

論文 炭素繊維シート開口部補強の特性に関する基礎的研究

伊奈 倫之*1・榊田 佳寛*2・鹿毛 忠継*3・中村 成春*4

要旨：RC構造物の補強に用いられる炭素繊維シートには繊維による方向性があるため開口がある場合、開口により切断された炭素繊維シートの補強方法はまだ明確にされていない。本研究では炭素繊維シートによる3種類の補強モデルについて、純引張試験を行い、補強方法・補強長さとの引張強度との関係を明らかにし、それぞれの補強モデルについて異方性を考慮した2次元弾性応力としてFEM解析を行い、開口部での応力集中の状況を評価した。繊維方向と平行方向のみ補強した場合は補強効果が少なく、水平方向と垂直方向の2方向に補強する必要があることを明らかにした。

キーワード：炭素繊維シート、開口部補強、異方性

1. はじめに

炭素繊維シート（以下CFRPシート）によるRC建築物の補強工事では、補強する部位をCFRPシートで覆ってしまうため、一般にCFRPシートの上から仕上げを行う。この時、乾式工法で仕上げを行う場合にはボルト穴を設ける必要がある。また、コンセントやボックスなどが躯体に埋め込んである場合には、CFRPシートに開口を設けることが必要となる。CFRPシート補強工法は、シートを躯体に連続して貼り付けることにより補強効果を得るものであるため、このような開口を設けることにより連続繊維に不連続な箇所ができ、補強効果が低下すると考えられる。CFRPシートには繊維

による方向性があるため開口部の補強方法についてはまだ不明な点が多い。本研究では、CFRPシートに人為的に開口部を設けCFRPシートによる補強効果を実験およびFEM解析により評価することとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用したCFRPシートの力学的特性を表-1に示す。

2.2 要因と水準

CFRPシートの開口部の補強方法は、ベースとなる母材CFRPシート（以下母材シート）に補強CFRPシート（以下補強シート）を重ねて貼り付けることにより補強する方法とした。

表-1 使用した炭素繊維シートの力学的特性

| 繊維方向に平行方向（カタログ値） | |
|-----------------------------|-------------|
| 繊維量 (g/m ²) | 200 |
| 単位幅断面積 (cm ² /m) | 1.11 |
| 引張強度 (N/mm ²)※ | 3500 [4101] |
| ヤング率 (kN/mm ²)※ | 240 [273] |

※括弧内の数字は実測値

表-2 要因と水準

| 補強モデル | 補強方向 | 補強長さ (mm) |
|-------|------------|----------------|
| 1 | 繊維方向に平行 | 50、100、150、200 |
| 2 | 繊維方向に垂直 | 50、100、150、200 |
| 3 | 繊維方向に垂直・平行 | 50、100、150、200 |

*1 株式会社 コンステック 開発技術本部 工修（正会員）

*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博（正会員）

*3 建設省建築研究所 第4研究部工業生産研究室室長 学博（正会員）

*3 宇都宮大学助手 工学部建設学科 工博（正会員）

補強方法についての要因と水準を表-2に示す。この要因と水準は次の手順によって定めた。まず、母材シートの繊維方向と平行方向にCFRPシートを貼り補強する方法について試験を行った。その結果、開口部から繊維方向に縦割れが生じ、補強区間外の母材で破断し、十分な補強効果が得られないことがわかった。そこで、繊維と平行方向だけでなく垂直方向にも補強する(補強モデル3)こととし、比較の意味で垂直方向のみ補強したもの(補強モデル2)も試験することとした。それぞれに対し補強シートの長さを変化させて補強効果の違いについて検討した。

2.3 供試体

供試体の概要を図-1に示す。供試体は長さ500mm、幅25mmの母材シートの中央に供試体幅の半分である直径12.5mmの開口を開けたものとし、母材シートと同じ幅の補強シートを母材シートの上に重ねて貼り付けたものを使用した。補強長さは、貼り付けた補強シートの長さとし、それぞれ4段階の補強長さについて試験した。試験機によるつかみ部分として供試体の両端に厚さ2mmのアルミ板を取り付けタブとした。供試体は各2体ずつとした。

