

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月27日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560485

研究課題名（和文）ハイブリッドFRP主桁の高度化，および，床版・床組構造の合理化に関する研究

研究課題名（英文）Development of the Advanced Hybrid FRP Girder and its Flooring System

## 研究代表者

前田 研一（MAEDA KEN-ICHI）

首都大学東京・都市環境科学研究科・教授

研究者番号：60244414

研究成果の概要（和文）：FRP（繊維強化プラスチック）橋梁は，一般に，材料コストが高く，たわみ制限が構造設計で支配的となることから，本研究では，経済性に優れたFRP桁の高剛性化，大断面化を提案した．また，合理的な床組構造を，独特の接合方法を含めて開発し，その妥当性を実験によって確かめた．さらに，それらの実用化のために，桁橋形式と斜張橋形式の跨線人道橋の試設計を行って，その有用性を示した．

研究成果の概要（英文）：In general, the FRP (Fiber Reinforced Plastic) bridges have high material cost and low rigidity against the deflection limitation of structural design. In this study, the increasing bending stiffness of FRP girders by bonding CFRP strips and bonding girder sections were proposed. The efficient flooring systems were developed and their validities were confirmed experimentally. Moreover, to demonstrate the practical use, the trial designs of footbridge over railway were performed.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：新素材，複合材料，土木材料，歩道橋，ペDESTリアンデッキ

## 1. 研究開始当初の背景

FRP（繊維強化プラスチック）は，鋼に比べ比重が約1/5と超軽量で，環境作用に対する耐久性にも極めて優れ，都市の再生と社会基盤施設の再構築のための革新的構造材料として注目されている．FRP橋梁は，我が国における実績は未だ少ないが，塩害・酸害地域や，軟弱地盤地域，施工困難地域等での架橋，および，作業時間が限定され工期短縮が大きな効果を及ぼす跨線橋など，欧米では歩

道橋を中心に着実に実績を積みつつある．しかしながら，比較的安価なGFRPの弾性係数は，鋼に比べて小さいことから，設計でたわみ制限が支配的となり，断面が大型化する問題点がある．また，FRPの軽量性，耐腐食性を活用して，厳しい施工条件や環境条件でFRP橋梁を建設する場合，合理的な床組構造を開発する必要がある．

## 2. 研究の目的

本研究は、FRP 橋梁のさらなる普及・発展を目指したもので、材料コストが高く、たわみ制限による使用性の照査が構造設計では支配的となることから、経済性に優れる FRP 桁の高剛性化、大断面化を提案するとともに、合理的な床版・床組構造を独特の接合方法を提案するものである。また、これらの実用化を目的に構造性能を検証し、実現性の高い線路上空通路のための桁橋形式と斜張橋形式の跨線橋の試設計も行って、その有用性を確かめるものである。

### 3. 研究の方法

#### (1)FRP 桁の高剛性化，大断面化

引き抜き成形された I 形材のフランジ上下面に、高弾性の CFRP 板を接着することによって、高剛性化を図ることを提案し、実験的、解析的に検討して、実用性を確かめる。さらに、2 つの I 形材のフランジ同士を合わせ、上下に重ねて合成させることによって、主桁の大断面化を図ることを提案し、接着接合部、軸方向の連結方法の詳細も含め検討して、実用性を確かめる。

#### (2)ハイブリッド FRP 桁の合理的な床組構造

床組構造を合理化するために、ハイブリッド FRP 主桁と GFRP 横桁を剛結する手法を、まず、跨線橋として試設計されたハイブリッド FRP 主桁斜張橋の接合部の荷重分担を解析的に検討した上で、縮小模型実験によって検証する。ここでは、接合部の補強も期待できる三面連結板を用いることによる床組構造の合理化を提案する。

#### (3)試設計による検証

線路上空自由通路のための跨線橋として、桁橋形式と斜張橋形式の歩道橋の試設計を、各種パラメータを変え、たわみ、応力度、振動使用性を照査して行い、長支間化の可能性等を検討することにより、本研究で提案する各要素技術が、実際の設計、施工に及ぼす効果を具体的に検証する。

