

逸脱防止機能を有するバラスト・ラダー軌道の開発

浅沼 潔* 曾我部 正道* 渡辺 勉*
岡山 準也** 涌井 一***

Development of A Ballasted Ladder Track Equipped with A Vehicle Guide Device

Kiyoshi ASANUMA Masamichi SOGABE Tsutomu WATANABE
Junya OKAYAMA Hajime WAKUI

The authors developed a ballasted ladder track equipped with a vehicle guide device, which minimizes the degree of damages when railway vehicle is derailed due to a large-scale earthquake. The vehicle guide device was joined by a hinge to the field side of the longitudinal beam of the ballasted ladder track. In this development, the authors examined rotary spring characteristic of the hinge joint by static loading experiments and load-bearing performance of the vehicle guide device by drop-weight experiments, and evaluated its vehicle-guide performance and buckling safety by parametric analysis. In addition, the authors laid the ballasted ladder track equipped with the vehicle guide device experimentally on a loop line in the premises of Railway Technical Research Institute and clarified tamping characteristics of the track.

キーワード：バラスト・ラダー軌道，逸脱防止，ヒンジ接合，地震，脱線，座屈

1. はじめに

新潟県中越地震における上越新幹線の列車脱線事故を契機に、転覆、対向列車との衝突など脱線に伴う被害を最小限に抑える安全対策が大きな課題になっており、横まくらぎを用いた有道床軌道やスラブ軌道を対象として列車の脱線を防ぐ脱線防止ガードや列車脱線後の逸脱を抑える逸脱防止ガードの開発が鋭意進められている¹⁾。

縦まくらぎ方式のラダーマクラギを有道床軌道に用いたバラスト・ラダー軌道は、軌きょう剛性が高く道床横抵抗力も大きいことから軌道変位は小さく抑えられ、温度変化に伴う軌道座屈に対しても優れた安定性を示すことが明らかになっている²⁾。地震時における軌道変位や軌道座屈に対しても同様の性能を期待できることから、バラスト・ラダー軌道に逸脱防止機能を付与すれば地震時、特に脱線後の列車の安全性向上に大きく寄与できるものと考えられる。

一方、地震時の脱線に至る車両挙動に比較して脱線後の挙動については十分な検討が行われておらず、脱線防止ガードや逸脱防止ガードの機能等について未解明な点が多い現状を踏まえ、曾我部らは、機構解析手法に基づく逸脱防止ガードの数値解析モデルを構築し、地震動の大きさ、軌道の敷設条件等が逸脱防止機能に及ぼす影響や逸脱防止ガードに作用する衝撃力等に関する解析的検

討を可能にした³⁾。

以上のような背景から、本研究では、バラスト・ラダー軌道に設ける逸脱防止構造として、ラダーマクラギの縦梁軌間外側にヒンジ接合したRC製逸脱防止壁を設ける構造を提案し、静的載荷試験および重錘落下衝撃載荷試験によりヒンジ接合部の回転ばね特性および耐荷性能を検討した。次に、機構解析手法に基づく逸脱防止構造の数値解析モデルを用いて逸脱防止機能および車輪接触時に同構造に作用する衝撃力を評価するほか、軌道座屈解析モデルを用いて衝撃力に相当する横荷重が作用した場合の座屈安定性を評価した。そして、鉄道総研構内ループ線に逸脱防止構造を設けたバラスト・ラダー軌道1ユニット(6.25m)を試験敷設し、施工性を確認した。また、逸脱防止機能を有するバラスト・ラダー軌道の安全性をさらに向上できるように、ラダーマクラギの縦梁軌間内側に設ける脱線防止構造を提案した。

2. バラスト・ラダー軌道に設ける逸脱防止構造

バラスト・ラダー軌道に設ける逸脱防止構造を図1に、同構造の配筋を図2に示す。逸脱防止構造の基本コンセプトは以下のとおりである。

2.1 逸脱防止壁の基本構造

線路方向に連続する付帯構造を配置しやすいラダーマクラギのメリットを活かし、列車の逸脱を防止するため

* 鉄道力学研究部 (構造力学)

