

GFRPを用いた立体トラス構造の開発(その1)

構造性能の検討

内海良和 萩尾浩也
木村耕三 高橋晃一郎

Development of Space Truss Structure using Glass Fiber Reinforced Plastics (Part 1)

Studies on Structural Properties

Yoshikazu Utsumi Hiroya Hagio
Kohzo Kimura Koichiro Takahashi

Abstract

This paper describes the development of a space truss structure using Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) pipes. GFRP pultruded pipes with superior heat resistance were adopted. Tensile and compression tests were carried out to examine the mechanical properties of GFRP under room- and high-temperature environments. After tests such as joint tests, a truss structure specimen using GFRP pipes was erected and a load was applied to it. The relationship between load and displacement remained linear until buckling began. The test result showed enough correspondence with that of the FEM analysis. Studies of these structural properties verify the structural design.

概要

熱特性に優れた、引抜き成形ガラス繊維強化プラスチック(以下、GFRPと称す)パイプを用いた立体トラス構造の開発を行った。GFRP材の常温および熱間における機械的特性を把握するために、引張、圧縮試験を行った。継手などの立体トラスを構成する部材およびこれらの部材を組み合わせた架構試験体を製作し、静的載荷実験を行った。架構実験の結果、荷重-変位関係はトラス部材の座屈により耐力が低下するまで線形挙動を示し、実験値は解析値と良い一致を示した。これら構造性能の検討から設計を行うためのデータを得た。

1. はじめに

軽量(比重 19kN/m^3)かつ耐食性に優れたガラス繊維強化プラスチックを用いて、ライフサイクルコストを含めたトータルコストの低減が可能な屋根架構として、立体トラス構造の開発を行った。

本立体トラス構造の特徴は以下の通りである。

- 1) 軽量で、高強度なGFRPを構造材として用いることによって、軽快な無柱空間を創造することができる。
- 2) 耐久性に優れた材料で構成しているため、屋内プール、海辺、温泉など過酷な環境下での利用に対してメンテナンスコストの低減が期待できる。
- 3) 部材が軽量なため、施工性の向上、工期短縮が可能となる。
- 4) 耐食性、耐薬品性および耐燃焼性に優れた樹脂を用いているため、万一燃焼した場合にも、有害なガスを発生することはなく、二次災害を防止できる。
- 5) 着色性に優れており、意匠的な要望にも低コストで対応することができる。

本論文では、GFRPを用いた立体トラス構造の構造性能について述べる。なお、継手およびノードの構造性能については参考文献1),2)に示す。

2. GFRPを用いた立体トラス構造の概要

本立体トラス構造(Fig. 1)は、Fig. 2に示すようにGFRPパイプを接着剤とリベットで固定した部材の端部を、ステンレス製のノード(SUS304A)にボルト(SUS630A)で接合して、トラスを構成するものである。

3. GFRPパイプの材料特性

GFRPパイプは、強化基材にEガラス、マトリックスに耐候性、耐薬品性および不燃性を有する変性アクリル樹脂(以下、FR樹脂)により構成され、プルトルージョン法による引き抜き成形材である。Fig. 3に基材構成を示す。この基材構成を変えることによってGFRPパイプのヤング係数や強度の調整が可能である。以下の実験に用いたパイプ材の基材構成は、軸方向の繊維体積含有率(V_f)を28%、周方向を含めた V_f を41%にしたものである。以下、パイプ材断面は、試設計から得られた外径145mm、管厚7.5mmを用いている。

