



## 谷埋め道路盛土の地震時変状の評価手法の検討

佐々木哲也<sup>1)</sup>，東拓生<sup>2)</sup>，加藤俊二<sup>3)</sup>，佐々木直也<sup>4)</sup>

- 1) 国立研究開発法人土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム，上席研究員  
e-mail : t-sasaki@pwri.go.jp
- 2) 国立研究開発法人土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム，主任研究員  
e-mail : azuma-t573bt@pwri.go.jp
- 3) 国立研究開発法人土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム，主任研究員  
e-mail : skato@pwri.go.jp
- 4) 八千代エンジニアリング株式会社 地質・地盤部  
(前 国立研究開発法人土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム，交流研究員)  
e-mail : ny-sasaki@yachiyo-eng.co.jp

### 要約

近年の大地震において，谷部を横断する道路盛土が大規模崩壊し，震後の道路交通機能の確保に支障となる事例が報告されている．このような被災を発生させないためには，谷埋め盛土の適切な設計法，既設盛土に対する補強工法の開発，既設盛土の耐震性の診断が可能な解析手法の提案が必要である．本研究では，谷埋め盛土の地震時崩壊について，盛土の崩壊に影響する要因を動的遠心模型実験により明らかにするとともに，動的遠心模型実験及び被災事例を対象に2次元自重変形解析の谷埋め盛土の地震時変状の評価手法としての適用性を検証した．また実盛土の水位観測の結果から，盛土内水位には大きな変動幅があることが確認され，耐震性の評価にあたっては盛土内水位の把握と適切な設定が重要であることが示唆された．

キーワード： 谷埋め高盛土，地震被害，遠心模型実験，変形解析

### 1. はじめに

近年の大地震において，谷部を横断する道路盛土が大規模崩壊し，震後の道路交通機能の確保に支障となる事例が報告されている．このような道路盛土の大規模な被害を軽減し，地震後も一定の道路機能を確保するためには，新設時の適切な設計法，既設盛土に対する合理的な耐震補強工法，耐震診断を効率的に行うための弱点箇所抽出手法，既設の耐震性の診断が可能な解析手法の提案が必要である．

本文では，既往の地震時崩壊の事例にみられる谷埋め高盛土の被害の特徴，これまでに土木研究所で実施した谷埋め高盛土の地震時変状のメカニズムや，変状を抑制するための対策手法の効果等を把握するための遠心模型実験の結果について述べるとともに，実験結果及び被災事例を対象とした2次元変形解析の結果を報告し，谷埋め高盛土の地震時変形評価の要点について述べる．

