

3610 東海道新幹線の盛土区間における脱線・逸脱防止対策

正 [土] ○大木 基裕 (JR 東海) 正 [土] 庄司 朋宏 (JR 東海)
 正 [土] 永尾 拓洋 (JR 東海) 正 [土] 阪本 泰士 (JR 東海)
 フェロー [土] 関 雅樹 (JR 東海)

Derailment prevention measures on earthquake of Tokaido Shinkansen in embankment section

Motohiro OHKI, Central Japan Railway Company. 33-1545, Ohyama, Komaki City
 Tomohiro SHOJI, Central Japan Railway Company.
 Takuhiro NAGAO, Central Japan Railway Company.
 Yasushi SAKAMOTO, Central Japan Railway Company.
 Masaki SEKI, Central Japan Railway Company.

This paper reports the derailment prevention measures on earthquake of Tokaido Shinkansen in the embankment section. By the dynamic centrifuge model test which changed the ground stiffness and the height of the embankment, it has related the deformation level of the embankment on the earthquake with the failure form of the embankment. And the failure form of the embankment at the deformation level 3 was investigated that the mainly deformation was not the ground but the embankment. New soil nailing reinforcement to the embankment is effective to decrease the subsidence at the earthquake.

Keywords:: embankment, deformation level, failure form, soil nailing, dynamic centrifuge model test

1. はじめに

東海道新幹線の盛土はこれまでに、基底円弧すべりや液状化など変形レベル4の盛土の耐震補強工事を実施し、概ね完了する段階となっている。

しかし、平成16年10月23日に発生した新潟県中越地震では、上越新幹線の浦佐～長岡間を走行中のとき325号が、構造物に大きな損傷はないものの、ロッキング脱線により脱線するという事象が発生した。

この事故を受け、平成16年10月25日に国土交通省鉄道局が設置した「新幹線脱線対策協議会」に当社も参画し、施設面、車両面で当面とり得る対策の可能性等について検討を進め、対策を確立した¹⁾。具体的には、地震時の脱線・逸脱防止に有効で保守面でも支障のない脱線防止ガードを主体とし、脱線防止ガードの機能を地震時、あるいは地震後にも発揮できるように軌道・構造物も併せて強化を図ることとした²⁾。

本報告では、盛土区間の脱線・逸脱防止対策として、まず、盛土の耐震性能を示し、盛土の地震時変形レベル3と2に応じた対策工の目的と工法について述べる。その中で特に変形レベル3で著者らが提案している破壊形態C型、D型、E型³⁾の盛土に適用する地山補強土工法の検討内容(模型実験・試験施工)について紹介する。

2. 東海道新幹線の盛土区間の対策概要

2.1 鉄道盛土の耐震性能

新設鉄道盛土の耐震性能は表.1に示す地震時の変形レベル(沈下量)を照査指標としている⁴⁾。これは被災後の復旧性の観点から定められ、盛土の天端沈下量が定量

的な目安として示されている。

表.1 被害程度と沈下量の目安

変形レベル	被害程度	沈下量の目安
1	無被害	無被害
2	軽微な被害	沈下量20cm未満
3	応急処置で復旧が可能な被害	沈下量20cm以上～50cm未満
4	復旧に長時間を有する被害	沈下量50cm以上

また、変形レベルの目安となる地震時の盛土沈下量はいくつかの成分に分類できる。図.1に円弧すべり⁵⁾、及び液状化⁶⁾による盛土の破壊形態と沈下成分を示す。

円弧すべりの場合は3つの現象(Ss:盛土の滑動沈下, Se:盛土本体の揺すり込み沈下, Sg:地盤の揺すり込み沈下)により表される。一方、液状化の場合も3つの現象(盛土のストレッチング、液状化地盤の側方流動、液状化地盤の体積圧縮)により表される。

このように、盛土天端の沈下量は地盤・堤体の各沈下量に大分され、それらの和で表される。破壊形態、変形レベルなどにより各々の成分割合は異なるため、工法は補強対象(地盤、堤体)により選択することが効果的かつ、経済的であることが示唆される。



