

CFRP製立体トラスの開発（その3）

— 設計方法 —

米丸 啓介
(技術研究所)

藤崎 忠志
(技術研究所)

杉崎 健一
(技術研究所)

中辻 照幸
(技術研究所)

Development of Space Truss Structure with CFRP (Part 3)

— Design Method —

by Keisuke Yonemaru, Tadashi Fujisaki, Kenichi Sugizaki and Teruyuki Nakatsuji

Abstract

Development of space truss structure with CFRP (CFRP truss) is dealt with in this paper. Mechanical properties of the material (CFRP), truss members and small truss structures have been obtained from the results of experimental studies to date. In this paper, structural design method of the CFRP truss is discussed. Though the stiffness of a CFRP truss member depends on the directions of its axial force, average stiffness can be used for structural analysis. Moreover, strengths and allowable stresses of CFRP are defined, based on previous data, for the structural design of CFRP truss.

概要

本論文はCFRP製立体トラス構造の研究開発に関する論文である。これまでに行われた実験的研究の結果から、素材（CFRP）、トラス部材ならびに小規模な立体トラス架構の力学的特性について把握した。本編では、CFRP製立体トラス構造を実構造物に適用する際に用いる設計方法について論じる。CFRPトラス部材の剛性は厳密には引張と圧縮で異なるがその平均剛性を用いた簡易解析方法の妥当性を述べた。また、本トラス構造は許容応力度設計を行い構造安全性の確認を行うが、そのために必要な材料強度や設計許容値をこれまでの研究で得られた知見をもとに設定した。

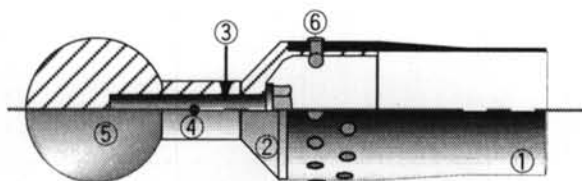
§ 1. はじめに

これまでになかった建築構造物や建築空間を実現することを目的に新しい建築構造材料の研究開発を行っている。鋼やコンクリートのような既存の建築構造材料にはない軽さと強さを併せ持った構造材料として、耐熱性に優れたフェノール樹脂をマトリックス樹脂とした炭素繊維強化複合材料（Carbon Fiber Reinforced Plastics；以下CFRP）に着目し、CFRP製のパイプ材（以下CFRPパイプ）を複層立体トラス構造の主構造材料として適用するための検討を行った。

繊維強化複合材料（Fiber Reinforced Plastics；以下FRP）は主に力を伝える強化繊維とそれらをまとめるマトリックス樹脂で構成される。FRPは強化繊維の方向により力学的な特性が変化する直交異方性を有するが、繊維の向きを設計し積層させることで必要な方向に必要な強度や剛性を有した効率の良い構

造材料を提供することが出来る。その力学的特性は直交異方性板を積層させたと考えることで積層板の理論により理論値が与えられる。一般にCFRPはばらつきの少なくない材料であること、直交異方性は建築構造材料としてはあまり馴染みのない性質であることから、CFRPを複層立体トラス構造に適用する際には実験的研究の結果からその実際の力学的特性を把握し、理論計算値との適合性を確認した¹⁾²⁾。

複層立体トラス構造には複数の部材を1箇所で結合するボールジョイント部分（接合部）が存在する。この部分については、現在の技術ではFRPで成形することができないため、先行技術に倣いアルミニウム立体トラス構造³⁾のボールジョイント部分に準じる構成方法を採用した。このため、CFRPパイプを適用した複層立体トラス構造（以下CFRP製立体トラス）の個々の部材は、図-1に示すようにCFRPパイプとその両端に取り付けられた金属製の部品で構成され、複雑な力学的挙動が予想された。



- ①: CFRP製パイプ
- ②: ステンレス鋼製ノーズコーン
- ③: クロムモリブデン鋼製ベアリングボルト
- ④: アルミニウム製カラー
- ⑤: アルミニウム製ハブ
- ⑥: ステンレス鋼製ブラインドリベット

図-1 CFRPトラス部材

また、部材端部から接合部にかけては圧縮と引張で力の伝達経路が異なることから、部材ならびに小規模な架構の力学的特性を実験的研究の結果から把握した⁴⁾⁵⁾。

CFRP製立体トラスを実構造物に適用する際には、構造解析を行い、これまでの実験的研究の結果をもとに検討された許容応力度設計体系に基づく設計法により構造安全性を確認する。本編ではCFRP製立体トラスの構造解析方法の妥当性と材料強度や設計許容値の考え方について論じる。

