

CFRP 板接着補修の信頼性評価

○関西大学 笠行 健介
関西大学 兼清 泰明

1 はじめに

近年注目されてきている CFRP 板接着補修工法では、はく離の発生に関するばらつきが非常に大きく、接着補強の信頼性を低下させている。そこで、本研究では接着剤厚さの空間的ばらつきを解析モデルに取り入れ、鋼板と CFRP 板に働く力のつり合いの方程式を、確率場により不規則変動が引き起こされる空間変動型の確率微分方程式に拡張し、計算機シミュレーションを用いて、接着部に生じる最大主応力のばらつきの特性を定量的に明らかとする。

2 CFRP 板接着における主応力の評価

2.1 接着剤に生じるせん断応力と垂直応力

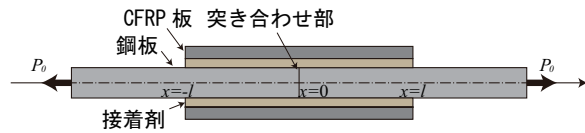


図-1 鋼板突き合わせ部に接着された CFRP 板と寸法図

図-1 に示すような突き合わせた 2 枚の鋼板の上下面に長さ $2l$ の CFRP 板を接着固定し、鋼板の両端に引張力が作用する状況を想定する。母材の鋼板の板幅を b_s 、板厚を t_s 、CFRP 板の板幅を b_p 、板厚を t_p 、鋼板の端部に働く軸力を P_0 とする。ただし、CFRP 板に生じる力および応力は $x=0$ に関して対称であることから、 $0 \leq x \leq l$ における挙動のみを考察の対象とする。位置 x において、鋼板に作用する軸力を $N_s(x)$ 、CFRP 板に作用するせん断力を $V_p(x)$ とし、次のような変数を設定する。

$$\begin{aligned} F_1(x) &= N_s(x) - \xi_0 P_0, F_2(x) = N_s'(x), F_3(x) = V_p(x) \\ F_4(x) &= V_p'(x), F_5(x) = V_p''(x), F_6(x) = V_p'''(x) \end{aligned} \quad (1)$$

このとき、次の方程式が成立する。

$$\frac{dF(x)}{dx} = A(x)F(x) \quad (2)$$

$$A(x) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_a^2(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & t_p \omega_a^4(x) & -4\omega_a^4(x) & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $F(x) = (F_1(x) \cdots F_6(x))^T$ (T は転置)、 G_e を接着剤のせん断弾性係数、 E_s を鋼板の弾性係数、 E_p を CFRP 板の弾性係数、 E_e を接着剤の弾性係数、 I_p を CFRP 板の断面二次モーメントとして、

$$c_a(x) = \sqrt{\frac{b_p G_e}{h(x)} \frac{2}{1 - \xi_0} \frac{1}{E_s b_s t_s}} \quad (4)$$

$$\omega_a(x) = \sqrt[4]{\frac{b_p E_e}{4h(x)} \frac{1}{E_p I_p}} \quad (5)$$

$$\xi_0 = \frac{1}{1 + 2 \frac{E_p b_p t_p}{E_s b_s t_s}} \quad (6)$$

であり、 $h(x)$ は位置 x における接着剤の厚さを表す。

鋼板の突き合わせ部および CFRP 板の端部における境界条件は、これらの変数を用いて、

$$F_1(0) = -\xi_0 P_0, F_3(0) = 0, F_5(0) = 0 \quad (7)$$

$$F_1(l) = (1 - \xi_0) P_0, F_3(l) = 0, F_6(l) = 0$$

で与えられる。

2.2 CFRP 板のはく離の照査方法

鋼部材に CFRP 板を接着した場合のはく離発生に対する照査方法としては、接着剤に生じる主応力が限界値を超えたときに CFRP 板のはく離が生じると考える。位置 x における接着剤に生じる主応力 $\sigma_p(x)$ は次式で表される。

$$\sigma_p(x) = \frac{\sigma_y(x)}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_y(x)}{2}\right)^2 + \tau(x)^2} \quad (8)$$

ここで、 $\tau(x)$ と $\sigma_y(x)$ は接着剤に生じるせん断応力と垂直応力をそれぞれ表し、式(1)で定義した変数を用いて、

$$\tau(x) = \frac{1}{2b_p} F_2(x), \quad \sigma_y(x) = -\frac{1}{b_p} F_4(x) \quad (9)$$

で表される。

3 確率場の導入による基本方程式のランダム化

3.1 不確実性の導入

CFRP 板接着における接着部分については、微視的な物理特性に関する不規則性に加えて、接着作業が主に手作業で行われることによる細部の成形のばらつきが避けられない。こういったばらつきの特性を定量的に評価するために、本研究では接着剤部分の厚さに空間的な揺らぎを取り入れ、その空間的不規則変動が、導出した鋼板軸力および CFRP 板せん断応力に対する基本方程式を通じて、接着部分のはく離の発生にどのように影響するかについて理論的な考察を与える。

位置 x での接着剤厚さ $h(x)$ が、空間的に不規則に変動する確率場により数学的に取り扱うことができると考える。解析の都合上、 h_0 を長さの次元を有する定数として、

$$h(x) = \frac{h_0}{C(x)} \quad (10)$$

により平均が 1 の空間一様な無次元確率場 $C(x)$ を導入する。

3.2 確率場 $C(x)$ の構成

平均が1である接着剤の厚さの空間的不規則変動を記述する確率場 $C(x)$ は,

$$d\tilde{C}(x) = -\frac{1}{l_c}\{\tilde{C}(x) - 1\}dx + \sqrt{\frac{2s_d^2}{l_c}}dW(x) \quad (11)$$

$$\tilde{C}(0) = \tilde{C}_0 \sim N(1, s_d^2) \quad (12)$$

$$C(x) = \frac{\exp(\tilde{C}(x))}{E\{\exp(\tilde{C}(x))\}} \quad (13)$$

と表せる. ここで, s_d は $\tilde{C}(x)$ の標準偏差を, l_c は空間的な相関距離を与える定数で, $W(x)$ は Wiener 確率場である. $\tilde{C}(x)$ の平均が1であることから, 標準偏差 s_d は $\tilde{C}(x)$ の変動係수에等しい.

