

2211 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

正 [土] ○荒鹿 忠義 (東海旅客鉄道) 正 [土] 吉田 幸司 (東海旅客鉄道)

正 [土] 庄司 朋宏 (東海旅客鉄道) 正 [土] 村松 浩成 (東海旅客鉄道)

Measures for preventing derailment of Tokaido Shinkansen by strengthening tracks and structures

Tadayoshi ARASHIKA, Central Japan Railway Company, 1545-33, Ohyama, Komaki City

Koji YOSHIDA, Central Japan Railway Company

Tomohiro SHOJI, Central Japan Railway Company

Hironari MURAMATSU, Central Japan Railway Company

The train derailment of Joetsu-Shinkansen was caused by Niigataken-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, the effects and applicable criteria of seismic measures for containing tracks and viaduct displacement at earthquake are described.

Keywords: seismic retrofitting, displacement control, derailment and dislodgement prevention

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、長期不通防止の観点から、L2地震動や想定東海地震動に対しても大規模な損傷を防止することを目的として耐震強化を進めてきた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、構造物に大きな損傷が無い場合であっても走行中の上越新幹線車両が脱線するという事象が発生した。

この事象を受け、当社では地震時の脱線防止と逸脱による被害の拡大防止を目的として、実験、解析および試験施設により、各対策の機能確認等を実施し、地震時の脱線・逸脱防止に有効であり、保守上においても支障のない対策を確立した²⁾。

本論文では、従来から進めてきた東海道新幹線の地震対策に加え、地震時に土木構造物に生じる大きな変位を抑制する軌道の強化と土木構造物の変位抑制の必要性和その根拠について述べる。

2. 新潟県中越地震での構造物被害

新潟県中越地震は、新潟県中越地方を震源（北緯 37 度 17.3 分、東経 138 度 52.2 分、深さ 13km）とするマグニチュード 6.8 の内陸活断層地震で、震源付近では最大震度 7 となる地震であった。

一方、新幹線の脱線現場は、震源から約 10km 北へ離れた箇所であり、当該付近の震度は、震度 6 強～6 弱であった。

また、脱線原因は、左右動を主要因とするロッキング脱線と推測されており^{3),4),5)}、地表面の揺れ 389gal が高架橋より約 700gal に増幅されたことが要因であると考えられる。なお、脱線現場付近の構造物には、大きな損傷は生じていなかった。

したがって、脱線を極力防止するための脱線防止ガー

ドを有効に機能させるために、従来から進めてきた大規模な損傷を防止する対策に加え、軌道面での地震動の増幅を極力抑制すること、バラスト軌道、盛土において大きな変位、沈下を生じさせないことなど、東海道新幹線の構造物の特状に考慮した対策を合わせて実施することが必要である。

3. 軌道強化と土木構造物変位抑制

3.1 バラスト軌道の強化

東海道新幹線の特状の一つとしてバラスト軌道がある。バラスト軌道では、図1のように、地震によりバラストが流れ、軌道形状そのものを維持できなくなり、軌道座屈を生じる可能性がある。東海地震対策では、これまでに鉄筋コンクリート (RC) 製のバラスト止めを用いた工法により、バラスト流出対策⁶⁾を実施してきた。この工法は、重量約 150～200kg の RC 製のバラスト止めを、擁壁のようにバラスト軌道の外側に設け、地震によるバラストの流出を防ぎ軌道形状を維持するものである (図2)。

そこで、脱線防止ガードを有効に機能させるためバラスト軌道に求める要求性能としては、横方向へのまくらぎ変位が 3cm 以下と設定した。この目標値は、想定地震 (L2 地震動および、想定東海地震動) に対し、実台車を用いた加振試験にて脱線防止ガードの機能が確認できた範囲のまくらぎ変位の最大値をもとに設定した⁷⁾。また、この 3cm 以下に横方向のまくらぎ変位を抑制し、軌道形状を保持するための対策がバラスト流出防止対策である。

しかし、この工法は RC バラスト止めが重量物であること、施工に際しては線路閉鎖工事が必要になることなど、施工性に難点がある。そこで、より効率的な方法としてジオテキバッグ (ジオテキスタイル素材でできた網目袋) を用いた工法を新たに開発した。この工法は、重量約 25kg のジオテキバッグを傾斜積みし、鉄筋を打ち込

