

ハイブリッドFRP桁を用いたこ線人道橋の概略設計と使用性

論文

Trial Design and Serviceability of Cable-Stayed Pedestrian Bridge over Railway Using Hybrid Composite Girders

○中村 一史* 前田 研一** 渡辺 貴之*** 柳沼 謙一**** 松井 孝洋*****
Hitoshi Nakamura Ken-ichi Maeda Takayuki Watanabe Ken-ichi Yaginuma Takahiro Matsui

ABSTRACT A hybrid composite girder is being developed consisting of carbon and glass fibers. The innovative feature is the optimum use of carbon and glass fibers in the flanges to maximize structural performance while reducing the overall cost by using glass fibers in the web section. According to previous work, the longer cable-stayed bridge was trially designed using the developed hybrid composite girder. The construction site was selected the pedestrian bridge over trunk railway as a case study to utilize the lightweight of FRP. As a result, the feasibility of the proposed structures and the reduction of total cost were confirmed. Moreover, in the vibration serviceability of the proposed bridge, since it was lightweight, the acceleration increased in resonance frequency of the pedestrian and the acceleration may become uncomfortable.

Keywords: 繊維強化プラスチック, ハイブリッドFRP桁, こ線人道橋, 斜張橋
Fiber Reinforced Plastic, Hybrid Composite Girder, Pedestrian Bridge over Railway, Cable-Stayed Bridge

1. はじめに

繊維強化プラスチック (FRP) は、軽量であり、耐食性に優れることから、架設作業に制約がある現場や、沿岸部など、環境条件の厳しい地域における社会基盤施設への普及が進んでおり、近年、研究開発も活発に行われている^{1)~3)}。しかしながら、FRP構造物の設計⁴⁾では、たわみ制限が断面設計の上で支配的になることが課題とされ、経済性を確保しつつ、高い曲げ剛性を効率的に得られるFRP部材が必要とされている。

このような要求に対して、ハイブリッドFRP桁⁵⁾は、外縁のフランジ部に重点的に高弾性率の炭素繊維 (CF) を配置し、それ以外については比較的安価なガラス繊維 (GF) を適用したものであり、経済性にも優れている。著者らは、これまでに、引き抜き成形も可能なハイブリッドFRP桁を開発し、その力学特性を明らかにしてきた^{6), 7)}。

一方、FRPの材料費は、鋼、コンクリートなど、従来の材料に比べて割高となるため、FRPの効果的な活用も検討する必要がある。著者らは、作業時間

の制約が極めて大きく、急速施工が求められる、鉄道施設内のペDESTリアンデッキ⁸⁾や、線路上空自由通路⁹⁾を対象に、FRPと鋼を組み合わせた複合構造を採用し、その試設計を行って、適用性を検討した。その結果、材料費の増加が全体工事費のコストアップに及ぼす影響は大きくなく、軽量化により大幅な工期短縮が期待でき、全体としてコストダウンできる可能性が確かめられた。

そこで、本論文では、これまでの試設計例⁹⁾を踏まえ、架設の制約条件が厳しい建設現場の一例として、幹線鉄道の複数路線に架かるこ線人道橋を選定し、さらなる長支間化を図るために斜張橋形式を採用して、ハイブリッドFRP桁を用いた歩道橋の試設計を行った。さらに、使用性、安全性の照査を実施して、その実現可能性を検討した。

2. 斜張橋形式への適用条件と試設計

2.1 比較検討案の設定

検討対象とした都市部の幹線鉄道におけるこ線人道橋の一般図を図-1に示す。図-1(a)は、参考とした

* 博(工) 首都大学東京 大学院 都市環境科学研究科 助教 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1) 第2種正会員
** 工博 首都大学東京 大学院 都市環境科学研究科 教授 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1) 第2種正会員
*** 修(工) 大成建設株式会社 椿坂トンネル工事作業所 (〒529-0536 滋賀県長浜市伊香郡余呉町新堂 200-1)
**** 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター (〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町 2-479)
***** 東レ株式会社 コンポジット技術部 (〒455-8502 愛知県名古屋市港区大江町 9-1)

本論文の一部は、土木学会第65回年次学術講演会、および、土木学会橋梁振動コロキウム2011にて発表。

既設鋼橋の一例である。この上部構造は、主に、鋼 I 形断面の 3 主桁、PC 床版、壁および屋根（スレート材）で構成されている。この既設工事例では、4 つの橋脚があるが、上部構造の長支間化によって下部構造を減らすこと、および、クレーンによる上部構造の一括架設を容易に実施するために、主桁にハイブリッド FRP 桁を適用して、上部構造の軽量化を図ることを試みた。これにより、大幅な工期の短縮が期待でき、材料費がかなり増加しても全体工事費のコストダウンが予測される。

また、長支間化にともなう鉛直たわみの増大に対処するために、斜張橋形式を採用することとした。ケーブルの定着間隔、段数を事前に検討した結果、図-1(b), (c)に示すように、主径間長を 30m, 側径間長を 20m とした 2 径間連続斜張橋形式で試設計を行った。

