

アラミド繊維シートによる  
鉄筋コンクリート橋脚の補強工法  
設計・施工要領(案)

令和3年4月

アラミド補強研究会



## 発刊にあたって

アラミド補強研究会は、アラミド繊維シートを用いた耐震補強工法の普及を目的として平成 8 年 6 月に発足し、現在 37 社で活動しております。この間、アラミド補強研究会は、(財)鉄道総合技術研究所に工法の研究を委託し、共同で「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」を作成しました。このたび、日本道路公団のご指導のもとに、平成 8 年度の「橋梁の耐震補強工法に関する技術検討委員会」においてご意見を頂き、「アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領(案)」をアラミド補強研究会から発刊する運びになりました。

本要領(案)の発刊より、本工法がアラミド繊維シートの特性を十分に生かした優れた工法であることをご理解頂けるとともに、道路橋橋脚および関連構造物の耐震補強の分野において、広く普及していく一助となることを願ってやみません。

平成 9 年 8 月

アラミド補強研究会

## 第 4 版の発刊にあたって

アラミド補強研究会は、平成 9 年 8 月に「アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領(案)」の第 1 版を発刊し、続いて同年 10 月に第 2 版を発刊いたしました。また、平成 10 年 1 月には、本工法が日本道路公団の「設計要領第二集橋梁保全編」に規定されるにあたり、同公団のご指導のもとに、第 2 版の内容を設計および施工の両面から再検討し、第 3 版として発刊いたしました。

この度、道路橋示方書や高速道路会社「設計要領第二集橋梁保全編」の改定内容や最新の技術情報を考慮して、第 3 版の内容を設計・施工両面から再検討し第 4 版として発刊することになりました。アラミド繊維シートによる道路橋の鉄筋コンクリート橋脚補強方法の基本的な指針として、本版を広く活用いただければ幸いです。

なお、第 4 版の改定にあたっては、高速道路総合技術研究所橋梁研究室の方々から貴重なご意見やご助言をいただきましたことを感謝いたします。

令和 3 年 4 月

アラミド補強研究会

## 発刊によせて

アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強工法は、アラミド補強研究会が試験・研究を実施し検討を行うことにより、今般、「アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚補強工法設計・施工要領(案)」としてまとめられ発行されました。

日本道路公団では、「設計要領第二集橋梁保全編」を平成 9 年 12 月に制定しましたが、この橋梁保全編では、鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強工法の一つとして、連続繊維巻立て工法を規定しています。この連続繊維巻立て工法の規定には、日本道路公団が従来より採用している炭素繊維による巻立て工法のほか、アラミド繊維についても炭素繊維と同様な適用が可能であり、経済性や施工性を検討のうえ採用して良いとしています。

これらの新素材による耐震補強工法は歴史も浅く、今後も引き続き研究開発すべきところもありますが、その材料特性には鉄筋コンクリート部材の耐震補強工法として優れたものがあります。現場におきましてアラミド繊維巻立て工法を採用する際には、この「アラミド繊維シートによる耐震補強工法設計・施工要領(案)」を適正に活用し、より耐震性に優れた構造物が建設されることを祈願致します。

平成 10 年 1 月

日本道路公団  
試験研究所 橋梁研究室長

アラミド補強研究会 会員名簿 (令和3年4月現在)

正会員

鹿島建設(株)	(株)コンステック
帝人(株)	帝人フロンティア(株)
東亜建設工業(株)	東レ建設(株)
東レ・デュポン(株)	日鉄ケミカル&マテリアル(株)
ファイベックス(株)	(株)ホーク
前田工織(株)	三井住建道路(株)
三井住友建設(株)	(株)リペアエンジ

要領改訂ワーキンググループ名簿

委員長	藤原保久	三井住友建設(株)土木本部
主査	井之上賢一	ファイベックス(株)技術部
同	中井裕司	前田工織(株)インフラ事業営業本部
委員	岡村脩平	帝人(株)アラミド事業本部
同	川口 武	帝人(株)アラミド事業本部
同	池端周作	帝人フロンティア(株)東京繊維資材部
同	松本柁志	帝人フロンティア(株)東京繊維資材部
同	山田洋輔	東レ・デュポン(株)ケブラー技術開発部
同	吉川雅人	ファイベックス(株)営業部
同	牧野航大	前田工織(株)構造部メンテナンス推進部
同	清水宏一朗	三井住友建設(株)土木本部土木技術部

## 設計編

1. 総則	1
1.1 適用の範囲	1
1.2 概要	1
1.3 用語の定義	2
2. 使用材料	3
2.1 アラミド繊維シート補強工法に用いる材料	3
2.2 設計に用いる材料特性	5
3. 橋脚の耐震補強設計	6
3.1 設計方針	6
3.2 AFRP シートの設計引張強度	6
3.3 AFRP シートの設計付着強度	6
3.4 段落し部を有する橋脚の補強設計	7
3.5 橋脚のせん断補強設計	10
3.6 じん性向上のための補強設計	11
3.6.1 単柱式の鉄筋コンクリート橋脚の限界状態に対応する水平耐力および水平変位	11
3.6.2 コンクリートの応力度－ひずみ曲線	12
4. 構造細目	15

## 施工編

1. 一般	16
2. 施工	17
2.1 施工計画	17
2.2 施工手順	17
2.2.1 使用材料の保管	17
2.2.2 表面処理工	18
2.2.3 アラミド繊維シート貼付け・巻立て工	19
2.2.4 仕上げ工	20
3. 品質管理および検査	21
4. 安全管理	26

## 付属資料

付属資料 1	AFRP シートの諸特性	27
付属資料 2	AFRP シートとコンクリートの付着特性	37
付属資料 3	AFRP シートで補強した部材の曲げ耐力の算定	40
付属資料 4	AFRP シートで補強した部材のせん断耐力の算定	43
付属資料 5	AFRP シートの拘束効果とコンクリートの応力度－ひずみ曲線	46
付属資料 6	AFRP シートで補強した部材の変形性能試験	50
付属資料 7	AFRP シートで補強した部材の変形性能とコンクリートの応力度－ひずみ曲線	54

注：令和 3 年 4 月における付属資料の改訂は、「付属資料 1 AFRP シートの諸特性」のうち「1. AFRP シートの補強工法用材料の種類」を中心とした。

# 設計編

## 1. 総則

### 1.1 適用の範囲

本要領は、既存コンクリート構造物の耐震補強のうち、橋脚をアラミド繊維シートで補強する工法(以下、アラミド繊維シート補強工法と呼ぶ)の設計・施工に適用する。

本要領に記載されていない事項については、関連する基準、規準および要領による。なお、本要領では以下の示方書および要領を引用している。

- ・ 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I～V 平成 29 年 11 月
- ・ 土木学会：コンクリート標準示方書 平成 29 年版 設計編
- ・ 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社：設計要領第二集 橋梁保全編 令和 2 年 7 月

アラミド繊維シート補強工法は、各種実験に基づき確立されたものである。実験に使用したアラミド繊維シートは、現在流通しているケブラー®、トワロン®、テクノーラ®の各アラミド繊維を用いて作成されたものである。その材料特性は各種材料試験を行い定められた。模型実験は、一柱式独立橋脚を想定し、せん断スパン比 4 以上、載荷方向に辺長比 1.5 以下、軸方向引張鉄筋比 1%程度で行われた。

本要領を実構造物に適用するに当たり、使用材料と構造物の適用範囲が異なる場合、別途検討の必要がある。なお、円形断面については本要領に従い設計してもよい。

### 1.2 概要

アラミド繊維シート補強工法は、アラミド繊維シートを既存鉄筋コンクリート橋脚の表面に含浸接着樹脂で貼り付けることにより耐震性能を向上させる工法である。補強方法は次の 3 種類を基本とし、組み合わせることも可能である。

- ・ 曲げ補強：橋脚表面の部材軸方向にアラミド繊維シートを貼り付けることにより曲げ補強筋を増設することと同等の効果を有し、曲げ耐力を向上させる。
- ・ せん断補強：橋脚表面の部材軸直角方向にアラミド繊維シートを貼り付けることによりせん断補強筋を増設することと同等の効果を有し、せん断耐力を向上させる。
- ・ じん性補強：橋脚の基部から断面高さの 1.5 倍にわたる区間に部材軸直角方向にアラミド繊維シートを貼り付けることにより、コンクリートを拘束する効果を有し、変形性能を向上させる。

アラミド繊維シートによる曲げ補強のメカニズムは、アラミド繊維シートをコンクリート表面の部材軸方向に貼り付けることにより引張主鉄筋とともに引張力を分担し、曲げ耐力が向上する。せん断補強



のメカニズムは、アラミド繊維シートをコンクリート表面の部材軸直角方向に貼り付けることにより、補強前橋脚のせん断耐力にアラミド繊維シートが負担するせん断補強効果が付加される。じん性補強のメカニズムは、アラミド繊維シートをコンクリート表面の部材軸直角方向に貼り付けることにより、コンクリートを拘束し変形性能を向上させる。

### 1.3 用語の定義

#### (1) アラミド繊維

- ・アラミド繊維：芳香族ポリアミド繊維をいう。
- ・AFRP：アラミド繊維を用いた繊維強化プラスチック(FRP)のことで、アラミド繊維に含浸させた樹脂が硬化したものをいう。
- ・アラミド繊維シート：アラミド繊維を1方向もしくは2方向に配列しシート状もしくは織物にしたものをいう。
- ・AFRPシート：樹脂を含浸させたアラミド繊維シートで、樹脂が完全に硬化した状態にあるものをいう。

#### (2) 樹脂

- ・プライマー：コンクリート表面に塗布浸透させ、コンクリートの表面を補強するとともにAFRPとの接着性を向上させる樹脂をいう。
- ・含浸接着樹脂：アラミド繊維シートに浸透し、コンクリート表面に接着させ、AFRP化するための結合剤をいう。
- ・指触硬化：含浸接着樹脂の混練時の溶剤が揮発して、粘り気が無く、樹脂に指を押付けても付着しない状態をいう。
- ・初期硬化：含浸接着樹脂の硬化反応が進み、爪痕が残らない状態をいう。
- ・完全硬化：含浸接着樹脂の硬化反応が終了し、以後の強度がほとんど変化しない状態をいう。

#### (3) AFRPシート

- ・破断強度：AFRPシートが引張破断した時の強度( $\sigma_{AFu}$ )
- ・引張強度：AFRPシートの材料強度として保証される強度( $\sigma_{AFk}$ )
- ・設計引張強度：AFRPシートで補強されたRC部材の耐力を算定する時に用いる強度( $\sigma_{AFd}$ )
- ・ヤング係数：引張応力～ひずみ曲線の破断時荷重の20～50%部分の勾配から求めた値( $E_{AF}$ )

(3) AFRPシートの断面はアラミド繊維と樹脂で構成されているが、その引張強度はアラミド繊維が発揮する。AFRPシートの引張強度は断面内に含まれる繊維の量(繊維混入率)により決まる。

そこで、本要領では、AFRPシートの材料特性を断面内に含まれるアラミド繊維の断面積で評価することとした。

引張強度の特性値はAFRPシートの材料試験の結果 [破断強度の平均値 - 3×標準偏差]とし、ヤング係数は材料試験の平均値として求めることとした。

## 2. 使用材料

### 2.1 アラミド繊維シート補強工法に用いる材料

#### (1) アラミド繊維シート

アラミド繊維シートは、高弾性型のアラミド 1 (パラ系全芳香族ポリアミドの単独重合系繊維) もしくは高強度型のアラミド 2 (パラ系全芳香族ポリアミドの共重合系繊維) を用いるものとする。

#### (2) プライマー

プライマーは、エポキシ樹脂系を用いる。ただし、プライマーは、次の規格を満足するものを選択する。

- ・接着強度：1.5N/mm<sup>2</sup>以上 (JSCE-E 545:2013 による。)
- ・密度：0.85～1.25 g/cm<sup>3</sup> (JIS K 5600-2-4:2014 による。)
- ・可使時間：0.3 時間以上 (JIS K 6833-3:2014 による。)
- ・粘度：施工条件などを考慮して十分に機能を発揮できるものとする。

#### (3) 含浸接着樹脂

含浸接着樹脂はエポキシ樹脂系の常温硬化型を用いる。ただし、含浸接着樹脂は、次の規格を満足するものを選択する。

- ・密度：1.00～1.30 g/cm<sup>3</sup> (JIS K 5600-2-4:2014 による。)
- ・可使時間：0.3 時間以上 (JIS K 6833-3:2014 による。)
- ・引張強度：30N/mm<sup>2</sup>以上 (JIS K 7161:2014 による。)
- ・曲げ強度：40N/mm<sup>2</sup>以上 (JIS K 7171:2016 による。)
- ・引張せん断強度：10N/mm<sup>2</sup>以上 (JIS K 6850:1999 による。)
- ・粘度：施工条件などを考慮して十分に機能を発揮できるものとする。

#### (4) 不陸調整材

不陸調整材はエポキシ樹脂系のパテを標準とし、プライマー、含浸接着樹脂と十分な接着が可能なもので、作業に適した粘度を有しなければならない。不陸調整材は、次の規格を満足するものを選択する。

- ・接着強度：1.5N/mm<sup>2</sup>以上 (JSCE-E 545:2013 による。)

(5) AFRP シート

AFRP シートは次の規格を満足するものを用いる。試験は、JIS A 1191:2004 に従い行うものとする。

- ・アラミド 1：引張強度 2060N/mm<sup>2</sup>以上 ヤング係数 118±20kN/mm<sup>2</sup>
- ・アラミド 2：引張強度 2350N/mm<sup>2</sup>以上 ヤング係数 78±15kN/mm<sup>2</sup>

(6) 仕上げ材

仕上げ材は、紫外線を遮断し、その他の条件に応じた必要な性能を有する材料を選択する。

ここでは、アラミド繊維シート補強工法に用いる材料のみを規定する。そのほかの材料(鉄筋、コンクリート、セメント、補修用材料など)については、1.1 で述べた基準、規準および要領などの規定を準用する。

- (1) アラミド繊維シートは、引張強度およびヤング係数により大きく分類され、これらの値によりアラミド繊維シートの材料を規定することができる。アラミド 1 のシートは、全芳香族ポリアミドの単重合系繊維であるケブラー®とトワロン®を用いたシートで、高弾性率を特徴としている。アラミド 2 のシートは、芳香族ポリエーテルアミドの共重合繊維であるテクノーラ®を用いたシートで、高強度を特徴としている。アラミド繊維の主な特性を付属資料 1 の付属表-1.1 に示す。
- (2) プライマーは、コンクリートとアラミド繊維シートが確実に接着し、一体化するために使用するもので、コンクリートとの十分な接着強度が得られるものでなければならない。
- (3) 含浸接着樹脂は、アラミド繊維シートをコンクリート面に接着するために、良好な含浸性を有するとともに貼付け時に確実にシートを保持する粘度が必要である。

- (5) AFRP シートは、高強度、軽量かつ耐久性に優れており、異形棒鋼 (SD295A) と比較して強度が約 8~10 倍、ヤング係数がほぼ 1/3~1/2 の引張特性を示す。また、AFRP シートは、異形棒鋼のような降伏棚がなく、破断強度まではほぼ弾性であることも大きな特徴である (図-解 2.1.1)。

AFRP シートの引張特性の試験は、JIS A 1191:2004 (コンクリート補強用連続繊維シートの引張試験方法) に準拠して行われている。この JIS は、日本における連続繊維シートを用いる補強工法が一般化されたために、本要領などを参考に作成されたものである。

本要領に規定している AFRP シートを用いた引張試験結果の例を付属資料 1 に示す。

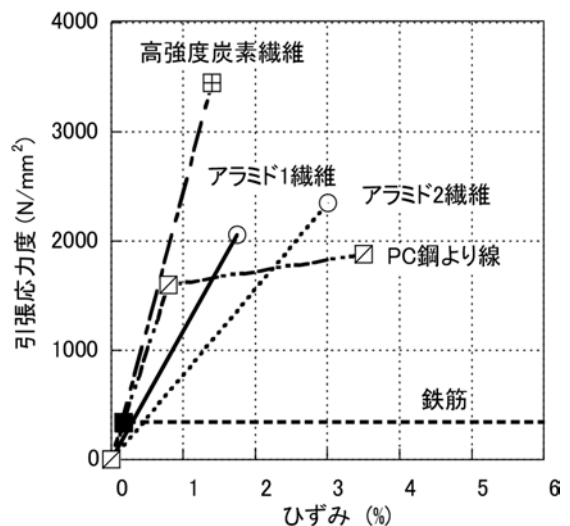


図-解 2.1.1 各種材料の応力度—ひずみ関係

(6) AFRP シートは、アラミド繊維とエポキシ系の樹脂ともに紫外線による強度低下が生ずる。既往の耐久性試験において 15 年相当におよぶ促進暴露試験の結果、遮光処置を行わない場合で 5%の強度の低下で、フッ素系塗装によって遮光した場合で強度低下は認められない。AFRP シート表面に被覆をしない場合でも樹脂表面層は若干劣化を起こすが、樹脂表面が紫外線を吸収し、内部のアラミド繊維が劣化することを防止することができる。また、その表面に被覆をすれば紫外線の影響を直接受けることはほとんどない。したがって、アラミド繊維シート補強工法は仕上げ工により耐久性が向上する。

## 2.2 設計に用いる材料特性

既存部分の鉄筋とコンクリートの強度およびヤング係数は、調査結果あるいは設計図書に基づき、適切な値をとるものとする。原則として「道路橋示方書・同解説」と整合性のある値とする。AFRP シートの引張強度は、アラミド 1 が 2060 N/mm<sup>2</sup>、アラミド 2 が 2350 N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数は、アラミド 1 が 118 kN/mm<sup>2</sup>、アラミド 2 が 78 kN/mm<sup>2</sup>とする。なお、設計に用いる AFRP シートの単位幅あたりの引張耐力は、使用するアラミド繊維の目付量により定まる。

本要領で検討した AFRP シートは、その保証耐力が 392kN/m～1176kN/m(目付量で 235g/m<sup>2</sup>～830g/m<sup>2</sup>)であり、AFRP シートとしての補強効果などは実験により確認している。将来、単位幅あたりの耐力を変える場合には実験などによりその性能を確認し、十分な検討を加えたものを使用するものとする。表-解 2.2.1 に代表的な AFRP シートの種類と材料特性を示す。

表-解 2.2.1 AFRP シートの種類と特性値

繊維種類		アラミド 1				アラミド 2			
		AK40 AW40	AK60 AW60	AK90 AW90	AK120 AW120	AT40	AT60	AT90	AT120
引張強度	N/mm <sup>2</sup>	2060以上				2350以上			
ヤング係数	kN/mm <sup>2</sup>	118±20				78±15			
破断伸度	%	1.8				3.0			
密度	g/cm <sup>3</sup>	1.45				1.39			
目付量	g/m <sup>2</sup>	280	415	623	830	235	350	525	700
設計厚さ	mm	0.193	0.286	0.430	0.572	0.169	0.252	0.378	0.504
保証耐力	kN/m (tf/m)	392 (40)	588 (60)	882 (90)	1176 (120)	392 (40)	588 (60)	882 (90)	1176 (120)

