307

CFRP[±45°]₄の非弾性変形と構成式

1.緒 言

複合材料の非弾性挙動に関する理論的研究は、多く 行われている⁽¹⁻⁴⁾. Hahn⁽¹⁾は、せん断応力-せん断 ひずみ関係の非線形性のみを考慮した複合材料の非弾 性理論を提案している. Hashinら⁽²⁾はRamberg-Osgood則を用いた複合材料の非弾性変形挙動の理論を 構築している.また,Sunら⁽³⁾は、3次元繊維強化複 合材料対し、Hillタイプの降伏関数を用い、その非弾 性変形挙動を簡単な流れ則で表している. さらに、金 川らは(4)は、ダメージ関数を用いたモデルを提案し ている.

実際に機械構造物の部材として使用される複合材料 には、一方向への負荷のみならず、逆負荷、負荷・除 荷の繰返しのような複雑な負荷が作用することが予想 される.しかしながら、先に述べたモデルでは、負荷 の反転・逆負荷を伴う繰返し負荷等の非弾性挙動を表 すことができない.

著者らは、先に金属材料の繰返し塑性変形挙動を記 述できる構成式を提案している(6).また、繰返し負荷 を受ける複合材料の特徴的な繰返し非弾性変形挙動も 実験的に明らかにしている⁽⁶⁾。本研究では、一般金属 材料に対して提案した構成式で複合材料の非弾性変形 を記述できることを示す、さらに、複合材料の特徴的 な繰返し変形挙動も構成式で記述可能であることを示 す.

2. 非弹性構成式

負荷関数が次式で表示できると仮定する.

$$\mathbf{f} = \overline{\boldsymbol{\sigma}} - \mathbf{R}(\kappa, \mathbf{T}) \tag{1}$$

ここで, σ, Rはそれぞれ相当応力, 流れ応力, κは硬 化・軟化のパラメータ, Tは温度である.また,相当 応力 のは次式で表せられると仮定する.

$$\overline{\sigma} = \left\{ \frac{3}{2} C_{ijkl} \left(\sigma_{ij} - \alpha_{ij} \right) \left(\sigma_{kl} - \alpha_{kl} \right) \right\}^{1/2}$$
(2)

ここで、σ_{ij}は応力テンソル、α_{ij}は背応力テンソル、 Ciiklは4階異方性テンソル係数である.

塑性ひずみ増分と負荷面の垂直性の仮定から、式 (1), (2)より塑性流れ則は次式となる.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{p} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} C_{ijkl} \left(\sigma_{kl} - \alpha_{kl} \right)$$
(3)

ここで、 eliは塑性ひずみ増分テンソル、 pは相当塑性ひ

北海道大学	正〇佐々木			克	彦
	Æ	石	Л	博	將

ずみ増分である.

背応力は次式のPrager-Zieglerの移動硬化則より算出 した.

$$d\alpha_{ij} = (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) d\mu$$
⁽⁴⁾

また、全ての応力-ひずみ関係は、次式のRamberg-Osgood則で表されると仮定した.

$$\varepsilon_{ij} - \mathbf{e}_{ij} = \frac{\sigma_{ij} - \alpha_{ij}}{E_{ij}} \left[1 + \mathbf{K} \left\{ \frac{\overline{\sigma}}{\mathbf{D}} \right\}^m \right]$$
(5)

ここで, e_{ij}は背応力α_{ij}に対応するひずみ, E_iは弾性係 数であり、Kは定数である.また、Dは抗応力、mは 硬化・軟化の指数である. mおよびDは流れ応力Rと 共に、次式で表されると仮定する.

 $D = D_0 \left[1 - \alpha \exp \left\{ -\frac{p}{\alpha} \right\} \right]$ (6)

$$\mathbf{m} = \mathbf{m}_0 \left[1 - \beta \exp\left\{ -\frac{\mathbf{p}}{\mathbf{b}} \right\} \right] \tag{7}$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_0 \left[1 - \lambda \exp\left\{ -\frac{\mathbf{p}}{\mathbf{c}} \right\} \right] \tag{8}$$

ここで、 D_0 , α , a, m_0 , β , b, R_0 , λ , cは、ひずみ速 度とひずみ振幅に依存する材料定数であり、実験とシ ミュレーションから最適値が決定される.また、pは 累積塑性ひずみである.

最終的に、塑性ひずみ増分、背応力増分はそれぞれ 次式となる.

$$\epsilon_{ij}^{p} = B\left(\frac{\overline{\sigma}}{D}\right)^{m} \frac{3}{2\overline{\sigma^{2}}} \left\{ C_{mnkl} \left(\sigma_{mn} - \alpha_{mn} \right) \right. \\ \left. \left. \left(\sigma_{kl} - \alpha_{kl} \right) \right\} C_{ijkl} \left(\sigma_{ij} - \alpha_{ij} \right) \right.$$
(9)

$$\dot{\alpha}_{ij} = \frac{3}{2\sigma^2} \left\{ C_{klmn} \left(\sigma_{mn} - \alpha_{mn} \right) \dot{\sigma}_{kl} \right\} \left(\sigma_{ij} - \alpha_{ij} \right) \\ - \frac{1}{\sigma} \left(\sigma_{ij} - \alpha_{ij} \right) \frac{1}{c} \left(R_0 - R \right) \dot{p}$$
(10)

ここで, B = <u>3K</u> (m + 1)である. - 方向に強化された繊維強化複合材料の単層板に構 成式を以下のように適用する.

