

# 炭素繊維アンカーによる耐震補強工法の 定着設計と施工方法

長澤保紀<sup>1</sup>・塚越英夫<sup>2</sup>・藤田忠夫<sup>3</sup>・池谷純一<sup>4</sup>・野口恒久<sup>5</sup>・前田敏也<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 清水建設株式会社 技術研究所テクノセンター (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17) E-mail: nagasawa@sit.shimz.co.jp

<sup>2</sup>工博 清水建設株式会社 技術研究所構造研究開発部 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

<sup>3</sup>清水建設株式会社 技術研究所テクノセンター (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

<sup>4</sup>清水建設株式会社 技術研究所テクノセンター (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

<sup>5</sup>正会員 清水建設株式会社 土木事業本部技術第1部 (〒105-8007 東京都港区芝浦 1-2-3)

<sup>6</sup>正会員 工博 清水建設株式会社 土木事業本部技術第1部 (〒105-8007 東京都港区芝浦 1-2-3)

炭素繊維アンカーは、炭素繊維シートを構成する炭素繊維ストランドを束ねて、1端をコンクリート躯体に穿孔した孔内にエポキシ樹脂とともに挿入硬化させて定着させる埋込みアンカーとし、他端を扇状に広げた炭素繊維ストランドとして先に貼付した炭素繊維シート上に含浸樹脂で接着硬化させて炭素繊維シートに定着させる扇形アンカーとした工場製品であり、炭素繊維シート補強の補助工法である。この炭素繊維アンカーの概要ならびに定着耐力実験・施工実験を実施した結果を示すとともに、この炭素繊維アンカーの定着設計方法ならびに施工方法、品質管理について述べた。

**Key Words:** carbon fiber, strengthen, anchor

## 1. はじめに

阪神大震災以降、道路橋や鉄道橋の耐震補強が行われてきている。耐震補強としては、通常、RC巻立て補強や鋼板巻立て補強が利用されており、揚重機や足場の設置あるいは作業空間に制限がある場合に、軽量かつ高強度で重機作業を必要としない炭素繊維シート接着補強が利用されている。しかし、市街地の高速道路高架橋の出入口付近などでは擁壁などの構築物に近接あるいは取り付いている場合があり、また、山間部あるいは河川内にある高橋脚で2柱I形断面などの複雑な形状であるために単に部材表面に巻き立てるだけでは困難な場合がある。

そうした場合、炭素繊維シートを貼付した後で、障害物に穿孔して穿孔内あるいは狭隙空間に炭素繊維ストランドを通し、両側の炭素繊維シートを繋ぐ、あるいは、炭素繊維シートを躯体にアンカー定着する事で、耐震補強を可能とする炭素繊維アンカー工法<sup>1)</sup>が考案され、現在、既設建築構造物の壁付き柱・耐震壁・床板・はりの耐震補強に利用され、100件余りの施工実績を積んでいる。

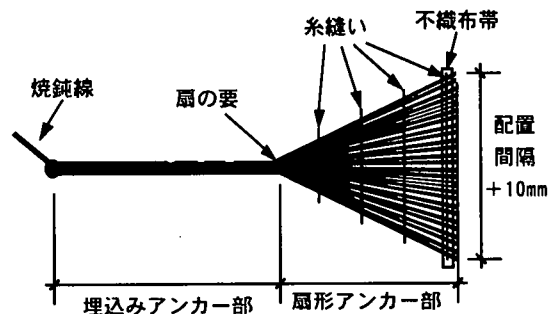


図-1 炭素繊維アンカー

この炭素繊維アンカーは、炭素繊維シートを構成する炭素繊維ストランド(炭素繊維を12,000本あるいは24,000本束ねたもの)を、先に貼付した炭素繊維シート層数とアンカー配置間隔に応じて所要の長さ・本数を巻き取り、コンクリート躯体に穿孔した孔内にエポキシ樹脂とともに挿入硬化させ躯体に定着させる埋込みアンカー機能と、貼付した炭素繊維シート上に扇形に広げた炭素繊維ストランドを含浸樹脂で接着硬化させ炭素繊維シートに定着させる扇形アンカー機能を有するものであった。今回、図-1

に示すように炭素繊維ストランドを工場で直線配置して束ねて縫製した製品の製造が可能となり、施工者の技能に余り左右されない、工場製品として安定した定着アンカー品質の供給が可能となった。

本報告では、道路橋や鉄道橋の橋脚の耐震補強を対象として、水平方向に巻き付ける炭素繊維シート接着工法の補助工法としての炭素繊維アンカー製品について実施した一連の定着耐力実験を実施した結果を報告するとともに、それらの結果にもとづいて確立した定着モデルおよび設計式ならびに施工方法について述べる。

表-1 使用材料

種類	型式名	備考
コンクリート	Fc-18-18-20N	呼び強度 18N/mm <sup>2</sup> , スランブ 18cm, 最大骨材寸法 20mm, 28 日圧縮強度 24.8N/mm <sup>2</sup> , 実験時材令 140 日
ストランド	T700SC-24000-60E	炭素繊維素線数 24K, サイジング剤 0.2%, 断面積 0.87mm <sup>2</sup> , 弾性係数 230kN/mm <sup>2</sup> , 引張強度規格値 3400N/mm <sup>2</sup>
含浸樹脂	FR-E3P K	エポキシ樹脂, 混合粘度 2500Pa·s, 引張強度 49.8N/mm <sup>2</sup> , 引張せん断強度 12.8N/mm <sup>2</sup> , 圧縮弾性係数 2.04kN/mm <sup>2</sup>
充填樹脂	FE-Z	エポキシパテ, コンクリート接着強度 2.5 N/mm <sup>2</sup> , 引張せん断強度 18.5 N/mm <sup>2</sup> , 圧縮弾性係数 2.21kN/mm <sup>2</sup>
プライマー	FP-NS	エポキシ樹脂, 混合粘度 2350Pa·s, コンクリート接着強度 2.8 N/mm <sup>2</sup>
ネジ付き鋼管	STKM13A (JIS G3445)	外径φ60.5mm×L350mm, L550mm×115mm, 片端ネジ M60×100mm, 降伏点 215 N/mm <sup>2</sup> 以上, 引張強度 370N/mm <sup>2</sup> 以上
底張材	プラスター 100	1袋 5kg, 練り混ぜ水 1,500cc/袋, 夏用, 35℃以下, 材令 5 日で膨張圧 30 N/mm <sup>2</sup> 以上

