

## ハイブリッドFRP主桁のペDESTリアンデッキへの適用検討

### Application and Examination of Hybrid FRP Composite Main Girders to Pedestrian Decks

○前田 研一\* 陸好 宏史\*\* 津吉 毅\*\*\* 鈴川 研二\*\*\*\* 松井 孝洋\*\*\*\*\*  
Ken-ichi MAEDA Hiroshi Mutsuyoshi Takeshi Tsuyoshi Kenji Suzukawa Takahiro Matsui

**ABSTRACT** FRP (Fibre-Reinforced Plastic) very much excellent in the lightness has drawn attention as a new structural material recently. However, the material cost becomes too expensive even if it takes the life cycle cost into consideration, when CFRP (Carbon Fibre-R. P.) of high elasticity is used in order to reduce the amount of bending deflection that is often dominant in the design. Therefore, the authors have proposed development of hybrid FRP composite girders placing carbon fibers intensively instead of glass fibers only in the part that contributes to flexural rigidity greatly. This study examined the applicability of hybrid FRP composite main girders to pedestrian decks, which are used as free passages over the railway in a big city. On such pedestrian decks, as what can utilize the lightness maximally, restrictions of available hours for construction over the track are very large, and also, the rate of the material cost occupied to the total cost of construction is very small. From the result, the high practicability was confirmed.

Keywords: 繊維強化プラスチック, ハイブリッドFRP桁, ペDESTリアンデッキ, 線路上空自由通路  
*Fiber-Reinforced Plastic, Hybrid FRP Composite Girder, Pedestrian Deck, Free Passage over Railway*

#### 1. はじめに

近年, 社会基盤施設の建設における経済性の追求や, 急速施工を含む架設作業の省力化, 維持管理の合理化などの重要性が指摘されるなか, 軽量性, 耐食性をはじめ, 加工性や, 成形性, 着色性などにも優れた繊維強化プラスチック (FRP) が革新的材料として注目されるようになり, これを従来の鋼やコンクリートに替えて一次構造材料に適用した土木・建築構造物に関する研究・技術開発が, 国内外で精力的に進められている<sup>1)~14)</sup>.

特に歩道橋の分野では着実に建設実績を積みつつあり, 我が国においても, 現在唯一の実橋ではあるが, ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) を適用した沖縄県の伊計平良川線ロードパーク連絡橋 (2径間連続鈹桁橋形式; 支間割 19.7m+17.2m, 有効幅員 3.5m) が 2000 年に完成している<sup>15)</sup>.

しかしながら, これらの FRP 構造物の設計では, たわみ制限が断面決定に際して支配的となることが多く, 鋼に比べて低弾性の GFRP を適用した場

合, 大断面が必要となり, 経済性, 施工性が大きく損なわれる一方, 高弾性の炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を適用した場合には, 材料コストがはるかに高くなり, ライフサイクルコストを考慮したとしても採用は極めて困難な状況にある.

このような観点から, 著者らは, たわみ変形量を経済性の面からも効率的に低減できるようにするために, 曲げ剛性に対する寄与度が高い部位に集中して炭素繊維を, それ以外の部位には比較的安価なガラス繊維を配置するハイブリッドFRP桁の開発を提案している<sup>16)</sup>.

本論文は, 作業可能時間の制約が極めて大きい都心部の線路上空に建設されるペDESTリアンデッキを対象に, 提案したハイブリッドFRP桁の実構造物への適用可能性と, 経済性, 施工性を検討したものである. 軽量性を最大限に活かすことができ, 大幅な工期短縮を期待できるとともに, 全体工事費に占める材料費の割合が低く, 材料コストの上昇の影響は小さいと予測されたからである.

\* 工博 首都大学東京 大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境工学専攻 教授

(〒192-0397 八王子市南大沢 1-1) 第2種正会員

\*\* 工博 埼玉大学 大学院 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門 教授 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

\*\*\* 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所 工事管理室 (〒151-8512 東京都渋谷区代々木 2-2-6)

\*\*\*\* 工修 東レ株式会社 コンポジット開発センター (〒791-3193 愛媛県伊予郡松前町大字筒井 1515)

\*\*\*\*\* 東レ株式会社 コンポジット開発センター (〒103-8666 東京都中央区日本橋室町 2-1-1)

## 2. 適用検討の方法と比較対象

検討にあたっては、まず、製作コストが比較的低廉な引き抜き成形材を想定して、ウェブはGFRP、曲げ剛性への寄与が大きい上下フランジはGFRPとCFRPを融合させたI形断面とし、それらの繊維組成を概略的に仮定して、ハイブリッドFRP桁の基本的な材料特性の試算を行った。

次に、その結果に基づき、線路上空を跨ぐペDESTリアンデッキの既設工事例を参照した簡略化モデルを対象として、鋼製主桁をハイブリッドFRP主桁に、PCプレキャスト版を敷並べてコンクリートが場所打ちされたRC床版をGFRP床版にそれぞれ置き替えて試設計を行った。ただし、2方向の主桁と剛結される脚柱としては、衝突・接触等への配慮や、架設時の安全・安定性の面などから、従来と同様に正方形断面の角型鋼管を用いることとした。また、比較のために、参照事例と同様の鋼構造としての試設計も行った。

