

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

| | | | | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|-------|----|--|
| ①研究代表者 | 氏名（ふりがな） | | 所属 | | 役職 | |
| | 岡 二三生（おか ふさお） | | 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 | | 教授 | |
| ②研究 テーマ | 名称 | 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 | | | | |
| | 政策 領域 | [主領域]（8）「大切な道路資産の科学的な保全」に資する技術研究開発 | 公募 | タイプII | | |
| | | [副領域]（10）「自然環境、地球環境の保全」に関する技術研究開発 | タイプ | | | |
| ③研究経費（単位：万円） | 平成21年度 | 平成22年度 | 平成23年度 | 総合計 | | |
| ※H21は精算金額、H22は受託金額、H23は計画額を記入。端数切り捨て。 | 693 | 779 | 777 | 2249 | | |
| ④研究者氏名 | （研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入して下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加して下さい。） | | | | | |
| 氏名 | 所属・役職 | | | | | |
| 木村 亮 | 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 教授 | | | | | |
| 木元 小百合 | 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 准教授 | | | | | |
| 肥後 陽介 | 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 助教 | | | | | |
| ⑤研究の目的・目標 | （提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入して下さい。） | | | | | |
| <p>本研究は、豪雨や浸透水などの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ている。</p> <p>地盤探査方法の改良による土構造物の劣化の程度や不均一性の解明、不飽和土の実験的な研究による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、遠心载荷振動台模型実験を実施する。</p> <p>慣用予測法との比較を行うとともに、最新の国際的知見を調査・導入し、水分履歴を考慮した地震時道路盛土の詳細被害予測法の提案、耐震性評価法と効果的排水対策方法など強化法を提言する。</p> | | | | | | |

⑥これまでの研究経過

(研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入。)

平成22年度は、土構造物の締固め土を念頭に、不飽和土の動的力学特性の把握と構成モデルの確立および不飽和-飽和地盤の解析、浸透水を考慮した道路盛土の動的遠心模型実験、盛土内の水分量分布の把握のための現位置物理探査を実施した。以下にその進捗状況を示す。

(A) 不飽和土及び軟岩の繰り返し変形特性と構成式

地震外力を受ける土構造物の締固め土を念頭に、不飽和砂質土の排水-排気、非排気-非排水条件での動的三軸圧縮試験を実施した。昨年度から引き続き実験結果を蓄積し繰り返し変形特性を把握すると共に、不飽和土の繰り返し弾粘塑性構成式により試験結果の再現を試みた。

本研究で使用した試料は、一部道路として供用されている淀川堤防で用いられている砂を用いた。細粒分を27%含み、 $D_{50}=0.29\text{mm}$ の粒径幅の広い砂質土である。図-1に排気-排水条件三軸試験結果と弾粘塑性構成式によるシミュレーション結果を示す。実験結果から、繰り返し载荷により軸ひずみおよび体積ひずみが蓄積している事がわかる。構成式によるシミュレーション結果は、概ねその挙動を再現できていると言える。さらに、非排気-非排水三軸圧縮試験のシミュレーションを実施するため、空気-水-土連成有限要素法(FEM)を用いた解析を実施した。

沢部を埋立てた盛土などの基礎地盤となっている軟岩材料の内部構造を μ フォーカスX線CTで可視化した(図-2)。試料は軽石混じり凝灰岩で、不均一なパミスの分布を明らかにした。今後、繰り返し3軸試験により、地震時の盛土基礎地盤の力学特性と内部構造変化を研究していく。

