

炭素繊維強化プラスチックを表面に施したRC壁部材の耐火性能

齋藤 秀人 池谷 純一
(技術研究所) (技術研究所)

Fire Resistance of Reinforced Concrete Walls Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Plastics

By Hideto Saito and Jun'ichi Iketani

Abstract

Carbon fibers are one of the most effective materials for seismic strengthening. However fire resistance of reinforced concrete members strengthened with carbon fiber reinforced plastics (CFRP) should be taken into account because of its combustibility. This paper describes the several tests in accordance to methods of Japanese Industrial Standard; tensile strength tests of CFRP exposed with elevated temperature, tensile strength tests of CFRP experiencing elevated temperature, noncombustibility tests of CFRP and fire resistance tests of wall specimens strengthened with CFRP. As the results of the tests, tensile strength of CFRP at 40 K decreased to approximately 40% of tensile strength at room temperature. CFRP experiencing up to 200 K showed the same tensile strength as the one before heating. CFRP covered with a plaster board had quasi-noncombustibility. For fire resistance, reinforced concrete walls strengthened with CFRP maintained the functions during 2 hours.

概要

炭素繊維は既存鉄筋コンクリート構造物の耐震補強に適した材料であるが、炭素繊維を接着する樹脂が比較的低温で溶融・燃焼するので、火災時における構造物等への支障が危惧された。そこで炭素繊維強化プラスチックの高温特性、および炭素繊維強化プラスチックを表面に施した壁の耐火性能に関する実験的研究を行った。その結果、炭素繊維強化プラスチックは熱間および加熱・冷却後にも相応の強度を保有し、また石膏ボードで被覆した炭素繊維強化プラスチックは準不燃材料に相当する性能を有していることを確認した。さらに2時間加熱の範囲では、炭素繊維補強は既存鉄筋コンクリート壁部材の耐火性能を損なうおそれがないことを明らかにした。

§ 1. はじめに

炭素繊維（以下CF）は強度が高く軽量であることから、既存鉄筋コンクリート（以下RC）構造物の耐震補強に適した材料として近年採用されるケースが増えている。一方、CF補強に広く用いられている樹脂は、比較的低温で溶融・発煙・燃焼するので、火災時には構造物・人命・避難活動・消防活動への支障が危惧された。そこで防耐火措置の必要性が語られ、CF補強した部材表面への仕上げ材やその下地材に耐火被覆を施す考え方が生まれた。

しかし、高温になると崩壊のおそれがある鋼部材に耐火被覆を施す場合とは大いに異なり、耐震補強するRC部材は補強前において既に耐火構造である。さらに火災と地震の同時発生は考えなくてよいので、耐震補強を目的としたCF補強が火災時に機能する必要はな

い。したがってCFを用いて耐震補強したRC部材への防火措置については、合理的な考え方を確立する必要があると考えた。

そこでCF補強の耐火性能に関し、炭素繊維強化プラスチック（以下CFRP）の高温特性、およびCFRPを表面に施したRC壁部材の耐火性能について実験的研究を行い、検討した結果を報告する。

§ 2. 実験概要

2.1 使用材料

使用するCFは、現在広く普及しているPAN系高強度CFシート（以下C1）、および石油精製副産物を有効活用して作られるピッチ系高弾性CFシート（以下C8）の2種類とした。使用する樹脂は、コンクリートのひび割

CF	繊維目付 g/m ²	繊維密度 g/cm ³	設計厚さ mm	設計引張 強度MPa	引張弾性 率 GPa
C1	300	1.8	0.167	3,480	230
C8	300	2.12	0.142	2,640	630

表一 1 CFシートの仕様とCFRPの力学特性

可使時 間 分	引張強 度MPa	圧縮強 度MPa	曲げ強 度MPa	引張せん断 強度 MPa	引張弾性 率 MPa
50	50.8	90	81.9	29.3	3,186

