

CFRP 角パイプの圧縮挙動に関する有限要素解析

Finite element analysis of CFRP box column in compression

北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科

○ 学生員 池田 真 (Makoto Ikeda)
正会員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)
学生員 櫻庭 浩樹 (Hiroki Sakuraba)
F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

1. はじめに

炭素繊維強化ポリマー(Carbon Fiber Reinforced Polymer CFRP)は、現在航空宇宙分野において広く用いられている材料であり、土木分野においても既存の材料に変わる材料として適用が研究されている。CFRP は高い耐久性や材料強度を有しているが、異方性を有していることから、既存の材料と比べ部材設計は複雑である。

等方性材料と異なり CFRP はせん断弾性係数やせん断強度が軸方向の特性値と比べて著しく低く、この特性が従来の設計法や仮定の適用を妨げている。現状では補修・補強材料としての利用がほとんどであり、主要部材として設計された例は少ない。よって建設構造物を対象とした設計を可能にするためには、CFRP の損傷と破壊について理解することが必要である。

現在までに、CFRP 材料と部材の実験的検討が行われている。本研究では CFRP 角パイプの圧縮試験を対象とし、積層構成の異なる 3 種類の試験体の挙動について有限要素解析を行い、損傷と破壊のメカニズムについて検討することを目的としている。

2. CFRP 角パイプの圧縮実験

2.1 実験概要

既往の実験では異なる繊維配向の CFRP 角柱を用意し、それらの中詰め材なし、端部を石膏で固定したものを対象としている。試験体の CFRP 角柱は高さ 80mm、1 辺 40mm の中空正方形断面で板厚は 3mm である。載荷方法は、角柱試験体を荷重が低下するまで軸方向に載荷している。図 - 1 に角パイプ試験体形状、図 - 2 に端部固定条件を示す。両端部の石膏は鋼製の皿に流し込まれ、この鋼製の皿を上下から圧縮する形となる。

CFRP 角パイプは軸方向(L)と周方向(T)の繊維比率が軸:周で 9:1(L9T1), 2:1(L2T1), 1:1(L1T1)の 3 種類製作されており、載荷方法は 3 種類とも同じで荷重が低下するまで載荷を行うものとする。また、実験で得られた最大荷重、最大 CFRP 応力、最大ひずみは、3 種類の繊維配向の試験体各 3 本から得られたものの平均値を用いている。

2.2 破壊性状

実験では、全ての試験体において、角パイプを固定している端部において破壊が生じており、中腹部は健全なままであった。

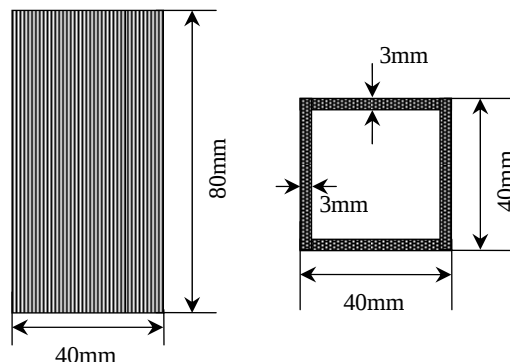


図 - 1 試験体形状

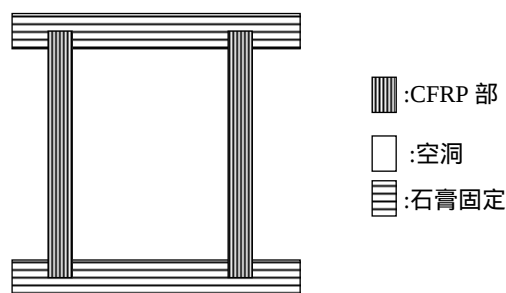


図 - 2 端部固定条件

3. CFRP 角パイプの有限要素解析

3.1 解析モデルの概要

解析モデルを図 - 3 に示す。FEM 解析の対象は前述した中詰め材なしで端部境界条件は固定である 3 種類の繊維配向の試験体である。解析では直交異方性の 8 節点ソリッド要素を用い、1/4 対称モデルとしている。表 - 1, 2, 3 に実験から得られた特性値と文献等から仮定した各繊維配向の材料特性値²⁾を示す。1 が梁軸方向、2 が周方向、3 が板厚方向である。表 - 1, 2, 3 より今回の CFRP は直交方向に積層したため 11 方向引張強度が高く、せん断強度が低いことが確認できる。

