

地山補強材により耐震補強を行った盛土の のり面工の効果に着目した模型振動台実験

松丸 貴樹¹・中島 卓哉²・濱田 吉貞³・渥美 知宏⁴

¹正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38)

E-mail: matsumaru.takaki.35@rtri.or.jp (Corresponding Author)

²正会員 元鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (現西日本旅客鉄道株式会社 大阪工事事務所)

(〒553-0003 大阪市福島区福島七丁目 15-26 大阪 YM ビル 9 階)

E-mail: takuya-nakashima@westjr.co.jp

³正会員 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島五丁目 4-20)

E-mail: yoshisada-hamada@westjr.co.jp

⁴正会員 西日本旅客鉄道株式会社 近畿統括本部

(〒532-0003 大阪市淀川区宮原四丁目 3-39 新大阪 NK ビル 9 階)

E-mail: tomohiro-atsumi@westjr.co.jp

鉄道盛土の耐震補強が進められており、地山補強材による堤体の補強が実施されている。一方、降雨に対する浸透や侵食防止を目的としてののり面工が施工されるが、このうちのり面を被覆するものは盛土内を不飽和状態に保ち盛土全体の耐震性向上に寄与すること、のり面工と地山補強材を連結することによって補強効果がより発揮されることが期待されるが、これらの効果については十分には解明されていない。そこで、のり面工および地山補強材を有する盛土模型を構築し、降雨散水を行いながら振動台実験を実施した。その結果、のり面の被覆によって盛土内の広い範囲が不飽和状態を維持することで盛土の耐震性が向上すること、ならびにのり面工と地山補強材を連結することで加振時に発揮される張力が増加し、耐震性向上効果が得られることが確認された。

Key Words: embankment, rainfall infil

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、鉄道分野では新幹線や都市部をはじめとした主要線区において、橋りょうや高架橋に対する耐震補強が進められてきた。しかし、鉄道は「線」で機能するため、線区全体の耐震性が重要であり、土構造物についても一定の安全性が求められる。土構造物については橋りょうや高架橋に比べて積極的に進められていなかったが、近年になって耐震診断・耐震補強の重要性が認識されており、合理的な耐震補強に向けた検討が進められている¹⁾。

現在、既設盛土の耐震診断では、対象とする盛土において盛土材料を採取した上で、三軸圧縮試験等により粘着力や内部摩擦角を把握し、設計での安定・変形計算に活用している。三軸試験は飽和状態で実施されることがほとんどであり、盛土の耐震性を安全側に評価できるものの、例えば、円弧すべり法による安定解析やNewmark

法による変形解析を用いた場合には、すべり面の発生位置を不飽和状態である場合と比べて深く想定することになり、耐震補強の際には地山補強材の打設長が長くなる可能性や、打設間隔が密になる可能性がある²⁾。近年では室内土質試験技術が高度化されることにより不飽和状態での三軸圧縮試験が行われるようになり、その結果を活用することで補強設計を合理化できることが示されている^{3,4)}。このため、降雨時にも盛土内で不飽和状態が維持され、飽和状態と比べ不飽和状態である場合に盛土材料の強度増加が期待できる場合には、盛土の耐震性を適切に評価でき、合理的な耐震補強を行うことができるものと考えられる。しかしながら、実際に含水状態が変化した状態での盛土の地震時挙動の変化や、地山補強材を用いた耐震補強効果に対する影響は十分には解明されていない⁵⁾。

一方、新幹線盛土や、輸送密度の大きい幹線の在来線盛土の場合には、降雨に対する盛土の浸透や侵食防止と

して、各種のり面工が施工されることが多い。これらののり面工のうち、のり面を被覆することで降雨に対して遮水機能を持つものは、盛土内部を不飽和状態に保つことに寄与し、耐震性向上に資することが期待される。また、のり面工と地山補強材の頭部を連結することで、地山補強材を単独で打設したもの比べて1本あたりの補強材に発揮される張力が増加し、合理的な補強となることが期待される。前者の効果の解明を目的として、過去にも模型振動台実験が実施されているが、飽和度分布に応じて強度特性が変化しづらい盛土を対象としており、盛土内の含水状態と耐震性の相関については十分には明らかになっていない⁹⁾。また、既往の研究では、例えばのり面工の支圧面積の違いが盛土の耐震性に影響を及ぼすことが確認されている⁷⁾が、補強材とのり面工の接合効果については十分には解明されていない。

著者らはこれまでに、模型振動台実験によって張ブロックによるのり面工の被覆によって盛土内部の飽和度の上昇を抑制できることによる耐震性の向上や、地山補強材とのり面工の連結による補強材張力の増加することを確認している⁸⁾。本研究では、盛土の地震時挙動に及ぼすのり面工の影響について評価することを目的として、上述の実験に加えて地山補強材を設置した盛土模型を対象に、遮水シートによるのり面の被覆、および格子枠工と地山補強材の連結の効果に着目した実験を新たに実施し、耐震性に及ぼす影響の更なる考察を行った。