§ 2. 構造解析方法

2.1 CFRPトラス部材の力学的特性と線形解析

これまでの実験的研究の結果から、CFRPトラス部材は引張と圧縮で異なる力学的挙動を示すことが明らかになった。これは、図-2にみられるように、接合部部品において引張と圧縮で力の伝達経路が異なることが主な原因である。表-1に代表的なCFRPトラス部材の剛性を示す。2種類の部材の全体剛性を示すが、いずれの場合も引張の部材剛性は圧縮に比べて10%程低い値を示す。なお、CFRPトラ

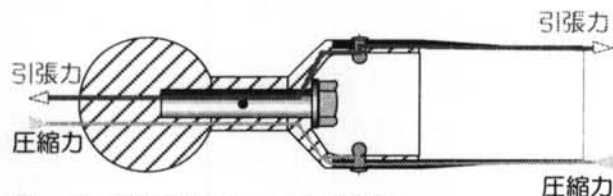


図-2 部材端部の力の伝達機構

呼び名	方向	部材剛性 (kN/mm)	耐力 (kN)	備考
P94×2	引張	25.7	141	ベアリングボルト 破断軸力は215.2kN
	圧縮	28.0	146	オイラー座屈
P109×2	引張	29.3	141	ベアリングボルト 破断軸力は215.2kN
	圧縮	32.6	240	オイラー座屈

※呼び名は、P (CFRPパイプの外径) × (CFRPパイプの肉厚) で表す。

表-1 部材の剛性

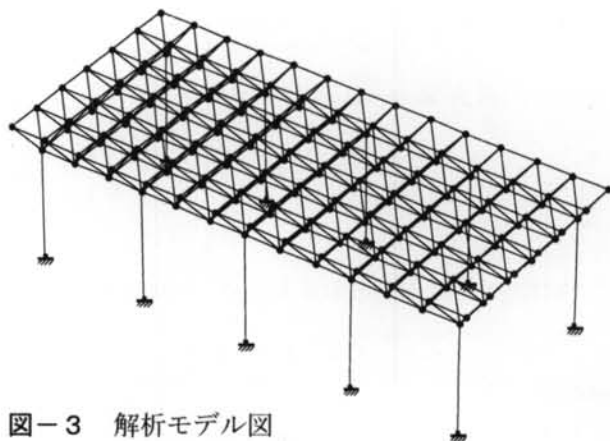


図-3 解析モデル図

ス部材の呼び名は主要部分であるCFRPパイプの(外径mm) × (肉厚mm) で表した。

汎用の線形フレーム解析ソフトを用いた場合、引張と圧縮で剛性の異なる部材を扱うことは煩雑である。ここでは、引張と圧縮にそれぞれの部材剛性を用いた詳細解析と、引張と圧縮の平均剛性を採用した簡易解析の両方を行いそれらの違いを検証する。

2.2 解析モデル

図-3に解析モデルを示す。CFRP製立体トラスを採用したT社社員食堂をモデル化したもので、架構の大きさは12m×26m、長さ2mの部材612本とハブと呼ばれる直径134mmのボールジョイント部品176個で構成される。上下の水平材にはP109×2、斜め材にはP94×2のCFRPトラス部材が採用され、これらの部材は接合部でピン接合される。この架構の上面に1kN/m²の荷重を想定し、架構へは上面の節点に支配面積分の荷重を入力した。詳細解析の場合は、この際に引張力が生じる部材には引張の、圧縮力が生じる部材には圧縮の部材剛性を与えて解析を行った。一方の簡易解析では全ての部材に引張と圧縮の平均剛性を与えて解析を行った。

2.3 解析結果と考察

解析によって得られた全ての部材の軸力について、簡易解析結果と詳細解析結果を比較して図-4

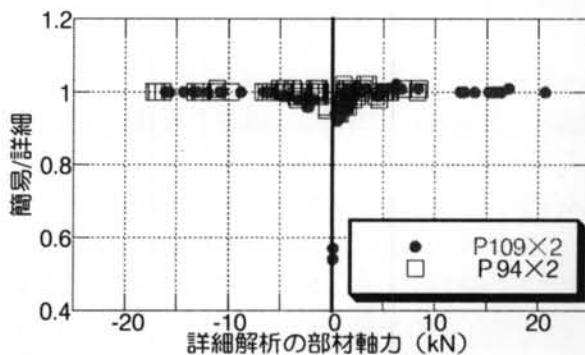


図-4 解析結果の比較 (部材軸力)

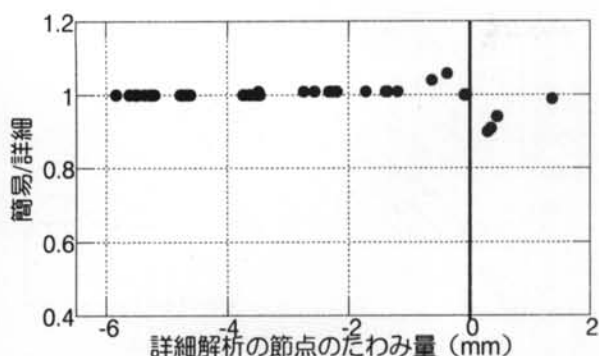


図-5 解析結果の比較 (節点の鉛直変位)

