(51) 複数の段差を有するCFRP接着鋼板のエネルギー解放率

水谷 壮志1・石川 敏之2・宮下 剛3・秀熊 佑哉4

¹学生会員 関西大学 理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目 3-35) E-mail:k380531@kansai-u.ac.jp

²正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目 3-35) E-mail: t-ishi@kansai-u.ac.jp

³正会員 長岡技術科学大学大学院准教授 工学研究科 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1) E-mail: mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

⁴正会員 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社(〒104-0061 東京都中央区銀座七丁目 16-3) E-mail: hidekuma.3ae.yuya@nscm.nipponsttel.com

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.2018年には、土木学会複合構造委員会から「FRP 接着による構造物の補修・補強指針 (案)」が発行され、エネルギー解放率を用いたはく離の照査方法が記載された.一方、CFRP 接着補修・補 強において、はく離荷重を上昇させる方法の一つに段差を設けて CFRP を積層接着する工法が提案されて いる.しかし、必要段差長を満たしていない場合のエネルギー解放率の算出方法や任意の段差位置におけ るエネルギー解放率の算出方法は明らかにされていない、本研究では、任意の長さの段差を設けて CFRP が積層された一軸引張を受ける CFRP 接着鋼板に対して、はく離の照査に用いるエネルギー解放率の算出 方法を明らかにした.

Key Words: CFRP, adhesive, step, energy release rate

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⁰⁻⁷. 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が知ら れており,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. このため, CFRP がは く離する際の荷重を上昇させる工法が多く提案されてい る²⁻¹³. その中の一つである, CFRPの端部をずらし, 段 差を設けて積層する方法(図-1)は, CFRP に特別な加工を する必要がなく, 簡便な方法である¹⁰⁻¹².

CFRPの端部に段差を設けて積層する場合,各CFRPの 段差長を一定(例えば25mm)⁹として接着する方法や接着 剤により各 CFRP に十分な力が伝達される必要段差長を 確保して接着する方法^{11,12}が提案されている.鋼部材 と CFRP 間の接着剤のせん断応力が端部を揃えて積層し た場合よりも小さくなることからはく離荷重上昇効果が 明らかにされている.一方,CFRP のはく離に対する照 査として,文献7)ではエネルギー解放率を用いた方法が 記載されている.この照査では,鋼部材とCFRP が合成 断面となるために必要な定着長や段差長が確保されてい ることが前提となっている.したがって,段差を設ける 場合に対しても,エネルギー解放率を用いたはく離の照 査を行う場合には,必要な段差長を確保する必要がある と言える.また,CFRP に段差を設けて積層する場合の 段差部は,はく離防止処理区間として定着長の外側に設 計しなければならず,CFRP の接着長は端部を揃えて積 層した場合に比べ長くなることが課題として挙げられる.



図-1 段差を設けて積層された CFRP 接着鋼板



図-2 段差を有する CFRP 接着鋼板モデル

一方,文献14)や文献15)のようにCFRPの接着長を短 くすることで,CFRP 接着補修・補強の適用範囲を広げ ることができると考えられる.しかし,必要段差長を満 たしていない場合のエネルギー解放率の算出方法は明ら かにされていない.

以上のことから、任意の段差を有する CFRP 接着鋼板 のエネルギー解放率の算出方法が確立できれば、より自 由で合理的な設計が行えると考える.本研究では、 CFRP の端部に任意の長さの段差を設けて積層された一 軸引張を受ける CFRP 接着鋼板に対して、はく離の照査 に用いるエネルギー解放率の算出方法を示す.

2. 本研究におけるエネルギー解放率の算出方法

図-1 に示した段差を有する CFRP 接着鋼板の 1/2 モデルを図-2 に示す.本研究では CFRP が上下左右に対象に接着されていると仮定している.

