

東北本線粘性土切土崩壊における崩壊時挙動についての考察

切土崩壊, 東北地方太平洋沖地震, ニューマーク法

東日本旅客鉄道(株) 正会員 ○中村 宏
 (株)複合技術研究所 正会員 三平伸吾
 ジェイアール東日本コンサルタンツ(株) 羽矢 洋
 東日本旅客鉄道(株) 正会員 山内真也

1. はじめに

2011年3月の東北地方太平洋沖地震により, 東北本線178k900m付近のローム主体の粘性土切土が, 線路延長80mに渡って崩壊した。筆者らは, 前回報告¹⁾で, 通常設計に用いる地盤調査で修正ニューマーク法により変形解析を実施したが, この時の変形量は1.5m程度で実崩壊の再現性に欠けた。そこで, 三軸圧縮試験によりピーク強度を求め, 繰返し一面せん断試験により粘性土切土の著しい強度低下を表現して残留強度とした。次に, 2次元FEM解析を併用した修正ニューマーク法を用いて変形解析し, 線路直角方向に10m規模と, 実崩壊とほぼ同等な変形量を表現することができた。

本稿では, 現地調査, 詳細な地盤調査, 変形解析の結果を用いて切土崩壊時の挙動について考察する。

2. 崩壊状況

- ① 図-1より, 線路直角方向に約10m規模の崩壊が発生した。土砂の崩壊は2方向に分かれていた。
- ② 切土法尻に構築された石積土留が, 一部目地切れする等損傷したが(図-2), ほぼ全長に亘り被災を免れた。これより, 変形解析(後述)のすべり面は, 石積頂部に設定した。
- ③ 2011年3月11日の地震発生前の当該箇所付近(栃木県那須町)の降雨・降雪データを図-3に示す。地震前の降雨・降雪は非常に少なかった。

3. 切土斜面概要

- ① 図-4にボーリングにより得られた崩壊箇所の地質横断面図を示す。調査地の地盤は, 土質やN値等から判断し, 表-1に示す地層に区分される。
- ② 崩壊した切土斜面は鋭敏なロームおよび凝灰質粘土からなる自然地山であり, 標準的な1:1の法面勾配で切土され, 構築されていた(図-4)。
- ③ 既存No.1, No.BR-3のローム層と凝灰質粘土層の境界付近で, 一部乳白色風化層が確認された。
- ④ 2011年3月11日以降, 崩壊箇所周辺で発生した地震による地滑りにおいて, 乳白色風化層等が地震時に著しい強度低下を起こした可能性が高いとする知見がある²⁾。

4. 地盤調査および室内土質試験³⁾

- ① No.1-1の位置では地下水位は観測されなかった。
- ② 図-5に物理試験結果(抜粋)を示す。含水比は概ね液性限界に近い。なお, 飽和度は88~100%である。
- ③ No.1-1と既存No.1の中間付近にてPS検層を実施し, P波速度およびS波速度から, 微小ひずみレベルにおける土のせん断弾性定数 G_0 とポアソン比を求めた。
- ④ ローム層, 乳白色風化層, 凝灰質粘土層で動的変形特性

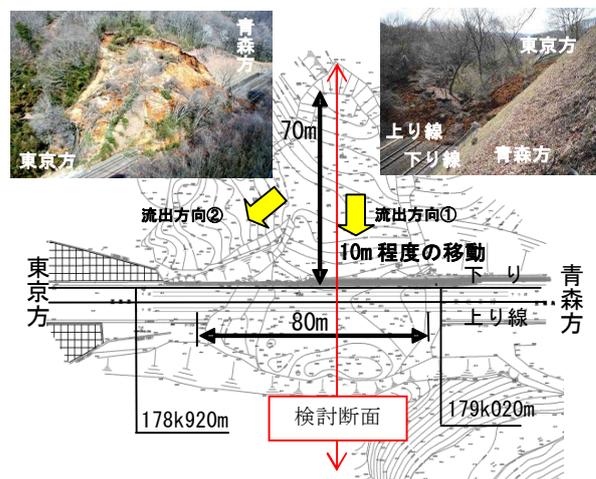


図-1 崩壊状況



図-2 石積土留壁状況(仮復旧後)

