

氏名（本籍）	渦岡良介（愛媛県）
学位の種類	博士（工学）
学位記号番号	乙第 17 号
学位授与年月日	平成 12 年 3 月 24 日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	地盤の液状化発生から流動までを予測対象とする解析手法に関する研究 (Analytical Study on the Mechanical Behavior and Prediction of Soil Liquefaction and Flow)
学位論文審査委員	(主査) 教授 八 嶋 厚 (副査) 教授 宇 野 尚 雄 教授 杉 戸 真 太

論文内容の要旨

1995 年兵庫県南部地震以降，土木構造物や液状化対策の耐震設計では一部でレベル 2 地震動を考慮した 2 段階設計法が採用されるようになり，実務では液状化地盤あるいは流動地盤中の構造物の変形を定量的に評価する手法が望まれている。そこで，本研究では液状化地盤や流動地盤における構造物の挙動を予測することを目的として，数値解析手法を提案し，その検証を行った。現状の液状化解析手法では 1 つの手法で初期状態から液状化後の大変形までを予測することは困難であることから，本研究では液状化の発生から流動に至る過程に対して，以下の 2 つの手法を適用した。

- ・地震前の初期状態から地震中の液状化発生の過程：固体力学に基づいた有効応力法
- ・地震後の完全液状化した地盤の流動過程：流体力学に基づいた新しい流動解析手法

まず，地震前の初期状態から地震中の液状化発生の過程，すなわち固体から液体へ変化する過程については，固体力学に基づく有効応力法を適用した。はじめに，砂の繰返し弾塑性モデルと粘土の繰返し弾粘塑性モデルを誘導し，室内試験結果をもとにモデルの検証を行った。砂のモデルについては，より簡便で安定した解を得ることができるせん断係数の低減手法を提案し，従来の手法と比較し，その利点を示した。粘土のモデルについては，モデルが載荷速度に依存した粘土の動的変形特性および動的強度特性を再現できることを室内試験結果に基づき確認した。場の方程式として，Biot の二相混合体理論に基づき，固相の変位 u と間隙水圧 p を未知数とした u - p formulation を誘導した。つりあい式と連続式からなる場の方程式に対し，有限要素法と差分法を用いて，空間離散化を行った。また，モデルの破壊線付近の挙動において，応力状態を補正する方法を提案し，精度の高い変形予測を可能とした。

提案した固体力学に基づく解析手法を用いて，模型実験や実際の構造物の被災事例を対象としたシミュレーションを行い，解析手法がどの程度の変形予測能力を有しているのか

を検討した。その際、地盤と構造物の地震中の変形挙動に対して、そのメカニズムを考察した。飽和砂地盤上の盛土の動的遠心模型実験、軟弱粘性土地盤上の盛土の動的遠心模型実験、1993年北海道南西沖地震で被災した後志利別川の河川堤防、1995年兵庫県南部地震で被災した淀川の河川堤防、1995年兵庫県南部地震で被災した重力式岸壁を対象とした解析の結果、変形量の定量的な予測については完全ではないものの、以下の結論を得た。

- ・ 模型実験の解析では、解析手法は基礎地盤内の応答加速度、過剰間隙水圧、盛土の沈下に関して実験結果を定性的に再現した。また、被災事例の解析では、近距離ながら被災程度の異なる2地点の被災量の大小関係を定性的に表現することができた。定量的には提案した手法の盛土天端沈下量に対する予測精度は倍半分程度であった。
- ・ 盛土直下地盤の挙動は初期の偏差応力の空間的変化、水平地盤の液状化時期などに影響され、全応力一定の境界条件のもとで繰返しせん断をうけ、鉛直方向の圧縮ひずみが生じる。この圧縮ひずみが盛土の沈下の一因となっていることを示した。同様な変形のメカニズムは、ケーソン直下の置換砂でもみられた。
- ・ 砂質土と粘性土の互層地盤では、液状化層の上部の粘性土層が構造物の地震時変形量に与える影響が大きく、粘性土層の変形特性を適切に評価することが予測精度を高める上で重要であることを示した。

次に地震後の完全液状化した地盤の流動過程、すなわち液体から固体へ変化する過程については、流体力学に基づく新しい流動解析手法を適用した。はじめに、液状化した土の粘性特性を調べた室内試験結果をもとに、流動モデルとして Bingham モデルを提案した。さらに、Bingham モデルを Newton 粘性を扱う汎用の数値解析手法へ組み込むための等価粘性係数の考え方を示した。場の方程式として、非圧縮性 Newton 流体の場の方程式の誘導を行った。空間離散化には有限体積法、時間離散化には後退差分を用いて離散化を行った。離散化した Navier-Stokes 方程式の解法には SIMPLE 法を用いた。また、流動した地盤の地表面形状を把握するため、移動境界の扱いには VOF 法を用いた。

提案した流動解析手法を用いて、模型実験や実際の被災事例を対象にシミュレーションを行い、流体力学に基づく流動解析手法が流動地盤の挙動をどの程度表現できるか検証した。液状化させた後、強制的に土槽を傾斜させて流動を発生させた振動台実験、流動地盤中に地中壁を設置した傾斜地盤の振動台実験、流動破壊を起こした道路盛土を対象とした解析の結果、液体から固体への遷移領域の再現については十分でないものの、以下の結論を得た。