3.2 Tsai-Wu の破壊規準

CFRP の破壊規準には、Tsai-Wu の破壊規準¹⁾を用いている。この破壊規準は CFRP のような直交異方性の積層板において、6 つの応力状態を考慮する式であり、材料強度から異方性を考慮した係数を得ることができる。式(1)に Tsai-Wu の破壊規準を示す。式(2)は式(1)の F_i と F_{ii} を示しており、表 - 1, 2, 3 の材料特性により決まる。L1T1, L2T1, L9T1 の各供試体について、式(1)の左辺で表される破壊指標値が右辺と等しくなったとき破壊が生じる。

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + 2F_{13}\sigma_3\sigma_1 + F_{44}\tau_{23}^2 + F_{55}\tau_{13}^2 + F_{66}\tau_{12}^2 = 1 \quad (1)$$

$$F_i = \frac{1}{\sigma_i^T} + \frac{1}{\sigma_i^C} \quad F_{ii} = -\frac{1}{\sigma_i^T \cdot \sigma_i^C} \quad (i = 1, 2, 3)$$

$$F_{44} = \frac{1}{(\tau_{23}^u)^2} \quad F_{55} = \frac{1}{(\tau_{13}^u)^2} \quad F_{66} = \frac{1}{(\tau_{12}^u)^2} \quad (2)$$

3.3 境界条件と隅角部の取り扱い

端部境界条件については、固定を水平変位固定境界条件と仮定し、モデル端部の節点のみ固定するケースと、モデル上下部分の一要素分の節点を固定するケースの2ケースを考えた。

また、CFRP 角パイプは製作時に角部で繊維が折れ曲がるため、側面と比較して角部の完全なモデル化が難しい。そこをモデル化あたり、既往の研究²⁾に従い角パイプの隅角部を水平方向の材料特性値が等しい横等方性材料として取り扱った。また、隅角部を横等方性とせず、側面を角部まで延長したケースも検討した。

上記の複数のケースについて解析モデルを作成して解析結果を検討したところ、上下部分の一要素分の節点を固定し、隅角部では側面を角部まで延長したケースが、実験に近い破壊性状を示した。よって以降の解析では、このケースに従い3種類の角パイプの解析を行う。

4. 解析結果と考察

4.1 結果

図 - 4 に各種試験体のひずみ(μ)と一軸圧縮応力(MPa)の関係を示し、図 - 5 に破壊を起こした箇所の荷重と破壊指標値の関係を示している。図 - 5 は設定荷重に達する前に破壊に到達していることを示している。図 - 6, 7 は破壊指標値分布を表しており、各種試験体とも同様な結果となった(図 - 7 は L9T1)。またこれらの図は破壊直前の値を表示している。解析では、破壊が生じると試験体全体に破壊が進行する為である。ただ直前の破壊指標値から特定する破壊箇所には相違はなく、以降も同様に破壊直前の値を用いるものとする。

表 - 1 L1T1 の材料特性(単位: MPa)

σ_1^T	1759	σ_3^T	62
σ_1^C	-612	σ_3^C	-173
σ_2^T	1759	E_3	8500
σ_2^C	-612	τ_{23}^u	32
E_1	81000	τ_{31}^u	46.1
E_2	81000	G_{23}	3200
τ_{12}^u	67.7	G_{31}	3200
G_{12}	3560	μ_{23}	0.465
μ_{12}	0.08	μ_{13}	0.465

表 - 2 L2T1 の材料特性(単位: MPa)