すなわち、本研究では、同一モデルを対象として、鋼構造、もしくは、鋼とFRPとの複合構造としたペDESTリアンデッキの試設計を同時に行い、主桁断面等を決定して比較するとともに、鋼製の脚柱に及ぼす影響を含め構造特性を把握して、設計の可能性を確かめることとした。さらに、都心部の線路上空に自由通路を建設した際の工費・工期の実績調査結果に基づいて、鋼・FRP複合構造とした場合の大略的な検討を行い、経済性、施工性などを鋼構造の場合と比較して評価した。

## 3. ハイブリッドFRP桁の材料特性の試算

ウェブにはGFRP、曲げ剛性への寄与が大きい上下フランジにはGFRPとCFRPを融合させたハイブリッドFRPを配した、図-1に示すI形断面のハイブリッドFRP桁について、材料特性の試算を行った。ここでは、単純化するために、繊維方向を仮に軸方向(0°)の1方向のみとして試算した。

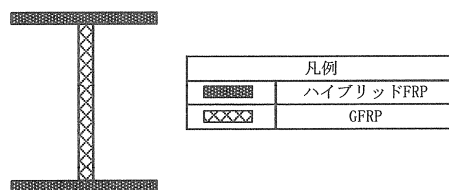


図-1 ハイブリッドFRP桁

製作コストが比較的低廉で、繊維含有率を高くでき、長尺桁の製作も可能な引き抜き成形法を想

定し、繊維含有率は $V_f = 50\%$ とした。この値は、実際には軸直角方向(90°)や45°方向の強化繊維を組み合わせる必要があることに配慮したものである。また、成形時に反りを生じないようにするため、ハイブリッド積層は交互に積層するものとし、ガラス繊維：炭素繊維=1：1の体積比とした。材料一覧を表-1に示す。

表-1 材料一覧

	タイプ	単体体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	フランジ部 V <sub>f</sub>	ウェブ部 V <sub>f</sub>	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
ガラス繊維	E-glass	25	25%	50%	76	2500
炭素繊維	高強度T700S	18	25%	0%	245	3400
樹脂	不飽和ポリエステル	12	50%	50%	4	70

表-2 各部位の基本的材料特性

	単体体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)
フランジ	16.8	82	1510	910
ウェブ	18.5	40	1285	770

このようなハイブリッドFRP桁について、合成断面となるフランジとウェブの部位別に試算<sup>17)</sup>した基本的な材料特性を表-2に示す。なお、一般的にFRPは、強化繊維が座屈または層間剥離することによって、特にCFRPの場合、圧縮強度が引張強度に比べてかなり低くなることが知られている。そこで、表-2では、これまでの低下率の実績50~70%の中間的な値として、両部位ともに、圧縮強度を引張強度の60%とした。

## 4. ペDESTリアンデッキの試設計検討

### 4.1 設計条件と試設計モデル

基本的な材料特性を試算したハイブリッドFRP桁を、既設工事例を参照して、図-2に示すような2線路とホームを跨ぐペDESTリアンデッキの鋼製主桁の代わりに置き換えた場合の適用可能性について、試設計により検討することとした。

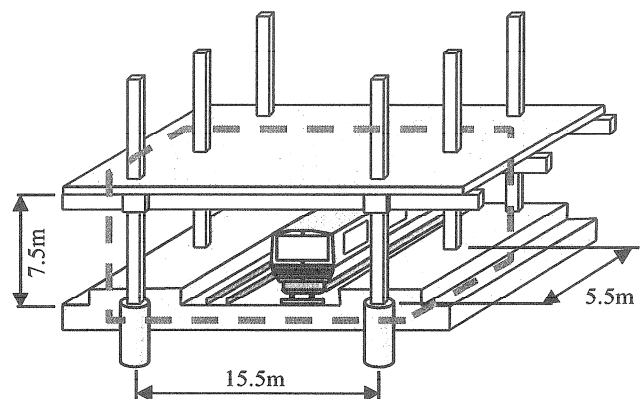


図-2 ペDESTリアンデッキの既設工事例

参照した既設工事例は、線路上空のコンコースに屋根等が設けられた構造で、駅舎の一部として建設され、建築構造物として設計されたものである。しかしながら、跨線橋や、線路上空の自由通路であれば土木構造物とされることが多い一方で、民間工事としては、両者の区別の境界は必ずしも明確ではないようである。

そこで、試設計を単純化し、土木構造物と建築構造物に共通する構造とするために、図-2の破線で囲んだ部分を取り出すとともに、屋根等を除去した簡略化モデルを試設計の対象とした。構造部材である脚柱と2方向の主桁が剛結された図-3に示すような門型ラーメン構造であり、コンコースについては、構造部材とせず、その重量を床版の死荷重として考慮するものとした。

