

ハイブリッド FRP 桁斜張橋の構造特性と使用性に関する研究

大成建設 正会員 渡辺貴之
 首都大学東京 正会員 中村一史・フェロー 前田研一
 埼玉大学 フェロー 睦好宏史
 東レ 正会員 松井孝洋・正会員 鈴木研二
 東日本旅客鉄道 正会員 吉田 一・正会員 柳沼謙一

1. はじめに

近年, LCC を考慮した経済性や施工の省力化をはじめ, 既設構造物の合理的な維持管理や再構築などが求められる中, 繊維強化プラスチック (FRP) を中心とした先進複合材料の適用が検討されている. しかし, FRP 構造物の設計では, たわみが断面設計の上で支配的になることが課題とされている. そこで, 開発されたハイブリッド FRP(以下 HFRP)桁の橋梁構造への適用可能性を明らかにするために, 架設の制約条件が厳しい建設現場の一例である, 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, HFRP 桁を用いた斜張橋形式を提案し, その構造特性と使用性を検討した.

2. 設計条件と試設計

検討対象とした線路上空自由通路の一般図を図-1 に示す. 図-1(a) は, 既設鋼橋の一例であり, 上部構造は鋼 I 形断面の 3 主桁, PC 床版および壁, 屋根で構成されている. 支間割は幹線鉄道では複数の路線を跨ぐことが多く, 長支間化や支間割の多様性も要求されている. そこで, HFRP 桁を跨線橋へ適用するにあたり, 長支間化を図りつつ, たわみ剛性の不足を補うために, 斜張橋形式を採用した. 検討にあたり, 主径間, 側径間を 2 段ケーブルとし, P2 橋脚を取り除いた線路内作業を伴わない構造諸元で試設計を行った.

さらに, 上部構造で大きな重量を占める構成部材を再検討し, 軽量化を試みた. 図-2 に示すように, 上部構造を, 鋼, コンクリート構造から FRP と鋼の複合構造としたモデル(舗装検討案 A)でも大幅に重量が低減されるが, 舗装には軽量化の余地があると考えられ, 舗装厚を半分としたモデル(舗装検討案 B)および既設の FRP 歩道橋を参考に, ゴム舗装としたモデル(舗装検討案 C)での検討を行った. これらの見直しにより, 上部構造だけで 71~81%の死荷重の低減が可能となった. このような上部構造の軽量化は, クレーンを用いた一括架設による工期短縮や, 設計照査における振動使用性の確保に効果的であると考えられる. なお, 斜張橋検討案の死活荷重比 (D/L) は 1.1~1.7 であった.

HFRP 桁の積層設計については, 表-1 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. 桁の断面寸法は, 長支間化により, たわみが増大すると予想されることから, 国内最大の引き抜き成形材である $600 \times 300\text{mm}$ とし, 図-3 に示すように 2 主桁で検討を行った. その他, 斜張橋を構成する塔, ケーブル定着部を含む横桁構造, 支点部の横桁およびケーブルについては鋼製とした. 活荷重に対する主桁の鉛直たわみが支間長の $1/500$ 以下¹⁾となるように, ケーブル断面積を調整することで試設計を行った. 表-2 に, 主要部材の断面諸元を示す.

設計条件に基づき立体骨組構造でモデル化し, 固定荷重解析, 固有振動解析, モード法による線形時刻歴応答解析を実施し, たわみ, 断面力, 振動使用性の照査を行った. また, せん断変形による付加たわみを考慮した解析法 (Timoshenko 梁理論, 以下, Timo.Th.) を適用し, 主桁の鉛直変位を厳密に算出し, その影響を考慮しない場合 (Bernulli-Euler 梁理論, 以下, B-E.Th.) も比較検討した.