接着剤に生じる応力からエネルギー解放率は次式で算 出することができる¹⁰⁻¹⁸.

$$G_{\rm I} = \begin{cases} \frac{h}{2E_e} \sigma_y^{-2} \left(\sigma_y \ge 0 \right) \\ 0 \quad \left(\sigma_y < 0 \right) \end{cases}$$
(1)

$$G_{\rm II} = \frac{h}{2G_e} \tau^2 \tag{2}$$

$$G_T = G_I + G_{II} \tag{3}$$

ここに,

- σ, :接着剤に生じる垂直応力
- τ :接着剤に生じるせん断応力

表-1 本研究における各部材の材料定数および断面寸法 (a) 鋼板

ヤング係数 <i>E</i> _s [N/mm ²]	200,000
ポアソン比 vs	0.3
断面寸法 $b_s \times t_s$ [mm ²]	50×9
(b) CFRP	
ヤング係数 E_c [N/mm ²]	165,000
ポアソン比 vc	0.35
断面寸法 $b_c \times t_c$ [mm ²]	50×1
(c) 接着剤	
ヤング係数 $E_e[\text{N/mm}^2]$	2500
ポアソン比 ve	0.36
断面寸法 $b_c \times h [mm^2]$	50×0.2

- *E*, : 接着剤のヤング係数
- G_: : 接着剤のせん断弾性係数
- *h* : 接着厚さ
- *G*₁:モードIのエネルギー解放率
- G₁₁:モード II のエネルギー解放率
- *G*_r : 全エネルギー解放率

はく離に対する照査には全エネルギー解放率 G_r が用いられる[¬].しかし、定着長を満たしている場合、鋼板の両面に CFRP をそれぞれ 1 枚接着した接着接合モデルに対して、軸方向の力のつり合いのみを考慮した理論解析モデルから算出されるせん断応力(近似解)を式(2)に代入しモード II のエネルギー解放率 G_{II} を求めると、はく離が微小面積だけ発生した際の CFRP 接着鋼板の構造系全体のひずみエネルギーの変化量から求められるエネルギー解放率(簡易式)と完全に一致することが明らかにされている¹⁸.また、平面応力条件での FEM 解析による全エネルギー解放率 G_r ともよく一致することが知られ



(0) はく離記の安系分割 図-3 FEM解析モデル

ている.本研究では、段差長が短い場合においてもエネ ルギー解放率を算出するため、簡易式に関しては付録に 示す.ここでは、軸方向のつり合いのみから得られるモ ードIIのエネルギー解放率 G_{II} が全エネルギー解放率 G_{7} に相当することに注意を要する.

段差を有する CFRP 接着鋼板においては軸方向の力の つり合のみを考慮した固有値による応力解析法(数値解 析法)が提案されている¹¹⁾.また,必要段差長を確保し て積層される CFRP 接着鋼板においては,簡易的に各層 の CFRP を一つの CFRP に換算した場合の接着剤に生じ るせん断応力の近似解が与えられている^{10,12)}.これら のせん断応力を式(2)に代入することでエネルギー解放 率が算出できると考えられる.

本研究では、任意の段差長におけるエネルギー解放率 の算出方法を検討するために、各部材の材料定数や断面 寸法は表-1の値を用い、段差長をパラメータとした. 一 般的に CFRP を積層し鋼板に接着する場合、伸び剛性の 等しい CFRP を積層することになる. また、CFRP 接着 補修・補強の設計では接着剤の厚さが一定であることが 仮定される. 以上のことから、本研究では CFRP と接着 剤の材料定数および断面寸法をそれぞれ一定と仮定した.

一定長さの段差を有する CFRP 接着鋼板のエ ネルギー解放率

本章では**図-2**に示す各 CFRP に設けられた段差長が全 て等しい条件($l_{12} = l_{23} = l_{34} = \dots = l_{(N-1)N}$)において各接 着剤におけるエネルギー解放率を数値解析を用いて算出 した場合と FEM 解析を用いた場合の結果を比較し評価 する.

鋼板の両面に CFRP がそれぞれ 5 枚積層されたモデル を対象とする. 段差長をパラメータとして $l_{12} \sim l_{45} = 0$, 5, 10, 25, 50, 75 mm, 最外層の接着半長さは $l_5 = 100$ mm とした. ここで, 段差長 $l_{12} \sim l_{45} = 0$ は各 CFRP の端 部を全て揃えて積層することを意味する.また,端部を 全て揃えた場合において,文献 19)の必要定着長は 98.4 mm であり, $l_{5} = 100$ mm はこれを満たしている.

(1) FEM 解析

FEM解析には四節点平面応力要素を用い,図-3(a)に示 すような 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 $\sigma_m = 1.0 \text{ N/mm}^2$ を与えた.

鋼板および CFRP の最大要素寸法は 0.1 mm×0.1 mm, 接着樹脂の要素寸法は,はく離先端近傍を除いて 0.025 mm×0.025 mmとなるように分割した.文献 18)を参考に, 接着剤 1 層目の厚さ中央では,二重節点を用いて端部か ら長さ 5 mm のはく離を模擬した.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 2.5× 10³ mm としている.はく離部の要素分割を図-3(b)に示 している.また,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 みに同様のはく離を模擬した解析を実施した.

