

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

Development of Moving Wheel Loading Test Apparatus to Simulate Running Train Load

村 本 勝 己 (むらもと かづみ)

財鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部

桃 谷 尚 嗣 (ももや よしつぐ)

財鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部

関 根 悦 夫 (せきね えつお)

財鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部

1. はじめに

地盤工学において、「交通荷重」というキーワードに対しては多くの場合、まず「地盤振動」や「繰返し荷重」といったキーワードが連想されるようである。しかしながら、「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あるから、本来、「交通荷重」には「荷重が移動する」という概念が含まれている。すなわち、交通荷重に伴う地盤の挙動を検討するには、本来は移動荷重条件が前提とされるべきである。

ところで、移動荷重に伴って地盤内の主応力軸が回転し、それが粒状体のせん断変形に対して少なからぬ影響があるという概念は古くからあって、中空ねじり試験等で要素実験的に検討されてきた。しかし、土構造物において主応力軸の回転が顕著な領域は、境界条件の影響が大きい領域でもあるため、実現象を要素実験的なアプローチだけで検証するには限界がある。このように、境界条件が材料特性に大きく影響するような問題の検討に模型実験は有効であり、車輪移動を前提とした移動荷重の模型試験装置は道路や、航空機の滑走路等の研究において世界中で用いられてきた。

鉄道の場合はバラストや路盤への荷重の作用点（≡まくらぎ）そのものの移動は地盤工学的には考慮しなくてよいと、移動荷重条件に関してはあまり重視されてこなかった。しかし、近年は、必ずしも地盤工学的な見地からだけではないが、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る。そこで、本報告では、鉄道総研において開発した小型移動荷重載荷試験装置およびマルチアクチュエータ方式小型移動載荷試験装置（以下 MOSCCOM: Moving-load Simulator with Concurrently Controlled Multi-actuators）について、その開発経緯や特徴等について紹介する。

2. 小型移動荷重載荷試験装置の開発

2.1 移動荷重載荷試験装置の開発の経緯

列車が走行すると、一定の大きさの荷重（輪重）がレール上を移動し、その荷重がまくらぎ、バラスト、路盤を介して地盤に伝達される。このときに、地盤内のある要素に着目すると図一 1 (a) のように、主応力軸の回転を伴いながら載荷-除荷が繰り返されている。また、各ま

くらぎは同じように沈下する（ただし、後述するように、実際には路盤条件や軌道構造の不連続性によって不同沈下が生じるため、その対策が課題となっている）。

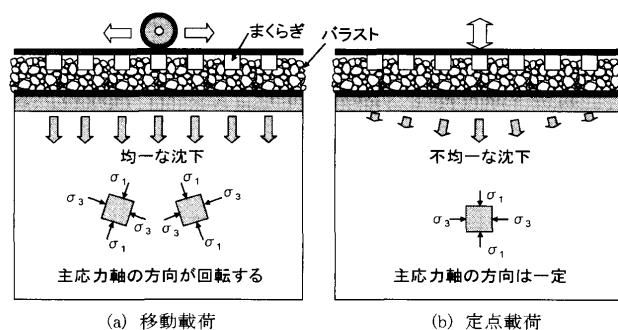
それに対して従来、列車荷重による軌道および路盤の変形特性を検討する際には、実物大の試験軌道を構築し、図一 1 (b) のように定点繰返し載荷を行うという方法が一般的であった。これは、実際に移動荷重を繰返し与える試験を行うのは困難であるという理由による。しかしながらこの方法では、主応力軸の回転の影響を評価できないことに加え、載荷点直下の地盤が相対的に大きく沈下するため、レールを介して他のまくらぎが荷重を負担し、繰返し載荷とともに地盤に作用する応力の最大値が減少するという問題があった。

そのようなことから、これまで列車荷重による軌道および路盤の変形特性については不明な点が多く、繰返し載荷による塑性変形量を適切に評価する方法は確立されていなかった。そこで、移動する列車荷重による路盤の変形特性を正しく評価することを目的として、車輪を移動させながら載荷を行う新しい試験装置の開発を行った。

