

# 論文 路盤剛性と加振周波数がバラスト軌道の沈下特性に与える影響

千田 耕大<sup>1</sup>・三輪 昌弘<sup>2</sup>・川崎 祐征<sup>3</sup>・松島 亘志<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 東海旅客鉄道株式会社 総合技術本部技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山1545-33)  
E-mail:koudai.senda@jr-central.co.jp

<sup>2</sup>正会員 東海旅客鉄道株式会社 総合技術本部技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山1545-33)  
E-mail:m.miwa@jr-central.co.jp

<sup>3</sup>正会員 東海旅客鉄道株式会社 総合技術本部技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山1545-33)  
E-mail:yoshiyuki.kawasaki@jr-central.co.jp

<sup>4</sup>正会員 筑波大学教授 システム情報系構造エネルギー工学域 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)  
E-mail:tmatsu@kz.tsukuba.ac.jp

高速鉄道では列車通過に伴って生じる荷重の周波数が在来線に比べて高い。例えば東海道新幹線では主に台車内の輪軸間隔に起因して生じる荷重列の周波数は30Hz以上にもなる。本研究では高速列車を想定し、このような比較的高い周波数での荷重がまくらぎ沈下挙動に与える影響を、路盤条件を変えながら実物大の試験軌道による試験および個別要素法を用いた解析により検証した。検証の結果、バラスト全体の加速度が重力加速度を上回るとまくらぎ沈下量が急激に増加することや、まくらぎ沈下量は路盤面の速度振幅に対して高い相関を示すことなどが明らかとなった。

**Key Words :** *roadbed stiffness, loading frequency, ballasted track, sleeper settlement, acceleration of ballast, velocity of roadbed*

## 1. 緒言

バラスト軌道では、局所的に軌道狂いの進行が速く保守作業の投入量が他に比べて多い箇所が発生することがある。軌道狂いの進行が速い要因には、構造物境界などによる軌道支持剛性の急変や、レール継目、溶接などの構造的不連続による輪重変動の増加などが挙げられるが、一部にはこのような明確な要因が見つからない場合もある。東海道新幹線においても、局所的に軌道狂いの進行が速い箇所が存在し、一部はその要因が明らかになっていない。この要因を解明することは、合理的な軌道狂い抑制対策の提案につながる可能性があり、鉄道の快適性の維持・向上にはもちろんのこと、保守作業量削減によるメンテナンスコスト低減にも寄与できることから非常に重要な課題である。

バラスト軌道において軌道狂いの進行が速くなる要因が路盤にあることは、経験的にもこれまでの検討<sup>1)2)</sup>からも言われていることであるが、そのメカニズムまでは明確には説明されていない。また、高速鉄道におけるバラ

スト軌道は、列車速度が高いため軌道が加振される周波数が在来線に比べて高いという特徴がある。例えば東海道新幹線では最新型のN700A車両が最高速度285km/hで走行している。N700A車両の台車には2本の輪軸が2.5m間隔に配置されており、軌道側から見ると主にこの輪軸通過に起因して生じる荷重の周波数は30Hz以上である。バラスト軌道の沈下挙動に関する実験的研究はこれまでも多く行われているが<sup>3)4)</sup>、こうした比較的高い周波数域を考慮して荷重周波数と軌道沈下量との関係性を検証している例は多くない。

著者らは、こうした比較的高い周波数での荷重条件下において、路盤条件の異なるバラスト軌道に生じる軌道狂いの進行状況を分析することで、保守作業の投入量が多い箇所の発生要因を明らかにできる可能性があると考えた。そこで本研究では、路盤条件や荷重周波数が軌道狂い進みに与える影響を実験および解析を用いて検証し、軌道狂い進みに影響が大きいパラメータを分析した。

