# 接着接合による炭素繊維シートと鋼板接合部のせん断付着特性

九州大学大学院　学生会員　○LE PHUONG TUNG　フェロー会員　日野伸一
㈱ホープ設計　正会員　金田一男
㈱大日本コンサルタント　正会員　田崎賢治
㈱日鉄コンポジット　正会員　井上和夫

## 1.まえがき

海上部に架設している橋梁橋脚の耐震補強工法として，多数の工法が適用されている．本研究は，経済性および施工性から気中に位置する段落とし部に炭素繊維シート(以下 CF シート)接着，また水中に位置する段落とし部に鋼板巻立てによる混合接着補強工法を使用することが目的である．今回は CF シートと機械継手を用いた鋼板による混合巻立て工法を橋脚の耐震補強に適用するために，その基本となる CF シートと鋼板の継手部のせん断付着強度を明らかにした．そこで，CF シートと鋼板の付着長を 200～500mm まで変化させた接着接合試験体の付着試験を行い，CF シートと鋼板の付着特性について検討した．

## 2.実験概要

### 2.1 試験体および試験方法

試験体の概略図を**図-1** に，試験体種類を**表-1** 示す．鋼板両面の規定長さにプライマーを塗布した．プライマー硬化後，鋼板両面に 3 mm 厚エポキシパテを塗布して CF シートを接着し，室温にて 7 日間以上養生した．

載荷試験は**図-1** に示すように CF シートと鋼板の端部に引張力を与えた．載荷は接着界面のせん断剥離破壊に至るまで変位制御で行い，JSCE-E541-2000「連続繊維シートの引張試験方法（案）」に準拠し，試験速度 0.5～1.2mm/分とした．破断荷重，CF シートのひずみ分布および付着強度を計測した．

### 2.2 実験結果および考察

#### 2.2.1 ひずみ―距離関係

**図-2** に単位幅当たり荷重 1500N 時における各タイプ CF シートの軸方向ひずみ分布を示す．CF シートは完全弾性体ため，ひずみと CF シートが受ける応力は比例する．付着長 200 mm の試験体は，先端部の応力集中が他の試験体に比べて顕著であることがわかる．また，付着長を長くすることで応力集中が緩和されることが確認できた．

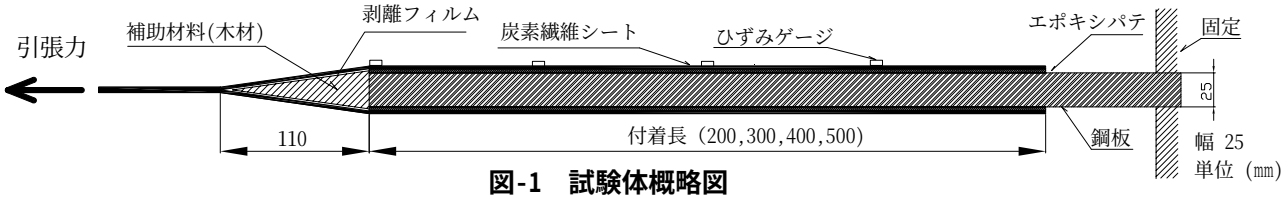


**図-1　試験体概略図**

**表-1　試験体種類**

| 付着長 (mm) | 鋼板表面下地処理 | シート層数 (片側) | |
|---|---|---|---|
| | | FTS-C1-30 | FTS-C1-60 |
| 200 | サンドブラスト処理 (74～105 μm) | 1層 | 2層 |
| 300 | | - | 4層 |
| 400 | | - | 5層 |
| 500 | | - | 6層 |

**表-2　材料特性値**

| | | |
|---|---|---|
| 鋼板 | 引張強度 ($N/mm^2$) | 450 |
| | 弾性係数 ($N/mm^2$) | $2.1x10^5$ |
| | ポアソン比 | 0.3 |
| 炭素繊維シート | 引張強度 ($N/mm^2$) | 3400 |
| | 弾性係数 ($N/mm^2$) | $2.45x10^5$ |
| | ポアソン比 | 0.2 |
| | 設計厚さ mm | 0.333 |
| | 繊維目付 ($g/m^2$) | 600 |
| エポキシパテ | 弾性係数 ($N/mm^2$) | $2.1x10^3$ |
| | ポアソン比 | 0.2 |
| | 引張せん断強度 ($N/mm^2$) | 16 |

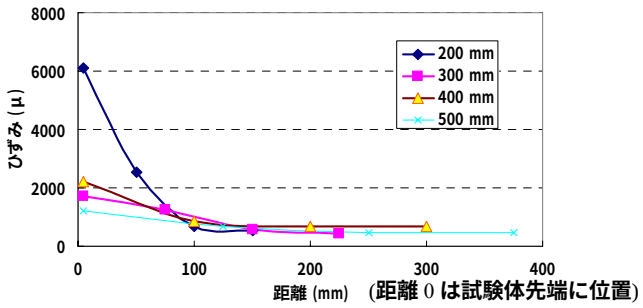


**図-2　単位幅当たり荷重 1500N 時のひずみ―距離**

キーワード：炭素繊維シート，鋼板，せん断付着強度，耐震補強，橋脚
連絡先　〒819-0395　福岡県福岡市西区元岡 744 番地　九州大学建設設計研究室　TEL 092-802-3392

### 2.2.2 付着効果の評価

付着長 50～150 mm の同様試験結果[1]と今回の試験結果と合わせて**図-3** に CF シート単位幅当たりの最大荷重と付着長の関係を示す．付着長が増加するとともにに炭素繊維シートの単位幅当たり最大荷重がほぼ直線的に増大することがわかった．

