

スパイラル筋巻立による高架橋脚の耐震補強工法の開発

(株)奥村組 技術開発部 正員 高橋 一成
同 上 技術研究所 正員 白石 文雄
同 上 技術研究所 正員 廣中 哲也
同 上 土木設計部 正員 中村 敏晴
(財)鉄道総合技術研究所 正員 渡辺 忠朋

1. はじめに

阪神・淡路大震災での構造物の被害を教訓に、既設鉄筋コンクリート柱の耐震補強工事が進められている。帯鉄筋量が少なく、耐震補強の必要な既設RC柱の代表的な補強工法として、鋼板巻立工法、RC巻立工法が採用されているが、これに替わる安価で施工性の良い補強工法として、スパイラル筋巻立補強工法を開発した。

これまでに、RCラーメン高架橋脚を想定し、地震時の変動軸力を考慮した載荷実験を行い、代表的な補強工法である鋼板巻立工法と、同等の補強効果があることを確認してきた。また、実規模橋脚(90cm×90cm×h=3mの2橋脚)を使つての施工実験を行い、スパイラル筋巻立補強工法の優れた施工性を実証した。これらの成果を、(財)鉄道総合技術研究所の指導のもとに、平成8年12月に同工法の設計・施工指針¹⁾にまとめ、発行した。平成9年2月には、京阪電鉄(株)・京阪本線の高架橋の補強工事に適用された。

ここでは、開発工法を紹介するとともに、交番載荷実験の結果を中心に報告する。

2. 工法の概要

(1) 工法の概要

当工法は、あらかじめフープ状に加工された高強度スパイラル筋を、ひねりを加えながら既設の柱の外面に装着、メッシュ筋を設置し、その上にモルタルを所定の厚さまで吹き付け、コテで仕上げる工法である。既設鉄筋コンクリート柱をらせん鉄筋柱とすることで、柱の曲げじん性・せん断耐力を大幅に向上させる耐震補強工法である。(図-2.1参照)

(2) 工法の特長

- ① 鋼板巻立工法と同等の補強効果が実験で確認された。
- ② 鋼板巻立工法の鋼板接続部の溶接作業、RC巻立工法のフープ筋の継手作業が不要となり、品質管理が容易になる。
- ③ らせん鉄筋に高強度鉄筋を用いることにより、通常の鉄筋に比べ鉄筋の径が細くなる。そのため、鋼板巻立工法やRC巻立工法などのように、鋼板や鉄筋等の重量物運搬・移動のための重機を必要とせず、施工性が優れている。
- ④ 吹き付けモルタルを使用するため、型枠の組立や解体が不要となり、工期が短縮される。
- ⑤ コスト的にも、施工条件によるが、鋼板巻立工法に比べ30%程度安価になる。
- ⑥ 補強後は補強前と同じ鉄筋コンクリート構造となるため、耐久性・耐火性に優れ、特別な維持管理を必要としない。

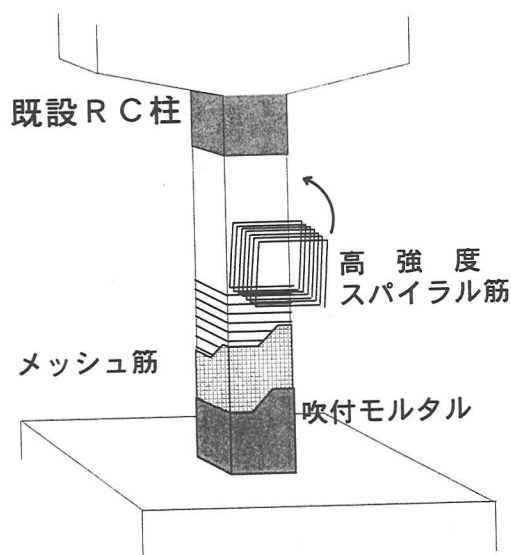


図-2.1 スパイラル筋巻立工法概念図

耐震補強、スパイラル筋、せん断補強、じん性補強

〒107 東京都港区元赤坂 1-3-10 TEL03-3585-4871 FAX03-3505-1678

3. 載荷実験

3. 1 実験方法

(1) 試験体の諸元

対象とする既設柱は「耐震設計指針（案）日本国有鉄道編 昭和 54 年」以前の基準に基づいて設計された鉄筋コンクリート高架橋の柱（断面寸法 80cm×80cm）とした。試験体は、表-3. 1 に示すように、柱の断面寸法を 5/8（断面寸法 50cm×50cm）に縮小したもので、せん断破壊が予想されるものである。

