

# 連続繊維シートによる耐震改修工法の調査報告

## § 1 はじめに

(財)建築保全センターでは平成7年3月に耐震性能判定委員会を設置し、学識経験者の指導のもとに公共建築物の耐震診断並びに耐震改修計画・立案を実施している。近年、所謂「居ながら改修」の要望が高まり、その有力な工法として連続繊維による耐震改修が考えられる。

連続繊維による土木・建築構造物補強工法は、1980年代に研究開発が盛んに行われるようになり、当初は橋脚や外壁のクラック改修、塩害による損傷の補修、床板、梁桁の補強に適用されてきた。1995年の阪神・淡路大震災以降、この連続繊維による構造物の耐震補強の研究開発が本格的に推進された。建設省・総合プロジェクト共同研究「構造物の耐震性向上技術の開発」が1996年に発足し、官・学・産の協力のもとに連続繊維による構造物の耐震改修工法の研究開発が行われ、その成果が1999年9月に(財)日本建築防災協会より「連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計・施工指針」<sup>1)</sup>(以下、「連続繊維補強耐震改修指針」と略す)として発刊された。同指針は連続繊維補強の基本的事項、設計方法、施工方法及び品質管理等を網羅し、連続繊維補強工法全般について記述している。

このほか、連続繊維補強方法の設計と実務に関する著書が最近相次いで出版され、耐震補強の設計・施工に関して豊富な情報が整備されてきている<sup>2)~7)</sup>。こうした状況をふまえ、本文は連続繊維による耐震改修技術の現況を調査し、工法の特徴、使用材料、施工方法、経済性等についてまとめ、今後の耐震改修計画の一助に供することを目的とするものである。なお、本文は建築技術2001増刊号の「連続繊維シート補強方法」を加筆してまとめたものである。

## § 2 連続繊維材の種類

連続繊維補強材は、1本の径が5~20 $\mu\text{m}$ の十分に長い繊維の素線(モノフィラメント)を数百本~数千本最小束状としたストランドまたは多数のストランドを一方向に引きそろえてシート状に加工した1方向シート、ストランドを縦横に織ったクロスシートがある。代表的な連続繊維材料は炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維、ビニロン繊維等である。図1に材料種別による分類を示

している。建築構造部材補強用繊維としては炭素繊維が最も多く用いられており、次いでアラミド繊維、ガラス繊維が使用されている。

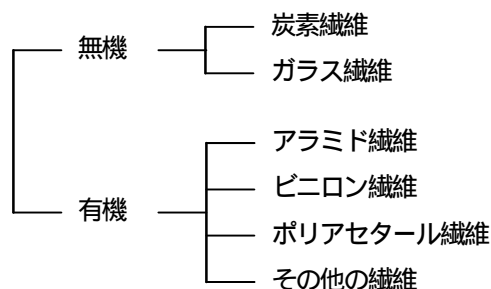


図1 連続繊維補強材の材料による分類

本文では、使用頻度の高い炭素繊維、アラミド繊維を用いた連続繊維補強工法に限定して述べることとする。

### § 2.1 炭素繊維ストランド

炭素繊維ストランドは7~10 $\mu\text{m}$ 程度のフィラメントと呼ばれる炭素繊維を束ねたもので、フィラメント本数が3,000本(3K)、6,000本(6K)、12,000本(12K)、24,000本(24K)のものがある。写真1に炭素繊維ストランド<sup>1)</sup>を示す。

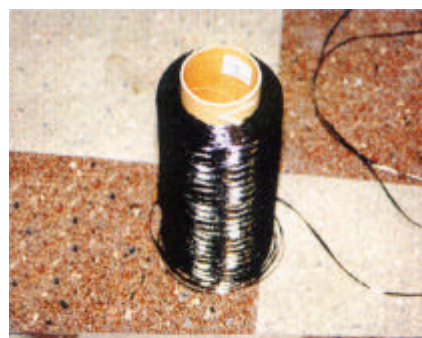


写真1 炭素繊維ストランド

現場では専用の巻付け機械を用いて独立柱の耐震補強に使用する。また、12K(断面積0.462 $\text{mm}^2$ 、直径0.767mm)と24K(断面積0.87 $\text{mm}^2$ )の炭素繊維ストランドは含浸接着樹脂を浸透させて炭素繊維(CF)アンカーとして炭素繊維シートの定着等に利用する。海外では50K-320K(炭素繊維の素線を5万本~32万本束ねたもの)のラジトウと呼ばれる製品が作られている。我が国でもラジトウの製造が検討されているが、このような製品を補強材として用いる場合は樹

脂の含浸性を十分に検討することが重要である。

### § 2.2 炭素繊維シート

炭素繊維シートは、厚さが0.2mm以下と薄い面状に加工されている。炭素繊維シートは一方に素線を敷き並べてシート状に成形するものでその方法は、

- (1) 炭素繊維をシート状に成形し、予めエポキシ樹脂を含浸させ、樹脂を未硬化の状態とするもの
  - (2) 横方向に補強繊維としてガラス繊維等を用いてクロス状に成形したもの
  - (3) 炭素繊維を一方に引きそろえ、接着剤を含ませた薄いガラス繊維で裏から補強・成形したもの
- がある。写真2に炭素繊維シート<sup>15)</sup>を示している。炭素繊維シートには工場成形板に加工されるものもあるが、一般的に工事現場で人力により貼り付けていく。

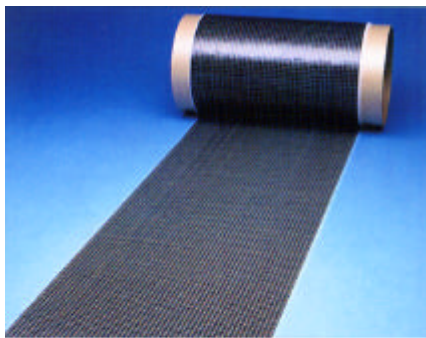


写真2 炭素繊維シート

### § 2.3 アラミド繊維シート

アラミド繊維はナイロンと同じパラ系全芳香族ポリアミドからなる合成繊維である。アラミド繊維シートは、形状保持のために補助的な材料を用いて厚さが0.3mm以下の薄い面状に成形される。写真3にアラミド繊維シート<sup>16)</sup>を示している。

