

氏名	ムハンマド レザウル カリム Md Rezaul Karim
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	工博第2697号
学位授与の日付	平成18年9月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工学研究科社会基盤工学専攻
学位論文題目	Simulation of Long-Term Consolidation Behavior of Soft Sensitive Clay Using an Elasto-Viscoplastic Constitutive Model (弾-粘塑性構成式を用いた軟弱鋭敏粘土の長期圧密挙動のシミュレーション)
論文調査委員	(主査) 教授 岡 二三生 教授 田村 武 教授 松岡 俊文

### 論文内容の要旨

第1章では、研究の目的と背景、論文の構成について述べている。軟弱鋭敏な自然粘土の長期挙動を合理的に予測することは、その上に建設する構造物のデザイン、施工、および維持にとって重要である。軟弱で鋭敏な粘土上に盛土を建設する時、比較的大きい変形や間隙水圧が発生するが、興味深い点は、盛土の建設が終わった後のある期間において、過剰間隙水圧が増加、またはほぼ一定となる現象である。この間、側方変形も増加し続けて、鉛直方向の沈下も増大する。盛土を建設した後一定時間後に、盛土が破壊する可能性があるため、このような鋭敏な粘土の挙動の適切な予測は非常に重要である。このような現象は、多くの文献で報告されているが、盛土の建設が終わった後間隙水圧と沈下が増加し続けることのシミュレーション法は確立されていない。本論文では、自然過圧密鋭敏粘土の長期圧密変形挙動を再現するために、時間増分自動選択スキームを新たに提案し、弾粘塑性構成式を用いた有限要素解析法を開発した。さらに、提案したFEMモデルの有効性を、計算結果と観測結果を比較することによって評価している。

第2章では、本論文の解析で用いた土の構成式について述べている。用いた構成式は、材料の内部構造の変化を考慮した超過応力方の弾粘塑性構成式であって、木元と岡によって提案されたものである。特に、材料の内部構造変化則については、数値解析に基づいて一般化を行っている。

第3章では、長期にわたる地盤材料のシミュレーションのための自動時間増分の選択スキームが提案されている。スキームは、数値解析の安定性と精度を考慮しており、簡易かつロバストである。このスキームは、材料の時間依存性履歴に依存する条件を満足するようになっている。簡易な半経験則である時間増分の決定式は、基本的にひずみ速度の不変量に依存しており、いくつかのパラメータを含んでいるが、これらのパラメータの選択方法は柔軟であり、パラメータの選択は精度より計算ステップ数に対する影響が大きい。

提案された自動選択スキームの有効性は、いくつかの粘土地盤上への盛土の建設問題での粘土地盤の有限要素法による圧密変形解析によって示されている。構成式には、弾性と弾粘塑性モデルが、また解析法としては1次元と2次元の微小変形解析と有限変形解析が用いられている。解析結果は、長期にわたる解析に対して自動選択スキームの有効性が高いことを示している。解析では、オイラーの陰解法とRunge-Kuttaの陽解法が用いられているが、制御パラメータを適切に選べば、オイラーの陰解法を用いた場合、4段のRunge-Kuttaの陽解法と同等の精度の解を少ない解析ステップ数で行うことができる。1次元解析では、4段のRunge-Kutta法に比べて、約40分の1のステップ数で計算が可能である。

第4章では、カナダラバル大学の地盤工学研究グループによってChamplain鋭敏粘土基盤上に建設されたSaint Alban試験盛土の形状、載荷条件、境界条件と有限要素シミュレーションに用いるモデルパラメータを簡潔に記述している。Saint Alban試験盛土下の鋭敏粘土内においては、建設終了後、間隙水圧増加や大変形などの長期観測されている。

第5章では、カナダ東部ケベック州のSt. Albanにおける試験盛土下のChamplain粘土基礎地盤の長期圧変形解析を微小ひずみ理論(SST)に基づいて行っている。解析では、内部構造の変化を考慮した弾粘塑性モデルを用いている。この

