

SNÍŽOVÁNÍ PŘENOSU VIBRACÍ OD POVRCHOVÉ A PODPOVRCHOVÉ DOPRAVY ZÁKLADOVÝM PROSTŘEDÍM DO BUDOV

Daniel Makovička¹, Daniel Makovička, ml.²

¹ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, makovic@klok.cvut.cz

² Statika a dynamika konstrukcí, Kutná Hora, d.makovicka@makovicka.cz

The building structures in the vicinity of transport ways are loaded by vibration exciting by passing of vehicles or trains. These vibrations are usually for buildings safety enough. But for users or inhabitants of building or for sensitive equipment located in the structure may be this level of vibration important. The paper deals with the response analysis of the rubber vibro-base insulated building structure as a method of vibration reduction. The structure of example is loaded by the groundborne vibration from rail systems of underground in the vicinity of building. The actual history of dynamic load measured on the pile heads was used as an input data for vibro-base insulation design and dynamic analysis of structure. The predicted floor vibrations fulfil the standard requirements for limit vibration level for residential structure.

Úvod

Zdrojem vibrací, které se šíří podloží do základů budov, jsou dynamické účinky pohybu vozidel po pozemních nebo podzemních komunikacích. Obvykle se tyto dynamické účinky označují jako technická seismicita od povrchové nebo podpovrchové dopravy. V řadě případů může být přenos vibrací od dopravy do konstrukce budov usnadněn bezprostředním kontaktem konstrukce vozovky nebo tunelové roury se základy budovy a navazujícími zdi objektu. Kontakt zdroje s ohroženou konstrukcí může rovněž zprostředkovat vysoká hladina spodní vody, promrzlé vrstvy terénu v zimním období, propojení základů ohrožené konstrukce i tunelové konstrukce se skalním podkladem, nepoužívané starší základy nebo jiné stavby v podloží, potrubní soustavy v podloží, případně skalní podklad v malých hloubkách pod povrchem terénu.

Charakter vibrací od dopravy je závislý zejména na hmotnosti vozidla, rychlosti a způsobu jízdy vozidla, na směru pohybu vozidla (po přímce nebo v oblouku, po rovině nebo ve svahu), na brždění nebo zrychlování vozidla. Dalším parametrem je „rovinnost“ jízdní dráhy, ať již kvalita povrchu silniční vozovky nebo směrové a výškové vyrovnaní kolejové dráhy, způsob upevnění kolejnic, skladba podkladních vrstev vozovky ap. Kromě parametrů vibrací ve zdroji má na velikost vibrací vliv složení prostředí na cestě od zdroje k ohrožené konstrukci budovy, tedy zvláště skladba geologického prostředí a jeho mechanické vlastnosti jako je tuhost, rychlost šíření vlnění, útlum se vzdáleností ap. Konečně pak může velikost vibrací z podloží zesílit nebo utlumit provedení vlastní konstrukce budovy a způsob jejího založení, zejména pak frekvenční naladění ohrožené konstrukce.

Právě pro řadu vlivů, které se podílejí na úrovni vibrací v místě stavební konstrukce, je pro rozvahy o snížení úrovně vibrací na přípustnou míru vhodné provést jejich měření. Měření lze realizovat buď na hotové konstrukci nebo v případě její předpokládané výstavby na úrovni základové spáry, nejlépe v sondách v blízkosti ohrožené konstrukce nebo v blízkosti zdroje vibrací, tedy na konstrukci vozovky nebo konstrukci metra, železnice, tramvajového tělesa ap. Naměřené vibrace pak lze využít pro kvalitnější analýzu odezvy celé konstrukce ohroženého objektu nebo jen jeho částí a návrh opatření ke snížení vibrací. I přes uvedené odlišnosti, které mají vliv na intenzitu a časový průběh vibrací od dopravy, mají seismické účinky od těchto zdrojů jisté společné znaky, uvedené v publikaci [9].

