

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# バラスト軌道の耐震性能を向上させる

バラスト軌道が地震動を受けると、レールが波状に大きく変形することがあります。とくに、夏季の日中にはレール温度の上昇に伴い軸力が増加するため、軌道の座屈により大きな変形が起こるリスクが高まります。構造物の耐震設計に関しては研究が進んでおり、設計法も確立されています。しかし、バラスト軌道については耐震の研究が十分に進んでいない状況にあります。ここでは、バラスト軌道が地震動を受けるときの座屈安定性とその向上策について、大型振動台試験を行うことにより検討した結果を紹介します。



**桃谷 尚嗣**  
Yoshitsugu Momoya  
軌道技術研究部  
軌道・路盤研究室  
室長  
【専門分野】バラスト軌道、省力化軌道、路盤・路床



**中村 貴久**  
Takahisa Nakamura  
軌道技術研究部  
軌道・路盤研究室  
副主任研究員  
【専門分野】バラスト軌道、省力化軌道、路盤・路床

## はじめに

バラスト軌道の耐震性能に関する研究は、国鉄時代の1980年代に、実物大軌道を用いた振動台試験<sup>1)</sup>や、高架橋の目違い・角折れが道床横抵抗力に与える影響の評価<sup>2)</sup>などが行われましたが、その後しばらくは、ほとんど研究が行われない時期が続きました。一方、高架橋や盛土などの土木構造物は阪神淡路大震災を契機として耐震に関する研究が大きく前進しました。バラスト軌道の耐震性能に関しては、2000年代以降、新潟県中越地震での新幹線の脱線などを受け、本格的

な研究がようやく進み始めました。また、このような研究は、海外に目を向けても、ほとんど行われていないのが実状です。

バラスト軌道が地震動を受けると、「波状曲がり」とも呼ばれる著大な通り変位が発生することが知られています<sup>3)</sup>。この著大な通り変位の発生メカニズムは完全には明らかにされていませんが、地震動による道床横抵抗力の低下に伴い、軌道が座屈しやすくなることが大きな要因の一つとして考えられます。そのため、バラスト軌道の耐震性能に関する研究は、地震時の道床

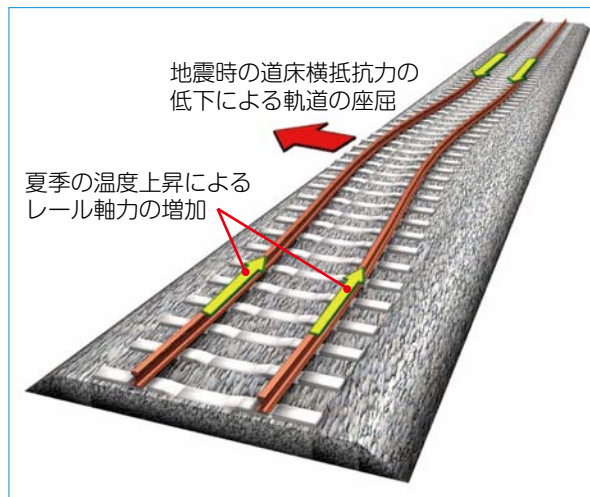


図1 地震時における軌道座屈の発生メカニズム

横抵抗力に直接影響を与えられ、レール直角方向の地震動に着目したアプローチが主体となっています。ここで紹介する最近の研究も、レール直角方向の加振に対する道床横抵抗力の評価とその向上策に関する内容となります。

その一方、レール長手方向の地震動がレール

ル軸力の変動を生じさせて座屈の発生につながることも考えられます。しかしながら、そのような現象を解明するには、延長の長い軌道を用いた大きな規模での実験が必要であると考えられ、これまでほとんど検討が行われてないという状況にあります。これについては、将来的な研究課題の一つと考えています。

### 道床横抵抗力の低下による軌道座屈の発生メカニズム

バラスト軌道にロングレールを適用する場合は、夏季のレール温度上昇時に座屈しないよう、十分な道床横抵抗力を確保することが必要とされており、それを前提として設計が行われています。しかしながら、レール軸力が高くなる夏季の日中にレール直角方向の地震動を受けると、道床横抵抗力が低下し、座屈が発生するリスクが高まります(図1)。ただし、地震時の座屈発生リスクについては、現在の設計では考慮されていません。

