

新幹線に対応したプレパックド コンクリート道床の開発

高橋 貴蔵* 伊藤 耆記*
 瀧上 翔太* 桃谷 尚嗣*

Development of Pre-packed Concrete Trackbed for Shinkansen

Takatada TAKAHASHI Kazuki ITOU
 Shouta FUCHIGAMI Yoshitsugu MOMOYA

For the ballast track of the Shinkansen, labor saving of the maintenance work and earthquake-resistant improvement are demanded. A ballastless track with concrete trackbed is one of the methods to solve these problems. To apply concrete trackbed to existing ballast track of Sinkansen, we decided to develop pre-packed concrete trackbed which is formed by filling cement grout into the void of ballast aggregate. As a result of material examinations and full-scale track model tests, we confirmed that pre-packed concrete trackbed had enough performance to support train load of Shinkansen.

キーワード：プレパックドコンクリート，直結軌道，土構造物

1. はじめに

新幹線のバラスト軌道では、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。営業線の道床をバラストレス化する工法として、バラストに固化材をてん充するてん充道床が在来線で実用化されている^{1) 2)}ものの、設計条件等が新幹線への適用を前提としていないため、新幹線では実用化されていない。

そこで、アスファルト路盤を有する土構造物上の新幹線を対象とし、従来のバラストの固化により道床の沈下を抑制するというてん充道床の考え方ではなく、バラストを骨材とし、曲げ部材として軌道を支持するプレパックドコンクリートを道床に適用することとした（以下、プレパックドコンクリート道床とする）。本報告では、プレパックドコンクリートの圧縮強度や曲げ強度等を評価するための材料試験および実物大軌道模型に対する繰返し載荷試験を行った結果について報告する。

2. プレパックドコンクリート道床を用いた軌道の基本構造

プレパックドコンクリート道床を用いた軌道の構造例を図1に示す。プレパックドコンクリート道床は、新幹

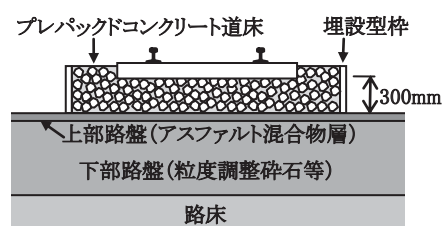


図1 プレパックドコンクリート道床を用いた構造例

線の既設バラスト軌道を対象とし、路盤は有道床軌道用アスファルト路盤（強化路盤）³⁾であることを前提とした。プレパックドコンクリート道床の厚さはバラスト軌道の道床厚と同一とし、まくらぎ底部で300mmとした。なお、本軌道構造は、一般部の他に分岐区間への適用も考慮していることから、まくらぎには合成まくらぎを用いることとして検討を行った。

3. 材料試験

3.1 使用材料

バラストを用いたプレパックドコンクリートの強度・変形特性を評価するために材料試験を行った。試験に使用した材料を表1に示す。

(1) モルタル

モルタルの配合を表2に示す。夜間線路閉鎖間合いでの施工時間と始発列車通過時に必要な強度を確保するため、プレパックドコンクリート道床に用いるモルタルに

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

特集：軌道技術

は急硬性と無収縮性を有するプレミックス材を用いた。

1袋当たり25kgのプレミックス材に対する水量とJA漏斗を用いた流動性試験の結果（JSCE F531）を図2に示す。モルタルの水量は、JA漏斗による流下時間が19秒程度になるように設定した。プレミックス材1袋当たりの水量は、材料試験においては5.8kg、実物大軌道模型においては6.0kgとなった。プレミックス材のセメントと細骨材の比率は1:1であることから、モルタルの水セメント比は、材料試験においては46.4%、実物大軌道模型においては48%であった。モルタルには可使時間（練混ぜ後にてん充作業ができる時間）が40分程度になるように凝結調整剤を混入した。