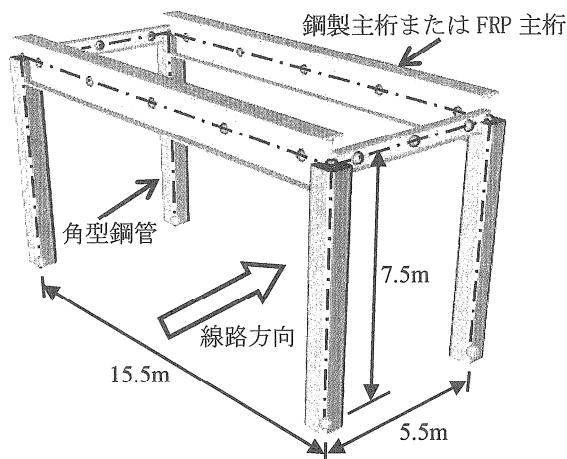


図-3 試設計モデル

試設計条件を整理したものを、表-3に示す。比較の対象となる鋼製主桁 (SM490A), FRP主桁ともにI形断面であり、それらを支える脚柱は、主桁材料に関係なく、従来と同様の正方形断面の角型鋼管 (BCP325, SM490A) による鋼製柱とした。

また、コンコースは、鋼製主桁の場合、参照事例と同様のPCプレキャスト版と場所打ちコンクリートを組み合わせたRC床版とし、FRP主桁の場合は、Duraspan型FRPデッキを用いたFRP床版とした。このDuraspan型は、引き抜き成形によるGFRP製で、道路橋床版用に米国で多用されているものであるが、適用スパンの伸張に対して高さの変化で主に対応し、重量は大きくは変化しないことと、近い将来、歩道橋等に適した軽量床版を開発することを考えて、ここでは、その最軽量タイプの重量を死荷重として準用することとした。

表-3 試設計条件

材料種別	脚柱(柱) : 鋼材, 主桁(梁) : 鋼材もしくはFRP		
構造形式	門型ラーメン構造		
構造部材	脚柱 : 鋼	角型鋼管 (BCP325, SM490A)	
	主桁 : 鋼	SM490A	
	: FRP	ハイブリッド型 (ガラス繊維+炭素繊維)	
床形式	コンコース (床版)	鋼製主桁 : PCプレキャスト版+場所打ちRC FRP主桁 : FRPデッキ (Duraspan型)	
	寸法	歩道幅員	5.5(m)
		跨線スパン	15.5(m)
	高さ	コンコース階	7.5(m)

#### 4.2 設計死・活荷重と水平地震力

設計荷重、および、応力、たわみの許容値については、参照事例に合わせて建築構造物に対する設計基準<sup>18)</sup>に従うものとしたが、土木構造物に対する設計基準<sup>19)</sup>と大きな差異はない。

設計死荷重については、主桁、脚柱の自重によるものに加え、表-4に示すように、コンコース (面積 : 85.25m<sup>2</sup>) の構成材料の重量を積み上げて、それぞれRC床版、FRP床版の死荷重として載荷するものとした。この表から、FRPデッキのPCプレキャスト版に対する重量比は1/3程度、現場打ちコンクリート重量を加えたものに対する比率は1/6程度であり、FRP床版はRC床版に比べて1/2程度に死荷重が軽減されていることが解る。

表-4 床版 (コンコース) 死荷重

階	床版	材料	重量 (N/m <sup>2</sup> )	
コンコース (85.25m <sup>2</sup> )	RC床版	仕上げ (セラタイル+下地)	1,640	
		PCプレキャスト版 t100mm + コンクリート t80mm	3,780	
		付帯工	500	
	小計			5,920
	FRP床版	仕上げ (セラタイル+下地)	1,640	
		FRPデッキ (Duraspan500 H=5.00 <sup>m</sup> )	620	
付帯工		500		
小計			2,760	

表-5 活荷重 (群集荷重)

	活荷重
常時	3,500 (N/mm <sup>2</sup> )
地震時	1,500 (N/mm <sup>2</sup> )

常時、および、地震時の活荷重 (群集荷重) を表-5に示す。設計計算は、図-4に示す3次元骨組構造解析モデルを対象とし、地震時には、図に付記したように、軸方向 (X方向) と線路方向の軸直角方向 (Z方向) との直角2方向に水平地震力を作用させるものとした。まず、設計地震荷重については、式(1)<sup>20)</sup>により算定した。

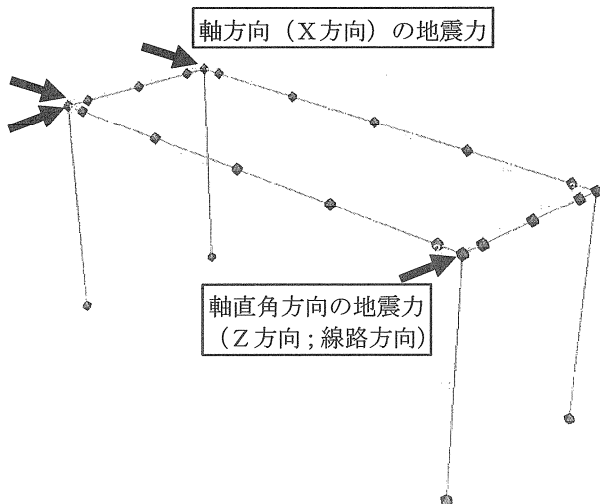


図-4 3次元骨組構造解析モデル

$$\left. \begin{aligned}
 Q_i &= C_i \cdot W_i \\
 C_i &= Z_s \cdot R_i \cdot A_i \cdot C_0 \cdot I \\
 A_i &= 1 + \left\{ \frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} - \alpha_i \right\} \frac{2T}{1+3T} \\
 T &= 0.03 \cdot h \\
 \alpha_i &= \frac{W_i}{W}
 \end{aligned} \right\} (1)$$

