

Lime treatment of plastic clays with special focus on triaxial extension behaviour

Thesis presented by Kuchvichea KAN

A dissertation submitted in fulfilment for the degree of Doctor in Engineering Sciences and Technology

Academic year 2019-2020

Supervisor: Professor Bertrand François
Co-supervisor: Dr. Savuth CHEA
Institut de Technologie du Cambodge

Thesis jury:

Philippe BOUILLARD (Université Libre de Bruxelles, Chair)

Pierre GERARD (Université Libre de Bruxelles, Secretary)

Olivier CUISINIER (Université de Lorraine, France)

Gontran HERRIER (Lhoist Business Innovation Center)



Remerciements

Le travail de recherche dans cette thèse a été rendu possible par la bourse d'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) et par Université Libre de Bruxelles (ULB), qui est grandement appréciée.

Je tiens à remercier en premier lieu Monsieur le Professeur Bertrand François, mon superviseur de thèse disponible et patient, pour ses conseils enthousiastes et experts, ses encouragements, ses suggestions constructives et ses critiques positives tout au long de ce travail de thèse. Son immense patience et sa disponibilité pour les commentaires chaque fois qu'il est approché, même au milieu de sa lourde pression de travail pendant toute la période de ses recherches et de son enseignement, mérite l'appréciation reconnaissante.

Je voudrais exprimer mon profond sentiment de gratitude à Professeur Philippe Bouillard, pour sa disponibilité et ses conseils. Remerciements particuliers sont adressés au professeur Pierre Gérard, pour ses conseils et suggestions.

Je souhaite également exprimer mes sincères remerciements au Dr. Chea Savuth pour avoir aimablement accepté de servir de co-superviseur ainsi que pour ses précieux conseils et son aide. Également, je voudrais remercier au M. Chrea Rada pour ses conseils et suggestions.

Je remercie le laboratoire de GéoMécanique du département de BATir (Bâtiment, Architecture et Urbanisme) à l'Ecole Polytechnique de Bruxelles à l'ULB et au laboratoire de génie civil de l'Institut de Technologie du Cambodge (ITC), pour fournir un environnement motivant pour la recherche.

Tous ceux qui sont intervenus dans les développements expérimentaux de la thèse se voient ici remerciés. Cela concerne en particulier M. Nicolas Canu, technicien au Laboratoire de GeoMécanique, pour son aide précieuse lors de nombreux essais, M. Fabiano Pucci, pour la qualité de son travail lors des essais de traction.

Il est heureux de remercier des étudiants de troisième cycle et des amis pour leur soutien et leur contribution à cette recherche, Nicolas Poncelet, Mpawenayo Régis, Valeriane Gigot et Joan Botey i Bassols.

Je tiens à souligner la contribution de ma famille, en particulier de ma mère bien-aimée, Mme Chin Mary, pour ses sacrifices et ses prières.

Je remercie plus généralement l'ensemble des membres du personnel du Laboratoire de LGM de BATir ainsi que du Laboratoire à l'ITC, qui tous contribuent à une excellente ambiance de travail, ambiance qui a concouru au bon déroulement de cette thèse.

Enfin, merci pour tout.

Lime treatment of plastic clays with special focus on triaxial extension behaviour

Kuchvichea KAN

Department

Building, Architecture and Town planning Department (BATir)

Laboratoire de GéoMécanique

Avenue F.D. Roosevelt, 50 - CPI 194/2, B - 1050 Bruxelles

Structure of thesis

Table Content	iv
Abstract	vii
Résumé	ix
Notation and Symbols	xi
Table of figures	xiv
List of tables	xix
Chapter 1. General Introduction.....	1
Chapter 2. Literature review of lime-treated clay	5
Chapter 3. Materials and methods.....	24
Chapter 4. Shear Process: Experimental Characterization.....	41
Chapter 5. Tensile Strength.....	78
Chapter 6. Combined tensile and shear rupture criterion.....	99
Chapter 7. Application of the combined rupture criterion	120
Chapter 8. Correlation of soil parameters	132
Chapter 9. Conclusions and Perspectives.....	150
References	153
Appendix 1	165
Appendix 2	167
Appendix 3	168

