

論文 連続繊維複合パネルによる大断面柱部材の耐震補強効果に関する検討

河村 圭亮*1・新藤 竹文*2・松岡 康訓*3・菅野 道昭*4

要旨：著者らはこれまで連続繊維シートを2枚のフレキシブルボードで挟み込んだパネル（以下、連続繊維複合パネル）を適用した耐震補強工法の開発を進めてきた。本稿では、本工法を比較的大断面の柱部材へ適用することを想定して、より大きな断面力に対して抵抗し得る、高目付量の炭素繊維シートおよびアラミド繊維シートを用いた連続繊維複合パネルによる耐震補強効果の検証実験を行った結果について記述する。パネル同士の接合部の性能を評価した上で、連続繊維複合パネルによって補強した実大規模のRC柱試験体の正負交番載荷実験を行い、その優れた耐震補強効果を明らかにした。

キーワード：耐震補強、連続繊維複合パネル、炭素繊維シート、アラミド繊維シート、靱性、せん断

1. はじめに

首都直下地震の発生等が懸念される中、鉄道施設等において耐震補強工事が進められている。柱部材の耐震補強に着目すると、鋼板巻きによる補強¹⁾が一般的であるが、高架下の空間が店舗や倉庫で利用されている等の、狭隘な場所での施工性改善を目的として、例えば薄肉鋼板を接着剤で貼り重ねる事例²⁾が報告されている。

著者らは、図-1に示す連続繊維シートを2枚のフレキシブルボード（繊維強化セメント板）で挟み込んだパネル（以下、連続繊維複合パネル）を開発し、その極めて軽量かつ目地処理の容易性を活かし、柱部材の耐震補強工法への適用検討を進めてきた。これまで、せん断補強および靱性補強効果の確認として、断面寸法750mm×750mmのRC柱に対して総目付量1,200g/m²の炭素繊維シートを用いた連続繊維複合パネルを適用した時の部材実験まで実施している³⁾。

連続繊維複合パネルをさらに大きな断面の柱部材に適用する場合、十分な補強効果を得るためには、より高目付の連続繊維シートが必要となる。そこで本研究では、高目付量の連続繊維シートを用いた連続繊維複合パネルを大断面RC柱の補強へ適用した時の効果について、この種の在来工法である連続繊維シート巻き立て補強の場合と比較して検討した。初めに、パネル接合部の性能評価試験を行い、性能を確認した上で、断面寸法900mm×900mmの実物大RC柱試験体での正負交番載荷実験を実施した。連続繊維シート巻き立てによる柱部材の補強効果について検討した既往の研究^{4),5)}でも、この規模の断面寸法、補強繊維量での事例は見られない。なお、連続繊維複合パネルに関する既往の検討³⁾では炭素繊維シ

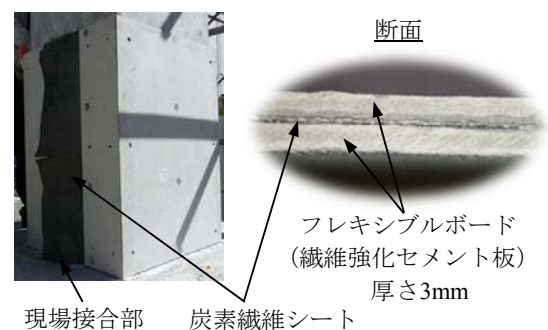


図-1 連続繊維複合パネル

トを用いたが、今回は破断ひずみが大きく大変形を受けた場合でもその変形に追従して補強効果が期待できるアラミド繊維シートを用いたケースについても検討対象としている。

2. パネル接合部の性能評価試験

2.1 接合部引張試験の概要

連続繊維複合パネルを柱部材の補強に適用する場合、連続繊維の方向となる柱の周方向にパネル同士の接合部が生じる。炭素繊維シート600g/m²×2層を用いた場合の接合部の性能については既に確認している³⁾。ここでは、高目付量の連続繊維シートを用いた場合の性能評価として、炭素繊維シート600g/m²×3層（総目付量1,800g/m²）およびアラミド繊維シート700g/m²×2層（総目付量1,400g/m²）を用いた場合について、パネル接合部の引張試験を実施した。使用した連続繊維シートの物性の規格値を表-1に示す。引張試験方法は、JIS A 1191「コンクリート補強用連続繊維シートの引張試験方法」に準拠し

*1 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 主任 工修 (正会員)

