

論文 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

村松 浩成^{*1}・関 雅樹^{*2}・渡邊 康人^{*3}・曾田 祥信^{*4}

要旨：新潟県中越地震での上越新幹線の脱線事故を受け、JR東海では、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た新たな地震対策の検討を進めてきた。その結果、従来から取り組んできた高架橋柱や盛土の耐震補強等に加え、地震時の構造物の大きな変位を抑制した上で、脱線防止ガードで脱線を極力防止し、万一脱線した場合に逸脱防止ストップで逸脱を極力防止する、二重系の脱線・逸脱防止対策を実施することとした。本報告では、対策の一つである脱線防止ガードとこれを設置するPCまくらぎについて、両者を一体として開発した結果を述べる。

キーワード：脱線防止ガード、脱線防止ガード用PCまくらぎ、東海道新幹線

1. はじめに

2004年に発生した新潟県中越地震により、構造物に大きな損傷がない場合でも、上越新幹線を走行中の新幹線が脱線するという事故が発生した¹⁾。これを受け、JR東海では、地震時の脱線防止と逸脱による被害の拡大防止を目的に、新たな地震対策の検討を進めてきた。その結果、従来から取り組んできた高架橋柱や盛土の耐震補強等に加え、地震時の構造物の大きな変位を抑制した上で、脱線防止ガードで脱線を極力防止し、万一脱線した場合に逸脱防止ストップで逸脱を極力防止する、二重系の脱線・逸脱防止対策を実施することとした^{2), 3)}。

本報告では、脱線・逸脱防止対策の一つである脱線防止ガードと、これを東海道新幹線の軌道構造上の特徴であるバラスト軌道に設置するためのPCまくらぎについて、両者を一体として開発した結果を述べる。

2. 脱線防止ガードとPCまくらぎの概要

今回開発した脱線防止ガード（図-1）は、レールの内側に並行になるようにPCまくらぎにボルトで直接固定する構造となっている。また、レール等の線路設備を保守する際に支障しないよう、保守時には転換することができる。なお、脱線防止ガードは、レールからの離れ80mm、高さ20mmの位置に設置され、鉄道車両の安全運行を確保するために設けられた建築限界（レールからの離れ60mm、高さ35mm）を支障することはない。

脱線防止ガードを設置するPCまくらぎ（図-2）は、JIS E 1201及びJIS E 1202で規格される新幹線の高速用PCまくらぎ（3H：プレテンション方式、4Hポストテンション方式）に、脱線防止ガードを固定する外径約30mm、

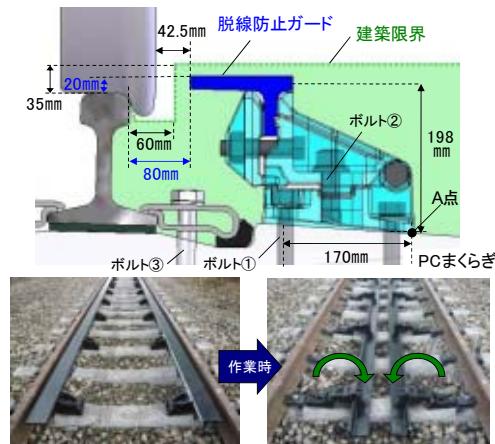


図-1 脱線防止ガードの概要

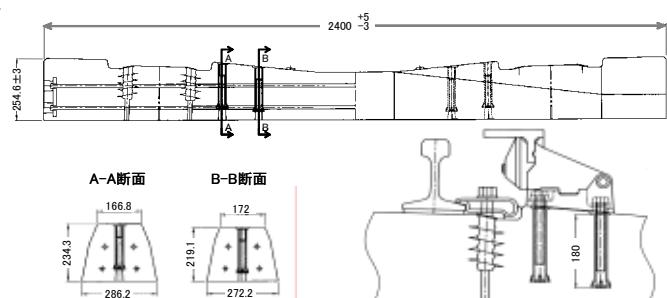


図-2 PCまくらぎの概要 (4Hまくらぎ)

