トラス構造物の形状最適化による F R P 部材の 適用性に関する一考察

阿部 淳一¹·渡邊 忠朋²

¹正会員 北武コンサルタント株式会社 技術部 (〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通7丁目4番7号) E-mail:j-abe@hokubu-c.co.jp

²正会員 北武コンサルタント株式会社 (〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通7丁目4番7号) E-mail: chuho@hokubu-c.co.jp

近年,複合構造物の1つとして,FRPを用いた構造物の普及が期待されている.FRPは高耐久性を有し, 近年多くの鋼やコンクリート構造物で課題となっている維持管理費用の削減が期待される.また軽量であ るため,橋梁構造物に適用した場合には、下部工への負担を軽減することが可能となる.一方,FRPを上 述のような橋梁構造物に適用した場合,他の材料に比べ変形が大きくなるなどの課題があり、比較的長い スパンの橋梁への適用が課題となっている.これらの観点のもと、橋梁に適したFRPの部材形状や断面寸 法に関する考察を行うことを将来の目的とし、本論文ではトラス橋を例にとり、形状最適化によるFRP部 材の適用性に関して検討を行ったものである.

Key Words : truss structures, pedestrian bridge, FRP members, shape optimization, genetic algoritms

1. はじめに

近年, FRPを主要な素材とた部材や部品が,航空や宇宙,自動車分野などの幅広い分野での実用化が進行している¹⁾. FRPは高耐久性を有し,近年の多くの鋼やコンクリートで建設された我が国の社会資本施設の課題である,維持管理費用の削減が期待され,土木分野への普及が期待される.近年ではFRP歩道橋指針²⁾のような指針が規定され,土木分野への汎用性が期待されているが,普及が進んでいないのが現状と考えられる.

本研究では、FRPを橋梁構造物などの土木分野におい て、有効的かつ効率的に利用するための断面や部材形状 を検討することを最終的な目的とし、そのための基礎的 な研究を試みたものである.具体的には、トラス歩道橋 の形状最適化を試み、鋼とFRPでそれぞれ算定される最 適な構造形状の比較を試みたものである.

2. 形状最適化の概要

本研究が対象としたのはトラス構造物である.形状最 適化の概念図を図-1に示す.また概念図の詳細を以下に 示す. 構造物は対象構造とし、支間長Lに対して半分をモデル化の対象とする.構造物としての最大高さをHとし、 さらに水平材の一要素の部材長をaとする.これらから 図-1の1)設計空間の設定のように、H×L2の空間をaの間 隔でメッシュ分割したとする.このメッシュ分割された 1つの空間を設計変数として形状最適化を行う.

設計変数は1~4として、以下の規則性により最適化を 試みる.図-1の2)設計変数の設定のように1は部材なし、 2はクロス、3は右上に傾く斜材、4は右下に傾く斜材と する.これらのように斜材の形状を設計変数とする.

たとえば図-1の2)設計変数の代入のように任意に数字 を与えたとする.すると、これらの数字を基に、図-1の 4)斜材の配置のように、斜材を配置する.斜材が配置さ れると、これを基に図-1の5)水平・鉛直材の配置のよう に、水平材と鉛直材を自動で配置する.なお、本計算で は部材の結合を両端ピンとして、不安定構造とならない ように配置された斜材を基に、水平材と鉛直材を自動配 置している.

水平および鉛直材を配置しトラス形状を作成すると, 左右反転し図-1の6)トラス構造物のような,トラス橋と なる.

トラス構造物が生成されると7)総体積(目的関数)の

算定を行い、8)骨組み解析を行う.なお.構造解析では 対象性を考慮して、L2の範囲でモデル化を行っている. 骨組み解析結果より制約条件の算定を行う.これらが一 連の作業となる.3)~8)を機械的に繰り返すことによ り、最適なトラス形状が算定されることになる.

3. 設計概要

(1) 設計条件

上述の手法に基づき,検討を行った設計条件を以下に 示す.なお,本検討では,比較のため材料をFRPとした 場合と鋼とした場合でそれぞれ検討を行っている.

