

地震時の地盤の揺れを再現する



土井 達也

Tatsuya Doi

鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室
主任研究員



伊吹 竜一

Ryuichi Ibuki

鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室
主任研究員



井澤 淳

Jun Izawa

鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室長

地盤の揺れと構造物の被害

地震が起きると、地盤は複雑に揺れ、構造物に被害を及ぼす可能性があります。このため、地震時の地盤の揺れを適切に評価した上で、必要な設計、対策を行う必要があります。鉄道総研ではこれまで、地震時の地盤の揺れを解析的に再現する方法を開発、高度化してきました。本稿では、複雑な地盤の揺れを再現する数値解析手法の構築に向けて、数値解析手法の妥当性確認に必要となる地盤の揺れの実験による再現手法について紹介します。

地盤の揺れを再現する

地盤は固い地層、軟らかい地層など、さまざまな地層で構成されています。また、軟弱な地層の中でも地下水位以深にある軟らかい砂質土層では、地震時に地層が液体状に変化する**液状化**

液状化

地下水位以深にある緩い砂質土層が地震により揺らされると、土粒子の間が詰まるように土が動くことにより、土粒子の間にある水の圧力が上昇します。この水の圧力によって土粒子の間のかみ合わせが外れ、泥水のように土が液体状に変化することを液状化と呼びます。液状化が発生すると、地盤に大きな変位が生じたり、構造物を支えられなくなったり、地中のマンホールなどの構造物が浮き上ったりするなどの被害が生じることがあります。

化が生じる場合があります。この場合、非常に大きな変形が生じ、構造物に被害を与える可能性があります。

地震時の地盤の揺れを適切に評価して必要な設計、対策を行うには、地盤挙動の数値解析法の構築が必要です。この数値解析法の妥当性を確認するには、地震時の地盤の揺れを実験的に再現する技術が不可欠です。地震時の地盤の揺れを実験的に再現する手法として、模型振動台実験と呼ばれる手法がよく用いられます。模型振動台実験とは、土槽と呼ばれる容器の中に模型地盤を構築し、容器ごと振動台に載せて揺らす実験です。模型振動台実験では、実地盤の地層の構成をそのまま再現した実験ができるため、地層どうしの力のやりとりによる地盤の複雑な揺れを再現することができます。

この模型振動台実験に用いられる土槽は、水槽と同じように側壁が動かない固定土槽と、口の字型の枠を多数積み重ね、枠の間にベアリングを設置することで側壁が動くように工夫したせん断土槽^{例えば1)}に大別されます。**図1**、**図2**に、固定土槽、せん断土槽の概要図を示します。固定土槽は、通常、前面に観察窓が設けられており、内部の模型地盤の様子を観察できます。一方、固定土槽では実際の地盤とは異なり、剛な側壁により模型地盤が水平方向に拘束されるた

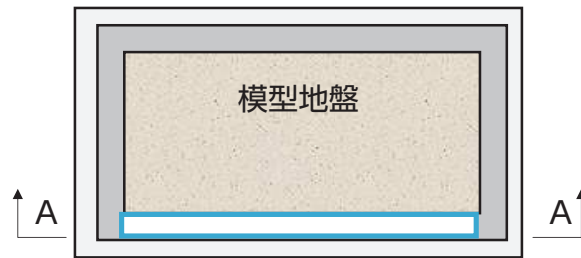
め、実際の地盤での地盤中の変形や、液状化の再現には限界があります。これに対し、せん断土槽では側壁が動くため、地盤における地盤中の変形や、液状化挙動の再現が可能です。さらに、杭基礎などの地盤中の構造物が地盤の変形によってどのように損傷するかを再現することもできます。しかしながら、せん断土槽では口の字型の枠を用いるため、固定土槽のように観察窓を設けることができず、内部の模型地盤の様子を観察できないのが欠点でした。また、口の字型の枠の高さが数cm程度と大きいため、薄い地層で大きい変形が生じる場合などの再現性にも課題がありました。

