

# 論文 軌道スラブへのケミカルプレストレストコンクリートの適用に関する基礎的検討

谷川 光\*1・細田 暁\*2・桃谷 尚嗣\*3

**要旨：**軌道スラブへのケミカルプレストレストコンクリートの適用に関する基礎的な検討を行った。膨張特性を評価した結果、同じ単位膨張材量であっても、細骨材ではなくセメントに置換して添加することで大きな膨張量が得られた。また、凍結融解抵抗性を評価した結果、膨張量が同程度であっても、添加方法や拘束条件によって凍結融解抵抗性が変化した。膨張材をセメント置換で  $54\text{kg/m}^3$  添加し  $250 \times 10^{-6}$  程度の膨張量が得られた配合は、無拘束の場合でも良好な凍結融解抵抗性を示し、軌道スラブへの適用の際には、拘束の影響が小さいかぶり表層や隅角部においても十分な耐凍害性を有すると考えられた。

**キーワード：**軌道スラブ、ケミカルプレストレストコンクリート、膨張材、長さ変化、凍結融解抵抗性

## 1. はじめに

スラブ軌道は、レールやレール締結装置、軌道スラブ、てん充層、コンクリート道床といった部材で構成される鉄道の軌道構造である(図-1)。1960年代に開発され<sup>1)</sup>、山陽新幹線以降の新幹線の主な軌道構造となっている。

構成部材のうち、軌道スラブは列車荷重を支持する役割を持つ板状部材である。早強ボルトランドセメント使用・低水セメント比・蒸気養生・1日脱型という特徴を持つコンクリート製の工場製品である。RC構造として開発され<sup>1)</sup>、東北・上越新幹線への適用時<sup>2)</sup>には寒冷地の明かり区間でのひび割れ幅を制御するためにPRC構造が開発されている。

軌道スラブの配筋は、RC構造・PRC構造ともに格子状の2段で配置されている。開発時は鉛直方向の列車荷重に対する曲げについて許容応力度法により設計計算がなされ、鉄筋の本数が定められた<sup>3)</sup>。その後、有限要素法が設計計算に用いられた。2012年には限界状態設計法の照査手法をベースとした性能照査型設計法へ移行したが、大きな変更が加えられることはなく、配筋間隔はRC構造で200mm以下、PRC構造で200~250mm程度と構造細目で規定された<sup>4)</sup>。開発以降大きな変更がなく、比較的密な配置となっている配筋やPC鋼棒の合理化について検討の余地があった。

ここで、添加した膨張材により体積膨張する特徴を持つケミカルプレストレストコンクリート(以下、CPC)に着目する。「膨張コンクリート設計施工指針<sup>5)</sup>」では、膨張コンクリートのうち、コンクリートが収縮してもなおケミカルプレストレストが残存するように多量の膨張材を添加したコンクリートと区分される。導入されるケミカルプレストレストとケミカルプレストレインにより、ひ

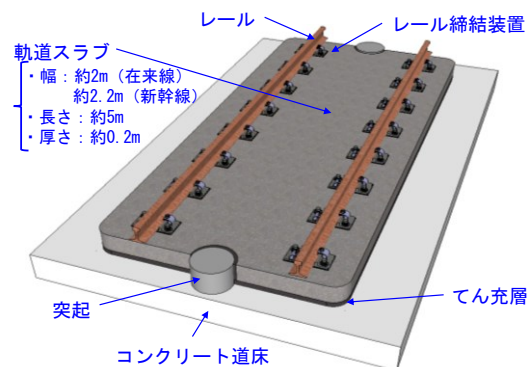


図-1 スラブ軌道の構造

び割れ発生耐力が増加し、ひび割れ幅も減少する<sup>例えば、6)</sup>。そのため、軌道スラブにCPCを適用することで、RC構造では曲げ性能の向上や配筋間隔の拡大が期待できる。また、PRC構造では機械式プレストレストの部分的置換によるPC鋼棒の小径化が期待できる。

一方、軌道スラブにCPCを適用するにあたっては、軌道スラブの製造条件下でケミカルプレストレストを発現可能なCPCの仕様を検討する必要がある。単位膨張材量が大きいCPCでは、材料強度や耐久性が低下する恐れがあることが指摘されており<sup>5)</sup>、それらに留意する必要がある。耐久性のうち、特に凍結融解抵抗性については単位膨張材量が大きくなると低下する傾向<sup>7)</sup>にあり、寒冷地でも用いられる軌道スラブでは必須の検討項目となる。

