

GFRP引き抜き成形材を用いた歩道橋の開発と使用性

Serviceability of Pedestrian Bridges Developed Using GFRP Pultrusion Members

前田研一*, 北山暢彦**, 中村一史***, 林耕四郎****, 梶川康男*****

Ken-ichi Maeda, Nobuhiko Kitayama, Hitoshi Nakamura, Koshiro Hayashi, Yasuo Kajikawa

* 工博, 東京都立大学大学院教授, 工学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

** 石川島播磨重工業(株), 橋梁事業部基本計画部 (〒135-8731 東京都江東区豊洲 2-1-1)

*** 工修, 東京都立大学大学院助手, 工学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

**** 旭硝子マテックス(株), C & A事業部主席技師 (〒229-1112 神奈川県相模原市宮下 1-2-27)

***** 工博, 金沢大学大学院教授, 自然科学研究科 (〒920-8667 石川県金沢市小立野 2-40-20)

This study examined the serviceability of single span pedestrian bridges with different span length and effective width, developed using pultrusion members of GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) as new structural materials. Application of fixed end support condition that it can largely reduce the deflection in comparison with the simple support condition was proposed, and the difference of both support conditions was also compared and was examined. The reason was that the material bending rigidity was low, and the cross section was decided in the allowable deflection. Moreover, not only the natural frequency but also the dynamic response by a simple method were supposed to examine the vibration serviceability, because the material specific gravity was small, and the mass also became small.

Key Words : GFRP, pultrusion member, pedestrian bridges, allowable deflection, vibration serviceability

キーワード: ガラス繊維強化プラスチック, 引き抜き成形材, 歩道橋, たわみ制限, 振動使用性

1. 緒 論

近年, 土木構造物における架設作業および維持管理などの合理化の重要性が指摘されるなか, 繊維強化プラスチック (FRP) が新素材として注目されるようになり, これを一次構造材料に適用した FRP 製の歩道橋, 道路橋の研究開発が, 国内外で精力的に進められている^{1) - 5)}.

なかでも, ガラス繊維強化プラスチック (Glass Fiber Reinforced Plastics ; GFRP) 製の歩道橋は, 世界各国で着実に実績を積みつつある. 切断・孔空けが容易で加工性が良いだけでなく, 比重が 2.0 以下と超軽量なことから作業性にも優れ, 架設時には従来の機材に比べ小規模なもので十分対応でき, 急速施工が可能である. さらに, 紫外線等による表面劣化を防護するためのゲルコートと呼ばれる被覆層を必要とするものの, 塩害など環境面で極めて不利な地域への適応性に優れ, 維持管理性も高い.

2000 年 3 月, 我が国においても, 最初の GFRP 製の実橋として, 伊計平良川線ロードパーク連絡歩道橋 (2 径間連続鉋桁橋形式; 支間割 19.7+17.2m, 有効幅員 3.5m) が沖縄県に竣工した^{6), 7)}. しかしながら, 塩害対策として採用されたものではあるものの, 主桁にハンドレイアップ材を用いたこともあり, ライフサイクルコストで評価してもなお, 経済性の点で課題が残された.

その結果, 材料コストの面からは, 人件費や型枠費の比率が高いハンドレイアップ材に比べて, 主桁部材の製作コストを大幅に削減できる可能性のある GFRP 引き抜き成形材の適用の検討が急務とされた. これは, 引き抜き成形材の生産技術が飛躍的に向上して, 大型断面材を製造できるようになっており, 歩道橋のレベルであれば, 主桁部材に用いることも十分に可能になってきたからである.

さらに, GFRP 製主桁の曲げ弾性率の値は, 引き抜き成形材によればハンドレイアップ材に比べ多少大きくなるものの, GFRP 鋼材に比べればかなり小さいことから, 使用性の指標であるたわみ制限で断面が決定される可能性が高く, たわみの低減が経済性を大きく向上させることが予測された. また, この歩道橋のたわみ制限は, 変形や振動が利用者に不安感, 不快感を及ぼさないようにするために静的に照査するものであり, 振動が及ぼす影響を動的に照査することによれば, 制限値を緩和できる.

本研究は, このような観点から, GFRP 引き抜き成形材を用いて, 鉋桁橋形式, および, 床版橋形式の 2 形式の単径間歩道橋を開発し, 単純支持条件に比べ, たわみを大きく低減できる両端固定支持条件の適用も提案することを目的としたものである.

そのため, 試設計結果に基づいて, これら 2 形式の実現性を検討するとともに, 両支持条件の差異についても比較

することとした。また、長支間化を目的とした床版橋形式については、有効幅員および断面構成を変えて適用可能支間長を探ることとした。

さらに、変形や振動に対する使用性に関しては、試設計時におけるたわみ制限による静的な照査に加え、たわみの制限値を変えて、動的な照査、すなわち振動使用性に対する照査も行うこととし、材料の比重が小さく、質量も小さくなることを考慮して、たわみ振動数のみならず、簡易計算法による動的応答値によっても評価するものとした。

2. 鋸桁橋形式 GFRP 歩道橋の開発と試設計

2.1 設計条件と材料特性

現在の引き抜き成形技術によって製造可能な部材断面の最大断面積は $2 \times 10^2 \text{ cm}^2$ 程度とされており、本章では、その範囲内の断面構成で、既に市販されている既製品を含め、GFRP 引き抜き成形材を用いた鋸桁橋形式歩道橋の開発の可否を確かめるために、次のように試設計を行って検討することとした。