Metodika snižování vibrací konstrukce

Pro snížení přenosu vibrací do chráněné konstrukce je možné provádět opatření ve zdroji, na cestě od zdroje ke chráněné konstrukci a konečně uvnitř nebo v základové části chráněné konstrukce. Provádět

opatření ve zdroji, tedy například použít pryžové nákolky u vozidel metra (jako v Paříži) nebo ukládat celou kolejovou dráhu pružně (jako v Miláně nebo na zkušebních úsecích v Praze na Kačerově [4]) zpravidla projektanti běžných objektů nemohou ovlivnit. Z těchto důvodů je nutné použít opatření, které spočívají v konstrukčním řešení snižování vibrací na cestě od zdroje ke chráněné konstrukci nebo v konstrukci budovy samé. Přenos vibrací na cestě od zdroje ke chráněnému objektu lze přerušit, například budováním podzemních stínících stěn s vloženými dynamickými filtry, které zčásti sníží přenos vibrací. V Praze byl tento způsob použit při návrhu založení nemocnice v Praze 9 na perlitových matracích nad tunelovými úseky metra [5]. Efektivnost tohoto řešení je zejména závislá na úrovni spodní vody v podzákladí a na jejím složení. Pro vysokou hladinu spodní vody je tento způsob neefektivní, pokud se neprovedou opatření k výraznému snížení hladiny spodní vody vhodným odvodněním. Dále tato metoda není příliš efektivní pokud zdroj vibrací, tedy tunel nebo stanice metra, je mělce pod velkou částí základové spáry chráněné konstrukce.

Efektivním způsobem pro snížení úrovně vibrací chráněné konstrukce je pružné založení konstrukce jako celku vůči její základové konstrukci (desce, vaně apod.). Toto odpružení bývá realizováno osazením celé konstrukce na pružiny, ať již ocelové, pryžové nebo korkové. Pokud není nutné chránit před vibracemi celou konstrukci, je možné provést odpružení jen pro její vybranou část, jako jsou koncertní sály, kina, divadla, studiové prostory rozhlasu a televize, byty apod. Efektivnost odpružení je dána frekvenčním naladěním odpružené konstrukce. Čím je naladěni konstrukce na pružinách nižší (na nižších frekvencích), tím spíše jsou utlumeny vyšší frekvence vibrací a akustické frekvence, které se do objektu šíří z geologického prostředí.

Použití pryží, korku a jim podobných hmot

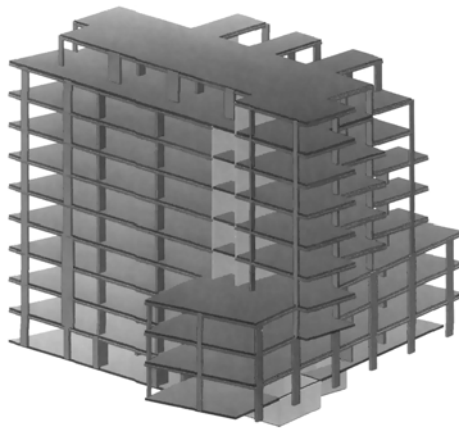
Při použití pryží, korku a jim podobných hmot se zpravidla umísťují tyto pružné prvky na úrovni základové desky. Nosná konstrukce budovy je pak osazena na těchto pružných prvcích prostřednictvím dostatečně širokých patek pod nosným skeletem, trámových roštů nebo další desky. Principem je důsledné oddělení horní konstrukce od základové konstrukce pomocí této pryžové vrstvy. Tloušťku spojitě pružné vrstvy nebo bloků z více vrstev tohoto materiálu a jejich rozmístění je nutné stanovit podle mechanických vlastností pryže (zejména modulu pružnosti) a statického předepnutí pryže na základě dynamického výpočtu a výsledků statického výpočtu objektu. Nevýhodou tohoto řešení je zpravidla nepřístupnost pryže v průběhu života konstrukce a tedy obtížnost nebo nemožnost její výměny, dále je nevýhodou změna vlastností pryže v důsledku jejího stárnutí. Stárnutí pryže ovlivňuje zejména sluneční svit a přítomnost derivátů benzínu nebo nafty. Pokud je pryž chráněna před slunečním svitem a bez přístupu k derivátům benzínu a nafty výrobci zpravidla udávají její životnost nad 30 až 80 let. Naopak výhodou pryže je dostatečný útlum, který umožňuje snížit rezonanční špičky kmitání na vlastních frekvencích pružného uložení konstrukce.