に示す。縦軸は同じ箇所部材について簡易解析結果による軸力値を詳細解析結果による軸力値で除した値、横軸は引張を正とした場合の詳細解析時の部材の軸力を示す。横軸0付近では簡易解析結果が詳細解析結果を下回るような傾向がみられるが、構造設計を行う上で判断材料となる部材軸力の絶対値が大きな部材では、ほぼ1に近く簡易解析結果と詳細解析結果に差がないことを示している。この結果より、各部材に生じる軸力の予測方法に簡易解析法を用いても実用上問題がない。

架構の変形に関して、全ての節点の鉛直方向変位を簡易解析と詳細解析を比較して図-5に示す。部材の軸力の場合と同様に、変位の絶対値が大きい部分では両解析結果に違いはなく、変位の予測に簡易解析法を用いても実用上問題がない。

以上より、CFRP製立体トラスの構造解析には、部材剛性に引張と圧縮の平均値を採用する簡易解析法を用いる。

§ 3. 設計方法

3.1 構造安全性の確認

CFRP製立体トラスを実構造物に適用するにあたり、その安全性を明らかにしなくてはならない。そのため許容応力度設計による構造設計を行う。これまでの研究で、CFRP¹²⁾、CFRPトラス部材や小規模トラス架構¹⁵⁾¹⁶⁾の力学的特性が明らかになった。その際に得られた設計許容値を設定する上で留意すべき点は次の2点である。

①CFRP自体の力学的特性にはある程度のばらつきが内在する

②CFRPは脆性材料である

①については材料特性上の問題であり、実強度に対する材料強度の安全率を適正に設定することで破壊に対する安全性を確保する。②については設計上、

長期	常時	G+P
短期	積雪時	G+P+S
	暴風時	G+P+W
	地震時	G+P+K
	火災時	G+P

※G:固定荷重、P:積載荷重、S:積雪荷重、W:風圧力、K:地震力

表-2 組み合わせ荷重

材料が破壊するまでの余裕度を大きめとすることで架構が崩壊するまでの安全性を確保する。これは、従来の立体トラス構造の素材には延性があり、一部の部材に材料強度を超えるような力が導入されても架構全体として応力再配分が行われ、崩壊に至るまでには余裕があったためである。

建築基準法施行令第81条に示される許容応力度等計算では、建物の供用期間中に作用する5つの外力(固定荷重(G)、積載荷重(P)、積雪荷重(S)、風圧力(W)、地震力(K))を想定される5つの状態の組合せ荷重として考慮する。これらの組合せについて表-2にまとめる。CFRP製立体トラスの構造安全性は、これらの荷重が付加されたときに部材に生じる応力が次節で設定する許容応力度を上回らないことで確認する。

3.2 CFRPの設計許容値の設定

設計許容値として、材料強度、短期許容応力度、長期許容応力度を設定する。

(a) 材料強度

建築における材料強度は、“安全性の観点から各材料が確保できる強度のこと”と定義されている。材料の実強度のばらつきに応じた安全率を考慮した材料強度を決定しなければならない。本研究においては材料強度の実験データの信頼性を95%と考え、統計的に下側1%点(99%信頼限界値)を許容限界値とし、その値を材料強度と設定した。これは、MIL-HDBK-5D⁹⁾に示される航空機の機体の構造材料の強度下限値(A Basis)を求めるやり方と同じであり、この信頼性は建築構造材料としては十分であると考えられる。CFRPの材料強度(A)は次式で求められる。なお、この場合の信頼限界係数(k_A)は自由度(=サンプル数-1)と信頼限界の割合(%)から決定される値として、MIL-HDBK-5D⁹⁾に一覧表で与えられている。その一部をt分布の1%点と比較して表-3に示すが、A Basisは特にサンプル数の少ない場合はかなり厳しい基準である。

$$A = X_{ave} - k_A \cdot \sigma = (1 - k_A \cdot C) \cdot X_{ave} \cdots \cdots (1)$$

X_{ave} : 実験値の平均値

k_A : 99%片側信頼限界係数⁹⁾

自由度 (n-1)	k_A (A Basis)	t 分布 1% 点	自由度 (n-1)	k_A (A Basis)	t 分布 1% 点
1	37.094	31.821	18	3.331	2.552
2	10.553	6.965	19	3.295	2.539
3	7.042	4.541	20	3.263	2.528
4	5.741	3.747	21	3.233	2.518
5	5.062	3.365	22	3.206	2.508
6	4.642	3.143	23	3.181	2.500
7	4.354	2.998	24	3.158	2.492
8	4.143	2.896	25	3.136	2.485
9	3.981	2.821	26	3.116	2.479
10	3.852	2.764	27	3.098	2.473
11	3.747	2.718	28	3.080	2.467
12	3.659	2.681	29	3.064	2.462
13	3.585	2.650	30	3.048	2.457
14	3.520	2.624	40	2.932	2.423
15	3.464	2.602	60	2.802	2.390
16	3.414	2.583	120	2.648	2.358
17	3.370	2.567	∞	2.326	2.326

