

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# バラスト軌道の地震時変形挙動を評価する

過去の地震において、構造物に大きな変状が見られない場合であっても、バラスト軌道に大きな変形が発生した事例が報告されています。高架橋や盛土などの構造物については、耐震に関する研究が盛んに行われており、地震に対応した設計法の整備も進んでいますが、軌道については、耐震性能に関する研究が十分に進んだと言える状況にはなく、設計法も整備されていない状況にあります。ここでは、バラスト軌道の耐震性能に関する最近の研究と今後の課題について紹介いたします。



**桃谷 尚嗣**  
Yoshitsugu Momoya  
軌道技術研究部  
軌道・路盤研究室  
主任研究員  
【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



**曽我部 正道**  
Masamichi Sogabe  
鉄道力学研究部  
構造力学研究室  
室長  
【専門分野】車両・軌道・構造物の動的相互作用解析、振動、疲労



**浅沼 潔**  
Kiyoshi Asanuma  
元 鉄道力学研究部  
構造力学研究室  
室長  
【専門分野】軌道座屈、PCまくらぎ、ラダー型まくらぎ

## 地震によるバラスト軌道の変形

地震による軌道の被害は、高架橋や盛土などの構造物の変形に伴って軌道にも変形が生じるケースがほとんどですが、過去の被害事例の調査<sup>1)</sup>において、構造物や路盤に大きな変状が見られない状況でも、バラスト軌道が大きく変形する場合があることが報告されています。さらに、バラスト軌道の変形が主要因となって脱線に至った事例も報告されています。

地震によるバラスト軌道の変形は、「波状曲がり」とも呼ばれ、著大な通り変位として現れます(図1)。波状曲がりは橋りょうや分岐器の前後などの構造変化箇所が発生するケースが多く見られますが、一般部において連続した波形として発生することもあります。

波状曲がりの発生メカニズムは完全には解明されていませんが、地震動そのものによる場合と、レールの温度応力が支配的となる座屈(☞参照)の場合に大きく分けることができると考え

られています。どちらの場合もまくらぎに対する軌道横断方向の抵抗力である「道床横抵抗力」の評価が重要であることから、バラスト軌道の耐震に関する研究は、地震時の道床横抵抗力の評価を中心として行われてきました。

## バラスト軌道の耐震に関する研究

バラスト軌道の耐震に関する研究は、1980年代前半を中心に、東海地震に対する検討の一環として、実物大振動台試験<sup>2)</sup>や高架橋の目違い・角折れの影響を検討する試験<sup>3)</sup>が行われ、一定の成果が示されました。しかしながら、その後しばらくは十分な研究が行われない時期が続きました。

2000年代に入ってから、バラスト軌道の耐震に関する研究の必要性が再認識され、鉄道総研においても重点的に研究が行われるようになりました。特に、地震動によって主に道床肩部が崩れることにより道床横抵抗力が低下

### ☞ 座屈

軌道における「座屈」とは「張出し」とも呼ばれ、温度上昇時にレール軸力が増加した際、軌きょうが横方向に移動しようとする力が道床の抵抗力を上回り、大きくレールが張り出す現象です。



