

動的な地盤の変形・破壊挙動を捉える実験技術

構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
主任研究員 渡辺健治

1. はじめに

鉄道総研ではこれまでに高速度カメラを用いた画像解析システムを土構造物に関する模型振動実験に適用してきた。これにより、例えば地震時に盛土内に発生するすべり面の発生過程や、液状化による地中構造物の浮上がり挙動の詳細検討が可能となり、得られた知見は最新の設計標準に反映されている。今回の発表では、解析精度向上のために実施したシステム改修を紹介し、大型斜面模型の振動実験における画像解析システムの適用事例、得られた知見を示す。

2. 画像解析システムの概要および有効性

(1) 画像解析システムの適用事例

模型実験における画像解析の有効性を示す事例を図1に示す。この模型実験は鉄道総研が所有する中型振動台（土槽幅：2050 mm，高さ 1000 mm，幅 600 mm）で実施したものであり、**図1左図**は土留め構造物（重力式擁壁）の模型を用いて実施した振動実験の事例¹⁾である。この実験では、擁壁模型の地震時挙動、擁壁模型に作用する地震時土圧、背面盛土に発生するすべり面の生成過程に着目したものであった。高速度カメラを用いた画像解析システムにより、模型内の黒色の標点の変位を自動追尾することにより、加振中のすべり面の発生過程を追跡することが可能となった。また、別途設置した加速度計、変位計、土圧計の計測結果と画像解析結果を比較することにより、加振中の擁壁と背面盛土間の動的相互作用を多角的に評価することが可能となった。

また、**図1右図**は液状化地盤中の地中構造物の浮き上がり挙動に着目した模型実験である¹⁾。この実験においても構造物の浮き上がりに伴う周辺地盤の変形挙動を画像解析によって測定し、別途設置した水圧計、荷重計の計測値と比較した。これにより構造物の浮き上がり挙動に及ぼす影響因子が明らかとなった。上記2例の実験で得られた知見は最新の耐震標準²⁾に反映された。

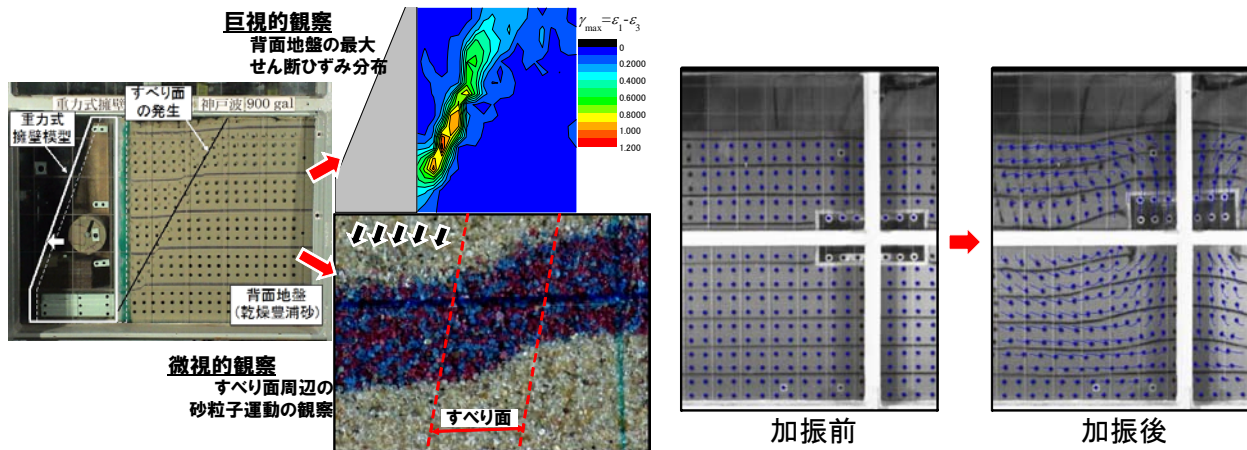


図1 振動台模型実験への画像解析システムの適用事例（左図：擁壁模型，右図：液状化実験）

(2) 画像解析システムの性能, 精度

画像解析システムの性能・精度は、カメラの解像度、撮影速度、連続撮影時間によって評価される。このうち解像度と撮影速度は高速度カメラ自体の性能であり、連続撮影時間はカメラあるいはパソコンのRAM容量で決定される。また、実験の撮影条件（明るさ）、標点の大きさ、標点を自動追尾するソフト（プログラム）の性能によっても画像解析の性能は変化する。

