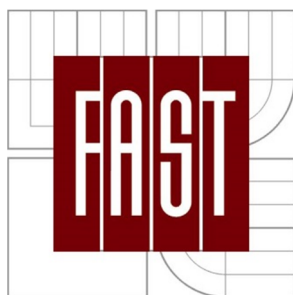




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

DYNAMICKÁ ANALÝZA ZÁKLADOVÉ KONSTRUKCE V INTERAKCI S PODZÁKLADÍM

DYNAMIC ANALYSIS OF THE SOIL-FOUNDATION INTERACTION

TEZE DOKTORSKÉ PRÁCE
DOCTORAL STATEMENT

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. JOSEF MARTINÁSEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VLASTISLAV SALAJKA, CSc.

BRNO 2015



Obr. 1 Schéma objemů výpočtového MKP modelu konstrukce s prostorovým modelem podzákladí s proměnnou mocností vrstev.

Obsah

1	ÚVOD DO PROBLEMATIKY	1
2	CÍLE PRÁCE	2
3	MODELOVÁNÍ STROJŮ V INTERAKCI S PODZÁKLADÍM.....	3
3.1	MODELOVÁNÍ STROJŮ.....	3
3.2	MODELOVÁNÍ ZÁKLADŮ POD STROJI.....	4
3.3	MODELOVÁNÍ PODZÁKLADÍ	4
4	TEORIE DYNAMIKY STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ A MECHANICKÉHO VLNĚNÍ	6
5	ŘEŠENÉ ANALÝZY.....	7
5.1	OSAMĚLÁ SÍLA NA POVRCHU PRUŽNÉHO POLOPROSTORU	7
5.1.1	POPIS ŘEŠENÉ ÚLOHY A VÝPOČTOVÉHO MODELU	7
5.1.2	VÝSLEDKY ŘEŠENÉ ANALÝZY	8
5.1.3	ZÁVĚRY	9
5.2	IMPULZ NA POVRCHU BLOKU ZEMINY (2D MODEL)	10
5.2.1	POPIS ŘEŠENÉ KONSTRUKCE A VÝPOČTOVÉHO MODELU.....	10
5.2.2	VÝSLEDKY ŘEŠENÉ ANALÝZY	12
5.2.3	ZÁVĚRY	13
5.3	IMPULZ NA POVRCHU BLOKU ZEMINY (3D MODEL)	15
5.3.1	POPIS ŘEŠENÉ KONSTRUKCE A VÝPOČTOVÉHO MODELU.....	15
5.3.2	VÝSLEDKY ŘEŠENÉ ANALÝZY	16
5.3.3	ZÁVĚRY	17
5.4	OSAMĚLÁ ŽELEZOBETONOVÁ PILOTA V INTERAKCI S PODZÁKLADÍM (3D MODEL)	17
5.4.1	POPIS ŘEŠENÉ KONSTRUKCE A VÝPOČTOVÉHO MODELU.....	17
5.4.2	VÝSLEDKY ŘEŠENÉ ÚLOHY	18
5.4.3	ZÁVĚRY	20
5.5	ŽELEZOBETONOVÝ ZÁKLAD V INTERAKCI S PODZÁKLADÍM.....	21
5.5.1	MODÁLNÍ ANALÝZA	21
5.5.2	DYNAMICKÉ BUZENÍ KONSTRUKCE.....	23
5.5.3	GENEROVÁNÍ PROSTOROVÉHO VRSTEVNATÉHO MODELU PODZÁKLADÍ ZE ZADANÝCH VRTŮ	25
6	ZÁVĚRY A SHRnutí	27
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURA.....	30
	SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ.....	31
	ŽIVOTOPIS	33

1 Úvod do problematiky

Problematika úloh interakce konstrukce s podzákladím je velice široká, zahrnuje a dotýká se mnoha oborů a vědních disciplín. Každý s těchto oborů se na úlohy interakce s podzákladím dívá z jiného, „svého“ pohledu a každého zajímají řešení jiných úloh. Například stavební inženýry zajímá, jak zemní prostředí ovlivní odezvu konstrukce, geotechniky naopak zajímá, jaká napjatost vzniká od konstrukce v podzákladí, dopravní inženýry a seizmology zajímají úlohy šíření vlnění podzákladím atd.

Z pohledu stavebního inženýra je každá konstrukce bez výjimky nějakým způsobem založena a přenáší zatížení přes základovou konstrukci do podzákladí. V současné době jsme schopni velice podrobně a přesně matematicky modelovat naprostou většinu konstrukcí, ovšem model podzákladí bývá ve většině případů úplně zanedbáván (v minulosti byl model podzákladí v matematických modelech téměř vždy zanedbán, pro jeho velkou náročnost na výpočtový čas a zejména objem dat). Tato skutečnost může vést, zvláště v úlohách dynamiky, ke zcela nesprávným a zkresleným výsledkům. Hmotnost řešené konstrukce včetně modelu podzákladí bývá několikanásobně větší než hmotnost samotné konstrukce. Při řešení odezvy na dynamické zatížení dochází k výraznému ovlivnění dynamické odezvy konstrukce kmitající hmotou podzákladí. Kmitající zemina mění modální charakteristiky řešené konstrukce, dochází ke zhuštění spektra a změně hodnot vlastních frekvencí.

Z uvedeného vyplývá nutnost řešit odezvu konstrukce na dynamické zatížení v interakci s podzákladím a to nejlépe s prostorovým modelem. Jakékoliv zjednodušení či redukce dimenze může v úlohách dynamiky vést k zavádějícím výsledkům. Toto zjednodušení by bylo přípustné pouze při výpočtu odezvy konstrukce na statické zatížení.

Modelování bloku podzákladí metodou konečných prvků (MKP) s sebou však nepřináší pouze výhody, ale i problémy. Samotné vytvoření modelu podzákladí je v programovém systému ANSYS relativně jednoduché, avšak problém nastává například ve zvolení velikosti modelu podzákladí, ve volbě jeho tvaru, ve způsobu diskretizace a ve volbě okrajových podmínek. Analýza těchto parametrů je jedním z cílů této disertační práce. Prostorový výpočtový model s podzákladím také klade vyšší nároky na výpočetní čas a na objem dat.

2 Cíle práce

V rámci doktorského studia se věnuji problematice řešení úloh **interakce konstrukce s prostorovým modelem podzákladím** v programovém systému ANSYS.

Vzhledem k masivnímu rozvoji výpočetní techniky a numerického modelování se v současné době nabízí řada nových přístupů k modelování vzájemného působení konstrukce a podzákladí, které nebylo možno dříve využít. Tyto postupy jsou relativně nové a je zde tedy velký prostor pro provádění verifikačních studií a hledání možných slabých míst dané metody. Je nutné neustále pracovat na metodických postupech a ověřovat jejich správnost.

Modelování prostorového výpočtového modelu s sebou přináší řadu výhod: snadné zavedení různých materiálových charakteristik (nehomogenity, anizotropie), možnost modelování spolupůsobících objektů (blízké stavby, tunely, potrubní systém v zemině apod.), možnost modelovat nerovinný povrch a rozhraní vrstev vrstevnatého prostorového modelu atd. Prostorový model podzákladí má i své nevýhody plynoucí z jeho ohraničenosti. Je to především otázka volby velikosti modelované oblasti podzákladí, dělení na konečné prvky a zvolení okrajových podmínek na hranici modelované oblasti podzákladí. Analýza těchto parametrů je jedním z cílů této disertační práce.

Práce si klade splnit následující cíle:

V teoretické části:

- Sestavit přehled modelů podzákladí.
- Sestavit přehled modelů podzákladí s pilotou.
- Zpracovat a uvést teorii dynamiky stavebních konstrukcí a šíření vlnění, která se týká dané problematiky.

V části řešených úloh:

- Srovnat odezvu Boussinesqova modelu podzákladí s prostorovým výpočtovým MKP modelem na statické zatížení osamělou silou na povrchu poloprostoru.
- Stanovit vliv okrajové podmínky a sklonu hranice na velikost odražené vlny od hranice modelované oblasti od dynamického zatížení.
- Vyjádřit se k vhodnosti tvaru prostorového výpočtového modelu (výhody model tvaru válce či kvádru).
- Srovnat výpočtový model s hmotnou a nehmotnou zeminou.
- Vytvoření sady různých modelů podzákladí pod řešenou konstrukci srovnání jejich vlivu na modální charakteristiky a dynamickou odezvu.
- Vytvoření algoritmu v jazyce APDL pro generování modelu podzákladí požadovaných vlastností.
- Vytvoření algoritmu pro stanovení významných (popř. nevýznamných) tvarů vlastního kmitání.

3 Modelování strojů v interakci s podzákladím

V projekční praxi se naprostá většina výpočtových modelů stavebních konstrukcí vytváří z plošných a prutových prvků. Podzákladí (zemní či horninové prostředí) je však typické 3D médium, a mělo by také tak být modelováno. V současné době je podzákladí často modelováno povrchovými modely. Jedná se zejména o Winklerův model, Pasternakův model a o efektivní model podloží. Nejméně výstižným modelem podzákladí je Winklerův model, který zohledňuje pouze svislou tuhost podzákladí. Tento model tak není schopen postihnout vznik poklesové kotliny a účinky sousedních objektů. Winklerův model doplnil Pasternak o vliv smykových složek napětí sloupců zeminy. Tento model je schopen vystihnout vznik poklesové kotliny i spolupůsobení sousedních objektů. Nové pojetí problematiky interakce konstrukce s podzákladím zavedli Vladimír Kolář a Ivan Němec, kteří vytvořili efektivní model podzákladí. Jedná se o víceparametrický povrchový model, při jehož deformaci se vykoná stejná virtuální práce jako u deformovaného poloprostoru. Zmíněný model věrně vystihuje tuhost podloží a je tak naprosto dostačující pro řešení většiny statických úloh projekční stavební praxe. Teorii povrchových modelů podloží lze nalézt v [1], [2] a [3].

Zmíněné povrchové modely však nejsou pro úlohy dynamiky vhodné, protože nevyjadřují žádným způsobem hmotnost, ale pouze tuhost podloží (nejsou tak schopny nahradit setrvačné síly v zemním prostředí). Povrchový model nelze také použít u konstrukcí podepřených pilotami. Nejvhodnějším modelem z hlediska vystižení rozložení tuhostních i hmotnostních parametrů je prostorový model podzákladí modelovaný například metodou konečných prvků. Prostorový model podloží je nezbytně nutný při řešení úloh dynamiky (při určování tvarů a frekvencí vlastního kmitání, vyčíslení dynamické odezvy konstrukce se strojem na účinky rotujících částí stroje, odezva na seizmické zatížení, ...). Prostorový model podzákladí však klade značné nároky na výpočetní techniku (výpočetový čas, objem dat).

Výpočtový model úlohy interakce konstrukce se strojním zařízením s podzákladím se skládá ze tří hlavních částí: model stroje, model základu a model podzákladí. V následujících třech podkapitolách jsou popsány přístupy modelování těchto tří hlavních částí.

3.1 Modelování strojů

V moderním průmyslu se bez strojů neobejdeme. Je jich celá řada a jedno z hlavních dělení strojů je dle typu pohonu. Stroj působí staticky vlastní tíhou a dynamicky pohybem nevyvážených hmot svých rotujících částí nebo hmot posuvných u pístových strojů. Pro stavební konstrukci jsou rozhodující tzv. budící síly, což jsou síly, kterými přímo působí stroj na konstrukci a které vyvolávají její kmitání.

K modelování strojního zařízení lze zaujmout dva přístupy. První z nich je vytvoření výpočtového modelu konstrukce **bez modelu soustrojí**, účinky stroje jsou zohledněny jako budící síly (to jsou síly od stroje v místě kotvení a uložení stroje). Výhodou je zjednodušení výpočtového modelu konstrukce. Nevýhodou je nutnost přesného převedení účinků stroje na soustavu budících sil, jejichž určení není jednoduché. Mnohem výhodnější je druhý způsob, který spočívá ve vytvoření výpočtového modelu konstrukce **včetně modelu soustrojí**. Dynamické účinky vyvozené strojem jsou pak do modelu vneseny pomocí dynamických sil určených příslušnou metodikou strojního inženýrství, které působí přímo na části modelu stroje.

3.2 Modelování základů pod stroji

Většina strojů je uložena na základové konstrukci, která přenáší statické a dynamické zatížení vyvozené strojem do podzákladí. Z konstrukčního hlediska se základy dělí na masivní a rámové. Masivní základy se chovají jako tuhé těleso. Stolové základy se skládají ze svislých (sloupy) a vodorovných (příče, desky) nosných prvků a umožňují tak využití prostoru pod strojem. Základy strojů se také dělí podle uložení základové konstrukce na zeminu. Jsou uloženy buď přímo, nebo přes izolátory, nebo je zatížení přenášeno přes piloty nebo přes další prvky speciálního zakládání staveb.

Materiálem základů je většinou železobeton s prostorovým vyztužením vzhledem k dynamickému zatížení a možnosti únavy materiálu.

K modelování základu se přistupuje opět dvěma základními přístupy. Prvním je předpoklad tuhého základu (ten je tedy reprezentován pouze svou hmotností, nedochází k vnitřním deformacím). Druhým, přesnějším přístupem je vytvoření modelu základu (konstrukce) prostorovými, plošnými, popř. prutovými prvky.

3.3 Modelování podzákladí

Model podzákladí je v problematice interakce nejdůležitější částí systému podzákladí – základová konstrukce – konstrukce, v některých úlohách či modelech je jedinou součástí systému, protože model konstrukce (spolu se základovou konstrukcí) je zanedbán, nebo je považován za tuhý celek.

Základní problémy interakce konstrukce s podzákladím, a tím i modely podzákladí, můžeme rozdělit do těchto základních kategorií:

- Odezva podzákladí (poloprostoru) na zatížení (dynamické nebo statické) působící na, nebo blízko povrchu.
- Odezva zemního prostředí na seizmické zatížení, nebo rychle se pohybující vlaky (*free-field problem*).
- Odezva idealizovaných tuhých konstrukcí na vlnění procházející zeminou.
- Odezva idealizovaných tuhých konstrukcí (základů, strojů se základy, pilot, ...) na zatížení (dynamické nebo statické) působící přímo na tyto konstrukce.
- Odezva okolních konstrukcí na zatížení přenesené podzákladím.

Získáním analytického řešení těchto úloh a jejich dílčích problémů se zabývala řada světových inženýrů a matematiků po několik staletí. Přesto jsou některé úlohy a problémy stále nedořešeny a některé úlohy si na své řešení musely řadu desetiletí počkat (na silnější matematický aparát, numerické metody a výkonnou výpočetní techniku).

První zmínky k problematice napjatosti v nekonečném prostoru můžeme najít v pracích francouzských matematiků Lamého a Clapeyrona (jak lze nalézt v pracích věnujících se historii interakce konstrukce a podzákladí, např. [4]). Jako první získal analytické řešení napjatosti v prostoru o několik desetiletí později Sir Thomson [5] více známý jako Lord Kelvin. O rok později se objevuje první zmínka o řešení odezvy nekonečného prostoru na osamělou harmonickou sílu v čase (Stoke [6]).

Na konci devatenáctého století vyjádřil analytické řešení pole napjatosti a deformací pružného poloprostoru od síly působící kolmo na povrch pružného poloprostoru francouzský matematik Boussinesq. Své první úvahy prezentoval v sérii článků [7], [8] a [9], nicméně své kompletní pojednání o řešení publikoval až o sedm let později. V tomto mezidobí publikoval své řešení úlohy osamělé síly umístěné na povrchu poloprostoru působící rovnoběžně s povrchem poloprostoru italský matematik Cerruti [10].

Průlomovým dílem problematiky interakce byla práce australského matematika Lamba [11] z roku 1904, která se věnuje problematice řešení úlohy dynamické síly působící kolmo na povrch homogenního pružného poloprostoru. Ve své době byl Lamb schopen vyčíslit pouze odezvu v místech vzdálených od zatížení z důvodu slabého matematického aparátu pro transformaci integrálů (neměl ani možnost numerické integrace pomocí silné výpočetní techniky). Vyčíslení integrálů pro kompletní řešení problému provedl o třicet pět let později Cagniard [12].

Dalším velice významným dílem v problematice interakce je Mindlinova práce z roku 1936 [13], kde lze poprvé nalézt jeho slavnou uzavřenou formu řešení pole posunutí vyvolané horizontální a vertikální silou působící v libovolném bodě pružného poloprostoru (viz dále).

