

# 論文 RC はりに接着した曲げ補強用熱可塑性 CFRP シートの付着性能に関する実験的検討

吉本 智咲\*1・和田 倫明\*2・栗橋 祐介\*3・柳田 龍平\*4

**要旨**：本研究では、RC はりに接着した曲げ補強用熱可塑性 CFRP シートの付着性能を検討することを目的として、RC はりの静的載荷実験を実施した。実験は、曲げ補強用シートと接着樹脂の種類、シート継手の有無と継手位置を変化させた計 5 体を対象に実施した。その結果、熱可塑性 CFRP シートを接着することにより、従来の炭素繊維シートを接着する場合と同程度以上の補強効果を期待できること、シート継手が最大引張応力発生位置ならびに、せん断力の作用による面外変形発生位置にある場合においても、継手なしの場合と同程度以上の補強効果を期待できること、などが明らかになった。

**キーワード**：熱可塑性 CFRP シート、継手、付着性能、界面剥離破壊エネルギー

## 1. はじめに

国内の社会資本ストックは、高度経済成長期に集中的に建設されたため、今後急速に老朽化することが懸念されている。また、南海トラフ地震や首都直下地震といった巨大地震が切迫しているとともに、極端な気候変動による災害の激甚化・広域化により外力が変化中、重要な交通ネットワークが機能喪失しないように既設インフラを補強することが重要となっている。

このような背景の中、代表的な構造物の補強工法として、RC 増厚工法や鋼板接着工法、炭素繊維シート接着工法が採用されている。これらの工法の中でも炭素繊維シート接着工法は、軽量かつ高強度の特長を持つ連続繊維を使用しているため、補強による構造物の重量増加がほとんどない。また、重機を使用することなく、手作業で施工できることや補強材である炭素繊維シートは現場合わせの加工ができることから特に有用な工法として活用されている。しかし、この工法は施工工程が多いため工期が長期化する課題を抱えている。工期短縮のために、予め CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) 板を作製し、構造物に接着する工法も存在するが、CFRP 板が柔軟に曲がらないため補強対象が限定されてしまう。また、予め加工した厚さ 2~3 mm 程度の成型板を使用するため、重ね継手が困難である。

これらの問題点を解決する工法として、本研究グループでは、柔軟性と高接着性を特長とした補強用熱可塑性 CFRP シート接着工法を開発した。CFRP の母材として熱可塑性樹脂を使用し、かつその厚さを 0.3mm 程度とすることで、ロール状の保管、重ね継手施工の他、現場で

補強対象に合わせた熱による曲げ加工が可能となる (図-1 参照)。また、プラズマ表面処理技術で電荷密度に偏りのある官能基を付与することで、エポキシ系接着樹脂との分子間力を向上させ、使用したシート同士の継手を可能にした (図-2 参照)。これまでの研究では、引張試験、継手試験、接着試験、疲労試験、促進暴露試験等で補強用熱可塑性 CFRP シートの物性評価を実施し、補強材料としての性能が確認されている。しかしながら、RC 部材を用いた載荷実験による検討は実施されていなかった。実用化のためには、熱可塑性 CFRP シートを接着したコンクリート面にひび割れ等の損傷が発生した場合の補強効果を確認する必要がある。

このような背景より、本研究では、RC 梁に接着した曲げ補強用熱可塑性 CFRP シートの付着性能を検討することを目的として、RC 梁の静的載荷実験を実施した。実験は、曲げ補強用シートと接着樹脂の種類、シート継手の有無と継手位置を変化させた計 5 本を対象に実施した。

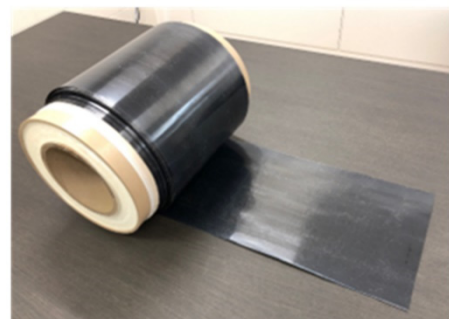


図-1 熱可塑性 CFRP シートの外観

\*1 金沢大学 理工学域 地球社会基盤学類 (学生会員)