※n: サンプル数

表-3 A-Basisを与える信頼限界係数 (k_A)⁸⁾

σ : 標準偏差

C: 変動係数 ($=\sigma/X_{ave}$)

これまでの研究²⁾で得られた各強度の実験データを用いて(1)式で計算した結果を表-4にまとめる。圧縮強度と支圧強度については、温度条件-25℃、0℃の実験データを常温のものと比較して値とばらつき具合に差がないと判断できたので常温のデータと同様に扱った。局部座屈強度、オイラー座屈強度に関しては、実験式(付録参照)により得られた計算値に対する各実験値の比率を(1)式で計算した。実験値の平均値に対する各破壊強度の下限値の比率は $(1-k_A \cdot C)$ で表されるが、各強度とも0.8前後でありそれほど差がない。このうち最もばらつきの大きい圧縮強度の比率の小数点以下3桁目を切り捨てた0.72を実験値の平均値に対する各破壊強度の下限值 (=材料強度) の比率として採用する。サンプル数を反映させた統計処理を行っているが、本研究におけるサンプル数は1素材の材料強度を設定するのに十分とはいえない。その材料の強度がなすであろう母集団の形状を特定するためには少なくとも100程度のサンプルが必要である⁸⁾といわれていることから、力学的特性データや長期耐久性データを充実させることはCFRPのような材料の今後の研究課題の一つである。

	n	X_{ave} (MPa)	σ (MPa)	k_A	c	$1-k_A \cdot c$	備考
引張強度	1	1512	—	—	—	—	パイプの実験値 ⁵⁾ 。実験値が少ないので評価しなかった
圧縮強度	40	562	51.8	2.941	0.0922	0.729	試験片(温度水準-25℃~25℃) ²⁾ +パイプの実験値 ⁶⁾ で計算
支圧強度	22	443	24.7	3.233	0.0558	0.819	試験片(温度水準-25℃~25℃) ²⁾ +パイプの実験値 ⁵⁾ で計算
局部座屈強度	15	1.01	0.0705	3.520	0.0698	0.754	各実験値 ⁹⁾ の計算値 (付録参照) に対する割合で計算
オイラー座屈強度	14	1.02	0.0729	3.585	0.0718	0.743	各実験値 ⁹⁾ の計算値 (付録参照) に対する割合で計算

表-4 実験値のばらつき

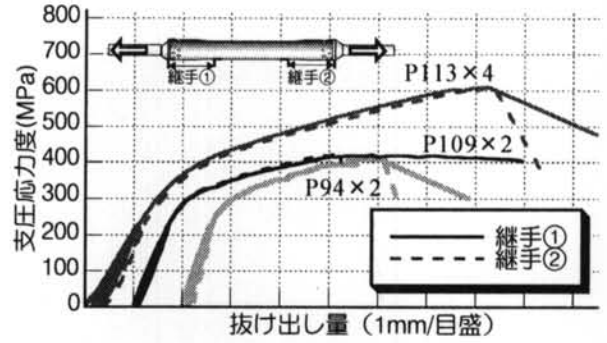


図-6 支圧応力度と引張治具抜け出し量の関係

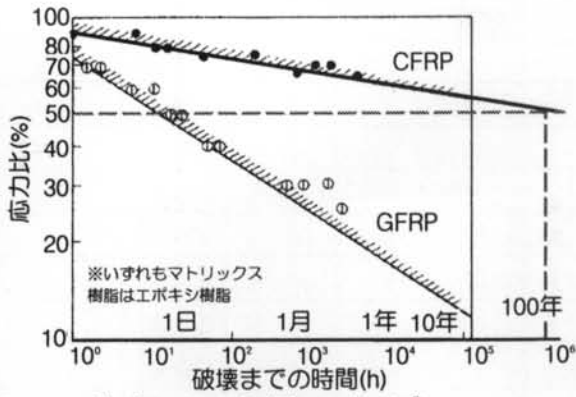
(b) 短期許容応力度

短期許容応力度は建物の供用期間中に1度以上遭遇する可能性の高い中規模の積雪、暴風、地震の外乱によりその後の建築物の安全性や使用性及び耐久性の低下につながるような損傷が生じず、そのための補修を必要としないことを目的としたもので、損傷の防止による財産保全の許容値といえる⁹⁾。具体的には、短期許容応力度を設定するための条件は、非損傷性の観点から材料の線形挙動範囲内であること、ならびに、3.1節に示したCFRPの留意点“②CFRPは脆性材料である”より、トラス架構としての脆性的な破壊を防止するために材料強度に対して十分な余裕を持っていることであると考えられる。

