

# 乾式吹付け工法と炭素繊維グリットを併用した 既存 RC 柱の耐震補強の可能性について

宮内 克之\*

Seismic Strengthening of Existent RC Column

with Polymer Cement Mortar and Carbon Fiber Grid Reinforcement

Katsuyuki MIYAUCHI\*

## ABSTRACT

Cyclic loading test was performed for existent RC column strengthened with polymer cement mortar by drying spray system and carbon fiber grid reinforcement. It was cleared that the proposed method was very applicable for seismic strengthening of existent RC column. It was found that a necessary amount of carbon fiber grid reinforcement for the seismic strengthening was at least 0.15 %, and least thickness of the polymer cement mortar was about 30 mm.

キーワード：耐震補強，補強，乾式吹付け，炭素繊維，RC 柱

Keywords : Seismic Strengthening, Strengthening, Drying Spray System  
Carbon Fiber, RC Column

## 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。また最近では、施工性を重視してコンクリートセグメントと鋼より線を用いた耐震補強方法<sup>1)</sup>が JR の高架橋柱に広く用いられている。

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こと、有機系材料を使用していないため劣化しな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、鋸びない、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た、乾式吹付け工法と高強度炭素繊維グリッド（以下、CFG）を併用した工法により耐震補強された RC 柱に関して実験を行い、提案工法の耐震せん断補強方法としての可能性について検討した。

\*建設環境工学科

## 2. 実験概要

### 2.1 実験計画

実験計画を表-1に示す。また、試験体の概要と補強計画を図-1に示す。補強前の試験体には、軸方向鉄筋としてD16を4本、せん断補強筋としてD6-150mmの帯鉄筋を配置した。補強前の試験体は、せん断補強が十分ではない既存のRC柱を模しており、正負交番繰返し載荷において曲げせん断破壊するように、耐力比が約1.6に計画されている。

試験体B2, B3は、いずれも乾式吹付けモルタル(以下、PCM)の吹付け厚さが30mmであり、主にCFG補強量の違いによる影響を検討するものである。また試験体B4は、B3とCFG補強量が同一で、PCMの

吹付け厚さが異なる試験体であり、耐震せん断補強上必要な吹付け厚さを確認するためのものである。

表-1におけるせん断耐力 $V_u$ の算定に際して、コンクリートのせん断耐力 $V_{cu}$ は二羽式<sup>2)</sup>を、帯鉄筋およびCFGのせん断耐力 $V_{su}$ ,  $V_{Gu}$ は、圧縮斜材が部材軸となす角度 $\theta=45^\circ$ , CFGの有効率を $k_g=2/3$ <sup>3)</sup>としたトラス理論によって計算した。なお、表-1における括弧内の値は、PCMによる断面増加を考慮して計算したものである。

計算に当たって、鉄筋の力学的特性値は材料試験の結果(表-2)を、コンクリートおよびPCMに関しては、柱試験時材齢の実験値(表-3, 4参照)をそのまま用いた。CFGに関しては、カタログ値(表-5

表-1 実験計画

試験体	CFG	補強量 $p_G$ (%)	PCM t(mm)	曲げ耐力 $P_u$ (kN)	せん断耐力(kN)				耐力比 $V_u/P_u$
					$V_{cu}$	$V_{su}$	$V_{Gu}$	$V_u$	
B1	無補強	—	—	31.17	28.13	21.27	—	49.40	1.58
B2	FTG-C3	0.10	30	31.17 (52.36)	28.13	21.27	10.00	59.40 (73.72)	1.91
B3	FTG-CR4	0.15	30	31.17 (52.36)	28.13	21.27	15.00	64.40 (78.72)	2.07
B4	FTG-CR4	0.15	10	31.17 (41.19)	28.13	21.27	15.00	64.40 (69.17)	2.07

