

Dokumentace programu ParamSeeker 1.0

Tomáš Janda, Jan Vorel

1 Úvod

Program ParamSeeker byl vyvinut jako jednoduchý nástroj pro určení a ověření materiálových parametrů dvou materiálových modelů. Tyto modely - jmenovitě modifikovaný Cam clay a Prucker-Prager s omezením v tlaku - se často vyskytují v nabídce geotechnických softwarů založených na metodě konečných prvků. Program využívá principu zpětné analýzy, tedy hledá takovou sadu materiálových parametrů, se kterými se daří nejpřesněji simulovat danou laboratorní zkoušku.

2 Materiálový model Cam clay

Tento model se hodí při popisu jemnozrnných materiálů, například jílu a spraší. Patří do skupiny tzv. modelů kritického stavu. Originální formulace konstitutivních vztahů modelu byla publikována v [3]. Užitečné informace o modelu lze nalézt též v [2] a v mnoha teoretických manuálech MKP softwarů.

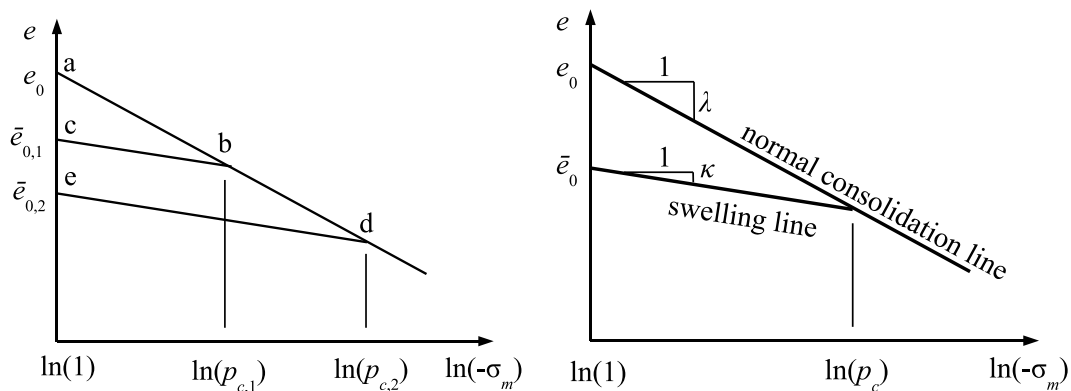
Při klasickém použití model využívá pět nezávislých materiálových parametrů:

- λ – koeficient stlačitelnosti
- κ – koeficient bobtnání
- e_0 – počáteční číslo pórovitosti
- ν – Poissonovo číslo
- M_J – sklon čáry kritického stavu

Materiálové parametry jsou pro jeden druh zeminy konstantní a během výpočtu se nemění. Mimo tyto parametry model využívá jeden tzv. stavový parametr

- p_c – konsolidační tlak, strukturální pevnost

který zohledňuje historii zatěžování zeminy.



Obrázek 1: Bilineární diagram izotropní konsolidace

2.1 Vztah napětí a deformace

Vztah mezi napětím a deformací je založen na následující interpretaci izotropní tlakové zkoušky: Zemina, která nebyla v minulosti vystavena jakémukoliv zatížení se nechá zkonsolidovat hydrostatickým tlakem o hodnotě 1kPa. Výsledná, ryze teoretická, hodnota čísla pórovitosti se nazývá počáteční číslo pórovitosti a označuje symbolem e_0 . Při následném zvyšování všesměrného tlaku působícího na zeminu dochází ke stlačování vzorku a poklesu čísla pórovitosti podle vztahu

$$e = e_0 - \lambda \ln(-\sigma_m) \quad (1)$$

kde koeficient stlačitelnosti λ definuje sklon tzv. čáry prvotní konsolidace (normal consolidation line). Při následném otížení dochází k dilataci zeminy a zvšování čísla pórovitosti podle vztahu

$$e = \bar{e}_0 - \kappa \ln(-\sigma_m) \quad (2)$$

který vyjadřuje čáru odtížení (unloading/reloading line) jejíž sklon je definován koeficientem bobtnání κ . Nejvyšší střední efektivní napětí, kterým byla zemina v průběhu izotropní zkoušky zatížena se nazývá konsolidační tlak p_c a slouží jako stavový parametr modelu Cam clay. Hodnota \bar{e}_0 závisí

$$\bar{e}_0 = e_0 - (\lambda - \kappa) \ln(p_c) \quad (3)$$

Výše uvedené vztahy jsou znázorněny na Obr. 1. Za předpokladu, že samotná zrna zeminy jsou objemově nestlačitelná, můžeme objemové deformace zeminy přímo svázat s její pórovitostí a bilineární diagram izotropní konsolidace vyjádřit ve tvaru

