

# 大型振動台試験によるバラスト軌道の耐震性能評価

中村 貴久\* 関根 悦夫\* 白江 雄介\*\*

Assessment of Aseismic Performance of Ballasted Track for Large-Scale Shaking Table Test

Takahisa NAKAMURA Etuso SEKINE Yusuke SHIRAE

The authors performed shaking table tests to evaluate the aseismic performance of ballasted track by using full-scale models. The test results showed that in case of the ballasted track without any countermeasures, the amplitude of lateral displacement and the residual displacement increased because the lateral resistance of ballasted track significantly decreased in case the earthquake acceleration acting on ballasted track exceeded around 800 gals. Furthermore, the authors concluded that the decrease of lateral resistance of ballasted track was prevented by applying some adequate countermeasures against track buckling.

キーワード：バラスト軌道，耐震性能，大型振動台試験，道床横抵抗力，座屈対策工

## 1. はじめに

日本は世界有数の地震国であり、地震に対する鉄道構造物の安全性を高めることは重要な課題である。

1980年代にバラスト軌道の地震被害に関する調査が行われており<sup>1)</sup>、列車の走行安全性が損なわれた事例の中に、軌道を支持する下部構造物の変状に起因したものと、下部構造物に変状が見られないが、道床横抵抗力の低下によるバラスト軌道の座屈に起因したものが報告されている。また、地震被害調査結果を受けて、地震時における道床横抵抗力の低下に関する研究が行われ、実物大軌道模型を用いた大型振動台試験より<sup>2)</sup>、<sup>3)</sup>、加振中の道床横抵抗力の低下率と加振加速度の関係が検討されたが、加振によるバラスト軌道の变形特性や加振後の道床横抵抗力について十分な検討は行われていない。

一方、1995年の兵庫県南部地震以降、各種鉄道構造物の下部構造物に対して、「鉄道構造物等設計標準(耐震設計)」<sup>4)</sup>が整備されており、その中で、想定地震動と構造物の重要度に応じた耐震性能を定めて照査を行う設計手法が採用されている。しかし、軌道構造物に対しては耐震設計法が整備されておらず、地震後の復旧性等を考慮した耐震性能の評価を行う必要がある。

そこで、地震時におけるバラスト軌道の变形特性および地震後のバラスト軌道の道床横抵抗力について検討するため、大型振動台試験によりバラスト軌道を加振し、その後、バラスト軌道に対して道床横抵抗力試験を行い、耐震性能を評価した。

## 2. 大型振動台試験

鉄道総研の大型振動試験装置を用いて、バラスト軌道に対し、レール直角水平方向に正弦波および地震波による加振試験を行った。大型振動試験装置の概要を図1に示す。加振方式は油圧サーボ方式である。試験土槽は、X軸7m、Y軸5m、高さ0.6mの鉄製であり、振動台テーブル上にボルトで剛結した。

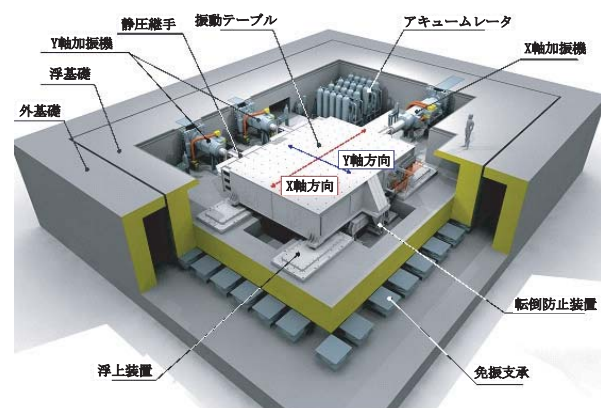


図1 大型振動台試験装置の概要

### 2.1 実物大軌道模型の概要

実物大軌道模型は、新幹線標準断面形状のバラスト軌道を想定し、道床厚300mm、道床肩幅500mmとした。図2(a)に示すように、無対策の場合は、4Tまくらぎおよび3Hまくらぎの2種類のまくらぎについて軌道模型を構築し、座屈対策工の場合は、図2(b)に示すように、座屈防止板およびバラスト止め壁の2種類の座屈対策を行った軌道模型を構築した。なお、各座屈対策工ケース