2000年代に入ってから行われた研究の多くは、加振後の道床横抵抗力を評価することが中心となっていました<sup>4)</sup>。大きな地震動を受けると、バラスト軌道は道床肩部のバラストが崩れるため、道床横抵抗力が低下します(図2)。これまでの研究により、 $6\text{m/s}^2$ 程度の加振力を受けるとバラストが崩れ始め、 $8\text{m/s}^2$ の加振力を受けるとバラストの崩れが大きくなり、道床横抵抗力も低下することがわかっています。

しかしながら実際には、レール軸力が増加している状態では、地震動を受けている間にもレールが座屈しようとしてまくらぎを横方向に押し出す力は作用し続けると考えられます。従来の振動台試験では、加振中にまくらぎが横方向に押される力を考慮した評価が

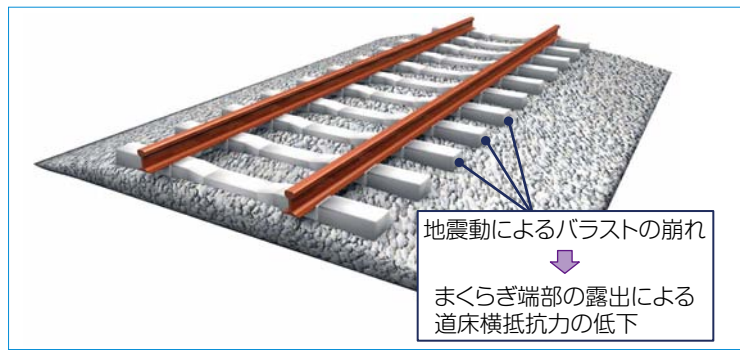


図2 地震動によるバラスト道床肩部の崩れ

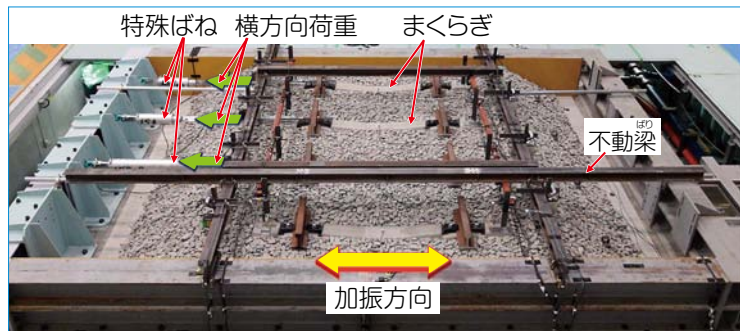


図3 まくらぎに横方向荷重を与えた大型振動台試験

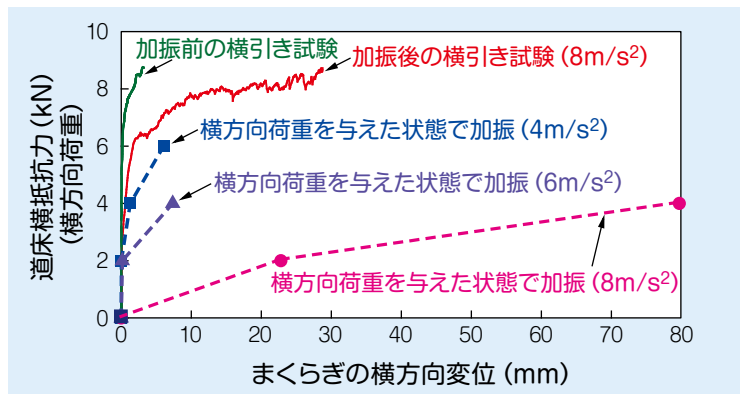


図4 横方向荷重とまくらぎの変位の関係

できていませんでした。そこで、まくらぎに横方向の力が作用した状態で加振した場合の道床横抵抗力を評価する方法を新たに検討することとしました。

### 大型振動台試験による道床横抵抗力の評価

まくらぎに一定の横方向荷重を与えた状態で加振を行うため、架線の張力を一定に保つために用いられているテンションバランサーと同じ構造の特殊ばねを製作しました(図3)。この特殊ばねは、所定のストロークの範囲内では張力がほとんど変化しない構造となっ