Modely a metody pro řešení úloh interakce konstrukce s podzákladem lze rozdělit do dvou základních skupin: (i) modely věnující se statickým úlohám, (ii) modely řešící dynamické problémy. Další dělení může být například podle počtu stupňů volnosti nebo teoretického základu (MSD modely, teorie pružného poloprostoru, redukce dimenze, atd.). Jedno z rozdělení modelů pro řešení úloh interakce konstrukce s podzákladem pak může vypadat následujícím způsobem:

- Bez modelu podzákladí.
- Statické modely.
 - Modely pružného poloprostoru.
 - Boussinesqův model.
 - Cerrutiho úloha.
 - Westergaardův model.
 - Mindlinův model.
 - Modely založené na předpokladu redukce dimenze (povrchové modely).
 - Winklerův (Fuss-Zimmermannův) model.
 - Pasternakův model.
 - Efektivní model podzákladí (Kolář, Němec).
- Dynamické modely.
 - Modely s jedním (popř. dvěma, třemi) stupněm volnosti (MSD modely).
 - Modely pro tuhý základ umístěný na povrchu zemního prostředí.
 - Tschebotarioffova metoda.
 - Alpanova metoda.
 - Newcombova metoda.
 - Hsiehova metoda.
 - Barkanova metoda.
 - Richartova a Lysmerova metoda.
 - Formulace vázaného pohybu kmitání pomocí Lagrangeových rovnic druhého druhu.
 - Modely pro tuhý základ zohledňující zapuštění základu pod povrch.
 - Modely zohledňující založení na pilotách.
 - Modely s více stupni volnosti.
 - Prostorový model MKP.
 - Prostorový model MHP.
 - Prostorový model MKP s okrajovou podmínkou nekonečného prvku.
 - Prostorový model MKP s okrajovou podmínkou prvku MHP.

V práci Jsou tyto modely dále popsány včetně modelů s pilotami.

4 Teorie dynamiky stavebních konstrukcí a mechanického vlnění

Obsahem této kapitoly je podrobný popis teorie, jejíž znalost je nezbytně nutné pro řešení úloh interakce konstrukce s podzákladím. Je logicky rozdělena do tří oddílů. První podkapitola je věnována kmitání soustavy s jedním stupněm volnosti, a to od volného, přes nucené, po kmitání vynucené pohybem okrajové podmínky. V druhé podkapitole je čtenář seznámen se soustavou s více stupni volnosti a to jmenovitě s modální analýzou a analýzou v časové oblasti. Třetí podkapitola je pak věnována mechanickému vlnění a to jak jednodimenzionálnímu tak vlnění šířícím se prostorem a poloprostorem, jeho odrazu a lomu na hranici či při přechodu do materiálu s odlišnými materiálovými charakteristikami.

V práci jsou rozebrány tyto tematické okruhy:

- Soustava s jedním stupněm volnosti.
 - Pohybová rovnice lineární soustavy s jedním stupněm volnosti.
 - Vlastní kmitání viskózně tlumené soustavy s jedním stupněm volnosti.
 - Odezva viskózně tlumené soustavy s jedním stupněm volnosti na harmonické buzení.
 - Odezva viskózně tlumené soustavy s jedním stupněm volnosti na harmonické buzení při rezonanci.
 - Ustálená odezva viskózně tlumené jednostupňové soustavy na harmonické buzení.
 - Ustálená odezva viskózně tlumené jednostupňové soustavy na buzení způsobené rotující částí stroje.
 - Ustálená odezva viskózně tlumené jednostupňové soustavy na buzení způsobené pohybem základu.
- Soustava s více stupni volnosti.
 - Modální analýza (vlastní, volné kmitání soustavy s více stupni volnosti).
 - Cauchyho teorém o rozdělení.
 - Časová analýza (Newmarkova metoda).
 - Metoda rozkladu podle vlastních tvarů kmitu.
- Mechanické vlnění.
 - Jednodimenzionální netlumené podélné vlnění v upnutém nekonečném prutu.
 - Jednodimenzionální netlumené torzní vlnění v nekonečném prutu.
 - Jednodimenzionální netlumené vlnění v konečném prutu.
 - Jednodimenzionální netlumené vlnění v nekonečném prutu s rozhraním materiálů.
 - Netlumené vlnění v trojrozměrném elastickém prostředí.
 - Netlumené vlnění v trojrozměrném prostředí s rozhraním materiálů.
 - Netlumené vlnění šířící se poloprostorem.
 - Rayleighova vlna.
 - Rayleighova vlna šířící se poloprostorem s rozhraním materiálů.
 - Loveova vlna.

5 Řešené analýzy

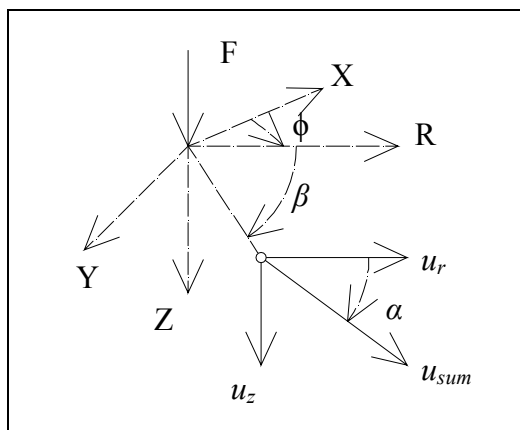
Tato kapitola je věnována popisu řešených analýz, popisu použitých modelů a jejich parametrů, prezentaci vybraných výsledků a z nich plynoucích závěrů. Kompletní sadu výsledků je možno nalézt v příloze disertační práce. Úlohy jsou logicky a systematicky řazeny od nejjednoduššího výpočtového modelu soustavy s jedním stupněm volnosti až po prostorový výpočtový model podzákladí. Poslední podkapitola je věnována možnosti vytvoření složitějšího výpočtového prostorového modelu podzákladí s proměnnou mocností vrstev ze zadané sady vrtů. Z důvodu omezené délky jsou zde uvedeny jen některé vybrané řešené úlohy.

5.1 Osamělá síla na povrchu pružného poloprostoru

Tato kapitola je věnována srovnání polí posunutí a napjatosti pružného poloprostoru vyvozených osamělým břemenem působícím kolmo na povrch poloprostoru. Pro řešení úlohy (a prvním sledovaným parametrem) jsou použity tyto modely: (i) Boussinesqův model pružného poloprostoru, (ii) Westergaardův model pružného poloprostoru (pouze svislé napětí), (iii) metoda konečných prvků v programovém prostředí ANSYS. Druhou sledovanou závislostí je vliv součinitele příčné kontrakce na průběhy napětí a posunů u jednotlivých modelů. Zásadními otázkami, na které je hledána odpověď, jsou:

- Jsou pole posunutí získaná danými metodami shodná? Liší-li se, jakým způsobem?
- Jsou pole napjatosti získaná danými metodami shodná? Liší-li se, jakým způsobem?
- Lze pozorovat závislost polí posunutí a napjatosti na poloze v prostoru (ve sférických souřadnicích)?
- Lze vysledovat nějaké závislosti na součiniteli příčné kontrakce?

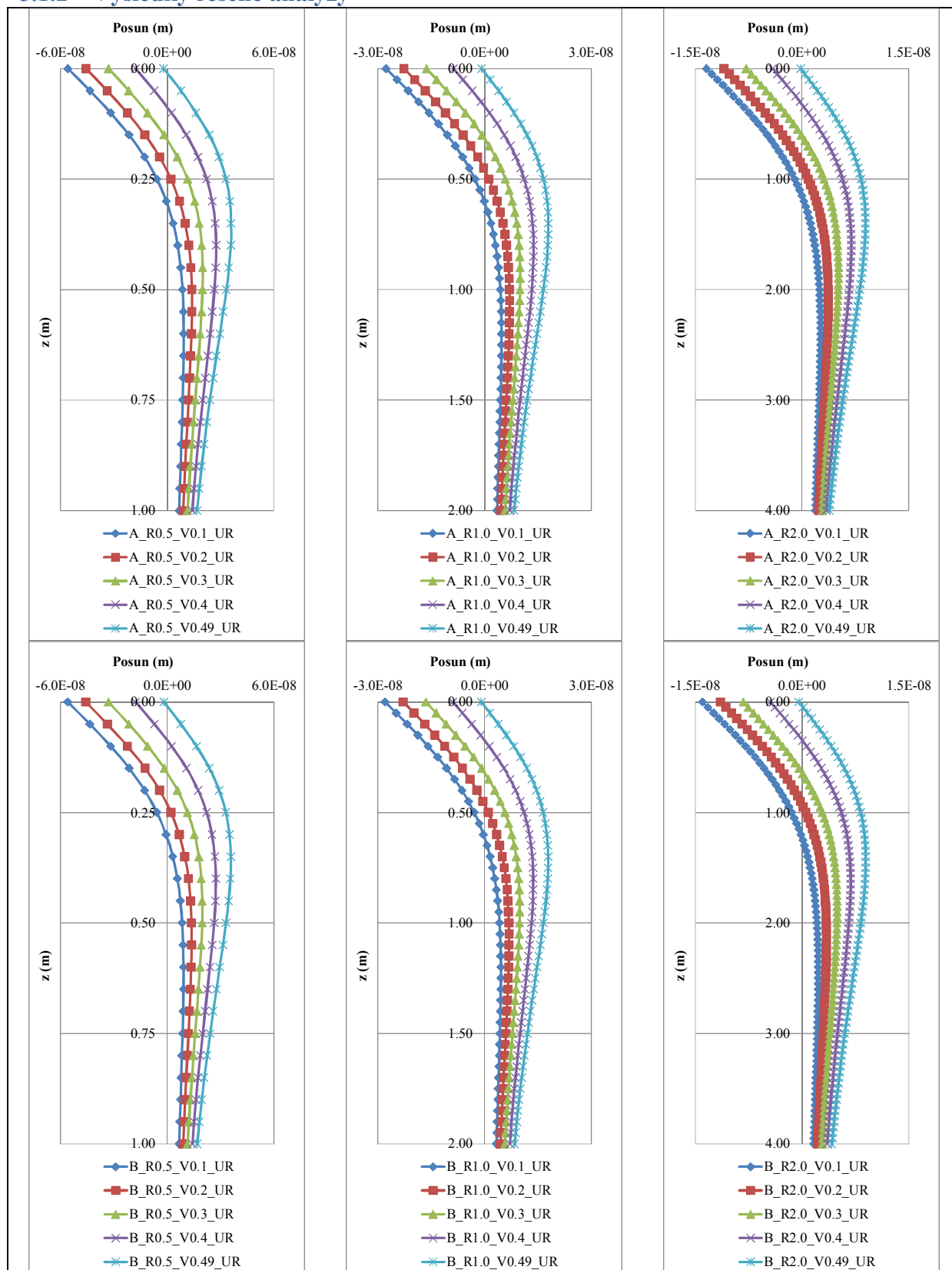
5.1.1 Popis řešené úlohy a výpočtového modelu



Obr. 2 Orientace souřad. systému.

Řešeným problémem je vyčíslení průběhů posunů a napětí od osamělé síly působící kolmo na povrch pružného poloprostoru. Vztahy pro výpočet napětí a posunů Boussinesqova a Westergaardova modelu jsou uvedeny v podkapitole 3.3. Výpočtový model v programu ANSYS je tvořen prvky PLANE182 s nastavením rotačně symetrické úlohy, délka a hloubka modelu je 10 m. Síla působící kolmo na povrch modelu má hodnotu 1 kN, materiálové vlastnosti homogenního podzákladí jsou modul pružnosti $E = 5 \text{ GPa}$ a součinitele příčné kontrakce $\nu = \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.49\}$. Porovnání je provedeno v cylindrickém (popř. sférickém) systému souřadnic (viz obrázek 2).

5.1.2 Výsledky řešené analýzy

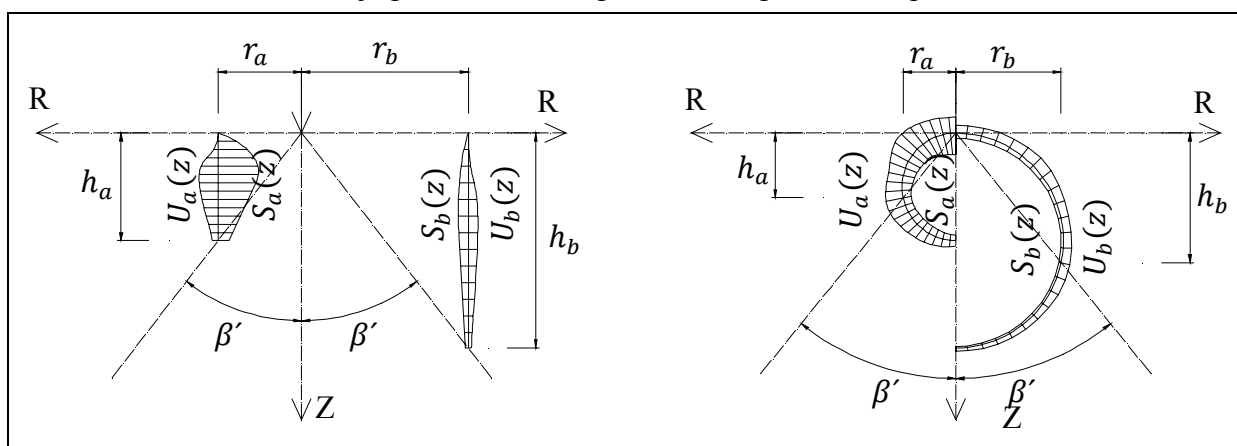


Graf 1 Průběhy posunů. Horní grafy zobrazují průběhy posunů v radiálním směru na svislých řezech získané programem ANSYS ve vzdálenostech 0.5 m (vlevo), 1.0 m (uprostřed), 2.0 m (vpravo). Dolní grafy zobrazují průběhy shodných veličin získané výpočtem dle Boussinesqa.

5.1.3 Závěry

Z uvedených výsledků lze konstatovat:

- Průběhy všech složek posunů řešené úlohy získané dle Boussinesqa a programovým prostředím ANSYS jsou shodné (lze pozorovat rozdíly v blízkosti okrajové podmínky).
- Průběhy všech složek napětí řešené úlohy získané dle Boussinesqa a programovým prostředím ANSYS jsou shodné.
- Průběh svislé složky napětí získaný dle Westergaarda má obdobný trend jako napětí získané dle Boussinesqa (programem ANSYS) s výjimkou případu nestlačitelných zemin (součinitel příčné kontrakce blízký 0.5). Nejvíce se Boussinesqovu průběhu napětí blíží Westergaardův model se součinitelem příčné kontrakce blízkému hodnotě 0.3, obdobné závěry lze konstatovat i pro hodnotu určitého integrálu svislé složky napětí.
- Průběhy napětí i posunů u všech sledovaných modelů (B, A, W) jsou geometricky podobné (s výjimkou posunů modelu s nestlačitelnou zeminou řešených MKP, u které lze pozorovat vliv okrajové podmínky), lze tedy pozorovat závislost na sférických souřadnicích. Průběh libovolné složky napětí S_a (posunu U_a) ve vzdálenosti r_a po výšce h_a je geometricky podobný průběhu napětí S_b (posunu U_b) ve vzdálenosti r_b po výšce h_b , platí vztahy $S_b = S_a \cdot (r_a/r_b)^2$, $U_b = U_a \cdot (r_a/r_b)$, pak $(r_a/r_b) \int_0^{h_b} S_b dz = \int_0^{h_a} S_a dz$ (stejně závěry lze konstatovat pro řezy libovolného tvaru, viz obrázek 3).
- Orientace výsledného vektoru posunutí bodu modelu má u modelu dle Boussinesqa a v softwaru ANSYS zcela totožný trend. Výsledné vektory posunutí na polopřímce s počátkem v působišti síly mají vždy stejný směr (úhel α). Orientace výsledného vektoru posunutí je závislá pouze na poloze (směru polopřímky β) a součiniteli příčné kontrakce (s výjimkou oblastí blízkých okrajové podmínce). Největších vzájemných rozdílů v orientaci v závislosti na součiniteli příčné kontrakce je dosaženo pro úhel $\beta = 10^\circ$.
- U modelu řešeného systémem ANSYS lze sledovat vliv okrajové podmínky na průběhy posunů i napětí. Tento vliv roste s rostoucí hodnotou součinitele příčné kontrakce a narušuje platnost vztahů geometrické podobnosti průběhů veličin.



Obr. 3 Schéma geometrické podobnosti průběhu napětí a posunů.

5.2 Impulz na povrchu bloku zeminy (2D model)

Tato podkapitola se věnuje stanovení vlivu okrajové podmínky a sklonu hranice modelovaného bloku zemního prostředí (vyjádřený rohovým úhlem) na velikost amplitudy odražené vlny. Zásadními otázkami, na které je hledána odpověď, jsou:

- Jaký vliv má sklon hranice modelu na velikost odražené amplitudy?
- Existuje nějaký sklon hranice modelu, pro nějž je odraz minimální?
- Existuje nějaká okrajová podmínka hranice modelu, pro nějž je odraz minimální?
- Má na velikost amplitudy odražené vlny u nejvhodnější okrajové podmínky vliv sklon hranice?

