

論文 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

宮内 克之^{*1}・下枝 博之^{*2}・小林 朗^{*3}

要旨：炭素繊維グリッド板の端部を炭素繊維束またはアラミド繊維ロープ束で固定し、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、炭素繊維束あるいはアラミド繊維ロープ束を用いた炭素繊維グリッド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、両繊維を用いた定着方法はどちらも極めて効果的であることが確認された。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、炭素繊維グリッド、連続繊維、せん断補強、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。ところで、水門・樋門等の耐震補強が喫緊の課題となっているが、ゲート幅の変更が不可能な水門・樋門等の耐震補強においては、主に耐久性、少ない断面厚の増加により、炭素繊維グリッド板（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は極めて効果的な工法であると思われる。しかし、CFG 板を水門・樋門等の補強に使用する場合、CFG 板の定着が問題となる。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⁾。しかし水門・樋門等の場合、部材を取り囲むことが困難な場合が想定されることから、CFG 板端部の定着を考えておく必要がある。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

久性の問題、ゲート幅変更の不可等の観点から、採用は難しいものと推察される。この問題を解決する方法の一つとして、良好な耐久性を有し既存断面内での補強を可能とする方法として、可塑性を有する炭素繊維あるいはアラミド繊維を用いた定着方法が考えられる。そこで実施工を考え、CFG 板の端部を炭素繊維束またはアラミド繊維ロープ束で固定し、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、炭素繊維束あるいはアラミド繊維ロープ束を用いた 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を行うものである。すなわち、提案する定着方法によりせん断補強用 CFG 板の性能が十分に発揮できるかどうかについて検討する。また、提案方法を用いてせん断補強された RC 部材のせん断耐力が、既存の設計式で評価できるかどうかについて検討を行う。

2. 実験概要

実験計画を表-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-2～4に示す。

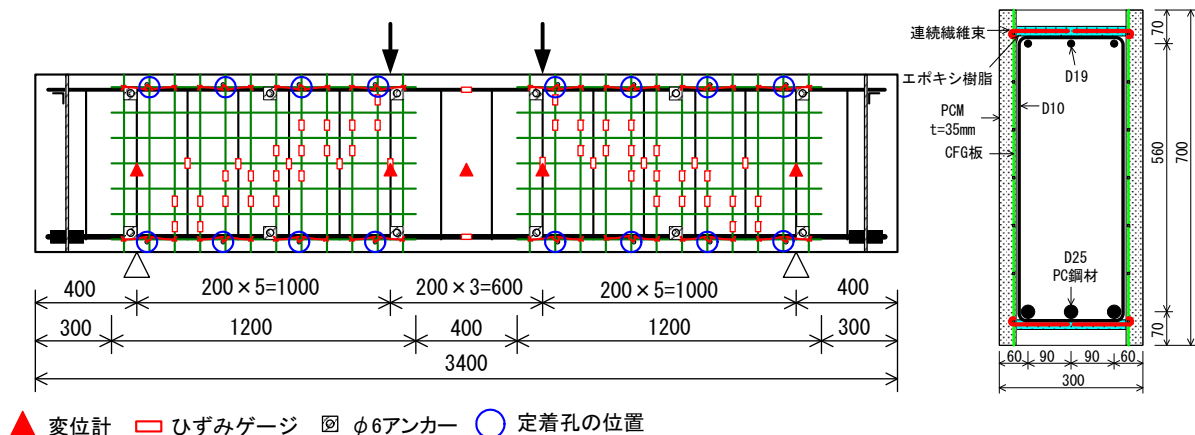


図-1 試験体の概要 (単位: mm)

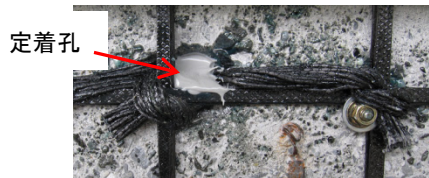
*1 福山大学 工学部 スマートシステム学科 教授 博士 (工学) (正会員)