\*2 アウロステクノロジーズ合同会社 (正会員)

\*3 金沢大学 理工研究域 地球社会基盤学系 教授 (正会員)

\*4 金沢大学 理工研究域 地球社会基盤学系 助教 Ph.D. (正会員)

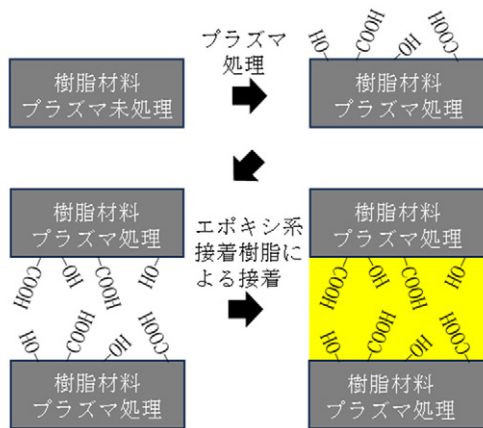


図-2 プラズマ処理効果の模式図

## 2. 実験方法

### 2.1 RCはり試験体の概要

図-3にRCはり試験体の形状寸法と配筋状況を示す。試験体は、幅 150mm×高さ 200mm×全長 2,400mm で、せん断スパン比  $a/d=5.00$  の複鉄筋 RC はりである。材料試験の結果、コンクリート強度は 20.0~39.6 N/mm<sup>2</sup> であった。また、主鉄筋の降伏強度は 370 N/mm<sup>2</sup> であった。

### 2.2 曲げ補強用シート

RC はりに接着したシートは炭素繊維シートと熱可塑性 CFRP シートの 2 種類である。これらのシートの材料特性は同一であり、その一覧を表-1に示す。なお、シートの種類によらず、コンクリート面の下地処理として、RC はりの型枠面を研磨し、レイタンス処理を施した。

炭素繊維シート接着の場合には、実施工と同様にエポキシ系のプライマーを塗布して1日間養生した後、エポキシ系の不陸修正材を塗布して1日間養生した。その後、

エポキシ系の含浸接着樹脂を用いて炭素繊維シートを接着した。これらの接着工程には、使用実績の多いエポキシ系接着樹脂を用いた。

一方、熱可塑性 CFRP シート接着の場合、不陸修正やプライマーを使用せずに、これらの機能を有する接着樹脂を開発し適用した。表-2には熱可塑性 CFRP シート接着に使用した接着樹脂の材料特性値を示している。接着材がプライマーと不陸修正材の役割を兼ねることから現行の炭素繊維シート接着工法に比べて、工程を削減することができ、ケレン処理からシート接着作業完了までの施工時間を 4 割程度短縮することができる。

### 2.3 補強概要

表-3には、実験ケースの一覧を示している。なお、試験体製作の都合上、試験体毎のコンクリートの圧縮強度が異なっている。試験体数は合計 5 体で、無補強試験体が 1 体、補強試験体が 4 体である。補強範囲は、図-4に示すとおり、RC はりの底面中央部 150×1,800 mm とした。なお、CT-1-C/S 試験体の熱可塑性 CFRP シートの継手長さは、高速道路総合技術研究所出版の「設計要領第二集 橋梁保全編」りに準拠して 200 mm とした。なお、CT-1-C/S 試験体における継手位置は、RC はり下縁のひび割れ損傷が著しくなることが想定される部位に設定した。すなわち、CT-1-C 試験体の継手位置は、シートに生じる引張応力が最大となり、曲げひび割れが大きく開口するスパン中央部とした。また CT-1-S 試験体の継手位置は、荷点付近から両支点側に進展する斜めひび割れがはり下縁のシートに到達し、面外変形を生じることが想定される位置とした。