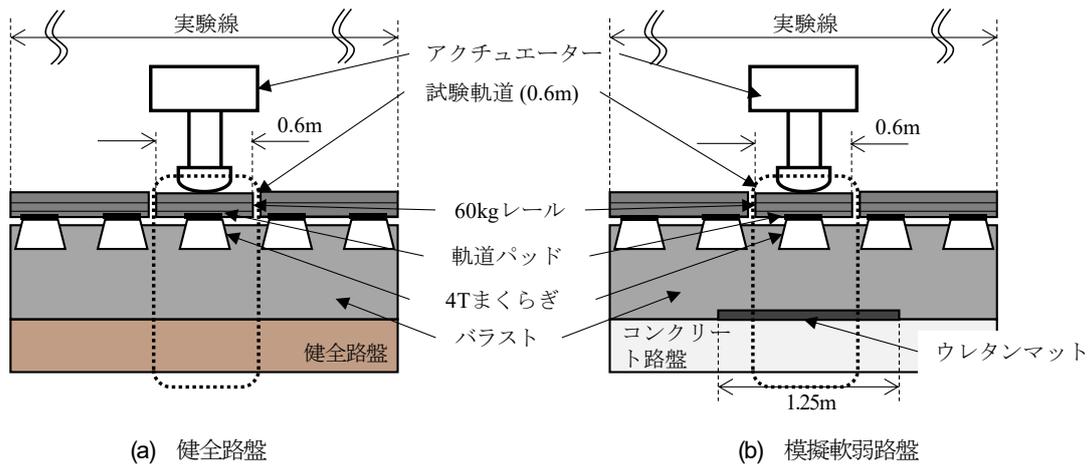


図-1 試験軌道

## 2. 実物大バラスト軌道による繰返し载荷試験

### (1) 実物大バラスト試験軌道

本試験は小牧研究施設にある実物大試験用軌道の中に試験軌道を作成して実施した。試験軌道を図-1に示す。試験軌道はレールを長さ0.6mに切断することで、まくらぎ1本分の延長とした。レール長さを0.6 mとしたのは、繰返し载荷試験により载荷点が浮きまくらぎとなるのを防ぐためである。レールおよびまくらぎは東海道新幹線で一般的に用いられている60kgレールと4Tまくらぎとし、バラスト厚さはまくらぎ下300 mmとした。軌道パッドはレール圧力測定用の厚さ10 mmタイプのものを使用した。路盤条件は、試験用軌道に設定されている健全な土路盤（以下、健全路盤という）および健全なコンクリート路盤上にばね定数の小さいウレタン製のマットを敷いた模擬軟弱路盤（以下、模擬軟弱路盤という）の2種類を設定した。試験軌道の主な条件を表-1に示す。なお、表-1中に示した地盤反力係数のうち、健全路盤のものは路盤表層部で実施した平板载荷試験から得られた数値である。模擬軟弱路盤の地盤反力係数は、強固な路盤上に敷設したマット上で小型FWD装置を用いて測定した値を示している。

### (2) 移動式载荷試験車

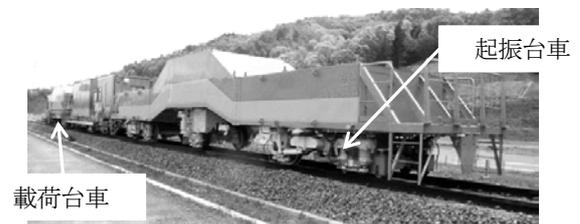
本試験では、図-2に示す移動式载荷試験車<sup>9)</sup>を用いて载荷を行った。本試験装置は载荷台車と起振台車の2つの载荷装置で構成されている。载荷台車は最大輪重120 kN、最大周波数40 Hzでの繰返し载荷が可能な载荷装置である。起振台車は、新幹線車両とほぼ同一の質量・ばね特性のもとで軌道を加振できる载荷装置で、加振時の最大周波数は150 Hzである。

### (3) 試験方法

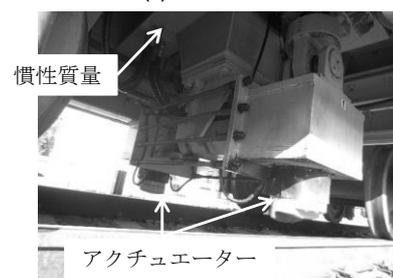
本試験では、2種類の载荷試験を実施した。ひとつは

表-1 試験軌道条件

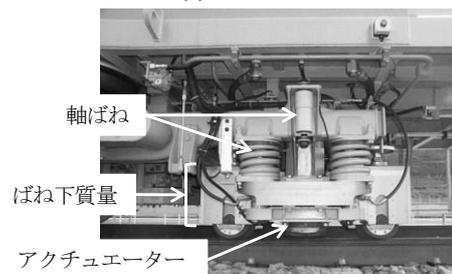
項目	仕様
レール	60kg レール
軌道パッド	110MN/m, 厚さ 10mm
まくらぎ	4T まくらぎ
バラスト厚さ(mm)	300
地盤反力係数 (MN/m <sup>3</sup> )	健全 199 模擬軟弱 20
マット寸法(mm)	1250×4250×30
マット剛性(公称値)(N/mm <sup>3</sup> )	0.030



(a) 全体図



(b) 载荷台車



(c) 起振台車

図-2 移動式载荷試験車

載荷台車を用いた繰返し載荷試験（以下、繰返し載荷試験という）、もうひとつは起振台車を用いた振動特性試験である（以下、振動特性試験という）。繰返し載荷試験では、各路盤条件・載荷周波数による軌道沈下量の違いを検証するため、荷重制御による正弦波載荷を行った。荷重条件は軌道片側あたり  $30 \pm 20$  kN とした。この最大荷重は、レールによる荷重分散効果を考慮したときの輪重の 1.7 倍に相当する。試験では、バラスト層の初期沈下を完了させるため、30 Hz で 50,000 回の載荷を実施した後、5 Hz から 40 Hz まで 5 Hz 刻みで周波数を変化させながら各 40,000 回の載荷を行った。振動特性試験は、繰返し載荷試験終了後、そのままの軌道状態で引き続き実施した。本試験は、各路盤条件における軌道の振動特性を検証するため、起振台車にランダム波の強制変位を入力した。このランダム波は変位のスペクトルが式(1)に示す分布となるように設定された 40 秒間の波で 150 Hz までの周波数成分を含む。

$$a(f) = \frac{30}{f} \quad (1)$$

ここで、 $a(f)$ : 変位振幅(mm),  $f$ : 周波数(Hz)である。

#### (4) 測定項目

本試験における測定項目を図-3に示す。本試験では、軌道沈下量に相当するデータとして、まくらぎ鉛直変位（まくらぎ沈下量）を測定した。そのほか、レール、まくらぎの上下加速度、バラスト上層、中層、下層の3軸加速度、アクチュエーター荷重、アクチュエーター変位、レール圧力、路盤圧力を測定した。バラスト加速度は左右の載荷点直下で測定した。