σ_1^T	1759	σ_3^T	62
σ_1^C	-713	σ_3^C	-173
σ_2^T	715	E_3	8500
σ_2^C	-247	τ_{23}^u	32
E_1	88800	τ_{31}^u	46.9
E_2	39000	G_{23}	3200
τ_{12}^u	68.1	G_{31}	3200
G_{12}	3530	μ_{23}	0.464
μ_{12}	0.1	μ_{13}	0.462

表 - 3 L9T1 の材料特性(単位: MPa)

σ_1^T	1790	σ_3^T	62
σ_1^C	-674	σ_3^C	-173
σ_2^T	295	E_3	8500
σ_2^C	-173	τ_{23}^u	32
E_1	98100	τ_{31}^u	49.5
E_2	20900	G_{23}	3200
τ_{12}^u	71.1	G_{31}	3200
G_{12}	3500	μ_{23}	0.46
μ_{12}	0.13	μ_{13}	0.43

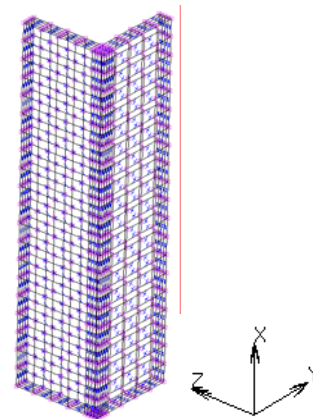


図 - 3 解析モデル

図 - 6 はモデルの上端と下端より 8mm 前後の箇所での破壊を起こしていることを示している。この解析ケースでは上下端部一要素を水平方向に固定しており、モデルでは軸方向に 20 分割しているの一要素辺り縦の長さは 4mm となり、端部で破壊したという実験の結果と同様であることを示している。

表 - 4 に実験値と解析値の比較を示す。実験値では荷重、応力共に L1T1 が最大であるが解析では最小となった。L2T1, L9T1 に関しては値こそ一致していないが実験と同様、応力、荷重が比較的近い結果を示した。またひずみの値が全体的に小さめに示しているのは、上述したように破壊直前のものを表示しているためであると考えられる。