** (株)安部日鋼工業 鉄道事業本部鉄道技術部

*** 研究開発推進室

特集：鉄道力学

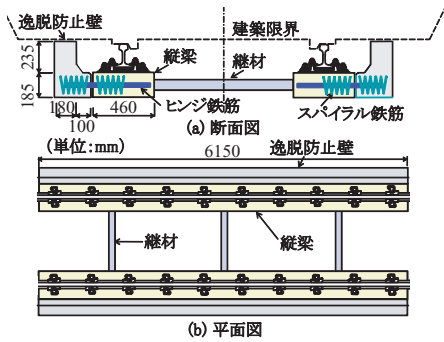


図1 逸脱防止構造

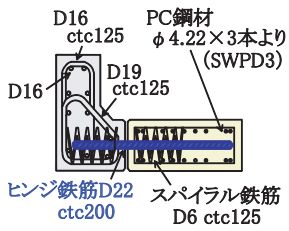


図2 逸脱防止構造の配筋

の基本構造として、RC製の逸脱防止壁を線路方向に連続的に設けることとした。逸脱防止壁の設置位置は、ラダーマクラギの縦梁軌間外側あるいは内側の2タイプが考えられる。本研究では逸脱防止構造を検討対象としたが、横まくらぎ有道床軌道を対象として検討が進められている軌間内側脱線防止ガードの取付けが可能であれば地震時におけるバラスト・ラダー軌道の安全性をさらに向上させることができる。また、内側に配置した場合は、台車下部の高剛性部材が逸脱防止壁に衝突する危険性がある。このような観点から、逸脱防止壁はラダーマクラギの縦梁軌間外側に設けることとした。

2.2 逸脱防止壁と縦梁の接合構造

逸脱防止壁に作用する衝撃力によってラダーマクラギ本体（主に継材）に大きな損傷が生じると後続車両の走行安全性を損なうほか早期復旧が困難になる。このため、衝撃力によってラダーマクラギ本体に過大な曲げモーメントが伝達されないように、逸脱防止壁と縦梁の接合部はヒンジ構造（図1）とした。衝撃力は、逸脱防止壁側面・底面の道床反力およびヒンジ接合部の回転抵抗力で分担する。ヒンジ接合部に配置する鉄筋（以下、ヒンジ鉄筋）は縦梁高さの中央、線路方向に等間隔で配置することとした。ヒンジ鉄筋について後述する静的荷重試験にて検討を行った結果、異形鉄筋D22を線路方向に20cm間隔で配置することとした。

3. 静的荷重試験によるヒンジ接合部の回転ばね特性評価

ラダーマクラギ本体に過大な曲げモーメントが伝達さ

れない構造とするヒンジ鉄筋量を設定するために、逸脱防止構造を設けた模擬部分供試体による静的水平荷重試験を行い、ヒンジ鉄筋量とヒンジ接合部の回転ばね特性との関係について検討を行った。

3.1 供試体および試験パラメータ

供試体は、図1に示す逸脱防止構造を設けたラダーマクラギから片側1レール分、線路方向に長さ2m分を取り出した形状寸法とした。なお、PC鋼材は緊張せず、継材は配置していない。試験パラメータはヒンジ鉄筋径とし、D19、D22、D25の3水準に変化させた。

3.2 荷重試験方法

供試体の荷重試験方法を図3に示す。縦梁を貫通させたゲビンデ鋼棒により供試体を固定し、油圧ジャッキを用いて水平荷重した。ヒンジ鉄筋がD19およびD22の供試体の場合は荷重開始から除荷することなく荷重し、D25の供試体の場合はヒンジ構造の復元力特性を確認するために、ヒンジ鉄筋降伏時における逸脱防止壁上部の水平変位 δ に対して5 δ まで荷重・除荷を繰り返し、その後は除荷することなく荷重した。

3.3 ヒンジ接合部の回転ばね特性

逸脱防止壁上部と下部の変位差を基にヒンジ接合部の回転角を算出し、同部に作用する曲げモーメントとの関係を求めた。その結果を図4に示す。同図から、中央部および端部における両者の関係はほぼ同等であること、ヒンジ鉄筋D25の結果から荷重時および除荷時におけるヒンジ接合部の回転ばね特性はほぼ同等であることが分かる。ここでは、逸脱防止壁に対する衝撃力によってラダーマクラギ本体に過大な曲げモーメントが伝達されな

