地震時の脱線防止ガードに関する研究

関 雅樹¹・小長井一男²・村松浩成³・渡邊康人⁴
可知 隆⁵・古関潤一⁶

¹フェロー 東海旅客鉄道株式会社 新幹線鉄道事業本部 (〒100-0005 東京都千代田区丸の内1-9-1)

²フェロー 東京大学 生産技術研究所 基礎系部門 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

³正会員 東海旅客鉄道株式会社 総合技術本部 技術企画部 (〒108-8204 東京都港区港南2-1-85)

E-mail: hironari.muramatsu@jr-central.co.jp

⁴正会員 東海旅客鉄道株式会社 東海鉄道事業本部 工務部 (〒453-8520 名古屋市中村区名駅1-3-4)

⁵正会員 シーエヌ建設株式会社 多治見軌道事務所 (〒507-0041 岐阜県多治見市太平町2-75)

⁶正会員 東京大学 生産技術研究所 人間・社会系部門 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

本研究は、2004年10月の新潟県中越地震による上越新幹線の脱線事象を踏まえ、大規模地震発生時においても、列車の走行安全性を確保する対策工の具体化をテーマとしている。東海道新幹線では、長期不通防止を目的とした土木構造物の耐震補強は概ね完了する段階となったが、本研究の成果を踏まえた新たな地震対策として、地震時の土木構造物の変位を抑制したうえで、列車の脱線と逸脱による被害拡大の双方を極力防止する二重系の脱線・逸脱防止対策を実施している。ここでは、対策の核となる脱線防止ガードについて、a) 耐震性能の評価、b) 要求性能を満たす具体的な設計仕様、c) 現行の鉄道システムへの適合の3点に関する評価手法と検討結果を示す。本研究の成果は、鉄道システム全体のさらなる安全性の向上に寄与するものである。

Key Words : *safety of railway system, earthquake, derailment prevention, anti-derailing guard rail*

1. はじめに

東海道新幹線の線路を支える土木構造物は、盛土 44%，切取 9%，高架橋 23%，橋梁 11%，トンネル 13%で構成される。東海道新幹線の地震対策は、これらの土木構造物の種別に応じた適切な工法により、これまでに、長期不通防止を目的として確実に進められてきた。代表的な対策工としては、シートパイル締切工による盛土補強、鋼板巻き補強工法による高架橋柱の補強等がある。さらには、地震時に列車を早期に止める対策として早期地震警報システムの導入と充実を図り、現在、これら対策は概ね完了する段階となった¹⁾。

一方、2004年10月の新潟県中越地震により、上越新幹線の浦佐～長岡間を走行中の「とき325号」が、脱線するという事象が発生した。脱線の原因とメカニズムについては、航空鉄道事故調査委員会が、「列車が走行する前には脱線につながるような損壊がなかった軌道を列車が走行しているときに、大きな地震動を受けたため、車輪の上昇量がフランジ高さを超え、また、車輪とレール

の左右相対変位が限界を超えたことにより脱線した」と推定している。さらに、現行の鉄道システムではこのような列車脱線を完全に防ぐことは困難とした上で、「本事故のような列車脱線を防止するためには、鉄道システム全体の問題としてとらえ、大きな地震動を受けた際に車両あるいは鉄道施設等について、脱線を可能な限り防ぐような装置や設備を検討すべきである」、「列車脱線を防止できなかった場合においても、車両が線路から大きく逸脱して被害が拡大することを防止するため、鉄道施設および車両の両面から対策を推進する必要がある」との所見を示している²⁾。

そこで、東海道新幹線の新たな地震対策として、地震時の列車の脱線と逸脱による被害拡大の双方を極力防止し、列車の走行安全性を確保する対策工の検討を行った。その成果に基づき、軌道、盛土、高架橋といった鉄道施設と車両の対策工を図-1、2と表-1に示す内容で具体化し、現在、脱線・逸脱防止対策として実施している³⁾。

脱線防止ガードは、地震時の車輪とレールの左右相対変位を抑制し、車輪がレールから外れて脱線するのを極

力防止する対策工である。逸脱防止ストッパは、車両に設置する対策工で、万が一脱線した場合でも脱線防止ガードの背面で逸脱防止ストッパをガイドし、車両が線路から大きく逸脱することを極力防止する⁴⁾。さらに、脱線防止ガードの機能を有効に発揮させるための前提として、地震時の土木構造物の変位を抑制する対策を実施する。具体的な対策工は、バラスト流出による軌道の変位を抑制するジオテキバッグ工法⁵⁾、盛土が横方向に

図-1 東海道新幹線の地震対策の基本的な考え方

表-1 脱線・逸脱防止対策の内容

対象	考慮した事柄	対策の内容
軌道 車両	・脱線 ・脱線後の逸脱	a) 脱線防止ガード b) 逸脱防止ストッパ
軌道	・バラスト流出	c) バラスト流出対策
盛土	・盛土沈下 ・橋台裏部での段差	d) 盛土沈下対策 橋台裏対策
高架橋	・水平目違い ・揺れの増幅	e) 高架橋目違い対策 高架橋変位対策

図-2 脱線・逸脱防止対策の対策工

広がることで生じる不等沈下を抑制する地山補強土工法⁶⁾、高架橋の変位応答を抑制するX型ブレース工法およびPC鋼棒による目違い防止工等とした⁷⁾。

以上のように、脱線・逸脱防止対策は、地震時の列車の脱線と逸脱による被害拡大の双方を極力防止することを目的に、鉄道施設と車両の両面から実施する対策である。この対策を実用化する上で最も重要な課題は、被害の発端となる地震時の列車の脱線そのものを防ぐ対策工の開発にある。そこで、本研究では、その核となる脱線防止ガードについて、a) 耐震性能の評価、b) 要求性能を満たす具体的な設計仕様、c) 現行の鉄道システムへの適合の3点に関する評価手法と検討結果を示す。

2. 脱線防止ガードの要求性能

航空鉄道事故調査委員会が推定した上越新幹線の脱線の原因とメカニズム²⁾、およびこの脱線挙動に対する脱線防止ガードの有効性を図-3に示す。

地震時に軌道全体に水平変位が生じると、一方の車輪がレールと衝突し、反動で反対側の車輪が上昇し始める。地震動により、この現象が左右の車輪とレール間で交互に繰り返されることで、車輪の上昇量が増加してフランジ高さを超え、その状態で線路が逆方向に動くことで脱線が生じる。すなわち、地震時の列車脱線は、左右動が主要因の車両のロッキング運動に起因する現象である。

これに対し、上昇した車輪の反対側の車輪はレールに接地しているため、脱線防止ガードがこの車輪の水平変位を抑制することで脱線を防止することができる。

以上の脱線メカニズムを考慮し、脱線防止ガードの有効性の観点から、(1) 想定する地震動、(2) 水平方向の作用力に対する耐力、(3) 作用時の水平変位の各項目における要求性能を定義した。さらに、列車の通常走行時の安全性の観点から、(4) 建築限界を考慮した設置位置に対する要求性能も定義した。以下にその内容を示す。

図-3 地震メカニズムと脱線防止ガードの有効性

(1) 想定する地震動

本研究では、想定する地震動として以下の3つを設定した。

一つ目は、図-4 に示す新潟県中越地震での上越新幹

図-4 新潟県中越地震での上越新幹線脱線現場推定波

図-5 L2設計地震動 (Spec2, G3地盤, 地表面波)

