

# 寒冷地に対応した既設新幹線 バラストレス軌道の開発

高橋 貴蔵\* 桃谷 尚嗣\* 伊藤 老記\* 長沼 光\*  
及川 祐也\*\* 鈴木 実\*\*\* 鈴木 浩明#

## Development of Ballastless Track for Existing Shinkansen-line in Cold Region

Takatada TAKAHASHI Yoshitsugu MOMOYA Kazuki ITOU Hikaru NAGANUMA  
Yuya OIKAWA Minoru SUZUKI Hiroaki SUZUKI

The authors have been developing a ballastless track using the track bed of pre-packed concrete with ballast. Reducing the changes in track support stiffness and improving freeze-thaw resistance remains problems in practical use. We carried out a freezing and thawing test, a cyclic loading test for a real size track model, a wheel load variation analysis, etc., in order to solve these subjects. The results of these studies, we propose a construction method of pre-packed concrete and application of a new type elastic sleeper.

キーワード：バラストレス軌道，プレパックドコンクリート，凍害，弾性まくらぎ

### 1. はじめに

新幹線のバラストレス軌道では、さらなる保守の省力化や耐震性の向上が求められており、有効な手法の一つとして道床のバラストレス化がある。これまで筆者らはアスファルト路盤を有する土構造物上の既設新幹線のバラストレス軌道を対象に、バラスト（最大粒径 40mm の砕石に置き換えたもの）を骨材としたプレパックドコンクリートを道床に適用するため、要素試験や実物大軌道模型に対する繰返し載荷試験等による力学的な検討を行ってきた<sup>1) 2)</sup>。さらに、まくらぎ端部から伝達される水平方向の荷重に対する耐力を検討し、道床肩幅を 200mm 以上とすることで設計荷重を満足することも確認した<sup>3)</sup>。

今後、提案したバラストレス軌道を実用化するに当たっては、上述した力学的な特性の他に、寒冷地に適用するための凍結融解抵抗性の向上と道床のプレパックドコンクリート化による軌道支持剛性の増加が課題として挙げられる。

そこで、プレパックドコンクリートに対する凍結融解試験を実施し、凍結融解抵抗性を改善する手法を新たに提案するとともに、支持剛性の増加に対しては弾性まくら

らぎを適用することで低ばね化し、実験および解析によりその効果を検証した。なお、本報告の内容は一般区間の他、分岐器区間も対象とするため、検討には分岐器で使用されている合成まくらぎを用いている。

### 2. 凍結融解抵抗性の改善

寒冷地において道床をプレパックドコンクリート化した場合、凍結融解による劣化が生じることが予想される。従来の検討では、バラストを含まないモルタル単体やバラストとモルタルをミキサー一括練りとした試験体の耐久性指数（凍結融解抵抗性を表す値）は高いものの、プレパックドコンクリートとした試験体の耐久性指数は低く安定しなかった。この理由として、プレパックドコンクリートにはバラストとモルタルとの界面に生じる気泡や空隙、端面における骨材露出等が存在し、これらが凍結融解抵抗性の低下に影響を及ぼしたことが考えられた。そこで、ミキサー一括練りに相当する振動締固めや、端面の気泡を取り除く作業（以下、「スペーシング」という）を行うことによって端面および内部の空隙を削減した試験体を作製し、凍結融解試験を行った。

#### 2.1 振動の有無と端面における空隙との関係

モルタルてん充時の振動締固めが、モルタルのバラストへの充てん性に及ぼす影響を調べるため、バラストに振動を加えながらモルタルをてん充したものと振動を加

\* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室  
\*\* 軌道技術研究部 軌道構造研究室  
\*\*\* 材料技術研究部 防振材料研究室部  
# 材料技術研究部 コンクリート材料研究室



図1 試験体の外観観察例

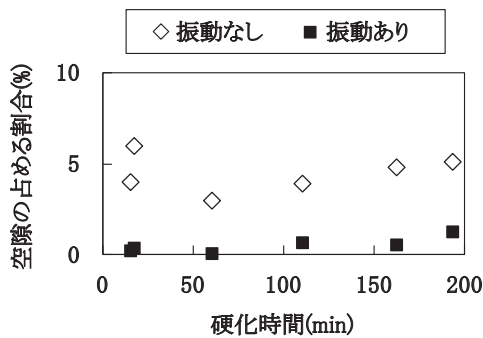


図2 振動の有無と端面における空隙の関係

表1 モルタルの配合

配合名	配合量 ( / 袋)		
	プレミックス材 (P) (kg)	練混ぜ水 (kg)	凝結調節剤 (g)
5.8	25	5.8	12.5
5.3		5.3	12.5

