

京都大学大学院工学研究科 正会員 小野紘一 京都大学大学院工学研究科 正会員 杉浦邦征
京都大学工学部 学生員 ○三木亮二 京都大学大学院工学研究科 学生員 佐々木敦
コニシ株式会社 若原直樹 日石三菱株式会社 小牧秀之

1. はじめに

繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastics:以下 FRP と略す)は、耐久性に優れ、軽量かつ高強度であるため、これらの特性を十分に活かすことができれば新たな構造形態を模索することが可能となる。現在 FRP として主に用いられているのは、ガラス繊維を用いた GFRP と炭素繊維を用いた CFRP である。GFRP は欧米を中心として既に数十の土木構造物に対して用いられている。ところが、GFRP より高強度である CFRP は、現在のところ補強・補修材としての利用しかなされていない。そこで、本研究では、CFRP の構造部材としての実用化に向けて引張試験、圧縮試験、曲げ試験を行い、これらの破壊性状や強度特性を実験的に把握することを目的とし、特に、積層数の強度への影響について検討を行った。

2. 供試体および実験の概要

供試体を図-1 に示す。圧縮・曲げ供試体は角形断面を有し、積層数の異なる5種類の供試体を用意した。供試体一覧を表-1 に示す。供試体 A は、繊維が軸方向にのみ配置されている試験体であり、供試体 C は、CFRP 薄板の両外縁に軸直角方向の層を積層した試験体である。また、供試体名中の数字は軸方向の積層数を表している。

引張試験は、1辺 35mm の角形圧縮・曲げ供試体の板要素から幅 12.5mm、長さ 270mm の板状供試体を取り出して行った。なお、供試体中央部に 2 軸ゲージを貼付し、各層厚について3体ずつ行った。また圧縮試験では、長さ 100mm の角形断面短柱供試体を用いた。なお、各面中央部にひずみゲージを貼付し、各層厚について 2 体ずつ行った。ここでは、供試体端部での破壊を防ぐため厚さ 2mm の鉄板を供試体内側にはめ込み、载荷を行った。さらに、曲げ試験では、長さ 400mm の角形断面はり供試体を用いた。ここで、試験区間は 300mm であり、支点-载荷点間は 100mm の 2 点载荷である。また、载荷点下での破壊を防ぐために角形断面中空部に 2mm の鋼板を隔壁とし

表-1 供試体一覧

	積層数	方向	肉厚		積層数	方向	肉厚
A-08	0	周	無し	A-24	0	周	無し
	8	軸	1.000		24	軸	3.000
	0	周	無し		0	周	無し
Total	8		1.000	Total	24		3.000
C-08	1	周	0.125	C-24	3	周	0.375
	8	軸	1.000		24	軸	3.000
	1	周	0.125		3	周	0.375
Total	10		1.250	Total	30		3.750
C-16	2	周	0.250				
	16	軸	2.000				
	2	周	0.250				
Total	20		2.500				

肉厚の単位は mm

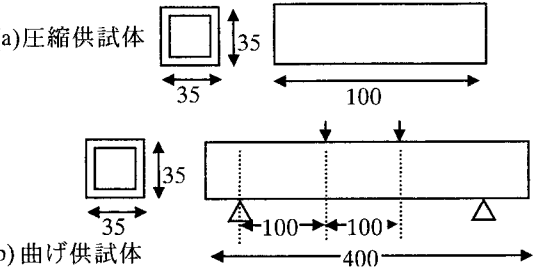


図-1 供試体図

3. 試験結果および考察

各試験で得られた結果は、有効断面積(軸方向の層のみの断面積)を用いて整理し、表-2～表-4 にまとめて示す。ここで、表中の数値は、各供試体の平均値を記している。

引張試験結果を表-2 に示す。弾性率は全ての供試体で 132~146(kN/mm²)と近い値であった。よって、周方向の層の有無、層厚の大小に関わらずほぼ同じ値をとることが分かった。また各供試体の強度は、積層数の増加に伴い低くなった。これは、層厚が大きくなるにつれて内部欠損の含まれる可能性が高くなること、つかみ

表-2 引張試験結果

	弾性率 (kN/mm ²)	破壊荷重 (kN)	引張強度 (kN/mm ²)
A-08	140.7	29.77	2.29
C-08	139.9	30.00	2.24
C-16	142.9	51.18	1.95
A-24	135.5	66.93	1.67
C-24	136.9	65.95	1.65