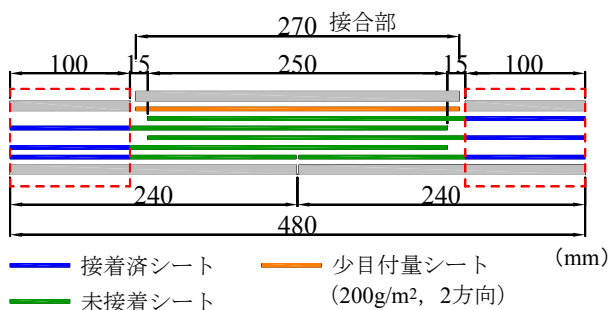
*2 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 部長 工博 (フェロー会員)

*3 成和リニューアルワークス(株) 特別顧問 工博 (正会員)

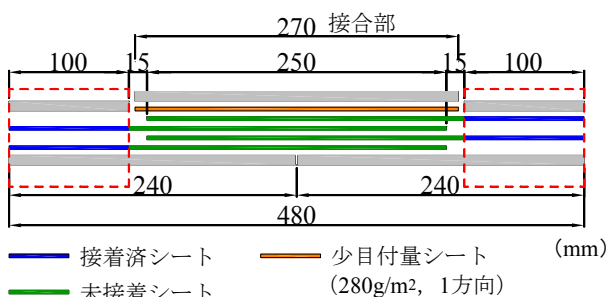
*4 成和リニューアルワークス(株) 技術・営業統轄部 新規技術開発室 課長

表－1 連続繊維シートの物性の規格値

繊維種類	炭素繊維シート	アラミド繊維シート
引張強度 (N/mm ²)	3,400以上	2,400以上
引張弾性率 (kN/mm ²)	245	78



(a) 炭素繊維シート 600g/m²×3 層



(b) アラミド繊維シート 700g/m²×2 層

図－2 試験片概要

たが、引張試験片の幅については JIS 規格よりも広い 25mm とした。これは、高目付量の連続繊維シートは束状になっており、パネルから引張試験片を切り出す位置が繊維本数に及ぼす影響を低減させるためである。試験片数はそれぞれ 5 本とした。

引張試験片の概要を図－2 に示す。図中の赤枠部分はパネル製作の時点で一体化されているが、接合部は連続繊維シートの樹脂含浸を行わない未含浸の状態（図中の未接着シート）としている。パネル接合時に各層の連続繊維シートを左右交互にエポキシ系樹脂を塗布して含浸し、その後、目付量の少ない連続繊維シートおよびフレキシブルボードを接着させた。なお、接合部の形状はそれぞれ応力集中を緩和させること、接合部が極端に厚くならないことを考慮したものとしている。

2.2 接合部の引張試験結果

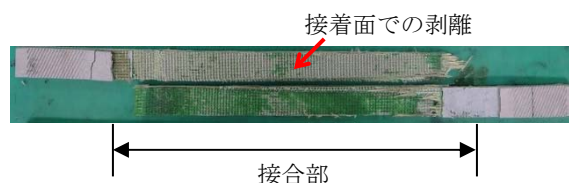
接合部引張試験の結果を表－2 に、代表的な試験片の破壊状況を写真－1 に示す。炭素繊維シート 600g/m²×3 層では、引張強度は 5 本平均で 3,252N/mm² であり、接合部端部での破断や連続繊維シート同士の接着面での剥離が生じる破壊状況であった。アラミド繊維シート

表－2 接合部引張試験結果

繊維種類	炭素繊維シート	アラミド繊維シート
目付量	600g/m ² ×3層	700g/m ² ×2層
引張強度 (N/mm ²)		
No.1	3,402	2,107
No.2	3,341	2,313
No.3	3,145	2,154
No.4	3,135	2,394
No.5	3,239	2,237
5本平均	3,252	2,241



