

報告 MMA 樹脂を用いた炭素繊維シート of 材料特性・施工性の検討

林 繁次^{*1}・青木 敏一^{*2}・酒井 芳文^{*3}・牛島 栄^{*4}

要旨：炭素繊維（以下CF）シートを用いたRC構造物の補強工法に用いられているエポキシ樹脂は、一般に低温時の硬化速度が遅く冬期の施工性に課題を有しているとされている。今回低温硬化性、速硬化性に優れたメチルメタクリレート系（以下MMA）樹脂を選択し、CFシートの材料特性試験及びRC構造物補強用材料としての可能性確認試験を行った。その結果、優れた低温施工性と速硬化性、良好なCFシートの引張特性、CFシートとコンクリートの接着性と一軸圧縮補強効果等を確認した。

キーワード：MMA樹脂、炭素繊維シート、低温硬化性、速硬化性、材料特性、補強

1. はじめに

既存鉄筋コンクリート（RC）構造物は、そのストック量の増加や先の阪神大震災による被害等により、維持管理の重要性が高まっている。このような背景の下、塩害、中性化、経年劣化等による劣化の顕在化、交通量の増加、交通荷重制限の引上げ、耐震基準の見直しに伴い、RC構造物の延命化、耐荷性向上、耐震性向上技術の確立が必要となり、各種の補修・補強工法が積極的に試みられている。その中で連続繊維補強材特にCFシートを用いた工法は、CFシートをRC構造物に樹脂を用いて貼るだけで十分な補強効果を得ることができる簡便な施工性が注目され、その適用に関する研究及び適用事例が急速に増加しつつある。

本研究は、CFシートの含浸接着用樹脂として一般的に用いられているエポキシ樹脂に替えて、低温硬化性、速硬化性に優れたMMA樹脂を用いた場合のCFシートの材料特性と施工性を把握することを目的としており、本報告では、0～30℃の環境温度下における施工性の検討、各温度でMMA樹脂を含浸硬化したCFシートの引張材料特性及びMMA樹脂を用いてCFシートを貼付けたコンクリート試験体の力学的特性試験結果について報告する。更に、CFシートを用いたRC梁、床版の曲げ補強において、CFシートのRC面への付着性が影響することが指摘されていることを踏まえ[1, 2]、CFシートを貼付けるコンクリート面の種々の表面状態がCFシートの一面せん断付着強度に及ぼす影響についての実験も行ったのでその結果についても報告する。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

試験体の作製に用いたCFシートの仕様を表-1に示す。又用いたMMA樹脂及び比較のため用いたエポキシ樹脂の特性を表-2に示す。コンクリート試験体へのCFシートの貼付けには、含浸接着用樹脂と同系のプライマーも用いた。又

表-1 炭素繊維シート¹⁾の仕様

シート目付	300g/m ²
設計厚み	0.167mm/枚
繊維密度	1.8g/cm ³
引張強度	3430MPa
引張弾性率	236GPa

1)三菱レイヨン社製：一方向CFクロス

*1 三菱レイヨン（株） 商品開発研究所 副主任研究員、工修（正会員）
 *2 三菱レイヨン（株） 商品開発研究所 副主任研究員
 *3 （株）青木建設 研究所 材料研究室 主任研究員（正会員）
 *4 （株）青木建設 研究所 材料研究室 室長、工博（正会員）

用いたコンクリートの配合を表-3に示す。

表-2 含浸接着用樹脂の特性

樹脂	環境温度 (℃)	粘度 (Pa・s)	硬化時間	曲げ強度 (MPa)	曲げ弾性率 (GPa)	ガラス転移温度 (℃)
MMA ¹⁾	30	0.20	43分	63	2.77	56
	20	0.26	50分	64	2.76	56
	10	0.52	41分	60	2.40	55
	0	0.72	42分	64	2.64	56
エポキシ ²⁾	20	10以上 ³⁾	10時間 ³⁾	98 ⁴⁾	3.33 ⁴⁾	48 ⁴⁾