### 4. 研究成果

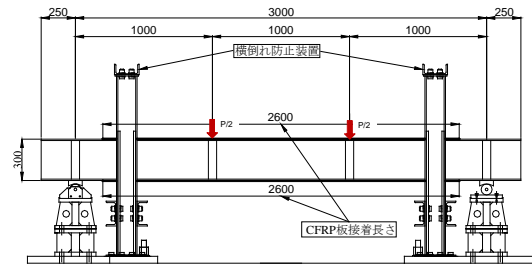
#### (1)FRP 桁の高剛性化，大断面化

桁高 300mm とした縮小模型の GFRP 桁 (H 300 × B 150 ×  $t_w$  14 ×  $t_f$  10mm, GN) に、高強度 (S) および高弾性 (M) の CFRP 板 (L 2,600 × B 50 ×  $t$  2mm) 接着による高剛性化 (GS, GM), および、GFRP 桁の重ね合成による大断面化 (GL) を検討した。さらに、大断面化については、その連結構造 (GL-J) も検討した。これは、フランジの連結位置を上下フランジで長手方向にずらすとともに、フランジ同士の重ね合わせ部は接着接合のみとしたものである (図-1(b))。

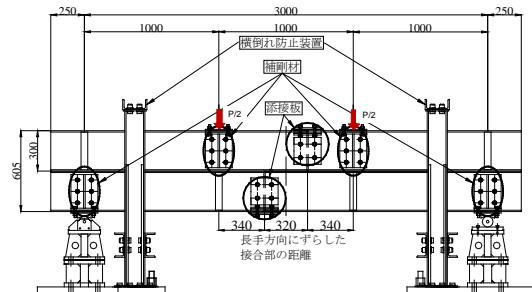
図-1 に、セットアップ状況を示す。載荷実

験では、支持条件を単純支持とし、支間長を 3,000mm、純曲げ区間長を 1,000mm とし、4 点曲げ載荷実験を行った。

検討結果の一部として、図-2 に、荷重と鉛直変位の関係を示す。GM では、約 200kN で上フランジに接着した CFRP 板で層間はく離が発生した。層間はく離が発生するまでは、実験値と理論値はよい一致を示すこと、また、GS より剛性が高くなることがわかる。図-3



(a)高弾性 CFRP 板接着による高剛性化 (GM)



(b)重ね合わせによる大断面化の連結構造 (GL-J)

図-1 4 点曲げ載荷実験のセットアップ

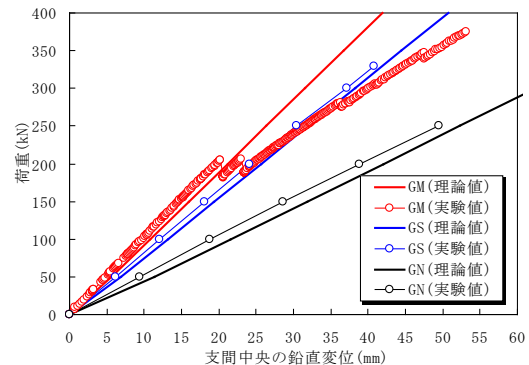


図-2 荷重と支間中央部の鉛直変位の関係

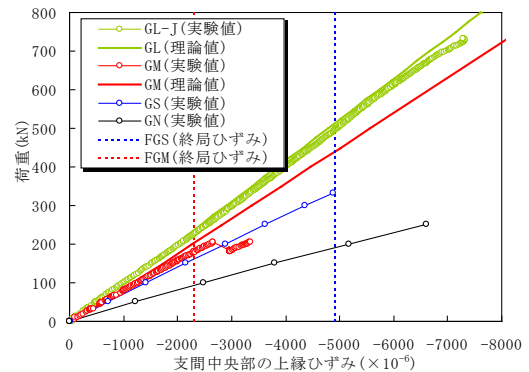


図-3 荷重と上縁ひずみの関係

に、荷重と上縁ひずみの関係を示す。GMの層間はく離は、約 $2200 \times 10^{-6}$ で発生したことがわかった。GMでは、上フランジで層間はく離が発生しても荷重が増加し、終局は、GFRP桁フランジの曲げ圧縮破壊であったのに対して、GSでは、上フランジのCFRP板の層間はく離と、GFRP桁上フランジの曲げ圧縮破壊がほぼ同時に発生した。GSの層間はく離は約 $5000 \times 10^{-6}$ で発生した。したがって、CFRP板の弾性率が高いほど、曲げ耐荷力が低下することがわかった。図を略したが、GSとGMの終局ひずみは、それぞれから切り出したクーポン試験片による結果とほぼ一致することも確かめられた。

