

地震時の盛土における復旧性能の新たな指標の提案

— 液状化による被害を中心として —

東海旅客鉄道(株) 正会員 ○永尾拓洋, 長縄卓夫 フェロー会員 関 雅樹
(株)大林組 正会員 佐藤 清 西松建設(株) 正会員 今村眞一郎

1. はじめに

新しい鉄道基準¹⁾では、L2地震動に対する盛土の耐震照査指標に盛土の変形レベル、すなわち被害程度による復旧性指標として盛土沈下量を用いている。しかしながら、盛土の復旧性は盛土の絶対沈下量のみ依存する訳ではなく、盛土の不等沈下あるいは地震被災後の盛土形状にも大きく影響を受けることになる²⁾。特に鉄道のような線状構造物の復旧性を検討する場合、盛土の絶対沈下量のみで判断することは、インフラのダウンタイムを減少させる上で危険側の判断となる可能性もある。

本研究では、新しい盛土の復旧性指標を検討する際に課題となる地震被災後の盛土形状の予測方法について、遠心力模型実験結果を用いて検証したので報告する。

2. 地震被災後の盛土形状

既往の研究³⁾によれば、鉄道盛土の震害パターンはⅠ～Ⅴ型に分類される。この内、液状化による震害は盛土底部に高い過剰間隙水圧が発生し、盛土本体にテンションクラックが生じるⅢ型、地盤の液状化により盛土が全体的に沈下するⅣ型、飽和砂質地盤上にある砂質盛土が地盤の液状化に伴い盛土自体も液状化し、盛土が全面的に崩壊するⅤ型破壊に分類される。ここで復旧性に着目した場合、長期不通防止を図るためには特にⅢ型とⅤ型破壊を防止する必要がある。2003十勝沖地震では、十勝川の堤防で写真1のような地盤の液状化現象による側方流動に伴うⅢ型破壊が生じているが、このように盛土堤体にテンションクラックによる大きな被害が発生した場合、堤体の剛性低下が著しく、被災盛土の再構築が必要なため、復旧に長期間を要することになる。



写真1 液状化によるⅢ型破壊（十勝川堤防）⁴⁾

そこで、盛土の復旧性指標の重要な因子となる盛土堤体のテンションクラック発生の予測方法について、遠心力模型実験結果を用いて検証することとした。

3. 遠心力模型実験結果を用いた検証

(1) 実験結果

L2 地震動に対する液状化地盤上の盛土の耐震補強効果を確認する目的で、表 1 に示す各試験ケースについて遠心力模型実験を実施した⁵⁾ (図 1: Case2 の実験概要図)。実験結果を実物

換算した値を表 2 に示すが、Case1 のみがテンションクラックにより盛土が大きく崩壊しているのに対し、各対策工法を施したものは何れも盛土形状を維持する効果があった（写真 2 参照）. この効果は、側方流動に伴い盛土堤体に発生する引張力を防ぐことで現れていることが、図 2 より理解できる.

(2) FEM 解析によるシミュレーション

上記の遠心力模型実験結果に対して、FEM 解析プログラム EFECT を用いて、ブラインドテスト形式により時刻歴応答解析によるシミュレーションを実施した。解析結果を

表1 試験ケース

試験ケース	対策工法
Case1	未対策ケース
Case2	シートパイル工法（支持層根入れ）
Case3	シートパイル工法（中間層打止め）
Case4	薬液注入工法（層状部分改良）

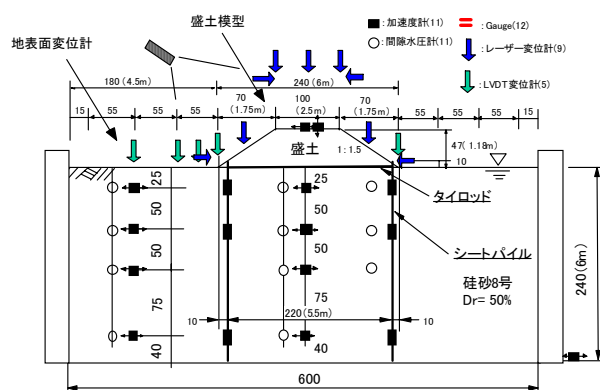


図 1 Case2: シートパイル締切り工法 (支持層根入れ)

key words : 盛土, 復旧性, 液状化, テンションクラック, L2地震動, 遠心力模型実験

連絡先：〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545-33 東海旅客鉄道(株)総合技術本部技術開発部