図.1 盛土の沈下成分(左:円弧 右:液状化)

2.2 東海道新幹線の盛土区間の特徴と対策の目的

東海道新幹線の盛土の構造的な特徴として、のり面勾配が1:1.5、バラスト軌道などが挙げられる。

このような特徴から、盛土区間における列車の脱線・逸脱につながる要因として、盛土天端の沈下(不等沈下)、バラストの流出による軌道の変位、構造物境界(橋台と橋台裏の盛土)における段差などが挙げられる。

一方、図.2に示す盛土天端と盛土底部の応答加速度の比と地盤N値の関係より、盛土の応答は高架橋ほど大きくはない。従って、脱線防止ガードが機能すれば脱線を防止できる²⁾。

以上より、軌道狂いの原因となる

盛土の不等沈下を抑制すること、およびバラスト肩部を補強し軌道変位を抑制すること、構造物境界の段差を解消することが、盛土区間の脱線・逸脱防止対策の目的である。なお、バラスト肩部の補強(バラスト流出防止工)、橋台裏の段差防止(橋台裏注入)については、別報^{7,8)}にて報告し、本稿では盛土沈下抑制対策を主に報告する。

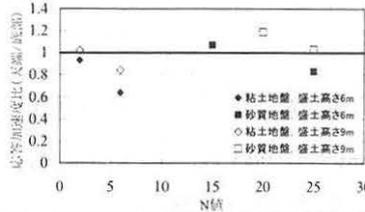


図.2 応答加速度比～地盤N値関係

2.3 鉄道盛土の沈下抑制対策の課題

盛土の変形レベルから考えれば、これまでの対象盛土は、大規模な破壊であり変形レベル4の対策を実施してきた³⁾。今回検討の対象となる盛土は変形レベル2、3となるが、具体的に地震動に対する盛土の破壊形態と、支持地盤強度、盛土高さの関係が未解明である。また、対策工を検討する際には盛土の破壊形態に即した補強が最も効果的であるため、考慮する変形レベルと破壊形態を相関させることが重要である。

したがって、支持地盤強度、盛土高さ、地震動をパラメータとして変化させ、沈下量と破壊形態を検証し、これに即した有効な対策工を開発することが課題である。

本検討では、破壊形態の把握や対策効果の検証は模型実験を中心に行い、解析により補足した。

3. 実験概要

実験は大林組技術研究所(清瀬市)の動的遠心模型試験機を用いた。模型(縮尺1/40)も併せて図.3に示す。

動的遠心模型実験は、相似則に従い、実物の1/n縮尺模型をnG場で外力を作用させ、実物における応力条件を再現し地震時の破壊形態や沈下量を評価するものである。模型作成は以下のように行った。

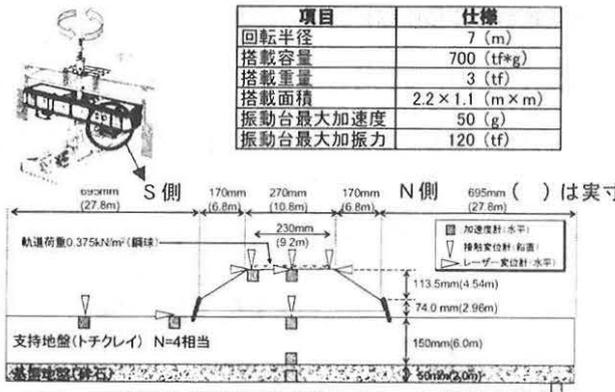


図.3 動的遠心模型概況(盛土7.5m土留有的場合)

支持地盤: 支持地盤は、強度の異なる粘性土3種(N値=2, 3, 6)、並びに非液化化砂質土3種(N値=15, 20, 25)を設定した。最下層に碎石層を設け、粘性土地盤は液性限界の1.5倍の含水比のスラリーを投入後、設定したN値になるよう圧密を行った。砂質土地盤の場合は所要の相対密度になるように空中撒き出しにより行った。いずれも支持地盤の厚さは6mと共通である。

