

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：82658

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18111

研究課題名(和文) 不飽和土の力学特性を考慮した盛土堤体液状化の現象解明

研究課題名(英文) Elucidation of phenomena about liquefaction of body of embankment considering mechanical characteristics of unsaturated soil

研究代表者

松丸 貴樹 (Matsumaru, Takaki)

公益財団法人鉄道総合技術研究所・構造物技術研究部・主任研究員

研究者番号：00425927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：軟弱粘性土地盤で堤体内に水位が形成された盛土が液状化する事例が近年の地震災害で見られているが、そのメカニズム解明や効果的な対策工の確立はされていない。そこで、水位より上方の不飽和土の挙動も含めた盛土堤体液状化の評価手法の確立を目的として、盛土材料の不飽和繰返し載荷試験の実施と、数値解析手法を構築した。また、本手法を活用して堤体液状化の対策工の効果の検討や、地震前の盛土の含水状態が液状化の発生に及ぼす影響について検討した。

研究成果の概要(英文)：In recent earthquakes, several damages were caused due to the occurrence of the liquefaction in the body of embankments. In these damages, the water level was often located in the body of embankment. However, the mechanism of the damages have not been clarified and the effective countermeasure methods have not been established. In this research, unsaturated cyclic loading tests of embankment materials were conducted and the numerical technique was developed, in order to establish the method for the evaluation of liquefaction of body of embankment. Furthermore, the effect of the countermeasure method and the influence of the water content before earthquake to the occurrence of the liquefaction were examined by use of the developed numerical technique.

研究分野：地盤工学

キーワード：不飽和土 液状化 盛土 繰返し載荷試験 構成式 水分特性曲線 数値解析 対策工

### 1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震では東北地方から関東地方にかけての広域で多数の液状化が生じた。道路・鉄道・河川などの盛土においては、過去の地震で見られた支持地盤の液状化に伴う被害だけでなく、盛土堤体自体の液状化に伴う被害が生じている。

この地震以降、1G場や遠心場で振動台を使った実験的手法により盛土堤体の液状化に着目した研究が行われ、以下の点が明らかになってきている。

- 1) 支持地盤の圧密沈下に伴う盛土内の飽和領域が同じ大きさであっても、密度の小さい盛土の方が液状化抵抗が小さいことに起因して盛土の沈下量は大きくなる。
- 2) 圧密による盛土堤体のめり込み沈下量が大きいほど、地震時の液状化の被害規模は大きくなる。これは、地震前の初期応力の大きな低下に起因する。

これらの成果は、例えば河川堤防盛土において震災以降の耐震対策の方向性として纏められている。しかしながらこれらの研究では水位以下の飽和領域に主に着眼点が置かれ、水位より上方の不飽和領域の挙動には着目がされていない。数値解析的検討も少なく、現行の手法では予測精度が十分でない。

### 2. 研究の目的

軟弱粘性土地盤上に構築された道路・鉄道盛土や河川堤防など盛土堤体自体に液状化が生じる場合の挙動については、水位以下の飽和層のみを液状化対象層とする現行の液状化判定法や有効応力解析手法では被害を説明できない。そこで、水位より上方の不飽和土の力学特性を考慮して挙動を明らかにすることを目的として、不飽和土の繰返し三軸試験・中空ねじり試験や模型振動台実験を系統的に実施する。また、この現象を精度良く予測できる数値解析手法を構築する。

最終的には、本研究の成果を活用・発展させることにより、数多く存在する盛土の中から地震発生時に堤体の液状化の発生が予測される箇所を適切に予測できるようになることを目指す。

### 3. 研究の方法

不飽和土の飽和度やサクシジョンの大きさに応じた繰返し载荷時の強度・変形特性を精緻に把握するために、不飽和繰返し三軸試験に加えて、不飽和中空ねじり試験ができる試験装置を用いて、実際に試験を実施した。

これらの挙動を表現できる土の構成モデルを構築し、土-水-空気連成解析手法への導入を行った。上述の室内土質試験の再現性の確認を行うとともに、盛土堤体液状化の発生を抑制する対策工の検討と、地震を受ける前の気象条件が堤体液状化の程度に及ぼす影響を解析的に検討する。

