

自動沈下補正まくらぎによる 構造境界部の軌道変位抑制効果

村本 勝己* 中村 貴久*

An Effect of Automatically Irregularity Correcting Sleepers on Maintaining Track Level around Conversion Part between Different Track Structures

Katsumi MURAMOTO Takahisa NAKAMURA

At locations between ballastless track and ballast track, it is a common knowledge that track irregularity becomes locally discontinuous; therefore loosen sleepers are likely to occur. As a countermeasure for the local track-irregularity, the authors developed the track structure, which adopted the automatically irregularity correcting sleepers as termed AICS. Since the AICS is a sleeper, which itself adds to its height automatically even if ballast deforms, rail subsidence is accordingly preventable. In this paper, the authors performed the moving load tests with 1/5 scale track models, and thereby grasped the relationship between the number of the AICS and the restraint effects of the track irregularity. In addition, the authors clarified the track-irregularity restraint mechanism for the track structure, which adopted the AICS.

キーワード：バラスト、軌道沈下、移動荷重、自動沈下補正まくらぎ

1. はじめに

接続軌道等の直結系軌道とバラスト軌道との境界部においては、局所的な道床の沈下によって浮まくらぎが発生しやすいことはよく知られている（図1）。筆者らは、軌道構造境界部においては、まくらぎが支持する荷重の分担が著しく不均一となり、その結果、粒状体であるバラストの塑性変形（沈下）が局所的に増大することを模型試験によって確認している¹⁾。一般に、軌道の支持剛性が急激に変化する構造境界部は局所的な軌道変位が発生しやすいとされるが、仮に支持剛性に大きな違いがなくても、塑性変形がほとんど生じない直結系軌道と、塑性変形が避けられないバラスト軌道の境界部において、局所的な軌道変位を防止するのは極めて困難である。

そこで、筆者らは、軌道構造境界部の局所的な軌道変位対策として、道床が沈下しても軌道変位を抑制できる自動沈下補正まくらぎを用いた軌道構造を提案し、開発を行っている²⁾。筆者らは、これまでに、1/5スケール模型および実物大試作を用いた模型試験によって、その顕著な軌道変位抑制効果を確認している。本報告においては、自動沈下補正まくらぎの施工本数と軌道変位の抑制効果との関係について、1/5スケール模型を用いた移動荷重載荷試験によって検討した結果を報告する。

2. 自動沈下補正まくらぎを用いた軌道構造

2.1 自動沈下補正まくらぎの基本構造

自動沈下補正まくらぎとは、レールが締結された上部ブロック（FRP製の合成まくらぎ）と、バラスト内に埋設される下部ブロック（金属製の箱）との間に自動沈下補正機構を挟んだ構造が基本である（図2）。自動沈下補正機構とは、上下方向に自由に伸長するが短縮しないラチェット機構のことであり、詳細は後述する。

この自動沈下補正まくらぎを、軌道構造境界部のバラスト軌道に一定本数設置すると、道床が局所的に沈下し

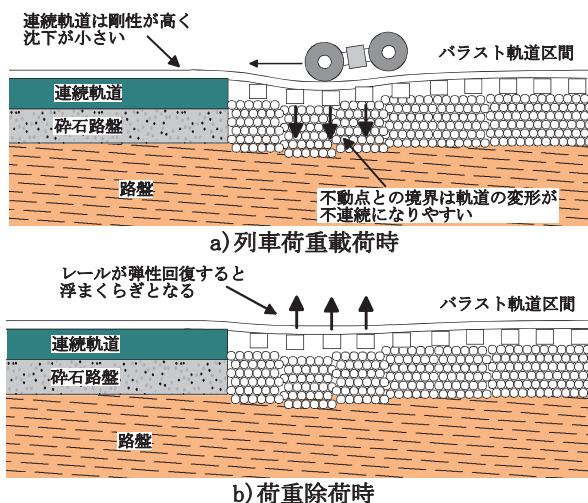


図1 軌道構造境界の浮まくらぎ発生メカニズム

* 軌道技術研究部（軌道・路盤）

特集：軌道技術

でも、各まくらぎが受動的に高さを増大して、各まくらぎ間の相対沈下を補正する。この結果、無負荷状態で、まくらぎがレールにぶら下がる状態、すなわち浮まくらぎの発生が抑制されることになる（図3）。

