

SPEKTRUM BUDIACEJ SILY NA POVRCHU VOZOVKY A POVRCHU ZEMNÉHO PROSTREDIA OD ÚČINKOV VOZIDIEL CESTNEJ DOPRAVY

© Demjan I., 2007

The article is devoted to finding solutions of selected issues of microtremor mainly in connection with transport effects. Analysis of transfer phenomena, as well as stationary stochastic processes, to obtain standard characteristics of stochastic analysis of subsoil vibrations due to effects of moving vehicles on the roads. Within scope of the paper are given some experimental results of the measurement of micro-vibrations of soils due to effects of road.

Úvod. Príspevok je venovaný riešeniu vybraných otázok technickej seizmicity, predovšetkým v nadväznosti na účinky dopravy. Vo všeobecnosti je možné konštatovať, že požiadavky na riešenie dynamických úloh v technickej praxi stále rastú. Nové výkonnejšie stroje, strojné zariadenia i zvyšovanie a zrýchľovanie dopravy pôsobia dynamickými účinkami, ktoré nepriaznivo ovplyvňujú stavebné objekty, ale tiež nepriaznivo pôsobia na človeka a okolité prostredie.

Na trvalo sa striedajúce účinky sú stavebné látky viac citlivejšie, ako na statické účinky. Dlhodobým pôsobením tohto kmitania sa otriasané hmoty vo svojej štruktúre menia a ich pevnosť sa znižuje. Veľké množstvo mikroseizmického kmitania od dopravy sa prejavuje ako únavový jav, t.j. vznikajú najprv vlasové trhliny, ktoré sa zväčšujú, neskôr sa rozdrví omietka a nakoniec to môže skončiť zosunutím stavby.

Ak sa vyskytujú poruchy na budovách, ktoré sú postavené v blízkosti cestných komunikácií, tak je predpoklad, že pôvodcom porúch sú vibrácie šíriace sa zemným prostredím od pohybujúcich sa vozidiel cestnej dopravy. Dôkladná analýza môže určiť, že nemusí byť zdrojom porúch budov blízka cestná doprava, ale poruchy budov môžu byť spôsobené inými vplyvmi.

Pri posúdení budovy na seizmické zaťaženie je nutné získať podklad charakterizujúci typické kmitanie terénu v príslušnej lokalite, alebo údaje o prevládajúcich frekvenciách kmitania a im odpovedajúce amplitúdy pohybu podložia. Výpočet je založený na znalosti frekvenčného spektra seizmického zaťaženia. STN 730036 uvádza niektoré spôsoby získania frekvenčného spektra seizmického zaťaženia od dopravy. Vzhľadom na skutočnosť, že nie sú známe vstupné charakteristiky budenia stavebného objektu od účinkov dopravy, v technickej praxi je potrebné tieto zisťovať na základe experimentálnych meraní. Spravidla sa vyšetrojú na úrovni základových konštrukcií buď vo forme rýchlosti, resp. zrýchlenia kmitania základovej pôdy, alebo vo forme vstupných spektier kmitania.

V článku sú uvedené niektoré výsledky z realizovaných experimentálnych meraní v zastavaných oblastiach miest, ktorých účelom bolo analyzovať fenomén budenia a šírenia sa otrasov zemným prostredím vyvolaných cestnou dopravou, ako jedného z účinkov, ktorý môže spôsobiť poruchy budov.

Charakteristika dynamickej odozvy povrchu polpriestoru od účinkov vozidiel cestnej dopravy. Podľa získaných záznamov seizmického pohybu sa zistilo, že pôdne podložie má dominantné frekvencie svojho seizmického pohybu, ktoré závisia od budiaceho zdroja a vlastností prostredia, ktorými sa seizmický pohyb šíri. Jednotlivé frekvenčné zložky pôvodného seizmického pohybu sa po prechode prostredím podložia zosilnia alebo utlmia, v závislosti od vlastností prenosovej cesty. Z výsledkov

experimentálnej a teoretickej analýzy seizmických poškodení budov sa môže usudzovať, že poškodenie objektov bolo tým väčšie, čím sa viac približovali vlastné frekvencie kmitania budovy k dominantným frekvenciám pohybu podlažia.

Technická seizmicita vyvolaná vibráciami od cestných vozidiel sa sleduje v určitých vzdialenostiach od cestnej komunikácie a analyzuje sa za predpokladu náhodnej a štatisticky stacionárnej funkcie času. Pri skúmaní kmitania podlažia v okolí dopravných ciest sa stretávame s charakterom signálov, ktoré odpovedajú ergodickým stacionárnym stochastickým procesom.

