

## 論文 鉄道高架橋における吹付けモルタルによる補修工事と追跡調査

峰松敏和\*1・瀬野康弘\*2・大橋潤一\*2・住田裕紀\*3

**要旨:**耐久性改善を目的として鋼繊維を混入した超速硬セメントモルタルを乾式吹付け工法で補修した鉄道高架橋の補修直後および16年経過後の補修・補強効果について追跡調査を実施した。補修効果の評価は、動的測定により得られた列車荷重と列車荷重により発生する鉄筋応力の関係を相関付けることにより行なった。調査の結果、列車荷重による鉄筋の応力負担低減効果が持続されていることが判明し、補修直後は言うまでもなく本工法による補修効果の長期持続性が確認できた。

**キーワード:** 鉄道高架橋, 補修, 吹付け工法, 超速硬セメント, 鋼繊維, 追跡調査

## 1. はじめに

現在供用中の鉄道高架橋の中には昭和初期に建造され70年以上経過したものや、戦後間も無い建設資材不足の特殊な環境下で建設されたもの、高度経済成長期の最中に慌ただしく構築されたものなど多数存在しており、これらの構造物は、経年劣化の進行や、施工・材料不良に起因する耐久性劣化が顕著となっているものが少なくない。これらの構造物は直ちに破壊に至る危険性は少ないものの、対策を施し構造物の安全性の確保と延命化を図る必要があり、補修・補強工法の確立が急務となってきている。

鉄筋コンクリート構造物の補修・補強工法の一つに鋼繊維を混入した超速硬セメントモルタルを乾式吹付け工法で施工する方法(以下、超速硬SF吹付け工法と呼ぶ)があり、鉄道高架橋を中心として多くの実績を上げ<sup>1)</sup>、その効果については既に報告<sup>2), 3)</sup>した。しかし、補修後長期間経過した後の効果の持続性に関して追跡調査した例は、本工法を含めてほとんど無い。

ここでは、超速硬SF吹付け工法により補修した鉄道高架橋の16年経過後の追跡調査結果について報告するとともに、改良を加えた本工法の補

修効果について報告するものである。

## 2. 調査・補修対象構造物

追跡調査の対象とした高架橋は、昭和25年に竣工され、昭和57年に本工法により補修された構造物である。補修当時は経年劣化が著しく、中性化の進行、遊離石灰、剥離、鉄筋腐食などが多く見られた。これらの変状は、構造上の欠陥となるまでには至っていないが早急な対策が必要であると判断され、超速硬SF吹付け工法により高架橋下面の大々的な補修工事を行った<sup>1)</sup>。

また、新たに補修を実施した構造物は追跡調査対象とした高架橋と同時期に施工された高架橋である。高架下のテナントの事情により未補修で残されていたが、平成10年の耐震補強工事に伴いテナントが立ち退いたことから補修可能となった部分である。この高架橋も先に補修した高架橋と同様の変状が見られ、特に中性化深さは約75~90mmと鉄筋のかぶり(35~40mm)以上に達していた。

以後本文においては、昭和57年に補修した調査対象構造物を構造物No.1、平成10年に補修した調査対象構造物を構造物No.2と呼ぶ。

\*1 (株)エステック レックス事業部(正会員)

\*2 東急建設(株)技術研究所土木研究室(正会員)

\*3 東京急行電鉄(株)交通事業部

### 3. 補修工法概要

超速硬SF吹付け工法の特徴を要約すると以下の通りである。

①吹付け工法の特徴により、梁・スラブ下面のような上向きの施工においても型枠なしで任意の厚さに施工でき、施工面と吹付け材料を密着させ、実用上十分な付着強度を得ることができる。