## 2. 炭素繊維アンカーの定着性能

炭素繊維アンカーに要求される定着性能として、

- 1) コンクリートへの埋込みアンカー定着性能
  - 2) 扇形アンカーとしてのシートとの定着性能
- を明らかにする必要がある。そこで、以下の実験を実施してそれぞれの定着性能について実験的に検討した。

### (1) 水平埋込み炭素繊維ストランド束の引抜き実験

炭素繊維ストランドのコンクリート躯体への埋込みアンカー定着の破壊形態としては、a) コンクリートのコーン状破壊, b) コンクリートと樹脂の界面破壊, c) 樹脂層での凝集破壊, d) 炭素繊維ストランドと樹脂の界面破壊, e) 炭素繊維ストランド引張破断の 5 形態が挙げられる。この内の a) についてはコンクリート強度に起因するものであるため、b) から e) の破壊形態を対象にして、図-2 に示す引抜き実験方法で実験的に検討することとした。

使用材料は表-1 に示すもので以下共通である。

試験体の要因および水準としては表-2 に示すとおりであり、炭素繊維アンカー配置間隔 200mm における炭素繊維シート 1 層および 2 層に相当するストランド本数 40 本および 80 本、それぞれの標準穿孔径 14mm および 20mm と拡幅径 25mm, 穿孔深さを 3 水準、孔内へのプライマー塗布の有無を水準として、

表-2 埋込みアンカー引抜き実験体の水準と実験結果

試験体名称	ストランド本数 ncs	ストランド断面積 Acs (mm <sup>2</sup> )	穿孔径 φ (mm)	埋込深さ Lcs (mm)	プライマー	Lcs·(Acs) <sup>1/2</sup> (mm <sup>2</sup> )	引抜き荷重最大値 Pmax (kN)	ストランド応力度 σcs (N/mm <sup>2</sup> )	最終状況
φ25P30-1	80	69.6	25	300	塗布	2503	259	3725	破断
φ25P30-2						2503	145	2077	充填不足抜け出し
φ25P30-3						2503	245	3514	破断
φ20P30-1			20		2503	230	3303	破断	
φ20P30-2					2503	198	2849	破断	
φ20P30-3					2503	252	3627	破断	
φ20N30-1	20	2503	217	無塗布	2503	217	3116	抜け出し	
φ20N30-2					2503	248	3559	抜け出し	
φ20N30-3					2503	221	3180	抜け出し	
φ14P10-1	40	34.8	14	100	塗布	590	61	1747	抜け出し
φ14P10-2						590	71	2043	抜け出し
φ14P10-3						590	67	1911	抜け出し
φ14P15-1			150		885	106	3055	抜け出し	
φ14P15-2					885	105	3026	抜け出し	
φ14P15-3					885	111	3178	破断	
φ14P20-1	200	1180	—	—	破断				
φ14P20-2		1180	131	3753	破断				
φ14P20-3		1180	112	3210	破断				
φ20P15-1	80	69.6	20	150	塗布	1251	126	1807	抜け出し
φ20P15-2						1251	104	1489	抜け出し
φ20P15-3						1251	135	1938	抜け出し
φ20P22-1			220		1835	182	2612	抜け出し	
φ20P22-2					1835	199	2862	抜け出し	
φ20P22-3					1835	162	2326	抜け出し	
φ20P30-4	300	2503	232	3330	抜け出し				
φ20P30-5		2503	230	3305	破断				
φ20P30-6		2503	251	3611	破断				

注)  $\sigma_{cs} = P_{max} / A_{cs}$

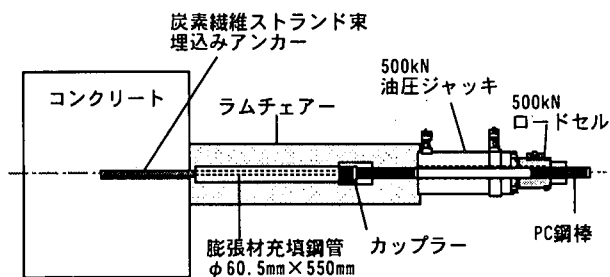


図-2 埋込みアンカー引抜き実験方法

各3本ずつ引抜き実験を実施した。

試験体製作手順としては、1) コンクリートドリルで所定の径・深さで穿孔する、2) 穿孔内をブラシ・エアブローで清掃する、3) 孔内面にプライマーを塗布もしくは無塗布する、4) 孔奥から充填樹脂を注入して孔内を満たす、5) ストランド束に含浸樹脂を十分に含浸させる、6) 樹脂含浸ストランド先端の焼鈍線に真鍮パイプφ3mmを取付けて、真鍮パイプを使って孔内へストランドを挿入し、孔口を硬練りパテで塞ぐ、7) 挿入パイプを押さえた状態で孔外の樹脂含浸ストランドを棒状に成形して棚受け金物の上に水平に保持して硬化させる、8) 樹脂硬化後に孔外のストランドを膨張材充填鋼管に挿入し、鋼管の両端を油粘土で塞ぎ、鋼管上面に設けた注入孔φ10mmと到達孔φ5mmを利用して膨張材を充填し、膨張硬化させる、であった。膨張材充填後7日以上経過後、引抜き実験を実施した。実験結果を表-2の右欄に示す。27体の試験体の内、16本がストランドと樹脂の界面での抜け出し(うち1本は充填樹脂の不足)、11本がストランド破断した。ストランド本数80本で穿孔深さ300mmにおいて穿孔径の相違およびプライマー有無による強度差は見られなかったが、プライマ

