

炭素繊維強化複合材料からなる構造部材の強度特性に関する解析的検討

Numerical Assessment on Strength of Carbon Fiber Reinforced Polymer Structural Members

杉浦邦征* 三木亮二** 小野紘一***, 小牧秀之****

Kunitomo SUGIURA, Ryoji MIKI, Koichi ONO and Hideyuki KOMAKI

* Ph.D., 京都大学大学院助教授, 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

** 工修, 新日本製鉄(株), Eng.事業本部鉄構海洋事業部設計部 (〒229-1131 相模原市西橋本 5-9-1)

*** Ph.D., 京都大学教授, 国際融合創造センター融合部門 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

**** 工修, 新日本石油(株)中央技術研究所研究員, 複合材料グループ (〒231-0815 横浜市中区千鳥町八番地)

The objective of this study is to assess the strength of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) numerically focusing the effect of layer profile on the strength. First of all, the numerical models were verified with the existing loading test results. Then, several layer profiles for the hollow rectangular CFRP structural members are analyzed. It is obtained that the layers with fibers in the longitudinal and transverse directions, as well as with some angles should be properly laminated in order to optimize the strength. In addition, the lamination should be symmetric to the middle plane of CFRP plate and 45 degree layers could be the most effective for the prevention of the deformation in cross section resulting in the higher stiffness and strength. It is also recommended that the behavior of CFRP should be evaluated in conjunction of nonlinear stress and strain relation for more complex layer profiles.

Key Words: Carbon Fiber Reinforced Polymers, Strength, Compression, Bending, Buckling

キーワード: 炭素繊維強化複合材料, 強度, 圧縮, 曲げ, 座屈

1. 概要

繊維強化複合材料 (Fiber Reinforced Polymers: 以下 FRP と略す) は, 耐久性に優れ, また軽量かつ高強度でありながら, 土木・建築構造物においてはこれまで補強材としての利用が中心であった。しかしこれらの特性を十分に活かすことができれば一般構造部材として利用できるだけでなく, 新たな構造形態を創造することに貢献できるものと考えられる。特に, 現有の構造材料である鋼, コンクリートにかわり FRP を構造材料として利用できるならば, 建設工事における施工の合理化や, 省力化が一層可能であると考えられる。例えば, 軽量であるため, 架設時に大型の重機を必要とせず, 工期の短縮が可能となり, 架設費用を大幅に削減することが出来ると考えられ, 今後急激な高齢化により世界一の高齢化社会になると予想されるわが国において, 建設業界における労働者の高齢化, 熟練者の不足という問題の解決に役立つものと考えられる。

現在, 建設分野で用いられている FRP は, ガラス繊維を活用した GFRP であり, FRP の中では比較的安価な材料であるため, 非常に多くの住宅設備関連の構造体に用いられている¹⁾。しかし, 炭素繊維を活用した CFRP は, 単位重量あたりの強度, 弾性係数 (それぞれを, 比強度, 比弾性係数と呼ぶ) の観点では, 優れた材料ではあるが, 価格格的制約から, まだまだ積極的に土木構造物の構造材料として実用化する社会的取り組みは少ない。このような状況では

あるが, GFRP, CFRP 等の FRP 系の新材料は, 欧米を中心として既に多くの橋梁構造物の構造材料として使用されている²⁾。その多くは, 耐久性向上の観点から, 床版の代替構造材料としての活用であり, 橋梁本体の構造材料としての活用は, まだ歩道橋の建設程度に止まっている。しかし, 海外では, 一般車両規格に対応した道路橋の主構造部材への適用が検討されるなど, わが国においても今後の研究開発が望まれているところである³⁾。

さて, FRP 材料の土木構造物への適用のために行われた FRP 構造体の力学的挙動に関する最近の国内の研究としては, 著者らによる, CFRP による中空正方形断面部材および H 型断面部材の圧縮・曲げ強度に関する実験的検討が挙げられる^{4),5)}。また, 木嶋らは, 安価な GFRP を主部材として, 高比強度・高比弾性係数の CFRP を限定的に貼り合わせ, 部材性能を改善しようとしたハイブリット FRP 構造部材に着目し, その特性を左右する接着面のせん断付着強度に関して検討している⁶⁾。一方, 構造物としては, 山田らが FRP 歩道橋の振動特性について検討している⁷⁾。一般に, FRP 構造体は, 繊維層と樹脂層が交互に配置された積層複合体であり, 各繊維層における繊維の配向角の組み合わせが, 積層構造としての複合体の力学的特性を左右する。しかし, 大量生産が望まれる機械部品では, 積層数は,それほど多くなく, 比較的薄肉もしくは充実の部材として構成され, 材料物性が, そのまま構造体の物性に反映されることが多い。他方, 大型である航空・宇宙分野, 船舶にお