②初期強度発現性に優れた超速硬セメントを使用することにより、供用中の構造物、例えば列車通過中の鉄道高架橋などにおける施工も可能である。

③構造物下縁の引張り部に鋼繊維を混入したモルタルを配置することにより、施工後の構造物においては部材剛性の向上が期待できる。

超速硬SF吹付け工法の施工フローは、前回施工時も今回施工時も同様である（図-1参照）が、今回の補修工事においては以下の3点を変更した。

①今回の工事範囲が前回施工時に比べ狭いことから、コンパクトなミキサに変更した。

②硬化後の物性（曲げ強度、接着性、防水性）の改善を目的として練混ぜ水をポリマーに置き換えた。

③細骨材は表面水管理が容易で配合のバラツキが少ないプレバック砂を使用した。これにより、

表-1 使用材料および使用機器

		前回(S57)	今回(H10)
使用材料	セメント	超速硬セメント( $\rho=3.04$ )	
	鋼繊維	波型せん断品 ( $0.25 \times 0.5 \times 25\text{mm}$ )	波型せん断品 ( $0.5 \times 0.5 \times 25\text{mm}$ )
	細骨材	鬼怒川産川砂 ( $\rho=2.62$ )	鹿島産川砂(プレバック) ( $\rho=2.62$ )
	ポリマー	使用せず	7クリルマゾン( $\rho=1.00$ )
使用機器	混練機	コンクリートモビル (連続ミキ)	ショウドミキ (連続ミキ)
	繊維投入機	ファイバファイダー	
	吹付け機	リードガン	
	コンプレッサー	170HP	100HP

表-2 基層吹付けモルタル配合表

構造物 No.	補修時期	W/C (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )				
			セメント	細骨材	水	ポリマー	鋼繊維
1	S57	35	430	1830	150	-	80
2	H10	45	510	1530	-	230	80

表-3 表層吹付けモルタル配合表

構造物 No.	補修時期	W/C (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )				
			セメント	細骨材	水	ポリマー	鋼繊維
1	S57	40	430	1800	172	-	-
2	H10	45	518	1554	-	233	-

吹付け機の閉塞防止、粉塵発生量の低減、リバウンドの減少を期待した。

使用材料および使用機器を前回工事と比較して表-1に示す。また、基層吹付け工に使用したSFポリマーモルタルの配合を表-2に、表層吹付け工に使用したポリマーモルタルの配合を表-3に示す。なお、いずれのモルタルも設計基準強度は $24\text{N/mm}^2$ (材齢7日)、吹付けモルタルと旧コンクリートとの目標付着強度は $0.5\text{N/mm}^2$ (材齢7日)とした。

図-2に施工断面を、また、構造物No.2にお

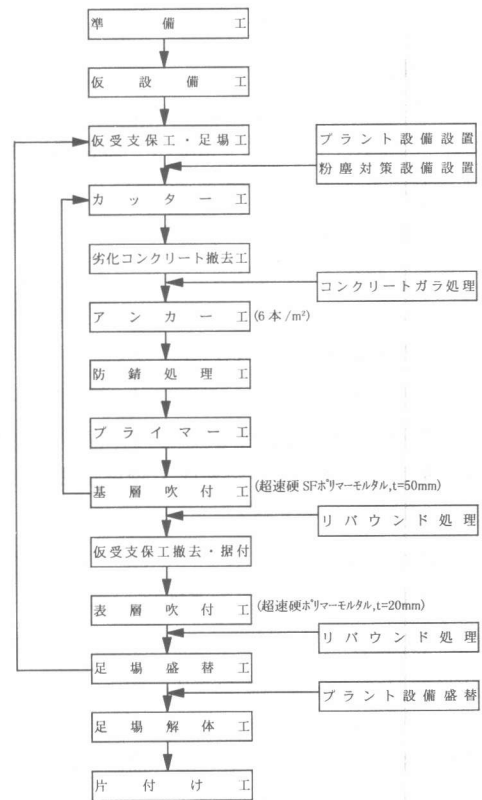


図-1 施工フロー

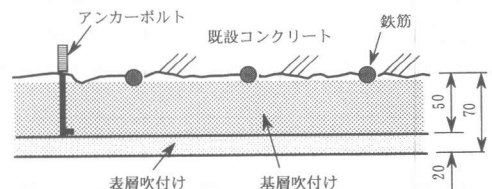


図-2 施工断面図

ける吹付けモルタルの品質管理試験結果を表-4に示す。

#### 4. 追跡調査方法

追跡調査は、補修前後の鉄筋の動的応力（ひずみ）を測定することによって行なった。鉄筋応力は縦梁・横梁・スラブのスパン中央付近の引張り鉄筋にひずみゲージを貼り付け（図-3参照、構造物No.1については前回測定時と同じ位置に設置）測定した。また、構造物No.1については簡単な目視調査および鉄筋応力測定位置における吹付けモルタルの中性化深さを測定した。

