

博 士 (工 学) トン アン チャン

学 位 論 文 題 名

Finite element modeling of peaty soft ground preconsolidated by vertical drains under vacuum-surcharge preloading

(真空圧密工法適用下の泥炭性軟弱地盤の
有限要素解析モデルに関する研究)

学位論文内容の要旨

The plane-strain simulation method of soft ground incorporating vertical drains under vacuum-surcharge preloading is usually adopted, because this method can save time and does not require a high specification computer as that of 3D simulation method.

However, the performance of a vertical drain in the field is close to an axisymmetric unit cell. Therefore, this thesis developed a conversion method to convert from an axisymmetric unit cell to an equivalent plane strain unit cell under vacuum surcharge preloading condition. Specifically, the analytical models for the axisymmetric and plane-strain unit cells and their analytical solutions are developed in this thesis. After that, a conversion method that can make the degree of consolidation of the plane strain unit cell equal to that of the axisymmetric cell is proposed.

In Chapter 1, background, research objectives and scope of research of this thesis are described.

In Chapter 2, available conversion methods under conventional surcharge preloading and vacuum-surcharge preloading conditions are reviewed.

In Chapter 3, a new conversion method for the proposed plane-strain unit cell excluding plane-strain smear zone under vacuum-surcharge preloading is proposed. In the proposed method, the determination of the length of drainage path of the vertical drain (l) of the axisymmetric unit cell in each soil layer (of a multi-layer subsoil, where the vertical drain driven through) is not required; besides, the proposed equivalent plane strain unit cell of this method does not need the inclusion of the plane-strain smear zone. Therefore, the proposed method is simpler and more convenient than Indraratna et al. (2005) method, which is the newest conversion method available on the world.

In Chapter 4, the proposed method was verified by FEM for 3 ideal cases of subsoil: (1) one homogeneous clay layer, (2) two clay layers, and (3) three soil layers which is clay-sand-clay sandwich subsoil that can be found in many places in Japan. The verification results showed that the proposed method yielded excellent agreement between the axisymmetric and plane strain cells in all the cases of subsoil. In particular, the results indicated that the effects of both well resistance (in the vertical drain) and smear zone (around the vertical drain) are satisfactorily modeled by the proposed plane strain unit cell.

Besides, FE analyses of two cases of subsoil (2) and (3) showed that Indraratna et al (2005) method could not produce matching results if the drain had high well-resistance and is installed in the subsoil having multi layers; moreover, in some cases, the converted permeability of their plane strain unit cell could even become negative.

In Chapter 5, by using the proposed conversion method, a FE 2D simulation method of a full-scale vacuum-embankment on soft ground is also developed. The comparison between the simulated results and the field-observed data in each soil layer, beneath the full-scale vacuum-embankment (constructed in Kushiro, Hokkaido, Japan) showed good agreement in terms of vertical, horizontal displacements and excess pore water pressure (PWP). This confirmed the validity of the proposed conversion method as well as the simulation method.

In addition, the verification of Shinsha et al. (1982) and Chai et al. (2001) methods via that full-scale embankment is also conducted. It is noted that Shinsha et al. (1982) method is being widely used in Japan, and Chai et al. (2001)' s method is one of the newest methods being used on the world.

The FE analysis results indicated that Shinsha et al. (1982) method could produce large over-prediction in terms of vertical displacement and negative excess PWP, albeit it could produce good prediction in terms of horizontal displacement. But, this good prediction is attributed to the overprediction of negative excess PWP, which could create computed high isotropic compression within the vertical drain-improved zone beneath the embankment.

Besides, the FE analysis revealed that Chai et al. (2001) method could turn out significant under-prediction related to negative excess PWP in some soil layers, but it could produce relatively good prediction in terms of vertical displacement in each soil layer. Regarding horizontal displacement, this method could give relatively good prediction at the time of just before filling the embankment, but it significantly overpredicted the field data after filling.

In Chapter 6, summary and conclusions of this thesis are presented.

