

## 報告 HPFRCC の実構造物への施工事例

稲熊 弘<sup>\*1</sup>・関 雅樹<sup>\*2</sup>・稲熊唯史<sup>\*3</sup>・六郷恵哲<sup>\*4</sup>

**要旨**：鉄道高架橋の縦梁部材への中性化対策の一工法として、実構造物に試験的に施工を行うことにより、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下、HPFRCC）の適用を試みた。本稿では、実高架橋の試験施工における品質管理方法、施工仕様、ならびに施工後3ヶ月および1年のHPFRCCの材料特性の調査結果について報告する。

**キーワード**：HPFRCC, 鉄道高架橋, 中性化対策, ひび割れ追従性能

### 1. はじめに

RC 構造物の中性化対策には、一般的に表面保護工（以下、ライニング）が採用されている。ライニングは、大気中の CO<sub>2</sub> の侵入を完全に遮蔽できる最も合理的な方法である。しかしながら、鉄道の RC ラーメン高架橋（以下、高架橋）などの橋梁では、列車が高架橋などを通過するたび、高架橋縦梁部下面のコンクリートに生じているひび割れが、列車荷重により微小な幅にて開閉するという特徴を有する。特に、新幹線や都心の在来線では、1日当りの運転本数が多く、列車編成も長いため、ひび割れの開閉する回数は非常に多い。このひび割れの開閉現象により、ライニングにひび割れが蓄積されて、将来的にライニングにひび割れが生じることが懸念されている。また、ライニングの材料は有機系材料であるため、紫外線により硬化し、伸び性能が時間とともに衰え、コンクリートのひび割れ開閉箇所にてライニングのひび割れを助長することも想定される。このように、鉄道高架橋などでは、長期的にひび割れが発生しない、あるいは、ひび割れが発生しても中性化の進行を抑制できる対策工法の提案が望まれている。本研究では、高引張靱性およびひび割れ分散特性を有する HPFRCC に着目し、中性化対策工法としての適用性について検討した。著者らは、

HPFRCC が中性化抑制効果<sup>1)</sup>、ひび割れ追従性能<sup>2)</sup>ともに有していることを確認している。これらの研究を踏まえ、実用化へ向けた施工仕様を確立するため、鉄道の実高架橋を利用した施工試験を行った。本稿では、施工試験における品質管理方法、施工仕様、ならびに施工後3ヶ月および1年の HPFRCC の材料特性の調査結果を報告する。

### 2. 施工試験の概要

施工試験の目的は、実列車荷重に対するひび割れ分散特性を確認するとともに、合理的な施工範囲を特定して、実用化へ向けた施工仕様を確立することである。表-1に示すように施工範囲として、高架橋の梁部材を対象に、梁全面施工1ケースと梁部分施工3ケースの計4ケースを設定した。

#### 2.1 使用材料

HPFRCC に使用した繊維は、径 0.04mm、長さ 12mm、引張強度 1,600MPa のポリビニルアルコールであり、その標準配合を表-2に示す。HPFRCC の施工は吹付け工法<sup>3)</sup>とし、吹付け厚は既往の研究<sup>4)</sup>から 5~20mm の範囲であれば、ひび割れ分散効果を有し、施工性も優れていることが明らかとなっていることから、吹き付ける母体コンクリートの不陸および吹付け仕上げ面の施工誤差を考慮して、設計厚 10mm を確保できるように施工厚の

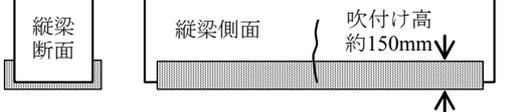
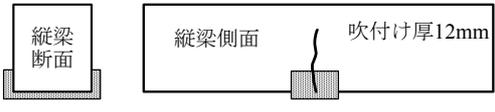
\*1 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部 コンクリートグループ 博(工) (正会員)

\*2 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部 博(工) (正会員)

\*3 ジェイアール東海コンサルタンツ(株) 調査技術部 開発技術部 (正会員)