### 4. 研究成果

本研究で得られた成果を項目別に述べる

#### ① 不飽和土の繰返し载荷試験

不飽和繰返し中空ねじり試験を新たに実施した。実験に用いた試験装置を図1に示す。供試体の寸法は、内径60mm、外径100mm、高さ200mmである。ペDESTALには、供試体への水の流入・流出を速やかに行えるように、従来のセラミックディスクに変えて微細多孔質膜を装着している。供試体の体積変化の測定は、供試体の内径については中空円筒内を水で満たし、その体積変化を読み取ることで算定した。外径については供試体の側面3箇所にクリップゲージを取り付け、各設置箇所での外径の変化の計測を行っている。

不飽和状態での繰返し中空ねじり試験には稲城砂を用いた。その物理特性は、土粒子の比重 $G_s=2.723$ 、50%粒径 $D_{50}=0.134\text{mm}$ 、均等係数 $U_c=9.29$ 、細粒分含有率 $F_c=23.6\%$ である。また、突固めによる締固め試験(A-c法)では最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.517\text{g/cm}^3$ 、最適含水比 $w_{opt}=21.6\%$ であった。供試体は、乾燥密度が $\rho_d=1.108\text{g/cm}^3$ 、含水比が13.0%程度となるようにモールド内で5層に分けて締固めにより作製した。

繰返し载荷は、ひずみ制御条件により行った。载荷は軸ひずみ片振幅0.15, 0.30, 0.75, 1.5, 2.25, 3.0, 4.5, 7.5%の三角波を各11波与えており、周波数は $0.001\text{Hz} \sim 0.0002\text{Hz}$ とした。また、同じ条件での不飽和繰返し三軸試験も実施しており、与えた軸ひずみは中空ねじり試験でのせん断ひずみと同一の評価が可能となるような軸ひずみの大きさの設定(せん断ひずみの2/3の大きさを軸ひずみの大きさとする)とした。

同条件で実施した不飽和状態での繰返し三軸試験および中空ねじり試験の結果として、応力経路図の比較を図2に示す。繰返し载荷中に間隙水圧・空気圧の上昇に伴って有効応力が減少していくことはいずれの試験

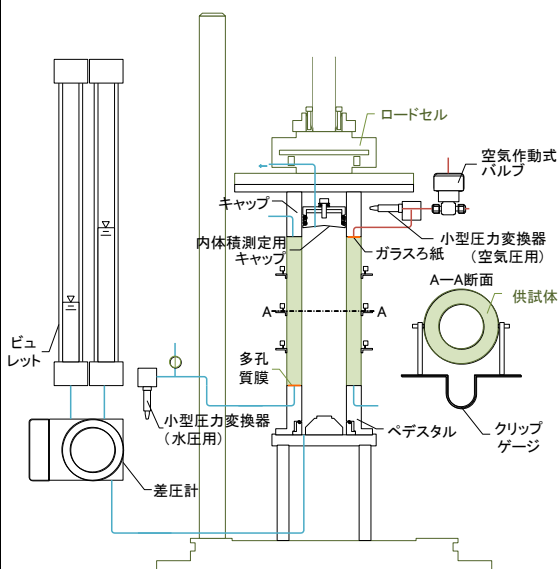


図1 中空ねじり試験装置の概要

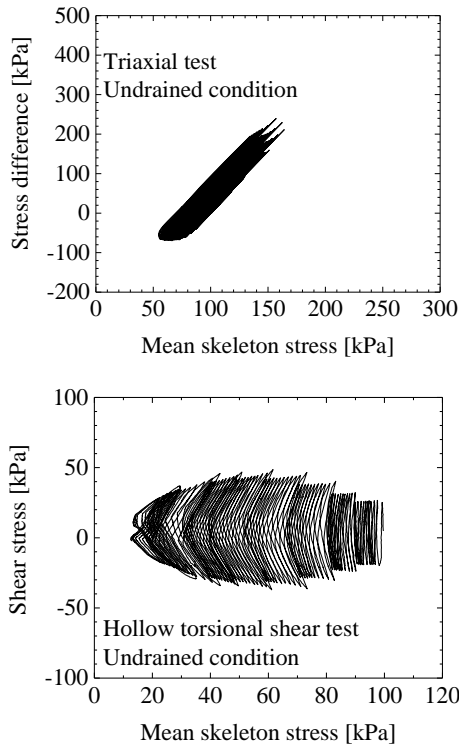


図2 三軸試験と中空ねじり試験の比較

法でも見られる。しかしながら、三軸試験の場合は1サイクルの载荷の中で間隙水圧・空気圧が増減をするため、有効応力が増減しながら減少するのに対して、中空ねじり試験の場合はこれらの増減の影響を受けず単調に減少していく。また、三軸試験の場合は軸差応力が圧縮側に偏りを示すのに対して、中空ねじり試験の場合は左右のせん断方向に同様のせん断応力の増減を示している。三軸試験では繰返し载荷終了時点においても有効応力が完全にはゼロとなることはなかったが、中空ねじり試験では有効応力がゼロとなり液状化状態に至っている。以上の繰返し载荷試験から、不飽和状態での繰返し载荷挙動は、三軸試験と中空ねじり試験で大きく異なるものとなることが確認された。