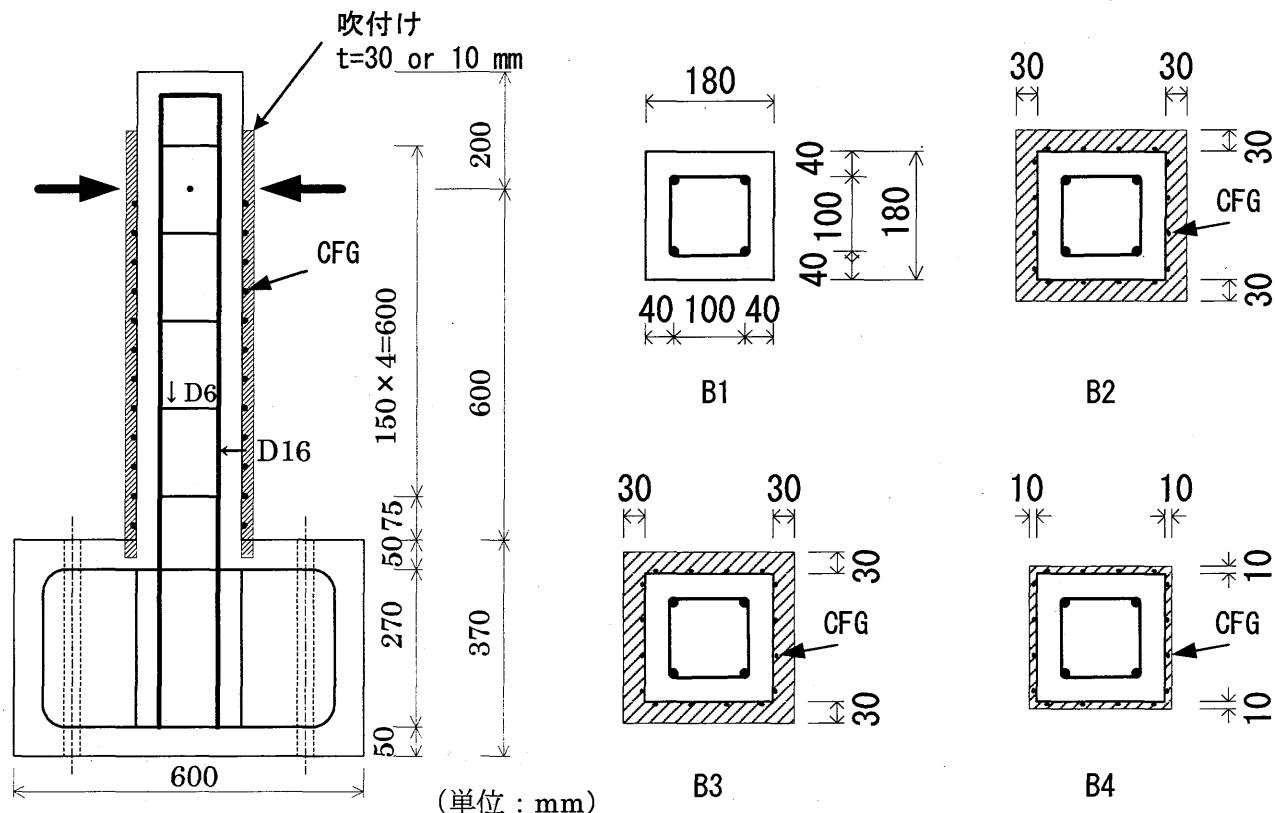


図-1 試験体の概要および補強計画

参照) を使用した。

## 2.2 使用材料

実験に用いた鉄筋、コンクリート、PCM および CFG の特性を表-2～5 に示す。また、写真-1 に補強に用いた CFG の概観を示す。試験体の寸法を考慮して、CFG のグリッド間隔は 50 mm のものを使用した。

## 2.3 試験体の作製

補強用の試験体は、材齢 42 日でウォータージェット (以後、WJ) により約 400～500 気圧で目荒しを行った後、あらかじめ試験体寸法に加工された U 字型の CFG (写真-1 参照) を設置した。CFG の固定には

$\phi 6$  のアンカーピンを 100 mm 間隔で 6 本用いた。グリッドの重ね合わせ長は 150 mm (3 交差点分<sup>3)</sup>) とした。

PCM の吹付けは、プレウェッティングを行った後、約 160 km/h の高速度で吹き付けた。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。写真-2 に作業の様子を示す。

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。標準水中養生を施す試験体は、吹付け後 2 日で  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  の水中養生を開始した。

表-2 鉄筋の機械的特性

鉄筋種	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
D16:SD345	392	569	192
D6:SD295	414	577	186

表-3 コンクリートの特性

材齢	養生条件	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
28 日	標準水中	33.1	29.2
柱試験時	現場	26.2	25.4

表-4 乾式吹付けモルタルの特性

材齢	養生条件	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	付着強度* (N/mm <sup>2</sup> )
28 日	標準水中	64.8	32.3	—
28 日	現場	—	—	2.87
柱試験時	現場	93.3	35.6	—

\* 建件式 :  $\phi 59$  mm

表-5 高強度炭素繊維グリッドの特性 (カタログ値)

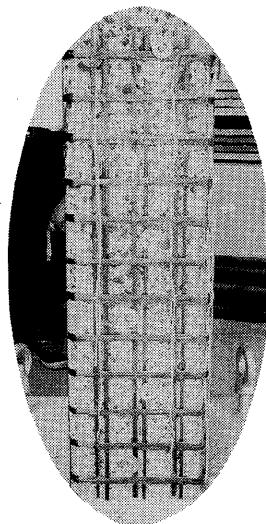
種類	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	グリッド 間隔(mm)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
FTG-C3	4.4	50	1,400	100
FTG-CR4	6.6	50	1,400	100



