

外圧を受けるCFRPパイプの強度について

傅 恩波, 見尾田征幸, 加賀 寿, 高村 巧

Compressive Strength of CFRP Pipe Against External Pressure

En-Bo Fu, Motoyuki Miota,
Hisashi Kaga, Takumi Takamura

要 旨

CFRPパイプの機械的強度を検討する目的で、パイプの圧縮実験を行った。その結果、外圧を受けるCFRPパイプの強度はパイプの寸法パラメータ $K(K=lt^2/d)$ に強く依存する。このパラメータを用い、次に示すような簡便な実験式にてパイプの強度が算定できることがわかった。

$$P = \frac{2\sigma lt^2}{3dC} = \frac{2K\sigma}{3C}$$

ここで、 P は最大荷重、 σ は応力、 d はパイプの直径、 l はパイプの長さ、 t はパイプの肉厚、 C は補正係数である。

1. 緒 言

炭素繊維を強化材とするプラスチック基複合材料(CFRP)は比強度(強度/密度)や比剛性/密度)が高く、さらに錆びないなどの優れた特性を有している。近年その応用分野は航空機や自動車などの産業から、スポーツやレジャー、海洋水産関係まで広がりつつあり、軽構造部材として非常に注目されている。特に強い、錆びないといった特性は海洋水産関連産業にとって最も魅力のある点である。すでにCFRP製ドラムを使用したイカ釣りロボットが実用化されつつあり、従来のステンレス製に比べ大幅に軽量化された¹⁾。また、定置網漁船のマストへの応用を目的とした低コストのCFRPパイプの製作技術も開発され、実用化へ向けて大きく前進した²⁾。

本研究ではCFRPパイプの実用化において欠かすことができない基礎データを得ることを目的とし、異なる直径のCFRPパイプに外圧を加え、その破壊強度や変形挙動などを調べた。さらに簡便な算出方法についても検討した。

2. 理 論

複合材料パイプの機械的強度に関する研究はすでにいくつか報告されているが³⁻⁶⁾、いずれも複雑な力学的計算を必要とする。本研究では簡便で、しかも実用的な方法を試みることにした。図1(a)に示すような上下二枚の板を用いてCFRPパイプを圧縮する場合、図1(b)と(c)の二つの状態に分けて考えることができる。

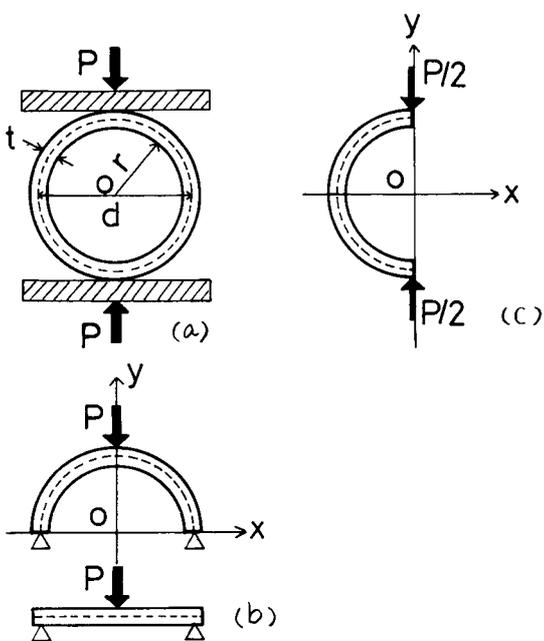


図1. 外圧を受けるパイプの模式図

- (a) 圧縮試験
- (b) 三点曲げ状態への想定
- (c) 単純曲げ状態への想定

図1 (b) に示すようにパイプをX軸方向に2分割して上の部分だけをとると、固定された円筒曲面の中央に集中荷重Pがかかる状態と見なすことができる。ここで、円筒曲面を平板と見なすと、図1 (b) の下図に示すような三点曲げの状態に置き換えることができる。したがって、引張り側の曲げ応力 σ_x は次式⁷⁾で表わすことができる。

$$\sigma_x = \frac{3Pd}{2lt^2} C \quad (1)$$

- ここで、P：荷重 (kgf)
- d：パイプの直径 (mm)
- l：パイプの長さ (mm)
- t：パイプの肉厚 (mm)
- C：補正係数

(1) 式を変形して、Pについて求めると、

$$P = \frac{2\sigma_x lt^2}{3dC} \quad (2)$$

と表わすことができる。

また、図1 (c) に示すようにパイプをY軸方向に2分割にして左側だけをとると、単純曲げの状態と見なすことができる。したがって、引張り側の曲げ応力 σ_y は次式⁹⁾で表わすことができる。