補強は上記既設柱の試験体に、高強度スパイラル筋を巻きつけた上にモルタルを吹き付けたものであり、スパイラル筋の量・軸応力度（地震時の軸力変動を考慮）をパラメータに 6 試験体とした。

なお、比較対象として帯鉄筋量を増やして曲げ破壊が予測される試験体と、

鋼板および炭素繊維シートで補強した試験体についても、実験をおこなった。図-3. 1 試験体構造図 図-3. 1 に試験体の構造図を示す。

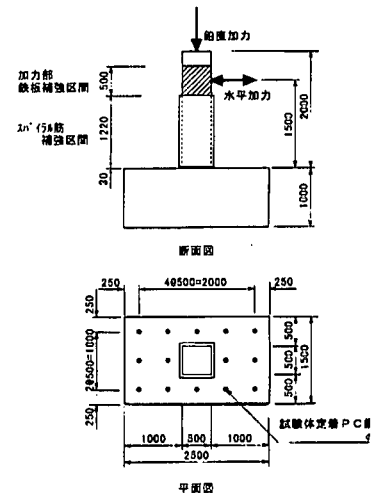


表-3.1 試験体の種類

試験体名	N-1	N-2	PL-1	CF-1	SP-1	SP-2	SP-3	SP-4	SP-5	SP-6
補強方法	補強無し (既設)	帯鉄筋 増加	鋼板巻 立	炭素織 維巻立	スパイラル筋巻立					
帯鉄筋 (帯筋 比)	φ 6 SR235 @94mm (0.12 %)	D13 SD295 @75mm (0.68 %)			欄外参 照				スパイラル筋 @31.3mm スパイラル筋比 0.33 %	
帯鉄筋 (帯筋 比)					φ 6 SR235 @94mm (0.12 %)				無し	φ 6 SR235 @94mm (0.12 %)
載 荷 軸 応 力 度 kgf/cm ²	0			圧縮載荷			+40		+10	引張載荷 -20
備 考	地震時の軸力変動 自重応力度相当				+10 kgf/cm ²					
					圧縮側応力度相当		+40 kgf/cm ²			
					引張側応力度相当		-20 kgf/cm ²			

鋼板巻立 SS400 t=3.2mm 30mm モルタル注入、炭素繊維巻立 t=0.165mm 2巻き

SP-1 スパイラル筋 @62.5mm スパイラル筋比 0.17%

(2) 載荷方法

降伏の判定は主筋のひずみが降伏ひずみに達した時点とし、降伏変位以降の載荷は、降伏変位の偶数倍の変位を変位制御で各 3 サイクルずつ載荷した。図-3. 2 参照

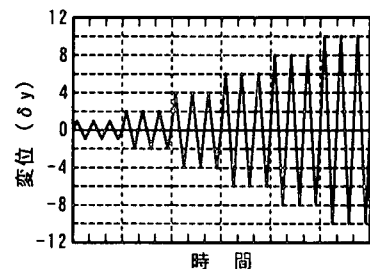


図-3. 2 載荷パターン

3. 2 実験結果

(1) 破壊性状

無補強の既設柱の試験体 (N-1) は、① 曲げひび割れの発生、② 主筋の降伏、③ せん断破壊の脆的な破壊性状を呈した。一方、補強した試験体は、いずれも、① 曲げひび割れの発生、② 主筋の降伏、③ 柱

下端圧縮側コンクリートの圧壊、はらみだしと続く、曲げ圧縮破壊のじん性に富む破壊性状を示した。補強方法の違いによる上記の破壊性状に、特筆すべき差異は見られなかった。

(2) 荷重-変位曲線

表-3.2に試験結果一覧を示す。各試験体の荷重-変位曲線を 図-3.3に示す。これらの図表より以下のことがわかる。

- ① 軸力を載荷しない場合、降伏荷重、最大荷重は、いずれの試験体もほぼ同じである。
- ② 終局変位、じん性率は、PL-1（鋼板巻立）とSP-2（スパイラル筋）で同程度で、荷重-変位曲線にも大きな差異はない。

