

# 土構造物上に用いる短繊維補強 コンクリート路盤の開発

高橋 貴蔵\*      桃谷 尚嗣\*\*  
関根 悦夫\*      伊藤 壱記\*

## Development of Short Fiber Reinforced Concrete Roadbed on Earth Structure

Takatada TAKAHASHI      Yoshitugu MOMOYA  
Etsuo SEKINE      Kazuki ITOH

To apply short fiber reinforced concrete to concrete roadbed on an earth structure, the mix test of the short fiber reinforced concrete was carried out paying attention to its flowability and shrinkage reduction. The test result has shown that the flowability is improved by increasing cement and fine aggregate in concrete, and the shrinkage strain is reduced by using an expansive additive and shrinkage reduction agent together. Moreover, as a result of executing trial construction of the concrete roadbed of 60m in length, the ease of construction and the shrinkage reduction effect were confirmed.

キーワード：コンクリート路盤，短繊維補強コンクリート，配合設計，試験施工

### 1. はじめに

従来，スラブ軌道は，沈下が少ないトンネルや高架橋の区間で用いられ，土構造物の区間ではバラスト軌道が用いられてきた。しかし，近年では，図1に示すように高品質な路床（ $K_{30}$ 値 $\geq 110\text{MN/m}^3$ ）上に，厚さ30cmの上部路盤（鉄筋コンクリート版）と厚さ15cmの下部路盤（粒度調整碎石層）で構成されるコンクリート路盤を設けることで，土構造物上にスラブ軌道を適用することが可能となっている<sup>1)</sup>。

鉄筋コンクリート版は，高架橋の床版等と同様に，鉄筋コンクリート構造であることから，曲げモーメントによって生じる圧縮応力はコンクリートで，引張応力は鉄筋で受け持つように設計されている。しかしながら，鉄筋コンクリート版は粒度調整碎石層で支持されるため，常時の列車荷重によって生じるコンクリートの応力は曲げひび割れ強度よりも小さい値となり，コンクリートの引張強度を設計に取り入れることが可能となる。

そこで，コンクリートの引張強度を設計に取り入れることが可能である短繊維補強コンクリートをコンクリート路盤の上部路盤に適用するための検討を行った。短繊維補強コンクリートは，コンクリート中に短繊維を混入し，コンクリートにひび割れが発生したとしても，ひび

割れ間で短繊維が応力を伝達する材料である<sup>2)</sup>。

本稿では，上部路盤に短繊維補強コンクリートを適用するに当たり，現場打設を行うための流動性および，耐疲労特性を低下させる収縮ひび割れを防止するための収縮低減性を考慮した配合試験を実施した。また，検討を行った短繊維補強コンクリートを用いて延長60mのコンクリート路盤の試験施工を行い，短繊維補強コンクリートの施工性と収縮ひび割れの発生について検討した。

### 2. 短繊維補強コンクリート

短繊維をコンクリートに混入すると，コンクリートに発生するひび割れ界面間で短繊維が応力を伝達する架橋効果が働き，見かけ上コンクリートが靱性的な材料に変化する（図2参照）。したがって，短繊維補強コンクリートを用いることで，コンクリートにひび割れが発生したとして