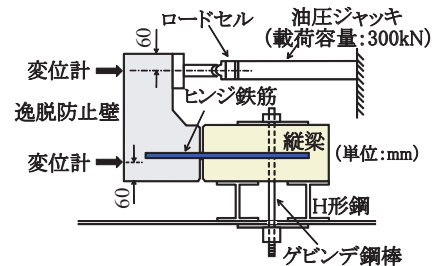


図3 荷重試験方法

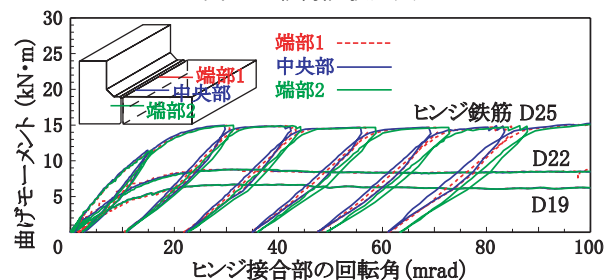


図4 ヒンジ接合部に作用する曲げモーメントと回転角との関係

い構造とするための評価指標として継材の降伏曲げモーメント (12.5kN・m) を用いた。各ケースにおける最大曲げモーメントと継材降伏曲げモーメントに対する割合を表1に示す。ヒンジ鉄筋D25における最大曲げモーメントは継材の降伏曲げモーメントを上回るため、衝撃力作用時にラダーマクラギ本体の損傷が懸念される。一方、D19、D22における最大曲げモーメントは継材の降伏曲げモーメントを下回るため問題ないが、回転ばね剛性が小さくなると衝撃力作用時における逸脱防止壁の回転変形(小返り)が大きくなるため逸脱防止機能の低下が懸念される。以上の評価結果から、実際の逸脱防止構造に用いるヒンジ鉄筋はD22とした。

表1 ヒンジ接合部の最大曲げモーメント

ヒンジ鉄筋径	最大曲げモーメント (kN・m)	最大曲げモーメント / 継材降伏曲げモーメント
D19	6.5	0.5
D22	8.6	0.7
D25	14.7	1.2

4. 重錘落下衝撃載荷試験による逸脱防止構造の挙動評価

逸脱防止壁に車輪が衝突する際の衝撃力を模擬した重錘落下衝撃載荷試験を行い、ヒンジ接合部の回転ばね特性および逸脱防止壁の耐荷力について検討を行った。

4.1 供試体および試験パラメータ

供試体は静的載荷試験と同様であり、ヒンジ鉄筋はD22とした。試験パラメータは衝撃力の作用時間とし、既往の研究における逸脱防止ガードへの車輪衝突の作用時間³⁾を参考にして10,20,30msecの3水準に設定した。衝撃力の作用時間の調整は、重錘衝突面に弾性材を配置してばね特性を変化させることにより行った。

4.2 載荷試験方法

載荷試験方法を図5に、試験状況を図6に示す。

本衝撃載荷試験では、質量60kgの重錘(直径20cm, 高さ25cm, 加速度計内蔵)を所定の高さから自由落下させ、供試体の逸脱防止壁中央位置に衝突させた。衝撃力は、重錘内蔵加速度計で得られた反発加速度に重錘質量

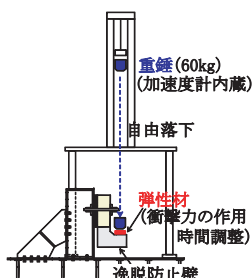


図5 重錘落下衝撃試験方法

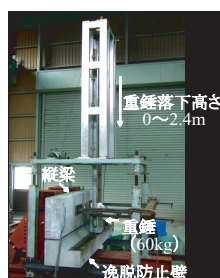


図6 試験状況

を乗じた換算衝撃力で評価した。

4.3 ヒンジ接合部の回転ばね特性

ヒンジ接合部に作用する曲げモーメントと回転角との関係を図7に示す。衝撃力の作用時間が30~20msec程度の場合は静的載荷試験結果とほぼ同様の傾向を示すが、10msec程度に短くなると異なる傾向を示す。これは、重錘の落下エネルギーが小さいため逸脱防止壁の応答が減少することが一因と考えられる。このような傾向については、今後、数値解析により検討を進めたいと考えている。