2.2 自動沈下補正機構の基本原理解

自動沈下補正機構については、いくつかの方式について検討を行ったが、コストや安全性等を踏まえて検討した結果、現在開発を進めているのが粒状体を用いたラチェット機構である。図4に、粒状体を用いた自動沈下補正機構の基本原理解を示す。

自動沈下補正機構は、基本的に内筒と外筒の2重構造であり、内筒の底面には粒状体の排出口がある。内筒は上部ブロックを介してレールと繋がっており、外筒は下部ブロックを介してバラストに接している。ここで、列車荷重の作用等によって道床が局所的に沈下すると、外筒がそれに追従して沈下し、内筒との間に隙間が発生する。この隙間に粒状体が落下して堆積し、内外筒の相対変位が補正される。

なお、排出口の面積を広げたり数を増やすことで、粒状体は内筒から外筒へ落下しやすくなって沈下補正のレスポンスは向上するが、負荷が掛った際に逆流しやすくなるため支持できる最大荷重が小さくなる。排出口の形状、面積、および粒状体の粒径等の最適値については検討中である。

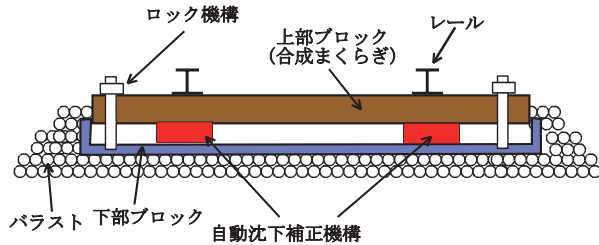


図2 自動沈下補正まくらぎの基本構造

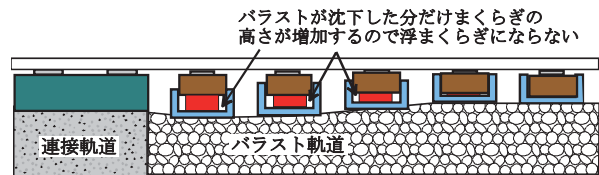


図3 浮まくらぎ防止の原理

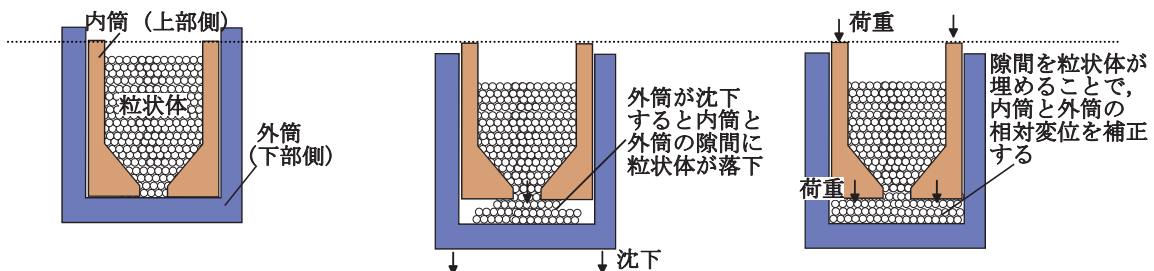


図4 粒状体を用いた自動沈下補正機構の原理

3. 移動荷重載荷試験

3.1 試験の概要

表1に試験条件を、図5に供試体の概要を示す。模型の縮尺は1/5で、軌道横断方向を同一断面とした平面ひずみ条件である。路床には軟弱路盤を想定して厚さ400mmのEPSブロック（D-20、ヤング率=6MPa）を用い、その上に粒度調整碎石を厚さ60mm締め固めて路盤を作製し軌道を設置した。多層系弾性解析による検討結果では、本供試体の路床面の K_{30} 値は約30MN/m³に相当し、粒度調整碎石層のヤング率を設計標準³⁾に基づいて40MPaと仮定すると路盤面の K_{30} 値は約50MN/m³に相当する。