地盤の揺れを可視化する

地盤中の揺れを可視化するための土槽の開発

せん断土槽において、内部の模型地盤の様子を高速度カメラなどで観察できれば、画像解析技術により地震時の地盤中の揺れの状態を可視化することができます。このことは、地震時の地盤の揺れに対する構造物の被害予測手法の開発や、既存の被害予測手法の一層の高度化につながります。そこで鉄道総研では、従来のせん断土槽に観察窓を設けることで、内部の模型地盤を観察可能なせん断土槽（以下、RTRI式せん断土槽）を開発しました²⁾。開発したせん断

平面図



正面図 (矢視 A-A)

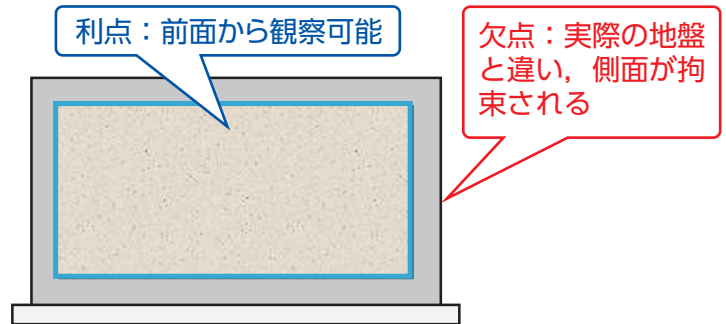
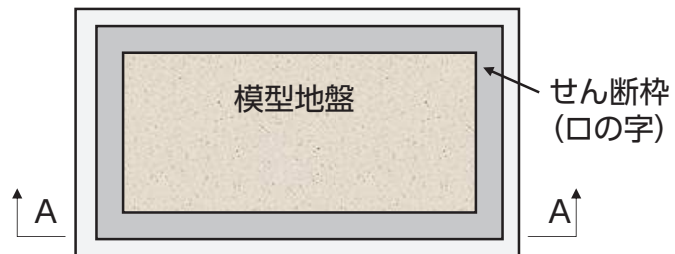


図1 固定土槽の概要

平面図



正面図 (矢視 A-A)

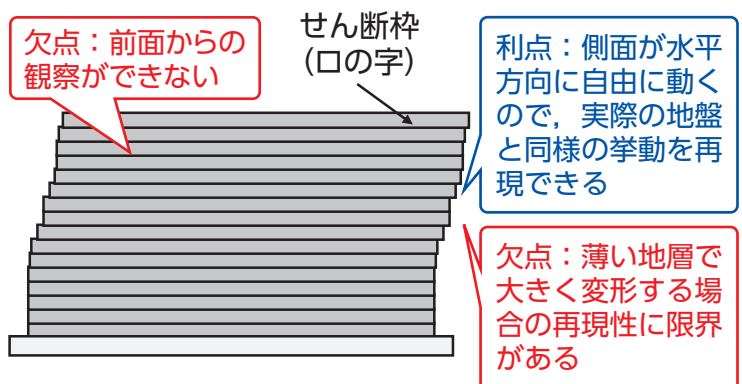


図2 せん断土槽の概要

土槽の概要を図3に示します。RTRI式せん断土槽では、従来のせん断土槽での口の字型の枠に代えて、コの字型のステンレス製の薄板（厚さ2mm）を採用し、観察窓を設けることで内部の模型地盤を観察可能としました。これによ

り、振動中の模型地盤の様子を観察窓から撮影可能となります。コの字型のステンレス板の間にはフラットローラ（図4参照）を設置することで、枠が水平方向に自由に動くようにしています。また、薄板を用いることで1段当たりの

枠高を従来の数cmから2.5mm（フラットローラの厚さ含む）に抑えられるため、軟弱な地層や液状化しやすい地層が薄く分布している場合の地盤中の動きをより適切に再現できるようになりました。

撮影画像を用いて地盤の中の揺れを可視化する技術

観察窓から連続的に撮影した模型地盤の画像を用いて画像解析を行うことで、地盤の揺れの様子（変位やひずみの発生状況）を可視化できます。画像解析にはさまざまな手法がありますが、ここではDIC（Digital Image Correlation：デジタル画像相関）解析と呼ばれる手法を紹介します。DIC解析の手順を図5に示します。まず、DIC解析を適用する画像を2枚以上準備します（図5①）。次に、初期時刻 t_0 の画像を複数の小さな領域に分割し、領域内のピクセル（画素）データから各領域の色合いの特徴を算定します（図5②）。最後に、時刻 t_1 の画像と比較して色合いの特徴が最も

