鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた鉄骨接合構法に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON A CONNECTION FOR STEEL STRUCTURES USING STEEL FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITE

田邊裕介 ——— * 1 石川裕次 ——— * 2
藤井英二 ——— * 3

Yusuke TANABE ——— * 1 Yuji ISHIKAWA ——— * 2
Eiji FUJII ——— * 3

キーワード：
鋼繊維補強セメント系複合材料, 鉄骨接合, 曲げ試験,
自由曲面鋼構造

Keywords:
Steel fiber reinforced cementitious composite, Connection of steel members, Bending test, Free-form steel structure

In this paper, a new connection for free-form steel structures using FRCC (Fiber-Reinforced Cementitious Composite) is proposed. The connection is an improved version from the previous one proposed by the authors. Firstly, basic material characteristics of FRCC using high strength mortar and two types of steel fibers are investigated through compression and bending tests. Then a full-scale connection composed of the FRCC, stud-welded rebars and shear connectors is constructed and subjected to cyclic bending. It is shown that the connection is capable of transmitting nearly half the bending capacity of the connected steel members. During the test, bond stress distribution of a stud-welded rebar to the FRCC is observed in detail.

1. はじめに

近年, 屋根やファサードに幾何学的な規則性を持たない曲面, いわゆる自由曲面を用いた建築物が増加している。こうした自由曲面は RC シェルや鋼構造単層ラチスで構成されることが多いが, 特に後者の場合, 鉄骨部材が多様な角度で取り合うため接合部が複雑になりがちで, 全体のコストに少なからず影響を与える。

複雑な鉄骨接合部を簡便に構築するのに, 繊維補強セメント系複合材料¹⁾(FRCC: Fiber Reinforced Cementitious Composite)が有効な手段となる可能性がある。引張強度や靱性に優れた FRCC を用いた鉄骨接合構法は多く提案されているが^{例えば 2)~4)}, 著者らはさらにその造形の容易さに着目し, 自由曲面鋼構造に適した鉄骨接合構法 (FRCC 接合) を既報⁵⁾で提案した。これは, FRCC や定着板付きスタッド鉄筋によって接合部を構築するもので, 異なる鉄骨部材のフランジ間を溶接で繋げる必要がないため, 多様な取り合い角度に比較的容易に対応することができる。既報では, 静的漸増繰り返し曲げ試験や FEM 解析を実施して接合部の基本的力学特性や接合効率 (鉄骨母材に対する接合部の耐力の比) を明らかにしたが, スタッド鉄筋の付着特性等, 未解明な部分も残った。また, 鉄骨端部に設けたエンドプレートと FRCC との界面において比較的大きな離間が生じる等, 改善すべき点も見られた。

そこで本稿では, FRCC 接合の改良案を提示し, その基本的力学特性を実験によって調べる。まず 2 章では, 既報における FRCC 接合の構成および試験結果の概要を示した上で, 本稿の改良案の構成を説明する。3 章では, FRCC 材料の圧縮試験および曲げ試験を行った結果を示す。4 章では, FRCC 接合(改良案)の実大試験体を用

いた静的繰り返し曲げ試験を実施した結果を示す。試験では, スタッド鉄筋の付着特性も調べた。5 章は全体のまとめである。

2. FRCC 接合の構成

2.1 既報⁵⁾の FRCC 接合

図 1 に, 既報で提案した FRCC 接合の構成を示す。複数の鉄骨部材 (もしくはブラケット) の端部に, 定着板付きのスタッド鉄筋を予め取り付けけたエンドプレート (エンド PL) を溶接し, 上下から鉄筋格子を配し, FRCC を打設するものである。スタッド鉄筋は接合部中心 (部材軸交点) 付近で所定の間隔をもって突き合わせて配置し, 圧接等は行わない。なお, 図中②-④方向のスタッド鉄筋は①-③方向の内側に配しているため, 部材方向によって曲げ性能は異なる。

この FRCC 接合の①-③方向について静的漸増繰り返し曲げ試験を実施したところ, 弾性剛性は鉄骨とほぼ同等 (初期載荷時) かやや低め (繰り返し載荷時) で, 曲げ降伏耐力 (実験値) は鉄骨母材 (SN490 規格値) の 34% であった。降伏後は FRCC とエンド PL の界面において離間が顕著となり, スタッド鉄筋の根元側が塑性化して破断に至った。塑性化範囲に影響を与える, スタッド鉄筋と FRCC との間の付着特性は明らかにできなかった。なお, 弾性範囲において鉄筋格子に発生する応力は僅かで, スタッド鉄筋の無い接合部中央面におけるモーメントのほとんどは, FRCC が負担していた。