表一 2 エポキシ樹脂の特性

スラ ンプ sl cm	空気 量 Air %	水セ メント 比 W/C %	細骨 材率 S/a %	単位容積重量 kg/m ³				
				水 W	セメ ント C	細骨 材 S	粗骨 材 G	混和 剤 Ad.
18	4.5	76.1	50.4	177	233	931	945	2.481

Ad.: ポゾリスNo.70 (AE減水材標準形)

表一 3 コンクリートの調合

加熱温度 K	20	40	75	100	200	260	300
熱間継手無し	○	○	—	○	—	—	—
熱間継手有り	○	○	○	○	—	—	—
冷却後継手無し	○	—	—	—	—	○	○
冷却後継手有り	○	—	—	○	○	○	○

表一 4 高温特性試験のパラメーター (○:実施)

れ補修などに汎用されているエポキシ樹脂の一種とした。なお、低温での硬化性や速硬性を意図して、MMA樹脂を用いたCF補強については、文献¹⁾を参照されたい。CFシートとエポキシ樹脂の特性等を表一 1・2に示す。

壁試験体のコンクリートは、CF補強の対象となる既存RC構造物の実強度を勘案して、材令3カ月以上での試験時目標強度を24 MPaとした。調合を表一 3に示す。

2.2 CFRPの高温特性試験

CFRPの高温特性試験は、熱間引張強度試験および加熱・冷却後の引張強度試験からなる。試験片はC1およびC8のCFシート1層・幅12.5 mmのCFRPであり、表一 4に示すように継手の有無と加熱温度をパラメータとした。継手有りとは、エポキシ樹脂を用いて2枚のCFシートを中央で重ね継手した試験片であり、重ね長さは設計・施工指針²⁾の構造細則に規定される最小値100 mmである。

熱間引張試験は、試験片を電気炉内にて所定の温度で30分加熱し、その温度を保持した状態で行う。また加熱・冷却後の引張試験は、試験片を電気炉内にて所定の温度で2時間加熱し、冷却後に行う。いずれの試験もJIS K 7073「炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法」

に準拠した。なお、熱間引張試験の全ておよび加熱・冷却後の引張試験の加熱のみは(財)建材試験センターに依頼し、冷却後の引張試験は技術研究所にて行うこととした。

2.3 準不燃試験

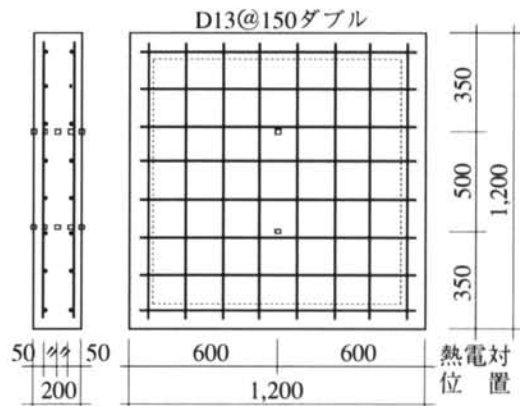
CFRPは不燃材料ではないが、一定水準の防火性能を期待できることが予想された。そこで準不燃試験として、建設省告示1231号に規定される表面試験・穿孔試験・ガス有害性試験および模型箱試験を行うこととした。パラメータはCFの種類と被覆(12 mm厚の石膏ボード(表中、石膏板))の有無であり、CFRPはCFシート1層である。試験は全て(財)建材試験センターに依頼して行うこととした。

2.4 壁の耐火試験

CF補強されたRC部材の基本的な耐火性能を確認することを目的として、CFRPを表面に施したRC壁の一面加熱試験を行うこととした。試験体は図一 1に示す1,200×1,200×200 mmの25体とし、CFシートは1層、パラメータは表一 5に示すように、CFおよび被覆材の種類である。表中、石膏ボードは石膏板、珪酸カルシウム板は珪カル板、湿式吹付けロックウールは吹付岩綿、ロックウールフェルトは岩綿フェルトと略記した。スーパータックUとコラムボンドについては後記する。また、散布した砂は珪砂3号である。特殊ネットとは耐アルカリ性有機繊維の編み物で、裏面をエポキシ樹脂でCFRPに接着し、表面に突起した繊維でモルタルとの付着を確保するものであり、市販されている。

