

## (44) ジオテキスタイルを用いた落石防護補強土壁の動的応答解析

Dynamic response analysis of rockfall-protection soil wall reinforced with geosynthetics

遠田真澄\*, 前川幸次\*\*, 田島与典\*\*\*, 難波正和\*\*\*\*

Masumi Toda, Koji Maegawa, Tomonori Tajima, Masakazu Nanba

\*金沢大学大学院博士前期課程, 自然科学研究科 社会基盤工学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

\*\*工博, 教授, 金沢大学理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

\*\*\*金沢大学大学院博士後期課程, 自然科学研究科 環境科学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

\*\*\*\*課長, (株) ライテック新潟事務所 (〒951-8061 新潟県新潟市中央区西堀通7番町1155番地)

Key Words : reinforced soil wall, rockfall, geosynthetics, simulation

キーワード : 落石防護補強土壁, ジオテキスタイル, シミュレーション解析

## 1. はじめに

日本の国土は、おおよそ4分の3が山地で急峻な地形と脆弱な地質であるうえ、豪雨・豪雪の環境下において、また世界有数の地震国でもあるという、極めて厳しい自然条件にある。このため、落石災害により道路交通に障害を与える事例は少なくない<sup>1)</sup>。さらに、落石被害が多い背景として、近年主要都市間を結ぶ産業幹線道路や観光地を結ぶ観光道路などが、比較的山岳地帯を通ることが多くなってきていることがあげられる。このような山間における斜面上方からの落石は、道路交通に多大な影響を与える恐れがあり、道路交通の安全性の確保という面だけではなく、人の命を守るという面からも、道路を落石から保護することが必要と考えられている。

落石に対する対策工の一つとして、落石防護補強土壁がある。これは、補強盛土工法等に用いられるジオテキスタイルにより築造した落石防護擁壁である。落石防護補強土壁はコンクリート擁壁と比べ、エネルギー吸収性能に優れており、また構造体が軽いため設置できる地盤の制約が少なく済むといった利点がある。

著者らは、この落石防護補強土壁の実規模重錘衝突実験を行い、落石防護補強土壁の落石エネルギー吸収性能と落石捕捉挙動を確認した<sup>2)</sup>。しかしながらこの実験では斜面落下による落石エネルギーの減少があったため、構造体の終局限界を確認することはできなかった。

このような背景から本研究では、実規模重錘衝突実験を対象としてLS-DYNAによるシミュレーション解析を行い実験結果と比較することで、作成した解析モデルの妥当性を検討することを目的とした。

## 2. 実験概要

## 2.1 実験方法

実験は、斜面高さ約37m、斜面平均勾配約40°の斜面から落石に見立てた重錘を落下させ、法尻に設置した実規模落石防護補強土壁に衝突させる方法で行った。重錘は落石防護柵の認証試験に関するEOTAの規格<sup>3)</sup>に準じた4種類(2.5ton, 5.2ton, 10.1ton, 17.1ton)を用い、全部で9ケースの実験を行った。

## 2.2 落石防護補強土壁

図-1は、落石防護補強土壁の断面図を示している。落石防護補強土壁は、30cm間隔で2種類のジオテキスタイルを交互に敷設した補強土体とジオセルと呼ばれる高密度ポリエチレン樹脂製枠に単粒度砕石6号を中詰めした緩衝体で構成されている。

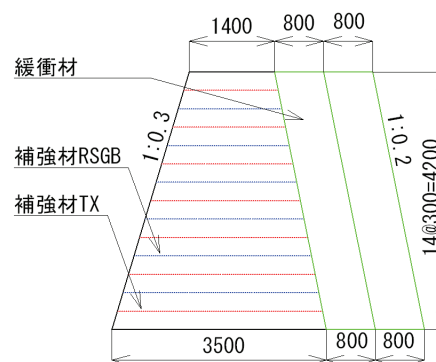


図-1 断面図 (TYPE 2)

