

座屈対策工を用いたバラスト軌道の地震時道床横抵抗力の評価

中村 貴久* 桃谷 尚嗣*

Evaluation for Lateral Resistance Force of Ballasted Track Equipped with Countermeasures to Prevent Track Buckling during Earthquakes

Takahisa NAKAMURA Yoshitsugu MOMOYA

The authors have performed shaking table tests using full-scale models for examining the lateral resistance force of the ballasted track during and after the earthquakes to evaluate the seismic performance of ballasted tracks so far. However seismic performance of the ballasted track equipped with countermeasures to prevent ballasted tracks buckling has not been considered enough. Therefore, in this study, to evaluate the seismic lateral resistance of the ballasted track equipped with the countermeasures to prevent track buckling, shaking table tests using full-scale model were conducted. As a result, it has become obvious that the countermeasure of the sleeper anchor or the prestressed ballast shoulder decreased the sleeper lateral displacement during earthquake by improving the lateral resistance force, and the countermeasure of the ballast wall decreased the sleeper displacement during earthquake by preventing decrease of the lateral resistance force during earthquake.

キーワード：バラスト軌道，地震時道床横抵抗力，座屈対策工，大型振動台試験，横方向荷重

1. はじめに

これまでに鉄道構造物は地震による様々な被害を受けており，列車の走行安全性に支障した事例の多くは，構造物の変状に起因したものが多くある。例えば，兵庫県南部地震においても構造物に多数の被害が生じたことが報告されている¹⁾。これらの背景から，構造物の耐震設計に関する検討が進められ，鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物）²⁾を例にとると平成19年の改訂において非常に強い地震動（L2地震動）に対して耐震性能を照査する設計方法の整備が行われた。一方，バラスト軌道はこれまでに耐震設計法の開発に向けた十分な検討が進められておらず，構造物の耐震性が向上した昨今においては，地震時における鉄道の安全性を高めるためには，バラスト軌道の耐震性能の評価ならびに対策工の検討が必要であると考えられる。

バラスト軌道は，特にロングレールを用いた場合，レールの温度上昇に伴って軸力が増大し，軌道を座屈させようとする横方向の力が生じる。この力に対して，各まくらぎが道床の抵抗力（以下，道床横抵抗力という）で拘束されることで安定な状態が保たれている。しかし，地震によって道床横抵抗力が低下すると，軌きょうが水平方向に横変位する座屈や張り出しが生じる可能性がある。これまでに，実物大バラスト軌道模型を用いた大型

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

振動台試験により，加振前後の道床横抵抗力を静的載荷試験により検討したところ，加振後に道床横抵抗力が低下することがわかっている³⁾。また，地震動の作用中における軌道の道床横抵抗力特性を評価するため，軌道を横変位させようとする横方向の荷重（以下，横方向荷重という）を作用させた状態で加振試験を行う評価方法を開発し，大型振動台試験を実施した。その結果，横方向荷重が加振後の道床横抵抗力の半分程度であっても，加振中に大きなまくらぎ残留変位が生じた⁴⁾。また，直線区間と曲線区間における道床形状が道床横抵抗力に与える影響を検討したところ，カントの有無が地震時の道床横抵抗力に及ぼす影響は小さいことがわかった⁴⁾。

本研究では，座屈対策工を施した実物大バラスト軌道模型を構築して大型振動台試験を行い，各種対策工の地震時道床横抵抗力と対策効果を検討した。

2. 実物大模型を用いた大型振動台試験

2.1 試験概要

各種座屈対策工の地震時道床横抵抗力を評価するため，実物大模型を用いた大型振動台試験を行った。本試験では，加振中において一定の横方向荷重をまくらぎに与えて地震時の道床横抵抗力を評価した。横方向荷重を作用させた加振試験の状況を図1に示す。本評価方法は，レールの温度上昇によりロングレールを座屈させようと