図-6 L2設計地震動 (Spec2, G3地盤, 鋼板巻き補強工法とX型ブレース工法を施した高架橋の応答波)

線の脱線現場における高架橋上面での応答波で、鉄道事故調査報告書の付図7に示された加速度波形²⁾から推定した応答波を用いた。

二つ目は、鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計によるL2設計地震動 (Spec2)¹⁰⁾で、図-5に示すG3地盤での地表面波と、図-6に示すG3地盤での鋼板巻き補強工法とX型ブレース工法⁹⁾を施した高架橋における応答波を用いた。

三つ目は、東海地震対策専門調査会報告による想定東海地震動¹¹⁾で、図-7に示すG3地盤での地表面波と、図-8に示すG3地盤での鋼板巻き補強工法とX型ブレース工法⁹⁾を施した高架橋における応答波を用いた。

なお、各地震動の水平加速度波形、水平変位波形の作成に際しては、車両挙動に与える影響が小さいと考えられる3~4秒以上の長周期成分はカットした。また、本研究では、これらの応答波以外にも、正弦波や過去に観測された他の地震動を用いた実験を実施し、検討内容を補完した。各地震動の概要は第4章(3)節で述べる。

図-7 想定東海地震動 (G3地盤, 地表面波)

図-8 想定東海地震動 (G3地盤, 鋼板巻き補強工法とX型ブレース工法を施した高架橋の応答波)

(2) 水平方向の作用力に対する耐力

地震による脱線時に車輪と脱線防止ガードの間に生じる作用力は、その際の地震動の大きさ、脱線防止ガードの構造、脱線防止ガードを設置する軌道構造の組み合わせにより異なった値となる。そこで、本研究では、設定した条件の組み合わせで生じた作用力の大きさに関わらず、脱線防止ガードを構成する部材の応力が、JIS 規格で定める弾性域内であることを要求性能とした。

(3) 作用時の水平変位

図-3 の下側に示す状態で、左側車輪の水平変位を拘束している脱線防止ガードがさらに右方向に変形すると、レール上に乗った右側車輪が右側レールの外方に落下する可能性がある。そこで、図-9 に示すように、車輪と脱線防止ガードの間に作用力が発生した際、車輪フランジの中心位置がレール頭部幅の範囲内となる変位を、脱線防止ガードの水平変位に対する要求性能とした。ここで、図-9 に、東海道新幹線で採用されている保守寸法を考慮した軌間、左右車輪の内面間距離、車輪フランジの中心位置の寸法、および JIS E 1101 における 60kg レールの頭部幅 65mm を用いると、脱線防止ガードの水平変位 d とレールからの離れ x の関係は、式(1)で表される。

$$d = 116 - x \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

なお、車輪と脱線防止ガードの間に作用力が発生した際、脱線防止ガードを取り付けた PC まくらぎにも水平変位が生じるため、図-9 における脱線防止ガードの水平変位は PC まくらぎに対する相対変位とした。

(4) 建築限界を考慮した設置位置

図-3 および式(1)からも分かるように、脱線防止ガードの有効性は、その設置位置がレール側面に近いほど、また、レール頭頂面から高いほど高くなると考えられる。

図-9 脱線防止ガードと車輪の位置関係

一方、鉄道施設には、列車の安全運行の確保を目的に、地上設備の恒久的な設置が可能な範囲として、図-10 に示す建築限界が設けられている。東海道新幹線における建築限界は、レール側面からの離れが 60mm 以上、レール頭頂面からの高さが 35mm 以下となっている。

そこで、脱線防止ガードの設置位置は、レールからの離れ、高さともに建築限界の範囲内とした。なお、設置位置を設定する際には、脱線防止ガードの施工時の設置誤差も併せて考慮することとした。

3. 脱線防止ガードの研究項目

脱線防止ガードの研究は、(1) 耐震性能の評価、(2) 要求性能を満たす具体的な設計仕様、(3) 現行の鉄道システムへの適合の確認の順序で、実験、解析及び試験敷設を実施し、その結果に基づき実用化した。

(1) 耐震性能の評価

脱線防止ガードの耐震性能の評価は、700系および N700系の新幹線電車の実際のボルスタレス台車を用いた実物大の加振試験により検討を実施した。検討内容の詳細は第4章で述べる。

なお、実際のボルスタレス台車を用いた実物大の加振試験は宮本らが実施しており、地震のような大変位振動を受けた際の車両挙動について検討を行っている¹²⁾。また、森村らが数値シミュレーション等を用いて、上下動、車体質量、線路線形等の因子が地震時の車両挙動および脱線メカニズムに与える影響を評価し、脱線防止ガードの有効性を確認している¹³⁾。

(2) 要求性能を満たす具体的な設計仕様

脱線防止ガードの具体的な設計仕様は、実物大の加振試験により第2章で述べた要求性能を満たすことを確認し、その際に得られたデータに基づき策定した。さらに、様々な条件での強度確認試験により設計仕様を満たすことを確認し、脱線防止ガードの実用化を図った。検討内容の詳細は第5、6章で述べる。

図-10 建築限界と脱線防止ガードの位置関係

(3) 現行の鉄道システムへの適合

現行の鉄道システムへの適合は、脱線防止ガードを東海道新幹線の本線に試験的に敷設し、施工性、敷設後の列車走行に問題がないこと、通常の方法により線路設備の保守が可能であること等を確認した¹⁴⁾。検討内容の詳細は第7, 8章で述べる。

4. 実物大の加振試験による耐震性能の評価

(1) 試験の目的

本試験は、東海道新幹線の軌道構造の特徴であるバラスト軌道において、地震時の脱線に対する脱線防止ガードの有効性を確認すること、および地震時の車輪、レール、脱線防止ガードの間に生じる作用力や相対変位等を測定することを目的に実施した。

(2) 試験装置の構成

a) 全体構成

試験装置の構成を写真-1 に示す。試験装置は、テーブル寸法 5m×5m、最大積載質量 50t、最大変位 600mm、最大加速度 29.4m/s^2 の大型三次元振動台上に設置した車両モデルと試験用バラスト軌道で構成した。

写真-1 実物大の加振試験の試験装置の構成

b) 車両モデル

車両モデルの構成を図-11 に示す。700系およびN700系の新幹線電車のボルスタレス台車1台の上に半車体の質量特性を模擬した荷重枠を載せ、新幹線半車両相当の試験体とした。車両モデルと振動台の間には、ピッチング、ヨーイング及び前後方向の運動を拘束し、ローリング θ 、上下 z 、左右 y 方向の運動を自由とする支持装置を設けた。

c) 試験用バラスト軌道

試験用バラスト軌道の構成を図-12 に示す。車両モデルおよび防護装置と合わせた装置の合計質量が、振動台の最大積載質量 50t 以内になるよう、レール方向の長さ 4m、まくらぎ方向の幅 3m、深さ 0.4m の鋼製コンテナ内に、実際に東海道新幹線で用いられているレール、PC まくらぎ、締結装置、バラスト等の軌道材料を用いて敷設した。なお、前後の車輪と脱線防止ガードの固定金具の位置が一致するよう、前後の車輪間隔 2.5m を考慮し、PC まくらぎの設置間隔は 625mm とした。また、試験用バラスト軌道のレール方向の長さが 4m のため、実際の軌道と比べて不足する道床横抵抗力は、左右レールの両端計 4箇所を単純支持条件で拘束して補った。