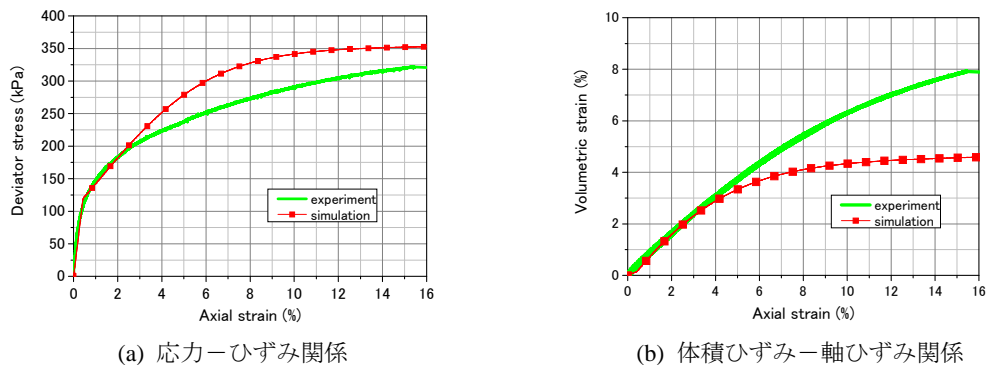


図-1 不飽和土の排気-排水三軸圧縮試験とサクシヨンの影響を考慮した弾粘塑性構成式によるシミュレーション (初期サクシヨ: 50kPa, 初期平均骨格応力: 128kPa)

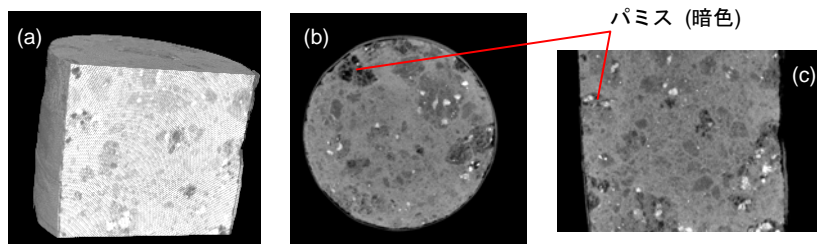


図-2 軽石混じり凝灰岩のX線CT画像: (a) 三次元画像; (b) 水平断面; (c) 鉛直断面

(B) 浸透-変形連成解析法による浸透時の道路盛土の動的解析

砂の繰り返し弾塑性構成式を用いた不飽和浸透-変形連成FEM解析手法を用いて、浸透と地震の複合問題として能登半島地震における能登有料道路での被災事例について再現解析を行った。図-3に能登有料道路縦38断面の解析モデル図を示す。盛土と強風化岩による基礎地盤との間に、透水性が高く軟弱な腐植土層を考慮した。まず、降雨などによる地下水位上昇を考慮し、浸透解析を実施した。山側の地下水位が高い場合（図-4(b)）、腐植土層とその上部の盛土層の飽和度が上昇している。その後、動的解析を実施し、浸透が無い場合と比較した。入力波は縦38に近い地点の観測波に距離減衰を適用し振幅調整したものを用いた。

図に動的解析終了時の変位ベクトル図を示す。図-5(a)を見ると山側の地下水位が低いと盛土法肩のみが崩壊する被災状況であったのが、地下水位が高い場合、図-5(b)に示すように盛土全体が円弧すべり状の変形を示す被災となった。すなわち、能登半島地震において検討箇所が大規模崩落を生じたのは、道路盛土背面の山側の地下水位が高いことが原因の一つであることが解析的に明らかになった。また、内部構造の変化を構成式中で考慮することで、円弧すべり状の変形をより再現することができた。

