

(53) 引抜成形中空角形CFRP部材を用いる トラス形式歩道橋の一試算

生島 広人¹・松村 政秀²・久部 修弘³・杉浦 邦征⁴・鈴木 康夫⁵

¹学生員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: ikushima.hiroto.36z@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: matsumura.masahide.4s@kyoto-u.ac.jp

³正会員 三菱ケミカルインフラテック株式会社 土木・防水補強部 (〒103-0021 東京都中央区日本橋本石町1-2-2)
E-mail: hisabe.nobuhiro.mb@m-chemical.co.jp

⁴正会員 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: sugiura.kunitomo.4n@kyoto-u.ac.jp

⁵正会員 京都大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: suzuki.yasuo.7c@kyoto-u.ac.jp

土木構造物の補修・補強材料として多用されているFRPは軽量で耐久性にも優れるため、FRP製部材を構造物へ適用できると、施工性や維持管理性において有利となることが想定されるが、主部材としての利用はほとんど見られない。そこで、本研究では、FRPの中でも高強度な繊維材料を用いるCFRPに着目し、経済性および材料特性の信頼性の観点から引抜成形された中空角形CFRP部材(100×100×t3.5 mm)を、トラス形式歩道橋(橋長18.5 m、有効幅員2 m)の主部材として用いる場合を想定し、試設計を行った。その結果、CFRP部材を用いると軽量でコンパクトな歩道橋の設計が可能であることが確認できた。CFRP部材はスパンが長く、重量的な制約を受ける橋梁への適用が考えられることから、CFRP部材の部材性能や接合部の設計に向けた検討を引き続き進めていくことを考えている。

Key Words : CFRP, pultrusion, pedestrian bridge

1. はじめに

繊維強化プラスチック(以下、FRP と略記)は、軽量で耐久性に優れた材料であり、航空、船舶、自動車産業など、幅広い分野で活用され、使用実績を伸ばしている。土木分野においても、ガラス繊維を用いる GFRP や炭素繊維を用いる CFRP などが構造物の補修・補強材料として広く活用されているほか、GFRP 製歩道橋など、構造主部材としての FRP 部材の利用に関する研究¹⁾が行われており、適用事例²⁾も見られるようになってきた。FRP を主部材とする構造物は、施工・維持管理が容易であるとされる。それゆえ、社会基盤の老朽化が進む日本において、今後ますます、補修・補強材としてのみならず、構造主部材としても FRP が求められると考えられる。その一方で、CFRP は軽量で剛性が高いが高コストであ

るため、土木構造物の主部材としての利用はほとんど見られないのが現状である。

このような背景を踏まえ、著者らは、引抜成形による中空角形 CFRP 部材をトラス形式歩道橋の主部材として適用することを検討している。中空角形 CFRP 部材は軽量であり繊維方向に優れた強度特性を示す利点があり、引抜成形により安定した品質での大量生産が可能である。この部材を用いて、GFRP 製トラス歩道橋の設計事例²⁾を参考に、トラス形式歩道橋の設計を試み、CFRP を用いる利点を検討する。トラス橋では軸力が卓越するため、引抜方向に強い FRP の特性を有効に活用できるという利点がある。

2. 引抜成形CFRP部材

中空角形 CFRP 部材として、図-1 示す引抜成形材を歩道橋の主部材として用いることを考えている。部材構成は、エポキシ樹脂により硬化された CFRP と GFRP から成る積層板であり、四角断面内側から、GFRP +45°/-45°/CFRP0°/GFRP+30°/-30°の5層からなり、板厚が3.5 mmのCFRPが、内側0.36[mm]、外側0.4[mm]のGFRPにサンドイッチされている(以下単に CFRP 部材と称する)。各層および部材の物性値は、表-1 に示すとおりである。