※凝結遅延剤は凝結時間が40～60分程度となるように添加した

えずにてん充した試験体を作製し、硬化後の試験体端面における空隙状況を硬化時間別に確認した。ここで、バラストには道床の寸法、入手性等を考慮して最大粒径40mmのコンクリート用碎石を使用した。図1および図2に結果を示す。振動を加えた試験体は振動を加えなかったものに対し空隙が平均で90%程度減少している。以上より、振動締め固めを行うことで端面の空隙を削減し、バラストの露出を抑えることが可能である。

## 2.2 凍結融解試験

モルタルの配合と試験体の作製水準および作製方法を表1、表2および図3に示す。試験はJIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠して行い、方法は水中凍結融解試験(A法)とした。

凍結融解試験の結果から算出した耐久性指数を図4に示す。練混ぜ水量や振動の有無によらず耐久性指数は95～97と従来の結果と比べ安定して高く、モルタル単体と同レベルの耐久性指数が得られた。なお、振動なし

表2 試験体の作製水準と作製数

配合名	モルタル単体 (体)	プレパックドコンクリート (体)	
		振動なし	振動あり
5.8	2	2	2
5.3	2	2	4

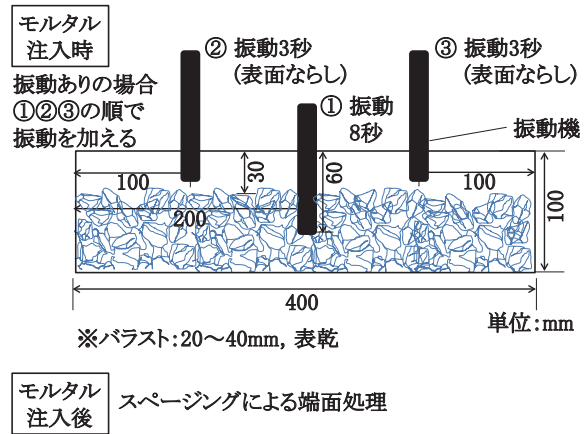


図3 試験体の作製方法

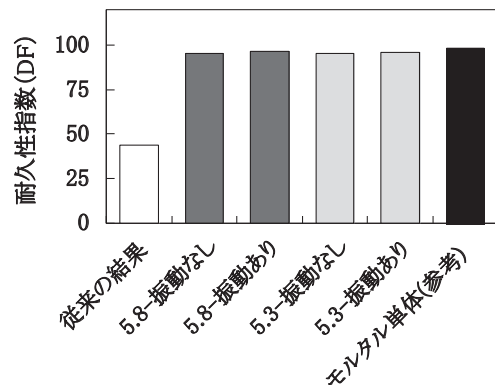


図4 凍結融解試験の結果(耐久性指数)

でも耐久性指数が高くなったのは、スペーシングにより端面状況が改善されたためと考えられる。

## 3. まくらぎパッドの変形特性試験

軌道構造が変化する境界部では軌道支持ばね係数を可能な限り近づけることが重要である。文献4では、走行安全性を考慮した輪重変動率(輪重変動/静止輪重)の評価基準値を、軌道変位との競合を考慮して0.13としており、速度260km/hに対する許容支持弾性比(1締結当たりの総合ばね定数の比率)は2.0程度としてある。そこで、本報告で提案するバラストレス軌道には弾性まくらぎを適用し、バラスト上およびプレパックドコンクリート上におけるばね定数の比が2.0倍以内になるまくらぎパッドを開発することとした。

まくらぎパッドは、エチレンプロピレンゴム(EPDM)製低弾性発泡ゴム(厚さ10mm)の下面(バラスト接触面)

