

構造工学技術シリーズ No.53

F R P 橋梁設計技術小委員会

報 告 書

2 0 0 6 年 1 0 月

F R P 橋梁設計技術小委員会

土木学会構造工学委員会

委員名簿

委員長	山田 聖志	豊橋技術科学大学建設工学系 (WG1, WG2, WG3, WG4)
幹事長	西崎 到	独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ (WG2)
幹 事	小川潤一郎	石川島播磨重工業(株)橋梁事業部建設部 (WG1)：~2005.8
	木嶋 健	独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ (WG1, WG2)
	小林 朗	日鉄コンポジット(株)技術部 (WG4)
	杉浦 邦征	京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 (WG1, WG3, WG4) (委員：~2006.3, 幹事：2006.4~)
	鈴木 博之	明星大学理工学部建築学科 (WG4)
	田澤 仁	旭硝子マテックス(株)提案企画部 (WG2)
	平山 紀夫	日東紡績(株)グラスファイバー生産本部 (WG1, WG4)
	前田 研一	首都大学東京大学院工学研究科土木工学専攻 (WG1, WG2)
	三上 修一	北見工業大学工学部土木開発工学科 (WG3)
委 員	青木 卓也	旭硝子マテックス(株)C&A 事業部 (WG1)
	Basem Abdullah	(株)エスエムエー構造設計部 (WG1, WG2, WG3, WG4)
	池田 虎彦	(株)長大国際事業部 (WG1, WG4)
	石丸 勝	(株)異設計コンサルタント広島事務所 (WG2, WG4)
	稲田 裕	清水建設(株)技術研究所社会基盤技術センター (WG3)
	井林 康	長岡工業高等専門学校環境都市工学科 (WG2, WG4)
	上田 多門	北海道大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (WG4)
	榎本 剛	東京製綱(株)エンジニアリング事業部 (WG4)
	小澤 延行	(株)ヴァンテック千葉工場技術センター (WG4)
	粕谷 明	倉敷紡績(株)技術研究所材料化学グループ (WG1, WG2, WG4)
	上林 正和	三菱重工業(株)横浜研究所鉄構研究室 (WG2)
	楠窪 剛	中電技術コンサルタント(株)道路部構造計画グループ (WG2)
	久保 圭吾	(株)宮地鐵工所技術研究所技術開発課 (WG1)
	幸左 賢二	九州工業大学工学部建設社会工学科 (WG3)
	小林 智和	新日本石油(株)技術開発部 CF 事業部 (WG4)：~2005.3
	竹村 振一	新日本石油(株)中央技術研究所 (WG4)：2005.4~
	小宮 巖	福井ファイバーテック(株)技術開発部 (WG3, WG4)
	酒井 正和	三井造船(株)鉄構・物流事業本部建設エンジニアリングセンター (WG2)
	杉浦 江	川崎重工業(株)鉄構ビジネスセンター
	鈴木 統	石川島播磨重工業(株)橋梁事業部設計部 (WG2)
	立石 寧俊	清水建設(株)技術研究所構造システムグループ (WG1, WG2)
	張 惟敦	石川島播磨重工業(株)技術開発本部基盤技術研究所 (WG4)
	仲井 朝美	京都工芸繊維大学大学院先端ファイブ科学専攻 (WG1, WG2)
	中島 章典	宇都宮大学大学院工学研究科情報制御システム科学専攻 (WG4)
	中村 俊一	東海大学工学部土木工学科 (WG2)
	中村 一史	首都大学東京大学院工学研究科土木工学専攻 (WG2)

委 員	西田 賢二	旭硝子マテックス㈱設計デザイン室 (WG4)
	濱田 泰以	京都工芸繊維大学大学院先端ファイブ科学専攻 (WG1, WG2)
	林 耕四郎	旭硝子マテックス㈱提案企画部 (WG4)
	日野 伸一	九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門 (WG4)
	福田 博	東京理科大学基礎工学部材料工学科 (WG2)
	福山 洋	独立行政法人建築研究所構造研究グループ (WG4)
	邊 吾一	日本大学生産工学部機械工学科 (WG1, WG3)
	松田 一史	パシフィックコンサルタンツ㈱交通技術本部構造部 (WG2)
	三上 藤美	㈱東邦アーステック構造補強コンサルタントチーム (WG4)
	弓倉 啓右	タカラ技研㈱技術設計部 (WG4)
	渡邊 哲也	旭硝子マテックス㈱提案企画部 (WG2)

