

## 谷埋め高盛土の地震時崩壊事例と耐震性照査手法

東 拓生・佐々木哲也・加藤俊二・佐々木直也

### 1. はじめに

平成16年新潟県中越地震、平成19年能登半島地震、平成23年東日本大震災などの近年の大地震において、谷部を横断する道路盛土（以下「谷埋め高盛土」という。）が大規模崩壊し、地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、①新設時の適切な耐震性照査手法の提案、②既設盛土の効率的な弱点箇所抽出手法の提案、③既設盛土の耐震性照査手法の提案、④既設盛土に対する合理的な耐震補強工法の開発などが必要である。

本報では、谷埋め高盛土の地震時崩壊事例について述べるとともに、主に前記の①及び③の提案に向け、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及びこれらを対象とした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状対策の要点について述べる。

### 2. 近年の谷埋め高盛土の被災事例<sup>1)</sup>

#### 2.1 のと里山海道における被災事例（平成19年能登半島地震）

平成19年3月25日に発生した平成19年能登半島地震により、能登有料道路（現 のと里山海道）において大規模な盛土崩壊が11箇所が発生した。これにより柳田IC（石川県羽咋市柳田町）～穴水IC（石川県鳳珠郡穴水町上野）までの48.2kmが、応急復旧完了まで1か月間通行止めとなった。

大規模崩壊が発生した11か所は、いずれも谷地形を埋めた高さ16～36mの高盛土で、後背地及び周辺域から地表水・地下水が供給される集水地形上の盛土であった。被災規模は箇所によって異なるが、崩壊延長は30m～140m、崩壊高さは16m～36m、崩壊土量は5,600m<sup>3</sup>～39,700m<sup>3</sup>で

あった。地震直後の現地調査では、多くの大規模崩壊箇所で大規模な土砂が流出している状況が確認され、崩落土砂が最大で200m程度先まで到達していた箇所も見られた。

大規模崩壊が発生した箇所においては、長年にわたる盛土内への水の浸透により、盛土材が脆弱化するとともに、保水しやすい状態となり、常に盛土内水位が高い状態であったと考えられている。このような状態で強い地震動を受け、盛土内水位以深の盛土材の過剰間隙水圧の上昇、せん断抵抗の低下により、盛土に流動的な変形が生じ、大規模崩壊に至ったと考えられている。

#### 2.2 東名高速道路牧之原SA付近における被災事例（平成21年駿河湾を震源とする地震）

平成21年8月11日に発生した駿河湾を震源とする地震により、東名高速道路 191.6kp付近において上り線盛土のり面が延長約40mにわたって崩壊し、5日間の通行止めが発生した。

地震前日の8月10日から当日の11日にかけて平成21年台風9号が接近した影響もあり、NEXCOの牧之原観測点で前日10日2:00～9:00の間に連続降雨量55.5mm、11日1:00～地震発生後の7:00までに連続雨量25.5mm（地震発生の日5:07までは13mm）の降雨があった。

被災した区間は道路の横断面を見ると凸形状、縦断面を見ると凹形状の丘陵地の尾根を覆うように構築された（馬の背に鞍を乗せたような）高盛土であり、水が集まりやすい地形・地質条件であったことから、降雨時に盛土内の水位が上昇し



写真-1 のと里山海道の盛土崩壊<sup>2)</sup>  
（H19能登半島地震）

やすかったと考えられている。また、盛土下部に使用された盛土材の泥岩が、長年の水の作用により風化（スレーキング）し強度低下するとともに、透水性が低下していたものと推定されている。その結果、盛土内の地下水位が上昇し、今回の地震が誘因となり崩落が発生したものと推定されている。



写真-2 東名高速道路牧之原SA付近の盛土崩壊<sup>3)</sup>

### 3. 谷埋め高盛土の耐震性照査手法

前項で述べたとおり、谷埋め高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、谷埋め高盛土について、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。

図-1に盛土内水位、盛土材料の締固め度  $D_c$  (以下「 $D_c$ 」と表記する。) の条件を変化させた遠心模型実験における変状の発生状況と、これらの実験を対象とした2次元変形解析「ALID」(以下「ALID」とする。) を用いた解析結果を示す。遠心模型実験は、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、盛土背面から盛土内に浸透水(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-1(b)と図-5(a)はレベル1地震動、図-2は関連する実験との整合を図るためレベル2地震動タイプIIの加速度を約1.2倍した波形、それ以外は当時使用していた加振装置の性能の制約からレベル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。またALIDは、地盤の液状化に伴う地盤変形を解析する手法である。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り、地

下水位以下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(実験及び解析手法の詳細は参考文献4~6を参照)。ここでは、地下水位以下の盛土部を液状化層と設定して応用した。