る FRP 構造体は、多積層構造体となり、ひとつひとつがオーダーメイドであり、単品としての安全性に配慮した積層構造の設計が行われ、実物大実験によってその設計の妥当性の最終照査が行われることが多い。一方、土木構造物も大型構造物であり、多積層構造体として捉える必要があり、力学的挙動に及ぼす寸法効果の影響を明らかにする必要があることを著者らは指摘している⁴⁾。

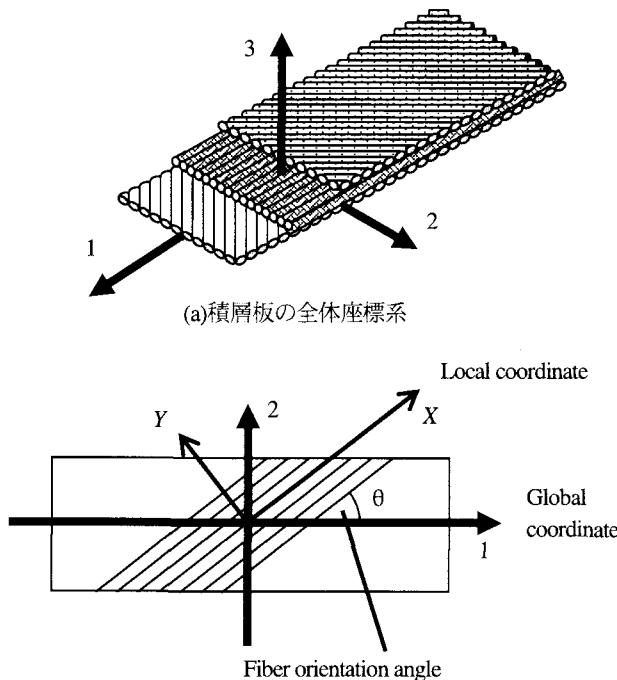
そこで、本研究では、著者らが行った載荷実験結果を参照して、汎用有限要素解析プログラム ABAQUS により有限要素モデルを構築し、Tsai-Wu の破壊基準を採用して、破壊に至る挙動の解析を行う。特に、積層構造の違いが、CFRP 部材の圧縮・曲げ強度に及ぼす影響を数値解析により明らかにし、積層構造の基本設計に関する資料の提供を目的とする。

2. 数値解析の概要⁸⁾

2.1 積層構造の概要

(1) 座標系と積層構造の定義

積層平板全体としての座標系は、積層板を構成する各ラミナの座標系との組み合わせで定義する必要がある。図-1 に本解析で用いた座標系を示す。全体座標系(1-2-3 軸)は、部材軸方向に 1 軸、同一平面内直角方向に 2 軸、板厚方向に 3 軸を定義する。一方、各ラミナの局所座標系(x-y-z 軸)は、繊維方向に x 軸、同一平面内直角方向に y 軸、板厚方向に z 軸を定義する。なお、1 軸と x 軸のなす角を、繊維配向角 θ と定義する。



(b) ラミナ（一方向繊維強化複合材料板）の局所座標系
図-1 解析に用いた座標系

一般に、積層構造は、 $[0_2/90_2/0_2]$, $[0_2/90]_s$ といった記述により表現され、ともに 0 度の繊維配向角を有するラミナを 2 層、90 度の繊維配向角を有するラミナを 2 層、そして 0 度の繊維配向角を有するラミナを 2 層、順に積層した板構造を示す。後者は、対称性を考慮して片側の積層構造のみを記述したものである（対称積層板のみ記述可能）。なお、解析対象とした積層構造については、これらの標記法を用いて次章で定義する。

(2) 破壊の定義

一般に、FRP 系の新材料では、応力およびひずみの各成分が相互に影響を及ぼし、それらの関係がある状態に至った時、破壊が生じるといった 2 次破壊規準が用いられる。一般式は、以下の通りである。

$$F_{ij} \sigma_i \sigma_j + F_i \sigma_i = 1 \quad (1)$$

ここで、添字 (i, j) は、 $i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ で 6 つの応力成分 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}, \sigma_{xy}$ の各成分) を表し、総和規約を適用した式の表記である。応力に代わり、ひずみ成分によっても同様な規準が提案されている。これまで多様な規準式が提案されているが、本解析では、最もよく用いられる経験式 Tsai-Wu の破壊規準を用いて解析を行った。なお、Tsai-Wu の破壊規準は、以下の通り与えられる。

$$\begin{aligned} & F_{xx} \sigma_x^2 + 2F_{xy} \sigma_x \sigma_y + F_{yy} \sigma_y^2 + \\ & F_{ss} \sigma_s^2 + F_x \sigma_x + F_y \sigma_y = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

