

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（1年目の研究課題対象）】

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は委託金額、H22以降は計画額を記入。端数切り捨て。	693	811	777	2,281		
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 産官学連携センター 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，遠心載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、具体的に記入して下さい。また、研究の目的・目標からみた研究計画、実施方法、体制の妥当性についても記入して下さい。)

初年度は、豪雨後に発生した地震による災害や水と地震災害とのデータの収集と見直し、土構造物の締め固め土を念頭に、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一飽和地盤の解析、実際の道路盛土を想定した基礎的な遠心模型実験を実施した。以下にその進捗状況を示す。

(A) 災害データの収集と調査

平成16年新潟県中越地震および平成19年能登半島地震における道路盛土の地震災害データを収集し、現地調査を実施した。また、国外における地震災害データを収集し、地震被害のメカニズムを研究した。

能登半島地震で被害を受けた道路盛土では、基盤と盛土の間に比較的透水性の高いと考えられる腐植土層が存在していた。変形性も高い層であると考えられ、地震前日の24日には10mm、22日には10mmの降雨があり、特にこの層に水が流れ、崩壊の大きな要因になった可能性がある。被害箇所は大規模な集水地形となっており、復旧時に施工された排水溝には水流が見られた。強化法としては、排水溝やふとん籠などの排水工、および補強土工法が適用されている事を確認した。

新潟県中越地震では多くの道路盛土および斜面が被害を受けた。沢埋め盛土の切盛境界で被害が多く発生しており、土質の不連続性と水の流れが盛土崩壊の大きな要因となっていた。また、大規模な斜面崩壊を起こした東竹沢は、古くからの地すべり地形であり、すべりによって緩くなった土層に地震前の降雨による地下水が滞留した事が要因と考えられる。液状化の可能性もあり、水分履歴が大規模崩壊に繋がった可能性がある。



図1 能登半島地震における道路盛土被害の現地調査位置図および縦32¹⁾の調査結果

最近の地震災害としては、2009イタリアラクイア地震が挙げられ、多くの土構造物が被害を受けた。ラクイアにおける盛土においても、側方流動によって分離された土塊ブロック間のきれつ幅が多地点で計測されている。ここでは、背面斜面から豊富な伏流水が供給さ

れ、地下水もかなり高く、地震動により表土層内の水圧が上昇したことが考えられる。この他、2008年四川大地震における被害データ、国外で取り組まれている盛土などの土構造物の耐震性と水分の関係についての研究結果を収集し分析を行った。

以上のように海外における盛土被害においても水分履歴と盛土崩壊の関係は非常に強い。

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.

(B) 不飽和土の繰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。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。また、不飽和土の繰返し弾粘塑性構成式を導出し、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2に非排気-非排水三軸試験結果を示す。締固め度は85%、初期サクシオンは50kPa、ひずみ速度は0.1%/minである。非排気-非排水では、繰返し応力により間隙圧の発生し平均骨格応力が減少していく事がわかった。また、間隙空気圧よりも間隙水圧の上昇量が大きく、サクシオンが減少していることから、繰返し外力により不飽和土の強度が減少する場合がある事が明らかになった。

図3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、繰返し荷重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。

荷重初期段階の挙動に実験結果とシミュレーション結果に差異が見られ、今後さらなる構成モデルの改良を行っていく。また実験については、サクシオン、締固め度、荷重速度の影響について実験データを積み重ね、不飽和土の動的力学特性を包括的に研究していく。