\*4 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

表－1 吹付け施工範囲

断面形状	施工長(高架橋の橋軸方向の施工長さ)	
	ライン施工(縦梁1スパンを吹付け)	部分施工(ひび割れ周辺を吹付け)
Rタイプ (縦梁を囲んで吹付け)		
Bタイプ (縦梁底部を中心に吹付け)		

表－2 HPFRCCの標準配合

水結合材比 W/B (%)	砂結合材比 S/B (%)	単位水量 W (kg/m <sup>3</sup> )	繊維体積率 Vf (%)
32	41.3	360	2.1

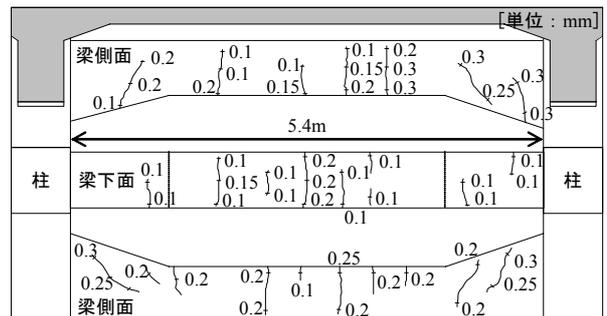
目標値を12mmに設定した。

### 2.2 施工対象高架橋

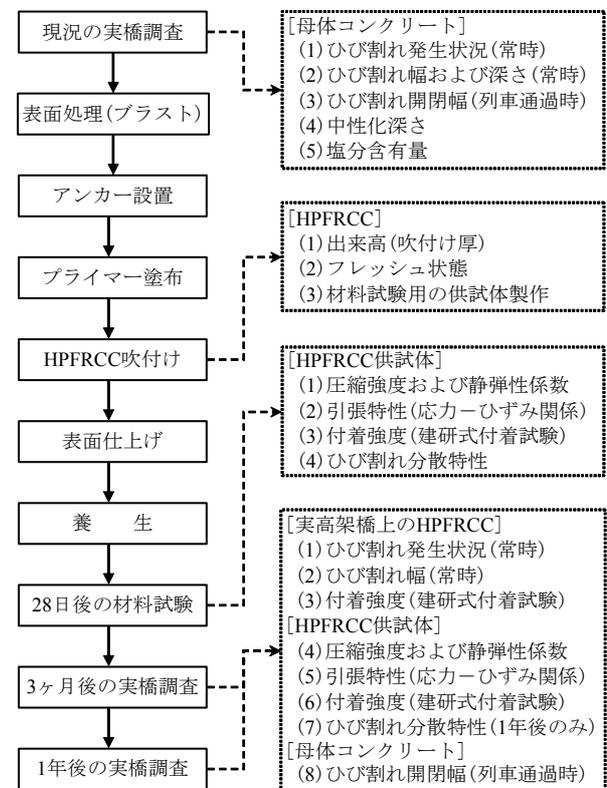
施工対象高架橋は、静岡県富士市に位置する供用40年の鉄道高架橋である。高架橋の縦梁のひび割れ展開図の一例を図－1に示す。他の縦梁のひび割れ発生状況はこれと概ね同様であった。中性化深さは、縦梁4箇所コア採取により測定したところ、3.4mm～14.5mmであった。試験施工は、縦梁6本中の4本を対象に、表－1に示す4種類の施工範囲を縦梁1本ずつに施工した。

### 2.3 施工試験要領

施工試験フローと調査内容を図－2に示す。施工試験は、列車が運行されている昼間に実施した。HPFRCCは、プレミックス材料を用いてホバートミキサにより現場で製造した。吹付け施工では、プライマーを塗布後、製造したHPFRCCをスクイズ式ポンプにより吹付けガンまで圧送し、1層目の吹付け厚が10mm以下となるよう吹付けを行い、材料がダレを生じなくなった時点(施工後2～3時間程度)で粗仕上げを行った。その後、2層目で仕上げ吹きを行い、同じく材料ダレが生じなくなった時点でコテ仕上げを行った。養生方法については、施工が3月初旬で施工期間中の外気温が5～10℃であったため、養生剤を噴霧し、高架橋全体をブルーシートで覆ってジェットヒーターにより