図1で適用した画像解析システムは解像度が約11.5万画素（480×240）、サンプリング周波数が200Hzである。模型の撮影範囲が1m×2m程度であるため1画素は約4mmに相当する。別途行った検定により、本システムは0.8mm（0.2画素）程度の精度を有することが確認されている。この精度は汎用型の変位計より劣るが、①模型の2次元変位を測定可能であること、②標点数の制限がないこと、③変位計のように設置するスペースが不要である、等のメリットを有する。

画像解析システムを導入して10年以上が経過するが、ほぼすべての振動実験において本システムが適用された。また、適用に際しては地盤内に設置する標点の形状・材質、最適な設置方法・間隔についての検討がなされ、実験の種類に応じた使い分けがなされるようになった。

(3) 新しい画像解析システムの導入

前節に示したシステムは主に撮影範囲が1m×2m程度の小型～中型模型に適用されてきたが、2008年に鉄道総研に大型振動試験装置が導入され、模型が大型化したことにより、撮影範囲が約2m×3m程度に拡大され、さらに加振時間の長い不規則波（実地震波）による加振を行うことが増えた。この場合、前節のシステムでは解像度、連続撮影時間が不足するため、新しいシステムを導入することになった。表1に新しい画像解析システムの主要諸元を示す。カメラの解像度は大幅に増加され、長時間の撮影が可能となった。

また、カメラA（2台所有）、B（1台所有）の3台の同時撮影が可能であり、模型の変形を多角的に撮影することが可能となった。

表1 新しく導入した画像解析システムの仕様

	カメラ A	カメラ B
画素数	406 万画素	131 万画素
周波数	最大 166Hz	最大 500Hz
連続撮影時間	最大約 80 秒	

3. 大型斜面模型の振動実験への画像解析システムの適用

(1) 大型斜面模型の振動実験について

著者らはこれまでに鉄道総研において小型（高さ1.1m）、中型（高さ約2~2.5m）の斜面模型の振動実験を系統的に実施し、画像解析により斜面内の弱層の角度、厚さ等がすべり面の発生やその後の崩壊パターンに及ぼす影響を検討している³⁾。本報告では、兵庫県耐震工学研究センターの実大三次元震動破壊実験施設（以下、Eディフェンス）において実施した大型斜面模型（高さ3.8m）の振動実験⁴⁾への新システムの適用事例、および画像解析精度向上のための実施した対策を紹介する。

(2) 画像解析の精度向上のための方策

① 建屋全体の振動への対処

Eディフェンスでは加振に伴い建屋全体が振動するため、通常の三脚ではカメラが振動し、解析精度が低下する。その影響を低減するために2m×2m×2mのコンクリートブロック（約18トン）および除振装置によりカメラ設置用の除振台を構築した（図2）。除振装置はバネとダンパー（粘弾性体）によって構築されており、水平動・鉛直動の両方に対しパッシブに除振できる。この除振台により加振時の実験棟床面の振動（±5gal程度）を±1gal程度に低減できた（図3）。

②撮影領域の広域化に伴う精度の低下への対処

模型が大型化し、撮影範囲が広域化すると当然ながら画像解析の精度が低下する。過去の中型模型の振動実験では±0.20画素程度（±0.3mm相当、撮影条件：1.5mm/画素、8.0EV）の精度が確保されていた。これまでの経験から、振動実験における画像解析の精度を確保するためには8.0EV程度以上の光量を模型全体にムラなく照射することが重要となることが分かっている。そのため、Eディフェンスでは、多くのメタルハライド灯を用い模型全体を明るくしたところ、±0.09画素程度（±0.3mm相当、撮影条件：3.46mm/画素、9.0EV）の精度、すなわち過去の中型模型と同等の精度を有することが確認された。なお、この撮影条件では、図4の黒線に示すようなノイズが発生するが、これはEディフェンスでは全て人工光を用いたため、2値化処理による標点の境界部分の認識がフリッカー（光源の60Hz変動）によって生じる輝度差により乱れるためであった。そのため、従来用いていた単色の標点だけではなく、図5中に示した十字に彩色した標点を用い、その中心座標を自動計測する手法を用いたところ、過去の中型模型実験以上の精度を確保できた（図4赤線、±0.05画素程度、±0.15mm相当）。なお、十字標点はすべり面の発生が予想される箇所に設置した。