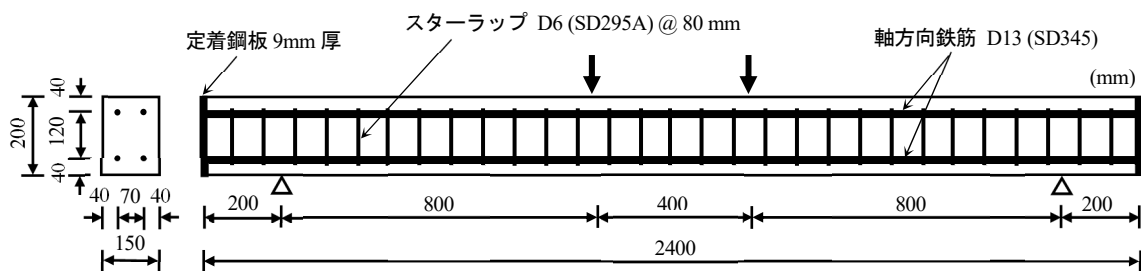


図-3 試験体概要

表-1 曲げ補強用シートの材料特性

繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )	設計厚さ (mm)	引張弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断ひずみ (μ)
200	0.111	245	3,400	13,878

表-2 熱可塑性 CFRP シート接着に使用した接着樹脂の材料特性

材質	粘度 (Pa・s)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	引張せん断接着強度 (N/mm <sup>2</sup> )
エポキシ樹脂	240	40	42	16

表-3 試験体一覧

試験体名	補強材料	シート層数	シート継手位置	コンクリート圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )
N	-	-	-	20.0
C-1	炭素繊維シート	1	-	20.0
CT-1	熱可塑性 CFRP シート	1	-	35.5
CT-1-C		1	等曲げ区間	39.6
CT-1-S		1	せん断スパン	26.4

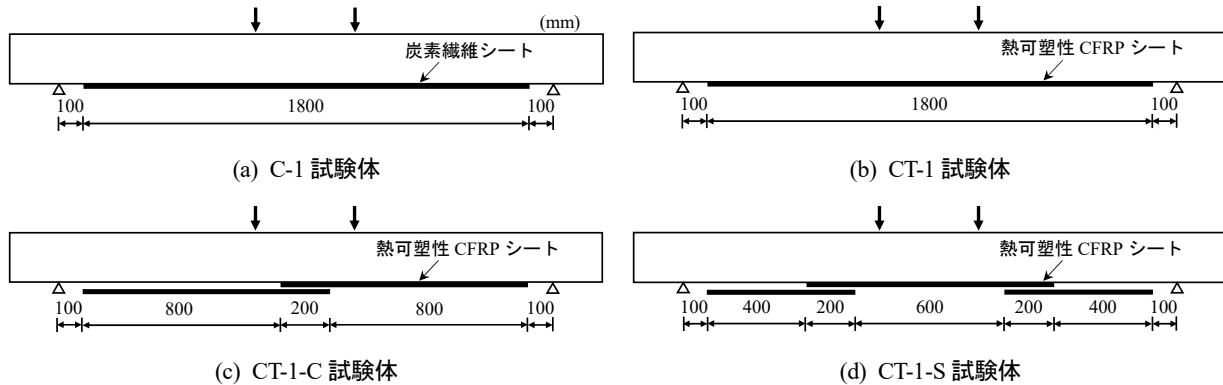


図-4 シート補強概要

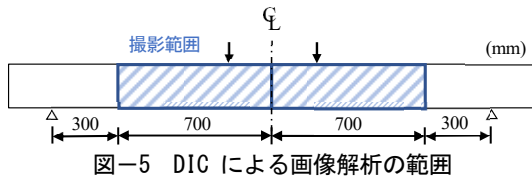


図-5 DIC による画像解析の範囲

## 2.4 載荷方法及び測定項目

荷重は、試験体中央から左右 200 mm の位置に丸鋼を設置し、油圧ジャッキにより変位制御で載荷した。N 試験体の場合には、変位が 50mm に到達するまで載荷を行った。N 試験体以外の 4 体の補強試験体の場合には、シートが剥離し荷重が低下するまで載荷した。