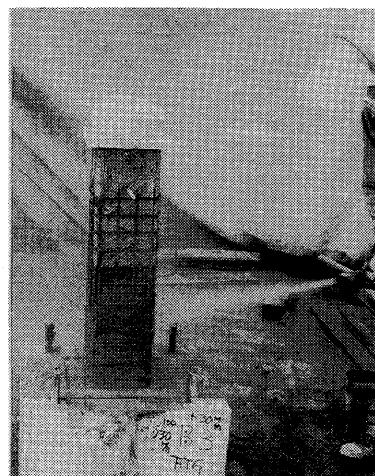
写真-1 CFG の概観



(a) WJ 作業



(b) CFG の設置



(c) PCM の吹付け

写真-2 試験体作製の様子

## 2.4 正負交番繰返し試験

無補強の試験体 B1 は、軸方向鉄筋に貼付したひずみゲージのひずみが降伏ひずみ（降伏強度を弾性係数で除した値）に達した時点の載荷点の水平変位  $\delta_y$  を基準に、 $\pm \delta_y$ ,  $\pm 2 \delta_y$ ,  $\pm 3 \delta_y$ , …と順次変位を増加させながら、正負交番繰返し載荷を行った。補強試験体 B2, B3, B4 は、PCM を吹き付けることにより断面の有効高さが変化し、軸方向鉄筋降伏時の載荷点変位が各試験体により変化する可能性がある。そこで、補強試験体では無補強試験体 B1 の降伏時変位  $\delta_y = 5.10$  mm を基準として載荷した。同一変位での繰返し回数は 3 回とした。なお、軸力は載荷していない。

試験中は載荷点の水平変位、軸方向鉄筋、帯鉄筋および炭素繊維グリッドのひずみを抵抗線式ひずみゲージによって測定した。また、柱部材の平均曲率、ひび割れ幅および軸方向鉄筋の基礎からの抜出し量を算定するために、柱部前面に画像計測用の測定点を設け、各測定点の変位を画像計測法<sup>4), 5)</sup>によって測定した。画像計測用の測定点は、高さ方向には 25 mm 間隔で 21 段、断面方向は柱中央を基準にして約 40 mm 間隔

で 7 列（無補強試験体 B1 に関しては 5 列）設置した（写真-3 参照）。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 破壊状況

図-2～5 に各試験体の荷重～変位関係を示す。また写真-3 に、各試験体の試験終了後の様子を示す。

#### (1) 試験体 B1：無補強

$1 \delta_y \sim 2 \delta_y$  の載荷時に、数本のせん断ひび割れが発生し、 $3 \delta_y \sim 4 \delta_y$  での載荷でせん断ひび割れの幅が拡大した。 $5 \delta_y$  の 2 回目負載荷時にせん断ひび割れの交差部のコンクリートが剥落した。 $7 \delta_y$  の載荷時にせん断破壊またはせん断付着破壊した。

#### (2) 試験体 B2 : $p_g=0.10\%$ , $t=30\text{mm}$

$1 \delta_y$  の載荷時に、基礎から 225 mm の位置にせん断ひび割れが発生した。 $3 \delta_y$  の載荷時に、基礎から 175 mm の位置に縦割れが発生した。 $6 \delta_y$  の載荷で右下に縦割れが発生し、 $7 \delta_y$  の載荷になると、右下の縦割れからせん断ひび割れへと発達した。