### 3. 試験結果および考察

#### (1) 繰返し載荷試験

図-4には、繰返し載荷試験から得られた各路盤条件におけるまくらぎ沈下曲線を示す。このまくらぎ沈下量は、左右のまくらぎ沈下量の平均値である。

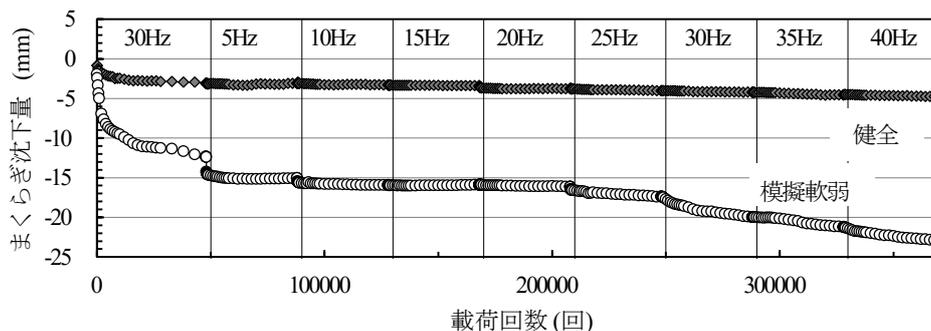


図-4 まくらぎ沈下曲線

図-4を見ると、いずれの路盤条件でも、試験開始直後からバラスト層の初期圧密に伴う比較的急激な沈下が生じており、概ね20,000回までに収束している。その後は、緩やかな沈下が発生しており、これらの傾向は既往の研究<sup>3)</sup>と同様であった。その後、周波数を変えながら載荷していくと、一定の周波数以上で沈下量が大きくなっているが、沈下量が大きくなった周波数での載荷開始直後では、再度圧密沈下時のような比較的急激な沈下が生じた。模擬軟弱路盤を例にとると、初期載荷後、5 Hz～20 Hzまでは、周波数を変化させても圧密沈下は生じておらず、緩やかな沈下もごく小さい。一方、25 Hz以上では周波数を変更した直後から一時的に沈下が急激になり、その後は緩やかになるものの、25 Hz以下のときに比べ非常に大きな沈下が生じている。健全路盤ではこのような傾向はほとんど見られなかった。

図-5には、各周波数で加振した際に発生したまくらぎ沈下量を示す。図-5におけるまくらぎ沈下量は、各周波数における初期沈下の影響を除くため、40,000回の載荷のうち、後半20,000回の載荷で発生した沈下量としている。図-5を見ると、健全路盤においては、25 Hzでややまくらぎ沈下量が大きいものの30 Hz以下では全体的にまくらぎ沈下量は非常に小さく、35 Hz、40 Hzでやや増加した。模擬軟弱路盤においては、20 Hz以下ではまくらぎ沈下量が非常に小さく、25 Hz以上では急激に増加した。また、まくらぎ沈下量は35 Hzで最大となり、40 Hz

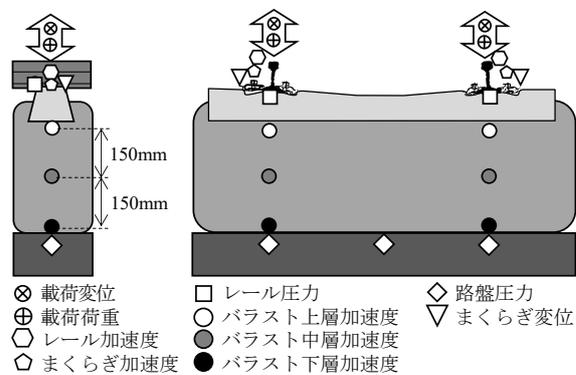


図-3 測定項目

では減少傾向となった。各路盤条件におけるまくらぎ沈下量の最大値は、健全路盤が0.19 mm、模擬軟弱路盤が0.76 mmであり、模擬軟弱路盤におけるまくらぎ沈下量は健全路盤の4倍となった。試験結果から、同一の荷重条件で繰返し载荷を行うと路盤剛性が小さいほうが全体的にまくらぎ沈下量は大きくなるのが分かった。また、まくらぎ沈下量は载荷周波数と単純な比例関係とはなっておらず、ある周波数でピークを迎えた後、減少傾向となることが分かった。図-6には载荷周波数と軌道各部の鉛直下向き最大加速度の関係を示す。最大加速度は各周波数における载荷5,000回目付近のものである。図-6を見ると、いずれの路盤条件でも軌道各部の応答加速度は载荷周波数に伴って増加傾向を示している。健全路盤では、レールとまくらぎ間、まくらぎと上層バラスト間、バラスト内でそれぞれ加速度が減衰されており、40 Hzでは下層バラストの加速度はレール加速度の50%程度となっている。一方、模擬軟弱路盤では減衰効果は小さく、レールからバラスト下層までほとんど加速度は減衰しなかった。模擬軟弱路盤上ではバラストより上部が一体となって振動していると考えられる。これらは、東海道新幹線本線において測定された軌道狂いの進行が見られる箇所と見られない箇所の応答の特徴とも一致しており、本試験は本線における現象を概ね再現できているといえる。また、模擬軟弱路盤においてまくらぎ沈下量が急激に増加した25 Hz以上のときの最大加速度を見ると、レールからバラスト下層まで軌道全体の加速度が重力加速度より大きくなっている。同様に健全路盤でまくらぎ沈下量が微増した35 Hzでは、バラスト上層の加速度が重力加速度より大きくなっており、40 Hzになるとバラスト全体の加速度が重力加速度を上回った。