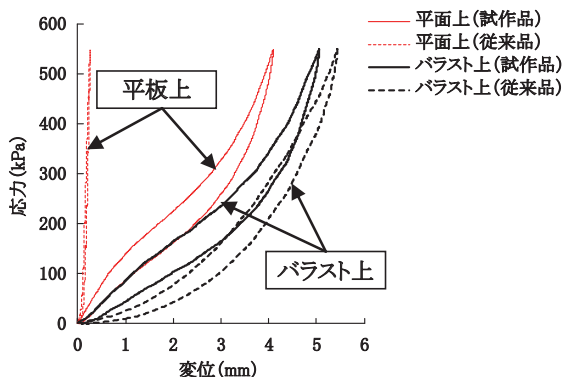


図5 まくらぎパッドの圧縮変形特性

表3 まくらぎパッドの圧縮特性

供試体		2～100kPa 間	
		ベッド弾性率 (kN/m <sup>3</sup> )	変位 (mm)
平面上	試作品	$1.55 \times 10^2$	0.63
	従来品	$9.07 \times 10^2$	0.11
バラスト上	試作品	$0.86 \times 10^2$	1.14
	従来品	$0.44 \times 10^2$	2.22

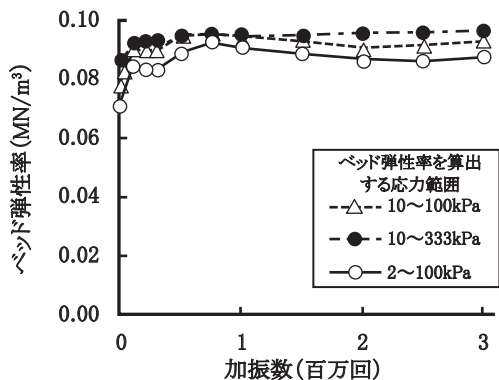


図6 耐荷重試験でのベッド弾性率

に、硬質ゴム（厚さ 6mm）を貼り合せた 2 層構造とした。ここで、硬質ゴムは、バラストの貫入や点接触に対する荷重分散を考慮したもので、バラストレス化前後の圧縮特性の変化を抑制するためのものである。

土槽（500 × 500mm）に充填した厚さ約 300mm のバラスト上とバラストレス軌道を模擬した平面上で、静的圧縮特性試験を行った結果を図 5 に示す。ここで、供試体の平面寸法は 200 × 200 mm である。試作品では、従来品と比べて変位の差が大幅に減少し、表 3 に示すようにベッド弾性率がバラスト上で  $0.86 \times 10^2 \text{ kN/m}^3$ 、平面上で  $1.55 \times 10^2 \text{ kN/m}^3$  となり、バラストレス化前後の変化が 2 倍以内になることを確認した。なお、前述の土槽上で応力  $2.05 \pm 1.95 \text{ kN}$ （3Hz、サイン波形）とする耐荷重試験を行った結果、図 6 に示すようにベッド弾性率は 30 ～ 50 万回の加振後に安定し、バラスト道床上での使用についても問題がないと考えられる。

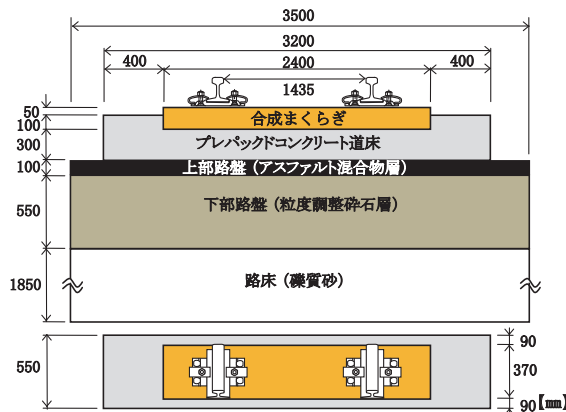


図7 実物大模型軌道の寸法図

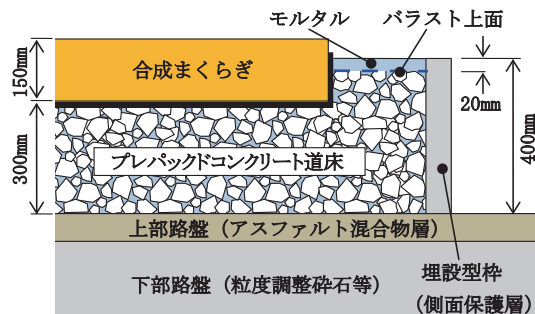


図8 実物大模型軌道の断面詳細図

表4 モルタルの配合

プレミックス材 1 袋当たり		
プレミックス材 (kg)	凝結調節剤 (g)	水 (kg)
25	20	5.3

表5 モルタルの品質管理値

漏斗流下時間 (秒)		ブリーディング率 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
J <sub>A</sub> 漏斗	J <sub>14</sub> 漏斗		
35.5	3.5	0	52.3*
36.0	3.4		