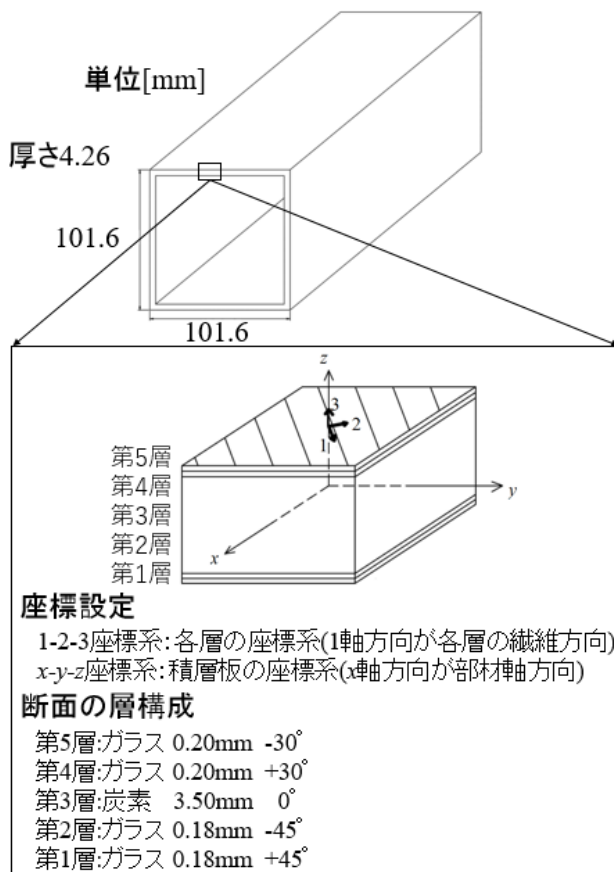


図-2 部材の形状および寸法

表-1 物性値

(a) CFRP 層

密度[g/cm ³]	縦弾性率[GPa]	剪断弾性率[GPa]	ポアソン比
1.60	E_1 : 140	G_{12} : 3.00	ν_{12} : 0.289
	E_2 : 11.2		ν_{21} : 0.0232

(b) GFRP 層

密度[g/cm ³]	縦弾性率[GPa]	剪断弾性率[GPa]	ポアソン比
2.13	E_1 : 48.2	G_{12} : 3.26	ν_{12} : 0.261
	E_2 : 13.5		ν_{21} : 0.0729

(c) 部材

密度[g/cm ³]	縦弾性率[GPa]	ポアソン比	引張強度[MPa]
1.72	E_x : 115	ν_x : 0.3	σ_x : 2230

部材の圧縮強度 σ_c は、設計・施工指針案³⁾に従い、積層板の座屈強度 $\sigma_{cr}(plate)$ と中空角形部材のオイラー座屈強度 $\sigma_{cr}(column)$ のうちの最小値とした。部材を構成する積層板の座屈強度 $\sigma_{cr}(plate)$ は、式(1)によって計算できる。ただし、板の曲げ剛性を D_{ij} 、板厚を t 、板幅を b とする。

$$\sigma_{cr}(plate) = \frac{2\pi^2}{t \cdot b^2} (\sqrt{D_{11}D_{22}} + D_{12} + 2D_{66}) \quad (1)$$

また、部材の柱としてのオイラー座屈強度 $\sigma_{cr}(column)$ は、式(2)によって計算できる。ただし、オイラー座屈が生じる軸圧縮荷重を P_{cr} 、部材長さを R 、部材断面積を S 、第 k 層の縦弾性率を $E_x^{(k)}$ 、断面2次モーメントを $I^{(k)}$ とする。

$$\sigma_{cr}(column) = \frac{P_{cr}}{S} = \frac{\pi^2 \sum_{k=1}^n E_x^{(k)} \cdot I^{(k)}}{R^2 \cdot S} \quad (2)$$

以上より、部材長さ R と部材の圧縮強度 σ_c の関係が得られる(図-2)。図中、曲線の折れ曲がり点の座標は、($\sigma_c = 209$ [MPa], $R = 3038$ [mm])である。