今回の動的応力測定においては、レールに輪重ゲージを貼り付け（図-4参照）、あらかじめキャリブレーションを行い校正係数を求め、車輪重量を算出できるようにした。なお、昭和57年の補修時にも動的測定を補修前後に実施しているが、車輛重量は乗車率を目視にて測定し、空車車輛重量に乗客による荷重（乗車率×定員×55kgf/人）を加えて求めている<sup>1)</sup>。なお、鉄筋の応力は、動的測定結果の出力チャートより台車通過時に鉄筋に発生する最大引張りひずみを読み取

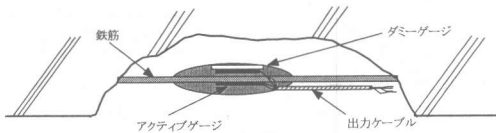


図-3 鉄筋ゲージ設置要領

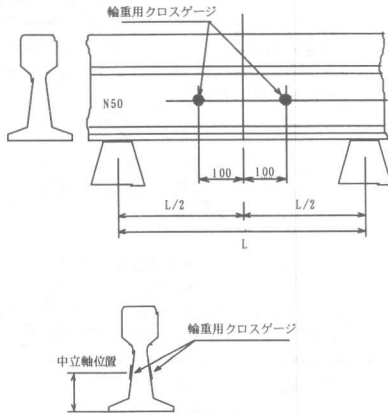


図-4 輪重ゲージ設置要領

り、測定値に鋼材の弾性係数200 (kN/mm<sup>2</sup>) を乗じて求めた。

調査対象構造物の鉄筋応力測定位置図を図-5および図-6に示す。

表-4 吹付けモルタル品質管理試験結果

試験項目	試験方法	試験対象	試験結果 (単位: N/mm <sup>2</sup> )		備考	
			1回目	平均		
圧縮強度	JCI-SF3 JIS A 1108	超速硬SF ポリアモorph	1回目	37.6	38.2	
				36.7		
				40.2		
			2回目	32.8		
				35.4		
			34.0			
付着強度	JIS A 6915	超速硬 ポリアモorph	1回目	1.10	1.60	母材+一部凝集破断
				1.90		母材+一部凝集破断
				1.80		母材+一部凝集破断
			2回目	0.38	母材破断	
				0.71	母材破断	
				0.69	母材破断	
					母材破断	

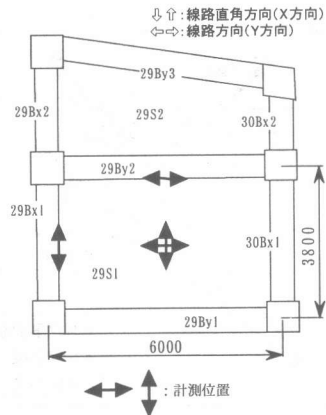


図-5 構造物No.1 鉄筋応力測定位置

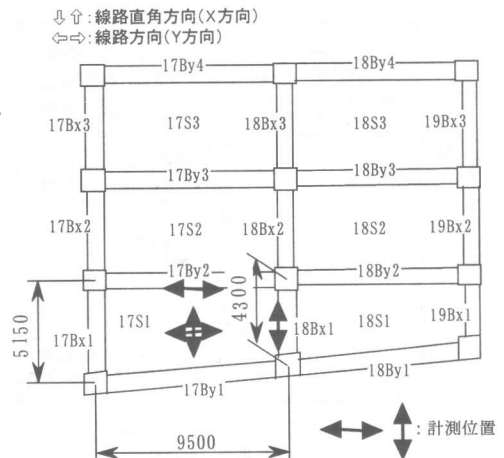


図-6 構造物No.2 鉄筋応力測定位置

## 5. 追跡調査結果

### 5.1 外観調査および中性化深さ

構造物No.1の目視調査の結果、わずかではあるが、にじみ程度の漏水が見られた。しかし、ひび割れなどの変状は、補修後2年時の追跡調査<sup>3)</sup>から大きな変化は見られなかった。

中性化深さについては10～20mm程度進行していたが、鉄筋には達しておらず鉄筋の状態は補修時の状態が保たれていた。

### 5.2 鉄筋応力の動的測定

表-5に今回の測定結果をまとめて示す。表より、台車重量の平均値はいずれの測定時においても21tf前後とほぼ同一条件の列車荷重であった。また、測定した鉄筋と軌道との位置関係にも

