

# アラミド繊維シートを用いた橋脚の耐震補強

○三井建設（株）東京土木支店  
日本道路公団東京第一建設局千葉工事事務所  
” 構造技術課  
三井建設（株）土木設計部

曾根 洋平  
瓦川 善三  
和田 宣史  
正会員 加島 清一郎

## 1. はじめに

アラミド繊維は、1960年代に開発された芳香族ポリアミド繊維ナイロンに属する繊維であり、高強度で耐衝撃性、耐蝕性に優れ、軽量かつ柔軟な非電導性の新素材である。アラミド繊維シート補強工法とは、このアラミド繊維をシート状にし、エポキシ樹脂を含浸させながらコンクリート構造物に貼付け、繊維強化プラスチック（FRP）として、橋脚、高架橋柱の耐震補強を行うものである。このアラミド繊維シート補強工法が、高速道路・RC橋脚の耐震補強（主鉄筋の段落とし補強）に試験的に採用されました。

本稿では、アラミド繊維シートの材料特性を述べるとともに、試験施工に先立ち実施した各種確認試験及び試験施工事例について報告するものである。

## 2. アラミド繊維シート補強工法

### 2. 1 アラミド繊維シート補強工法の概要

アラミド繊維シート補強工法は、その補強の目的に応じて、①せん断補強、②じん性補強、③段落とし部の曲げ補強 に分けられる。

せん断補強及びじん性補強は、アラミド繊維シートを部材軸直角方向に巻き付ける形で貼付け、帯鉄筋の代替としてせん断耐力を向上させるとともに、拘束効果により変形性能の向上を図り、じん性補強するものである。

また、段落とし部の曲げ補強は、部材軸方向にシートを貼付け、引張鉄筋の代替として曲げ耐力の向上を図り補強効果を生じさせるものである。

### 2. 2 アラミド繊維シート補強工法の特徴

阪神大震災以後、橋脚の耐震補強が数多く行われ、主な耐震補強工法としては、表-1に示すものがある。これらの補強工法と比べて、アラミド繊維シート補強工法は、次のような特徴を有している。

#### 1) 高強度

- ・鋼材の7～10倍の引張強度を持っている。

#### 2) 軽量

- ・比重が鋼材の1/5と軽量である。

#### 3) 耐久性

- ・腐食、劣化に対して安定している。
- ・耐疲労特性にも優れている。

#### 4) 施工性

- ・軽量であり作業性に優れるとともに、狭いスペースでも施工可能である。
- ・熟練を必要とする作業がない。
- ・隅角部の特別な処理が不要である。
- ・火気を使用せず、施工時の安全性に優れる。
- ・柔軟性があり扱い易く、樹脂の含浸性がよく、気泡ができにくい。

表-1 代表的な耐震補強工法

1. 鉄筋コンクリート巻立て補強工法
2. 鋼板巻立て補強工法
3. 炭素繊維シート補強工法
4. アラミド繊維シート補強工法

キーワード：アラミド繊維、耐震補強、段落とし部曲げ補強

連絡先：長野県北佐久郡軽井沢町大字発地 1827 三井建設（株）軽井沢発地工事事務所

TEL 0267-48-2335 FAX 0267-48-2306

5) 経済性

- ・目的に応じて補強量の細かい増減が可能である。
- ・工種が少なく工期短縮が図れる。

6) 電気絶縁性

- ・電気を通さず、安全性に優れる。

表-2 アラミド繊維シートの特長

	アラミド1	アラミド2
引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	21000	24000
引張弾性率 (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.2x10 <sup>6</sup>	0.8x10 <sup>6</sup>
破断伸度 (%)	1.8	3.0

3. アラミド繊維シートの特長

3.1 アラミド繊維シートの強度特性

アラミド繊維は、引張強度および引張弾性率の違いにより大きく分類され、高弾性タイプ(HM:アラミド1)のものと、高強度タイプ(HT:アラミド2)に規定されている。

これらの繊維により作られた樹脂硬化シートの強度特性を表-2に示す。なお、試験方法は JIS K 7073 「炭素繊維強化プラスチックの試験方法」に準拠し、表内の引張強度は材料試験時の [破断強度の平均値 - 3σ (標準偏差)] としたものであり、引張弾性率は材料試験時の平均値を示したものである。

さらに図-1にはアラミド繊維などの応力-ひずみ関係を示す。図に示すように、アラミド繊維は鋼材のような降伏点がなく、破断強度に至るまでほぼ直線上にある弾性材料である。

