

# 乾式吹付けとの併用による耐震補強方法における 炭素繊維グリッドの有効率について

宮内 克之\*

Effectiveness of Carbon Fiber Grid Reinforcement for Seismic  
Strengthening of Existing RC Members

Katsuyuki MIYAUCHI\*

## ABSTRACT

Shear failure test was performed for RC beams strengthened with carbon fiber grid reinforcement and polymer cement mortar by drying spray system. Based on the test results, effectiveness of carbon fiber grid reinforcement for the proposed strengthening method was evaluated quantitatively from the points of both shear carrying capacity and the strain of the carbon fiber grid. It was cleared that the proposed method was very applicable for seismic strengthening of existing RC members. It was found that coefficient of effectiveness of carbon fiber grid reinforcement for the proposed seismic strengthening was at least 70 %.

キーワード：耐震補強，補強，炭素繊維グリッド，乾式吹付け

Keywords : Seismic Strengthening, Strengthening, Carbon Fiber Grid,  
Drying Spray System

## 1. はじめに

既存の鉄筋コンクリート（RC）構造物の耐震補強法としては、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吹付け工法は，RC構造物の補修や床版等の補強で実績を伸ば

してきている。中でも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。さらに，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。

このような状況を踏まえて，錆びることがなく軽量で施工が容易であるなどの特徴を有している炭素繊維グリッドと，乾式吹付けポリマーセメントモルタルを

\*建設環境工学科

併用した既存 RC 構造物の耐震せん断補強工法の開発に取り組んでいる。提案工法は、施工性が良く耐久性に富むものである。また、施工性が良いため現場維持期間が短くて済み、コストの縮減が可能である。さらに、耐久性に富むため、ライフサイクルコストの低減が可能である。

ところで、既存の RC 構造物の補強設計を行う場合、補強された RC 棒部材の設計せん断耐力  $V_{ud}$  は一般に以下のように表される。

$$V_{ud} = V_{cd} + V_{sd} + V_{xd} \quad (1)$$

ここに、 $V_{cd}$ : コンクリートが負担する設計せん断耐力、 $V_{sd}$ : せん断補強筋が負担する設計せん断耐力、 $V_{xd}$ : それぞれの補強工法によって負担される設計せん断耐力である。

それぞれの補強工法により負担される設計せん断耐力  $V_{xd}$  を算定するためには、その補強方法の安全率を定める必要がある。その際の安全率は、一般には材料係数として扱われるが、本論では、乾式吹付けモルタルとの併用の影響まで考慮しているため、あえて有効率と呼ぶこととする。この有効率を決定するためには、補強された部材を実際にせん断破壊させて評価する必要がある。

そこで、高強度炭素繊維グリッドと乾式吹付け工法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、提案工法のせん断補強効果、特に高強度炭素繊維グリッドの有する引張強度の本補強工法における有効率を、せん断耐力および炭素繊維グリッドのひずみの面から定量的に評価した。

## 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、高強度炭素繊維グリッド（以後、CFG）と乾式吹付け工法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。せん断耐力の算定において、コンクリート負担分  $V_{cu}$  は二羽式<sup>1)</sup>を用いて算出した。乾式モルタル（以後、PCM）負担分は、(2)式を用いて等価な母材コンクリートの部材幅に置換した。

表-2 鋼材の機械的特性

種類	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> )
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 鋼棒に関しては、メーカー実施試験の値  
\*: 0.2%耐力

表-3 CFG の機械的特性

種類	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
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 <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	134 日	36.6	29.0
PCM	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/mm<sup>2</sup>