そこで、本研究では軌道スラブへCPCを適用するための基礎的な検討を行う。はじめに、軌道スラブの製造条件下における膨張特性を得るため、膨張材の添加方法や添加量をパラメータとした配合試験を実施する。次に、凍結融解抵抗性の評価のため、供試体の拘束条件をパラメータとした凍結融解試験を実施する。

\*1 (公財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部軌道・路盤研究室副主任研究員 修(工) (正会員)

\*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院教授 博(工) (正会員)

\*3 (公財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部軌道・路盤研究室研究員 博(工) (正会員)

## 2. 軌道スラブの製造条件下における膨張特性の検討

### 2.1 配合試験の方法

膨張特性を把握するため、膨張材の添加方法や添加量をパラメータとした長さ変化測定試験および圧縮強度試験を実施した。長さ変化測定試験は、材齢 1, 7, 14, 21, 28, 91 日で行った。圧縮強度試験は、材齢 1 日および 7 日で行った。なお、材齢 1 日は、軌道スラブの脱型を行う材齢であり、PRC 構造の場合には同日にプレストレス導入も行う材齢にあたる。また、材齢 7 日は軌道スラブの最短出荷材齢にあたる。

#### (1) 使用材料

使用材料の諸元を表-1 に示す。セメントには、現状の軌道スラブに用いられている早強ポルトランドセメントを使用した。膨張材は、コンクリート工場製品向けのエトリンガイト系膨張材を使用した。使用した膨張材の標準添加量は、収縮補償用で  $30\text{kg/m}^3$ 、CPC 用で  $30\sim 70\text{kg/m}^3$  とされ、細骨材への置換が標準添加方法となっている。混和剤は、AE 剤（単位粉体量の 0.03% 添加）および高性能減水剤（単位粉体量の 0.8% 添加）を使用した。

#### (2) コンクリートの示方配合

コンクリートの示方配合を表-2 に示す。現状の軌道スラブの配合を基に設定した「従来配合」に加えて、膨張材を添加する配合として、「セメント質量に対して 7.5, 10, 12.5, 15% で細骨材に置換して添加する配合（外割り添加）」および「セメント質量に対して 7.5, 10, 12.5, 15% でセメントに置換して添加する配合（内割り添加）」を設定した。スランプは  $12\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は  $4.5\pm 1.0\%$  とした。

#### (3) 供試体の製作

練混ぜには強制練り二軸ミキサ（容量 55ℓ）を使用し、練混ぜ量は 1 配合あたり 30ℓ とした。はじめに、セメント・膨張材・細骨材・粗骨材を投入して 10 秒間練混ぜを行った。その後、水と混和剤を投入して 90 秒間練混ぜを行ってミキサから排出した。いずれの配合においてもスランプおよび空気量は基準の範囲内で、コンクリートの温度は  $22^\circ\text{C}$  であった。

長さ変化測定試験用供試体として、JIS A6202 の B 法（膨張及び収縮を対象とした試験方法）に準拠して PC 鋼棒および拘束端板を配置した角柱供試体を作製した（図-2）。また、圧縮強度試験用供試体として JIS A1108 に準拠して鋼製型枠を用いて円柱供試体を作製した。

養生は、実際の軌道スラブの蒸気養生を想定して高温高湿養生を行った。高温高湿養生の前置き時間は、練混ぜ後から 3 時間とした。その後、高温高湿養生を行った（設定湿度 98%）。高温高湿養生の温度条件は、温度上昇速度の設定値を 1 時間当たり  $10^\circ\text{C}$  とし、最高温度の設定値を  $50^\circ\text{C}$ 、最高温度の保持時間を 6 時間と設定した。高

表-1 使用材料の諸元

W	上水道水
C	早強ポルトランドセメント, 密度 $3.14\text{g/cm}^3$
E	エトリンガイト系, 密度 $2.93\text{g/cm}^3$
S	砕砂, 表乾密度 $2.63\text{g/cm}^3$ , 吸水率 1.32%, 単位容積質量 $1.71\text{kg/ℓ}$ , 実績率 65.9%, 粗粒率 2.73
G	砕石 2005A, 最大寸法 20mm, 表乾密度 $2.67\text{g/cm}^3$ , 吸水率 0.69%, 単位容積質量 $1.63\text{kg/ℓ}$ , 実績率 61.3%, 粗粒率 6.68

