

第 I 部門

軸力を受ける CFRP 積層接着補強鋼板の段差位置におけるエネルギー解放率

関西大学大学院 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 接着接合では、CFRP 端部の接着剤に高いせん断応力および垂直応力が生じることから、鋼部材が降伏する前に CFRP がはく離する場合があることが報告されている。文献 1) では、鋼板と CFRP が合成断面となるために必要な CFRP 端部からの接着長 (定着長) を確保したうえで、エネルギー解放率を用いたはく離の照査が行われる。

一方、図-1 の用のように CFRP の端部をずらし、段差を設けて積層する工法は、CFRP に特別な加工が必要なく簡便でありながら、はく離荷重の向上が確認されている。端部に段差を設けて積層する工法では、接着剤により各 CFRP に十分な力が伝達される段差長を確保して接着することで、鋼板と CFRP1 のみの合成断面からエネルギー解放率を算出することができる²⁾。また、鋼板と CFRP が合成断面として挙動するために必要な各段差 (長さや積層数) の設計方法が提案されている³⁾。しかし、鋼板と CFRP および CFRP 間の接着剤のエネルギー解放率の材料特性値は異なる可能性もある。

本研究では、図-1 の接着接合モデルに対して、鋼板と CFRP が合成断面として挙動するための必要段差長が確保されている場合の各段差部における簡便なエネルギー解放率の算出方法を示す。一般的に CFRP を積層する場合には、伸び剛性の等しい CFRP を積層し、接着補修・補強の設計では接着剤の厚さを一定と仮定するため、CFRP および接着剤の厚さは各層で一定としている。

2. エネルギー解放率の算出方法

軸力を受ける鋼板の両面に CFRP が 1 層接着されている場合、はく離照査に用いられるエネルギー解放率 G_n は次式で与えられる¹⁾。

$$G_n = \frac{P^2}{4b_c E_s} \left(\frac{1}{A_s} - \frac{1}{A_v} \right) = \frac{P^2}{4b_c E_s A_s} (1 - \xi_0) \quad (1)$$

ここに、 $\xi_0 = E_s A_s / (E_s A_s + 2E_c A_c)$ 、 P : 作用荷重、 A_v : 鋼板と CFRP の合成断面 ($A_v = A_s / \xi_0$)、 A_s : 鋼板の断面積、 E_s : 鋼板のヤング係数、 b_c : CFRP の幅、 A_c : CFRP の断

面積、 E_c : CFRP のヤング係数。式(1)は鋼板と CFRP の伸び剛性からエネルギー解放率が算出できる簡易な式である。

文献 2) のように必要段差長を確保して積層接着する場合には、 i 層目の CFRP を積層する場合、鋼板と CFRP1~ i 層目までを鋼板と CFRP との合成部材と考えることで、式(1)を拡張することができると考えられる。

$$G_{ni} = \frac{P^2}{4b_c E_s} \left(\frac{1}{A_{v(i-1)}} - \frac{1}{A_{vi}} \right) = \frac{P^2}{4b_c E_s A_s} \left(\prod_{j=1}^{i-1} \xi_j - \prod_{j=1}^i \xi_j \right) \quad (2)$$

ここに、 $\xi_i = E_s A_{vi} / (E_s A_{vi} + 2E_c A_c)$ 、 A_{vi} : 鋼板と CFRP1~ i 層目の合成断面 ($A_{vi} = b_s t_{vi} = b_s t_s / \prod_{j=1}^{i-1} \xi_j$)。ただし、 $i = 1$ のとき $\prod_{j=1}^0 \xi_j = 1$ 。

3. 提案式の妥当性

本研究では、式(2)および FEM 解析によるエネルギー解放率を比較することでその妥当性を確認する。FEM 解析には 4 節点平面応力要素を用い、1/4 対称モデルを作成した。境界条件は、鋼板の厚さ方向および軸方向の対称面に直角な変位を拘束し、外力作用面に作用軸応力 $\sigma_{sn} = P/A_s = 10.1$ N/mm² を与える。鋼板および CFRP の最大要素寸法は 1 mm $\times$ 1 mm、接着剤の要素寸法は、はく離先端近傍を除いて 0.25 mm $\times$ 0.25 mm となるように分割した。応力拡大係数を求めるために、接着剤 1 層目の厚さ中央では、二重節点を用いて端部から 5 mm のはく離を模擬した。はく離周辺の要

