WTNV126 – Réponse à des chemins mixtes de saturation-consolidation avec le modèle de Barcelone

Résumé :

Le but de ce test est de montrer la capacité du modèle de Barcelone à décrire la réponse à des chemins complexes de chargement. En particulier, l'expérience met en évidence l'unicité de la réponse en terme de déformation volumétrique à des sollicitations mixtes (pression mécanique et pression capillaire) empruntant des chemins différents mais à degré de saturation croissant et aboutissant au même état de contrainte (existence d'une surface d'état en l'absence de sollicitations désaturantes). En revanche, on sait que les phases de désaturation détruisent l'unicité de la réponse en déformation.
On soumet donc un échantillon de sol initialement partiellement désaturé à une succession de sollicitations homogènes en pression hydrostatique et pression capillaire :

I. Une sollicitation mixte sans désaturation, avec deux trajets conduisant au même état en contrainte nette et pression capillaire:

1) un trajet en pression hydrostatique jusqu'à une pression $P1$ supérieure au seuil de consolidation puis une resaturation complète du matériau .
2) un trajet de mouillage (diminution de la pression capillaire) jusqu'à resaturation complète puis consolidation jusqu'à la pression $P1$. On observe alors l'unicité du déplacement résultant des deux chemins de contrainte.

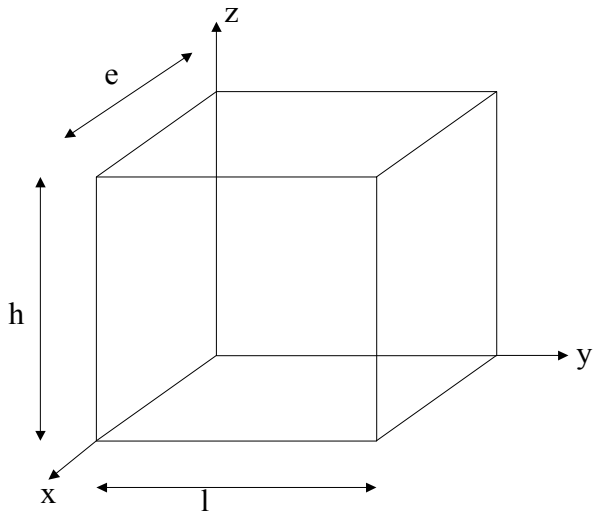
II. On poursuit la sollicitation à partir du point de charge précédent, avec toujours deux trajets conduisant au même état de contrainte mécanique et pression capillaire :

1) un trajet en pression hydrostatique jusqu'à une pression $P2 > P1$ puis une désaturation du matériau .
2) un trajet de séchage (désaturation) puis consolidation jusqu'à la pression $P2$. On observe alors une différence significative entre les déplacements issus des deux chemins.

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

- Module de cisaillement $\mu=2.76\,10^{6}\,Pa$
- Porosité initiale $PORO=0.14$
- Module de compressibilité plastique en saturé $\lambda=0.2$,
- Module de compressibilité élastique $\kappa=0.02$,
- Pente de la droite critique $M=1.$,
- Pression critique égale à la moitié de la pression de consolidation à saturation $PRES_CRIT=2.\,10^{5}\,Pa$,
- Pression de référence $PA=10^{5}\,Pa$
-
- Paramètres permettant de calculer le module de compressibilité en fonction de la pression capillaire $\lambda(p_c)=\lambda(0)\left[(1-r)\exp(-\beta\,p_c)+r,\right]$
- $r=0.75,\beta=12.5\ 10^{-6}$
- Pente de cohésion $k_c=0.6$
- Seuil plastique initial de la pression capillaire PC0_INIT $P_{c0}(0)=3\,10^{5}\,Pa$

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

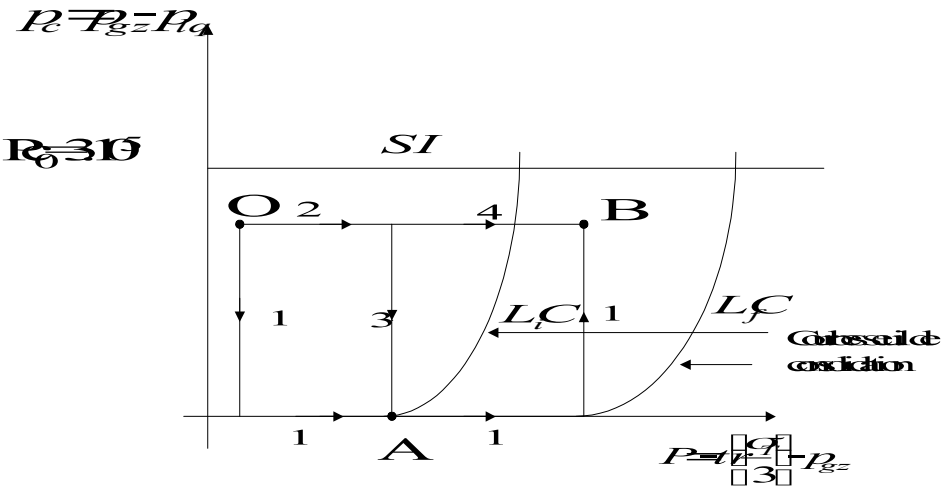
- Module de compressibilité élastique de la succion $\kappa_s = 0.008$
- Module de compressibilité plastique de la succion $\lambda_s = 0.08$