図-12 試験用バラスト軌道の構成

d) 試験用脱線防止ガード

本試験に用いた試験用脱線防止ガードは、第2章に示す要求性能を考慮して試作した。概要を図-13に示す。

試験用脱線防止ガードのレールからの離れ x と高さ y は、図-10 に示す建築限界に相当する離れ 60mm、高さ 35mm と、在来線で乗り上がり脱線対策として既に実用化されている脱線防止ガードの離れ 85mm、高さ 10mm から、レールからの離れ x を 60~85mm、高さ y を 10~35mm の範囲で 4 通りに組み合わせて設定した。これらの組み合わせは、全て第2章(4)節に示す建築限界を考慮した設置位置に対する要求性能を満たしている。

写真-2 は、試験用脱線防止ガードの静的水平載荷試験

ガード材 : SS400 (JIS G 3101)
 固定金具 : FCD500-7 (JIS G 5502)
 ボルト1, 2 : M24 強度区分10.9 (JIS B 1051 並目ねじ)
 ボルト3, 4, 5 : M20 強度区分10.9 (JIS B 1051 並目ねじ)
 設置位置 : $(x, y) = (60\text{mm}, 35\text{mm}), (65\text{mm}, 35\text{mm}), (85\text{mm}, 20\text{mm}), (85\text{mm}, 15\text{mm})$

図-13 試験用脱線防止ガードの概要

写真-2 試験用脱線防止ガードの静的水平載荷試験

図-14 試験用脱線防止ガードの静的水平載荷重試験の結果

験の状況を表している。この試験では、脱線防止ガード単体（PCまくらぎ1本分の長さのガード材と固定金具1組の組み合わせ）を鋼製の治具に固定して実施した。一方、実際の脱線防止ガードは、写真-1のc)および図-12に示すようにレール長手方向につながっているため、水平方向の作用力は隣接する固定金具へ分散される。さらに、固定金具を取り付けたPCまくらぎがバラストでバネ支持されていることを考慮すると、写真-2は実際よりも厳しい条件での載荷に相当する。

図-14に静的水平載荷試験の結果を示す。これより、試験用脱線防止ガードは、単体で水平荷重100kN程度まで弾性域が確保できる仕様に相当する。水平荷重100kN載荷時のボルト応力は、ボルト2が約560MPa、ボルト3が約700MPaで、JIS B 1501 並目ねじ 強度区分10.9の保証荷重応力である830 MPa以下の弾性域であった。また、その際の水平変位は約10mmで、今回設定した離れ x が60~85mmの条件において、要求性能である式(1)を満たしている。なお、その他の部材の応力はボルト2, 3に比べてJIS規格における弾性域に対してさらに余裕があることから、以降の検討ではボルト2, 3の応力に着目した。

(3) 加振条件

加振条件には正弦波と地震波を用い、これに図-13に示す脱線防止ガードの設置位置を組み合わせ、延べ約500ケースの加振試験を実施した。

a) 正弦波

正弦波は、宮本らの実験¹²⁾や森村らの検討¹³⁾を参考に、本試験で使用した試験装置の性能上から設定可能な条件として、周波数0.5~2.5Hz、水平変位振幅10~330mmの範囲内で両者を組み合わせて用いた。また、波形の不連続による衝撃的な入力を緩和するため、図-15に示すように、正弦波連続5波の始終端には緩和形状を挿入した。

b) 地震波

地震波は、図-4~8に示す本研究において想定する地震動に加え、過去に観測された地震波から、地震時の車両脱線に与える影響が大きいとされる1Hz前後の成分が卓越した地震波を中心に選定した。

振動台に入力する地震波は、地盤として鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計におけるG1, G3地盤¹⁰⁾、

図-15 正弦波の例（連続5波、1.1Hz、振幅100mm）

構造物種別として地表面と高架橋、さらに高架橋への耐震補強の有無の組み合わせを考慮し、車両への入力波となる構造物天端での応答波として、水平加速度波形と水平変位波形を算定した。

実際の試験では、各地震波の成分のうち車両挙動に与える影響が小さい3～4秒以上の長周期成分をカットし、水平変位波形の振幅倍率を、例えば、一律0.25倍にした波、次に0.5倍にした波と徐々に大きくする順序で振動台に入力して加振した。本試験をこのような変位制御で実施したのは、加速度制御では、車輪とレールおよびガードが衝撃した際に生じる加速度成分が、振動台で測定する加速度制御用のデータに含まれてしまうためである。

本試験で用いた地震波を表-2に示す。この内、最大の地震波は図-8で、図-7に示すG3地盤における想定東海地震動の地表面波の、鋼板巻き補強工法とX型ブレース工法を施した高架橋天端での応答波に相当し、変位振幅倍率1.0倍の条件で、最大水平加速度1300gal、最大水平変位33.3cmである。これらの値は、本試験で使用した試験装置の性能上から設定可能な加振の上限に相当する。

ここで、表-2の番号3, 4, 5, 7に示す高架橋の天端応答波の算定に際しては、写真-3に示す高架橋柱への鋼板巻き補強工法およびX型ブレース工法による耐震補強の効果を考慮している。

表-2 実物大の加振試験で用いた地震波

番号	地震波	種別	地盤	構造物	耐震補強	最大変位(cm) 最大加速度(gal)	波形
1	新潟県中越地震 上越新幹線脱線 現場での推定波	左右	—	高架橋	—	17.7 694.9	図-4
2	L2設計地震動 (Spec2)	左右	G3	地表面	—	25.1 871.0	図-5
3				高架橋	A	26.4 981.6	図-6
4					B	31.0 581.0	—
5				G1	A	17.3 1142.6	—
6	想定東海地震動	左右	G3	地表面	—	32.2 956.8	図-7
7				高架橋	A	33.3 1300.3	図-8
8		上下		地表面	—	7.6 215.8	—
9	兵庫県南部地震 鷹取での観測波	左右	—	地表面	—	34.3 614.2	—
10	兵庫県南部地震 神戸海洋気象台 での観測波	左右	—	地表面	—	16.8 808.7	—
11		上下	—	地表面	—	7.7 335.7	—
12	鳥取西部地震 日野での観測波	左右	—	地表面	—	24.2 923.3	—
13	中越沖地震 柏崎での観測波	左右	—	地表面	—	45.1 675.4	—

※A: 高架橋を鋼板巻き補強とX型ブレース工法で補強した場合

※B: 高架橋を鋼板巻き補強で補強した場合

X型ブレース工法の変位抑制効果は、吉田、関らが動的解析を用いて検討を行っている⁹⁾。図-16に示す橋長24m、スパン3m+6m@3+3m、高さ7.0m、柱断面寸法0.6m×0.6mの1層2柱式3径間ラーメンで構成される東海道新幹線の標準的な高架橋が、図-7に示すG3地盤における想定東海地震動の地表面波を受けた際の高架橋天端の地表面に対する応答変位を計算した。その結果、鋼板巻き補強工法のみの場合が最大約26cmなのに対し、鋼板巻き補強工法とX型ブレース工法を合わせて実施することで約3cmとなり、天端での変位増幅が約1/8に抑制された。

以上のような検討結果を踏まえ、東海道新幹線の脱線・逸脱防止対策では、脱線防止ガードの機能を有効に発揮させるための前提として、表-1と図-2に示すように、地震時の土木構造物の変位を抑制する対策を、土木構造物の種別に応じ、脱線防止ガードの設置と合わせて実施している。