設計条件は、単径間で、主桁長 10.8m、有効幅員 1.5m とし、モルタル舗装を除く全ての部材に GFRP 引き抜き成形材を用いて、それらの主要な材料特性を表-1 に示す値とした。抵抗断面は主桁断面のみとし、床版、地覆、高欄、

および、舗装の死荷重 (Bridge) はそれぞれ、 0.417 kN/m 、 0.126 kN/m 、 0.560 kN/m 、および、 1.202 kN/m とした。また、設計基準には「立体横断施設技術基準・解説 (昭和 54 年版⁸⁾)」を適用して、活荷重は 3.5 kN/m^2 、温度変化は $\pm 30^\circ \text{C}$ とし、使用性を確保するための静的なたわみの制限値、および、回避すべきたわみ振動数の帯域はそれぞれ、 $L/600$ (L : 支間長)、および、 $1.5 \sim 2.3 \text{ Hz}$ とした。

主桁両端の支持条件としては、単純支持条件のみならず、両端固定支持条件も対象とすることとし、合理的な固定支持構造についても検討することとした。これは、表-1 に示した梁試験結果に基づく曲げ弾性率の値が鋼材に比べてかなり小さく、許容応力度ではなく、たわみ制限によって主桁断面が決定される可能性が高かったことから、活荷重に対するたわみを低減することを図ったものである。なお、静的な断面力や、たわみ量、および、たわみ振動数の算出は、概略設計でもあり、梁公式によるものとした。

2.2 試設計結果とその照査

試設計結果として、単純支持条件、および、両端固定支持条件の場合の側面図、断面図をそれぞれ、図-1、図-2 に示す。また、図-3 は、床版の断面詳細図であり、前述の 2 径間連続鋸桁橋形式 GFRP 歩道橋の実橋 (伊計平良川線ロードパーク連絡歩道橋) で用いられた実績がある中空パネ

表-1 GFRP 引き抜き成形材の材料特性と製造可能断面積

	曲げ弾性率 (GPa)	曲げ強度 (MPa)	せん断強度 (MPa)	比重	線膨張係数 ($1/^\circ \text{C}$)	製造可能断面積 (cm^2)
主桁、端横桁	30	260	100	1.9	1.0×10^{-5}	2×10^2
床版、地覆、高欄	—	—	—	1.6	0.7×10^{-5}	2×10^2

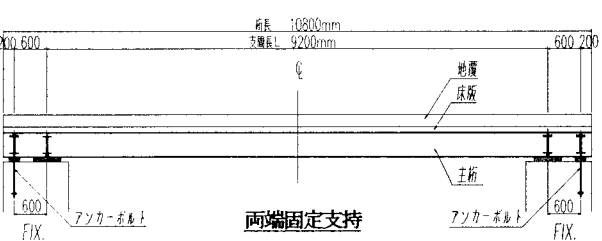
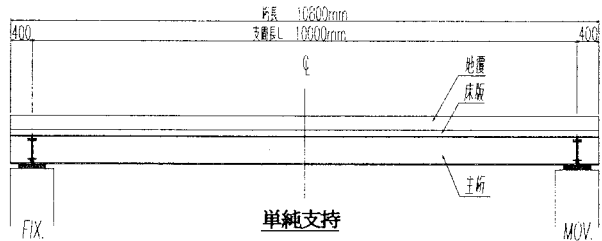


図-1 試設計結果 (側面図)

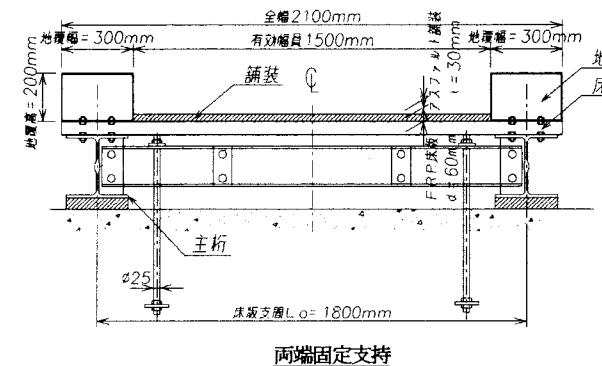
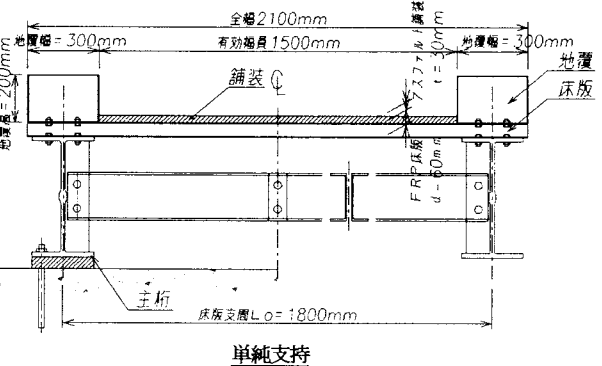


図-2 試設計結果 (断面図)

断面積： $A=183\text{cm}^2$
 断面2次モーメント： $I=69373\text{cm}^4$
 重量： $W=3.68\text{kN/本}$

