

# 動的な変形・破壊挙動を捉える模型実験技術

Experimental Technique to Evaluate the Dynamic Deformation Characteristic of Ground

渡 辺 健 治 (わたなべ けんじ)

(公財)鉄道総合技術研究所 主任研究員

## 1. はじめに

地盤工学分野において、地盤の変形挙動の評価や現象解明をするために、模型実験あるいは数値解析が実施されることが多い。模型実験や数値解析にはいろいろな手法が存在するが、模型実験が有効となるのは、数値解析では表現しづらい現象の再現・解明を目的とする場合や、数値解析の検討を補間するために真値の測定を目的とする場合が多く、例えば以下に着目した実験が挙げられる。

- ① 地盤と構造物の動的相互作用（抗土圧，補強土，基礎構造物等）
- ② 斜面崩壊のような大変形挙動
- ③ 三次元的な形状の影響の大きい現象（例：各種対策工の効果検討）
- ④ 軟弱粘性土地盤の水平変位挙動（例：盛土施工による周辺地盤への影響）
- ⑤ 他分野との境界領域における地盤の挙動（例：津波越流による盛土の侵食現象）

模型実験を行う場合には、言うまでもなく、できるだけ現実に近い模型（実験供試体）を作成することが重要であるが、相似則の問題により対象とする地盤・地山・構造物を全て精緻にモデル化することは困難である。そのため、実験目的に合わせてモデル化の精度・方法を選択することが重要である。

一般的に、盛土や擁壁等の土構造物（人工構造物）のモデル化よりも、支持地盤や地山等の自然に存在する対象物のモデル化の方が難しい場合が多い。また、地盤や盛土内に杭基礎、矢板、地山補強材やジオテキスタイル等の「部材」を模擬した模型を設置する場合には、部材（模型）の諸元・材料の決定方法も重要である。通常は部材（実物）の強度、剛性、実地盤との相対剛性のいずれかに着目してモデル化するが、このモデル化により実験結果が大きく異なるため、十分な配慮が必要である。

また、荷重や変形の計測も重要であり、応力場と変位場の両方をバランス良く計測し、それらを相互に比較することが重要である。

鉄道総研ではこれまでに多種多様な模型実験を行ってきたが、荷重計による応力場の計測結果と、高速度カメラを用いた画像解析システムによる変位場の計測結果を比較することにより、例えば液状化地盤中の地中構造物の浮き上がり挙動<sup>1)</sup>（図-1）や、土留め構造物（抗土圧擁壁，補強土擁壁）の地震時挙動を評価してきた<sup>2)</sup>。

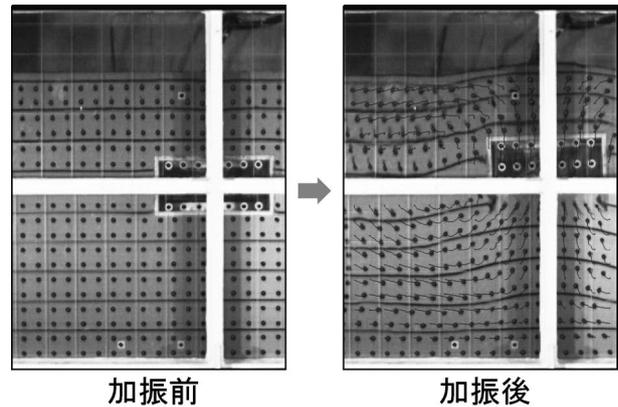


図-1 振動実験への画像解析システムの適用事例  
(液状化によるトンネル模型の浮き上がり)

表-1 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	

本報告では、最近行った実験事例として①大型斜面模型の振動実験，②剛体盛土模型の津波実験，を紹介し、画像解析システムの有効性及び得られた知見を示す。

## 2. 大型斜面模型の振動実験

### 2.1 実験概要

筆者らはこれまでに小型（高さ1.1 m）、中型（高さ約2~2.5 m）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。本報告で紹介する大型斜面模型の振動実験は、(独)防災科学技術研究所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）において実施されたものであり<sup>3)</sup>、加振中の斜面模型の変位を計測するために画像解析システムを適用した。表-1に示すように、従来のシステム<sup>1),2)</sup>と比較して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。