盛土: 盛土の土質は耐震標準²⁾の土質2に相当する。盛土は高さの異なる3種(6m, 7.5m, 9m)で、のり勾配は1:1.5、締め固め度は90%は共通とした。天端はバラスト荷重相当の鋼球を敷設した。

加振条件: 40G場まで遠心载荷した後、異なる地震動2種(L2SP II地震動, 想定東海地震動)で加振した¹⁾。

以上を組合せ18ケースの試験を行った。

4. 実験結果

4.1 盛土の破壊形態と変形レベル

(1) 変形レベルに及ぼす地盤強度と盛土高さの影響

図.4～図.7に18ケースの盛土天端の残留沈下量を、地震動別、地盤物性別に示す。

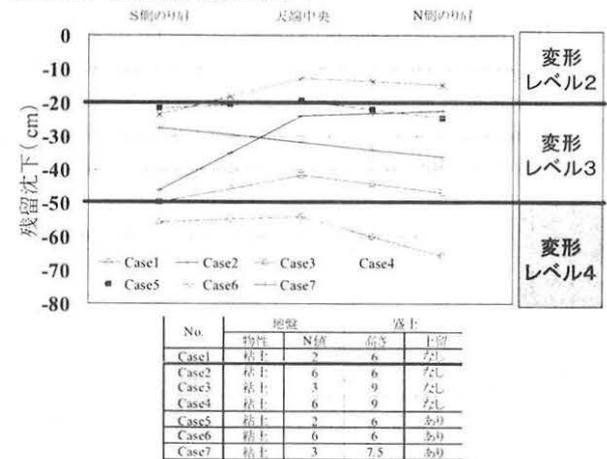


図.4 想定東海地震時の盛土の変形レベル(粘性土地盤)

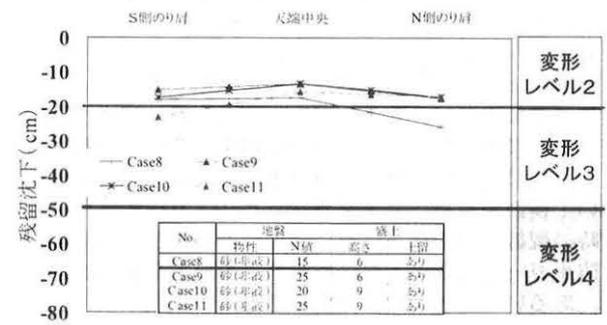


図.5 想定東海地震時の盛土の変形レベル(砂質土地盤)

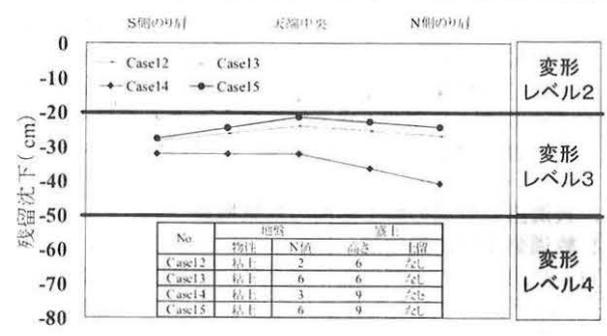


図.6 L2SP II地震時の盛土の変形レベル(粘性土地盤)

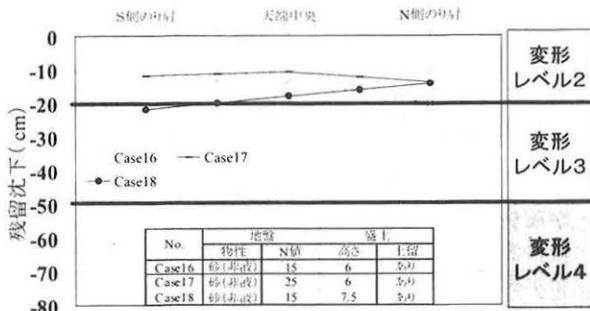


図.7 L2SP II地震時の盛土の変形レベル (砂質土盤)

天端の沈下量に着目すると、変形レベル3の実験結果では、総じて天端中央に比較し、のり肩の沈下量は大きい。つまり天端では不等沈下が生じている。一方、変形レベル2の実験結果では、のり肩と盛土中央での沈下量の差は小さく、一様な沈下となっている。

