

# 論文 バラスト軌道のプレパックドコンクリート化に関する基礎的研究

高橋 貴蔵<sup>\*1</sup>・伊藤 孝記<sup>\*2</sup>・澁上 翔太<sup>\*1</sup>・桃谷 尚嗣<sup>\*3</sup>

**要旨:** 鉄道のバラスト軌道では、列車の通過によって生じるバラストの沈下に対する定期的な保守を必要とし、また地震時におけるバラスト流動に対する対策が求められている。そこで、バラスト軌道の保守省力化と耐震性の向上を目的に、バラストのプレパックドコンクリート化に関する基礎的な研究として材料試験を実施した。その結果、列車荷重を支持する強度部材として新幹線に対してもプレパックドコンクリートを使用できることを確認した。

**キーワード:** バラスト, プレパックドコンクリート, 圧縮強度, 曲げ強度, 曲げ疲労強度

## 1. はじめに

鉄道のバラスト軌道は、バラストと称する最大粒径63mm程度の碎石でまくらぎを支持し、まくらぎから伝わる列車荷重を広く路盤に伝達する機能を有するものであり、最も一般的な軌道構造である。バラスト軌道は、建設費が安く、容易にレール面の高さを調整できる等といった利点を有しているが、列車が繰り返し通過することによってバラストが変形するため、定期的な保守を必要とするものである。特に、高速で走行する新幹線では、レールの高さ方向の不整に対する管理値は、在来線と比べると厳しく、保守作業の機械化が進んでいるものの、保守量の低減が求められている。また、バラスト軌道は線路直角方向の抵抗力を必要とするが、地震動によってバラストが流動した場合、線路直角方向の抵抗力が低下し、条件によっては残留変形が生じる場合がある<sup>1)</sup>。

上述したバラスト軌道の保守量の低減と地震動による線路直角方向の抵抗力の低下防止を同時に行える有効な手法の一つとして、新設線に対してはスラブ軌道や弾性まくらぎ直結軌道のようにバラストの代わりにコンクリートを用いる方法がある。また、既設のバラスト軌道を強化する方法としては、バラストに固化材をてん充するてん充道床軌道が在来線で実用化されている<sup>2)3)</sup>。ただし、てん充道床軌道の設計条件等は新幹線への適用を前提としておらず、新幹線には用いられていない。

以上を踏まえ、本研究では既設の新幹線バラスト軌道を対象とし、従来のバラストの固化によりバラスト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たプレパックドコンクリートを強度部材として設計することを目的に、てん充に用いるモルタルの施工性とプレパックドコンクリートの強度に関する検討を行った。

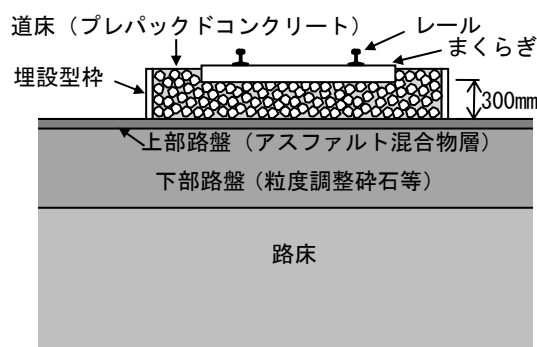


図-1 プレパックドコンクリートを用いた構造例

## 2. プレパックドコンクリートを用いた軌道構造

プレパックドコンクリートを用いた軌道構造の例を図-1に示す。本軌道構造は、バラスト内部に鉄筋を配置せず、無筋構造とすることを想定している。また、プレパックドコンクリート底部に生じる応力が過大とならないよう、有道床軌道用アスファルト路盤<sup>4)</sup>上に敷設されているバラスト軌道を対象とすることとした。また、プレパックドコンクリートの施工は、事前に新品バラストに交換した上で、列車が走行しない夜間に行うことから施工時間が限られる。そのため、一晩での施工延長を5m程度とし、施工目地を設けることを想定している。これにより、プレパックドコンクリートに生じる温度応力や列車荷重によって生じる曲げ応力を低減する効果も期待できる。

プレパックドコンクリートの厚さは、施工を行う前後のバラスト軌道の厚さと同一とし、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PCまくらぎの他に合成樹脂製の合成まくらぎの適用も想定している。

\*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 工修(正会員)

\*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 工修

\*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 工博(正会員)