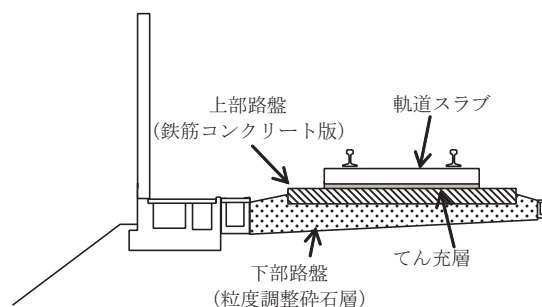


図1 土構造物上スラブ軌道

\* 軌道技術研究部（軌道・路盤）

\*\* 運輸安全委員会事務局

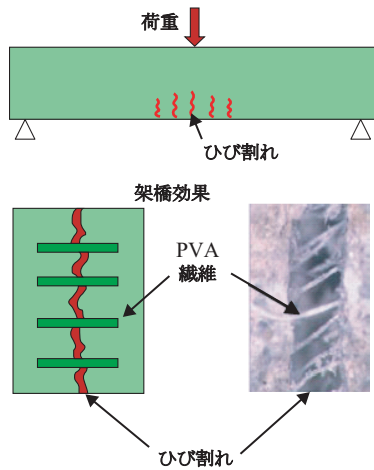


図2 架橋効果



図3 PVA繊維の外観

も、脆的な破壊には至らず、引張軟化曲線に対応した曲げ耐力を発揮することが可能となる。短繊維の混入量が多い場合には、曲げひび割れ発生以降に、曲げ変形とともに曲げ応力が増加する短繊維補強コンクリートもある。

本稿で用いた短繊維は図3に示すポリビニルアルコール (Polyvinyl Alcohol：以下、PVAと略す) 繊維であり、物性を表1に示す。ここで用いたPVA繊維は長さが30mmで直径が0.66mmであり、粗骨材が含まれるコンクリートに用いられる。短繊維の長さは、コンクリート練り混ぜ時の短繊維の分散性と架橋効果を考慮すると、粗骨材の1.5倍程度が有効とされており、図3に示すPVA繊維の長さも粗骨材最大寸法20mmの1.5倍である。PVA繊維は、原料が水溶性であることから、親水性に優れておりコンクリートとの付着が良く、比重が大きいためコンクリート練り混ぜ時に分離しにくい特徴がある。

表1 繊維物性

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	断面 (mm)	長さ (mm)	細長比	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張弾性率 (kN/mm <sup>2</sup> )
1.30	φ 0.660	30	45	880	29

表2 使用材料

材料	種類	記号	物性他
水	水道水	W	
セメント	高炉セメントB種	C	密度 3.04g/cm <sup>3</sup>
混和材	膨張材	EX	密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	砕砂	S1	表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 3.00
	陸砂	S2	表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 1.80
粗骨材	碎石	G	表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup> , 実績率 59.0%
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	密度 1.04 ~ 1.11g/cm <sup>3</sup> , ポリカルボン酸系
	空気量調整剤	AE	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
	収縮低減剤	SRA	密度 1.00 ~ 1.03g/cm <sup>3</sup>
短繊維	ポリビニルアルコール	F	密度 1.30 g/cm <sup>3</sup> , 長さ 30mm, 直径 0.66mm

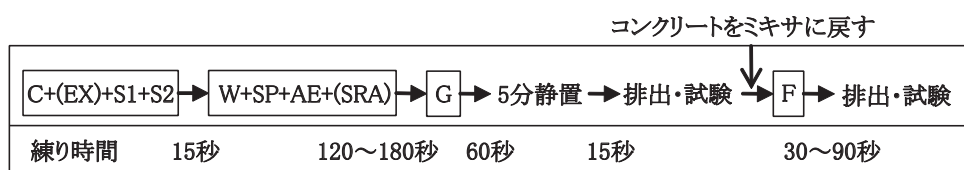
### 3. 短繊維補強コンクリートの配合設計

#### 3.1 配合条件

コンクリートに短繊維を混入すると、短繊維の細長比が大きいため、短繊維の混入によってコンクリートのワーカビリティは低下し、粘性は増加することが確認されている<sup>3)</sup>。そこで、短繊維補強コンクリートの施工性を考慮して、事前に検討した結果を踏まえて、短繊維混入後のスランブを21.0 ± 2.0cmに設定し、短繊維混入前のスランブフロー (スランブ試験時のコンクリートの広がり直径) を67.5 ± 7.5cmとした。コンクリートの材料分離抵抗性は高流動コンクリート施工指針<sup>4)</sup>を参考に短繊維混入前の50cmフロー到達時間を5 ~ 20秒とした。なお、空気量は短繊維混入前後において4.5%とした。

短繊維補強コンクリートで製作する上部路盤の形状は厚さ0.3m、幅2.6m、長さ60mと長い部材であり、乾燥収縮や温度変化によるひび割れが発生する懸念がある。そこで、「3.4 収縮対策」で示すように膨張材および収縮低減剤を添加することを条件とした。なお、長さを60mとしたのは、土構造物上スラブ軌道用コンクリート路盤の目地間隔を参考にしたものである<sup>1)</sup>。