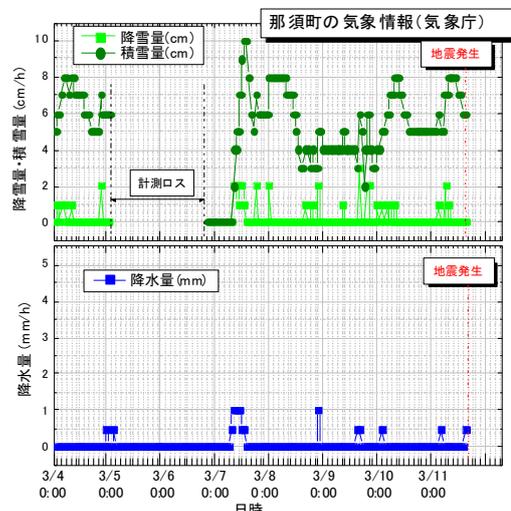


図-3 当該箇所付近の降雨・降雪データ(那須町)

を求めるため、繰返し三軸圧縮試験を実施した。得られた $G/G_0 \sim \gamma$ および $h \sim \gamma$ 曲線を、地震応答解析に用いる地盤材料特性として考慮した。

- ⑤ ローム層と乳白色風化層に対する強度低下を確認するため、ひずみ制御可能な一面せん断試験装置を用いて、定体積条件で片振幅 2.5mm として、累積変位量が 10m 程度となるまで繰返し一面せん断試験を実施した。
- ⑥ 乳白色風化層の静的強度 ($c=63.8\text{kN/m}^2$, $\phi=8.2^\circ$) は、下層の凝灰質粘土層と同程度 ($c=62.9\text{kN/m}^2$, $\phi=11.5^\circ$) であり、変位解析の最大強度は凝灰質粘土層と同じ特性としつつも、繰返し一面せん断試験結果に基づいて強度特性の低下傾向を別途設定した。最終的にはローム層ではピーク強度の 60% 程度、乳白色風化層では 27% 程度まで強度低下した (図-6, 表-2)。

5. 修正 Newmark 法による変位量解析³⁾

- ① 変形量解析で用いる入力地震動は、観測地震波を一旦基盤に落とし込み、この基盤波を当該崩壊箇所 (地上) まで持ち上げることで作成した。
- ② 滑動変位量を算定する前段として、まず極限すべり面内の平均的な応答加速度を、2次元 FEM 非線形逐次積分解析により評価した。
- ③ 2次元 FEM 解析により得られた各々の要素の応答加速度分布を考慮して平均的な入力地震波を作成し、円弧すべり安定解析で得られた推定すべり面に対し、修正 Newmark 法⁴⁾を適用して、地震時変形量を算出した。
- ④ ③において、ローム層と乳白色風化層の両層が強度低下させた場合、降伏震度 $K_h=0.25$ で極限釣り合い状態の円弧が定まり (図-7)、滑動変位量が 10.2m と算定され、当該斜面の崩壊規模と同程度となった。但し、Newmark 法の変形量解析では、実崩壊規模よりも小さい領域のすべり面となった。

6. 考察

2. ~5. から崩壊の要因について考察する。

- (1) 本崩壊に対して、降水および地下水が直接的に影響している可能性は極めて低いが、現地の粘性土切土地山の含水比、飽和度は、常に極めて高い状態にある。
- (2) 5. ④より、すべり面が実崩壊より小さいこと、崩壊は2方面に及んでいることから、まず最初の崩壊は今回の解析で推測されたすべり面付近で発生し、その後、残った不安定部が進行的に崩壊していった可能性がある。
- (3) 4. ⑥より、乳白色風化層の強度低下が著しい。
- (4) ローム層、下端の乳白色風化層の両層とも強度低下を考慮したケースで実崩壊に近い変形量が得られたことから、高含水状態の火山灰質粘性土が、長時間の地震動に揺すられてせん断面での抵抗力が著しく低下したことが、今回の崩壊の主要因であると推定される。