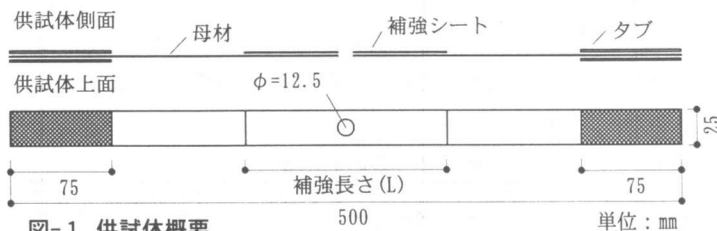


図-1 供試体概要

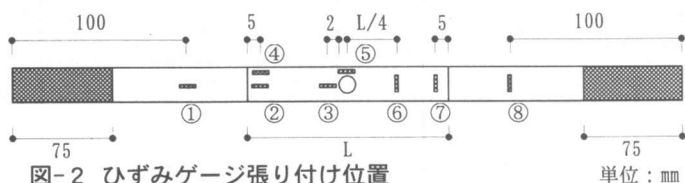


図-2 ひずみゲージ張り付け位置

2.4 供試体製作方法

供試体は室温20℃の室内において離形性のビニールシートの上で製作した。補強シートによる補強は、母材シートのエポキシ樹脂が硬化する前に重ねて作った。供試体の製作工程を以下に示す。

ビニールシートに下塗りエポキシ樹脂を目標として0.4 kg/m²塗布し、母材シートを貼り付けて脱泡し、シート貼り付けから30分後に上塗りエポキシ樹脂を目標として0.2 kg/m²塗布した。次に、補強シートを貼り付ける供試体については貼り付ける部分にエポキシ樹脂を0.4 kg/m²塗布し、補強シートを貼り付けさらに上塗りエポキシ樹脂を0.2 kg/m²塗布した。

養生期間は20℃で7日以上とし、養生後に供試体の側面を整形し、開口を補強シートの上からボール盤を用いて行った。

2.5 試験方法

試験方法は、単純引張試験とし、試験速度はクロスヘッドの速度で1mm/minとした。ロードセルを用いて荷重を測定し、5mmのひずみゲージを用いて母材シート側でひずみを測定した。また、破断状況を観察した。ひずみゲージ貼り付け位置を図-2に示す。

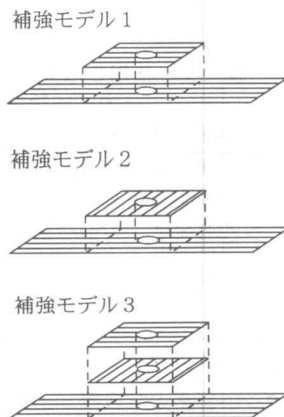


表-3 試験結果

| 補強モデル | 補強長さ (mm) | エポキシ樹脂含浸量 (g/m ²) | 引張強度 (N/mm ²) | 変動係数 (%) | 破断状況 |
|-------|-----------|-------------------------------|---------------------------|----------|------|
| 無補強 | 0 | 881 | 1494.6 | 14.49 | I |
| 1 | 50 | 518 | 1187.4 | 12.23 | II |
| | 100 | 495 | 1720.3 | 14.78 | II |
| | 150 | 467 | 1634.7 | 11.18 | II |
| | 200 | 446 | 1875.7 | 6.79 | II |
| 2 | 50 | 687 | 1597.3 | 19.06 | I |
| | 100 | 804 | 1595.0 | 2.84 | I |
| | 150 | 565 | 1581.1 | 3.79 | I |
| | 200 | 541 | 1401.8 | 9.18 | I |
| 3 | 50 | 733 | 2641.1 | 1.37 | I |
| | 100 | 672 | 2502.6 | 15.72 | I |
| | 150 | 542 | 2978.6 | 8.54 | I |
| | 200 | 555 | 3028.1 | 1.12 | I |

※破断状況 I : 開口部での破断

II : 縦割れが発生し無補強部分での破断

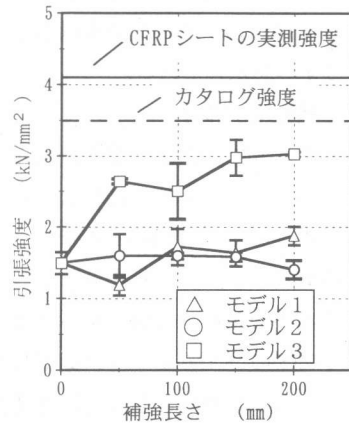


図-3 補強長さ-引張強度関係

3. 試験結果と考察

3.1 引張強度

補強方法と引張強度の関係を表-3, 図-3に示す。表-3におけるエポキシ樹脂含浸量は供試体質量から算出した。補強モデル1および2については、補強長さに関係なく補強効果が無いことが推察される。補強モデル3については、補強長さが長くなるにつれて引張強度が上昇し、補強効果があることが確認された。しかし同一幅の開口部を持たないCFRPシートの強度に対して低い値を示しており、十分な補強効果があるとは言えない。