短繊維補強コンクリートに用いるコンクリートには、短繊維の分散性および材料分離抵抗性を向上するため、



(注：記号は表2参照)

図4 室内試験練りの練混ぜ方法

粉体量を多くし、単位粗骨材絶対容積を小さくする必要があるのである。プラントに予備サイロがない場合、フライアッシュや石灰石微粉末などにより粉体量を増加することができないため、粉体がセメントのみとなる。この場合、単位セメント量が増大し、アルカリ総量が多くなる傾向にあるため、アルカリ骨材反応抑制対策として高炉セメントB種を使用することとした。短繊維補強コンクリートに用いた材料を表2に示す。

3.2 試験練り方法

上部路盤には短繊維を単位容積当たり1.5%混入した短繊維補強コンクリートを適用することとし、短繊維の分散するスペースを確保するために、単位粗骨材絶対容積を0.149m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>とした。

試験練りは室内と実機で行うこととし、室内試験練りにより短繊維混入前後のフレッシュ性状試験（ここでは、スランプフロー、50cmフロー到達時間、空気量を測定）を実施することで暫定配合を決定した。また、暫定配合をもとに、実機ミキサを用いた試験練りを行い、短繊維混入前のコンクリートのフレッシュ性状を確認して、示方配合を決定した。

室内試験練りは、室内ミキサ（2軸強制練りミキサ、公称容量50リットル）を用い、コンクリートを図4に示す手順で30リットル練り混ぜた。短繊維混入前のフレッシュ性状試験は、練混ぜ5分後および短繊維混入後に実施した。

実機試験練りは、実機ミキサ（2軸強制練りミキサ、公称容量3.0m<sup>3</sup>）によって3.0m<sup>3</sup>（1.5m<sup>3</sup>×2バッチ）練り混ぜ、練混ぜ5分後にフレッシュ性状の試験を実施した。なお、収縮低減剤を実機ミキサに添加して練り混ぜると、ミキサに付着したモルタルが他のコンクリートの空気量の調整に悪影響を及ぼすことが考えられるため、本試験では、アジテータ車に添加した。そのため、実機ミキサでは収縮低減剤を除いた配合を練り混ぜた。

3.3 試験練り結果

室内試験練りの結果を表3に示す。試験の結果、表4に示す配合にすることで、フレッシュ性状の目標値を全て満足することが確認された。なお、表3および表4には実機試験練りの結果および配合も併せて示す。

室内試験練りの配合をもとに、実機試験練りを行った結果、室内試験練りよりも高性能AE減水剤の添加量が大幅に増加する傾向にあった。原因として、実機ミキサでは、収縮低減剤6kg/m<sup>3</sup>を除いた単位水量169kg/m<sup>3</sup>の状態では練り混ぜているため、練混ぜに必要な水分が足りずに十分な攪拌が行われず、高性能AE減水剤が十分に効果を発揮しなかったものと考えられた。そこで、実機ミキサでの攪拌性を高めるために、収縮低減剤はアジテータ車に添加することは変更せずに、実機ミキサで練り混ぜる際の単位水量を169kg/m<sup>3</sup>から175kg/m<sup>3</sup>に増やした。また、図4のようにモルタルを先行して練るのではなく、粗骨材も初めから投入する一括練りとし、粗骨材による攪拌性を向上した。その結果、実機試験練りの練り混ぜ方法は図5として実施した。

表3 試験練りによるフレッシュ性状試験結果

試験項目		目標値	室内試験	実機試験
短繊維混入前	スランプフロー (cm)	67.5 ± 7.5	67.0 × 66.0	64.0 × 62.0
	50cmフロー到達時間 (秒)	5 ~ 20	6.3	6.9
	空気量 (%)	4.5 ± 1.5	4.9	3.6
短繊維混入後	スランプ (cm)	21.0 ± 2.0	21.5	—
	スランプフロー (cm)	—	43.0 × 41.0	—
	空気量 (%)	4.5 ± 1.5	3.2	—