試験はJIS A 1304「建築構造部分の耐火試験方法」に準拠し、技術研究所の小型壁炉を用いた片面からの2時間加熱とした。

なお耐火試験に先立ち、各種手法によるCFRPと石膏ボードの付着試験を行った結果を図一 2に示す。内装工事で広く使われているGL工法は、付着強度が極度に



図一 1 壁試験体

No.	補強	被覆材	下地処理・施工法	σ_B MPa	温度 K		
					表面	裏面	
1	無し	無し	-	29.6	859	73	
2				29.6	876	75	一部爆裂
3				29.6	867	90	コンクリート小剥落
4	C1	無し	-	24.8	758	76	繊維・樹脂焼失, コンクリート小剥落
5				27.5	824	77	同上
6		石膏板12mm	スーパータックU・GL工法	26.0	756	75	石膏板剥落, 繊維・樹脂焼失
7		石膏板12mm	コラムボンド	26.0	801	65	同上
8		珪藻板12mm	釘止め	29.8	199	47	珪藻板割れ, 樹脂焼け
9		ラスモルタル20mm	未硬化樹脂・砂散布	24.8	626	54	樹脂焼失, 繊維白化, モルタル剥離
10		モルタル10mm	未硬化樹脂・特殊ネット	24.8	798	77	モルタル剥落, 繊維・樹脂焼失
11		吹付岩綿10mm	直	29.6	411	56	岩綿剥落, 樹脂焼失, 繊維焼け
12		吹付岩綿20mm	直	29.6	244	46	岩綿割れ, 樹脂焼失
13		岩綿フェルト7mm	鉋止め	27.5	673	54	岩綿フェルト割れ, 繊維・樹脂焼失
14	C8	無し	-	24.8	847	74	繊維・樹脂焼失, コンクリート小剥落
15				27.5	814	71	同上
16		石膏板12mm	スーパータックU・GL工法	29.8	1018	85	石膏板剥落, 繊維・樹脂焼失, 爆裂
17		石膏板12mm	コラムボンド	29.8	711	68	石膏板剥落, 繊維・樹脂焼失
18		珪藻板12mm	釘止め	26.0	210	46	珪藻板割れ, 樹脂焼け
19		ラスモルタル20mm	未硬化樹脂・砂散布	27.5	587	48	樹脂焼失, 繊維白化, モルタル剥離
20		モルタル10mm	未硬化樹脂・特殊ネット	29.6	737	83	モルタル剥落, 繊維・樹脂焼失
21		吹付岩綿10mm	直	24.8	350	60	岩綿剥落, 樹脂焼失, 繊維焼け
22		吹付岩綿20mm	直	26.0	205	41	岩綿割れ, 樹脂焼失
23		岩綿フェルト7mm	鉋止め	24.8	609	44	岩綿フェルト割れ, 樹脂焼失
24	鋼板	無し	-	27.5	753	67	樹脂焼失, コンクリート小剥落
25				27.5	813	64	樹脂焼失

