

# 論文 路盤剛性およびまくらぎ間隔を考慮した バラスト軌道の沈下特性に関する研究

吉川 秀平<sup>1</sup>・伊藤 孝記<sup>2</sup>・桃谷 尚嗣<sup>3</sup>・木次谷 一平<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員（公財）鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤

（〒185-0034東京都国分寺市光町2-8-38）

E-mail:kikkawa.shuhei.68@rtri.or.jp

<sup>2</sup>正会員（公財）鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤

E-mail: ito.kazuki.29@rtri.or.jp

<sup>3</sup>正会員（公財）鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤

E-mail: momoya.yoshitsugu.29@rtri.or.jp

<sup>4</sup>正会員（公財）鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤

E-mail: kijiya.ippei.83@rtri.or.jp

閑散線区のバラスト軌道では、軌間保持機能の強化を目的に木まくらぎからPCまくらぎに交換が進められており、最近では一部の鉄道事業者でまくらぎ間隔を拡大したPCまくらぎ化が実施されている。まくらぎ間隔を従来より大きく広げたバラスト軌道の設計では、新設線を対象としている現行の設計標準では対応できないのが現状である。そこで、本研究では、まくらぎ間隔を大きく広げたバラスト軌道の設計法を検討する一環で、新品バラストを用いた条件において、路盤剛性およびまくらぎ間隔を考慮した実物大バラスト軌道を用いた繰返し載荷試験を行った。その結果から、まくらぎ種別、路盤剛性および荷重分担率がバラスト軌道の沈下特性に与える影響を評価した。

**Key Words :** ballasted track, roadbed stiffness, sleeper spacing, track stiffness, loading frequency

## 1. はじめに

閑散線区のバラスト軌道では、軌間保持機能の強化を目的に木まくらぎからPCまくらぎに置き換える施策（以下、PCまくらぎ化）が進められることが多く<sup>1)2)3)</sup>、最近では一部の鉄道事業者でまくらぎ間隔を拡大したPCまくらぎ化が実施されている<sup>4)5)</sup>。既設線のバラスト軌道において、まくらぎ間隔の拡大といった構造検討を行う場合、鉄道構造物等設計標準・同解説（軌道構造）<sup>6)</sup>（以下、設計標準）は一般的なまくらぎ間隔の新品バラストを用いた新設線を対象とした設計法であるため、既設線には対応できない場合もある。そのため、既設線のバラスト軌道の構造検討に対しては、列車を安全かつ安定的に運行させるために要求される性能について設計標準を参考とした実験や営業線への試験敷設等により所要の性能を満足することを各鉄道事業者で確認、判断しているのが現状である。今後も持続可能な鉄道を維持していくには道床バラストの状態、路盤剛性、まくらぎ間

隔の違いによる荷重分担率の変化等の供用条件および管理レベルに応じて適用可能なバラスト軌道の設計法の整備が必要であると考えられる。新設線のバラスト軌道の設計における照査では、バラスト軌道の応答値を求めるために軌道沈下量推定式が用いられている。軌道沈下量推定式の導出にあたっては、実物大バラスト軌道を用いた繰返し載荷試験による道床バラストの厚さおよび路盤剛性と軌道沈下量との関係が確認されている<sup>7)</sup>。

そこで、本研究では供用条件および管理レベルに応じて適用可能なバラスト軌道の設計法を検討する一環で、まくらぎ種別、路盤剛性および荷重分担率がバラスト軌道の沈下特性に与える影響を確認するため、新品バラストを用いて上記の軌道沈下量導出時に実施された試験を参考にまくらぎ間隔の拡大を考慮した実物大軌道模型を用いた繰返し載荷試験を行った。

## 2. 繰返し載荷試験の載荷条件の検討

### (1) FEM解析の概要

まくらぎ1本の実物大軌道模型を用いた繰返し載荷試験の載荷荷重の条件を設定するため、在来線バラスト軌道を想定した軌道延長25m程度のバラスト軌道モデルを作成し、まくらぎ間隔をパラメータとして線形FEM解析を実施した。表-1に解析条件を示す。載荷条件は、解析モデル中心のまくらぎ直上のレールに軸重160kN（片側レール80kN）を与えることで列車荷重を想定したものとした。軌道条件は、レール種別50kgNレール、まくらぎ間隔を600mm、800mm、1000mm、1200mmの4条件とした。なお、本検討では一般部を対象としており、衝撃荷重が作用する継目部では継目部用のまくらぎ間隔が設定されているため、本検討の対象外とした。道床バラストの厚さは200mm、路盤・路床および地盤の条件は $K_{30}$ 値=50MN/m<sup>3</sup>としてヤング率を設定した。解析結果から鉛直変位および軌道パッドの反力を算出し、結果を整理した。解析モデルを図-1、各要素の物性値を表-2に示す。解析モデルはレール、まくらぎパッド、まくらぎ、道床バラスト、路盤・路床および地盤の構成とした。要素物性値については「鉄道構造物等設計標準・同解説―土構造物」<sup>8)</sup>（以下、設計標準（土構造物））を参考に設定した。