解析により、盛土建設後の地盤中での間隙水圧の増加現象を説明することに成功している。ただし、変形の予測精度は間隙水圧に比べて低い。また、解析では内部構造変化に関するパラメータの選定および FEM メッシュの適切な設定が重要であることが明らかになった。

第 6 章では、Updated Lagrangian 法に基づく有限変形解析法を用いた解析を 5 章で述べた同様の盛土基礎地盤に対して実施した結果について述べている。この解析では、間隙水圧のみでなく、初期ならびに長期の変形についても観測結果がよく再現されている。解析においては、内部構造パラメータの設定と粘塑性パラメータの C の設定が解析結果に与える影響が大きい。さらに、地下水面が浅い粘土表層地盤のモデル化の方法も解析結果に与える影響が大きい。また、FE 要素中心での応力のスムージングも結果に与える影響が大きい。このためには、SPR (super convergent patch recovery) などの方法が有効であると推測される。微小変形解析法は、短期の解析にのみ適用可能であるが、有限変形解析のための材料パラメータの選定には有効である。

第 7 章では、有限要素離散化スキームとサンプリング点（積分点）の選定の安定性と精度に与える影響について述べている。

FE メッシュが適切に選択されない場合、要素での積分点の選び方は結果に大きな影響をあたえる。さらに、簡易で有効な自動メッシュ更新法が提案されている。ここで採用されたメッシュの更新は、事後誤差評価とひずみの不偏量などの適切な変数の分布に基づく要素の細分割によるものであり、計算ステップ数を節約できる点で優れている。その有効性は、長期圧密変形解析に与える初期要素分割の与える影響が少ないことによって確認されている。最後に、空間的な低減積分法の影響について述べている。低減積分法は、適切な有限要素の選択が行われない場合には、誤差の大きい結果を与える。つまり、ここで採用した自動更新法と低減積分を同時に用いることにより安定した精度のよい解が得られることが明らかとなった。

第 8 章は結論として、本研究によって得られた結果をまとめるとともに、今後課題について、述べている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、自然過圧密鋭敏粘土の長期圧密変形挙動を予測するために、弾粘塑性構成式を用いた有限要素解析法を開発し、盛土建設後に長期にわたって間隙水圧が滞留または増加する現象の予測法を明らかにした成果をまとめたものである。

- (1) 自然粘土の塑性変形に伴う内部構造の崩壊を適切に表現できるよう拡張した粘性土の弾粘塑性構成式を用いて、粘土地盤の長期挙動を数値解析するために、自動的な時間増分の選定のためのスキームを提案している。
- (2) このスキームは、材料の種々のパラメータに依存して、時間増分を自動的に調節し、新たな状態に適応するもので、ロバストであるために、この自動的に時間増分選択スキームは、粘土の長期挙動解析に対してこれまで使用されてきた固定時間増分法、事後の誤差評価に基づく方法や他の経験的アプローチなどと比較して、有効な方法である。
- (3) カナダケベック州の St. Alban で鋭敏粘土上に建設された試験盛土基礎地盤の長期観測結果をシミュレーションし、盛土建設後に間隙水圧が増加する不安定現象の解明に成功している。さらに、有限変形特有の数値不安定性とその原因についても考察し、有限変形理論の有効性を明らかにしている。
- (4) 有限要素メッシュ構成と積分点が有限要素方法の精度と安定性へ与える効果を示し、信頼できる有限要素メッシュ配置の更新法に基づいて簡単に適応的な手順を提案している。この方法により、軟弱鋭敏な粘土の弾粘塑性長期圧密挙動に与えるメッシュ依存性と積分点の影響を減少させることができることを明らかにしている。

以上、本論文は、時間増分選択スキームを提案し、鋭敏な軟弱粘土地盤の長期圧密問題を可能とする地盤と間隙水の連成を考慮した有限要素解析法を提案しており、地盤工学の進展に多大に貢献する研究である。よって、博士（工学）の学位に値すると認める。