

論文 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

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、ポリマーセメントモルタルを乾式で吹き付ける定着方法でせん断補強された RC 部材の単調載荷試験を行い、炭素繊維束を用いた炭素繊維格子板の定着方法に及ぼす繊維量の影響に関して検討した。その結果、炭素繊維格子板端部を定着するために必要な繊維量は、炭素繊維格子板縦筋の引張耐力に相当する引張耐力を有する繊維量で十分であることが明らかになった。また、提案する定着方法によってせん断補強された RC 部材のせん断耐力は、既存の計算式で評価できることが確認された。

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, 定着

1. はじめに

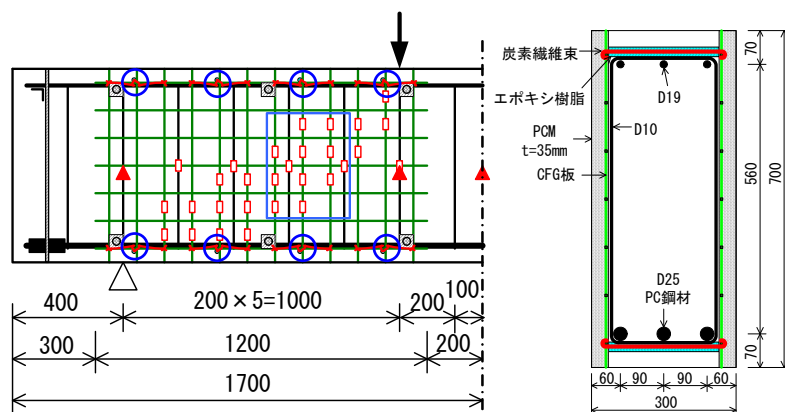
1980 年以前のいわゆる旧基準に基づいて設計された既存 RC 構造物の中には、耐震性能が必ずしも十分ではなく、近い将来発生が危惧されている巨大地震により強い地震動を受けると、相当な被害が生じることが予想される構造物も少なくない。そこで、主に耐久性および補強に伴う断面厚の増加が少ないという観点から、炭素繊維格子板（以下、CFG 板）とポリマーセメントモルタル（以下、PCM）の乾式吹付け工法を併用した補強方法の開発研究を進めている。

独立した柱部材の場合、周囲を取り囲む方法によりせん断補強が可能であるため、CFG 板の定着も容易であり、その効果は確認されている¹⁾。しかし、補強用の CFG 板で部材を取り囲むことが困難な場合には、別途 CFG 板端部の定着方法を考える必要がある。一般的な定着の方法としては鋼板等による固定も考えられるが、耐久性に問題がある。

そこで、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でせん断補強された RC 部材の単調載荷試験を行い、炭素繊維束を用いた CFG 板の定着方法の可否と補強部材の力学的挙動に関して検討した。その結果、提案工法によりせん断補強された試験体は最終的にせん断破壊し、破壊に至るまで定着用炭素繊維束の損傷あるいは破断は確認されておらず、提案する定着方法は、せん断補強に用いる CFG 板端部の定着方法として効果的であることが確認された²⁾。

本論文は、定着に使用する炭素繊維束の繊維量が定着性能に及ぼす影響を明らかにした。すなわち、CFG 板縦筋 1 本当りへの引張耐力に対する定着用炭素繊維束の引張耐力の比を実験要因とし、提案方法でせん断補強された RC はり試験体に関して単調載荷によるせん断破壊試験を行い、CFG 板の定着性能に及ぼす繊維量の影響に関して検討した。また、提案する定着方法によってせん断補強された RC 部材のせん断耐力が、既存の計算式で評価できるか否かについて検討した。



▲ 変位計 □ ひずみゲージ ◻ φ6アンカー ○ 定着孔の位置

図-1 試験体の概要 (単位: mm)