### (2) 解析結果

解析結果より、載荷点直下の軌道パッドのばね反力から載荷点直下のまくらぎが受ける荷重の分担率を求め、まくらぎ間隔と荷重分担率の関係を図-2に示す。同図から求めた推定式を用いて、4パターンの荷重分担率（0.4, 0.6, 0.8, 1.0）時におけるまくらぎ間隔を求めた結果は表-3のとおりとなった。荷重分担率1.0（160kN）時のまくらぎ間隔は2010mmであった。載荷試験に先立ち、解析結果の妥当性について検討した。

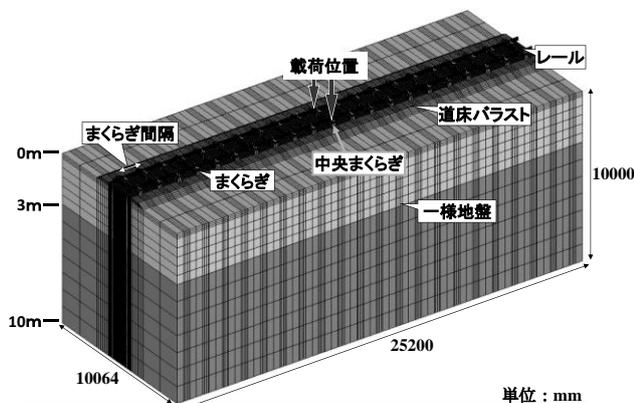


図-1 解析モデル

表-1 解析条件

区分	項目	備考
載荷条件	列車荷重	軸重 160kN (80kN/片レール)
	レール種別	50kgN レール
軌道条件	まくらぎ間隔	600, 800, 1000, 1200mm
	道床バラストの厚さ	200mm
	地盤	$K_{30}$ 値=50MN/m <sup>3</sup> の路盤・路床、地盤 深さ 0-3m : $K_{30}$ 値×0.609 深さ 3-10m : $K_{30}$ 値×1.218

表-2 各要素の物性値

要素	要素種類	ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	備考
レール	ソリッド	210000	0.3	
軌道パッド	スプリング	110MN/m	-	
PCまくらぎ	ソリッド	35000	0.2	
道床バラスト	ソリッド	100	0.3	
路盤・路床	ソリッド	30.5	0.3	深さ 0-3m
地盤		60.9		深さ 3-10m

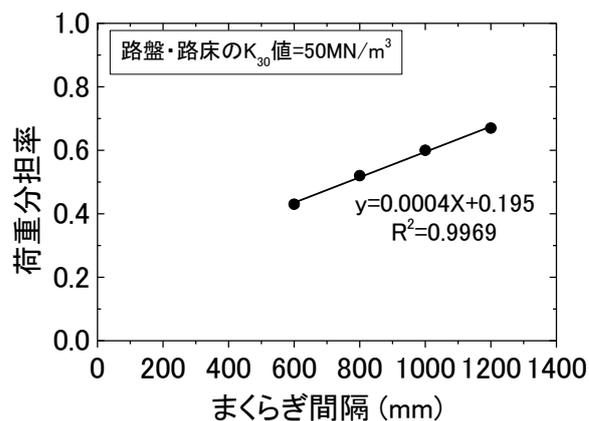


図-2 まくらぎ間隔と列車荷重分散率との関係

表-3 所定の荷重分担率時のまくらぎ間隔の推定

荷重分担率	0.4	0.6	0.8	1.0
まくらぎ間隔 (mm)	510	1010	1510	2010

### 3. 現地調査による荷重分担率の評価

#### (1) 調査の概要

まくらぎ間隔の異なる営業線においてセンサパッドを用いて軌道支持剛性測定装置（以下、RFWD）<sup>9)</sup>による荷重分担率の現地調査を実施した。センサパッドは、通常の軌道パッドの一部を切り取り、ひずみゲージ式の荷重計を設置したものである。RFWDを図-3に示す。RFWDは載荷機構、制御装置および制御・収録用PCからなり、自動で重錘を落下させて荷重および変位の時刻歴波形の測定・収録が可能な装置である。載荷機構は二つのユニットからなり、最大40kN（20kN/ユニット）の荷重を軌道に作用させることができる。本装置を用いた現地調査結果と2章の解析条件を調査区間の条件で解析した結果と比較することで、解析結果の妥当性を検証した。

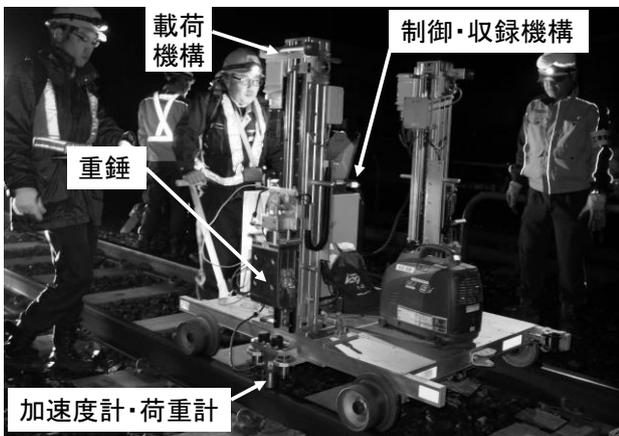


図-3 RFWDの概要

#### (2) 調査方法

まくらぎ間隔と荷重分担率の関係を評価するため、営業線にてRFWDを用いた衝撃載荷試験（以下、RFWD試験）により荷重作用時のレール圧力から荷重分担率を求めた。現地調査は在来線において、まくらぎ間隔が異なる2区間で実施した。表-4に調査区間の軌道条件を示す。レール下面圧力は合計7本のまくらぎにおいて、レール下に挿入したセンサパッドで測定した。センサパッドは軌道パッドより3mm薄いため、鉄板を挿入して厚さを調整した（図-4）。測定前の準備作業として、荷重分担率は軌道の支持状態が大きく影響することが考えられるため、センサパッドの設置作業後にタイタンパによるつき固めを行った。また、つき固め後にはレール底部に接触している道床バラストが荷重を負担しないように道床整理を行った。

