

液状化領域の空間分布評価に基づいた地盤流動の予測と対策に関する研究

著者	吉田 雅穂
雑誌名	博士学位論文要旨 論文内容の要旨および論文審査結果の要旨 / 金沢大学大学院自然科学研究科
巻	平成13年6月
ページ	461-466
発行年	2001-06-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/16396

氏名	吉田 雅穂
生年月日	
本籍	福井県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第223号
学位授与の日付	平成12年9月29日
学位授与の要件	論文博士(学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	液状化領域の空間分布評価に基づいた地盤流動の予測と対策に関する研究
論文審査委員(主査)	北浦 勝(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	松本 樹典(工学部・教授) 宮島 昌克(工学部・教授) 近田 康夫(自然科学研究科・助教授) 杉戸 真太(岐阜大学工学部・教授)

学位論文要旨

ABSTRACT

This dissertation is focusing on estimation and countermeasure for liquefied ground flow based on evaluation of spatial liquefaction potential. First, two methods are proposed here to evaluate a liquefied ground flow. One is a method to estimate a spatial liquefaction potential using a shape interpolating function and a Kriging technique. The other is a method to evaluate an anisotropy of hardness of soil using a semi-variogram and a trend surface on altitude. Case studies using these methods are carried out to show effectiveness and instructions for use. Secondly, statistical analyses using data of past earthquakes, shaking table tests using a small-scale model ground and numerical analyses using the proposed methods mentioned above are conducted to investigate the mechanism of liquefied ground flow, which occurred at horizontally plane ground. It is clarified that the direction of liquefied ground flow is influenced by the inclination of boundary of geological stratum, existence of very loose surface soil and inertia force of strong ground motion. Furthermore, a magnitude of liquefied ground flow is influenced by the thickness of liquefied soil layer. Thirdly, shaking table tests and numerical analyses are carried out to solve the matters under consideration of gravel drain system as a countermeasure against liquefaction, such as residual settlement after earthquake, application to buried pipelines and effectiveness during actual earthquake. Finally, simple shear tests and shaking table tests using a small-scale model ground are conducted to investigate whether the gravel drain system is effective against liquefied ground flow. If the gravel

drain system is able to prevent liquefaction, the liquefied ground flow can be mitigated by the increase of rigidity of improved ground due to its permeability, compaction and displacement effects.

ライフライン構造物は構造体としては線状であるが、システムとしては面的な広がりを持つ構造物である。そのため、敷設地域の液状化危険度の予測を行う場合や、液状化の可能性ありと判定された箇所に対策を施す場合には、対象となる広域地盤を面的または空間的に評価することが必要となる。特に、広域地盤が数メートルも水平移動する液状化に伴う地盤流動は、地中に埋設された管路に致命的な損傷を与えるものであり、その発生領域の予測や対策は非常に重要な問題である。

この地盤流動の変位量については、従来より多くの予測法が提案されているが、変位方向についてはあまり検討がなされていない。これは、流動現象の多くが傾斜地盤や護岸背後地盤で発生しており、前者では標高の高い所から低い方向へ、後者では護岸の傾斜方向、すなわち海側や川側へというように、その方向が一意的に決まるためである。しかし、1964新潟地震や1995年兵庫県南部地震における地盤流動事例を調査した結果、地表面の傾斜や護岸の移動という地盤流動を引き起こす顕著な誘因のない水平地盤においても、数メートルもの地表水平変位が生じている事例が確認されている。この場合には、地表変位を引き起こす誘因が不明であるため、流動方向はもちろんのこと、流動の発生を事前に予測することは不可能であり、さらに対策を施すことも困難である。上記のような地表面傾斜や護岸移動という地表で目に見える誘因のない水平地盤においては、その誘因は外的な地震動、または地盤内部に存在していると考えられる。したがって、それを明らかにすることは、地中埋設管路の多い都市部に広く分布する水平地盤での、地盤流動被害を軽減することに多いに貢献できると思われる。