CFRPは弾性材料であるが、リベット継手部分におけるリベットまわりの支圧に関する力学的挙動は図-6に示すようなバイリニア挙動を示し、その折れ曲がり点はパイプの径や肉厚によらず最大強度の60~80%で観察された。先述の破壊強度に対する材料強度の比率が0.72であることを考慮すると、リベット継手部分の力学的挙動の折れ曲がり点はCFRPの支圧の材料強度の80~110%となる。本論では短期許容応力度以下における線形挙動を確実なものにするために、また、設定した破壊強度の下限值 (=材料強度) に対する安全率を2とすることを念頭に置き、材料強度の50%を短期許容応力度として設定する。

(c) 長期許容応力度

長期許容応力度は建築物の長期間の使用に対してクリープによる変形等により使用上の支障を来さないことを目的としたもので、機能性確保のための許



図一七 曲げクリープ破壊のデータ⁴⁾

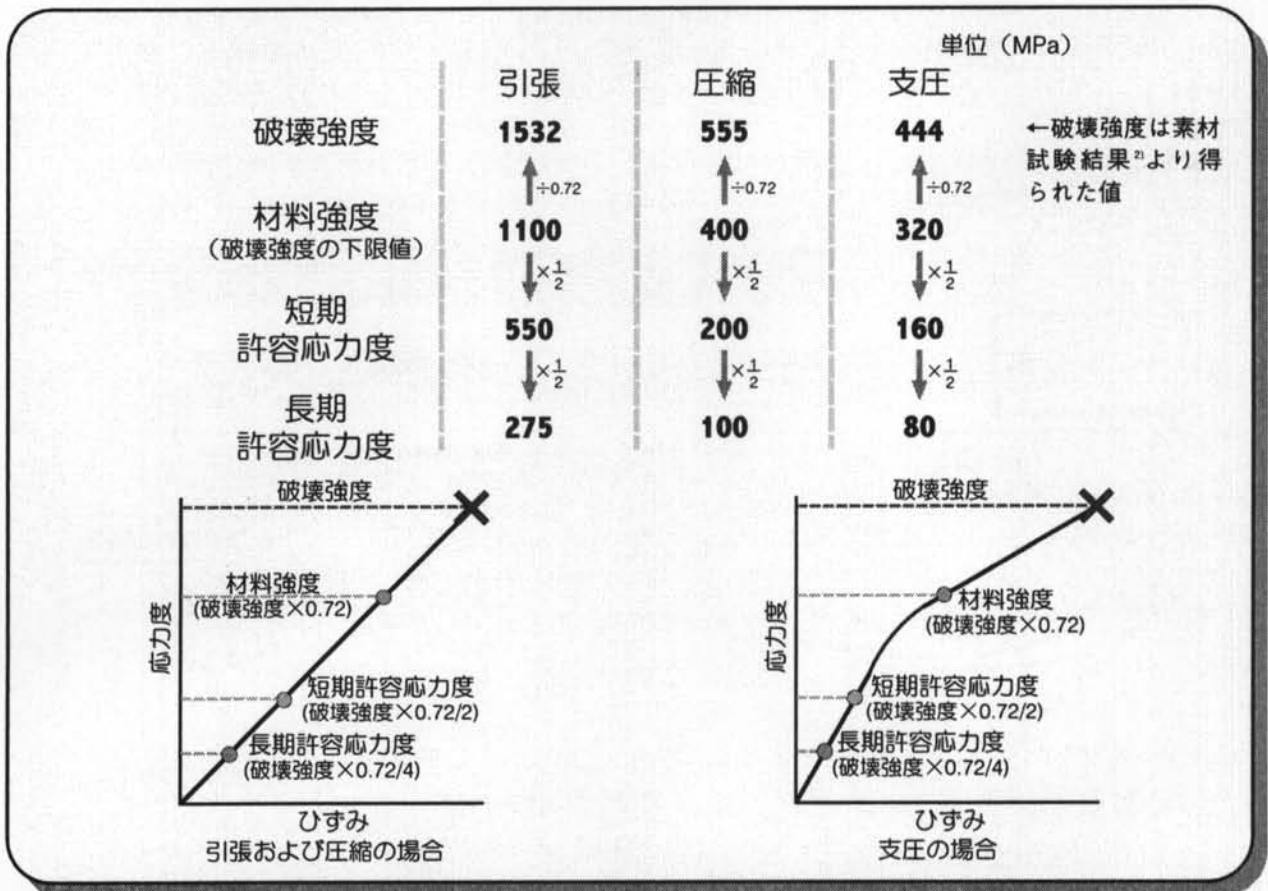
容値といえる⁹⁾。具体的には建築物の供用期間を想定した上で、長期許容応力度が生じた状態でクリープ変形による部材等のたわみが使用上の限界を超えないこと、長期許容応力度がクリープ破壊強度に対して余裕を持った値であることが条件となる。