測定項目は、載荷荷重、試験体中央変位、およびシートの軸方向ひずみであり、0.1 s ごとに計測した。平均載荷速度は 5.0 N/s 程度とした。ひずみゲージは、試験体中央から左右 800 mm の位置までの範囲に 100 mm 間隔で合計 17 箇所貼り付けた。

## 2.5 DIC による画像解析

2 次元デジタル画像相関法 (DIC) による画像解析を行うため、実験準備の段階で、試験体側面を白塗りした後、スプレーで黒色の斑点を塗布した。実験時には、市販のデジタルカメラを用いて、解像度 350 dpi 程度で変形前後の側面を撮影した。解析は、サブセットの大きさを 20 pixel に設定して実施した。なお、1 pixel あたりの大きさは 0.135 mm 程度とした。図-5 には、撮影範囲を示している。

## 3. 実験結果

### 3.1 荷重-変位関係

図-6 には、全試験体の荷重-変位関係に関する実験結果を (a) シート種類の影響、(b) 継手の有無と位置の影響について整理して示している。また、断面分割法による計算結果との比較を図-7 に示した。

#### (1) シート種類の影響

図-6(a)には荷重-変位関係に関する実験結果のうち、シート種類の影響について示している。図より、N 試験体の場合には、荷重 10 kN 付近で曲げひび割れが発生し、荷重 45 kN 付近で主鉄筋が降伏している。その後、両試験体ともに、荷重がほぼ一定割合で増加し続け、C-1 試験体の場合には 60 kN 付近、CT-1 試験体の場合には 65 kN 付近でシート剥離に至った。なお、力学特性が同一の炭素繊維シートを使用しているにもかかわらず CT-1 試験体の耐荷性能が C-1 試験体よりも大きいのは表-3 に示したとおりコンクリート強度の違いが一要因であるものと考えられる。

炭素繊維シートおよび熱可塑性 CFRP シートで補強した C/CT-1 試験体は、荷重 15 kN 付近で曲げひび割れが発生し、荷重 45 kN 付近で主鉄筋が降伏している。その後、両試験体ともに、荷重がほぼ一定割合で増加し続け、C-1 試験体の場合には 60 kN 付近、CT-1 試験体の場合には 65 kN 付近でシート剥離に至った。なお、力学特性が同一の炭素繊維シートを使用しているにもかかわらず CT-1 試験体の耐荷性能が C-1 試験体よりも大きいのは表-3 に示したとおりコンクリート強度の違いが一要因であるものと考えられる。

以上の結果から、炭素繊維シートおよび熱可塑性 CFRP シート補強を行うことで、RC はりの曲げ耐力が向上することが分かった。また、その補強効果について、熱可塑性 CFRP シート補強は、従来の炭素繊維シート補強と大きく変わらないことが明らかになった。

