

Abstrakt

Mechanické vlastnosti mořských sedimentů v okolí přístavu Koper a numerické modelování hluboké stavební jámy

Inženýrskogeologické poměry v okolí koperského přístavu na jihozápadě Slovinska nutí geotechnické odborníky a stavební inženýry řešit problémy se zakládáním objektů různého typu a účelu prakticky již od padesátých let minulého století, kdy začal intenzivní rozvoj infrastruktury přístavu. Z výsledků řady geologických a geotechnických průzkumů, monitoringu a dlouhodobých zkušeností se zakládáním v místních geologických poměrech vyplývá, že se prakticky vždy jedná o 3. geotechnickou kategorii, čili zakládání náročných stavebních konstrukcí ve složitých geologických podmínkách pod hladinou podzemní vody. Celá oblast spadá do Alpsko-Dinárského tektonického prostoru. Horninový fundament je zde tvořen komplexy flyšových sedimentů eocenního stáří, na které nasedají soubory recentních mořských sedimentů a v prostoru široce zařínutého říčního údolí fluvialní štěrky a písky. Z inženýrskogeologického hlediska je to zajímavá lokalita, kde je většina staveb založena ve vrstvě měkkých mořských sedimentů, případně je pomocí speciálních metod zakládání realizováno zakládání hlubinné na úroveň únosnějších vrstev štěrku a písku řeky Rižany nebo na úroveň podložního flyše. Soubor mořských sedimentů v okolí koperského přístavu, co by základová půda, se jeví jako vhodný pro aplikaci metod numerického modelování na řešení geotechnických úloh jako je například zakládání hlubokých stavebních jam, stabilita geotechnických konstrukcí, sedání různých typů základů apod. Vhodnost použití těchto metod je podložena minimální tektonickou porušeností této vrstvy, geotechnicky ověřenou celkovou homogenitou masívu v laterálním i vertikálním směru, zrnitostním vytříděním a stálou mineralogií zeminy.

Zemina v přirozeném stavu není uměle připravený materiál s předem známými parametry. Proto je třeba při interakci zemina - stavební konstrukce vyšetřit různé aspekty chování zemin polními geotechnickými zkouškami a laboratorními metodami mechaniky zemin. V ideálním případě lze navázat na výsledky těchto metod numerickou 2D či 3D analýzou ve formě konstitučního (materiálového) modelu v kombinaci s programy využívajícími metodu konečných prvků (MKP).

V geotechnické praxi jsou pro řešení výše zmíněných úloh často používány numerické modely, které zcela nevystihují důležité aspekty chování zemin, proto jejich výsledky mohou být zavádějící. Příkladem může být používání dobře známého Mohr-Coulombova modelu, jenž nerespektuje závislost chování zemin na stavových proměnných (napětí, pórovitost,

stupeň překonsolidace, atp.). Navíc opomíjí další důležitý faktor jako je nelinearita chování, což není z hlediska mechaniky zemin zcela korektní.

Do této problematiky vstupuje hypoplastický model, využívající moderních poznatků v geomechanice. Model je založený na mechanice kritických stavů a na teorii hypoplasticity, která je vyvíjena od osmdesátých let minulého století. Jako pokročilý model již zohledňuje nelinearitu chování (vysoká tuhost v oboru velmi malých přetvoření). Vzhledem k tomu, že využívá v základní verzi pět materiálových parametrů, jenž lze získat vyhodnocením standardních laboratorních zkoušek, je možno jej v praxi jednoduše používat při řešení rutinních geotechnických úloh.

Pro účely modelování téměř 13 metrů hluboké stavební jámy v podmínkách vysoce plastických hlín až jílu na křížení ulic Kolodvorska - Ferrarska na okraji města Koper bylo třeba využít hypoplastický model obohacený o tzv. koncepci intergranulárních přetvoření. Jáma byla pro porovnání výsledků modelována rovněž Mohr-Coulombovým modelem. Jedná se o stavební jámu obdélníkového půdorysu s rozměry stran 54,8 x 56,3 a hloubkou 12,8 m. Pažení je provedeno formou podzemních stěn v kombinaci s rozpěrami pomocí vlastních stropních desek. Deformace stěn jámy byly monitorovány inklinometry v lamelách L5, L12, L17 a L27.

