SSNV202 – Essai œdométrique drainé avec les lois de CAM_CLAY et KH_CSSM

Résumé

Ce test de compression œdométrique drainé (en *mécanique pure,* équivalent à des conditions hydrauliques drainées) permet de valider les lois élastoplastique s C AM_CLAY et KH_CSSM, spécifiques aux comportements des sols, présentant sous ce chargement un régime élastique non linéaire et un régime plastique durcissant.

La modélisation A utilise le modèle C AM_CLAY et pilote l'essai par un déplacement imposé croissant monotone, on part d'un état du sol normalement consolidé à $p_{co}=10^{+4}Pa$. La modélisation B utilise le modèle KH_CSSM et pilote l'essai par une pression imposée avec des cycles de décharges . Pour chacune des deux lois , les grandeurs calculées sont comparées aux résultats issus du logiciel FLA C de calcul de mécanique des sols dans la modélisation A et aux résultats issus d' un calcul mtest au point matériel dans la modélisation B.

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

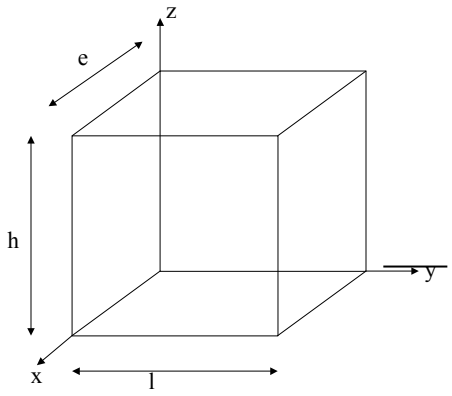
Table des matières

1Problème de référence....3
1.1Géométrie....3
1.2Propriétés du matériau....3
1.3Conditions aux limites et chargements....4
1.4Conditions initiales....5
2Modélisation A....6
2.1Caractéristiques du maillage....6
2.2Caractéristiques de la modélisation....6
2.3Grandeurs testées et résultats....7
2.3.1Valeurs testées....7
2.4Synthèse et commentaires....7
3Modélisation B avec la loi KH_CSSM....10
3.1Caractéristiques du maillage....10
3.2Caractéristiques de la modélisation....10
3.3G randeurs testées et résultats....10
4Références bibliographiques....11

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie



L'essai œdométrique est effectué sur un domaine de forme cubique : hauteur : $h=1\,m$, largeur : $l=1\,m$, épaisseur : $e=1\,m$.

1.2 Propriétés du matériau

L a masse volumique est $\rho=1900\,kg/m^3$.
Les propriétés élastiques sont :

- coefficient de Poisson : $\nu=0.3$
- module d e Young : $E=7.2.10^{+5}Pa$.

Les paramètres spécifiques à la loi élastoplastique CAM_CLAY sont (cf. [R7.01.14]) :

Dans la modélisation A :

Module de cisaillement : $\mu=276923.Pa$, $e_0=2$ donc $\phi_0=0.667$, $\lambda=0.2$ (coefficient de compressibilité), $\kappa=0.05$ (coefficient de gonflement), $M=1.02$ (pente de la droite d'état critique ; correspond à un angle de frottement de 25,85 degrés), $P_{cr}^0=5.10^3\,Pa$ (pression critique : sol normalement consolidé), $K_{cam}=0$, $P_{trac}=0$.

Remarque : *L ' indice de vide initial e_0 est associé à la porosité initiale φ_0 par la relation $e_0=\phi_0/(1-\phi_0)$.*

Du fait de la loi élastique non linéaire retenue, il est nécessaire de vérifier la cohérence des données mécaniques initiales avec l'état de contraintes initial : en effet, la loi élastique non-linéaire s'écrit comme suit :

$$\dot{P}'=K\,\dot{\varepsilon}_v^e=\frac{P'(1+e_0)}{\kappa}\,\dot{\varepsilon}_v^e \qquad [1]$$

$$\dot{\mathbf{s}}=2G\,\dot{\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}} \qquad [2]$$

où P' représente la contrainte effective volumique, K^t le module de compressibilité tangent, G le module de cisaillement, ε_v^e la déformation élastique volumique, $\mathbf{s}$ le tenseur du déviateur des

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

contraintes et $\widetilde{\varepsilon}$ celui des déformations. Le symbole $*$ indique la dérivée par rapport au temps des quantités considérées.

