

Numerical Modeling and Neural Networks to Identify Constitutive Parameters from In Situ Tests

THÈSE N° 4457 (2009)

PRÉSENTÉE LE 24 JUILLET 2009

À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT
LABORATOIRE DE MÉCANIQUE DES SOLS
PROGRAMME DOCTORAL EN MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Rafal Filip OBRZUD

acceptée sur proposition du jury:

Prof. J.-F. Molinari, président du jury
Prof. L. Vulliet, Prof. A. Truty, directeurs de thèse
Prof. M. Boulon, rapporteur
Prof. J. Zhao, rapporteur
Prof. T. Zimmermann, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse
2009

Contents

Table of Contents	i
Abstract	v
Résumé	vii
Acknowledgments	ix
List of Symbols	xi
1 Introduction	1
1.1 Evaluation of engineering properties of soils	1
1.2 Objectives of the thesis	2
1.3 Outline of the thesis	4
2 Fundamentals of Parameter Identification	7
2.1 Testing as a tool for parameter identification	10
2.2 Reliability of experimental measurements	14
2.3 Classical approaches to the inverse problem	15
2.3.1 Constitutive equations and direct approach	16
2.3.2 Objective function and its minimization	17
2.3.3 Gradient-based search algorithm	18
2.3.4 Limitations of gradient-based optimization	21
2.4 Enhanced approach to parameter identification	22
2.5 Summary and anticipated contribution	25
3 Neural Networks as Identification Method	27
3.1 Introduction	27
3.2 Identification based on neural networks	30
3.2.1 Numerical approach for database generation	31
3.2.2 Preparation of training patterns	32
3.3 Theory of feed-forward neural networks	32
3.3.1 Model of a neuron	33
3.3.2 Network architecture and feed-forward procedure	34
3.3.3 Neural network training	35
3.3.3.1 Selection of training database	36
3.3.3.2 Data pre-processing	36

3.3.3.3	Determination of network topology	38
3.3.3.4	Back-propagation algorithm	38
3.3.3.5	Network performance monitoring	40
3.3.4	Post-training network analysis	41
3.4	Remarks on NN's shortcomings	42
3.5	Summary	43
4	Mathematical Model of Soil	45
4.1	Constitutive equations of the Modified Cam Clay model	46
4.2	Hydro-mechanical solid-fluid interaction	47
4.3	Remarks on model shortcomings	49
5	Enhanced Identification Verification	51
5.1	Numerical implementation for drained triaxial compression test	51
5.1.1	Space of parameters	53
5.1.2	Parameter identification for isotropic consolidation test .	54
5.1.3	Parameter identification for the drained compression test	54
5.2	Parameter identification for real experimental data	58
5.2.1	Material and test procedure	58
5.2.2	Example of parameter identification for the isotropic con- solidation test	58
5.2.3	Example of parameter identification for the drained com- pression test	59
5.2.4	Efficiency test	63
5.3	Summary	64
6	BVPs of Selected <i>In Situ</i> Tests	67
6.1	Overview of <i>in situ</i> tests	67
6.1.1	Self-boring pressuremeter test	68
6.1.2	Piezocone penetration test	69
6.2	Analytical analysis of self-boring pressuremeter test	71
6.2.1	<i>In situ</i> state of soil	71
6.2.2	Cavity expansion test	72
6.2.3	Analysis of dissipation test	80
6.2.4	Overestimation of determined parameters	83
6.2.5	Hydro-mechanical coupling of pressuremeter tests	85
6.3	Analysis of the piezocone penetration test	86
6.3.1	Theoretical analysis of cone resistance	88
6.3.2	Interpretation of CPTU measurements	92
6.3.2.1	Normalization of CPTU data	93
6.3.2.2	Undrained shear strength	93
6.3.2.3	Effective stress strength	96
6.3.2.4	Stress history	97
6.3.2.5	Horizontal stress	99
6.3.2.6	Stiffness characteristics	100
6.3.2.7	Rigidity index and consolidations characteristics	101
6.3.3	Effect of drainage conditions on penetration results	103

