FRP 材料の支圧破壊を考慮した損傷進展解析に関する研究

名古屋大学大学院　学生会員　○寺口　大輝
名古屋大学大学院　学生会員　北村　勇斗
京都大学大学院　正会員　北根　安雄

１．研究目的

FRP 構造物の有限要素解析では，FRP を異方性を有する線形弾性材料として扱うことが多いが，FRP 構造物が終局強度に至るまでには材料の損傷に伴う非弾性挙動を示すため，損傷に伴う非弾性挙動を再現できる損傷進展解析が近年注目されている [1)~2)]．著者らは FRP 部材のボルト接合部に損傷進展解析を適用しているが，ボルトの締め付けが繊維座屈や層間剥離を抑制することで生じる支圧耐力の増加が考慮できていないため，終局限界状態までを正確に再現できない場合があることを示している [2)]．そこで本研究では，ボルトの締め付けによる支圧耐力の増加を考慮することで，終局限界状態までを再現できる損傷進展材料モデルを提案する．

２．損傷進展材料モデル

破壊基準は，繊維方向の破壊基準とマトリックス樹脂の破壊基準に分けられる．破壊基準が 1.0 に達した時，損傷が開始したと判定される．

a)　繊維方向の破壊基準

$\hat{\sigma}_{11} < 0$　のとき:

$$F_f = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{-X_C + \alpha\langle\hat{\sigma}_{33}\rangle}\right)^2 \tag{1}$$

$\hat{\sigma}_{11} \geq 0$　のとき:

$$F_f = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X_T}\right)^2 \tag{2}$$

b)　マトリックス樹脂の破壊基準

$\hat{\sigma}_{22} + \hat{\sigma}_{33} < 0$のとき：

$$F_m = \frac{1}{(YZ)^2}(Z\hat{\sigma}_{22} + Y\hat{\sigma}_{33})^2 + \frac{1}{(S_{23})^2}\left(\hat{\sigma}_{23}{}^2 - \hat{\sigma}_{22}\hat{\sigma}_{33}\right) + \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\hat{\sigma}_{13}}{S_{13}}\right)^2 \tag{3}$$

$\hat{\sigma}_{22} + \hat{\sigma}_{33} \geq 0$のとき：

$$F_m = \frac{1}{Y}\left[\left(\frac{Y}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right]\hat{\sigma}_{22} + \frac{1}{Z}\left[\left(\frac{Z}{2R_{23}}\right)^2 - 1\right]\hat{\sigma}_{33} + \frac{1}{4(S_{23})^2}(\hat{\sigma}_{22} + \hat{\sigma}_{33})^2 + \frac{1}{(S_{23})^2}\left(\hat{\sigma}_{23}{}^2 - \hat{\sigma}_{22}\hat{\sigma}_{33}\right) + \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\hat{\sigma}_{13}}{S_{13}}\right)^2 \tag{4}$$

ここで,

$$\langle\hat{\sigma}_{33}\rangle = \frac{\hat{\sigma}_{33} - |\hat{\sigma}_{33}|}{2} \tag{5}$$

$$Y = \begin{cases} Y_C \ for\ \hat{\sigma}_{22} < 0 \\ Y_T \ for\ \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \end{cases},\ Z = \begin{cases} Z_C \ for\ \hat{\sigma}_{33} < 0 \\ Z_T \ for\ \hat{\sigma}_{33} \geq 0 \end{cases} \tag{6}$$

また，$\hat{\sigma}_{ij}$は有効応力，X_CとX_T，Y_CとY_T，Z_CとZ_Tは繊維方向，繊維直角方向及び板厚方向の引張及び圧縮強度，S_{ij}はij面のせん断強度である．定数αはα =1.5 とした．

破壊基準を満たすと，損傷指標 d_I に応じて材料の剛性を低下させる．構成則は以下のように示される．

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{M}\boldsymbol{C_0}\boldsymbol{\sigma} \tag{7}$$