はく離先端の半径 0.01 mm 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.

$$G_{\rm I} = K_{\rm I}^2 / E_e \tag{4}$$

$$G_{\rm II} = K_{\rm II}^2 / E_e \tag{5}$$

ここに,

K₁ :モードIの応力拡大係数

*K*_Π : モードⅡの応力拡大係数

全エネルギー解放率*G_r*は式(4), (5)を式(3)に代入し求める.

(2) 数値解析および FEM 解析によるエネルギー解放率の比較

図-4 に各層の段差長とエネルギー解放率の関係を示す. 図には 4.(1)節に後述する, 文献 10)による鋼と CFRP が 合成断面となるために必要な各段差長を破線により示し ている.この図からわかるように、1 層目の段差におい ても、文献 10)で提案されている必要段差長は満足して いない解析モデルも含まれる.また、文献 10)で提案さ れている必要段差長は、外側の段差ほど必要段差長が長 くなる.これは、文献 10)における必要段差長は、積層 数が増すと、各積層間の接着剤の影響が考慮されるため である.

ここでは、数値解析および FEM 解析によるエネルギー解放率を段差長が長い場合、0 の場合、短い場合に分け考察する.

a) 各段差長が 25 mm 以上の場合

図4より,各段差長が25mm以上であれば文献11)の 数値解析およびFEM解析によるエネルギー解放率の結 果がよく一致していることがわかる.このことから,最 外層に近づくほど,文献10)の必要段差長を満たしてい ない場合においても鋼板応力が十分に伝達され,せん断 応力が収束していると考えられる.これは,文献10)で は,鋼板とCFRPが合成断面となるために必要な段差長 が提案されているが,安全側の評価となっていることが 起因していると考える.

b) 端部を揃えて積層した場合

図4より、*l*₁₂ ~*l*₄₅ =0では数値解析および FEM 解析 によるエネルギー解放率が一致していない.一方、端部 を揃えて積層した場合のエネルギー解放率は、積層され た CFRP を1つの CFRP として換算することで算出する ことができる¹⁹.この場合、換算する前の各層の接着剤 の影響が換算後の接着剤に反映される.このことから、 端部を揃えて積層した場合のエネルギー解放率は接着剤 1層目のみのせん断応力で算出することができず、2層 目以降のせん断応力も考慮すべきだと考えられる.そこ で、CFRP の端部が揃っている際のエネルギー解放率を 次式を用いて算出し、図4に◆で示す.

$$G_{T} = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{h_{i}}{2G_{ei}} \tau_{ie}^{2} \right)$$
(6)

ここに,

- τ_{ie}: 数値解析から得られる接着剤iの端部に生じる生じるせん断応力
- *h*_i : 接着剤 i の厚さ
- *G*_{*ai*} : 接着剤 *i* のせん断弾性係数
- *N* : 鋼板の片面に積層された CFRP の層数

式(6)は数値解析から得られる各層のエネルギー解放 率の和を表している. 図4の くより,式(6)によるエネル ギー解放率が FEM 解析にける 1 層目のエネルギー解放 率と同程度の値であることがわかる.

c) 段差長が短い場合

図-4のl₁₂~l₄₅=5,10mmのように段差長が短い場合,



図-5 はく離長さ(5mm)を考慮した FEM 解析修正モデル

数値解析および FEM 解析によるエネルギー解放率が一 致していない.

文献 15)では、CFRP の接着長が短い場合のエネルギー 解放率の算出方法を示している. CFRP が必要定着長を 満たしていない場合、FEM 解析で応力拡大係数を計算 する際にモデル化したはく離長さの影響を受ける. この ため、数値解析および FEM 解析によるエネルギー解放 率を比較する際には、解析モデル上でのはく離長さを考 慮する必要がある.

本研究では,FEM 解析のはく離長さ 5 mm の影響が FEM 解析から得られるエネルギー解放率に影響しない ように,はく離の模擬を数値解析での接着長さの外側に 行った.例えば,2 層目の接着剤におけるエネルギー解 放率を求める場合は図-5 のようになる.

