論文 圧縮強度が 50N/mm² 級の PCM と炭素繊維格子板を用いたせん断補強効 果について

宮内 克之*1・下枝 博之*2・小林 朗*3

要旨: 炭素繊維格子板の端部を炭素繊維束で固定し, 圧縮強度が 50 N/mm²程度の PCM を乾式吹付け工法また は左官工法により, 既設コンクリートと一体化させる方法でせん断補強された RC 部材に関して, せん断補強 効果について検討した。その結果, 乾式吹付け工法を用いた場合には, せん断補強用 CFG 板の性能が確実に 発揮できていることが確認された。一方, 左官工法を用いた場合には, 既設コンクリートと PCM との界面剥 離が生じ, せん断補強用の CFG 板の性能が十分には発揮されなかった。

キーワード:炭素繊維,炭素繊維格子板,せん断補強,乾式吹付け,ポリマーセメントモルタル

1. はじめに

1980 年以前のいわゆる旧基準に基づいて設計された 既存 RC 構造物の耐震補強方法として,主に耐久性およ び補強に伴う断面厚の増加が少ないという観点から,炭 素繊維格子板(以下,CFG板)とポリマーセメントモル タル(以下,PCM)の乾式吹付け工法を併用した補強方 法の開発研究を進めている。その際のCFG板端部の定着 方法として,CFG板の上下端部を炭素繊維束で固定し, PCMを乾式で吹き付ける定着方法を提案した¹⁾。この定 着方法に関しては,CFG板端部を定着するために必要な 炭素繊維の量は、CFG板縦筋の引張耐力の1.15倍に相当 する引張耐力(耐力比 1.15)を有する繊維量で十分であ ることが明らかになった²⁾。

ところで、CFG 板は炭素繊維にビニルエステル樹脂を 含浸し、格子状に成形したものであり、その表面を覆う ビニルエステル樹脂と補強に用いた PCM との付着力は 決して大きいとは言えない。したがって、せん断補強筋 として機能する CFG 板縦筋に作用する引張力(あるいは, CFG 板縦筋が負担するせん断力)は、CFG 板縦筋と横筋 との格点の結合力を介して CFG 板横筋と PCM との機械 的な抵抗により負担されるものと考えられる。この点に 関しては、圧縮強度が 75 N/mm² 程度の PCM を用いた実 験において、ひび割れ面直近の CFG 板の格点で、その約 60%が負担されていることが明らかになった²⁾。しかし、 ひび割れ面直近の CFG 板の格点が負担する引張力は、補 強に使用する PCM の力学的特性、特に圧縮強度(あるい は支圧強度)に依存するものと推察されるため、より圧 縮強度が低い 50 N/mm²程度の PCM を用いた場合に関し て検討した。

PCM の乾式吹付け工法を用いた既設 RC 構造物の耐震 補強方法の一つに乾式吹付耐震補強工法がある。この耐 震補強工法における PCM の圧縮強度の特性値は 50 N/mm²としている³⁾。同工法における PCM の圧縮強度は 60~80 N/mm²程度であるので, 50 N/mm²程度になること



*1 福山大学 工学部 スマートシステム学科 教授 博士(工学)(フェロー会員)

*2 StoCretec Japan (株) 代表取締役

*3日鉄ケミカル&マテリアル(株)(正会員)

	コンクリート*			PCM		
試験体	圧縮強度	割裂強度	弾性係数	圧縮強度	割裂強度	弾性係数
	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(kN/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(kN/mm ²)
C8C1	35.7	3.29	31.1	77.8	4.89	31.6
C8C4	37.6	2.97	29.8	55.0	4.44	23.6
C8C5	38.7	3.25	30.0	46.7	3.99	29.6

表-1 試験体一覧とコンクリート系材料の RC はり実験時材齢における力学的特性

*呼び強度24のレディーミクストコンクリートを使用

14 といいの力子的符合

筋種	引張強度 (N/mm ²)		弹性係数 (kN/mm ²)		筋1本の断面積	格子間隔
	実測値	保証値	実測値	保証値	(mm ²)	(mm)
CR8	1,690	1,400	102.0	100.0	26.4	100