一方、大断面化については、図-4に、荷重と鉛直変位の関係を示す。GL(連結無)、GL-J(連結有)ともに、終局までほぼ線形挙動を示し、GL-Jは、たわみが理論値よりも小さくなっている。これは、連結構造によって曲げ剛性が増加したことによるものと考えられる。また、最大荷重は、GL-Jで726kN、GLで581kNであり、GLの方が最大荷重は小さかった。これは、GLでは、載荷点のGFRP製補剛材が先に圧壊したためである。GL-Jでは、鋼製補剛材を採用しており、補剛材からの破壊は生じなかった。GL-Jでは、後述するよう添接板端部の破壊が起点となり、終局となった(図-5)。

以上のことから、桁の曲げ耐力は、高剛性化では、CFRP板の曲げ圧縮強度に、また、大断面化では、GFRP桁の曲げ強度にそれぞれ支配されることが確かめられた。

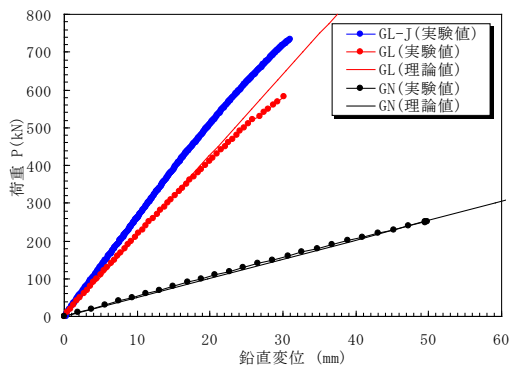


図-4 荷重と支間中央部の鉛直変位の関係

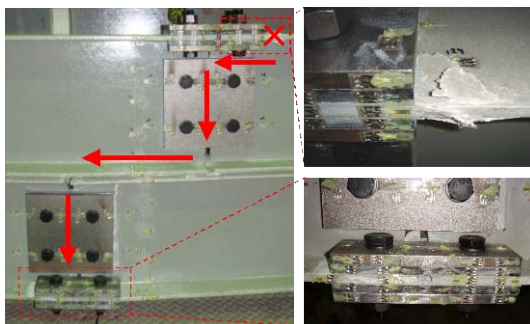


図-5 終局時における接合部の破壊状況

(2)ハイブリッドFRP桁の合理的な床組構造

検討対象は、図-6に示したハイブリッド桁を主桁に適用した斜張橋形式の線路上空自由通路であり、ケーブル定着部は鋼箱形断面桁、その他の横桁はGFRP桁とした。接合部の断面力は骨組構造解析により算出し、死荷重(D)、活荷重(L)、風荷重(W)を考慮した。解析結果から、面外方向の曲げモーメントを考慮した場合にフランジ応力度が最大となる点に着目し、試設計を行った。

ハイブリッドFRP主桁と鋼箱形断面横桁との接合部は、打込み式高力ボルトによる支圧接合を前提とした。打込み式高力ボルト(M22, B10T)をハイブリッドFRP桁に用いる際の支圧力については、別途、実験的な検討から決定した。試設計の結果として、鋼箱形断面横桁に主桁断面と等しい断面を有する仕口を設けて主桁を接合した設計例を図-7に示す。

設計した接合部の面外方向荷重に対する安全性を検証するために、接合部を縮小模型でモデル化した試験体を作製し、実験的な検討を行った。試験体はH形鋼(H300×300, SS400)にハイブリッドFRP桁(I300×150)を垂直に接合したものであり、試験体のH形鋼のフランジとウェブは鋼箱形断面桁の中心線から半分として、H形鋼のフランジは張出し部としてモデル化した。接合部はさらなる高強度化と合理化を図るため、ハイブリッドFRP桁の接合に高力ボルト摩擦接合(M16, F10T)と接着接合の併用接合を適用した。なお、鋼横桁部の接合は摩擦接合とした。実験は、電気油圧式サーボアクチュエータを用い、載荷速度0.02 mm/sec.の変位制御で行った。試験体および接合部の面外曲げ載荷実験のセットアップ図を図-8に示す。

