

- 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

# 道床・路盤上を移動する 列車荷重を再現する

レールを支えるバラスト道床や路盤などに使用される砕石や土は、一般に粒状体力学に従った挙動を示します。すなわち、道床や路盤の変形の大半が、粒子相互のズレ（せん断変形）であり、その特性は荷重の大きさだけでなく、作用方向にも大きな影響を受けます。したがって、道床や路盤の変形挙動を実験で正確に再現するには、列車の走行に伴って大きさと作用方向が時々刻々と変化する移動荷重を考慮しなければなりません。そこで、本稿では、道床や路盤に対する移動荷重の概念と、鉄道総研が開発した移動荷重載荷試験装置について紹介します。



**村本 勝己**  
Katsumi Muramoto  
軌道技術研究部  
軌道・路盤研究室  
室長  
[専門分野] 地盤工学,  
バラスト軌道, 省力化  
軌道



**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] 地盤工学,  
バラスト軌道, 省力化  
軌道



**渡辺 健治**  
Kenji Watanabe  
構造物技術研究部  
基礎・土構造研究室  
主任研究員  
[専門分野] 地盤工学,  
土構造物

## はじめに

鉄道を含め「交通」とは、人や乗り物が一定の経路に沿って移動することです。したがって、陸上交通における「交通荷重」には「荷重が移動する＝移動荷重」という概念が含まれています。実際、道路や滑走路の分野では、車輪から作用する移動荷重が舗装や路盤に与える影響を考慮した実験が、比較的古くから行われています。

鉄道の場合は、列車からの荷重はレールとまくらぎを介してバラスト道床や路盤へと作用するので、多くの場合は作用点（＝まくらぎ）そのものの移動は工学的には考慮しません。そのため、軌道や路盤の模型載荷実験を行う場合に、移動荷重条件に関してはあまり重視されてきませんでした。しかし、近年は、鉄道においても移動荷重を載荷できる模型試験装置の重要性が、世界的に認識されつつあります。

鉄道総研でも、道床や路盤に対する移動荷重条件の重要性を認識し、移動荷重を再現する試験装置を開発して実験を行ってきました。

## 鉄道における移動荷重

列車が走行すると、基本的には一定の大きさの荷重（輪重）が作用している車輪がレール上を移動し、その荷重がまくらぎ、道床、路盤を介して地盤に伝達されます。このとき、例えば路盤内のある要素に着目すると図1(a)のように、主応力方向（☞参照）が変化（回転）しながら載荷－除荷が繰り返されることとなります。

ここで、移動荷重が作用している軌道において、ある1本のまくらぎに着目すると、1車輪の移動に伴ってまくらぎから道床に作用する荷重は、概ね正弦波荷重となります。そこで、列車荷重の道床や路盤への影響を検討する

### ☞ 主応力方向, 主応力軸

3次元空間において、固体材料に何らかの応力が作用している場合、内部のある微小な要素に着目すると、要素に作用している応力状態が、互いに直交する3方向の圧縮応力が引張応力のみで表現できる方向があります。これらの3つの応力を主応力といい、その方向を主応力方向または主応力軸といいます。一般に、3主応力のうち、最大主応力を $\sigma_1$ 、最小主応力を $\sigma_3$ と記述します。

