

床版橋形式 GFRP 歩道橋および線路上空自由通路のための ハイブリッド FRP 桁斜張橋の開発

Development of Pedestrian GFRP Slab Bridges
and Hybrid Composite Girder Cable-Stayed Bridges for Free Passage over Railway

中村 一史* 前田 研一* 睦好 宏史** 柳沼 謙一*** 松井 孝洋† 渡辺哲也††
Hitoshi Nakamura Ken-ichi Maeda Hiroshi Mutsuyoshi Ken-ichi Yaginuma Takahiro Matsui Tetsuya Watanabe

*首都大学東京 大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

**埼玉大学 大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

***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 番地の 1)

††AGC マテックス株式会社 提案企画部 (〒229-1112 神奈川県相模原市宮下 1-2-27)

Since the deflection limitation often becomes dominant in the design of FRP pedestrian bridges, it is very important to reduce the bending deflection for an economical structure design. In this paper, two FRP pedestrian bridges were proposed. First, a pedestrian slab bridge using two kinds of GFRP pultrusion profiles, which has adopted semi-fixed support conditions at both ends, was investigated experimentally and analytically. Next, 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 FRP pedestrian bridges was confirmed.

Keywords: Fiber Reinforced Plastic, Deflection Limitation, Trial Design, Pedestrian Bridge, Free Passage over Railway

キーワード: 繊維強化プラスチック, たわみ制限, 試設計, 歩道橋, 線路上空自由通路

1. はじめに

FRP 歩道橋の設計では、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、たわみを効果的に抑制できる構造形式や、高い曲げ剛性が得られる FRP 部材の開発が望まれている。本論文は、このような課題を合理的に解決することを目的として、既に提案した2つ異なる形式の FRP 歩道橋における検討結果^{1),2)}を再構成して、その概要を示したものである。

まず、GFRP 引き抜き成形材を組み合わせて製作した床版橋形式の主桁に、擬似両端固定支持条件を適用して、たわみを効果的に抑制することができる GFRP 歩道橋を提案した³⁾。特に、既製品の GFRP 引き抜き成形材を適用することで、ハンドレイアップ成形法による製作に比べて、コストダウンを図ることができる。床版橋形式 GFRP 歩道橋の開発にあたっては、試設計例を示して、断面構成を決定した後、実大部分模型試験体を製作して、曲げ変形特性、擬似両端固定支持構造、および、主桁連結部⁴⁾に着目した実験的な検討を行って、設計の妥当性や耐荷力を検証した。

次に、開発したハイブリッド FRP 桁^{5)~8)}の線路上空自由通路への適用性を検討した。ハイブリッド FRP 桁は、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) を適用したものであり、引き抜き成形による製作も可能で、経済性にも優れている。ここでは、軽量の FRP の効果的な活用方法を検討するために、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。軽量化と長支間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、試設計を行って、その実現可能性を検討した。

2. 床版橋形式 GFRP 歩道橋の開発

2.1 主桁の断面構成と材料特性

床版橋形式 GFRP 歩道橋では、その概念図を図-1 に示すように、全ての部材で既製品の GFRP 引き抜き成形材を使用している。試設計に用いた引き抜き成形材と素材

の積層構成を図-2に、また、組み合わせ部材の構成の一例を図-3に、それぞれ示す。これらの図に示したように、床版橋形式の主桁断面には、高さ 300mm の I 形断面部材（以下、I300 と略称）と、厚さ 4mm のシート状の板材（以下、F1000 と略称）を適用し、それらは、チョップドストランドマット（CSM）にビニルエステル樹脂を含浸させたマットインと呼ばれる一種の接着剤を用いて組み立てられている。JIS に準拠して実施した材料試験による各部の材料物性値を表-1 に示す。以下の検討では、設計条件に応じて、この 2 種類の引き抜き成形材を組み合わせで検討を行うものとした。

2.2 床版橋形式歩道橋の試設計

図-1 に示したように、既製品の GFRP 引き抜き成形材を組み合わせて床版橋形式とした歩道橋の試設計を行った。ここでは、有効幅員を 1.5m として、主桁の断面構成を検討して、たわみ制限を満たす限界支間長を検討するとともに、たわみを抑制し、経済性を高めるための改善策を提案することを目的とした。

表-2 に、設計条件を示す。設計基準には、立体横断施設技術基準・同解説⁹⁾を適用した。また、たわみを効率的に抑制する方法として、両端固定形式とすることを検討した。すなわち、両端のゴム支承の外側にアンカーボルトを用いて主桁を定着することによって、負反力に抵抗できる擬似両端固定支持構造とした。設計計算は、概

