

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成21年度採択)
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.21-4	水分履歴を考慮した不飽和道路盛土の耐震性の評価法と強化法	京都大学 教授 岡 二三生

本研究では、豪雨や浸透水など水分履歴を考慮し、地盤探査方法改良、不飽和土の実験的な研究、地震時の不飽和-飽和地盤の動的浸透-変形連成解析法の開発と遠心力実験を実施し、道路管理の実務に資する耐震評価法や強化法を提案する。

1. 研究の背景・目的 (研究開始当初の背景・動機、目標等)

2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震での道路盛土の被害では、旧谷集水地形での道路盛土の崩壊など水との相互作用がある場合、土構造体の安定性が大きく低下することが明らかになった。しかし、高含水時の土構造物の耐震性評価やその補強補修工法に関する研究が不十分であり、耐震性の評価基準が定まっていない。本研究では、道路盛土の水分量や劣化状況の探査手法の開発、不飽和土の動的力学挙動の把握と構成モデルの確立、地震時の不飽和-飽和地盤の動的浸透-変形連成解析法の開発、遠心載荷振動台模型実験による道路盛土の動的挙動の把握を行い、水分履歴を考慮した道路盛土の耐震性の評価法および強化法の確立を目的とし、研究を実施した。

2. 3カ年の研究内容 (研究の方法・項目等)

■不飽和土の繰返し変形特性と構成式の確立

地震外力を受ける土構造物の締固め土を念頭に、不飽和砂質土の排気-排水、非排気-非排水条件での繰返し三軸試験を実施し、繰返し載荷時における変形特性と時間依存性挙動を詳細に検討した。さらに、不飽和土の繰返し弾粘塑性構成式の確立のため、構成式による要素シミュレーションを実施した。

■盛土地盤の遠心載荷装置による振動実験

降雨や地下水位上昇による水分履歴を受けた道路盛土の地震時安定性を評価する事を目的とし、含水比の異なる不飽和盛土、浸透を受ける盛土、浸透後に水位低下させた盛土について動的遠心模型実験を実施した。また、浸透に対する盛土の強化法として、ドレーンを設置した実験を行い対策の効果を検証した。

■多相系地盤の動的大変形解析法の確立

不飽和-飽和地盤の空気-水-土骨格からなる多相系材料の大変形解析法を確立する事を目的とし、弾塑性構成式を用いた多相連成有限要素法、有限変形理論に基づく有限要素法及び粒子法による多相連成解析を行った。

■道路盛土内の水分量および劣化状況の物理探査

2007年能登半島地震時に、能登有料道路の集水地形の高盛り土に発生した代表的な流動性崩壊箇所(縦41断面¹⁾)を利用して高密度表面波探査連続波レーダーによる電磁波速度構造調査および電磁波反射法構造調査を実施した。また、物理探査のキャリブレーションのため、表面波探査およびRIコーンによる地盤調査を行った。さらに、室内実験で電磁波速度と地下水位の関係を求めた。

3. 研究成果 (図表・写真等を活用し分かりやすく記述)

淀川堤防砂を用いた不飽和砂質土の排気-排水、非排気-非排水条件での繰返し試験により、不飽和土のひずみ速度依存性と繰返し力学特性を明らかにし、弾粘塑性構成式によるシミュレーションによって不飽和土の構成モデルを確立した。また、盛土基礎地盤や切土斜面で問題となる軟岩についても、繰返し特性を含む力学特性を明らかにし、弾粘塑性構成式を確立した。

動的遠心模型実験によって、盛土全体の含水比が高い場合および浸透水がある場合に大変形が起り、水位低下後でもなお大きな変形が発生する事を明らかにした。不飽和盛土内への浸透過程では、盛土内に空気が封入され部分的に飽和した箇所を水が流れる事を明らかにした。排水工が法尻への浸透を防ぎ、動的載荷による変形を抑制するメカニズムを明示した。

不飽和土の弾塑性構成式を用いた多相連成有限要素法による、動的遠心載荷試験のシミュレーションを実施し、不飽和盛土の破壊メカニズムを詳細に明らかにした。2007年能登半島地震による能登有料道路の盛土崩壊事例の解析で、水の浸透によって盛土が大変形を起こす挙動を再現し、解析法の適用性を示した(図-1)。また、間隙空気圧と間隙水圧の挙動を同時に解析する、有限変形

多相連成有限要素法、大変形を高精度で解析可能な粒子法を用いた多相連成解析法を開発した。さらに、慣用設計法と本研究の提案手法の比較および解析例を示し、水分履歴を考慮した不飽和道路盛土の地震時の耐震性の評価には、本研究の解析手法の適用性が高い事を示した。

連続波レーダー探査によって盛土内の地下水位を評価し、電磁波速度から地盤構造の推定を実施した。室内実験で、地下水位と電磁波速度の関係性を求め、連続波レーダー探査の結果のキャリブレーションを行った。RIコーンによる地盤調査を実施し、盛土内の物性と地下水位を測定した。また、表面波探査により地盤物性を測定した。これらの結果で、連続波レーダー探査結果を補完し、総合的に盛土内の水分量と物性を評価する手法を示した(図-2)。

