

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

Applicability of Cable-Stayed Bridges Using Hybrid Composite Girder to Free Passage over Railway

○中村 一史* 前田 研一** 睦好 宏史*** 吉田 一**** 松井 孝洋*****
Hitoshi Nakamura Ken-ichi Maeda Hiroshi Mutsuyoshi Hajime Yoshida Takahiro Matsui

ABSTRACT A hybrid composite girder is being developed consisting of carbon and glass fibers. The innovative feature is the optimum use of CFRP and GFRP in the flanges to maximize structural performance while reducing the overall cost by using glass fibers in the web section. In this study, cable-stayed bridges were trially designed using the developed hybrid composite girder. In order to utilize the lightweight of FRP, the construction site was selected the free passage over the busy railway as a case study. As a result, the feasibility of the proposed structures and the reduction of total cost were confirmed.

Keywords: 繊維強化プラスチック, ハイブリッドFRP桁, 線路上空自由通路, 斜張橋
Fiber Reinforced Plastic, Hybrid Composite Girder, Free Passage over Railway, Cable-Stayed Bridge

1. はじめに

近年、建設コストの縮減が指摘される中で、繊維強化プラスチック (FRP) は、軽量性、耐食性に優れた材料特性から、工期の短縮や架設費の削減だけでなく、維持管理費の低減にも効果的であると考えられている。最近では、FRP 構造部材の社会基盤施設への適用を目的とした研究開発が活発になっている^{1)~3)}。しかしながら、FRP 構造物の設計では、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、高い曲げ剛性が得られるFRP部材の開発が望まれている。

このような観点から、著者らは、曲げ剛性を効率的に付与するために、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) を適用して、経済性にも優れたハイブリッドFRP桁を開発し⁴⁾、その力学特性を明らかにしてきた⁵⁾⁶⁾。

一般に、鋼、コンクリートなどの従来の材料に比べて、FRPの材料費は割高となるため、FRPの効果的な活用を検討する必要がある。例えば、都市部幹線鉄道の線路上空自由通路の建設では、線路内の架設作業が夜間に限定されるため、工期が長くなり、

全体工事費に占める材料費の割合が小さくなることなく、そこで、著者らは、作業可能時間の制約が極めて大きい鉄道施設内のペDESTリアンデッキを対象に、ハイブリッドFRP桁の適用性について検討を行った⁷⁾。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を確かめている。

本論文は、開発したハイブリッドFRP桁の橋梁構造への適用可能性を明らかにすることを目的としたものである。事前検討と同様に、架設の制約条件が厳しい建設現場の一例として、都市部幹線鉄道の複数路線を跨ぐ線路上空自由通路を選定した。長支間化と軽量化により大幅な工期短縮を図ることを目的として、ハイブリッドFRP桁を用いた斜張橋形式を提案し、支間長の異なる2タイプについて試設計を行い、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線路上空自由通路の一般図を図-1に示す。図-1(a)は、参考

* 修(工) 首都大学東京 大学院 都市環境科学研究科 助教
** 工博 首都大学東京 大学院 都市環境科学研究科 教授
*** 工博 埼玉大学 大学院 理工学研究科 教授
**** 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所
***** 東レ株式会社 コンポジット開発センター
本論文の一部は土木学会第63回年次学術講演会にて発表。

(〒192-0397 八王子市南大沢1-1) 第2種正会員
(〒192-0397 八王子市南大沢1-1) 第2種正会員
(〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)
(〒151-8512 東京都渋谷区代々木2-2-6)
(〒103-8666 東京都中央区日本橋室町2-1-1)

とした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、P3、P4 橋脚の施工は線路内作業となるため、都市部の幹線鉄道では、作業が夜間に限定されるなど、工期が著しく長期化し、それに伴う工費もかなり増加することが、事例調査から明らかとなった。

したがって、線路内作業をできるだけ減らすことで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たことから、下部構造を減らして上部構造の長支間化を図ることに加え、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、上部構造の軽量化も同時に図ることを試みた。また、長支間化にともなって、鉛直たわみに対する主桁の曲げ剛性が不足することから、斜張橋形式を採用することとした。支間割および基礎の配置を検討した結果、図-1(b)、(c)に示したように、2 つのタイプの斜張橋形式で試設計を行った。Type1 は、主径間長を 20m とし、線路内作業を P2 橋脚のみとしたケースであり、Type2 は、主径間長を 24m とし、線路内作業を伴わないケースである。

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 に示すように、曲げ剛性を効率的に付与するために、上下フランジ部に炭素繊維 (CF) とガラス繊維 (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 に示すように、フランジ部の CF と GF の積層構成と体積比率が異なる 4 つのケース (A~D) を設定して検討を行った。桁の断面寸法は、比較検討のため参考とした既設鋼橋の桁と同じ 440×300 mm とした。なお、フランジ、ウェブの各部位の等価剛性は、積層理論⁸⁾に基づく算定値である。