略的な検討のため、両端固定支持条件を適用して、初等はり（Bernoulli-Euler はり）理論に基づいて行った。

試設計の結果、適用可能支間長は 16m となり、その一般図を図-4 に示す。主桁の断面構成については、5 本の I300 と上下に各 2 層とした F1000 を必要とし、その曲げ剛性は 3.940×10^4 (kN・m²) となった。支間中央部における鉛直たわみは 22.7mm となり、たわみの制限値 (26.7mm) を満足することが確かめられた。また、曲げ応力度は、固定端において絶対最大値を生じ、24.0MPa となること、温度荷重による応力度は 10.5MPa となることから、表-1 に示された GFRP 部材の強度に対して十分に小さいことが確かめられた。したがって、概略的な検討結果からは、試設計が十分に可能であるといえた。

2.3 実大部分模型による曲げ変形特性の検証

設計の妥当性を検証するために、試設計断面の一部分を忠実にモデル化した実大部分模型（支間長 4m）を製作して、4 点曲げ載荷実験を行った。実大部分模型は、2 本の I300 と 2 層の F1000（幅 800mm）で構成され、マットインで貼り合わせて製作されている。荷重は荷重制御で 300kN まで静的に載荷した。

実験結果の一部として、図-5 に 4 点曲げ載荷実験による鉛直たわみ分布を示す。図中には、GFRP の直交異方性を考慮した 3 次元有限要素解析（MARC 2005）の結果（以下、3D FEM と略称）、せん断変形による付加たわみ

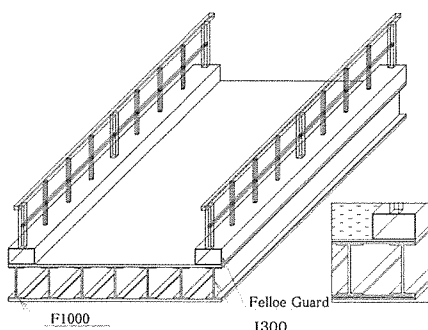


図-1 床版橋形式 GFRP 歩道橋の概念図

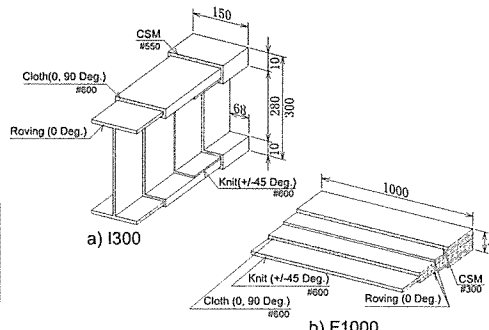


図-2 引き抜き成形材と素材の積層構成

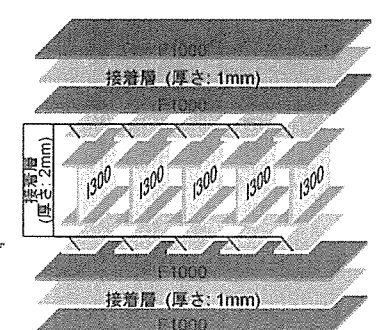


図-3 組み合わせ部材の構成の一例

表-1 各部位の材料物性値

	F1000	I300		接着層 (マットイン)
		フランジ	ウェブ	
引張弾性率 E_{xt} (GPa)	28.3	34.0	27.1	9.1
圧縮弾性率 E_{xc} (GPa)	29.7	36.0	30.5	—
引張強度 σ_{xt} (MPa)	409.0	406.8	253.0	151.9
圧縮強度 σ_{xc} (MPa)	429.6	484.1	439.7	—
密度 (kN/m ³)	17.99	17.55		13.01

表-2 設計条件

死荷重 (kN/m)	構造部材	1.308
	地 覆	0.126
	高 欄	0.56
	舗 装	1.202
活荷重 (kN/m ²)		3.5
温度変化 (°C)		20±30
活荷重に対するたわみ制限 (L: 支間長)		L/600
振動使用性 (回避すべき振動数帯: Hz)		1.5~2.3

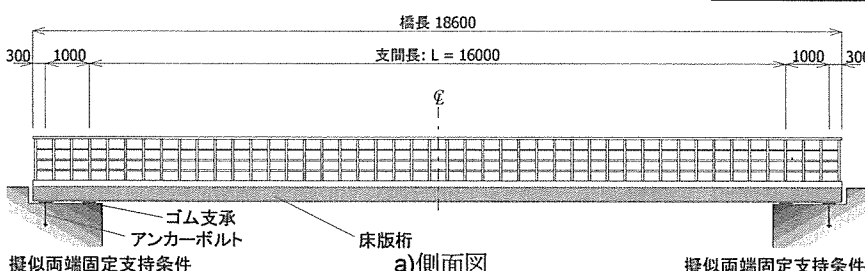


図-4 試設計モデルの一般図

を考慮した Timoshenko はり理論に基づく解析結果(以下, Timo. Th.と略称), および, 初等はり (Bernoulli-Euler はり) 理論に基づく解析結果(以下, B.-E. Th.と略称)を併記している. 図より, 3D FEM によれば最も精度良く予測できることが解る. 初等はり理論では, 鉛直たわみが過小に評価されることから, 少なくともせん断変形による付加たわみを考慮する必要があるといえた.