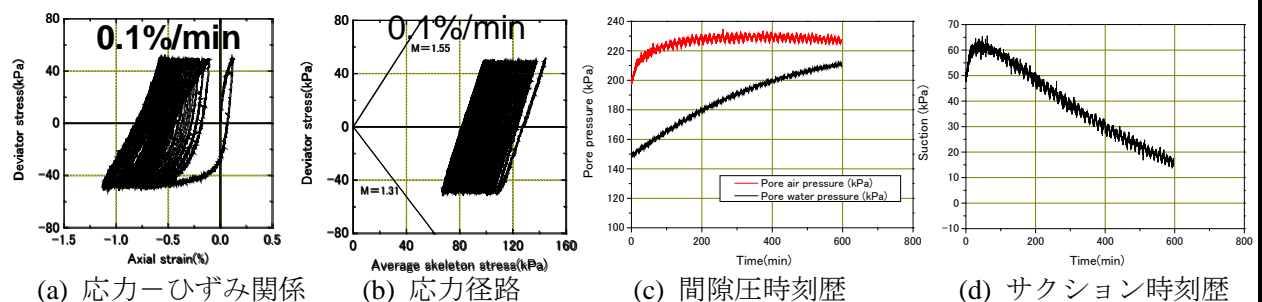
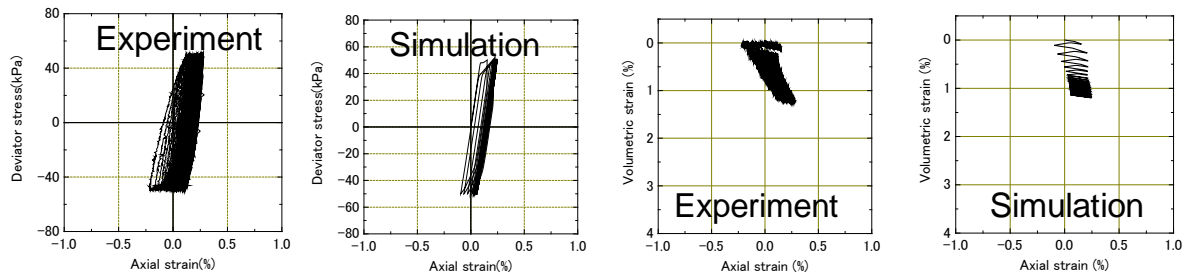


図2 不飽和砂質土の非排気-非排水三軸圧縮試験の結果



(a) 応力-ひずみ関係 (b) 体積ひずみ-軸ひずみ関係
 図3 排気-排水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

不飽和土は飽和土や乾燥土に比べ、サクシヨンの影響で高強度を示すが、ピーク後のひずみ軟化挙動が脆性的であり、より不安定化する特徴を持つ。そこで、不飽和土の不安定化のメカニズムを詳細に検討するため、 μ フォーカスX線CT装置を用いて、せん断過程における土内部の構造変化を可視化した。実験には、三軸試験、遠心実験と同じ材料を用いた。また、通常、空気の圧縮性が大きく不飽和土の体積変化を計測するのは困難であるが、CT画像から変形中、変形後の形状を精度よく計測し、不飽和土の体積変化特性を明らかにした（図4、図5）。今後、これらのデータを基に構成則の見直しを図る。

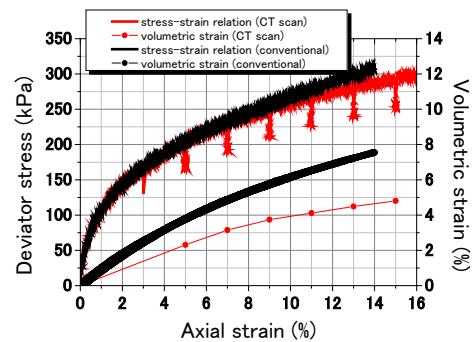
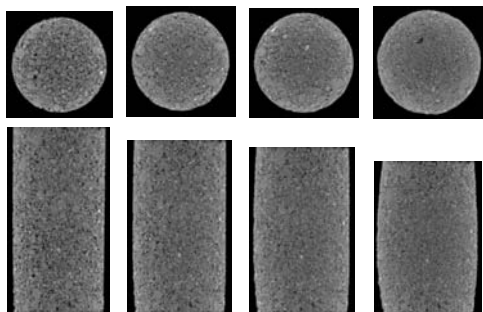


図4 X線CT画像（上：水平断面，下：鉛直断面） 図5 不飽和土の体積変化（赤：X線CT，黒：従来法）

(C) 多相系地盤の動的大変形解析法の確立

道路盛土の地震時安定性を解析で評価するため、土-水-空気の多相系地盤の有限要素解析法 (FEM) を用いた。不飽和土特有のサクシジョンの影響を考慮した構成式を適用した。

