

鋼部材に接着された当て板のはく離に対するモード別エネルギー解放率の提案

京都大学 学生員 ○清水 優 大倉 慎也
正会員 石川 敏之 服部 篤史 河野 広隆

1. はじめに

近年、腐食や設計荷重の変更によって耐荷力の不足した鋼部材に対して、炭素繊維補強樹脂 (CFRP) 板や鋼板等の当て板を接着することによる補修・補強が行われ始めている¹⁾。この当て板接着補強は、鋼母材にボルト孔を設ける必要がないため、簡易に施工することができる。一方、断面急変部である当て板接着端部には、接着剤内に高い応力が生じるため、作用する荷重によっては当て板がはく離する可能性があり、その照査法の確立が課題として挙げられる。当て板のはく離を照査する方法として、接着端部の接着剤に生じる主応力を用いた評価や、鋼部材と当て板の剛性から簡易に算出できるエネルギー解放率を用いた評価方法が提案されている²⁾。しかし、当て板のはく離に対してこれまでに与えられているエネルギー解放率は、図-1に示すような、モード I (開口はく離) とモード II (面内せん断はく離) に分けられていないため、鋼桁圧縮フランジに接着された当て板のように、モード I のエネルギー解放率が 0 となる場合に対して適用することができないと考えられる。そこで本研究では、当て板のはく離に対するモード I, II のエネルギー解放率の算定方法を提案し、FEM 解析と比較して、その妥当性を明らかにする。

2. 当て板のはく離に対するモード別エネルギー解放率

鋼部材に接着された当て板のはく離に対する、モード I, II のエネルギー解放率 G_I, G_{II} は、接着剤中のクラックが単位面積だけ増加するときの各モードのひずみエネルギー $\delta U_I, \delta U_{II}$ の変化として次式で与えられる。

$$G_I = \lim_{\delta_{cr} \rightarrow 0} \frac{\delta U_I}{b \delta_{cr}} = \begin{cases} \frac{h}{2E_e} \sigma_{ycr}^2 & (\sigma_{ycr} \geq 0) \\ 0 & (\sigma_{ycr} < 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$G_{II} = \lim_{\delta_{cr} \rightarrow 0} \frac{\delta U_{II}}{b \delta_{cr}} = \frac{h}{2G_e} \tau_{cr}^2 \quad (2)$$

ここに、 δ_{cr} は微小クラックの長さ、 E_e および G_e はそれぞれ接着剤のヤング率およびせん断弾性係数、 h は接着剤の厚さ、 b は当て板の幅 (接着幅)、 σ_{ycr} および τ_{cr} はそれぞれクラック先端の接着剤に生じる垂直応力およびせん断

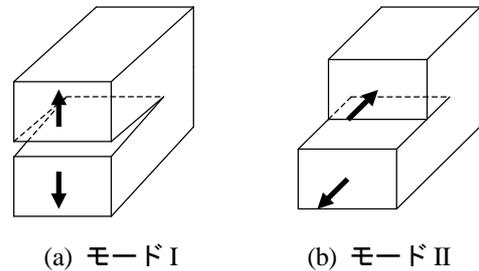


図-1 当て板のはく離のモード

応力である。

式(1), (2)の σ_{ycr} と τ_{cr} に対して、鋭いクラックの先端では応力特異点となるが、本研究では、これまでに提案されている当て板端の接着剤に生じる垂直応力とせん断応力の固有値解析解³⁾を σ_{ycr} と τ_{cr} に与えることによって、モード I およびモード II のエネルギー解放率を算出する。

鋼部材に接着された当て板のはく離に対するエネルギー解放率 G は、モード I, II のエネルギー解放率の和として次式で与えられる。

$$G = G_I + G_{II} \quad (3)$$

3. エネルギー解放率の計算値と FEM 解析結果との比較

3.1 鋼部材の引張側に接着された当て板のはく離によるエネルギー解放率

図-2に示すように、先端に集中荷重を受ける片持ち鋼部材の曲げの引張側に当て板が接着され ($P = 2 \text{ kN}$)、クラックが固定端側の当て板端部から生じる場合に対して、クラック先端のエネルギー解放率 G とクラック長さ l_{cr} の関係を図-3に示す。図-3の破線は、文献2)で与えられている当て板のはく離に対するエネルギー解放率であり、鋼部材と当て板との完全合成部材に対して、鋼部材および当て板のひずみエネルギーの変化から求めたエネルギー解放率である。

$$G = \frac{M_{cr}^2}{2bE_s} \left(\frac{1}{I_s} - \frac{1}{I_v} \right) \quad (4)$$

ここに、 I_s は鋼部材の断面二次モーメント、 I_v は鋼部材と当て板の合成部材の断面二次モーメント、 E_s は鋼部材のヤング率、 M_{cr} はクラック先端位置に作用する曲げモーメント (図-2参照) である。

また、汎用有限解析ソフト MARC⁴⁾を用いて、2次元弾性

キーワード 当て板, 接着, 鋼部材, エネルギー解放率

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C クラスター 構造物マネジメント工学講座 TEL 075-383-3321

線形解析を行って得られたエネルギー解放率もプロットしている。FEM 解析では 4 節点平面応力要素を使用し、鋼部材と当て板のヤング率およびせん断弾性係数は 200GPa および 76.9GPa、接着剤のヤング率およびせん断弾性係数は 2GPa および 0.74GPa とした。