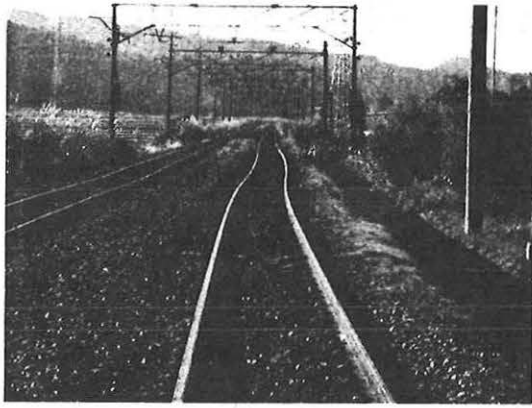


図1 地震によるバラスト軌道の変形

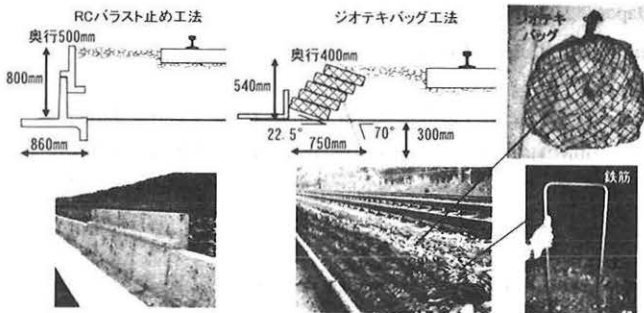


図2 バラスト流出対策

表1 盛土の変形レベル⁸⁾

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

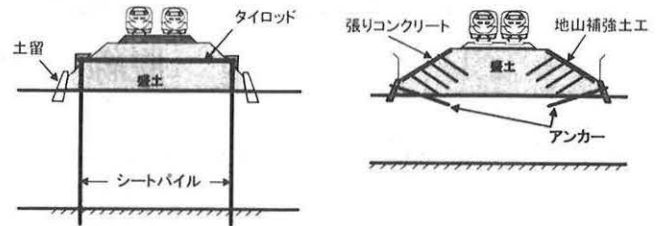
む構造で、人力施工が可能である。

なお、この工法については、実物大の振動実験により従来の RC バラスト止めと同等の耐震性能を有することを確認している。

3.2 盛土区間の更なる耐震強化（変位抑制）

東海道新幹線において、これまでに実施してきた盛土の耐震補強は、軟弱地盤上の盛土や液状化地盤上にある盛土といった、大規模地震時における盛土の大変形（あるいは崩壊）を防止することを目的とした対策である。地震による盛土の沈下量が 50cm 以上となる箇所を対象にシートパイル締切工法による対策を実施し、対策後に盛土の沈下量が 20cm 未満となる。耐震標準⁸⁾に定める耐震性能としては、変形レベル 4 から変形レベル 2（もしくは変形レベル 1）への耐震性能の向上を図った対策である（図 3(a)）。ここで、表 1 に盛土の変形レベルを示す。

一方、これまで対策対象としてこなかった盛土（50cm 未満）の中には、沈下量 20cm 以上の箇所（変形レベル 3）となる箇所が存在する。また、このような盛土の地震時の挙動を模型実験や FEM 解析により評価した結果、盛土のり肩が天端中央に比べて大きく沈下することが分かり、盛土の不等沈下による路盤面の不陸ひいては軌道面の変状が生じることとなる。特に、盛土の沈下量 20cm 以上となる場合には、まくらぎ端面が露出することにな



(a)沈下量 50cm 以上
(シートパイル締切工)
(b)沈下量 20cm～50cm
(地山補強土工)

図3 盛土沈下対策

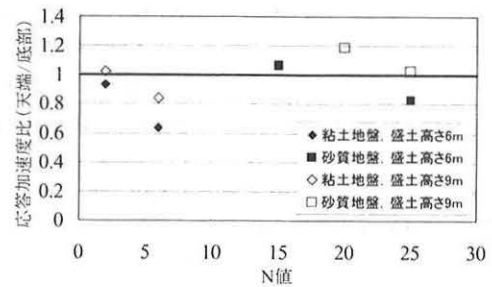
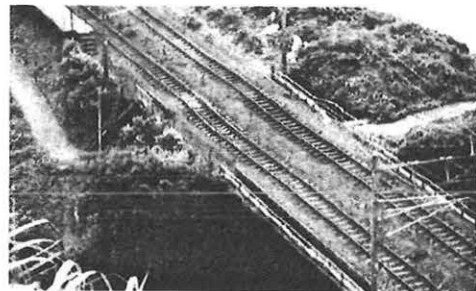
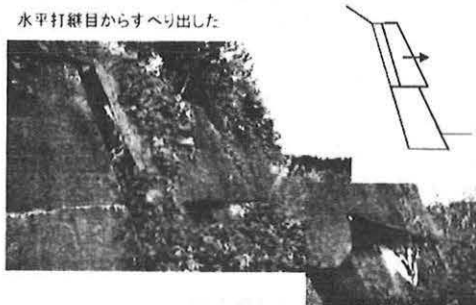