② 不飽和土の繰返し载荷挙動を表現するモデルの提案と検証

不飽和土が繰返し载荷を受ける際には、非排気・非排水条件が満足された場合においても体積圧縮が生じ、間隙比が低下（密度が増加）していく。この効果を解析モデルで考慮する手法を提案するとともに、不飽和土の繰返し载荷試験を対象とした解析を通じてモデルの妥当性を検証した。

不飽和土のサクシオン・飽和度の変化を記述するために、水分特性曲線を用いるが、水分特性曲線は間隙比が小さくなるとシフトすることが知られている。この効果を表現するために、次式で示される間隙比変化を考慮した水分特性曲線を用いることとする。

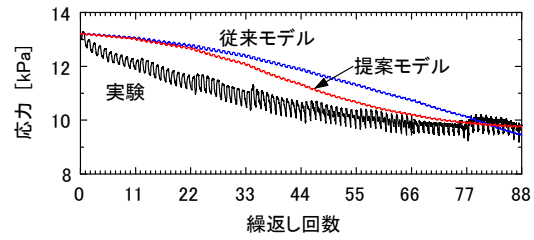


図3 繰返し回数とサクシオンの関係

$$s_e = \left[ 1 + \left\{ \frac{p^c}{\alpha} \left( \frac{e}{e_0} \right)^{\psi^{wa}} \right)^m \right\}^{-n} \right] \quad (1)$$

ここに、 $s_e$  は有効飽和度、 $p^c$  はサクシオン、 $\alpha$ 、 $m$ 、 $n$  は水分特性曲線に関するパラメータである。また、 $e_0$  は初期の含水比、 $e$  は現在の間隙比、 $\psi^{wa}$  は間隙比の影響変化を調節するパラメータである。

一方、土骨格の構成式にはせん断応力比一定型の降伏関数および非線形移動硬化関数を用いた構成式を用いるが、非線形移動硬化則中に含まれる硬化パラメータについても同様の定式化で間隙比変化を考慮することとした。

改良した水分特性曲線および構成式を用いて、繰返し三軸試験の解析を行った。得られた繰返し回数とサクシオンの関係を図3に示す。実験では载荷回数の増加とともに与える軸ひずみの大きさが増加するものの、繰返し载荷の初期にサクシオンが低下し、载荷の後半でその低下速度が小さくなっていく挙動を示している。これに対して、従来モデルを使った場合は実験挙動とは異なり、与える軸ひずみの増加に応じてサクシオンの低下量が増加していくため、実験と解析で整合する挙動が得られていない。一方で、提案した間隙比の減少の効果を考慮した水分特性曲線および土骨格の構成式を用いることで、特に繰返し载荷の後半で解析による実験の再現性が向上していることがわかる。

③ 盛土堤体液状化の対策工を想定した数値解析

②で述べた不飽和土の繰返し载荷に対する挙動を表現できるモデルを使って、盛土堤体液状化を想定した解析を行う。この中で、液状化発生に伴う盛土の変形抑制を目的とした対策工についての解析を行い、無対策との挙動の違いを把握する。解析手法は、土が土骨格・間隙水・間隙空気から成る三相混合体として、混合体のつりあい式と間隙水・間隙空気の連続式を考慮するものである。解くべき連立方程式の未知数は、土骨格の変位  $u_s$ 、間隙水圧  $p^w$  および間隙空気圧  $p^a$  とする。空間離散化には有限要素法を、時間積分にはNewmarkの時間積分法を適用しており、土骨格の変位・間隙水圧・間隙空気の2階微分  $\mathbf{a}^s$ 、 $\dot{p}^w$ 、 $\dot{p}^a$  を逐次解いていく。