2.2 小型移動荷重載荷試験装置の概要

開発した小型移動荷重載荷試験装置¹⁾を図一 2 に示す。この試験装置は模型軌道に対して移動する車輪により荷重を与える構造となっており、載荷輪には電空変換器によりパソコンから制御され空圧でエアシリンダーを介して荷重が与えられる。また、車輪は載荷フレームと平行に取り付けられたスクロッドの回転に沿って移動する構造であり、車輪の移動および反転についてもパソコンより制御を行っている。

軌道模型は 1/5 縮尺を標準としており、まくらぎ



図一 1 移動載荷と定点載荷の違い

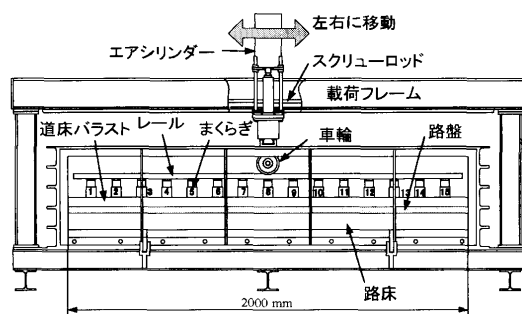


図-2 小型移動荷重試験装置

(15本)とレールの間に設置された二方向ロードセルによりレールから各まくらぎに伝達される荷重を計測できる。また、土槽の底面には二方向ロードセル(13点)が受圧板により分割して配置されており、圧力分布が測定できるようになっている。また、土槽側面はアクリル板であるため、連続写真または動画撮影を行うことによって、地盤内のひずみ分布を計測することができる²⁾。

2.3 移動載荷と定点載荷による変形特性

小型移動荷重試験装置を用いて移動載荷および定点載荷を行った際の典型的な例として、模型中央部に設置したまくらぎ No. 8 の荷重-変位曲線を図-3 に示す。このケースでは豊浦砂 ($D_r=80\%$) で路盤を作成し、その上に軌道模型を直接設置している。

移動載荷を行うと、まくらぎに作用する荷重は繰返し載荷とともにわずかに増加している。これは繰返し載荷とともに地盤が締め固まり、支持剛性が増加することでレールの曲げ剛性による荷重分散効果が低減し、車輪直下のまくらぎに作用する荷重が増加するためである。なお、一般的な軌道ではレール曲げ剛性による荷重分散効果により、車輪直下のまくらぎで40%程度、その両隣のまくらぎで各20%程度、さらにその隣のまくらぎで各10%程度の荷重を負担するが、この模型実験においても、移動載荷では車輪直下のまくらぎに作用する荷重は載荷荷重の40%程度であることが確認できる。

それに対して定点載荷(まくらぎ No. 8 上で載荷)を行うと、載荷点直下のまくらぎに作用する荷重は繰返し載荷とともに減少する。

移動載荷において、各まくらぎに作用する荷重の波形を図-4 に示す。車輪の移動に伴い、各まくらぎが順次同じように荷重を受けている様子が確認できる。一方、図-5 に示すように、定点載荷の場合は載荷初期にはおおむね移動載荷に近い荷重分担であるものの、繰返し載荷を行うと、各まくらぎに作用する荷重の割合が均一化する方向に変化してしまう。すなわち、地盤に作用する応力の最大値が低減してしまう。

このように、移動載荷と定点載荷では主応力軸の回転の有無の影響に加え、地盤に作用する応力が異なることがわかった。試験結果から移動載荷を行うと定点載荷の4~5倍程度の塑性沈下が生じることがわかったが(図-3, 荷重3kNの結果を参照)、主応力軸を回転させる要素試験の結果³⁾から、列車荷重の移動で生じる主応

