



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Étude du comportement au fluage de l'argile sous chargements triaxiaux complexes en relation avec la microstructure

Résumé

Dans les zones urbaines à fortes populations, le besoin de plus en plus fort en construction amène à concevoir et à réaliser des ouvrages géotechniques sur des sols argileux mous. Ces argiles se caractérisent souvent par des déformations de fluage importantes. Ces déformations, qui se développent en fonction du temps, sont complexes et difficiles à prévoir in-situ. Cette question nécessite donc une réflexion approfondie autour des propriétés elasto-viscoplastiques des argiles, et pour leur identification, une démarche expérimentale rigoureuse. Cette recherche vise à analyser et à identifier, par des essais, le comportement au fluage d'une argile de type kaolinite sous un état de contraintes triaxial. Une investigation fine de l'état microstructural, avant et après fluage, a par ailleurs été réalisée, ce qui a permis de fournir un éclairage complémentaire pour une meilleure compréhension du comportement.

L'enquête consiste à effectuer une revue de la littérature, un programme expérimental en laboratoire et un programme analytique. Des recherches expérimentales sont menées sur de l'argile reconstituée saturée normalement consolidée et surconsolidée sous différentes contraintes continues constantes dans une certaine durée de fluage. L'étude au microscope est basée sur une analyse de microstructure approfondie utilisant notamment un microscope électronique à balayage, couplée à une méthode adaptée pour l'identification des orientations préférentielles des particules. Cette étude microscopique est complétée par une analyse de porosimétrie par intrusion de mercure, une méthode qui permet de quantifier l'espace poreux et de caractériser le taux de vide local.

La liste organisationnelle détaillée de la thèse est la suivante:

Une introduction générale à la déformation dépendant du temps de l'argile est fournie.

Le chapitre 1 contient un résumé de l'état de l'art actuel sur le fluage des sols argileux, y compris des études macroscopiques et des études microscopiques.

Le chapitre 2 présente les matériaux argileux et les méthodes expérimentales utilisées dans cette étude.

Le chapitre 3 présente les résultats d'expériences macroscopiques, qui comprennent trois groupes de tests de fluage triaxial drainé sous différentes pressions préconsolidées ($p'_0 = 200$ kPa,

800 kPa et 1000 kPa). L'évolution des contraintes de fluage ainsi que les taux de déformation en fonction du temps, du niveau de stress et du taux de surconsolidation sont présentés.

Le chapitre 4 propose les résultats des expériences microscopiques de deux groupes d'échantillons: six échantillons de la série de tests de fluage avec $p'_0 = 1000$ kPa et six échantillons dans des essais de cisaillement conventionnels qui suivent exactement le même chemin de contrainte que les essais de fluage. Les résultats de la microscopie électronique à balayage et de la porosimétrie par intrusion de mercure sont comparés sur les sols après cisaillement et après fluage.

Les conclusions tirées de cette étude et les perspectives sur les recherches futures sont données.

A l'échelle macroscopique, la méthode expérimentale consiste à réaliser une série d'essai de fluage triaxial drainé, les échantillons ayant subi au préalable des chargements purement déviatoriques (sous contrainte moyenne effective constante), à des degrés de surconsolidation différents. L'intérêt de type de chargement se situe dans le fait que la déformation volumique obtenue n'est causée que par la seule variation du déviateur des contraintes.

Les essais sont réalisés sur l'argile reconstituée saturée, au moyen d'un système triaxial automatisé. Les déformations de fluage, axiales et volumiques, sont obtenues en fonction du temps, chaque essai se caractérise par un niveau de contrainte donné et à un degré de surconsolidation donné.

L'étude de la microstructure est basée sur l'analyse de photos de microscope électronique à balayage (MEB), couplée à une méthode adaptée pour l'identification des orientations préférentielles des particules argileuses, et de la distribution et orientation des pores.

Cette étude microscopique est soutenue par des résultats d'essais au porosimètre de mercure (PAM), une méthode qui permet de quantifier et de caractériser l'espace poral, et la distribution des pores.