2. 実験条件

(1) 盛土模型に用いた材料

盛土模型には稲城砂を用いた。その物理特性は、土粒子の比重 $G_s=2.705$ 、50%粒径 $D_{50}=0.209\text{mm}$ 、均等係数 $U_c=2.99$ 、細粒分含有率 $F_c=9.7\%$ である。また、突固めによる締固め試験（A-c 法）を実施したところ、最大乾燥密度 $\rho_{d\max}=1.667\text{g/cm}^3$ 、最適含水比 $w_{\text{opt}}=17.4\%$ であった。締固め試験の結果をもとに、模型盛土構築時には締固め密度比が80%程度（ $\rho_{d\max}=1.33\text{g/cm}^3$ 程度）、含水比が13%程度となるようにした。盛土の密度は実際の鉄道や道路盛土と比べると、最大乾燥密度に対して小さめに設定しているが、これは砂質盛土を想定して粘着力を過度に高くしないこと、および実験における降雨散水を与えた際の浸透性を良くすること、ならびに加振実験で極端に大きくない加振加速度で盛土に変状を与えることを目的としたためである。

(2) 模型盛土と実験ケース

振動台実験では、実物の1/10スケールを想定した盛土模型を構築し、既往の2ケースの実験⁸⁾に加えて今回新

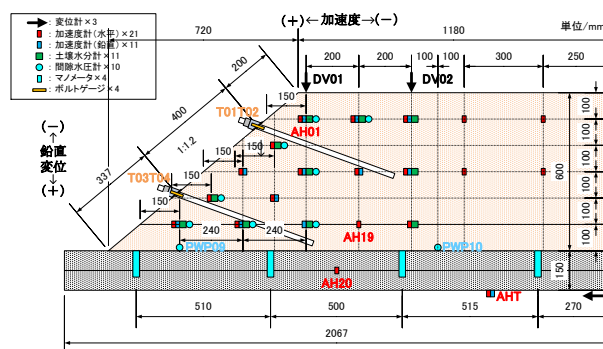


図-1 模型盛土の概要と計測機器配置

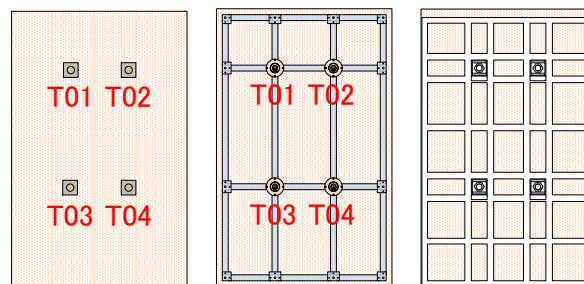


図-2 のり面工の有無および形状

たに2ケースの加振ケースを追加し、計4ケースの実験を実施した。いずれのケースも盛土の高さは600mm、勾配は1:1.2とした。

後述するCase0を例にして、盛土模型の概略図および計測器配置図を図-1に示す。盛土は稲城砂を用いて(1)で述べた含水比・乾燥密度を目標とし、層厚50mmごとに締固め管理を行いながら構築した。盛土模型の下層には、降雨散水を与えることによる浸透水を支持地盤に貯めないことを目的として、透水性の良い地盤を模擬するために粒度調整碎石を用いた。十分な締固め密度比となるように層厚75mmごとに撒き出して構築した。なお、土槽の奥行は600mmである。

各ケースののり面の形状を図-2に示す。Case0は、地山補強材を用いて盛土堤体を補強した盛土であり、のり面工は用いていない。地山補強材は上下奥行方向に計4本（2列×2段）の配置としている。補強材径は $\phi 20\text{mm}$ 、補強材長は550mmであり、ナイロン材質の補強材としているが周囲には地盤材料との摩擦を確保するために砂を接着させた。補強材の頭部は支圧版で固定を行っている。

次に、のり面工での降雨浸透の遮水効果が盛土の耐震性に及ぼす影響を検討することを目的として、本論文では新たにCase1の実験ケースとして、Case0と同様の地山補強材の打設を行い、のり面工としてのり面に遮水シートを有する盛土の加振ケースを設定した。遮水シートによって、降雨散水中にのり面から盛土内部への降雨浸

透が生じない形としており、またシートであるため盛土のり面には上載荷重も作用しない。地山補強材は、Case0と同様に頭部を支圧版で固定した。

次に、Case2・3ではのり面工と地山補強材の連結に着目した実験を実施した。Case2はプレキャスト格子枠工を有し、地山補強材の頭部と接合した実験模型である。格子枠模型には4列×4段のアルミ角棒(20mm×20mm)を使用した。地山補強材は、頭部をアルミ角棒とベアリングにより接合し、剛結構造ではなくピン結合となるよう回転可能な機構とした。格子枠模型の重量は6.2kgであり、のり面の開口率は実際とのスケール比で合わせた。

