

## 緩い砂質土で構成される盛土体の液状化に関する模型振動台実験

キーワード 液状化, 盛土, 振動台実験

鉄道総合技術研究所 正会員 ○佐藤武斗  
 鉄道総合技術研究所 正会員 長尾洋太  
 元鉄道総合技術研究所 国際会員 松丸貴樹  
 複合技術研究所 正会員 木口峰夫

**1. はじめに** 2011年東北地方太平洋沖地震において、軟弱粘性土地盤上の盛土の液状化による被害が鉄道盛土にも見られた<sup>1)2)</sup>。この被害形態は、盛土の供用期間中に軟弱粘性土地盤の圧密沈下により、盛土体の一部が地下水位以下まで沈下し、飽和化した盛土の一部が地震時に液状化し、盛土天端に大きな沈下が発生する。過去にも地震時に大きな天端沈下が生じ、安定解析や地震応答解析では説明できない事例<sup>3)</sup>が報告されている。この事例では、軟弱な腐植土で構成される地盤上の盛土体の一部が地下水位以下まで沈下していたことから、同様の破壊形態であったことが推測される。しかしながら、盛土体の液状化の発生条件やそのメカニズムは十分に解明されていない。そこで、本研究では盛土体に発生する液状化について、盛土材料の浸透特性が及ぼす影響を評価することを目的に、継続時間の長い地震動を用いた模型振動台実験を実施した。

**2. 実験概要** 内寸 1.1m × 2.1m × 1.4m の剛体土槽を用いて、盛土体に発生する液状化について検討するために模型振動台実験を実施した。作成した盛土模型断面を図1に示す。高さ 4.0m、天端幅 3.0m、のり勾配 1:1.5 の盛土を想定し、1/10 スケールで模型作製を行った。支持地盤である非液状化層を下限值  $D_c=90\%$  で作成後、逆台形状に掘削し盛土模型を所定の密度で締固めることで、供用期間中の支持地盤の圧密により地下水位以下に沈下したためり込み層を模擬した。この作成方法では、遠心模型実験で行われる供用期間中の圧密沈下の再現と異なり、盛土底部でのストレッチングによる密度や応力低下を考慮出来ないが、1G 場での実験であるため盛土体の密度を低く設定することで対応した。液状化層を含む盛土体は 4.75mm でふるった稲城砂（初期含水比  $w=13\%$ ）を相対密度  $D_r=60\%$  ( $\rho_d=1.108\text{g/cm}^3$ ) を目標に作成しており、模型底面から炭酸ガス、水道水を順に注入することで、地表面高さまで飽和するように液状化層を作成した。水位上昇後、2日間程度水位を保ったままオーバーフローさせることで模型内部の飽和度を高めている。実験開始前における飽和度を把握することを目的に、図1中の PWP05 の位置と PWP02 の位置で土壌水分計による飽和度計測を行った。その結果、水位線以下-100mm の盛土内に位置する土壌水分計では Sr90%程度であり、盛土体の内部の PWP02 の位置では 75%程度であることを確認した。盛土材料に使用した稲城砂の粒径加積曲線を図2に示す。土粒子の比重  $G_s=2.723$ 、50%粒径  $D_{50}=0.134\text{mm}$ 、均等係数  $U_c=9.29$  であり、細粒分含有率は  $F_c=23.6\%$  とやや細粒分を含む材料であることが特徴である。また、定水位透水試験による飽和透水係数は  $k=1.86 \times 10^{-4}$  (m/s) であり、盛土模型作製時と同じ密度で非排水繰返し三軸試験を行ったところ、繰返し回数 20 回、両振幅軸ひずみ 5% 時の応力比 ( $R_{120}$ ) は  $R_{120}=0.119$  となることを確認している<sup>4)</sup>。加振実験に使用した加速度の時刻歴波形を図3に示す。入力加速度は 200gal、5Hz の正弦波として加振実験を実施した。実験時における計測項目は、レーザー変位計を使用した盛土のり面および天端の鉛直・水平変位、間隙水圧、加速度である。間隙水圧の計測の内、PWP01 と 03 はセラミックカップを使用したサクシオン計測用の間隙水圧計である。また、ガラス面に設置した標点には、液状化後の大きな変形にも追随性を有するフェルトで作成した標点を採用し、加振実験中の画像解析を実施した。

