東海道新幹線の盛土区間における脱線・逸脱防止対策について

東海旅客鉄道 正会員 ○大木 基裕 東海旅客鉄道 フェロー 関 雅樹

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¹⁾.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により脱線するという事象が発生した.この事象を受け,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する対策を行い,併せて,脱線防止ガードの機能を地震時,地震後にも発揮できるよう軌道・構造物も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

1	1000-0	T =====		T
分類	対策目的	長期	走行安全性	
	破壞形態	想定東海地震対策	全線追加(L2地震)対策	脱線·逸脱防止対策
A	軟弱粘性土地線 地盤を含む円弧滑り による沈下	タイロッド シートハイル(支持層) + タイロッド ・N≤4	タイロット・ シートパイル (支持層) +タイロット・ N≤4	対象外
В	液状化地盤 地盤の液状化 による沈下	タイロット(4) シートパイル(支持層) + タイロット・ ・ 液状化地盤	シートバイル (GL-3m) + タイロッド (4 ロッド) (液状化・地震	対象外
С	やや軌跡と砂貫土地盤 盛土の円弧滑り による沈下	地山補強土工法 地山補強土工法 ・N≤15 かつ 6m≤H ・9m≤H (普通地盤)	対象外	地山 補達土工法 ・1.2 地震 N≤15 かつ 6m≤H ・想定東海地震 15(N≤20 かつ 6m≤H
D	やや軟砂が粘性土地盤 盛土と地盤の境界の 揺り込みによる沈下	④ シートバイル(GL-1m) + タイロッド または土留活用タイロッド ・4 <n≤5 3m≤h<="" td="" かつ=""><td>対象外</td><td>増加 補強±工法 ・L2・地震 4.N ≤6 かつ 3m≤H ・想定東海地震 5<n≤6 3m≤h<="" td="" かつ=""></n≤6></td></n≤5>	対象外	増加 補強±工法 ・L2・地震 4.N ≤6 かつ 3m≤H ・想定東海地震 5 <n≤6 3m≤h<="" td="" かつ=""></n≤6>
Е	著通地盤 盛土の緩い沈下	対象外	対象外	グラスト流出防止エ ・対策箇所を含む全盛土区問

図-1 盛土の変形レベル・破壊形態と対策の関係

の目的と工法について述べる.次に、図-1に示すように著者らが提案している変形レベル3における破壊形態 C型、D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)についてまとめる.

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

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,盛土の天端沈下量が定量的な目安として示されている.

また、地震時の盛土の沈下量は図-2のように地盤の沈下量と盛土の変形量に大別できる。円弧すべり(図-2左)の場合は3つの成分(Ss:盛土の滑動沈下、Se:盛土本体の揺すり込み沈下、Sg:

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

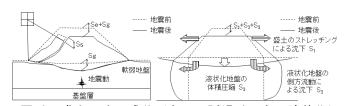


図-2 盛土の沈下成分(左:円弧滑り,右:液状化)

地盤の揺すり込み沈下), 液状化(図-2 右) の場合も3つの成分(盛土のストレッチング S1, 液状化地盤の側方流動 S2, 液状化地盤の体積圧縮 S3) で表せる.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.

[:] Motohiro Ohki(Central Japan Railway Company), Masaki Seki(Central Japan Railway Company)

2.2 盛土区間の特徴と脱線逸脱防止対策の目的 2)

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-3に示す盛土天端と盛土底部の応答加速度の比と地盤

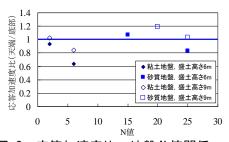


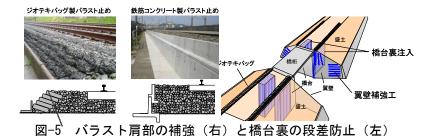
図-3 応答加速度比~地盤 N 値関係

N値の関係より、盛土の応答は高架橋ほど大きくはない. これより、脱線防止ガードが機能すれば脱線を防止できる. 従って、盛土区間の脱線・逸脱防止対策の目的は、①軌道狂いの原因となる盛土の不等沈下を抑制すること、③橋台裏など構造物境界の段差を解消すること、③バラスト肩部を補強し軌道変位を抑制する

こと,である.図-4にこれまで行われてきた盛土の耐震補強と今回行う脱線・逸脱防止対策の関連性を踏まえた,盛土の変形レベルと破壊形態に対する耐震補強の考え方について示す.これまでの支持地盤から破壊する変形レベル4の盛土を対象に対策を実施してきたことにより¹⁾,今回の検討対象とする脱線・逸脱防止対策があることが分かる.図-5にバラスト肩部の補強(バラスト流出防止工)⁵⁾および,橋台裏の段差防止(橋台裏注入)⁶⁾を示す.本稿では盛土沈下抑制対策について報告する.



