スチールフレーム方式 CFRC カーテンウォールの開発

DEVELOPMENT OF CFRC CURTAIN WALLS REINFORCED BY STEEL FRAME STRUCTURE

谷口可一 ———*1
小林美亀雄 ———*2
末永龍夫 ———*3
中川裕章 ———*4
依田和久 ———*5
秋浜繁幸 ———*6

Yoshikazu TANIGUCHI
Mikio KOBAYASHI
Tatsuo SUENAGA
Hiroaki NAKAGAWA
Kazuhisa YODA
Shigeyuki AKIHAMA

Taking full advantage of the Carbon Fiber Reinforced Concrete (CFRC), new steel-framed curtain wall panel with CFRC with uniform thickness and high dimensional stability without autoclave curing was developed, while conventional CFRC has been designed to have perimeter rib which leads to a complicated cross section, heavy weighted and complicated manufacturing. It was found that the new steel-framed CFRC curtain wall panel with a natural stone surface could be manufactured in practice, and confirmed to have sufficient performance whereby an application to building constructions was executed.

キーワード：
カーテンウォール, スチールフレーム方式, 炭素繊維補強コンクリート, 低収縮セメント, 石先付け

Keywords:
Curtain wall, Steel frame structure, CFRC, Low-contractile cement, Granite facing

1 はじめに

安価なピッチ系炭素繊維が1980年代に製造されるようになったのに伴い、CFRC(炭素繊維補強コンクリート)の研究開発も進んできた。CFRCは強度特性、寸法安定性、耐久性に優れ、かつ軽量であるという特徴を生かし、建築二次部材の中でも特にカーテンウォールとしてこれまで多く使用されてきた。

CFRC製カーテンウォールが開発された当初は、カーテンウォール四周の断面を厚くすることにより補強したリブ方式の構造が採用されていた。しかしながら、靱性・強度が高いCFRCにおいては、通常のコンクリートとは異なり薄いパネル状とすることが可能である。この特徴を生かして、パネルの裏面をリブではなくスチールフレームによって補強した方式のカーテンウォールを考案した。この方式を用いたカーテンウォールの特長は、CFRC部分が等厚断面になるためパネル部材内の寸法変化が均一となり、亀裂の発生防止の点から有利であること、パネルの大型化が容易なこと、リブ方式よりも重量が低減できることおよび型枠・配筋・製造が簡略化されることなどが挙げられる。

一方、従来のCFRCは、寸法安定性確保のためにオートクレープ養生を行っていたために、石やラスタータイルの先付けが困難であ

った。また、スチールフレーム方式のカーテンウォールを製造するとすれば、オートクレープ養生の後にフレームをパネルに取り付けねばならず、大きな手間がかかるのが難点と推測された。

以上のことから、オートクレープ養生を不要とし、石先付けを可能とするスチールフレーム方式のCFRC製カーテンウォールを開発することを目標に、以下に示す一連の実験研究を実施した。

2 低収縮セメントを用いたCFRCの物性試験

2.1 試験の目的

事前に、低収縮セメントを用いたCFRCに関して最適と考えられる調査を決定するために、各種の調査を検討し基礎物性試験を行った。その結果から決定した比重の異なる二つの調査について最終的に物性の確認を行った。

2.2 供試体

2.2.1 使用材料とCFRCの割合

試験に使用した炭素繊維・セメント・骨材の性質を表1～表3に、CFRCの割合を表4に示す。

2.2.2 練り混ぜ・成形・養生方法

CFRCの練り混ぜにはオムニミキサを使用した。供試体は成形後、図1に示すように40℃で蒸気養生を行い、約20時間で脱型し、

*1 鹿島技術研究所 主任研究員
*2 鹿島技術研究所 専門部長
*3 鹿島技術研究所 主管研究員
*4 鹿島技術研究所 主任研究員
*5 鹿島技術研究所 研究員
*6 (株)エフ・アール・シー 副社長・工博

*1 Kajima Technical Research Institute
*2 Kajima Technical Research Institute
*3 Kajima Technical Research Institute
*4 Kajima Technical Research Institute
*5 Kajima Technical Research Institute
*6 F・R・C Corporation, Dr. Eng.

