

Tomáš PETŘÍK¹, Eva HRUBEŠOVÁ²

NUMERICKÝ MODEL ODEZVY DYNAMICKÉHO ZATÍŽENÍ REÁLNÉHO HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ S POUŽITÍM METODY LATIN HYPERCUBE SAMPLING

NUMERICAL MODEL OF THE DYNAMIC LOAD RESPONSE IN THE REAL ROCK MASS USING LATIN HYPERCUBE SAMPLING METHOD

Abstrakt

Príspevek navazuje na predešlou modelovou studiu, ve které bylo využito simulačních stochastických metod modelování pro stanovení dynamické odezvy v horninovém prostředí. I v tomto příspěvku je využito simulační stochastické metody Latin hypercube sampling (LHS) pro stanovení vstupních parametrů modelu. Pro modelování bylo zvoleno reálné horninové prostředí. Výsledné hodnoty maximálních amplitud rychlostí kmitání z modelů jsou pak porovnány s provedeným experimentálním měřením in-situ. Celkem bylo generováno pro každý vstupní parametr 20 hodnot. Maximální amplitudy rychlosti kmitání byly vypočteny pro 15 různě vzdálených povrchových bodů od místa použití reverzní vibrační desky. Pro každou analyzovanou vzdálenost byly výsledky statisticky zpracovány a stanoveny základní statistické charakteristiky získaného souboru dat odezvy modelů. Na základě těchto výsledků stochastického modelování dynamické odezvy lze pak stanovit rozsahy, ve kterých se budou rychlosti kmitání v různé vzdálenosti od zdroje kmitání s určitou pravděpodobností pohybovat.

Klíčová slova

Dynamické zatížení, numerický model, stochastický parametr, Latin Hypercube Sampling, maximální amplituda rychlosti kmitání, experimentální měření.

Abstract

This paper follows on previous paper “numerical model of the dynamic load response in the soil using Latin hypercube sampling method”. In this paper the Latin Hypercube Sampling method (LHS) is used in order to evaluate the values of input parameters of real rock environment. The resulting values of the models were compared with the experimental in-site measurements. Twenty input values were generated for each input parameter. The peak oscillation velocities were calculated for 15 different surface points. The results were statistically analyzed in each distance (the basic statistical characteristics were evaluated). Based on this stochastic analysis the attenuation curve of the vibration velocity with the certain level of probability were determined.

Keywords

Dynamic loading, numerical model, stochastic parameter, Latin Hypercube Sampling method, peak oscillation velocity, experimental measurements.

¹ Ing. Tomáš Petřík, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 362, e-mail: tomas.petrik@vsb.cz.

² Doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 373, e-mail: eva.hrubesova@vsb.cz.

1 ÚVOD

Objektivita a spolehlivost vstupních parametrů je jedním z nejdůležitějších činitelů matematických modelů. Jednou z možností, jak lze zohlednit proměnlivý charakter horninového prostředí, je využití pravděpodobnostního přístupu k modelování. Aplikaci pravděpodobnostního přístupu na řešení odezvy seizmického zatížení horninového prostředí a okolních konstrukcí se již věnovali např. [1, 2 nebo 3]. Využívali zde především simulační stochastické metody Latin hypercube sampling (dále jen LHS) pro výběr hodnot vzorků vstupních parametrů matematických modelů. Tento článek se zaměřuje na využití metody LHS pro zohlednění stochastického charakteru parametrů horninového prostředí, na které působí dynamické zatížení. Konkrétně za náhodně proměnné vstupní parametry horninového prostředí jsou považovány deformační modul, úhel vnitřního tření a v případě soudržných zemin i soudržnost. Článek tak navazuje na předchozí modelovou studii [4], která je tentokrát provedena pro reálnou geotechnickou situaci. Díky tomu je možné porovnat výsledky stochastických modelů s provedeným experimentálním měřením. Toto terénní měření bylo provedeno v prostorech areálu Fakulty stavební VŠB-TUO, jehož výsledky jsou publikovány v článku [5].

