. Spectral ratio methods are possible to use for the resonance frequency determination. Paper deals with the using of these methods for determination of fundamental frequency of six-storied building and for determination of resonance frequency of subsurface sedimentary layers. Seismic records of ambient noise were analyzed using two methods - HVSR and SSR. It was found that the fundamental frequency of building and soil frequency are different. Nevertheless, using the HVSR method, it was found that the vibrations caused by the resonance vibration of underlying soil layers are transmitted from the subsoil to the building. Also another frequency was detected in the peripheral parts of the building, which probably corresponds to the frequency of torsional oscillation.

Klíčová slova

rezonanční frekvence, metoda spektrálních poměrů, SSR, HVSR, seizmický neklid

Keywords

resonance frequency, spectral ratio method, SSR, HVSR, ambient noise

1 Úvod

Při posouzení seizmického zatížení v zastavěných oblastech hrají důležitou roli jak dynamické parametry samotných stavebních objektů, tak také dynamické charakteristiky geologického podloží. Obecně je známo, že lokální geologická stavba může ovlivňovat velikost seizmických účinků na povrchu buďto jejich zesílením nebo také zeslabením. V zastavěných oblastech představuje zesílení seizmických účinků na povrchu zvýšení rizika poškození stavebních objektů, a to převážně těch, jejichž vlastní frekvence je totožná s rezonanční frekvencí přípovrchové geologické stavby. Jedním z možných přístupů k hodnocení tohoto rizika je sestavení map rezonanční frekvence sedimentárních vrstev v dané oblasti a jejich konfrontace s informací o vlastní frekvenci stavebních objektů v dané lokalitě, viz např. (Ansal et al., 2010, Gosar et al., 2010, Gribovszki et al., 2010, Györi, 2013).

Efekt zesilování seizmických účinků v sedimentárních vrstvách je dlouhou dobu zkoumán jak v oblasti hodnocení reálných měření in situ (např. Ansal, 2004, Bard, 2008, Gosar a Lenart, 2010, Kaláb et al., 2010), tak v oblasti teorie a matematického modelování (např. Chávez-García, 2007). Dominantním jevem, který řídí zesílení vibrací v nezpevněných nebo málo zpevněných sedimentárních vrstvách pokrývajících pevný horninový masiv, je změna amplitudy rychlosti kmitání a interferenční jevy v sedimentech v důsledku výrazného rozdílu vlnových odporů sedimentů a horninového masivu. Ke zkoumání tohoto efektu zesílení jsou využívány tzv. metody spektrálních poměrů, pomocí nichž lze analyzovat záznamy vibrací a stanovit rezonanční frekvenci vrstev sedimentů a faktor zesílení. Pomocí metod spektrálních poměrů se obvykle analyzují buďto seizmické záznamy zemětřesení, záznamy indukovaných seizmických jevů nebo vibrace způsobené technickou seismicitou (metoda SSR a HVSR), nebo se analyzují záznamy seismického neklidu (metoda HVNR). Jedním z výstupů těchto studií bývá zpravidla sestavení mapy rezonanční frekvence sedimentárních vrstev pro daný region.

Poměrně podrobnou informaci o vlastní frekvenci stavebních objektů lze získat na základě matematického modelování dynamické odezvy daného objektu při simulaci dynamického zatížení (např. Čada et al., 2010, Hradil et al., 2009, Nevařil, 2009). Nejpresnější informaci o vlastní frekvenci objektu však lze získat pouze z provedených měření vibračních účinků během dynamického zatížení přímo v předmětném objektu (např. Brož et al., 2008, Kaláb a Lednická, 2011, Kaláb, 2012). Ne vždy je však možné provádět měření v době, kdy je objekt vystaven dostatečně silným dynamickým účinkům. Jak se uvádí např. v Gallipoli et al. (2010), řešením je provedení krátkodobých měření seizmického neklidu v objektu a tato data analyzovat pomocí zmíněných metod spektrálních poměrů. V prezentovaném článku je popsáno experimentální měření seizmického neklidu ve vybrané šestipodlažní budově a jejím okolí a stanovení vlastní frekvence této budovy za použití dvou vybraných metod spektrálních poměrů.

2 Metody spektrálních poměrů

Metody spektrálních poměrů jako prostředek zkoumání efektu zesílení seizmických účinků na povrchu se používají převážně v zemětřesných oblastech pro stanovení rezonanční frekvence sedimentárních vrstev. Mají však využití v mnoha dalších oborech, mimo jiné se dají použít ke stanovení vlastních frekvencí stavebních objektů. Nejčastěji se uplatňují tyto metody – SSR (standard spectral ratio),

HVSR (horizontal to vertical spectral ratio) a FSR (floor spectral ratio). Tyto metody jsou aplikovány na záznamy seismického neklidu naměřené v příslušném objektu, případně v jeho blízkém okolí.