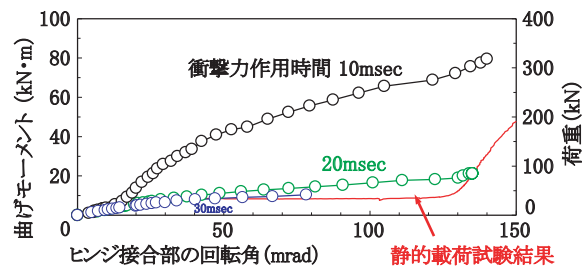


図7 ヒンジ接合部に作用する曲げモーメントと回転角との関係

4.4 逸脱防止構造の耐荷性能

ヒンジ接合部の回転角が130mrad程度に達すると逸脱防止壁下部がラダーマクラギの縦梁下部に接触する。作用時間10msecおよび20msecの場合はヒンジ接合部の回転角がこの値を超えて両者が接触したが、ヒンジ鉄筋の復元力により除荷とともに非接触状態に戻り、接触部分に損傷は見られなかった。また、重錘落下高さ2.4m, 作用時間10msecの条件で衝撃荷重は709kNに達したが、図8に示す位置に幅0.05mm程度のひび割れが確認されたのみで、大きな損傷は見られなかった。

以上の結果から、本研究で提案した逸脱防止構造の耐荷性能は十分であると考えられる。

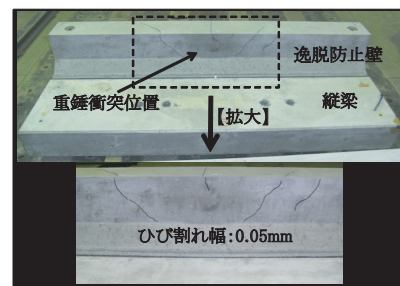


図8 供試体のひび割れ発生状況 (重錘落下高さ2.4m, 作用時間10msec, 衝撃荷重709kN)

5. 数値解析による逸脱防止機能の評価

5.1 数値解析手法

機構解析MBD (Multi Body Dynamics) 手法による、半車両規模の車両/軌道/構造物モデル³⁾を用いて逸脱

特集：鉄道力学

防止機能の評価を行った。

逸脱防止構造，ラダーマクラギ，構造物の力学モデルを図9に示す。逸脱防止壁，ラダーマクラギ，構造物は剛体とした。ラダーマクラギは，バラストによる鉛直，水平，回転ばねで支持し，縦梁と逸脱防止壁のヒンジ接合部には，3章の結果を基にバイリニア非線形回転ばね要素を配置した。力学モデルの全長を6.25mとした。力学モデルで用いたばね定数の一覧を表2に示す。水平支持ばね（道床横抵抗力）の非線形特性は，本解析の支配的な要因となる。水平支持ばねの降伏荷重は，力学モデル全長当たりのラダーマクラギの最終道床横抵抗力に車両の自重による摩擦抵抗増加分を加算して片側130kNとし，降伏変位は道床横抵抗力試験結果を基に1.3mmとした。

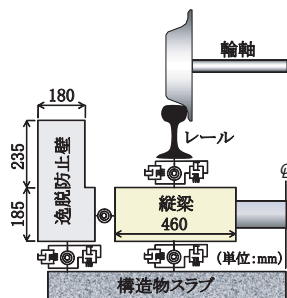


図9 数値解析に用いた力学モデル

表2 力学モデルに用いたばね定数

項目		単位	値
縦梁支持ばね	鉛直	N/mm	3.35×10^6
	水平	N/mm	1.00×10^5
	回転	N・mm/rad	6.00×10^9
逸脱防止壁支持ばね	鉛直	N/mm	2.42×10^6
	水平	縦梁支持ばねに集約	
	回転	N・mm/rad	1.00×10^9
逸脱防止壁接合部	回転	N・mm/rad	2.46×10^9

※いずれのばねも非線形，ばね値は力学モデル片側6.25m当たり

5.2 正弦波加振に対する検討

正弦波加振に対する各種の安全限界振幅・加速度を図10に示す。正弦波加振では逸脱防止構造の必要高さを安全側に評価するために，バラストによる縦梁の水平支持ばねは線形として検討した。車輪上昇量30mmは，振動数ごとに正弦波5波を用いて振幅を漸増させながら加振し，レールからの車輪上昇量が30mmとなった点をプロットしたものである。この車輪上昇量30mmは概ね車輪のフランジ高さに相当している。図中には，実物大車両模型を用いた既往の加振試験から求めた安全限界振幅⁴⁾も併せて示した。本解析では車両諸元を一般化しており，実物大車両模型試験における車両諸元と異なる部分があるためこの実験値と直接比較することはできないが，基本性状としては比較的良い一致を見ている。図中に示した逸脱限界は脱線後に車輪が高さ235mmの逸脱防止構造を乗り越えない限界の振幅であり，車輪踏面下側の逸脱防止構造への接触位置高さおよび逸脱防止構造の先端変