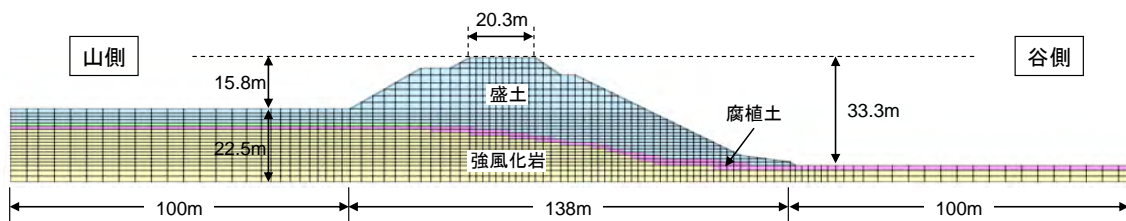


図-3 解析モデル（縦38）

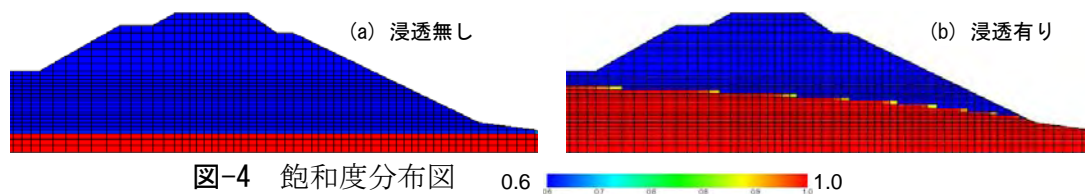


図-4 飽和度分布図 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0

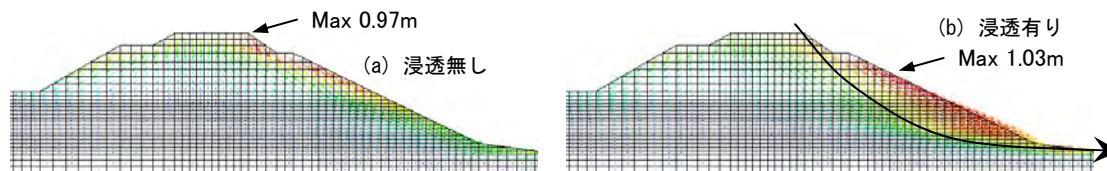


図-5 変位ベクトル図 0.0 (m) 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 (m)

(C) 浸透を考慮した動的遠心模型実験

豪雨後など盛土内水位が高い状態での地震を想定して、浸透水を考慮した砂質盛土地盤の遠心載荷装置による振動実験を行い、浸透が盛土の変形挙動に与える影響を検討した。

実験土槽の概略図を図-6に示す。硬質な基礎地盤に施工された片盛土をモデル化しており、土槽右側よりスリットを通して水を浸透させた。材料は(A)の三軸試験で用いた材料と同じ砂質土で、最適含水比で締固め度は90%とした。遠心加速度は50gである。実験条件を模式図として図-7に示す。基本ケース(Case 2-1)、浸透水量が多いケース(Case 2-2)、定常状態まで浸透後に90分(プロトタイプで約3日)水位を低下させたケース(Case 2-9)を実施した。図-8に加振直前(浸透後/水位低下後)の盛土内水位を示す。模型盛土に設置したターゲットを用いたPTV画像解析による変位ベクトル図(図-9)を見ると、浸透水量が少ないCase 2-1、2-2では変形が小さいが、盛土内部及び基礎地盤に一度浸透が進んだ後では水位低下後でも大きな変形が見られた(Case 2-9)。すなわち、降雨後に地下水位が低下した後でも、盛土や基礎地盤の水分量が多い場合、大きな変形が生じる事を明らかにした。