Použití ocelových vinutých pružin spolu s viskózními tlumiči

Velmi efektivní je použití ocelových vinutých pružin pro provedení odpružení. Jeden z neznámějších výrobců vinutých pružin, firma Gerb Berlin, umísťuje vinuté pružiny do bloků, které jsou spolu vzájemně spojeny a lze je na stavbě osazovat jako celek. Osazují se buď v předepnutém stavu (stlačené do provozní a předem vypočtené výšky) nebo jako nepředepnuté a případně u levnějších typů bez možnosti předpětí. Pro zvýšení tlumení mohou být pružinové bloky vybaveny integrovanými nebo samostatnými viskózními tlumiči a nebo, v levnější variantě, jsou vlastní pružiny povlakovány pryží. Výhodou pružinových bloků je možnost jejich dodatečné výměny za měkčí nebo tužší, případně u typů které to umožňují upravit tlumení při rekonstrukcích, přestavbách objektu, při změně zatížení nebo užívání objektu. Dále lze pružinové bloky v konstrukci objektu osadit až ve fázi dokončování stavby objektu podle skutečné úrovně kmitání objektu, nebo při doladování vlastností konstrukce, případně pod částí konstrukce tyto bloky vůbec neosazovat. Tuto manipulaci s bloky umožňuje konstrukční možnost přizvednutí části roštových trámů zvedáky a nebo jen prostým podložením roštu ocelovými klíny v okolí pružinových prvků a zaaretováním pružinových prvků (stažením montážními šrouby). Pružinové bloky jsou na svém spodním i horním povrchu přilepeny samolepicími podložkami, které přenáší vodorovné síly třením (vodorovná tuhost bloků je srovnatelná s vertikální tuhostí).

Příklad pružně osazené budovy na pryži

Na příkladu vícepodlažní železobetonové budovy je řešen přenos vibrací z okolního základového prostředí do vlastní konstrukce. Budova je založena na velkopřůměrových pilotách, vzájemně provázaných výztuží se spodní základovou deskou. Na této desce bylo navrženo umístění antivibrační vrstvy pryže značky Belar. Na pryži je osazena horní základová deska, do které je vetknuta skeletová monolitická konstrukce budovy. Pružná pryžová vrstva tedy důsledně odděluje spodní a horní část základové desky. Obdobně bylo provedeno odpružení spodní a horní části samostatných základových patek (vodorovnými vrstvami pryže) a dále všechny svislé konstrukční prvky pod úrovní terénu od okolního prostředí (vrstvy pryže podél sloupových postupů zeminou nebo obvodových stěn pod úrovní terénu). Při modelování konstrukce, viz obr.1, byla respektována jednotlivá podlaží v členění na stropní, základové a střešní desky, sloupy, nosné stěny a obvodové a vnitřní průvlaky. Pryžová vrstva, sestavená z různých typů pryže, byla umístěna pod celou plochou horní částí dvojité základové desky. Do hmotnosti stropních a základových desek byly zahrnuty hmoty nenosných prvků (tenké příčky, podlahové vrstvy apod.) a také ekvivalent užitého zatížení podlah, střechy a teras. Dynamické zatížení na úrovni spodní základové konstrukce pod vrstvou pryže bylo stanoveno z naměřených vibrací od účinků metra na patkách základových pilot.