はじめに

橋梁への FRP の適用は、軽量化による下部構造や施工等の簡素化や、腐食しない材料特性による長寿命化・メンテナンスフリーを実現できることから、建設工期・ライフサイクルコスト (LCC)・ライフサイクル環境負荷 (LCCO₂) などの低減が可能となる。そうした効果を期待して、我が国で初めての全 FRP 橋梁が、2000 年 4 月に沖縄県伊計平良川線ロードパーク歩道橋として完成した。しかし、それにつづく実橋は残念ながら現時点までは施工されていない。初期コストが PC (プレストレストコンクリート) 橋や鋼橋に比して現状では高いことが第 1 の理由であるが、設計法が確立していないことや国家的な支援体制がないなどが、その理由として指摘されている。

そうした中、土木学会では、2000 年、構造工学委員会に FRP 橋梁研究小委員会を設立し、北見工業大学の大島俊之教授を委員長として「第 1 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム」を開催するなど、FRP 橋梁研究の啓蒙に成果を挙げた。引き続き 2002 年からは、東京都立大学の前田研一教授を委員長として、FRP 橋梁技術の State of the Art に関する出版企画と原稿執筆を主とした活動を展開し、2004 年 1 月に土木学会から「FRP 橋梁—技術とその展望—」を刊行した。

FRP 橋梁設計技術小委員会は、上記の FRP 橋梁研究小委員会の活動を引き継ぎ、FRP 材料を用いた合理的な構造システム実現に向けた構造設計法の確立を念頭に、合成床版、歩道橋、道路橋、既存橋梁の補強・補修などの各々について FRP を活用した設計マニュアル等の整備につながる調査研究を行うことを目的として、2004 年 8 月に構造工学委員会に設置された。委員は公募により参加した FRP と橋梁に関する 47 名の研究者である。同小委員会は 2 年間の予定活用期間を終え、2006 年秋に活動を終了することとなった。本報告書は同小委員会の活動終了にあたりとりまとめた、同小委員会の活動結果と主要成果である。

本報告書の公表にあたり、構造工学委員会、土木学会研究事業課、参加された委員各位およびその所属機関、ならびに FRP 橋梁設計技術小委員会の活動を支援していただいた全ての方々に謝意を表します。

2006 年 10 月 24 日

土木学会構造工学委員会
FRP 橋梁設計技術小委員会
委員長 山田 聖志

目 次

第1章	FRP 橋梁設計技術小委員会の活動報告	1
第2章	FRP の橋梁への適用に関する国際コロキウム（ICAFB2006）／第2回 FRP 橋梁に関するシンポジウム報告.....	6
第3章	FRP 橋梁に関する海外視察団	13
第4章	WG1 (FRP 床版) 報告	20
第5章	WG2 (FRP 歩道橋) 報告.....	35
第6章	WG3 (FRP 橋梁のモニタリングとインテリジェント化) 報告.....	44
第7章	WG4 (既設橋の補修・補強への FRP の活用) 報告.....	50
第8章	FRP 橋梁の今後の展望	54
付録	FRP 歩道橋の性能照査型設計マニュアル目次(案).....	59

第1章 FRP 橋梁設計技術小委員会の活動報告

1.1 委員会活動の概要

FRP 橋梁設計技術小委員会では、2004 年 8 月 20 日から約 2 年間にわたり、合成床版、歩道橋、インテリジェント FRP 橋梁、既存橋梁の補強・補修の各分野で活動を行ってきた。この中で、合成床版、歩道橋、既存橋梁の補強・補修については、FRP を活用した設計マニュアル等の整備につながる調査検討を実施した。