つき固め後の仕上がりを確認するため、調査区間においてRFWD試験を行い、最大荷重と最大変位が発生した

時の時刻の差から算出する応答変位遅延時間を用いて軌道の支持状態を確認した。応答変位遅延時間は浮きまくらぎを判別できるとされており<sup>10)</sup>、その値が大きい場合は浮きまくらぎが生じていることとなる。試験結果は図-5に示すとおりで、つき固め補修後の浮きまくらぎが生じていない箇所の応答遅延時間は1~2msec程度とされており<sup>11)</sup>、概ねその範囲内であることおよびばらつきが小さいことを確認した。

荷重分担率の調査はRFWD試験を調査区間の全てのまくらぎで行った。試験方法はまくらぎ中心位置のレール上において、まくらぎ1本おきに20kN/ユニットで載荷した際の最大荷重とセンサパッドを用いて測定したレール圧力から荷重分担率を求めた。調査区間の荷重分担率を解析的に求めるため、路盤剛性を小型FWD試験<sup>12)</sup>により測定したところ、区間1が48MN/m<sup>3</sup>、区間2が75MN/m<sup>3</sup>であった。

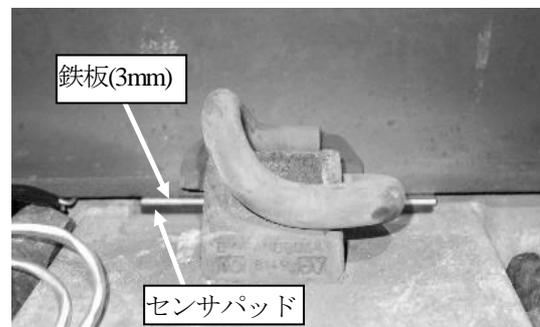


図-4 センサパッドの敷設状況

表-4 調査区間の軌道条件 (単位: mm)

調査区間	レール種別	まくらぎ種別	まくらぎ間隔	まくらぎ高さ
1	50kgN	翼付 PC	1041	140
2		まくらぎ	740	165

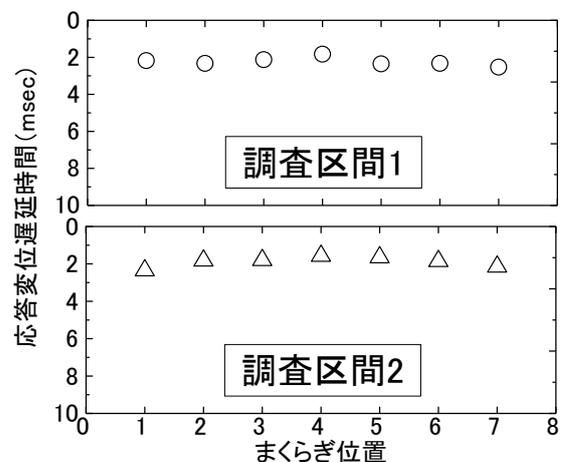


図-5 応答変位遅延時間（左右レール平均）の測定結果

### (3) 調査結果

各調査区間における荷重分担率について図-6および図-7に示す。ここで、解析結果は各調査区間の軌道条件および調査結果を基に再度解析を行った。調査結果として各まくらぎでのRFWD試験により求めた荷重分担率を示す。解析結果における載荷点直下の荷重分担率と調査結果における荷重分担率の最大値の位置を合わせ、比較できるように図示した。荷重分担率が最も大きい値を示したのは、調査区間1ではまくらぎ番号5で試験した際の右レールのセンサパッドの測定値、調査区間2ではまくらぎ番号6で試験した際の左レールのセンサパッドの測定値であった。今回、調査区間1の左レール、調査区間2の右レールでは測定したレール圧力の合計値が輪重と一致しなかった。そのため、レール圧力の合計値と輪重が一致した側におけるレールの測定結果を用いて比較を行った。調査結果と解析結果を比較すると、両者が概ね一致しており、2章の解析は妥当であると考えられる。また、調査区間2よりまくらぎ間隔が広い調査区間1の方が荷重分担率が大きい値を示し、まくらぎ間隔を拡大した場合、まくらぎ1本に作用する列車荷重が大きくなる傾向であることを確認した。

