

等曲げモーメントを受ける CFRP 積層接着補強鋼管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、土木学会複合構造委員会から発刊された「FRP による建造物の補修・補強指針(案)」¹⁾により、FRP 接着による建造物の補修・補強に対する設計・施工の方針が示された。指針(案)¹⁾では、軸力または曲げを受ける鋼部材に対して、鋼部材の断面力が CFRP へ十分に伝達されない範囲である定着長の設計方法やはく離を防止するためのエネルギー解放率による照査方法が示されている。

他方、鋼管部材への CFRP 接着補修・補強の研究も 2000 年ごろから数多くの研究が行われてきたが、指針(案)¹⁾では、その設計方法は記載されていない。これは、鋼管部材の CFRP 接着補修・補強において、せん断遅れ理論や CFRP 端の接着剤のはく離に対するエネルギー解放率に関する研究が不足していたためだと考えられる。そこで、著者らは軸力または曲げを受ける鋼管に CFRP が 1 層されている条件に対してせん断遅れ理論を適用し、定着長やエネルギー解放率の算出方法を提案した²⁾。しかし、文献 2)では、図-1 に示すような CFRP の積層構造が評価できず、はく離防止対策として多く採用される CFRP 端部に段差を設けた CFRP 接着補修・補強に適用できていない。

本研究では、等曲げモーメントを受ける条件に対して、文献 2)のせん断遅れ理論を多層の CFRP が積層された場合に拡張した。拡張にあたり、文献 3)で提案されているひずみに関する 1 階の連立微分方程式を固有値で解く応力解析手法(以下、数値解析)を用いる。また、数値解析を用いて接着端部のエネルギー解放率を評価した。

2. 数値解析

図-1 に示すように、鋼管に n 層の CFRP が積層されている場合を考える。本研究では、図-2 に示すように、角度 $\theta = -2/\pi$ を基準に微小区間の力のつり合いにより、次式の連立微分方程式導出した。

$$d\boldsymbol{\varepsilon}/dx = \mathbf{A}_n \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_{Ms} \quad \varepsilon_{Mci} \quad \gamma_1 \quad \cdots \quad \varepsilon_{Mci} \quad \gamma_i \quad \cdots \quad \varepsilon_{Mc n} \quad \tau_n\}^T \quad (2)$$

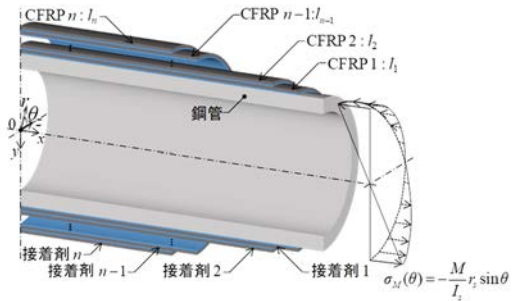


図-1 等曲げモーメントを受ける CFRP 積層接着鋼管

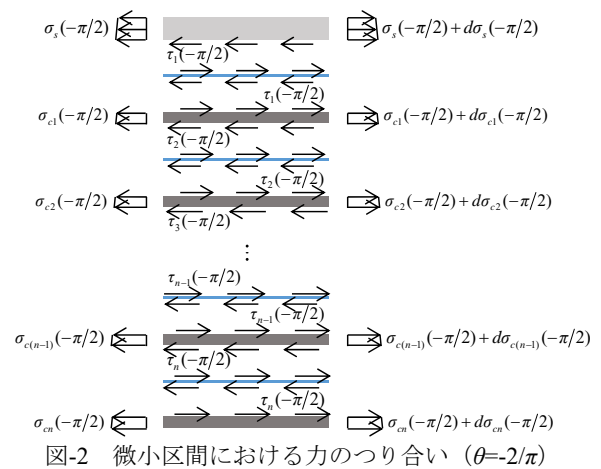


図-2 微小区間における力のつり合い ($\theta = -2/\pi$)