*2 StoCretec Japan (株) 代表取締役

*3 新日鉄住金マテリアルズ (株) 日鉄コンポジット社 社会資本材料事業部 技術部長 (正会員)

表－１ 実験計画

試験体	CFG 板	端部定着材料
C8CA	CR8 格子間隔 100mm	左スパン 炭素繊維束 右スパン アラミド繊維ロープ束



(a) 炭素繊維束定着部



(b) アラミド繊維ロープ束定着部

写真－１ CFG 板定着部

表－２ 鋼材の力学的特性

筋 種	降伏強度 (耐力) (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	適 用
D25:PC B 種 1 号	994	1,144	200	引張鉄筋
D19:SD345	374	579	198	圧縮鉄筋
D10:SD295A	372	578	188	帯鉄筋

表－３ 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	1,811	1,400	101.4	100.0	26.4

表－４ 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)
コンクリート	34.6	2.94	31.5
PCM	57.1	6.62	—

RC はり部材のせん断スパンに、せん断補強用の CFG 板を板 1 枚につき $\phi 6$ アンカー 6 本で仮留めし、上下端部を炭素繊維束またはアラミド繊維ロープ束で定着した。せん断補強用に配置した CFG 板上下端部の定着は、左右のせん断スパンで定着材料を変えている。左側せん断スパンでの CFG 板上下端部の定着には炭素繊維束を用いた。また、右側せん断スパンでの CFG 板上下端部の定着にはアラミド繊維ロープ束を使用した。エポキシ樹脂を含浸させた定着用連続繊維束の一端を 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 参照）。定着に使用した連続繊維束の量は、CFG 板の筋 1 本が有す引張耐力の約 1.3 倍の耐力となる量とした。炭素繊維の引張強度は $4,829 \text{ N/mm}^2$ 、弾性係数は 253 kN/mm^2 、アラミド繊維ロープの引張強度は $2,752 \text{ N/mm}^2$ 、弾性係数は 107 kN/mm^2 である。定着用の連続繊維束は 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、炭素繊維束用で 22 mm 、アラミド繊維ロープ束用で 26 mm とした。また、定着孔は試験体の断面を貫通して開けているものの、連続繊維束の定着は各側面から行い、定着長はいずれも 150 mm とした。なお、定着孔の開口端は応力集中等による連続繊維束の耐力低下を防ぐために、半径 20 mm 程度の丸みをつけた。

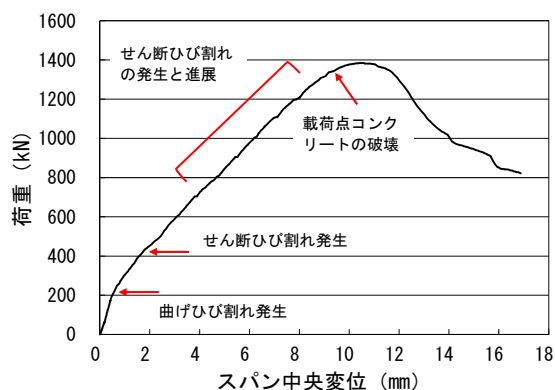
載荷は単純支持状態での二点对称載荷とした。試験中は、支点、載荷点およびスパン中央のたわみ量を変位計により測定した。また、軸方向鉄筋、帯鉄筋および CFG 板の縦筋のひずみを電気抵抗線式ひずみゲージにより測定した。