2.1 Metoda SSR

Poprvé byl princip metody SSR popsán v práci Borchardt (1970), kdy byla metoda použita pro hodnocení zesilujícího vibračního účinku v sedimentárních vrstvách. Rezonanční frekvence sedimentárních vrstev se vypočítá jako poměr spekter horizontálních složek rychlosti kmitání naměřených v místě sedimentárního pokryvu ke spektru horizontálních složek rychlosti kmitání naměřených na referenčním stanovišti, v tomto případě se jednalo o skalní výchoz v blízkém okolí. Pro účely stanovení vlastní frekvence budov je metoda SSR použita obdobným způsobem, počítá se poměr spekter horizontálních složek rychlosti kmitání naměřených v jednotlivých podlažích objektu ke spektru horizontálních složek naměřených na referenčním stanovišti. Tímto stanovištěm je v daném případě místo v okolí budovy, které by již nemělo být ovlivněno kmitáním samotné budovy přenášeným podložím do okolí. Jak se uvádí v práci Gosar et al. (2010), doporučená vzdálenost referenčního stanoviště by měla být minimálně rovna výšce budovy, v práci Gallipoli et al. (2010) se dokonce uvádí vzdálenost rovna dvojnásobku výšky budovy.

2.2 Metoda HVSR a HVNR

Metody HVSR (Lermo et al., 1993) a HVNR (Nakamura, 1989) jsou založeny na podobném principu jako metoda SSR, avšak pro výpočet poměrů spekter není potřeba měření na referenčním stanovišti. Počítá se poměr spektra horizontálních složek rychlosti kmitání ke spektru vertikální složky rychlosti kmitání stanovených ze signálu naměřeného v daném místě. Při analýze rezonanční frekvence podloží pomocí metody HVSR se zpracovává naměřený seismický záznam (např. zemětřesení, indukovaný seismický jev, vibrace způsobené technickou seismicitou), metoda HVNR zpracovává záznam seismického neklidu. Pro hodnocení rezonanční frekvence podložních vrstev jsou tyto metody výhodné v místech, kde neexistuje referenční stanoviště v podobě skalního výchozu. Při použití metody HVSR pro stanovení vlastní frekvence stavebních objektů existují jistá omezení. V práci Gallipoli et al. (2010) se např. uvádí, že pokud je budova malá s velkou prostorovou tuhostí, potom tato metoda nedokáže eliminovat vliv vibrací podložních vrstev, které se mohou přenášet z podloží do objektu. Na křivkách spektrálních poměrů se tyto vibrace mohou projevit samostatným píkem, který by mohl být nesprávně interpretován jako vlastní frekvence objektu.

2.3 Metoda FSR

Tato metoda se využívá pouze ke stanovení rezonanční frekvence u budov. Princip výpočtu je obdobný jako u metody SSR. Počítá se poměr spekter horizontálních složek rychlosti kmitání naměřených v příslušném podlaží budovy ke spektru horizontálních složek rychlosti kmitání naměřených na základech budovy (Gosar et al., 2010).