今後、さらに実験ケースを蓄積すると共に、FEMやMPMを用いたシミュレーションを行い、盛土の地震時の安定性の評価を行っていく。

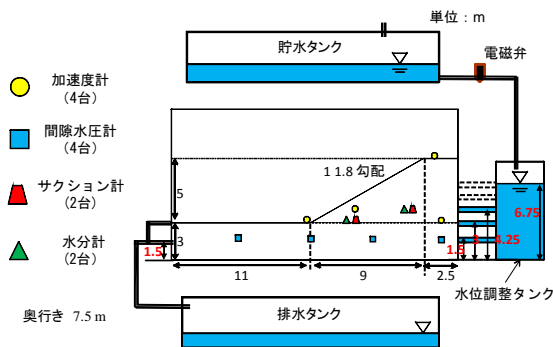


図-6 模型地盤土槽及び計測器の配置図

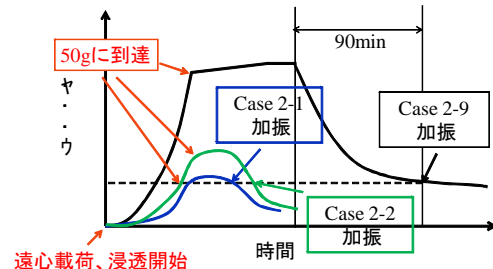


図-7 各ケースの基礎地盤部間隙水圧模式図

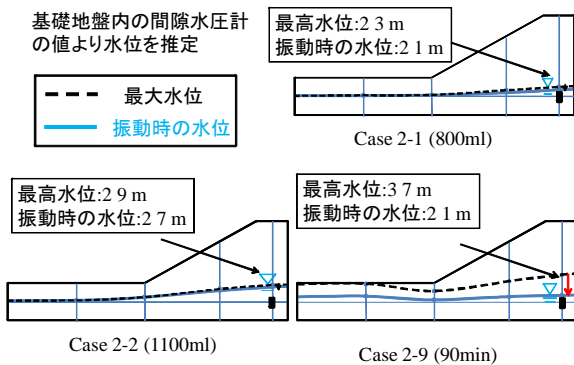


図-8 浸透後及び水位低下後の盛土内水位

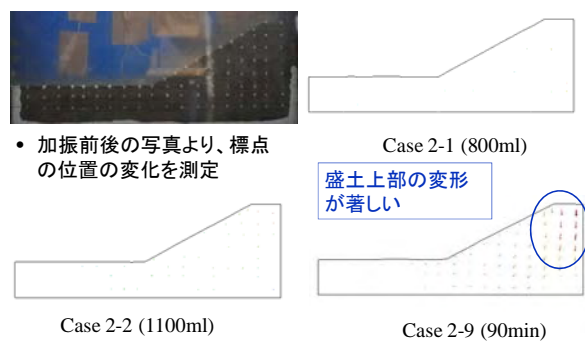


図-9 PTV画像解析による変位ベクトル図

(D) 物理探査による現位置盛土内の水分量分布の把握

平成19年（2007）能登半島地震時に、能登有料道路の高盛土に発生した代表的な崩壊箇所（縦41断面）で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。図-10に計測断面位置図、図-11に計測位置平面図を示す。

図-12に雨天時の測線1における電磁波速度構造断面を示す。電磁波は、水において最も伝搬速度が低下する特徴を利用すると、土中の地下水面を予想した。本断面では、地下8m付近から速度低下が発生しており、その付近に地下水面が存在する可能性が高い。測線1については雨天翌日にも計測しており、雨天時との比較を図-13に示す。地下水面と思われる電磁波低下深度は、雨天当日の地下8m付近から翌日は地下6m付近まで上昇する。また復旧法面に向かって若干高い傾向が見られる。また、雨天翌日に計測した測線2の電磁波速度構造断面は図-14に示す。同日の測線1の結果と同じく電磁波測速度変化面は地下6m付近に検出されている。ただし速度変化面の分布傾向は、測線1の横断位置で若干深く、測線両端に向かって地下5.5m付近まで高まる。