表-2 コンクリートの示方配合

配合名称	W/B (%)	s/a (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )					
			W	C	E	S	G	
従来配合	35.0	46.7	150	429	-	821	950	
E 外割 32	32.5	45.8			32	792		
E 外割 43	31.8	45.5			43	781		
E 外割 54	31.1	45.2			54	773		
E 外割 64	30.4	44.9			64	763		
E 内割 32	35.0	46.7			397	32		821
E 内割 43					386	43		
E 内割 54					375	54		
E 内割 64					365	64		

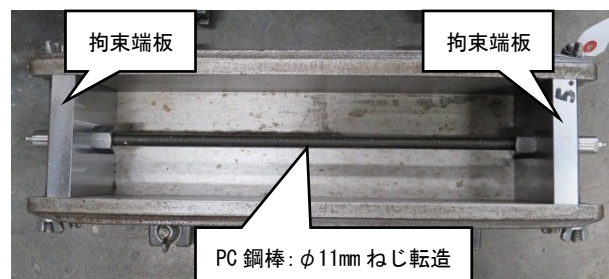


図-2 角柱供試体の型枠

温高湿養生後は自然冷却を行い、材齢 1 日で脱型した。脱型後の供試体表面を観察した結果、いずれの配合においてもひび割れや豆板といった施工不良は見当たらなかった。

脱型後は、恒温恒湿室（設定温湿度  $20^\circ\text{C}60\%$ ）で保管した。軌道スラブは、脱型の後、屋外にて保管されることから、降雨がない場合、乾燥して水和反応が進みにくい状況に置かれる。そのため、角柱供試体および円柱供試体ともに設定温湿度  $20^\circ\text{C}60\%$  下にて保管し、長さ変化測定試験および圧縮強度試験も同環境下で実施した。

## 2.2 結果と考察

### (1) 長さ変化

長さ変化測定試験の結果を図-3 に、乾燥収縮量を図

図-4に示す。長さ変化は、打込み直前の基長を0とした。乾燥収縮量は、材齢1日の脱型後の測定結果から材齢91日までの長さ変化の変化量として求めた。

図-3より、単位膨張材量の増加につれて膨張量が大きくなるのがわかる。膨張材の添加方法については、内割り添加は、外割り添加と比べて少ない単位膨張材量で大きな膨張量が得られた。一般的に単位膨張材量を増加させると膨張量も増加することから、単位セメント量に対する単位膨張材量が多い内割り添加で膨張量が大きくなったと考えられる。また、外割り添加した配合は水結合材比が小さいため、自己収縮が大きくなり膨張材の膨張が相殺された可能性も原因の一つとして考えられる。

なお、材齢1日の長さ変化について、「従来配合」では $-10 \times 10^{-6}$ であった。脱型直後であることから主に自己収縮による長さ変化と考えられるが、水セメント比に対して比較的小さい値であった。これは、水和反応初期の弾性係数が低く、ねじ転造されたPC鋼棒との付着が十分でなかったことが要因の一つとして考えられる。一方、体積膨張する場合は、拘束端板で両端から拘束されるため、PC鋼棒との付着によらず膨張ひずみが計測される。

「膨張コンクリート設計施工指針<sup>9)</sup>」ではCPC用の長さ変化の範囲として $200 \sim 1000 \times 10^{-6}$  (材齢7日)と示されており、その範囲を満足するのは「E外割64」、「E内割54」、「E内割64」であった。これらの配合は、材齢91時点でも膨張ひずみが残存した(それぞれ109, 70,  $174 \times 10^{-6}$ )。材齢7日の長さ変化が同程度であった「E外割64」( $260 \times 10^{-6}$ )および「E内割54」( $252 \times 10^{-6}$ )について、膨張エネルギーによるプレストレス量を試算<sup>9)</sup>すると、それぞれ0.48, 0.49MPaとなる。PRC構造の軌道スラブのプレストレスは1.5MPa程度であることから、その1/3に相当するケミカルプレストレスが期待できる。