6.3.4	Remarks	104
7	Numerical Modeling of Selected Field Tests	107
7.1	Numerical model of pressuremeter test	108
7.1.1	Finite element model	108
7.1.2	Effect of soil permeability	109
7.1.3	Non-uniqueness and sensitivity of strength parameters	111
7.1.4	Effect of stress anisotropy	111
7.1.5	Sensitivity analysis of pressure holding test	113
7.2	Numerical model of piezocone test	114
7.2.1	Finite element model	115
7.2.1.1	Cone-soil interface modeling	116
7.2.1.2	Experimental evidence of the steel-soil interface	118
7.2.1.3	Strength anisotropy	119
7.2.1.4	Finite element discretization	120
7.2.2	Analysis of finite element model	124
7.2.2.1	Analysis of cone factors	127
7.2.2.2	Analysis of drainage conditions	134
7.2.2.3	Friction effects on piezocone measurements	136
7.2.3	Semi-numerical model for the NN pattern generation	145
7.3	Summary and remarks	145
8	Parameter Identification for <i>In Situ</i> Tests	147
8.1	Hybrid neural network/gradient-based model calibration based on pressuremeter tests	148
8.1.1	Strategy of parameter identification	148
8.1.2	Numerical generation of training patterns	152
8.1.3	Definition of network input	155
8.1.4	Training and post-training analysis	157
8.1.5	Efficiency and convergence analysis	160
8.1.6	Effect of initial state variables	162
8.1.7	Summary	163
8.2	Neural networks for parameter estimation based on piezocone data	164
8.2.1	Strategy of parameter estimation	164
8.2.2	Numerical generation of training patterns	170
8.2.3	Verification of numerical database	170
8.2.4	Definition and notation of network inputs and outputs	175
8.2.5	Training and post-training analysis	176
8.2.5.1	Undrained shear strength	176
8.2.5.2	Effective stress strength	179
8.2.5.3	Stress history	181
8.2.5.4	Horizontal stress	188
8.2.5.5	Deformation characteristics	190
8.2.6	Knowledge extraction	192
8.2.7	Summary	194
9	Validation of Enhanced Parameter Identification	197

9.1	Model calibration using pressuremeter test	198
9.1.1	Experimental data	198
9.1.2	Parameter identification	201
9.1.3	Analysis of obtained results	202
9.1.4	Summary	204
9.2	Parameter estimation using piezocone test	205
9.2.1	Estimation of OCR for a worldwide database	205
9.2.2	Parameter estimation for Bäckebol site, Sweden	206
9.2.3	Parameter estimation for Skå-Edeby site, Sweden	213
9.2.4	Parameter estimation for Port Huron site, USA	215
9.2.5	Parameter estimation for Amherst site, USA	218
9.2.6	Parameter estimation for Bothkennar site, UK	222
9.2.7	Conclusions	227
10	Final Conclusions and Recommendations	229
10.1	Conclusions	229
10.1.1	Enhanced parameter identification	230
10.1.2	Model calibration with SBPT	231
10.1.3	Soil profiling with CPTU	233
10.1.4	Summary of original contributions	236
10.2	Outlook for future research	237
A	Modified Gauss-Newton Algorithm	257
	References	257
B	Material Data for Numerical Simulations	265
C	R_p versus OCR in the MCC	267
D	Pattern Generation for CPTU	269
E	GUI for CPTU Data	271
F	NN Training for CPTU Data	273
G	Material Data	281
G.1	Database of discrete piezocone results from clay sites	281
G.2	Database of continuous CPTU results from clay sites	284
	Curriculum Vitae	287

Abstract

This study proposes a new advanced algorithm for determining material parameters based on *in situ* tests.

In situ testing gives an opportunity to perform soil characterization in natural stress conditions on a representative soil mass. Most field techniques reduce soil disturbances to minimum, allowing investigating the response of virgin soil. Self-boring pressuremeter tests (SBPT) and standard piezocone tests (CPTU) are widely used to deduce properties of clayey soils through analytical and empirical correlations between soil properties and experimental measurements. Empirical correlations usually require some tuning based on reference laboratory data because first-order estimates for typical correlation coefficients may give unreliable evaluation of soil properties. Analytical correlations are mostly based on cavity expansion methods which are restricted to either fully drained or perfectly undrained problems, so that inverse closed-form solutions for relatively simple constitutive models can be derived. In practice, however, depending on physical and consolidation properties of the soil, partially drained conditions may occur during field testing, leading to an erroneous estimation of clay characteristics. Therefore, elaborating a generic parameter identification framework, which is based on the artificial neural network (NN) technique and which may improve the reliability of soil properties derived from *in situ* testing, is the main goal of this research.