関連すると思われるが、総じて横梁の発生応力が大きくなっていることが分かる。

図-7は、構造物No.1の測定で得られた台車重量と各鉄筋に発生する引張り応力の関係を示し

表-5 動的測定結果のまとめ

構造物No.	備考	測定項目	測定位置	最大値	最小値	平均値
1	S57年補修 H10年測定	鉄筋応力 (N/mm <sup>2</sup> )	横梁 (X方向)	13.8	5.8	10.4
			縦梁 (Y方向)	3.7	0.3	1.6
			スラブX方向	6.8	2.7	4.6
			スラブY方向	3.0	0.6	1.6
	台車重量 (tf)	29.6	15.1	21.4		
2	H10年補修 補修前測定	鉄筋応力 (N/mm <sup>2</sup> )	横梁 (X方向)	7.7	2.3	5.1
			縦梁 (Y方向)	6.6	1.3	3.7
			スラブX方向	5.7	1.5	3.4
			スラブY方向	3.0	1.0	1.8
	台車重量 (tf)	25.8	15.4	20.8		
2	H10年補修 補修後測定	鉄筋応力 (N/mm <sup>2</sup> )	横梁 (X方向)	4.7	1.7	3.5
			縦梁 (Y方向)	2.8	0.6	1.9
			スラブX方向	1.9	0.2	1.2
			スラブY方向	1.4	0.0	0.5
	台車重量 (tf)	26.1	15.0	20.5		

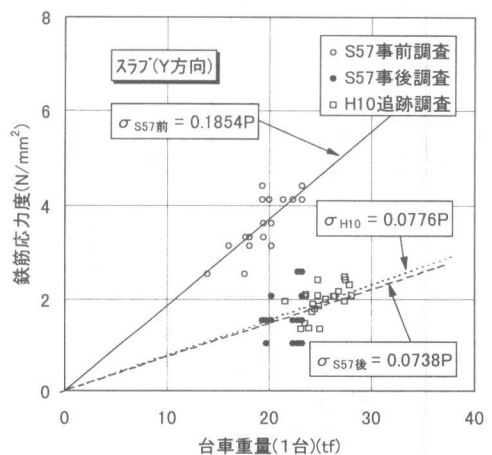
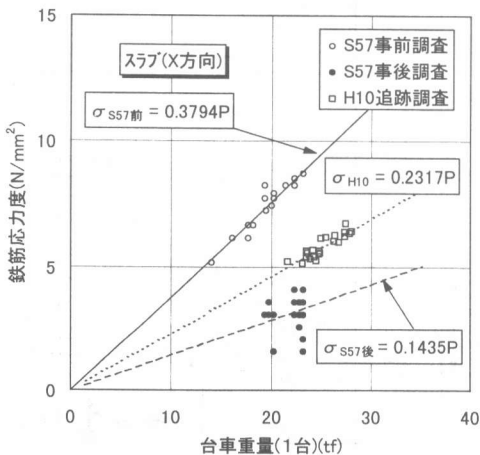
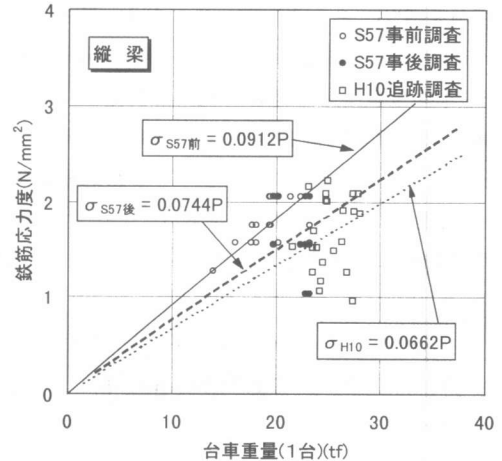
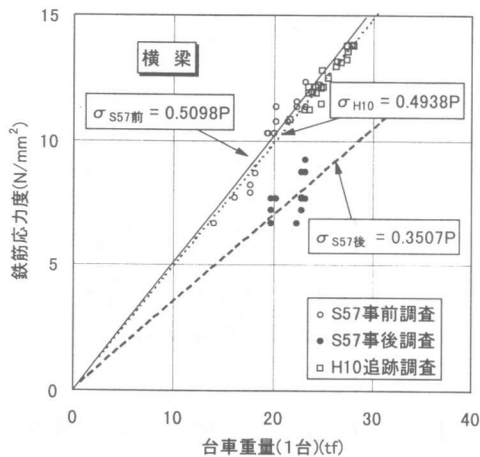