表-1 試験体一覧

試験体	耐力比*
C8CA ²⁾	1.3
C8C1	1.15
C8C2	1.0
C8C3	0.82

*: CFG 板縦筋 1 本当りへの引張耐力に対する定着用炭素繊維束の引張耐力の比

・炭素繊維の特性
引張強度: 4,829 N/mm²
弾性係数: 253 kN/mm²

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

*2 StoCretec Japan (株) 代表取締役

*3 新日鉄住金マテリアルズ (株) コンポジットカンパニー 開発部長 (正会員)



写真-1 CFG板格点結束部



写真-2 炭素繊維束定着部

表-2 CFGの力学的特性

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

表-3 コンクリート系材料の力学的特性

	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	使用試験体
コンクリート*	35.7	3.29	31.1	C8C1, C8C2
	37.6	2.98	32.0	C8C3
PCM	77.8	4.89	31.6	C8C1, C8C2
	73.3	4.20	30.3	C8C3

*呼び強度24のレディーミクストコンクリートを使用

2. 実験概要

試験体一覧を表-1に、試験体の概要を図-1に示す。また、使用材料の力学的特性を表-2, 3に示す。引張鉄筋にはD25(PC B種1号), 圧縮鉄筋にはD19(SD345), 帯鉄筋には、左側せん断スパンにD10(SD295A)を200mm間隔で、右側せん断スパンにはD13(SD345)を100mm間隔で配置した。

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。実験要因は定着に使用する炭素繊維束の繊維量であり、その量は、CFG板縦筋1本当りの引張耐力の1.3, 1.15, 1.0, 0.82倍の耐力となる量とした。耐力比1.3の試験体C8CAに関しては文献2)で既に公表済みであるが、定着性能に及ぼす繊維量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C8CAに関する詳細については、文献2)を参照されたい。

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(写真-1, 2参照)。定着用の炭素繊維束は3格点分をひとまとめにして1ヶ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。PCMの吹付厚さは35mmとした。

載荷は単純支持状態での二点对称載荷とした。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。

いずれの試験体においても荷重が400kNから500kN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。試験体C8C1およびC8C3においては、その後、荷重が約900kNにかけてせん断ひび割れが進展した。荷重が1,000kNから1,300kN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1,300kN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。一方、CFG板が耐力比1.0の炭素繊維束で定着された試験体C8C2においては、荷重が約900kNになると左支点から発生したせん断ひび割れがアーチ状に進展した。これに伴い、アーチ機構が形成されたことによる荷重の上昇がみられた。