This study explores the possibility of using NNs to solve complex inverse problems including partially drained conditions. In other words, NNs are used to map experimental measurements onto set of soil properties. The development of NN-based inverse models is based on a training data sets which consists of pseudo-experimental measurements derived from numerical simulations of both the SBPT and the CPTU test in normally- and lightly overconsolidated clay type material.

The study presents a generic two-level procedure designed for the calibration of constitutive models of soils. It is demonstrated that NN inverse models can be easily integrated into the classical back-analysis. At the first level, the NN approach is applied to achieve the first approximation of parameters. This technique is used to avoid potential pitfalls related to the conventional gradient-based optimization (GBO) technique, considered here as a corrector that improves predicted parameters. Trained NNs as parallel operating systems can provide output variables instantly and without a costly GBO iterative scheme. The proposed framework is verified for the elasto-plastic Modified Cam Clay (MCC) model that can be calibrated based on standard triaxial laboratory tests, i.e. the isotropic consolidation test and the consolidated isotropic drained compression test. The study presents formulations of the input data for the NN predictors, enhanced by a dimensional reduction of experimental data using principal component analysis (PCA). The determination of model characteristics is demonstrated, first on numerical pseudo-experiments and then on the experimental data. Furthermore, the efficiency of the proposed approach in terms of accuracy and computational effort is also discussed.

The verified two-level strategy is applied to a numerical procedure of parameter identification for the boundary value problem (BVP) of the SBPT. The coupled hydro-mechanical finite element (FE) formulation allows the generated excess pore water pressure to be dissipated during simulations of the expansion test, followed then by a holding test. Numerical simulations demonstrate that volume changes that may occur in clay during the expansion test due to partial drainage, can cause local soil hardening near the cavity wall and affect parameter interpretation for pressuremeter

tests. Therefore, the NN technique is applied to obtain an initial guess for model parameters, taking into account the possible partially drained conditions during the expansion test. Parameter identification based on measurements obtained through the pressuremeter expansion test and two types of holding tests is illustrated on the MCC model. NNs are trained using a set of synthetic test samples, which are generated by means of FE simulations based on constrained random permutations of input model parameters. The measurements obtained through expansion and consolidation tests are normalized by the proposed normalizing formulas so that NN predictors operate independently of the testing depth. Examples of parameter determination are demonstrated on both numerical data and field measurements from the Fucino clay deposit. The efficiency of the combined parameter identification in terms of accuracy, effectiveness and computational effort is also discussed.

Finally, an application of NN predictors as a stand-alone support for soil profiling is presented for the piezocone test. By similarity to the SBPT problem, a number of NN inverse models are developed based on the results derived from rigorous FE analyzes. The FE model of piezocone penetration involves numerical formulation for the two-phase material obeying the MCC law and including the large strain theory, as well as the large deformation formulation for contact interface. It is demonstrated that a considerable computational effort related to the generation of the training database can be reduced by optimizing the mesh size and "steady-state" depth in function of soil rigidity index. Due to a severe loss of measurement accuracy observed in the finite elements adhered to the "rough" interface, an equivalent semi-numerical approach is proposed to account for frictional effects in different drainage conditions which are delineated from a number of numerical simulations. The validity of the developed penetration model is verified in detail by means of comparisons with other theoretical solutions and parametric studies synthesized from literature, as well as experimental evidence for both undrained and partially drained scenarios. An extended parametric study including influence analyzes of strength and stress anisotropy, rigidity index and cone roughness on two cone factors provides new insight into the analysis of cone penetration. The shortcomings of the FE model due to the limitations of the applied constitutive model are also discussed. As regards NN models, different configurations of input variables, including standard normalized piezocone metrics and other available soil characteristics are investigated in terms of feasibility of effective NN training. The post-training regression analyzes are performed for numerical data allowing the assessment of the influence of specific input variables on accuracy of parameters predictions. Finally, the developed NN models are applied to predict parameters based on field measurements for a number of characterization sites. Provided examples demonstrate that NN inverse models may constitute an effective complementary support during the first-order quantification of the MCC parameters from piezocone measurements.