## 2.2 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。

建屋全体の振動による悪影響を低減するため2m×2m×2mのコンクリートブロック(18t)及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

E-ディフェンスでの大型斜面模型の実験では、模型のサイズ、加振時の振動台の変位振幅を勘案し、撮影領域を7032mm(左右)×5166mm(上下)とかなり広範囲に設定した。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。例えば、過去の中型模型(高さ約2~2.5m)の振動実験では撮影領域がE-ディフェンスの1/2程度であったが、±0.3mm程度の精度(撮影条件:1.5mm/画素, 8.0EV)を確保していた。

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できた。なお、この撮影条件では、図-4に示すようなノイズが発生するが、これはE-ディ

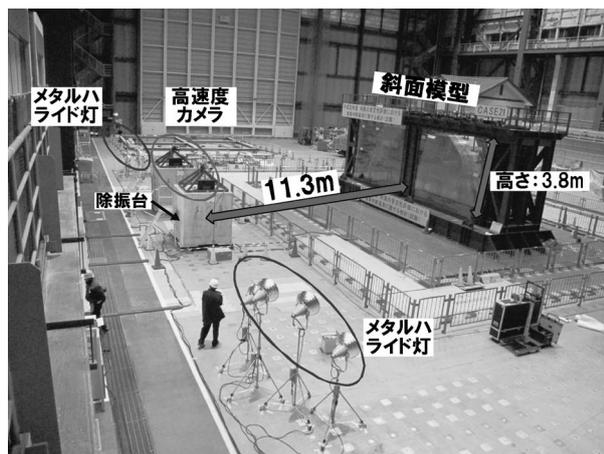


図-2 E-ディフェンスで実施した振動実験における除振台, 照明, 大型斜面模型の位置関係

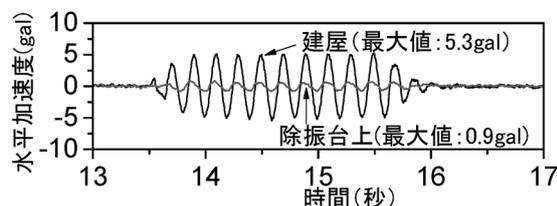


図-3 除振台による振動低減の効果

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, ±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)に対して同時に実施した<sup>3)</sup>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。