図-10 計測位置（縦41）主断面図¹⁾



図-11 計測位置平面図

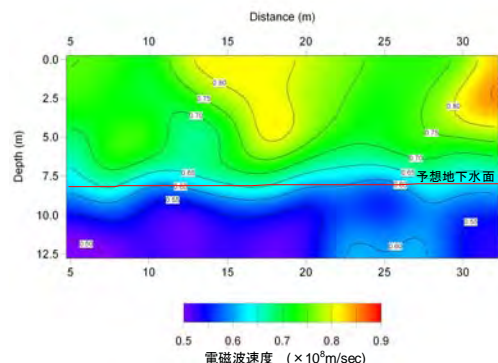


図-12 測線1の電磁波速度構造（雨天時）

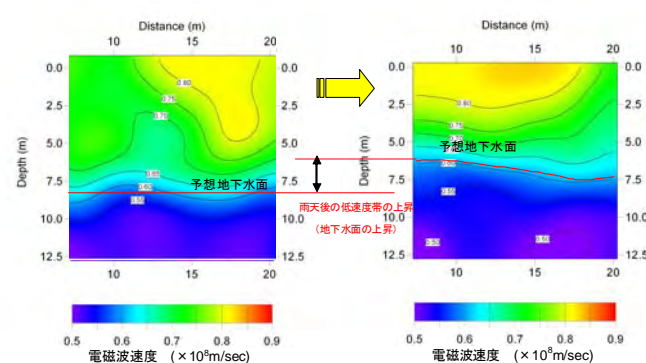


図-13 測線1の雨天時とその翌日の電磁波速度構造の比較

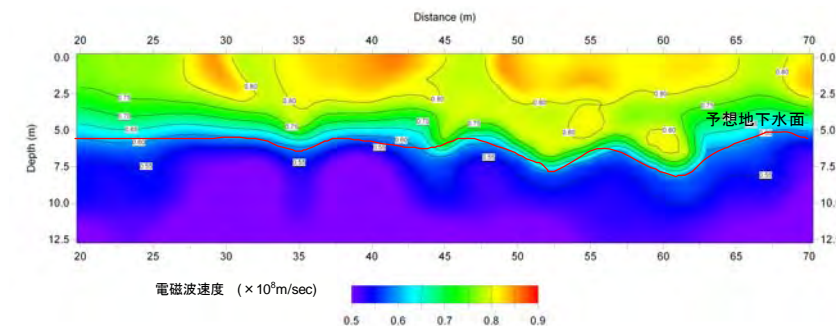
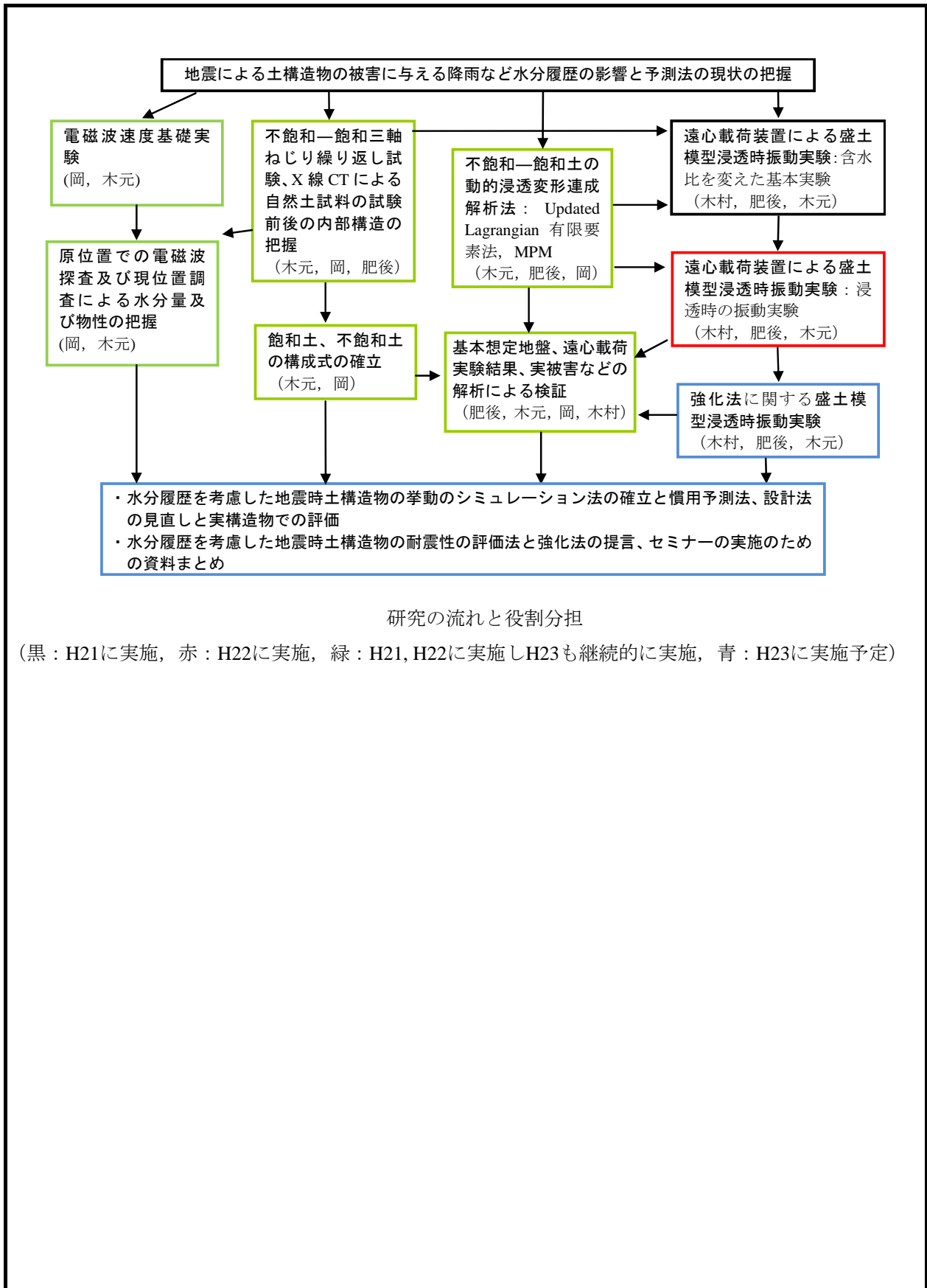