※供試体数 3 体の平均

#### 4. バラストレス軌道の性能確認

凍結融解抵抗性を改善し、弾性まくらぎを適用したバラストレス軌道の施工性と弾性化の効果を軌道として確認するため、実物大軌道模型を構築し、繰返し荷重試験を実施した。また、実験結果をもとに輪重変動解析を実施して衝撃輪重の低減効果を確認し、プレバックドコンクリートの性能を照査した。

##### 4.1 実物大軌道模型の構築

実物大軌道模型の寸法図と断面詳細図を図 7、図 8 に示す。実物大軌道模型の道床側面には、耐凍害性を改善する目的で埋設型枠を設置し、道床上面にはモルタルのみの層が 20mm 程度になるようにバラスト（コンクリート用碎石を使用）を敷き詰めた。

特集：軌道技術

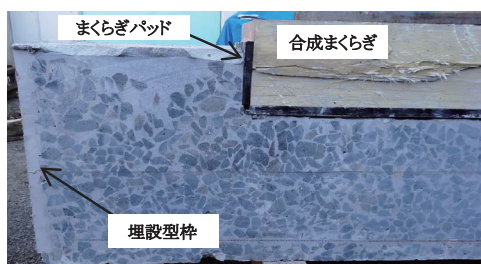


図9 モルタルのてん充状況

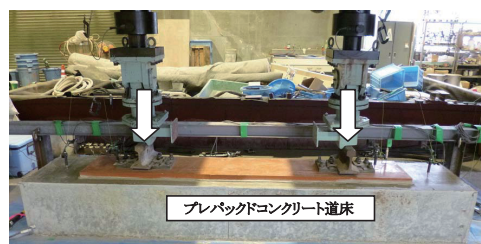


図10 実物大模型軌道に対する载荷状況の例

表6 実物大模型軌道に対する試験条件

	バラスト 軌道	バラストレス軌道	
		(材齢：90分)	(材齢：7日)
荷重	5～45kN	5～67kN	
周波数	5Hz (サイン波形)		
回数	1万回	100万回	

モルタルの配合と品質管理値を表4と表5に示す。「2. 凍結融解抵抗性の改善」の結果を踏まえ、モルタルの水量は、従来の5.8～6.0kg/袋<sup>1)</sup>よりも減らした5.3kg/袋とし、パイププレートによる振動締めを行った。なお、モルタルの流動性が低下しないよう、てん充直前にバラストへ散水した。また、モルタルの硬化後に塗膜養生剤を塗布して表面からの水分の逸散を防止した。

試験終了後に実物大模型軌道を切断してモルタルのてん充状況を確認した結果を図9に示す。バラストの周りや埋設型枠面に対して十分にモルタルがてん充されていることを確認した。なお、プレパックドコンクリートから採取したコアの材齢7日の圧縮強度は31.0N/mm<sup>2</sup>であり、設計基準強度として定めた20N/mm<sup>2</sup>を満足していた。

4.2 実物大軌道模型に対する繰返し载荷試験

実物大模型軌道に対する繰返し载荷試験の状況を図10に、試験条件を表6に示す。

荷重振幅をまくらぎ変位振幅で除した値をまくらぎ支持ばね係数と称し、図11に示す。材齢90分での繰返し载荷に対するまくらぎ支持ばね係数はバラスト軌道よりも大きく、繰返し回数1万回の範囲内で一定となり、材齢90分で初列車を走行させることについて問題はないと言える。材齢7日でのまくらぎ支持ばね係数はさらに大きくなり、繰返し回数100万回の範囲内に対してまくらぎ支持ばね係数はほぼ一定であった。したがって、材齢90分で列車を通過させても、その後の荷重支持性能