図4 応答加速度比～地盤 N 値関係



(a)地震による橋台裏部での段差



(b) 地震による翼壁の損傷（ずれ）

図5 新潟県中越地震での被災事例

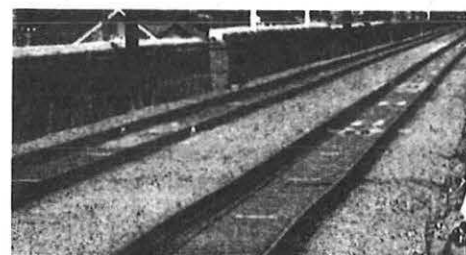


図6 2009年8月11日の駿河湾の地震での東海道新幹線の被災事例

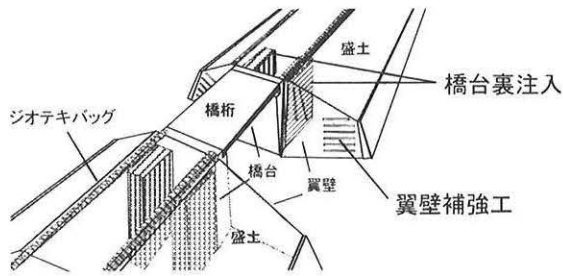


図7 橋台裏（盛土と橋の境界部）対策

変形レベル	レベル4	レベル3	レベル2
イメージ			
	従来対策	今回対策	脱線・逸脱防止

図8 盛土の耐震強化¹²⁾

り軌道狂いが発生する。したがって、変形レベル3から変形レベル2（もしくは1）への対策が必要である。

対策箇所の選定については模型実験やサイスミックマイクロゾーニングにより、地盤強度、盛土高さをパラメータとして対策箇所選定基準を地震動ごとに定めた。対策工法は地震時の盛土の変形によるのり肩の沈下を抑制することを目的として、のり面を補強する地山補強土工法とした（図3(b)）。なお、模型実験による盛土底部と盛土天端の応答加速度の比較をした結果、図4に示すように、盛土の増幅は高架橋に比較し大きくはなく、脱線防止ガードが有効に機能すれば脱線しない。したがって、盛土区間における対策は、脱線防止ガードの機能が十分発揮されるよう、不等沈下を抑制することが対策の目的となる。また、全ての盛土区間が沈下20cm未満となれば、3.1節に述べたバラスト流出対策との組合せにより、まくらぎ高さ相当の20cm以上の変状は生じないため、バラスト軌道の形状が保たれ、列車走行性が向上する⁹⁾。

さらに、道路等との交差箇所においては、盛土と橋台との構造境界がある。地震による橋台裏部の盛土沈下に伴い、段差や折れ角が生じる可能性があり、これらを抑制する対策が必要である。新潟県中越地震での橋台裏部の被災事例を図5に、2009年8月11日の駿河湾の地震での東海道新幹線の被災事例を図6にそれぞれ示す。

これまでに、国鉄時代からの東海地震対策として、地震時の橋台裏部での段差の抑制を目的に、特に段差が大きくなる箇所へのセメントミルクの注入等を実施してきた。なお、対策箇所については、脱線防止ガードを有効に機能させるという観点から、変位制限標準¹⁰⁾より段差3cm以内、折れ角11.5/1000以内に抑制する必要がある箇所を、解析等で再評価して選定した。加えて、翼壁への対策として、大きな崩壊に至らなくても、翼壁がずれて橋台裏盛土が流出することで段差が助長される可能性を考慮し、翼壁補強対策を併せて実施する（図7）¹¹⁾。

