

Eva HRUBEŠOVÁ<sup>1</sup>, Zdeněk KALÁB<sup>2</sup>, Karel VOJTASÍK<sup>3</sup>

## MODELOVÁNÍ VLIVU PODZEMNÍ VODY NA VELIKOST SEIZMICKÝCH PROJEVŮ NA POVRCHU

### Abstract

This contribution deals with brief description of seismological monitoring in the Karviná region. Area under discussion is known as place with very intensive mining induced seismic events. Main aim is presentation of first results from modeling of influence of local geology on intensity of seismic effect on surface.

The numerical system Plaxis (Netherlands) based on the FEM was used for modeling. Initial results of simulation of seismic loading by mining induced seismicity are presented. Parametric study that evaluates influence of ground water level shows interesting results. However, it is necessary to prepare simulations that are more realistic.

### ÚVOD

V oblastech s hlubinnou těžbou nerostných surovin lze, při splnění řady podmínek [např. 1], pozorovat na povrchu vibrace vyvolané nejintenzivnějšími důlně indukovanými seizmickými jevy, zejména jevy s mělkými ohnisky. Vibrace jsou často považovány za příčinu škod na stavebních objektech, přestože se ve skutečnosti často jedná o jiné následky důlní činnosti, např. deformace terénu nebo změnu výšky hladiny spodních vod, nebo o projevy s důlní činností nesouvisející, např. nesprávně založený objekt nebo odlehčení či přitížení objektu po jeho rekonstrukci.

Mezi oblasti s projevy důlně indukované seizmicity patří také Karvinsko. Proto se zde provádí trvalý monitoring vývoje seizmické aktivity, který je základem protiořesového boje. Ze záznamů ze stanic, jejichž seizmometry jsou umístěny v povrchových objektech, je odvozováno vlnové pole na povrchu (zpracovává OKD, DPB a.s. Paskov). Toto vypočtené pole je konfrontováno s měřeními na soliterních stanicích [např. 2, 3]. Provedeme-li úvahy o možných škodách na budovách s využitím informativní tabulky závislosti poškození na maximální rychlosti kmitání, druhu objektu a základové půdě dle ČSN 73 0040, pak pro frekvenční obor do 10 Hz dostaneme při uvažování prvního stupně poškození (trhliny do šířky 1 mm na styku stavebních prvků) limitní normovou hodnotu 8-15 mm/s. Pro úplnost dodejme, že zmiňovaná tabulka uvádí limitní hodnoty rychlosti kmitání pro hodnocení stupně poškození objektů vlivem trhacích prací. Největší naměřené hodnoty, které byly získány ze záznamů mimořádně intenzivních seizmických jevů jsou na spodní hranici tohoto možného poškození s možným negativním vlivem vibrací na stavební objekty.

Významnou roli z pohledu velikosti seizmických projevů na povrchu hraje v karvinské oblasti zesilování, resp. zeslabování seizmických vln v důsledku lokální geologické stavby. Seizmologické studie dokazují, že významný vliv mají sedimentární horniny, hydrogeologická situace a topografická pozice [např. 4 – 6]. Také naše analýzy dat důlně indukovaných seizmických jevů z Karvinska ukazují na vliv lokální geologické stavby na intenzitu seizmického projevu na povrchu [např. 2, 7 - 9].

---

<sup>1</sup> Doc. RNDr., Ph.D., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, FAST, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 708 33 Ostrava-Poruba, LPoděště 1875, , tel. (+420) 596991373, e-mail eva.hrubesova@vsb.cz

<sup>2</sup> Doc. RNDr., CSc., Oddělení geofyziky, Ústav geoniky Akademie věd České republiky, 708 00 Ostrava – Poruba, Studentská 1768, tel. (+420) 596979341, e-mail kalab@ugn.cas.cz; také: Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, FAST, VŠB – Technická univerzita Ostrava

<sup>3</sup> Doc. Ing., CSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, FAST, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 708 33 Ostrava-Poruba, L. Poděště 1875, tel. (+420) 596991947 e-mail karel.vojtasik@vsb.cz

## MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

Jedním z prostředků pro analýzy projevů vibrací je matematické modelování. V tomto příspěvku představujeme výsledky modelování dané problematiky holandským programovým systémem Plaxis 2D, založený na metodě konečných prvků. Tvorba dynamického modelu je stejná jako v případě statistické analýzy a zahrnuje zadání geometrie modelu, hraničních podmínek, generaci sítě a zadání počátečních podmínek. Byl vytvořen základní výchozí numerický model, na jeho základě pak byly realizovány parametrické výpočty.