2.2 ハイブリッド FRP 桁の断面諸元

ハイブリッド FRP 桁は、比較的安価な引き抜き成形による製作を前提とし、図-2 (a)に断面形状を示すように、曲げ剛性を効率的に付与するために、上下フランジ部に CF と GF を、ウェブにはせん断剛性を付与するために $\pm 45^\circ$ 方向を多く含む GF を配置している。表-1 に、ハイブリッド FRP 桁の積層構成を示す。ハイブリッド FRP 桁の積層構成は、これまでの検討結果⁹⁾を踏まえ、最も高い弾性率が得られる組み合わせとした。また、桁の断面寸法は、国内最大の引き抜き成形材である $H600 \times B300\text{mm}$ ($t_f: 18\text{mm}$, $t_w: 12\text{mm}$) の I 形断面部材とし、図-2 (b)に示すように、2 主桁で検討を行った。なお、フランジ、ウェブの各部位の等価剛性は、積層理論¹⁰⁾に基づく算定値である。

2.3 構成部材と設計条件

既設工事例では、鋼、コンクリート、スレート材など、一般的な建設材料が用いられており、大きな死荷重が作用するため、振動使用性を確保できるように、主構造の断面が決定されている。

そこで、上部構造の軽量化として、鋼主桁からハイブリッド FRP 桁への変更以外にも、上部構造で大きな重量を占める部材の軽量化を試みた。すなわち、屋根材をスレートから鋼製の折板へ、また、床版を PC 版から GFRP 床版（パネル材）へ、コンクリート地覆から GFRP 地覆（箱断面）へ変更するとともに、外壁を省略して GFRP 高欄のみとした。さらに、橋面工（地幅、舗装）のうち、舗装の材料（タイル、敷きモルタル）についても、軽量化を図れる余地が

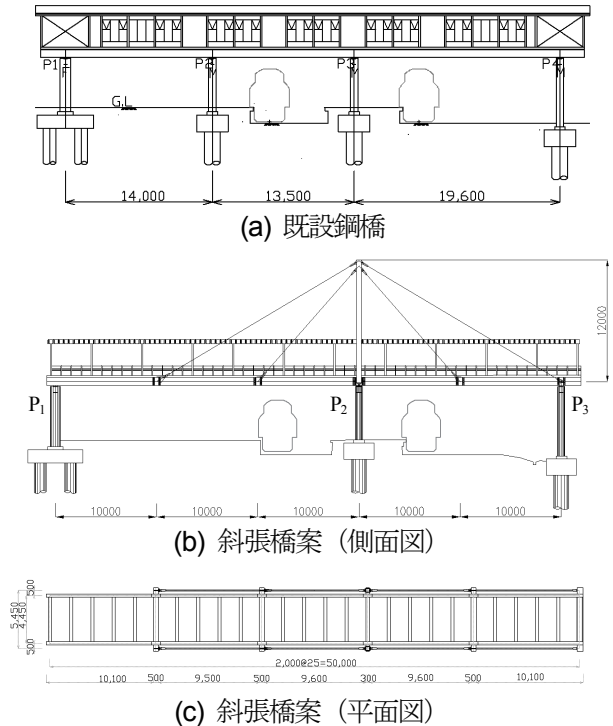


図-1 こ線人道橋の一般図

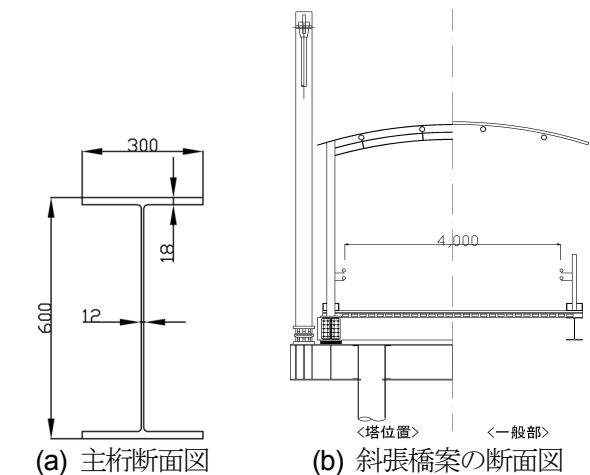


図-2 ハイブリッド FRP 桁と斜張橋案の断面図

表-1 ハイブリッド FRP 桁の積層構成

部位	繊維の種類・方向別の体積比率				軸方向弾性率 E (GPa)	せん断弾性率 G (GPa)
	CF 0°	GF $0/90^\circ$	GF $\pm 45^\circ$	GF Mat		
フランジ	52	10	13	25	65.7	6.7
ウェブ	—	32	42	25	15.7	6.7