5.2.1 Popis řešení konstrukce a výpočtového modelu

Výpočtový model je tvořen poddajnou deskou umístěnou na horním povrchu bloku zeminy. Kruhová deska o poloměru 1 m je modelována jako zcela poddajná (s nulovou tuhostí). Zemina je modelována jako homogenní izotropní materiál (modul pružnosti $E=50$ MPa, součinitel příčné kontrakce $\nu = 0.3$, hustota $\rho = 2000$ kg/m³). Model podzákladí o výšce 20 m a poloměru 12 m při horním okraji je modelován plošnými prvky PLANE182 (rotační symetrie). Hranice modelu podzákladí je modelována v různých variantách sklonu, vyjádřených hodnotou rohového úhlu $\alpha = (60, 120)^\circ$. Okrajová podmínka na hranici s měnícím se sklonem je modelována jako: (i) kluzná, (ii) vetknutí, (iii) Winklerova pružná okrajová podmínka (SURF153, kolmá na hranici, v rovnoběžném směru s hranicí je tuhost nulová) se součinitelem ložnosti podzákladí $C = (5 \cdot 10^4, 5 \cdot 10^9)$ kN/m³, (iv) disipativní okrajová podmínka (COMBIN14, kolmá na hranici) s koeficientem viskózního tlumení $c = (1 \cdot 10^4, 1 \cdot 10^7)$ Ns/m, (v) bez okrajové podmínky (volná hranice), (vi) vazkopružná okrajová podmínka (kombinace pružné a disipativní okrajové podmínky) modelovaná kolmo i rovnoběžně s hranicí (viz dále). Okrajová podmínka na spodní vodorovné hranici je modelována jako vetknutí. Schéma řešení úlohy je zobrazeno na obrázku 4. Zatížení působící na horním povrchu desky ve směru záporné osy Y je znázorněno na obrázku 5.

Ad (vi) vazkopružná okrajová podmínka (COMBIN14) je modelována v několika variantách, a to v násobcích „ideální“ tuhosti a koeficientu viskózního tlumení, jejichž výpočet je popsán v následujícím textu. Tuhost kolmá na hranici je získána ze vztahu

$$k_{I,\perp} = \frac{4Gr_0}{1-\nu}, \text{ kde } r_0 = \pi^{-0.5}. \quad (1)$$

Hodnota koeficientu viskózního tlumení kolmého na hranici je získána dosazením vztahu rychlosti kmitání částic média a napětí do následujícího výrazu pro výpočet reakce

$$R = \dot{u}c, \text{ získáme tedy} \\ R = \sigma_x A = \dot{u}\rho v_p A = \dot{u}c_{I,\perp}, \quad (2)$$

kde $c_{I,\perp} = \rho v_p A$ je koeficient viskózního tlumení „ideálního“ tlumiče kolmo na hranici modelu.

Koeficient viskózního tlumení rovnoběžný s hranicí obdržíme stejným způsobem ve tvaru

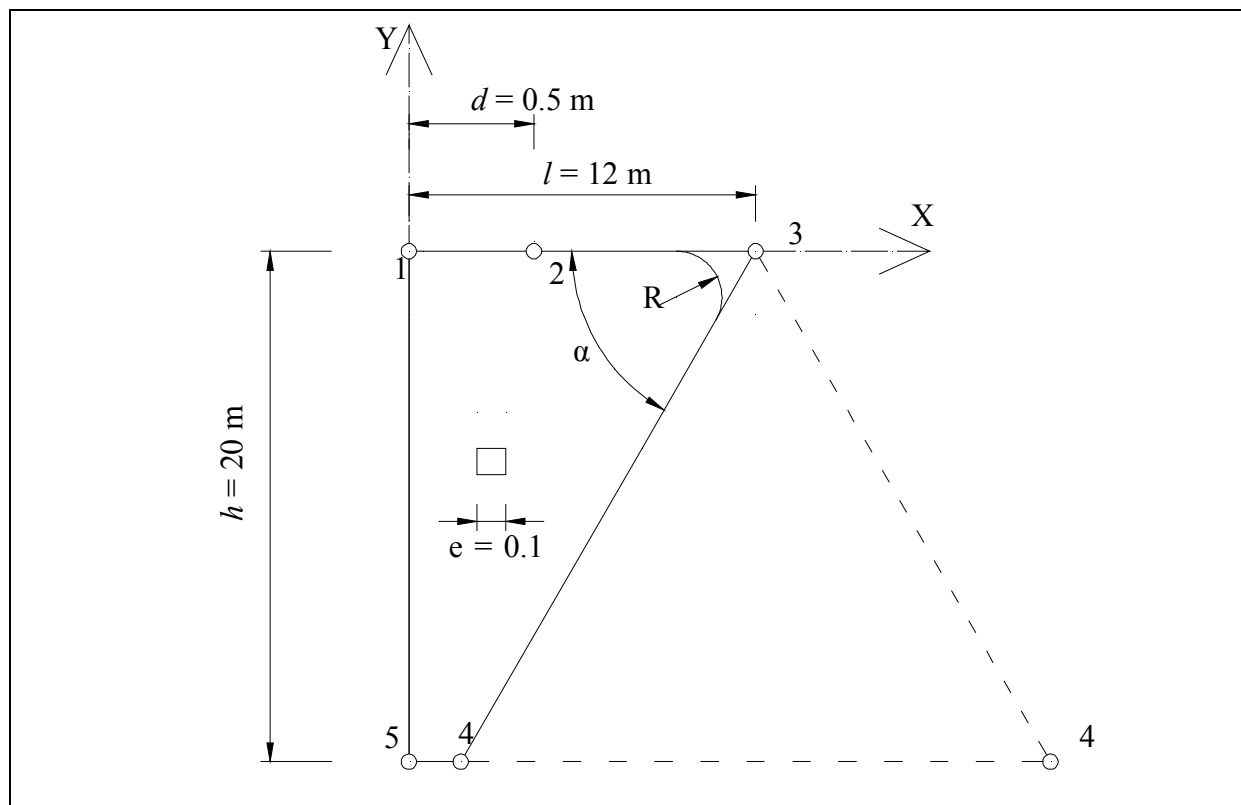
$$c_{I,\parallel} = \rho v_s A = c_{I,\perp} \frac{v_s}{v_p}. \quad (3)$$

Tuhost rovnoběžná s hranicí je pak vyjádřena jako

$$k_{I,\parallel} = k_{I,\perp} \frac{v_s}{v_p}. \quad (4)$$

Protože úloha je řešena jako osově symetrický 2D problém, musíme výše uvedené výrazy pro tuhosti a koeficienty tlumení přenásobit hodnotou $2\pi le$, protože reakce jsou počítány na povrch celého válce. Získáme tak tyto hodnoty

$$\begin{aligned} K_{I,\perp} &= k_{I,\perp} 2\pi le = 62 \cdot 10^6 \cdot 2\pi le = 467.5 \cdot 10^6 \text{ (N/m)} , \\ K_{I,\parallel} &= K_{I,\perp} \frac{v_s}{v_p} = 249.9 \cdot 10^6 \text{ (N/m)} , \\ C_{I,\perp} &= c_{I,\perp} 2\pi le = 366.9 \cdot 10^3 \cdot 2\pi le = 2.766 \cdot 10^6 \text{ (Ns/m)} , \\ C_{I,\parallel} &= C_{I,\perp} \frac{v_s}{v_p} = 1.479 \cdot 10^6 \text{ (Ns/m)} . \end{aligned} \quad (5)$$



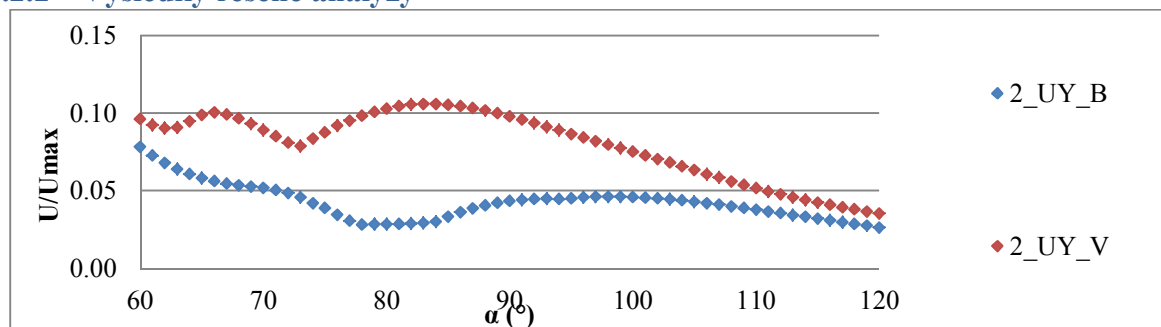
Obr. 4 Schéma řešené úlohy (2D úloha – rotační symetrie).



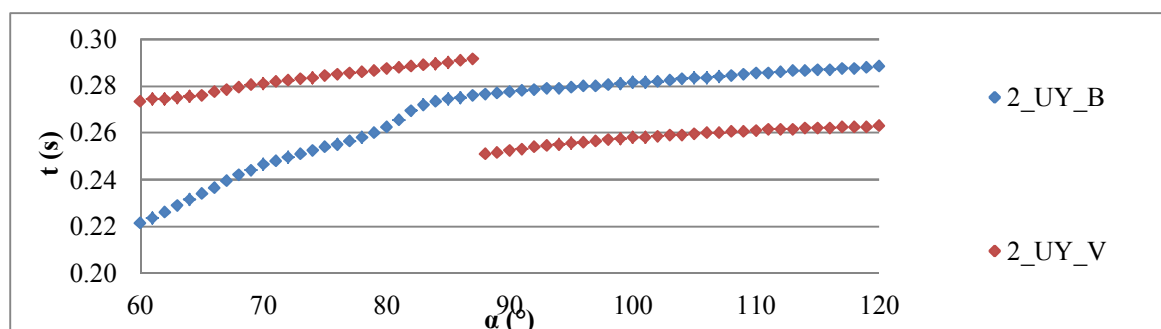
Obr. 5 Schéma zatížení.

Odezva na dané zatížení je řešena v časové oblasti implicitní Newmarkovou metodou do konečného času 0.5 s, s časovým krokem $5 \cdot 10^{-4}$ s. Tlumení je modelováno jako Rayleighovo tlumení s parametry $\alpha = 8.0784$, $\beta = 1.5158 \cdot 10^{-4}$, což odpovídá tlumení 5% pro dvojici frekvencí 15 Hz a 90 Hz.

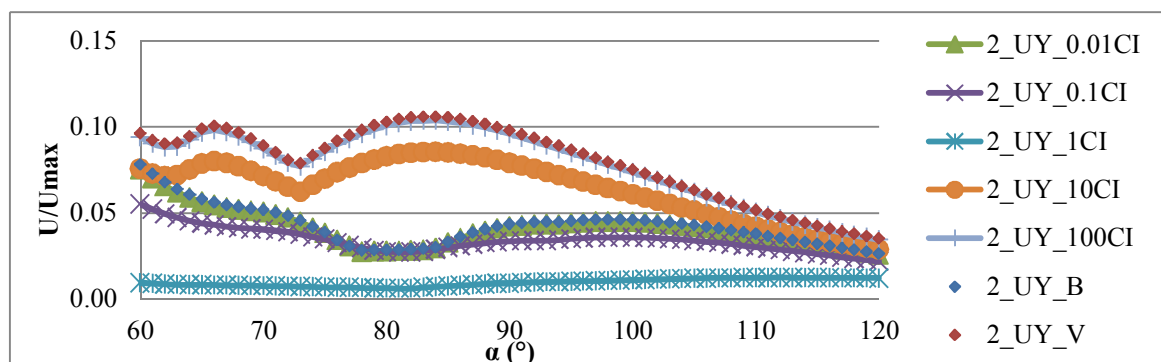
5.2.2 Výsledky řešené analýzy



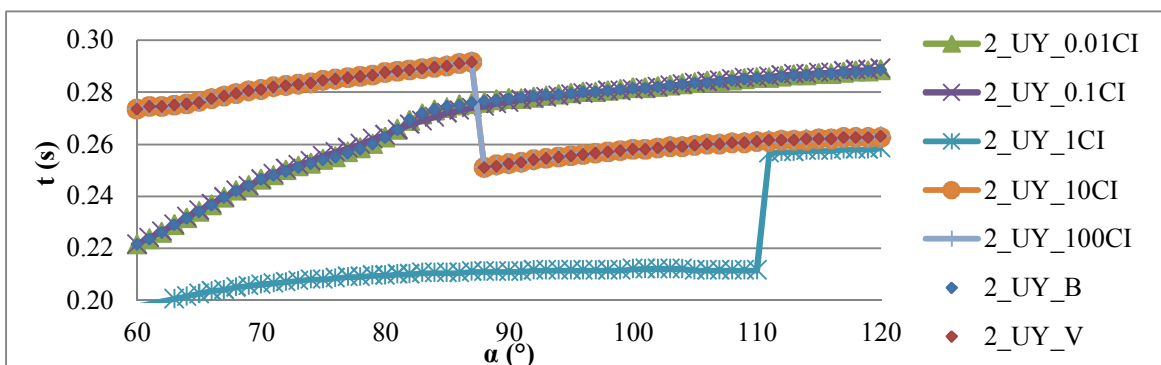
Graf 2 Relativní výchylka uzlu číslo 2 s okrajovou podmínkou volné hranice (B) a vetknutí (V). Průběhy od těchto dvou okrajových podmínek jsou zobrazeny i v ostatních grafech jako „srovnávací“.



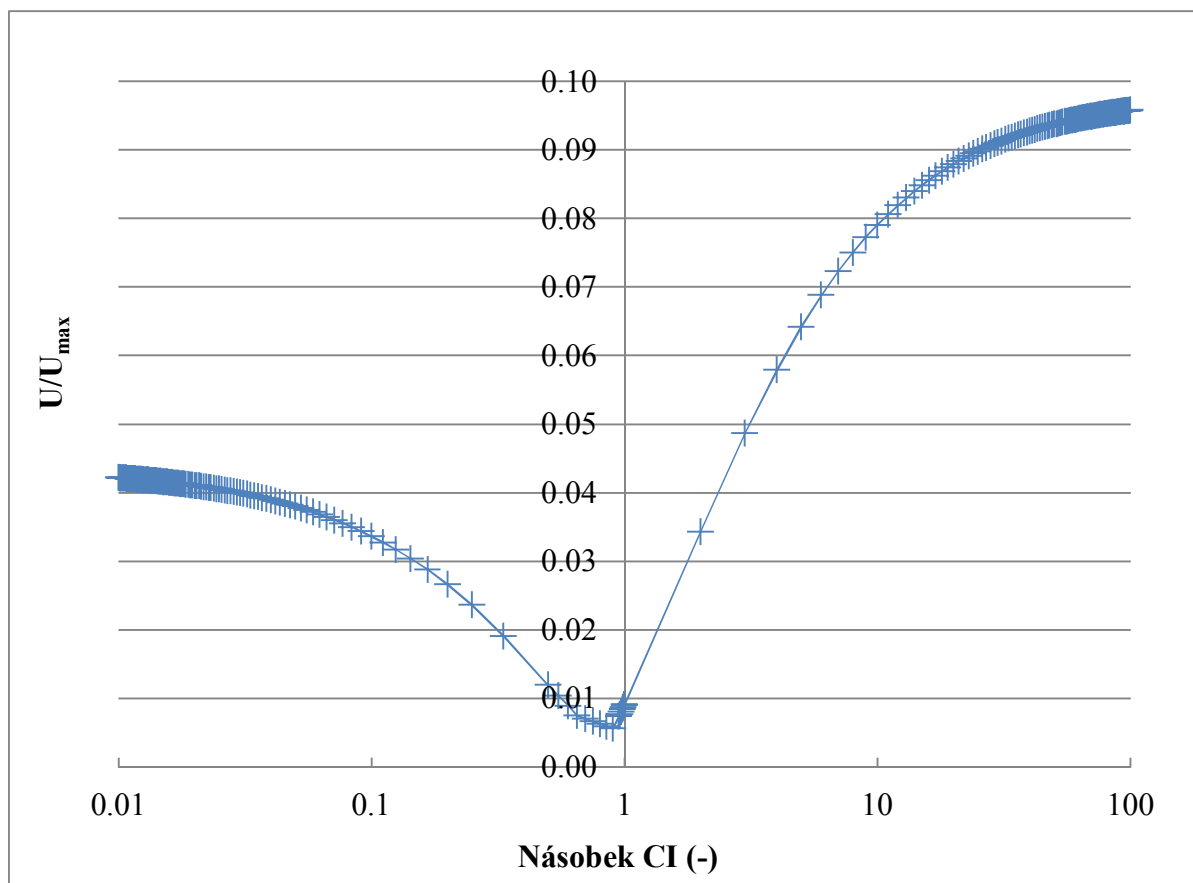
Graf 3 Čas dosažení maxima relativní výchylky uzlu číslo 2 s okrajovou podmínkou volné hranice (B) a vetknutí (V). Průběhy od těchto dvou okrajových podmínek jsou zobrazeny i v ostatních grafech jako „srovnávací“.