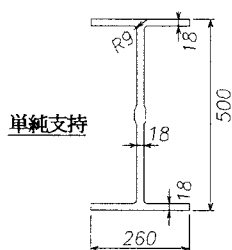


図-4 主桁断面詳細

断面積： $A=99\text{cm}^2$
 断面2次モーメント： $I=10917\text{cm}^4$
 重量： $W=2.00\text{kN/本}$

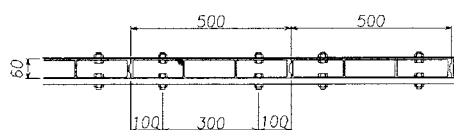
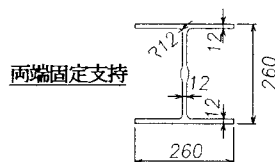


図-3 床版断面詳細 (側面図)

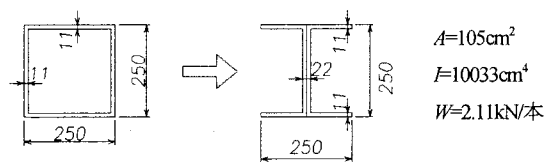


図-5 既製品による主桁断面詳細 (両端固定支持)

表-2 照査結果と部材重量・総重量

	製作 キャンバー (mm)	最大 たわみ (mm)	最大 応力度 (MPa)	たわみ 振動数 (Hz)	GFRP 重量 (kN/Bridge)			総重量 (kN/ Bridge)
					主桁, 端横桁	床版	地覆, 高 欄	
単純支持	9.4	16.4	18.6	5.8	7.9	4.5	7.4	32.7
両端固定支持	7.6	15.0	34.1	6.5	4.2	4.5	7.4	29.0
(既製品)	8.4	16.3	35.7	6.2	4.6	4.5	7.4	29.4

ル材 (500×60×4.0×5.0mm) である。

両支持条件の主桁の断面詳細図は、図-4 に示すようであり、単純支持条件の場合でも製造可能な部材の最大断面積を下回っているが、ともに製造実績の未だない I 形材である。ただし、両端固定支持条件の場合には、図-5 に示すように形状は異なるものの、同程度の断面性能を有する中空角形材が、既製品として市販されている。したがって、例えば、図のように加工することにより、現状においても即応できる。

これら 3 ケースの試設計の照査結果と、各部材の重量・総重量などを表-2 に示す。曲げ強度に対する最大応力の安全率はかなり大きく、たわみ制限によって主桁断面が決定されていることが確かめられるとともに、回避すべきたわみ振動数の帯域を大きく外れていることも解る。また、所要の製作キャンバーは小さく、舗装形状で容易に吸収でき、より軽量の舗装材料を用いれば、さらに軽減できる。なお、具体的な照査結果は省略するが、両端固定支持条件

の場合、図-2 に示したようにφ25 のアンカーボルトを使用した結果、SS400 相当の強度のものでよく、合理的な固定支持構造となることも確かめられている。

3. 床版橋形式 GFRP 歩道橋の開発と試設計

3.1 設計条件と材料特性

前章の鈹桁橋形式歩道橋に関する検討の結果、適用範囲の拡大を求めて、長支間化を経済的に図るためには、床版断面も抵抗断面に加えることが必須条件といえた。

そこで、本章では、市販されている GFRP 引き抜き成形材の既製品から、梁背が最も高い I 形材 (300×150×14.0×10.0mm) と、最大断面のシート材 (1000×4.0mm) を選び、等間隔に並べられた I 形材の上面、下面に Deck Plate, Bottom Plate として数層のシート材を配置した断面構成の床版橋形式歩道橋を考え、次のように試設計を行って適用可能な支間長を検討することとした。

表-3 GFRP 引き抜き成形材の材料特性

	曲げ弾性率 (GPa)	曲げ強度 (MPa)	せん断強度 (MPa)	比重	線膨張係数 (/°C)
主桁・床版	30	260	100	1.9	1.0×10^{-5}
地覆, 高欄	—	—	—	1.6	0.7×10^{-5}