特集：軌道技術

する荷重を想定した横方向荷重をまくらぎに作用させて加振試験を行うものである。ばねは 80～100mm 程度のストロークに対して張力変化率が 15%程度と小さなものであり、本ばねを用いて横方向荷重をまくらぎ長手方向に作用させた。試験ケースは、バラスト止め壁、座屈防止板およびプレストレスの 3 種類の座屈対策工と無対策の計 4 ケースである (図 2, 図 3)。ここで、道床横抵抗力は、まくらぎの端面、側面および底面の各面における道床の抵抗力の合計で評価できることがわかっている⁵⁾。本試験で検討する各種座屈対策工は主にまくらぎ端面の負担力を向上させる対策工である。バラスト止め壁は、L 型の擁壁を道床肩部に設置して、地震時における道床肩部の崩壊を抑制して道床横抵抗力の低下を抑える効果が期待できる。プレストレスは、道床肩部の剛性を増加させて道床横抵抗力を向上させるものである。道床肩部の道床天端と底面に鉄板を設置して鉄筋棒で上下の鉄板を接続し、鉄板に引張荷重を作用させて道床肩部のバラストに拘束圧を与えることで、道床の剛性を増加させる。座屈防止板は、まくらぎ端面の面積を増加させて、道床横抵抗力を増加させる効果を期待したものである。大型振動台試験の試験状況を図 4 に示す。

2.2 供試体作製方法

供試体は、曲線区間の新幹線バラスト軌道を想定した実物大模型とした。バラスト道床の形状は、カント 200mm、道床厚 (内軌側) 200mm、道床肩幅 500mm とし、密度 $1.6t/m^3$ となるように振動バイブレーターを用いて道床バラストを締め固めて構築した。まくらぎ種別は PC まくらぎ 3H であり、レール種別は 60kg レールである。レールの長さは、まくらぎ 1 本あたりの自重を考慮して、新幹線の標準的なまくらぎ間隔と同じ 581mm とした。まくらぎ底面の高さまで道床を構築した後、まくらぎをレール長手方向に 4 本並べた (図 4)。実物大模型のまくらぎ配置間隔は、隣接するまくらぎの影響が小さくなるように 1m ずつ離れた。また、高架橋上を想定し、実物大バラスト軌道模型と振動台テーブルとの間にはコンクリートに近い材質であるセメントボードを設置した。

バラスト止め壁は、まくらぎ端部から 500mm の外軌側の道床肩部に設置した。本試験で用いたバラスト止め壁は鉄製の L 型の擁壁であり、大型振動台テーブルに剛結した。プレストレスは、外軌側の道床肩部の道床底面および表面に鉄板を設置し、上下の鉄板に鉄筋棒を通し、センターホールジャッキで鉄筋棒に引張り荷重を作用させ、鉄板間に挟まれた道床に拘束圧を与えた。道床肩部の鉄板下の道床バラストは土のうに入れ、加振による道床肩部の崩壊に対して鉄筋棒の引張荷重の低下を抑制する構造とした。引張荷重は 18kN であり、道床がせん断破壊しない程度で、かつ極力大きなプレストレス

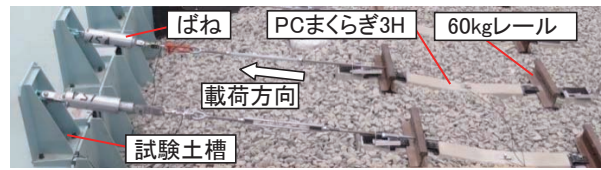


図 1 地震時道床横抵抗力の評価方法の試験状況

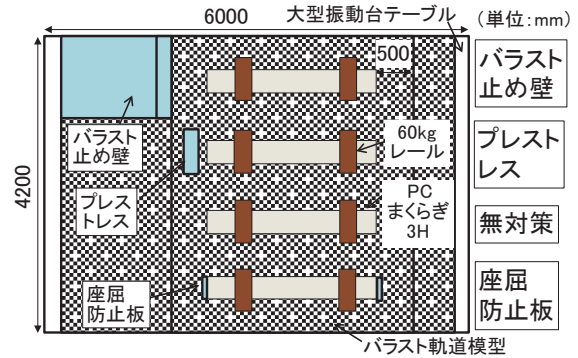


図 2 大型振動台試験の概要 (平面)