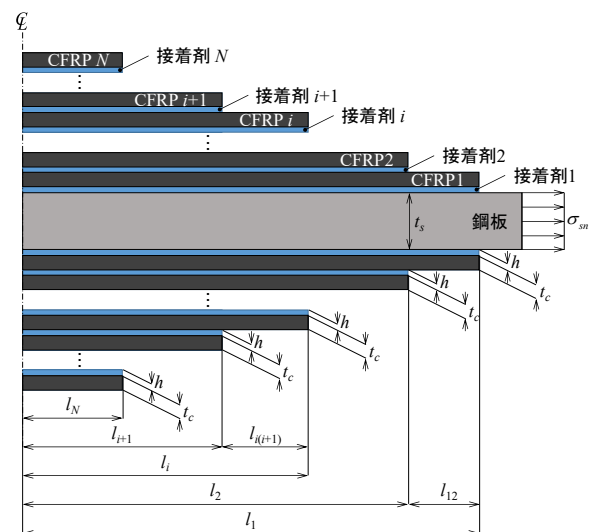


図-1 段差を有する CFRP 接着鋼板

Morimune MIZUTANI and Toshiyuki ISHIKAWA

k38.531@kansai-u.ac.jp

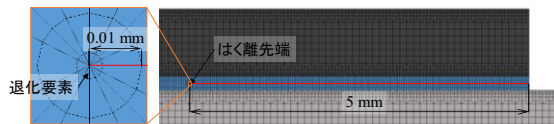


図-2 はく離周辺の要素分割

表-1 各部材の材料定数および断面寸法

(a) 鋼板

ヤング係数 E_s [N/mm ²]	200000
ポアソン比 ν_s	0.3
断面寸法 $b_s \times t_s$ [mm ²]	5 × 9

(b) CFRP

ヤング係数 E_c [N/mm ²]	165000
ポアソン比 ν_c	0.35
断面寸法 $b_c \times t_c$ [mm ²]	5 × 1

(c) 接着剤

ヤング係数 E_e [N/mm ²]	2500
ポアソン比 ν_e	0.6
断面寸法 $b_e \times h$ [mm ²]	5 × 0.5

表-2 エネルギー解放率 G_{ni} に関するパラメータ

i	t_{vi} [mm]	ξ_i	$\Pi_{j=1}^i \xi_j$	G_{ni} [$\times 10^{-6}$ N/mm]
1	190	0.85	0.85	10743
2	107	0.87	0.73	10275
3	120	0.88	0.65	974
4	140	0.89	0.58	768
5	150	0.9	0.52	621

要素分割を図-2に示す。はく離先端では、放射状に退化要素を用い、最も内側の要素の長辺は 205×10^{-3} mmとしている。

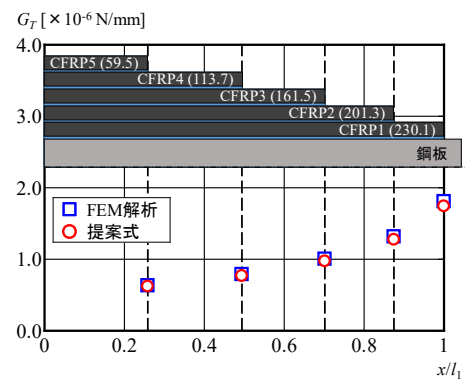
はく離先端の半径 0.1mm を指定して得られる応力拡大係数を求め、次式によりエネルギー解放率を算出する。

$$G_T = (K_I^2 + K_{II}^2) / E_e \quad (3)$$

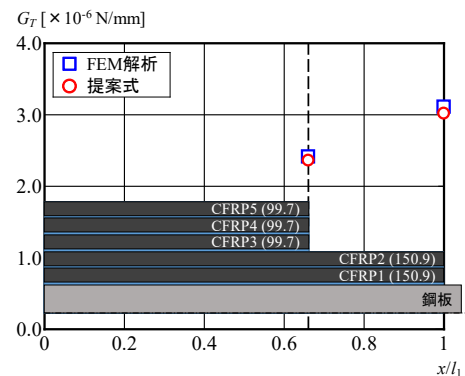
ここに、 K_I : モード I の応力拡大係数、 K_{II} : モード II の応力拡大係数、 E_e : 接着剤のヤング係数。

計算例として表-1に示す部材寸法および材料定数を用いる。CFRPの積層数は5枚として、すべての端部をずらして積層したモデルとCFRP1・2および3～5の端部をそれぞれそろえて積層したモデルを考える。後述する算出方法ごとのエネルギー解放率を示した図-3に各モデルを示している。ここで、図-3には、CFRP i (l_i) として、CFRP i 層目の接着剤半長さ l_i [mm] を示している。 l_i は、文献2), 3) を参考に必要段差長を満たすように算出している。また、FEM解析では各段差位置でのエネルギー解放率を得るために、2層目以降の接着剤においても、着目箇所のように同様のはく離を模擬した解析を実施した。

一方、式(2)の提案式は部材寸法および材料定数が決定されると、着目する層番号 i ごとに、表-2のように整理することで、すべての端部をずらして積層した場合の各差着材にお



(a) すべての端部をずらして段差を設けた場合



(b) CFRP1・2と3～5の端部をそれぞれ揃えた場合

図-3 エネルギー解放率の比較

けるエネルギー解放率が比較的容易に算出できる。また、端部を揃えて積層する場合のエネルギー解放率は、端部が揃えられている接着剤各層の和と与えられる³⁾。すなわち、CFRP1・2の段差位置では、 $G_{n(1,2)} = G_{n1} + G_{n2} = 300.8 \times 10^{-6}$ N/mm、CFRP3～5の段差位置では同様に $G_{n(3,5)} = G_{n3} + G_{n4} + G_{n5} = 2063$ N/mm である。

図-3に提案式とFEM解析によるエネルギー解放率の比較を示す。図より、提案手法により算出されるエネルギー解放率はFEM解析とよく一致していることがわかる。

4. おわりに

本研究では、軸力を受ける鋼板に段差を設けてCFRPを積層したモデルに対して、簡便にエネルギー解放率を算出する方法を示した。提案した手法はFEM解析によるエネルギー解放率とよく一致した。また、CFRP間の接着剤におけるエネルギー解放率を算出することも可能であるため、各段差位置においてもはく離の照査が適用できると考えられる。

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) 石川敏之, 宮下剛: 一軸引張を受けるCFRP板接着鋼板に対する段差の設計法, 土木学会論文集 A(構造・地震工学), Vol.67, No.2, pp.351-359, 2011.
- 3) 水谷壮志, 石川敏之, 宮下剛, 秀熊佑哉: 複数の段差を有するCFRP接着鋼板のエネルギー解放率, 第13回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム, pp.412-420, 2019.