\* 軌道技術研究部(軌道・路盤)

\*\* 前軌道技術研究部(現四国旅客鉄道株式会社)

特集：軌道技術

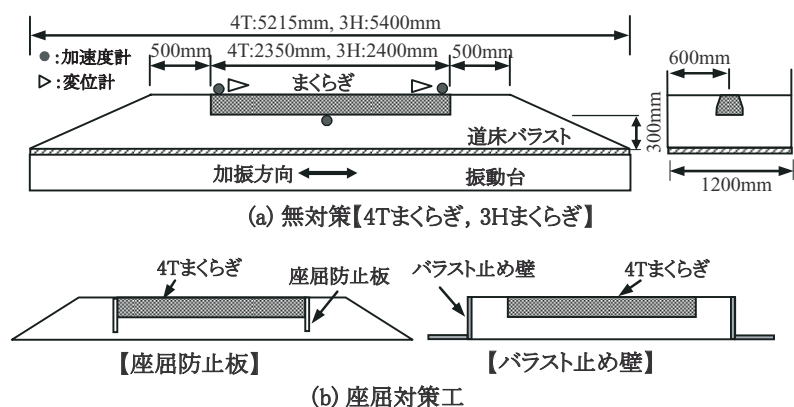


図2 実物大軌道の概要

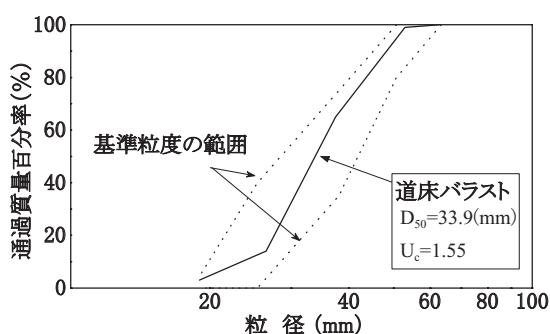


図3 道床バラストの粒度分布

に使用したまくらぎは4Tまくらぎである。バラスト道床は、密度 $1.6t/m^3$ を目標に振動パイプレーターにより転圧して作製した。使用した道床バラストは安山岩であり、粒度分布を図3に示す。

2.2 座屈対策工の概要

これまでの研究より、道床横抵抗力は、まくらぎの端面、側面、底面の各面において生じる抵抗力の和で表せることがわかっている<sup>5), 6)</sup>。本試験で検討する座屈対策工は、どちらも主にまくらぎ端面の抵抗力の向上および保持を目的とするものである。座屈防止板は、4Tまくらぎ断面よりも約3.5倍の面積の鉄製の板をまくらぎ両端部にボルト固定したものであり、端面の抵抗力の向上が期待できる。バラスト止め壁は、まくらぎ端から500mmの位置に振動台と剛結することで、バラスト流動に伴う端面抵抗力の低下の防止が期待できる。また、無対策ケースに用いた3Hまくらぎは4Tまくらぎよりも重量が1.26倍、端面の断面積が1.16倍大きいことから、底面および端面の抵抗力の向上が期待できる。

2.3 試験条件

大型振動台試験ケース一覧を表1に示す。加振試験は、正弦波と地震波の2種類の波形について行った。

正弦波加振の場合は、加振時におけるバラスト軌道の基本特性を検討するため、図4に示すように、まくらぎ

1本からなる軌道模型に対して、载荷周波数3Hz、正弦波10波の加振を行うこととした。加振は、加振加速度200galから200gal刻みで増加させるステップ加振により行い、最大加振加速度は800galとした。

地震波加振の場合は、地震時における実バラスト軌道の変形特性を検討するため、図5に示すように、まくらぎ5本からなる軌道模型に対して、実地震波による加振を行うこととした。加振波形には、L2地震動を想定し、釧路沖地震波(釧路地方気象台記録NS)を用いた。釧路沖地震波は海洋型地震波(スペクトルI)であり、図6に示すように、地震動の継続時間が長く波数が多い。なお、本試験の加振は加速度制御方式とした。