Finally, recommendations for further research are provided in Chapter 7.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三田地 利 之

副 査 教 授 三 浦 清 一

副 査 教 授 藤 井 義 明

学 位 論 文 題 名

Finite element modeling of peaty soft ground preconsolidated by vertical drains under vacuum-surcharge preloading

(真空圧密工法適用下の泥炭性軟弱地盤の
有限要素解析モデルに関する研究)

軟弱地盤上への社会基盤諸施設の建設を余儀なくされる場合の対応として様々な地盤改良の技術が開発されてきたが、1960年代に考案された真空圧密工法について工費縮減・工期短縮の観点からその利点が見直され、近年盛んに用いられるようになってきた。地盤の圧密沈下を促進させる方法として地盤に1m程度の間隔で多数のドレーン材を挿入して鉛直の排水路 (vertical drain) を設けた上で盛土を施工する方法 (以下、載荷重工法と呼ぶ) が古くから用いられてきた。真空圧密工法では載荷重を加える前にドレーンの施工範囲をカバーするシートを地表面に被せ、ドレーンと連結した水平配管を通じて真空圧を作用させた上で盛土を載荷する (以下、真空圧密併用載荷重工法と呼ぶ)。

上記いずれの工法においても、地盤の変形挙動を有限要素 (FE) 解析で予測しようとする場合、盛土長軸方向にほとんど変形を生じないものとして2次元平面ひずみ条件で近似できるが、個々のドレーンに向かう間隙水の流れは放射状となるので、3次元のFE解析を行う必要がある。しかし、実地盤は多数の層からなることが多く、ドレーン材をも含めると多数の有限要素を設ける結果、計算時間が圧倒的に長くなって、実務的でない。そこでFE計算全体を2次元で近似するために放射流れ (軸対称モデル) を平面ひずみモデルに置き換えた場合の間隙水圧と軸対称モデルの場合のそれとを等値することにより、放射流れの場合と等価な透水係数を求めてこれをFE解析に用いる方法が採られる。載荷重工法の場合、透水係数の変換は既往の提案式により行われ、解析法もほぼ定着しているが、真空圧密併用載荷重工法に適用すべき変換式の提案はこれまでにIndraratna(2005)によるものの以外にない。しかし、この方法は本来多層問題への適用を考慮していないことと、ドレーン材を地盤に打ち込む際に乱れを生じた部分 (スミアゾーン) の存在を平面ひずみモデルにも導入している結果、要素数と入力パラメータの増大という問題を含んでいる。

以上のような背景から、本研究は多層地盤に適用可能でかつ実務計算に耐えるように可能な限り単純化されたモデルによる変換式を導き、かつその妥当性を軸対称および平面ひずみ条件のvertical drainのモデルを対象としたFE解析と実地盤に対するFE変形挙動解析によって検証したもので、7章から構成されている。

第1章では、研究の背景について述べるとともに、研究の目的を明らかにしている。

第2章では、載荷重工法と真空圧密併用載荷重工法の解析に用いる透水係数の変換式に関する既往研究についてとりまとめている。

第3章では、著者が新たに導いた変換式の誘導過程とその特徴を説明している。提案法は多層問題における各層の排水距離を決める必要がないというメリットを有し、また、この方法ではスミアゾーンを設けない平面ひずみモデルに対する等価透水係数を求めることに特徴がある。したがって提案法は Indraratna の方法における欠点を補うのみならず、モデルがより単純でかつ計算に便利である。

第4章では、モデル地盤が(1)単一層からなる場合、(2)二層から構成されている場合、(3)2つの粘土層の間に砂層が挟まれている場合、の3ケースについて、圧密度-時間関係を FEM によって計算し、等価な透水係数を用いた平面ひずみの計算結果と軸対称モデルとの比較を行っている。その結果、すべてのケースについて軸対称と平面ひずみモデルの計算結果がきわめてよく一致すること、しかも提案法は vertical drain 内の well resistance(透水抵抗)の大小にかかわらず適用可能なことを示した。また、Indraratna の方法を適用すると、(2)と(3)のように複数の層からなる場合、well resistance が高い場合に計算誤差が大きくなること、また変換後の透水係数が負になることすらあって、実際問題に適用出来ない場合が生じることを指摘している。

第5章では、釧路市郊外で施工された真空圧密併用盛土下の泥炭性軟弱地盤の変形挙動の観測値と、提案法を用いて行った2次元平面ひずみ FE 解析によるシミュレーション結果との比較を行っている。提案法を用いた解析結果は、地盤の鉛直・水平変位のみならず発生間隙水圧についても観測値とのよい一致をみせ、解析手法はもちろんのこと、著者の変換式の妥当性が確認された。

第6章では本研究で得られた知見を総括して結論を述べ、第7章で今後の展望と課題を述べている。

これを要するに著者は、真空圧密併用載荷重工法適用下の軟弱地盤の変形解析に不可欠な、Vertical Drain に向かう間隙水の放射流れを平面ひずみ条件に変換するための独自の方法を提案し、軸対称および平面ひずみモデルを対象とした FE 解析と実地盤 FE 変形挙動解析によってその妥当性を検証しており、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。