図-4 変形レベルと破壊形態に対する耐震補強の考え方



2.3 鉄道盛土の沈下抑制対策の課題

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.しかし、今回検討の対象となる盛土は変形レベル2、3となるが具体的な破壊形態を解明できていない. したがって、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、まず、無補強時の破壊形態を動的遠心模型実験により再現し、次に、対策工法を試験施工により確立し、仕様検討のため再び実験検証を行った.

3. 地震時の盛土の形状と有効な対策工法

無補強時の盛土の変形レベルと破壊形態を検証するために、支持地盤の強度、盛土の高さ、地震動をパラメータとした動的遠心模型実験(40G場、1/40スケール)を実施した. 図-6に遠心力模型実験の概要と、模型作成方法を以下に示す.

支持地盤: 支持地盤は、強度の異なる粘性 ± 3 種 (N値 = 2, 3 \sim 4, 6)、並びに非液状化砂質 ± 3 種 (N値=15, 20, 25)を設定した。最下層に砕石層を設け、粘性土地

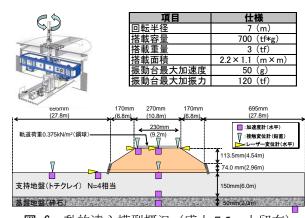


図-6 動的遠心模型概況 (盛土 7.5m 土留有)

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 値になるよう圧密した.砂質土地盤は空中 撒き出しにより所要の相対密度になるように行った. 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4の土質2に相当する. 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%と共通である. 天端はバラスト荷重相当の鋼球を敷設した.

加振条件:40G まで遠心載荷後,図-7に示す異なる地震動(L2SPII地震動,想定東海地震動)で加振した.

以上を組合せ 18 ケースの試験を行った. 図-8 に脱 線・逸脱防止対策の対象となる変形レベル3の盛土の 地震後の残留状況を示す. 試験条件は, 粘土地盤 N 値 =6, 盛土高 6m, 入力は想定東海地震動である. 地盤 模型のメッシュの変位より、地盤の沈下は軽微で、主 に盛土が変形していることがわかる. これより盛土そ のものを補強する工法が有効なことから, 地山補強土 工法に着目し工法の開発を進めた.

4. 開発した地山補強土工法の概要

地山補強土工法は杭の太さに応じ多様な工法が存在 するが、図-9示す共通する4項目に着目した.

- ①大規模な設備とグラウトの大量使用・大量産廃
- ②芯材を挿入する際の不確実性
- ③足場工などの付帯工事
- 4頭部防錆処理

開発した地山補強工法は、従来の排水パイプ工を参 考に有孔鋼管(径 60.5mm)をのり面に打設し、鋼管 口元よりグラウトを注入する工法である. また, のり 面と打設鋼管頭部を固定する頭部処理は、これまで降 雨対策として行われてきたのり面張りコンクリート工 の技術が基本となっており、これらの簡便な既往の工 法を融合させたものと言える. 上記の着目点は図-10 のように改善された.

- ①加圧注入とし使用するグラウト量を減少させ、プラ ント設備が縮小した. 発生汚泥はない.
- ②③芯材の鋼管を打撃挿入させるため、孔壁の崩壊は ない. コンクリートブレーカを改良した打設機械を 考案し,人力施工が可能となり操作性が向上した. これにより、足場工も簡素化した.
- ④のり面工と一体化する頭部処理工法を考案し、簡易 な頭部養生となった.

5. 引き抜き強度の検証

造成した補強工の引抜試験を実施した.表-2に引抜 試験の試験体の種類と本数を示す.グラウト注入なし, 無加圧で注入(自然注入),加圧注入,の3種とした.

