

論文 鋼繊維モルタル吹付けによる鉄道高架橋補強実験

川満 逸雄*¹ 田中 宏昌*² 関 雅樹*³ 鎌田 敏郎*⁴

要旨: 鉄道高架橋の梁に対して鋼繊維補強モルタル吹付けによる補強実験を実施した。実験は、列車運行時間帯および運行していない時間帯での吹付けを行い既設コンクリートとの付着状況の比較を行った。また、比較のため鋼板接着による補強も実施した。計測は付着状況を確認するための非破壊検査・付着強度試験および実列車走行による応力・加速度計測である。実験の結果、同工法による補強効果が確認された。

キーワード: 鉄道高架橋, 鋼繊維補強モルタル, 吹付け, 補修・補強工法

1. はじめに

コンクリート構造物であるラーメン高架橋は、長期間に渡って使用されて行く必要がある。このために劣化の進行を抑制させ補修・補強等を実施する必要性が生じることが考えられる。そこで、将来の補修・補強工法の一つとして添え筋補強との組合せた鋼繊維補強モルタル（以下「鋼繊維モルタル」とする）による吹付工法について有効性を検討することとした。鋼繊維モルタルは、鋼繊維を混入していることにより、コンクリート片剥落対策にも優れた工法と位置付けられる。鋼繊維モルタル吹付け工法は、床版下面への適用については実験・実施¹⁾³⁾されたことがあるが、梁に対する適用例は報告されていない。

本研究は、梁に対する鋼繊維モルタル吹付け工法による補強の可能性を検討するために供用中の高架橋の梁部に対して実施したものである。

2. 鋼繊維モルタル吹付け工法の特徴

鋼繊維モルタル吹付け工法は以下のような特徴がある。

- 1) 部材下面に対する上向き方向での吹付け施工が可能。
- 2) 型枠の設置が不要であるか、または簡易な型枠工で施工可能。
- 3) 鋼繊維の補強効果によりコンクリートの剥落防止効果が大きい。
- 4) 耐久性に優れている。
- 5) 既存鉄筋腐食対策として、添え筋により鉄筋応力を分担することが可能。

3. 想定する補強の適用例

鋼繊維モルタルによる補強適用対象の高架橋梁の劣化状態は、コンクリートの中性化の範囲が主鉄筋位置まで到達している場合、または主鉄筋の一部に錆が発生し断面欠損している状態

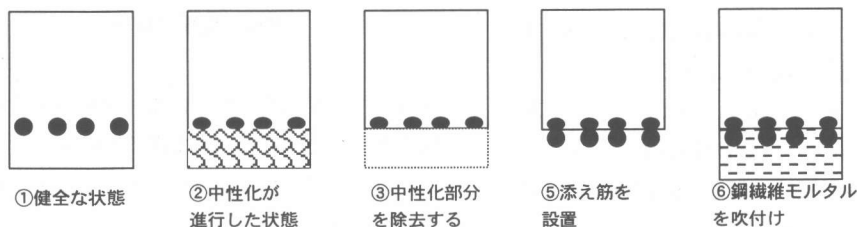


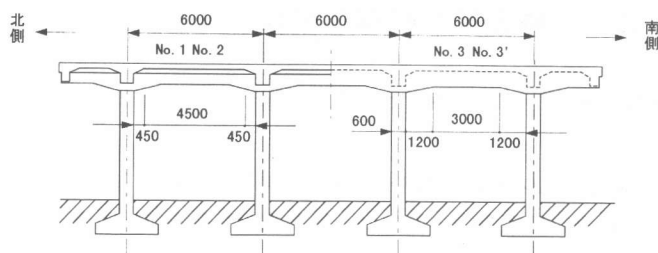
図-1 鋼繊維モルタルによる補強概念図

*1 (株) 日建設計 土木事務所 工博 (正会員)

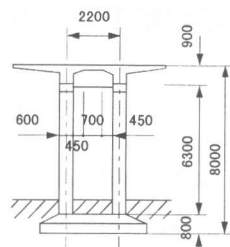
*2 東海旅客鉄道 (株)