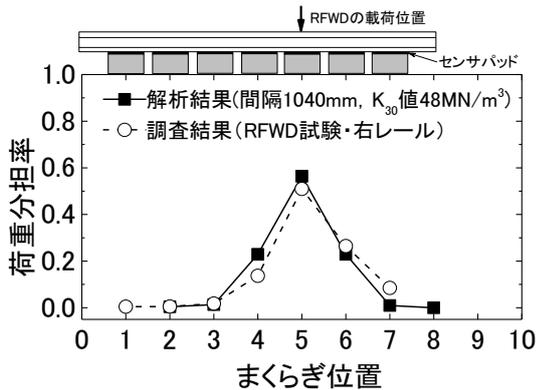


図-6 調査区間1の荷重分担率の例

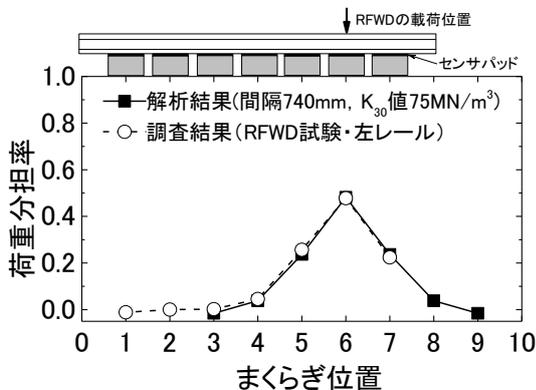


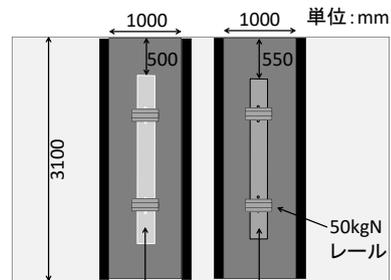
図-7 調査区間2の荷重分担率の例

## 4. 実物大軌道模型を用いた繰返し載荷試験

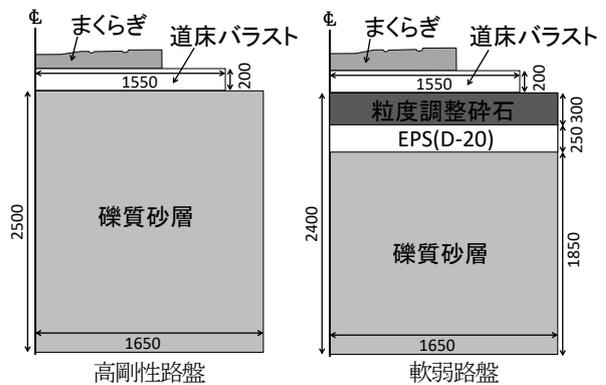
### (1) 実物大軌道模型の概要

本試験ではまくらぎ種別、路盤剛性、まくらぎ間隔の違いによる荷重分担率が新品バラストを用いたバラスト軌道の沈下特性に与える影響を確認した。実物大軌道模型の概要を図-8に示す。実物大軌道模型は在来線を想定したまくらぎ1本分の実物大軌道模型であり、50kgNレール、まくらぎ、道床バラスト、路盤の構成となっている。道床バラストには新品バラストを使用し、道床バラストの厚さは200mmとした。試験ケースを表-5に示す。まくらぎは並まくらぎと3号PCまくらぎとし、PCまくらぎ化した場合の効果を確認した。路盤は、設計標準(土構造物)における新設線の碎石路盤以上の剛性を有している高剛性路盤( $K_{30}$ 値=140MN/m<sup>3</sup>)と軟弱路盤( $K_{30}$ 値=50MN/m<sup>3</sup>)とした。なお、本試験では路盤の変位とまくらぎ間隔毎の沈下特性について評価するため、路盤を乾燥状態とすることでバラストが路盤に貫入しない条件とした。まくらぎ間隔の違いによる荷重分担率は表-3に示した4パターンとした。

軌道模型は、それぞれの路盤上にバラストを投入し、プレートランマーを用いてまくらぎ下20mmの高さまで道床バラストを十分に締め固めた。締め固め後の密度は1.6t/m<sup>3</sup>であった。その後、まくらぎを設置し所定の道床バラストの厚さとなるようにタイタンパーによるつき固めを行った。



並まくらぎ 3号PCまくらぎ  
(a) 実物大軌道模型の寸法



(b) 土槽内の路床・路盤の断面構成

図-8 実物大軌道模型の概要

表-5 試験ケース

試験ケース	まくらぎ種別	路盤条件	K <sub>30</sub> 値 (MN/m <sup>3</sup> )
case1	3号PCまくらぎ	高剛性路盤	140
case2	並まくらぎ		
case3	3号PCまくらぎ	軟弱路盤	50
case4	並まくらぎ		

(2) 繰返し荷重試験の条件

繰返し荷重試験のフローを図-9に示す。はじめに作製直後の実物大軌道模型は荷重履歴を受けていない状態であり、初期沈下が試験結果に影響を与える可能性が考えられる。そこで、合計90万回(30万回×3セット)の予備荷重試験を行った。30万回の荷重後、荷重前のレールレベルになるようにタイタンパによるつき固めを行った。

その後、まくらぎ種別、路盤剛性、まくらぎ間隔の違いによる荷重分担率とまくらぎ変位量の関係を把握するため、荷重分担率0.4、0.6、0.8、1.0の条件のもと表-6に示す荷重条件でそれぞれ30万回の繰返し荷重を行った。荷重荷重は在来線の静止軸重160kNに荷重分担率を乗じて求めた。荷重荷重は最小荷重を5kNの押え荷重とし、最大荷重を69~165kN(荷重振幅64~160kN)とした。予備荷重試験と同様に、荷重後はタイタンパによるつき固めを行った後に次ぎの荷重を行った。道床バラストの厚さを200mmとしたが、高剛性路盤(K<sub>30</sub>値=140MN/m<sup>3</sup>)の試験ではcase1およびcase2で繰返し荷重試験におけるまくらぎ変位が小さく、予備荷重時においてタイタンパによるつき固め時のこう上量が試験結果に影響していたことを確認した。そのため、つき固め時のこう上量を確保するために道床バラストを厚くすることとし、case1およびcase2は表-7に示す道床バラストの厚さとした。バラスト

