

## 9. CFRP グリッドおよび CFRP スtrandシートを用いた RC 部材の補強部界面の付着特性

枚山 功樹

## 1. はじめに

近年、高強度で耐久性に優れ、かつ施工性も良好な連続繊維補強材を用いた補修および補強工法が注目されている。中でも、CFRP グリッド（以下、グリッド）およびCFRP スtrandシート（以下、strandシート）を配置し、接着剤等で一体化する増厚工法が、ボックスカルバート、トンネル内面の補強等、広く用いられている。

著者はこれまでにグリッドを用いたポリマーセメントモルタル（以下、PCM）吹付け工法（以下、グリッド工法）でグリッドを1および2層補強した場合の付着特性、曲げ、せん断およびじん性補強効果について検討した。その結果、前記の補強効果を有することが確認できている。一方、strandシートを用いたRC部材の補強工法（strandシート工法）は、接着剤に従来のエポキシ樹脂を用いた場合、補強効果を有することは確認できているが、種々の施工条件を想定して接着剤を選定し、それらの補強効果を検討するといった研究はこれまで皆無であった。

そこで、本研究では、グリッド工法およびstrandシート工法の2つに大別した。まず、グリッド工法では、未解明であったグリッドとPCM および既設コンクリート相互の付着強度および応力伝達機構を検討した。次にstrandシート工法では、種々の施工条件を想定し、接着剤を従来のエポキシ樹脂に加え、MMA樹脂、PCM および打継ぎ併用型ジェットセメントモルタル（以下、JCM）の4種類を選定した。その後、コンクリートの付着強度および付着特性を明らかにする付着強度試験を行い、それぞれの材料特性を評価した。最後に、strandシートで補強したRCはりの曲げ載荷試験を行い、付着強度試験の結果を踏まえ補強効果を検討した。

## 2. 内容

## 2.1 平板型試験による必要定着長（グリッド）

## 2.1.1 試験概要

本試験では、PCM吹付け厚10mm程度の実構造物を模擬した試験体を作製し、グリッドとPCMおよび既設コンクリート相互の付着強度および応力伝達機構を検討した。試験体概略図を図-1に示す。試験体は7種類（各3体）とし、増厚材には高強度および低弾性型PCMを使用した。またグリッドは汎用性の高いCR-5（D6相当）を用い、格子筋間隔50mm、75mmおよび100mmとした。試験体を表-1、材料特性値を表-2にそれぞれ示す。作製方法は、まず既設コンクリートを作製しコンクリート表面をブラスト処理した。その後、グリッドを既設コンクリート表面に接触配置した。H-1、4、6はグリッドの縦筋1本、H-2、3、5、7はグリッドが縦筋を有することによる横筋の拘束効果確

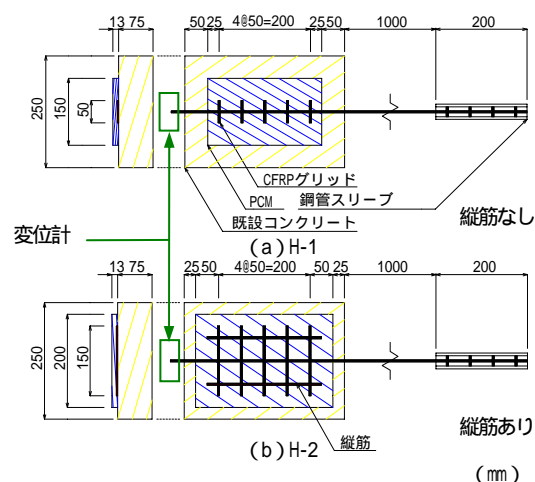


図-1 試験体概略図（平板型）

表-1 試験体（平板型）

タイプ	グリッド			PCM
	格点数	筋間隔(mm)	縦筋	
H-1	5	50	無	高強度
H-2			有	
H-3			有	高強度
H-4	4	75	無	
H-5			有	
H-6			無	
H-7			有	

表-2 材料特性値（平板型）

規格	圧縮強度 ( $N/mm^2$ )	引張強度 ( $N/mm^2$ )	弾性係数 ( $\times 10^4 N/mm^2$ )
グリッド CR-5	-	1400	10.0
PCM	高強度	58.7	3.02
	低弾性	30.1	1.55
コンクリート	44.0	-	3.20