ー無しでは抜け出しを生じた。図-3にストランドの炭素繊維断面積の平方根に埋込み深さを乗じた値( $L_{cs} \cdot A_{cs}^{1/2}$ )に対する引抜き耐力ならびに炭素繊維応力度との関係を図示した。破断した試験体はストランド本数ごとにみると埋込み深さが深い場合に位置しており、浅くなると抜け出しが生じる結果を示した。引抜き耐力と $L_{cs} \cdot A_{cs}^{1/2}$ との関係図において抜け出しデータから原点通過の回帰式を求め、片側95%信頼下限式を求めると、式(1)、(2)で表された。

$$\text{定着耐力式: } P_{bcs} = 102 \cdot L_{cs} \cdot A_{cs}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{95\%下限式: } P_{bcs95} = 81 \cdot L_{cs} \cdot A_{cs}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $L_{cs}$ : 埋込み深さ (mm)

$A_{cs}$ : 炭素繊維ストランド断面積 ( $n_{cs} \cdot a_{cs}$ )

$n_{cs}$ : 炭素繊維ストランド本数

$a_{cs}$ : 24K ストランド1本断面積 (0.87mm<sup>2</sup>)

### (2) 扇形アンカーの定着実験

炭素繊維ストランド扇形アンカーの定着耐力を確認する方法として規準になる試験方法がない為、1) コンクリート試験体に炭素繊維シートを貼付して扇形アンカーを2面に貼付して行う定着耐力実験(コンクリート定着実験と略称)を考案した。しかし、コンクリート定着実験は実際の補強状況に近いが、コンクリートの打設から強度発現期間と表面乾燥期間が必要であり重量も重いことから、定着性能をパラメータスタディするには不向きであると判断し、簡易に行える方法として、2) 鋼板に炭素繊維シートを貼付して扇形アンカーを1面に貼付して行う定着耐力実験(鋼板定着実験と略称)を考案した。

いずれの場合でも、扇形アンカーの埋込み部に相当する部分は、樹脂含浸させて棒状に整形して硬化

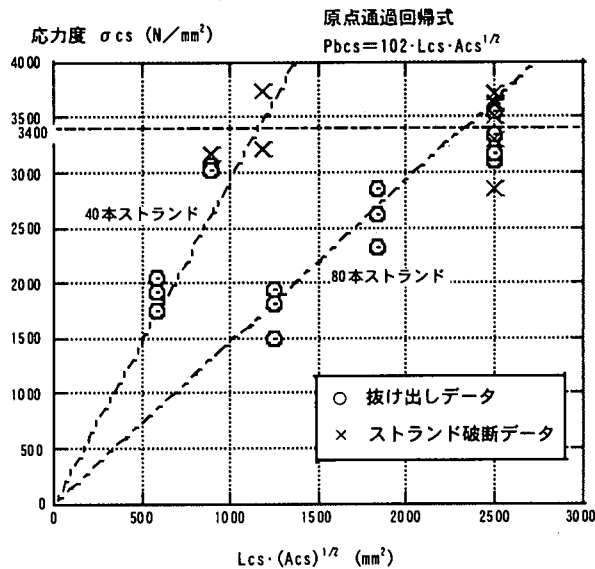
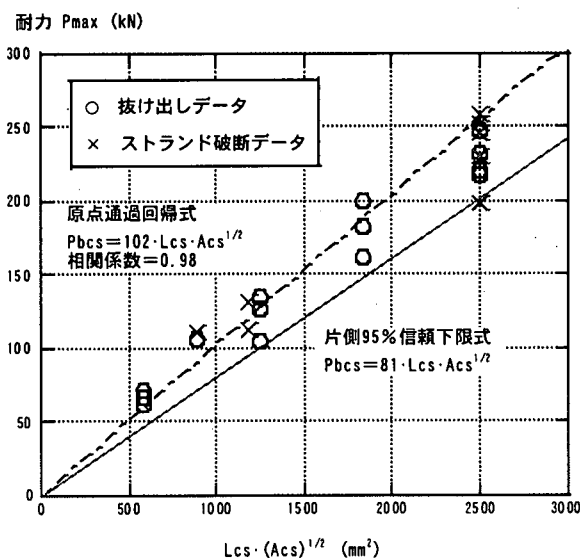


図-3 抜け出した水平施工埋込みCFアンカー引抜き耐力結果と回帰式

させ、前節の引抜き実験と同様に、膨張材充填鋼管の中に挿入し、鋼管両端を油粘土で塞ぎ、中に膨張材を充填して膨張硬化させた。

(a) コンクリート定着実験

コンクリート定着実験では、図-4に示すコンクリート試験体 300×400×500mm の両側面に図面横方向に扇長さ 300mm 幅で炭素繊維シート1層を貼付し、側面および上面に 200mm 幅で縦方向に炭素繊維シートを1層もしくは2層貼付して硬化させ、翌日、埋込み部を樹脂含浸させてストランド束にまとめて膨張材充填鋼管に挿入した後、扇形アンカーを縦方向シート上に貼付して硬化させた。硬化後、鋼管内に膨張材を充填して膨張硬化させた。載荷方法としては、図-5に示すように2本の鋼管を反力構台にナットで固定し、試験体中央を1MN油圧ジャッキにて押すことにより扇形アンカー部に引張荷重を与えた。実験結果を表-3に示す。炭素繊維シート1層に対応するストランド40本の扇形アンカーではすべて扇部のストランド破断であるが、炭素繊維シート2層に対応するストランド80本の扇アンカーでは扇形アンカーとシートの間で層間剥離を生じる、いわゆる、ピーリング破壊であった。ピーリングが生じた原因としては扇形アンカーとシートのせん断面と鋼管固定中心位置が一致していない為に外側へ僅かに