橋梁形式:下路式トラス歩道橋

支間長: 32.0m

- 幅員:2.0m
- 材料:
 - 鋼(SM400, *f*_{5k}=240kN/mm², 単位重量77.0kN/m³, 弾性係数*E*=200kN/m²)
 - FRP (引抜成形材, *f_{ik}=f_{ik}=*400kN/mm², 単位重量19.0kN/m³,弾性係数(圧縮・引張共 に) *E*=24kN/m²)
- 活荷重:3.5kN/m²

なお,材料係数はFRPで1.3²,鋼で1.05³としている.

(2) 最適設計条件

上述の条件に基づき,最適化を行う条件を以下に示す. 最適化手法は,本研究では遺伝的アルゴリズム(GA⁴)を用いた.

a) 目的関数

目的関数は、総体積の最小化とする.以下に目的関数 式を示す.

目的関数:
$$OBJ = \sum_{i=1}^{m_{\max}} v_i \rightarrow \min$$
 (1a)

ここで, *OBJ*は目的関数, v_iは部材 *i* の体積, *m*_{max}は総 部材数である. なお,総体積は設計の対象とする鉛直, 水平, 斜材のみを対象としている.

b) 制約条件

最適化計算における制約条件は、FRP歩道橋指針より、 使用性としてたわみの照査,安全性として軸方向力に対 する照査を行う.なお、本来設計においてはこの他、復 旧性などの他の要求性能や、照査を満足する必要がある が、最適化計算で検討する制約条件は上述の2点とした. また、FRP歩道橋設計指針では性能照査型設計法を基と した記述となっているため、比較のため鋼の照査では鉄 道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造³を参考に 軸方向力に対する照査を行った.

たわみに対する制約条件を以下に示す.





図-1 トラス形状最適化のフロー

たわみに対する照査:
$$\gamma_i \cdot \gamma_a \cdot \delta_d / \delta_u$$
 (1b)

ここで、 γ_i は構造物係数(=1.0)、 γ_a は構造解析係数(=1.0)、 δ_a は支間中央の設計鉛直変位、 δ_u は鉛直変位の限界値(=L/400)、Lは支間長である.

材料をFRPとした場合の軸方向力に対する制約条件を 以下に示す.

軸引張力に対する照査:
$$\gamma_i \cdot N_d / N_{ud}$$
 (1c)

$$N_{ud} = A f_{ud} / \gamma_b \tag{1d}$$

ここで、 N_{ud} は設計引張耐力、Aは断面積、 f_{ud} は設計引張 強度、 γ_b は部材係数(=1.3)である.

軸圧縮力に対する照査:
$$\gamma_i \cdot N_d / N'_{ud}$$
 (le)

全断面の設計圧縮耐力:
$$N'_{ud} = Af'_{ud} / \gamma_b$$
 (1f)

全体座屈耐力:
$$N'_{ud} = A \pi^2 E_x / (\lambda^2 \gamma_b)$$
 (1g)

ここで、 N'_{ud} は設計圧縮耐力、 f'_{ud} は設計圧縮強度、 γ_b は 部材係数(=1.3)、 E_x は軸方向圧縮弾性率、 λ は細長比 である.

一方,材料を鋼とした場合の軸方向力に対する照査を 以下に示す.

軸方向力に対する照査:
$$\gamma_i \cdot N_d / N_{ud}$$
 (1h)

$$N_{ud} = \rho_{pg} \cdot \rho_{bl} \cdot A_n \cdot f_{svd} / \gamma_b \tag{1i}$$

ここで、 N_{ud} は設計引張耐力、 A_n は有効断面積、 f_{sd} は鋼材の設計降伏強度、 γ_b は部材係数(=1.3)である. ρ_{bg} は全体座屈を考慮した係数で、次式により算定される. なお、引張軸力の場合には ρ_{bg} =1.0とする.

$$\begin{cases} \rho_{pg} = 1.0 & (\bar{\lambda} \le 0.1) \\ \rho_{pg} = 1.00 - 0.53(\bar{\lambda} - 0.1) & (0.1 < \bar{\lambda} \le \sqrt{2}) & (1j) \\ \rho_{pg} = \frac{1.7}{2.8\bar{\lambda}^2} & (\bar{\lambda} > 0.1) \end{cases}$$

λは細長比パラメータで次式により算定される.

$$\overline{\lambda} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{syk}}{E}} \cdot \frac{l}{r}$$
(lk)

Eはヤング係数,rは断面2次半径である.ρ_bは局部 座屈の影響を考慮した低減係数で1.0とした.