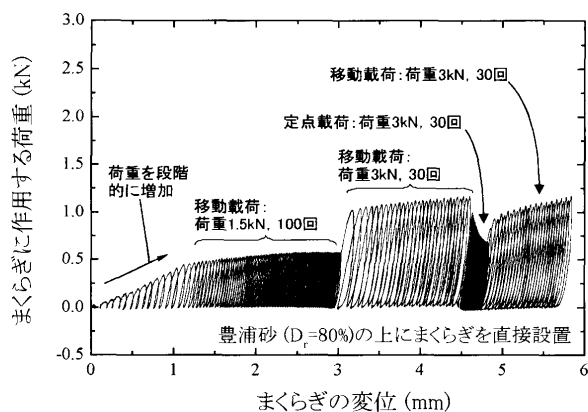


図-3 まくらぎの荷重-変位曲線

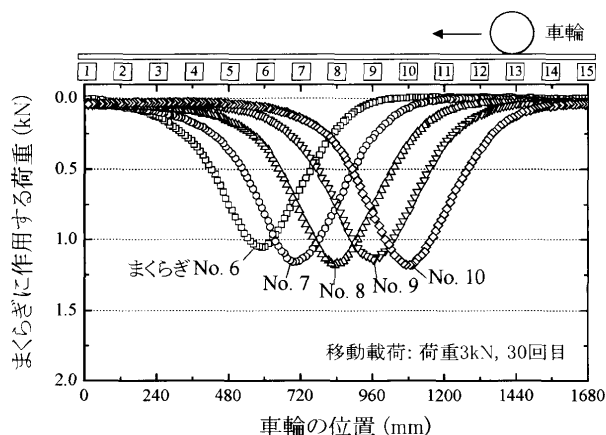


図-4 まくらぎに作用する荷重の波形(移動載荷)

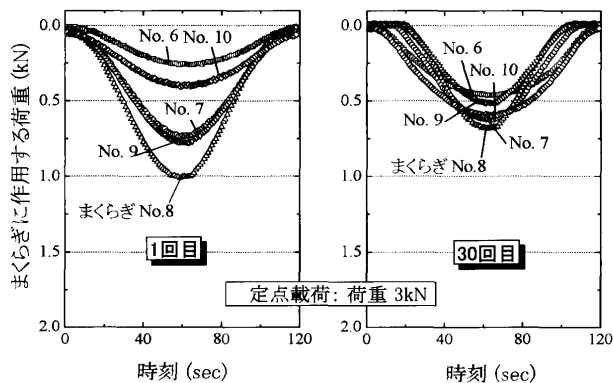


図-5 まくらぎに作用する荷重の波形(定点載荷)

力軸回転を与えると、主応力軸が回転しない場合の2倍程度の塑性ひずみが生じることが確認されている。すなわち、移動載荷と定点載荷の違いには、主応力軸の回転による影響と地盤に作用する応力の変化の影響がそれぞれ寄与していることがわかった。

実物大試験においても定点載荷を行うとこれと同様の現象が生じるため、特にバラスト軌道などの沈下の比較的大きい構造を対象とすると軌道の変形特性を適切に評価することができない。ただし、実物大試験の定点載荷試験においても、塑性沈下がほとんど生じない条件であれば、弾性的な変形については適切に評価できることが確認されている⁴⁾。

3. マルチアクチュエータ方式小型移動荷重載荷試験装置 (MOSCCOM) の開発

3.1 MOSCCOM の開発の経緯

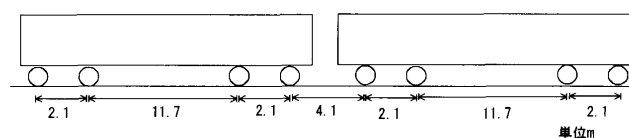
小型移動荷重載荷試験装置によって、列車荷重による軌道の変形は、移動載荷試験を行わなければ定量的に評価するのは難しいことがわかった。これは、