On voit que l'aspect non-linéaire de la loi est porté par la partie volumique, avec un module de compressibilité K dépendant de l'état de contrainte effective volumique P'. La partie déviatorique reste linéaire, avec un module de cisaillement déterminé à partir des données élastiques. Il s'avère ainsi nécessaire de vérifier initialement la cohérence entre les valeurs de G et de K, et plus exactement, de vérifier que l'on a bien au départ $0<\nu<0.5$. On arrive ainsi aux conditions suivantes :

$$P'\geq 0 \text{ et } E<\frac{3P'(1+e_0)}{\kappa} \quad [3]$$

La première condition indique que l'on ne tolère pas d'état de contrainte volumique négatif (condition de stabilité du matériau poroélastique), tandis que la seconde revient à majorer la valeur de E en fonction de l'état de contrainte volumique actuel. Ainsi, partant d'un état normalement consolidé, soit $P'_0=p_{co}$, la seconde inégalité montre qu'un module bien choisi doit respecter la condition :

$$E<1.810^6 Pa \quad [4]$$

Les p aramètres spécifiques à la loi élastoplastique `K H_CSSM` sont (cf. [R7.01.44]) :

Dans la modélisation B :

- paramètres élastiques : $K=100.10^6 Pa$, $G=60.10^6 Pa$, $\kappa=2.10^2$,
- $p_{c0}=10.10^6 Pa$, $p_{t0}=1.10^6 Pa$, $M=1$, $a_{bp}=1$, $m_{bp}=2$, $\omega=5.10^1$,
- paramètres d'écrouissage déviatorique cinématique : $H=30.10^6 Pa$, $r=1$.

Remarque : *L a loi* `K H_CSSM` *utilise les paramètres géométriques* $a_{bp}=1$ *et* $m_{bp}=2$ *pour d éfinir un domaine de réversibilité elliptique identique à celui de la loi* `CAM_CLAY` *. Le paramètre* κ *n'a pas la même signification dans les deux lois. Le lecteur est invité à se référencer aux documents [R7.01. 14] et [R7.1.44] pour leur interprétation respective.*

1.3 Conditions aux limites et chargements

Remarque : *Un essai œ dométrique consiste à imposer à l'éprouvette une variation de charge verticale (en effort ou déplacement) tout en maintenant les déformations latérales nulles . Il peut être drainé (la pression interstitielle de fluide ne varie pas au cours de l'essai) ou non-drainé (la pression interstitielle de fluide évolue dans l'échantillon). On s'intéresse ici au cas drainé. La pression effective notée* P' *est donc égale à la pression* P *.*

Dans la modélisation A :

L'essai œ dométrique est effectué avec un état de contraintes homogènes initié à $P^0_{cons}\mathbf{Id}$ avec $P^0_{cons}=2P^0_{cr}$ la préconsolidation.

La charge verticale est pilotée en déplacement variant de $u_z=0$ à $u_z=-0.1m$ (déformation maximale axiale de compression de 10%), entre $t=0.$ et $t=10.$, sur la face supérieure de l'échantillon cubique .

Dans la modélisation B :

L'essai œ dométrique est effectué avec un état de contraintes homogène initié à 0 . La charge verticale est pilotée en effort variant la force pression $-\sigma_{zz}$ selon le chemin $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4$ avec $P_1=15.10^6 Pa$, $P_2=1.10^4 Pa$, $P_3=30.10^6 Pa$ et $P_4=1.10^4 Pa$ s ur la face supérieure de l'échantillon cubique .

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

1.4 Conditions initiales

Dans la modélisation A :

L'opérateur CREA_CHAMP permet de définir cet état de contrainte initial iso trop e homogène $P^0_{cons}\mathbf{Id}$ sur tout l'élément aux points de G auss . Le régime élastique au cours du chargement est nul (cas d'un sol normalement consolidé) .