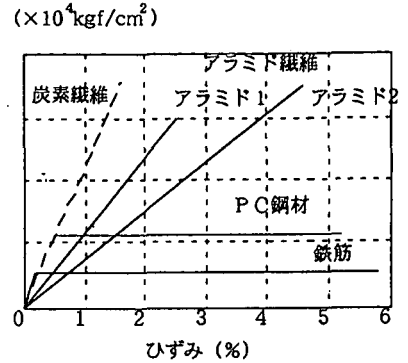


図-1 応力-ひずみ関係

3.2 アラミド繊維シートの曲げ補強効果

今回の補強目的は主鉄筋段落とし部の曲げ補強であり、橋脚表面にアラミド繊維シートを貼付けることにより、部材の曲げ耐力向上を期待している。この曲げ補強効果を確認するため、RCはりの曲げ試験を行った。試験体は、幅 15cm, 高さ 15cm, 長さ 140cm のはりとし、シートの目付量, 貼付け方法, 表面処理方法を変え、載荷試験を行った。試験体種別を表-3に、試験に用いた材料特性を表-4に示す。

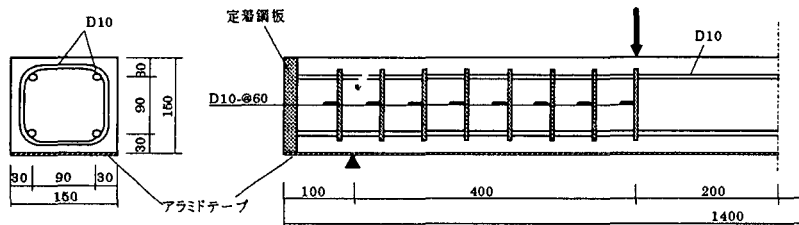


図-2 試験体形状

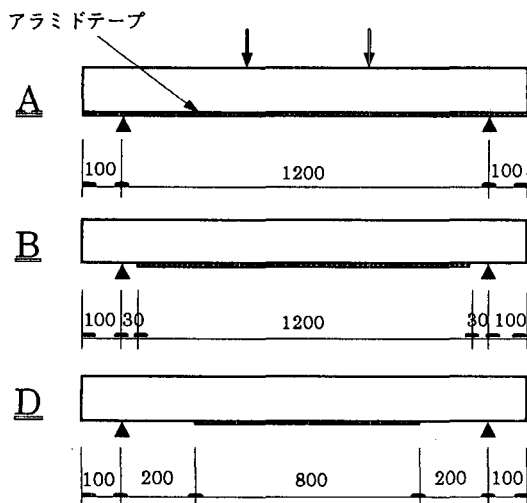


図-3 アラミド繊維シートの貼付け方法

表-3 試験体種別

試験体名	貼り付け方法	目付量(g/m <sup>2</sup> )	表面処理
無補強	-	-	-
200Ac	A	200	ブラスト処理
200Bc	B	200	ブラスト処理
150Bc	B	150	ブラスト処理
150Dc	D	150	ブラスト処理
150Dn	D	150	サンダー処理

表-4 材料特性

	コンクリート	鉄筋(SD295)	アラミド
強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	464	3651	24820
弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	3.3x10 <sup>5</sup>	2.1x10 <sup>6</sup>	1.29x10 <sup>6</sup>

荷重とはり中央での変位の関係を図-4に示す。無補強試験体の鉄筋が降伏した後、アラミド繊維シートの剛性により降伏荷重が増加するとともに、最大荷重も増加する。この図において、200Ac, 200Bc, 150Bcはシートが引張破断したものであり、150Dc, 150Dnはシートが付着切れしたものである。

各試験体の曲げ耐力の実験値と、各材料の実際の強度を用いて計算した曲げ耐力の値を表-5に示す。この結果、実験値が計算値をいずれのケースにおいても上回っており、計算上の曲げ補強効果が得られていることがわかった。

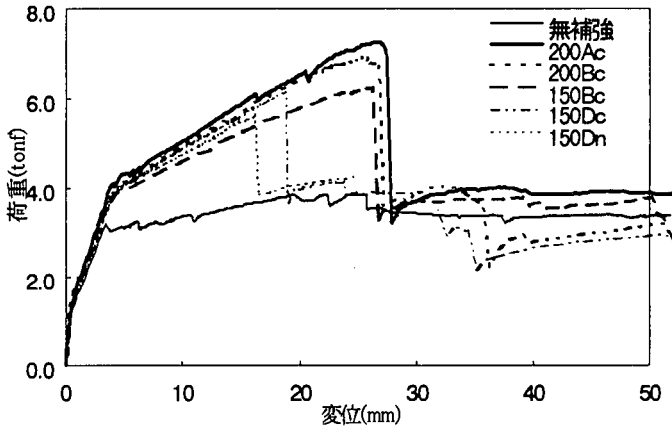


図-4 荷重-変位曲線

表-5 実験結果一覧

最大荷重時			
試験体名	実験値(tf)	計算値(tf)	有効率
無補強	3.9	3.5	-
200Ac	7.3	6.7	1.21
200Bc	6.9	6.9	1.00
150Bc	6.2	6.1	1.05