Vlastnosti zemného prostredia závisia od konkrétnych podmienok ich vzniku, stupňa nehomogenity a anizotropie. Špecifické vlastnosti zemného média sú vo vysokom stupni nehomogenity, ktorá je tvorená mikro- a makropuklinami, tektonickými dislokáciami, diskontinuitami a pod.. Zemný materiál vykazuje väzkopružné vlastnosti, ktoré sa prejavujú závislosťou charakteristík pružnosti od frekvencie a existenciou silného tlmenia v dôsledku vnútorného trenia. Charakteristické vlastnosti podlažia môžu ovplyvňovať výsledky dosiahnuté metódami dynamickej diagnostiky a ich interpretáciu.

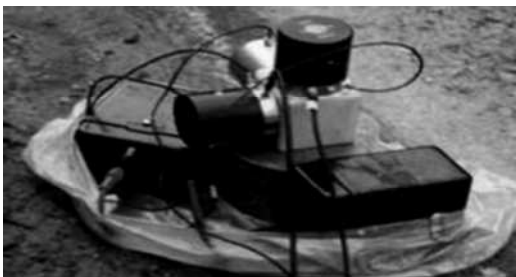
Experimentálne merania. Prvoradou úlohou je poznanie charakteristík popisujúcich zdroj spôsobujúci vibrácie a následne aj zemné prostredie nachádzajúce sa medzi cestnou komunikáciou a sledovanou budovou. Cieľom je zistiť:

- frekvenčnú skladbu a hladiny kmitania zdroja náhodného budenia (vozidlá cestnej dopravy);
- frekvenčnú skladbu a hladiny kmitania dynamickej odozvy zemného podlažia na úrovni sledovaných základových konštrukcií.

Experimentálne meranie bolo realizované v zastavenej oblasti mesta, v blízkosti mestskej cestnej komunikácie funkčnej triedy MS 16,5. Cestná komunikácia je smerovo rozdelená a každý smer má dva jazdné pruhy o šírke 3,5m. Povrchová úprava cestnej komunikácie je celistvá, udržiavaná bez väčších nerovností alebo porušení. Sledované miesto vibrácií zemného prostredia je vo vzdialenosti 8,3m od cestnej komunikácie.

Rýchlosť nákladných vozidiel pohybujúcich sa po miestnej komunikácii funkčnej triedy MS 16,5 bola 50km/h až 80km/h. Podlažie v sledovaných lokalitách má charakter piesčitých hĺn až štrkopieskov do hĺbky cca 20m, hladina spodnej vody je v hĺbke cca 8,10m.

Na meranie dynamických účinkov od cestnej dopravy sa zvolili absolútne snímače zrýchlenia B&K8306 a KB12-RFT (obr. 1), z ktorých boli signály zrýchlenia vedené káblami do integrálnych zosilňovačov B&K2635 a Robotron00042. Mechanický pohyb v príslušnom bode bol pomocou akcelerometrov pretransformovaný na elektrický signál a po príslušnom zosilnení a integrácii bol káblami vedený a zaznamenaný na disk PC (obr. 1).



Obr. 1 Absolútne snímače zrýchlenia kmitania a A/D prevodník a PC s programovým vybavením DAS 16

Pomocou výkonovej spektrálnej hustoty (VSH) $G_{xx}(f)$ sa študujú predovšetkým periodické vlastnosti náhodného signálu $x(t)$ alebo jeho realizácie:

$$G_{xx}(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\psi_x(f, f + \Delta f)}{\Delta f} = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t, f, \Delta f)^2 dt \quad (1)$$

Pri praktickej aplikácii je možné využiť uvedené vlastnosti pri určovaní tzv. prenosovej funkcie $H(f)$, resp. pri určovaní odozvy sústavy budenej náhodným signálom:

$$G_{yy}(f) = |H(if)|^2 \cdot G_{xx}(f) \quad (2)$$

Vzájomná výkonová spektrálna hustota (VVSH) popisuje vzťah medzi dvoma náhodnými procesmi $x(t)$ a $y(t)$. VVSH nesie informáciu o fáze medzi výstupným a vstupným signálom a to ju predurčuje k využitiu v oblasti identifikácie systémov:

$$G_{xy}(f) = |G_{xy}(f)| e^{-i\Theta_{xy}(f)} \quad (3)$$

Pri známych VSH a VVSH sa môže definovať koherenčná funkcia:

$$\gamma_{xy}(f)^2 = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)} \leq 1 \quad (4)$$