【参考資料】

- 1) 中村宏, 三平伸吾, 古関潤一, 羽矢洋: 崩壊した鉄道切土斜面における地震時挙動の解析的検証, 第 48 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1895-1896, 2013.7
- 2) 地盤工学会関東支部: 関東地域の火山由来地盤の災害事例研究と地域特性に関する研究委員会報告書, 2012
- 3) 中村宏, 三平伸吾, 羽矢洋, 山内真也, 古関潤一: 粘性土高切土の地震時崩壊事例を対象とした修正 Newmark 法による再現解析, 土木学会論文集 (投稿中)
- 4) 鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等設計標準・解説 耐震設計, 1999.10

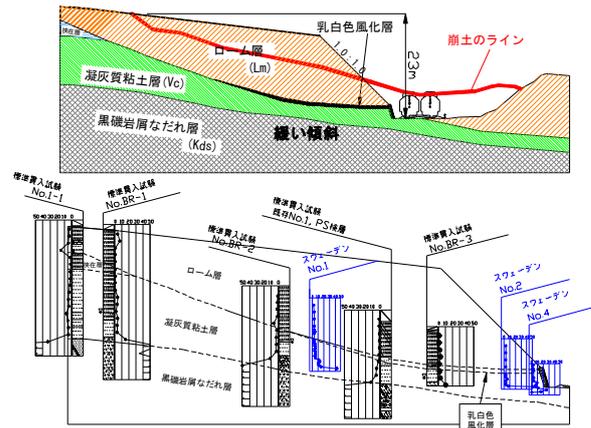


図-4 検討モデル

表-1 当該箇所の地質構成

地質年代	地層名 (地層略称)	主な土質	N値
現世	表土層 (Ts層)	有機質ローム 礫混り砂質粘土	-
更新層	ローム層 (Lm層) 挟在層 (S1層)	ローム 礫混り砂質粘土 凝灰質粘土 礫混り砂	1~5 (挟在層15)
	乳白色風化層 凝灰質粘土層 (Vc層)	凝灰質粘土 礫混り凝灰質粘土	5以下
	黒礫岩層 なだれ層 (Kds)	礫混り固結粘土 砂礫, 玉石混り砂礫	33~50以上

図-5 物理試験結果 (No. 1-1)

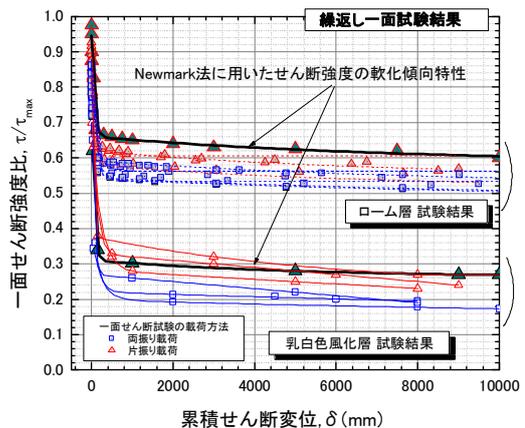


図-6 繰返し一面せん断試験結果 (Bor: BR-1, BR-2)

表-2 Newmark法滑動変位量解析用土質定数

地層名	単位体積重量 γ (kN/m ³)	内部摩擦角 ϕ (°)	粘着力 c (kN/m ²)	設定根拠
ローム層	14.0	8.7	54.3	室内試験結果
		10m変位時 τ 60%に軟化		
乳白色風化層	15.0	11.5	62.9	室内試験結果
		10m変位時 τ 27%に軟化		
凝灰質粘土層	15.0	11.5	62.9	室内試験結果
礫混り粘性土	17.0	50	345	室内試験結果

※ローム層と乳白色風化層は上段に最大強度、下段に軟化強度を記載する。

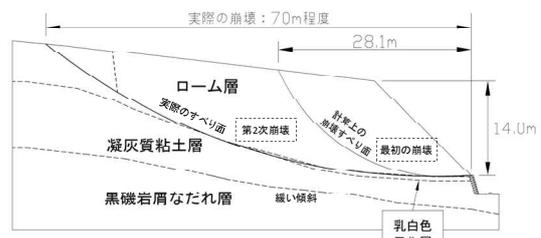


図-7 Newmark法解析モデルとすべり面