

CFRP 接着により補強された鋼管部材のエネルギー解放率

関西大学 学生員 ○水谷 壮志
 関西大学 正会員 石川 敏之

1. はじめに

2018年に土木学会より、FRP 接着による構造物の補修補強指針(案)¹⁾が発刊され、腐食や疲労などによって劣化した鋼部材に炭素繊維強化樹脂(CFRP)を接着して補修・補強を行う工法の設計方針が示された。CFRPは高強度で耐食性に優れている複合材料であり、接着補修・補強は他の接合方法と比べ施工が容易である。鋼部材にCFRPを貼り付ける場合、接着剤を介して鋼部材とCFRPとの間の荷重が伝達される。このため、断面急変部となる接着端部では接着剤に高い応力が生じることでCFRPがはく離する可能性がある。文献1)では、鋼製の板部材や桁部材をCFRPにより補修・補強する際には、エネルギー解放率を用いたCFRPのはく離の照査方法が示されている。

他方、近年、鋼製の標識柱や照明柱など鋼管部材にCFRP接着補修・補強を用いた研究成果が報告されている²⁾。鋼管部材の補修・補強に対しても文献1)と同様なエネルギー解放率を用いたはく離の照査が行えると考えられる。しかし、これまでにCFRP接着鋼管部材に対するエネルギー解放率は与えられていない。

本研究では、鋼管部材のCFRP接着補修・補強に対する基礎的な研究として、図-1に示すような等曲げモーメントを受けるCFRP接着補強鋼管を対象として、FEM解析を用いてエネルギー解放率を評価し、理論式により算出可能かを検討した。

2. FEM解析によるエネルギー解放率

FEM解析モデルは対称性を考慮し、図-2に示すように3次元1/4モデルとしている。等曲げモーメント M

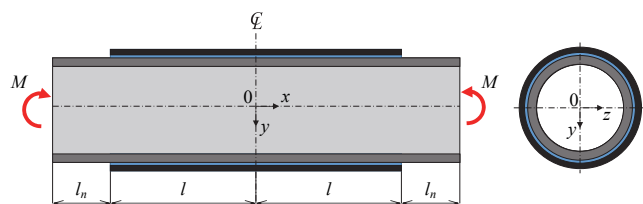


図-1 等曲げモーメントを受けるCFRP接着補強鋼管モデル

を作用させるために、モデルの右端の鋼管断面には、 x 軸方向の応力を作用させた。ただし、無補強部の鋼管下部の曲げ応力は $\sigma_m = 100 \text{ N}$ とした。

解析モデルにおいて接着剤は最低4層に分割し、エネルギー解放率(J積分値)を求めるために、接着剤端部から5mm、厚さ中央に初期のはく離を模擬している。はく離範囲は周方向のすべてに接着端部から5mmとした。また、はく離先端では、応力特異性を考慮して、放射状に退化要素を用いている。はく離先端から半径0.025mmの経路を指定し、エネルギー解放率を得る。

解析モデルの各部材の寸法は、鋼管の外径が $D_o = 114.3 \text{ mm}$ 、板厚が $t_s = 4.5 \text{ mm}$ 、接着剤の厚さが $h = 1 \text{ mm}$ 、CFRPの厚さが $t_c = 2 \text{ mm}$ である。また、CFRPの接着半長さは $l = 200 \text{ mm}$ としている。各部材の材料定数は、ヤング係数を E_i 、ポアソン比を ν_i で表し、鋼管が $E_s = 200,000 \text{ N/mm}^2$ 、 $\nu_s = 0.30$ 、接着剤が $E_e = 2,500 \text{ N/mm}^2$ 、 $\nu_e = 0.36$ 、CFRPが $E_c = 150,000 \text{ N/mm}^2$ 、 $\nu_c = 0.35$ とした。

FEM解析により得られたエネルギー解放率を図-3に○で示す。図の縦軸はエネルギー解放率であり、横軸には図中に示すように z 軸を0として、仰角 θ を示している。図中の●は、上記の条件で解析を実行した際に、曲げモーメントにより圧縮を受けるモデル上部では、はく離面の要素が交差するため、これを防止す

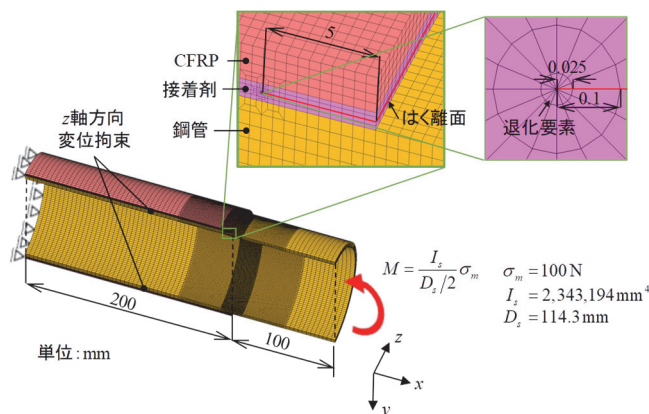


図-2 FEM解析モデル

キーワード CFRP, 接着, 鋼管, エネルギー解放率

連絡先 〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3-35 関西大学 TEL 06-6368-1121

