

VÝPOČETNÍ MODELY ZEMIN POUŽÍVANÉ V SOUČASNÉM SOFTWARE

COMPUTATIONAL MODELS OF SOILS USED IN THE CURRENT SOFTWARE

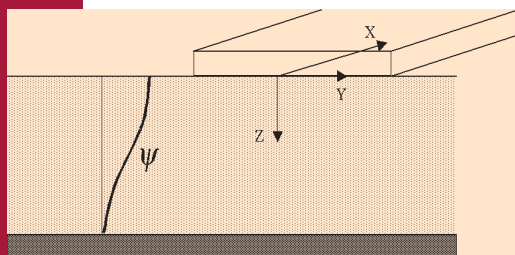
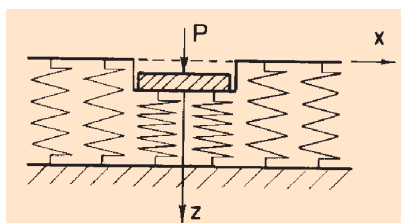
JAN SALÁK

Softwarové programy používané ke geotechnickým výpočtům lze rozdělit do tří skupin dle úrovně geotechnického modelu: řešení horní stavby a její interakce s podložím, řešení geotechnických konstrukcí a řešení na bázi MKP specializované na mechaniku hornin (zemín). Článek podává přehled materiálových modelů používaných v jednotlivých typech programů.

There are three groups of geotechnical software according a level of the geotechnical model: structure solution in interaction with subsoil, solution of geotechnical structures and solution on the base of FEM specialized on rocks and soils. A review of material models used in the software is presented in the article.

V obecném pojetí je geotechnický výpočet složen z řady postupných kroků, počínaje vytvořením geologického modelu podloží, stanovením jeho geotechnických parametrů, vhodnou volbou matematicko-fyzikálního modelu, vlastním matematickým řešením, interpretací výsledků z matematicko-fyzikální analýzy na geotechnický model s případnou úpravou postupu nebo parametrů úlohy a finálními geotechnickými závěry.

Obr. 1 Winklerův model podloží
Fig. 1 Winkler's model of subsoil



V běžných úlohách statiky je aplikace tohoto obecně platného a značně komplexního analytického algoritmu pro řešení geotechnických úloh neefektivní a často zbytečně náročná. Obvykle je možné a nutné řešenou úlohu zjednodušit a abstrahovat od vlivů, které v konkrétním případě mají malý vliv.

Z tohoto hlediska je možno rozdělit používaný software na tři skupiny se specifickým zaměřením a tím i volbou geotechnického modelu:

- programy pro řešení horní stavby a její interakce s podložím, ve kterých je podloží charakterizováno obvykle jen deformační odezvou na zatížení, konstantami při lineárních resp. funkcemi (zatěžovacími křivkami) při nelineárních výpočtech. Typickými představiteli jsou programy FEAT a IDA-NEXIS.

- specializované programy pro řešení jednotlivých geotechnických konstrukcí – často aplikace klasických postupů a norem. Typicky jednotlivé součásti systému GEO4 u nás (patka, pilota, opěrné zdi, stabilita svahu), specializovaný firemní software a mnoho programů zahraničních – například GGU Software v Německu, přehled je možno získat např. na webových stránkách ggsd.com.

- programy na bázi MKP specializované na problematiku mechaniky zemín (hornin) resp. konstrukcí v zemním prostředí. Představiteli mohou být u nás GEO4MKP, v zahraničí Plaxis, Zsoil, Crisp, Geo-Slope a mnohé další.

Záměrně je v tomto přehledu vynechána problematika geoenvironmentální, řešící úlohy přesahující z geotechniky do sousedních oborů (a naopak).

MODELY KVAZI-ELASTICKÉHO CHOVÁNÍ ZEMIN

Úlohy interakce horní stavby a plošných základových konstrukcí s podložím jsou obvykle specifické tím, že řeší konstrukce při běžných zatíženích a podlimitních stavech napjatosti v zemině. Jen za těchto podmínek je přijatelné použití jedno- a dvoupara-

metrických modelů zemín, které obecně nemohou vystihnout skutečný charakter přetvoření zemního prostředí. Pokud tento předpoklad není splněn, je v interakčních úlohách vhodnější použít nelineární přírůstkový výpočet a tuhost podloží pod jednotlivými základovými konstrukcemi zadat zatěžovacími křivkami buď z měření in-situ nebo spočtenými v programech s dokonalejšími materiálovými modely.