表-1 実験計画

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	曲げ耐力 $P_u$ (kN)	せん断耐力 (kN)			耐力比 $V_u/P_u$	
						$V_{cu}$	$V_g$	$V_u$		
T1	-	300	10	2.50	141.7	66.3	-	66.3	0.47	
T3			30		141.7	86.2	-	86.2	0.61	
C3T1			CFG-1		10	141.7	66.3	30.0	96.3	0.68
C3T3					30	141.7	86.2	30.0	116.2	0.82
C4T1	CFG-2	300	10	2.50	141.7	66.3	45.0	111.3	0.79	
C4T3			30		141.7	86.2	45.0	131.2	0.93	
T1_L	-	450	10		3.57	99.2	35.0	-	35.0	0.35
T3_L			30			99.2	45.4	-	45.4	0.46
C3T1_L			CFG-1	10		99.2	35.0	30.0	65.0	0.66
C3T3_L				30		99.2	45.4	30.0	75.4	0.76

\*炭素繊維グリッドの格子間隔: 50 mm

$$beq. = bm \cdot f' m / f' c \quad (2)$$

ここに、 $beq.$ ：等価な母材コンクリートの幅、 $bm$ ：PCMの幅で吹付け厚さの2倍、 $f' m$ ：PCMの圧縮強度、 $f' c$ ：母材コンクリートの圧縮強度である。

またCFG負担分は、圧縮斜材が部材軸となす角度 $\theta=45^\circ$ 、CFGの有効率を1.0とした(3)式によって算定した。CFGの強度特性は表-3の値を使用した。

$$Vg = 2Ag \cdot fg \cdot ke / s \quad (3)$$

ここで、 $Vg$ ：CFGが負担するせん断耐力、 $Ag$ ：CFGの断面積、 $fg$ ：CFGの引張強度、 $s$ ：CFGのグリッド間隔、 $ke$ ：CFGの有効率で1.0とする。

曲げ耐力は、表-2~4の値を用い、全ての材料係数および部材係数を1.0とした断面分割法によって計算した。

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(D10-50mm)が施されている。

実験要因は、CFGの補強量( $Ag=4.4, 6.6 \text{ mm}^2$ )、PCMの吹付け厚さ(10, 30 mm)およびせん断スパン比( $a/d=2.5, 3.57$ )である。

## 2.2 試験体の作製および荷重試験

母材コンクリートの材齢が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 $\phi 6$ 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150 mm(交差点3個分の長さ)とした。

プレウェットングを行った後、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。

はり試験体の荷重方法は2点対称荷重とした。荷重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、荷重時には試験体を拘束しないように緩めている。