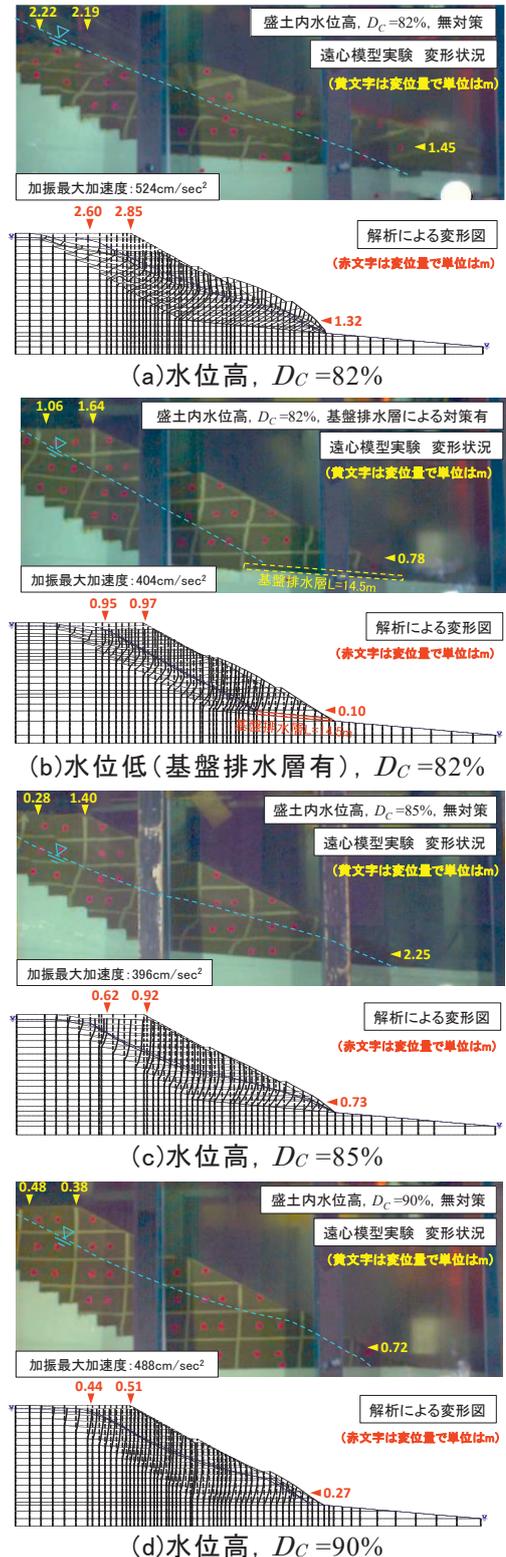


図-1 盛土内水位、盛土材料の締固め度を変化させた遠心模型実験とその解析結果

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-1(b)は、のり尻部に基盤排水層(L=14.5m)を設置し、法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-1(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排水対策の効果が限定的となることに注意が必要である。

また図-1(a), (c), (d)によれば、 $D_c$ 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た。

図-2に、地震時の盛土変状に及ぼす地形の影響を把握するため、盛土横断方向の幅（盛土幅）を1/2にした遠心模型実験と、これを対象とした解析の結果を示す。盛土幅が薄くなることで、盛土内水位がのり面表面近くまで上昇するとともに、のり肩直下の地山近傍で加速度応答が大きくなり、この実験の直後行った盛土幅の大きいケースよりも地震時の変形量が大きくなった<sup>7)</sup>。

図-3及び図-4に、過年度実施した無対策の実験ケースの $D_c$ 、水位と天端沈下量の関係をALIDによる解析結果とともに示す。 $D_c$ に着目すると、 $D_c$ が低くなると沈下量が増大し、第1小段（下段）直下での水位と天端沈下量の関係をみると、水位が高いケースで変形量が大きく、 $D_c$ が低いケースで変形量が急増する傾向がある。

図-5に、谷埋め高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とその解析結果を示す。図-5(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-1(a)と比較すると、天端沈下量とのり面のせり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-5(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=3mm）とグラウンドアンカー（実験模型はφ0.7mmのワイヤー）による構造的な補強を行った実験であり、図-1(a)と比較すると、のり尻付近のせり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。