なお、本検討では最終的に補剛材を配置するなどに より局部座屈を発生させないものとし、最適化における 局部座屈の照査は行っていない.



c) 設計変数

前節に示したように、本検討では斜材の配置を設計変数としている.設計空間は、支間長Lに対して、水平材1 要素の部材長aによってそれぞれ異なる.本検討では、 a=2.0mおよび4.0mに設定してそれぞれ検討を行った.それぞれ順にCASE1, CASE2とすると、設計空間は図-2のように可視される.

部材の断面積は図-3のような150×150の箱型断面とし て解析を行った.なお、断面が変われば得られる最適解 も異なってくる.そのため、断面を変更した場合の計算、 あるいは最適化に断面を変数とした解析を行うことは、 今後の課題とする.

				FRP
CASE1				
総体積	OBJ	m ³	0.427	
変形照査	σ_d	mm	78.5	
	σ _a	mm	80.0	
	σ_d / σ_a	-	0.98	
軸力照查	N _d	kN	105.8	
	N _{ud}	kN	523.8	
	N_d / N_a	-	0.20	構造図
				FRP
CASE2				
総体積	OBJ	m ³	0.381	
変形照査	σ _d	mm	53.8	
	σ _a	mm	80.0	
	σ_d / σ_a	-	0.67	
軸力照査	N _d	kN	64.8	32000
	N _{ud}	kN	65.5	
	N_d / N_a	-	0.99	構造図
				金岡
		2		CASE1
総体積 変形照査	OBJ	m	0.216	
	σ _d	mm	78.0	
	σ _a	mm	80.0	
軸力照査	σ_d / σ_a	-	0.98	
	N _d	kN	373.0	
	N _{ud}	kN	469.0	
	N_d / N_a	-	0.80	情道凶 2001
	ORI	3	0 203	CASEZ
変形照査	0	mm	0.203 AA 2	
	o d	mm	80.0	
	σ_a/σ	-	0.55	
軸力照査	N J	kN	162.0	
	N _{ud}	kN	195.8	32000
	$\frac{N_d}{N_d}$	-	0.83	構造図
	u · · · d		5.05	

図-4 材料および解析ケース別の最適解

3. 解析結果

以下にCASE1およびCASE2の解析結果を示す.図-4に は鋼とFRPの最適設計結果の総体積,照査結果の最大値 および構造図を示す.軸方向力の照査結果の最大値は, 各部材で照査を行ったものの中で,最も照査が厳しい部 材に対してのものである.

総体積を鋼とFRPで比較すると、CASE1では鋼が 0.427m³でFRPが0216m³であり、鋼に比べFRPでは2倍程度 多く必要としていることがわかる.

制約条件を確認すると、CASE1ではFRP,鋼ともに変 位が78mm程度となり、変位の限界値である支間長L/400 = 32000/400=80mmに近い値であることがわかる.一方, 軸力の照査では鋼の照査値が0.80で若干厳しいものの, 軸力で最適解が決定されるものとはなっていない.なお, 軸力はいずれも圧縮上弦材の座屈耐力で照査が厳しい結 果となっている.

鋼に比べFRPの総体積が大きくなった要因としては、 弾性係数が鋼の1/10程度で変形しやすいため、桁高をス パン全域で高くする必要があったことが要因と考えられ る.その反面、部材数が多く1部材に作用する断面力は 小さいため、軸力に対する照査には余裕があることがわ かる.特に桁高2.0~4.0mの領域では変形を抑えるため の寄与が少ない部分であるため、部材が配置されていないことが特徴と考えられる.次にCASE2でFRPと鋼を比較すると、総体積はFRPで0.381m³、鋼で0.203m³であり、CASE1と同様に鋼に比べてFRPでは1.9倍程度多く必要としていることがわかる.

