WTNV124 - Essai de désaturation-consolidation avec le modèle de Barcelone

Résumé :

Ce test permet de valider le modèle de Barcelone, qui intègre une loi mécanique élasto-plastique couplée à l'hydraulique (et éventuellement à la thermique) en condition de non saturation de la phase liquide. Cette loi intègre un mécanisme hydrostatique élasto-plastique (dont la partie élastique est non-linéaire et le seuil d'écoulement correspond à une pression de consolidation variable avec la succion) couplé à un mécanisme déviatorique élasto-plastique. Les caractéristiques de ces mécanismes dépendent de la succion (c'est-à-dire de la différence entre pression de gaz et pression de liquide). Il existe en particulier deux mécanismes d'écrouissage en pression et succion complètement couplés. La surface de charge du modèle de Barcelone se présente (dans le diagramme pression hydrostatique-déviateur et pour une succion donnée) sous la forme d'une ellipse coupant l'axe hydrostatique en deux points : la valeur de la pression de consolidation et la cohésion du matériau proportionnelle à la succion. En condition de saturation complète, ce critère se réduit à celui du modèle Cam-Clay spécifique aux sols normalement consolidés saturés.
Le présent test effectué en couplage hydro-mécanique (modélisation HHM) comprend deux trajets de chargement :

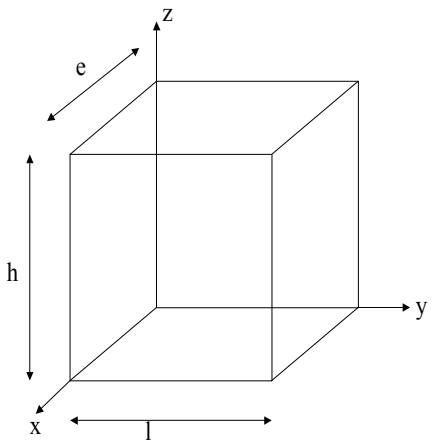
1) un trajet de désaturation en faisant augmenter la pression capillaire au-delà du seuil de plasticité hydrique,
2) un trajet de compression hydrostatique sur l'échantillon désaturé.

La modélisation est réalisée en 3D.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Problème de référence

1.1 Géométrie



hauteur : $h=1\mathrm{m}$
largeur : $l=1\,m$
épaisseur : $e=1\,m$

1.2 Propriétés du matériau

Propriétés thermo-élastiques :

$E=22.4\,E7\,Pa$
$\nu=0.3$
$\rho=2500\,kg/m^3$

- Module de cisaillement $\mu=7.76\,10^6\,Pa$
- Porosité initiale $PORO=0.14$
- Module de compressibilité plastique en saturé $\lambda=0.25$,
- Module de compressibilité élastique $\kappa=0.05$,
- Pente de la droite critique $M=0.9$,
- Pression critique égale à la moitié de la pression de consolidation à saturation $PRES_CRIT=3.E7Pa$,
- Pression de référence $PA=1.E5$ Pa
- Paramètres permettant de calculer le module de compressibilité en fonction de la succion $\lambda(p_c)=\lambda(0)\left[(1-r)\exp(-\beta p_c)+r,\right]$
  $r=0.75,\beta=12.5\,E-6$
- Pente de cohésion $k_c=0.6$
- Seuil initial de la succion PC0_INIT $p_{c0}(0)=6E7$
- Module de compressibilité élastique de la succion $\kappa_s=0.01$
- Module de compressibilité plastique de la succion $\lambda_s=0.05$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Propriétés hydrauliques : les propriétés hydrauliques du matériau qui sont indépendantes du modèle de Barcelone mais néanmoins nécessaires pour effectuer le calcul couplé sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Eau liquide	Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	1.10^3
	Chaleur à pression constante ($J.K^{-1}$)	4180
	Inverse du coefficient de compressibilité (Pa^{-1})	0.510^{-9}
	Perméabilité intrinsèque (m^2)	1.10^{-18}
	viscosité	1.10^{-3}
Etat initial	Porosité	0,14
	Température (K)	293
	Pression capillaire (Pa)	$1.51\ 10^7$
	Pression de gaz (Pa)	$1.51\ 10^5$
	Saturation initiale en liquide	0,99
Constantes	Constante des gaz parfaits	8,315
Coefficients homogénéisés	Masse volumique homogénéisée ($kg.m^{-3}$)	2400
	Courbe capillaire	$S(P_c) = 0.99\left(1 - 6\ 10^{-9}\ p_c\right)$
	Coefficient de Biot	1

1.3 Conditions aux limites et chargements

Le premier trajet de chargement consiste à effectuer une désaturation , avec une pression hydrostatique constante $P = 1.E7\,Pa$ (la pression de gaz est maintenue constante à $PRE2 = 1.E5\,Pa$ pendant tout l'essai). La pression capillaire varie de zéro jusqu'à $PRE1 = 7.E7\,Pa$, au-delà du seuil de plastification égal initialement à $PRE1 = 6.E7\,Pa$. L'écrouissage dû à l'augmentation de succion provoque une augmentation du seuil de consolidation, puisque les deux écrouissages hydrique et mécanique sont couplés dans le modèle de Barcelone. On le vérifie en suivant le second trajet consistant à exercer une pression hydrostatique dépassant le seuil initial ($P_{con} = 6.E7Pa$) sans provoquer de plastification.