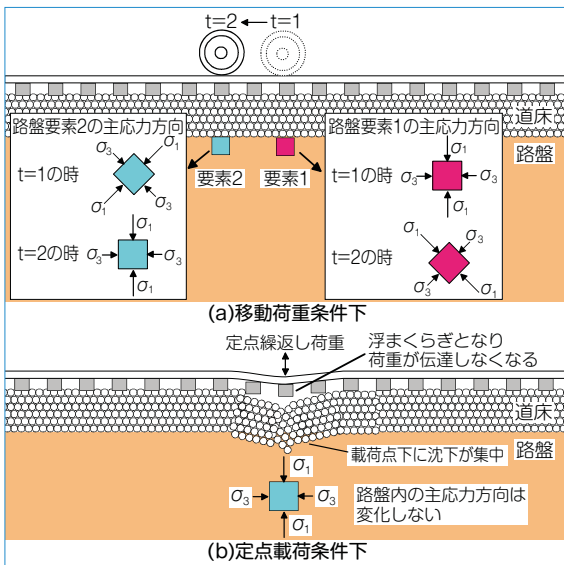


図1 道床・路盤

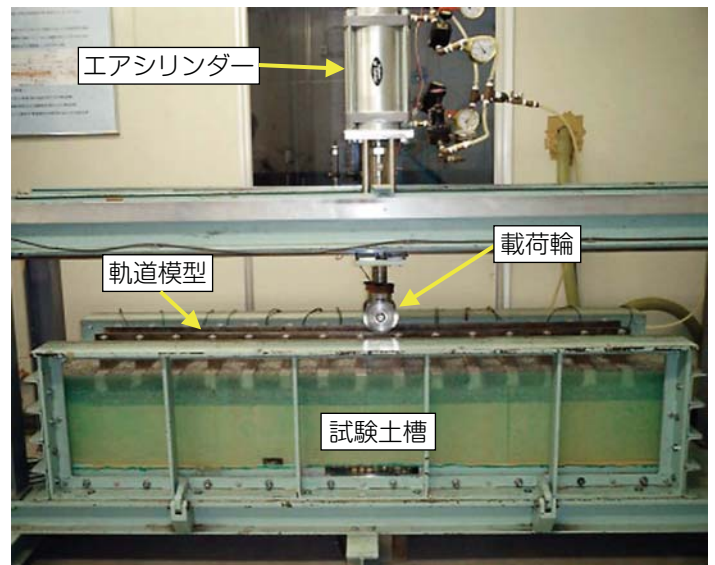


図2 小型移動荷重載荷試験装置 (車輪移動方式)

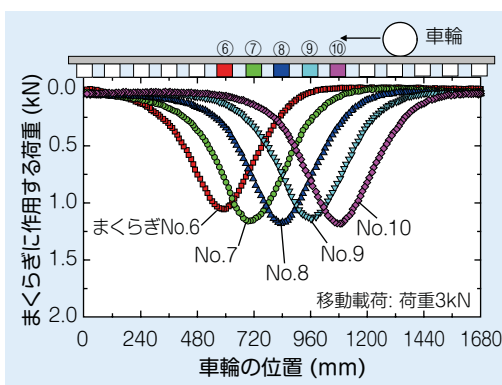


図3 移動荷重載荷のまくらぎ荷重波形

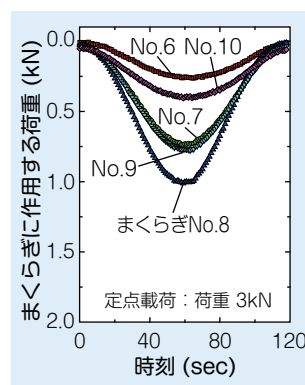


図4 定点荷重のまくらぎ荷重波形

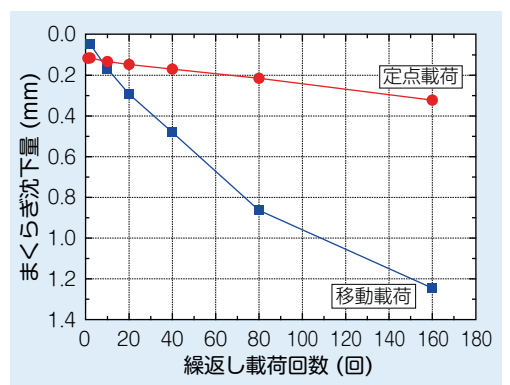


図5 移動荷重載荷と定点荷重の沈下量の違い

実験においては、図1 (b) に示すような定点載荷条件下で正弦波荷重の繰返し載荷試験を行うのが一般的です。しかし、この載荷条件の場合、路盤内の主応力は、大きさだけが変化し、方向が変化することはありません。また、道床や路盤の沈下は載荷点の直下に集中し、さらに沈下が進むと、レールの変形が道床の変形に追従できなくなって、まくらぎから道床に荷重を伝達できなくなってしまいます。