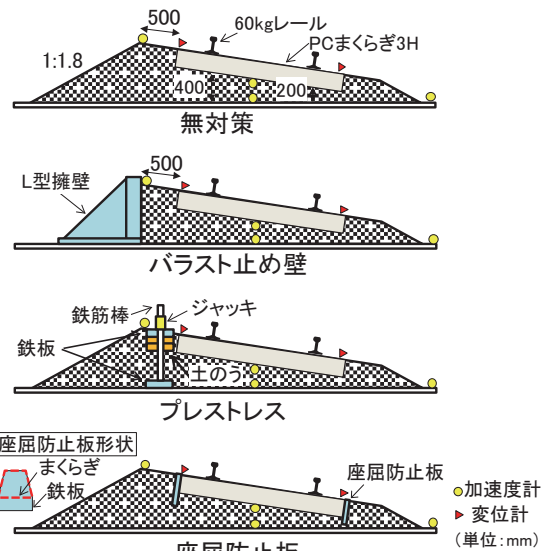


図 3 各種座屈対策工の概要 (断面)

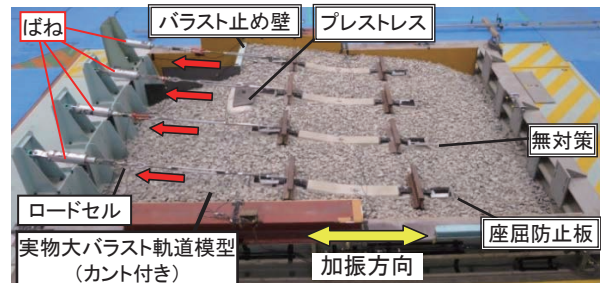


図 4 大型振動台試験の試験状況

を道床に与える応力レベル (鉛直応力 100kPa) とした。座屈防止板は、鉄板をまくらぎ両端部にそれぞれボルトで固定した。

表1 試験条件（加振試験）

試験ケース	横方向荷重	加振ステップ
バラスト止め壁	4kN	①正弦波 2.0m/s ²
	0kN	②正弦波 4.0m/s ²
プレストレス	4kN	③中越波 6.0m/s ²
	0kN	④中越波 7.0m/s ²
無対策	4kN	⑤正弦波 6.0m/s ²
	0kN	⑥正弦波 7.0m/s ²
座屈防止板	4kN	⑦正弦波 8.0m/s ²
	0kN	⑧正弦波 9.0m/s ²

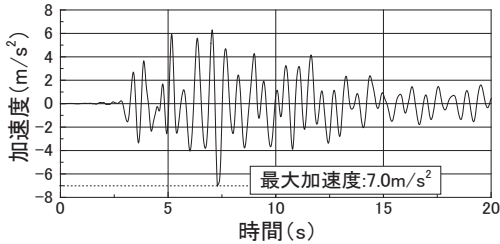


図5 中越波の波形

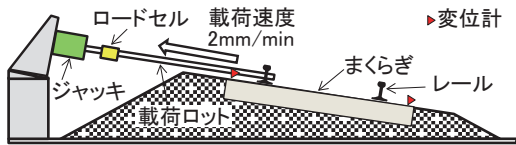


図6 道床横抵抗力試験の条件

2.3 試験条件

加振試験の試験条件を表1に示す。加振波形は、正弦波（載荷周波数3Hz、正弦波10波）および実地震波である。実地震波は新潟県中越地震における十日町高架橋上面の応答波である⁶⁾（図5）。加振方式はステップ加振であり、表1に示す①～⑧の順序にて、正弦波または中越波の最大加振加速度を設定して加振を行った。レールの温度上昇により軌道を横変位させようとする横方向荷重は0kNと4kNの2種類である。

道床横抵抗力試験は、横方向荷重4kNの場合の加振試験前および横方向荷重0kNの場合の加振試験後の供試体を用いて、レールに載荷ロッドを設置し、ジャッキにより載荷を行った。載荷速度は2mm/minであり、載荷方向は外軌側のまくらぎ長手方向である（図6）。計測項目は、載荷荷重とまくらぎ両端部のまくらぎ変位とした。

3. 試験結果

3.1 加振前後の道床横抵抗力特性

図7に加振前後における道床横抵抗力試験の結果を示す。ここで、まくらぎ1本を水平に載荷した際のまくらぎ変位2mm時における荷重が、一般的に軌きょう全体が移動した場合の道床横抵抗力と概ね等しくなるとされている⁷⁾。そこで、加振前の道床横抵抗力はまくらぎ変位2mm時の荷重で評価した。加振前の道床横抵抗力