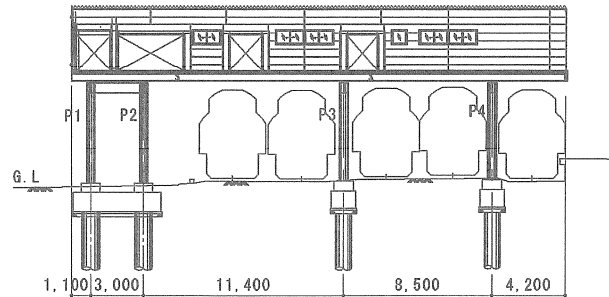
2.3 構成部材と設計条件

前述したとおり、既設工事例では、鋼、コンクリ

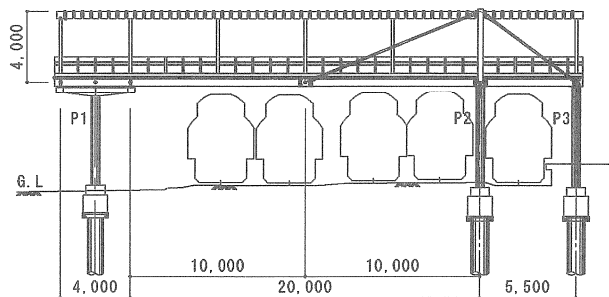
表-1 ハイブリッド FRP 桁の積層構成

部位		繊維の種類, 方向別の体積比率					板厚 t (mm)	弾性係数 E (GPa)	せん断弾性係数 G (GPa)
		CF 0°	UD 90°	GF 0°	UD 90°	GF ±45°			
フランジ	A	52%	0%	0%	10%	13%	25%	65.7	4.4
	B	33%	10%	0%	19%	13%	25%		
	C	33%	0%	0%	29%	13%	25%		
	D	14%	0%	0%	48%	13%	25%		
ウェブ(共通)		0%	0%	0%	32%	42%	26%	15.7	6.7

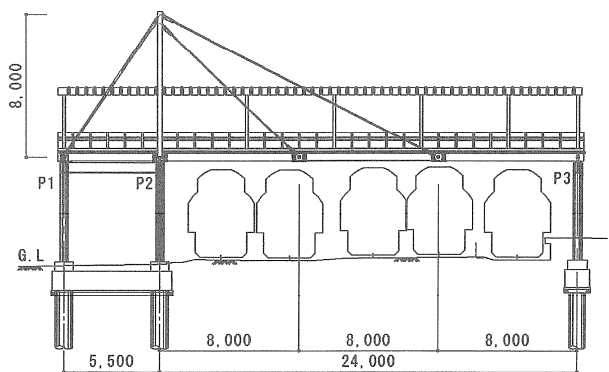
ート、スレート材など、一般的な材料が用いられており、大きな死荷重が作用する。そこで、下部構造のスリム化や、クレーンを用いた一括架設による上部構造の工期短縮を図るために、上部構造で大きな重量を占める部材の軽量化も検討した。主として、屋根材をスレートから鋼製の折板へ、また、床版を PC 版から GFRP 床版 (パネル材) へ、コンクリー



(a) 鋼橋の既設工事例



(b) 斜張橋検討案 (Type1)



(c) 斜張橋検討案 (Type2)

図-1 対象とした線路上空自由通路の一般図

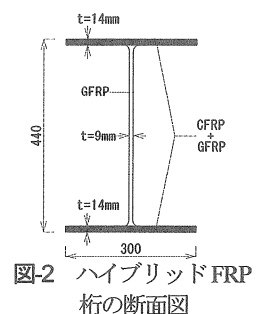


図-2 ハイブリッド FRP 桁の断面図

ト地覆から GFRP 地覆 (箱断面) へ変更した。加えて、外壁を省略して GFRP 高欄のみとした。その他、塔、ケーブル定着部のブラケットを含む横桁構造およびケーブル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。なお、部分的に鋼製部材を併用しているため、適切にメンテナンスを行う必要がある。

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。ハイブリッド FRP 桁と GFRP 床版 (幅 500mm のパネル材) の概略図を図-3 に示す。パネル材は引き抜き方向を床版支間方向に配置した。

各タイプにおける上部構造の一般図を図-4 に、また、Type1 における断面図を図-5 に、それぞれ示す。Type1 では既設工事例と同じ 3 主桁、長支間化を図った Type2 では 4 主桁として試設計を行った。横桁

は、既設工事例の対傾構間隔を参考に、ほぼ 2m 間隔で設置した。

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⁹⁾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、また、設計上、主桁のたわみ制限が支配的で、応力的には余裕があることから、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することとした。

作成した立体骨組構造モデルを図-6 に示す。主桁、

表-2 主要部材の断面諸元

部材	A (m ²)	J (m ⁴)	I _{in} (m ⁴)	I _{out} (m ⁴)	E (GPa)	G (GPa)	
主桁	積層構成A	1.21E-02	6.51E-07	4.34E-04	6.30E-05	9.0	
	積層構成B						59.7
	積層構成C						48.4
	積層構成D						44.8
横桁	一般部 (GFRP)	1.21E-02	6.51E-07	4.34E-04	6.30E-05	25	4.5
	定着部 (鋼)	2.71E-02	1.35E-03	9.02E-04	9.02E-04	200	77
塔 (鋼)	1.59E-02	5.16E-07	2.32E-04	2.32E-04	200	77	
床版 (GFRP パネル)	1.52E-02	2.05E-05	6.40E-06	1.51E-04	25	4.5	

