

一般報文

現場条件を考慮した災害復旧に関する動的遠心力载荷模型実験 ～大型土のうと補強材を用いた本復旧盛土の適用性～

森 芳徳・久保哲也・宮武裕昭

1. はじめに

近年、豪雨や地震により道路盛土等が大きく崩壊するなど道路土工構造物の災害が大規模化し、交通機能が遮断され、復旧までに時間を要することで物流に支障を来すことや集落の孤立等の社会的影響が拡大する場合がある（写真-1）。道路管理者には、被災によって遮断された交通機能を早期に回復することが求められ、被災現場の状況に応じた復旧対策の立案や迅速に回復できる工法の選定が必要とされる。

既往の調査¹⁾から、迂回路や片側交互通行等の対応が困難で復旧までに時間を要した被災現場では、道路盛土の崩壊等の災害現場における応急復旧方法として、施工性や資材調達迅速性の観点から大型土のうを用いた応急復旧が用いられていることが確認されている（図-1）。

筆者らは、大型土のうを用いた応急復旧に着目し、本設構造物（本復旧）への適用性について研究を進めている。一方で、大型土のうを道路盛土本体に残置すると、将来的に水みちや盛土材が吸い出される原因となること等が懸念されている。

本報告では、実際に現場で災害復旧を経験された道路管理者及び復旧作業者を対象にヒアリングを実施し、その結果を踏まえ、実現場の施工条件等を考慮した動的遠心力载荷模型実験^{*}を実施した結果を報告する。

2. 復旧形状の検討

本検討では、既往の調査結果を参考に、大規模災害の被災現場で想定される代表的な事例として図-2(a)の崩壊形状を抽出し、応急復旧及び本復旧の形状を検討した。

応急復旧の断面形状を図-2(b)に示す。応急復旧は早期復旧を基本とするため、崩壊土砂の撤去や切土等の土工量をなるべく低減させること、崩壊土砂を一時的に仮置きするためのヤードを設けるなどの理由から壁面勾配は急勾配（1:0.5）とした。また、復旧する土工構造物は高盛土となるため、盛土の安定性を確保するために、補強材（ジオテキスタイル）を敷設することとした。

本復旧の断面形状を図-2(c)及び(d)に示す。地山が近接し施工スペースの確保が困難な現場に対しては、前面に急勾配で腹付盛土を設置する構造（図-2(c)：補強土タイプ）、比較的用地や施工条件等の制約がない現場に対しては、前面を安定勾配で盛土する構造（図-2(d)：安定勾配タイプ）の2種類を考案した。



写真-1 道路盛土の被災現場（例）
a) 牧之原SA付近²⁾ b) 能登有料道路³⁾

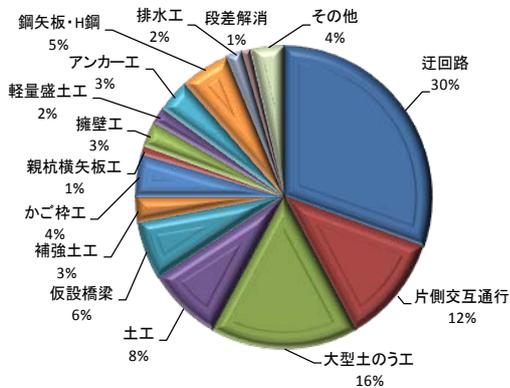
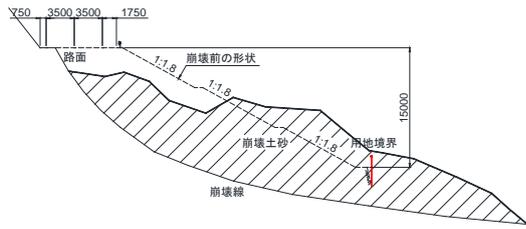