### 3. 橋脚の耐震補強設計

#### 3.1 設計方針

(1) 適用

橋脚の耐震補強として以下の補強部分について適用する。

- 1) 橋脚段落し部の曲げ補強
- 2) 橋脚のせん断補強
- 3) 橋脚基部のじん性補強
- 4) 1) から 3) 各部の組み合わせ

(2) 検討する荷重状態

耐震設計上考慮する荷重は、道路橋示方書V耐震設計編3章および4章の規定に従う。

#### 3.2 AFRP シートの設計引張強度

AFRP シートの設計引張強度は、2.2 に規定される引張強度の 0.6 倍とする。

AFRP シートの終局時の設計引張強度は、次の 2 つの要因を考慮して決定した。AFRP シートの材料としての安全係数と AFRP シートを用いてせん断補強した部材における AFRP シートの破断強度にたいする補強効率である。AFRP シートの材料の安全係数は、施工条件、使用環境、実験供試体と実構造物に用いる場合の差異などを考慮し 1.15 とした。また、終局時の破壊性状を決定するせん断補強に対する AFRP シートの補強効率(破断強度を用いたトラス理論の計算値にたいする有効率)は 0.7 倍程度である。これらを考慮し、AFRP シートの設計引張強度は、引張強度の 0.6 倍とした。

段落し部の曲げ補強に AFRP シートを用いる場合、AFRP シートの破断伸度が大きいために曲げ圧縮部に過度の圧縮ひずみを生じさせない目的で、曲げ補強時の AFRP シートの許容ひずみを設けた。

#### 3.3 AFRP シートの設計付着強度

AFRP シートとコンクリート部材との設計付着強度は、 $0.45\text{N/mm}^2$  とする。

曲げ補強を行う場合、付着強度は曲げ耐力を保証する上で重要な因子になる。本設計付着強度は、施工編 2.2.2 に規定された表面処理工で得られる最低値である。

### 3.4 段落し部を有する橋脚の補強設計

#### (1) 段落し部の曲げ補強設計

段落し部の曲げ補強は、躯体下端が初降伏曲げモーメントの 1.2 倍に達したときの段落し位置の作用モーメントより、補強前の段落し位置の初期降伏曲げモーメントとの差分の不足曲げモーメントに対して行う。この段落し部の不足モーメントに対する AFRP シートの補強量の算定は、式(3.4.1)から式(3.4.3)によるものとする。

$$\Delta M = 1.2M_{By0} \frac{h_T}{h_B} - M_{Ty0} \quad (3.4.1)$$

$$A_{AF} = 1000 \frac{\Delta M}{7/8 \cdot \sigma_{AFb} \cdot D} \quad (3.4.2)$$

$$n_p = \frac{A_{AF}}{t_{AF} \cdot b_{AF}} \quad (3.4.3)$$

ここに、

$M_{By0}$  : 橋脚躯体の基部断面における初降伏曲げモーメント(kNm)

$h_B$  : 橋脚躯体の基部断面から上部構造の慣性力の作用位置までの高さ(m)

$M_{Ty0}$  : 橋脚躯体の段落し位置の初降伏曲げモーメント(kNm)

$h_T$  : 橋脚躯体の段落し断面から上部構造の慣性力の作用位置までの高さ(m)

$\Delta M$  : 段落し部の不足モーメント(kNm)

$A_{AF}$  : 必要となる AFRP シートの断面積(mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{AFb}$  : AFRP シートの曲げ補強用設計強度(N/mm<sup>2</sup>)

$$\sigma_{AFb} = E_{AF} \cdot \varepsilon_{AFb} \quad (3.4.4)$$

$E_{AF}$  : AFRP シートのヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)

$\varepsilon_{AFb}$  : 曲げ補強時の許容ひずみ(1.0%)

$D$  : 部材高さ(m)

$n_p$  : AFRP シートの必要積層数

$t_{AF}$  : AFRP シートの設計厚さ(mm)

$b_{AF}$  : AFRP シートの貼付け幅(mm)

#### (2) 補強範囲

AFRP シートによる補強範囲は、照査段落し位置から段落し部の降伏曲げモーメントと作用モーメントの交点までとする。

(3) 曲げ補強した AFRP シートの定着長

1) 上側定着長

上側の定着位置は、実際の段落し位置から式(3.4.5)で求められる定着長さ $l_{AFn}$ を加えた高さとする。ただし、段落し部の初期降伏曲げモーメントと作用モーメントとの交点から $l_{AF1}$ を加えた高さと比較し、高い位置とする。

$$l_{AFn} = \frac{\sigma_{AFb} \cdot n \cdot t_{AF}}{\tau_{AF}} \quad (3.4.5)$$

ここに、

$l_{AFn}$  :  $n$ 層積層した場合、必要となるAFRPシートの長さ(mm)

$t_{AF}$  : AFRPシートの設計厚さ(mm)

$\tau_{AF}$  : 曲げ補強に用いるAFRPシートの設計付着強度(N/mm<sup>2</sup>)

2) 下側定着位置

照査段落し位置から式(3.4.5)で求められる定着長さ $l_{AFn}$ を確保する。

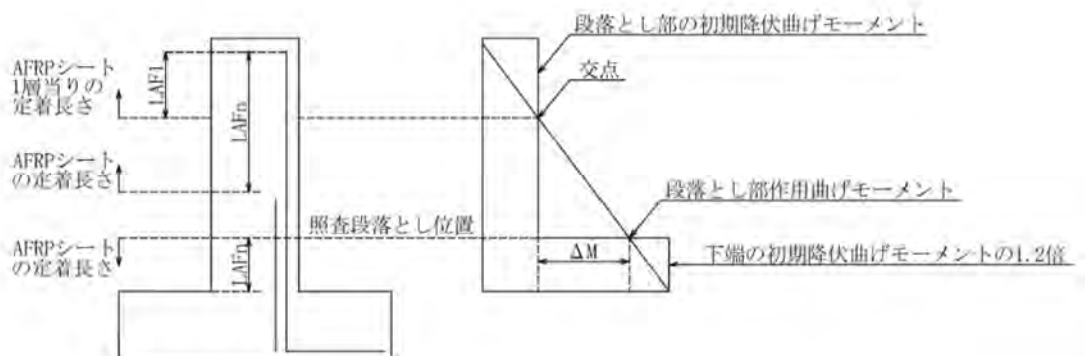
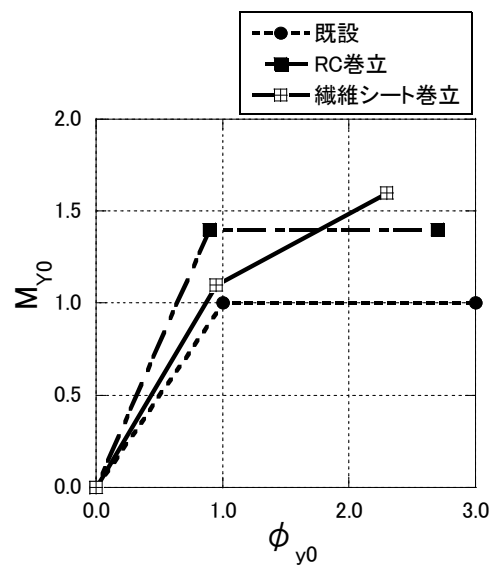


図-3.3.1 AFRPシートの貼付け位置

- (1) 想定した地震時に段落し部に有害な損傷が生じないように、AFRPシートの最大ひずみを1.0%とした。段落し部における実用的な引張鉄筋比の領域でAFRPシートにより曲げ補強を行った場合、縁端におけるコンクリートの圧縮ひずみが0.35%となるとき、AFRPシートの引張ひずみは1.0%以上になる。

既設橋脚の主筋段落し部の照査は、静的解析において初降伏時の水平耐力は段落し部が基部の1.2倍以上であること、動的解析においては段落し部は初降伏に達しないことが条件である。その結果、AFRPシートを用いて段落し補強を行う場合は、式3.4.2を用いて繊維シートの補強量を算出する。

段落し部を AFRP シートで補強した場合、**図-解 3.4.1** に示すように、段落し部の初降伏モーメントは僅かしか増加せず、曲率の増加にともない抵抗モーメントが増加することになる。このため、曲率の急激な増加が抑制され段落しの損傷を防ぐことになる。また、算出された AFRP シート量で曲げ補強した段落し部の終局曲げ耐力は基部の終局曲げ耐力の 1.2 倍程度になる。注意事項は、補強後の動的解析においても段落し部で初降伏に至る可能性があるが、上記の理由でさらなる補強は不要となる。



**図-解 3.4.1** 段落しの補強イメージ  
補強前後の抵抗モーメントと曲率の関係



### 3.5 橋脚のせん断補強設計

せん断補強設計は、式(3.5.1)に示す不足せん断耐力( $\Delta P_S$ )に対して照査を行い、AFRPシートの補強量算定は、式(3.5.2)および式(3.5.3)によるものとする。

$$\Delta P_S = P_u - P_S \quad (3.5.1)$$

$$A_{AF} = \frac{\Delta P_S \times 1.15}{\sigma_{AFd} \times d} \quad (3.5.2)$$

$$n_p = \frac{A_{AF}}{2 \times t_{AF}} \quad (3.5.3)$$

ここに、

$\Delta P_S$  : 不足せん断耐力(kN)

$P_u$  : 設計せん断力(kN)

$P_S$  : せん断補強前のせん断耐力(kN)

$A_{AF}$  : 単位幅(1m)あたりのAFRPシートの断面積(mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{AFd}$  : 3.2で規定されるAFRPシートの設計引張強度(N/mm<sup>2</sup>)

$d$  : せん断耐力を算定する方向に平行な方向の橋脚断面の有効高(m)

$n_p$  : AFRPシートの必要枚数(枚)

$t_{AF}$  : AFRPシート1枚あたりの設計厚さ(mm)

AFRPシートを用いたせん断補強は、道路橋示方書V耐震設計編に示されたせん断補強前のせん断耐力  $P_S$  の算出式と同様に加算則が成り立ち、 $P_S$  と AFRP シートが負担するせん断耐力の和によって算定できる。式(3.5.2)は、付属資料4に示された実験結果に基づくものである。この式は、せん断補強の場合に、部材軸直角方向の全面にAFRPシートを巻くことを仮定したもので、付属資料4における式(付4.3)のAFRPシートの単位幅  $a_{AF}$  を1mに、鉛直軸とのなす角度  $\theta_{AF}$  を一律に90°としたものである。

式(3.5.3)は、アラミド繊維シートの種別に関わりなく、次式で算出できる。

$$n_p = \frac{\Delta P_S \times 1.15}{2 \times 0.6 \times P_{AFu} \times d} \quad (\text{解 } 3.5.1)$$

ここに、

$P_{AFu}$  : アラミド繊維シートの保証耐力(kN/m)

### 3.6 じん性向上のための補強設計

#### 3.6.1 単柱式の鉄筋コンクリート橋脚の限界状態に対応する水平耐力および水平変位

- (1) 既存橋脚の許容塑性率が必要とする塑性率より小さい場合は、じん性向上のための耐震補強設計を行う。
- (2) じん性向上のための耐震補強を行った鉄筋コンクリート橋脚の終局水平耐力および終局水平変位は、道路橋示方書V耐震設計編 8 章を参考に、下記の条文を用いて算出する。
- (3) コンクリートの応力度-ひずみ曲線および終局ひずみは 3.6.2 の規定による。
- (4) 限界状態 2、3 とは、橋脚の最外縁においてコンクリートのひずみがタイプ I の地震動およびタイプ II の地震動それぞれに対応した終局ひずみに達する時とする。

AFRP シートを用いてじん性向上を目的とした耐震補強された鉄筋コンクリート橋脚の終局水平耐力および終局水平変位を算出するためのコンクリートの応力-ひずみ曲線は、3.6.2 に規定した。タイプ I およびタイプ II 地震動に対する終局時とは、橋脚の最外縁位置においてコンクリートが終局ひずみに達する時と定義した。この理由は、軸方向鉄筋の座屈後においても、AFRP シートを巻き付けることによりかぶりコンクリートは拘束され、圧縮応力を分担しているためである。

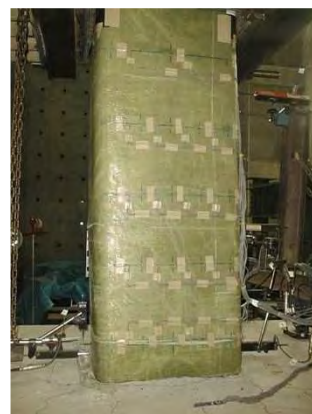
参考として、同一仕様の RC 柱を同一の耐力の炭素(C)、アラミド 1(A1)、およびアラミド 2(A2)の繊維シートで巻き立て、正負交番载荷を実施した終局状態を写真-解 3.6.1 に示す。繊維シートの状況は、C が破断、A1 が損傷、A2 が無傷である。また、終局時の靱性率は、C、A1、A2 が、それぞれ、8、10、12 であった。繊維シートの破断伸度が大きくなるに従い、破壊性状が改善され、靱性率が大きくなる。



炭素繊維 C (破断伸度 1.4%)



アラミド A1 (1.8%)



アラミド A2 (3.0%)

写真-解 3.6.1 各種シートを用いた正負交番载荷試験の終局時の比較

参考文献：中井裕司,樋口昇,下村匠,丸山久一：連続繊維シートで補強した柱のせん断耐荷機構,コンクリート工学年次論文報告集, VOL.24,No.2,PP1363-1368,2002

### 3.6.2 コンクリートの応力度-ひずみ曲線

- (1) 帯鉄筋と AFRP シートによる拘束効果を適切に評価して、コンクリートの応力~ひずみ関係を定めた。
- (2) じん性向上を図る塑性ヒンジ内における軸方向の連続繊維シートは考慮しない。
- (3) じん性向上目的とした補強を行う場合は、躯体の下端から躯体の断面高さの 1.5 倍の範囲を補強する。
- (4) 解析モデルの塑性ヒンジ長  $L_p$  は、上部構造の慣性力作用高さ  $h$  と断面高さ  $D$  より次式で算出される値に補正係数  $C_{Lp}=0.8$  を乗じた値とする。

$$L_p = 0.2h - 0.1D \quad (\text{ただし、} 0.1D \leq L_p \leq 0.5D)$$

- (1) 正負交番荷重を受けるコンクリートの圧縮側の応力~ひずみ関係を以下に示す。

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right\} & (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}) \\ \sigma_{cc} - E_{des} (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) & (\varepsilon_{cc} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}) \end{cases} \quad (\text{解 3.6.1})$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{cc}}{E_c \varepsilon_{cc} - \sigma_{cc}} \quad (\text{解 3.6.2})$$

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8\alpha \sigma_{sy} \left( \rho_s + \rho_{AF} \frac{E_{AF}}{E_s} \right) \quad (\text{解 3.6.3})$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.033\beta \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \left( \rho_s + \rho_{AF} \frac{E_{AF}}{E_s} \right) \quad (\text{解 3.6.4})$$

$$\left[ \text{一般に、} \frac{E_{AF}}{E_s} = 0.5 \text{ としてよい。} \right]$$

$$\sigma'_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8\alpha (\rho_s \sigma_{sy} + 0.4\rho_{AF} \sigma_{AFd}) \quad (\text{解 3.6.5})$$

$$\varepsilon'_{cc} = 0.002 + 0.033\beta (\rho_s \sigma_{sy} + 0.4\rho_{AF} \sigma_{AFd}) \frac{1}{\sigma_{ck}} \quad (\text{解 3.6.6})$$

$$E'_{des} = 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s \sigma_{sy} + 2.2\rho_{AF} \sigma_{AFd}} \quad (\text{解 3.6.7})$$

$$\varepsilon_{cu} = \begin{cases} \varepsilon_{cc} & (\text{タイプIの地震動}) \\ \varepsilon'_{cc} + \frac{0.2\sigma'_{cc}}{E'_{des}} & (\text{タイプIIの地震動}) \end{cases} \quad (\text{解 3.6.8})$$

$$E_{des} = \frac{\sigma_{cc} - 0.8\sigma'_{cc}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{cc}} \quad (\text{解 3.6.9})$$

$$\rho_s = \frac{4A_h}{s \cdot d} \quad (\text{解 3.6.10})$$

$$\rho_{AF} = \frac{4A_{AF}}{s_{AF} \cdot d_{AF}} \quad (\text{解 3.6.11})$$

ここに、

- $\sigma_c$  : コンクリート応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_{cc}$  : 横拘束筋で拘束されたコンクリートの強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_{ck}$  : コンクリートの設計基準強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\varepsilon_c$  : コンクリートのひずみ
- $\varepsilon_{cc}$  : 最大圧縮応力時ひずみ
- $\varepsilon_{cu}$  : 横拘束筋とAFRPシートで拘束されたコンクリートの終局ひずみ
- $E_c$  : コンクリートのヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>) で、道示Ⅲ編 表-4.2.3 による。
- $E_{AF}$  : AFRPシートのヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>) で、2.2 の規定による。
- $E_{des}$  : 下降勾配 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\rho_s$  : 横拘束筋の体積比 ( $\leq 0.018$ )
- $\rho_{AF}$  : AFRPシートの体積比
- $A_h$  : 横拘束筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)
- $A_{AF}$  : AFRPシートの断面積 (mm<sup>2</sup>)
- $s$  : 横拘束筋の間隔 (mm)
- $s_{AF}$  : AFRPシートの幅 (mm)
- $d$  : 横拘束筋の有効長 (mm)
- $d_{AF}$  : AFRPシートの有効長 (mm) で、既設橋脚断面の外側寸法を用いる。
- $\sigma_{sy}$  : 横拘束筋の降伏強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_{AFd}$  : AFRPシートの設計引張強度 (N/mm<sup>2</sup>) で、3.2 の規定による。
- $t_{AF}$  : AFRPシートの1層当たりの設計厚さ (mm)
- $n_p$  : AFRPシートの積層数
- $\alpha, \beta$  : 断面補正係数で、円形断面の場合には  $\alpha=1.0, \beta=1.0$ 、  
矩形断面の場合には  $\alpha=0.2, \beta=0.4$  とする。

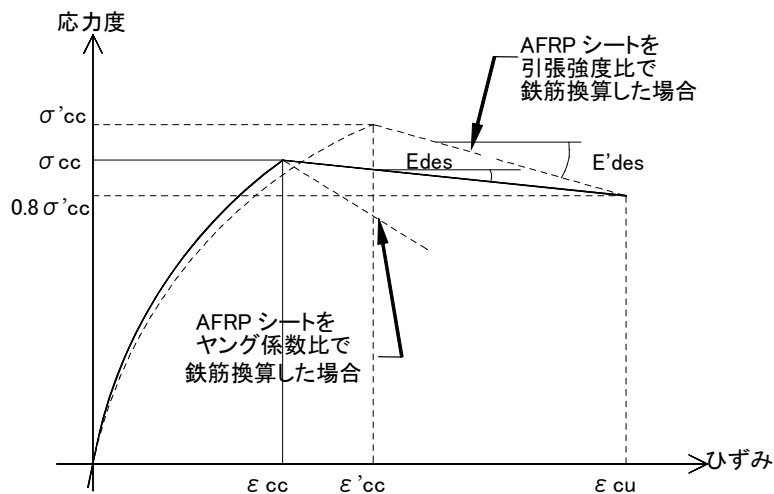


図-解 3. 6. 1 AFRPシートを巻き立てたコンクリートの応力度—ひずみ曲線

(1) AFRP シートによるコンクリートの拘束効果の定式化にあたっては、横拘束鉄筋による拘束効果の評価式がすでに存在し広く使用されていることを考慮して、この式において AFRP シートを適当な方法で帯鉄筋に換算することにより、その拘束効果を評価する方法を採った。換算方法としては、コンクリートが最大圧縮応力に達する前後で、ヤング係数による換算と強度による換算に分けた。すなわち、コンクリートが最大圧縮応力  $\sigma_{cc}$  に達するまではヤング係数によって AFRP シートを帯鉄筋に換算し、終局応力と終局ひずみ  $\varepsilon_{cu}$  は引張強度によって換算した式により実験値を回帰し、設計式を定めた。式(3.6.5)および式(3.6.6)の係数 0.4 と式(3.6.7)の係数 2.2 は、回帰的に求められた値である。下降勾配  $E_{des}$  は、このようにして算出された最大圧縮応力点と終局応力点を結ぶように求めるものとした。これらにより、コンクリートのひずみが小さい領域と大きい領域での拘束効果の違いを表現できるようになっている。