図3 開発したせん断土槽の概要²⁾

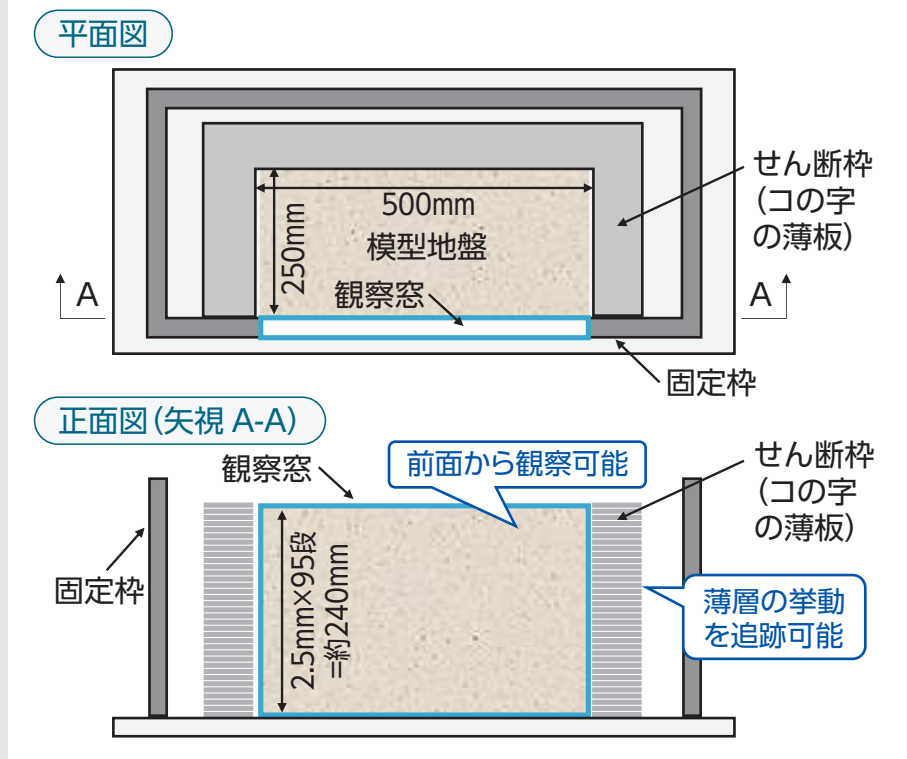
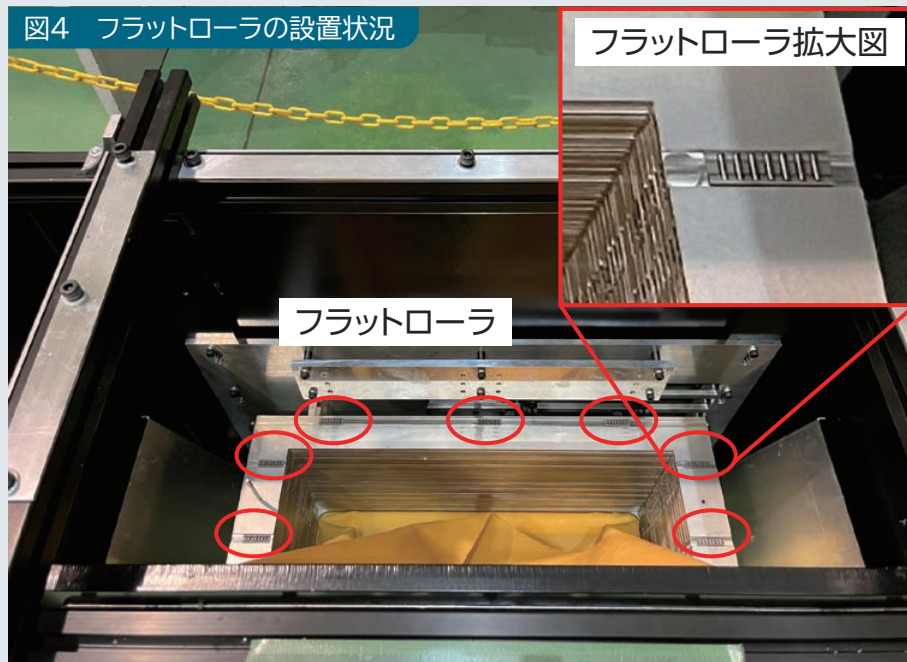