2 CHARAKTERISTIKA MODELU

Jako podklad pro geologické poměry sloužila závěrečná zpráva, která byla zveřejněna v článku [6]. Geologie se v dané lokalitě sestává ze 7 m vrstvy tuhých jíílů třídy F6 (CI, CL), pod kterými se nachází vrstva ulehlých písků o mocnosti přibližně 3,0 m třídy S3 (S-F) a dále cca 5,0 m mocná vrstva ulehlých písčitých štěrků třídy G3 (G-F). Pod vrstvou štěrků dále pokračují ulehlé písky třídy S2 (SP). Základní model je vytvořen s jednoduchým geologickým rozhraním. Hladina podzemní vody se v terénu nachází přibližně v hloubce 16,5 m, v modelech se ovšem s hladinou podzemní vody neuvažuje. Geotechnické vlastnosti zemin vychází ze směrných normových charakteristik ČSN 73 1001, která je již v současné době neplatná, a jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1: Vstupní parametry horninového prostředí v areálu FAST

Třída	Poisson. číslo ν	Objemová tíha γ kN.m ⁻³	Deformační modul E_{def} MPa	Úhel vnitřního tření φ_{ef} °	Soudržnost c_{ef} kPa
F6	0,40	21	3–6	17–21	8–16
S3	0,30	17,5	17–25	30–33	0
G3	0,25	19	90–100	33–38	0
S2	0,28	18,5	30–50	34–37	0

Za stochastické parametry s normálním rozdělením pravděpodobnosti jsou považovány deformační modul E_{def} , úhel vnitřního tření φ_{ef} a soudržnost c_{ef} všech zemin (s výjimkou soudržnosti u nesoudržných písčitých a štěrkovitých zemin). Pro generaci náhodných hodnot vstupních parametrů metodou LHS byl použit modulu GLHS, který byl vyvinut na katedře geotechniky a podzemního stavitelství, VŠB-TUO. Generace byla provedena na základě horních a dolních mezí, střední hodnoty a směrodatné odchylky stochastických parametrů horninového prostředí a zvoleného rozdělení pravděpodobnosti. Celkově bylo zvoleno 20 simulačních variant, pro které byly určeny příslušné distribuční funkce a k nim náležející výsledné hodnoty vstupních parametrů modelů (Tab. 2).

Tab. 2: Ukázka výstupních parametrů zemin z modulu GLHS

	modul F6		Soudržnost F6		Úhel tř. F6		Modul G3		Úhel tř. G3	
	DF	gen.hod.	DF	gen.hod.	DF	gen.hod.	DF	gen.hod.	DF	gen.hod.
1	0,275607	4,20203	0,175877	10,75842	0,475067	18,95831	0,524933	95,10423	0,275607	35,00338
2	0,824123	4,965595	0,026282	9,41537	0,524933	19,04169	0,674528	95,75408	0,724393	35,99662
3	0,624663	4,658875	0,375337	11,57633	0,076147	18,04568	0,824123	96,55198	0,375337	35,23521
4	0,026282	3,530762	0,724393	12,79459	0,175877	18,37921	0,275607	94,00677	0,973718	37,1154
5	0,375337	4,341125	0,923853	13,90863	0,425202	18,87427	0,126012	93,09092	0,076147	34,30711
6	0,873988	5,072723	0,475067	11,91662	0,375337	18,78817	0,923853	97,38579	0,774258	36,12745
7	0,325472	4,273775	0,325472	11,39673	0,674528	19,30163	0,724393	95,99323	0,225742	34,87255

Dynamické zatížení je v modelu definováno jako spojité zatížení vyvolané hutnicím strojem použitým při experimentálním měření [5] v okolí zkušební konstrukce stand v areálu Fakulty stavební, VŠB-TUO (viz obr. 1). Parametry dynamického zatížení (viz tab. 3) vycházejí z prospektů výrobce reverzní vibrační desky VDR 22 [7] a výsledků experimentálního měření in-situ [5]. Při tomto měření dosahovala reverzní vibrační deska frekvence 82 Hz. Doba, po kterou zatížení v modelu působí, je 5 s.