Winklerův model podloží (obr. 1), který zanedbává smykové spolupůsobení zeminy v okolí základu, je podmínečně vhodný snad jen pro desky na vrstvě zeminy omezené mocnosti, kde se málo projeví útlum napětí σ_z a kde by smyková složka reakce zeminy způsobovala nereálný nárůst kontaktního napětí a tím namáhání na okrajích desky. Stanovení deformační konstanty např. zkouškou zatěžovací deskou, kde je v deformační charakteristice obsažena i smyková pevnost, je v tomto případě nevhodné, neboť mimo jiné není zajištěna modelová podobnost výchozích předpokladů (šířka b / hloubka aktivní zóny H).

Pro základ na vrstvě zeminy dle obr. 2, při zanedbání vodorovných posunů a při rozdělení svislého posunutí na dvě složky – posun na povrchu w a průběh svislého posunu s hloubkou podloží – funkci y , lze získat podmínku rovnováhy ve svislém směru ve tvaru:

$$C_1 w + C_2 \Delta w - q = 0,$$

kde značí C_1 [kN/m³], C_2 [kN/m] konstantu „winklerovskou“ a konstantu smykové tuhosti podloží, w svislý průhyb a q svislé zatížení povrchu podloží, resp. kontaktní napětí pod základem.

Pro konstanty podloží platí:

$$C_1 = \int_0^h E_{oed} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)^2 dz,$$

$$C_2 = \int_0^h G \psi^2 dz,$$

kde E_{oed} je oedometrický modul a G je smykový modul pružnosti zeminy.

Parametry C_1 , C_2 se liší dle varianty útlu-

Obr. 2 Winkler – Pasternakovo podloží
Fig. 2 Winkler – Pasternak's subsoil

mové funkce a v různých programech jsou definovány odlišně:

- IDA NEXIS používá pro výpočet C_1 , C_2 programový modul SOILIN, který umožňuje volbu z výpočtu sedání dle normy DIN 4019, EC 7 a ČSN 73 1001. Tyto normy obsahují útlumové funkce pružného polo-prostoru (Boussinesq), ČSN může být navíc doplněna o opravné koeficienty hloubky nestlačitelného podloží a strukturální pevnosti zemin, omezující empiricky hloubku aktivní zóny. Hodnoty C_1 , C_2 se iterují pro konkrétní zadanou hodnotu zatížení a rozměry základového prvku.

- FEAT doporučuje stanovit C_1 , C_2 graficky z nomogramu dle Bittnar [5], odvozeného ze vztahů podle Kuklík [6], [7] který zohledňuje E_{def} , ν a poměr b/H . Protože výchozí vztahy platí pro desku, doporučují autoři programu pro základové pasy šířky b přepočítat konstanty dle vztahů

$$C_1^* = bC_1 + \sqrt{C_1 C_2} ,$$

$$C_2^* = bC_2 + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_2^3}{C_1}}$$

Podobně jsou upraveny vztahy pro tuhost podloží pod patkou rozměrů $l \times b$.

- GEO4 moduly Nosník a Deska počítají C_1 , C_2 dle vztahů pro pružnou vrstvu mocnosti H dle Kuklík [6]. Tento postup umožňuje zohlednit vrstevnatost prostředí, jeho přetvárné charakteristiky a hloubku aktivní zóny v závislosti na šířce konstrukce.

Všechny programy umožňují též konstanty zadat pevnou hodnotou.