ジオテキスタイルは、高密度ポリエチレン製の1方向補強材 (RSGB) とポリプロピレン製の多方向補強材

(TX)を用いた。補強土壁は、緩衝体幅が0.8m (TYPE2)と1.6m (TYPE3)の2形式とし、どちらも補強土体の形状は等しく、直高4.2m, 谷側勾配1:0.3, 山側勾配1:0.2, 補強土体天端幅1.4mとした。

また、落石防護の有効延長を12m, ジオセルの小口止めを両端部に1mずつ設置し、落石防護補強土壁の総延長を14mとした。さらに、実験最終段階において、補強土体単独構造 (TYPE1)の性能を確認するため、緩衝体を撤去し補強土体単体に対する重錘衝突実験も試みた。表-1に実験ケースごとの概要を示す。

表-1 実験概要

ケース	補強土壁	重錘質量	緩衝体
1	TYPE 2	5.2t	1列
2	TYPE 2	10.1t	1列
3	TYPE 3	17.1t	2列
4	TYPE 3	17.1t	2列
5	TYPE 3	17.1t	2列
6	TYPE 2	17.1t	1列
7	TYPE 1	2.5t	なし
8	TYPE 1	10.1t	なし
9	TYPE 1	17.1t	なし

### 3. 解析モデルと結果の比較

#### 3.1 解析モデル

解析には汎用陽解法有限要素解析ソフト「LS-DYNA」を使用した。図-2にTYPE1の解析モデルの概要図を示す。本研究では基本構造となる補強土体単独構造 (TYPE1)をモデル化し、ケース8の実験条件での解析を試みた。解析モデルの総接点数は49634, 総要素数は58928である。解析条件として、重錘質量10.1 tonに衝突速度15.689 m/s, 衝突回転角速度12.102 rad/s, 線速度エネルギー1243 kJ, 回転エネルギー284 kJ, 全エネルギー1527 kJを与え、重錘は水平に衝突したものとした。なお、重錘の衝突速度および回転速度は、高速度カメラの画像解析により算出し、この値からエネルギーを求めた。また、重錘衝突位置は、重錘衝突後に重錘を撤去し

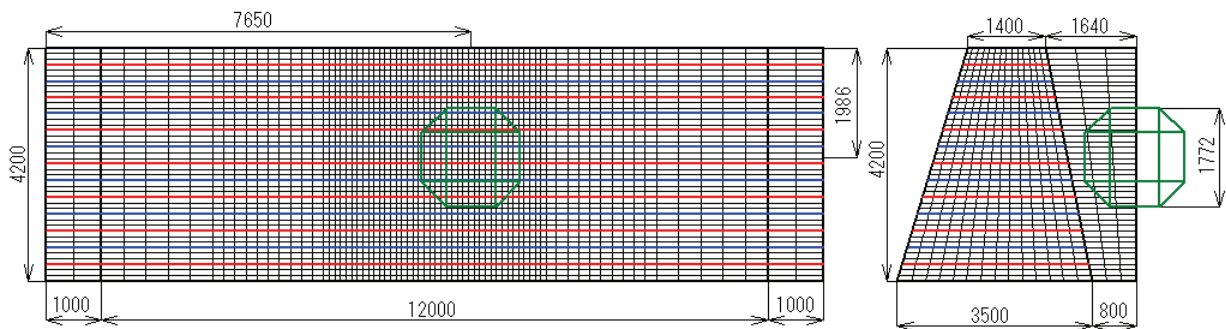


図-2 解析モデル概要図 (TYPE1)

た補強土壁の損傷状況から推定した。

以下、要素名等についてはLS-DYNAでの英字名称を用いる<sup>4)</sup>。

#### (1) 土堤材

土堤の主材料である土はSolid要素でモデル化し、破壊規準としてDrucker-Pragerの規準を適用した。土の物性値は室内土質試験の結果を参考に、密度1.5 ton/m<sup>3</sup>, せん断弾性係数5 N/mm<sup>2</sup>, ポアソン比0.3, 摩擦角38°, 粘着力0.05 N/mm<sup>2</sup>を与えた。