1) 三菱レイソ社製を使用
2) CFシート補強工法で一般に使用されている常温硬化エポキシ樹脂
3) 粘度値
4) 1週間硬化養生後の試験結果

表-3 コンクリートの配合

スラブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE減水剤 C×wt(%)
				W	C	S	G	
8±2.5	4.5±2.5	56.9	43.7	152	267	813	1092	0.25

表-4 MMA樹脂の配合と硬化時間

環境温度 (℃)	硬化剤量 (phr) ¹⁾	促進剤量 (phr) ¹⁾	硬化時間 (分)
30	1.5	1	45
20	2.0	1	50
10	3.0	1	47
0	4.0	1	40

1) 重量部 (樹脂100部に対して)

2. 2 ABA2液法によるMMA樹脂の含浸硬化

用いたMMA樹脂の各環境温度での適正な硬化剤及び促進剤の配合量と配合樹脂の硬化時間を表-4に示す。配合樹脂は各温度で硬化時間が40～50分程度であり、樹脂の可使時間が制限されCFシートの貼付け可能面積が少なくなる等の問題が予見できる。そこで十分なCFシート貼付け作業時間を確保するため、硬化剤と促進剤を別々に配合した常温では安定な2種類の樹脂液(それぞれA、B液)を順次CFシートに含浸させ、塗布面で両液を接触混合することにより硬化させる工法(以下ABA2液法)を考案した。コンクリートにシートを貼付ける場合のABA2液法概念図を図-1に示す。本研究では、試験体の作製はこのABA2液法を中心に実施したが、比較のため硬化剤と促進剤を1液に配合した通常MMA1液配合樹脂、更にはエポキシ樹脂を用いた実験も行った。

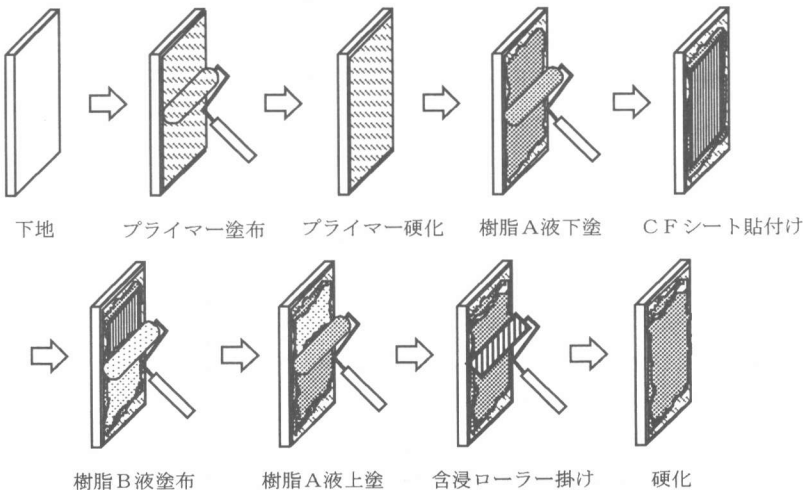


図-1 ABA2液法の概念図

2. 3 試験体の作製と試験方法

2. 3. 1 樹脂を含浸硬化したCFシートの引張特性試験

樹脂の調製、CFシートへの樹脂の含浸と硬化は、所定の環境温度に設定した環境可変室内で行った。樹脂の標準使用量は 0.6kg/m^2 とした。

表-5 試験水準と測定数

試験水準及び測定数を表-5に示す。CFシートの1層硬化板からJIS K 7073に準拠して、試験体(12.5×250mm, タブ長60mm)を作製し20℃でCFの配列方向に引張試験を行った。強度、弾性率はCFシートの設計厚み換算値として求めた。