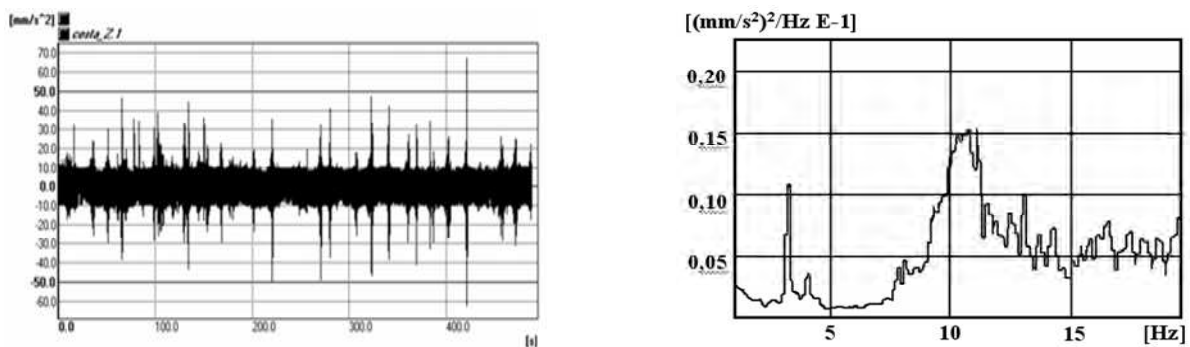
Ak sú dve funkcie $x(t)$ a $y(t)$ štatisticky nezávislé, potom $\gamma_{xy}(f)^2 = 0$, v prípade že $\gamma_{xy}(f)^2 = 1$, sú funkcie na všetkých frekvenciách úplne koherenčné.

Výsledky experimentálneho merania. Vykonané experimentálne meranie umožňujú realizovať širokú analýzu získaných dát. V danom prípade sa uvádzajú niektoré výsledky, ktoré sa získali aplikáciou spektrálnej analýzy.

Z hľadiska potrieb inžinierskej praxe hrajú najdôležitejšiu úlohu základná a ďalšie nižšie vlastné frekvencie kmitania budovy, pri ktorej spravidla vznikajú najväčšie dynamické napätia. V danom prípade bola analýza zameraná na frekvenčné oblasti do 20Hz, kedy je predpoklad, že sa môžu vyskytovať rezonančné javy z titulu budiaceho signálu a z dôvodu kmitania budovy v niektorej z vlastných frekvencií.

Najlepšie ukazuje rozloženie jednotlivých frekvencií výkonová spektrálna hustota z realizácie časovo dostatočne dlhého záznamu, na ktorom sú zaznamenané prejazdy nákladných vozidiel pohybujúcich sa po cestnej komunikácii. VSH vibrácií podlažia z realizácie časovo dostatočne dlhých záznamov je možné považovať za návrhové mikro seizmické spektrá.

Vozidlo sa po prejazde nerovnosťou rozkmitá a kmitá určitú dobu vlastným kmitaním s tlmeným harmonickým zaťažením, t.j. u odpružených hmôt vozidla (karoséria + náklad) je táto frekvencia 2Hz až 4Hz, u neodpružených hmôt (nápravy + kolesá) sa jedná o frekvencie od 9Hz do 16Hz, obr. 2. Vzhľadom na malú hmotnosť náprav a kolies, v porovnaní s odpruženou hmotou, má pre zaťaženie vozoviek význam kmitanie karosérie s nákladom. Z hľadiska najväčších dynamických vplyvov je najnepriaznivejšia rýchlosť 40km/h až 60km/h. Výrazné špičky v spektre zrýchlenia kmitania podlažia v oblasti nad 18Hz priamo nesúvisia s kmitaním vozidiel cestnej dopravy a môžu byť vyvolané inými zdrojmi kmitania.



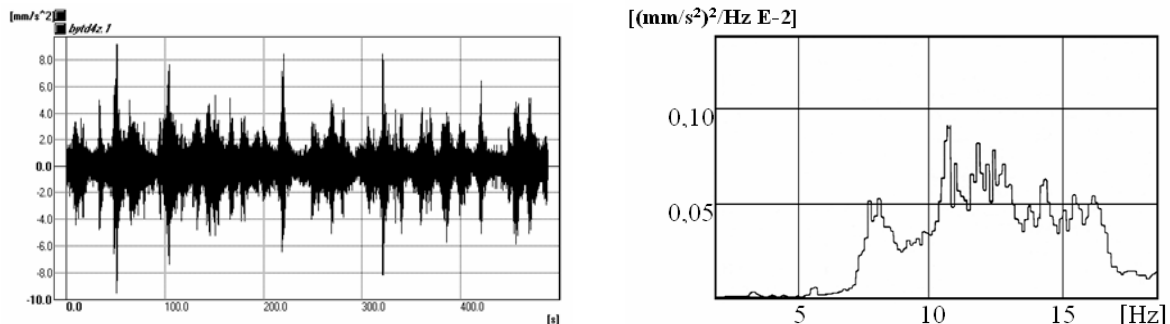
Obr. 2 Časový záznam zrýchlenia kmitania a VSH zrýchlenia kmitania cestnej vozovky (vertikálny smer)