図-6 に, 300kN 載荷時の支間中央部断面における垂直ひずみと垂直応力の分布図を示す. 図-6 a) より, 接着接合された断面であっても平面保持すること, 実験値は理論値よりも若干低くなることが解る. また, 図-6 b) の垂直応力分布からは, I300 のフランジ部の弾性率が最も大きいので, F1000 の縁応力よりも I300 のフランジ部に

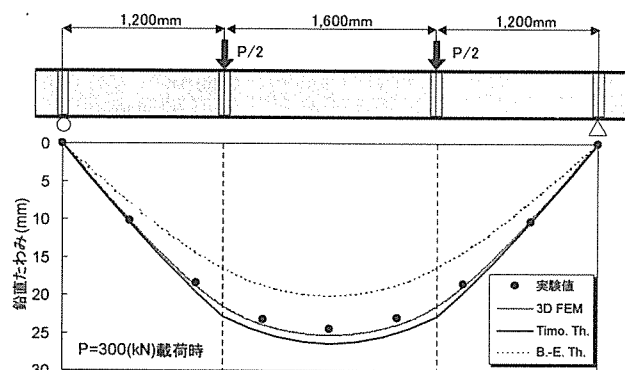


図-5 4点曲げ載荷実験による鉛直たわみ分布

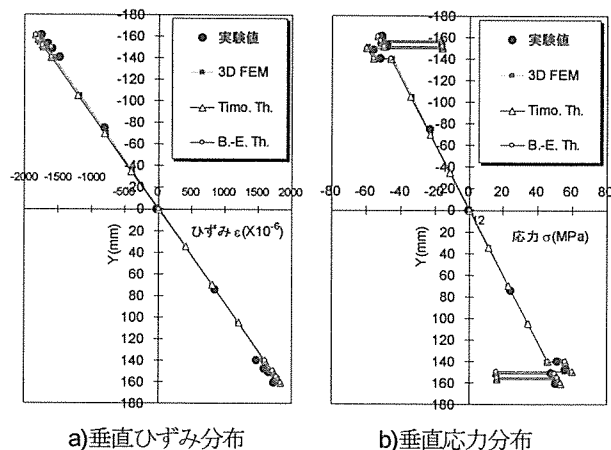


図-6 支間中央部における断面内のひずみと応力の分布

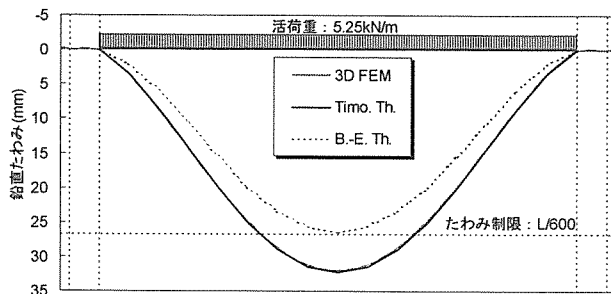


図-7 試設計モデルにおける鉛直たわみ分布

表-3 たわみ制限と適用可能支間長

たわみ制限	適用可能支間長(m)
L/600 (立体横断施設)	14.956
L/450 (EUROCOMP)	16.627
L/300 (EUROCOMP)	19.321

おける応力の方が突出して大きいことが解る.

2.4 試設計モデルの解析的検討

前節において, 実大部分模型による曲げ変形特性と鉛直たわみの解析精度が明らかとなった. 本節では, 試設計モデルを対象に, 曲げ変形特性を検討して適用支間長を明らかにするとともに, 固有振動解析を行って振動使用性を検証した.

(1)曲げ変形特性と適用支間長

擬似両端固定支持条件の試設計モデルを対象に, 前述した3ケースの解析を実施して, 活荷重による鉛直たわみを算定した結果を, 図-7に示す. 図より, 3D FEM と Timo. Th.では, 鉛直たわみはほぼ同程度であるが, たわみ制限を大きく超えることが解る. そこで, せん断変形による付加たわみを考慮して, 適用可能支間長を算出した結果を表-3に示す. 表中には, 比較のために, EUROCOMP¹⁰⁾で示されるたわみ制限を満たす適用可能支間長についても示している. L/600 では, 適用可能支間長は約15mとなることが解った.

(2)固有振動特性と振動使用性

固有振動解析結果の一部として, 表-4に, 振動モードと固有振動数の関係を, また, 図-8に, 3D FEMによる代表的な振動モードと固有振動数をそれぞれ示す. これらの図表より, 最低次の振動モードは, たわみ対称一次モードであり, 3D FEMにおける固有振動数が最も低くなったが, 振動使用性を満足することが確かめられた.

