

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

九州大学大学院 学生会員 ○ 繁戸 趙文 九州大学大学院 正会員 山口 浩平
九州大学大学院 フェロー会員 日野 伸一 さとうベネック 正会員 中村 智

1. 目的

FRP を用いた既設コンクリート構造物の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あることから広く普及している。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シート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工法¹⁾(以下、ストランドシート工法)が開発され、既往の研究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の接着剤として従来のエポキシ樹脂に加え、低温硬化性・速硬化性に特徴を持つ MMA 樹脂および湿温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、また打継剤併用型超速硬セメントモルタル(以下、JCM)を選定し、各接着剤を用いて積層した CFRP スtrandシートの付着試験を行い、各接着剤における CFRP スtrandシートのコンクリートとの付着強度や有効付着長を明らかにした。

2. 試験概要

本試験で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-E543-2007)²⁾に準拠し、コンクリートとストランドシートの付着強度試験を実施した。コンクリートと全ねじ鋼棒の付着割裂破壊を防止するために、らせん鉄筋を用いた。接着剤はエポキシ樹脂、MMA 樹脂、PCM、打継剤併用型 JCM を用いた。エポキシ、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た。PCM は既設コンクリートと CFRP スtrand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。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、CFRP スtrandシートを配置した後で JCM を厚さ 5mm で塗布した。本試験では積層数の違いによる補強効果を確認するため各接着材で CFRP スtrandシートの層数を 1 層、2 層、3 層、5 層とした。CFRP スtrandシートは接着幅を 50mm とし、付着長は 3 層未満は 280mm、3 層以上は 470mm とした。また CFRP スtrandシートを積層する際の端部での応力集中をさけるため、25mm ずつのテーパを設けた。図 - 1 に試験体の概略図を、表 - 1 には CFRP スtrandシートと接着剤の材料特性値を示す。

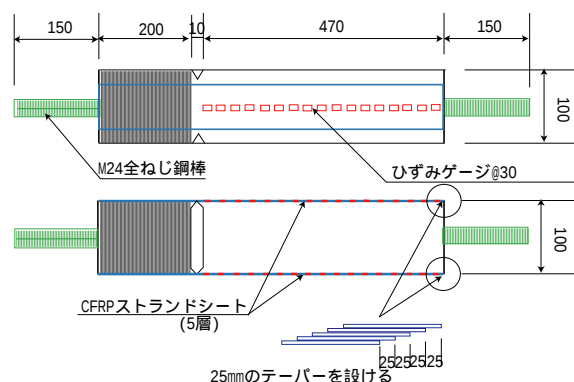


図 - 1 試験体概略図

表 - 1 材料特性値

(a) CFRP スtrandシート

	繊維目付量 (g/mm ²)	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) 接着剤 (N/mm²)

	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	5.3
曲げ強度	58.8	71.0	6.5	9.5
引張せん断強度	25.8	22.0	—	—

3. 試験結果

試験結果を表 - 2、図 - 2、図 - 3 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 CFRP スtrandシート界面での剥

離破壊を呈し、破壊面はストランド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 τ_u は、JSCE-E543-2007²⁾に準じて式(1)、(2)を用いて算定した。

$$G_f = \frac{P_{\max}^2}{8b^2E_ft} \quad (1) \quad \tau_u = \frac{P_{\max}}{2b\ell} \quad (2)$$

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。

CFRP 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。積層数の増加に伴い、接着層の厚さが増し、付着応力が増大するためと考えられる。また、界面剥離破壊エネルギーに関しては、炭素繊維シート1層の界面剥離破壊エネルギーである0.5(N/mm)を上回り、一部試験体を除きCFRP 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。

4. 有効付着長の算定

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事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、この領域を連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書⁵⁾に基づき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。

$$\tau_y = \frac{\Delta\varepsilon_F E_F A_F}{S_g b} \quad (3) \quad \ell_e = \frac{P_{\max}}{2\tau_y b} \quad (4)$$

