

論文 各種接着剤により積層補強された CFRP スtrandシートとコンクリートとの付着特性

中村 智*1・山口 浩平*2・小森 篤也*3・日野 伸一*4

要旨：連続繊維シート接着工法は、軽量、高強度、高弾性、高耐久等の優れた構造性能を有する連続繊維補強材（以下、FRP）を用いたRC部材の補強工法である。しかし、本工法は入念な不陸修正や含浸工程が必要で、施工性や施工品質に問題があった。そこで著者らは、CFRPストランドシートを用い、寒冷地や早期交通開放、湿潤環境での各種施工条件に応じた接着剤による補強効果を検討するため、付着強度試験を実施した。本実験の結果、いずれの接着剤も設計で想定する補強量に応じた界面剥離破壊エネルギーおよび付着強度を有することが確認され、設計上重要な有効付着長を明らかにした。

キーワード：CFRP スtrandシート、積層補強、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

RC部材の曲げ補強工法として軽量、高強度、高弾性、高耐久性等の優れた構造性能を有するFRPを用いた補強工法が用いられている。FRPの形状はシート状、板状、棒状があり、連続繊維の種類として、炭素、アラミド、ガラス繊維等がある。FRPは軽量で、薄い断面での補強が可能で施工性に優れることから、橋梁上・下部工、道路・水路トンネル、ボックスカルバート、樋門・樋管等様々なコンクリート部材の補強工法として広く普及している。

しかし、一般的な連続繊維シート補強工法は、プライマー、不陸修正、接着樹脂の下塗り・上塗りと工数が多く、養生期間も長くなる。また、浮き膨れ等のないFRPを形成するために、現場で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り、施工品質が作業者の技量に依存する等の問題があった。

一方、CFRPプレート接着工法は炭素繊維を工場にて板状に成形したCFRPプレートを用いるため、炭素繊維シートと比較して、単位幅当りの補強量が大幅に向上し、材厚が大きいため剛性が高く、現場での含浸工程がないためシートよりも施工に手間がかからない等の利点を有するが、高強度で幅の狭いプレートを使用するため、付着面積が小さく、接着樹脂のみで補強する場合には母材強度に対して低い荷重で早期剥離し、重ね継手部で母材強度を確保出来ない等の問題があった。

そこで著者らは、工場にて連続繊維ストランド一本ずつに樹脂含浸して硬化させた線材を、すだれ状にシート化した連続繊維補強ストランドシート(以下、ストランド

シートを用いた曲げ補強工法を開発した。ストランドシート(写真-1)は既設コンクリート表面に塗布したパテ状のエポキシ樹脂を用いることでプライマー、不陸修正を行わず直接貼り付けることが可能で、現場での樹脂含浸工程が不要のため、含浸不良や浮き膨れ等の発生の恐れが少ない。また、1層で連続繊維シート約3層分の補強量を有し、連続繊維シートと同様に躯体全面に接着できるので付着面積が広く確保でき、高い付着力が期待できるなどの長所が挙げられる¹⁾。

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、上面増厚時の張り出し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で、かつ低温環境下でも硬化可能なアクリルモノマーであるメタクリル酸メチルを主原料としたMMA樹脂(以下、MMA)および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)を、また硬化時間が短く早期交通開放が可能な無機系材料であるエポキシ樹脂系打継剤併用型超速硬セメントモ

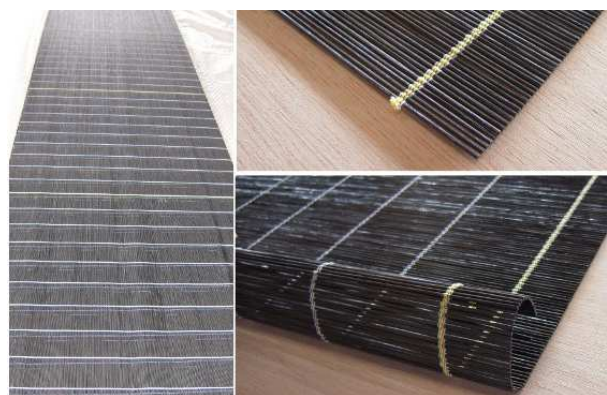


写真-1 CFRP スtrandシート

*1 (株) さとうベネック 土木事業部 技術部 (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)