2.5 擬似両端固定支持構造の試設計と安全性の検証

本節では, 提案した擬似両端固定支持構造をより具体的に検討するとともに, 実大部分模型による静的載荷実験を実施して, その安全性を検証した.

まず, アンカーボルトは, I300の下フランジに各2本配置することとした. 試設計モデルを対象に, B.-E. Th.

表-4 振動モードと固有振動数

振動モード	固有振動数 f (Hz)		
	3D FEM	Timo. Th.	B.-E. Th.
たわみ対称一次モード	3.76	3.92	4.63
ねじり対称一次モード	8.53	—	—
たわみ逆対称一次モード	10.01	10.59	12.78
たわみ対称二次モード	19.11	20.06	25.08
ねじり対称二次モード	25.04	—	—
たわみ逆対称二次モード	29.86	31.68	41.49

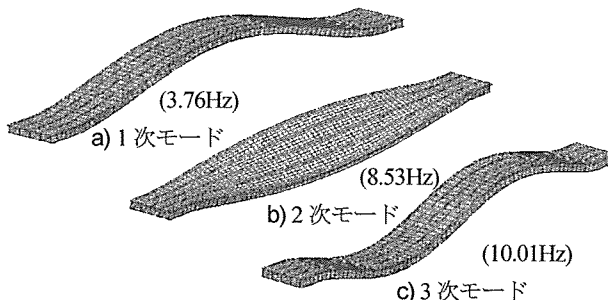


図-8 3D FEMによる代表的な振動モードと固有振動数

および3D FEMにより得られた反力を比較して、橋軸直角方向のアンカーボルト軸力の分配効果を検討した結果、B-E. Th.により得られた反力を10%割り増ししたものを設計軸力とした。その結果、アンカーボルト1本あたりの設計軸力は18.7kNとなり、許容応力度設計¹⁾により照査した結果、アンカーボルト(SUS304)の直径は20mmとなった。また、アンカーボルトの引張力を、主桁に分散して伝達させるために、定着盤を設置することとした。その接合には、ブラインドリベット(SUS304, $\phi 4.8$)とエポキシ樹脂接着剤を用いることとした。

試設計された擬似両端固定支持構造の安全性を検証するために、対象部位を忠実にモデル化した実大部分模型試験体(図-9)を製作して、簡便な荷重モデルにより破壊まで荷重実験を行った。実験結果の一部として、図-10に、荷重と荷重点直下の鉛直変位の関係を示す。最大荷重130.2kNで、I300とF1000のマットインによる接着層で界面はく離が生じ終局となったが、擬似両端固定支持構造およびアンカーボルトに損傷は見られなかった。この時、設計軸力に対する安全率は2.87以上、分配効果を考慮しても2.61以上となることから、十分な安全性が確保されていることが確かめられた。

2.6 主桁連結部の試設計と接合強度の検証⁴⁾

主桁の連結部については、連結位置を支間中央部として、リベット接合で試設計を行った。接合材料には、ブラインドリベット(SUS304, $\phi 4.8\text{mm}$, せん断保証強度: 5.3kN)および添接板(厚さ4mm, SUS304)を用い、エ

