

OPONENTNÍ POSUDEK

diplomové práce posluchače UK PřF ÚHIGUG Radka Suchomela „Využití pravděpodobnostních metod v numerické analýze geotechnických problémů“

1. Úvod

Oponentní posudek je vypracován na základě dopisu ředitele Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy (UK PřF ÚHIGUG) ze dne 11.5.2007 se žádostí o posouzení výše uvedené diplomové práce. Požaduje se posouzení, zda diplomant splnil zadání, citoval všechny potřebné podklady, uvedl odkazy na převzaté materiály a zřetelně označil vlastní výsledky, dále jestli jeho práce splňuje svým obsahem a formou požadavky na diplomovou práci a má vědecký či praktický přínos.

V posudku se nejprve rekapituluje obsah práce a pak se uvádí vlastní posouzení, které se dělí na dvě části. Nejprve se posuzují první tři kapitoly, které svým rozsahem, obsahem, odbornou úrovní a formou plně odpovídají i vysokým požadavkům na diplomovou práci. Čtvrtá kapitola má podle názoru oponentky spíše výzkumný charakter, a proto se posuzuje samostatně.

2. Obsah diplomové práce

Předložená práce pozůstává z pěti kapitol a obsahuje 70 stránek textu, 8 tabulek a 36 obrázků.

První kapitola je věnována přehledu a definici základních pojmů teorie pravděpodobnosti. Jsou definovány náhodné proměnné diskrétní a spojité, jednorozměrné a vícerozměrné. Jsou uvedeny základní charakteristiky spojité náhodné proměnné jako hustota pravděpodobnosti, distribuční funkce, střední hodnota (první moment), rozptyl (druhý moment), šikmost (třetí moment) a špičatost (čtvrtý moment). Zmiňuje se o nejvýznamnějších rozděleních náhodných veličin jako je normální a lognormální rozdělení a uvádí se vzájemná transformace středních hodnot a směrodatných odchylek. Jsou definovány charakteristiky jako koeficient variace, medián a mód. Důležitými charakteristikami vícerozměrných náhodných veličin je koeficient korelace, korelační matice a kovariační matice.

Množina náhodných proměnných tvoří náhodné pole, které může být homogenní, izotropní, stacionární a nestacionární. Kromě střední hodnoty a variance je významnou charakteristikou náhodného pole korelační délka, která je definována jako vzdálenost, za kterou dvě náhodné veličiny již nejsou efektivně korelovány. Malá korelační délka (blížící se k nule) znamená nízkou korelaci s náhlou změnou náhodné veličiny. Velká délka (blížící se k nekonečnu) znamená naopak vysokou korelaci s téměř konstantní hodnotou náhodné veličiny. Tato korelace může být izotropní nebo anizotropní.

První kapitola práce se zabývá také promítnutím náhodného pole do sítě metody konečných prvků (MKP). Velký význam má poměr velikosti konečného prvku k velikosti korelační délky. Čím bude prvek relativně menší v poměru ke korelační délce, tím méně bude náhodné pole ovlivněno dělením MKP. V této kapitole je popsána také metoda Monte Carlo, která se v práci aplikuje. Jde o řešení problému vhodného generování náhodných čísel s rovnoměrným rozdělením v daném intervalu a nalezení příslušné transformační funkce. Cílem je vyhovující odhad pravděpodobnostní charakteristiky úlohy, kterého se dosahuje velkým počtem pokusů kontrolovaných podle předepsané hodnoty chyby.

Druhá kapitola obsahuje stručný popis vybraných pravděpodobnostních metod, které se aplikují v geomechanice a uvádějí se příklady jejich využití. Cílem těchto metod je zohlednění prostorové variability fyzikálně-mechanických vlastností horninového prostředí při numerické

analýze geotechnických problémů. Metoda jedné náhodné proměnné SRVM (Single Random Variable Method) zjišťuje závislost řešení na variabilitě jednoho vybraného parametru, ale neuvažuje přitom prostorovou variabilitu tohoto parametru. Typickým příkladem je závislost stupně bezpečnosti svahu z jílovité zeminy na variabilitě její nedrénované smykové pevnosti. Metoda FOSM (First Order Second Moment), jejíž název vyjadřuje hlavní předpoklady metody, umožňuje zohlednit vliv více náhodných proměnných na výsledky řešení, ale stále bez jejich prostorové korelace.