このような観点から本論文では、地盤内部の物性値を空間的に評価する手法、すなわち液状化領域の空間分布推定法を提案し、既往の液状化被害事例をケーススタディとして、それを地盤流動予測に適用することについて検討を行った。また、模型実験や上記手法により水平地盤における地盤流動メカニズムを明らかにすることを試みた。さらに、低騒音、低振動のため都市部や既設構造物に対する液状化対策に適したグラベルドレーン工法を取り上げ、それによる地中埋設管路の液状化対策と地盤流動対策の有効性について実験的に検討を行った。なお、本論文は6章で構成されており、各章の概要と得られた結論は以下の通りである。

第1章では、液状化地盤の流動現象の予測と対策に関する実務の現状を紹介し、それを背景とした本研究の目的と概要について述べた。また、本研究に関する既往の研究を紹介するとともに、それに対する本研究の位置づけについて言及した。

第2章では、液状化領域の平面的または空間的な分布を推定する手法について検討

した。まず、 F_L 値を利用した液状化領域の空間分布推定手法として、形状補間関数を用いた方法とKriging法を用いた方法を提案し、両者の推定精度に及ぼす影響因子について、既往の液状化被害事例をケーススタディとして検討した。その結果、両手法ともに液状化危険度の面的分布状況を視覚的に扱えることで非常に有効な手法であるが、地盤物性値の空間相関を考慮した予測が行える点、任意に分布するデータを扱える点、また推定誤差の評価が行える点においてKriging法を用いた方法の方が利用価値が高いことを明らかにした。しかし、局所的に地盤条件の異なる部分が存在する地盤の推定を行う場合には、物性値の空間相関を表す指標であるsemi-variogramの取扱いに十分な注意を要し、利用するデータを事前にチェックする前処理が必要であることを示した。

つぎに、地盤流動による地表水平変位の方向性を検討するにあたり、 N 値を利用した地盤の硬軟分布の等方性、または異方性を明らかにすることを目的として、semi-variogramを用いた方法と傾向面を用いた方法を提案し、両手法による地盤の硬軟分布の方向性評価手法について、既往の液状化被害事例をケーススタディとして検討した。その結果、両手法ともに硬軟分布の方向性を視覚的に扱える非常に有効な手法であるが、分布の傾向を1枚の図で量的に表現できる点、局所的な分布の方向性も評価できる点、3次元分布の評価にも応用できる点において傾向面を用いた方法の方が利用価値が高いことを明らかにした。しかし、任意に分布するデータを扱う場合には、等間隔配置のデータに補完する前処理が必要であることを示した。

第3章では、従来から検討されている傾斜地盤や護岸背後地盤での流動現象とは異なる、地表面が水平な地盤における流動メカニズムについて、事例分析、数値解析、模型実験により検討した。まず、兵庫県南部地震の埋立地盤と新潟地震の沖積地盤で発生した、地盤流動による地表水平変位の量と方向の特徴について統計的に検討を行った。その結果、兵庫県南部地震の事例では、護岸移動による影響が少なく地表面勾配の非常に小さい内陸地盤において、最大で約2m、平均でも約1mの地表水平変位が発生し、その方向については南方向の一方向に卓越していたことを明らかにした。また、この水平地盤で発生した地表変位の方向性に影響を与える要因として、地表面や地層境界面の傾斜、地動加速度、液状化領域の分布に着目しそれぞれの方向性について検討した。その結果、地表面に関しては、勾配の影響のある場合とない場合が平均的にほぼ同等の割合であり主たる要因とは判断できなかった。しかし、地動加速度の卓越方向、埋立地盤下部の地層境界面の傾斜方向、液状化領域下面の傾斜方向については、いずれも南向きの方向性を有する傾向があり、これらが埋立地盤で発生した南方向への地表水平変位の要因である可能性を示唆した。一方、新潟地震の事例では、地表水平変位の方向と液状化層上下面の傾斜方向とが一致していることを明らかにした。さらに、大きな水平変位の発生した下流部では、表層に N 値5程度の非常に軟弱な粘土層が分布しており、この軟弱地盤の存在も地盤流動の方向や量に影響を与えた可能性を示唆した。

