

# 論文 各種接着剤と CFRP スtrandシートにより積層補強した RC はりの曲げ補強効果

中村 智\*1・山口 浩平\*2・小森 篤也\*3・日野 伸一\*4

**要旨:** 炭素繊維シート接着工法は、軽量かつ薄い断面で RC 部材の補強が可能なことから、広く普及している工法である。しかし、入念な不陸修正や樹脂を繊維に含浸させる工程が必要で、施工品質が作業者の技量に依存する等の問題があった。そこで著者らは、工場にて炭素繊維等をエポキシ樹脂で棒状に成形した FRP スtrandシートを用いた RC 部材の補強工法に着目し、施工条件に応じた接着剤を選定するとともに、FRP スtrandシートを積層補強した場合の補強効果を検討するために各種要素試験を実施した。次に本補強工法で補強した RC はりの曲げ載荷試験を行った結果、本実験の範囲内で十分な曲げ補強効果が得られた。

**キーワード:** FRP スtrandシート, 曲げ補強, MMA 樹脂, ポリマーセメントモルタル, 超速硬セメント

## 1. はじめに

FRPを用いた既設コンクリート構造物の補強工法として最も一般的な炭素繊維シート接着工法は、炭素繊維シートが軽量・高強度・高弾性・高耐久性等の長所を有し、薄い断面での補強が可能で施工性に優れることから、広く普及している工法である。しかし、浮きや膨れのないFRPを形成するため、入念に不陸修正を行った後にシートを貼付け、構造物の表面で樹脂を繊維に含浸させる作業や脱泡作業を行う必要があるため、工数が多く施工品質が作業者の技量に依存する等の問題があった。そこで、工場にて炭素繊維等をエポキシ樹脂で棒状に成形した連続繊維ストランドをすだれ状にシート化した連続繊維ストランドシートを用いた補強工法(以下、ストランドシート工法)が開発され、既往の研究<sup>1)</sup>により設計で想定した通りの補強効果が確認されている。本研究ではストランドシートの接着剤として従来のエポキシ樹脂に加え、上面増厚時の張出床版の曲げ補強等を想定し、硬化時間が短く、早期交通開放が可能なメタクリル酸メチルを主原料とした低温硬化性・速硬化性に特徴を持つMMA樹脂および打継剤併用型超速硬セメントモルタル(以下、JCM)を、また水路トンネル内面等の湿潤環境でも施工可能な無機系ポリマーセメントモルタル(以下、PCM)の4種類を選定した。これら各種接着剤を用いたストランドシートの引張強度、継手強度およびストランドシートを1層から3層まで積層した場合のコンクリートの付着強度等を明らかにする要素試験を行い、各材料特性を評価した。また、ストランドシート(1~3層)で積層補強したRCはりの曲げ載荷試験を行い、要素試験の結果を踏まえてその補強効果を総合的に検討した。

## 2. FRP スtrandシートおよび専用接着剤の材料特性

### 2.1 FRP スtrandシートの引張強度および継手強度

ストランドシート、接着剤の材料特性値、試験体概略図を表-1、図-1に示す。試験方法は連続繊維シートと同様に接着剤(エポキシ樹脂、MMA樹脂)で板状に固めた試験片を作製して連続繊維シートの試験方法に準拠して引張試験(土木学会規準JSCE-E541-2007)<sup>2)</sup> および継手試験(同JSCE-E-542-2007)<sup>2)</sup>を行った。試験結果を表-2に示す。いずれの試験体もストランドシートが脆性的に母材破断した。また、ストランドシートの引張強度の平

表-1 材料特性値

(a) FRP スtrandシート

規格	繊維目付量 (g/mm <sup>2</sup> )	厚さ (mm)	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
高強度型炭素繊維	600	0.333	2.45 × 10 <sup>5</sup>	3400

(b) 専用接着剤

(単位: N/mm<sup>2</sup>)

種類	エポキシ樹脂	MMA樹脂	PCM	JCM
圧縮強度	78.3	79.0	11.3	55.3
弾性係数	3970	2500	4800	26200
引張強度	35.8	43.0	2.37	5.30
曲げ強度	58.8	71.0	6.50	9.50
引張せん断強度	25.8	22.0	-	-