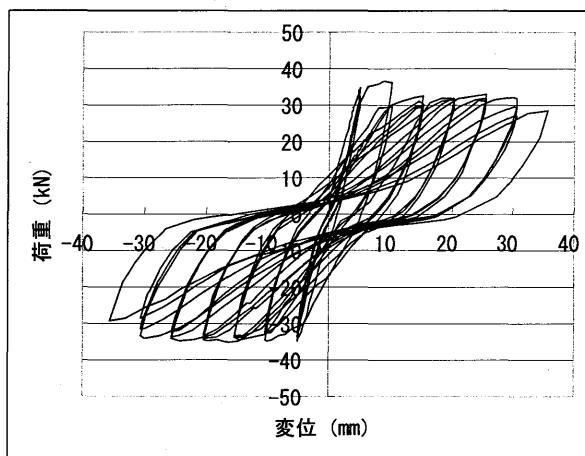


図-2 荷重～変位関係：B1

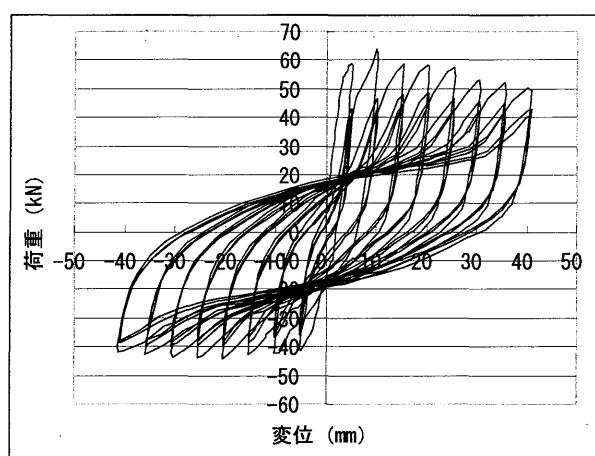


図-3 荷重～変位関係：B2

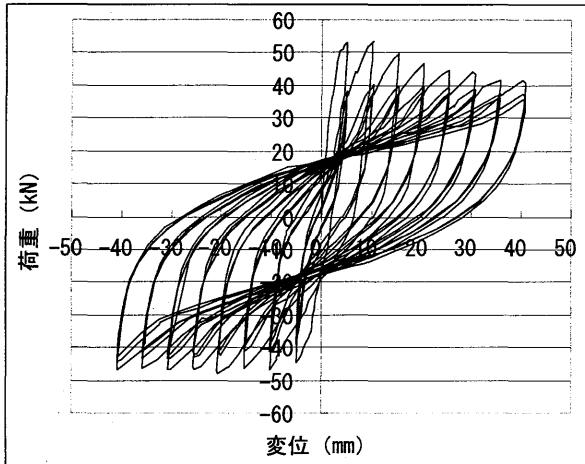


図-4 荷重～変位関係：B3

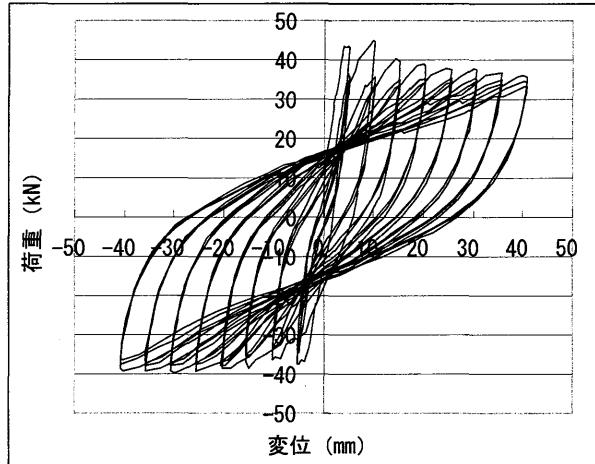
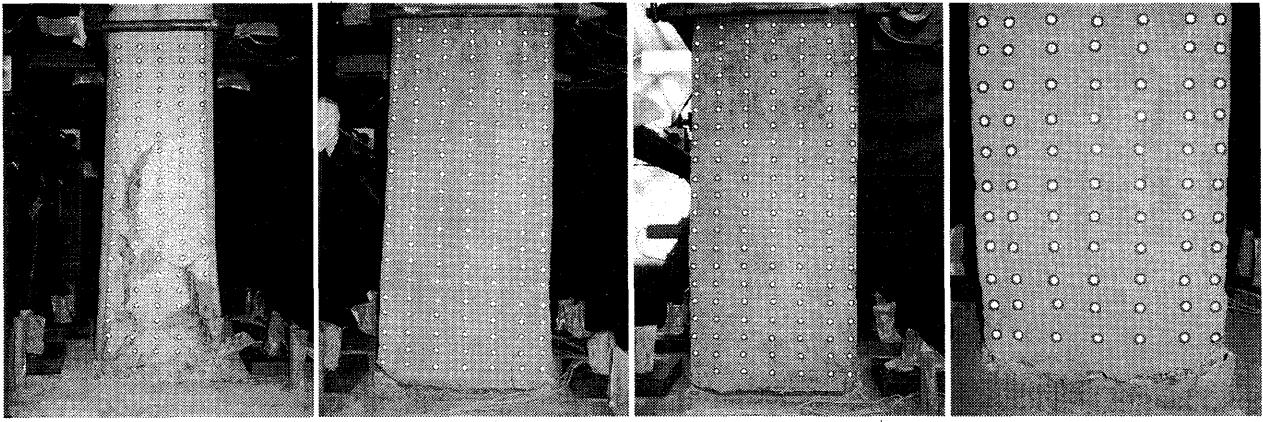


図-5 荷重～変位関係：B4



B1

B2

B3

B4

写真-3 試験体の試験後の状況 (白丸: 画像計測用の測定点)

(3) 試験体 B3 :  $p_G=0.15\%$ ,  $t=30\text{mm}$ 

$1\delta_y$  の載荷時に、基礎から  $150, 300\text{ mm}$  の位置に曲げひび割れが発生した。 $5\delta_y$  まで基部ひび割れの拡大以外変化は無く、 $5\delta_y$  の 1 回目負載荷時に、中央に縦割れが発生した。 $7\delta_y$  の載荷で縦割れはせん断ひび割れに発展した。また  $7\delta_y$  の 3 回目正載荷時には、引張面中央に縦割れが発生した。