表-2 主要部材の断面諸元

部材	断面積 A (m ²)	断面2次モーメント I_m (m ⁴)	軸方向弾性率 E (GPa)	せん断弾性率 G (GPa)	
主桁	ハイブリッド FRP 桁	1.76×10^2	1.09×10^3	57.5	6.7
横桁	一般部 (GFRP)	1.76×10^2	1.09×10^3	25	4.5
	定着部 (鋼)	3.11×10^2	1.45×10^3	200	77
塔 (鋼)	1.19×10^2	4.82×10^4	200	77	
ケーブル (鋼)	1.68×10^3	—	200	—	

あるため、その重量をパラメトリックに検討した。ここでは、既設鋼橋と同じ仕様の舗装（橋面積あたり 1.23kN/m^2 ）としたケースを Case A、既設鋼橋の舗装厚を半分（橋面積あたり 0.62kN/m^2 ）としたケースを Case B、および、既設 FRP 歩道橋⁴⁾を参考に、ゴム舗装（橋面積あたり 0.10kN/m^2 ）としたケースを Case C とした。そのほか、塔、ケーブルおよびケーブル定着部のブラケットを含む横桁構造については鋼製とした。ただし、ケーブル定着部以外の一般部の横桁については、主桁と同断面の GFRP 製とした。

表-2 に、主要部材の断面諸元を示す。ハイブリッド FRP 桁の弾性係数は、表-1 に示した各部位の弾性係数を用いて、合成断面として算出したものである。

床版は、GFRP 製のパネル材（幅 500mm）とし、引き抜き方向を橋軸方向に配置した。また、床版の鉛直たわみが、支持間隔に対して 1/600 のたわみ制限¹¹⁾を満足するように、横桁間隔を 2m とした。

ケーブルプレストレスを含むケーブルの設計張力の算定は、一般的な斜張橋と同様な計算手法¹²⁾によった。すなわち、斜張橋の骨組構造モデルに死荷重を作用させた時のケーブル張力 T_D と、ケーブルを除去したプレストレス算定モデルから得られるケーブルプレストレス T_{PS} の和で与えられる。通常、ケーブルプレストレスは、完成時において、主桁の曲げモーメントのバランスに配慮して決定される。しかしながら、FRP を主桁に適用する場合、引き抜き成形時に所定の製作そりを導入することが困難であることから、ケーブル定着点における死荷重時の鉛直たわみをゼロとすることを目的として、ケーブルプレストレスを決定した。

モデル化については、主桁、横桁および塔ははり要素で、また、ケーブルは軸力要素でモデル化し、立体骨組構造モデルを作成した。本検討は、ハイブリッド FRP 桁の実構造への適用性を把握するための概略的な試設計であることから、微小変位変位理論に基づいた骨組構造解析法によるものとした。また、FRP 歩道橋の設計では、せん断変形にともなう付加たわみの影響⁴⁾にも留意する必要があることから、それらの影響についても検討することとした。ここでは、それを無視した Bernoulli-Euler はり理論に基づく骨組構造解析（以下、B-E. Th. とよぶ）、および、それを考慮した Timoshenko はり理論に基づく骨組構造解析（以下、Timo. Th. とよぶ）を実施した¹³⁾。

試設計では、まず、ケーブル以外について、表-2 の断面諸元を有する構造解析モデルを作成して、活荷重に対する主桁の鉛直たわみが支間長の 1/500 以下¹⁴⁾を満足するように、繰返し計算によって、必要

なケーブル断面積を決定した。ケーブル断面積の決定、および、主桁の鉛直たわみの照査にあたっては、活荷重 L (3.5kN/m^2) を主径間全域 (P_1 - P_2 間) に載荷した。なお、ケーブル断面積は、表-2 に併記されているように、 $1,675\text{mm}^2$ /本となり、作用荷重による応力度照査ではなく、たわみ制限で決定された。

次章以降では、ハイブリッド FRP 桁斜張橋の試設計結果の一部として、固定荷重解析による主桁のたわみ照査、作用応力度の算定、安全性の照査、および、振動使用性の照査について述べる。

3. 試設計結果と照査結果

3.1 上部構造の重量比較

図-3 に、上部構造における部位ごとに重量を比較したものを示す。まず、鋼橋の既設工事例に対して、FRP と鋼の複合構造形式の斜張橋とすることで、塔およびケーブルの重量がわずかに増加するものの、各部位の重量は、主桁の変更（鋼桁からハイブリッド FRP 桁への変更）で約 92%、床版の変更（PC 床版から GFRP 床版へ変更）で約 95%、上屋の見直し（外壁の省略とスレート材から鋼製折板への変更）で約 75%、それぞれ大幅に削減されることが解る。したがって、橋面工を除いた、ハイブリッド FRP 桁斜張橋の重量は、既設鋼橋に対して約 81% となった。なお、ハイブリッド FRP 桁の比重は 1.8 として算出した。

さらに、舗装重量をパラメトリックに検討した結果、既設鋼橋に対する全体重量は、既設鋼橋と同一の舗装とした Case A で約 71%、舗装厚を半分にした Case B で約 76%、ゴム舗装とした Case C で約 81% となった。このような上部構造の軽量化は、下部構造のスリム化やクレーンを用いた一括架設による工期短縮だけでなく、後述するように、設計照査時における振動使用性の確保にも効果的であった。