解析断面は、図 6 に示すように、平成19年能登半島地震において大規模なすべりを起こした能登有料道路の縦32断面¹⁾である。FEMモデルを図 7 に示す。崩壊の原因となったと考えられる腐植土層を盛土と基盤の間に考慮している。盛土のパラメータは盛土材料の繰り返し三軸試験結果のシミュレーションからできるだけ忠実に決定した。腐植土層はデータが少ないため、パラメトリックスタディが必要であるが、第一近似として既存の山砂のパラメータを用いた。

図 8 に入力地震動、図 9 に変形および相対有効応力減少比分布図を示す。相対有効応力減少比は 0~1 の範囲で液状化の度合いを表す量で、1に近いほど液状化状態に近い。解析結果を見ると腐植土層が液状化に近づき、盛土は図の右方向へ変位した。今後、大変形の再現を目指し、材料の劣化の観点から構成式の硬化-軟化則の拡張を行っていく。

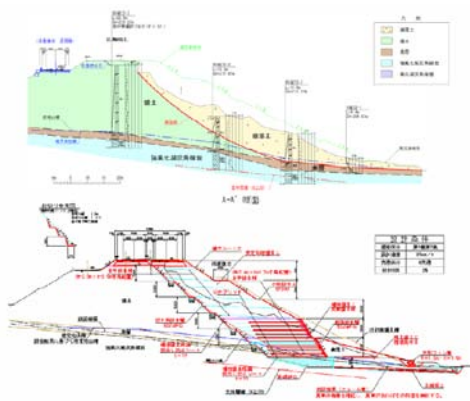


図 6 能登有料道路 縦32^{※)}の崩壊断面と復旧断面図

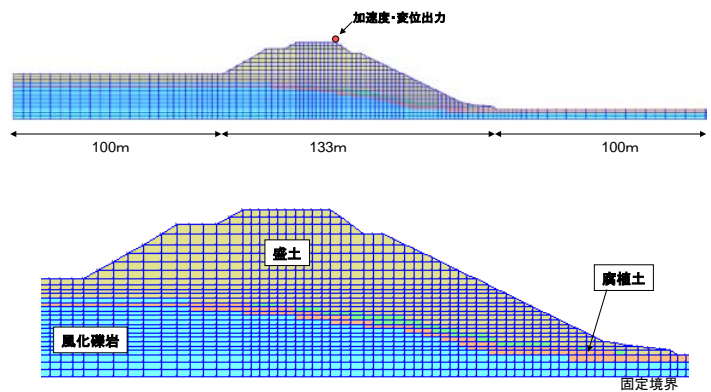


図 7 有限要素解析モデル図 (上: 全体図, 下: 盛土部拡大図)

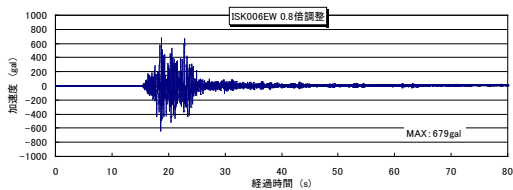


図 8 入力地震動の時刻歴

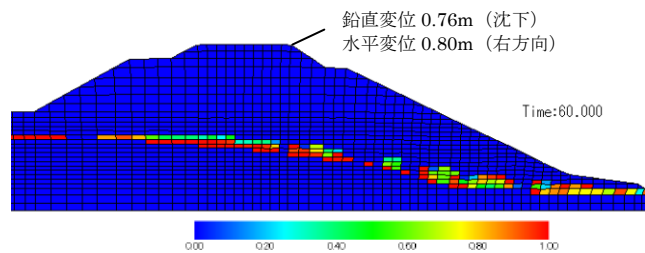


図 9 相対有効応力減少比 (0: 初期, 1: 液状化)

(D) 盛土地盤の遠心载荷装置による振動実験

初年度（H21年度）は次年度以降のための基礎的な実験として、豪雨後の地震を想定して飽和度と含水比の異なる砂質盛土地盤の遠心载荷装置による振動実験を行い、飽和特性が盛土の変形・破壊に与える影響を検討した。

実験土槽の概略図を図10に、実験条件を表に、実験結果を図11に示す。最適含水比付近ではほとんど変状が見られなかった一方、高含水比の盛土では大変形が生じた。

次に、豪雨時および豪雨後に盛土内部に浸透水が存在する状況を想定し、土槽底面および右端から不飽和盛土へ水を浸透させ、振動実験を行っている。この実験については、今後、盛土内への浸透状態を再現するための最適な条件をさぐり、地震時の安定性の評価を行っていく。

