

液状化強度の空間的変化を有する地盤の模型振動台実験

液状化 振動台実験 沈下

鉄道総合技術研究所 正会員 ○長尾 洋太  
正会員 佐藤 武斗  
東京大学 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年の東北地方太平洋沖地震では、人工埋立地や地形改変地を中心に液状化が発生し、鉄道構造物もその被害を被った<sup>1)</sup>。土構造物においては、石炭焼却灰からなる大規模な鉄道車両基地盛土の液状化を確認しており、その上の鉄道軌道では不陸箇所が数多く観測された<sup>2)</sup>。鉄道軌道では運行の安全上、ミリ単位で変位を制限する必要があるが、液状化発生時の不陸箇所やその程度を推定することは困難である。筆者らは、液状化によって生じる鉄道軌道の不陸箇所の簡易推定法の確立を目的に、これまでに現地調査や模型実験等を実施してきた<sup>3)4)</sup>が、簡易推定法の確立には至っていない。本稿では、既往の研究<sup>2)4)</sup>により液状化層厚の空間的な分布と液状化強度の空間的な分布がそれぞれ地表面不陸へ影響を及ぼしていることが示唆されており、本稿においては後者に着目した検討を実施したため、これを報告する。

**2.実験概要** 模型実験では内寸、幅 2080mm×奥行 600mm×高さ 1400mm の剛体土槽を用いた。本検討では文献 3)に示す現地調査時に推測された地盤内 S 波速度の分布と不陸発生との関係に着目し、空間的に液状化強度を変化させた模型を作成した。模型概要と計測器配置を図-1に示す。

本検討では、空間的な液状化強度の変化による地表面の沈下量分布への影響を計測することを目的とし、液状化層を液状化強度の異なる2つの領域とした。なお、液状化層は4.75mmふるいを通過した稲城砂を表-1に示す物理特性を目標として締め固め法により作製している。これらの試料については、別途非排水繰返し三軸試験を実施しており、繰返し応力比  $R_L$  と両振幅軸ひずみ 5%に達した時の繰返し載荷回数  $N_c$  の関係から  $N_c=20$  回で定義される  $R_{L20}$  は、 $\rho_d=1.069g/cm^3$  で  $R_{L20}=0.119$ 、 $\rho_d=1.598g/cm^3$  で  $R_{L20}=0.525$  程度となっている。

液状化層の下部に堆積する非液状化層は玉石を用いて作製し、液状化層との境界部には剛な金網と不織布を用いている。模型作製後、土槽底面から炭酸ガス、水道水を順に注入することで、模型土層すべてを飽和させた。なお、図-1に示すように模型土層中には土壌水分計を設置しており、飽和度の確認を実施した。計測結果に若干のばらつきはあったものの、概ね全体が飽和度 90%程度以上の飽和度になっていたことを確認している。

振動実験は振動台加速度 200gal、周波数 3Hz、継続時間約 200sec の条件で加振した。振動台加速度の時刻歴を図-2に示す。

**3.実験結果・考察** 図-3に土層内1段目(地表面から100mmの位置)および2段目(同250mmの位置)における加速度応答の時刻歴を示す。図-1に示すとおり、A01H および A02H の加速度計は液状化強度の低い液状化層②に位置するものであり、図中赤線の時点でそれぞれ液状化が発生したと考えられる。なお、本実験では間隙水圧計により過剰間隙水圧の測定を実施したが、精度良く計測を実施できなかったため、過去に実施した振動実験<sup>4)</sup>における過剰間隙水圧の上昇と加速度減衰の関係から液状化発生の有無を判断するものとした。加速度減衰の状況から加振開始直後(20sec程度)でA01Hの位置の液状化が発生し、その後50sec程度経過するとA02H および A08H の位置で順次液状化が発生したものと推察される。また、A06Hの位置においては、