軌道構造は締結番号1～3が路盤直結の接続軌道、4～10番の7本を自動沈下補正まくらぎ、11～16番の6本をPC3号相当の通常まくらぎとした。模型まくらぎは、アルミニウムの削り出しで作製し、自動沈下補正機構の排出口径はφ3mm、内筒の底面に対する開口率は2.4%とした。また、自動沈下補正機構の粒状体には豊浦珪砂（粒径0.1mm～1mm）を使用した。レールの曲げ剛性は50kgNレール相当とした。

載荷は、マルチアクチュエータ方式移動載荷試験装置を用いて行った。本試験装置の詳細については文献4)を参照されたい。試験ケースは沈下補正を作動させない場合（CASE1）、沈下補正機構を4番まくらぎから3本、5

表1 試験条件

模型の縮尺	1/5
軌道延長	1800mm（16締結）
路盤面のK値	K_{30} 値にして50MN/m ³ 相当
軸重	3kN （実物大で100kN相当）
移動速度	1000mm/s （実物大で18km/h相当）
移動方向	100列車ごとに変更
列車編成	10両（M荷重40軸）
列車数	5000列車（20万軸）
試験ケース	CASE1：沈下補正なし CASE2：沈下補正3本 CASE3：沈下補正5本 CASE4：沈下補正7本 CASE5：CASE1終了後 沈下補正7本作動

本、7本作動させた場合（CASE2～4）、CASE1の5000列車走行終了後に沈下補正機構を7本作動させてさらに5000列車走行させたCASE5の5ケースである。荷重はM荷重相当の列車編成荷重（図6）で軸重3kNとした。これは、まくらぎ下面圧力を考慮して実物大の軸重に換算すると100kN相当となる。この列車荷重を5000列車、車軸通過数にして20万回載荷した。なお、一般部に比べて剛性の低い軌道模型両端部については、弾性変形量を一般部にできるだけ合わせるために、1番および16番アクチュエータは所定軸重の1/3、2番および15番アクチュエータは所定軸重の2/3に載荷荷重を減じている。試験状況を図7に示す。

3.2 軌道沈下量

図8～図11に、各レール締結位置を列車の先頭から21番目の車軸が通過した際の軌道沈下量の分布の推移を示す。CASE1の場合、接続軌道端部から急速に軌道沈下が進み、7番以降のまくらぎで大きな落ち込みが発生している。CASE2の場合、軌道沈下のピークがCASE1よりもわずかに右に移動し、沈下量もCASE1に比べると若干は減少しているものの、軌道狂いとしてはCASE1

と大差ない。CASE3の場合は、変位分布が線形的となり、接続軌道からバラスト軌道への軌道沈下が滑らかに推移している。さらに、CASE4では軌道沈下量の絶対値がCASE3よりも小さい。

3.3 軌道変位振幅

図12～図15に、各レール締結位置を列車の先頭から21番目の車軸が通過した際の軌道変位振幅の分布の推移を示す。

CASE1の場合、7～8番まくらぎ付近をピークに軌道変位振幅が増大しており、この付近のまくらぎが浮まくらぎとなっていることがわかる。CASE2の場合、100列車以降に9～10番まくらぎ付近をピークに急速に軌道変位振幅が増大し、浮まくらぎとなったことがわかる。ただし、5000列車の時点では軌道変位振幅が減少しており、軌道沈下が増大して結果的に浮まくらぎが解消したものと考えられる。CASE3では、沈下補正なしの9番まくらぎ以降で軌道変位振幅が若干大きいものの、顕著な浮まくらぎは発生しなかった。CASE4の場合、軌道変位振幅は終始安定しており、浮まくらぎは発生しなかった。

3.4 まくらぎ荷重分担率

図16～図19に、各レール締結位置を列車の先頭から21番目の車軸が通過した際の、まくらぎ荷重分担率の分布の推移を示す。ここに、まくらぎ荷重分担率とは、レール締結部に設置されているロードセルで測定した応答荷重を軸重3kNで除したものである。ただし、接続軌道はスラブ構造であるため、締結部の荷重分担率とした。すべての試験ケースにおいて、バラスト軌道部の初期の荷重分担率は概ね40～50%であった。

