

3611 橋台裏盛土の脱線・逸脱防止対策とシミュレーション

正 [土] ○庄司 朋宏 (JR 東海) 正 [土] 荒鹿 忠義 (JR 東海)
正 [土] 長縄 卓夫 (JR 東海) 正 [土] 前田 昌克 (JR 東海)
正 [土] 松浦 章夫 (芝浦工業大学名誉教授)

Simulation analysis and measures on the boundary between embankment and abutment to prevent Shinkansen derailment

Tomohiro SHOJI, Central Japan Railway Company. 33-1545, Ohyama, Komaki City
Tadayoshi ARASHIKA, Central Japan Railway Company.
Takuo NAGANAEA, Central Japan Railway Company.
Maeda MASAKATSU, Central Japan Railway Company.
Akio MATSUURA, Shibaura Insutitute of Technology.

The train derailment of Joetsu-Shinkansen was caused by Niigata chuetsu Earthquake in 2004. Thus, Central Japan Railway Company has examined the seismic measures with the object of the prevention of damage expansion by the derailment at the earthquake. In this paper, Simulation analysis and measures on the boundary between embankment and abutment to prevent Shinkansen derailment

keyword : earthquake, derailment prevention, abutment, embankment, Simulation

1. はじめに

東海道新幹線の地震対策については、これまでに、高架橋柱等の土木構造物の耐震補強や早期地震警報システムの導入等を進め、現在、これらは概ね完了する段階となっている¹⁾。このうち、橋台や翼壁については、倒壊などによる大規模な変状となる可能性のあるものについて、東海地震対策や阪神淡路大震災以降の長期不通防止対策にてストラッドやシートパイル締切り工などの耐震補強を実施している。

平成16年10月23日に発生した新潟県中越地震での上越新幹線脱線事象を受け、当社では脱線防止ガードレールの開発²⁾を進めてきた。この脱線防止ガードレールが有効に機能するためには、下を支える構造物の変形を極力抑制する必要がある。特に、過去の地震被害事例からも、盛土と橋台の境界（以下「橋台裏」という。）の僅かな沈下差によって、図1に示すような軌道の段差や折れ角といった著しい軌道狂いが発生する。この上を列車が走行した場合、脱線防止ガードが設置してある場合でも、脱線に至ることが考えられる。そのために、橋台裏盛土の脱線・逸脱防止対策について検討を進めてきた。

本報告では、まず、橋台裏の沈下差によって発生した軌道の段差の上を、車両が通過する時のシミュレーションを実施し、そのときの車両やレールの挙動を解明した。次に、脱線防止ガードレールが設置している条件で脱線となる段差の閾値を提案した。さらに、技術研究所速報³⁾から、地震対策や降雨時の陥没対策として実績のある橋台裏注入工法の効果を確認し、提案した。そして、福島⁴⁾による橋台裏の沈下量推定式とあわせて橋台裏対策のフローを提案した。

また、地震時における被害事例として、翼壁部の打ち継ぎ目部で発生するズレや転倒による背面土砂やバラストの流出を防ぐために、既存の耐震補強工法である鋼材を用いた翼壁補強工を提案した。

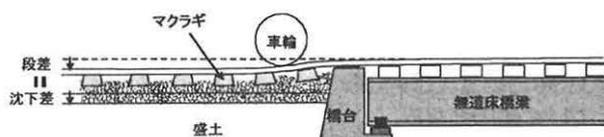


図1 橋台裏の段差・折れ角のイメージ

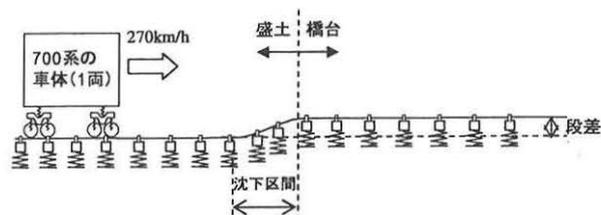


図2 解析モデル

2 橋台裏の車両走行安全シミュレーション

2.1 解析モデルの概要

橋台裏を通過した場合の車両挙動の解明には、前田ら⁵⁾が開発した地震時の車両、軌道、構造物の相互作用を考慮した3次元連成応答時シミュレーション解析モデルを用いている。

橋台裏の解析モデルを図2に示す。レール長手方向をマクラギ間隔の梁要素に分割し、隣接する要素との境界に節点を設けることで有限要素モデル化している。節点は上下方向とピッチング方向に自由度を持つ。