Dans la modélisa t ion B :

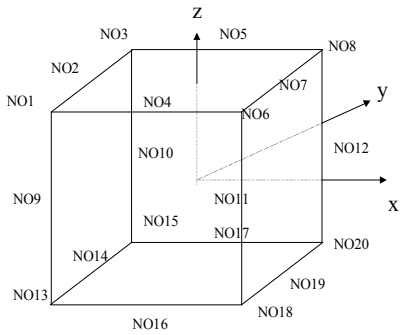
L' état de contrainte est initié à 0 . Le début du chargement suit une évolution élastique (cas d'un sol sur-consolidé).

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

2 Modélisation A

2.1 Caractéristiques du maillage

Modélisation 3D .



Nombre de nœuds : 20
Nombre de mailles : 1 de type HEXA20
6 de type QUAD8

On définit les mailles suivantes, cf. figure :

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*

2.2 Caractéristiques de la modélisation

La modélisation A avec la loi CAM_CLAY de type 3D est *tridimensionnelle* et *statique non linéaire*.

La préconsolidation initiale de l'échantillon est égale à $p_{co}=10^{+4}\,Pa$. On vérifie que le module de Young respecte l'inégalité [4] : $E<1.8\times10^{+6}\,Pa$.

La charge verticale est pilotée en déplacement variant de $u_z=0$ à $u_z=-0.1\,m$ (déformation maximale axiale de compression de 10%), entre $t=0.$ et $t=10.$ en 70 pas de temps, sur la face supérieure de l'échantillon cubique (groupe de mailles $HAUT$) . Lors du calcul, on active la subdivision automatique du pas de temps pour gérer les situations de non convergence de l'intégration locale.
Dans cette modélisation A, s ur l e groupe de mailles $HAUT$, DZ varie donc entre 0 et $-0.1\,m$ (déformation axiale de 10% en compression).

Dans l'intégration des équations d'équilibre, on demande une réactualisation de la matrice tangente, laquelle est fournie par les routines de la loi CAM_CLAY et accélère sensiblement la convergence. On

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

demande également la subdivision du pas de temps (commande DEFI_LIST_INST) pour traiter les situations d'échec de l'intégration locale dues à des incréments de chargement trop grands.

Pour représenter un essai œdométrique, les conditions aux limites communes aux modélisations A et B sont (conditions de symétrie, car l'élément cubique représente un huitième de l'échantillon) :

- Sur le groupe de maille $DEVANT$ et $DERRIERE$: $DX=0$.
- Sur le groupe de maille $GAUCHE$ et $DROITE$: $DY=0$.
- Sur le groupe de maille BAS : $DZ=0$.

2.3 Grandeurs testées et résultats

2.3.1 Valeurs testées

Les solutions sont calculées au nœud $NO8$ pour 4 niveaux de déformation ε_{zz} et comparées à des solutions FLA C fournies par E DF/ CIH . Elles sont données en termes de pression moyenne P , de contrainte équivalente Q et d'indice des vide e . Celles-ci sont synthétisées par le s tableau x ci-dessous :

$P'=\frac{1}{3}\mathrm{tr}(\boldsymbol{\sigma}')$ (variable interne V3)

ε_{zz}	$P(Pa)$ Code_Aster	$P(Pa)$ FLAC	% différence
-0.1%	10132.3	10070.0	6.185999E-01 %
-0.5%	10505.9	10500.0	5.612671E-02 %
-1%	11014.5	11010.0	4.103812E-02 %
-2%	12499.3	12480.0	1.546621E-01 %
-10%	41989.0	41840.0	3.561562E-01 %

$Q=\sqrt{\frac{3}{2}s:s}$ (variable interne $V4$)

ε_{zz}	$Q(Pa)$ Code_Aster	$Q(Pa)$ FLAC	% différence
-0.1%	514.6	521.0	1.220654E+00 %
-0.5%	1998.8	2016.0	8.555258E-01 %
-1%	3051.1	3068.0	5.502329E-01 %
-2%	4189.7	4219.0	6.945647E-01 %
-10%	12904.9	13020.0	8.836658E-01%

e (variable interne $V7$)

ε_{zz}	e Code_Aster	e FLAC	% différence
-0.1%	1.998	1.997	3.004507E-02 %
-0.5%	1.986	1.985	3.022670E-02 %
-1%	1.971	1.970	3.045685E-02 %
-2%	1.941	1.940	3.092784E-02 %
-10%	1.701	1.700	3.529412E-02 %