CASE1の場合、早い段階で4～8番のまくらぎがほとんど荷重を支持しなくなっていることがわかる。その結果、接続軌道端部の3番締結部の荷重分担率が150%

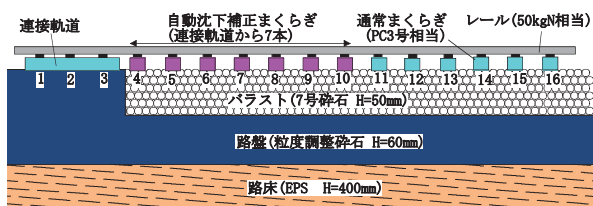


図5 移動載荷試験の供試体の概要

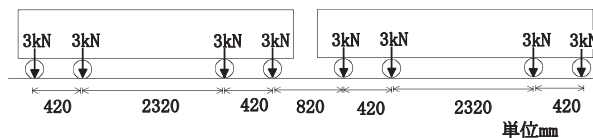


図6 M荷重相当載荷パターン

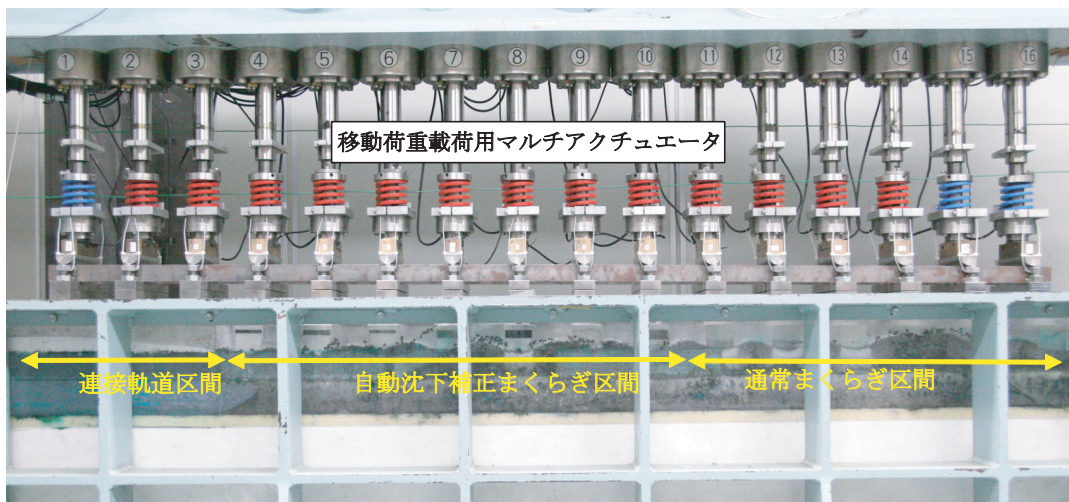


図7 移動載荷試験の状況

特集：軌道技術

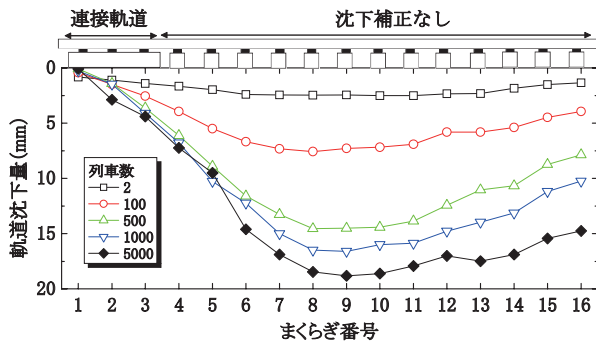


図8 軌道沈下量の推移 (CASE1)

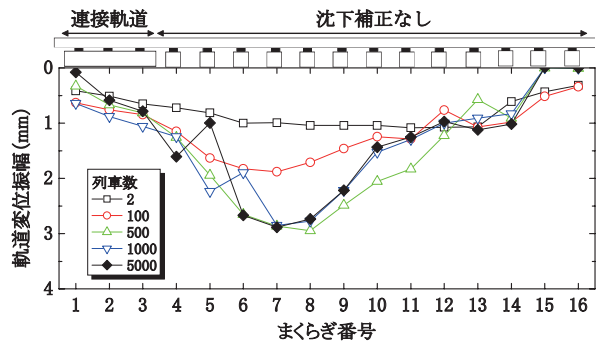


図12 軌道変位振幅の推移 (CASE1)

