論文 乾式吹付け工法と炭素繊維グリッドを併用した RC 部材の耐震補強

宮内 克之^{*1}・清水 健蔵^{*2}

要旨:既存の鉄筋コンクリート構造物の耐震補強を目的として、ポリマーセメントモルタ ルの乾式吹付け工法と高強度炭素繊維グリッドを併用した方法により補強された鉄筋コン クリートはり部材のせん断破壊試験を行い、本工法の耐震せん断補強効果について定量的 に検討した。その結果、乾式吹付け工法と高強度炭素繊維グリッドを併用した工法は、耐 震せん断補強方法として有用的であり、高強度炭素繊維グリッドの引張強度の、本補強方 法に対する有効率は 2/3 程度確保できること、本補強方法に用いる乾式モルタルの吹付け 厚さとしては、30 mm 程度必要であることが明らかとなった。

キーワード:乾式吹付け、炭素繊維グリッド、耐震、耐震補強、補強

1. はじめに

既存の鉄筋コンクリート (RC) 構造物のせん 断補強法としては,鋼板巻き立て工法,コンク リート巻き立て工法,連続繊維シート貼付け工 法などが主に用いられている。しかし鋼板巻き 立て工法は重機械を要する,コンクリート巻き 立て工法は鉄筋の組立てや型枠の設置を必要と する,連続繊維シート貼付け工法においてはコ ンクリート表面が湿潤状態では施工できないな どの欠点を有している。

一方,ポリマーセメントモルタルを使用した 乾式吹付け工法は,型枠が不要であること,小 回りが利き施工性がよいこと,吹付け速度が速 いため締固め効果が大きく母材との付着性が高 いなどの特徴を有している。また,高速度吹付 けに伴う締固め効果と低水セメント比により, 中性化速度および塩化物イオン拡散速度が極め て遅く,耐久性に富んでいるという特徴も有し ている。炭素繊維グリッドは,錆びない,軽量 で施工が容易であるなどの特徴を有している。

そこで,既存の RC 構造物の耐震せん断補強 を目的として,乾式吹付け工法と高強度炭素繊 維グリッドを併用した方法により補強された RC はり部材のせん断破壊試験を行い、本工法のせん断補強効果を定量的に評価した。

- 2. 実験概要
- 2.1 実験計画

実験計画を表-1に示す。また、使用した材料の強度特性を表-2~4に、試験体の概要を 図-1に示す。試験体は、せん断耐力が十分ではなく、耐震性に関して問題がある既存の RC 構造物を補強する場合を想定している。したがって、乾式吹付け工法と高強度炭素繊維グリッ

試験体 記号	炭素繊維 グリッド	補強区間 長(mm)	吹付け厚 (mm)	a/d	
T1			10		
Т3			30	2.50	
C3T1	CEC 1	200	10		
C3T3	Cr0-I	300	30		
C4T1	CEG 2		10		
C4T3	Cr0-2		30		
T1_L	_		10		
T3_L		450	30	3.57	
C3T1_L	CEG 1	430	10		
C3T3_L	010-1		30		

表-1 実験計画

*炭素繊維グリッドの格子間隔:50 mm

*1 福山大学 工学部建設環境工学科教授 博士(工)(正会員)

*2 アキタ建設(株)専務取締役

ド(以後、CFG)を併用した補強方法の補強効 果を定量的に把握できるよう,補強を行った後 もせん断破壊するように、耐力比(せん断耐力 /曲げ耐力)が1.0以下に計画されている。せ ん断耐力の内, CFG 負担分は, 圧縮斜材が部材 軸となす角度 θ=45°, CFG の有効率を 1.0 とし た土木学会式¹⁾によって算定した。CFGの強度 特性は表-3の値を使用した。コンクリート負 担分は二羽式2)を用いて算出し, 乾式モルタル (以後, PCM) 負担分は, 等価な母材コンクリ ートに置換した。また,試験体の片側せん断ス パンのみを評価対象区間としており、反対側せ ん断スパンには十分なせん断補強(D10-50 mm) が施されている。実験要因は、CFG の補強量, PCM の吹付け厚さおよびせん断スパン比であ る。