2.2 FRCC 接合の改良案

図 2 に, 本稿で提案する FRCC 接合の構成を示す。基本的な構成は図 1 を踏襲しているが, 新たに埋込 PL およびシアコネクタを設けた。これはエンドプレートと FRCC の離間抑制および接合効率の

¹⁾ ㈱竹中工務店技術研究所 研究員
(〒270-1356 千葉県印西市大塚 1-5-1)

²⁾ ㈱竹中工務店技術研究所 主任研究員・博士 (工学)

³⁾ ㈱竹中工務店先進構造エンジニアリング本部 博士 (工学)

¹⁾ Researcher, Research & Development Institute, Takenaka Corporation

²⁾ Chief Researcher, Research & Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

³⁾ Advanced Structural Engineering Dept., Takenaka Corporation, Dr. Eng.

(a) 各部の構成

(b) 完成時

図 1. FRCC 接合(既報)

(a) 各部の構成

(b) 完成時

図 2. FRCC 接合(改良案)

向上を図っている。シアコネクタには、高強度(S45C)の全ねじボルトとナットを用い、接合部の組立を容易にしている。既報で接合部中央での効果を期待していた鉄筋格子は、力の負担割合が小さかったため省略した。なお改良案では、接合部中央面における応力伝達を FRCC および交差方向の追加した埋込 PL のシアコネクタの軸力によって行う。なお、この改良案では①－③方向および②－④方向のスタッド鉄筋の間隔を等しくした上で、上下方向にずらして配置しているので、各方向の曲げ耐力に差異が生じることはないが、正曲げと負曲げで若干の差異が生じる。

3. FRCC 材料の特性

本章では、次の 4 章で用いる FRCC 材料について圧縮試験および曲げ試験を行い、FRCC の基礎性状の把握を行った。

3.1 材料仕様

本稿で用いる FRCC 材料は、写真 1 に示すフック付鋼繊維(鋼繊維 H)と細径ストレート鋼繊維(鋼繊維 S)をそれぞれ 1.0Vol.%ずつ高強度モルタルに混入したハイブリッド型 FRCC である。繊維量の 2.0Vol.%は、施工実験を行い引張強度および施工性を考慮して決定した。表 1 に鋼繊維の仕様を、表 2 にモルタルの配合等を示す。鋼繊維 H と鋼繊維 S がそれぞれ異なる引張ひずみ領域で架橋効果を発揮するため、広いひずみ範囲で引張力を保持することができる⁵⁾。

3.2 圧縮試験結果

圧縮試験は JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」⁶⁾に

写真 1. 鋼繊維

表 1. 鋼繊維の仕様

略称	長さ (mm)	直径 (mm)	アスペクト比	引張強度* (N/mm ²)	混入量 (Vol.%)
鋼繊維 H	30	0.38	79	2200+	1.0
鋼繊維 S	13	0.16	81	2200+	1.0

※メーカー規格値

表 2. モルタルの配合等

W/B (%)	S _F /B (%)	空気量 (%)	養生方法	養生期間
14	15-20	2.0	現場封緘	8 週

W: 水, B: C+S_F, C: セメント, S_F: シリカフェューム

図 3. 圧縮試験結果

図 4. 曲げ試験方法

従って実施した。供試体寸法は直径 100mm×高さ 200mm で、供試体数は 3 体とした。図 3 に試験結果を示す。応力-ひずみ関係は最大耐力に到達するまではほぼ線形で、通常の高強度コンクリートに見られる破壊時の飛散はほとんど認められなかった。3 体の平均をとった圧縮強度は $f_c' = 175 \text{ N/mm}^2$ 、ヤング係数は $E_c' = 4.49 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ で、ばらつきも小さかった。ポアソン比は約 0.24 で、低応力域および高応力域ではそれよりやや大きな値となった。

3.3 曲げ試験結果

曲げ試験は、JCI 規準「繊維補強セメント系複合材料の曲げモーメント-曲率曲線試験方法」⁷⁾に従った 3 等分点 2 点荷重曲げ試験とした(図 4)。供試体寸法は 100mm×100mm×400mm で、供試体数は 3 体とした。