(a) 炭素繊維シート 600g/m²×3 層（上から No.2, No.5）



(b) アラミド繊維シート 700g/m²×2 層（No.5）

写真－1 試験片の破壊状況

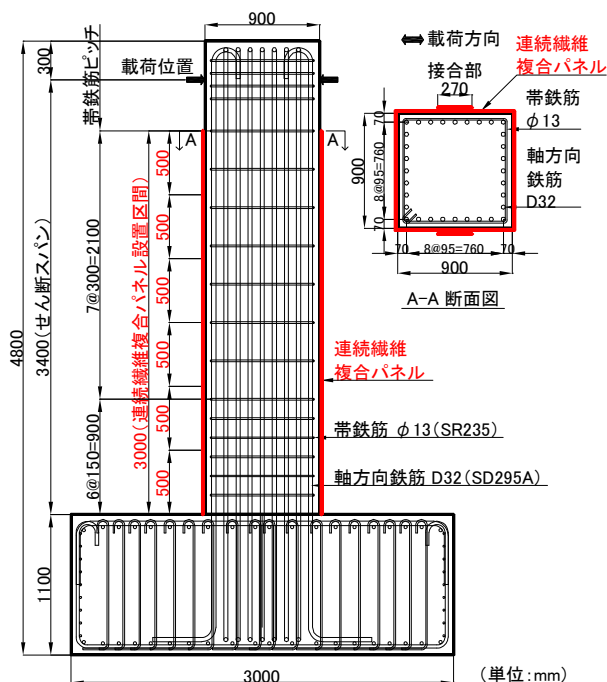
700g/m²×2 層では、引張強度は 5 本平均で 2,241N/mm² であり、いずれも連続繊維シート同士の接着面で剥離する破壊状況であった。

パネル接合部の引張強度について、炭素繊維シート 600g/m²×2 層を用いた場合³⁾は炭素繊維シート単体の引張強度の規格値を上回ったが、高目付量の連続繊維シートを用いた場合は連続繊維シート単体の引張強度の規格値を下回った。その要因としては、連続繊維シートの積層数の増加に伴い接着面が増えたことで均一に引張力が伝達されなかったことや、接合部内外での厚みの差が大きくなることで、接合部端部で応力集中が生じたことなどが考えられる。しかし、このパネル接合部の形状とすることで、いずれも連続繊維シート単体の規格値の 90% 以上と十分に高い引張強度が得られた。

3. RC 柱試験体の正負交番載荷実験

3.1 試験体概要

RC 柱試験体の概要を図－3 に、諸元を表－3 にそれぞれ示す。試験体は約 50 年前に建設され、耐震補強が必要とされる鉄道ラーメン高架橋の柱部材を実物大で模擬し



図－3 試験体概要

表－3 試験体諸元

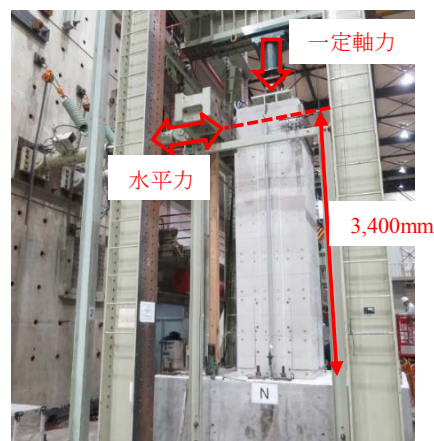
試験体	Case-1	Case-2
柱断面寸法	900mm×900mm	
せん断スパン	3,400mm	
せん断スパン比	4.1	
軸方向鉄筋	SD295A D32×32本	
帯鉄筋（基部）	SR235 φ13@150mm	
帯鉄筋比（基部）	0.197%	
軸応力度（基部）	1.5N/mm ²	
補強繊維量	炭素繊維 600g/m ² ×3層	アラミド繊維 700g/m ² ×2層

表－4 材料試験結果

コンクリートの 圧縮強度	Case-1 載荷試験時	36.9 N/mm ²
	Case-2 載荷試験時	34.7 N/mm ²
鉄筋の降伏強度	軸方向鉄筋 D32	354 N/mm ²
	帯鉄筋 φ13	329 N/mm ²

たものである。柱の断面寸法は 900mm×900mm で、鉄道高架橋の柱としては比較的大断面であり、軸方向鉄筋には異形鉄筋 D32（SD295A）、帯鉄筋には丸鋼 φ13（SR235）を用いている。コンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表－4 に示す。

試験体は 2 体で、Case-1 は炭素繊維シート、Case-2 はアラミド繊維シートをそれぞれ用いた連続繊維複合パネルによる補強を行った。なお、本研究では、補強後の性能を連続繊維シート巻き立て補強の場合と比較して考察することを主目的とするため、補強した試験体のみで実験を行った。使用した連続繊維シートの量および種類は 2 章に示すものと同じである。補強区間は基部から