長さ180mmの鋼製インサートを、PC鋼線やPC鋼棒と支障しないレール長手方向の断面中心に設置した構造となっている。

これらの仕様は、新幹線電車の実物台車を用いた加振試験で地震時の脱線に対する脱線防止ガードの有効性を確認した上で、その際に得られた測定データ等に基づき策定した。以下に、その概要を述べる。

*1 JR東海 総合技術本部 技術開発部 担当課長 修(工) (正会員)

*2 JR東海 総合技術本部 技術開発部 部長 博(工) (正会員)

*3 JR東海 総合技術本部 技術開発部 グループリーダー

*4 JR東海 総合技術本部 技術開発部 主幹研究員

3. 実物台車を用いた加振試験^{4), 5)}

3.1 試験の目的

本試験は、東海道新幹線の軌道構造上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、及び地震時の車輪、レール、脱線防止ガード間の作用力等を把握することを目的に、宮本らの実験手法⁶⁾を参考に実施した。

3.2 試験装置の構成

試験装置（図-3）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/s²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されている。

車両モデル（図-4）は、新幹線電車のボルスタレス台車（700系・N700系）1台の上に半車体の質量特性を模した荷重枠を載せ、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、ピッキング、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。

試験用バラスト軌道（図-5）は、装置の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敷設した。なお、レール方向の長さが短く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。また、脱線防止ガードのレールからの離れと高さが脱線防止機能に影響を与えると想定されたため、建築限界に支障しない位置で、レールからの離れを 60～85mm、高さを 15～35mm の範囲で 4通りに組み合せて試験を実施した。



図-3 実物台車を用いた加振試験装置の構成

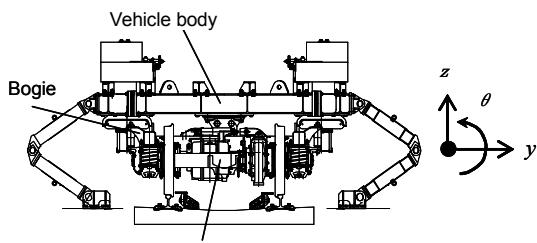


図-4 車両モデル

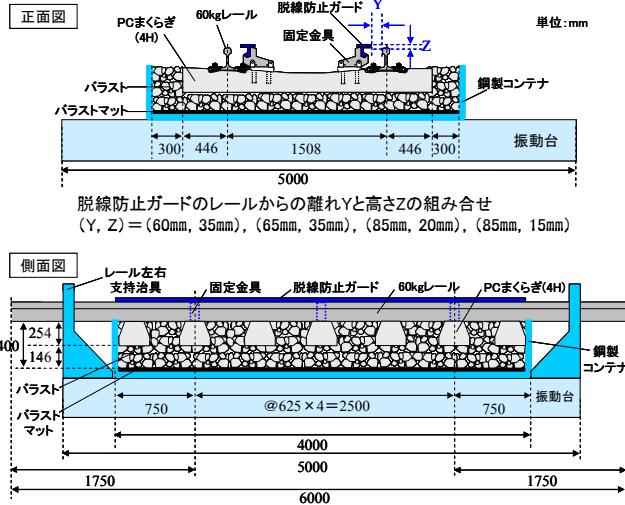


図-5 試験用バラスト軌道

3.3 加振条件

加振条件には、正弦波と地震波（例：L2設計地震動⁷⁾、想定東海地震波）を用いた。正弦波は、周波数0.5～2.5Hz、変位振幅10～330mmの範囲内で両者を組み合せて用いた。また、地震波は、地盤（G1、G3地盤⁷⁾、構造物種別（地表面、盛土、高架橋）及び耐震補強の有無（鋼板巻き、ダンパープレース工⁸⁾）を組み合せた応答波を算定し、その変位波形の振幅倍率を調整した波（例えば、変位振幅を一律0.5倍にした波、1.0倍の波等）を用いた。本試験は、正弦波、地震波及び脱線防止ガードの設置位置を組み合せ、同条件での試験も含み延べ約500回実施した。なお、設定した最大の加振条件は、想定東海地震波（G3地盤、高架橋応答）（図-6）の変位振幅1.0倍で、最大左右加速度1300gal、最大左右変位333mmであり、試験装置の性能上から設定できる上限に相当する。