各分野における調査検討のため、本委員会の他に WG を設置して活動を行った。設置した WG は、FRP 床版に関する情報を収集整理する WG1、FRP 歩道橋設計マニュアル目次案を検討する WG2、FRP 橋梁のモニタリングに関する情報を収集整理する WG3、FRP による橋梁補強に関する情報を収集整理する WG4 の 4 つである。なお、WG1 および WG2 は内容が近いため合同で開催した。本委員会の開催回数は 7 回である。第 2 回委員会は、本委員会と東三河地域防災協議会との合同で開催した。開催期日、開催場所、出席者を下記に示す。また、第 2 回委員会の出席者については、東三河地域防災協議会関係者の出席者との総数も括弧内に示した。

第 1 回委員会（2004.8.20 開催：土木学会）、出席者：31 名

第 2 回委員会（2004.11.9 開催：豊橋技術科学大学）、出席者：24 名（総数：109 名）

第 3 回委員会（2005.2.8 開催：土木学会）、出席者：18 名

第 4 回委員会（2005.4.6 開催：九州大学、福岡県大牟田市）、出席者：19 名

第 5 回委員会（2005.7.8 開催：土木学会）、出席者：21 名

第 6 回委員会（2006.1.16 開催：高知県高知市）、出席者：11 名

第 7 回委員会（2006.10.24 開催：土木学会）、出席者：14 名

第 1 回委員会では、本委員会および各 WG の全体計画に関する議論を行った。第 2 回委員会では、明星大学の鈴木博之教授による「炭素繊維強化樹脂板による鋼橋の補強」の講演、および、北海道大学の上田多門教授による「連続繊維補強材によるコンクリート橋の耐震補強」の講演が行われた。第 3 回委員会では、2006 年 1 月に開催予定の FRP の橋梁への適用に関する国際シンポジウム／第 2 回 FRP 橋梁に関するシンポジウムや 2006 年 7 月実施予定の米国 FRP 橋梁の調査内容等について議論を行った。第 4 回委員会では、GFRP 部材による床版補強事例として、福岡県大牟田市にある片平橋の床版補強工事を見学した。第 5 回委員会では、宮地鐵工所の久保圭吾氏による「FRP 合成床版の設計方法および施工事例」の講演が行われた。第 6 回委員会では、耐食性を利用した FRP 合成床版の施工事例として、高知市の潮新町線 FRP 合成床版の架設工事を見学した。第 7 回委員会では、本小委員会の最終報告書の内容について議論を行った。

1.2 本委員会での議事内容

1.2.1 第 1 回委員会

最初に、山田聖志委員長より、本委員会の前身委員会である FRP 橋梁研究小委員会の設立経緯および成果概要についての説明があった。その後、FRP 橋梁設計技術小委員会の目標が下記の通りに示された。

- ・FRP 床版および FRP 歩道橋については、設計マニュアル目次案を作成すること

- ・FRP 橋梁のインテリジェント化および既設橋の補修・補強については、実用研究に繋がるように内外の研究事例や実施事例を整理すること

次に、西崎到幹事長より、本小委員会の目的、概要、スケジュール、海外との情報交換等についての説明があった。その後、各 WG の主査より、WG1~WG4 の活動計画が下記の通りに示された。

WG1：WG2 と合同で行い、床版に特化した課題が生じた場合には別途検討する。

WG2：FRP 歩道橋の設計マニュアル作成を最終目標として目次案を作成する。

WG3：FRP 橋梁に特化したインテリジェント化技術を検討する。

WG4：実用研究に繋がるように、内外の研究事例や実施事例を整理する。

1.2.2 第2回委員会

明星大学の鈴木博之教授より、「炭素繊維強化樹脂板による鋼橋の補強」の講演が行われた。本講演では、宮城県古川市にある鋼橋「桜の目橋」の補強方法として、主桁下フランジ部に CFRP 板を貼付した事例の紹介が行われた。講演および質疑応答の概要は下記の通りである。