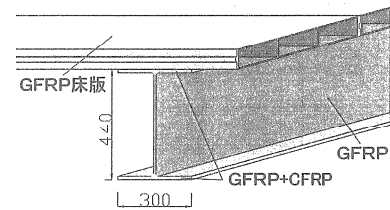


図-3 ハイブリッド FRP 桁と GFRP 床版の概略図

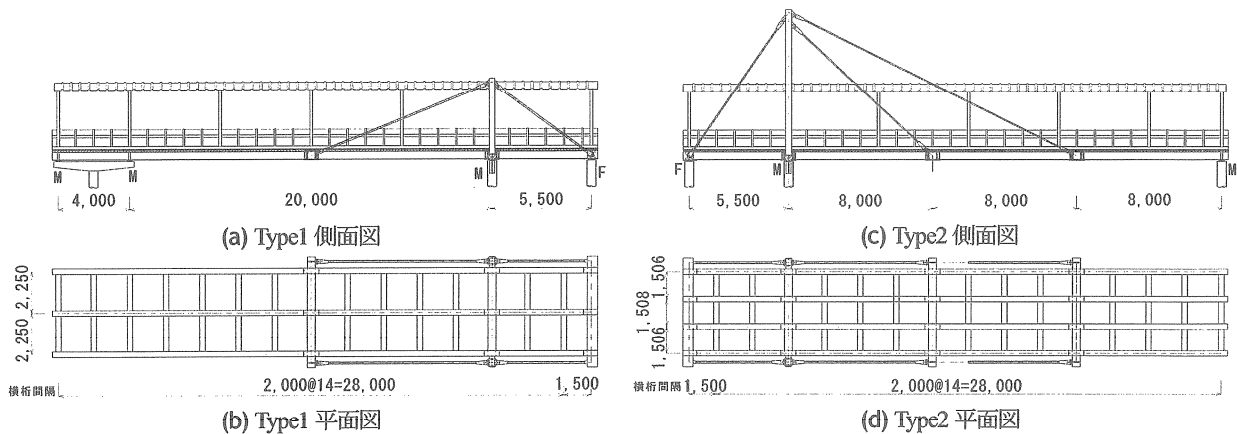


図-4 上部構造の一般図

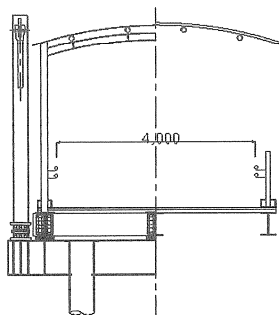


図-5 Type1 における断面図

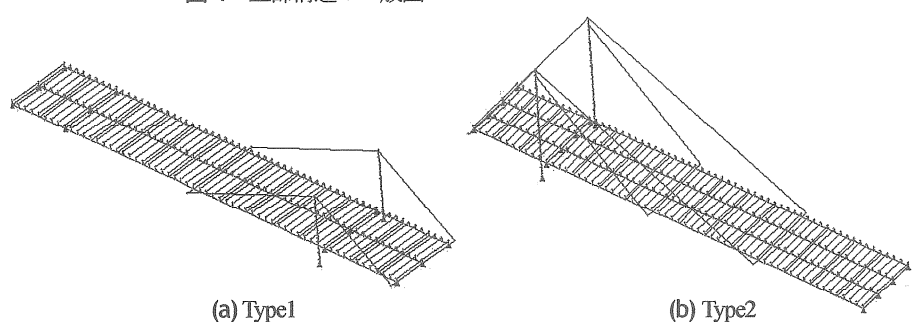


図-6 立体骨組構造モデル

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た。GFRP 床版もはり要素により 500mm 間隔で設置したが、主桁面内の曲げ剛性には寄与しないものとしてモデル化した。なお、本検討は、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解析法によった。

試設計では、活荷重に対する主桁の鉛直たわみが支間長の 1/500 以下¹⁰⁾を満足するように、タイプ別、積層構成別に、必要なケーブル断面積を算定することとした。検討した活荷重載荷ケースの一例を図-7 に示す。ケーブル断面積の決定にあたっては、主桁の鉛直たわみの影響線解析結果に基づき、活荷重載荷ケース L1 を適用した。なお、死荷重および活荷重 (3.5kN/m²) の載荷にあたっては、1-0 法により各主桁に荷重を配分した。

さらに、固定荷重解析による主桁のたわみ照査や応力度照査、および、固有振動解析による振動使用性の照査を実施して、ハイブリッド FRP 桁斜張橋の実現可能性を検討した。