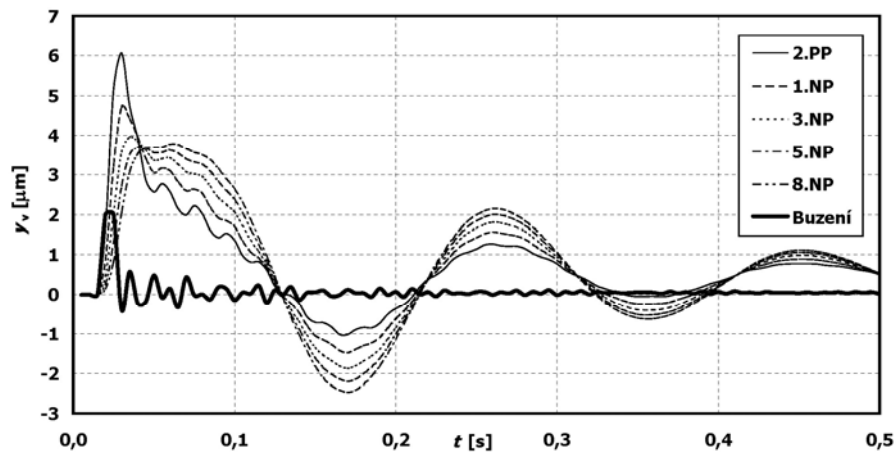


Obr.1 Výpočetní model budovy

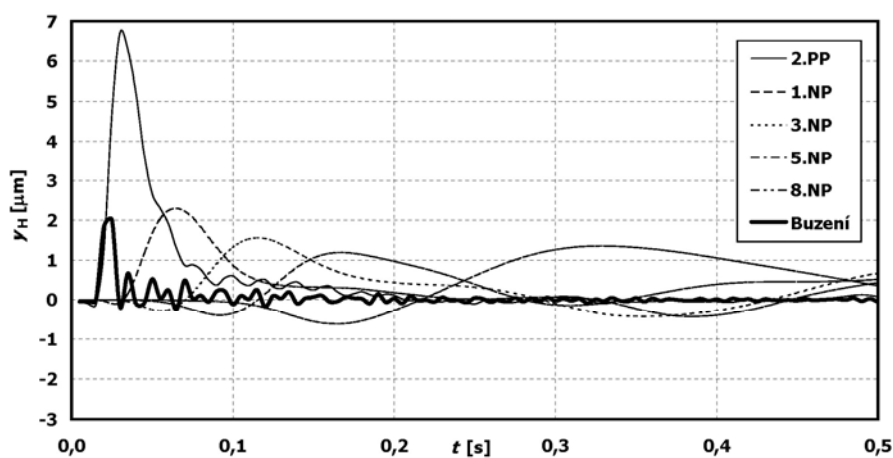
Pro analyzovanou budovu byl proveden výpočet vynuceného kmitání při neharmonickém buzení vibracemi od provozu metra. Byly stanoveny časové průběhy vynuceného kmitání po celou dobu trvání budicího signálu, a to pro vybrané prvky na konstrukci na jednotlivých podlažích. Dále byly vyhodnocovány okamžité tvary deformace (výchylek) jednotlivých podlažích a z nich sestaveny obálky maximálních hodnot. Pro vybraná podlaží jsou vypočtené výchylky dokumentovány na obr.3.

Z vypočtených časových průběhů kmitání je zřejmé, že buzení od provozu metra se projevuje zejména v nejnižším podlaží jako impuls; nejvíce kmitající místa jsou v blízkosti sloupů a části konstrukce prostorově situované ke zdroji. S rostoucí výškou podlaží se tento způsob buzení projevuje zakmitáním objektu na některé z vlastních frekvencí konstrukce. Výraznější vliv zakmitání je však omezen většinou jen na nejnižší dvě až tři podlaží. Velmi ostré špičky výchylek na značně malé části podlahy místností v nejnižším podlaží (2.PP) budou při uvážení skutečných rozměrů průřezů nosné konstrukce integrovány do větší plochy s nižší hodnotou vibrací odpovídající integrálu pod kmitající plochou. Ve vyšších podlažích je časová charakteristika kmitání roztažena do nižších frekvencí. Z porovnání výpočtů pro danou konstrukci při vertikálním versus horizontálním buzení je zřejmé, že úroveň horizontálního buzení je nižší než vertikálního buzení, podle měření přibližně poloviční. Dále pak je odezva na horizontální buzení „roztažena“ do velmi nízkých frekvencí a také relativně rychleji utlumena než pro vertikální buzení.