表-1 骨材の物性

項目	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	微粒分量 (%)
砕石 A	2.72	0.39	0.90
砕石 B	2.72	0.46	0.27

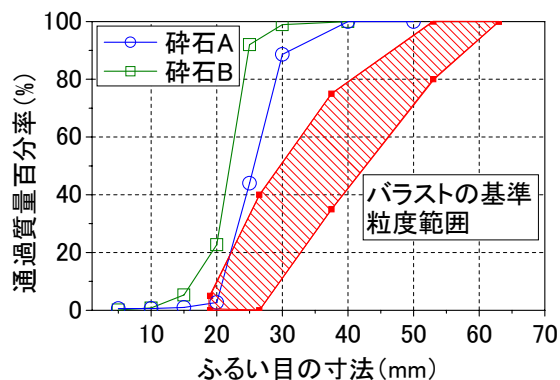


図-2 骨材の粒度分布



(a)砕石 A (b)砕石 B

図-3 骨材の外観状況

### 3. 試験概要

#### 3.1 試験目的

プレパックドコンクリートに用いるモルタルの施工性を検討するため、流動性および骨材へのてん充試験を行った。また、てん充試験の結果を踏まえたモルタルをてん充したプレパックドコンクリートの強度を検討するため、圧縮試験、曲げ試験および曲げ疲労試験を実施した。

#### 3.2 使用材料

夜間での施工時間と始発列車通過時に必要な強度を確保し、収縮ひび割れの発生を抑制するため、プレパックドコンクリートに用いるモルタルには急硬性と無収縮性を有するプレミックス材を用いた。なお、プレミックス材のセメントと細骨材の質量の比率は1:1である。

バラスト軌道に用いるバラストは、アルカリ骨材反応性試験を実施すると無害でないと判定されるものがあり、バラスト軌道のプレパックドコンクリート化を計画している地域のバラストは全て無害でないと判定された。そこで、本研究では、一般的に使用されているバラストではなく、現地にて入手することが可能な最大粒径 40mm の2種類の砕石を用いることとした。試験に用いた骨材の主な物性を表-1 に、粒度分布を図-2 に、外観状況を

表-2 モルタルの配合

プレミックス材 1袋 25kg 当り		W/C (%)	R/W (%)	ケース 数
凝結調整剤 R (g)	水 W (kg)			
10.0	5.0~6.0	40.0~48.0	0.2~0.17	5
0~40	5.3	42.4	0~0.75	5

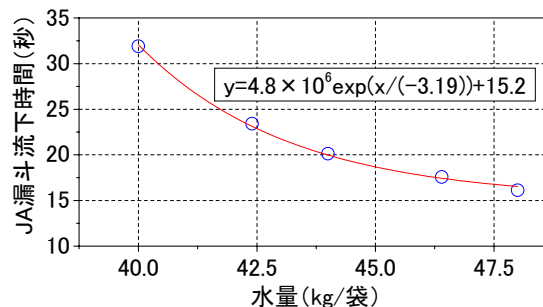


図-4 JA 漏斗流下時間と水セメント比の関係

を図-3 に示す。なお、30~50mm の粒径の砕石をバラストとして用いた軌道の試験結果<sup>5)</sup>を考慮すれば、モルタルをてん充するまでの間、本試験で使用する骨材をバラスト軌道に使用しても軌道の沈下に対しては問題ないと考えられる。

#### 3.3 流動性試験

##### (1) 試験方法および供試体作製

流動性試験は JSCE-F 531 「PC グラウトの流動性試験方法」に準じて JA 漏斗を用いて実施した。試験に使用したモルタルの配合を表-2 に示す。モルタルの練混ぜおよび流動性試験は、温度 20.0±1.0℃、湿度 60.0±5.0% の恒温恒湿内で実施し、練混ぜには回転数が 1100rpm のハンドミキサーを用いた。

試験は、はじめに練混ぜ水の水量をパラメータとした試験を練り上がり直後に実施し、その後、水セメント比をプレミックス材の標準配合である 42.4%としたモルタルに対して凝結調整剤をパラメータとした試験を、練り上がり後 0 分、10 分、以後 5 分間隔で実施した。ここで、練混ぜ水に対する凝結調整剤の比率を凝結調整剤水比 (R/W) とする。なお、JIS A 1181 「レジンコンクリートの試験方法」に準じて触感法による可使時間を測定するとともに、別途 270ml のプラスチック容器にモルタルを入れ、熱電対により練上がり直後から中心の発熱温度を測定し、可使時間との比較を行った。