*3 東海旅客鉄道 (株) 工修

*4 岐阜大学 工学部 土木工学科 工博 (正会員)



a) 高架橋の側面形状寸法 (軌道方向)[単位: mm]



b) 高架橋の形状寸法 (軌道直角方向)[単位: mm]

図-2 実験対象高架橋

を想定している。本研究における補強のプロセスを図-1に示す。すなわち、①健全な状態から、②中性化が進行し、鉄筋に腐食が発生した場合に、③中性化部分を除去し、④欠損した鉄筋に代わる添え筋を配置し、⑤鋼繊維モルタルを吹付ける。最後に、表層部分は鋼繊維の発錆を防ぐために鋼繊維を含まないモルタルを吹付ける。

本工法を実用化するためには、以下のような課題が残っており、これらを解決するために、実構造物に対する吹付け実験を実施した。

- 1) 列車走行の振動が吹付け施工に与える影響。
- 2) 添え筋への応力分担効果の確認。
- 3) 他工法として鋼板接着工法との比較検討。

4. 実験概要

実験は、新駅建設に伴い撤去されるスパン6mの単線3連ラーメン式高架橋に対して行った。高架橋の一般図を図-2に示す。

実験のフローを図-3に示す。実験は高架橋の3スパンのうち2スパンを対象に1スパンを鋼繊維モルタル吹付け、他方のスパンを比較のため鋼板接着を行った。実験は、補強前計測、施工時および補強後計測の3工程で実施した。

補強実験は、図-4に示すように、ラーメン高架橋の両端縦桁のうち北方に鋼繊維モルタル吹付け (No.1: 昼間吹付, No.2: 夜間吹付), 南方に鋼板接着 (2本とも昼間接着) を実施した。実験は、高架橋が営業線として供用中に実施し、列車走行の振動を受ける状態 (昼間) での吹付けと列車走行の振動を受けない状態 (夜間) の条件下での吹付けを実施した。また、供用中の高架橋であることを考慮して、はつりは主鉄筋

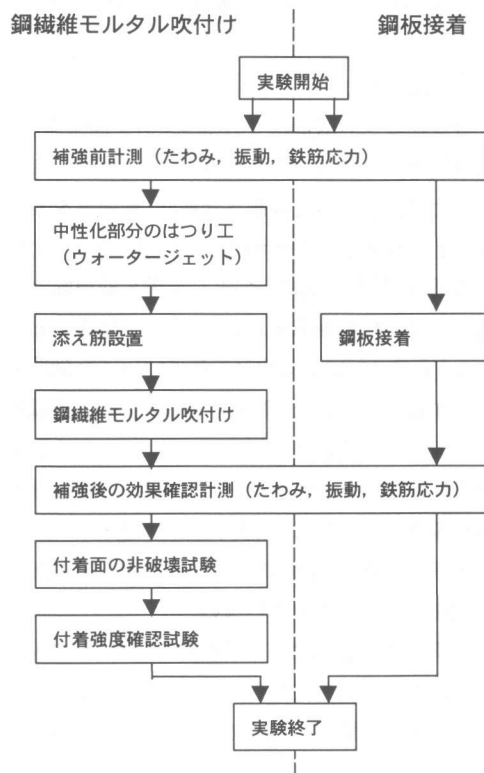


図-3 実験フロー

位置まで行わず、吹付けモルタルの付着を確保する目的で中性化深さである10mmにとどめた。はつりは、ウォータージェットロボットにより行った。

添え筋は既設鉄筋の腐食が進行していないこともあり、既設2段配筋の1段分として、D29を4本配置した。添え筋の定着は、ハンチ筋にフレア溶接する方法を採用した。なお、既設のスターラップにより添筋とハンチ筋が離れてい

る場合は、鉄筋をスパーサーとして挿入し多段のフレア溶接とした。配置図を図-5に示す。

鋼繊維モルタルは、目標厚さを10cmとして吹付けた。吹付けは梁の両側に高さ10cmの型枠をセットし、吹付け直後に余盛部分を削り取った。吹付け施工は、列車の運行時間帯（以下昼間施工と呼ぶ）と列車の運行が終了した夜間時間帯（以下夜間施工と呼ぶ）に分けて施工し、その影響を比較した。