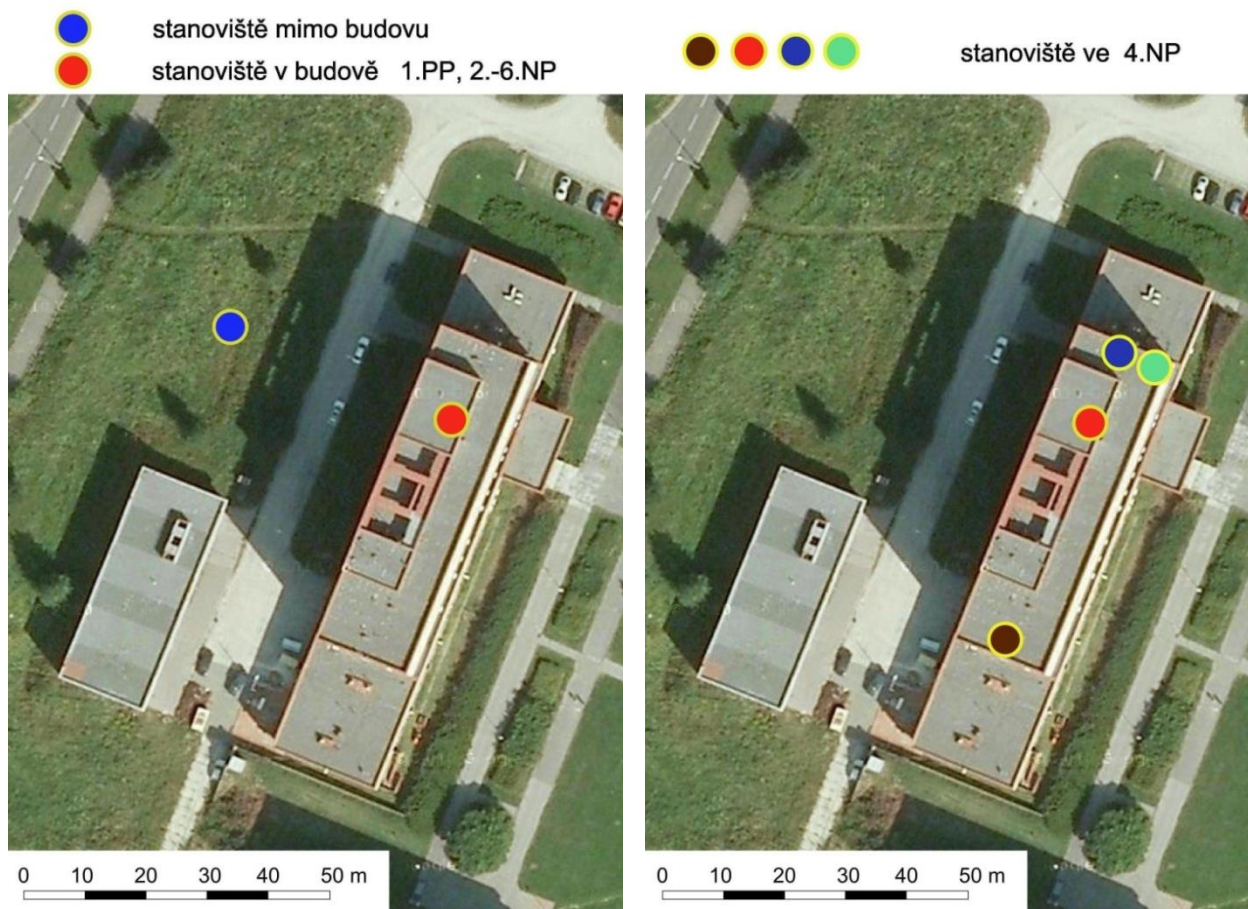
3 Experimentální měření

3.1 Popis lokality

Experimentální měření seizmického neklidu bylo provedeno v podsklepené šestipodlažní budově s železobetonovým skeletovým systémem. Lokalizace budovy včetně míst provedených měření jsou uvedeny na Obr. 1. Geologické podloží v daném místě je tvořeno vrstvou navážky, pod kterou se nachází kvartérní sedimenty tvořené hlinitými a písčitými jíly do hloubky 12,5 m. V hloubce 4,5 až 7 m se nachází písčitá vrstva, místy s kameny. V hloubce 12,5 m až 20 m se nachází písky s příměsí jemnozrnných zemin, které překrývají břidlice kulmského stáří (podle Petřík et al., 2012). Budova je situována v klidném prostředí, nejbližší komunikace se nachází ve vzdálenosti 70 m.

3.2 Měření

Měření seizmického neklidu probíhalo v jednotlivých podlažích budovy, vynecháno bylo pouze měření v prvním nadzemním podlaží. Stanoviště označené jako 6.NP se nacházelo v úrovni střechy objektu, měřicí senzor byl situován v přístupové části ke strojovně výtahu. Měřicí stanoviště pro analýzu základní vlastní frekvence byla rozmístěna po výšce budovy nad sebou, zhruba v jedné čtvrtině délky budovy blízko centrálního schodiště. U měření seizmického neklidu pro účely stanovení základní vlastní frekvence objektu je třeba se vyvarovat měření v místech, kde by mohlo docházet k rozkmitání jednotlivých konstrukčních prvků, jako např. strop, nosník, stěna, apod. Jak se uvádí v práci Gallipoli et al. (2010), rozmístěním měřicích stanovišť v okrajových částech nejvyššího podlaží lze na křivkách spektrálních poměrů analyzovat také případné projevy torzního kmitání. Toto kmitání by se mělo projevit píkem na dané frekvenci, ale pouze u stanovišť na okrajích budovy. Na stanovišti situovaném ve středu budovy by tento pík neměl být detekován. Měřicí stanoviště pro analýzu případného torzního



obr. 1 Lokalizace objektu s vyznačenými místy měření; vlevo - stanoviště rozmístěná po výšce budovy v jednotlivých podlažích a mimo budovu; vpravo - stanoviště rozmístěná na různých místech ve 4.NP

kmitání byla rozmístěna ve 4.NP na několika různých místech (Obr. 1). V nejvyšším podlaží nebylo toto měření provedeno, neboť v požadovaných místech nebylo možné umístit měřicí senzor.

Na každém stanovišti byl pořízen minimálně půlhodinový kontinuální záznam seizmického neklidu. Měření bylo realizováno komerční aparaturou GAIA (firma VISTEC Praha) s třísložkovým rychlostním snímačem Lennartz LE3D. Vzáorkovací frekvence digitálních dat byla 500 Hz, frekvenční rozsah senzoru je 1 – 80 Hz. Frekvenční rozsah zvoleného senzoru byl pro dané měření dostačující, neboť se nepředpokládalo, že by vlastní frekvence objektu mohla být menší než 1 Hz (podle Gallipoli et al., 2010).