ルタル(以下、JCM)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を1層から5層まで積層した場合のストランドシートとコンクリートとの付着特性を明らかにした。

2. 試験概要

2.1 試験体

試験体種類を表-1に示す。試験体は接着剤の種類およびストランドシートの積層数をパラメータとして各3体を作製した。

ストランドシート、接着剤、母材コンクリートの材料特性値、試験体概略図および補強断面詳細図を表-2、図-1、図-2に示す。ストランドシートの設計厚さは繊維目付量と比重から算出した値である。試験体の母材コンクリート断面寸法は100mm×100mmとし、ストランドシートの積層数に応じて付着長および全長を決定した。ストランドシートの有効付着長は積層数の増加に応じて、長くなると考えられるため²⁾、有効付着長を算出できるように1層および2層試験体では280mm、3層および5層試験体では470mmとして、実付着長を変化させた。母材コンクリート側面には幅と深さが20mmのV型のノッチを設け、ノッチの上下面には試験体端部の角欠け防止のため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、ら旋鉄筋を設置した。

エポキシ樹脂試験体の試験体作製状況およびひずみゲージ設置位置を写真-2、JCM試験体の作成状況およびひずみゲージ設置位置を写真-3に示す。母材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/mm²としてブラスト処理を施した。次に、接着幅を50mmとしたストランドシートを母材コンクリートの両面に接着した。エポキシ樹脂試験体はエポキシ樹脂を1層目に3.0kg/m²、2~5層目に2.5kg/m²となるように塗布した。MMA試験体は、母材コンクリートにプライマーを0.2kg/m²、ストランドシートにウレタンプライマーを0.1kg/m²塗布し、指触乾燥確認後にMMAを1層目に3.0kg/m²、2~5層目に2.5kg/m²となるように塗布した。PCM試験体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をストランドシート1層当たり2mmの厚さとなるように塗布後、ドライアウトの防止と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エポキシ樹脂打継剤を0.7kg/m²で塗布し、不陸修正用のJCMを厚さ5mmで塗布後、JCM表面が硬化する前にエポキシ樹脂打継剤を1層目に3.0kg/m²、2~5層目に2.0kg/m²となるように塗布した。更に、エポキシ樹脂打継剤が硬化する前に上塗りJCMを厚さ5mmで塗布した。ストランドシートを積層す

表-1 試験体種類

専用接着剤	積層数(層)	実付着長(mm)	ロット	特徴	用途
エポキシ樹脂	1	280	a	汎用型	多用途 (下記以外)
	2	280			
	3	470	b		
	5	470			
MMA樹脂	1	280	a	低温硬化型 早期硬化型	寒冷環境 上面増厚等
	2	280			
	3	470	c		
	5	470			
PCM	1	280	a	湿潤環境型	水路トンネル カルバート等
	2	280			
JCM	1	280	a	早期硬化型	上面増厚等
	3	470			
	5	470			

表-2 材料特性値

(a) ストランドシート

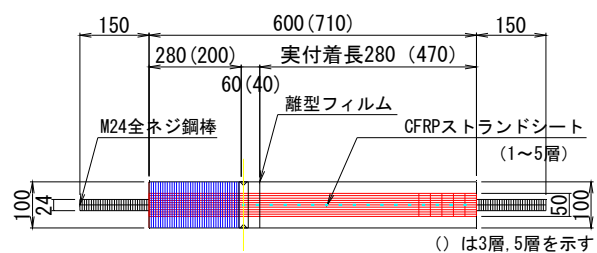
規格	繊維目付量(g/mm ²)	設計厚さ(mm)	弾性係数(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)
高強度型炭素繊維	600	0.333	2.45 × 10 ⁵	3400