MODELÝ IDEÁLNĚ PRUŽNO-PLASTICKÉHO PROSTŘEDÍ A JEJICH PARAMETRY

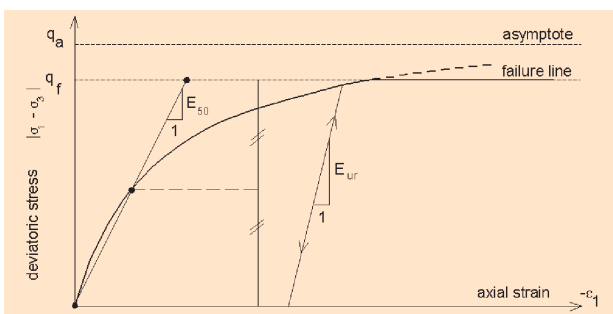
Pro složitější úlohy, kde analytické postupy

Obr. 3 Přetvárný diagram z triaxiální

$$E_{50} \approx E_{oed}$$

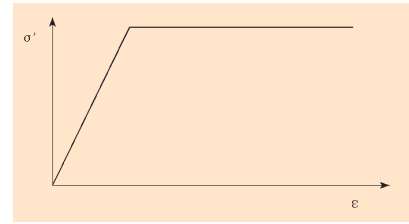
Fig. 3 Stress-strain curve from triaxial

$$E_{50} \approx E_{oed}$$



Obr. 4 Ideálně pružno-plastický model chování materiálu

Fig. 4 An ideal elastic plastic model of the performance of materials

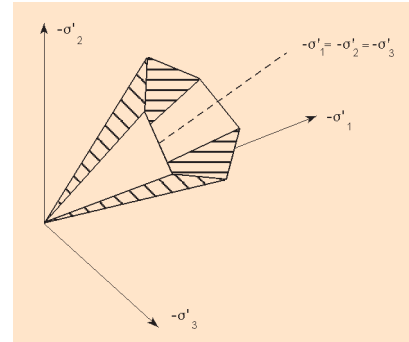


nejsou k dispozici, je numerické modelování zpravidla metodou konečných prvků (MKP) vhodnějším a někdy jediným možným řešením. K výpočtu konstrukce pomocí MKP je třeba jisté zkušenosti uživatele ve výběru materiálového modelu, jeho vstupních parametrů, verifikaci výsledků a zejména v interpretaci – výsledky závisí nejen na správných vstupních údajích, ale i na správně vygenerované síti, okrajových podmínkách apod. Pro algoritmus deformační varianty MKP rozšířený o iterační proces redistribuce napětí za mezí plasticity – obvykle variantu metody počátečních napětí nebo metody Newton-Raphsonovy – je možno použít některý z ideálně pružno-plastických modelů chování zemin.

Lineární model

Lineární model je základní materiálový model, použitý i v ideálně pružno-plastických materiálech před dosažením meze plasticity, který používá lineární převodní vztahy mezi napětím a přetvořením dané Hookeovým zákonem.

Programy vyžadují zadat pro tento model objemovou tíhu zeminy γ [kN/m³], Poissonovo číslo ν , modul přetvárnosti E_{def} [MPa]. Hookeův zákon vyjadřuje závislost mezi napětím σ a přetvořením ϵ pomocí Youngova modulu E (modul pružnosti). Je zřejmé, že u zemin platí lineární závislost pouze pro určitý malý obor přitížení a z odlehčovací větve pracovního diagramu zemin (obr. 3) vidíme, že pružné přetvoření je malé k celkové hodnotě přetvoření. Proto v lineárním modelu používáme modul přetvárnosti E_{def} . Hodnoty modulu přetvárnosti získáme přepočtením E_{oed} z oedometrické zkoušky pomocí koeficientu β , obvyklé hodnoty jsou pro



Obr. 5 Mohr-Coulombova podmínka v hlavních napětích

Fig. 5 Mohr-Coulomb's condition in the main stresses

zeminy uvedeny např. v tab. 11 až 13 normy ČSN 73 1001.

Modifikovaný lineární model

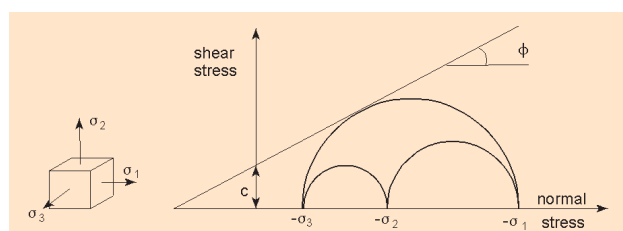
Modifikovaný lineární model vychází z modelu lineárního, pro přitížení používá modul přetvárnosti E_{def} a pro odlehčení modul pružnosti – E_{pr} v programu GEO4 a E_{ur} v Plaxisu. Autoři programu GEO4 doporučují používat tento parametr až ve vyšších modelech, v Plaxisu lze využít až v pružno-plastickém modelu se zpevněním, kde iterační proces zajišťuje zachování rovnováhy. Orientační hodnota modulu pružnosti je $3 E_{def}$. Vhodnější je určit tuto hodnotu z laboratorních zkoušek.