Úvodní studie hodnotily výpočtové možnosti programu Plaxis 2D, současně byly provedeny typové výpočty seizmické odezvy objektů [10, 11]. Následné studie se zabývaly modelováním vlivu lokální geologie na velikost seizmických projevů důlně indukovaných seizmických jevů na povrchové objekty. Tyto publikace popisují výsledky modelování, které vycházely z reálné situace. Realizace parametrických výpočtů byla provedena ve dvou etapách. První etapa zahrnovala realizaci 4 základních variant geologie podloží, druhá etapa pak realizaci 9 variant s podrobnějším modifikací geologie podloží [12 – 14]. Každý parametrický výpočet byl realizován ve 3 výpočetních fázích:

1. stanovení primárního stavu napjatosti v horninovém prostředí (bez vlivu stavby)
2. realizace konstrukce budovy (aktivace konstrukčních prvků budovy, deaktivace zeminy ve sklepních prostorách budovy)
3. dynamická analýza po dobu 10 s

Získané výsledky modelování prokázaly pro některé modelové situace nejen změnu v charakteru vyvolaných vibrací (významné změny zvláště na začátku seizmogramů), tak i ve velikosti maximálních amplitud (nárůst přesahuje hodnotu 100 % původní maximální hodnoty na měřeném objektu).

## MODELOVÁNÍ Vlivu Podzemní Vody

Parametry modelu pro stanovení projevů šíření seizmických vln zvodněným horninovým prostředím vycházejí z obecných zákonitostí pro šíření seizmického zatížení horninovým prostředím.

Ze vztahů pro stanovení rychlosti šíření vln horninovým prostředím

$$V_p = \sqrt{\frac{E_{\text{od}}}{\rho}}, \quad E_{\text{od}} = \frac{(-\mu)E}{(+\mu)(-2\mu)} = \frac{4}{3}(G+K), \quad \rho = \frac{\gamma}{g}, \quad g - \text{grav. zrychlení}$$
$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad G = \frac{E}{2(+\mu)}, \quad K = \frac{E}{3(-2\mu)}$$

plyne, že mezi nejzákladnější parametry determinující šíření seizmických vln horninovým prostředím patří hustota materiálu prostředí  $\rho$  a jeho tuhost, daná primárně modulem pružnosti  $E$  a Poissonovým číslem  $\mu$ .

Dále je třeba pro zohlednění materiálového tlumení zadat tzv. Rayleighovy parametry tlumení  $\alpha$  a  $\beta$ . Materiálové tlumení vyplývá především z viskózních vlastností, tření a vývoje plasticity.

Ve zvodněném prostředí dochází k větší či menší změně všech výše uvedených základních determinujících parametrů šíření vln horninovým prostředím. Zeminová zrna jsou v oblasti pod hladinou podzemní vody nadlehčována vodou, snižuje se tedy objemová tíha zeminy. Vzduch v zeminových pórech je vytlačován a je nahrazován vodou, což vzhledem k prakticky nulové stlačitelnosti vody vede ke zvýšení objemového modulu  $K$ . Z uvedených fyzikálních zákonitostí vyplývá, že přítomnost vody v pórech zvyšuje rychlosti šíření seizmických vln horninovým prostředím, a to dominantně především rychlost vln  $V_p$ .

Seizmické zatížení zvyšuje v saturovaném prostředí pórové napětí a snižuje smykovou pevnost. Ztráta pevnostních parametrů je přitom výraznější v případě krátkodobého dynamického zatížení (zemětřesení, výbuch), neboť v této krátké době nemůže dojít k potřebnému rozptýlení

pórových tlaků. V případě písčitých zemin může docházet v důsledku dynamického zatížení až k jejich ztekucení.

K variantnímu modelování vlivu výšky hladiny podzemní vody (HPV) na seizmickou odezvu dvoupatrové budovy (šířka 6 m, výška nadzemní části 6 m, hloubka založení 2 m) byla zvolena lokální geologie s hloubkou v modelu 70 m. Tato varianta lokální geologie je tvořena 2.5 m kvartérních typů zemin, pod nimi je vrstva terciérních zemin o mocnosti 22.5 m, v hlubších vrstvách se pak nachází podkladová horninová vrstva o mocnosti 45 m. Původní materiálové parametry zeminového prostředí, nezohledňující vliv zvodnění prostředí, jsou uvedeny v tabulce 1, charakteristiky konstrukčních prvků budovy jsou v tabulce 2.