なお、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_s (= \sigma_{xy})$ は、それぞれ、ラミナの X 軸方向（繊維方向）の応力、Y 軸方向（繊維直角方向）の応力、および面内せん断方向の応力である。また、強度パラメータ F は、単軸の引張試験/圧縮試験およびせん断試験により、下記のように与えることができる。

$$\left. \begin{aligned} F_{xx} &= \frac{1}{\frac{\sigma_{TU}^2}{1} - \frac{\sigma_{CU}^2}{1}} \\ F_x &= \frac{\sigma_{TU}^2}{\sigma_{TU}^2} - \frac{\sigma_{CU}^2}{\sigma_{CU}^2} \\ F_{yy} &= \frac{1}{\frac{\sigma_{TU}'^2}{1} - \frac{\sigma_{CU}'^2}{1}} \\ F_y &= \frac{\sigma_{TU}'^2}{\sigma_{TU}'^2} - \frac{\sigma_{CU}'^2}{\sigma_{CU}'^2} \\ F_{ss} &= \frac{1}{\tau_U^2} \\ F_{xy} &= -0.5 \sqrt{F_{xx} \cdot F_{yy}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 σ_U, σ'_U および τ_U は、ラミナの繊維方向の一軸強度、繊維直角方向の一軸強度、ラミナ面内のせん断強度であり、解析には表-1 の値を用いた。なお、添字の「T」、「C」は、引張、圧縮方向をそれぞれ示す。ここで、応力空間での表示では、異方性の強い材料であるため破壊曲面

表-1 数値解析に用いたラミナの強度 (単位: kN/mm²)

σ_{tu}	σ_{cu}	σ'_{tu}	σ'_{cu}	τ_u
2.65	1.47	0.064	0.20	0.080

が非常に偏平となるため、ひずみ空間表示に置き換えて、繊維配向角を0度、90度、45度と変化させ、破壊曲面の差異を図-2に示す。この図から、繊維を45度(実際には、 ± 45 度)に単体として配置する場合は、FRPとしての特性を十分に発揮できないことが分かる。なお、複合材料による構造部材の破壊は、各ラミナの破壊を判定しつつ、破壊規準を満足する場合は、該当するラミナの剛性の全体剛性への寄与を除外しながら、進行性破壊を追跡できることも可能と考えられる。ただし、解析対象の連続体としての仮定の妥当性について慎重な検討を要するので、本研究では、最初のラミナの破壊により、構造体の破壊とした。

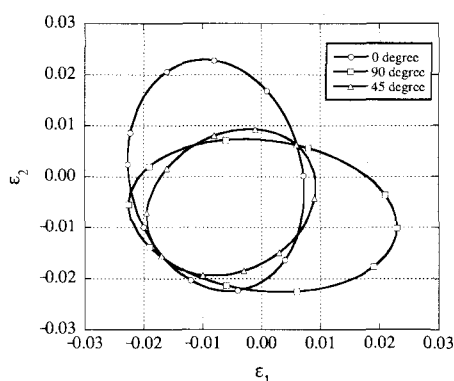


図-2 ひずみ表示による破壊曲面の差異

(3) 積層薄板の有限要素モデル

FRP 積層板は、厚肉シェル理論に対して誘導された有限要素 (ABAQUS では S8R5 要素) を用いて、構造体をモデル化した⁹⁾。FRP 積層板中央面の位置の代表変形に基づき、各積層の変形を定義することとなる。したがって、各積層ごとに繊維の配向角を正しく評価し、面内、カップリング、および曲げ剛性マトリックスへの貢献を評価するとともに、得られた変形状態から個々のラミナの応力・ひずみを算定することとなる。これらの値を、2.1(2)で述べた破壊規準と照らし合わせて、終局状態を判断した。なお、一般的な、解析手法の流れは、文献[8, 9]を参考にしていきたい。また、2.2で述べる解析対象に対して用いた積層板の各ラミナの弾性物性を表-2にまとめて示す。応力-ひずみ関係には、直交異方性材料の関係式を用いている。

表-2 解析に用いたラミナの弾性物性値

E_x (kN/mm ²)	E_y (kN/mm ²)	ν_{xy}	ν_{yx}	G (kN/mm ²)
115.0	8.8	0.45	0.033	5.0

2.2 固有値解析および有限変位解析による座屈強度

(1) 構造モデル

文献[4]における短柱圧縮試験体 (1 辺・外径 35mm, 長さ 100mm の中空角形供試体 (角部 R=2mm)) の積層数 24 (部材軸方向に繊維を有する層を 24 層配置) の A-24 を例にモデル化を行う。すなわち、積層構造は、 $[0_{24}]$, $[0_{12}]_s$ で表される。その形状を、図-3 に示す。有限要素解析では、対称性を考慮して 1/4 を対象に、中空角形断面を構成する各板パネルをシェル要素 (S8R5) によりそれぞれ 16×16 分割した。なお、部材端部は単純支持とし、部材中央の対称断面では、変形の対称性を考慮した境界条件を設定した。