表-3.2 荷重-変位 試験結果一覧表

試験体名	N-1	N-2	PL-1	CF-1	SP-1	SP-2	SP-3	SP-4	SP-5	SP-6
補強方法	補強無し	帯鉄筋増加	鋼板巻立	炭素繊維巻立	スパイラル筋巻立					
軸応力度 kgf/cm ²	0						圧縮載荷		引張載荷	
							+40	+10	-20	
降伏荷重 tf	29.2	30.7	31.0	29.5	32.6	30.9	42.1	33.5	34.5	25.9
降伏変位 mm	9.2	8.9	8.5	9.1	8.2	7.9	9.3	7.8	8.6	7.2
最大荷重 tf	36.0	38.0	38.0	38.9	40.0	39.0	49.4	41.7	42.6	34.3
終局変位 mm	23	75	90	120	75	90	70	72	78	105
じん性率	2.5	8.1	10.0	13.2	7.9	9.8	7.6	9.2	9.1	14.6

降伏荷重：主鉄筋のひずみが降伏ひずみに達した時点の水平荷重 降伏変位：降伏荷重時の変位
 終局変位：荷重-変位曲線の包絡線において、荷重が降伏荷重を下回らない最大の変位
 じん性率：終局変位を降伏変位で除した値

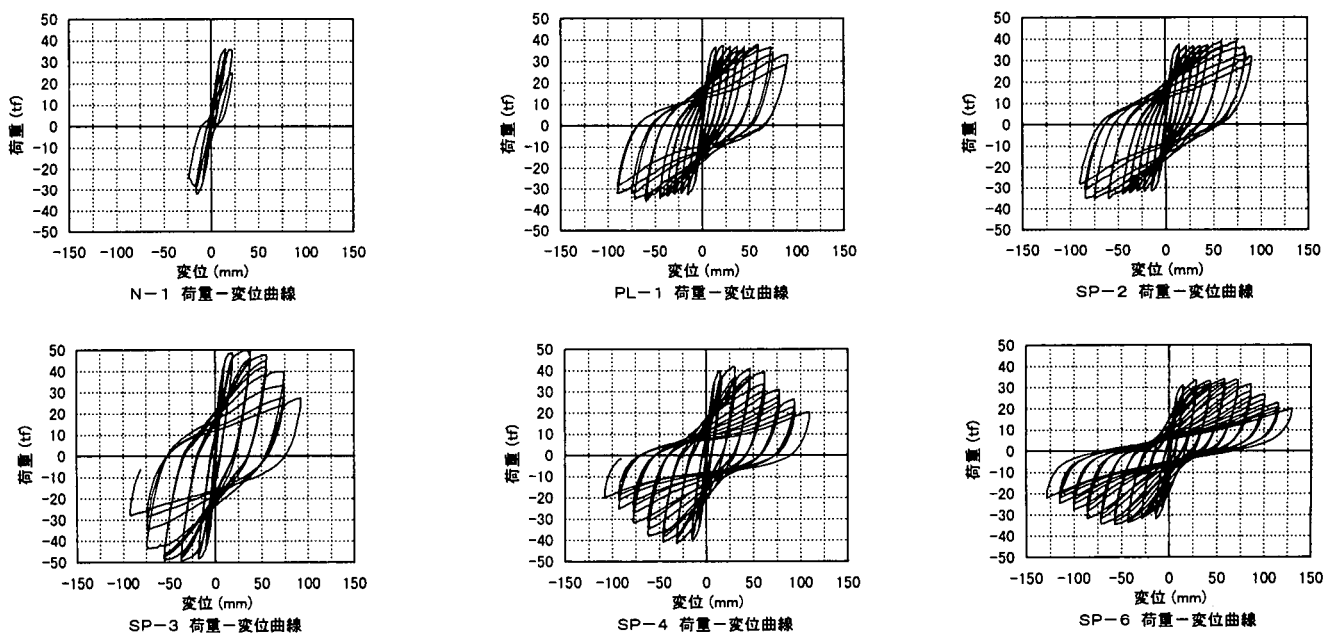


図-3.3 荷重-変位曲線

軸力を載荷したもの（試験体名 SP-2、SP-3、SP-4、SP-6）の比較より

③ 圧縮軸力が大きくなると降伏荷重・降伏変位・最大荷重は増加し、終局変位・じん性率は減少する傾向が認められる。

(3) 主鉄筋のひずみ

主鉄筋の鉛直方向のひずみ分布を 図-3.4 に示す。

各試験体ともに降伏変位 δ_y を超える载荷で柱下端部の主鉄筋は降伏領域に入り、変位の増加とともに降伏領域が下方・上方に拡大していく。拡大範囲は上方に 50~75cm 下方に 25cm 程度であることがわかる。スパイラル補強した試験体は、**図-3.4 主筋ひずみ分布 (SP-4)** 破壊にいたるまで 1.5D (75cm) より上方では鉄筋は降伏せず、塑性ヒンジ領域はこの範囲内であった。