パイプ材の構造特性を把握するために行った引張、圧縮試験(以下、材料強度試験と称す)、FR樹脂をマトリックスとしたGFRPの熱特性を把握するために行った熱

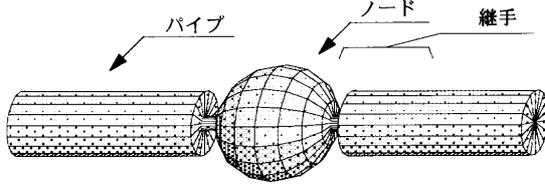


Fig. 1 トラスの概要

Outline of the Truss System

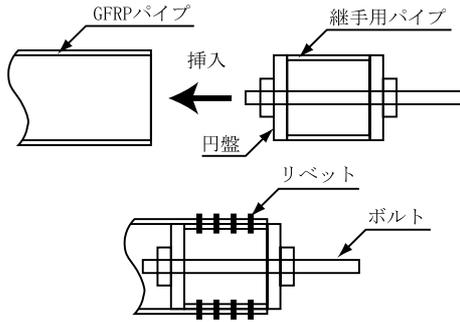


Fig. 2 継手の概要

Outline of the Joint

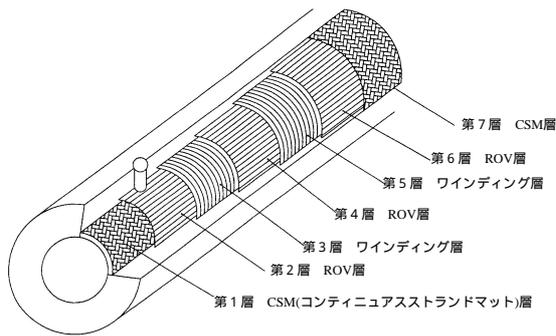


Fig. 3 パイプ材の基材構成

Organization of a Pipe

間での引張, 圧縮試験(以下, 熱間強度試験と称す)および防火性能試験について, それぞれ3.1節, 3.2節, 3.3節で述べる。

3.1 材料強度試験

3.1.1 試験方法 Fig. 4に示すJIS K 7054に準拠した引張試験およびFig. 5に示すJIS K 7056に準拠した圧縮試験(切出し圧縮試験と称す)はパイプ長手方向が試験片の長手方向になるように切出して行った(試験片数は各々5)。なお, 圧縮試験では, Fig. 6に示すように長さ200mmおよび290mmのパイプをそのまま用いた実断面圧縮試験も同時に行った(試験片数はそれぞれ3, 5)。

3.1.2 試験結果および考察 引張および圧縮試験結果をTable 1に示す。この結果から, 引張および圧縮ヤング係数 E はそれぞれ約 20kN/mm^2 および 25kN/mm^2 であった。圧縮側のヤング係数は切出し圧縮試験と実断面圧縮試験とも同等であった。しかし, 圧縮強度 σ_c に関しては後述するパイプの圧縮実験結果に対し, 切出し圧縮試