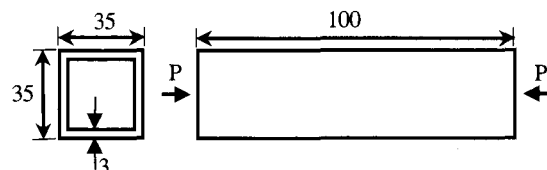


図-3 短柱圧縮試験体の形状 (寸法単位: mm)⁴⁾

(2) 有限変位解析における初期変形の設定

有限変位解析による圧縮力-板たわみ関係を図-4に示す。なお、図中には、A-24 に対する載荷実験で得られた座屈荷重 $P=224$ (kN) を参考までに示す。これを平均応力で標記すると、 $\sigma=0.58$ (kN/mm²) であり、固有値解析から得られる座屈強度 $\sigma_{cr}=0.589$ (kN/mm²) との整合性も確認できる。また、これらの値は、表-1 で与えたラミナの圧縮強度 (材料強度) を大幅に下まわり、弾性座屈強度に対応していることも分かる。また、板の初期変形を、正弦半波で与え、その最大値を板厚の 10%, 1%, および 0.1% と 3 段階で変化させ、複合材料による薄板構成部材で採用すべき初期変形の値を検討した。図-4 より、1%の初期変形を仮定することで、有限変位解析の結果は、十分な精度が得られるものと判断し、3.の解析に用いた。なお、参考として座屈波形を図-5に示す。

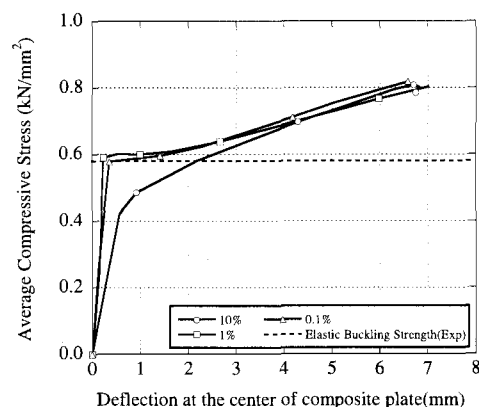


図-4 平均圧縮応力-板たわみ関係

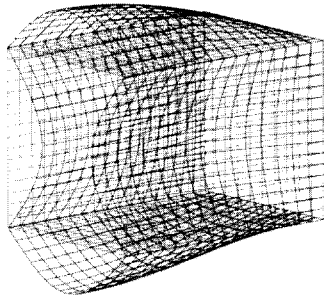


図-5 圧縮荷重下における座屈モード

3. 解析結果および考察

3.1 圧縮部材に関する考察

(1)解析ケース

2.2の解析対象を基本モデル(24積層部材)として、圧縮強度に及ぼす積層構造を検討するため表3に示す解析ケースを設定した。Case1は、繊維配向角が、圧縮強度に及ぼす影響を、Case2は、部材軸方向に繊維を配置したコア層に、繊維配向角の異なるラミナを両面に積層すること(カバー層)の効果を、Case3は、Case2に対して、積層構造を対称配置とすることによる効果を検討するために設定したものである。なお、すべての解析ケースは、同一ラミナを24層に積層する構造を採用しているため、部材の重量は、一定といった条件での強度比較をすることとなる。また、Case1の繊維配向角0度が、基本モデルに相当する。

表-3 圧縮部材の解析ケース

解析ケース	積層構造	繊維配向角度 θ (度)
Case1	$[\theta_{12}/-\theta_{12}]$	0, 30, 45, 60, 90
Case2	2-1 $[\theta_1/\theta_{23}/-\theta_1]$	
	2-2 $[\theta_2/\theta_{20}/-\theta_2]$	
	2-3 $[\theta_4/\theta_{16}/-\theta_4]$	
	2-4 $[\theta_8/\theta_8/-\theta_8]$	
Case3	3-1 $[\theta_1/-\theta_1/\theta_{20}/-\theta_1/\theta_1]$	
	3-2 $[\theta_2/-\theta_2/\theta_{16}/-\theta_2/\theta_2]$	