図－1 縦梁のひび割れ展開図の例



図－2 施工試験フローと調査内容

給熱養生を行った。養生後の施工完了状態を写真－1に示す。

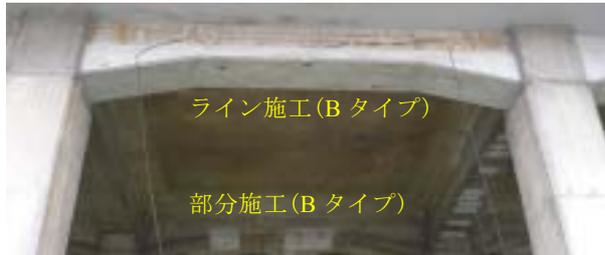
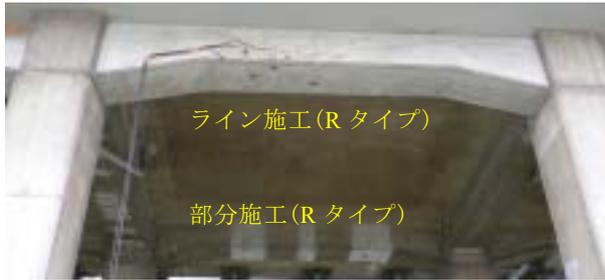


写真-1 養生後の施工完了状態

### 3. 出来高管理

#### 3.1 管理と検査の方法

施工時の吹付け厚の管理方法と、施工後の吹付け厚の出来高検査方法は以下のとおりとした。

ライン施工 (Rタイプ: 梁全体を対象) の管理は、梁の側面と底面に厚さ 12mm の位置で水糸を設置し、さらに梁中央および梁中央から両側の 1m, 2m, 2.5m の位置に、写真-2 に示す厚さ管理用の検束ピンを設置する方法とした。検査は、梁の側面と底面で、梁中央および梁中央から両側に 1m, 2m, 2.5m の位置で、基準位置からの施工前後の距離を計測して吹付け厚を算出する方法とした。

ライン施工 (Bタイプ: 梁底部を対象) の管理は Rタイプの方法および、梁側面の施工範囲の端部に、12mm 高の型枠板を設置する方法とした。検査方法は、Rタイプの方法と同一である。

部分施工(RタイプおよびBタイプ)の管理は、施工範囲の端部に、施工厚さと同じ 12mm 高の型枠板を設置する方法とした。検査は、各施工箇所の梁の側面と底面で、型枠板設置位置の 4 隅にて吹付け厚を測定する方法とした。

#### 3.2 検測結果

ライン施工の梁の検測データを表-3 に示す。なお、部分施工は、測定位置が型枠板設置位置であり、施工誤差が生じなかったことから、以下の検討では除外する。

表-3 検測データ

施工ケース	測定箇所	吹付け厚 (mm)						
		-2.5m	-2m	-1m	梁中央	1m	2m	2.5m
ライン施工 Rタイプ (梁全面)	梁側面(内側)	11	9	13	11	12	11	11
	梁底面	12	15	14	14	11	13	10
	梁側面(外側)	10	12	10	10	12	9	9
ライン施工 Bタイプ (梁底部)	梁側面端部(内側)	12	13	12	12	12	13	14
	梁側面(内側)	10	11	10	12	12	13	12
	梁底面	14	13	13	12	11	14	16
	梁側面(外側)	12	13	13	13	13	14	12
	梁側面端部(外側)	12	12	12	12	12	13	12

ライン施工の検測データの中で、設計厚 10mm を下回っている箇所は 3 箇所ある。検測データの平均値は 12.05mm、標準偏差は 1.47mm、変動係数は

12.2%である。5%危険率の下側信頼区間 (Ave-1.645σ) を求めると 9.64mm であり、設計厚 10mm を下回る結果となる。吹付け厚 10mm を確実に確保するためには、管理目標値を 12mm 以上とする必要があるが、今回の管理目標値は 12mm としていたことから、15mm 程度に設定する必要がある。しかしながら、設計厚を安全側で設定していること、厚 10mm を下回った位置は梁側面であり、要求性能に支障はないため、今回設定した管理目標値は妥当と考える。