図1 地震を受けた軌道の変状の例

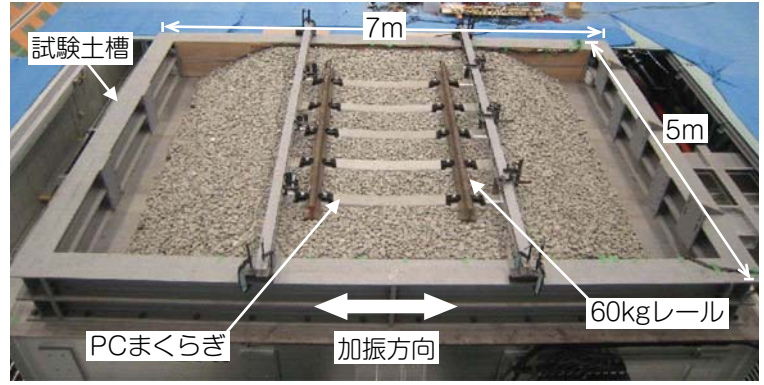


図2 バラスト軌道の大型振動台試験

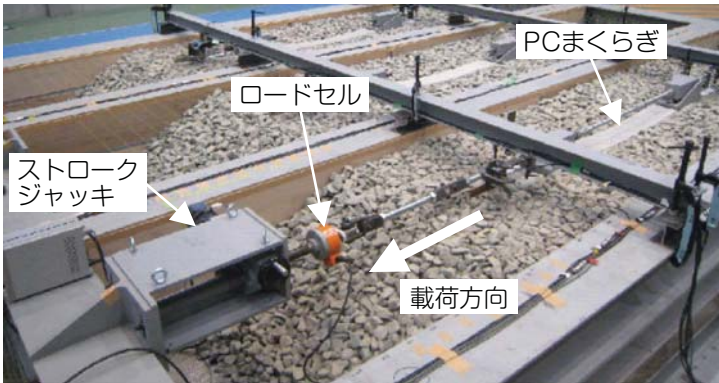


図3 道床横抵抗力試験の状況

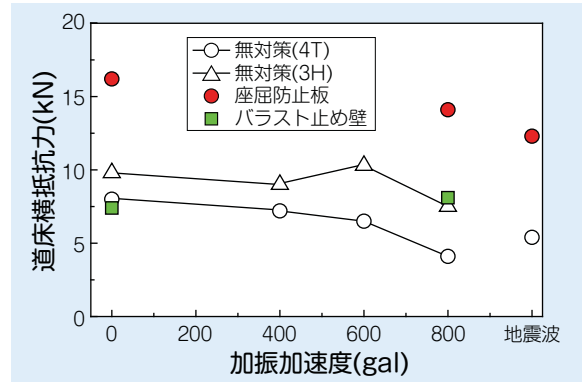


図4 加振加速度と道床横抵抗力

し、ロングレールの軌道が座屈する状況を念頭に置いた検討を行っています。

最近の研究では、模型バラスト軌道を用いた道床横抵抗力試験や振動台試験<sup>4)</sup>、実物大バラスト軌道による振動台試験および道床横抵抗力試験による検討が行われています。また、有限要素解析により、構造物境界部に角折れや目違いが生じた場合の道床横抵抗力を評価する方法を提案しています。さらに、これらの検討結果から得られた道床横抵抗力を用いて、地震時における構造物境界の角折れや目違いを伴う場合の軌道の座屈安定性を評価する解析手法を開発しています<sup>5)</sup>。

以下に、これまで得られた最新の知見について紹介いたします。

### 模型試験による道床横抵抗力の評価

模型試験を行うことで、道床横抵抗力を比較的簡易に評価することができます。そこで、縮尺1/5の模型試験により、道床横抵抗力の基本的な特性について評価を行っています。道床横抵抗力は、まくらぎの寸法や形状によ

て異なりますが、これまでの検討から、一般的な形状のPCまくらぎの場合、まくらぎの底面、側面および端面でそれぞれ1/3程度ずつ道床横抵抗力を負担していることが分かっています。

このような知見を踏まえ、まくらぎの形状を最適化することで、道床横抵抗力を増加させ、バラスト軌道の座屈安定性を向上させる方法について検討を進めています。

### 振動台試験によるバラスト道床の変形特性および道床横抵抗力の評価

バラスト軌道の振動台試験については、はじめに縮尺1/3の模型を用いた基礎的な検討を行い、その後、実物大のバラスト軌道模型による評価を行っています(図2, 図3)。

縮尺1/3の模型を用いた振動台試験の結果からは、小さい入力加速度ではバラスト道床の形状にほとんど変化が見られないものの、600gal程度で変形が生じはじめ、800galを越えたあたりでバラスト道床の変形量が急激に大きくなることが明らかとなりました<sup>4)</sup>。