$$\sigma_y = \frac{Mhx}{I} C \quad (3)$$

ここで、M：曲げモーメント、 $M = \frac{1}{4}Pd$

hx：中立軸から引張り側までの距離、 $hx = \frac{t}{2}$

I：断面二次モーメント、 $I = \frac{1}{12}lt^3$

C：補正係数

(3) 式に曲げモーメントなどの関係式を代入すると、次式となる。

$$\sigma_y = \frac{3Pd}{2lt^2} C \quad (4)$$

(1) 式と(4)式の右辺に注目すると、 $\sigma_x = \sigma_y$ であることがわかる。つまり外圧を受けるパイプの上下および左右両側の曲げ応力は同一である。(1)式と(4)式が適用できるか否かについては、補正係数Cの値によって判断できる。補正係数Cが1.0に近い値なら、上記の式が使えることになる。

表1. パイプの寸法

No.	直径 d (mm)	厚み t (mm)	長さ l (mm)
1	41.4	2.8	100
2	78.1	3.0	100
3	106.0	2.9	100
4	208.0	2.9	100
5	311.0	3.0	100

3. 実験方法

本実験に使用したパイプの寸法を表1に示す。パイプはCF/エポキシプリプレグクロス材(東レ製トレカT-300)をコアに10層巻き付け、その上に拘束テープを巻き、140℃で加熱硬化して成形した

ものである。比較のため、同じプリプレグ材を用いてプレス成形法とテープ圧成形法により積層板を作製した。この積層板の曲げ応力を求めた。その結果、プレス成形法では76.1kgf/mm²、テープ圧成形法では51.0kgf/mm²であった。本研究に用いたパイプはテープ圧成形法により作製したものであることから、比較のための積層板の曲げ応力値は同一成形法の51.0kgf/mm²を用いた。

圧縮試験に用いた装置の概要図を図2に示す

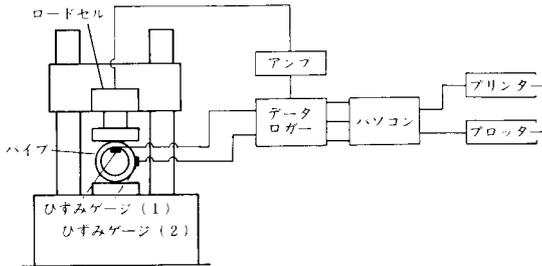


図2. 圧縮試験装置の概要図

50tonの万能試験機を用い、ロードセルおよびひずみゲージからの出力をパソコンに入力して、データ処理を行った。なお、ひずみゲージは図2に示すように2ヶ所に貼付した。実験条件は、圧縮速度2mm/min、室温24℃、湿度60%であった。

4. 結果および考察

4.1 荷重とひずみとの関係

図3にゲージ(1)とゲージ(2)の各ひずみ量と荷重との関係を示す。

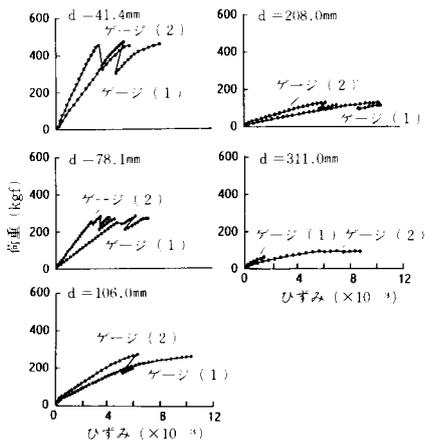


図3. パイプの荷重-ひずみ曲線

荷重が小さい時は、両ひずみとも荷重の増加にともなってほぼ直線的に増加するが、荷重がある値を超えるとひずみの増加は直線的ではなくなった。同じ荷重の場合、ゲージ(2)のひずみ量はゲージ(1)のひずみ量より小さい。しかし、パイプの直径の増大にともなってその差は徐々に小さくなり、パイプ直径が311mmの場合には逆にゲージ(1)のひずみ量がゲージ(2)のひずみ量より大きな値を示した。このような傾向は、破壊の様相にも観察された。写真1に外圧を加えたパイプの変形の様子を示す。