2.4 Synthèse et commentaires

On représen t e sur les Figure 2.4-1 et Figure 2.4-2 les différentes comparaisons entre Code_Aster et GEFDYN, en termes de trajet de chargement dans le plan (P',Q) (Figure 2.4-1) (avec $P'=P$ dans cet essai drainé) , et d'évolution de l'indice des vides (Figure 2.4-2). Dans cette dernière, on fait apparaître deux solutions Code_Aster :

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

- La solution en une phase, qui correspond à la modélisation A.
- La solution en deux phases, où l'on a remplacé l'affectation du champ de contrainte initiale P^0_{cons} (CREA_CHAM) par le calcul de la loi élastoplastique CAM_CLAY sous consolidation isotrope jusqu'à la pression P^0_{cons} .

La procédure adoptée dans la modélisation A étant celle utilisée pour le calcul FLAC. En termes de trajet de chargement dans le plan (P',Q), on retrouve une excellente convergence des solutions entre FLAC et ASTER, aussi bien en une phase qu'en deux. En ce qui concerne, en revanche, l'indice des vides, si la solution Code_Aster en une phase coïncide bien avec la solution FLAC, il en est tout différemment pour la solution Code_Aster en deux phases. Ceci s'explique aisément : lors du chargement isotrope avec la loi CAM_CLAY, l'indice des vides a évolué, passant de $e_0=2$ à $e\approx 1.82$. Ce résultat montre donc en quoi les deux approches (en une ou deux phases) ne sont pas tout à fait équivalentes, et qu'il convient d'en avoir conscience.

Figure 2.4-1: Trajet de chargement de le plan (P',Q) : comparaison entre les solutions Code_Aster et FLAC.

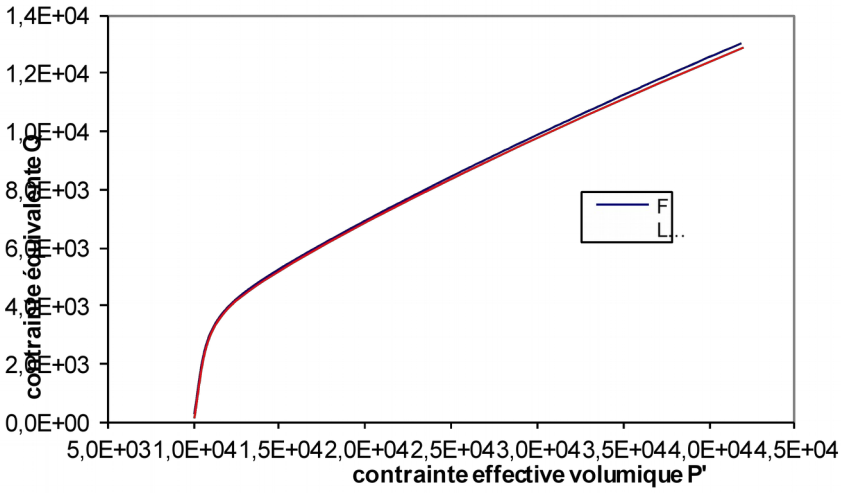
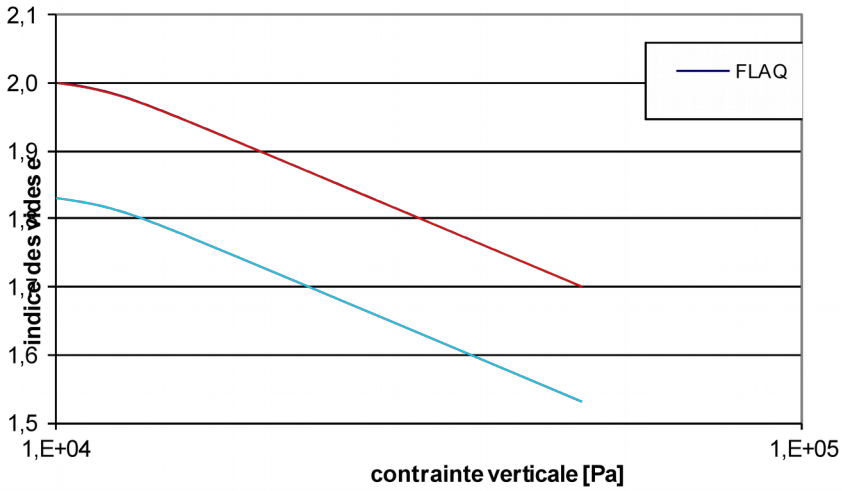


Figure 2.4-2: Indice des vides en fonction de la contrainte verticale : comparaison entre les solutions FLAC et Code_Aster pour deux calculs : en une phase et en deux phases.