つぎに、前述の要因のうち基盤の傾斜と地動加速度の慣性力が地表水平変位の方向に与える影響を明らかにするため模型振動実験を実施した。その結果、地表面が水平であっても、基盤が傾斜している場合にはその傾斜方向へ、また地動加速度の大きさに偏りがある場合にはその慣性力の大きな方向に地表水平変位が発生することを明らかにした。

つぎに、これらの結果を基に水平地盤における液状化地盤の流動メカニズムについて考察した。その結果、従来より指摘されている地層境界面の傾斜で生じた初期せん断力が液状化により解放され、その傾斜方向に水平方向の力が作用することが、その主たるメカニズムであることを示した。また、液状化層厚の違いによる液状化継続時間および液状化の程度の水平方向の不均衡も一つの要因であり、これにより軟弱層の厚い方への地盤変形が促進されることを指摘した。さらに、液状化が発生しなくても、強い地震動を受ける軟弱地盤では大きなせん断ひずみが生じるため、それにより残留変位が発生することも考慮すべきであることを指摘した。また、地震動の慣性力に関しては、兵庫県南部地震のような強い地震動の場合には、支配的な要因となりうることを指摘し、軟化した地盤が強い地震動による慣性力を受け、水平方向に変位することも考慮すべきであることを指摘した。

最後に、第2章で提案したKriging法による液状化領域の空間分布推定手法と、傾向面を用いた地盤の硬軟分布評価手法を兵庫県南部地震の液状化被害事例に適用し、地盤流動による地表水平変位の量と方向を予測する手法について検討した。その結果、地盤流動に伴う地表水平変位の量は対象地盤下部の液状化層の厚さに比例し、その方向は平面的な硬軟分布の不均衡で形成された地層境界面の傾斜により決定づけられていたことを明らかにした。また、変位量の最大値を決定づける大きな要因の一つは液状化層厚であるが、地点ごとに異なる流動量のばらつきは、その他の地盤条件や入力条件による促進要因や抑制要因の影響を受けることを示唆した。

第4章では、低騒音、低振動のため都市部や既設構造物に対して適用可能な液状化対策工法の一つであるグラベルドレーン工法を取り上げ、従来より実務上の問題点として指摘されてきた地震後の残留沈下の問題、地中埋設管路への適用の可能性、実地震に対する効果について検討を行った。まず、地震後の残留沈下の問題に関して模型振動実験により検討した。その結果、液状化時の地盤沈下は最大過剰間隙水圧比と相関があり、本工法の液状化防止効果は、間隙水の排水よりも過剰間隙水圧の早期消散が支配的であることを明らかにした。また、本工法によって過剰間隙水圧の上昇が抑制された場合、改良地盤周辺部の液状化抵抗力が増加するため、改良地盤だけでなくその周辺の非改良地盤における対策効果も期待でき、さらに地盤沈下も低減されることを示した。

つぎに、地中埋設管路の液状化対策として本工法を適用した場合の有効性や問題点について模型振動実験により検討した。その結果、本工法の間隙水圧消散効果によって埋設管路近傍の液状化継続時間が短縮し、過剰間隙水圧比の最大値が低減するため、

管路破壊の要因となる地盤沈下や管に生じる浮力が低減するとともに、管路歪の継続時間が短縮されることを明らかにした。また、本工法の効果はグラベルパイルの打設間隔および打設幅に強く依存し、概してグラベルパイルを密に打設し埋設管路近傍の液状化抵抗力を増加させることが本工法の効果向上につながることを明らかにした。しかし本実験の範囲内においては、グラベルパイルの打設条件によって、グラベルパイルの強制振動や、間隙水圧消散効果の不均一さによる地盤の動的振幅や不等沈下などが発生し、管路破壊の危険性の高まる場合があることを指摘した。以上より、本工法の地中埋設管路への適用の実用化に向けての課題などを明らかにすることができた。

最後に、グラベルドレーン工法が初めて実地震の洗礼を受けた1993年釧路沖地震の事例を取り上げ、現地調査や数値解析などにより本工法の液状化対策効果について検討した。その結果、液状化の可能性が非常に高い地盤であったにも関わらず本工法を施工していた地点では液状化被害は認められず、従来より問題点として指摘されていた地震後の残留沈下も確認されなかったことを明らかにした。また、数値解析により釧路沖地震時の本工法施工地盤の過剰間隙水圧発生状況をシミュレートし、最大過剰間隙水圧比が低く抑制されていたことを示した。