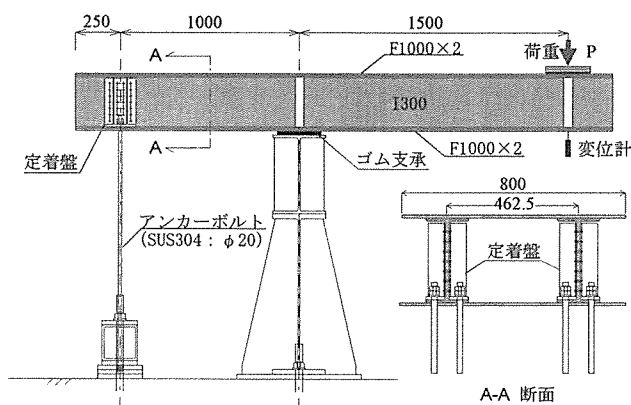


図-9 擬似両端固定支持構造の実大部分模型試験体

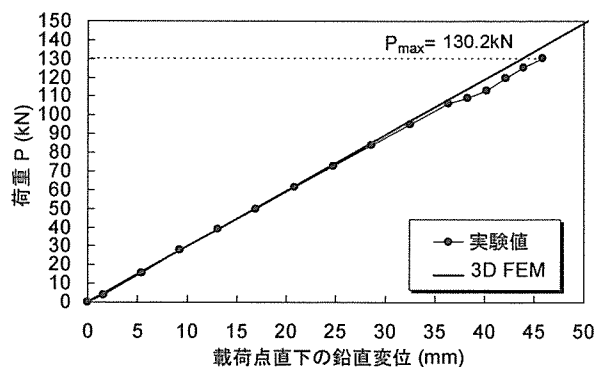


図-10 支持構造の荷重実験による荷重-変位関係

ポキシ樹脂接着剤も併用した。また、I300とF1000の接合部には、施工性を考慮してマットインに替えて厚層にも対応できるエポキシ樹脂接着剤を用いた。初等はり理論(B-E. Th.)に基づく骨組構造解析を適用して断面力を算出し、安全率を3.0と仮定して連結部の試設計を行った。支持条件については、擬似両端固定支持に加え、単純支持とした場合についても検討した。その結果を表-5に示す。ここでは、安全側の設計を考慮して、単純支持条件での試設計結果を採用することとした。さらに、連結部の安全性を考慮して、I300とF1000の継手位置を同一箇所とせずに変更するとともに、施工上の観点からハンドホール用の開口部を設けるために、上フランジ側のF1000の継手を2箇所とした。試設計モデルにおける主桁連結部の概念図を図-11に示す。なお、この連結部

表-5 支間中央部における連結部の試設計

支持条件	擬似両端固定支持	単純支持
作用曲げモーメント: $M (\text{kN}\cdot\text{m})$	死荷重時: D	36.8
	活荷重時: L_{max}	60.5
	死活荷重時: $D+L_{\text{max}}$	97.3
作用最大応力: $\sigma_{D+L_{\text{max}}} (\text{N/mm}^2)$		10.8
フランジ部への換算軸力: P (kN)	I300 フランジ	99.2
	F1000×2層	235.3
作用断面力に対する終局時の安全率: γ		3.0
リベット必要本数: N (本)	I300 フランジ	116(2列)
	F1000×2層	268(2列)
	総数	384
		1,048

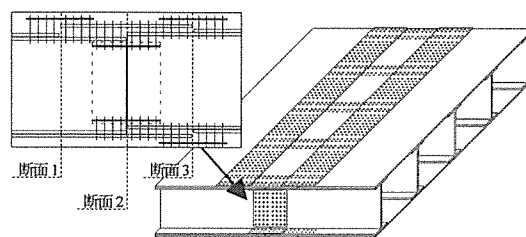


図-11 主桁連結部の概念図

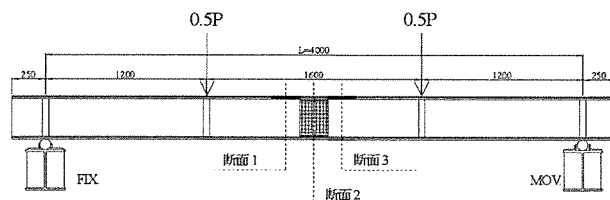


図-12 連結部を有する実大部分模型試験体

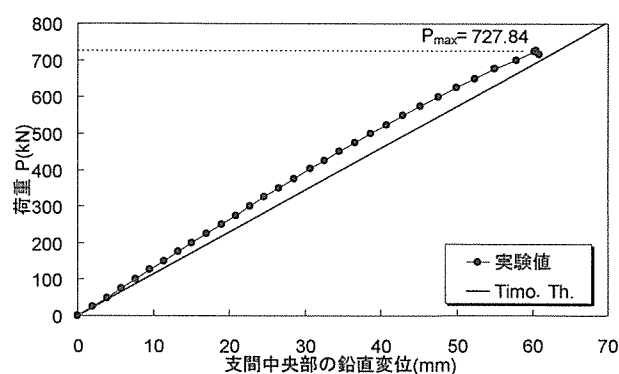


図-13 桁連結部の荷重実験による荷重-変位関係

で必要となるリベット総数は1,928本であった。

試設計された連結部の接合強度を検証するために、連結部を忠実に再現した実大部分模型試験体(図-12)を製作し、破壊まで曲げ載荷実験を実施した。実験結果の一部として、図-13に、荷重と支間中央部における鉛直変位の関係を示す。リベットのせん断保証強度から予測される最大荷重は約560kNであったが、実験における最大荷重はそれを上回り、728.4kNとなった。この時、上フランジの添接板(断面1)と載荷点のほぼ中間において母材の上フランジが座屈して終局となったが、連結部に損傷は見られなかった。試設計モデルにおける連結位置の最大作用応力に対する安全率は11.2以上となり、十分な安全性を有していることが確かめられた。

3. ハイブリッドFRP桁斜張橋の開発

3.1 斜張橋形式への適用条件と試設計

(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-14に示す。図-14 a)は、参考とした既設鋼橋の一例であり、その上部構造は、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。特に、この工事例では、P3、P4橋脚の施工は線路内作業となり、都市部の幹線鉄道では、作業が夜間に限定されるため、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見込まれたことから、橋脚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、長支間化にともなう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した。支間割および基礎の配置を検討した結果、図-14 b)に示すように、主桁間長24mを有する2径間連続斜張橋で試設計を行うこととした。なお、斜張橋検討案では長支間化を図るため、主桁本数を4本とし、横桁は、既設工事例の対傾構間隔を参考に、ほぼ2m間隔で設置することとした。

