

第 I 部門 部分的に CFRP を接着した片持ち鋼管の力学特性

関西大学大学院 学生員 ○前田 悠作

関西大学 正会員 水谷 壮志, 石川 敏之

1. はじめに

標識柱や鋼製橋脚のような鋼管構造に対する補修・補強として、CFRP を鋼管に接着する工法がある。この工法は施工性が良く、炭素繊維シートや CFRP ストランドシートは、鋼管構造のような曲面を持つ構造への接着が可能である。一方 CFRP を接着する際には、補修効果を十分に発揮するために必要な定着長の設計や、はく離を防止するための照査が必要である¹⁾。そのため、これまでに CFRP 接着鋼管が等曲げモーメントを受ける場合の、鋼管および CFRP の断面力と接着剤に生じるせん断応力に算定式を与えている²⁾。一方、標識柱や鋼製橋脚は片持ち状態の構造であり、文献 2)による理論とは境界条件が異なる。

そこで本研究では CFRP を接着した片持ち状態の鋼管構造に対しせん断遅れ理論を適用する。また、導出した理論を FEM 解析と比較し、その妥当性を検討する。

2. 片持ち CFRP 接着鋼管の理論式

本研究では図-1 に示す、CFRP が接着された片持ち鋼管を対象にする。この図に示すように固定端側の CFRP 端部を原点とし、原点から荷重点までの長さを L_P 、固定端から荷重点までの長さを L_s 、CFRP の長さを l とする ($l < L_P < L_s$)。また、鋼管と CFRP の外半径をそれぞれ r_s 、 r_c 、板厚を t_s 、 t_c 、接着剤の厚さを h とする。CFRP を接着する範囲を $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ (上下左右対称) とする。点荷重は鉛直上向きを正としている。

図-1 に示すモデルより、片持ち CFRP 接着鋼管に作用する曲げモーメント $M(x)$ は $M(x) = P(L_P - x)$ である。微小区間の鋼管が分担する曲げモーメント $M_s(x)$ と、接着剤に生じるせん断応力 $\tau(x, \theta)$ の力のつり合いから得られる基礎微分方程式の解が、次式で与えられている²⁾。

$$M_s(x) = B_1 \cosh(cx) + B_2 \sinh(cx) + \xi M(x) \quad (1)$$

ここに、

$$c = \sqrt{\frac{G_e}{h} \left(r_s + \frac{h}{2} \right)^3 Z \frac{1}{E_s I_s} \cdot \frac{1}{1 - \xi}}, \quad \xi = \frac{E_s I_s}{E_s I_s + E_c I_c'}$$

$$Z = 4 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^2 \theta d\theta = \{2(\theta_2 - \theta_1) + \sin(2\theta_1) - \sin(2\theta_2)\},$$

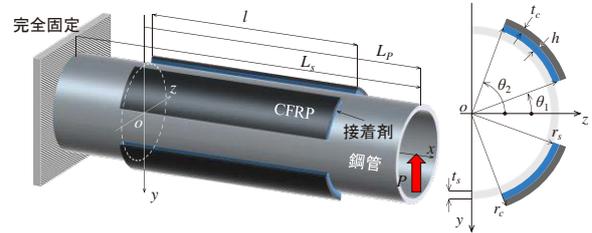


図-1 部分的に CFRP が接着された鋼管のモデル

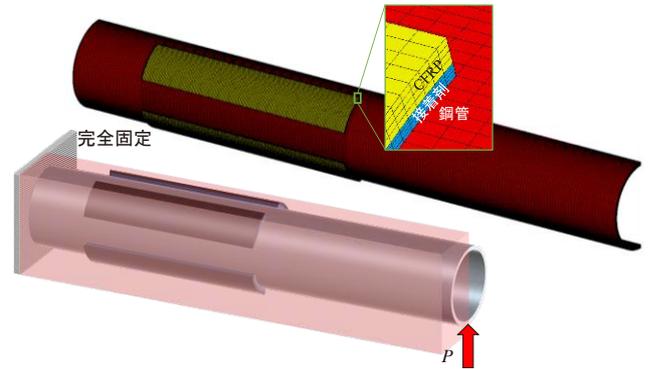


図-2 FEM 解析モデル例(Model-20-70)

$$I_s = \pi \{r_s^4 - (r_s - t_s)^4\} / 4, \quad I_c' = \{r_c^4 - (r_c - t_c)^4\} Z / 4$$