Nejobecnější je metoda RFEM (Random Finite Element Method), která vzniká kombinací teorie náhodných polí s metodou konečných prvků. Materiálové parametry mají u každého konečného prvku pravděpodobnostní rozdělení a respektuje se střední hodnota, směrodatná odchylka a korelační délka vstupních parametrů. Tyto charakteristiky se při mapování náhodných veličin na plochu konečného prvku mění, a proto je řešení RFEM závislé na hrubosti sítě. Výsledné pravděpodobnostní řešení je výsledkem velkého počtu realizací, kdy se při každé realizaci generuje nové náhodné pole a provádí se opakované řešení úlohy metodou konečných prvků.

Jako příklad použití metody FOSM je v práci uveden výpočet opěrné stěny zatížené zemním tlakem, který je převzatý z literatury. Stěna má střední hodnotu stupně bezpečnosti $FS = 1,5$ a zjišťuje se spolehlivost FS v závislosti na čtyřech náhodných veličinách: objemové tíže stěny a zeminy, součiniteli aktivního zemního tlaku a koeficientu tření. Výsledkem řešení je nízká pravděpodobnost porušení stěny, tj. vysoká spolehlivost stěny s $FS = 1,5$ jak podle normálního, tak podle lognormálního rozdělení hustoty pravděpodobnosti.

Problematika únosnosti plošného základu je řešena RFEM a zde se již zavádí prostorová variabilita úhlu tření a soudržnosti zeminy jako dvou náhodných polí. Uvažuje se tzv. beta rozdělení pro omezené náhodné veličiny a je předpokládána stejná korelační délka pro soudržnost a úhel tření. Prostorová korelace náhodných veličin je popsána pomocí Markovovy funkce. Řeší se parametrická studie metodou Monte Carlo a metodou konečných prvků při použití ideálně plastického Mohr-Coulombova konstitutivního modelu. Výsledkem řešení jsou grafy závislosti únosnosti základu na statistických hodnotách parametrů.

Stejnou metodou RFEM je řešen i poslední příklad z literatury popisující pravděpodobnostní posouzení stability svahu. Vyšetřuje se pravděpodobnost porušení svahu v závislosti na prostorově variabilním náhodném poli nedrénované smykové pevnosti zeminy. Výsledky řešení této úlohy se dále porovnávají s výsledky řešení diplomanta uvedenými v další kapitole práce.

V třetí kapitole se popisují programy vytvořené v ÚHIGUG pro kombinované využití teorie náhodných polí a metody konečných prvků (RFEM). Jde o kombinaci programů Random Field a Tochnog, které byly vypracovány vedoucím diplomové práce Mgr. D. Mašínem, PhD. za použití volně přístupných softwarových produktů. V kapitole se popisuje činnost programu, způsob zadání parametrů a výsledky dvou parametrických studií řešených za účelem ověření funkce kombinovaného programového díla.

Úkolem programu Random Field je náhodné generování a přiřazení materiálových vlastností prvkům sítě tak, aby odpovídaly zadanému pravděpodobnostnímu rozdělení. Korelační koeficient mezi prvky je počítán pomocí Markovovy funkce. Pro síť metody konečných prvků platí omezení, že síť musí být čtvercová. Důvodem je jednodušší integrál pro výpočet faktoru pro redukci variance v rámci jednotlivých konečných prvků.

Program Random Field je začleněn do programu metody konečných prvků Tochnog v místech, kde vstupují do programu materiálové charakteristiky. Vstupní soubor programu Tochnog je tedy rozdělen na dvě části: první část je obvyklý soubor vstupních dat bez charakteristik materiálů, druhá část výstup z programu Random Field. Vlastní funkce programu pak pozůstává z provedení a vyhodnocení velkého počtu simulací realizovaných - jak bylo zmíněno výše - metodou Monte Carlo a metodou konečných prvků.

Kontrola programu byla provedena pomocí již zmíněného příkladu pravděpodobnostního posouzení stability svahu pomocí kombinované metody RFEM, který byl včetně vstupních dat publikován v literatuře. Byla provedena analýza vlivu podrobnosti dělení sítě na přesnost řešení. S růstem podrobnosti dělení roste sice přesnost řešení, ale roste také výpočetní čas, a tím se snižuje možnost provedení dostatečného počtu simulací.

V první parametrické studii se analyzoval homogenní svah (nekonečně velká korelační délka) metodou jedné náhodné proměnné SRVM a každá simulace měla přidělenou náhodně generovanou hodnotu nedrénované smykové pevnosti zeminy. Stabilita svahu se počítala metodou mezní rovnováhy sil a pravděpodobnost numerickou integrací. Výsledkem je graf pravděpodobnosti porušení svahu v závislosti na mediánu a varianci nedrénované smykové pevnosti. V grafu jsou porovnány také praktické pokusy RFEM s analytickým výpočtem.