この対策により、東海道新幹線の盛土の変形レベルは図8に示すように、全体を変形レベル2（もしくは1）となる。

3.3 高架橋の更なる耐震強化（変位抑制）

東海道新幹線の高架橋は、図9に示すように、建設年

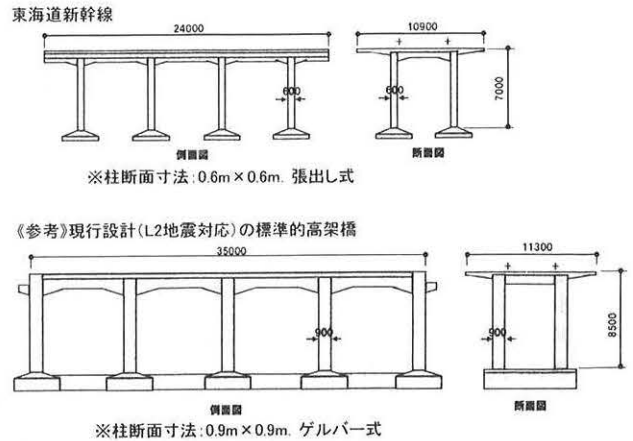


図9 東海道新幹線高架橋と他の新幹線高架橋の比較

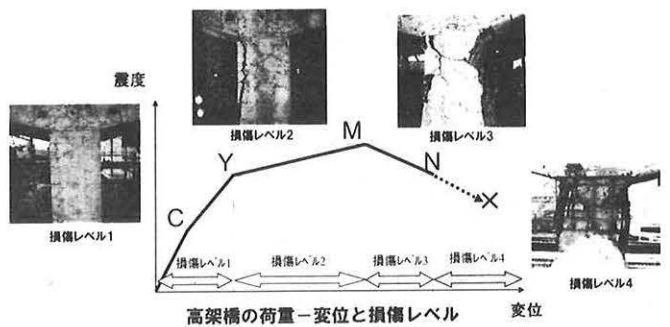


図10 高架橋の損傷レベル⁸⁾

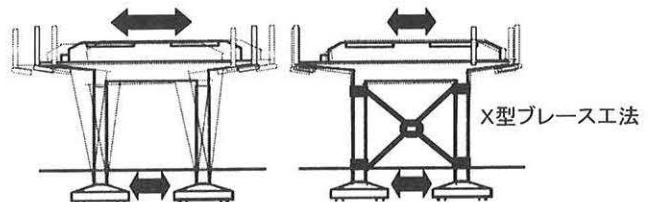


図11 高架橋変位対策

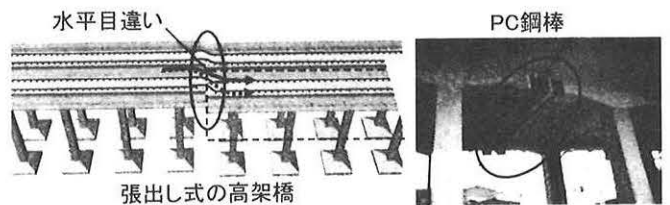


図12 高架橋目違い対策

損傷レベル	レベル4	レベル3	レベル2
イメージ			
	従来対策	今回対策	脱線・逸脱防止

図13 高架橋の耐震強化¹⁶⁾

代も古いこと等から、他の新幹線に比べ、柱断面が小さく剛性が低い、そのため、地震による応答（揺れ）が増幅しやすいと考えられる。また、線路方向の両端部が3mの張出し式構造という特状を有する。

一般に、高架橋の損傷レベルは、図10に示すように、部材の損傷程度に応じて、損傷レベル1～4で定義され、耐震性能としては損傷レベル3までに収めることが要求される⁸⁾。

これまで地震対策として実施してきた高架橋の耐震補強は、兵庫県南部地震で発生した高架橋柱のせん断破壊等、地震による構造物の大きな損傷の防止を目的としており、地震時に損傷レベル4となる構造物を、損傷レベル3（もしくは2）にする対策である。したがって、対策実施後も地震動の大きさによっては構造物に変状が生じ、これが地震時の脱線に影響を与えたと考えられる。

一方、新潟県中越地震では事象を踏まえ、まず、高架橋で配慮すべきは、地表面と高架橋天端との揺れの増幅割合である。一連の脱線・逸脱防止対策の検討の中で、脱線防止ガードが有効に機能した地震動による水平変位は、実台車による加振実験で想定東海地震の1.0倍¹³⁾、1/5モデルによる加振実験で同1.4倍までの範囲で確認¹⁴⁾しており、有効に機能できる水平変位には限界がある。

想定東海地震に対する東海道新幹線の標準的高架橋の応答解析によれば、地表面の揺れ（約30cm）に対し、高架橋が無対策の場合には、高架橋の天端で約30cm+約26cm（増幅）となる。これに対し、図11に示すX型ダンパー・ブレース工による対策により高架橋の天端で約30cm+約3cm（増幅）となり、高架橋による変位増幅は約1/8に抑制される¹⁵⁾。