上式において、 $Q_i$  (kN) が  $i$  階に生じる層せん断力であり、 $C_i$  は層せん断力係数、 $\alpha_i$  は  $i$  階より上部の構造物重量  $W_i$  (kN) と地上部分の構造物重量  $W$  (kN) の比である。また、 $Z_s$  は地域係数、 $I$  は用途係数、 $C_0$  は標準せん断力係数である。さらに、 $h$  (m) は構造物の高さ、 $T$  (sec) は設計用 1 次固有周期である。

試設計モデルのようにコンコース階のみの場合  $\alpha_i = 1.0$  ( $W_i = W$ ) であり、 $T$  の値に関係なく、 $A_i = 1.0$  となる。また、 $Z_s = 1.0$ 、コンコース階は  $I = 1.0$  で、弾性範囲内の 1 次設計では  $C_0 = 0.2$  であり、 $T = 0.03 \times 7.5 = 0.225 \text{sec}$  が地域種別による周期  $T_c$  (= 0.6sec) を下回った場合、 $R_i = 1.0$  となる。

したがって、地上部の構造物重量  $W$  に 0.2 を乗じた値の 1/2 の外力を、軸方向 (X 方向) と線路方向の軸直角方向 (Z 方向) との直角 2 方向の水平地震力として、図-4 に示したように各脚柱に作用させることとした。試設計モデルの場合、地上部の構造物重量  $W$  は、鋼製主桁または FRP 主桁と鋼製脚柱の自重、および、床版自重と地震時の活荷重を合計した値である。

### 4.3 許容応力度と許容変形量

弾性範囲内の許容応力度設計法によるものとし、許容応力度は表-6 に示す値とした。FRP 主桁については、表-2 に示した圧縮強度、引張強度に対して、材料品質や、環境劣化、クリープなどを考慮した表-7 に示す安全率 4.0 を適用<sup>16)</sup>した。

表-6 許容応力度

	鋼材 <sup>18)</sup>		FRP(主桁)	
	主桁	脚柱	フランジ	ウェブ
圧縮強度 $\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	490	490	910	770
引張強度 $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	490	490	1510	1285
安全率	2.6	2.3	4.0	4.0
許容圧縮応力度 $\sigma_{ca}$ (N/mm <sup>2</sup> )	185	210	230	190
許容引張応力度 $\sigma_{ta}$ (N/mm <sup>2</sup> )	185	210	380	320
許容応力度の地震時増倍係数	1.5	1.5	1.5	1.5

表-7 FRP 主桁の安全率

項目	記号	ハイブリッド	備考
安全率	F	4.0	静的荷重を対象
$F = F_a \times F_b \times F_c \times \dots \times F_z$			
材料品質に関する安全率	F <sub>a</sub>	2.3	
$F_a = F_0 \times L_1 \times L_2 \times \dots \times L_n$			
基本的安全係数	F <sub>0</sub>	1.3	材料の破壊強さが基準
材料特性値の信頼度係数	L <sub>1</sub>	1.1	
用途・重要度係数	L <sub>2</sub>	1.1	公共性があり、社会的影響大
外力荷重の推定不確定係数	L <sub>3</sub>	1.0	
構造計算での精度係数	L <sub>4</sub>	1.2	等方性材料力学で検討
材料特性のばらつき係数	L <sub>5</sub>	1.2	材料試験を行わない場合
成形方法による係数	L <sub>51</sub>	1.0	引抜き成形
成形者の経験年数による係数	L <sub>52</sub>	1.0	機械方式
成形環境の整備状態による係数	L <sub>53</sub>	1.05	空調設備のない工場内
環境劣化に関する安全率	F <sub>b</sub>	1.1	大気中
環境劣化に関する物性保持率	L <sub>6</sub>	0.9	
静的荷重に関する安全率	F <sub>d</sub>	1.6	
クリープ破断に関する物性保持率	L <sub>7</sub>	0.64	

主桁、脚柱の断面決定を行う際の照査項目として、応力の他に、たわみ変形があり、FRP 主桁の場合には支配的となることが表-2 の弾性係数の値から予測された。ここでは、参照事例における変形制限<sup>18)</sup>に従って、表-8 に示す許容量とした。

表-8 許容変形量

		変形制限	許容量	備考
主桁	常時	鉛直たわみ 1/500 以下	31mm	軸方向 (X 方向) 主桁
			11mm	軸直角 (Z 方向) 主桁
脚柱	地震時	水平たわみ 1/200 以下	38mm	脚柱の X, Z 方向の倒れ