(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-15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-6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

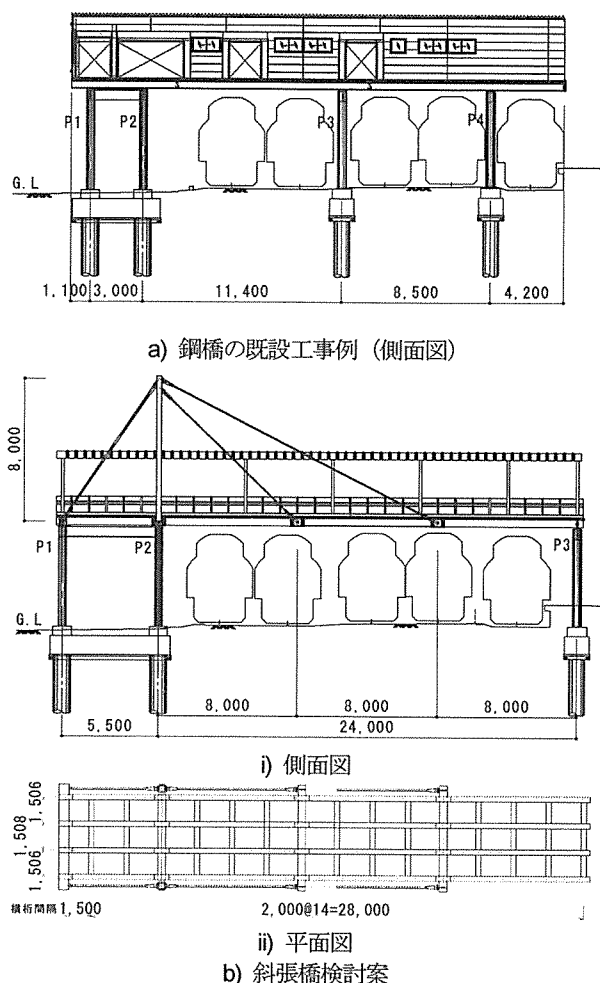


図-14 対象とした線路上空自由通路の一般図

た既設鋼橋の桁と同一とした。なお、フランジ、ウェブの等価剛性は、積層理論¹²⁾に基づく算定値である。

(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。

表-7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-6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-16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。

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¹³⁾によった。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した。

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骨組構造解析法によった。

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¹⁴⁾を満足するように、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は、主径間載荷(L1)および全径間載荷(L2)の2ケースとした。また、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、概略検討であるため、各段のケーブルは同断面積とした。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。

ここでは、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。

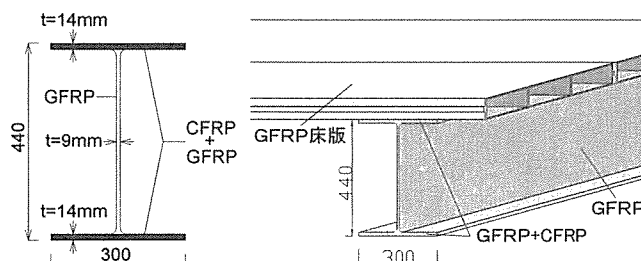


図-15 桁断面図

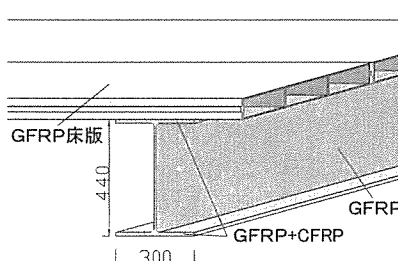


図-16 桁と床版の概略図

表-6 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 UD 0°	CF 0/90 90°	GF ROV. 0/90°	GF ROV. ±45°	GF MAT —			
フランジ	A	52%	0%	10%	13%	25%	14	65.7	4.4
	B	33%	10%	19%	13%	25%		52.9	
	C	33%	0%	29%	13%	25%		48.8	
	D	14%	0%	48%	13%	25%		32.0	
ウェブ(共通)		0%	0%	32%	42%	26%	9	15.7	6.7

表-7 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				59.7	
	積層構成B				48.4	
	積層構成C	1.21E-02	6.51E-07	4.34E-04	44.8	9.0
	積層構成D			6.30E-05	30.0	
横桁	一般部(GFRP)	1.21E-02	6.51E-07	4.34E-04	25	4.5
	定着部(鋼)	2.71E-02	1.35E-03	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

3.2 試設計結果と照査結果

(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-17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、斜張橋案の全重量は既設工事例の半分以下となった。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は、既設工事例では約11%、斜張橋案では約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、斜張橋案では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た。