硬化環境温度 (℃)	引張試験		
	MMA ABA2液法	MMA 1液配合	エポキシ 1液配合
30	6	—	—
20	24	6	6
0	18	6	—

2. 3. 2 CFシートを貼付けたコンクリート試験体の基礎材料特性試験

コンクリート試験体は打設後約50日の気中養生を行った後、CFシート貼付け表面をサンドペーパーでケレンし、下地処理を行った。環境可変室内で樹脂を調製し、プライマーとして標準使用量 0.2kg/m^2 で塗布し硬化した後、更に樹脂として標準使用量 0.6kg/m^2 (ABA2液法の場合、A,B液各 0.3kg/m^2)でコンクリート試験体にCFシートを貼付け又は巻付け、樹脂を含浸硬化して試験体を作製した。試験項目、試験水準及び測定数を表-6に示す。

(1) CFシートとコンクリートの接着力試験

コンクリート試験体(1

表-6 試験項目、試験水準と測定数

00×100×400mm)にCFシートを1層貼付け、樹脂を硬化後JIS A 6909に準じ20℃で建研式接着力試験を実施した。

硬化環境温度 (℃)	接着力試験			一軸圧縮強度試験 ¹⁾		
	MMA ABA2液法	MMA 1液配合	エポキシ 1液配合	MMA ABA2液法	MMA 1液配合	エポキシ 1液配合
30	6	—	—	6	—	—
20	6	6	6	12	6	12
10	6	—	6	—	—	—
5	6	—	6(硬化不可)	—	—	—
0	6	—	6(硬化不可)	6	—	—

1)一軸圧縮強度試験の12は1層巻付け6体と2層巻付け6体の計12体を、6は1層巻付け6体をそれぞれ意味する。無補強試験体は6体実施。

(2) 一軸圧縮強度試験

コンクリート円柱試験

体(100φ×200mm)の側面に重ね継手長さを10cmとしてCFシートをCFの配列方向が周方向となるように試験体の上下1cm分を空けて巻付け、樹脂を硬化後JIS A 1108に準じ20℃で圧縮強度試験を実施した。重ね継手長さは、樹脂を含浸硬化したCFシートの重ね継手長さと破断荷重の関係を予備実験により検討し、継手長さを10cmとれば継手破壊の傾向も認められるものの、破断荷重がCFシートの引張破断荷重に近くほぼ一定となることを確認して決定した。2層巻付ける場合は、1層毎に重ね継手を設け、2層目の継手位置は1層目の継手位置の反対側になるようにした。20℃でCFシートを巻付けた試験体については、ひずみゲージで周方向と軸方向ひずみ量の測定も実施した。

(3) 一面せん断付着力試験

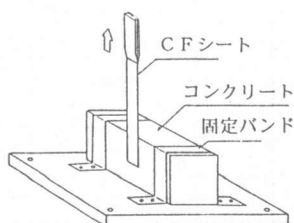
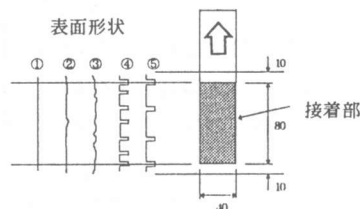


図-2 一面せん断付着力試験方法



- ①脱型したままの状態(剥離剤が付着)
- ②サンダーケレン状態
- ③チッピング状態(ノミで凹凸形成)
- ④ダイヤモンドカッターで溝切り7本(深さ5mm, 幅2~3mm)
- ⑤ダイヤモンドカッターで溝切り4本(同上)

図-3 コンクリート下地処理状態

コンクリート試験体(100×100×400mm)に20℃でCFシートを図-2に示すように1層貼付けた試験体を作製し、接着面と平行方向にシート端部を引張るせん断付着力試験を20℃で行った。CFシートを貼付けるコンクリート面の寸法と下地処理状態は、図-3に示す5水準とした。各表面状態は、表面粗さ測定装置で計測した。なお、下地処理がサンダーケレン処理の条件でCFシートをエポキシ樹脂を用いて貼付けた試験体を用いた比較実験も行った。