3.2 破断状況

破断状況は、補強モデル1を除き、ほとんどの供試体において開口部で破断した。補強モデル1で縦割れを起こした原因としては、エポキシ樹脂のせん断強度が十分でなく、繊維同士の応力の伝達が十分でないことが考えられる。また、他の補強モデルに比べエポキシ樹脂の量が少なかったことも影響していると考えられる。その結果、開口により切断された繊維と切断されていない繊維との境界で、繊維方向と平行に縦割れが発生したと考えられる。

3.3 ひずみ

荷重-ひずみ関係を図-4に示す。無補強の供試体では②と④のひずみを比べると④の方が大きな値を示しており、開口により切断された繊維部分の応力が連続繊維の部分に十分伝わっていないことがわかる。横ひずみは、開口部に近い位置でひずみが大きくなっている。

(1) 補強モデル1

補強モデル1の供試体では、他の補強モデルと違い⑤の破断時のひずみが低い値を示している。これは供試体繊維方向と平行に縦割れを起こし、補強区間外の母材シートの部分で破断したためと考えられる。

(2) 補強モデル2

補強モデル2では、補強長さ200mmの供試体の①②④のひずみがほぼ等しい値を示しているが、補強長さ100mmでは最大荷重付近で異なった値を示している。補強長さ200mmでは、補強長さが長くなったことにより、開口部から100mm離れた位置で均一なひずみ分布であると言える。横ひずみについては、無補強のものに対して減少していることがわかる。開口部での破断ひずみは、無補強のものとは違はない。この補強モデルは、母材繊維方向と垂直方向に貼り付けた

補強シートにより応力を伝達できることを確認するための供試体であり、繊維と水平方向に補強を行っていない。そのため⑤は①に対して約2倍のひずみを示している。

(3) 補強モデル3

補強モデル3では、①と⑤がほぼ同じひずみを示しており、共に破断時にはCFRPシートの破断ひずみである12000 μ を示しており、垂直方向の補強シートにより十分に応力が伝わっていることがわかる。補強モデル2に対して同一荷重での⑤のひずみが1/2に低下しており、母材シートと水平方向に貼り付けた補強シートが半分の応力を負担していることがわかる。④と⑤のひずみは、補強長さにより異なった傾向を示している。これは補強シート端部では応力が伝わりにくく、定着長さが必要であるため補強長さ100mmの供試体では補強シート端部での応力伝達が十分にできていないためと考えられる。十分な補強効果が得られない理由としては応力集中により開口部内側の応力が大きく、内

側から繊維が破断していくためと考えられる。

4. 解析

実験結果を合理的に説明するためにFEM解析を行った。

4.1 素材試験

FEM解析に用いる数値を求めるためCFRPシートの素材試験を行った。素材試験の結果を表-4に示す。また、CFRPシートの応力-ひずみ関係を図-5に示す。CFRPシート