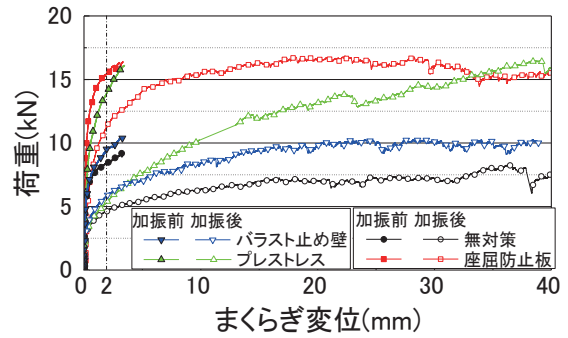


図7 加振前後の道床横抵抗力

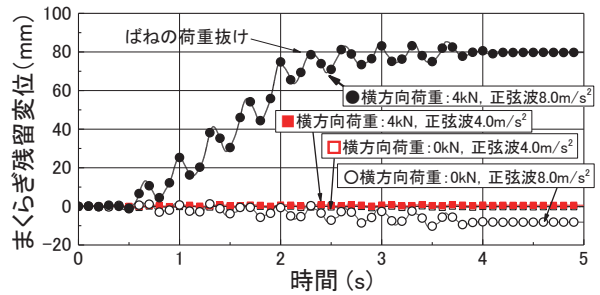


図8 まくらぎ変位波形（無対策）

は、無対策が8.4kNであるのに対して、バラスト止め壁が9.5kN、座屈防止板が15.5kNおよびプレストレスが14.0kNであった。バラスト止め壁は無対策よりも2割程度大きく、座屈防止板およびプレストレスが無対策の2倍程度の道床横抵抗力を発揮した。

加振後は、内軌側に最大10mm程度のまくらぎ残留変位が生じた試験ケースがあり、まくらぎ変位2mm時の評価が困難となったため、荷重が概ね一定となるまくらぎ変位30～40mmにおける荷重の平均値で、加振後の道床横抵抗力を比較した。加振後の道床横抵抗力は、無対策が7.5kNであるのに対して、バラスト止め壁が9.9kN、座屈防止板が15.4kN、プレストレスが15.5kNであった。バラスト止め壁は無対策よりも3割程度大きく、座屈防止板およびプレストレスが無対策の2倍程度の道床横抵抗力を発揮した。以上より、各種座屈対策工を施すことで、加振前後とも無対策に対して道床横抵抗力が向上することがわかった。

3.2 加振中の変形特性

3.2.1 加振中のまくらぎ変位

図8～図11に、各試験ケースにおける加振中のまくらぎ変位波形を示す。加振波形は正弦波4.0m/s²および正弦波8.0m/s²であり、横方向荷重が0kNおよび4kNである。

図8より、無対策の正弦波4.0m/s²の場合、横方向荷重4kNが作用していてもまくらぎ変位はほとんど発生しなかった。正弦波8.0m/s²の横方向荷重4kNの場合では、加振中にまくらぎ残留変位が80mm程度まで急増し、

特集：軌道技術

加振途中でばねが伸びきり、横方向荷重が抜けたことでまくらぎ残留変位は80mm程度で一定となった。これは、加振中に道床横抵抗力が低下したことによるものと考えられる。正弦波 8.0m/s² の横方向荷重 0kN の場合はまくらぎ変位が小さく、加振中に横方向荷重の作用方向とは逆の内軌側へ徐々にまくらぎ残留変位が生じた。これは、加振により道床両肩部が崩壊したことに伴い、カント勾配で自重が作用している内軌側にまくらぎが変位したものと考えられる。

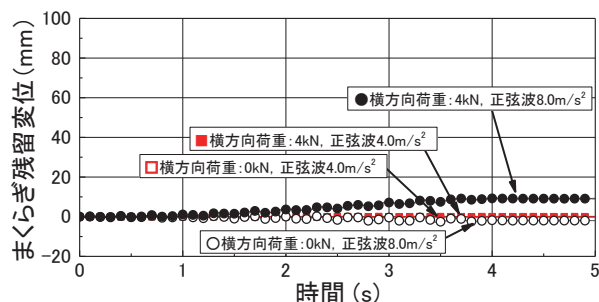


図9 まくらぎ変位波形 (バラスト止め壁)