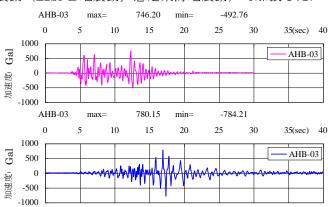


図-7 地震動(上:L2SPⅡ、下:想定東海地震)



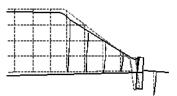


図-8 地震後の盛土の残留状

問題点①改良体を造成する過程 ⇒大規模なプラント施設、産廃処理費





問題点②芯材を挿入する過程 ⇒孔壁崩壊時の対処が困難

問題点③足場工の設置撤去



問題点4)頭部処理の過程 ⇒芯材頭部の防錆処理(補強効果に無関係)



従来の地山補強土工法の4つの着目点 図-9

解決点①改良体を造成する過程

⇒プラント施設を省力化、産廃処理なし





解決点②芯材を挿入する過程

鋼管先端を鋭利、肉厚を増す



解決点③足場工の設置撤去



解決点4頭部処理の過程 ・のり面工と一体化、コンクリートによる養生

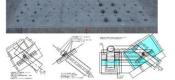


図-10 開発した地山補強土工法の特徴

図-11 に砂礫盛土における加圧注入した補強工 (1m) の引抜状況と 4m 引抜試験の概況を示す. 砂礫盛土の場合, 改良径は概ね 100mm 程度となった.引抜試験は,補強工の間隔を開け,補強材周囲の盛土を拘束しないように十分離隔を持つ治具を用いた.

図-12 に引抜試験結果を示す. 図-12 (左)砂礫盛土における結果はグラウト注入なしの場合でも盛土材料の摩擦角と上載圧により一定の抵抗力がある. また,自然注入の場合は延性的な挙動を,加圧注入の場合は脆性的な挙動を示している. 図-12 (右)粘土質礫盛土における結果は、注入なりでは抵抗力は発揮されない。また

は、注入なしでは抵抗力は発揮されない. また、自然注入に 比較し加圧注入の方が引抜抵抗力は大きい.

表-3に過去のダウアリングの検討における引抜強度試験の結果⁷⁾,著者らが行ったネイリングの引抜試験結果⁸⁾および,今回の加圧注入した 4m 補強材の引抜強度の最小値 91.6kN (粘土質礫盛土)の試験結果の比較である. 盛土の土質の違



図-11 仕様検討と 4m 引抜試験の状況 本教計



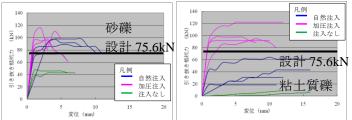


図-12 引抜強度試験結果(左:砂礫 右:粘土質礫) 表-3 各工法の引抜強度の比較

工法	改良経	打設長	計測 引抜荷重	単位長 引抜強度	単位面積 付着応力	盛土土質
	mm	m	kN	kN/m	kN/m2	с, ф
ダウアリング	400	3.0	274.4	91.5	72.8	稲城砂 φ=37.1° c=8kN/m2
ネイリング	100	1.0	35.0	35.0	111.5	粘土質礫 φ=36.5° c=45kN/m2
小口径有孔管	60	3.6	91.6	25.4	135.1	粘土質礫 φ=36.5° c=45kN/m2

い等から一概に比較する事は困難だが、例えば同じ土質であるネイリングと小口径有孔管の比較では単位周面積あたりの付着強度は近似している.これより、周面積が小さい小口径有孔管の一本当たりの引抜抵抗力は小さいが、より密な配置とすることで従来工法と同等の補強効果とする設計が可能である.

6. まとめ

今回開発した小口径有孔管を用いた地山補強土工法は大幅な省力化を実現した。また、試験施工により引 抜強度特性を把握した。これにより、従来の設計法を適用した設計コードを確立することが可能であると考 えられる。なお、のり面の遮水効果を併せ持つ本工法は、降雨時の盛土の補強工法としても有効である。

参考文献

- 1) 関 雅樹: 東海道新幹線の技術開発-最近の地震対策の取組-, 土木技術 2010, Vol.65, No.2, pp2-6,2010.2
- 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講演論文集, pp.553-5556, 2009.12.
- 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論文集,pp.75-82,2009.8.
- 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
- 5) 可知 隆, 関 雅樹, 小林 幹人, 永尾 拓洋, 古関 潤一:ジオテキバッグ工法による東海道新幹線 脱線・逸脱防止対策, 第 16 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.647-650, 2009.12.
- 6) 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講演論文集, pp.659-662, 2009.12.
- 7) 吉田 茂,宮里 実,浦川 智行,舘山 勝,田村 幸彦:大径棒状改良体の引抜性能,第33回地盤工 学研究発表会,pp2437-2438,1998.7
- 8) 大木 基裕, 永尾 拓洋, 関 雅樹, 山本 哲也, 浜井 邦彦, 山田 宏: 既設盛土の耐震補強工法, 第 62 回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp161-162, 2007.9