図-4より、乾燥収縮量は、単位膨張材量の増加につれて減少し、水結合材比が小さい外割り添加した配合では最大で24%減少した。

## (2) 圧縮強度

圧縮強度試験の結果を図-5および図-6に示す。材齢1日では「E内割64」のみ、「従来配合」に比べて圧縮強度がわずかに低下した。材齢7日では、膨張材を添加した配合はいずれも「従来配合」の圧縮強度を上回った。外割り添加した配合では単位膨張材量の増加につれて圧縮強度が増加し、内割り添加した配合では減少した。一般に単位膨張材量を大きくすると、圧縮強度が低下する傾向にあるが、本研究ではその傾向が見られなかった。これは、早強ポルトランドセメント使用・低水セメント比・蒸気養生という早期強度発現を意図した軌道スラブの製作条件が影響した可能性があると考えられる。

軌道スラブの圧縮強度の製造管理値は、材齢1日の脱

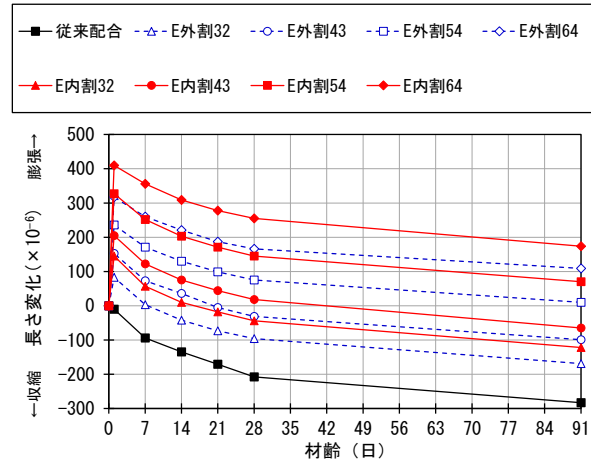


図-3 長さ変化の推移

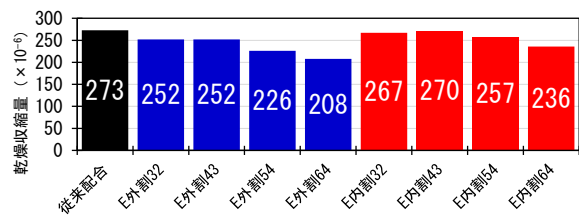


図-4 乾燥収縮量

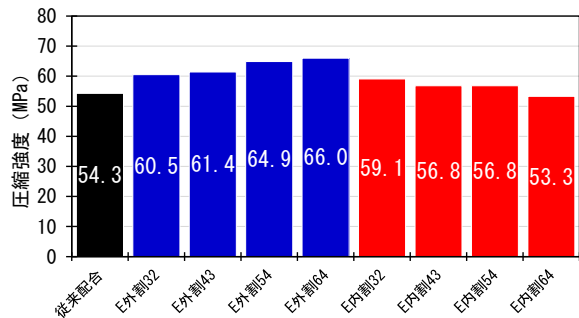


図-5 圧縮強度 (材齢1日)

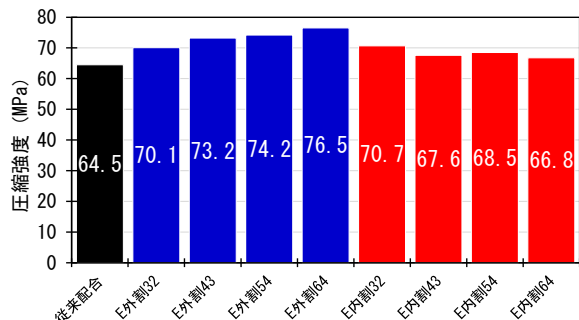


図-6 圧縮強度 (材齢7日)

型時で14MPa以上、材齢1日のプレストレス導入時で32MPa以上 (PRC構造)、材齢28日で40MPa以上と設定されている。試験結果と比較すると、いずれの配合においても材齢1日時点で上記の管理値を満足した。

## 3. 凍結融解抵抗性の評価

### 3.1 凍結融解試験の方法

凍結融解抵抗性を評価するため、供試体の拘束条件をパラメータとした凍結融解試験を実施した。既往の研究

において拘束条件の差異により凍結融解抵抗性が変化することが確認されている<sup>8)</sup>ことから、パラメータに取り入れた。あわせて気泡間隔係数や細孔径分布を測定した。