大型振動台試験では、実物大バラスト軌道模型に対する加振を行った後、道床横抵抗力の評価を行いました。実物大試験においても、加振加速度600gal程度からバラスト道床の変形が生じはじめ、800galで加振するとバラスト道床が大きく変形することが確認されました。

加振後に道床横抵抗力試験を行い、加振加速度と道床横抵抗力の関係を評価しました。道床横抵抗力試験では、まくらぎ種別による違いや、座屈防止板、バラスト止め壁等の対策工の効果について評価を行いました。これらの検討の結果、スリムな形状のまくらぎ(新幹線用4Tまくらぎ)に対し、寸法の大きなまくらぎ(新幹線用3Hまくらぎ)を用いることで、地震後の道床横抵抗力が大幅に改善されることが分かりました。また、座屈防止板やバラスト止め壁が道床横抵抗力の向上に対して有効であることが明らかとなりました(図4)。

### 有限要素解析による道床横抵抗力の評価

非線形有限要素解析により、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する解析手法を提案しています(図6)。バラスト軌道が地震動を受けると、主に道床肩部が崩れていきますが、この現象を累積損傷度法と呼ばれる手法で材料特性を軟化させることによって表現し、地震動による道床横抵抗力の低下を再現しています。この解析手法を用いることで、800gal加振後の道床横抵抗力を精度よく推定できることを示しました。また、構造物境界部の不同変位を考慮した解析を行った結果から、さらに材料特性を軟化させることで、構造物境界部における道床横抵抗力の低下量を推定する手法を提案し、検討を進めています。

### 構造物境界に対する数値解析

連続する鉄道高架橋は、様々な構造物から構成されています(図7(a))。このような構造物が地震動を受けると、異なる振動特性の構造物の境界には、目違いや角折れといった局所的な変形が生じて、これがバラスト軌道にとっての弱点箇所となります。

このような地震時の軌道全体の複雑な挙動を明らかにするために、三次元有限要素法をベースとした軌道座屈安定性解析ツール ATRAS (Analysis program for track stability)<sup>5)</sup>を開発しました。この ATRAS では、有限要素を用いて任意の軌道形式、構造物形式、各種境界条件、構造・材料の不均一性等をモデル化することができます(図7(b))。レールやまくらぎは節点を設けて分割し、その間をはり要素で結び軌きょう構造を再現します。バラストの道床横抵抗力や締結装置の剛性は非線形のばね要素を用いて表します。

地震時のバラスト軌道の挙動を再現

する上で最も重要なパラメーターとなるのが道床横抵抗力です。この道床横抵抗力は、地震による横揺れや境界部の角折れの繰り返しにより、徐々に低下していくことが知られています。 ATRAS では、この影響を考慮するために、道床横抵抗力を、バラストに生じている慣性力と構造物境界からの距離に応じて、徐々に変化させていく手法を用いています(図7(c))。具体的な低下率は、前述の実物大の振動台実験の結果等に基づいて設定します。解析では、まず温度変化等によりロングレールに蓄積される軸力や変形を初期値として計算します。この初期値を用いて、幾何学的非線形性(軌道の