以上のように、定点繰返し載荷試験は、道床や路盤内部の応力状態や変形を正確に再現することができないため、ほとんどの場合は定性的な評価に用いることとなります。すなわち、列車荷重によって道床や路盤に発生する様々な現象を忠実に再現するには、移動荷重条件を再現できる試験装置が必要となります。

### 小型移動荷重載荷試験装置 (車輪移動方式)

列車走行による移動荷重載荷を再現するには、軌道模型に実際に車輪を移動させる方法が原理的には最も簡単です。そこで、鉄道総研では、図2に示す車輪移動方式の小型移動荷重載荷試験装置<sup>1)</sup>をまず開発しました。この試験装置は、エアシリンダーで荷重制御された載荷輪が軌道模型上に往復移動して、移動荷重を再現します。

軌道模型は1/5縮尺を標準としており、まくらぎ (15本) とレールの間に設置された二方向ロードセルによって、レールから各まくらぎに伝達される鉛直荷重と水平荷重 (軌道延長方向) を計測することができます。

本試験装置を用いた試験結果の一例を図3および図4に示します。図3は、3kNの静的な輪重が軌道模型上を移動

した場合の模型中心付近の各まくらぎに作用する鉛直荷重の波形です。各まくらぎには、概ね同等の大きさで、まくらぎ一本分ずつ位相がずれた正弦波荷重が作用していることがわかります。

一方、図4は、3kNの正弦波荷重を、模型中心のNo.8まくらぎ上で定点繰返し載荷した場合の各まくらぎが負担する荷重波形です。各まくらぎの荷重波形は、No.8こそ移動荷重載荷に近い波形となりますが、その他のまくらぎが負担する荷重の波形はこれよりも小さくなります。したがって、同じ回数の載荷を行っても、定点載荷条件下では、移動荷重条件下よりも塑性変形を過小評価する可能性が高いこととなります。