表-3 試験結果一覧（平板型）

タイプ	最大荷重 (kN)	最大ひずみ $\times 10^4$ ( $\mu$ )	弾性係数 ( $\times 10^4 N/mm^2$ )
H-1	18.3	1.37	10.1
H-2	21.9	1.62	10.2
H-3	18.0	1.17	11.3
H-4	20.8	1.57	10.1
H-5	19.1	1.45	10.0
H-6	15.6	1.43	10.2
H-7	17.0	1.20	10.6

試験値は全て平均値であり、引抜が破断に至った試験体は除外した。

認のためグリッドの縦筋3本とし、それぞれ4または5格点定着させた。プライマー塗布後にPCMをかぶり厚が10mmとなるように増厚した。なお、本研究ではグリッドの設置に固定用のアンカーを設置しなかった。試験方法は1000kN万能試験機を用い、試験機固定側のグリッドは、鋼管スリーブに膨脹定着させた。荷重は終局まで単調荷重とした。また偏心荷重にならないように試験体の反対側に同じ大きさの抱き合わせコンクリートブロックを取り付け、緩衝ゴムを設置することにより試験体とコンクリートブロックとの接触を防いだ（図-2）。グリッドの自由端側の端面は平滑な面に仕上げ、グリッドの引抜き量を計測するため変位計



図-2 設置状況

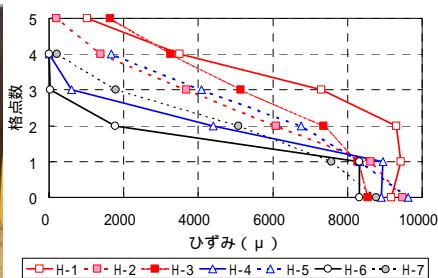


図-3 格点数 - ひずみ関係(P=12.0kN)

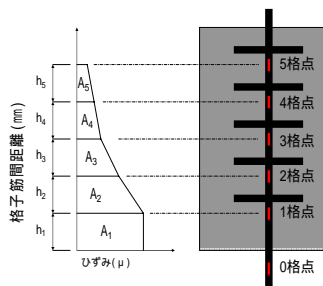


図-4 ひずみ分担率算出の概略図

$$S = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^{4 \text{ or } 5} A_i} \times 100 \quad (1)$$

$$A_i = \frac{1}{2} \times (D_{i-1} + D_i) \times h_i \quad (2)$$

$S$ : ひずみ分担率(%)  
 $D_i$ : 計測点におけるひずみ値(μ)  
 $h_i$ : ひずみゲージ測点間隔(mm)

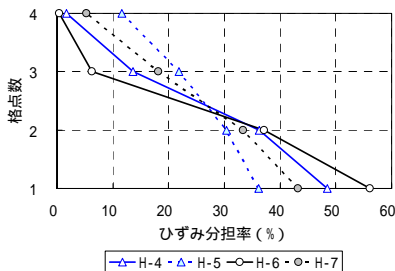
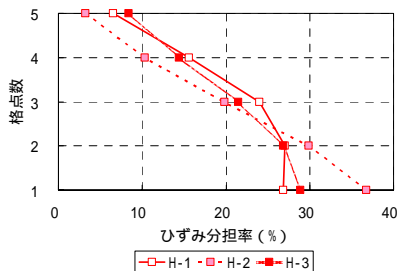


図-5 ひずみ分担率(P=12.0kN)

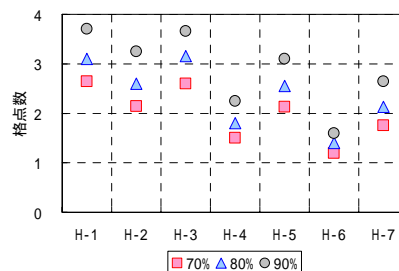


図-6 各ひずみ分担率の必要格点数

を設置した(図-1)。

2.1.2 必要格点数および応力伝達機構

表-3に試験結果,図-3にグリッドの終局応力状態である各タイプのP=12.0kN(グリッド破断荷重の2/3)での格点数-ひずみ関係を示す。図より全タイプで1格点目,2格点目と順番にひずみ値が減少した。破壊形態は,引抜け破壊に至った試験体を除き,全てグリッドの母材破断を呈した。ここで,引抜け破壊は,グリッドが許容応力状態となるP=6.0kN(グリッド破断荷重の1/3)付近から引抜けが急増して終局となった場合を定義した。次に,全体のひずみ値から各格点部が負担しているひずみ値を除いた割合をひずみ分担率と定義した。図-4にひずみ分担率算出の概略,式(1),(2)に算出方法をそれぞれ示す。図-5に前式より算出したP=12.0kNでの各タイプのひずみ分担率,図-6に各ひずみ分担率の必要格点数を示す。