Graf 4 Relativní výchylka uzlu číslo 2 u modelů s okrajovou podmínkou různého násobku ideálního koeficientu viskózního tlumení.



Graf 5 Čas dosažení maxima u modelů s okrajovou podmínkou různého násobku ideálního koeficientu viskózního tlumení.



Graf 6 Relativní výchylka uzlu číslo 2 u modelu s svislou hranicí ($\alpha = 0$).

5.2.3 Závěry

Z uvedených výsledků lze konstatovat:

- Průběhy posunů bodu povrchu (celého poloprostoru) řešené úlohy mají obdobný průběh, jaký je dán teorií.
- Pro dané materiálové charakteristiky můžeme vypočítat rychlosti šíření vln prostředím $v_p = 158.11$ m/s, $v_s = 98.06$ m/s $\approx v_r$. Z hodnot rychlostí můžeme stanovit časy návratu vln k sledovanému bodu číslo 2 odražených od šikmé hranice jsou $t_{p,stěna} = 0.1486$ s, $t_{s,stěna} = 0.2396$ s. Časy návratu vln k sledovanému bodu číslo 2 odražených od spodní vodorovné hranice jsou $t_{p,dno} = 0.2530$ s, $t_{s,dno} = 0.4079$ s. Při dosažení maximální hodnoty amplitudy je zaznamenán příslušný čas dosažení maxima, z něj lze usoudit, který typ odražené vlny maximum způsobil.
- Sklon hranice modelu má značný vliv na hodnotu amplitudy odražené vlny. Tento vliv je dále závislý na okrajové podmínce.
- Na rozdíl od jednodimenzionální úlohy, kde odražená vlna má stejnou amplitudu (opačného znaménka) při odrazu od nekonečně tuhé hranice (vetknutí) a volné hranice (bez okrajové podmínky), je v prostorové úloze (s šířící se povrchovou vlnou) amplituda odražené vlny u nekonečně tuhé a volné hranice různá a závisí na úhlu α (rohový úhel). Amplituda odražené vlny od volné hranice je ve srovnání s amplitudou odražené vlny od nekonečně tuhé hranice (vetknutí) značně menší. Amplituda odražené vlny s volnou hranicí má své minimum pro $\alpha \in (78,84)^\circ$, což se shoduje s teoretickými závěry, které udávají lokální minimum energie odražené R-vlny pro úhly α blízké 80° . Lokální minimum amplitudy odražené vlny od nekonečně tuhé hranice je pro úhel $\alpha = 73^\circ$.

- U modelů se „zaoblením rohu“ je amplituda odražené vlny od nekonečně tuhé hranice se zaoblením menší než amplituda odražené vlny od volné hranice se zaoblením (dokonce je v celém intervalu menší než amplituda odražené vlny od volné hranice bez zaoblení). Z praktického hlediska není zaoblení vhodné s ohledem na pokrytí modelu sítí konečných prvků (zvláště u prostorových modelů).
- Amplituda odražené vlny modelů s pružnou Winklerovou okrajovou podmínkou se nachází téměř pro všechny případy mezi amplitudou pro nekonečně tuhou hranici a amplitudou pro volnou hranici. Obecně lze říci, že s rostoucí hodnotou tuhosti (koeficientu ložnosti) se odezva blíží odezvě s nekonečně tuhou hranicí. Pro úhel $\alpha = 70^\circ$ se amplituda odražené vlny s pružnou okrajovou podmínkou (nezávisle na tuhosti) blíží amplitudě odražené vlny s volnou hranicí.
- Naprosto stejné závěry platí pro disipativní okrajovou podmínku.
- Amplituda odražené vlny modelu s okrajovou podmínkou násobku „ideálního“ koeficientu viskózního tlumení se pro násobitel 1.0 blíží nule (má minimum pro $\alpha \in \langle 79,82 \rangle^\circ$ a je značně menší než amplituda odražené vlny od volné hranice). Amplituda odražené vlny se jednostranně blíží k amplitudě odražené vlny od volné hranice, je-li násobitel menší než 1.0 a jde-li k nule. Amplituda odražené vlny se jednostranně blíží k amplitudě odražené vlny od nekonečně tuhé hranice, je-li násobitel větší než 1.0 a jde-li k nekonečnu.
- Amplituda odražené vlny modelu s okrajovou podmínkou násobku „ideální“ tuhosti se pro násobitel 1.0 nachází mezi amplitudou s nekonečně tuhou hranicí a amplitudou s volnou hranicí. Amplituda odražené vlny se nejednostranně (v závislosti na α) blíží k amplitudě odražené vlny od volné hranice, je-li násobitel menší než 1.0 a jde-li k nule. Amplituda odražené vlny se nejednostranně (v závislosti na α) blíží k amplitudě odražené vlny od nekonečně tuhé hranice, je-li násobitel větší než 1.0 a jde-li k nekonečnu. Hodnota ideální tuhosti tedy není vhodná.
- Amplituda odražené vlny u modelů s vazkopružnou okrajovou podmínkou (kombinace „ideální“ tuhosti a „ideálního“ koeficientu viskózního tlumení) je minimální pro kombinace s násobkem ideálního koeficientu tlumení 1.0 a násobkem ideální tuhosti 0.0 nebo 0.01 (tyto odezvy jsou si vzájemně velmi blízké). Pro kombinaci 1CI nastane minimum odražené amplitudy pro $\alpha = 82^\circ$, pro kombinaci 1CI_0.01KI nastane minimum odražené amplitudy pro $\alpha = 80^\circ$, což je globální minimum ze všech řešených variant.
- Je nutné zdůraznit, že hodnota koeficientu ideálního tlumení byla počítána pro celý model ze stejného poloměru (20m). Lze tedy předpokládat dosažení zlepšení (v řádu procent) pohlcení vln pro výpočet hodnot koeficientu tlumení pro každý uzel hranice z jeho přesného poloměru. Toto zlepšení lze očekávat spíše u rohových úhlů nízkých hodnot.
- Dále byl proveden výpočet pro rohový úhel $\alpha = 90^\circ$ pro řadu hodnot násobitele „ideální“ hodnoty viskózního tlumení (bez „ideální“ tuhosti). Je zřejmé, že minimální hodnoty amplitudy odražené vlny jsou dosaženy pouze pro násobitel blízký jedničce, a to zleva (viz graf 6). Minimální hodnota amplitudy odražené vlny nastane pro násobitele „ideální“ hodnoty viskózního tlumení rovný 0.9.

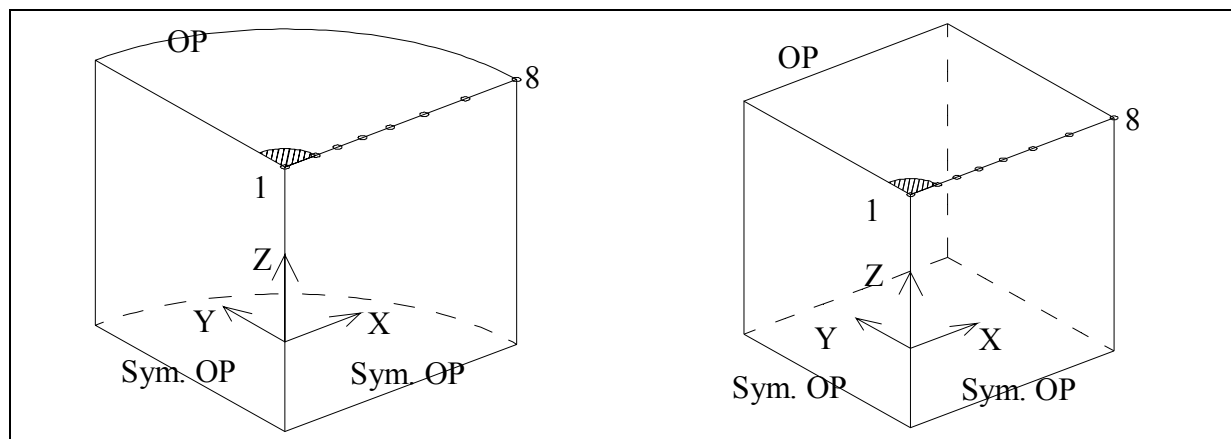
5.3 Impulz na povrchu bloku zeminy (3D model)

Tato podkapitola se věnuje stanovení vlivu okrajové podmínky a tvaru výpočtového modelu na velikost odražené vlny (amplituda i znaménko) od hranice výpočtového prostorového modelu. Zásadními otázkami, na které je hledána odpověď, jsou:

- Jaký vliv má okrajová podmínka na velikost odražené vlny?
- Jaký vliv má tvar na velikost odražené vlny?
- Lze řešit tuto úlohu s nehmotnou zeminou?

5.3.1 Popis řešení konstrukce a výpočtového modelu

Výpočtový model je tvořen železobetonovou deskou umístěnou na horním povrchu bloku zeminy. Kruhová deska výšky 0.2 m o poloměru 1 m je modelována prostorovými prvky *SOLID45*. Model podzákladí je modelován prostorovými prvky *SOLID45*, s různými materiálovými charakteristikami ve vertikálním směru, ve dvou tvarových alternativách: (i) model podzákladí ve tvaru válce o poloměru a hloubce 44 m, (ii) model podzákladí ve tvaru kvádru o stejné hloubce a objemu. Model podzákladí je dělen na 80 konečných prvků podzákladí od hranice desky ke konci modelované oblasti podzákladí v horizontálním i vertikálním směru. Okrajová podmínka na svislé hranici modelů podzákladí je uvažována ve třech variantách: (i) bez okrajové podmínky (volná hranice), (ii) vetknutí, (iii) disipativní okrajová podmínka s „ideální“ hodnotou koeficientu viskózního tlumení (popsanou v oddílu 5.2.1). Okrajovou podmínkou na spodním povrchu modelovaného bloku zeminy je vetknutí. Zatížení působící na horním povrchu desky ve směru záporné osy Z je znázorněno na obrázku 5. Jsou sledovány posuny vybraných osmi uzlů ležících v přímce na horním povrchu modelu. Sledované uzly a schéma prostorového výpočtového modelu jsou vyobrazeny na obrázku 6.



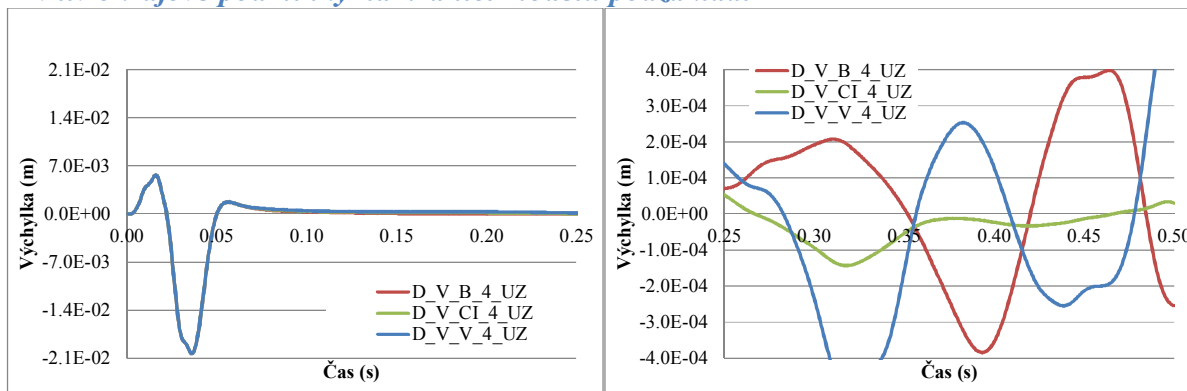
Obr. 6 Schéma výpočtového modelu.

Odezva na dané zatížení je řešena v časové oblasti implicitní Newmarkovou metodou do konečného času 0.5 s, s časovým krokem $5 \cdot 10^{-4}$ s. Tlumení je modelováno jako Rayleighovo tlumení s parametry $\alpha = 8.0784$, $\beta = 1.5158 \cdot 10^{-4}$, což odpovídá tlumení 5% pro dvojici frekvencí 15 Hz a 90 Hz.

Sledované uzly $\{1,2,3,4,5,6,7,8\}$ jsou umístěny na průniku roviny symetrie XZ a roviny horního povrchu modelu podzákladí (viz obrázek 6).

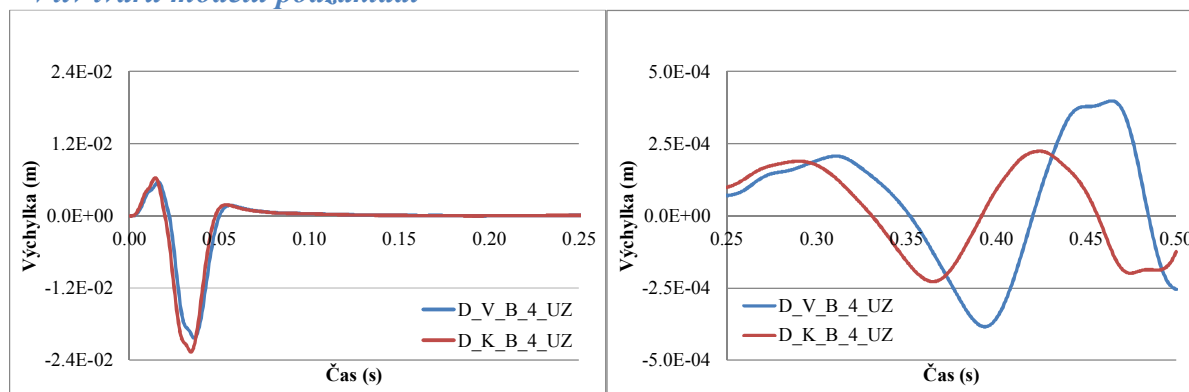
5.3.2 Výsledky řešené analýzy

Vliv okrajové podmínky na hranici modelu podzákladí



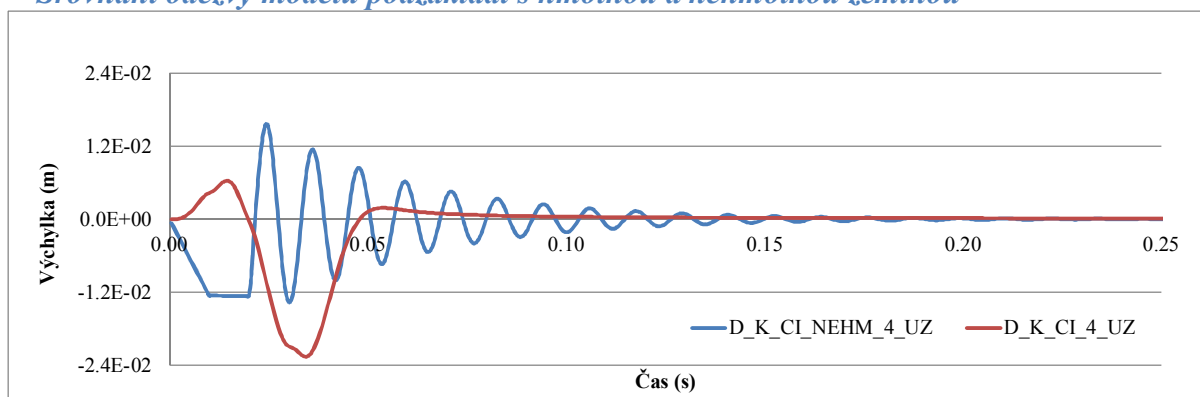
Graf 7 Vertikální výchylka uzlu číslo 4 – vliv okrajové podmínky (model tvaru válece).

Vliv tvaru modelu podzákladí



Graf 8 Vertikální výchylka uzlu číslo 4 – vliv tvaru modelu podzákladí (volná hranice).

Srovnání odezvy modelu podzákladí s hmotnou a nehmotnou zemínou



Graf 9 Vertikální výchylka uzlu číslo 4 – vliv hmotná/nehmotná zemina.