##### (2) 試験結果および考察

JA 漏斗流下時間と水セメント比の関係を図-4 に示す。単位水量の増加に伴い流下時間が約 15.2 秒に漸近する傾向にあることがわかった。

水セメント比を 42.4%とし、凝結調整剤水比をパラメータとした場合の JA 漏斗流下時間と経過時間の関係を図-5 に示す。JA 漏斗流下時間は、0.75%の凝結調整剤

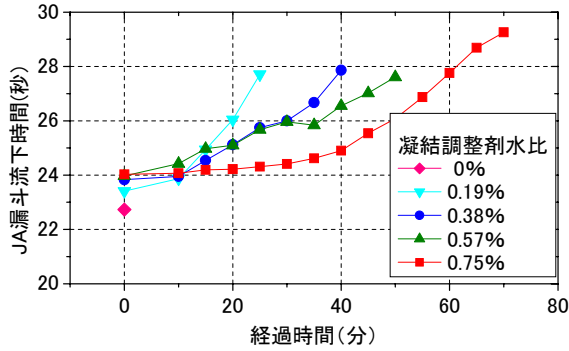


図-5 JA 漏斗流化時間と経過時間の関係

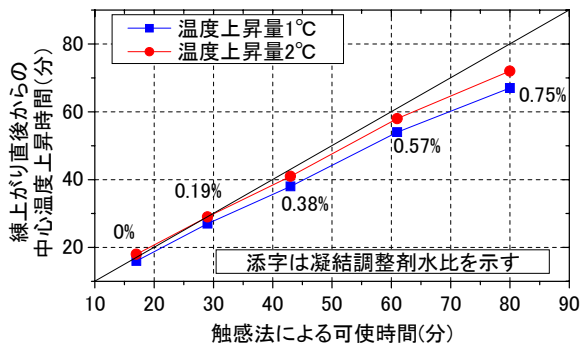


図-6 触感法による可使時間と中心温度上昇時間の関係

水比のケースを除けば、約 10 分後から長くなり始め、JA 漏斗流下時間が 28 秒を過ぎたあたりから急激に硬化が始まり、流動性試験ができなくなった。また、凝結調整剤水比が大きくなると可使時間が長くなることがわかった。ただし、凝結調整剤水比が 0.75% の場合、約 30 分後から JA 漏斗流下時間が長くなり始めることから流動性を長く確保できるものの、60 分を経過しても硬化が始まらず、急硬性を要求する本構造には適用できないことがわかった。なお、凝結調整剤を混入しないケースについては、練混ぜ直後に硬化が始まる結果となった。

図-6 に触感法による可使時間とモルタルの中心温度上昇量の関係を示す。同図には中心温度上昇量が 1°C と 2°C の場合を示してある。触感法による可使時間は中心温度の温度上昇量が 2°C の場合と相関が高く、温度の測定により可使時間を管理できることがわかった。ただし、触感法や温度上昇量を 2°C とする場合の可使時間では、図-5 に示したように流動性が既に低下し始めていることから、施工に際しては可使時間（ここでは流動性が急速に失われるまでの時間と定義）を 40 分に設定し、練り上がり後 10 分以内に打設するのがよいと考えられる。

### 3.4 てん充試験

#### (1) 試験方法および供試体作製

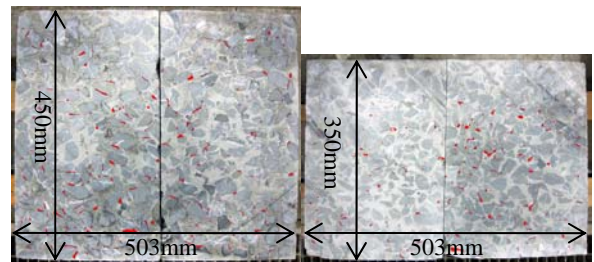
モルタルのてん充状況を確認するため、表-3 に示す条件でてん充試験を実施した。モルタルのてん充は型枠隅角部の骨材上面 1 ヶ所から行った。てん充状況の確認は、型枠内に詰めた骨材の質量から骨材の実積率および