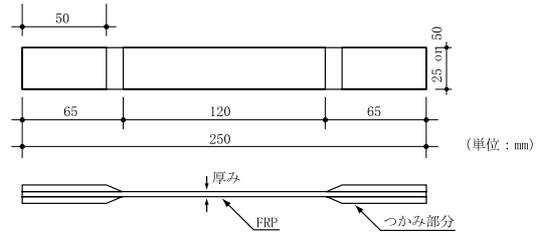


Fig. 4 JIS K 7054に準拠した引張試験方法
Method of Tensile Test based on JIS K 7054

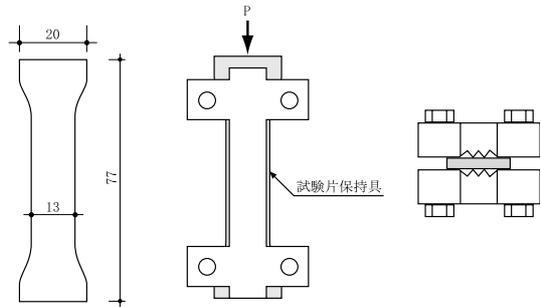


Fig. 5 JIS K 7056に準拠した圧縮試験方法
Method of Compression Test based on JIS K 7056

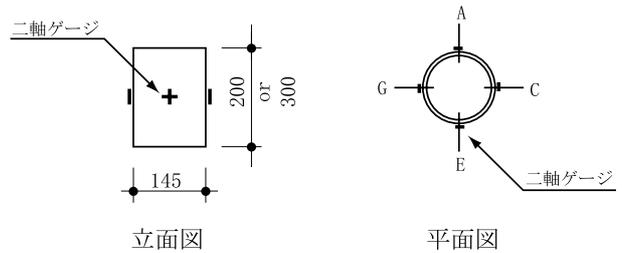


Fig. 6 実断面圧縮試験方法
Method of Compression Test with Real Section

Table 1 材料強度試験結果
Result of Material Strength Tests

	引張試験	切出し 圧縮試験	実断面 圧縮試験*1	実断面 圧縮試験*2
強度	σ_t N/mm ²	σ_c N/mm ²	σ_c N/mm ²	σ_c N/mm ²
No.1	294	212	195	190
No.2	388	230	211	210
No.3	301	217	173	172
No.4	286	217	-	190
No.5	337	233	-	179
平均	321	222	193	188
ヤング 係数	E_t kN/mm ²	E_c kN/mm ²	E_c kN/mm ²	E_c kN/mm ²
No.1	19.9	24.4	25.6	25.7
No.2	22.7	25.7	25.9	25.4
No.3	17.6	29.2	25.9	25.4
No.4	21.1	25.3	-	26.2
No.5	20.2	22.5	-	26.2
平均	20.3	25.4	25.8	25.8

E_t : 引張ヤング係数, E_c : 圧縮ヤング係数

(荷重20~60%の割線から算出)

*1: 全長200mm, *2: 全長290mm

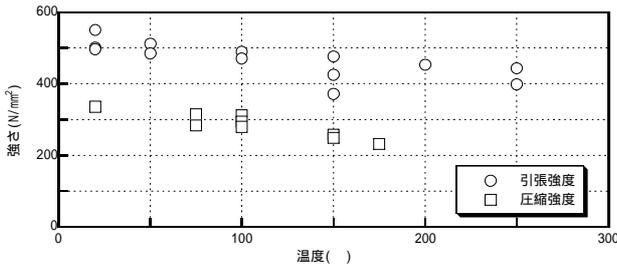


Fig. 7 GFRPの熱間強度
Strength of GFRP under High Temperature

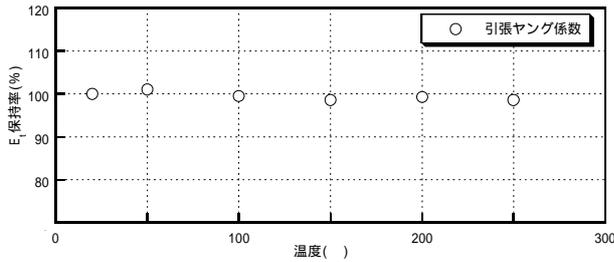


Fig. 8 GFRPの引張ヤング係数保持率
Ratio of Tensile Young's Modulus of GFRP under High Temperature

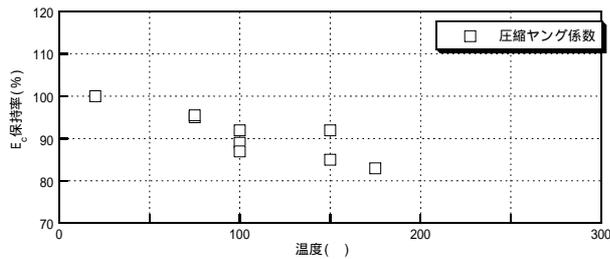


Fig. 9 GFRPの圧縮ヤング係数保持率
Ratio of Compression Young's Modulus of GFRP under High Temperature

験では危険側の評価となった。一方、実断面圧縮試験結果はパイプの圧縮実験結果と近似していた。切出し圧縮試験結果が危険側の評価となるのは、拘束治具の影響によるものと推察される。したがって、圧縮強度は、実断面圧縮試験に基いて評価する。