Case3は新たに本論文で実施したケースであり、場所打ちの格子枠の枠間に補強材を打設することを想定したケースである。格子枠は本ケースでは軽量無収縮モルタルにより製作を行った。格子枠の形状は図-2に示す通りであり、枠間に地山補強材を打設し、Case0と同様の大きさの止圧版を取り付けた。格子枠の重量は8.7kgとCase2よりも幾分か大きい。

盛土内には、いずれのケースについても図-1に示す配置で加速度計、土壌水分計および間隙水圧計を配置し、降雨散水に伴う盛土内の飽和度・間隙水圧の変化、および加振中の盛土内部の加速度応答・過剰間隙水圧の変化を計測した。間隙水圧計にはセラミックフィルターを取付けており、不飽和土の領域においても間隙水圧の変動のみを計測できるようにしている。なお、セラミックフィルター^{9,10)}では加振中の動的な水圧変化の計測は困難であることから、PWP09およびPWP10については、加振時の動的応答の計測を優先させるため、従来の液状化等を対象とした実験で用いられるメッシュフィルターを取付けた。盛土の沈下については、天端に設置した接触式の防滴変位計により計測した。ただし、接触式変位計のストロークは20mmと小さい。このため、振動台正面の透明なガラスを活用し、盛土模型とガラスの間に標点を設置し、土槽正面から高速度カメラによる撮影を行った。そして、標点の挙動を画像解析することにより、盛土全体の挙動および変位計がレンジオーバーとなった際の変位量の補完に活用した。標点は50mm間隔で格子状に配置し、グリスを塗布することでガラス面と標点の間の摩擦低減を図っている。また、支持地盤の長手方向中央測線部にはマノメータを配置し、降雨浸透に伴う盛土内の水位を測定した。本マノメータの初期水位は盛土底面を0としている。地山補強材は補強材頭部にボルトゲージを設置し、地山補強材に発揮される張力の測定を行った。

(3) 降雨散水と加振の条件

降雨散水装置により各ケースとも同一の降雨条件で盛土内の飽和度分布を変化させて加振を行った。降雨散水

表-1 降雨散水履歴と加振ステップ

	降雨強度 (mm/h)	累積雨量 (mm)	加振条件
Step1	降雨なし		正弦波5Hz10波 (100~600gal)
Step2	40	105	
Step3	60	210	漸増加振

装置は、振動台上の建屋天井に設置した散水ノズルから盛土模型全体に均等に降雨を散水させることが可能である。なお、散水ノズルと振動台土槽底面の距離は約10mである。実験ステップを表-1に示す。以下では、Case0を例に実験の手順を述べる。まずは、降雨散水を開始する前をStep1として、5Hz10波の正弦波の加速度振幅を100galから100galずつ増加させ、600galまで段階的に加振した。なお、段階加振における最大加速度を600galと設定したのは、加速度応答の増加が確認できつつ、盛土に大きな変状が生じない範囲までの加振とするためである。その後Step2として、平均時雨量40mm/hで継続的に降雨散水し、盛土深部の飽和度が高まった時点(連続雨量105mm程度)でStep1と同様に段階加振を行った。なお、この時点では盛土内部に水位は形成されていない。Step2の加振終了後、Step3として、平均時雨量を60mm/hに変更して降雨散水を行い、盛土内全体の飽和度が高まり水位が形成された後の時点(連続雨量210mm程度)でStep1と同様に段階加振を行った。このような降雨散水および加振を他のケースでも同様に実施したが、実験ケースによってはStep1・2の加振加速度を、盛土の応答を確認しながら変状が生じないように600galに到達することなく終了しているものもある。なお、Case1におけるStep2の加振終了後では、盛土内部に水位形成が確認され、盛土内部の飽和度分布が他のケースのStep3程度まで上昇していることが確認されたことから、Step3の降雨履歴を与えた状態での加振は実施しないこととした。

3. 含水状態の変化に応じた盛土の地震時挙動

まず、本実験の特徴である含水状態の変化に応じた盛土の地震時挙動の変化を明らかにする。Case0の加振を例に、降雨散水前のStep1での500gal加振時、および降雨散水の継続によって盛土内部で飽和度や水位の上昇が見られた、Step3での500gal加振時の挙動に着目する。なお、両ステップでの盛土内部の飽和度や水位の違いの詳細については、4で示すこととする。

盛土地表面の鉛直変位(図-1中の変位計DV01およびDV02)、盛土内部の過剰間隙水圧(間隙水圧計PWP09およびPWP10)、地山補強材の張力(上段T01および02の平均、下段T03および04平均)、盛土のり肩および支持地盤の応答加速度(AH01、AH20)の時刻歴を示す。