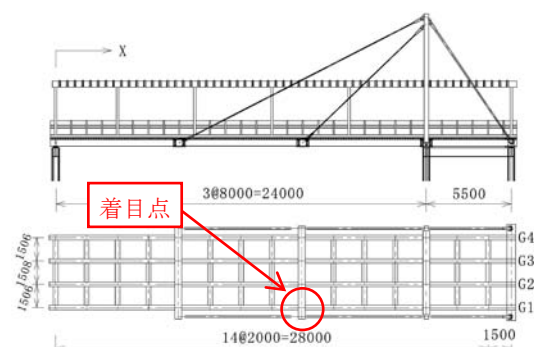


図-6 設計対象とした線路上空自由通路

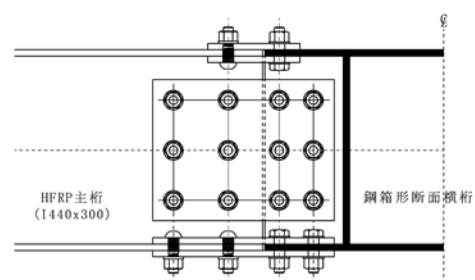


図-7 接合部の試設計例

実験の結果、ハイブリッドFRP桁の接着併用の接合部におけるはく離や、鋼横桁の接合部における摩擦面のすべりはみられず、水平荷重 92kN で、添接板端部においてハイブリッドFRP桁のフランジ端部が圧縮破壊し、終局を迎えた。破壊箇所を図-8に、ハイブリッドFRP桁の水平変位分布を図-9に、H形鋼のウェブを中心とした接合点まわりの M-θ 関係を図-10に、それぞれ示す。図-9、図-10から、接合点付近の水平変位は小さく、接合点まわりの回転角は、初期勾配が解析値とほぼ一致するため、面外方向荷重に対する接合部の剛性は十分に高いといえる。また、図を略したが、過去のクーポン試験結果より定めた許容支圧力程度の作用力の下では、線形挙動を示すことも確かめている。しかしながら、ボルト1本あたりの作用力がクーポン試験の終局荷重に達する前に終局を迎えている。これは、終局荷重に達する前に、フランジ端部が圧縮強度に達し、破壊したためであった。したがって、面外方向荷重に対して、接合部はハイブリッドFRP桁の母材強度が支配的となることが確かめられた。なお、風荷重を考慮した荷重の組み合わせによる応力度照査では、フランジ端部の応力度は、母材の圧縮強度に対して、安全率 4.0 以上が確保されており、十分な安全性を有しているといえた。

### (3) 試設計による検証

#### ① 三面連結板による連結部の合理化

前述した、斜張橋形式の線路上空自由通路

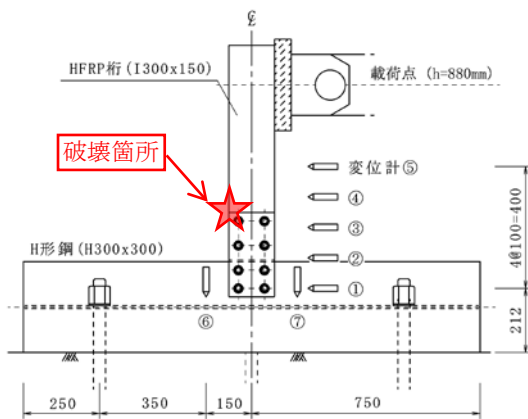


図-8 試験体とセットアップ図

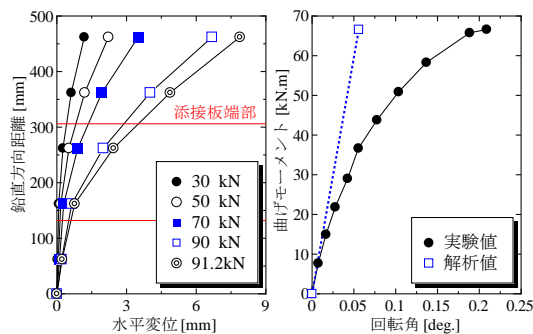


図-9 水平変位分布

図-10 M-θ 関係

を対象に、三面連結板を適用して試設計した接合部について、有限要素解析を行い、異種材料の組み合わせによる接合部に生じる応力分布を確認した。接合部のモデリングには各部材の板厚を考慮した板要素を用い、ボルトは簡易的に剛体と仮定した梁要素でモデル化した。骨組要素によりモデル化した橋梁に接合部のモデルを組み込み、静的解析を行った。橋梁全体の解析モデルおよび接合部の板要素解析モデルを図-11に示す。また、有限要素解析により得られた三面連結板の応力分布を主荷重のみ载荷した場合と風荷重を加えて载荷した場合について図-11の(a)と(b)に示す。図-11から風荷重を载荷した際には連結板に面外の応力が作用するが、三面連結板が応力を分担することで、過大な応力が生じていないことがわかる。図を略したが、母材の接合部の応力分布図からは、主荷重に加え風荷重を载荷した場合、主桁の下フランジに最も大きい応力が作用するが、三面連結板の剛性により大きな偏りなく応力が伝達されていることも確かめられた。