橋台裏の沈下差と軌道の段差が等しいと仮定し、路盤面に段差を与え、有限要素法の形状関数マトリクスによりレールの形状を導き出した後、沈下により軌きょうが路盤面に落下するまでの区間(以下、「沈下区間」という。)のマクラギ支持力を設定する。盛土区間はバラスト軌道、橋梁区間は無道床軌道として、マクラギ下の支持力を設定し、沈下区間は支持力が低下していると仮定し、盛土区間の1/10とした。

解析における列車速度は270km/hである。なお、脱線防止ガードレールが有効に機能していることを前提に、地震動は考慮していない。

2.2 解析事例

解析例として、段差が3cmの時のレール位置ごとの車輪上昇量を図3に、輪重を図4に示す。ここで、車輪上昇量は、走行前のレール高さを基準とした上下方向の移動量である。

図から、沈下区間上ではマクラギ支持力が小さいためにレールがたわみ、輪重が増加する。その後、橋台部直前で車輪がレールに衝突することにより輪重が大きなピークとなり、車輪が上昇し始める。車輪が上昇することで輪重抜けの状態となるが、着地と同時に再び輪重がピークとなる。その後、何回か車両がバウンドするような挙動となる。

したがって、車輪上昇量を脱線防止ガードが有効に機能する範囲内とするために、橋台部直前の段差を抑制する対策が必要であると考えられる。

2.3 対策の閾値

本解析モデルを用いて、段差を3cm、4cm、11cmとした時の車両走行安全シミュレーションを実施した。

それぞれの車輪上昇量を図5に示す。段差3cmでは車輪上昇量が最大25mmであり、段差4cmでは最大50mm、段差11cmでは最大300mmと車輪上昇量は、曲線的に増加していく傾向となる。

ここで、車輪上昇により車輪フランジが脱線防止ガードを超えた時点を脱線と判定するものとして、そのときの段差を、本対策の閾値とすることとした。

車輪フランジが脱線防止ガードを超える高さは、700系車両の車輪フランジ高さ30mmと脱線防止ガードレールのレール踏面からの高さ20mmの計50mmに対して、ガードレール設置の許容値5mm⁶⁾を考慮すれば、45mmとなる。レールと車輪フランジと締結装置、脱線防止ガードレールの配置を図6に示す。

これから、脱線となる車輪上昇量の限界値45mmを満たす段差は3cm以下であり、これを超える橋台裏については、対策を必要とする。

この段差の閾値については、鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限³⁾(以下、変位制限標準という)からも妥当であると考えている。

また、段差3cmの時の輪重及び横圧の解析結果は、それぞれ202kN、13kNである。輪重が著大値の目安値である200kNを超えたが、一時的な衝撃荷重であることからレールが破断にいたることはないと考えられる。