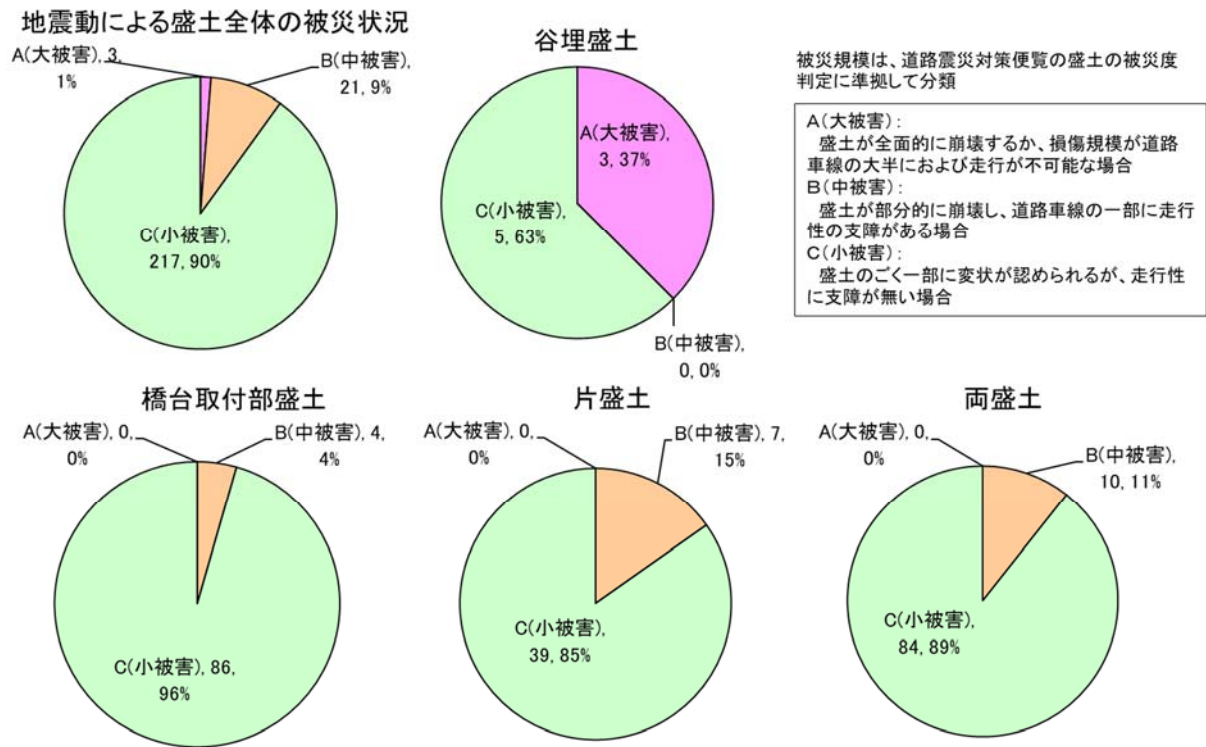


図1 2011年東北地方太平洋沖地震における直轄国道における道路盛土の被災傾向

## 2. 既往の地震における道路盛土の被害の傾向

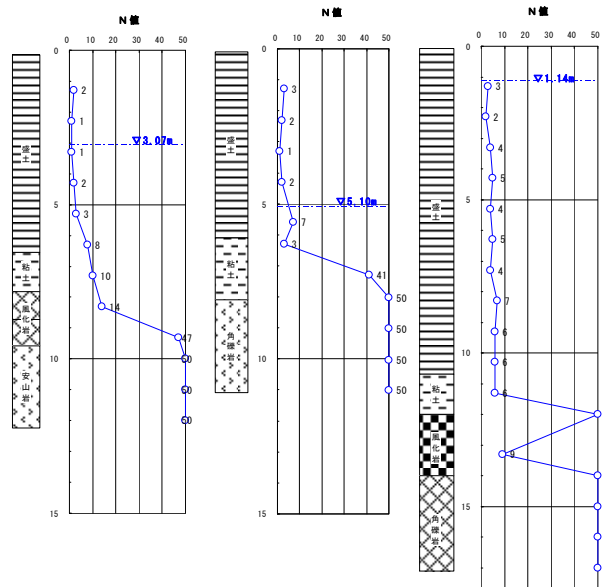
平成16年新潟県中越地震、平成19年能登半島地震、駿河湾を震源とする地震、平成23年東北地方太平洋沖地震等の近年の大地震において、谷部を横断する道路盛土（以下、谷埋め盛土という）が大規模崩壊し、震後の道路交通機能の確保に支障となる事例が報告されている。

図1は、2011年東北地方太平洋沖地震における直轄国道の盛土区間で何らかの被災箇所を対象に被害の傾向を分析したものである。被災程度については、災害査定資料、被害調査報告書をもとに道路震災対策便覧（復旧編）<sup>1)</sup>の被災区分に従って分類している。何らかの被害が生じた直轄国道の盛土区間全体では大被害に至った割合は少ないが、大被害に至った事例はいずれも谷埋め盛土において生じている。一方で、橋台取り付け盛土や平地部の盛土に多い両盛土では大被害に至った事例は見られていない。本事例からは、地震後の道路機能の確保の観点から谷埋め盛土の耐震性の確保が重要であると言える。

既往の谷部を埋めた盛土の大規模な崩壊は盛土内の水が要因と考えられているが、一例として平成19年(2007年)能登半島地震で被災した能登有料道路（現のと里山海道）の事例を紹介する<sup>2)</sup>。代表的な被災状況を写真1に示す。平成19年(2007年)能登半島地震では、能登有料道路において11箇所で大規模な盛土崩壊が生じた。地震後に異なる被災程度の異なる地点で実施した盛土のり尻部におけるボーリング柱状図を図2に示す。ここで、被害程度は、「大規模崩落」は盛土がすべり崩壊したものの、「中被害」は概ねのり面の変状や路面のクラック等が路床まで達しているもの、「無被害」は被害が報告されていない箇所である。なお、縦38（大規模崩落）については、同一盛土内の未崩落箇所でも実施されたものである。これらより、被害程度によらず盛土内のN値はいずれも5以下と低い傾向にあり、盛土内の水位については、無被害及び中被害箇所では比較的低い一方で、大規模崩落箇所では非常に高く、表層付近にあることがわかる。以上から、地山からの浸透水等により盛土内の水位が高かったことが被害を拡大させた大きな要因であることが考えられている。



写真1 能登有料道路の盛土崩壊<sup>3)</sup>  
(H19能登半島地震)



(a)縦26(1) 無被害 (b)縦22(2) 中被害 (c)縦38 大規模崩落  
図2 能登有料道路における盛土のり尻付近の地盤柱状図<sup>2)</sup>

### 3. 動的遠心模型実験による谷埋め盛土の地震時崩壊のメカニズムの把握

前項で述べたとおり、既往の事例から、谷埋め盛土の地震時崩壊には盛土内の水が大きく影響していることが考えられる。これまで土木研究所では、谷埋め盛土について、動的遠心模型実験等により耐震性向上のための排水対策や締固め方法、構造的対策等による耐震対策法の検討を行っている。ここでは、動的遠心模型実験の結果について紹介する。

図3に動的遠心模型実験の代表的な模型図を示す。実験は盛土高さ15mの盛土を想定し、50Gの遠心力を作用させながら、盛土背面の給水タンクの水位を一定に調整し、給水パイプにより盛土内に浸透水(粘度を50倍に調整したメチルセルローズ水溶液)を給水し、所定の盛土内水位に達した後に地震動(後述の図4(b)と図7(a)はレベル2地震動タイプⅠ、それ以外はレベル2地震動タイプⅡの加速度を約0.7倍した波形)による加振を行ったものである。

図4に盛土内水位、盛土材料の密度(締固め度)の条件を変化させた実験における変状の発生状況を示す。盛土内水位は背面水位の調整及び盛土のり尻に基盤排水層を設置することにより変化させている。