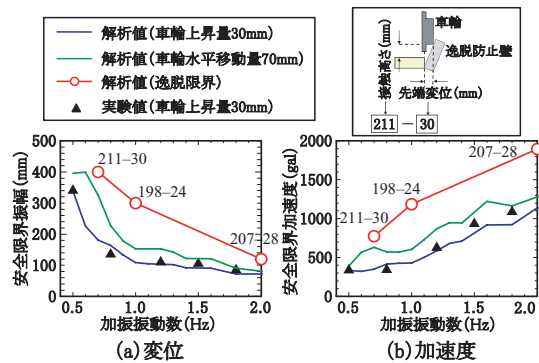


図10 正弦波加振による安全限界振幅

位を2つの数字の組み合わせで示した。乗り越えの形態は，逸脱防止構造への接触後に生じる場合，未接触で生じる場合など様々である。なお，接触位置が高さ215mm以上になると慣性力により車輪が逸脱防止構造を乗り越える結果となった。

5.3 地震波加振に対する検討

地震波加振による検討の概念図を図11に示す。鉄道における代表的なRCラーメン高架橋に対して動的非線形解析を実施し，得られた高架橋天端の応答波形を前述のモデルに入力することにより，逸脱防止構造の機能の評価した。地震動はL2地震動スペクトルⅡ⁵⁾とし，地盤種別はG3（普通地盤）とした。

高架橋1基モデルの入力波形を図12に示す。高架橋の等価固有周期は東海道・山陽新幹線高架橋を想定し0.5秒および0.8秒とした。これらの高架橋では降伏震度は0.5程度，最大震度は0.6程度となるが，完全弾塑性モデルを用いて逸脱防止構造の反力を安全側に求めるために，解析上の降伏震度は0.8とした。

高架橋20基モデルは，車両と構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARS IIにより入力波形を作成した³⁾。高架橋の特性については前述の高架橋1基モデルに準じた。地震波加振に対する解析結果の一覧を表3に示す。いずれのケースも車両は逸脱せず，逸脱防止壁に作用する衝撃力は200kN～240kNの範囲にあった。

高架橋20基モデルの解析結果を図13に示す。同図から分かるように，9.14秒に脱線した後，9.23秒に逸脱防

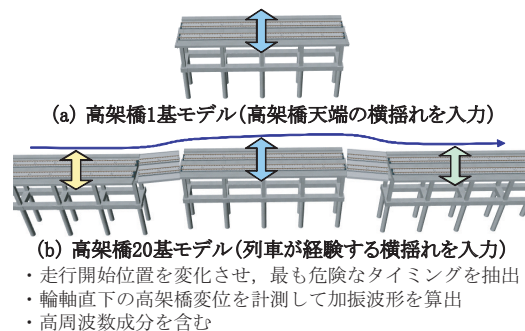


図11 地震波に対する検討の概念図

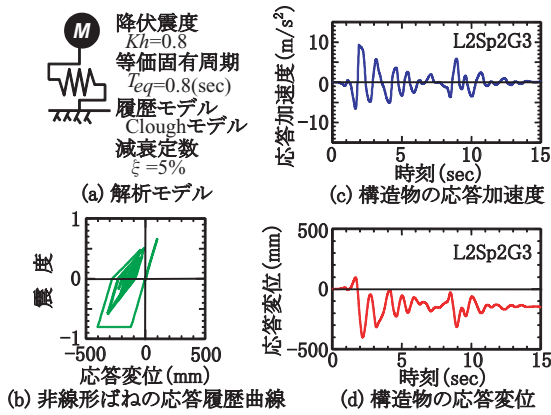


図12 高架橋1基モデルの入力波形

表3 地震波加振に対する解析結果

解析モデル	等価固有周期 (sec)	逸脱防止壁に作用する衝撃力 (kN)	ラダーマクラギの横変位 (mm)
高架橋1基	0.5	202	36
	0.8	221	39
高架橋20基	0.5~0.8	240	32

