

第I部門

一軸引張を受ける継目を有する CFRP 接着鋼板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

腐食損傷した鋼部材に軽量かつ強度の高い炭素繊維強化樹脂(CFRP)を接着して補修・補強する工法が適用され始めている¹⁾。CFRP は人力での運搬や施工が可能であり、接着剤により CFRP を貼り付ける工法であるため、従来の高力ボルト当て板接合と比べると施工が容易である。しかし、CFRP 接着補修では、CFRP 端部の接着剤に生じる高い応力により、鋼部材が降伏する前に CFRP がはく離する場合がある。このため、接着接合部の耐力・強度は定着長が確保されている場合、エネルギー解放率を用いた照査が行われる¹⁾。

他方、高弾性型の CFRP 板や CFRP ストランドシートでは、施工や輸送の面から長さが制約される。このため、補修・補強部の長さがそれ以上長くなる場合、CFRP に継目や継手を設けた補修・補強が行われる²⁾。本研究では、図-1 に示すような CFRP に継目を設けて鋼板に接着して補修や補強を行う工法に着目する。図-1 に示すモデルに対して、定着長が十分に確保されている条件の下に、継目位置および CFRP 端部のエネルギー解放率の算出式を導出する。

2. 継目を有する CFRP 接着鋼板のエネルギー解放率

本章では、継目を有する CFRP 接着鋼板の CFRP1 の継目位置($x=0$)の接着剤1および2, CFRP1 の端部($x=l_1$)の接着剤1および CFRP2 の端部($x=l_2$)の接着剤2からはく離が生じる場合を対象として、エネルギー解放率(G_{No} , G_{Ne1} , G_{Ne2})の算出式を導出する。

(1) 全エネルギー解放率の簡易式

これまでに、構造系全体のひずみエネルギーの変化量から全エネルギー解放率を直接算出する簡易式が提案されている。エネルギー解放率 G は、はく離が微小面積だけ増加するときのひずみエネルギー U の変化量として考えられ、次式で表すことができる。

$$G = \frac{1}{2b_c} \frac{\partial U}{\partial l_{cr}} \quad (1)$$

ここに,

 b_c : CFRP の接着幅 l_{cr} : はく離長さ

各はく離位置で長さ l_{cr} のはく離が生じた場合の構造系全体のひずみエネルギーを導出し、得られたひずみエネルギーを式(1)に代入することで、簡易式はそれぞれ次式で与えられる。ここで、各部材は合成断面であると仮定している。

$$G_{Ne1} = \frac{P^2}{4b_c E_s A_s} \{1 - \xi_0 (1 + J)\} \quad (2)$$

$$G_{Ne2} = \frac{P^2}{4b_c E_s A_s} \xi_0 J \quad (3)$$

$$G_{No} = \frac{P^2}{4b_c E_s A_s} \left\{ 1 - \xi_0 - \frac{J}{J + \xi_0 (1 + J)} \right\} \quad (4)$$

ここに,

$$\xi_0 = \frac{E_s A_s}{E_s A_s + 2E_{c1} A_{c1} + 2E_{c2} A_{c2}}, \quad J = \frac{2E_{c2} A_{c2}}{E_s A_s + 2E_{c1} A_{c1}}$$

 P : 作用軸力 E_s, A_s : それぞれ鋼板のヤング係数および断面積 E_{c1}, A_{c1} : それぞれ CFRP1 のヤング係数および断面積 E_{c2}, A_{c2} : それぞれ CFRP2 のヤング係数および断面積

(2) FEM 解析から得られるエネルギー解放率

FEM 解析には、汎用の有限要素解析 MARC を用いた。解析モデルでは、四節点平面応力要素を用いて、対称性を考慮した 1/4 モデルとした。

境界条件は、CFRP1 の継目を考慮し、鋼板および CFRP2 のみ軸方向の変位を拘束し、モデル下端で板厚方向の変位を拘束している。また、無補強部に作用する軸応力が 1N/mm^2 となるようにモデル右端で荷重を与えた。

接着剤の要素寸法は、はく離先端を除き $0.1 \times 0.1\text{mm}$ とした。はく離位置では、接着剤の厚さ中央に二重節点を用いて 5mm のはく離を模擬している。また、CFRP1 の継目位置では接着剤に生じる垂直応力は圧縮となるため、はく離面の接着剤の要素が交差しないように接触条件を入れている。はく