1.4 Conditions initiales

La contrainte initiale (contrainte effective de Bishop) est choisie de telle façon que la contrainte utilisée dans le comportement ($\sigma = \sigma_T + p_{gz} 1^d$) se trouve à l'intérieur de la surface de charge.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Solution de référence

En l'absence de chargement déviatorique, une solution exacte est disponible pour les déformations et les seuils d'écrouissage à tous les stades du chargement :

Déformation volumique réversible en chargement mécanique $\varepsilon_v = \frac{\kappa}{1+e_0} Ln \frac{P}{P_0}$

Déformation volumique réversible en chargement hydrique $\varepsilon_v = \frac{\kappa_s}{1+e_0} Ln \frac{p_c + p_{atm}}{p_{atm}}$

Déformation volumique totale en chargement hydrique, après franchissement du seuil : $\Delta\varepsilon_v = \frac{\lambda_s}{(1+e_0)} Ln \frac{p^+_c + p_{atm}}{p^-_c + p_{atm}}$ si $p_c > p_{c0}$

Déformation volumique totale en chargement mécanique, après franchissement du seuil de consolidation : $d\varepsilon_v = \frac{\lambda(p_c)}{1+e_0} \frac{dP}{P}$

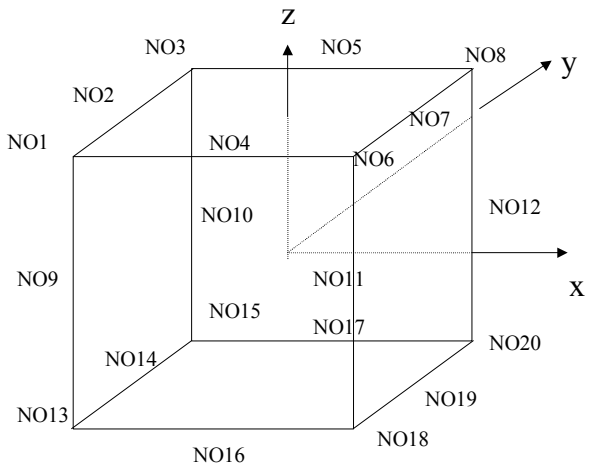
Couplage des seuils : $\frac{dp_{c0}}{p_{c0} + p_{atm}} = \frac{\lambda - \kappa}{\lambda_s - \kappa_s} \frac{dP_{cr}}{P_{cr}}$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D



3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 20
Nombre de mailles : 1 de type HEXA 20
6 de type QUAD 8

On définit les mailles suivantes :

DROITE	*NO3 NO5 NO8 NO10 NO12 NO15 NO17 NO20*
GAUCHE	*NO1 NO4 NO6 NO9 NO11 NO13 NO16 NO18*
DEVANT	*NO6 NO7 NO8 NO11 NO12 NO18 NO19 NO20*
DERRIERE	*NO1 NO2 NO3 NO9 NO10 NO13 NO14 NO15*
BAS	*NO13 NO14 NO15 NO16 NO17 NO18 NO19 NO20*
HAUT	*NO1 NO2 NO3 NO4 NO5 NO6 NO7 NO8*

Pour représenter la 1/8ème de la structure, les conditions aux limites en déplacement imposées sont :

Sur la face BAS : $DZ=0$
Sur la face $GAUCHE$: $DY=0$
Sur la face $DERRIERE$: $DX=0$

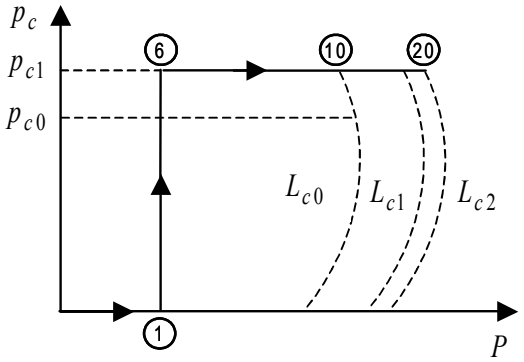
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Le chargement est constitué de la même pression répartie en compression sur les 3 mailles : *'HAUT'*, *'DROITE'* et *'DEVANT'* pour simuler un essai hydrostatique. Tous les nœuds sont astreints à une pression de gaz constante et à une succion variant de 0 à $7.10^{7\text{Pa}}$

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3.3 Grandeurs testées et résultats

Il s'agit d'un essai homogène, le lieu d'observation des champs est indifférent. On testera le déplacement u_z au nœud 8 à l'instant 1 (fin du trajet hydrostatique), à l'instant 6.0 (franchissement du seuil hydrique) ainsi que les variables internes d'indicateur de plasticité et pression critique au même nœud. On teste ensuite les mêmes champs à l'instant 10 (chargement purement hydrostatique en franchissant l'ancien seuil donc sans plastification) et enfin à l'instant 20 où l'on franchit le nouveau seuil mécanique (plastification).



Valeurs de u_z :

	Instant	Référence
1 er chargement	1.	-2.324-03
2eme chargement	6.0	-1.0621-02
3eme chargement	10.0	-1.3549-02
4eme chargement	20.	-1.779-02

Indicateur plastique (seuil mécanique) :

	Instant	Référence
1 er chargement	1.	0
2eme chargement	6.0	0
3eme chargement	10.0	0
4eme chargement	20.	1

Indicateur d'irréversibilité hydrique :

	Instant	Référence
1 er chargement	1.	0
2eme chargement	6.0	1
3eme chargement	10.0	0
4eme chargement	20.	0

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Valeur du seuil hydrique :

	Instant	Référence
1 er chargement	1.	3E+05
2eme chargement	6.0	4E+05
3eme chargement	10.0	4E+05
4eme chargement	20.	4.3913E+5

Valeur du seuil mécanique :

	Instant	Référence
1 er chargement	1.	2E+05
2eme chargement	6.0	3.8368E+05
3eme chargement	10.0	3.8368E +05
4eme chargement	20.	4E+05

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Synthèse des résultats

On obtient des résultats sur les déplacements ou les valeurs des seuils de consolidation très proches de la solution analytique et, ce, que l'on soit dans le domaine plastique ou réversible.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)