(4) 地震時の脱線防止ガードの有効性

本試験で実施した延べ約500ケースの加振時の試験映像を確認した結果、約100ケースにおいて、無対策であればそのまま脱線に至る車両のロッキング運動が確認さ

a) 高架橋柱の鋼板巻き補強工法

b) 鋼板巻き補強工法+X型ブレース工法

写真-3 高架橋の耐震補強

図-16 東海道新幹線の標準的な高架橋の例

れた。しかし、本試験では、これらのケース全てにおいて図-3に示すメカニズムにより脱線防止ガードが有効に作用し、車両の脱線を適切に防止した。試験映像の例を写真-4に示す。

ここで、脱線防止ガードの有効性が確認された約100ケースの主な加振条件は、図-4, 7, 8に示す本研究において想定する地震動、および加振周波数1.1~1.5Hzの正弦波等である。なお、本研究において想定する地震動のうち、図-5, 6に示すL2設計地震動 (Spec2) については、本試験で採用した条件の組み合わせでは、図-3に示すような脱線挙動は生じなかった。

また、本試験では、左右動と上下動の組み合わせとして、表-2の番号6と8, 7と8, 10と11の条件でも試験を実施しているが、上下動が地震時の車輪上昇量や脱線に与える影響は小さく、ロッキング運動に起因する地震時の脱線は左右動の影響が主体的であった。

(5) 脱線防止ガードの作用力と水平変位

a) 測定方法

本試験では、加振時の車輪、レール、脱線防止ガードの間に生じる作用力として、歪ゲージを設置した間欠式の測定用車輪を用いて、上下方向に作用する輪重と左右方向に作用する横圧を測定した¹⁵⁾。なお、横圧については、図-17に示すように、車輪とレールの間に作用する横圧が正の符号、車輪と脱線防止ガードの間に作用する横圧が負の符号となるよう測定用車輪を校正した。また、PCまくらぎに設置したレーザー変位計により脱線防止ガードの水平変位を、振動台に設置したレーザー変位計によりPCまくらぎの水平変位を測定した。

横圧の時刻歴波形の例を図-18に示す。加振条件は

写真-4 実物大の加振試験の試験映像

図-8に示す本研究において想定する地震動である想定東海地震動で、脱線防止ガードの設置位置はレールからの離れ 85mm, 高さ 15mm である。図-18の水平加速度と水平変位は振動台での測定値で、設定した変位波形の振幅倍率を実際の試験装置で再現するよう振動台を制御する変位制御で試験を実施したため、水平加速度の最大値は、図-18に示す測定値の方が図-8に示す元波より大きくなった。また、図-18の横圧は、写真-1のa)全体構成に示す台車の手前側の車軸の左右車輪での測定値である。

図-18より、左右動に伴う車両のロッキング運動により、13.7秒付近で左車輪と左レール間に約140kNの正の横圧が生じている。この状態は、図-3の上の位置関係に相当する。その後、右側への脱線挙動が開始するが、14.1秒付近でレールに接地した左車輪の水平変位を脱線防止ガードが拘束して脱線を防止している。この状態は図-3の下の位置関係に相当し、左車輪と脱線防止ガードの間に負の横圧として約108kNの作用力が生じている。続いて反対の左側にも脱線挙動が開始されるが、14.5秒付近で右車輪の水平変位を脱線防止ガードが拘束して脱線を防止し、負の横圧として約50kNの作用力が生じている。

図-17 間欠式測定用車輪の横圧測定の校正

図-18 実物大の加振試験時の横圧の時刻歴波形の例

b) 脱線防止ガードの作用力

図-19 に、試験用脱線防止ガードの作用力とその際に振動台で測定された水平加速度の最大値の関係を示す。ここで、図-19 での地震波は全て第2章(1)節に示す本研究において想定する地震動に相当し、四角プロットが図-4 に示す新潟県中越地震での上越新幹線脱線現場推定波、菱形プロットが図-7, 8 に示す想定東海地震動である。なお、脱線防止ガードの作用力は、同じ加振条件でもその構造により異なった値となるため、図-19 は本試験で用いた図-13 に示す試験用脱線防止ガードと表-2 に示す加振条件の組み合わせでの結果に相当する。

図-19より、水平加速度の増加に伴い作用力も増加し、水平加速度が同程度であれば、脱線防止ガードのレールからの離れが大きいほど作用力が大きくなる傾向があることが分かる。本試験の条件の組み合わせで得られた試験用脱線防止ガードの作用力の最大値は108kNで、図-8に示す本研究において想定する地震動である想定東海地震動での測定値である。また、作用力108kNでのボルト応力は、図-13に示すボルト2が約216MPa、ボルト3が458MPaで、JIS B 1501 並目ねじ強度区分10.9の保証荷重応力である830MPa以下の弾性域であった。

以上より、図-13に示す試験用脱線防止ガードは、第2章(1)節に示す本研究において想定する地震動に対し、第2章(2)節に示す水平方向の作用力に対する耐力の要求性能を満たしている。

c) 脱線防止ガードの水平変位

図-20 は、図-19 に示す全データのうち、レールからの離れ x が 85mm、高さ y が 15mm、20mm の条件での、試験用脱線防止ガードおよび PC まくらぎの水平変位と試験用脱線防止ガードの作用力の関係を表している。

図-19 試験用脱線防止ガードの作用力と水平加速度の関係

図-20 より、試験用脱線防止ガードの作用力が約 40kN までは、試験用脱線防止ガードと PC まくらぎ間には相対的な水平変位はほとんど生じず、さらに作用力が増加すると、水平変位もこれに伴い増加することが分かる。なお、PC まくらぎに対する試験用脱線防止ガードの水平変位の最大値は約 6mm で、平均的な横剛性は 11.3kN/mm であった。一方、試験用脱線防止ガードの作用力が約 60kN までは、PC まくらぎと振動台の間には一律 5mm 程度の水平変位が生じ、さらに作用力が増加すると、水平変位もこれに伴い増加することが分かる。

式(1)より、要求性能を満たすための脱線防止ガードの水平変位 d は、レールからの離れ $x=85$ mm の条件では 31mm となり、図-13に示す試験用脱線防止ガードは、第2章(1)節に示す本研究において想定する地震動に対し、第2章(3)節に示す作用時の水平変位に対する要求性能を満たしている。なお、本試験での試験用脱線防止ガードの水平変位の最大値が約 6mm と比較的小さくなった理由は、バラスト軌道では脱線防止ガードの作用力が一定値以下では主に PC まくらぎに水平変位が生じ、それ以上になると PC まくらぎに対する脱線防止ガードの水平変位が生じ始めるためと推測される。図-20に示す本試験の条件では、その境界値が約 40~60kN に相当すると考えられる。

ここで、図-20 の丸で囲った 3 プロットは、作用力が同程度の他のプロットに比べて水平変位が大きくなっているが、これらは全て正弦波 1.5Hz で加振した際の測定値である。これより、特定の周波数で連続加振された場合にバラストは緩み易く、PC まくらぎと振動台間の水平変位が大きくなる可能性が示唆される。

図-20 試験用脱線防止ガードの作用力と水平変位の関係

本試験では、**図-12のa)**に示すように、レール直角方向のバラスト軌道の両端に剛体の壁を設け、加振時のバラストの側方流動を抑制する条件で試験を実施している。一方、地震時のバラスト軌道の被災例としては、**写真-5**に示すように、地震動によりまくらぎ端部のバラストが崩れ、まくらぎを水平支持するバラストの横抵抗力が低下することで軌道が大きく変形する被害が知られている。そこで、東海道新幹線の脱線・逸脱防止対策では、**表-1**と**図-2**に示すように、地震時にバラストが崩れることで生じる軌道の水平変位を抑制する対策を脱線防止ガードと合わせて実施している。