(2) 骨材（バラスト）

道床に用いるバラストの最大粒径は63mmであり、プレパックドコンクリート道床の厚さは300mmである。したがって、部材厚さを考慮すると、バラストをそのままプレパックドコンクリートの骨材として使用するには大きいものと考えられる。そのため、本研究では図3に示す最大粒径40mmの砕石を用いることとした。試験に用いた砕石の最大乾燥密度（JIS A 1210）は1.70g/cm³で、砕石表面の微粒分量（JIS A 1103）はコンクリート用骨材の基準である1.0%に近い0.90%であった。

3.2 試験方法

プレパックドコンクリートの強度特性を確認するため、圧縮試験と曲げ試験を行った。

圧縮試験にはφ150×300mmの円柱供試体を用い、材齢1時間、2時間、3時間、1日、7日および28日で行った。圧縮試験では、荷重とひずみ（供試体側面2箇所）を測定し、圧縮強度と静弾性係数を求めるとともに、別途作製した同寸法の円柱供試体の内部に熱電対を埋め込んで供試体内部の温度を測定し、内部積算温度と圧縮強度の関係を調べた。なお、この結果は「5. 若材齢時の検討」で作製する実物大軌道模型の試験時における圧縮強度の推定に用いるものである。また、φ50×100mmのモルタルのみの円柱供試体を作製し、各材齢における圧縮強度を測定した。

曲げ試験には300×300×1200mmのはり供試体を用い、スパン900mmの3等分点曲げによる静的荷重試験と繰返し荷重試験を行った。試験時の材齢は28日とした。静的荷重試験の供試体数は3体とし、繰返し荷重試験は静的荷重試験から得られた最大荷重の平均値に対して0.65、0.75および0.85倍した荷重を繰返し荷重する3ケースとした。なお、繰返し荷重試験での最小荷重は5kNとし、荷重周波数は、0.65倍と0.75倍に対して5Hz、0.85倍に対して1.5Hzとした。

表1 使用材料

項目	物性他
モルタル	・プレミックス材（速硬性、無収縮） ・水（材料試験）：水道水 水（実物大軌道模型）：地下水 ・凝結調整剤
骨材（バラスト）	最大粒径37.5mm、表乾密度2.72g/cm ³ 、吸水率0.39%、微粒分量0.90%（埼玉県秩父郡産硬質砂岩）

表2 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)	凝結調整剤 (g)	水 (kg)
材料試験	25	20	5.8
実物大軌道模型		12.5	6.0

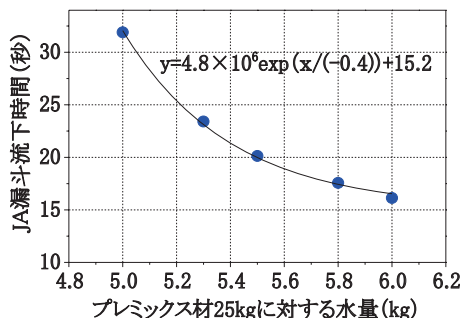


図2 水量とJA漏斗流下時間の関係

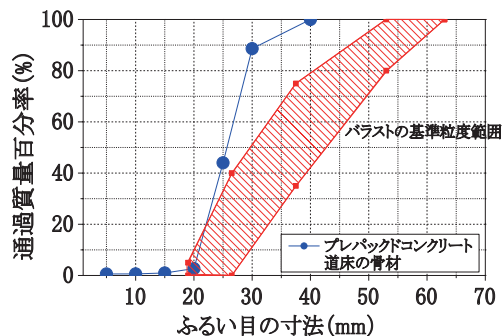


図3 砕石の粒度分布

表3 モルタルの練り上がり温度と流下時間

供試体形状	練り上がり温度 (°C)	JA漏斗流下時間 (秒)
円柱	20.5	17.2
はり（静的荷重用）	20.0	16.8
はり（繰返し荷重用）	20.0	17.3

3.3 供試体作製

モルタルの練混ぜは温度20.0±1.0°C、湿度60.0±5.0%の恒温恒湿室内で実施した。モルタルの練り上がり温度とJA漏斗流下時間を表3に示す。砕石の表面は微粒分が付着した状態のままとし、単位容積質量が1.58g/cm³

程度になるように型枠内に敷き詰め、実施工を想定して砕石の上面からモルタルをてん充した。供試体作製後、円柱供試体については恒温恒湿室内で試験材齢まで封かん養生を行い、はり供試体については試験材齢まで恒温恒湿室外の室内で散水養生を行った。