(4) 試験体 B4 :  $p_G=0.15\%$ ,  $t=10\text{mm}$ 

$3\delta_y$  の負載荷時には左下に縦割れが発生し、基礎から  $100\text{ mm}$  の位置にせん断ひび割れが発生した。その後の載荷でひび割れ幅は拡大していった。 $6\delta_y$  時には引張面に縦割れが発生した。 $8\delta_y$  の載荷になると、基礎から  $200\text{ mm}$  程度以下の範囲に数本のせん断ひび割れが発生した。また基部付近に微細な縦、斜め方向のひび割れが多数発生した。

## 3.2 等価減衰定数から見た耐震せん断補強効果

RC 部材の耐震性はマクロ的には等価減衰定数（等価粘性減衰定数）で評価することができる。等価減衰定数  $h_e$  は、荷重～変位曲線における履歴ループの面積を用いて次式のように定義される。

$$h_e = \frac{\Delta W}{2\pi W} \quad (1)$$

ここに、 $\Delta W$  : 荷重～変位曲線における各履歴ループの面積 ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )、 $W$  : 原点とピーク時とでなす三角形の面積 ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ ) である。

図-6 に各試験体の等価減衰定数の推移を示す。無補強試験体 B1 は、 $3\delta_y$  までは 0.2 程度の値を示したが、 $4\delta_y$  以降 0.15 程度まで急激に低下した。これはせん断ひび割れが大きく発達した時期とほぼ対応している。

これに対して、補強試験体 B2, B3, B4 は 3 体とも  $8\delta_y$  載荷終了時まで 0.2~0.25 程度の値を維持してお

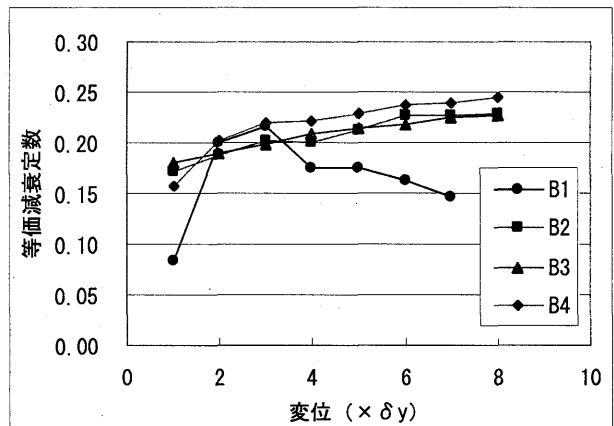


図-6 等価減衰定数の推移

り、PCM と CFG を併用した補強によって耐震性が大きく改善されていることがわかる。

PCM の吹付け厚さが  $30\text{ mm}$  で CFG 補強量が異なる試験体 B2, B3 についてみると、等価減衰定数はほとんど同一であり、CFG 補強量の差はみられなかった。一方、CFG 補強量が同じで、PCM の吹付け厚さが異なる試験体 B3, B4 についてみると、吹付け厚さが  $10\text{ mm}$  の試験体 B4 のほうが、全般に等価減衰定数が大きめの値となった。これは両者の荷重～変位関係の形狀の差によるものである。B3 の場合、ピーク時の変位近くになると荷重が増大しており、明らかに B4 と異なる形狀をしている。等価減衰定数の場合、履歴ループの面積をピーク時の荷重と変位で除しており、結果的に B3 の方が B4 よりも値が小さくなつたものと思われる。このことは B2 に関しても同様である。

### 3.3 せん断変形量から見た耐震せん断補強効果

図-7に単位作用せん断力当りのせん断変形量の推移を示す。せん断変形量 $\delta_s$ は次式により求めた。

$$\delta_s = \delta - \delta_b - \delta_r \quad (2)$$

ここに、 $\delta$ ：載荷点における全変形量、 $\delta_b$ ：平均曲率を柱高さ方向に積分して求めた載荷点での曲げ変形量、 $\delta_r$ ：軸方向鉄筋の基礎からの抜出しに伴う柱部の剛体回転による載荷点での変形量である。

平均曲率 $\phi$ は、柱中心から±約40 mmの位置の測定点の座標値および鉛直方向の変位量を用いて次式により算定した。

$$\phi = \frac{\Delta y_t - \Delta y_c}{D \cdot \Delta b} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta y_t, \Delta y_c$ ：計測区間における引張側および圧縮側測定点の鉛直方向の相対変位、 $D$ ：測定点間の鉛直距離、 $\Delta b$ ：測定点間の水平距離である。

図-7より、無補強試験体B1は、 $4\delta_y$ 辺りからせん断変形量が増大した。一方、PCMとCFGを併用した工法で補強した試験体は、 $6\delta_y$ 辺りからせん断変形量は増加するものの、補強することによって、無補強試験体に比べてせん断変形量が明らかに小さくなっている。また、せん断補強量および吹付け厚さの違いによる明確な差は見られなかった。