表-3 てん充試験条件

使用骨材	碎石 A	碎石 B
寸法	500×500×450mm	500×500×350mm
単位容積質量	1.58g/cm <sup>3</sup>	1.61g/cm <sup>3</sup>
てん充速度	23l/分	
水セメント比	42.4%	
凝結調整剤水比	0.38%	
環境温度	20°C	

表-4 てん充試験の結果

項目	碎石 A	碎石 B
供試体出来形(mm)	503×503×448	503×503×350
碎石質量(kg)	177.8	140.9
表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.72	2.72
単位容積質量(g/cm <sup>3</sup> )	1.57	1.59
碎石の実積率(%)	57.6	58.5
間隙率(%)	42.4	41.5
推定てん充量(L)	48.2	36.7
実測てん充量(L)	47.2	35.7
てん充率(%)	98	97



(a) 碎石 A (b) 碎石 B

図-7 切断面のてん充状況

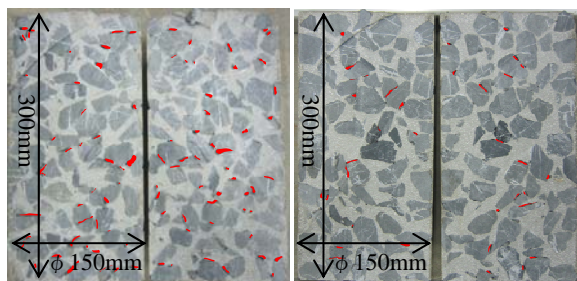
間隙率を算出し、モルタルの注入量を推定して実測値と比較することで行った。また、硬化後に供試体を十字に切断し、目視により切断面を観察した。

型枠内の骨材の単位容積質量は、碎石 A に対して 1.58g/cm<sup>3</sup>、碎石 B に対して 1.61g/cm<sup>3</sup> とした。これらは、JIS A 1210「突固めによる土の締固め試験方法」における E 法により得られた最大乾燥密度の 93% としたものである。なお、骨材は微粒分が付着した状態で使用した。これは、モルタルの施工をする前にパラストを新品な骨材に交換することを前提としているが、線路の高さを正整する作業や新幹線の繰返し通過による摩耗によって骨材に微粒分が付着することを想定しているためである。

てん充に用いるモルタルの水セメント比は 42.4%、凝結調整剤水比は 0.38% とし、JA 漏斗流下時間を測定した。また、JSCE-F 532「PC グラウトのブリーディング率および膨張率試験方法（ポリエチレン袋方法）」に準拠して、

表一五 追加てん充試験の条件

練混ぜ 水量 (kg/袋)	水セメ ント比 (%)	凝結調整 剤水比 (%)	JA 漏斗 流下時間 (秒)	骨材の 単位容積 質量(g)
5.3	42.4	0.19	23.4	1.54
6.0	48.0	0.17	16.1	1.57



(a) W/C=42.4% (b) W/C=48.0%  
図一八 追加てん充試験のてん充状況

モルタルのブリーディング率および膨張率を測定した。

### (2) 試験結果および考察

水セメント比を 42.4%としたモルタルの JA 漏斗流下時間は 24.2 秒、膨張率は 0%，ブリーディング率は 0.28% であり、やや材料分離する傾向にあることを確認した。てん充試験の結果を表一四に示す。てん充試験の結果、砕石 A の骨材を用いた供試体のてん充率は 98%で、砕石 B の骨材を用いた供試体のてん充率は 97%となった。

切断面のてん充状況を図一七に示す。ここで、空隙を分かりやすくするため、赤色でハッチングを行った。切断面の観察の結果、空隙の割合は砕石 A と砕石 B の骨材ではほぼ同じであり、表一四の結果と同様であった。また、骨材周囲の空隙は、その大きさおよび空隙が無い骨材の周囲の状況から、分離した水によるものではなく、未てん充によるものと考えられた。

これらの結果より、JA 漏斗流下時間が 24 秒程度では、本試験で用いた骨材に対して、十分なてん充を行うことができないものと考えた。そこで、材料分離する懸念はあるものの、てん充率を上げ、てん充負傷の発生を極力回避するため、水セメント比を 42.4%と 48.0%としたモルタルを用いて、追加てん充試験を実施した。追加てん

