

突き合わせ鋼板のCFRP板2層接着補修における応力場の空間不規則分布の解析

関西大学大学院 非会員 河原宏紀
 関西大学 正会員 ○兼清泰明

1. 緒言

本研究では亀裂を模擬した突き合わせ鋼板の両面に、2層のCFRP板で引張荷重に対する接着補修を行う場合を想定する。そして、接着剤厚さの空間的不均一性を確率場として基礎微分方程式に取り込むことで、空間変動型の確率微分方程式へと拡張し、計算機シミュレーションにより各層の接着剤に生じる応力のばらつきの特性を定量的に評価する。

2. 2層のCFRP板が接着された鋼板の引張荷重下での応力場の基礎微分方程式

本研究では図-1に示すように、突き合わせた2枚の鋼板の上下面に長さ $2l_1$ のCFRP板が接着され、長さ $2l_2$ の2層目のCFRP板が接着されている場合を想定する。ここで、鋼板の突き合わせ部を原点として、図-1に示すように座標軸を設定し、鋼板の両端に引張力 P_0 が作用しているものとする。ただし、CFRP板に生ずる力および応力は $x=0$ に関して対称であることから、 $0 \leq x \leq l_1$ における挙動のみを考察する。

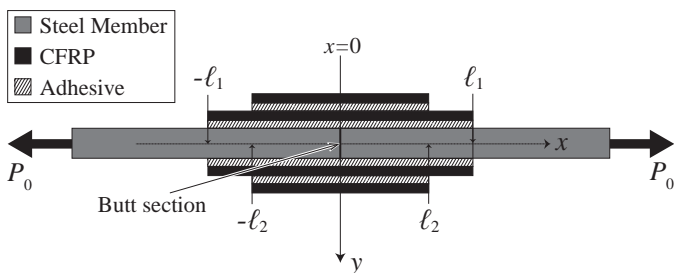


図-1 鋼板付き合わせ部に接着された2層のCFRP板と座標の設定

i 層目のCFRP板の接着剤に生じるせん断応力と垂直応力をそれぞれ $\tau_i(x)$, $\sigma_i(x)$ ($i=1,2$)とし、鋼板には軸力のみ、各CFRP板には軸力、せん断力、曲げモーメントが作用するものとする。局所的なつり合いを記述する連立方程式が次のように得られる。ただし、当て板が薄い場合には部材の図心間距離が接着剤厚さの影響を受けるため、接着剤厚さを考慮した式となっている。

$$\frac{d}{dx} \left\{ \frac{\tau_1(x)}{R_h^{(1)}(x)} \right\} = \frac{G_e}{h_0} \left\{ \frac{N_s(x)}{E_s A_s} - \frac{N_{c1}(x)}{E_{c1} A_{c1}} - \frac{M_{c1}(x)}{E_{c1} I_{c1}} \left(\frac{t_{c1} R_h^{(1)}(x) + h_0}{2R_h^{(1)}(x)} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \left\{ \frac{\sigma_1(x)}{R_h^{(1)}(x)} \right\} = \frac{E_e}{h_0} \left\{ \frac{M_{c1}(x)}{E_{c1} I_{c1}} \right\} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dx} \left\{ \frac{\tau_2(x)}{R_h^{(2)}(x)} \right\} = \frac{G_e}{h_0} \left\{ \frac{N_{c2}(x)}{E_{c2} A_{c2}} - \frac{M_{c2}(x)}{E_{c2} I_{c2}} \left(\frac{t_{c2} R_h^{(2)}(x) + h_0}{2R_h^{(2)}(x)} \right) \right\} \quad (3)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \left\{ \frac{\sigma_2(x)}{R_h^{(2)}(x)} \right\} = \frac{E_e}{h_0} \left\{ \frac{M_{c2}(x)}{E_{c2} I_{c2}} - \frac{M_{c1}(x)}{E_{c1} I_{c1}} \right\} \quad (4)$$

ここで、 N , M , E , G , h , t は軸力、曲げモーメント、縦弾性係数、せん断弾性係数、接着剤厚さ、部材の厚さを表しており、添え字 s , $c1$, $c2$, e はそれぞれ鋼板、1層目のCFRP板、2層目のCFRP板、接着剤を意味する。また、 h_0 は接着剤厚さの平均を表す正定数であり、 $R_h^{(1)}(x) = h_0/h_1(x)$, $R_h^{(2)}(x) = h_0/h_2(x)$ は接着剤厚さの空間変動の平均からのずれを表す無次元量である。