### 3.3 アラミド繊維シートの付着性状

曲げ補強を行った際の補強効果は、コンクリート表面に貼り付けたアラミド繊維シートが、曲げモーメントによる引張力を分担することによって生じるものである。この曲げ補強効果を得るためには、アラミド繊維シートとコンクリートとの間に十分な付着力が確保されていなければならない。そこで、アラミド繊維シートとコンクリートとの付着性状を確認するため、RCはりの曲げ試験を行った。

試験体は、幅 40cm、高さ 80cm、長さ 600cm のはりとし、使用したアラミド繊維はアラミド-1 (AK-60) およびアラミド-2 (AT-60) で、積層数(補強量)、フープ方向アラミド繊維シートの有無(付着補強)を変え、載荷試験を行った。試験体一覧を表-6に示す。

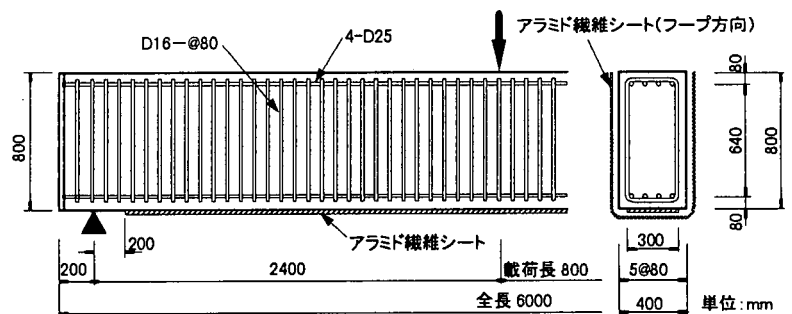


表-6 試験体一覧

図-5 試験体形状

試験体名	使用シート	曲げ補強シート	付着補強シート	最大荷重(tonf)		シートの破壊形式	平均付着強度 kgf/cm <sup>2</sup>
				実験値	計算値		
無補強	-	-	-	40.9 <sup>*1</sup>	38.5	-	-
K-3	AK-60	3層	なし	56.2	79.1	付着切れ	4.6
K-3F	AK-60	3層	1層	79.3	79.3	破断	7.7
T-3F	AT-60	3層	1層	66.7	67.3	*2	4.5
K-5F	AK-60	5層	1層	88.2	101.8	付着切れ	12.9

\*1: 計算終局変位時の荷重、\*2: 梁圧縮縁破壊

アラミド繊維シートに貼り付けたひずみゲージの値を用いて求めた平均付着強度と荷重との関係を図-6に示す。この図より、平均付着強度は主鉄筋の降伏後著しく増加する。シートが付着切れする場合の平均付着強度は、曲げ補強シートのみ K-3 で 4.6 kgf/cm<sup>2</sup>、付着補強した K-5F で 12.9 kgf/cm<sup>2</sup> となる。また、既往の曲げ補強試験の結果も併せて、アラミド繊維シート積層数と平均付着強度の関係を図-7に示す。

これらの結果より、アラミド繊維シートとコンクリートとの平均付着強度として、 $\tau_{AF} = 4.5 \text{ kgf/cm}^2$ が確保できることがわかった。

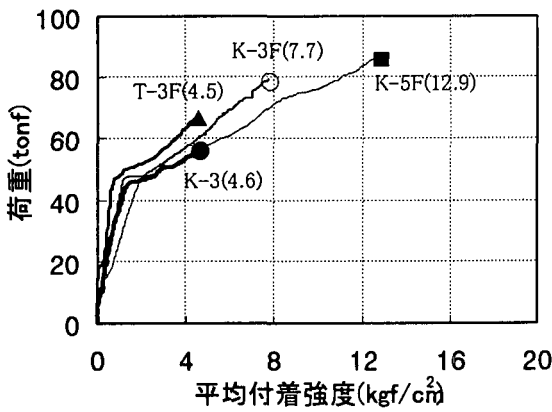


図-6 平均付着強度

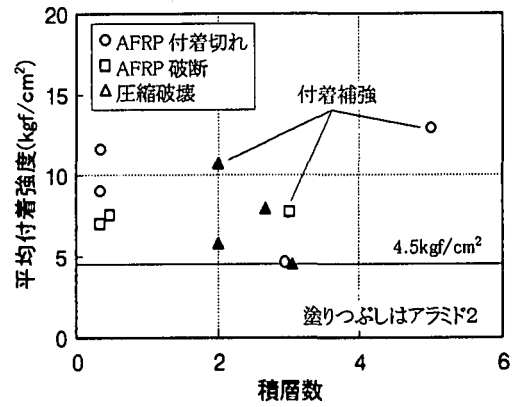


図-7 積層数-平均付着強度の関係

### 3. 4 アラミド繊維シートの曲げ内半径の影響

アラミド繊維シートを橋脚表面に巻き付ける場合、隅角部では局部的な屈折による強度低下が懸念される。このため、隅角部の曲げ内（面取り）半径をパラメータとした引張強度試験を行った。

