

樹脂含浸ストランドを用いるFRP圧縮試験法

東燃株式会社・総合研究所
津島栄樹、○谷口硯士

New Compression Test Method for FRP Using Resin-Impregnated Strand Specimen

Eiki Tsushima, Kenshi Taniguchi
Corporate Research & Development Laboratory, Tonen Corporation

1. はじめに

近年、CFをはじめとする各種高性能繊維およびその複合材において圧縮物性の向上と解明が大きな課題となっている。繊維自身の圧縮強度測定法としてはループ試験、単繊維埋没樹脂試験などいくつかの試みがあるが、現状ではASTMD3410 (Celanese法)等の複合材の圧縮試験による評価が一般的である。しかし、従来の複合材圧縮試験は試験片の作製が面倒であるうえに、試験の条件や技術に結果が影響されやすいといった問題点があった。本報告では、FRPの圧縮強度を正確かつ簡便・迅速に測定するために新規に開発した、樹脂含浸ストランドを試験片として用いるストランド圧縮試験法(東燃法)の概要を述べ、東燃法により各種繊維の圧縮強度の評価を行なった結果を紹介する。

2. 実験

2-1. 試料

試料繊維には、Pitch系CF (A-1~3、B-1~3) およびPAN系CF (C-1~4、D-1~2) を用いた。各繊維の主な物性をTable 1に示す。これらのうち、A-1~3は東燃(株)において圧縮強度評価用に実験的に製造したものであるが、他はいずれも市販品である。

Table 1 Physical parameters and tensile properties of CF.

Name	Filament N (kf)	Diameter d (μm)	Density ρ (g/cm^3)	Strength σ_t (kg/mm^2)	Modulus E_t (kg/mm^2)	Elongation ϵ_t (%)
A-1	3	10.1	2.15	290	68.5	0.42
A-2	3	10.3	2.15	362	50.5	0.72
A-3	3	10.1	2.05	296	23.9	1.24
B-1	2	10.4	2.15	224	73.9	0.31
B-2	2	10.3	2.06	214	53.1	0.40
B-3	2	10.5	2.06	176	38.8	0.50
C-1	6	5.0	1.93	444	56.8	0.78
C-2	6	5.1	1.87	397	49.6	0.80
C-3	6	7.2	1.81	272	37.0	0.74
C-4	6	6.2	1.76	318	22.6	1.41
D-1	6	6	1.80	450	40	1.10
D-2	6	7	1.79	350	24	1.50

樹脂含浸ストランドの作製はJIS R7601に準拠して行ない、樹脂には汎用エポキシを用いた。試験に供するストランドは $V_f=40\%$ 、断面形状が直径 $d=1\text{mm}$ の真円で、大きな湾曲やねじれのないものとし、著しく性状の異なるものは除外した。所定の長さで切断したストランド片の両端にエポキシ系接着剤を用いて金属製の円筒状タブを接着して試験片とした。試験片長の影響をみるため、試験部の長さ $L=3\sim 30\text{mm}$ の範囲で変化させた。

2-2. 圧縮試験

東燃法による圧縮試験の概要を模式的にFig. 1に示す。試験片に治具を装着し、これを材料試験機により、クロスヘッド移動速度 $1\text{mm}/\text{min}$ で圧縮荷重を負荷した。

ストランド圧縮強度 σ_c (kg/mm^2)算出は、圧縮においても引張と同様に樹脂の弾性率の寄与は無視できるとして、次式を用いた。繊維の体積含有率 $V_f=60\%$ に換算してある。

$$\begin{aligned}\sigma_c &= \sigma_f \times V_f = P/A_f \times V_f \\ &= (P_{\max} + w) \times \rho / T \times 1000 \times 0.6 \\ \sigma_f &: \text{繊維の圧縮強度} (\text{kg}/\text{mm}^2) \\ A_f &: \text{繊維の全断面積} (\text{mm}^2) \\ P &: \text{総荷重} (\text{kg}) \\ P_{\max} &: \text{最大荷重} (\text{kg}) \\ w &: \text{上部治具重量} (\text{kg}) \\ \rho &: \text{繊維の密度} (\text{g}/\text{cm}^3) \\ T &: \text{繊維の繊度} (\text{mg}/\text{m})\end{aligned}$$

比較のために、一部の繊維についてUD-FRP積層板を作製し、Celanese法による 0° 方向の圧縮強度測定を実施した。

3. 結果および考察

試験片はすべてゲージ部で破断した。一部の試料では破断箇所がタブの先端近傍のものが若干あったが、タブの内部での破壊は認められなかった。また、繊維方向への縦割れや接着剤の破壊による抜けもなく、破壊状況は良好であった。

長さの異なる試験片による、強度 σ_c とゲージ長/直径比 L/d の関係をFig. 2に示す。繊維の種類による絶対値の大小はあるものの、 σ_c は L/d と負の相関があり、低 L/d 側と高 L/d 側とではその依存傾向は大きく異なる。すなわち、低 L/d 領域では、 L/d の増加に対して σ_c はほぼ一定、もしくは緩やかに減少する。一方、高 L/d 領域では、 L/d の増加に伴って σ_c は急激に低下する。これは今回測定したすべてのCFに共通する傾向であり、2つの領域は破壊様式の違いに起因すると思われる。