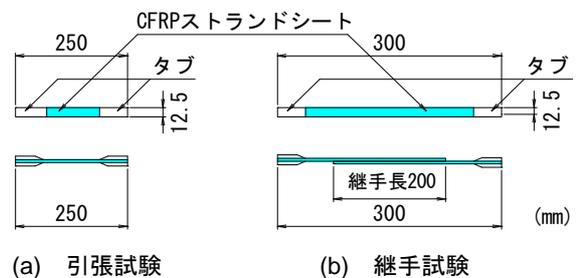


図-1 試験体概略図

\*1 (株) さとうベネック 土木営業部 工務課 (正会員)

\*2 九州大学大学院 工学研究院 助教 博(工) (正会員)

\*3 新日鉄マテリアルズ(株) 社会資本材料事業部 技術部 マネージャー (正会員)

\*4 九州大学大学院 工学研究院 教授 工博 (正会員)

均値、最小値とも連続繊維シートを保証引張強度である(3400N/mm<sup>2</sup>)を上回る結果となった。本試験結果より、エポキシ樹脂またはMMA樹脂を接着剤とした場合のストランドシートの引張強度が確認され、継手長は200mmを確保すれば剥離破壊を防止でき、母材以上の継手強度を確保できることが確認された。

## 2.2 FRP ストランドシートとコンクリートの付着強度

### (1) 試験概要

コンクリートの材料特性値および付着試験体概略図を表-3、図-2に示す。試験方法は連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法(案)(JSCE-E 543-2007)<sup>2)</sup>に準拠し、コンクリートブロックの側面にノッチを設け、ノッチの上下面に離型フィルムを挿入した。また、コンクリートと全ネジ鋼棒の付着割裂破壊を防止するために、らせん鉄筋を設置した。既設コンクリートの表面はブラスト材をアルミナ、投射密度を30 N/mm<sup>2</sup>としてブラスト処理を施した。次に、接着幅50mmとしたストランドシートを付着長が280mmとなるように接着した。実施工と同様にエポキシ樹脂、MMA樹脂はメーカー指定の単位面積当たりの標準塗布量で接着し、PCMは既設コンクリートとストランドシートの界面に接着用PCMを塗布後、表面保護を目的として厚さ10mmで表面保護用PCMを別途塗布した。また、JCMは既設コンクリートに不陸修正用のJCMを厚さ5mmで塗布後、エポキシ樹脂打継剤を単位面積当たり標準塗布量で塗布し、ストランドシートを配置した後にJCMを厚さ5mmで塗布した。ストランドシートを積層する場合の端部での応力集中を避けるため、25mmずつのテーパを設けた。コンクリートの圧縮強度は、目標圧縮強度30N/mm<sup>2</sup>に対して材齢28日で37.1N/mm<sup>2</sup>であり、ストランドシートの接着後16~18日の養生を行った後試験を行った。

### (2) 界面剥離破壊エネルギーおよび付着強度

試験結果を表-4に示す。いずれの試験体も片側の付着面が剥離する、既設コンクリートとストランドシート界面での剥離破壊を呈し、破壊面はストランドシートにコンクリート表面が付着した状態であった。界面剥離破壊エネルギー $G_f$ および付着強度 $\tau_u$ は、JSCE-E543-2007<sup>2)</sup>に準じて式(1)、(2)を用いて算定した。

$$G_f = \frac{P_{max}^2}{8b^2 E_f t} \quad (1)$$

$$\tau_u = \frac{P_{max}}{2b\ell} \quad (2)$$

ここに、 $G_f$ : 界面剥離破壊エネルギー(N/mm)、 $\tau_u$ : 付着強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $P_{max}$ : 最大荷重(N)、 $b$ 、 $E_f$ 、 $t$ : シートの幅(mm)、弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)、厚さ(mm)、 $\ell$ は試験部分における有効付着長(mm)である。炭素繊維シート1層のコンクリートとの界面剥離破壊エネルギーは一般に0.5