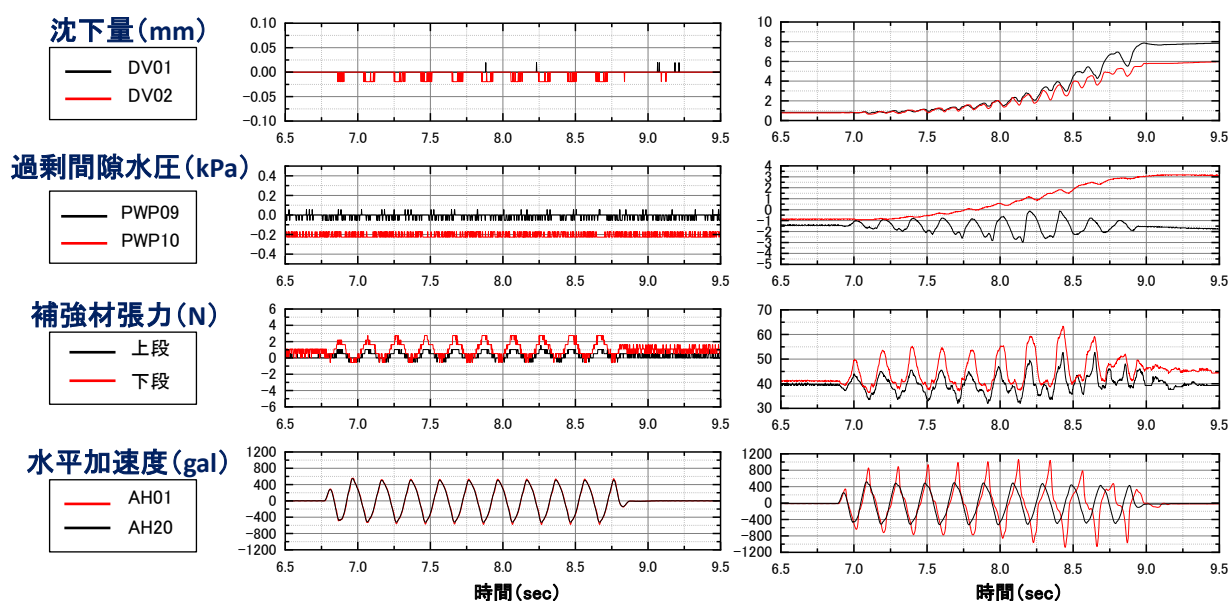


図-3 Case0・500gal 加振時の盛土の変位・過剰間隙水圧・補強材張力および加速度の時刻歴

加速度や変位の「+」・「-」の向きについては図中に示す通りである。また、補強材張力の「+」は引張側、「-」側は圧縮側としている。

盛土天端の鉛直変位および過剰間隙水圧の時刻歴に着目すると、Step1の加振では加振中の変位や過剰間隙水圧の増加は見られないが、Step3の加振では、加振の進行に伴って過剰間隙水圧が上昇するとともに、変位が増加している。これは、Step1は降雨散水を与えていない盛土構築時の含水状態であることに対して、Step3では降雨散水により盛土内部の飽和度が高まり水位が形成されたことによって、盛土内部で過剰間隙水圧の上昇を招き、有効応力が低下したこと起因して盛土が変形しやすい状況となったことに起因するものと考えられる。

次に、盛土のり肩の応答加速度に着目すると、Step1の加振では、盛土のり肩の応答加速度は支持地盤の応答加速度と同程度であり、盛土全体が一様に挙動している状況が確認された。一方、Step3の加振では、支持地盤の応答加速度に対して盛土のり肩の応答加速度が大きくなっている。これは、降雨散水に伴う盛土内の飽和度の上昇に伴い盛土材料の剛性が低下していることに起因するものと考えられる。また、加振の後半では、前述の剛性低下に加えて加振中の過剰間隙水圧の上昇に伴う更なる軟化の影響を受け、盛土の固有周期が長周期化し、入力振動との位相差が発生するとともに、盛土のり肩の応答加速度は減衰する傾向を示していることが確認された。なお、稲城砂を使った不飽和返し三軸試験が実施されているが、不飽和状態であっても有効応力がゼロに近い状態となることが確認されており^{10)・11)}、またこの材料特性を考慮した数値解析によっても液状化に至ることが示さ

れている¹⁰⁾。

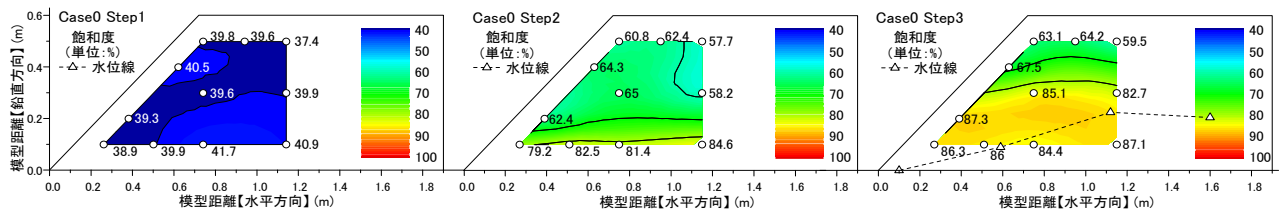
また、地山補強材頭部に発生した張力については、Step1の加振では、入力に伴う補強材張力は3N程度であった。一方、Step3の加振では、それまでの加振により500gal加振開始時点で40N程度張力が残留した状態となっているが、下段の補強材ではさらに60N程度まで増加していることがわかる。これは、Step3の加振において盛土全体の応答加速度が増加したこと起因しているものと推測される。また、補強材張力は上段よりも下段においてより大きく発揮されており、これは上段に対して下段の方が補強材周囲の拘束圧が大きいいため、加振時の盛土の変形に対してより抵抗力を大きく発揮していることに起因しているものと考えられる。