- ・CFRP 板の貼付は、6 層を千鳥状に配置して、2 液性エポキシ樹脂接着剤により行った。また、接着面は、塗装を剥がして、サンダーにより研磨した。
- ・500 万回の動的載荷試験を実施した場合においても接着強度は十分であり、梁中央部のたわみは静的載荷試験とほぼ同等であった。
- ・メリットは、工期が短縮されること、軽量のため施工が容易であること、接着剤の採用により補修回数・騒音振動の低減が見込めること、の3点である。
- ・今後の課題は、接着剤の均等塗布方法、接着した CFRP 板の仮固定方法、の2点である。
- ・CFRP 板と鋼材の熱膨張率の違いによる影響は、実用上問題ないレベルであると判断された。

次に、北海道大学の上田多門教授より、「連続繊維補強材によるコンクリート橋の耐震補強」の講演が行われた。本講演では、CFRP や AFRP を用いた FRP シートによる橋梁の耐震補強事例、および、PAF (Polyacetal Fiber) や PET (Polyethylene Terephthalate) を用いた FRP シートによる耐震設計概念が紹介された。講演および質疑応答の概要は下記の通りである。

- ・耐震設計にあたっては、構造物のじん性を確保することが重要である。樹脂として用いるポリエステル樹脂の破断ひずみは鋼材とほぼ同等であるが、炭素繊維やアラミド繊維の破断ひずみはこれよりも著しく低い。
- ・PAF や PET の破断ひずみは鋼材の 40~65%であり、炭素繊維やアラミド繊維に比べて大きい。PAF や PET を用いた FRP シートは、破断ひずみを大きくとることができるので、耐震性能を向上させることができる。
- ・FRP シートによる橋梁補強については、床版や梁の場合は接着が重要となるが、柱の場合は接着が必要とされない。

1.2.3 第3回委員会

最初に、山田聖志委員長より、本委員会とは別に土木学会内に組織されている「革新的構造物材料の土木分野への活用に関する調査研究委員会」についての説明があった。この委員会では、新材料のニーズおよびシーズに関する調査を行い、具体的な用途や効果を整理して報告書を作成することになっている。

次に、西崎到幹事長より、2006 年 1 月に開催予定の「FRP の橋梁への適用に関する国際コロキウム／第 2 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム」の内容についての説明が下記の通りにあった。

- ・論文は WG1~4 の内容を対象とする。論文募集の公告を 2005 年 5 月の土木学会誌に登載する。
- ・シンポジウムは国際コロキウムとし、海外からの研究発表（特に FRP 床版）を受け入れるため英語セッションを設置する。
- ・海外の著名講師による基調講演を行う。

また、米国 FRP 橋梁の調査内容および日程が下記の通りに示された。

- ・調査は 6 月下旬～7 月上旬にかけて実施する。参加者の募集は 2005 年 4 月にメールにて行う。
- ・FRP 床版（特にサンドイッチ構造）を主な調査対象とする。

1.2.4 第 4 回委員会

(1) 見学会

I 桁形式の GFRP 部材を用いた橋梁補強事例として、福岡県大牟田市にある片平橋 RC 床版補強工事の見学を行った。補強工事の状況を、写真 1.1 および写真 1.2 に示す。



写真 1.1 片平橋の全景



写真 1.2 GFRP 部材の設置状況

(2) 会議

三菱重工工事の浦川智志氏および山田正志氏より、GFRP 部材による片平橋 RC 床版補強工事の設計概要、施工概要および現地実験の結果が報告された。また、旭硝子マテックスの林耕四郎氏からは、補強に用いた GFRP 部材の物性が、九州大学の日野伸一教授からは、GFRP 部材の曲げおよびせん断特性に関する実験や FEM 解析結果が報告された。質疑応答の概要は下記の通りである。

- ・RC 床版と GFRP 部材との接着部の疲労剥離については、過去の実験等を考慮すると、問題はないと考えられる。
- ・本補強方法のメリットは、橋梁全体が構造的に頑丈になる点にある。コストは主桁下面に CFRP 板を貼付した場合の 1.1 倍である。しかし、橋梁全体が構造的に頑丈になるように CFRP 板を主桁上下面に貼付けた場合には、本補強方法のコストの方が低くなる。