写真－2 正負交番載荷実験状況

3,000mm とし、高さ 500mm の連続繊維複合パネルを 6 段設置し、載荷直角方向の 2 面に幅 270mm の接合部を設けた。接合部の形状は図－2 に示すものと同じである。この面に接合部を設けたのは、安全側の評価となるように、せん断耐力向上の観点から不利な条件とするためである。鉛直方向はパネル同士が突き合わせの状態で一体化していない。最下段のパネルとフーチングの間には、曲げ圧縮時に両者の接触を避けるために 10mm の離隔を設けている。連続繊維複合パネルと柱表面の間には 10mm の隙間を設けて、パネル設置後に無収縮グラウトを注入することにより両者を一体化させている。なお、無収縮グラウトの圧縮強度は標準養生、材齢 7 日で 63.0N/mm² であった。

3.2 載荷方法および測定項目

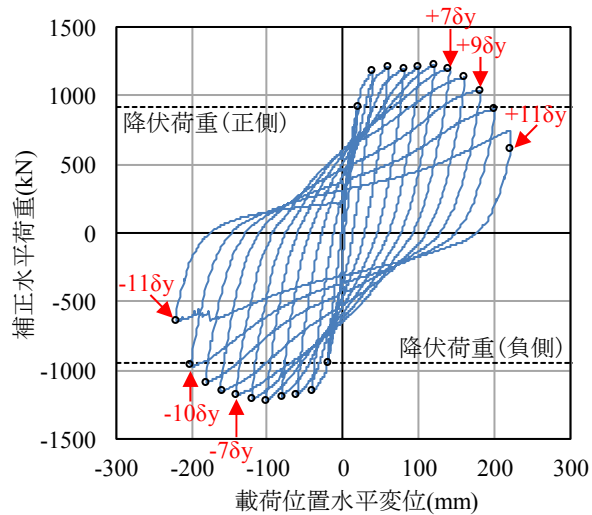
正負交番載荷実験の状況を写真－2 に示す。最初に、基部の軸応力度が所定の値（1.5N/mm²）となるように、鉛直方向ジャッキにより軸方向力を作用させた。その後、基部から 3,400mm の位置で水平方向ジャッキにより押し（正載荷とする）・引き（負載荷とする）を繰り返して水平力を作用させる正負交番載荷を行った。水平力は正側・負側ともに、基部で引張縁軸方向鉄筋のひずみが鉄筋引張試験より得られた降伏ひずみに達するまで荷重制御により載荷した。この降伏ひずみに達した時点の水平変位量を降伏変位 δ_y 、水平力を降伏荷重 P_y として、これ以降は正側・負側ともに δ_y の整数倍の変位量（ $\pm 2\delta_y$, $\pm 3\delta_y$, ...）で各 1 サイクルの載荷を変位制御で行った。

載荷位置における水平変位と基部から高さ 900mm までの範囲で軸方向鉄筋、連続繊維シートのひずみの測定を行った。

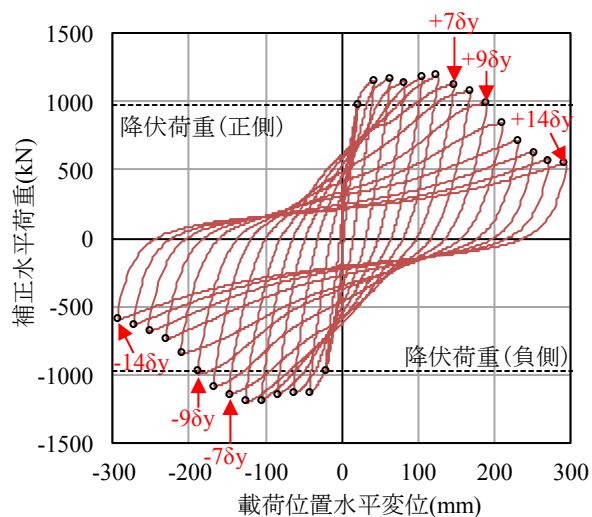
3.3 実験結果

(1) 荷重－変位関係

各ケースの水平荷重に軸力による偏心モーメントを水



(a) Case-1 (炭素繊維)



(b) Case-2 (アラミド繊維)