図-8に試験装置を示す。油圧ジャッキの一方に隅角部を模した治具を、もう一方に半円形の治具を配し、両治具間に巻いたアラミド繊維シートに引張力を与えるものである。隅角部の形状は、図-8に示すように面取り半径を0,10,20,30mmとしたもの（90°モデル）と直線的に角を落としたもの（135°モデル）とした。

試験結果を図-9、表-7に示す。この結果より90°モデルの場合は面取り半径が10mm以上であれば隅角部での破断が生じないこと、135°モデルでは面取りをしなくても隅角部では破断しないことがわかった。

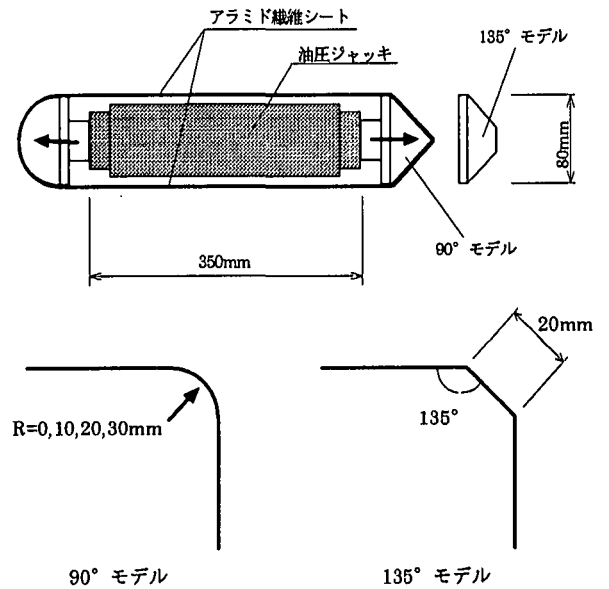


図-8 試験装置

表-7 試験結果一覧

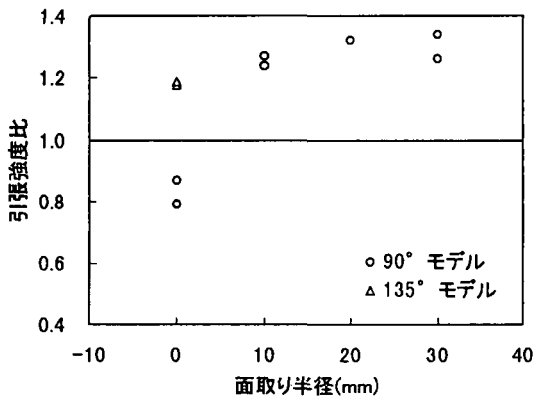


図-9 試験結果

モデル	面取り半径 (mm)	最大引張強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	設計引張強度との比	破壊状況
90°	0	179.2	0.87	隅角部破断
90°	0	162.9	0.79	隅角部破断
90°	10	256.6	1.24	母材破断
90°	10	260.6	1.27	母材破断
90°	20	272.8	1.32	母材破断
90°	30	276.7	1.34	母材破断
90°	30	260.9	1.26	母材破断
135°	0	243.8	1.18	母材破断
135°	0	244.4	1.19	母材破断

#### 4. 耐震補強工事概要

##### 4. 1 工事概要

今回、耐震補強を行った工事の概要は、以下のとおりである。

- ・工事名 : 京葉道路(改築)千葉東工事
- ・発注者 : 日本道路公団東京第一建設局
- ・施工者 : 三井建設(株)・(株)クボタ建設共同企業体
- ・耐震補強工 : RC橋脚 41基

上記、耐震補強橋脚41基のうち、C-P12橋脚(円形:φ3500)およびD-P3橋脚(角形:2500x1900)の2基において、アラミド繊維シート補強が採用された。図-10にD-P3橋脚の一般図を示す。