供試体の加速度および変位については、図2に示すように、まくらぎ両端部に加速度および変位計を、まくらぎ中央部直下の道床および試験土槽に加速度計を設置して計測した。また、加振前後において、道床形状を測定した。

表1 大型振動台試験ケース一覧

軌道模型		加振波形				
まくらぎ種別	座屈対策工	正弦波 (gal)				地震波波
		200	400	600	800	釧路波
4T	無対策	○	○	○	○	○
	座屈防止板	-	-	-	○	○
	バラスト止め壁	-	-	-	○	-
3H	無対策	○	○	○	○	-

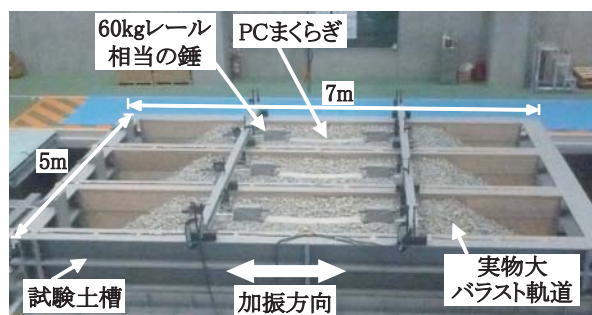


図4 正弦波加振試験の供試体概要

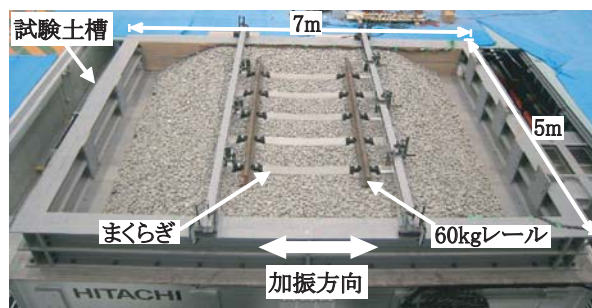


図5 地震波加振試験の供試体概要

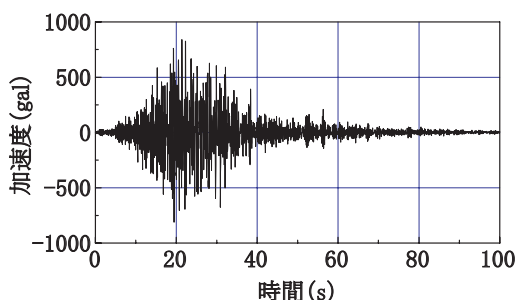


図6 釧路沖地震波

## 2.4 試験結果

### 2.4.1 加振加速度とまくらぎ変位の関係

図7に各正弦波ステップ加振時および地震波加振時におけるまくらぎ変位振幅と加振加速度との関係を、図8に各正弦波ステップ加振後のまくらぎ残留変位と加振加速度との関係を示す。ここで、まくらぎ変位振幅とは、試験土槽とまくらぎの相対変位であり、正弦波加振時には10波目の最大変位振幅、地震波加振時には最大変位振幅である。

正弦波加振の場合は、無対策および座屈対策工とも、加振加速度が増加するとまくらぎ変位振幅は増加し、概ね加振加速度が600gal付近を超えると急増する傾向にある。また、まくらぎ残留変位も、加振加速度が600galを超えると急増する傾向にあることがわかる。次に、地震波加振の場合、まくらぎ変位振幅は、無対策の4Tまくらぎで、正弦波800gal加振時よりも2倍程度大きく、座屈防止板で、正弦波800gal加振の場合の半分程度であった。一方、まくらぎ残留変位はどちらの場合においても正弦波800gal加振の場合と同程度であった。

### 2.4.2 加振加速度応答倍率と面積比の関係

これまでの検討より道床横抵抗力はまくらぎ端部の道床バラストの状態に影響を受けることがわかっている<sup>7)</sup>。そこで、まず、無対策について、各ステップ加振で測定した道床肩部の形状より各加振前後の面積比を算出した。この面積比とまくらぎおよび道床の加速度応答倍率について整理したものを図9および図10に示す。なお、加速度応答倍率は、試験土槽の加速度とまくらぎおよび道床の加速度との比で整理したものであり、正弦波加振の場合は10波目のピーク加速度について、地震波加振の場合は試験土槽の加速度が最大となったときの応答加速度について整理した。