2つの領域において典型的な荷重-変位曲線をFig. 3に示す。低 L/d 領域 ($L/d=5$)では、変位の増加とともにほぼ直線的に荷重が増加し、最大荷重で瞬時に試験片は破断し、荷重が急激に低下する脆性材料に特有のものである。高 L/d 領域 ($L/d=30$)では、

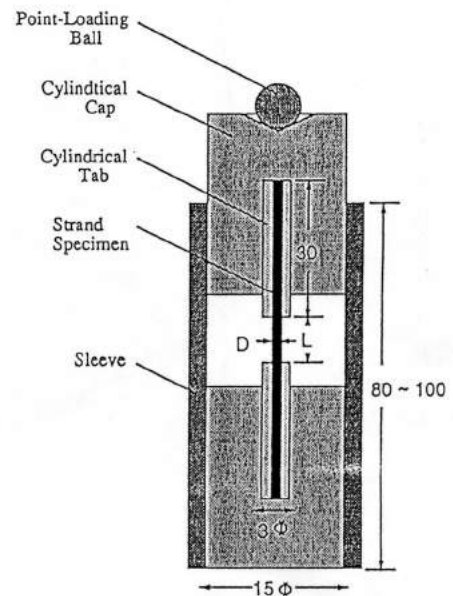


Fig. 1 Schematic view of strand compression apparatus.

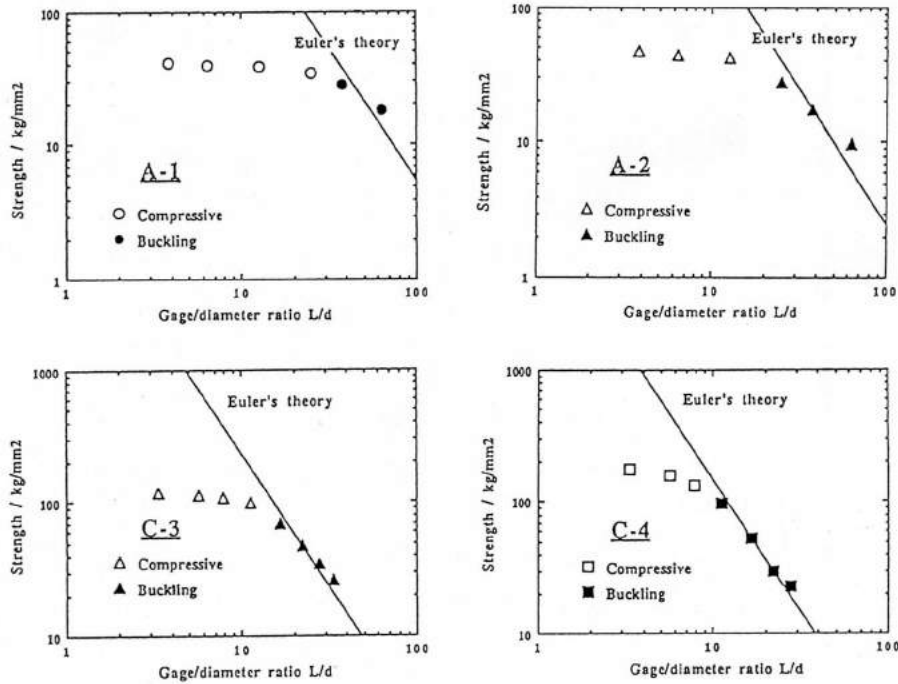


Fig. 2 Strength vs. gage length / diameter ratio on strand compression.

初期の立ち上がりは同様であるが、やがて荷重増加が緩慢になり、最大荷重を経過後も荷重が徐々に減少しながら変形を続け、破断に至る。

Fig.4 に破断直前の試験片の変形状態を示す。高L/d領域では中央部付近が大きく湾曲し、長柱座屈を生じていることが分かる。

ここで、Eulerの座屈公式によれば弾性率E、長さLの柱の座屈応力 σ は

$$\sigma = n\pi^2 \times E / \lambda^2 = n\pi^2 \times EI / AL^2$$

n : 端末係数

λ : 細長比

I : 最小断面二次モーメント

A : 柱の断面積

で与えられ、直径dの円柱に対しては $I = \pi d^4 / 64$ 、 $A = \pi d^2 / 4$ であるから

$$\sigma = n\pi^2 / 16 \times E / (L/d)^2$$

となる。両辺の対数をとると次式を得る。

$$\log \sigma = -2 \log (L/d) + \log (n\pi^2 / 16 \times E)$$

Fig. 2に上式を用いて計算した結果を示す。端末条件に両端固定端を仮定して、端末係数n=4とした。これより、高L/d領域における σ_c は、Eulerの座屈の式により、よく記述されることがわかる。すなわちこの領域における σ_c は座屈応力であり、繊維自身の真の圧縮強度を反映した値ではない。Fig. 2において低L/d領域では低弾性のCFの方が σ_c が高いが、高L/d領域では逆に、高弾性CFの方が高くなるのもこのことによる。