3.4 試験結果

(1) 圧縮試験

プレパックドコンクリートとモルタルの各材齢に対する圧縮強度を図4に示す。プレパックドコンクリートの圧縮強度はモルタルよりも小さいことがわかった。また、モルタルの圧縮強度は材齢に応じて増加する傾向にあったが、プレパックドコンクリートでは材齢7日以降で強度増進が小さかった。なお、プレパックドコンクリートの圧縮試験後の破壊状況を確認すると、モルタルと砕石の界面で破壊が進行していた。これより、砕石に付着する微粒分の影響で、材齢7日以降は付着強度が増加せず、プレパックドコンクリートの圧縮強度も増加しなかったものと考えられる。

プレパックドコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を図5に示す。静弾性係数は圧縮強度に比例して増加する傾向にあった。材齢7日でのプレパックドコンクリートの圧縮強度は19.5N/mm²で、静弾性係数は22.2kN/mm²であり、同強度に対する普通骨材コンクリートの静弾性係数⁴⁾22.8kN/mm²と、概ね同程度になることがわかった。

プレパックドコンクリートの圧縮強度と内部積算温度の関係を図6に示す。図6より圧縮強度と内部積算温度の関係は式(1)および式(2)で表すことができる。

$$\sigma_c = 6.525 \log_{10} M - 6.365 \quad (1)$$

$$M = \sum (\theta + A) \Delta t \quad (2)$$

ここに、

σ_c : 圧縮強度 (N/mm²)

M : 積算温度 (°C・時)

θ : Δt 時間中のコンクリートの温度 (°C)

A : 定数で一般に10°C

Δt : 時間 (時)

(2) 曲げ試験

静的荷重試験による最大荷重とプレパックドコンクリートの曲げ強度を表4に示す。静的荷重試験の結果、プレパックドコンクリートの曲げ強度の平均値は2.67N/mm²となった。

繰返し荷重試験の荷重荷重は、静的荷重試験で得られた最大荷重の平均値240kNの0.65, 0.75, 0.85倍の荷重を最大荷重とした。繰返し荷重試験の試験条件および試験結果を表5に示す。また、応力振幅と繰返し回数の関係を図7に示す。