図9から、加振により道床肩部の面積比が低下すると、まくらぎ加速度応答倍率は増加する傾向にあり、特に、800gal加振後の面積比の減少が著しく、加速度応答倍率が急増していることがわかる。これは、800gal加振により道床肩部の崩壊が進み、道床肩部のバラスト剛性が著しく低下したことによるものと考えられる。また、図10から、600gal程度の加振まで、道床肩部の面積比が低下しても、まくらぎ中央部直下の道床の応答加速度は概ね

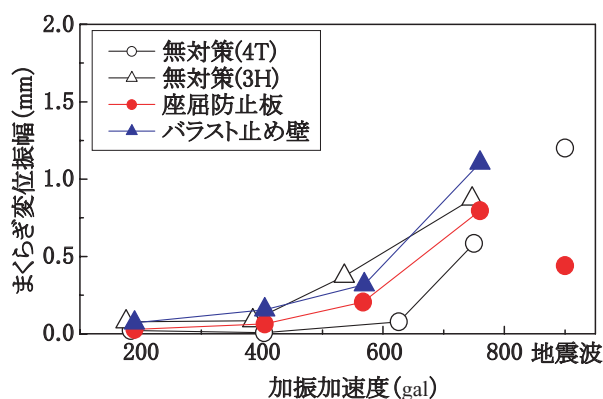


図7 まくらぎ変位振幅と加振加速度の関係

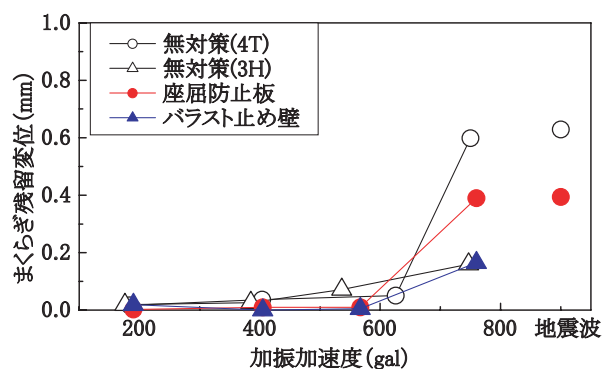


図8 まくらぎ残留変位と加振加速度の関係

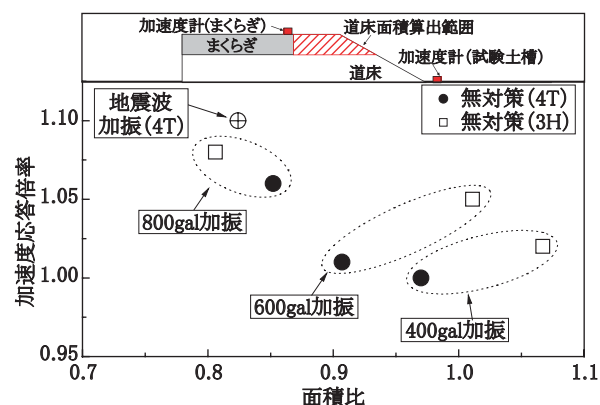


図9 まくらぎ加速度応答倍率と面積比との関係

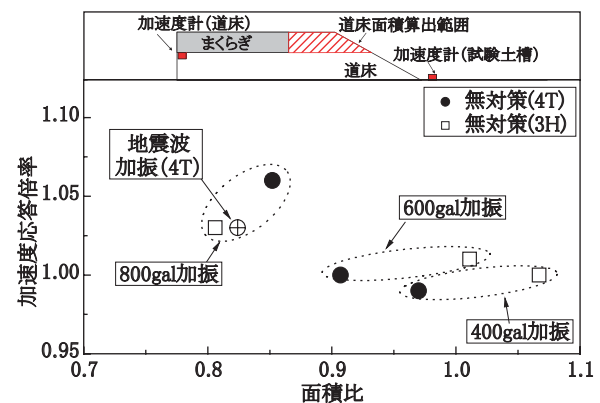


図10 道床加速度応答倍率と面積比との関係

一定となっており、800gal程度の加振により道床の加速度応答倍率が急増していることがわかる。これは、

特集：軌道技術

800gal程度の加振により、道床肩部の剛性低下が著しく進み、まくらぎ中央部直下の道床のバラスト剛性も低下したことによるものと考えられる。地震波加振の場合は、まくらぎおよび道床の加速度とも、正弦波800gal加振の場合の加速度応答倍率とほぼ同じ傾向であった。