鋼繊維モルタルの配合を表-1に示す。鋼繊維は矩形断面の直線状で長さ3cmのものを体積混入率1%で使用した。セメントは超速硬セメントを使用し、砂とセメントおよび鋼繊維を事前にミキサーで混合してエアージェットの吹付ノズル部で水と混合し吹付けた。鋼繊維モルタルの吹付け状況を写真-1に、施工後の状態を写真-2に示す。

鋼繊維モルタル吹付け工法の比較のため鋼板接着による補強も実施し、その挙動を計測した。添筋の鉄筋量とほぼ等しくなるように、鋼板厚6mmを用い、2本の梁下面に接着した。

計測は補強前後で列車走行荷重による梁の振動および鉄筋の応力を測定した。計測項目を表-2に計器配置図を図-6に示す。車両速度および列車種別は目視で確認した。計測は午前9時から午後5時までの全通過列車に対して行った。

既設コンクリートと鋼繊維モルタル間の施工面での付着状態を把握するために非破壊検査および付着強度確認試験を行った。

5. 実験結果

5.1 列車走行時の計測結果

車両長さ等の基本寸法は統一されているが、車両の重量は軽量化が進められており、列車の重量は列車種別により異なっている。そこで、鋼繊維モルタルによる補強前後に実列車走行による鉄筋応力等の計測結果を列車の列車種別ご

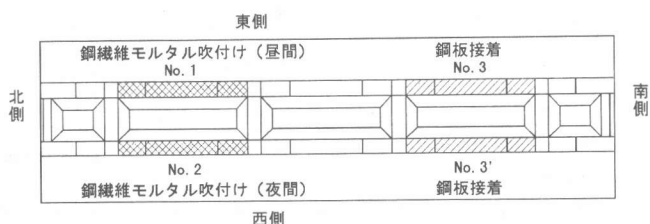


図-4 実験梁位置図（高架橋上面から見た透視図）

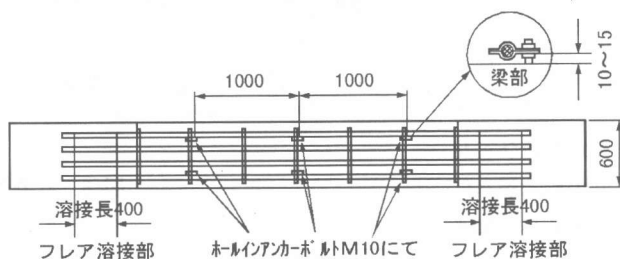


図-5 添え筋配置図

表-1 吹付けモルタルの配合

W/C (%)	S/C (%)	単位量 (kg/m³)			
		超速硬セメント C	砂 S	水 W	鋼繊維
45	3	512	1536	230	80

注) 鋼繊維体積混入率=1%



写真-1 吹付け状況図

とに整理した平均値として表-3に示す。No.3'の補強前計測は不動点の固定が不十分であったために記載していない。

補強前において鋼繊維モルタルを吹付けたスパンと鋼板接着のスパンで主鉄筋のひずみが異なっている。これは、長期間供用されてきたことによるクラック等の影響と考えられる。補強により梁のたわみ・主鉄筋のひずみ等は減少傾向がみられ、梁とモルタル部が一体として挙動しており、鋼繊維モルタル吹付けによる補強効果が認められる。振動レベルに関しても、水平方向に関しては幾分増加傾向が認められるが、特に

鉛直方向に関しては減少傾向が認められる。これは、鋼繊維モルタルの吹付けにより梁の質量が増加したことによると考えられる。

鋼繊維モルタルの吹付け施工との比較のために施工した鋼板接着工法との効果比較を行う。追加した添え筋および鋼板のひずみ増加量は、ほぼ同じであるに関わらず、鋼繊維モルタル吹付けの主鉄筋ひずみの減少量が大きくなっており、同工法が主鉄筋断面の減少した梁に対する有効な補強方法であることを示している。

5. 2 付着状態確認試験

鉄筋コンクリート部材に対する鋼繊維モルタル吹付けによる補強が成立するためには、既設コンクリートと鋼繊維モルタルとの施工境界面での付着が確保されていることが重要である。施工面の付着状態を把握するために超音波法による非破壊試験および建研式による付着強度試験を実施した。試験位置を図-7 に示す。