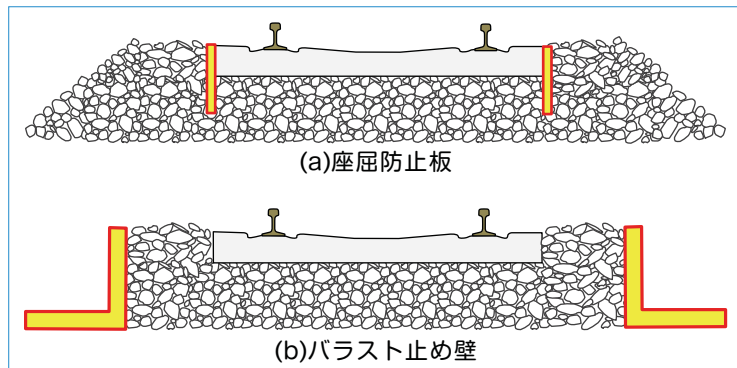
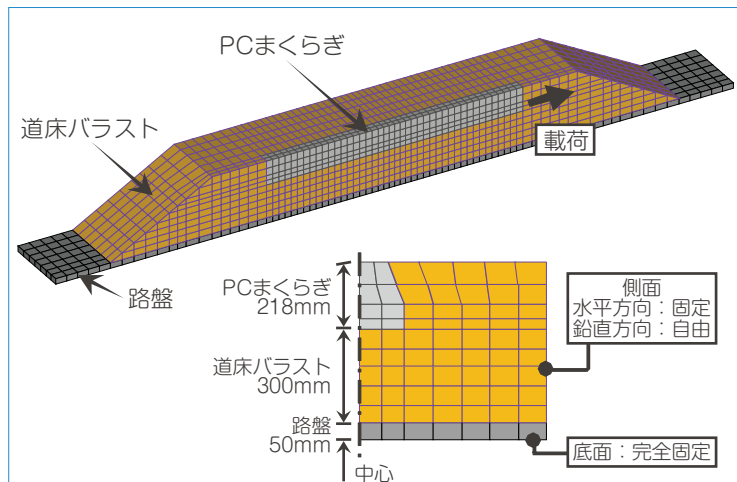
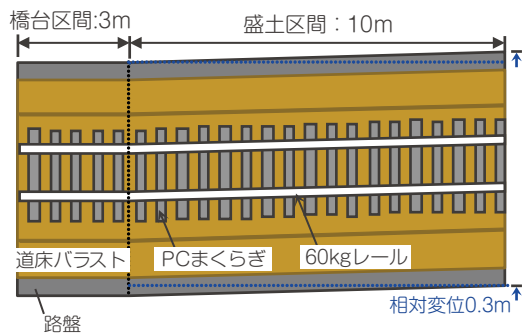