5.3.3 Závěry

Z uvedených výsledků lze konstatovat:

- Průběhy posunů bodu povrchu (celého poloprostoru) řešené úlohy mají obdobný průběh jaký je dán teorií. Pro dané materiálové charakteristiky můžeme vypočítat rychlosti šíření vln na povrchu $v_p = 1178.51 \text{ m/s}$, $v_s = 158.91 \text{ m/s} \approx v_r$, z nich následně příslušné časy dopadu vln na hranici modelované oblasti $t_p = 0.03648 \text{ s}$, $t_s = 0.2722 \text{ s}$.
- Vliv typu okrajové podmínky na průběh posunů uzlu od vlny putující směrem k hranici je nulový u uzlů vzdálených hranici. Tento vliv nepatrně roste u uzlů blízkých se hranici (je však stále zanedbatelný). Znaménka amplitud odražené vlny u okrajových podmínek vetknutí a volné hranice jsou opačná. Hodnota amplitudy odražené vlny je minimální u disipativní okrajové podmínky s „ideálním“ koeficientem viskózního tlumení. Při dopadu R-vlny (která je nositelem největší části energie, cca 67%) na volnou hranici se část vlny odráží zpět a značná část se láme a pokračuje ve formě R-vlny šířící se po volné hranici (nepatrná část se přemění na prostorovou vlnu šířící se směrem od průsečíku volné hranice a povrchu). Při dopadu R-vlny na nekonečně tuhou okrajovou podmínku (vetknutí) se téměř celá její část odráží ve formě R-vlny putující po povrchu zpět ke zdroji. Při dopadu vlnění na disipativní okrajovou podmínku s „ideálním“ koeficientem viskózního tlumení je většina energie dopadajících vln pohlcena a odráží se jen zlomek původní vlny zpět.
- Vliv tvaru modelu podzákladí nemá vliv na vlnu šířící se k hranici modelu podzákladí. Prezentované grafy výchylek mají u modelu ve tvaru válce a kvádru shodný trend s tím rozdílem, že u modelu podzákladí tvaru kvádru nastane ve většině případů upozorování výchylky dříve, protože vlnění urazí kratší cestu (hranice je ve sledovaném řezu u modelu podzákladí tvaru kvádru blíže). Tvar modelu podzákladí má velký vliv na způsob odrazu vlnění od hranice. Popis odraženého vlnění u modelu podzákladí tvaru kvádru je značně složitější, zejména u modelu s volnou hranicí.
- U modelu s nehmotnou zeminou nedochází k šíření vlnění, nedochází tak k pohybu bodů povrchu po eliptických drahách. Body povrchu oscilují po přímkových drahách, jejichž sklon ve svislé rovině závisí na vzdálenosti od zdroje vlnění. Model s nehmotnou zeminou je pro úlohy dynamiky nevhodný.

5.4 Osamělá železobetonová pilota v interakci s podzákladím (3D model)

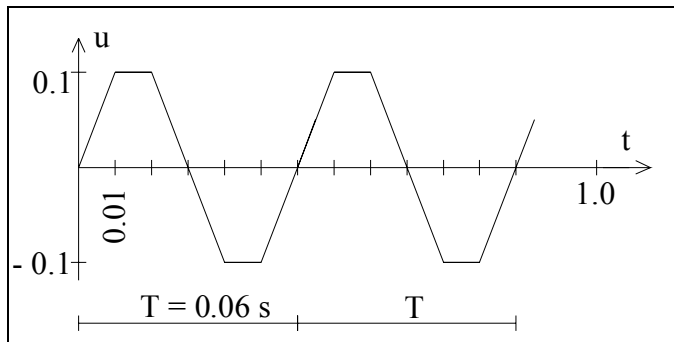
Tato podkapitola se věnuje stanovení vlivu okrajové podmínky na odezvu osamělé piloty umístěné v bloku zeminy na periodické zatížení v časové oblasti. Zásadními otázkami, na které je hledána odpověď, jsou:

- Jaký vliv má okrajová podmínka na odezvu řešené konstrukce?
- Lze řešit tuto úlohu s nehmotnou zeminou?

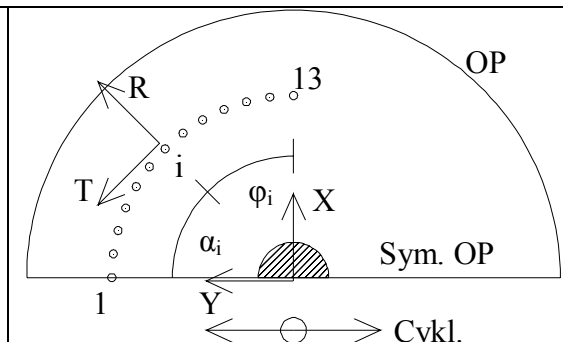
5.4.1 Popis řešené konstrukce a výpočtového modelu

Konstrukce je tvořena osamělou železobetonovou pilotou umístěnou uprostřed bloku zeminy. Hlava piloty je ve výšce 0.2 m nad povrchem, pata piloty zasahuje do hloubky 19.5 m pod povrch modelu podzákladí. Průřez piloty je kruhový o průřezové ploše 0.16 m^2 . Model podzákladí ve tvaru válce o poloměru a výšce 44 m je modelován prostorovými prvky *SOLID45* s měnícími se materiálovými charakteristikami ve vertikálním směru. Výpočtový model podzákladí je dělen na 80 konečných prvků od průsečíku piloty s horním povrchem modelu podzákladí ke konci modelované oblasti podzákladí v horizontálním i vertikálním

směru. Okrajová podmínka na svislé hranici modelů podzákladí je uvažována ve třech variantách: (i) bez okrajové podmínky (volná hranice), (ii) vetknutí, (iii) disipativní okrajová podmínka s „ideální“ hodnotou koeficientu viskózního tlumení (popsanou v oddílu 5.2.1). Okrajovou podmínkou na spodním povrchu modelovaného bloku zeminy je vetknutí. Zatížení působící na horním povrchu hlavy piloty ve směru osy Y je modelováno periodickou funkcí (viz obrázek 7). Půdorysné schéma výpočtového modelu je vyobrazeno na obrázku 8.



Obr. 7 Schéma zatížení.

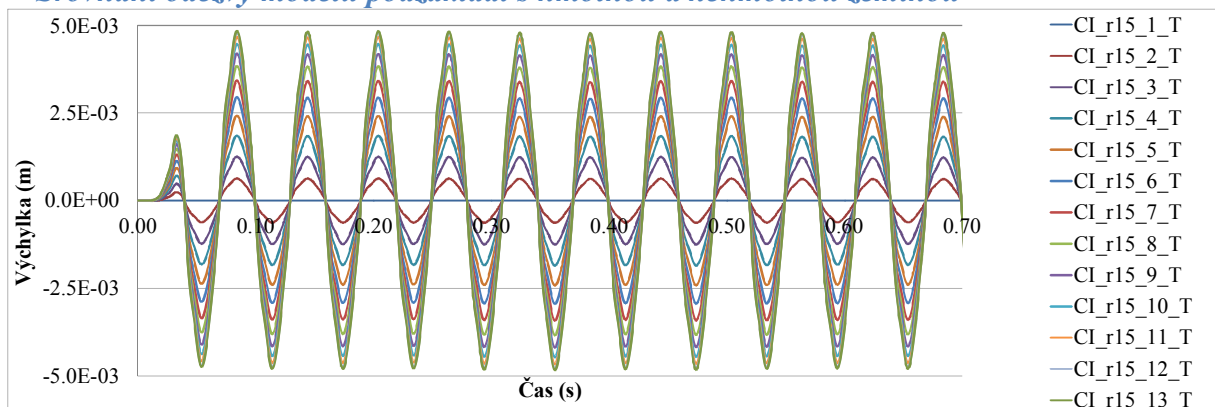


Obr. 8 Schéma řešené úlohy.

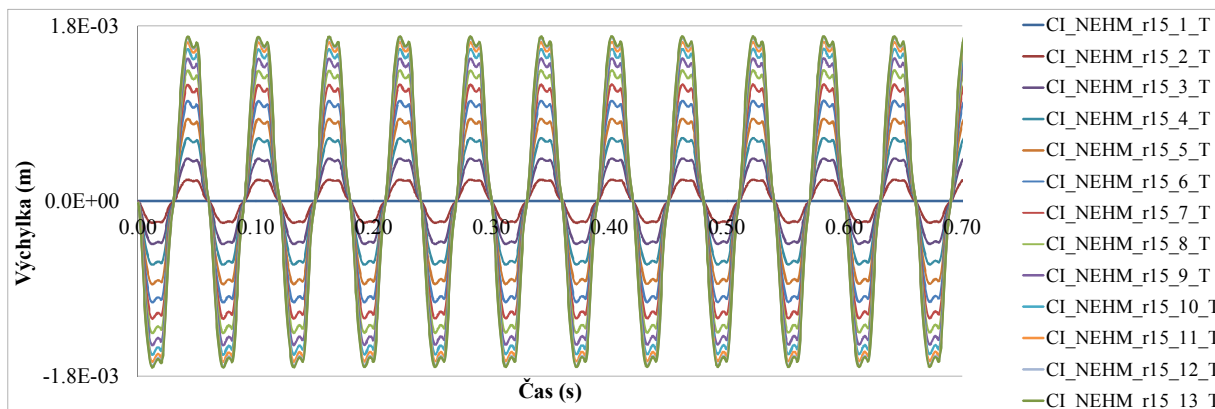
Odezva na dané zatížení je řešena v časové oblasti implicitní Newmarkovou metodou do konečného času 1.0 s, s časovým krokem $5 \cdot 10^{-4}$ s. Tlumení je modelováno jako Rayleighovo tlumení s parametry $\alpha = 8.0784$, $\beta = 1.5158 \cdot 10^{-4}$, což odpovídá tlumení 5% pro dvojici frekvencí 15 Hz a 90 Hz.

5.4.2 Výsledky řešené úlohy

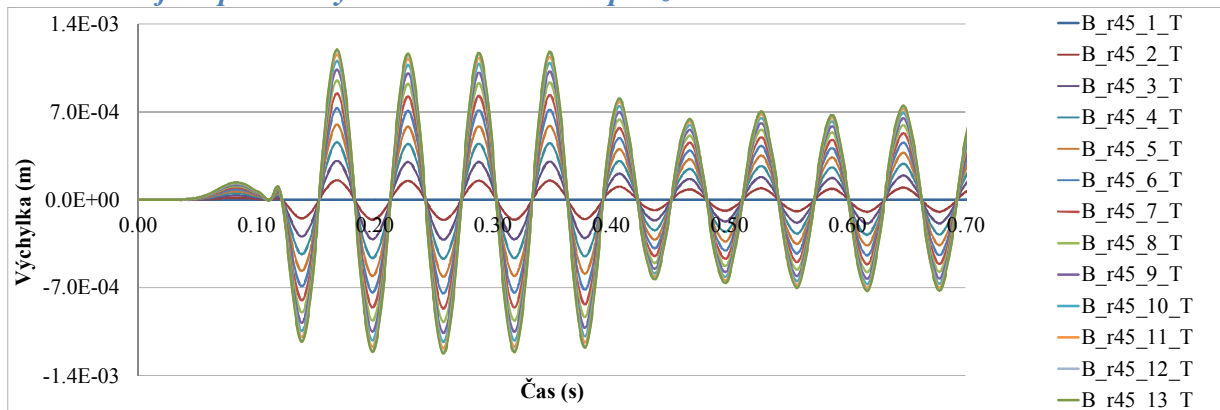
Srovnání odezvy modelu podzákladí s hmotnou a nehmotnou zeminou



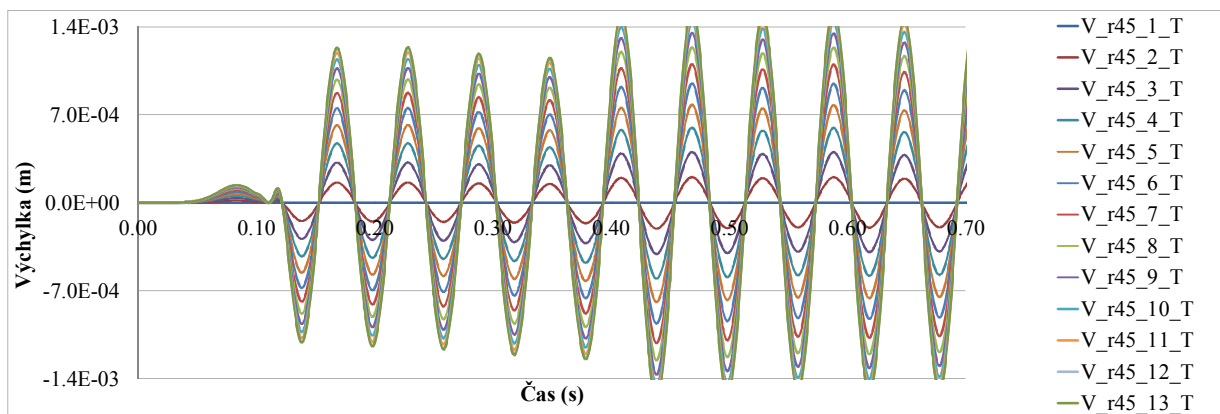
Graf 10 Výchylka sledovaných uzlů –model s hmotnou zeminou.



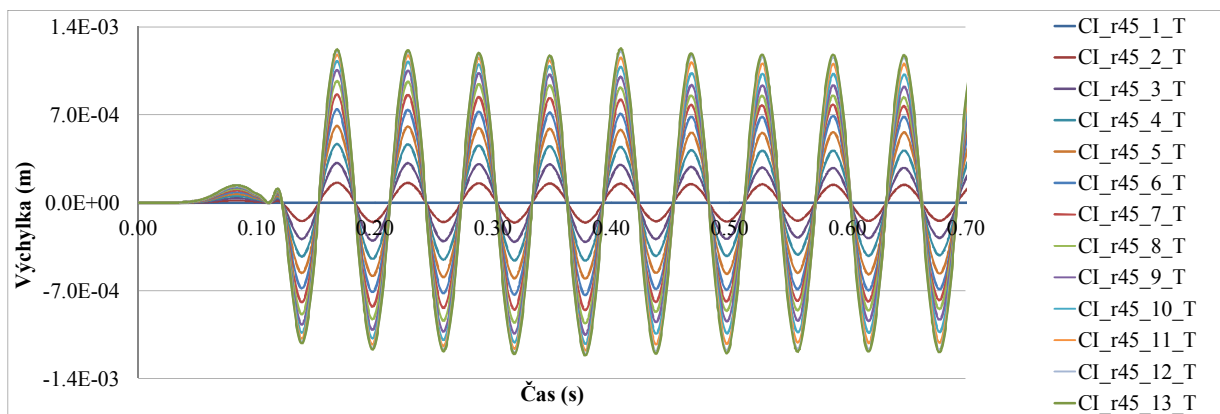
Graf 11 Výchylka sledovaných uzlů –model s nehmotnou zeminou.

Vliv okrajové podmínky na hranici modelu podzákladí

Graf 12 Výchylka sledovaných uzlů – volná hranice.



Graf 13 Výchylka sledovaných uzlů – vetknutí.

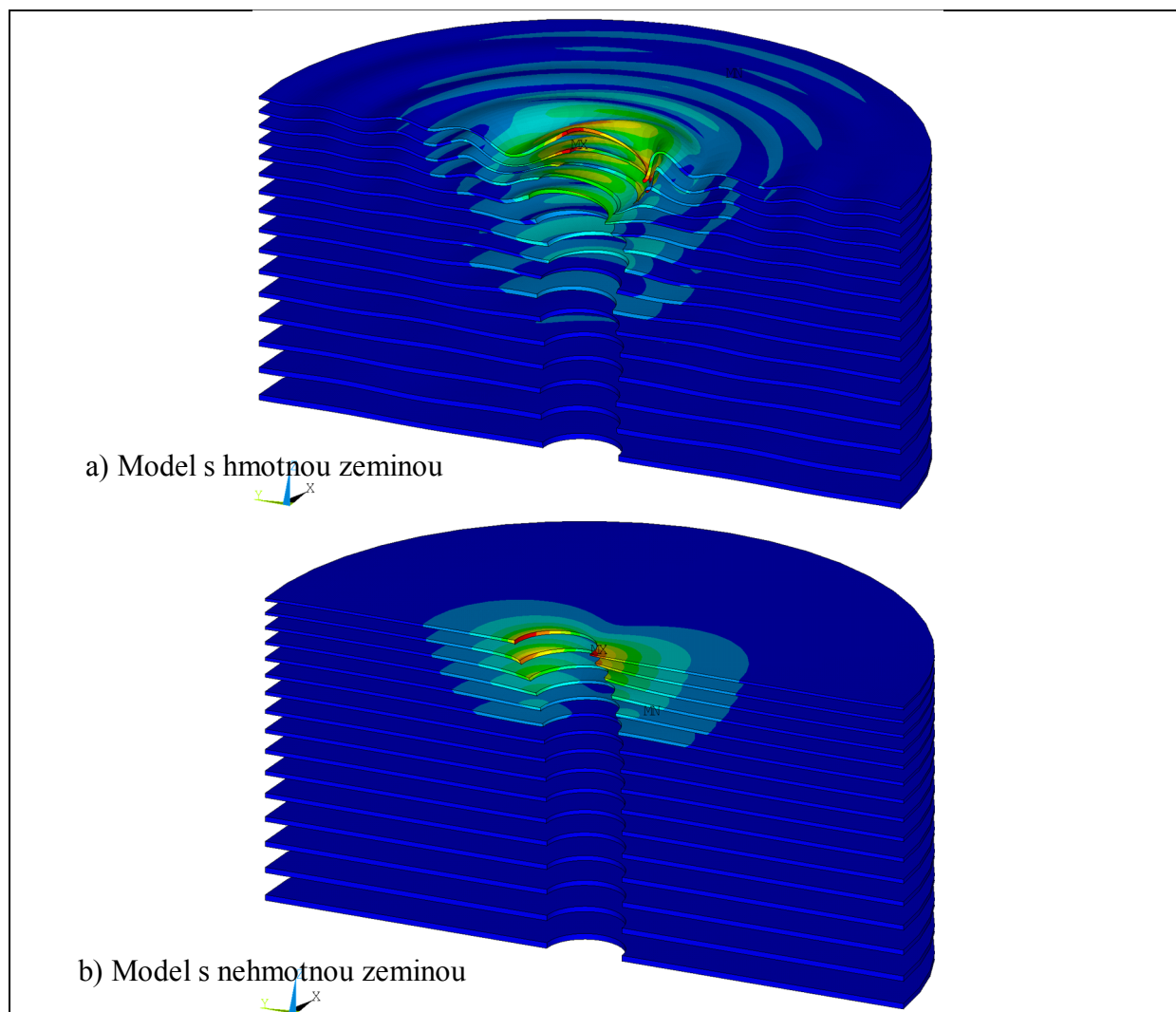


Graf 14 Výchylka sledovaných uzlů – disipativní okrajová podmínka.