は極めて稀であると同時に,補強材料に異形棒鋼を使用 しているため,PCMの圧縮強度が補強部材の耐震性能に 及ぼす影響は大きくない。しかし,補強材料にCFGを使 用した場合には,PCMの強度特性が補強部材のせん断特 性に影響を及ぼす可能性がある。そこで,乾式吹付け工 法において品質を確保したうえで,施工可能な最低限の 圧縮強度であると思われる 50 N/mm²程度のPCMで一体 化した場合に関し,せん断補強効果について検討した。 また,左官工法の場合,付着特性が劣る可能性があるた め,左官工法により 50 N/mm²程度のPCMを用いて補強 した場合の問題点に関しても検討した。

2. 実験概要

2.1 実験計画

試験体一覧と各試験体に用いたコンクリートおよび PCMの力学的特性を表-1に,試験体の概要を図-1に 示す。また,CFGの力学的特性を表-2に示す。引張鉄 筋にはD25(PCB種1号),圧縮鉄筋にはD19(SD345)を使 用した。試験体の左側せん断スパンのみを評価対象区間 とし,CFG板によるせん断補強は左側せん断スパンのみ とした。補強区間における既設の帯鉄筋には D10(SD295A)を200 mm間隔で配置した。右側せん断ス パンにはD13(SD345)を100 mm間隔で配置し,左側せん 断スパンに先んじてせん断破壊しないように補強した。

定着に使用する炭素繊維束の繊維量は,耐力比1.15となる量とした。試験体C8C1に関しては文献1)で既に公表済みであるが,補強効果に及ぼす強度特性の影響を検討するうえで必要であるため,本論文においても併せて扱うこととする。試験体C8C1に関する詳細につては,文献1)を参照されたい。

2.2 補強方法

(1) CFG 板の定着方法

せん断補強用の CFG 板を板 1 枚につき φ6 アンカー6

本で仮留めし、上下端部を炭素繊維束で定着した。エポ キシ樹脂を含浸させた定着用炭素繊維束の一端を CFG 板の最上下端の格点に結束し、他端を定着用の孔に挿入 し、エポキシ樹脂で定着した。定着用の炭素繊維束は 3 格点分をひとまとめにして1ケ所の定着孔に挿入した。 定着孔の直径は22mmとし、定着孔は試験体の断面を貫 通して開けているものの、炭素繊維束の定着は各側面か ら行い、定着長はいずれも150mmとした。なお、定着 孔の開口端は応力集中等による炭素繊維束の耐力低下を 防ぐために、半径20mm程度の丸みをつけた。

(2) 乾式吹付け工法による施工:試験体 C8C4 乾式吹付け工法を用いて耐震補強する場合の圧縮強度



写真-1 乾式吹付け工法による施工の様子 (両端部を除く側面全体を施工)



写真-2 左官工法による施工の様子 (左側スパンの 1,400 mm の範囲を施工)

の下限値に近い 50 N/mm²程度の PCM の施工に関しては, 予備実験を行い, 吹付け性能と圧縮強度との関係を確認 したのち, 試験体 C8C4 への吹付け施工とした。PCM の 吹付けに先行して, ウォータージェット(以下, WJ)に より既設コンクリート面の目粗しをした。写真-1に, 乾式吹付け工法による PCM の吹付けの様子を示す。

(3) 左官工法による施工:試験体 C8C5

試験体 C8C5 においては左官工法により補強用 CFG 板 と既設部材を一体化した。PCM の施工に先んじて WJ に よる既設コンクリート面の目粗しを行い, PCM の接着性 を向上させるためのプライマーを塗布した。PCM の左官 施工は 2 層施工(1 層目: CFG が隠れる程度, 2 層目: 残り厚を施工)とし, 2 層目の施工の前にはプライマー を塗布した。写真-2に, 左官工法による PCM の施工の 様子を示す。左官工法による施工は, 左側スパンの 1,400 mm の範囲とした(図-1参照)。