表-2 試験結果

### (a) 引張試験

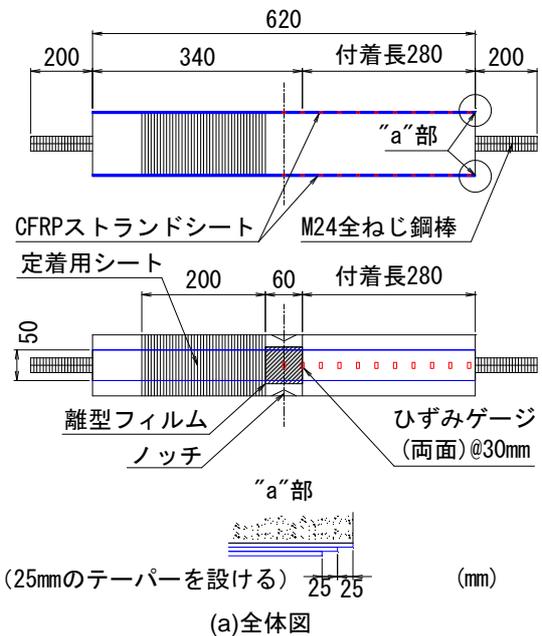
Type	最大荷重(kN)		引張強度(N/mm <sup>2</sup> )		破壊形態	
	試験値	平均	試験値	平均		
エポキシ樹脂	1	16.1	16.2	4146	4169	母材破断
	2	15.6		4007		
	3	16.4		4207		
	4	16.1		4142		
	5	16.9		4341		
MMA樹脂	1	16.4	17.2	4210	4412	母材破断
	2	18.2		4670		
	3	15.7		4040		
	4	16.5		4230		
	5	19.1		4910		

### (b) 継手試験

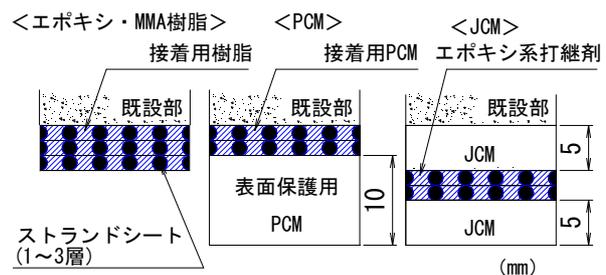
Type	最大荷重(kN)		引張強度(N/mm <sup>2</sup> )		破壊形態	
	試験値	平均	試験値	平均		
エポキシ樹脂	1	15.6	15.2	4001	3910	母材破断
	2	16.2		4175		
	3	13.4		3465		
	4	16.3		4197		
	5	14.4		3713		
MMA樹脂	1	17.1	17.1	4390	4394	母材破断
	2	16.2		4160		
	3	17.3		4450		
	4	17.9		4580		
	5	17.1		4390		

表-3 コンクリートの材料特性値

種別	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	材齢(日)
早強ポルトランドセメント	37.1	2.69 × 10 <sup>4</sup>	28



(a) 全体図



(b) 補強部詳細図

図-2 付着試験体概略図

N/mm で<sup>3)</sup>、概ねこれを上回ったが、MMA 樹脂 3 層の試験体に関しては、0.46 と 5% 程度下回った。また、付着強度に関しては既設橋脚の震補強工法事例集<sup>4)</sup>に示される曲げ補強に用いる繊維材シートの設計用付着強度 (0.44 N/mm<sup>2</sup>) 以上であった。各接着剤の界面剥離破壊エネルギーは 1 層の場合で比較すれば JCM, エポキシ樹脂, MMA 樹脂, PCM の順に大きく、さらにストランドシート<sup>1)</sup>の層数が増加するに従って減少した。

### (3) 応力伝達区間

ストランドシートの軸方向ひずみ分布の一例を図-3に示す。P=10kN 時にはストランドシート全面が接着されており最大引張力が作用する点から直線的にひずみが減少し、約 60mm でひずみが 0 となり、この区間でストランドシートからコンクリートに応力が伝達されている。一方、剥離破壊直前の P=50kN 時は、0-60mm 区間のひずみは引張力作用位置での母材のひずみにほぼ等しく一定で、剥離が完全に生じているものと考えられる。また、60-120mm 区間のひずみは急激に減少しており、既設コンクリートに応力を伝達している区間であると考えられる。120-280mm 区間ではひずみは緩やかに減少し、剥離は生じていないものと考えられる。

### (4) 有効定着長

最大荷重をシートの貼付け面積で除して求めた見かけの付着強度は、貼付け長が長くなるほど低下することが知られているが実際の付着応力はシート貼付け面積全域ではなく、ある限られた領域に生じていると推定される。この領域はシートの付着に実質的に有効な区間であり、本論文では連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書(II)<sup>5)</sup>に基づき、この領域をストランドシートの有効付着長と定義した。軸方向ひずみ分布よりひずみ増加区間でひずみ勾配を求め、これより式(3)を用いて最大付着応力を求め、式(4)を用いて有効付着長を算定した。各試験体の剥離荷重直前の軸方向ひずみ分布を図-4に、式(3)、(4)により得られた各試験体の有効付着長を図-5に示す。