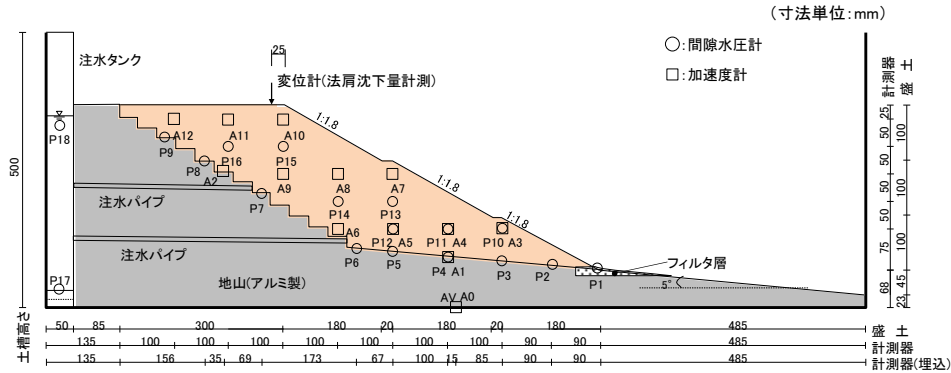


図3 実験模型概要

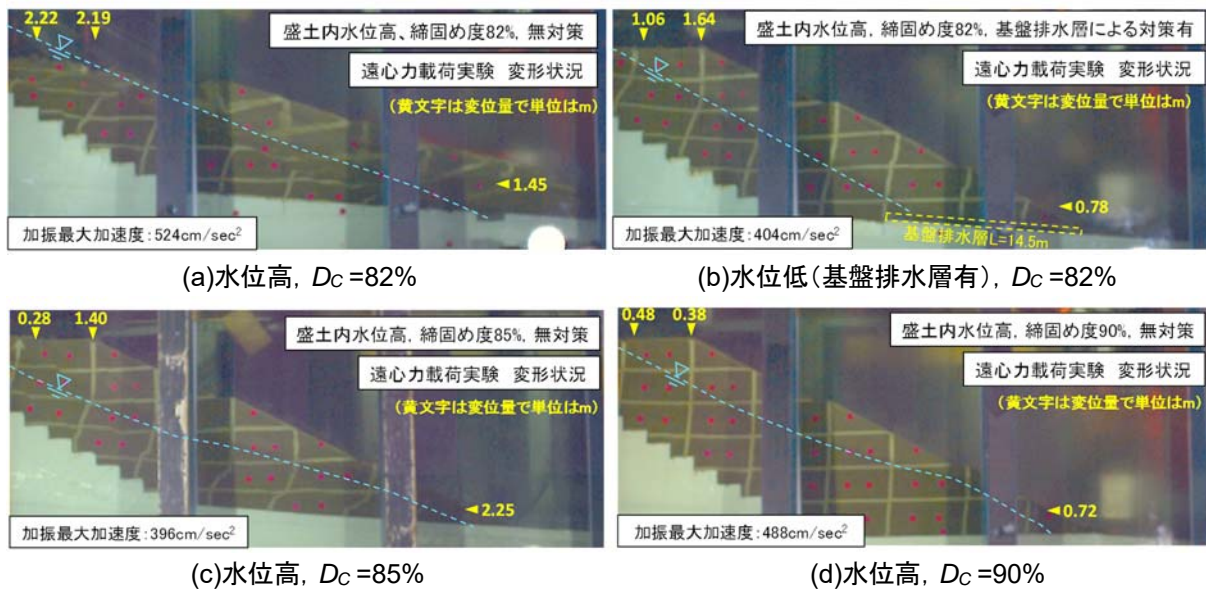


図4 盛土内水位、盛土材料の締固め度を変化させた遠心模型実験結果

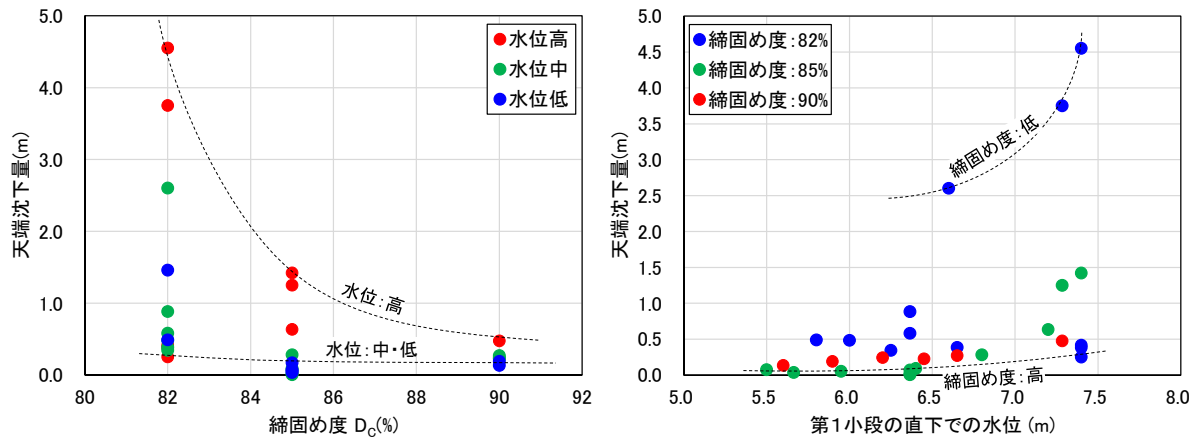
実験結果から、いずれのケースにおいても盛土の変形は地下水位以下の盛土のせん断変形が卓越していることが分かる。