3. 接着剤厚さの不確実性の導入

本研究では、著者らの一連の先行研究^{1),2)}と同様に、接着剤厚さの空間的な不規則性に起因する応力場の空間的不規則性がはく離のばらつきを誘発すると考える。

ここで、文献¹⁾より接着剤厚さは対数正規分布によく適合することが示されているため、本研究では $R_h^{(i)}(x)$ は平均ゼロ、分散 s^2 の空間一様な正規確率場 $C^{(i)}(x)$ から以下の式より点変換するという形で構成する。

$$R_h^{(i)}(x) = \exp \left(C^{(i)}(x) - \frac{1}{2}s^2 \right) \quad (i=1,2) \quad (5)$$

このとき、平均ゼロの一様正規確率場 $C^{(i)}(x)$ は、次の空間変動型の確率微分方程式の解となる。

$$dC^{(i)}(x) = -\frac{1}{l_c} C^{(i)}(x) dx + \sqrt{\frac{2s^2}{l_c}} dW^{(i)}(x) \quad (i=1,2) \quad (6)$$

$$C^{(i)}(x_0) \sim N(0, s^2) \quad (i=1,2) \quad (7)$$

ここで、 l_c は空間的な相関距離を与える定数、 $W^{(i)}(x)$ ($i=1,2$)は独立な標準Wiener確率場であり、これらと $C^{(i)}(x)$ ($i=1,2$)も独立であるものとする。

式(5)を式(1)–(4)に代入することにより得られる方程式は、空間変動型の確率微分方程式であり、その解とし

キーワード 多層積層, 接着補修, 引張荷重, 確率微分方程式

連絡先 〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号 関西大学大学院理工学研究科

て得られる確率場が, $\tau_i(x)$, $\sigma_i(x)$ の空間不規則分布を与えると考える. ただし, 実在雑音との整合性を保つために, Stratonovich 型確率微分方程式として取り扱う.

4. 数値例

式(1)–(4)および式(5)から得られる確率微分方程式の解の構成には, 文献^{1),2)}と同様に伝達マトリクス法を応用した手法を適用し, 式(6)と(7)のサンプルの生成で必要となる正規乱数は, Mersenne-Twisterにより得られる一様乱数から Box-Muller 法により変換して生成する. なお, 伝達マトリクスの次元数が13となるため, 倍精度固定精度計算では数値計算スキームが不安定化してしまう. 本研究では10進100桁の多倍長精度保証計算を適用することによりこの問題を回避する²⁾.

図-2は平均接着剤厚さ $h_0 = 0.5$ [mm], 標準偏差 $s = 0.2$, 相関距離 $l_c = 100$ [mm] として, 各層の接着剤に生じている主応力のサンプルを10本プロットしたものである. なお, 1層目のCFRP板について $l_1 = 150$ [mm] とし, 2層目のCFRP板について $l_2 = 125$ [mm], 引張力 $P_0 = 24$ [kN] としてある.

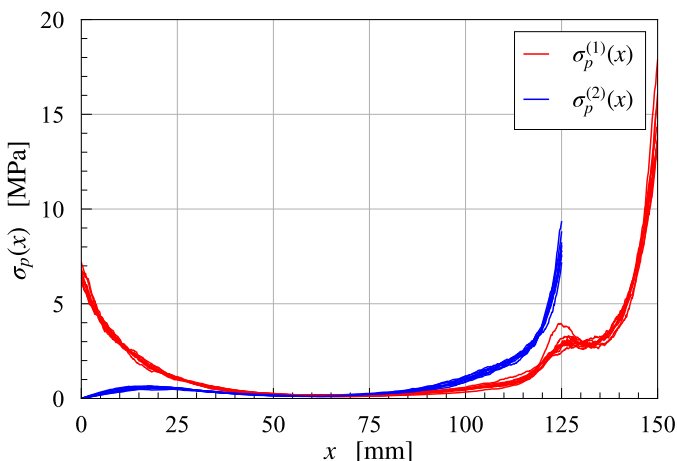


図-2 $s = 0.2$, $l_c = 100$ [mm] の場合の $\sigma_p^{(1)}(x)$ と $\sigma_p^{(2)}(x)$ のサンプル挙動.