出来形管理方法については、部分施工は型枠板端部を計測することにより、吹付け厚の管理は容易である。一方、ライン施工については、今回、梁側面、梁底面ともに、梁中央および梁中央から両側に 1m, 2m, 2.5m の位置で、基準位置からの施工前後の距離を計測することで吹付け厚の管理を行ったが、この管理方法は手間が掛かる。今後の施工においては、検束ピンによる厚さ管理をすれば、ライン施工の場合でも比較的容易に出来形を管理できると思われる。

### 4. 供試体の品質管理

HPFRCC の品質規格を表-4 に示す。本規格は、既研究<sup>1),2)</sup>から要求性能として設定した。なお、中性化抑止性は既研究にて確認しているため、本施工試験では割愛した。



写真-2 検束ピン

表-4 HPFRCの品質規格

区分	項目	規格	試験方法
フレッシュ時	流動性	375±100mm	JIS A 1150
	単位体積質量	1,650kg/m <sup>3</sup> 以下	JIS A 1116
吹付け後	圧縮強度	30N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS A 1108
	引張降伏強度	2.0N/mm <sup>2</sup> 以上	
	引張終局ひずみ	0.2%以上	ダンベル型一軸引張試験
	最大ひび割れ幅	規格引張終局ひずみにおける最大ひび割れ幅が0.1mm以下	
	付着強度	母体コンクリートとHPFRCの付着強度が1.5N/mm <sup>2</sup> 以上	建研式引張試験
	中性化抑止性	中性化速度係数が4mm/√(週)以下	JIS A 1153