上記の FEM 解析の修正モデルによって得られたエネ ルギー解放率を図-6 に示す. 図中の数値解析は図-4 と同 じである. また,接着剤1層目におけるエネルギー解放 率のみ $l_{12} \sim l_{45} = 0.2$, 1,3 mm のモデルを追加した. 図-6より,数値解析およびFEM解析によるエネルギー解放



図-6 エネルギー解放率と段差長の関係(FEM 解析修正)

率は各段差の段差長が短くなるほど誤差は大きくなるが 5 mm 以上であればよく一致していることがわかる. 段 差長が非常に短い場合には数値解析による算出の妥当性 が得られないが,設計の際に 5 mm より短い段差長を設 けることは考えづらい. また,各段差長が 0.2 mm にお いても端部を揃えた場合のエネルギー解放率よりも小さ くなることが確認できた.

以上より,段差長が 5 mm 程度まで短い場合でも,文献 11)の数値解析から得られる接着剤のせん断応力を用いて式(2)から各段差の接着剤のエネルギー解放率が計算できると言える.また,段差長が非常に短い場合においては,式(6)のように各接着剤におけるエネルギー解放率の和を用いることで安全側の照査を行うことができる.さらに,式(6)によるエネルギー解放率は段差長によらずほぼ一定となることが確認できた.

4. 必要段差長を確保して積層した CFRP 接着鋼 板のエネルギー解放率

CFRP の端部を揃えずに積層した CFRP 接着鋼板 のエネルギー解放率

文献 10, 12)では、段差を設けて積層する場合、鋼と CFRP が合成断面として挙動するために必要な各段差長 が与えられている. 必要段差長を確保した場合、理論解 析により接着剤*i*の端部に生じるせん断応力の近似解が 次式で与えられている^{10,12}.

 $\tau_{ie} = c_i t_{vi} \frac{1 - \xi_i}{2} \left(\prod_{j=1}^{i-1} \xi_j \right) \sigma_{sn}$ (7)

ここに,

$$\xi_i = \frac{1}{1 + 2F E_c t_c / (E_s t_{vi})}$$

$$t_{vi} = t_{s} \left\{ 1 + \frac{2(i-1)FE_{c}t_{c}}{E_{s}t_{s}} \right\} = \frac{t_{s}}{\prod_{j=1}^{i-1} \xi_{j}}$$
$$c_{i} = \sqrt{\frac{G_{ei}}{h_{i}} \frac{2}{1-\xi_{i}} \frac{F}{E_{s}t_{vi}}}}{F = b_{c}/b_{s}}$$

 E_s , E_c : それぞれ鋼板および CFRP のヤング係数 t_s , t_c : それぞれ鋼板および CFRP の板厚 b_s , b_c : それぞれ鋼板および CFRP の幅 j: 総和Σ または総積 Π の対象範囲 ただし, i=1のとき, $\Pi_{j=1}^0 \xi_j = 1$. また, 接着剤の端部に生じるせん断応力が式(7)に収 束するための必要な各段差長は次式で与えられている¹⁰.

$$l_{i(1+1)} = \frac{1}{c_i'} \cosh^{-1} \left(\frac{1}{\eta - 1} \frac{2FE_c t_c}{E_s t_{v_i}} \right)$$
(8)

ここに,

$$c_i' = \sqrt{\frac{G_{ei}}{h_{vi}} \frac{2}{1 - \xi_i} \frac{F}{E_s t_{vi}}} = c_i / \sqrt{\sum_{j=1}^i \left(\frac{D_j}{D_i}\right)}$$
$$h_{vi} = h_i + \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{h_j G_{ei}}{G_{ej}}\right) = h_i \sum_{j=1}^i \left(\frac{D_j}{D_i}\right)$$
$$D_i = \frac{h_i}{h_1} \frac{G_{e1}}{G_{ei}}$$
$$\eta = \sqrt[N]{\eta_0}$$

 η_0 :部材中央の鋼板応力が $\left(\prod_{j=1}^N \xi_j\right) \sigma_{sn}$ に収束 する精度

ただし, i = Nのとき, $l_{N(N+1)}$ は最外層の CFRP の接着半長さ l_N .

式(8)では,接着剤 $1 \sim i$ の全厚が考慮されているため, $l_{i(i+1)}$ は接着剤iの端部に生じるせん断応力 τ_i が所定の 値に収束する場合よりも長くなる.