※車輪と逸脱防止壁の接触力は1輪当たり

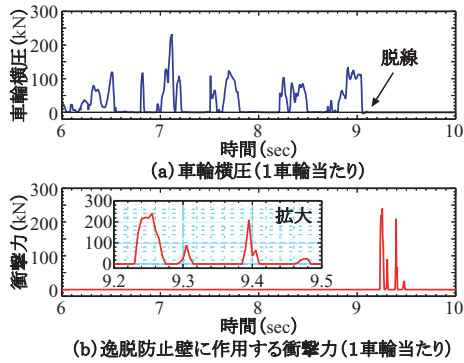


図13 地震波加振に対する解析結果 (高架橋20基モデル)

止壁に接触した。接触時に逸脱防止壁に作用する最大衝撃力は240kN（作用時間40msec）であり、車輪接触位置は逸脱防止壁上縁から20mmの高さであった。

以上、限定的な解析結果ではあるが、逸脱防止構造を有するバラスト・ラダー軌道は、大規模地震動に対しても逸脱防止機能を発揮し得ると推定される。

6. 数値解析による座屈安定性の評価

軌道座屈解析モデルにより、衝撃力に相当する横荷重が作用した場合の軌道の座屈安定性を評価した。

6.1 解析モデルおよび解析条件

バラスト・ラダー軌道の解析モデルを図14に示す。解析モデルは直線および曲線軌道（新幹線本線最小曲線半径2500m）とし、ロングレール不動区間を模擬するためにレール端部の線路方向変位を拘束した。

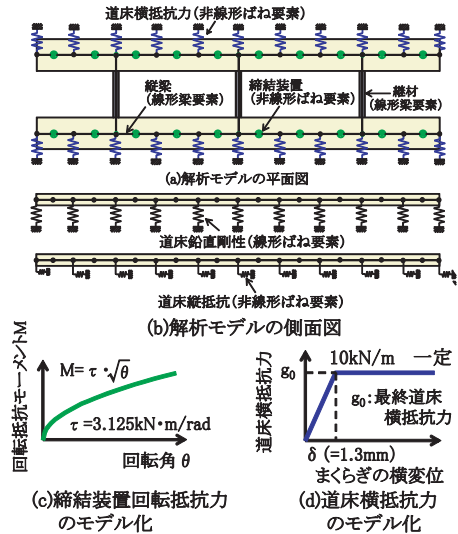


図14 バラスト・ラダー軌道の解析モデル

6.2 レール温度変化量および横荷重

レールの温度変化量はロングレールの設定温度を基に40℃に設定した。なお、比較のために、温度変化がない場合についても解析を行った。横荷重は、図15に示す解析モデル中央に1点载荷した。

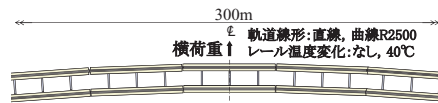


図15 横荷重の载荷位置

6.3 数値解析結果

レールの線路直角方向変位と横荷重との関係を図16に示す。直線と曲線では大きな差異はなかった。温度変化を与えない場合は、軌道座屈を生じることなく線路直角方向変位は増加するが、温度変化を与えた場合は、420kN程度で軌道座屈を生じる。逸脱防止壁に作用する衝撃力は作用時間が非常に短いため衝撃力すべてが軌道座屈に寄与することはないと考えられるが、前述の表3に示される逸脱防止壁に作用する最大衝撃力240kNが静的に作用しても線路直角方向変位は2mm程度に収まり軌道座屈を生じることはない。

以上の結果から、逸脱防止構造を設けたバラスト・ラダー軌道は、車輪衝突時においても軌道座屈の危険性はないと考えられる。

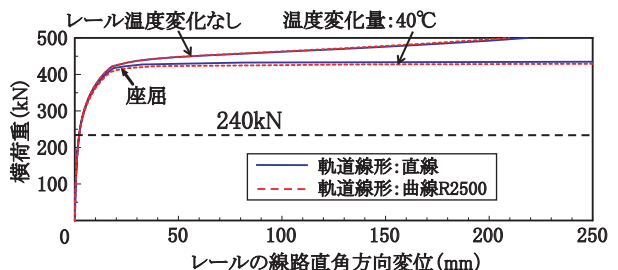


図16 横荷重とレールの線路直角方向変位との関係

特集：鉄道力学

7. 施工性確認試験

鉄道総研構内ループ線にて逸脱防止構造を設けたラダーマクラギ1ユニットを試験敷設した。まくらぎ下バラストのつき固めも可能であり、施工性は良好であることを確認した。試験敷設状況を図17に示す。