図-3よりH-1~3で縦筋無しの場合は1,2格点目のひずみ差が0となっており,1,2格点部のグリッド表面とPCM間で附着切れが生じている。一方,縦筋有りの場合は,横筋の両端が拘束されているため,縦筋が無い両端自由の場合と比較し,グリッド縦筋の変形量が小さく,附着切れが発生しにくくなり,グリッド全体で引張力に抵抗したと考えられる。図-5よりH-5,7のひずみ分担率はH-4,6と比較し,縦筋を有することで1格点目のひずみ分担率が10%程度向上し,1~2格点のひずみ分担率の差異が小さくなった。また,同図より全タイプの1格点目のひずみ分担率は,筋間隔が大きくなるにつれて増加した。これは,図-3より筋間隔が大きくなるにつれて2格点目のひずみ値が減少しているためである。一方,PCM種類でひずみ分担率の差異は確認できなかった。

図-6より,一例としてひずみ分担率の総和が80%時の必要格点数に着目するとH-1,2,3および5で3格点,H-4,6,7で2格点となった。これより縦筋の有無が次格点への

応力伝達機構に影響することと筋間隔によってグリッドの表面付着力の影響が変化することが考えられる。

2.2 スtrandシートとコンクリートの附着強度試験

2.2.1 試験概要

材料特性値および附着試験体概略図を表-4,図-7に示す。試験方法はJSCE-E543-2007に準拠した。まず,既設コンクリートを作製しコンクリート表面をブラスト処理した。その後,接着幅50mmとしたStrandシートを附着長が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樹脂は単位面積当たりの塗布量で厚さを管理し,PCMは同様に接着用PCMを既設コンクリートとStrandシートの界面に塗布後,ひび割れ防止を目的として厚さ10mmで表面保護用PCMを別途塗布した。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塗布量で塗布し,Strandシートを配置した後にJCMを厚さ5mmで塗布した。Strand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,各層ごとに25mmのテーバーを設けた。

2.2.2 界面剥離破壊エネルギーおよび附着強度

試験結果を表-5に示す。いずれの試験体もコンクリートとStrandシート界面での剥離破壊を呈し,破壊面はStrandシートにコンクリート表面が附着していた。界面剥離破壊エネルギー(以下, $G_f$ )および附着強度(以下, $\tau_u$ )は,式(3),(4)を用いて算定した。

$$G_f = \frac{P_{max}^2}{8b^2 E_f t} \quad (3) \quad \tau_u = \frac{P_{max}}{2b\ell} \quad (4)$$

ここに, $G_f$ : 界面剥離破壊エネルギー(N/mm),  $\tau_u$ : 附着強度(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),  $\ell$ は附着長(mm)である。炭素繊維シート1層のコンクリートとの $G_f$ は一般に0.5N/mmで,各接着剤においてこれを上回った。また, $\tau_u$ も曲げ補強に用いる繊維材シートの設計用附着強度である

0.44 N/mm<sup>2</sup>を満たした．各接着剤の $G_f$  はJCM, エポキシ樹脂, MMA 樹脂, PCM の順に大きく, スtrandシート の層数の2 乗根にほぼ比例して増加した．

2.2.3 有効付着長

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, 付着長が長くなるほど低下するが, 実際の付着応力はシート貼付け面積全域ではなく, 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 本研究では JCI 基準集 (日本コンクリート工学協会) に基づき, この領域をstrandシート の有効付着長と定義した．図-8 の軸方向ひずみ分布よりひずみ増加区間でのひずみ勾配を求め, これより式(5)を用いて最大付着応力を求め, 式(6)を用いて有効付着長を算定した．

$$\tau_y = \frac{\Delta \epsilon_F \cdot E_F \cdot A_F}{S_g \cdot b} \quad (5) \quad \ell_e = \frac{P_{max}}{2\tau_y \cdot b} \quad (6)$$

ここに,  $\tau_y$ : 最大付着応力 (N/mm<sup>2</sup>),  $P_{max}$ : 最大荷重時のひずみ増加区間で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．