いずれの試験体も、最終的には最大荷重を示した後、

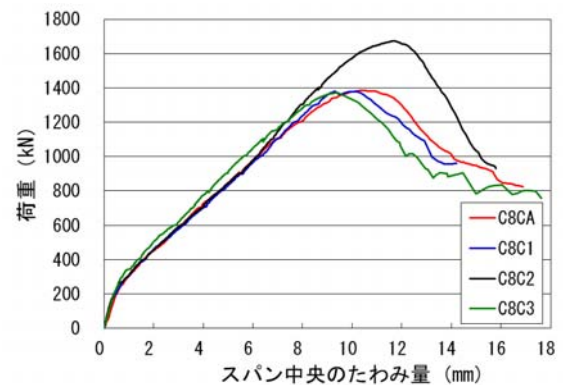


図-2 荷重～スパン中央のたわみ量関係

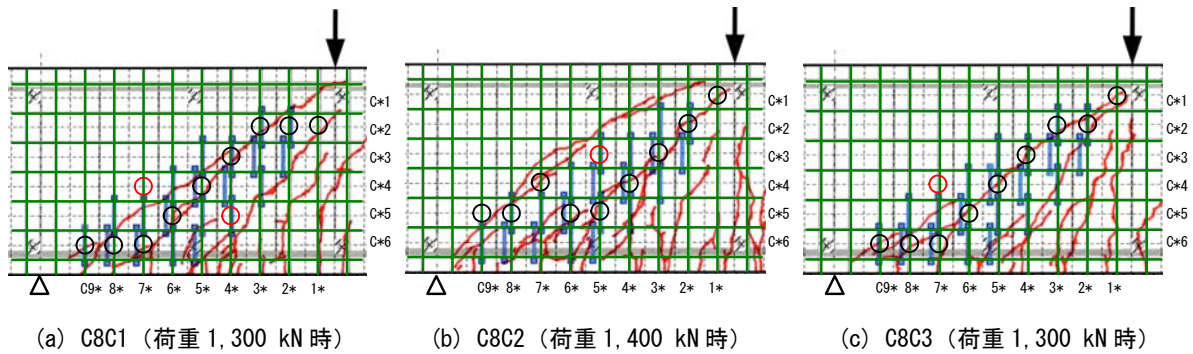


図-3 ひび割れ発生状況



写真-3 CFG板横筋のせん断変形 (C8C2 前面)



写真-4 CFG板横筋のせん断変形 (C8C3 後面)



写真-5 CFG板横筋の繊維方向の割れ裂け (C8C2 前面)



写真-6 CFG板横筋の一部破断 (C8C3 前面)

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。

各試験体の最大荷重時前(試験体C8C2は荷重1,400 kN時、それ以外の試験体は荷重1,300 kN時)におけるひび割れ発生状況を図-3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により大きくせん断変形した部分(写真-3, 4)や、はりのせん断変形に伴う上下方向のずれにより、

格点中あるいは格点近傍でも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板横筋の繊維方向の割れ裂けが確認できた(写真-5)。また、CFG板横筋の一部破断も確認された(写真-6)。この横筋の一部破断は、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、最大荷重点を過ぎて変形が相当に大きくなった時点で発生したものと推察される。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板縦筋のひずみ分布

図-4は、せん断スパン中央の(図-1中における□内の範囲)CFG板縦筋のひずみ分布を試験体ごとに、前面のCFG板に関して示したものである。各ひずみゲージ

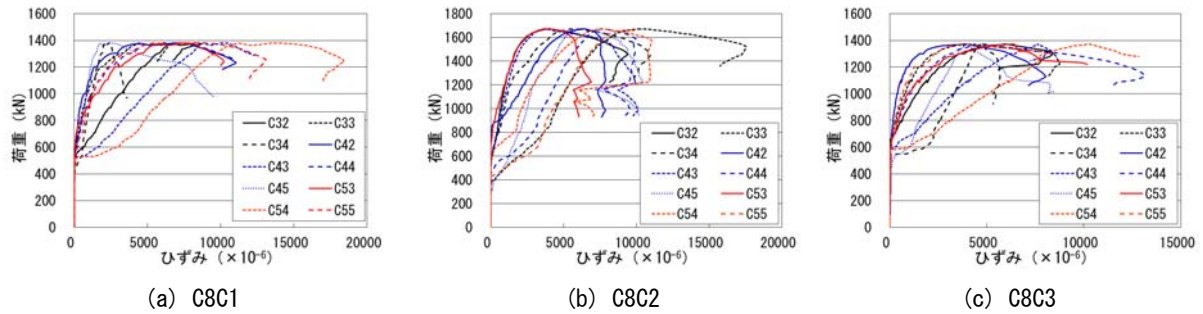


図-4 CFG板縦筋のひずみ(前面)

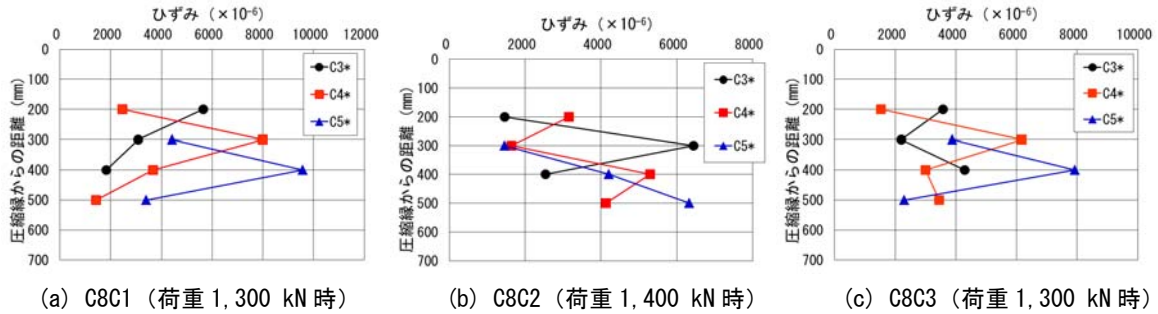


図-5 CFG板縦筋のひずみの部材高さ方向の分布(前面)