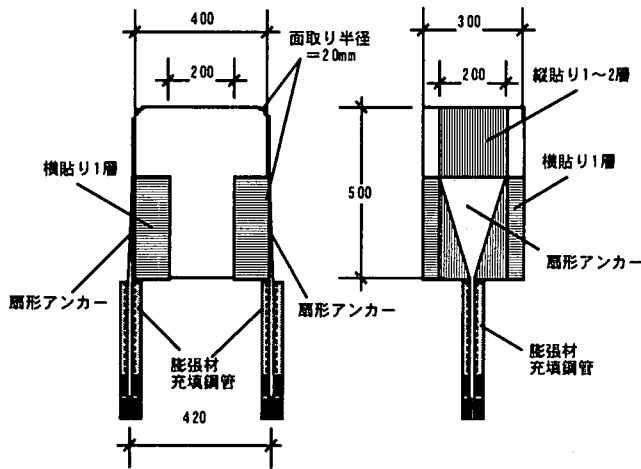


図-4 コンクリート定着実験用試験体

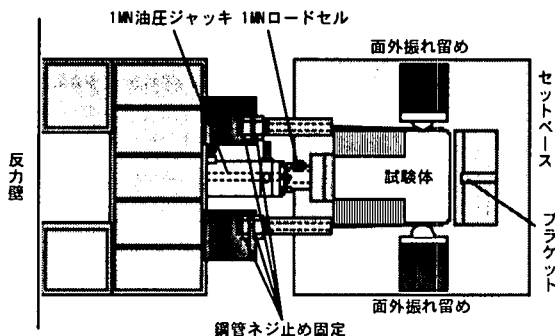


図-5 コンクリート定着実験方法

表-3 コンクリート定着実験結果

シート層数	ストランド本数	扇幅 (mm)	扇長さ (mm)	破断荷重 (kN)	破断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	破断状況
1	40	200	300	200	2874	3099	破断
				219	3147		破断
				228	3276		破断
2	80	200	300	344	2471	2478	剥離
				320	2299		剥離
				371	2665		剥離

注) 破断：扇部分でストランド破断、剥離：扇とシートの間で層間剥

離しており、破断荷重の大きい80本扇形アンカーで顕著に表れたものと考えられる。よって、本実験方法では扇形アンカーの真の定着耐力を求められたとはいえないが、実験結果から、安全側の判断として以下のことがいえる。

- 1) 扇形アンカーではストランド本数の増加に伴って定着耐力が増加する。
- 2) 炭素繊維シート1層対応の40本扇形アンカーではストランド破断を生じており炭素繊維シートとの接着力は十分であった。

(b) 鋼板定着実験

鋼板定着実験では、パラメータスタディを行う為に、また、2MNアムスラー試験機のチャックに固定する都合から扇幅を100mmに、さらに、前節の結果を踏まえて炭素繊維シート2層および3層を対象にして、試験体の要因と水準を設定した。さらに、扇幅を1/2とした影響を見るために試験体を追加した。扇形アンカーの形状については、図-6に示すように、扇形だけでなく、先端側を矩形にして定着面積を部分的に広く取れる形状のものも水準に加えた。試験体としては、図-7に示すように、鋼板の片面に炭素繊維シート2層もしくは3層を貼付し、1端はシートの上から鋼板接着して2MN試験機の平板チャックにセットできるようにし、他端はシートの上に扇形アンカーを貼付して埋込み部を膨張材充填鋼管に挿入し、膨張材充填硬化後に、鋼管を2MNアムスラー

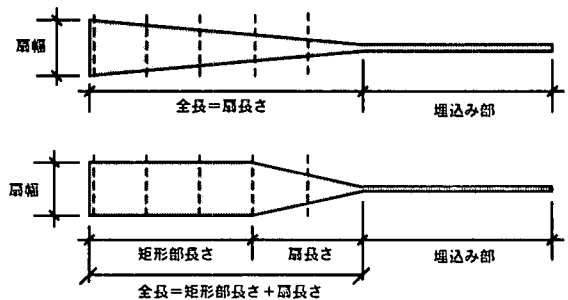


図-6 鋼板定着実験用扇形アンカー形状

試験機のチャックで掴めるようにした。また、充填鋼管の下面に支え鋼板を設け、かつ、鋼管が引張方向に移動できるが引張方向の直角方向には移動しないようにU形ボルトで拘束した。このU形ボルトの拘束で、コンクリート定着実験で発生したピーリングモードを幾分でも抑制するねらいであった。

使用した鋼板はSS400であり、作用引張荷重で降伏しない板厚とした。膨張材充填鋼管は、チャック圧が付加されることから、前節までに使用した厚肉

鋼管ではなく薄肉鋼管(SGP25A)  $\phi 34 \times 300$ mmを使用した。

表-4に試験体の要因と水準ならびに実験結果を示す。同表の中のストランド本数は扇幅と炭素繊維シート層数に比例して設定している。

実験結果によれば、すべての試験体は、引張荷重の増加に伴って、扇の要部から徐々に扇形アンカーとシートの間でシート側の繊維を引き千切りながら剥離していき、扇先端領域に到達すると一機に破断音とともに扇形アンカーが脱落した。試験体の中には脱落と同時に2次的に扇形アンカーの途中部分あるいは要部で破断を伴ったものがあった。その間、引張荷重は、細かな破断音で一時的に少し下がるとはいえ、最大耐力まで常に上昇傾向を示した。図-8に扇形アンカー全長に対する定着耐力とアンカー一部炭素繊維応力度との関係を示す。同図によれば、扇全長が長くなっても定着耐力も炭素繊維応力度も増加する傾向が見られず、ほぼ一定の傾向を示している。以上のことから、この扇形アンカーの定着破壊メカニズムとして次のようなモデル化が考えられる。すなわち、鉄筋の付着と同様に、有効定着長が存在し、荷重増加にしたがって付着が切れ、徐々に有効付着領域が移動・進展すると考えられ、最初、扇の要から、ある定着長さ( $l_e$ )領域が定着抵抗として作用しているが、荷重の増加により限界値に達して、逐次、定着領域が扇先端へ移動していく。この時、