### 3.4 帯鉄筋のひずみから見た耐震せん断補強効果

図-8は、各試験体の帯鉄筋のひずみを示したものである。図において帯鉄筋のひずみは、基礎から75, 225, 375 mmの位置における左右計6本のひずみゲージの値の正負載荷ピーク時における平均値を示している。また、図中には試験から求めた帯鉄筋の降伏ひずみ( $2,226 \times 10^{-6}$ )を示している。無補強の試験体B1において帯鉄筋は降伏しているが、補強を施した試験体では帯鉄筋のひずみが降伏ひずみまで達してはおらず、本工法が耐震せん断補強として効果的であることがわかる。

図-9は、補強試験体におけるCFG横筋のひずみを示したものである。CFGのひずみは、基礎から25~325 mmの範囲における左右計12本のひずみゲージの値の正負載荷ピーク時における平均値を示している。CFGのひずみは繰返し変位の増大に伴って徐々に増加しているものの、破断ひずみの $14,000 \times 10^{-6}$ までは達していない。観測された最大のひずみでも破断ひずみの70%程度であった。

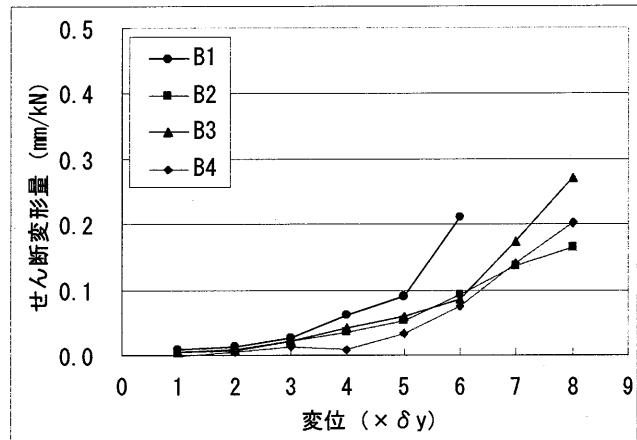


図-7 せん断変形量の推移

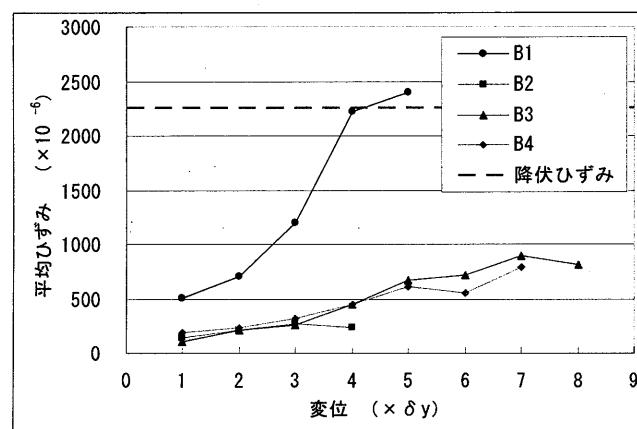


図-8 帯鉄筋のひずみの変化

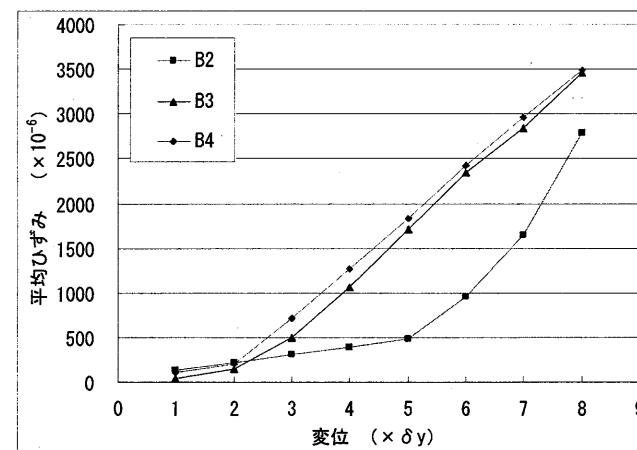


図-9 CFG 横筋のひずみの変化

### 3.5 どの程度の炭素繊維グリッドを設置すればよいか

図-6および図-7に示したように、等価減衰定数およびせん断変形量で見る限りにおいては、せん断補強量（具体的には設置した CFG の断面積）による差は無いようである。

図-10, 11は、断面方向の測定点間の伸び量を示したものである。

補強量の少ない B2 は、 $1\delta_y$  の載荷において既に基礎から 250 mm 付近にせん断ひび割れが発生していることを見てとることができる。その後、繰返し変位の増加に伴ってせん断ひび割れ幅は拡大しており、せん断補強量の不足が懸念される。

