

学 位 論 文 題 名

軟弱地盤に構築された道路盛土の耐震性評価に関する研究

(Evaluation of seismic performance of road embankment constructed on soft ground)

学位論文内容の要旨

構造物の耐震設計法の高度化や解析機能の発達、地盤震動問題に取り組む研究者の精力的な研究により、地盤の地震応答解析が耐震設計に適用される機会が増加している。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東北地方のみならず広い地域で、震源の広さと震源破壊の不均一性に起因して、継続時間が長く振幅の大きい領域が連続するような特徴的な地震動が発生し、多くの構造物に被害を与えた。南海トラフ沿いの大地震など、今後発生が想定される地震に備え、構造物の耐震検討や既設構造物の耐震評価を積極的に進めていく必要があり、地盤の地震応答解析が適切な耐震設計法構築のため、ますます重要になっている。

地盤の地震応答特性を精度よく評価するためには、対象地点の地盤構造の広がりに応じた解析次元と解析範囲の設定、層構造や地盤物性の設定を含めた地盤のモデル化、地盤材料のせん断ひずみ～せん断応力に関する非線形特性の考慮のほか、解析目的に応じた地震応答解析手法の選定が必要である。浅層部に飽和した緩い砂質地盤が含まれる場合には、過剰間隙水圧の上昇による有効応力の減少に伴うせん断強度の低下といった非線形特性、いわゆる液状化現象も考慮する必要がある。

一方、道路構造物の構造形式として比較的多く用いられている盛土は、復旧が比較的安易であること、基礎地盤を含め施工後の時間経過に伴い強度が増加し安定性が増すと考えられていること、適切な法面勾配を確保することによりある程度の外力に対しては安全であると考えられているため、耐震性能については特別に配慮されることがほとんどなかった。しかし、1968年十勝沖地震以降の地震において複数の盛土が被災を受け、耐震性能確保の必要性が求められてきた。さらに現在では、社会基盤を構成する道路構造物に対しては、地震後の避難経路の確保や緊急物資の輸送という機能も求められ、重要幹線道路に対しては高い耐震性能が要求されている。盛土は地盤に直接構築するという構造的特徴から、地震時の挙動は基礎地盤の挙動に大きく影響を受けると考えられる。そのため、盛土の耐震性能は、盛土だけではなく基礎地盤をあわせた地盤-盛土の連成系としての検討を行う必要がある。盛土の耐震性能の評価のためには、実際の地震時挙動に基づく耐震検討が要求されるが、盛土を対象として長期的に地震観測が行われている事例が少ないことから、十分な検討が行われていないのが現状である。

このような背景から、本研究では、軟弱地盤における盛土の地震時挙動の把握とその耐震安全性を評価するための基礎資料を得ることを目的とし、長期間にわたる液状化アレー観測記録を用いて研究を進めた。まず、2003年十勝沖地震とその他の中小地震で観測された記録の分析により、地震動レベルの増加に伴い地盤の増幅特性の非線形性が顕著になることや、過剰間隙水圧の特徴的な上昇特性等を明らかにしている。さらに、表層地盤の非線形

増幅特性の影響を受けた道路盛土の地震時挙動について、地盤-盛土の連成系としての検討を行っている。その結果、盛土の低次の振動モードは、基礎地盤の振動モードが現れていること、入力地震動レベルの増加に伴い、盛土の増幅特性にも非線形性が見られることを明らかにしている。

次いで、地盤の地震応答解析法の一つである等価線形解析法の適用範囲について検討を実施している。等価線形解析法は、非線形特性を近似的ではあるが考慮することが可能であり、かつ非線形特性を含めた入力パラメータの設定がシンプルで、計算も安定していることから、実務レベルの地震応答解析で適用されている。しかし、この解析法は地盤に生じる非線形性が拡大すると解析精度が低下する課題があり、適用範囲を考慮した上で使用する必要がある。そこで、同一地点を対象に異なるレベルの入力地震動を使用して地盤の非線形特性の取り扱い方が異なる手法で地盤の地震応答解析を実施し、等価線形解析法の適用性について検討を行った。ここでは、非線形解析法による観測記録の再現度合を閾値と考え、等価線形解析法の適用性の良否を考察している。これらの結果に基づいて、地盤に生じる最大せん断ひずみと等価線形解析法の適用範囲を示し、その妥当性を論じている。このことによって、実務に有益な情報を与えたと考えている。

本研究は、全7章で構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、関連する既往の研究をレビューし、本研究の位置付けを行った。特に、軟弱地盤における盛土の地震時挙動に関する研究背景、等価線形解析法の適応範囲に関する研究について紹介している。

第2章では、本研究で観測記録を用いた、北海道苫小牧市で実施されている液状化アレー観測システムについて、詳述している。さらに、観測された地震動記録を用いて、地震計の設置誤差の再検討を行い、既報の検討結果の妥当性を検証している。

第3章では、苫小牧液状化アレー観測点において観測された2003年十勝沖地震とその余震の地震動記録、さらに過去の記録を分析し、記録に含まれる地震動の特徴などを検討している。

第4章では、道路盛土が構築されている軟弱地盤の非線形増幅特性について検討を行っている。その際、地震動レベルの増加に伴う、過剰間隙水圧の上昇特性、表層地盤の卓越振動数の低下および地震動の増幅率の低下を明らかにしている。

第5章では、第4章での表層地盤の非線形増幅特性を踏まえ、軟弱地盤に構築された道路盛土の地震時挙動について検討を行っている。具体的な検討は、入力地震動レベルと最大応答値、入力時振動と盛土の伝達特性、地盤に生じるせん断ひずみとせん断剛性について実施している。