図-1 応急復旧工の分類

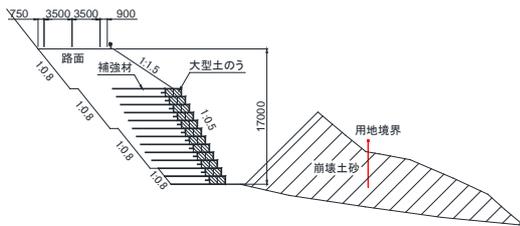
Dynamic Centrifuge Models Tests for Disaster Prevention Considering Actual Construction Conditions

*土木用語解説：遠心力载荷模型実験

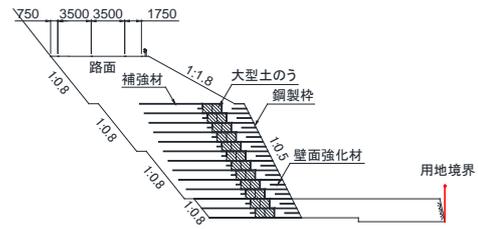
(a)大規模災害で想定される崩壊形状



(b)応急復旧の断面形状



(c)本復旧の断面形状（補強土タイプ）



(d)本復旧の断面形状（安定勾配タイプ）

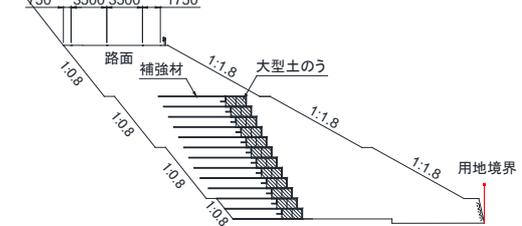


図-2 考案した復旧形状

3. 災害復旧関係者へのヒアリング

復旧形状の安定性を検証するための動的遠心力載荷模型実験を実施するにあたり、実際に現場で災害復旧を経験された直轄国道の道路管理者及び復旧作業員（施工業者）を対象に、図-2の復旧形状等についてヒアリングを実施した。ヒアリングの項目は、①施工上や構造上の問題が生じると

思われる事項、②現場で活用するために必要と思われる改良点、③実験において計測等により確認しなければいけないと思われる事項、その他、被災現場における土工工事（復旧工事）の実情等に関して、道路管理者及び復旧業者ともに同様な内容とした。

ヒアリングの主な意見を表-1に示す。道路管理者・復旧業者ともに、①大型土のう間に隙間が

表-1 ヒアリング結果

道路管理者（発注者（地方整備局・河川国道事務所））	
①	大型土のう間に隙間が生じ、 <u>水みちや盛土材の流出</u> が懸念。
②	大型土のう設置箇所の <u>締固め不足</u> による沈下が懸念。
③	大型土のうを残置することで <u>本設構造物としての品質確保</u> が懸念。
④	大型土のうの設置位置は、 <u>交通荷重の影響を直接受け</u> ない範囲にすべき。
⑤	盛土高さが高い場合、 <u>下層部を3列配置</u> にした方が施工性や安定性が向上。
⑥	のり面勾配を1:0.5にした場合、施工時の安全対策が必要。
⑦	大型土のうの品質管理が必要。施工及び品質はオペレータの技量に左右される。
⑧	本復旧であれば、大型土のうの <u>長期的耐久性</u> の検証が必要。
⑨	大型土のうを擁壁（補強土）として考える場合、設計法および維持管理の手法が必要。
⑩	上記の懸念事項等が解決できれば有効な復旧方法。
復旧作業員（施工業者）	
①	大型土のうの間に隙間が生じ、 <u>水みちや盛土材の流出</u> が懸念。
②	大型土のう設置箇所の <u>締固め不足</u> 等による沈下が懸念。
③	大型土のう自体に排水機能を付加することは、しっかり施工できていれば問題ない。
④	<u>腹付盛土</u> ののり面勾配は、施工性等も勘案すると 1:0.8 程度が限界。
⑤	崩壊した土砂を崩壊面から完全に除去することが、その後の作業性や安全性に大きく影響。
⑥	大型土のう間の隙間対策として、現場では流動化処理土を充填。
⑦	鋼製壁面材の使用は <u>施工性</u> や復旧の <u>迅速性</u> を勘案すると現実的でない。
⑧	復旧するのり面表面は、 <u>植生シート</u> を用いて保護すると効果的。
⑨	実現現場では大量の大型土のうや矢板等を確保する必要があり、 <u>材料調達・手配が困難</u> 。
⑩	補強材を敷設する作業はあまり手間だとは思わない。
⑪	現地発生土を利用する際は、 <u>土質により安定処理</u> が必要な場合もある。
⑫	基本的に大型土のうを用いて本復旧することは可能。