制約条件を確認すると、CASE2ではCASE1とは逆に FRP,鋼とも軸力の照査が厳しいことがわかる.一方, 変位の照査には余裕がある.なお,軸力の照査はいずれ も、上弦材や圧縮斜材の座屈耐力の照査が厳しい結果と なっている.

鋼に比べFRPの総体積が大きくなった要因としては, 圧縮強度は高いものの,弾性係数が鋼の1/10程度で座屈 耐力が小さく,圧縮側の格点距離を短くして有効座屈長 を短くし,かつ圧縮側の部材を多くして断面力を低減さ せる必要があったことが要因と考えられる.図4のよう に,FRPのCASE2では下弦材が格点距離8.0mに対し,上 弦材では格点距離が4.0mとなり,支間全域的に配置さ れている.なお,変形に対する照査は厳しくないため, いずれも桁高は8.0mで同じとなっている.

図-5には総体積が小さいCASE2において,FRPの最適 解に対して,材料を鋼として解析および照査した場合, 鋼の最適解に対して,材料をFRPとして解析および照査 した結果を示す.図のようにFRPの最適解の材料を鋼と



図-5 最適解の相互照査

した場合には、いずれの照査も満足するのに対し、鋼の 最適解の材料をFRPとした場合には、変形、軸力の照査 を大幅に満足しない結果となっていることがわかる.

以上の数値計算より,FRPと鋼による構造物を比較す ると、同断面では構造的に鋼に比べ,FRPでは変形,座 屈耐力の照査がともに厳しく、多くの部材を必要とする 結果となった.これは、いずれも弾性係数が小さいこと が要因と考えられる.

これらの結果は、FRPを鋼と同条件で使用する場合に は、構造的な有効性が少ないことを示唆した結果である と考えられる.FRPを構造部材として有効的に活用する には、構造物として引張力が主となるような形式や、変 形・加工の容易性を考慮して、座屈が生じにくい断面形 状を創出することが必要と考えられる.

4. おわりに

トラス歩道橋を例に形状最適化を試み,FRPと鋼による比較を試みた.同断面による条件で計算を行うと,鋼に比べFRPではいずれも総体積が大きくなる結果となっ

た.照査においても変形,座屈耐力ともにFRPが厳しい 結果となった.これらはいずれもFRPの弾性係数が鋼よ り低く,FRPの高強度を有効に活用できていないことが 要因と考えられた.FRPを構造部材として有効に活用す るには、引張を主とするような構造形式に用いることや、 座屈が生じにくい断面形状とすることが必要と考えられ る.これらより、今後、断面積を小さくし、かつ座屈が 生じにくいような、FRP部材特有の最適な断面形状の創 出を行いたいと考えている.

参考文献

1) 社団法人 強化プラスチック協会:FRP 構造設計便覧, 1994. 2) 土木学会:FRP 歩道橋設計・施工指針(案),2011.

3) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準·同解説 鋼· 合成構造物,2009.

4) 杉本博之, 鹿美麗, 山本洋敬:離散的構造最適設計のための GAの信頼性向上に関する研究, 土木学会論文集, No.471/I-24, pp.67-76, 1993.

A STUDY ON APPLICABILITY OF FRP MEMBERS BY SHAPE OPTIMIZATION OF TRUSS STRUCTURES

Junichi ABE and Tadatomo WATANABE

In recent years, as one of the composite structures, the spread of the structures using the FRP is expected. The FRP is high durable material. Therefore, reduction of the maintenance costs of problems of many RC or steel structures are expected. However, the FRP is not disseminated as one of the civil engineering material. In this paper, we investigated the applicability of the FRP by the shape optimization of truss structures. As numerical examples, a pedestrian bridge using materials of steel or FRP of 32m span length is calculated.