CFRPの繊維配置最適化による耐水環境性向上*

高橋 和也^{*1}, 中村 孝^{*2}
小熊 博幸^{*2}, 高木 敏勝^{*3}Improvement in Resistant Properties of CFRP against
Aqueous Environment by Optimizing Fiber PlacementKazuya TAKAHASHI, Takashi NAKAMURA^{*4},
Hiroyuki OGUMA and Toshikatu TAKAGI^{*4} Division of Mechanical and Space Engineering,
Graduate School of Engineering, Hokkaido University,
N13, W8, Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 060-8628 Japan

To clarify the water absorption properties of CFRP and resin, water immersion tests of resin and CFRP were conducted. The cross-section of CFRP was observed to understand fiber placement inside CFRP. To analyze the water absorption of CFRP with different fiber placements, a new software program which used a diffusion coefficient and a maximum water concentration in resin was developed. The calculated data were coincident with the experimental water absorption. Therefore, the adequacy of this program was confirmed. The analysis using this program suggested that fiber should be placed as close as the surface to improve the resistant properties of CFRP against aqueous environment.

Key Words: Composite Material, Numerical Analysis, Water Absorption, Carbon Fiber Placement

1. 緒 言

CFRPは近年、機械分野のみではなく、土木分野などにも用いられるようになり、その使用範囲は拡大している。土木分野における使用例としては、橋脚の柱に巻き付けるなどの耐震補強材としての利用が挙げられる。このような場合には、CFRPは湿気などの水環境に曝される。CFRPが水に曝されると、吸水により強度低下を生じる事が知られている⁽¹⁾。ここで、吸水を抑えることができれば、CFRPの耐水環境性の向上、すなわち水環境に曝される事による強度低下の抑制が期待される。CFRPの吸水現象に影響を与える因子として、樹脂の化学構造、炭素繊維の表面処理剤、CFRP内部での炭素繊維の配置などが考えられる。

本研究では、耐水環境性を向上させる炭素繊維の最適な配置方法を提案する事を目的とした。そのために、CFRPの吸水挙動を樹脂の最大水分濃度、拡散係数および炭素繊維の配置状態から解析するプログラムを開発した。そして、そのプログラムの妥当性を確認するために、樹脂およびCFRPの吸水挙動を把握するための浸漬実験、ならびにCFRPの断面観察を行った。

* 原稿受付 2009年9月30日。

^{*1} 学生員、北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8)。^{*2} 正員、北海道大学大学院工学研究科。^{*3} 北海道大学大学院工学研究科。

E-mail: nakamut@eng.hokudai.ac.jp

2. 実験方法

吸水特性を把握する為に(1)樹脂およびCFRPの吸水特性の取得ならびに(2)CFRPの断面観察を行った。

2・1 試験片 浸漬試験の為に2種類の試験片(樹脂試験片およびCFRP試験片)を作製した。両試験片の母材にエポキシ樹脂 EPOTHERMTM (三菱化学社製)を使用した。樹脂試験片は平板に樹脂を均一に広げた後に硬化させて製作した板材を短冊状に切り出す事で製作した。CFRP試験片の強化材には、繊維方向が一方に揃った炭素繊維シート ReplarkTM (三菱化学社製)を使用した。4枚の繊維シートを[0,0]_s方向に積層し硬化させた板材を短冊状に切断した。ここで試験片長手方向と繊維方向を一致させた。試験片の切断面に#400のエメリー紙で研磨仕上げを施した。両試験片の寸法(長さ×幅)は、250 mm×25 mmであり、厚さは樹脂試験片:1.1 mm, CFRP試験片:1.7 mmである。

2・2 浸漬実験 浸漬実験は、ASTM D5229/D5229M-92に準拠して実施した。恒温槽には東京理化学器械株式会社製 NTT-20Gを用いた。製作した試験片を湿度3%の環境で約3ヶ月程度十分乾燥させた後、20℃に保持した脱イオン水中に約4ヶ月間浸漬した。

2・3 質量測定 質量測定には電子天秤(ザルトリウス社製 LA130S-F)を用いた。浸漬させた試験片を水から定期的に取り出し、質量を測定した。

Fig.1 Moisture content during immersion tests

2・4 断面観察 光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡(SEM)により試験片断面を観察し、浸漬させたCFRP内部の繊維の配置を特定した。