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

3 Modélisation B avec la loi KH_CSSM

3.1 Caractéristiques du maillage

I dem à la modélisation A.

3.2 Caractéristiques de la modélisation

Idem à la modélisation A, avec d ans la modélisation B, sur l e groupe de maille s $HAUT$, la pression P suit le trajet $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4$ à partir de 0 .

3.3 G randeurs testées et résultats

Les solutions sont calculées au point $NO8$ aux instants 1, 2, 3 et 4 pour $-\sigma_{zz}=P_1, P_2, P_3$ et P_4 . Elles sont données en termes déformations totale ε_{zz} et plastique ε_{zz}^p et comparée à des références issues d'un calcul mtest au point matériel. Celles-ci sont synthétisées par le tableau ci-dessous :

Instant	ε_{zz} mtest	ε_{zz} Code_Aster	% différence
1	-0.0231999	-0.0231997	4.795012E-04 %
2	-0.0130639	-0.0130643	3.594497E-03 %
3	-0.0405272	-0.04052721	2.502734E-05 %
4	-0.0296467	-0.02962875	6.054316E-02 %

Instant	ε_{zz}^p mtest	ε_{zz}^p Code_Aster	% différence
1	-0.0171265	-0.0171262	1.428092E-03 %
2	-0.0142507	-0.0142511	3.043996E-03 %
3	-0.0333304	-0.0333303	5.179365E-05 %
4	-0.0302677	-0.0302505	5.678920E-02 %

Les Figure 3.3-1 et Figure 3.3-2 donnent les évolutions des déformations totale ε_{zz} et plastique ε_{zz}^p avec la contrainte σ_{zz} au nœud. On y observe en particulier l'hystérésis des phases de décharges.

Figure 3.3-1: Réponse de la déformation totale ε_{zz} .

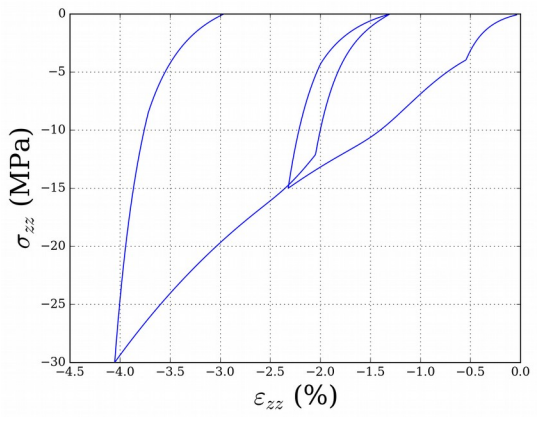
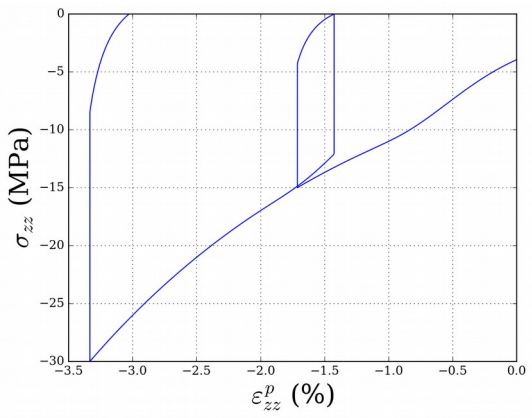


Figure 3.3-2: Réponse de la déformation plastique ε_{zz}^p .



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

4 Références bibliographiques

- [R7.01. 14] Loi de C am-Clay modifié .
- [R7.01.44] Loi élastoplastique KH_CSSM de mécanique des sols .

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