Keywords: back analysis, parameter identification, elasto-plastic model calibration, optimization, neural networks, principal component analysis, Modified Cam Clay model, finite element modeling, hydro-mechanical coupling, soft clay deposits, self-boring pressuremeter testing, piezocone testing, soil profiling

Résumé

Cette étude propose un nouvel algorithme avancé pour la détermination des paramètres des matériaux à partir de tests *in situ*.

Les tests *in situ* permettent de caractériser un échantillon de sol représentatif dans des conditions de contraintes naturelles, tout en réduisant l'altération des échantillons au minimum et en favorisant l'analyse du comportement d'un sol intact. Les essais pressiométriques auto-foreur (SBPT) et les essais de pénétration de cône (CPTU) sont couramment utilisés pour la détermination des propriétés des sols argileux ; ils utilisent des corrélations analytiques et empiriques entre les propriétés du sol et les mesures expérimentales. Les corrélations empiriques exigent habituellement un ajustement sur la base d'essais de laboratoire de référence, afin d'améliorer les estimations de premier ordre pour les coefficients de corrélation typiques. Les corrélations analytiques sont pour la plupart basées sur les méthodes d'expansion d'une cavité. Ces méthodes sont limitées aux problèmes entièrement drainés ou parfaitement non drainés, de sorte que des solutions inverses en forme fermée peuvent être obtenues pour des modèles constitutifs relativement simples. Or, les tests *in situ* peuvent présenter des conditions partiellement drainées, lesquelles dépendent des propriétés physiques et de consolidation du sol et peuvent induire des estimations erronées des caractéristiques de l'argile. Le but de cette recherche est ainsi d'élaborer un système générique d'identification des paramètres basé sur la technique des réseaux de neurones artificiels (artificial neuronal network NN) et permettant d'améliorer la fiabilité des caractéristiques du sol déterminées à partir de tests *in situ*.

On explore la possibilité d'utiliser les NN pour résoudre des problèmes inverses complexes, notamment en conditions partiellement drainées. En d'autres termes, les NN sont utilisés pour transformer des mesures expérimentales en un ensemble de propriétés du sol. Le développement de modèles inverses basés sur des NN s'appuie sur des données issues de mesures pseudo expérimentales dérivées d'une simulation numérique des deux tests - SBPT et CPTU - exécutés dans de l'argile normale et légèrement surconsolidée.

On présente une procédure générique à deux niveaux conçue pour la calibration des modèles constitutifs de sols. On démontre que les modèles inverses NN peuvent facilement être intégrés dans des rétro-analyses classiques. D'abord, l'approche NN est appliquée afin d'obtenir une première approximation des paramètres, ce qui permet d'éviter les pièges potentiels liés aux techniques conventionnelles d'optimisation par gradient (gradient-based optimisation GBO), considéré ici comme un correcteur qui améliore les paramètres prédits. Le système d'exploitation parallèle des réseaux de neurones, fournit instantanément les variables de sortie sans passer par un système itératif coûteux tel que le GBO. Le système proposé a été vérifié pour le modèle elasto-plastique Modified Cam Clay (MCC), qui peut être calibré par le biais de tests triaxiaux standards en laboratoire, c'est-à-dire la consolidation isotrope et l'essai drainé de compression triaxiale conventionnelle. L'étude formule les données d'entrée pour les prédicteurs du NN, enrichies par une réduction dimensionnelle des données expérimentales par analyse des composantes principales (principal component analysis, PCA). Les caractéristiques du modèle sont déterminées d'abord sur les pseudo-expériences numériques puis sur les données expérimentales. De plus, l'efficacité de l'approche proposée est discutée en termes de précision et de coût de calcul.

