

地盤や盛土高さの違いが盛土の変形形態に及ぼす影響 — 動的遠心力模型実験の観察とその解釈 — Effect of ground material and height of embankment on deformation mode of embankment

大木基裕¹，関雅樹²，永尾拓洋³，酒井崇之⁴，中野正樹⁴

- 1 東海旅客鉄道・総合技術本部技術開発部・motohiro.ohki@jr-central.co.jp
2 東海旅客鉄道・総合技術本部
3 東海旅客鉄道・建設工事事務部
4 名古屋大学・大学院工学研究科社会基盤工学専攻

概 要

東海道新幹線は開業以来、安全対策を堅実に進め今日の姿がある。特に沿線の約44%を占める盛土区間のうち、地震時に支持地盤から変形し、長期間の列車が不通になると考えられる軟弱地盤上の盛土に対し、シートパイル締め切り工による補強を施工し、現在概ね完了する段階にある。しかし、中越地震での列車脱線の事象を踏まえ、連続する異種構造物間の均衡ある耐震性の向上が必要となり、盛土区間についても、地震時変形レベルを考慮し、列車の走行安全性を確保するための新たな対策を行うこととした。一方、地震時における盛土の変形形状はいくつかに分類されることがこれまでの実験検証において解明され、その違いに及ぼす具体的な条件について示されている。本稿では、走行安全性の確保を目的とした脱線・逸脱防止対策の補強対象とする盛土（地震時変形レベル3）について、地盤の物性、盛土の高さが異なる動的遠心力模型の実験結果の観察と再現解析により、変形機構を解釈することを試みる。

キーワード：鉄道盛土，変形レベル3，動的遠心力模型実験，地震応答解析，有限要素法

1. はじめに

東海道新幹線の盛土のうち地震時に支持地盤から破壊が生じると予測される盛土には、シートパイル締め切り工を実施し、概ね完了する段階にある¹⁾。しかし、平成16年の新潟県中越地震では、構造物に大きな損傷がない中で列車脱線の事象が生じた²⁾。これを踏まえ、東海道新幹線における脱線・逸脱防止対策の実用化について検討し、脱線防止ガードを主とする新たな軌道対策と併せ、土構造物では地震中あるいは地震後にも脱線防止ガードが有効に機能するように、盛土天端における不等沈下を防止する耐震補強を行うこととした³⁾。

従って、今回対象とする盛土の地震時における変形レベルは、従来の対策対象の盛土に比較し小さくなる。このような盛土の変形挙動を把握するため、動的遠心力模型による実験的検証を行い⁴⁾、盛土の破壊形態の分類と、その違いに及ぼす具体的な条件について示されている⁵⁾。本稿では地震時における盛土の応答を解明するため模型実験の観察を行い解析検討と併せ、変形挙動の解釈を試みるものである。

2. 盛土の破壊形態とその条件

鉄道盛土の耐震性能として、被害程度に基づく表1のような地震時の変形レベルが照査指標となり、その目安として盛土天端の沈下量が示された⁶⁾。

表1 盛土の変形レベルと沈下量の目安

変形レベル	被害程度	沈下量の目安
1	無被害	無被害
2	軽微な被害	沈下量20cm未満
3	応急処置で復旧が可能な被害	沈下量20cm以上～50cm未満
4	復旧に長時間を有する被害	沈下量50cm以上

また、地震時における盛土の2つの破壊形態、すなわち円弧すべりと液状化の例について考えてみると、盛土天端における沈下量は図1のように地盤の沈下量と盛土の変形量に大別できる。円弧すべり⁷⁾（図1左）の場合は3つの成分（Ss：盛土の滑動沈下，Se：盛土本体の揺すり込み沈下，Sg：地盤の揺すり込み沈下），液状化（図1右）の場合も3つの成分⁸⁾（盛土のストレッチング S1，液状化地盤の側方流動 S2，液状化地盤の体積圧縮 S3）の和が盛土天端の沈下量として各々表される。

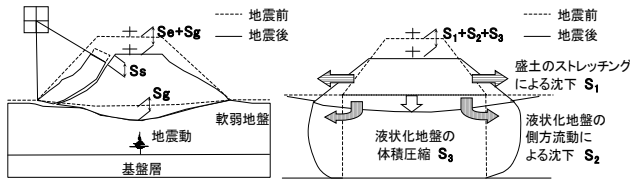


図1 盛土の沈下成分 左：円弧 右：液化化

例えば地盤の強度が弱くなるほど、地盤の沈下成分が増加し、盛土天端の変形量に占める割合は相対的に大きくなるといえる。このように、破壊形態とその沈下成分を相関させることにより破壊機構を解明することは、有効な対策工法の選定に大きく寄与すると考えられる。