3. 試設計結果と照査結果

3.1 上部構造の重量比較

試設計結果の一部として、各部位の重量を比較したものを図-8 に示す。まず、鋼橋の既設工事例に対して、斜張橋形式とすることで、塔、ケーブルおよ

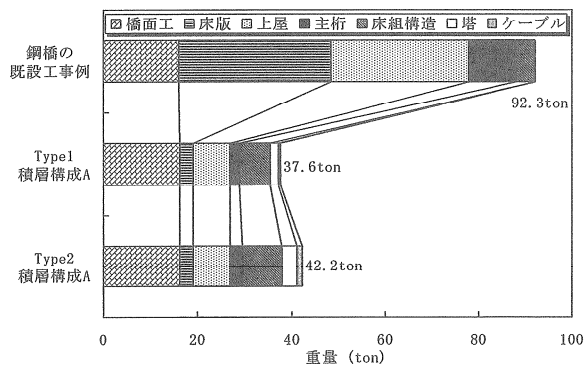
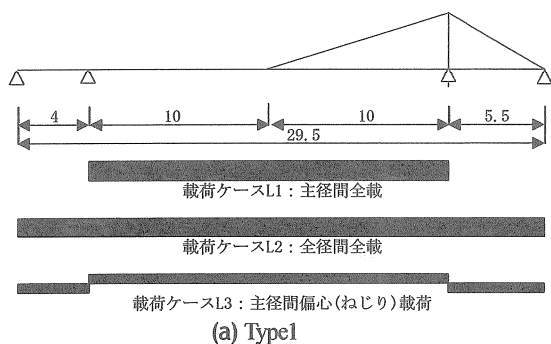


図-8 各部位の重量比較



(a) Type1

び床組構造の中に含まれるケーブル定着構造 (鋼製横桁) の重量が増加するものの、各部位の重量は、床版の変更 (PC 床版から GFRP 床版へ変更) で約 91%, 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 73%, それぞれ大幅に削減されたことから、全重量は両タイプで半分以下となった。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。

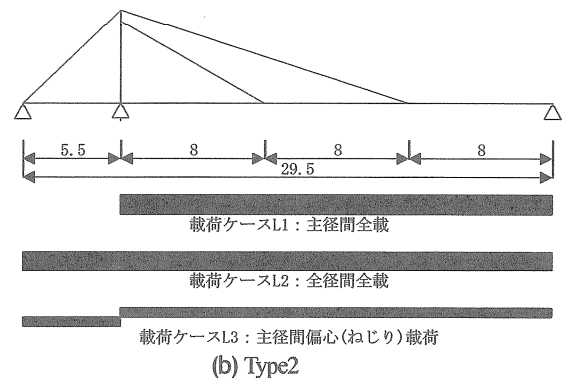
一方、主桁については、鋼製桁からハイブリッド FRP 桁への変更により、その死荷重も 3 主桁の Type1 で約 82%, 4 主桁の Type2 で約 76%, 大幅に削減された。また、全重量に対する主桁重量の割合については、既設工事例では約 11%, Type1 では約 5%, Type2 では約 6%であった。斜張橋案では、各部位で軽量化が図られたものの、主桁重量が相対的に小さいことが解る。なお、ハイブリッド FRP 桁の比重の平均値は 1.68 であった。

さらに、死荷重 D に対する活荷重 L の比率 L/D は、既設工事例では 0.43, Type1 では 1.12, Type2 では 0.99 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 ケーブルの清算断面積と作用応力度

図-9 に、ハイブリッド FRP 桁の弾性係数とケーブル断面積の関係を示す。概略検討であるため、各段のケーブルは同じ断面積として試設計を行った。図より、ハイブリッド FRP 桁の弾性係数が低いほど、主桁の鉛直たわみが増大するため、ケーブル断面積を増加させる必要のあることが解る。特に、弾性係数の最も小さい、Type1 の積層構成 D では、ケーブルの必要断面積が最も大きくなることが解る。

ハイブリッド FRP 桁の弾性係数とケーブルの張力および作用応力の関係を、図-10、図-11 にそれぞれ示す。これらの図では、張力が最も大きかった短



(b) Type2

図-7 活荷重載荷ケース

径間側のケーブルに着目し、ケーブル張力が最大となる活荷重載荷ケース L1 について比較検討を行った。まず、図-10 より、両タイプで、ハイブリッド FRP 桁の弾性係数が低くなるほど、ケーブル張力が若干増加することが解る。前述したとおり、死荷重に対する活荷重の比率が大きいことから、死荷重 (D+PS) 時の張力に対して、死荷重載荷 (D+PS+L1) 時には、ほぼ2倍の張力を生じることが解る。一方、図-11 からは、ハイブリッド FRP 桁の弾性係数が低くなるほど、ケーブルの作用応力は低下しており、ケーブル断面積が最も大きかった Type1 の積層構成 D で、最大作用応力は 142MPa であった。一般に、鋼製ケーブルの引張強度は高い¹¹⁾ ことから、応力的にはかなり余裕があるといえ、ケーブルの必要断面積も主桁のたわみ制限が設計上、支配的になることが確かめられた。

3.3 たわみ特性と活荷重たわみの照査結果

まず、図-12 に、死荷重 (D+PS) 時における外桁の鉛直たわみを示す。設計条件で述べたように、死荷重時のケーブル定着点における鉛直たわみ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、定着点での鉛直たわみがほとんど生じていな