なお, PCM の施工厚さは, いずれの試験体においても 35 mm とした。また, PCM の施工後は養生シートにより 養生し, PCM の乾燥を防止した。

2.3 実験方法

載荷は単純支持状態での二点対称載荷とした。試験中 は、支点、載荷点およびスパン中央のたわみ量を変位計 により測定した。また、軸方向鉄筋、帯鉄筋および CFG 板縦筋と横筋のひずみを電気抵抗線式ひずみゲージによ り測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊状況

実験により得られた試験体の荷重~スパン中央のたわ み量関係を図-2に示す。図中には、実験中に大きな破 壊音が確認された時点を赤の×で、小さな破壊音が確認 された時点を青の×で示す。

PCM を乾式吹付け工法により施工した試験体 C8C4 に おいては、荷重が 400 kN から 600 kN にかけて、曲げひ び割れの一部がせん断ひび割れへと発展した。その後、 荷重が約 900 kN にかけてせん断ひび割れが進展した。荷 重が1,000 kNから1,300 kNにかけてひび割れがさらに進 展するとともに、せん断ひび割れの幅も拡大していった。 荷重が1,300 kNを超えると、せん断ひび割れの幅がさら に拡大し、左載荷点近傍のコンクリートに破壊が確認さ れるようになった。

左官工法により PCM を施工した試験体 C8C5 において は、載荷試験時において乾燥に伴う収縮が原因と思われ るひび割れが既に発生していた。その状況を図-3 に示 す。ひび割れの幅は、ほとんどが 0.2~0.3mm 程度であり、 一部 0.5 mm 程度に達するものが認められた。ひび割れは 発生しているものの、打音では PCM と既設コンクリート との剥離を思わせる変化は確認されなかった。載荷試験 では、荷重が 400 kN を過ぎたあたりからせん断ひび割れ がみられるようになった。その後、荷重が約 900 kN にか けてせん断ひび割れが進展した。この段階までは、他の









写真-3 CFG 板横筋のせん断変形(C8C4 前面)



写真-5 PCMの1層目と2層目の剥離(C8C5前面)

試験体と挙動が同じであることから、載荷前のひび割れ の影響はないものと考えられる。荷重が 1,000 kN を過ぎ ると、せん断ひび割れの幅も拡大していった。荷重が 1,200 kN 手前で、左載荷点近傍のコンクリートに破壊が 確認されるようになった。

いずれの試験体も,最終的には最大荷重を示した後, 左側載荷点近傍のコンクリートの破壊が進み,荷重が低 下した。

試験体 C8C1, C8C4 については最大荷重前の荷重 1,300 kN時, 試験体 C8C5 については最大荷重直後の荷重 1,160 kN時におけるひび割れ発生状況を図-4に示す。

実験終了後,主破壊面となったせん断ひび割れ近傍の PCM を取り除き,CFG 板の状況を確認したところ,各試 験体においては,以下に示すような CFG 板の筋の損傷等 が確認された。

主破壊面となったせん断ひび割れと交差する CFG 板の横筋(部材軸方向の筋)が,せん断変形に伴う上下方向のずれ(面内変形)により大きくせん断変形した部分

(写真-3)や、はりのせん断変形に伴う上下方向のず れ(面内変形)により、格点中における CFG 板縦筋と CFG 板横筋の一体性が損なわれる等の理由による、CFG 板縦筋の格点からの抜出しが確認できた(写真-4)。こ れにより、さらにせん断変形が大きくなり、荷重が低下 したものと思われる。これらの損傷は、実験中に確認さ れた破壊音と思われる音がした時点のことを考えると、 最大荷重点の直前あるいは最大荷重点を過ぎて変形が相



写真-4 CFG 板縦筋の格点からの抜出し(C8C5 前面)



写真-6 PCMの1層目と2層目の剥離(C8C5前面)

当に大きくなった時点で発生したものと推察される。左 官工法で施工した試験体 C8C5 においては、変形が大き くなるに伴い,既設コンクリートと PCM との剥離あるい は PCM の 1,2 層目間の剥離が,打音により確認されるよ うになった。写真-5,6には、実験終了後に確認した PCM の 1,2 層目間の剥離の様子を示す。