表1 炭素繊維の性質

炭素繊維 の種類	繊維形状			比重	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)	伸度 (%)
	直径 <d> (μm)	長さ <ℓ> (mm)	アスペクト比 (ℓ/d)				
ビッチ系	18.0	6.0	333	1.63	78	3.8×10^3	2.1

表2 セメントの性質

種類	化学成分 (%)					物理的性質	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	比重	比表面積
低収縮セメント	23	11	1	48	9	2.96	4500cm ² /g

表3 骨材の性質

骨材の種類	化学成分 (%)			物理的性質	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	その他	比重	粒径 (μm)
粉末珪石	95.0	2.2	2.8	2.7	0~80
シラスパルーン	67.0	14.0	19.0	1.0	0~150

表4 CFRC の調合

調合	水セメント比 (%)	計画繊維 混入率 (Vol %)	骨材・セメント比 (S/C)	骨材の種類	混和剤 の種類
A	47.3	2.0	0.254	粉末珪石	増粘剤・消泡剤
B	73.3		0.427	シラスパルーン・粉末珪石	凝結調節剤

※ S:骨材 (重量), C:セメント (重量)

※ 調合Bのシラスパルーンと粉末珪石との割合は、重量比で 1:2.09

図1 蒸気養生の温度履歴

その後 20°C・60%RH 条件室に試験まで静置した。

2.2.3 供試体の形状

圧縮試験の供試体の形状は、50φ×100 mm、曲げ試験および長さ変化試験の供試体の形状は 40×40×160 mm とした。

2.3 試験方法

2.3.1 フレッシュ CFRC

フレッシュ CFRC の特性を確認するために、CFRC の練り上がり直後にフロー試験を JIS R 5201 に、単位容積重量試験を JIS A 1116 に準じてそれぞれ行った。なお実績繊維混入率は、CFRC の単位容積重量と各材料の比重から計算で求めた。

2.3.2 硬化した CFRC

硬化した CFRC の特性を把握するために圧縮・曲げ・長さ変化試験を行った。

a. 圧縮試験：100 ton オートグラフ試験機を用い、クロスヘッドスピード 0.5 mm/分の変位制御で、材令 28 日にて試験を行った。

b. 曲げ試験：2 ton オートグラフ試験機を用い、クロスヘッドスピード 2.0 mm/分の変位制御で、材令 28 日にて試験を行った。なお、載荷方式はスパン 100 mm の中央集中載荷とした。

c. 長さ変化試験：JIS A 1129 (コンパレータ方法) に準じて行

った。供試体を脱型後直ちに基長を測定し、その後所定材令にて測定を行った。なお測定期間中、供試体を 20°C・60%RH 条件室に静置した。

2.4 結果と考察

2.4.1 フレッシュ CFRC

試験結果を表5に示す。

表5 フレッシュ CFRC の特性

調合	実績繊維混入率 (Vol %)	練り上がり温度 (°C)	フロー値	単位容積重量 (kg/ℓ)
A	2.07	31.5	161	1.78
B	2.03	27.0	159	1.58

2.4.2 硬化した CFRC

強度試験結果を表6に示す。A 調合は B 調合に比べて圧縮強度および曲げ強度が約 1.6 倍大きかったが、これは水セメント比の違いによる影響が大きいと思われる。

長さ変化試験結果を図2に示す。両調合の CFRC と、初期材令にて膨張し、材令 5 日前後にてそのピークをむかえた。このように初期に膨張を起こすのは、低収縮セメントが水和の初期にエトリンガイトを生成し、膨張を起こすためである。なお A 調合は、B 調合に比べて膨張量が大きく、また材令 20 週における収縮量は小さい。

一方、従来の CFRC は 20°C・60%RH 条件室に静置した場合に、長期材令における長さ変化率は凡そ $-4 \sim -6 \times 10^{-4}$ である⁴⁾。それに対して低収縮セメントを用いた CFRC も、図2からわかるように長期材令における長さ変化率は $-4 \sim -6 \times 10^{-4}$ にほぼ収まると思われる。したがって、低収縮セメントを用いた CFRC の長さ変化率 (乾燥収縮率) はオートクレープ養生を行った従来の CFRC とほぼ同等であると言える。

表6 CFRC の強度試験結果

調合	気乾比重	圧縮強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)
A	1.66	319	166
B	1.29	196	99

※ 強度は3体の供試体の平均値

図2 長さ変化率と材令との関係

3 シアコネクター引き抜き実験

3.1 実験の目的

CFRC カーテンウォールは、従来の PC (プレキャストコンクリート) カーテンウォールに比べて薄肉である。石先付け仕上がり場合には、シアコネクターの形状で CFRC の最小厚みが制限される。本実験では CFRC の厚みを 60 mm として、これに対応した小型のシ