図-解 3.6.2 は、補強量と  $\varepsilon_{cu}$  の関係をプロットしたものである。塗りつぶしの点は1軸圧縮試験から、白抜きのは変形性能試験から求められたもので、いずれも材料諸値は実測値を用いている。無補強のとき、実験値の  $\varepsilon_{cu}$  は 5000 $\mu$  程度を示しており、補強とともにその値は伸びるが、次第に頭打ちの傾向を示すことがわかっている。一方、設計式は補強量に対してほぼ線形であり、補強量が少ない範囲で、実験値を安全側に評価しているが、補強量が多くなるに従い実験値に一致してくる。このような違いがあるため、補強量は実験値の得られている領域内 ( $0.05 \leq (\rho_s \sigma_{sy} + \rho_{AF} \sigma_{AF}) / \sigma_{ck} \leq 0.7$ ) に抑えるものとし、領域外での本設計式の適用に当たっては十分な検討を行うものとする。

図-解 3.6.3 に、補強橋脚の変形性能実験結果と本設計式による計算結果の比較を示す。比較は橋脚天端の終局変位に関して行っている。計算値は 3.6.2 (4) の規定に従って求めたものであり、図-解 3.6.2 とは異なり設計用の材料諸値を用いている。本設計式は、いずれの実験結果に対しても安全側の評価をしていることが分かる。

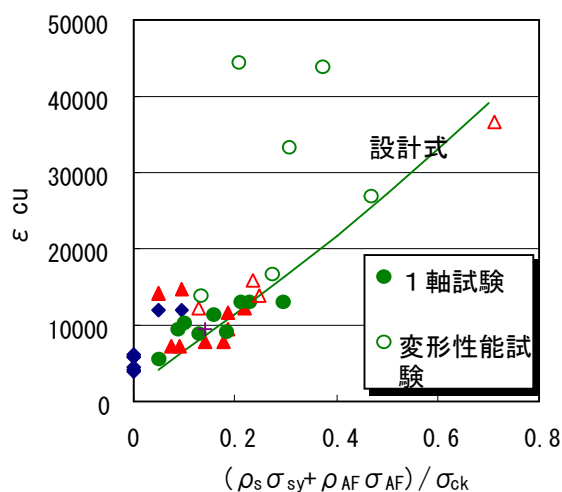


図-解 3.6.2 補強量と  $\varepsilon_{cu}$  の関係

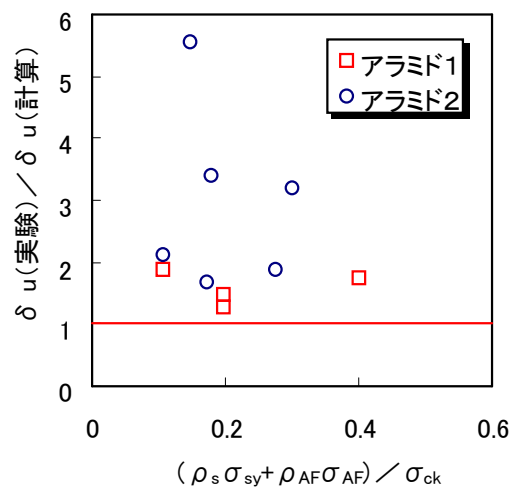


図-解 3.6.3 実験結果と計算結果の比較

- (3) じん性向上の耐震補強範囲は、一連の橋脚の変形性能試験における著しい損傷区間および補強部材への作用応力などを勘案し決定した。これらの試験の範囲は独立橋脚形式であるが、本章の規定はラーメン構造の面内補強などにも準用できる。

#### 4. 構造細目

- (1) AFRP シートの重ね継手長は、保証耐力 392kN/m と 588kN/m の AFRP シートを用いる場合 200mm 以上、882kN/m と 1176kN/m の AFRP シートを用いる場合 250mm 以上とする。
- (2) 面の隅角部は、サンダーにて突起を取り除く。
- (3) 段落し部の補強を行う場合は、曲げ補強のために躯体軸方向に AFRP シートを貼り付け、その外周の帯鉄筋方向に AFRP シートを1層巻立てるものとする。

- (1) AFRP シートどうしの重ね継手長が十分でないとその引張強度に影響を及ぼす。そこで、重ね継手の実験を行い、AFRP シートの重ね継手部の長さを決めた。本来、AFRP シートの重ね継手長は、シート1枚の引張強度と樹脂の接着強度およびその接着長さにより決定されるので、シートの単位引張強度ごとに定められるべきである。
- (2) AFRP シートは、面取りを施された 135° の隅角部や、90° のコーナーに設けた半径 10mm 程度の曲面における引張強度の低下はほとんど生じない。実構造物はほとんど面取りが行われているので、隅角部をサンダーにてコンクリートの突起などを取り除くことを原則とした。
- (3) 補強が曲げ補強だけで帯鉄筋方向には設計上 AFRP シートを配置しなくてもよい場合でも、帯鉄筋方向の AFRP シートが、曲げ補強の AFRP シートとコンクリートとの一体性を強化することができるので、上記のように規定にした。

# 施工編

## 1. 一般

本要領は、既存鉄筋コンクリート構造物の耐震補強のうち、橋脚をアラミド繊維シートで補強する工法の施工に適用する。

アラミド繊維シート補強工法は、工法の特徴を理解し、本要領に従い施工しなければならない。本要領に記載されていない事項については、関連する基準、規準、および要領による。なお、本要領では以下の示方書および要領を引用している。

- ・ 日本道路協会;道路橋示方書・同解説 I～V 平成 29 年 11 月
- ・ 土木学会;コンクリート標準示方書 平成 29 年版 施工編
- ・ 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社;構造物施工管理要領 令和元年 7 月

アラミド繊維シート補強工法は、コンクリート表面にアラミド繊維シートをエポキシ系樹脂で接着含浸し、AFRP シートとして機能を発揮させる工法である。本工法は、各工種の施工手順を定めており、これらを遵守して形成された AFRP シートが工法としての所定の機能を発揮することができる。したがって、それらの内容を理解したうえで施工を実施する必要がある。

アラミド繊維シート補強工法は、以下の手順によるものとする。

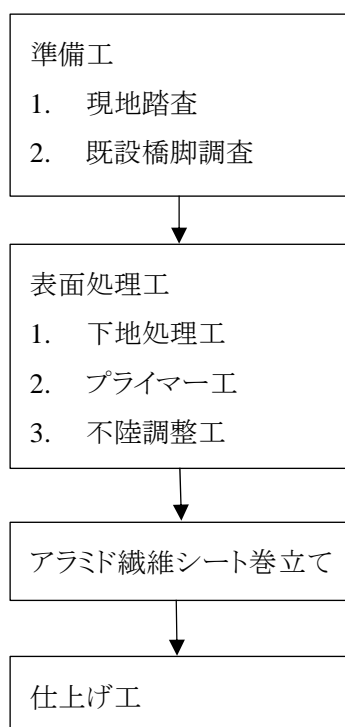


図-解 1.1 アラミド繊維シート補強工法の施工手順

## 2. 施工

### 2.1 施工計画

工事に先立ち材料の搬入と保管、機材の搬入、下地処理、アラミド繊維シートの貼付け、および巻立てについて検討し、施工および工程の計画を立てなければならない。

施工計画、施工および施工管理は、本工法に関する設計・施工上の基礎知識や材料の特性・使用上の留意点に関する知識を有する技術者によって行わなければならない。施工時の管理者や作業者の知識・技量に大きな影響を受けることから、施工管理および施工技能に関する資格認定制度が、外部団体(繊維補修補強協会)に設けられており、施工技術者の選定にあたっては、資格の有無、経験年数なども考慮することが望ましい。

既設橋脚の補強工事では、環境条件などで制約される場合が多く、施工計画を立てるには検討が必要である。例えば、樹脂の調合で有機溶剤などの危険物を使用する場合は、作業者に安全教育を行う必要がある。また、巻立ての施工時期における気温や湿度の条件に留意しなければならない。施工手順と品質管理方法は、以下に規定する。

### 2.2 施工手順

#### 2.2.1 使用材料の保管

使用材料は、材料品質に影響を与えないように適切に保管しなければならない。

- (1) アラミド繊維シートは、暗所で、水、砂ぼこりなどがかからない乾燥した場所に保管しなければならない。
- (2) プライマーおよび含浸樹脂などのエポキシ樹脂は、水、砂ぼこりなどがかからない冷暗所に保管しなければならない。

アラミド繊維シートは、エポキシ樹脂を含浸してFRP化する前の状態で紫外線に暴露されると強度が低下する。したがって、太陽光に直接さらされるような状態で放置してはならない。プライマー、含浸樹脂も有機化学製品であり、保管中に変質することを防止するためには、直射日光や高温下で長時間放置してはならない。



## 2.2.2 表面処理工

必要に応じて以下に示す(1)～(3)の表面処理工を行う。

### (1) 下地処理工

既設橋脚のコンクリート表面は、適切な下地処理方法により、脆弱部や汚れを取り除かなければならない。また、橋脚などの隅角部については突起などを除去し、半径 10mm 以上の面取りを行わなければならない。事前調査で補修が必要と認められた鉄筋の露出部、著しい断面欠損部、豆板などの不良部、および型枠目地の段差は、補修し平坦性を確保しなければならない。有害なひび割れは修復しなければならない。

### (2) プライマー工

既設コンクリートとアラミド繊維シートとの接着性を向上させるために、下地処理を行った既設コンクリート表面にプライマーを塗布しなければならない。

### (3) 不陸調整工

コンクリート面の段差などについては不陸調整材を用いて平坦に仕上げなければならない。

- (1) アラミド繊維シート補強工法は、接着剤による接着耐久性が工法の信頼性や耐久性を左右するものであるため、橋脚などの表面の風化層、レイトンス層などの脆弱部分や汚れなどは、適切な処理方法にて除去しなければならない。また、隅角部については突起および段差を確実に除去しなければならない。通常のアラミド繊維シートを使用するときは、既存橋脚が面取りを有する場合は特別の処置を必要とせず、面取りが行われていない場合にのみ半径 10mm 以上の面取りを行う事と規定している。しかしながら、隅角部にアラミド繊維シートを確実に追従させ浮きを防止するため、面取りの有無に依らず半径 10mm 以上の面取りを行わなければならないものとした。表面処理工(下地処理工)はディスクサンダー処理を標準としてよい。

損傷の補修としては、断面修復工とひびわれ注入工が考えられる。断面修復工は、鉄筋の露出や著しい断面欠損部分、豆板などの不良部分がある場合に、その部分のはつりとともに、鉄筋を防錆処理した後、コンクリートと同等以上の強度を有する断面修復材で補修し、平坦に仕上げなければならない。また、ひびわれが生じている場合には、その部分に接着したアラミド繊維シートに過大な応力集中が起こる可能性があるため、低圧樹脂注入工法など適切な注入方法でひび割れを補修しなければならない。

- (2) プライマーの塗布は、コンクリート表面が十分に乾燥していること、雰囲気温度が 5℃以上である必要がある。ただし、施工現場の保温など適切な処置を講じる場合はこの限りではない。

表-解 2.1 コンクリートの乾燥状態

目視による状態	表面水分率	プライマーの種類
白く乾燥している	8%未満	一般用プライマー
黒く変色している 結露している	8%以上	乾燥処理を行う

標準的な施工手順と注意点を以下に示す。

- 1) プライマー工に先立ち、コンクリート表面が乾燥状態であることを確認する。  
原則として気温が 5℃以下あるいは雨天等湿度 85%以上では施工してはならない。
  - 2) プライマーが指触硬化の状態になるまでに、外気温度が 5℃以下になる場合は、適切な保温処置を行う。
  - 3) プライマーを所定の配合比で均一になるまで十分に攪拌する。
  - 4) 1 回の調合量は可使時間以内に使用し終える量とする。
  - 5) 施工面にローラー刷毛にてプライマーを均一に塗布する。
  - 6) 製品により規定された標準使用量を参照する。ただし、標準使用量は、コンクリートの表面状態により変動することに留意する。
- (3) 不陸調整工は、下地処理工および断面補修工を行った後に残された小さな型枠段差や小さなエアホールなど、アラミド繊維シート巻き立て後に気泡や浮きの原因となる不良部分を仕上げるために実施する。不陸調整工に用いる材料は、樹脂系のパテ材やモルタルなどを適宜選択して使用する。

小さなエアホールの数が多い場合、左官仕上げの要領で全面仕上げを行う事が望ましい。特に、高耐力シートを使用する場合、浮き、膨れとコンクリート面に直接塗布する第1層目の下塗り量の不足を防止するために不陸調整の仕上がり状態には注意しなければならない。

### 2.2.3 アラミド繊維シート貼付け・巻立て工

アラミド繊維シートの貼付け・巻立ては、アラミド繊維シート補強の性能が発揮できるように、浮き・膨れなどが生じないようにしなければならない。

- (1) アラミド繊維シートおよび含浸接着樹脂は、設計図書に定められた仕様のものを使用しなければならない。
- (2) アラミド繊維シートの貼付け・巻立ては、原則として雰囲気温度が 5℃以下、あるいは雨天等湿度が 85%以上の場合は、施工してはならない。ただし、施工現場の保温などの適切な処置を行う場合はこの限りではない。
- (3) アラミド繊維シートに含浸接着樹脂を確実に含浸してコンクリートと密着させるため、念入りに脱泡を行わなければならない。

標準的な施工手順と注意点を以下に示す。

- 1) プライマーが指触乾燥していることを確認する。(揮発型プライマー使用時)
- 2) アラミド繊維シートは、設計図書に従い貼付け作業に適した長さに切断する。
- 3) 含浸接着樹脂を所定の配合比で均一になるまで十分に攪拌する。
- 4) 含浸接着樹脂の 1 回の調合量は可使時間以内に使用し終える量とする。
- 5) 施工面にローラー刷毛にて、下塗りの含浸・接着剤を均一に塗布する。アラミド繊維シートへ

の樹脂含浸は、下塗りの樹脂を含浸させる事が基本である。下塗り樹脂量は、シートメーカーや樹脂メーカーが定めている下塗り樹脂の標準塗布量に従う。

- 6) 含浸接着樹脂の塗布面にアラミド繊維シートを押しつけ、繊維方向に気泡を除去しながら貼り付ける。この際、シートの弛みが生じないように繊維方向に張力を加えた状態で徐々にシートを巻き出す。
- 7) FRP 用脱泡ローラーやゴムヘラを使用し、空気溜まりを除去するとともに含浸接着樹脂を十分にアラミド繊維シートに含浸させる。
- 8) 下塗りの含浸作業後、上塗り作業は直ちに行わず、15分程度の養生を行い樹脂の自然含浸を期待する。ただし、含浸接着樹脂の可使時間を超えて放置してはならない。
- 9) 貼り付けたアラミド繊維シートの上から、上塗り樹脂として含浸接着剤をローラー刷毛にて均一に塗布し、FRP 用脱泡ローラーやゴムヘラを使用し、含浸接着樹脂の含浸を完全に行う。
- 10) 製品により規定された標準塗布量を遵守する。ただし、標準塗布量は、アラミド繊維シートの種類により変動することに留意する。
- 11) 2層以上を積層する場合には、5)～9)の作業を繰り返す。
- 12) 含浸接着樹脂が、初期硬化に至るまでに外気温度が5°C以下になる場合は、適切な保温処置を行う。
- 13) 連続して多層張りを行う場合には、下層の含浸接着樹脂の指蝕乾燥状態を確認した後に上層の施工を行わなければならない。
- 14) 次層の巻立てに入る前に下層のシートの表面状態を観察し、浮きや膨れなどがあった場合は、樹脂の硬化状態に応じてエア抜きや樹脂注入などの処置を行ってから次工程に入らなければならない。
- 15) 施工中に結露が発生した場合には、ウェスなどで空拭きし乾燥などの対策を行った後に施工する。
- 16) 降雨時の雨水や強風時の砂などが付着しないように、必要に応じてビニールシートなどで養生を行わなければならない。

#### 2.2.4 仕上げ工

施工場所の立地条件および環境条件に応じて、仕上げ工を行わなければならない。

アラミド繊維シート補強工法の耐久性を向上させるため、遮光ならびに外力からの保護を目的とした仕上げ工を行わなければならない。仕上げ材の種類には、樹脂系の塗装材料、モルタル吹付けや、吹付け材料に塗装を組み合わせた複合塗膜など様々な種類があり、施工場所の立地条件、環境条件さらに美観にも配慮して適切な製品を選定することが望ましい。

耐火性能が要求される場合、条件に応じて温度が220°Cを超えない耐火被覆構造とする必要がある。

### 3. 品質管理および検査

#### (1) 品質管理

施工開始前に、各使用材料の品質を確認するとともに、機械および設備の性能を確認しなければならない。また、施工に際しては以下の計測・試験を実施して品質を確保しなければならない。

- 1) 環境条件の計測
- 2) 貼付け表面の観察
- 3) AFRP シートの引張試験
- 4) AFRP シートの接着試験
- 5) 仕上げ材の性能試験

#### (2) 検査

施工が完了した後、各使用材料の数量検査、出来形検査を行わなければならない。また、AFRP シートの貼付け状況、仕上げ工の仕上がり状況を目視などにより確認しなければならない。

#### (1) 品質管理

施工開始前に、各使用材料の品質を製造者発行の試験成績表で確認しなければならない。また、使用する施工機械および設備の性能を製造者発行の仕様書により確認しておかなければならない。施工中の品質管理として実施する計測および試験項目は、以下の方法を標準とする。

##### 1) 環境条件の計測

環境条件の計測は、プライマー塗布工およびアラミド繊維シート巻立て工において使用する樹脂材料の品質管理を目的として行い、樹脂材料の施工条件を満足していることを確認する。計測項目は、天候、施工場所の雰囲気温度、コンクリートの表面水分率、およびAFRPシート表面の結露の有無などがある。それぞれ目視または計測機器を用いて測定を行い、施工条件を満たしていることを確認してから施工を行う。

環境条件の計測は、施工期間中の全日において施工開始前に実施しなければならない。表-解 3.1 に計測された外気温による品質管理手法の一例を示す。ただし、樹脂の適正な施工条件(外気温)は、メーカーによって異なることがあるため、メーカーの施工要領書などに従うこと。