(2)積層構造と圧縮強度に関する考察

図-6にCase1の解析結果を示す。有限変位解析に基づく弾性座屈強度とTsai-Wuの破壊規準を適用して算定した終局強度を比較して示す。積層構造を形成する各ラミナの繊維の方向は、部材軸方向に対して対称に配置されるが、板中央面に対しては逆対称配置となっている。ただし、すべてのラミナは同じ繊維配向角を有して、荷重作用軸が、積層板の平面内2方向の弾性物性の対称軸であり、その主軸に一致している。結果的に、直交異方性板の圧縮強度は、荷重作用方向に繊維を位置させることで(繊維配向角が0度)、最大強度を発揮するといった当然な結果となった。また、繊維配向角が45度に対して、圧縮強度が最小となる結

果を得た。一方、繊維配向角が0度でない場合、Tsai-Wuの破壊規準による終局強度は、弾性座屈強度を大きく下回り、最大で約40%(例えば、45度の時、0.323から0.125kN/mm²に低減)に低下する。したがって、繊維の方向と荷重作用の方向が一致しない場合、異方性材料であるがために、積層構造内におけるひずみ・応力分布が、著しく変化し、材料破壊が支配的となると想定される。

続いて、図-7にCase2の解析結果を示す。なお、ここでは、Tsai-Wu破壊規準による強度の改善を積層構造の最適化により実現できないかを検討する目的で、Tsai-Wuの破壊規準に基づいた終局強度のみを対象とした。繊維を部材方向に配置したコア層の両側から、繊維配向角を有するラミナを若干層貼り合わせることで、終局強度の向上が見られる。例えば、部材軸直角方向(90度)に1層ずつ貼り付けるだけでも、強度が約50%(0.585から0.882kN/mm²に増加)上昇する。しかし、コア層の積層数に対して相対的にカバー層の積層数が増すと、カバー層があっても、基本モデルの強度を回復することは困難となる。カバー層の繊維配向角にあわせて、その積層数を設定する必要があると考えられる。最後に、図-8にCase3の解析結果を示す。ここでも、Tsai-Wuの破壊規準に基づいた終局強度を対象としている。なお、Case1およびCase2の結果を詳細に検討したところ、積層構造が板厚方向に非対称であることから、板のねじれ変形が顕著に発生していることが明らかになった。この結果を受けて、Case3を設定している。図から、45度層を配置することで、大幅に強度改善が見られ、例えば、Case3-2では、約80%の強度増加(0.585から1.035kN/mm²に増加)が得られた。90度の1層の繊維直角方向への剛性寄与は、45度の2層分のそれに相当する。例えば、Case2-2とCase3-1、Case2-4とCase3-3においては、積層理論上、繊維方向および繊維直角方向の剛性が等しい。ただし、Case3では、積層が板中央面に対して対称であるため、カップリング剛性が消失し、有害なねじれ変形が生じないため、強度の大幅な改善が得られたと考えられる。したがって、45度層を有効に配置することで、合理的な積層構造を形成することが可能と考えられる。