の位置に関しては、図-3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400kN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, C8C2においては、最大荷重時のCFG板縦筋のひずみは約 $10,000 \times 10^{-6}$ であった。この値はCFG板縦筋の終局ひずみ $11,000 \times 10^{-6}$ ($1,690/102,000 \times 2/3$, $2/3$: CFGの終局時における材料強度の安全率³⁾)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 $19,200 \times 10^{-6}$ (後面で観測)、試験体C8C2で約 $17,500 \times 10^{-6}$ (前面で観測)であった。この値はCFGの破断ひずみ $16,500 \times 10^{-6}$ ($1,690/102,000$)を上回る値であり、耐力比が1.0以上の範囲においては、定着が確実に機能しており、せん断補強用の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C8C3においては、最大荷重時のひずみは他の試験体より全体的に多少小さい値であった。

3.3 CFG板縦筋のせん断力負担機構

CFG板は炭素繊維にビニルエステル樹脂を含浸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吹付けに用いたPCMとの付着力は決して大きいとは言えない。したがって、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。

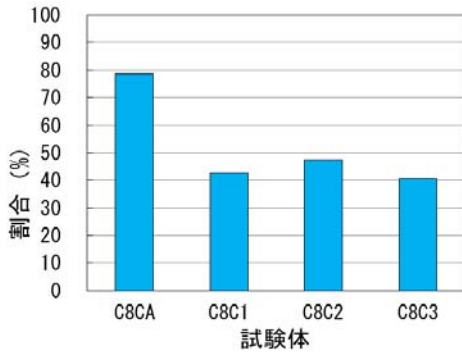
図-5は、図-1中に□で示した範囲に関して、部材高さ方向のCFG板縦筋のひずみ分布を、最大荷重時前

(試験体C8C2は荷重1,400kN時、それ以外の試験体は荷重1,300kN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。

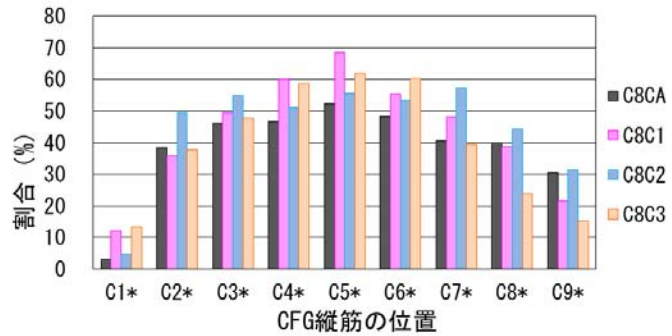
図-5において、ひび割れ面(あるいは、ひび割れ面近傍)におけるCFG板縦筋に作用する引張力(あるいは、CFG板縦筋が負担するせん断力)は、CFG板縦筋の格点を境に不連続に減少するものと考えられる。そこで、ひび割れ面(あるいは、ひび割れ面近傍)におけるCFG板縦筋のひずみを基準(100%)にして、ひび割れ面から上下側におけるCFG板縦筋のひずみの割合を図-6に示す。

各試験体により、あるいは同一の試験体においても位置によりひび割れの発生状況が異なる。したがって、多少のばらつきはあるものの、C8CA以外の試験体においては、CFG板縦筋に作用する引張力は、ひび割れ面から1格点遠ざかると約40%に減少することが推察される。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、その約60%が負担されていることがわかる。試験体C8CAにおいては、その負担割合は80%に近い値となった。これは、C8CAで使用したPCMの圧縮強度(57.1 N/mm^2 : 文献2))が他の試験体で使用したPCMの圧縮強度(75 N/mm^2 程度、表-3参照)よりも低いことも一因と考えられる。