(b) 専用接着剤

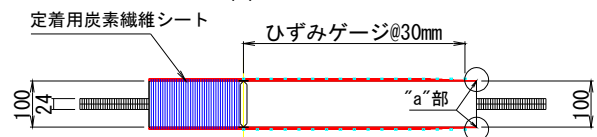
種類	(単位: N/mm ²)			
	エポキシ樹脂	MMA樹脂	PCM	JCM
圧縮強度	78.3	79.0	11.3	55.3
弾性係数	3970	2500	4800	26200
引張強度	35.8	43.0	2.37	5.30
曲げ強度	58.8	71.0	6.50	9.50
引張せん断強度	25.8	22.0	-	-

(c) 母材コンクリート

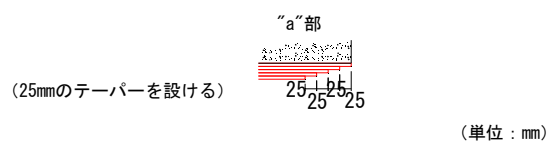
種別	ロット	圧縮強度(N/mm ²)	弾性係数(N/mm ²)	材齢(日)
母材コンクリート(早強) 30-12-20	a	37.1	2.69 × 10 ⁴	28
	b	36.2	-	28
	c	38.5	-	28



(a) 平面図



(b) 側面図



(c) ストランドシート端部詳細図

図-1 試験体概略図

る際には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³⁾。

コンクリートの圧縮強度は、目標圧縮強度 30N/mm^2 に対して材齢28日で $36.2\sim 38.5\text{N/mm}^2$ であった。ストランドシート⁴⁾の接着施工後16~18日の養生後に、付着強度試験を行った。

2.2 試験方法

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)⁴⁾に準拠し、偏心荷重が作用しないよう、試験体の軸心が試験機の軸心と一致するように端部の全ネジ鋼棒を試験機チャックに取り付け、載荷速度は一定の $2\sim 5\text{kN/min}$ とした。

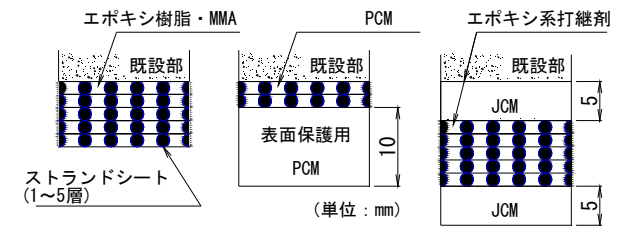
3. 試験結果

3.1 破壊性状

破壊性状を写真-4に示す。いずれの試験体も荷重の



写真-2 試験体作成状況およびひずみゲージ設置位置(エポキシ樹脂)



(a)エポキシ・MMA (b)PCM (c)JCM

図-2 補強断面詳細図

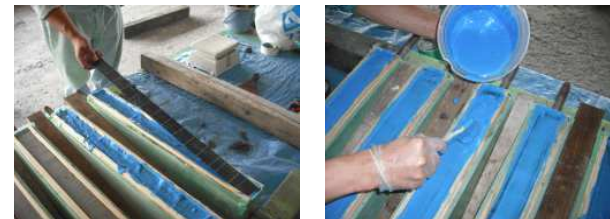


写真-3 試験体作成状況およびひずみゲージ設置位置(JCM)

増加に伴い、ノッチ部にひび割れが発生し、荷重が一時低下した。再び荷重が増加し、シートの剥離が発生した。その後、荷重はわずかに増加しながら、片側の付着面の剥離破壊を呈した。エポキシ樹脂, MMA は、母材コンクリートとストランドシート界面での剥離破壊であり、破壊面はストランドシートに母材コンクリート表面が付着した凝集破壊を呈した。PCM も同様に母材コンクリートとストランドシート界面での剥離破壊であったが、破壊面はストランドシートに母材コンクリート表面がエポキシ樹脂, MMA 試験体に比べて薄く付着した状態であった。JCM は、不陸修正用 JCM とストランドシート界面での剥離破壊であり、破壊面はストランドシートに不陸修正用 JCM が付着した状態であった。なお、全ての試験体に共通して積層数が多いものほど母材コンクリートが多く付着することが観察された。