$$\tau_y = \frac{\Delta \varepsilon_F \cdot E_F \cdot A_F}{S_g \cdot b} \quad (3)$$

$$\ell_e = \frac{P_{max}}{2\tau_y \cdot b} \quad (4)$$

ここに、 $\tau_y$ : 最大付着応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $\Delta \varepsilon_F$ : 最大荷重時のひずみ増加区間の隣り合うゲージひずみ値の差、 $E_F$ : 連続繊維シートの弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)、 $A_F$ : 連続繊維シートの断面積(mm<sup>2</sup>)、 $S_g$ : ひずみゲージの貼り付け間隔(mm)、 $b$ : 連続繊維シートの幅(mm)、 $\ell_e$ : 有効付着長(mm)、 $P_{max}$ : 試験体の最大荷重(N)である。

図-5 より各試験体において、有効付着長はシートの積層数が増すごとに長くなり、1 層の場合は 130-190mm

程度、2 層の場合は 250mm 程度であった。エポキシ樹脂および MMA 樹脂における 3 層試験体については、軸方向ひずみ分布において明確な剥離区間は確認されず、引

表-4 付着試験結果

Type	層数 (層)	最大荷重 $P_{max}$ (kN)		界面剥離破壊エネルギー $G_f$ (N/mm)		付着強度 $\tau_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	
		試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均
エポキシ樹脂	1	43.3	42.1	1.15	1.09	1.55	1.51
		41.9		1.08		1.50	
		41.2		1.04		1.47	
	2	51.2	51.7	0.80	0.82	1.83	1.84
		46.6		0.67		1.66	
		57.2		1.00		2.04	
	3	56.4	56.7	0.65	0.66	2.01	2.02
		54.7		0.61		1.95	
		59.0		0.71		2.11	
MMA樹脂	1	40.6	36.0	1.01	0.80	1.45	1.29
		32.2		0.64		1.15	
		35.2		0.76		1.26	
	2	42.2	42.3	0.55	0.55	1.51	1.51
		41.4		0.53		1.48	
		43.3		0.57		1.55	
	3	43.7	47.1	0.39	0.46	1.56	1.68
		50.7		0.53		1.81	
		47.0		0.45		1.68	
PCM	1	35.8	35.4	0.79	0.77	1.28	1.27
		-		-		-	
		35.0		0.75		1.25	
	2	44.1	45.1	0.60	0.63	1.58	1.61
		42.3		0.55		1.51	
JCM	1	54.6	48.2	1.83	1.44	1.95	1.72
		43.5		1.16		1.55	
		46.6		1.33		1.66	
		-		-		-	

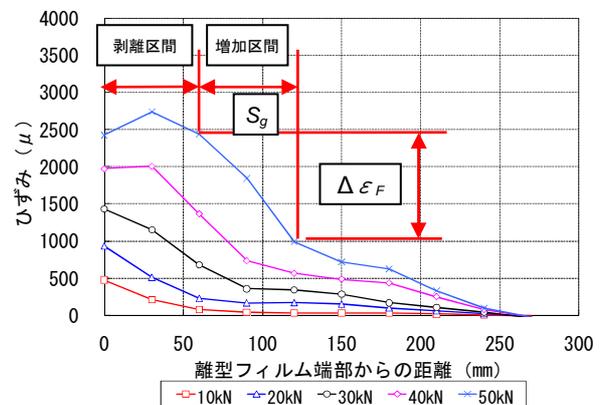


図-3 軸方向ひずみ分布(エポキシ, 2層)

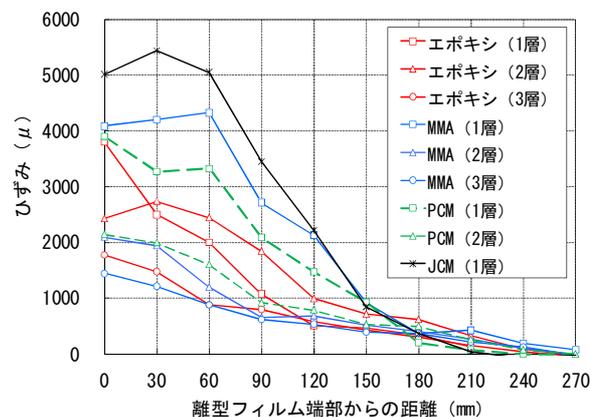


図-4 軸方向ひずみ分布(P≠剥離直前)