ここで，$\boldsymbol{\varepsilon}$はひずみベクトル，$\boldsymbol{\sigma}$は応力ベクトル，$\boldsymbol{C_0}$は初期のコンプライアンス行列，$\boldsymbol{M}$は損傷係数行列である．$\boldsymbol{M}$は以下のように定義される．

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-d_f} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-d_m} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1-d_m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{1-d_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{1-d_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{1-d_s} \end{bmatrix} \tag{8}$$

ここで，d_f，d_m，d_sは繊維方向，マトリックス樹脂，せん断の損傷指標である．また，d_sはd_f，d_mの最大値であり，有効応力は $\hat{\sigma}_{ij} = M_{ij}\sigma_{ij}$で表される．

d_Iは等価ひずみを用いて以下のように定義される．

$$d_I = \frac{\varepsilon_{I.eq}^F\left(\varepsilon_{I.eq}^{max} - \varepsilon_{I.eq}^0\right)}{\varepsilon_{I.eq}^{max}\left(\varepsilon_{I.eq}^F - \varepsilon_{I.eq}^0\right)} \tag{9}$$

$$\varepsilon_{I.eq}^0 \leq \varepsilon_{I.eq}^{max} \leq \varepsilon_{I.eq}^F : \varepsilon_{I.eq}^{max} = \max(\varepsilon_{I.eq}^{max}, \varepsilon_{I,eq}) \tag{10}$$

等価ひずみは以下のように定義する．

繊維方向の等価ひずみ$\varepsilon_{f,eq}$：

$$\sqrt{(\varepsilon_{11})^2 + (\varepsilon_{12})^2 + (\gamma_{13})^2} \tag{11}$$

マトリックス樹脂の等価ひずみ$\varepsilon_{m,eq}$：

$$\sqrt{(\varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{33})^2 + (\gamma_{12})^2 + (\gamma_{13})^2 + (\gamma_{23})^2} \tag{12}$$

また，$\varepsilon_{I.eq}^0$は破壊モードIの破壊基準が 1.0 に達したときの等価ひずみ，$\varepsilon_{I.eq}^F$はd_I =1.0 のときの等価ひずみである．$\varepsilon_{I.eq}^F$は式(1)を満たしとき$\varepsilon_{f.eq}^F$ =0.3，式(2)を満たしとき$\varepsilon_{f.eq}^F$ =0.2，$\varepsilon_{m.eq}^F$は 1.0 と定めている．

また，式(1)を満たした後，$\varepsilon_{f.eq}^{max} = \beta$ =0.85 に達した要素では，以降で全ての破壊モードIについて損傷を進展させないとしている．

© Japan Society of Civil Engineers

３．解析モデル

2 章の損傷進展材料モデルを用いて，茗荷ら[2)]によって行われた GFRP のボルト接合の載荷試験の再現解析を行う．接合部はダブルラップ形式の接合で，母板は GFRP 板，添接板は鋼板であり，板厚は 12mm と 6mm である．また，ボルト，ワッシャーは鋼製である．母板の寸法は**図-1** に示す．

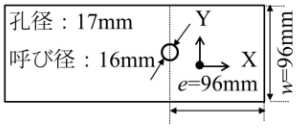

図-1　母板

解析ソフトには Abaqus/Standard[3)]を用い，三次元低減積分ソリッド要素により，**図-2** に示すようにモデル化した．摩擦係数は母板－添接板間で 0.483，ボルト軸－ボルト孔間で 0.1, ワッシャー－添接板間で 0.01 である．

GFRP 板の材料特性を**表-1** に示す. GFRP 板は X 方向と Y 方向に同量の繊維が配向されている．また，材料モデルにおける繊維方向(1 方向)と GFRP 板の X 方向が一致するとしている．鋼は，ヤング率 200GPa，ポアソン比 0.3 である. 解析は**図-2** に示すように添接板の端部に一様変位を与え，変位制御で行った．