E_s 、 E_c と I_s 、 I_c' はそれぞれ鋼管、CFRP のヤング係数と断面 2 次モーメントであり、 G_e は接着剤のせん断弾性係数である。

固定端側の CFRP 端部を $x = 0$ とすると、CFRP 端部 $x = 0, l$ における境界条件はそれぞれ $M_s(0) = M(0)$ 、 $M_s(l) = M(l)$ である。この 2 つの式を連立方程式により解くことで、未定係数 B_1 、 B_2 は次式で与えられる。

$$B_1 = M(0)(1 - \xi) \quad (2)$$

$$B_2 = (1 - \xi) \{M(l) - M(0) \cosh(cl)\} / \sinh(cl) \quad (3)$$

未定係数 B_1 、 B_2 を式(1)に代入し得られる $M_s(x)$ と、CFRP が分担する曲げモーメント $M_c(x) (= M(x) - M_s(x))$ から、鋼管が分担する曲げモーメント $M_s(x)$ が導出できる。接着剤のせん断応力は鋼管が分担する曲げモーメント $M_s(x)$ と、接着剤に生じるせん断応力 $\tau(x, \theta)$ の力のつり合いから与えられるが、本研究のモデルは固定端から荷重点までが短く、曲げモーメントに対して鋼管のせん断力の影響が大きいため、つり合いの式に鋼管に作用するせん断力 P の項を加えて、接着剤に生じる

表-1 計算例および解析に用いる寸法と材料定数

Model	鋼管	CFRP	接着剤	接着角度[°]
0-90	$r_s = 57.15 \text{ mm}$, $t_s = 4.5 \text{ mm}$,	$r_c = 60.15 \text{ mm}$, $t_c = 2.0 \text{ mm}$,	$E_e = 2500 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.36$,	0 - 90
20-70	$E_s = 200 \text{ kN/mm}^2$	$E_c = 150 \text{ kN/mm}^2$, $G_{xy} = 919 \text{ N/mm}^2$	$G_e = 919 \text{ N/mm}^2$	20 - 70