この結果から, 主応力の空間的変動に大きなばらつきが確認できるが, 1層目と2層目でともに端部で最大値をとっていることがわかる.

各層の端部での主応力値 $\sigma_p^{(1)}(150)$ と $\sigma_p^{(2)}(125)$ を散布図として, 標準偏差を変化させ $s = 0.2$ (図中青色) と $s = 0.5$ (図中赤色) の場合についてプロットしたものが図-3である. ここで, サンプル数は250としてある. これより, 標準偏差 s が大きくなる場合, 主応力のばらつきが大きくなることがわかる. また, 1層目より2層目の主応力が大きくなるサンプルが存在することも確認できる.

表-1は $\sigma_p^{(1)}(150)$ と $\sigma_p^{(2)}(125)$ について, 接着剤の弾性係数を変化させた場合の変動係数を示したものである. 算出には1000サンプルを用いた. この結果から, 低弾

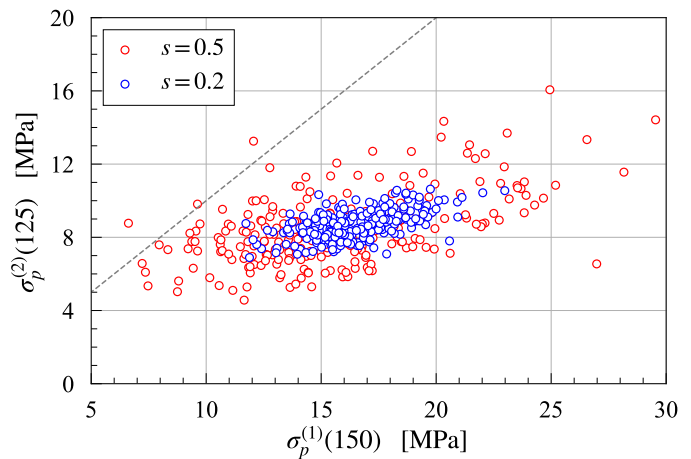


図-3 横軸に $\sigma_p^{(1)}(150)$, 縦軸に $\sigma_p^{(2)}(125)$ とした主応力の散布図 ($s = 0.2$ と $s = 0.5$ の場合).

性体の場合には, 変動係数が大きくなっていることが確認できる.

ここで, 低弾性体の場合には, 2層目の接着剤でのばらつきが1層目よりも大きくなっている. しかし, 1層目の主応力値 $\sigma_p^{(1)}(150)$ を超えているサンプルは確認できなかった. これは, 低弾性になることにより, 応力の伝達効率が減少し, 必要定着長やずらし量が変わったことが原因であると考えられる.

表-1 接着剤の弾性係数を変化させた場合の $\sigma_p^{(1)}(150)$ と $\sigma_p^{(2)}(125)$ の変動係数 ($l_c = 100$ [mm], $s = 0.5$).

E_e [MPa]	G_e [MPa]	$\sigma_p^{(1)}(150)$	$\sigma_p^{(2)}(125)$
6500	2390	27.0%	25.3%
58.3	20.8	33.8%	40.5%

5. 結言

本研究では引張荷重下で2層のCFRP板により接着補修を行う場合について, 接着剤厚さの空間的不規則性を取り入れた応力場の解析が可能であることを明らかにした. その結果, 主応力は端部で大きくばらつくこと, 接着剤が低弾性体である場合にはそのばらつきが大きくなることが明らかとなった. 本手法は2層のCFRP板が接着されている場合のみでなく, 多層のCFRP板が接着されている場合にも適用できると考えられる.

参考文献

- 1) 中村和之, 笠行健介, 河原宏紀, 兼清泰明, 石川敏之: CFRP板接着補修における曲げ荷重下での離発生確率の推定とその統計実験による検証, 材料, Vol.71, No.3, pp.273-280, 2022.
- 2) 笠行健介, 兼清泰明, 石川敏之, 檀寛成: 多倍長精度計算を用いたCFRP接着鋼部材の数値解析, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol.74, No.2, pp.I_23-I_31, 2018.