La stratégie à deux niveaux validée est appliquée à une procédure numérique d'identification de paramètres pour le problème aux limites (boundary value problem, BVP) de la SBPT. La formulation couplée hydromécanique aux éléments finis (EF) inclut la dissipation de l'excès de pression interstitielle pendant la simulation des essais d'expansion suivis d'un essai de holding. Les simulations numériques démontrent

que les changements de volume survenant dans l'argile pendant les essais d'expansion en raison d'un drainage partiel, peuvent causer un écoulement local du sol proche des parois de la cavité et donc affecter l'interprétation des paramètres pour les essais de pressiomètre. C'est pourquoi on applique la technique des réseaux de neurones afin d'obtenir une première estimation des paramètres du modèle, tout en tenant compte des conditions partiellement drainées durant les essais d'expansion. L'identification des paramètres basée sur les mesures obtenues grâce aux essais d'expansion de pressiomètre et aux deux types d'essais de holding est appliquée au modèle MCC. Les NN sont développés en utilisant un ensemble d'échantillons de tests numériques générés au moyen de simulations EF basées sur une permutation aléatoire contrainte des paramètres d'entrée du modèle. Les mesures obtenues par les essais d'expansion et de consolidation sont normalisées afin que les prédicteurs NN fonctionnent indépendamment de la profondeur d'essai. On présente des exemples d'identification de paramètres pour des données numériques ainsi que pour des mesures sur le terrain d'un dépôt d'argile Fucino. De plus, l'identification combinée des paramètres est discutée en termes de précision, d'efficacité et de coût de calcul.

Enfin, on présente l'application des prédicteurs de réseaux de neurones en tant que support autonome pour effectuer le profil du sol pour l'essai de pénétration du cône. Comme pour le problème SBPT, des modèles inverses NN sont développés sur la base de résultats provenant d'analyses EF rigoureuses. Le modèle EF de la pénétration du cône implique une formulation numérique pour le matériau biphasique qui obéit à la loi MCC et contenant la théorie des grandes déformations ainsi qu'une formulation de grands déplacements pour l'interface. Il a pu être démontré que l'important effort de calcul lié à la génération de la base de données peut être réduit en optimisant la taille du maillage et la profondeur "d'état stationnaire" en fonction de l'indice de rigidité du sol. Afin de solutionner l'imprécision des mesures prises dans les éléments finis adhérant à la surface rugueuse, on propose une approche semi-numérique équivalente qui explique les effets de friction dans les différentes conditions de drainage déterminées sur la base de nombreuses simulations numériques. Le modèle de pénétration proposé est validé par comparaison avec d'autres solutions théoriques et études paramétriques issues de la littérature, ainsi que des données expérimentales de scénarios drainé et partiellement drainé. Une étude paramétrique plus étendue et comprenant l'analyse de l'influence de l'anisotropie de la résistance et de la contrainte, de l'indice de rigidité et de la rugosité du cône, offre un nouveau regard sur l'analyse des essais de pénétration de cône. Les défauts du modèle EF dus aux limitations du modèle constitutif appliqué sont également discutés. Quant aux modèles NN, différentes configurations des variables d'entrées, y compris les mesures des cônes normalisés ou autres caractéristiques du sol, sont examinées en termes de faisabilité d'apprentissage effectif des NN. Une analyse post-apprentissage est réalisée sur les données numériques afin d'évaluer l'influence de variables d'entrée spécifiques sur la précision des paramètres de prédiction. Enfin, les modèles NN développés sont appliqués aux paramètres de prédiction basés sur les mesures du terrain pour un certain nombre de sites caractéristiques. Les exemples présentés démontrent que les modèles NN inverses constituent un support complémentaire et efficace lors de la quantification de premier ordre des paramètres MCC des mesures de pénétration du cône.

Mots-clefs: rétro-analyse, identification de paramètres, calibration de modèle elasto-plastique, optimisation, réseaux de neurones, analyse de composantes principales, Modified Cam Clay, modélisation aux éléments finis, couplage hydromécanique, dépôts d'argile molle, pressiomètre autoforeur, pénétration d'un cône, profil géotechnique