- ① バラストや路盤に作用する応力の方向の変化
- ② まくらぎからバラストに作用する荷重の分布の二つの条件が、移動載荷でなければ実際と異なるという理由による。特に、主応力軸の回転の影響が比較的にまくらぎ直下のバラストの変形については、②の荷重分布の影響が支配的となる⁵⁾。

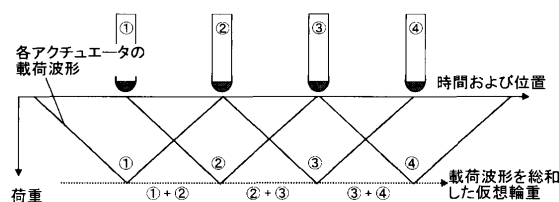
ところで、実際の軌道に作用する荷重は、図—6 に示すように、複数の車輪および台車で構成された列車荷重であり、バラストや路盤の応力分布は、この荷重列からレールおよびまくらぎを介してバラストに作用した応力の重ね合わせとなる。その結果、応力の大きさだけでなく主応力軸方向の分布も、作用荷重の分布によって変化する。すなわち、模型試験においてバラストや路盤の変形挙動を正確に再現するには、移動荷重条件に加えて、作用荷重の分布も正確にシミュレートする必要がある。しかし、2 章で紹介したような車輪移動方式の移動載荷試験装置では、載荷車軸数は 1~2 軸が限度であり、実際の軌道に作用する荷重分布を正確に再現することは難しいことから、新たな試験装置を開発することにした。

鉄道においてバラスト以下に作用する荷重は車輪から直接作用するのではなく、レールとまくらぎを介してバラストに伝達されるので、必ずしも車輪を使用する必要はない。そこで、レール延長方向に複数のアクチュエータを配置し、それらを順次位相差を付けて作動させることで移動荷重を再現することを考案し、MOSCCOM の開発に至った。

図—7 にマルチアクチュエータを用いた移動荷重載荷の概念図を示す。等速移動を表現する場合の各アクチュエータの基本波形は三角波となり、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。



図—6 列車荷重の例



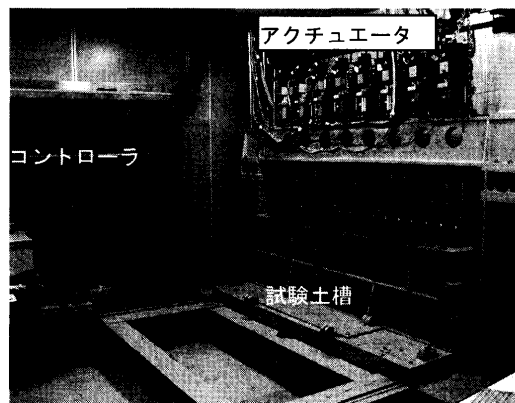
図—7 マルチアクチュエータによる移動荷重の概念図

3.2 MOSCCOM の概要

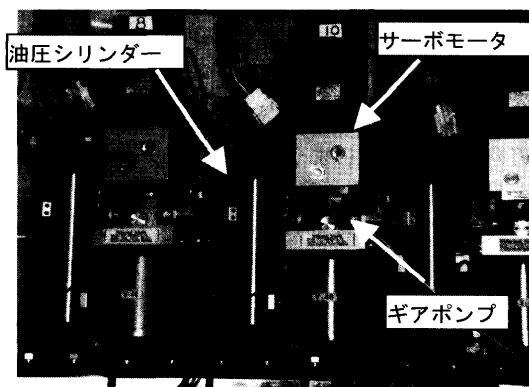
マルチアクチュエータを用いて移動荷重を再現するには、各アクチュエータに高速のリアルタイムフィードバック性能が必要となるため、油圧制御が必須となる。しかし、本システムでは使用するアクチュエータの本数が多いので、通常の油圧システムを用いると、大型の外部油圧源が必要となる上に油圧配管が複雑になってしまう。そのため、通常の油圧システムでは、マルチアクチュエータを用いた移動載荷試験装置は導入コストおよびメンテナンスコストが膨大となる。