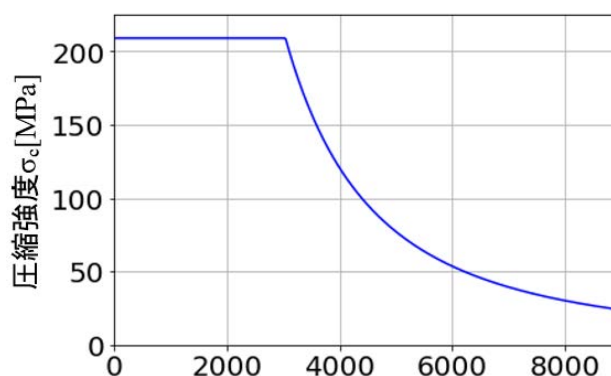


図-1 部材の圧縮強度

3. 歩道橋の設計条件

設計手法は FRP 歩道橋設計・施工指針(案)³⁾を参考にし、限界状態設計法とした。既存の GFRP 製歩道橋である玄若橋(図-4、図-3)の設計寸法と設計荷重条件、たわみの上限値(表-2)を参考にし、CFRP 部材を用いる歩道橋を試設計する。玄若橋は、文献²⁾に設計法が公表されている。また、玄若橋は既存の FRP 橋の中で橋長が比較的に長いので、部材の長さを大きくすることができ、高強度・高弾性である CFRP 部材の特徴を生かせると考え、本試設計の参考にした。玄若橋の照査結果を表-3に示す。



図-3 玄若橋²⁾

表-2 設計条件

橋長[mm]	18500
支間長[mm]	17635
全幅員[mm]	4100
有効幅員[mm]	2000
活荷重[kN/m ²]	3.5 (群衆荷重)
たわみ[mm]	43.8 (橋長の 400 分の 1)

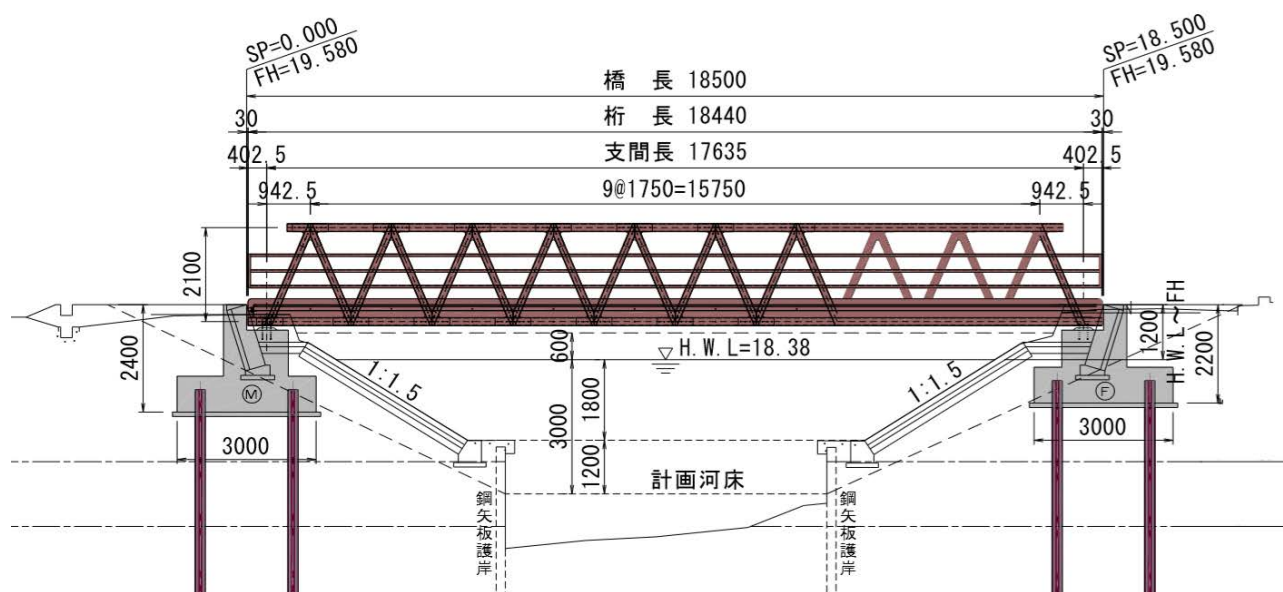


図-4 玄若橋一般図²⁾

表-3 玄若橋照査結果²⁾

性能	部材	項目	照査結果
安全性 (破壊)	上弦材	軸圧縮	$0.96 \leq 1.00$
	斜材	軸圧縮	$0.74 \leq 1.00$
	斜材	軸引張	$0.15 \leq 1.00$
	下弦材	軸引張	$0.28 \leq 1.00$
	振止材	軸圧縮	$0.56 \leq 1.00$
使用性	全体	たわみ	$43.2 \leq 43.8\text{mm}$
	全体	振動	$6.34 \geq 2.30\text{Hz}$