図-4 補正水平荷重－載荷位置水平変位関係

平荷重に換算した分を加えた補正水平荷重と載荷位置における水平変位の関係を図-4 に示す。いずれのケースも軸方向鉄筋の降伏後、 $\pm 7\delta_y$ までは最大荷重程度を保持した。その後、荷重は緩やかに低下したが、Case-1 の正側は $+9\delta_y$ 、負側は $-10\delta_y$ まで、Case-2 は正側・負側ともに $\pm 9\delta_y$ まで降伏荷重以上の荷重を保持した。なお、いずれのケースも最後のサイクルまで軸力は保持できていた。

(2) 損傷状況

いずれのケースも $\pm 7\delta_y$ で基部付近の圧縮側にはらみ出しが確認された。これは軸方向鉄筋の座屈に伴うものと考えられ、荷重が低下し始めた時点とも整合している。その後、 $\pm 9\delta_y$ では 100mm 程度のはらみ出しが確認された。

実験終了時における載荷方向面基部付近の損傷状況を写真-3 に示す。Case-1 では、正側・負側ともに $\pm 11\delta_y$



(a) Case-1 (炭素繊維)



(b) Case-2 (アラミド繊維)

* 奥行方向が載荷方向

写真-3 基部付近の損傷状況 (実験終了時)



(a) Case-1 (炭素繊維)



(b) Case-2 (アラミド繊維)

写真-4 基部付近の損傷状況 (圧壊部除去後)

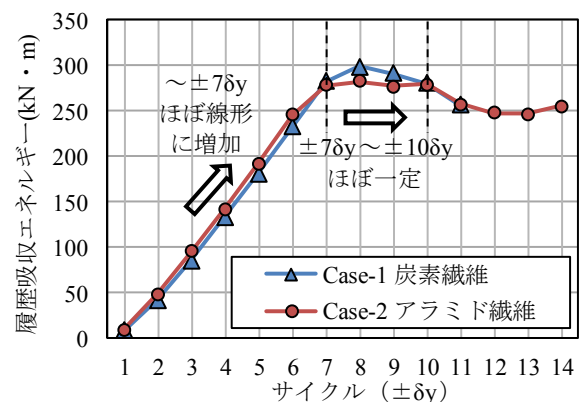


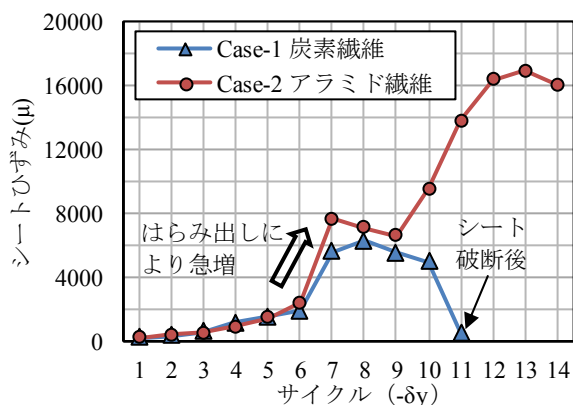
図-5 履歴吸収エネルギーの変化

のサイクルで圧縮側基部付近の角部において炭素繊維シートが破断し、荷重が大きく低下している。Case-2 では、正側・負側ともに $\pm 14\delta_y$ のサイクルまで載荷を行ってもアラミド繊維シートは破断しなかった。

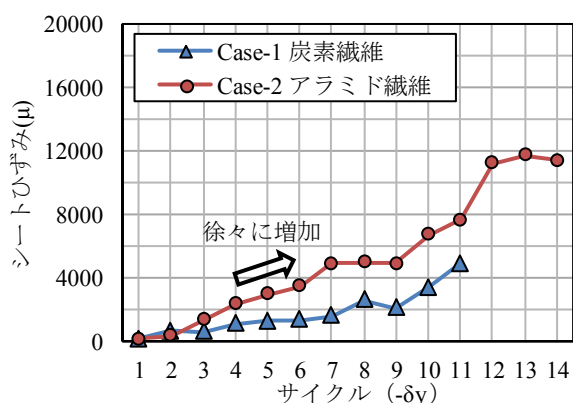
実験終了後に、基部付近の連続繊維複合パネルおよび圧壊したコンクリート塊を除去した後の状況を写真-4 に示す。いずれの試験体も基部から 500mm 程度の範囲で軸方向鉄筋が座屈していたが、破断は生じていなかった。また、Case-2 の方が最終サイクルの変形量が大きいくともあり、内部コンクリートの圧壊領域が大きかった。