一方,定着用炭素繊維束は定着部および格点結束部を 含め,特に損傷は確認されなかった。

3.2 CFG 板縦筋のひずみの推移

図-5は、せん断スパン中央の(図-1中における□ 内の範囲) CFG 板縦筋のひずみの推移を試験体ごとに、 前面の CFG 板に関して示したものである。各ひずみゲー ジの位置に関しては、図-4を参照されたい。

いずれの試験体においても、せん断ひび割れの発生が 確認された荷重 400 kN あたりから、せん断ひび割れ発生 位置に近い CFG 板縦筋のひずみが増大し始めた。

試験体 C8C1, C8C4 においては,最大荷重時の CFG 板 縦筋のひずみの最大値は約 11,000×10⁻⁶であった。この 値は CFG 板縦筋の終局ひずみ 11,000×10⁻⁶ (1,690/102,000×2/3, 2/3: CFG の終局時における材料 強度の安全率⁴⁾)に相当する値である。また,測定され た最大ひずみの値は試験体 C8C1 で約 19,200×10⁻⁶(後 面で観測),試験体 C8C4 で約 16,500×10⁻⁶(後面で観 測)であった。この値は CFG の破断ひずみ 16,500×10 ⁻⁶(1,690/102,000)と同等以上の値であり,試験体 C8C1, C8C4 においては,定着が確実に機能しており,せん断補



図-5 CFG 板縦筋のひずみ(前面)







図-8 CFG 板縦筋の最大ひずみの終局ひずみに対する 割合(最大荷重時)

C6*

C7*

C8*

C9*

C5*

CFG縦筋の位置

■ C8C1

C8C4

C8C5

強用の CFG 板の性能が十分に発揮できているものと考 えられる。

一方, 試験体 C8C5 においては, 最大荷重時の CFG 板 縦筋のひずみは 3,000~6,000×10⁻⁶であり, CFG 板の 性能が十分に発揮できていない。その理由としては, PCM と既設コンクリートとの付着あるいは PCM の1層目と2 層目の付着特性が劣ることにより, ひび割れを挟む CFG 板の格点間のみの CFG 板縦筋の伸びが, 格点を越えたよ り広い範囲の伸びとして現れるため, 結果として CFG 板 縦筋のひずみが小さくなったものと考えられる。このこ とは, 後述の CFG 板の 1 格点隔てた CFG 板縦筋のひず み負担の割合が, 他の試験体に比べて大きいことからも わかる。

3.3 CFG 板縦筋のせん断力負担

C4*

C2*

C1*

C3*

図-6は、部材高さ方向の CFG 板縦筋のひずみ分布を、 最大荷重時前(試験体 C8C1, C8C4 は荷重 1,300 kN 時, 試験体 C8C5 は荷重 1,100 kN 時)および最大荷重時に関 して示したものである。ひずみの値は前面の CFG 板縦筋 に貼付されたひずみゲージの値に関して示してある。

最大荷重時前および最大荷重時において, 試験体 C8C1 と C8C4 は, ほぼ同様の分布を示している。一方, 試験 体 C8C5 においては, 他の試験体とは異なり, ひずみが 十分に発生していない。その理由としては, 前述したよ うに, PCM と既設コンクリートとの付着あるいは PCM の1層目と2層目の付着特性が劣ることにより, 作用せ ん断力が, より広範囲の CFG 板縦筋によって負担されて いることによるものと考えられる。

ひび割れ面(あるいは,ひび割れ面近傍)における CFG 板縦筋のひずみを基準(100%)にして,ひび割れ面から 上下側における CFG 板縦筋のひずみの割合を図-7に 示す。