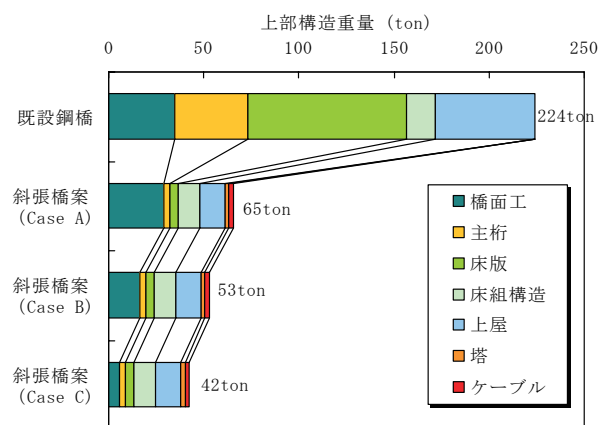


図-3 上部構造重量の比較

また、死荷重 D に対する活荷重 L の比率 L/D は、既設工事例で 0.32 となるのに対して、ハイブリッド FRP 桁斜張橋の Case A で 1.09, Case B で 1.35, Case C で 1.69 であり、作用荷重の比較から活荷重による影響が大きくなることが予測される。

3.2 主桁のたわみ特性と活荷重たわみの照査結果

図-4 に、死荷重 ($D+PS$) 時および活荷重 (L) 時における主桁の鉛直変位を示す。この図は、死荷重時のたわみが、最も大きくなった Case A について示したものである。図より、死荷重時にケーブル定着点における鉛直変位がゼロとなるようにケーブルプレストレスを決定したことから、死荷重 ($D+PS$) 時における定着点での鉛直変位はほとんど生じていないことが解る。しかしながら、支点やケーブル定着点以外では、主桁の鉛直変位がわずかに生じ、最大で 6.6mm であった。この程度の変位であれば、橋面工の舗装等で十分に対応できるものと考えられる。

一方、図-4 に併記した活荷重時の主桁の鉛直変位は、主径間において鉛直変位が最大となるように、主径間に活荷重を全載して算定されたものである。図より、所要の断面積を有するケーブルを適用したことで、たわみ制限 (1/500) を満足していることが解る。

さらに、図中には、せん断変形の影響を比較するために、それを考慮しなかった場合 (B.-E. Th.)、考慮した場合 (Timo. Th.) を併記している。図より、死荷重時、活荷重時ともに、両者の差異は小さく、せん断変形による鉛直変位の増加はわずかであるといえた。これは、桁高 600mm に対して支間長が十分に大きいことによるものと考えられる。

3.3 主桁の断面力と作用応力度の検討

図-5 に、Case A について、死荷重 ($D+PS$) 時および死活荷重 ($D+PS+L$) 時の主桁の軸力および曲げモーメントをそれぞれ示す。ここでは、死荷重 ($D+PS$) 時に加え、主桁の断面力が最大となる主径間全載 ($D+PS+L$) 時について比較した。図より、死荷重時には、ケーブルプレストレスの調整により、曲げモーメントはほぼ均等になっていること、また、軸力は、両径間ともに最上段ケーブルからの導入される軸力が大きいことが解る。さらに、両図からは、活荷重載荷に伴う断面力の増分が大きいことも解る。

図-6 に、Case A について、死荷重 ($D+PS$) 時および死活荷重 ($D+PS+L$) 時の主桁の作用応力度を算定した結果を示す。ハイブリッド FRP 桁は、フランジとウェブで弾性係数が異なるため、合成断面として

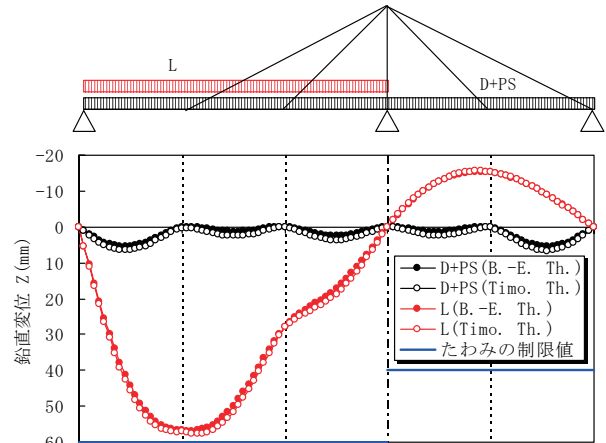
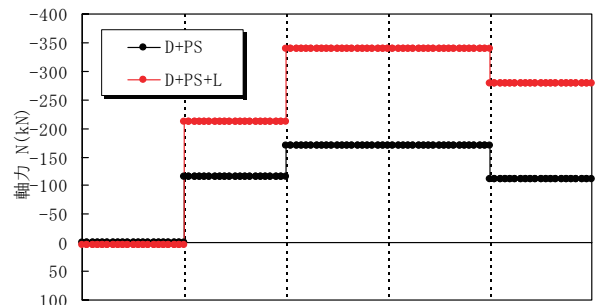
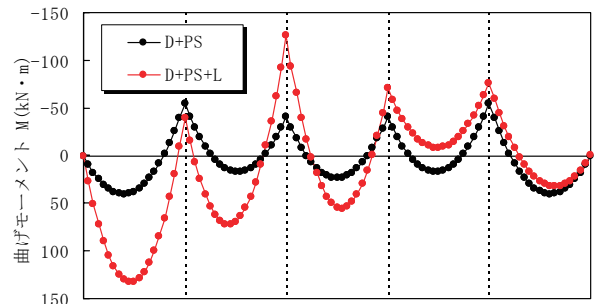


