

博士（工 学） Surendra Bahadur Tamrakar

学 位 論 文 題 名

# Design Parameters for Elasto-plastic FE Analysis of Soft Clay Ground

（軟弱粘土地盤の弾塑性有限要素解析のための  
設計パラメーターに関する研究）

## 学位論文内容の要旨

Urbanization and industrialization processes are taking very rapidly in metropolitans in South-East Asia, including Bangkok, where soft clay is found over a wide area. In designing and constructing of infrastructures such as buildings, roads, expressways, airports, harbors, etc., on these soft clay deposits, engineers need a thorough knowledge of soil properties, especially elastic stiffness, shear strength and compressibility characteristics, in predicting or back-analyzing the deformation behavior of soft clay subjected to construction works such as embankment loading and deep excavation with retaining structure.

Prediction of deformation behavior of soft clay ground by means of FE analysis greatly depends upon the initial profile of cited ground (e.g., stratigraphy, pore pressure and  $K_0$ -value profile with depth, etc), the representative soil parameters of in-situ ground (elastic stiffness, Poisson's ratio, shear strength, compressibility, water-flow characteristics, in-situ bulk modulus of water, etc.), the employed constitutive soil model (linear-elastic, non-linear elastic, elasto-plastic, etc.), the analysis types (fully undrained, fully drained or coupled) and the boundary conditions.

As for elastic stiffness parameters in use for linear-elastic or elasto-plastic FE analysis, there are many ways and methods so far proposed to determine or estimate it. However, no information is usually available on genuinely elastic stiffness properties at very small strains in site investigation of soft clay, since engineers traditionally consider deformation of soft clay as a large strain problem. Therefore, the importance of the small-strain stiffness of soft clay ground is highlighted in this study.

In this thesis, a comprehensive case study was made out into the capability of FE analysis, together with the effects of soil parameters, soil models, boundary conditions, etc., of cited ground, in predicting deformation behavior of soft Bangkok clay subjected to two types of construction works; the construction of test embankment at Nong Ngoo Hao (NNH) site and the excavation work with retaining diaphragm wall at Ratchada station along the

northern line of Bangkok Metro, using a commercially available SAGE-CRISP FE program. This computer program was employed in this thesis because it is frequently authorized as a design tool in geotechnical engineering projects in SE Asia.

This thesis consists of 10 chapters. The composition of each chapter is as follows;

In Chapter 1, the objectives and scope of current research are described.

In Chapter 2, a brief literature review on the use of soil parameters such as elastic stiffness parameters, Poisson's ratio and permeability considered in previous deformation analyses of soft clays is presented. A particular attention is also paid to cover case histories of deformation analysis of soft clay ground by using a computer program of SAGE-CRISP.

Chapters from 3 to 8 are divided into two parts. The results of site characterization of Bangkok clay are presented and discussed in Part I (Chapters 3 and 4). The site investigation was carried out at two sites in Bangkok; i.e., NNH site where test embankment was constructed, and Sutthisan site from where test data for deep excavation work with concrete diaphragm wall was obtained. Based on the results of geotechnical site characterization, Part II of this thesis (Chapters 5 to 8) deals with the presentation and discussion of the results of FE analysis performed based on the geotechnical site characterization in relation to two case histories (embankment loading and excavation works) at Bangkok.

In Chapter 3, the results of site investigation performed at NNH site and Sutthisan site are presented. The basic soil properties, together with soil stratigraphy in each site were manifested. The depth-profiles of compressibility, undrained shear strength, stiffness, and permeability are described in detail based on the results of in-situ and laboratory tests.

In Chapter 4, discussion is made on engineering characteristics of Bangkok clay in relation to undrained shear strength, quasi-elastic shear modulus, dependency of soil stiffness with strain and earth pressure at rest. Also, a summary of design parameters of Bangkok clay for geotechnical engineering practice is presented.

In Chapter 5, instrumentation employed for test embankment and deep excavation work is described.

In Chapter 6, a basic concept of FE analysis and Cam clay model in geotechnical engineering is reviewed at first. Then, the features of SAGE-CRIPS FE program are described. At last, the determination of soil parameters for Cam clay models is explained. Simulation of laboratory tests are also shown.

Chapter 7 describes the results of case study (coupled consolidation analysis) of embankment loading at NNH site. The discussions are made on the effects of constitutive models (i.e., linear elastic and elasto-plastic models), drainage boundary conditions, elastic stiffness, Poisson's ratio and coefficients of permeability on deformation behavior of the clay ground when subjected to embankment loading.

Chapter 8 describes the results of case study (undrained analysis) of deep excavation at Ratchada station. Discussions are made on the effects of constitutive models (i.e., linear elastic and elasto-plastic models), elastic stiffness, Poisson's ratio and the in-situ bulk

modulus of water on deformation behavior of the clay ground when subjected to excavation.

In Chapter 9, a proposal for practical method for predicting deformation behavior of soft clay ground is presented, based on the parametric study made in Chapters 7 and 8.

Conclusions of this thesis are described in Chapter 10.