L'identification de l'état microstructural (MEB et PAM) est réalisée sur des petits échantillons extraits d'éprouvettes (centimétriques) ayant été au préalable sous chargement mécanique. L'investigation est systématiquement menée après le chargement purement déviatorique d'une part, et après le chargement purement déviatorique suivi de l'essai de fluage d'autre part. Cette méthode permet, par la comparaison des résultats, d'observer comment varie la microstructure au cours du fluage.

L'analyse du comportement au fluage d'une kaolinite a mis en évidence certaines caractéristiques mécaniques liées à l'état de contrainte dans le plan (p'-q). Les résultats montrent clairement que, sous un chemin de contrainte p' constant, l'évolution de la contrainte au cours du fluage dépend fortement du comportement au cours des étapes de chargement initial. Les évolutions des déformations viscoplastiques dépendant du temps et dépendant du stress sont contrôlées par les mécanismes du domaine volumétrique. Dans le domaine de la contractance pour les échantillons normalement consolidés: une contracture de fluage a été obtenue pour tout niveau de contrainte. L'ampleur de la contracture de fluage a été influencée par l'état de contrainte de fluage, c'est-à-dire que les contraintes de fluage étaient plus importantes sous des niveaux de contrainte plus élevés. Un durcissement viscoplastique dépendant du temps développé en continu à une vitesse de déformation décroissante.

Dans le domaine de dilatance pour les échantillons surconsolidés: une dilatance au fluage a été clairement observée pour les échantillons fortement surconsolidés pour tout niveau de stress dans ce domaine. La souche volumétrique dilutive était plus grande pour un niveau de stress plus élevé.

Dans le domaine pseudo-élastique, des évolutions de contraintes volumétriques plus complexes ont été obtenues pour les spécimens légèrement surconsolidés. Alternance petites amplitudes contractancy / dilatancy sont apparues pendant le stade de fluage. Ces résultats ont été supposés être la conséquence de petites variations de stress lorsque le programme GDS essayait de maintenir un niveau de stress donné. Dans ce domaine, aucun changement de contrainte volumétrique ne peut être supposé pendant le fluage.

Trois étapes de fluage sont identifiées dans différents tests. Dans l'état critique, tous les échantillons montrent le stade primaire, les stades secondaire et tertiaire sont rarement observés sauf dans l'essai au-delà de l'état critique. La rupture de fluage au stade tertiaire était due à un ramollissement viscoplastique, conduisant à la diminution de la résistance maximale avec la diminution de la densité du sol.

L'évolution de la vitesse de déformation au fluage est partiellement différente de la tendance générale proposée par Singh & Mitchell (1968). La courbe ($\log \dot{\epsilon} - \log t$) varie dans différents domaines volumétriques, et le paramètre m ajusté par la partie linéaire de la courbe de la vitesse de déformation n'est pas toujours constant. Le paramètre m lié à la déformation volumétrique est plus sensible à la variation de l'amplitude de la contrainte.

Le but de la recherche microscopique est d'établir un lien entre les performances de fluage macroscopique de l'argile et leur microfabric. Les résultats de la microstructure montrent que l'ajustement de la structure dans le fluage dépend de l'état structural à la fin de l'étape de chargement monotone. La variation microstructurale des particules et des pores identifiés par des images MEB et l'intrusion de mercure montrent des résultats logiques qui correspondent à la tendance à l'échelle de l'échantillon.

Dans le domaine de la contractante pour les échantillons normalement consolidés: l'analyse micro fabrique sur des échantillons après chargement monotone indique l'anisotropie du tissu pour tout niveau de stress. Les particules s'orientent généralement parallèlement les unes aux autres dans un plan avec une orientation préférentielle entre 150° et 165° . Dans le fluage, les plus grands pores inter-particules dont le diamètre est supérieur à $0,3 \mu\text{m}$ ont d'abord été compressés en diamètre, tandis que les plus petits pores sont restés inchangés. Pendant ce temps, la longueur des pores à l'intérieur de l'échantillon après le cisaillement et après le fluage était presque la même, nous pouvons supposer que les mouvements de glissement entre les particules sont négligeables. La compression des pores avec le réarrangement des particules résultant de l'augmentation du pourcentage de particules dans l'orientation préférentielle. Conséquemment, l'anisotropie structurale est augmentée avec la contractante de fluage.