今,1方向,2方向をそれぞれ単層板の繊維方向, 繊維と垂直方向とする.単層板が直交異方性材であり, 繊維方向では非弾性変形は生じないと仮定すると,4 階異方性テンソル係数は、C2222、C1212の2個になる. すなわち、例えば、2方向およびせん断方向の塑性ひ ずみ増分は次式となる.

$$\dot{\varepsilon}_{2}^{p} = \mathbf{B} \left(\frac{\overline{\sigma}}{D} \right)^{m} \frac{3}{2\overline{\sigma}^{2}} \left\{ C_{22} \left(\sigma_{2} - \alpha_{2} \right) \left(\dot{\sigma}_{2} - \dot{\alpha}_{2} \right) \right.$$

+ 4C₆₆ (
$$\sigma_6 - \alpha_6$$
) ($\dot{\sigma}_6 - \dot{\alpha}_6$) C₂₂ ($\sigma_2 - \alpha_2$) (11)
 $\dot{\epsilon}_6^p = B\left(\frac{\overline{\sigma}}{D}\right)^m \frac{3}{2\overline{\sigma}^2} \{C_{22} (\sigma_2 - \alpha_2) (\dot{\sigma}_2 - \dot{\alpha}_2)$

+ $4C_{66}(\sigma_{6} - \alpha_{6})(\dot{\sigma}_{6} - \dot{\alpha}_{6})$ (2C₆₆($\sigma_{6} - \alpha_{6}$) (12) $C_{22}=C_{2222}$, $C_{66}=C_{1212}$ \mathcal{T} \mathcal{T} \mathcal{T} \mathcal{T}

3. シミュレーション結果

前章で提示した非弾性構成式の適用性をCFRP試験 片を用いた実験とシミュレーションの比較により検証 した。

実験に用いた試験片は、プリプレグシート(東レ製 P3051-12)を試験片軸に対し± θ °傾け対称に配 向し、8層積層されている円筒試験片である.試験片 の外径、内径および標点間距離はそれぞれ 17mm、15mm、40mmである⁽⁶⁾.

Fig.1は、配向角0', ±22.5', ±45', ±67.5', 90'の試験片を用いた純粋引張り実験とシミュレーション結果である。Fig.1で各印が実験結果であり、実線 がシミュレーション結果を示す。Fig.1より全ての配 向角の応力-ひずみ関係を構成式でよく表せることが 分かる。特に、構成式で配向角±45'の著しい非弾性 変形をもよく表示できることが明らかである。

引張り・圧縮の繰返し負荷を配向角±45'の試験片 に与えた場合、その変形挙動は一般金属材料とは異な る特徴的な挙動となる⁽⁶⁾. Fig. 2 に一定ひずみ振幅 1.5%、ひずみ速度0.01%/sの引張り・圧縮繰返し負荷 を配向角±45'の試験片に与えた時の応力-ひずみ関 係を示す. Fig. 2 より、明らかに引張り方向と圧縮方 向のループ端応力の変化の仕方に違いがあることが分 かる. すなわち、引張り方向のループ端応力は、負荷 の繰返しと伴に減少するが、圧縮方向のループ端応力 は、負荷の繰返しに伴う変化がなく負荷中は常に一定 である.

Fig.3にFig.2と同一条件の引張り・圧縮繰返し負荷 を構成式によりシミュレーションした結果を示す. Fig.2とFig.3を比較するとシミュレーションは実験を よく表していることが分かる.すなわち,本構成式で CFRPの特徴的な繰返し非弾性変形を記述可能である ことが明らかである.

4. 粘 言

本研究では、CFRPの繰返し非弾性変形を記述する ための構成式について検討した.その結果、著者らが 金属材料に対して提案した繰返し塑性構成式をCFRP に適用できることが分かった.また、CFRPの特徴的 な繰返し非弾性変形挙動も構成式で正確に記述できる ことが明らかになった.

参考文献

1. Hahn, H.Y. and Tsai, S.W., J. Composite Materials, 7, 102 (1973).

2. Hashin, Z, Bagehi, D. and Rosen, B.W., NASA, CR 2313 (1973).

Sun, C.T. and Chen, J.L. J. Composite Materials, 23, 1009 (1989).
 金川, ほか4名, 第23回FRPシンポジウム講演論文集,

5. 石川, 佐々木, 中川, 機論, 59, 360(1993).

6. K. Sasaki and H. Ishikawa, Proc. of APCFS'93, 1, 357(1993).



Fig. 1 Pure tension



Fig. 2 Cyclic tension compression loading (experiment)



Fig. 3 Cyclic tension compression loading (simulation)