高強度軽量FRP構造材の応用について

成澤 哲也' 青木 繁'' 上保 徳彦'''

Application of High Stiffness and Light Weight FRP Structural Materials

Tetsuya NARISAWA, Shigeru AOKI, Norihiko UWABO

Abstract - Fiber reinforced plastics (FRP) are one of the high-strength , high-stiffness, and lightweight composite materials. Recently, advanced composite materials so as IsoTruss structure has been developed for alternative structures in the field of mechanical and construction industry. This material which developed by BYU at Utah in USA is made based on the honey comb structures. In this report, we show the following acknowledg-ments of present study. The first, IsoTruss grid structures have been formed with carbon/ epoxy FRP materials with helically filament-winding (FW) method. The next, influence of the tetrahedron region (pyramidal grid in this structure) on mechanical properties are measured. The third, for the applications of this structure the Christmas tree tower was constructed at campus of Kusiro N. C. T. with connected half a dozen pieces.

Key Word: FRP, IsoTruss, Composite Materials, FW forming, Stiffness, Vibration

1.はじめに

平成16年度に,株.トーラスから受けた奨学寄付 金および釧路工業高等専門学校長裁量研究費により実 施した成果を報告する。また,本研究は平成17年度 科学研究費補助金(課題番号17360103)の基礎となる ものである。

複合材料の一つである繊維強化プラスチック(FR P:Fiber Reinforced Plastics)は機械や建築構造の 強度メンバにまで利用が拡大している。また近年,円 筒状にハニカム構造を展開したFRP三次元グリッド 構造材(IsoTruss:商標)が登場した。この材料は米 国ユタ州のBYU(ブリンガム・ヤング大学)で発明 されたハニカム構造を円筒状に配したものであり 軽 量化とトラス構造による強度向上の2つの利点が合わ さった高強度軽量FRP材である⁽¹⁾。

本稿では, C - F R P(一方向カーボン繊維による F R P)で作られた IsoTrussの製造法について紹介 すると共に, ハニカム構造の基本となる四角錐ピラ ミッド構造の機械剛性への寄与および本構造の応用例 について報告する。

2. IsoTruss の特長

2.1 基本構造

図1に一般材料の比剛性と比強度を示す。特にC-FRPは金属に比べ高い値を持ち 鋼材の5~10倍

* 釧路高専機械工学科

**都立高専機械工学科

***株.トーラス

の値を示していることが分かる。ただし,剛性と強度 の絶対値は繊維方向で金属のそれの2分の1以下 繊 維に直角方向では数10分の1程度になっている。 よって,FRP利用による構造剛性強化は構造の負荷 方向に応じたテーラリング積層により実現することに なる。



Fig.1 Ratio of modulus and tensile strength to weight of various materials



Fig.2 Honey comb sandwich structures

FRPによる平板状八ニカム構造は1960年に 米国NASAとマクドネル・ダグラス社で開発され, その基本構造を保ちながら近年ユタ州BYUが円筒 状に改良したものである⁽²⁾。図2は段ボールクラフ トで製作した円筒であり本構造の基本形である。裏 打ちであるライナーを軸方向繊維,正三角形を成す ウエイブを螺旋方向繊維で構成し,八ニカムピラ ミッドを円筒周方向に展開させたものである。図3 .aに簡単な成形品を示す。図3.bは米国アイソトラ ス・ストラクチャ社による44m電波塔の施工例で ある。

2.2 製作方法

基本的に糸巻きの原理を応用したフィラメント・ ワインディング(FW)法を用いる。図4に成形パ スラインを示す。番号順にプリプレグFRP繊維を パスさせ,全パスが終了することで一層が形成され る。軸糸と螺旋(ヘリカル)糸との交差をノードと 呼び,織り重なるように積層構成する。ノードの数 によってピラミッドの数が決まるが,その数が増す とともに相対的にピラミッドは小さくなりその効果





Fig.3 Photo of IsoTruss structure (a.) and 44M , WiFi tower concrete pad +

special adapters (b. HP by IsoTruss Structure Co.Ltd.)