そこで、MOSCCOM では、サーボモータと小型ギアポンプを組合せた電動-油圧アクチュエータを採用した(図—9)。この電動-油圧アクチュエータは、それぞれが独立した小型のポンプ(油圧源)を持つため、外部に大きな油圧源や冷却装置を必要としない。各ポンプは、直結したサーボモータによって直接フィードバック制御されるので、アクチュエータに接続されるのは電気配線のみで油圧配管が不要なため信頼性が高く、使用する作動油の量も極めて少量で足りる。結果として、導入コストやメンテナンスコストを大幅に圧縮することができた。

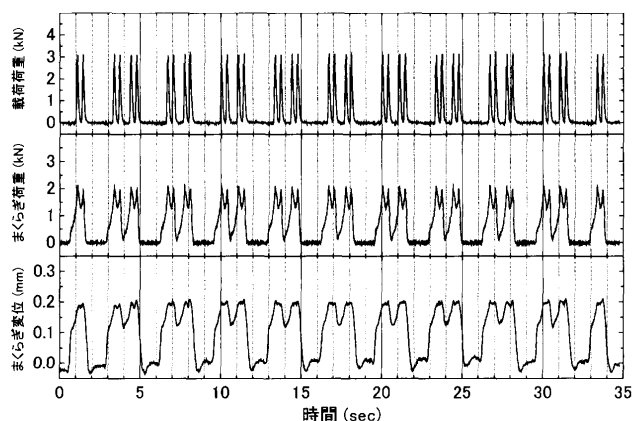
MOSCCOM によって載荷することができる列車荷重と、それに伴う軌道模型の応答荷重・変位波形を図—10 に示すが、実際の列車走行に伴う応答荷重、応答変位に近い波形が得られている。



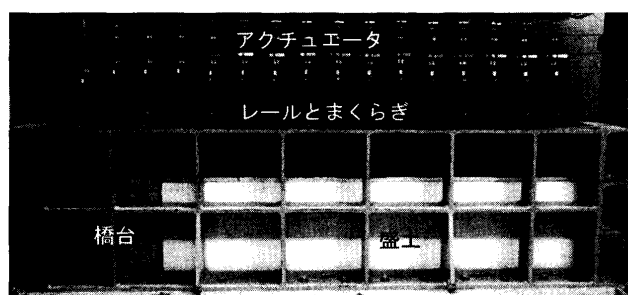
図—8 マルチアクチュエータ方式小型移動荷重載荷試験装置 (MOSCCOM)



図—9 MOSCCOM の電動-油圧アクチュエータ



図一10 列車荷重に対する軌道模型の応答荷重・変位波形の例（10両編成列車）



図一11 移動荷重載荷試験における盛土と橋台の接続部の模型（緩衝構造なし）

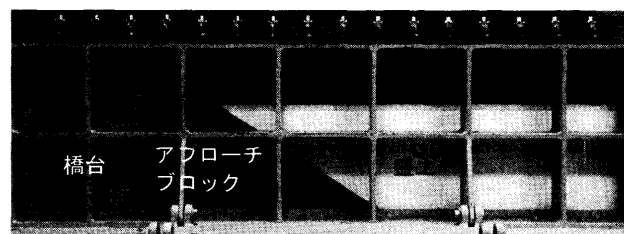
3.3 MOSCCOM を用いた移動荷重載荷試験の例

橋台裏や踏切など、軌道や路盤の構造が変化する箇所は支持剛性の変化が大きいので、一般にバラストや路盤の塑性変形が大きくなる。こういった構造境界部の軌道や路盤の応答を適切に評価するには、移動荷重載荷試験装置が有効である。一例として、MOSCCOMを用いた移動荷重載荷試験による盛土と橋台の接続部の緩衝構造の検討⁶⁾について紹介する。