3.2 熱間強度試験

3.2.1 試験方法 FR樹脂をマトリックスとしたGFRPの熱間強度試験は簡易炉内に固定した熱電対により温度管理を行い、設定温度に達した状態で加力を行った(試験片数は各々3)。

3.2.2 試験結果および考察 熱間強度の試験結果をFig. 7, 8および9に示す。250 °Cでの引張強度は常温での強度の約80%で、175 °Cでの圧縮強度は常温での強度の約70%であり、いわゆる大きく強度の低下する変曲点は今回行った試験範囲より温度の高いものと推察される。引張ヤング係数は250 °Cまでほとんど低下しないが、175 °Cでの圧縮ヤング係数は常温でのヤング係数の80%であった。

Table 2 コーンカロリー計試験結果
Result of Cone-Calorimeter Test

種類	着火時間 sec	最大発熱速度 kW/m ²	消火時間 sec	総発熱量 MJ/m ²			判定
				5分	10分	20分	
FR	389	16.7	1000	0.1	3.2	9.0	準不燃
PR	323	87.3	1120	0.0	18.3	44.9	難燃

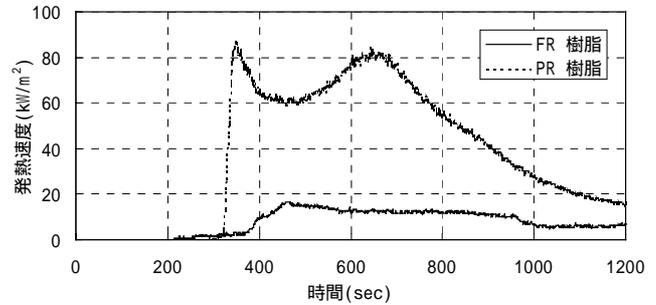


Fig. 10 発熱速度と時間の関係
Heat Release Rate-Time Relationships

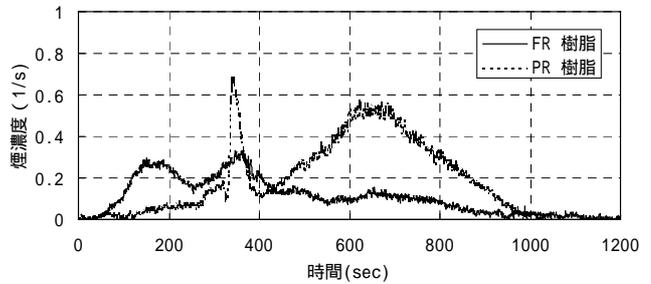


Fig. 11 煙濃度と時間の関係
Smoke Extinction Coefficient-Time Relationships

3.3 パイプ材の防火性能試験

3.3.1 試験方法 防災計画重要となる防火性能試験について記述する。マトリックスの防火性能を、一般に火や熱に対して強いとされるフェノール樹脂(以下、PR樹脂とする)およびGFRPのパイプ材に用いたFR樹脂で製作した100×100×12.5mmの試験体で比較した。なお、強化繊維の基材構成・無機物の体積含有率は同等とした。

試験はISO 5660に規定されるコーンカロリー計により、外部加熱強度を50kW/m²とし、試験時間は20分間で行った。

3.3.2 試験結果および考察 試験結果一覧をTable 2に、発熱速度と時間の関係および煙濃度と時間の関係をFig. 10, 11に示す。Fig. 10によると、PR樹脂の試験結果は難燃材料に相当するものであった。一方FR樹脂は、着火時間および消火時間ともにPR樹脂とほぼ同じであるが、最大発熱速度でPR樹脂の約1/5の結果となった。Table 2の総発熱量を比較してもFR樹脂の方がPR樹脂よりかなり小さく、FR樹脂は準不燃材料に相当する結果であった。またFig. 11より、煙の発生量もFR樹脂の方がPR樹脂よりも小さいことが分かる。