3. 実験結果

3・1 浸漬試験 浸漬試験結果を図1に示す。縦軸は浸漬開始からの吸水量を表面積 ($2 \times \text{長さ} \times \text{幅}$) A で除した値 $M_w [\text{g}/\text{m}^2]$ 、横軸は浸漬時間の平方根 $[\text{hour}^{1/2}]$ である。樹脂試験片の M_w (図中△) は浸漬開始から一定の割合 $d=1.09 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{hour}^{1/2})$ で増加した。その後、 M_w の増加は緩やかになり、約 $30.0 \text{ hour}^{1/2}$ 以降ほぼ一定値 $M_{w, \max}=22.6 \text{ g}/\text{m}^2$ を示した。拡散係数 $D_m [\text{m}^2/\text{hour}]$ および最大水分濃度 $\rho_m [\text{g}/\text{m}^3]$ を次式で求めた。ここで、 L は試験片厚さ $[\text{m}]$ 、 V は試験片体積 $[\text{m}^3]$ である。

$$D_m = \pi \left(\frac{L}{4M_{w, \max}} \right)^2 d^2 \quad (1)$$

$$\rho_m = \frac{AM_m}{V} \quad (2)$$

$D_m=6.61 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{hour}$, $\rho_m=37.5 \times 10^3 \text{ g}/\text{m}^3$ が得られた。

3・2 断面観察 CFRP 試験片の断面を図2に示す。図の鉛直方向が厚さ方向、横方向が幅方向である。そして、紙面の法線方向が長さ方向(繊維方向)に対応する。CFRP 試験片の表面を図中の黒の破線で示す。繊維はCFRP 試験片内部で楕円状の束として存在している事が確認された。特に図中の白の点線で囲った束の形状および位置は次の通りであった。

- ・楕円の長軸 (L_1)、短軸 (L_2) : 3.40 mm, 0.33 mm
- ・束の端と隣の束の端間の距離 (L_3) : 0.38 mm
- ・最も表面に近い束の下端と2層目の束の上端の間隔

Fig.2 Cross-section observation of CFRP

Fig.3 Magnified photograph of fiber bundle

(L_4) : 0.09 mm

- ・表面と表面に最も近い炭素繊維の束の上端の間隔

(L_5) : 0.09 mm

本試験で使用した部材で製作したCFRPの断面の束の部分拡大した画像を図3に示す。図中の○は、炭素繊維の断面である。束内部での炭素繊維の面積率を求めた結果、約56%となった。

4. 解析手法

CFRP内部の時間経過に伴う水分濃度分布の変化を2次元拡散問題とし樹脂の最大水分濃度、拡散係数および繊維配置から解析するプログラムを開発した。

図4にCFRPの断面の模式図を示す。図中 x , y , z 方向はそれぞれ厚さ、幅、長さ方向に対応する。また、図の上端がCFRP表面を示す。CFRPが水に曝された時の水分濃度を、次の方法で算出する。

(1)断面を厚さ Δx 、幅 Δy の要素に分割する。樹脂に相当する部分を要素 R_{ij} とする。また、繊維に相当する部分を要素 C_{ij} とする。ここで、炭素繊維が吸水しない性質を考慮し、要素 C_{ij} で水の授受がないものとする ($i,j=1,2,3,\dots$)

(2)各要素に浸漬させる前の初期水分濃度 $\rho_{i,j}^0 [\text{g}/\text{m}^3]$ を設定する。本研究では試験片を十分乾燥させたので、全要素の初期水分濃度を0と設定した。

(3)任意の時間 t から Δt 後 (n ステップ後) の要素 R_{ij} の水分濃度 $\rho_{i,j}^{n-1}$ を算出する ($n=1,2,3,\dots$)

要素 R_{ij} 内で質量保存則より次の関係が成り立つ。

(単位時間あたりに増加する水分量) =

(流入質量流束) - (流出質量流束)