### (1) 供試体の製作

コンクリートの示方配合は、表-2 に示した配合のうち、「従来配合」、「E 外割 64」、「E 内割 54」の3種類を用いることとした。膨張材を添加する配合は、前章の結果から CPC 用の長さ変化の範囲を満足し、圧縮強度の低下が見られなかった配合を選定した。「E 外割 64」、「E 内割 54」のいずれの配合も材齢 7 日の長さ変化が  $250 \times 10^{-6}$  程度で同等の膨張量であった。練混ぜ・養生は前章と同じ方法で実施した。

供試体は、図-7 に示すように「拘束なし」に加えて、JIS A6202 の B 法の拘束器具（図-2）を用いる「B 法器具」および「B 法端板撤去」の3パターンの形状とした。「拘束なし」は鋼棒等を配置せず、 $100 \times 100 \times 400$ mm 鋼製型枠の妻板を調整・固定して、コンクリート部分の全長を「B 法器具」および「B 法端板撤去」と同寸法の 385mm とした。鋼棒等を配置していないため、膨張材を添加した配合では型枠による拘束は存在するものの、硬化時に自由膨張する条件となる。

「B 法器具」は、PC 鋼棒の付着および両端からコンクリートを押さえる拘束端板による拘束を与えた条件となる。この拘束は硬化時から発生することから、膨張材を添加した配合では PC 鋼棒にケミカルプレストレンが導入される。「B 法端板撤去」は、「B 法器具」と同様に製作を行った後、凍結融解試験直前に両端の拘束端板を撤去したもので、凍結融解試験中は PC 鋼棒の付着のみによる拘束を与えた条件となる。実際の部材に対しては、拘束の影響が小さいと考えられるかぶり表層や隅角部を想定している。

### (2) 試験の流れ

各配合・各拘束条件の供試体は1体ずつ用意し、材齢 28 日から JIS A1148 の A 法（水中凍結融解）により凍結融解試験を行った。試験後に、図-7 に示した型枠底面側から 20mm の位置付近で試料を採取して細孔径を測定した（水銀圧入ポロシメーター）。軌道スラブは、型枠底面側を上面として供用することから、上面のかぶり近傍を評価していることとなる。

また、凍結融解前の状態把握を目的に、「拘束なし」および「B 法器具」については、同バッチのコンクリートで供試体を別途1体ずつ用意し、材齢 28 日で供試体中央断面にて気泡間隔係数（ASTM C457-06 リニアトラバース法、0.01mm 以上の気泡を対象）を測定した。測定後は、図-7 に示した型枠底面側から 20mm の位置付近で試料を採取して細孔径を測定し、凍結融解作用を受けていない状態の細孔径分布を調べた。