図-7にはバラスト下層の最大加速度とまくらぎ沈下量の関係を示す。図-7を見ると、バラスト加速度が重力加速度以下のときは、バラスト加速度とまくらぎ沈下量が概ね比例関係にあることがわかる。バラスト加速度が重力加速度以上になるとまくらぎ沈下量の増加が著しくなり、両者の関係が変化している。また、さらに加速度が増加するとまくらぎ沈下量は減少傾向に転じ、さらに関係は変化した。この試験結果は、バラストに作用する加速度が重力加速度以下の領域ではまくらぎ沈下量はバラスト加速度に比例するが、重力加速度を超えるとそれまでの関係が成立しないことを示唆している。

また、試験中は载荷点のまくらぎ周辺のバラスト挙動にも路盤条件による挙動の違いが確認された。模擬軟弱路盤では、载荷周波数が25 Hz以上の時に载荷点付近の表層バラストが個々に振動し、徐々に移動したり軌道の肩部付近のバラストが転がり落ちたりするなどの現象が発生した。また、模擬軟弱路盤では敷設したマット全域が振動したために健全路盤に比べて振動発生範囲が広く、

バラスト軌道ののり尻付近のバラストまで振動が生じていた。

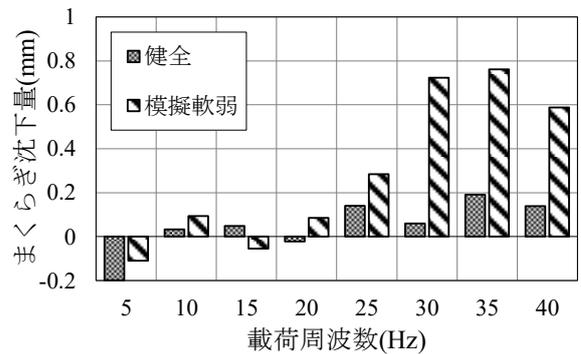
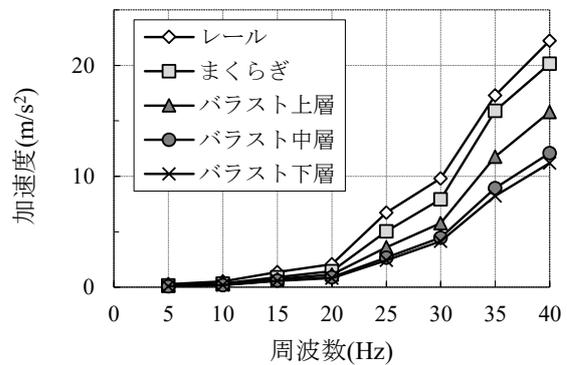
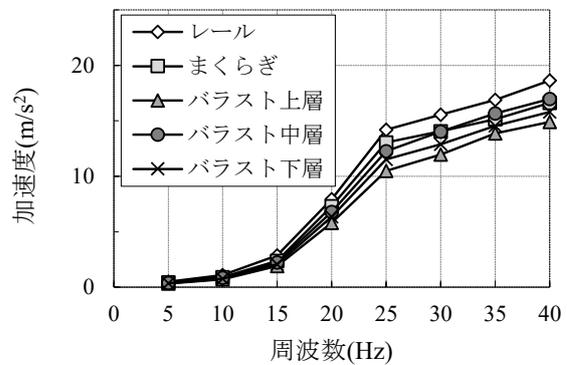


図-5 20,000回の载荷で生じたまくらぎ沈下量



(a) 健全路盤



(b) 模擬軟弱路盤

図-6 軌道各部の最大加速度 (鉛直下向き)