生じ、水みちや盛土材流出、②大型土のう設置箇所の締固め不足による沈下、等を懸念する意見があった。また、道路管理者からは、①大型土のう残置による盛土の品質確保が懸念、②大型土のう設置位置は交通荷重の影響範囲外とすべき、との意見があり、復旧業者からは、①腹付盛土（補強材無し）ののり面勾配は1:0.8程度が限界、②大型土のう自体の排水機能の付加はしっかり施工出来ていれば問題ない、等の意見があった。これらの意見を踏まえ、実験ケースを設定した。

4. 動的遠心力载荷模型実験

4.1 実験概要

実験は最大遠心加速度が100Gまで対応可能なビーム型の動的遠心力载荷実験装置を用いた（写真-2）。模型は遠心力の相似則から、実スケールの1/50とした。模型地盤は、写真-3に示す長さ1m×高さ0.5m×幅0.2mの土槽内に、高さ240mm（実スケールで12m相当）となるように大型土のう（12段積み）、盛土及び補強材を敷設し、更にもうその上に高さ100mm（実スケールで5m相当）の嵩上げ盛土を構築した（写真-4）。



写真-2 実験装置



写真-3 土槽



写真-4 模型地盤（補強土タイプ）

実験ケースは、本設構造物（本復旧）としての安定性に着目し、大型土のうを残置させた状態において、地震動に対する地盤の変状や地下水位

を与えた場合の排水機能を明らかにするために、腹付盛土の形状、大型土のうの配列、盛土内の排水条件（盛土下層部の基盤排水層及び土のう中詰め材の排水機能の有無）等をパラメーターとして設定した。各ケースの仕様を表-2に、補強土タイプと安定勾配タイプの代表的な断面形状を図-3に示す。CASE-1は、土のうは配列せず一般的に本設構造物として採用されている補強土を模擬したケースとし、CASE-2、CASE-6は、排水性能を有する大型土のうを適用したケースとした。CASE-3、CASE-7は、大型土のうの背面にベントナイト層を設けることで大型土のうの排水性能を低下（不透水）させ、CASE-4、CASE-8は、大型土のうの配列を上部（2列）と下部（3列）で変化させた。配列の変化点は、既往の実験結果等を考慮して大型土のうの設置高さの1/2とした。CASE-5は一般的な安定勾配で復旧した盛土（無補強）を模擬したケースとした。

表-2 実験ケース

ケース	腹付盛土形状	土のう配列	基盤排水層	土のう中詰め材
CASE-1	補強土タイプ	無し	全面	—
CASE-2	タイプ(勾配1:0.5)	2列	部分	透水
CASE-3	配1:0.5)	2列	部分	不透水
CASE-4	タイプ(勾配1:1.0)	2、3列	部分	透水
CASE-5	安定勾配タイプ	無し	全面	—
CASE-6	タイプ(勾配1:1.0)	2列	部分	透水
CASE-7	タイプ(勾配1:1.0)	2列	部分	不透水
CASE-8	タイプ(勾配1:1.0)	2、3列	部分	透水