荷重中はまず、複数の微細なひび割れ(幅: 0.04~0.06mm)が発生し、その内 2~4 本が成長して最大荷重に到達した。写真 2 に No. 1 試験体の最大荷重時の状況を示す。その後は 1 本のひび割れが卓越して伸展し、緩やかに荷重が低下した。図 5 に曲げ応力-曲率関係を示す。ここに曲げ応力は、荷重荷重から求めたモーメントを供試体全断面の断面係数で除した値であり、ひび割れ下で実際に発生する縁応力とは異なる。3 体の平均をとった最大曲げ応力は $f_b' = 26.6 \text{ N/mm}^2$ で、上記 JCI 規準に従って算出した換算引張強度は $f_{teq} = 9.8 \text{ N/mm}^2$ 、換算引張終局ひずみは $\epsilon_{teq} = 1.2\%$ となった。図 6 には試験体 No.1 の中立軸位置 z_n の履歴を示す。これは、図 4 中の 2 つの軸方向変位計の計測値から、平面保持を仮定した上でひずみが

写真 2. 最大曲げ応力時の状況

図 5. 曲げ応力-曲率関係

図 6. 中立軸位置

0 となる位置を算出したものである。初期ひび割れ発生までは、 z_n は試験体せいど中心である 50mm 付近を推移したが、ひび割れの成長とともに試験体上方へと移動した。最大曲げ応力時は $z_n = 85 \text{ mm}$ (3 体の平均)で、上記 JCI 規準に基づき算出した計算値 88mm と良好な整合性を示した。

4. FRCC 接合の曲げ試験

本章では、図 2 に示した FRCC 接合(改良案)の実大試験体について静的繰り返し曲げ試験を実施した結果を示す。

4.1 接合部試験体

図 7 に試験体図を示す(図中の▼は後述)。定着板付きスタッド鉄筋 D19 の定着長は 220mm(約 12D)とし、中央の突き合わせ部では 20mm の間隔を設けた。鋼材の材料試験結果を表 3 に示す。FRCC の材料特性は 3 章で示した通りである。

4.2 荷重方法

図 8 に荷重方法を示す(試験体の上下が図 7 と逆であることに注意)。中央で FRCC 接合した梁状の試験体をスパン $2L=2300\text{mm}$ で単純支持し、支持点から各 $l=460\text{mm}$ だけ中央寄りの 2 点で油圧ジャッキによって荷重した。荷重は 2 つのジャッキ反力がほぼ同じ値となるよう調整しながら行い、試験体中央部の変位 u_c と支持点変位 u_s から求める変形角 $R=(u_c-u_s)/L$ で制御した。荷重履歴は $R=\pm 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10, 5.0, 15, 20 \times 10^{-3}\text{rad}$ の正負交番繰り返し荷重とし、繰り返し回数は各 R について 2 回とした。

4.3 試験結果

(1) 破壊経過

最初の繰り返し荷重 $R=\pm 0.5 \times 10^{-3}\text{rad}$ では、FRCC の表面にひび割れは視認できなかった。次の $R=\pm 1.0 \times 10^{-3}\text{rad}$ の時にエンド PL と FRCC の界面に微小な離間が認められ、さらに $R=\pm 2.5 \times 10^{-3}\text{rad}$ へ向かう途中の $R=1.5 \times 10^{-3}\text{rad}$ 付近では、スタッド鉄筋が突き合わせられている(すなわち、スタッド鉄筋が存在しない)接合部中央に

ひび割れが生じた。この時、交差方向の埋込 PL 周りに微小な離間が認められた。 $R=\pm 5.0 \times 10^{-3}\text{rad}$ では、中央に生じたものとは別の新たなひび割れが円弧状に分布し始めた。 $R=\pm 7.5 \times 10^{-3}\text{rad}$ を経て $R=+10 \times 10^{-3}\text{rad}$ では、繊維が抜け出す音と共に中央のひび割れが開いた(写真 3)。その後の $R=\pm 15, 20 \times 10^{-3}\text{rad}$ では、FRCC 上面および下面に円弧状に分布したひび割れが大きく成長して上下方向に繋がり、耐力をほぼ喪失した。最終的な破壊状況を写真 4 に示す。

(2) 荷重－変形角関係

図 9 に荷重 P －変形角 R 関係を示す。 P は 2 つのジャッキ反力の平均値で、接合部に作用するモーメントは $M=Pl$ である($l=460\text{mm}$)。図中には、鉄骨のみの(FRCC 接合部を鉄骨に置き換えて算出した) P

表 3. 鋼材の材料試験結果

部位	寸法	材質	機械的性質※1)				
			f_y (N/mm ²)	ε_y (μ)	$E(\times 10^5)$ N/mm ²	f_u (N/mm ²)	ε_u (%)
スタッド鉄筋	D19	SD345	400	2020	1.98	533	19.6
シアコネクタ	M16	S45C-H	762	4000	1.91	885	—※2)
エンド PL	t 22	SN490	373	1810	2.06	537	31.1
埋込 PL	t 16	SN490	369	1840	2.00	547	26.9
鉄骨	t 8	SN490	410	1980	2.07	558	35.4
	t 12		375	1820	2.06	548	41.4