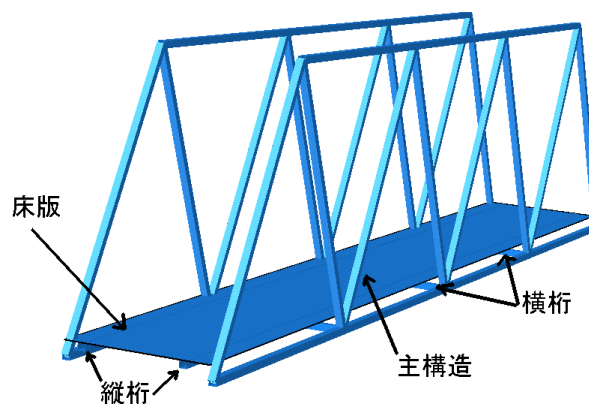


図-5 歩道橋の構造

4. 構造形式

前章の設計条件に基づき、2章で述べた CFRP 部材を主部材として用いて歩道橋の試設計を行う。歩道橋は、図-5 に示す構造とした。床版に作用する活荷重は、縦

桁に支持され、横桁を介してトラス形式の主構造の格点部に伝達される。CFRP 部材を、床版を支持する縦桁と主構造に用いることを想定している。初めに縦桁の設計を行い、次に主構造の設計を行う。その後、歩道橋の重量と高さという観点で構造の合理性を比較検討する。

縦桁の設計では、床版下の縦桁本数 n 〔本〕、トラス桁の格点間距離 L 〔mm〕が設計パラメータである(図-6)。縦桁の作用圧縮応力が積層板の座屈応力 $\sigma_{cr}(\text{plate}) = 209[\text{MPa}]$ 以下となるような(n 〔本〕, L 〔mm〕)の組み合わせとして、(2〔本〕, 4409〔mm〕)あるいは(4〔本〕, 5878〔mm〕)が求められる(図-7)。なお、床版が部材全長にわたって配置される縦桁には、オイラー座屈は生じないものと仮定している。