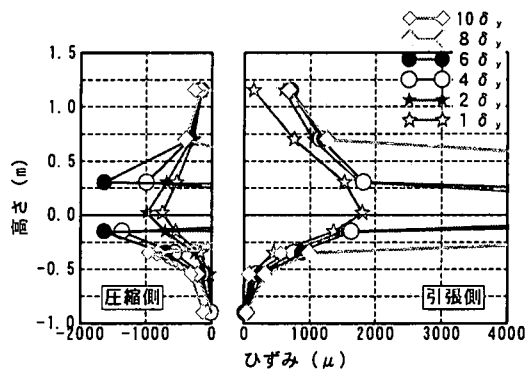


図-3.4 主筋ひずみ分布 (SP-4)

(4) 帯鉄筋、スパイラル筋のひずみ

帯鉄筋、スパイラル筋のひずみ分布を 図-3.5 に示す。

材料試験による帯鉄筋の降伏ひずみは 1810 μ 、スパイラル筋の降伏ひずみは 6540 μ である。帯鉄筋の降伏は 6~8 δ_y で生じ、同時にスパイラル筋のひずみが急増するが、終局状態でもスパイラル筋は降伏しなかった。せん断補強筋量が増えたことにより、最終的な破壊モードが、曲げ降伏後の曲げ破壊になったことを示している。

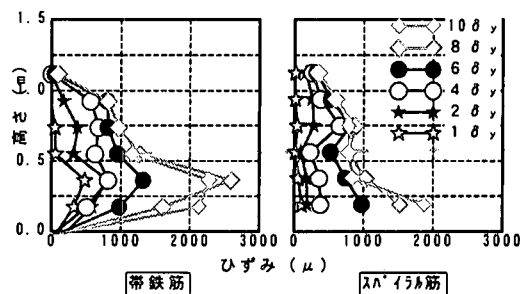


図-3.5 帯鉄筋・スパイラル筋ひずみ分布 (SP-4)

3.3 耐力評価

曲げ耐力は以下の評価式と実験結果を比較した。

- ・コンクリート示方書³⁾
- ・鉄道構造物標準²⁾
- ・復旧仕様⁴⁾

コンクリートの応力ひずみ関係は、コンクリート示方書、構造物標準では、降伏ひずみを 2000 μ 、終局ひずみを 3500 μ としている。復旧仕様では帯鉄筋の拘束筋の効果の評価して、降伏ひずみ、終局ひずみ、および応力ひずみ関係を算定している。

曲げ耐力の比較を 図-3.6 に示す。計算式間での差異は小さく、降伏・終局曲げモーメントともに実験結果とおおむね一致している。

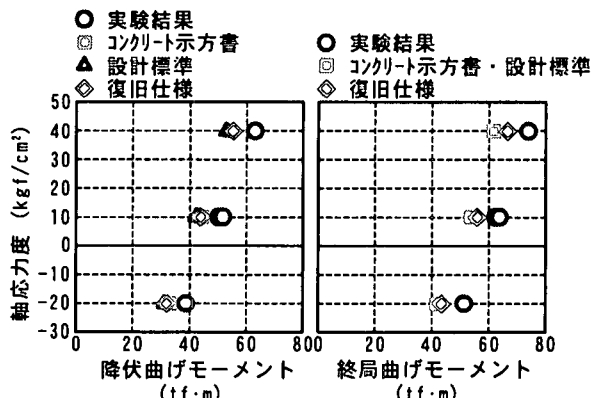


図-3.6 曲げ耐力の評価

3.4 じん性評価

・じん性率の評価

スパイラル筋により補強された部材のじん性率は、構造的に鉄筋コンクリート部材とみなせることから、既往の鉄筋コンクリート部材のじん性率算定式で評価できるものと考えられる。そこで、「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物 平成4年 付属資料10」(RC標準式と呼ぶ)により実験値の評価を試みた。ただし、スパイラル筋による補強が施されていることから、以下の条件・方法でじん性率を算定した。