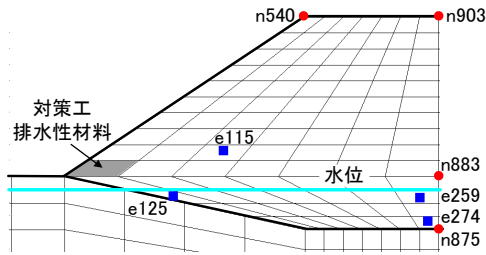


図4 盛土部の拡大図

対象とする盛土は標準的な複線構造の鉄道盛土を想定し、盛土高さを6m、のり面勾配を1:1.5、盛土の天端幅を10mと定めた。地下水位は地表面の位置から0.5mの深度としている。盛土が圧密沈下により地下水位以下に埋没したことを想定し、地表面位置に対して盛土と支持地盤の境界部が2m下方に位置することを想定した。すなわち、盛土部のうち1.5m分が地下水位以下に位置することとなる。盛土材料は、鉄道路構造物の設計標準に示される盛土材料の中の土質3（粒度配合の良くない土）に分類され、建設年代が古く締固め管理が十分になされていない既設盛土を想定した。地盤については、 $V_s=120\text{m/s}$ 程度の沖積粘土層を想定し、繰返し载荷に対する非線形特性を記述できるように盛土堤体と同じ弾塑性構成式を用いてモデル化した。ただし、繰返し载荷中に液状化が生じることがないパラメータ設定としている。対策工は盛土ののり尻部を排水性（透水性）および変形特性に優れた材料を用いることを想定した。その範囲を盛土の拡大図として図4に示す。

入力地震動には、鉄道構造物の耐震設計標準に示されるL2地震動、スペクトルIIの基盤位置での時刻歴波形を用いた。

各ケースの解析終了時点で得られたせん断ひずみの分布を図5に示す。なお、結果は左半分の盛土およびめり込み部のカウンター図としており、図中の数字は図4で示した節点n540, n875, n883, n903での水平・鉛直変位の各成分を示している。無対策の解析ではめり込み部でひずみが大きく発達し、盛土堤体でも最大0.3程度のひずみが発達している。これに対して、対策工を施工したケースでは、めり込み部で生じるひずみは低減され、盛土堤体でも生じるひずみはのり尻の排水性材料直上の限られた範囲に留まっております。対策工が効果を発揮していることがわかる。

④ 盛土堤体液状化に及ぼす降雨や融雪水に関する試算

盛土の堤体液状化の発生に対して、降雨浸透や融雪水がどのように影響するか、解析的な検討を行った。

対象とする盛土は③の解析と同様に、標準的な複線構造の鉄道盛土を想定し、のり面勾配を1:1.5、盛土の天端幅を10mと定めた。ここでは、盛土高さを4mおよび2mの2種類

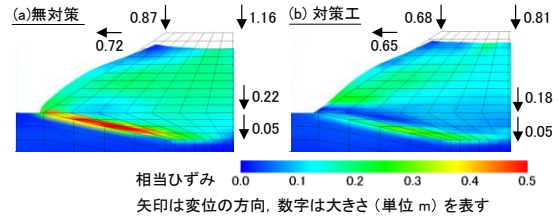


図5 地震後の盛土の変形と相当ひずみ分布

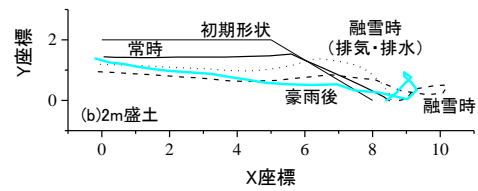
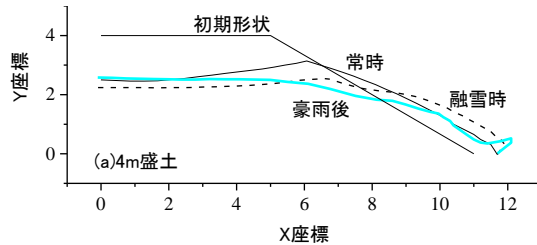


図6 地震後の盛土の変形

を設定し、その挙動の違いについて考察する。また、地下水位については支持地盤の地表面の位置に設定し、ここでは簡単のため支持地盤に対しては降雨や融雪水の影響は考慮しないものとする。粘性土地盤への盛土のめり込み部については本解析では考慮していない。盛土材料や支持地盤のパラメータは4の解析と同様である。