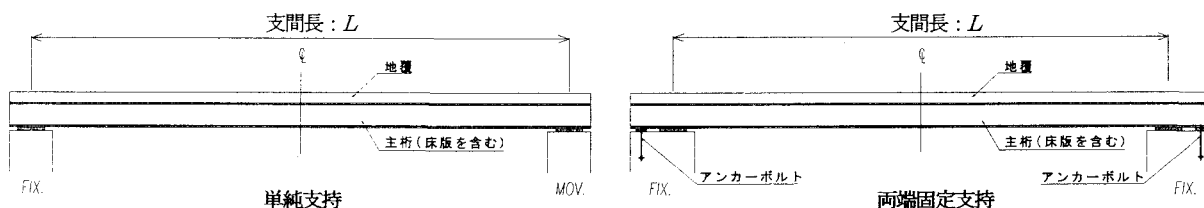


図-6 両端支持条件と支間長

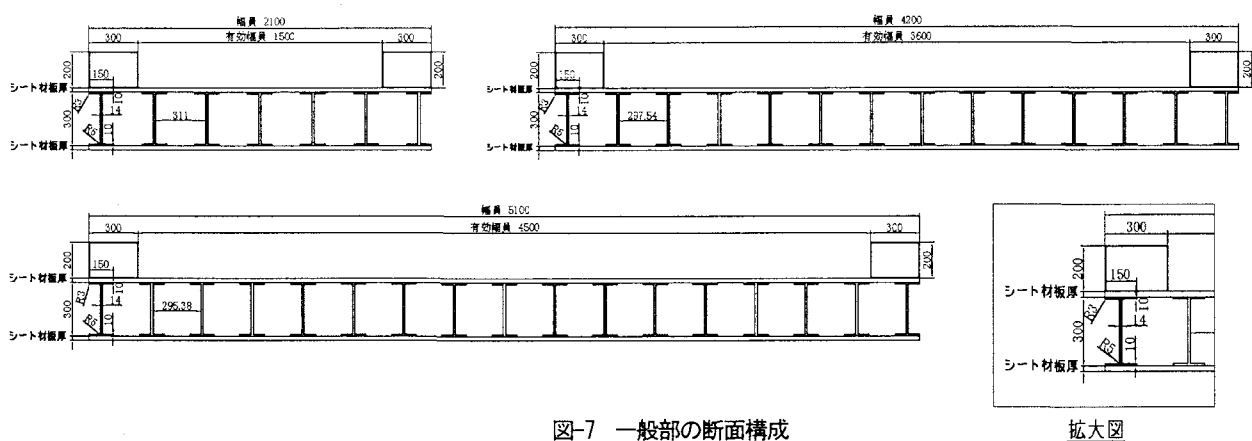


表-4 I 形材の本数、シート材の層数と適用可能支間長

有効幅員 (m)	支持条件	I 形材数 (本)	適用可能支間長 (m)					
			4mm×2 層×2 面	4mm×3 層×2 面	4mm×4 層×2 面	4mm×5 層×2 面	4mm×6 層×2 面	4mm×7 層×2 面
1.5	単純支持	3	9.2	10.3	11.2	12.1	12.9	13.6
		5	9.7	10.7	11.6	12.4	13.1	13.8
		7	10.1	11.1	11.9	12.7	13.4	14.0
	両端固定 支持	3	15.7	17.6	19.2	20.7	22.0	23.3
		5	16.6	18.3	19.8	21.2	22.5	23.6
		7	17.3	18.9	20.3	21.6	22.9	24.0
3.6	単純支持	5	8.5	9.6	10.5	11.3	12.1	12.7
		9	9.0	10.0	10.8	11.6	12.3	13.0
		14	9.5	10.4	11.2	11.9	12.6	13.2
	両端固定 支持	5	14.6	16.4	18.0	19.3	20.6	21.8
		9	15.4	17.1	18.5	19.8	21.0	22.2
		14	16.3	17.8	19.1	20.4	21.5	22.6
4.5	単純支持	6	8.4	9.5	10.4	11.2	11.9	12.6
		11	8.9	9.9	10.7	11.5	12.2	12.8
		17	9.4	10.3	11.1	11.8	12.5	13.1
	両端固定 支持	6	14.4	16.2	17.8	19.2	20.4	21.6
		11	15.3	16.9	18.3	19.6	20.8	22.0
		17	16.1	17.6	19.0	20.2	21.3	22.4

表-5 I 形材とシート材の合計重量

有効幅員 (m)	支持条件	I 形材数 (本)	I 形材とシート材の合計重量 (kN/m/Bridge)					
			4mm×2 層×2 面	4mm×3 層×2 面	4mm×4 層×2 面	4mm×5 層×2 面	4mm×6 層×2 面	4mm×7 層×2 面
1.5	単純支持	3	1.03	1.35	1.67	1.99	2.31	2.63
		5	1.30	1.62	1.94	2.25	2.57	2.89
		7	1.56	1.88	2.20	2.52	2.84	3.16
3.6	および 両端固定 支持	5	1.94	2.57	3.21	3.85	4.49	5.13
		9	2.46	3.10	3.74	4.38	5.02	5.65
		14	3.12	3.76	4.40	5.04	5.67	6.31
4.5	両端固定 支持	6	2.34	3.12	3.89	4.67	5.44	6.22
		11	3.00	3.77	4.55	5.33	6.10	6.88
		17	3.79	4.57	5.34	6.12	6.89	7.67

設計条件は、単径間で、有効幅員を 1.5m、3.6m、4.5m の 3 種とし、モルタル舗装を除く全ての部材に GFRP 引き抜き成形材を用いて、それらの主要な材料特性を表-3 に示

す値とした。I 形材とシート材、および、各層のシート材は工場建屋内においてプレス下で接着剤により接合することとし、それらが一体化された断面を抵抗断面とした。

また、地覆、高欄、舗装、および、活荷重や、静的なたわみの制限値、回避すべきたわみ振動数の帯域などは、前章の鉸桁橋形式の場合と同一とした。

主桁両端の支持条件についても、前項と同様、図-6に示すように、単純支持条件、両端固定支持条件の両支持条件を対象に、適用可能な最大支間長を求めることとした。また、静的な断面力や、たわみ量、たわみ振動数の算出も、同様に梁公式によるものとした。

3.2 試設計結果とその照査

試設計にあたっては、図-7に示す両支持条件に共通な一般部の断面図のように、3種の有効幅員に応じて等間隔に並べられたI形材の本数を、有効幅員1.5mの場合には、3本、5本、7本、3.6mの場合には、5本、9本、14本、4.5mの場合には、6本、11本、17本と、それぞれ変化させるものとした。すなわち、図-7は、各有効幅員について、I形材の本数がそれぞれ、7本、14本、17本と最多の場合の断面図を示したものである。