また、張出し式構造は、隣接高架橋間の目違いによる局所的な不同変位（ずれ）を生じやすいことも考えられるため、この不同変位を抑制することも必要であり、この目標値として、変位制限標準¹⁰⁾の考え方に基づき設定した地震時の水平目違いの目安（約3cm）を設定した。

なお、高架橋目違い対策は、国鉄時代からの東海地震対策として、静岡地区の一部で隣接する高架橋間をPC鋼棒で連結して水平目違いを抑制する対策をベースに検討した。このときの地震動として1968十勝沖地震での八戸波で検討されているため、今回想定する大規模地震を考慮して、PC鋼棒径をφ17mmから32mmへ変更した仕様にて連結する（図12）。高架橋変位対策により、高架橋の水平変位は約3cmへ抑制されており、隣り合う高架橋が逆位相で応答したと仮定した場合、水平目違いは約6cmと想定されるが、目違い対策により、さらに約2cm（約1/3）へ変位抑制でき、目標値（約3cm）を満足することを確認している¹⁵⁾。

東海道新幹線の高架橋についても、これまで耐震強化に加え、脱線防止ガードを有効に機能させるために変位抑制する耐震強化を実施することで、図13に示すように、全体を損傷レベル2（もしくは1）とし、脱線・逸脱防止を図ることが必要である。

4. 結論

新潟県中越地震での軌道および土木構造物の被災状況等を踏まえ、東海道新幹線の特状に応じた対策を検討した結果、以下の知見を得た。

(1) 東海道新幹線の特状の一つとしてバラスト軌道がある。今後も継続してバラスト流出対策を実施し、バラスト軌道の強化を図ることが必要である。

- (2) 東海道新幹線の盛土については、これまで耐震強化に加え、変位（沈下）を抑制する耐震強化により、全体を変形レベル2（もしくは1）とし、脱線・逸脱防止を図ることが必要である。
- (3) 東海道新幹線の高架橋についても、これまで耐震強化に加え、変位抑制する耐震強化を実施することで、全体を損傷レベル2（もしくは1）とし、脱線・逸脱防止を図ることが必要である。

当社では、これまで様々な地震対策に取り組んできた。引き続き、従来からの高架橋柱、盛土等の耐震補強の仕以上に注力し、東海道新幹線の弱点をなくすとともに、それにプラスする形で、対策を追加し、脱線・逸脱防止を図って、地震により強い東海道新幹線を目指していく。

参考文献

- 1) 関雅樹、松田猛、荒鹿忠義、阪本泰士：東海道新幹線構造物の耐震強化工事について、J-Rail2009（投稿中）、2009.12.
- 2) 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、J-Rail2009（投稿中）、2009.12.
- 3) 航空・鉄道事故調査委員会：鉄道事故調査報告書（上越新幹線浦佐駅～長岡駅間列車脱線事故）、2007.11.30.
- 4) 東日本旅客鉄道：上越新幹線脱線調査報告書、2008.1.31.
- 5) 鉄道総合技術研究所：新潟県中越地震新幹線脱線シミュレーション解析、2008.12.
- 6) 池上邦信、家田仁、花輪匠太郎、新野希嘉：バラスト止ブロックの性能試験とその設計について、鉄道線路、Vol.30, No.8, pp.19-24, 1982.8.
- 7) 可知隆、関雅樹、永尾拓洋、古関潤一：ジオテキパッグ工法による東海道新幹線脱線・逸脱防止対策、J-Rail2009（投稿中）、2009.12.
- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）、1999.10.
- 9) 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、J-Rail2009（投稿中）、2009.12.
- 10) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）、2006.2.
- 11) 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、J-Rail2009（投稿中）、2009.12.
- 12) 伯野元彦：被害から学ぶ地震工学、1992.12.
- 13) 三輪昌弘、坂上啓、足立昌仁、村松浩成：実台車を用いた脱線防止ガードの効果確認試験、J-Rail2009（投稿中）、2009.12.
- 14) 足立昌仁、森村勉、石川栄、深田淳司、嘩道佳明：地震時の脱線メカニズムと脱線防止ガード機能に関する研究、J-Rail2009（投稿中）、2009.12.
- 15) 吉田幸司、松田猛、阿知波秀彦、関雅樹：高架橋のダンパーブレース補強による東海道新幹線の脱線・逸脱防止対策、J-Rail2009（投稿中）、2009.12.
- 16) 鉄道総合技術研究所：兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書、1996.12.