表-解 3.1 外気温による品質管理例

外気温*1	冬用樹脂		夏用樹脂	
	注意事項	対策	注意事項	対策
5°C以下	施工性の著しい低下	総合的な施工対策	適用外	
5°C～ 10°C	含浸性の低下、硬化の遅延、白化現象の発生	含浸状態に注意 補助具の使用*3 温暖所に保管 保温養生	適用外	
10°C～ 15°C	適正温度		適用外	
15°C～ 20°C*2	粘着性の低下、 可使時間の短縮	接着状態に注意 1回の作業量に注意 冷暗所に保管 直射日光を遮断して施工	含浸性の低下、 硬化の遅延	含浸状態に注意 補助具の使用*3 温暖所に保管 保温養生
20°C～ 25°C	適用外		適正温度	
25°C～ 30°C	適用外		粘着性の低下、 可使時間の短縮	接着状態に注意 1回の作業量に注意 冷暗所に保管 直射日光を遮断して施工
30°C以上	適用外		施工性の著しい 低下	総合的な施工対策 樹脂の変更

\*1：温度範囲は、使用する含浸接着樹脂の温度特性により異なる。

\*2：樹脂の適用温度が重複する範囲においては、気象条件、立地条件などを考慮してタイプを選択する。

\*3：アイロンやヒートローラなどの加熱により含浸性を補助する用具

## 2) 貼付け表面の観察

アラミド繊維シート巻立て工の表面の観察による管理項目を表-解 3.2 に、対象となる不良状態を表-解 3.3 にそれぞれ示す。

アラミド繊維シートの直線性に影響する位置ずれは、層数の増加と共に位置ずれが累積する傾向があるので、1層毎に観察し許容範囲内となるように施工する。酷暑期や厳寒期、連続して多層貼りを行う場合などは、含浸接着樹脂の状態によりだれが生じ易くなる場合があり注意が必要である。

アラミド繊維シートの接着性に影響するシートの浮きや膨れなどの未接着部は、巻き立て後、硬化と共に徐々に発生し進行する。このため、次層の巻き立てに入る前に下層のシートの表面状態を観察し、浮きや膨れなどがあった場合は、樹脂の硬化状態に応じてエア抜きや樹脂注入などの処置を行わなければならない。直射日光が当たる施工面は、浮きや膨れが発生し易くなる場合があり、注意が必要である。

表-解 3.2 品質管理項目

管理項目	管理値	対象となる不良状態
直線性	不良部の位置ずれの大きさが辺長または直径の 1/200 以下	波打ち、傾斜、段差、だれなどの位置ずれ
接着性	不良部の面積が 1 個につき 10cm <sup>2</sup> 以下、不良部の合計面積が全面積の 0.5% 以下	浮き、膨れなどの未接着部

表-解 3.3 施工不良の種類

管理項目	名称	状態	原因
直線性	波打ち	繊維が波打ち直線性が無い	張力不足、整形不足
	傾斜段差	繊維の方向が補強方向より傾く 接手部に段差が生じる	張力不均等、整形不足
	だれ	自重で局所的に垂れ下がる	張力不足、樹脂量過多、 含浸不足、高・低温時の施工
接着性	浮き	シートは平面であるが付着が無い	含浸不足、樹脂量過少、 不陸調整不足、直射日光
	膨れ	シートが膨れ上がり付着が無い	含浸不足、樹脂量過少、 不陸調整不足、直射日光

## 3) AFRP シートの引張試験

AFRP シートの引張試験は、アラミド繊維シート巻立て工における AFRP シートの品質管理を目的として行い、AFRP シートの複合材料としての強度性能を評価する。AFRP シートの引張試験は、JIS A 1191:2004 に規定する引張試験方法によるものとする。ただし、AFRP シートの引張試験の試験片は B 形試験片とする。試験片は現場で製作し、硬化後、引張強度とヤング係数を測定する。なお、試験頻度は各工事、各使用材料のロット毎に 1 回とする。

試験結果の評価は、5 個の試験片の測定結果を用いて評価する。チャック切れその他の要因により、正常な測定結果が得られなかった場合は、正常な測定結果が 5 個得られるまで試験片を追加する。

a) 試験片の形状・寸法

- ・AFRP シート：幅  $12.5 \pm 2.5 \text{mm}$  × 長さ 200mm 以上
- ・試験区間長さ：100mm 以上

b) 引張強度とヤング係数の評価

- ・引張強度：次表に示す規格値以上
- ・ヤング係数：次表に示す規格値の範囲内

表-解 3.4 品質規格

シートの種類	項目	規格
アラミド 1	引張強度	2060N/mm <sup>2</sup> 以上
	ヤング係数	118±20kN/mm <sup>2</sup>
アラミド 2	引張強度	2350N/mm <sup>2</sup> 以上
	ヤング係数	78±15kN/mm <sup>2</sup>

4) AFRP シートの接着試験

AFRP シートの接着試験は、表面処理工におけるコンクリートの状態およびアラミド繊維シート巻立て工における AFRP シートの積層化の均質性を品質管理するために行い、AFRP シートとコンクリート間の接着性能および AFRP シート間の接着性能を評価する。

AFRP シートの接着試験は、JSCE-E 545:2013 に準拠して実施する。現位置試験として試験を行う場合、補強区間内に試験箇所を設定すると AFRP シートを切断し補強効果を減ずるため、試験後に試験位置の補修を行うなど注意が必要である。このため AFRP シートの接着試験は、補強範囲外に試験区間を設定して実施することが望ましい。また、あらかじめ試験用に準備したコンクリート板にアラミド繊維シートを貼り付けて接着試験を行う方法もある。これらの際、AFRP シートの貼付けは、補強区間と同様の仕様で行わなければならない。なお、試験頻度は各工事につき 1 回以上とし、試験数は 5 個以上とする。

a) 試験体

接着試験用アタッチメントは、接着面が 40×40mm の鋼製引張用治具を用いる。現位置試験によらずコンクリート板を使用する場合、アラミド繊維シートを接着するコンクリート板の強度は、既存橋脚のコンクリート強度以上のものを用いなければならない。

b) 接着強度

AFRPシートとコンクリートの境界面での剥離やAFRPシート内部での層間剥離が生じた場合は、不合格とし、AFRPシートと共にコンクリートが引き剥がれれば合格とする。ただし、境界面で剥離した場合でも接着強度が $1.5\text{N/mm}^2$ 以上あれば合格とする。

5) 仕上げ材の性能試験

仕上げ材の性能試験は、仕上げ工の品質管理を目的として行い、仕上げ材のAFRPシートに対する防護性能を判断するために行う。仕上げ工の目的および仕上げ材の種類には様々なものがあり、それらに応じて適切な試験方法を選定しなければならない。

遮光による耐久性の向上を目的とした場合、仕上げ材の遮光効果は、仕上げ材とAFRPシートの促進劣化試験によって代替評価してよい。

接着試験は、JIS A 6909:2014 に準拠し、同規格中の鋼製治具による引張試験方法とする。

(2) 検査

施工が完了した後、各使用材料の検査を実施する。プライマー、含浸接着樹脂は、数量検査として空缶の数により確認する。アラミド繊維シートの使用量は、出来形検査として貼付け面積と積層数を確認する。また、仕上げ材料の使用量は、材料の種類に応じて適切な検査方法を選択する。

目視による検査でAFRPシートの広範囲の浮きが確認された場合は、内部の気泡に樹脂注入を行わなければならない。また、仕上げ材に関してAFRPシートの露出個所が認められた場合は、該当個所の上塗り塗装などを行わなければならない。



## 4. 安全管理

エポキシ系樹脂などの汚染・吸入による災害に対して適切な対策をたてなければならない。さらに、アラミド繊維シート補強工法に関する一般的な注意事項に対して適切な対策をたてなければならない。

アラミド繊維シート補強工法におけるプライマーや含浸樹脂などのエポキシ系樹脂を使用することや、作業状況が狭隘部や高所作業となることによる労働災害防止のために、十分な対策をたてなければならない。エポキシ系樹脂などの汚染・吸入による災害の防止のため、以下の対策を行わなければならない。

- ・樹脂および有機溶剤の取扱いに関して、消防法や有機溶剤中毒予防規則（有機則）などの法令の規制の対象となるものは適切に法令に則った処置を行う。
- ・樹脂および有機溶剤の保管は、保管場所を定め、各法令に定められた貯蔵の表示、掲示、溶剤区分の表示などを行わなければならない。
- ・ハンドミキサーなどによる樹脂の練り混ぜ時には換気に注意し、必要に応じて送風機やダクトによる強制換気を行わなければならない。
- ・樹脂が直接肌に触れると皮膚障害を起こすこともあるので、肌の露出は避けるとともに、必ず保護メガネ、保護マスク、ビニール手袋などの安全保護具を着用しなければならない。



# 付 属 資 料

注：令和 3 年 4 月における付属資料の改訂は、「付属資料 1 AFRP シートの諸特性」のうち「1. AFRP シートの補強工法用材料の種類」を中心とした。



## 付属資料 1 AFRP シートの諸特性

### 1. AFRP シートの補強工法用材料の種類

#### 1.1 アラミド繊維

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で、ゴム資材の補強、ロープ類、手袋などの安全防具、防弾材などに広く使用されている。現在、世界における生産能力は約 10 万 ton である。アラミド繊維はそれを構成するアミン成分が1種類のアラミド 1 と 2 種類のアラミド 2 の二つがある。それぞれの繊維の代表的な特性を付属表-1.1 に示す。

付属表-1.1 アラミド繊維の代表的な特性

種類		アラミド 1	アラミド 2
繊維商品名		ケブラー® トワロン®	テクノーラ®
繊維性能	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	3000	3400
	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	110	74
	破断伸度 (%)	2.4	4.5
	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.45	1.39

#### 1.2 AFRP シート

本工法に用いられる AFRP シートは、単位幅 (1m) あたりの保証耐力 (kN/m) により規格化されている。現在製品化されているシートの種類と規格値を付属表-1.2 に示す。

付属表-1.2 AFRP シートの種類と規格値

繊維種類		アラミド 1				アラミド 2			
品番		AK40 AW40	AK60 AW60	AK90 AW90	AK120 AW120	AT40	AT60	AT90	AT120
引張強度	N/mm <sup>2</sup>	2060以上				2350以上			
ヤング係数	kN/mm <sup>2</sup>	118±20				78±15			
破断伸度	%	1.8				3.0			
密度	g/cm <sup>3</sup>	1.45				1.39			
目付量	g/m <sup>2</sup>	280	415	623	830	235	350	525	700
設計厚さ	mm	0.193	0.286	0.430	0.572	0.169	0.252	0.378	0.504
保証耐力	kN/m	392	588	882	1176	392	588	882	1176
	(tf/m)	(40)	(60)	(90)	(120)	(40)	(60)	(90)	(120)

付記：品番表記について

- AK40 (-10)      1 文字目：アラミド  
 AW60 (-30)      2 文字目：商品名…K:ケブラー® W:トワロン® T:テクノーラ®  
 AT90 (-50)      3 文字目以降の数字：保証耐力規格…40:392kN/m (40tf/m)  
 ( )内：シートの幅 (-50);50cm

## 2. AFRP シートの引張特性

### 2.1 引張強度とヤング係数

JIS A 1191:2004 によった試験結果で、引張強度を付属表-1.3 に、ヤング係数を付属表-1.4 にそれぞれ示す。

付属表-1.3 AFRP シートの引張強度

種類	アラミド1								アラミド2				
	ケブラー®				トワロン®				テクノーラ®				
繊維商品名	品名	AK40	AK60	AK90	AK120	AW40	AW60	AW90	AW120	AT40	AT60	AT90	AT120
試験体数		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
平均値 X (N/mm <sup>2</sup> )		2933	2861	2787	2606	3127	2901	2980	3022	3127	3110	2930	3022
σ (N/mm <sup>2</sup> )		191	171	138	94	162	196	137	93	136	107	120	93
X-3σ (N/mm <sup>2</sup> )		2360	2348	2373	2324	2641	2313	2569	2743	2719	2790	2571	2743
規格値		2060N/mm <sup>2</sup> 以上								2350N/mm <sup>2</sup> 以上			

付属表-1.4 AFRP シートのヤング係数

種類	アラミド1								アラミド2				
	ケブラー®				トワロン®				テクノーラ®				
繊維商品名	品名	AK40	AK60	AK90	AK120	AW40	AW60	AW90	AW120	AT40	AT60	AT90	AT120
試験体数		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
平均値 X (kN/mm <sup>2</sup> )		131	130	125	118	126	117	118	115	80	81	72	76
σ (kN/mm <sup>2</sup> )		4	3	8	6	6	8	5	6	5	4	3	3
規格値		118±20kN/mm <sup>2</sup>								78±15kN/mm <sup>2</sup>			

## 2.2 AFRP シートの積層枚数の影響<sup>1)</sup>

### (1) 試験の概要

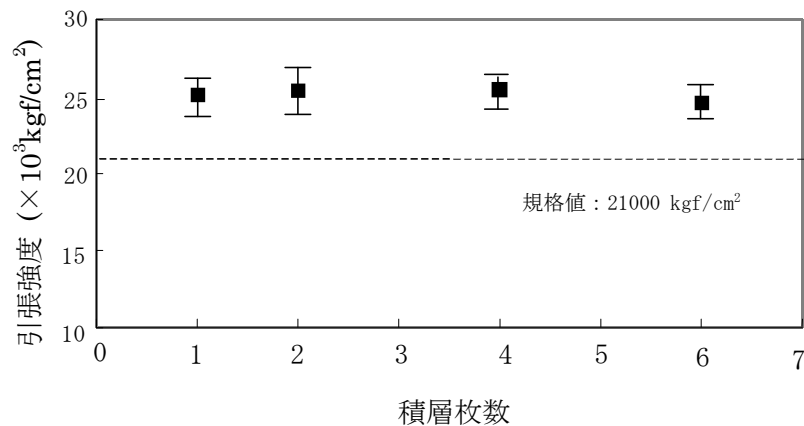
積層枚数によるシート強度への影響を確認するため、繊維シートの積層枚数を変えた試験片を作製し引張強度試験を実施した。

### (2) 試験片

目付量  $425\text{g/m}^2$  の繊維シートを使用し、積層枚数が 1～6 枚の試験片を引張強度試験と同じ方法で作製した。

### (3) 引張試験結果

引張強度試験の結果を付属図 1.1 に示す。本試験の結果が示すとおり 6 層までの積層では、積層枚数による強度低下は認められない。



付属図-1.1 シート積層枚数と強度の関係 (試料: アラミド 1 シート)

## 2.3 AFRP シートの曲げ内半径の影響<sup>1)</sup>

### (1) 試験の概要

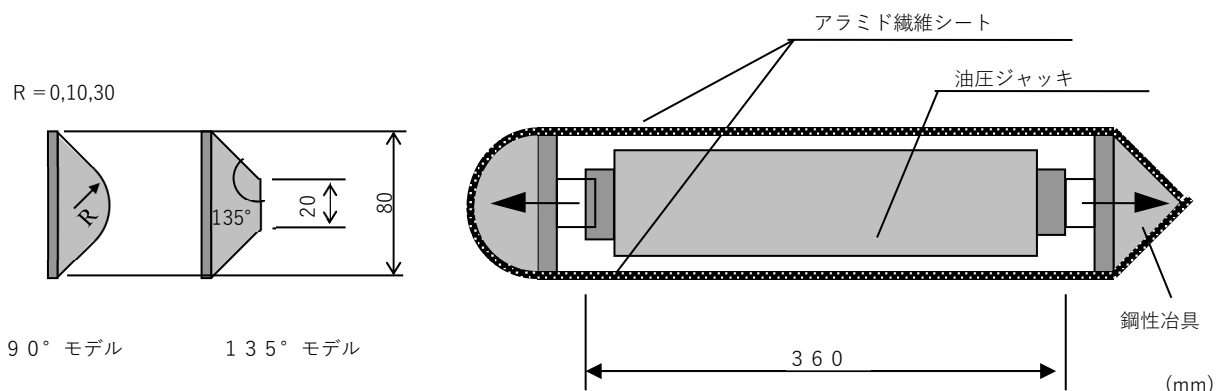
隅角部の曲げ内半径の大きさが AFRP シート強度へ与える影響を確認するため、隅角部の曲げ内半径をパラメータとして引張試験を実施した。

### (2) 試験片

曲げ加工部の形状を模した鋼製治具上にアラミド繊維シートを配置し、樹脂を含浸・硬化させて試験片を制作した。鋼製治具上の形状を付属図-1.2 に示す。隅角部の角度は、 $90^\circ$  および  $135^\circ$  とし、 $90^\circ$  モデルについては曲げ内半径の大きさを  $0\sim 30\text{mm}$  に変化させた。アラミド繊維テープの目付量は、 $425\text{g/m}^2$  の製品を使用した。

### (3) 試験方法

上記試験片を**付属図-1.2**の曲げ加工部引張試験装置を用いて試験を実施した。



**付属図-1.2** 曲げ加工部引張強度試験装置

### (4) 試験結果と考察

曲げ加工部の形状と引張強度の関係を**付属表-1.5**に示す。隅角部の角度が90°で面取りを行っていない場合、AFRPシートは隅角部で破断し、破断強度は母材強度の66%に低下した。しかしながら、隅角部が90°半径10mm以上の面取り加工を施した試験体は、すべて隅角部以外の位置において破断し、破断強度は母材強度とほぼ同等であった。さらに、隅角部の角度が135°で面取りを行っていない試験体は、隅角部が90°で面取り加工を施した試験体と同様に隅角部以外の位置において破断し、破断強度は母材強度とほぼ同等となった。

**付属表-1.5** 曲げ加工部の形状と引張強度の関係 (試料: アラミド1シート)

角度 (°)	面取り半径 (mm)	引張強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	破壊形式
90	0	179.2	隅角部破断
90	0	162.9	隅角部破断
90	10	256.6	母材破断
90	10	260.6	母材破断
90	20	272.8	母材破断
90	30	276.7	母材破断
90	30	260.9	母材破断
135	0	243.8	母材破断
135	0	244.4	母材破断



## 2.4 AFRP シートの重ね継手長試験

### (1) 試験概要

AFRP シートの重ね継手部の長さが強度に与える影響を検討するため、継手長をパラメータとして引張試験を実施した。

### (2) 試験片

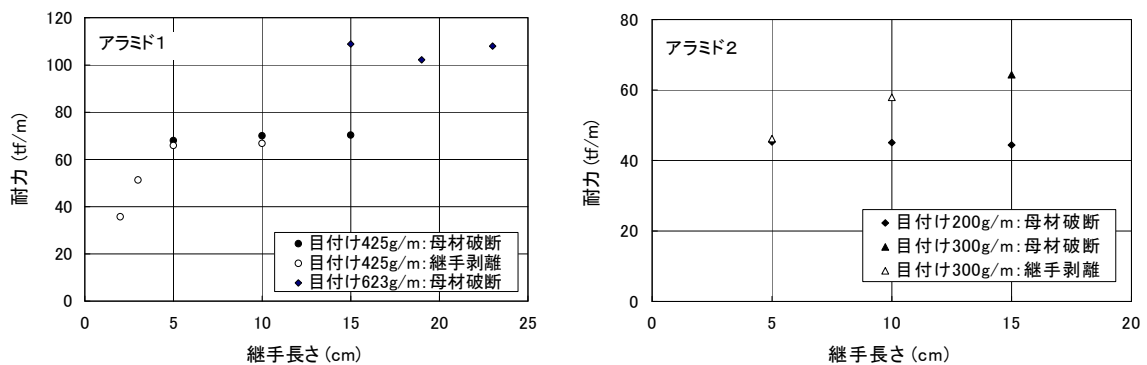
試験片は、2 枚の AFRP 繊維シートに順次樹脂を含浸させて所定の重ね継手長に整形した。試験は、前述の引張強度試験と同様な方法で実施した。試験に用いたシートは、アラミド 1 が目付量  $425\text{g/m}^2$ 、 $623\text{g/m}^2$  アラミド 2 が目付量  $200\text{g/m}^2$ 、 $300\text{g/m}^2$  とした。