3.2 最大荷重

試験結果を表-3、最大荷重と積層数の関係を図-3に示す。ストランドシート剥離時の最大荷重は積層数が多いほど増加した。これは積層数の増加に伴い、ストランドシートの引張剛性が増加し、付着強度が増大するためであると考えられる。また、各接着剤の同じ積層数で比較すれば、最大荷重はJCMが最も高くエポキシ樹脂, MMA, PCMはほぼ同様の値を示した。

3.3 界面剥離破壊エネルギーおよび付着強度

界面剥離破壊エネルギーと積層数の関係を図-4に示す。界面剥離破壊エネルギー G_f および付着強度 τ_u は、JSCE-E543-2007⁵⁾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), τ_u : 付着強度(N/mm²), P_{max} : 最大荷重(N), b , E_f , t : シートの幅(mm), 弾性係数(N/mm²), 厚さ(mm), ℓ は試験部分における有効付着長(mm)である。なお、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 N/mmであるが⁴⁾、全ての試験体でこれを1.10~2.88倍上回った。また、付着強度は既設橋脚の耐震補強工事例集⁶⁾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/mm²)以上であることが確認された。このことからエポキシ樹脂, MMA, JCMを接着剤とした場合にはストランドシート1~5層, PCMを接着剤とした場合には1~2層の範囲内で設計上、十分な付着強度を有することが確認された。各接着剤の界面剥離破壊エネルギーは同じ積層数で比較すれば、JCMが最も高くエポキシ樹脂, MMA, PCMはほぼ同様の値を示した。また、ストランドシートの層数が増加するに従って減少した



写真-4 破壊性状

表-3 試験結果

種類	ロット	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 τ_u (N/mm ²)		有効 付着長 ℓ_e (mm)	最大付着 応力度 τ_y (N/mm ²)		
			試験値	平均	試験値	平均	試験値	平均			試験値	試験値
エポキシ樹脂	a	1	43.3	42.1	1.15	1.09	1.55	1.50	188	2.24		
			41.9		1.08		1.50					
			41.2		1.04		1.47					
		2	51.2	51.7	0.80	0.82	1.83	1.85			262	1.97
			46.6		0.67		1.66					
			57.2		1.00		2.04					
	b	3	56.1	54.4	0.64	0.60	1.12	1.09	285	1.91		
			52.3		0.56		1.05					
			54.7		0.61		1.09					
		5	68.6	70.6	0.58	0.61	1.37	1.41	264	2.67		
			67.6		0.56		1.35					
	75.5	0.70	1.51									
	MMA	a	1	40.6	36.0	1.01	0.80	1.45	1.29	134	2.69	
				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	243			1.74
			41.4		0.53		1.48					
			43.3		0.57		1.55					
c		3	57.4	55.2	0.67	0.62	1.15	1.10	計測不良			
			51.5		0.54		1.03					
			56.8		0.66		1.14					
		5	81.6	75.0	0.82	0.69	1.63	1.50			234	3.20
			75.5		0.70		1.51					
			67.8		0.56		1.36					
PCM	a	1	35.8	35.4	0.79	0.77	1.28	1.27	128	2.77		
			-		-		-					
			35.0		0.75		1.25					
	2	44.1	45.1	0.60	0.63	1.58	1.61	242			1.87	
		42.3		0.55		1.51						
		49.0		0.74		1.75						
JCM	a	1	54.6	48.2	1.83	1.44	1.95	1.72	127	3.80		
			43.5		1.16		1.55					
			46.6		1.33		1.66					
		3	64.6	72.8	0.85	1.09	1.29	1.46			267	2.73
			78.4		1.26		1.57					
			75.3		1.16		1.51					
	b	5	114.5	107.1	1.61	1.42	2.29	2.14	232	4.62		
			93.5		1.07		1.87					
		113.3	1.57	2.27								