※1) f_y : 降伏応力, ε_y : 降伏ひずみ, E : ヤング係数, f_u : 引張強度, ε_u : 伸び
 ※2) 計測データなし

(a) 伏図

(b) 立断面図

図 7. 接合部試験体図

(a) 荷重装置

▲: +荷重時の荷重点・支持点
 △: -荷重時

(b) 荷重点および支持点

図 8. 荷重方法

写真 3. $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時の状況

写真 4. 最終破壊状況

— R 関係をあわせて示す。 $|R| \leq 2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ もしくは $|P| \leq 175 \text{kN}$ の範囲で、FRCC 接合を含む梁全体の剛性は梁全体を鉄骨のみとした剛性とほぼ同等であった。なお鉄骨のみの剛性算出時にはせん断変形を考慮した。 $|R| > 2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ ではひび割れの進行に伴って剛性が低下したが、明確な降伏点は認められなかった。 $R=+7.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ で P は最大値 $P_{\text{mx}}=274 \text{kN}$ (モーメント換算値で $M_{\text{mx}}=P_{\text{mx}} l = 126 \text{kNm}$) を記録し、以降の繰り返しでは徐々に低下した。鉄骨母材の全塑性モーメント $M_p=274 \text{kNm}$ (規格値) に対する M_{mx} の割合、すなわち終局曲げ接合効率率は 46% となった。この値は図 7(a) の交差方向にも共通であり、既報の FRCC 接合 (降伏曲げ接合効率で 34%, 交差方向はさらに小) から大幅に性能を向上させることができたと言える。なお、正曲げと負曲げで荷重の最大値には大きな差異は認められなかったが、その後の履歴ループは正曲げ時の方がやや大きかった。これは、負曲げより正曲げを先に載荷することや、正曲げ時に引張側 (図 7(b) における下側) となるスタッド鉄筋の方がかぶり厚さが大きいことに起因すると考えられる。限界変形角は 2 回目のサイクルで荷重が大きく下がり、ひび割れも大きく開いた $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ とした。FRCC 接合部の中立軸位置は、最大耐力時にせいの 0.75 倍の位置であり、スタッド鉄筋と埋込み PL の影響から材料実験の位置より、中央寄りとなった。破壊のきっかけとなる上下に連結したひび割れ近傍にあるスタッド鉄筋に貼付したひずみ値からスタッド鉄筋の負担力を求めると、スタッド鉄筋は約

(a) $R=0 \sim \pm 5.0 \times 10^{-3} \text{rad}$

(b) $R=0 \sim \pm 20 \times 10^{-3} \text{rad}$

図 9. 荷重 P —変形角 R 関係

図 10. 離間量 δ —変形角 R 関係

60%程度の力を負担しており、残りを FRCC と直交方向の埋込み PL の高強度ボルトの軸方向力で負担したと考えられる。

(3) FRCC とエンド PL の界面の離間

図 10 に、FRCC とエンド PL の界面の離間量 δ と変形角 R の関係を示す。ここに δ は FRCC 表面から 40mm 離れた位置に設けた変位計の計測値で、実際の離間量よりはやや大きい。 δ は $R=+5.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ の時に最大値 0.23mm をとった。これを変位計からその反対側の FRCC 表面までの距離 374mm で除すと $R'=0.6 \times 10^{-3} \text{rad}$ となり、離間による変形角が全体の変形角に占める割合は 8% となった。改良

図 11. スタッド鉄筋の軸方向応力 σ_a

図 12. スタッド鉄筋軸部の付着応力 τ_b

案の目的の一つであった離間の抑制は十分に達成されたと言える。なお、 $R > 5.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ では δ は逆に小さくなったが、これは FRCC 中央および円弧状に分布したひび割れに変形が集中したためである。