#### 4.4 設計結果とその考察

試設計の照査結果の集計表を、常時について表-9に、地震時について表-10にそれぞれ示す。設計をより単純化するために、これらの表から解るよ

うに、線路方向である軸直角方向(Z方向)の主桁は、鋼製、FRP主桁ともに同一断面とした。ただし、床版死荷重は、軸方向(X方向)の長スパンの主桁がすべて担うものとした。

表-9 常時における設計照査

主桁 断面図					
		鋼製主桁		ハイブリッドFRP主桁	
		I-250×250	I-588×300	I-250×250	I-700×300
寸法	H (mm)	250	588	250	700
	B (mm)	250	300	250	300
	b (mm)	9.0	12.0	9.0	13.0
	t (mm)	14.0	20.0	14.0	24.0
断面力	Mmax (kN・m)	1.0	462.4	0.6	304.4
	N (kN)	0.3	92.1	0.1	60.4
材料物性	弾性係数E (N/mm <sup>2</sup> )	200,000	200,000	フランジ 82,000 ウェブ 40,000	フランジ 82,000 ウェブ 40,000
	圧縮強度σ <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	490	490	910	910
	引張強度σ <sub>t</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	490	490	1,510	1,510
	安全率	2.6	2.6	4.0	4.0
	許容応力度の割増係数	1.0	1.0	1.0	1.0
	許容圧縮応力度σ <sub>ca</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	185	185	230	230
	許容引張応力度σ <sub>ta</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	185	185	380	380
				320	320
断面応力	圧縮応力度σ (N/mm <sup>2</sup> )	1.2	125.0	0.7	57.4
	引張応力度σ (N/mm <sup>2</sup> )	1.1	115.0	0.7	52.1
たわみ	判定	OK	OK	OK	OK
	鉛直たわみ量δ (mm)	0.3	29.4	0.2	28.0
	許容たわみ量δ <sub>a</sub> (mm)	11	31	11	31
判定	OK	OK	OK	OK	

脚柱 断面図			
		鋼製主桁の場合	FRP主桁の場合
		550×550×16	500×500×16
寸法	H (mm)	550	500
	B (mm)	550	500
	t (mm)	16.0	16.0
断面力	Mmax (kN・m)	462.4	304.4
	N (kN)	213.8	136.8
材料物性	弾性係数E (N/mm <sup>2</sup> )	200,000	200,000
	圧縮強度σ <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	490	490
	引張強度σ <sub>t</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	490	490
	安全率	2.3	2.3
	許容応力度の割増係数	1.0	1.0
断面応力	許容圧縮応力度σ <sub>ca</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	210	210
	許容引張応力度σ <sub>ta</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	210	210
	圧縮応力度σ (N/mm <sup>2</sup> )	72.7	57.1
たわみ	引張応力度σ (N/mm <sup>2</sup> )	48.1	39.7
	判定	OK	OK
判定	水平たわみ量δ (mm)	0.3	0.2
	許容たわみ量δ <sub>a</sub> (mm)	—	—
判定	—	—	

表-10 地震時における設計照査

主桁 断面図					
		鋼製主桁		ハイブリッドFRP主桁	
		I-250×250	I-588×300	I-250×250	I-700×300
寸法	H (mm)	250	588	250	700
	B (mm)	250	300	250	300
	b (mm)	9.0	12.0	9.0	13.0
	t (mm)	14.0	20.0	14.0	24.0
断面力	Mmax (kN・m)	55.6	466.9	11.8	263.2
	N (kN)	39.6	111.4	23.4	63.6
材料物性	弾性係数E (N/mm <sup>2</sup> )	200,000	200,000	フランジ 82,000 ウェブ 40,000	フランジ 82,000 ウェブ 40,000
	圧縮強度σ <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	490	490	910	910
	引張強度σ <sub>t</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	490	490	1,510	1,510
	安全率	2.6	2.6	4.0	4.0
	許容応力度の割増係数	1.5	1.5	1.5	1.5
	許容圧縮応力度σ <sub>ca</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	278	278	340	340
	許容引張応力度σ <sub>ta</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	278	278	570	570
				480	480
断面応力	圧縮応力度σ (N/mm <sup>2</sup> )	70.1	127.2	16.5	50.1
	引張応力度σ (N/mm <sup>2</sup> )	61.3	115.2	11.3	44.6
たわみ	判定	OK	OK	OK	OK
	鉛直たわみ量δ (mm)	1.3	23.5	1.1	19.3
	許容たわみ量δ <sub>a</sub> (mm)	—	—	—	—
判定	—	—	—	—	

脚柱 断面図			
		鋼製主桁の場合	FRP主桁の場合
		550×550×16	500×500×16
寸法	H (mm)	550	500
	B (mm)	550	500
	t (mm)	16.0	16.0
断面力	Mmax (kN・m)	466.9	263.2
	N (kN)	183.8	101.2
材料物性	弾性係数E (N/mm <sup>2</sup> )	200,000	200,000
	圧縮強度σ <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	490	490
	引張強度σ <sub>t</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	490	490
	安全率	2.3	2.3
	許容応力度の割増係数	1.5	1.5
断面応力	許容圧縮応力度σ <sub>ca</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	315	315
	許容引張応力度σ <sub>ta</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	315	315
	圧縮応力度σ (N/mm <sup>2</sup> )	71.6	48.2
たわみ	引張応力度σ (N/mm <sup>2</sup> )	50.4	35.4
	判定	OK	OK
判定	水平たわみ量δ (mm)	12.8	11.4
	許容たわみ量δ <sub>a</sub> (mm)	38	38
判定	OK	OK	