図-14 測線2の電磁波速度構造（雨天翌日）

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所, (独) 土木研究所, (独) 建築研究所: 平成19年(2007年)能登半島地震被害調査報告, 2008.



⑦研究成果の発表状況

(本研究から得られた研究成果について、学術誌等に発表した論文及び国際会議、学会等における発表等があれば記入。)

1. Higo, Y., Oka, F., Kimoto, S., Goto, Y., Morinaka, Y. and Chen, Z. (2010), A multi-phase analysis of unsaturated elasto-plastic soils by an MPM-FDM coupled method, Proceedings of the 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, WCCM/APCOM 2010, Sydney, Australia, July 19-23, 2010, pp. 180-181.
2. Doi, T., Higo, Y., Oka, F., Kimura, M., Kimoto, S. and Lee, C.-W. (2010), Dynamic centrifugal tests for the unsaturated embankments with infiltration, the 23rd KKCNN Symposium on Civil Engineering, Taipei, November 13-15, pp.303-306.
3. 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載荷時における力学特性, 第45回地盤工学研究発表会, 松山, 2010, 8.
4. 土井達也, 肥後陽介, 岡二三生, 木村亮, 木元小百合, 李忠元, 遠心場における不飽和盛土の浸透手法と振動台実験に関する研究, 第45回地盤工学研究発表会, 松山, 2010, 8. 肥後陽介, 後藤優典, 岡二三生, 木元小百合, MUSL アルゴリズムを適用したMPM-FDM法による不飽和土の浸透-変形連成解析, 第45回地盤工学研究発表会, 松山, 2010, 8.
5. Mojtaba Mirjalili, Babak Shahbodagh Khan, 岡二三生, 木元小百合, 肥後陽介, Dynamic Analysis of Strain Localization in Soft Clay Using Cyclic Elasto-Viscoplastic Model, 第45回地盤工学研究発表会, 松山, 2010, 8.
6. 佐藤朋弥, 肥後陽介, 岡二三生, 木元小百合, 松島祥樹, X線CT画像を用いた不飽和砂三軸供試体の内部構造変化の定量化, 第45回地盤工学研究発表会, 松山, 2010, 8.
7. 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, 札幌, 2010, 9.
8. 後藤優典, 肥後陽介, 岡二三生, 木元小百合, 西村太佑, 破断を考慮したMPM-FDM法による越流時の河川堤防の浸透-変形連成解析, 土木学会全国大会, 第65回年次学術講演会, 札幌, 2010, 9.
9. 土井達也, 肥後陽介, 岡二三生, 木村亮, 木元小百合, 李忠元, 遠心模型実験による動的載荷時の不飽和道路盛土の安定性に与える初期含水比の影響, 土木学会全国大会, 第65回年次学術講演会, 札幌, 2010, 9.
10. 肥後陽介, 岡二三生, 木元小百合, 森中雄一, 後藤優典, Chen Zhen (2010), 多相系地盤材料の浸透-変形連成解析のためのMPM-FDMシミュレーション法, 計算工学会, 福岡, 2010, 5, 計算工学講演会論文集Vol.15, pp.953-956.