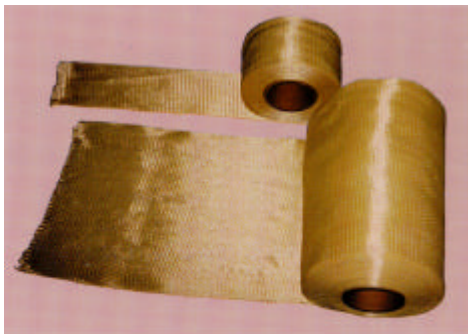


写真3 アラミド繊維シート

アラミド繊維には1種類のアミン成分から構成される単独重合系と2種類のアミン成分から構成される共重合系

がある。「連続繊維補強耐震改修指針」では前者をアラミド1、後者をアラミド2と呼んでいる。直径はいずれも12μm程度で、他の有機繊維に較べて引張強度、剛性、耐熱性が格段に高い。また、比較的シートの幅が小さい製品が造られており、アラミド繊維テープと呼ばれる。

連続繊維補強は、これらの連続繊維にエポキシ樹脂やメタクリル樹脂の接着樹脂を含浸させ、硬化させた繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastics、略してFRP)を形成し、強度を発揮させるものである。

### § 3.1 連続繊維材料の物性と力学的性状

表1に代表的な連続繊維の物性を示している。炭素繊維にはPAN系とピッチ系があり、強度、弾性率によって高弾性率品、高強度品、汎用品、高性能品と用途に応じた製品が製造されている。現在(2000年)国内ではPAN系を3社、また、ピッチ系を2社の合計5社が高性能グレード炭素繊維を製造している。炭素繊維は全般に耐酸性、耐アルカリ性および耐有機溶剤性に優れている。

アラミド繊維は炭素繊維に較べると耐酸性、耐アルカリ性に劣る。また、アラミド繊維のうち商標ケブラーとトワロンは耐酸性に特に劣るが、耐有機溶剤性については優れている。しかし、アラミド繊維は耐衝撃性に優れ、高い耐熱性、耐炎性、耐薬品性をも有している。

構造物の補強に用いる連続繊維の比重は、アラミド繊維(1.4)、炭素繊維(1.6~2.1)、ガラス繊維(2.3~2.6)の順に重くなっているが、鉄(7.74)に比べると約1/5~1/3ではるかに小さい。また、含浸樹脂としてエポキシ樹脂とメタクリル樹脂が用いられるが、その比重も1.1~1.4程度である。このように材料が軽量であることは、搬入や施工に重機類を必要とせず大きな利点である。

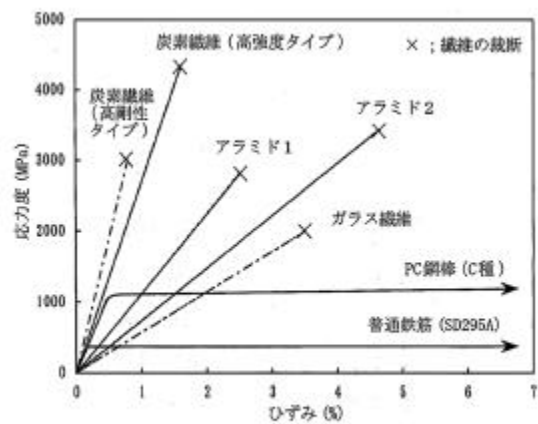


図2 連続繊維補強材と鋼材の引張強度-歪み曲線

図2に連続繊維補強材と鋼材の引張応力-歪み関係を示している<sup>6)</sup>。連続繊維は鋼のように塑性降伏域を持たず、

表1 連続繊維の物性

種類 項目		炭素繊維				アラミド繊維			ガラス繊維		ポリビニルアルコール繊維
		PAN系		ピッチ系		ケブラー49	トウロン	カーラ	Eガラス	耐アルカリガラス	ビロン
		高強度品	高弾性品	汎用品	高強度高弾性						
物理的性質	引張強度 (MPa)	2500 ~ 4500	2000 ~ 2800	780 ~ 10000	3000 ~ 3500	2800	3100	3500 ~ 3600	1800 ~ 3500	700 ~ 1500	
	弾性係数 (GPa)	200 ~ 240	350 ~ 450	380 ~ 400	400 ~ 800	130	77	74 ~ 75	70 ~ 76	11 ~ 37	
	伸び (%)	1.3 ~ 1.8	0.4 ~ 0.8	2.1 ~ 2.5	0.4 ~ 1.5	2.3	4.4	4.8	2~3	7.0	
	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.7 ~ 1.9	1.8 ~ 1.9	1.6 ~ 1.7	1.9 ~ 2.1	1.45	1.39	2.6	2.27	1.26 ~ 1.30	
	直径(μm)	5~8		9~18		12	12	8~12	8~12	14	
耐化学薬品性	耐酸性										
	塩酸					×		×	-		
	硫酸					×		×	-		
	硝酸					×		×	-		
	耐アルカリ										
	水酸化ナトリウム										
	耐海水性								-		
	耐有機溶剤性										
	アセトン							-		-	
	ベンゼン									-	
ガソリン									-		

：非常に優れている、：比較的良好、：やや不良、×：不良

出展：「建築改修実務事典」 産業調査会事典出版センター 1998年2月

引張破断まで完全弾性体として挙動する。従って、連続繊維による補強を行う場合、繊維の破断に対する安全余裕度の捉え方が必要である。

連続繊維の引張強度は、鉄の約 300~600MPa に比べて炭素繊維で約 10 倍 (780~10000MPa)、アラミド繊維で 5~7 倍 (2800~3100MPa)、またガラス繊維で 3~9 倍 (1800~3600MPa) と極めて大きい。このことが

連続繊維の構造補強材としての大きな魅力である。

また、図 2 から判るように連続繊維のヤング係数は炭素繊維で鋼と同等ものと 2 倍以上の高弾性のものがあるが、高弾性のものは破断歪みが 0.4~0.8% とが非常に小さく、靱性に乏しいのでせん断補強材として使用する際には注意が必要である。