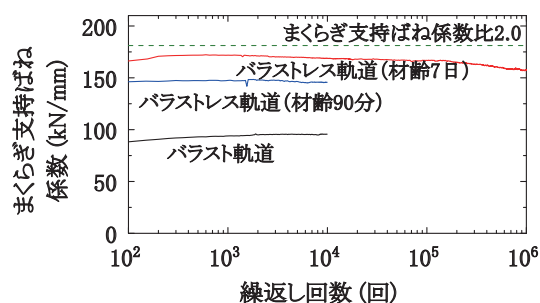


図11 まくらぎ支持ばね係数と繰返し回数の関係

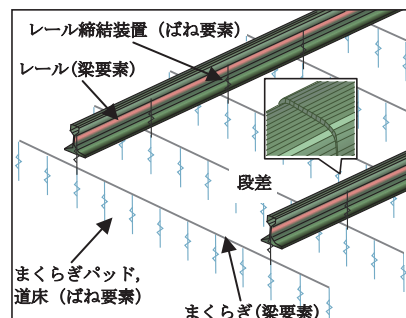


図12 軌道モデルの構成

表7 軌道スラブを想定した梁要素の物性値

ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	31000
質量密度 (kg/mm <sup>3</sup> )	2.50 × 10 <sup>-6</sup>
ポアソン比	0.2
断面 (mm)	幅 581 × 高さ 190 × 長さ 2340

には影響を与えないものと考えられる。

バラスト軌道に対するバラストレス軌道のまくらぎ支持ばね係数の比は2倍以内であり、軌道として許容支持弾性比を満足することを確認した。

4.3 弾性まくらぎ化による輪重変動低減効果

弾性まくらぎ化することで軌道に生じる衝撃的な輪重変動を抑制する効果が期待されることから、輪重変動解析により確認することとした。

軌道モデルは図12に示すように、レールとまくらぎを梁要素でモデル化しており、レールとまくらぎの間およびまくらぎ下にはばね要素(以下、「レール支持ばね」および「まくらぎ支持ばね」という)を配置している<sup>5)</sup>。レール支持ばねはレール締結装置、まくらぎ支持ばねはまくらぎパッドと道床ばね等の合成ばねに相当する。締結間隔は581mmとし、車両は新幹線型車両で走行速度は260km/hとした。なお、本解析モデルは衝撃荷重を発生させるため、同図に示すようにレール表面に段差をつけている。

解析モデルはまくらぎを梁要素でモデル化しているため、スラブ分岐器を想定する場合、軌道スラブの特性を表7のようにまくらぎ(梁要素)に置き換えてモデル化した。また、レール支持ばねは剛結相当、まくらぎ支持ばねは樹脂てん充材<sup>6)</sup>を想定し、表8のように与えた。

表8 スラブ分岐器を想定した各ばね係数

レール支持ばね	20000kN/mm (剛結相当)
まくらぎ1本あたりのまくらぎ支持ばね	1433kN/mm

表9 まくらぎの物性値

ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	8100
質量密度 (kg/mm <sup>3</sup> )	7.39 × 10 <sup>-7</sup>
ポアソン比	0.3
断面 (mm)	幅 370 × 高さ 150 × 長さ 2400

表10 プレパックドコンクリート道床の分岐器を想定した各ばね係数

レール支持ばね	20000kN/mm (剛結相当)
まくらぎ1本あたりのまくらぎ支持ばね	170kN/mm*

※実験結果を使用 (図11 参照)

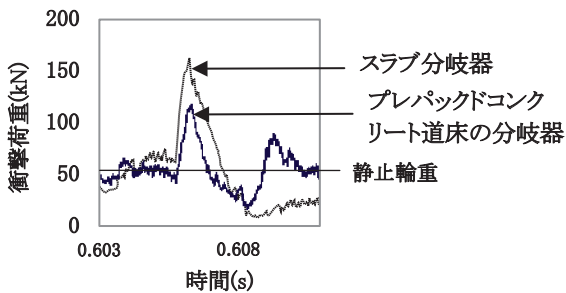


図13 衝撃荷重を生じる軌道条件での解析結果

プレパックドコンクリート化した道床 (以下、「プレパックドコンクリート道床」という) の分岐器を想定した場合の解析条件を表9, 表10に示す。まくらぎはプレパックドコンクリート道床で使用する, まくらぎ下面にまくらぎパッドを貼付けた合成まくらぎを想定している。レール支持ばねは剛結相当, まくらぎ支持ばねはまくらぎパッドとプレパックドコンクリート道床を想定し, 「4.2 実物大軌道模型に対する繰返し载荷試験」で示す実験結果に基づいて値を設定した。なお, まくらぎパッドとプレパックドコンクリート道床のばね係数は, それぞれまくらぎ1本あたり212kN/mm, 850kN/mmである。