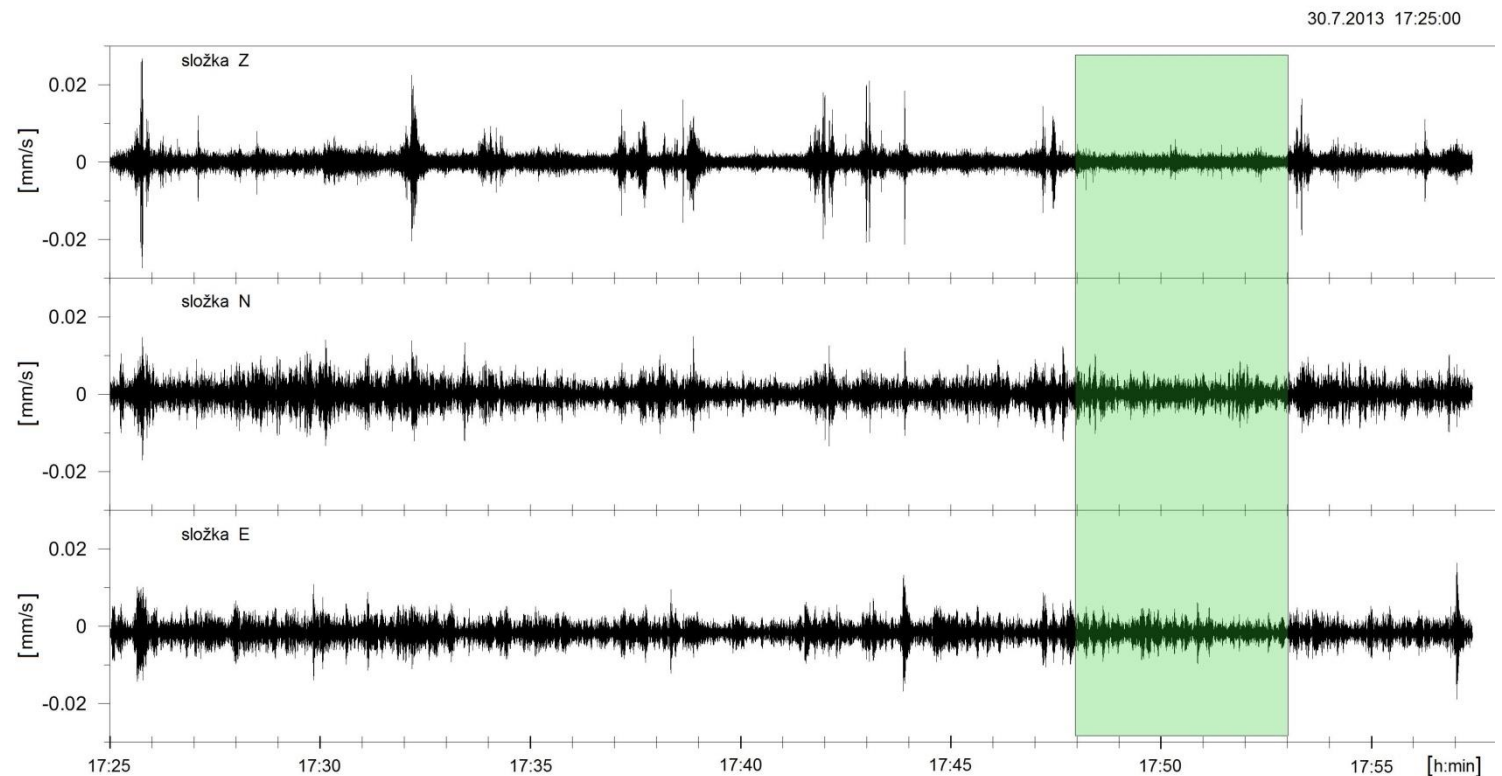
Kromě měření v budově bylo provedeno také měření v blízkém okolí budovy, a to ve vzdálenosti 30 m od objektu. Tato vzdálenost odpovídá zhruba 1,5 násobku výšky budovy, to znamená, že by se v místě měření již nemělo projevovat kmitání samotné budovy šířící se podloží do okolí. Během všech měření byl senzor orientován stejným směrem, longitudinální složka L byla rovnoběžná s podélnou osou budovy, transversální složka T byla orientována kolmo na podélnou osu budovy.

3.3 Analýza dat

Z naměřených půlhodinových záznamů byly na každém stanovišti vybrány pětiminutové úseky seizmického neklidu (příklad na Obr. 2), které nebyly ovlivněny provozem budovy (např. jízda výtahu, pohyb osob) nebo jinými vnějšími vlivy (např. průjezdy nákladních aut po blízké komunikaci).

Pro vybrané pětiminutové záznamy byla provedena spektrální analýza následujícím způsobem:

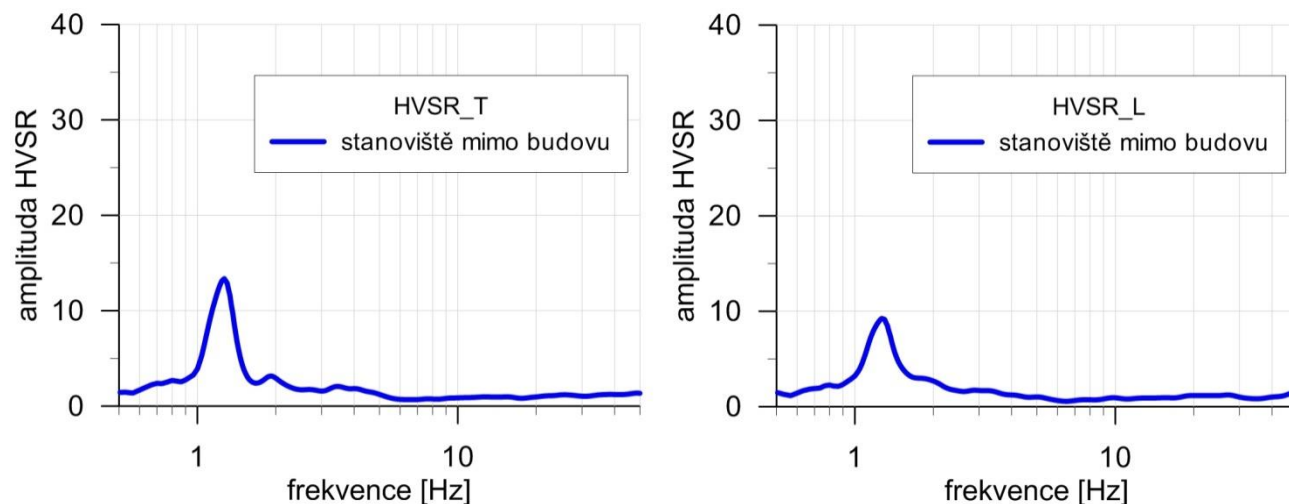
- pětiminutový záznam byl rozdělen na 20-ti sekundová nepřekrývající se časová okna;
- pro každé 20-ti sekundové okno bylo napočítáno frekvenční spektrum pomocí FFT a vyhlazeno;
- frekvenční spektra pro jednotlivá okna byla poté zprůměrována;



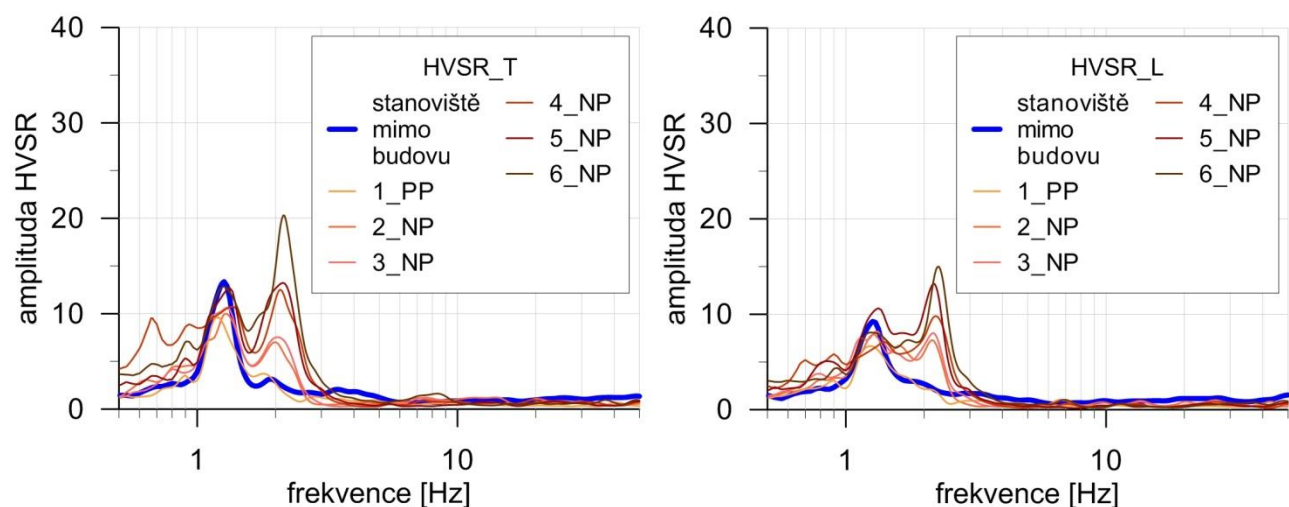
Obr. 2 Příklad půlhodinového záznamu seizmického neklidu naměřený ve 4.NP s vyznačeným detailem zpracovaného pětiminutového úseku signálu

- výpočet byl proveden zvlášť pro jednotlivé složky signálu – vertikální V, transversální T a longitudinální L.

Vypočítané průměry spekter pětiminutových úseků pro jednotlivé složky V, T a L byly dále použity do výpočtu poměrů spekter pomocí metody HVSR a SSR. Metoda HVSR byla použita zvlášť pro stanovení rezonanční frekvence podloží a zvlášť pro stanovení vlastní frekvence budovy. Pro každé podlaží i pro stanoviště mimo budovu byl spočítán poměr mezi spektrem horizontální složky a spektrem vertikální složky, a to zvlášť pro obě vodorovné složky T a L. Metoda SSR byla použita jak pro zpracování záznamů naměřených v jednotlivých podlažích budovy, tak i záznamů naměřených na různých místech ve 4.NP pro zhodnocení případného projevu torzního kmitání. Pro každé podlaží byl spočítán poměr mezi spektrem horizontální složky v daném podlaží a spektrem horizontální složky záznamu naměřeného mimo budovu. Poměry spekter byly opět zpracovány pro obě vodorovné složky zvlášť. Výsledné poměry spekter pro jednotlivá podlaží a pro stanoviště mimo budovu jsou uvedeny na Obr. 3, 4, 5 a 6. Analýza spekter pomocí metody FSR nakonec nebyla provedena, neboť se ukázalo, že spektrum signálu naměřeného v 1. PP je téměř totožné se spektrem signálu naměřeného mimo budovu. Výsledné poměry spekter při použití metody FSR by byly stejné jako při použití metody SSR.