Model je vytvořen za předpokladu podmínky rovinného přetvoření a Mohr-Coulombova materiálového modelu.

Seizmické zatížení je do modelu zavedeno zadáním příslušných časových hodnot horizontálních zrychlení na spodní hranici modelu, maximální hodnoty zrychlení 2.4 m/s<sup>2</sup> (tedy 0.24 násobku gravitačního zrychlení) je dosaženo v část t=2.4 s. Doba působení seizmického zatížení byla uvažována 10 s.

**Tab.1** Materiálové parametry vrstev horninového prostředí bez zvodnění

<i>Parametr</i>	<i>Jednotky</i>	<i>1 kvartér F3 (tuhá)</i>	<i>2 terciér (SC)</i>	<i>3 podloží</i>
<b>Objemová tíha</b> $\gamma_{\text{nesat.}}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	18,00	18,50	23,00
<b>Objemová tíha</b> $\gamma_{\text{sat.}}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	20	21.5	25
<b>Modul pružnosti</b> E	[kN/m <sup>2</sup> ]	8000,000	12000,000	100000,000
<b>Poissonovo číslo</b> $\mu$	[-]	0,350	0,350	0,250
<b>Soudržnost c</b>	[kN/m <sup>2</sup> ]	16,00	12,00	80,00
<b>Úhel vnitřního tření</b> $\phi$	[°]	29,00	28,00	30,00
<b>Koeficient filtrace k</b>	[m/s]	1 10 <sup>-4</sup>	1 10 <sup>-5</sup>	1 10 <sup>-8</sup>

**Tab.2** Materiálové parametry konstrukčních prvků budovy

<i>Identifikace strukt. prvků</i>	<i>Normál. tuhost EA</i> [kN/m]	<i>Ohybová tuhost EI</i> [kNm <sup>2</sup> /m]	<i>Tíha w</i> [kN/m/m]
Strukturní prvky budovy	5.10 <sup>6</sup>	9000	5,00

Výška hladiny podzemní vody byla v modelu uvažována v následujících devíti variantách úrovně HPV pod základovou spárou: 43 m, 33 m, 28 m, 23 m, 18 m, 14 m, 9.5 m, 6.5 m a 3.5 m.

Vstupní data matematického modelu vycházejí z výše uvedených základních faktorů determinujících šíření seizmických vln ve zvodnělém horninovém prostředí. Vzhledem k tomu, že jsme neměli k dispozici údaje o kvantitativní změně smykového a objemového modulu a o parametrech tlumení ve zvodnělých vrstvách, byly v tomto prvotním modelovém přiblížení tyto vstupní parametry identické s odpovídajícími parametry nezvodnělého zeminového prostředí, zvýšení

rychlostí šíření seizmických vln ve zvodněném prostředí bylo tedy v modelu dosaženo pouze modifikací objemové tíhy zeminy pod hladinou vody dle vztahu:

$$\gamma_{\text{pod HPV}} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w, \quad \gamma_{\text{sat}} \dots \text{objemová tíha saturevané zeminy}$$

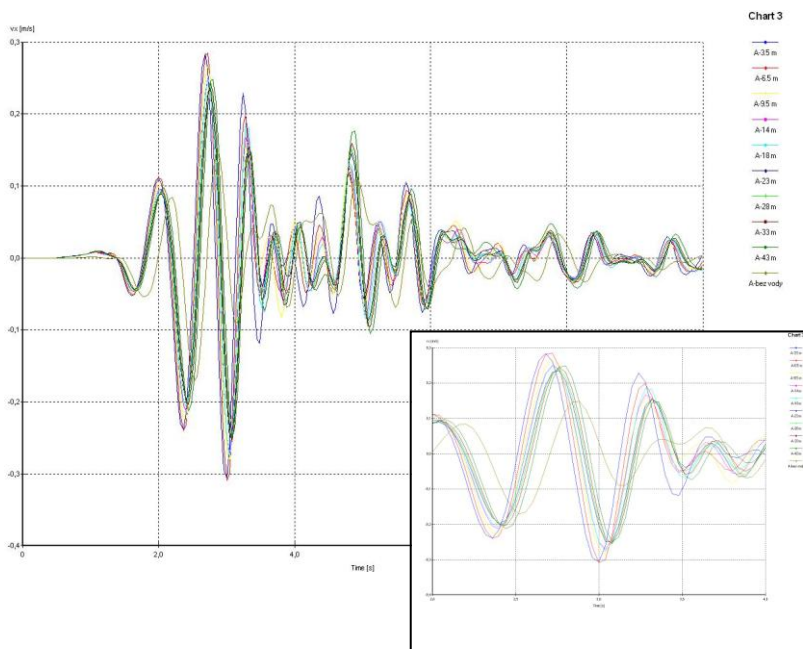
$$\gamma_w \dots \text{objemová tíha vody}$$