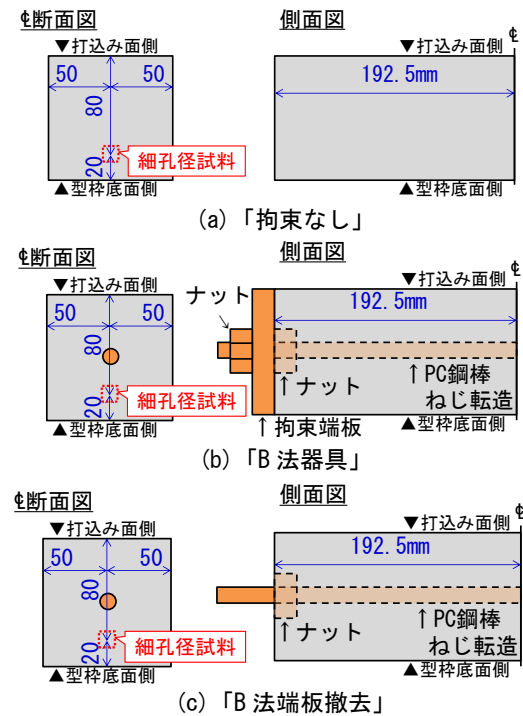


図-7 供試体の拘束条件（単位：mm）

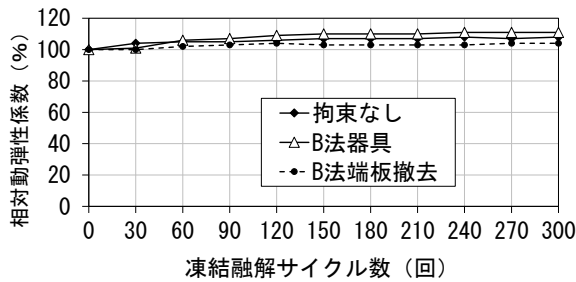
## 3.2 結果と考察

### (1) 相対動弾性係数

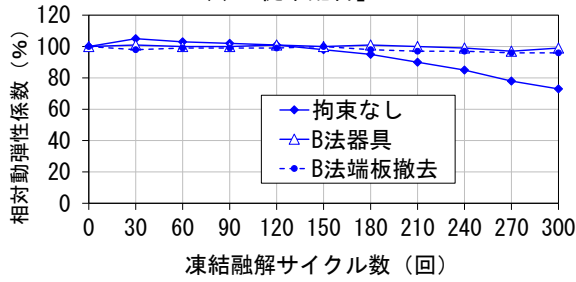
凍結融解試験の結果を図-8 に示す。「従来配合」および「E 内割 54」については、拘束条件の有無による影響は見られず、拘束がない場合でも相対動弾係数の低下は見られなかった。なお、「従来配合」については、300 サイクル時点で相対動弾係数が 5~10% 程度増加したが、これは水中浸漬で行う凍結融解試験中に水和反応が進行したためと考えられる。なお、軌道スラブの寒冷地での供用環境下においては水中浸漬の状態となる可能性は低いため、本試験のような水和反応の進行は生じにくいと考えられる。

「E 外割 64」について見ると、拘束がない場合、150 サイクル以降、相対動弾性係数が低下した。一方、拘束を与えた場合、相対動弾性係数の低下は見られなかった。これは、凍結時に拘束器具がコンクリートを拘束することで組織が粗となるのを抑制したためと考えられる。既往の研究<sup>8)</sup>と同様に、蒸気養生を行った本研究においても拘束の有無により凍結融解抵抗性が変化した。「E 外割 64」および「E 内割 54」は膨張量が同等な配合であることから、膨張材の添加方法によっても凍結融解抵抗性が変化すると考えられた。

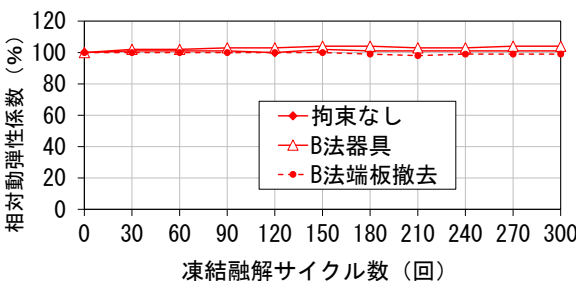
また、本研究では、拘束端板を撤去して拘束の程度を変化させたが、拘束端板の有無による凍結融解抵抗性の差異は見られなかった。そのため、本研究の条件においては供試体中心に配置された PC 鋼棒のみでもコンクリートに十分な拘束が生じると考えられる。



(a) 「従来配合」



(b) 「E 外割 64」



(c) 「E 内割 54」

図-8 相対動弾性係数の推移

スケーリングは、「従来配合」および「E 外割 64」では打込み面で見られたが、「E 内割 54」では確認されなかった。スケーリングの有無によらず、いずれの配合でも供試体質量の減少は見られず、300 サイクル終了時点ではいずれの供試体も 1%程度増加した。これは、脱型以降、恒温恒湿室（設定温湿度 20°C60%）で乾燥させたことから、凍結融解試験中に吸水したためと考えられる。

「E 内割 54」は、拘束がない場合でも、「E 外割 64」と比べて良好な凍結融解抵抗性を示したことから、軌道スラブへの適用の際には、拘束の影響が小さいと考えられるかぶり表層や隅角部においても十分な耐凍害性を有すると考えられる。

## (2) 気泡間隔係数

気泡間隔係数の測定結果を表-3 に、空気量の測定結果を表-4 に示す。測定された空気量はフレッシュ試験時の値以下となる傾向が見られ、フレッシュ試験時の空気量の範囲である  $4.5 \pm 1.0\%$  を下回る供試体も見られた。気泡間隔係数は、拘束を与えた場合、配合によらず増加する傾向にあった。「E 内割 54」の気泡間隔係数は、「従来配合」より小さく、「従来配合」に比べて良好な凍結融解抵抗性を有すると考えられる。