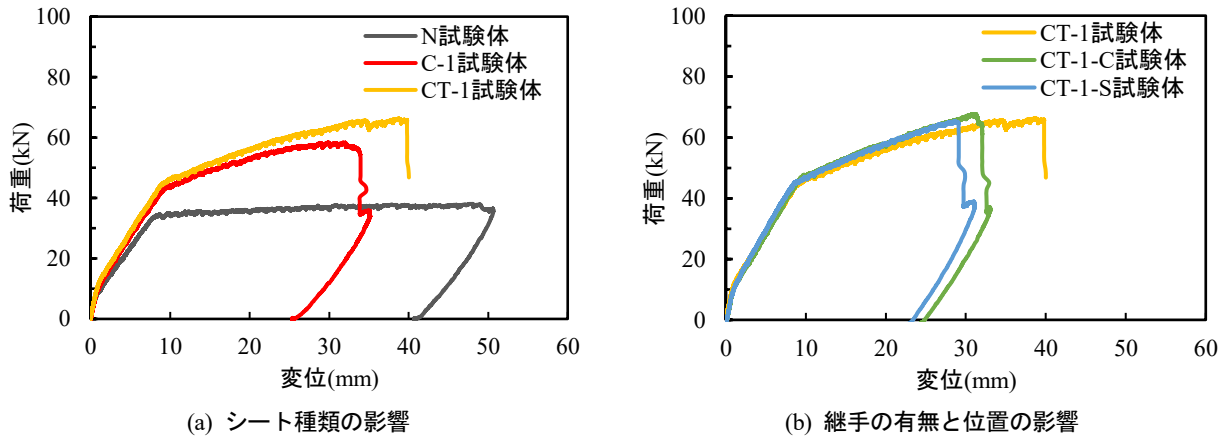


図-6 荷重-変位関係に関する実験結果

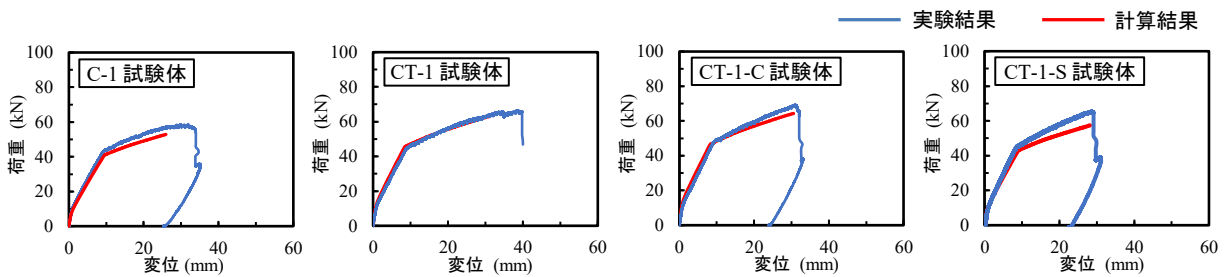


図-7 各補強試験体に関する荷重-変位関係の計算結果と実験結果の比較

## (2) 継手の有無と位置の影響

図-6(b)には荷重-変位関係に関する実験結果のうち、シートの継手の有無と位置の影響について示している。なお、図中の試験体はすべて熱可塑性CFRPシート補強したものである。継手を有するCT-1-C/S試験体の場合には、荷重15kN付近で曲げひび割れが発生し、45kNの付近で主鉄筋が降伏した。その後、荷重がほぼ一定の割合で増加し続け、65~70kNあたりでシート剥離に至った。また、これら試験体の耐荷性状は、継手を有していないCT-1試験体とほぼ同様である。

以上の結果から、熱可塑性CFRPシートによる補強効果は、継手の有無や継手位置による影響をほとんど受けないことがわかる。このことから、継手長を200mmとすることにより、継手なしの場合とほぼ同様の補強効果を期待できることが明らかになった。

## (3) 計算結果と実験結果の比較

本研究では、試験体ごとのコンクリート強度が異なっていることから、コンクリートとシートの完全付着を仮定した計算結果と実験結果を比較することにより、実験時におけるシートの付着性能を評価した。図-7には、補強試験体の荷重-変位関係を、断面分割法による計算結果と比較してそれぞれ示している。

計算は、土木学会コンクリート標準示方書 [設計編]<sup>2)</sup>に準拠してコンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係を設定し、平面保持の仮定の下、上縁コンクリートのひずみ

が $3,500\mu$ に到達するまで実施した。なお、コンクリート強度については、試験体の実強度である表-3の値を用いて計算を行った。また、シートの応力-ひずみ関係は、「FRP接着による構造物の補修・補強指針(案)」<sup>3)</sup>(以下、FRP指針)に準拠して破断ひずみに至るまで応力が線形的に増加するように設定した。なお、CT-1-C/S試験体の継手部におけるシート層数増分は考慮せず、継手なしの場合と同様シート1層として計算している。

図より、いずれの補強試験体においても、実験結果は、最大荷重時まで計算結果とほぼ対応している。特に、継手を有するCT-1-C/S試験体の場合には実験結果の荷重が計算結果を上回っている。これは、継手部区間における曲げ剛性が大きいことによるものと推察される。これらの結果より、熱可塑性CFRPシートは継手の有無や位置によらず、計算上の上縁コンクリート圧縮破壊時まで補強効果を発揮していることが明らかになった。

