

# 地震動を受けるバラスト軌道の道床横抵抗力の評価

中村 貴久\* 桃谷 尚嗣\*  
藪中 嘉彦\* 野村 清順\*

## Assessment of Lateral Resistance Force of Ballasted Track during Earthquakes

Takahisa NAKAMURA Yoshitsugu MOMOYA  
Yoshihiko YABUNAKA Kiyonori NOMURA

The authors performed shaking table tests using full-scale models to evaluate the lateral resistance force of the ballasted track during earthquakes. As a test conditions, the lateral force to induce track buckling was given to a sleeper using a special spring which could maintain a constant tension in the sleeper's longitudinal direction. We also evaluated the effect of the number of sleepers. The results of the shaking table test clarified that the lateral resistance force of the ballasted track decreased during an earthquake regardless of the number of sleepers and the sleeper's lateral displacement increased significantly even by lateral force smaller than the lateral resistance force of the ballasted track after shaking. The sleeper's lateral displacement increased during an earthquake more in cases where the number of sleepers is three than in cases where the number of sleepers is one.

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

### 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降，各種鉄道構造物に対して，「鉄道構造物等設計標準（耐震設計）」<sup>1)</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，バラスト軌道については，常時の設計法が定められているものの<sup>2)</sup>，地震時に対しては設計法が整備されておらず，列車走行安全性を考慮すると，耐震性能の評価を行う必要がある。

常時において道床横抵抗力を評価する際には，一般的に，まくらぎ1本を水平に載荷し，水平変位2mm時における水平荷重を最終道床横抵抗力としている<sup>2)</sup>。これは，まくらぎ1本を水平載荷した場合のまくらぎ水平変位2mm時における道床横抵抗力が，軌きょうの場合の最終道床横抵抗力の70～80%程度の値となること，およびまくらぎ1本の場合は，軌きょう全体が移動する場合と比較して道床横抵抗力が約15～20%程度高くなることから，まくらぎ1本の水平変位2mm時における道床横抵抗力は軌きょう全体が移動した場合の最終道床横抵抗力と概ね等しくなるためである<sup>2)</sup>。

これまでに，バラスト軌道の耐震性能に関して行われた研究において，まくらぎ1本の実物大模型を用いてL2地震動を想定した大型振動台試験を行い，地震後の道床横抵抗力が評価されてきた<sup>3)</sup>。しかし，地震中の道床横抵抗力は検討が行われておらず，また，まくらぎ本

\* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

数が複数本からなる軌きょうの場合の道床横抵抗力の特性についても，十分な検討が行われていない。

そこで，本研究では，加振中におけるバラスト軌道の座屈に対する抵抗力を定量的に評価する試験方法を開発し，実物大模型を用いた大型振動台試験により，加振中における道床横抵抗力の特性を検討した。また，まくらぎ本数が1本の場合と複数本の軌きょうの場合について，バラスト軌道の耐震性能を評価した。

### 2. 大型振動台試験

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。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