これに対し補強量の多い B3 は、 $6\delta_y$  辺りまで目だったせん断ひび割れも発生しておらず、せん断補強量としては十分であると思われる。

なお、両試験体とも基礎近くで伸び量が大きくなっているが、これはグリッドの縦筋位置に発生した縦割れのためである。この点に関しては今後更なる検討が必要である。

### 3.6 吹付け厚さはどの程度にすればよいか

図-12は、吹付け厚さが 10 mm の試験体 B4 において、断面方向の測定点間の伸び量の推移を示したものである。 $5\delta_y$  辺りの大変形における繰返し載荷によって、基礎から 200 mm 程度以下の範囲に微細なひび割れが多数発生していることが伺われる。CFG 補強量が同一で、吹付け厚さが 30 mm の試験体 B3（図-11 参照）と比較して、吹付け厚さが 10 mm では不十分であるものと推察される。

### 3.7 実構造物の耐震補強への適用性

実構造物の補強の一例として、JR 高架橋で一般的に見られる  $800 \times 800$  mm の柱のせん断補強を想定する。実験の結果、十分な耐震性が確認された試験体 B3 の補強量（断面積： $6.6 \text{ mm}^2$ 、グリッド間隔： $50 \text{ mm}$ ）に見合った補強量としては、断面積が約  $60 \text{ mm}^2$  で  $100 \text{ mm}$  間隔の CFG に相当する。この場合 CFG の厚さは約 7 mm 程度である。母材コンクリートとの隙間を考慮しても、CFG の吹付け厚さが 30 mm であれば十分なかぶりが確保でき、強度的にも耐久性の面からも問題はなく、十分現実的な補強方法と考えられる。

### 3.8 施工性の検討

本研究の補強においては、CFG と母材コンクリートとの間に特に隙間を設けることはせず、直接コンクリート面に CFG を設置した（コンクリート面の凹凸による隙間は存在する）。そこで、このような CFG の設置方法に対して、PCM が問題なく CFG 裏面に充填さ

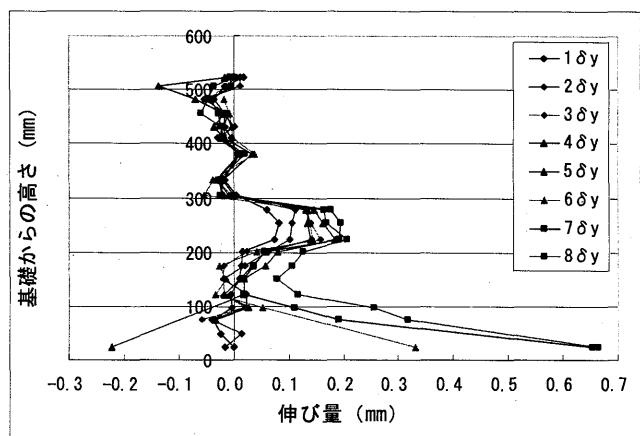


図-10 伸び量の推移 : B2  
(柱中央から土約 80 mm の測定点間)

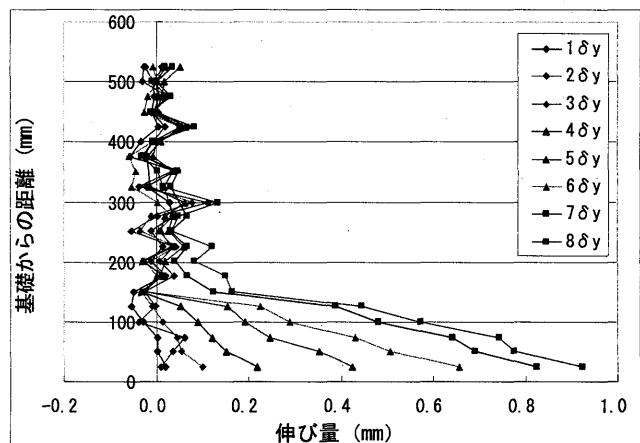


図-11 伸び量の推移 : B3  
(柱中央から土約 40 mm の測定点間)

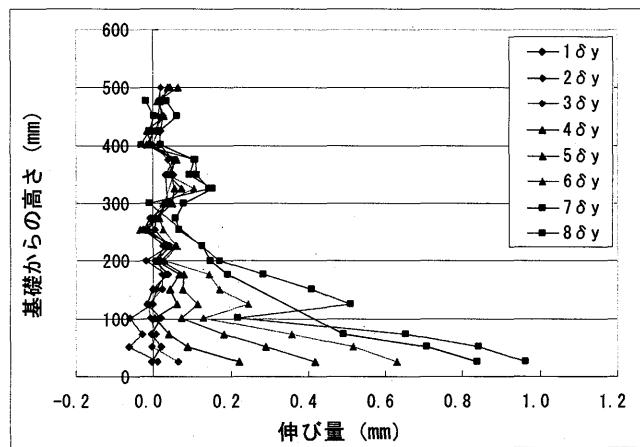


図-12 伸び量の推移 : B4  
(柱中央から土約 80 mm の測定点間)