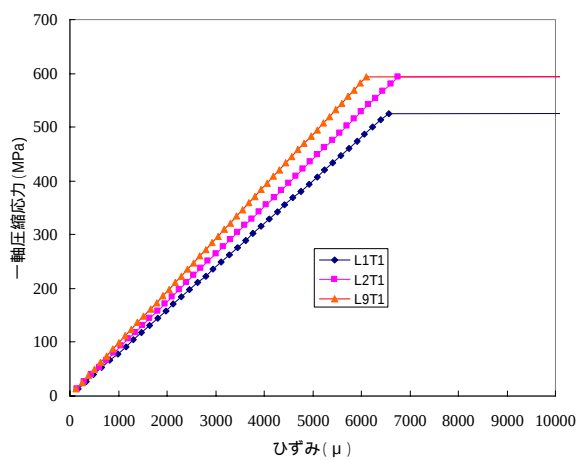


図 - 4 応力 - ひずみ関係

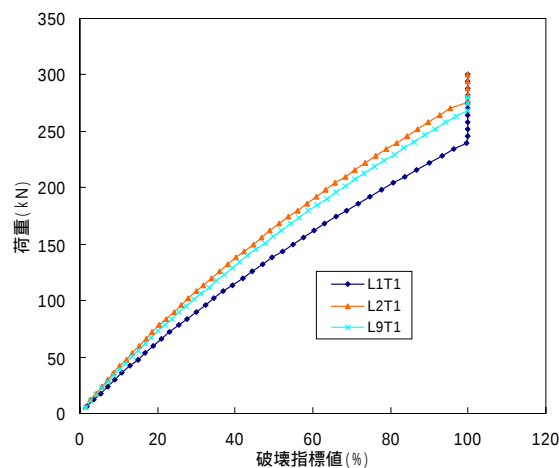


図 - 5 荷重 - 破壊指標値関係

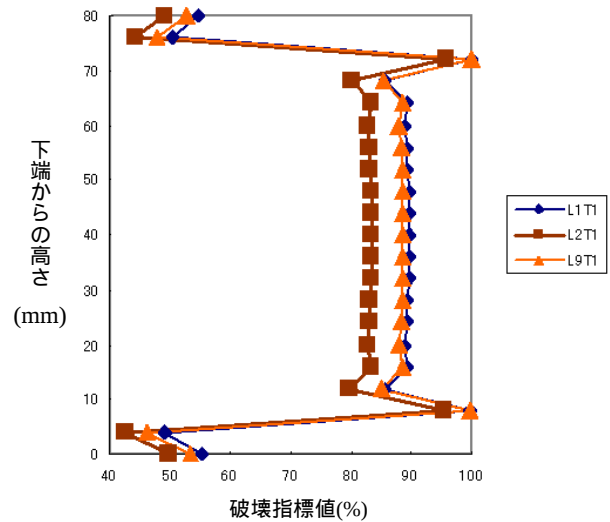


図 - 6 破壊指標値分布

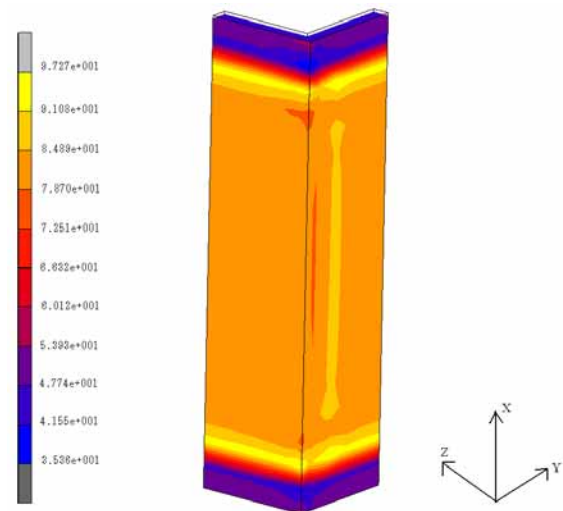


図 - 7 破壊指標値分布図(L9T1)

表 - 4 実験値と解析値の比較

	繊維配向	荷重(kN)	応力(MPa)	ひずみ(μ)
解析値	L1T1	240	525	6564
	L2T1	270	594	6752
	L9T1	269	594	6102
実験値	L1T1	268	605	9726
	L2T1	245	553	7696
	L9T1	246	555	5225

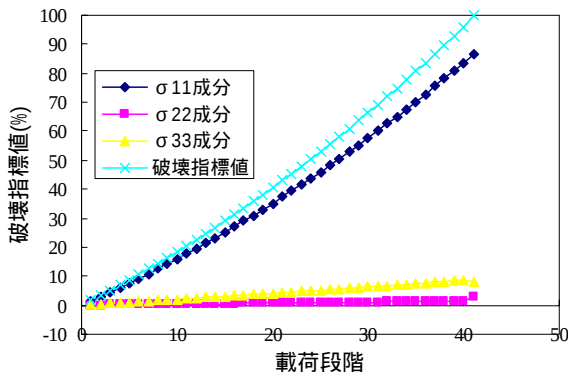


図 - 8 端部破壊指標値関係図(L1T1)

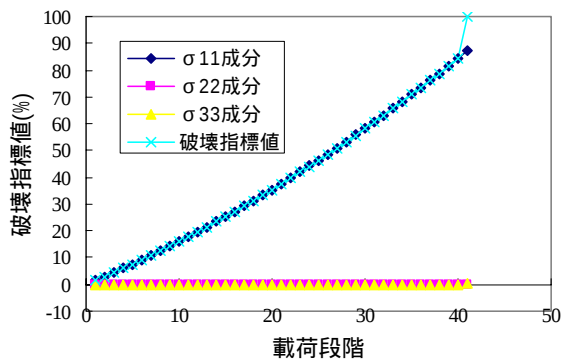


図 - 9 中腹部破壊指標値関係図(L1T1)