## 3.2 ひび割れ性状

図-8には、実験終了後におけるひび割れ状況を示している。なお、シート剥離によるコンクリート剥落部は灰色の網掛けで示している。図より、無補強のN試験体の場合には、等曲げ区間に損傷が集中しており、特に上縁コンクリートの圧縮破壊と、下縁から進展する曲げひび割れが顕在化していることが分かる。

これに対し、補強試験体の場合には、いずれも曲げ変形量が無補強試験体の場合よりも小さく、ひび割れが等

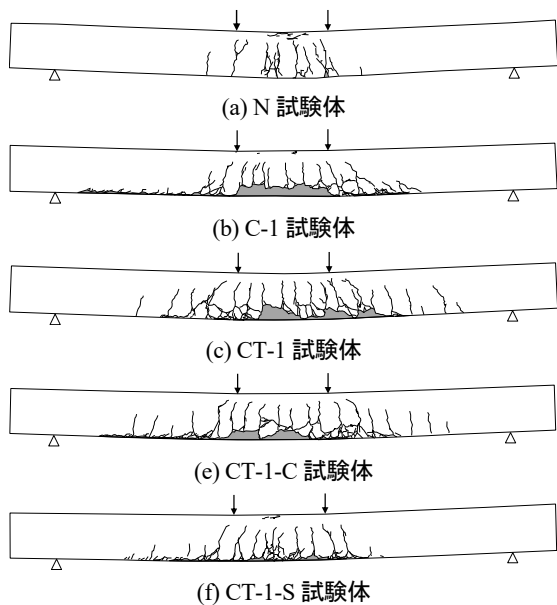


図-8 実験終了後におけるひび割れ状況

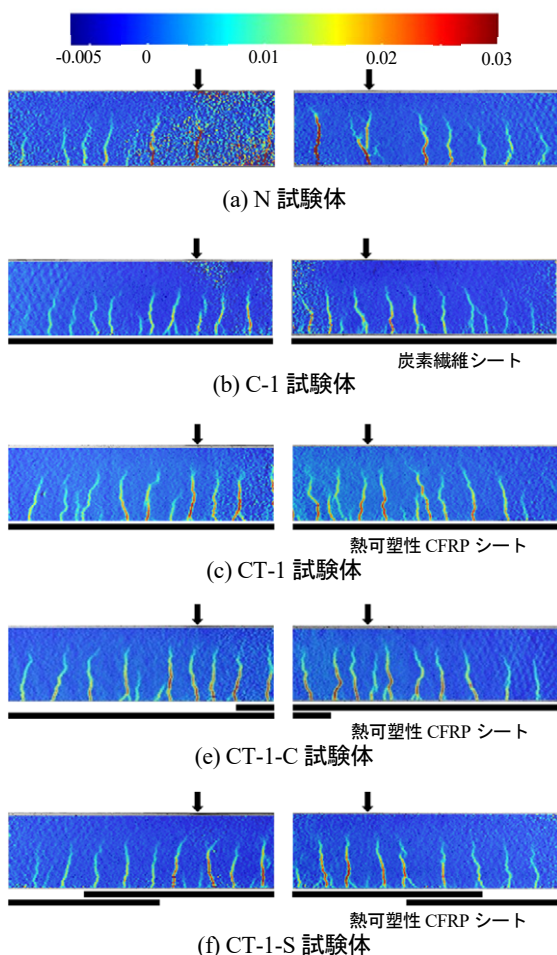


図-9 DIC 解析結果

曲げ区間よりも広い範囲に分布していることが分かる。また、等曲げ区間においては曲げひび割れ、せん断スパンにおいては斜めひび割れが発生している。実験時には、

いずれの試験体も下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れが曲げ変形量の増加に伴って開口し、シートが面外方向に引き剥がされ、シート剥離に至ったことを確認している。このような状況は、シートの種類や継手の有無・位置によらず同様であった。

図-9には、DIC解析により得られた主鉄筋降伏時におけるひび割れの分布性状を、主ひずみコンターとして示している。図より、N試験体の場合には、等曲げ区間の周辺において曲げひび割れが開口しており、左右の支点に近づくにつれてひび割れ幅が小さく、かつ高さ方向に進展する長さも短いことが分かる。補強試験体の場合にも同様の傾向が見られるが、無補強の場合よりもひび割れ幅が小さく、かつひび割れ間隔が狭い傾向にあり、ひび割れ分散効果が発揮されていることが分かる。また、このような傾向は、シートの種類や継手の有無・位置によらずほぼ同様である。