#### (2) 補強材 RSGB

図-3 (左)に示すRSGBはShell要素でモデル化し、同一平面内の土堤のSolid要素と節点を共有させた。材料特性は単軸引張試験の結果を基に、密度0.92 ton/m<sup>3</sup>, 弾性係数525 N/mm<sup>2</sup>, せん断弾性係数239 N/mm<sup>2</sup>を与えた。なおRSGBは構造の異方性を考慮し、軸直行方向および面法線方向の弾性係数とせん断弾性係数をそれぞれ10分の1, 100分の1とした。

#### (3) 補強材 TX

図-3 (右)に示したTXはShell要素でモデル化し、同一平面内の土堤のSolid要素と節点を共有させた。TXは等方性材料とし、材料特性は単軸引張試験の結果を基に、密度0.91 ton/m<sup>3</sup>, 弾性係数174 N/mm<sup>2</sup>, ポアソン比0.1を与えた。

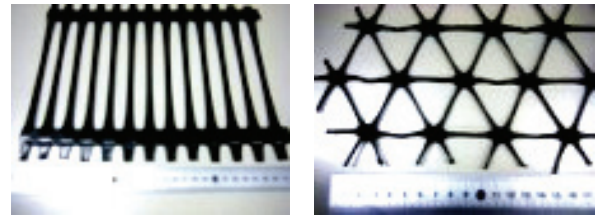


図-3 RSGB (左)とTX (右)