⑧研究成果の活用方策

(本研究から得られた研究成果について、その活用方法・手段・今後の展開等を記入。)

本研究により、慣用予測法との比較を行うとともに、降雨履歴を考慮した地震時道路盛土の詳細被害予測法の提案、耐震性評価法と効果的排水対策方法など強化法を提言する。予測解析手法の高度化、破壊メカニズムを考慮した最適な強化法の提言のため、2009年駿河湾（静岡県）の地震など各国の地震時盛土被害状況、盛土および斜面崩壊時の多相相互作用のモデル化について、最新の知見を調査・導入し、国際的観点から道路政策の質の向上を目指す。

具体的には、降雨など水分履歴を考慮した地震時土構造物の耐震性の評価法、モニタリング法と強化法の提言を行う。技術移転のためのセミナーの実施、公開資料を作成する。

⑨特記事項

(本研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入。また、研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価も記入。)

本研究では、非排気-非排水試験とそのシミュレーションを実施した。不飽和土の実験に関する既往の研究では、排気-排水条件での実験がほとんどであるが、地震時などの動的な荷重条件では、短時間に大きな外力を受けるため発生した間隙圧が消散しない状態が考えられることから、非排気-非排水条件での実験が必須である。特に、気相までを考慮してシミュレーションが実施された例は世界的に見ても無く、不飽和土構造物の道路盛土の地震時挙動を力学的に説明するための先進的な研究となっている。

浸透と変形を連成し、地下水の盛土内部への浸透から地震外力による変形までを一連で解析した例は国内外でも少なく、事後解析結果は現象を良く表わしていた。さらに、空気-水-土連成の有限変形FEMやMPMを用いた解析によって、崩壊土の挙動をも含むような大変形解析が可能である。

ミクロンレベルの分解能を持つ、 μ フォーカスX線CT装置により、通常計測が不可能な土の内部構造を可視化した。特に不飽和土や軟岩の内部構造の可視化は新しい成果である。

実物大を想定する事ができる遠心荷重装置での振動台模型実験では、不飽和盛土の研究例及び浸透時の盛土の浸透実験の例が少ない。特に、降雨の数日後を想定した水位低下後の実験は例が無く、本研究で新たな知見を得ることができた。さらに提案した構成式と解析手法による実験のシミュレーションにより、予測法や盛土の耐震性の評価法の研究を実証的に進めていく。

連続波レーダー探査による盛土内部の水分量探査は、従来型のパルス波に比べて深い深度までの探査が可能であると同時に、室内土槽実験によるキャリブレーションを通して電磁波速度から地盤物性や含水量を知ることのできる新しい手法である。本研究では、降雨時の盛土の探査を実施しており今後予定している現位置調査結果と併せて、降雨時の盛土内の水分の分布を含む物性を明らかにしていく。