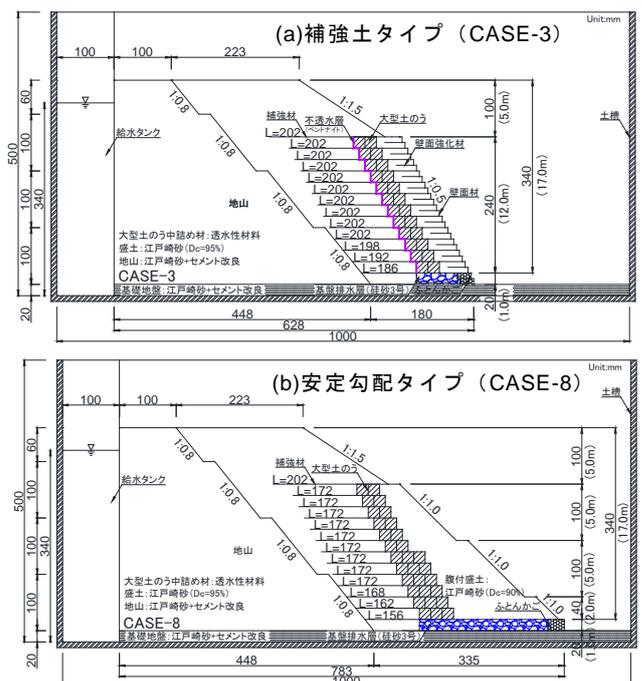


図-3 実験ケースの断面形状図

模型を製作するに当たり、大型土のうは不織布（透水係数： 2.7×10^{-2} cm/s）を用い、縦20×横20×高20mm（実スケールで1.0×1.0×1.0m相当）の立方体に作成した（写真-5）。大型土のうの中詰材には7号砕石とジリコンサンドを混合した材料（ $\rho_t=1.80\text{g/cm}^3$ ）を用いた。補強材は実スケールで必要となる引張剛性 $E \cdot t$ （ E ：弾性係数、 t ：厚さ）が本実験の相似則に合うようにポリエチレン製のジオテキスタイル（ $E \cdot t=36.0\text{kN/m}$ ）を使用した。補強材の敷設長及び引張剛性は、ジオテキスタイルを用いた設計・施工マニュアル⁴⁾により算出した。補強土タイプの腹付盛土の壁面材には、高さ10mmのステンレス製のL型アングルを使用した。補強材とL型アングルとは接着剤を用いて接続した（写真-6）。盛土材は表-3に示す江戸崎砂を用いた。盛土の締固め条件は、実際の現場条件を想定し、補強土領域は締固め度 $D_c=95\%$ 、CASE-5及び腹付盛土の領域は締固め度 $D_c=90\%$ とした。基礎地盤及び盛土背面の地山は、江戸崎砂とセメントを混合した改良土を用いて堅固な地山条件を再現した。



写真-5 大型土のう



写真-6 壁面材と補強材

表-3 盛土材（江戸崎砂）の物性

項目		Dc=90%	Dc=95%
土粒子の密度		2.746	
粒度分布	礫分 (%)	—	
	砂分 (%)	91.7	
	シルト分 (%)	3.7	
	粘土分 (%)	4.6	
均等係数U		3.09	
透水係数 (cm/s)		1.10×10^{-4}	1.02×10^{-3}
最大乾燥密度 (g/cm ³)		1.761	1.578
最適含水比 (%)		18.0	
湿潤密度 (kN/m ³)		17.27	18.27
粘着力c (kN/m ²)		5.15	14.21
せん断抵抗角φ (°)		33.72	35.76

4.2 実験手順

実験は、遠心加速度を50Gまで上昇させ、模型の状態が安定した後に盛土背面の地山から水を盛

土内に供給した。その後、盛土内の間隙水圧が安定した後に入力加速度150、250gal（レベル1相当）、350、500gal（レベル2相当）の正弦波（2.0Hz）を20波ずつ段階的に加振した。計測器の配置を図-4に示す。計測項目は、標点による盛土及び大型土のうの変位、盛土内の土圧、応答加速度、間隙水圧、及び補強材のひずみ等とした。

4.3 実験結果

4.3.1 盛土全体の挙動

写真-5に加震後の実験断面の例を示す（CASE-6）。安定勾配タイプでは、前面の腹付盛土の領域ですべり崩壊が生じているが、地山と大型土のうに挟まれた領域では、地山境界部で僅かなクラックが発生したものの大規模な変状は生じていないことが確認できた。補強土タイプは、腹付盛土も含めて大規模な変状は生じなかった。