- 1) 試験体の断面寸法は補強前の寸法とする。
- 2) スパイラル筋の受け持つせん断耐力は、帯鉄筋と同じトラス理論から求まる算定式を用い、算定した。ただし、算定式に用いるスパイラル筋の降伏強度の上限を 7500kgf/cm² とした。これは、高強度鉄筋で

補強した部材のせん断耐力は、せん断補強筋の降伏強度に線形に比例して増大せず、上限があるとされている。そこで、終局強度型耐震設計指針⁵⁾から、せん断補強筋の降伏強度に上限値を設け、上限値を $25 \cdot \sigma_b$ (kgf/cm^2) = 7500kgf/cm^2 と (σ_b : コンクリートの圧縮強度) とした。

図-3.7 に軸圧縮応力度が $0 \sim 10 \text{kgf/cm}^2$ と低い試験体について、実験結果とRC標準式のじん性率の比較を示す。図より計算じん性率は実験結果を比較的精度よく、安全側に評価していることがわかる。

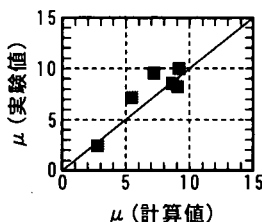


図-3.7
じん性率の評価

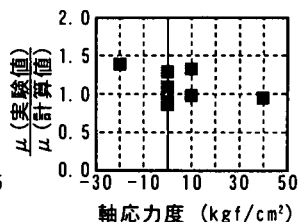


図-3.8
軸応力度の影響

・軸力の影響

図-3.8は縦軸にじん性率の実験値と計算値の比を、横軸に軸圧縮応力度をとり軸圧縮応力度の影響を見たものである。図より、じん性率が軸力の影響を受け、実験値と計算値の比は、引張軸力下では大きく、高圧縮軸力下では小さくなるのがわかる。じん性の評価には軸力の影響を考慮する必要があることがわかる。

図-3.9は「コンクリート標準示方書 耐震設計編 平8年 土木学会」(土木学会式と呼ぶ)を参考に軸力の影響について検討したものである。横軸に釣合い破壊時の軸圧縮応力度に対する作用圧縮応力度の比 (σ_0/σ_b) を、縦軸にじん性率の実験値と計算値の比をとった場合の結果を示す。軸力の影響がほぼ直線で近似できる。

軸圧縮応力度が0の場合、RC標準式により算定されるじん性率になるとし、釣合い破壊時の軸応力度が作用する場合じん性率が1になると仮定し、直線的にじん性率を低減させれば次式となる。

$$\mu = \mu_0 + (1 - \mu_0) \cdot (\sigma_0 / \sigma_b)$$

μ_0 : RC標準式で算定される補強試験体のじん性率

μ : 軸力の影響を考慮したじん性率

σ_0 : 作用軸圧縮応力度

σ_b : 釣合い破壊時の軸圧縮応力度

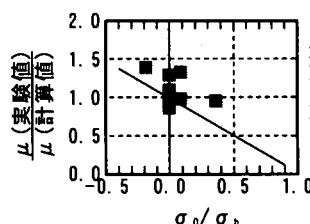


図-3.9
じん性率と軸力

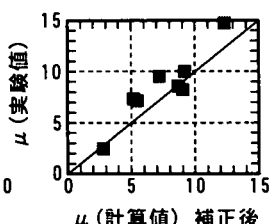


図-3.10
軸応力度の補正

図-3.10に上式による軸力補正後の計算値と実験値の比較を示す。高圧縮軸力下や引張軸力下の結果も概ね評価できると思われる。

以上より、低圧縮軸力下では、RC標準式によりじん性率を比較的精度良く、安全側に評価することができる。ただし、高圧縮軸力下や引張軸力下の部材に対しては、軸力に対する補正が必要であり、実験結果に対しては土木学会の方法で評価することが可能であった。