対象モデルは **3**章と同様にして、鋼板の両面に CFRP がそれぞれ 5 枚積層された条件おいてエネルギー解放率 を算出する.式(8)より各段差長および最外層の CFRP の 接着は長さはそれぞれ $l_{12} = 28.8$ mm, $l_{23} = 39.8$ mm, $l_{34} = 47.8$ mm, $l_{45} = 54.2$ mm および $l_5 = 59.5$ mm となる. ここで、 $\eta_0 = 1.01$ とした.上記の段差長および最外層 の接着半長さを用いて数値解析および FEM 解析により エネルギー解放率を求める.また、近似解によるエネル ギー解放率として式(7)を式(2)に代入したエネルギー解 放率も算出する.

図-7に各算出方法のエネルギー解放率の比較を示す. グラフの横軸は部材中央からの距離 $x \in CFRP1$ の接着半長さ l_i で除した値を示している.ここで、CFRPiの接着 半長さ l_i は次式で与えられる.



図-7 算出方法の違いによるエネルギー解放率の比較

$$l_{i} = \sum_{i=i}^{N} l_{j(j+1)}$$
(9)

図-7 より、数値解析および FEM 解析も用いて得られ るエネルギー解放率はよく一致していることがわかる. また、数値解析と近似解はよく一致しており、必要段差 長を確保した場合には、近似解によって容易にエネルギ 一解放率が算出できる.

(2) 複数の CFRP の端部を揃え段差を設けて積層した CFRP 接着鋼板のエネルギー解放率

図-3 および図-7 からわかるように伸び剛性の等しい CFRP を各層に段差を設けて積層した場合,接着剤 1 の エネルギー解放率が最大となる.文献 12)では,2層目以 降の接着剤に生じるせん断応力には,はく離荷重に対し て余裕があることから複数の CFRP の端部を揃えて段差 を設け積層する方法が提案されている.この場合,4.(1) 節と比較すると CFRP の接着長さを短くすることができ る.

CFRP*i*以降の CFRP の端部を揃えて積層する場合,接着剤*i*に生じるせん断応力は次式で与えられる.

$$\tau_{(i,i+X-1)e} = c_{i,i+X-1} t_{vi} \frac{1 - \xi_{i,i+X-1}}{2F} \left(\prod_{j=1}^{i-1} \xi_j\right) \sigma_{sn} \quad (10)$$

ここに,

$$c_{i,i+X-1} = \sqrt{\frac{G_{ei}}{h_i} \frac{2}{1 - \xi_{i,i+X-1}} \frac{F}{E_s t_{vi}}}$$
$$\xi_{i,i+X-1} = \frac{1}{1 + 2F X E_c t_c / (E_s t_{vi})}$$

X : CFRP の端部を揃えて積層する枚数(X ≥ 2) また,式(10)が適用できる際の必要段差長は次式で与 えられる.

$$l_{(i,i+X-1)(i+X)} = \frac{1}{c_{i,i+X-1}'} \cosh^{-1}\left(\frac{1}{\eta - 1} \frac{2XFE_c t_c}{E_s t_{vi}}\right) \quad (11)$$



図-8 算出方法の違いによるエネルギー解放率の比較

 $\begin{array}{l} \sum \zeta_{i,i+X-1} & \sum \limits_{i=1}^{\prime} - \sqrt{\frac{G_{ei}}{h_{vi}} \frac{2}{1 - \xi_{i,i+X-1}} \frac{F}{E_s t_{vi}}} = c_{i,i+X-1} / \sqrt{\sum_{j=1}^{i+X-1} \left(\frac{D_j}{D_i}\right)} \\ h_{vi}' & = h_i + \sum_{j=i+1}^{i+X-1} \left(\frac{h_j G_{ei}}{G_{ej}}\right) + \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{h_j G_{ei}}{G_{ej}}\right) = h_i \sum_{j=1}^{i+X-1} \left(\frac{D_j}{D_i}\right) \\ \eta & = N_i / \overline{\eta_0} \end{array}$

N': CFRP の端部を揃えることを考慮して換算
 した際の積層数

ただし, i = N - X + 1のとき, $l_{(N-X+1,N)(N+1)} = l_{N-X+1}$ = $l_{N-X+2} = \cdots = l_N$.