4 統計的解析と考察

2.1 節と同様の状況での引張試験を想定した上で, $C(x)$ のサンプルごとに数値的に導出し, その結果を用いて接着剤に生じる主応力のサンプルを発生させる. CFRP 板の半長は $l = 100[\text{mm}]$ とした. 図-2 は接着剤厚さの変動係数 $s_d = 0.2$, 相関距離 $l_c = 100[\text{mm}]$ の場合について, 無作為に10本生成した主応力 $\sigma_p(x)$ のサンプルをプロットしたものである. ばらつきが大きい, 端部 $x=100[\text{mm}]$ で主応力が最大となる可能性が圧倒的に高いことがわかる. しかし, 図-2 と比較して CFRP 板の厚さ $t_p(x)$ を薄くした図-3 では, 端部と突き合わせ部で主応力の差が小さくなるため, 最大値がどちらで発生するかは確率的にしか判断できなくなる.

はく離の発生が主応力に支配されると考えると, はく離の発生する確率が主応力の最大値の従う確率分布に強く影響を受けると考えられるため, 図-3 と同様の条件のもとで主応力の最大値の分布を調べた. 無作為に1000個の主応力のサンプルを生成し, その最大値を確率紙にプロットしたものを図-4 に示す. 図-4 から, 対数正規分布が最も適合性の良い分布であることがわかる.

5 おわりに

本研究では, 計算機シミュレーションを通じて, 接着剤に生じる主応力の統計的解析を行った. その結果, 主応力の端部と突き合わせ部におけるばらつきが非常に大きくなること, 主応力の最大値の分布は対数正規分布が最も適合性の良い分布であること, などが明らかとなった.

謝辞

本研究を進めるにあたり, ご指導をいただいた石川敏之准教授, 檀寛成准教授に感謝いたします.

参考文献

- [1] 兼清泰明, 笠行健介, 石川敏之: “空間変動型確率微分方程式を用いた CFRP 板接着補修における不規則性解析”, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 73, No. 2, I.11-I.22, 2017.

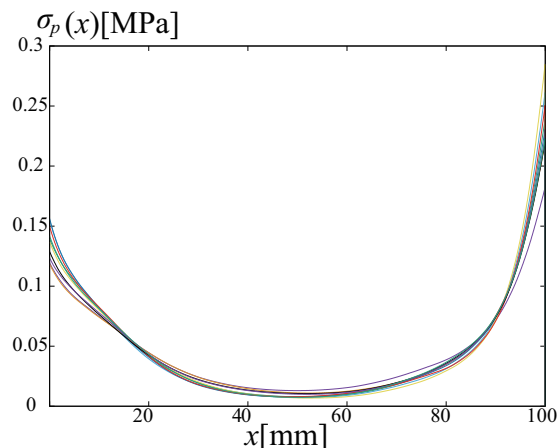


図-2 $s_d = 0.2$, $l_c = 100[\text{mm}]$ の場合の主応力 $\sigma_p(x)$ のサンプル挙動

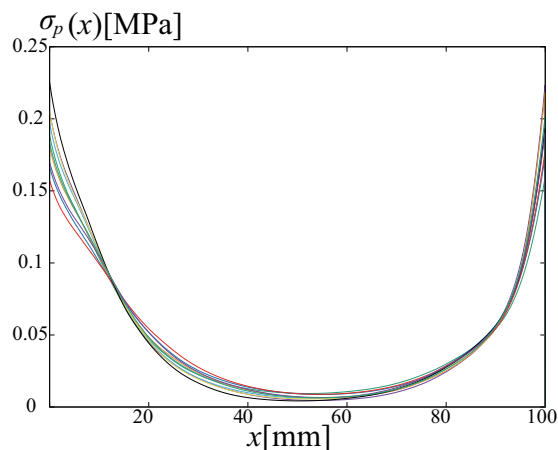


図-3 $s_d = 0.2$, $l_c = 100[\text{mm}]$ の場合の主応力 $\sigma_p(x)$ のサンプル挙動 ($t_p(x)$ を薄くした場合)

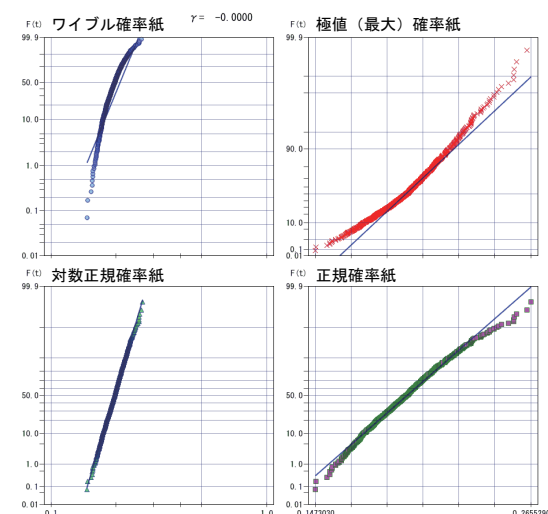


図-4 $s_d = 0.2$, $l_c = 100$ の場合の主応力の最大値のサンプルの確率紙プロット