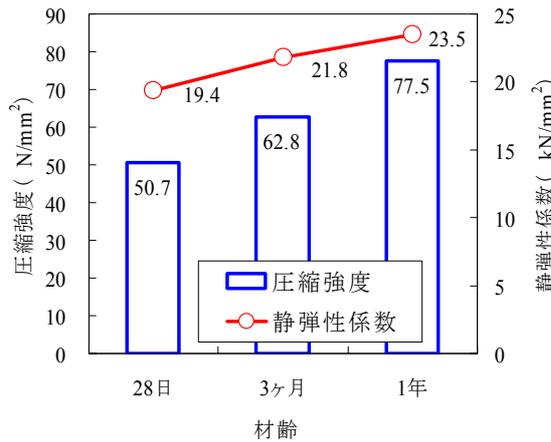


図-3 圧縮強度および静弾性係数

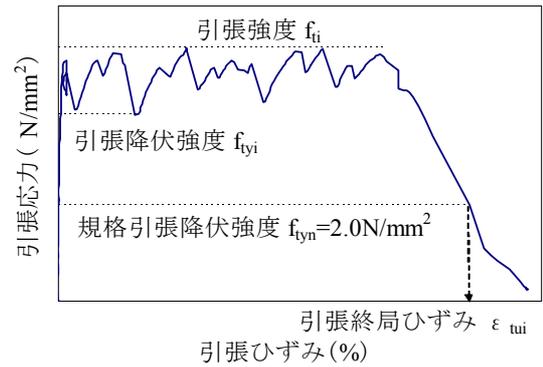


図-5 応力ひずみ-曲線の例と定義

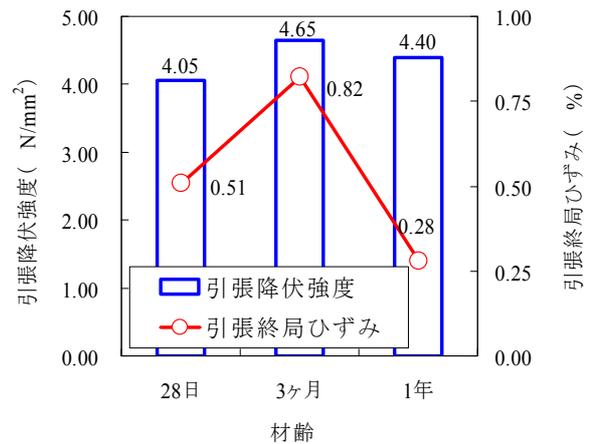


図-6 引張降伏強度および引張終局ひずみ

4.1 圧縮強度

静弾性係数も併せて確認した。静弾性係数はJIS A 1149に準じ、圧縮強度の1/3の点とひずみが $50 \times 10^{-6}$ の点とを結ぶ割線弾性係数とした。試験材齢は28日、3ヵ月、1年の3材齢とし、それぞれ3体ずつ試験を行い、その平均値を試験値とした。供試体の養生方法は他の試験も同一で、製作後は封緘養生、材齢7日以降は標準水中養生とした。試験結果を図-3に示す。圧縮強度は材齢28日の時点で、規格値 $30 \text{ N/mm}^2$ の1.7倍であり、材齢の進行に伴い、強度が発現している。

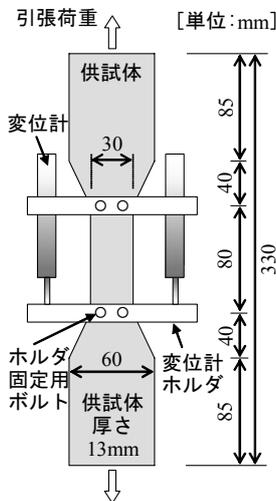


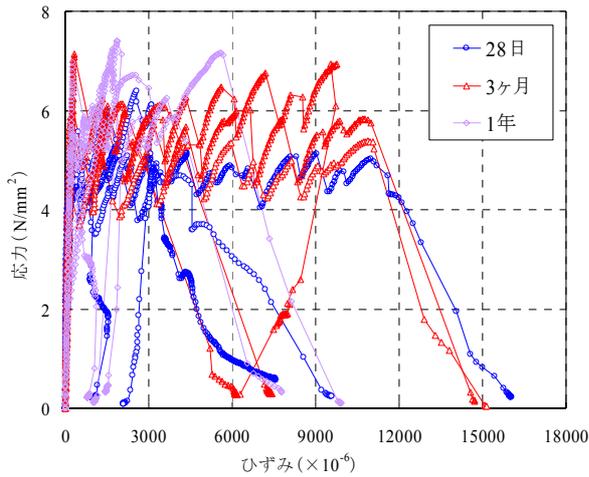
図-4 供試体

4.2 引張特性

引張特性は、図-4に示すダンベル型供試体を用いた一軸引張試験により、引張降伏強度および

引張終局ひずみを確認した。引張特性の定義を図-5に示す。規格引張降伏強度 $2.0 \text{ N/mm}^2$ は、材料のばらつき等を考慮して定めた引張降伏強度の材料特性値である。試験時の载荷速度は $0.5 \text{ mm/分}$ とし、引張ひずみは2本の変位計の平均値とした。試験材齢は4.1と同一で、各材齢にて5体ずつ試験を行い、試験値は引張終局ひずみの最大最小値を除いた3体の平均値とした。

試験結果を図-6、応力-ひずみ曲線を図-7に示す。引張降伏強度は、材齢28日の時点で規格引張降伏強度 $2 \text{ N/mm}^2$ の約2倍あり、材齢の経過と関係なく、概ね同程度の値である。一方、引張終局ひずみは図-7からも伺えるように、長期材齢の1年で低下している。これは、圧縮強度は材齢と比例して増加していることから、材齢の経過に伴い、材料マトリックスに変化が生じ、繊維の付着特性に何らかの影響を及ぼしたためと思われる。表面保護工としての利用では、長期的な高靱性を期待しているため、本件は今後の課題である。



図一七 引張試験における応力-ひずみ曲線



写真一三 付着試験後の状況

#### 4.3 付着強度

試験は、JIS A 5334 の鉄筋コンクリートU型用ふたに HPFRCC を吹き付け、建研式引張試験により、1 供試体で 8 回の

試験を行い、試験値は最大最小値を除いた 6 回の平均値とした。試験材齢は 4.1 と同じであり、各材齢で 1 供試体ずつ試験を行った。試験結果を表一五に示す。付着強度は材齢 28 日で、要求性能  $1.5\text{N/mm}^2$  を上回っており、破壊箇所のほとんどが基盤コンクリートであった。材齢 28 日での試験後の状況を写真一三に示す。