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ひずみゲージ値の差, 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)。有効付着長を図-4に示す。

有効付着長は、エポキシ樹脂の2層~5層で262mmから285mm程度、MMAの2層~5層で234mmから243mm程度、PCMの2層で242mm程度、JCMの3層~5層で242mm程度となり有効付着長は5層(PCMは2層)までの場合で、約300mmとすれば設計上安全であることが確認された。

参考文献

- 1) 中村智, 山口浩平, 小森篤也, 日野伸一: 各種接着剤とCFRPストランドシートにより積層したRCはりの曲げ補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No2, pp.1405-1410, 2011.7
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書[基準編], 2007.5

表-2 試験結果

Type	層数	最大荷重 Pmax(kN)		界面剥離破壊エネルギー Gf(N/mm)		有効付着長 ℓe(mm)
		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	188
		41.9		1.08		
		41.2		1.04		
		51.2		0.80		
		46.6		0.67		
	2	57.2	51.7	1.00	0.82	262
		56.1		0.64		
		52.3		0.56		
	3	54.7	54.4	0.61	0.60	285
		68.6		0.38		
MMA樹脂	1	67.6	70.6	0.57	0.62	264
		75.5		0.71		
		40.6		1.01		
		32.3		0.64		
		35.2		0.76		
	2	42.2	42.3	0.55	0.55	243
		41.4		0.53		
		43.3		0.57		
	3	57.4	55.2	0.68	0.62	算定不可
		51.5		0.55		
		56.8		0.67		
		81.6		0.82		
		75.5		0.71		
PCM	1	67.8	75.0	0.57	0.70	234
		35.8		0.79		
		—		—		
		35.0		0.75		
		44.1		0.60		
	2	42.3	45.1	0.55	0.63	242
		49.0		0.74		
		54.6		1.83		
		43.5		1.16		
		46.6		1.33		
JCM	1	64.6	48.2	0.85	1.44	127
		78.4		1.26		
		75.3		1.17		
		115		1.62		
		93.5		1.08		
	3	113	107	1.59	1.43	232
		—		—		
		—		—		
		—		—		
		—		—		

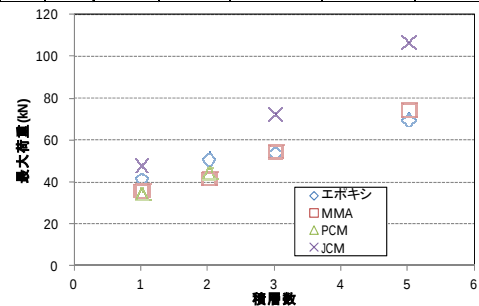


図-2 最大荷重と積層数の関係

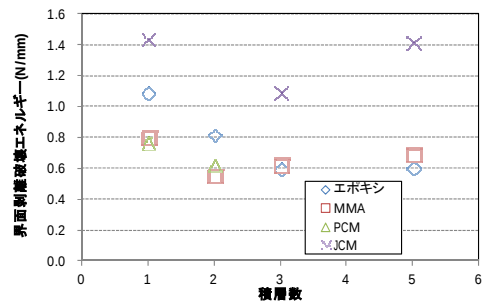


図-3 界面剥離破壊エネルギーと積層数の関係

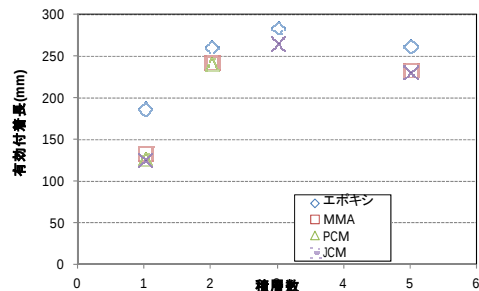


図-4 有効付着長と積層数の関係

- 3) 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