したがって、三面連結板を用いた場合、接合部に作用する力が分散されるとともに、接合部の剛性を確保できることが確認できた。

#### ② 高剛性化、大断面化した桁形式線路上空自由通路の試設計による検証

実用性の検討は、国内最大断面 (I600:H 600 × B 300 × t<sub>w</sub> 12 × t<sub>f</sub> 18mm) の GFRP 桁 (TGN とよぶ) を基本形状とした。また、高強度 (S)、高弾性 (M) タイプの炭素繊維強化プラスチック板 (以下、CFRP 板とよぶ、厚さ 2mm) をフランジ部に接着し、高剛性化 (それぞれ TGS, TGM とよぶ) を図ること、また、2つの GFRP 桁を縦に重ね合わせ接着することで、大断面

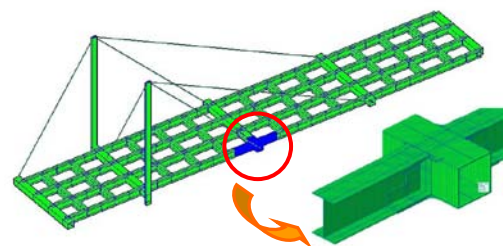
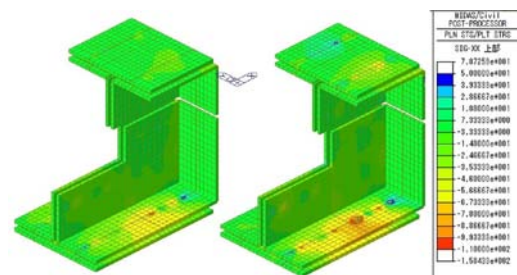


図-11 線路上空自由通路の解析モデル



(a) 死荷重 D+活荷重 L (b) D+L+風荷重 W

図-12 三面連結板の応力分布

化 (TGL とよぶ) を図ることとした。表-1 に、FRP 部材の材料物性値を示す。設計条件は、活荷重 3.5 kN/m<sup>2</sup> に対するたわみ制限 L/500 以下を満足すること、また、振動使用性として固有振動数が 1.5~2.3 Hz に抵触しないことである。高剛性化では有効幅員 4.0 m の鉸桁形式、大断面化では有効幅員 1.5 m の中路形式として、単径間に対してたわみ制限以下となるように、最大支間長  $L_{max}$  を算定した。たわみの算出には Timoshenko はり理論により、せん断変形による付加たわみを考慮した。表-2 に、最大支間長と最低次の固有振動数を示す。高剛性化では、主桁本数 3 本とし、大断面化では、主桁本数を 2 本として、最大支間長を求めた。高剛性化、大断面化ともに、TGN より、最大支間長を伸ばすことができることがわかる。また、それぞれ桁の最大支間長のとき、最低次の固有振動数は、振動使用性を満たすものの、支間長が長くなる TGL では、余裕がないこともわかる。

さらに、試設計で求めた各最大支間長  $L_{max}$  における最大曲げモーメントから曲げ圧縮ひずみを求め、前述の載荷実験から得られた終局ひずみと比較し、安全性の照査を行った。このとき、GL は、載荷位置で圧壊が先行したため、連結構造を有する大断面化した GFRP 桁 (GL-J) の載荷試験から得られた終局ひずみと比較した。表-3 に、照査の結果を示す。TGS と TGM を比較すると、曲げモーメントが大きく、終局ひずみの小さかった TGM の安全率が低いことがわかる。TGL では、曲げモーメントが大きく、終局ひずみも大きいため、安全率が TGS よりも低いことがわかる。しかし、TGM でも、曲げモーメントに対して、安全率 3.3 を確保することができ、十分な安全性を有していることがわかった。なお、照査結果は省略したが、大断面化した桁の連結構造