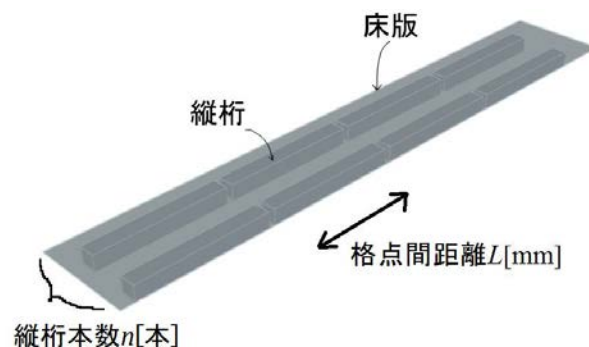


図-6 縦桁の設計パラメータ

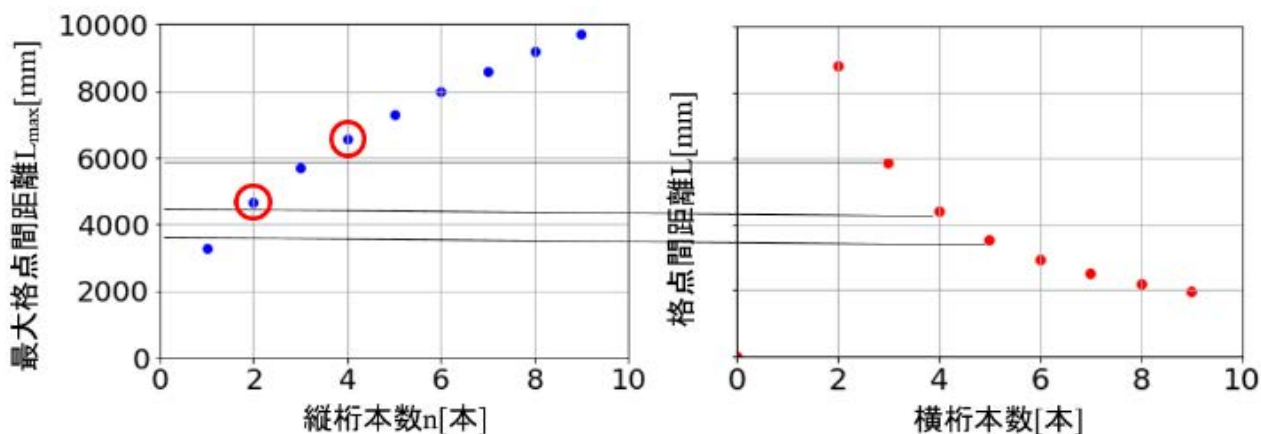


図-7 縦桁本数と格点間距離の関係

5. 歩道橋の試設計

歩道橋の主構造は、玄若橋と同じ下路トラス構造とし、図-8に示すように、単純支持されたトラス橋を考え、設計荷重作用時の作用応力およびたわみを FEM 解析により算出した。解析には Abaqus (ver.6.14)を用いた。設計荷重は活荷重と死荷重のみを考慮し、1 構面を対象に解析を行った。格点部はピン結合あるいは剛結合とし、ピン結合の場合にはトラス要素を、剛結合の場合にははり要素を用いてトラス構造をモデル化する。ただし、格点部には破壊が生じないものと仮定し、まず、格点部をピン結合の場合を対象に検討をすすめる。

安全率を(上限値)/(解析値)で定義し、以降の解析で解析値を求め、構造の安定性を安全率により評価する。本試設計では、たわみおよび応力の安全率を定義して用いた。たわみの上限値は、43.8〔mm〕(支間中央でのたわみで、玄若橋の設計と同じ。)とした(表-2)。たわみの解析値には、支間中央部のたわみの解析結果を用いた。応力の安全率は、引張応力の安全率と圧縮応力の安全率のうち、小さい方の値で定義した。応力の上限値は、引張の場合：表-1 から引張強度 2230〔MPa〕、圧縮の場合：図-2 により与えられる圧縮強度〔MPa〕とした。応力の上限値は、圧縮の場合の方が引張の場合より常に小さい。従って、ほとんどのケースで、圧縮の場合の安全率がそのま

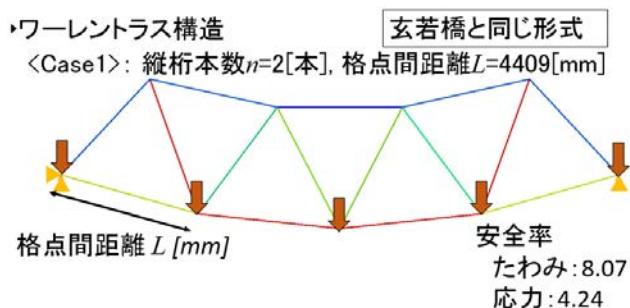


図-8 Case-1

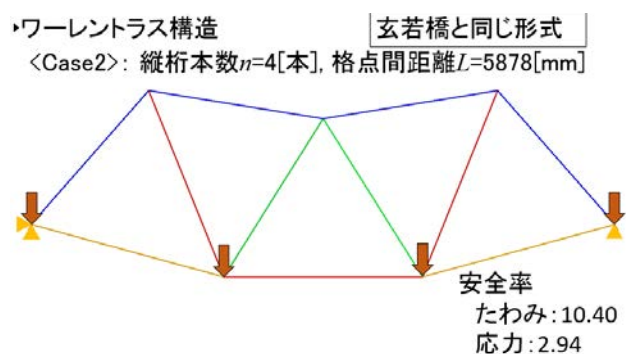


図-9 Case-2

ま応力の安全率となる。応力の解析値には、全積分点のうち応力の安全率が最小になる点の解析結果を用いた。Case1 から Case5 の解析を行ったが、全ての Case において、上弦材のうち支間中央に最も近い積分点で応力の安全率が最小となった。トラス要素を使用しているため、1 部材の中のどこでも応力(部材軸方向)の解析値は同じとなった。また、応力の上限値は 1 部材の中で一定である。全ての Case の解析結果の図において、暖色が引張応力を、寒色が圧縮応力を表している。