4.2 考察

L1T1 について破壊の生じた試験体端部と健全な試験体中央部における破壊指標値と主な応力成分の割合を図 - 8,9 に示す。各応力成分が占める破壊指標値の割合からみて軸方向が顕著であり、おもに軸方向の応力による破壊であると考えられる。しかし端部では端部拘束による22方向、33方向の応力が発生しており、それらが加わり破壊指標値が高まり、中腹部より先に破壊に至っている。この事は各試験体で同様であり、拘束により発生する応力が影響を及ぼしていると考えられる。

図 - 10,11,12 は端部と中腹部における軸方向の応力と12方向の応力を破壊包絡線と共に表示した図である。端部拘束により生じる22方向と33方向の応力がせん断を生じさせ、端部において包絡線に、より近付くことが示されている。

5. まとめ

本研究は、FEMにより既往のCFRP角パイプ圧縮実験を解析することで応力分布と破壊性状を把握しCFRP角パイプの圧縮挙動を理解するために行われた。以下にまとめを示す。

- 1) 破壊性状が端部の境界条件により大きく影響される。
- 2) FEM解析により端部境界条件を1要素分水平方向拘束にすることで破壊性状の傾向を再現できた。
- 3) L2T1とL9T1は比較的近い破壊荷重が解析により再現された。

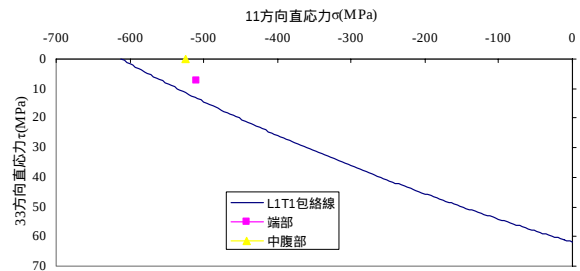


図 - 10 L1T1 破壊包絡線

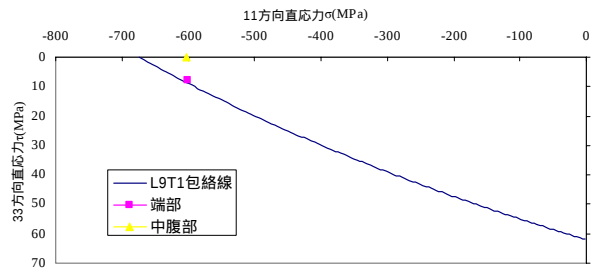


図 - 11 L2T1 破壊包絡線

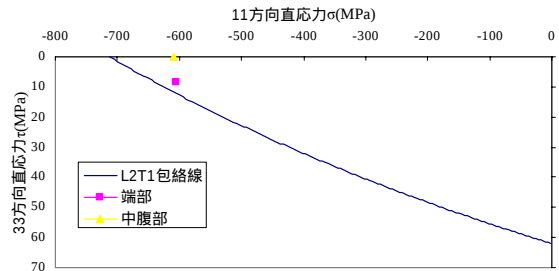


図 - 12 L9T1 破壊包絡線

- 4) 試験体端部と中腹部では発生する応力成分に違いがあり、その違いが破壊部位の違いとなり現れた。

今後の課題として、実験条件をより反映した解析モデルを作成し、中詰め材を有するCFRP角パイプの圧縮についても検討することが挙げられる。

謝辞

本研究で用いた実験結果は清水建設株式会社技術研究所の御厚意により提供されました。ここに記し、御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 邊吾一, 石川隆司: 先進複合材料工学, 培風館, pp.25-41, 2005
- 2) Bishnu Prasad Gautam: Finite element analysis on deformation, damage, and failure mechanisms of concrete-filled CFRP box beam under transverse and axial loads, Master thesis, University of Tokyo, 2007.