図5は、本試験装置で、バラスト軌道模型の載荷試験を行った結果の一例ですが、移動荷重載荷と比較して、定点載荷は沈下量が約1/4となっている

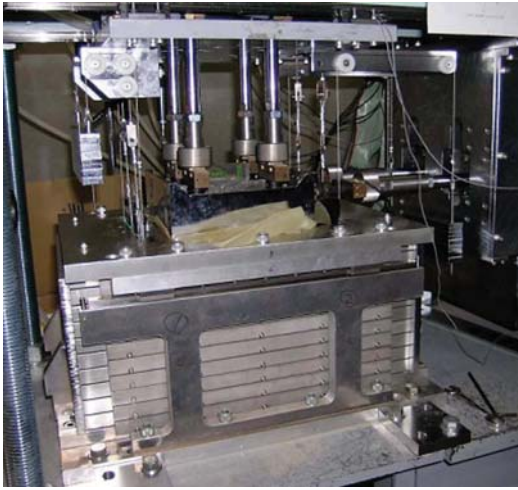


図6 主応力軸回転試験装置

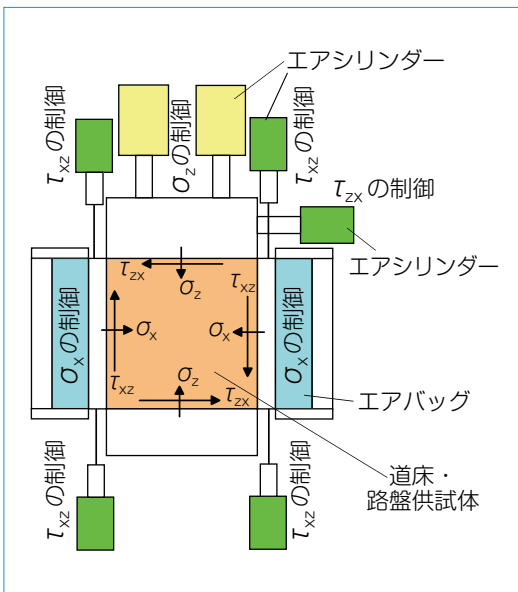


図7 主応力軸回転試験装置の基本原

ことがわかります。

### 主応力軸回転試験装置

軌道模型を用いた移動荷重載荷試験は、列車荷重によって発生する現象を再現するのに適しています。しかし、軌道模型の境界条件の影響が強くなるため、道床や路盤の材料特性を詳細に把握することが難しいという問題があります。移動荷重条件下の道床や路盤の材料特性を個々に把握するには、図1のような主応力方向の回転を伴う応力状態を考慮した要素実験が必要です。

鉄道総研が開発した主応力軸回転試験装置<sup>2)</sup>(図6)は、平面ひずみ状態(※参照)の要素に対して、すべての圧縮応力( $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$ )と、せん断応力( $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{zx}$ )を独立して制御することが可能なせん断

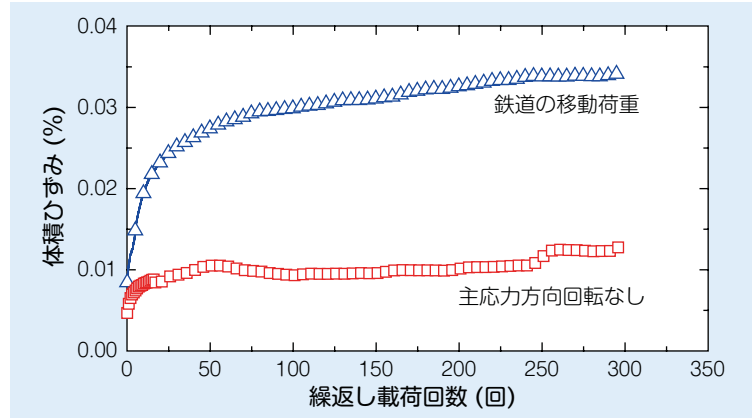


図8 主応力方向の回転が鉄道路盤の変形に与える影響

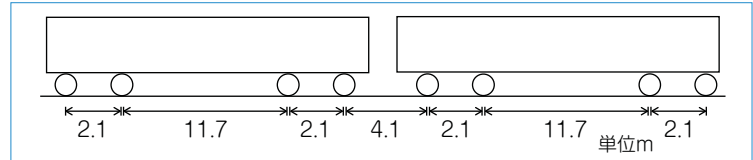


図9 列車荷重の配置(在来線電車の例)

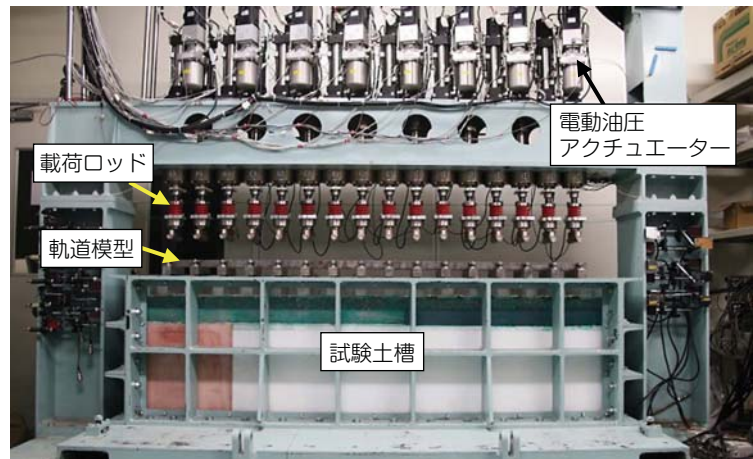


図10 小型移動荷重載荷試験装置(マルチアクチュエーター方式)