#### 4.4 ひび割れ分散特性

試験は 4.2 と同じ方法により、引張ひずみが 0.2% に達した時点のひび割れ幅とひび割れ本数を測定する方法とした。試験材齢は 28 日と 1 年の 2 材齢とし、各 5 体ずつ試験を行い、計測された最大のひび割れ幅と本数のそれぞれの平均値を試験値とした。試験結果を表一六に示す。材齢が 28 日と 1 年の比較では、材齢 1 年の方がひび割れ本



写真一四 剥離

表一五 付着強度試験結果

No	付着強度(N/mm <sup>2</sup> )								Ave
	1	2	3	4	5	6	7	8	
28日	2.23	2.33	2.86	2.08	2.15	1.94	2.88	2.15	2.30
3ヶ月	3.69	4.11	3.99	4.08	4.01	3.23	3.40	3.74	3.82
1年	3.26	3.44	2.93	3.31	2.92	2.26	3.66	2.91	3.13

表一六 ひび割れ分散特性試験結果

No	最大ひび割れ幅(mm)						ひび割れ本数(本)	
	材齢28日			材齢1年			材齢28日	材齢1年
1	0.09	0.06	—	0.09	0.03	—	2	2
2	0.11	0.05	—	0.03	0.03	0.02	2	4
3	0.10	測定不能	—	0.2%未満で破断			1	—
4	0.08	0.05	0.01	0.10	0.05	0.03	3	3
5	0.09	0.06	0.02	0.07	0.05	0.03	3	4
Ave	0.094mm			0.0725mm			2.20	3.25

数は多く、最大ひび割れ幅も小さい傾向にある。

### 5. 実高架橋の追跡調査

#### 5.1 外観調査

3 ヶ月後の外観調査では、ひび割れは HPFRCC に生じていなかったが、HPFRCC の表層に約 10cm 四方の大きさのシワが数箇所観察された。1 年後の調査では変状の進展は見られなかったため、これは、施工時の成型不良によるものと思われる。シワの発生は、HPFRCC 層の密度が部分的に低下するため、中性化防止上好ましくないため、施工あるいは養生の方法に改善が必要である。

1 年後の調査では写真一四に示すように、HPFRCC 表層が 1mm 以下の厚さで剥離している箇所が観察された。また、剥離がない箇所についても、全体的に表面は脆弱に見受けられた。HPFRCC のひび割れについては、ライン施工 B タイプで、母体コンクリートのひび割れ箇所上に 0.05mm~0.1mm のひび割れが 1 箇所発生していたが、その他にはひび割れは発生していなかった。

#### 5.2 ひび割れ開閉幅

高架橋縦梁躯体に発生していた既存のひび割れ開閉幅は、 $\pi$ 型変位計により主要なひび割れ 11 箇所をそれぞれ同一位置で、列車本数 10 本を対象に測定した。測定位置は、HPFRCC の吹付け前後で異なるように、 $\pi$ 型変位計を固定する駒を取り付けたまま、その部分を外して吹付け施工を

表－7 ひび割れ開閉幅の最大値

施工ケース	No	常時ひび割れ幅 (mm)	HPFRCC 施工前ひび割れ開閉幅 a (mm)	HPFRCC 施工後3ヶ月ひび割れ開閉幅 b (mm)	割合 b/a ×100 (%)	HPFRCC 施工後1年ひび割れ開閉幅 c (mm)	割合 c/b ×100 (%)
部分施工 Bタイプ	1	0.1	0.0135	0.0108	80	0.0105	97
	2	0.2	0.0156	0.0132	85	0.0129	98
	3	0.1	0.0155	0.0143	92	0.0142	99
部分施工 Rタイプ	4	0.1	0.0145	0.0119	82	0.0124	104
	5	0.1	0.0150	0.0072	48	0.0078	108
	6	0.1	0.0101	0.0052	51	0.0056	108
ライン施工 Bタイプ	7	0.15	0.0123	0.0089	72	0.0099	111
	8	0.2	0.0176	0.0181	103	0.0188	104
	9	0.2	0.0093	0.0082	88	0.0091	111
ライン施工 Rタイプ	10	0.2	0.0172	0.0089	52	0.0090	101
	11	0.15	0.0195	0.0167	86	0.0176	105