ているため、加振中にまくらぎに数センチ程度の変位が生じてても、ほぼ一定の横荷重を与え続けることができます。

加振試験により得られた道床横抵抗力(横方向荷重)とまくらぎ横変位の関係を図4に示します。載荷波形は正弦波とし、 $3\text{Hz}$ で10波の加振を行いました。このうち、「加振前の横引き試験」および「加振後の横引き試験( $8\text{m/s}^2$ )」の結果は、それぞれ加振前および加振後にストロークジャッキで静的に横引き試験を行った結果です。 $8\text{m/s}^2$ での加振後は加振前と比較して道床横抵抗力が低下していることがわ

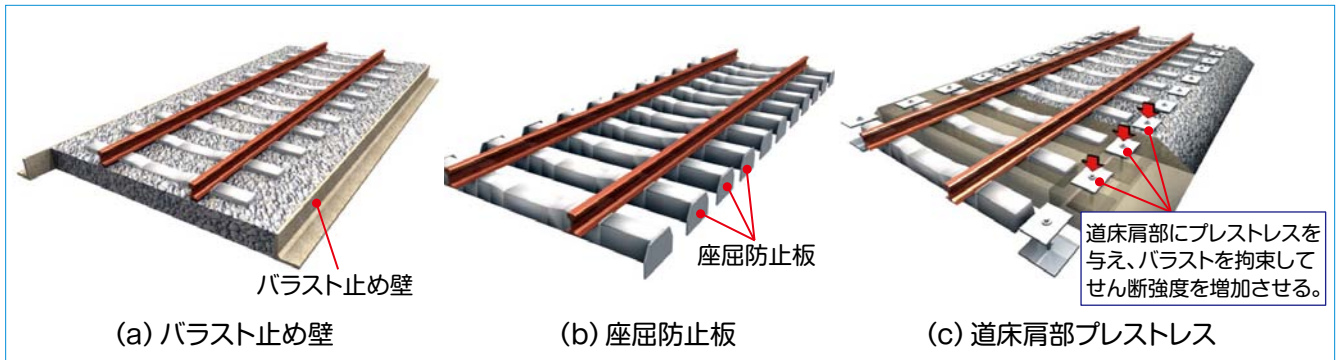


図5 座屈対策工の概要

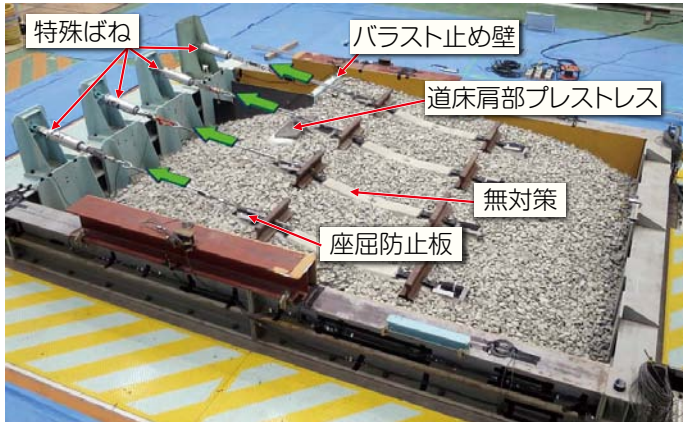


図6 座屈対策工の大型振動台試験

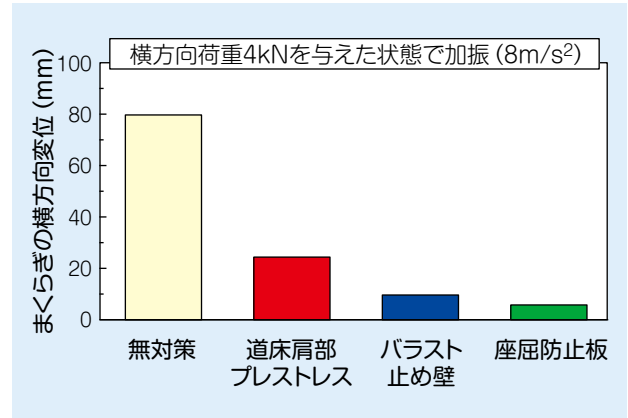


図7 座屈対策工の効果

かります。

正弦波 $4\text{m/s}^2$ 、 $6\text{m/s}^2$ 、 $8\text{m/s}^2$ での「横方向荷重を与えた状態で加振」は、特殊ばねで一定の引張り荷重を与えて加振した際に生じたまくらぎの横方向変位を示しています。この結果を見ると、たとえば正弦波 $8\text{m/s}^2$ 加振後の静的な横引き試験においては、 $4\text{kN}$ の荷重を与えた時点ではまくらぎの横方向変位はほとんど生じていませんでした。しかし、特殊ばねにより $4\text{kN}$ の荷重を与えた状態で加振を行うと、正弦波 $6\text{m/s}^2$ の加振で $8\text{mm}$ 、正弦波 $8\text{m/s}^2$ の加振では $80\text{mm}$ 程度の横方向変位が生じています。このように、まくらぎに横方向の荷重が作用した状態で地震動を受けると、加振後の横引き試験から想定されるよりも、はるかに大きな変位が生じることがわかりました。なお、横方向荷重 $4\text{kN}$ は、レール温度が設定温度よりも $40^\circ\text{C}$ 程度高い状態を想定しています。

### 座屈対策工の検討

バラスト軌道の耐震性を向上させるためには、座屈対策工を設けることが望まれます。ここでは、大型振動台試験により、3種類の座屈対策工の効果を評価しました。各座屈対策工の概要を図5に示します。「バラスト止め壁」は、道床肩部のバラストが地震動により崩れるのを防ぎ、道床横抵抗力の低下を抑制することを目的としています。「座屈防止板」はまくらぎ端部の面積を増加させ、道床横抵抗力そのものを向上させることを目的としています。「道床肩部プレストレス」は道床肩部のバラストにプレストレスを与えて拘束力を加え、バラスト自体のせん断力を増加させて道床横抵抗力を増加させることを目的としています。