有効付着長算定結果を表-6 に示す．各試験体において, 有効付着長は1 層試験体で 130-200 mm 程度, 2 層試験体で 220-280 mm 程度であった．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 280 mm 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( ) (建設省土木研究所) 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-9 に一例としてエポキシ樹脂を接着剤とした 3 層試験体の摩擦応力度 - 荷重関係を示す 同図より P=35 kN 程度までは 0-30 mm 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strand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=35 kN 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strand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=48 kN 前後で 30-60 mm 区間の付着切れが生じている．以上から, 図-9 に示した 3 層試験体において, 引張力の作用位置に近い部分 (0-60 mm) で剥離が生じていることが確認され, 最終的に荷重の増大に伴い剥離が進展し付着区間が短くなり剥離破壊を呈したと考えられる．これより, 3 層試験体の有効付着長は試験体の付着長から付着切れが生じたと推定される区間を差し引いた 220-250 mm 程度である．

2.3 StrandシートによるRC はりの曲げ補強

2.3.1 試験概要

試験体概略図を図-10に示す．材料特性値は表-4と同様である．試験体は14 種類とし, 施工方法は, 土木構造物で一

表-4 材料特性値

(a) Strandシート (付着およびはり)

繊維種類	繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )	厚さ (mm)	弾性係数 (10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
高強度型	600	0.333	2.45	3,400

(b) 専用接着剤 (付着およびはり)

種類	圧縮強度	弾性係数	引張強度	曲げ強度	引張せん断強度
エポキシ樹脂	78.3	3,970	35.8	58.8	25.8
MMA樹脂	79.0	2,500	43.0	71.0	22.0
PCM	11.3	4,800	2.4	6.5	-
JCM	55.3	26,200	5.3	9.5	-

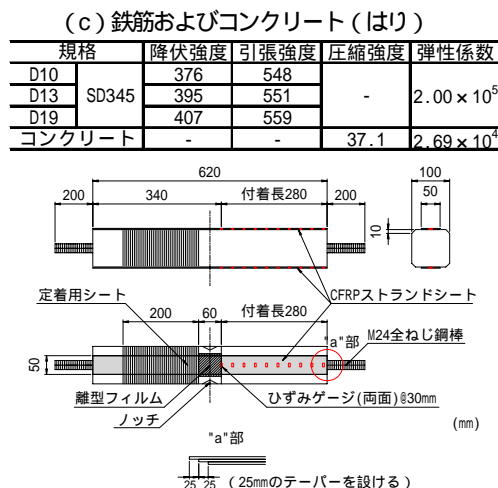


図-7 試験体概略図 (付着)

表-5 試験結果 (付着)

接着剤	層数	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 $\sigma$ (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	1.50
		41.9		1.08		1.50	
		41.2		1.04		1.47	
	2	51.2	51.7	1.60	1.65	1.83	1.85
		46.6		1.33		1.66	
		57.2		2.01		2.04	
3	56.4	56.7	1.95	1.97	2.01	2.02	
	54.7		1.83		1.95		
	59.0		2.13		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	1.09	1.10	1.51	1.51
		41.4		1.05		1.48	
		43.3		1.15		1.55	
3	43.7	47.1	1.17	1.37	1.56	1.68	
	50.7		1.57		1.81		
	47.0		1.36		1.68		
PCM	1	35.8	35.4	0.78	0.77	1.28	1.26
		*		*		*	
	2	35.0	45.1	0.75	1.25	1.25	1.61
		44.1		1.19		1.58	
JCM	3	42.3	48.2	1.10	1.44	1.51	1.72
		49.0		1.47		1.75	
		54.6		1.83		1.95	
		43.5		1.16		1.55	
		46.6		1.33		1.66	

\*: 計測不良

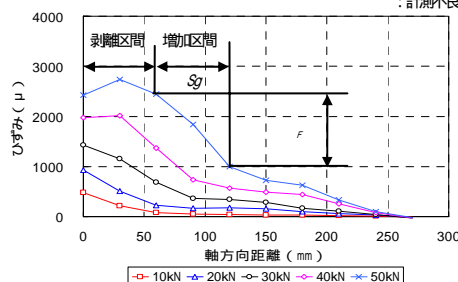


図-8 軸方向ひずみ分布 (エポキシ, 2層)

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はり試験体を作製した。コンクリート打設後、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、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。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点漸増増荷とした。

2.3.2 耐力の評価

表-7に試験結果を示す。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。同表より既設鉄筋の降伏荷重は、ストランドシートがはりに完全合成されているとし、平面保持を仮定して計算を行った。その結果、試験値と設計値の比は0.92~1.19と精度よく一致した。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 $G_f$ 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に基づき、式(7)を用いて算出した。