アコネクターを2種類試作し、引き抜き実験を行いその耐力を確認した。

3.2 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表7に示す。

表7 シアコネクター引き抜き実験の要因と水準

要因	水準
シアコネクターの形状	i) 2重バネ型 ii) ハンガー型 (図3参照)
石材(花崗岩)の種類	i) 稲田石(国産) ii) ピンクポリーノ(スペイン産)
	iii) カバオポニート(ブラジル産)
	iv) ベルファースト(南アフリカ産)
石材の厚み	i) 25mm ii) 35mm
CFRCの調合	i) A調合 ii) B調合 (表4参照)

※ 調合A, Bとも繊維の長さは4.5mm

3.3 供試体

実験に用いた2種類のコネクターの形状・寸法を図3に示す。

石材の裏面は通常は裏面処理材により処理されるが、本実験では石材とCFRCの界面での付着が切断された場合を想定して、厚さ0.15mmのビニールシートを敷き込んだ。

供試体は、型枠底面に、コネクターを取り付けた石材をセットし、その上にCFRCを打設して成形した。供試体の形状・寸法を図4に示す。

1次養生は図1に示す方法で行った。その後、供試体を実験まで屋内に静置した。

図3 シアコネクターの形状・寸法

図4 シアコネクター引き抜き実験の供試体の形状・寸法

3.4 実験方法

実験は、石材に鋼製のアタッチメント(100×100×10mm)を接着剤で貼り、建研式接着力試験機(最大能力2ton)を使用して、CFRCの材令28日にて行った。なお一部の供試体については、段階的な破壊性状を確認するために10tonインストロン試験機を用いて、クロスヘッドスピード2.0mm/分で載荷し、荷重と変位との関係を同機のレコーダーに記録した。

3.5 結果と考察

実験結果を図5に示す。石材の種類による耐力の違いはほとんど見られなかった。石材の種類が同じ場合には、2重バネ型、厚み25mm、調合Aの方がそれぞれハンガー型、厚み35mm、調合Bに比べて平均で5~10%大きな耐力を示した。また、どの供試体も、コネクター用穴部の初期破壊時が荷重の最大値(耐力)となったことから、コネクターの耐力はほとんどが石材の母材強度によって決定したと言える。

シアコネクター引き抜き実験における荷重と変位との関係(代表例)を図6に示す。この図からシアコネクターは、荷重の最大値を示した後に引き抜けるまで大きな靱性を持つことがわかる。

図5 シアコネクター引き抜き実験結果

図6 シアコネクター引き抜き実験の荷重と変位との関係

4 スチールフレーム方式CFRCカーテンウォールの製造・暴露実験

4.1 実験の目的

実物大の石先付け仕上げのスチールフレーム方式CFRCカーテ

ンウォールを大・小2体製造し、製造上の問題点を洗い出し、さらに屋外暴露実験を行って反り等の観測を行い、その性状を確認した。

4.2 供試体

供試体（カーテンウォール）の形状・寸法を図7、図8に示す。

石材の裏面は、通常の石先付けPC（プレキャストコンクリート）カーテンウォールと同様に、裏面処理材（弾性エポキシ樹脂）を施しエフロレッセンス防止用の防水層をつくると共にCFRCと石材とを絶縁し、CFRCと石材との挙動の違いによる影響を防止した。

4.3 製造実験

4.3.1 製造方法

供試体の製造は次の手順で行った。

① 打設準備：型枠準備、石材配置、メッシュ敷き込み、スチールフレームの配置

② 打設：ホッパーによりCFRCを打設

③ 1次養生：図1参照、但し蒸気養生時間（最高温度保持時間）は、供試体①：17時間（40℃）、供試体②：15時間（40℃）

④ 2次養生：日射・通風を避けるため、材令7日までシート掛け

4.3.2 結果と考察

製造に関しては、従来のCFRCカーテンウォールあるいは石先付けPCカーテンウォールに関する技術でほぼ対応できた。将来における製造効率上の若干の課題は残ったが、特に支障となるような問題点は見られず、実際の製造に向けての基礎データを得ることができた。

4.4 暴露実験

4.4.1 実験方法

2次養生後に供試体①、②を埋め込みインサート部分が支持点になるように、水平に並べたH形鋼の上に水平に静置して屋外に暴露した。その後、供試体①は材令6カ月、供試体②は材令2カ月に架台に取り付け、南向きに垂直な状態でさらに暴露を続けた（写真