(2)ケーブルの清算断面積と作用応力度

図-18に、ハイブリッドFRP桁の弾性係数に対するケーブルの断面積および最大応力の関係を示す。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。また、ハイブリッドFRP桁の弾性

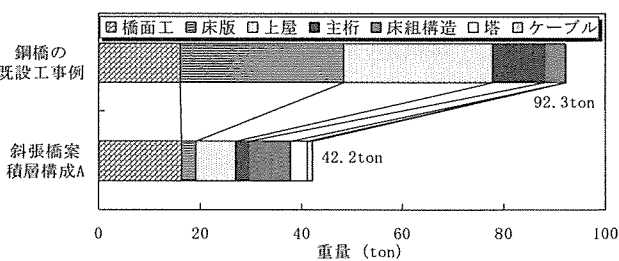


図-17 上部構造の各部位の重量比較

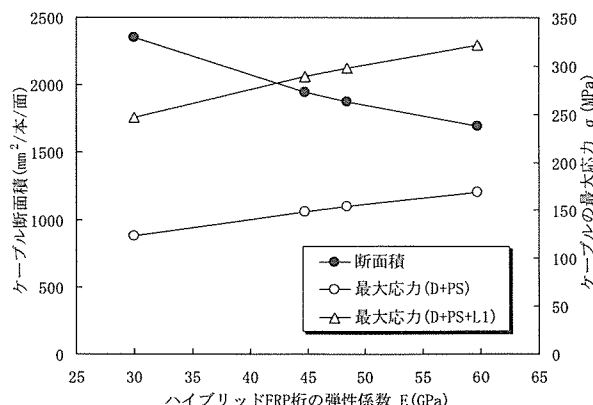


図-18 桁の弾性係数とケーブル断面積の関係

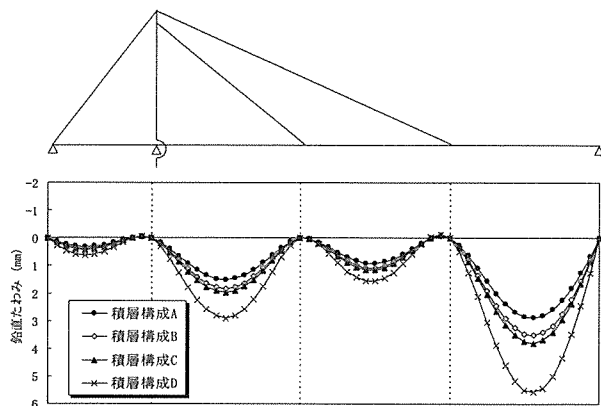


図-19 死荷重(D+PS)時の外桁の鉛直たわみ

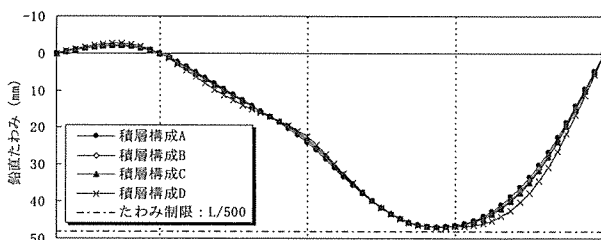


図-20 活荷重(L1)時の外桁の鉛直たわみ

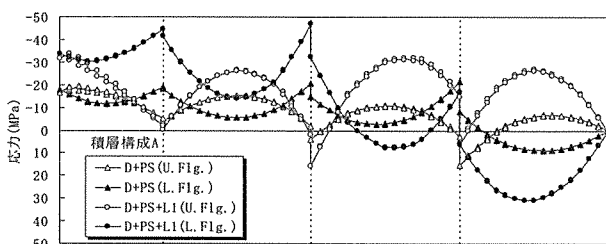


図-21 死重時および死活荷重時における外桁の応力度照査結果

係数が低くなるほど、ケーブルの最大応力は低下し、ケーブル断面積が最も大きかった積層構成Dで、最大作用応力は247MPaであった。一般に、鋼製ケーブルの引張強度は高いことから、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)たわみ特性と活荷重たわみの照査結果

図-19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、積層構成Dの死荷重たわみは、最大で5.6mmであった。今回のケーブルプレストレスの算定では、ケーブル定着点における死荷重時の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-20は、主桁の鉛直たわみが最大となる活荷重載荷(主径間載荷: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、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。

(4)主桁の応力度照査結果

主桁の応力度照査結果の一部を図-21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-21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。死荷重(D+PS)時の応力は小さく、死活荷重(D+PS+L1)時であっても-50~30MPaの範囲内であった。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。

(5)固有振動特性と振動使用性の照査結果

固有振動解析による概略的な検討結果として、図-22に、ハイブリッドFRP桁の弾性係数と固有振動数の関係を示す。図より、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、振動使用性⁹⁾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。