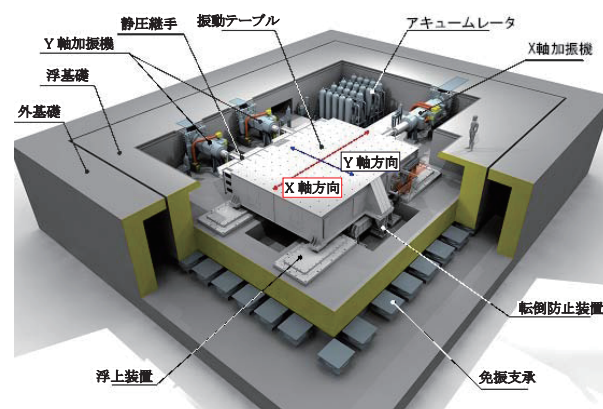


図1 大型振動試験装置の概要

特集：軌道技術

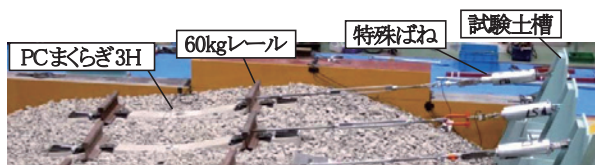


図2 特殊ばねによる横方向荷重の加振試験状況

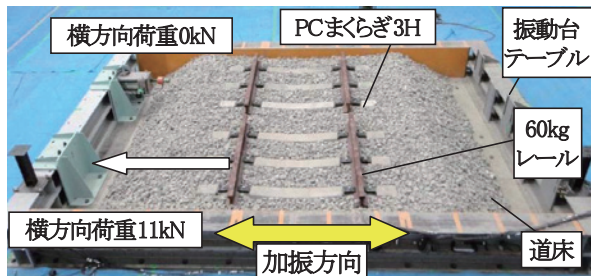


図3 大型振動台試験の状況（例：ケース2）

にボルトで剛結した。大型振動試験装置の概要を図1に示す。特殊なばねを用いることにより、加振中においても一定の横方向荷重をまくらぎに与えることができる試験方法を開発し、本試験に適用した。横方向荷重は、ロングレールが軌道を座屈させようとする荷重に相当する荷重であり、80～100mm程度のストロークに対して張力変化率が15%程度の特殊ばねを用いてまくらぎに作用させた。特殊ばねによる横方向荷重の加振試験状況を図2に示す。加振状況を図3に示す。

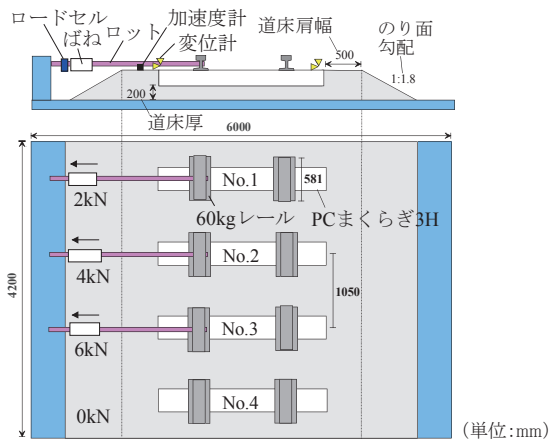
2.1 実物大軌道模型の概要

実物大軌道模型は、高架橋上における新幹線のバラスト軌道を想定し、道床厚200mm、道床肩幅500mm、のり面勾配1:1.8とした。軌道模型の諸元を表1に示す。なお、まくらぎ1本あたりのレール重量は、実軌道におけるまくらぎ間隔（レール25m/まくらぎ43本）より設定した。実物大模型の概要を図4に示す。模型は、まくらぎ1本の場合とまくらぎ3本の軌きょうの場合の2種類とした。高架橋上の新幹線バラスト軌道を想定し、バラスト・路盤間の摩擦係数を考慮するため、セメントボードを振動台テーブル上に設置した。その上に、新品バラストを投入し、道床密度1.6t/m<sup>3</sup>となるように振動パイプレーターを用いて締め固め、バラスト軌道を構築した。まくらぎ1本の場合は、まくらぎをレール長手方向に4本並べ、まくらぎ3本の場合はまくらぎ3本からなる軌きょうをレール長手方向に2組並べて、振動台テーブル上に配置した。実物大模型のまくらぎおよび軌きょうの配置間隔は、隣接するまくらぎまたは軌きょうの影響が小さくなるように設定した。

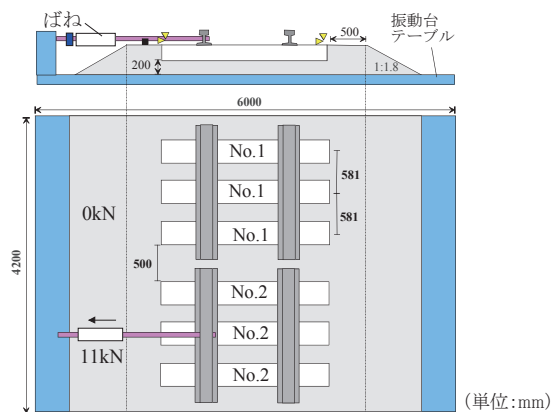
加振試験および道床横抵抗力試験の試験条件を表2に示す。加振波形は、正弦波（載荷周波数3Hz、正弦波10波）および地震波であり、加振方向はレール直角水平方向である。地震波は、図5に示す新潟県中越地震における十日町高架橋上面の応答波である<sup>4)</sup>（以下、「中越波」とい