第5章では、液状化地盤の流動対策工法としてグラベルドレーン工法を取り上げ、模型実験により本工法の有効性について検討した。まず、傾斜地盤にグラベルパイルを打設した場合の流動抑制効果に影響を与える要因について模型振動実験により検討を行った。その結果、本工法による地盤流動対策効果の要因には、碎石により地盤の透水性が向上する透水効果、液状化の可能性の高い砂を碎石で置き換える置換効果、また施工時の碎石の突き固めによる周辺地盤の締固め効果の3点であることを明らかにした。したがって、本工法は間隙水圧消散工法に分類されているが、今後は後者の2点をその付加効果として考慮すべきであることを指摘した。また、グラベルパイルを打設した対策箇所の下流側に比べて上流側の方が地盤流動の抑制効果が大きく、これは前述の三つの効果によって対策箇所の地盤剛性が高まり、上流側からの流動を食い止める働きが生じたためと考えられる。さらに、グラベルパイルを2列に幅広く打設するよりも1列で密に打設し、対策箇所の過剰間隙水圧比をさらに低く抑える方が上流側の流動を抑制する上では合理的であることも明らかにした。

つぎに、グラベルパイルを打設した模型地盤に対する単純せん断実験を行い、常時または液状化時の対策地盤のせん断剛性の変化とそれに影響を及ぼす要因について検討した。その結果、飽和砂地盤にグラベルパイルを打設することにより、地盤のせん断剛性が向上し、その効果はグラベルパイルの打設間隔を小さくし、径間比または置換率を増加させることでより向上することを明らかにした。また、この効果は砂を碎石で置き換える置換効果のみでも確認でき、それは打設時の突き固め処理による締固め効果でより向上し、本実験の範囲内においてはその分担割合はおおよそ1対1であることを明らかにした。さらに、液状化過程における地盤のせん断剛性に影響を与える要因は、透水効果、置換効果、締固め効果のうち特に透水効果による影響が大きいこ

とを明らかにした。しかし、急激な過剰間隙水圧の上昇によりグラベルパイルによる透水効果が機能せず、周辺地盤の過剰間隙水圧比が1.0に達し地盤が軟化してしまった場合には、グラベルパイルの置換効果や締固め効果によるせん断剛性は期待できないことを明らかにした。

学位論文審査結果の要旨

本学位論文に関し、平成12年8月1日に第1回審査会を開催、面接審査を行った後、論文の内容について検討した。また、専門5科目に関して試問した。さらに、8月7日に行われた口頭発表の後に第2回審査会を開き、協議の結果、以下のように判定した。

本論文は、液状化領域の空間分布評価に基づいた地盤流動の予測法解明と対策開発を目指した研究である。液状化に伴う地盤流動は地中埋設管の破壊に強く関与しているが、変位方向についてはもとより、変位量についても信頼性ある予測法が未だ提案されていない。既往の液状化被害を見ると、水平地盤においても、数メートルもの地表水平変位が生じている例がある。そこで本論文では、(1)このような地表面傾斜や護岸移動という地表で目に見える誘因のない水平地盤においては、その誘因は外的な地震動、または地盤内部に存在していると想定し、(2)地盤内部の物性値を空間的に評価する手法、すなわち液状化領域の空間分布推定法を提案し、(3)既往の液状化被害事例をケーススタディとして、それを地盤流動予測に適用することについて検討を行っている。また、(4)模型実験や上記手法により水平地盤における流動メカニズムを明らかにすることを試みている。さらに、(5)低騒音、低振動のため都市部や既設構造物に対する液状化対策に適したグラベルドレーン工法を取り上げ、それによる地中埋設管路の液状化対策と地盤流動対策の有効性について実験的に解明している。

以上の研究成果は、地盤流動の予測法解明と対策開発に貢献しており、実際上の価値が認められることから、本申請者は博士(工学)の学位を受けるに値する、と判定した。