3.5 実験結果のまとめ

- ① せん断破壊し変形性能が小さい既設鉄筋コンクリート柱をスパイラル筋巻立により補強した試験体はいずれも、1) 曲げひび割れの発生、2) 主筋の降伏、3) 柱下端圧縮側コンクリートの圧壊、はらみだしと続く、曲げ圧縮破壊のじん性に富む破壊性状を示し、柱の変形性能が大きく向上した。
- ② スパイラル筋巻立により補強した試験体は、スパイラル筋量に依存はするが、鋼板巻立により補強した試験体と同等の変形性能を有しており、鋼板巻立と同等の補強効果を得ることが可能である。
- ③ スパイラル筋巻立により補強した試験体の変形性能は軸応力度に依存する。圧縮軸力が大きくなると降伏荷重・降伏変位・最大荷重は増加し、終局変位・じん性率は減少する傾向が認められた。

- ④ スパイラル筋巻立により補強した試験体の主鉄筋が降伏する範囲は、柱下端から柱幅の1.5倍以内である。
- ⑤ スパイラル筋巻立により補強した試験体の既設部分の帯鉄筋はいずれの試験体でも降伏したが、スパイラル筋のひずみは最大2500 μ 程度であり降伏ひずみの1/2以下であった。
- ⑥ スパイラル筋巻立により補強した試験体の曲げ耐力は、既往の指針による算定式で比較的精度よく、安全側に評価することができる。
- ⑦ スパイラル筋巻立により補強した試験体のじん性率は、低圧縮軸力下ではRC標準式により比較的精度良く安全側に評価することができる。ただし、高圧縮軸力下や引張軸力下では、軸力に対する補正が必要であり、実験結果に対しては土木学会式で評価することが可能であった。

4. 施工実験

実規模の橋脚(90cm×90cm×h=3m、2橋脚)を作成し、スパイラル筋巻立工法の施工方法の検討、および提案施工法を実証した。以下、実験で得られた施工法を手順に従い概説する。

①既設コンクリートの表面処理工

既設コンクリートとあらたに吹付けるモルタルとの付着を良くするため、コンクリート表面の汚れ、異物等を除去する。

②スパイラル筋組立工

地上あるいは堅固な作業足場のあるところで、人力で装着する。(写真-4.1参照)スパイラル筋を吊り上げ、最上部より所定の間隔で配置する。

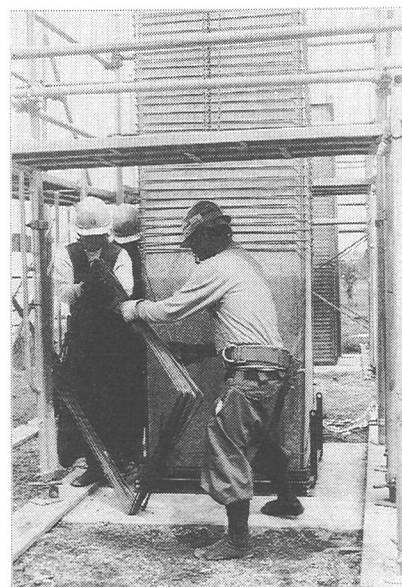


写真-4.1 スパイラル筋巻立状況

表-4.1 スパイラル筋の引張強度

降伏点 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	伸び(%)
13 000 以上	14 500 以上	7 以上

表-4.2 スパイラル筋の記号、呼び名および断面形状

呼び名	公称径(mm)	基本径(mm)	公称断面積(mm ²)	単位質量(kgf/m)
6.4	6.4	6.25	30	0.235
7.1	7.1	7.25	40	0.315
9.0	9.0	9.15	64	0.500
10.7	10.7	11.10	90	0.710
12.6	12.6	13.10	125	0.980