図4(b)は、のり尻部に基盤排水層(L=14.5m)を設置し、のり尻付近の水位を低下させた実験とその解析結果である。無対策の図4(a)と比較すると、水位が高い(a)は天端から法肩の沈下量が2mを超えているが、水位を低下させた(b)は天端の沈下量が解析では1m以内に抑制されている。ただし、本実験で使用した盛土材料は、比較的透水性がよい砂質土であり、細粒分を多く含み、透水性が悪く保水しやすい盛土材料では水位が低下しにくく排水対策の効果が限定的となる場合があることに注意が必要である。

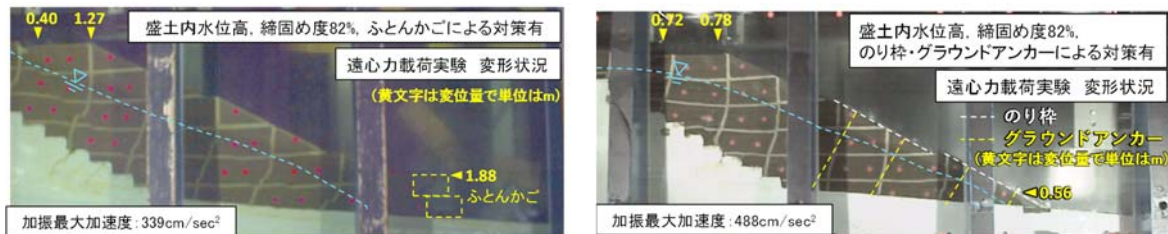
また図4(a), (c), (d)によれば、締固め度が82%から85%及び90%になることで、盛土のせん断変形が抑制され、天端沈下量が大幅に抑制されていることがわかる。

図5に、締固め度 $D_c$ 、第1小段(下段)直下での水位と天端沈下量との関係を示す。 $D_c$ に着目すると、 $D_c$ が低くなると沈下量が増大するが、特に水位が高い場合に $D_c$ が低くなると変形量が急増する傾向がある。このように、谷埋め盛土の地震時の被害軽減のためには、盛土の締固めと排水による盛土内水位の低下、特にのり尻付近の水位の低下が重要であることが分かる。

図6に、谷埋め盛土の地震時変状対策の効果を確認するための遠心模型実験の結果を示す。図6(a)は、ふとんかご(高さ1.5m, 幅3m, 2段)による対策を行った実験であり、図4(a)と比較すると、天端沈下量とのり面のはらみ出し量が抑制されており変形量が抑えられている。また図6(b)は、のり尻からのり面中腹まで、のり枠(実験模型はアクリル板 $t=3\text{mm}$ )とグラウンドアンカー(実験模型は $\phi 0.7\text{mm}$ のワイヤ



(a) 盛土材料の締固め度と天端沈下量の関係 (b) 第一小段直下での水位と天端沈下量の関係  
 図5 締固め度及び地下水位と天端沈下量の関係



(a)ふとんかごによる対策有 (b)のり枠+グラウンドアンカーによる対策有  
 図6 対策有の場合の変形状況

一) による構造的な補強を行った実験であり、図4(a)と比較すると、のり尻付近のはらみ出しが対策工により抑制されることで、天端からのり肩の沈下量も大幅に抑制されている。このように、盛土ののり尻付近の盛土の変形を抑制することで、谷埋め盛土の地震時の大規模な崩壊や沈下の抑制可能なことが分かる。

#### 4. 2次元静的自重変形解析の地震時変状評価手法としての適用性の検討

前項で示した遠心模型実験を対象として、2次元FEM液状化流動解析「ALID」<sup>5)</sup>(以下ALIDという)により自重変形解析を行い、盛土の締固め度、盛土内水位、対策工の有無などが地震時変状に及ぼす影響を解析で適切に再現できるか検証を行った。

ALIDは、地盤の液状化に伴う地盤変形を解析する手法であり、地震時の地盤や盛土材料の剛性低下を考慮し動的な現象を静的な現象に置き換えた比較的簡便な解析手法である。地下水位以深の液状化層の液状化に対する抵抗率 $F_L$ を算定し、 $F_L$ に応じた地盤の剛性低下に伴う変形の発生を静的に計算する手法である。ここでは、基礎地盤、盛土内水位下、盛土内水位上に分け、基礎地盤は弾性モデル、盛土内水位下は地震時の剛性低下を考慮し、盛土内水位上は地震時の剛性低下を考慮しない弾・完全塑性モデル「改良MC/DPモデル」とした。対象とした実験及び解析手法の詳細は参考文献5)~7)を参照されたい。

図7に、前項で示した遠心模型実験と自重変形解析による解析による地震後の変形状況の例を示す。遠心模型実験では、盛土が不飽和の状態在所定の遠心加速度(50G)を載荷し、その状態で盛土模型背面から浸透水を供給しているため、盛土模型内部の飽和度を土壌水分計で計測すると、加振直前の盛土は完全に飽和しておらず、飽和度は92~94%程度であった。これを考慮すると、盛土材料の繰返しせん断強度比 $R_L$ は、既往の研究から飽和度100%に近い室内土質試験(繰返しせん断強度試験)による $R_L$ の約2倍となることが推察される<sup>7)</sup>。このため、本解析では盛土内水位以深の盛土材料の $R_L$ を繰返しせん断強度試験による $R_L$ の2倍に設定して解析を行った。