試設計結果として、3種の有効幅員に対する単純支持条件、および、両端固定支持条件の適用可能支間長を、I形材の本数を上述のように変化させるとともに、Deck Plate, Bottom Plateとなる上、下面のシート材の層数を変えて板厚(4mm×層数)を変化させた場合について、表-4に示す。表-5には、表-4に対応し、I形材の本数とシート材の板厚の組み合わせによるI形材、シート材の単位長さあたりの合計重量(Bridge)を示すが、この合計重量が支持条件に無関係であることは明らかである。また、表-6には、同様に表-4に対応し、曲げ強度に対する最大応力の安全率を示す。さらに、図-8には、表-4に対応して、支持条件別、有効幅員別に、I形材の本数が最多の場合のたわみ振動数

と適用可能支間長との関係を示す。

表-4はたわみ制限により得られたものであり、この表から、単純支持条件の場合、適用可能支間長が15mを超えるには、シート材を7層にしても不十分であるのに対して、両端固定支持条件の場合には、2層で十分であり、7層にすれば、25mに迫ることが解る。適用可能支間長が、有効幅員の増幅にしたがって、若干短くなる傾向についても確かめられる。

表-5からは、I形材を必要最少限の本数とし、シート材の層数を増やす方が、適用可能支間長を伸ばすうえで経済的であることが解る。また、表-6からは、たわみ制限によって適用可能支間長が決定されていることが確かめられ、特に単純支持条件の場合の安全率はかなり大きくなることが解る。

さらに、図-8からは、たわみ振動数が、長支間化に伴って回避すべきたわみ振動数の帯域に近付くこと、および、適用可能支間長が支配的で、有効幅員にはほとんど依存しないことが解る。

3.3 橋軸方向の連結部の接合方法

長支間に適用する場合、架設現場への輸送の問題を考えると、橋軸方向連結部の接合方法の検討が不可欠であることはいうまでもないが、ここでは、適応性の確認に止め、一案として、図-9に示すイメージ図のようにブラインドリベットを用いた接合案を考えることとした。

このブラインドリベットは、せん断接合用リベットの一種であり、自動車をはじめとする機械部品の接合に主に用いられてきたものであるが、簡単な工具(リベッター)によって、外面または内面からのどちらか1面からの作業のみで接合できる特色がある。鋼、ステンレス、アルミ合金

表-6 I形材の本数、シート材の層数と曲げ強度に対する安全率

有効幅員 (m)	支持条件	I形材数 (本)	曲げ強度に対する安全率					
			4mm×2 層×2面	4mm×3 層×2面	4mm×4 層×2面	4mm×5 層×2面	4mm×6 層×2面	4mm×7 層×2面
1.5	単純支持	3	20.8	22.1	23.2	23.5	23.8	24.1
		5	21.2	22.3	23.0	23.4	23.7	23.9
		7	21.5	22.4	22.9	23.3	23.5	23.7
	両端固定 支持	3	5.7	6.0	6.2	6.3	6.4	6.4
		5	5.8	6.0	6.2	6.3	6.3	6.4
		7	5.9	6.1	6.2	6.3	6.3	6.3
3.6	単純支持	5	20.9	22.4	23.4	24.1	24.6	24.9
		9	21.4	22.6	23.5	24.1	24.5	24.7
		14	21.9	22.8	23.5	24.0	24.3	24.5
	両端固定 支持	5	5.7	6.1	6.3	6.4	6.5	6.6
		9	5.8	6.1	6.3	6.4	6.5	6.5
		14	5.9	6.2	6.3	6.4	6.5	6.5
4.5	単純支持	6	20.9	22.4	23.5	24.2	24.7	25.0
		11	21.5	22.7	23.5	24.1	24.5	24.8
		17	21.9	22.9	23.6	24.1	24.4	24.6
	両端固定 支持	6	5.7	6.1	6.3	6.4	6.5	6.6
		11	5.9	6.1	6.3	6.4	6.5	6.6
		17	6.0	6.2	6.3	6.4	6.5	6.5