以上から、FR樹脂はPR樹脂より優れた防火性能を持っていると言える。

4. GFRPパイプの構造特性

トラス架構を構成するためには、トラス部材の圧縮特性が重要な問題となる。そこで、トラス部材としての構造特性把握を目的として、部材長さをパラメーターとしたパイプ単体の圧縮実験を行った。

4.1 実験方法

パイプに圧縮荷重が作用するとき、細長比が小さい場合の圧壊と細長比が大きい場合のオイラー座屈破壊が問題となる。そこで、部材長さをパラメーターとして1000mmから500mmごとに3000mmまで各3体の計15体を用いたパイプの圧縮実験を行った。支持条件は一方のみ回転自由なピン支持とし、油圧ジャッキを用い、単調増加で荷重を行った。また、パイプの中央部にFig. 6と同様に4枚のひずみゲージを貼付することにより軸方向のひずみを測定した。

4.2 実験結果および考察

破壊形式は、圧壊およびオイラー座屈破壊 (Photo 1) であった。Fig. 12にオイラー座屈した試験体 (パイプ長さ2500mm) の軸応力と軸ひずみの関係を示す。弾性座屈の後、破壊に至っていることが分かる。Fig. 13に実験結果を破壊形式で区別してプロットした。細長比はピン支持した治具間隔を座屈長さとして求めている。材料強度試験結果から算出したオイラー座屈曲線と実断面圧縮試験結果のプロットも併せて示した。この実断面圧縮試験値から、(平均値 - 2×標準偏差)を基準強度値 (F値) とする。これにより、破壊形式が変わる領域近傍の試験値はこのF値により表現することができる。圧縮および引張の基準強度をTable 3に示す。また、オイラー座屈領域でのばらつきは小さく、算出値と近似していた。以上からF



Photo 1 圧縮実験状況
State of Compression Test

値およびオイラー座屈曲線により圧縮強度を把握できると考えられる。

5. 立体トラス架構の特性把握実験

各部材を組み合わせた立体トラス架構の構造特性について述べる。実験状況をPhoto 2に示す。

5.1 試験体

試験体は10m×20mスパンの試設計に基づいて設定した。一辺2.8mの正四角錐を基準としたので、トラスのせいはいは約2mとなる。そのうち、正四角錐3つを上弦材で繋いだものを試験体とした。部材設計で求められるトラス部材の軸力150kNから、GFRPパイプの断面寸法は 145 × t7.5とした。このときGFRPパイプの圧縮ヤング係数は実断面圧縮試験から25.2kN/mm²である。ノード中心間距離を座屈長さとして算出した単材の座屈耐力は244kNである。

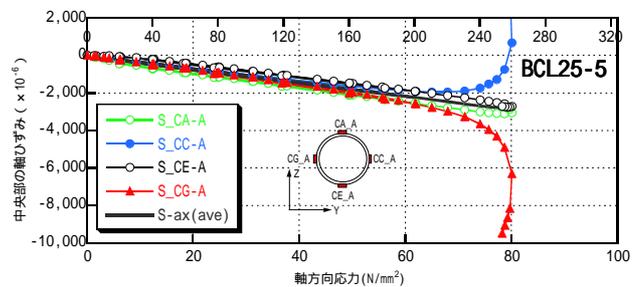


Fig. 12 軸応力と軸ひずみ関係 (パイプ長さ2500mm)
Axial Stress-Axial Strain Relationship
of Pipe Length 2500mm