Fig.4 Nodal pattern and pass line of IsoTruss winding process



Fig5 Automatic winding machine (a. KOKUBUN Co. Ltd.) and handmade winding process (b)



Fig.6 Manufacturing process of IsoTruss

は薄れる。

- 3.実験方法と評価
- 3.1 テストピースの製作

FW法は軸対称品の成形が容易であるが,専用型 が必要である。図5.aは自動ワインディング機のプ ロトタイプであり,数分のタクトタイムで巻き上げ が可能である。図5.bは下型であるマンドレルを旋 盤に取り付けて行う手巻き成形法である。今回は後 者を採用した。その工程を図6に示す。炭素繊維プ リプレグT700(高強度一方向炭素繊維にエポキ

Table.1 Specification of Graphite/Epoxy FRP (in catalog)

Prepreg C-FRP	T700S12K	Number of filamtnts	12000
Tensile stiffness [GPa]	233	Tensile strength [GPa]	5.23
Relative density	1.8	Fiber volume fraction [%]	58

Table.2 Specification of IsoTruss structure

Test pieces	A With pyramid	B Without pyramid	C Complex type	
Number of nodes	6 0		6	
Number of layers	4 [L/H/L/H(inner,outer)]			
Numper of pyramides	66	0	66	
Internal diameter [mm]	φ56			
Outer diameter [mm]	φ100	φ58	φ100	
Length (effective length)	0.63(580)			
Weight [kg]	0.0995	0.0862	0.0914	

シ樹脂を含浸したコンポジット,東レ社製)を巻い た後,180~200 で約1時間オーブンで加熱 硬化させ,離型し成形品とする。マンドレルは割り 型となっている。

グラファイト / エポキシプリプレグ材とテスト ピースの諸元を表1と2に示す。図7はテストピー



Fig.7 Appearance of 6 nodes Iso-Truss test pieces



Fig.8 Appearance pyramidrical structures of IsoTruss

ス外観である。積層形態は[L/H(内側/外側)]の 4層とした(L:軸巻き,H:螺旋巻き)。図7上図 がピラミッド有り(Type-A),下図が無い場合(Type-B)である。さらに比較対象として,ピラミッド無し を2層,有りをその上から2層巻きしたテストピー ス(Type-C)を製作して同じ試験を行った。図8は Type-Aの詳細である。ピラミッドは円周上に6,長 さ方向に11列の計66個あり,一辺が28.9mm の正三角形を組み合わせた四角錐トラス構造となっ ている。

3.2 曲げ,ねじり剛性の測定③

テストピースについて,3点曲げ試験およびねじ り試験を行った。図9に曲げ試験装置を示す。試験 開始時には,中央のフックにあらかじめおもりを載 せた状態で,ダイヤルゲージの針を零に合わせた。得 られた荷重とたわみから等価的な曲げ剛性EIを算出 した。図9右図は,おもり皿をぶら下げるホルダー である。本構造は編み目構造をしているので,構造 全体のトータルな機械剛性をみるために,負荷部の 荷重を円筒の周上に均等にかける工夫する必要があ り,このようなアダプタを用意した。

図10にねじり試験装置を示す。試験は,テスト ピース一端に中子を入れ,外側をバイスで挟み片持 ち条件とし,他端にアームを取り付け,その先端に おもりをぶら下げた。ねじりトルクとねじり角の関 係から,等価的なねじり剛性GIpを算出した。両試験 とも最大荷重後は除荷を行いながら,零点復帰を確 認している。また衝撃を与えないように注意し,5 回の計測を行った。

図11,12から,曲げ剛性ElはType-A(図中W) で273[Nm²],Type-B(図中W/0)で279[Nm²]となり, 有意差はみられなかった。しかし,ねじり剛性Glpは Type-Aで243[Nm²],Type-Bで134[Nm²]となり,ピラ ミッドの効果が認められた。Type-C(図中Complex)