1.2.5 第5回委員会

宮地鐵工所の久保圭吾氏より、酒井鉄工所および宮地鐵工所で開発した、FRP とコンクリートから成る FRP 合成床版に関する講演が行われた。講演および質疑応答の概要は下記の通りである。

- ・ FRP とコンクリートを一体とするため、境界面に砂を配置して接着機能を向上させている。
- ・ FRP は紫外線劣化を受けるが、床版下面にあるため影響を余り受けない。高欄等の太陽光のあたる場所は、塗料を塗布して紫外線劣化に対応している。また、耐火性を確保するために難燃性樹脂を用いた。
- ・ 疲労試験を実施したところ、RC 床版では 180 万回で剛性低下が見られたが、FRP 合成床版はそれ以上でも剛性低下が見られなかった。
- ・ FRP 床版は、疲労耐久性、耐食性、耐水性に優れているため、維持管理の高度化を図ることができる。
- ・ 初期コストは、鋼／コンクリート合成床版よりも 1 割程度高くなるが、維持管理費が安くなるため、ライフサイクルコストは低くなる。

1.2.6 第6回委員会

FRP の耐食性を利用した、FRP とコンクリートとの FRP 合成床版の施工事例として、高知県高知市にある潮新町線 FRP 合成床版の架設工事を見学した。架設工事の状況を、写真 1.3 および写真 1.4 に示す。



写真 1.3 FRP 合成床版の全景



写真 1.4 FRP 合成床版の架設状況

1.2.7 第7回委員会

FRP 橋梁設計技術小委員会の報告書（案）について議論を行った。報告書（案）の目次は下記の通りである。

- ・ 表 紙
- ・ 委員名簿
- ・ まえがき
- ・ 目 次
- ・ 第 1 章 FRP 橋梁設計技術小委員会の活動報告
- ・ 第 2 章 FRP の橋梁への適用に関する国際コロキウム（ICAFB2006）／第 2 回 FRP

橋梁に関するシンポジウム

- ・第3章 FRP 橋梁に関する海外調査団
- ・第4章 WG1（FRP 床版）報告
- ・第5章 WG2（FRP 歩道橋）報告
- ・第6章 WG3（FRP 橋梁のモニタリングとインテリジェント化）報告
- ・第7章 WG4（既設橋の補修・補強への FRP の活用）報告
- ・第8章 FRP 歩道橋の今後の展望
- ・付 録 FRP 歩道橋の性能照査型設計マニュアル目次（案）

第2章 FRP の橋梁への適用に関する国際コロキウム(ICAFB2006)／

第2回 FRP 橋梁に関するシンポジウム報告

2.1 はじめに

FRP 橋梁・FRP の橋梁への適用に関する最新の研究成果に関する情報交換は、本小委員会の主たる目的のひとつであるので、このためのシンポジウムを2006年1月20日(金)に開催した。同様のシンポジウムは2000年1月に本小委員会の前身である「FRP 橋梁研究小委員会」により実施されており、今回のシンポジウムは「第2回 FRP 橋梁に関するシンポジウム」として実施し、最近の6年間の研究の進展に関する情報交換を目的とした。また、FRP の橋梁への適用は日本国内よりも、米国、欧州を始めとする海外での検討が盛んであるため、国際コロキウム(ICAFB2006, The International Colloquium on Application of FRP to Bridges)を兼ねて実施することとし、海外からの研究発表も受け付けた。このため発表セッションは、日本語セッションの他に英語セッションも用意することとした。さらには、米国および欧州の FRP 橋梁研究の第一人者(Bank 教授および Keller 教授)を招いて、基調講演としてそれぞれの最新の研究の現状を解説いただくこととした。発表論文は文末の参考文献リストにあるように、全部で21編であるが、英語論文は13編(そのうちの1編は当日キャンセル)で、日本語論文は8編であった。

コロキウム開催場所は東京都新宿区四ツ谷の土木学会講堂である。企画にあたり、会議に要する費用は会議参加費の他に、土木学会構造工学委員会からの論文集印刷費の一部負担を得たほか、国立大学法人豊橋技術科学大学と共催により実施することとし、同大からの直接寄附を得て実施した。参加者は約80名(外国人参加者10名)と比較的小さな集会ではあったが、FRP や橋梁に関する専門家の集会であり、いずれの講演に対しても奥深い内容の質疑がつづき、非常に実りある会議となった。以下にそれぞれの講演内容の概要を示す。