試設計結果のまとめとして、主桁、および、脚柱の断面寸法と自重を表-11に示す。また、床版、主桁、および、脚柱の総重量と、鋼構造を鋼・FRP複合構造とした場合のその低減率を表-12に示す。

表-11 主桁、脚柱の断面寸法と自重

部材	断面寸法	断面積 (㎡)	自重 (kN/m)	備考
鋼製主桁	I-588×300×12×20	0.01857	1.430	軸方向 (X方向)
	I-250×250×9×14	0.00900	0.693	軸直角 (Z方向)
FRP主桁	I-700×300×13×24	0.02288	0.399	軸方向 (X方向)
	I-250×250×9×14	0.00900	0.155	軸直角 (Z方向)
鋼製脚柱	□550×550×t16	0.03418	2.632	鋼製主桁+RC床版
	□500×500×t16	0.03098	2.385	FRP主桁+FRP床版

表-12 床版、主桁、脚柱の総重量と低減率

	鋼構造	鋼・FRP複合構造	低減率
床版	RC床版: 504.7 (kN)	FRP床版: 235.3 (kN)	-53%
	PC版: 179.0kN)	(FRPデッキ: 52.9kN)	(-70%)
主桁	鋼製(軸方向): 44.3 (kN)	FRP(軸方向): 12.4 (kN)	-72%
	鋼製(軸直角): 7.6 (kN)	FRP(軸直角): 1.7 (kN)	-78%
脚柱	79.0 (kN)	71.6 (kN)	-9%

これらの表に一部を示した試設計結果から、ハイブリッドFRP主桁のペデストリアンデッキへの適用可能性、および、その構造特性について、次のようなことなどがいえた。

すなわち、まず、FRP主桁を適用した鋼・FRP複合構造とし、FRP床版を用いたことにより、従来の鋼製主桁による鋼構造にRC床版を用いた場合に比べて大幅な軽量化が図られ、脚柱への負担もかなり軽減されることが確かめられた。

また、線路を跨ぐ軸方向の長スパンの主桁では、鋼製主桁の場合はその常時の応力によって、FRP主桁の場合はその常時の鉛直たわみによって、それぞれ断面が決定されたが、想定した引き抜き成形が可能な断面の範囲内に収めることができた。

さらに、鋼製脚柱は、鋼製主桁、FRP主桁の場合ともに、その地震時の水平たわみ(倒れ)によって断面が決定され、軸直角方向の短スパンの主桁剛性の差異もその断面決定を左右したが、FRP主桁の方が脚柱の断面を小さくできた。

したがって、ハイブリッドFRP桁を主桁とするペデストリアンデッキが、経済性の面からも効率良くたわみ変形量を低減でき、十分に設計できる

ことが明らかになったとともに、その超軽量性を最大限に活かすことができれば、それによる工費縮減と大幅な工期短縮により、材料コストの大きな上昇を上回る効果が得られることを推測できた。

## 5. 線路上空自由通路の工費・工期の検討

試設計で確かめた超軽量性を最大限に活かせる可能性の高い、線路上空自由通路として都心部に建設されたペデストリアンデッキの工費・工期の実績調査結果に基づき、鋼・FRP複合構造とした場合の検討を大略的に行って、経済性、施工性などを従来の鋼構造の場合と比較した。

線路上空に比較的規模の大きい人工地盤や、自由通路等を建設する場合、特に都心部においては、以下の理由により、現状では、工事費が非常に大きなものとなっている。

- ・既設の鉄道施設(ホーム屋根やトロリー線など)の撤去、改修に膨大な時間と労力を要する。
- ・材料の搬出入や、部材架設が、夜間の電車が走らない時間に制約されるため、1日の実作業時間は2時間30分~3時間30分程度と非常に短い。
- ・貨物列車が走行する線路近辺や上空では、上記の作業時間帯も毎日確保できるものではなく、1週間に3日程度しか確保できない。

