CFRP および CF/GF 三層 FRP の曲げクリープ特性に関する時間-温度換算則の適用性†

古 江 治 美*

Master Curves for Creep Properties of CFRP, GFRP and CF/GF Sandwich Laminates

by

Harumi FURUE*

In order to predict the long term creep property, the creep deflection during 3 point bending creep tests were measured at various elevated temperatures below the glass transition temperature on CFRP samples at off-axis angles of 0°, 15°, 30° and 45°, three kinds of CF/GF sandwich laminates and GFRP used as the cores of sandwich. The master curves of creep property were obtained by applying the reciprocation law between time and temperature of laminates. The results obtained were compared with long term creep properties measured under a constant testing condition ($T_0=50^\circ\text{C}$). A good agreement between the master curves of creep modulus and long term creep results was found on CFRP and its off-axis samples, but not on the sandwich laminates.

Key words : CFRP, CF/GF sandwich laminate, Flexural creep, Reciprocation law between time and temperature

1 は じ め に

力学特性に優れ、かつ軽量化に最も寄与し得る材料として CFRP があげられる。しかし、CFRP は一般構造材料と比較して、極めて高価な材料である。一方、機械構造用材料としては経済性を無視することはできない。高い精度を要求される剛構造においては、荷重に対する部材の変形を経時的にも極めて小さくすることが重要である。そして、CFRP は軽量でクリープ特性に優れ、経時的変形を起こしにくい材料として期待されている。そこで、既報¹⁾では経済性を考慮した高剛性軽量材料として、心材に GFRP を用いた対称三層 CF/GF 板を対象に 3 点曲げクリープ特性に対する CFRP と GFRP の厚さ比、CF 繊維方向に対する試験方向(θ)、温度の影響について検討した。

宮野らは、不飽和ポリエステル樹脂をマトリックスとした平織りガラスクロス強化プラスチックおよびエポキシ樹脂をマトリックスとした CFRP 繊維直角方向のそれぞれについて曲げクリープ変形をガラス転移温度 T_g を含む広範囲で求め、クリープ変形はそれぞれのマトリックス樹脂に成立するものと同一の時間-温度換算則の成立すること、および T_g 以下の温度範囲について、3) と同様の材料では厳密には時間-温度換算則は成立せず、提案の修正時間-温度換算則および複合則を用いれば、クリープ変形に対する正確な長

期の予測が可能であることを報告している。

ここでは、既報¹⁾の CF/GF 三層 FRP 板のクリープ特性に対する温度の影響のデータをもとに、時間-温度換算則を適用してクリープ弾性率のマスター曲線を求め、長時間クリープ試験データと比較し、長時間クリープ特性予測のための時間-温度換算則の適用性について検討する。

2 クリープ実験

2・1 実験材料

実験に用いた合計 5 種類の材料の仕様を Table I に示す。材料 A は CFRP、材料 G は GFRP で、それぞれ表面層、中央層素材に相当する。B, D, E は表面層を CFRP、中央層を GFRP とする、それぞれ厚さ比 0.50, 0.33, 0.20 の対称三層 FRP 板である。GFRP はチョップドストランドマット 450 gr/m²,

Table I. Specification of materials.

Material		A	B	D	E	G
Thickness ratio H_2/H		1	0.50	0.33	0.20	0
CFRP H_2	Number of ply	12	8	8	8	0
	Thickness, mm	3	2	2	2	0
GFRP H_1	Number of ply	0	4	8	16	6
	Thickness, mm	0	2	4	8	3
Total thickness, mm		3	4	6	10	3

† 原稿受理 平成 5 年 6 月 18 日 Received June 18, 1993

* 正 会 員 機械技術研究所 〒305 つくば市並木, Mech. Eng. Lab., AIST, MITI, Namiki, Tsukuba, 305

CFRP は平織クロス 400 gr/m² プリプレグ、樹脂はビニルエステル系樹脂（エポキシ樹脂を変性したもの）を用い、三層板では厚さ中央部の GFRP 層を別工程で成形後、所定の厚さ、および厚さ比になるように CF 平織クロスプリプレグを重ねて、プレス成形により各試験板を成形したのち、機械加工により 20 mm 幅の短冊形試験片を作成した。GFRP の動的粘弾性測定における損失弾性率のピークより求めたガラス転位温度 T_g は 140°C であった。CFRP についてもほぼ同程度のガラス転移温度であると考えられる。

2・2 実験方法

3 点曲げクリープ実験条件の概略を Table II に示す。

Table II. The outline of creep testing.