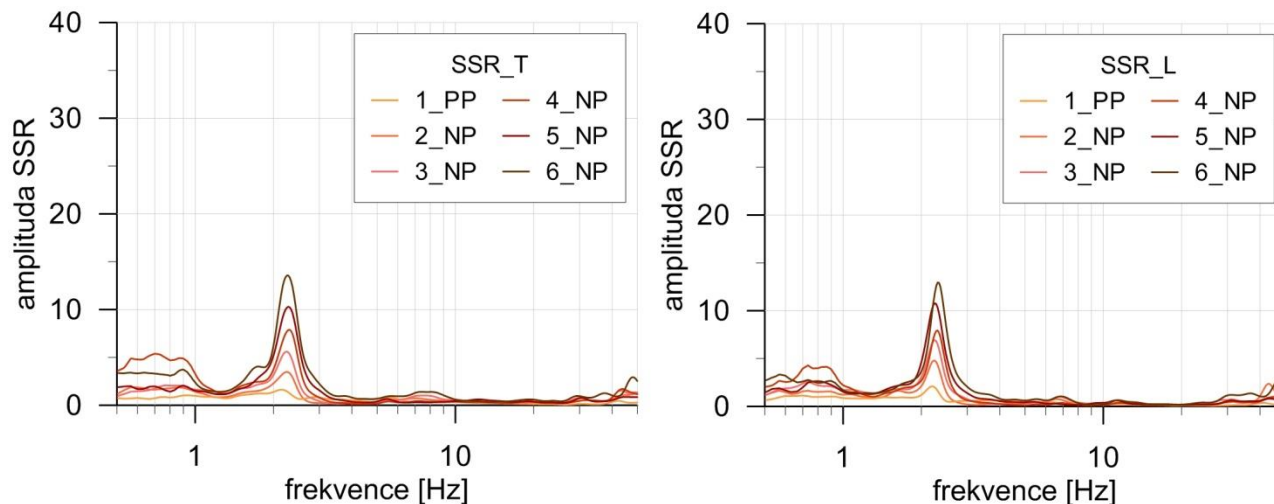
Obr. 3 Poměry spekter získané metodou HVSR pro složku T a L, stanoviště mimo budovu



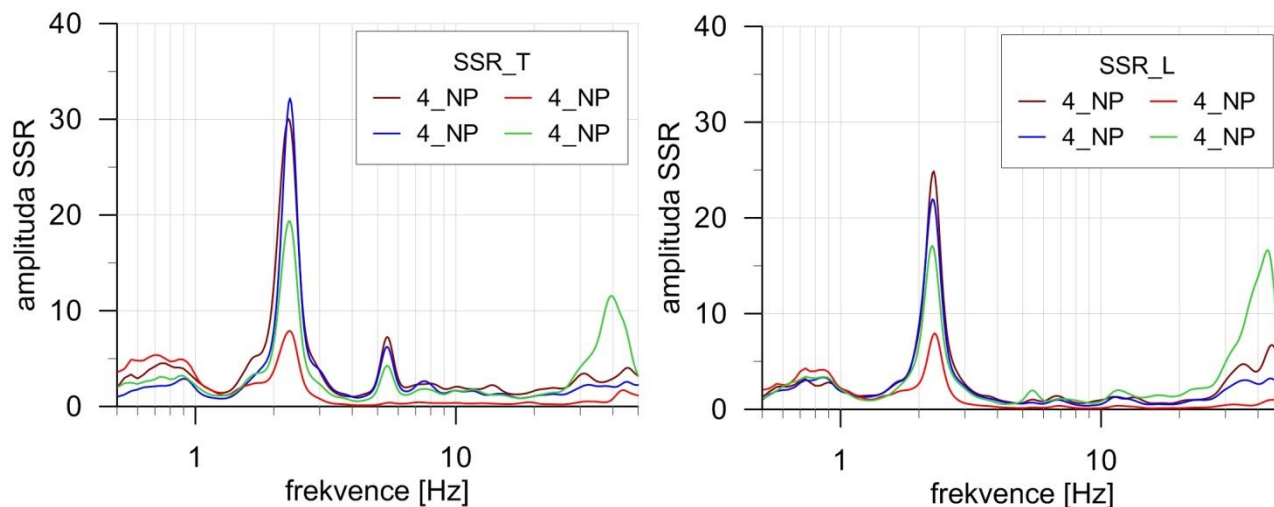
Obr. 4 Poměry spekter získané metodou HVSR pro složku T a L, stanoviště mimo budovu a stanoviště v jednotlivých podlažích budovy