#### (4) 重錘

実験に用いた重錘は、Solid要素でモデル化し、密度は2.56 ton/m<sup>3</sup> (総質量10.1 ton)を与えた。

### 3.2 実験と解析結果の比較

実験結果及び解析結果の例として、図-3はケース8の実験映像を、図-4はケース8の解析画像をそれぞれ

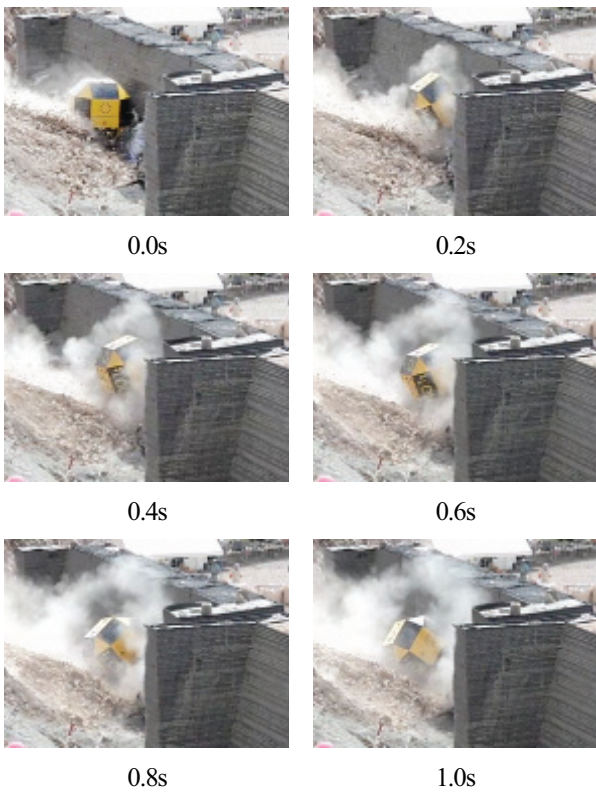


図-4 実験映像

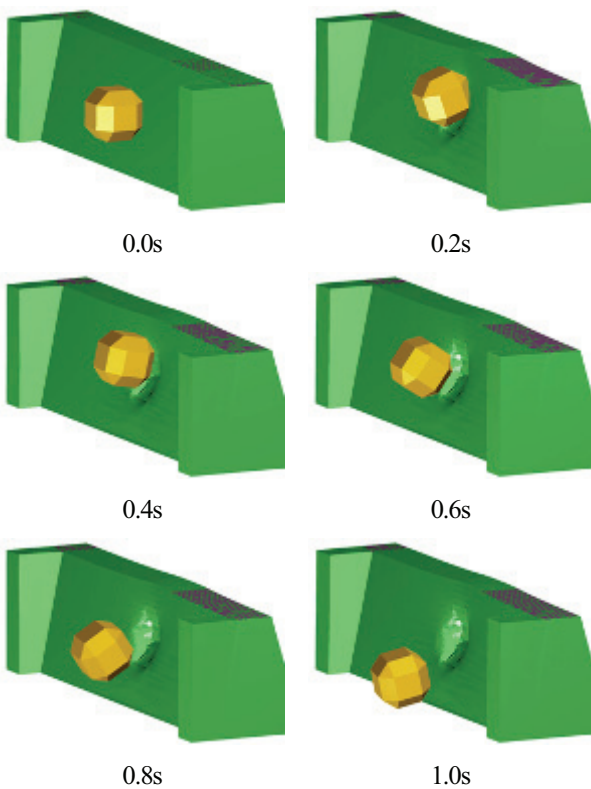


図-5 解析画像

示している。解析モデルにおいても、重錘を捕捉し、落石防護の機能を確認することができた。重錘は補強土体に衝突した後、補強土体に貫入しながら回転運動で迫り上がる挙動を示している。

### (1) 補強土体背面変位

実験では重錘衝突後の補強土体に生じた背面の残留変位をトータルステーションにて測定した。その結果と解析により得られた背面の残留変位を比較する。図-6

(a)は実験および解析における補強土体背面の残留変位の測定位置を示し、図-6 (b) 実験値、および (c) 解析値は地盤からHにおける残留変位量を示している。残留変位の最大値はどちらも同じ位置で生じており、解析値は実験値の70%程度であり、実験値および解析値は共に、残留変位の大きい順にH=2.1, 3.3, 4.2, 0.9, 0.0mとなっている。しかし、解析値では、2番目および3番目に大きい残留変位も1番目と同程度生じているが、実験では2.1mの残留変位が卓越しており、実験と解析で異なる結果が得られた。

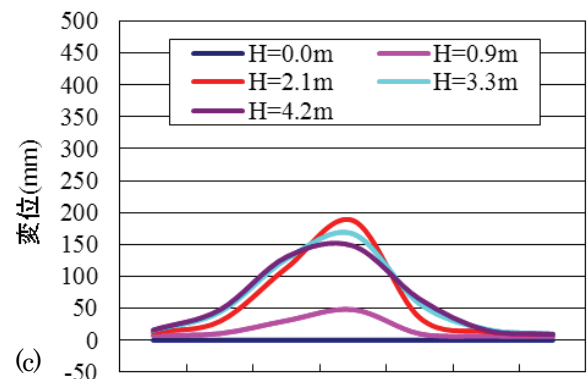
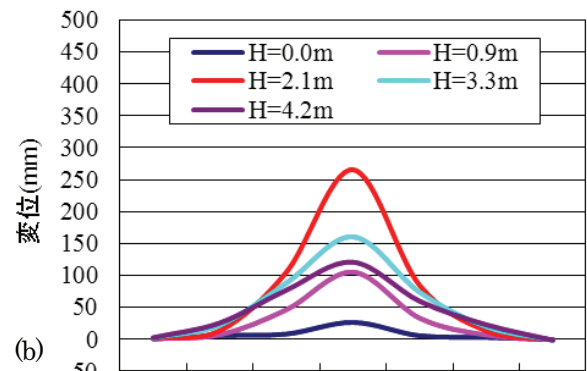
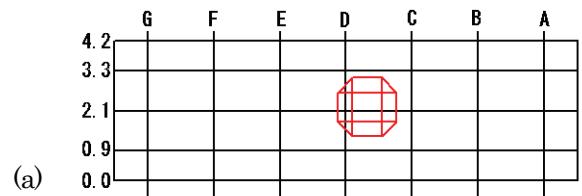