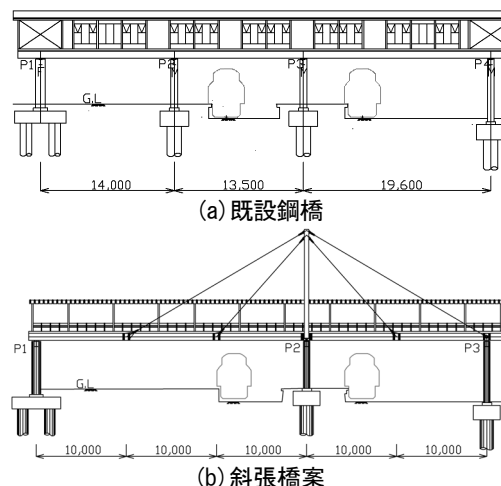


図-1 線路上空自由通路の一般図

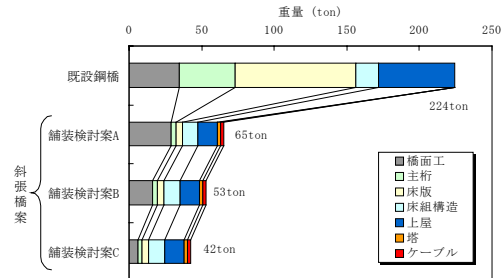


図-2 上部構造重量の比較

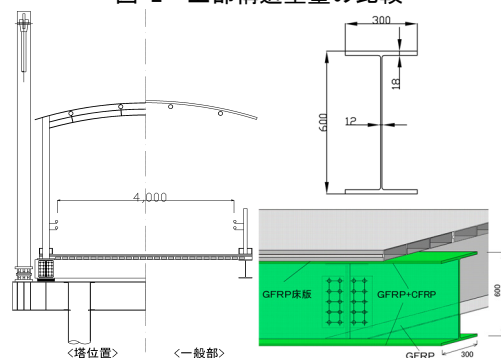


図-3 斜張橋案の断面図

表-1 HFRP 桁の積層構成

部位	繊維の種類, 方向別の体積比率				弾性率 E (GPa)	せん断 弾性率 G (GPa)
	CF Tow 0°	GF Rov. 0/90°	GF Rov. $\pm 45^\circ$	GF Mat		
フランジ	52%	10%	13%	25%	65.7	9.0
ウェブ	-	32%	42%	25%	15.7	9.0

表-2 主要部材の断面諸元

部材	A(m ²)	I _{in} (m ⁴)	E(GPa)	G(GPa)	
主桁	HFRP	1.76E-02	1.09E-03	57.5	9.0
横桁	一般部(GFRP)	1.76E-02	1.09E-03	25	4.5
	定着部(鋼)	3.11E-02	1.45E-03	200	77
	塔(鋼)	1.19E-02	4.82E-04	200	77
ケーブル(鋼)	1.68E-03	-	200	-	

Key Words : ハイブリッド FRP 桁, 斜張橋, 線路上空自由通路, 試設計, 振動使用性

連絡先 : 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL. 042-677-1111 内線 (4564) FAX. 042-677-2772

3. 照査の結果と考察

3.1 たわみの照査

図-4 に、たわみが最大となる主径間に活荷重を全載したケース(L1)および舗装検討案 A の死荷重(D+PS)時について、主桁の鉛直変位を示す。ケーブル定着点における死荷重時の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、定着点でのたわみはほとんど生じていない。所要の断面積を有するケーブルを適用すればたわみ制限を満足すること、また、せん断変形による付加たわみの影響も小さいことが解った。

3.2 設計断面力と断面耐力の比較

既往の材料試験結果²⁾を参考に、材料強度から軸力(圧縮)と曲げモーメントの限界値(N_u , M_u)を算出し、死活荷重時における設計断面力(N , M)との比率を求めた。なお、評価式は $N/N_u + M/M_u$ とし、部分係数等は考慮しないものとした。図-5 に、死荷重と全載した活荷重の載荷時について、断面力が最も大きくなる舗装検討案 A で比較した結果を示す。図より、断面耐力に対する設計断面力の比率は小さく 0.20 となり、断面耐力に対して余裕のあることが解った。

3.3 振動使用性の照査

a) 固有振動特性

図-6 に示した固有振動解析結果より、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 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、せん断変形に伴う曲げ剛性の低下による振動数の低下は僅かであることも解った。

b) 動的荷重による振動特性

応答加速度の恕限度を $0.1G(0.98m/s^2)$ とし³⁾、加振力 $f(t)$ を $f(t) = \alpha W \sin \omega t$ で与えて、対称 1 次振動モードの最大振幅点で加振した。衝撃力比 α を 0.4 とし、一人当たりの自重 W を 70kg とし、1 人および 5 人について検討を行った。また、減衰定数については、既設の GFRP 歩道橋を参考に、 $h=0.03$, 0.015 と設定し、比較のために、 $h=0.0075$ と仮定した場合も検討した。定加振解析による共振曲線(舗装検討案 C)を図-7、上部構造重量に対する最大応答加速度を図-8 に示す。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る傾向にあった。また、全ての減衰定数で固有振動数 1.5~2.3Hz における通常の歩行時では、応答加速度は十分小さいことが解った。しかしながら、死荷重の低減により応答値は大きくなる傾向にあり、共振時では 1 人の場合で、 $h=0.03$, 0.015 のみ恕限度を満足する結果となった。以上より、減衰定数が小さく、ジョギング走行時に共振し、使用性を満足しない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。