一方、盛土の破壊形態とその対策工に関し、図2に示すように、関らば破壊形態を5種に分類し、破壊形態に即した効果的な対策工の相関性について整理した。ここで図中には、模型実験において破壊形態が再現された際のN値や盛土高さを示している。また○の数字は無補強時の変形レベルを示す(表1を参照)。本稿では走行安全性の確保を目的とした脱線・逸脱防止対策の補強対象とする盛土(地震時変形レベル3、図2の□)についての、模型実験結果および解析結果について考察する。

分類	対策目的 破壊形態	長期不通防止		走行安全性 脱線・逸脱防止対策
		想定東海地震対策	全線追加(L2地震)対策	
A	軟弱粘性土地盤 地盤を含む円弧滑りによる沈下	シートパイル(支持層)+タイロッド ・N≦4	シートパイル(支持層)+タイロッド ・N≦4	対象外
B	液化地盤 地盤の液化による沈下	シートパイル(支持層)+タイロッド ・液化地盤	シートパイル(GL-3m)+タイロッド ・液化地盤	対象外
C	やや軟弱な砂質地盤 盛土の円弧滑りによる沈下	地山補強土工 ・N≦15 かつ 6m≦H ・9m≦H (普通地盤)	対象外	地山補強土工 ③ ・地山補強土工法 ・L2地震 N≦15 かつ 6m≦H ・想定東海地震 15≦N≦20 かつ 6m≦H
D	やや軟弱な粘性土地盤 盛土と地盤の境界の掘り込みによる沈下	シートパイル(GL-1m)+タイロッド または土留活用タイロッド ・4≦N≦5 かつ 3m≦H	対象外	地山補強土工 ③ ・地山補強土工法 ・L2地震 4≦N≦6 かつ 3m≦H ・想定東海地震 5≦N≦6 かつ 3m≦H
E	普通地盤 盛土の緩い沈下	対象外	対象外	② バラスト流出防止工 ・対策箇所を含む全盛土区間

図2 盛土の破壊形態と対策工の関係⁵⁾
(図中の○数字は無補強時の変形レベルを示す)

3. 模型実験による破壊形態の検証

3.1 模型実験の概要

盛土の破壊形態や盛土天端の沈下量を地盤条件、盛土高さ、地震動別に分析することおよび、補強効果を把握することを目的として、前述の項目をパラメータとした実験検証を行った。実験は大林組技術研究所(清瀬市)の動的遠心力模型試験機を用いた。模型(縮尺1/40)を図3に示す。

動的遠心力模型実験は、相似則に従い、実物の1/n縮尺模型をnG場で外力を作用させ、実物の応力条件を再現し

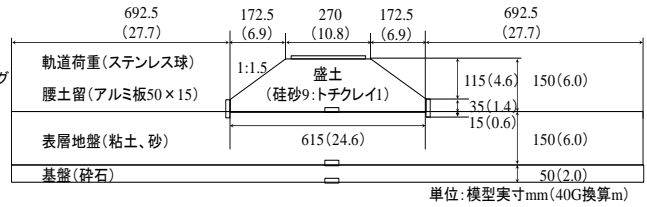


図3 動的遠心力模型概況(例：盛土6.0m土留あり)

地震時の破壊形態や沈下量を評価するものである。模型作製は以下のように行った。

支持地盤：支持地盤は、図2の分類C,Dを対象とする。すなわちやや軟弱な粘土地盤および、やや軟弱な砂質地盤で、粘性土(N値=6相当)砂質土(N値=15相当)を設定した。最下層に碎石層を設け、粘土地盤は液性限界の1.5倍の含水比のスラリーを投入後、設定したN値になるよう圧密を行った。砂質地盤の場合は所要の相対密度になるように空中撒き出しにより行った。支持地盤の厚さは6mと共通とした。

盛土：盛土の土質は土構造物標準⁷⁾の土質3に相当する。盛土は高さの異なる2種(6m, 9m)で、のり勾配は1:1.5、締固め度は90%に揃えた。天端はバラスト荷重相当の鋼球を敷設した。またのり尻に、腰土留めを設けずそのまま盛りこぼした形状と、図3のように腰土留めを設けた2種を設定した。