アラミド繊維とガラス繊維の弾性係数は、それぞれ、

鋼の 1/2 ~ 1/3 および 1/2 と小さいが、引張強度時の歪みは 2.3 ~ 4.4% と炭素繊維に較べて大きく、柔軟性に富んでいる。

### § 3.2 連続繊維補強材料の規格

連続繊維補強耐震改修指針では、連続繊維シートの形状を次の4つに分類している。

- (a) 連続繊維束を少量の樹脂と保形メッシュにより離型紙上で保形したもの
- (b) 連続繊維束の両面または片面に接着剤付きの保形メッシュを配列したもの
- (c) 連続繊維束をガラス繊維やナイロン繊維などで織物

上にしたもの

- (d) 連続繊維束の両面または片面を熱可塑性樹脂不織布で熱融着したもの

連続繊維の規格として炭素繊維には 3400MPa 級と 2900MPa 級、アラミド繊維にはアラミド1 およびアラミド2 について品質基準(表2)を規定している。炭素繊維は 3400MPa と 2900MPa に区分し、アラミド繊維はアラミド1 とアラミド2 に区分し、更に目付量によって 40 トン、60 トン及び 90 トンの3タイプにランク分けして規定している。

表2 連続繊維シートの規格

連続繊維の種類		呼び名	目付量 (g/m <sup>2</sup> )	設計厚 (mm)	規格引張強度	規格ヤング係数
炭素繊維シート		2900MPa 級	200	0.111	2900 MPa (30000kgf/cm <sup>2</sup> )	230GPa (2.34 × 10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )
			300	0.167		
		3400MPa 級	200	0.111	3400MPa (35000kgf/cm <sup>2</sup> )	
			300	0.167		
アラミド繊維シート	アラミド1	40 トンタイプ	280	0.193	2060 MPa (21000kgf/cm <sup>2</sup> )	118GPa (1.20 × 10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )
		60 トンタイプ	415	0.286		
		90 トンタイプ	623	0.430		
	アラミド2	40 トンタイプ	235	0.169	2350 MPa (24000kgf/cm <sup>2</sup> )	78GPa (0.80 × 10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )
		60 トンタイプ	350	0.252		
		90 トンタイプ	525	0.378		

### § 3.3 含浸接着樹脂

表3 含浸用接着材樹脂の品質基準例

樹脂の種類	エポキシ樹脂	メタクリル樹脂
比重	1.0 ~ 1.3	1.03
可使用時間 *例 30	85 分	20 分
使用時の温度環境	5 以上	- 10 以上
使用時の湿度環境	結露が生じない湿度 (85%以下)	
硬化物特性* <sup>1</sup>		
引張強度 (MPa)	29.4 (300) 以上	29.4 (300) 以上
曲げ強度 (MPa)	39.2 (400) 以上	39.2 (400) 以上
引張せん断強さ (MPa)	9.8 (100) 以上	9.8 (100) 以上

\* 1 ( ) 内の値は単位 kgf/cm<sup>2</sup> のもの

連続繊維補強工法においては、一般にエポキシ樹脂系とメタクリル樹脂系（MMA）の含浸接着樹脂が用いられており、樹脂の種類に応じて品質基準を設けている。表3に含浸用接着材樹脂の品質基準例を示している。連続繊維補強耐震改修指針では連続繊維と含浸樹脂の組み合わせを(1)炭素繊維とエポキシ樹脂系、(2)炭素繊維とメタクリル樹脂系および(3)アラミド繊維とエポキシ樹脂系の3つを適用対象としている。エポキシ樹脂は耐アルカリ・薬品性に優れており、硬化時の収縮が小さく、コンクリートや繊維等との接着力が高い。しかし、表3にも見られるように低温・多湿では十分に効果が期待できず、5以下では施工を行ってはならない。これに対してメタクリル樹脂は、使用温度環境が-10まで適用でき、低温・寒冷地での使用には適している。

#### § 4 連続繊維補強の特徴

連続繊維補強は種々の特徴があるが、それらを材料、設計、施工、および機能に分類してまとめると以下のように述べることができる。

##### § 4.1 材料面での特徴

連続繊維補強材の力学的性状の項でも述べたが、鉄筋に比べて引張強度が約5~10倍と大きく、応力-歪み関係は完全弾性体なので降伏点がなく脆性的に破断する。この高い引張強度は接着樹脂が十分に連続繊維に含浸する事が前提であり、含浸が不十分の場合は強度の低下が生じることがあるので樹脂含浸の確認が重要である。

連続繊維は軽量であり、運搬や施工に鋼板補強のように重機を必要としないことは大きな利点である。また、連続繊維は鉄のように腐食することがないので耐食性に優れており、メンテナンスを殆ど必要としない。硬化後の耐酸性、耐アルカリ性、耐薬品性は一般的に優れているが、繊維ごとに異なるので注意が必要である。

連続繊維補強材の耐火性能は、炭素繊維とエポキシ樹脂の場合は、約260までの加熱履歴であれば引張強度の低下はないとされている。アラミド繊維も鉄に比べると耐熱性が低い。しかし、接着樹脂はそれ以上に耐熱性に劣り、熱による樹脂の軟化が連続繊維補強材の引張強度を低下させる。連続繊維を用いた補強に耐火性が要求される場合には、耐火被覆を施す必要がある。最近、耐熱性のある樹脂が開発されてきており、そうした材料の適用が将来に期待されるところである。

連続繊維シートは、はさみやカッターで切断することができ、鉄に比べて成形が極めて容易である。また、あ

る程度の半径を与えれば自由に曲げることの出来る加工性に富む材料であり、躯体断面形状への追従性も優れている。特にアラミド繊維は炭素繊維に比較してヤング係数が小さく、既存構造部材の隅角部の面取りについても手間が少なく済み、高い破断伸度を有しており、韌性に優れた特徴を持っている。

##### § 4.2 設計面での特徴

連続繊維補強材は、一般に厚さが0.3mm以下のものが使用されており、既存構造材の断面寸法の変化が非常に少ない。そのために構造部材の剛性の変化は極めて小さく無視できる。また、重量の変化も耐火被覆を行わない場合は無視することができる。従って、連続繊維補強による平面的並びに立面的剛性の大きな変化を考慮することなく、この補強法は建築物の剛性バランスに影響を与えることはない。