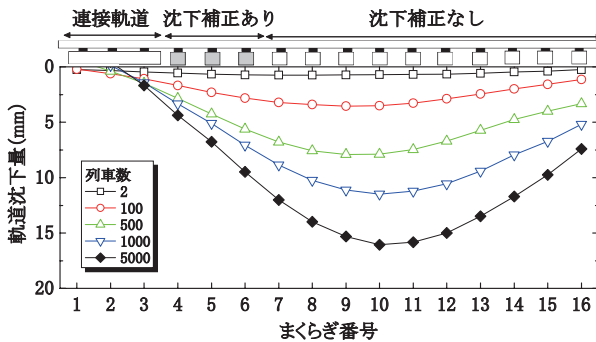


図9 軌道沈下量の推移 (CASE2)

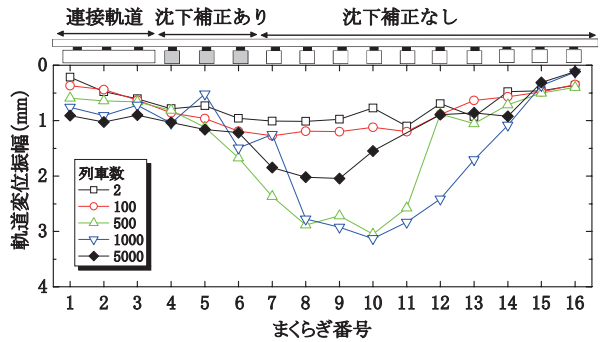


図13 軌道変位振幅の推移 (CASE2)

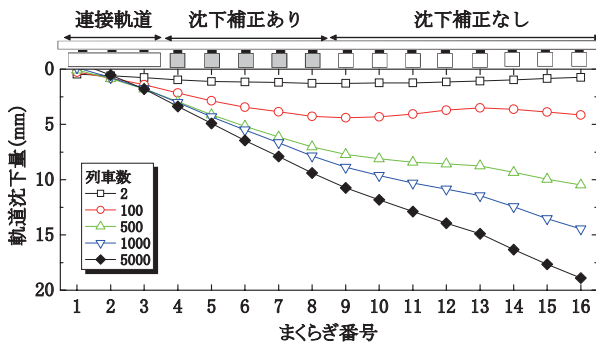


図10 軌道沈下量の推移 (CASE3)

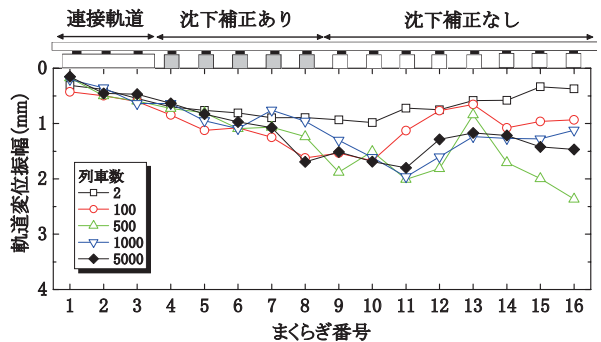


図14 軌道変位振幅の推移 (CASE3)

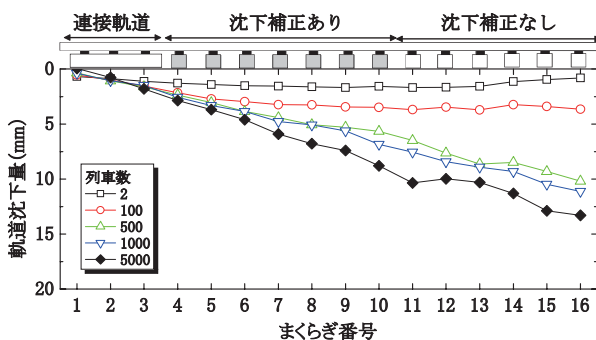


図11 軌道沈下量の推移 (CASE4)