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
	coefficient de dilatation thermique du liquide (K^{-1})	10^{-4}
Squelette	Capacité calorifique à contrainte constante	800
Etat initial	Porosité	0,14
	Température (K)	293
	Pression capillaire (Pa)	$2\ 10^5$
	Pression de gaz (Pa)	10^5
	Saturation initiale en liquide	0,1
Constantes	Constante des gaz parfaits	8,315
Coefficients homogénéisés	Masse volumique homogénéisée ($kg.m^{-3}$)	2400
	Courbe capillaire	$S(P_c) = 0.99(1 - 4.49.10^{-6} p_c)$
	Coefficient de Biot	1

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

1.3 Conditions aux limites et chargements



Chemin 1 jusqu'au point A (mouillage ensuite compression hydrostatique)

A partir d'un état non saturé et d'un état de contraintes initiales choisis de telle façon que la contrainte nette ($\sigma = \sigma_T + p_{gz} 1^d$) se trouve à l'intérieur du critère, l'échantillon est mouillé jusqu'à saturation complète. Ensuite, il est soumis à une compression hydrostatique avec plastification.

Chemin 2 et 3 jusqu'au point A (compression hydrostatique ensuite mouillage)

A partir du même état initial, on comprime l 'échantillon avant de le mouiller complètement.

Ainsi on compare la réponse en déplacement de l 'échantillon au point A .

Chemin 4

On poursuit le chargement hydrostatique à l'état non saturé, initié par le chemin 2, jusqu'au point B .

Chemin 1 du point A au point B

Le chargement hydrostatique est poursuivi à partir de A jusqu'à un certain niveau de compression hydrostatique, ensuite l'échantillon est soumis à un séchage jusqu'au point B .

Ainsi on compare la réponse en déplacement de l 'échantillon au point B , issue du chemin 1 et celle issue du chemin 2 et 4.

1.4 Conditions initiales

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

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 du critère.

2 Solution de référence

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 : $d\varepsilon_v = \frac{\lambda(p_c)}{1+e_0} \frac{dP}{P}$

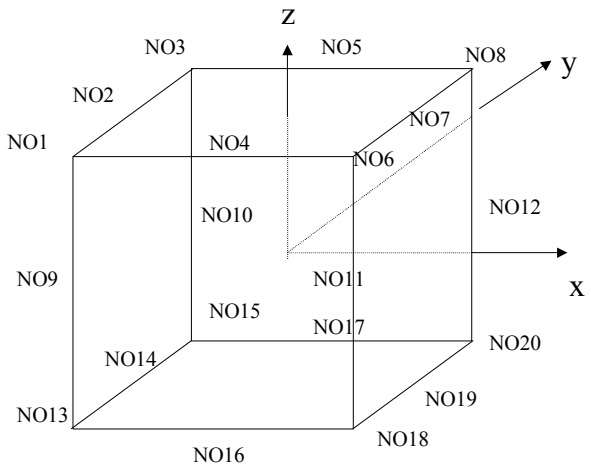
Couplage des seuils : $\frac{dp_{c0}}{p_{c0} + p_{atm}} = \frac{\lambda - \kappa}{\lambda_s - \kappa_s} \frac{dP_{cr}}{P_{cr}}$

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 $DERRIERE$: $DX=0$

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.

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 $NO8$ ainsi que les variables internes $v1$ (la pression critique), $v2$ (l'indicateur de plasticité), $v4$ (indicateur d'irréversibilité hydrique) au même noeud.

Au point A :

Valeurs de u_z :

	Instant	Référence	*Aster*	% différence
Chemin 1	12.	-3.2671-02	-3.264935-02	-0.066
Chemins 2 et 3	12.	-3.2660-02	-3.264929-02	-0.033

Valeurs de $v1$ (Pression critique) :

	Instant	Référence	*Aster*	% différence
Chemin 1	12.	3.+05	3.0000024+05	1.48E-06
Chemins 2 et 3	12.	3.+05	3.0000000+05	6.92E-09

Valeurs de $v2$ (indicateur de plasticité mécanique) :

	Instant	Référence	*Aster*	% différence
Chemin 1	12.	1.	1.	-
Chemins 2 et 3	12.	1.	1.	-

Valeurs de $v4$ (indicateur d'irréversibilité hydrique) :

	Instant	Référence	*Aster*	% différence
Chemin 1	12.	0	0	-
Chemins 2 et 3	12.	0	0	-

Au point B :

Valeurs de u_z :

	Instant	Référence	*Aster*	% différence
Chemin 1	24.	-1.8415-02	-1.84048-02	-0.055
Chemin 4	12.	-4.4036-02	-4.40067-02	-0.066

Valeurs de $v1$ (Pression critique) :

	Instant	Référence	*Aster*	% différence
Chemin 1	24.	3.5+05	3.50000047+05	-1.55E-05
Chemin 4	12.	6.81280+05	6.81230+05	-0.007

Valeurs de $v2$ (indicateur de plasticité mécanique) :

	Instant	Référence	*Aster*	% différence
Chemin 1	24.	1.	1.	-
Chemin 4	12.	0.	0.	-

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

Valeurs de $v4$ (indicateur d'irréversibilité hydrique) :

	Instant	Référence	*Aster*	% différence
Chemin 1	24.	0	0	-
Chemin 4	12.	0	0	-

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

4 Synthèse des résultats

On remarque que les résultats obtenus au point A suite au mouillage et à la compression hydrostatique (chemin1) ou suite à la compression hydrostatique et au mouillage (chemins 2 et 3) sont presque identiques alors que ceux obtenus au point B suite à une compression hydrostatique d'un sol non saturé (chemin 4) ou suite à la compression hydrostatique d'un sol saturé et de son séchage (chemin 1) ne sont pas identiques.
Ces constatations sont bien reproduites par Code_Aster et confortées expérimentalement en fonction de la croissance monotone ou non monotone de la saturation.

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