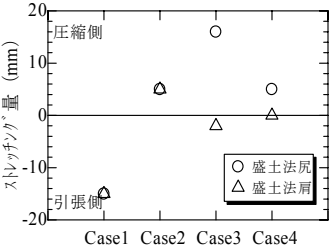


写真 2 Case1：地表面形状 図 2 盛土のストレッチング量

表 3 に示す．盛土沈下量に自重変形分が入っていないことから，実験結果と比較して小さい値となっているが，一部の解析結果を除けば，実験結果の傾向を良く捉えていると考えられる．

（3）せん断歪みインデックス（SI 値）の提案

盛土堤体のテンションクラック発生を予測する指標として SI 値を式（1）のように定義する．

$$SI = \sum A_i \cdot \overline{SS}_i \text{ ----- (1)}$$

A_i ：盛土堤体部の FEM 解析要素の面積

$\overline{SS}_i$ ：せん断歪みがある閾値を超えた要素のせん断歪みの平均値

今回，盛土堤体部の各 FEM 解析要素に発生するせん断歪みの平均値を，表 4 のように 9 ランクに区分した．遠心力模型実験の Case1 の解析結果を考慮し， $\overline{SS}_i \geq 0.14$ を閾値として，図 3 に示す盛土堤体部分の FEM 解析要素の面積を乗じた重み積分をすることで SI 値を算出した．結果を表 5 に示すが，① 盛土堤体部の全ての FEM 解析要素を対象としたケース，② ①のケースに対して表層 2 列の要素を対象外としたケースの 2 通りの SI 値を算出している．②のケースで表層 2 列を対象外とした理由は，シートパイルを対策工法に利用した Case2,3 の FEM 解析結果を調べると，支持地盤からシートパイルを伝播して盛土に実験結果と比較して大きな加速度が入力されており，そのためこの表層 2 列に限り比較的大きなせん断歪みが発生していることによる．

算出した SI 値と表 2 の遠心力模型実験結果におけるテンションクラックの発生状況と比較すると，①，②のケースどちらもある閾値を決定することで，盛土堤体のテンションクラックの発生を予測できる可能性があるが，②のケースはより顕著にその傾向を捉えていると考えられる．

なお，FEM 解析結果における盛土の法尻・法肩のストレッチング量についても総合的に勘案することで，テンションクラックの発生をさらに精度良く予想できるものと推測される．

4．おわりに

本研究では，SI 値により相対的に盛土堤体のテンションクラック発生を予測できる可能性について指摘した．今後は盛土を構成する土質の要素試験レベルのせん断ひずみと盛土のテンションクラック発生との関係，並びに土質による相違，加えて液状化による盛土の V 型破壊発生メカニズム等について検討することを考えている．

《謝辞》今回の研究成果は，(株)大林組，五洋建設(株)，西松建設(株)と実施している研究会成果の一部であり，ご協力を頂いている関係各位には誌面を借りて深くお礼を申し上げます．

〔参考文献〕1) 鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，1999． 2) 道路震災対策便覧（震災復旧編），日本道路協会，2002． 3) 野沢，新幹線盛土構造物の耐震強化に関する研究，鉄道技術研究報告 No.1304，1986． 4) 北海道新聞 HP より 5) 永尾他，基礎地盤の側方流動現象に着目した鉄道盛土の耐震補強工法に関する一考察，第 39 回地盤工学研究発表会（投稿中）

表2 遠心力模型実験結果（cm）

試験ケース	盛土天端沈下量			不等沈下量	テンションクラック
	左	中央	右		
Case1	55.0	62.5	45	17.5	クラック大
Case2	32.5	42.5	22.5	20	ヘアクラック1本
Case3	62.5	65	67.5	5	なし
Case4	48.8	47.5	46.3	2.5	なし

表3 FEM解析によるシミュレーション結果（cm）

試験ケース	盛土天端沈下量			不等沈下量	ストレッチング量	
	左	中央	右		法尻	法肩
Case1	25.6	32.5	25.5	7	27.3	19
Case2	7.9	9.4	8.2	1.5	0.4	28.1
Case3	16.1	11.3	12.3	4.8	1.1	14.3
Case4	6.6	7.6	7.8	1.2	0	6.4

表4 せん断歪みの平均値

ランク	せん断歪み		
	下限	平均	上限
1	0.32	0.34	0.36
2	0.28	0.3	0.32
3	0.24	0.26	0.28
4	0.2	0.22	0.24
5	0.16	0.18	0.2
6	0.12	0.14	0.16
7	0.08	0.1	0.12
8	0.04	0.06	0.08
9	0	0.02	0.04

※ ②のケースは斜線部の表層 2 列を対象外



図 3 盛土堤体部の FEM 解析要素

表5 SI値の算出結果

試験ケース	SI値	
	①	②
Case1	0.79	0.45
Case2	0.73	0.21
Case3	0.36	0
Case4	0.03	0