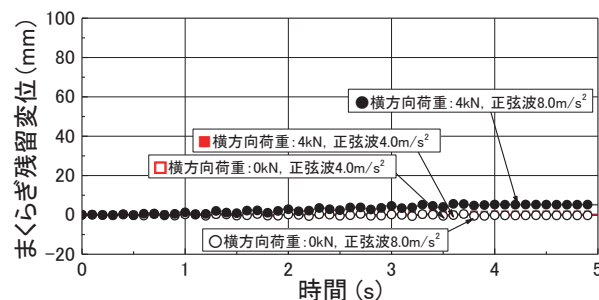


図10 まくらぎ変位波形 (座屈防止板)

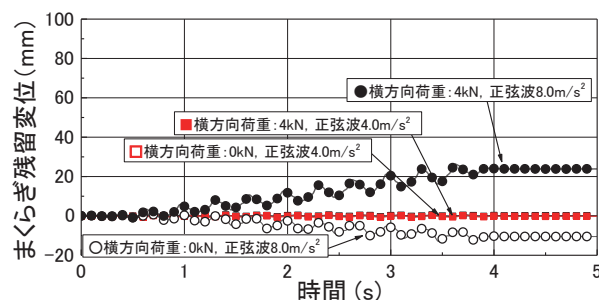


図11 まくらぎ変位波形 (プレストレス)

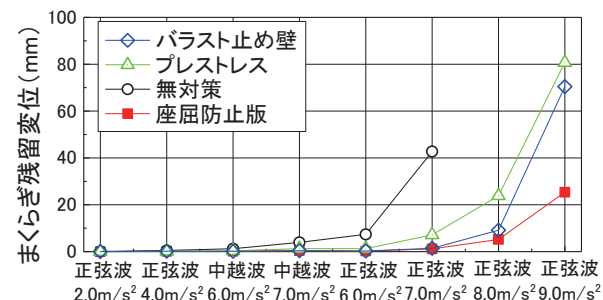


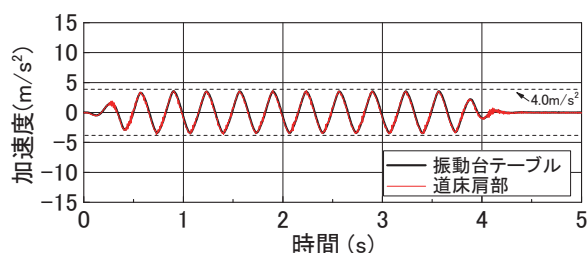
図12 各加振ステップのまくらぎ残留変位 (横方向荷重 4kN の場合)

図9および図10より、バラスト止め壁および座屈防止板のまくらぎ残留変位は、横方向荷重 4kN の場合、加振中にわずかに増加するものの、どちらのケースも 10mm 以下と小さく、無対策と比較してまくらぎ変位を大きく抑制できていることがわかる。また、横方向荷重 0kN の場合のまくらぎ残留変位はわずかであった。

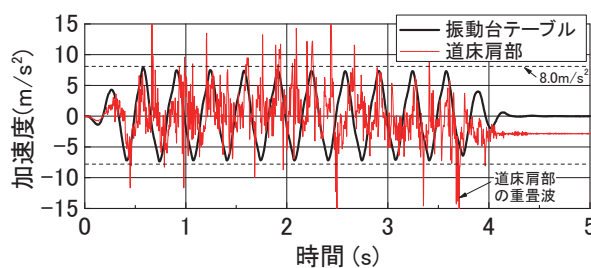
図11より、プレストレスでは、横方向荷重 4kN の場合、加振中のまくらぎ変位がやや大きく、加振後に 23.9mm のまくらぎ残留変位が生じた。無対策と比較してまくらぎ変位を抑制できているものの、他2つの対策工よりもやや大きな残留変位が生じた。また、横方向荷重 0kN の場合は無対策の場合と同様に内軌側に 10mm 程度のまくらぎ残留変位が生じた。