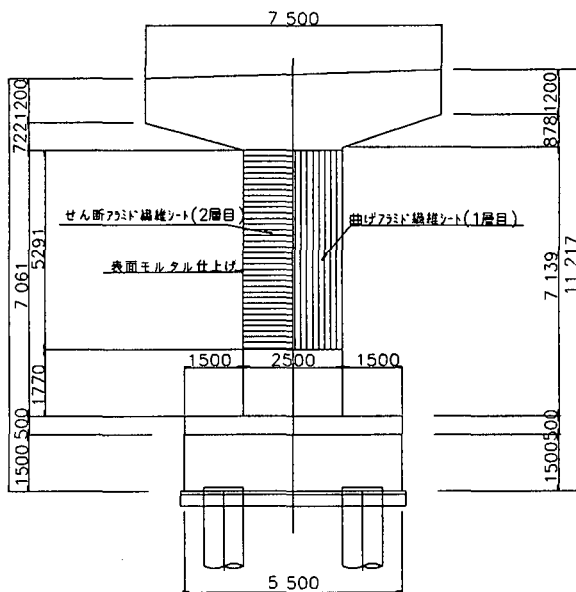


図-10 D-P3橋脚一般図

##### 4. 2 使用材料

今回のアラミド繊維シート補強工法で使用した材料を表-8に示す。

表-8 使用材料

材料	材料名	備考
アラミド繊維	アラミド-1	目付量 425g/m <sup>2</sup> (AK-60)
含浸樹脂	DDグラウト	(エポキシ樹脂)
プライマー	ネオプライマー	(エポキシ樹脂)

#### 5. 段落とし部の補強設計

##### 5. 1 補強設計

段落とし部の曲げ補強設計は、「耐震設計・施工要領(案)」(日本道路公団,平成7年7月)“5.炭素繊維巻き立て工法”に準じて行った。ここでは、橋脚基部が終局曲げモーメントに達したときの照査段落とし位置での作用モーメントより降伏モーメントを大きくするように曲げ補強を行う。この補強により、破壊位置を段落とし部から橋脚基部へと移行させる。この時のアラミド繊維シートの必要枚数(層数)は下式で求める。なお、数値はDP-2橋脚の計算例を提示する。

$$\Delta M = M_{ut} - M_y = 918.6 - 773.9 = 144.7 \text{ tf}\cdot\text{m}$$

$$A_{AF} = \Delta M / (\sigma_f \times 7/8 \times d) = 144.7 / (20,500 \times 7/8 \times 250.0) = 3.227 \text{ cm}^2$$

$$n = A_{AF} / (t_{AF} \times b_{AF}) = 3.227 / (0.0293 \times 190.0) = 0.580 \rightarrow 1 \text{ 層}$$

ここに、 $\Delta M$ :不足モーメント

$M_{ut}$ :基部が終局モーメントに達したときの照査段落とし位置の作用モーメント

$M_y$ :照査段落とし位置の降伏モーメント

$A_{AF}$ :アラミド繊維シートの断面積 (cm<sup>2</sup>)

$\sigma_f$ :設計用曲げ引張強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$d$ :有効高さ (cm)

$n$ :アラミド繊維シートの必要枚数

$t_{AF}$ :アラミド繊維シートの厚み (cm)

$b_{AF}$ :アラミド繊維シートの幅 (cm)

また、定着長についても下式で求まる。

$$l_{AF} = (\sigma_f \times n \times t_{AF}) / \tau_{CF} = (20500 \times 1 \times 0.0293) / 4.5 = 133.5 \text{ cm}$$

ここに、 $l_{AF}$ :アラミド繊維シートの定着長さ (cm)

$\sigma_f$ :設計用曲げ引張強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$n$ :アラミド繊維シートの必要枚数

$t_{AF}$ :アラミド繊維シートの厚み (cm)

$\tau_{AF}$ :アラミド繊維シートの設計用付着強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

## 5. 2 M-φ曲線, P-δ曲線

アラミド繊維は、炭素繊維と比較すると引張弾性率が約1/2~1/3であるが、伸び剛性(EA)で見るとほぼ同じとなる。そこで、曲げ補強効果の確認として、現況(無補強)と炭素繊維およびアラミド繊維で曲げ補強した際の計算上の段落とし部でのM-φ曲線、また橋脚頭部でのP-δ曲線を算出し、それぞれ図-11, 図-12に示す。

M-φ曲線図では、曲率が大きくなるにしたがって、弾性率の大きい炭素繊維シートがさきに補強効果を示す。一方、弾性率の小さいアラミド繊維シートは、さらに大きい曲率の段階で補強効果が現れる。そして、現況と比較した場合の補強効果は、双方とも大差ないものと判断できる。また、P-δ曲線図では、現況、炭素繊維シート補強、アラミド繊維シート補強ともほぼ同一の曲線を描き、前述した段落とし部での曲率変化の影響はほとんどないと考えられる。