一方、主ひび割れ面から離れた比較的損傷が少ない(ひび割れが発生していない)領域に関してCFG板の格点の効果を見る。検討対象は、図-3中における○のひずみ



図一六 主ひび割れ面から1格点隔てた縦筋におけるひずみ負担の割合：最大荷重時前



図一七 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）

ゲージ位置のみと、事例はわずか4例ではあるが、主ひび割れ面から2格点遠ざかると、CFG板縦筋の負担割合は約30%に減少していた。

以上のことより、CFG板の定着長が十分な場合には、CFG板端部の定着に使用する炭素繊維束の量は、CFG板縦筋が負担する引張耐力に相当する引張耐力を有する炭素繊維束の量で十分と考えられる。しかしながら、CFG板の定着長が必ずしも十分でない、せん断ひび割れ端部においては、この考え方は必ずしも当てはまらない。

図一七は、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一三中に○印で示す。

試験体の最も荷重点に近いC1の縦筋は、C2の縦筋と同一の定着孔に定着されている。C2の縦筋には相当のひずみが発生していることから、最大荷重時において定着は十分に機能しているものと考えられる。一方、C1の縦筋においてひずみがほとんど発生していないのは、ひび割れ位置との関係で、C1の縦筋に引張力がほとんど作用していないことによるものと考えられる。

また、最終的に主破断面となるせん断ひび割れと交差するC2～C7の縦筋においては、いずれの試験体においても40～60%程度のひずみ値が観測されており、CFG板縦筋がせん断補強筋として十分に機能していることが推察される。

一方C8およびC9の縦筋に注目すると、耐力比が0.82の炭素繊維束で定着された試験体C8C3においては、他の試験体と比べて値が極端に小さくなっており、定着が十分に機能していないことを伺わせる結果となった。

3.4 せん断耐力の実験値と計算値との比較

試験体の作用せん断力の実験値（荷重の1/2）と標準示

方書⁴⁾に基づいて算定した終局せん断耐力および設計せん断耐力との比較を図一八に示す。CFG板でせん断補強された部材のせん断耐力は式(1)で表されるものと仮定した。補強用CFG板が負担するせん断耐力 V_{gu} に関しては式(2)により算定した。式(2)は一般的なトラス理論によるせん断耐力の算定式を基にしている。

補強用CFG板縦筋の強度の有効係数 K_g は、提案する定着方法における、定着用炭素繊維束で補強用CFG板の格子を結束することによる、補強用CFG板の格子の強度の減少あるいは結束による応力集中等による定着用炭素繊維束の強度低下等、補強効果を低下させる影響を取り入れるためのものである。

材料の力学的特性は、各試験体の作製時期が異なるため多少の差異があるが、ここでは、試験体C8C1、C8C2で使用した材料特性を用いて計算した値を示す。

終局せん断耐力の計算においては、強度などの材料特性は全て実際の値（表一2、3）を使用し、材料係数、部材係数は全て1.0を使用した。CFGの終局時における引張強度の安全率は $\alpha=2/3$ ³⁾を用い、補強用CFG板縦筋の強度の有効係数は $K_g=1.0$ を用いた。また、設計せん断耐力の計算においては、強度などの材料特性は特性値を使用し、材料係数、部材係数の値は標準示方書に定める値を用いた。CFGの終局時における引張強度の安全率は $\alpha=2/3$ を用いた。また、 $K_g=1.0$ を用いている。

$$V_u = V_{cu} + V_{sy} + V_{gu} \quad (1)$$

$$V_{gu} = \frac{2A_g \times f_g \times \alpha \times K_g \times z}{s_g} \quad (2)$$

ここに、 V_u ：せん断耐力(N)

V_{cu} ：コンクリート系材料が負担するせん断耐力(N)

V_{sy} ：既設帯鉄筋が負担するせん断耐力(N)

V_{gu} ：補強用CFG板が負担するせん断耐力(N)