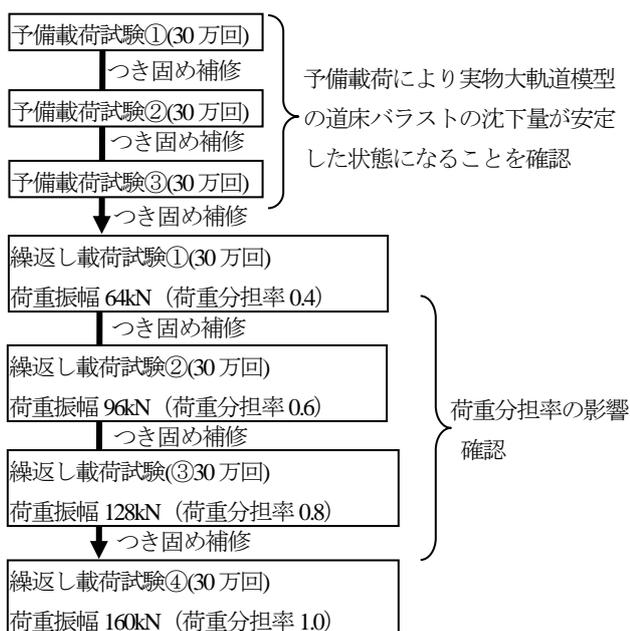


図-9 繰返し荷重試験のフロー

道床の厚さの影響については、高剛性路盤(K<sub>30</sub>値=140MN/m<sup>3</sup>)上の3号PCまくらぎ1本の実物大繰返し荷重試験の結果、新品バラストではまくらぎの残留変位が道床厚200mmと250mmで大きく変わらないことやまくらぎの変位振幅はバラスト道床の厚さの影響をあまり受けなことが報告されており<sup>13)</sup>、本試験ではバラスト道床の厚さの違いはわずかであるため、この影響は無視するものとして結果を整理した。

本試験における荷重方法および測定項目を図-10に示す。荷重はアクチュエータ1基に荷重梁を接続し、まくらぎの左右のレールに対して荷重した(荷重中心間隔1132mm)。本試験では、図-2の解析結果に基づき、各まくらぎ間隔に相当する荷重荷重をまくらぎ1本に与えることで、まくらぎ間隔毎の力学状態を模擬した。荷重波形は正弦波、制御方式を荷重制御とし、荷重周波数は10Hzとした。荷重周波数10Hzは、在来線車両の軸距2.1mに対しては時速75.6kmに相当する周波数となる。測定項目は、アクチュエーター荷重、アクチュエーター変位、まくらぎ鉛直変位および路盤変位とした。路盤変位測定治具は、荷重時の路盤表面のたわみ量がレール直下とまくらぎ中央で大きく変わらないことから、まくらぎ中央の路盤表面に設置した。

表-6 荷重試験の荷重条件

試験条件	荷重分担率	最小荷重	最大荷重	荷重振幅
予備荷重試験	0.4	5kN	69kN	64kN
繰返し荷重試験①	0.4		69kN	64kN
繰返し荷重試験②	0.6		101kN	96kN
繰返し荷重試験③	0.8		133kN	128kN
繰返し荷重試験④	1.0		165kN	160kN

表-7 道床バラストの厚さ (case1およびcase2)

試験条件	道床バラストの厚さ
予備荷重試験	200mm
繰返し荷重試験①	210mm
繰返し荷重試験②	220mm
繰返し荷重試験③	
繰返し荷重試験④	

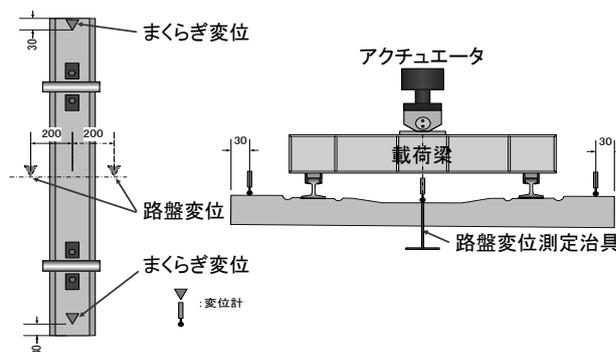
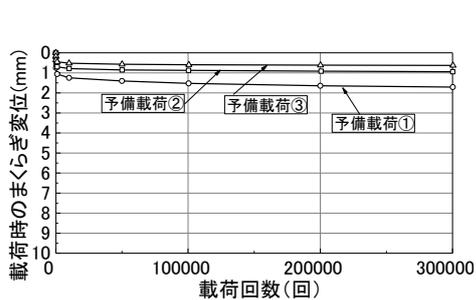