Na základě uvedených vztahů byly vypočteny hodnoty rychlostí šíření seizmických vln  $V_p$  a  $V_s$  v prostředí zvodněném a nezvodněném pro jednotlivé geologické vrstvy.

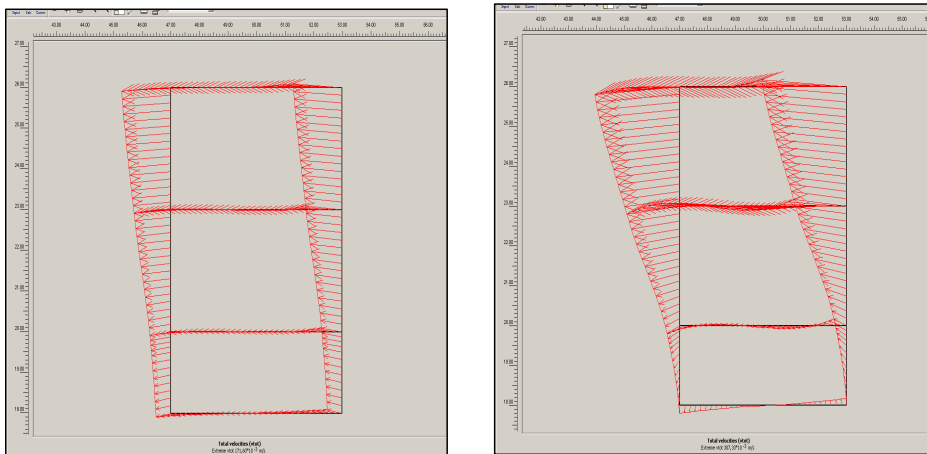
Vzhledem k tomu, že stanovení útlumových Rayleighových parametrů vyžaduje provedení jistých experimentálních měření, která jsme neměli k dispozici, bylo materiálové tlumení v modelu bez vody i v modelu s uvažováním HPV zohledněno zavedením identických Rayleighových parametrů tlumení  $\alpha=\beta=0.01$  (předdefinované hodnoty). Tato ne zcela objektivní a spolehlivá volba útlumových vstupních parametrů, projevující se samozřejmě určitou měrou ve výsledcích modelování, snižuje vypovídací schopnost výsledků modelování. Tuto skutečnost je třeba vzít při této analýze výsledků modelování v úvahu, zobektivizování parametrů materiálového tlumení bude, mimo jiné, předmětem dalšího výzkumu.

Pro každou analyzovanou variantu výšky HPV byl modelově monitorován bod A umístěný ve středu střechy budovy. V tomto bodě byly v průběhu výpočtu vyhodnocovány horizontální posuny, rychlosti a zrychlení a bylo provedeno vzájemné porovnání výsledků těchto hodnot pro jednotlivé varianty hodnot HPV pod základem budovy. Jako příklad je na obr. 1 znázorněn vývoj horizontálních rychlostí  $v_x$  v bodě A.

Z grafického vyhodnocení výsledků (příklad na obr. 2) je zřejmé, že maximálních kladných resp. záporných hodnot horizontálních posunů, rychlostí a zrychlení pro varianty s vlivem podzemní vody je dosaženo v časovém rozmezí  $t=2-4$  s. Maximální kladné hodnoty těchto veličin jsou ve zmíněném časovém rozmezí pro všechny uvažované varianty větší než pro variantu bez vlivu vody a se vzrůstající hloubkou HPV pod základovou spárou v zásadě ne příliš výrazný klesající trend. Hodnoty horizontálních posunů  $u_x$  pro čas  $t$  větší než 4 s jsou pro všechny uvažované varianty výšky hladiny podzemní vody menší než v případě varianty bez vlivu vody.