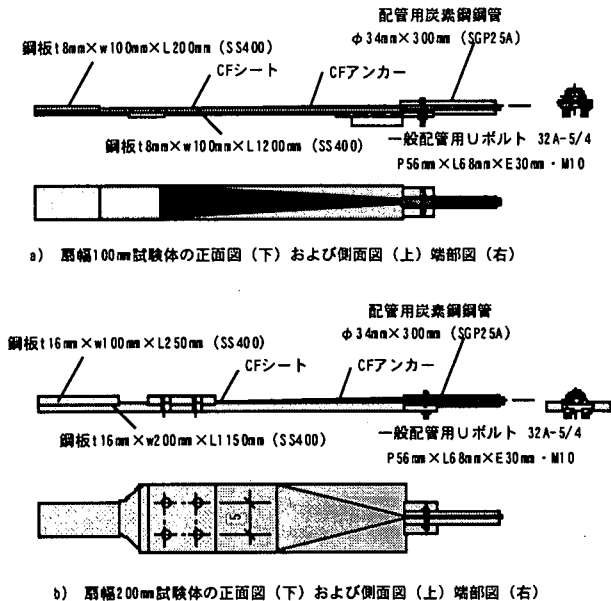


図-7 鋼板定着実験用試験体

表-4 扇形アンカー鋼板定着試験体の水準と実験結果

シート層数	ストランド本数	形状	幅(mm)	全長(mm)	矩形部の長さ(mm)	要の幅(mm)	破断荷重(kN)	破断強度(N/mm <sup>2</sup> )	平均値 標本標準偏差 変動係数	破壊状況					
2	40 (扇幅200mm 換算で80に 相当)	扇	100	315	0	19	127.0	3649	3387	層間剥離					
				313		19	113.2	3253		227	層間剥離				
				309		17	113.4	3259		6.7%	層間剥離				
				412		16	107.4	3086	3069	層間剥離					
				415		14	101.8	2925		136	層間剥離				
				417		17	111.2	3195	4.4%	層間剥離					
				515		15	98.6	2833	3151	層間剥離					
				510		19	109.2	3138	325	層間剥離					
				510		15	121.2	3483	10.3%	層間剥離					
				765		17	107.2	3080	2875	層間剥離					
				758		17	95.0	2730	183	層間剥離					
				757		15	98.0	2816	6.4%	層間剥離					
				3		60 (扇幅200mm 換算で120に 相当)	扇	100	315	0	18	128.0	2452	2446	層間剥離
									308		22	125.4	2402	41	層間剥離
312	22	129.6	2483		1.7%				層間剥離						
508	19	155.4	2977		2701				層間剥離						
509	20	138.6	2655		256				層間剥離						
512	18	129.0	2471		9.5%				層間剥離						
512	307	21	138.6		2655				2846		層間剥離				
扇+矩形	506	303	21		144.8		2774		235	層間剥離					
	515	315	20		162.3		3109		8.3%	層間剥離					
	扇	761	0		19		143.8		2755	2560	層間剥離				
		759			19		123.1		2358	198	層間剥離				
		764			19		134.0		2567	7.7%	層間剥離				
	2	80	扇 不織布 無し		200		304		0	33	210	3017	2989	層間剥離	
							302			35	214	3075	104	層間剥離	
305				28		200	2874	3.5%		層間剥離					
403				33		247	3549	3539		層間剥離					
402				32		257	3693	158		層間剥離					
401				32		235	3376	4.5%		層間剥離					

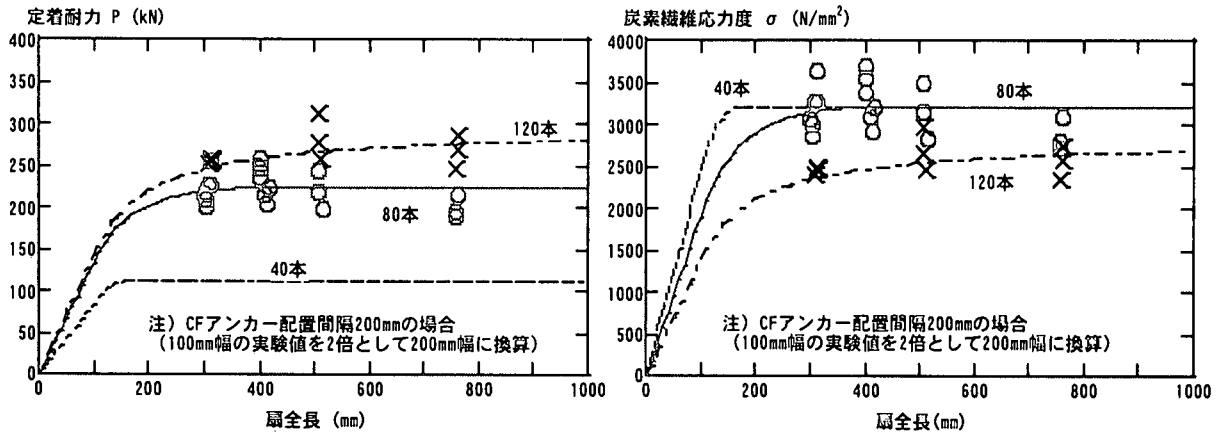


図-8 1～3層相当のCFアンカーの定着耐力ならびに定着強度の計算値と実験値

扇先端に行くにしたがって定着面積が増える傾向にあるため、定着耐力が徐々に増加するメカニズムと考えられる。ただし、その定着面積は扇先端の広がりには比例的に増加するのではなく、扇中のストランドの定着は、ストランド密度が疎であれば一定の定着有効幅が存在し、ストランド密度が密であれば隣り合うストランドと分け合った幅が有効になると考えられる。このストランド密度の疎密の境界値を炭素繊維目付け量で表現し、定着有効目付け量 ( $W_L$ ) と定義する。また、扇のストランド密度が  $W_L$  に達する位置と扇要との距離を重合距離 ( $r_L$ ) と定義し、扇の定着耐力を決定する定着面積 ( $A_{be}$ ) を定式化すると、以下のようなものである。