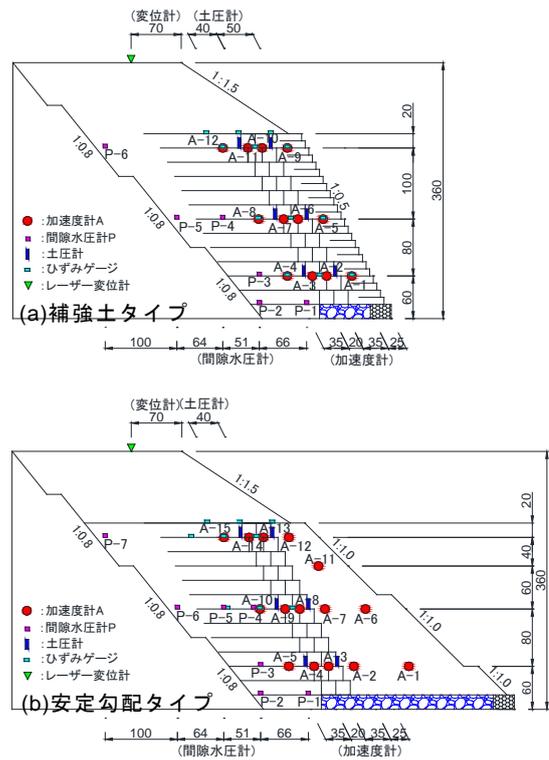


図-4 計測器の配置

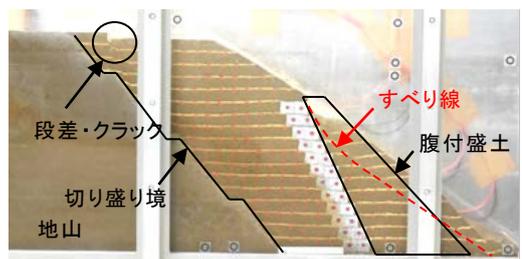


写真-5 加震後の状態 (CASE-6)

図-5に各ケースの入力加速度250gal加振後と350gal加振後における盛土の相対変位分布を示す。何れのケースにおいても、土粒子の変位量は盛土下部では微小であり、盛土上部で多く生じる傾向を示した。また、排水条件だけが違うCASE-2とCASE-3、及びCASE6とCASE7を比較することにより、盛土の変形は盛土の含水状態が影響し、排水性を有する大型土のうの適用は、盛土の変形を抑制することが確認できた。

図-6は、図-5と同条件におけるせん断ひずみ分布例（CASE-2, CASE-6）を示す。せん断ひずみは補強材が敷設されていない地山付近の盛土箇所や、安定勾配タイプにおいては腹付盛土で顕著に見受けられ、無補強領域で生じていることが確認できた。