図-5に、そのような状況で線路上空自由通路を新設した際の1㎡あたりの実績工事費の内訳を示す。

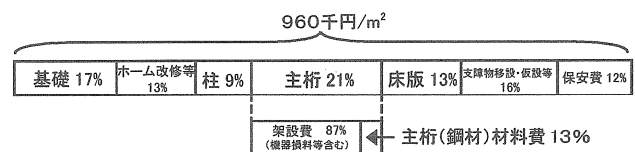


図-5 線路上空自由通路新設工事の工費の実績例

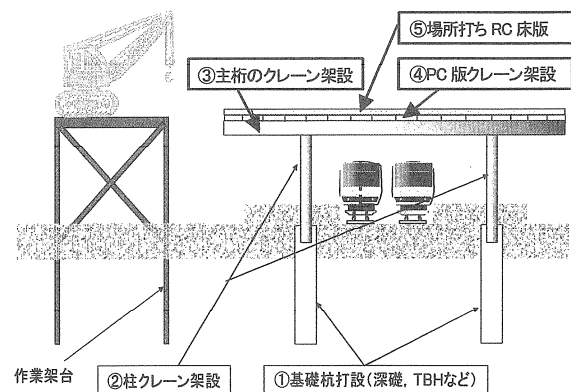
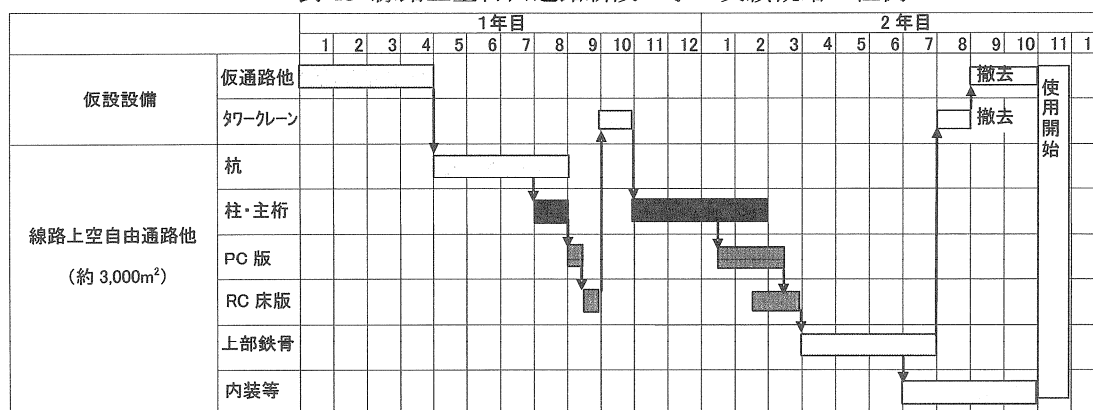


図-6 線路上空自由通路新設工事の施工順序

表-13 線路上空自由通路新設工事の実績概略工程例



工事は、図-6 に示すように、基礎杭をホーム下に打設後、鋼製脚柱（柱）、鋼製主桁、床版のPCプレキャスト版をクレーン架設し、敷き並べられたPC版の上にコンクリートを場所打ちしてRC床版とするものである。これらの工事を、営業運転に使用中の諸設備の移設・復旧等を行いつつ、ほとんどすべての作業を夜間作業で行っている。

図-5 に示した全体工事費の内訳から、主桁関連の工事費の割合は約 21%で、機器損料等を含む架設費を除いた主桁（鋼材）材料費は、その約 13%であり、全体工事費に占める割合としては僅か3%程度でしかないことが解る。また、床版関連の工事費は全体工事費の約 13%であり、その材料費の占める割合はより小さいと考えられる。

したがって、全体工事費の約 17%を占める基礎の簡素化や、その約 9%を占める脚柱の断面減なども考え合わせれば、FRP 主桁、FRP 床版を用いたことにより、それらの材料コストがかなり上昇したとしても、総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あまり大きくなく、超軽量化に伴って工期を大幅に短縮できることになれば、全体としてはむしろ、コストダウンを望める可能性も十分にあるといえた。

表-13 に、同様の条件で都心部の線路上空に自由通路を新設した際の実績概略工程を示す。

この表から解るように、脚柱（柱）、および、主桁の工事がクリティカルになる期間は約 2.5 ヶ月であり、表-12 に示したように、FRP 主桁の総重量が鋼製主桁に比べ 70%以上低減され、鋼製脚柱の総重量も約 9%低減されることを考えれば、大幅な工期短縮を予測できる。杭の工事がクリティカルな期間も約 3.0 ヶ月あり、基礎の簡素化による工期短縮も期待できる。

また、(PC版+RC)床版の工事がクリティカルになる期間は約 2.0 ヶ月であり、そのうち場所打ちコンクリートにより RC 床版とする工事がクリティカルになる期間の約 1.0 ヶ月は、FRP 床版とすることにより完全に不要となる。残る約 1.0 ヶ月のクリティカルな期間も、表-12 に示したように、FRP デッキの総重量が PC 版に比べ約 70%低減されることを考えれば、FRP 主桁の場合と同様に大幅な工期短縮を予測できる。

これらのことから、FRP 主桁を適用して鋼・FRP 複合構造とし、FRP 床版を用いることにより、RC 床版を用いた従来の鋼構造の場合の約 22 ヶ月の全体工期を、主桁、床版関連工事のみで少なくとも 10%（約 2.2 ヶ月）以上は短縮でき、杭の工期期間の短縮なども考え合わせれば、総材料費の増加を十分に上回る工費縮減の可能性は高いといえた。さらに、FRP 床版と FRP 主桁を一体化した適切な架設ユニットを開発でき、容易にクレーン架設することが可能になれば、より大幅な工期短縮と工費縮減を期待できることも明らかであった。