表-5 壁試験体および試験結果の一覧

試験名 項目		判定値	C1 無被覆			C1 石膏板被覆					
表面	変形・溶融・亀裂		無し	無し	無し	無し	無し	無し			
	残炎時間 秒	30	0	17	19	0	0	0			
	超過時間 分	3	無し	無し	無し	無し	無し	無し			
	温度時間面積 K・分	100	0	0	0	0	0	0			
	発煙係数 CA	60	4.5	6.9	6.6	6.3	6.8	6.0			
	合・否		合格	合格	合格	合格	合格	合格			
	判定		合格			合格					
穿孔	残炎時間 秒	90	-			0	0	0			
	温度時間面積 K・分	150				0	0	0			
	発煙係数 CA	60				9.5	8.1	7.2			
	合・否					合格	合格	合格			
	判定					合格					
ガス有害性	Xs* 分	6.32, 6.46**	7.91	7.43	15	15					
	合・否		合格	合格	合格	合格					
	判定		合格			合格					
	参考値										
模型箱	CO最高%	5.03, 5.30**	3.20	3.24	1.54	1.55					
	CO最高%	1.12, 1.31**	0.43	0.42	0.10	0.09					
	O ₂ 最低%	14.7, 14.2**	16.1		18.6						
	最大発熱速度 kJ/秒	170	224			84					
	合計発熱量 kJ	50000	68700			31900					
異常燃焼		有り (F.O.)			無し						
合・否		不合格			合格						