3. 実験結果および考察

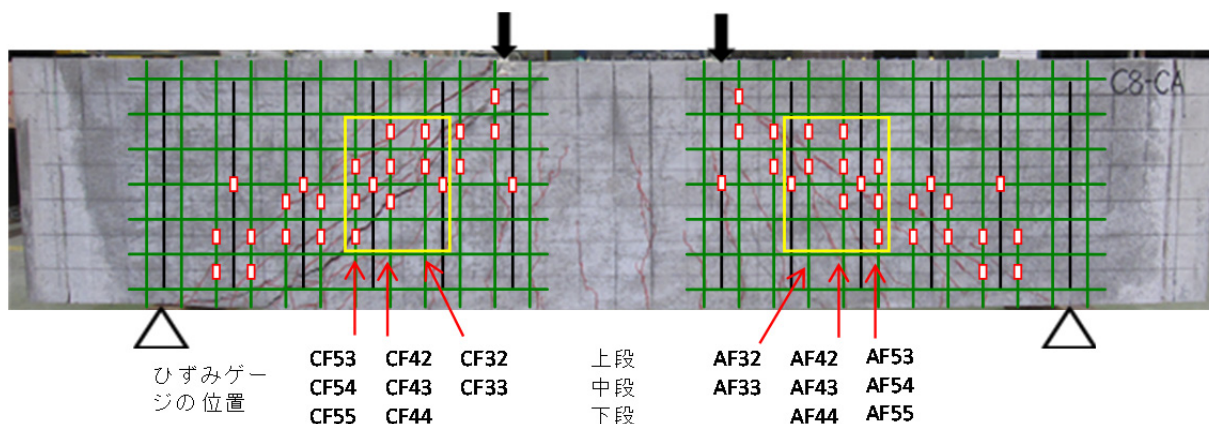
3.1 破壊状況

実験により得られた試験体の荷重～スパン中央変位関係を図－２に示す。また、実験終了後におけるひび割れ発生状況を写真－２に示す。

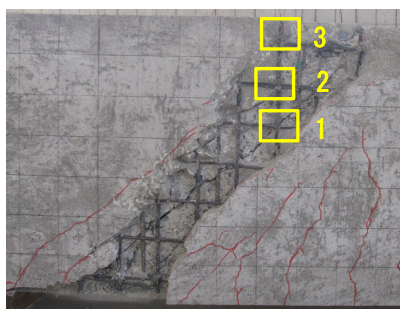
荷重が 200 kN あたりで引張縁に曲げひび割れが発生し、荷重が 400 kN を超えたあたりで、左右のせん断スパン内の曲げひび割れがせん断ひび割れへと発展した。荷重が $700 \sim 900 \text{ kN}$ にかけて、せん断ひび割れが発生した。その後、荷重が $1,300 \text{ kN}$ にかけて、せん断ひび割れが進展するとともに、せん断ひび割れ幅も拡大した。さらに、荷重が $1,300 \text{ kN}$ を過ぎたあたりから、せん断ひび割れ幅が徐々に拡大するとともに、左載荷点近傍のコンクリートに破壊が確認されるようになった。最終的には、 $1,384.5 \text{ kN}$ の最大荷重を示した後、特に左側せん断スパン（炭素繊維束で定着した側）において、せん断ひび割れの幅の拡大が著しくなった。左側載荷点近傍のコンクリートの



図－２ 荷重～スパン中央変位関係



写真－２ ひび割れ発生状況（実験終了後）



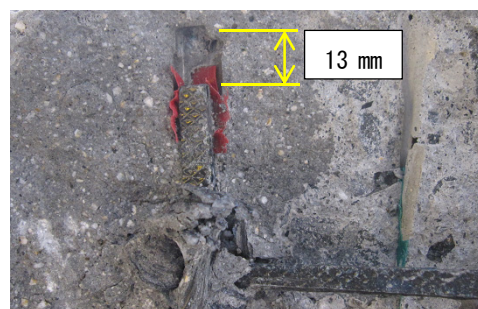
写真－３ 主破壊面に沿った CFG 板の状況



写真－４ CFG 板横筋のせん断変形（□1）



写真－５ CFG 板横筋の繊維方向の割れ裂け（□2）



写真－６ CFG 板上端の下方へのずれ（□3）

破壊が進み、荷重が約 800 kN に低下したため、実験を終了した。荷重が 1,300 kN を超えたあたりから、CFG 板の筋の破断を思わせる音が数回聞こえた。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、CFG 板の筋の破断は確認されなかった。しかし、以下に示すような CFG 板の筋の損傷等が確認された。