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^{in} - \lambda^* \ln\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_m^{in}}\right) \quad \text{pro počáteční zatěžování} \quad (4)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^{in} - \kappa^* \ln\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_m^{in}}\right) \quad \text{pro odtížení a opětovné přitížení} \quad (5)$$

kde

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e} \quad (6)$$

$$\kappa^* = \frac{\kappa}{1+e} \quad (7)$$

Bez ohledu na stav, ve kterém se zemina nachází platí následující vztahy pro změnu elastické a plastické složky objemové deformace

$$\varepsilon_v^{el,2} = \varepsilon_v^{el,1} - \kappa^* \ln \left(\frac{\sigma_m^2}{\sigma_m^1} \right) \quad (8)$$

$$\varepsilon_v^{pl,2} = \varepsilon_v^{pl,1} - (\lambda^* - \kappa^*) \ln \left(\frac{p_c^2}{p_c^1} \right) \quad (9)$$

První z rovnic lze přepsat jako nelineární elastický zákon v přírůstkovém tvaru

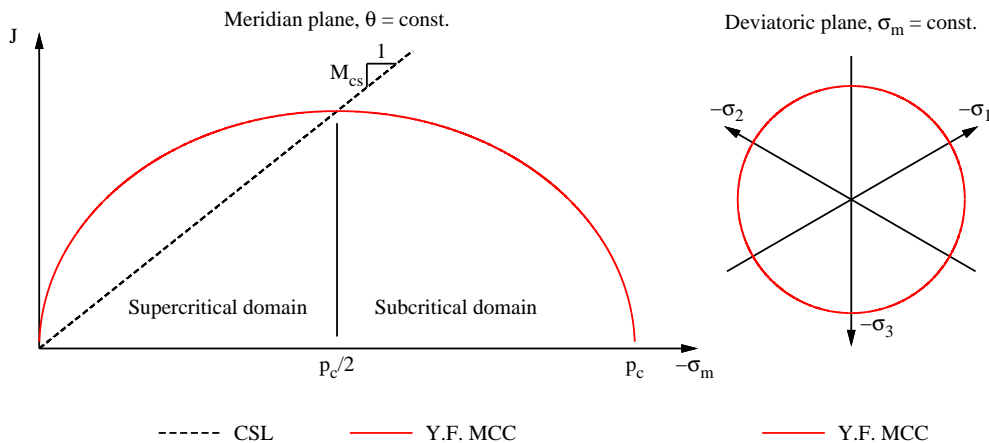
$$\sigma_m^2 = \sigma_m^1 + K_s(\sigma_m^1)(\varepsilon_v^{el,2} - \varepsilon_v^{el,1}) \quad (10)$$

ve kterém aktuální hodnota objemového modulu závisí na aktuálním středním efektivním napětí

$$K_s(\sigma_m^i) = -\frac{\sigma_m^i}{\kappa^*} \quad (11)$$

Takto získaný objemový modul lze spolu s konstantní hodnotou Poissonova čísla použít při výpočtu elastické matice tuhosti.

2.2 Funkce plasticity



Obrázek 2: Funkce plasticity modifikovaného modelu Cam clay

Funkce plasticity, nebo též plocha plasticity, ohraničuje v prostoru hlavních napětí oblast, kde se mechanická odezva materiálu řídí elastickým zákonem a nedochází ke změnám v plastických deformacích. Tvar a velikost této oblasti závisí na parametrech změkčení či zpěvnění κ . Obecně je tato plocha definována rovnicí

$$F(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\kappa}) = 0 \quad (12)$$

Funkce plasticity modelu Cam clay je vyjádřena pomocí středního napětí σ_m a deviačního napětí J

$$F = \frac{J^2}{M_{cs}^2} + \sigma_m^2 + \sigma_m p_c = 0 \quad (13)$$

Tato rovnice určuje eliptický tvar funkce plasticity v tzv. meridiánové rovině prostoru hlavních napětí, jak ukazuje Obr. 2. Tvar plochy plasticity určuje konstantní sklon čáry kritického stavu M_{cs} , zatímco její velikost závisí na proměnném stavovém parametru (parametru zpevnění) p_c . Na rozdíl od klasických materiálových modelů, jakými jsou např. Mohr-Coulomb či Drucker-Prager, elastická oblast modelu Cam clay je uzavřená, což umožňuje plastické porušení zeminy všesměrným tlakem.