4. のり面工の遮水効果が盛土の耐震性に及ぼす影響

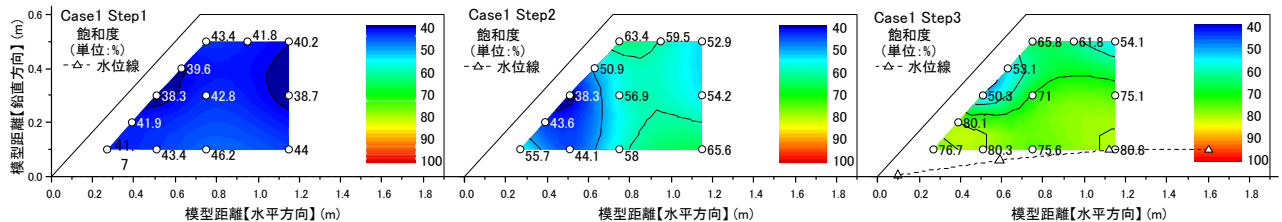
Case0とCase1の実験ケースでは、のり面工による盛土のり面の被覆の有無による挙動の違いを確認している。そこで、のり面工による盛土のり面の遮水効果が盛土の耐震性に及ぼす効果について検討した。

(1) 盛土内部の飽和度の変化

図4に両ケースのStep1～3における加振直前の盛土内の飽和度分布を示す。Case0における各ステップの盛土内の平均飽和度分布は、Step1で40%程度、Step2で60%程度、Step3で80%程度であった。また、Step3ではマノ



(a) Case0 (のり面工なし)



(b) Case1 (のり面工：遮水シート)

図-4 盛土内部の飽和度の変化および水位線の形成の違い

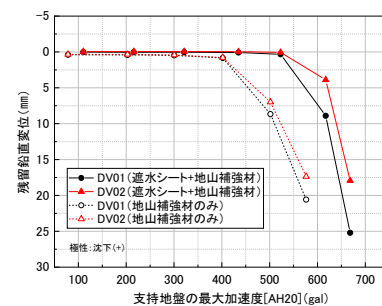
メータの計測値から盛土内部に 0.25m 程度の水位が形成されていた。

一方、Case1 における各ステップの盛土内の平均飽和度分布は、Step1 では Case0 と同様に 40% 程度であったが、Step2 で 50% 程度、Step3 で 70% 程度であり、Step3 での盛土内部の水位は 0.15m 程度に留まっていた。以上のことから、Case2 では遮水シートによる被覆により、のり面工がないケースと比較して、降雨時においてものり面直下を中心に盛土内の相対的に広い範囲が不飽和状態を維持していることがわかる。

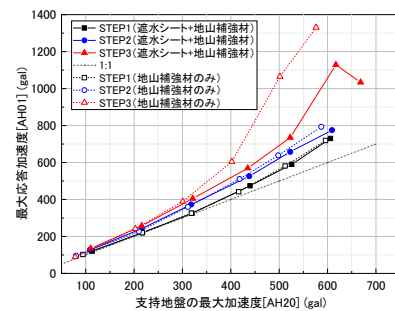
(2) 盛土の耐震性に及ぼすのり面工の遮水効果

盛土内の飽和度の低下が盛土の耐震性能に及ぼす影響を把握するため、両ケースの Step3 の加振についての比較を行った。加振加速度と盛土天端の残留鉛直変位の関係、加振加速度と盛土のり肩の最大応答加速度の関係、および Case1 の Step3・500gal 加振時における過剰間隙水圧・盛土のり肩の応答加速度の時刻歴波形を図-5 に示す。(a)の鉛直残留変位に着目すると、地表面の残留鉛直変位については、同加振ステップではのり面工のない Case0 に比べて遮水シートを配置した Case1 の方が小さくなっている。また、(b)の加速度応答より、盛土のり肩の応答加速度においても降雨散水を与えた後の Step2 や Step3 の加振ステップでは、Case0 と比較して Case1 ではより小さくなっており、盛土の動的応答が抑制されていることがわかる。

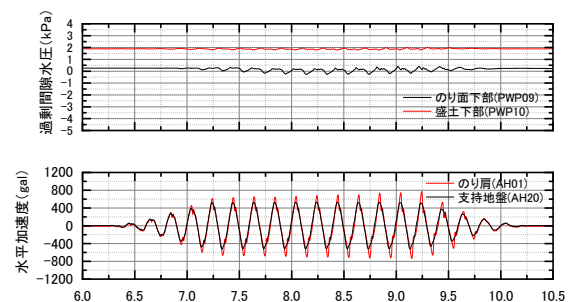
図-3(b)に示したように Case0 の実験において盛土の変形が増加した Step3・500gal の加振では、盛土下部において過剰間隙水圧の上昇がみられたが、Case1 の加振ではこの加振ステップでは過剰間隙水圧の上昇は見られな