表4 試験練り配合

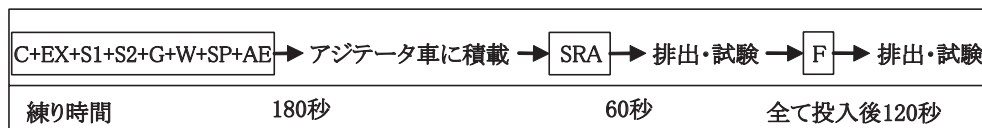
	C (%)	W/B (%)	単位粗骨材絶対容積 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )									
						W	B		S1	S2	G	SP (B × %)	AE (A)	SRA	F
							C	EX							
室内試験	32.4	31.3	0.149	75.0	4.5	175	540	20	829	347	396	1.65	20 <sup>*1</sup>	6	19.5 <sup>*2</sup>
実機試験													6.25 <sup>*1</sup>	6 <sup>*3</sup>	

\*1：空気量が0.3～1.0%増加するセメント質量に対する基本量（ここでは基本量B×0.001%を使用）

\*2：単位容積当たり1.5%混入（外割り）

\*3：外割り

（注：記号は表2参照）



（注：記号は表2参照）

図5 実機試験練りの練混ぜ方法

表5 試験ケースおよび長さ変化率の試験方法

ケース	膨張材 添加量 (kg/m <sup>3</sup> )	収縮低減剤 添加量 (kg/m <sup>3</sup> )	試験方法	備考
1	0	0	JIS A 6202 「コンクリート用膨張材」 膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法 (B法)	7日間水中養生後、 乾燥養生
2	20	0		
3	20	6		
4	40	0		
5	40	6		

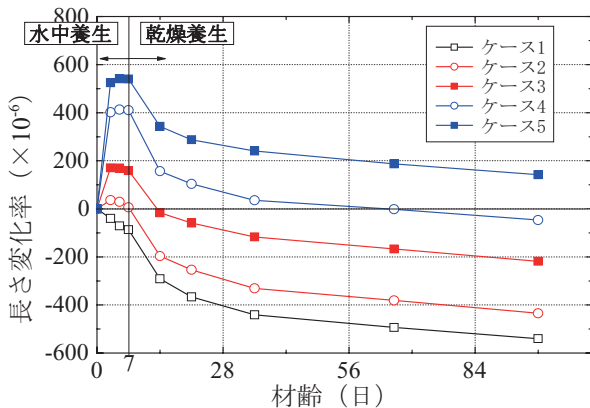


図6 長さ変化率

表4に示す実機試験練りの配合に対して、上記を踏まえた練混ぜ方法を採用することで、高性能AE減水剤を追加して添加することなく、表3に示す通りにフレッシュ性状の目標値を満足することが確認された。本配合に対して、短繊維を混入したフレッシュ性状の試験は実施していないが、50cmフロー到達時間が目標値を満足しており十分な粘性を有していること、また、室内試験練りのスランプフローと同程度であることから、短繊維の分散に対して問題ないものと考えられ、上部路盤に用いる短繊維補強コンクリートの配合として定めた。なお、収縮低減剤を使用した場合、空気量の調整具合が通常のコンクリートと異なり、AE剤の量を増加する必要があった。

3.4 収縮対策

上部路盤に用いる短繊維補強コンクリートは鉄筋で補



図7 短繊維混入後のスランプフロー

強しないため、収縮によるひび割れの発生を抑制する必要がある。そこで、膨張材および収縮低減剤を用いてコンクリートの収縮を抑制することとした。

表5に試験ケースおよび長さ変化率の試験方法を示す。各ケースの配合は、試験練りで選定した配合を基準に、単位水量、水結合材比および単位粗骨材絶対容積を同一とした。練混ぜ方法は、一括練りの180秒とし、フレッシュ性状試験で所要の性能を満足することを確認した後、それぞれの供試体を採取した。