張力の作用点から直線的にひずみが減少する傾向であり、本試験における付着長 280mm を超える算定結果となった。そこで、本研究ではコンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(Ⅲ)<sup>6)</sup>に基づき各ひずみ測定点のひずみ差から摩擦応力度を算出した。図-6 にエポキシ樹脂を接着剤とした3層補強の試験体の摩擦応力度-荷重関係を示す。同図より P=35kN 程度までは 0~30mm 区間の摩擦応力度が増大している。これは、既設コンクリートとストランドシートの剥離が部分的に進行しながら荷重に抵抗している状態であると考えられる。また P=35kN 以降の摩擦応力度はピーク値を過ぎると徐々に低下する。これは既設コンクリートとストランドシートの付着が切れ、摩擦力が働いているものと考えられる。同様に P=48kN 前後で 30-60mm 区間の付着切れが生じている。以上から、図-4 に示した3層補強試験体においても、引張力の作用位置に近い部分(0-60mm)では剥離が生じていることが確認され、最終的には荷重の増大に伴い剥離が進展し付着区間が短くなることで剥離破壊を呈したと考えられる。

### 3. FRPストランドシートによるRCはりの曲げ補強効果

#### 3.1 試験概要

試験体種類および各接着剤の特徴を表-5、鉄筋およびコンクリートの材料特性値を表-6、試験体概略図を図-7に示す。接着剤およびストランドシートの材料特性値は表-1と同様である。試験体は14種類とし、接着剤は従来型のエポキシ樹脂および早期硬化型のMMA樹脂、打継剤併用型JCM、および無機系接着剤のPCMを選定した。施工方法は、土木構造物で一般的な引張鉄筋比が約1%で曲げ破壊先行型となるようにせん断補強筋を配置したRCはり供試体を作製し、早強ポルトランドセメントを用い目標圧縮強度を30.0N/mm<sup>2</sup>として打設し、打設後約1週間で既設コンクリート表面のブラスト処理を行い、約3週間後に2.2と同様の施工方法で、ストランドシートをはり下面に長さ1500mm、幅200mmの範囲で接着した。ストランドシートの層数は1層~3層とし、積層する場合には両支点端部での応力集中を避けるため、各層ごとに25mmのテーパを設けた。継手試験体は、はり中央の等曲げ区間でストランドシートを200mmの長さで重ねて接着した。FRPストランドシート接着後さらに1週間以上養生した。試験方法は、せん断スパン700mm、等曲げ区間200mmの2点漸増載荷とした。

#### 3.2 変形状

試験結果を表-7に示す。荷重-スパン中央変位関係を図-8に示す。MMA樹脂1層補強のM-1および継手有りのE-J、M-JおよびJ-Jは、エポキシ樹脂1層補強試験体とほぼ同様の性状を示したため同図から省略した。いずれ

の補強試験体も無補強試験体Nに比べて最大荷重および剛性が向上した。初期剛性は他の試験体に比べて同積層数のJCMの剛性が高くなっているが、これは既設コンクリートに不陸修正用のJCMを厚さ5mmで塗布した後にストランドシートを接着しており、部材有効高が高くなったためである。また、既設鉄筋降伏後(P=200kN程度)

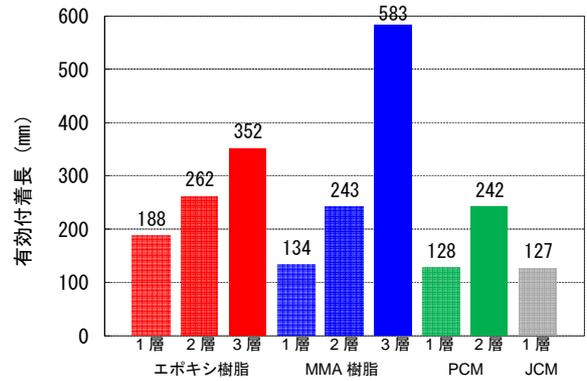


図-5 有効付着長

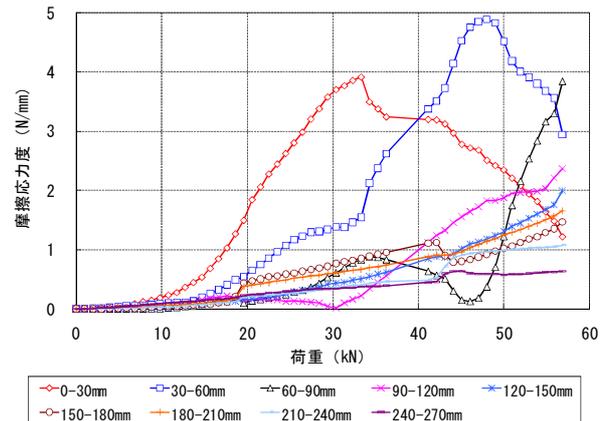


図-6 摩擦応力度-荷重関係 (エポキシ, 3層)