**Obr.1** Vývoj horizontálních rychlostí v bodě A (střecha budovy) pro různé hodnoty HPV



**Obr.2** Hodnoty totálních rychlostí konstrukce v čase odpovídajícím maximální seismické odezvě.  
 Vlevo: situace bez vody ( $v=0,171 \text{ m.s}^{-1}$ ), vpravo: situace s HPV 3,5 m pod základy konstrukce  
 ( $v=0,307 \text{ m.s}^{-1}$ )

## ZÁVĚR

Príspevek ukazuje výsledky modelování vlivu změny úrovně hladiny podzemní vody na velikost seismického projevu v povrchové konstrukci. Tato parametrická studie navazuje na výsledky modelování vlivu změny mocnosti sedimentárních hornin (viz výše). Získané výsledky modelování změny HPV ukazují, že je nutno brát i tento parametr do úvahy při hodnocení aktuálního seismického zatížení daného místa. Další práce se musí soustředit také na zpřesnění parametrů prostředí, jímž se vibrace šíří.

*Tento příspěvek byl zpracován za částečné finanční podpory GAČR, projekt 105/04/1424.*

## LITERATURA

- [1] GIBOWICZ, S.J. & KIJKO, A. (1990): An Introduction to Mining Seismology. Academic Press, San Diego, California.
- [2] HOLEČKO J., KALÁB, Z., KNEJZLÍK J. & PTÁČEK, J. (2006): Rychlost kmitání povrchu v karvinské části hornoslezské pánve. Uhlí – Rudy – Geologický průřez, č.2/2006, 34-39.
- [3] DOLEŽALOVÁ, H., HOLEČKO J., KALÁB, Z. & KNEJZLÍK J. (2004): Analýza vlivu důlně indukované seismicity na povrch na Karvinsku. Transactions (Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební), 13. Regionální konference Rozvoj seismologie, inženýrské geofyziky a geotechniky, roč. IV, č.2/2004, 85-93.
- [4] STEIN, S & WYSESSION M. (2003): An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. Blackwell Publishing.
- [5] ANSAL, A. – ed. (2004): Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [6] JANOTKA, V., VISKUP, J., PANDULA, B. & LESSO, I. (2006): Soil Profiles and Seismic Loading. Metalurgija 45, 127-130.
- [7] KALÁB, Z. & KNEJZLÍK, J. (2002): Systematic Measurement and Preliminary Evaluation of Seismic Vibrations Provoked by Mining Induced Seismicity in Karviná Area. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., M-24(340), 95-103 .
- [8] DOLEŽALOVÁ, H., KALÁB, Z. & KNEJZLÍK, J. (2004): Experimentální měření rychlosti kmitání na povrchu v karvinské oblasti. Geotechnika 2004, sborník konference, ORGWARE a BERG TU Košice, 471-476.

- [9] KALÁB, Z. & KNEJZLÍK, J. (2005): Seizmologický experiment z Karvinska v roce 2004. Transactions (Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební), roč. V, č.2/2005, 69-76.
- [10] HRUBEŠOVÁ, E., LAHUTA, H. & SEDLÁŘOVÁ, H. (2003): Zhodnocení výpočtových možností a typových výpočtů seizmické odezvy objektů programem Plaxis. VŠB – TU Ostrava, FAST, výzkumná zpráva, nepublikováno.
- [11] HRUBEŠOVÁ, E. & KALÁB, Z. (2004): Modelování účinků důlně indukované seizmicity na povrchové objekty programem Plaxis. Sborník příspěvků 32. konference se zahraniční účastí Zakládání staveb-Foundations-Grundbau, Brno, 171-176.
- [12] HRUBEŠOVÁ, E. (2004): Modelování vlivu lokální geologie na velikost seizmických projevů důlních seizmických jevů na povrchové objekty. VŠB – TU Ostrava, FAST, výzkumná zpráva, nepublikováno.
- [13] HRUBEŠOVÁ, E. & KALÁB, Z. (2005): Example of Modeling of the Mining Induced Seismicity Impact on the Building Using Numerical System Plaxis. In: Konečný, Pa. (ed): EUROCK 2005 – Impact of Human Activity on the Geological Environment, A.A.Balkema Publisher, Leiden, 213-218.
- [14] HRUBEŠOVÁ, E. & KALÁB, Z. (2005): Typové výpočty seizmické odezvy objektů pro oblast Karvinska (oblast důlně indukované seizmicity). Proceedings of the 3rd International conference on Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering (DYN-WIND 2005). University of Žilina, Slovak Republic, 105-108.

**Reviewer:** Doc. RNDr. Pavel Bláha, DrSc.