A_g ：補強用CFG板の縦筋1本の断面積(mm^2)

f_g : 補強用CFG板の引張強度 (N/mm^2)
 K_g : 補強用CFG板の強度の有効係数
 α : 補強用CFG板の引張強度の安全率
 s_g : 補強用CFG板縦筋の間隔 (mm)
 z : 偶力のアーム長 (mm)

せん断耐力の実験値は、試験体 C8C2 以外は、標準示方書に基づいて算定した終局せん断耐力よりも多少小さい値となった。これは、実験における最終的な破壊形態が、載荷点近傍の圧縮側コンクリートの圧縮破壊であったことが影響しているものと考えられる。また、写真-3～6に示したようなせん断ひび割れと交差するCFG板横筋のせん断変形や繊維方向の割れ裂けも影響しているものと考えられる。一方、実験値は標準示方書に基づいて算定した設計せん断耐力を大きく上回る結果となった。したがって、CFG板とPCMの乾式吹付けを併用した補強方法は、提案した定着方法によりCFG板端部を定着することにより、既存RC部材のせん断補強方法として効果的に機能するものと考えられる。

いずれの試験体においても、最終的な破壊形式がCFG板縦筋の破断あるいはCFG板の定着部の破壊ではなく、載荷点近傍のコンクリートの破壊である。したがって、最大荷重時において必ずしもCFG板縦筋の負担荷重が、CFG板縦筋のせん断耐力には達していないものと考えられる。一方、最大荷重時におけるCFG板縦筋のひずみは試験体C8C3を除き $10,000 \times 10^{-6}$ 程度であり、CFG板縦筋の終局ひずみ $11,000 \times 10^{-6}$ に相当する値である。

したがって、CFG板縦筋1本当りの引張耐力に相当する引張耐力を有する炭素繊維束で定着すれば、補強用CFG板が負担するせん断耐力は式(1)、(2)によって算定してもよいものと考えられる。

4. まとめ

CFG板の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でせん断補強されたRC部材に関して、CFG板の定着性能に及ぼす繊維量の影響に関して検討した。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。

- (1) 提案工法によりせん断補強された試験体は、破壊に至るまで、定着用炭素繊維束の損傷あるいは破断は確認されておらず、提案する定着方法はせん断補強

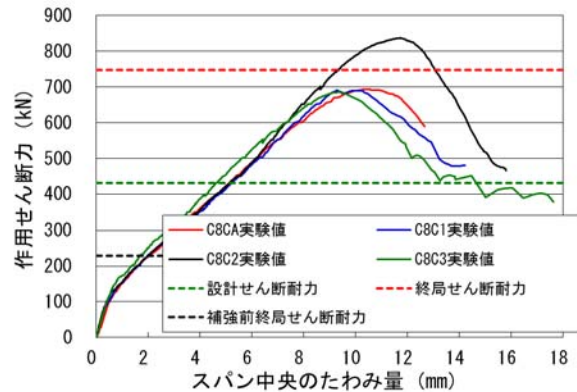


図-8 せん断耐力の比較

用CFG板端部の定着方法として効果的であるものと考えられる。

- (2) 耐力比がそれぞれ 1.15 あるいは 1.0 の炭素繊維束で定着された試験体 C8C1, C8C2 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 $16,500 \times 10^{-6}$ を上回る値であり、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。
- (3) 耐力比が 0.82 の炭素繊維束で定着された試験体C8C3においては、最大荷重時での支点近傍におけるCFG板縦筋のひずみが、他の試験体と比べて値が極端に小さくなっており、定着が十分に機能していないことを伺わせる結果となった。
- (4) せん断耐力の実験値は土木学会コンクリート標準示方書に基づいて算定した設計せん断耐力を大きく上回る結果となった。したがって、提案工法によってせん断補強されたRC部材のせん断耐力は、既存の計算式で評価が可能である。

参考文献

- 1) 宮内克之, 清水健蔵: 乾式吹付けと炭素繊維グリッドを併用した補強方法の耐震補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1597-1602, 2007.7
- 2) 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
- 3) 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
- 4) (社) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2012