充試験は、砕石 A の骨材を締め固めた φ150×300mm の型枠に対して行った。モルタルの硬化後、円柱供試体の断面中心を長手方向に切断して断面の観察を行った。追加てん充試験に用いたモルタルの JA 漏斗流下時間および骨材の単位容積質量を表一五に示す。試験の結果、JA 漏斗流化時間を 16 秒程度とすることで、図一八に示すように未てん充個所が減少することを確認した。

### 3.5 強度試験

#### (1) 試験方法および供試体作製

表一六に示す条件により、プレパックドコンクリートの各種強度試験を行った。

圧縮試験では、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠して、各材齢における圧縮強度と静弾性係数を測定した。圧縮試験には、φ150×300mm の円柱供試体を用い、モルタルのてん充は骨材の上面から行った。また、φ50×100mm のモルタルの円柱供試体を作製し、各材齢の圧縮強度を測定した。なお、圧縮試験の円柱供試体数は、各ケースに対して 3 体とした。

曲げ試験および曲げ疲労試験に使用した梁供試体の寸法は高さ 300mm、幅 900mm、長さ 1200mm であり、スパン 900mm の 3 等分点曲げ載荷とした。モルタルのてん充は型枠隅角部の骨材上面 1ヶ所で行った。曲げ試験の供試体数は 3 体とし、曲げ疲労試験は曲げ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 倍した荷重を繰り返し載荷する 3 ケースとした。なお、曲げ疲労試験での最小荷重は 5kN とし、載荷周波数は、0.65 倍と 0.75 倍に対して 5Hz、0.85 倍に対しては、載荷装置の制約から 1.5Hz とした。

モルタルの水セメント比は、「3.4 てん充試験」の結果を踏まえ、空隙を少なくすることを考慮し、JA 漏斗流下時間が 17.0±1.0 秒になるように水セメント比を 46.4%とし、凝結調整剤水比は 20℃の条件で可使時間が 40 分になるように 0.35%とした。モルタルの練混ぜおよび供試体の養生は、5℃あるいは 20℃の恒温恒室内で行った。なお、円柱供試体は封かん養生とし、梁供試体は散水養生とした。モルタルの練り上がり温度と JA 漏斗流下時

表一六 コンクリート強度確認試験ケース一覧

試験項目	温度 (°C)	砕石種類	供試体寸法	材齢(各 3 本)					
				1 時間	2 時間	3 時間	1 日	7 日	28 日
圧縮強度	5	A	φ150×300mm	○	○	○	-	○	○
		B		○	○	○	-	○	○
	20	A		○	○	○	○	○	○
		B		○	○	○	○	○	○
曲げ強度	20	A	1200×300×900mm	-	-	-	-	-	○
曲げ疲労強度	20	A		-	-	-	-	-	○