図6に拘束膨張および収縮試験<sup>5)</sup>で得られた試験結果を示す。図6より、膨張材の添加量を0, 20, 40kg/m<sup>3</sup>と増加するに従い、水中養生期間である材齢7日までの膨張量の増加が確認された。また、膨張材と収縮低減剤を併用することで、水中養生材齢7日までの膨張量がさらに130×10<sup>-6</sup>程度増加する結果が得られたことから、乾燥収縮だけでなく自己収縮も低減できることを確認した。

以上より、一般に、収縮補償を目的とした膨張コンクリートの材齢7日の膨張率は150～250×10<sup>-6</sup>とされていることから<sup>6)</sup>、膨張材20kg/m<sup>3</sup>および収縮低減剤6kg/m<sup>3</sup>をコンクリートに混入した。

3.5 流動性の検討

スランプフロー試験では、短繊維補強コンクリートの横流し時の流動性を評価することが難しく、また、スランプコーンを垂直に持ち上げるため、図7に示すように短繊維が中央に集中し、モルタル分が周囲に流出する傾向になる。そこで、短繊維補強コンクリートの横流し時

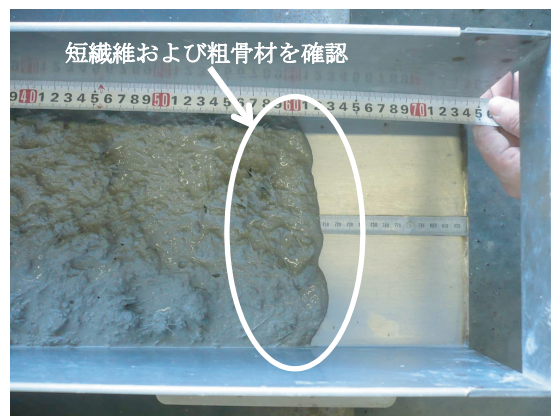


図8 Lフロー先端部の状況

表6 短繊維補強コンクリートの必要性能及び管理値

必要性能		試験方法	管理値	
フレッシュ時	短繊維混入前	スランブフロー (cm)	JIS A 1150	67.5 ± 7.5
		50cmフロー到達時間 (秒)	JIS A 1150	5 ~ 20
		空気量 (%)	JSCE-F 513	4.5 ± 1.5
		コンクリート温度 (°C)	温度計による	5 ~ 35
	短繊維混入後	スランブフロー (cm)	JIS A 1150	45.0 以上
		空気量 (%)	JIS A 1128	8.0 以下
	コンクリート温度 (°C)	温度計による	5 ~ 35	

の流動性および材料分離抵抗性を確認するため、L形フロー試験<sup>7)</sup>を行った。試験では、短繊維補強コンクリートを試験機に詰めた後に、仕切りゲートを引き上げて、仕切りゲートの内面からコンクリートの先端までの距離をLフローとして測定し、材料の分離状態を目視により確認した。なお、短繊維補強コンクリートの配合は表4の室内試験練りと同じである。

試験の結果、短繊維混入直後のLフローは62.5cmであり、十分な流動性が確認された。また、目視観察の結果、Lフロー先端部の短繊維補強コンクリートには粗骨材および短繊維が確認され、十分な材料分離抵抗性があることが確認された(図8参照)。また、短繊維混入155分後(練混ぜ180分後)にL型フロー試験を再度実施した結果、Lフローが41.0cm(スランブフロー49.5×45.5cm)となり、短繊維混入直後に比べて21.5cm小さい値となったが、実際の打設ではバイブレータが使用されるため、試験でも振動を加えたところ、流動距離を大きくするこ

とができた。よって、短繊維混入後の時間経過によりスランブフローが49.5×45.5cmまで低下しても、打設が可能であることがわかった。

#### 4. 試験敷設による施工性および収縮低減効果の確認

##### 4.1 施工性の確認

短繊維補強コンクリートの施工性を確認するため、長さ60m、幅2600mm、厚さ300mmの上部路盤の試験敷設を行った。試験敷設に用いた短繊維補強コンクリートの配合は表4の実機試験練りと同様とし、短繊維補強コンクリートの練り混ぜ方法は図5と同じとした。短繊維は打設現場でアジテータ車のホッパーから10~15分かけて投入した。投入に際しては、短繊維を分散させてドラムの奥に投入することで、コンクリートに均一に分散されることを確認した。