表-5 はり試験体種類

Type	専用接着剤	継手	積層数(層)	特徴
N	(無補強)	無	-	-
E-1	エポキシ樹脂	無	1	従来型 (上下面増厚等)
E-2			2	
E-3			3	
E-J		有	1	
M-1	MMA樹脂	無	1	早期硬化型 (上面増厚等)
M-2			2	
M-3			3	
M-J			有	
P-1	PCM	無	1	湿潤環境型 (水路トンネル等)
P-2			2	
J-1	JCM	無	1	早期硬化型 (上面増厚等)
J-2			2	
J-J			有	

表-6 材料特性値 (単位: N/mm<sup>2</sup>)

Material	Property	Value	弾性係数	2.00 × 10 <sup>5</sup>
D10 (SD345)	降伏強度	376		
	引張強度	548		
D13 (SD345)	降伏強度	395		
	引張強度	551		
D19 (SD345)	降伏強度	407		
	引張強度	559		
コンクリート	圧縮強度	37.1		2.69 × 10 <sup>4</sup>

の曲げ剛性は既設鉄筋降伏前に剥離破壊したE-3および既設鉄筋の降伏とほぼ同時に剥離破壊したP-2を除けば、ストランドシートの積層数が多いほど向上した。

### 3.3 破壊性状

破壊性状を図-10、試験体の破壊後の断面を写真-1に示す。無補強試験体 N は既設引張鉄筋の降伏後、圧縮縁コンクリートの圧縮破壊に至り、破壊後の試験体は300mm 程度の間隔で曲げひび割れが卓越した。補強試験体は無補強試験体 N に比べひび割れが分散しており、ひび割れ間隔は 150mm 程度であった。既設鉄筋降伏時までは主としてスパン中央部、両載荷点直下の曲げひび割れが卓越した。1 層補強の試験体に関しては、いずれも既設鉄筋降伏後に載荷点直下のストランドシートが剥離破壊を呈した。また、2 層補強の試験体に関しては概ね 1 層補強と同様の破壊性状を呈したが P-2 は既設鉄筋の降伏とほぼ同時に剥離破壊を呈した。3 層補強の M-3 に関しては除既設鉄筋降伏後に載荷ストランドシート端部から斜めひび割れが発生し、荷重の増大に伴いひび割れ幅が増加した。その後、斜めひび割れを起点としてかぶりコンクリートが主鉄筋に沿って破壊した。また、E-3 に関しては既設鉄筋降伏よりストランドシート剥離が先行した。全ての試験体でストランドシートの剥離後、無補強試験体 N の降伏荷重程度まで荷重が低下し、その後変形が大きくなり、圧縮縁のコンクリートが圧縮破壊した。また、スパン中央に継手部を設けた試験体 E-J, M-J および J-J も同様の破壊形式を呈し、継手破壊は生じなかった。また、全ての試験体で試験後のストランドシート表面にはかぶりコンクリートが付着した状態であった。なお、P-1,2 に関してはかぶりコンクリートに沿って軸方向のひび割れが卓越したが、ストランドシート表面にはコンクリート表面が薄く付着した状態であった。

### 3.4 耐力の評価

補強試験体の最大荷重はいずれも無補強試験体の最大荷重を1.22~1.79倍上回った。表-7に示す既設鉄筋の降伏荷重(既設鉄筋のひずみが降伏ひずみに達する際の荷重)は、CFRP ストランドシートがRC はりに完全付着されているとし、平面保持を仮定してコンクリートの引張強度を無視して計算を行った。実験値と設計値の比は0.98~1.19と精度よく一致している。また、同表に示す終局荷重の設計値は、2.2にて実施したストランドシートとコンクリートの付着強度試験により算出された界面剥離エネルギー( $G_f$ )を用いて、連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針<sup>3)</sup>に基づき、式(5)を用いて算出した。