Fig.9 Three-points bending experiment unit



Fig.10 Torsional experiment unit



Fig.12 Result of torsional test



Fig.13 Figure of FFT analyzed test setup





Fig.14 Results of impulse hammering test

の曲げ剛性EIは261[Nm²],ねじり剛性GIpは109[Nm²] となり,どちらの剛性評価においてもType-A,Type-Bより低い値をとった。

本実験における曲げ試験では,構造全体のトータ ル評価ができるが,複雑なトラス構造に対する単純 支持条件の実現,中央荷重負荷の方法などが実験結 果に影響し,曲げ剛性にはピラミッドの効果が出な かったものと思われる。

3.3 固有振動数および減衰比の測定(4)

支持点長さ590mmの片持ちはり条件にて,インパル スハンマによる打撃試験を行いFFTアナライザ (RION,SA-71)にて周波数応答を測定した。ピック アップマイクロフォン(RION,NK-50)は振動モードの 節を避け,自由端近傍に張り付けた。3次までの応 答ピーク値から,固有振動数を求めた結果が表3で ある。高次振動になるとともに固有振動数は高くな り,一次の振動数はType-Bで110Hz,Type-Aで85Hz,

Table.3 Experimental static and dynamic moduli

		Static[Nm ²]		Dynamic[Hz]		
	Туре	EI	GIp	1st	2nd	3rd
А	With pyramid	273	243	85	460	780
В	Without pyramid	279	134	110	550	920
С	Complex	261	109	50	400	650



Bending stifness EI [Nm²]

Fig.15 Bending and torsional stuffiness and natural frequencies





Fig.16 Experimental and analytical natural frequencies

Table.4 Damping ratio ζ obtained by half band width method (× 10⁻³)

	Туре	1st	2nd	3rd
Α	With pyramid	15.0	13.8	29.0
В	Without pyramid	12.0	12.0	21.0
С	Complex	12.7	14.7	98.0

Table.5 Damping ratio ζ obtained by free vibration and

half band width method (\times 10⁻³)

Number of layers	2	4	6
Free vibration	19.2	8.62	7.77
Half power method	9.82	20.4	10.5

Type-Cで50Hzとなった。さらに,得られた曲げ剛性 EIとの関係が図15である。左からType-C(図中 Comp.),Type-A(図中W),Type-B(図中W/0)の順で ある。各固有振動次数で回帰したところ直線近似で きたので,固有振動数と等価曲げ剛性は線形関係に あることが分かった。さらに,得られた振動数とは り横振動の自由振動式(厳密解)から計算した固有 振動数と比較した(図16)。解析式に必要な密度ρ と断面積Aを求めるため,1次の振動モードが静的た わみと同じと考え,1次の振動の実験値からρAを逆 算して2,3次に適用した。図から,計算値(calc.) は実験値(exp.)よりかなり大きくなっている。この ことから,トラス構造に連続体の振動の方程式は当 てはまらず,離散的なFEMなどの近似計算の必要な ことが認められた。

次に,得られた共振曲線に対して半値幅法を用い て減衰比ζを求めた。その結果が表4である。1次, 2次,3次の順に減衰比が大きくなる結果が得られた。よって,低次振動の減衰挙動には注意しなければならないことが分かった。さらに,1次振動の減衰に着目した実験を行った。Type-A(8ノードタイプ)について水平振動台に一端を固定して加振実験を行った。得られた自由振動波形から対数減衰率を求め,換算式より減衰比ζを求めた。また,1次共振曲線に対し,前述の半値幅法を適用して減衰比ζを求めた。積層数を2,4,6と変化させた結果が表5である^{(5),(6)}.結果から,積層数の増加によって減衰



Fig.17 Draft plan and design **



Fig.18 Assembling work



Fig.19 Appearance of 4m tower decorated with Christmas ornaments

比は小さくなる傾向が見られた。

減衰問題は固有値問題と並んで振動問題の大きな 課題である.継続的な研究が必要と思われる。

4. 各種コンテストへの参加と研究課題の

本構造の応用として,6本を接続したタワーを釧 路高専キャンバスに設置した。基本設計と実施設計 を行った後,さらにイルミネーションを取り付けク リスマスツリーとした(図17~19)。耐風圧計算 は木谷校長にお願いした。これら一連の成果が釧路



Fig.20 Kushiro newspaper (04.12.22)