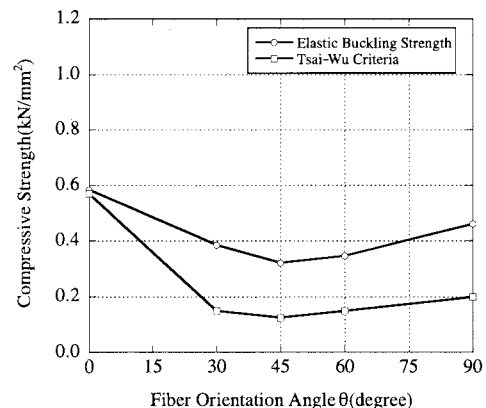


図-6 Case1における圧縮強度の変動

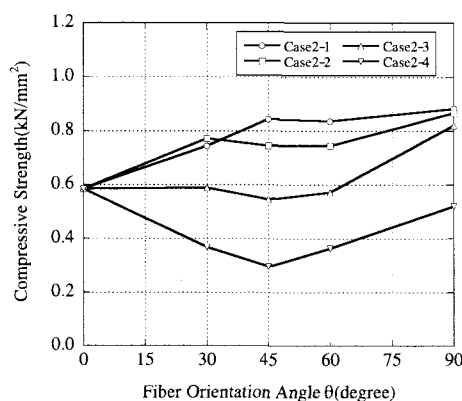


図-7 Case2 における圧縮強度の変動

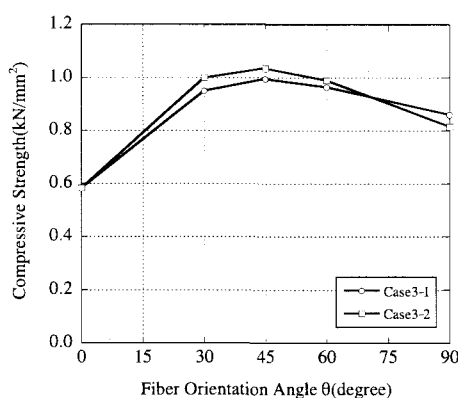
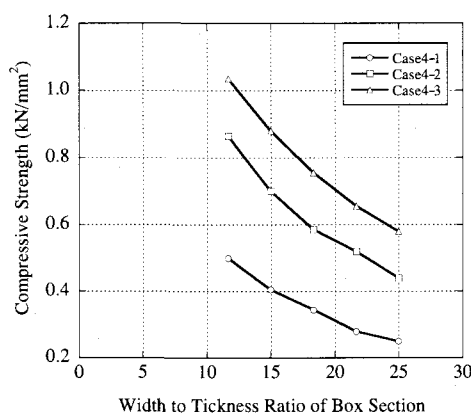
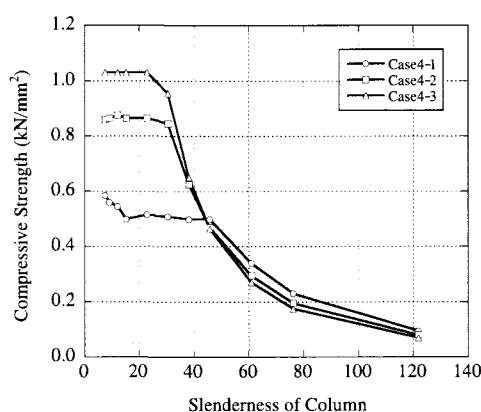


図-8 Case3 における圧縮強度の変動



(a) 板幅の影響 (部材の細長比=15.2)



(b) 柱の細長比の影響 (板の幅厚比=35/3)

図-9 終局強度に及ぼす板幅と柱の細長比の影響

(3) 柱長さ、板幅の影響に関する検討

次に、Case4-1: $[0_{24}]$ 、Case4-2: $[90_2/0_{20}/-90_2]$ および Case4-3: $[45_2/-45_2/0_{16}/-45_2/45_2]$ の積層構造を対象に、中空正方形断面部材の細長さと箱断面を構成する板幅とをパラメータとして終局強度を検討した。その結果を図-9に示す。なお、強度は、有限変位解析による座屈強度と Tsai-Wu 破壊基準に基づく強度の小さい値を採用している。また、図-9aでは、部材の細長比は15.2で一定とし、図-9bでは、幅厚比を11.7で一定としている。前述の考察と同様に、45度層を適切に配置することで、圧縮強度の改善が効率よく行えることが分かる。一方で、圧縮力を受ける中空箱断面部材の圧縮強度が、鋼部材と同様に、細長い場合は、全体座屈で、太短い場合は、断面構成板の局部座屈もしくは材料破壊で与えられることが分かる。一方、断面の曲げ剛性が同じ積層構造 (Case4-2 と Case4-3 が該当) であれば、細長い柱の圧縮強度は、積層形態には大きく影響を受けないことが分かる。したがって、Case4-3 のような45度層を適切に対称配置する積層構造を採用するのが望ましい。

3.2 曲げ部材に関する考察

(1) 解析ケース

再度、文献[4]における曲げ試験体 (1辺・外径35mm、

長さ400mmの中空角形供試体 (角部 $R=2\text{mm}$) の積層数24 (部材軸方向に繊維を有する層を24層配置) のA-24を基本モデルとして設定する。その形状を、図-10に示す。有限要素解析では、中空正方形断面を構成する各板パネルをシェル要素 (S8R5) によりそれぞれ16 (幅方向) $\times$ 60 (部材軸方向) に分割し、載荷点・支持点には、正方形断面の断面形状を保持する目的で、隔壁を設置し、これらもシェル要素でモデル化している。なお、載荷実験に用いた試験体においては、支持点のみに、鋼製の板をはめ込み、断面形保持を保証している (載荷点には、設置していない)。構造物の対称性を考慮して、半スパンを解析対象とし、その有限要素モデル、解析結果と実験結果の比較をそれぞれ図-11および図-12に示す。図-12から分かるように、横荷重を受ける断面の拘束条件の違い (隔壁の有無) によって、初期剛性は若干変化するが、Tsai-Wuの破壊規準による終局荷重は大きく異なっている。解析時の集中荷重の与え方 (線荷重)、および載荷治具の曲面座の曲率半径と接触幅の関連も考慮して、詳細な比較検討が今後の課題と考えられる。一方で、終局時には繊維と母材の樹脂間での剥離等の局所的な破壊進行に伴うと考えられる材料非線形性が強く、非線形性を考慮した応力-ひずみ関係を用いた解析

