

氏 名	文 龍
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2183 号
学位授与の日付	平 成 14 年 7 月 23 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 土 木 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	地盤の液状化・流動化現象の統一的解析法に関する研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 佐 藤 忠 信 教 授 田 村 武 教 授 岡 二 三 生

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は飽和砂地盤の液状化・流動過程を解析するための方法論の開発を行なったものであり、6章からなっている。第1章は序論であり、本論文の背景と構成からなっている。第2章は地盤の液状化の発生とともに発現する地盤の流動現象に関する既往の研究成果をまとめたものであり、本論文で提案する方法論を発想するに至った経緯が述べられている。

第3章では液状化・流動過程を通して飽和砂の挙動を記述できる構成式について検討している。飽和砂地盤の液状化・流動過程は液状化発生前の固体的な挙動から、液状化時の流体的な挙動を経て、再び固体的な挙動を回復する、一種の相変化が連続的に発生する現象である。このような問題を解析するために、固体と流体間の遷移領域を表現でき、簡便かつ多次元解析にも適用可能な飽和砂の構成式を開発した。これは繰返し弾塑性構成式と Newton 粘性流体構成式を過剰間隙水圧比に依存した相変化制御関数を導入して、組み合わせたものである。さらに、提案した構成式を流・弾塑性構成式と名付け、室内試験を模擬した要素シミュレーションを行い、構成式の基本的な力学的挙動や相変化制御関数の設定方法について検討した。結果として、流・弾塑性構成式を用いると、液状化が発現した状態で要素に発生する大きなせん断ひずみを的確に評価できることが判明した。また、有効応力が回復すると固体的な性質が復元し、流動が終了することも表現でき、液状化過程における固体・流体間の連続的な相変化を表現できた。

第4章では、Biot の二相混合体力論に基づいた連成型動的解析手法に、流・弾塑性構成式を取り入れることにより、液状化・流動過程を支配する場の方程式の定式化を行った。固相の変位 u と間隙水圧 p を未知数とした u - p 表現形式を用い、釣り合い式は有限要素法により、連続式は差分法により空間的な離散化を行い、時間的には Newmark の β 法により離散化した。解析手法の2次元境界値問題に対する適用性を確認するために、液状化地盤上の盛土の動的挙動に関する遠心模型実験を対象としたシミュレーションを行った。結果として、盛土側方地盤の水平変位量や盛土本体の変形量が、従来の固体力学に基づいた推定値より、合理的に評価できることを明らかにした。また、液状化した後の地盤の流動速度に着目し、強制傾斜土槽を用いた振動台実験を対象とした解析を行った。結果として、流・弾塑性構成式を用いた解析値は、固体力学や流体力学に基づいた解析値より、実験での流動速度、水平変位をよく再現することができた。さらに、解放面を有する場合の地盤の流動現象を対象として大型ケーソン式岸壁の変形解析を行なった結果、ケーソンおよび地盤の変形特性は、従来の固体力学に基づいた結果と大差のないことが判明した。これはケーソン底面の置換砂の変形特性がケーソンの変位を拘束しており、置換砂は液状化しないのでケーソンの移動量に大きな差が発生しなかったためである。また、ケーソン背後の埋立土の部分で、液状化が発生してもケーソンの移動量が拘束されているため背後地盤の変形にも大きな差が生じなかった。

第5章では有限変形を考慮できる解析コードを開発した。液状化に伴う流動現象は地表面勾配が1～2%以下の、工学的にはほとんど水平と考えられるような地盤でも発生し、液状化に伴い非常に大きな地盤変位が誘起される場合があり、液状化層の平均的なせん断ひずみは100%を超えることも多い。このような大きなせん断変形挙動を正確に表現するためには、有限変形理論に基づいた考察が必要である。このため、有限変形理論に基づいた修正 updated Lagrangian 法により支配方

程式を定式化した。飽和弾性体の一次元圧縮挙動、弾塑性構成式と流・弾塑性構成式を用いた飽和砂の非排水単純せん断挙動、Newton 粘性流体構成式を用いた傾斜地盤の流動挙動などを解析し、定式化の妥当性を確認した。次に、強制傾斜土槽を用いた振動台実験を対象として流・弾塑性構成式を用いた地盤の液状化・流動化過程の有限変形解析を実施した。その結果、修正 updated Lagrangian 法で得られた液状化地盤の流動速度は微小変形理論で得られたそれとほぼ同じであったが、最終地表面の変形形状は修正 updated Lagrangian 法による解析の方が実験結果を良く説明できることが明らかにされた。

最後の第 6 章は結論であり、本研究で得られた成果について要約し、また、今後行なうべき研究の方向について提言を行っている。

論文審査の結果の要旨

飽和砂地盤が液状化し流動現象を発現しそれが終息する過程は、固体であった地盤が、液状化することにより流体的に挙動し、過剰間隙水圧の消散とともに再び固体的な性質を回復する、一種の相変化が連続的に発生する現象である。本論文は、こうした現象を統一的に解析するための方法論を展開したものであって、得られた成果の主たるものは以下のとおりである。

1. 地盤の液状化・流動現象を統一的に取り扱うために、繰返し弾塑性構成式と Newton 粘性流体構成式を過剰間隙水圧比に依存した相変化制御関数を導入して組み合わせ、簡便かつ多次元解析にも適用可能な飽和砂の構成式を提案した。
2. 提案した構成式を用いて、室内試験を模擬した要素シミュレーションを行い、構成式の基本的な力学的挙動や相変化制御関数の設定方法を検討した。
3. Biot の二相混合体力論に、提案した構成式を組み込むことにより、液状化・流動現象を支配する場の方程式を定式化した。さらに、それを有限要素法と差分法を用いて離散化した。
4. 解析手法の妥当性を検証する目的で、液状化地盤上の盛土挙動に関する遠心模型実験を対象としたシミュレーションを行った。その結果、実験値を良く説明できることが示された。また、液状化した後の地盤の流動現象に着目し、強制傾斜土槽を用いた振動台実験を対象とした解析を行った結果、液状化地盤を固体や流体として取り扱った従来の解析に比べ、実験で得られた流動速度や水平変位をよく再現することができた。
5. 液状化に伴う流動現象では液状化層の平均的なせん断ひずみは100%を超える場合もある。こうした大せん断変形挙動を正確に表現するために、修正 updated Lagrangian 法に基づいた有限変形解析コードを開発した。有限変形を考慮した解析により、大変形時における実験結果を良く説明できることを示した。

以上要するに本論文は、地盤の液状化・流動過程を統一的に解析するための方法論を開発し、実験結果のシミュレーションを通して、開発した方法論の有用性を検証したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成14年 6 月19日に論文内容とそれに関する試問を行った結果、合格と認めた。