図-4 主桁の鉛直変位図 (Case A)



(a) 軸力図



(b) 曲げモーメント図

図-5 主桁の断面力図 (Case A)

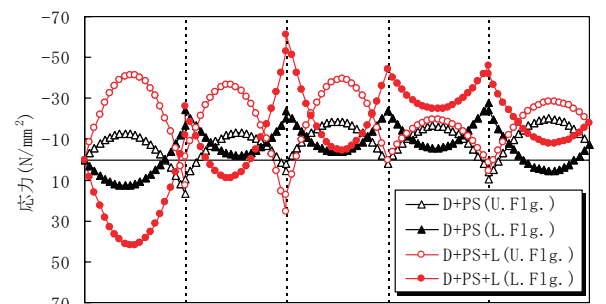


図-6 主桁上下フランジの作用応力度 (Case A)

応力度を算出した。図より、死荷重 ($D+PS$) 時の応力は十分に小さく、死活荷重載荷 ($D+PS+L$) 時に応力の絶対値が最大となり、その位置は、主径間側の下段ケーブル定着点であった。また、最大、最小応

力は、それぞれ、41.8, -61.4(N/mm²)であり、活荷重載荷に伴う断面力が増加しても、主桁の作用応力は比較的小さいことが確かめられた。

3.4 主桁の安全性に対する照査

(1) 算定条件と設計断面耐力

本検討では、文献4)を参考に、性能照査型設計に基づいて、主桁の安全性(断面破壊)に対する照査を試みた。まず、ハイブリッドFRP桁の各部位の材料強度は、実験などにより求める必要があるが、類似の積層構成に基づく実験結果¹⁵⁾を参照して、表-3に示すように仮定した。また、材料係数 γ_m 、部材係数 γ_b 、構造解析係数 γ_a および構造物係数 γ_i は、それぞれ、1.30, 1.30, 1.0 および 1.0 と設定した。さらに、作用係数 γ_f は、固定死荷重(主桁, 床版等) D_1 に対して 1.00, 付加死荷重(高欄, 舗装等) D_2 , 活荷重(群集荷重) L に対して 1.20 とし、作用係数と設計作用の組み合わせは、 $1.00D_1+1.20D_2+1.20L$ とした。なお、作用修正係数 ρ_f は 1.65 とした。

設計断面耐力は、表-3 に併記した設計強度(材料強度を材料係数 γ_m で除した値)を用いて、ハイブリッドFRP桁の設計曲げ耐力 M_{ud} 、および、設計圧縮耐力 N_{ud} を算定した。その結果、 $M_{ud}=565 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $N_{ud}=3,536 \text{ kN}$ となった。ここでは、概略的な検討として、設計断面耐力の算定には、局部座屈等は考慮していない。設計断面耐力は、ハイブリッドFRP桁のフランジ部が設計圧縮強度に達するときの断面力を部材係数で除して求めた。

(2) 照査結果と考察

上述の算定条件の下で、断面破壊に対する主桁の安全性を次式により照査した。

$$\gamma_i \left\{ \left(\frac{N_d}{N_{ud}} \right) + \left(\frac{M_d}{M_{ud}} \right) \right\} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに、 N_d および M_d は、それぞれ、設計軸力、設計曲げモーメントであり、前節で述べた、死活荷重載荷 ($D+PS+L$) 時における主桁の軸力、曲げモーメントの値を用いた。

図-7 に、照査結果を示す。図より、死荷重時の断面力が大きくなる検討ケースほど、照査値が大きくなるものの、その差異はわずかであった。照査値は、最大で 0.68 (Case A) であり、式(1)を満足することから、主桁の安全性が確かめられた。本検討では、局部座屈等による断面耐力の低下を考慮しなかったが、設計断面力が小さいため、ほとんど問題にはならないと考えられる。

表-3 ハイブリッドFRP桁の各部位における仮定した部材軸方向の材料強度と設計強度

部位	材料強度 (N/mm ²)		設計強度 (N/mm ²)	
	引張	圧縮	引張	圧縮
フランジ	800	300	615	230
ウェブ	170	170	130	130