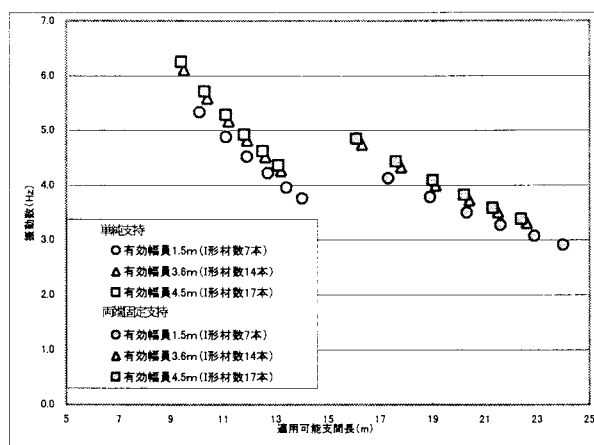


図-8 たわみ振動数と適用可能支間長

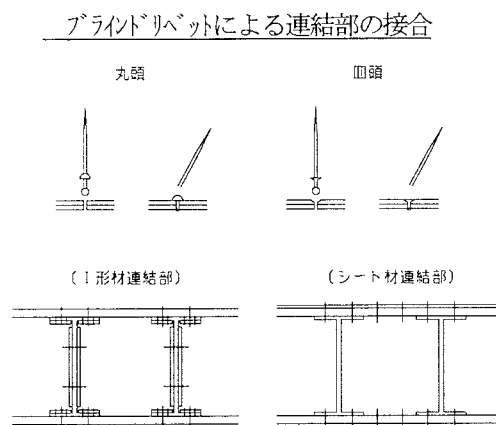


図-9 橋軸方向の連結部の接合イメージ

などの製品があり、現在の最大呼径は 6.4mm、最大長さは 40mm で、接合可能な最大板厚（かしめ板厚）は 35.5mm であるが、特注品であれば、より大きな呼径、長さのものの製造も可能とされている。呼径が小さく、所要本数が多くなるのが短所であるが、GFRP の場合は、孔空けは容易で、架設現場であっても十分に接合が可能であり、実施例もみられる。

図-9 に示したように、Deck Plate、および、Bottom Plate となる上、下面のシート材の連結部を、I 形材の連結部と位置をずらして設ければ、せん断面の集中を避けることができるとともに、添接板の配置も容易になる。さらに、上、下面のどちらかのシート材の連結部を、I 形材の連結部の位置を挟んで両側に設けておけば、開口部を設けることができ、内部での作業を終了した後閉じればよい。

なお、応力面ではかなりの余裕を見込めることから、孔引きによる影響を無視できるとともに、全強で設計する必要はなく、ブラインドリベットの数量や、添接板の板厚も、かなり低減できるものと考えられる。そのことがたわみに及ぼす影響は小さいからである。

また、ボルト継手には劣るものの、解体、再組立は比較的容易であり、軽量の特性を生かし、移設して再利用することも十分に可能である。

4. GFRP 歩道橋の動的応答値による使用性の評価

前章における床版形式歩道橋の試設計の結果、図-3 に示したように、両端固定支持条件の場合には、たわみ振動数が、長支間化に伴って回避すべきたわみ振動数の帯域に近付くことが解った。

そこで、本章では、有効幅員 1.5m、3.6m、4.5m について、最長支間で最小振動数となった、I 形材の本数が最多で、Deck Plate、Bottom Plate となる上、下面のシート材の板厚 28mm（7 層）の場合について、簡易計算法による動的応答値によっても振動使用性を検討することとした。さらに、試設計を追加して、有効幅員 2.1m、3.0m の場合も加え、計 5 種の有効幅員について検討することとした。

検討にあたっては、回避すべきたわみ振動数の帯域 1.5 ～ 2.3Hz に達することを予測し、たわみ制限値として、試設計で適用した $L/600$ (L : 支間長) のみならず、 $L/500$ 、 $L/400$ 、および、 $L/300$ の場合についても検討することとした。

適用した設計基準⁸⁾におけるたわみ制限 $L/600$ は、道路橋に比べ剛性が小さいことに配慮したものであるが、あくまでも鋼歩道橋に対する規定であるとともに、振動使用性に十分に配慮すれば、 $L/400$ まで緩和してよいとしている。したがって、応力的に十分に余裕があることも合わせて考えれば、道路橋示方書における最小値である $L/350$ 程度までは緩和できる可能性があると考えられたからである。

動的応答値を求める簡易計算式としては、BS5400 などでも適用され、桁橋の最大応答加速度 a (m/sec^2) を簡便に算定できる次式によるものとした^{9), 10)}。

$$a = 4\pi^2 f_1^2 w K \phi \quad (1)$$

上式において、 f_1 は最低次のたわみ振動数 (sec)、 w は、700N の鉛直集中荷重による静的最大たわみ (m) である。 K は、単純桁橋の場合を $K=1.00$ とした桁構造形式に関する形状関数であり、両端固定支持条件を側側間が極端に短い 3 径間連続桁橋と考え、ここでは $K=0.92$ とした。

さらに、 ϕ は、最大支間長と減衰定数 h をパラメータとして与えられる動的応答係数であり、減衰定数 h は、対数減衰率 δ と次式で関係付けられる。

$$\delta = 2\pi h \quad (2)$$

すなわち、式(1)は、体重 700N の人ひとりの共振歩調による桁橋の最大応答加速度を算定するものであり、表-7 に、減衰定数 h を変えて、各有効幅員、各たわみ制限値に対する適用可能支間長に対応する最大応答加速度 a を算定した結果を示す。