2.2 試験体の作製および載荷試験

試験体は材齢7日で脱型し、試験時まで実験 室内に放置した。

表-2 鋼材の機械的特性

種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弹性係数 (kN/mm ²)
異形 PC 鋼棒 (B 種 1 号)	1,051*	1,152	200
D16 : SD345	401	571	195
D10 : SD345	400	600	186
異形 PC 鋼棒に	「閉」てけ	くーカー宝協調	計論の値

*:0.2%耐力

表-3 CFGの機械的特性

種類	公称断面積 (mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弹性係数 (kN/mm ²)	
CFG-1	4.4	1,400	100	
CFG-2	6.6	1,400	100	
メーカーのカタログ値				

表-4 コンクリートおよび PCM の強度特性

種類	材齢*	圧縮強度 (N/mm ²)	弹性係数 (kN/mm ²)	
コンクリート	134 日	36.6	29.0	
РСМ	58日	37.3	30.2	

*:はり試験時材齢

PCM:材齢28日における建研式付着強度は2.06 N/mm²



材齢が 28 日以上経過した段階で,ウォーター ジェットにより粗骨材が十分に露出する程度に 目荒らしを行った後,あらかじめ試験体寸法に 加工された U 字型の CFG を設置した。CFG の 固定には ϕ 6 のアンカーピンを用いた。CFG の グリッド間隔は 50 mm のものを使用し,隅角部 には半径 20 mm の曲部を設けた。グリッドは試 験体の引張・圧縮面で重ね合わせ,重ね合わせ 長は 150mm (交差点 3 個分の長さ)とした。

プレウェッティングを行った後, PCM を吹き 付けた。吹付けを行った後直ちに所要の寸法に 整形を行った。また, PCM の強度試験用, 母材 コンクリートと PCM との付着試験用の試験体 も同時に作製した。吹付けを終えた試験体は直 ちに保水シートで覆い乾燥するのを防止した。

はり試験体の載荷方法は2点対称載荷とした。 載荷中はスパン中央および両支点の変位を変位 計により測定した。なお,試験体両端に設置し てあるナットは,鋼材組立て用のもので,載荷 時には試験体を拘束しないように緩めている。

実験結果および考察

3.1 破壊状況

図-2に荷重~変位関係を,写真-1に試験 終了後における試験体の様子を示す。また,表 -5に実験結果の一覧を示す。

a/d=2.5 の試験体についてみると, PCM のみ を吹き付けた試験体 T1 は,荷重が 135 kN のと き PCM を貫通するせん断ひび割れが生じ,荷 重が 155 kN のときはり下面で水平方向にひび 割れが進展し,最終的にはせん断圧縮破壊を示 した。同じく, PCM のみを吹き付けた試験体 T3 は,荷重が 140 kN で PCM にせん断ひび割れが 生じ,荷重が 188 kN のとき 2 本目のせん断ひび 割れが発生した。最終的には T1 同様,はり下 面で水平方向にひび割れが進展し,せん断圧縮 破壊を呈した。なお,母材コンクリートと PCM との付着切れは観察されなかった。

a/d=2.5 で CFG を配置した試験体は,補強部 に複数のせん断ひび割れが発生し,その内の 1





写真-1 破壊の様子

本のせん断ひび割れの幅が拡大した後,せん断 圧縮破壊を示した。せん断補強量の多い C4 シ リーズ(C4T1, C4T3)は、せん断圧縮破壊と曲 げ圧縮破壊が混在した破壊様式を示した。特に PCM の吹付け厚さが 30 mm の C4T3 は、曲げ圧 縮破壊の様相を強く呈した。

a/d=3.57の試験体は、CFG 配置の有無および PCM の吹付け厚さに関係なく、全て斜め引張破 壊した。ただし、CFG を配置した試験体では、 多少曲げ圧縮破壊の影響が見られた。また、 PCM の吹付け厚さが 10 mm の試験体では、30 mm のものに比べて、せん断ひび割れの数が多 いようである。

CFG を配置せず吹付け厚さが 10 mm の試験 体 T1_L は, PCM にせん断ひび割れが発生した 後も荷重が上昇し,最終的には CFG を配置せず 吹付け厚さが 30 mm の試験体 T3_L よりも相当 に大きな耐力を示した。アーチ機構がうまく形 成されたことが想像できるが,明確な原因は不 明である。