Case1, Case2 として、玄若橋と同じワーレントラス構造を検討した。(n[本], L[mm])の組み合わせは、Case1 : (2[本], 4409[mm]), Case2 : (4[本], 5878[mm])とした。FEM 解析の結果、たわみ・応力ともに安全率に余裕があることがわかった(図-8, 図-9)。

次に、歩道橋の高さを低くするために、プラットトラス構造を検討した。プラットトラス構造はハウトラス構

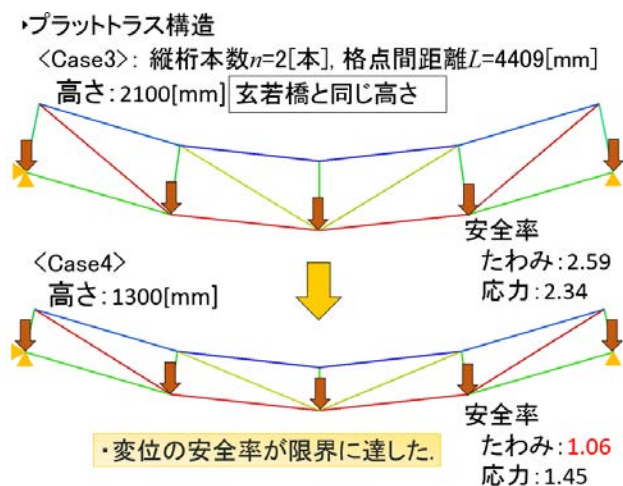


図-10 Case-3 と Case-4

造と比べ、部材長さが最も大きくなる斜材に引張応力が作用するため、応力の安全率において有利である。(n[本], L[mm])の組み合わせは、(2[本], 4409[mm])とした。Case3 で、玄若橋と同じトラス構面高さにして解析した。その結果、ワーレントラス構造より高さが小さくなり、たわみ・応力ともに安全率に余裕があった(図-10)。歩道橋の高さがさらに低い場合の解析を行ったところ、高さ 1300[mm]でたわみの安全率が応力に先行して限界に達した。

次に、プラットトラス構造で格点部の数を増やした場合の解析を行った。左右対称となるように、図-11 のような形とした。その結果、Case4 と同様に、高さ 1200[mm]でたわみの安全率が応力に先行して限界に達した。

以上Case1からCase5の比較より、重量という観点で見ると、Case4が最も軽いことがわかる(表-4)。また、いずれのCaseにおいても、縦桁と主構造の重量が玄若橋より小さく、高さも小さいことがわかる。プラットトラス構造(Case3からCase5)では、歩道橋の高さを小さくしていくと応力に先行してたわみが限界に達することから、たわみが歩道橋の高さを決定していると言える。

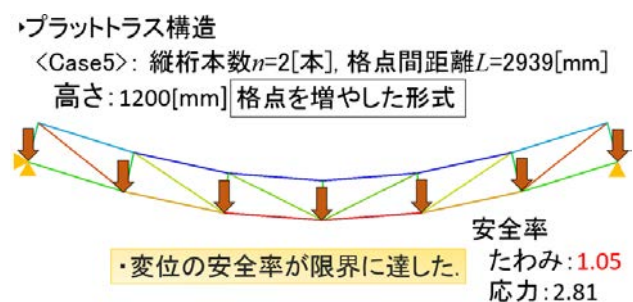


図-11 Case-5

表-4 主構造解析結果

Case	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	玄若橋
構造	台形トラス構造		並行弦トラス構造			
縦桁本数[本]	2	4	2	2	2	
格点間距離[mm]	4409	5878	4409	4409	2939	
高さ[mm]	3818	5091	2100	1300	1200	2100
①応力の上限值[MPa]	99.2	55.8	99.2	99.2	209	
②応力の解析値[MPa]	23.4	19.0	42.4	68.3	74.3	
応力の安全率(=①/②)	4.24	2.94	2.34	1.45	2.81	
③たわみの上限值[mm]	43.8	43.8	43.8	43.8	43.8	
④たわみの解析値[mm]	5.43	4.21	16.94	41.39	41.85	
たわみの安全率(=③/④)	8.07	10.40	2.59	1.06	1.05	
縦桁と主構造の総重量[kg]	478	571	474	441	459	1020.5