よく知られているようにCFは応力-歪関係に非線形性をもっており、圧縮においては引張とは逆の負の非線形性を示す。したがってEulerの式のEは実際には一定ではなく、圧縮弾性率の減少を考慮に入れるべきである。特に高弾性のPitch系CFで式とのズレが大きいのはこのためと考えられる。

また、低 L/d 領域においてもわずかに負の相関がみられる理由は明らかではないが、 L が短くなることによりタブ端の拘束の影響等が無視できなくなることも考えられる。したがって、どの点をもって圧縮強度を評価すべきかについては検討の余地が残るが、ここでは便宜的に $L/d=5$ における値をストランド圧縮強度と呼ぶことにする。

各種CFについて東燃法によるストランド圧縮強度 ($L/d=5$) とCelanese法による複合材圧縮強度の相関をFig. 5に示す。これにより両者の値はほとんど同等であるといえる。

4. 結言

- (1) 東燃法によるストランド圧縮強度 ($L/d=5$) は Celanese法によるUD-FRP積層板の 0° 方向圧縮強度に対応する。すなわち、東燃法により複合材圧縮強度の測定が可能である。
- (2) 試験片の L/d に応じて破壊様式が異なる。 L/d が小さい場合はほぼ純粋な圧縮破壊、大きい場合は座屈を伴う破壊を生じる。この座屈挙動は Euler の弾性座屈理論により説明される。

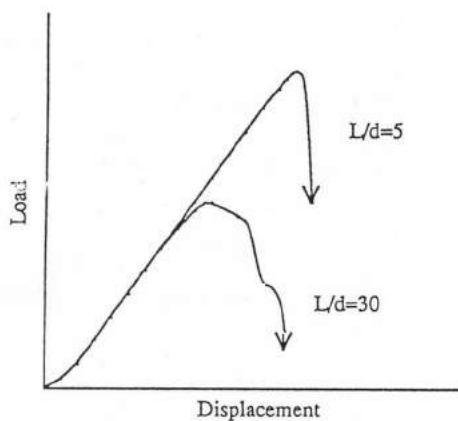


Fig. 3 Typical load-displacement curve.

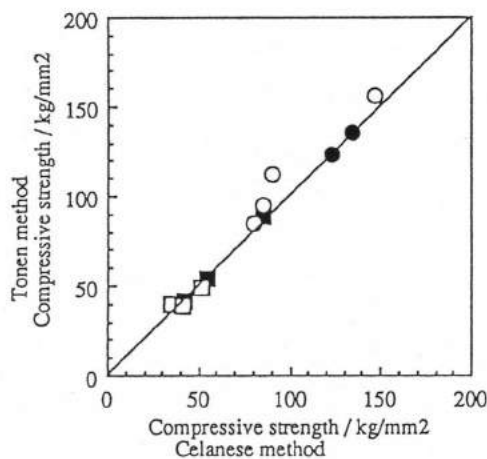


Fig. 5 Tonen method vs. Celanese method.

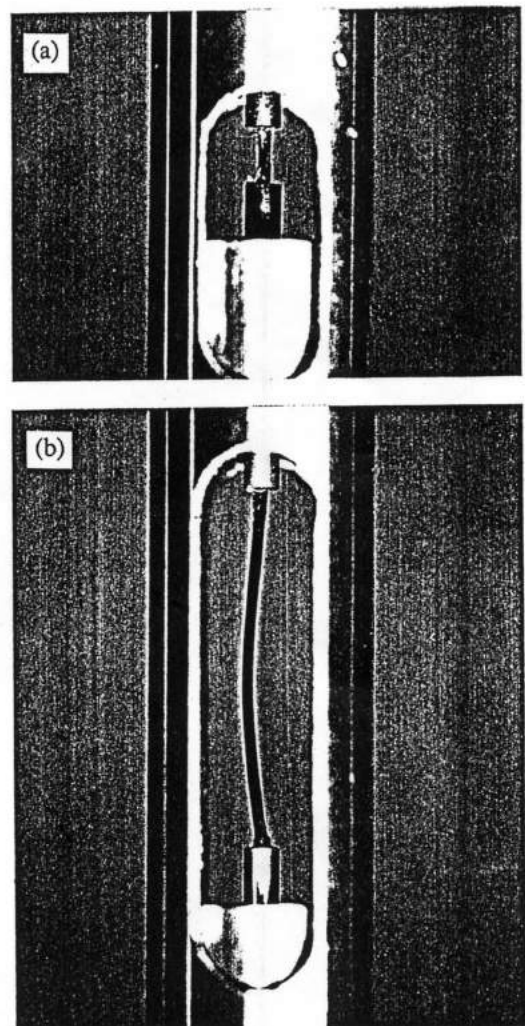


Fig. 4 Deformation of strand specimen.

(a) $L/d=5$ (b) $L/d=30$