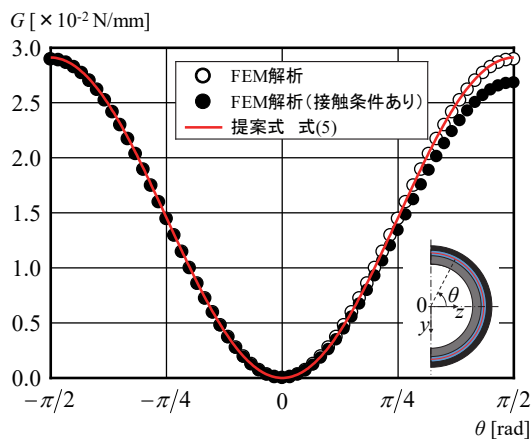


図-3 エネルギー解放率の分布

るために接触条件を設けた解析結果である。また、図には後述する提案式の値も記している。

図-3 の FEM 解析の結果より、曲げモーメントによる引張と圧縮の作用が大きくなるモデル下部 ($\theta = -\pi/2$) と上部 ($\theta = \pi/2$) でエネルギー解放率が大きくなっていることがわかる。また、モデル中央 ($\theta = 0$) ではエネルギー解放率が 0 となっている。さらに、接触条件を設けた解析では、圧縮側ではく離を抑制するように、はく離面と垂直な方向の応力が接着剤に生じるため、エネルギー解放率が小さくなっている。

3. エネルギー解放率の推定

エネルギー解放率 G は、はく離が微小面積 dA_{cr} だけ増加するときの鋼管と CFRP のひずみエネルギーの変化量 dU として、次式で与えられる。

$$G = dU/dA_{cr} \quad (1)$$

また、ひずみエネルギー U は次式で与えられる。

$$U = \int_x \int_A \frac{\sigma_x^2}{2E} dA dx \quad (2)$$

ここで、 σ_x : x 軸方向の応力、 A : 断面積。

図-4 に内径の半径 r_1 、外径の半径 r_2 の断面の円管が等曲げモーメント M により生じる軸応力の分布 σ_x を示す。図-4 より、位置 θ における微小範囲のひずみエネルギー $U(\theta)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} U(\theta) &= \int_x \int_{\theta} \int_{r_1}^{r_2} \frac{M^2}{2EI^2} r^3 \sin^2 \theta dr d\theta dx \\ &= \int_x \frac{M^2}{2\pi EI} \int_{\theta} \sin^2 \theta d\theta dx \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 I : 断面 2 次モーメント、 E : ヤング係数。

図-1 に示すような CFRP 接着補強鋼管に対して、接着端部から l_{cr} の範囲 ($l - l_{cr} \leq x \leq l$) ではく離が生じ、それ以外の範囲では鋼管と CFRP が合成断面であると

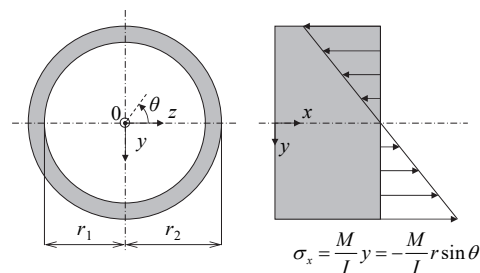


図-4 円管に生じる軸応力

仮定すると、ひずみエネルギー $U(\theta, l_{cr})$ は次式となる。

$$\begin{aligned} U(\theta, l_{cr}) &= \int_0^{l_n} \frac{M}{2\pi E_s I_s} \int_{\theta} \sin^2 \theta d\theta dx \\ &+ \int_{l_n}^{l_n+2l-l_{cr}} \frac{M^2}{2\pi E_s I_v} \int_{\theta} \sin^2 \theta d\theta dx \\ &+ \int_{l_n+2l-l_{cr}}^{2l_n+2l} \frac{M^2}{2\pi E_s I_s} \int_{\theta} \sin^2 \theta d\theta dx \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 I_s : 鋼管の断面 2 次モーメント、 I_v : 鋼管と CFRP との合成断面の鋼換算断面 2 次モーメント、 r_h : 断面の中心からはく離面までの距離。

式(4)を式(1)に代入し整理することで、位置 θ におけるエネルギー解放率は次式で与えられる。

$$G = \frac{d^2 U(\theta, l_{cr})}{r_h d\theta dl_{cr}} = \frac{M^2}{2\pi r_h E_s} \left(\frac{1}{I_s} - \frac{1}{I_v} \right) \sin^2 \theta \quad (5)$$

2 章の FEM 解析モデルに対して、式(5)から得られるエネルギー解放率を図-3 に赤の実線で示している。ここで、接着剤厚さ中央までの距離 r_h は、FEM 解析モデルと一致するように、 $r_h = D_s/2 + h/2$ とした。

図-3 より、式(5)は FEM 解析の結果とよく一致していることがわかる。また、式(5)では、はく離面に生じるはく離を抑制する応力を考慮できないため、接触条件を設けていない FEM 解析結果とよく一致する。

4. おわりに

本研究では、等曲げモーメントを受ける CFRP 接着補強鋼管に対して、はく離指標となるエネルギー解放率の算出式を与えた。算定式は、FEM 解析の結果とよく一致した。また、はく離面に接触条件を設けた FEM 解析では、圧縮側でエネルギー解放率が小さくなる。

参考文献

- 1) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修補強指針（案），2018。
- 2) 松村政秀，陳晨，中尾亮介，竹本香織，杉浦邦征：熱硬化型炭素繊維プリプレグシートにより腐食部を補強した鋼管柱の政敵載荷実験，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 73, No. 5, pp. II_42-II_51, 2017。