以上より、変形レベル3の盛土を変形レベル2へ耐震性を向上させることにより、天端の不等沈下を防ぐことが可能であることが示唆される。

変形レベル3の対策箇所選定に当たり、サイズミックマイクロゾーニング⁹⁾による地盤分類、既対策盛土箇所に隣接、または地盤や盛土の条件が類似する箇所など多面的な検討を重ね、変形レベルと地盤強度、盛土高さの関係を地震動ごとに試験結果を整理し、対策適用範囲(対策箇所選定基準)を定めた³⁾(表2,3)。

表.2 想定東海地震動における盛土の変形レベル

左: 粘性土地盤 右: 砂質土地盤

地盤分類	粘性土地盤			砂質土地盤		
	H<3m	3m≦H<9m	9m≦H	H<6m	6m≦H<9m	9m≦H
N値≦4	レベル4	レベル4	レベル4	レベル4	レベル4	レベル4
4<N値≦5	レベル2	レベル4	レベル3	レベル2	レベル3	レベル3
5<N値≦6	レベル2	レベル3	レベル3	レベル2	レベル3	レベル3
非開削地盤	レベル2	レベル2	レベル2	レベル2	レベル2	レベル2

表.3 L2SP II地震動における盛土の変形レベル

左: 粘性土地盤 右: 砂質土地盤

地盤分類	粘性土地盤			砂質土地盤		
	H<3m	3m≦H<9m	9m≦H	H<6m	6m≦H<9m	9m≦H
N値≦4	レベル4	レベル4	レベル4	レベル4	レベル4	レベル4
4<N値≦5	レベル2	レベル3	レベル3	レベル2	レベル3	レベル3
5<N値≦6	レベル2	レベル3	レベル3	レベル2	レベル2	レベル2
非開削地盤	レベル2	レベル2	レベル2	レベル2	レベル2	レベル2

(2) 変形レベル3の盛土の破壊形態とそのメカニズム
動的遠心模型実験の代表的な実施ケースを表.5に、加振後の残留状況を図.8に示す³⁾。天端沈下量はCase2, Case6は変形レベル3, Case8は変形レベル2に留まった。

Case2は腰土留めがない条件での実験結果である。盛土天端に若干段差が発生した。のり面には平行クラックが見られ、のり肩とのり尻にやや集中している。断面形状から、堤体円弧すべりの傾向がある。

Case6は腰土留めがある場合の実験結果である。Case2と天端沈下量に差異はないがのり面の破壊形状が異なる。

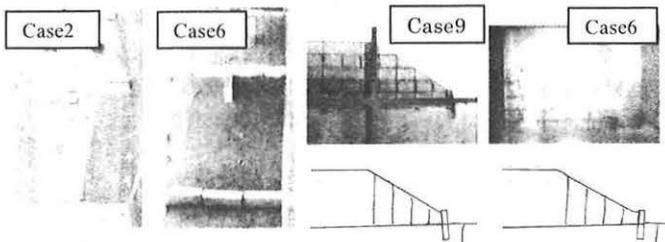


図.8 軟弱地盤上の盛土の破壊形態

また、図8右図はCase9, Case6の加振後の側面図である。Case6に比較しCase8は、腰土留めの挙動が小さく、全体のメッシュの乱れも小さい。これより、変形レベル2であれば天端の平坦性は確保されていることがわかる。

また、変形レベル3であるCase6の側面図における残留状態から破壊メカニズムは図.9のように表すことが出来る。支持地盤強度の違いによる、盛土そのものの破壊形態のほか、腰土留めの挙動により背面盛土の落ち込みによる影響が加わり、堤体変形がより顕著に現れたと考えられる。

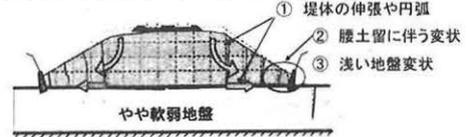


図.9 腰土留めがある場合の盛土の破壊メカニズム

図.10は、兵庫県南部地震で見られた鉄道盛土の被害事例である。腰土留めの挙動がのり面、のり肩まで影響し、のり肩に亀裂が確認される。概ね図.9と同じ破壊形態である。



