

FRP部材におけるボルト支圧接合部の耐力評価解析

Numerical evaluation on strength of bearing type bolted connections for FRP structural members

北根安雄¹⁾, Mohammad Abdul Kader²⁾, 伊藤義人³⁾

Yasuo Kitane, Mohammad Abdul Kader, and Yoshito Itoh

1) Ph.D. 名古屋大学大学院 工学研究科 准教授 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町, E-mail: ykitane@civil.nagoya-u.ac.jp)

2) MSc 名古屋大学大学院 工学研究科 博士課程後期課程2年 (〒464-8603名古屋市千種区不老町, E-mail:

kader.mohammad.abdul@e.mbox.nagoya-u.ac.jp)

3) 工博 名古屋大学大学院 工学研究科 教授 (〒464-8603名古屋市千種区不老町, E-mail: itoh@civil.nagoya-u.ac.jp)

Progressive damage analysis is performed to evaluate the ultimate strength and failure model of bearing type bolted connections of FRP members. A set of failure criteria are defined to predict failure modes of FRP composite. The constitutive model with failure criteria is implemented in a user-subroutine, UMAT of a general purpose finite element package, ABAQUS. The modeling procedure is validated with experimental results in available literature.

Key Words : FRP composites, bearing type bolted connection, ultimate strength, failure mode

1. はじめに

FRP (Fiber-Reinforced Polymer) は、軽量であることや耐食性が高いことなど、従来の建設材料と比較して多数の優れた材料特性を有している。近年、社会基盤施設の老朽化対策に社会的関心が急激に高まっている建設産業においては、それらの優れた特徴を有するFRPは非常に魅力的な材料であり、FRP部材を利用した構造物の建設だけでなく、FRP材料を既存構造物の補修・補強に利用する事例が増加している。しかし、今後社会基盤施設の主要構造部材としてFRP部材が普及していくためには、異方性材料であるFRPの接合部の耐力評価が精度良く行われ、接合部の設計方法が確立される必要がある。

本研究では、FRP部材どうしのボルト支圧接合部に着目し、接合部耐力を数値解析的に評価することを目的とする。FRPの各層における方向による材料強度の違いを考慮し、各層の損傷をモデル化した材料構成則を用いた非線形解析により、接合部耐力だけでなく、接合部破壊形式の評価を行うことを目的とする。

2. 損傷進展解析

(1) 破壊基準

本研究では、Changら[1]の破壊基準を修正したものを使用している。破壊基準では、主に、強化繊維の破壊とマトリックス樹脂の破壊を取り扱っている。

a) 強化繊維の破壊基準

以下の破壊インデックスが1.0に達した時、繊維は破壊に至る。

$\hat{\sigma}_{11} \geq 0$ のとき :

$$F_{ft} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X_T} \right)^2 + \frac{\frac{\hat{\tau}_{12}^2}{2G_{12}^2} + \frac{3}{4}\alpha\hat{\tau}_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}^2} + \frac{3}{4}\alpha S_{12}^4} + \frac{\frac{\hat{\tau}_{13}^2}{2G_{13}^2} + \frac{3}{4}\alpha\hat{\tau}_{13}^4}{\frac{S_{13}^2}{2G_{13}^2} + \frac{3}{4}\alpha S_{13}^4} \quad (1)$$

$\hat{\sigma}_{11} < 0$ のとき :

$$F_{fc} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X_C} \right)^2 + \frac{\frac{\hat{\tau}_{12}^2}{2G_{12}^2} + \frac{3}{4}\alpha\hat{\tau}_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}^2} + \frac{3}{4}\alpha S_{12}^4} + \frac{\frac{\hat{\tau}_{13}^2}{2G_{13}^2} + \frac{3}{4}\alpha\hat{\tau}_{13}^4}{\frac{S_{13}^2}{2G_{13}^2} + \frac{3}{4}\alpha S_{13}^4} \quad (2)$$

b) マトリックス樹脂の破壊基準

以下の破壊インデックスが1.0に達した時、マトリックス樹脂は破壊に至る。

$$F_m = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y} \right)^2 - \frac{\hat{\sigma}_{33}\hat{\sigma}_{22}}{YZ} + \left(\frac{\hat{\sigma}_{33}}{Z} \right)^2 + \frac{\frac{\hat{\tau}_{12}^2}{2G_{12}^2} + \frac{3}{4}\alpha\hat{\tau}_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}^2} + \frac{3}{4}\alpha S_{12}^4} + \frac{\frac{\hat{\tau}_{13}^2}{2G_{13}^2} + \frac{3}{4}\alpha\hat{\tau}_{13}^4}{\frac{S_{13}^2}{2G_{13}^2} + \frac{3}{4}\alpha S_{13}^4} + \frac{\frac{\hat{\tau}_{23}^2}{2G_{23}^2} + \frac{3}{4}\alpha\hat{\tau}_{23}^4}{\frac{S_{23}^2}{2G_{23}^2} + \frac{3}{4}\alpha S_{23}^4} \quad (3)$$