### 2.3 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

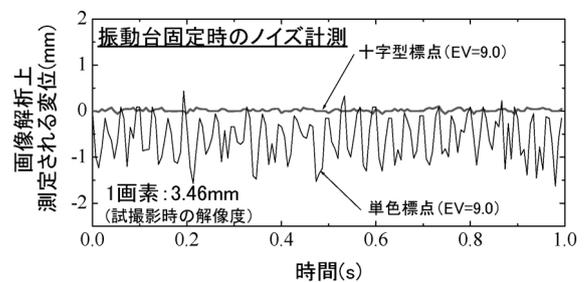


図-4 画像解析システムの精度確認

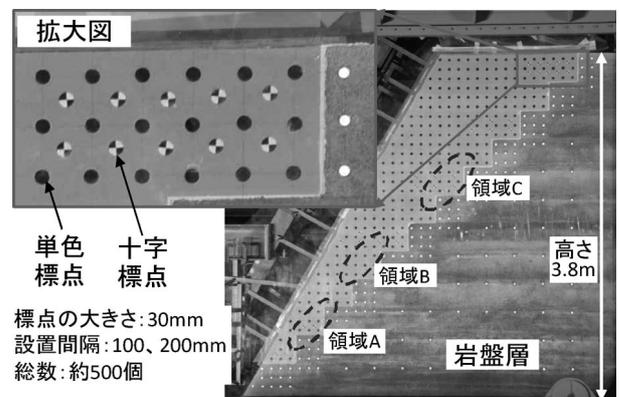


図-5 画像解析用の標点設置の様子

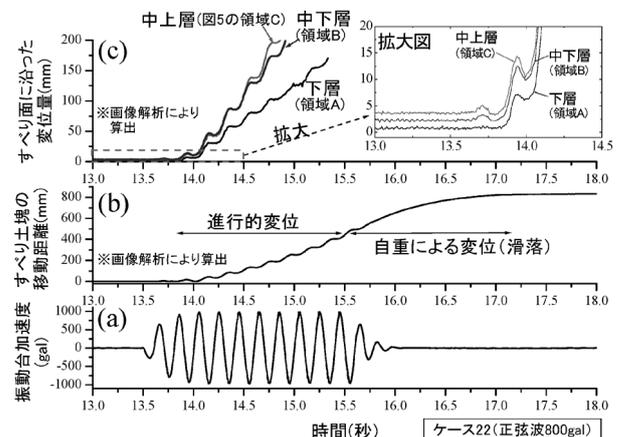


図-6 振動台加速度, 土塊の変位量の時刻歴

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、すべり面上で発揮されているせん断強度の低下(ひずみ軟化)及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模型の中層(図-5の領域B, C)においては、最終試番に至るまでの加振試番により、既にすべり面に沿って2~4 mm程度の変位が発生しており、これが加振に伴い5 mm程度を超えた段階で変位が急増したことが分かる。

図-7に加振中(13.86秒)の模型の最大せん断ひずみ分布を示す。この時刻は変位が急増する直前(図-6参照)であるが、既に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ていることが分かる。その後、これらがつながって1本のすべり面として形成された。また、この時の最大せん断ひずみは平均的に3~4%程度であり、これは過去に実施した小型・中型模型実験における破壊直前のひずみ量より大きい。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。

#### 4. 剛体盛土模型の津波実験

##### 4.1 実験概要

筆者らは、津波による鉄道盛土被害を軽減するために、津波に対して粘り強く抵抗する盛土構造の開発を行っている<sup>4)</sup>。その一環として、農村工学研究所が所有する造波水路実験施設(奥行き2 m, 水路延長: 約60 m)を使用し、勾配の異なる剛体盛土模型(高さ400 mm)に対する津波実験を行った。この実験により、盛土勾配、波高及び波形が異なる津波による作用力(衝撃波圧、揚圧力)及び盛土周辺の流速の関係について検討した。

##### 4.2 計測器

実験では、津波により盛土模型が受ける作用力(衝撃波圧、揚圧力)を把握するために、直応力とせん断応力が同時に計測可能な2方向ロードセル及び市販の水圧計を使用した(図-8)。2方向ロードセルは、法面壁面部に内蔵可能な構造としており、各計測器に取り付けた受圧板(50 mm×50 mm)に作用した水圧の計測を行った。

一方、盛土模型周辺の流速分布を測定するために、水槽正面に高速度カメラ(表-1, カメラA)を設置した。水中にはトレーサーとしてイオン交換樹脂(形状: 球形, 直径: 0.25 mm, 比重: 1.01)を混入させ、PIVによる流速分布を測定した(図-9, カラー図は口絵写真-1 (

図-7 加振中の模型の最大せん断ひずみ分布(13.86秒)