なお、振動実験は2種類の斜面模型（Case21、Case22、図5）に対して実施した⁴⁾ため、2つの独立した除振台、画像解析システムを構築し、同期撮影を行った。

(3)画像解析により得られた知見

図6にCase22の最終試番（正弦波800gal 5Hz 10波）における振動台加速度、画像解析から算出したすべり土塊の移動距離、すべり面に沿った変位量の時刻歴を示す。図6(b)より、正弦波2波目前後から変位が顕著となり、その後は慣性力が崩壊方向に作用した時のみ進行的に変位したが、正弦波9~10波目から加振後においては自重により変位が増加する滑落モードに遷移したことが分かる。これは変位の増加に伴い、すべり面上で発揮

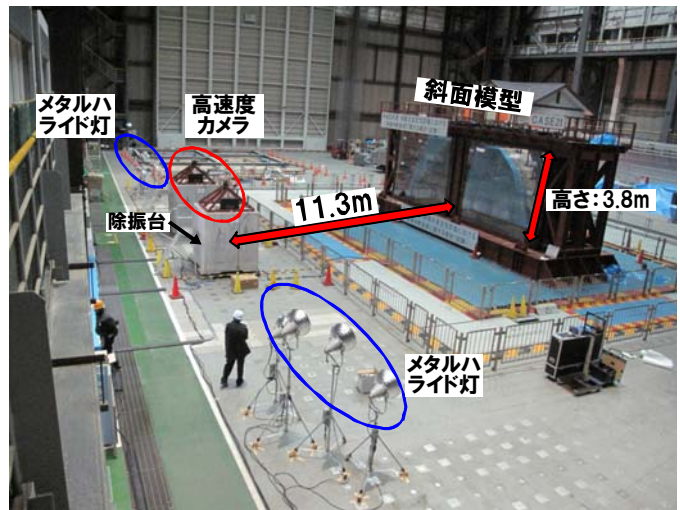


図2 除振台、照明、斜面模型の位置関係

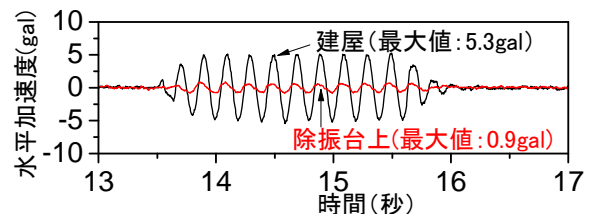


図3 除振台による振動低減の効果

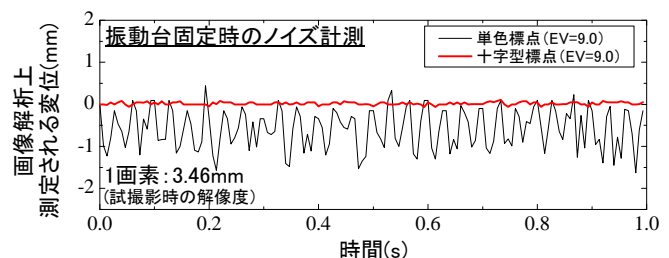


図4 画像解析システムの精度確認

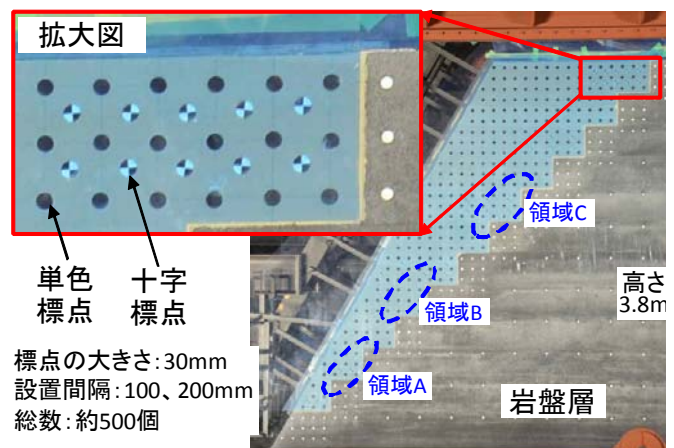


図5 画像解析用の標点設置の様子

されているせん断強度の低下（ひずみ軟化）およびすべり面の面積減少のためだと考えられる。また、図 6(c) より加振前において既に模型の中層（図 5 の領域 B, C）においてすべり面に沿って 2~4mm 程度の変位が発生しており、これが加振に伴い 5mm 程度を越えた段階で変位が急増したことが分かる。