図4 フラットローラの設置状況



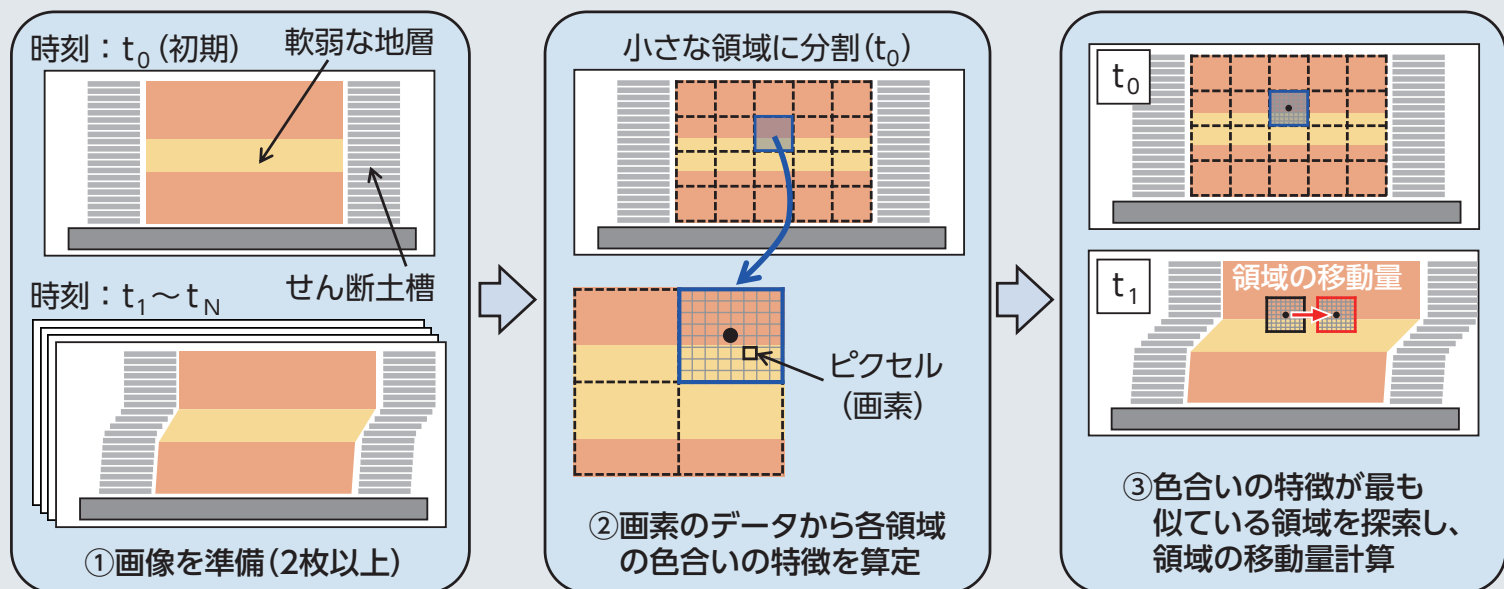


図5 DIC解析の手順

似ている（相関が高い）領域を探索することで、各領域の移動量を計算します（図5③）。この計算を各領域に対して時刻 t_N まで連続的に行うことで、地震時の地盤全体の揺れを可視化できます。

再現事例

固定土槽および、RTRI式せん断土槽を用いた模型振動台実験について紹介します。図6に振動台、土槽および高速カメラの設置状況を示します。模型振動台実験では、RTRI式せん断土槽または固定土槽を振動台に固定しています。ま

た、高速カメラについても振動台に固定することで、振動台上からみた模型地盤の様子を観察できます。模型地盤は3層で構成し、上層と下層は硬い砂層、中層は軟らかい砂層としました。また、実際の地盤に存在する地下水の影響