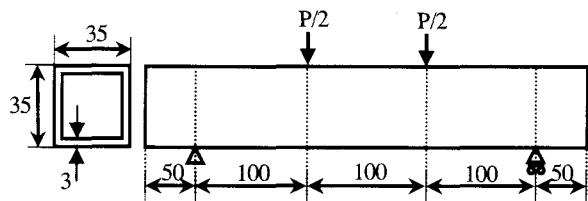


図-10 曲げ試験体の形状と載荷条件（寸法単位：mm）⁴⁾

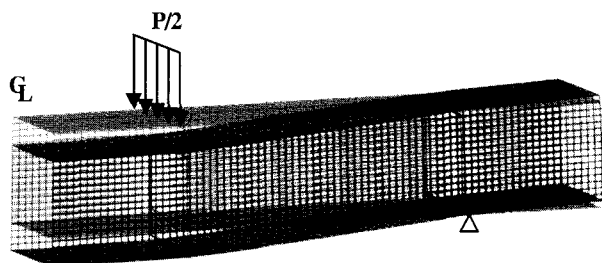


図-11 有限要素モデルと変形図

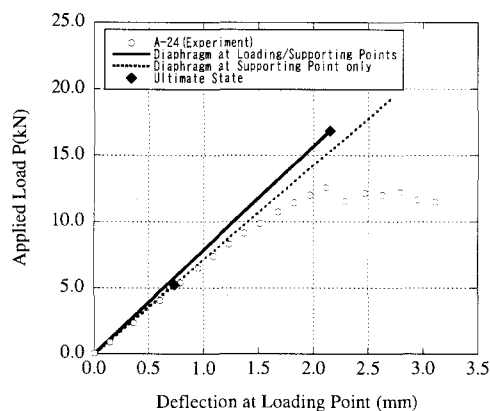


図-12 横荷重－たわみ曲線の比較結果

表-4 曲げ部材を対象とした解析ケース

解析ケース	積層構造
Case5	5-1 [0 ₂₄]
	5-2 [30 ₁₂ /-30 ₁₂]
	5-3 [30 ₁₂ /-30 ₁₂]
	5-4 [90 ₂₄]
Case6	6-1 [30 ₂ /0 ₂₀ /-30 ₂]
	6-2 [45 ₂ /0 ₂₀ /-45 ₂]
	6-3 [60 ₂ /0 ₂₀ /-60 ₂]
	6-4 [90 ₂ /0 ₂₀ /-90 ₂]
Case7	7-1 [30 ₁ /-30 ₁ /0 ₂₀ /-30 ₁ /30 ₁]
	7-2 [45 ₁ /-45 ₁ /0 ₂₀ /-45 ₁ /45 ₁]
	7-3 [60 ₁ /-60 ₁ /0 ₂₀ /-60 ₁ /60 ₁]
	7-4 [30 ₂ /-30 ₂ /0 ₁₆ /-30 ₂ /30 ₂]
	7-5 [45 ₂ /-45 ₂ /0 ₁₆ /-45 ₂ /45 ₂]
	7-6 [60 ₂ /-60 ₂ /0 ₁₆ /-60 ₂ /60 ₂]

も、真の終局状態を把握する上では必要と考えられる。しかし、ラミナの基本物性に基づく線形の応力－ひずみ関係と Tsai-Wu の破壊規準を考慮した有限変形解析によっても、積層板からなる構造部材の荷重－変形関係の力学的挙動を比較的良くとらえることが可能と考えられる。

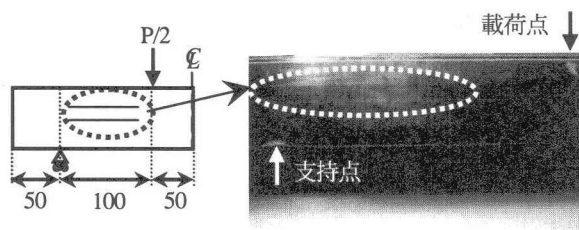
以上から、本研究で構築した有限要素モデルは、各種積層構造に対するパラメトリックな解析により力学的挙動に及ぼす積層構造の影響の定性的な比較検討を行うことに重大な問題を有しないと判断し、曲げ部材に対する解析ケースを以下のとおり設定した。なお、Case5-1 が、文献[4]における A-24 試験体に対応する。

(2)結果と考察

得られた曲げ耐力および終局と判断された部位をまとめて表-5 に示す。基本モデルの Case5-1 に対して耐力の改善が見られるのは、部材軸方向に繊維を配置したコア層を主に、部材軸に対してゼロでない繊維配向角を有するカバ層を若干配置したケースとなっている。特に、繊維配向角が、45 度、60 度程度が、望ましいといった結果が得られている。これらの結果は、軸圧縮力を受ける部材の力学特性と同じで、設計の基本思想の方向性を示していると考えられる。また、解析結果から得られた終局部位は、①載荷点と支持点間のせん断スパン部における腹板のせん断により支配される場合と、②曲げスパンにおける上フランジ板・角部の圧縮応力に支配される場合、③載荷点、支持点における局所的な応力の発生に基づくものと分類が可能である。その一例の比較として、文献[4]で得られた C-24 試験体のせん断スパン部の腹板に、水平方向（部材軸方向）に折れ線が、薄っすらと現れている状況を写真-1 に示す。なお、C-24 試験体は、[90₃/0₂₄/-90₃]の積層構造を有し、Case6-4 に最も近いケースであり、終局部位が、実験と解析で類似