2.2 オープニング

開催にあたり、主催者である土木学会構造工学委員会・FRP 橋梁設計技術小委員会を代表して委員長・山田聖志が、上述のような本コロキウム開催までの経緯について解説するとともに、多忙な中、参加した全員に謝辞が述べられた(写真2.1)。

2.3 基調講演1

山田聖志¹⁾は、1980年代に北海道で多発した畜産用 FRP タワーサイロの破壊事故とその後に整備された構造設計マニュアルに携わったことが FRP 研究の最初であること、1995年以降は主として引抜成形 FRP について、それら部材の剛性や崩壊性状を解明してきたことについて言及した。その中で特に、(1)長柱の圧縮実験での FRP 部材特有な周期的局部座屈波の発生にふれるとともに、局部座屈領域を規定して異方性板の板要素局部座屈耐力を算定する新しい逆解析的手法により、材料パラメータが非常に多く最適設計への方向性を見出しにくいこの種の問題に対し、簡便で設計上有用な解が得られること⁴⁾についての紹介があった。また、(2)接合部の破壊挙動を解明することも重要で、FRP 骨組構造では接合部破壊が設計の限界状態になりやすいことから、回折格子型光ファイバセンサ(FBG センサ)を接合部母材内に埋め込むことでその健全性モニタリングが可能であると¹¹⁾論じた。



写真 2.1 オープニング

2.4 基調講演 2

Lawrence C. Bank 教授²⁾はウィスコンシン大学マディソン校土木環境工学科教授で、米国土木学会（ASCE）の学術論文誌「建設用複合材料（Journal of Composite for Construction）」の初代編集長として有名である。1985 年米国コロンビア大学（ニューヨーク市）で積層複合材の力学をテーマとした論文で Ph. D.を取得して以来、企業やカトリック大学（ワシントン DC）などで、引抜成形部材の実験的研究を主として行ってきた経歴を自己紹介した。講演では、米国における FRP の橋梁への適用について、FRP 歩道橋、高速道路用 FRP 桁、高速道路用 FRP 床版、コンクリートとの合成床版について、多くの事例を紹介した（写真 2.2）。最後に、（1）FRP トラス歩道橋は米国では広く普及しており低コストであるが、殆ど ET Techtonics 社の独占状態であること、（2）高速道路用 FRP 桁と高速道路用 FRP 床版は実用化され普及しつつあるが、コストが高くなりがちであること、（3）コンクリートとの合成床版はコスト的にも有利で、施工性や耐久性の面からも将来有望であること、を論じた。質疑では、コスト並びに設計基準について多くの発言があり、低コスト化のためにも、設計マニュアルや基準等の早急な整備が望まれることが指摘された。



写真 2.2 L. C. Bank 教授

2.5 セッション 1

このセッションは一般の英語講演セッションで、北見工大・三上修一助教授の司会のもとで 4 題の講演があった。立石寧俊⁴⁾は、CFRP サンドイッチ版の開発に関連して、その局部座屈耐力を簡便に予測する方法として、局部座屈モードを 4 種類に規定して陽な形の耐力式を導き、実験や FEM 解析結果との整合性からその有用性と、強度・剛性が CFRP に対して極めて小さい発泡コア材が座屈耐力を大きく上昇させることについて論じた。Jinwoo Jeong⁶⁾は、引抜成形 GFRP 床版の大型車両を用いたフィールド載荷実験について、歪計測結果と FEM 解析結果の整合性について論じた。Govinda Raj Pandey⁷⁾は、既設の RC 梁の耐震補強のための FRP シート接着工法について、実験と FEM 解析をもとに接着層の剥離の予測式を提案した。Sherif Beskhyroun⁸⁾は FRP 構造の損傷を、圧電アクチュエータと圧電加速度計によってセンシングする手法について論じた。