3. 道床横抵抗力試験

本試験は、「2.大型振動台試験」により加振されたバラスト軌道に対して、まくらぎを水平方向に載荷する道床横抵抗力試験である。

3.1 試験条件

試験ケースは、無対策2種類（4Tまくらぎ、3Hまくらぎ）と座屈対策工2種類（座屈防止板、バラスト止め壁）の各軌道模型に対して、各正弦波ステップ加振および地震波加振を行った場合の計16ケースである。試験ケース一覧を表2に示す。

道床横抵抗力試験の概要と試験状況を図11および図12に示す。本試験は、載荷装置を用いてまくらぎ1本に対し、載荷速度2mm/minでまくらぎ長手水平方向に載荷を行うものである。図11に示すように、まくらぎ水平変位は、まくらぎ両端部に設置した変位計により計測し、荷重はロードセルにより計測した。

表2 道床横抵抗力試験ケース一覧

軌道模型		加振条件					
まくらぎ種別	座屈対策工	無加振	正弦波 (gal)				地震波 釧路波
			200	400	600	800	
4T	無対策	○	○	○	○	○	○
	座屈防止板	○	-	-	-	○	○
	バラスト止め壁	○	-	-	-	○	-
3H	無対策	○	○	○	○	○	-



図11 道床横抵抗力試験の概要

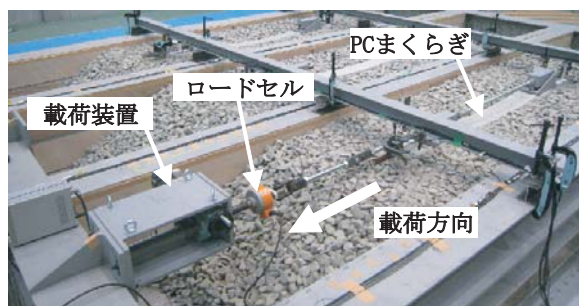


図12 道床横抵抗力試験の試験状況

3.2 試験結果

3.2.1 正弦波加振後の道床横抵抗力

正弦波加振後の道床横抵抗力試験結果を図13～図16に示す。まず、図13および図15より、無対策の4T、3Hまくらぎの場合、断面積が広く、重量の重い3Hまくら

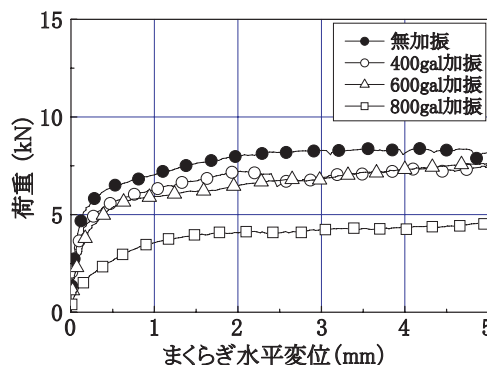


図13 まくらぎ水平変位と荷重の関係（無対策4T）

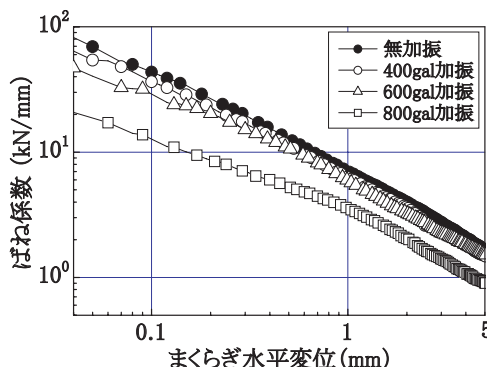


図14 まくらぎ水平変位とばね係数の関係（無対策4T）

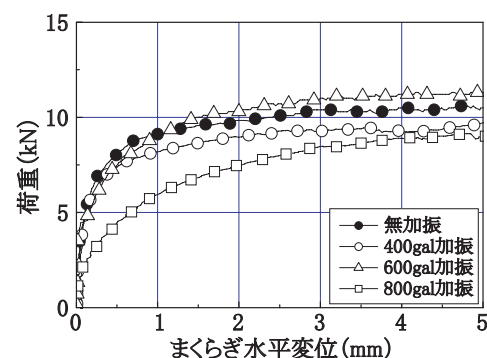


図15 まくらぎ水平変位と荷重の関係（無対策3H）

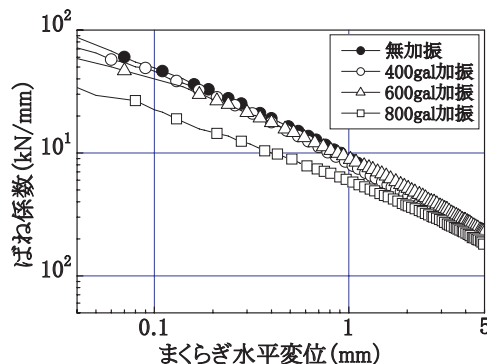


図16 まくらぎ水平変位とばね係数の関係（無対策3H）