図.10 鉄道盛土の被害事例

4.2 盛土の沈下抑制工法

図.9に示した破壊形態の場合、支持地盤を補強するシートパイル締め切り工¹⁰⁾を適用するよりも、より堤体の変形を抑制する対策工法の適用が有効である。また、図.10より、のり面だけではなくのり尻の耐震性も考慮し、もたれ式腰土留めなどにはアンカーによる補強も必要である。

図.11に対策工の断面図を示す。対策仕様は、地山補強土工法¹¹⁾に受圧構造体として張りコンクリート工を行う。また、図.10を踏まえ土留めの形態により2種の仕様とした。

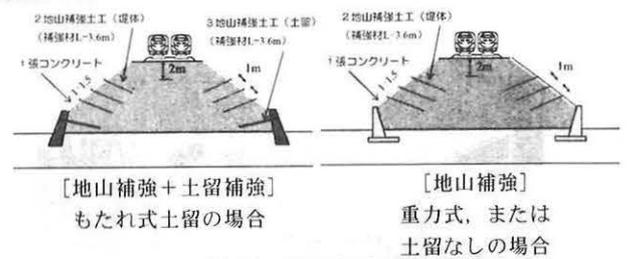


図.11 対策概念図

対策工の仕様を策定するため図.12に示す安定計算を実施した。長さ3.6mのネイリングをのり面に配し、設計水平震度0.35に対し、安全率1.1を満たす仕様である。

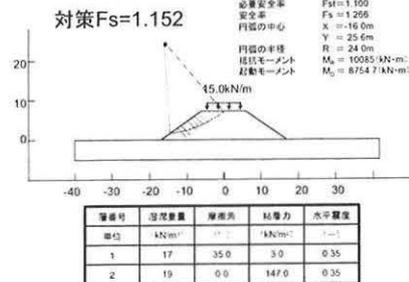


図.12 安定解析 (設計水平震度 0.35)

図.13 に安定計算で求めた地山補強土工法を適用した場合の沈下量を無対策の場合と比較して示す。地震動は想定東海地震動である。無対策では、のり肩に段差が見られるのり肩のすべりが確認された。残留沈下量は、のり肩では 20cm を超えた。一方、地山補強土工法を実施したことにより、天端沈下量は 20cm 未満となり、盛土天端の不等沈下を抑制することができた。

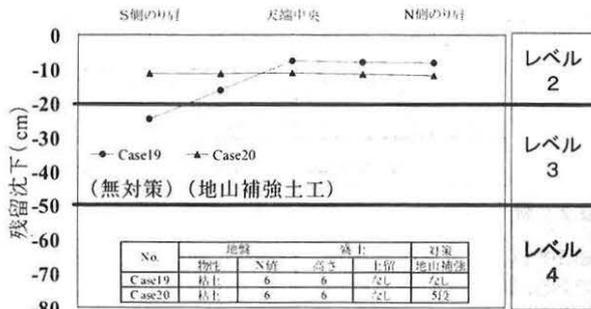


図.13 ネイリングの模型実験結果の比較

模型実験による対策工法の効果検証に併せ、施工方法の検証を目的とし、当社、小牧研究施設にある試験盛土において、試験施工を行った。施工状況の全景を図.14 に、詳細および、引抜いた改良体を図.15 に示す。

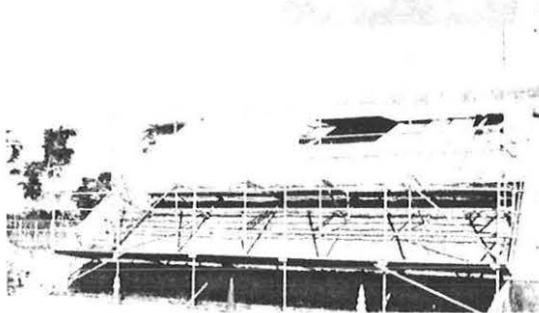


図.14 施工状況全景

機械打撃により有孔鋼管をのり面に挿入した後、人力によるセメントミルクの注入を行い地山との定着を図った。引抜き抜いた地山補強土工の出来形はφ200mmであり、十分な改良体を造成することができた。