FRPの一つの特徴は構成材料や強化繊維の配向により力学的特性を自由に設計できることである。実際、建築以外の構造用途で用いられているFRPは構造体と同時に材料自体の設計もなされ、要求性能に応じた断面構成となっていることが多い。したがって、それぞれの場合でFRPが固有の力学的特性を有

することになり、一般的なデータベースの構築が難しい。また、特定の構成のFRPに対して試験が行われても一般に公表されることは少ない。特にクリープのように時間のかかる実験はあまり実施されておらず、クリープ特性については既存の数少ない実験データから推定されることが多い。

本研究においても、CFRPのクリープ試験を実施しなかったことから、既存のクリープデータ⁷⁾を用い検討した。トラス部材には引張と圧縮の軸力が生じるために、引張よりも曲げのクリープデータが適当と考えた。図一七にCFRPとGFRPの曲げクリープ破壊のデータを示す。縦軸は初期強度に対する応力比、横軸は破壊までの時間を表している。建築物の供用期間を100年とすると、CFRPの曲げクリープ破壊強度は外挿により初期強度の50%と読める。この実験に用いられたCFRPと本CFRPパイプのマトリックス樹脂や断面構成が異なること、本CFRPのクリープ変形については未知であることを考慮して、このクリープ破壊強度に対する安全率を2とし、材料強度の25%を長期許容応力度として設定する。

(a) (b) (c) で設定した材料強度、許容応力度を図一八にまとめる。なお、ここに示す破壊強



図一八 材料強度と許容応力度

度（引張1532MPa、圧縮555MPa、支圧444MPa）は文献2)の素材試験によって得られた値である。

3.3 耐火安全性の確認

耐火安全性の検証には、CFRP製立体トラスを適用する建物の部分の火災を想定し、その火災に対してCFRP製立体トラスが構造的に安全であることを確認する¹⁰⁾。フェノール樹脂をマトリックス樹脂とするFRPは比較的耐熱特性に優れ、準不燃材料の通則認定を取得しているものもある⁷⁾。本CFRPの高温時の力学的特性はこれまでの研究¹²⁾で得られているが、それでも従来の鋼に比べて熱に対する性能が高いとはいえない。このため、それらのデータからCFRPの限界温度を設定し、CFRP製立体トラス架構の限界温度時の構造安全性の検証、ならびにCFRPトラス部材が限界温度以上の雰囲気さらされたり、炎と触れたりすることのないよう防火設計を行う。

本CFRPの強度ならびに直交異方性を表す5つの弾性係数に関する温度特性の実験結果を図-9と図-10に示す。これらのデータより、建築構造材料としての実用性と各値に急激な変化のない上限の温度であることを考慮して、200℃を本CFRPの限界温度に設定した。表-5に本CFRPの限界温度時の弾性係数ならびに常温強度に対する保持率をまとめる。強

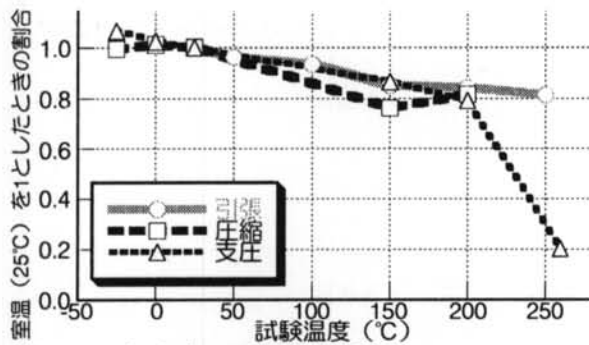


図-9 各強度の温度依存性

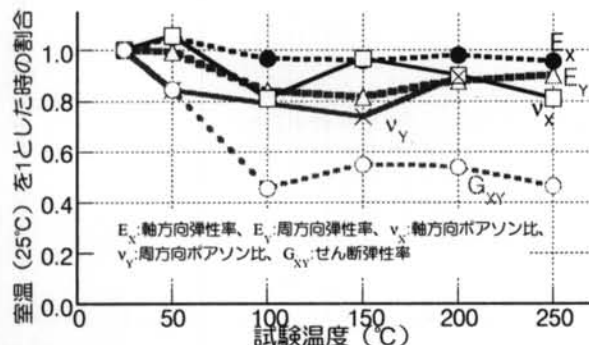


図-10 各弾性係数の温度依存性

限界温度	200 ℃	
	保持率	備考
引張強度	80 %	実験値
圧縮強度	80 %	実験値
支圧強度	80 %	実験値
軸方向弾性率: E_x	80 %	実験値
周方向弾性率: E_y	80 %	実験値
せん断弾性率: G_{xy}	50 %	実験値
軸方向ポアソン比: ν_x	80 %	実験値
周方向ポアソン比: ν_y	80 %	実験値
オイラー座屈強度	80 %	実験式 ^{付録} より推定
局部座屈強度	63 %	実験式 ^{付録} より推定