れているかどうかを、試験終了後試験体を切断して確認した。

写真-4は、切断面の様子を示したものである。写真-4(a)より、CFGの裏面までPCMが問題なく充填されており、今回行ったようにCFGを直接コンクリート面に設置する方法でも問題が無いことが確認できた。ただし、CFGの断面積が大きくなり、幅が広くなるとPCMの充填が十分に行われない可能性も捨てきれない。

CFGの重ね部におけるPCMの充填性に関してみると、写真-4(b)に示すように下層のCFGと母材コンクリートとの間で多少の空隙が観察された。CFGの断面積が大きくなり、幅が広くなるとこの傾向は一段と大きくなることが予想される。この点に関しては、今後の課題としたい。

#### 4. 結論

乾式吹付けモルタルと高強度炭素繊維グリッドを併用した、既存RC構造物の耐震せん断補強方法の確立を目的とした実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 十分な耐震性能を確保するためには、本研究の範囲内では、せん断補強量としては、0.15%（断面積 6.6 mm<sup>2</sup>、グリッド間隔 50mm）程度の補強が必要である。
- (2) 十分な耐震性能を確保するためには、本研究の範囲内では、乾式吹付けモルタルの吹付け厚さとしては、30 mm 程度必要である。
- (3) 乾式吹付けと高強度炭素繊維グリッドを併用した工法は、RC構造物の耐震せん断補強工法としての可能性が高い。

#### 謝辞

本研究を実施するに当たり以下の方々をはじめとして多くの皆様のご協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

東京都 株クリテック・ジャパン

窪田昌行 氏、末吉正明 氏

福山市 山崎建設㈱ 山崎安育 氏

福山市 三島産業㈱ 岸田 晃 氏

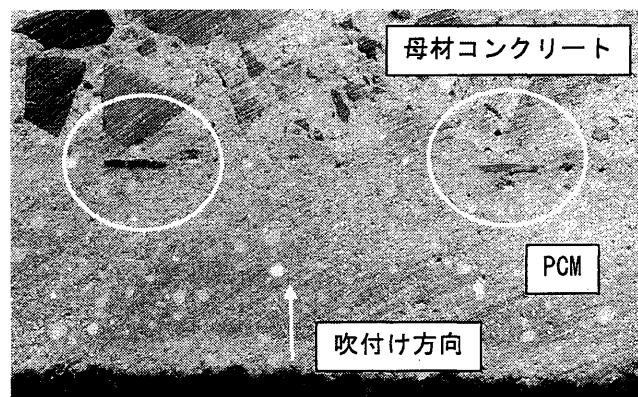
津市 様日本土建 黒石吉孝 氏

新潟市 第一建設工業㈱ 松本光昭 氏

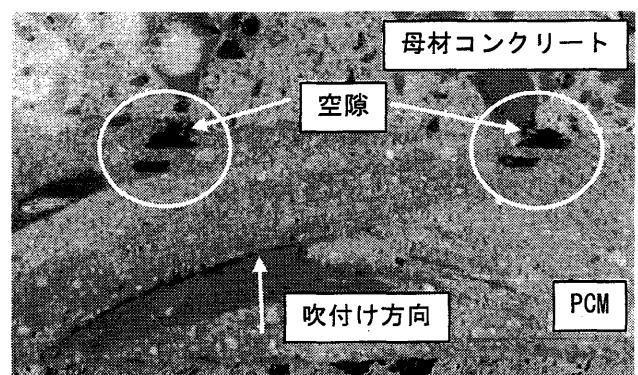
周南市 アキタ建設㈱ 清水健蔵 氏

高知市 栄宝生建設㈱ 佐藤哲司 氏

また、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



(a) CFG 背面への PCM 充填の様子



(b) CFG 重ね部における PCM 充填の様子

写真-4 PCM 充填の様子

ました。ここに記して感謝の意を表します。

さらに、実験を遂行するに当たりコンクリート工学研究室の荒川祐介君、安部希芳君、石樵一歩君、三谷淳君のご協力を得ました。記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 松田好史ほか：コンクリートセグメントと鋼より線を用いた既設 RC 柱の耐震補強、土木学会論文集、No.763/VI-63, pp.185-203, 2004.6
- 2) 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
- 3) 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)、FRP グリッド工法研究会
- 4) 宮内克之ほか：画像計測法を用いた RC はりの変形特性の測定、コンクリート工学年次論文集、Vol.26, No.2, pp.913-918, 2004.7
- 5) 宮内克之、秋本圭一：画像計測法を用いた RC 柱の変形特性の測定、土木学会第 58 回年次学術講演会、V-415, pp.829-830, 2003.9