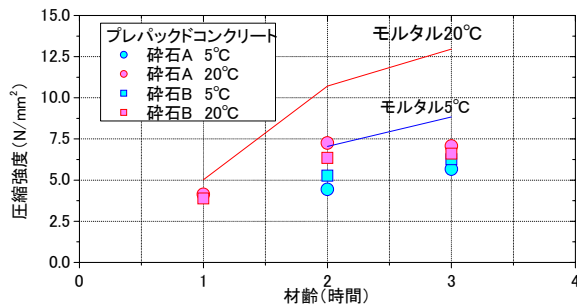


図-9 若材齢時の圧縮強度と材齢の関係

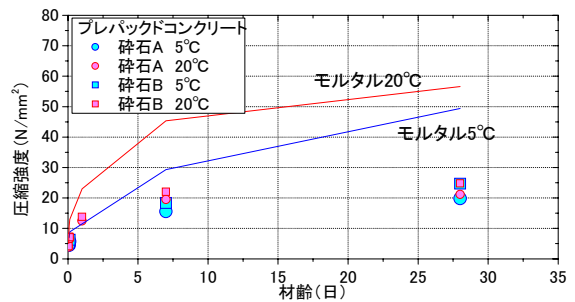


図-10 材齢 28 日までの圧縮強度と材齢の関係

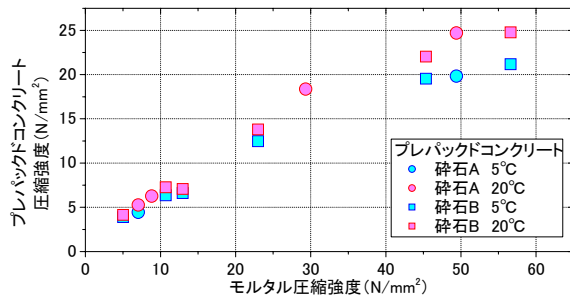


図-11 圧縮強度の比較

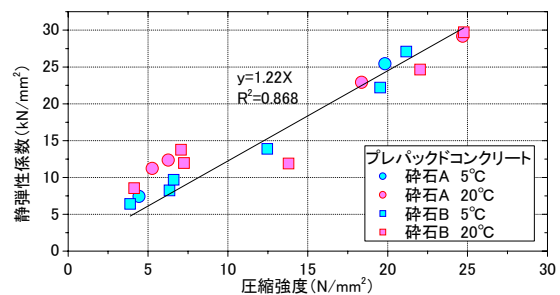


図-12 静弾性係数と圧縮強度の関係

間は、20°Cの条件で20.5°Cと17.2秒、5°Cの条件で6.7°Cと20.1秒となり、環境温度が15°C低下することでJA漏斗流下時間は2.9秒遅くなった。

骨材の単位容積質量は、てん充試験と同様に最大乾燥密度の93%となるように、砕石Aに対して1.58g/cm<sup>3</sup>、砕石Bに対して1.61g/cm<sup>3</sup>を目標とした。

## (2) 試験結果および考察

プレパックドコンクリートおよびモルタルの圧縮強度と材齢に対して、若材齢時の関係を図-9、材齢28日までの関係を図-10に示す。

図-9に示す材齢3時間以内の若材齢時に着目すると、20°Cで養生した場合、材齢1時間での圧縮強度は3.9N/mm<sup>2</sup>程度になった。100%乗車時の列車荷重(車軸1本当たりの荷重:128kN)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/mm<sup>2</sup>であったことから、列車荷重を支持するのに十分な強度を有していることを確認した。5°Cで養生した場合は、材齢1時間ではモルタルの硬化が始まっていないため圧縮試験を実施することができなかったが、これは凝結調整剤の量を20°Cの養生条件に合わせたためである。養生温度が5°Cであっても、凝結調整剤の減量によって材齢1時間で強度を発現させることは十分可能であると考えられる。これらの結果を考慮すれば、施工終了後2時間で初列車を安全に通過させることが可能であると考えられる。

図-10より、プレパックドコンクリートの圧縮強度は、20°Cで養生した方が大きいことがわかった。ただし、材齢7日から28日の圧縮強度の増加割合は、養生温度20°Cでは約10%であるのに対し、養生温度5°Cでは約30%で

あった。また、材齢28日での圧縮強度は養生温度に関係なくほぼ等しくなることがわかった。一方、モルタルの圧縮強度も温度の影響を受けるが、材齢28日において20°Cで養生した圧縮強度は、5°Cで養生したものよりも15%大きくなることがわかった。また、材齢7日から28日のモルタルの圧縮強度の増加割合は、養生温度20°Cで25%、養生温度5°Cで69%となり、プレパックドコンクリートの増加割合よりも大きいことがわかった。

そこで、モルタルがプレパックドコンクリートの圧縮強度に与える影響を評価するため、図-11に示すように両者の圧縮強度の比較を行った。両者の関係は骨材種別の影響を受けるものの、養生温度の影響をほとんど受けないことがわかった。モルタルとプレパックドコンクリートの圧縮強度は比例関係には無く、モルタルの圧縮強度が30N/mm<sup>2</sup>を超えたあたりから、プレパックドコンクリートの強度増加が緩やかになった。粒径が小さいものの微粒分量が少ない砕石Bの方で圧縮強度が大きいこと、また圧縮試験によって生じるひび割れが骨材とモルタルの界面で進行し、割れた骨材が少ないことを考慮すると、骨材の微粒分がプレパックドコンクリートの強度増加に影響したものと考えられる。

以上より、本研究で使用したような微粒分の付着した骨材を用いる場合は、モルタルの圧縮強度が30N/mm<sup>2</sup>以上では付着強度の増加が少なかった。また20°Cで養生した材齢7日のプレパックドコンクリートの圧縮強度は5°Cで養生した材齢28日の圧縮強度を満足することから、図-1に示した軌道構造の設計には20°Cで養生した材齢7日での強度を適用するのがよいものと考えられる。

プレパックドコンクリートの静弾性係数と圧縮強度の

表-7 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 <sup>2</sup> )
1	197	2.19
2	255	2.83
3	267	2.97
平均値	240	2.67