また、式(1)の解は行列 \mathbf{A}_n の固有値・固有ベクトルを用いて次式で与えられる。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{T} e^{\mathbf{A}_n x} \mathbf{T}^{-1} \mathbf{C} = \mathbf{T} e^{\mathbf{A}_n x} \mathbf{T}^{-1} \mathbf{H}^{-1} \mathbf{E} \quad (3)$$

式(1)の \mathbf{A}_n は $2n + 1$ 次の正方行列であり、大部分が 0 成分の疎行列である。したがって、 \mathbf{A}_n の要素のうち 0 以外の要素のみを次に示す。

$i = 1$ において、

$$a_{1,3} = \pi r_s (r_s + h_1/2)^2 G_{c1} / (E_s I_s) \quad (4)$$

$$a_{2,3} = -\pi r_{c1} (r_s + h_1/2)^2 G_{c1} / (E_{c1} I_{c1}) \quad (5)$$

$$a_{3,1} = (r_s + h_1/2) / (h_1 r_s) \quad (6)$$

$$a_{3,2} = (r_s + h_1/2) / (r_{c1} h_1) \quad (7)$$

$2 \leq i \leq n$ において、

$$a_{2i-2,2i+1} = \pi r_{c(i-1)} (r_{c(i-1)} + h_i/2)^2 G_{ci} / (E_{c(i-1)} I_{c(i-1)}) \quad (8)$$

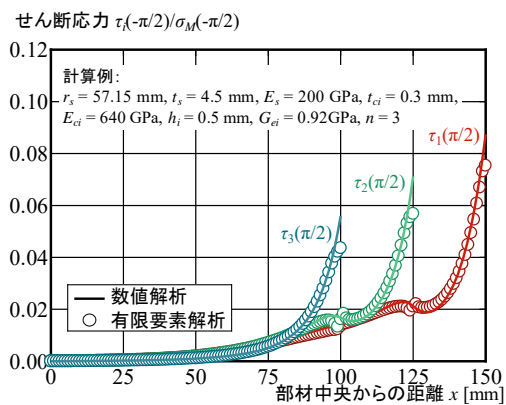
$$a_{2i,2i+1} = -\pi r_{ci} (r_{c(i-1)} + h_i/2)^2 G_{ci} / (E_{ci} I_{ci}) \quad (9)$$

$$a_{2i+1,2i-2} = (r_{c(i-1)} + h_i/2) / (h_i r_{c(i-1)}) \quad (10)$$

$$a_{2i+1,2i} = -(r_{c(i-1)} + h_i/2) / (r_{ci} h_i) \quad (11)$$

キーワード CFRP, 鋼管, 積層接着, エネルギー解放率

連絡先 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 関西大学 TEL:06-6368-0926

図-3 せん断応力分布 ($\theta = -\pi/2$)

ここで, ε_{Ms} , ε_{Mci} : $\theta = -2/\pi$ における鋼管またはCFRPの表面の x 軸ひずみ, γ_i : $\theta = -2/\pi$ における接着剤 i のせん断ひずみ, r_s , r_{ci} : 鋼管, CFRPの外周半径, t_s , t_{ci} , h_i : 鋼管, CFRP, 接着剤 i の厚さ, I_s , I_{ci} : 鋼管, CFRPの断面二次モーメント, E_s , E_{ci} : 鋼管, CFRPのヤング係数, G_{ci} : 接着剤のせん断弾性係数, T : A_n の固有ベクトルを並べた行列, Λ : A_n の固有値, C : 未定係数ベクトル, H : 係数行列, E : 外力をひずみに変換したベクトル.