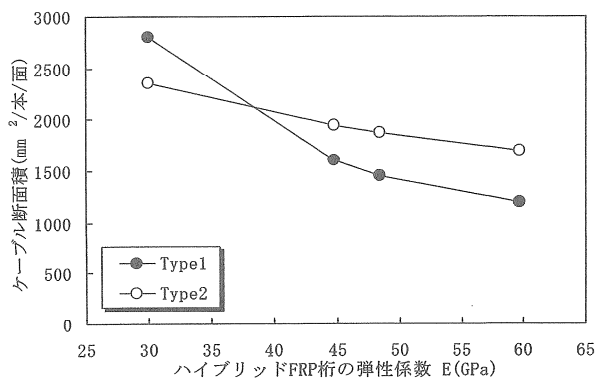


図-9 桁の弾性係数とケーブル断面積の関係

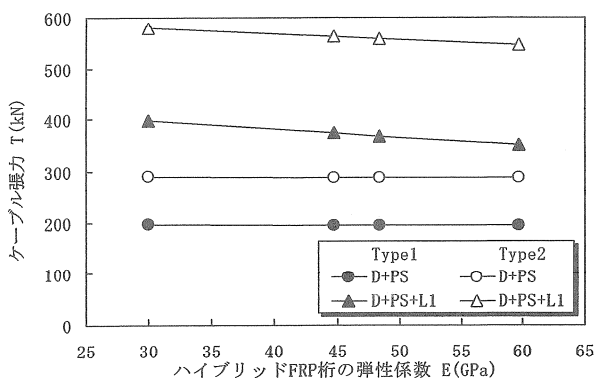


図-10 桁の弾性係数とケーブル張力の関係

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、桁の弾性係数の低下に伴って、鉛直たわみが増大することも解る。なお、Type1 の積層構成 D の死荷重たわみは、最大で 8.8mm であった。今回のケーブルプレストレスの設計計算では、ケーブル定着点での死荷重たわみをゼロとすることに着目したが、死荷重時のたわみ分布を均一化することに着目することも、必要に応じて考えられる。

図-13 は、主桁の鉛直たわみが最大となる活荷重載荷 (主径間全載 : L1) ケースについて、外桁の鉛直たわみ分布を示したものである。所要の断面積を有するケーブルを適用したことで、両タイプ、全ての積層構成において、たわみ制限 (L/500) を満足していることが解る。また、Type1 の積層構成 D において、ケーブル定着点でたわみが屈曲していることが解る。これは桁の曲げ剛性が小さいことに起因するものと考えられた。

さらに、図-14 には、主径間偏心載荷 (L3) 時における両外桁の鉛直たわみ差を示す。両タイプ、全ての積層構成で、ほぼ同程度のねじり変形特性であることが解る。特に、ケーブル定着点ではケーブル断面積の大きさに比例して鉛直たわみ差が抑制されていることから、ケーブルにより効果的に支持されているといえる。

以上のことから、Type1、Type2 とともに積層構成にかかわらず、設計上、主桁のたわみ制限が支配的となったが、所要の断面積を有するケーブルを適用することで試設計が可能であることが確かめられた。また、積層構成の選択にあたっては、最も弾性率の低い、積層構成 D については、死・活荷重荷載時におけるたわみが局部的に増大することから、今回検討した範囲では、ハイブリッド FRP 桁の弾性係数が 45GPa (積層構成 C と同等) 以上を採用すれば、実用上、大きな問題はないといえた。なお、主桁の材料を GFRP とした場合、一般に、弾性係数は 25GPa