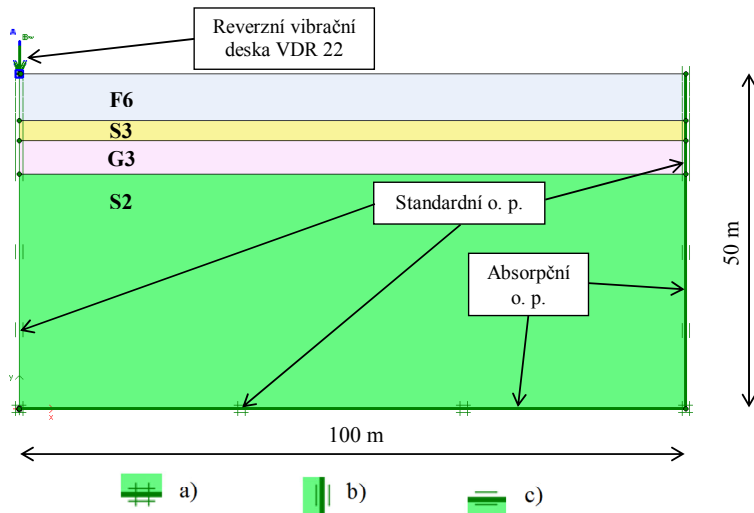
Tab. 3: Vstupní parametry reverzní vibrační desky

Reverzní vibrační deska VDR 22		
Hmotnost	120	kg
Rozměry hutnicí desky	400 × 630	mm
Frekvence	82	Hz
Odstředivá síla	22	kN



Obr. 1: Foto z experimentálního měření

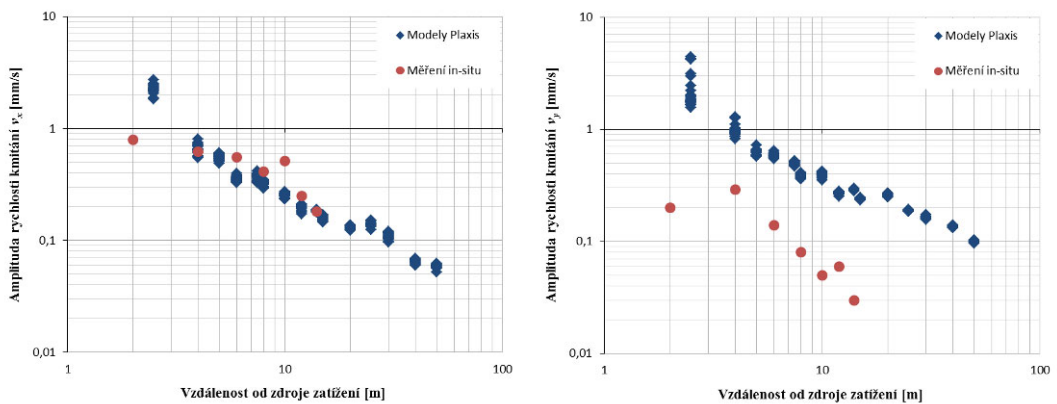
Základní model je vytvořen ve výpočetním programu Plaxis jako osově symetrický v rozsahu 100 × 50 m (délka × hloubka). Geologické rozhraní modelu s umístěním dynamického zatížení je vidět na obr. 2. Vstupní parametry horninového prostředí jsou definovány jak podle tab. 1 (parametry prostředí považované za deterministické), tak i podle výstupních parametrů modulu GLHS uvedených v tab. 2 (stochastické parametry prostředí). Parametry materiálového tlumení zeminy se ve výpočetním programu Plaxis zadávají pomocí Rayleighových parametrů (α_R a β_R). Na základě modelové studie je pro daný případ uvažováno s variantou $\alpha_R = 0,001$ $\beta_R = 0,0001$.



Obr. 2: Geometrie modelu v programu Plaxis (standardní okrajové podmínky s totálním omezením a) s omezením v horizontálním směru b) a vertikálním směru c))

3 VÝSLEDKY MODELOVÁNÍ

Na základě popsanych vstupních parametrů (deterministických i stochastických) a předpokladů modelu byly pro všech 20 simulačních variant stanoveny amplitudy rychlosti kmitání v ose x a ose y v 10-ti různě vzdálených bodech. Pro podrobnější výsledky bylo využito možnosti dopočítat další body v modulu Output výpočetního programu Plaxis. Celkově tedy pro 15 vzdáleností bylo stanoveno 600 hodnot maximální amplitudy rychlosti kmitání horninového prostředí. Všechny tyto body jsou zaneseny do grafů na obr. 3 a obr. 4 a porovnány s hodnoty měření in-situ.