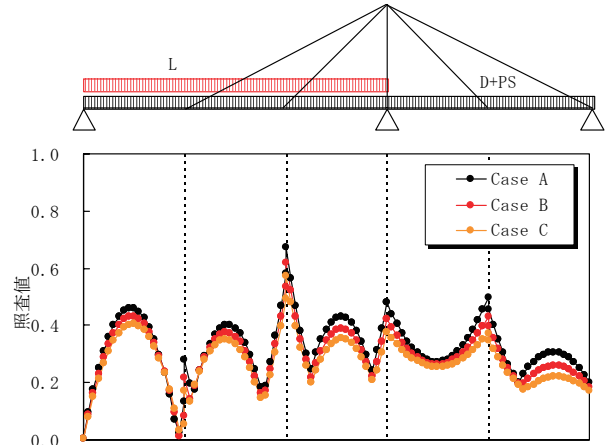


図-7 主桁の安全性に対する照査結果

4. 振動使用性の照査

4.1 固有振動特性の検討

(1) 解析モデルと算定方法

立体横断施設技術基準・同解説¹¹⁾では、人の歩調と共振し不快感を与えないようにするために、主構造系のたわみ振動の固有振動数が、2Hz 前後 (1.5~2.3Hz) にならないようにすることを規定している。本検討では、対象とするハイブリッドFRP桁斜張橋を忠実に再現した3次元骨組構造解析モデルを作成し、固有振動解析を実施した。また、せん断変形の影響を考慮した解析法(Timo. Th.)を適用した場合、および、その影響を考慮しない場合(B-E. Th.)について比較を行った。解析モデルは、舗装の軽量化が固有振動特性に及ぼす影響を把握するために、Case A~Case Cの3ケースについて作成した。なお、本検討では、歩行者荷重は考慮せず、上部構造の死荷重のみの状態で固有振動数を算定した。

(2) 固有振動モードと固有振動数

各固有振動モードの固有振動数の比較を表-4に、上部構造重量と固有振動数の関係を図-8に、また、固有振動モードを図-8にそれぞれ示す。これらの図表より、回避すべき固有振動数の範囲(1.5~2.3Hz)に対して、せん断変形を考慮した場合においても、全てのケースで2.4Hz以上となり、通常歩行時における振動使用性を満足すること、また、せん断変形に伴う固有振動数の低下は、低次モードではほとんどなく、高次モードになると僅かに生じる程度であ

表-4 各固有振動モードの固有振動数の比較

固有振動モード	検討ケース	固有振動数 f (Hz)	
		B.-E. Th.	Timo. Th.
たわみ1次モード	Case A	2.42	2.40
	Case B	2.70	2.68
	Case C	3.04	3.01
ねじりモード	Case A	2.90	2.87
	Case B	3.23	3.20
	Case C	3.62	3.58
たわみ2次モード	Case A	4.88	4.71
	Case B	5.50	5.33
	Case C	6.25	6.08
たわみ3次モード	Case A	5.42	5.16
	Case B	6.21	5.91
	Case C	7.20	6.88

$$F(t) = \alpha \cdot W \cdot \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

ここに、 α は、衝撃力比、 W は歩行者荷重、 f は歩行者により加振される振動数である。ここでは、衝撃力比 α を0.4とし、歩行者荷重 W を1人(700N)および5人(3,500N)と設定して検討を行った。また、減衰定数 ξ については、既設のGFRP歩道橋の測定例¹⁷⁾を参考に $\xi=0.015$ (対数減衰率 $\delta=2\pi\xi$)と設定し、比較のために、その値の0.5倍および2倍とした0.0075, 0.03を仮定した。歩行者により加振される振動数 f を1.0~3.5Hzの範囲で変化させて、モード法に基づく時刻歴応答解析¹³⁾を実施した。なお、応答加速度のじょ限度は0.1G(0.98m/sec²)¹¹⁾とし、振動使用性の照査を行った。

(2) 照査結果と考察

定点加振応答解析による共振曲線を、ケースごとに図-10に示す。まず、回避すべき固有振動数の範囲(1.5~2.3Hz)の通常の歩行時では、全てのケースおよび減衰定数において、応答加速度は十分小さいことが確かめられた。一方、各ケースで共振状態にある時、応答値が最大となり、減衰定数が小さいほど応答が大きくなった。橋面工の死荷重の低減により、固有振動数は大きくなるものの、共振時には最大応答加速度も増加することから、軽量化によって振動しやすくなる傾向にあることが解る。

図-11に、上部構造重量と最大応答加速度の関係を示す。最大応答加速度は、図-10における共振時の最大値である。図より、共振時には、全てのケースで、加振力が1人の場合かつ、 $\xi=0.03, 0.015$ の時に、振動使用性のじょ限度を満足する結果となった。

5. まとめ

本論文では、既往の検討結果を踏まえ、架設の制約条件が厳しい建設現場の一例として、幹線鉄道の複数路線に架かるこ線人道橋を選定し、さらなる長支間化を図るために斜張橋形式を採用して、ハイブリッドFRP桁を用いた歩道橋の試設計を行った。