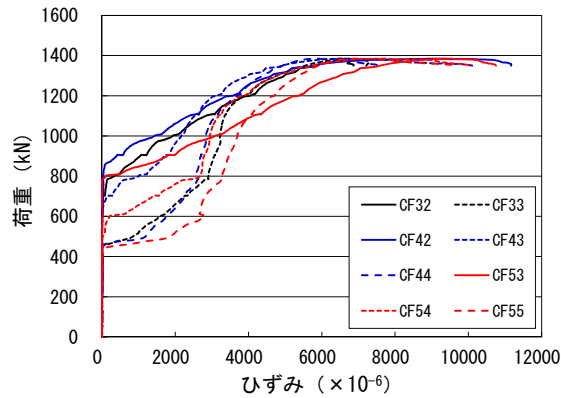
写真－３ は、主破壊面となったせん断ひび割れ近傍の PCM を取り除いた後の状況を示したものである。また、写真－３ 中の□記号と数字は、写真－４～６の拡大した部分の位置を示している。主破壊面となったせん断ひび割れと交差する CFG 板の横筋（部材軸方向の筋）が、せん断変形に伴う上下方向のずれにより大きくせん断変形した部分（写真－４）や、繊維方向に割れ裂けた部分（写真－５）が確認された。また、せん断変形に伴う上下方

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 板縦筋の下方へのずれが確認できた（写真－６）。このずれの量は、左側上面載荷点に発生した上面のずれの量とほぼ同じ 13 mm であった。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。

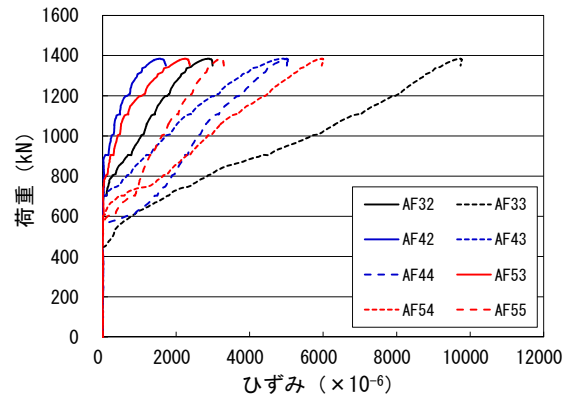
3.2 CFG のひずみ分布

図－３ は、CFG 板縦筋が負担するせん断力を算定する際に使用した CFG 板縦筋のひずみ分布を、左右のせん断スパンごとに（CFG 板の定着方法ごとに）、前面の CFG 板に関して示したものである。

左右どちらのせん断スパンにおいても、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



(a) 炭素繊維束定着（左側せん断スパン）



(b) アラムド繊維ロープ束定着（右側せん断スパン）

図－3 CFG 板縦筋のひずみ（前面）

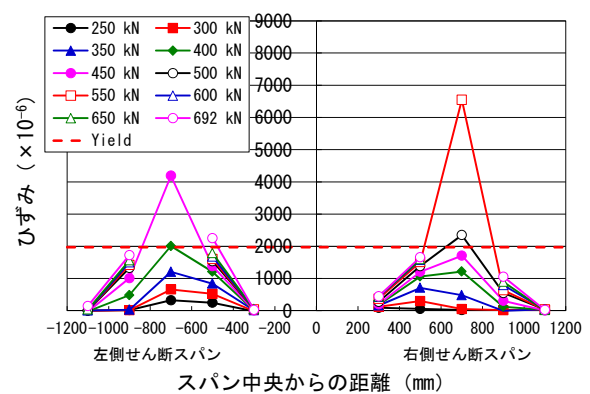
めた。せん断破壊を示した左側せん断スパン（炭素繊維束で定着）における最大荷重時の CFG 板縦筋のひずみは約 $10,000 \times 10^{-6}$ を示した。測定された最大ひずみは約 $16,000 \times 10^{-6}$ であった。この値は、ほぼ CFG 板の筋の破断ひずみに相当する値であり、定着が十分に機能しており、せん断補強用の CFG 板の性能が十分に発揮できているものと考えられる。一方、右側せん断スパン（アラミド繊維ロープ束で定着）における最大荷重時の CFG 板縦筋のひずみは $6,000 \sim 10,000 \times 10^{-6}$ を示した。測定された最大ひずみは約 $13,500 \times 10^{-6}$ であった。