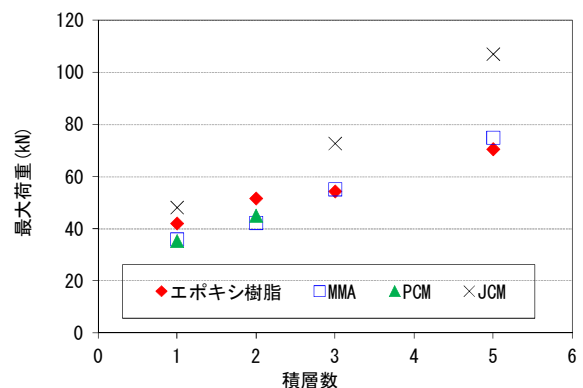


図-3 最大荷重と積層数の関係

が、MMA3層、5層およびJCM5層に関してはデータにばらつきがみられたので今後はデータ数を増やして統計的検討を行う必要がある。

4. 有効付着長の算定

4.1 算定方法

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)⁷⁾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のひずみ勾配を求め、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。

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

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

ここに、 τ_y : 最大付着応力(N/mm²)、 $\Delta \varepsilon_F$: 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/mm²)、 A_F : 連続繊維シートの断面積(mm²)、 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)、 ℓ_e : 有効付着長(mm)、 P_{max} : 試験体の最大荷重(N)である。

4.2 結果および考察

ストランドシートの軸方向ひずみ分布の一例を図-5に示す。ここに横軸は離型フィルム端部からの距離である。P=10~30kN時にはストランドシート全面が接着されておりひずみはほとんど発生していない。P=30kN時は最大引張力が作用する点から徐々にひずみが減少しており、全面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。本試験では最大引張力が作用する点から30mm位置は離型フィルム上であり、局所的にひずみ値が高くなるので、有効付着長の算出過程においてはデータから除外した。剥離破壊直前のP=56.1kN時は、60mm位置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いため、0~60mm区間では剥離が生じているものと考えられる。また、60-150mm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。150-480mm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。各試験体の剥離荷重直前の軸方向ひずみ分布を図-6に、式(3)、(4)により得られた各試験体の有効付着長と積層数の関係を図-7に示す。

図-7より各試験体の有効付着長はエポキシ樹脂試験

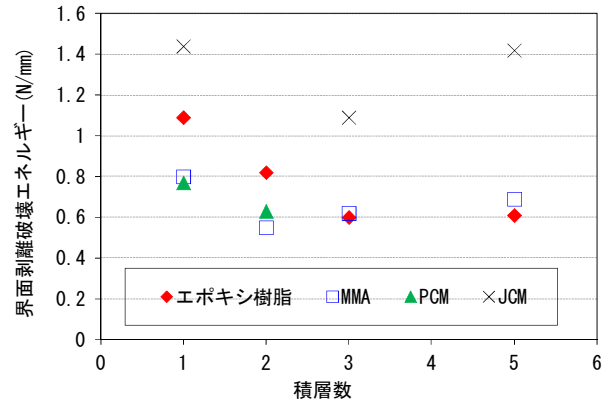


図-4 界面剥離破壊エネルギーと積層数の関係

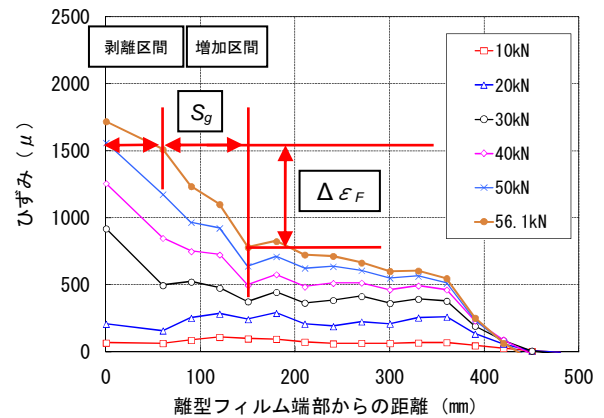


図-5 軸方向ひずみ分布 (エポキシ3層)

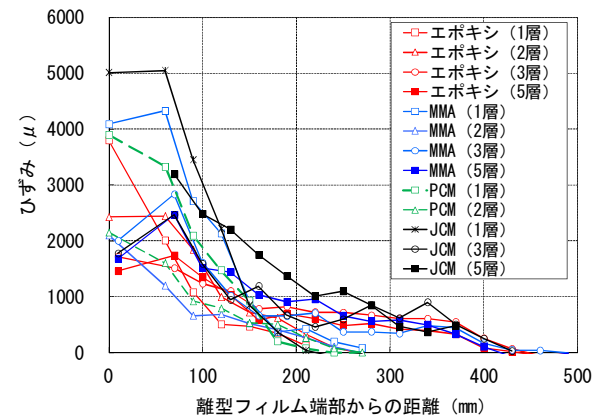


図-6 軸方向ひずみ分布 (P≒剥離直前)