付属図-1.3 試験片の形状

### (3) 試験結果

測定結果を付属図-1.4 に示す。重ね継手長が 15cm 以上の試験体は、接着面での剥離は認められず、すべて継手部以外の位置における母材破断となった。



付属図-1.4 重ね継手長と破断強度

### 3. AFRP シートの耐久性

#### 3.1 耐候性

アラミド繊維は他の有機繊維と同様に紫外線による影響を受ける。しかし、エポキシ樹脂で含浸・硬化されたロッドやシートでは、樹脂の紫外線遮蔽効果により劣化の程度は大きく緩和されることも知られている。さらに長期の耐久性を向上するためには、AFRP シートの表面を耐候性に優れた塗料やモルタルなどにより覆い紫外線を遮蔽するなどの施策が望ましい。ここでは、AFRP シートの長期耐久性に関する諸実験の結果を示す。

#### 3.2 AFRP ロッドの自然暴露試験<sup>1)</sup>

##### (1) 試験概要

AFRP シートの自然暴露試験のデータが現在十分に得られていないため、ここではエポキシ樹脂で含浸硬化した AFRP ロッド(アラミド 1)の海洋暴露実験の結果を示す。

##### (2) 試験片

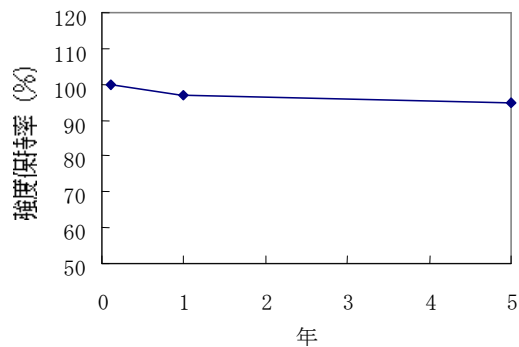
暴露試験に用いた供試体は、繊維を組紐状に編み、エポキシ樹脂で含浸・硬化して直径 7mm のロッドに整形したものである。

##### (3) 試験方法

試験体の自然暴露は、兵庫県尼崎市沖の海上にロッドを静置して行った。自然暴露試験は、1990 年 7 月より開始し、所定の暴露期間を経過した試験体の引張試験を順次実施した。

##### (4) 試験結果

5 年間の結果を付属図-1.5 に示す。5 年間での引張強度低下は 5%程度であった。



付属図-1.5 AFRP ロッドの海洋暴露試験

### 3.3 AFRP シートの促進劣化試験

#### (1) 試験概要

AFRP シートの促進劣化試験として紫外線カーボンアーク照射試験を実施した。

#### (2) 試験片

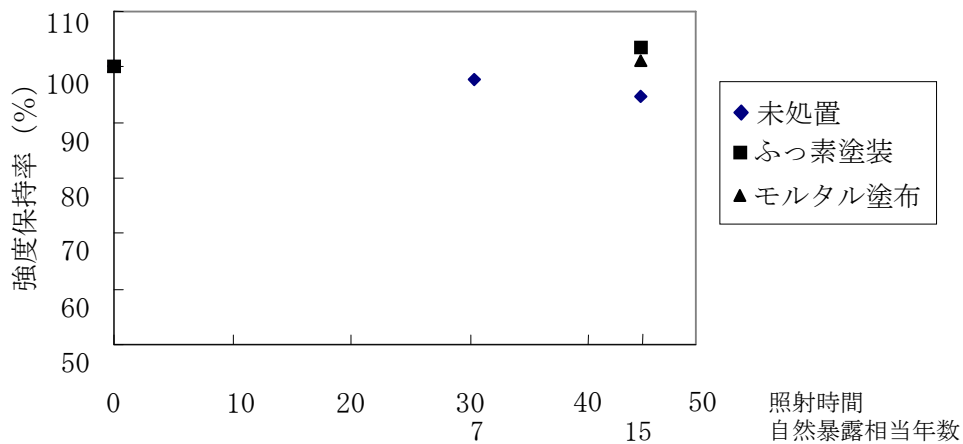
促進劣化試験の供試体はアラミド 2 の繊維シートにエポキシ樹脂を含浸硬化させた供試体、AFRP シートの上にさらに遮光塗料(ふっ素系)を塗布した供試体、および含浸シートの上にモルタルを塗布した供試体の 3 種類である。

#### (3) 試験方法

促進劣化試験は JIS A 1415 に準拠した。促進劣化試験は大日本プラスチック(株)製、アイ・スーパ-UV テスターで行った。促進劣化後の試験体は JIS K 7073:1988 に従って引張強度を測定した。

#### (4) 試験結果

試験結果を付属図-1.6 に示す。遮光処置を施していない供試体については、15 年の自然暴露相当期間の間に平均強度で 5%程度の低下が認められたが、遮光処置を施した供試体については強度低下が認められなかった。



付属図-1.6 AFRP シートの促進劣化試験結果 (アラミド 2 シート)

### 3.4 仕上げ塗料の紫外線透過率<sup>2)</sup>

#### (1) 試験概要

各種仕上げ材料の紫外線の遮蔽効果を確認するため、紫外線透過率を測定した。

#### (2) 試験片

フッ素系塗料、アクリルシリコン系塗料、ポリウレタン系塗料の3種を用いてそれぞれの塗料をスライドガラスに塗布した。塗装層数は、1層、2層、3層として各3体の試験体を制作した。さらに、無塗装のスライドガラスの1体についても紫外線透過率を測定とした。塗装は、スライドガラスに刷毛で塗装した後、1昼夜室温にて放置乾燥する方法で行い、乾燥後に塗膜の厚さをマイクロメーターにて測定した。

#### (3) 試験方法

供試体の紫外線透過率は、紫外線透過率測定器(島津制作所製;UV3100S)により測定した。測定波長は260~500nmである。

#### (4) 測定結果

サンプルの無い状態を100%とし、各供試体の透過率を百分率で付属表したものを**付属表-1.6**に示す。いずれの塗料を塗布した試験体も紫外線を100%遮蔽することが確認できた。

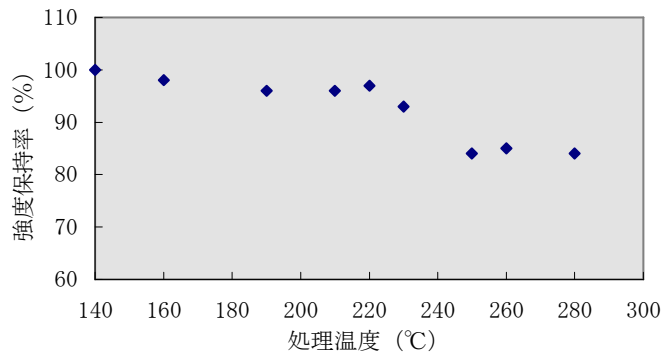
付属表-1.6 仕上げ塗料の紫外線透過率

	塗装層数	塗膜厚さ	紫外線透過率(%)			
	(層)	(mm)	300nm	320nm	380nm	460nm
スライドガラス	—	—	46	90	92	92
フッ素系	1	0.025	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.050	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.075	0.00	0.00	0.00	0.00
シリコン アクリル系	1	0.025	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.050	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.075	0.00	0.00	0.00	0.00
ポリウレタン系	1	0.025	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.050	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.075	0.00	0.00	0.00	0.00

## 4. AFRP シートの耐熱性

### 4.1 AFRP シートの耐熱性試験

AFRP シートを乾熱状態で 2 時間加熱した後、常温にもどした状態での引張試験を行った。それぞれの処理温度における強度保持率を付属図-1.7 に示す。エポキシ樹脂の耐熱温度である。220℃までは十分な強度を保持している。



付属図-1.7 耐熱試験結果 (試料: アラミド 1 シート)

### 4.2 継手部の耐熱性試験

継手部界面の樹脂に雰囲気温度が与える影響を検討するために、継手長さが 10cm の AFRP シートの試験体を製作し、所定の雰囲気温度で 2 時間加熱したのちの引張強度を測定した。結果を付属表-1.7 に示す。樹脂の耐熱温度にほぼ近い 230℃までは強度低下は認められない。

付属表-1.7 継手部の耐熱性 (試料: アラミド 2 シート)

熱処理温度 (°C)	引張強度保持率 (%)	破壊箇所
20	100	母材破壊
180	100	母材破壊
230	100	母材破壊
260	77	母材破壊

### 4.3 AFRP シートの耐熱性向上

耐震補強部分が火災もしくは他の高温条件にさらされる恐れのある場合は、含浸樹脂の耐熱性(220℃)を目処に、適切な防火、断熱処置を施す必要がある。

#### 参考文献

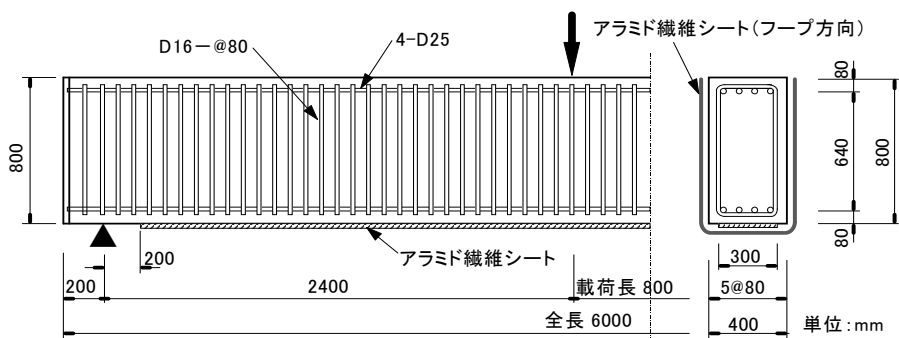
- 1) 三井建設(株)：FITS工法技術資料
- 2) 帝人(株)：社内技術資料
- 3) 神鋼鋼線工業(株)：高機能繊維複合材「フィブラ」技術資料
- 4) 帝人(株)：社内技術資料
- 5) 三井建設(株)：社内技術資料

## 付属資料 2 AFRP シートとコンクリートの付着特性

アラミド繊維シート補強工法における曲げ補強は、コンクリート表面に貼り付けた AFRP シートに曲げモーメントによる引張力を負担させるものである。所定の曲げ補強効果を得るためには、AFRP 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なければならない。

AFRP シートを貼り付けた梁の曲げ補強実験により、AFRP シートとコンクリートとの付着性状を検討した。試験体は、付属図-2.1 に示すように幅 40cm、高さ 80cm、長さ 600cm とした。使用したアラミド繊維シートはアラミド 1 (AK-60) およびアラミド 2 (AT-60) で、パラメータは積層数(補強量)とフープ方向 AFRP シート(付着補強)の有無とした(付属表-2.1)。

付属図-2.2 に荷重と鉛直方向の変位の関係を示す。無補強の試験体と比較して、AFRP シートにより補強した試験体では、最大荷重が増加した。曲げ補強用シート 3 層の場合、K-3 試験体はシートが付着切れしたのに対し、付着補強した K-3F 試験体は最大荷重が増加するとともにシートが破断し、付着補強の効果が見られた。曲げ補強用シートが 5 層の場合、K-3F よりも最大荷重は上回ったが、フープ方向に貼り付けた付着補強用シートが梁の隅角部に沿って破断し、荷重が低下した。

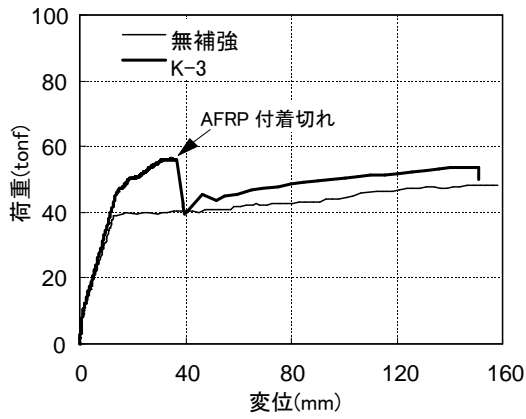


付属図-2.1 試験体形状

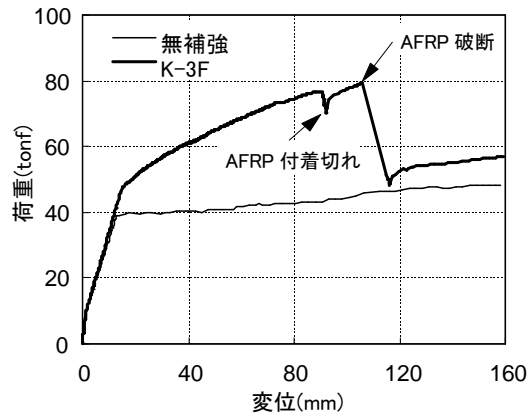
付属表-2.1 試験体一覧

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*1	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

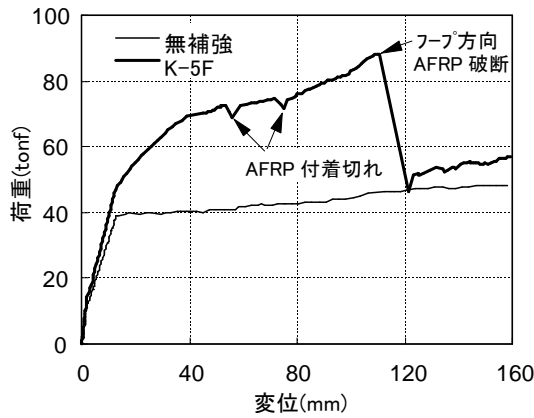
\*1: 計算終局変位時の荷重、\*2: 梁圧縮縁破壊



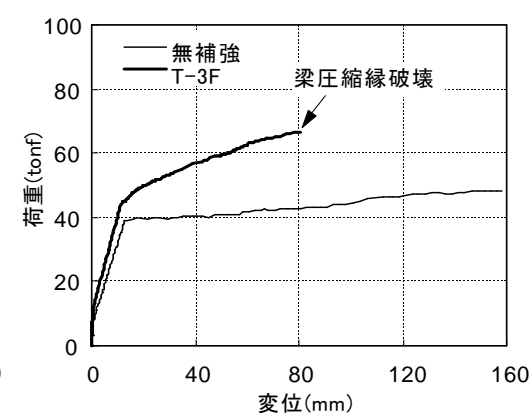
(a) K-3



(b) K-3F



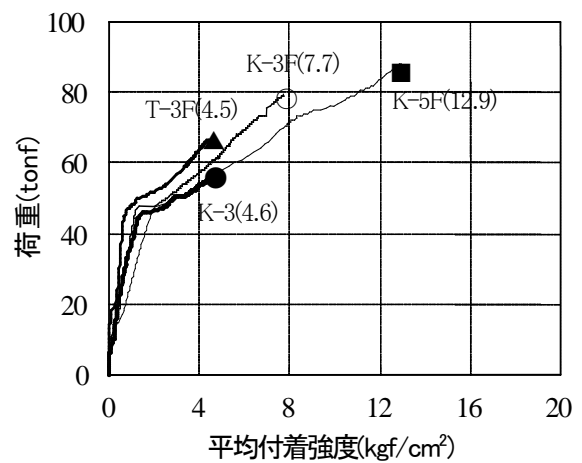
(c) K-5F



(d) T-3F

付属図-2.2 荷重-変位関係

AFRPシートに貼り付けたひずみゲージの値を用いて、式(3.4.5)から求めた平均付着強度と荷重の関係を付属図-2.3に示す。図より、主鉄筋の降伏後、平均付着強度の増加が著しくなることが分かる。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で K-3 で  $4.6\text{kgf/cm}^2$ 、付着補強した K-5F で  $12.9\text{kgf/cm}^2$  となる。



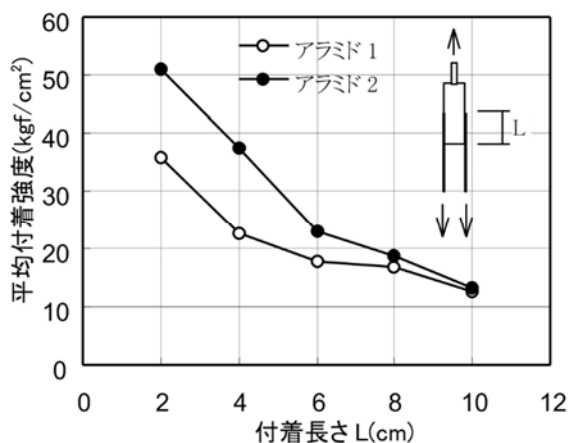
付属図-2.3 平均付着強度



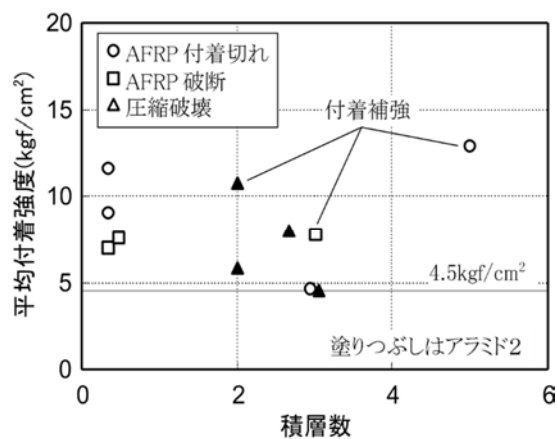
AFRP シートとコンクリートとの水平せん断試験結果(付属図-2.4)によれば、シートの付着長さが大きくなると平均付着強度が小さくなり、10 kgf/cm<sup>2</sup>程度に収束することが分かっている。

既往の曲げ補強試験(試験体サイズ:1.4×0.15×0.15m と 4.0×0.4×0.4m)の結果も併せて、AFRPシート層数と平均付着強度の関係を付属図-2.5に示す。本指針では、AFRPシート曲げ補強において設計定着長さを平均付着強度で評価することとし、その値は付属図-2.5における下限値の4.5 kgf/cm<sup>2</sup>とする。

所定の定着長の確保が困難な場合においては、適切な方法で付着補強を行った上で、最大で7.5 kgf/cm<sup>2</sup>を用いてよいものとする。ただし、その場合でも、既往の試験体の定着長さを参考とし、定着長さが220cm以下の場合に限るものとする。