1参照）。また、所定材令にて、供試体の反りの計測及び外観の観察を行った。なお、反りの計測は供試体の近くに設けた不動点間にピアノ線を張り、ピアノ線と石材との間隔を測定して行った。

写真1 垂直暴露状況

4.4.2 結果と考察

垂直暴露用の架台に取り付けた直後は、カーテンウォールファスナーによって反りが幾分か拘束されるため、水平時よりも反りは小さかった。

材令1年において、供試体の最大変形量（ δ ）は供試体②で2.4mmであり、供試体長辺寸法（ l ）に対する変形率（ δ/l ）は1/1593と小さかった。なお、供試体①は寸法が②より小さいため、反りはさらに小さかった。また両供試体とも、ひびわれの発生、石材のしみや汚れ等の異状は全く見られなかった。

今回の実験では、両供試体ともカーテンウォールパネル端部における反りは短辺方向に比べて、長辺方向の方が小さかった。これは

図7 供試体①の形状・寸法

図8 供試体②の形状・寸法

長辺方向の方が埋め込みインサートの間隔が小さく、スチールフレームによる拘束が大きかったためと考えられる。したがって、短辺方向のインサートを増設しその間隔を小さくすることによって、変形（反り）をさらに小さくすることが可能であると推測される。

5 スチールフレーム方式 CFRC カーテンウォールの面外変形実験

5.1 実験の目的

石先付け仕上げのスチールフレーム方式 CFRC カーテンウォールに、風荷重を想定した等分布負圧を静的に加え、変位・ひずみ度の測定を行い、その性能の確認を行った。

5.2 供試体

面外変形実験に用いた供試体は、製造実験で製作した供試体①(図7参照)と全く同一の仕様である。

なお、この仕様における供試体の設計風荷重 P_w は、建物の想定高さを 35.7 m として、(1)式に示すように負圧で 440 kgf/m² である。

$$P_w = 120^4 \sqrt{35.7} \times (-1.5) = -440 (\text{kgf/m}^2) \quad \cdots \cdots (1)$$

5.3 実験方法

実験装置の概要を図9に示す。供試体を反力フレーム(H-300×300)に4個のカーテンウォールファスナーを用いて吊り下げ、その上部に反力フレームによって支持された底のない鋼製水槽枠(内面ビニール袋張り)を組み立て、実験装置とした。したがって実験は、スチールフレームを除いた供試体の自重(170 kgf/m²)が常時、供試体に載荷された形で行った。

図9 面外変形実験装置の概要

図11 荷重と変位との関係

加力は、供試体の CFRC の材令が 45 日のときに実施し、水槽内に注水し、水圧による等分布荷重によって行った。なお加力は図10に示すように3サイクルを行った。実験状況を写真2に示す。

図10 面外変形実験の加力サイクル

写真2 面外変形実験

5.4 結果と考察

荷重と変位との関係を図11に示す。供試体中央部の変位は、1.0 P_w , 3.0 P_w , 3.4 P_w 載荷時にそれぞれ、1.31 mm, 4.98 mm, 5.72 mm だった。また、実験後の残留変位は 0.42 mm であり、供試体長辺方向に対する変形率は 1/6533 だった。よって供試体は、非常に弾性に富み、復元力が大きいという特性を示したと言える。

荷重とひずみ度との関係を図12に、各材料のひずみ度を表8に示す。3.4 P_w 載荷時においても、各材料のひずみ度は、その降伏比

図12 荷重とひずみ度との関係

表8 面外変形実験における各材料のひずみ度

材 料 名	a 降伏(比例限界)時の 概略のひずみ度($\times 10^{-6}$)	測定箇所 (図12参照)	測定値: ひずみ度($\times 10^{-6}$)			計算値(%)		
			b 設計荷重(P_w)時	c 最大荷重($3.4 P_w$)時	d 除荷時	b/a	c/a	d/a
石材(花崗岩)	+ 260	1	+ 25	+102	0	9.6	39.2	0.0
C F R C	-2000	2	- 57	-186	- 58	2.9	9.3	2.9
		3	-100	-430	- 2	5.0	21.5	0.1
スチール (SS41)	-1950	4	- 78	-292	- 5	4.0	15.0	0.3