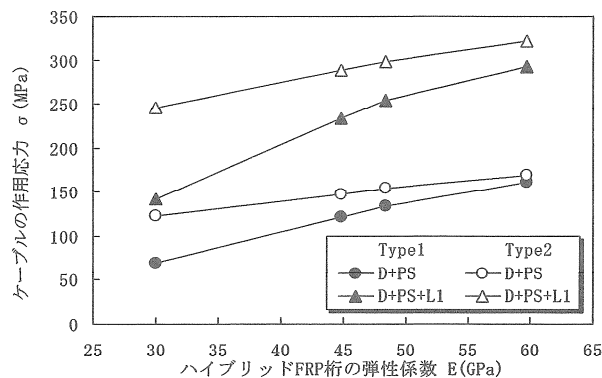


図-11 桁の弾性係数とケーブルの作用応力との関係

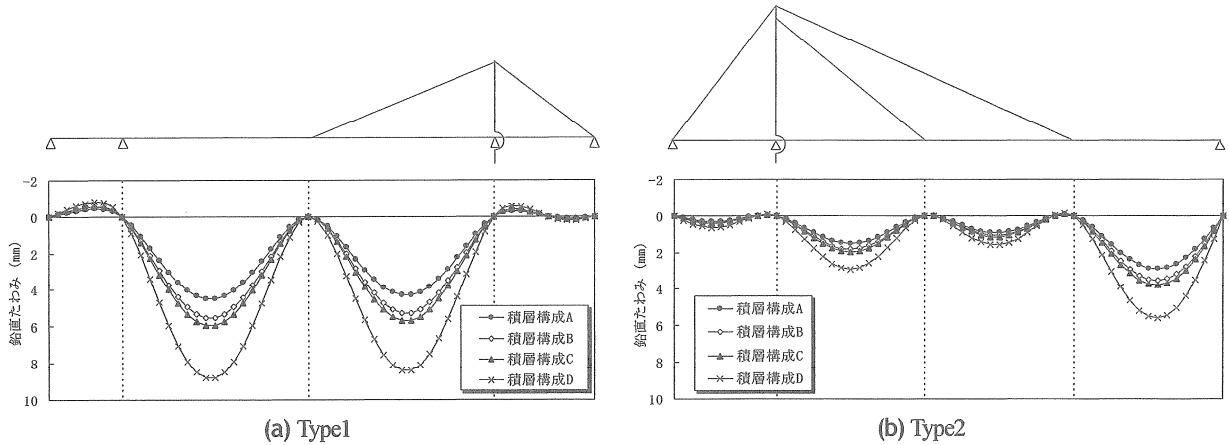


図-12 死荷重(D+PS)時の外桁の鉛直たわみ

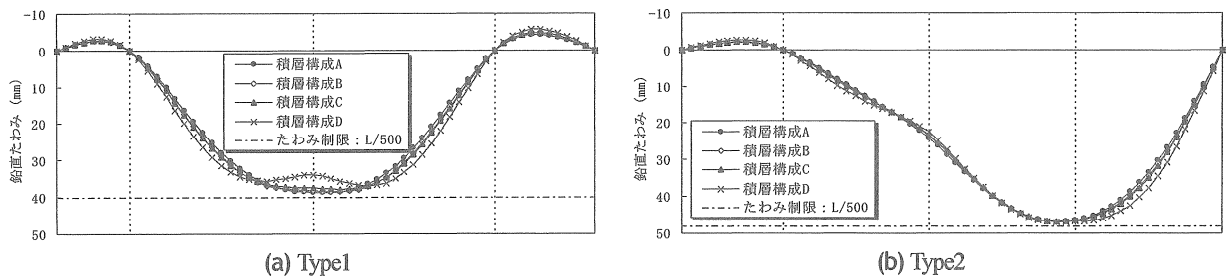


図-13 活荷重(L1)時の外桁の鉛直たわみ

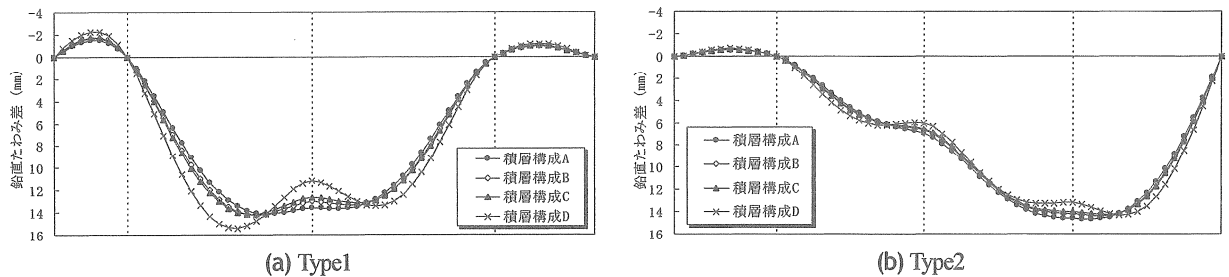


図-14 活荷重(L3)時における両外桁の鉛直たわみ差

程度であり、その適用性については、さらに困難になるものと予測され、ハイブリッドFRP桁の適用が不可欠であることも確かめられた。

3.4 主桁の断面力と応力度照査結果

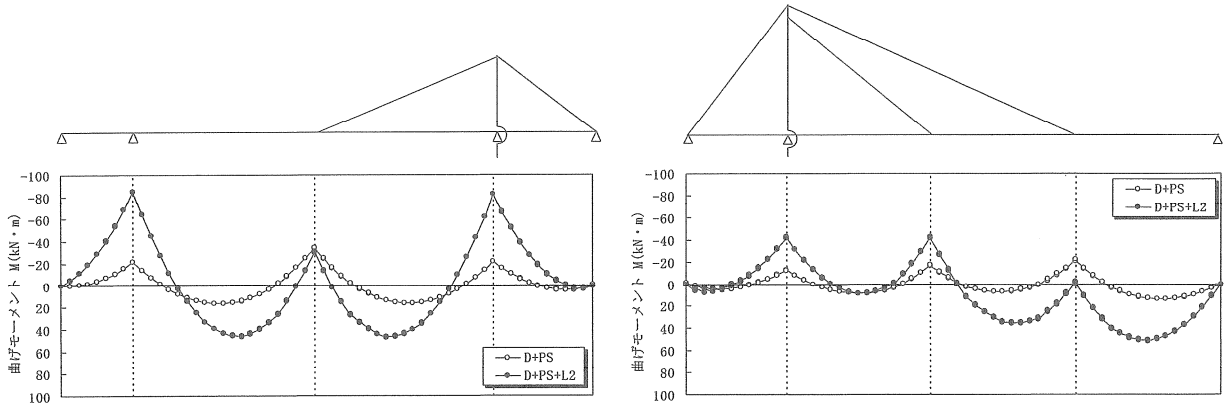
図-15, 16 に、死活荷重載荷時における外桁(積層構成A)の曲げモーメントおよび軸力をそれぞれ示す。ここでは、死荷重(D+PS)時に加え、主桁の断面力がほぼ最大となる全径間全載(D+PS+L2)時について比較した。図-15より、死荷重たわみをプレストレスで調整したことにより、両タイプで、死荷重(D+PS)時の曲げモーメントはほぼ均等になっていること、また、図-16からは、一般的な斜張橋と同様な軸力分布を示していることが解る。両図からは、活荷重載荷に伴う断面力の増加が大きいことも解る。