Mohr-Coulomb

Převážná část případů porušení zemin a homin je smykového charakteru, někdy též tahem či kombinací smyku a tahu. Jedním z modelů popisujících stav napětí při porušení je Mohr-Coulombův model.

Obr. 6 Mohr-Coulombova podmínka plasticity

Fig. 6 Mohr-Coulomb's condition of plasticity



Tento model popisuje vývoj nevratných přetvoření materiálu – tedy vznik plastických oblastí při překročení meze plasticity (obr. 4, materiál se do určitého napětí chová lineárně pružně, pak ideálně plasticky). Mohr-Coulombův model je možné definovat pomocí funkce plasticity – mezích funkcí, jejichž zobrazení v hlavních napětích představuje šestiboký jehlan (obr. 5). Tuto podmínku je možné zobrazit v Mohrových kružnicích napětí jako přímkou pro většinu zemin či křivku pro málo zvětralé a zdravé horniny (obr. 6). Tradiční mechanika zemin a částečně i mechanika hornin jsou založené na tomto modelu, parametry jsou známé – např. ČSN 73 1001, nebo zjistitelné základními laboratorními zkouškami. Vstupní parametry vycházejí z lineárního modelu, jsou doplněny o parametry – úhel vnitřního tření φ [°], soudržnost zeminy c [kPa] a úhel dilatace ψ [°].

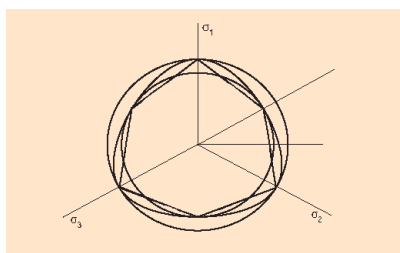
Úhel dilatace udává velikost plastické objemové expanze (dilatace) a během plastického tečení je konstantní. Pokud je $\psi = 0$, předpokládá se, že materiál při smyku nemění svůj objem. Normálně konsolidované jíly vykazují určitou malou míru dilatace, překonsolidované výraznou. Úhel dilatace u písků je závislý na ulehlosti a úhlu vnitřního tření. Orientační hodnota ψ pro ulehlé písků a šterky s úhlem vnitřního tření $\varphi > 30^\circ$ se doporučuje počítat $\psi = \varphi - 30$. Záporná hodnota úhlu dilatace je reálná pouze u extrémně kyprých písků. V běžných případech je však úhel dilatace možno uvažovat rovný nule.

Drucker-Prager

Drucker-Pragerův model upravuje singularitu Mohr-Coulombova modelu na průnicích jednotlivých rovin – funkcí plasticity

Obr. 7 Varianty ploch plasticity M-C, D-P a modifikovaný M-C v deviatorické rovině

Fig. 7 Alternative planes of plasticity M-C, D-P and modified M-C in a deviation plane



ty, v zobrazení pomocí hlavních napětí tvoří kužel. Funkce plasticity je obvykle funkcí opsanou vnějším nebo vnitřním hranám Mohr-Coulombova jehlanu (omezuje ji tak shora nebo zdola), zavádí materiálovou konstantu M_{jp} . V geomechanických aplikacích je nutné vztáhnout tuto materiálovou konstantu k úhlu vnitřního tření φ_{er} dle typu namáhání.

Jiný způsob vyhlazení plochy plasticity pro málo soudržné materiály doporučuje manuál programu GEO4MKP jako Modifikovaný M-C model (obr. 7), avšak spíše než zdokonalování ideálně pružno-plastických modelů dávají lepší výsledky další materiálové modely zavádějící zpevnění materiálu a doplňující deviatorické podmínky plasticity (cone) podmínkami mezích stavů napjatosti (cap plasticity).