(4) スタッド鉄筋の応力

図 11 に、図 7 で▼を付したスタッド鉄筋の軸方向応力 $\sigma_a(x)$ の推移を示す。ここに $\sigma_a(x)$ は、スタッド鉄筋の上下に施した溝に 40mm 間隔で貼付したひずみゲージの計測値を、上下で平均した上で、ヤング係数を乗じて算出した。 x はひずみゲージの接合部中央からの距離で、 $x=40, 80, 120, 160, 200 \text{mm}$ である。いずれの変形角 R においても、 $\sigma_a(x)$ は根元(エンド PL 側、 x は大)から先端(接合部中央側、 x は小)に近づくほど小さな値となったが、最も先端側の $\sigma_a(40)$ でも比較的大きな値を維持した。これはスタッド鉄筋の定着板の効果である。荷重 P が最大となった $R=7.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ においては、根元側で $\sigma_a(200)=323 \text{N/mm}^2$ 、先端側で $\sigma_a(40)=157 \text{N/mm}^2$ となっており、定着板がスタッド鉄筋軸力の 49%(降伏応力規格値 345N/mm^2 に対しては 46%)を負担したことがわかる。

図 12 にはスタッド鉄筋軸部の付着応力(もしくは付着破壊後の摩擦応力) τ_b の推移を示す。これは、図 11 の x の各区間の軸方向応力の傾き $\Delta\sigma_a/\Delta x$ にスタッド鉄筋の断面積を乗じ、周長で除したもので

ある。 $R=+1.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ と小さい範囲では、 τ_b は先端側より根元側で大きかったが、徐々にその関係は逆転した。これは、 R の増加に伴って根元側で付着破壊が進行したためと推察される。その後、 τ_b は $R=+7.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ の時に先端側で最大値 8.8N/mm^2 をとり、 $R=+10 \times 10^{-3} \text{rad}$ で減少に転じた。このことから、本稿で用いたスタッド鉄筋と FRCC については、付着強度は $\tau_{bu}=8.8 \text{N/mm}^2$ であったと考えられる。なお、根元側では τ_b が τ_{bu} に達しないまま低下に転じたが、これは根元付近ではスタッド鉄筋に曲げ応力が生じることが一因と考えられる。

5. まとめ

本稿では、繊維補強セメント系複合材料(FRCC)を用いた簡易な鉄骨接合構法を提案し、その基本的曲げ特性を実験によって調べた。得られた主な成果および知見は次の通りである。

- 1) FRCC、定着板付きスタッド鉄筋、全ねじボルトを用いたシアコネクタ等によって鉄骨を接合する構法(FRCC 接合)を提案した。
- 2) FRCC 接合部の実大試験体を対象に静的繰り返し曲げ試験を実施し、同接合部が鉄骨の終局曲げ耐力の 46%を伝達できることを確認した。接合剛性は、弾性領域ではほぼ剛(鉄骨と同等)で、塑性領域においても FRCC と鉄骨エンド PL との離間による変形は小さく、急激な剛性低下がないことを確認した。これらは、著者らが既報⁹⁾で提案した FRCC 接合と比較すると、大幅な性能向上と言える。
- 3) 上記 2)の試験において、定着板付きスタッド鉄筋の軸方向ひずみの分布を計測し、その付着特性を調べた。その結果、同試験におけるスタッド鉄筋軸部の付着強度は 8.8N/mm^2 であったこと、定着板がスタッド鉄筋軸力の約半分を負担したこと等が明らかとなった。

以上、本稿では FRCC 接合の基本的曲げ特性を明らかにしたが、今後の実用化に向けては、軸方向力や弱軸回りの曲げ、さらには交差方向鉄骨を含めた複合応力状態に関する検討が必要である。また、さらなる実験や FEM 解析によって応力伝達機構をより詳細に解明した上で、構造設計者が利用し易い簡便な設計式を構築することが必要である。

参考文献

- 1)土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)、コンクリートライブラリー127、2007
- 2)金子佳生、三橋博三、桐越一紀、阿部孝仁：鋼繊維補強セメント系複合材料の新分野への応用 ―鋼構造柱梁接合法に関する基礎実験―、日本建築学会技術報告集 第14号、pp.119-122、2001.12
- 3)梁一承、西山功、白井一義、上田宣人：高靱性セメント系複合材料を用いた鉄骨間柱の中央部接合に関する研究、コンクリート工学年次論文集 Vol.26 No.2、pp.1261-1266、2004
- 4)西山功、梁一承、福山洋、諏訪田晴彦：高靱性セメント系複合材料を用いた鉄骨プレースの中央部接合に関する研究、コンクリート工学年次論文集 Vol.26 No.2、pp.1267-1272、2004
- 5)田邊裕介、石川裕次、藤井英二、大野正人：鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた鉄骨接合構法に関する基礎的研究、コンクリート工学論文集 第23巻2号、2012.5
- 6)国土交通省：JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法、2006.6
- 7)日本コンクリート工学会：繊維補強セメント系複合材料の曲げモーメント―曲率曲線試験方法(JCI-S-003-2007)、2007

[2012年6月20日原稿受理 2012年9月28日採用決定]