この表-7 には、BS5400 に規定された、

$$a \leq 0.5 \cdot f_1^{0.5} \quad (3)$$

なる式で与えられる最大応答加速度 a (m/sec^2) の制限度の値も付記した。

表-7 減衰定数と最大応答加速度（両端固定支持条件，シート材の層数7層）

有効幅員 (m) [I 形材]	たわみ 制限	質 量 (t/m)	曲 げ 弾性率 (kN/m ²)	断面2次 モーメント (m ⁴)	適用可能 支間長 (m)	たわみ 振動数 (Hz)	最大応答加速度 (m/sec ²)			BS5400 恕限度 (m/sec ²)
							減衰定数 0.5 %	減衰定数 0.6 %	減衰定数 0.8 %	
1.5 [7 本]	L/600	0.504	30.0 × 10 ⁶	3.79 × 10 ⁻³	24.0	2.90	1.306	1.190	1.086	0.852
	L/500				25.5	2.57	1.283	1.166	1.061	0.801
	L/400				27.5	2.21	1.258	1.139	1.032	0.744
	L/300				30.3	1.83	1.223	1.103	0.995	0.676
2.1 [9 本]	L/600	0.643		4.87 × 10 ⁻³	23.4	3.08	1.033	0.942	0.862	0.878
	L/500				24.8	2.73	1.016	0.924	0.842	0.826
	L/400				26.7	2.35	0.994	0.901	0.818	0.767
	L/300				29.4	1.94	0.969	0.875	0.790	0.697
3.0 [12 本]	L/600	0.850		6.50 × 10 ⁻³	22.8	3.24	0.788	0.719	0.658	0.900
	L/500				24.3	2.87	0.772	0.703	0.642	0.847
	L/400				26.1	2.47	0.757	0.687	0.624	0.787
	L/300				28.8	2.04	0.736	0.666	0.602	0.715
3.6 [14 本]	L/600	0.988		7.58 × 10 ⁻³	22.6	3.31	0.680	0.620	0.569	0.910
	L/500				24.0	2.93	0.667	0.607	0.555	0.856
	L/400				25.9	2.53	0.651	0.591	0.538	0.795
	L/300				28.5	2.09	0.634	0.574	0.519	0.722
4.5 [17 本]	L/600	1.196		9.21 × 10 ⁻³	22.4	3.38	0.562	0.513	0.471	0.919
	L/500				23.8	2.99	0.552	0.503	0.459	0.865
	L/400				25.6	2.58	0.541	0.491	0.447	0.803
	L/300				28.2	2.22	0.527	0.477	0.431	0.730

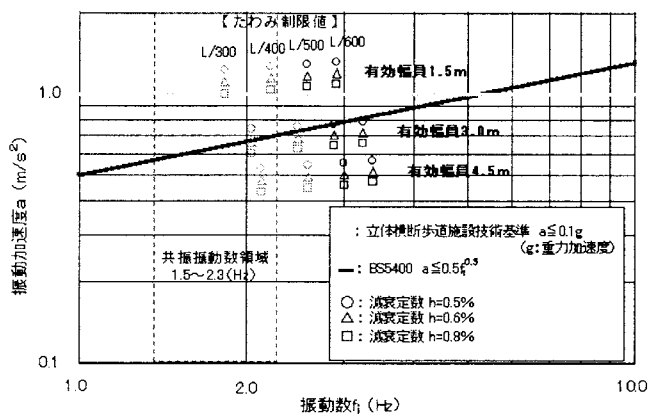


図-10 有効幅員と応答加速度の恕限度

また、図-10 には、式(3)による恕限度、および、設計基準⁸⁾の解説に記載された我が国における代表的な恕限度の一つである 0.1g (g ; 重力加速度) と、表-7 に示した最大応答加速度 a の算定値との関係を、有効幅員 1.5m, 3.0m, 4.5m の場合についてのみ示す。

これらの図表から、有効幅員 1.5m, 2.1m の場合、たわみ制限値を L/400 あたりまで緩和すると、回避すべきたわみ振動数の帯域に達するが、減衰定数 h を 0.8% 程度まで確保できれば、最大応答加速度 a は、最も狭い 1.5m の場合でも、設計基準⁸⁾における恕限度 0.1g 近くまでには抑えられることが解る。しかしながら、BS5400 における恕限度を満たすためには、2.1m の場合は 0.8% を少し上回る程度でよいのに対して、1.5m の場合は 1.0% を大きく超える減衰定数 h を確保することが必要であるといえる。

これに対して、有効幅員 3.0m, 3.6m, 4.5m の場合には、たわみ制限値を L/350 あたりまで緩和すると、回避すべきたわみ振動数の帯域にほぼ達するが、有効幅員が 3.0m を超えると、曲げ剛性が大きくなり、減衰定数 h が 0.6% 程度までであっても、最大応答加速度 a は、BS5400 における恕限度をも十分に下回ることが解る。

したがって、有効幅員を十分に広くとることができ、減衰定数 h を十分に確保できれば、振動使用性の面からは、たわみ制限値を L/350 程度まで緩和することが可能であるといえ、その場合には、適用可能支間長は 30m に迫ることができる。また、応力面からも問題がないことはいうまでもない。

なお、前述の我が国最初の実橋である伊計平良川線ロードパーク連絡歩道橋（2 径間連続桁橋；支間割 19.7 + 17.2m, 有効幅員 3.5m）では、振動試験が実施されており、減衰定数 h の実測値として約 1.5% という値が得られている¹¹⁾。しかし、本橋は鉸桁橋形式で、対傾構や床組などにボルト継手があり、それらが減衰性を高めたものと考えられており、さらなる検討が必要である。

5. 結 言

GFRP 引き抜き成形材の使用を想定して開発した、鉸桁橋形式の単径間歩道橋の試設計結果とその照査結果からは、つぎのようなことなどがいえた。

(1) 単純支持条件、および、提案した両端固定支持条件ともに、たわみ制限で断面が決定され、支間長 10m 程度であれば、現在の引き抜き成形技術で製造可能な断面の部材を主桁に用いて、鉸桁橋形式歩道橋の設計が可能であり、振動使用性についても全く問題がみられない。