MODEL Y PRUŽNOPLASTICKÉHO MATERIÁLU SE ZPEVNĚNÍM A ZMĚČENÍM

Zatímco předchozí modely počítají s nezávislostí pevnostních a přetvárných konstant na stavu napjatosti, jejich další modifikace umožňuje zohlednit mj. nárůst pevnosti (ψ) podle dosažené napjatosti, svázaný s postupnou změnou objemu materiálu. Ta je vyjádřena logaritmickou závislostí mezi číslem pórovitosti a středním efektivním napětím, odlišně pro zatěžování a odlehčování pomocí parametrů κ ; λ a výchozího prekonsolidačního napětí p_c .

Tyto modely dále zavádějí limitní hodnotu nárůstu dilatace, resp. nulovou změnu čísla pórovitosti, za kterou je zemina již v kritickém stavu. Rozlišují tak mezi podmínkou plasticity a podmínkou kritického stavu, pro správný odhad chování zemin je nezbytné vhodně zvolit resp. změřit triaxiální zkouškou kromě klasických parametrů pro Mohr-Coulombův model navíc objemový modul K , součinitele stlačitelnosti a odlehčení κ a λ , počáteční číslo pórovitosti e , součinitel prekonsolidace OCR , stanovit vztah mezi prekonsolidačním napětím a součinitelem K_0 a směrnici kritické čáry M , jejíž hodnota se ovšem liší v programu Plaxis (Hardening soil, Soft soil model) od Modifikovaného Cam Clay modelu, použitého v GEO4MKP.

MODEL Y REOLOGICKÉ

Program Plaxis umožňuje navíc analýzu v totálních napětích za nedrénovaných podmínek a je doplněn i modelem časové změny pórových tlaků při výpočtu klasické primární konsolidace podle Terza-

Literatura:

- [1] Manuál programu GEO4, FINE s.r.o., Praha, 2004, www.fine.cz
- [2] Manuál programu Plaxis 8, Plaxis B.V., Delft, 2003, www.plaxis.nl
- [3] Manuál programu FEAT2000, SmartSoft, Praha, 2001, www.smartsoft.cz
- [4] Manuál programů NEXIS32 a SOILIN, SCIA, Brno, 2002, www.scia.cz
- [5] Bittnar Z., Šejnoha J.: Numerical methods in structural engineering, ASCE Press, 1996
- [6] Kuklík P.: Příspěvek k řešení vrstevnatého podloží, Pozemní stavby, 1984, č. 7
- [7] Kuklík P. a kol.: Příspěvek k řešení hloubky deformační zóny, Sborník 31. konf. Zakládání staveb, Brno, 2003, s. 15–20
- [8] Vaníček I.: Mechanika zemin, skripta ČVUT, Praha 2000
- [9] ČSN 73 1001 Základová půda pod plošnými základy, Praha, 1986

ghiho a do Soft soil modelu dále zavádí creep – sekundární konsolidaci. Platnost modelu resp. jeho parametrů je ovšem závislá na dodržení podobnosti okrajových podmínek (historie zatěžování, rychlost deformace) při laboratorních měřeních a podmínkách zatěžování in-situ. Tyto modely mají větší využití zejména v zemích s častějším výskytem velmi měkkých překonsolidovaných jemnozrných zemin, na které je tento program také zaměřen.

Příspěvek byl zpracován v souvislosti s řešením VZ MŠMT MSM 210000003 „Rozvoj algoritmů počítačové mechaniky a jejich aplikace v inženýrství“

Ing. Jan Salák, CSc.
Katedra geotechniky FSv ČVUT
Thakurova 7, 166 29 Praha 6
tel.: 224 354 908
e-mail: salak@fsv.cvut.cz

PŘEHLED INZERENTŮ V ČÍSLE:

Betosan, s. r. o.	str. 5
Betomax, GmbH & Co KG	str. 21, 57
Skanska DS, a. s.	str. 27
Degussa	
Stavební hmoty, s. r. o.	str. 41
Lias Vintřtřov, LSH, k. s.	str. 46, 47