部での荷重伝達の影響と考えられる。また、破壊荷重に関しては、周方向の層の影響はなかった。

圧縮試験結果を表-3 に示す。A シリーズでは角形断面隅角部に沿って縦に亀裂を生じ、断面を構成する各板要素が独立して座屈破壊(柱座屈)した。これは、圧縮力を受け、断面が膨らもうとするが、樹脂の抵抗力だけでは断面形状を維持することができず、隅角部で破壊に至ったと予想される。一方、C-08 では隅角部付近に亀裂は生じず、各板要素で局部座屈(板座屈)し、また、C-16、C-24 では端部において圧壊した。これは、供試体の内側に鋼板をはめ込み断面の変形を拘束したが、供試体端部で炭素繊維がプラスチック内で座屈したり、積層間での剥離等に起因して破壊したと考えられる。また C-16、C-24 では、破壊荷重が予想耐力(引張時)の6割程度となった。したがって、前述のように端部での破壊の原因、および試験方法等も含め、詳細な検討が必要である。一方、座屈を起こした供試体では、細長い柱(角形断面の4面が独立と仮定)の弾性座屈強度を若干上回る程度であった。また、周方向に繊維が存在すると圧縮強度が増す傾向を示しており、特に、層厚が20層を超えると弾性率は115~121(kN/mm²)とほぼ同程度となった。

曲げ試験結果を表-4 に示す。周方向の層のないAシリーズでは角形断面隅角部による破壊であった。Cシリーズにおいては、圧縮側において座屈破壊することが予想されたが、支点近傍での腹板の面内座屈破壊が顕著であった。このことから支点部での補強の必要性が考えられる。各供試体の強度は圧縮試験と同様に予想耐力より下回ったが、支点での破壊を起こさないように補強を行えば、耐力向上が期待できる。また、周方向に繊維が存在すると曲げ耐力が増加する傾向を示している。A-24 および C-24 の荷重-変位曲線を図-2 に示す。図中の理論値は、微小変形理論による式(1)。これより、圧縮試験で求めた弾性率を用いると理論値と実測値の初期直線部分が非常によく一致することがわかる。

曲げ試験結果を表-4 に示す。周方向の層のないAシリーズでは角形断面隅角部による破壊であった。Cシリーズにおいては、圧縮側において座屈破壊することが予想されたが、支点近傍での腹板の面内座屈破壊が顕著であった。このことから支点部での補強の必要性が考えられる。各供試体の強度は圧縮試験と同様に予想耐力より下回ったが、支点での破壊を起こさないように補強を行えば、耐力向上が期待できる。また、周方向に繊維が存在すると曲げ耐力が増加する傾向を示している。A-24 および C-24 の荷重-変位曲線を図-2 に示す。図中の理論値は、微小変形理論による式(1)。これより、圧縮試験で求めた弾性率を用いると理論値と実測値の初期直線部分が非常によく一致することがわかる。

$$\delta = \frac{5Pl^3}{324EI} \quad (1)$$

ただし、 δ : 載荷点でのたわみ量(mm) , P : 荷重(kN) , ℓ : 部材長(300mm) , E : 圧縮弾性率(kN/mm²) , I : 断面2次モーメント(mm⁴)

4. まとめ

- ① 周方向の層は断面の広がりを抑え、これが隅角部の応力集中に対する抵抗力を向上させ、圧縮強度や曲げ強度が向上することが分かった。
- ② 層厚の小さな場合は、座屈破壊が顕著となり強度が発揮できないことが分かった。
- ③ 各供試体の弾性率は有効断面積を用いるとほぼ同じであり、引張弾性率は139(kN/mm²)程度、圧縮弾性率は117(kN/mm²)程度となることが分かった。
- ④ 圧縮試験、および曲げ試験は、その載荷方法や、支持条件によって局部的な破壊が生じる可能性があり、ばらつきが少なく、また強度を精度よく評価できる標準的な試験方法を確立する必要がある。

表-3 圧縮試験結果

	弾性率 (kN/mm ²)	予想耐力 (kN)	圧縮耐力 (kN)	圧縮強度 (kN/mm ²)
A-08	135.8	184	16.1	0.113
C-08	125.0	184	43.5	0.310
C-16	116.5	353	208.0	0.766
A-24	115.0	508	234.3	0.590
C-24	119.0	508	300.5	0.763

表-4 曲げ試験結果

	予想耐力 (kN)	曲げ耐力 (kN)	圧縮強度 (kN/mm ²)
A-08	14.9	2.67	0.225
C-08	17.9	8.95	0.624
C-16	30.5	17.27	0.727
A-24	34.1	12.65	0.473
C-24	38.6	25.45	0.834

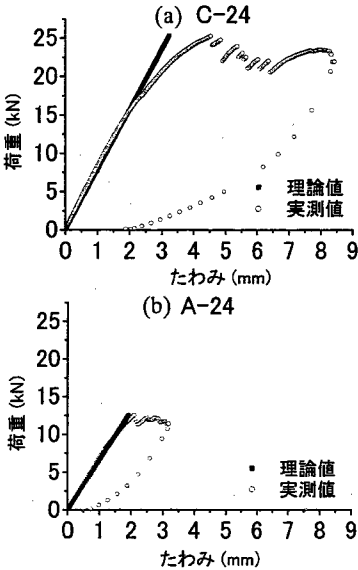


図-2 荷重-変位曲線