超音波法では、2 探触子法により施工面から

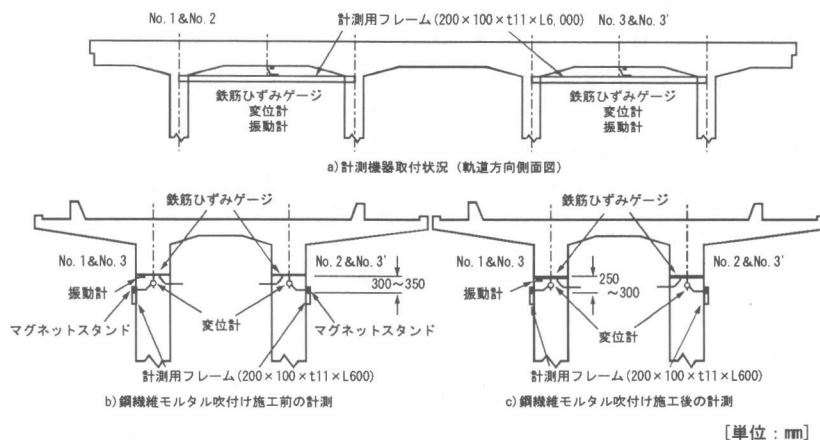


図-6 計測機器配置図

表-2 計測項目

計測項目	試験体 No.	測点数	備 考
梁中央加速度	No. 1, 2, 3, 3'	2 点	No. 1, No. 3 のみ
梁中央たわみ		4 点	
梁中央主鉄筋ひずみ		4 点	
梁中央添え筋ひずみ	No. 1, 2	2 点	補強後計測のみ
梁中央鋼板ひずみ	No. 3, 3'	2 点	補強後計測のみ
走行車両速度	共通	2 点	高架橋 2 点で目視トリガー

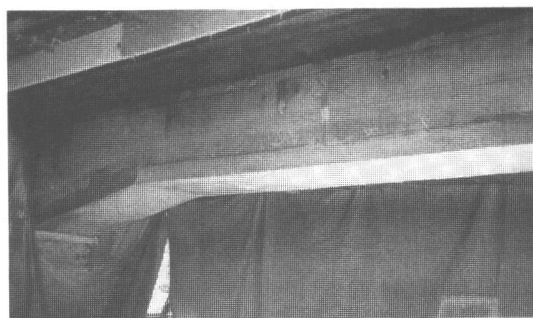


写真-2 吹付け後の状態

の反射波を受信し、その最大振幅値を用いた評価を行った。これは、鋼繊維モルタルと既設コンクリートとの音響インピーダンスの違いや空隙の存在により、施工面での超音波の反射強度が異なることを利用するものである。反射波の最大振幅値は、反射の強度を示す指標であり、音圧反射率の算定式⁴⁾によれば、施工面が完全に剥離している場合に最も大きな値を示すことがわかる。そこで本実験では、施工面において人工的に剥離を起した場合に計測された最大振幅値を基準値 100(%)として、この値に対する最