付属図-2.4 水平せん断試験結果



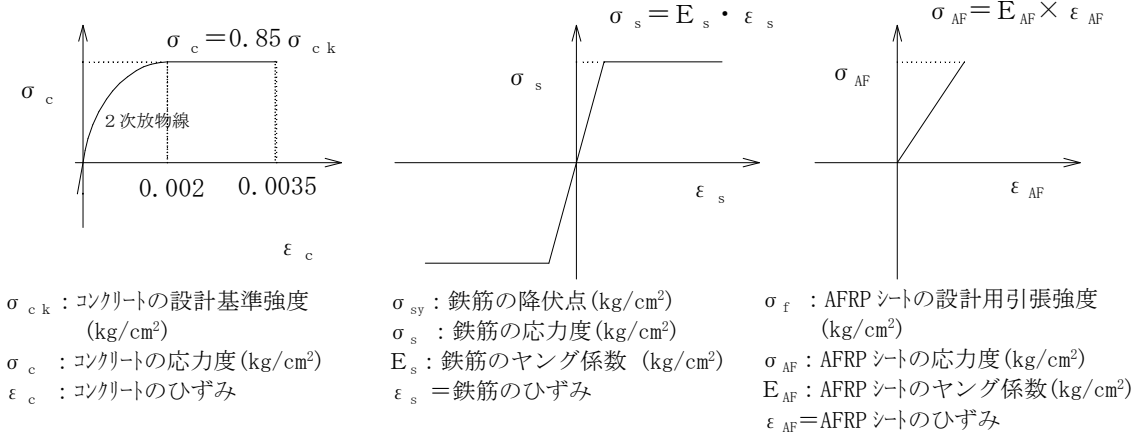
付属図-2.5 曲げ補強量—平均付着強度の関係

## 付属資料 3 AFRP シートで補強した部材の曲げ耐力の算定

### 1. 曲げ耐力の算定

塑性ヒンジを想定しない部位の曲げ耐力は、コンクリート、鉄筋、および AFRP シートについては付属図-3.1~3.3 に示す構成則を用い、以下の仮定に基づき算定するものとする。

- (1) 維ひずみは、中立軸からの距離に比例する。
- (2) コンクリートの応力度～ひずみ曲線は、付属図-3.1 のとおりとする。
- (3) 鉄筋の応力度～ひずみ曲線は、付属図-3.2 のとおりとする。
- (4) アラミド繊維シートの応力度～ひずみ曲線は、付属図-3.3 のとおりとする。



付属図-3.1 コンクリート

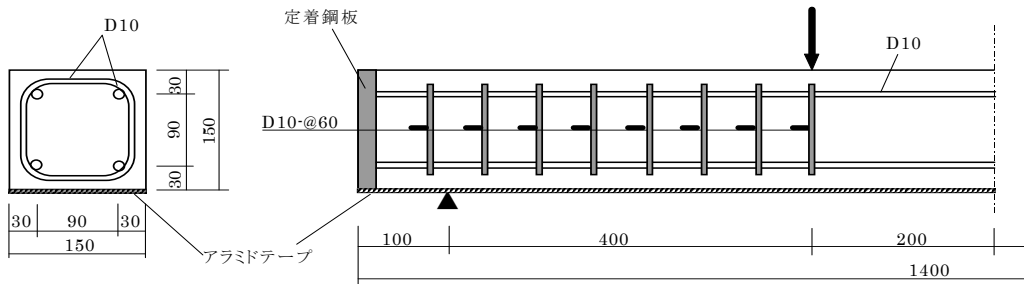
付属図-3.2 鉄筋

付属図-3.3 シートの応力歪み関係

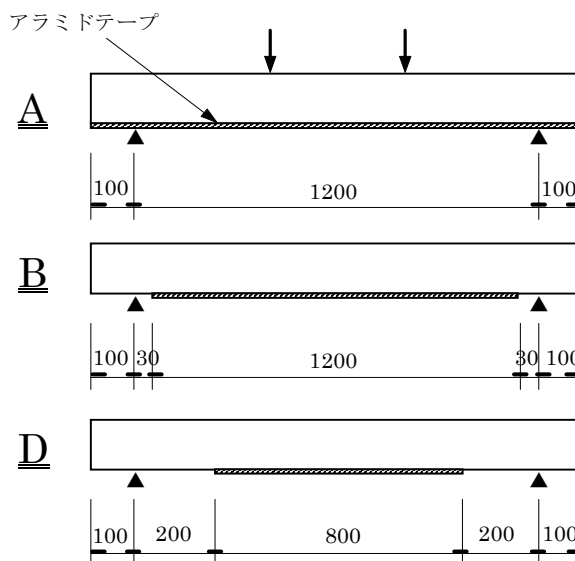
### 2. 補強した梁の曲げ実験

アラミド繊維シートを RC 部材の引張表面に貼り付けることにより、部材の降伏耐力および最大耐力の増加を期待することができる。以下にその効果を確認するために行った、実験的検討を示す。

試験体は、幅 15cm、高さ 15cm、長さ 140cm の梁とし、付属図-3.4 に示す。表面処理の方法やアラミド繊維シートの貼付け方法をパラメータとした。実験のパラメータを付属表-3.1 に、アラミド繊維シートの貼付け方法を付属図-3.5 に示す。試験に用いた材料の特性を付属表-3.2 に示す。



付属図-3.4 試験体形状



付属図-3.5 アラミド繊維シート貼付け方法

付属表-3.1 供試体の種類

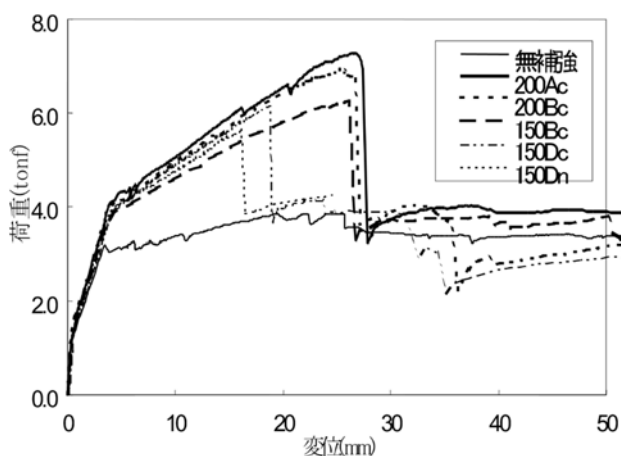
試験体名	貼り付け方法	目付量( $\text{g}/\text{m}^2$ )	表面処理
無補強	—	—	—
200Ac	A	200	ブラスト処理
200Bc	B	200	ブラスト処理
150Bc	B	150	ブラスト処理
150Dc	D	150	ブラスト処理
150Dn	D	150	サンダー処理

付属表-3.2 材料特性

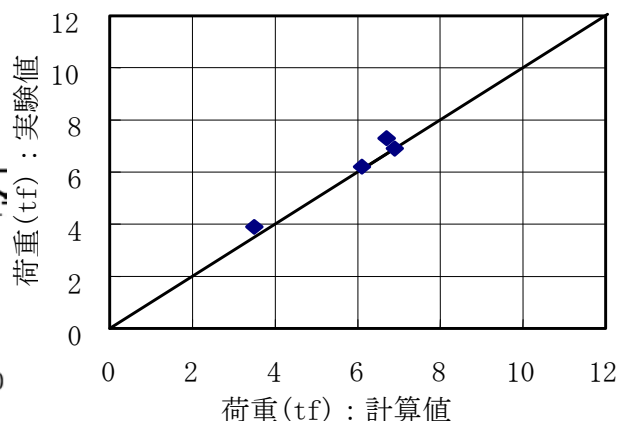
	コンクリート	鉄筋 (SD295)	アラミド
強度 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	464	3651	24820
ヤング係数 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	$3.3 \times 10^5$	$2.1 \times 10^6$	$1.29 \times 10^6$

付属図-3.6 に荷重と梁中央での鉛直変位の関係を示す。補強した試験体は、無補強の試験体に比べ、AFRP シートの剛性により降伏荷重が増加し、さらに最大荷重も増加していることがわかる。この図において、200Ac、200Bc、150Bc は AFRP シートが引張破断したもので、150Dc、150Dn は AFRP 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計算値を付属表-3.3 に示す。計算値は各材料の実際の強度を用いており、実験値が計算値をいずれのケースにおいても上回っている。その結果、有効率も1を上回っており、AFRP シートを曲げ補強に用いる場合、有効率として  $\alpha=1.0$  を用いることができる。



付属図-3.6 荷重－変位曲線



付属図-3.7 AFRPシートの計算値と実験値の関係(有効率)

付属表-3.3 実験結果の一覧

試験体名	最大荷重時		
	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

\* 計算値は、実際の強度により算出したものである。

注： AFRP シートの有効率を算出した。  
有効率は次式で定義した。

$$\alpha = (P_u - P_c) / (P_{cal} - P_c)$$

ここに、

$P_u$  : 最大耐力実験値

$P_c$  : 鉄筋コンクリート負担分 (計算値)

$P_{cal}$  : 破断強度を用いて求めた曲げ  
終局耐力 (計算値)

#### 付属資料 4 AFRP シートで補強した部材のせん断耐力の算定

せん断耐力  $P_s$  は、式(付 4.1)に示すように、コンクリートの負担するせん断耐力  $S_c$  と、帯鉄筋の負担するせん断耐力  $S_s$  の和に、AFRP シートが負担するせん断耐力  $S_{AF}$  を足し合わせて表すこととした。ただし、コンクリートの負担するせん断耐力  $S_c$  および帯鉄筋の負担するせん断耐力  $S_s$  は、道路橋示方書 IIIコンクリート橋・コンクリート部材編(以下：道示III) 5.8.2 により算出するものとする。

AFRP シートが負担するせん断耐力  $S_{AF}$  の設計式は、式(付 4.2)のように、帯鉄筋が負担するせん断耐力と同様にトラス理論に従うこととする。ただし、AFRP シートの引張強度を用いたトラス理論値は、AFRP シートのせん断補強効果を過大に評価する場合があるため、AFRP シートの引張強度  $\sigma_{AFk}$  に強度低減係数  $K_{AF}$  を乗じることにより、既往の実験結果を安全側に評価できるように定める。

$$P_s = S_c + S_s + S_{AF} \quad (\text{付 4.1})$$

$$S_{AF} = \frac{A_{AF}(K_{AF} \cdot \sigma_{AFk}) d(\sin\theta_{AF} + \cos\theta_{AF})}{1.15a_{AF}} \quad (\text{付 4.2})$$

ここに、

- $P_s$  : せん断耐力 (N)
- $S_c$  : コンクリートが負担するせん断耐力 (N)
- $S_s$  : 帯鉄筋が負担するせん断耐力 (N)
- $S_{AF}$  : AFRP シートの負担するせん断耐力 (N)
- $A_{AF}$  : 単位幅あたりの AFRP シートの断面積 (mm<sup>2</sup>)
- $K_{AF}$  : AFRP シートの強度低減係数
- $\sigma_{AFk}$  : AFRP シートの引張強度の規格値 (N/mm<sup>2</sup>)
- $d$  : せん断耐力を算定する方向に平行な方向の橋脚断面の有効高 (mm)
- $b$  : せん断耐力を算定する方向に直角な方向の橋脚断面の幅 (mm)
- $\theta_{AF}$  : AFRP シートが部材軸方向となす角度
- $a_{AF}$  : AFRP シートの単位幅 (mm)

以下に既往の実験結果と設計式を比較検討した結果を示す。

アラミド 1、アラミド 2 を用いた既往のせん断補強実験のうち、断面寸法があまり小さくない(断面の短辺が 25cm 程度以上)試験体で、付着割裂破壊などが生じず、主鉄筋が降伏する前にせん断破壊した実験での AFRP シートのせん断補強効果を付属図-4.1 に示す。

縦軸は各実験における AFRP シート補強によるせん断耐力増加量  $S_{AF.exp}$  のトラス理論による計算値  $S_{AF.truss}$  に対する比率を示す。なお、トラス理論による計算値では、AFRP シートの強度として、材料試験値を低減せずにそのまま用いている。

横軸は AFRP シートの補強量 ( $\rho_{AF} \times \sigma_{AFu}$ ) を示す。

ここに、

$\rho_{AF}$  : AFRP シートのせん断補強筋比

$$\rho_{AF} = A_{AF} / (b \cdot a_{AF})$$

$\sigma_{AFu}$  : 材料試験により測定された AFRP シートの破断強度

これによると、AFRP シートによるせん断補強効果は、シート強度として破断強度  $\sigma_{AFu}$  を用いたトラス理論値の 7 割程度以上である。したがって、 $K_{AF}=0.7$  とすれば既往の実験結果を安全側に評価できる。しかし、設計式においては、シートが弾性材料であることなどを考慮に入れて、1.15 程度の安全率を見込み、 $K_{AF}=0.6$  と定めることとする。また、設計式の AFRP シートの引張強度としては、材料試験により測定された AFRP シートの破断強度  $\sigma_{AFu}$  を 99% 以上の確率で安全側に評価する AFRP シートの引張強度の規格値  $\sigma_{AFk}$  を用いる。

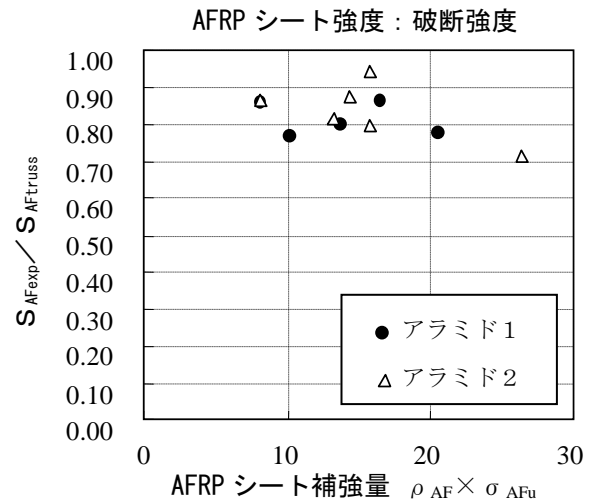
設計編の 2.2 では、AFRP シートの引張強度の規格値  $\sigma_{AFk}$  に強度低減係数  $K_{AF}=0.6$  を乗じたものを設計引張強度  $\sigma_{AFd}$  として規定している。これに従うと、式(付 4.2)は式(付 4.3)のように書くことができる。

$$S_{AF} = \frac{A_{AF} \sigma_{AFd} d(\sin \theta_{AF} + \cos \theta_{AF})}{1.15 a_{AF}} \quad (\text{付 4.3})$$

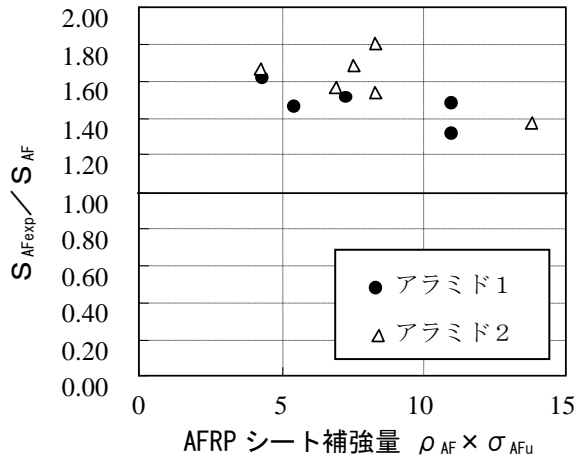
ここに、

$\sigma_{AFd}$  : AFRP シートの設計引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

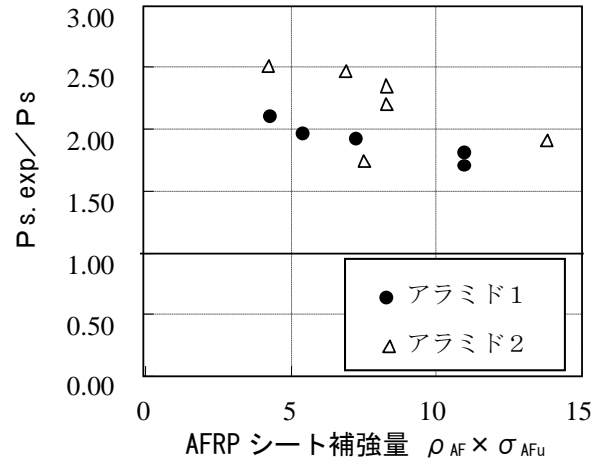
式(付 4.2)により算出した AFRP の負担するせん断耐力  $S_{AF}$  と実験結果を比較すると、付属図-4.2 に示されるとおり、既往の実験結果を安全側に評価できる。また、式(付 4.1)、式(付 4.2)で算出した各試験体のせん断耐力設計値  $P_s$  と実験値  $P_{s.exp}$  を比較すると、付属図-4.3 に示されるように実験値が設計値をかなり上回っており、一般の帯鉄筋を用いた場合と同様に、本設計式は既往の実験結果をかなり安全側に評価できる。



付属図-4.1 AFRP シートによるせん断耐力増加量の実験値とトラス理論値の比較



付属図-4.2 AFRPシートによるせん断耐力増加の実験値と設計値の比較



付属図-4.3 せん断耐力設計値と実験値との比較

#### 参考文献

中島規道、中井裕司、渡辺忠朋、松本信之：アラミド繊維シートにより補強した鉄道高架橋のせん断性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16,No.2,1997.6

## 付属資料 5 AFRP シートの拘束効果とコンクリートの応力度－ひずみ曲線

### 1. 一軸圧縮試験方法

AFRP シートを RC 柱の周囲に巻き付ける事により、部材の変形性能が大きく増加する事が確認されている。変形性能の向上効果における、コンクリートの応力度－ひずみ関係を把握するため、AFRP シートにより補強したコンクリート柱の圧縮試験を実施した。

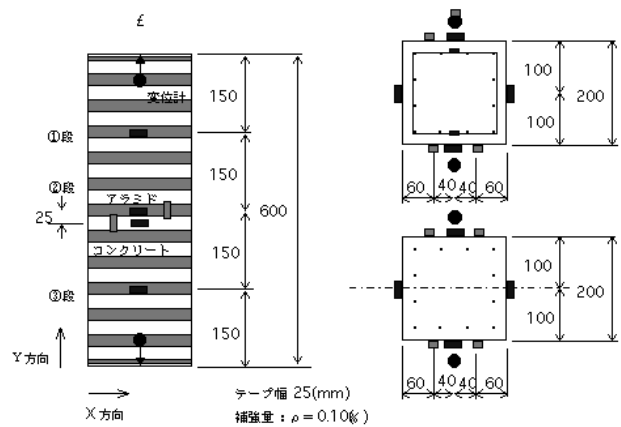
試験体は、付属図-5.1 に示す 200×200×600 (mm) の角柱試験体を使用した。試験のパラメータは、繊維シートの種類、AFRP シートの補強量、帯鉄筋の有無とした。各繊維シートは、目付量を調整し繊維換算の面積、すなわち体積補強量が等しくなるように設定し、補強量は実構造物に合わせて体積比で 0.0～0.3% の範囲に設定した(付属表-5.1 参照)。このため、AFRP シートによる補強は、細い帯状のシートをストライプ状に巻き付けて行った。使用材料および補強方法を付属表-5.2 および付属表-5.3 に示す。

試験は、200tf 万能試験機を使用し、載荷速度を毎秒 1.0kgf/cm<sup>2</sup> として静的に載荷を行った。また、破壊時の挙動を把握するために動的手法により計測を行った。試験時の標準試験体(φ100×200)によるコンクリートの圧縮強度は、315kgf/cm<sup>2</sup> であった。

### 2. 試験結果

#### 2.1 周方向ひずみ

軸方向ひずみと AFRP シートの周方向ひずみの関係の一例を付属図-5.2 に示す。軸方向ひずみは、変位計による計測値を試験体の全高 600mm で除して算出し、周方向ひずみは AFRP シートに貼り付けしたひずみゲージの値を使用した。