図-10 荷重方法および測定項目

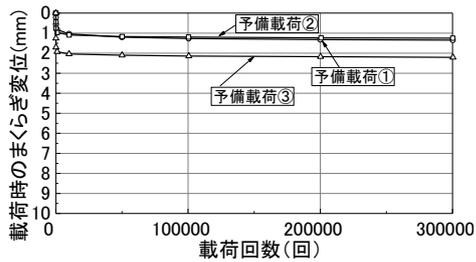
## 5. 試験結果および考察

### (1) 予備荷重試験

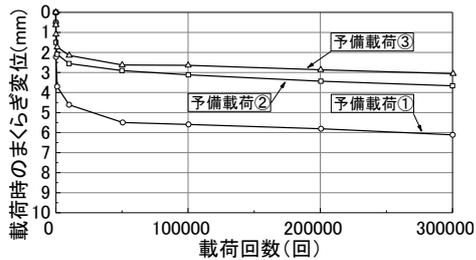
図-11に各試験ケースにおける予備荷重試験から得られた荷重回数と荷重時のまくらぎ変位を示す。同図より、予備荷重②と予備荷重③の30万回の繰返し荷重後のまくらぎ変位は概ね同程度であり、路盤剛性によらずまくらぎ変位量の再現性が得られることを確認した。case2のみ3回目の予備荷重時のまくらぎ変位が大きかったが、これは試験前に実施したつき固め補修時のこう上量が1mm程度と非常に小さく、つき固め作業により締め固まった道床バラストを乱したことによるものと考えられる。



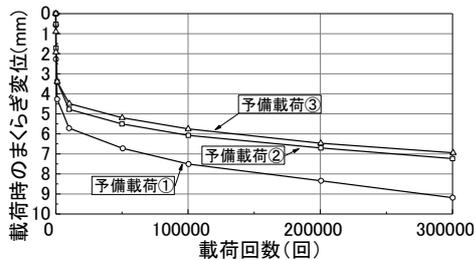
(a) case1 (高剛性路盤・3号PCまくらぎ)



(b) case2 (高剛性路盤・並まくらぎ)



(c) case3 (軟弱路盤・3号PCまくらぎ)

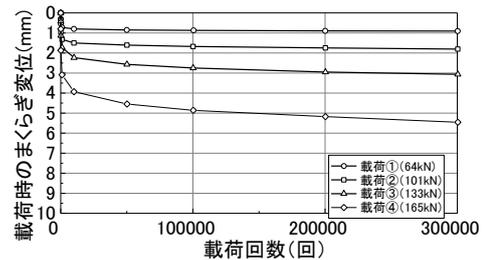


(d) case4 (軟弱路盤・並まくらぎ)

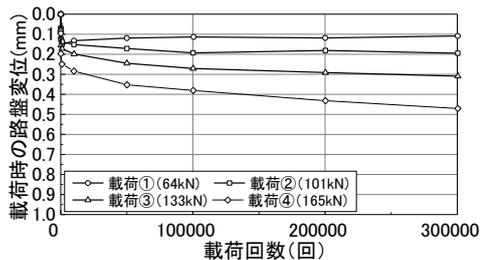
図-11 荷重回数と荷重時のまくらぎ変位の関係 (予備荷重)

### (2) 高剛性路盤における繰返し荷重試験

高剛性路盤における3号PCまくらぎおよび並まくらぎの繰返し荷重試験の結果を図-12および図-13に示す。荷重分担率を考慮して4段階に荷重荷重を大きくしたところ、荷重の増加で荷重時のまくらぎ変位および路盤変位も大きくなった。まくらぎ変位をまくらぎ種別の違いと比較すると、段階的に荷重が大きくなってPCまくらぎの方が小さかった。並まくらぎと比較してPCまくらぎの変位量が小さいのは既往の見解<sup>14)</sup>と同様であった。並まくらぎよりも3号PCまくらぎの方が路盤変位は小さかったが、両まくらぎとも1.0mm以下の変位であった。

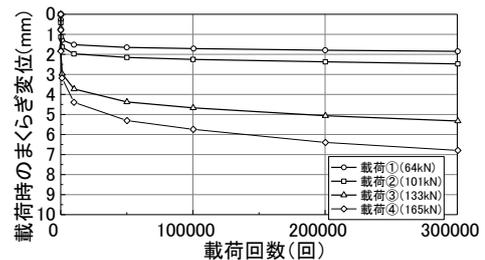


(a) 荷重回数と荷重時のまくらぎ変位の関係

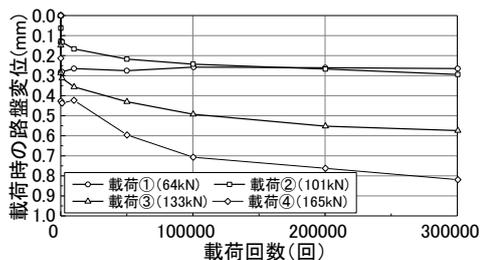


(b) 荷重回数と荷重時の路盤変位の関係

図-12 繰返し荷重試験結果 (case1・3号PCまくらぎ)



(a) 荷重回数と荷重時のまくらぎ変位の関係

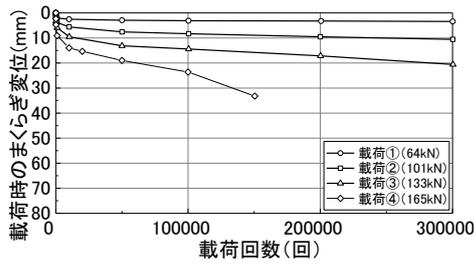


(b) 荷重回数と荷重時の路盤変位の関係

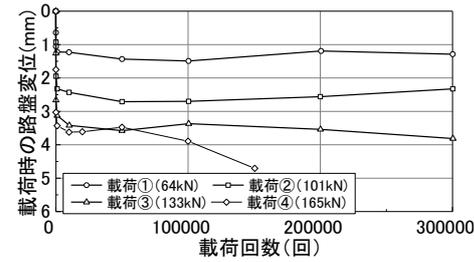
図-13 繰返し荷重試験結果 (case2・並まくらぎ)