表-3 列車走行時計測結果

			A系			B系			C系		
			補強前	補強後	差分	補強前	補強後	差分	補強前	補強後	差分
計測	数		20	5	—	32	16	—	7	3	—
車両	速度	(km/h)	90	87	-3	84	91	7	95	101	6
鋼 織 維 モ ル タ ル 吹 付 け	梁 No. 1	中央変位 (mm)	0.245	0.185	-0.060	0.143	0.121	-0.022	0.168	0.152	-0.016
		主鉄筋歪 (μ)	48	27	-21	40	23	-17	41	24	-17
		添筋歪 (μ)	—	37	—	—	30	—	—	32	—
	振動 レベル (dB)	軌道方向	69.4	71.2	1.8	67.2	68.3	1.1	66.6	68.7	2.2
		軌道直角	68.8	68.1	-0.7	61.2	59.3	-1.9	61.5	61.3	-0.2
		鉛直方向	72.9	71.4	-1.5	69.6	66.6	-3.0	68.9	68.3	-0.6
鋼 板 接 着	梁 No. 2	中央変位 (mm)	0.238	0.138	-0.100	0.139	0.090	-0.049	0.156	0.102	-0.054
		主鉄筋歪 (μ)	40	25	-15	33	20	-13	34	22	-12
		添筋歪 (μ)	—	28	—	—	22	—	—	24	—
	梁 No. 3	中央変位 (mm)	0.259	0.123	-0.136	0.153	0.096	-0.057	0.168	0.102	-0.066
		主鉄筋歪 (μ)	29	25	-4	24	20	-4	24	21	-3
		鋼板歪 (μ)	—	31	—	—	26	—	—	27	—
鋼 板 接 着	梁 No. 3'	振動 レベル (dB)	70.4	71.6	1.2	67.9	68.8	0.9	67.2	69.3	2.1
		軌道直角	66.0	67.5	1.5	61.0	61.0	0.0	61.4	61.2	-0.2
		鉛直方向	72.1	71.4	-0.7	68.3	67.1	-1.2	68.3	68.8	0.5
	梁 No. 3'	中央変位 (mm)	—	0.197	—	—	0.151	—	—	0.168	—
		主鉄筋歪 (μ)	33	26	-7	27	21	-6	28	23	-5
		鋼板歪 (μ)	—	30	—	—	24	—	—	26	—

大振幅値との百分率を最大振幅値比として定義した。図-8に超音波法による測定状況図を示す。

図-7に示す調査位置での最大振幅値比を表-4に示す。なお、梁両端には、人工的に剥離欠陥を設置した場所（中央1および10）である。最大振幅値比に

関して列車走行による振動の有無による差異は、夜間施工に比べて昼間施工の方が最大振幅値比が大きい傾向を示す。また、昼間施工の方が最大振幅値比のバラツキも大きいことがわかる。

鋼繊維モルタルの付着状態を確認するため建研式による付着強度確認試験を実施した。試験はコア径68mmで梁の中心線上7個所で行った。試験結果を表-5に示す。破断位置を見ると、昼間施工ではモルタル内部で破断している場合が多く、夜間施工に比べ相対的にモルタル強度が低いことをうかがわせる。しかも、昼間施工と夜間施工を比較すると、昼間施工の方が付着強度の平均値が小さくなっている。また、付着界

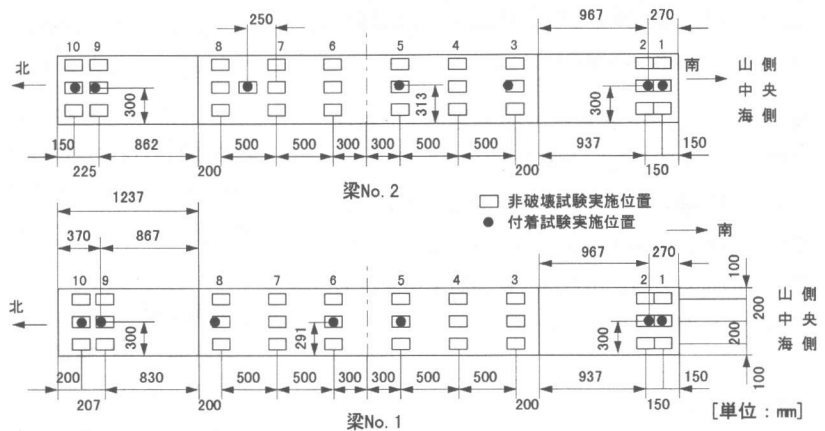


図-7 付着試験実施位置図（梁を下から見上げた図）

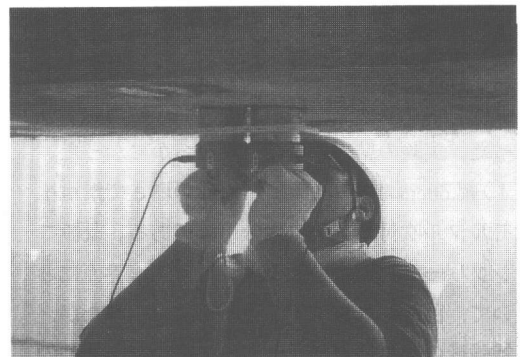


図-8 超音波法による測定状況

面で破断したのは人工欠陥の4箇所のみであった。これよりモルタル吹付け施工の付着性能が確認された。非破壊検査での最大振幅比との関

表-4 最大振幅値比

昼間施工(梁No.1)