(a) 加振加速度と鉛直変位の関係



(b) 加振加速度と盛土のり肩の加速度応答の関係



(c) Case1 step3 500gal 加振時の加速度・過剰間隙水圧の時刻歴

図-5 Case0・Case1 の実験挙動の比較

った。Case0の実験では、降雨散水により盛土内の飽和度が高まり水位が形成されたことにより、盛土深部において加振中の過剰間隙水圧の上昇が生じ、有効応力が低下したことが考えられる。一方で、Case1では盛土のり肩の応答加速度は支持地盤の応答加速度よりも僅かに大きいものに対し、Case0では支持地盤の応答加速度に対し盛土のり肩の応答加速度が振幅で2倍以上大きくなっている。これは、降雨散水に伴う盛土内の飽和度の上昇に伴い盛土材料の剛性が低下したことに起因するものと考えられる。さらに、加振後半では、上記有効応力の低下に伴い、応答加速度に減衰や支持地盤の加速度波形との位相差が見られた。なお、本実験でも最終加振ステップであるStep3・700galの加振では同様に過剰間隙水圧は上昇したが、Case1ほどの上昇は見られなかった。

5. のり面工と地山補強材の連結に関する検討

次に、Case2、Case3の実験ケースでは、のり面工の有無および地山補強材とのり面工の連結を変えた検討を行っている。そこで、のり面工と地山補強材の連結が盛土の盛土の耐震性に及ぼす効果について検討した。

(1) 盛土のり肩の応答加速度の変化

Case0・2・3を対象に、Step1からStep3(Case2ではStep2)の加振における、各加振加速度での支持地盤(AH20)の最大加速度と盛土のり肩(AH01)の最大応答加速度の関係を示す。Step1では、Case2およびCase3の加速度応答がCase0と比べて大きくなっている。これはCase2およびCase3では、のり面工の重量による慣性力の増加が影響したものと考えられる。

一方で、盛土部で飽和度の上昇や水位の形成があったStep3(Case2ではStep2)では、盛土に大きな変状が発生するまでの間の応答加速度は、加振加速度が小さなレベルではStep1と同様の傾向を示しているが、加速度の増加に伴ってCase0やCase3では著しく大きな応答が生じている。これは、盛土への変形の発生や、過剰間隙水圧の上昇が影響していると考えられる。

(2) 地山補強材張力の変化

盛土に大きな変状が発生したStep3の加振(Case1ではStep2の加振とする)における、入力加速度と棒状補強材頭部に発生した張力の最大値の関係を図-7に示す。Case0およびCase3では加振加速度の増加に伴う補強材張力の増加はわずかなものとなっており、また全ての補強材で補強材張力が増加しているわけではない。

ところが、地山補強材とのり面工を連結させたCase2では、加振加速度の増加と共に特に下段の補強材である

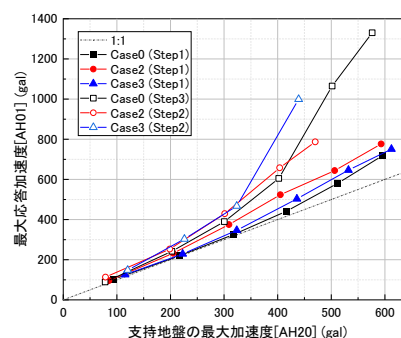


図-6 Case0・2・3の加速度応答の比較

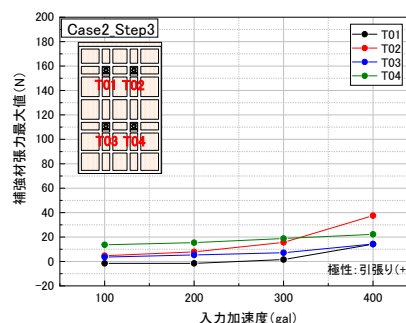
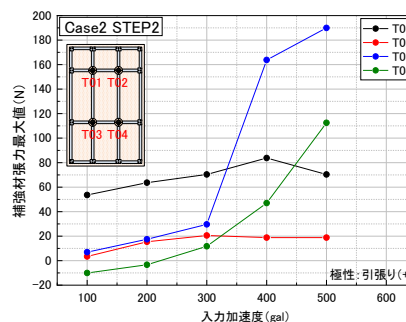
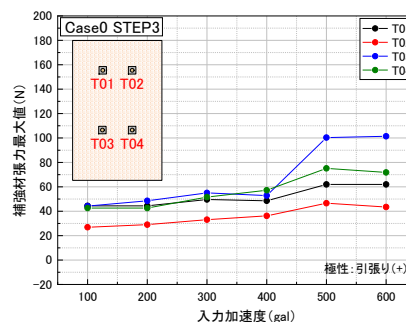