図17 逸脱防止構造を設けたバラスト・ラダー軌道の試験敷設状況

8. バラスト・ラダー軌道に設ける脱線防止構造

本研究では逸脱防止構造を検討対象としたが、横まくらぎ有道床軌道を対象として検討が進められている内軌側脱線防止ガードの取付けが可能であれば地震時におけるバラスト・ラダー軌道の安全性をさらに向上させることができる。このような観点から、脱線防止ガード用鋼材の位置に関する設計条件を図18のように設定して、水平力200kNに対して損傷を受けない脱線防止構造を提案した。脱線防止構造は、図19に示すように、ラダーマクラギの縦梁内軌側上面に六角ボルトにて固定したガードホルダーに線路方向に連続したガードアングルを取り付ける構造とした。

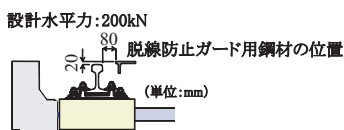


図18 脱線防止構造の設計条件

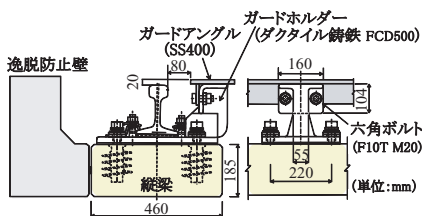


図19 ラダーマクラギに設ける脱線防止構造

9. まとめ

本研究で得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) バラスト・ラダー軌道に設ける逸脱防止構造として、ラダーマクラギの縦梁軌間外側にヒンジ接合したRC製逸脱防止壁を設ける構造を提案した。

- (2) 静的載荷試験により、逸脱防止壁に作用する衝撃力によってラダーマクラギ本体に過大な曲げモーメントが伝達されない構造とするためのヒンジ鉄筋として、D22を縦梁高さの中央、線路方向に20cm間隔で配置する構造を提案した。
- (3) 重錘落下衝撃載荷試験により、作用時間10msec・最大荷重709kN程度のパルス的な衝撃荷重に対して大きな損傷は見られず、逸脱防止構造の耐荷性能は十分であることを確認した。
- (4) 機構解析モデルを用いた正弦波加振解析に対して、安全限界振幅（車輪上昇量が30mmを超えない限界の振幅および車輪が高さ235mmの逸脱防止構造を乗り越えない限界の振幅）を示した。
- (5) RCラーメン高架橋天端の地震時応答波形（地震動：L2地震動スペクトルⅡ，地盤種別：G3（普通地盤））を用いた地震波加振解析により、逸脱防止構造に作用する車輪の衝撃力は200kN～240kNの範囲にあり、車両の逸脱は生じないことが分かった。限定的な解析結果ではあるが、逸脱防止構造を設けたバラスト・ラダー軌道は、大規模地震動に対しても逸脱防止機能を発揮し得ると推定される。
- (6) (5)で得られた衝撃力200kN～240kNに相当する横荷重が静的に作用した場合の座屈挙動解析を行った結果、軌道変位は2mm程度に収まり、軌道座屈に対して十分に安全であることが分かった。
- (7) 鉄道総研構内ループ線にて逸脱防止構造を設けたラダーマクラギ1ユニットを試験敷設し、施工性が良好であることを確認した。
- (8) 逸脱防止機能を有するバラスト・ラダー軌道の安全性をさらに向上できるように、ラダーマクラギの縦梁内軌側に設ける脱線防止構造を提案した。

文献

- 1) 土木学会・第二次調査団：平成16年新潟県中越地震 社会基盤システムの被害等に関する総合調査「調査結果と緊急提言」Ⅰ報告・提言編，2004
- 2) 浅沼潔，奥田広之，松本信之，涌井一，富田耕司：バラスト・ラダー軌道の座屈安定性に関する解析的検討，鉄道総研報告，Vol.20，No.11，pp.41-46，1996
- 3) 曾我部正道，浅沼潔，涌井一：地震時列車逸脱防止ガードの性能評価法の開発，鉄道力学シンポジウム論文集，No.11，pp.69-74，2007
- 4) 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（C編），Vol.72，No.706，2005
- 5) 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