##### § 4.3 施工面での特徴

連続繊維補強工事の施工面での大きな利点としては補強材料が軽量のため手作業で施工でき、重機が不要で狭い場所で施工できることである。連続繊維シートの裁断、加工、貼り付け等の作業は容易で、短い施工期間で補強工事を完了することができる。含浸接着樹脂と連続繊維がFRPを形成する時間は、使用する接着樹脂と作業時の温・湿度により大きく異なるので条件に適した施工管理が必要である。また、鋼板補強と異なり溶接を使用しないので火災の危険がなく、作業エリアの養生も狭い範囲で済む事が特徴として挙げられる。一方、連続繊維のフライ（浮遊片）による事故、接着樹脂の臭い、有機溶剤による事故等に周到な対策が必要である。

##### § 4.4 機能面での特徴

連続繊維補強材は、下地処理の段階から構造材表面を平滑にし、貼り付け作業を行うので補強後の表面には凹凸が生じないので、補強により外観を損なうことはない。また、建物の柱補強の場合、執務空間が狭くなるとか、補強壁で部屋が細分化されて機能が大きく低下することもない。連続繊維で既存コンクリートを補強することは、下地処理による部材亀裂等の修復や耐久性に優れた連続繊維材での被覆によりコンクリートの耐久性を向上させる効果がある。

##### § 5.1 曲げ補強

連続繊維による曲げ補強は従来、スラブや梁の補強な

どに用いられてきた。コンクリート構造部材の引張応力が生じる部位にまたは既存の曲げ補強筋（主鉄筋）と平行に連続繊維を貼り付け、連続繊維の大きな引張強度を生かして曲げ耐力の向上を図るものである。連続繊維の破断ひずみは、炭素繊維で 1.2～1.5%、アラミド繊維で 2.4～4.6%と鉄筋の降伏ひずみ約 0.2%に比べて大きく、一般に既存鉄筋の降伏後に連続繊維の破断が生じる。従って連続繊維の貼り付けによる曲げ補強は鉄筋降伏後の塑性変形の進行を抑制することもできる。このように連続繊維は鉄筋コンクリートの主筋の役割を担うもので、その能力を発揮するためには連続繊維の引張強度のみならず端部の定着が極めて重要である。建築分野における連続繊維の耐震曲げ補強は、地震時に曲げ耐力が不足する煙突の降伏曲げ耐力の向上等に有効で多くの実績がある。また、煙突に形状が同じ無線塔、排気筒、灯台などへの連続繊維による耐震補強適用例があり、特殊なものでは神社の鳥居がある。

## § 5.2 せん断補強

連続繊維による部材のせん断補強は、部材材軸の直角方向に連続繊維を巻き付けたり、貼り付けることにより連続繊維の大きな引張強度を利用して部材のせん断強度を上昇させるものである。連続繊維によるせん断補強は同時に、囲んだコンクリートに対して横拘束効果が期待でき、大きな靱性能を得ることが出来る。この連続繊維によるせん断補強は、一般に脆性柱や梁の靱性向上を目的に施工されているが、高軸力（ただし、軸力比 0.55）を受ける下階壁抜けフレームの柱や第 2 種構造要素となる柱の補強に対しても有効である。

## § 6 構造部材の補強について

### § 6.1 柱の耐震補強

連続繊維による柱の耐震補強は、独立柱と壁付き柱の場合に分けられる。独立柱の場合は、所謂閉鎖型の連続繊維補強を施工することができ、柱のせん断強度を高め、せん断破壊を防止して靱性能を増加させることが多くの実験で確かめられている。一方、袖壁、たれ壁等が存在する場合はコの字型の補強となり、その効果は閉鎖型に比べて極めて小さいとされている。従って、壁付きの場合はスリットを設けて閉鎖型となるようにするか、プレート・定着ボルト締めや定着アンカー等の定着端部に工夫をして閉鎖型と同等の補強効果を得る事が必要である。

また、壁付き柱に対して閉鎖型補強を実現するために CF アンカーを用いる工法が提案され、技術評価（技術

評価取得補強法一覧参照）を得ている。

### § 6.2 梁部材の補強

梁部材はその断面が矩形の場合には閉鎖型の連続繊維補強を行うことができ、実験等によりその有効性が確認されている。しかし、梁部材は一般にスラブを有し、単純には閉鎖型の補強を行うことはできない。このようにスラブ等が接続する梁に対しては壁付き柱と同様に適切な方法により連続繊維補強材の端部を定着し、閉鎖型に近い補強効果を有する補強工法を採用しなければならない。現在までに定着プレートと定着ボルトを用いた方法やスラブに孔を開け定着アンカーで連続繊維補強材の端部を定着する方法などが提案されているが、荷重条件や実験方法により補強効果が異なり、矩形断面梁を閉鎖型に補強したものと同等のせん断補強効果を有する結果の報告は少ない。しかし、後述の連続繊維補強材の端部定着アンカー工法は連続繊維補強材だけで擬似閉鎖型を形成することが出来るので、慎重な検討の上で適用することができる工法と考えられる。

### § 6.3 床の補強

床の補強工法は、一般に老朽化したスラブの曲げ耐力不足や用途変更による荷重の増加による曲げ応力の増加に対する補強方法として開発されている。地震時における大スパンのスラブにおいて、鉛直動による曲げ応力の増加が予測される場合に補強が必要となる。補強方法としては長期荷重時の補強がそのまま採用できる。スラブの曲げ補強は定着が極めて重要であり、補強の効果が発揮されるためには確実な端部定着の施工が不可避である。

### § 6.4 耐震壁の補強

連続繊維シートまたはクロスシートを既存壁に対角線方向にクロス（X状）に貼り付け、連続繊維の大きな引張強度を利用して壁のせん断耐力を増加させる工法である。既存壁の健全性に依じて下地処理を行い、補強材端部の適切な定着を行う。連続繊維補強材端部を梁や柱に埋め込み、定着させる工法が開発されている。研究報告によれば使用材料・工法や端部定着等の条件等によって異なるが、連続繊維補強された壁のせん断耐力は 10～30%程度増加するとされている。CF アンカーを用いた工法では補強量の上限を一方方向 6 層としている。