表-5 CFRPの限界温度時の各強度や弾性係数

度のうち、局部座屈強度の保持率が63%と最も低い。

火災時に考慮すべき荷重は表-2に示すように常時と同じである。常時には部材の応力を材料強度の25%（長期許容応力度）内に納まるよう設計がなされる。限界温度時の強度について、最も保持率の低い局部座屈強度が先述のように63%であるので、CFRP製立体トラスの限界温度時の構造安全性については常時の許容応力度設計がなされれば自動的に確保される。したがって、耐火安全性の確認においては防火設計を行いCFRPトラス部材が炎と触れない、限界温度以上の雰囲気さらされない等の検討を行えばよい。防火設計の手順を図-11に示す。照

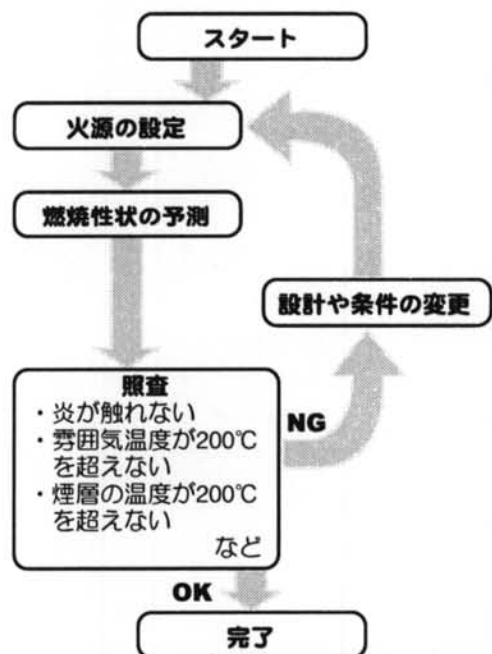


図-11 CFRP製立体トラスの防火設計フロー

査の結果が不良の場合は、天井高の変更や排煙設備の増設など設計的な変更と、火気や可燃物を持ち込ませない維持管理を行うなど使用条件の変更が考えられる。

§ 4. まとめ

本編では、CFRP製立体トラスを実構造物に適用する際に用いる構造解析手法ならびに、許容応力度設計を行うのに必要なCFRPの材料強度ならびに許容応力度について論じた。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) CFRPトラス部材は引張と圧縮で異なる剛性を示すが、トラス架構の構造解析を行うにあたっては、各部材の剛性に引張と圧縮の平均剛性を用いても実用上問題ない。
- 2) 本CFRPの材料強度は、実験値のばらつきを考慮して破壊強度平均値の72%とした。
- 3) 本CFRPの短期許容応力度は、線形挙動域であること、破壊に対する安全率を2とすることを考

慮して材料強度の50%とした。

- 4) 本CFRPの長期許容応力度は、一般的なCFRPデータより100年後の曲げクリープ破壊強度を予測し、それに安全率2を考慮して材料強度の25%とした。
- 5) 本CFRPの限界温度は、建築構造材料としての実用性と各値に急激な変化のない上限の温度であることを考慮して、200℃とした。
- 6) CFRP製立体トラスの限界温度時の構造安全性は常時の許容応力度設計がなされれば自動的に確保される。