図 7 に模型の最大せん断ひずみ分布を示す。まず斜面模型中腹付近のせん断ひずみと上層部分におけるテンションクラックが顕在化し、その後これがつながって 1 本のすべり面として形成したことが分かる。変位が急増する直前のすべり面に沿った最大せん断ひずみは平均的に 3~4% 程度であり（図 7 右図）、著者らが過去に実施した小型・中型の斜面模型実験と比較してひずみ量が多い。これは模型が大型化したため、①模型内部の拘束圧が増加し、ピーク強度発揮時のひずみ量が増加したこと、②模型各所に独立して発生し始めていたひずみが 1 本のすべり面としてつながるまでにより広い範囲でひずみが発生したこと、などに起因している。

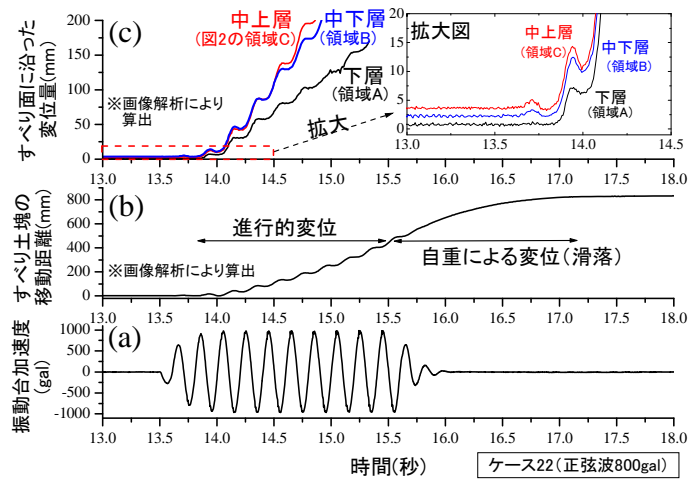


図 6 振動台加速度，土塊の変位量の時刻歴

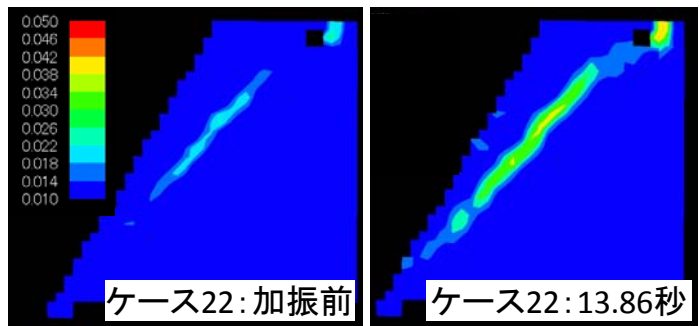


図 7 加振前，加振中の模型の最大せん断ひずみ分布

4. まとめ

本研究では模型実験における画像解析の有効性を示し、さらに大型斜面模型の振動実験における画像解析システムの適用事例、解析精度向上のための実施したシステム改修を紹介した。

現在、補強土工法を応用した防潮堤の耐津波性に関する模型実験を行っており、ここで紹介した画像解析システムを流体場に適用できるように検討を進めている。従来の荷重計、変位計等による計測に加えて、画像解析システムにより動的な地盤の変形・破壊挙動を捉えることで実挙動をより精緻に評価することが可能となり、今後更なる発展が望まれる。

なお、本報告で紹介した大型斜面模型の振動実験は、(独)原子力安全基盤機構の委託業務（平成23年度斜面の安定性評価における損傷判断基準に関する検討（試験））で実施した。

参考文献

- 1) 渡辺健治：高速度カメラを用いた画像解析システムによる模型地盤の破壊現象の可視化，地盤工学会誌，Vol.56，No.10，pp.24-25．2008
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），2012
- 3) 篠田昌弘，渡辺健治，阿部慶太，西村隆義，坂井公俊，村田雅明，中村英孝，中村晋：岩盤斜面の地震時安定性評価手法の構築に向けた試み，第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集，2010
- 4) 中島進，篠田昌弘，渡辺健治，阿部慶太，佐名川太亮，中村英孝，村田雅明，中村晋，河合正：E デイフェンスを用いた斜面の地震時安定性に関する振動実験，第 47 回地盤工学研究発表会，2012