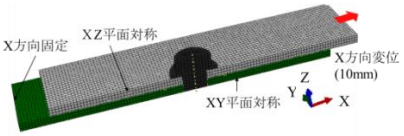

図-2　解析モデル

表-1　GFRP 板の材料特性

弾性係数（GPa）					
E_X	E_Y	E_Z	G_{12}	G_{13}	G_{23}
26.7	25.1	13.2	3.91	4.44	4.64

強度（MPa）							
X_T	X_C	Y_T	Y_C	Z_C	S_{12}	S_{13}	S_{23}
353	267	335	288	339	75.2	34.3	34.0

ポアソン比		
ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
0.13	0.39	0.41

４．解析結果

図-3 にトルクが 25Nm の場合の実験と解析の荷重－変位関係を示す．また，解析ではβ =0 とした材料 B を用いた場合の結果も示している．接線剛性が初期剛性より 30%低下した時を初期破壊，最大荷重時を終局破壊と定義している．**図-3** より，本研究の材料モデルを用いた場合，実験で得られた荷重－変位関係を再現できている．他方，材料 B を用いた場合，終局破壊時の荷重と破壊形式が実験と異なっている．

図-4a)に載荷終了時の試験体の様子，**図-4b)**，c)に載荷終了時の損傷指標のコンター図を示す．実験では，

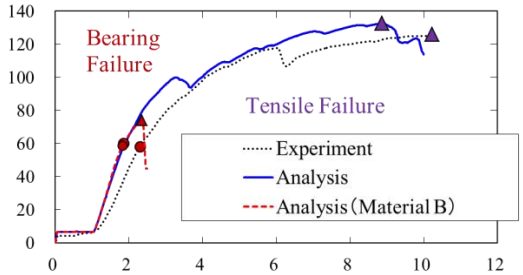

図-3　荷重-変位関係

ボルトの締め付けにより層間剥離を生じなかった支圧損傷部がそのまま接触面となることで，損傷を拡大しながら更なる載荷が可能となるのに対し，材料 B では損傷指標が 1 になった材料は荷重を伝達できないため，載荷が続けられず支圧破壊に至ったと考えられる．繊維方向の圧縮破壊モードで損傷が大きくなった要素の損傷進展を停止させる本研究の材料では，損傷部で接触面ができる様子を解析的に再現でき，結果，終局限界状態である引張破壊が生じるまで載荷が継続された．

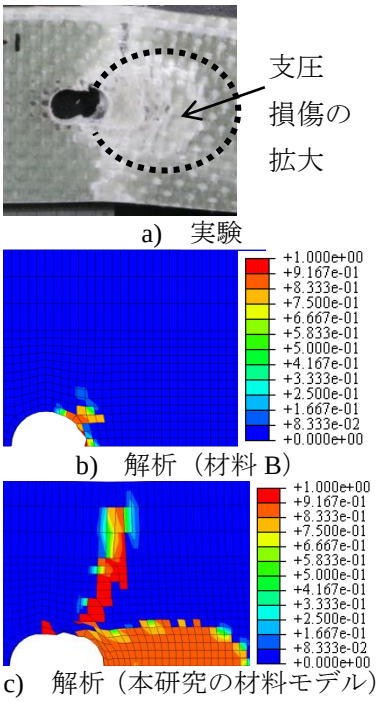

図-4　載荷終了時の試験体

５．結論

1) 支圧損傷の大きな要素で損傷進展を停止させることで，ボルトの締め付けにより支圧の損傷部で接触面ができる様子を解析的に再現でき，実験結果と同様に終局限界状態である引張破壊まで載荷を継続することができた．
2) 繊維方向の圧縮の破壊基準に面外圧縮応力を考慮することで，ボルトの締め付けによる初期破壊時の支圧耐力の増加を再現することができた．

参考文献

1) 北根安雄，Mohammad Abdul Kader，伊藤義人（2014）：FRP 部材におけるボルト支圧接合部の耐力評価解析, 計算工学講演会論文集, Vol.19, Paper No. E-5-5.
2) 茗荷将浩，北根安雄，伊藤義人（2017）：ハンドレイアップ GFRP 部材を用いた支圧ボルト接合部の耐力評価に関する研究，名古屋大学修士論文.
3) Dassault Systèmes: Abaqus 6.14 Documentation, 2014.

© Japan Society of Civil Engineers