Předmětem druhé parametrické studie bylo opakování studie převzaté z literatury při použití nového kombinovaného programu pro řešení úloh pomocí RFEM. Porušení svahu se dosahovalo zvýšením gravitačního přetížení. Studoval se vliv variance a korelační délky na pravděpodobnost porušení svahu. Jsou uvedeny příklady rozložení náhodných polí nedrénované smykové pevnosti a je znázorněn jejich vliv na průběh smykových ploch, které jsou zobrazeny pomocí charakteristiky plastického smykového přetvoření. Jsou porovnány výsledky výpočtů s výsledky původní studie a jsou analyzovány příčiny nižší přesnosti dosažené v diplomové práci.

Čtvrtá kapitola práce obsahuje praktickou aplikaci nového programu RFEM na případ sesuvu v Lodalenu, který byl již řešen a publikován, ale pro posouzení byly použity jiné metody (metoda mezní rovnováhy sil a pravděpodobnostní metoda FOSM) než RFEM. Je popsána historie sesuvu a výsledky průzkumu. Pravděpodobnou příčinou porušení svahu byl nevhodný zásah do geometrie svahu při napjaté hladině podzemní vody. V diplomové práci byla provedena statistická analýza vstupních parametrů a byl vytvořen numerický model svahu. Vliv napjaté hladiny byl do modelu zaveden zvýšením hustoty vody. Dále byla pro posouzení svahu aplikována metoda redukce smykové pevnosti (MKP) a pravděpodobnostní metoda pomocí nového programu RFEM, která umožnila zavést do řešení vliv korelační délky. Porušení svahu se při aplikaci RFEM dosahovalo zvýšením gravitačního přetížení. Byla dosažena vysoká pravděpodobnost porušení svahu 0,86.

V **páté kapitole** jsou stručně shrnuty výsledky celé diplomové práce.

3. Posouzení diplomové práce

Jak je z výše uvedeného obsahu patrné, jde o velkou práci, která svým rozsahem daleko převyšuje běžné požadavky na diplomovou práci. Týká se to jak tématu, tak objemu a způsobu provedení práce. Teorie pravděpodobnosti v geomechanice se zpravidla nepřednáší jako samostatný předmět při výuce inženýrské geologie a její aplikace při numerické analýze geotechnických problémů je stále ještě ve fázi výzkumu. Proto i vlastní zadání – ověření funkčnosti nového kombinovaného programového produktu Random Field + Tochnog pro aplikaci RFEM – lze považovat za řešení dílčího výzkumného problému.

Cenné je, že kromě řešení vlastního předmětu zadání, první dvě kapitoly práce přehledně shrnují nejdůležitější poznatky z teorie pravděpodobnosti včetně metod a příkladů jejich použití v geotechnice. Přehled je sestaven na základě převážně zahraniční literatury, což svědčí o schopnosti diplomanta samostatně pracovat s literaturními prameny v angličtině a poznatky shrnout stručným a výstižným způsobem.

K těmto kapitolám mám jen malé připomínky, které se týkají drobných nedokonalostí textu na str. 3, 5, 17,24, 28, 30 a 36. Na stranách 1 a 31 bych doporučila změnu názvu kapitoly 2.2.2, která se zabývá mezní únosností plošného základu a nikoliv sedáním plošného základu.

Třetí kapitola má stěžejní význam z hlediska splnění zadání diplomové práce. Činnost nového programu je popsána způsobem, který svědčí o dobrých znalostech diplomanta, co se

týče struktury programového díla. Totéž platí o výstižném popisu způsobu zadání vstupních dat. Výběr metod a příkladů podle literatury pro ověření funkce programu Random Field a kombinovaného programu Random Field + Tochnog lze považovat za správný a výsledek analýzy za přesvědčivý. Přesto, že k této kapitole již mám některé dotazy a připomínky:

- Jak byly ošetřeny prvky na povrchu modelu na obrázku 3.5, které nejsou čtvercové?
- Jaké jsou okrajové podmínky modelu a jak mohly ovlivnit výsledky řešení stability?
- Jaká je míra zvýšení gravitačního zatížení svahu u jednotlivých realizací metody Monte Carlo?
- Jak je přitom definován stupeň bezpečnosti FS?
- Je způsob gravitačního přetížení svahu dostatečně výstižný pro určení mechanismu a pravděpodobnosti porušení svahu a pro určení spolehlivosti stupně bezpečnosti svahu?
- Jak byla určena střední hodnota $\mu_{Cu} = 25$ na str. 49 až 56 a jakou má vazbu na bezrozměrnou střední hodnotu $C = 25$ na str. 34?
- Je V_{Cu} na str. 53 koeficient variance nebo koeficient variace?
- V práci chybí popis a vzorec pro výpočet charakteristiky plastických přetvoření κ .