3. 実験結果及び考察

3. 1 硬化性と施工性

MMA樹脂は粘度が低く、塗工性とCFシートへの含浸性は良好であった。また各環境温度において硬化時間が1時間以内と優れた速硬化性を示し、5℃以下における低温硬化性も確認された。今回の様な小型試験体の作製においては、通常MMA1液配合樹脂を用いた方法で十分対応可能であったが、ABA2液法でも硬化し、特に大面積にCFシートを貼付ける場合に貼付け作業時間を確保できる点で有効であると考えられた。一方、エポキシ樹脂は、5℃以下では30日放置後も硬化が不十分であった。

3. 2 樹脂を含浸硬化したCFシートの引張特性試験結果

試験結果を表-7に示す。MMA樹脂を用いた場合、0～30℃の範囲においては硬化温度が引張強度に及ぼす影響はほとんどなく、いずれの硬化温度でも20℃でエポキシ樹脂を硬化した場合と同等の引張特性を示している。又ABA2液法で作製した試験体と通常MMA1液配合樹脂を用いた試験体においても顕著な強度差は認められず、

表-7 引張試験結果

硬化環境温度 (℃)	材料・工法	引張強度(N/mm ²) 平均値/最小値	引張弾性率(N/mm ²) 平均値 ×10 ³	破断ひずみ(%)
30	MMA・ABA2液	3980/3830	247	1.54
20	MMA・ABA2液	3710/3510	239	1.48
	MMA・ABA2液	3890/3630	243	1.53
	MMA・ABA2液	3830/3760	239	1.54
	MMA・ABA2液	3900/3570	240	1.54
	MMA1液配合	3890/3730	243	1.54
0	エポキシ液配合	3950/3720	247	1.54
	MMA・ABA2液	3710/3430	241	1.47
	MMA・ABA2液	3620/3320	242	1.45
	MMA・ABA2液	3740/3390	244	1.47
	MMA1液配合	4060/3910	248	1.58

注)硬化板毎のデータ 各n=6

工法が引張特性に及ぼす影響もないことが確認できた。

3. 3 CFシートを貼付けたコンクリート試験体の基礎特性試験結果

(1) CFシートとコンクリートの接着力試験

試験結果を表-8に示す。MMA樹脂を用いてCFシートを貼付けた全ての試験体は、エポキシ樹脂を用いた場合と同等の接着強度を示し、接着強度の硬化温度依存性もないことが確認された。破壊状態もコンクリート母材破壊であり、良好な接着性を示した。

表-8 接着力試験結果

硬化環境温度 (℃)	材料・工法	接着力 (N/mm ²)	破壊状態
30	MMA・ABA2液	3.7	コンクリート母材破壊
20	MMA・ABA2液	4.0	コンクリート母材破壊
	MMA1液配合	3.0	コンクリート母材破壊
	エポキシ液配合	3.4	コンクリート母材破壊
	MMA・ABA2液	3.0	コンクリート母材破壊
10	エポキシ液配合	3.7	コンクリート母材破壊
	MMA・ABA2液	4.0	コンクリート母材破壊
5	エポキシ液配合	硬化不良	—
	MMA・ABA2液	3.0	コンクリート母材破壊
0	エポキシ液配合	硬化不良	—
	MMA・ABA2液	3.0	コンクリート母材破壊

(2) 一軸圧縮強度試験

試験結果を表-9に、又代表的な試験体

での軸方向応力と軸方向ひずみ及び軸方向応力と周方向ひずみの関係を図-4に示す。MMA樹脂

脂を用いCFシートを巻付け硬化した補強試験体は、無補強試験体に対して圧縮強度と終局ひずみの大幅な増大を示した。

破壊位置については、CFシートでの重ね継手引張試験においてと同様、継手破壊の場合も認められたものの、エポキシ樹脂を用いた場合とほぼ同等の補強（拘束）効果が得られることが確認できた。