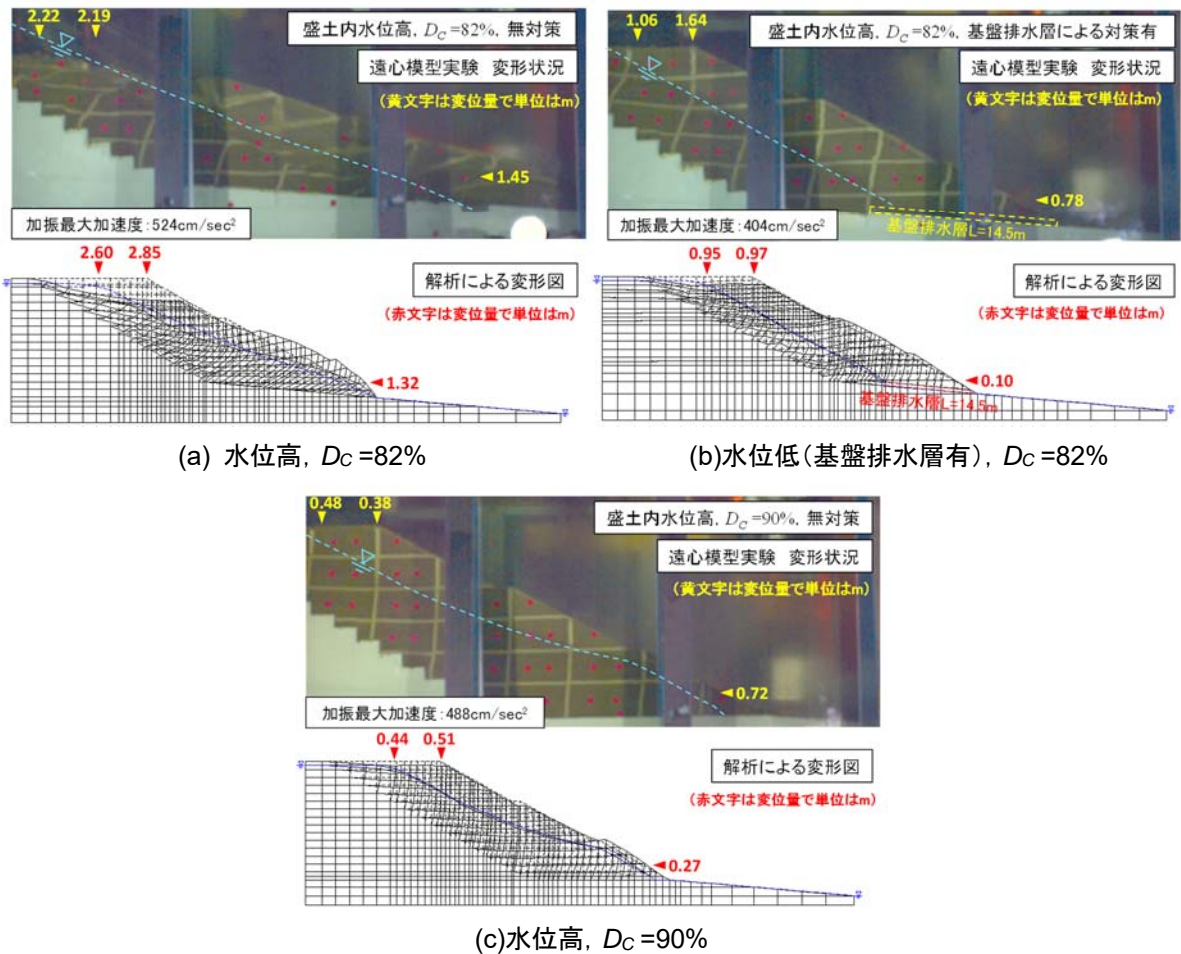


図7 盛土内水位, 盛土材料の締固め度を変化させた遠心模型実験とその解析結果

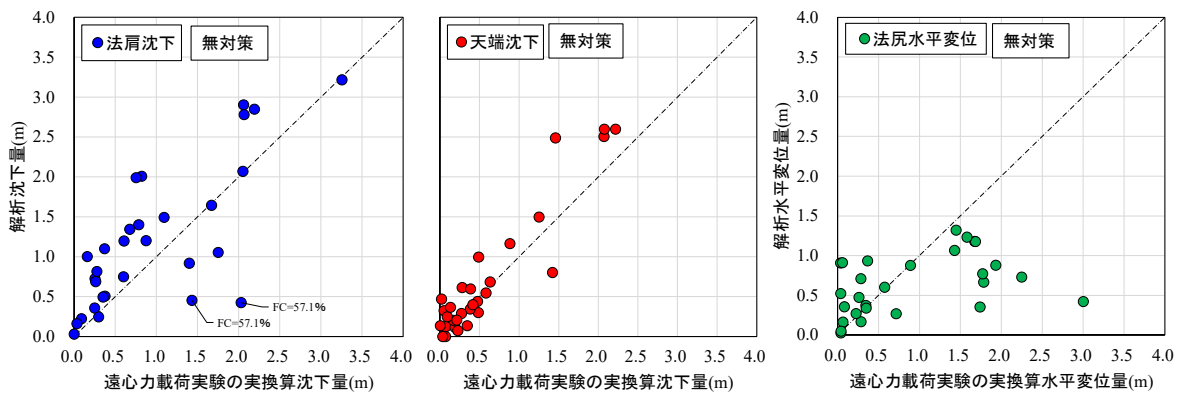


図8 対策有の場合の変形状況

図7(a)と(c)の締固め度違いや, 図7(a)と(b)の排水対策の有無による盛土内水位の違いを解析により適切に再現でき, 変形量自体も概ね整合した。

図8に, 動的遠心模型実験と自重変形解析の変形量の関係を示す。解析による天端及び法肩の沈下量は, 実験結果と比較してやや大きくなるものの, ばらつきは少ない結果となった。一方, のり尻の水平変位量はばらつきが大きく, 解析による変位が実験に比べて抑制されているケースがみられる。実験では地山と盛土の接合部は, 摩擦抵抗はあるものの滑動できるが, 解析では盛土モデル底面が剛体である