文献 12)では, 接着剤 1 の端部に生じるせん断応力が 最大となるように, CFRP の端部を揃えて積層できる条 件を設定している. 鋼板の両面に CFRP がそれぞれ 5 枚 積層された場合, CFRP4・5 の端部を添えて積層するこ とができる. 式(11)より, 各段差長さはそれぞれ $l_{12} =$ 27.5 mm, $l_{23} = 38.1$ mm, $l_{34} = 45.7$ mm および $l_5 = 84.5$ mm となる. すなわち, 各 CFRP の接着半長さはそれぞれ $l_1 = 200.8$ mm, $l_2 = 173.3$ mm, $l_3 = 135.2$ mm および $l_4 = l_5 = 89.5$ mm となる.

上記の CFRP の接着半長さを用いて数値解析および FEM 解析によりエネルギー解放率を求める.また,近 似解によるエネルギー解放率として式(10)を式(2)に代入 したエネルギー解放率も算出した.

図-8に各算出方法のエネルギー解放率の比較を示す. グラフの横軸は部材中央からの距離 $x \in CFRP1$ の接着半長さ l_1 で除した値を示している.また、CFRP4・5の端部はそれぞれ揃えて積層しているため、次式により接着剤iの端部におけるエネルギー解放率 G_n を算出している.

$$G_{T_{i}} = \sum_{j=i}^{i+X-1} \left(\frac{h_{j}}{2G_{ej}} \tau_{je}^{2} \right)$$
(12)

図-8より数値解析,FEM解析および近似解を用いて得

られるエネルギー解放率がよく一致していることがわかる.また,CFRP4・5の端部を揃えることにより,4.(1)節のように各 CFRP の端部をずらして積層した場合に比べ,CFRP1の接着半長さは約0.87倍と短くなる.

以上のように、各段差の端部においてエネルギー解放 率の算出が可能である.したがって、接着剤1の端部に 生じるせん断応力が最大となる条件を無視した場合にお いても任意の位置ではく離に対する照査を行うことで CFRPの接着長が制限される場合においても段差を設け た CFRP 接着補修・補強が適用できると考える.すなわ ち、接着剤1以降の接着剤に生じるせん断応力が最大と なる代わりに、CFRPの接着長をさらに短くすることが できると考える.

本研究では、鋼板の両面に CFRP がそれぞれ 5 枚積層 された条件において、接着剤1の端部に生じるせん断応 力が最大となる条件を無視し、CFRP2・3 と CFRP4・5の 端部をそれぞれ揃えて段差を設けて積層したモデル、 CFRP3~5 の端部を揃えて段差を設けて積層したモデル を対象にエネルギー解放率を算出する.

a) CFRP2・3と CFRP4・5の端部をそれぞれ揃えた 場合

式(11)より得た段差長から各 CFRP の接着半長さを算 出すると、それぞれ l_1 = 177.6 mm, $l_2 = l_3 = 151.6$ mm お よび $l_4 = l_5 = 84.5$ mm となる.

接着剤1の端部に生じるせん断応力が最大となる条件 を無視して段差を設けて積層した場合における各算出方 法のエネルギー解放率の比較を図-9に示す.

図-9(a)より数値解析,FEM解析および近似解を用いて 得られるエネルギー解放率がよく一致していることがわ かる.また、本モデルでは、接着剤2におけるエネルギ ー解放率 G_{r_2} が最大になっていることから、最も早くは く離が生じる位置は接着剤2であると考えられる.数値 解析による G_{r_2} は接着剤1におけるエネルギー解放率 G_{r_1} と比較して約129倍になるが、4.(1)節のように各 CFRPの端部をずらして積層した場合に比べ、CFRP1の 接着半長さは約0.78倍となる.

b) CFRP3~5の端部を揃えた場合

式(11)より得た段差長から各 CFRP の接着半長さを算 出すると、それぞれ $l_1 = 169.4$ mm、 $l_2 = 143.4$ mm および $l_3 = l_4 = l_5 = 107.6$ mm となる.

図-9(b)に、本モデルにおける各算出方法のエネルギー 解放率の比較を示している.図-9(b)より数値解析、FEM 解析および近似解を用いて得られるエネルギー解放率が よく一致していることがわかる.また、本モデルでは、 接着剤3におけるエネルギー解放率*G*_{r3}が最大になって いることから、最も早くはく離が生じる位置は接着剤3 であると考えられる.数値解析による*G*_{r3}は接着剤1に





図-9 算出方法の違いによるエネルギー解放率の比較

おけるエネルギー解放率 G_{r1} と比較して約 1.36 倍になる が,各 CFRP の端部をずらして積層した場合に比べ, CFRP1 の接着半長さは約 0.74 倍となる.