## § 7 連続繊維補強の施工法

連続繊維補強の施工について、図 3 には標準的施工法

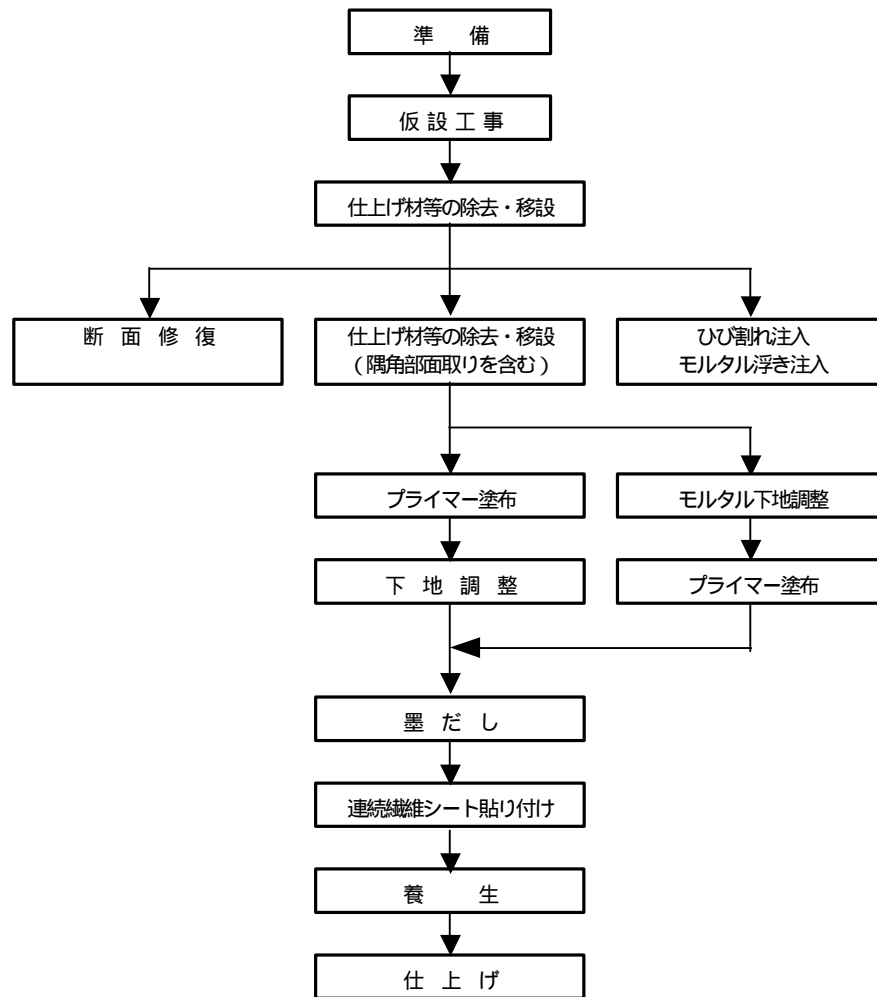


図3 標準施工フロー

を、また、写真4<sup>12)</sup>には下地処理以降の工程の流れを示している。施工の手順は、準備、仮設工事、下地処理、プライマー塗布、下地調整等、墨だし、連続繊維シート貼り付け、養生、仕上げで構成される。

これらの手順のうち、施工現場の状況により省略できる項目や多層貼り付けの場合のように繰り返される手順も含まれる。以下に、各手順について簡単に解説する。

### § 7.1 施工準備

連続繊維補強工事を実施するに先立ち施工を円滑に行うために、材料及び工具搬入、保管場所の設置、保管等を行うものであり、各工法により基本的には差はないが材料の特性などを十分に考慮することが必要である。

### § 7.2 仮設工事

連続繊維補強工事において柱・壁上部、梁、床等の補強工事は高所工事となるので、作業性及び安全確保には

適切な足場・作業台の設置が重要である。また、工事に伴う研り、解体、サンダーがけ、プライマー塗布、連続繊維貼り付け、接着樹脂塗布等により騒音、粉塵、臭いなどが生じるので、工事の作業域をシートやボードで養生する必要がある。「建物を使用しながら」の工事の場合、居住者の安全確保はもとより、コンピュータ等のOA機器や事務機器・家具も防塵シート等で十分に養生する。

### § 7.3 下地処理等

連続繊維補強の効果を確実に発揮させるためには、構造部位の既存仕上げ材は原則として除去することとする。仕上げ材を除去する場合には電動チップャー、コンクリートカッターなどの衝撃力の小さな研り機械を用い、構造躯体に損傷を与えないように丁寧に作業を行う。仕上げ材除去後のコンクリート面に亀裂、欠損、ジャンカ等が発見された場合には適切な工法で修復を行う。

既存仕上げが一定の条件を満足し、躯体に損傷や欠陥

がない場合には、工法によって仕上げ材を除去せずに連続繊維補強を実施することができる。ただし、連続繊維補強材を曲げ補強等に用い、接着面にせん断力の伝達を期待する場合には、既存仕上げ材はすべて除去する。

連続繊維を貼り付ける既存構造体下地表面は、泥、油分、埃・粉塵等の連続繊維補強材の接着を低下させるような異物は、切削工具等を用いて除去する。また、下地表面は、凹凸や段差などがないように平滑に仕上げる。

連続繊維は部材断面の隅角部が直角だと応力集中が生じ、割れ等が発生するので面取りを行い、その半径が炭素繊維で20mm以上、アラミド繊維で10mm以上とする。一般に炭素繊維で30mm、アラミド繊維で20mm以上の半径で滑らかな円弧状に加工し、その円弧部は材軸方向に直線性を保持するように加工する。こうした処理の後に既存構造体表面は、エアブロー等を用いて粉塵等を十分に除去する。