試験装置です(図7)。これにより主応力方向が変化する移動荷重条件下の道床・路盤内部の応力状態とひずみの変化を忠実に再現することができます。

図8は、本試験装置を用いて行った、鉄道の移動荷重条件下の路盤要素の繰返しせん断試験結果の一例です。同じ大きさの繰返し応力を受けても、主応力方向が回転する移動荷重条件下では、主応力方向が回転しない場合に比べて2倍以上のひずみが蓄積していることがわかります。

では、なぜ主応力方向が変化すると沈下が大きくなるのでしょうか？これは、道床バラストや路盤が土質材料、すなわ

ち粒状体で構成されていることが大きな要因です。粒状体で構成された構造の変形は、個々の粒子の配列が変化することで生じますが、ある応力を受けて一度確定した粒子の配列は、それと同等以下の応力を同じ方向に何度加えてもあまり変化しません。しかし、以前に力を受けた方向と違う方向の応力を与えると、粒子の配列は乱されて動きやすくなります。例えば、乾いた砂浜の上に30cm四方くらいの板を置き、その上で垂直に何度も飛び跳ねると、最初は板が砂に埋まりますが、ある程度砂が締め固まればそれ以上沈下しなくなります。しかし、そこで

#### ※ 平面ひずみ状態

三次元空間において、一方向にひずみ(変形)が生じない状態を平面ひずみ状態といい、二次元的な変形問題として取り扱うことができます。変形が生じない方向は主応力方向の一つであり、最大主応力 $\sigma_1$ よりも小さく最小主応力 $\sigma_3$ よりも大きい中間主応力 $\sigma_2$ が作用します。

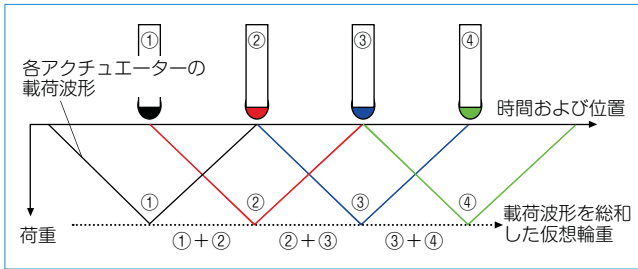


図11 マルチアクチュエーターによる移動荷重の概念

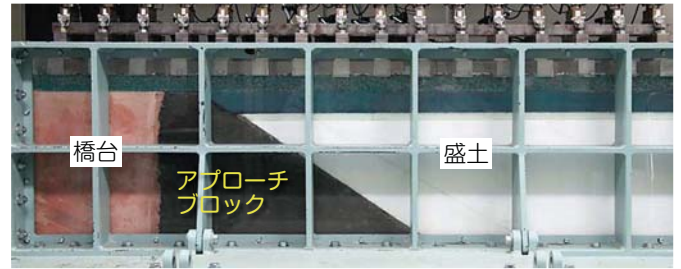


図13 構造境界部の緩衝構造の模型実験

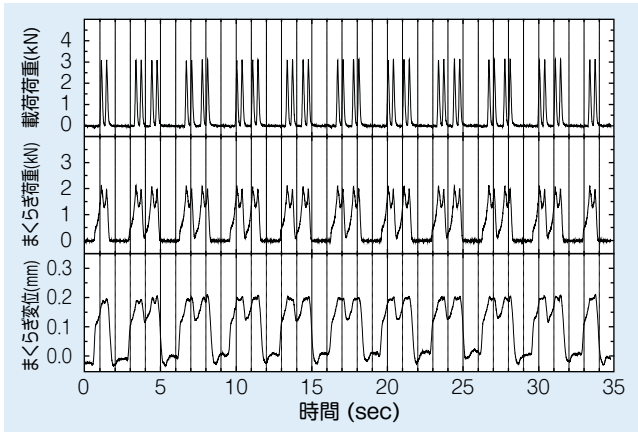


図12 MOSCCOMによる軌道模型の荷重・変位波形の例(10両編成列車)