加振条件：40G場まで遠心载荷した後、想定東海地震動⁵⁾を相似則に従い調整した加速度波形を入力した。

試験ケースを表2に、入力地震動を図4に示す。なお、図4中の0.7sec, 1.25secは、図8に示すせん断ひずみ分布の時刻である。

表2 動的遠心力模型実験の試験ケース

Case	地盤	N値	盛土高さ	腰土留め
Case1	粘土	6相当	6m	なし
Case2	粘土	6相当	9m	なし
Case3	粘土	6相当	6m	あり
Case4	砂質	15相当	6m	あり

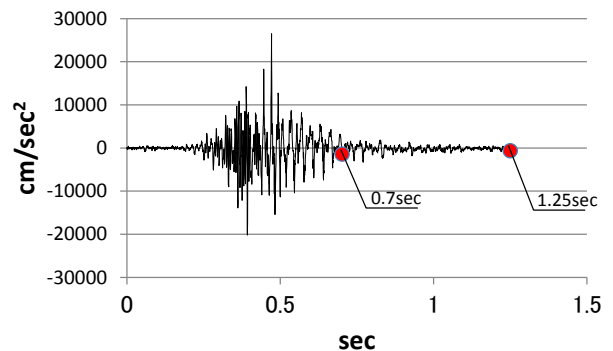


図4 入力地震動
(相似則調整波形(土層底部水平方向))

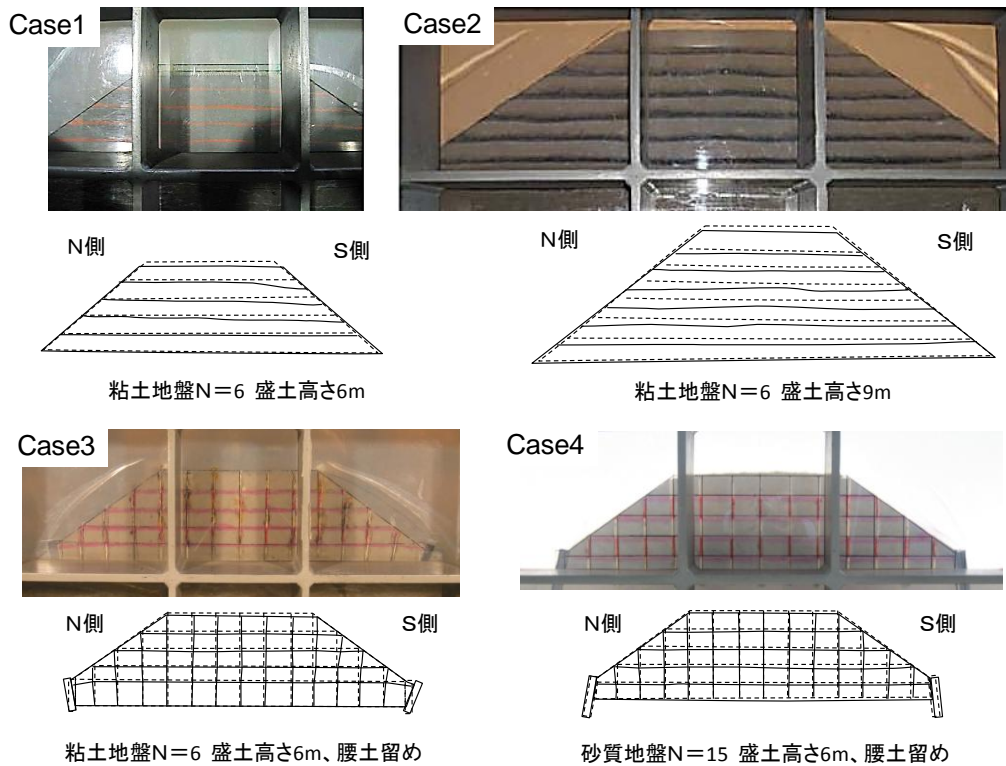


図 5 加振後の盛土の残留状況（動的遠心力模型実験）

3.2 実験結果

図 5 に Case1～Case4 の加振後の盛土の残留状況を示す。写真は模型断面を、メッシュは模型の盛土内部に予め敷設した色砂や、腰土留めの挙動を抽出したものである。各ケースとも地盤の変状が小さく、盛土底部の沈下量はさほど大きくはない。変形の主体が盛土であることがわかる。