Dans le domaine de dilatance pour des échantillons fortement surconsolidés: une isotropie structurale nette formée à la fin de la charge monotone, se manifestant par l'assemblage de groupes de particules orientées de manière isotrope. Les pores de l'éprouvette dilatante sont généralement plus arrondis que ceux de l'échantillon contractif. Sur la base de cet état microfabrique, l'isotropie structurale continue de se développer dans l'orientation des directions, formées par des groupes de particules plus aléatoires. Des résultats similaires sont obtenus sur l'analyse de l'orientation des pores. Le diamètre moyen des pores et le volume poreux cumulé / surface pour l'échantillon de fluage est plus grand que l'échantillon de cisaillement, correspond à la dilatation au niveau macroscopique. L'expansion des micropores ensemble entraîne l'ouverture de microfissures à l'intérieur du matériau qui contribue à la dilatation de l'échelle de l'échantillon.

Dans le domaine pseudo-élastique: le microfabric des sols légèrement surconsolidés est à l'état intermédiaire. L'évolution des particules et des pores après cisaillement et après fluage est assez proche, ce qui est particulièrement évident pour les tests $\text{ROC} = 2,5$. Ce résultat indique que l'évolution microstructurale au sein du fluage dans ce domaine est assez limitée.

Il est à noter que l'évolution de la microstructure du kaolin en fluage, sous le chemin de contrainte purement déviatorique, dépend plus de l'état de surconsolidation que du niveau de contrainte. Pour les échantillons de fluage normalement consolidés, l'orientation du sol avec $q = 200$ kPa et 670 kPa coïncide tout à fait après une certaine durée de fluage, bien que la différence puisse évidemment être trouvée dans les échantillons après chargement monotone. Des tendances similaires sont observées sur des échantillons légèrement surconsolidés avec $q = 200$ kPa et 445 kPa. La différence initiale d'orientation structurale sous différents niveaux de contrainte à la fin du cisaillement a tendance à être minimisée en phase de fluage. Cette tendance peut indiquer que, dans un certain état de consolidation, un certain état structural d'équilibre existe et que le niveau structural sous différents niveaux de stress évolue avec le temps vers cet état.

Dans ce travail de doctorat, une étude expérimentale complète a été menée sur le comportement dépendant du temps du kaolin. Nous espérons avoir apporté quelques idées pour une meilleure compréhension des caractéristiques mécaniques de l'argile, et enrichir la modélisation du comportement dépendant du temps des matériaux argileux. Il y a beaucoup d'aspects pour la recherche future.

(1) Tests de fluage avec différents rapports de surconsolidation et différents niveaux de contrainte dans un domaine pseudo-élastique. Dans cette recherche, nous avons obtenu deux résultats de test de fluage avec $OCR = 1.5$ et 2.5 sous $q = 200$ kPa dans ce domaine. Il sera intéressant d'étudier le comportement de fluage volumétrique avec d'autres ROC et niveaux de contrainte, afin de déterminer les conditions aux limites complètes du domaine volumétrique sans changement de volume.

(2) Effectuer des tests de fluage sous différents chemins de contrainte terminés dans le même emplacement de contrainte dans le domaine pseudo-élastique. Dans cette recherche, les domaines volumétriques sont déterminés en référence à la constante de contrainte p' . La contrainte de fluage volumétrique après différents chemins de contrainte peut être très utile pour étudier les mécanismes dans ce domaine.

(3) Une autre technique d'étude de la microstructure peut être très prometteuse pour révéler l'évolution structurale au sein du fluage. Par exemple, la microtomographie et microscopes électroniques à balayage à faisceau d'ions focalisés (FIB-SEM), qui peuvent donner des informations 3D des pores, en particulier le développement de micro fissures avec le temps dans les échantillons dilatants.

(4) Modélisation constitutive du fluage tenant compte des effets OCR et de la microstructure des sols mous.

Mots-clefs: Argile, Kaolinite, Fluage drainé, Microstructure, Essai triaxial, Prosimètre au mercure (PAM), Microscope Electronique à Balayage (MEB)