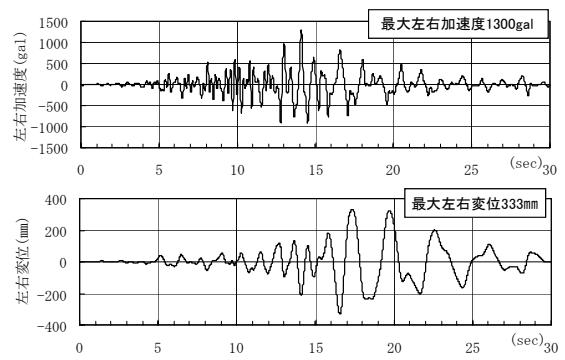


図-6 想定東海地震波(G3 地盤・高架橋応答)

3.4 地震時の脱線防止ガードの有効性

延べ約500回の加振試験の内、脱線現象が確認されたのは約100回であった。図-7に示す試験映像等から、何れも左右動が主要因の車両のロッキング運動に起因する脱線現象で、脱線防止ガードが有効に作用することを確認した。なお、脱線防止ガードの有効性を確認した最

大の加振条件は、想定東海地震波（G3地盤・高架橋応答）（図-6）の変位振幅1.0倍である。また、正弦波では周波数1.1～1.5Hzの条件で脱線現象が確認された。

図-8に示すように、地震時の車両の脱線は、①地震で線路が左右に揺れると一方の車輪がレールと衝突し、②反動で反対側の車輪が浮き上がり（ロッキング運動）、③この状態で線路が逆方向に動くことで生じる。一方、④浮き上がっ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横方向の変位を抑制することで脱線が防止される。

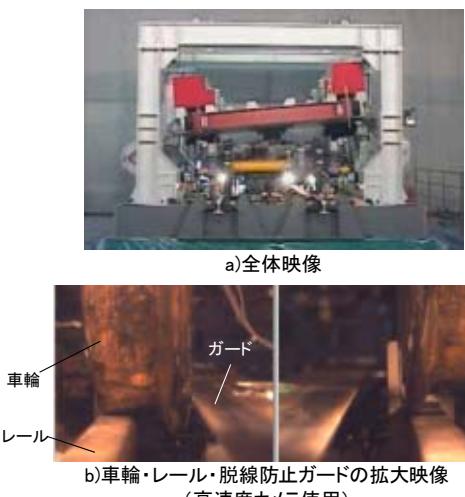


図-7 実物台車を用いた加振試験の試験映像

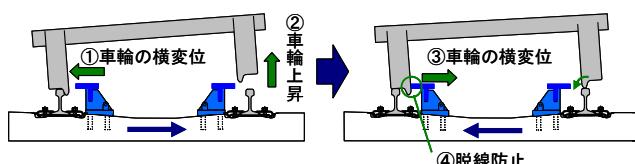


図-8 地震時の脱線に対する脱線防止ガードの有効性

3.5 脱線防止ガードの作用力と横剛性

(1) 測定方法

本試験では、加振時の車輪、レール、脱線防止ガード間の作用力として、歪ゲージを設置した間欠式の測定用車輪⁹⁾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。なお、横圧については、図-9に示すように、車輪とレール間に作用する横圧が正の符号、車輪と脱線防止ガード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-10に示す。加振条件は、想定東海地震波（G3地盤・高架橋応答）（図-6）の変位振幅1.0倍、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。なお、試験で設定した変位