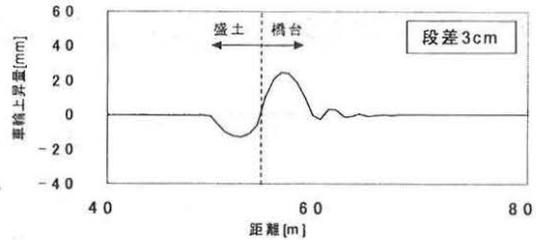


図3 レール位置での車輪上昇量

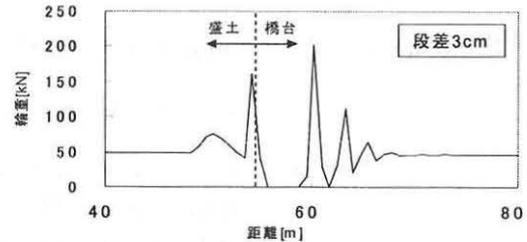


図4 レール位置での輪重

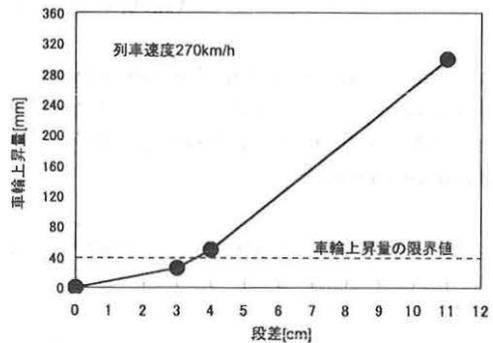


図5 段差と車輪上昇量

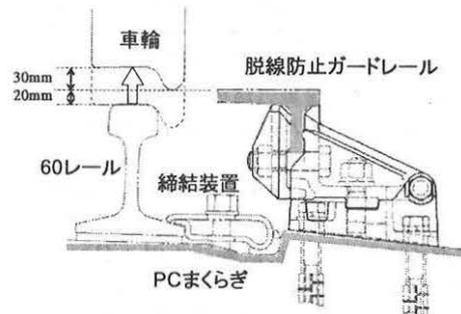


図6 脱線防止ガードレールの配置

3. 橋台裏対策の概要

橋台裏対策工法を図7に示す。橋台裏注入は、盛土内の間隙をセメント系の注入材で埋めることで、揺込み沈下を抑制し、さらに盛土材料の強度向上により、円弧滑りに対する安全率の改善、変形抑制効果を期待することができる。翼壁補強工は、地震動によりズレ・転倒する恐れのある打ち継ぎ目をアングル材で補強する。極めて経済的な対策である。どちらの工法も東海地震対策などの耐震補強工法として実績を持つ工法である。

また、他の構造物対策として実施する盛土沈下対策⁷⁾やジオテキバッグ⁸⁾などのバラスト流出防止対策を併せて実施することで、脱線リスクはより軽減されると考えられる。以降に、各対策の効果と仕様について述べる。

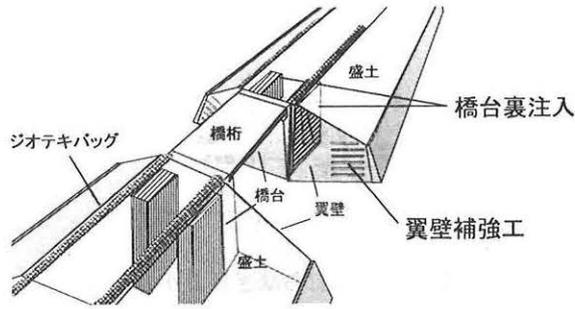


図7 橋台裏の脱線・逸脱防止対策のイメージ

4. 橋台裏注入による効果と注入範囲

4.1 振動台模型実験

注入工法の沈下抑制効果については、国鉄時代に縮尺模型による振動台実験³⁾を実施している。

試験体は 1/2.4 の縮尺模型である。単線仕様で、のり面勾配は 1:1.5、実際の盛土高さ 6.0m である。盛土材料は、砂質土をユル詰め (N 値≒1 程度) して構築している。注入材料はセメント系材料で、改良率 26% である。

実験は周波数 10Hz の正弦波で 100Gal~400Gal を段階的に加振している。各加振時間は 10sec である。

実験結果として、各加振時間の累積沈下量を図 8 に、加振力毎の沈下抑制効果を表 2 に示す。ここで、沈下量は実寸を表示している。

これより、100Gal の加振において、無対策模型の沈下量は 3mm と小さく、注入対策模型の沈下抑制効果も 1/2 程度であった。しかしながら、200~400Gal と加振力が大きくなるにつれて、無対策模型の沈下量は大きく増加していくが、注入対策模型の沈下量は緩やかな増加である。その結果、沈下抑制効果は約 1/5 程度であることを確認した。

4.2 注入範囲の仕様

橋台裏注入により段差の閾値を満足することに加えて、軌道の折れ角を満たす必要がある。この折れ角の閾値は変位制限標準の 11.5/1000 を適用した。

線路方向の注入形状については、この折れ角を満たすように低減させていくことが望ましいが、実際の施工では困難であり、施工範囲も長くなるため不経済である。したがって、注入量または、注入高さを線路方向で大きく階段状にすることとした。具体例として段差 10cm では注入範囲 7m で、橋台から 4m から階段状となるように仕様する。注入対策による軌道形状については 2.1 の解析モデルを用いている。解析結果を図 9 に示す。階段状の沈下量とすることで、折れ角の限界値を満たすことが確認できる。段差ごとに経済的で効果的な注入範囲を求め、図 10 に示すとおり 2 パターンの対策仕様とした。

なお、線路直角方向の対策範囲については、列車荷重を直接受けないのり肩部を重点的に対策する仕様とした。これは、東海道新幹線の盛土の現地簡易コーン試験結果から、軌道直下は列車荷重による締め固め効果により、Nd 値が 50 程度の強度があることが確認できたため対策不要と判断したものである。