表-1 FRP 部材の材料物性値

	GFRP 桁		CFRP 板	
	フランジ	ウェブ	高強度 S	高弾性 M
弾性係数 (GPa)	35.0	28.8	167	286
せん断弾性係数 (GPa)	—	3.65	—	—
引張強度 (MPa)	407	253	2466	1847

表-2 最大支間長と必要本数

桁の種類 (主桁数)	GN に対する曲 げ剛性比	最大支間長 $L_{max}$ (m)		固有振動数 (Hz)
		鉸桁形式	中路形式	
TGN (3 主桁)	1.00	10.2	—	4.9
TGS (3 主桁)	1.49	11.6	—	4.5
TGM (3 主桁)	1.84	12.4	—	4.6
TGL (2 主桁)	3.67	—	21.3	2.5

表-3 曲げ圧縮破壊に対する安全性の照査結果

桁の種類	主桁本数(本)	最大支間長 (m)	最大曲げモーメント (kN・m)	曲げ応力 (MPa)	曲げひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	仮定した終局ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	設計荷重に対する安全率
TGN	3	10.2	304.3	-28.6	-818	-7000	8.6
TGS	3	11.6	393.6	-119.5	-716	-4500	6.3
TGM	3	12.4	449.7	-189.5	-662	-2200	3.3
TGL	2	21.3	680.0	-34.9	-996	-7000	6.7

造の試設計を行った結果、十分に安全かつ妥当なボルトの本数・配置となることを確かめている。

### ③連結構造の耐久性に及ぼす効果の検証

提案した接着接合を併用した接合方法については、接合部を有するクーボン試験片の暴露試験を開始し、長期耐久性を検証している。表-4 に、3つの地域で設置した暴露試験の状況を示す。暴露開始5ヶ月の時点で、鋼材の発錆により、若干ではあるが、試験片量の増加を確認している。引き続き継手の耐久性に関するデータを収集する予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

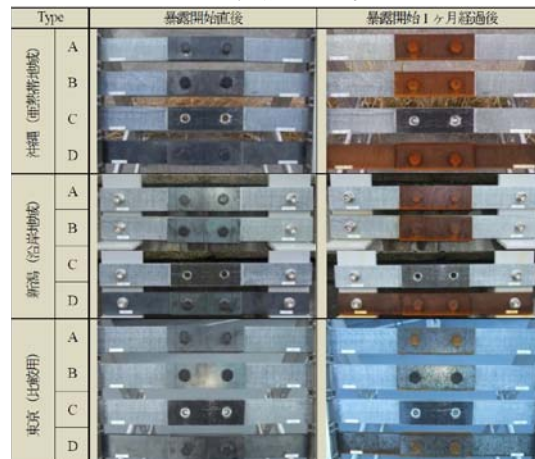
①北山暢彦, 前田研一, 中村一史, 渡邊哲也, 瀬戸内秀規: 床版橋形式GFRP歩道橋のリベット接合と接着接合を併用した連結構造の開発, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 59A, pp. 936-948, 2013. 3 (査読有)

②北山暢彦, 前田研一, 中村一史, 渡邊哲也: 床版橋形式GFRP歩道橋の曲げ耐荷力およびパンチングシア耐力, 土木学会, 複合構造委員会, 第4回FRP複合構造・橋梁シンポジウム講演概要集, pp. 131-137, 2012. 11 (査読有)

③中村一史, 前田研一, 睦好宏史, 松井孝洋, 柳沼謙一: リベット接合と接着接合によるハイブリッドFRP桁の連結方法に関する実験的検討, 土木学会, 複合構造委員会, 第4回FRP複合構造・橋梁シンポジウム講演概要集, pp. 95-103, 2012. 11 (査読有)

④Onek Denis Obedi, Shuhei Sugai, Hitoshi Nakamura, Ken-ichi Maeda and Ken-ichi Yaginuma: Feasibility Study on Increasing Bending Stiffness of FRP Girders by Bonding CFRP Strips and Bonding Girder Sections, The Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, APFIS2012,

表-4 暴露試験の状況



8 pages, 2012.2 (査読有)

⑤中村一史, 前田研一, 渡辺貴之, 柳沼謙一, 松井孝洋: ハイブリッドFRP桁を用いたこ線人道橋の概略設計と使用性, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, 第19巻, pp. 27-34, 2011.11 (査読有)

⑥中村一史, 前田研一, 渡辺貴之, 柳沼謙一, 松井孝洋: ハイブリッドFRP桁を用いた斜張橋形式こ線人道橋の振動使用性, 土木学会, 橋梁振動コロキウム 2011 論文集, pp. 142-149, 2011.9 (査読有)