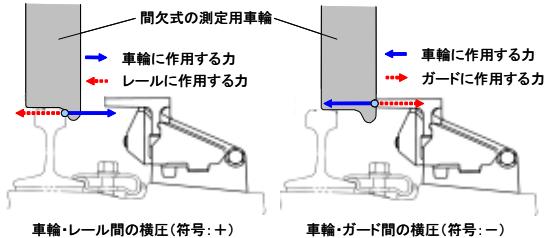


図-9 測定用車輪の横圧の校正

波形の振幅倍率を再現するよう振動台を制御した結果、左右加速度は元波より大きくなつた（左右加速度の最大値は図-10（測定値）方が図-6（元波）より大きい）。

図-10より、車両のロッキング運動により、13.7秒付近で左車輪とレール間に約140kNの正の横圧が生じた後（図-8の左側の状態）、その状態で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変位を脱線防止ガードが拘束して脱線を防止し（図-8の右側の状態）、両者の間に負の横圧として約108kNの作用力が生じているのが分かる。この条件では、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。

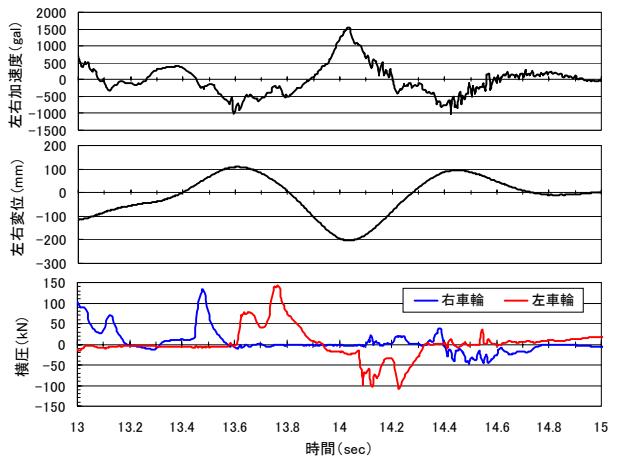


図-10 加振時の横圧の時刻歴波形の例
・想定東海地震波（G3地盤・高架橋応答）の変位振幅1.0倍
・脱線防止ガードの設置位置はレールからの離れ85mm、高さ15mm

(2) 脱線防止ガードの作用力

図-11に、脱線防止ガードの有効性を確認した条件での左右加速度と脱線防止ガードの作用力の関係を示す。これより、左右加速度の増加に伴い作用力も増加し、左右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。なお、最大の作用力は108kNで、図-10の加振条件で測定された。

(3) 脱線防止ガードの横剛性

図-12に、レールからの離れ85mm、高さ15mm及び20mmの条件での、脱線防止ガード及びPCまくらぎの

水平変位と脱線防止ガードの作用力の関係を示す。

これより、脱線防止ガードとPCまくらぎ間には、作用力が約40kNまで水平変位はほとんど生じず、さらに作用力が増加すると、それに伴い両者間の水平変位も増加することが分かる。なお、その際の平均的な横剛性は11.3kN/mmであった。一方、PCまくらぎと振動台間には、作用力が約60kNまで一律5mm程度の水平変位が生じ、さらに作用力が増加すると、それに伴い両者間の水平変位も増加することが分かる。

以上より、脱線防止ガードの作用力が一定値(図-12)の条件では約40~60kN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も生じ始めると推測される。

なお、図-12の丸で囲った3点は他に比べて水平変位が大きくなっているが、これらは何れも正弦波1.5Hzでの測定値である。これより、特定の周波数で連続して加振される場合にバласт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。