表1 実物大模型の諸元

まくらぎ	JIS 3H まくらぎ
レール	JIS 60kg
まくらぎ間隔	581mm (3本模型の場合)
道床肩幅	500mm
道床厚	200mm



(a) ケース1:まくらぎ1本模型



(b) ケース2:まくらぎ3本模型

図4 実物大模型の概要

表2 試験条件

試験ケース	まくらぎ本数	まくらぎNo.	横方向荷重	道床横抵抗力試験	加振ステップ
ケース1	1本	1	2kN	-	①正弦波 2.0m/s <sup>2</sup>
		2	4kN	-	②正弦波 4.0m/s <sup>2</sup>
		3	6kN	加振前	③中越波 6.0m/s <sup>2</sup>
		4	0kN	加振後	④中越波 7.0m/s <sup>2</sup>
ケース2	3本	1	0kN	加振後	⑤正弦波 6.0m/s <sup>2</sup>
		2	11kN	加振前	⑥正弦波 7.0m/s <sup>2</sup> ⑦正弦波 8.0m/s <sup>2</sup>

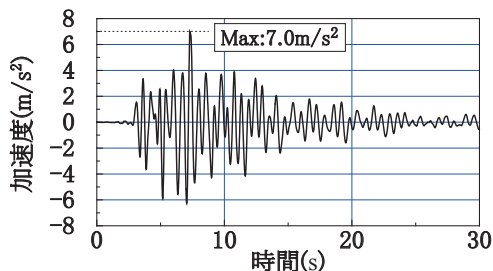


図5 加振試験の地震波形（中越波）

表3 横方向荷重とレール温度変化の関係

レールの温度変化	29℃	40℃	42℃	52℃
横方向荷重	2kN	3.7kN	4kN	6kN

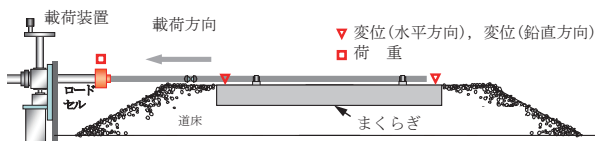


図6 道床横抵抗力試験の概要

う)。加振中に作用させる横方向荷重は、温度変化によりロングレールが軌道を座屈させようとする荷重を想定して、まくらぎ1本の場合が0kN, 2kN, 4kN, 6kNの4種類、まくらぎ3本の場合が0kN, 11kN(まくらぎ1本あたり3.7kN)の2種類とした。表3に横方向荷重とレール温度変化の関係を示す。横方向荷重はエネルギー法を用いて算出した<sup>5)</sup>。計測項目は、まくらぎ両端部の水平変位および鉛直変位、まくらぎ両端部の水平加速度、道床肩部およびまくらぎ底面位置の道床表面の水平加速度、振動台テーブルの水平加速度、および特殊ばねの横方向荷重である。

道床横抵抗力試験は、加振試験前の横方向荷重6kNの軌道模型および正弦波8.0m/s<sup>2</sup>加振後の横方向荷重0kNの軌道模型に対して、図6に示す荷重装置を用いて、荷重速度2mm/minでまくらぎ長手方向に荷重を行った。道床横抵抗力試験の計測項目は、まくらぎ両端部の水平変位および水平荷重である。なお、本試験では、軌きょうでの最終道床横抵抗力で評価するため、まくらぎ1本の場合はまくらぎ水平変位2mm時、3本の場合は10mm時の道床横抵抗力を軌きょうでの最終道床横抵抗力とした。

2.2 試験結果

2.2.1 加振前後の強度・変形特性

図7に、まくらぎ1本模型およびまくらぎ3本模型の加振前および正弦波8.0m/s<sup>2</sup>加振後に行った道床横抵抗力試験による、道床横抵抗力とまくらぎ水平変位の関係を示す。なお、まくらぎ3本模型の場合の道床横抵抗力は、まくらぎ1本あたりに換算している。

加振前の道床横抵抗力は、まくらぎ1本模型の2mm時で8.4kN、まくらぎ3本模型の10mm時で7.4kNであり、まくらぎ3本模型の道床横抵抗力の方がやや小さい値となった。正弦波8.0m/s<sup>2</sup>加振後の道床横抵抗力は、まくらぎ1本模型の2mm時で5.3kN、まくらぎ3本模型の10mm時で6.8kNであり、まくらぎ3本模型の方がやや大きい値となり、まくらぎ1本模型の10mm時の7.2kNと比較すると、やや小さい値となった。加振後の道床横抵抗力の低下率は、まくらぎ1本模型の2mm時の方が大きく37%程度であり、まくらぎ3本模型の10mm時の場合は9%程度であった。これは、軌きょうの群杭効果によりまくらぎ1本あたりの道床横抵