表1 実験条件（遠心加速度：50g）

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
締固め度	90%	90%	90%	90%
含水比	12.6%	13.7%	17.5%	18.0%

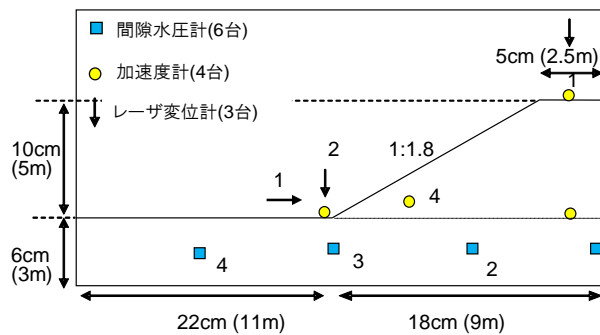


図10 実験土槽外略図

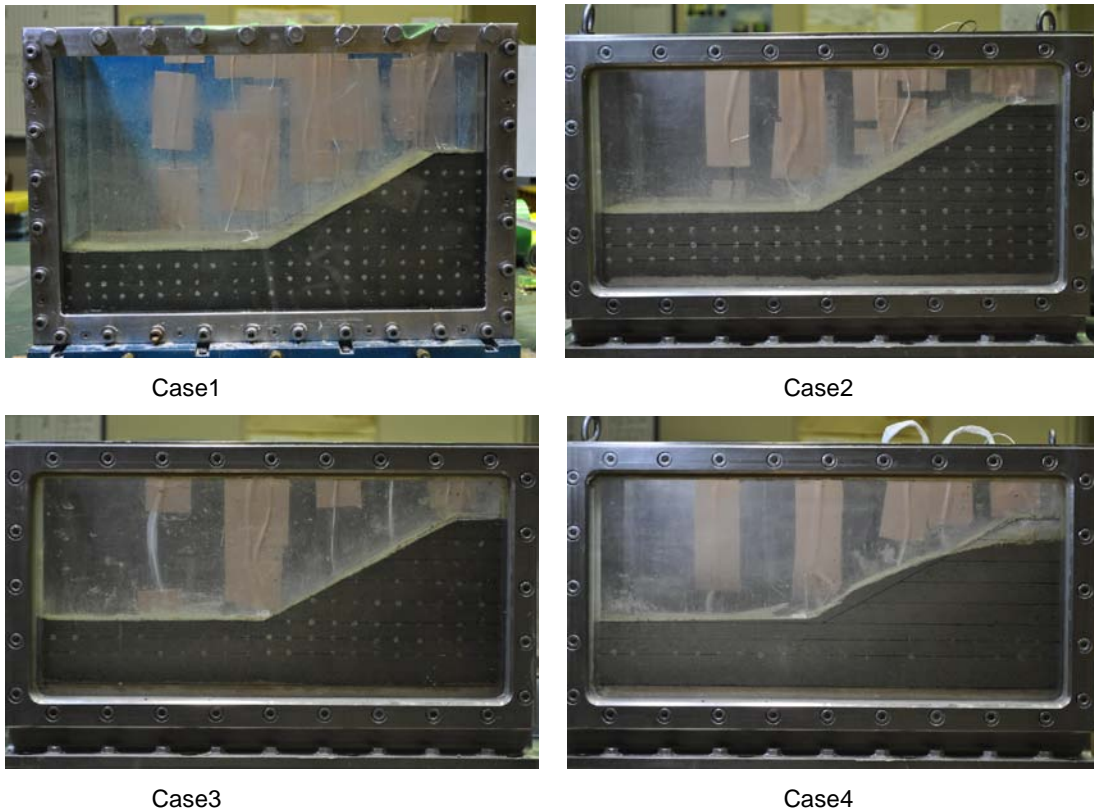
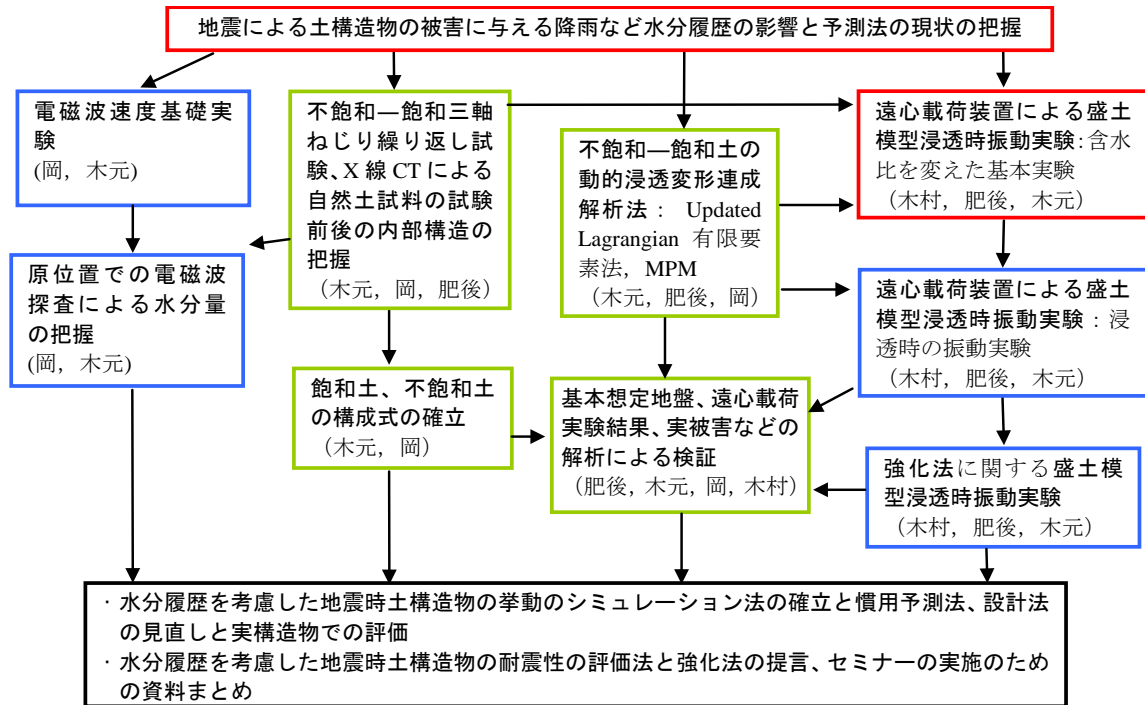