今後、CFRPのような新しい材料を建築構造材料として積極的に適用するためには、その力学的特性や長期耐久性データの整備が重要な課題である。

謝辞

本研究開発は東レ株式会社、株式会社日本アルミと共同で行ったものである。末筆ながら、関係各位に謝意を表する。

<参考文献>

- 1) 米丸啓介, 藤崎忠志, 杉崎健一, 中辻照幸: “CFRP製立体トラスの開発 (その1) -CFRPの力学的特性-” 清水建設研究報告, Vol. 64, pp41~47, 1996.10
- 2) 米丸啓介, 藤崎忠志, 杉崎健一, 中辻照幸, 鈴木弘之: “CFRPパイプを構造材料に適用するための基礎的研究” 日本建築学会構造系論文集, 第542号, pp195~202, 2001.4
- 3) 檜山裕二郎, 高島英幸, 飯島俊比古: “アルミ合金単層ラチスドームに用いるボールジョイントの載荷実験及び弾塑性解析” 日本建築学会構造系論文集, Vol. 37, No. 10, 1997.12
- 4) 米丸啓介, 藤崎忠志, 杉崎健一, 中辻照幸: “CFRP製立体トラスの開発 (その2) -部材と架構の力学特性-” 清水建設研究報告, Vol. 65, pp49~56, 1997.4
- 5) 米丸啓介, 藤崎忠志, 杉崎健一, 中辻照幸, 鈴木弘之: “CFRPトラス部材の引張特性に関する研究” 日本建築学会構造系論文集, 第548号, pp159~165, 2001.10
- 6) 米丸啓介, 藤崎忠志, 杉崎健一, 中辻照幸, 鈴木弘之: “CFRPトラス部材の圧縮特性に関する研究” 日本建築学会構造系論文集, 第556号, pp197~204, 2002.6
- 7) 強化プラスチック協会: FRP構造設計便覧, 1994.9
- 8) MILITARY STANDARDIZATION HANDBOOK -METALLIC MATERIALS AND ELEMENTS FOR AEROSPACE VEHICLE STRUCTURES-, MIL-HDBK-5D, DEPARTMENT OF DEFENSE USA, 1 June 1983
- 9) 日本建築学会: 連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案, 日本建築学会, 2002.3
- 10) 米丸啓介, 藤崎忠志: 防火設計による新しい構造材 (CFRP) の適用, 日本火災学会誌Vol48 No.1, 1998.2, pp29~33

付録 座屈強度の計算式

○CFRPの弾性係数

座屈強度の計算に用いるCFRPパイプの弾性係数には、実験値と積層板の理論による理論計算値に良い対応がみられた²⁾ことから、理論計算値をそのまま用いる。

- 軸方向弾性率 (引張) : $E_x = 108\text{GPa}$
- 軸方向ポアソン比 : $\nu_x = 0.086$
- 周方向弾性率 : $E_y = 41.4\text{GPa}$
- 周方向ポアソン比 : $\nu_y = 0.033$
- せん断弾性率 : $G_{xy} = 5.95\text{GPa}$

○オイラー座屈強度

CFRPパイプのオイラー座屈強度 ($\sigma_{cr,e}$) は次式で表される⁶⁾。

$$\sigma_{cr,e} = \alpha \cdot \pi^2 \cdot E_x / \lambda^2 \cdot \dots \text{(付-1)}$$

(α : 実験によって得られた係数、 λ : 細長比 (= l_b/i)、 l_b : 座屈長さ、 i : 断面二次半径)

CFRPパイプの場合、圧縮の軸方向弾性率が引張の90%であったため、軸方向引張弾性率を用いて表記する場合には係数 $\alpha = 0.90$ を乗じる。

○局部座屈強度

本CFRPパイプのような直交異方性薄肉円筒の局部座屈強度理論値は次式で表され、非対称変形座屈強度 ($\sigma_{cr,u}$) と軸対称変形座屈強度 ($\sigma_{cr,s}$) の2つのモードのうち低い方で決定される⁷⁾。

$$\frac{\sigma_{cr,u}}{\sigma_{cr,s}} = \left\{ \frac{\sqrt{E_x \cdot E_y + 2 \cdot G_{xy}(1 - \nu_x \cdot \nu_y)} + E_x \cdot \nu_y}{\sqrt{E_x \cdot E_y + \left(\frac{E_x \cdot E_y}{2 \cdot G_{xy}}\right)} - E_x \cdot \nu_y} \right\}^{1/2} \dots \text{(付-2)}$$

$$\sigma_{cr,s} = \sqrt{\frac{E_x \cdot E_y}{3 \cdot (1 - \nu_x \cdot \nu_y)}} \cdot \frac{t_n}{R_p} \dots \text{(付-3)}$$

(t_n : パイプの肉厚、 R_p : CFRPパイプの半径)

式(付-2)に上記の弾性係数を代入して計算すると

$$\sigma_{cr,u} / \sigma_{cr,s} = 0.433$$

となり、CFRPパイプにおいては必ず非対称変形座屈が起こる。この理論値に対する本CFRPパイプの実験値の比率は0.78であったことから、CFRPパイプの局部座屈強度は係数 $\beta = 0.78$ を用いて次式で表される⁶⁾。

$$\sigma_{cr,u} = \beta \cdot \left\{ \frac{\sqrt{E_x \cdot E_y + 2 \cdot G_{xy}(1 - \nu_x \cdot \nu_y)} + E_x \cdot \nu_y}{\sqrt{E_x \cdot E_y + \left(\frac{E_x \cdot E_y}{2 \cdot G_{xy}}\right)} - E_x \cdot \nu_y} \right\}^{1/2} \cdot \sqrt{\frac{E_x \cdot E_y}{3 \cdot (1 - \nu_x \cdot \nu_y)}} \cdot \frac{t_n}{R_p} \dots \text{(付-4)}$$

(β : 実験によって得られた係数)