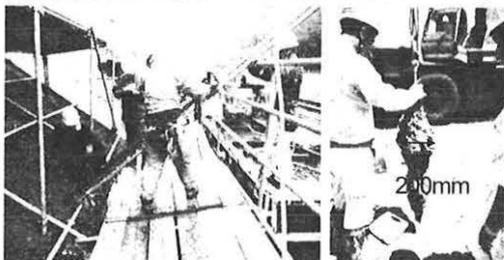


図.15 施工状況と造成改良体

5. まとめ

東海道新幹線の盛土区間の脱線・逸脱防止対策の目的は、著しい軌道狂いの原因となる盛土天端の不等沈下を抑制すること、バラスト肩部を補強し軌道変位を抑制すること、構造物境界の段差を解消することである。本稿は特に、盛土の不等沈下防止対策について述べた。

以下に、本検討で得られた知見について述べる。

- 地盤強度、盛土高さ、地震動をパラメーターとして変化させた模型実験により、盛土の地震時変形レベルと破壊形態の相関性を把握した。この結果やサイズミックマイクロゾーニングなどから、適用範囲(対策箇所選定基準)を定めた。
- 変形レベル2の盛土の破壊形態より、天端の平坦性が確保されることを実験より把握した。これは、軌道の変形を抑制するバラスト流出防止対策の有効性を示唆された。
- 変形レベル3の盛土の破壊形態より、沈下の主体は堤体変形であることを究明し、破壊形態に即した地山補強土工法の沈下抑制対策の有効性を検証した。

地震時の脱線と逸脱により生じる被害拡大の双方を極力防止する脱線防止ガードが有効に機能するために、盛土強化を鋭意進める所存である。

今後も更なる研究・開発に努め、安全・安定輸送の強化に貢献する。

【参考文献】

- 1) 森村 勉, 関 雅樹: 新潟県中越地震後の東海道新幹線の地震対策について, 第16回鉄道技術連合シンポジウム(投稿中)
- 2) 荒鹿 忠義, 吉田 幸司, 庄司 朋宏, 村松 浩成: 軌道強化と土木構造物変位抑制工法による東海道新幹線の脱線・逸脱防止対策, 第16回鉄道技術連合シンポジウム(投稿中)
- 3) 関 雅樹, 大木 基裕, 庄司 朋宏, 永尾 拓洋, 荒鹿 忠義: 地震時における盛土の破壊と対策の有効性に関する実験的検証, 第21回中部地盤工学シンポジウム, 2009.8
- 4) 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計), 鉄道総合技術研究所, 1999.10
- 5) 鉄道構造物等設計標準・同解説(土構造物), 鉄道総合技術研究所, 2007.1
- 6) 黒瀬 浩公・田村 敬一・佐々木 哲也: 液状化地盤上の盛土の変形特性に関する動的遠心模型実験, 第38回地盤工学研究発表会, 2003.7
- 7) 小林 幹人, 渡邊 康人, 鏝坂 勝利, 村松 浩成: ジオテキバッグ工法の設計及び本線施工試験結果, 第16回鉄道技術連合シンポジウム(投稿中)
- 8) 庄司 朋宏, 荒鹿 忠義, 長縄 卓夫, 前田 昌克, 松浦 章夫: 橋台裏盛土の脱線・逸脱防止対策とシミュレーション, 第16回鉄道技術連合シンポジウム(投稿中)
- 9) 関 雅樹, 仁杉巖監修: 鉄道を巨大地震から守る, 一兵庫県南部地震をふりかえって-, 山海堂, pp.195-199, 2001.2
- 10) 盛土補強工法の手引き(案), 日本国有鉄道, 1980
- 11) 新しい補強土擁壁のすべてー盛土から地山までー, 総合土木研究所, pp.127-140, 2005.10