図-7 Case0・2・3の補強材張力の比較

T03やT04では張力が大きく増加している。(1)で述べたように盛土の加速度応答は慣性力の影響を受けるため、これにより地山補強材の張力も大きくなることが想定される。しかしながら、加振加速度が400galを越えると以降の加振でCase1よりもCase0やCase2の方が加速度応答が

大きいにもかかわらず、Case2の下段の補強材張力が非常に大きくなっている。Case2ではのり面工と棒状補強材の結合が効果を発揮し、加振中も補強材を介して盛土本体がのり面工に拘束されていたものと考えられる。

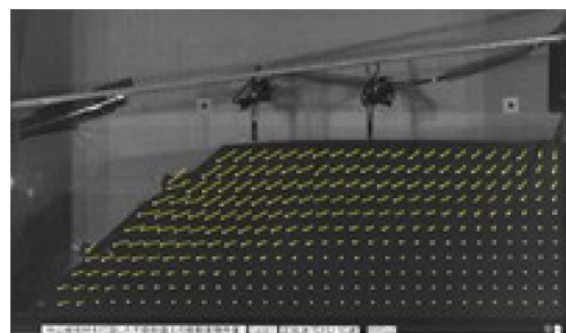
(3) 盛土の崩壊形態に関する考察

Case0, 2 および 3 の加振で、盛土に大きな変位が発生した際 (Case0 および 3 については Step3 の 500gal 加振時、Case2 では Step2 での 500gal 加振時) の、盛土の崩壊形状を図-8 に示す。これらの変位の軌跡図は、土槽正面に設置した盛土の各標点の加振中に得られた変位ベクトルを示している。

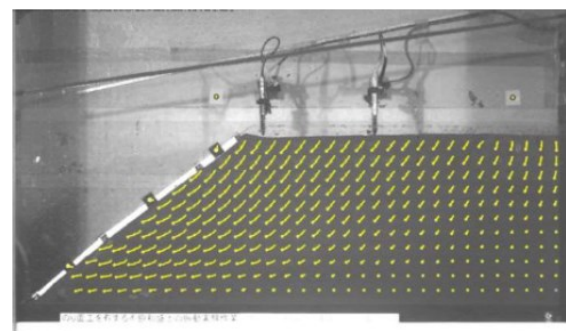
のり面工と地山補強材が連結されていない Case3 に着目すると、盛土ののり肩からのり面にかけての領域で、盛土の変形が集中している。これはのり面工が加振に伴う慣性力の影響を受けるが、地山補強材と連結されていないため盛土内部までは伝達されず、のり肩からのり面にかけての領域の変形が集中したものと考えられる。

地山補強材のみの Case0 では、のり面工がないためのり面での極端な慣性力の増加はない。このため、上述した Case3 と比較すると変位が生じる領域はのり面付近だけではなく、盛土の上部 20cm 程度の範囲でも変位ベクトルの増加が見られる。

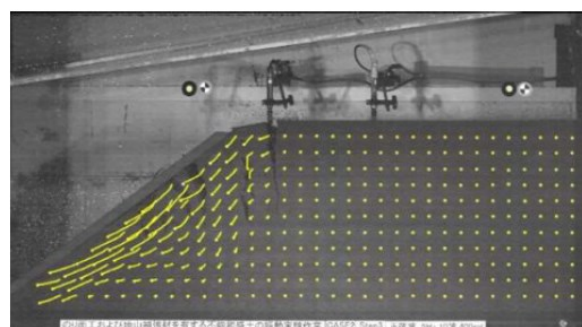
地山補強材とのり面工を連結した Case2 では、Case0 および Case3 の加振と比較すると盛土の最も深部まで変位が及んでおり、盛土全体が一体的な挙動を示している。のり面工の重量は慣性力の増加をもたらす、降伏震度の低下に寄与するものの、のり面工と棒状補強材を確実に結合することで、補強材が張力を発揮し盛土の形状をのり面工が保持する効果によって、崩壊を小規模に抑えることが可能であると考えられる。



(a) Case0



(b) Case2



(c) Case3

図-8 各ケースの盛土の崩壊形態

6. まとめ

本論文では、耐震補強を目的として地山補強材による補強を行った盛土を対象に、のり面工を用いることによる盛土のり面の被覆の効果、および地山補強材とのり面工の連結の効果を明らかにすることを目的として、模型盛土の振動台実験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 本実験では、降雨散水を与えながら盛土の加振を繰り返す実験を行ったが、降雨浸透で盛土内の含水状態が高まることによって、同じ加振加速度であっても盛土のり肩を中心に応答加速度が増加することや、盛土内で過剰間隙水圧の上昇が生じるとともに、変形が生じやすくなることが確認された。