5.4.3 Závěry

Z uvedených výsledků lze konstatovat:

- Pro dané materiálové charakteristiky můžeme vypočítat rychlosti šíření vln na povrchu modelu $v_p = 1178.51 \text{ m/s}$, $v_s = 158.91 \text{ m/s} \approx v_r \approx v_l$. Z rychlostí pak stanovíme čas dopadu první sekundární vlny na hranici modelované oblasti $t_s = 0.2754 \text{ s}$, časy doražení první odražené sekundární vlny k sledovaným řadám uzlů jsou $t_{r75} = 0.3012 \text{ s}$, $t_{r45} = 0.4245 \text{ s}$, $t_{r15} = 0.5159 \text{ s}$.
- Odraz vlnění od okrajové podmínky s „ideálním“ koeficientem viskózního tlumení je minimální. Odraz vlnění od vetknutí a volné hranice je znatelně větší a amplitudy těchto odražených vln mají vzájemně opačné znaménko.
- U modelu s nehmotnou zeminou nedochází k šíření vlnění (viz obrázek 9), nedochází tak k pohybu bodů povrchu po eliptických drahách. Body povrchu oscilují po přímkových drahách, jejichž sklon ve svislé rovině závisí na vzdálenosti od zdroje vlnění. U modelů s nehmotnou zeminou nabývá odezva řádově jiných hodnot, zejména ve vertikálním směru. Odezvy modelu s nehmotnou zeminou pro různé časy jsou lineárně závislé.



Obr. 9 Celkové posuny vybraných vrstev podzákladí, rozdíl modelu s hmotnou a nehmotnou zeminou ($t = 1.0 \text{ s}$).

5.5 Železobetonový základ v interakci s podzákladím

Tato podkapitola se věnuje komplexnímu srovnání odezvy analýz základních úloh dynamiky modelu konstrukce s prostorovým modelem podzákladí s modely pružin na podloží. Bližší specifikace hledaných klíčových otázek je uvedena v jednotlivých oddílech. Konstrukcí na níž je provedeno srovnání je stolový základ s kompresorem a parní turbínou umístěný na pilotách (podrobný popis je uveden v disertační práci).

Model podzákladí

Model podzákladí je vytvořen v pěti variantách: (i) prostorový model podzákladí, (ii) prostorový model podzákladí s nehmotnou zemínou, (iii) pružiny na pilotách „nahrazující“ tuhost prostorového modelu podzákladí (vypočítané z jednotkového posunutí, viz dále), (iv) pružiny a tlumiče na pilotách – ekvivalentní model, (v) pružiny, tlumiče a osamělé hmoty na pilotách – ekvivalentní model.

Ad (i) Prostorový model podzákladí. Jsou vytvořeny tři varianty prostorového výpočtového modelu, použitým prvkem je prvek *SOLID45* jehož materiálové charakteristiky se mění v závislosti na vertikální poloze těžiště prvku, dle vztahu. Modely jsou vytvořeny ve tvarové variantě válce s následujícím poloměrem a dělením na konečné prvky (v radiálním směru): 18 m (16 prvků), 31 m (28 prvků), 44 m (40 prvků). Menší model vznikl vždy odebráním dvanácti řad prvků z většího modelu. Počet konečných prvků ve vertikálním směru je vždy 40 od spodní hrany základu k modelované hranici podzákladí. Na svislé hranici je disipativní okrajová podmínka s „ideálním“ koeficientem viskózního tlumení, Na spodní hranici modelované oblasti podzákladí je vetknutí.

Ad (ii) Prostorový model podzákladí s nehmotnou zemínou. Je vytvořena jedna varianta prostorového modelu s nulovou objemovou tíhou. Jedná se o největší variantu prostorového modelu popsaného výše.

Ad (iii) Pružiny na pilotách „nahrazující“ tuhost prostorového modelu podzákladí. Tuhost prostorového modelu je nahrazena třemi ortogonálními pružinami v každém uzlu piloty výpočtového modelu. Tuhost je získána odečtením reakcí vypočítaných z jednotkového posunutí ve směru osy X, Y a Z.

Ad (iv) a ad (v) pružiny (osamělé hmoty) a tlumiče na pilotách. Parametry jsou získány z ekvivalentního modelu popsaného v teoretické části dizertační práce.

5.5.1 Modální analýza

Je řešena modální analýza, která se věnuje výpočtu frekvencí a tvarů vlastního kmitání základu v interakci s různými modely podzákladím. Zásadními otázkami, na které je hledána odpověď, jsou:

- Jaký je vliv modelů podzákladí na spektrum frekvencí vlastního kmitání?
- Lze v daném spektru určit významné tvary vlastního kmitání?
- Jak normovat vlastní vektory (na matici hmotnosti, na jedničku)?
- Je zásadní rozdíl v náročnosti výpočtu modální analýzy u jednotlivých modelů?

Jsou sledovány a srovnány hodnoty frekvence vlastního kmitání u všech modelů. U modelů s hmotnou zemínou je dále porovnávána hodnota frekvencí vybraných vlastních tvarů stejného čísla. Pro určení „významných“ tvarů vlastního kmitání je sledována průměrná absolutní hodnota vlastního vektoru uzlů konstrukce a uzlů povrchu zeminy. Je sledován vliv modelů podzákladí na sledované veličiny popsané výše.

Závěry

Z uvedených výsledků lze konstatovat:

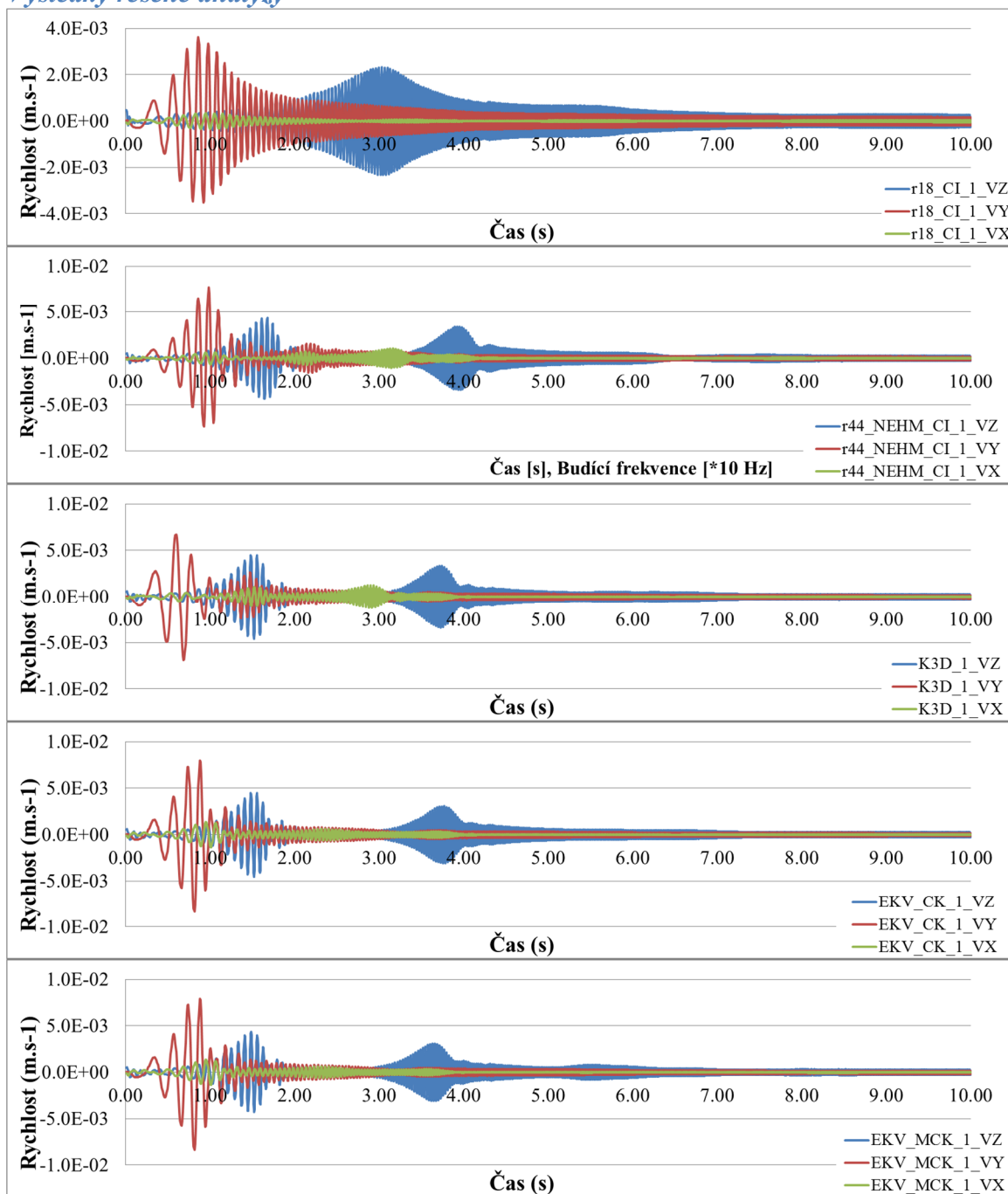
- Z výsledků modální analýzy lze pozorovat velký rozdíl v trendu závislosti frekvence vlastního kmitání na číslu vlastního tvaru u výpočtových modelů s prostorovým modelem podzákladí s hmotnou zeminou a u ostatních porovnávaných modelů. Hmotný prostorový model podloží zásadně mění spektrum frekvencí vlastního kmitání.
- Spektrum frekvencí vlastního kmitání u modelů s pružinami na pilotách je vzájemně velmi podobné. Z grafu závislosti frekvence vlastního kmitání na číslu vlastního tvaru kmitání jsou u těchto modelů rozpoznatelné „násobné“ frekvence kmitání pilot (dvacet čtyři téměř shodných vlastních frekvencí odpovídající dvanácti pilotám, kde každá kmitá ve dvou směrech).
- Model s pružinami na pilotách nahrazující tuhost prostorového modelu (K3D) je ze zjednodušených modelů nejbližší hmotnému prostorovému modelu.
- Přidaná hmota u ekvivalentního modelu nepatrně vylepšila vlastnosti modelu, ne však zásadně.
- Hledání (stanovení) významných tvarů vlastního kmitání u modelů s hmotným prostorovým modelem podzákladí není triviální problém. Způsob normování vlastních vektorů významně ovlivní počet vybraných významných tvarů vlastního kmitání (zvláště u tvarů s vyšší frekvencí vlastního kmitání). Normování vlastních vektorů na matici hmotnosti je pro výběr „významných“ tvarů méně vhodné, vlastní tvary jsou zkreslené kmitající hmotou podzákladí. Což lze považovat za nevýhodu, protože některé na modální analýzu navazující analýzy oblasti dynamiky (například metoda lineárních spekter odezvy) vyžadují normování tvarů vlastního kmitání na matici hmotnosti. Pro výběr významných tvarů vlastního kmitání se jeví jak nejvýhodnější sledování průměrné absolutní hodnoty vlastního vektoru sledovaných uzlů konstrukce normovaného na jedničku. Za významný tvar lze pak považovat tvar s „vysokou“ hodnotou průměrné výchylky konstrukce, nebo tvar s „nízkou“ hodnotou průměrné výchylky povrchu zeminy. Stanovení hranice „vysoká“ („nízká“) je však obtížné.
- Z parametru průměrné absolutní hodnoty vlastního vektoru sledovaných uzlů lze určit oblasti „významných“ tvarů kmitu. U modelů s prostorovým modelem podzákladí s hmotnou zeminou jsou to oblasti blízké frekvencím {10,30,45} Hz. U ostatních řešených modelů jsou to oblasti blízké frekvencím {8,12,25,35,60,90} Hz.
- Na základě určených „významných“ tvarů vlastního kmitání lze určit odhad rezonančních oblastí. Vzájemným porovnáním grafů a tabulek výsledků modální analýzy a odezvy na dynamické buzení můžeme usoudit, že odhad rezonančních oblastí na základě „významných“ vlastních tvarů je v řešené oblasti přesný.
- Počet „významných“ tvarů vlastního kmitání se u modelů s hmotnou a nehmotnou zeminou značně liší. Shrňme-li „významné“ tvary vlastního kmitání sobě blízké frekvence u modelů s hmotnou zeminou do jedné rezonanční oblasti, můžeme konstatovat, že počet rezonančních oblastí u modelů s hmotnou zeminou je větší než počet „významných“ tvarů vlastního kmitání u modelů s nehmotnou zeminou. Navíc rezonanční oblasti u modelů s hmotnou zeminou mají ve srovnání s „významnými“ vlastními tvary kmitu u modelů s nehmotnou zeminou různou hodnotu vlastní frekvence.
- Náročnost výpočtu (objem dat, výpočtový čas) modální analýzy je značná, zvláště u modelů s hmotným prostorovým modelem.

5.5.2 Dynamické buzení konstrukce

Tento oddíl se věnuje vyčíslení odezvy konstrukce v interakci s různými modely podzákladí na dynamické zatížení v časové oblasti a jejímu vzájemnému porovnání. Zásadními otázkami, na které je hledána odpověď, jsou:

- Umožní nám disipativní okrajová podmínka dostatečně přesné řešení s menším výpočtovým modelem?
- Je odezva prostorových modelů s hmotnou a nehmotnou zemínou shodná (blízká)?
- Je odezva prostorových modelů s hmotnou zemínou shodná (blízká) s odezvou zjednodušeným modelům pružin na pilotách?

Výsledky řešené analýzy



Graf 15 Rychlost uzlu číslo 1 (střed horní desky základu).

Závěry

Z uvedených výsledků lze konstatovat:

- Z výsledků dynamické analýzy konstrukce na dané buzení lze konstatovat, že disipativní okrajová podmínka s „ideálním“ koeficientem viskózního tlumení je velice vhodná. U modelů různé velikosti s hmotnou zeminou jsou odezvy modelů (maximální dosažené hodnoty výchylek, rychlostí i zrychlení) shodné (nepatrné rozdíly lze pozorovat u nejmenšího modelu r18 v oblasti vyšších frekvencí u uzlů podzákladí).
- Větších vzájemných rozdílů v odezvě na dané dynamické buzení lze pozorovat u modelu s nehmotnou zeminou a u zjednodušených modelů pružin na pilotách (K3D, EKV_CK, EKV_MCK). Tyto odezvy se také liší od odezvy modelů s hmotnou zeminou. Lze říci, že maximální hodnoty posunů, rychlostí a zrychlení jsou u modelů s hmotnou zeminou dva až tři krát menší než u modelu s nehmotnou zeminou a modelů pružin na pilotách. U hodnot napětí lze očekávat opačný trend.
- Srovnáme-li čas dosažení maximální výchylky u většiny modelů, dojdeme k závěru, že čas dosažení maximální výchylky je obdobný, tedy k maximální výchylce dochází u všech modelů v téměř shodné rezonanční oblasti.
- Srovnáme-li čas dosažení maximální hodnoty rychlostí a zrychlení u modelů s hmotnou zeminou a ostatních modelů dojdeme k závěru, že čas dosažení maximálních hodnot je různý, tedy k maximální hodnotě rychlosti a zrychlení dochází u modelů s hmotnou zeminou a u ostatních modelů v různých rezonančních oblastech.
- Větší rozdíly v odezvě modelů s hmotnou zeminou a ostatními modely lze pozorovat v uzlech zeminy, pilot a pro směr kolmý na rovinu zatížení (směr rovnoběžný s osou soustrojí).
- U bodu povrchu zeminy u prostorového modelu s nehmotnou zeminou lze pozorovat nevýznamné výchylky ve svislém směru (na rozdíl od modelů s hmotnou zeminou).
- Přidaná hmota u ekvivalentního modelu nemá zásadní vliv na výsledky řešené úlohy ve srovnání se stejným modelem bez přidané hmoty.