一方、「E 外割 64」は、「従来配合」および「E 内割 54」

表-3 気泡間隔係数の測定結果（単位： $\mu\text{m}$ ）

拘束条件	従来配合	E 外割 64	E 内割 54
拘束なし	299	357	289
B 法器具	349	384	308

表-4 空気量の測定結果

（下段（）内はフレッシュ試験時の値。単位：%）

拘束条件	従来配合	E 外割 64	E 内割 54
拘束なし	3.4 (4.5)	3.8 (3.8)	3.2 (5.3)
B 法器具	4.3 (4.5)	3.3 (3.8)	3.1 (5.3)

に比べて気泡間隔係数が大きくなる傾向にあった。前項で示したように拘束を与えない場合に相対動弾性係数が低下したのは、他配合と比べて相対的に凍結融解抵抗性が劣るためと考えられる。拘束を与えた場合、気泡間隔係数はさらに大きくなるが、相対動弾性係数の低下は見られなかった。そのため、拘束を与えて凍結融解試験を行った場合、拘束の影響が小さいと考えられるかぶり表層や隅角部の凍結融解抵抗性を過大評価する可能性があると考えられる。「E 内割 54」と比べて気泡間隔係数が大きくなったのは、単位膨張材量が大きいことから、膨張材の生成物で空隙が押しつぶされるケミカルプレス効果<sup>9)</sup>によって気泡が減少した可能性が考えられる。

## (3) 細孔径分布

細孔径分布の測定結果を図-9 に示す。各配合において、拘束の有無や拘束の程度による細孔径分布の顕著な差異は見られず、その分布は概ね一致した。概ね 0.01mm (10000nm) 以上を対象とした気泡間隔係数は、前項で示したように拘束の有無による差異が見られたが、細孔構造の差異はほとんどないことがわかった。また、「E 外割 64」は、「従来配合」および「E 内割 54」に比べて 10~100nm 付近の細孔量が小さかった。これは、水粉体比が小さいことその他、前項と同様、ケミカルプレス効果<sup>9)</sup>によるものと考えられる。

凍結融解試験後の測定結果を見ると、「従来配合」で 25~570nm、「E 外割 64」で 89~570nm、「E 内割 54」で 13~140・2260~10000nm の範囲でいずれも減少した。特定の細孔径が減少した理由は不明であるものの、水中浸漬で行う凍結融解試験中に水和反応が進行し、細孔構造が緻密化した結果、細孔径が減少に至ったと考えられる。本試験では、一般的に凍結融解抵抗性を評価する水中凍結融解で試験を行ったが、軌道スラブの寒冷地での供用環境下においては水中浸漬の状態となる可能性は低いいため、本試験結果に達するような細孔量の減少は生じにくいと考えられる。