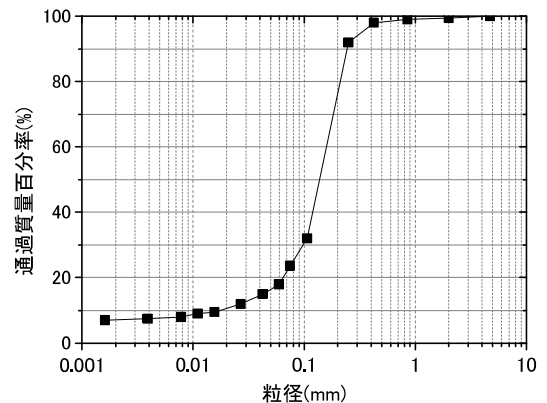


図2 稲城砂の粒径加積曲線

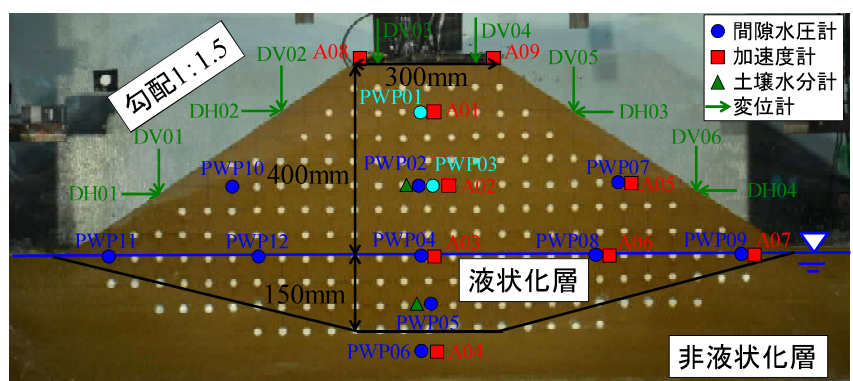


図1 盛土模型断面と計測器の配置

Shaking table test for liquefaction of embankments constructed of loose sand

Sato Taketo, Railway Technical Research Institute  
 Nagao Yota, Railway Technical Research Institute  
 Matsumaru Takaki, Railway Technical Research Institute  
 Kiguchi Mineo, Integrated Geotechnolgy Institute

**3.実験結果** 図3に画像解析による崩壊直前の盛土の変形挙動を示す。図中には各標点の変位ベクトルを矢印で示している。崩壊直前までの変位は数ミリ単位であったため、変位ベクトルは10倍とした。天端から15cm程度までは沈下が生じているが、それより低い位置ではのり面を除き、ほぼ沈下が生じていない。また、のり面ではクラックを伴うはらみだしが確認され、その後崩壊に至った。水位線以下であるめり込み層に着目すると、変位は小さいことがわかる。このように盛土自体の変形挙動が先行したため、盛土体の液状化には至らなかったが盛土崩壊直前までは過剰間隙水圧の上昇が見られた。図4に過剰間隙水圧および加速度の時刻歴を示す。過剰間隙水圧が発生し始めるタイミングは、天端直下のPWP04、のり面直下のPWP08、12が50s程度からほぼ同時に上昇しており、遅れてめり込み層内のPWP05で過剰間隙水圧が発生している。その後、のり尻に位置するPWP09、11では変形が卓越し、上載圧が増加するまで過剰間隙水圧の上昇がみられなかった。これまで行われてきた遠心模型実験(例えば5),6),7)を見てみると、盛土天端直下よりも盛土ののり尻側から液状化する傾向がみられる。この結果は比較的拘束圧が高い盛土天端直下では、せん断に伴う体積変化が小さく、拘束圧が低いのり尻側では体積変化が大きいに起因すると考えられる。しかしながら、液状化の発生は十分に透水係数が小さく非排水条件に近い状態であることが前提と考えられる。表1に既往の研究の実験条件を示す。本研究における盛土材料は比較的乾燥密度が低く、透水係数も大きいことが特徴的である。その結果、図5に示す実験開始前と崩壊直前の模型状況を比較すると、湿潤領域の変化が見られたことからサクションによって吸い上げられた間隙水が変形により、移動していることがわかる。さらに、加振時にのり尻より水が抜けている様子が確認されたことから、加振に伴う間隙水の浸透により、のり尻で排水が生じ、排水境界近くであるのり尻のPWP09では変形が生じて大きく過剰間隙水圧が増加しなかったものと考えられる。以上のことから、盛土材料の透水性により弱部となりうる盛土のり尻での液状化発生を抑制し、結果として盛土体の液状化発生を遅延させたものと見られる。