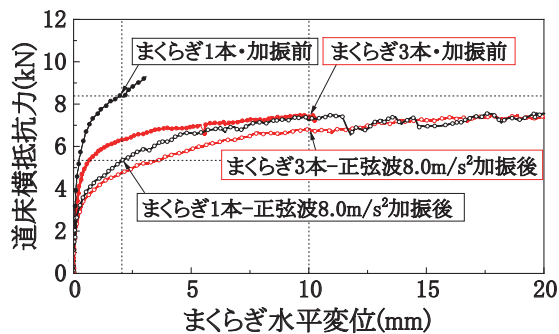


図7 まくらぎ水平変位と道床横抵抗力の関係

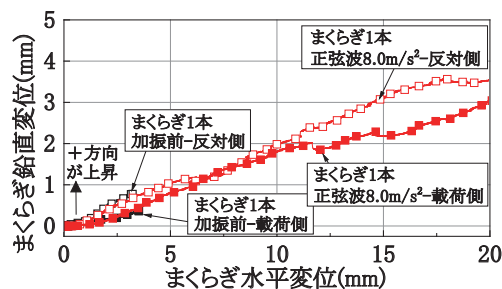


図8 まくらぎの水平変位と鉛直変位の関係(1本)

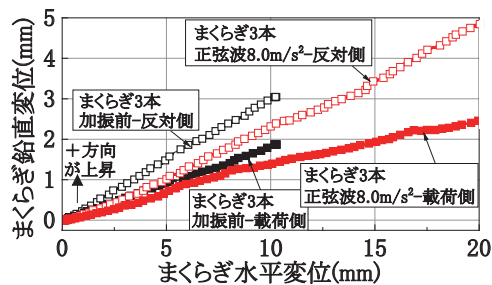


図9 まくらぎの水平変位と鉛直変位の関係(3本)

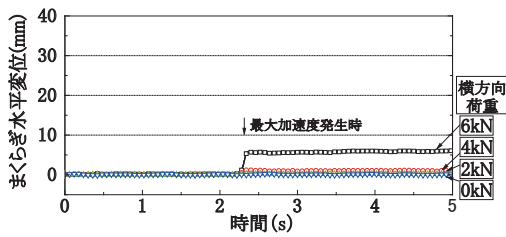
抗力が低下するため<sup>6)</sup>、もともとまくらぎ端部の寄与分が小さいまくらぎ3本模型の方がまくらぎ端部周辺の剛性低下の影響が小さくなり、加振後の道床横抵抗力の減少量が小さくなったためと考えられる。

図8および図9に、まくらぎ1本模型および3本模型の加振前および正弦波8.0m/s<sup>2</sup>加振後に行った道床横抵抗力試験による、まくらぎ水平変位とまくらぎ鉛直変位の関係を示す。加振前後とも、まくらぎ水平変位の増加とともにまくらぎ両端部のまくらぎ鉛直変位が上昇方向に増加しており、荷重方向と反対側のまくらぎ端部の方が荷重側よりも鉛直変位が大きくなった。これは、水平荷重に対して、道床肩部のバラストが十分に締め固められて剛性が高い場合に、道床肩部のバラストのダイレイタンスにより、荷重側のまくらぎ端部が上昇するとともに、荷重側のまくらぎ端部を回転中心として、反対側のまくらぎも上昇する変形挙動を示すことによるものと考えられる。

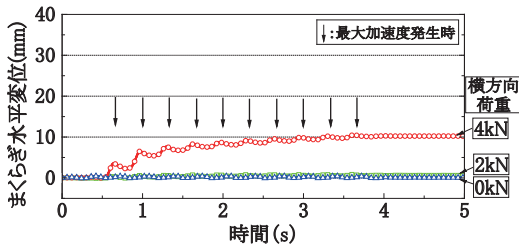
2.2.2 加振中の変形特性

(1) 加振中のまくらぎ変位

図10に、まくらぎ1本模型の加振中におけるまくらぎ



(a) 中越波6.0m/s<sup>2</sup>



(b) 正弦波6.0m/s<sup>2</sup>

図10 まくらぎ変位波形(まくらぎ1本模型)