#### § 7.4 プライマー塗布

プライマーは、既存躯体コンクリート表面に連続繊維補強材を確実に貼り付けるために塗布する。プライマーを塗布する前には下地の状態の確認を行い、連続繊維施工後に不具合が生じない状態であることを確認する。また、プライマー塗布は、施工時のみでなく養生期間の天候に大きく影響されるので、その期間中の天候を予測し、適切な養生を行うと同時に、場合によっては工事を中止するなどの適切な管理が必要である。特にエポキシ樹脂系プライマーは、施工時温度が5℃以上と規定されているので、冬期や寒冷地などでは温度管理が必要である。メタクリル樹脂系は-10℃の低温まで適用可能であるが、逆に施工温度の上限を定めている製品があるので仕様規定に従って施工する。

#### § 7.5 下地調整

プライマー塗布後に、エポキシ樹脂系では手で触れて指紋が付かない指触乾燥状態、メタクリル樹脂系では爪を立てても跡が付かない完全硬化状態であることを確認する。下地の不陸、段差、ピンホール等の小さい不具合を金ごて、パテべらなどを用いて樹脂系下地調整材で平滑に仕上げる。

#### § 7.6 墨だし

連続繊維補強材の割付は、補強強度確保のためには非常に重要な工程である。墨だしは、施工図に基づき、連続繊維補強材の貼り付け方向と貼り付け開始位置が明確

になるように行う。墨だしの色は、含浸接着樹脂を塗布したとき容易に判別できるものとする。図6(1)~(9)に連続繊維シートによる柱せん断補強の墨だしの例を示している。一般的な巻き付けは、一段ごとに水平に重ね長さを取って1周貼り付けで行われる。従って、シートの切り出し長さは柱の周長とラップ長さの和になる。

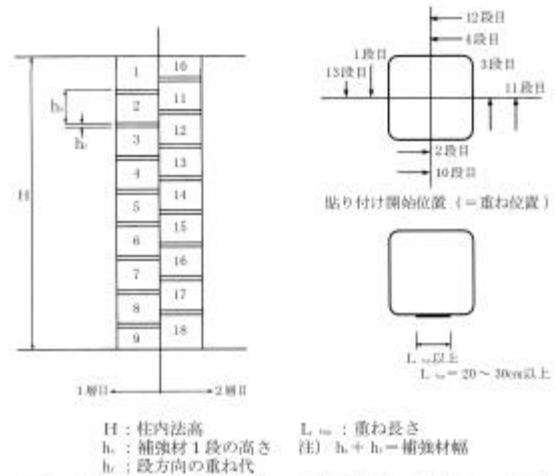


図4 連続繊維補強材の割付例(2層貼りの場合)

#### § 7.7 連続繊維シートの貼り付け

割付図に従い、連続繊維をカッターナイフや鋏などで指定された寸法に必要な枚数を裁断する。連続繊維シートを貼り付けていく場合に重ね部分が生じる。この重ね部分で破壊が生じないようにするためには、施工上の安全率を考慮して表4に示す値の重ね長さを取ることが規定されている。

表4 シートの種類と重ね長さ

シートの種類		重ね長さ (mm)
炭素繊維	200g 目付	200 以上
	300g 目付	200 以上
アラミド繊維	40t クラス	200 以上
	60t クラス	200 以上
	90t クラス	300 以上

次に、施工面積に応じた量の含浸接着樹脂を所定の配合割合に従って正確に計量し、均一に混練する。含浸接着樹脂は、連続繊維シートを貼り付ける箇所にローラーやはけを用いて液溜まり等の無いように均一に下塗りを実施する。下塗りの範囲は新鮮で粘性が低く、含浸性の良い樹脂を供給するためにシート巻き付けの箇所のみとする。

この際、可使時間を過ぎた樹脂は絶対に使用してはならない。

含浸接着樹脂塗布後、直ちにシートの端部を墨だし位置に合わせて固定し、シートに張力を掛けながら、蛇行やしわが生じないように端部から順に貼り付けていく。裏当て紙の付いたプリプレグタイプ連続繊維シートの場合は、裏当て紙を除去する。貼り重ね部には接着樹脂を増し塗りする。シートに浮き、しわ、気泡、樹脂溜まりが生じないように、脱泡ローラーやゴムべらなどを用いてシート全面を繊維方向に押さえながら注意深く貼り付け作業を行う。下塗り接着樹脂の含浸の確認を行い、接着樹脂の上塗りを行う。現在の含浸樹脂は性能が良く、多くの場合下塗りのみで含浸が可能とされているが、連続繊維シートの表面を樹脂層で保護する意味と含浸が十分でない場合の樹脂供給を目的として施工されている。上塗りの方法は、下塗りと同様にローラーやはけを用いて行う。複数層の貼り付けは、上記の含浸接着樹脂の配合から上塗りまでの手順を繰り返す。

### § 7.8 養生・仕上げ

貼り付け作業が終了した後、適切な養生を行わなければならない。特に、硬化までに降雨や低温等の気象的变化が規定された性能に大きな影響を与えないように、必要に応じてビニールシート養生、防護囲い、温度養生等を行う。特に居ながら施工においては、接着樹脂の臭いが周囲へ及ばないような配慮が必要である。

連続繊維補強材は、その特徴において述べたように一般的に耐久性に優れており、その耐久性能は屋外及び促進暴露試験で確認されている。従って経年劣化を対象とした仕上げは、特に必要としない。しかし、アラミド繊維は鉄に比べて耐熱性が低く、含浸接着樹脂はそれ以上に耐熱性が低い。また、接着樹脂は紫外線やオゾンによりその表面が劣化・白化し易い。このために、意匠、防火、表面保護に配慮した仕上げが行われるのが一般的である。仕上げ方法は目的に応じてモルタル塗り、ボード貼り、塗装等が施される。

### § 8.1 品質管理

連続繊維補強方法は比較的新しい工法であるので品質管理には特に注意する。まず、品質管理体制、判定基準を明確にし、工事の各段階でチェックシートに従って材料の検査を行い、施工が適正に実施されているか、施工不良等が無いかなどを確認する。不良箇所が発見された場合は修復またはその部分の工事のやり直しを行い、所期