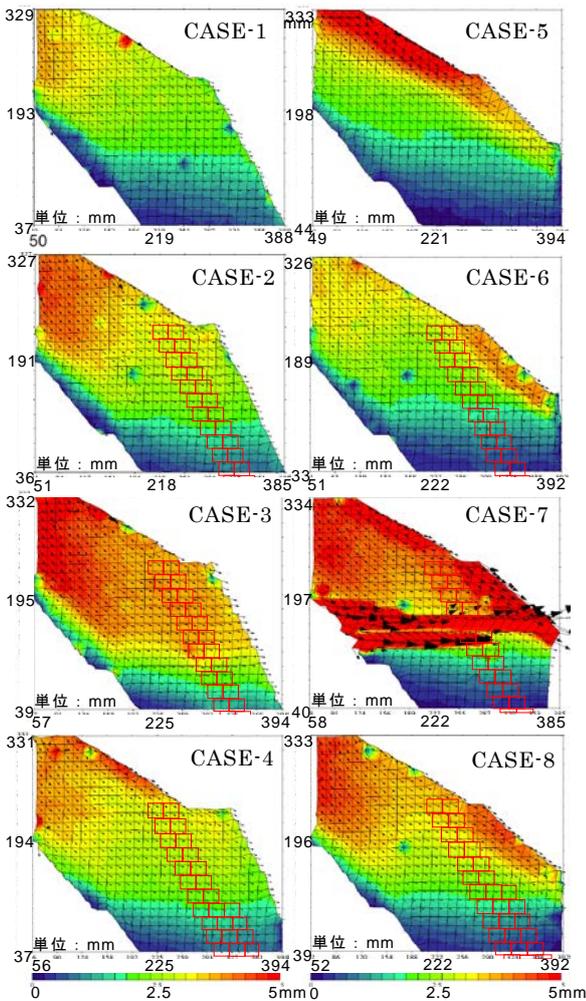


図-5 相対変位分布

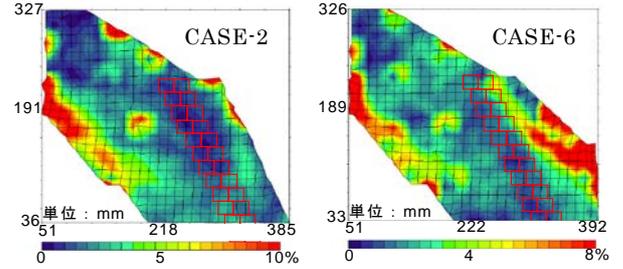


図-6 せん断ひずみ分布

4.3.2 大型土のうの挙動

図-7は加振後における後列（地山側）の大型土のうと大型土のうの背面に位置する盛土に設けた標点の水平変位の相関を示す。大型土のうと盛土の水平変位は同程度の変位を示しており、0.9程度の強い相関性が認められ、大型土のうと盛土は一体的に挙動していることが確認できた。

図-8は、入力加速度500gal 加振後における後列（地山側）の大型土のうの水平変位を示す。大型土のうの変形は、補強土タイプと安定勾配タイプで異なる挙動を示した。補強土タイプでは盛土下部からはらみ出す変形を、安定勾配タイプでは盛土下部の水平変位は抑制され、中間付近から水平変位が増加する変形を示した。これは、大型土のう前面に腹付けした盛土の影響によるものと考えられる。

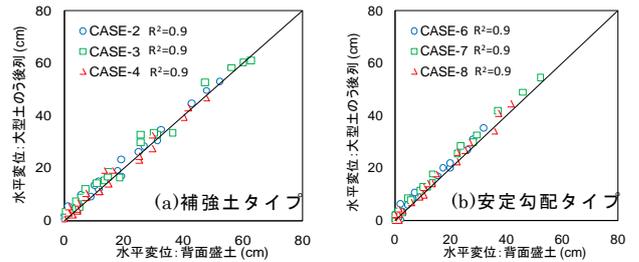


図-7 大型土のうと盛土の挙動（水平変位）

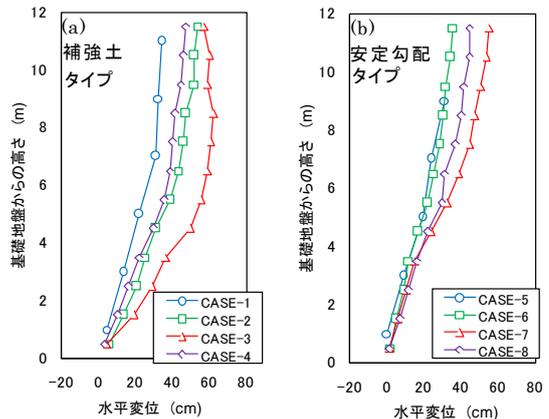


図-8 大型土のうの水平変位（後列）

4.3.3 応答変位

図-9は、入力加速度500gal 加振時における補強土タイプ（CASE-2）及び安定勾配タイプ（CASE-6）の隣接した大型土のうの応答変位を示す。前列と後列の大型土のうの応答変位は、振幅の大きさが異なるものの、概ね同位相の傾向を示した。この結果から、地震動等の作用による土のう間における隙間や水みち等の発生の可能性は低いことが確認できた。