3.2 せん断耐力から見た CFG の有効率

斜め引張破壊した a/d=3.57 の試験体に関して, 本補強方法における CFG の有効率について検 討する。CFG の有効率は, CFG が負担するせん 断耐力の実験値と理論値を比較(有効率=実験 値/理論値)することにより算定した。 試験体の補強部分に関して, せん断耐力 Vu は次式で表される。

Vu=Vcu+Vmu+Vg(1)

ここに、Vcu:コンクリートが負担するせん断
耐力、Vmu:PCM が負担するせん断耐力、Vg:
CFG が負担するせん断耐力である。

これより Vg の実験値は、対応する試験体(諸 条件が同一で、CFG 設置の有無のみが異なる試 験体)のせん断破壊時の作用せん断力の差とし て得られる。ここで、CFG を配置していない試 験体のせん断耐力(Vcu+Vmu)としては、T1_L よりも吹付け厚さの厚い T3_L の方が大きくな るはずである。しかし、実験では T1_L の方が より高いせん断耐力を示した。したがって、Vg の実験値を求める際の(Vcu+Vmu)の値として は、安全側であることを考慮して T1_L のせん 断耐力 67.5 kN を用いた。一方 Vg の理論値は、 2.1 節と同一の方法により算出した。

吹付け厚さを 30 mm とした試験体 C3T3_Lに 関しては,有効率 1.08 が得られた。しかし,吹 付け厚さが 10 mm の試験体 C3T1_L に関しては, 有効率は 0.45 であった。

一方, せん断圧縮破壊した a/d=2.5 の試験体 に関しても同様に CFG の有効率を検討した。

吹付け厚さが 10 mm の試験体 C3T1 および C4T1 に関しては,それぞれ有効率は 1.47, 0.87

試験体 記号	Vcr (kN)	Vexp. (kN)	Vgexp. (kN)	Vgcal. (kN)	有効率 Vgexp./Vgcal.	破壊形式
T1	67.5	103.8	_	_	_	せん断圧縮
Т3	70.0	122.2				せん断圧縮
C3T1	92.5	148.0	44.2	30.0	1.47	せん断圧縮
C3T3	73.5	147.9	25.7	30.0	0.86	せん断圧縮
C4T1	72.5	142.8	39.0	45.0	0.87	せん断圧縮
C4T3	92.5	141.8	19.6	45.0	0.44	せん断圧縮→曲げ圧縮
T1_L	58.5	67.5	_	_	_	斜め引張
T3_L	54.5	54.5				斜め引張
C3T1_L	56.5	81.0	13.5	30.0	0.45	斜め引張
C3T3_L	63.0	100.0	32.5	30.0	1.08	斜め引張

表-5 実験結果

・Vcr: PCM せん断ひび割れ発生時作用せん断力

・Vexp.:最大作用せん断力の実験値。ただし、試験体 T1_L, T3_L では、PCM にせん断ひび割れが発生した後、荷重低下した際のピーク時の作用せん断力(図-2参照)

・Vgexp., Vgcal.: CFG が負担するせん断耐力の実験値および理論値

であった。 吹付け厚さが 30 mm の試験体に関し ては, C3T3 では 0.86 であったが, C4T3 に関し ては 0.44 となった。

最終的に曲げ圧縮破壊した C4T3 と,対応す る無補強の試験体のせん断耐力が大きくなった C3T1_L 以外に関しては,理論値の 0.86~1.47 倍の実験値を示した。C3T3, C4T1 に関しても, 曲げ圧縮破壊の様相を呈さなければ,更に有効 率は高くなるものと思われる。したがって,本 実験の範囲では,本補強方法における CFG の有 効率は,吹付け厚さを 30 mm とすることで 80 % 程度,少なくとも 2/3 程度は十分に可能である ものと考えられる。

3.3 ひずみから見た CFG の有効率

図-3に、荷重とCFG 横筋(はり軸方向に鉛 直)のひずみとの関係を示す。CFG 横筋のひず みは、各試験体においてひずみの最大値が観測 された CFG 横筋のひずみを用いている。PCM にせん断ひび割れが発生して以降、CFG 横筋の ひずみが増加の一途をたどり、CFG がせん断補 強筋として有効に機能していることがわかる。