の補強性能が確保されていることを確認する。「連続繊維補強耐震改修指針」に連続繊維シート施工管理チェックシート例が示されているほか、日本建築防災協会の技術評定を取得した工法の設計施工指針には品質管理項目と役割分担を定めているものもあるのでそれらを利用して品質の確保を図る。

### § 8.2 検査・試験

「連続繊維補強耐震改修指針」では、検査項目および各種試験について一般的事項が述べられており、また、品質管理上必要と考えられる場合には関係者間で協議するとしている。検査は設計値を充足していることを確認し、検査結果報告書としてまとめ、設計・指示書に示された補強工事を確実に実施したことを記録として残す。

連続繊維補強材の品質を確認する試験として引張試験、耐久性試験があり、連続繊維の施工品質試験として接着試験がある。「建築改修工事仕様書」<sup>8)</sup>では、試験の適用は特記によることとしている。後述の(財)日本建築防災協会の技術評価を取得した各工法の設計・施工指針には、実施すべき検査・試験を規定している。また、「建築改修工事監理指針」<sup>9)</sup>では、補強工事の目的がせん断補強の場合、曲げ補強の場合、及び特殊な環境条件の場合について考え方と必要な試験について述べている。採用すべき試験項目の選定の参考とすることができる。

### § 8.3 安全管理

建設工事においては「労働安全衛生法」等の関連法律に基づき、施工条件、作業条件を整備し、十分な安全の確保を図らなければならない。特に連続繊維補強工事においてはプライマー、連続繊維、含浸接着樹脂等の化学物質を使用する。施工者は使用する材料について十分な知識を有し、その保管と取り扱いには注意深い配慮が必要である。主な問題や事故として炭素繊維による電氣的障害、皮膚のかぶれ、フライ(浮遊片)による事故、接着樹脂によるかぶれ、有機溶剤の吸引による事故などが挙げられる。これらの事故は未然に防ぐことが最も重要なことであるが、不幸にして発生した場合の処置、対策等を周知徹底させるとともに安全体制を整えておくことが必要である。また、連続繊維補強工事は「居ながら工事」が一般的であるので、居住者への安全対策が極めて重要である。作業エリアと居住者の動線との分離を図り、振動・騒音・臭気等の影響が周囲に及ばないように適切な対策を実施する。

工事に際しては既存仕上げの除去材や残材が発生する。

補強工事においては、廃棄物の発生を最少にするように適切な使用材料の計量等を行い、発生ごみや残材については廃棄物関連の法律、指針、仕様書に従って適正に管理する。特に、化学物質を多く含むだけに廃棄物発生の低減、適正処理および最終の処分については十分に留意する。

#### § 8.4 技術評価と大臣認定工法

一般的に用いられている連続繊維補強工法は(財)日本建築防災協会の技術評価や(財)日本建築センターの一般評価を受けて建設大臣の認定を取得している。前者は「建築物の耐震改修の促進に関する法律」に基づくもので床面積の増加を伴わず、「建築基準法」における確認

申請を必要としないものである。また、後者は「建築基準法」の確認申請を必要とするもので面積の増加を伴う増改築等である。これら連続繊維補強工法は設計及び施工指針を定め、設計、構造細則、施工方法、施工及び品質管理、施工技術者等について細かく規定している。各工法は、せん断終局強度と付着強度に対して(社)日本建築学会の「終局強度型耐震設計指針」や「靱性保証型耐震設計指針」等に示されている強度式を準用している。以下に技術評定や大臣認定を取得した主な工法について述べる。以上、ここに述べた工法については、(財)日本建築防災協会(www.kenchiku-bosai.or.jp)で評価技術名、工事概要、評価時期、申請者、問い合わせ先が示されている。

#### § 9.1 経済性について

表5に連続繊維の性能と単位面積あたりの価格例を示している。連続繊維素材の単位面積あたりの価格は、同

じ繊維種類、高強度や高弾性の同一のタイプでも目付量や性能により3倍近い価格差があることが判る。

表5 連続繊維性能と価格例(N社 2001年2月1日現在)

繊維種類	繊維目付 g/m <sup>2</sup>	設計厚さ mm	価格 (¥/m <sup>2</sup> )	引張強度 N/mm <sup>2</sup> (N/mm幅)	引張弾性率 N/mm <sup>2</sup>
高強度炭素繊維 1	200	0.111	6,600	3,400 (380)	2.3 × 10 <sup>5</sup>
高強度炭素繊維 2	300	0.167	9,500	3,400 (570)	2.3 × 10 <sup>5</sup>
高強度炭素繊維 3	450	0.250	13,000	3,400 (850)	2.3 × 10 <sup>5</sup>
高強度炭素繊維 4	600	0.333	16,500	3,400 (1,130)	2.3 × 10 <sup>5</sup>
高弾性炭素繊維 1	300	0.165	15,000	2,900 (480)	3.9 × 10 <sup>5</sup>
高弾性炭素繊維 2	300	0.143	19,000	1,900 (270)	5.4 × 10 <sup>5</sup>
高弾性炭素繊維 3	300	0.143	19,800	1,900 (270)	6.4 × 10 <sup>5</sup>
アラミド繊維 A	280	0.193	6,500	2,000 (380)	1.2 × 10 <sup>5</sup>
アラミド繊維 B	415	0.286	9,400	2,000 (570)	1.2 × 10 <sup>5</sup>
アラミド繊維 C	623	0.430	11,280	2,000 (860)	1.2 × 10 <sup>5</sup>
アラミド繊維 D	830	0.572	13,500	2,000 (1,130)	1.2 × 10 <sup>5</sup>
E ガラス	300	0.118	3,000	1,500 (170)	7.3 × 10 <sup>4</sup>

一般に素材としての価格を比較すると、高弾性炭素繊維が最も高価であり、高強度炭素繊維とアラミド繊維がほぼ同等と考えて良い。ガラス繊維は比較的安価であり、炭素繊維織物の繋ぎ材として用いられる。

耐震補強工事費算定の具体例として「建築改修実務辞典」<sup>5)</sup>に独立柱炭素繊維補強の工事価格算出例が示されている。この例ではピロティ形式の建築物の4本の独立柱を鋼板と炭素繊維で補強した場合について工事費を算出している。これによると独立柱鋼板補強で総額1,505,781円、独立柱炭素繊維補強で1,313,897円の工事費となっている。この補強工事例の場合、鋼板補強が炭素繊維補強より約1割強高い工事費となっている。