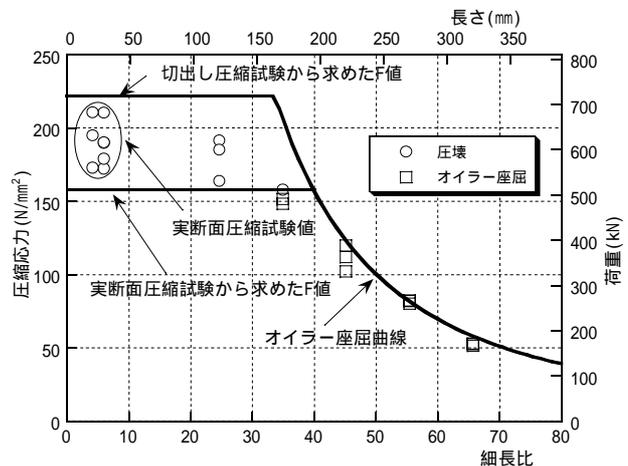


Fig. 13 圧縮実験結果
Compression Test of GFRP Pipes

Table 3 GFRPパイプ材の基準強度
Strength of GFRP Pipe

基準強度	
圧縮	引張
N/mm ²	N/mm ²
160	235

継手は、継手用パイプ長さを200mm,円盤の厚さを40mm,リベットを75本とし、接着剤も併用している。ボルトはSUS630 (F10T級)を用いており、サイズはM24である。ノードはSUS304Aを用いており、サイズは 270×t35で開口 140である。

5.2 実験方法

加力は上弦材中央のノードを鉛直下向きに行い、載荷過程で100kNごとに除荷を行いながら載荷した。計測は、荷重、変位およびGFRPパイプのひずみとした。変位は、各ノードの位置での鉛直変位、水平変位を計測した。ひずみは各パイプ中央部に2枚ずつ貼付した一軸ひずみゲージで測定をした。上弦材および斜材については、中央部に4枚貼付した。

反力は、4隅のノードで鉛直支持した。この4隅においては、X軸(長辺方向)に並進移動、Y軸(短辺方向)周りに回転できるようにした。



Photo 2 実験状況
View of Test

5.2 実験結果

Fig. 14に荷重と上弦3箇所のノードの鉛直変位 (V9, V10, V11 : Fig. 17参照) 関係を示す。荷重と変位は線形関係にあり、繰返し荷重に対しても弾性挙動を示した。

耐力は上弦材の座屈により決定された。Fig. 15,16に荷重と上弦材(要素51と52 : Fig. 17参照)中央部のひずみの関係を示す。要素52は初期不整によるものと思われる変形が先行し、315kNで座屈現象が見られた。最大耐力は350kNであり、その後急激に耐力が低下した。座屈モードは、上弦材が水平面内にはらみ出す逆対称形であった。

5.3 解析結果および考察

Fig. 17にFEM解析に用いた節点番号,要素番号を示した。括弧付きが節点番号である。ノード,ボルト,円盤およびパイプを直列バネとすることで部材の等価剛性を算出した。その結果,部材の軸剛性は圧縮31.2kN/mm,