(3) 履歴吸収エネルギー

各サイクルにおける履歴吸収エネルギーの変化を図-



(a) 荷重方向の圧縮側の面



(b) 荷重直角方向の面

図-6 連続繊維シートひずみの経時変化

5 に示す。ここで、履歴吸収エネルギーは補正水平荷重－荷重位置水平変位関係において、履歴曲線で囲まれた面積により算定した。いずれのケースも軸方向鉄筋の座屈が生じた $\pm 7\delta_y$ のサイクルまではほぼ線形に増加している。その後、 $\pm 10\delta_y$ のサイクルまではほぼ一定で変化しており、安定したエネルギー吸収能を示している。軸方向鉄筋座屈後も低下しなかったのは、連続繊維複合パネルによる拘束効果が有効に発揮されたためと考えられる。

(4) 連続繊維シートのひずみ

連続繊維シートのひずみの経時変化を図-6 に示す。図示したものは負側荷重時の値で、基部から高さ 300mm の位置で、荷重方向の圧縮側の面および荷重直角方向の面のものである。なお、荷重方向の面は中央に、荷重直角方向の面は接合区間を避けた位置にひずみゲージを貼り付けている。

荷重方向の圧縮側の面については、 $-7\delta_y$ で基部付近のはらみ出しに伴いシートひずみが急増している。Case-1 の炭素繊維シートはその後、ひずみの大きな増加は見られず最大約 6,000 μ であり、 $-11\delta_y$ ではシート破断により値が低下している。Case-2 のアラミド繊維シートは基部付近の大きなはらみ出しに追従して変形し、最大約

表-5 曲げせん断耐力比の計算値

試験体	Case-1 炭素繊維	Case-2 アラミド繊維
補強前	1.28	1.27
補強後	5.12	2.91

表-6 靱性率の計算値と実験値

試験体	Case-1 炭素繊維	Case-2 アラミド繊維
計算値	7.2	10.5
実験値	正:9.9, 負:10.1 平均:10.0	正:9.2, 負:9.0 平均:9.1

17,000 μ となっている。これより、破断ひずみが大きく大きな伸び性能を有するアラミド繊維シートは、大変形を受けた場合でも破断することなく、補強効果を発揮していることが分かる。また、接合部が荷重方向の 2 面にあったとしても、シートひずみの最大値は 2 章の接合部引張試験結果より推定される破断ひずみより小さいため、接合部でのシート破断は生じなかったと考えられる。

荷重直角方向の面については、主にせん断力に対して抵抗する面であるが、サイクルが進むにつれて徐々にシートひずみが増加している。これは内部コンクリートの損傷が進むことで、連続繊維シートが負担するせん断力が増加しているためであると考えられるが、特に $\pm 7\delta_y$ 以降のサイクルでははらみ出しの影響もあると考えられる。なお、アラミド繊維シートは引張弾性率が炭素繊維シートの約 1/3 であるため、シートひずみは相対的に大きくなっている。

3.4 連続繊維複合パネルによる補強効果

(1) せん断補強効果

実強度を用いて計算した補強前後の曲げせん断耐力比（曲げ耐力に達する時の水平荷重に対するせん断破壊する時の水平荷重の比率）を表-5 に示す。せん断耐力は「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」（以下、補修補強指針）に示される式⁹⁾にて部材係数を 1.0 として算定した。ここで、連続繊維複合パネルの負担分は連続繊維シートを直接接着させる場合と同様に考え、計算ではパネル接合部の引張強度試験より得られた実強度を用いた。補強前の曲げせん断耐力比は 1.28, 1.26 であり 2.0 を大きく下回ることから、既往の知見⁷⁾より、曲げ降伏後、大変形を受ける前にせん断破壊することが推察される。補強後の曲げせん断耐力比は 5.12, 2.91 であるが、実験でも曲げ降伏後の大変形を受けても荷重を保持できており、連続繊維複合パネルにより、相応のせん断補強効果が得られることが示された。また、連続繊維シートのひずみからもせん断力に対して