# 学位論文審査の要旨

主 査	教 授	三田地 利 之
副 査	教 授	石 島 洋 二
副 査	教 授	三 浦 清 一
副 査	助教授	澁 谷 啓

## 学 位 論 文 題 名

### Design Parameters for Elasto-plastic FE Analysis of Soft Clay Ground

(軟弱粘土地盤の弾塑性有限要素解析のための  
設計パラメーターに関する研究)

東南アジア地域における都市の近代化および工業化は急速に展開しており、タイ王国バンコック市もその例外ではない。一方、バンコック市の地盤の特徴は、軟弱粘土が広範囲に厚く堆積していることであり、社会基盤諸施設の建設に伴う地盤の変形予測においては、圧密特性および弾塑性的せん断特性に関する地盤情報が重要であるにもかかわらず、地盤調査技術の未成熟さのため信頼性の高いデータの蓄積が極めて少ない。この現状は他の東南アジア諸国においても同様であり、我国を含めた諸外国の建設コンサルタント業が当該地域で安全かつ経済的な工事を実施する上での緊急課題となっている。

当該地域に限らず我国においても、軟弱粘土地盤の変形解析に必要な「弾性係数」は、非排水せん断強度と関連づけられた各種経験式により推定しているのが実情である。一方、粘土の応力-ひずみ関係は広範囲のひずみにおいて著しく非線形であり、現行設計における地盤の「弾性係数」は、ひずみレベルを規定しない便宜的な変形係数といわざるを得ない。加えて、軟弱粘土地盤に関する工学的諸問題は大変形問題との一般的認識があるため、通常の実務設計においては、微小ひずみでの変形特性に関する情報が欠落しているのが現状である。おりしも、当該国ではコンクリート連続地中壁を打設し、軟弱地盤の変形を拘束した状態で掘削を行う工事例が急増している。この種の工事は、軟弱粘土地盤といえども本質的に小ひずみ変形問題であり、土留めに作用する土圧や地盤変形の予測には、地盤の「真の弾性係数」に対して適切な低減係数を乗じた値を用いた方がより合理的であると考えられるが、この思想を設計に反映するまでには至っていない。

以上のような背景のもと、本論文はバンコック第二国際空港建設地での試験盛土、および地下鉄駅部におけるコンクリート連続地中壁工法を用いた土留め掘削時の地盤の変

形予測における力学パラメーターの活用に着目した事例研究である。当該国では初めて導入された各種の地盤調査を基礎に、弾塑性力学パラメーターを含むバンコック粘土の工学的特性を明かにした上で、2次元弾塑性有限要素（FE）解析を実施し、軟弱地盤の変形挙動の予測と実測の比較検討を行ったもので、10章で構成されている。

第1章では、研究の背景、目的および範囲について述べている。

第2章では、軟弱粘土地盤のFE解析に関する既往の報告を詳細にレビューしている。

第3章および第4章では、我国の最新の技術を導入して実施された地盤調査から得られたバンコック粘土の圧縮特性、非排水せん断強度、せん断弾性係数、静止土圧係数の深度分布および変形係数のひずみレベル依存性を報告するとともに、圧密およびせん断特性について詳しく論じている。とりわけ、弾性波探査による微小ひずみでの弾性係数を明示し、変形係数のひずみレベル依存性を明かにした上で、従来法とのすり合わせのために強度との関連に着目した定式化を試みていることは評価に値する。地盤は自然の産物であるがために、その材料特性にはローカル性が強く、バンコック粘土に関するこの種の調査報告は皆無に近く、その意味で工学的に貴重なデータを提示している。

第5章～第8章では、変形解析の結果を述べるとともに、解析結果に及ぼす諸要因の影響について論じている。第5章では、両サイトにおける現場計測の項目と方法について紹介し、第6章では、解析に用いた弾塑性モデルの特徴について簡単にレビューするとともに、FEプログラムの概要を紹介している。さらに、室内要素試験のシミュレーション結果を提示した上で、解析ツールは特定のひずみの範囲において、要素の変形挙動を適切に表現できることを示している。

第7章では、試験盛土における連成解析の結果を提示し、盛土基礎地盤の変形予測に及ぼす構成モデル、排水境界設定条件、弾性係数、ポアソン比、透水係数、等の影響について論じ、弾塑性モデルを用いた土-水連成解析の予測能力が優れていることを明確にするとともに、土質パラメーターの適正值の範囲を示している。

第8章では、土留め掘削サイトにおける非排水変形解析の結果を提示し、前章と同様に変形予測に及ぼす諸要因の影響について議論している。軟弱地盤といえども、剛な土留め壁を用いた掘削工事に伴う地盤のひずみは小さいため、地盤変形の短期の予測には弾性解析が実用的であると結論づけている。

第9章では、一連の地盤調査および解析結果を踏まえ、設計に必要とされる土質パラメーターを求めるための地盤調査法と弾塑性有限要素解析をリンクさせた軟弱粘土地盤の変形予測における実用的手法を提案している。

第10章は結論で、本研究で得られた知見を総括し今後の展望と課題を述べている。

これを要するに著者は、我国の最新の地盤調査技術を導入してバンコック粘土の工学的特性の詳細、とりわけ変形係数のひずみレベル依存性を明らかにした上で、強度との関連に着目した定式化を行うとともに、弾塑性パラメーターを求めるための地盤調査法と弾塑性有限要素解析をリンクさせた軟弱地盤の変形予測の実用的手法を提案している。弾性係数とそのひずみレベル依存性を陽な形で取り入れた解析手法は斬新であり、地盤

工学とりわけ軟弱地盤工学の発展に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。