ここで

$$Y = \begin{cases} Y_T & \text{for } \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \\ Y_C & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Z = \begin{cases} Z_T & \text{for } \hat{\sigma}_{33} \geq 0 \\ Z_C & \text{otherwise} \end{cases}$$

上記の破壊インデックスで、 $\hat{\sigma}_{ij}$ は相当応力成分、 X_T と X_C は繊維方向の引張および圧縮強度、 Y_T と Y_C は繊維直角方向の引張および圧縮強度、 Z_T と Z_C は板厚方向の引張および圧縮強度、 S_{ij} は ij 面のせん断強度である。また、 α は実験より得られる定数で、せん断応力とせん断ひずみの非線形関係を表すパラメータである。

(2) 損傷モデルと構成則

上記の破壊基準に達すると、次に示す損傷パラメータ d_i に応じて材料の剛性を徐々に低減させる。 d_i の i は、破壊モードを表している。応力とひずみの関係は以下のよう

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{MC}_0 \boldsymbol{\sigma} \quad (4)$$

ここで、応力ベクトル $\sigma^T = [\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}]$ 、ひずみベクトル $\varepsilon^T = [\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{23}]$ であり、 \mathbf{C}_0 は初期コンプライアンス行列、 \mathbf{M} は、コンプライアンス行列に対する損傷係数行列である。 \mathbf{M} は以下のように表される。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_f)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_m)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 d_f と d_m は、繊維の損傷パラメータとマトリックス樹脂の損傷パラメータを表しており、式(5)からもわかるように、本研究では、せん断破壊をマトリックスの損傷に関連付けている。

式(1)~(3)で使用されている相当応力 $\hat{\sigma}$ は \mathbf{M} を用いて以下のように表される。

$$\hat{\sigma} = \mathbf{M}\sigma \quad (6)$$

損傷進展モデルは、Camanhoら[2]のモデルを一般化したものを使用した。 d_i は、等価ひずみによって次のように定義される。

$$d_i = \frac{\varepsilon_{i,eq}^F (\varepsilon_{i,eq}^{\max} - \varepsilon_{i,eq}^0)}{\varepsilon_{i,eq}^{\max} (\varepsilon_{i,eq}^F - \varepsilon_{i,eq}^0)} \quad (7)$$

ここで

$$\varepsilon_{i,eq}^0 \leq \varepsilon_{i,eq}^{\max} \leq \varepsilon_{i,eq}^F \quad (8)$$

$$\varepsilon_{i,eq}^{\max} = \max(\varepsilon_{i,eq}^{\max}, \varepsilon_{i,eq}) \quad (9)$$

i は、損傷のモードを表し、繊維の引張破壊、繊維の圧縮破壊、マトリックス樹脂の破壊の3種類がある。等価ひずみとそれに対応する等価応力は以下のように定義する。強化繊維の引張破壊または圧縮破壊に対する等価ひずみ：

$$\varepsilon_{ft,eq} \text{ or } \varepsilon_{fc,eq} = \sqrt{\varepsilon_{11}^2 + \gamma_{12}^2 + \gamma_{13}^2} \quad (10)$$

強化繊維の引張破壊に対する等価応力：

$$\sigma_{ft,eq} = \frac{\sigma_{11}\varepsilon_{11} + \tau_{12}\gamma_{12} + \tau_{13}\gamma_{13}}{\varepsilon_{ft,eq}} \quad (11)$$

強化繊維の圧縮破壊に対する等価応力：

$$\sigma_{fc,eq} = \frac{\sigma_{11}\varepsilon_{11} + \tau_{12}\gamma_{12} + \tau_{13}\gamma_{13}}{\varepsilon_{fc,eq}} \quad (12)$$

マトリックス樹脂の破壊に対する等価ひずみ：

$$\varepsilon_{m,eq} = \sqrt{\varepsilon_{22}^2 + \varepsilon_{33}^2 + \gamma_{12}^2 + \gamma_{13}^2 + \gamma_{23}^2} \quad (13)$$