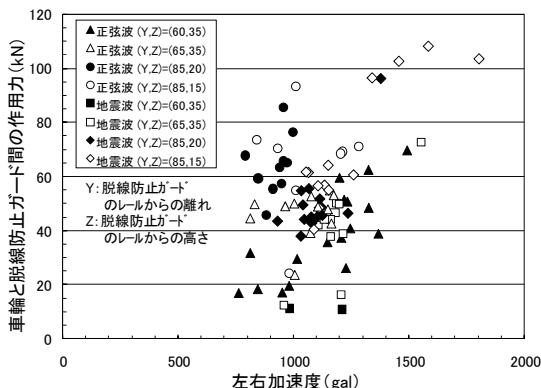


図-11 脱線防止ガードの作用力と左右加速度の関係

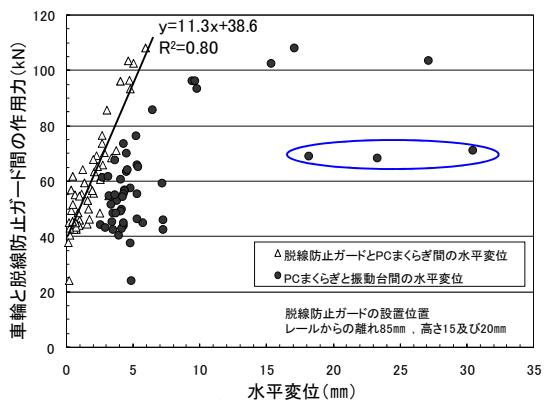


図-12 脱線防止ガードの作用力と水平変位の関係

4. 設計仕様の検討

4.1 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、脱線に対する有効性を確保した上で、設置誤差や保守上の余裕を考慮し、図-1に示す建築限界に対し極力余裕のある仕様を定めた。

3章に示す加振試験で建築限界に対する余裕が最も大

きい設置位置は、レールからの離れ85mm、高さ15mmである。図-10より、この設置位置で最大の加振条件である想定東海地震波(G3地盤・高架橋応答)(図-6)の変位振幅1.0倍での脱線に対する有効性を確認した。一方、脱線防止ガードの設置誤差は、2006年10月から2009年3月までに本線で実施した延べ約3000mの試験敷設の結果から、±5mmを見込むこととした¹⁰⁾。以上より、±5mmの設置誤差が生じても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。

4.2 脱線防止ガードの長さ

脱線防止ガードの長さは、保守時の人手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。

4.3 脱線防止ガードの設計荷重

図-11より、地震時の車輪と脱線防止ガードの衝撃による作用力には、100kNを見込むこととした。

一方、隣り合う脱線防止ガードの継目部(図-13)には、車輪が乗り移る際の衝撃力を緩和を目的に、脱線防止ガードの端部に1/100のテーパーを設けている。この際の作用力は、黒河内の研究結果¹¹⁾より、式(1)から計算した。計算条件を表-1に、結果を図-14に示す。

$$F = Q_1 + K \sqrt{(V \cdot (X/Y)/3.6)^2 \times m \times k + Q_1^2} \quad (1)$$

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

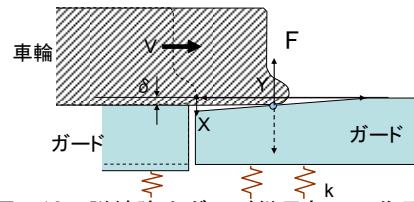


図-13 脱線防止ガード継目部での作用力F

表-1 脱線防止ガード継目部での作用力の計算条件

項目	条件
M: バネ下質量	2t~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
Q1: レール/車輪間の摩擦力	1.25t~μP=0.25×5t(N700系の輪重に基づく)
δ: 車輪誘導量	6mm~図-12の脱線防止ガードの最大水平変位
k: 脱線防止ガードの横剛性	11.3kN/mm~図-12の脱線防止ガードの横剛性