図7に示すように横軸の繰返し回数を対数とするグラ

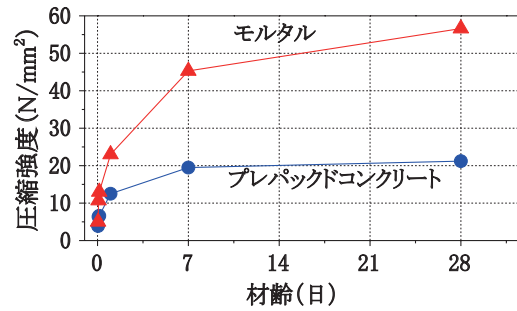


図4 圧縮強度と材齢の関係

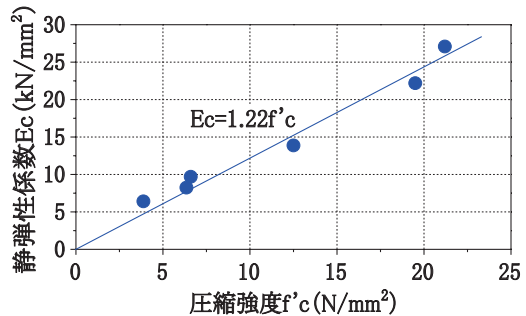


図5 静弾性係数と圧縮強度の関係

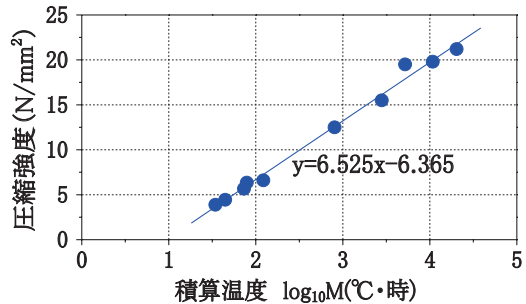


図6 圧縮強度と内部積算温度の関係

表4 曲げ試験における最大荷重と曲げ強度

No.	最大荷重 (kN)	曲げ強度 (N/mm ²)
1	197	2.19
2	255	2.83
3	267	2.97
平均値	240	2.67

表5 繰返し荷重試験条件と疲労寿命

No.	荷重倍率	荷重荷重 (kN)	周波数 (Hz)	疲労寿命 (回)
1	0.65	5 ~ 156	5	80444
2	0.75	5 ~ 180	5	23328
3	0.85	5 ~ 204	1.5	219

フにおいて、直線で近似できるS-N曲線を得ることができた。なお、プレパックドコンクリートの繰返し荷重試験結果は3ケースと少ないことから、曲げ強度を2.67N/mm²とした普通骨材コンクリートの疲労強度と比較した。その結果、プレパックドコンクリートの疲労強度は普通骨材コンクリートのS-N曲線と概ね同様な傾向にあることが確認された。

特集：軌道技術

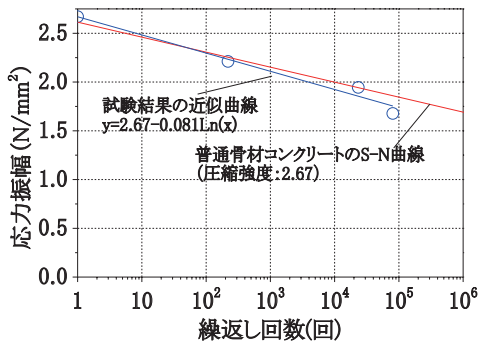


図7 応力振幅と繰返し回数の関係

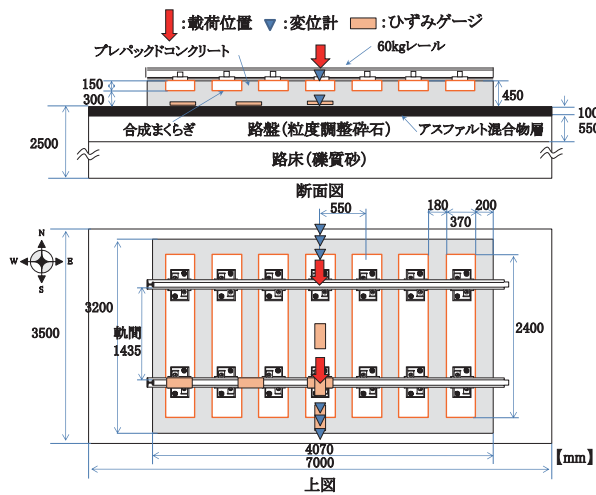


図8 バラストレス化軌道の実物大軌道模型

4. 実物大軌道の繰返し載荷試験

プレパックドコンクリート道床の施工性，列車荷重に対するプレパックドコンクリート道床の耐力および軌道の残留変位を評価するため，実物大軌道模型を作製して繰返し載荷試験および静的載荷試験を行った。

4.1 実物大軌道模型の作製

実物大軌道模型の寸法は，図8に示すように延長を7m，道床厚を300mm，合成まくらぎの配置間隔を550mmとし，アスファルト路盤上に作製した。プレパックドコンクリート道床には「3. 材料試験」に示したモルタル，碎石および配合を用いた。

施工状況を図9～図12に示す。碎石は実際の軌道の締め固め状況を想定して，単位容積質量が1.58t/m³になるように1層約150mmで2層に分けて締め固めた。モルタルのてん充は実物大軌道模型の隅角部から開始し，道床全体へのてん充を行った。プレパックドコンクリートの養生期間は7日とした。