## 3. 実験結果および考察

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、図-3に試験終

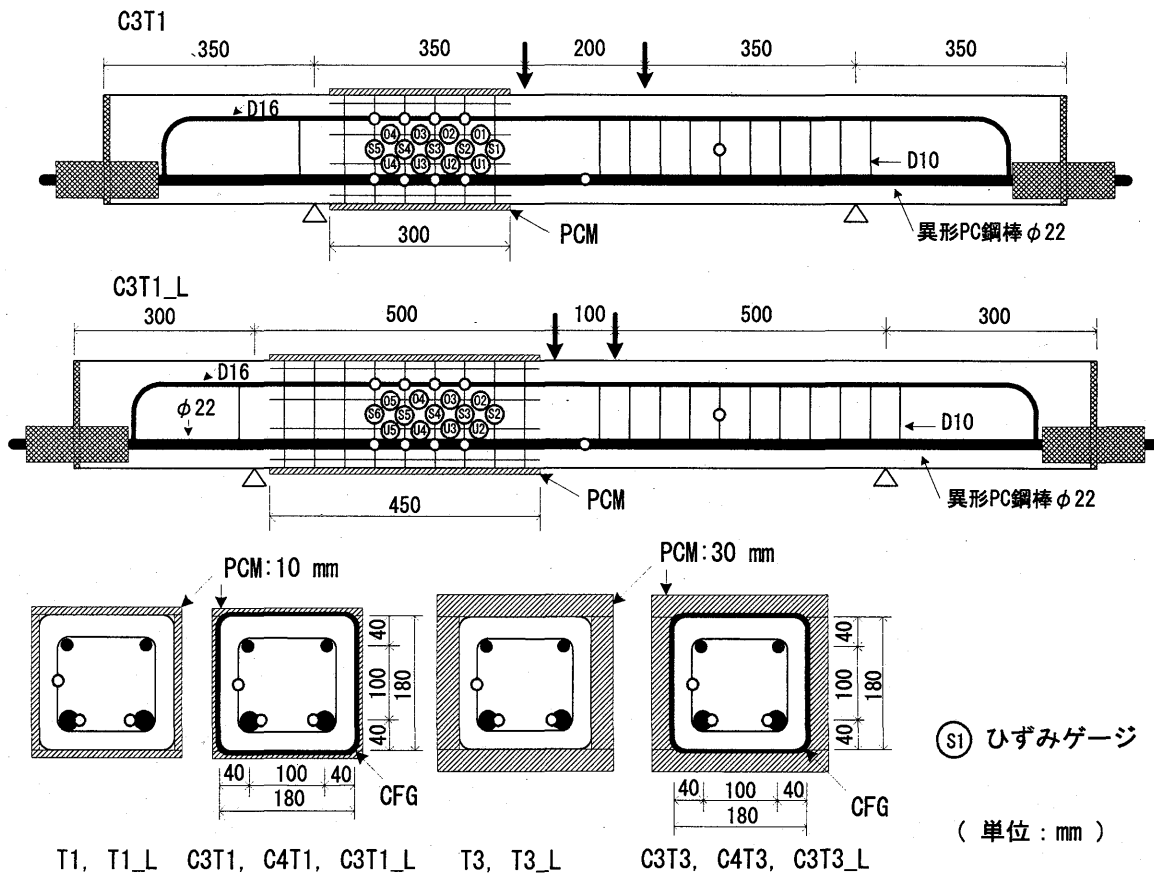


図-1 試験体の概要

了時におけるひび割れの様子を示す。

### 3.1 破壊状況

(1)  $a/d=2.5$  の試験体 (補強区間長 : 300 mm)

1) 試験体 T1 : PCM/ $t=10$  mm

PCM のみを 10 mm 厚で吹き付けた試験体 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、最終的には荷重 207.5 kN でせん断圧縮破壊を示した。

2) 試験体 T3 : PCM/ $t=30$  mm

PCM のみを 30 mm 厚で吹き付けた試験体 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、荷重 244.3 kN で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。

3) 試験体 C3T1 : CFG-1 + PCM/ $t=10$  mm

断面積が  $4.4 \text{ mm}^2$  の CFG-1 を配置し、PCM を 10 mm 厚で吹き付けた試験体 C3T1 は、185 kN のときに補強部にせん断ひび割れが発生した。その後複数のせん断ひび割れが発生し、その内の 1 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。なお、最大荷重 296.0 kN を示した後は、圧縮部コンクリートの破壊と CFG の破断により荷重が低下した。

4) 試験体 C3T3 : CFG-1 + PCM/ $t=30$  mm

断面積が  $4.4 \text{ mm}^2$  の CFG-1 を配置し、PCM を 30 mm 厚で吹き付けた試験体 C3T3 は、147 kN のときに補強部にせん断ひび割れが発生した。その後複数のせん断ひび割れが発生し、その内の 1 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。なお、最大荷重は 295.7 kN であり、CFG の破断は確認されなかった。

5) 試験体 C4T1 : CFG-2 + PCM/ $t=10$  mm

断面積が  $6.6 \text{ mm}^2$  の CFG-2 を配置し、PCM を 10 mm 厚で吹き付けた試験体 C4T1 は、145 kN のとき PCM にせん断ひび割れが発生した。その後複数のせん断ひび割れが発生し、その内の 1 本のせん断ひび割れの幅が拡大した後、285.5 kN でせん断圧縮破壊を示した。しかし、せん断圧縮破壊と曲げ圧縮破壊が混在した破壊様式であった。最大荷重を示した後は、圧縮部コンクリートの破壊に伴い一旦荷重が低下したが、その後も 250 kN 以上の荷重を維持した。変形が大きくなると、CFG の破断とともに荷重が低下した。