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2G_f E_f}{n_f \cdot t_f}} \quad (7)$$

ここに、 $f$ : 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。

本試験ではEP3SおよびPC2Sを除いた試験体の試験値と設計値の比は1.09~1.36と安全側に評価されたが、EP3SおよびPC2Sではそれぞれ0.80, 0.83と1を下回った。これは、終局状態においては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ストランドシート端部から主鉄筋に沿って破壊したためストランド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避けるため各層ごとに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。

3. 結論

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 筋間隔が大きくなるにつれてグリッドの表面付着力の影響が変化し、ひずみ分担率が増加した。
- (2) 一例としてひずみ分担率の総和が80%時の必要格点数に着目するとH-1, 2, 3および5で3格点, H-4および6, 7で2格点となった。

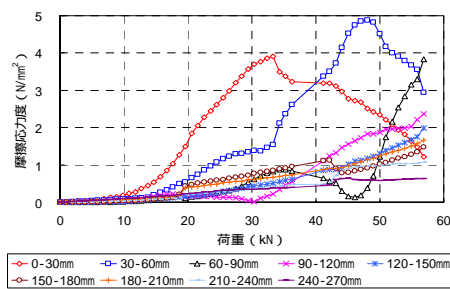


図-9 摩擦応力度 - 荷重関係 (エポキシ, 3層)

表-6 有効付着長算定結果 (付着)

接着剤	有効付着長 (mm)		
エポキシ樹脂	1層	196	220
	2層	276	220
MMA樹脂	1層	156	250
	2層	219	250
PCM	1層	119	-
JCM	1層	125	-

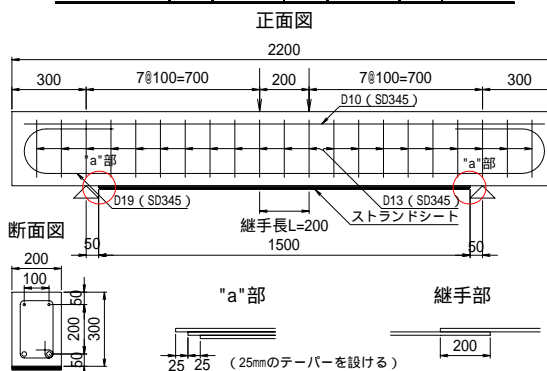


図-10 試験体概略図 (はり)

表-7 試験結果 (はり)

Type	接着剤	継手	層数	ひび割れ荷重		降伏荷重		終局荷重				
				試験Pcr (kN)	試験Py (kN)	設計Pyc (kN)	Py/Pyc	試験Pu (kN)	設計Puc (kN)	Pu/Puc		
N	-	-	-	39.8	131	143	0.92	165	153	1.08		
EP1S	エポキシ樹脂	無	1	50.4	191	178	1.07	278	200	1.39		
EP2S			2	55.0	236	212	1.11	295	259	1.14		
EP3S			3	49.9	-	239	-	234	294	0.80		
EPJS	エポキシ樹脂	有	1	49.9	210	178	1.18	271	200	1.36		
MM1S			MMA樹脂	無	1	50.1	205	178	1.15	255	204	1.25
MM2S					2	51.8	223	212	1.05	285	238	1.20
MM3S	3	34.9			251	239	1.05	290	266	1.09		
MMJS	MMA樹脂	有	1	53.4	211	178	1.19	252	204	1.23		
PC1S			PCM	無	1	51.9	191	178	1.07	252	193	1.30
PC2S					2	35.1	191	207	0.92	201	242	0.83
JC1S	JCM	無	1	49.9	185	176	1.05	262	223	1.17		
JC2S			2	54.3	222	207	1.07	280	257	1.09		
JCJS			1	55.1	191	176	1.09	271	223	1.22		

- (3) コンクリートとストランドシートの $G_f$ はストランドシートの積層数が増えるほど増加した。
- (4) コンクリートとストランドシートの付着強度試験で有効付着長は1層試験体で130-200mm程度、2層試験体で220-280mm程度、3層試験体で220-250mm程度となった。
- (5) 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。
- (6) 既設鉄筋の降伏荷重は、平面保持を仮定して計算を行った結果、0.92~1.19と精度よく一致した。
- (7)  $G_f$ を基に算定した試験体の剥離破壊荷重はエポキシ3層試験体とPCM2層試験体を除き試験値と設計値の比は1.09~1.36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。