Case1 と Case2 の比較（盛土高さの違い）では、Case1 では S 側ののり面やのり肩の変形が N 側よりも大きいのに対し、Case2 では、N 側 S 側ともにメッシュが同程度乱れている。これらの乱れをトレースすると、堤体内部ですべりが生じていることが推察され、その形状は直線的であるように見られる。

Case1 と Case3 の比較（腰土留めの有無）では、腰土留めを設置した Case3 では、Case1 で見られた堤体内部でのすべりの他に、腰土留めの転倒による変形が確認された。具体的には、腰土留めの背面が緩み、のり面が落ち込むように土留めに追従した結果、のり面表層部でのり尻からのり肩にかけてメッシュの乱れが生じている。

Case3 と Case4 の比較（支持地盤の物性の違い）では、粘土地盤である Case3 の腰土留めは転倒モードが卓越しているが、Case4 の腰土留めは滑動モードであり、水平変位は少ない。Case3 に比較し、のり面のメッシュの乱れも Case4 の方が軽微である。

図 6 に各 Case における天端沈下量、盛土圧縮量、地盤沈下量を示す。なお、天端沈下量は天端の中央における変位量の計測結果である。

いずれのケースも盛土の圧縮量が卓越している。Case1 と Case3 を比較すると、腰土留のある程度の盛土の変形を

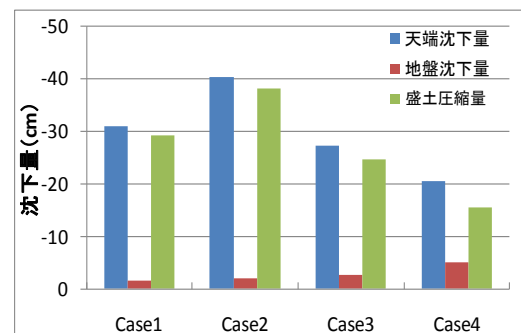


図 6 各成分の沈下量

抑制する効果があることが分かる。また、Case3 と Case4 を比較すると、盛土の変形量は抑制されている一方、地盤の沈下量は Case4 の方が多い。支持地盤が異なるため定性的ではあるが、盛土の変形が抑制されている分、地盤の沈下量が増加したものと考えられる。

4. 数値解析による模型実験結果の解釈

模型実験では、やや軟弱な粘土地盤と砂質地盤上の盛土の地震による応答において、①いずれの試験結果も盛土天端の沈下量は変形レベル 3 であること、②地盤の変形と比較して、盛土の変形の方が卓越していることを確認した。本章では、得られた盛土の地震時変形挙動を数値解析により表現する。解析には、土の構成式に骨格構造の働きを記述する SYS カムクレイモデル⁹⁾を搭載した、動的/静的水～土連成有限変形解析プログラム **GEOASIA** (All Soils All States All Round Geo-Analysis Integration)^{10),11)}を用いた。

4.1 解析条件

本稿では Case 1 と Case4 の実験結果を対象とする。すなわち、盛土高さは 6m で同じ材料、同じ寸法に対し、地盤は粘土地盤 (N 値=6 相当)、砂質地盤 (N 値=15 相当) の 2 種類である。また砂質地盤上の盛土は盛土法尻に腰土留めを設置しているが、今回の解析では省略している。

(1) 解析に用いた材料定数

表 3 に設定した材料定数を示す。地盤、盛土については、模型実験終了後に試料を採取し室内力学試験を実施している。粘土地盤、砂質地盤、基礎の砕石層のパラメータについては阪本ら¹²⁾が示したように、SYS カムクレイモデルで応答を再現することにより材料定数を決定した。盛土の材料定数については、模型実験における地震動を作用させる直前の状態 (初期状態) における土被り圧を考慮した密度に換算し、設定している。