Fig.4 Cross-section of CFRP

$$\frac{\rho_{i,j}^{n+1} - \rho_{i,j}^n}{\Delta t} \Delta x \Delta y = (q_i^n \Delta y + q_j^n \Delta x) - (q_{i+1}^n \Delta y + q_{j+1}^n \Delta x)$$

$$\therefore \rho_{i,j}^{n+1} = \rho_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x \Delta y} [(q_i^n \Delta y + q_j^n \Delta x) - (q_{i+1}^n \Delta y + q_{j+1}^n \Delta x)] \quad (3)$$

流束 q [kg/(m² · s)] は Fick の法則より次式で求める⁽²⁾.

$$q_i^n = D_m \frac{\rho_{i,j}^n - \rho_{i-1,j}^n}{\Delta x} \quad q_j^n = D_m \frac{\rho_{i,j}^n - \rho_{i,j-1}^n}{\Delta y} \quad (4)$$

一方、要素 R_{ij} の周りに要素 C_{ij} が存在する場合は、要素 C_{ij} に出入りする流束は 0 とする。ここで、 D_m および ρ_m は浸漬試験より得た値を用いた。

解析に用いたモデルを図 5 に示す。図の上端は CFRP 表面、下端は CFRP の中央に対応する。図の左右端は、束の端と隣の束の端間を 2 等分する面に対応する。厚さ、幅、長さ方向は、図 3 と同じである。要素長さは、厚さ方向幅方向共に 10 μm である。束の寸法および位置は、断面観察時の値 $L_1 \sim L_5$ を採用した。また、束内部に要素 C_{ij} を面積率が約 56 % になるように均等に配置した。上下端および左右端の境界条件を以下に示す。

$$\rho_{i,j}^n = \rho_m \text{ (上端)}, q_i^n = 0 \text{ (下端)}, q_j^n = 0 \text{ (左右端)}$$

5. 解析結果および考察

解析結果を図 1 に示す。実験値 (図中、○印) と解析値 (+印) はほぼ一致する事が確認され、プログラムの妥当性が示された。そこで、この手法により耐水環境性を向上させる炭素繊維の配置方法を検討する。

式(4)より、CFRP 内部への単位時間当りの流入量は、表面の濃度とその直下の濃度の差に依存する。つまり、表面直下の水分濃度を速く飽和可能ならば、単位時間当りの吸水量は小さくなる。一方、CFRP 板における吸水過程で以下の現象が起きていると考えられる。

- ①表面から流入した水は、近くに拡散の障害となる炭素繊維が無いために、樹脂の中を厚さ方向に浸透する。
- ②時間の経過に伴い、水は表面に最も近い炭素繊維の束の近傍まで浸透する。
- ③炭素繊維は吸水しないため、水の厚さ方向への浸透が困難になる。
- ④表面近傍の水分濃度が飽和に近づく

Fig.5 Analysis model

Fig.6 Relation between speed of water absorption and L_5

つまり、表面に近い位置へ繊維を配置する事により厚さ方向への水の浸透を抑制可能と考えられる。そこで、図 5 の解析モデルにおいて、表面と表面に最も近い炭素繊維の束の上端までの間隔 L_5 を変えて、吸水挙動の変化を調べた。解析結果を図 6 に示す。 L_5 が小さくなるにつれて、吸水速度が低くなる傾向が確認された。以上より、炭素繊維をできる限り表面近くに配置する事で耐水環境性を向上できる可能性を示した。

6. 結 言

CFRP の耐水環境性を向上させる最適な繊維配置方法を提案する事を目的に、浸漬試験ならびに吸水挙動を解析するプログラムの開発を行った。浸漬試験の吸水挙動と解析結果はほぼ一致し、本プログラムの妥当性が示された。本プログラムを用いて吸水特性を解析した結果、繊維を出来る限り表面近くに配置する事で、CFRP の耐水環境性が向上する可能性が示された。

文 献

- (1) Toshikatu, T., Toshio, T., Kazuya, T., Hiroyuki, O. and Takashi, N., Effect of Aqueous Environment on Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastic, Proceedings of the 47th Hokkaido Branch Meeting of the Japan Society of Mechanical Engineering, No.082-2 (2008), pp.39-40.
- (2) The Japan Society of Mechanical Engineering, JSME Text Series: Heat Transfer, (2005), p.164.