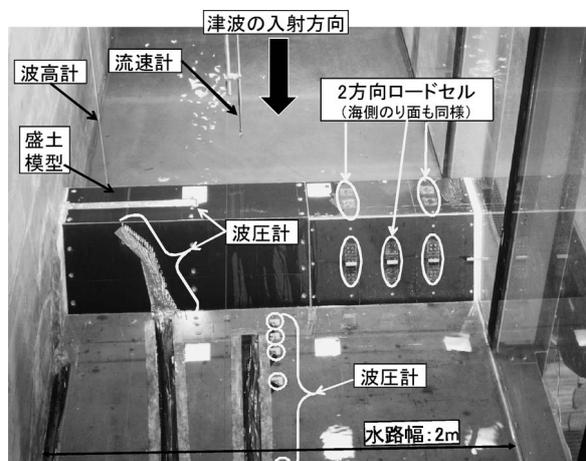


図-8 津波実験における計測器の配置状況

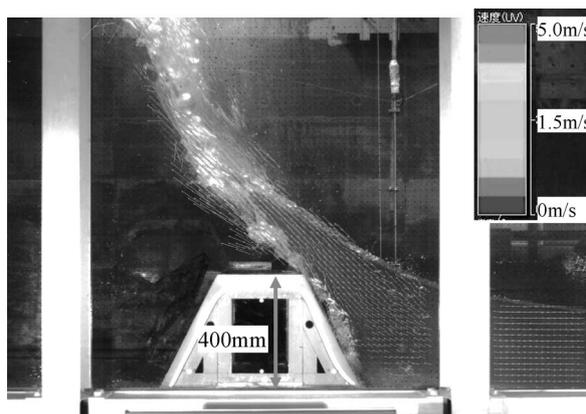


図-9 画像解析による流速分布測定結果例

51&Itemid=72))。なお、撮影時のレンズ絞り値は3.5~4.0, 露光時間2 000 μsec, 照明としてフリッカーノイズのないLEDライトを用いた。以上の計測システムにより、津波による波圧(応力場)及び盛土周辺の流速分布(速度場)の同時計測が可能となった。

##### 4.3 津波実験により得られた知見

津波が盛土模型に到達する時点で碎波しない場合において、盛土法面(海側)に作用する衝撃波圧(直応力)

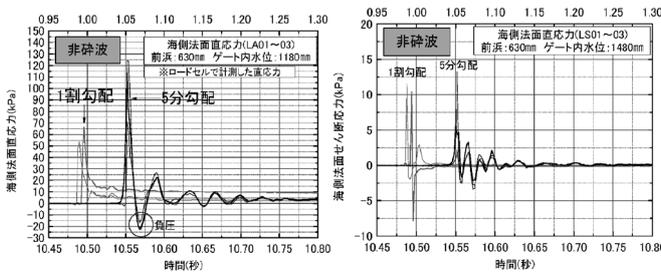


図-10 海側法面に作用する衝撃波圧  
(左図：直応力，右図：せん断応力)

は最大で静水圧の10倍程度に達し、法面表面に凹凸がない場合でも法面の上方に向かって直応力の1/8程度のせん断応力が作用したことが確認された(図-10)。更に、法面勾配が急勾配(1:0.5)である場合には衝撃波圧は増加し、静水圧の25倍程度に達することが確認された。しかしながら、この衝撃波圧の作用時間は非常に短く(0.01秒程度、図-10参照)、その後の定常越流状態においては静水圧レベルの水圧しか作用していないことが確認された。また、津波が盛土模型に到達する前に砕波する場合にはこのような大きな衝撃波圧が作用せず、津波到達時～定常越流時に渡って静水圧レベルの水圧しか作用しなかった。

定常越流時においては、盛土法肩(陸側)に-3 kPa程度の揚圧力(負圧)が作用し、画像解析によって算出した盛土周辺の流速分布との比較により、この揚圧力が流速に応じて増減することが分かった(図-11, 図-12)。

ここに示した実験は剛体盛土模型に対する作用力を評価する実験であり、津波到達後の長時間の越流現象を再現していない。そのため、現在は地盤材料で作成した盛土模型を用い、長時間の越流に対する盛土の抵抗特性に着目した模型実験を行っている<sup>5)</sup>。

#### 4. まとめ

本稿では、模型実験の目的及び計測の重要性を概括し、大型斜面模型の振動実験及び剛体盛土模型の津波実験における画像解析システムの適用事例、得られた知見を紹介した。

従来の荷重計や変位計等による計測に加えて、画像解析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る。更に、今後の技術の進歩により、カメラの高精度化・小型化や長時間撮影が可能となり、更なる計測精度向上が期待できる。