### 3.3 シートのひずみ分布性状

図-10には、補強試験体のシートの軸方向ひずみ分布の実験結果を計算結果と比較して示している。なお、計算結果は前述の断面分割法により算定した値である。ここでは、各補強試験体の曲げひび割れ発生時、主鉄筋降伏時、および計算終局時における同一変位時（以下、計算終局時）の結果を比較して示した。

図より、いずれの試験体も主鉄筋降伏時までは、実験結果と計算結果がほぼ対応していることが分かる。このことから主鉄筋降伏時までシートはコンクリートと良好な接着状態にあったものと判断される。また、計算終局時には、実験結果が計算結果を上回る傾向にある。これは、実験時にはひび割れが大きく開口しているものの、計算ではひび割れの開口が考慮されていないことによるものである。なお、CT-1-S/C試験体の実験結果のうち○印を付したひずみは計算結果よりも著しく小さく示されている。これは、継手部の先端に貼付されたひずみゲージ出力であるためと考えられる。

### 3.4 界面剥離破壊エネルギー $G_f$

図-11には、シートのコンクリートの界面剥離破壊エネルギー  $G_f$  に関する実験結果を計算結果と比較して示している。なお、 $G_f$  はFRP指針<sup>3)</sup>に掲載されているシート剥離応力の算定式(1)に基づいて、 $G_f$ を求める式に変形し式(2)により試算した。すなわち、等曲げ区間のシートのひずみの平均値  $\varepsilon_f$  から発生応力  $\sigma_f$  を算定し、式(2)に代入することで  $G_f$  を試算した。

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2 G_f E_f}{n_f t_f}} \quad (1)$$