凍結融解を与えていない結果について、透水係数や透

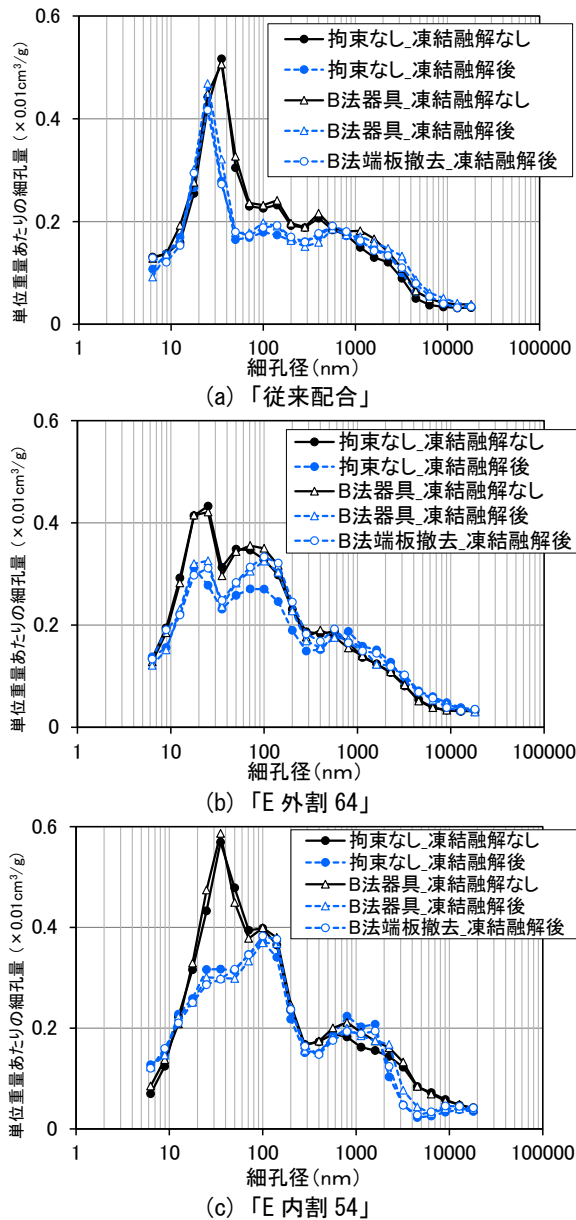


図-9 細孔径分布

気係数といったコンクリートの物質移動抵抗性と高い相関がある閾細孔径<sup>10)</sup>を算出すると、「従来配合」で20.7nm、「E外割64」で16.6nm、「E内割54」で40.7nmであった。既往の検討<sup>10)</sup>では、材齢28日まで水中養生された水結合材比40%の供試体で70~135nmという値が得られている。既往の検討結果と比較すると本研究で得られた閾細孔径は小さく、水粉体比が小さいことから推定できるように、いずれの配合もコンクリートの有害因子の侵入に対して高い抵抗性を有していると考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、軌道スラブへCPCを適用するための基礎的な検討を行った。得られた知見を以下に示す。

(1) 軌道スラブの製造条件下における膨張特性を得るた

め、膨張材の添加方法や添加量をパラメータとした配合試験を行った。その結果、同じ単位膨張材量であっても、細骨材ではなくセメントに置換して添加することで大きな膨張量が得られることがわかった。また、膨張材を添加した場合でも圧縮強度の大きな低下は見られなかった。

(2) 凍結融解抵抗性を評価するため、拘束条件をパラメータとした凍結融解試験を行った。その結果、膨張量が同程度であっても、膨張材の添加方法や拘束条件によって凍結融解抵抗性が変化した。膨張材をセメント置換で54kg/m<sup>3</sup>添加して250×10<sup>-6</sup>程度の膨張量が得られた配合は、拘束がない場合でも良好な凍結融解抵抗性を示し、軌道スラブへの適用の際には、拘束の影響が小さいと考えられるかぶり表層や隅角部においても十分な耐凍害性を有すると考えられた。

#### 参考文献

- 1) 日本国有鉄道 鉄道技術研究所 無道床軌道構造グループ：コンクリートスラブアスファルトのてん充形軌道の開発，鉄道技術研究報告，No.632，1968.4
- 2) 渡邊偲年：東北・上越新幹線におけるスラブ軌道の適用に伴う問題点とその解決，土木学会論文集，第385号/VI-7，pp.126-133，1987.9
- 3) 石橋忠良：軌道スラブの設計(1)，構造物設計資料，日本鉄道施設協会，No.39，pp.1613-1617，1974.9
- 4) 公益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 軌道構造，丸善，2012.1
- 5) 公益社団法人土木学会：膨脹コンクリート設計施工指針，コンクリートライブラリー75，1983.6
- 6) 岡村 甫，辻 幸和：ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学的特性，土木学会論文報告集，第225号，pp.101-108，1974.5
- 7) 國府勝朗：膨脹コンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎研究，土木学会論文報告集，第334号，pp.145-154，1983.6
- 8) 竹下永造，長塩靖祐：膨張材を混和したコンクリートの凍結融解抵抗性評価に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.817-822，2015
- 9) 山本賢司，森岡 実，坂井悦郎，大門正機：膨張材を混和したセメントの膨張機構，コンクリート工学年次論文集，第14巻，第3号，pp.23-31，2003.9
- 10) 酒井雄也，岸 利治：臨界浸透確率に基づく閾細孔径の抽出とコンクリート中の液状水移動の定量評価，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.72，No.2，pp.83-96，2016