5. おわりに

本研究では、CFRP の端部に段差を設けて積層された 一軸引張を受ける CFRP 接着鋼板に対して、任意の接着 剤の端部でのエネルギー解放率の算出方法を示した. CFRP の接着長に制約を受け、これまでに CFRP 接着補 修・補強が適用できなかった場合などに対して適用範囲 を広げることができると考える.本研究により得られた 結果を以下に示す.

 CFRP の段差長が短い場合においても数値解析を 用いることで FEM 解析と同程度のエネルギー解 放率を算出することができる.ただし、数値解 析により CFRP の端部を揃えて積層した際のエネ ルギー解放率を算出する場合には、式(6)や式(12) のように端部が揃えられた各接着剤のエネルギ 一解放率の和を用いなければならない.

- 2) 文献 10), 12)で提案されている式(8)や式(11)によ る必要段差長を満たして段差を設けて積層する 場合には、式(7)や式(10)のせん断応力の近似解を 用いて容易にエネルギー解放率を算出すること ができる.
- 3) 伸び剛性の等しい CFRP の端部をずらして積層す る場合,接着剤1に生じるエネルギー解放率が最 大になるため、この位置においてはく離の照査 を行う.しかし、CFRP の端部を揃えて積層する 際には任意の位置においてエネルギー解放率に よるはく離の照査を行わなければならない.

付録 簡易式と近似解によるエネルギー解放率

これまでに、はく離が微小面積だけ発生した際の CFRP 接着鋼板の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導出した簡易式と呼ばれる 式が提案されている^{10,18)}. 鋼板の両面にそれぞれ1枚の CFRP が接着された一軸引張を受けるモデルに対して簡 易式は次式で与えられている.

$$G_{T} = \frac{P^{2}}{4b_{c}E_{s}} \left(\frac{1}{A_{s}} - \frac{1}{A_{v}}\right) = \frac{P^{2}}{4b_{c}E_{s}A_{s}} \left(1 - \xi_{0}\right) \quad (\text{fr} \ 1)$$

ここに,

$$\xi_0 = \frac{1}{1 + 2F E_c t_c / (E_s t_s)}$$

P:作用軸力($P = \sigma_{sy}A_{s}$)

A: :鋼板の断面積

A, : 鋼と CFRP の鋼換算合成断面積

式(付 1)は鋼と CFRP の伸び剛性から全エネルギー解放 率を算出することができ,文献 7)の指針にも記載されて いる.ただし,CFRP の接着長が十分に確保されている ことが前提となる.

式(付1)を本研究のように CFRP に段差を設けて積層す る場合に拡張すると接着剤i におけるエネルギー解放率 は次式で表すことができる.

$$G_{Ti} = \frac{P^2}{4b_c E_s b_s t_{vi}} \left(1 - \xi_{i,i+X-1}\right)$$
 (\pounds 2)

ただし, X = 1 の場合にも適用できるものとして, $\xi_{ii} = \xi_i$ とする.

鋼板の両面に鋼板の両面にそれぞれ1枚のCFRPが接着された一軸引張を受けるCFRP接着鋼板における近似 解のせん断応力を用いて式(2)のモードIIのエネルギー解 放率を算出すると式(付1)の簡易式と完全に一致するこ とが知られている¹⁸.式(7)や式(10)のせん断応力の近似 解を式(2)に代入し,整理すると式(付2)と完全に一致す ることが確認できる.したがって、CFRP の端部に段差を設けて積層する CFRP 接着鋼板においても簡易式によりエネルギー解放率の算出が可能である.また、はく離に対する設計引張耐力 N_{ud} は、 G_{Ti} が最大となる $i \ge i_d$ として、次式で与えられる.

$$N_{ud} = \sqrt{4b_c E_s b_s t_{vi_d} G_{ud} / (1 - \xi_{i_d, i_d + X - 1})} \qquad (\text{ff 3})$$