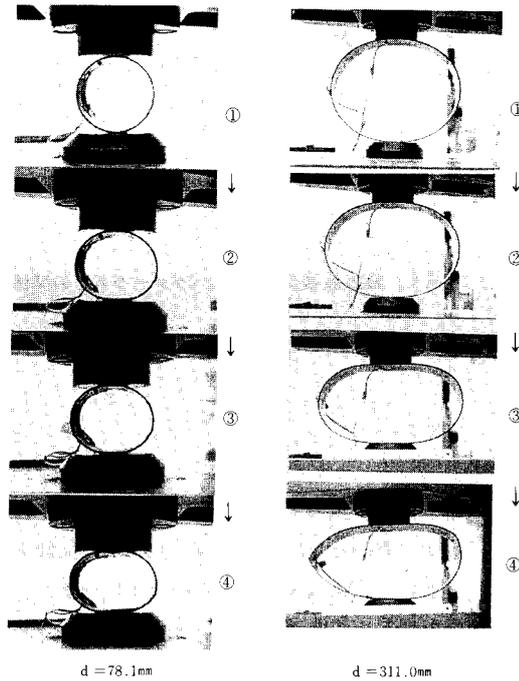


写真1. 外圧を受けるパイプの変形様子

直径の小さいパイプの破壊はほとんど圧子との接触面からであるが、直径の大きいパイプは逆に側面から先に破壊されることがわかる。直径の大きいパイプほど圧縮する時のパイプの変形が大きいため、圧子とパイプとの接触面積も大きくなる。したがって、上下にかかる荷重が分散されることにより、応力集中が緩和され、パイプの上下面が側面よりも遅く破壊されたものと考えられる。また、直径の大きいパイプほど、側面にかかるモーメントが大きいため、側面は上下面より先に壊れたとも考えられる。原因の詳細については、今後さらに研究が必要である。

4.2 破壊強度

パイプが圧縮破壊する時の荷重である最大破壊強度とパイプの寸法パラメータKとの関係を図4に示す。

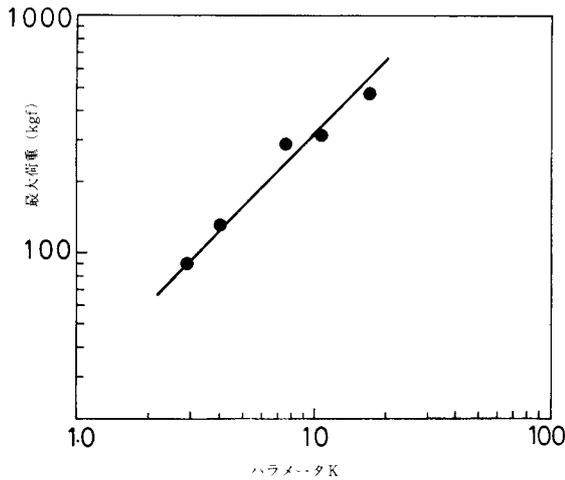


図4. 最大破壊荷重 P_k とパラメータKとの関係

ここで、パラメータKは次式より求めた。

$$K = \frac{lt^2}{d} \quad (5)$$

破壊時の最大荷重 P_k とKとの間には相関関係がみられ、最小自乗法を用いて $P_k = 36.7K$ (相関係数 $r = 0.98$) という関係式を得た。テープ圧成形法により作製した積層板の曲げ応力値を用い、(1)式あるいは(4)式より補正係数 $C = 1.08$ を得た。補助係数が1.0に近いことより、(1)式および(4)式は適用可能であり、(2)式を用いて外圧を受けるパイプの破壊強度を求めることができる。