表-9 一軸圧縮強度試験結果

硬化環境温度(℃)	材料・工法	層数	圧縮強度(N/mm ²)	強度比 ¹⁾	破壊位置と個数
30	MMA・ABA2液	1	71.2	2.1	シート2, 継手2, 混合2
20	MMA・ABA2液	1	69.4	2.0	シート2, 継手2, 混合2
	MMA・ABA2液	2	98.9	2.9	シート3, 継手2, 混合1
	MMA1液配合	1	69.2	2.0	シート2, 継手4
	エポキシ1液配合	1	71.9	2.1	シート6
0	エポキシ1液配合	2	103.9	3.0	シート6
	MMA・ABA2液	1	69.1	2.0	継手4, 混合2

1) 無補強試験体の圧縮強度(34.5N/mm²)を1.0とした時の強度比

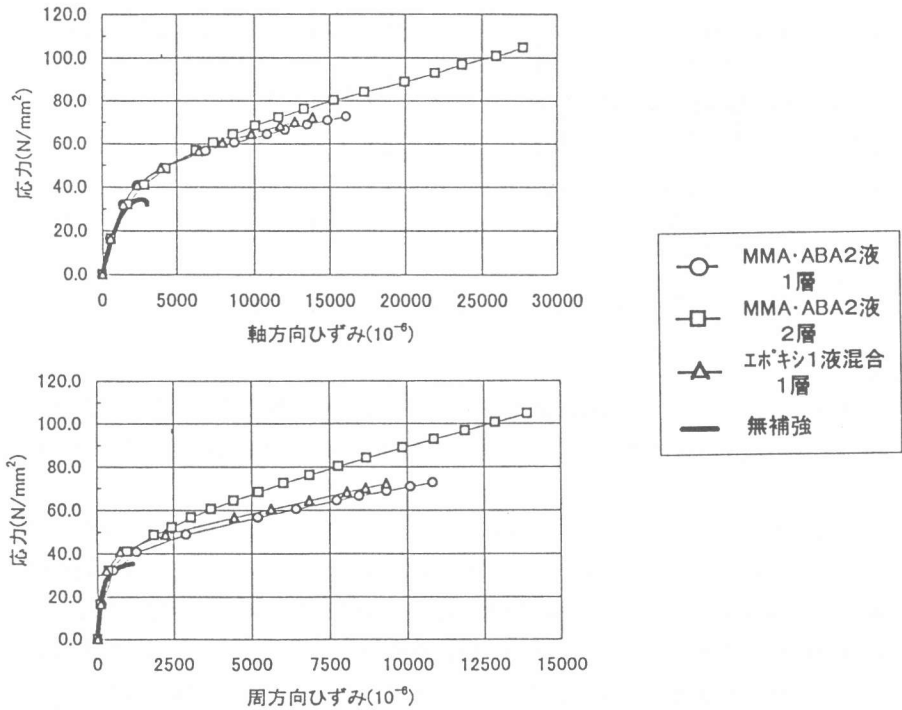


図-4 軸方向応力とひずみの関係

(3) 一面せん断付着力試験

試験結果を図-5に、CFシートを貼付けるコンクリート表面の下地処理状態の表面粗さ計測結果を図-6に示す。せん断破壊面は、コンクリートの母材破壊とCFシートとコンクリートの界面破壊が混在する形態を呈した。MMA樹脂を用いた場

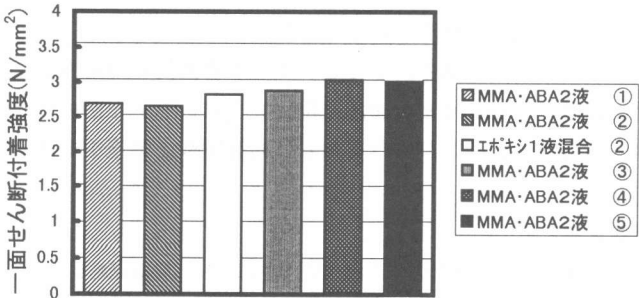


図-5 コンクリート下地処理と一面せん断付着強度

合の一面せん断付着強度は、サンダーケレン処理だけの場合には無処理と変わらないが、CFシートを貼付けるコンクリート表面をチップングあるいは溝切り処理を行うことによりアンカーリング効果を賦与した場合には、一面せん断付着強度は向上し、エポキシ樹脂を用いた試験体以上の値が得られることが判った。