表-5 曲げ耐力と終局部位の 覧

解析ケース	曲げ耐力 (kN)	終局部位
5-1	168	載荷点/支持点間のウェブ中央部
5-2	127	載荷点/支持点間のウェブ中央部
5-3	768	載荷点上フランジ端部
5-4	557	載荷点下フランジ端部
6-1	284	載荷点上フランジ端部
6-2	298	載荷点下フランジ端部
6-3	307	載荷点上フランジ端部
6-4	288	載荷点/支持点間のウェブ中央部
7-1	196	載荷点下フランジ端部
7-2	238	載荷点上フランジ端部
7-3	248	載荷点下フランジ端部
7-4	230	載荷点上フランジ端部
7-5	291	載荷点上フランジ端部
7-6	276	載荷点下フランジ端部



(寸法単位:mm)

写真-1 曲げ試験時に見られたウェブの折れ線 (C-24)

していることが分かる。結果的に、箱断面の隅部、および集中荷重を受ける場合の載荷点近傍が、終局に至る可能性があり、鋼薄肉構造と同様に補剛構造の採用が不可欠であることを結論付ける。

4. 結論

本研究では、汎用有限要素解析プログラム ABAQUS により CFRP 中空角形部材の有限要素モデルを構築し、直交異方性材料に対する応力-ひずみ関係および Tsai-Wu の破壊規準を適用して、圧縮力、曲げを受ける CFRP 部材の破壊に至る挙動の解析を行った。特に、角形断面を構成する薄板の積層構造の違いが、CFRP 部材の強度に及ぼす影響を明らかにし、積層構造の基本設計に関する資料の提供を目的とした。その結果、以下の結論が得られた。

- ① 2 軸応力状態となる薄板集成構造部材に対しては、一方方向繊維強化複合材料をラミナとして部材軸に合わせて配置するのではなく、繊維配向角が 0 度でないラミナを数層だけ積層することで、強度の向上が得られる。特に、繊維配向角が 45 度の層を適切に配置することが効果的である。
- ② 積層構造は、板材の中央面から対称にラミナを積層することが望ましく、板要素のねじれ変形を抑制することで、強度の向上につながる。
- ③ 横荷重などを受ける部材の場合、薄肉集成部材の断面形状を維持するような適切な補剛構造（隔壁など）を採用する必要がある。

最後に、今後の検討課題としては、繊維配向角が 0 度ではない層を有する場合、荷重-変形関係の非線形性が顕著となることが分かっている。さらに、外力の作用方向と繊維方向が一致しない場合も、非線形性を生じさせる要因と考えられ、このような非線形な応力-ひずみ関係を表現できる構成則および破壊規準を適用して、FRP 系の新材料を用いた構造部材の挙動について詳細に検討する必要がある。また、ラミナの破壊基準の高精度化も含め、全体座屈、局部座屈、局所破壊もしくは進行性破壊などによる強度変動を種々の構造寸法と関連付け精査する必要がある。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書（I），pp.5-7，1998.10.
- 2) 強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧，1994.9.
- 3) Thomas Keller：Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction, IABSE, Structural Engineering Documents 7, 2003.
- 4) 小野紘一，杉浦邦征，大島義信，三木亮二，小牧秀之：角形断面を有する炭素繊維強化プラスチック管部材の強度特性に関する実験的研究，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.449-459，2002.7.
- 5) 小野紘一，杉浦邦征，北川淳一，小牧秀之，林誠：ブレーディング成形法による H 型 CFRP 部材の圧縮・曲げ強度特性に関する実験的研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.49A，pp.105-113，2003.3.
- 6) 木嶋健，西崎到，明嵐政司：FRP 貼合せ部材の接着層せん断応力の評価，構造工学論文集，土木学会，Vol.49A，pp.11-18，2003.3.
- 7) 山田聖志，近田純生：FRP 剛接トラス歩道橋の振動特性，土木学会論文集，No.738/I-64，pp.67-74，2003.7.
- 8) 座古勝，松本金矢：複合材料の挙動解析，朝倉書店，pp.13-15，1998.3.
- 9) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.: ABAQUS Theory Manual Ver.5.8, 1997.

(2003 年 9 月 12 日)