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2G_f E_f}{n_f \cdot t_f}} \quad (5)$$

ここに、 $\sigma_f$ : 部材中の最大曲げモーメントによる曲げひび割れ位置での連続繊維シートの応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $G_f$ : 連続繊維シートとコンクリートの界面剥離破壊エネルギー(N/mm)、 $E_f$ : 連続繊維シートの弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)、 $n_f$ : 連続繊維シートの積層数、 $t_f$ : 連続繊維シートの1層当りの厚さ(mm)である。

本実験ではP-2を除いた試験体の実験値と設計値の比は1.02~1.36と安全側に評価されたが、P-2では0.94と1を

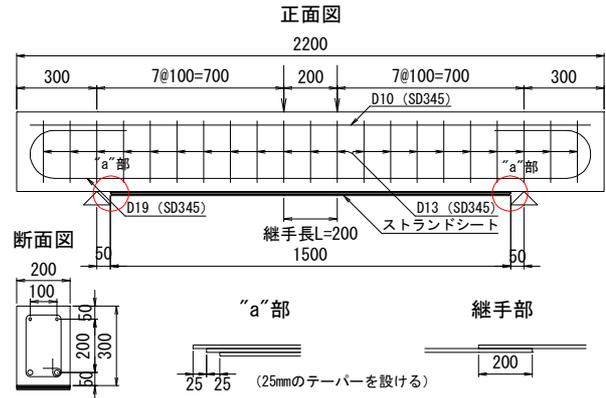


図-7 試験体概略図

表-7 試験結果

Type	降伏荷重			終局荷重			破壊モード
	実験 $P_y$ (kN)	設計 $P_{yc}$ (kN)	$P_y/P_{yc}$	実験 $P_u$ (kN)	設計 $P_{uc}$ (kN)	$P_u/P_{uc}$	
N	140	143	0.98	165	153	1.08	曲げ圧縮破壊
E-1	191	178	1.07	278	209	1.33	載荷点直下より剥離
E-2	236	212	1.11	295	223	1.32	
E-3	-	239	-	234	229	1.02	端部の剥離
E-J	210	178	1.18	271	209	1.30	載荷点直下より剥離
M-1	205	178	1.15	255	200	1.27	
M-2	223	212	1.05	285	209	1.36	端部の剥離
M-3	251	239	1.05	290	216	1.35	
M-J	211	178	1.19	252	200	1.26	載荷点直下より剥離
P-1	191	178	1.07	252	199	1.26	端部の剥離
P-2	-	207	-	201	213	0.94	
J-1	185	176	1.05	262	218	1.20	載荷点直下より剥離
J-2	222	207	1.07	280	-	-	
J-J	191	176	1.09	271	218	1.24	