### (3) 軟弱路盤における繰返し載荷試験

軟弱路盤における繰返し載荷試験の結果を図-14および図-15に示す。載荷試験④（荷重分担率1.0）では3号PCまくらぎおよび並まくらぎともに、まくらぎ変位が急激に進展したため、約15万回で載荷を終了した。高剛性路盤での試験結果と同様に、荷重が大きくなるのに対して載荷時のまくらぎ変位および路盤変位も大きくなり、まくらぎ変位は並まくらぎよりPCまくらぎの方が小さかった。路盤変位は路盤剛性が $K_{30}$ 値=50MN/m<sup>3</sup>と小さいため、載荷荷重が大きくなると路盤変位も大きくなり、まくらぎ種別の違いによる影響は小さかった。

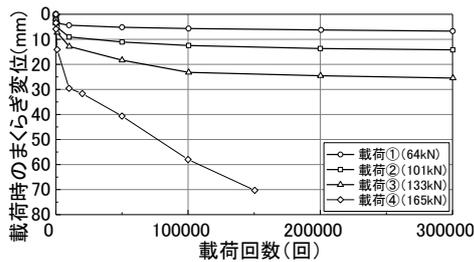


(a) 載荷回数と載荷時のまくらぎ変位の関係

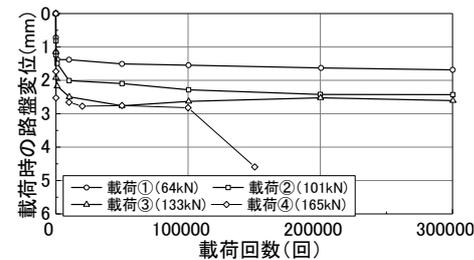


(b) 載荷回数と載荷時の路盤変位の関係

図-14 繰返し載荷試験結果 (case3・3号PCまくらぎ)



(a) 載荷回数と載荷時のまくらぎ変位の関係



(b) 載荷回数と載荷時の路盤変位の関係

図-15 繰返し載荷試験結果 (case4・並まくらぎ)

### (4) 考察

実際の軌道変位は、初期沈下量を含んでいることから、本試験では載荷15万回時におけるまくらぎ変位量にて、まくらぎ間隔毎の沈下特性を評価した。各種路盤で実施した繰返し載荷試験で得られた荷重と載荷時のまくらぎ変位を図-16に示す。同図より、路盤剛性が低いほど荷重が大きくなることに伴うまくらぎ変位の増加が顕著になり、路盤剛性がバラスト軌道の沈下に影響した。これは模型軌道を用いた繰返し載荷試験の知見<sup>15)</sup>と同様に、路盤の弾性変形が道床部の塑性沈下を促進させたものと考えられる。高剛性路盤では荷重が大きくなるにつれてまくらぎ変位量は大きくなるが、路盤剛性の影響の方が大きく軌道保守量の増加を許容すれば、新品バラスト条件ではまくらぎ間隔の拡大といった軌道構造の変更が可能であると考えられる。一方、軟弱路盤では載荷試験②における荷重101kN以上を超えたあたりから非線形的にまくらぎ変位量が大きくなっており、3号PCまくらぎよりも並まくらぎで顕著であった。並まくらぎの載荷試験①（まくらぎ間隔550mm想定）のまくらぎ変位と3号PCまくらぎの載荷試験②（まくらぎ間隔1010mm想定）のまくらぎ変位を比較すると、概ね同程度であった。このことから、PCまくらぎ化においてまくらぎ間隔を拡大する場合、道床バラストが新品バラストであればまくらぎ間隔を1010mm程度に拡大しても保守量はあまり増加しない可能性があると考えられる。よって、軟弱路盤でまくらぎ間隔を拡大する場合、軌道保守量が大幅に増加することにつながる可能性があることから、特に路盤剛性を適切に把握した上でまくらぎ間隔を設定することが重要であると考えられる。

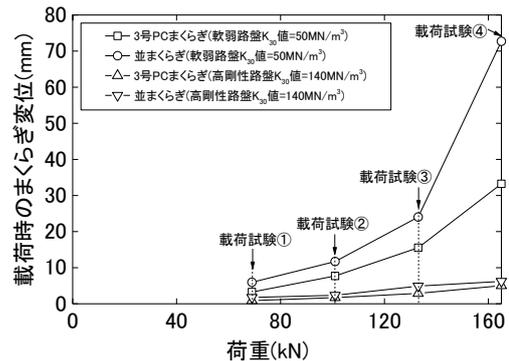


図-16 荷重と載荷時のまくらぎ変位の関係 (15万回載荷時)