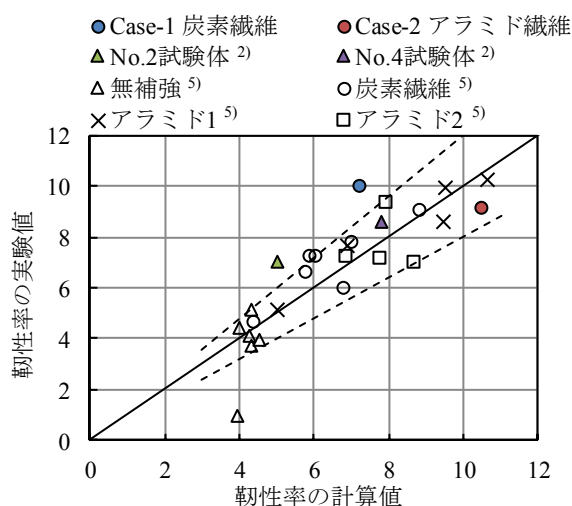


図-7 靱性率の計算値と実験値の比較

力を負担していることが確認できる。

(2) 靱性補強効果

実強度を用いて補修補強指針に示される式⁶⁾にて部材係数を 1.0 として算定した靱性率の計算値を実験値と併せて表-6 に示す。なお、算定式において靱性率の上限値は 10 であるがここでは考慮しない。靱性率の実験値は、荷重-変位関係の包絡線において降伏荷重を下回らない最大変位を終局変位 δ_u とし、終局変位 δ_u を降伏変位 δ_y で除して算出した。また、今回の実験データ、炭素繊維シートを用いた連続繊維複合パネルにより補強した既往の部材実験データ (No.2 試験体および No.4 試験体)³⁾、補修補強指針に示される連続繊維シートにより補強した部材実験データ⁶⁾のそれぞれについて、靱性率の計算値と実験値の関係を図-7 に示す。

大断面の柱部材の補強に高目付量の連続繊維シートを用いた連続繊維複合パネルを適用した場合でも、補強材料の拘束効果による靱性補強効果は既存の連続繊維シート巻き立て補強を対象とした算定式によって評価できるものと考えられる。補修補強指針に示される式による靱性率の算定値は既往の実験結果に対する平均的な値であり、実験値は概ね図中の破線の範囲でばらつきがある。炭素繊維シートを用いたケースではその範囲よりも高い値が得られているが、厚さ 10mm の無収縮グラウトの存在により連続繊維シートを直接接着させる場合よりも拘束効果がさらに向上している可能性も考えられる。アラミド繊維シートを用いたケースでは計算値を下回る結果ではあるが、既往の実験データのばらつきの範囲内にある。また、降伏荷重を下回った後、さらに大変形を受けても繊維の破断が生じず、急激な荷重低下やエネルギー吸収能の低下が生じていないことは特筆すべき点である。

今回の実験は補強前の曲げせん断耐力比が 1.0 を上回

る曲げ破壊型の RC 柱試験体で行ったが、No2 試験体では 1.0 を下回るせん断破壊型の RC 柱試験体でも十分な補強効果が確認できている。これら計 4 体の実験条件の範囲においては、連続繊維複合パネルによる補強は効果的なものとなることが検証された。

4. まとめ

本研究では、高目付量の連続繊維シートを用いた連続繊維複合パネルを大断面柱部材の補強に適用した場合の効果について検討するため、パネル接合部の性能評価試験および RC 柱試験体の正負交番載荷実験を実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 連続繊維シートを交互に重ね合わせるパネル接合部の形状では、高目付量の場合でも十分に高い引張強度が得られることが示された。
- (2) 高目付量の連続繊維シートを用いて大断面柱部材に適用した場合でも、連続繊維複合パネルの高い引張強度および拘束効果により十分なせん断補強効果および靱性補強効果が得られ、連続繊維複合パネルによる補強は効果的なものとなることが検証された。

参考文献

- 1) 宮本征夫, 石橋忠良, 斉藤俊彦: 既設橋脚の鋼板巻き耐震補強方法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.2, pp.275-280, 1987.
- 2) 田附伸一ほか: 薄鋼板を貼り重ねる既設 RC 柱の耐震補強工法の開発, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.2, pp.326-335, 2006.
- 3) 鈴木三馨, 岡本修一, 新藤竹文, 竹井勝美: CF 複合パネルによる柱部材の耐震補強工法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.925-930, 2015.
- 4) 森山智明, 岡野素之, 松本信之, 涌井一: 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱のじん性補強に関する実験的研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部, Vol.52, pp.308-309, 1997.
- 5) アラミド補強研究会: アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領 (案), pp.46-49, 1998.
- 6) 土木学会: コンクリートライブラリー101 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, pp.23-32, 2000.
- 7) 津吉毅, 小林将志, 石橋忠良: 正負交番載荷を受ける RC 柱の損傷状況, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.3, pp.1213-1218, 1999.