図12に中越波での各加振ステップにおけるまくらぎ残留変位を示す。どのケースも加振加速度の増加とともにまくらぎ残留変位は増加しており、正弦波 7.0m/s² において、無対策のまくらぎ残留変位が 40mm 程度まで急増した。3種類の各座屈対策工は正弦波 7.0m/s² の場合にプレストレスが 7.1mm、バラスト止め壁が 1.4mm、座屈防止板が 1.1mm であり、変位抑制効果が発揮されていることが確認された。正弦波 9.0m/s² の場合のまくらぎ残留変位は、プレストレスが 80.1mm、バラスト止め壁が 70.4mm 程度であり、座屈防止板が 25.3mm であった。なお、無対策は正弦波 8.0m/s² 加振中にまくらぎ残留変位が増大してばねによる横方向荷重が抜けてしまったために、評価できなかった。

以上より、座屈防止板のまくらぎ変位抑制効果が最も高く、次いでバラスト止め壁であったが、正弦波 8.0m/s² まで両者の変位抑制効果は概ね同程度であった。座屈防止板は道床横抵抗力の向上効果により加振中のまくらぎ変位を抑制し、バラスト止め壁は道床横抵抗力の向上効

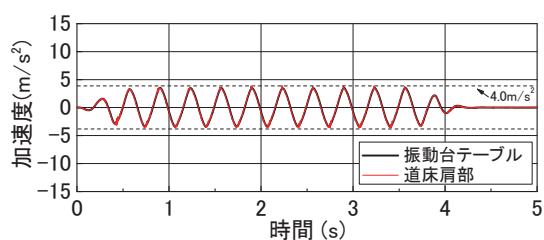


(a) 無対策 (正弦波 4.0m/s²)

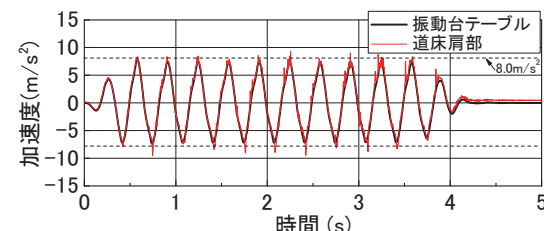


(b) 無対策 (正弦波 8.0m/s²)

図13 道床肩部の応答加速度波形 (横方向荷重 4kN)

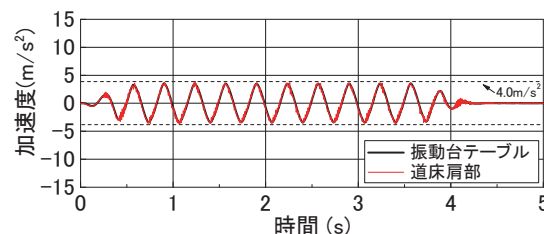


(a) バラスト止め壁(正弦波4.0m/s²)

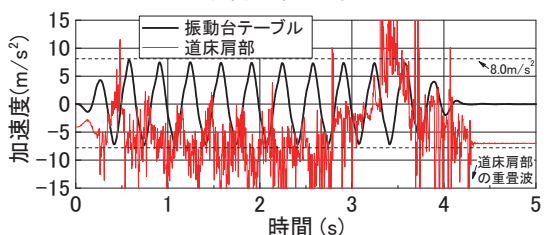


(b) バラスト止め壁(正弦波8.0m/s²)

図14 道床肩部の応答加速度波形(横方向荷重4kN)

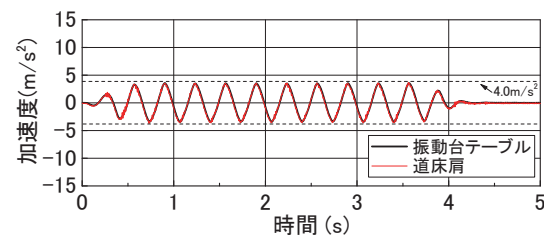


(a) 座屈防止板(正弦波4.0m/s²)

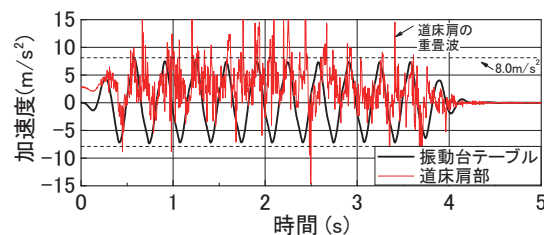


(b) 座屈防止板(正弦波8.0m/s²)