地山に結合しているため、のり尻に近い範囲の変形量が抑制されたものと推測される。

以上のとおり、盛土内水位や盛土材料の動的強度を正確に設定するなど適切に解析モデルを作成して解析を行うことで、地下水位、締固め度、対策工の有無等の違いを適切に表現できることが確認できた。

## 5. 被災事例を対象とした解析手法の適用性の検証

2011年東北地方太平洋沖地震における盛土崩壊事例を対象に、地震時残留変形解析手法の適用性等の検討を行った。なお、本事例を含め、過去の被災事例を対象に同様の検証しており、詳細については文献8)を参照されたい。

対象とした事例は、宮城県亶理郡山元町に位置する丘陵部の谷間に構築された国道6号線の谷埋め盛土区間である。図9に、被災状況、被災箇所を平面図及び断面図を示す。谷埋め盛土全体にわたって路面の沈下、クラック等の変状が確認され、大きな谷埋め部の切盛り境付近から約50mの区間で盛土崩壊が発生し、法肩部の沈下量は約4m程度である。近傍震度は6強（山元町浅生原）であった。道路盛土背面の造成地内には複数の集水井も設置されていたことや、災害復旧時も沢の出口にあたる位置では湧水によるのり尻付近小崩壊も確認され、元々高い地下水位であったことが推察された。

本事例の崩壊箇所の断面を対象に再現解析を行った。解析モデルは、4.と同様に、基礎地盤、盛土内水位下、盛土内水位上に分け、基礎地盤は弾性モデル、盛土内水位下は地震時の剛性低下を考慮し、盛土内水位上は地震時の剛性低下を考慮しない弾・完全塑性モデル「改良MC/DPモデル」とした。盛土内水位下については繰返しせん断強度比 $R_L$ を設定し、所定の地震外力（繰返しせん断応力比）との関係から液状化に対する抵抗率 $F_L$ を計算し、この $F_L$ に基づきせん断剛性を低下させて自重解析を行った。

解析条件のうち、土質定数、盛土内水位等は被災後の地盤調査結果を基に設定した。繰返しせん断強度比 $R_L$ は道路橋示方書の液状化判定式を準用し $N$ 値と細粒分含有率 $FC$ から算出し、盛土材料は砂質土で平均 $N$ 値は3.0、細粒分含有率 $FC$ は27.1%であった。地下水位は地盤調査時の水位を設定した。水平震度は近傍観測所のEW成分の最大加速度から地表面震度として0.87とした。