Laboratorní práce probíhaly na vzorku mořských sedimentů, který byl na místě odebrán z hloubky 3,4 m jako neporušený. Indexové vlastnosti zeminy stanovila laboratoř společnosti Arcadis Geotechnika a. s. Konsolidované nedrénované triaxiální zkoušky s měřením pórového tlaku (CIUP) a oedometrické zkoušky byly prováděny na neporušených i rekonstituovaných vzorcích. Celkem bylo odzkoušeno 6 triaxiálních vzorků (3 neporušené a 3 rekonstituované), z nichž byly pro kalibraci parametrů modelu použity 2 neporušené a jeden rekonstituovaný vzorek. Oedometrických vzorků bylo odzkoušeno rovněž 6 (3 neporušené a 3 rekonstituované), pro kalibraci se použily výsledky všech šesti zkoušek. Rozšíření hypoplastického modelu o koncepci intergranulárních přetvoření však vyžaduje dalších pět parametrů, které lze získat pomocí méně standardních laboratorních zkoušek. Jsou to zkoušky, které vyšetřují tuhost zeminy při malých a velmi malých přetvořeních. V případě této práce se jednalo o měření doby průchodu smykové vlny vzorkem pomocí prvků bender elements. Na triaxiální vzorky byly nainstalovány lokální snímače deformací (LVDT) pro měření malých deformací. Pro ověření mineralogického složení zeminy byly připraveny vzorky přirozeně vysušené a posléze na jemnou frakci podrcené zeminy. RTG analýzu provedl doc. Příkryl z Ústavu geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů, Přírodovědecké fakulty, UK.

Na výsledcích laboratorních zkoušek se pomocí programu Triax nakalibrovaly všechny potřebné parametry obou numerických modelů. Samotné modelování se provádělo v programu PLAXIS 2D, kde byla nejprve nadefinována geometrie úlohy, reálné parametry technických prvků jámy (podzemní stěny a rozpěry) a parametry zemin obou modelů. Parametry hypoplastického modelu byly do programu PLAXIS implementovány pomocí subrutiny, kterou vyvinul Mašín (2010). Vzhledem k dvojrozměrné analýze úlohy musel být vybrán nejvhodnější řez celou stavební jámou. Byl zvolen profil jdoucí přes lamely podzemních stěn L27 a L5, ve kterých byly situovány inklinometrické vrty pro porovnání výsledků.

Výpočet obou modelů byl rozčleněn celkem do osmi fází a probíhal formou plastické, respektive elastoplastické analýzy za nedrénovaných podmínek (hladina podzemní vody 1,8 m pod povrchem). Fáze výpočtu byly odvozeny od reálných fází těžby jámy, ale celková koncepce výpočetních fází obou modelů musela být upravena pomocí modifikované β metody (odvozeno od β metody známé již z modelování tunelů NATM) pro korigování prostorového efektu postupu těžby a pažení jednotlivých úrovní. Kombinace různých β faktorů se později projevila jako klíčová pro výsledky obou modelů a probíhala ve formě zpětné analýzy tak, aby simulace co nejlépe reprezentovala reálné podmínky. Postup výstavby modelu byl prováděn v souladu se zásadami numerického modelování tak, aby byl vybraný typ modelu co možná nejvhodnější k dosažení požadovaných výsledků, nejjednodušší, ale zároveň co možná nejvýstižnější.

Výstupy obou modelů byly porovnávány s výsledky monitoringu, kde se ověřily reálnější predikce hypoplastického modelu v jednotlivých fázích. Bylo dosaženo vynikající shody mezi inklinometrickými měřeními a deformacemi podzemních stěn, predikovanými hypoplastickým modelem a to jak z hlediska velikosti deformací, tak tvaru křivky horizontálních posunů. V podání Mohr-Coulombova modelu byla shoda těchto deformací výrazně menší. Dále bylo prokázáno, že hypoplastický model předpovídá mnohem reálnější průběhy deformací dna jámy a těsného okolí podzemních stěn (díky předpovědi vyšší tuhosti při odlehčení a při velmi malých přetvořeních). Naopak Mohr-Coulombův model predikuje tyto deformace v mnohem větším rozsahu a velikosti, protože má lineární povahu a nerespektuje výše uvedené aspekty chování zemin. Prostřednictvím hypoplastického modelu lze v různých fázích výpočtu zobrazovat celou řadu stavových proměnných, které výrazně přispívají k pochopení dějů probíhajících při celém procesu hloubení a pažení stavební jámy a názorně demonstrují aspekty chování zemin.

Modelováním chování hluboké stavební jámy Kolodvorska v Koperu byla prokázána oprávněnost použití metod numerického modelování při řešení takovýchto geotechnických úloh. Na základě rešerší polních geotechnických zkoušek a provedení laboratorních zkoušek z odebraných vzorků zeminy by chtěl autor této práce poukázat na analogičnost a přenositelnost výsledků numerického modelování v místních inženýrskogeologických poměrech z hlediska stálosti mechanických vlastností základové půdy. V této souvislosti se jeví hypoplastický model jako silný a efektivní nástroj k řešení mnoha geotechnických úloh.