図－4 は、荷重をパラメータとして帯鉄筋のひずみ分布の推移を示したものである。1 個の帯鉄筋には、高さの 1/2 の位置に試験体の表裏側にそれぞれ 1 枚のひずみゲージが貼付してある。図－4 に示すひずみの値は、これら 2 枚のひずみゲージの値の平均値で示してある。

荷重が 300 kN を超えたあたりから、帯鉄筋のひずみが増大し始めた。荷重が 400 kN 時には、左载荷点から 400 mm（スパン中央から 700 mm）の位置に配置した帯鉄筋のひずみが降伏ひずみに達した。その後は、せん断ひび割れの拡大に伴いひずみが増大している。ひずみのデータが得られていないため明言はできないが、せん断スパンの中央を中心とした範囲において、せん断ひび割れが発達していることを伺わせる。

3.3 CFG が負担するせん断力

図－5 は、炭素繊維束で定着された左側スパンに関して式(1)により算定した、帯鉄筋、CFG 板縦筋およびそれ以外のコンクリート系断面（既存コンクリートおよび吹付け PCM）が負担するせん断力の推移を示したものである。計算にあたって、帯鉄筋のひずみは载荷点から左 200 mm, 400 mm の位置の帯鉄筋の計 4 枚のひずみゲージの値の平均値を使用した。なお、一端降伏ひずみに達した場合には、その後のひずみ値が得られていない場合でも、帯鉄筋は降伏しているものとして処理した。また、CFG



図－4 帯鉄筋のひずみ分布の推移

板縦筋のひずみは、载荷点から 250, 350, 450 mm の位置の表裏 16 枚のひずみゲージの値の平均値を使用した。計算に使用した帯鉄筋および CFG 板縦筋のひずみゲージの位置を写真－2 中に□で示す。

$$V_s = \frac{\varepsilon_{s,ave} \times E_s \times 2A_s \times z}{s_s}$$

$$V_g = \frac{\varepsilon_{g,ave} \times E_g \times 2A_g \times z}{s_g}$$

$$V_c = V - V_s - V_g$$

ここに、 V : 作用せん断力 (N)

V_s : 既設帯鉄筋が負担するせん断力 (N)

V_g : 補強用 CFG 板縦筋が負担するせん断力 (N)

V_c : コンクリート系材料が負担するせん断力 (N)

$\varepsilon_{s,ave}$: 既設帯鉄筋のひずみの測定値

$\varepsilon_{g,ave}$: 補強用 CFG 板縦筋のひずみの測定値

E_s : 既設帯鉄筋の弾性係数 (N/mm²)

E_g : 補強用 CFG 板縦筋の弾性係数 (N/mm²)

A_s : 既設帯鉄筋の断面積 (mm²)

A_g : 補強用 CFG 板縦筋 1 本の断面積 (mm²)

s_s : 既設帯鉄筋の間隔 (mm)

s_g : 補強用 CFG 板縦筋の間隔 (mm)

z : 偶力のアーム長 (mm)

図－6は、左右のせん断スパンに関して、図－5と同じ位置のひずみの値を用いて定着材料ごとに式(1)により算定した CFG 板縦筋が負担するせん断力の推移を示したものである。図中に示す V_{gu0} 、 V_{gu1} 、 V_{gu2} に関しては式(2)により算定した。 V_{gu0} 算定時においては、 f_g は実強度、 $\alpha=1.0$ 、 $K_g=1.0$ を用いた。 V_{gu1} 算定時においては、 f_g は保証値、 $\alpha=1.0$ 、 $K_g=1.0$ を用いた。また、 V_{gu2} 算定時においては、 f_g は保証値、 $\alpha=2/3^{2)}$ 、 $K_g=1.0$ を用いた。式(2)中における K_g は、定着用連続繊維束で補強用 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連続繊維束の強度低下を、補強用 CFG 板縦筋の強度の有効係数 K_g の形で評価式に取り入れようとするものである。

