

## ブレーディング法による H 型断面 CFRP 構造部材の強度特性について

京都大学大学院工学研究科  
京都大学大学院工学研究科  
日石三菱株式会社

小野 紘一  
三木 亮二  
小牧 秀之

京都大学大学院工学研究科 杉浦 邦征  
京都大学工学部地球工学科 ○北川 淳一  
村田機械株式会社 林 誠

## 1. はじめに

繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastics: 以下 FRP と略す) は, 耐久性に優れ, 軽量かつ高強度であるため, これらの特性を十分に活かすことができれば新たな構造形態を模索することが可能となる. そこで, 本研究で CFRP 材の構造材料としての実用化に向けて引張試験, 圧縮試験を行い, これらの破壊性状や強度特性を実験的に把握することを目的とした. また継手構造に対する検討として, 円孔を有する CFRP 形材の引張試験も行い, 応力集中による強度変動を明らかにした.

## 2. 供試体および実験の概要

本研究ではブレーディング (以下 BR) と呼ばれる組物構造を, 所定の断面形状に成形し金型中にて樹脂を硬化させ供試体を製作した. 成形法の手順を図 1 に示す. 炭素繊維は

(a)組物中の繊維配置



(b)成形・部材製作

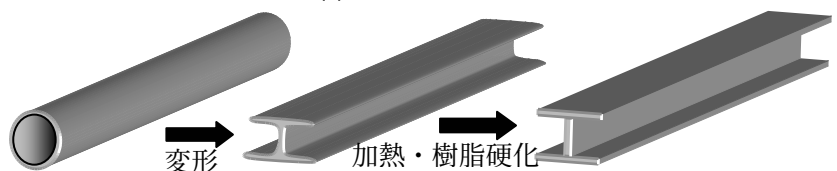


図 1 供試体成形

0°, ±45°に同量入っており全繊維含有率は約 60%である. 引張試験供試体は, H 型圧縮供試体のフランジ部から幅  $w=12.5\text{mm}$ , 長さ 500mm の寸法で切り出し両端にタブを接着し作製した. 供試体の形状を図-2 に示す. Type A は孔無し供試体, Type B, C はそれぞれ直径  $d=2, 1(\text{mm})$  の孔を 1 つ有する供試体. Type D は直径  $d=1(\text{mm})$  の孔を 2 つ有する供試体, Type E は比較のためハンドレイアップ (以下 HL) 法による孔無し供試体である. また圧縮試験は, 長さ 150mm の H 形断面短柱供試体を用い, BR 法, HL 法の 2 種類について行った. 供試体の形状を図-3 に示す. 圧縮試験では供試体端部での局部破壊を防ぐため深さ 3mm の H 型の溝を掘った鉄板を両端に被せ接着剤で一体化し, 载荷を行った. なお, 引張試験・圧縮試験それぞれ, 各タイプにつき 3 体ずつ試験を行った.

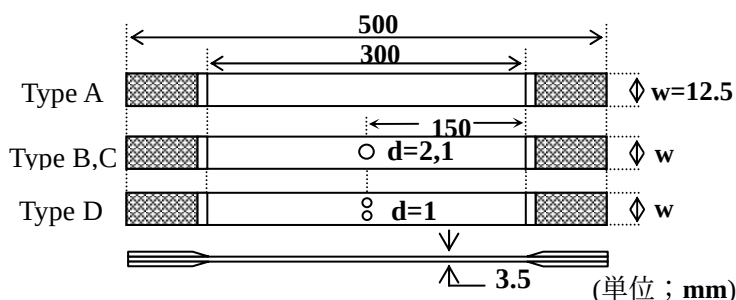


図-2 引張供試体の形状

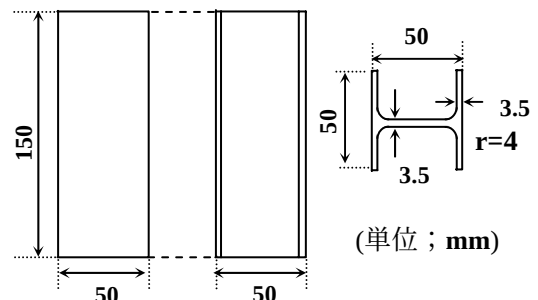


図-3 圧縮供試体の形状

## 3. 試験結果および考察

## 3.1 引張試験

引張試験結果(孔無し)を表-1 に示す. ここで, 表中の数値は 3 体の平均値を記している. 軸方向に配置されている繊維含有率は同等であるが, BR 法供試体よりも HL 法供試体の方が, 引張強度が倍以上大きくなった. なお全ての供試体がタブ近傍で破断しており CFRP 本来の引張強度が発揮できていない可能性があり, 再検討が必要である.