最大荷重を接着面積で除したものを平均付着強度と定義し，付着効果を評価する．**図-3** には関係平均付着強度を単位幅当たり最大荷重-付着長関係曲線の勾配として示す．実験データによる線形近似直線の勾配が 6.42 N/mm$^2$ となった．設計上では，平均付着強度($\tau_{cf}$)が 4.0 N/mm$^2$ となれば十分な安全性が確保できる．

写真-1　破壊状況　（付着長 400 ㎜）

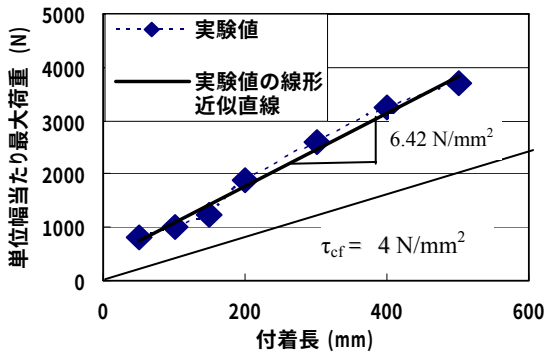


図-3　単位幅当たり最大荷重-付着長

### 3.剥離荷重の計算方法

**図-4** に試験体の微分要素にはたらく力のつり合いを示す。この力のつり合いを用いて次エポキシパテのせん断応力分布式が求められる[2]。

パテエポキシのせん断応力分布式

$$\tau_x = \frac{P\alpha}{b_{cf}} \times \left\{ \frac{(1-\eta)\cosh\alpha L + \eta}{\sinh\alpha L} \cosh\alpha x - (1-\eta)\sinh\alpha x \right\} \qquad (1)$$

$$\alpha^2 = \frac{G_a}{t_a}\left(\frac{1}{E_{cf}b_{cf}t_{cf}} + \frac{1}{E_s b_s t_s}\right) b_{cf} \quad \eta = \frac{\beta}{\alpha^2} \quad \beta = \frac{G_a}{t_a}\frac{b_{cf}}{E_s b_s t_s} \quad G_a = \frac{E_a}{2(1+\nu_a)}$$

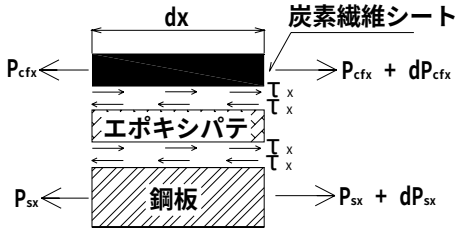


図-4　微分要素の力釣合い図

x:試験体の先端から注目する位置までの距離 (mm)

$P_{cfx}$ :先端から x 位置での炭素繊維シートの引張力 (N/mm$^2$)

$\tau_x$：先端から x 位置でのエポキシパテの付着せん断応力 (N/mm$^2$)

P:試験体の先端に作用する引張力 (N), L:炭素繊維シートの付着長(mm)

$E_{cf}$ :炭素繊維シートの弾性係数 (N/mm$^2$)，$E_s$：鋼板の弾性係数(N/mm$^2$)

$b_{cf}$：炭素繊維シートの幅 (mm)，$b_s$:鋼板の幅 (mm)

$E_a$:エポキシパテの弾性係数 (N/mm$^2$)，$t_{cf}$：炭素繊維シートの厚さ(mm)

$t_s$：鋼板の厚さ(mm)，$t_a$：エポキシパテの厚さ (mm)

$G_a$: エポキシパテのせん断弾性係数 (N/mm$^2$)

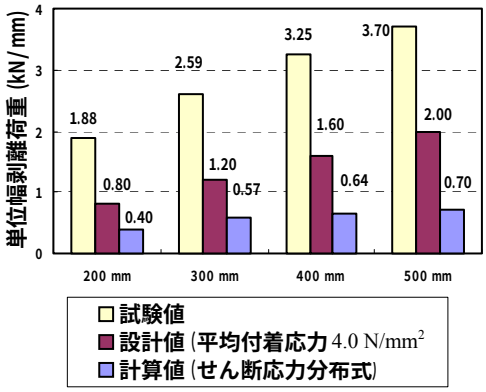


図-5　剥離荷重の比較

今回はエポキシパテの引張せん断強度を 16 N/mm$^2$（**表-2**）とし，付着応力がこの引張せん断強度に超えた時点における荷重を剥離荷重とする．**図-5** に実験による最大荷重，式(1)を用いて算出した剥離荷重と設計上の平均付着強度 4.0 N/mm$^2$ によって算出した剥離荷重設計値との比較を示す．本実験では，最大荷重と剥離荷重の比が 4.53～5.28 であり，かなり安全側の評価となっている．設計上では，平均付着強度が 4.0 N/mm$^2$ となれば最大荷重と剥離荷重の比が 1.85～2.35 となり，経済的で十分な安全性が確保できる．

### 4.まとめ

CF シートと鋼板のせん断付着特性を実験的に考察した結果，（1）付着長が 100 mm の範囲では，単位幅あたりの最大荷重は付着長の増加にともないほぼ直線的に増加し，その勾配すなわち平均付着強度は 6.42 N/mm$^2$ となることがわかった，（2）エポキシパテの引張せん断強度を 16 N/mm$^2$ とし，付着応力がこの引張せん断強度に超えた時点における荷重を剥離荷重とれば最大荷重とその剥離荷重の比が 4.53～5.28 となった，（3）設計上では，平均付着強度が 4.0 N/mm$^2$ となれば最大荷重と剥離荷重設計値の比が 1.85～2.35 となり，十分な安全性が確保できる．

**参考文献：**1)ホープ設計㈱：炭素繊維シートと鋼板のせん断付着強度試験報告書，2007.6

2) 岳尾弘洋：CFRP 接着工法における炭素繊維シート付着耐力向上実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol 20,No1, pp.431-436,1998