5.5.3 Generování prostorového vrstevnatého modelu podzákladí ze zadaných vrtů

Tento oddíl se věnuje vytvoření prostorového vrstevnatého výpočtového modelu podloží s vrstvami proměnné mocnosti ze sady zadaných vrtů s využitím jazyka APDL. Zásadními otázkami, na které je hledána odpověď, jsou:

- Je možné využít APDL pro efektivní generování složitějšího prostorového modelu s vrstvami proměnné mocnosti?
- Lze stejného principu využít pro prostorové rozložení materiálových charakteristik?
- Jsou nějaké nevýhody prezentovaného přístupu?

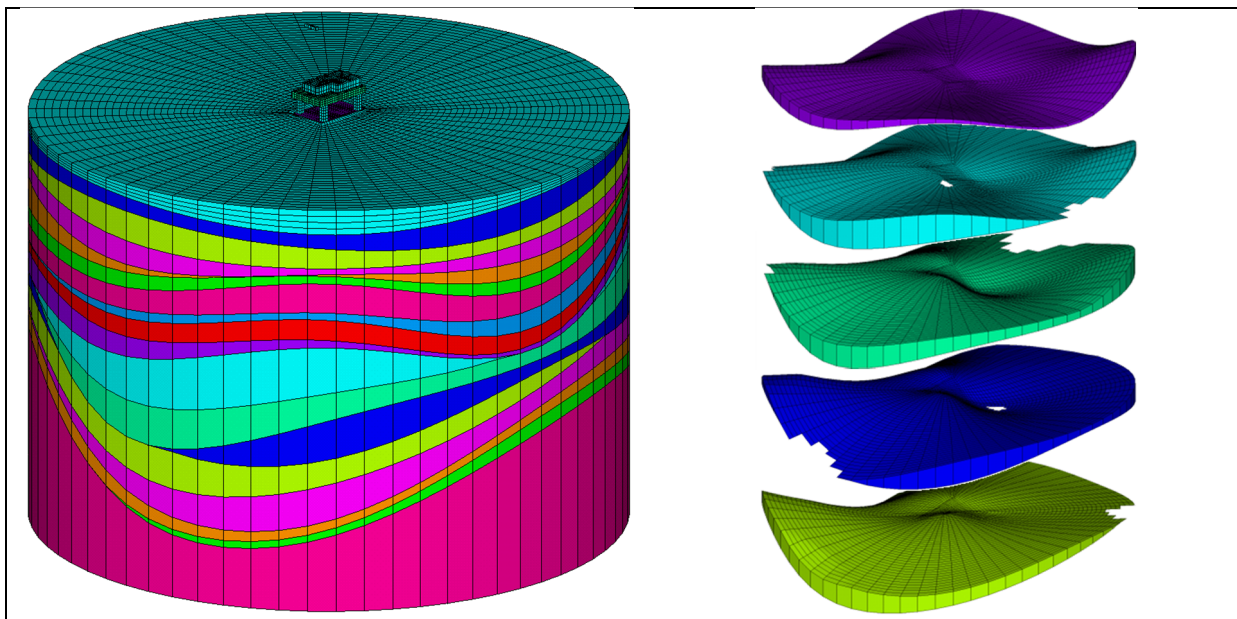
V běžné stavební praxi (i prostorové modely v předchozím oddílu) je naprostá většina výpočtových modelů podzákladí modelována jako po sobě jdoucí sled vrstev konstantní mocnosti, a to z několika možných důvodů: (i) model zahrnuje malou oblast podloží na niž je proměnlivost vlastností zanedbatelná, (ii) nepoměrně jednodušší vytváření výpočtového modelu a jeho následná kontrola, (iii) nedostatek vstupních dat a jejich přesnost. V následujícím textu je prezentován postup vytvoření prostorového výpočtového vrstevnatého modelu s vrstvami proměnné mocnosti ze zadané sady vrtů.

APDL

APDL je programovací skriptovací jazyk programového systému ANSYS vycházející z programovacího jazyka FORTRAN. Dále je rozšířen o sadu příkazů a funkcí umožňující vytvoření, úpravu, smazání a zjištění libovolné informace týkající se kterékoliv entity (klíčového bodu, linie, plochy, objemu, prvku, uzlu, ...) v prostředí ANSYS. Při vytváření algoritmu je využito obsáhlých manuálu systému ANSYS.

Ukázka vygenerovaného modelu podzákladí se strojem

Na následujícím obrázku je ukázka vygenerovaného modelu pod řešeným základem se strojem. Model je vygenerován na úrovni objemů a je možno ho dále jednoduše upravovat. Například pro zapuštění modelu základu hlouběji do bloku zeminy je horní vrstva rozdělena a v blízkosti základu jsou souřadnice navázány na základ. Dále jsou automaticky změněny vlastnosti objemů pilot, to by však bylo vhodnější provést až na úrovni konečných prvků (pata piloty by pak mohla zasahovat dovnitř vrstvy). Následně jsou objemy pokryty sítí konečných prvků. Ukázka vygenerovaných objemů viz obrázek 1 a 10.

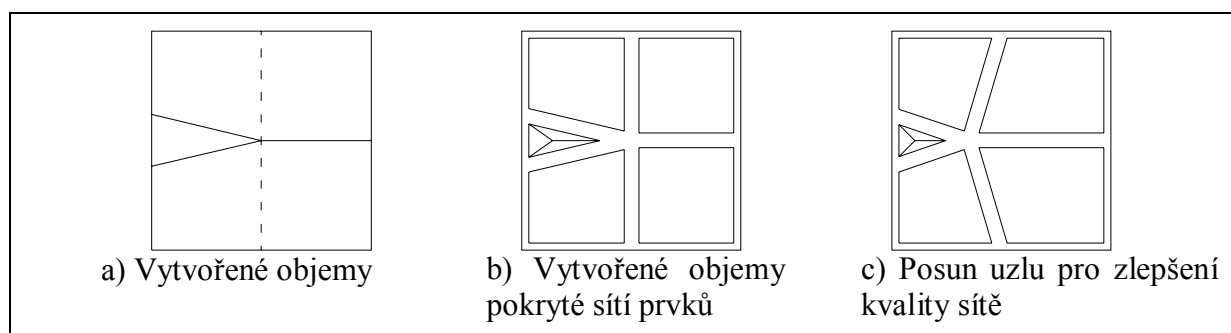


Obr. 10 Vygenerované objemy výpočtového modelu podzákladí s konstrukcí.

Závěry

Z uvedeného lze konstatovat:

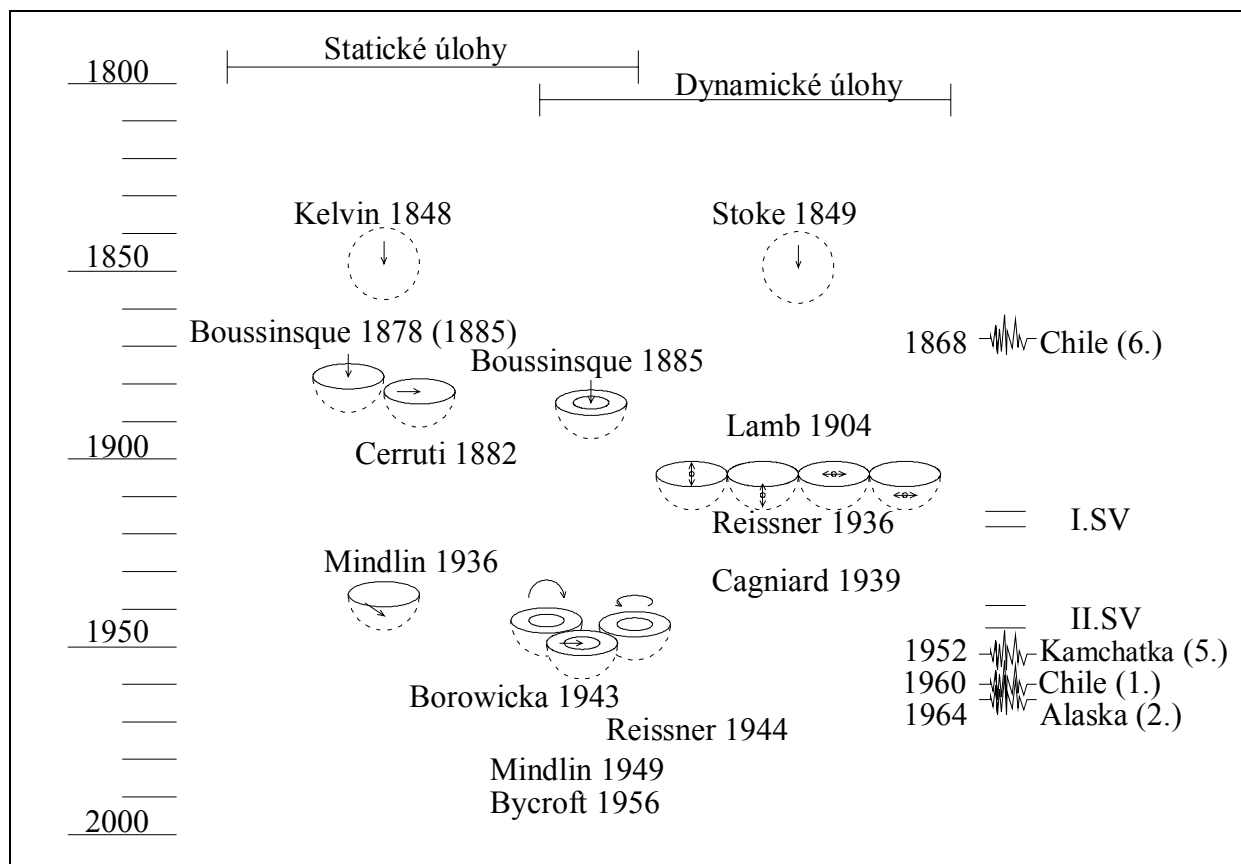
- Skriptovací jazyk APDL lze považovat za mocný nástroj, s jehož využitím lze automatizovat jak vytváření, tak výpočet i vyhodnocování v programovém prostředí ANSYS.
- Je ukázáno, že vytvoření univerzálního relativně složitěho generátoru podzákladí je s využitím APDL relativně snadné. Celková délka kódu je cca 340 řádků, z toho téměř polovinu zabírá generování objemů vrstev. Na takto vytvořený model pokrytý sítí konečných prvků je dále možno aplikovat automatické vytvoření okrajové podmínky s ideálním koeficientem viskózního tlumení opět pomocí APDL.
- Obdobným způsobem lze měnit libovolnou vlastnost (např. materiálovou charakteristiku) prvku (popřípadě celého objemu) v závislosti na poloze v prostoru, číslu vrstvy, mocnosti vrstvy, atd. Drobnou nevýhodou zde může být náročnější kontrola takto vygenerovaného modelu.
- Výhodou prezentovaného přístupu je jeho univerzálnost a možnost vytvoření přesného složitějšího modelu s možností vymizení (vyklínování) vrstvy.
- Možnost vymizení vrstvy lze však považovat za drobnou komplikaci při tvorbě sítě konečných prvků. Nesmíme zapomenout, že ne každý n-stěn lze pokrýt mapovanou sítí. Z toho důvodu může vzniknout několik prvků horší kvality v oblasti vymizení vrstev. Jejich kvalitu lze opět zlepšit automatickým posunutím uzlu (či klíčového bodu) s využitím APDL, viz následující schéma.



Obr. 11 Schéma zlepšení kvality sítě u objemů tvaru klínů.

6 Závěry a shrnutí

Problematika úloh interakce konstrukce s podzákladím se prolíná řadou vědních oborů a je v zájmu vědeckých pracovníků, matematiků a inženýrů po řadu desetiletí. Do historie této problematiky se nesmazatelně zapsala řada autorů a světových událostí (obrázek 12).



Obr. 12 Časové schéma významných historických událostí týkajících se problematiky interakce konstrukce s podzákladím.

Jako první významná událost je uvedeno získání analytického řešení napjatosti od osamělé statické síly působící v **prostoru**, které odvodil Sir Thomson (více známý jako Lord Kelvin). O rok později se objevují první zmínky o ekvivalentní úloze v oblasti dynamiky, tedy řešení napjatosti v prostoru od osamělé harmonické síly. Stokes vyjádřil řešení v uzavřené formě v libovolném místě prostoru v časové i frekvenční oblasti (na tuto úlohu se odkazuje celá řada dalších problémů a metod a stala se i jedním ze základních kamenů metody hraničních prvků).

Další kapitolou je řešení napjatosti v pružném **poloprostoru** od různého zatížení. Úlohu osamělé síly působící kolmo na povrch pružného poloprostoru zformuloval známý francouzský matematik Boussineque roku 1887, kompletní vyřešení této úlohy mu trvalo sedm let. V tomto mezidobí vyřešil úlohu osamělé síly působící rovnoběžně s povrchem pružného poloprostoru italský matematik Cerruti. O více než půlstoletí později vyjádřil řešení napjatosti v pružném poloprostoru od libovolné síly (působící nejen na povrchu, ale i uvnitř poloprostoru) americký mechanik Mindlin. Úlohu harmonické síly působící na povrchu pružného poloprostoru formuloval Lamb roku 1936. Pro nedostatečně silný matematický aparát a nemaje možnosti numerické integrace pomocí výpočetní techniky, byl Lamb schopen vyjádřit řešení napjatosti pouze v oblastech vzdálených od působící síly. Na jeho práci navázali více než o třicet let později Reissner a později Cagniard, který dokázal vyčíslit dvojné integrály zformulované Lambem.

Další oblastí jsou úlohy odezvy **kruhového základu** na různé druhy zatížení umístěného na pružném poloprostoru. U těchto úloh se prolíná oblast statického a dynamického pojetí. Přesněji řečeno staticky odvozené veličiny jsou používány u dynamických modelů. Svislou tuhost (kolmo na povrch poloprostoru) zemního prostředí pod kruhovým základem odvodil již Boussinesqu (ke stejnému závěru za jiných předpokladů došel později Reissner a také Timoschenko a Goodier). Tuhost proti pootočení kruhového základu v rovině kolmé na povrch poloprostoru odvodil Borowicka, tuhost proti pootočení kruhového základu v rovině povrchu poloprostoru za předpokladu lineárního průběhu napětí odvodil Reissner. Vodorovnou tuhost (rovnoběžnou s povrchem poloprostoru) zemního prostředí pod kruhovým základem odvodil Mindlin, k nepatrně jinému závěru (zvláště pro hodnoty nízkého součinitele příčné kontrakce) došel později Bycroft.

Vývoj v problematice úloh interakce byl také ovlivněn několika významnými **světovými událostmi** a to zejména světovými válkami (první metody pro řešení dynamických úloh interakce konstrukce s podzákladím byly založeny na experimentech provedených během druhé světové války v Německu). Dále pak několika ničivými seismickými událostmi. Významné bylo také sestavení prvního jaderného reaktoru roku 1942 v Chicagu, první jaderné elektrárny roku 1954 v tehdejší Sovětské svazu, a také výstavba radarových obranných systémů na počátku studené války.

Mezi významné osobnosti, které zásadním způsobem přispěly do oblasti geotechniky, patří pražský rodák, profesor Harvardské univerzity a zakladatel mechaniky zemin, Karl Terzaghi. Dalšími uznávanými odborníky v oboru interakce konstrukce s podzákladím je dvojice Vladimír Kolář a Ivan Němec, jejichž povrchový model podzákladí lze považovat za nejlepší statický model vůbec. Oblastí dynamických výpočtů interakce konstrukce s podzákladím (případně s kapalinou) se zabývají také Vlastislav Salajka a Viktor Kanický. Na Slovensku v tomto oboru působí Norbert Jendželovský a Juraj Králik.