スラブ分岐器を想定した軌道において0.3mmの段差を走行する解析を行った結果, 図13のように上下方向の衝撃荷重は静止輪重の3.1倍となった。なお, この段差は分岐スラブの設計に用いる荷重と同程度になるように定めたものである。同様の段差で, プレパックドコンクリート道床の分岐器を想定した場合の解析を行った結果, 上下方向の衝撃荷重は静止輪重の2.2倍であった。このことから, プレパックドコンクリート道床の分岐器の場合はスラブ分岐器より衝撃荷重が減少することがわかった。解析でアスファルト路盤の変形を考慮すれば, 衝撃荷重はより小さくなる可能性がある。

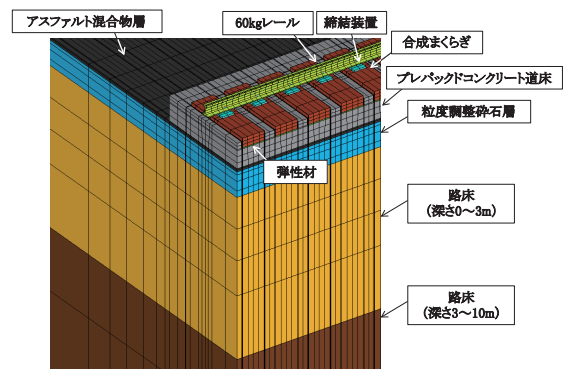


図14 解析モデル

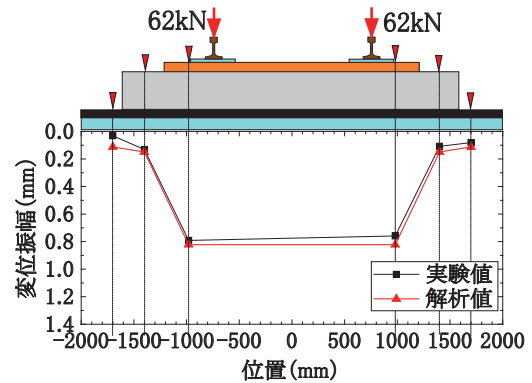


図15 実物大軌道模型に対する実験値と解析値の比較

表11 解析に用いた物性値

	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	備考
レール	210,000	0.3	60kg レール
締結装置	210,000	0.3	分岐器用締結装置
まくらぎ	8,000	0.3	合成まくらぎ
まくらぎパッド	2.2	0.4	要素試験より設定
プレパックドコンクリート道床	24,400	0.2	文献2
アスファルト混合物層	2,000	0.3	夏季の物性値
粒度調整碎石層	180	0.3	
路床	67.0 (深さ0~3m) 133.9 (深さ3~10m)	0.3	

#### 4.4 プレパックドコンクリート道床の性能照査

プレパックドコンクリート道床の性能照査に用いる応力を算定するため有限要素法を用いた静的弾性解析を行った。図14に解析モデルを示す。なお, 事前に図10に示した実物大軌道模型に対する繰返し载荷試験の解析を行い, 図15に示すように解析による変位は試験結果とほぼ等しく, 解析モデルが妥当であることを確認した。モデル化した路盤・路床条件は, 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物<sup>7)</sup>に記載の有道床軌道用アスファルト路盤とし, 通トンが多い場合のK<sub>30</sub>値≥110MN/m<sup>3</sup>の路床条件における, 「適合みなし仕様における新幹線鉄道の場合の路盤厚さ」を参考に設定した。バラストレス軌

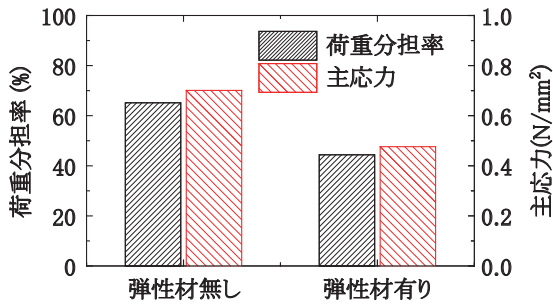


図 16 まくらぎパッドの有無による荷重低減効果

道のモデル化では、プレパッドコンクリート道床の目地間隔をまくらぎ 5 本分（まくらぎ間隔 550mm）とし、幅 10mm の目地を設けた。载荷条件は、輪重 85kN、軸距 2.5m とした。表 11 に解析に用いた物性値を示す。なお、まくらぎパッドによる列車荷重の低減効果を確認するため、まくらぎパッドが無い場合についても解析を行った。