解析を行うケースは、常時・豪雨後および融雪時の3ケースとした。常時では、年平均降水量(800mm/年)相当の降雨浸透を受けた盛土として、3年の間盛土に平均降水量を与えて盛土内の飽和度やサクシヨンの大きさが定常となる状態を求めた後に地震応答解析を行う。豪雨時では、常時の解析の後に鉄道路構造物の設計標準に示す作用Iの短時間型降雨履歴を与えた後に地震応答解析を行った。融雪時については、盛土上の積雪を積雪深50cm、密度 $0.3\text{g/cm}^3$ としてこれが全て融雪により20日間かけて盛土内へ浸透していくことを仮定した。

入力地震動には強震継続時間の長い地震動を用いた。

高さが2m, 4mの各解析ケースで、地震応答解析終了時の盛土天端およびのり面の変形状況を図6に示す。これらの図は、各ケースの解析で得られた解析終了時の盛土天端中央からのり尻までの各節点の座標（初期位置に水平・鉛直方向の変位を加えたもの）をつなぎプロットしたものである。4mの盛土の結果に着目すると、盛土の中央位置での沈下量については3ケースの解析で大きな違いがない。一方、のり肩からのり尻にかけてはケース間での違いが見られ、豪雨後のケースで



はのり面方向への水平変位やのり肩部での沈下が見られる。融雪時のケースにおいても豪雨後ほどではないが、のり肩からのり面にかけての変状が大きくなっている。

一方、高さ2mの盛土の場合は、高さ4mの盛土と比べると、ケース間の盛土の変形の違いが大きくなっている。定量的には、盛土の天端中央位置において、4m盛土での場合には盛土高さに対する沈下量の比率がケース間で0.57~0.64の範囲に収まっていたのに対して、2m盛土の場合には0.47~0.72となっており、ケース間の違いが大きく生じている。また、豪雨後や融雪時ではのり肩での沈下やのり面側へのはらみ出しが著しく、高さの低い盛土では影響が大きく生じるものと考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 松丸貴樹, 佐藤武斗: 不飽和状態を考慮した盛土堤体液状化の浸透-変形連成解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 71, No. 2, pp. I\_655-I\_666, 2016  
[https://doi.org/10.2208/jscejam.71.I\\_655](https://doi.org/10.2208/jscejam.71.I_655)
- ② 松丸貴樹, 渦岡良介: 間隙変化を考慮した水分特性曲線と土骨格の構成式を用いた不飽和繰返し三軸試験の解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 72, No. 2, pp. I\_323-I\_334, 2017  
[https://doi.org/10.2208/jscejam.72.I\\_323](https://doi.org/10.2208/jscejam.72.I_323)
- ③ 松丸貴樹, 川尻峻三, 岸田久徳, 田中悠暉: 積雪寒冷条件下の間隙水圧・空気圧挙動を考慮した盛土の地震応答解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 73, No. 4, pp. I\_642~I\_654, 2017.  
[https://doi.org/10.2208/jscejsee.73.I\\_642](https://doi.org/10.2208/jscejsee.73.I_642)
- ④ Matsumaru, T. and Uzuoka, R.: Numerical simulation of unsaturated cyclic triaxial test considering effect of void change and scanning soil water characteristic curve, Proceedings of 3rd International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Vancouver, No. 353, pp. 1-6, 2017.
- ⑤ 松丸貴樹, 渦岡良介, 木口峰夫: 多様な境界条件下での不飽和土の繰返し載荷試験と数値シミュレーション, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 73, No. 2, pp. I\_477-I\_488, 2018  
[https://doi.org/10.2208/jscejam.73.I\\_477](https://doi.org/10.2208/jscejam.73.I_477)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 松丸貴樹, 渦岡良介: 間隙変化を考慮した不飽和繰返し三軸試験の解析, 平成28年度不飽和土研究会研究発表論文集, pp. 55-62, 2017.
- ② 松丸貴樹, 川尻峻三: 積雪寒冷地での盛土の水理挙動を踏まえた地震応答評価の試み, 気候変動に伴う積雪寒冷地の地盤災害に関するシンポジウム論文集, pp. 35-42, 2017.
- ③ 松丸貴樹: 排水性材料の適用による盛土堤体の液状化対策に関する数値解析, 第52回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1073-1074, 2017.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

松丸 貴樹 (MATSUMARU, Takaki)  
鉄道総合技術研究所・  
構造物技術研究部・主任研究員  
研究者番号: 00425927