2.3 Zákon plastického zpevnění/změkčení

Zákon plastického zpevnění/změkčení je vyjádřen závislostí parametru zpevnění, který řídí velikost plochy plasticity, na plastické deformaci. V modelu Cam clay je jediným parametrem zpevnění konsolidační tlak p_c , který je s vázán s plastickou objemovou deformací rovnicí (9).

3 Izotropní konsolidace

Izotropní konsolidace, zvaná též hydrostatická zkouška, patří mezi standardní geotechnické laboratorní testy. Při zkoušce je saturovaný vzorek zatížen hydrostatickým tlakem, čímž dochází k jeho stlačování a odtoku vody skrze horní drenovanou podstavu. Na spodní podstavě vzorku je měřen pórový tlak, který s postupující konsolidací vzorku klesá. Pro zvolenou sadu materiálových parametrů lze experiment numericky modelovat metodou konečných diferencí [1] a získat tak odpovídající průběh pórového tlaku. Při řešení konsolidace hraje významnou roli koeficient hydraulické vodivosti K [m/s], jehož hodnota v průběhu konsolidace spolu s hodnotou pórovitosti klesá. Závislost aktuální hodnoty koeficientu hydraulické vodivosti na čísle pórovitosti je dána mocninným vztahem

$$K = K_0 \left(\frac{e}{e_0} \right)^m \quad (14)$$

Z podstaty izotropní zkoušky plyne, že zatěžovací dráha odpovídá hydrostatické osa a deviační napětí aplikované na vzorek zůstává po celou dobu experimentu nulové. Proto postup implementovaný v programu ParamSeeker neumožňuje získat informace o tvaru plochy plasticity a stanovit sklon linie kritického stavu M_J a Poissonovo číslo ν .

3.1 Formát datového souboru

Při kalibrování či testování materiálových parametrů modelu Cam clay program ParamSeeker vyžaduje data izotropní konsolidace, t.j. časovou řadu hodnot pórového tlaku. Jednotlivá měření popsaná dvojicemi hodnot času v sekundách a pórového tlaku v kilopascalech jsou uvedena ve formátu CVS, tedy každé měření na novém řádku s hodnotami času a tlaku oddělenými čárkou. Jako desetinné znaménko je třeba použít tečku. Následující příklad ukazuje měření s intervalem 100 s. Pórový tlak při zahájení měření byl 250 kPa, měření bylo ukončeno v čase 800 s s hodnotou pórového tlaku 43 kPa.

0.0, 250.0
100.0, 246.0
200.0, 222.0
300.0, 165.0
400.0, 130.0
500.0, 103.0
600.0, 76.0
700.0, 59.0
800.0, 43.0

Pro správnou funkci programu musí být časové intervaly mezi jednotlivými měřeními konstantní.

4 Jak stanovit parametry modelu Cam clay

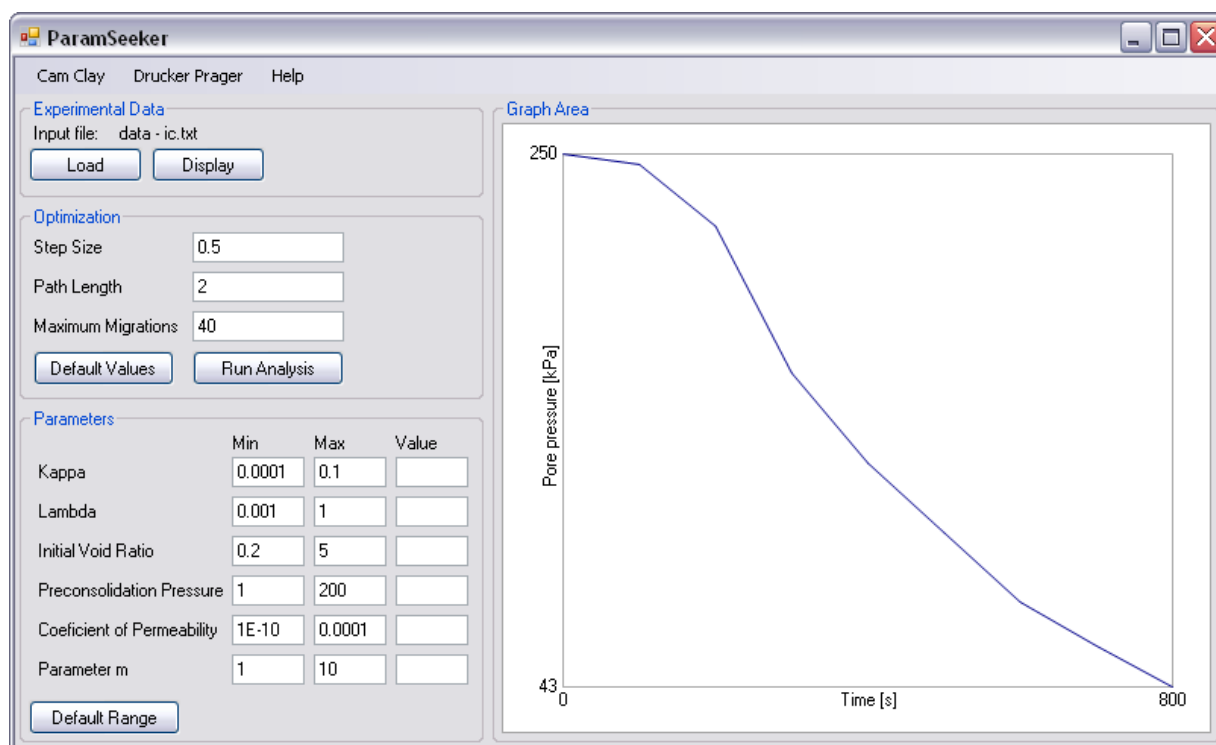
Princip stanovení parametrů modelu Cam clay, který nabízí program ParamSeeker spočívá ve zpětné analýze laboratorní zkoušky, v našem případě izotropní konsolidace. Tato zkouška je numericky simulována pro různé sady materiálových parametrů. Ta sada parametrů, se kterou numerické řešení nejvěrněji kopíruje experimentální data, by měla odpovídat Cam clay parametrům daného vzorku.