⑦ Hitoshi Nakamura, Ken-ichi Maeda, Hiroshi Mutsuyoshi, Ken-ichi Yaginuma, Takahiro Matsui: Trial Design of Cable-Stayed Bridges Using Hybrid Composite Girders and Applicability to Free Passage over Railway, The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2010, pp. 148-151, 2010.9 (査読有)

[学会発表] (計11件)

①片野洋輔, 中村一史, 前田研一, 柳沼謙一, 松井孝洋: 実大部分模型を用いたハイブリッドFRP桁と鋼桁の高力ボルト接合方法に関する研究, 土木学年次学術講演会, 第67回全国大会, CS2-032, 名古屋大学, 2012.9.5~7

②中村大希, 濱崎景太, 中村一史, 前田研一, 柳沼謙一, 松井孝洋: FRP歩道橋の主桁-横桁交差部の高力ボルト接合方法に関する基礎的研究, 土木学年次学術講演会, 第67回全国大会, CS2-033, 名古屋大学, 2012.9.5~7

③飯田達也, 前田研一, 中村一史, 柳沼謙一, 松井孝洋: ハイブリッドFRP主桁斜張橋における主桁と横桁の接合部の面外風荷重に対する検討, 土木学年次学術講演会, 第67回全国大会, CS2-034, pp. 67-68, 名古屋大学, 2012.9.5~7

④荻屋彰吾, 藤田盛吾, 中村一史, 前田研一, 北山暢彦, 渡邊哲也: 床版橋形式GFRP歩道橋の接着接合断面のはく離挙動と安全性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第66回全国大会, CS2-027, pp. 53-54, 愛媛大学, 2011.9.7~9

⑤Onek Denis Obedi, 中村一史, 前田研一, 柳沼謙一, 松井孝洋: CFRP板接着によるFRP桁の高剛性化と実用性に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第66回全国大会, CS2-028, pp. 55-56, 愛媛大学, 2011.9.7~9

⑥濱崎景太, 片野洋輔, 中村一史, 前田研一, 柳沼謙一, 松井孝洋: 高力ボルトと接着剤を用いたハイブリッドFRP部材の接合方法に関する実験的研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第66回全国大会, CS2-033, 愛媛大学, 2011.9.7~9

⑦飯田達也, 前田研一, 中村一史, 柳沼謙一, 松井孝洋: ハイブリッドFRP主桁斜張橋における主桁と横桁の接合方法に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第66回全国大会, CS2-035, 愛媛大学, 2011.9.7~9

⑧水貝脩平, 中村一史, 前田研一, 柳沼謙一: GFRP桁の重ね合成による大断面化と実用性に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第66回全国大会, CS2-038, 愛媛大学, 2011.9.7~9

⑨飯田達也, 前田研一, 中村一史, 睦好宏史, 松井孝洋, 鈴川研二, 吉田一, 柳沼謙一: ハイブリッドFRP部材のボルト接合における支圧強度とガルバニック腐食に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第65回全国大会, CS2-011, 北海道大学, 2010.9.1~3

⑩片野洋輔, 中村一史, 前田研一, 睦好宏史, 松井孝洋, 鈴川研二, 吉田一, 柳沼謙一: ハイブリッドFRP部材と鋼部材の高力ボルト接合に関する実験的研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第65回全国大会, CS2-012, 北海道大学, 2010.9.1~3

⑪渡辺貴之, 中村一史, 前田研一, 睦好宏史, 松井孝洋, 鈴川研二, 吉田一, 柳沼謙一: 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, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第65回全国大会, CS2-015, 北海道大学, 2010.9.1~3

[図書] (計1件)

①前田研一, 中村一史 (分担執筆): FRP歩道橋設計・施工指針(案), 複合構造シリーズ04, FRP歩道橋設計ガイドライン小委員会, 原案検討部会, 複合構造委員会, 土木学会, pp. 8-26, pp. 95-106, pp. 177-192, 2011.1

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

前田 研一 (MAEDA KEN-ICHI)  
首都大学東京・都市環境科学研究科・教授  
研究者番号: 60244414

### (2) 研究分担者

中村 一史 (NAKAMURA HITOSHI)  
首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授  
研究者番号: 70264596

### (3) 連携研究者

なし