4.2 試験方法

荷重の載荷位置および変位計とひずみゲージの取り付け位置を図8に示す。繰返し載荷試験では5～190kNの



図9 碎石の締め固め



図10 軌きょうの設置



図11 てん充状況①



図12 てん充状況②

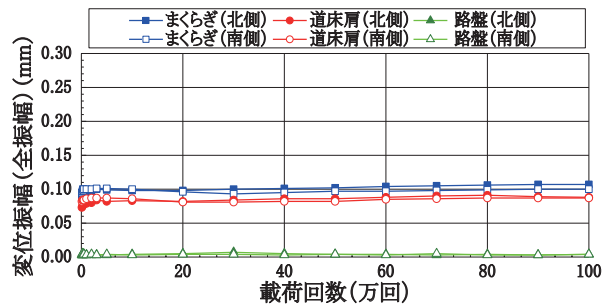


図13 各測定位置の変位振幅と繰返し回数の関係

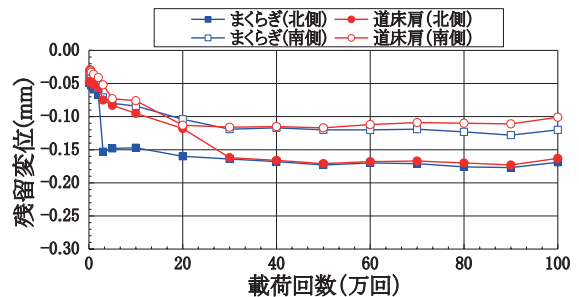


図14 まくらぎおよび道床肩の残留変位

正弦波荷重を周波数11Hzで，100万回載荷した。また，繰返し載荷試験終了後に，荷重250kNまでの静的載荷試験を行った。ここで，繰返し載荷試験の荷重振幅（全振幅）である185kNは100%乗車時の新幹線の軸重である128kNに対して軸重の変動分として1.45倍した値⁵⁾であり，静的載荷試験の荷重250kNは軸重128kNの2倍に相当する。

4.3 試験結果

繰返し載荷中のまくらぎ，道床肩および路盤の変位振幅（全振幅）と繰返し回数の関係を図13に示す。変位振幅は路盤で0.01mm程度，道床肩で0.08mm程度，まくらぎで0.1mm程度と小さく，繰返し回数による増加はほとんど生じなかった。図14にまくらぎおよび道床肩の残留変位

位と荷重回数との関係を示す。ここで、残留変位は最小荷重5kN荷重時の変位である。荷重初期に残留変位が進行したが、荷重回数20万回以降の明確な進行は確認されず、100万回での残留変位は、まくらぎで0.17mm程度、道床肩で0.16mm程度と極めて小さかった。図15、図16にレール横断方向、レール長手方向の道床底部のひずみ分布を示す。ひずみは最大でも $9\mu\epsilon$ 程度であり、極めて小さかった。

繰返し荷重試験後の静的荷重試験による荷重とレール長手方向のひずみの関係を図17に示す。繰返し荷重試験と同様に、ひずみの最大値は荷重点直下で生じているが、その値は $13\mu\epsilon$ と小さい結果となった。

なお、荷重試験前に別途作製していたプレパックドコンクリートのブロックから採取したコアの圧縮強度と荷重試験後に実物大軌道模型の荷重点直下から採取したコアの圧縮強度はともに 26N/mm^2 であり、繰返し荷重による圧縮強度の低下は見られなかった。

4.4 曲げ強度および曲げ疲労強度との比較

荷重試験後のプレパックドコンクリートの圧縮強度は 26N/mm^2 であることから、図5に示した圧縮強度と静弾性係数の関係を適用すると、静弾性係数は $26\text{N/mm}^2 \times 1.22 = 31.7\text{kN/mm}^2$ となる。荷重250kNまでは弾性範囲内にあることが静的荷重試験によって確認されていることから、100%乗車時の軸重の2倍の荷重によってプレパックドコンクリート道床底面に生じる引張応力は $31.7\text{kN/mm}^2 \times 13\mu\epsilon = 0.4\text{N/mm}^2$ となる。仮に100%乗車時の軸重の2倍の荷重が繰返された場合の曲げ疲労寿命は 1.48×10^{12} 回となり、プレパックドコンクリート道床が十分な曲げ疲労強度を有していることがわかった。

また、プレパックドコンクリートの曲げ強度を表5より 2.67N/mm^2 とした場合、100%乗車時の軸重の13倍の荷重が荷重されても曲げ破壊は生じないと考えられる。