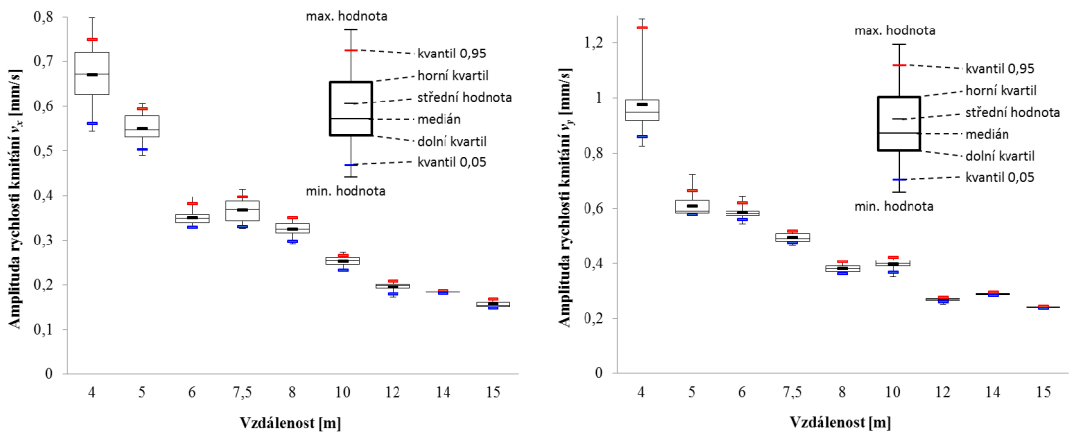
Obr. 3 a obr. 4: Záznamy amplitud rychlosti kmitání v ose x a ose y

V těchto grafech je patrný vliv horninového prostředí na amplitudu rychlosti kmitání. K nejvýraznějšímu ovlivnění dochází v rozmezí vzdálenosti 8 až 10 m od středu vibrační desky v ose x a 10 až 12 m ve složce y . Zde dochází k nárůstu amplitudy rychlosti kmitání, který je především způsoben v důsledku odrazu seizmických vln od nižších vrstev horninového prostředí s odlišnými geotechnickými vlastnostmi. Další takový vliv je z grafů patrný už pouze z namodelovaných dat ve vzdálenosti okolo 20 až 22 m. Veškerá modelová data byla pak v každé analyzované vzdálenosti statisticky zpracována tabulkovým procesorem MS Excel. Byly stanoveny základní statistické charakteristiky získaného statistického souboru odezvy modelu, které jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4: Základní statistické charakteristiky z tabulkového procesoru MS Excel

Vzdálenost [m]	4	6	8	10	4	6	8	10
Osa	v_x [mm.s ⁻¹]				v_y [mm.s ⁻¹]			
Střední hodnota	0,671	0,351	0,325	0,253	0,978	0,583	0,382	0,396
Medián	0,672	0,349	0,326	0,255	0,951	0,582	0,381	0,399
Směrodatná odchylka	0,068	0,017	0,016	0,011	0,115	0,021	0,014	0,018
Kvantil 0,05	0,561	0,329	0,299	0,233	0,859	0,559	0,363	0,359
Kvantil 0,95	0,750	0,382	0,350	0,268	1,226	0,619	0,406	0,422

Z výsledků stochastického modelování dynamické odezvy lze pak stanovit rozsahy, v nichž se budou rychlosti kmitání v různé vzdálenosti od zdroje kmitání s určitou pravděpodobností pohybovat. Například ve vzdálenosti 6 m od místa působení vibrační desky se hodnoty amplitudy rychlosti kmitání s 90% pravděpodobností pohybovaly v rozsahu od 0,329 do 0,382 mm/s ve směru x a v rozmezí od 0,559 do 0,619 mm/s ve směru y . Tato data jsou zpracována v krabicových grafech na obr. 5 a obr. 6.