ぎの方が4Tまくらぎよりも、全体的に高い抵抗力を示していることがわかる。また、どちらのまくらぎの場合においても、加振加速度600gal程度までの加振では、無加振時とほぼ同程度の荷重を示しており、加振加速度が800galになると、载荷初期より荷重が低下していることがわかる。これまでの研究から、道床横抵抗力は、強度特性として载荷初期にまくらぎ側面と底面のバラスト状態の影響を大きく受け、まくらぎ水平変位が進むとまくらぎ端部のバラスト状態の影響を大きく受けるようになることがわかっている<sup>6)</sup>。したがって、道床横抵抗力は、加振加速度が600gal程度になると、まくらぎ端部周辺のバラスト剛性の低下に起因して低下し、加振加速度が800galになると、まくらぎ端面だけではなく、側面および底面のバラストも剛性が低下するため、荷重が著しく低下したものと考えられる。また、荷重とまくらぎ水平変位より算出したばね係数とまくらぎ水平変位の関係(図14および図16)より、4T、3Hまくらぎのどちらの場合においても、加振加速度が大きくなるほどばね係数が低下する傾向にあり、特に加振加速度が800galになると急激に低下していることがわかる。

続いて、加振によるまくらぎ端面の道床バラスト状態の変化が道床横抵抗力に及ぼす影響を検討するため、無対策の4Tまくらぎおよび3Hまくらぎについて、加振前後での道床肩部の面積比と、各ステップ加振後と無加振での道床横抵抗力(水平変位2mm時の荷重)の比で整理した結果を図17に示す。同図より、加振による道床横抵抗力の低下率は道床肩部の面積比と概ね比例関係にあり、加振加速度800galでは、どちらの場合においても、道床肩部の崩壊とともに道床横抵抗力が著しく低下していることがわかる。

次に、座屈対策工の場合について、まくらぎ水平変位と荷重の関係を図18に示す。座屈防止板は、加振加速度が800galになると荷重が低下するものの、バラスト止め壁よりも全体的に高い抵抗力を示していることがわかる。また、座屈防止板は、加振加速度が800galになると、水平変位0.2mm程度までは無加振時とほぼ同程度の荷重

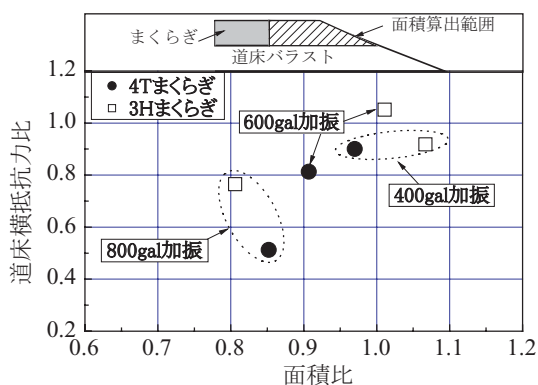


図17 面積比と道床横抵抗力比(無対策4T, 3H)