東海道新幹線では、従来、地震時のバラスト軌道の耐震性の向上を目的に、**写真-6のa)**に示すRCバラスト止め工を実施してきた。しかし、この工法は、必要な耐震性能は満たすものの、重量物を扱うことから経済性と施工性に課題があった。そこで、新たな工法として、**写真-6のb)**に示すジオテキサック工法を実用化した。この工法は、バラストを中詰め材としたジオテキスタイル素材の網目状のバッグをバラスト軌道の道床肩に沿って積み上げて積層体とし、さらに補強鉄筋を路盤に打ち込むことでせん断抵抗を向上させている。また、ジオテキサック工法の耐震性能は実物大の加振試験で確認した^{5), 6), 7)}。

5. 具体的な設計仕様の策定

第4章の実物大の加振試験の結果より、**図-13**に示す試験用脱線防止ガードが第2章に示す要求性能を全て満たすことを確認した。そこで、基本構造や構成部材は試験用脱線防止ガードから変更せず、実用化を目的とした脱

写真-5 地震時のバラスト軌道の被災例

a) RCバラスト止め工 b) ジオテキサック工法の概要

写真-6 RCバラスト止めとジオテキサック工法の概要

線防止ガードの設計仕様を策定した。具体的な内容を以下に示す¹⁶⁾。

(1) 脱線防止ガードの設計荷重

図-19 より、地震時の車輪と脱線防止ガードの衝撃による水平方向の作用力は 100kN とした。

一方、隣り合う脱線防止ガードの継目部には、**図-21**に示すように、車輪が乗り移る際の衝撃力が発生するため、その緩和を目的に、脱線防止ガードの端部に 1/100 のテーパを設けることとした。この際の作用力 F は、式(2)から計算した¹⁷⁾。計算条件を**表-3**に、結果を**図-22**に示す。

$$F = Q_1 + K \sqrt{(V \cdot (X/Y) / 3.6)^2 \times m \times k + Q_1^2} \quad (2)$$

$$K = f(m, V, X/Y, Q_1, \delta, k)$$

図-22 より、脱線防止ガードの継目部で生じる作用力 F を 70kN とし、**図-19**の結果から定めた 100kN と合わせ、脱線防止ガードの設計荷重は 170kN とした。

図-21 脱線防止ガードの継目部での作用力 F

表-3 脱線防止ガードの継目部での作用力 F の計算条件

項目	条件
m : バネ下質量	2,000(kg) N700系の値に基づく
V : 走行速度	~270km/h
X/Y : テーパー形状	1/100
Q_1 : レール/車輪間の摩擦力	$\mu P = 0.25 \times 5,000(\text{kg}) = 1,250(\text{kg})$ N700系の輪重に基づく
δ : 車輪誘導量	6(mm) 図-20のガード最大水平変位
k : 脱線防止ガードの横剛性	11.3(kN/mm) 図-20のガードの横剛性

図-22 脱線防止ガードの継目部での作用力 F の計算結果

(2) 脱線防止ガードの横剛性

図-13に示す試験用脱線防止ガードから横剛性の値を変更すると、同じ加振条件でも脱線防止ガードに生じる作用力や水平変位が異なった値となる。そこで、図-14, 20より、PCまくらぎに対する脱線防止ガードの横剛性は10kN/mm以上とした。

(3) 脱線防止ガードの設置位置

脱線防止ガードの設置位置は、地震時の脱線に対する有効性を確保した上で、敷設時の設置誤差や保守上の余

ガード材 : SS400 (JIS G 3101)
 固定金具 : FCD500-7 (JIS G 5502)
 ボルト1, 2 : M24 強度区分10.9 (JIS B 1051 並目ねじ)
 ボルト3, 4, 5 : M20 強度区分10.9 (JIS B 1051 並目ねじ)

図-23 脱線防止ガードの概要

図-24 脱線防止ガード用PCまくらぎの概要

a) 通常時の状況

b) 転換時の状況

写真-7 脱線防止ガードの転換状況

裕を考慮し、図-10に示す建築限界に対し極力余裕のある仕様を定めた。

図-13に示す試験用脱線防止ガードの設置位置の内、建築限界に対する余裕が最も大きいのはレールからの離れ $x=85\text{mm}$ 、高さ $y=15\text{mm}$ である。一方、詳細は第8章(1)節で述べるが、2006～2009年に本線で実施した延べ約3,000mの脱線防止ガードの試験敷設の結果から、施工時の脱線防止ガードの設置誤差は $\pm 5\text{mm}$ の範囲内であった¹⁴⁾。以上より、 $\pm 5\text{mm}$ の設置誤差が生じて脱線に対する有効性を確認した離れ85mm、高さ15mmが確保されるよう、離れ80mm、高さ20mmを脱線防止ガードの設置位置とした。概要を図-23に示す。

(4) PCまくらぎの鋼製インサートの引張抵抗力

脱線防止ガードを設置するPCまくらぎは、JIS E 1201およびJIS E 1202で規格される新幹線高速用PCまくらぎである3Hプレテンション方式、4Hポストテンション方式とした。また、脱線防止ガードを片側2箇所固定する外径30mm、長さ180mmの鋼製インサートを、PC鋼線およびPC鋼棒と支障しないレール長手方向の断面中心に設置する構造とした。概要を図-24に示す。

ここで、図-23より、脱線防止ガードに第5章(1)節で定めた170kNの設計荷重が水平方向に作用した際の最大引張力はボルト3に生じ、A点周りのモーメントの釣合いから、その値は約200kNとなる。そこで、鋼製インサートの引張抵抗力は200kN以上とした。

(5) 脱線防止ガードの長さ

脱線防止ガードは、レール等の線路設備の保守に支障しないよう、保守時は転換可能な構造とした。概要を写真-7に示す。なお、図-23のボルト2を取り外すことで転換が可能となる。

脱線防止ガードの長さは、保守時の人力での転換が可能な重量、東海道新幹線のPCまくらぎの敷設間隔0.581m等を考慮し、直線用はPCまくらぎ11本分の約6.4m、曲線用はPCまくらぎ7本分の約4.1mとした。

6. 強度確認試験

第5章に示す設計仕様に基づく実用化を目的とした脱線防止ガードとPCまくらぎの試験体を用いて、強度確認試験を実施した¹⁶⁾。結果を以下に示す。

(1) 鋼製インサートの引抜破壊試験

a) 試験方法

試験方法は、JIS E 1201及びJIS E 1202におけるレール締結装置の埋込栓の引抜破壊試験に基づき実施した。試

験状況を写真-8のa)に示す。

b) 鋼製インサートの仕様

試験には、引張抵抗力の向上を目的に製作した写真-9に示す2種類の鋼製インサートを用いた。Aタイプは異形棒鋼を用いることで側面でのコンクリートとの付着強度の増加を見込み、Bタイプはインサート下端に設けた突起で引張抵抗力の増加を見込んだ仕様である。また、鉄道の軌道回路に与える電氣的な影響を考慮し、両タイプとも絶縁コーティングを施した。なお、絶縁抵抗は、JIS K 6911に基づき測定し、JIS E 1118におけるレール締結装置の埋込栓の規格値 $1.0 \times 10^4 \text{M}\Omega$ 以上であることを確認した。試験概況を写真-8のb)に示す。

c) 試験結果

引抜破壊試験の結果を表-4に示す。両タイプとも引張

a) 引抜破壊試験

b) 絶縁抵抗試験

写真-8 鋼製インサートに関する試験

タイプ	長さ(mm)		外径 (mm)	材質
	全体	ねじ部		
A	180	130	D29	SD345
B	180	130	φ30	SS490

写真-9 鋼製インサートの仕様

表-4 引抜破壊試験の結果

タイプ	引抜破壊強度(kN)			
	1回目	2回目	3回目	平均値
A	290	300以上	300以上	296.7以上
B	295	300以上	300以上	298.3以上

a) Aタイプ

b) Bタイプ

写真-10 引抜破壊試験時の破壊状況

抵抗力は最低でも290kN以上が確保されており、第5章(4)節で述べた設計仕様200kNを満たしている。また、両タイプとも鋼製インサートそのものが引抜かれて（Bタイプは途中で破断して）破壊に至った。破壊状況を写真-10に示す。