表 3 盛土の材料定数

定数	盛土	地盤 (粘土)	地盤 (砂)	基礎 (砕石)
弾塑性パラメータ				
圧縮指数 λ	0.052	0.06	0.04	0.05
膨潤指数 κ	0.008	0.025	0.006	0.012
限界状態定数 M	1.15	1.10	1.25	1.00
NCL の切片 Γ	1.88	1.61	1.86	2.00
ポアソン比 ν	0.2	0.3	0.1	0.3
発展側パラメータ				
正規圧密土化指数 m	0.04	1.2	0.02	0.06
構造劣化指数 a	3.0	0.66	0.001	2.2
構造劣化指数 b	1.0	1.0	1.0	1.0
構造劣化指数 c_s	0.8	1.0	1.0	1.0
回転硬化指数 b_r	0.001	0.001	1.0	3.5
回転硬化限界定数 m_b	0.4	1.0	0.2	0.7

(2) 解析に用いた有限要素メッシュと境界条件

解析に用いた盛土-地盤連成モデルの有限要素メッシュと境界条件を図 7 に示す。遠心模型実験と同サイズ (縦 20cm×横 200cm) の全断面を解析領域とした。盛土、地盤ともに 2 次元の平面ひずみ条件で完全飽和とし、水~土 2 層系の弾塑性有限要素で表現した。

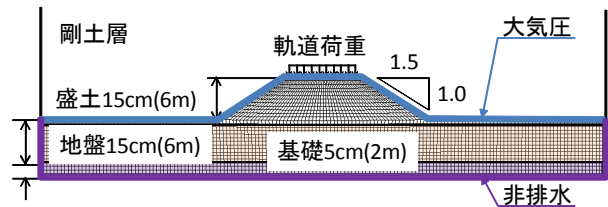


図 7 盛土-地盤連成モデル (解析メッシュ)

地盤と盛土の上面は、水圧を常にゼロ (大気圧条件) に保ち、地盤の側面と底面は非排水境界、盛土底面と地盤の境界は排水境界としている。本報告の解析では、重力加速度は常に 40G 場で固定とし、以下の手順で解析を行った。

- ①初期地盤である図-6 の地盤部分に対し、常に 40G 場の状態としている。
- ②40G 場の状態で、盛土に対応する有限要素メッシュ (図-6 の盛土部分) を、①の初期地盤上に 1 段ずつ (メッシュ 1 層ずつ) 盛土高さまで 12 段 (1.25cm×12 段で 15cm) 追加し、圧密沈下が収束するまで計算する。
- ③実験と同様、軌道荷重を分布荷重 (40G 換算で $q=147\text{kN/m}^2$) で盛土天端に載荷し、再び圧密沈下が収束するまで計算する。
- ④模型実験では、剛土層を用いているため、地震動は、地盤側面と底面の全有限要素節点に、図 4 に示すような加速度と時間を相似則に従い調整して、水平方向に入力した。

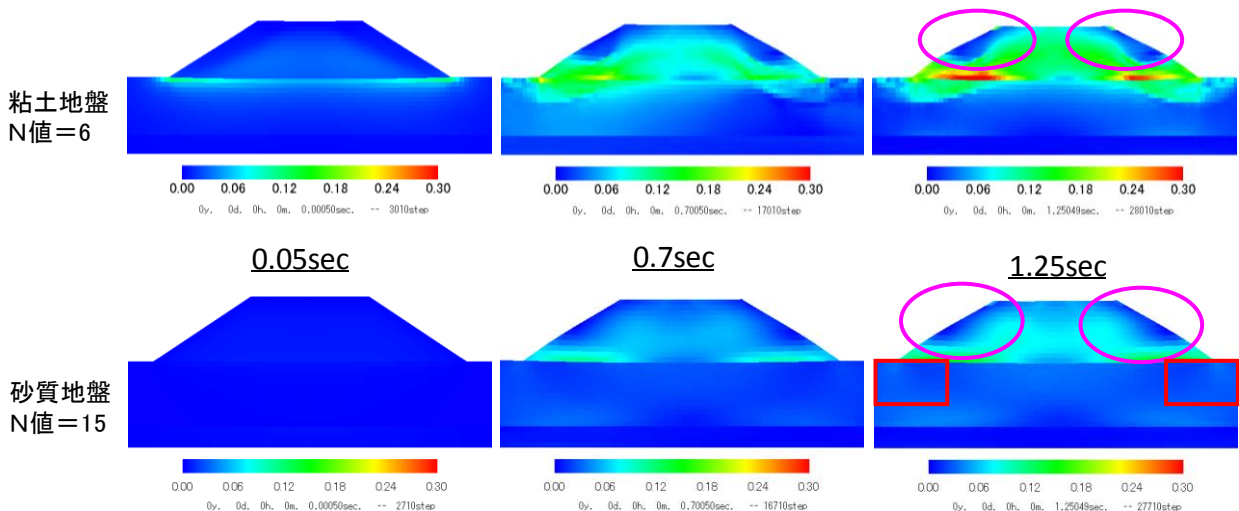


図 8 動的遠心力模型実験を再現した解析検討結果 (せん断ひずみ分布)