第6章では、観測された異なるレベルの入力地震動を用いて、地盤の非線形特性の取り扱い方が異なる解析手法（線形解析法、等価線形解析法、非線形解析法）で地盤の地震応答解析を実施し、等価線形解析法の適用範囲について指摘している。

最終の第7章は結論である。併せて、各章で得られた知見を総括するとともに、今後の展望と課題を述べている。

学位論文審査の要旨

主 査	特任教授	三 浦 清 一
副 査	教 授	林 川 俊 郎
副 査	准教授	石 川 達 也

学 位 論 文 題 名

軟弱地盤に構築された道路盛土の耐震性評価に関する研究

(Evaluation of seismic performance of road embankment constructed on soft ground)

これまで日本各地において多くの盛土構造物が供用され、重要な社会基盤施設を形成している。しかし、最近の盛土材料の工学的挙動に関する研究の進展や高度化した動的設計手順を考慮すると、耐震性能の評価上、検討を要する点が多い。すなわち、地震時の盛土本体の力学挙動はその基礎地盤の動的特性に支配されていることを示唆した被災事例が多く認められている。たとえば、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、震源の広さと震源破壊の不均一性ととも、継続時間が長く振幅の大きい領域が連続するという特異な地震動が発生し、極めて多岐にわたる地域で、土構造物-基礎地盤系の大規模破壊が導かれ、基礎地盤の耐震挙動を盛土体に連成化させた合理的な耐震設計法の構築が強く求められている。すなわち今後発生が想定される強振動の地震に対して、基礎地盤の地震応答特性を適切に考慮した耐震設計手順を確立することが、緊急の課題になっている。

このような背景から、本研究では、種々の堆積地盤にある盛土構造物において、高精度の原位置観測機器を設置し、基礎地盤と盛土本体の連成振動挙動を明らかにすることを目指した。具体的には火山灰土や砂質土からなる軟弱地盤における盛土の実地震時挙動の把握とその耐震性能を評価するためのデータをを得ることを目的とし、長期間にわたる液状化アレー観測による研究を進めた。まず、2003 年十勝沖地震とその他の中小地震で観測された記録の解析により、地震動レベルの増加に伴い地盤の増幅特性の非線形性が顕著になること、また地震動伝播に伴う過剰間隙水圧の特徴的な上昇挙動を明らかにしている。ついで、一般的に表層地盤の非線形増幅特性の影響を受ける道路盛土本体の地震時挙動について、地盤-盛土の連成系としての解析が必須であることを見出すとともに、盛土本体の低次の振動モードには基礎地盤の振動モードが強く関与していること、さらに入力地震動レベルの増加に伴って、盛土本体の増幅特性の非線形性が顕著になること等を明らかにしている。

本論文は 7 章から構成されるが、研究の成果を章毎に要約すると以下のようなものである。

第 1 章では研究の背景を示し、本研究の目的と論文の概要が述べられている。

第 2 章では、北海道苫小牧市で実施した液状化アレー観測システムについて、各データの獲得手法を詳述している。さらに、観測された地震動記録を用いて、地震計の設置誤差の

再検討を進め、過剰間隙水圧などの各計測値との整合性を種々の考察から明確にしている。

第3章では、2003年十勝沖地震について苫小牧地域の日高高規格道路周辺域での液化化アレー観測で得た地震動記録、さらに本地震の余震記録を含めた過去の記録を解析・比較し、厚い堆積層上にある本地域の地震動の特異性などを明らかにしている。併せて本章では、本研究が対象とした火山灰土の噴出起源や地質条件を詳述し、本地域の地盤の堆積形成過程を解説している。また構成粒子が特異な形状・構造を呈する本火山灰土地盤が受けた地震災害履歴を要約するとともに、このような地盤の耐震性能評価において懸念される力学的な問題点を系統的に指摘している。さらに、実施した一連の室内試験のための試料採取法、それらの物理的性質および供試体作製方法についても紹介している。

第4章では、道路盛土が構築されている軟弱地盤の振動時非線形増幅特性について検討を行なっている。具体的には、地震動レベルの増加に伴う過剰間隙水圧の上昇特性、表層地盤の卓越振動数の低下挙動および地震動の増幅率の低下パターンの特徴を明示している。

第5章では、前章で把握した表層地盤の非線形増幅特性を踏まえ、軟弱地盤に構築された道路盛土の地震時挙動特性について考察を進めた。一連の検討から、入力地震動レベルと最大応答値、入力地震動と盛土の伝達特性、地盤に生じるせん断ひずみとせん断剛性の定量的な関係を導いている。

第6章では、観測された異なるレベルの入力地震動を用いて、地盤の非線形特性の取り込み方が異なる解析手法（線形解析法、等価線形解析法、非線形解析法）で地盤の地震応答解析を実施し、特に等価線形解析法の適用範囲について詳細に考察している。その結果から、等価線形解析法は、上述の関係を考慮することにより非線形特性を再現できることから、実務レベルの地震応答解析に適用可能であるとしている。一方、本解析法は基礎地盤の変形の非線形性が拡大すると解析精度が低下するため、ここでは同一地点を対象に種々のレベルの入力地震動をのもつて、非線形特性を示す基礎地盤の地震応答解析を実施し、等価線形解析法の適用限界を明示している。これらの検討結果に基づいて、実務の設計のための地盤最大せん断ひずみと等価線形解析法の適用範囲を具体的に提案するとともに、その妥当性を示している。

第7章は結論であり、各章で得られた知見を総括し、今後の展望と課題を述べている。

これを要するに、著者は、従来の耐震解析において用いられてきた等価線形解析法の適用範囲を地震時に誘発される基礎地盤の最大せん断ひずみ値から明示するとともに、火山灰のような軟弱地盤でみられる大変形レベルでの地震応答解析結果の合理的な評価法の構築について貴重な知見を得ており、地盤動力学の発展に貢献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。