これらの図より、せん断ひび割れが発生して以降、CFG 板縦筋と帯鉄筋とが負担するせん断力が増加していることがわかる。また、最大荷重時において、炭素繊維束で定着した左側せん断スパンにおける CFG 板縦筋の負担するせん断力は約 300 kN、アラミド繊維ローブ束で定着した右側せん断スパンにおける CFG 板縦筋が負担するせん断力は約 150 kN であった。

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

ここに、 V_{gu} : 補強用 CFG 板が負担するせん断耐力(N)

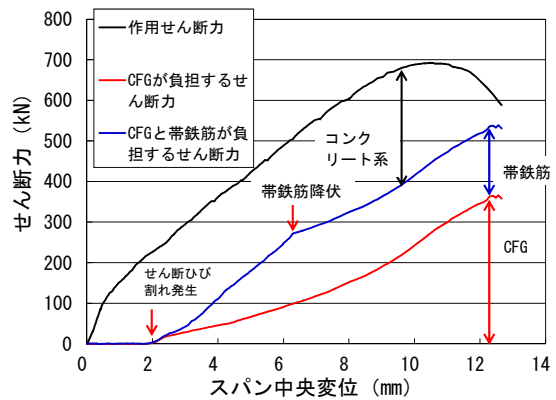
f_g : 補強用 CFG 板縦筋の引張強度 (N/mm^2)

K_g : 補強用 CFG 板縦筋の強度の有効係数

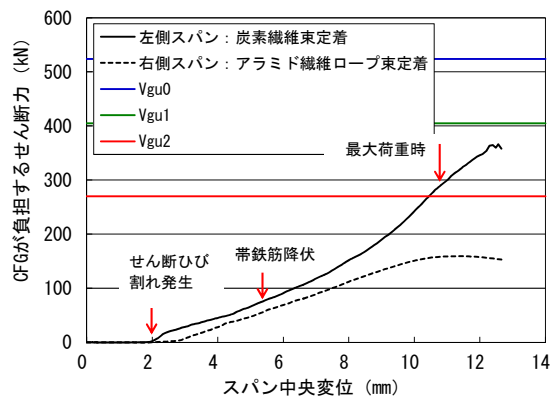
α : 補強用 CFG 板縦筋の引張強度の安全率

図－7は、CFG 板縦筋が負担するせん断力の作用せん断力に占める割合の変化を示したものである。せん断破壊した左側スパン（炭素繊維束で定着）における、CFG 板縦筋が負担するせん断力の割合は、最大荷重時で約 40%、最終的には約 60%に達していることがわかる。一方、アラミド繊維ローブ束で定着した右側スパンにおける、CFG 板縦筋が負担するせん断力の割合は、最大荷重時で約 23%であった。

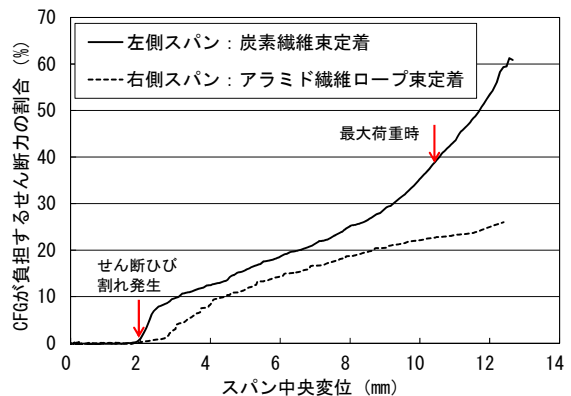
図－8は、せん断破壊した左側スパンに関して、式(1)を用いて求めた実験結果においてコンクリート系材料（コンクリートおよび PCM）が負担するせん断力 V_c と、二羽式³⁾ および標準示方書⁴⁾ に基づくコンクリート系材料のせん断耐力との比較を示したものである。計算にあたって、コンクリート系材料のせん断耐力は、コンクリート部分が負担するせん断耐力と PCM の負担するせん断耐力との合計とした。せん断ひび割れ発生時および最大荷重時共に、二羽式から求まるせん断耐力は実験結果とよく一致した。なお、式(1)中における作用せん断力として、実験における荷重の 1/2 を使用した。