マトリックス樹脂の破壊に対する等価応力：

$$\sigma_{m,eq} = \frac{\sigma_{22}\varepsilon_{22} + \sigma_{33}\varepsilon_{33} + \tau_{12}\gamma_{12} + \tau_{13}\gamma_{13} + \tau_{23}\gamma_{23}}{\varepsilon_{m,eq}} \quad (14)$$

また、 $\varepsilon_{i,eq}^0$ は初期等価ひずみであり、破壊モード i の破壊インデックスが1.0に達した時のひずみである。 $\varepsilon_{i,eq}^F$ は、損傷が100%の時つまり $d_i = 1$ の時のひずみである。本研究では、 $d_i = 0.98$ までは $\varepsilon_{i,eq}^F$ を $10^{10}\varepsilon_{i,eq}^0/L_c$ と非常に大きな値に設定し、損傷後の等価応力 $\sigma_{i,eq}$ を損傷開始時の等価応力 $\sigma_{i,eq}^0$ と等しくしている。ここで、 L_c は要素の特性長である。等価応力-等価ひずみ関係を図-1に示す。

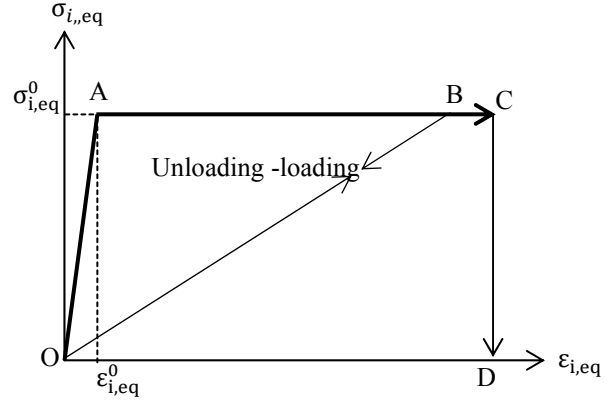


図-1 等価応力-等価ひずみ関係

破壊インデックスが1.0に達する前も後も材料は弾性と仮定している。等価応力-等価ひずみ関係は点Aまでは線形弾性である。点Aで破壊インデックスが1.0に達し、そのまま荷重が続けば、 d_i が0.98に達する点Cまで等価応力は一定となる。点C以降も荷重が続けば、材料は完全に損傷したものとして、応力を低減し、点Dに至る。点Bから除荷が起きた場合は、原点に向かい線形的に除荷が起こる。また、再荷重の場合は、点Bまでは線形弾性挙動を示す。

(3) 解析ソフトウェア

解析には、汎用有限要素解析パッケージのABAQUSを使用し、ABAQUSが提供するユーザーサブルーチンUMATを用いて、上記の損傷進展解析を行った。

3. モデルの検証

(1) 解析モデル

2章で記述した損傷モデルと構成則の妥当性を検証するために、Khashabaら[3]によって行われたGFRPのピン接合の荷重試験の有限要素解析による再現を行う。接合部はダブルラップ形式の接合で、母板はGFRP、添接板は鋼板となっている。GFRP1層の層厚は、0.4mmで、次の4種類の積層構成が使用されている： $[0^0/90^0]_{2s}$ 、 $[15^0/-75^0]_{2s}$ 、 $[30^0/-60^0]_{2s}$ 、 $[45^0/-45^0]_{2s}$ 。GFRP母板の寸法を図-2に示す。

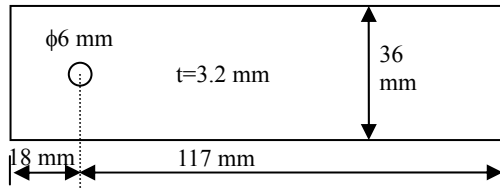


図-2 GFRP 母板の寸法

接合部の3次元モデルをABAQUSで作成し、3次元ソリッド要素により、GFRP板と鋼板およびピンをモデル化した。鋼板とGFRP板との接触面では、摩擦を考慮せず、ピンとピン孔との接触面では、摩擦係数0.1を考慮した。