Item	Level
Material (α)	1.0, 0.50, 0.33, 0.20, 0
Axis, (Off axis) (θ)	0°, (15°, 30°, 45°, of CFRP)
Temperature (T)	20°C, 50°C, 80°C, 110°C
Maximum flexural creep stress	49 MPa
Creep testing time	1000 min, 1000 hr

3 点曲げクリープ試験では最大曲げ応力 49 MPa の荷重をスパン 100 または 200 mm の 2 等分点にかけ、荷重点で 3 点曲げクリープたわみを計測した (Fig. 1 参照)。3 点曲げクリープ試験のスパンについては、材料 B, D, E の全温度レベル、および材料 A の試験片軸方向と繊維織り目方向の角度 $\theta=0^\circ$ のうち 20°C, 50°C, 80°C レベルの 3 点曲げクリープ試験では 200 mm を使用し、他は 100 mm を使用した。

たわみ量はデジタルリニアゲージ (最小表示 1 μ m) を使用して計測し、時間とたわみ量を記録した。梁の 3 点曲げ理論の式に従って、測定したたわみ量から、次式により、クリープ時間に相当するクリープ弾性率を求めた。

$$E_{\tau,t} = \frac{l^3}{4bh^2} \times \frac{W}{\delta_{\tau,t}} = \frac{l^3}{6} \times \frac{\sigma_{\max}}{\delta_{\tau,t}} \quad (1)$$

ここで、 T : クリープ試験温度

t : クリープ試験開始後の時間

E : クリープ弾性率

b : 試験片の幅

h : 試験片の厚さ (高さ)

l : スパン間距離

δ : 荷重点におけるクリープたわみ

W : 試験開始時に負荷する一定荷重

σ : 試験開始時に負荷する一定応力

$$(\sigma = 3lW/2bh^2)$$

三層板についても均一材料とみなして、クリープたわみの測定値、初期設定応力、および試験片幅から、梁の 3 点曲げ理論により求めたみかけの弾性率をクリ

ープ弾性率として用いた。

各材料の 20°C, 50°C, 80°C, 110°C の各温度における 10^3 分までの (10^3 時間に対して) 短時間クリープたわみの測定他に、50°C における 10^3 時間までの (10^3 分に対して) 長時間クリープたわみについても測定し、同時に測定結果をもとに上式を用いてクリープ弾性率を求めた。

2・3 クリープ弾性率マスター曲線について

上記で求めた数水準の一定温度下での短時間クリープ弾性率-時間曲線を用い、50°C を基準温度とし、他の温度に対する曲線を互いに重なるよう平行移動して、クリープ弾性率のマスター曲線を求めた。

3 結果と考察

3・1 クリープたわみ-時間曲線

Fig. 1 はクリープ荷重負荷後の時間経過とクリープたわみの関係を示す、クリープたわみ-時間曲線の測定例である。他の材料についても同様に求めた。

全般的傾向は、温度の上昇、時間の経過と共にクリープたわみが増大し、したがってクリープたわみは明らかな時間および温度依存性が認められた。クリープたわみの時間依存性は温度の上昇と共に高くなり、また温度依存性は時間の経過と共に顕著になった。

3・2 クリープ弾性率-時間曲線

式 (1) に従い、求めたクリープ弾性率-時間曲線の結果は材料 A (CFRP) の $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 方向について Fig. 2, その他の材料について Fig. 3 のそれぞれ左側に $\log t - E_{\tau,t}$ 線図として示した。時間および温度依存性に対する全般的傾向は、クリープたわみと同様に存在する。ただし、この場合は温度の上昇、時間の経過と共に $E_{\tau,t}$ は低下する。材料別では、三層板の厚さ比が小さくなるほど、すなわち GFRP の割合が増すほど、また温度が高くなるほど、クリープ時間が長くなるほどクリープ弾性率が小さくなる。CFRP では θ が大きくなるほどクリープ弾性率は小さくなる。

3・3 クリープ弾性率マスター曲線

Fig. 1. Creep deflection-creep time curves.

Fig. 2. Master curves for short term flexural creep of CFRP by the reciproation law between time and temperature.