図-4は、荷重ピーク時における CFG のひず みと、ひずみの最大値とを示したものである。 ひずみの値は、図-3と同じく、各試験体にお いてひずみの最大値が観測された CFG 横筋の ひずみを用いている。

破壊形式がせん断破壊もしくはせん断破壊に 極めて近いと考えられる C3 シリーズ (C3T1, C3T3, C3T1_L, C3T3_L) に関して考察する。 PCM の吹付け厚さが 30 mm の試験体 (C3T3, C3T3_L) の方が,吹付け厚さが 10 mm の試験 体 (C3T1, C3T1_L) よりも荷重ピーク時,最大 値ともにひずみの値が大きくなった。これは, 吹付け厚さが 30 mm の方が 10 mm の場合に比 べて, CFG が PCM によく保持されており, CFG の有する能力が十分に発揮できたからだと考え られる。

C3 シリーズ 4 試験体の荷重ピーク時におけ るひずみの平均値(4 試験体,計 22 枚のひずみ ゲージの平均値)は,CFG の破断ひずみ(=引) 張強度/弾性係数:14,000×10⁶)の71%であった。また、4試験体ごとに観測された最大ひずみの平均値は、CFGの破断ひずみの108%であった。このことより、せん断破壊した試験体においては、CFGの有する能力が十分に発揮できており、その引張強度に対する有効率は70%よりも大きいものと考えられる。







図-4 CFG 横筋のひずみ

一方, せん断補強筋の量が多い C4 シリーズ (C4T1, C4T3) に関してみると, 荷重ピーク時 のひずみの平均値 (2 試験体, 計 12 枚のひずみ ゲージの平均値) は, 破断ひずみの 49 %であっ た。さらに, 観測された最大ひずみの平均値も, 破断ひずみの 74 %と小さい値となった。C4 シ リーズの試験体はせん断補強量が多いため, 必 ずしもせん断破壊をしておらず, CFG の有効率 を定量化するには至らなかったものと考えられ る。

3.4 PCM の必要吹付け厚さ

先の考察のとおり, PCM の吹付け厚さが 10 mm では CFG の保持能力が劣り, 不十分である ことがわかる。この点に関して, CFG 縦筋(は り軸方向)のひずみの面から考察を行う。

図-5は、a/d=3.57の試験体に関して、最大 ひずみを観測した CFG 横筋に隣接した CFG 縦 筋のひずみの変化の様子を示したものである。 吹付け厚さが 30 mmの試験体 C3T3_Lにおいて は、PCM にせん断ひび割れが発生するまで、 CFG 縦筋にはほとんどひずみが生じていない。 これに対して、吹付け厚さが 10 mmの試験体 C3T1_L においては、PCM にせん断ひび割れが 発生する以前から PCM 縦筋にひずみが生じて いる。格点付近では目視では観察されない微細 なひび割れが発生している可能性があり、PCM の保持能力が低下したものと考えられる。

a/d=2.5の試験体に関しては, a/d=3.57の試験体ほど, 吹付け厚さが CFG 縦筋のひずみに与える影響は明らかではなかった。

4. 結論

既存の RC 構造物の耐震補強を目的として, ポリマーセメントモルタルの乾式吹付け工法と 高強度炭素繊維グリッドを併用した方法の耐震 せん断補強効果について定量的に検討した。そ の結果,以下のことが明らかとなった。

(1) 乾式吹付け工法と高強度炭素繊維グリッド を併用した工法は,耐震せん断補強方法とし



て有用的である。

- (2)本実験の範囲では、高強度炭素繊維グリッドの引張強度の、本補強方法に対する有効率は、少なくとも 2/3 程度確保できる。
- (3) 本補強方法に用いる乾式モルタルの吹付け 厚さとしては, 30 mm 程度必要である。

謝辞 本研究で使用した高強度炭素繊維グリッ ドは日鉄コンポジット(株)小林朗氏よりご提 供いただきました。ここに記して感謝の意を表 します。

参考文献

- 1) 2002 年制定コンクリート標準示方書構造性 能照査編, 土木学会, p.67, 2002
- 二羽淳一郎ほか: せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会 論文集, 第 372 号/V-5, pp.167-176, 1986.8