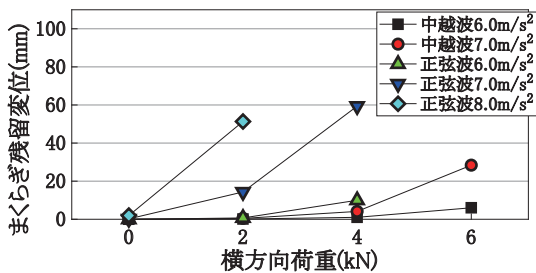
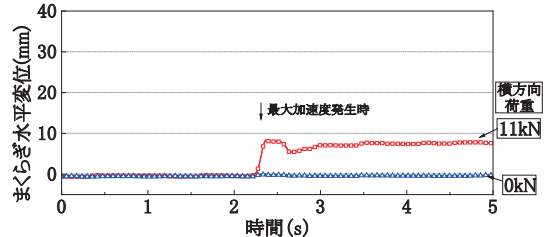


図11 まくらぎ残留変位(まくらぎ1本模型)

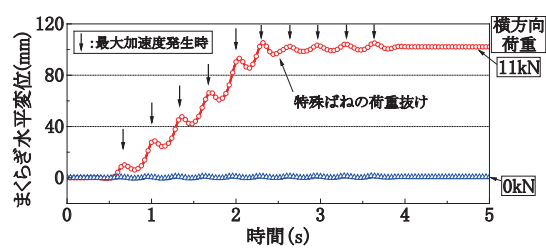
変位波形を示す。正弦波 6.0m/s<sup>2</sup> および中越波 6.0m/s<sup>2</sup> とも、最大加速度が生じた際にまくらぎ水平変位が増大し、特に横方向荷重が大きな条件ではまくらぎ残留変位が急増した。また、中越波では、最大加速度前後に残留変位がほとんど生じていないことがわかる。

図11に、まくらぎ1本模型における横方向荷重と各加振ステップのまくらぎ残留変位の関係を示す。横方向荷重 0kN では、正弦波 8.0m/s<sup>2</sup> 加振後でもまくらぎ残留変位は 2.0mm であるが、横方向荷重が増加するほど、各加振ステップのまくらぎ残留変位が増大していることがわかる。横方向荷重 2kN は、正弦波 8.0m/s<sup>2</sup> 加振後のまくらぎ水平変位 10mm 時における道床横抵抗力の 1/4 程度に相当するが、正弦波 8.0m/s<sup>2</sup> 加振により 51mm の残留変位が生じた。このように、正弦波 8.0m/s<sup>2</sup> 加振後の道床横抵抗力より小さな横方向荷重でも大きな残留変位が生じたことから、加振中には道床横抵抗力が低下していたものと考えられる。

図12に、まくらぎ3本模型の加振中におけるまくらぎ変位波形を示す。まくらぎ3本模型の場合、中越波および正弦波ともにまくらぎ1本模型の場合と同様に横方向荷重が作用することで、加振中の最大加速度作用時にまくらぎ残留変位が生じた。



(a) 中越波6.0m/s<sup>2</sup>



(b) 正弦波6.0m/s<sup>2</sup>

図12 まくらぎ変位波形(まくらぎ3本模型)

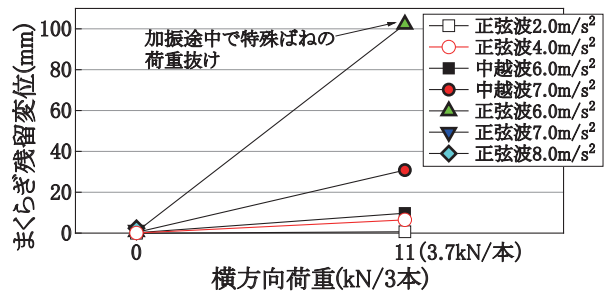


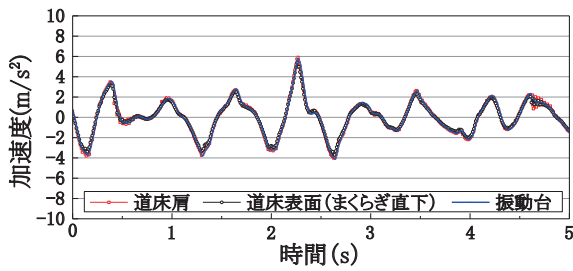
図13 まくらぎ残留変位(まくらぎ3本模型)