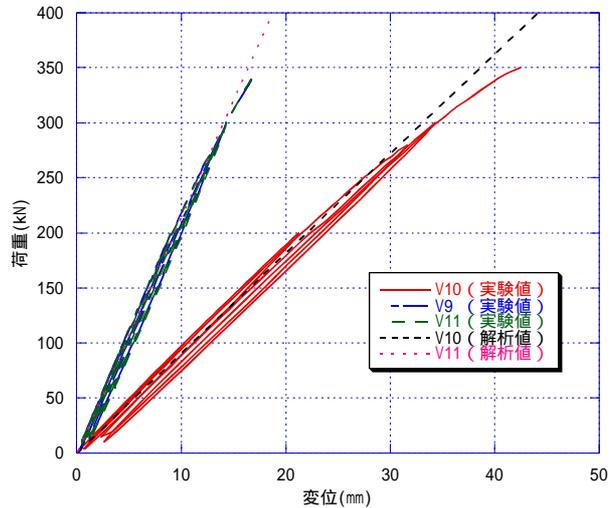


Fig. 14 荷重 - 変位 (V9, V10, V11) 関係
Load-Displacement Relationships

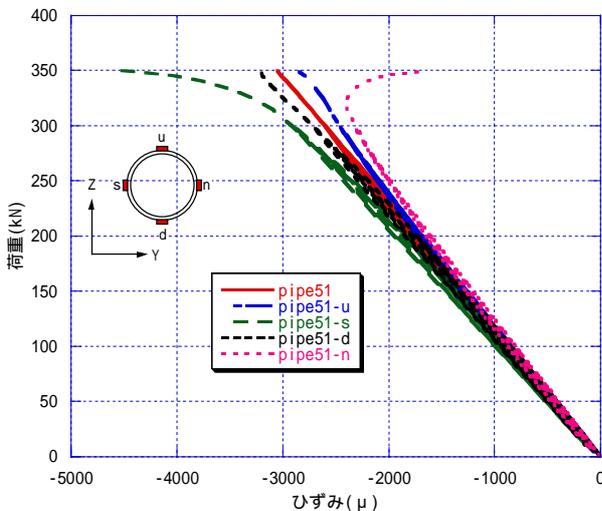


Fig. 15 荷重 - ひずみ (要素51) 関係
Load-Strain Relationships on Element No.51

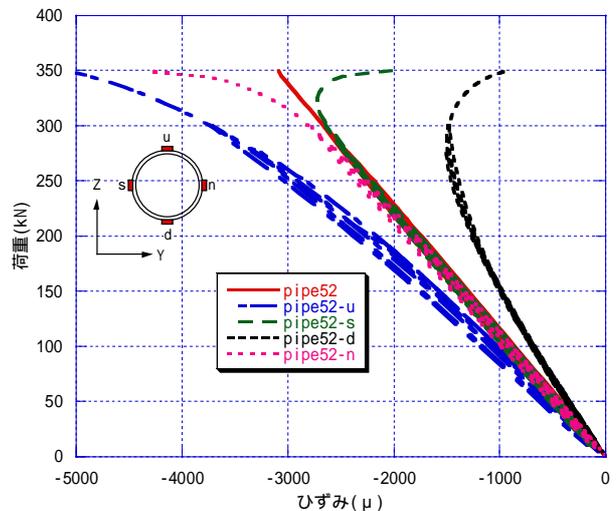


Fig. 16 荷重 - ひずみ (要素52) 関係
Load-Strain Relationships on Element No.52

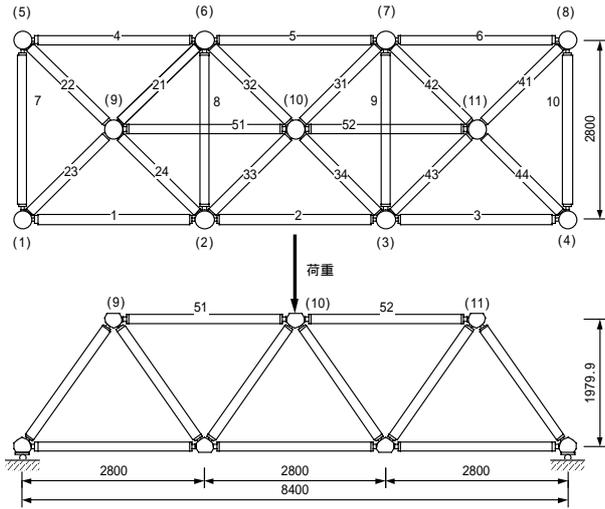


Fig. 17 節点、要素の識別番号
Nodes and Elements Number

引張29.4kN/mmとなる。変位を算出する際の安全側処理として引張の剛性を用いて解析を行った。上弦材中央のノードに集中荷重を載荷する。

Fig. 18に荷重200kN時の変形および軸力分布を示す。荷重200kNのとき、上弦材中央のノードの鉛直変位は22mmである。Fig. 14に示すように、解析値の荷重 - 変位関係は試験値と280kNまでは良い一致を示した。Table 4に荷重200kN時の各部材軸力の比較を示す。要素7から10の軸力が小さい部材を除いて、解析値は十分な精度で実験値と一致している。