付属図-5.1 試験体形状寸法および計測方法

付属表-5.1 試験水準

形状	帯筋 (%)	繊維 (%)	繊維種類			
			ケブラー	トワロン	テクノーラ	炭素
角柱	0.0	0.00	○			
		0.05	○	—	○	—
		0.10	○	—	○	○
		0.15	○	○	○	—
		0.20	○	—	○	○
		0.30	○	—	○	—
	0.5	0.00	○			
		0.15	○	—	○	○
	1.0	0.00	○			
0.15		○	—	○	○	

付属表-5.2 使用材料

	ケブラー	テクノーラ	炭素
目付 (g/m <sup>2</sup> )	160	153	200
厚さ (mm)	0.11	0.11	0.11
破断強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	25800	29800	35000

付属表-5.3 補強方法

補強量 (%)	幅 (mm)	層数 (—)	段数 (—)
0.00	—	—	—
0.05	10	1	13
0.10	25	1	11
0.15	30	1	15
0.20	25	2	11
0.30	30	2	15



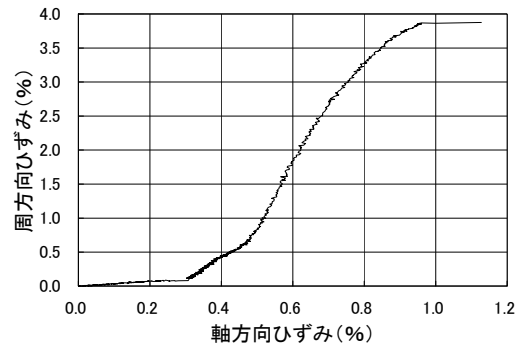
最大強度以降、繊維シートのひずみが増加し、拘束力を発揮していることが認められる。試験体の破壊は、すべての試験体においてAFRPシートの破断により生じた。計測された最大ひずみは、AFRPシートの破断ひずみに達しておりシートの破断強度が有効に発揮されている。

## 2.2 最大強度および最大強度時のひずみ

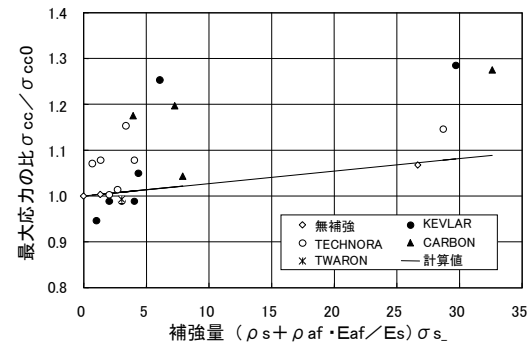
最大強度および最大強度時のひずみは、式(解 3.6.3)および式(解 3.6.4)を用いて計算される。AFRPシートの補強効果は、補強量に帯鉄筋とのヤング係数比を乗じた項( $\rho_s + \rho_{AF} \cdot E_{AF}/E_s$ )により帯鉄筋の補強量に加算して考慮した。これは、「最大軸方向圧縮応力が生じる時点において帯鉄筋が降伏した。」と考えられ、この時点でAFRPシートにはヤング係数比に比例した応力が発生していると考えられるためである。

AFRPシートの補強量と最大強度の関係を付属図-5.3に、補強量と最大強度時のひずみの関係を付属図-5.4にそれぞれ示す。この中で、最大強度は無補強の基準試験体の試験結果との強度比として、計算値はAFRPシートの破断強度で算定した。最大圧縮強度は、バラツキが大きいものの補強量の増加と共に若干の増加傾向が認められる。また、図中に併記した式(解 3.6.3)において概ね評価が可能であると考えられる。最大強度時のひずみに関しても、同様に増加傾向が認められ、式(解 3.6.4)による値は安全側の評価を与える結果であった。

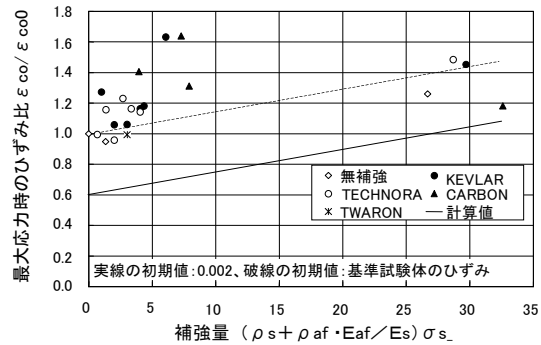
アラミド繊維シートの種類によらずヤング係数比( $E_{AF}/E_s$ )を0.5として補強効果を評価した場合のAFRPシートの補強量と最大強度の関係を付属図-5.5に、補強量と最大強度時のひずみの関係を付属図-5.6にそれぞれ示す。簡便な方



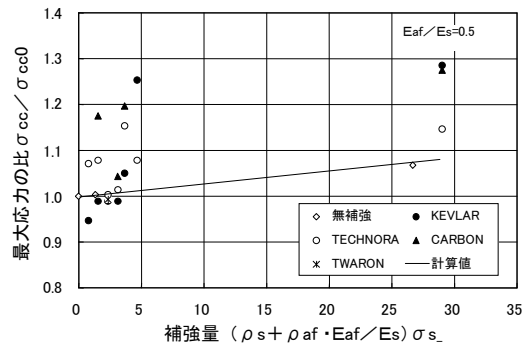
付属図-5.2 AFRPシートのひずみ



付属図-5.3 補強量と最大強度の関係



付属図-5.4 補強量と最大強度時のひずみの関係



付属図-5.5 補強量と最大強度の関係

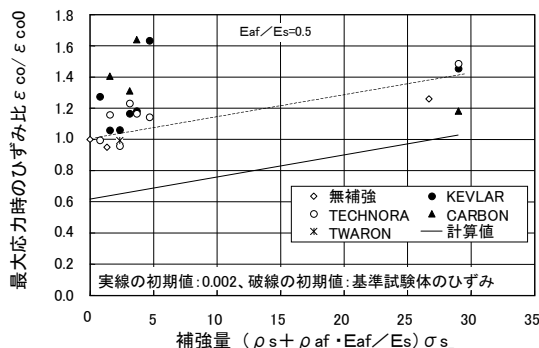
法によってもヤング係数比を考慮した場合と同等の計算結果を得られている。

### 2.3 終局ひずみと下降勾配

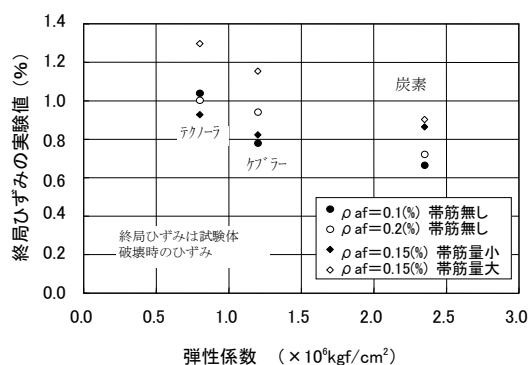
終局ひずみの計算値は、AFRP シートの補強効果を考慮した最大強度、最大強度時のひずみ、下降勾配に関する式(解 3.6.5)、式(解 3.6.6)、および式(解 3.6.7)により求められる。最大強度、最大強度時のひずみに関する AFRP シートの補強効果は、補強量に破断強度と補正係数を乗じた項( $\rho_s \cdot \sigma_{sy} + \rho_{AF} \cdot \sigma_{AF} \cdot \gamma$ )により評価した。破断強度のみを用いた場合、上項は「最大軸方向圧縮応力が生じる時点において鉄筋が降伏し AFRP シートが破断した。」ことを示し、過大な値となるため補正係数  $\gamma$  により低減を行った。一方、下降勾配に関する AFRP シートの補強量は、破断強度のみを用いた場合、逆に終局ひずみを著しく小さく評価するため、補正係数  $\gamma'$  により実験値との整合をはかった。

AFRP シートのヤング係数が終局ひずみに与える影響について付属図-5.7 に示す。終局ひずみは試験体の破壊時の値を使用した。AFRP シートのヤング係数が小さいほど終局ひずみが大きくなる傾向が認められる。補正係数  $\gamma$  をヤング係数比 ( $E_{AF}/E_s$ )、補正係数  $\gamma'$  をその逆数 ( $E_s/E_{AF}$ ) とした場合の補強量と終局ひずみの関係を付属図-5.8 に示す。ここで、終局ひずみは、各試験体の耐力が最大値の 80%に低下した時点のひずみとした。設計式は、ヤング係数の影響も含め、終局ひずみにおける AFRP シートの補強効果を良好に評価していると考えられる。

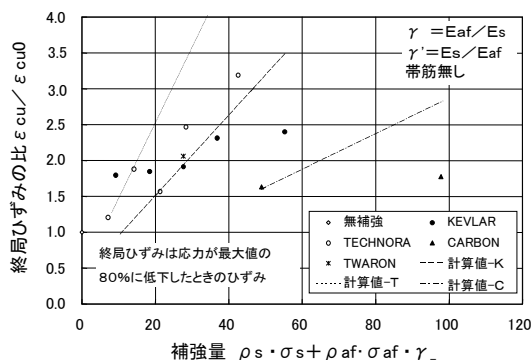
続いて AFRP シート間の統一を図り利便性を向上させるため、補正係数  $\gamma$  および  $\gamma'$  を定数 ( $\gamma=0.4, \gamma'=2.2$ ) とした場合の補強量と終局ひずみの関係を付属図-5.9 に示す。補正係数を定数



付属図-5.6 補強量と最大強度時のひずみの関係



付属図-5.7 ヤング係数と終局ひずみの関係



付属図-5.8 補強量と終局ひずみの関係(a)

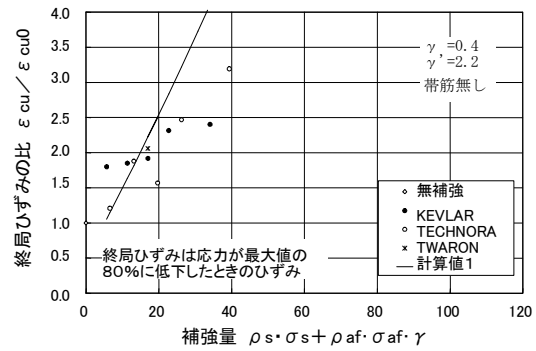
とした場合においても AFRP シートの補強効果は概ね評価が可能であると考えられる。

さらに、終局ひずみの計算に AFRP シートの設計強度を使用した場合、十分な安全率を有すると判断され得る(付属図-5.10 参照)。

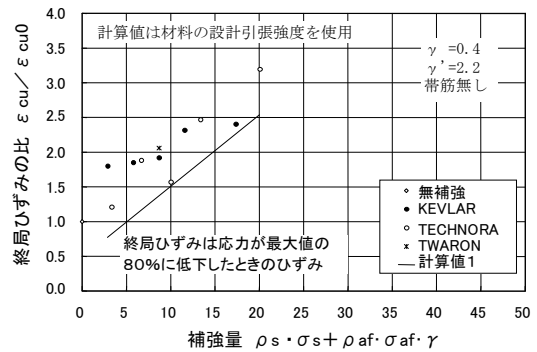
一軸圧縮試験の応力度-ひずみ曲線の一例を付属図-5.11 に示す。図中には、実験値に加えて AFRP シートの破断強度と設計引張強度を用いて計算した応力度-ひずみ曲線もそれぞれ併記した。破断強度を用いたモデルは、実験結果を良好に反映していることが認められる。さらに、設計引張強度を用いた場合には、十分な安全率を有するものと判断される。

### 3. まとめ

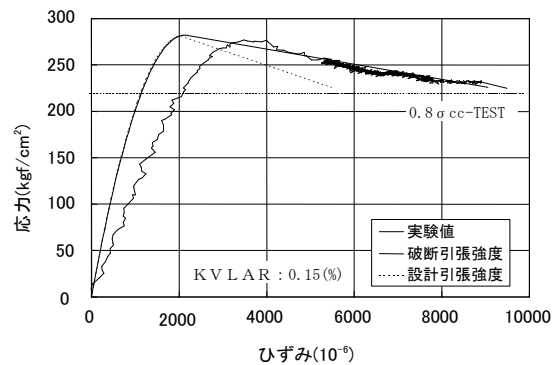
AFRP シートにより補強した部材の一軸圧縮試験結果より、設計編 3.6.2 に規定される AFRP シートにより拘束されたコンクリートの応力度-ひずみ曲線が妥当であることが確認できた。



付属図-5.9 補強量と終局ひずみの関係(b)



付属図-5.10 補強量と終局ひずみの関係(c)



付属図-5.11 応力度-ひずみ関係

## 付属資料 6 AFRP シートで補強した部材の変形性能試験

### 1. 変形性能試験概要

変形性能の改善について、AFRP シートの巻付け量をパラメータとした 5 体 (A-0~A-4) の試験と、段落し部の曲げ補強効果について、1 体 (B-1) の試験を行った。試験水準の一覧を付属表-6.1 に示す。供試体の断面寸法は 300×450mm である。

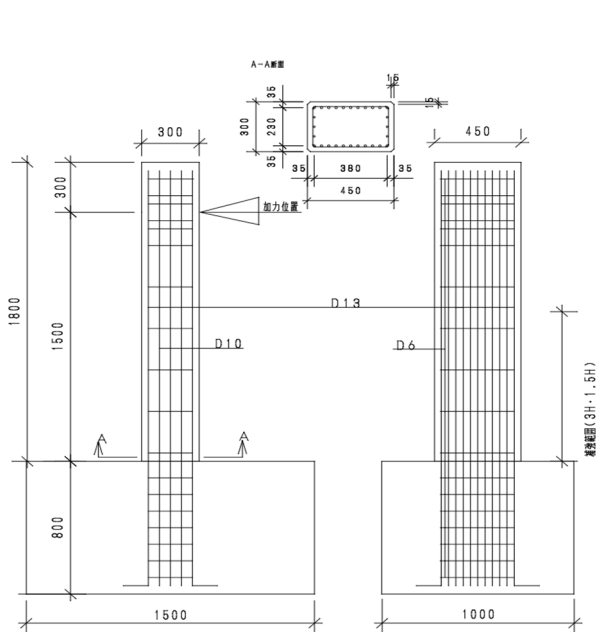
付属図-6.1 に示す A-0~A-4 供試体は、せん断スパン 1500mm とし、シート補強は帯鉄筋方向のみに行い、補強範囲は躯体下端から 1.5H~3H (H:断面高さ) の区間とした。A-0 供試体の計算曲げ耐力は 101.9kN、せん断耐力は 71.3kN である。付属図-6.2 に示す様に B-1 供試体は、せん断スパン 2900mm とし、鉄筋の段落し位置は、躯体下端から 1300mm の位置とした。シート補強は帯鉄筋方向にアラミド 2、主鉄筋方向にアラミド 1 の 2 方向に行い、補強範囲は躯体下端より 2500mm とした。補強前の計算曲げ耐力は基部で 49.0kN、段落し部で 33.3kN である。曲げ補強設計は、設計編 3.4 の規定に従った。ただし、段落し照査断面の不足曲げモーメントとして、躯体下端の終局曲げモーメントの 1.0 倍を仮定した作用モーメントと断面の初期降伏モーメントとの差とした。補強後の曲げ耐力の算出には、AFRP シートの引張強度の 85% を使用した。その結果、補強後の段落し部の曲げ耐力は 51.0kN となる。

コンクリートは、最大骨材寸法 10mm、設計圧縮強度 24N/mm<sup>2</sup> を使用し、主鉄筋は D13 を、側方鉄筋は D10 を、帯鉄筋は D6 を使用した。使用材料の諸物性を付属表-6.2 と 6.3 に示す。

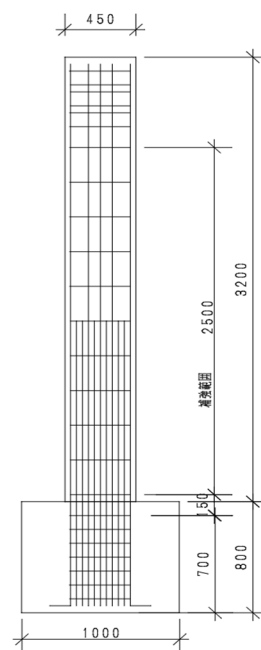
付属表-6.1 試験水準

	A-0	A-1	A-2	A-3	A-4	B-1
断面 (mm)	300×450	300×450	300×450	300×450	300×450	300×450
せん断区間長 (mm)	1500	1500	1500	1500	1500	2900
引張主鉄筋 (引張主鉄筋比)	11@D13 (1.16%)	11@D13 (1.16%)	11@D13 (1.16%)	11@D13 (1.16%)	11@D13 (1.16%)	11@D13 (1.16%)
段落し後						5@D13
せん断補強鉄筋 (面積比)	D6@250 (0.056%)	D6@250 (0.056%)	D6@250 (0.056%)	D6@250 (0.056%)	D6@250 (0.056%)	D6@250 (0.056%)
アラミドシート補強 40tf 級枚 (面積比)		アラミド 1 1 (0.086%)	アラミド 1 2 (0.176%)	アラミド 1 2 (0.176%)	アラミド 2 1 (0.075%)	アラミド 1,2 1 (0.075%)
補強範囲	—	3H	3H	1.5H	3H	8.3H

載荷は一定軸力下(6kgf/cm<sup>2</sup>)で行った。載荷ループは、正負の初期降伏荷重までの1サイクルを荷重制御で、その基準変位の整数倍の水平変位に対して変位制御で1回のサイクルを負荷した。載荷は初期降伏荷重の50%程度の水平耐力まで行った。



付属図-6.1 A0~A4 供試体



付属図-6.2 B1 供試体

付属表-6.2 コンクリートの材料物性

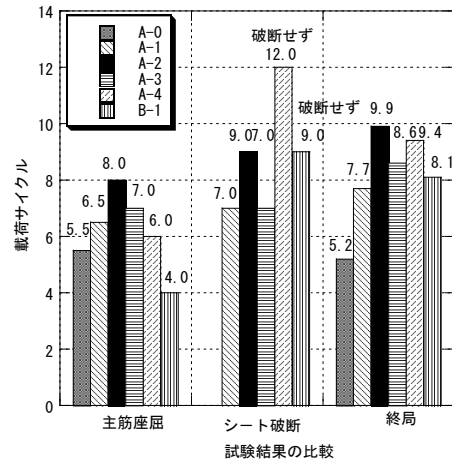
	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ×10 <sup>4</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
A-0	29.5	2.68	2.00
A-1	31.2	2.94	2.02
A-2	32.1	2.94	2.14
A-3	30.4	2.59	2.02
A-4	30.9	2.56	2.09

付属表-6.3 鉄筋の材料物性

	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ×10 <sup>5</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
D13	368	509	1.80
D6	394	627	1.73