4.5 モルタルのてん充状況の確認

荷重試験後、モルタルのてん充状況を確認するため、プレパックドコンクリート道床を切断して断面の観察を行った。図18に示す切断面より、若干の未てん充箇所があるものの、画像解析から未てん充箇所は碎石間の空隙に対して2%程度であり、モルタルのてん充は概ね良好であることが確認できた。



図18 プレパックドコンクリート道床の切断面 ※赤の着色箇所が未てん充箇所

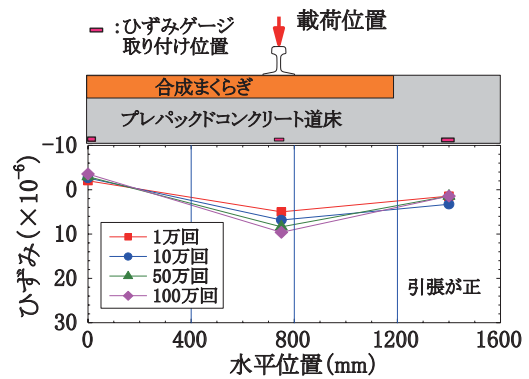


図15 レール横断方向道床底部のひずみ分布

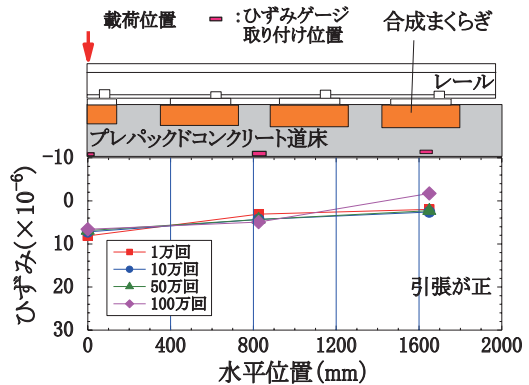


図16 レール長手方向道床底部のひずみ分布

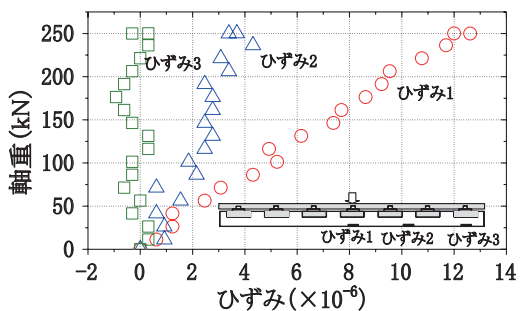


図17 静的荷重試験による荷重とひずみの関係

5. 若材齢時の検討

初列車通過時のプレパックドコンクリート道床の荷重支持性能を確認するため、まくらぎ1本の実物大軌道を作製して、材齢を2時間とする繰返し荷重試験を行った。

5.1 若材齢用実物大軌道模型の作製

若材齢用実物大軌道模型の寸法を図19に示す。若材齢用実物大軌道模型に用いた材料および作製方法は「4. 実物大

特集：軌道技術

軌道の繰返し载荷試験」と同じである。なお、若材齢の実物大試験はアスファルト路盤よりも地盤反力係数が小さい粒度調整碎石路盤上における評価とした。図19にはまくらぎ、道床、路盤の鉛直変位の測定位置もあわせて示してある。

5.2 若材齢時の試験方法

若材齢用実物大軌道模型に対する繰返し载荷試験は、モルタルのてん充が完了してから2時間後に開始した。繰返し载荷試験では5～135kNの正弦波荷重を周波数11Hzで、3万回载荷した。ここで、荷重振幅130kNは100%乗車時の列車の軸重128kNに対して軸重の変動分として1.45倍した値⁵⁾に、FEM解析で算出したレールなどによる荷重分散率0.7を乗じた値である。