図5 座屈防止対策工



(a)道床横抵抗力解析



(b)構造物境界部の不同変位

図6 道床横抵抗力を評価する有限要素解析例

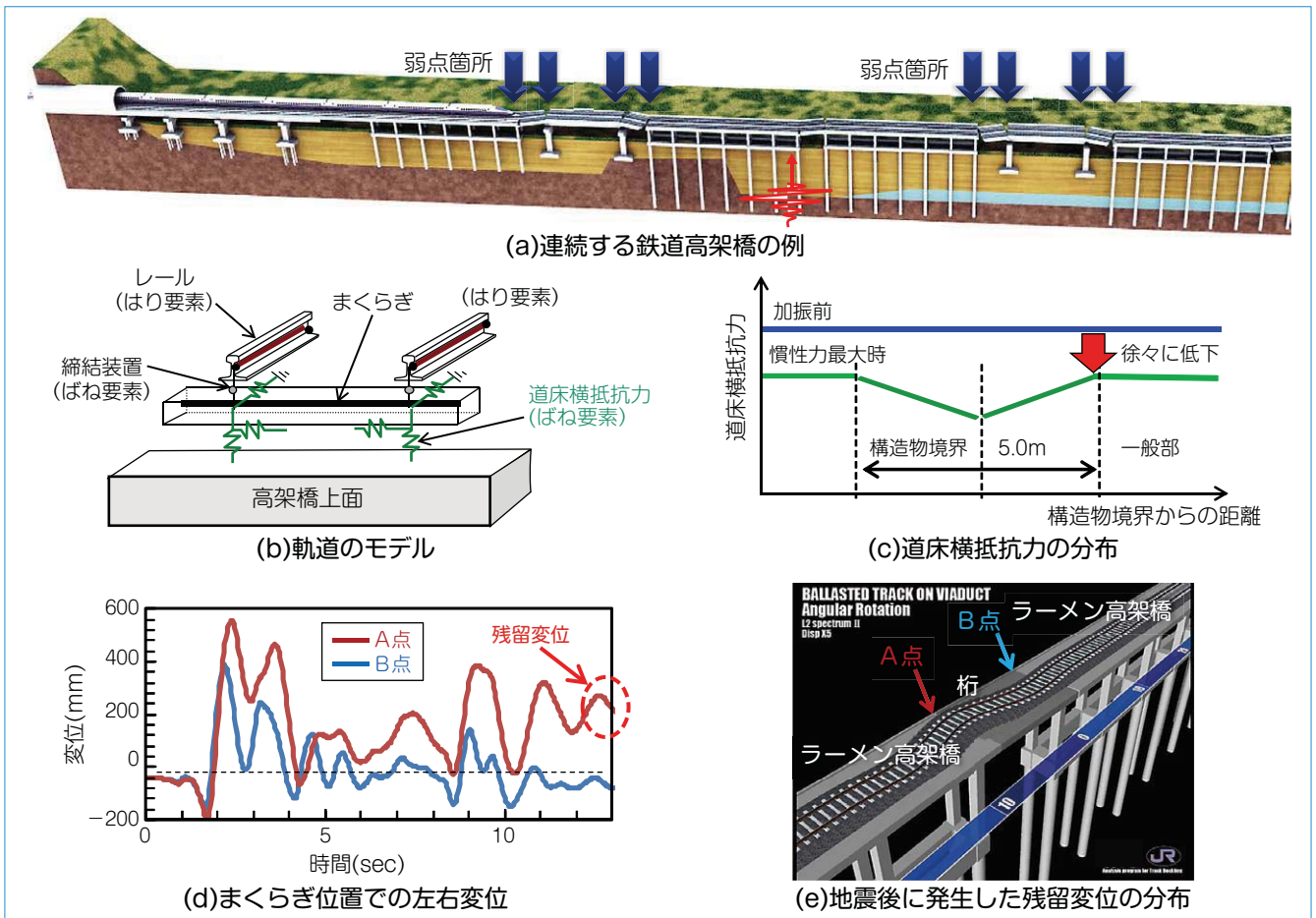


図7 構造物境界部に対する数値解析例

水平変形によりレールの軸力の軸線が水平に移動して軌道に回転力の成分が生じる影響)を考慮した動的な解析が行われます。

内陸活断層型の大規模地震動L2スペクトルIIを用いた解析結果、および地震後に発生した残留変位の分布を図7(d)、図7(e)に示します。スパンの短い桁(図7(e)の濃い着色部分)の構造物境界A点、B点は、地震時に折れ角が生じ、弱点箇所となります。図では、A点側のラーメン高架橋の応答が大きかったため、構造部境界A点で残留変位が生じていることが分かります。

このような手法により、連続する鉄道高架橋上でのバラスト軌道の弱点箇所を定量的に推定するとともに、バラ

ストの道床横抵抗力の強化や軌道の横剛性の付加等の対策工の効果を検証することができます。

### おわりに

これまでの検討で、地震動によるバラスト軌道の道床横抵抗力を定量的に評価し、構造物境界部における角折れや目違いを考慮した座屈安定性を評価する手法を提案しました。

今後は、曲線部におけるカントの形状の影響や、加振中の道床横抵抗力の変化を考慮し、軌道座屈安定性の推定精度の向上に取り組んでいきます。

RRR

### 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関する文献調査, 鉄道技術研究所速報, No.82-45, 1982
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 関根悦夫, 石川達也: 地震時における有道床軌道の変形挙動, 鉄道総研報告, Vol.19, No.2, 2005
- 5) 浅沼潔, 関根悦夫, 片岡宏夫, 曾我部正道, 後藤恵一, 徳永宗正: バラスト軌道の地震時変形挙動, 鉄道総研報告, Vol.25, No.6, pp.47-52, 2011