*: マウスの平均行動停止時間, **: 標準材料 (赤ラワン) の値

表-6 準不燃試験および結果の一覧

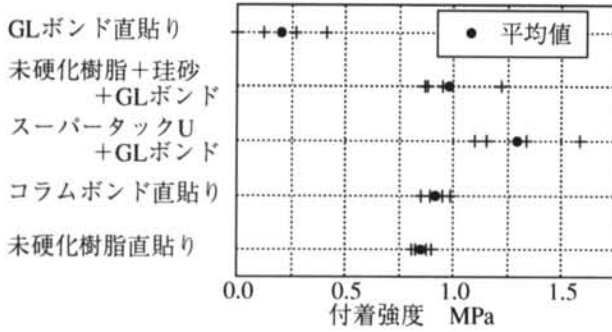


図-2 CFRPと石膏ボードの接着性状

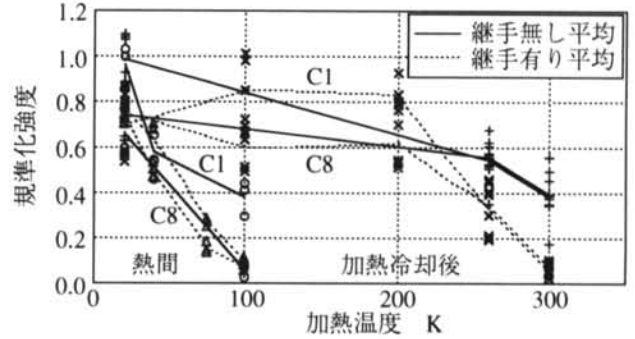


図-3 CFRPの熱間および加熱・冷却後の強度

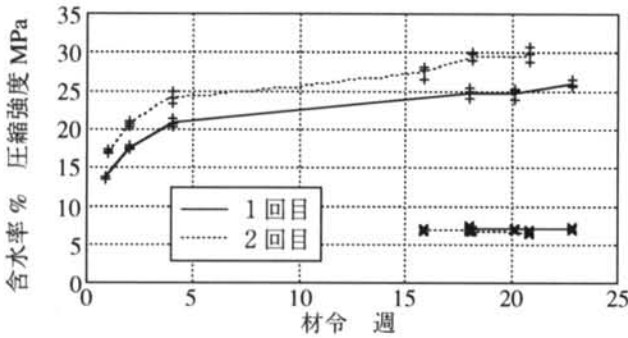


図-4 壁試験体コンクリートの圧縮強度と含水率

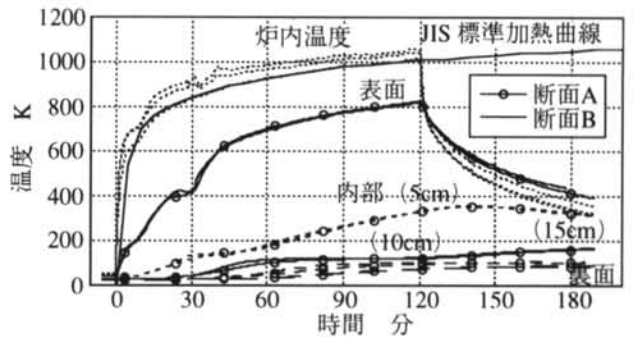


図-5 壁試験体 (No.5, 無被覆) の時刻歴温度変化

低くCFRP直には行えない。未硬化樹脂上に砂をまき、硬化後にGL工法を行うか、硬化すると粘着性を発揮するプライマー（スーパータックU）を用いてGL工法を行うか、または、鉄骨への直貼り用に開発された接着材（コラムボンド）を使用しなければならないので注意を要する。なお、スーパータックUおよびコラムボンドは（株）吉野石膏の商品名である。

§ 3. 実験結果と考察

3.1 CFRPの高温特性試験

表-1に示したCFの設計引張強度で熱間引張強度試験結果を除き、規準化強度として図-3に示した。図中、常温で設計引張強度を下回るデータが見受けられるが、これは加力治具の不具合によるもので、全体的傾向に影響は無いと考えた。

熱間引張強度はエポキシ樹脂のガラス転移点である40 K以上で低下が認められ、特に100 Kでの強度残存率は、継手の無いC1を除き設計引張強度の1割程度に低下することが明らかとなった。

現在、CF補強の主流であるCFシートを用いた耐震補強工法では、閉鎖型のCFRPを形成するために継手が必要不可欠である。したがって、常時高温となることが予想される工場・機械室・公衆浴場等へのCF補強設計では、CFRPの温度を40 K程度以下に留めるように高

品質な断熱被覆材を計画するなどの、十分な配慮が必要である。

加熱・冷却後の引張強度は260 K以上で低下が認められ、この傾向はC1よりもC8の方が、また弱点となる継手がある方が無いものよりも著しい。ただし継手があるC1は、200 Kまでの加熱・冷却後も設計引張強度をほぼ満足しており、火災を受けた後でそのまま再使用可能なCFRPの温度は200 K程度といえよう。

すなわち、大地震による火災後の補修・補強中に発生する余震を考慮したCF補強においては、CFRPの温度が200 K以下になるようように耐火設計する必要がある。

3.2 準不燃試験

試験結果の一覧を表-6に示す。無被覆CFRPの穿孔試験は、CFRP内部に異種材料は存在しないので行っていない。また模型箱試験では、C1の試験結果が濃煙をとまなうフラッシュオーバー（表中F.O.）現象を呈して不合格となったので、同様の状況・結果が予測されたC8の試験は行わなかった。

表面試験では、無被覆のC8を除き他は合格であった。無被覆C8が不合格となったのは、3試料の内の1つが特異な値を示したためである。試料の製作・試験等に何らかの不具合があったと考えられるが、原因は不明である。しかし穿孔試験において、石膏ボード被覆のCFRPは、C1・C8ともにほぼ同じ数値で合格している