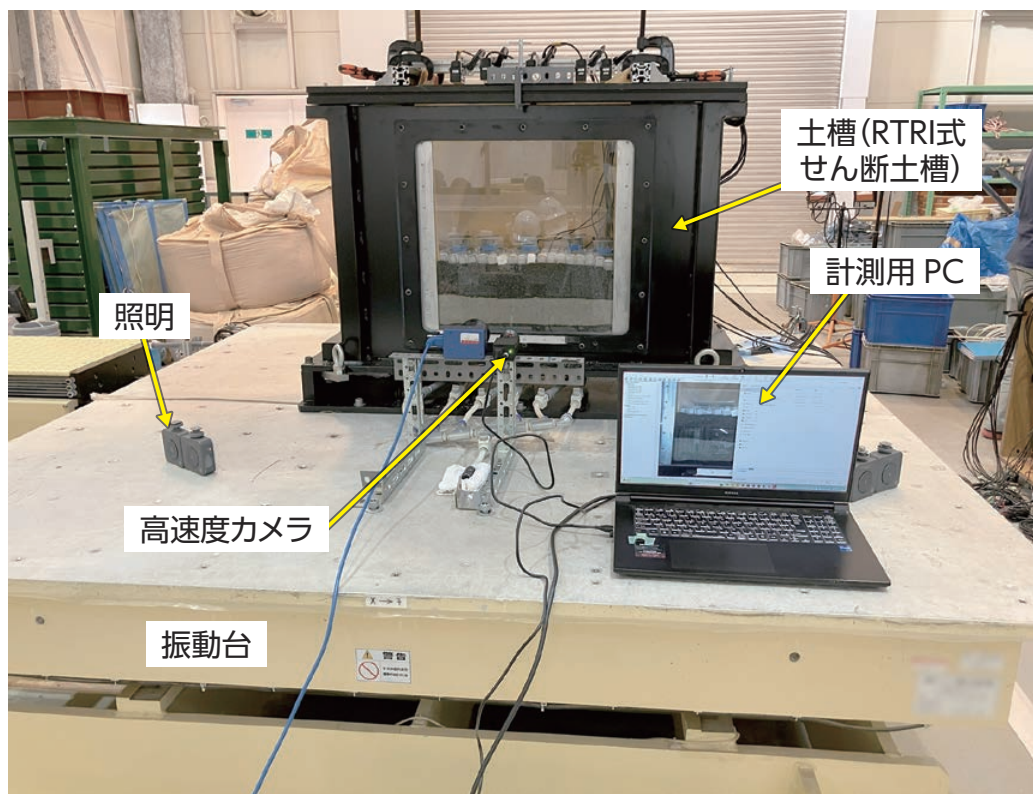
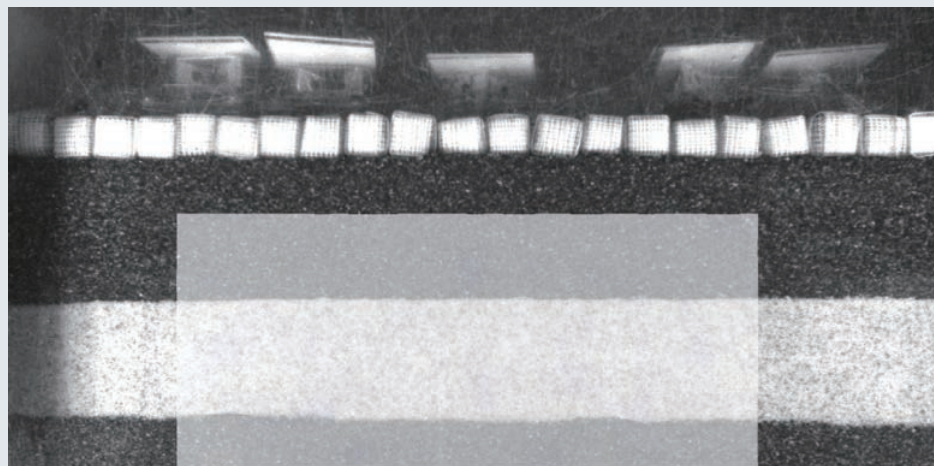
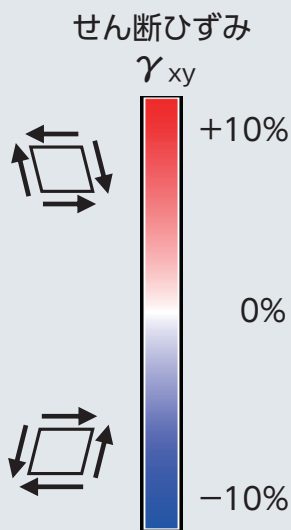
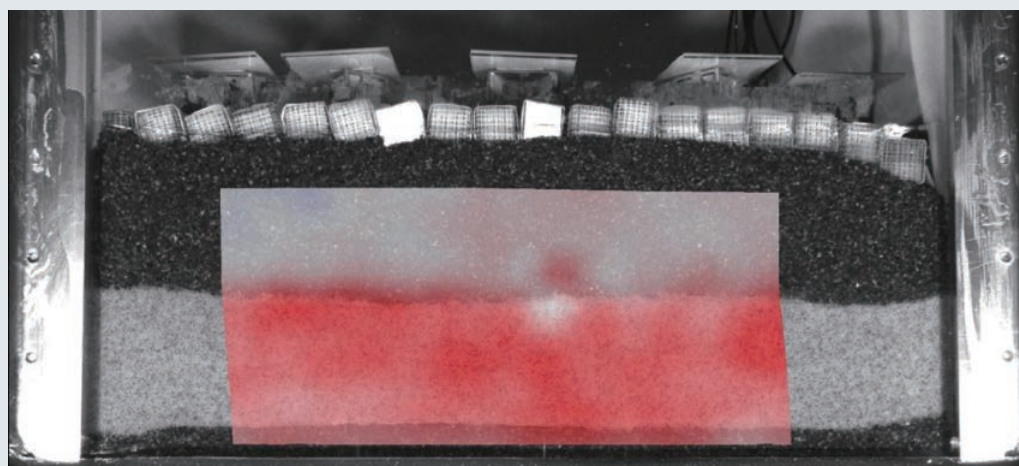