キーワード: CFRP, 強度特性, ブレーディング法

連絡先: 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻 TEL075-753-4791

一方 BR 法では繊維を編み込んでいるため成形時において繊維を正しく部材軸方向に配置するのが困難と考えられ、供試体を切り出す際、軸方向繊維含有率が HL 法より少なくなってしまう事が強度低下の原因と考えられる。また弾性率に関しても、BR 法による供試体では  $43.15(\text{kN/mm}^2)$ 、HL 法による供試体では  $62.98(\text{kN/mm}^2)$  と大きな差が生じた。積層理論を用いて算出した理論弾性率は  $89.17(\text{kN/mm}^2)$  であり、BR 法による CFRP 部材に対する積層理論の適用性も含め再検討の必要がある。またポアソン比はいずれの供試体においても 0.677、0.752 と非常に大きな値となった。これは  $\pm 45^\circ$  方向の繊維が入ることで、荷重作用軸直角方向への変形が助長され、理論的にも整合性がある。有孔引張試験結果を表-2 に示す。破壊性状に関しては、Type C では 3 体全てグリップ付近で破壊したが、Type B、D では最小有孔断面で破壊した。断面欠損( $nd/w$ )が 0.16 以上ではグリップ部より孔近傍に応力集中が生じていることがわかる。本部材の直交異方性を考慮した FEM 解析では円孔周りの応力集中係数は約 4.7 と高いにもかかわらず大きな引張強度低下にはならなかった。

### 3.2 圧縮試験

圧縮試験結果を表-3 に示す。圧縮強度に関して、BR 法と HL 法の成形法の差はあまり見られなかった。一方破壊性状に関して、BR 法供試体は 3 体中 2 体が中央付近で座屈したが、HL 法供試体は 3 体中 2 体が端部で破壊した。よって HL 法供試体に比べて BR 法供試体では、局所的な応力集中を防ぐことができると考えられる。さらに、圧縮供試体の耐力を検討するため、供試体フランジ部分 3 辺単純支持 1 辺自由の板としての弾性座屈強度( $k=0.425$ )と、ウェブ部分 4 辺単純支持の板としての弾性座屈強度( $k=4$ )のそれぞれを求めた。 $\sigma_u$  は圧縮強度、 $\sigma_y$  は引張強度とした。表からわかるように R が小さい場合においても  $\sigma_u/\sigma_y$  は 1.0 を大きく下回り、CFRP 材の圧縮強度が相対的に低いことがうかがえる。

### 4. まとめ

①引張試験では両成形法ともグリップ付近で破壊が生じ、材料本来の引張強度が得られなかった可能性が高い。今後、グリップ付近の応力集中を緩和する試験片形状等を検討し標準的な引張試験方法を確立する必要がある。②BR 法による CFRP 材では断面欠損 0.16 以上では孔及び孔付近で破壊した。また断面欠損率が同じ場合孔の個数にはあまり影響を受けないと考えられる。③圧縮強度は両成形法とも  $0.3\sim 0.42(\text{kN/mm}^2)$  と、ほぼ同じ値となった。しかし HL 法による供試体に関しては端部で繊維の分離が生じやすいなどの傾向が見られた。

【参考文献】 1) 社団法人 強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧，pp129-159 2) 三木光範 他：複合材料，pp118-130

表-1 引張試験結果(穴無し)

|                                | Braiding | Hand-lay-up |
|--------------------------------|----------|-------------|
| 最大荷重 (kN)                      | 24.33    | 50.97       |
| 引張強度 ( $\text{kN/mm}^2$ )      | 0.556    | 1.165       |
| 弾性係数 ( $\text{kN/mm}^2$ )      | 43.15    | 62.98       |
| 弾性係数 (理論) ( $\text{kN/mm}^2$ ) | 89.17    |             |
| ポアソン比                          | 0.677    | 0.752       |

表-2 有孔引張供試体の強度

|        | d/w  | 孔数<br>n | 引張強度<br>( $\text{kN/mm}^2$ ) | 破壊性状            |
|--------|------|---------|------------------------------|-----------------|
| Type B | 0.16 | 1       | 0.521                        | 3 体中 2 体が孔付近で破壊 |
| Type C | 0.08 | 1       | 0.629                        | 3 体全てグリップ付近     |
| Type D | 0.08 | 2       | 0.600                        | 3 体中 2 体が孔で破壊   |

表-3 圧縮試験結果

|         | 圧縮強度<br>( $\text{kN/mm}^2$ ) | 圧縮<br>弾性率<br>( $\text{kN/mm}^2$ ) | $\sigma_u/\sigma_y$<br>(実験) | フランジ突出部<br>弾性座屈強度 |                     | ウェブの弾性<br>座屈強度 |                     |
|---------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------|----------------|---------------------|
|         |                              |                                   |                             | R                 | $\sigma_u/\sigma_y$ | R              | $\sigma_u/\sigma_y$ |
| BR<br>法 | 0.299                        | 56.26                             | 0.538                       | 0.879             | 1.29                | 0.516          | 3.76                |
|         | 0.351                        | 57.50                             | 0.63                        | 0.953             | 1.10                | 0.559          | 3.20                |
|         | 0.335                        | 53.50                             | 0.603                       | 0.895             | 1.25                | 0.525          | 3.63                |
| HL<br>法 | 0.420                        | 59.66                             | 0.361                       | 1.274             | 0.62                | 0.748          | 1.79                |
|         | 0.365                        | 60.56                             | 0.313                       | 1.116             | 0.80                | 0.655          | 2.33                |
|         | 0.363                        | 61.64                             | 0.312                       | 1.266             | 0.62                | 0.743          | 1.81                |

注) R；幅厚比パラメータ

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad \left[ \begin{array}{l} b: \text{板の幅(mm)}, t: \text{板の厚さ(mm)} \nu: \text{ポアソン比} \\ k: \text{座屈係数}, E: \text{弾性係数} \end{array} \right]$$

$\sigma_u$  は圧縮強度  $\sigma_y$  は引張強度