6) 試験体 C4T3 : CFG-2 + PCM/ $t=30$  mm

断面積が  $6.6 \text{ mm}^2$  の CFG-2 を配置し、PCM を 30 mm 厚で吹き付けた試験体 C4T3 は、185 kN のとき

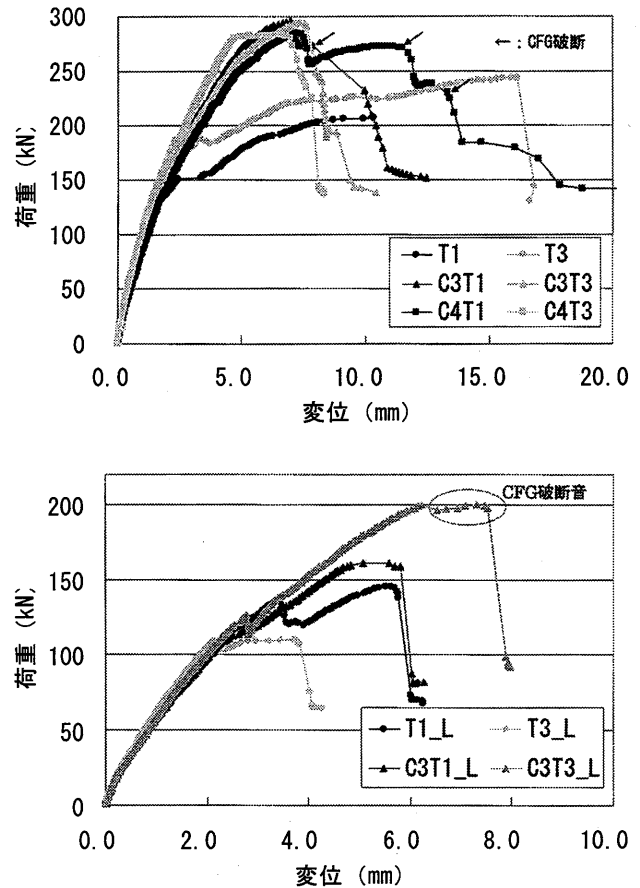


図-2 荷重～変位関係

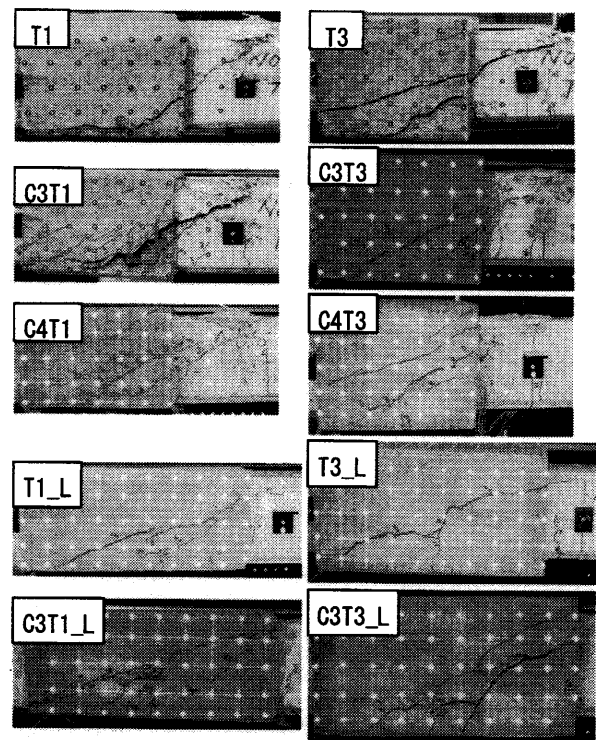


写真-1 破壊の様子

PCM にせん断ひび割れが発生した。その後荷重の増加に伴いせん断ひび割れの幅は大きくなるものの、せん断破壊することなく、曲げ圧縮破壊の様相を強く呈した。最大荷重は、283.5 kN であり、CFG の破断は確認されなかった。