**4.まとめ** 模型振動台実験による盛土堤体の液状化の発生条件について検討を行った。その結果、水位線以下の盛土体では液状化には至らなかったものの、過剰間隙水圧の増加が確認された。しかしながら、盛土のり尻では過剰間隙水圧がほぼ上昇していなかった。この結果を受け、既往の研究との実験条件を比較することで、盛土材料の透水性により盛土のり尻で発生する過剰間隙水圧を抑制できることを示唆した。また、盛土のり尻での過剰間隙水圧の発生を抑制することで、盛土体の液状化発生を遅延できるものとする。

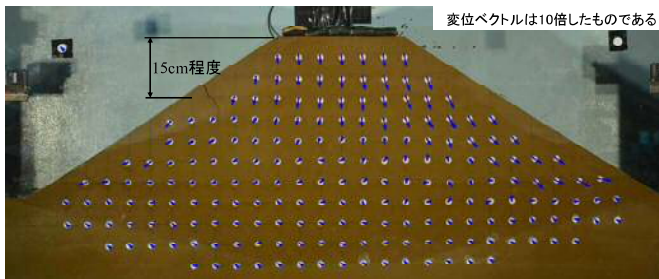


図3 崩壊直前における盛土の変形図

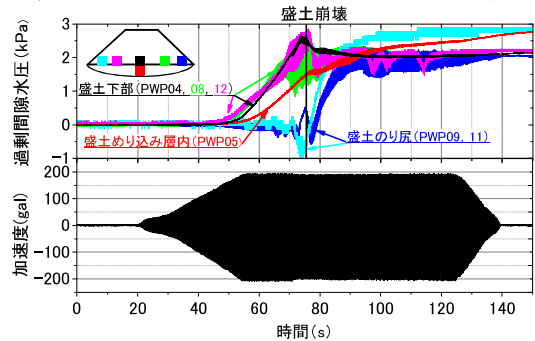
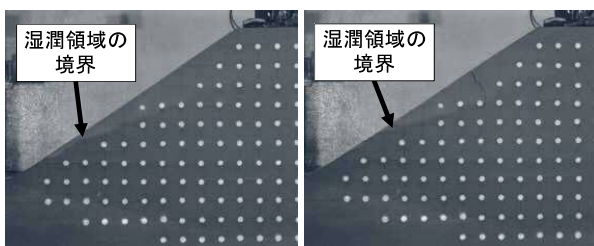


図4 過剰間隙水圧と振動台加速度の時刻歴



(a)実験開始前 (b)崩壊直前

図5 変形による湿潤領域の相違

**参考文献** 1)Koseki, J., Koda, M., Matsuo, S., Takasaki, H., Fujiwara, T: "Damage to railway earth structures and foundations caused by the 2011 off Pacific Coast of Tohoku Earthquake.", *Soil and Foundations*, Vol.52, No.5, pp.872-889,2012. 2)鈴木佑典, 岡田直久: 京成電鉄における被害状況と復旧の取組み, *鉄道施設協会誌*, Vol.49, No.10, pp.48-51, 2011. 3)那須誠, 藤沢一, 四本慶一: 日本海中部沖地震による被害盛土の安定解析, *鉄道技術研究所速報*, No.A-86-140,1986. 4)松丸貴樹, 小島謙一, 舘山勝: 浸透水の影響を受けた盛土の地震時挙動に関する基礎的研究, *土木学会論文集 C*, Vol.70, No.1, pp.135-149, 2014. 5)藤原憲, 岡村未対: 遠心模型実験による鳴瀬川堤防の地震被害の再現と破壊メカニズムの検討, 第48回地盤工学研究発表会, pp.1563-1564, 2013. 6) 荒木裕行, 谷本俊輔, 石原雅規, 佐々木哲也: 堤体密度に着目した堤体液状化に関する遠心模型実験 (その2) 堤体密度の違いが地震時の堤体変状メカニズムに及ぼす影響, 第49回地盤工学研究発表会, pp1387-1388, 2014. 7) Okamura, M., Tamamura, S., Yamamoto, R."Seismic stability of embankments subjected to pre-deformation due to foundation consolidation", *Soil and Foundations*, Vol.53, No.1, pp.11-22, 2013.

表1 模型材料の比較

	使用材料	乾燥密度 $\rho_d$ (tf/m <sup>3</sup> )	透水係数 $k$ (m/s)
本研究	稲城砂	1.108	$1.86 \times 10^{-4}$
文献21	鳴瀬川砂	1.330	$1.62 \times 10^{-5}$ ※1
文献22	DLクレー+カオリン	1.551	$2.10 \times 10^{-5}$ ※1
文献23	非塑性シルト質砂	1.555	$2.50 \times 10^{-6}$ ※1

※1 1G場における値に換算したものである