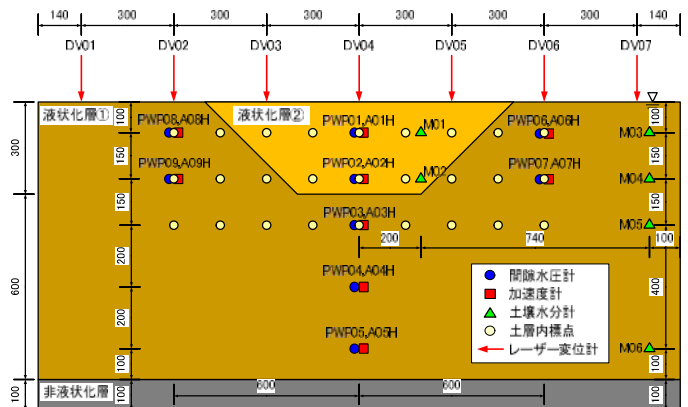


図-1 模型概要・計測値配置

表-1 模型土層の物理特性

	$G_s$	$D_{50}$ [mm]	$U_c$	$F_c$ [%]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
液状化層①	2.723	0.134	9.29	23.6	1.289
液状化層②					1.108

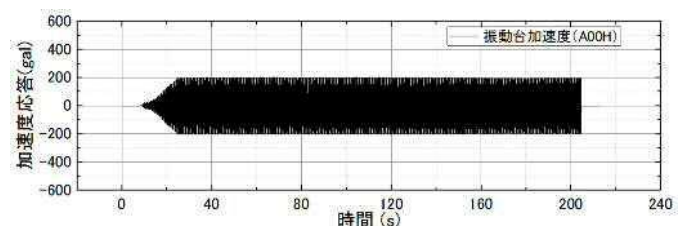


図-2 振動台加速度の時刻歴

Shaking table test of model ground with spatial distribution of liquefaction strength: Yota NAGAO (Railway Technical Research Institute), Taketo SATO (Railway Technical Research Institute), Takaki MATSUMARU (Tokyo University), Mineo KIGUCHI (Integrated Geotechnology Institute Limited)

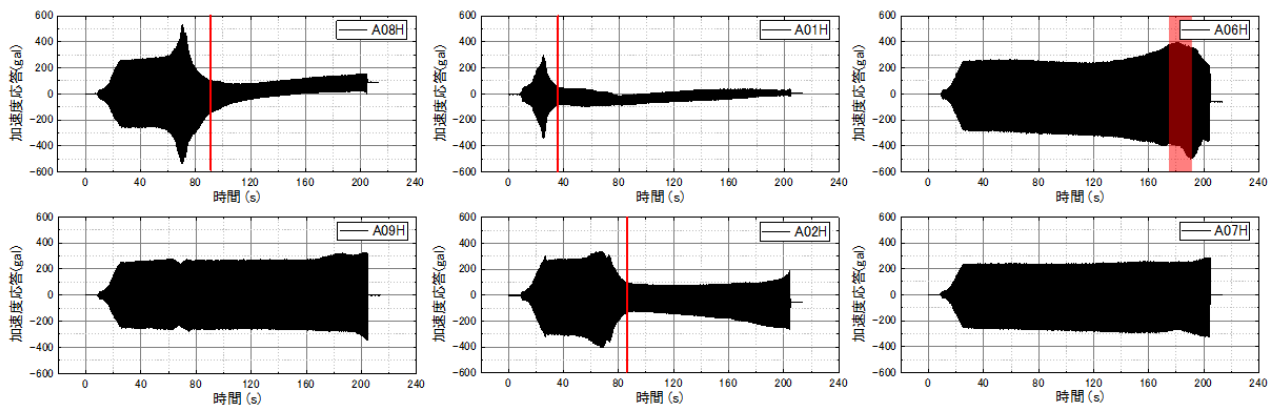


図-3 土層内1段目および2段目における加速度応答の時刻歴

図中に網掛けで示すように加振終了直前に加速度応答が増幅されており剛性低下はしているものの液状化は発生していなかったと考えられる。なお、A07H および A09H の位置ならびにそれ以深では液状化は発生しなかった。

加振終了後、十分に時間をおいて土槽内の水を排水し、再圧密による沈下状況を観察した。排水後に観測された地表面残留沈下量を図-4 に示す。地表面沈下の全体傾向として、土槽右側ではほぼ沈下が発生せず、土槽左側および中央部で大きな沈下が観測された。このことから土槽右側では液状化が生じなかったことが分かる。なお、土槽左端から400mm 程度の位置で傾向の異なる点が2つ観測された。これは、加振の影響により地表面標点が土層内へと潜り込んでしまったものと考えられる。