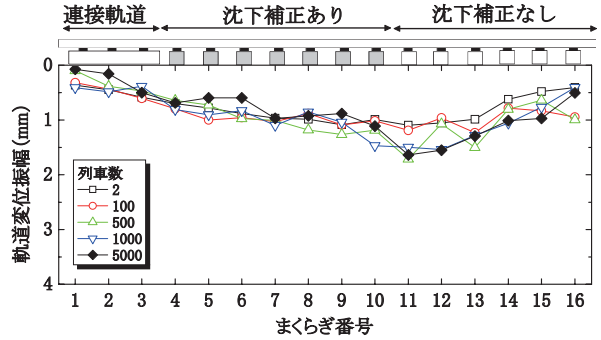


図15 軌道変位振幅の推移 (CASE4)

となっているが、これは4～8番が浮まくらぎとなった結果、3番締結部には21番目の車軸の軸重に加えて20番目の車軸の軸重も作用したためである。

CASE2の場合、荷重分担率の分布形状が列車数と共に様々に変化しているが、最終的には自動沈下補正まくらぎに隣接する7～9番のまくらぎが荷重を支持しなく

なっている。CASE3の場合は、荷重分担率の分布形状が早いうちに固定し、概ね3番、9番、14番の3点支持となっている。CASE4も同様であるが、主な荷重の支持点は3番、7番、13番の3点である。

4. 自動沈下補正まくらぎによる軌道変位抑制効果のメカニズム

軌道構造境界部のバラスト軌道において、構造境界部直近から自動沈下補正まくらぎを一定本数以上使用することによって、局所的な軌道変位および浮まくらぎが効果的に抑制できることが確認された。そこで、本構造による軌道変位抑制効果のメカニズムについて考察を行う。

軌道沈下量（図8～図11）および軌道変位振幅（図12～図15）の比較より、この軌道・路盤剛性の組合せの場合、自動沈下補正まくらぎを5本以上敷設すると、変位分布が直線的になり、7本以上敷設すると浮まくらぎの発生がほぼ抑制されることがわかった。ただし、まくらぎ荷重分担率の分布（図16～図19）をみると、変位分布が直線的で浮まくらぎが発生していても、まくらぎ荷重は極めて離散的に分布していることがわかる。

さらに、変位分布が非線形で浮まくらぎが生じたCASE1およびCASE2と、変位分布が線形的なCASE3およびCASE4の荷重分担を比較すると特徴的な違いがみられる。大まかにみて前者は軌道模型の中心付近の支持点間隔が広く、最終的に2点支持の単純梁に近い構造に収束しているのに対して、後者は軌道模型の中心付近にも支持点を有する3点支持の不静定梁構造に収束している。

これらの結果は、以下のメカニズムによって生じるものと考えられる。

- 1) バラスト軌道の軌きょうはそもそも不静定次数の高い連続梁構造であり、バラスト層が塑性変形しやすいため、まくらぎ荷重分担が刻々と変化する。
- 2) 列車荷重によって軌道変位が進行すると、荷重を支持するまくらぎと支持しないまくらぎが顕在化する。これは、軌きょうの見かけの不静定次数が軌道・路盤の剛性比に応じてなるべく低次に収束するようにバラスト層が塑性変形するためである。
- 3) 自動沈下補正まくらぎが介在すると、バラスト層が局所的に沈下しても強制的に中間支持点が形成されるため、変位分布の線形性を優先した不静定構造が維持される。

例えば、この模型軌道は、本来はCASE1のような荷重分担の支持構造に収束するはずであるが、CASE3やCASE4では自動沈下補正まくらぎが介在することで強制的に中間支持点が形成され、変位分布の線形性を優先した不静定構造に収束したのと考えられる。

ここで、CASE1において、5000列車走行させたあとに、自動沈下補正機構を7本作動させてさらに5000列車走行させたCASE5の結果を図20～図22に示す。軌道沈下については6～9番まくらぎで2～3mm程度回復しており（図20）、6～9番まくらぎの動的変位振幅も著しく低減している（図21）ことから、浮まくらぎが補正され

ただけ軌道が扛上したのと考えられる。ただし、まくらぎ荷重分担率をみると、5～10番まくらぎで荷重を均等に支持しているものの、CASE3やCASE4のような明確な中間支持点はみられない。これは、図20からわかるように、変位分布が線形的に戻ったわけではなく浮まくらぎが補正されただけであるため、2点支持と3点支持の折衷的な構造に収束したのと考えられる。