5 沈下量の推定

地震時における橋台裏盛土の沈下量については、図 11 に分類され、(式 1) で表される⁵⁾。

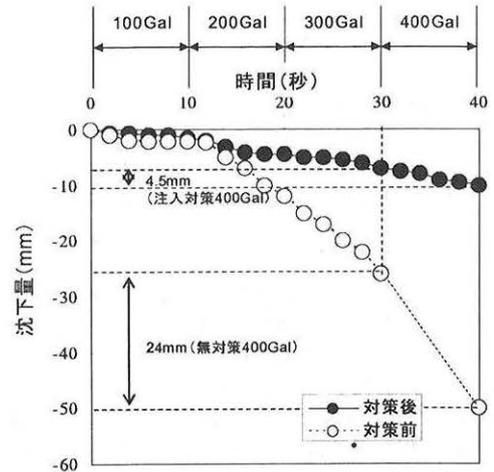


図8 模型実験による沈下量

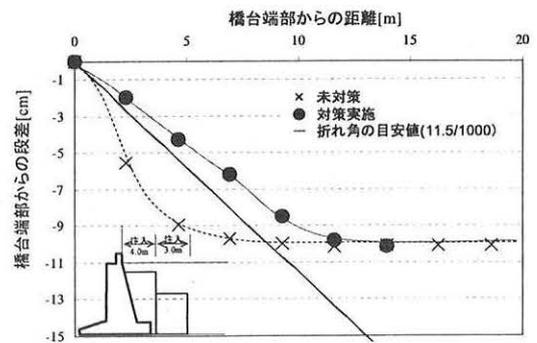


図9 沈下差10cm 注入範囲7m の解析結果

表2 注入対策による沈下抑制効果

加振力	加振力ごとの沈下量[mm]		沈下抑制効果 (注入/無対策)
	無対策	注入対策	
100Gal	3	1.5	1/2
200Gal	9	2	1/4.5
300Gal	14	3	1/4.7
400Gal	24	4.5	1/5.3

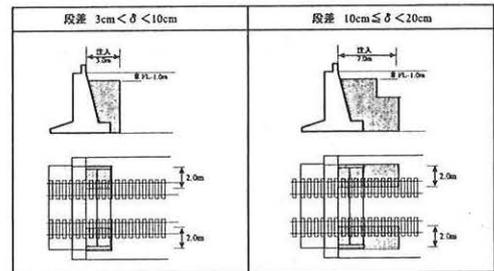


図10 注入範囲の仕様

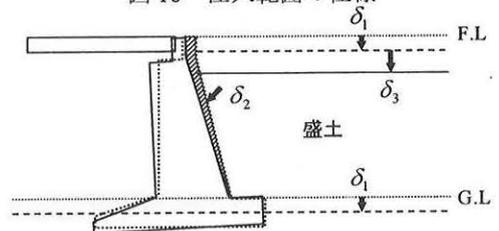


図11 橋台裏の沈下量の分類

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \quad \dots (式1)$$

- S : 橋台との相対沈下量
- S_1 : 地盤の変形係数の低下に伴う沈下量
- S_2 : 橋台の移動による盛土の揺り込み沈下量
- S_3 : 盛土本体の揺り込みによる沈下量

このうち、 S_1 、 S_2 については、東海地震対策及び長期不通防止対策にて対策済みである。また、橋台と盛土の相対的な沈下差を問題としていることから、今回は、橋台裏の沈下量として S_3 のみを考慮することとした。

S_3 の沈下量は、過去の地震被害事例から、係数 K [1/Gal]、地震動の大きさ α [Gal]、盛土の高さ H [m]、盛土の強度 N_d を用いて、(式2)の推定式が提案されている⁵⁾。

$$S_3 = K \cdot \alpha \cdot H / N_d \quad \dots (式2)$$

ここで、東海道新幹線の橋台裏については、 N_d は盛土の土質分類で、 α はL2地震動及び想定東海地震動のG3~G5地盤上の地表面加速度を用いることとした。

また、これまでに耐震補強でシートパイル締め切り工法やストラッド工を実施した箇所や、耐震補強や降雨対策で注入対策を実施した箇所については、各対策の沈下抑制効果¹⁰⁾を考慮することとした。以上を踏まえて、対策箇所と対策範囲の選定に関するフローチャートを図12に示す。