(2)  $a/d=3.57$  の試験体 (補強区間長 : 450 mm)

1) 試験体 T1\_L : PCM/t=10 mm

CFG を配置せず、PCM の吹付け厚さが 10 mm の試験体 T1\_L は、117 kN のとき PCM にせん断ひび割れが発生した。その後も荷重が上昇し、135 kN のとき荷重が大きく低下した。この時点でせん断破壊 (斜め引張破壊) したものと推察されるが、その後も荷重は上昇した。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。

2) 試験体 T3\_L : PCM/t=30 mm

CFG を配置せず、PCM の吹付け厚さが 30 mm の試験体 T3\_L は、109 kN のとき PCM にせん断ひび割れが発生し、事実上せん断破壊 (斜め引張破壊) した。その後もアーチ機構の形成により荷重を維持したが、最大荷重は、T1\_L を下回る 110.6 kN に留まった。

3) 試験体 C3T1\_L : CFG-1 + PCM/t=10 mm

断面積が  $4.4 \text{ mm}^2$  の CFG-1 を配置し、PCM の吹付け厚さが 10 mm の試験体 C3T1\_L は、113 kN のとき PCM にせん断ひび割れが発生した。その後アーチ機構の形成により荷重が上昇し、160 kN のとき荷重が大きく低下した。この時点でせん断破壊 (斜め引張破壊) したものと推察される。その後変形が大きくなると、CFG が破断する音が確認できた。

4) 試験体 C3T3\_L : CFG-1 + PCM/t=30 mm

断面積が  $4.4 \text{ mm}^2$  の CFG-1 を配置し、PCM の吹付け厚さが 30 mm の試験体 C3T3\_L は、126 kN のとき PCM にせん断ひび割れが発生し、荷重が一旦低下した。その後アーチ機構の形成により荷重が再び上昇し、200 kN のときせん断破壊 (斜め引張破壊) した。CFG の破断は確認できなかった。