以上より、炭素繊維シート、アラミド繊維シートどちらで補強しても、橋脚の変形性能およびそれによる補強効果に及ぼす影響は少ないと考えられる。

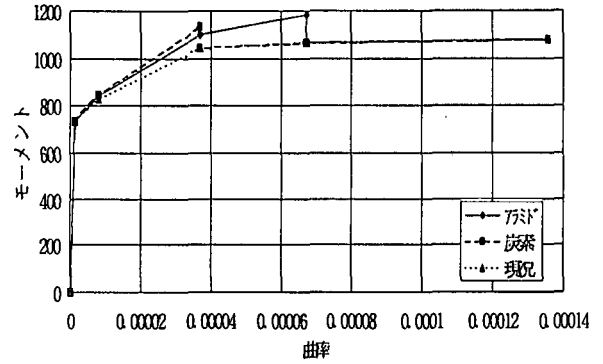


図-11 M-φ曲線

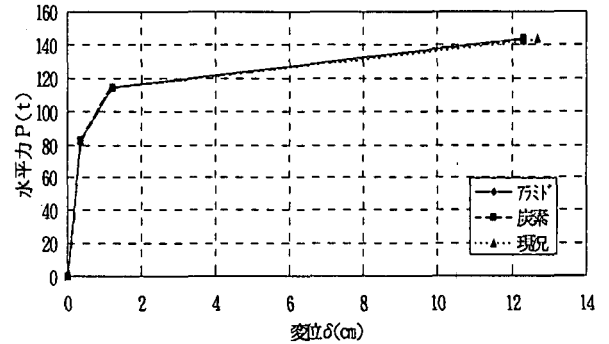


図-12 P-δ曲線

## 6. 施工方法

### 6. 1 施工手順

アラミド繊維シート補強工法の標準的な施工手順を図-13に示す。

この工法は、アラミド繊維シートにエポキシ系の樹脂を含浸させ、コンクリート表面に密着させるとともに、アラミド繊維と含浸樹脂との複合体すなわちFRP化して、はじめて所定の補強効果を得られるものである。

このため、図-13に示す施工手順の各工種をその目的に応じて所定の管理を行う必要がある。

### 6. 2 施工状況

今回の施工における主要な工種毎の施工状況写真を図-14に示す。

### 6. 3 施工管理

今回の施工では施工時の品質管理として、前述した「耐震設計・施工要領(案)」“5. 炭素繊維巻立て工法”にしたがって、以下の試験を行った。

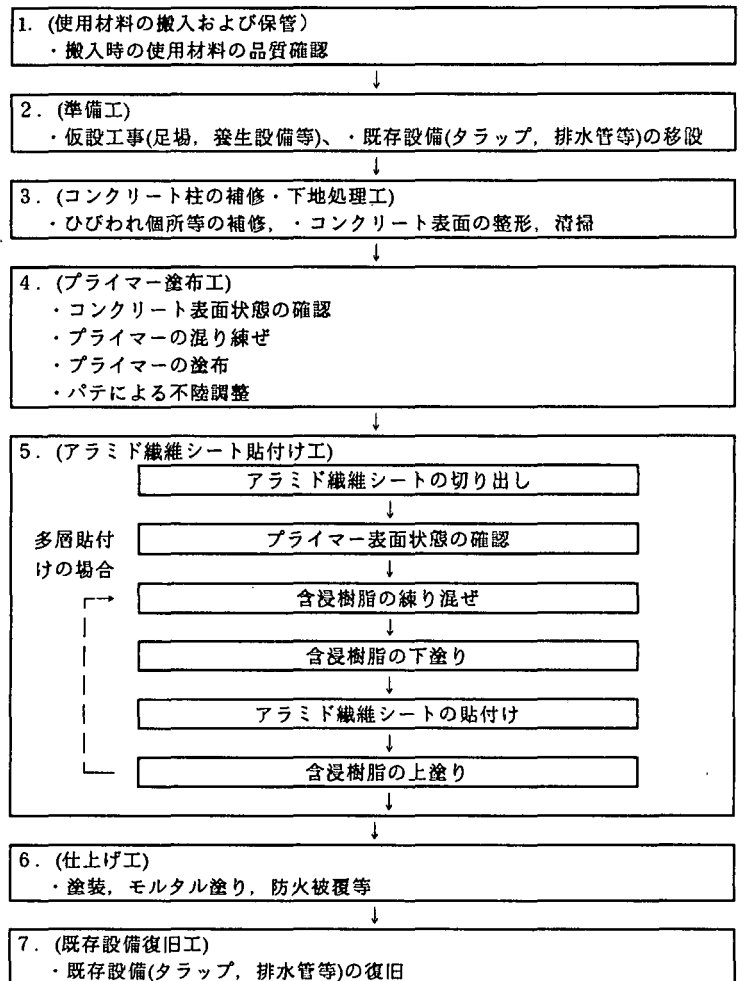
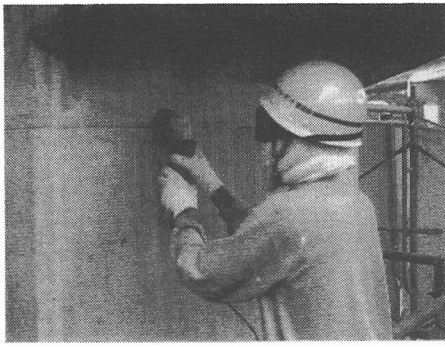