Table Content

Table Content	iv
Abstract	vii
Résumé	ix
Notation and Symbols	xi
Table of figures	xiv
List of tables	xix
Chapter 1. General Introduction	1
1.1 Scope of the study	1
1.2 Objective	2
1.3 Cambodian context	3
Chapter 2. Literature review of lime-treated clay	5
2.1. Chemical reaction in lime treated clay soil	5
2.1.1 Nature of soils	5
2.1.2 Nature of lime	7
2.1.3 Treated clayey soil	8
2.2 Effect of soil treatment with lime	10
2.2.1 Change in physical behaviors	10
2.2.2 Change in mechanical behaviors	15
2.3 Conclusion	23
Chapter 3. Materials and methods	24
3.1 Experimental methods	24
3.1.1 Soil preparation	24
3.1.2 Atterberg Limits (ASTM D 4318-00)	25
3.1.3 Specific gravity (ASTM D 854-00)	25
3.1.4 Hydrometer analysis (ASTM D 4318 - 00)	25
3.1.5 Soil Compaction (ASTM D 1557-02)	25
3.1.6 Unconfined Compressive Strength Test (ASTM D 2166-00)	26
3.1.7 Indirect tensile strength (ASTM D 3967 - 16)	26
3.1.8 Uni-axial Consolidation (ASTM D 4186-re98)	28
3.1.9 Eades and Grim method (ASTM D 6276-99a)	30
3.1.10 Cation Exchangeable Capacity	30
3.2 Material characteristics	31
3.2.1 Quicklime	31
3.2.2 Estimated percentage of lime for stabilization	31
3.2.3 Physical Properties of Soils	32
3.2.4 Mechanical Properties	35
3.3 Conclusion	40

Chapter 4.	Shear Process: Experimental Characterization.....	41
4.1	Direct Shear Tests.....	41
4.1.1	Test Procedure	42
4.1.2	Stress-strain behavior	42
4.1.3	Shear strength parameters of peak resistance.....	45
4.2	Triaxial Compression Tests.....	47
4.2.1	Testing scheme	47
4.2.2	Test specimen	49
4.2.3	Test Procedure	49
4.2.4	Results of Triaxial Compression test.....	53
4.3	Conclusion.....	77
Chapter 5.	Tensile Strength.....	78
5.1	Introduction	78
5.2	Triaxial extension method – Bishop et Garga	79
5.2.1	Overview	79
5.2.2	Simulation Model in COMSOL 5.2	82
5.2.3	Test procedure	84
5.3	Extension tests of untreated Clay soils (N1)	87
5.3.1	Saturation step	87
5.3.2	Extension test result.....	88
5.3.3	Cohesion and friction angle of extension test.....	91
5.4	Extension test of treated soils N1 with lime	93
5.4.1	Consolidated Undrained Test	93
5.4.2	Consolidated Drained Test	96
5.5	Conclusion.....	97
Chapter 6.	Combined tensile and shear rupture criterion.....	99
6.1	Introduction	99
6.2	Mohr-Coulomb criterion (1776).....	100
6.3	Hoek-Brown Failure Criterion (1982).....	102
6.4	Failure envelope, Lade (2010).....	103
6.5	Griffith theory (1921).....	104
6.5.1	Presentation of Griffith Criterion in Plane (σ_3, σ_1)	109
6.5.2	Presentation of Griffith Criteria in Plan $\left(k = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}, \frac{\sigma_1}{\sigma_t} \right)$	113
6.5.3	Presentation of Griffith Criterion in Plan (σ, τ)	115
6.6	Failure criterion in (σ, τ) plane, Liu et al. (2013)	117
6.7	Conclusion.....	119
Chapter 7.	Application of the combined rupture criterion	120

7.1	Rupture criteria by triaxial compression and extension (Soil N1)	120
7.1.1	Untreated soils (CU test)	120
7.1.2	Treated soils N1 with lime at 7, 56 and 300 days (CU test).....	124
7.1.3	Treated soils N1 with lime at 7 and 28 days (CD test).....	127
7.2	Rupture criteria by triaxial compression and direct shear (4 Soils)	127
7.2.1	Failure points of triaxial compression and direct shear	128
7.2.2	Shear strength of soils.....	130
7.3	Conclusion	131
Chapter 8.	Correlation of soil parameters	132
8.1	Introduction	132
8.2	Shear strength parameters.....	133
8.2.1	Effective peak friction angle of shearing resistance	134
8.2.2	Cohesion of soils	137
8.3	Consolidation.....	138
8.4	Swelling potential	142
8.5	Conclusion	149
Chapter 9.	Conclusions and Perspectives.....	150
9.1	Conclusions	150
9.1.1	Properties of cohesion and friction angle	150
9.1.2	Tensile strength behavior.....	150
9.1.3	Failure criteria.....	151
9.1.4	Empirical equation.....	151
9.2	Perspectives	152
9.2.1	Experimental tensile strength	152
9.2.2	Failure criterion and constitutive model.....	152
9.2.3	Correlation	152
References	153
Appendix 1	165
Appendix 2	167
Appendix 3	168