Na následující dvojici obrázků jsou uvedeny časové průběhy kmitání ve vybraných bodech nad sebou na jednotlivých podlažích. Body jsou vybrány na straně budovy u zdroje buzení. Vypočtený průběh kmitání konstrukce je možné na obrázcích porovnat s normalizovaným časovým průběhem buzení v příslušném směru.

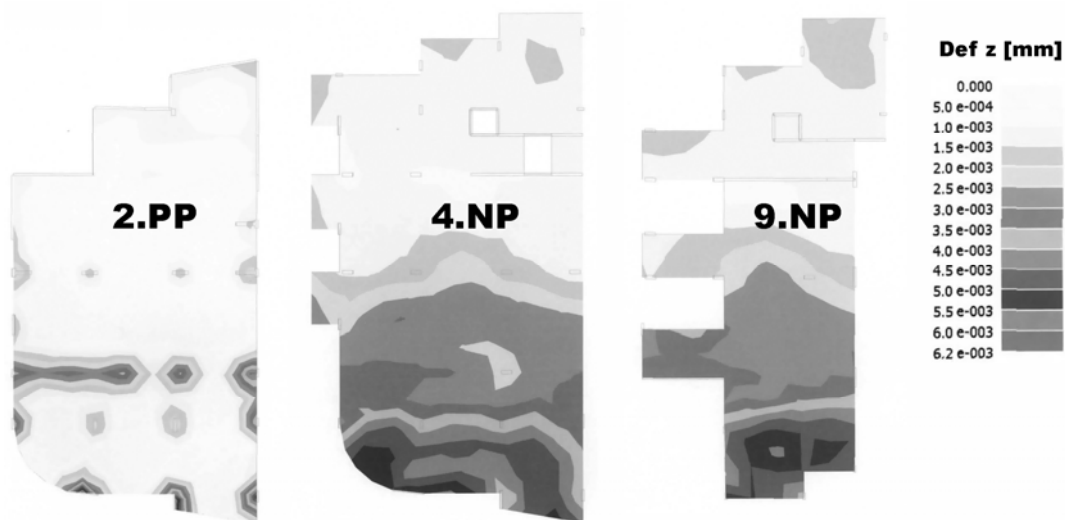


Obr.2a Časový průběh vertikálního kmitání ve vybraných bodech a normalizovaným buzením



Obr.2b Časový průběh horizontálního kmitání ve vybraných bodech a normalizovaným buzením

Normalizovaná funkce buzení je bezrozměrná a její maximální výkmit je roven 1. Na obr.2 je z důvodu čitelnosti její amplituda dvojnásobná, tak aby bylo možné porovnat časový tvar buzení s časovým průběhem odezvy na jednotlivých podlažích.



Obr.3 Maximální vertikální výchylky pro svislé buzení ve vybraných podlažích

Posouzení vibrací podlah vzhledem k osobám pracujícím, pobývajícím nebo bydlícím v objektu je předepsáno podle mezinárodních a současně i českých norem ČSN ISO 2631 [2] a také v Nařízení

vlády č.502/2000 [3], které odpovídají platným hygienickým předpisům u nás. V případě analyzované budovy je nejvýznamnější posouzení obytných místností v objektu vzhledem k bydlení osob.