1. Zobrazte panel pro Model Cam Clay: Menu -> Cam Clay -> Izotropic Consolidation.
2. Zadejte data izotropní konsolidace: Kliknutím na tlačítko Load a zadejte cestu k datovému CSV souboru. V oblasti Graph Area se modře vykreslí průběh pórových tlaků.
3. Hodnoty dat lze zkontrolovat kliknutím na tlačítko Display.
4. Ve skupině Optimization lze nastavit parametry optimalizátoru. Základní hodnoty jsou Step Size = 0.5, Path Length = 2.0, Maximum Migrations = 40.
5. V oblasti Parameters se nastavují intervaly, ve kterých optimalizátor hledá jednotlivé materiálové parametry. Pokud je některý z parametrů znám např. z jiného experimentu, je vhodné jeho hodnotu zafixovat zúžením jeho intervalu.
6. Optimalizace se spouští tlačítkem Run Analysis ze skupiny Optimization.
7. Po zkončení optimalizace je nejlepší sada parametrů vypsána v oblasti Parameters a jí odpovídající průběh pórových tlaků vykreslen červenou křivkou v oblasti Graph Area.

4.1 Tipy při optimalizaci

- Výpočetní čas optimalizace závisí na počtu měření uvedených ve vstupním souboru, kterých by mělo být cca 10 až 40.
- Pro zpřesnění optimalizace lze zmenšit Step Size, zvětšit Path Length a zvětšit Maximum Migrations.

- Pro zrychlení optimalizace lze zvětšit **Step Size**, zmenšit **Path Length** a zmenšit **Maximum Migrations**.
- Princip zpětné analýzy nezajišťuje jednoznačné řešení. Získané sady parametrů se mohou při opakovaném běhu optimalizace lišit. Výstup lze významně zpřesnit zúžením intervalů pro známé parametry.



Obrázek 3: Panel modelu Cam clay s daty izotropní konsolidace

Reference

- [1] T. Janda, P. Kuklík, and M. Šejnoha, *Mixed experimental numerical approach to evaluation of material parameters of clayey soils*, International Journal of Geomechanics 4 (2004), no. 3, 199–206.
- [2] D. M. Potts and L. Zdravkovič, *Finite element analysis in geotechnical engineering – theory*, Thomas Telford, London, 1999.
- [3] K. H. Roscoe and J. B. Burland, *On the generalised behaviour of 'wet' clay*, Engineering plasticity (J. Heyman and F. A. Lechie, eds.), Cambridge University Press, 1968, pp. 535–609.

Seznam obrázků

- 1 Bilineární diagram izotropní konsolidace 2

2	Funkce plasticity modifikovaného modelu Cam clay	3
3	Panel modelu Cam clay s daty izotropní konsolidace	6

Obsah

1	Úvod	1
2	Materiálový model Cam clay	1
2.1	Vztah napětí a deformace	2
2.2	Funkce plasticity	3
2.3	Zákon plastického zpevnění/změkčení	4
3	Izotropní konsolidace	4
3.1	Formát datového souboru	4
4	Jak stanovit parametry modelu Cam clay	5
4.1	Tipy při optimalizaci	5