(2) 脱線防止ガードの静的水平载荷試験

a) 試験方法

脱線防止ガードの長さは、第5章(5)節に示すように、直線用が約6.4m、曲線用が約4.1mで、PCまくらぎ1本おきに直線用は片側6箇所、曲線用は片側4箇所固定されている。したがって、脱線防止ガードが受ける作用力は、脱線防止ガード、レール、PCまくらぎ及びバラストから成る軌きょう全体で支持している。そこで、軌きょうによる水平方向の作用力の分散を考慮し、図-25に示す曲線用の脱線防止ガードを模擬した軌きょうモデルを構成し、静的水平载荷試験を実施した。なお、载荷位置は、脱線防止ガードの固定金具の位置、固定金具の中間、継目部の3箇所とした。ここで、PCまくらぎ端部のバネはバラストのバネ要素を模擬しており、バネ定数 K は式(3)より計算した。なお、実際の試験では、式(3)による理論計算の結果に基づき、表-5に示す市販のバネで構成できるバネ定数を採用した。

$$K = (G_0 + 2\mu P_l) / y_a \quad (3)$$

G_0 : PCまくらぎ1本あたりの道床横抵抗12kN

y_a : 道床横抵抗12kNの際の水平変位2mm

μ : PCまくらぎ下面とバラスト間の摩擦係数0.75

P_l : 輪重85kN（レール締結装置の設計荷重C相当）

での各PCまくらぎ位置でのレール圧力

図-25 静的水平载荷試験装置の構成

表-5 静的水平载荷試験に用いたPCまくらぎ端部バネ定数

まくらぎ番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
バネ定数 (kN/mm)	5.0	6.1	10.2	19.5	26.0	19.5	10.2	6.4	5.0

b) 試験結果

試験結果の一例として、固定金具位置での静的水平載荷試験の結果を図-26に示す。

図-26より、第5章(1)節に示す設計荷重 170kN までの平均的な横剛性は 13.8kN/mm、最大水平変位は約 15mm で、第5章(2)節に示す設計仕様である横剛性 10kN/mm 以上、式(1)による要求性能である水平変位 31mm 以内を双方とも満たしている。

また、図-23に示すボルト2と3の応力は、170kN 載荷時では双方とも約 590MPa で、JIS B 1501 並目ねじ強度区分 10.9 の保証荷重応力である 830MPa 以下の弾性域であった。さらに荷重を増加した結果、250kN 程度で鋼製インサートの引抜きにより PC まくらぎ部が破壊した。破壊状況を写真-11に示す。ここで、PC まくらぎに破壊が生じた脱線防止ガードへの作用力 250kN を、図-23に示す A 点周りのモーメントの釣合いからボルト3の引張力に換算すると約 290kN となり、表-4に示す鋼製インサートの引抜破壊試験の結果と概ね一致した。

なお、図-25に示す固定金具の中間、継目部での静的水平載荷試験においても、横剛性はそれぞれ 10.2kN/mm、10.0kN/mm、170kN 載荷時のボルト2と3の応力は 400～600MPa で、設計仕様および要求性能を満たしている。

7. 本線での試験敷設に向けた取り組み

第4～6章の検討により、脱線防止ガードの耐震性能の評価と、その結果に基づく具体的な設計仕様の策定、

図-26 固定金具位置での静的水平載荷試験の結果

写真-11 静的水平載荷試験時の破壊状況

および強度試験による要求性能の確認を完了した。本章では、もう一つの研究項目である現行の鉄道システムへの適合について、脱線防止ガードを本線に試験敷設して確認する前段で実施した様々な試験の結果を述べる¹⁴⁾。

(1) 基地線への試験敷設

2006 年度から開始した脱線防止ガードの本線への試験敷設に先立ち、2005 年度から基地線に約 1,000m の脱線防止ガードの試験敷設を実施した。

基地線での試験敷設では、脱線防止ガードを設置する際の施工性、従来の線路設備の保守や検査への影響、作業用の保守用車の通過確認等を実施し、何れも問題がないことを確認した。基地線での試験敷設の状況を写真-12に示す。

(2) 繰り返し載荷試験

営業列車によるレールへの上下方向の繰り返し載荷により、脱線防止ガードを構成する部材にボルトの緩み等の変状が発生しないことを確認するため、写真-13、図-27に示す繰り返し載荷試験を実施した。

写真-12 保守基地での確認試験の状況

写真-13 繰り返し載荷試験装置の構成

図-27 繰り返し載荷試験での測定項目

a) 試験条件

繰り返し载荷試験では、実際のバラスト軌道に脱線防止ガードを直線用の1セット分として6.38m敷設し、レール頭頂面に起振機で振動を与え、脱線防止ガードの設置位置やボルト軸力の変動の経時変化を確認した。

繰り返し载荷の周波数は30Hzとした。これは、新幹線の同一台車における前後の車輪軸の距離が2.5mであることから、2.5m間隔に配置された車輪軸が速度270km/hで通過する際の周波数に相当する。また、繰り返し载荷回数は、東海道新幹線の約1年分の通過車輪軸数に相当する370万回とした。さらに、レール片側あたりの载荷荷重は、東海道新幹線の車輪1つあたりの重さである輪重60kNを考慮し、 60 ± 30 kNとした。なお、この値は輪重変動率 $\pm 50\%$ に相当し、通常の線路保守状態から考えると厳しい条件に相当する。

図-28 脱線防止ガードの離れxの変化

図-29 脱線防止ガードの高さyの変化

図-30 測定点Bでのボルト軸力の変化

b) 試験結果

試験前後の脱線防止ガードの設置位置の変化を図-28, 29に示す。これより、試験前後の設置位置の変動は、概ね測定装置の誤差範囲である ± 0.5 mm程度で、問題となるような変動は生じなかった。