### 3.2 せん断耐力から評価した 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  $V_u$  は次式で表される。

$$V_u = V_{cu} + V_{mu} + V_g \quad (4)$$

ここに、 $V_{cu}$  : コンクリートが負担するせん断耐力、 $V_{mu}$  : PCM が負担するせん断耐力、 $V_g$  : CFG が負担

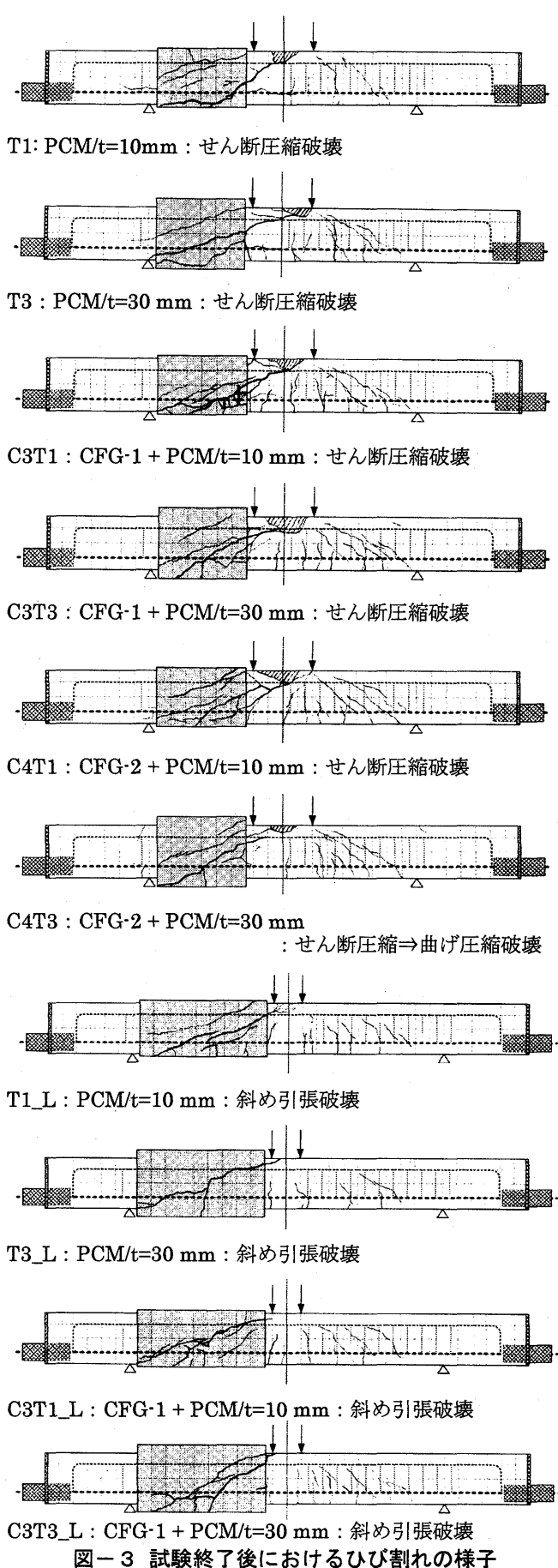


図-3 試験終了後におけるひび割れの様子

するせん断耐力である。

これより  $V_g$  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 ( $V_{cu}+V_{mu}$ ) 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、 $V_g$  の実験値を求める際の ( $V_{cu}+V_{mu}$ ) 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  $67.5 \text{ kN}$  を用いた。一方  $V_g$  の理論値は、CFG の有効率を  $1.0$  とした(3)式により算出した。計算結果を表-5に、各試験体ごの有効率を図-4に示す。

吹付け厚さを  $30 \text{ mm}$  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  $10 \text{ mm}$  の試験体  $C3T1\_L$  に関しては、有効率は  $0.45$  であった。これは、 $T1\_L$  のせん断耐力が異常に高かったこ

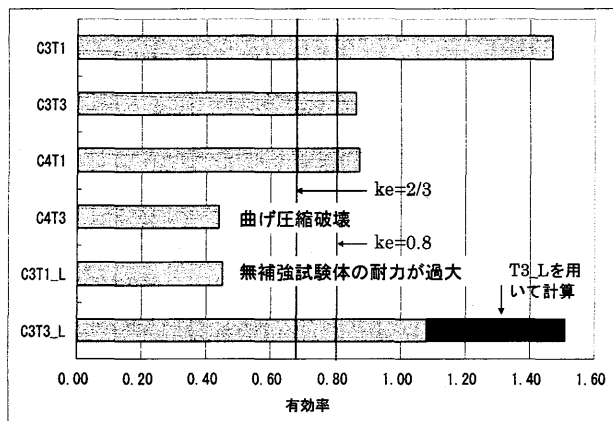


図-4 せん断耐力から評価したCFGの有効率

とが影響しているものと思われる。

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  $10 \text{ mm}$  の試験体  $C3T1$  および  $C4T1$  に関しては、それぞれ有効率は  $1.47$ 、 $0.87$  であった。吹付け厚さが  $30 \text{ mm}$  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  $0.86\sim 1.47$  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  $30 \text{ mm}$  とすることで  $80\%$  程度、少なくとも増厚・巻立て工法用の補修・補強指針<sup>2)</sup> で採用している安全率である  $2/3$  程度は十分に採用可能であるものと考えられる。

### 3.3 ひずみから評価したCFGの有効率

図-5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-6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-5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

表-5 実験結果

試験体記号	$V_{cr}$ (kN)	$V_{exp.}$ (kN)	$V_{gexp.}$ (kN)	$V_{gcal.}$ (kN)	有効率 $V_{gexp.}/V_{gcal.}$	破壊形式
T1	67.5	103.8	—	—	—	せん断圧縮
T3	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

- $V_{cr}$  : PCMせん断ひび割れ発生時作用せん断力
- $V_{exp.}$  : 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、荷重が低下した際のピーク時の作用せん断力（図-2参照）
- $V_{gexp.}$ 、 $V_{gcal.}$  : CFGが負担するせん断耐力の実験値および理論値