Fig.21 Commitment in various festival

新聞にて紹介された(図20,2004.12.22)。また, 「釧路雪あかりまつり」(2004.12.24-25)に出品し評 価を得た。

身近な製品への応用としてマウンテンバイクのフレームに組み込んだ例が図22であり,釧路根室地区産業技術展である「メイド・イン・釧路(2005.2.5-



Fig.22 Mountain bicycle applied IsoTruss displaied in industrial technique festival `Made in Kushiro`



Fig.23 Photograph of participator in 'Made in Kushiro'



Fig.24 Buckling fracture at neck assembly



Fig.25 Idea of joint assembly



Fig.26 Curved shape assembly

6) にて発表し,学外への技術宣伝にも努めた。

これまでの研究過程で生まれた課題についてまと める。まず,FW成形法の効率向上問題である。鉄 鋼材と比べて比剛性,比強度が高いが材料費だけで なく,自動成形による製造コスト低減も必要であり, 成形機メーカーがこの方面の開発を進めている。ま た,本構造は編み目構造のため,連続体に基づく静・ 動厳密解析だけでなく,FEM解析からその特性を 明らかにする必要がある。一連の研究過程での新し い知見として,図24のようにタワー設置の段階で トラスのクロスゾーン(ネック)部の層間剥離によ る曲げ破断がある。座屈現象であるが,ピラミッド 構造は破壊されず,ピラミッド間のネック部に応力 集中が起こっている⁽⁸⁾。このような応力分布を解明 するにも離散化解析を行う必要がある。

また,接続機構として図25のようなねじ締結機 能を本構造の端部に形成する研究も行っている。図 26は曲線状のものであり,本年度の高専ロボット コンテストに参加する本校のロボットフレームに採 用検討中である。

5.おわりに

高強度軽量 F R P トラス構造を F W法を用いて成 形し、本構造の強化メカニズムの一部を解明した。そ の結果,形成されたピラミッド構造によってねじり 剛性が高くなることが明らかとなった。また,各種 イベントに参加し,実用化への手がかりと課題を得 た。

本研究は1年半の短い期間に集中的に実施された。 遂行に当たって都立高専総合科学交流センターの協 カのもと,青木研究室の卒研生には基礎的な実験を 行っていただいた。また,釧路高専テクノセンター の方々の協力も得て,平成16年度釧路高専卒研生 には応用面の実験を行ってもらった。最後に,研究 環境や施設の整備に当たって,釧路高専木谷校長を はじめ関係各位の協力を得た。ここに感謝の意を表 する。

参考文献

(1) Thomas J. Weaver and David W. Jensen, Mechanical Characterization of a Graphite/Epoxy IsoTruss., *J. Aero. Eng.*, 23, (2000), 23-35.

(2) Smart W. and David W. Jensen, Flexure of Concrete Beams Reinforced with Advanced Composite Orthogrids., *J. Aero. Eng.*, 23, (1997), 7-15.

(3)山本・成澤・高下,高強度軽量構造材の実用化に関する 研究(第1報,成形法および強度),日本機械学会北海道学 生会卒業研究発表会,(2005),231-232.

(4)吉川・成澤・高下,高強度軽量構造材の実用化に関する 研究(第2報,振動特性および応用事例),日本機械学会北 海道学生会卒業研究発表会,(2005),233-234.

(5)青木・成澤・上保・長野・明石, FRP構造材料を用いた 構造物の成形に関する研究(第1報,製造法および強度),日 本機械学会関東支部総会講演会,(2005),403-404.

(6)青木・成澤・上保・明石・長野, FRP 構造材料を用いた 構造物の成形に関する研究(第2報,振動特性),日本機械 学会関東支部総会講演会,(2005),405-406.

(7)成澤・青木・上保,FRP構造材料を用いた構造物の成形に 関する研究(第3報,ピラミッド構造が強度に及ぼす影響), 日本機械学会関東支部総会講演会,(2005),407-408.

(8)成澤・坂野・佐藤・菅原・吉田,高強度軽量FRPトラ ス構造材の特性に関する研究,日本機械学会D&S講演会, (2005),306-307.