③剥落防止用アンカー・メッシュ筋取り付け工

吹付けモルタルの剥落を防止するアンカーと、硬化後の表面のひびわれの防止のためのメッシュ筋を取付ける。

④吹付け定規工

吹付けモルタル厚さ管理のため、柱の隅角部に吹付け定規を設置する。

⑤モルタル製造工

所定の配合の材料をモルタルミキサーを使用して、均一に練り混ぜる。

⑥モルタル吹付け工

モルタルは、ポンプで圧送し、コンプレッサーの空気圧で吹き付ける。(写真-4.2参照)吹付けは2層に分けて行い、2層吹付け後金ゴテ仕上げを行う。

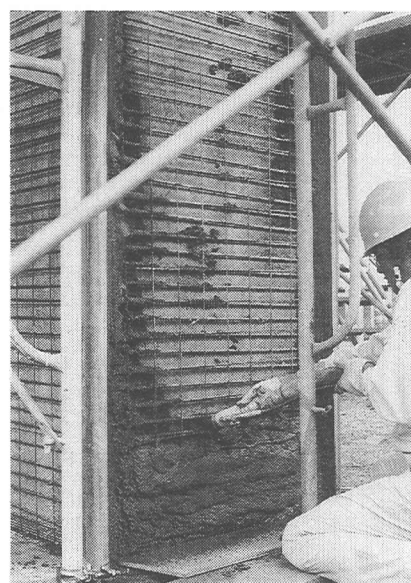


写真-4.2 モルタル吹付状況

5. 吹付モルタルの開発

吹付モルタルは、以下の点を考慮し、開発を行った。

- 既設コンクリートと接着性が良いこと(10kgf/cm²以上)
- 乾燥収縮が小さいこと(0.06%以下)
- 圧縮強度 500kgf/cm²以上
- 吹付け後のだれ落ちが少ないこと
- ポンプで圧送が可能なこと
- 左官仕上げが容易であること

その結果、吹付モルタルは、膨張材を用いたセメント系モルタルとした。基本配合例を表-5.1に、試験体に用いた吹付モルタルの試験結果を表-5.2、表-5.3に示す。

表-5.1 基本配合例

W/B	EA/B	EA/B	EA/B
3.5~4.5	2.0~3.0	0~6	0~2.0

W:単位水量

S:単位細骨材量

EA:膨張材量

Sp:高性能AE減水剤

B:単位硬化材量=普通セメント+膨張材+シリカフェム,フライアッシュ,ポリマー等

表-5.2 フレッシュ時の性状

空気量 (%)	比重	スランプ* ¹ (cm)	テーブルフロー* ² (cm)
7.8%	2.2	7.0cm	13.5cm

*1: JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」による。

*2: JIS R 5201「セメントの物理試験方法」(試験用機械器具及びフロー値の測り方)による。

表-5.3 硬化後の物性

(材令:28日)

圧縮強度 kgf/cm ²	静弾性係数 ×10 ⁵ kgf/cm ²	接着強度* ¹ kgf/cm ²	長さ変化 ×10 ⁻⁶
733	2.9	18.4	537

*1: JIS A 1101「建設省建築研究所式の接着力試験」による。

6. 実工事への適用

当開発工法の最初の適用工事として、京阪電鉄の高架橋補強工事に採用された。(写真-6.1参照)工事概要は以下の通りである。

工事名称:京阪本線守口第8高架橋耐震補強工事

発注者：京阪電気鉄道株

工事場所：守口市橋波

工 期：平成9年2月～3月

工事内容：柱本数8本

□90×90cm, □90×100cm

h=4.5～6.6m

スパイラル筋φ 12.9mm@39mm

φ 10.7mm@50mm

モルタル吹付厚 t=55mm



写真-6.1 スパイラル筋巻立法実施状況

7. あとがき

スパイラル筋巻立法が、鋼板巻立法と同程度の優れた補強効果を有することを、載荷実験により確認した。実規模橋脚による施工実験を行い、施工法を提案した。

これら成果を、(財)鉄道総合技術研究所の指導により、当工法の設計・施工指針としてまとめた。京阪電鉄株の高架橋補強工事に適用され、スパイラル筋巻立法が、経済性・施工性に優れた補強工法であることが実証できた。

今後、施工実績を積み、スパイラル筋巻立法の信頼性をさらに高めるとともに、施工法の合理化を図っていく予定である。

最後に、スパイラル筋巻立法の開発に際し、ご指導頂いた埼玉大学教授町田篤彦先生、(財)鉄道総合技術研究所の方々、補強工事の機会を与えて頂いた京阪電鉄株の関係各位に、ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- 1)(財)鉄道総合技術研究所、「既存鉄道コンクリート 高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針—スパイラル筋巻立法編—」、平成8年12月
- 2)(財)鉄道総合技術研究所、「鉄道構造物設計標準・同解説—コンクリート構造物—」、平成4年10月
- 3)(社)土木学会、「コンクリート標準示方書 設計編 平成8年」
- 4)(社)日本道路協会、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様および復旧仕様の解説(案) 平成7年」
- 5)(社)日本建築学会、「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説 1988」