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。CFG の有効率に及ぼす PCM の吹付け厚さの影響については、更に詳しく検討する必要がある。

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 :  $14,000 \times 10^{-6}$ ) 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。

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筋が多いため、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。

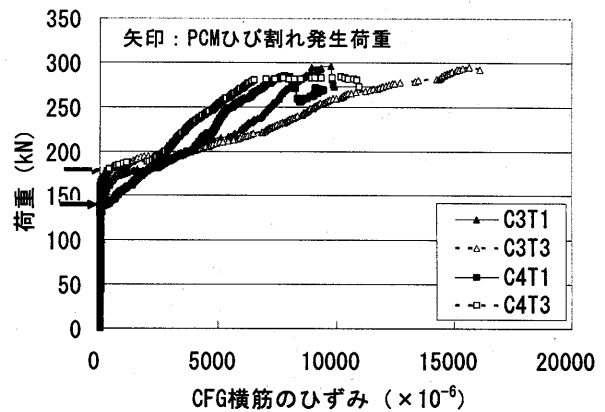
#### 4. 結論

既存の RC 構造物の耐震補強を目的として、高強度炭素繊維グリッドとポリマーセメントモルタルの乾式吹付け工法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。

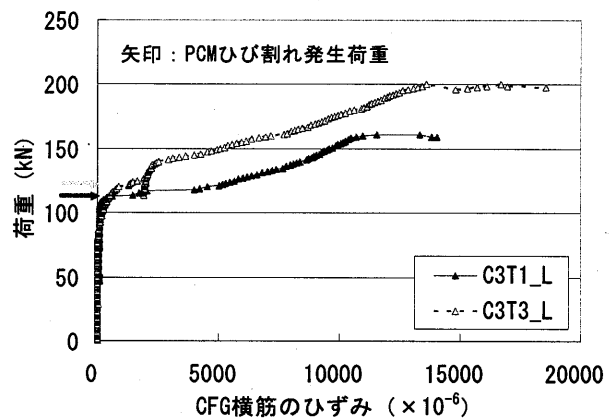
- (1) 高強度炭素繊維グリッドと乾式吹付け工法を併用した工法は、耐震せん断補強方法として有効である。
- (2) 本実験の範囲では、高強度炭素繊維グリッドの引張強度の、本補強方法に対する有効率は、少なくとも 70% 程度確保できる。

**謝辞** 本研究を遂行するに当たり、多大なご協力を賜りましたアキタ建設 (株) 専務清水健蔵氏をはじめとするアキタ建設 (株) の皆様、および (株) 日本土建黒石吉孝氏、第一建設工業 (株) 松本光昭氏に、厚く御礼申し上げます。

本研究で使用した高強度炭素繊維グリッドは日鉄コ



(a) a/d=2.5



(b) a/d=3.57

図-5 荷重と CFG 横筋のひずみとの関係

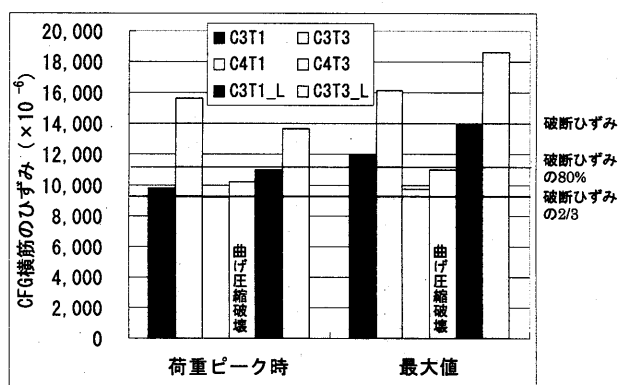


図-6 CFG 横筋のひずみから評価した有効率

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。

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、小川正道君、谷本武志君、長治明典君、  
三宅康太君、若山典弘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) 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
- 2) 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，2001.4