次に、せん断破壊柱が曲げ破壊型となるという設定条件で独立柱10本の耐震補強を炭素繊維1層巻き、2層巻き、鋼板6mm補強、および鉄筋補強(特許取得のもの)について2001年5月にA社に見積もりを求めた結果、以下の表6の回答を得た。

表6 条件: 700mm角、高さ2600mmの独立柱10本

補強方法	合計金額(円)	m <sup>2</sup> 単価(円)
炭素繊維シート1層貼り付け	2,446,100	33,600
炭素繊維シート2層貼り付け	3,679,278	50,540
鋼板巻き立て(PL-6mm)	5,437,633	74,693
鉄筋による耐震補強工法	-	155,000

ここで、補強による最終塑性率 $\mu$ は、炭素繊維の1層巻きと2層巻きで4.35と5.0(上限値)、鋼板補強で4.23、

および鉄筋補強 2.95 であり、炭素繊維巻きが他の 2 つの工法に較べてより良い結果となっている。また、表 6 の工事費は炭素繊維シート 2 層貼り付けと鋼板巻き立てを比較した場合、炭素繊維補強が鋼板巻き立て補強の約 7 割弱であり、炭素繊維補強が経済性に優れていること示している。表 7 は 10 本以上を施工するという条件下で壁付き柱の耐震補強に対する見積もりであるが、炭素繊維補強の経済性が明確に示されている。

表 7 条件：700mm 角、高さ 2600mm、単位 - 円

補強方法	金額 / 本	m <sup>2</sup> 単価
SR-CF 工法、2 層貼り付け	588,089	73,511
スリット+炭素繊維シート 2 層巻き	834,909	104,364
スリット+鋼板補強(PL-6mm)	1,120,330	140,041

作業環境、既存仕上げ材の撤去等施工条件によって工事費は大きく変化すると考えられるが、本文で示した工事費の例は、炭素繊維補強の経済性評価の一助とすることができる。

## § 10 あとがき

阪神・淡路大震災以降、建築物の耐震改修の促進に関する法律が施行され、公共建築を中心として耐震診断及び耐震改修が一層押し進められている。こうした中で、連続繊維補強工法は、耐震改修の所謂「居ながら施工」を可能にし、業務の停滞を最小に止めることができるために、今後の耐震改修の有用な方法として期待されているところである。連続繊維耐震補強工法はその研究開発において、官・学・産の協力の下に幅広く実施されてきたが、特定の企業または企業グループが数多くの特許を取得しており、実際に連続繊維補強工法を使用する場合に制約を受けるのは否めない事実である。また、技術が極めて精力的に短い期間に研究・開発されたために実務的的施工技術者の育成が遅れているという現実がある。1999 年 10 月には「連続繊維補強協会」が発足し、翌 2000 年には全国 3ヶ所で「連続繊維補強工法研修会」を実施し、施工技術者の育成と技術の普及に務めている。このように連続繊維補強工法は、社会的要請に応える要件も整い、普及・利用の時代に移行していると考えることができる。今後は、実施される耐震改修工事において連続繊維補強工法が数多く用いられ、重要な役割を果たすことが期待される。

最後に本文を書くに当たり、国土交通省・独立行政法人建築研究所福山洋上席研究員より多くの資料提供を頂きました。(財)日本建築防災協会の菊池志郎企画部長には技術評価等に関する多くの資料を提供していただきました。また、清水建設技術研究所矢部貴堂構造研究開発

部長、大林組小畠克朗技術規格センター所長からは貴重な資料をいただきました。さらに建設各社、連続繊維メーカー各社の技術指針、パンフレット等より参考または引用をさせていただきました。ここに記して心より感謝します。

## 【参考文献】

- 1) 建設省住宅局建築指導課監修：「連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計・施工指針」（財）日本建築防災協会 1999 年 9 月
- 2) 建設省大臣官房技術調査室監修：「連続繊維補強コンクリート【諸性質と設計法】」 連続繊維補強コンクリート編集委員会編 技報堂 1995 年 7 月
- 3) CF による建築構造物の耐震補強・補修工法開発推進協議会：「炭素繊維シート補強工事の材料と工法（2）」（社）建築研究振興協会 1998 年 11 月
- 4) (社)日本コンクリート工学協会：「コンクリート構造物の震災復旧・耐震補強技術と事例」 1998 年 8 月
- 5) 建築改修実務事典編集委員会：「建築改修実務事典」産業調査会 1998 年 2 月
- 6) 繊維補修補強協会：「連続繊維による耐震補強 - 正しい設計・施工の基礎知識 -」 理工図書 2000 年 4 月
- 7) 村橋久弘他編著：「連続繊維による補修・補強」 理工図書 2000 年 7 月
- 8) 建設省大臣官房官庁営繕部監修：「建築改修工事共通仕様書」（財）建築保全センター1999 年 1 月
- 9) 建設省大臣官房官庁営繕部監修：「建築改修工事監理指針下巻」（財）建築保全センター1999 年 9 月
- 10) 福山 洋：建築技術「耐震補強・耐震改修工法メニュー・柱の補強」 1997 年 10 月
- 11) 福山 洋：「連続繊維シートによる既存 RC 建築物の補強」 建築研究所春季講演会資料 1997 年 3 月
- 12) 三菱レイヨン(株)：「アクリペアシステム」
- 13) 東レ(株)：「トレカクロス工法技術資料」
- 14) 東レ・デュボン(株)：「ケブラー繊維製シート工法」
- 15) SR-CR 工法研究会：「炭素繊維による SR-CR 工法」
- 16) AF 工法研究会：「AF 工法」資料
- 17) 清水建設：[SR-CF 工法] パンフレット
- 18) 三菱化学：「炭素繊維成形板工法」パンフレット
- 19) 大林組：「CRS 工法 - 柱」パンフレット
- 20) 黒田 欽也：「連続繊維シート補強工法」建築技術 2001 年増刊 Vol.16