6. まとめ

GFRPを用いた立体トラス構造の開発にあたり、GFRPの部材試験および架構の構造実験を行い、以下の知見が得られた。

- 1) GFRPパイプの材料基準強度およびヤング係数は、引張はJIS K 7054で、圧縮は実断面圧縮試験によって求めることができる。部材の圧縮特性は基準強度およびオイラー座屈強度で評価できる。
- 2) 変性アクリル樹脂をマトリックスとしたGFRPは、フェノール樹脂をマトリックスとしたGFRPよりも優れた防火性能を有する。
- 3) 部材を組み合わせた立体トラス架構試験体による静的荷重実験を行った。その結果、荷重 - 変位関係は座屈により耐力が低下するまで線形挙動を示し、解析値と良い一致を示した。
- 4) これら構造性能の検討から設計を行うためのデータを得た。
- 5) GFRP部材の耐久性（耐候性）について今後検討していく必要がある。

謝辞

本開発を共同で行って頂いた旭硝子マテックス(株) ,

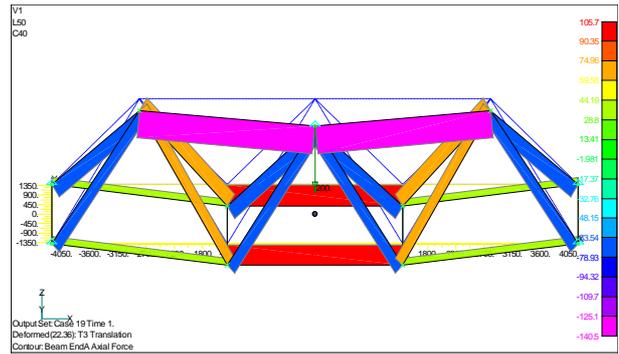


Fig. 18 荷重200kN時の変形と軸力
Displacement and Axial Force at Load 200kN

Table 4 荷重200kN時の部材軸力の比較
Comparison of Axial Force at Load 200kN

要素番号	解析値 kN	ヤング係数 kN/mm ²	ひずみ値 μ	実験値 kN	解析 / 実験
1	35.6	24.7	441	35.3	1.01
2	105.7	24.7	1443	115.5	0.92
3	35.6	24.7	448	35.9	0.99
4	35.6	24.7	432	34.6	1.03
5	105.7	24.7	1399	112.0	0.94
6	35.6	24.7	440	35.2	1.01
7	0.0	24.7	62	5.0	0.00
8	0.5	24.7	4	0.3	1.41
9	0.5	24.7	5	0.4	1.13
10	0.0	24.7	170	13.6	0.00
21	69.7	24.7	893	71.5	0.98
22	-70.3	25.2	-866	-70.7	0.99
23	-70.3	25.2	-892	-72.8	0.97
24	69.7	24.7	922	73.8	0.94
31	-70.8	25.2	-903	-73.7	0.96
32	-70.8	25.2	-863	-70.5	1.00
33	-70.8	25.2	-906	-74.0	0.96
34	-70.8	25.2	-872	-71.2	0.99
41	-70.3	25.2	-847	-69.2	1.02
42	69.7	24.7	907	72.6	0.96
43	69.7	24.7	923	73.9	0.94
44	-70.3	25.2	-894	-73.0	0.96
51	-140.5	25.2	-1797	-146.7	0.96
52	-140.5	25.2	-1767	-144.3	0.97

ステンレスを採用するにあたり協力頂いた大同特殊鋼(株)の関係各位にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 萩尾, 内海, 他: GFRPを用いた大空間トラス構造の開発 その1,その2,日本建築学会大会梗概集 B-1, pp.963-966, (2000)
- 2) 萩尾, 内海, 他: GFRPを用いた大空間トラス構造の開発 その3,その4,日本建築学会大会梗概集 B-1, pp.871-874, (2001)
- 3) 田澤, 糸日谷, 木村, 萩尾, 内海: GFRPを用いた大空間トラス構造の開発, 46th FRP CON-EX 2001 講演会講演要旨集, pp.75-77, (2001)