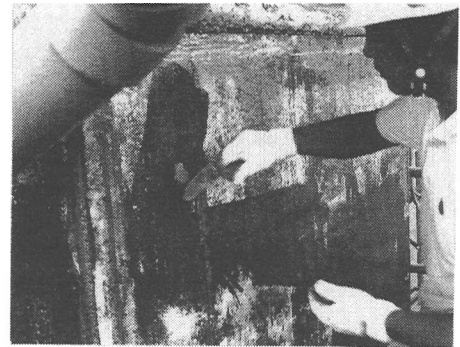
図-13 施工手順



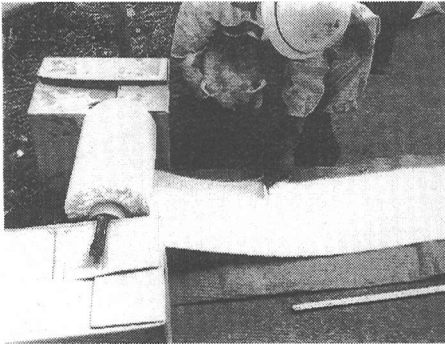
1. 下地処理工



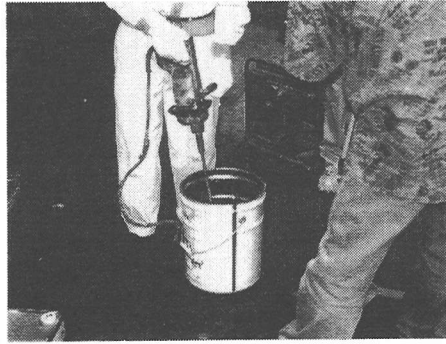
2. プライマー塗布工



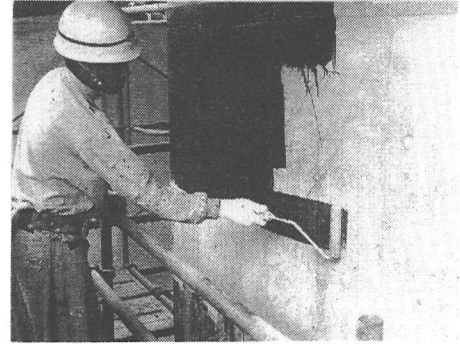
3. プライマー不陸調整工



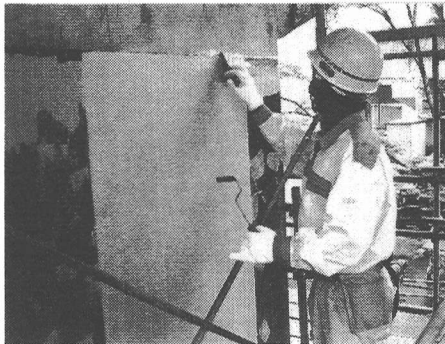
4. アラミド繊維シートの切り出し



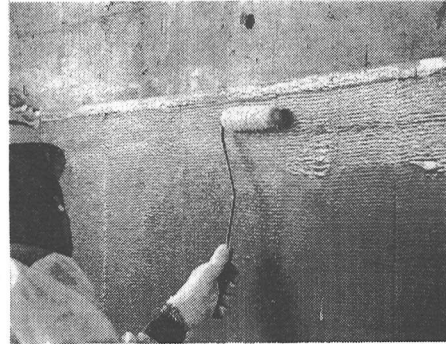
5. 含浸樹脂の練り混ぜ



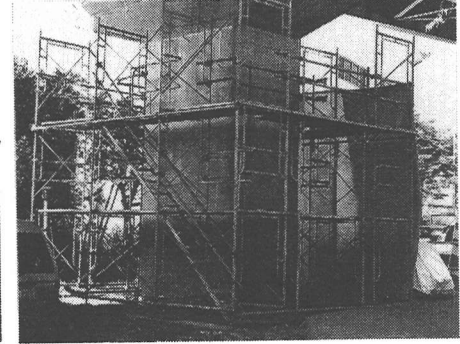
6. 含浸樹脂の下塗り



7. アラミド繊維シート貼付け



8. 含浸樹脂の上塗り



9. アラミド繊維シート貼付け完了

図-14 施工状況

表-9 施工時の品質試験方法

①アラミド繊維材料試験  
 ②アラミド繊維シート接着試験  
 試験方法および判定方法については、  
 表-9に示すとおりである。

	試験方法	判定方法
引張試験	JIS K 7073	所定の引張強度以上で合
接着試験	JIS K 5400	アラミド繊維シートとともに コンクリートが引き剥がされれば合