$$G_f = \frac{\sigma_f^2 n_f t_f}{2 E_f} \quad (2)$$

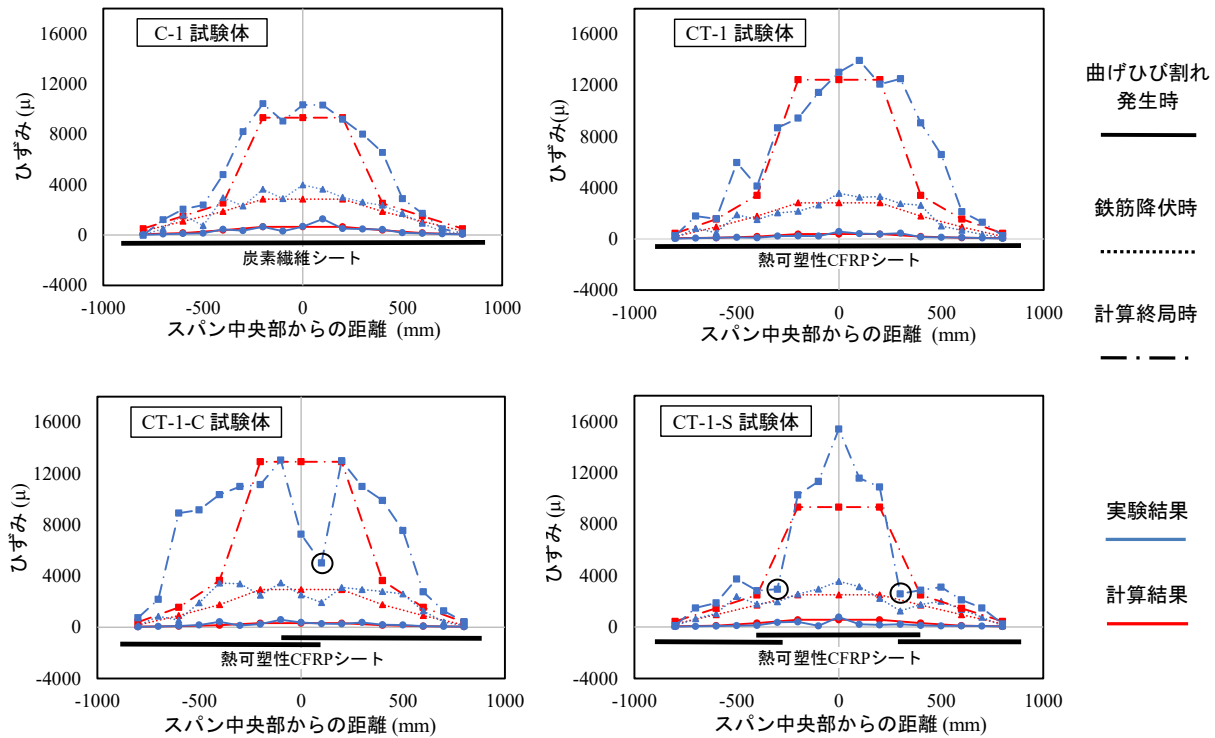


図-10 各時点におけるシートのひずみ分布に関する実験結果と計算結果の比較

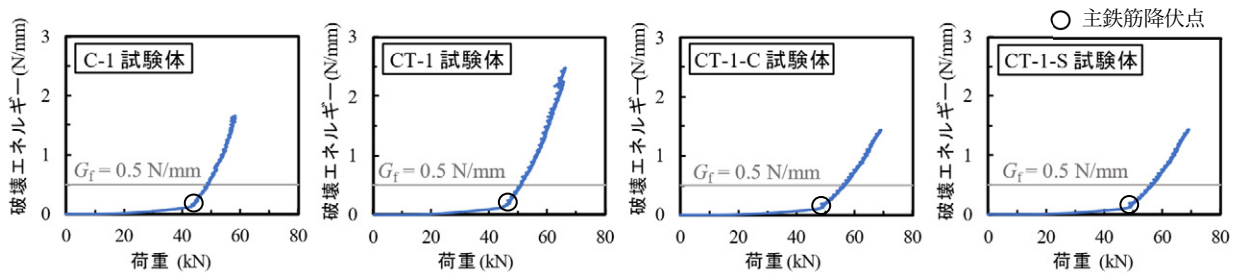


図-11 シートのコンクリートの界面剥離破壊エネルギー  $G_f$  に関する実験結果

ここで、 $n_f$  はシートの積層数、 $E_f$  はシートの弾性係数、 $t_f$  はシートの1枚当たりの設計厚さである。なお、図中には、FRP 指針に記載されている設計用の  $G_f = 0.5 \text{ N/mm}$  を併記している。

図より、いずれの補強試験体も  $G_f$  は主鉄筋降伏 (図中○印) 後に急激に増加していることが分かる。これは、主鉄筋降伏後にシートの補強効果が顕著に発揮されるため、シート接着界面に蓄積される破壊エネルギーも増大することを示している。なお、実験結果では  $G_f = 0.5 \text{ N/mm}$  を超過した後、剥離破壊エネルギーが増加し続けてもシート剥離に至っていない。このことから、従来の炭素繊維シート接着工法と熱可塑性 CFRP シート接着工法の剥離破壊エネルギーは、ともに FRP 指針に掲載されている設計値よりも大きいことが明らかになった。

#### 4. まとめ

1) 熱可塑性 CFRP シートを接着することにより、従来

の炭素繊維シートを接着する場合と同程度以上の補強効果やひび割れ分散効果が発揮される。

- 2) 熱可塑性 CFRP シートの継手が、最大引張応力が発生する等曲げ区間に位置する場合や、せん断力の作用によって面外変形が発生するせん断スパンに位置する場合においても、継手なしの場合と同程度以上の補強効果が発揮される。
- 3) 界面剥離エネルギー  $G_f$  は、FRP 指針に掲載されている設計用の  $G_f (= 0.5 \text{ N/mm})$  よりも十分に大きい。

#### 参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社：設計要領第二集 橋梁保全編、2020.7
- 2) (公財) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]
- 3) (公財) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針 (案)、複合構造シリーズ 09、2018.7