図11 含水比の異なる盛土の振動遠心模型実験結果

初年度は、ほぼ目的に沿って研究を進めることができた。次年度以降は、初年度の研究結果をさらに発展させていくと共に盛土の不均一性の解明のため物理探査を実施する。研究体制は以下の通りであり、初年度の進捗と今後の予定を考慮しても、本研究課題の目標達成のため妥当であると考えている。



研究の流れと役割分担

(赤実線：H21に実施，青：H22に実施予定，緑：H21に実施しH22も継続的に実施，黒：H23に実施予定)

⑦特記事項

(研究で得られた知見、成果、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して下さい。また、研究の見通しや進捗についての自己評価も記入して下さい。)

地震など動的な荷重時には、排水排気条件は満たされないため、間隙空気圧と間隙水圧の上昇が地震時の地盤挙動に影響を及ぼすことが重要である。しかし、空気の圧縮性が非常に大きく空気圧の測定が困難であることから非排気条件で動的試験を実施した例はほとんどなく、モデル化も行われていない。本研究では、空気圧作動式バルブを用いて空気圧を正確に計測し、非排気非排水状態で動的試験を行い、不飽和土の動的力学特性を明らかにするとともに、これを基に不飽和土の繰返し構成モデルを開発する。

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内部を可視化し、地盤の含水状態と劣化の状態を得た。特に不飽和土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振動台模型実験を行い地震時の道路盛土の挙動を明らかにした。不飽和盛土の研究、特に浸透時の盛土の浸透実験は少なく、今後の研究への新たな知見を得ることができた。さらに提案した解析手法で実験や計測事例をシミュレーションする事により、予測法や盛土の耐震性の評価法の研究を実証的に進めることができる。