文献[3]のGFRPの1方向材の材料特性は表-1に示す。解析に必要なその他の材料特性は次のように仮定した： $E_{33} = E_{22}$, $G_{13} = G_{12}$, $Z_T = Y_T$, $Z_C = Y_C$, $S_{13} = S_{12}$, $G_{23} \approx G_{12} \approx G_{13}$, $\nu_{23} \approx \nu_{12} \approx \nu_{13}$ 。鋼については、ヤング率 $E = 200$ GPa, ポアソン比 $\nu = 0.3$ とした。

解析は、GFRPの端部に一様変位を与え、変位制御で行った。

表-1 GFRP の材料特性[3]

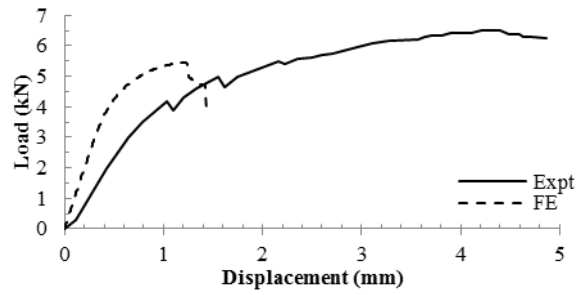
E_{11} (MPa)	E_{22} (MPa)	ν_{12}	G_{12} (MPa)	
32100	5740	0.33	1240	
X_T (MPa)	X_C (MPa)	Y_T (MPa)	Y_C (MPa)	S_{12} (MPa)
722	230	14	34	54.6

(2) 解析結果

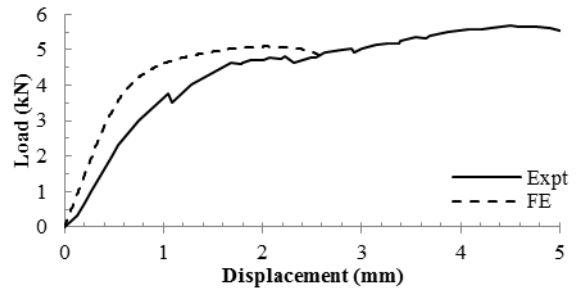
図-3に異なる積層構成をもつGFRP板を用いた場合の、解析から得られたピン接合部の荷重-変位関係を示す。図中の実線が文献[3]の実験結果で、破線が本研究の解析結果である。図-3(d)に示す積層構成 $[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$ については、初期剛性と最大耐力ともに、解析結果は実験結果を非常によく再現している。最大耐力に関しては、約1%の誤差である。この積層構成は、実験では支圧破壊が破壊モードであった。他の積層構成 $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$, $[15^\circ/-75^\circ]_{2s}$, $[30^\circ/-60^\circ]_{2s}$ については、最大耐力は比較的良好に再現出来ているが、初期剛性が大きく異なっている。最大耐力に関しての最大誤差は、約16%であった。これらの試験体については、実験ではせん断破壊が破壊モードであった。初期剛性の違いについては、実験での初期のクリアランスなどによる影響も考えられるため、今後実験などによる検証が必要である。

解析における破壊モードを検証するため、図-4に積層構成 $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ と $[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$ のそれぞれの層における破壊インデックスが1.0に達した要素を赤で示す。それぞれの図の左端がGFRP板の縁端であり、右端はまだ板が続いているが図上では省略されている。したがって、孔の左側にピンが接触している状態となる。

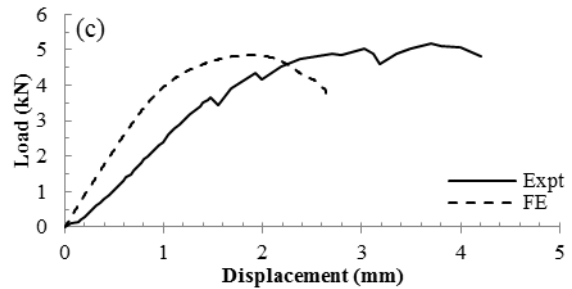
$[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ では、式(3)で示すマトリックス樹脂の破壊基



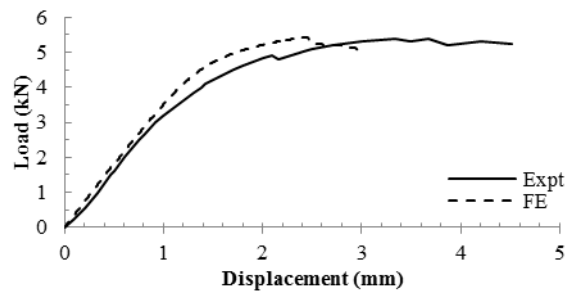
(a) $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$