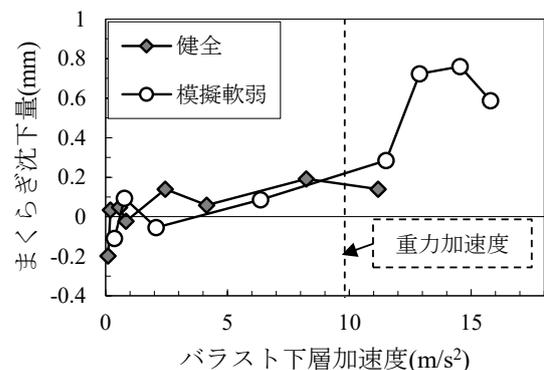


図-7 バラスト下層加速度とまくらぎ沈下量の関係

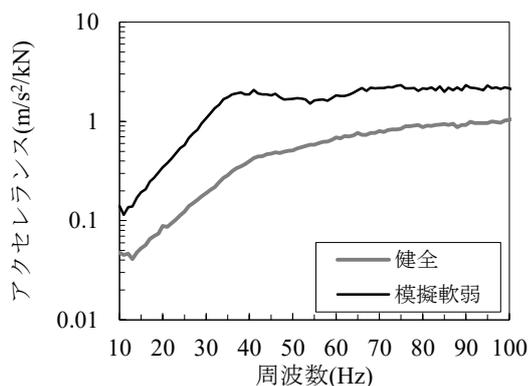


図-8 アクセラランス

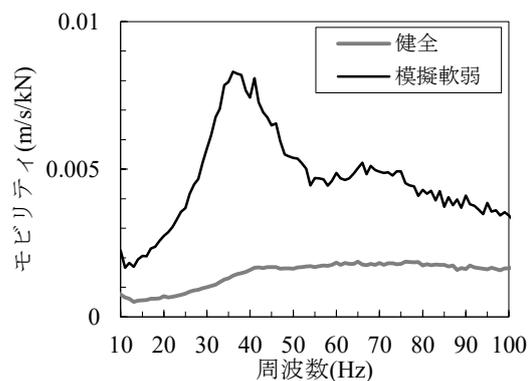


図-9 モビリティ

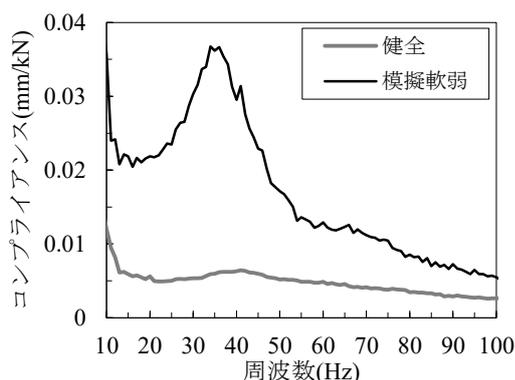


図-10 コンプライアンス

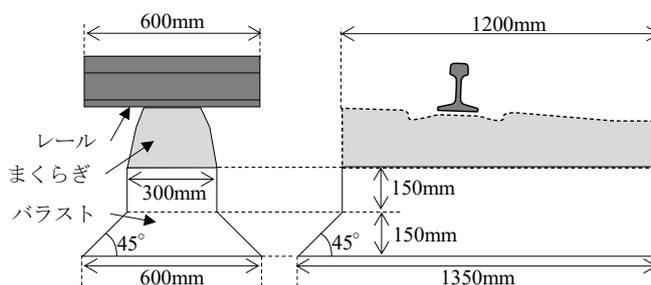


図-11 固有振動数計算時に考慮した軌道の範囲

バラスト加速度が重力加速度に達したときの状況について考える。バラストは主に上方のバラストの重量と粒子間摩擦力によって周囲のバラストから拘束力を受け、バラスト層としての形状を維持している。拘束しているバラストに上向きの慣性力が生じると、加速度に比例してこれらの拘束力は減少することになる。これは既往の研究にも示されている<sup>3)</sup>。さらに加速度が増加しバラストに作用する慣性力が重力以上になると、拘束力が完全に失われて個々のバラスト粒子は非常に不安定な状態となり、これが原因で、まくらぎ沈下量の急激な増加や、表層バラストの不安定な挙動が発生したと考えられる。

## (2) 振動特性試験

振動特性試験では、起振台車を用いて試験軌道をランダム加振し、各条件の軌道の振動特性を求めた。図-8には載荷輪重とバラスト下層部加速度のパワースペクトル密度（以下、PSDという）から求めたアクセラランス、図-9には載荷輪重とバラスト下層部速度のPSDから求めたモビリティ、図-10には載荷輪重とバラスト下層部変位のPSDから求めたコンプライアンスをそれぞれ示す。なお、10 Hz以下では加振時に発生した輪重および加速度が非常に小さく、測定時の誤差の影響が大きかったため、アクセラランス、モビリティ、コンプライアンスについての議論は10 Hz以上の領域で行うこととした。

表-2 固有振動数算出時の軌道諸元

路盤条件	健全	模擬軟弱
レール質量 (kg)	36.5	
まくらぎ質量 (kg)	130	
バラスト質量 (kg)	244.5	
路盤ばね剛性 (MN/m)	34.0	15.3
固有振動数 (Hz)	44.5	30.8

図-8に示したように、アクセラランスは周波数の増加とともに増加傾向あるいは横ばいとなった。健全路盤では明確なピークは見られないが、40 Hz付近で勾配が変化している。模擬軟弱路盤では38 Hz付近に緩やかなピークが見られた。まくらぎ沈下量との関係を見ると、両条件ともまくらぎ沈下量とアクセラランスのピーク周波数は概ね一致した。しかし、まくらぎ沈下量はピーク後に減少傾向となるのに対してアクセラランスは横ばいまたは増加しており、ピーク以降の傾向は異なった。

図-9のモビリティを見ると、ピークとなる周波数は、健全路盤で41 Hz、模擬軟弱路盤では34 Hzであり、模擬軟弱路盤ではアクセラランスよりややピーク周波数が低くなった。また、ピーク後のモビリティは健全路盤では減少傾向、模擬軟弱路盤では横ばいから微減傾向となっており、アクセラランスとは傾向が異なった。図-10のコンプライアンスでは、ピーク周波数はモビリティとほぼ同じであるが、ピーク後の減少傾向がモビリティより

顕著になった。

応答倍率に現れたこれらのピーク周波数について考える。ピーク周波数は、図-11、表-2に示したように、本試験の軌道を1質点系振動系と考えたときの固有振動数に概ね一致していた。また、ピーク周波数は繰返し載荷試験から得られたまくらぎ沈下量が最大となる周波数(図-5)とも概ね一致した。