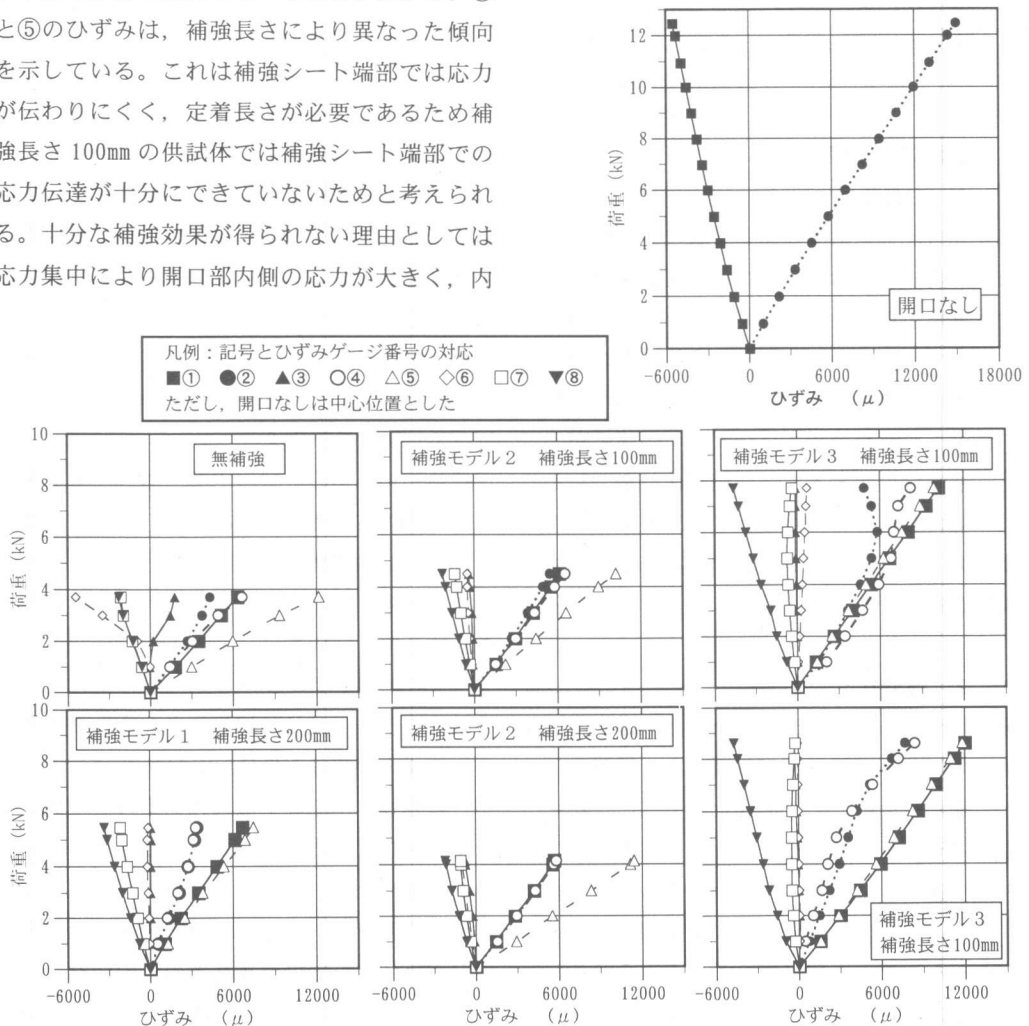


図-4 荷重-ひずみ関係

には塑性域がほとんどみられないため、CFRPシートを弾性体と仮定し、厚さも薄いため既往のプログラム¹⁾を用いて、異方性を考慮した修正²⁾をして2次元弾性解析を行った。

4.2 FEM解析

要素分割を図-6に示す。CFRPシートは異方性材料であるためX方向のヤング率を E_x 、ポアソン比を ν_x 、Y方向のヤング率を E_y 、ポアソン比を ν_y 、せん断係数を G_{xy} として、応力-ひずみマトリックスを以下のようにした。

$$[D] = \frac{1}{1 - \nu_x \nu_y} \begin{pmatrix} E_x & \nu_y E_x & 0 \\ \nu_x E_y & E_y & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \nu_x \nu_y) G_{xy} \end{pmatrix}$$

またマックスウェル-ベティの相反定理より

$$\nu_y E_x = \nu_x E_y$$

となる。 G_{xy} については1軸応力状態のためエポキシ樹脂の値を使用し

$$G_{xy} = \frac{E_y}{2(1 + \nu_y)}$$

とした。

表-4 CFRPシートの素材試験結果

| 方向 | 繊維方向に水平 | 繊維方向に垂直 |
|------------------------------|---------|---------|
| エポキシ樹脂含浸量(g/m ²) | 858 | 942 |
| ヤング率(kN/mm ²)※ | 29.8 | 3.93 |
| ポアソン比 | 0.304 | — |
| 引張強度(N/mm ²)※ | 355.5 | 19.9 |
| 破断ひずみ(μ) | 12000 | 5000 |

※CFRPシート1層の厚さを1mmとした値

4.3 解析結果と考察

供試体の厚さは単位厚さとし、補強部分のヤング率は、重ね合わせたシートの縦横のヤング率を足し合わせた。要素の破壊については、無補強および平行方向にのみ補強した区間については、表-4よりY方向の応力がX方向の0.056倍以上のとき破壊することとし、破壊した要素のヤング率を0として、解析を繰り返し行った。単位荷重をかけた場合の開口部での最大ひずみについて、開口が無い場合の単位荷重に対する応力を100%とした時の、開口部での単位荷重に対する最大応力の割合を3種類の補強モデル(補強長さ200mm)と無補強のものについて比較をした。結果を図-7に示す。無補強のモデルでは、最大荷重に達するまでに開口部から繊維方向と平行にせん断破壊が生じることが確認され、開口により切断された繊維が力を負担できない。解析結果として開口の無いものに対し約2倍の応力がかかっていることがわかり、実験での実測強度に対する引張強度と一