図10に解析結果を示す。崩壊箇所における沈下量は約4m程度であるが、解析結果におけるのり肩部の沈

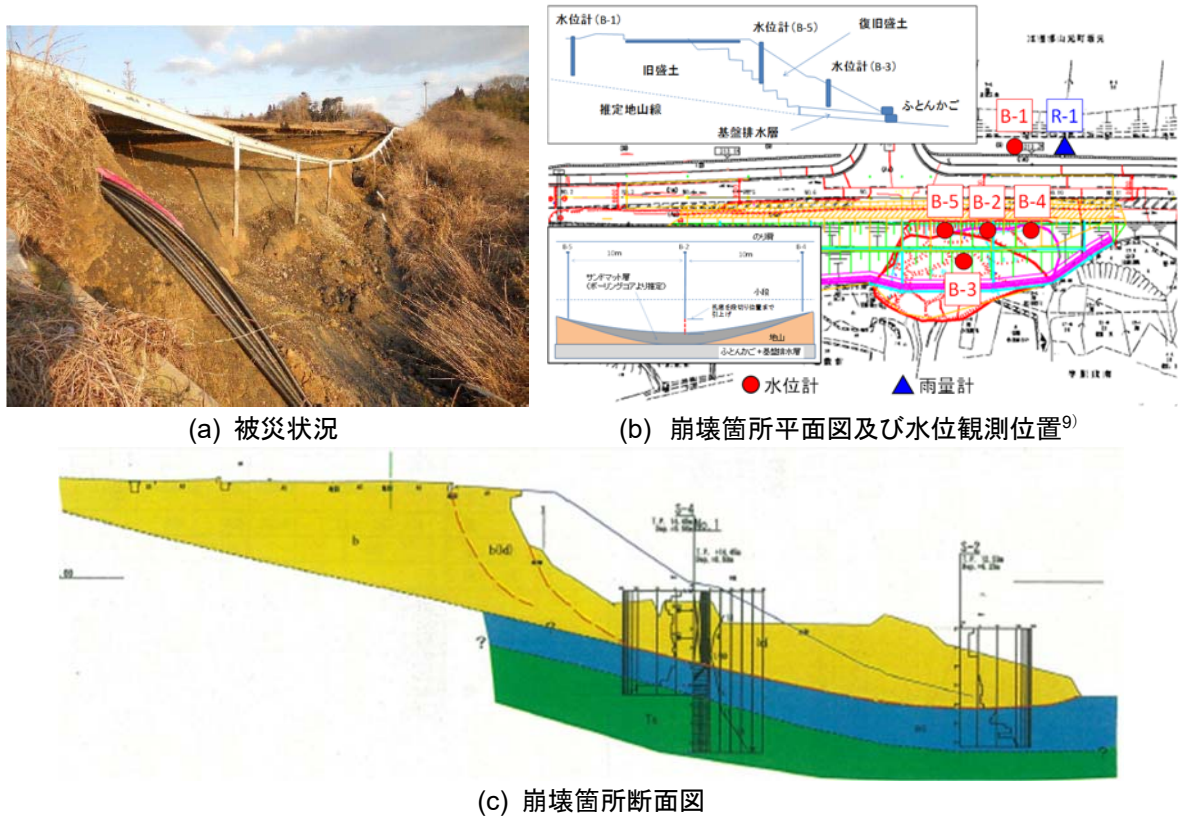


図9 盛土崩壊状況と水位観測機器の配置

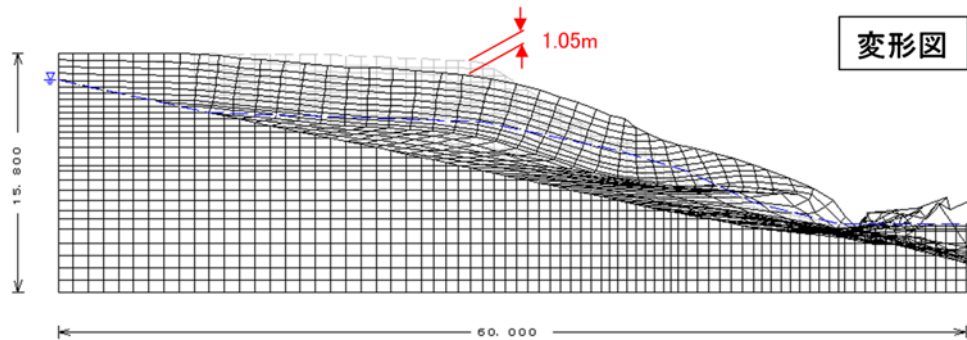


図10 解析結果

下量は1.05mとなり、比較的大きな沈下が生じたものの被災事例よりは小さい結果となった。

実被災事例の再現にあたっては、盛土の $N$ 値や盛土材料の粒度にはばらつきが多く、これらが影響している可能性もあるが、水位に関しても、崩壊箇所の調査時の水位は崩壊により水位が低下している場合があり、地震発生時の水位と整合していないことも主要因の一つとして考えられる。

本箇所においては、復旧にあたって盛土材料の改良や基盤排水層等の設置等の排水対策が施されているため、被災時とは盛土の条件が異なっているが、災害復旧された後の2012年6月より水位観測を実施している<sup>9)</sup>。図9(b)に水位観測の計測器の配置位置を示している。水位計は沢筋及び沢の形状を考慮して、山側に1箇所、のり肩に3箇所、のり尻に1箇所の計5箇所設置し、山側の平地部分に雨量計を設置している。

ここでは例として、2013年10月1日～2014年9月30日までの水位変動を図11に示す。降雨に対して各水位計が大きく反応し、大きいところでは3m程度の水位上昇が観測されており、本被災箇所は水が非常に