これらの対策工を施したまくらぎに対し、特殊ばねにより $4\text{kN}$ の横方向荷重を与えた状態で加振試験を行いました。なお、これらの加振試験は、曲線

部におけるカントの付いた条件で検討を行いました(図6)。また、各ケースともまくらぎ1本での評価としました。

加振試験の結果を図7に示します。3種類の座屈対策工の中では座屈防止板の効果が最も高く、本試験の条件下では、加振中に生じるまくらぎの横方向変位が無対策の場合の $1/10$ 程度に低減しました。バラスト止め壁も高い効果があることが確認できました。道床肩部のプレストレスは本研究で検討した新たな試みですが、無対策の場合と比較してまくらぎの横方向変位が $1/4$ 程度に低減しました。プレストレスを与える構造の改良により、さらに高い効果が期待できると考えています。

### 道床横抵抗力の評価において考慮すべき事項

大型振動台試験では、費用や工期の制約がある中で、できるだけ多くの条件を比較検討するため、まくらぎ1本

または2本での道床横抵抗力を評価することが多いのですが、軌きょうの状態では横引き試験を行うと、まくらぎ1本あたりで見た場合の道床横抵抗力は小さくなるということがわかっています<sup>5)</sup>。これは、隣接するまくらぎが相互に影響するためであり、「群杭効果」(群杭効果)の一種と考えられます。

軌きょうを組んだ状態での道床横抵抗力を評価するため、図8に示すように、3本のまくらぎで構成される軌きょう2組を振動台テーブル上に設置し、加振試験を行いました。2組の軌きょうのうち、片方は11kN(まくらぎ1本あたり3.7kN)の横荷重を与え、もう片方は横荷重を与えずに加振しました。この結果をまくらぎ1本(横荷重4kN)の場合の結果と比較しました。

加振波形は新潟県中越地震において新幹線が脱線した箇所における、高架橋上の応答波形<sup>6)</sup>としました。加振により生じたまくらぎの横方向変位を図9に示します。まくらぎの横方向変位は加速度が最大となった時に大きく生じました。まくらぎ1本の場合の横方向変位は4mm程度でしたが、軌きょうの場合はまくらぎ1本あたりの横方向荷重がやや小さい条件であったにもかかわらず、変位が30mm程度に大きくなりました。このように、軌きょうの状態では、まくらぎ1本で評価した場合と比較して、地震動により生じる変位が大きくなることがわかりました。なお、