		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
北	山側	B	A	B	A	B	A	C	A	A	A	南
	中央	C	B	C	A	C	A	A	A	A	B	
	海側	C	C	C	A	A	B	A	A	—	—	

夜間施工(梁No.2)

		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
北	山側	—	A	B	A	A	A	A	A	B	A	南
	中央	C	A	B	A	A	A	A	A	C	C	
	海側	B	A	A	B	A	A	A	A	B	B	

A:0-40% B:40-60% C:60-100%

表-5 付着試験結果

No.1(昼間施工)				No.2(夜間施工)			
位置	付着強度 (N/mm ²)	破断 位置	最大振 幅値比	位置	付着強度 (N/mm ²)	破断 位置	最大振 幅値比
1	0.00	界面	49.0*	1	0.00	界面	100.0
2	0.34	モルタル	28.5	2	1.28	既設	61.5
5	0.69	モルタル	25.0	5	0.91	既設	28.0
6	1.25	モルタル	62.7	6	1.32	既設	35.0
8	1.05	既設	25.5	8	1.18	既設	41.4
9	1.59	既設	51.3	9	1.22	治具	31.3
10	0.00	界面	73.0	10	0.00	界面	—

*参考値(既設側の表面状態不良)

係を調べると、最大振幅値が60程度以下であれば界面での欠陥は無いと考えられる。

非破壊試験および付着強度確認試験により得られた結果の傾向はおおむね一致しており、施工面での付着の観点からは、夜間施工が優れていることが明らかとなった。

6. まとめ

将来における中性化の進行等により劣化したコンクリートラーメン橋の補強工法として、施工性・経済性・効果の面から、鋼繊維モルタルの吹付け工法の有効性を探るために、供用中の鉄筋コンクリートの梁において吹付け実験を行った。実験の結果以下の事が明らかになった。

1) 幅60cmの梁下面に約10cmの厚さで鋼繊維モルタル吹付け施工は十分可能である。既設コンクリートと鋼繊維モルタルの施工境界面において、部分的な施工不良箇所も認められたが、補強後の部材の力学挙動としては十分な補強効果が確認された。

2) 既設コンクリートの鉄筋ひずみは、鋼繊維モルタルの吹付けにより応力の減少が確認され、

鋼繊維コンクリート内に設置した添え筋のひずみが発生しており、主鉄筋の応力を添え筋が分担していることが明らかとなった。

3) 列車走行による振動の、吹付け工事への影響については、振動の作用しない条件下(夜間施工)での吹付けの方が、コンクリートとモルタルとの施工境界面での付着性に対して変位等の計測結果でも効果が大きいことが確認された。このため、施工コストが大きくなっても夜間施工の必要性が示唆された。経済性については、今回は試験施工による小規模施工のため、割高となったが、社会基盤の重要度を考慮すれば十分施工可能な水準であることも確認された。

4) 超音波法による既設コンクリートとモルタルとの界面特性を判定することは可能であることが明らかとなった。

最後に、本実験の実施にあたり、岐阜大学六郷恵哲教授のご指導を頂きました。また、東海道新幹線品川駅新設工事の関係の方々にご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉野伸一, 石橋忠良, 渡部忠朋, 峰松敏和: 添え筋と吹付けモルタルによるRC床版補強工法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 9-1, pp. 305-310, 1987
- 2) 石橋忠良, 北後征雄, 吉野伸一, 田中善樹: 添え筋と吹付けモルタルによる鉄筋コンクリート床版補強工法の施工について, 鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の修復技術に関するシンポジウム論文集, pp. 89-94, 1989
- 3) 峰松敏和, 瀬野康弘, 大橋潤一, 佳田裕紀: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp. 229-234, 1999
- 4) (社) 日本非破壊検査協会 編: 新 非破壊検査便覧, 日刊工業新聞社, p. 235, 1992