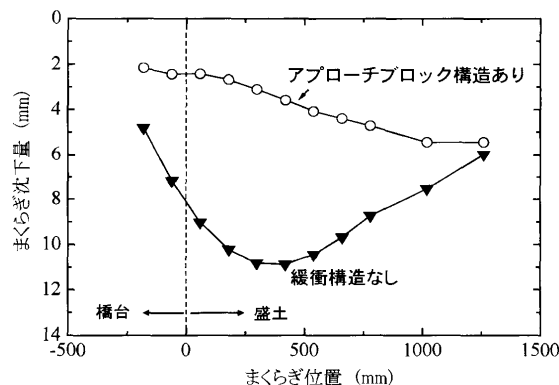
軌道・路盤模型は、緩衝構造なしの場合（図一11）と緩衝構造としてアプローチブロックを用いた場合（図一12）を想定した。荷重条件は、車軸荷重を2 kN（応力レベルは実荷重相当）とし、走行速度は3.6 km/h（実スケールで18 km/hに相当）で、10両編成（車軸数＝40軸）の列車走行を想定した移動荷重を載荷した。走行方向は1列車ごとに変更している。

図一13に200列車が走行した後の軌道沈下形状の比較を示す。緩衝構造がない場合は、橋台裏の盛土部で大きな軌道沈下が発生している。これは、軌道を支持する剛性が橋台部と盛土部とで急激に変化し、各まくらぎの荷重分担が著しく不均一になることが原因と考えられる。これに対して、橋台と盛土との間にアプローチブロックを敷設すると、軌道の支持剛性が連続的に変化するので、局所的な軌道沈下が抑制されることがわかる。

このように、移動荷重載荷試験装置を用いることによって、列車走行による構造境界部のバラストや路盤の塑性変形を検討することができるようになった。



図一12 移動荷重載荷試験における盛土と橋台の接続部の模型（アプローチブロック構造あり）



図一13 軌道沈下形状の比較（10両編成列車，200列車通過後）

4. おわりに

移動荷重載荷試験装置が開発されたことによって、鉄道における軌道・路盤の変形のメカニズムに関して新しい知見が数多く得られ、設計や維持管理手法に反映されつつある。今後は、移動荷重条件下の模型試験結果が要素試験や数値解析に反映され、地盤工学における交通荷重分野の研究がさらに発展することを期待する。

参考文献

- 1) 村本勝己・関根悦夫・桃谷尚嗣：軌道模型の繰返し載荷試験における荷重方法の影響，土木学会第56回年次学術講演会，Ⅲ-A，pp. 434～435，2001。
- 2) Momoya, Y., Sekine, E., & Tatsuoka, F.: Deformation characteristics of railway roadbed and subgrade under moving wheel load, *Soils and Foundations*, Vol. 45, No. 4, pp. 99～118, Japanese Geotechnical Society, 2005.
- 3) Momoya, Y., Watanabe, K., Sekine, E., Tateyama, M., Shinoda, M. & Tatsuoka, F.: Effects of continuous principal stress axis rotation on the deformation characteristics of sand under traffic loads, *Design and Construction of Pavements and Rail Tracks-Geotechnical aspects and Processed Materials-*, pp. 77～87, Taylor & Francis, 2007.
- 4) 桃谷尚嗣・関根悦夫・丸山 修・米澤豊司・山崎貴之：粘性土地盤に対応したスラブ軌道用 RC 路盤の検討ー載荷試験ー，第42回地盤工学研究発表会，pp. 989～990，2007。
- 5) 村本勝己・中村貴久・関根悦夫：バラスト軌道の噴泥と列車荷重波形の関係，第41回地盤工学研究発表会，pp. 1075～1076，2006。
- 6) 桃谷尚嗣・関根悦夫・高橋貴蔵・中村貴久：構造物境界部における軌道沈下対策のための路盤構造の検討，第62回土木学会年次学術講演会，4-269，pp. 537～538，2007。

（原稿受理 2008.5.23）