2.6 基調講演 3

Thomas Keller 教授³⁾はスイス連邦工科大学チューリッヒ校で Ph. D.を取得し、現在、スイス連邦工科大学ローザンヌ校複合構造研究所 (CCLab) の教授を務めている。国際橋梁構造工学会 (IABSE) で FRP 関係部会のまとめ役に長く従事し、1999 年と 2003 年の IABSE 学会誌での世界各国の FRP 構造に関する記事を編纂した。講演の冒頭で、Keller 教授は、建設構造材料の歴史に触れ、木、石、鉄、コンクリート、FRP と展開してきており、FRP は建設構造材料としては発展途上であると強調した (写真 2.3)。すなわち、構造材として標準化されているのは、基本的な一方向 GFRP 引抜材、CFRP ケーブル材、2 方向 GFRP サンドイッチ材のみであると述べ、これらの限定された選択で構造設計が制約されており、標準化を進めることこそ橋梁への FRP の普及に欠かせないと論じた。また、構造設計規準の整備に当たっては、特に、接合法に関する課題が多いことを強調し、線形弾性体で脆性的な材料である FRP を組み立てて構造システム全体の靱性を発現させるための接合システムの開発研究状況を紹介した。また、他の構造材に比して優勢であるとされている耐久性に関しては、ライフサイクルコストに反映させてその有利性を進める合意形

成の重要性にも触れた。FRP は様々なアイデアでこれまでにない構造部材も開発可能であると述べ、台形閉断面内に水を入れた版（床版用または鉛直構造壁用）を作ることで、対火災に有効な構造材も試作されていることを紹介した。こうした多面的な問題提起にフロアから多くの議論が出された。



写真 2.3 T. Keller 教授

2.7 セッション 2

日本語による口頭発表のセッションでは、FRP 構造の力学・モニタリング・床版に関する講演が発表された。司会は日鉄コンポジット・小林朗氏が担当した。尚、以下の日本語セッションではスライド内の文字は英語とするか、または英語と日本語を併記することとし、外国からの参加者でも講演内容はスライドで内容把握ができるよう配慮した。木嶋健⁹⁾は、断面中央のカーボン繊維層の両側をガラスのニットファブリック層とコンテニユアスストランドマットを積層した板のボルト接合実験結果を報告した。ボルト軸力の増加に伴う摩擦力によって接合耐力上昇が期待できることが確認されている。山本展久¹⁰⁾は、FRP 積層円筒部材の局部座屈について、初期不整を考慮した非線形解析を行い、線形座屈解析値を上限とし、初期不整による座屈耐力の低下の下限値が減少剛性解析（RS 解析）値に概略一致することを示した。等方性の場合と同様異方性の大きい場合でも初期不整に敏感ではあるが、その程度は相対的に小さく、また、積層構成を変化させても RS 値は概略一定となる結果も提示している。小宮巖¹¹⁾は GFRP 板材のボルト接合と接着接合の 2 面せん断実験結果とその接合界面に FBG センサを装着して損傷センシングを実施した結果について発表した。木嶋の発表と同様、ボルト軸力を増すと接合耐力が上昇する傾向にあるが、その上昇過程での FBG センサの光パワースペクトルは単一ピーク型から複数ピーク型に変化し、その時点で母材の損傷が生じていることを明らかにした。久保圭吾¹²⁾は、FRP と箱型鋼管のハイブリッド型枠を永久型枠として用いた合成床版の開発について、静的載荷実験を行い、型枠とコンクリート間のずれ止めとして鋼管上部に水平方向の突起を設けることで十分な合成効果が得られること等について論じた。