本試験の結果から、軌道はレール・まくらぎ・バラストと路盤剛性によって決まる固有振動数を有しており、バラスト層の応答はこの固有振動数で卓越すると考えられる。まくらぎ沈下量は、固有振動数付近で軌道が加振されたときに応答が卓越したことで増加したと考えられる。また、固有振動数以上の周波数領域も考慮した場合、まくらぎ沈下量はモビリティまたはコンプライアンスに近い傾向を示すことが分かった。

#### 4. 個別要素法を用いた軌道沈下解析

前章では軌道沈下量が路盤面の速度あるいは変位に相関が高い可能性があることを示した。本章では、個別要素法(以下、DEMという)を用いた解析により、路盤の応答とまくらぎ沈下量との関係について検証した。個別要素法は要素個々の挙動を再現できるため、バラストの沈下挙動を分析するのに適している。本解析では筑波大学で開発された2次元DEM解析コード“DEM-seg”<sup>7)</sup>を用いた。

##### (1) 解析モデル

図-12には使用した解析モデルを示す。解析モデルは、幅800 mm、高さ800 mmの土槽にバラストを詰め、まくらぎ1本を設置したモデルとした。バラスト要素は図-13に示すように円要素2個でモデル化し、長軸・短軸比には30個のバラスト寸法を計測した値の平均を用いた。DEMにおける各要素の接触は、法線方向がばねおよびダンパー、接線方向がばね、ダンパーおよびスライダを用いてモデル化されている。解析で各要素に用いた主なパラメータを表-3に示す。なお、本モデルではバラスト1個分の奥行きを想定しているため、各要素の接触に関するパラメータについては既往の研究<sup>8)</sup>を参考に3次元モデルで適用されている値と同一とし

た。また、土槽の底面はばねとダンパーで支持されており、まくらぎからの加振によって生じる路盤振動を再現できるようにした。解析では路盤条件として地盤反力係数が30 MN/m<sup>3</sup> (Roadbed-A), 50 MN/m<sup>3</sup> (Roadbed-B), 110

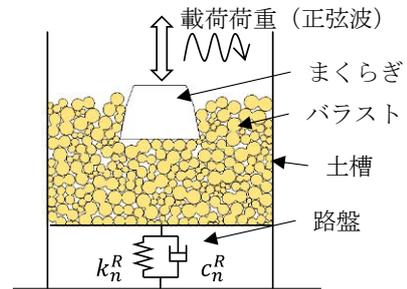


図-12 解析モデル

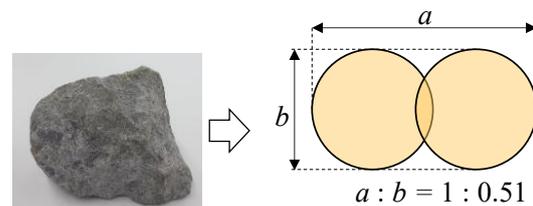


図-13 バラスト粒子モデル

表-3 解析諸元

		項目	値	
まくらぎ	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho^S$	2.50	
	質量 (kg)	$m^S$	7.92	
	ばね定数 (N/m)	法線方向	$K_n^S$	$9.09 \times 10^6$
		接線方向	$K_s^S$	$2.27 \times 10^6$
	減衰係数 (N·s/m)	法線方向	$C_n^S$	652
		接線方向	$C_s^S$	326
	粒子間摩擦角 (degree)	$\mu^S$	20	
バラスト	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho^B$	2.50	
	質量 (kg)	$M_{\text{total}}^B$	54.2	
	ばね定数 (N/m)	法線方向	$K_n^B$	$9.09 \times 10^6$
		接線方向	$K_s^B$	$2.27 \times 10^6$
	減衰係数 (N·s/m)	法線方向	$C_n^B$	652
		接線方向	$C_s^B$	326
	粒子間摩擦角 (degree)	$\mu^B$	36	
土槽	ばね定数 (N/m)	法線方向	$K_n^{Bo}$	$9.09 \times 10^6$
		接線方向	$K_s^{Bo}$	$2.27 \times 10^6$
	減衰係数 (N·s/m)	法線方向	$C_n^{Bo}$	652
		接線方向	$C_s^{Bo}$	326
	粒子間摩擦角 (degree)	側面	$\mu^{Bo}$	0
		底面	$\mu^{Bo}$	20

表-4 路盤要素の諸元

項目		Roadbed-A	Roadbed-B	Roadbed-C
地盤反力係数(MN/m <sup>3</sup> )	$K_{30}$	30	50	110
ばね定数 (N/m)	法線方向 $K_n^R$	$1.62 \times 10^6$	$2.70 \times 10^6$	$5.94 \times 10^6$
減衰係数 (N·s/m)	法線方向 $C_n^R$	$1.36 \times 10^4$	$2.26 \times 10^4$	$4.98 \times 10^4$
1 質点振動系における固有振動数 (Hz)	$f$	38.7	50.0	74.1

MN/m<sup>3</sup> (Roadbed-C)相当となる3条件を設定した。路盤に用いたパラメーターおよびモデル全体を1質点振動系として考えたときの固有振動数を表-4に示す。