諸元：

- $B_0$  : 扇の配置ピッチ (mm)
- $n_{cs}$  : 扇に配置する 24K ストランド本数
- $a_{cs}$  : 24K ストランド 1 本の断面積 (=0.87mm<sup>2</sup>)
- $\rho_f$  : 炭素繊維密度 (=1.8 g/cm<sup>3</sup>)
- $d_{cs}$  :  $n_{cs}$  本のストランドを含浸接着樹脂で硬化させた時の標準直径 (=1.8 · ( $n_{cs}$  ·  $a_{cs}$ )<sup>1/2</sup>, mm)
- $L_0$  : 扇の全長 (mm)

式の誘導：

扇の要からの距離  $r$  における扇幅  $B$  および目付け量  $W$  は下式で表される。

$$B = (B_0 - d_{cs}) \cdot r / L_0 + d_{cs} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$W = 1000 \cdot n_{cs} \cdot a_{cs} \cdot \rho_f / B$$

$$= 1000 \cdot n_{cs} \cdot a_{cs} \cdot \rho_f / \{ (B_0 - d_{cs}) \cdot r / L_0 + d_{cs} \} \quad \dots \dots \dots (4)$$

定着有効目付け量  $W_L$  となる位置までの距離  $r_L$ 、その位置での扇幅を定着限界幅  $B_L$  とおけば、

$$B_L = 1000 \cdot n_{cs} \cdot a_{cs} \cdot \rho_f / W_L \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$r_L = \{ (1000 \cdot n_{cs} \cdot a_{cs} \cdot \rho_f) / W_L - d_{cs} \} \cdot L_0 / (B_0 - d_{cs}) \quad \dots \dots \dots (6)$$

扇の全長 ( $L_0$ ) を有効定着長さ ( $L_e$ ) よりも大きくすることを前提とすれば、定着耐力を決定する定

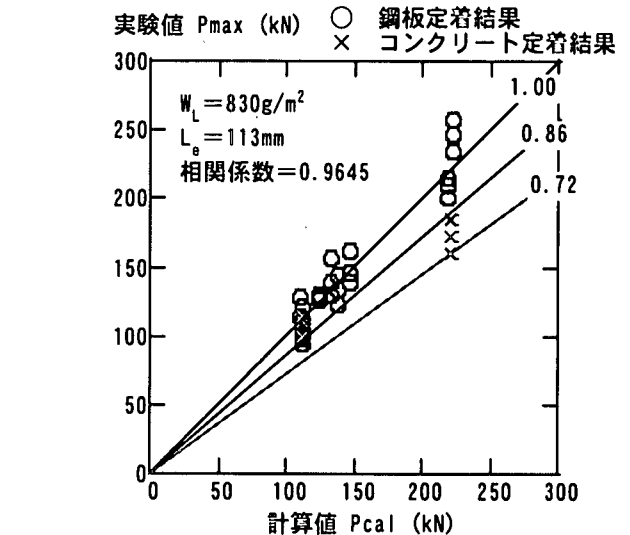


図-9 鋼板定着耐力実験値と計算値の相関図

着面積 ( $A_{be}$ ) は扇先端から  $L_e$  の範囲の面積として、 $L_e \leq L_0 \leq L_e + r_L$  の場合

$$A_{be} = B_L \cdot (L_0 - r_L) + \{ (B_L - d_{cs}) \cdot (L_0 - L_e) / r_L + d_{cs} + B_L \} \cdot (r_L - L_0 + L_e) / 2 \quad \dots \dots \dots (7)$$

$L_e + r_L \leq L_0$  の場合

$$A_{be} = B_L \cdot L_e \quad \dots \dots \dots (8)$$

よって、扇形アンカー定着耐力 ( $P_{b0}$ ) は、

$$P_{b0} = \tau_p \cdot A_{be} \quad \dots \dots \dots (9)$$

ただし、 $\tau_p$  : 扇に含浸させた樹脂の引張せん断強度 (今回使用した樹脂では 12.8N/mm<sup>2</sup>)

上記の関係式では、定着有効目付け量 ( $W_L$ ) ・有効定着長さ ( $L_e$ ) を決める必要があり、これらの量は含浸樹脂の接着特性による。そこで、鋼板定着実験データに対して、 $W_L$  および  $L_e$  の値を組み合わせそれぞれ  $A_{be}$  を式 (7) (8) で求め、式 (9) で得た計算値と実験値の相関を求め、相関係数が最大となるようにシミュレーションを行った。その結果、図-9 に示すような相関図が得られ、次の値を得た。

$$W_L = 830 \text{ g/m}^2, \quad L_e = 113 \text{ mm} \quad \dots \dots \dots (10)$$

アンカー配置間隔  $B_0=200$  mm, ストランド本数  $n_{st}$   
 $=40$  本,  $80$  本,  $120$  本の場合について定着耐力-扇  
 全長関係を図-8 に示す. 計算値は鋼板定着実験結果  
 をよく推定できていると考えられる. 節(1)と同様に  
 式(9)の片側 95%信頼下限式を求めると,

$$P_{b0}=0.86 \tau_p \cdot A_{be} \quad \dots\dots\dots (11)$$

図-9 には, 併せて, コンクリート定着実験結果を  
 $\times$ 印でプロットしており, データが少ない為に鋼板  
 定着実験結果と同様な分析はできないが, 定着モデ  
 ルとして鋼板定着の場合と同様にモデル化できると  
 考えられ, 実験結果の下限式として

$$P_{b0}=0.72 \tau_p \cdot A_{be} \quad \dots\dots\dots (12)$$

が設定できる.