図6 振動台、土槽およびカメラの設置状況（RTRI式せん断土槽を使用した実験の場合）

を考慮するため、土槽の底面から水を注入して、模型地盤の地表面に地下水位がある状態としています。この地盤では、比較的緩い砂質土層である中層で液状化が生じやすく、中層で変形が発生しやすいと想定されます。



(a) 固定土槽を用いた実験



(b) RTRI 式せん断土槽を用いた実験

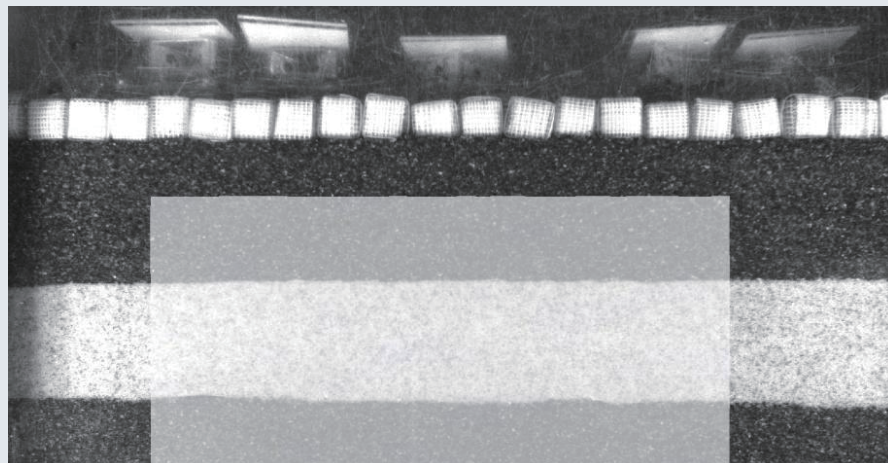
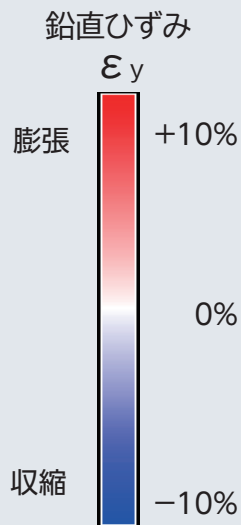
せん断ひずみ