Z prezentovaných výsledků analýz je nutné zdůraznit tato konstatování:

- Řešení úlohy vlastních čísel pomocí řešení **charakteristické rovnice** je možné pouze u relativně jednoduchých systémů. Můžeme sledovat vliv změny parametru systému či přidání (odebrání) stupně volnosti na změnu hodnoty frekvence vlastního kmitání soustavy. I tak lze však tento přímý přístup považovat za neefektivní, zvláště se stoupajícím počtem stupňů volnosti. Průzkum a studium těchto jednoduchých systémů má však svůj význam a je důležité pro pochopení složitějších systémů.
- Porovnáním výsledků (pole posunutí a pole napjatosti) modelu pružného poloprostoru dle **Boussinesqa** a MKP modelu v prostředí ANSYS musíme konstatovat téměř naprostou shodu (s očekávanou výjimkou oblasti blízké okrajové podmínky). Boussinesqova úloha napětí je velice důležitá a na její výsledky se odkazuje (navazuje) řada dalších úloh (metoda hraničních prvků, Hertzův kontakt). Důležitým poznatkem je sledovaný vliv geometrické závislosti. Libovolnou veličinu lze vyjádřit jako součin dvou funkcí, kde první (složitější) funkce je závislá pouze na sférické souřadnici úhlu a druhá je funkce vzdálenosti od působíště síly (tedy pouze $1/r$ pro posuny, nebo $1/r^2$ pro napětí).
- Porovnáním výsledků (rychlostí, deformací) šíření vln výpočtovým MKP modelem s teoretickými předpoklady můžeme konstatovat kvalitní shodu. Je nutné dodržet maximální **velikost konečného prvku** v závislosti na rychlosti šíření vln daným materiálem.
- Existuje vhodná **disipativní okrajová podmínka** s ideálním koeficientem viskózního tlumení závislým pouze na materiálových charakteristikách daného média. U této

okrajové podmínky je dosaženo téměř ideálního pohlcení dopadající vlny a lze tak konstatovat, že je nesrovnatelně vhodnější okrajovou podmínkou v úlohách dynamiky než běžně používané vetknutí a kluzné roviny. Tato okrajová podmínka musí být vždy modelována ve všech směrech posunů, tedy kolmo i rovnoběžně s hranicí modelu. Výjimečnost této okrajové podmínky můžeme pozorovat na řešených úlohách rovinných i prostorových.

- Dále můžeme říci, že sklon hranice modelu má na velikost odražené vlny vliv, ale ve srovnání s volbou okrajové podmínky je tento vliv zanedbatelný. Volba nesvislé hranice modelu nám může ušetřit výpočtový čas možným snížením počtu stupňů volnosti, na druhou stranu nám komplikuje vytváření prostorového modelu s automatickým generováním okrajové podmínky a následnou kontrolu modelu. Lze tedy říci, že **svislá hranice** není nejvhodnější, ale z praktického hlediska (s vhodnou okrajovou podmínkou) je a bude nejpoužívanější.
- Výpočtový model podzákladí **tvaru válce** lze považovat za výhodnější než model ve tvaru kvádru. Model tvaru válce je přirozenější z hlediska šíření válcových a kulových ploch vlnění, dále je tento model výhodnější v hledání významných tvarů vlastního kmitání (jsou jasně odděleny tvary vlastního kmitání, kde kmitá pouze zemina). Bylo ověřeno, že se jedná o vliv tvaru modelu a ne vliv tvaru sítě na výpočtových modelech kombinující tyto vlivy.
- Výpočtový model s **nehmotnou zemínou** je pro řešení úloh oblasti dynamiky nevhodný. Stejně závěry lze provést pro modely nijak nezahrnující vliv hmotnosti spolukmitající zeminy.
- Máme-li konstrukci založenou na pilotách, je velmi obtížné zvolit zjednodušující výpočtový model. Chceme-li nahradit vliv spolukmitající zeminy nemáme v současné době možnost zjistit kde a kolik hmotnosti zeminy přidat k pilotám. Navíc v každém tvaru kmitu kmitá jiná část spolukmitající zeminy. Jediným východiskem se jeví **prostorový výpočtový model s hmotnou zemínou**, který díky disipativní okrajové podmínce může být relativně malý a neklade velké nároky na výpočtový čas.
- Skriptovacího jazyka **APDL** lze velice efektivně využít, a to od tvorby modelů přes jejich následnou úpravu, nastavení a výpočet analýz až po vyhodnocení výsledků. Využití programovacího jazyka APDL ve spojení s programem ANSYS má velmi široké možnosti využití, které jsou omezeny pouze fantazií programátora.

Seznam použité literatury

- [1] Němec I. *Modelování interakce stavby s podloží*, Vysoké učení technické v Brně, 1991.
- [2] Kolář V., Němec I. *Modelling of soil-structure interaction*, Academia, Praha, 336 s, 1990.
- [3] Kolář V., Němec I. *Contact Stress and Settlement in the Structure-Soil*, Academia, Praha, 159 s, 1991.
- [4] Kausel E. Early history of soil-structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake engineering*, Vol. 30, Issue 9, Elsevier, p. 822-832, September 2010.
- [5] Thomson, W.(Lord Kelvin).On the equations of equilibrium of an elastic solid, *Cambridge–Dublin Mathematical Journal*, Vol. 3, p. 87-89, 1848.
- [6] Stokes, G.G. On the dynamical theory of diffraction, *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 9, p. 1-62, 1849.
- [7] Boussinesq, V.J. Équilibre d'élasticité d'un sol isotrope sans pesanteur, supportant différent poids, *Comptes Rendus*, Paris, Gauthier-Villars, LXXXVI, p. 1260-1263, 1878.
- [8] Boussinesq, V.J. Sur la dépression que produit, à la surface d'un sol horizontal élastique et isotrope, un poids qu'on dépose, et sur la répartition de ce poids entre ses divers point d'appui, *Comptes Rendus*, Paris, Gauthier-Villars, LXXXVII, p. 402-405, 1878.
- [9] Boussinesq, V.J. Sur la manière dont se distribue entre ses points d'appui le poids d'un corps dur, posé sur un sol poli, horizontal et élastique: identité de ce mode de répartition, pour une base de sustentation plane et horizontale, avec celui d'une charge électrique en équilibre dans une plaque mince de même forme, *Comptes Rendus*, Paris, Gauthier-Villars, LXXXVII, p. 519-522, 1878.
- [10] Cerruti, V. Ricerche intorno all'equilibrio dei corpi elastici isotropi, *Reale Accademia dei Lincei*, Roma, Vol.13, 1882.
- [11] Lamb, H. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A, 203, p. 1-42, 1904.
- [12] Cagniard, L. Réflexion et réfraction des ondes séismiques progressives, *Gauthier-Villars*, Paris, 1939.
- [13] Mindlin R. D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid, *Physics*, 7, p. 195-202, May 1936.

Seznam publikovaných prací

- [14] Doležel J., Kabát V., Lahner J., Martinásek J., Řoutil L. Numerická analýza průběhu porušení betonového trámce za ohybu Část I, Sborník konference *Juniorstav 2008*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2009.
- [15] Martinásek J. *Dynamická analýza základové konstrukce pod kompresor*, Brno, 2008.
- [16] Kika O., Martinásek J., Salajka V. Seismická analýza nosné konstrukce vertikální průmyslové pece, Sborník konference *Medzinárodná konferencia 70 rokov SvF STU*, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Bratislava, Slovensko, 2008, ISBN 978-80-227-2979-6.
- [17] Martinásek J. Vliv tvaru modelu podzákladí na modální charakteristiky konstrukce, sborník konference *Juniorstav 2009*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2009, ISBN 978-80-214-3810-1.
- [18] Martinásek J. The effects of discretization of subsoil on modal characteristics of the construction, sborník *XII. Mezinárodní vědecké konference*, VUT v Brně, Fakulta stavební. Brno, 2009, ISBN 978-80-7204-629-4.
- [19] Martinásek J. Vliv modelu podzákladí a vliv stupně diskretizace modelu podzákladí na dynamickou odezvu konstrukce, sborník konference *Juniorstav 2010*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2010, ISBN 978-80-214-4042-5.
- [20] Martinásek Z., Mácha T., Rášo O., Martinásek J.; Šilhavý P. Optimization of differential power analysis, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 2011, No. 12, p. 140-144, 2011, ISSN: 0033- 2097.
- [21] Martinásek J. Numerická analýza vlivu parametrů MKP modelu podzákladí na modální charakteristiky systému podzákladí-konstrukce, *Konstrukce*, KONSTRUKCE Media, s.r.o., č.6, roč.10, Ostrava, 2011, ISSN 1213-8762.
- [22] Martinásek Z., Nečas O., Zeman V., Martinásek J. Diferenciální elektromagnetická analýza, *Elektrorevue*, roč. 2011, č. 60, s. 1-6, 2011, ISSN: 1213-1539.
- [23] Martinásek J. Řešené numerické příklady do předmětu Statika I, Sborník konference *Juniorstav 2011*, VUT v Brně, Fakulta stavební. Brno, 2011, ISBN 978-80-214-4232-0.
- [24] Štěpánek M., Martinásek J. Vliv postupu hutnění násypu na stav napjatosti přesypaných kleneb, sborník konference *Juniorstav 2011*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2011, ISBN 978-80-214-4232-0.
- [25] Martinásek J., Kratochvíl O. Dynamická analýza mostní konstrukce zatížené pohybem osob s důrazem na vodorovné zatížení. Sborník konference *Juniorstav 2012*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2012, ISBN: 978-80-214-4393-8.
- [26] Martinásek J., Martinásek Z. Vytváření prostorového modelu podzákladí v systému ANSYS s využitím programovacího jazyka APDL, Sborník konference *Juniorstav 2012*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2012, ISBN: 978-80-214-4393-8.

- [27] Martinásek J., Martinásek Z. Numerická analýza vlivu parametrů modelu podzákladí na modální charakteristiky systému podzákladí-konstrukce, Sborník konference *Juniorstav 2012*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2012, ISBN: 978-80-214-4393-8.
- [28] Martinásek J. Numerická analýza vlivu parametrů a typu okrajové podmínky na velikost amplitudy odražené vlny v zemním prostředí řešená metodou konečných prvků, *Konstrukce*, KONSTRUKCE Media, s.r.o., Ostrava 2013, č.5, roč.12, ISSN 1213-8762
- [29] Martinásek J. Numerická analýzy vlivu parametrů modelu podzákladí na dynamickou odezvu osamělé desky v interakci s podzákladím, Sborník konference *Juniorstav 2013*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2012, ISBN: 978-80-214-4669-4
- [30] Martinásek J. Numerická analýzy vlivu parametrů modelu podzákladí na dynamickou odezvu osamělé piloty v interakci s podzákladím, Sborník konference *Juniorstav 2013*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2012, ISBN: 978-80-214-4669-4
- [31] Martinásek J. Srovnání pole napjatosti a posunutí pružného poloprostoru modelu dle Boussinesqa, Westergaarda a MKP modelu, Sborník konference *Juniorstav 2014*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2013, ISBN: 978-80-214-4851-3.
- [32] Lang R., Němec I., Martinásek J. Specifické aspekty ohybově netuhých konstrukcí. Proceedings of the 12th International Conference on *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings*. Faculty of Civil Engineering, STU Bratislava, 2014. (pouze CD) ISBN 978-80-227-4259-7.
- [33] Martinásek J. Vzájemné srovnání odezvy v časové oblasti a harmonické analýzy stolového základu v interakci s podzákladím řešené v systému ANSYS, Sborník konference *Juniorstav 2015*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2015, ISBN: 978-80-214-5091-2.
- [34] Martinásek J. Generování prostorového vrstevnatého modelu podzákladí ze zadaných vrtů pomocí programovacího jazyka APDL v programovém systému ANSYS, Sborník konference *Juniorstav 2015*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2015, ISBN: 978-80-214-5091-2.

Životopis

Osobní údaje:

Ing. Josef Martinásek
Ústav stavební mechaniky
Fakulta stavební
Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika
E-mail: martinasek.j@fce.vutbr.cz
Narozen 19. 1. 1984, Vyškov

Zaměstnání:

od května 2014

Vývojový pracovník FEM consulting, s.r.o.

od prosince 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Pozice: akademický pracovník – asistent

Popis činnosti:

vedení cvičení BD03 - Statika I
vedení cvičení BD04 - Statika II
vedení cvičení CD05 - Dynamika
vedení cvičení CD52 - Statická a dynamická analýza
stavebních konstrukcí

září 2009 – květen 2010 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Veveří 331/95, 602 00 Brno

Popis činnosti:

vedení cvičení BD03 - Statika I
vedení cvičení BD04 - Statika II

Projekční praxe:

Huryta s.r.o., Staňkova 557/18a, Brno

Popis činnosti: vytváření výpočtových MKP modelů v IDA Nexis,
tvorba projektové dokumentace

Balance s.r.o., Tomešova 1, Brno

Popis činnosti: vytváření výpočtových MKP modelů v IDA Nexis,
tvorba projektové dokumentace

Vzdělání:

od září 2008

VUT Brno, Fakulta stavební, doktorský studijní program

2003 – 2008

VUT Brno, Fakulta stavební, magisterský studijní program,
obor: Konstrukce a dopravní stavby

zaměření: Konstrukce

specializace: Stavební mechanika

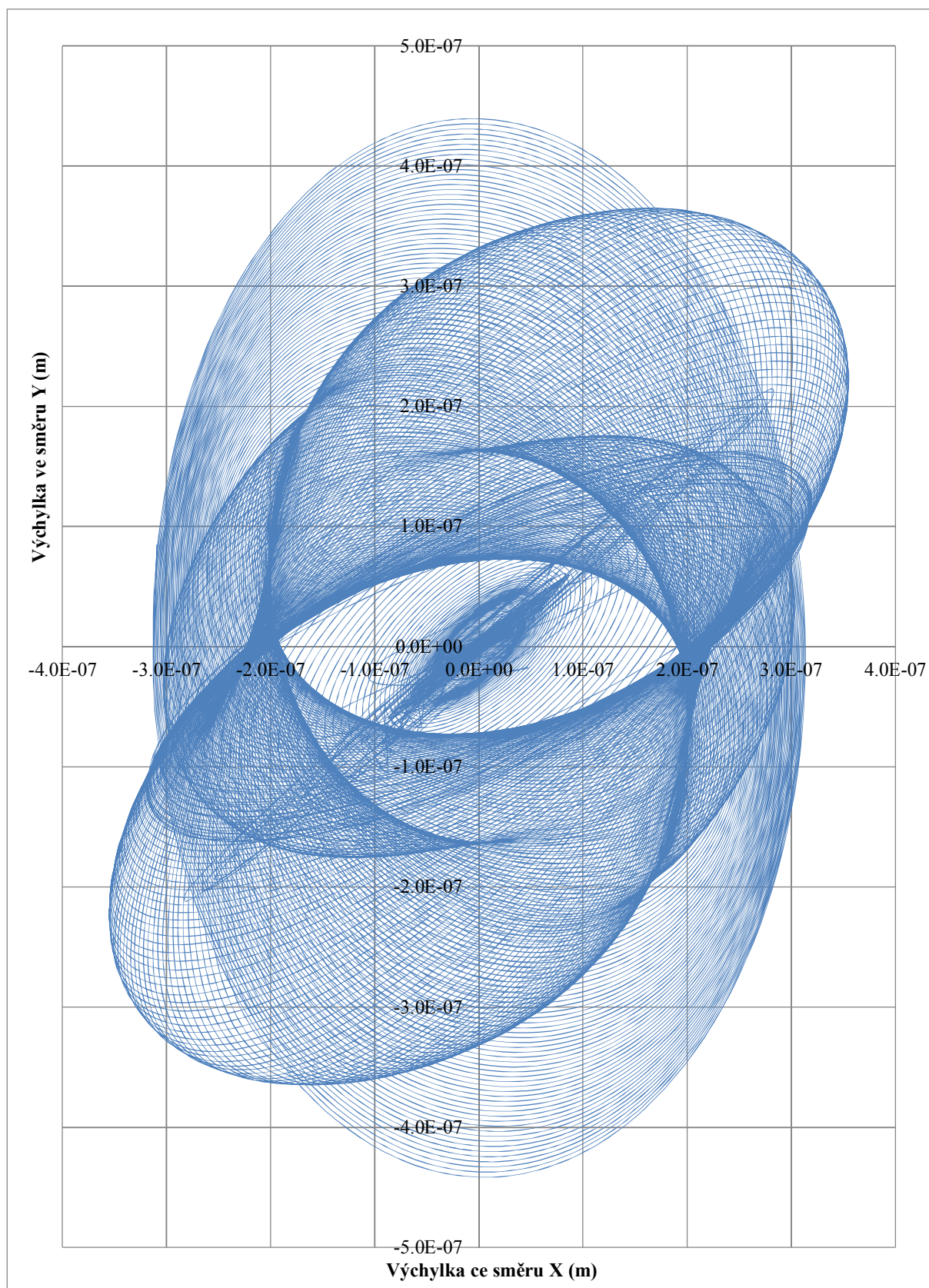
1999 – 2003

Gymnázium tř. Kpt. Jaroše v Brně

Odborné znalosti:

AutoCAD, CADKON RCD, IDA Nexis, ANSYS s využitím APDL

Praxe ve vytváření výpočtových MKP modelů



Obr. 13 Trajektorie sledovaného uzlu piloty při rozběhu stroje.