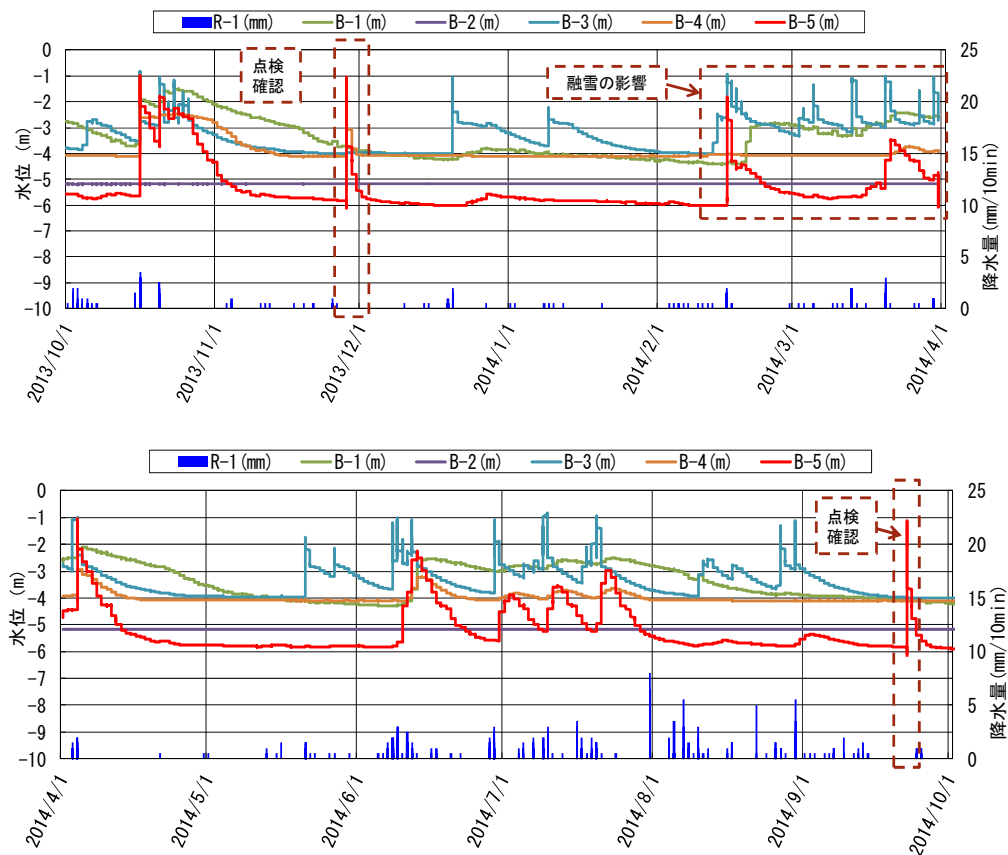


図11 盛土内水位の観測結果



集まりやすい傾向があることがわかる。また、小段付近に設置したB-3に着目すると降雨時には小段から-1m程度まで水位が上昇していることがわかる。また、季節変動もみられ、2月～4月、6月～8月の間は全体的に高い水位が維持される傾向がみられる。前者は融雪の影響が考えられるが、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の際も同様に水位が比較的高い状態であった可能性も考えられる。

本事例のように、谷埋め盛土における弱点箇所については、水が集まりやすく、気象条件等により変動しやすい傾向があることが想定されるが、谷埋め盛土の耐震性の評価にあたっては盛土内水位の把握と解析にあたっての適切な水位の設定が重要であるといえる。

## 6. まとめ

谷埋め高盛土の地震時変状は、主に①盛土内水位、②盛土材料の密度・粒度・飽和度等から定まる動的強度、③地震外力の大きさの影響を受けることが動的遠心模型実験により明らかにした。

解析に用いた静的自重変形解析は、前述のとおり地震時の地盤の変状を比較的簡便に解析可能な手法であるが、盛土内水位、盛土材料の動的強度、地震外力などを適切に設定することで、谷埋め高盛土の変状についても概ね再現することができた。

また、実被災盛土における水位観測結果から、被災箇所においては、水が集まりやすく、気象条件等により盛土内水位は大きく変動しており、谷埋め盛土の耐震性の評価にあたっては盛土内水位の把握と適切な設定が重要であることが分かった。

以上を踏まえ、谷埋め盛土の耐震性の適切な評価に向けて、水位観測や物理探査（電気探査）等による盛土内の水位を把握する手法、サンプリング及び室内土質試験や物理探査（弾性波探査）等による盛土全体の動的強度を把握する手法及び解析に当たりこれらのパラメータを適切に設定する手法等の整備が課題であると考えられる。

## 参考文献

- 1) (公社)日本道路協会：道路震災対策便覧（震災復旧編）令和4年度改訂版，2023.
- 2) 平成19年(2007年)能登半島地震被害調査報告，土木研究所資料第4087号，2007.
- 3) 佐々木哲也，杉田秀樹，大川寛，水橋正典：2007年能登半島地震で被災した盛土における地盤調査，土木学会第63回年次学術講演会，2008.
- 4) 佐々木哲也，加藤俊二，東拓生，佐々木直也他：谷埋め高盛土の地震時変形に関する動的遠心模型実験，土木研究所資料，第4427号，2022.
- 5) (株)地盤ソフト工房：ALID/Win 地盤土の構成則(第3版)，2016.
- 6) 東拓生，佐々木哲也，加藤俊二：谷埋め高盛土の地震時変形挙動に関する解析手法の検討，土木技術資料，Vol.62，No.12，pp16-19，2020.
- 7) 東拓生，佐々木哲也，加藤俊二，佐々木直也：谷埋め高盛土の地震時変状に及ぼす盛土幅の影響，第16回日本地震工学シンポジウム，2023. (投稿中)
- 8) 佐々木直也，東拓生，佐々木哲也，加藤俊二：谷埋め高盛土の地震時の変形に関する被災事例を対象とした解析手法の検討，土木学会第77回年次学術講演会，2022.
- 9) 加藤俊二，佐々木哲也，梶取真一：融雪水による盛土内水位変動の影響，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，pp373-374，2014.

## **Investigation of evaluation method of earthquake deformation of valley-filled road embankments**

SASAKI Tetsuya <sup>1)</sup>, KATO Shunji <sup>2)</sup>, AZUMA Takuo <sup>3)</sup> and SASAKI Naoya <sup>4)</sup>

1) Senior Researcher, Public Works Research Institute

2) Team Leader, Public Works Research Institute

3) Senior Researcher, Public Works Research Institute

4) Yachiyo Engineering CO., Ltd

(Former, Exchange Researcher, Public Works Research Institute)

### **ABSTRACT**

In recent large-scale earthquakes, large-scale collapse of valley-filled road embankments affecting post-earthquake road traffic functions has been reported. In order to prevent such damages, it is necessary to develop appropriate design methods and reinforcement methods for existing embankments, as well as to propose analytical methods to evaluate seismic resistance of existing valley-filled embankments. In this study, the factors affecting the collapse of valley filled embankments during an earthquake were clarified by dynamic centrifugal model tests. The applicability of two-dimensional self-weight deformation analysis as an evaluation method for the deformation of valley-filling embankments during an earthquake was verified with the dynamic centrifugal model test results and past case histories. In addition, from the results of water level observation of actual embankments, it was confirmed that there is a large fluctuation range in the water level in the embankment. It was suggested that appropriate setting of the water level in the embankment is important for evaluating the seismic resistance of the valley-filled embankments.

*Keywords: Valley filled embankment, Seismic damage, Centrifugal model test, Deformation analysis*