図13に、まくらぎ3本模型における横方向荷重と各加振ステップのまくらぎ残留変位の関係を示す。横方向荷重 0kN では、正弦波 8.0m/s<sup>2</sup> 加振後のまくらぎ残留変位が 2.3mm であった。横方向荷重 11kN は、正弦波 8.0m/s<sup>2</sup> 加振後のまくらぎ水平変位 10mm 時における道床横抵抗力の 1/2 程度であるが、まくらぎ1本模型と同様に加振中に大きな残留変位が生じた。

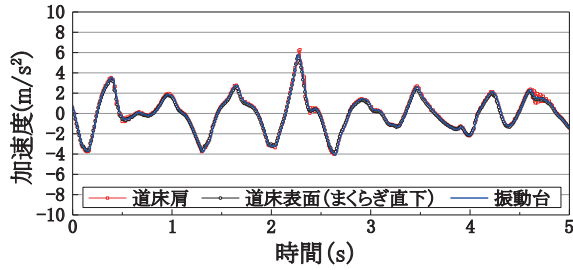
横方向荷重 11kN がまくらぎ3本模型のまくらぎに均等に荷重が分担されたと仮定すると、まくらぎ1本あたりの負担荷重は 3.7kN となるが、中越波 7.0m/s<sup>2</sup> および正弦波 6.0m/s<sup>2</sup> の加振の場合に、まくらぎ1本模型の横方向荷重 4kN の場合よりも大きな残留変位が生じ、横方向荷重 6kN と同程度であった。以上より、まくらぎ3本模型の場合、群杭効果の影響でまくらぎ1本模型よりも道床横抵抗力が加振中に大きく低下することがわかった。

(2) 加振中の道床加速度

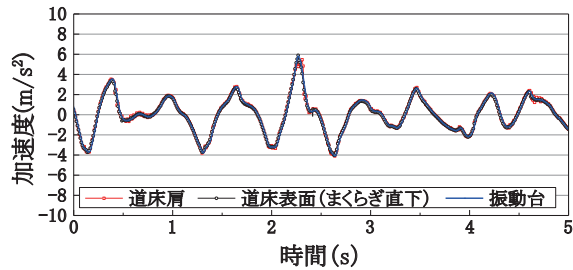
図14および図15に中越波 6.0m/s<sup>2</sup> および正弦波 6.0m/s<sup>2</sup> の場合について、まくらぎ1本模型の道床肩部およびまくらぎ底面位置の道床表面における加速度波形を示す。横方向荷重が 0kN および 2kN の場合、どちらの加振波形においても、振動台テーブルの加速度波形と概ね道床



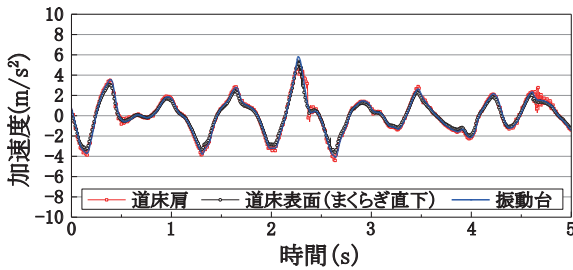
(a) 横方向荷重: 0kN



(b) 横方向荷重: 2kN



(c) 横方向荷重: 4kN

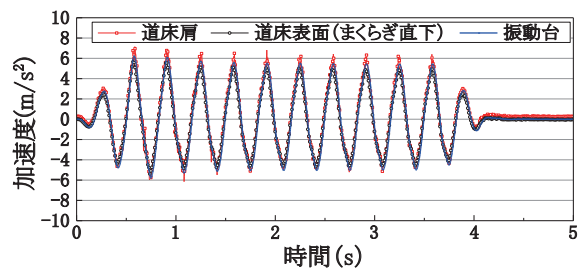


(d) 横方向荷重: 6kN

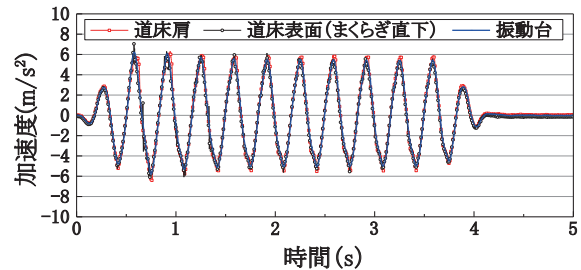
図 14 加速度波形 (まくらぎ 1 本・中越波 6.0m/s<sup>2</sup>)