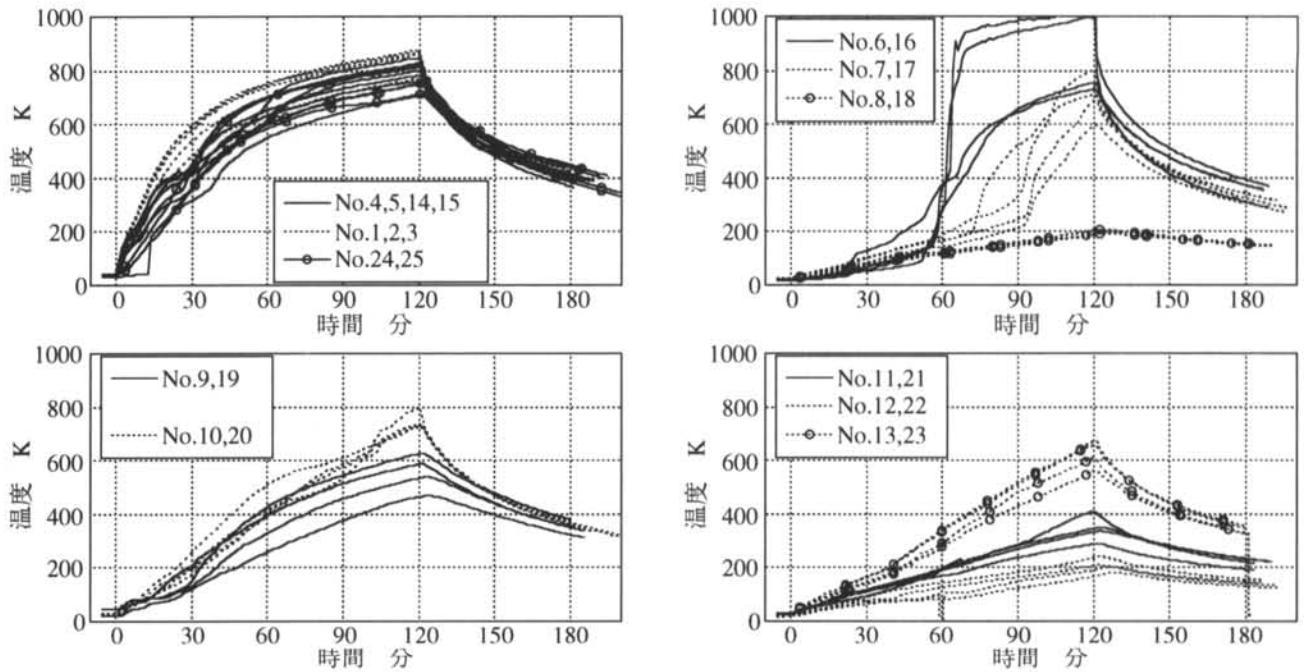


図-6 壁試験体加熱側コンクリート表面温度の時刻歴変化

ことから、両者の性能に本質的な差異があるとは考えられない。なおガス有害性試験において、無被覆CFRPはC1・C8ともに合格した点が特筆される。また石膏ボード被覆のCFRPは全てに合格し、軽微な被覆を施したCFRPは準不燃材料相当の防火性能を有していることが明らかとなった。

3.3 壁の耐火試験

コンクリートの圧縮強度と含水率の推移を図-4に示す。コンクリートの打設は2回に分けて実施したが、試験時の材令111～160日で圧縮強度は24.8～29.8 MPa、含水率は6.63～7.24%であり、満足できる値が得られている。

試験結果の一覧は表-5に示した。表中 σ_B は、試験時の各試験体コンクリートの平均圧縮強度である。また、計測例としてNo.5試験体の時刻歴温度を図-5に示す。

全試験を通して、CFの種類による差異は特に認められなかった。各試験体の状況等は以下の通りである。

RC無補強のNo.1～3試験体では、火災を受けたRC部材に特有の爆裂現象が一部で観察された。

CFRP無被覆のNo.4・5・14・15試験体では、着火後約20分で樹脂が燃え尽き、30～60分程度で繊維剥落、試験終了時は繊維が完全に焼失していた。

石膏ボードを配したNo.6・7・16・17試験体では、着火後約60分で石膏ボードと繊維が剥落し、試験終了時には繊維が完全に焼失していた。なおNo.16試験体は、石膏ボードが剥落した直後の着火約60分で全面的に爆

裂し、一部で鉄筋が露出した。養生条件等が同じである他の試験体では全く見受けられなかった現象であるが、原因は不明である。

珪酸カルシウム板を配したNo.8・18試験体では、冷却過程で珪酸カルシウム板にひび割れが発生したが、樹脂が多少損傷を受けた程度であった。

ラスモルタル20mmを施したNo.9・19試験体では、上塗り10mmのモルタルは剥落、メタルラスを塗り込んだ下塗り10mmは残存して試験体から剥離し、白色化した繊維が残存していた。