### (2) 解析条件

解析ではまくらぎに対して荷重制御により正弦波荷重を入力した。荷重振幅は2.0±1.4 kNとした。この最大荷重は静止輪重の1.7倍に相当する。載荷周波数は、10, 20, 32, 40, 50, 64, 80, 100 Hz、載荷回数は5,000回とした。

### (3) 解析結果

解析から得られた解析終了時のまくらぎ沈下量と載荷周波数の関係を図-14に示す。また、図-15から図-17には載荷周波数と路盤部における加速度、速度、変位の振幅値との関係をそれぞれ示す。図-14を見ると、いずれの路盤条件でもまくらぎ沈下量はピークとなる周波数を

有しており、Roadbed-Aでは40 Hz、Roadbed-BおよびRoadbed-Cでは64 Hzであった。Roadbed-B, Cではややずれはあるものの、表-4に示したレール・バラスト・まくらぎの質量と路盤ばね定数から求めた1質点振動系における固有振動数と概ね一致した。また、まくらぎ沈下量が増加するのは、Roadbed-A, Roadbed-Bでは20 Hz、Roadbed-Cでは32 Hzからであった。これは、図-15に示した路盤加速度が重力加速度を上回った周波数と一致している。路盤加速度が重力加速度を超えると、バラスト全体で重力加速度以上の加速度を生じるバラストが増加することでバラストの拘束力が著しく低下する瞬間が生じ始め、まくらぎ沈下量が急激に増加したと考えられる。

路盤部の応答を見ると、図-16、図-17に示したように、速度振幅および変位振幅はひとつピーク値を有した山なりの傾向を示した。また、ピーク周波数はまくらぎ沈下量のものと概ね一致した。一方、加速度振幅は図-15に示したように明確なピークは現れず、全体的に64 Hzま