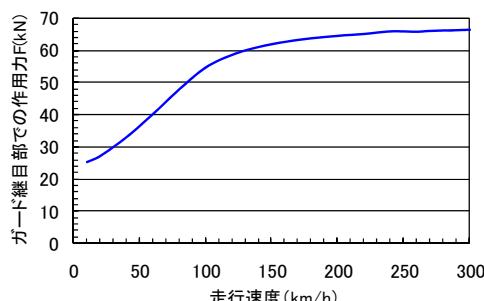


図-14 脱線防止ガード継目部での作用力の計算結果

図-14より、脱線防止ガードの継目部で生じる作用力を70kNとし、図-11の結果と合わせ、脱線防止ガードの設計荷重を170kNとした。

4.4 脱線防止ガードの横剛性

図-8右に示す状態で、車輪の横方向の変位を抑制している左側の脱線防止ガードとPCまくらぎ間に大きな水平変位が生じると、右車輪がレール上から右側へ脱線する可能性がある。そこで、PCまくらぎに対する脱線防止ガードの横剛性の仕様を定めることとした。

図-12より、4.1節で述べた設置位置の設計仕様の基となるレールからの離れ85mmで脱線防止ガードの有効性を確認した条件に基づき、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。

4.5 PCまくらぎの鋼製インサートの引張抵抗力

PCまくらぎの仕様は、JIS E 1201の3H及びJIS E 1202の4Hとし、これに加え、鋼製インサート(図-2)の引張抵抗力の仕様を定めることとした。

図-1より、脱線防止ガードに170kNの設計荷重が作用した際の最大引張力はボルト①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. 強度確認試験

4章に示す設計仕様に基づき製品化を想定して製作した脱線防止ガードとPCまくらぎを用いて、強度確認試験を実施した。結果を以下に示す。

5.1 鋼製インサートの引抜き破壊試験

(1) 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(図-1のボルト③の埋込栓)の引抜き破壊試験に基づいた(図-15左)。

(2) 鋼製インサートの仕様

試験には、図-16に示す引張抵抗力の向上を目的に製作した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付着強度の増加を見込み、Bタイプは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、軌道回路に与える電気的な影響を考慮し、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 $1.0 \times 10^4 M\Omega$ 以上であることを確認した(図-15右)。

(3) 引抜き破壊試験の結果

引抜き破壊試験の結果を表-2に示す。両タイプとも引張抵抗力は最低でも290kN以上が確保されており、4.5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(図-17)。



図-15 鋼製インサートに関する試験の実施状況
引抜き破壊試験 絶縁抵抗測定



	インサート長さ(mm)	ねじ部長さ(mm)	外径(mm)	材質
Aタイプ	180	130	D29	SD345
Bタイプ	180	130	Φ30	SS490

図-16 試験に用いた鋼製インサート

表-2 引抜き破壊試験の結果

インサート	引抜き破壊強度(kN)				
	種別	1回目	2回目	3回目	平均値
Aタイプ	290	300*	300*	296.7以上	296.7以上
Bタイプ	295	300*	300*	298.3以上	298.3以上

*引張荷重300kNで破壊に至らなかった。



図-17 PCまくらぎ、鋼製インサートの破壊状況

5.2 脱線防止ガードの静的水平載荷試験

(1) 試験方法

脱線防止ガードは、PCまくらぎ1本おきに直線用(約6.4m)は6箇所で、曲線用(約4.1m)は4箇所で固定されている。したがって、脱線防止ガードの作用力は、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、図-18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、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箇所で静的水平載荷試験を実施した。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(2)より計算した。

$$K = (G_0 + 2\mu P_t)/ya \quad (2)$$

G_0 : PCまくらぎ1本あたりの道床横抵抗力 12kN

ya : 道床横抵抗力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_t : 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

なお、地震で PC まくらぎ周辺のバラストが流出すると道床横抵抗力が大きく低下するため、東海道新幹線の脱線・逸脱防止対策には、バラスト軌道の外側に壁を設けて軌道形状を維持する対策が含まれている²⁾。