## 6. まとめ

本研究では、路盤剛性およびまくらぎ間隔を考慮した荷重分担率が新品バラストを用いたバラスト軌道に与える影響について実験による検証を行った。本研究により

得られた知見を以下に示す。

- 1)まくらぎ間隔と荷重分担率の関係を確認するため、営業線での調査結果より、まくらぎ間隔を拡大した場合にまくらぎ1本が分担する荷重が大きくなることを確認した。また、現地調査の結果を基に繰返し載荷試験の荷重条件設定に用いた解析モデルの妥当性を確認した。
- 2)荷重履歴を受けていない実物大軌道模型について、初期沈下を安定させるには30万回の予備載荷後につき固め補修を行い、さらに30万回の予備載荷を行うことで路盤剛性によらずまくらぎ変位量の再現性が高まることを確認した。
- 3)繰返し載荷試験におけるまくらぎ変位および路盤変位は、路盤剛性によらず載荷荷重が大きくなるのに対して同様に大きくなった。
- 4)15万回載荷時における荷重と載荷時のまくらぎ変位の関係から、路盤剛性が低いほど荷重が大きくなることに伴うまくらぎ変位の増加が顕著になり、路盤剛性がバラスト軌道の沈下に大きく影響すると考えられた。これは、従来の知見と同様であった。
- 5)高剛性路盤では荷重が大きくなるにつれてまくらぎ変位量は大きくなるが、軌道保守量が増加することを許容すれば、まくらぎ間隔の拡大といった軌道構造の変更が可能であると考えられる。
- 6)軟弱路盤でまくらぎ間隔を拡大する場合、軌道保守量が大幅に増加することにつながる可能性があることから、特に路盤剛性を適切に把握した上でまくらぎ間隔を設定することが重要であると考えられる。

謝辞：現地調査にご協力いただいた（株）西日本旅客鉄道株式会社 施設部施設技術室、岡山支社施設課、岡山保線区および倉敷保線区の皆様に御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 沼倉明夫, 伊藤謙一, 蔭山朝昭：中・下級線用まくらぎの開発, 土木学会第 55 回年次学術講演会, IV-292, pp.584-585, 2000
- 2) 楠田将之, 田淵剛, 高山宜久：PC まくらぎ化の低廉化に向けた軌道構造の検討, 土木学会第 55 回年次学術講演会, IV-74, pp.147-148, 2004
- 3) 楠田将之, 田淵剛, 高山宜久：実物大の軌きょうを用いた PC まくらぎの道床横抵抗力試験, 土木学会第 68 回年次学術講演会, VI-465, pp.929-930, 2013
- 4) 志手江津夫：下級線におけるまくらぎ配置間隔の拡大, 鉄道施設協会誌, pp.34-36, 2010.11
- 5) 藪中嘉彦, 高尾賢一：下級線に適した PC まくらぎ化の検討, 鉄道施設協会誌, pp.45-48, 2018.4
- 6) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, 丸善, 2012.1
- 7) 古川敦, 泉英治：実物大軌道模型載荷試験による軌道沈下量算定式の導出, J-Rail 2008, 2008.12
- 8) 財団法人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, pp.534-536, 丸善, 2007
- 9) 中村貴久, 桃谷尚嗣, 谷川光, 吉川秀平, 木次谷一平：バラスト軌道における軌道支持剛性評価方法の開発, 鉄道総研報告, Vol.31, No.12, pp.29-34, 2017
- 10) 谷川光, 中村貴久, 桃谷尚嗣：小型FWDを用いた軌道支持剛性評価法における浮きまくらぎの影響の検討, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.20, pp.161-168, 2016.7
- 11) 谷川光, 中村貴久, 桃谷尚嗣：軌道支持剛性測定装置 (RFWD) の開発, 新線路, 第72巻, 第1号, pp.36-38, 2018
- 12) 公益社団法人土木学会：FWDおよび小型FWD運用の手引き, 舗装工学ライブラリー-2, 丸善, 2002.12
- 13) 谷川光, 中村貴久, 桃谷尚嗣：小型FWDを用いた軌道支持剛性評価法の基礎的研究, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.19, pp.135-142, 2015.7
- 14) 佐藤裕, 平田五十：軌道の繰返衝撃実験, 鉄道技術研究報告, No.325, 1962.8
- 15) 関根悦夫, 河野昭子, 村本勝己, 石川達也：列車荷重を受けるバラスト軌道の塑性変形に及ぼす路盤剛性の影響, 第40回地盤工学研究発表会, 2005.7

(2019.4.5 受付)

## STUDY ON TRACK SETTLEMENT IN CONSIDERATION OF ROADBED STIFFNESS AND SLEEPER SPACING

Shuhei KIKKAWA, Kazuki ITO, Yoshitugu MOMOYA and Ippei KIIYA

In the ballasted track of the regional railway lines with low tonnage, the replacement of wooden sleepers to PC sleepers is proceeding by PC sleepers for the purpose of strengthening the gauge holding function, and recently, some railway operators have introduced expanded sleeper spacing with PC sleepers. When designing the track structures such as expanded sleeper spacing of the ballasted track of the existing lines, the current design standards for new lines is not applicable, and the development of a design method for the ballasted track of the expanded sleeper spacing is necessary. Therefore, in this study, as part of the investigation of the design method in consideration of expanded sleeper spacing conditions, cyclic loading tests were conducted by mean of a full scale ballasted track taking into account the stiffness of the roadbed and the spacing between sleepers under new ballast conditions. As a result, the influence of the sleeper type, the roadbed stiffness and the train load sharing rate on the settling characteristics of ballasted track was confirmed.