6. 結合の種類の検討

5章では格点部をピン結合としたが、本章で、格点部が剛結の場合も検討する。格点部がピン結合の場合、部材には軸力のみが作用するため、繊維方向に強いFRP部材にとって有利である。一方で格点部が剛結の場合、応力としては曲げが生じるため不利になるが、たわみについては剛結部が変形を抑制するため有利となる。そこで、格点部がピン結合の場合と剛結の場合で解析を行い、安全率を用いてこれらの傾向を検証した。5章の解析結果で最も軽かったCase4と同じ形式を対象とし、歩道橋の高さをパラメータとして解析した。

その結果、ピン結合・剛結の場合で、応力・たわみの安全率が歩道橋の高さに対して線形の関係となった(図-12)。ピン結合・剛結どちらの場合でも、高さを小さくしていくと、たわみの安全率が応力より先に限界に達した。応力が最小となった積分点は、全てのCase共通して、上弦材のうち支間中央に最も近い点であった。ピン結合の場合は、トラス要素を使用しているため、1部材の中のどこでも応力(軸方向)の解析値は同じとなっているが、剛結の場合は、はり要素を使用しているため、1部材の中で応力(軸方向)の解析値は異なっている。

応力については、剛結の場合、ピン結合の場合より明らかに安全率が小さくなった。格点部が剛結であると部材に曲げが生じるため、部材断面内の応力分布が不均一になって圧縮力がピン結合の場合より大きくなり、結果として応力の安全率が小さくなっていると考えられる。一方たわみについては、剛結の場合、剛結部が変形を抑

制するため、ピン結合より安全率がわずかに大きくなった。

ピン結合・剛結でたわみの安全率が同じときを比較すると、高さの差は12.5[mm]であった。即ち、ピン結合から剛結に変えることで、応力の面では不利になるが、たわみにおいては有利となり、高さを12.5[mm]小さくすることができると言える。

本解析では、部材の破壊モードとして、板の局部座屈と部材全体のオイラー座屈のみを検討した。今後、実際に格点部を剛結とする場合は、曲げにより他の破壊モードが発生しないか調査する必要がある。実際、先行研究⁴⁾では曲げにより中空角形部材の角部でせん断破壊が生じている。一方、実際に格点部をピン結合とする場合は、部材の圧縮強度曲線が図-2のとおりになるか検証する必要がある。また、ピン結合に関しては、先行研究⁵⁾としてボールジョイントを使用している例(図-13)が存在するが、コストと重量の面から、より容易に製作可能な接合部の開発が望まれる。