加速度波形が一致しており、横方向荷重が小さい場合には、最大加速度 6.0m/s<sup>2</sup> 程度の加振による影響は小さいことが考えられる。一方、横方向荷重が 4kN および 6kN に増加すると、振動台テーブルの加速度波形に対して、最大加速度作用時に道床肩部および道床表面の加速度波形が乱れていることがわかる。これは、道床の最大加速度が 6.0m/s<sup>2</sup> 程度に達すると、特に拘束圧の低い道床表層において、加振中におけるまくらぎの水平変位と慣性力の影響を受けて各バラスト粒子がランダムな挙動を示し、道床の剛性が低下して加速度波形が乱れたものと考えられる。

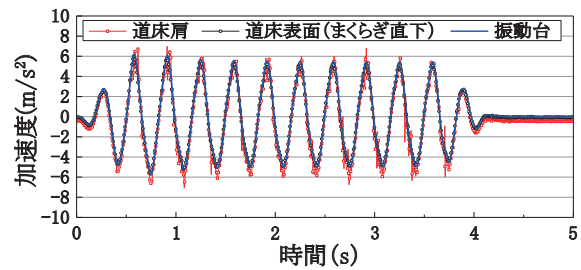
以上より、横方向荷重が大きい場合、道床肩部およびまくらぎ底面位置の道床表面の応答加速度がある大きさの加速度に達すると（以下、限界加速度という）、慣性力で道床の剛性が低下して道床横抵抗力も低下し、図



(a) 横方向荷重: 0kN

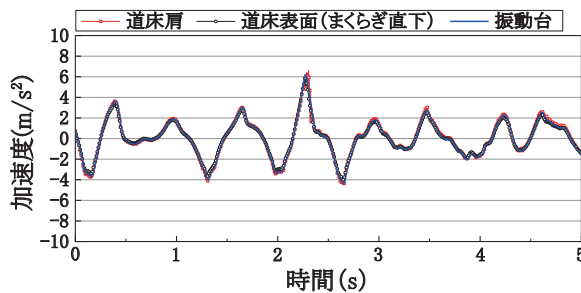


(b) 横方向荷重: 2kN

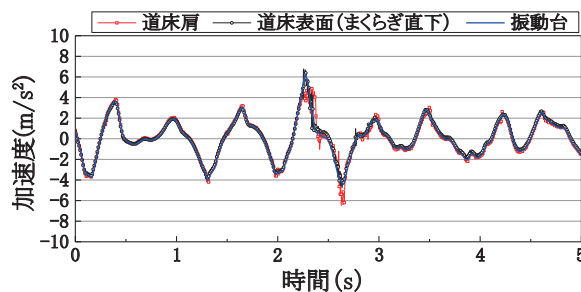


(c) 横方向荷重: 4kN

図 15 加速度波形 (まくらぎ 1 本・正弦波 6.0m/s<sup>2</sup>)



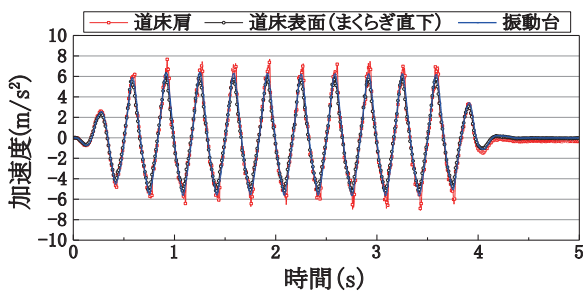
(a) 横方向荷重: 0kN



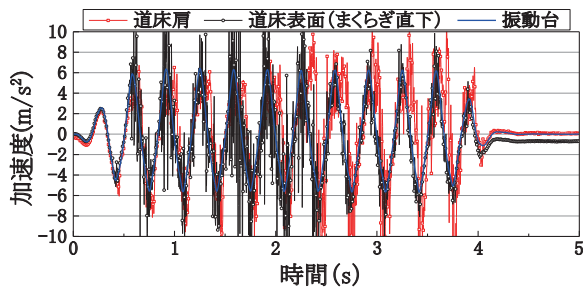
(b) 横方向荷重: 11kN

図 16 加速度波形 (まくらぎ 3 本・中越波 6.0m/s<sup>2</sup>)

10 などに示すように、加振中のまくらぎ残留変位が急増したものと考えられる。また、応答加速度が限界加速度以下の場合にまくらぎ残留変位が増加しないことが



(a) 横方向荷重: 0kN



(b) 横方向荷重: 11kN

図 17 加速度波形 (まくらぎ 3 本・正弦波  $6.0\text{m/s}^2$ )