4 Výsledky měření

V grafu na Obr. 3 lze vidět typickou ukázkou spektrálního poměru s výrazným píkem, který odpovídá rezonanční frekvenci podložních sedimentárních vrstev. Hodnota této rezonanční frekvence se pohybuje okolo 1,27 Hz. Porovnáme-li křivky spektrálních poměrů pro záznamy seizmického neklidu naměřené v jednotlivých podlažích budovy (Obr. 4 a 5), na první pohled lze vidět rozdíl ve výsledcích při použití metody HVSR a SSR. V křivkách SSR je dominantní pouze jeden pík odpovídající frekvenci 2,24 – 2,3 Hz (liší se nepatrně pro jednotlivá podlaží). Jedná se s velkou pravděpodobností o základní vlastní frekvenci budovy. Žádné další píky na vyšších frekvencích, které by odpovídaly dalším vlastním frekvencím, nebyly detekovány. V křivkách HVSR se projevují dva významné píky. Pík na frekvenci 1,21 – 1,38 Hz odpovídá pravděpodobně rezonanční frekvenci podložních sedimentárních vrstev a pík na frekvenci 2,0 – 2,27 Hz odpovídá základní vlastní frekvenci budovy. Pík na frekvenci 1,21 – 1,38 Hz poukazuje na přenos vibrací z podloží do budovy, přičemž vliv těchto vibrací lze pozorovat ve všech podlažích budovy a amplituda píku se pro všechna stanoviště příliš neliší. Pro vlastní frekvenci budovy je typický pík, jehož amplituda vzrůstá s výškou podlaží. Tento fakt se projevuje u výsledků obou použitých metod.



Obr. 5 *Poměry spekter získané metodou SSR pro složku T a L, stanoviště v jednotlivých podlažích budovy*



Obr. 6 *Poměry spekter získané metodou SSR pro složku T a L, měření na různých místech v 4.NP; barva zobrazených křivek odpovídá barvě stanoviště na obr. 1(vpravo)*

Spektrální poměry SSR pro záznamy naměřené na různých místech ve 4.NP jsou uvedeny na Obr. 6. Frekvence dominantního píku 2,24 – 2,3 Hz je stejná pro všechna stanoviště a odpovídá základní vlastní frekvenci budovy. Amplituda je mnohem větší u stanovišť blízko obvodových zdí budovy ve srovnání se stanovištěm situovaným uvnitř budovy. Na těchto stanovištích se navíc na křivce spektrálního poměru pro složku T objevuje menší, ale zřetelný pík na frekvenci 5,44 Hz. Ten by mohl odpovídat frekvenci torzních kmitů nebo další vlastní frekvenci. Na křivce spektrálních poměrů pro složku L tento pík detekován není. Nárůst amplitudy u křivek spektrálních poměrů pro hodnoty frekvencí nad 30 Hz již není analyzován. Patrně nesouvisí s vlastní frekvencí budovy, může se jednat o rezonanční kmitání některého z prvků v blízkosti měřicího stanoviště u obvodových zdí objektu.

5 Závěr

Metody spektrálních poměrů jsou užitečným nástrojem při hodnocení vlastních frekvencí stavebních objektů a rezonančních frekvencí podloží. Využívají se při hodnocení seizmických účinků v zastavěných oblastech, kdy na základě konfrontace map rezonanční frekvence sedimentárních vrstev v dané oblasti a informací o vlastní frekvenci stavebních objektů lze vytipovat kritická místa v dané lokalitě. Jedná se převážně o objekty, jejichž vlastní frekvence je shodná s rezonanční frekvencí podloží.

Prezentované metody spektrálních poměrů byly použity při stanovení vlastní frekvence vybraného šestipodlažního objektu, jehož podloží je tvořeno vrstvou sedimentů. Z měření provedených v blízkém okolí budovy byla stanovena rezonanční frekvence podložních sedimentárních vrstev 1,27 Hz. Analýza naměřeného seizmického neklidu metodou HVSR prokázala, že vibrace způsobené rezonančním kmitáním podložních vrstev se přenášejí z podloží do budovy a na křivkách spektrálních poměrů se projevují samostatným píkem. Dále z provedených analýz vyplývá, že základní vlastní frekvence budovy je přibližně 2,3 Hz. Další frekvence 5,44 Hz, která byla detekována v obvodových částech budovy ve 4.NP, pravděpodobně odpovídá frekvenci torzního kmitání nebo další vlastní frekvenci.

Velká výhoda prezentovaných metod spočívá v časové nenáročnosti prováděných měření bez potřeby dlouhodobého seizmického monitoringu v daném objektu. Je však nezbytné provádět měření podle doporučených metodik a za použití vhodného aparaturního vybavení s odpovídajícím frekvenčním rozsahem senzoru. Do budoucna se plánuje měření v dalších objektech spolu se zkoumáním charakteristik podloží, a to převážně v oblastech se zvýšeným seizmickým zatížením.

Poděkování

Príspevek byl zpracován za finanční podpory GAČR, projekt č. 13-07027/P „Studium seizmických charakteristik základových půd s využitím frekvenční analýzy vibračních projevů“. Téma článku souvisí s kooperací MAV a AVČR, projekt „Improvement of the methods of seismic hazard assessment through comparison of methods used by the Institute of Geonics (Ostrava) and Kövesligethy Seismological Observatory (Budapest)“.