4. まとめ

HFRP 桁斜張橋の概略的な試設計を行った結果、斜張橋形式とすることで、長支間化した場合でも使用性を満足できたことから、ハイブリッド FRP 桁の適用性は十分にあるといえた。また、振動使用性の照査から、通常歩行時は十分に使用性を満足でき、ジョギング走行時の場合でも GFRP と同等の減衰定数を確保できれば、恕限度を満足することが解った。

参考文献

- (財)鉄道総合技術研究所：乗換跨線橋設計指針，pp.8-9，1987。
- 白木健亮，陸好宏史，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，CS2，2008.9
- 松本嘉司，佐藤秀一，西岡隆，塩尻弘雄：歩行者の特性を考慮した歩道橋の動的設計に関する研究，土木学会論文報告集 205 号，pp.63-70，1972.9

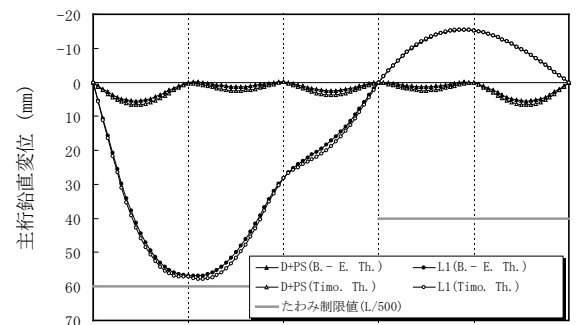


図-4 死・活荷重時の鉛直たわみ分布

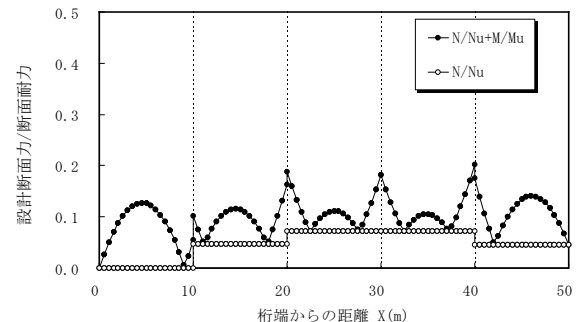


図-5 設計断面力と断面耐力の比較

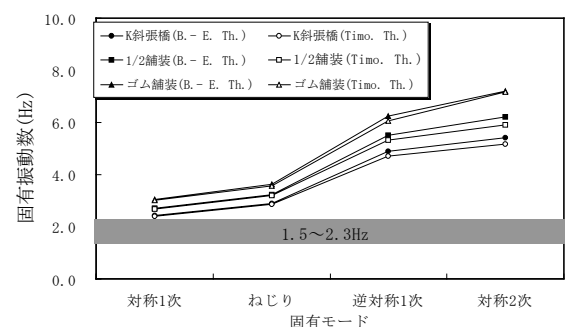


図-6 固有モードと固有振動数

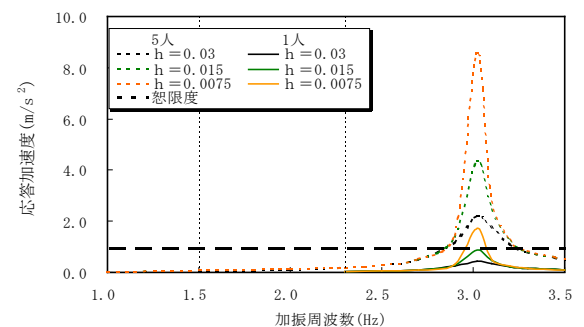


図-7 舗装検討案 C における加速度共振曲線

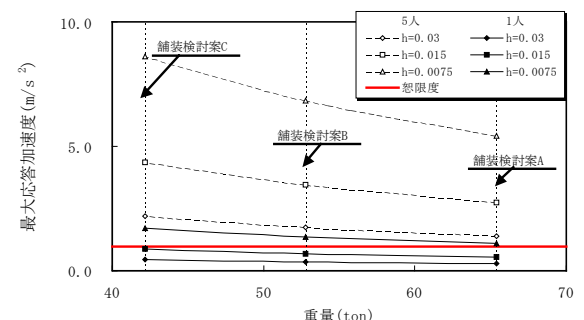


図-8 上部構造重量に対する最大応答加速度