ら、加振中の道床横抵抗力の低下は、限界加速度が作用した際の一時的なものと考えられる。

図 16 および図 17 に、中越波  $6.0\text{m/s}^2$  加振および正弦波  $6.0\text{m/s}^2$  加振の場合について、まくらぎ 3 本模型の道床肩部およびまくらぎ底面位置の道床表面における加速度波形を示す。横方向荷重が  $0\text{kN}$  の場合では、どちらの加振波形においても、振動台テーブルの加速度波形と道床加速度波形が概ね一致しており、横方向荷重が小さい場合には、まくらぎ 1 本模型と同様に最大加速度  $6.0\text{m/s}^2$  程度の加振による影響は小さいことが考えられる。一方、横方向荷重  $11\text{kN}$  の場合では、まくらぎ 1 本模型の場合よりも振動台テーブルの加速度波形に対して道床肩部および道床表面の加速度波形が大きく乱れており、 $6.0\text{m/s}^2$  程度の加振加速度でも、まくらぎ底部およびまくらぎ端部の道床が加振による影響を大きく受けることがわかった。これは、加振による道床肩部およびまくらぎ底面位置の道床表面の剛性低下に加えて、まくらぎ本数が増えることによる群杭効果によりまくらぎ端部周辺の道床横抵抗力が加振中に低下したことによるものと考えられる。

### 3. まとめ

加振中におけるバラスト軌道の道床横抵抗力の特性を検討するため、大型振動台試験を行った。

以下に得られた主な知見を示す。

- (1) 道床横抵抗力試験より、常時ではまくらぎ 1 本模型のまくらぎ変位  $2\text{mm}$  時よりも、まくらぎ 3 本模型のまくらぎ変位  $10\text{mm}$  時の方が道床横抵抗力がやや小さくなった。

- (2) 加振前後の道床横抵抗力試験において、両者ともまくらぎ水平変位の増加とともにまくらぎ両端部のまくらぎ鉛直変位が上昇方向に増加しており、载荷方向と反対側のまくらぎ端部の方が载荷側よりも鉛直変位が大きいことがわかった。
- (3) 横方向荷重が作用していない軌道模型に対して、正弦波  $8.0\text{m/s}^2$  加振後に道床横抵抗力試験を行ったところ、まくらぎ本数によらず、加振後に道床横抵抗力は低下することがわかった。また、まくらぎ 1 本模型よりまくらぎ 3 本模型の方が、加振後の道床横抵抗力の減少量が小さかったことから、まくらぎ 3 本模型は群杭効果によりまくらぎ端部が負担する抵抗力の寄与分が小さいため、まくらぎ 1 本模型よりも道床の剛性低下の影響が小さいことが考えられる。
- (4) 横方向荷重が作用していない場合は、正弦波  $8.0\text{m/s}^2$  加振後のまくらぎ残留変位が、まくらぎ 1 本模型と 3 本模型でどちらも概ね  $2\text{mm}$  程度であり、横方向荷重が作用した場合に比べて小さいことがわかった。
- (5) 限界加速度に達すると、特に拘束圧の低い道床表層において、加振中におけるまくらぎの水平変位と慣性力の影響を受けて各バラスト粒子がランダムな挙動を示し、道床の剛性が低下することが考えられる。
- (6) 加振試験より、道床横抵抗力は加振中に低下し、ロングレールが軌道を座屈させようとする荷重を想定した横方向荷重が加振後の道床横抵抗力より小さくても、限界加速度に達するとまくらぎ残留変位が生じることがわかった。また、群杭効果により、まくらぎ 1 本模型よりも 3 本模型の方が、横方向荷重が作用した場合のまくらぎ残留変位が大きいことがわかった。

### 文 献

- 1) (財) 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，1999
- 2) (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
- 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) 航空・鉄道事故調査委員会：鉄道事故調査報告書 I 東日本旅客鉄道株式会社上越新幹線浦佐駅～長岡駅間 列車脱線事故，2007
- 5) 三浦重，柳川秀明：急曲線へのロングレールの適用，鉄道総研報告，Vol.6，No.1，1992
- 6) 小池陽平，早野公敏，中村貴久，桃谷尚嗣：まくらぎの形状と本数がバラスト軌道の道床横抵抗力に及ぼす影響，第 48 回地盤工学研究発表会，2013