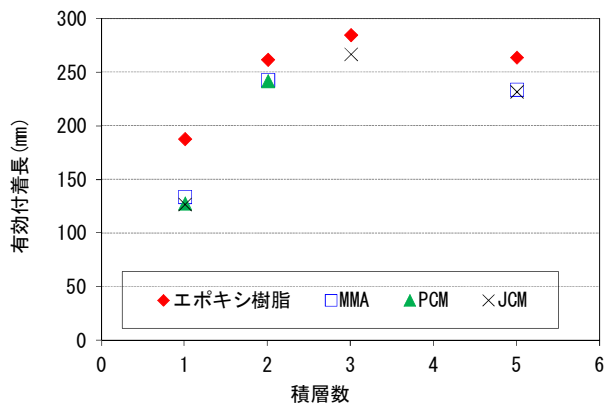


図-7 有効付着長と積層数の関係

体で2～5層において260～290mm程度、MMA試験体で2～5層において230～240mm程度、PCM試験体で2層において240mm程度、JCM試験体で3～5層において230～270mm程度となった。一般に炭素繊維シートの有効付着長は1層で110mm、2層で150mmである⁵⁾。また、エポキシ樹脂に比べれば、MMAおよびJCMは若干、有効付着長が短く最大付着応力が高いことが確認された。また、PCMはエポキシ樹脂よりも有効付着長が若干短い、2層補強の場合で最大付着応力が低いことから、2層補強が限度であることが推察される。以上のことから、ストランドシートの有効付着長は5層(PCMは2層)までの場合で設計上約300mmとすれば設計上安全側であることが確認された。

5. 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) 各種接着剤を用いてストランドシートを1層から5層(PCMは2層)まで積層した場合のコンクリートとストランドシートの付着強度は、積層数が増加するごとに上昇した。
- (2) 界面剥離破壊エネルギーは、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 N/mm)を上回り、一部試験体を除き、ストランドシートの積層数が増えるほど減少する傾向にあったがMMA3層、5層およびJCM5層に関しては増加する傾向を示した。今後のデータ数を増やして統計的検討を行う必要がある。
- (3) 付着強度に関しては全ての試験体で既設橋脚の耐震補強工法事例集⁵⁾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/mm²)以上であった。
- (4) エポキシ樹脂、MMA、JCMを接着剤とした場合にはストランドシート1～5層、PCMを接着剤とした場合には1～2層の範囲内で設計上、十分な付着性状を有することが確認された。

- (5) スtrandシートの有効付着長はエポキシ樹脂試験体で2～5層において260～290mm程度、MMA試験体で2～5層において230～240mm程度、PCM試験体で2層において240mm程度、JCM試験体で3～5層において230～270mm程度となり、有効付着長は5層(PCMは2層)までの場合で設計上約300mmとすれば設計上安全側であることが確認された。

以上より、本研究の範囲内で各種接着剤と積層したCFRPストランドシートの付着特性が確認された。

参考文献

- 1) 小林 朗, 佐藤靖彦, 高橋義裕, 立石晶洋: FRP スtrand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) 岳尾弘洋, 松下博通, 矢原輝政, 佐川康貴: CFRP接着工法における炭素繊維シート付着耐力向上実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.1, pp.431-436, 1998.5
- 3) 秀熊佑哉, 小林 朗, 長井正嗣, 宮下 剛, 和久井 穰: FRPシート接着による鋼部材の補修に関する研究, 第3回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム論文集, pp.91-96, 2009.7
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書[基準編], 2007.5
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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

謝辞 最後に本研究の遂行に当たり、試験にご協力頂きましたFRP新技術研究会の会員の皆様に感謝の意を表します。