地震時変形挙動に関する遠心場における高速撮影技術と画像解析技術

-盛土の動的挙動に関する遠心実験事例-

HIGH SPEED IMAGE CAPUTURING TECHNIQUE AND ITS ANALYSYS SYSTEM ON CENTRIFUGAL FIELD FOR SEISMIC DEFORMATION BEHAVIOR

-AN EXAMPLE OF CENTRIFUGE MODEL TEST ON DYNAMIC BEHAVIOR OF EMBANKMENT-

上村 健太郎*・スレン ソッキアン*・津田 雅丈**・伊吹 竜一***・土井 達也***・井澤 淳***・上野 勝利**** Kentaro UEMURA, Sokkheang SRENG, Masatake TSUDA, Ryuichi IBUKI, Tatsuya DOI, Jun IZAWA and Katsutoshi UENO

Dynamic centrifuge model test can be used to simulate the real phenomena of the related geotechnical structures and to verify practical design or numerical analysis. The cabled sensors are used to obtain experimental data of centrifuge test in general, however its large sensors head and cables may induce negative influence on accurate data acquisition. Image analysis has been developed as non-physical contact measurement technique on static centrifuge test. However, in dynamic centrifuge test, it is difficult to capture photos of minute deformation during shaking because of the occurrence of the relative displacement between shaking table and centrifuge platform. In this paper, a new high speed capturing technique in centrifugal force field is developed to capture minute deformation during shaking without any calibration. And then, embankment deformation during shaking was mesured by image analysis. From these results, it is possible to evaluate deformation of embankment during shaking.

Keywords : dynamic centrifuge model test, image analysis, high-speed capturing system

1. はじめに

遠心力模型実験は、小型の模型実験でありながら地盤の 地中応力を実際のレベルまで近づけた状態で、外力を受け た土構造物の変形量や構造物への影響を定量的に評価す ることができる実験方法である。これまでに様々な構造物に対 して遠心力模型実験が実施されてきた^{例えば1)}。遠心力模型 実験では、他の模型実験や実大実験と同様に計測機器を使 用してデータを取得することが一般的であるが、計測器の設 置にあたってはセンサーのケーブルや感圧部など模型の挙 動に影響する要因を最小化または排除することが望ましい。 従って、計測機器は小型・軽量であることが求められる。さら に、遠心実験模型に使用する一般的なセンサーはケーブル を有するという制約上、模型に配置するセンサーの設置密度 には限界がある。 一方で、遠心場において模型の全体変形を実験的に観 察・評価するために高解像度の画像と標点を組み合わせた 変形計測技術や画像解析技術が発達してきた。これらの技 術はすでに補強土^{例えば2),3)}、地盤改良^{例えば4)}、基礎^{例えば5)}な どの様々な構造物の変形挙動の検討に用いられており、非 接触で全体変形を定量化できる。しかしながら、そのいずれも 変形速度の小さい静的な実験における連続写真や加力前後 の状態の写真を使用したものである。加振中の変形挙動を捉 えることは、動的現象における変形量照査の合理化や損傷 過程を考慮した土構造物の耐震性能評価方法⁶⁾の確立に役 立つが、計測機器による点的なデータからしか動的遠心力模 型実験における加振中の変形挙動は評価できなかった。

そこで、本論文では遠心場において高速撮影が可能な環 境を整備した上で、遠心加速度20G場での動的遠心力模型 実験を行った。この実験において高速撮影とその画像を用い た画像解析を行い、動的遠心力模型実験においても加振中 の模型の全体変形が評価可能であることを示した。その結果 から模型実験の計測システムを高度化できたことを示した。

 ^{*} コンサルティング事業統括本部 中央研究所 試験・実験センター
 ** コンサルティング事業統括本部 基盤技術事業本部

地盤環境事業部 *** 公益財団法人鉄道総合技術研究所

^{****} 徳島大学

2. 動的遠心力模型実験

(1) 実験装置

動的遠心力模型実験に使用した装置は、日本工営株式会 社の自社製である。装置は有効半径 2.6m のビーム型で、片 側のプラットフォームに模型を設置し、逆側のプラットフォーム に実験模型と釣り合うカウンターウェイトを搭載できるようになっ ている。(写真-1)。動的遠心力模型実験においては、遠心 場での加振を行い、その際の模型の観察・計測を実施した。

写真-2は振動台であり、遠心力場において正弦波、不規 則波(地震波)の出力が可能である。加振装置の性能を表-1 に示す。20G 場における加振性能は最大 1200gal、振幅 は±3.0mm である。周波数は 10Hz から 400Hz の出力まで 対応している。



写真-1 遠心力模型実験装置(自社製)