特殊ネットを介してモルタル10mmを施したNo.10・20試験体は、モルタルに剥落・ひび割れが生じ、剥落した部分の繊維は完全に焼失していた。

湿式吹付けロックウール10・20mmを施したNo.11・12・21・22試験体は、ロックウールにひび割れが生じ、樹脂は損傷を受けていたが、繊維は原形を留めていた。

ロックウールフェルト7mmを施したNo.13・23試験体は、固化したロックウールフェルトにひび割れが生じ、繊維が部分的に残存していた。

鋼板補強のNo.24・25試験体は、樹脂が蒸し焼き状態で完全に焼失し、試験中は黒煙と刺激臭が観測された。

被覆の種類等に区分して、加熱側コンクリート表面温度の時刻歴変化を図-6に示す。読み取れる傾向は以下の通りである。

被覆の無いCFRPや鋼板補強の加熱側コンクリート表面温度は、無補強のRCよりもわずかに低い。

石膏ボードは、剥落するまでの約60分間は断熱性を発揮するが、以降は被覆が無い試験体の温度に近づく。

珪酸カルシウム板は、試験体中央部に目地を設けたにもかかわらず、終始良好な耐火・断熱性能を示した。図中突出している温度は、爆裂により露出された熱電対が加熱温度を検出したものである。

モルタルは、厚塗りの方が温度が低く、断熱効果が高いといえる。しかし剥離・剥落をともなっているため、塗り厚が異なる場合も測定温度の差は大きくない。

湿式吹付けロックウールは厚塗りの方が温度が低く、断熱効果が高い。ロックウールフェルトは薄いためか、湿式吹付けロックウールよりも温度が高い。

以上、壁試験の結果から次の点を確認できた。

・2時間加熱の範囲内では、CFRPの存在が試験結果に悪影響を与えてはいなく、CF補強が既存RC部材の耐火性能を損なうおそれはない。

・石膏ボードは加熱1時間程度で剥落するが、その間はRC部材の温度上昇を抑制し、防火上有効である。

・CFRPに耐火被覆を施す必要がある場合は、珪酸カルシウム板、湿式吹付けロックウール、またはモルタルを施工することが望ましい。ただし、珪酸カルシウム板では固定方法と目地の処理方法、湿式吹付けロックウールでは必要耐火時間に応じた施工厚さ、モルタルではCFRPとの取り合いと塗り厚に留意する必要がある。

§ 4 . 結論

本研究ではCFシート2種類とエポキシ樹脂を用いて、CFRPの高温特性およびCFRPを表面に施したRC壁試験体の耐火性能について実験的検討を行い、以下の結論を得た。

(1) PAN系高強度CFシートおよびピッチ系高弾性CFシートを用いたCFRPは、いずれも40Kで引張強度が低下するので使用上配慮を要するが、200K程度の加熱・冷却後では設計引張強度を保持する。

(2) 無被覆のPAN系CFRPは表面試験・ガス有害性試験を満足し、無被覆のピッチ系CFRPはガス有害性試験を満足する性能を有している。石膏ボードで被覆したCFRPはいずれも、表面試験・穿孔試験・ガス有害性試験・模型箱試験を満足し、準不燃材料に相当する性能を有している。

(3) 2時間加熱の範囲内では、CF補強は既存のRC壁部材の耐火性能を損なうおそれはない。

今後はさらに検討を進め、CF補強したRC柱部材の防耐火性能、および、防火区画を構成するRC壁部材等にスリット等を設けてCF補強し、CFRPが防火区画を貫通する場合の遮熱性・遮炎性・遮煙性について研究・報告する予定である。

本研究は(財)石油産業活性化センターの研究開発事業の一環として実施した。

<参考文献>

- 1) 林繁次, 池谷純一, 齋藤秀人: "メチルメタクリレート (MMA) 樹脂/炭素繊維シートにより補強されたRC部材の耐火性", 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 251 ~ 252, 1999年9月
- 2) 清水建設(株): "SR-CF工法による鉄筋コンクリート柱の設計施工指針", 1997年12月