図-7 台車重量と鉄筋応力の関係 ( 構造物 No.1 )

たものである。図には前回（昭和57年）の調査結果を再整理して示すとともに台車重量を説明変数、列車通過時に各部材鉄筋に発生する応力を目的変数として原点を通る直線（ $\sigma = \alpha \times P$ ）で回帰した結果を合わせて示した。この回帰係数 $\alpha$ は、台車重量1tf当りの平均的な応力係数に相当する。なお、データに使用した台車重量は、前回調査時と同様にして乗車率より求まる車輛重量を2で除して求めた。

これらの図より以下のことがわかる。

①いずれの部材も、昭和57年の補修後の測定結果の回帰係数が、補修前の測定結果より小さくなっていることから、前回の補修により、列車荷重による鉄筋の応力負担が低減されていたことが

改めて確認できる。

②今回の測定結果から得られる縦梁およびスラブ線路(Y)方向部材の回帰係数は補修直後の回帰係数とほとんど変わっておらず、補修効果が維持されている。

③今回の測定結果から得られる横梁およびスラブ線路直角(X)方向部材の回帰係数は補修直後の回帰係数より大きくなっているが、これは、線増などにより軌道線形が変り、軌道位置がスパン中央近傍に寄ったためと思われる。

構造物No.2の測定結果で得られた台車重量と各鉄筋に発生する引張り応力の関係を図-8に示す。なお、構造物No.2の測定結果の整理においては、輪重ゲージの測定値から得られる台車重