写真-2 振動台

表-1	加振装置性能
11 1	加派表世江能

項目	仕様
加振制御システム	電気油圧サーボ制御方式
加振大寸法	(L)700mm×(W)400mm
最大遠心力加速度	100G
最大加振加速度	25G (1/20 model 約 1200gal)
最大搭載模型重量	250kg
最大振幅	-3.0mm~+3.0mm
最大速度	40 cm/s
周波数	10~400Hz



図-1 実験モデル

表-2 各ケースの実験材料の物理特性

項目			-
盛土材料			江戸崎砂
土粒子の密度	$ ho_{ m s}$	(g/cm ³)	2.719
最大粒径	D_{\max}	(mm)	2.0
均等係数	$U_{ m c}$	(-)	7.18
細粒分含有率	$F_{ m c}$	(%)	13.1
最適含水比	Wopt	(%)	18.1
最大乾燥密度	$ ho_{ m dmax}$	(g/cm ³)	1.674



(2) 実験ケース

実験モデルは空石積擁壁で補強された盛土である(図-1)。盛土には江戸崎砂を使用した。実験に使用した江戸崎砂の物性を表-2に示す。

設置するセンサーは図-1 に示す通り、盛土内に加速度 計、石積表面ならびに地表面にレーザー変位計を設置した。 各種センサーから得た加振中の計測結果と高速撮影画像の 画像解析結果を比較・考察した。

(3) 模型地盤の作成方法

本実験は 20G 場で実施した。使用した土槽の寸法は幅 1000mm×高さ 490mm×奥行き 200mm であり、実験モデル (1/20)は図-1 に示した通りである。実験モデルにおいて、 盛土の基盤はセメントを混合した砂を締固めることによって堅 固な地盤とした。背面盛土は、高さ 200mm、法面勾配 1:0.5、江戸崎砂を D_c =85%で8層に分けて締固めることで作 製した。盛土構築後、のり面の形状を整え、整えた法面にブ ロックを積み上げることによって石積擁壁の模型を作製した。 模型ブロックは表 $3 \text{cm} \times 2 \text{cm}$ 、裏 $1 \text{cm} \times 1 \text{cm}$ の四角錐台とし、 モルタルで作製した。

(4)入力波

動的遠心力模型実験で入力した加振波を図-2 に示す。 なお、図の加振波は実大換算した値の時系列として示したも のであり、波数 20 波・3.0Hz(遠心場では 20 波・60Hz)の正 弦波である。加速度振幅は実大換算で 500gal とした。



写真-3 高速カメラのセットアップ

項目	仕様
映像出力	USB3.0
シャッタータイプ	グローバルシャッター
フレームレート	最大 121fps
解像度	320 万画素
有効画素数(H×V)	2048×1536
カメラ重量	90g
カメラサイズ	44mm×29mm×57.5mm
動作温度	0~50°C

表-3 高速度カメラの性能

(5) 高速画像撮影方法

動的遠心力模型実験での画像撮影は、プラットフォーム上 に固定された剛で安定した架台などに撮影機器を取り付けて 行うことが一般的である。これは加振時に振動台上で生じる 加速度に高速度カメラが耐えられないことや設置スペースの 問題から取り付けそのものが困難であるためである。そのた め、振動台(可動部)とカメラ設置場所(非可動部)の相対変 位を無視できず、加振中の模型地盤の動きを精緻に捉えるこ とは困難であった。また、高速度カメラでの撮影に要求される 性能を有するPCを遠心場で作動させることが容易ではない。 このような理由から、これまで遠心場における精緻な高速撮影 は困難であった。

そこで、本実験では自社製の遠心装置の一部を改修し、 高性能 CPU を搭載した PC や高速度カメラの設置スペース を新たに確保した。振動台上への高速度カメラの設置は写真 -3 のように行った。使用したカメラの詳細なスペックを表-3 に示す。実験時の撮影速度は 120fps と設定した。遠心場で は 60Hz、20 波の正弦波を入力するため、入力波の 1 周期 あたりに 2 枚の画像撮影が可能である。このカメラに焦点距離 の短い興和オプトロニクス株式会社製のレンズ (LM3NCM-WP)を装着した。なお、実際の撮影時にはレンズと土槽前面 の距離は 19.0cm である。



(6) 画像解析手法

動的遠心力模型実験中に連続撮影した画像を使用して画 像解析を行った。画像解析手法は、テンプレートマッチングを 使用した方法であり、一致度の判定には式(1)に示す相互相 関係数を用いている。図-3に示すように変形前・後の 2 枚 の画像から、それぞれ(X_0, Y_0)、(X_d '、 Y_d ')を中心とする大 きさ(2n+1)画素×(2n+1)画素の小画像(\mathcal{F} ンプレート)を切 り出す。それを 1 次元のベクトルデータ V₁、V₂に変換し、両 者の相互相関係数(R_{12})を以下の式により求める。

$$R_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{(2n+1)^2} v_{1i} \cdot v_{2i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{(2n+1)^2} v_{1i}^2 \cdot v_{2i}^2}}$$
(1)