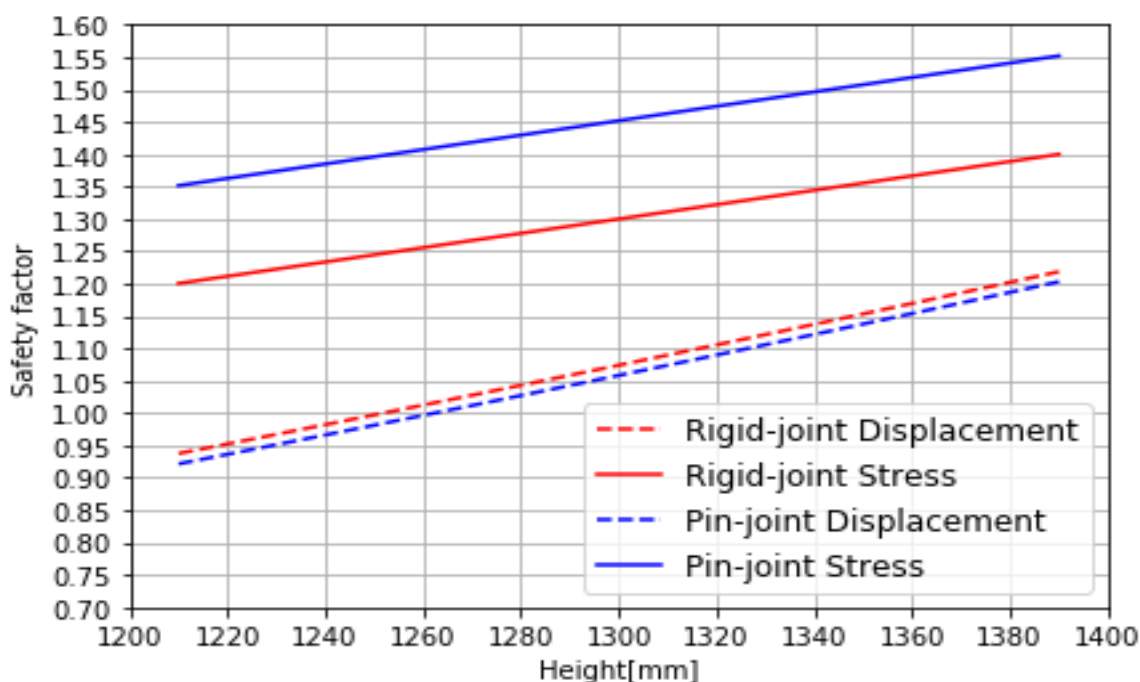
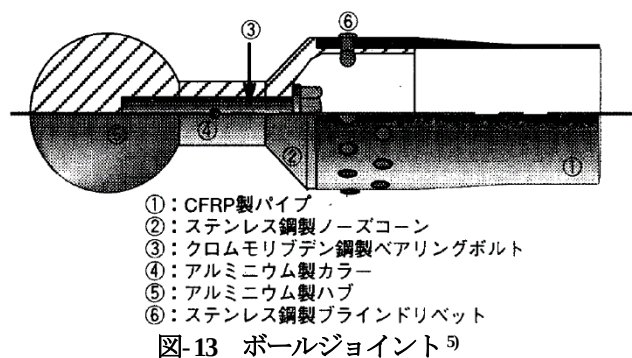


図-12 ピン結合・剛結の場合のパラメータ解析結果

7. まとめ

引抜成形された中空角形CFRP部材（100×100×t3.5 mm）を、歩道橋（橋長18.5 m、有効幅員2 m）の主部材として用いて試設計を行った。その結果、CFRP部材を用いると軽量でコンパクトな歩道橋の設計が可能であることが確認できた。また、格点部をピン結合から剛結に変えることで、応力の面では不利になるが、たわみにおいては有利となり、歩道橋の高さを小さくすることができるとわかった。今後、CFRP部材の部材性能や接合部の設計に向けた具体的な検討を進めていく必要がある。

謝辞：供試体は三菱ケミカルインフラテック株式会社 久部修弘様より提供していただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 大森政和，松村政秀，久部修弘，野阪克義：歩道橋への適用を目指した CF+GFRP 積層桁の構造特性に関する研究，第 5 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，2014.
- 2) 日比英輝，高橋秀夫，渡辺忠朋，中村一史，松本幸大，西崎到：FRP 下路トラス橋梁の設計施工，第 10 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，2013.
- 3) 土木学会：FRP 歩道橋設計・施工指針(案)，2011.
- 4) 櫻庭浩樹，松本高志，林川俊郎：積層構成が異なる箱形断面 CFRP 梁の曲げ挙動に関する研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），1 号，第 68 巻，p.73-87，2012.
- 5) 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 の力学特性)，清水建設研究報告，第 64 巻，p.41-47，1996.

A TRIAL CALCULATION ON A PEDESTRIAN TRUSS BRIDGE USING HOLLOW PULTRUSION MOLDED CFRP MEMBERS

Hiroto IKUSHIMA, Masahide MATSUMURA, Nobuhiro HISABE,
Kunitomo SUGIURA and Yasuo SUZUKI

Fiber Reinforced Polymers shows good characteristics such as high strength, lightweight and high resistance to corrosion and etc. Therefore structures made of FRP bring some advantages to construction and maintainance. However, there are few application examples of FRP structures to actual bridge structure as a main structural member. Then the authors focus on hollow pultrusion molded CFRP member (100×100×t3.5 mm) in terms of economy and reliability and in this study a trial design calculation of pedestrian truss bridge (length; 18.5 m, effective width; 2 m) using the CFRP members as truss chord members are presented. As the result, it was found that the CFRP members bring a light-weight and small-height bridge.