例限界) 時のひずみ度に比較して十分に小さかった。

今回の実験においては、供試体の石材面(表面)ならびにCFRC面(裏面)ともにひびわれは発生しなかった。また、石材と目地材、及び石材とCFRC界面での縁切れによるクラックの発生も見られなかった。さらに、スチールフレーム、カーテンウォールファスナー部分、並びにインサート部分にも全く異状は認められなかった。したがって、供試体は設計荷重に対して十分安全であると共に、設計上、十分な余裕を持つことが確認された。

6 適用事例

低収縮セメントを用いたCFRC及び石先付け仕上げのスチールフレーム方式CFRCカーテンウォールについて一連の研究開発を行い、a)CFRCの物性、b)シアコネクタの引き抜き性状、c)カーテンウォールの製造・暴露・面外変形性能について満足なデータが得られ、現場適用が可能であるという確信を持った。

その後、スチールフレーム方式CFRCカーテンウォールは石材、タイル、塗装等の仕上げを施され、T 歯科大ビル(花崗岩先付け仕上げ4140 m^2)、東京都E博物館(フッ素樹脂塗装仕上げ11900 m^2)、大手町Nビル(花崗岩先付け仕上げ5300 m^2)、Sガーデンビル(フッ素樹脂塗装仕上げ50000 m^2)をはじめとして、多くの建物に適用されている。

なお、実際の建物に適用されていくなかで、性能の向上・コストダウンが図られており、現在では、CFRCの厚みは通常は50mmである。また、スチールフレームや埋め込みインサートの形状にも改良が加えられている。

写真3 適用事例

7 今後の展開

7.1 高性能収縮低減材を用いたCFRC

現在使用している低収縮セメントを用いたCFRCは、蒸気養生が必要である。一方、蒸気養生が不要な高性能収縮低減材を用いたCFRCの開発を、実用化の直前まで進めている。

高性能収縮低減材は、主成分がカルシウムアルミネート系鉱物と無機硫酸塩であり、普通ポルトランドセメントと組み合わせて全結合材量に対して約20%を混入して用いる混和材である。この混和材を用いたCFRCは、蒸気養生を行うことなく材令1日で脱型強度が確保できる早強性がある。また、混和材タイプのため、遠隔地でCFRCを製造する場合に輸送上のメリットも期待できる。

7.2 合成高分子系炭素繊維を用いたCFRC

従来の炭素繊維とは異なり、合成高分子系炭素繊維は繊維直径が30 μm までの太径の繊維も製造可能である。また、繊維の長さ・直径の寸法精度が高い、ぬれ性が良い、繊維の製造工程がシンプルなため繊維のコストの低減が期待できる等の特徴がある。これらの特徴を生かして、繊維長(l)と繊維径(d)との組み合わせの中から、最適なアスペクト比(l/d)を選択し、スチールフレーム方式のカーテンウォールに適した、流動性が良く繊維の補強効率の高いCFRCを現在開発中である。

8 おわりに

現在でもパネルの形状や使用部位によってはリブ方式の方が適切な場合もあり、その際はリブ方式が使用されている。ただし、製造されているCFRCカーテンウォールの3分の2以上がスチールフレーム方式を採用している。また現在CFRCはカーテンウォールだけでなく、屋根、軒天井、笠木を始め建築二次部材の広い範囲で適用が進められている。

なお、高性能収縮低減材を用いたCFRCは電気化学工業(株)との、合成高分子系炭素繊維を用いたCFRCは三井鉱山(株)とのそれぞれ共同研究によるものである。

参考文献

- 1) 秋浜, 末永, 若山, 中川, 谷口: 本石打込みCFRC(炭素繊維補強コンクリート)カーテンウォールの開発研究(その1), 鹿島建設技術研究所年報, 第36号, pp. 47~54, 1988.6
- 2) 武井, 末永, 依田: 高性能収縮低減材を用いた炭素繊維補強コンクリート(CFRC)の諸特性及び水和反応機構, 鹿島建設技術研究所年報, 第41号, pp. 33~38, 1993.10
- 3) 武井, 小林, 末永, 谷口: 合成高分子系炭素繊維を用いたCFRCの特性, 鹿島建設技術研究所年報, 第42号, pp. 59~64, 1994.10
- 4) 秋浜: 炭素繊維補強コンクリート(CFRC)一特性と適用事例一, 建築技術, No. 412, pp. 139~148, 1985.12

[1995年6月30日原稿受理 1995年8月25日採用決定]