ここで、V₁、V₂iは、ベクトル V₁、V₂のi番目要素である。変 形後の画像より取り出したテンプレートの中心座標(X_a'、 Y_a')を移動させ、R₁₂の最大点を探索し、変形前の画像座標 (X₀、Y₀)に対応する変形後の画像座標(X_d、Y_d)を決定す る。

画像解析ソフトに使用したプログラムは、徳島大学と日本 工営株式会社で共同開発した TN-SKIP(Surface Kinematometry by Image Processing)である。図-4 は 本報告で使用した画像解析ソフトの処理画面の一例である。



図-4 画像解析ソフトの表示画面の一例







図-6 変形図

図中には本解析で設定したメッシュも示しており、不動点を 有する連続画像上にメッシュを併記し、解析範囲を分かりや すく表記できる。なお、実際には盛土全体にメッシュを設定で きるが、本解析では発散を防ぐため盛土天端付近に解析メッ シュを設定しなかった。連続画像の1枚目に解析メッシュを設 定して解析実行することで、それ以降の模型の変形を解析で きる。さらに、解析結果についても、同ウィンドウで確認するこ とができる。

TN-SKIP には、他に以下に示すようなプリポスト機能が備 えられている。

- メッシュの自動生成機能、メッシュサイズの変更
- スケールの設定、実座標取得機能
- 模型内標点の追従機能
- 解析結果を CSV ファイルとして抽出

3. 実験結果

(1) 変形計測結果

レーザー変位計により計測した鉛直ならびに水平変位の 結果を図-5に示す。図-5(a)は天端の鉛直変位を示してお り、法肩部では天端中央よりも大きく沈下した。これは擁壁の はらみ出しとともに、擁壁背面に盛土が入り込むように変形す るためである。図-5(b)は擁壁の水平変位であり、擁壁中腹 においてはらみ出しが生じたことが示されている。一方で、法 肩部では盛土方向に傾くような変形が生じた。

(2) 変形図

加振による変形前後のスケッチを図-6 に示す。図中の破線は盛土の初期状態を示しており、青線はクラック、赤線は加振後の盛土の形状を示している。

石積擁壁前面は中腹部分がはらみ出し、頭頂部付近が盛 土側に傾斜するような全体変形を呈した。また、盛土の天端 では、擁壁に近いほど壁面のはらみ出しの影響で沈下量が 大きくなる傾向にあるが、盛土そのものの締固め度が小さいた めに変形が盛土全体に生じた。

(3) 連続画像の整理

高速で連続撮影した画像を図-7 に整理した。撮影画像 中には盛土の初期形状(赤破線)、石積擁壁の初期形状(黄 色破線)を示している。なお、図-7 の時系列は基盤の応答 加速度の時系列を示しており、画像撮影時の撮影速度から 逆算した撮影タイミングも付記した。

図から加振に伴って擁壁が変形していることを明確に確認 できる。盛土は沈下しながら擁壁を押し出すように変形してい る。石積擁壁については、中腹付近がはらみ出すように最も 大きく変形した。その一方、加振中の擁壁中腹付近のはらみ 出しによって、擁壁の天端付近は盛土側に後傾するような



図-7 連続画像の整理

変形となることが観察された。

次項で記述する画像解析では、図-7 に示したような画像 の一覧を用いて画像解析を実施した。



図-8 画像解析と実験結果の比較

(4) 画像解析結果

1) 解析結果の妥当性の検証

画像解析の妥当性を確認するために、同地点で水平変位 の実験結果と解析結果の値を比較し、図-8 に整理した。加 振に伴って盛土が変形し、法面が水平方向にはらみ出してい ることが確認できる。さらに、加振終了後の水平変位量も、画 像解析結果と実験結果でほぼ同程度の値となった。このこと から、画像解析結果は精度よく盛土の変形を追従できること が分かった。

2) コンター図

図-9 は、図-7 にて得られた連続画像に対して実施した 画像解析から得られた累積の合成変位と最大せん断ひずみ 分布図である。なお、結果はすべて実大換算した値で示す。



合成変位の分布図から加振の進行とともに擁壁を前面に 押し出すように変形している。盛土と石積擁壁の変形を比較 すると、盛土は沈下方向の変形が顕著になっているが、石積 擁壁はいずれも前面にはらみ出すように変形している。特に、 擁壁の中段付近での水平変位が最も大きい。