载荷点直下のまくらぎに対する荷重分担率とプレパッドコンクリート道床底面の最大主応力を図 16 に示す。荷重分担率は、まくらぎパッドが無い場合で 65.2% 程度に対して、まくらぎパッドが有る場合では 44.4% 程度となり、まくらぎパッドを用いることで荷重が広く分散することを確認した。また、プレパッドコンクリート道床底面に生じる最大主応力は、まくらぎパッドが無い場合で 0.70N/mm<sup>2</sup> に対して、まくらぎパッドが有る場合では 0.48N/mm<sup>2</sup> となり、荷重分散効果により 31% 低減した。

鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造<sup>8)</sup> に従ってプレパッドコンクリート道床の曲げ破壊に関する安全性の照査を実施した結果を表 12 に示す。ここで、変動輪重係数は輪重変動解析の結果を考慮して 2.5 とし、プレパッドコンクリートの曲げ強度の特性値は設計基準強度を 20N/mm<sup>2</sup> として算定した<sup>2)</sup>。照査の結果、プレパッドコンクリート道床は曲げ破壊に対する性能を満足することがわかった。なお、曲げ疲労破壊に対しても性能を満足することを確認している。

## 5. まとめ

既設新幹線バラスト軌道の実用化を目的に実施した検討で得られた知見は以下の通りである。

- (1) モルタルのてん充時に振動締め固めを行うことで、凍結融解抵抗性が改善され、従来よりも水量を減らした配合で施工が行えることを確認した。
- (2) まくらぎパッドをエチレンプロピレンゴム製低弾性発泡ゴムと硬質ゴムの 2 層構造にすることで、許容支持弾性比を満足することを確認した。
- (3) 材齢 90 分で列車を通過させることが可能であるこ

表 12 曲げ破壊に対する安全性の照査結果

		まくらぎパッドあり
路床の K <sub>30</sub> 値	MN/m <sup>3</sup>	110
静止輪重	kN	85
変動輪重係数		2.5
作用係数		1.1
軌道構造係数		1
設計応答値	N/mm <sup>2</sup>	1.309
設計基準強度	N/mm <sup>2</sup>	20
曲げ強度の特性値	N/mm <sup>2</sup>	2.95
材料係数		1.3
軌道部材係数		1.1
設計限界値	N/mm <sup>2</sup>	2.06
軌道構造係数		1.1
照査結果		0.67
判定		○

とを確認した。

- (4) 弾性まくらぎを用いることで衝撃的な輪重変動が緩和するとともに、荷重分担率が低下することを確認した。
- (5) 弾性まくらぎを適用した既設新幹線バラスト軌道有道床軌道用アスファルト路盤上に適用できることを性能照査型設計法で確認した。

## 文 献

- 1) 高橋貴蔵, 伊藤孝記, 洲上翔太, 桃谷尚嗣: 新幹線に対応したプレパッドコンクリート道床の開発, 鉄道総研報告, Vol.26, No.2, pp.19-24, 2012
- 2) 高橋貴蔵, 伊藤孝記, 洲上翔太, 桃谷尚嗣: バラスト軌道のプレパッドコンクリート化に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1471-1476, 2012
- 3) 高橋貴蔵, 伊藤孝記, 桃谷尚嗣: プレパッドコンクリートを用いた道床の水平耐力に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1495-1500, 2013
- 4) 名村明, 松尾浩一郎, 三浦重: 支持弾性遷移区間の軌道の挙動解析, 鉄道総研報告, Vol.11, No.2, pp.39-42, 1997
- 5) 及川祐也, 清水紗希: 分岐器の弾性支持化に対する評価手法, 日本鉄道施設協会誌, 第 12 号, pp.24-27, 2013
- 6) 鉄道技術研究所速報 東北新幹線総合試験線 (小山地区 - 下り線) の総合監査における軌道関係試験結果 pp71
- 7) 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.210-213, 丸善, 2007
- 8) 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