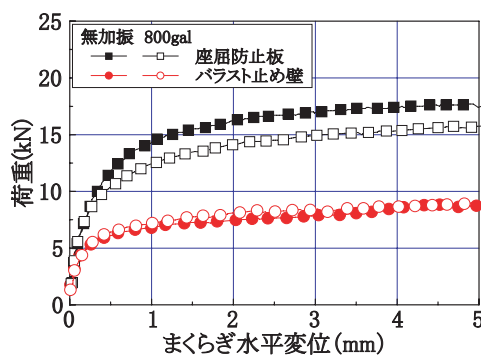


図18 水平変位と荷重の関係(座屈対策工)

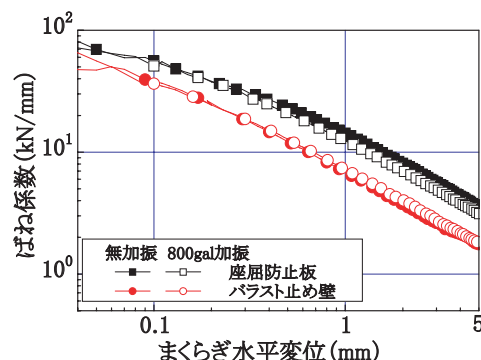


図19 水平変位とばね係数の関係(座屈対策工)

であるが、その後、水平変位が進むと荷重が無加振時よりも低くなっている。これは、まくらぎ側面および底面のバラスト剛性が保持され、加振によりまくらぎ端面付近のバラスト剛性が低下したことによるものと考えられる。

バラスト止め壁は、加振加速度が800galであっても道床形状にほとんど変化が見られず、道床横抵抗力もほとんど低下していない。これは、道床肩部の拘束による座屈防止効果が発揮されたことによるものと考えられる。

図19より、座屈防止板は、バラスト止め壁よりもかなり大きいばね係数を示していることがわかる。また、加振加速度が800galになると、荷重と同様に座屈防止板のばね係数がやや低下するが、バラスト止め壁のばね係数にはほとんど変化がないことがわかる。

### 3.2.2 地震波加振後の道床横抵抗力

図20および図21にまくらぎ5本からなる軌道模型に対する地震波加振後の道床横抵抗力試験の結果を示す。無対策の4Tまくらぎおよび座屈防止板のどちらにおいても、荷重およびばね係数は無加振時に比べ、载荷初期で低下している。また、まくらぎ1本の軌道模型に対する正弦波800gal加振後と比較して、その低下傾向は、無対策の4Tまくらぎで小さく、座屈防止板ではやや大きい。

### 3.2.3 加振加速度が道床横抵抗力に及ぼす影響

図22に加振加速度と道床横抵抗力(水平変位2mm時の荷重)の関係を示す。無対策の4Tまくらぎおよび3Hまくらぎのどちらにおいても、加振加速度が増大すると道床横抵抗力が低下する傾向にあり、加振加速度800gal