(6)ハイブリッドFRP桁の積層構成の選択

以上のことから、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、各照査を満足し、全ての積層構成に対して、試設計が可能であることが確かめられた。積層構成の選択にあたっては、弾性率の最も低い積層構成Dについては、死荷重時における鉛直たわみが部分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桁の弾性係数は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、その弾性係数は25GPa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といえた。

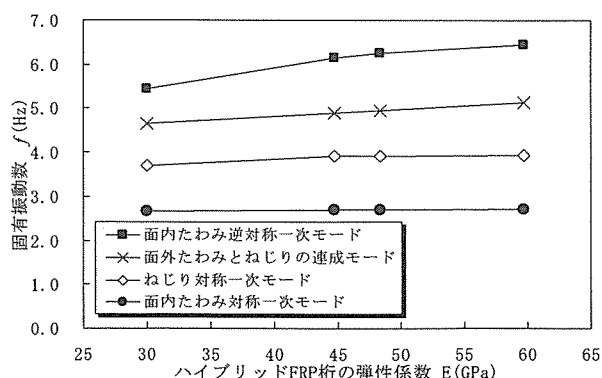


図-22 桁の弾性係数と固有振動数の関係

3.3 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（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-23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15)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ェ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。

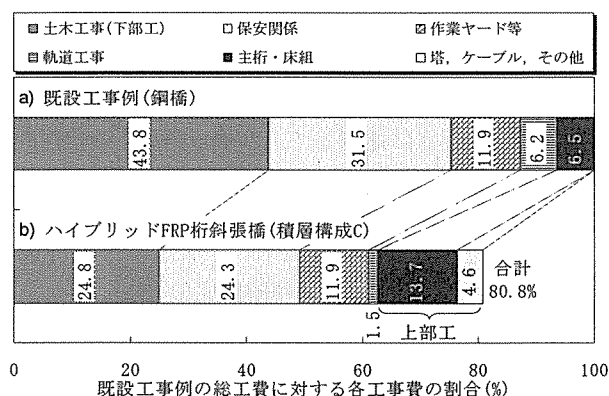


図-23 工事費の比較

4. まとめ

本論文では、FRP歩道橋の設計において、断面決定に支配的なたわみ制限の問題を合理的に解決することを目的として提案した2つ異なる形式のFRP歩道橋における検討結果の概要を述べた。

まず、床版橋形式GFRP歩道橋は、材料コストを抑えるために、全ての部材で既製品のGFRP引き抜き成形材を使用し、マットインによる接着接合で主桁断面を構成したものである。その試設計を行って検討した結果、擬似両端固定支持構造を適用することで、効果的に活荷重たわみを抑制することができ、合理的に設計できることが確かめられた。また、実大部分模型による実験的な検討を行った結果からは、擬似両端固定支持構造やリベット接合による主桁連結部の設計の妥当性と安全性を検証することができ、実現性は十分にあるといえた。

次に、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からは、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。特に、上部構造の長支間化と軽量化によって、線路内作業が大幅に削減されるため、下部構造の施工の合理化と工期短縮に効果的であり、FRPの材料費を含む上部工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。

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。共同研究者各位からは貴重なご助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) H. Nakamura, K. Maeda, K. Kitayama, T. Watanabe: Experimental and Analytical Studies on a Pedestrian Slab Bridge Using GFRP Pultrusion Profiles, Fibre Composite in Civil Infrastructure, Past, Present and Future, Proceedings of the International Workshop, pp.77-82, 2008.
- 2) 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, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, Vol.16, pp.167-174, 2008.
- 3) 前田研一, 北山暢彦, 中村一史, 林耕四郎, 梶川康男: GFRP引き抜き成形材を用いた歩道橋の開発と使用性, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.50A, pp.375-382, 2004.
- 4) 藤田盛吾, 高野 徹, 中村一史, 前田研一, 渡邊哲也: 床版橋形式GFRP歩道橋のリベット接合による連結部の試設計とその安全性の検討, 土木学会, 第64回年次学術講演会講演概要集, CS2, 2009. (投稿中)
- 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) 前田研一, 睦好宏史, 津吉毅, 鈴川研二, 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.
- 7) 浅本晋吾, 睦好宏史, 鈴川研二: 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.
- 8) 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.
- 9) 日本道路協会: 立体横断施設技術基準・同解説, 1979.
- 10) J. L., Clarke: Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP Design Code and Handbook, European Structural Polymer Composite Group, E & SPON, 1996.
- 11) ダム・堰施設技術協会: ダム・堰施設(水門)技術基準(平成11年版), 1999.
- 12) 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.
- 13) 中井 博, 北田俊行: 鋼橋設計の基礎, 共立出版, pp.552-557, 1992.
- 14) (財)鉄道総合技術研究所: 乗換跨線橋設計指針, pp.8-9, 1987.
- 15) 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.