### 3. 炭素繊維アンカーの設計

扇形アンカーに要求される定着性能として, 前節  
 で述べた定着モデルを採用できることから, 設計式  
 として, 以下の設計式の提案が可能となる.

#### (a) 対象炭素繊維シートが必要とする定着設計荷重

先に貼付した炭素繊維シートに対して扇形アンカ  
 ーに求められる定着設計荷重  $P_{bk}$  を下式で与える.

$$P_{bk}=n_{CF} \cdot t_{CF} \cdot f_{CFuk} \cdot B_0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに,  $n_{CF}$ : 炭素繊維シート層数  $\leq 2$  層  
 $t_{CF}$ : 炭素繊維シート厚さ (mm)  
 $f_{CFuk}$ : 炭素繊維シート引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $B_0$ : 扇形アンカー配置間隔 (mm)

#### (b) 扇形アンカー部の設計

扇形アンカーの扇形部の定着設計耐力  $P_{b1}$  は下式  
 を満足するものとする.

$$P_{b1} \geq P_{bk} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$P_{b1}=0.72 \tau_p \cdot A_{be} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ただし,  $L_e \leq L_0 \leq L_e + r_L$  の場合

$$A_{be}=B_L \cdot (L_0 - r_L) + \{ (B_L - d_{cs}) \cdot (L_0 - L_e) / r_L + d_{cs} + B_L \} \cdot (r_L - L_0 + L_e) / 2 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$L_e + r_L \leq L_0$  の場合

$$A_{be}=B_L \cdot L_e \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここに,  $\tau_p$ : 含浸樹脂の引張せん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $L_0$ : 扇全長 (mm), 50mm の倍数  
 $B_L=1000 \cdot n_{sc} \cdot a_{cs} \cdot \rho_f / W_L$   
 $r_L = \{ (1000 \cdot n_{sc} \cdot a_{cs} \cdot \rho_f) / W_L - d_{cs} \} \cdot L_0 / (B_0 - d_{cs})$   
 $d_{cs}=1.8 \cdot (n_{cs} \cdot a_{cs})^{1/2}$   
 $n_{cs}$ : 炭素繊維ストランド本数, 10 の倍数  
 $a_{cs}$ : 24K ストランド 1 本断面積 (0.87mm<sup>2</sup>)  
 $\rho_f$ : 炭素繊維密度 (=1.8, g/cm<sup>3</sup>)  
 $L_e$ : 定着有効長さ (=113 mm)

$W_L$ : 定着有効目付け量 (=830, g/m<sup>2</sup>)

#### (c) 埋込みアンカー部の設計

扇形アンカーの埋込み部の定着設計耐力  $P_{b2}$  は下  
 式を満足するものとする.

$$P_{b2} \geq P_{bk} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$P_{b2}=81 \cdot L_{cs} \cdot (n_{cs} \cdot a_{cs})^{1/2} \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここに,  $L_{cs}$ : 埋込み深さ (mm), 50mm の倍数

なお, コンクリートのコーン状破壊についてはア  
 ンカーボルトの設計同様に別途検討する必要がある.

#### (d) 埋込みアンカーの穿孔径

今回の一連の実験で用いた埋込みアンカーの穿孔  
 径  $\phi_{cs}$  は SR-CF 工法<sup>1)</sup>で規定した値に準じて設定し  
 ており, 次式で算定して小数点以下は切り上げる.

$$\phi_{cs}=2.3 \cdot (n_{cs} \cdot a_{cs})^{1/2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

#### (e) 扇形アンカー位置での下貼りシート

扇形アンカー位置では, 対象となる炭素繊維シー  
 トの約 1/3 程度の炭素繊維シートを直角方向に下貼  
 りすることとする. これは扇形にストランドを配置  
 しているために軸直角方向分力を生じ, この分力を  
 扇直下の軸方向シートの下に貼付した下貼りシート  
 で抵抗させる目的のものであり, これについても  
 SR-CF 工法<sup>1)</sup>に準ずるものとする.

なお, 今回使用した炭素繊維ストランドおよび含  
 浸樹脂は特定のものを使用しており, これ以外の組  
 合せを用いる場合には, 定着耐力特性について実験  
 的に確認しなければならない.

### 4. 炭素繊維アンカーの施工方法および品質管理

扇形アンカーの施工方法を図-10 に示す. 手順と  
 しては以下のものである.

#### 1) コンクリート面への穿孔

コンクリート補強面に予め貼付した炭素繊維シー  
 ト面に扇形アンカーを取り付ける位置の墨出しを行  
 い, シート面に沿って墨出し位置に所定の穿孔径の  
 コンクリートドリルで穿孔する. この時, 孔口がシ  
 ート面と段差を生じないように, かつ, 水平よりも  
 やや下向きに穿孔する. 孔軸とシート面がなす角度  
 を 5~10 度程度とできるだけ小さくする. 施工の都  
 合から, この状態で期間を開ける場合には, 雨水な  
 どが入らないように孔口を栓で塞ぐ.

#### 2) 穿孔内へのプライマー塗布

穿孔した孔内をエアブローおよびブラシによって  
 十分清掃し, 孔内をプライマー塗布する.