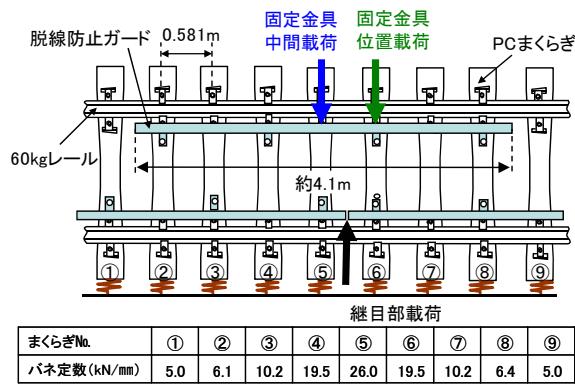


図-18 静的水平載荷試験装置の構成

(2) 静的水平載荷試験の結果

図-19 に、結果の一例として、固定金具位置（図-18）での静的水平載荷試験の結果を示す。

これより、設計荷重 170kN までの平均的な横剛性は 13.8kN/mm で、4.4 節に示す設計仕様 10kN/mm 以上を満たしていることが分かる。また、170kN 載荷時のボルト①と②（図-1）の応力は最大で 590MPa で、弾性域の目安値 830MPa (JIS B 1051 並目ねじ 強度区分 10.9 の保証荷重応力) 以下であった。なお、荷重をさらに増加した結果、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。破壊状況を図-20 に示す。

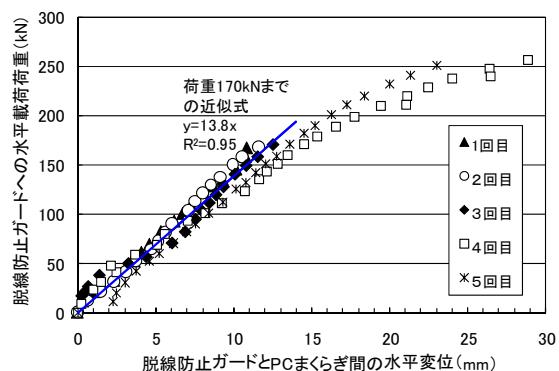


図-19 固定金具位置での静的水平載荷試験の結果



図-20 静的水平載荷試験での PC まくらぎの破壊状況

ここで、脱線防止ガードの作用力 250kN を、図-1 の A 点周りのモーメントの釣合いからボルト①の引張力に換算すると約 290kN となり、表-2 の鋼製インサートの引抜き破壊試験の結果と概ね一致する。

同様の静的水平載荷試験を、図-18 に示す固定金具の中間、継目部でも実施し、何れも設計仕様を満たしていることを確認した。なお、横剛性は、固定金具中間では 10.2kN/mm、継目部では 10.0kN/mm であった。

6.まとめ

(1) 実物台車を用いた加振試験を実施し、地震時の脱線に対する脱線防止ガードの有効性を確認した。

(2) 実物台車を用いた加振試験で脱線防止ガードの有効性を確認した際の測定データ等に基づき、脱線防止ガードと PC まくらぎの設計仕様を策定した。

(3) 製品化を想定して製作した脱線防止ガードと PC まくらぎを用いて強度確認試験を実施し、何れも設計仕様を満たしていることを確認した。

最後に、試験の実施にあたり多大なご協力をいただいた鉄道総合技術研究所、大林組技術研究所、並びに関係メーカーの皆様に厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- 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
- 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
- 関雅樹ほか：東海道新幹線構造物の耐震強化工事について, J-Rail2009, pp.549-552, 2009.12.
- 三輪昌弘ほか：実台車を用いた脱線防止ガードの効果確認試験, J-Rail2009, pp.557-562, 2009.12.
- 村松浩成ほか：実台車を用いた加振試験による脱線防止ガードの設計仕様の検討, J-Rail2009, pp.491-494, 2009.12.
- 宮本岳史ほか：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
- 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, 丸善, 1999.10
- 吉田幸司ほか：高架橋のダンパーー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
- 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, 研友社, pp.72, 1993.5
- 渡邊康人ほか：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
- 黒河内浩：分岐器レール伸縮継目の設計に関する基礎的研究, 鉄研報告, 1972