表－8 付着強度試験結果

施工ケース	試験箇所	No	施工後3ヶ月		施工後1年	
			付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破壊箇所	付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破壊箇所
ライン施工 Rタイプ	梁下面	1	0.00	表層	1.29	吹付け層
		2	0.21	吹付け層	0.73	吹付け層
		3	0.27	吹付け層	2.11	吹付け層
	梁側面	4	0.20	吹付け層	1.11	吹付け層
		5	0.23	吹付け層	2.20	吹付け層
		6	0.64	吹付け層	1.00	吹付け層
部分施工 Rタイプ	梁下面	7	0.24	界面	1.84	界面
		8	0.11	吹付け層	0.44	吹付け層
		9	0.43	吹付け層	1.74	吹付け層
	梁側面	10	0.53	吹付け層	0.86	吹付け層
		11	0.30	吹付け層	1.34	吹付け層
		12	0.36	吹付け層	2.18	吹付け層

行った。

各測定箇所のひび割れ開閉幅の最大値を表－7に示す。施工後3ヶ月および1年の値は、吹付け前に比べて大差はない。常時のひび割れ幅 0.1～0.2mm に対する列車通過時の変動量 0.01～0.02mm の割合は約 10%である。前述のように、HPFRCC に観察されるひび割れは、母体コンクリートのひび割れ箇所上の1箇所のみであったことから、母体コンクリートのひび割れ幅が 0.01～0.02mm 程度変動しても、材齢 1 年程度では、ひび割れがほとんど生じないことがわかった。

### 5.3 付着強度

試験は 4.3 と同一方法により、高架橋の吹付け箇所を対象に、施工後3ヶ月と1年に実施した。試験位置は、梁下面と梁側面の各2箇所とし、試験値は3測定/箇所の平均値とした。試験結果を表－8に示す。付着強度は、3ヶ月後、1年後ともに要求性能を満たしていない。一方、供試体による付着強度はすべてが要求性能以上であった。違いの原因は、吹付けの向き、吹付け層数、養生方法などの違いによるものと考えられるが、原因の特定と改善は今後の課題である。また、施工後1年

に比べ、施工後3ヶ月の付着強度が小さいのは、水和反応によるものと思われる。以上より、施工ケースの違いでは、HPFRCC のひび割れ発生状況、ひび割れ開閉幅および付着強度に大差はないと言える。

## 6. まとめ

施工試験により得られた知見を列記する。

- (1) 施工ケースの違いにより HPFRCC の材料特性に相違はないため、施工範囲はひび割れ部近傍、かつ梁底部を対象に施工するのが合理的である。
- (2) 列車運行時の昼間に施工を行ったが、列車荷重により HPFRCC にはひび割れが生じなかった。
- (3) 付着強度は、供試体と実構造物とで大きく異なるため、供試体の製作方法や養生方法をより実構造物の施工条件に合わせる必要がある。

## 参考文献

- 1) 稲熊 弘, 伊藤裕一, 稲熊唯史, 関 雅樹: コンクリートのひび割れ箇所の中性化進行度に関する一考察, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 5-062, pp.123-124, 2005.9.
- 2) Hiroshi INAGUMA, Masaki SEKI, Kumiko SUDA and Keitetsu ROKUGO, “Experimental study on crack-bridging ability of ECC for repair under train loading”, International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites(HPFRCC) in Structural Applications, pp.499-508, May 2005.
- 3) Tetsushi KANDA, Tadashi SAITO, Noboru SAKATA, “FUNDAMENTAL PROPERTIES OF DIRECT SPRAYED ECC,” Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) – Application and Evaluation -, pp.133-141, October 2002.
- 4) 国枝 稔, 稲熊 弘, 増川淳二, 六郷恵哲: 吹付けECCを用いた表面保護工に関する基礎的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集 第4巻, 2004.10.