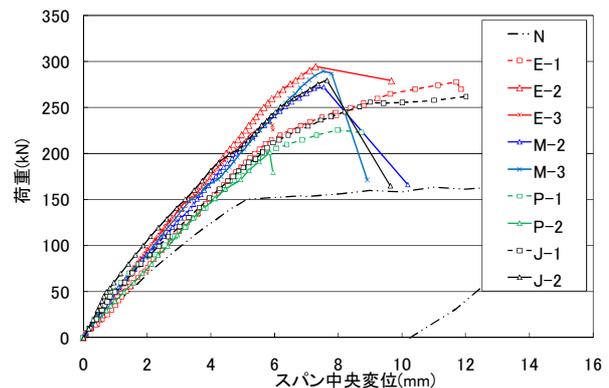


図-8 荷重-スパン中央変位関係

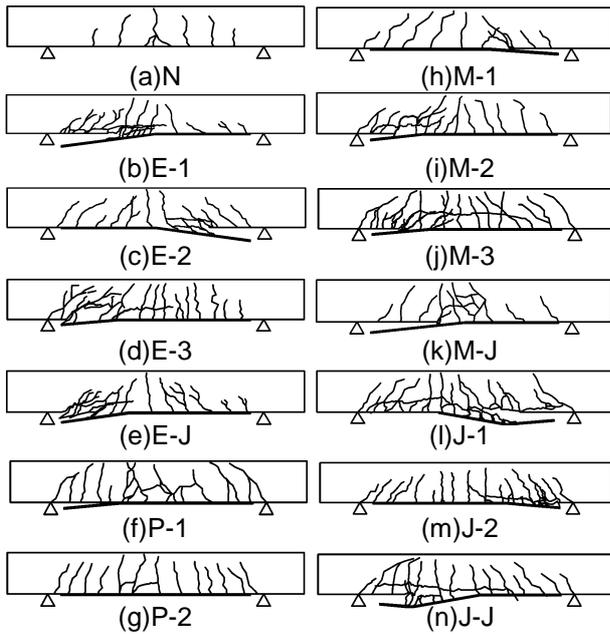


図-9 破壊性状

6%程度下回った。また、E-3はエポキシ樹脂の3層補強、P-2はPCMの2層補強であるが、いずれも終局状態においては既設鉄筋降伏前にシート端部から斜めひび割れが発生し、これを基点としてかぶりコンクリートがシート端部から主鉄筋に沿って破壊したためシート端部の応力集中による破壊モードの変化や接着層・界面の強度の影響が考えられる。本試験では端部の応力集中を防ぐために25mmのテーパを設けたが、接着剤の種類や積層数に応じてテーパ区間を長くする等、今後の検討が必要である。

#### 4. まとめ

本研究により得られた知見は以下の通りである。

- (1) エポキシ樹脂または MMA 樹脂を接着剤とした場合のストランドシートの引張強度は、ストランドシートの保証引張強度( $3400\text{N}/\text{mm}^2$ )を上回り、また継手長200mmを確保すれば継手破壊せずに母材破断を呈することが確認された。
- (2) 各種接着剤を用いてストランドシートを積層した場合のコンクリートとストランドシートの界面剥離破壊エネルギーは、MMA3層試験体を除き炭素繊維シート1層のコンクリートとの界面剥離破壊エネルギー( $0.5\text{N}/\text{mm}$ )を上回り、ストランドシートの積層数が増えるほど減少した。
- (3) ストランドシートの有効付着長は接着剤の種類によらず積層数が増加するごとに長くなり、1層で130-190mm程度、2層で250mm程度、3層で350~580mm程度であった。
- (4) 曲げ破壊先行型の RC はりに各種接着剤を用いてス

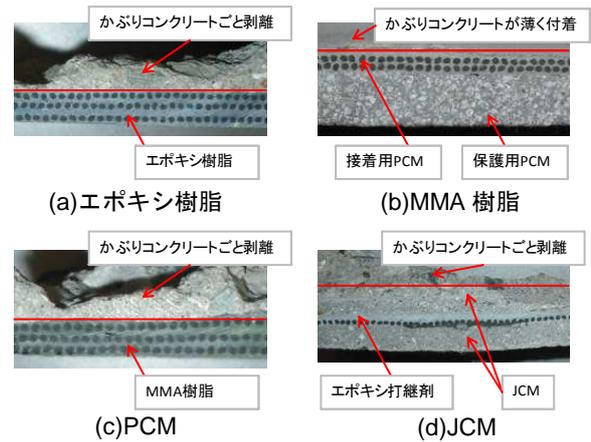


写真-1 剥離部断面

- トランドシートを接着して補強することにより、はりの曲げ剛性と曲げ耐力が1.22~1.79倍向上した。
- (5) 既設鉄筋の降伏荷重は、ストランドシートがRCはりに完全付着されているとし、平面保持を仮定してコンクリートの引張強度を無視して計算を行った計算結果と比較して0.98~1.19と精度よく一致した。
  - (6) コンクリートとストランドシートの界面剥離破壊エネルギーを基に設計したはり試験体の剥離破壊荷重はP-2を除き実験値と設計値の比は1.02~1.36と安全側に評価できたが、接着剤の種類や積層数に応じてテーパ区間を長くする等、E-3およびP-2でみられたストランドシート端部からの剥離破壊を防止するための検討が今後必要である。

以上より、本研究の範囲内で各種接着剤とCFRPストランドシートにより積層補強したRCはりの曲げ補強効果が確認された。

#### 参考文献

- 1) 小林 朗, 佐藤靖彦, 高橋義裕, 立石晶洋: FRP ストランドシートの材料特性とRC梁の曲げ補強効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1561-1566, 2008.5
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書[基準編], 2007.5
- 3) 土木学会: 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー第101号, 2000.7
- 4) 海洋架橋・橋梁調査会: 既設橋梁の耐震補強工法事例集, 2005.4
- 5) 日本コンクリート工学協会: JCI 規準集(1977~2002年度), pp.509-515, 2004.4
- 6) 建設省土木研究所: コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(III), pp.121-128, 1999.11