図-6 (a)残留変位測定位置、(b)実験値、(c)解析値

### (2) 重錘合成加速度

実験では、重錘の中心部に3軸加速度計を設置し、衝突時の重錘加速度を測定した。今回の測定方法では、加速度計が重錘と一体となって斜面を転がり落ちるため

衝突時の進行方向加速度を得ることが難しいことから、本論文では図-7に示すように3方向の合成加速度を用いて、解析における重錘加速度との比較を行った。

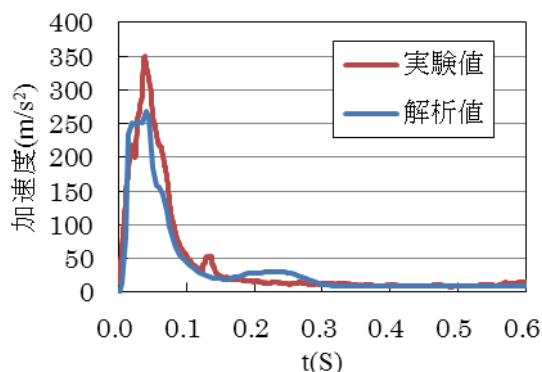


図-7 重錘加速度

図-7 から、重錘加速度の実験値と解析値は類似していることがわかり、衝撃力の作用時間がほぼ等しいことがわかる。最大値は実験値が  $350.2 \text{ m/s}^2$ 、解析値が  $269.1 \text{ m/s}^2$  となり、解析値は実験値の約 77% 程度となった。

### (3) 補強土体上面の加速度

実験では、補強土体上面に加速度計を設置し、衝突時に生じる加速度を計測した。図-8 は、補強土壁上面の中央部における重錘衝突方向の加速度を、実験値と解析値で比較したものである。

図-8 から、グラフの概形及び値ともに実験値と解析値はあまり一致していない。実験における加速度の最大

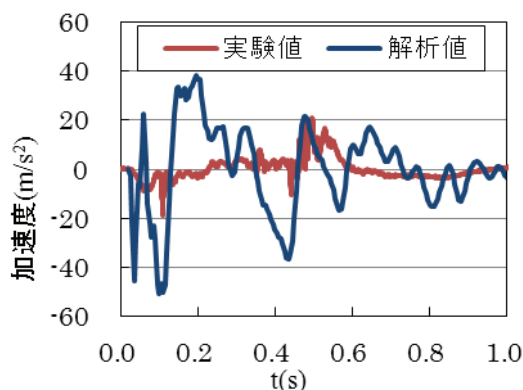


図-8 補強土体上面の加速度

値は  $20.9 \text{ m/s}^2$  であるのに対し、解析では  $47.35 \text{ m/s}^2$  と、約 2 倍の値が出ている。加速度センサーが補強土体の上面に埋設されていなかったため、正しく計測できなかったことが考えられる。

## 4. まとめ

本研究では、落石防護補強土壁の実規模重錘衝突実験の結果と LS-DYNA による解析結果を比較し、モデル化の妥当性を検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) 今回作成した基本構造である TYPE1 構造体の解析モデルは、衝突エネルギー約 1500kJ の落石を捕捉した。
- 2) 補強土体の背面変位について、解析では実験における最大残留変位の約 70% の背面変位が生じ、実験よりも小さな値となった。実験では 2.1m の変位がやや卓越した形となったが、解析では上方 3 測点の変位量の差は約 4cm 以内にとどまっている。
- 3) 重錘合成加速度について、実験と解析のグラフの概形はほぼ一致しており、解析値の最大加速度は実験値の約 77% であった。
- 4) 補強土体上面の加速度については、今回作成した解析モデルでは実験結果の挙動を示すことができなかったが、加速度センサーの設置上の問題も考えられる。

本研究では、基本構造である補強土壁体のみである TYPE1 のモデル化を試みた。今後、ジオセルによる緩衝体を有する TYPE2 や TYPE3 の構造体のモデル化を行う。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6.
- 2) 田島与典，前川幸次，難波正和，遠田真澄：ジオテキスタイルを用いた落石防護補強土壁の実規模重錘衝突実験，土木学会第 65 回年次学術講演会，I-265，2010.9.
- 3) European Organization for Technical Approvals (EOTA)：ETAG27，GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL of FALLING ROCK PROTECTION KITS，pp.34，2008.2.
- 4) Livermore Software Technology Corporation，LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL Ver.970，2003.