土層内部における標点の移動状況を図-5 に示す。図-5 より、液状化層①のうち2段目3段目標点の位置では液状化が生じなかったため、飽和時の圧密沈下の影響のみとなっており、加振および液状化発生による沈下はほぼ生じていなかったものと考えられる。これに対し、液状化の発生した位置においては、非液状化位置と比較して沈下量は多くなっている。なお、図中に示すA点およびB点では初期位置より上方へと移動していた。これは、すぐ脇の標点が内側へと移動していることから、液状化が発生したことにより、相対密度の高い液状化層①から相対密度の低い液状化層②へと砂粒子が移動したことにより、発生した可能性が考えられる。

**4.まとめ** 地盤沈下に及ぼす液状化強度の空間的変化の影響を把握するために模型振動実験を実施した。これにより、以下に示す知見が得られた。

- 1) 液状化発生箇所では、非液状化箇所と比較して大きな沈下が発生する。
- 2) 液状化範囲に空間的な液状化強度のバラツキが存在する場合、液状化後には全体が均一化される可能性がある。
- 3) 液状化強度の境界部付近では相対的に沈下量が少なくなり、結果として地表面では一様沈下とならずに不陸が発生するものと考えられる。

以上より、地盤内 S 波速度の分布と不陸発生との関係性について一定の考察が得られたと考えるが、簡易推定法の確立には課題が多く残るものと考えられる。

<参考文献>1)野沢ら：東北地方太平洋沖地震における鉄道の被災状況及びその復旧について，地盤工学ジャーナル，Vol.7，No.1，pp127-137，2012。2)工藤ら：石炭焼却灰を含んだ鉄道盛土材料の液状化抵抗特性，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，2013。3)佐藤ら：石炭灰で構成される鉄道盛土の液状化とその影響評価，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，2014。4)佐藤ら：液状化発生後の不陸箇所推定のための実験的検討，第11回地盤工学会関東支部発表会，2014。

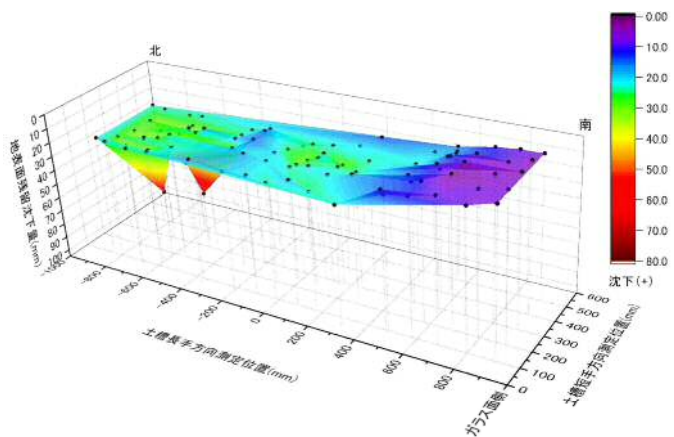
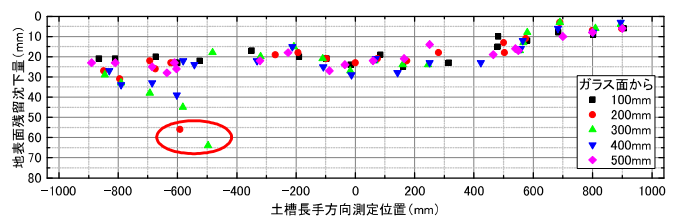


図-4 地表面における標点の残留沈下量

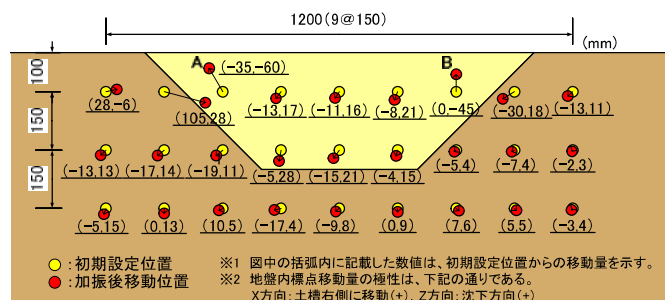


図-5 土層内部における標点の移動状況