次に、試験時のボルト軸力の変化の例として、図-27における測定点Bでの結果を図-30に示す。これより、ボルトの軸力にも問題となるような変動は生じなかった。

(3) 着氷を想定した载荷試験

降積雪が脱線防止ガードの敷設に与える影響を確認するため、レールと脱線防止ガードの間に介在する氷塊と車輪フランジ間の作用力を測定し、その値から氷塊が走行安全性に与える影響を検討した¹⁸⁾。

a) 試験条件

雪や氷は、外力を受けた際の変形が抑制される条件ほど圧縮強度が向上するため、本試験では、レールと脱線防止ガードの間に完全に氷塊が充填された極端な条件を設定した。また、载荷試験時の周辺温度は -10°C とした。これは、東海道新幹線の米原地区での実際の最低気温のデータから算出した30年再現期間値 $-8 \sim -10^{\circ}\text{C}$ に基づく。

b) 試験体の作成方法

実際の降雪→融解→氷への硬化→降雪のサイクルを極力模擬するため、写真-14に示す手順によりレールと脱線防止ガードの間に氷塊を充填した。

当初は -10°C の環境下で作業を実施したが、新たな氷層の作成中にその下層が溶け始めたため、最終的には、 -50°C の環境下で供試体の作成を行った。この現象は、新たな氷層が凍る際の発熱が原因と推測される。なお、実際の東海道新幹線では適切に除雪作業が行われることを考えても、写真-14のようなレールと脱線防止ガードの間に完全に氷塊が充填されるような状態は発生せず、本試験は極端な例を想定した参考との位置づけである。

c) 载荷試験の方法

写真-15に示す -10°C の環境下に設置された载荷試験機

写真-14 試験体の作成方法

を用い、レールと脱線防止ガードの間に完全に充填した氷塊への載荷試験を実施した。なお、載荷部には実際の車輪フランジの形状を模擬した治具を使用した。

載荷試験は載荷治具の車輪踏面がレール頭面に接するまで載荷速度0.83cm/secで実施し、氷塊からの反力と、レールと脱線防止ガードの間の水平変位を測定した。また、氷塊が外力を受けた際の変形を抑制する条件の影響を確認するため、写真-16に示す2条件と、参考として、試験体の両側で変形を拘束する計3条件を設定した。

d) 試験結果

試験結果を図-31に示す。両側開放と片側開放の結果

写真-15 載荷試験装置の概要

写真-16 載荷条件の概要

図-31 載荷試験の結果

に大差はなく、模擬フランジの氷塊への貫入量が約 10～15mm で 1,000～2,000kg 程度の最大反力が生じ、その後は氷塊が割れて反力が低減する傾向が見られた。なお、載荷中のレールと脱線防止ガードの離れは、最大で約 0.7mm 拡大した。これより、氷塊からの車輪フランジ部への反力は車輪片側あたり 1,000～2,000kg 程度と推定され、新幹線の輪重を 5,000kg とした場合、この値は輪重減少率 0.2～0.4 に相当する。鉄道車両の速度向上試験で一般的に用いられる輪重減少率の目安値は動的で 0.8、静的で 0.6 以下であり¹⁵⁾、氷塊からの反力が走行安全性に与える影響は低いと考えられる。

(4) 信号設備に与える影響確認試験

脱線防止ガードが、東海道新幹線の本線で使用している軌道回路や地上子類に与える影響については、牧野らが確認している¹⁹⁾。車両基地内に延長 400m の脱線防止ガードを敷設し、実際の軌道回路に与える影響を測定した結果、軌道回路定数の変動は通常の範囲内で、ATC 受電器の受信レベルへの影響は十分に小さかった。また、地上子近傍に脱線防止ガードを設置してその影響を確認した結果、地上子類に与える影響も十分に小さかった。

8. 本線試験敷設

第 7 章に示した基地線での試験敷設および様々な載荷試験により、脱線防止ガードの施工性や保守性、敷設後の変状、信号設備に与える影響等について、実用上の問題がないことを確認した。これらの結果を受け、2006 年 10 月から脱線防止ガードの本線への試験敷設を実施した¹⁴⁾。

まず、走行速度 80km/h の低速区間の直線部に脱線防止ガードを 35m 敷設した。その後、速度域や線形条件を変えて増設し、2008 年 3 月までに直線部に約 800m、曲線部に約 100m の合計約 900m の敷設を行い、脱線防止ガードの施工性や敷設後の列車走行に問題がないことを確認した。

さらに、施工性等の検討の深度化を目的に、脱線防止ガードの本線試験敷設の区間を拡大した。走行速度 270km/h の高速区間、長延長の曲線と勾配の複合線形、トンネル区間、地上子等の信号設備の設置区間、降積雪地区等を対象に、2009 年 3 月までにさらに合計 2,125m を敷設した。

(1) 脱線防止ガードの設置誤差

2009年3月までに実施した脱線防止ガードの本線試験敷設の総延長約3,000mにおける、敷設時の設置誤差実績を図-32に示す。これより、設置誤差は最大で±4mm程度

であった。そこで、第5章(3)節に述べたように、脱線防止ガードの設置位置の設計仕様であるレールからの離れ80mm、高さ20mmの設定に際しては、施工時の脱線防止ガードの設置誤差として $\pm 5\text{mm}$ を見込んでいる。

(2) 本線での敷設後の状態確認

第7章(2)節に示す脱線防止ガードの繰り返し载荷試験の結果から、脱線防止ガード敷設時に所定のトルクでボルトを緊締すれば、列車通過時の振動等の影響でボルトが緩むことは無いと推定される。しかし、さらに安全を期すため、本線に試験敷設した脱線防止ガードの敷設後の状態確認を実施した。

具体的には、脱線防止ガードの設置位置について、写真-17に示す専用の検測装置を用いた定期的な静的検測と、図-33に示すセンサによる営業列車通過時の動的挙動の測定を行った。

図-34に、脱線防止ガードの静的検測結果の一例を示す。これより、1年以上にわたり脱線防止ガードの設置位置の検測を行った結果、その変化は測定装置の許容誤差の範囲内であり、実質上、脱線防止ガードの位置変動は生じていないことを確認した。

図-32 脱線防止ガードの設置誤差

a) 人力による検測

b) 手押し式検測装置

写真-17 脱線防止ガードの設置位置の静的検測

また、図-33に示すセンサによる脱線防止ガードの動的挙動を測定した結果、最大で離れ0.2mm、高さ0.4mm程度であり、実用上問題ない範囲であった。

(3) 本線での保守作業に与える影響の確認

脱線防止ガードの設置が通常の線路設備の保守や検査に与える影響を本線での実際の作業で確認するため、本線に試験敷設した脱線防止ガード区間において、通常行われている各種保守作業や検査を実際に行った。

確認試験の結果、脱線防止ガードの転換・復位、一部の作業では撤去・復旧により、通常の方法で保守作業や検査が可能であることを確認した。なお、マルチプルタイタンパによる軌道整備作業のように、長い延長の保守作業を実施する場合、前日までに脱線防止ガードを転換

図-33 脱線防止ガードの設置位置の動的検測

図-34 脱線防止ガードの設置位置の静的検測結果

した後、マルチプルタイタンパによる本作業を行い、後日にガードを復位するという場合もある。写真-18に実施した確認試験の例を示す。

9. まとめ

本研究では、地震時の脱線防止対策である脱線防止ガードの、(1) 耐震性能の評価、(2) 要求性能を満たす具体的な設計仕様、(3) 現行の鉄道システムへの適合について、実物大の加振試験、強度確認試験、本線試験敷設等により検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 耐震性能の評価