ここに,

 G_{ud}
 : 軸力を受ける場合の CFRP のはく離強度に

 対するエネルギー解放率

参考文献

- 玉井宏章,高松隆夫,服部明生,灰谷徳治,櫻庭 誠:炭素繊維プレートによる化学プラント架構小ば り補剛の施工例,鋼構造年次論文報告集,第13巻, pp.545-552,2005.
- 杉浦江,小林朗,大垣賀津雄,稲葉尚文,富田芳男, 長井正嗣:鋼部材不足損傷部の補修における炭素繊 維シート接着方法に関する解析的研究,土木学会論 文集 A, Vol.64, No.4, pp.806-813, 2008.
- 杉浦江、小林朗、稲葉尚文、本間淳史、大垣賀津雄、 長井正嗣:鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シートによ る補修技術に関する設計・施工法の提案、土木学会 論文集 F、Vol.65、No.1、pp.106-118、2009.
- 岩尾省吾,今村壮宏,山口弘信,荒巻真二,小林朗, 大垣賀津雄:CFRP シートによるけた端部の腐食補 修に関する実橋載荷試験,土木学会第65回年次学術 講演会公演概要集,CS2-004, pp.7-8, 2010.
- 5) 高速道路総合技術研究所:炭素繊維シートによる鋼 構造物の補修・補強工法設計・施工マニュアル, 2013.
- 5) 土木学会複合構造委員会:FRP 部材の接合および鋼 と CFRP の接着接合に関する先端技術、複合構造レ ポート 09, 2013.
- 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.
- 石川敏之,大倉一郎,小村啓太:CFRP 板端部に段 差を設けることによるはく離荷重上昇の理論解析, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.362-367, 2009.
- 石川敏之:端部に段差を有する CFRP 板が接着され た切断鋼板の理論解析,土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.717-722, 2010.
- 石川敏之,大倉一郎:複数の段差を有する CFRP 板 接着鋼板の各 CFRP 板の必要接着長さと最適剛性, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.368-377, 2010.
- 宮下剛,長井正嗣:一軸引張りを受ける多層の CFRP が積層された鋼板の応力解析,土木学会論文 集A, Vol.66, No.2, pp.378-392, 2010.
- 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.
- 13) 手塚渉太,林帆,孫継光,中村一史,前田研一,福田欣弘:鋼構造の補修・補強に用いる CFRP 板の端部処理による接着強度の向上,土木学会第67回年次学術講演会, pp.33-34, 2012.
- 14) 秀熊佑哉,石川敏之: CFRP 接着鋼板において定着 長不足が補強効果に与える影響,土木学会論文集A1,

Vol.75, No.5, pp.II_19-II_26, 2019.

- 15) 水谷壮志,石川敏之,秀熊佑哉:定着長が不足した CFRP 接着鋼板のエネルギー解放率,第65回理論応 用力学講演・第22回土木学会応用力学シンポジウム 講演論文集,pp.25-26,2019.
- 16) Bocciarelli, M., Colombi, P., Fava, G. and Poggi, C.: Prediction of debonding strength of tensile steel/CFRP joints using fracture mechanics and stress based criteria, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.76, pp.299-313, 2009.
- 17) 清水優,大倉慎也,石川敏之,服部篤史,河野広 隆:鋼部材に接着された当て板のはく離によるエネ ルギー解放率,土木学会論文集 A2(応用力学),

Vol.69, No.2, pp.I_701-I_710, 2013.

- 18) 清水優,石川敏之,服部篤史,河野広隆:軸力を受ける当て板接着鋼板のはく離によるエネルギー解放率,土木学会論文集 A2, Vol.70, No.2, pp.I_899-I_908, 2014.
- 19) 水谷壮志,石川敏之,北根安雄:マトリックス樹脂の影響を考慮した CFRP 接着鋼板のエネルギー解放率と定着長,構造工学論文集, Vol.65A, pp.745-754, 2019.

(Received August 30, 2019)

ENERGY RELEASE RATE OF MULTI STEPPED CFRP BONDED STEEL PLATE

Morimune MIZUTAN, Toshiyuki ISHIKAWA, Takeshi MIYASHITA and Yuya HIDEKUMA

In Japan, the repair and strengthening method by bonding carbon fiber reinforced plastic (CFRP) of lightweight and high strength to corrosion damaged steel member has begun to be applied. In 2018, JSCE issued "Guidelines for Repair and Strengthening of Structures using Externally Bonded FRP", and the energy release rate was employed to the checking of debonding of CFRP. On the other hand, in CFRP bonding repair, CFRP step bonding was proposed for reduction of stress concentration in the adhesive at the end of CFRP. However, the calculation procedure of the energy release rate when the CFRP step length is not enough to the required length is not proposed. In this paper, it was clarified that the calculation method of the energy release rate of any step condition of CFRP bonded steel plate under uni-axial loading.