Obr. 5 a obr. 6: Krabicový graf amplitud rychlosti kmitání na ose x a ose y

4 ZÁVĚR

Uplatnění stochastických metod v modelování geotechnických úloh může výrazně zpřesnit představu o předpokládaném chování posuzovaného horninového masívu či stavební konstrukce a předejít tak nekvalitním či nevhodným návrhům. Je známo, že metoda LHS je efektivní stochastickou metodou pro zohlednění pravděpodobnostního charakteru vstupních parametrů. Ve srovnání se standardní metodou Monte Carlo snižuje tato metoda počet nutných simulací při zachování vysoké přesnosti výsledků. Určitou nevýhodou metody LHS však je, že neumožňuje libovolné přidání simulací k již zpracovanému souboru dat. Obecně platí, že vyšší počet simulací odpovídá větší přesnosti výsledků. S tím však rostou nároky na potřebný objem dat a dobu výpočtů. Zároveň roste i nejistota spojená s chybou lidského faktoru (např. při přepisování dat). V současné době již existují modifikace metody LHS, které umožňují rozšířit výchozí počet simulací (bez nutnosti opakovat celý předchozí simulační výpočet), například metoda *Hierarchical Subset Latin Hypercube Sampling* (HSLHS) [8]. I v případě aplikace této metody HSLHS počet potřebných simulací nenarůstá lineárně (v našem případě by pro 20 původních simulací bylo nutné pro další stupeň hierarchie dopočítat 40 simulací). V analyzované úloze lze při aplikaci metody LHS získat

představu o pravděpodobnostním výskytu extrémních hodnot maximální amplitudy rychlosti kmitání horninového prostředí a navrhnout pro daný případ uplatnění jiného technologického postupu či jiných opatření.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován za finančního přispění MŠMT, podporou specifického vysokoškolského výzkumu Studentské grantové soutěže VŠB-TU Ostrava pod identifikačním číslem SP2013/139.

LITERATURA

- [1] RAJEEV, P. & TESHAMARIAM, S. Seismic fragilities of non-ductile reinforced concrete frames with consideration of soil structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012, Vol. 40, pp. 78-86. ISSN 0267-7261.
- [2] CELAREC, D. & DOLŠEK, M. The impact of modelling uncertainties on the seismic performance assessment of reinforced concrete frame buildings, *Engineering Structures*, Volume 52, July 2013, Pages 340-354, ISSN 0141-0296.
- [3] HRUBEŠOVÁ, E. & LUŇÁČKOVÁ, B. Modelování dynamických vlivů odstřelu na napěťo-deformační stav svahového tělesa. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava – Řada stavební*. 2006, roč. VI, č. 1, s. 65-71. ISSN 1213-1962.
- [4] PETŘÍK, T.; MOHYLA, M. & HRUBEŠOVÁ, E. Numerický model odezvy dynamického zatížení v zemině s použitím metody latin hypercube sampling. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava – Řada stavební*. 2013, roč. XIII, č. 1. ISSN 1213-1962 (v tisku).
- [5] PINKA, M.; STOLÁRIK, M.; FOJTÍK, R. & PETŘÍK, T. Experimental Seismic Measurement on the Testing Construction and The Analyze. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava: Construction Series* [online]. Warsaw: Versita, 2012, Volume XII, Number 1 / 2012, s. 1-11 [cit. 2012-09-13]. DOI: 10.2478/v10160-012-0006-6.
- [6] ČAJKA, R.; KŘIVÝ, V. & SEKANINA, D. Design and Development of a Testing Device for Experimental Measurements of Foundation Slabs on the Subsoil. *Transactions of the VŠB-Technical University of Ostrava: Construction Series* [online]. Warsaw: Versita, 2011, Volume XI, Number 1 / 2011, s. 1-5 [cit. 2012-09-13]. DOI: 10.2478/v10160-011-0002-2.
- [7] NTC – Profesionální stavební technika [online]. [cit. 2012-09-13]. Oficiální stránky společnosti NTC stavební technika. Dostupné z: <<http://www.ntc.cz/>>
- [8] VOŘECHOVSKÝ, M. Extension of sample size in Latin Hypercube Sampling with correlated variables. In EDITORS, Michael Beer. REC 2010, *Proc. of 4th International Workshop on Reliable Engineering Computing*, Singapore, March 3-5, 2010, pp. 353–368. ISBN 978-981-08-5118-7.

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Marián Drusa PhD., Katedra geotechniky, Stavebná fakulta, ŽU v Žiline.

Doc. Ing. Miroslav Vořechovský, Ph.D., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, VUT v Brně.