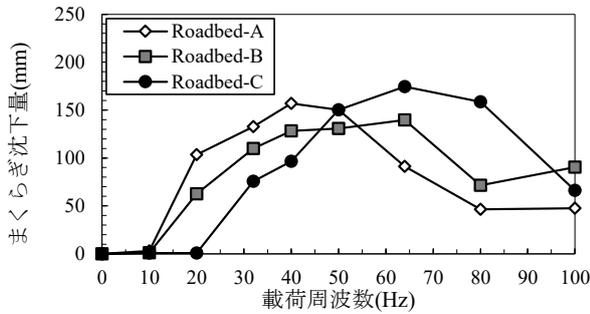


図-14 載荷周波数 - まくらぎ沈下量関係

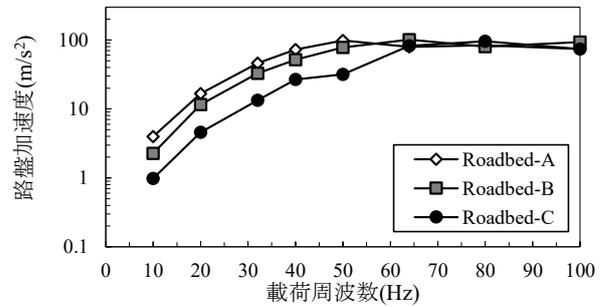


図-15 載荷周波数 - 路盤加速度関係

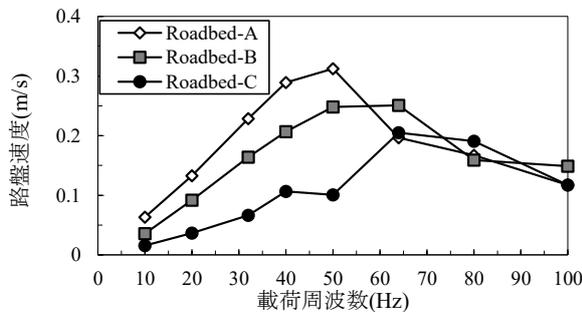


図-16 載荷周波数 - 路盤速度関係

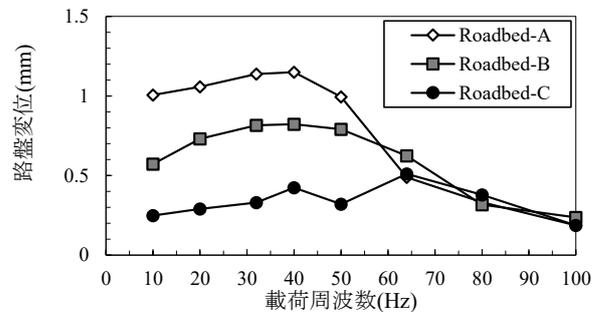


図-17 載荷周波数 - 路盤変位関係

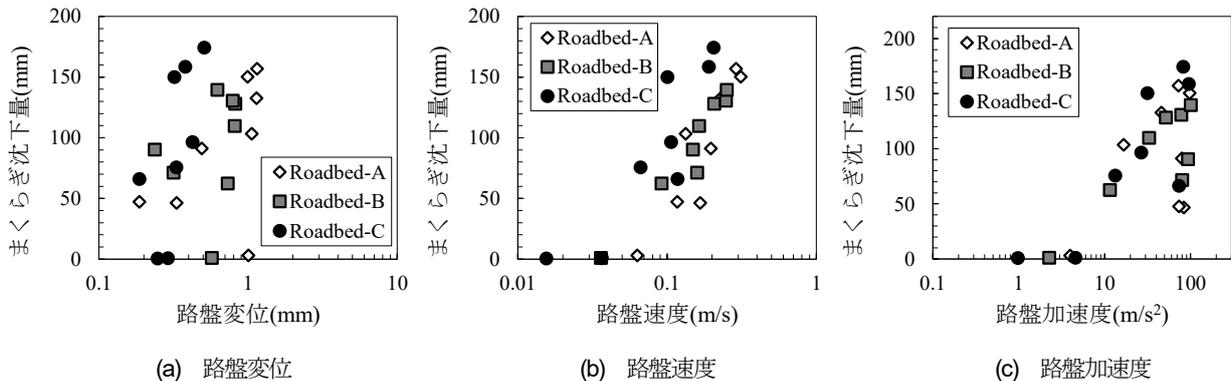


図-18 路盤応答とまくらぎ沈下量の相関

では増加傾向でその後は横ばいから微増となった。

図-18には、路盤部の応答とまくらぎ沈下量との関係を示した。図-18を見ると、路盤部の変位・速度・加速度の中では、速度に対する相関が最も高くなった。この結果からは、路盤部の速度を指標とすると、路盤剛性や載荷時の周波数などに依存せず、まくらぎ沈下量と一定の関係性を求めることができる可能性があるといえる。

以上より、解析からは、路盤部の加速度が重力加速度を超えるとまくらぎ沈下量が急激に増加すること、まくらぎ沈下量は載荷周波数が軌道の固有振動数と等しくなるときに最大となり、その後は減少すること、まくらぎ沈下量は路盤部の速度と相関が高いことが分かった。これらはいずれも前章の試験結果の傾向とも概ね一致していることから、本解析は2次元での検討であるが、実際のバラスト軌道に生じている現象を概ね説明できていると考えられる。今後はDEMから得られるバラスト個々の詳細挙動をさらに分析し、路盤速度がまくらぎ沈下量に高い相関を示す要因についての分析を進めていく。

## 5. 結言

本研究では、路盤剛性および載荷周波数とまくらぎ沈下量の関係について実験および解析による検証を行った。以下に今回得られた知見をまとめる。

- (1) 繰返し載荷試験の結果、同一の荷重条件では路盤剛性が小さいほうが軌道沈下量が大きくなった。
- (2) 試験および解析の結果、軌道沈下量はバラスト全体の加速度が重力加速度を上回ると急激に増加した。このとき、バラストの拘束力はほとんど失われて非常に不安定な状態になっており、これが沈下量の増加に大きく影響していると考えられる。
- (3) 軌道沈下量は加振周波数に対してピーク値を有して

おり、ピーク以降は加振周波数の増加に伴い軌道沈下量は減少した。また、軌道沈下量は路盤部の速度振幅に対して高い相関を示すことが分かった。

## 参考文献

- 1) 村本勝己, 関根悦夫: 繰返し荷重に対するバラスト軌道の沈下特性, 土木学会第55回年次学術講演会, III-A213, 2000.
- 2) 古川敦, 泉栄治: 実物大バラスト軌道模型載荷試験による軌道沈下量算定式の導出, 第15回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2008), 講演論文集, pp.403-406, 2008.
- 3) 佐藤裕: 繰返し荷重による道床沈下の実験, 鉄道技術研究報告, No.65, 1959.
- 4) 名村明, 石川達也, 三浦重, 内田雅夫, 堀池高広: 有道床軌道の道床沈下の定量化に関する基礎的検討, 鉄道総研報告, Vol.7, No.10, 1993.
- 5) Masahiro Miwa, Shou Nakamura: High Speed Running Test and the New Testing Equipment for Wheel/Rail Dynamic Interaction, *Proc of Int. Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems (STECH'03)*, JSME, pp.489-493, 2003.
- 6) 千田耕大, 三輪昌弘, 川崎祐征: 軌道狂い進みに伴うバラスト挙動の経時変化に関する一考察, 第71回年次学術講演会講演概要集, DVD-ROM, 2016.
- 7) Matsushima, T. and Saomoto, H.; Discrete Element Modeling for Irregularly-Shaped Sand Grains, *Proc. NUMGE: Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Mestat (ed.)*, pp.239-246, 2002.
- 8) 河野昭子, 松島亘志: 離散体モデルを用いた道床バラスト層の変形挙動解析, 鉄道総研報告, Vol.28, No.12, 2014.

(2017.4.7 受付)

## INFLUENCE OF ROADBED STIFFNESS AND LOADING FREQUENCY ON TRACK SETTLEMENT

Kodai SENDA, Masahiro MIWA, Yoshiyuki KAWASAKI and Takashi MATSUSHIMA

The loading frequency caused by passing vehicles is higher in high-speed trains compared with that of vehicles in conventional line. In case of the Tokaido Shinkansen, the frequency is determined above 30 Hz, which is mainly caused by the time to pass the distance between two wheelsets in a bogie. In this study, we verified the influence of this relatively high frequency cyclic load on track settlement by experiments using full-scale ballasted track model and simulation using the Discrete Element Method. The results of the experiments and the simulation yielded two major outcomes. The first is that the sleeper settlement rapidly increases if the ballast acceleration exceeds the gravitational acceleration. The second is that the sleeper settlement correlates with the velocity amplitude of the roadbed.