短繊維補強コンクリートの施工時の管理は、表6に示す短繊維混入前後のフレッシュ時の試験により行った。

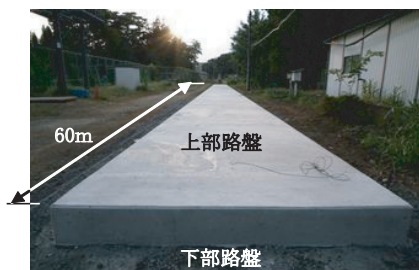


図9 次世代軌道用路盤の全景

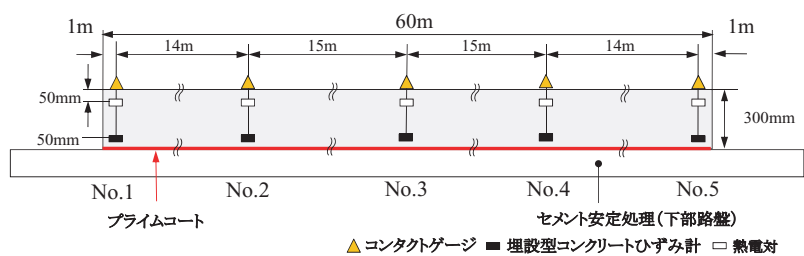


図10 上部路盤におけるセンサ位置

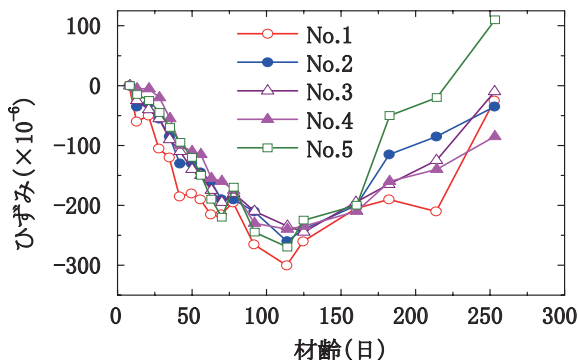


図11 路盤上面のひずみ

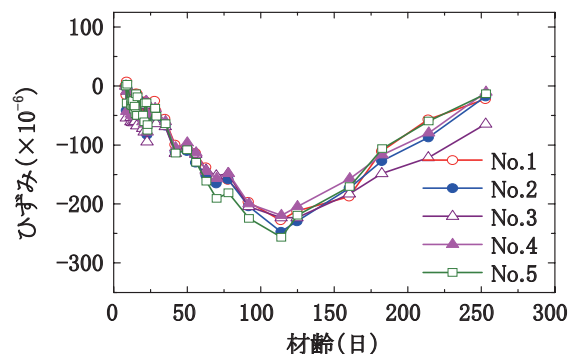


図12 路盤下面のひずみ

特集：軌道技術

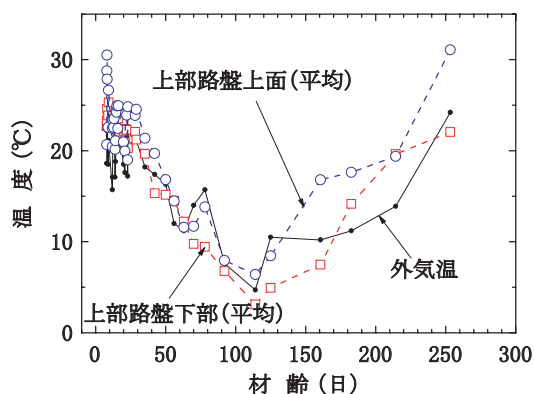


図13 上部路盤の温度変化

短繊維を投入することでワーカビリティは低下するが、表6に示す管理値、特にスランプフローを満足させることで、通常のコンクリートの打設と同様な施工が可能であることが確認された。なお、短繊維混入後の性状に合わせ、管理値をスランプからスランプフローに変更した。本施工ではアジテータ車を打設場所のわきに寄せ、アジテータ車のシュートを用いて直接打設した。打設後から7日間の湿布養生を行い、養生終了後に脱型した。短繊維補強コンクリートを用いた上部路盤を図9に示す。