各試験体により, ひび割れの発生状況が異なるものの, 試験体 C8C1, C8C4 においては, CFG 板縦筋に作用する 引張力は, ひび割れ面から 1 格点遠ざかると 40~45%程 度に減少することがわかる。すなわち, CFG 板縦筋に作 用する引張力は, ひび割れ面直近の CFG 板の格点で, そ の 55~60%程度が負担されていることが推察される。試 験体 C8C5 においては, その負担割合は 35%程度であっ た。これは, 付着機能が低下したことにより, CFG 横筋 の機械的な抵抗力が低下し, ひび割れ面(あるいは, ひ び割れ面近傍)における CFG 板縦筋に作用する引張力が, 格点を隔てた CFG 板縦筋により多く伝達されたことに よるものと考えられる。したがって, 左官工法により既 設部材と一体化した場合には, より大きいせん断力(引 張力)が CFG 板の定着部へ伝達される可能性がある。

図-8は、最大荷重時の CFG 板縦筋ひずみの最大値の、 終局ひずみに対する比率を、CFG 板の縦筋ごとに比較し たものである。なお、全体的な定着の有効性を検討する ため、最大荷重時のひずみの最大値は、試験体前後面の CFG 板に貼付した2枚のひずみゲージの測定値の平均値 を用いた。CFG 板縦筋ごとに最大値を示したひずみゲー ジの位置を図-4中に〇印で示す。

試験体 C8C5 においては, 試験体 C8C1, C8C4 と比較して, 全体的に比率が小さく, CFG 板縦筋がせん断補強筋として十分に機能していないことが推察される。

3.4 CFG 板横筋のひずみの推移

試験体 C8C4, C8C5 における主破壊面に近い CFG 板横 筋のひずみと,その横筋と1格点を介して接続する縦筋 のひずみの推移を図-9に示す。対象の CFG 板横筋のひ ずみゲージの位置を図-1,4中に■で示す。

試験体 C8C4 においては、せん断ひび割れの発生と進 展に伴い縦筋のひずみが増大しているが、横筋のひずみ は約 900 kN 時まで増加していない。このことより、格点 の機械的な抵抗が十分に機能していることがわかる。な お、荷重が約 900 kN 以降の横筋のひずみの増加は、横筋 の位置をひび割れが横切ったことによるものである。試 験体 C8C5 においては、せん断ひび割れの発生により縦 筋のひずみが増大するのと同時に横筋のひずみも増大し ている。横筋の位置をひび割れが横切ったことに起因す ることも考えられるが、格点の機械的な抵抗が十分に機 能していないことを伺わせるものであった。



図-9 CFG 板横筋のひずみの推移

4. まとめ

CFG 板の端部を炭素繊維束で固定し,圧縮強度が 50 N/mm² 程度の PCM を乾式吹付け工法または左官工法により一体化させる方法でせん断補強された RC 部材に関して,せん断補強効果について検討した。本研究により明らかとなったことは,以下のとおりである。

- 試験体 C8C1, C8C4において測定された CFG 板縦筋の最大ひずみは、CFG の破断ひずみ 16,500×10⁻⁶と同等以上の値であり、せん断補強用 CFG 板の性能が確実に発揮できているものと考えられる。
- (2) 左官工法により施工された試験体 C8C5 においては, 既設コンクリートと PCM との界面剥離が生じ, せん 断補強用の CFG 板の性能が十分には発揮できなかっ た。したがって, 左官工法により既設部材と一体化し た場合には, より大きいせん断力(引張力)が CFG 板の定着部へ伝達される可能性があるため,本工法に おける定着方法が成立しない可能性がある。

なお,本研究の一部は平成30年度学術研究助成基金助 成金(基盤研究(C))により行ったものである。

参考文献

- 宮内 克之,下枝 博之,小林 朗:連続繊維束を用いた炭素繊維グリッド板の端部定着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1393-1398, 2016.7
- 2) 宮内 克之,下枝 博之,小林 朗:炭素繊維格子板の 端部定着性能に及ぼす定着用炭素繊維束量の影響,コ ンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.949-954, 2018.7
- 3) 日本コンクリート補修・補強協会:乾式吹付耐震補強 工法 設計・施工指針(案),2012
- 4) FRP グリッド工法研究会: FRP グリッド増厚・巻立て 工法によるコンクリート構造物の補修・補強 設計・ 施工マニュアル (案), 2001