図15 道床肩部の応答加速度波形(横方向荷重4kN)



(a) プレストレス(正弦波4.0m/s²)



(b) プレストレス(正弦波8.0m/s²)

図16 道床肩部の応答加速度波形(横方向荷重4kN)

果自体は高くないもの(図7)、加振中の変位抑制効果が座屈防止板と同程度であった。

3.2.2 加振中の応答加速度

図13～図16に各ケースの道床肩部の応答加速度波形と振動台テーブルの加振波形を、図17～図21に各ケースのまくらぎ直下の道床および道床底部の応答加速度波形と振動台テーブルの加振波形を示す。図13～図16は横方向荷重4kNの正弦波4.0m/s²および正弦波8.0m/s²の場合を、図17～図20は横方向荷重4kNの正弦波8.0m/s²の場合を示した。

図13(a)、図14(a)、図15(a)および図16(a)より、正弦波4.0m/s²の場合、道床肩部と振動台テーブルの加速度波形は、どのケースにおいても、ほぼ一致していることがわかる。正弦波8.0m/s²の場合、道床肩部の応答加速度は、バラスト止め壁以外の試験ケースにおいて顕著な高調波が重畳しており、振動台テーブルと全く異なる波形を示している(図13(b)、図15(b)および図16(b))。正弦波8.0m/s²では道床肩部が大きく崩れたことから、加速度計を固定した道床肩部のバラストが振動台テーブルの加振波形と異なる挙動を示したと考えられる。一方、バラスト止め壁(図14(b))は、多少の高調波が重畳しているものの、振動台テーブルの加振波形に近い波形を示している。これは、道床肩部の変形が抑制されたことによるものと考えられる。

以上より、バラスト止め壁以外の試験ケースは、最大加速度作用時に道床肩部の大きな変形により、まくらぎ端面の道床横抵抗力が低下して、まくらぎ残留変位が生じたものと考えられる。バラスト止め壁は道床肩部の変形が抑制されたことで、加振時の道床横抵抗力の低下およびまくらぎ残留変位が抑制されたと考えられる。

図17～図20より、道床底部に設置した道床バラストの応答加速度は、全ケースにおいて振動台テーブルとほぼ同様の波形を示していることから、道床底部の変形に及ぼす加振の影響は小さいと考えられる。

無対策の場合(図17)、正弦波8.0m/s²加振時におけるまくらぎ直下の道床の応答加速度波形に高調波が重畳した。これは、まくらぎ直下の道床が加振により大きく変形したためと考えられる。また、まくらぎ直下の道床が変形したことにより、まくらぎ底面が分担する道床横抵抗力も低下したと考えられる。

バラスト止め壁および座屈防止板の場合(図18、図19)、正弦波8.0m/s²加振時におけるまくらぎ直下の道床の応答加速度は振動台テーブルと概ね同様であり、まくらぎ底面が分担する道床横抵抗力の低下が生じにくかったと考えられる。