さらに、主桁の応力度照査結果の一部を図-17に示す。ハイブリッドFRP桁は、フランジとウェブで

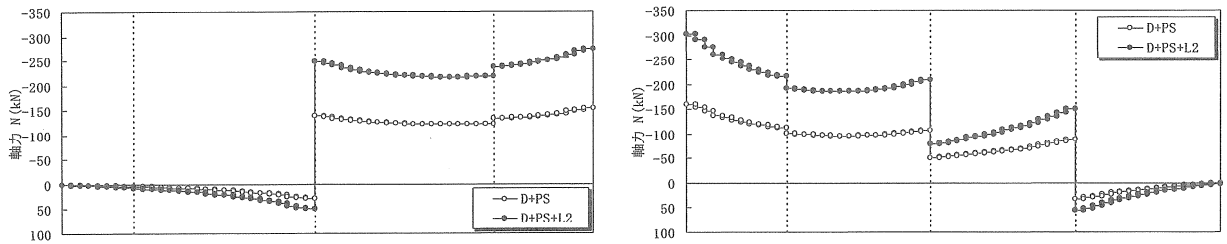
弾性係数が異なるため、合成断面として応力度を算出した。図-17は、応力が最も高くなった、積層構成Aにおける外桁の応力度分布を、死・活荷重時について示したものである。両タイプともに、死荷重(D+PS)時の応力は小さく、死活荷重載荷(D+PS+L2)時に応力の絶対値が最大となるType1であっても、最大、最小応力は、50.7、-65.5(MPa)であった。したがって、活荷重載荷に伴う断面力の増加が大きくなって、主桁に発生する応力は比較的小さく、応力的には問題ないことが確かめられた。

3.5 固有振動特性と振動使用性の照査結果

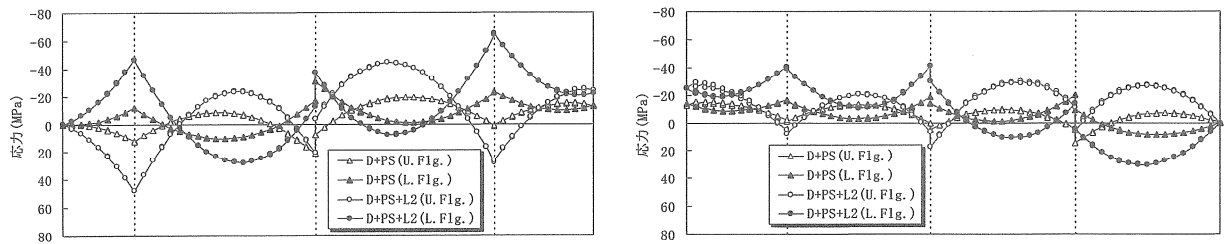
立体横断施設技術基準・同解説¹²⁾では、人の歩調と共振し不快感を与えないようにするために、主構造系のたわみ振動の固有振動数が、2Hz前後(1.5~2.3Hz)にならないようにすることを規定している。固有振動解析による概略的な検討結果として、図-18に、ハイブリッドFRP桁の弾性係数と固有振動数の



(a) Type1 (b) Type2
図-15 死活荷重載荷時における外桁(積層構成A)の曲げモーメント



(a) Type1 (b) Type2
図-16 死活荷重載荷時における外桁(積層構成A)の軸力



(a) Type1 (b) Type2
図-17 死活荷重載荷時における外桁(積層構成A)の応力度照査結果

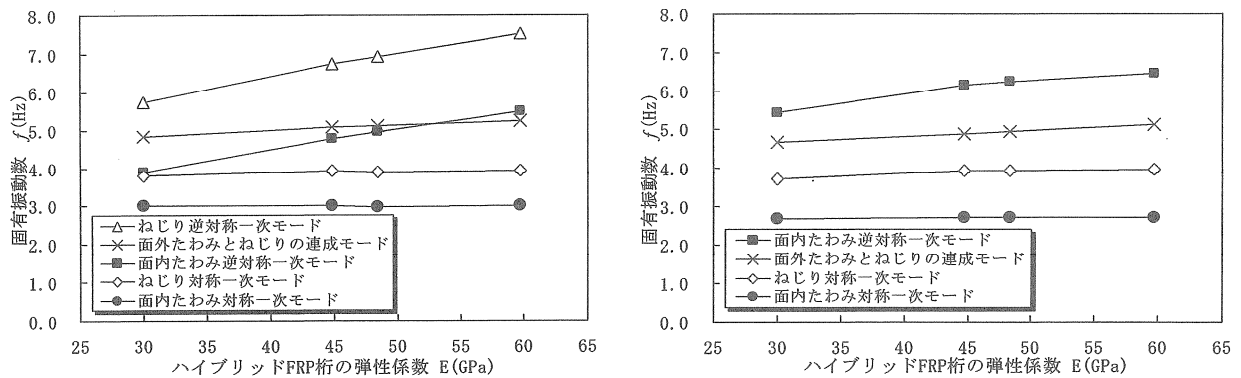


図-18 桁の弾性係数と固有振動数の関係

関係を示す。図より、Type2 で最低次(面内たわみ対称一次)モードの振動数が最も小さくなるものの、両タイプともに振動使用性を満足することが確かめられた。また、低次モードの振動数は、桁の弾性係数に関係なく、ほぼ一定であることから、たわみ制限を満たすように設計されたケーブルの軸剛性が寄与しているものと考えられる。