- ・ 解析手法は液状化地盤の流動速度の時刻歴に関して、実験結果を定性的に再現した。また、解析手法は地中壁に作用する最大流動圧の発生時刻や深度分布に関して、実験結果を定量的に再現した。以上より、流動開始直後の液状化地盤は Bingham 流体によりモデル化することができるといえる。
- ・ 流動破壊した盛土に対して、固体力学に基づく手法では盛土内の過剰間隙水圧の発生やせん断破壊に至る領域の予測は可能であるが、その後の大変形を再現することは困難であった。流体力学に基づく手法は液状化した盛土の流動破壊後の大変形を再現することができた。

論文審査結果の要旨

1995年兵庫県南部地震以降、土木構造物や液状化対策の耐震設計では一部でレベル2地震動を考慮した2段階設計法が採用されるようになり、実務では液状化地盤あるいは流動地盤中の構造物の変形を定量的に評価する手法が望まれている。そこで、本研究では液状化地盤や流動地盤における構造物の挙動を予測することを目的として、数値解析手法を提案し、その検証を行っている。現状の液状化解析手法では1つの手法で初期状態から液状化後の大変形までを予測することは困難であることから、本研究では液状化の発生から流動に至る過程に対して、以下の2つの手法を適用している。

- ・地震前の初期状態から地震中の液状化発生の過程：固体力学に基づいた有効応力法
- ・地震後の完全液状化した地盤の流動過程：流体力学に基づいた新しい流動解析手法

まず、地震前の初期状態から地震中の液状化発生の過程、すなわち固体から液体へ変化する過程については、固体力学に基づく有効応力法を適用している。はじめに、砂の繰返し弾塑性モデルと粘土の繰返し弾粘塑性モデルを誘導し、室内試験結果をもとにモデルの検証を行っている。また、モデルの破壊線付近の挙動において、応力状態を補正する方法を提案し、精度の高い変形予測を可能としている。提案した固体力学に基づく解析手法を用いて、模型実験や実際の構造物の被災事例を対象としたシミュレーションを行い、解析手法がどの程度の変形予測能力を有しているのかを検討している。解析の結果、以下の結論を得ている。

- ・模型実験の解析では、解析手法は基礎地盤内の応答加速度、過剰間隙水圧、盛土の沈下に関して実験結果を定性的に再現した。また、被災事例の解析では、近距離ながら被災程度の異なる2地点の被災量の大小関係を定性的に表現することができた。定量的には提案した手法の盛土天端沈下量に対する予測精度は倍半分程度であった。
- ・盛土直下地盤の挙動は初期の偏差応力の空間的变化、水平地盤の液状化時期などに影響され、全応力一定の境界条件のもとで繰返しせん断をうけ、鉛直方向の圧縮ひずみが生じる。この圧縮ひずみが盛土の沈下の一因となっていることを示した。同様な変形のメカニズムは、ケーソン直下の置換砂でもみられた。
- ・砂質土と粘性土の互層地盤では、液状化層の上部の粘性土層が構造物の地震時変形量に与える影響が大きく、粘性土層の変形特性を適切に評価することが予測精度を高める上で重要であることを示した。

次に地震後の完全液状化した地盤の流動過程、すなわち液体から固体へ変化する過程については、流体力学に基づく新しい流動解析手法を適用している。はじめに、液状化した土の粘性特性を調べた室内試験結果をもとに、流動モデルとして Bingham モデルを提案している。さらに、Bingham モデルを Newton 粘性を扱う汎用の数値解析手法へ組み込むための等価粘性係数の考え方を示している。提案した流動解析手法を用いて、模型実験や実際の被災事例を対象にシミュレーションを行い、流体力学に基づく流動解析手法が流動地盤の挙動をどの程度表現できるか検証している。解析の結果、以下の結論を得ている。

- ・解析手法は液状化地盤の流動速度の時刻歴に関して、実験結果を定性的に再現した。また、解析手法は地中壁に作用する最大流動圧の発生時刻や深度分布に関して、実験結果

を定量的に再現した。以上より、流動開始直後の液状化地盤は Bingham 流体によりモデル化することができるといえる。

- ・流動破壊した盛土に対して、固体力学に基づく手法では盛土内の過剰間隙水圧の発生やせん断破壊に至る領域の予測は可能であるが、その後の大変形を再現することは困難であった。流体力学に基づく手法は液状化した盛土の流動破壊後の大変形を再現することができた。

以上が、本研究の主な成果であり、これらの結果は、近年切望されている液状化地盤あるいは流動地盤中の構造物の変形を定量的に評価する手法の確立に対して重要な情報を与えるものであり、本研究の意義は大きい。したがって、本研究は学位論文として認定するに値すると判定した。

最終試験結果の要旨

八嶋 厚，宇野尚雄，杉戸真太で構成する審査委員会は、本論文および論文別刷り等を慎重に検討した結果、提出された査読付き論文 8 編の主要部分は申請者によって書かれており、本論文は学位論文として十分に完成された内容を有していることを確認した。また、耐震工学および地盤工学に関連する専門知識について学識確認レポートを課し、申請者が学位を授与するに十分な専門的知識を有していることを確認したので、最終試験（公聴会）を開催し審査した。審査委員会での審議の結果、合格と判定した。