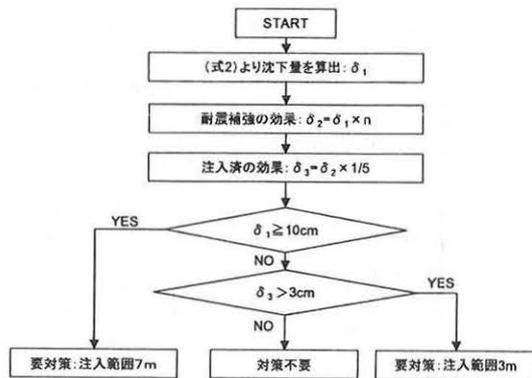


図12 対策箇所と対策範囲の選定に関するフロー

6 翼壁補強工法

地震動によって翼壁全体が転倒や滑動するものについては、これまでの地震対策で耐震補強済みである。

したがって、今回の対策箇所は、翼壁の打ち継ぎ目で発生しているズレ、転倒といった軽微な変状が軌道へ大きく影響するものの対策となる。

打ち継ぎ目は、水平3mピッチ、鉛直5mピッチであることから、翼壁高さ3m以上を対象に耐震補強を実施することとした。

翼壁補強工の仕様は、設計標準¹¹⁾に基づき地震時主動土圧と翼壁の慣性力、目地部の摩擦抵抗から必要な補強による抵抗力を算定し、鋼材及びアンカーの仕様を決定する。打ち継ぎ目より上の作用力の考え方を、図12に示す。また、橋台との隙間から背面土砂が流出するのを防ぐための鋼材を設置する仕様としている。

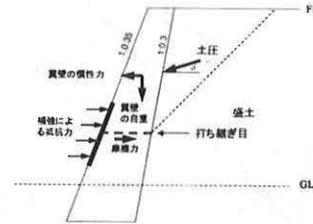


図12 翼壁（打ち継ぎ目より上）の作用力

7. まとめ

本報告書で得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 車両走行安全シミュレーションにより、橋台部を通過する車両の挙動は、橋台部で衝撃を受けり飛び上がる現象となることがわかった。
- (2) 段差3cmを超えると、飛び上がりにより車輪フランジが脱線防止ガードを超える可能性がある。したがって、対策の閾値3cmを提案した。
- (3) 振動台模型実験より、注入工法による沈下抑制効果は約1/5である。
- (4) 注入範囲は折れ角の限界値を満足するように、段差の大きさにより、効果的な2つの仕様を提案した。
- (5) 対策箇所の選定及び対策工法について、これまでの耐震補強等の効果を考慮できるようなフローチャートを提案した。
- (6) 翼壁補強工法として、既存の対策工法を提案した。

参考文献

- 1) 関雅樹, 松田猛, 荒鹿忠義: 東海道新幹線構造物の耐震強化工事について (投稿中), J-Rail2009,2009.12
- 2) 村松浩成, 可知隆, 三輪一弘, 渡邊康人, 船田智己, 生田周史: 実台車を用いた加振試験による脱線防災ガードの設計仕様の検討 (投稿中), J-Rail2009,2009.12
- 3) 垂水尚志, 匹本慶一, 岡田勝也, 福島弘文, 大植英亮, 川名英二, 地震時の橋台裏盛土の変状機構と変状防止対策に関する研究, 鉄道総合技術研究所速報No.A85-33, pp100-106, 1985.3
- 4) 福島弘文, 岡田勝也, 小笠原令和: 中小地震に対する橋台裏盛土の沈下量の算定式に関する一考察, 土木学会第41回年次学術講演会, 1986.11
- 5) 前田昌克, 阿知波秀彦, 関雅樹, 松浦章夫: 地震時構造物の相互作用を考慮した車両運動シミュレーション (投稿中), J-Rail2009,2009.12
- 6) 渡邊康人, 近藤邦弘, 鏑坂勝則, 曾田祥信, 三輪一弘: 新幹線バラスト軌道用脱線防止ガードの試験施工 (投稿中), J-Rail2009,2009.12
- 7) 大木基裕, 庄司朋宏, 永尾拓洋, 阪本泰士, 関雅樹: 東海道新幹線の盛土区間における脱線・逸脱防止対策 (投稿中), J-Rail2009,2009.12
- 8) 可知隆, 関雅樹, 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の脱線・逸脱防止対策 (投稿中), J-Rail2009,2009.12
- 9) 鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限, 2005.10, 丸善
- 10) 長縄卓夫, 伊藤浩二, 松田隆: 橋台の地震時挙動に関する遠心模型振動実験, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集, pp401-402
- 11) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 1999.10, 丸善