(b) $[15^\circ/-75^\circ]_{2s}$



(c) $[30^\circ/-60^\circ]_{2s}$



(d) $[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$

図-3 荷重-変位関係

準 F_m が1.0に達している要素が多くなっており、また、 F_m が1.0に達した要素が、孔から縁端まで伸びている。したがって、文献[3]の実験で得られた通り、せん断破壊のモードを明らかに示していることがわかる。また、 $[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$ では強化繊維の破壊インデックス、マトリックス樹脂の破壊インデックスともに、1.0に達した要素が孔から縁端まで伸びることはなく、孔のピンが接触している側で多くの要素が1.0に達していることから、支圧破壊型のモードであることがわかる。また、マトリックス樹脂の破壊インデックスは、荷重と垂直方向にも伸び

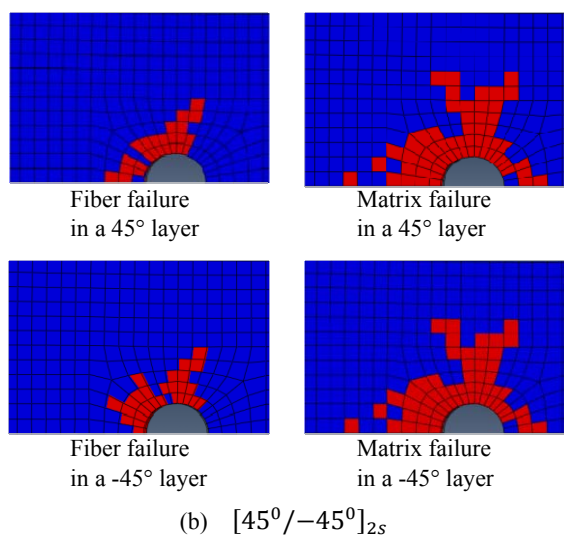
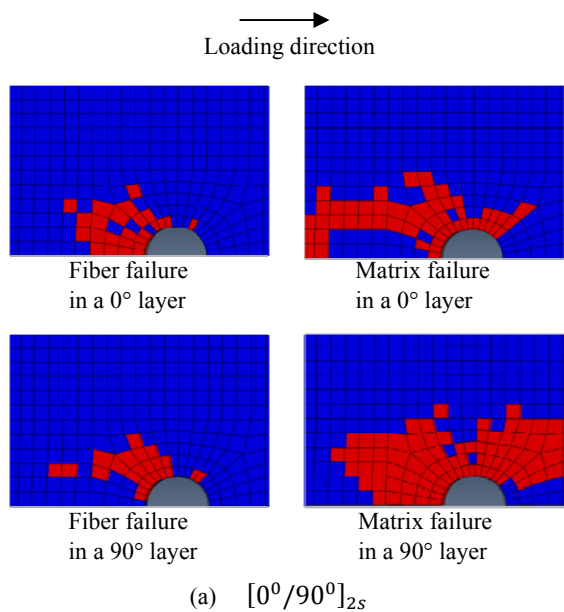


図-4 破壊インデックスが1以上の要素

ており、これは若干であるが引張破壊の様相も示していることがわかる。

以上のことから、本解析手法により、接合部の破壊モードも明らかにできることがわかった。

4. 結論

本研究では、FRP部材どうしのボルト支圧接合部に着目し、接合部耐力を数値解析的に評価することを目的とし、FRP部材接合部の損傷進展解析を行うための破壊判定基準や構成則を汎用解析パッケージABAQUSのユーザーサブルーチンを利用して導入した。

導入した手法は、接合部の最大耐力を予測することが可能であり、接合部の破壊モードも推定することができることが明らかとなった。

今後、実験を行うことにより、多列ボルト接合の場合においても、最大耐力や破壊モードを予測できるか確認していく予定である。

参考文献

- [1] Chang, F.K. and Lessard, L.B.: Damage tolerance of laminated composites containing an open hole and subjected to compressive loadings: part I – analysis, *Journal of Composite Materials*, Vol. 25, No. 1, pp. 2–43, 1995.
- [2] Camanho P.P., Da'vila C.G.: Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials, *NASA/TM-2002-211737*, 37p. 2002.
- [3] Khashaba, U.A., Sebaey, T.A., Mahmoud, F.F., Selmy, A.I., and Hamouda, R.M.: Experimental and numerical analysis of pinned-joints composite laminates: Effects of stacking sequences, *Journal of Composite Materials*, Vol. 47, No. 27, pp. 3353–3366, 2013..