図-3 から、FEM 解析の結果は、式(4)よりも式(3)に近いことがわかる。また、当て板が鋼部材の引張側に接着されている場合には、クラック長さ l_{cr} が大きくなるとクラック先端のエネルギー解放率は小さくなっている。これは、クラック長さが大きくなると、クラック先端の曲げモーメント M_{cr} が小さくなるためである。

3. 2 鋼部材の圧縮側に接着された当て板のはく離によるエネルギー解放率

図-2 において、鋼部材の曲げの圧縮側に当て板を接着した場合 ($P = -2 \text{ kN}$) の、クラック先端のエネルギー解放率 G とクラック長さ l_{cr} の関係を図-4 に示す。当て板を鋼部材の圧縮側に接着する場合には、クラックが鉛直方向に開口しないため、クラック界面の接触判定を考慮した FEM 解析では、モード I のエネルギー解放率がほぼ 0 となり、図-3 で示した当て板を鋼部材の引張側に接着した場合よりもエネルギー解放率が小さくなっている。また、クラック先端に生じる垂直応力 σ_{ycr} が負の値となるため、式(1)で示すモード I のエネルギー解放率 G_I は 0 となる。そのため、図-4 の式(3)は $G = G_{II}$ となっており、その値は FEM 解とほぼ一致している。一方、式(4)から得られるエネルギー解放率は、当て板が鋼部材の圧縮側および引張側に接着されている場合で同じ値になるので、FEM 解よりも大きな値となる。

4. まとめ

鋼部材に接着された当て板のはく離に対して、これまでに与えられている当て板端の接着剤に生じる垂直応力とせん断応力を用いた、モード I (開口のはく離) およびモード II (面内せん断のはく離) のエネルギー解放率の算定方法を提案した。FEM 解析より得られたエネルギー解放率は、提案したモード I, II のエネルギー解放率の和に近い値となった。特に、鋼部材の曲げの圧縮側に接着された当て板のはく離に対して、これまでに与えられているエネルギー解放率の簡易算定式は FEM 解析よりも大きい値となるが、提案したモード II のエネルギー解放率は FEM 解析結果とほぼ一致した。

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 24656269 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を示します。

参考文献

1) 複合構造委員会 FRP と鋼の接合方法に関する調査研究

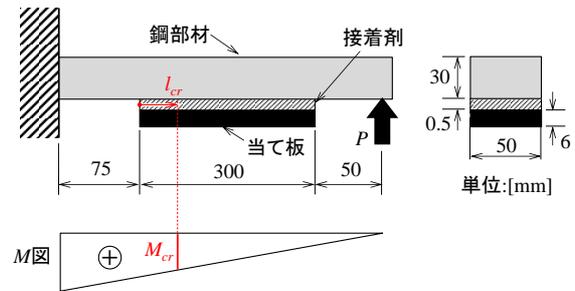


図-2 当て板が接着された片持ち鋼部材

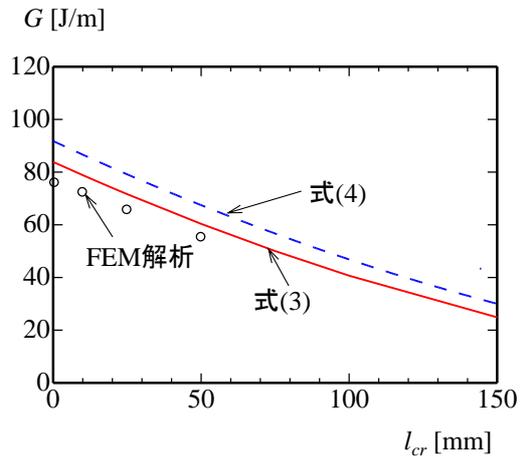


図-3 鋼部材引張側に接着された当て板のはく離に対する G と l_{cr} の関係

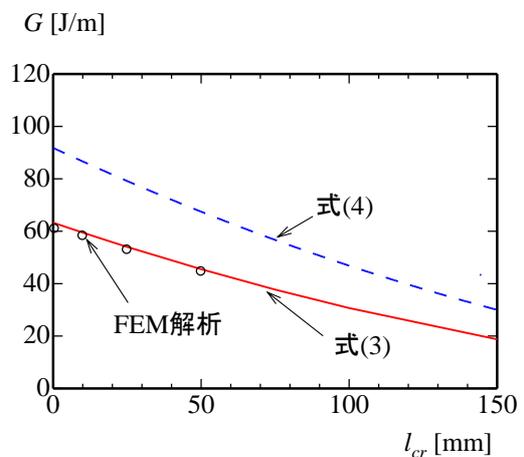


図-4 鋼部材圧縮側に接着された当て板のはく離に対する G と l_{cr} の関係

小委員会：FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端，複合構造レポート 05，土木学会，2012。

- 2) Cadei, J.M.C., Strafford, T.J., Hollaway, L.C. and Duckett, W.G., Strengthening Metallic Structures Using Externally Bonded Fibre-Reinforced Polymers, CIRIA, C595, 2004.
- 3) 宮下 剛, 石川敏之: 多層の CFRP 板が積層された曲げを受ける鋼部材の応力解析, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.1, pp.26-39, 2013.
- 4) MSC Software, MARC2011 User's Guide, MSC Software, 2011.