- (2) 遮水シートをのり面に敷設することでのり面から浸透する降雨を遮水したケースでは、のり面を被覆していないケースと比べると、同じ降雨履歴を与えた各段階において、加速度応答や変位の増加が抑制されることがわかった。遮水機能を持つのり面工によって盛土内の飽和度がより低く維持されることで盛土材料が大きな強度・変形特性を発揮することにより、耐震性向上の効果を発揮することが確認された。
- (3) のり面に格子枠工を有する加振ケースでは、のり面工の自重の影響を受けることで、盛土のり肩部での加速度応答の増加が見られた。しかしながら、のり面工と地山補強材を連結させることで、地山補強材で発揮される補強材張力が増加するとともに、盛土の変形モードをのり面からのり肩の領域での局所的

な変形の集中から、盛土全体での変形となり盛土の崩壊規模の抑制に繋げることが期待される。

今回の実験では、加振ステップの後半で見られたように、盛土内に水位が形成されると、過剰間隙水圧の上昇と、これに起因した有効応力の低下が発生し、盛土の大きな変形に繋がることが確認された。山岳地域の集水地形に立地する谷埋め盛土や、水平地盤上の盛土であっても地下水位が高い粘性土地盤上の盛土では、盛土内の水位形成の影響によって地震中に過剰間隙水圧が上昇し、有効応力が低下することで被害が生じた事例が過去に報告されている¹²⁾。降雨時の盛土の安定だけでなく、地震時の水位以下の領域の過剰間隙水圧の上昇を防ぐ意味でも盛土からの排水を積極的に促す必要がある。

参考文献

- 1) 油谷彬博, 中村宏, 浜崎直行, 前田剛志, 桐生郷史: 御茶ノ水～水道橋間における土構造物耐震補強, 基礎工, Vol.45, No.12, pp.42-46, 2017.
- 2) 藤原雅仁, 山田孝弘, 中島進, 島田貴史, 長尾洋太, 佐藤武斗: 不飽和強度特性を使用した盛土の耐震補強設計に関する検討, 第 51 回地盤工学研究発表会, No.0344, pp.687-688, 2016.
- 3) 小湊祐輝, 中島進, 島田貴文, 佐藤武斗, 山田孝弘, 藤原雅仁: 不飽和強度特性を使用した盛土耐震補強設計の技術課題整理, 第 51 回地盤工学研究発表会, No.0343, pp.685-686, 2016.
- 4) 佐藤武斗, 中島進, 山田孝弘, 藤原雅仁, 西村友良: 既設盛土の耐震診断における不飽和強度特性の評価手法に関する実験的検討, 第 51 回地盤工学研究発表会, No.0345, pp.689-690, 2016.
- 5) 一井康二: 降雨による盛土の耐震性低下に関する実験的研究, 土木学会論文集, vol.28, pp.1-8, 2005.
- 6) 小湊祐輝, 松丸貴樹, 佐藤武斗: 含水状態の異なる不飽和盛土の模型振動台実験, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.73, No.4, I_1001-I_1009, 2017.
- 7) 稲川雄宜, 山本彰: 地山補強土工法における法面工の耐震性について, 大林組技術研究所報, No.76, pp.1-7, 2012.
- 8) 中島卓哉, 佐藤武斗, 松丸貴樹, 藤井昌隆, 濱田吉貞, 小湊祐輝, 渡邊健治: 盛土の耐震性に及ぼすのり面工の影響評価を目的とした模型振動台実験, 日本地震工学会論文集, Vol.20, No.1, pp.1_183-1_193, 2020.
- 9) 玉手聡, 伊藤直幸, 遠藤明: 地盤の透水性と降雨強度の関係に着目した斜面の表層崩壊に関する実験的考察, 労働安全衛生総合研究所特別研究報告, No.35, pp.33-58, 2007.
- 10) 松丸 貴樹, 渦岡 良介: 不飽和土の繰返し弾塑性構成式を用いた三相系多孔質体理論に基づく盛土の地震応答解析, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.70, No.4, pp.395-411, 2014.
- 11) 古関潤一, 王海龍, 佐藤剛司, 宮下千花: 飽和・不飽和状態にある鉄鋸粉と砂質土の繰返し三軸試験, 生産研究, Vol.66, No.4, pp.57-60, 2014.
- 12) (社)地盤工学会: 道路・鉄道土木構造物および造成盛土, 新潟県中越地震災害調査委員会報告書 (DVD-ROM), pp.143-293, 2007.

SHAKING TABLE TESTS OF MODEL EMBANKMENT WITH SEISMIC REINFORCEMENT USING SOIL NAILS FOCUSED ON EFFECT OF SLOPE PROTECTION WORKS

Takaki MATSUMARU, Takuya NAKASHIMA, Yoshisada HAMADA
and Tomohiro ATSUMI

Slope protection works are often constructed on railway embankment for the purpose of the prevention of seepage and erosion to rainfall. Though the works sometimes cause increase of load acting to embankments, it is possible that the works contribute to the increase of seismic performance by keeping the embankment in unsaturated condition and connection with soil nails. However, these effects have not been studied clearly. In this paper, series of shaking table tests of model embankments with slope protection works and soil nails were conducted, with rainfall infiltration.