筆者のこれまでの経験では、模型実験に適用する画像解析の精度向上のためには、カメラの解像度だけでなく、撮影技術(レンズの品質、照明の明るさ、フリッカーノイズの有無、ムラなく照明を当てる技術)等のアナログ的な技術も非常に重要である。また、振動実験のように、動的な現象を撮影する場合において、データの一時保存用のRAMあるいは高速度カメラとPC間のデータ転送速度が撮影容量のボトルネックになる場合には、解像度よりも撮影速度(サンプリング周波数)を優先した方が

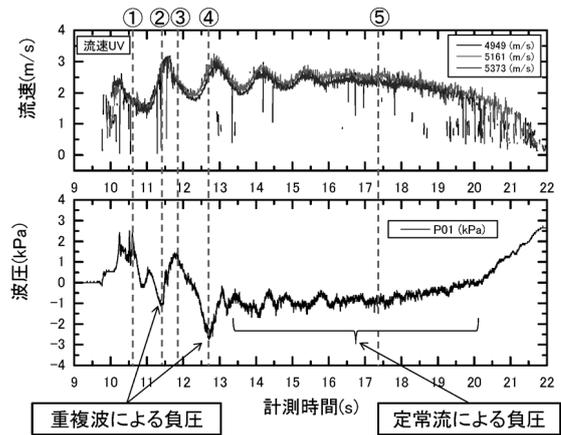


図-11 陸側法肩周辺の流速と法肩部に作用する波圧(揚圧力)の時刻歴<sup>4)</sup>

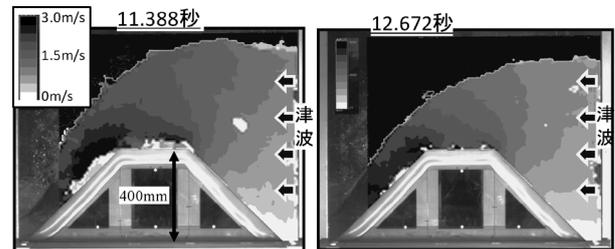


図-12 越流時の盛土周辺の流速分布<sup>4)</sup>  
(左図：図-11中②の時刻，右図：図-11中④の時刻)

解析精度が高まる場合が多い。これらを考慮すると、今後はフリッカーノイズのない安価な大型LEDライト、大容量RAMをカメラ上に直接搭載可能な高速度カメラの普及が待たれる。このような技術を応用することにより、模型実験の更なる高精度化・発展が実現できる。

なお、本報告で紹介した大型斜面模型の振動実験は、(株)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・澤田 亮・古関潤一：液状化による開削トンネルの浮上り量の簡易評価法，第56回地盤工学シンポジウム，Vol. 56, pp. 23~28, 2011.
- 2) Watanabe, K., Koseki, J. & Tateyama, M.: Seismic earth pressure exerted on retaining wall under large seismic load, Soils and Foundations, Vol. 51, No. 3, pp. 379-394, 2011.
- 3) 中村英孝・篠田昌弘・河合 正・中村 晋：E-Defenseで実施した大型斜面模型の振動台実験，地盤工学会誌，Vol. 60, No. 3, pp. 28~29, 2012.
- 4) 野中隆博・渡辺健治・松浦光佑・工藤敦弘・毛利栄征・松島健一・田村幸彦・飯島正敏：津波により盛土のり面周辺に作用する揚圧力の評価，第49回地盤工学会研究発表会，2014.
- 5) 渡辺健治・藤井公博・松浦光佑・野中隆博・工藤敦弘・飯島正敏・山口晋平・青柳悠大・古川大祐・川邊翔平・菊池喜昭：長時間の津波越流に対する補強土構造物の抵抗性に関する実験的研究，地盤工学会特別シンポジウム発表論文集，2014.

(原稿受理 2014.6.9)