一方、高次モードになるほど、桁の弾性係数の大きさに比例して、振動数が高くなる傾向にあることも解る。さらに、ねじりモードや面外たわみモードの振動数は比較的高く、設計上、大きな問題とならないことも確かめられた。

4. 既設工事例に対する工費の比較

ハイブリッドFRP 桁斜張橋 (Type2, 積層構成C) の試設計結果の妥当性を検証するために、既設工事例 (鋼橋) に対する概算工費を比較したものを図-19 に示す。内訳として、土木工事 (下部工) には、橋脚・基礎工事のほか、簡易工事桁、計測工、作業帯などを含んでいる。なお、ハイブリッドFRP 桁 (引き抜き成形) の材工費はメーカーの見積りにより、一般的なFRP の材工費は文献13)を参考に、算出した。

図より、橋脚数と線路内作業の減少により、全体工費に大きなウエイトを占める土木工事 (下部工) 費用が大幅に低減された。また、全体工期も13ヶ月から9ヶ月半に短縮されたことで、現場管理のための保安関係の費用も大幅に低減された。したがって、既設工事例における上部工の費用は総工費に占める割合が小さいため、ハイブリッドFRP 桁斜張橋の上部工の費用が既設工事例の約3倍となった場合でも、総工費で比較すれば19.2%の削減が可能となった。

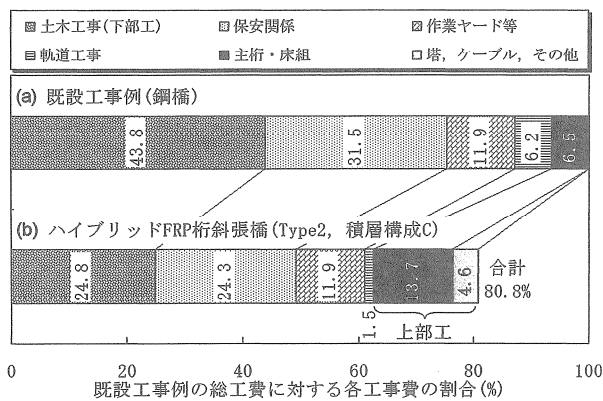


図-19 工事費の比較

5. まとめ

都市部幹線鉄道における線路上空自由通路の既設工事例を参照して、ハイブリッドFRP 桁斜張橋の概略的な試設計を行った結果、主桁のたわみ変形量によって鋼製ケーブルの断面積が決定されたが、たわみ制限、振動使用性を満足し、設計上、大きな問題はみられなかったことから実現可能であるといえた。

また、一般のFRPと同様に、たわみ制限が設計上、大きな制約となるが、長支間化した場合であっても、適切な積層構成を選択し、斜張橋形式とすることで、十分に設計できることが確かめられた。特に、上部構造の長支間化と軽量化により線路内作業を大幅に削減できるため、下部構造の施工の合理化と工期短縮に効果的であり、FRP の材料費や上部工の費用が増加しても全体工事費のコストダウンが期待でき、その有用性は高いといえた。

今後は、実用化へ向けて、FRP 構造に適した合成・接合方法の開発や、合理的な架設方法の検討のほか、動的応答解析に基づく振動使用性の検討を実施する予定である。

謝辞

本研究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。共同研究者各位からは貴重なご助言をいただいた。また、研究当時、東京都立大学の卒業研究生であった渡辺貴之氏 (現首都大学東京 大学院生) には、解析データの作成・整理等でご協力いただいた。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 橋梁一技術とその展望一, 構造工学シリーズ 14, 丸善, 2004.
- 4) 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.
- 5) 浅本晋吾, 睦好宏史, 鈴木研二: ハイブリッド I 型 FRP 構造部材の曲げ性状に関する実験的, 解析的検討, 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.
- 6) 中村一史, 前田研一, 睦好宏史, 鈴木研二: 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) 前田研一, 睦好宏史, 津吉毅, 鈴木研二, 松井孝洋: 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.
- 8) 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.
- 9) 中井 博, 北田俊行: 鋼橋設計の基礎, 共立出版, pp.552-557, 1992.
- 10) 東日本旅客鉄道株式会社: 乗換こ線橋設計の手引, 1992.
- 11) 日本鋼構造協会: 構造用ケーブル材料規格, JSSC レポート, No.29, 1994.
- 12) 日本道路協会: 立体横断施設技術基準・同解説, pp.35-37, 1979.
- 13) 革新的構造材料の活用検討委員会編: 革新的構造材料の土木分野への活用に関する調査研究 その 2 (平成 17 年度) 成果報告書, 土木学会, p.180, 2008.