Vibrace naměřené při výstavbě objektu na hlavách pilot, odpovídající buzení od provozu vlaků metra, dosahovaly maximálních výkmitů zrychlení až 690 mm/s^2 ve frekvenční oblasti od 32 do 40 Hz. Tato frekvenční složka odpovídá horizontálnímu ohybovému kmitání pilot v okolí 35 Hz (v závislosti na rozměrech jednotlivých měřených pilot). Odpružením budovy jako celku se přesunuly dominantní vibrace budovy do oblasti nejnižších vlastních frekvencí kmitání objektu jako celku. Pro frekvence naladění odpružení do 5 Hz je prognóza maximálního efektivního zrychlení $a_{ef} \approx 4,9 \text{ mm/s}^2$. Pro třetinooktávové pásmo se střední frekvencí 5 Hz je pro obytné místnosti pro noční dobu podle výše citovaných hygienických norem a předpisů (viz [2] [3]) přípustné efektivní zrychlení $6,02 \text{ mm/s}^2$.

Závěr

Příspěvek je zaměřen na analýzu vlivu technické seismicity na konstrukce budov nebo halových konstrukcí a způsob snižování vibrací uvnitř konstrukce odpružením konstrukce jako celku nebo jeho části. Seismické zatížení konstrukce je závislé především na intenzitních i frekvenčních charakteristikách zdroje. Vibrace od technické seismicity se mohou šířit do značných vzdáleností a na své cestě ohrožovat ostatní konstrukce. Jedná se o velmi širokou problematiku, proto je v příspěvku na příkladu obytné budovy ilustrován postup stanovení úrovně vibrací a snížení těchto vibrací na přípustnou míru vhodným odpružením budovy jako celku.

Pro konkrétní budovu v Praze 5 byla použita pružná antivibrační vrstva na úrovni základové spáry pro eliminaci nadměrných vibrací, které se šíří do posuzované budovy geologickým prostředím od konstrukce metra. Na hlavách vybraných pilot budovy byly měření zjištěny maximální vibrace. Časové průběhy těchto vibrací byly použity jako dynamické zatížení namodelované konstrukce budovy, v jejíž základové spáře byla navržena dělicí pružná pryžová vrstva. Pro takovýto model byla stanovena prognóza vibrací na jednotlivých podlažích. Vibrace v odpružené budově splňují hygienické předpisy pro bytové místnosti vzhledem k jejich působení na člověka.

Poděkování

Práce na této problematice byla podporována grantovým projektem GAČR: 103/03/0082 „Nelineární odezva konstrukcí při mimořádných zatíženích a zatíženích způsobených pohybem člověka“. Autoři si dovoluji touto cestou vyslovit grantové agentuře za její podporu svůj dík.

Literatura

- [1] ČSN 73 0040: Zatížení stavebních objektů technickou seismicitou a jejich odezva. ČNI, Praha, 1995
- [2] ČSN ISO 2631-1,2 (01 1405): Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím, Část 1: Všeobecné požadavky, Část 2: Nepřerušované vibrace a rázy v budovách (1 až 80 Hz), ČNI Praha, 1994, revize 1999
- [3] Nařízení vlády č. 502/2000 ze dne 27.listopadu 2000 o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, revize 2004
- [4] D. Makovička: The Influence of Dynamic Effects dueto the Operation of Underground Railway on Historical Buildings, In: Strengthening of Building Structures, Venezia, Itálie, 1983
- [5] D. Makovička: Použití dynamických filtrů pro snížení přenosu vibrací základovou půdou do budov, Pozemní stavby, 1986/12, s. 561-565
- [6] D.Makovička, D. Makovička: Dynamická analýza budovy nemocnice pro zřízení heliportu na její střeše, Stavební obzor, 2001/4, s. 97-100
- [7] D.Makovička, D. Makovička: Analýza seizmických účinků na segmentovou dálniční konstrukci. Stavební obzor, 2001/2, s.33-37
- [8] D.Makovička, D. Makovička: Izolace budov proti nadměrným vibracím od provozu metra, Stavební obzor 2005/1, s. 8-15
- [9] D.Makovička, D. Makovička: Zatížení stavebních konstrukcí vibracemi od povrchové a podpovrchové dopravy, Stavební obzor 2005/9, s. 261-269