せん断ひずみの分布図から、盛土内部にせん断ひずみが 集中し、すべり線を形成していることが確認できる。さらに、せ ん断ひずみは盛土と石積の境界部にも集中している。これ は、擁壁の背面盛土の沈下量と比較して、石積擁壁に生じる 沈下が小さいことに起因したと推察される。

3) 鉛直、水平変位

画像解析結果から模型の各点の鉛直・水平変位を抽出した。図-10 は石積ならびに盛土の各節点における鉛直・水 平変位の結果をとりまとめたものである。背面盛土天端付近 の変形は鉛直方向が卓越した。一方で石積の変形は水平変 位が卓越し、石積各段の水平変位から擁壁の中段(5 段目) 付近の変形が最も大きくなった。

4) せん断ひずみ

画像解析結果から模型のすべり線上(要素番号 129)、石 積と盛土の境界部(要素番号 139)、すべり線直下(要素番 号 163)、盛土底部(要素番号 248)におけるせん断ひずみ の値を抽出した。図-11 は時間とせん断ひずみの関係であ り、図中には加振後時点の画像を使用した解析結果と抽出し た要素も示している。

図-11 よりすべり線上の要素(No.129)よりも、石積と盛土 の間の要素に生じるせん断ひずみの方が大きい。これは擁壁 と背面盛土における鉛直方向変位の挙動の違いによるもので ある。すべり線から離れるほどせん断ひずみは小さくなる傾向 にあるが、盛土底部においても 10%程度のせん断ひずみが 生じた。







図-11 盛土のせん断ひずみ(解析結果)

4. 結論

動的遠心力模型実験において遠心力場における高速撮 影とその撮影画像を用いた画像解析に関して以下にとりまと める。

• 耐 G 高速度カメラを振動台に搭載することで、加 振中の模型の挙動を観察することに成功した。撮影速 度は現在 120fps であるが、遠心載荷装置に搭載する CPU の高性能化によってさらなる高速撮影が可能で ある。

• 撮影した連続画像を使用して画像解析を実施した。画像解析結果は実験時に計測したレーザー変位計による変形と同程度であった。このことから、加振中の変形を画像解析によって定量的に計測できることが確認された。

• 画像解析結果から鉛直・水平変位・せん断ひずみ の定量値を抽出し、模型の変形について考察した。そ の結果、動的現象中の石積と盛土の挙動や盛土の各 部に生じるせん断ひずみの違いを評価した。

動的遠心力模型実験においてセンサーによる計測と画像 解析を組み合わせることによって、センサーによる点的なデー タを画像解析による面的なデータで補完することができた。こ れによって、加振を受けた土構造物の崩壊に至るまでのひず みの発生挙動や各部の変形量が評価可能となり、合理的な 耐震設計方法の検討や損傷過程を考慮した設計法の確立 に寄与できると考えられる。

今後は、撮影速度の高速化・画像の高解像度化によって、 より精緻な変形の捕捉に取り組む予定である。

参考文献

- 木村孟:遠心模型実験 1.講座を始めるに当たって、土と基礎、 Vol.35、No.11、pp. 357-358、1987.
- 2) 荒木裕行、石原雅規、梶取真一、佐々木哲也:補強土壁の動的遠 心模型実験を対象とした補強領域内におけるひずみの定量化と分 析、ジオシンセティック論文集、Vol.29、2014.

- 3) 井澤淳、斉藤智哉、伊藤秀行、上野誠、桑野二郎:ジオグリッドと改 良土を組み合わせた補強土壁の地震時挙動に関する研究、地盤 工学ジャーナル、vol.2、No.2、pp. 73-86、2007.
- 4) 篠崎晴彦、土田孝、一井康二、森川嘉之、高橋英紀、大林淳、木下 洸樹、平嶋裕、小林茂雄:遠心力模型実験による水硬性スラグコン パクションパイル工法の設計及びレベル 2 地震動における変形抑 制効果の検証、新日鉄住金技報、Vol.399、pp. 73-78、2014.
- 5) Yujian LIU、Sokkheang SRENG、望月秋利、上野勝利、坪井裕 也:重力場、遠心場における水平砂地盤上の支持力実験と変形挙 動計測、地盤工学ジャーナル、Vol.2、No.3、pp. 139-148、2007.
- 6) Ibuki R., Doi T, Izawa J., Uemura K., Sokkeheang S.:High speed observation on damage process of embankments during earthquakes in a centrifugal acceleration field, 10th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, pp. 912-915, 2022.
- 7) スレンソッキアン、上野勝利、望月秋利他:隣接基礎による砂地盤の 変形と支持力、土木学会応用力学論文集、Vol.7、pp. 65-74、 2004.