特集：軌道技術

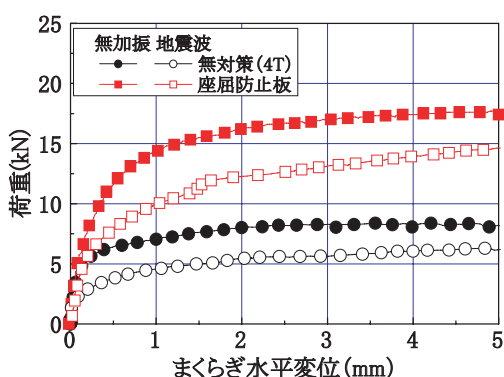


図20 水平変位と荷重の関係（地震波加振）

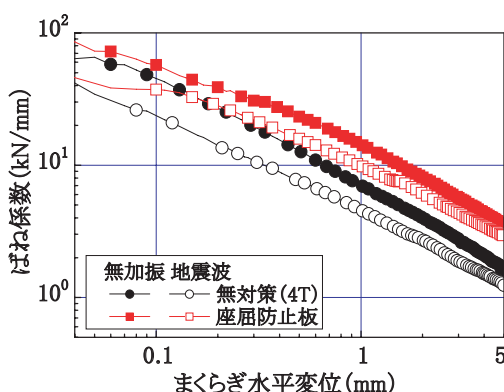


図21 水平変位とばね係数の関係（地震波加振）

でその傾向が顕著に表れている。座屈対策工については、座屈防止板の場合、加振加速度800galで荷重が低下する傾向にあるものの、加振加速度800galの座屈防止板の荷重は無加振時の無対策の4Tまくらぎよりも2倍程度大きく、地震波加振後においても無加振時の無対策の4Tまくらぎに比べて、かなり大きい道床横抵抗力を有していることがわかる。バラスト止め壁の場合は無加振時から道床形状にほとんど変化がなく、加振加速度800galでの道床横抵抗力が、無対策の3Hまくらぎと同程度であった。

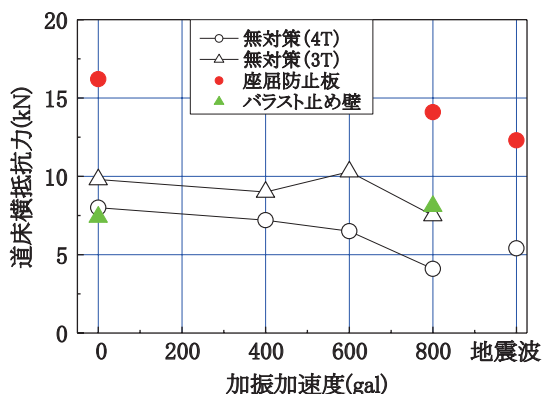


図22 加振加速度と道床横抵抗力

4. まとめ

バラスト軌道の耐震性能の評価として行った大型振動台試験より得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 正弦波による加振試験より、道床形状は、加振加速度が600gal程度までは加振を受けても形状に変化がなく、加振加速度が800gal程度になると道床肩部が崩壊し、道床バラストの剛性が低下する。
- (2) 道床横抵抗力は、加振加速度が600gal程度までは無加振時と同程度であり、加振加速度が800gal程度になると著しく低下する。
- (3) L2地震動を想定した釧路沖地震波による加振試験より、道床形状は正弦波800gal加振時と同程度まで道床肩部が崩壊し、道床横抵抗力も同程度まで低下する。
- (4) 各座屈対策工はどちらも一定の効果が見られ、特に、座屈防止板は、加振加速度800galの場合でも無対策の無加振時の2倍程度の道床横抵抗力を發揮し、最も座屈防止効果が高いと考えられる。
- (5) 加振による道床肩部の崩壊程度と道床横抵抗力の低下率は相関関係にある。

本研究により、加振時における実物大バラスト軌道の変形特性と、加振を受けたバラスト軌道の道床横抵抗力および座屈防止対策工の効果を確認した。今後は、地震動を受けたバラスト軌道の道床横抵抗力を定量的に評価できる手法の確立を行う予定である。

文献

- 1) 三浦重, 切敷啓介: 地震による列車および軌道の被害に關する文献調査, 鉄道技術研究所速報, No.82-45, 1982.3
- 2) 佐藤吉彦, 小林悟, 永田正巳: 地震時における道床横抵抗力, 鉄道技術研究報告, No.675, 1969.4
- 3) 佐藤吉彦, 高谷博文, 鈴木俊一: 軌道の地震時における座屈安定性の検討, 鉄道技術研究報告, No.1334, 1987.1
- 4) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計, 丸善, 1999.10
- 5) 佐藤吉彦, 宮井徹: 各種有道床まくらぎ軌道の道床横抵抗力とその特性, 鉄道技術研究所速報, No.76-150, 1976.11
- 6) 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, pp473-474, 2010.9
- 7) 平尾博樹, 関根悦夫: 模型バラスト軌道の振動台試験 その2 道床抵抗力, 土木学会第63回年次学術講演会, 第IV部門, pp147-148, 2008.9