Práce obsahuje podrobný rozbor výsledků třetí kapitoly. Týká se to zejména průběhu pravděpodobnosti porušení svahu, která by při koeficientu variace 1 měla mít konstantní hodnotu 0,5 (50%) a místo toho se blíží hodnotě 0,1 (obr. 3.11 až 3.14). Liší se tedy od výsledků literárního pramene a není přitom na bezpečné straně. Tento fakt diplomant vysvětluje závislostí výsledků řešení na podrobnosti dělení modelu a na počtu simulací. To však svědčí o značné citlivosti aplikovaného pravděpodobnostního modelu na formulaci úlohy a na způsobu její realizace. Tato okolnost může ovlivnit využitelnost metody v praxi.

Jak bylo výše konstatováno, již první tři kapitoly zprávy obsahují materiál více než postačující na diplomovou práci, a proto čtvrtou kapitolu s praktickou aplikací kombinovaného programu Random Field + Tochnog považují za součást budoucí výzkumné zprávy. V tomto smyslu je nutno chápat i dále uvedené připomínky.

- Pro model sesuvu v Lodalenu platí stejné otázky jako pro předchozí model svahu: je nutno vysvětlit způsob ošetření povrchu modelu, kde jsou jiné prvky než čtvercové, a posoudit vliv podrobnosti dělení a okrajových podmínek modelu a způsobu vyvolání porušení svahu gravitačním přetížením na výsledky řešení.
- Lze velmi kladně hodnotit, že stabilita svahu v Lodalenu byla posouzena několika metodami. Při použití metody redukce smykové pevnosti však chybí výkres průběhu smykové plochy, který lze znázornit pomocí charakteristiky plastických přetvoření κ . Bylo by zajímavé porovnat tuto plochu s málo vyvinutými smykovými plochami generovanými RFEM při gravitačním přetížení svahu (obr. 4.7).
- Proces lokalizace přetvoření a progresivního porušení svahu při vytváření kinematicky možné smykové plochy vycházející na povrch lze dobře modelovat numerickými metodami a metodou redukce pevnosti i při použití deterministických vstupních dat. V závislosti na struktuře a geometrii svahu se vytváří smykové plochy různého tvaru. Možnost zjišťování mechanismu porušení a tvaru smykové plochy nelze proto považovat za přínos aplikace náhodných proměnných, jak je konstatováno na více místech práce včetně závěru. Je to hlavně přínos aplikace numerických metod a vlastní přínos náhodných proměnných je nutno ještě prokázat pečlivým porovnáním metod.
- Bude užitečné podrobněji vysvětlit, jakému součiniteli bezpečnosti FS odpovídá pravděpodobnost porušení svahu 0,86 zjištěná RFEM, a naopak jakou pravděpodobnost má součinitel bezpečnosti FS = 1,02 zjištěný metodou redukce smykové pevnosti. Teprve potom lze stanovit pořadí metod, co se týče spolehlivosti předpovědi stability svahu.

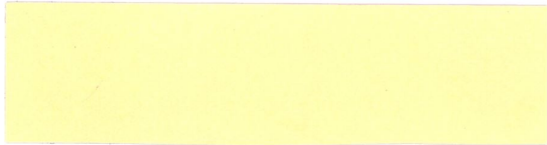
4. Závěr

Na základě výše uvedeného přehledu a rozboru konstatujeme, že

- předložená diplomová práce jak po obsahové a formální stránce, tak svým předmětem a rozsahem do značné míry přesahuje běžné požadavky na diplomovou práci;
- diplomant splnil náročné zadání a využil a citoval všechny potřebné podklady včetně zahraniční literatury a to ve větší míře než se od diplomanta očekává;
- převzaté podklady a poznatky jsou v práci opakovaně označeny a zřetelně odlišeny od vlastních výsledků diplomanta;
- předložená práce má vědecký přínos, protože ověřila funkčnost nového programového produktu ústavu, který lze v rámci České republiky považovat za průkopnický; diplomová práce může být podkladem pro další výzkum.

Předloženou práci doporučuji k obhajobě s klasifikací „výborně“.

V Praze dne 25.5.2007



Ing. Marta Doležalová, CSc.
h. profesor