ところで、すべての試験ケースにおいて、接続軌道端

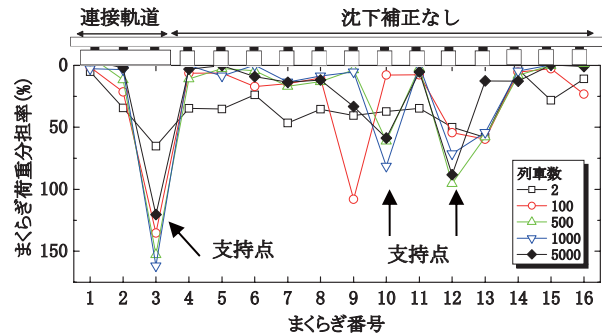


図16 まくらぎ荷重分担率の推移（CASE1）

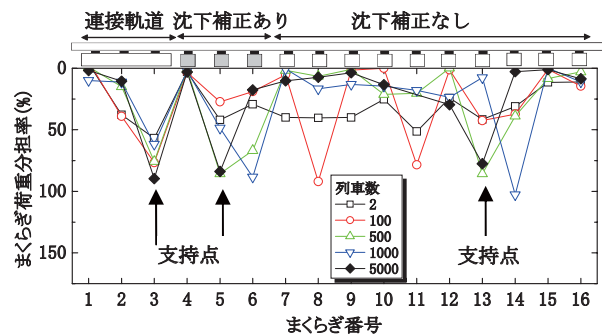


図17 まくらぎ荷重分担率の推移（CASE2）

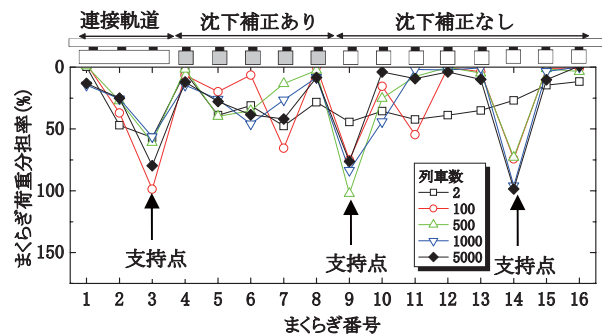


図18 まくらぎ荷重分担率の推移（CASE3）

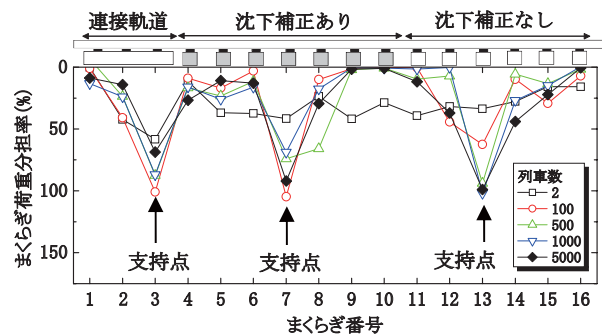


図19 まくらぎ荷重分担率の推移（CASE4）

特集：軌道技術

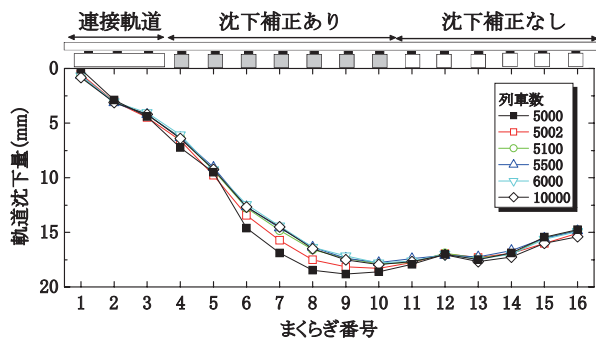


図 20 軌道沈下量の推移 (CASE5)

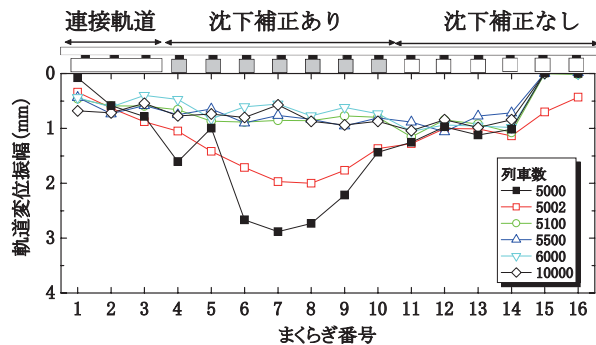


図 21 軌道変位振幅の推移 (CASE5)