#### 3) 穿孔内への樹脂を充填

埋込みアンカーを挿入した時に孔内が樹脂で満た

されるように、孔奥から1/2ないし2/3の範囲を樹脂で充填し、雨水などが入らないように孔口を栓で塞ぐ。

4) 埋込みアンカー先端処理

埋込みアンカーを所定の埋込み長さで孔内に挿入する為に、1端を埋込み長さとした直角L形パイプ（φ3mm程度）にアンカー先端の焼鈍線を挿入する。

5) 埋込み部と扇要部の樹脂含浸

含浸樹脂が入ったパレット内に埋込み部および扇要部を浸して樹脂を十分に含浸させる。

6) 埋込み部の孔内挿入

穿孔口の栓を除去し、直角L形パイプを使って埋込みアンカー部をパイプのL字部まで押し込む。直角L形パイプは埋め殺しとし、その長さが埋込みアンカー長を保証することとなる。

7) 扇部貼付面への樹脂塗布

扇部を貼付する位置の炭素繊維シート面に含浸樹脂を塗布する。

8) 扇部への樹脂含浸・脱泡・仕上げ樹脂塗布

樹脂塗布面に扇部を広げて貼り付け、扇部ストランドに樹脂を十分含浸させ、脱泡ローラーなどで脱泡させる。この時、1度で樹脂を多く塗布すると扇面が所定の位置からずり下がる場合があるので、数度に分けて少量づつ樹脂塗布して所定の位置に落ち着かせ、仕上げ樹脂塗布する。なお、扇先端部は扇形アンカー配置間隔よりも10mm長く製作するようにしており、扇先端で互いが10mm程度重なり合うように貼付する。

品質管理は、それぞれの材料受入時にそれぞれのミルシート出荷伝票で所定の品質を確認する。また、現地において、既設コンクリート躯体を使って、埋込みアンカー部の引抜き実験（図-2参照）を樹脂アンカーボルトと同様にアンカー本数500本に1本もしくは1施工ブロックに3本の頻度で実施する。試験終了後は、突出物の除去および樹脂パテによる断面修復を行う。扇アンカー部については、数量は引抜き実験と同一とするが、現地での試験が困難であることから、鋼板定着実験用供試体（図-7参照）を現地にて作製し、樹脂硬化養生後、室内試験により引張試験を実施し、所要の定着強度を確認するものとした。図-11に炭素繊維アンカーを建築物および土木構造物に利用した場合の例を示す。

参考文献

- 1) SR-CF 工法研究会：既存建築物の耐震改修設計施工指針、建築物等防災技術評価委員会、建防災発第1399号、2001.2

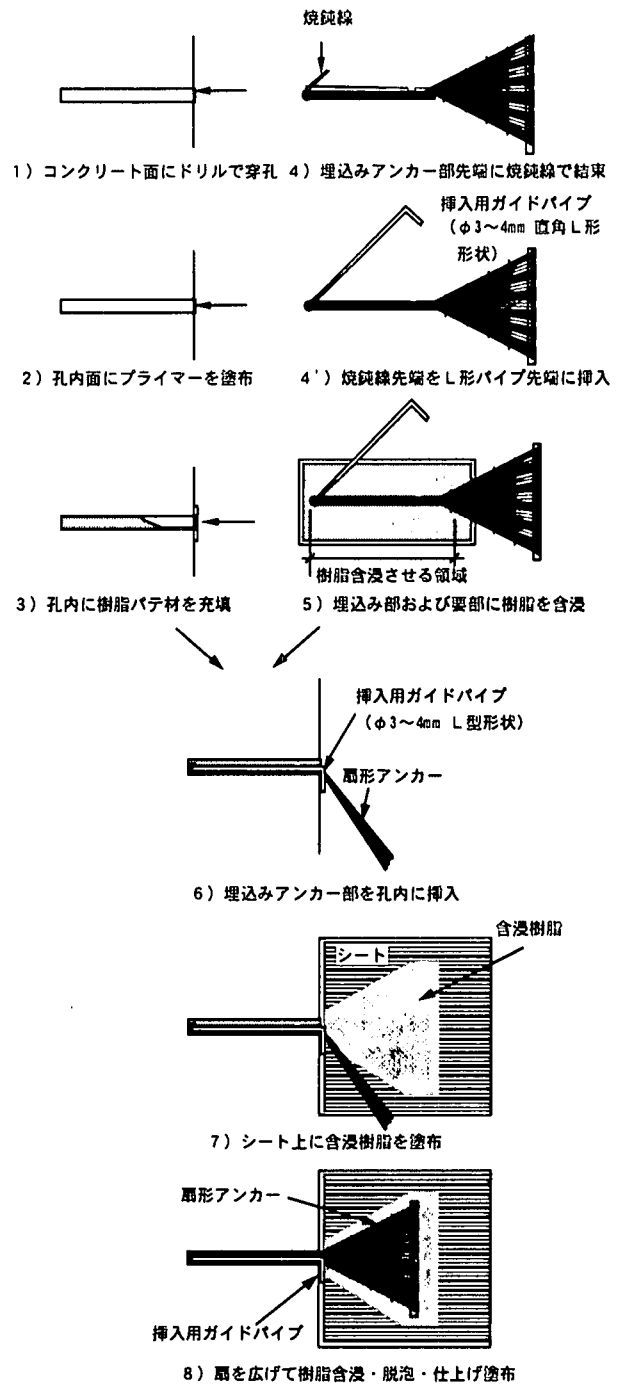


図-10 扇形アンカー施工手順

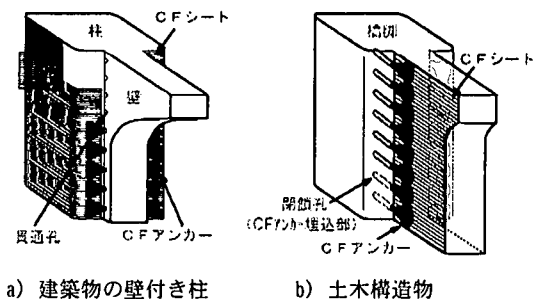


図-11 炭素繊維アンカーの利用例