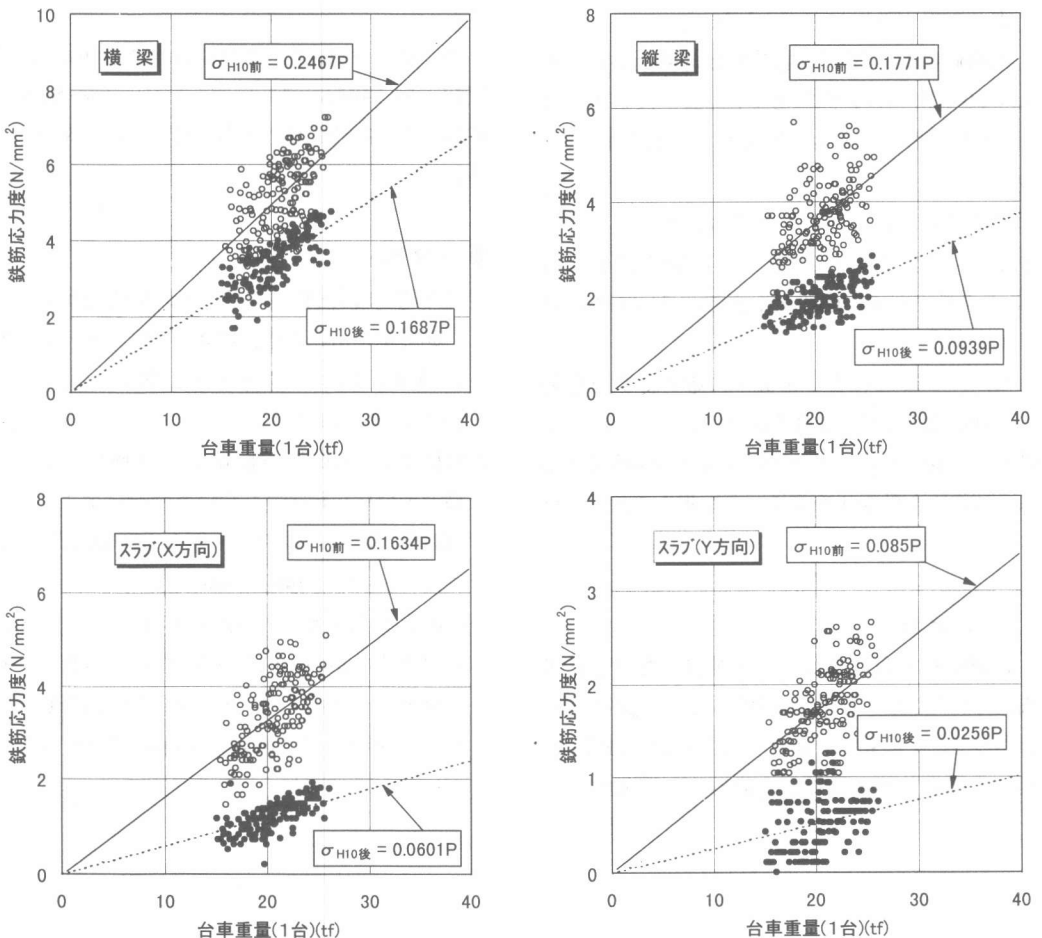


図-8 台車重量と鉄筋応力の関係（構造物No.2）

量を使用し、車輛1編成当りの輪重変動幅が大きい10列車分のデータ（n=10列車×8両×2台車=160）を用いている。

表-5 および図-8より補修後の発生応力、回帰係数とも補修前の値より小さくなっており、今回の工事においても補修効果があったことがわかる。

そこで、補修効果の指標として下式のように鉄筋の応力負担低減率を定義して求めた結果を表-6に示す。

$$\begin{aligned} & (\text{鉄筋の応力負担低減率}) = \\ & (\text{補修前の値} - \text{補修後の値}) / (\text{補修前の値}) \\ & \times 100(\%) \quad \dots (1) \end{aligned}$$

表より以下のことが認められる。

①補修による鉄筋の応力負担低減効果は、およそ20～70%の範囲にあり、低減率は応力係数から求めても平均応力から求めてもほぼ同じである。

②その効果は梁とスラブではスラブの方が大きく、スラブについては線路(Y)方向と線路直角(X)方向では方向に関係なく大きな低減効果が得られている。

なお、ここで報告したように応力係数を定期的に捕らえる手法は、軌道線形が変わらなければ鉄道構造物の新設時の性能の持続性や補修後の効果の持続性を監視する指標となり得ることがわかる。

#### 4. まとめ

超速硬SF吹付け工法により補修した鉄道高架橋構造物の鉄筋の動的応力測定による追跡調査を行なった。その結果、鉄筋の応力負担低減率は、補修直後の状態を維持していることが確かめら

表-6 応力負担低減率

項目	部材	補修前	補修後	低減率(%)
S57 応力係数	横梁 (X方向)	0.510	0.351	31.2
	縦梁 (Y方向)	0.091	0.074	18.4
	スラブX方向	0.379	0.144	62.2
	スラブY方向	0.185	0.074	60.2
H10 応力係数	横梁 (X方向)	0.247	0.169	31.6
	縦梁 (Y方向)	0.177	0.094	47.0
	スラブX方向	0.163	0.060	63.2
	スラブY方向	0.085	0.026	69.9
H10 平均応力 (N/mm <sup>2</sup> )	横梁 (X方向)	5.1	3.5	31.9
	縦梁 (Y方向)	3.7	1.9	48.0
	スラブX方向	3.4	1.2	64.5
	スラブY方向	1.8	0.5	70.0

れ、本工法は、補修直後は言うまでもなく15年以上もその効果が持続することが確かめられた。

また、応力係数を定期的に捕らえる手法は、鉄道構造物の新設時の性能の持続性や補修後の効果の持続性を監視する指標となり得ることが示された。

超速硬SF吹付け工法および本監視手法は、道路橋梁構造物などにも応用が可能と思われ、今後の構造物の維持管理の参考に役立てれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 浅野昭一・西岡哲・峰松敏和：超速硬セメントと鋼繊維を用いた吹付けコンクリートによる緊急補修工事，コンクリート工学Vol.23, No.2, pp.28-35, 1985.2
- 2) 峰松敏和・内田美生・松崎邦彦・佐藤雅男：超速硬セメントと鋼繊維を用いた吹付けモルタルの諸性状，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.437-440, 1986.6
- 3) 内田美生・峰松敏和・田中喜樹：超速硬セメントと鋼繊維を用いた吹付け工法，鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術に関するシンポジウム論文集，pp.63-70, 1989.1