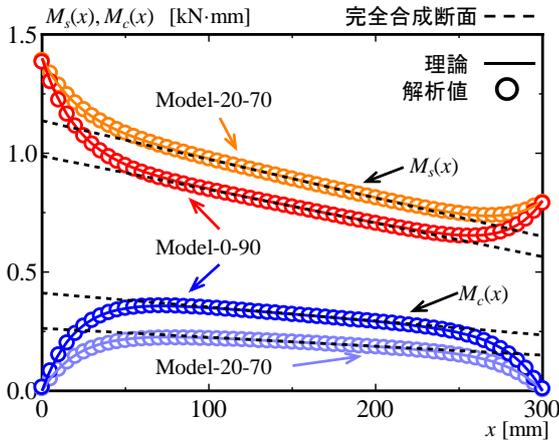


図-3 曲げモーメント分布図

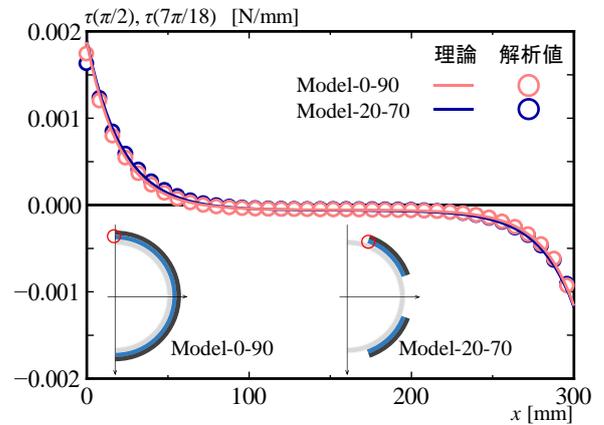


図-4 接着剤に生じるせん断応力分布図

せん断応力は次式で与えられる。

$$\tau(x, \theta) = - \frac{c \left\{ B_1 \sinh(cx) + B_2 \cosh(cx) + \frac{P}{c}(1-\xi) \right\}}{(r_s + h/2)^2 Z} \sin \theta \quad (4)$$

3. 解析との比較と考察

理論の妥当性を確認するために、汎用の有限要素解析プログラム Marc を用いて FEM 解析を行った。解析モデルは図-2 に示すように、1/2 モデルとして境界条件を与え、鋼管の厚さ方向に 6 分割、CFRP と接着剤の厚さ方向に 4 分割している。CFRP 接着長さ l を 300 mm、鋼管長さ L_s を 800 mm とし、原点から荷重点までの距離 $L_P = 700 \text{ mm}$ の位置に $P/2 = 1 \text{ N}$ を作用させている。解析モデルの寸法と材料定数を表-1 に示す。 G_{xy} は x 軸方向に対するせん断弾性係数である。両モデルは CFRP の接着範囲が異なり、表-1 に示す接着角度は第一象限に対する角度で、上下左右対称である。ここで、CFRP は直行異方性の材料特性を与えているが、樹脂のせん断遅れを考慮する。文献 3) より、換算接着層厚 $h' (= h + t_c G_e / 3G_{xy})$ を用いて、係数 c の G_e/h を G_e/h' に置換することで CFRP 内のせん断遅れを考慮する。

理論と FEM 解析から得られた、両モデルの鋼管と CFRP が分担する曲げモーメント $M_s(x)$, $M_c(x)$ を図-3 に示す。図の横軸は原点からの距離を示し、縦軸は鋼管および CFRP が分担する曲げモーメントを示している。また、完全合成断面を仮定した場合のそれぞれが分担する曲げモーメントも図に示している。図-3 から、理論と解析値が同様な値を示していることがわかる。鋼

管および CFRP の分担する曲げモーメントは、CFRP 中央で完全合成断面の値と一致しており、CFRP 両端では完全合成断面とはならないことが確認できる。また、全周接着した場合だけでなく、部分的に接着した場合も理論と合致していることがわかる。

次に理論式と FEM 解析から得られた、Model-0-90 における $\theta = \pi/2$ と Model-20-70 における $\theta = 7\pi/18$ の接着剤に生じるせん断応力分布を図-4 に示す。この図からわかるように理論と解析値が一致していることがわかる。また、CFRP の両端では高いせん断応力が生じていることがわかる。部分的な接着においても式(4)から算出した接着剤に生じるせん断応力は、FEM 解析結果と同程度であった。

以上のことから、本研究において導出した理論が妥当であることが確認できた。

4. まとめ

片持ち状態の CFRP 接着鋼管を対象に、鋼管と CFRP の断面力と接着剤に生じるせん断応力の理論式を与え、FEM 解析により理論の妥当性を確認した。

参考文献

- 1) 土木学会 複合構造委員会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案)，複合構造シリーズ 09，2018。
- 2) 水谷壮志，前田悠作，石川敏之：部分的に CFRP が接着された鋼管の力学特性，構造工学論文集，Vol.70，pp.940-954，2024。
- 3) 白井瑛人，北根安雄，石川敏之，伊藤義人：軸力が作用する CFRP 接着補修鋼板に対する CFRP 板のせん断変形を考慮した理論解析，構造工学論文集，Vol.61A，pp.798-807，2015。