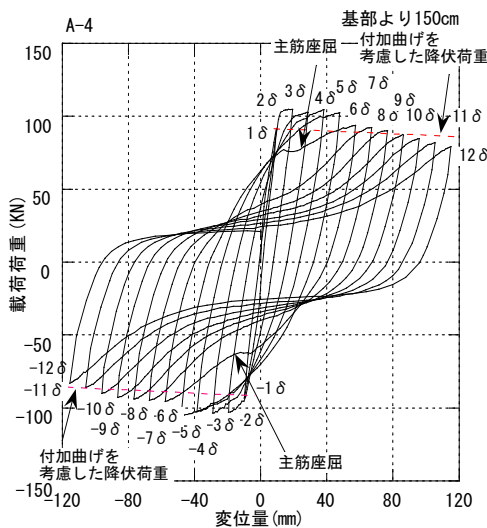
## 2. 試験結果

試験結果の比較を付属図-6.3 に示す。初期降伏変位は、計算初期降伏荷重に至った時の変位とした。終局時とは、計算初期降伏荷重を下回った時とした。無補強供試体 A-0 に比べ、AFRP シートを巻き立てた供試体は、主筋の座屈時期を遅らせることができるのが解る。主筋の座屈範囲は柱基部より 300mm 程度であり、ほぼ帯鉄筋間隔である。無補強供試体は、主筋座屈とほぼ同時に終局に至るが、シート補強を行った供試体は、耐力の急激な低下は見られずじん性能が改善されている。アラミド 2 で補強した供試体は、シートが破断せず終局に至った。また、AFRP シートに有意に歪が観測されたのは、柱基部より 1.5H の区間であった。

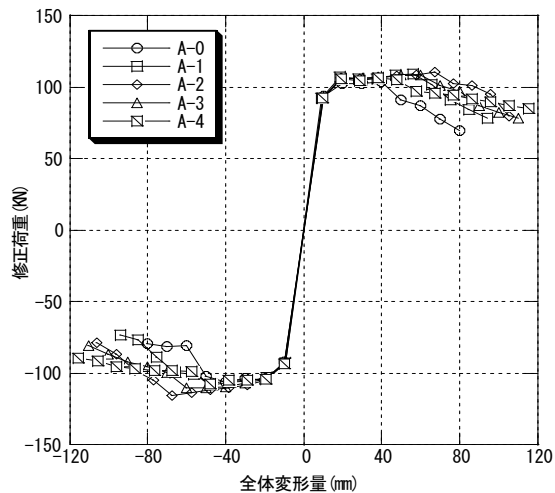


付属図-6.3 試験結果の比較

載荷荷重と水平変位の履歴曲線の一部(A-4)を付属図-6.4 に、載荷荷重と変形量の包絡線の関係を付属図-6.5 に示す。なお、包絡線の修正荷重とは、P- $\delta$  効果による付加モーメントの効果を加算したものである。AFRP シートの補強により、主筋座屈後も耐力を維持し変形性能が改善されている。



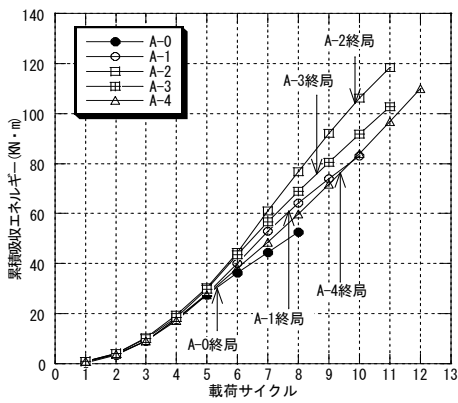
付属図-6.4 A-4 供試体の履歴



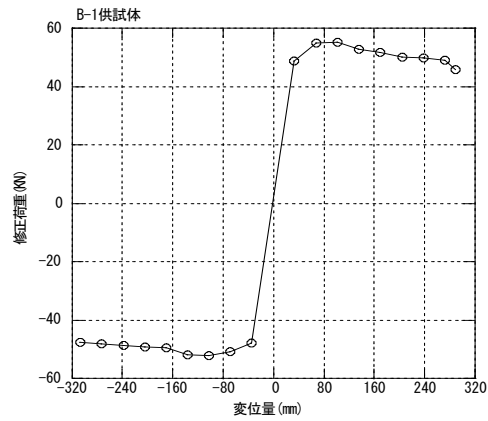
付属図-6.5 包絡線 (A-0~A-4)

累積吸収エネルギーの比較を**付属図-6.6**に示す。 $4\delta_y$ までは、パラメータの相違による差はほとんど見られない。その後、シート補強により累積吸収エネルギーが増加している。

B-1 供試体の載荷荷重と変形量の包絡線の関係を**付属図-6.7**に示す。供試体は、補強前の段落し部の計算曲げ耐力で破壊せず、基部の鉄筋が降伏し、主筋の座屈が $4\delta_y$ で生じ、破壊断面が、段落し部から柱基部に移行したのが確認された。また、基部のじん性補強により座屈後も急激な耐力の低下は認められず、変形性能が改善された。本供試体は設計編 3.4 に規定された手法より厳しい状況の実験であったが、段落し部に有害な損傷は観察されなかった。



付属図-6.6 履歴累積履歴エネルギー比較



付属図-6.7 包絡線(B-1)

## 付属資料 7 AFRP シートで補強した部材の変形性能とコンクリートの応力度－ひずみ曲線

### 1. AFRP シートの拘束効果

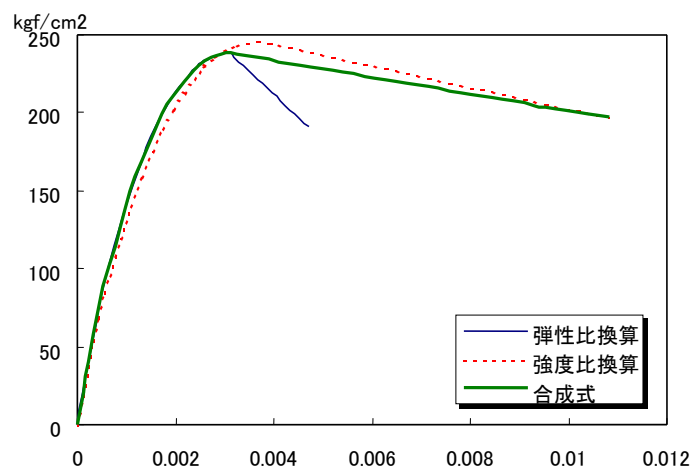
橋脚を補強材で巻立てる補強方法の代表的なものとして、鋼板巻立て補強が挙げられる。この鋼板巻立て補強により既設橋脚を補強する場合、一般的に鋼板は横拘束鉄筋と同様の効果が期待でき、鋼板を同体積の横拘束鉄筋として換算することにより、コンクリートの拘束効果を定量的に評価できる。一方、繊維シートは、鉄筋や鋼板と比較して弾性率や引張強度が異なるほか、明瞭な降伏棚が存在しないなど、破断に至るまでの性状にも大きな違いがある。したがって、繊維シートによる既設橋脚の補強にあたっては、これらの力学的性質の違いを勘案してコンクリート拘束効果を評価する必要がある。

繊維シート補強におけるコンクリート拘束効果は、鋼板巻立て補強と比較した場合、次のような定性的な特徴を有する。

- ① 繊維シート補強の拘束効果は、拘束されたコンクリートが最大応力を示すまではあまり明確に現れてこない。
- ② 繊維シート補強の拘束効果は、最大応力以後の下降勾配および終局ひずみの量として顕著に現れる。

これは、通常補強に用いる程度の繊維シート量では、鋼板と比べてシートとしての剛性( $E \times A$ )が小さいので、コンクリートのひずみが小さいうちはシートの張力は鋼板よりも弱く、帯鉄筋が降伏しコンクリートのひずみが大きくなった段階で、シートの張力が拘束効果を発揮するのに十分な強さとなるためと考えられる。さらに、材料特性として、鋼板の補強効果は、コンクリートのひずみが著しく増加しても降伏により一定になるのに対して、繊維の拘束力は繊維自体が破断するまで直線的に増加していく事も大きく影響していると判断される。

AFRP シートによるコンクリートの拘束効果の定式化にあたっては、道路橋示方書耐震設計編の式を基本として、このようなコンクリートのひずみが小さい領域と大きい領域での拘束効果の違いを表現することを考えた。具体的には、AFRP シートを等価な帯鉄筋として換算する際、コンクリートが最大圧縮応力に達する前後で弾性率換算と強度換算に分けることにより、コンクリートのひずみが小さいときは繊維シートの補強効果が小さく、ひずみが大きくなると補強効果が大きくなるようなモデルとした。本設計式によるコンクリートの応力度－ひずみ曲線の一例を付属図-7.1 に示す。



付属図-7.1 コンクリートの応力度－ひずみ曲線の例



## 2. 実験結果との比較

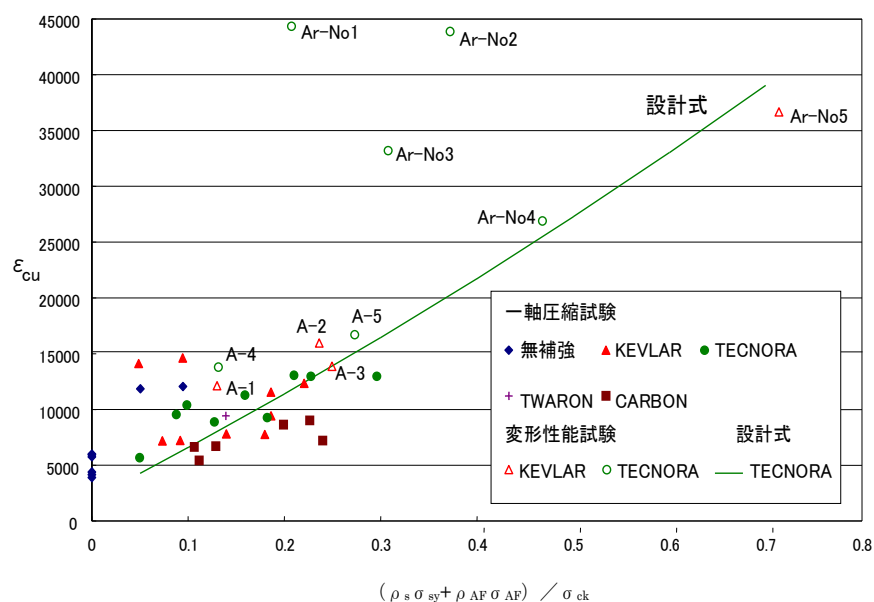
### 2.1 終局ひずみに関する比較

コンクリートの応力度-ひずみ曲線は、主要な 4 つのパラメータ ( $\sigma_{cc}$ 、 $\varepsilon_{cc}$ 、 $E_{des}$ 、 $\varepsilon_{cu}$ ) を決定すればその形状が決まる。そのうち、変形性能にもっとも影響を与えるものは終局ひずみ  $\varepsilon_{cu}$  である。今回の定式化に当たり、AFRP シートの補強量を単に強度比を用いて帯鉄筋に換算しただけでは  $\varepsilon_{cu}$  の計算値と実験値の間に若干の乖離が生じるため、 $\varepsilon_{cu}$  に与える影響の大きい式 (3.6.6) および式 (3.6.7) に係数を導入し、回帰的にこの係数を決定することにより設計式の最適化を試みた。

付属図-7.2 は、縦軸にコンクリートの終局ひずみ  $\varepsilon_{cu}$ 、横軸に補強量を表すパラメータ  $(\rho_s \sigma_{sy} + \rho_{AF} \sigma_{AF}) / \sigma_{ck}$  をとり、1軸圧縮試験結果・変形性能試験結果・設計式を図示したものである (付属資料 5 および付属資料 6 参照)。

変形性能試験における終局ひずみは、設計編 3.6.1 および 3.6.2 の規定を準用し、測定された終局変位を満たすコンクリート最外縁の圧縮ひずみを回帰計算により求めたものである。この際、材料諸値は実測値を用いた。さらに、図中の設計式は、アラミド 2 で補強された帯鉄筋を含まない角柱橋脚を想定した場合であり、式 (解 3.6.6) および式 (解 3.6.7) の係数は、回帰計算で得られた最適値 0.4 および 2.2 を用いている。また、アラミド繊維シートの破断強度は公称値とし、コンクリート強度は  $240 \text{kgf/cm}^2$  として算出した。

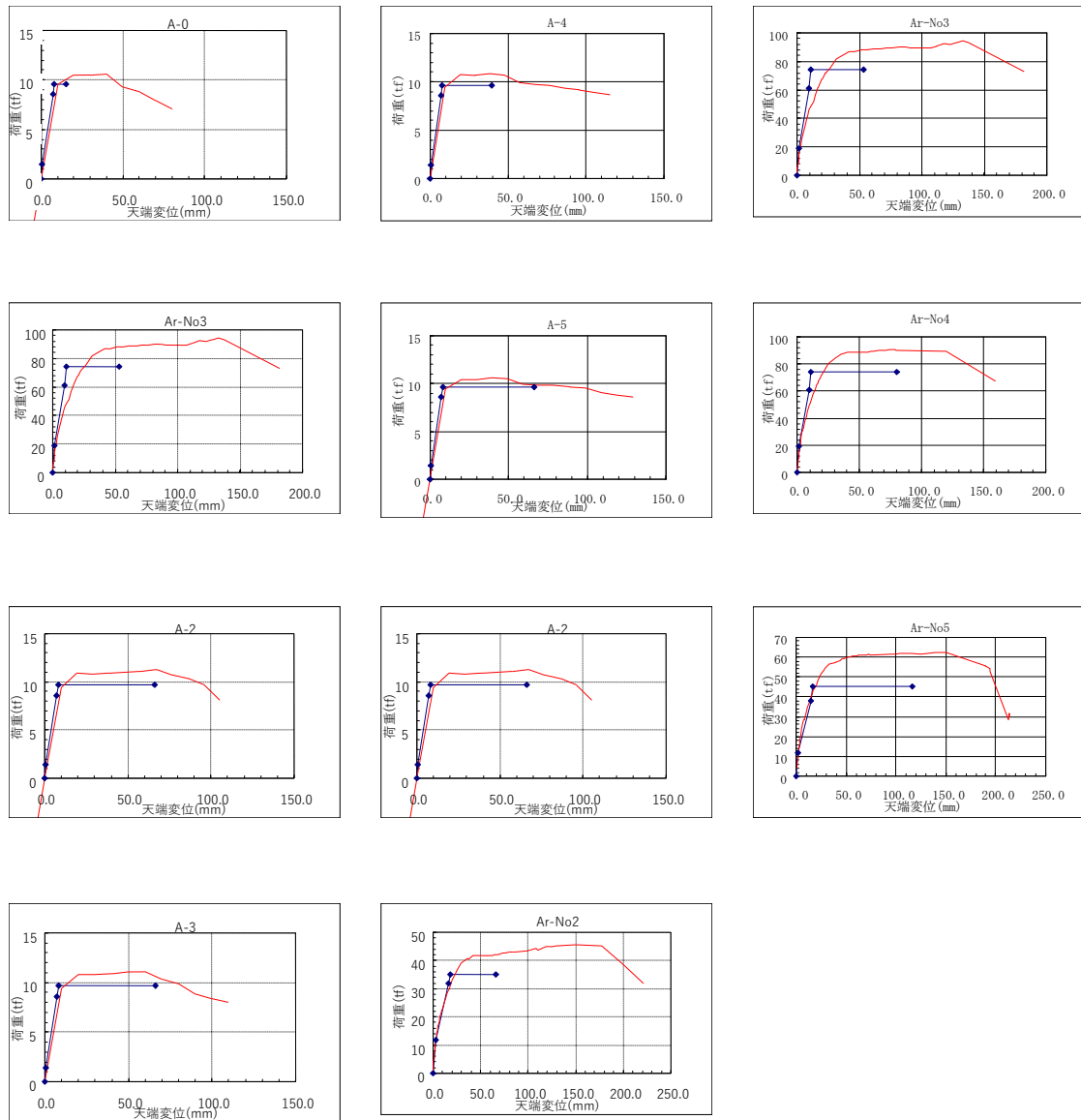
鉄筋の抜けだしなどが影響していると推測される Ar-No1~No3 供試体を除くと、実験結果では補強量の増加量に対する  $\varepsilon_{cu}$  の増加量は、補強量が大きくなるにつれて次第に減少する傾向がみられる。一方、設計式では逆に  $\varepsilon_{cu}$  の増加量は大きくなる傾向が認められる。したがって、試験により確認された補強の範囲を逸脱して本設計式を使用する場合は、十分な検討を行う必要がある。



付属図-7.2 補強量と終局ひずの関係

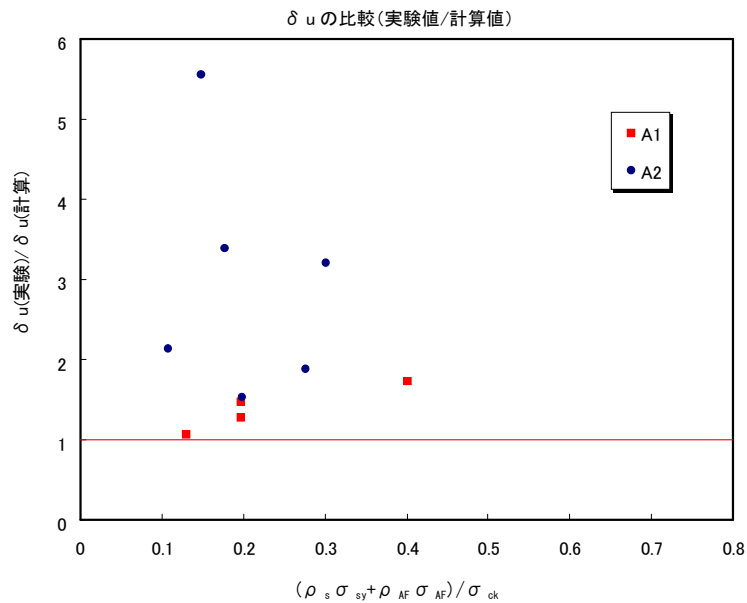
## 2.2 終局変位に関する比較

付属図-7.3 は、荷重－変位曲線の比較である。設計式による折れ線は、材料諸値としては安全率を見込んだ設計用の値を用いて求めている。実験値の終局は、降伏耐力を下回った点と定義している。降伏耐力は実験値と計算値ではほぼ等しいと考えてよいので、この図では、実験値は終局よりもう少し先まで描かれていることになる。



付属図-7.3 荷重－変位曲線の比較

これらの図より、設計式は終局変位・耐力ともに安全側に評価し、降伏点までの勾配も実験結果とよく一致していることが分かる。付属図-7.4 に、終局変位の比較を示す。縦軸には実験値と計算値の比、横軸には補強量をとっている。すべてのケースにおいて 1 より上にあり、安全側に評価していることがわかる。



付属図-7.4 終局変位の比較

#### 参考文献

(財)鉄道総合技術研究所：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、1996.11

アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領(案)

---

第1版	第1刷	平成 9年 8月
第2版	第1刷	平成 9年 10月
第3版	第1刷	平成 10年 1月
	第2刷	平成 11年 12月
	第3刷	平成 12年 10月
第4版	PDF	令和 3年 4月

編集 アラミド補強研究会

事務局：ファイベックス株式会社内  
〒104-0033 東京都中央区新川一丁目 16-3  
TEL:03-5579-8291 FAX:03-5579-8292

お問い合わせは下記の URL からお願いいたします。

URL:<http://aramid-ken.jp/index.html>

発行 アラミド補強研究会

当該出版物内容の一部または全部を、複写や他の出版物へ転載するような場合は、必ず上記の発行元の許可を得てください。