まず、試設計結果からは、活荷重に対する主桁の鉛直変位を抑制するために、鋼製ケーブルの断面積が決定された。また、死活荷重時における主桁の作用応力度は十分に小さく、性能照査に基づいた安全性(断面破壊)についても全く問題はなかった。したがって、一般のFRP構造物と同様に、たわみ制限が設計上、支配的であったが、概略的な試設計結果からは、大きな問題はみられず、実現可能性は高いといえた。

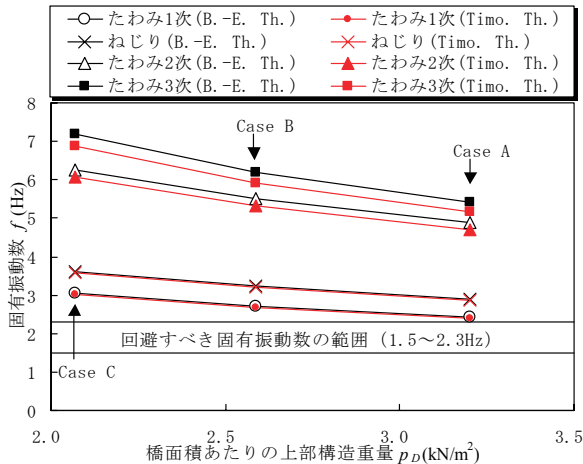


図-8 上部構造重量と固有振動数の関係

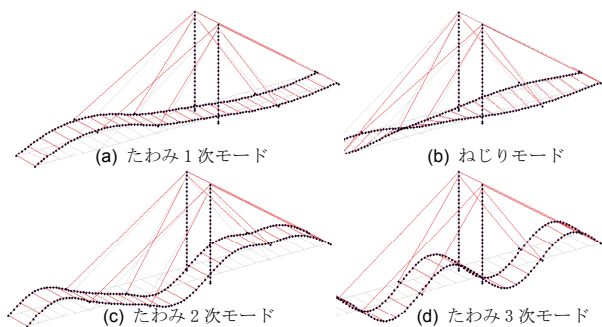


図-9 固有振動モード

ることが解った。なお、ねじりモードの固有振動数の範囲は2.9~3.6Hzであり、比較的低いことから、歩道橋のねじり振動についても留意する必要があるといえた。

4.2 定点加振応答解析による振動使用性の照査

(1) 解析モデルと算定方法

動的解析を実施するにあたっては、モデルを簡略化するために、2次元骨組構造解析モデルを作成した。定点加振を行う位置は、たわみ1次モードで振幅が最大となる個所とし、それは、主径間側の最上段ケーブルの定着点付近であった。加振力 $F(t)$ は、次式で与えられる¹⁶⁾。

一方、上部構造の軽量化は、固有振動数の上昇につながり、歩行者の歩調との共振の可能性を回避するためには効果的であるといえた。しかしながら、通常歩行での共振の可能性は小さいものの、回避すべき固有振動数の範囲外での共振を想定した場合、軽量なほど、応答加速度が大きくなり、減衰性能によっては、じよ限度を超え、歩行者に不快感を与える可能性があることも確かめられた。このような場合には、ダンパーの設置等による適切な制振対策が必要であるといえた。

なお、文献 18) では、近年、欧州で提案されている性能照査型の設計体系^{19), 20)}に基づいた照査法を適用して、振動使用性をより詳細に検討しているのを参照されたい。

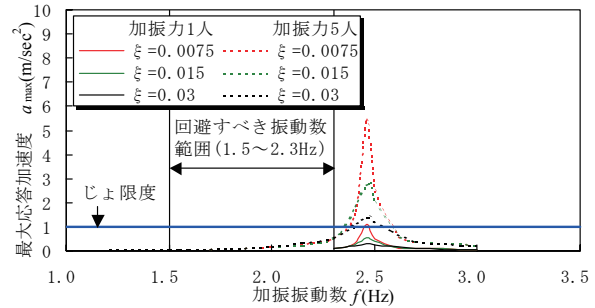
今後は、実用化へ向けて、FRP 構造に適した接合方法の開発のほか、合理的な架設方法の検討を実施する予定である。

謝辞

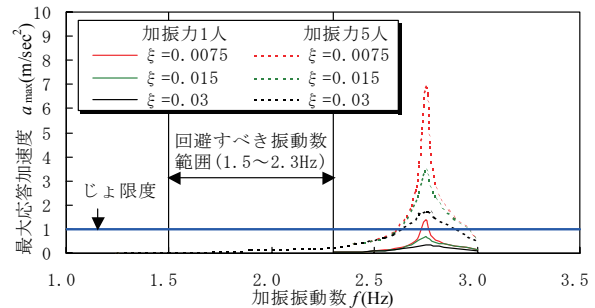
本研究の一部は、国土交通省建設技術研究開発助成制度（研究課題名：革新的材料を用いた社会基盤施設の再構築）の一環として行われた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