表-8 曲げ疲労試験条件と疲労寿命

No.	荷重倍率	載荷荷重(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

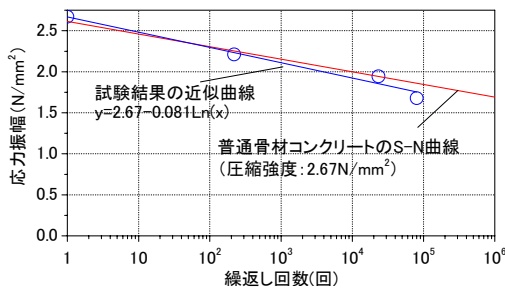


図-13 曲げ疲労強度と曲げ疲労寿命の関係

関係を図-12に示す。静弾性係数は圧縮強度におおよそ比例して増加する傾向にあり、圧縮強度が20N/mm<sup>2</sup>における静弾性係数は普通骨材コンクリートの静弾性係数<sup>6)</sup>と概ね同程度になることがわかった。

曲げ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-7に示す。曲げ試験の結果、養生温度を20℃とした場合の材齢28日におけるプレパックドコンクリートの曲げ強度の平均値は2.67N/mm<sup>2</sup>となった。これは普通骨材コンクリートの設計で用いる圧縮強度と曲げ強度の関係<sup>7)</sup>とほぼ同じであった。

曲げ疲労試験の試験条件および試験結果を表-8に示す。また、曲げ疲労強度と曲げ疲労寿命の関係を図-13に示す。試験の結果、図-13に示すように横軸の繰返し回数を対数とするグラフにおいて、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載荷試験結果は3ケースと少ないことから、曲げ強度を2.67N/mm<sup>2</sup>とした普通骨材コンクリートの疲労強度と比較した結果、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<sup>6)</sup>と同様な傾向にあることを確認した。

#### 4. まとめ

営業中の新幹線バラスト軌道のバラストをプレパックドコンクリート化することを目的に、てん充するモルタルの流動性とプレパックドコンクリートの各種強度試験を行った結果得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 最大粒径が40mm、微粒分量が0.9%、実積率が58%程度の碎石に対して本試験で使用したモルタルを十分にてん充する場合、JA漏斗流下時間を17.0±1.0秒程度にする必要がある。
- 2) プレパックドコンクリートの施工では、モルタルの可使時間を40分とし、練り上がり後10分以内に打設するのがよいと考えられる。
- 3) プレパックドコンクリートの圧縮強度は、材齢2時間で列車荷重を支持するのに十分な強度となる。
- 4) 長期の耐力を照査する場合は、養生温度を20℃とし、材齢7日で実施する圧縮試験の結果を用いるのがよいと考えられる。
- 5) プレパックドコンクリートの曲げ強度と曲げ疲労強度は普通骨材コンクリートにおける圧縮強度との関係とほぼ等しく、列車荷重を支持する軌道部材として曲げ破壊および曲げ疲労破壊に対する安全性<sup>8)</sup>を満足するように設計することが可能であるとされる。

#### 5. おわりに

本研究では、骨材に微粒分が付着した状態で試験に供した。試験の結果、微粒分がモルタルのてん充や強度に与える影響が確認され、てん充を確実にを行うため練混ぜ水を増やした結果、十分な強度が得られるもののモルタルに材料分離が確認された。今後は、練混ぜ水を減少させ、材料分離が生じない、より耐久性の高いプレパックドコンクリートとするため、骨材に付着する微粒分量を一般的なコンクリート碎石よりも厳しく管理することで、てん充性を向上させることを考えている。

#### 参考文献

- 1) 浅沼潔, 関根悦夫, 片岡宏夫, 曾我部正道, 後藤恵一, 徳永宗正: バラスト軌道の地震時変形挙動, 鉄道総研報告, Vol.25.No.6, pp.47-52, 2011
- 2) 長藤敬晴, 多田逸雄, 爪長徹: E型舗装軌道用注入材PTCAMの物性, 鉄道技術研究所速報, 1985.3
- 3) 佐竹渉, 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
- 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(土構造物), pp.210-213, 丸善, 2007
- 5) 乾清一: 中間粒度バラストの細粒劣化及び軌道沈下に及ぼす効果, 鉄道線路, Vol.24, No.11, 1976.11
- 6) 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.71-80, 丸善, 2004
- 7) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同