K experimentálne získaným VSH zrýchlenia kmitania dynamickej odozvy zemného prostredia na úrovni základových konštrukcií (referenčné stanovisko) od účinkov cestnej dopravy je možné konštatovať, že vlnenie šíriace sa zemným prostredím v podstate kopíruje vstupné spektrá pri znížených hladinách výkonu a je doprevádzané frekvenčným spektrom v hraniciach 0Hz až 20Hz. V danom prípade sa zistilo relevantné frekvenčné pásmo od 8Hz do 16Hz, obr. 3.

Prenosové charakteristiky daného zemného prostredia poukazujú takmer na rovnaké frekvenčné pásma a linearitu kmitania na týchto frekvenčných pásmach dokazujú koherenčné funkcie.

Pri prejazde ťažkých nákladných vozidiel po cestných komunikáciách boli namerané na okraji vozovky priemerné amplitúdy zrýchlenia kmitania od 20mm/s^2 do 40mm/s^2 a v niektorých prípadoch viac ako 60mm/s^2 .

Hodnoty konštanty absorpcie α [m^{-1}] boli vypočítané podľa vzťahu (34), kap. 7, normy STN 730036, na základe zistených efektívnych hodnôt zrýchlenia kmitania x_{ef} pre vertikálny smer a pohybovali sa v rozmedzí $\alpha = 0,0577\text{m}^{-1}$ až $0,0703\text{m}^{-1}$.



Obr. 3 Časový záznam zrýchlenia kmitania VSH zrýchlenia kmitania zemného prostredia (vertikálny smer)

Rýchlosť Rayleighovej vlny C_R sa určí pomocou času τ zo vzájomnej korelačnej funkcie $R_{xy}(\tau)$, z ktorej je C_R definovaná ako doba prechodu maxim vlny medzi dvoma sledovanými bodmi polpriestoru. Zo vzájomnej korelačnej funkcie je $C_R = 193,08\text{m/s}$ až $209,17\text{m/s}$. Zo získaných rýchlostí povrchových vln C_R je možné určiť dynamické moduly pružnosti horninového prostredia E_D a G_D ($E_D = 218,896\text{MPa}$ až $256,899\text{MPa}$; $G_D = 81,073\text{MPa}$ až $95,148\text{MPa}$ pre odhadnuté $\mu = 0,35$; $\rho = 1\,900\text{kg/m}^3$).

Záver. Pri riešení konkrétnych úloh v praxi je potrebné najprv dôkladne poznať a analyzovať zdroj vibrácií a zemné prostredie, ako prenosová cesta, ktorou sa šíri vlnenie od zdroja vibrácií až ku základovej konštrukcii budovy. Poznanie vstupných hodnôt energie kmitania vyvolané vozidlami cestnej dopravy a energie odozvy zemného podlažia sú dôležitými poznatkami pre frekvenčnú a amplitúdovú analýzu budov.

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia projektu VEGA č. 1/4197/07 “Nelineárna dynamická interakcia vybraných stavebných konštrukcií s podlažím pri seizmickom budení”.

1. STN 730036: Seizmické zaťaženia stavebných konštrukcií, UNMS, 1997 (In Slovak). 2. Benčat, J.: Technická seizmicita a dynamické charakteristiky podlaží (čiastková správa výskumnej úlohy III–3–1/6), KMch VŠDS, Žilina, 1983–1985 (In Slovak). 3. Benčat, J.: Investigation of Traffic Ground Vibrations by Random Process Theory, In: Vehicle–Infrastructure Interaction IV, San Diego, 1996 (In English). 4. Martinček, G.: Dynamická diagnostika vozoviek, VEDA–SAV, Bratislava, 1983 (In Slovak). 5. Juhásová, E.: Pôsobenie seizmických pohybov na stavebné konštrukcie, Veda, Bratislava, 1985 (In Slovak). 6. Durbák, V.; Nižník, L.; Tomko, M.; Hrubovčák, V.: Statický a dynamický návrh objektu bytov administratívnych priestorov Oran, Alžírsko, In: Projekt a stavba, roč. 3, č. 11, 2001 (In Slovak).