4.2 収縮低減効果の確認

試験敷設した上部路盤を用いて収縮に対する評価を行った。収縮量(ひずみ)の測定は上部路盤の上面(コンタクトゲージ)と下部(埋設型コンクリートひずみ計)で行った。測定位置を図10に示す。

脱型日を初期値とした上部路盤の上面と下部のひずみの経時変化を図11および図12に示す。上面の収縮ひずみは最大で  $300 \times 10^{-6}$  程度で、下部の収縮ひずみの最大値  $250 \times 10^{-6}$  程度に比べると  $50 \times 10^{-6}$  程度大きい、コンクリートの収縮ひずみとしては十分小さい値であった。また、上面と下部のひずみの差が比較的小さいことから、上部路盤は自由収縮に近い挙動であったと考えられる。

脱型後3カ月間で各測定箇所の平均温度は、図13に示すように  $20^{\circ}\text{C}$  程度低下したが、一般的なコンクリートの線膨張係数 ( $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )<sup>8)</sup> を考慮すると、温度変化によるひずみは  $200 \times 10^{-6}$  程度となる。すなわち、測定された収縮ひずみの大部分は温度の低下によるものと考えられる。つまり、膨張材および収縮低減剤の併用効果によって乾燥収縮によるひずみは非常に小さくなったと考えられる。なお、材齢120日以降にひずみが増加しているのは気温が上昇したためである。また、材齢260日時点において、収縮ひび割れは確認されなかった。

5. まとめ

本研究により得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 室内試し練りでは、単位粗骨材絶対容積を  $0.149\text{m}^3/\text{m}^3$  程度まで低減することで、短繊維の良好な分散性を確保できた。また、収縮低減剤を添加すると空気量調整剤の添加量が通常よりも増加することがわかった。
- (2) 実機試験練りでは、収縮低減剤を外割りとした場合、実機ミキサで練り混ぜる際の単位水量を  $169\text{kg}/\text{m}^3$  から  $175\text{kg}/\text{m}^3$  に増やす必要があることがわかった。
- (3) 膨張材および収縮低減剤を添加した場合のコンクリートの長さ変化率を測定したところ、両材料を併用することで収縮量の低減効果があることがわかった。
- (4) コンクリートのスランプフローを  $70.0\text{cm}$  にすることで、短繊維補強コンクリートの流動性が確保され、延長  $60\text{m}$  の上部路盤を施工するのに十分な施工性を有することがわかった。
- (5) 短繊維補強コンクリートに膨張材と収縮低減剤を併用することで、収縮ひずみが低減され、延長  $60\text{m}$  の上部路盤に収縮ひび割れが発生しないことがわかった。

6. おわりに

本稿では、短繊維補強コンクリートの配合および施工について報告した。今後は照査法の検討を進めていく必要がある。特に、初期ひび割れや外力によるひび割れが発生した後に、ひび割れ発生荷重より小さな荷重が繰り返された場合に対する疲労破壊の照査法の検討を進めていく予定である。

文献

- 1) 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，丸善，2007
- 2) 高橋貴蔵，関根悦夫，堀池高広，松岡茂，保城秀樹：短繊維補強コンクリートの軌道スラブへの適用に関する検討，鉄道総研報告，Vol.21，No.6，pp.23-28，2007
- 3) 川又篤，高橋貴蔵，掘越哲郎，松岡茂：繊維補強セメント系複合材料の基礎性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.389-394，2006
- 4) (社)土木学会コンクリート委員会：高流動コンクリート施工指針，(社)土木学会，1998.7
- 5) JIS A 6202：コンクリート用膨張剤膨張付属書2 コンクリートの拘束膨張および収縮試験方法，日本規格協会，2002
- 6) (社)土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，丸善，2007.12
- 7) JSCE-F 514：高流動コンクリートのL形フロー試験方法(案)，土木学会基準，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 コンクリート構造物，丸善，2004