Literatura

- ANSAL, A. (ed.) *Recent Advances in Earthquake Engineering and Microzonation*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2004, 354 p., ISBN 1-4020-1827-4.
- ANSAL, A., KURTULUŞ, A., TÖNÜK, G. Seismic microzonation and earthquake damage scenarios for urban areas. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, Vol. 30, Issue 11, p. 1319-1328.
- BARD, P.-Y. (ed.) *Bulletin of Earthquake Engineering, Special Issue: The H/V Technique: Results of the SESAME Project.*, Vol. 6, Issue 1. Netherlands, Springer, 2008, 147 p., ISSN 1570-761X.
- BORCHERDT, R.D. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bull Seism Soc Am*, 1970, Vol. 60, Issue 1, p. 29-61.
- BROŽ, M., ŠTRUNC, J., SVATOŠ, J. Monitorování seizmických účinků a porušení staveb při výstavbě tunelu Blanka s ohledem na historické stavby v areálu Pražského hradu. In *Sborník příspěvků přednesených na 2. Tradičním geomechanickém a geofyzikálním kolokviu, Ostravice 22.-23.5.2008, Documenta Geonica*. Ostrava, Ústav geoniky AVČR, v.v.i. a Green Gas DPB, a.s., 2008, s. 61-78. ISBN 978-80-86407-36-4.
- ČADA, Z., SALAJKA, V., HRADIL, P., KANICKÝ, V. Účinky přírodní a technické seizmicity na stavební konstrukce v ČR. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava: řada stavební*, 2010, roč. 10, č. 2, s. 173-182.
- GALLIPOLI, M. R., MUCCIARELLI, M., ŠKET-MOTNIKAR, B., ZUPANČIČ, P., GOSAR, A., PREVOLNIK, S., HERAK, M., STIPČEVIĆ, J., HERAK, D., MILUTINOVIĆ, Z., OLUMČEVA, T. Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings. *Bull Earthquake Eng.*, 2010, Vol. 8, Issue 3, p. 593-607.
- GOSAR, A., LENART, A. Mapping the thickness of sediments in the Ljubljana Moor basin (Slovenia) using microtremors. *Bull Earthquake Eng.* 2010, Vol. 8, Issue 3, p. 501-518.
- GOSAR, A., ROŠER, J., ŠKET-MOTNIKAR, B., ZUPANČIČ, P. Microtremor study of site effects and soil-structure resonance in the city of Ljubljana (central Slovenia). *Bull Earthquake Eng.*, 2010, Vol. 8, Issue 3, p. 571-592.
- GRIBOVSKI, K., SCHULEK-TÓTH, F., VARGA, P. Deterministic seismic hazard assessment of the inner town of Budapest. *Acta Geod. Geoph. Hung.*, 2010, Vol. 45, Issue 3, p. 372-387.
- GYÖRI, E., 2013, ústní sdělení.
- HRADIL, P., KALÁB, Z., KNEJZLÍK, J., KOŘÍNEK, R. SALAJKA, V., KANICKÝ, V. Response of a panel building to mining induced seismicity in Karvina area (Czech Republic). *Acta Montanistica Slovaca*, 2009, Vol. 14, Issue 2, p. 143-151.
- CHÁVEZ-GARCÍA, F. J. Site Effects: From observation and modelling to accounting for them in building codes. In *Pitilakis, K.D. (ed.), Earthquake Geotechnical Engineering*. Dordrecht, Springer, 2007, Chapter 3, p. 53-72. ISBN 978-1-4020-5892-9.
- KALÁB, Z. Úvodní studie hodnocení vibrací vyvolaných větrnou turbínou. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava: řada stavební*, 2012, roč. 12, č. 2, s. 93-102.
- KALÁB, Z., KNEJZLÍK, J., LEDNICKÁ, M., DOLEŽALOVÁ, H., HRUBEŠOVÁ, E. *Studium seizmických účinků v okolí seizmické stanice v závislosti na místních geologických podmínkách. Documenta Geonica 2010/2*. Ostrava, Akademie věd České republiky, Ústav geoniky Ostrava, v.v.i. a Montanex, a.s., 2010. 162 s. ISBN 978-80-7225-339-5.
- KALÁB, Z., LEDNICKÁ, M. Analýza naměřených vibračních projevů v kostelní věži. *EGRSE - International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment*, 2011, Vol. 18, Issue 3, p. 53-61.
- LERMO, J., CHÁVEZ-GARCÍA, F. J. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bull Seism Soc Am*, 1993, Vol. 83, Issue 5, p. 1574-1594.
- NAKAMURA, Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quart Rep Railway Tech Res Inst*, 1989, Vol. 30, Issue 1, p. 25-33.

- NEVAŘIL, A. Odezva výškové konstrukce na dynamická zatížení. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava: řada stavební*, 2009, roč. 9, č. 2, s. 193-200.
- PETŘÍK, T., HRUBEŠOVÁ, E., LEDNICKÁ, M. A comparison of numerical models results with in-situ measurement of ground vibrations caused by sheet pile driving. *Acta Geodyn. Geomater.*, 2012, Vol. 9, Issue 2 (166), p. 165-171.
-

Autor

¹ Ing. Markéta Lednická, Ph.D., Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00 Ostrava-Poruba, lednicka@ugn.cas.cz