Fig. 3. Master curves for short term flexural creep of CF/GF-RP by the reciproation law between time and temperature.

クリープ弾性率-時間曲線を用い、50°Cの曲線を基準として他の温度に対する曲線を互いに重なるよう平行移動し、クリープ弾性率のマスター曲線を求めた。求めた50°Cのクリープ弾性率マスター曲線の結果と50°Cにおける 10^3 時間までの通常のクリープ試験結

果を比較して、CFRPの $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ についてFig. 2の右側に、その他の材料、三層板およびGFRPについてFig. 3の右側に示した。CFRPについて、本報の範囲で2~3桁の予測が可能であり、両者は非常によく一致した。しかし、その他の三層板およびGFRPについては良い一致とはいえず、特に三層板BおよびEの材料で差が大きい。すなわち、単一積層板では長時間クリープ特性と短時間クリープ特性からの長時間予測結果（マスター曲線）は良い一致を示した。しかし、単一積層ではない三層積層板では良い一致はみられなかった。この原因として、三層板においては成形上のばらつきの確率が高いこと、樹脂過多層の存在およびそのばらつきの確率の高いことなどが考えられ、このために三層板ではクリープ挙動に大きなばらつきがあると考えられる。チョップ繊維のランダム強化材料であるGFRPについても材質的ばらつきが大きく、長時間予測結果とマスター曲線は良い一致とはならない。

宮野らのCFRP繊維直角方向についての曲げクリープ変形では、 T_g 以下の温度範囲について厳密には時間-温度換算則が成立しないとされた。しかし、ここでの材料、平織りクロスCFRPの T_g 以下の温度、 $\theta = 0^\circ \sim 45^\circ$ の範囲について時間-温度換算則による予測はほぼ完全に長時間結果と一致し、時間-温度換算則が成立した。

3・4 材料と時間-温度移動因子

マスター曲線を求めると同時に、移動温度に対する時間-温度移動因子についても求めた。Fig. 4の材料と時間-温度移動因子、 $\log a_{T, (T-T_0)} = \log t_T / t_{T_0}$ についての結果は材料間で大きな差はない、強い傾向を読むとCFRPよりもGFRPで高い。また、CFRPとGFRPのクリープ弾性率に対する温度の影響を考慮すると、移動温度と時間-温度移動因子の関係はFig. 5のような傾向になることが予測できる。Aの $\theta = 0^\circ$ 、Bを除く20°Cおよびすべての材料の110°Cのデータは、実験温度間隔が大きいために、温度 T_N と

Fig. 4. Time-temperature shift factor, $\log a_T$ at shift-temperature=30°C.

Fig. 5. Time-temperature shift factor, $\log a_T$ of CFRP and GFRP.

T_{N-1} の結果が重ならず、マスター曲線に生かせないデータであった。ここで用いたCFRPについては、時間-温度換算則が、実験温度間隔および測定持続時間を適切に選び広範囲の時間-温度換算を可能とすれば、さらに長時間の予測に有用と考えられる。

4 ま と め

CFRP, GFRP およびそれを用いた三層板について、異なる温度による短時間のクリープ弾性率-時間曲線を求め、それらに時間-温度換算則を適用して得

たマスター曲線と長時間クリープ弾性率-時間曲線の測定結果とを比較して以下の結論を得た。

(1) CFRP については $\theta=0^\circ\sim 45^\circ$ のすべてで短時間結果からの予測と長時間の試験結果は良い一致を示し、時間-温度換算則が成立した。

(2) 三層板については両者の良い一致は見られず、時間-温度換算則が成立するとは言い難い。

(3) (2)の原因として、三層板成形上のばらつき、樹脂過多層の存在およびそのばらつきなどが原因のクリープ挙動のばらつきが考えられる。

(4) 短時間クリープ特性の測定温度間隔を適当に選べば、さらに広範囲の時間-温度換算が可能と考えられる。

(平成5年3月17日 日本材料学会第22回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 古江治美, 野口祐成, 材料, **35**, 545 (1986).
- 2) 宮野 靖, 鈴木克人, 材料, **23**, 1057 (1974).
- 3) 宮野 靖, 金 光 学, 国 尾 武, 材料, **28**, 1098 (1979).
- 4) 宮野 靖, 笠森正人, 平桜康晴, 日本複合材料学会誌, **19-1**, 20 (1993).