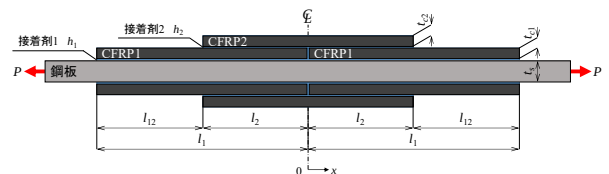


図-1 CFRP に継目を有する CFRP 接着鋼板

表-1 計算例に用いる各部材の材料定数および寸法

(a) 鋼板

板幅 $b_s \times$ 板厚 t_s [mm]	50×12
無補強部の長さ l_n [mm]	50
ヤング係数 E_s [kN/mm ²]	200

(b) CFRP1, 2

板幅 b_c [mm]	50
接着長さ l_1, l_2 [mm]	400, 200
ヤング係数 E_{c1}, E_{c2} [kN/mm ²]	167

(c) 接着剤 1 および 2

ヤング係数 E_{e1}, E_{e2} [N/mm ²]	2500
せん断性係数 G_{e1}, G_{e2} [N/mm ²]	926

表-2 CFRP および接着剤のパラメータ

No.	CFRP 板厚		接着厚さ		No.	CFRP 板厚		接着厚さ	
	t_{c1}	t_{c2}	h_1	h_2		t_{c1}	t_{c2}	h_1	h_2
1	2	2	0.4	0.4	11	2	2	0.4	0.6
2	2	1	0.4	0.4	12	2	2	0.4	0.8
3	2	3	0.4	0.4	13	2	2	0.4	1.0
4	2	4	0.4	0.4	14	2	2	0.6	0.4
5	1	2	0.4	0.4	15	2	2	0.8	0.4
6	3	2	0.4	0.4	16	2	2	1.0	0.4
7	4	2	0.4	0.4	17	2	2	0.6	0.6
8	1	1	0.4	0.4	18	2	2	0.8	0.8
9	3	3	0.4	0.4	19	2	2	1.0	1.0
10	4	4	0.4	0.4					

(単位: mm)

離先端では、放射状に退化要素を用い、最も内側の要素の長辺は 0.01mm としている。はく離先端を中心とする半径 0.01mm の経路を指定してモード I および II の応力拡大係数 (K_I , K_{II}) を求め、次式によりエネルギー解放率を算出する。

$$G_I = K_I^2 / E_e \quad (5)$$

$$G_{II} = K_{II}^2 / E_e \quad (6)$$

また、全エネルギー解放率は、次式で与えられる。

$$G_T = G_I + G_{II} \quad (7)$$

(3) 簡易式および FEM 解析の比較

簡易式および FEM 解析の計算例として、部材の材料定数および寸法を表-1 および表-2 の値を用いて簡易式および FEM 解析から得られるエネルギー解放率を算出した。簡易式および FEM 解析の比較を図-2 に示す。図-2 より、 G_{Ne1} , G_{Ne2} および G_{No} は傾きが 1 の直線の近くにプロットされ、表-2 に示すパラメータにかかわらず、簡易式により FEM 解析と同等のエネルギー解放率が得られることがわかる。

3. 継目を有する CFRP 接着鋼板のはく離位置

式(2)~(4)の全エネルギー解放率の簡易式は鋼板に対する各 CFRP の伸び剛性の比 ($E_{c1}A_{c1}/E_sA_s$, $E_{c2}A_{c2}/E_sA_s$) によって大小関係が決まる。各はく離位置における簡易式の大小関係を図-3 に示す。図に示す実線および破線は、それぞれ $G_{Ne1} = G_{Ne2}$, $G_{Ne2} = G_{No}$ を解くことで得られる。

図-3 の領域 A では G_{Ne1} が最大となり、領域 B および C で

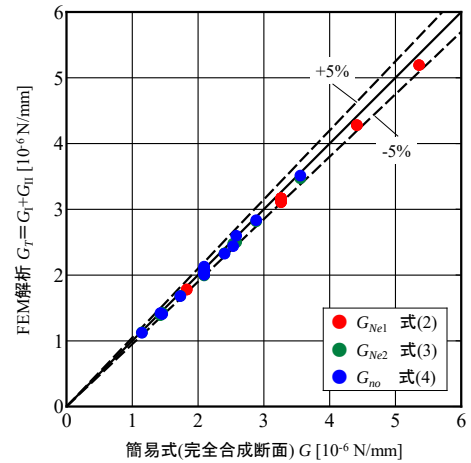


図-2 簡易式および FEM 解析の比較

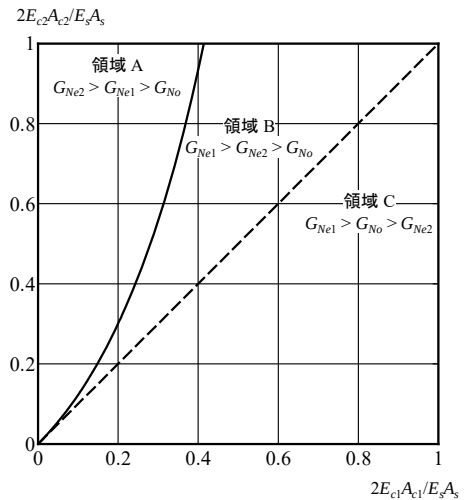


図-3 各はく離位置の簡易式の大小関係

は G_{Ne2} が最大になる。図-3 より、CFRP1 の継目位置よりも CFRP の端部が早くはく離することが考えられるが、CFRP の端部にテーパや機械式定着を設けるなどのはく離対策を行う場合は、CFRP1 の継目位置でのエネルギー解放率が最大になる可能性がある。

4. おわりに

本研究では一軸引張を受ける継目を有する CFRP 接着鋼板において各はく離位置を対象に全エネルギー解放率の大きさを算出する簡易式を導出した。また、簡易式を用いて FEM 解析と同等の値を算出できることを示した。さらに、鋼板と各 CFRP の伸び剛性の比がエネルギー解放率の大小関係に影響することを示した。

参考文献

- 1) 土木学会複合構造委員会: FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案), 複合構造シリーズ 09, 2018.
- 2) 宮下 剛, 秀熊佑哉, 小林 朗, 奥山雄介, 工藤晃也, 長井正嗣: 継目を有する CFRP スtrandシート接着鋼板の引張試験, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.2, pp.257-274, 2013.