4.2 解析結果

図 8 は、図 4 の入力地震動に対し、時刻 0.05sec（原波形では 2sec 後、以下同様）0.7sec（28sec 後）および、1.25sec（50sec 後）時におけるせん断ひずみ分布を示している。ここで、時刻 0.05sec は加振初期に、0.7sec は、加振中せん断ひずみが特に卓越している時に、時刻 1.25sec では、加振終了時に対応する。上段が粘土地盤（N 値=6 相当、実験 Case1 に関連）、下段が砂質地盤（N 値=15 相当、粘土地盤を砂質地盤に置き換えたもの、Case4 の土留壁がないもの）である。

加振中の挙動（0.7sec）としては、粘土地盤の場合、盛土に対する円弧すべり状にせん断ひずみが卓越している。またその円弧すべり状の延長にある粘土地盤表層部分においても高いせん断ひずみが発生している。

砂質地盤の場合は、盛土底部におけるせん断ひずみが卓越し、粘土地盤ほど地盤内にせん断ひずみは高く発生していない。

加振終了直後（1.25sec）では、粘土地盤の場合、地盤内よりも盛土のり尻底部でせん断ひずみが卓越している。また、地盤においては、盛土のり尻方向へのひずみの進展に伴い、せん断変形により沈下が生じたと考えられる。一方、のり面では顕著なひずみが出ていないものの、のり肩部分のみせん断変形が大きくなっているが、破壊には至っていない。

砂質地盤の場合も同様の傾向が確認できるが、全般的に発現しているせん断ひずみ量は粘土地盤の場合に比較し少ない。地盤では、盛土が上載しているのり尻直下の地盤のせん断ひずみよりも、のり先の自由地盤におけるせん断ひずみが相対的に若干多い（図中□）。

また両者の、のり面のせん断ひずみ分布から、図中○で囲われた範囲は、盛土の他の部分に比較しせん断ひずみが小さいことから、のり面から深さ 2m 程度の範囲は土塊として挙動していると考えられる。これは、模型実験においてメッシュが変形した範囲と対応しており、定性的に実験結果を説明している。

実際の変形量の比較については、解析結果は実験結果よりも変形量が大きくなった。これは、模型実験における盛土は不飽和状態であるのに対し、解析では完全飽和条件を設定していることが要因の 1 つに挙げられる。ここでは、沈下成分の割合や変形量の割合について着目する。

図 9 に解析及び模型実験における、盛土天端の平均沈下量（左右のり肩と中央の平均）に対する、地盤沈下成分と盛土圧縮成分の比を百分率で示す。実験結果は、粘土地盤では Case1 を、砂質地盤では Case4 の結果を用いている。沈下成分の割合は実験と解析でよい一致を示している。

また、図 10 には左右のり肩の変形量の差（=拡幅）に対する左右の水平変位の割合を示す。左右の、のり肩の水平変位の割合も実験と解析でよい一致を示している。

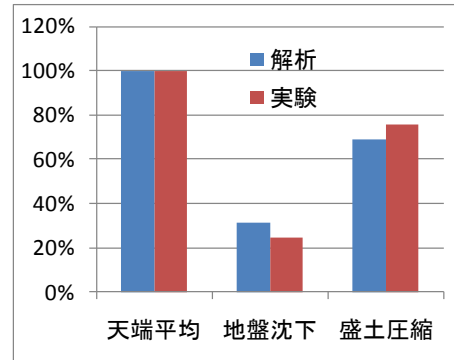
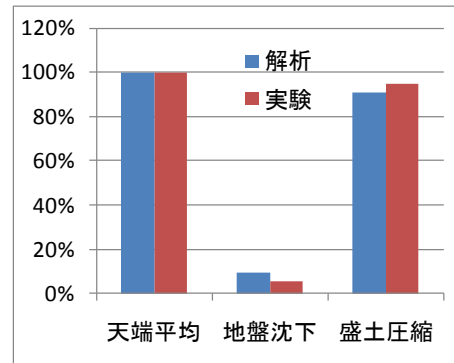