東海道新幹線の軌道構造の特徴であるバラスト軌道を実物でモデル化し、実際の700系およびN700系の新幹線電車のボルスタレス台車を用いて実物大の加振試験を実施した。その結果、本研究において想定する地震動で生じたロッキング脱線に対し脱線防止ガードが有効に機能することを確認した。なお、有効性を確認した最大の加振条件は、G3地盤における想定東海地震動の地表面波の、鋼板巻き補強工法とX型ブレース工法を施した高架橋天端での応答波で、最大水平加速度は1300gal、最大水平変位は33.3cmであった。

a) ガード転換作業

b) 軌道整備作業 (むら直し)

c) レール交換作業

d) レール削正作業

e) 保守用車による道床突き固め作業

写真-18 保守作業に与える影響確認の例

(2) 要求性能を満たす具体的な設計仕様

実物大の加振試験で本研究における要求性能を全て満たすことを確認した脱線防止ガードの基本構造に基づき、具体的な設計仕様を策定した。

設計荷重は、実物大の加振試験で測定された結果から、地震時の車輪と脱線防止ガードの衝撃による作用力100kNに、脱線防止ガードの継目部で生じる作用力の計算値70kNを加味し170kNとした。

脱線防止ガードの横剛性により、同じ加振条件でも脱線防止ガードに生じる作用力や水平変位が異なった値となるため、実物大の加振試験で測定された結果から、PCまくらぎに対する脱線防止ガードの横剛性は10kN/mm以上とした。

脱線防止ガードの設置位置は、実物大の加振試験で脱線防止ガードの有効性を確認した条件の内、建築限界に対する余裕が最も大きいレールからの離れ85mm、高さ15mmに、設置誤差として±5mmを見込み、離れ80mm、高さ20mmとした。

脱線防止ガードをPCまくらぎに固定する鋼製インサートの引張抵抗力は、脱線防止ガードに170kNの設計荷重が作用した際のモーメントの釣り合いから、200kN以上とした。

脱線防止ガードは、レール等の線路設備の保守に支障しないよう、保守時は転換可能な構造とした。また、レール長手方向の寸法は、保守時に人力での転換が可能な重量、東海道新幹線のPCまくらぎの設置間隔0.581mを考慮し、直線用はPCまくらぎ11本分の約6.4m、曲線用はPCまくらぎ7本分の約4.1mとした。

(3) 現行の鉄道システムへの適合

脱線防止ガードを実際に本線に試験敷設し、施工性や保守性、敷設後の変状、信号設備に与える影響を確認した結果、東海道新幹線という現行の鉄道システムに脱線防止ガードが適用可能であるとの結論を得た。

本線敷設試験に先立ち、基地線での試験敷設および様々な载荷試験を実施し、脱線防止ガードの施工性や保守性、敷設後の変状、信号設備に与える影響等について、実用上の問題がないことを確認した。

本線試験敷設は、様々な速度域や線形条件、トンネル区間、および降積雪地区等を対象に述べ延長約3,000mで実施した。その結果、脱線防止ガードが実用上問題ない設置誤差で敷設が可能で、敷設後に列車振動等により変状が発生しないこと、脱線防止ガードの転換・復位や一部撤去・復旧により、通常の方法で保守や検査が可能であることを改めて確認した。

(4) 脱線・逸脱防止対策の実施状況

以上の検討結果を踏まえ、地震時の車両の脱線そのも

のを極力防止する脱線防止ガードの具体的な仕様を策定した。この脱線防止ガードに、万一脱線した場合に車両の逸脱を極力防止する逸脱防止ストッパ、および地震時の土木構造物の変位を抑制する対策を加えた二重系の脱線・逸脱防止対策は既に実用化され³⁾、2013年3月までに、東海地震の特に揺れが強いと想定される地区等を中心に、軌道延長140kmを対象に実施している。

謝辞：最後に、紙面をお借りし、本研究にご協力いただいた皆様に改めて感謝の意を表したい。具体的な対策工の検討に際しては、東海道新幹線土木構造物調査委員会（委員長：小長井一男 東京大学生産技術研究所教授）に関係する大学の先生方から、多くのご助言をいただいた。また、（公財）鉄道総合技術研究所の関係各位には、各種試験の実施に関する貴重なご助言をいただいた。さらに、関係メーカーには対策工の製品化に際し多大なご尽力をいただいた。今回の成果は、社内外の多くの皆様のご協力の賜物だと確信している。

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り組み－，土木技術，pp.9-16，2010.2.
- 2) 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
- 3) 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，pp.545-548，2009.12.
- 4) 角南浩靖，森村勉，石川栄，足立昌仁，坂上啓，南善徳，渡邊康人，曾田祥信：脱線時の車両の逸脱防止に関する実台車走行試験，日本機械学会論文集，Vol.C-76-770，pp.2462-2471，2010.10.
- 5) 小林幹人，関雅樹，渡邊康人，可知隆，古関潤一：鉄道バラスト用ジオテキスタイル製網目袋の性能確認試験，ジオシンセティック論文集，第 24 巻，pp.151-156，2009.12.
- 6) 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，J-Rail2009，pp.647-650，2009.12.
- 7) 関雅樹，中村格之，村松浩成：ジオテキバッグ工法の改良構造の性能確認試験，No.503，第 47 回地盤工学研究発表会，2012.7.
- 8) 大木基裕，庄司朋宏，荒鹿忠義，関雅樹：小口径有孔管による盛土の耐震補強工法の開発，第 45 回地盤工学研究発表会，pp.1489-1490，2010.8.
- 9) 吉田幸司，松田猛，阿知波秀彦，関雅樹：高架橋のダンパースプ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，pp.663-666，2009.12.
- 10) 国土交通省鉄道局，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.
- 11) 中央防災会議 東海地震に関する専門調査会 報告，内閣府，2011.12.11
- 12) 宮本岳史，松本信之，曾我部正道，下村隆行，西山幸夫，松尾雅樹：大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験，日本機械学会論文集，Vol.C-71-706，pp.59-65，2004.7.
- 13) 森村勉，西村和彦，曄道佳明，曾我部潔：地震時の脱線メカニズムおよび脱線防止ガード機能に関する解析，日本機械学会論文集，Vol.C-76-770，pp.2447-2453，2010.10.
- 14) 渡邊康人，近藤邦弘，鎧坂勝則，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，J-Rail2009，pp.565-568，2009.12.
- 15) 鉄道総合技術研究所：在来鉄道運転速度向上試験マニュアル，pp.67-78,96-100，研友社，1993.5.
- 16) 村松浩成，関雅樹，渡邊康人，曾田祥信：東海道新幹線の脱線・逸脱防止対策の脱線防止ガード及び PC まくらぎの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.817-822，2010.
- 17) 佐藤吉彦，梅原利之：線路工学，日本鉄道施設協会，pp.483-489，1995.
- 18) 村松浩成：脱線防止ガードへの着氷を想定した載荷試験，土木学会中部支部研究発表会，2011.3.
- 19) 牧野茂樹，石津成一，田淵学，安藤聡，高橋直樹：脱線防止ガードの信号設備への影響に関する現地試験，J-Rail2009，pp.499-502，2009.12.

(2012. 4. 11 受付)

RESEARCH AND DEVELOPMENT FOR PREVENTING DERAILMENT BY LARGE-SCALE EARTHQUAKES

Masaki SEKI, Kazuo KONAGAI, Hironari MURAMATSU, Yasuhito WATANABE,
Takashi KACHI and Junichi KOSEKI

The purpose of this study is the establishment of train safety in the case of large-scale earthquake, considering the derailment of Joetsu Shinkansen in 2004.

Strengthening Tokaido Shinkansen structures to prevent long-time suspension of operation is nearly completed. As a result of this study, double measures against derailment and deviation were added and have been done.

In this paper, we report the performance, the design, and the adaptability to the current railway of “Anti-Derailing Guard Rails”. This study contributes to the safety of railway system.