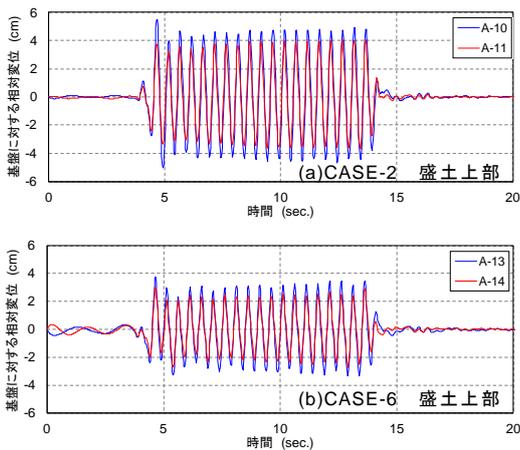


図-9 隣接した大型土のうの応答変位例

4.3.4 間隙水圧

図-10は、盛土底盤における地山との境界付近に設置した間隙水圧計P-2（実線）及び盛土の中間に位置する間隙水圧計P-4（破線）の加振時における過剰間隙水圧（最大値）の変化を示す。大型土のうの中詰め材の違いによる盛土底部（実線）の間隙水圧を比較すると、補強土タイプ及び安定勾配タイプともに、不透水状態にあるCASE-3やCASE-7の方が、透水状態であるCASE-2やCASE-6よりも高い値を示した。この結果から、排水機能を有する大型土のうの適用が過剰間隙水圧の抑制に有効であることが確認できた。

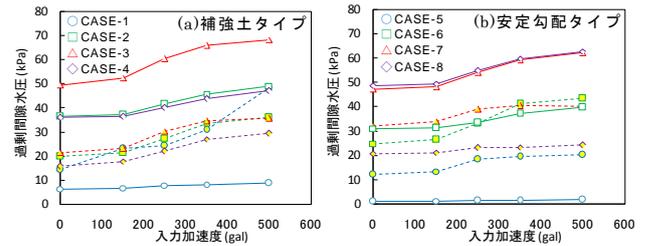


図-10 過剰間隙水圧（最大値）

5. まとめ

大型土のうを用いた本復旧盛土の適用性について、動的遠心力模型実験を実施し、以下の知見が得られた。

- ①排水性能を有する大型土のうの適用は、盛土の変形及び過剰間隙水圧の抑制に有効である。
- ②隣接する土のうは一体的な挙動を示しており、隙間や水みち等の発生は確認されなかった。
- ③下層部を3列配置にした場合でも、2列配置と同様な挙動であり局部での変形等は見られなかった。

今後は、実大モデルを構築し施工性や交通荷重による影響及び長期的耐久性の検証が必要と考えており、現在、土木研究所構内における実大実験の実施に向けて検討しているところである。

また、これらの研究成果を取り纏め、大型土のうを用いた災害復旧対策工法マニュアル（案）を作成したいと考えている。

参考文献

- 1) 久保、森、宮武：大規模土砂災害による被災現場の効率的な復旧法の検討、ジオシンセティックス技術情報誌、pp.11~18、2014.11
- 2) NEXCO中日本：【緊急報告】東名復旧までの115時間<駿河湾を震源とする地震による東名高速被災応急復旧報告>、2009.8
- 3) 国土交通省北陸地方整備局：能登半島地震による能登有料道路の被害と復旧、2007
- 4) (一財)土木研究センター：ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル、2000

森 芳徳



土木研究所地質・地盤研究グループ施工技術チーム主任研究員
Yoshinori MORI

久保哲也



研究当時 土木研究所地質・地盤研究グループ施工技術チーム交流研究員、現 前田工織(株)
Tetsuya KUBO

宮武裕昭



土木研究所地質・地盤研究グループ施工技術チーム上席研究員
Hiroaki MIYATAKE