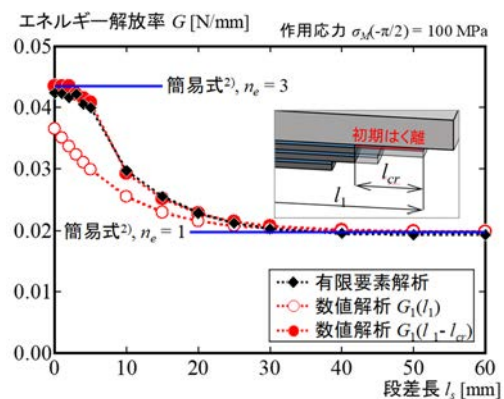
3. 数値解析の検証

本章では, 有限要素解析を実施して, 数値解析を検証する. 図-3 にせん断応力分布を示す. CFRPを3層積層したモデルを計算例としており, 各部材の断面寸法および材料特性を図中に示している. また, 軸方向の接着半長さは, 最外層CFRP3を $l_3 = 100$ mmとして, CFRPの端部を25mmずつずらしている. 図の縦軸は $\theta = -2/\pi$ のせん断応力 $\tau_i(-2/\pi)$ を鋼管表面の作用応力 $\sigma_M(-2/\pi)$ で無次元化しており, 横軸は部材中央からの距離である.

図-3より, 各CFRPの接着端部付近で数値解析の値が有限要素解析よりも大きい, その他の範囲では両者がおおむね一致していることがわかる. 接着端部付近のずれは, 数値解析において接着剤に生じる垂直応力を無視したせん断遅れ理論を用いていることや有限要素解析における接着剤端部は自由面となることに起因している.

4. エネルギー解放率

図-3において, せん断応力が最も高くなる接着剤1層目端部に着目して, 有限要素解析と数値解析により, エネルギー解放率 G を求めた. 計算例は前章と同様であり, CFRP端部のずらし長さ(段差長)をパラメータとして変化させた. 図-4に解析結果を示す. 図の縦軸が接着剤1層目のエネルギー解放率, 横軸が段差長である. 有限要素解析では, はく離先端のエネルギー解放率(j 積分)を求めるために, 長さ $l_{cr} = 5$ mmの初期はく離を二重節

図-4 接着剤1層目のエネルギー解放率 ($\theta = -\pi/2$)

点により模擬した. 数値解析では, 文献2)を参考にして, 接着剤1層目の端部のせん断応力を用いてエネルギー解放率 $G_1(l_i)$ を算出している. また, 初期のはく離分の接着半長さを減じた場合のエネルギー $G_1(l_i - l_{cr})$ も算出した. これは, 有限要素解析に条件を合わせるためである. さらに, CFRP接着長さが十分に長い場合に対して与えられた簡易式²⁾の値も図-4に示している. $n = 1$ はCFRP1層, $n = 3$ はCFRP3層分を1層のCFRPに換算した. $n = 1$ は段差長が十分に長い場合に対応し, $n = 3$ はCFRPの端部が揃えられた場合に対応する.

図-4の有限要素解析と数値解析より, 段差長が長くなるほどエネルギー解放率 G が小さくなり, $n = 1$ のみの簡易式に収束していることがわかる. 段差長が短い範囲(0 ~ 20 mm)では, 有限要素解析と数値解析 $G_1(l_i - l_{cr})$ がよく一致し, 数値解析 $G_1(l_i)$ と一致しない. したがって, 段差の短い範囲で設計する場合には, 初期はく離長さ l_{cr} がエネルギー解放率 G に影響することに注意を要する. また, $n = 3$ の簡易式は作用力に対して安全側となるため, 簡略的な設計には簡易式が適用できると考えられる.

5. おわりに

本研究では, 等曲げモーメントを受けるCFRP積層接着補強鋼管に対して, 数値解析を用いて1層のせん断遅れ理論を多層に拡張した. 数値解析は有限要素解析の応力分布とおおむね一致した. また, 段差長に着目して, CFRP接着鋼管のエネルギー解放率の算出方法を示した.

参考文献

- 1) 土木学会 複合構造委員会: FRP接着による建造物の補修・補強指針(案), 複合構造シリーズ09, 2018.
- 2) 石川敏之, 水谷壮志: CFRP接着された鋼管の定着長とはく離に対するエネルギー解放率, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.77, No.1, pp.59-72, 2021.
- 3) 宮下剛, 長井正嗣: 一軸引張りを受ける多層のCFRPが積層された鋼板の応力解析, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.378-392, 2010.