プレストレスの場合(図20)、正弦波8.0m/s²加振時におけるまくらぎ直下の道床の応答加速度波形に、高調波が重畳した。これは、無対策と同様にまくらぎ直下の

特集：軌道技術

道床が変形したことを示すものであり、まくらぎ底面の道床横抵抗力も低下したと考えられる。

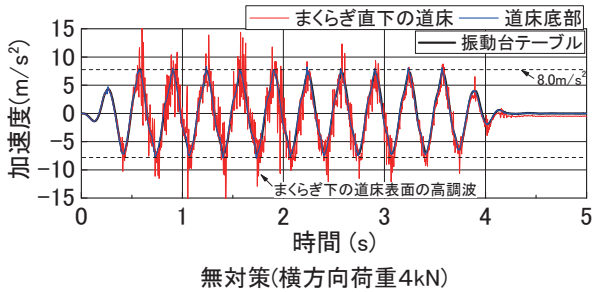


図 17 まくらぎ直下の道床および道床底部の
応答加速度波形（正弦波 8.0m/s²）

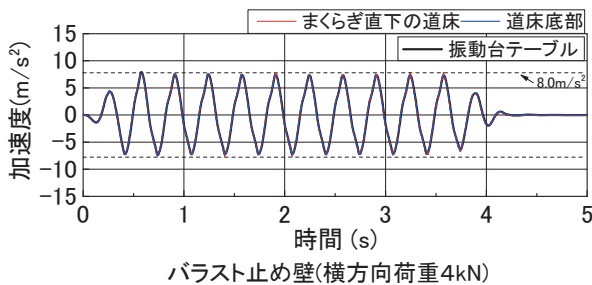


図 18 まくらぎ直下の道床および道床底部の
応答加速度波形（正弦波 8.0m/s²）

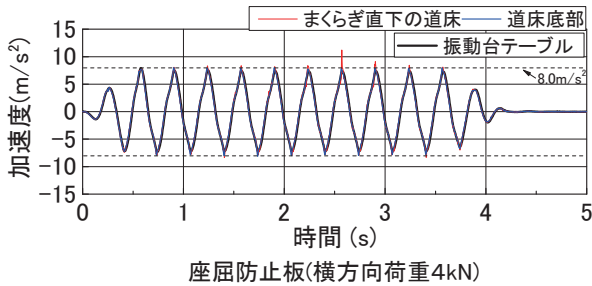


図 19 まくらぎ直下の道床および道床底部の
応答加速度波形（正弦波 8.0m/s²）

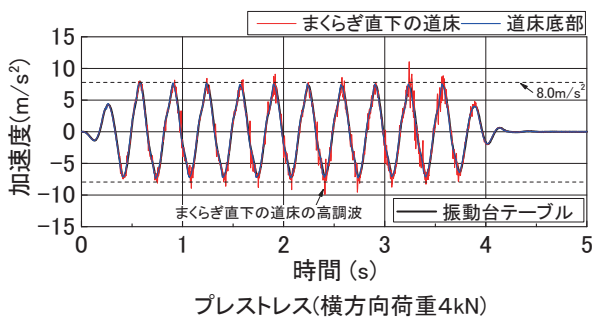


図 20 まくらぎ直下の道床および道床底部の
応答加速度波形（正弦波 8.0m/s²）

4. まとめ

実物大バラスト軌道模型を用いた大型振動台試験を行い、座屈対策工を施したバラスト軌道の地震時道床横抵抗力を検討した。

以下に得られた主な知見を示す。

- 1) 加振前の道床横抵抗力は、座屈防止板およびプレストレスを用いることで無対策の2倍程度、バラスト止め壁では無対策の2割程度まで増加し、加振後は座屈防止板およびプレストレスが無対策の2倍程度、バラスト止め壁では無対策の3割程度大きかった。各種座屈対策工を施すことで、加振前後とも道床横抵抗力が向上することがわかった。
- 2) 無対策の場合は、正弦波 7.0m/s² 加振中に 40mm を超えるまくらぎ残留変位が生じたのに対して、各種対策工の場合、加振中の残留変位が 10mm 以下となった。座屈防止板が加振中のまくらぎ残留変位を最も抑制し、次いでバラスト止め壁、プレストレスの順にまくらぎ変位抑制効果が見られた。
- 3) バラスト止め壁による道床横抵抗力の増加は座屈防止板やプレストレスより小さいが、道床肩部の変形に伴う道床横抵抗力の低下が抑制されることで、加振中のまくらぎ変位が小さくなったと考えられる。

文献

- 1) (財) 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、鉄道総研報告、特別第4号、pp.86-93, 1996
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 - 土構造物、丸善、2007
- 3) 中村貴久、関根悦夫、白江雄介：大型振動台試験によるバラスト軌道の耐震性能評価、鉄道総研報告、Vol.24, No.12, 2010
- 4) 中村貴久、桃谷尚嗣、早野公敏、小川隆太：地震時におけるバラスト軌道の道床横抵抗力特性、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、Vol.70, No.3, 2014
- 5) 関根悦夫、中村貴久、平尾博樹：バラスト軌道の道床横抵抗力に関する模型試験、土木学会第65回年次学術講演会、第IV部門、pp.473-474, 2010
- 6) 地震による新幹線脱線シミュレーション解析グループ：新潟県中越地震新幹線脱線シミュレーション解析、鉄道総研報告、特別第52号、2008
- 7) (公財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造、2012