## 6. 結 言

線路上空を跨ぐペデストリアンデッキの既設工事例を参照した試設計の結果、たわみ変形量によって FRP 主桁の断面が決定されたが、想定した引き抜き成形が可能な断面の範囲内に収めることができ、たわみ剛性を効率よく経済的に高められるハイブリッド FRP 桁の適用は極めて合理的であることが解った。その結果、FRP 主桁を適用して鋼・FRP 複合構造とし、FRP 床版を用いることによって、RC 床版を用いた従来の鋼構造の場合に比べ超軽量化を図ることができる設計が十分可能であり、鋼製とした脚柱の断面減や、基礎の簡素化な

ども期待できることが確かめられた。

この超軽量性を最大限に活かせる可能性の高い、作業時間が週数日程度の夜間の極めて短い時間帯に限定される都心部の線路上空自由通路として建設されたペDESTリアンデッキの工費の実績調査結果に基づく検討結果からは、材料費の占める割合は極めて小さく、基礎の簡素化、脚柱の断面減なども考え合わせれば、FRP 主桁、FRP 床版を用いたことにより、それらの材料コストがかなり上昇したとしても、総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あまり大きくないことが確かめられた。

また、同様の条件のペDESTリアンデッキの工期の実績調査結果に基づく検討結果からは、超軽量化に伴う施工性の向上や、基礎の簡素化、床版工事における場所打ちコンクリート工の不要化などによって、工期を大幅に短縮でき、総材料費の増加を十分に上回る工費縮減の可能性、すなわち、全体工事費をコストダウンできる可能性も高いといえた。さらに、FRP 床版と FRP 主桁を一体化した適切な架設ユニットを開発できれば、より大幅な工期短縮を期待でき、経済性、施工性に及ぼす効果は極めて大きいといえた。

ゆえに、振動使用性を含む設計法の確立、および、歩道橋等に適した FRP 床版の開発、さらには、適切な接合方法、架設ユニット、架設機材の開発など、今後に残された課題は少なくないが、ハイブリッド FRP 主桁によるペDESTリアンデッキの実現可能性は高いといえよう。特に大幅な工期短縮の可能性は、鉄道事業者や関係自治体等のみならず、周辺住民、駅の利用者もしくは乗客らにとっても、大きなメリットになるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) J.L. Clarke : Structural Design of Polymer Composites – EUROCOMP Design Code and Handbook, European Structural Polymer Composites Group, E & FN SPON, 1996.
- 2) 建設省土木研究所: 繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書 (I) – 一次構造材料としての FRP の適用事例調査一, 共同研究報告書第 210 号, 1998.
- 3) T. Keller, et al. : Advanced Materials, Structural Engineering International, IABSE, Vol.9, No.4, pp.250-301, 1999.
- 4) 建設省土木研究所: 繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書 (II), 共同研究報告書第 252 号, 2000.
- 5) 明嵐政司, 西崎到, 木嶋健, 佐々木巖: 繊維強化プラスチックの橋梁への適用事例に関する研究, FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.13-18, 2001.
- 6) T. Keller, et al. : Advanced Materials, Structural Engineering International, IABSE, Vol.12, No.2, pp.66-116, 2002.
- 7) T. Keller : Use of Fiber Reinforced Polymers in Bridge Construction, Structural Engineering Documents 7, IABSE, 2003.
- 8) 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.
- 9) 独立行政法人土木研究所: 新材料の土木構造物への適用に関する研究, 土木研究所資料第 3888 号, 2004.
- 10) 独立行政法人土木研究所: FRP を用いた橋梁の設計技術に関する強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書 (I) – ビルトアップ法による FRP 歩道橋設計に関する検討一, 共同研究報告書第 324 号, 2005.
- 11) 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.
- 12) Xian Cui, K. Maeda, H. Namamura, N. Kitayama and T. Watanabe : Structural Characteristics of Pedestrian Slab Bridge Using Pultrusion Profiles, Proc. of International Colloquium on Application of FRP to Bridges / 2nd Symposium on FRP Bridges, JSCE, pp.125-130, 2006.
- 13) 上林正和, 西崎 到, 武内幸生, 渡邊哲也, 平山紀夫, 宮永直弘: FRP 歩道橋の主桁部材設計法に関する研究, 第 2 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.131-137, 2006.
- 14) 平山紀夫, 宮永直弘, 渡邊哲也, 上林正和, 西崎 到: ビルトアップ FRP 橋梁主桁の構造設計と FEM 解析, 第 2 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.139-142, 2006.
- 15) 北山暢彦, 佐伯彰一, 山城和雄: 沖縄ロードパーク歩道橋の設計, 土木学会 FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集, pp.103-106, 2001.
- 16) 土木学会: 先進複合材料の社会基盤施設への適用 / [資料] 米国 FRP 橋梁調査, 複合構造レポート 01, 丸善, pp.188-195, 2007.
- 17) 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.
- 18) 鉄道建築協会: 線路上空建築物 (低層) 構造設計標準, 2002.
- 19) 東日本旅客鉄道株式会社: 乗換こ線橋設計の手引き (平成 4 年 10 月), 1992.
- 20) 国土交通省: 建築基準法 (告示昭 55 建告代 1793 号第 3), 1980.