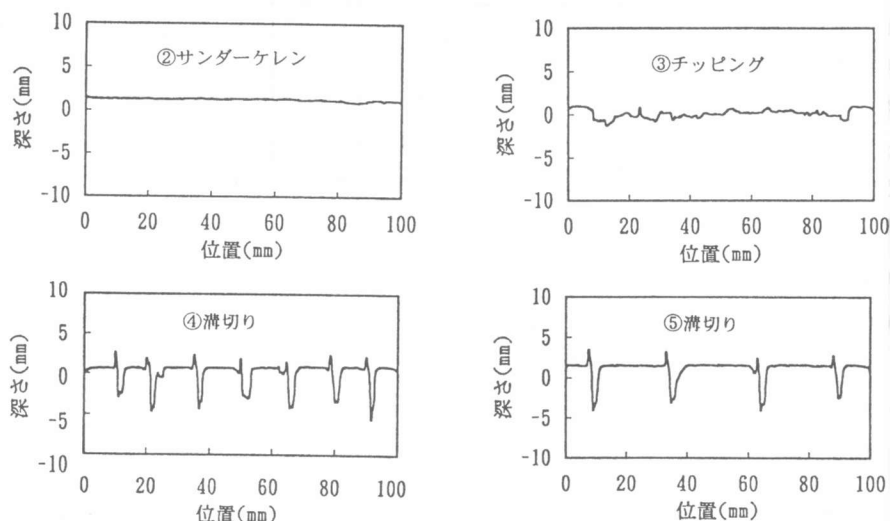


図-6 コンクリート表面の下地処理状態

4. まとめ

CFシート補強工法のCFシート含浸接着用樹脂としてMMA樹脂を用いることにより、

- (1) 硬化時間の大幅な短縮が可能であり、又低温（5℃以下）環境下での施工が可能となる見通しが得られた。
- (2) 良好な樹脂塗工性、CFシートへの含浸性が得られ、小規模施工なら通常の1液配合樹脂を用いた施工法でも十分適用可能であるが、硬化剤と促進剤を分離したABA2液法により、実施工に対応可能なCFシート貼付け作業時間を確保できる見通しが得られた。
- (3) 樹脂を含浸硬化したCFシートは、エポキシ樹脂を用いた場合と同等の引張特性を示した。
- (4) エポキシ樹脂を用いた場合とほぼ同等のCFシートのコンクリートへの接着性とコンクリート円柱の一軸圧縮補強（拘束）効果を示した。
- (5) コンクリートに貼付けたCFシートの端部の一面せん断付着力試験において、CFシートを貼付けるコンクリート面をチップング及び溝切り処理することにより、一面せん断付着強度の向上が期待できることが判った。

以上、CFシート補強工法のCFシート含浸接着用樹脂としてMMA樹脂を適用できる可能性を見出した。現在、MMA樹脂を用いてCFシートを貼付けた大型RC試験体での梁せん断補強実験、柱の靱性実験及びスラブの曲げ補強実験を実施中である。

(参考文献)

- [1] 酒井芳文、宇賀田康男、秋山吉弘、牛島 栄：炭素繊維シートを用いて曲げ補強を行ったRC床版の力学的特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18、No. 1、pp. 1445-1450、1996
- [2] 李翰承、友澤史紀、野口貴文、鹿毛忠継：炭素繊維シートによって曲げ補強したRC梁の有限要素解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18、No. 1、pp. 1065-1070、1996