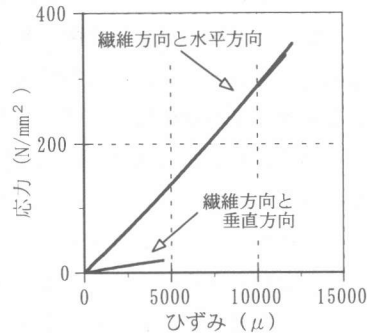


図-5 CFRPシートの応力-ひずみ関係

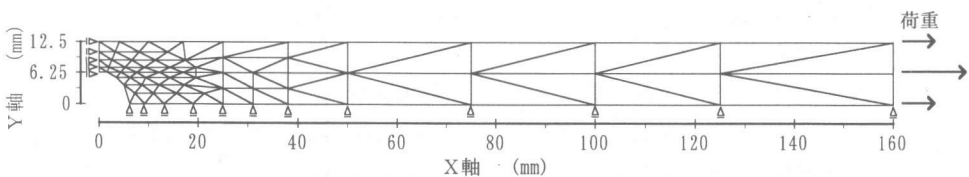


図-6 要素分割図

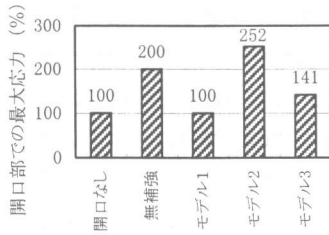


図-7 補強方法による開口部最大応力の比較

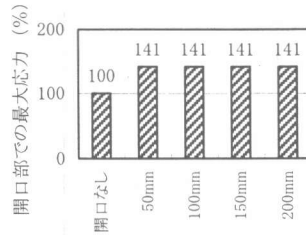


図-8 補強モデル3における補強長さ-開口部最大応力関係

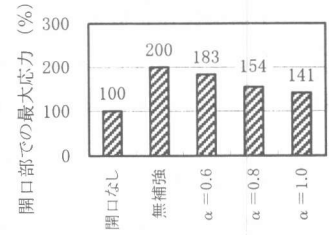


図-9 補強モデル3における有効率の変化

致している。補強モデル1による補強でも無補強のものと同様にせん断破壊が発生した。補強モデル2では、約2.5倍の値を示している。この結果は補強長さ200mmでの実験結果と一致しており、母材シートと垂直方向に貼り付けた補強シートによりせん断破壊が抑制され、応力集中の影響を受け強度が低下したと考えられる。補強モデル3では約1.4倍の値を示している。この補強モデル3の値は、CFRPシートの引張強度の実測値に対する補強モデル3の補強長さ200mmでの実験結果と一致している。

次に、補強モデル3において補強長さを変えて開口部での最大応力をみたものを図-8に示す。その結果、今回行ったFEM解析では、補強長さによる補強効果の変化についてはほとんど無いという結果となった。この理由としては、応力が高くなると、母材シートとの接着が徐々に小さくなり、補強シートに応力が伝わりにくくなっていくことが考えられる。そこで、補強長さ50mmの範囲で補強シートの有効率 α を考え、補強シート有効率による応力集中の変化を比較した。有効率を用いた要素のヤング率の計算方法を以下に示す。

$$E = E_b + \alpha(E_{s1} + E_{s2})$$

E : 要素のヤング率

E_b : 母材シートのヤング率

E_{s1} : 補強シート1層目のヤング率

E_{s2} : 補強シート2層目のヤング率

有効率と開口部での最大応力の関係を図-9に示す。補強シートの有効率増加に伴い、応力集

中が減少する傾向がみられた。この結果から補強長さ50mmでの補強シートの有効率を逆算すると有効率は0.78となった。

5. まとめ

開口を有するCFRPシートの補強工法として、CFRPシートを貼り重ねる補強方法の効果について試験・解析して、本研究の範囲で以下のことが明らかとなった。

(1) 母材CFRPシートの繊維方向に対し平行方向にだけ補強する補強方法では補強効果がみられない。

(2) 母材CFRPシートに対して、平行および垂直方向に補強シートを貼り付けることにより補強効果が得られるが、応力集中を考慮して断面欠損以上に母材繊維方向と平行に補強することが必要である。

(3) 補強長さが短い場合には補強効果が得られにくい。

謝辞

実験に際しCF建協 安藤達夫氏、大日本色材工業(株)大出努氏に協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) T.Yyang: よくわかる有限要素構造解析入門, 技報堂出版, pp.443-447, 1996.6
- 2) 吉田博, 小堀為雄: 有限要素による構造解析プログラム, 丸善, pp.141-150, 1976.12