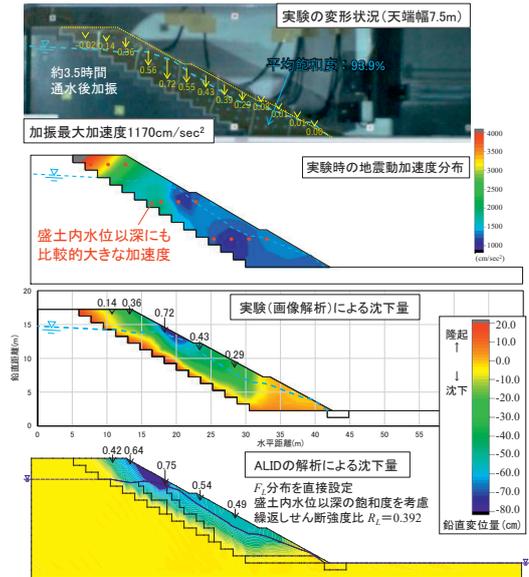


図-2 盛土幅を1/2にした実験と解析結果

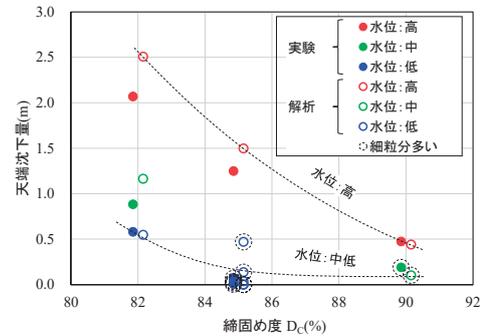


図-3 盛土材料の締固め度と天端沈下量の関係

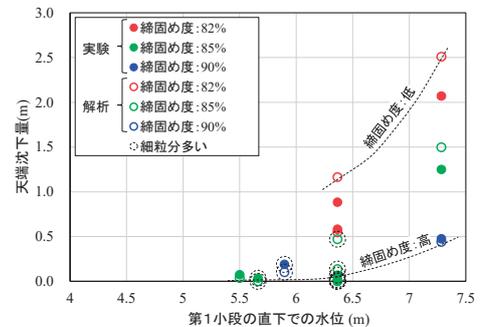


図-4 第一小段直下での水位と天端沈下量の関係

以上の実験を対象としたALIDによる解析結果は、水位や地震動加速度分布とともに、盛土内水位以深の盛土材料の飽和度等も考慮して動的強度を設定するなど、適切なモデル化を行うことで、地下水位以下の盛土の変形が卓越する状況や、地下水位、締固め度、盛土の形状、対策工の有無等の違いを適切に表現できており、概ね実験結果と整合している。

#### 4. まとめ

谷埋め高盛土の地震時変状は、地震外力により

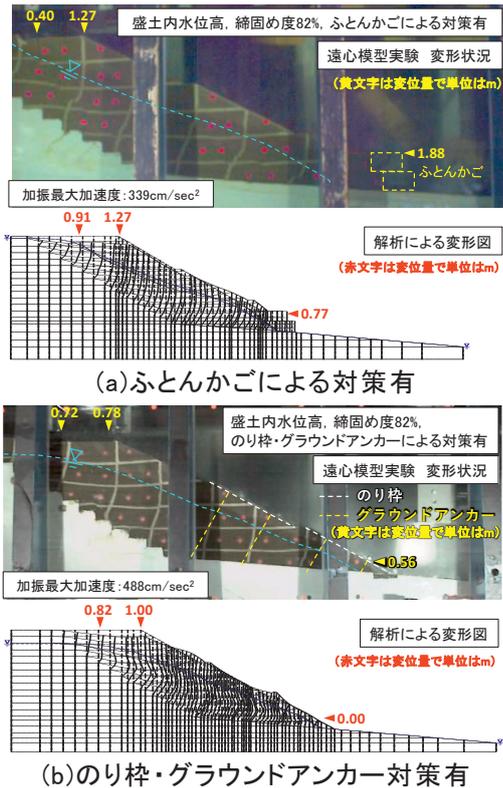


図-5 対策有の場合の変形状況

盛土内水位以深の盛土材料の過剰間隙水圧の上昇(有効応力の低下)による剛性低下によって引き起こされるため、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実験により明らかとなった。これらを踏まえて、設計・施工段階では、適切な密度管理、盛土内に水を浸透・貯水させないための十分な排水対策を行うことが重要である。既設の合理的な診断のためには、これらの要因に加えて、周囲の地形の影響なども含めて弱点箇所の抽出手法を確立し、これらも踏まえたスクリーニング手法の開発が必要である。また既設に対する耐震補強工法については、前述のとお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、排水対策の効果が限定的となる恐れがあることから、これも踏まえた耐震補強工法についても検討が必要である。

解析に用いたALIDは、前述のとおり液状化に伴う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、地震外力などを解析モデルに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。こうした解析手法を既設の耐震性評価に適用するにあたっては、水位観測や物理探査(電気探査)等による盛土内水位の把握、サンプリング及び室内土質試験や物理探査(弾性波探査)等により盛土材料の動的強度を適切に把握し、解析モデルに設定することが重要である。今後、新設の設計や既設の対策工の検討に、簡便で定量的な解析手法を適用できるよう、解析モデルの作成方法とともに、実盛土からの解析パラメータの取得方法等の高度化を図る必要がある。

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年3月
- 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年2月
- 3) 中日本高速道路(株)：【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年8月
- 4) 佐々木哲也、加藤俊二、東拓生、佐々木直也他6名：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年7月
- 5) (株)地盤ソフト工房：ALID/Win 地盤土の構成則(第3版)、2016年5月
- 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、第62巻、第12号、pp.16~19、2020年12月
- 7) 東拓生、佐々木直也、佐々木哲也、加藤俊二：谷埋め高盛土の地震時変状に及ぼす盛土幅の影響に関する遠心模型実験、土木学会第78回年次学術講演会、2023年9月(投稿中)

東 拓生



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  
AZUMA Takuo

佐々木哲也



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  
SASAKI Tetsuya

加藤俊二



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  
KATO Syunji

佐々木直也



研究当時 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、現 八千代エンジニアリング(株) 地質・地盤部 技術第三課  
SASAKI Naoya