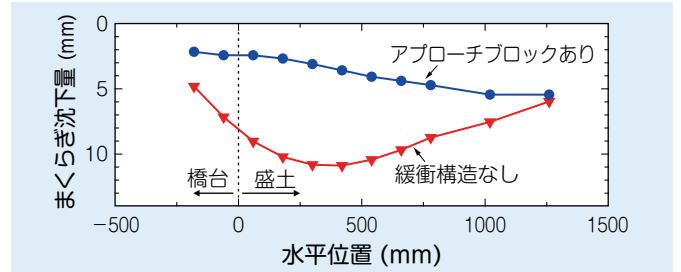


図14 構造境界部の緩衝構造の沈下抑制効果

体を前後左右に大きく揺ると、板は再び砂に埋まっていくでしょう。移動荷重が作用する道床バラストや路盤に対しても同様の現象がおこっているため、なかなか沈下が収束しないのです。

### 小型移動荷重載荷試験装置 (マルチアクチュエーター方式)

実際の軌道に作用する列車荷重は、**図9**に示すように、複数の車輪や台車および車両の組合せによる連行荷重(参照)であり、道床や路盤の応力分布は、この荷重列からレールおよびまくらぎを介して道床に作用した応力の重ね合わせとなります。その結果、応力の大きさだけでなく主応力方向の分布も、作用荷重の分布によって複雑に変化することになります。すなわち、模型試験においてバラストや路盤の変形挙動を正確に再現するには、移動荷重条件に加えて、作用荷重の分布も正確にシミュレートする必要があります。

#### 連行荷重

複数の輪軸を所定の間隔で配置して作用させる荷重のことを連行荷重といい、鉄道構造物は車両長や台車の設置間隔を想定した連行荷重によって設計されます。

ます。しかし、前記の車輪移動方式の移動荷重載荷試験装置では、載荷車軸数は1~2軸が限度であり、実際の軌道に作用する荷重分布を正確に再現するのは困難です。

そこで、鉄道総研では、レール延長方向に複数のアクチュエーター(載荷装置)を配置し、それらを順次位相差を付けて作動させることで、実際の列車編成を模擬した移動荷重を再現するマルチアクチュエーター方式の小型移動荷重載荷試験装置(**図10**、以下MOSCCOMという)を開発しました<sup>3)</sup>。

**図11**にマルチアクチュエーターを用いた移動荷重載荷の概念図を示します。等速移動を表現する場合の各アクチュエーターの基本波形は三角波となり、アクチュエーター①→④へと位相を1/2ずつ遅らせて載荷することで、移動荷重を表現することができます。**図12**に、MOSCCOMを用いて10両編成の列車走行を模擬した試験における、軌道模型中心のまくらぎの荷重および変位の波形を示します。まくらぎに作用する荷重とそれに伴う変位の応答が、連行荷重の重ね合わせの結果として、複雑な波形となっていることがわかります。

MOSCCOMを用いた実験の例として、盛土と橋台の構造境界部の軌道沈下対策に関する実験を紹介しますが、**図13**、**図14**は、200列車通過後のまくらぎ沈下量の分布を示したものが、アプローチブロックとよばれる緩衝構造を使用することにより、構造境界部で発生する局所的な沈下が低減していることがわかります。

### おわりに

移動荷重条件を再現できる試験装置によって、鉄道における道床や路盤の変形のメカニズムに関する新たな知見が得られ、設計や維持管理に反映されています。今後は、実際の現象をより正確に再現するために、実物大スケールの移動荷重載荷についても検討を進めます。**RRR**

### 文献

- 1) 村本, 関根, 桃谷: 軌道模型の繰返し載荷試験における載荷方法の影響, 土木学会第56回年次学術講演会, III-A, pp.434-435, 2001
- 2) 渡辺, 篠田, 桃谷, 龍岡他: 主応力方向が制御可能な要素試験装置の開発, 第40回地盤工学研究発表会, pp.465-466, 2005
- 3) 村本, 桃谷, 関根: 移動する鉄道荷重を再現した移動荷重載荷試験装置の開発, 地盤工学学会誌, pp.8-11, 2008