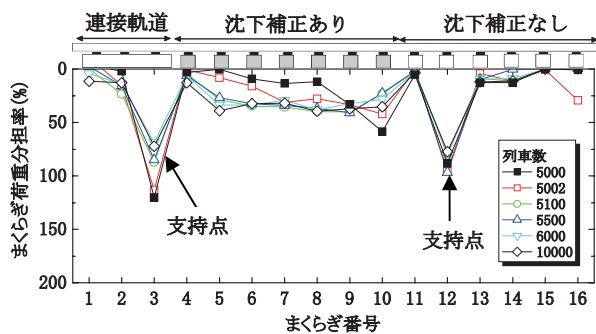


図 22 まくらぎ荷重分担率の推移 (CASE5)

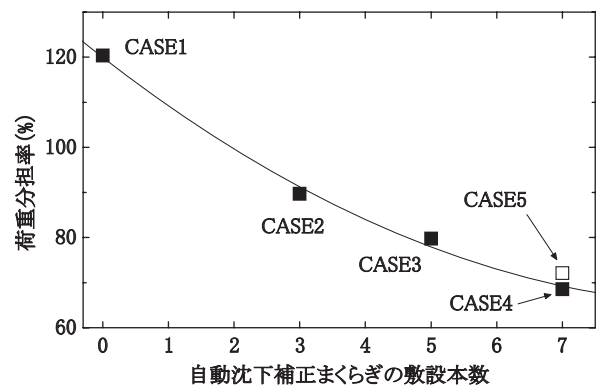


図 23 接続軌道端部の荷重分担率の比較 (5000 列車走行後)

部である3番締結部は必ず荷重支持点になっており、軌道全体の荷重支持条件に最も大きな影響を与えているのは明らかである。そこで、5000列車走行後の3番締結部の荷重分担率と自動沈下補正まくらぎの敷設本数との関係を整理したのが図23である。自動沈下補正まくらぎの敷設本数が増えるに従って、接続軌道端部への荷重の負荷が下がることがわかる。また、CASE5についてもCASE4と同等の荷重分担率となることから、初期の軌道状態によらず、自動沈下補正まくらぎの敷設本数が接続軌道端部の負荷を決定するものと考えられる。

5. まとめ

1/5 縮尺の軌道模型を用いた移動載荷試験の結果、以下のことがわかった。

- 1) 直結系軌道とバラスト軌道の境界部に自動沈下補正まくらぎを用いることで、局所的な軌道変位を効果的に抑制できるとともに、直結系軌道の端部への負荷も低減できると考えられる。
- 2) 軌道変位分布と各まくらぎ(あるいは締結部)の荷重分担には密接な関係があると考えられるが、浮まくらぎがなく、変位分布が線形であっても各まくらぎの荷重分担が均等であるとは限らない。

6. おわりに

本報告の結果は、一つの軌道・路盤の組合せにおいて検討して得られた結果であり、それぞれの剛性が変化すれば、自動沈下補正まくらぎの敷設本数と沈下抑制効果の関係も変化する可能性がある。したがって、今後は軌道および路盤剛性の組合せについて検討を行い、自動沈下補正まくらぎの敷設条件を確立していく予定である。

文 献

- 1) 村本勝己, 中村貴久: 軌道構造変化箇所における浮きまくらぎ発生メカニズムとその対策, 第62回土木学会年次学術講演会概要集IV, pp.539-540, 2007.
- 2) 中村貴久, 村本勝己: 自動沈下補正まくらぎを用いた浮きまくらぎ防止対策, 日本鉄道施設協会誌, Vol.47, pp. 157-160, 2009.2
- 3) 国土交通省監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 附属資料51, pp.637-640, 丸善, 2007.
- 4) 村本勝己, 関根悦夫: マルチアクチュエータ方式移動載荷試験装置を用いたバラスト軌道の模型試験, 第60回土木学会年次学術講演会概要集IV, pp. 290-291, 2005.