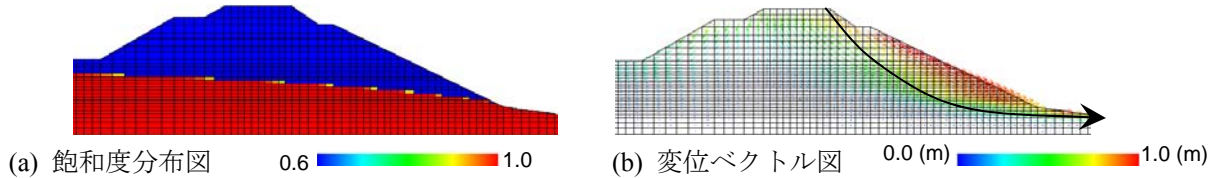


図-1 浸透を受ける盛土の地震時浸透-変形連成解析結果(能登有料道路盛土, 縦38)

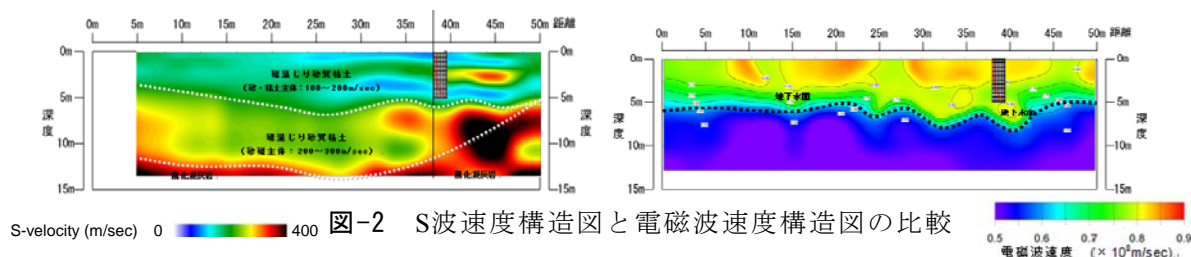


図-2 S波速度構造図と電磁波速度構造図の比較

4. 主な発表論文(研究代表者はゴシック、研究分担者は下線)

- 1) 中島康介, 岡二三生, 木元小百合, 肥後陽介, 松本真明, 不飽和砂質土の繰返し三軸試験と弾粘塑性構成式によるシミュレーション, 土木学会全国大会, 第65回年次学術講演会講演概要集, 札幌, III-095 (DVD-ROM), 2010, 9.
- 2) 加藤亮輔, 岡二三生, 木元小百合, 肥後陽介, 浸透水を考慮した道路盛土の地震時動的浸透-変形連成解析, 第46回地盤工学研究発表会, 神戸, 756 (DVD-ROM), 2011, 7.
- 3) 山田茂治, 北川義治, 岡二三生, 木元小百合, 肥後陽介, 電磁波速度構造探査による地下水調査事例, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2011, 公益社団法人地盤工学学会関西支部, pp.79-82, 2011.
- 4) 肥後陽介, 岡二三生, 木村亮, 木元小百合, 土井達也, 李忠元, 衣川哲平, 排水工を施した不飽和道路盛土の動的遠心模型実験とそのシミュレーション, 土木学会, 第67回年次学術講演会, 名古屋, 2012, 9. (発表予定)
- 5) Higo, Y., Oka, F., Kimoto, S., Doi, T., Lee, C.W. and Kinugawa, T., centrifugal model test for unsaturated embankments considering seepage flow and the numerical analysis, the 18th ICSMGE, Paris, France, 2013, 9. (査読有, 発表予定)

5. 今後の展望(研究成果の活用や発展性、今後の課題等)

- ・ 不飽和土や軟岩の着実な実験データの蓄積によって構成モデルを改良し、遠心模型実験結果や被災事例のシミュレーションによるキャリブレーションを行う事で、本研究の解析手法は水分履歴を考慮した盛土の地震時変形量照査法としての適用が可能である。
- ・ 遠心模型実験のデータとその解析結果は、水分履歴を受けた道路盛土の変形メカニズムを明示するものであり、予測解析手法のキャリブレーションや対策法の考案に有効である。
- ・ 電磁波速度及び体積含水率のデータの蓄積により、精度の高い相関関係の検討、比誘電率と体積含水率の定量的評価を進める事で、実務に供し得る探査法が確立できる。
- ・ 長時間の繰返し载荷、予測される地震動、豪雨などの水分履歴を考慮した、今後予想される外力に対する不飽和盛土の挙動を評価することが必要である。
- ・ 本研究の技術的成果を道路盛土の耐震化に役立てるため、大学、学会、産業界、各種法人や行政組織などと連携しながら普及に務めることが望まれる。

6. 道路政策の質の向上への寄与(研究成果の実務への反映見込み等)

本研究で確立した多相連成動的解析手法は、浸透水を有する盛土、液状化の可能性のある盛土など、慣用設計法の適用範囲外の条件における、道路盛土の安定性照査法として適用可能である。

さらなる実験データの蓄積によって電磁波速度と水分量の相関関係の精度を向上させる事で、実際の道路盛土内の水位と物性の探査手法を実務へ適用する事ができる。

7. ホームページ等(関連ウェブサイト等)

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻地盤力学講座地盤力学分野のホームページで、本研究関連の発表論文の原稿がダウンロードできる。