物体を水平方向にずらす力が働いたときに、どれだけひずんだかを表す量です。平行四辺形のようにひずむときの角度（ラジアン単位）で表されます。

図7 画像解析によるせん断ひずみ分布の算定結果

画像解析では地盤の変形を表すさまざまな指標が得られますが、ここでは「せん断ひずみ[®]」と「鉛直ひずみ[®]」を例に示します。せん断ひずみは地盤の水平変位の変形、鉛直ひずみは地表面の沈下量に関係するひずみであり、どちらも鉄道構造物の地震時被害の評価法構築や高度化において重要な指標です。図7にせん断ひずみの算定結果を、図8に鉛直ひずみの算定結果を示します。図7、図8より、固定土槽を用いた実験では模型地盤の側面が水平方向に拘束されているため、比較的緩い砂質土層である中層も含めて、模型地盤全体として発生する鉛直ひず

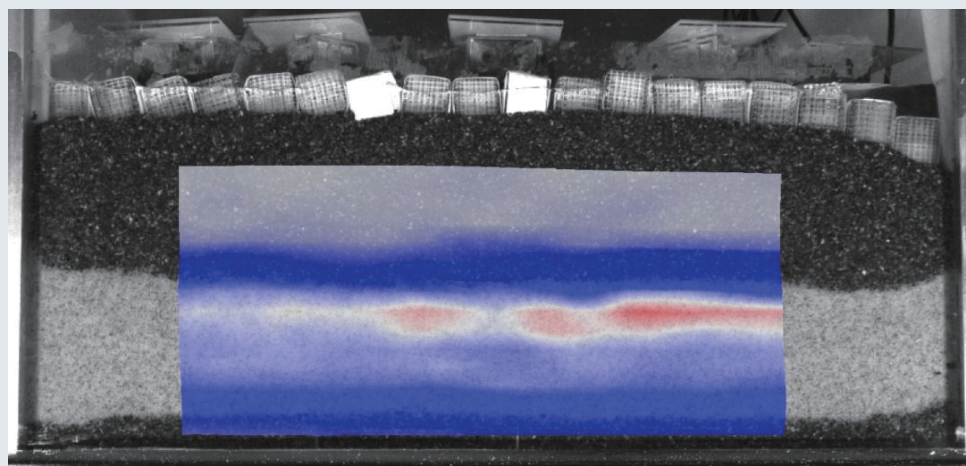
みやせん断ひずみは小さくなっています。一方、RTRI式せん断土槽を使用した実験では、実際の地盤と同様に模型地盤の側面が水平方向に自由に動くことにより、中層でせん断ひずみや鉛直ひずみが大きく発生する挙動を評価できています。また、中層の液状化は、固定土槽を用いた実験では生じず、RTRI式せん断土槽を用いた実験では生じていることを別途確認しています。以上より、RTRI式せん断土槽を使用することで、地盤中の揺れを観察窓から観察し、画像解析技術により地盤中の揺れを可視化できることを確認しました。



(a) 固定土槽を用いた実験

鉛直ひずみ

物体を鉛直方向に押し込むまたは引っ張る力が働いたとき、どれだけひずんだかを表す量です。元の物体の鉛直方向の長さを L 、力が働くことによる長さの変化量を ΔL とすると、 $\Delta L/L$ で表されます。



(b) RTRI 式せん断土槽を用いた実験

図8 画像解析による鉛直ひずみ分布の算定結果

おわりに

本稿では、地盤の揺れの実験による再現手法として、実験に使用する新しい容器の開発および、実験中に撮影した画像を用いた画像解析の方法について述べるとともに、これらを用いた地盤の揺れの再現事例を紹介しました。本実験手法によりさまざまな地盤の地震時挙動に関する知見を蓄積することで、地震時の地盤の揺れに伴う構造物被害の評価法の開発や高度化に役立てたいと考えています。 **RRR**

文 献

- 1) 国生剛治, 岩楯敏広: 軟弱地盤の非線形震動特性についての模型振動実験と解析, 土木学会論文報告集, No.285, pp.57-67, 1979
- 2) 土井達也, 井澤淳, 伊吹竜一, 仙頭紀明, 阿部慶太, 飯島正敏: 薄い液状化層がトンネル, 盛土の地震応答に及ぼす影響(その1: せん断土槽の開発), 第60回地盤工学研究発表会, 22-11-5-05, 2025