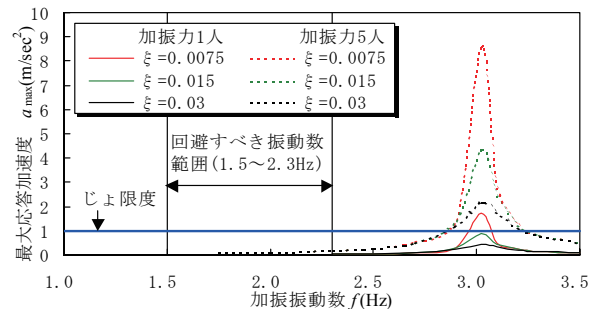
- 1) J. L., Clarke: Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP Design Code and Handbook, European Structural Polymer Composite Group, E & SPON, 1996.
- 2) T. Keller: Use of Fiber Reinforced Polymers in Bridge Construction, Structural Engineering Documents 7, IABSE 2003.
- 3) 土木学会：FRP 橋梁—技術とその展望—，構造工学シリーズ 14，丸善，2004.
- 4) 土木学会複合構造委員会編：FRP 歩道橋設計・施工指針(案)，複合構造シリーズ 04，丸善，2011.
- 5) 土木学会：先進複合材料の社会基盤施設への適用，複合構造レポート 01，pp.121-136，2007.
- 6) 中村一史，前田研一，睦好宏史，鈴川研二：ハイブリッド FRP 桁のせん断変形特性とウェブ・クリッピングに関する実験的検討，第 7 回複合構造の活用に関するシンポジウム，土木学会，CD-ROM，6pages，2007.
- 7) Nguyen Duc Hai, Hiroshi Mutsuyoshi, Shingo Asamoto and Takahiro Matsui: Structural behavior of hybrid FRP composite I-beam, Construction and Building Materials, Volume 24, Issue 6, pp.956-969, 2010.
- 8) 前田研一，睦好宏史，津吉毅，鈴川研二，松井



(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C

図-10 定点加振応答解析による共振曲線

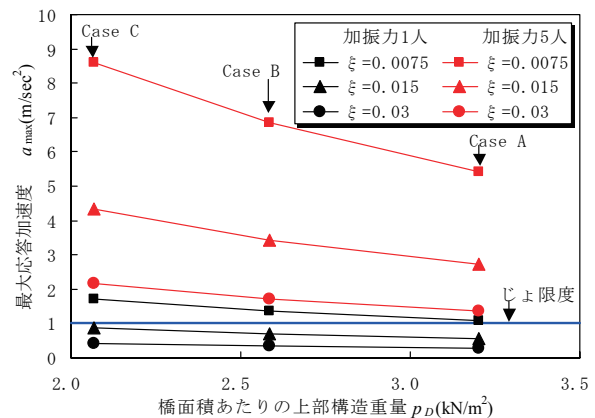


図-11 上部構造重量と最大応答加速度の関係

孝洋：ハイブリッド FRP 桁のペDESTリアンデッキへの適用検討，鋼構造年次論文報告集，日本鋼構造協会，Vol.15，pp.211-218，2007.

- 9) 中村一史，前田研一，睦好宏史，吉田 一，松井孝洋：ハイブリッド FRP 桁斜張橋の試設計と

- 線路上空自由通路への適用可能性, 鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, Vol.16, pp.167-174, 2008.
- 10) 座古 勝, 松本金矢: 複合材料の挙動解析, 応用数値計算ライブラリ, 朝倉書店, 1998.
 - 11) 日本道路協会: 立体横断施設技術基準・同解説, pp.35-37, 1979.
 - 12) 尾下里治, 大森邦雄: 斜張橋のケーブルプレストレスの実用計算法の提案, 橋梁と基礎, 建設図書, Vol.25, No.11, pp.31-35, 1991.
 - 13) マイダスイティジャパン: midas Civil 2009 理論マニュアル, 2009.
 - 14) 東日本旅客鉄道株式会社: 乗換こ線橋設計の手引, 1992.
 - 15) 白木健亮, 睦好宏史, 浅本晋吾, 松井孝洋: ハイブリッド FRP 材料の力学的特性に関する研究, 土木学会, 第 63 回年次学術講演会講演概要集, CS02-53, pp.153-154, 2008.
 - 16) 山田均, 米田昌弘: 応用振動学, コロナ社, pp.73-79, 2003.
 - 17) 張惟敦, 鎌田敬治, 佐伯彰一, 山城和男: FRP 製歩道橋の主桁剛性および固有振動数に関する実験的評価, 石川島播磨技報, Vol.41, No.3, pp.77-81, 2001.
 - 18) 中村一史, 前田研一, 渡辺貴之, 柳沼謙一, 松井孝洋: ハイブリッド FRP 桁を用いた斜張橋形式こ線人道橋の振動使用性, 土木学会, 橋梁振動コロキウム 2011, 2011. (投稿中)
 - 19) Setra: Technical guide Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading, 2006.
 - 20) 土木学会構造工学委員会編: 歩道橋の設計ガイドライン, 構造工学シリーズ 21, 丸善, pp.51-104, 2011.