図 9 盛土天端の沈下に対する地盤と盛土の沈下成分の割合
上) 粘土地盤 (N=6 相当) 下) 砂質地盤 (N=15 相当)

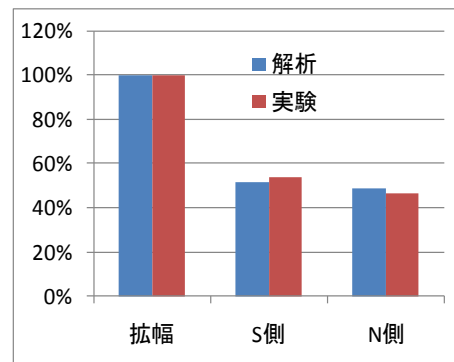
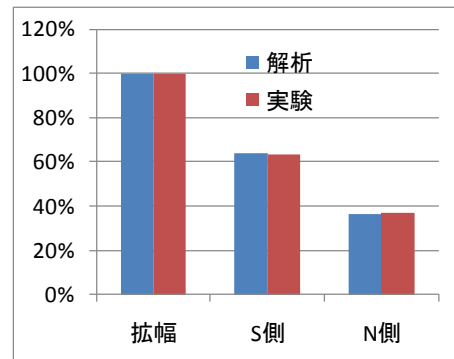


図 10 盛土天端の拡幅量に対する左右のり肩の水平変位の割合
上) 粘土地盤 (N=6 相当) 下) 砂質地盤 (N=15 相当)

5. まとめ

本稿では動的遠心力模型実験の加振後の残留状況を観察および、動的／静的水～土連成有限変形解析プログラム **GEOASIA** による、盛土 - 地盤系に発生するせん断ひずみ分布を比較した。

解析では盛土を完全飽和状態と設定していることから、変形量は大きくはなつたが、盛土や地盤の沈下量の割合、のり肩の水平変位の割合などから、変形挙動の傾向も概ね表現することができた。

模型実験の観察および解析で得られたのり面のせん断ひずみ分布から、盛土のり尻におけるせん断ひずみが高く発現している傾向が確認された。粘土地盤の場合は、のり尻下の地盤表層においてもせん断ひずみが発現しているのに対し、砂質地盤ではせん断ひずみの発現は小さい。

一方、盛土のせん断ひずみの分布から、のり面は深さ 2m 程度の範囲は他の盛土の部分と比較しせん断ひずみが小さいことから、土塊として挙動することが確認された。

これにより、盛土を主体とする補強の有用性が示唆されたといえる。

今後は、別途行っている今回とは異なる地振動の変形に対しても解析を行い、変形挙動を再現して、盛土材料の材料定数のさらなる検討を行うと伴に、腰土留めの効果や盛土を主体とする補強工法の数値シミュレーションも実施してゆくつもりである。

参 考 文 献

- 1) 関雅樹：東海道新幹線の技術開発－最近の地震対策の取組－、土木技術 Vol.65, No.2, pp. 2-6, 2010
- 2) 森村・関：新潟県中越地震後の東海道新幹線の地震対策について、第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 No.09-65, pp.545-548, 2009.
- 3) 荒鹿ら：軌道強化と土木構造物変位抑制による東海道新幹線の脱線逸脱防止対策、第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 No.09-65, pp.553-556, 2009.
- 4) 例えば大木ら：地震時における盛土の破壊形態と対策工の実験的検証、土構造物の地震時における性能設計と変形量予測に関するシンポジウム発表論文集, pp.241-246, 2007.
- 5) 関ら：地震時における盛土の破壊と対策の有効性に関する実験的検証、第21回中部シンポジウム論文集, No.12, 2009.
- 6) 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）、1999、丸善
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物）、2007、丸善
- 8) 黒瀬ら：液状化地盤上の盛土の変形特性に関する動的遠心力模型実験、第38回地盤工学研究発表会、2003
- 9) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K., Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002.
- 10) Asaoka, A. and Noda, T.: All soils all states all round geo-analysis integration, *International Workshop on Constitutive Modelling -Development, Implementation, Evaluation, and Application*, HongKong, China, pp.11-27, 2007.
- 11) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, vol.48, No.6, pp.771-790. 2008.
- 12) 阪本ら：地震時の不整形地盤・盛土の連成系の数値解析的検討、第21回中部シンポジウム論文集, No.13, 2009.