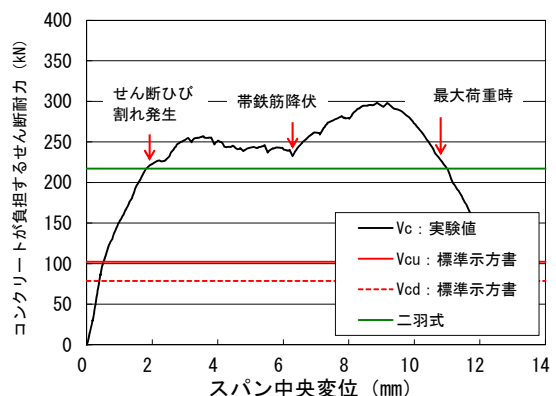
図－5 CFG 板縦筋が負担するせん断力



図－6 CFG 板縦筋が負担するせん断力の推移



図－7 CFG 板縦筋が負担するせん断力の割合



図－8 コンクリート系が負担するせん断力

3.4 セン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－9 に示す。CFG 板でせん断補強された部材のせん断耐力は式(3)で表されるものと仮定した。 V_{gu} に関しては前出の式(2)により算定した。

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－2～4）を使用し、材料係数、部材係数は全て 1.0 を使用した。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、材料係数の値は標準示方書に定める値を用いた。部材係数に関しては全て 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 $\alpha=2/3$ を用いた。また、 $K_g=1.0$ を用いている。

$$V_u = V_{cu} + V_{sy} + V_{gu} \quad (3)$$

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)

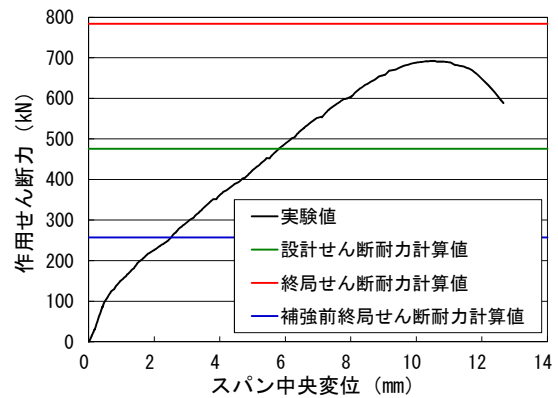
V_{sy} ：既設帯鉄筋が負担するせん断耐力 (N)

せん断耐力の実験値は、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（実験値／計算値＝0.88）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－4、5 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（実験値／計算値＝1.45）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。ちなみに、終局せん断耐力の計算値と実験における最大せん断耐力との比率から算定した補強用 CFG 縦筋の強度の有効係数の値は、 $K_g=0.90$ であった。

4. まとめ

炭素繊維格子板の端部を炭素繊維束またはアラミド繊維ロープ束で固定し、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 部材の力学的挙動を検討した。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



図－9 セン断耐力の比較

至るまで、定着用炭素繊維束およびアラミド繊維ロープ束の損傷あるいは破断は確認されておらず、両繊維を用いた定着方法はどちらも効果的であるものと考えられる。

- (2) 炭素繊維束で定着されたせん断スパンにおいてせん断破壊が生じた。その際、測定された CFG 板縦筋の最大ひずみは約 $16,000 \times 10^{-6}$ であり、せん断補強用 CFG 板の性能が十分に発揮できているものと考えられる。
- (3) 実験で得られた試験体のせん断耐力は、使用材料の実強度を用いて計算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、実験での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、および CFG 板横筋のせん断変形や繊維方向の割れ裂けが影響しているものと考えられる。
- (4) 実験結果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、提案工法において、引張耐力が CFG 板縦筋の引張耐力の約 1.3 倍の炭素繊維束を用い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) 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
- 3) 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
- 4) (社) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]、2007