4.3 パイプの見掛けの弾性係数

図5に示すひずみ量と荷重との関係から、パイプの見掛けの弾性係数を次式のように定義した。

$$E_1 = \frac{(P_2 - P_1)d}{(\epsilon_2 - \epsilon_1)lt^2} \quad (6)$$

$$E_2 = \frac{(P_2 - P_1)d}{2(\epsilon_2' - \epsilon_1')lt^2} \quad (7)$$

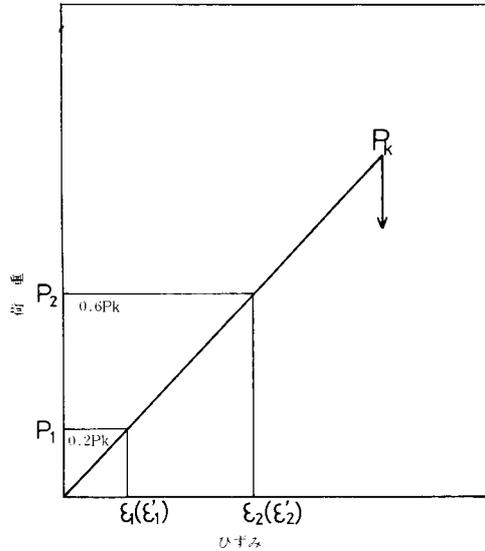


図5. 荷重-ひずみ曲線の模式図

ここで、 E_1 はゲージ(1)から求められる見掛けの弾性係数で、 P_1 と P_2 は最大荷重 P_k の20%と60%の値、 ϵ_1 と ϵ_2 はそれぞれのひずみ量である。 E_2 はゲージ(2)から求められる見掛けの弾性係数で、 ϵ_1' と ϵ_2' はそれぞれ荷重 P_1 と P_2 時のゲージ(2)のひずみ量である。見掛けの弾性係数 E_1 、 E_2 とパイプの寸法パラメータKとの関係を図6に示す。

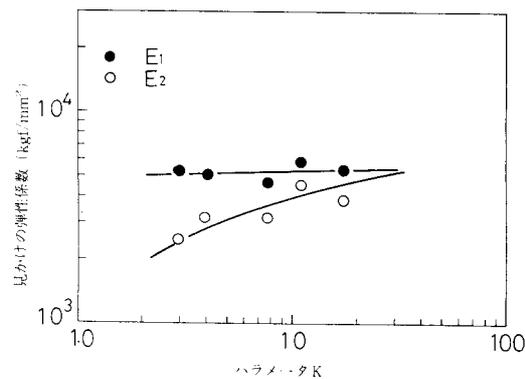


図6. 見かけの弾性係数とパラメータKとの関係

E_1 はKの増大によってあまり変化せず、ほぼ一定値を示した。一方、 E_2 はKの増大にともなって大きくなる傾向を示した。Kの値が小さい時、 E_1 は E_2 より

大きい、Kの増大にともなって両者は徐々に接近する。つまり、パイプの直径が小さい(Kが大きい)場合には、 E_1 と E_2 はほぼ同じ値を示し、パイプの直径が大きくなると、両者は異なる値を示す。パラメータKの値が小さい場合、パイプの左右両側の弾性係数が上下側の弾性係数より低くなり、パイプの左右両側が先に破壊すると考えられる。これは4.1節で述べた破壊の様相と一致する。

5. 結 言

外圧を受けるCFRPパイプの強度はパイプのパラメータKによって変動する。パイプの応力 $\sigma_x(\sigma_y)$ は(1)式と(4)式を使って実験的に求めることができる。逆に応力 $\sigma_x(\sigma_y)$ がわかれば、(2)式を使ってパイプの強度を求めることができる。寸法パラメータKの大きいパイプは上下側が先に破壊し、パラメータKの小さいパイプは左右側が先に破壊することがわかった。

CFRPパイプの強度はパイプの寸法パラメータ以外にも、積層材、加工方法、成形温度などによって大きく影響されることが考えられる。今後、これらの影響を考慮し、各種パイプの機械的強度を実験的に研究する所存である。

6. 謝 辞

本研究の論文作成に当り、御協力・御助言下さった材料開発科の下野 功、菅原智明両研究員に衷心より感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 工業材料：39 (1), 16 (1991).
- 2) 北海道立工業技術センター：平成3年度函館地域加速的技術開発支援事業成果報告書。(1992).
- 3) 粕谷平和, 植村益次：材料, 34, 262 (1985).
- 4) 粕谷平和：材料, 38, 1378 (1989).
- 5) 平井恒夫, 横山敦士, 村田泰彦：材料, 35, 354 (1986).
- 6) 林 毅編：複合材料工学, 日科技連, 東京, 1262 (1988).
- 7) 宮入裕夫：島津科学計測ジャーナル, 2 (5) 173 (1990).
- 8) 山口章三郎, 大柳 康, 辻川洋三郎, 高橋義男：材料, 23, 588 (1974).