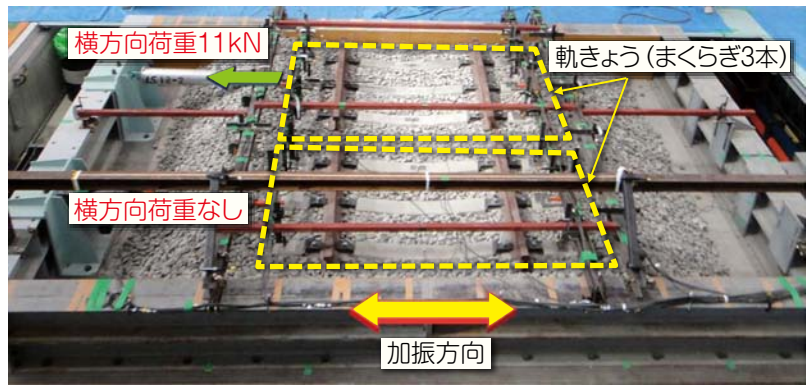


図8 軌きょうの大型振動台試験

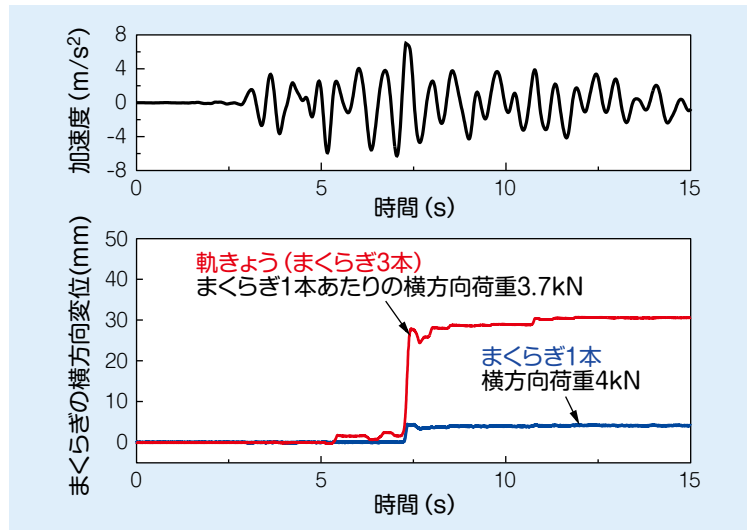


図9 加振によるまくらぎの横方向変位

横方向荷重を与えない条件では、横方向変位がほとんど生じませんでした。

このように、軌きょうの状態ではまくらぎ1本の場合よりも道床横抵抗力が小さくなるため、地震時の道床横抵抗力を定量的に求めるには、軌きょうの状態を考慮して評価する必要があると考えられます。

### おわりに

まくらぎに横方向荷重を与えた状態で大型振動台試験を行うことで、実際の地震時に生じる現象に近い挙動を再現することが可能となりました。今後は、ある程度の軌道延長を持つ小型モデルを用いて、レールを加熱して軸力を与えた状態で加振し、座屈を再現するとともに、座屈対策工の効果を評価する実験を行う計画としています。[RRR]

### 群杭効果

近接して設置された複数の杭の1本あたりの支持力は、独立した1本の杭の支持力よりも小さくなることが知られています。これは、杭を支持する地盤が近接する杭の荷重も受けるためです。軌きょうの場合も群杭効果と同様の影響により、まくらぎ1本で評価した場合よりも道床横抵抗力が小さくなると考えられます。

### 文献

- 1) 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—新幹線の場合—, 鉄道技術研究報告, No.1334, 1987
- 2) 佐藤吉彦, 三浦重, 高井秀之, 長沢孝哉: 高架橋の水平目違いおよび水平角折れに対する軌道の変形特性試験, 鉄道技術研究所速報, No.A-85-61, 1985
- 3) 三浦重, 切敷啓介: 地震による列車および軌道の被害に関する文献調査, 鉄道技術研究所速報, No.82-45, 1982
- 4) 桃谷尚嗣, 中村貴久, 曾我部正道, 浅沼潔: バラスト軌道の地震時変形挙動を評価する, RRR, Vol.70, No.3, pp.24-27, 2013
- 5) 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
- 6) 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