#### 6.4 仕上げ工

アラミド繊維シートは、基本的には耐久性に優れた材料ではあるが、シート貼付け完了後、耐候性、耐火性、美観等の向上を目的として仕上げ工を行う。仕上げ工は、施工位置の環境条件および施工後の維持管理の容易さなどの条件に応じて、適切なものを選択しなければならない。仕上げ工の目的および仕様についてその一例を表-10に示す。

表-10 仕上げ工の例

仕上げ工	目的	仕様
TYPE-1 (塗装工)	紫外線対策	ウレタン系樹脂塗膜 フッ素系樹脂塗膜
TYPE-2 (表面保護工)	表面保護対策 紫外線対策	モルタル吹付 セラミック系塗膜
TYPE-3 (耐火被覆工)	耐火対策 表面保護対策 紫外線対策	モルタル被覆 耐火ボード貼付 セラミック系塗膜



今回の補強した橋脚については、施工後の何らかの外力によるアラミド繊維シートの破損を防ぐため、加えて遮光による耐候性の向上、さらに美観の向上を目的に表面保護工を行った。表面保護工の仕様については、セラミック系複合塗膜を使用し、上塗りとしてフッ素系の樹脂を塗膜した。

仕上げ工を行った後の橋脚の状況を図-15に示す。

## 6.5 施工上の特徴

アラミド繊維シートを用いた今回の施工を通じて、その施工上の利点、注意点について、以下に述べる。

### 1) 施工上の利点

- ・材料が人力施工で十分なほど軽量であり、また、材料ヤードが少なく済む。
- ・繊維シートが柔らかく、作業空間が狭い箇所でも施工が容易である。
- ・下地処理からシート貼付けまで、職種が煩雑でなく1パーティで施工でき、一般的に工期短縮となる。
- ・繊維シートがしなやかであり、扱いが容易であるとともに、織物状であり樹脂が含浸し易い。

### 2) 施工上の注意点

- ・プライマーの塗布後やシートの貼付け作業中に、水や砂ぼこりが付着しないように、ビニールシート等で養生する必要がある。
- ・アラミド繊維シートは柔らかいので、貼り付けの際、シートによれが発生しないように注意する必要がある。

## 7. おわりに

今回、試験施工に先立ち行われた各種確認試験および施工を通して、アラミド繊維シート補強は、主鉄筋段落とし部の曲げ補強方法として、炭素繊維シート補強と同等の補強性能、施工性を有していることが確認された。

今後は、耐震補強工法の一つとして、軽量でクレーンなどの重機が不要で、狭い場所での施工にも適しており、また、柔らかく樹脂の含浸性がよく、耐衝撃性にも優れているアラミド繊維シートの特徴を生かしていきたいと考えております。

### \*参考文献

- 1) 「アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針」(財)鉄道総合技術研究所(平成8年11月)
- 2) 「耐震設計・施工要領(案)」日本道路公団(平成7年7月)
- 3) アラミド補強研究会資料
- 4) 「FITS工法技術資料」三井建設株式会社(平成8年9月)

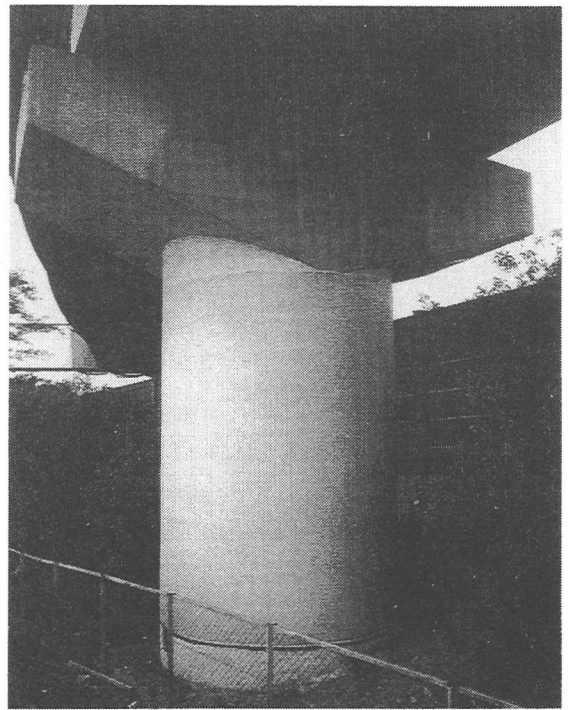


図-15 補強後の橋脚(C-P12橋脚)