(2)アンカーボルトを使用した合理的な構造によって両端固定支持条件とし、たわみを抑制することにより、経済性を改善できるとともに、既製品を用いた即応が現状においても可能となる。

(3)両支持条件ともに、主桁、端横桁、および、床版、地覆、高欄を加えた GFRP 引き抜き成形材の重量は 20kN 前後、舗装重量を加えた総重量でも 30kN 前後と極めて軽量で、施工が容易であり、急速施工が求められる場所等に特に有用である。解体、運搬、保管、再組立も比較的容易であり、再利用性も高い。

一方、長支間化を図り、GFRP 引き抜き成形材の既製品を組み合わせた接着接合断面を想定して開発した、床版橋形式の単径間歩道橋の試設計結果とその照査結果、および、たわみ振動数や、動的応答値による使用性の検討結果からは、つぎのようなことなどがいえた。

(4)単純支持条件、および、提案した両端固定支持条件ともに、たわみ制限により断面が決定され、有効幅員の増幅に伴って適用可能支間長が若干短くなる傾向にあるものの、両端固定支持条件の場合には、Deck Plate, Bottom Plate としての上、下面のシート材の板厚を 8mm (2 層) とすることで、適用可能支間長 15m を超えることができる。

(5)シート材の層数を増やし、上、下面のシート材の間隔を保持するための I 形材を必要最少限の本数としたほうが、適用可能支間長を伸ばすうえで経済的であり、シート材の板厚を 28mm (7 層) までさらに厚くすることによって、単純支持条件の場合は、適用可能支間長 15m でさえ超えることができないのに対して、両端固定支持条件の場合には、適用可能支間長 25m に迫ることができる。

(6)たわみ振動数は、適用可能支間長が支配的で、有効幅員にはほとんど依存せず、長支間化に伴って回避すべきたわみ振動数の帯域に近付き、有効幅員が狭い場合には、たわみ制限を $L/400$ あたりまで、3.0m を超える広い場合には、たわみ制限を $L/350$ あたりまで緩和することによって、その帯域に達する。

(7)有効幅員が狭い場合で、回避すべきたわみ振動数の帯域に達した状態であっても、減衰定数を 0.8% 程度まで確保できれば、体重 700N の人ひとりの共振歩調による最大応答加速度は、我が国における代表的な恕限度の一つである 0.1g (g ; 重力加速度) 近くには抑えられる。

(8)有効幅員が狭い場合には、回避すべきたわみ振動数の帯域に達した状態で、上述と同様の共振歩調による最大応答加速度が BS5400 の恕限度 $0.5 \cdot f_i^{0.5}$ (f_i : 最低次たわみ振動数) を満たすためには、1.0% を大きく超える減衰定数を確保することが必要となる場合もあるが、有効幅員が 3.0m を超える広い場合には、減衰定数が 0.6% 程度までであっても十分に満たすことができる。

(9)有効幅員を十分に広くとることができ、減衰定数を十分に確保できれば、応力面はもちろん、振動使用性の面からも、試設計で適用した $L/600$ から、 $L/350$ 程度にまでたわみ制限値を緩和することは可能であるといえ、その場合には、適用可能支間長は 30m に迫ることができる。

したがって、両形式ともに実現性は高いといえるが、床版橋形式の場合には、接着接合断面の平面保持性と耐久性の検証、および、減衰特性の把握など、種々の課題が残されている。また、種々の検討には梁公式を適用しており、特に両端固定支持条件の場合、アンカーボルトの設計とともに、それによる実際の固定度の把握も不可欠である。

さらに、橋軸方向連結部の接合案としたブラインドリベット接合は、合理的で、架設現場における作業性にも優れており、架設条件の制約をかなり緩和できるものと考えられるが、その安全性と耐久性の検証も、実現に至るまでに残された課題である。

謝 辞

本研究のデータ整理・CAD 製図等にあたっては、東京都立大学大学院生の神原由紀君の協力を得た。多大な貢献に対して、ここに、心より謝意を表したい。

参考文献

- 1) T. Keller, et al. : Advanced Materials, Structural Engineering International, IABSE, Vol.9, No.4, pp.250-301, 1999.
- 2) T. Keller, et al. : Advanced Materials, Structural Engineering International, IABSE, Vol.12, No.2, pp.66-116, 2002.
- 3) 建設省土木研究所：繊維強化プラスチックの土木構造物材料への適用に関する共同研究報告書 (I) ——次構造物材料としての FRP の適用事例調査——, 共同研究報告書第 210 号, 1998.
- 4) 建設省土木研究所：繊維強化プラスチックの土木構造物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, 土木学会 FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集, pp.13-18, 2001.
- 6) 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.
- 7) 北山暢彦, 宇野名右衛門：「伊計平良川線ロードパーク連絡歩道橋」の設計・製作・架設, 石川島播磨技報, 橋梁特集号, pp.82-86, 2001.
- 8) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説 (昭和 54 年版), 1979.
- 9) 日本鋼構造協会：これからの歩道橋一付・人にやさしい歩道橋計画設計指針一, 技報堂出版, pp.120-123, pp.186-190, 1998.
- 10) 土木学会：橋梁振動モニタリングのガイドライン, 構造工学シリーズ 10, pp.165-168, 2001.
- 11) 張惟敦, 鎌田敬治, 佐伯彰一, 山城和雄：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, 橋梁特集号, pp.77-81, 2001.

(2003 年 9 月 12 日受付)