5.3 若材齢時の繰返し载荷試験結果

若材齢時における繰返し载荷中のまくらぎ、道床肩および路盤の最大変位と载荷回数との関係を図20に示す。若材齢における3万回の繰返し载荷において、まくらぎ、道床および路盤の最大変位は微小であり、まくらぎの最大変位は0.05～0.1mm程度進展するものの、その進展量は繰返し回数の増加に伴い緩やかになった。なお、本試験では粒度調整碎石路盤の上に直接プレパックドコンクリート道床を設置したため、まくらぎおよび道床の沈下は粒度調整碎石路盤の沈下が主要因と考えられる。本試験結果から、材齢2時間における繰返し载荷によってプレパックドコンクリート道床は初列車に対する十分な荷重支持性能を有しているものと考えられる。

なお、道床内部の熱電対によって測定した材齢2時間における温度履歴から、式(1)によって推定したプレパックドコンクリート道床の圧縮強度は5.1N/mm²であった。100%乗車時の列車荷重によってプレパックドコンクリートに生じる圧縮応力をFEM解析によって算出した結果、おおよそ0.8N/mm²であったことから、十分な強度を有していたものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、新幹線のバラスト軌道のさらなる省力化および耐震性の向上等を目的に、土構造物上の道床バラストのプレパックドコンクリート化に関する検討を行った。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 微粒分量が0.9%と比較的多い碎石をプレパックドコンクリートの骨材に使用しても、軌道として必要な強度を有していることがわかった。
- (2) 材齢7日における実物大軌道模型に対する繰返し载荷試験により、軌道に生じる鉛直変位は微小であり、変位の漸増がほとんど生じないことがわかった。また、静的载荷試験により、プレパックドコンクリー

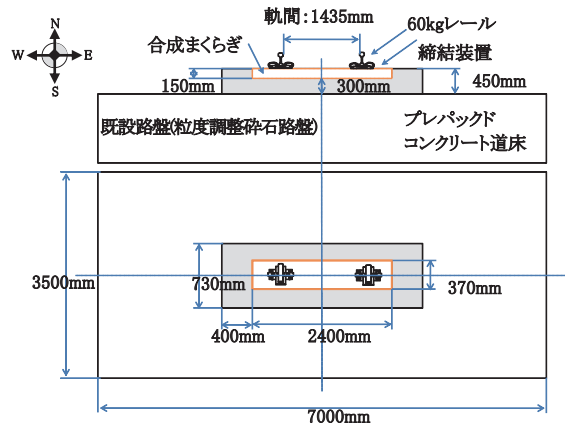


図19 若材齢用実物大軌道模型概略図

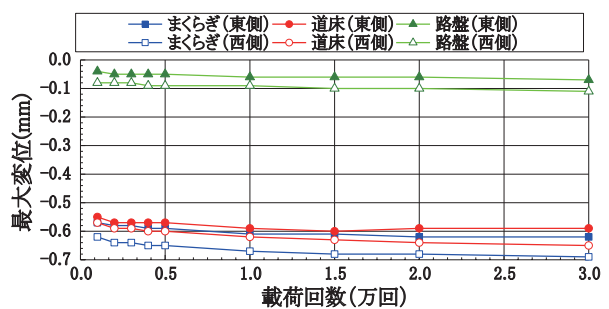


図20 最大変位と载荷回数の関係

ド道床が十分な強度を有していることがわかった。
 (3) 材齢2時間における若材齢用実物大軌道模型に対する繰返し载荷試験により、初列車を通過させるために十分な強度を有していることがわかった。
 以上より、プレパックドコンクリート道床は新幹線の荷重に対して十分な性能を有していることを確認した。今後は、横圧等の水平方向の荷重に対する検証を進めていく予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり御協力いただいた東日本旅客鉄道(株)に感謝の意を表する。

文献

- 1) 長藤敬晴, 多田逸雄, 爪長徹: E型舗装軌道用注材PTCAMの物性, 鉄道技術研究所速報, 1985.3
- 2) 佐竹涉, 阿部広和, 塙光雄: 山手線へ敷設したTC型省力化軌道の評価, 土木学会第53回年次学術講演会, IV-491, pp.982-983, 1998.10
- 3) 国土交通省鉄道局監修, 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), pp.210-213, 丸善, 2007
- 4) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物), pp.79-80, 丸善, 2004
- 5) 鉄道総合技術研究所: A形軌道スラブ設計要領, 鉄道総合技術研究所, 1989