2.8 セッション3

セッション2と同様、日本語による口頭発表のセッションで、FRPを用いた橋梁の補修・補強について研究成果に関する講演が発表された。司会は明星大学・鈴木博之教授が担当した。林健治¹³⁾は、鋼床版で発生する、デッキプレートと縦リブの溶接部疲労亀裂がデッキを貫通して舗装部に大きな損傷を生じさせる問題に対し、FRP格子筋によって鋼床版舗装構造を改良することの有効性を載荷実験とFEM解析を基に明らかにした。杉浦江¹⁴⁾は、鋼橋の腐食部をCFRPシートで補修する工法について、その有効性を示し、実用的な施工手順を提案した。立石晶洋¹⁵⁾は、既設の鉄筋コンクリート橋梁の補強のためのCFRPプレート緊張工法の開発に関連して、実橋を補強した際の補強効果の実証のための荷重車載荷実験結果を示し、鉄筋の応力や主桁剛性が改善したと論じた。中村一史¹⁶⁾は、鋼橋における面外ガセット溶接継手に発生する疲労亀裂をCFRPプレートで補修する工法を提案し、その有効性を実験的に明らかにした。岡本陽介¹⁷⁾は、鋼橋におけるリブ十字溶接継手に発生する疲労亀裂をGFRPプレートで補修することで、疲労強度の改善が図れることを実験的に明らかにした。

2.9 セッション4

日本語による口頭発表のセッションで、FRP橋梁について研究成果に関するものが発表された。司会は首都大学東京・中村一史助手が担当した。齋藤明幸¹⁸⁾は、FRPを用いたハイブリッドトラス橋のコスト最適化に関する基礎的分析結果を示した。崔賢¹⁹⁾は、GFRP引抜成形材を用いた歩行者用床版橋の応力・たわみ・固有振動数の解析的検討を行った。上林正和²⁰⁾は、歩道橋の主桁部材にFRPを適用するにあたり、FRP材の有する材料学的利点を十分に活用する効率的な設計法の提案とその試設計、並びに実験による検証結果を示し、実用化の可能性を示唆した。平山紀夫²¹⁾は、歩道橋用のFRP主桁を予め成形されたGFRPとCFRPでビルトアップする手法について、その構造設計を論じ、特に、複雑な基材の材料物性値を最新の均質化法で評価することの有用性を強調した。

2.10 クロージングおよび懇親会

閉会にあたり、FRP橋梁設計技術小委員会幹事長・西崎到から、長時間にわたり本コロキウムに参加した全員に謝辞が述べられた。また、閉会后、別会場にて本コロキウム参加者による懇親会が開かれ、参加者相互の懇親が行われるとともに、活発な情報交換が行われた。

2.11 おわりに

会議中は各講演に対し、非常に活発な質疑がなされたが、特に、日本大学・邊吾一教授と宇都宮大学・中島章典教授には多くの貴重な指摘をして戴き、会議を大いに盛り上げていただいた。講演集は土木学会「構造工学技術シリーズ 47 (ISSN 1880-8212)」として土木学会より発刊された。

【参考文献】（注：○は発表者を示す）

- 1) Seishi Yamada: Collapse Behavior of Pultruded FRP Shapes and the Structural Health Monitoring, pp.1-8.
- 2) Lawrence C. Bank: Application of FRP Composites to Bridges in the USA, pp.9-16.
- 3) Thomas Keller: Fiber-Reinforced Polymer Bridges and their Design, pp.17-24.

- 4) ○Yasutoshi Tateishi, Seishi Yamada: Local Buckling Behaviors of CFRP Sandwich Panels and Quasi-hyperboloidal One-way Shell, pp.25-30.
- 5) T. G. Kwon, K. S. Youm, Y. H. Lee, Y. K. Hwang: An Experimental Study on Seismic Performance Using GRP Wrapping around the Lap-Spliced Bridge Piers, pp.31-38. (当日欠席で発表はキャンセル)
- 6) ○Jinwoo Jeong, Young-Ho Lee, Kwang-Su Yeom, Yoon-Kook Hwang: Development and Field Test of Modular Bridge Deck Made of GFRP Composite Materials, pp.39-46.
- 7) ○Govinda Raj Pandey, Hiroshi Mutsuyoshi, Kamal Babu Adhikary: Seismic Behavior of RC Frame Structures with Beams Retrofitted by Externally Bonded FRP Sheets, pp.47-54.
- 8) ○Sherif Beskhyroun, Shuichi Mikami, Tomoyuki Yamazaki, Toshiyuki Oshima: Vibration Based Monitoring Technology for FRP Structures, pp.55-62.
- 9) ○木嶋健, 渡邊哲也: CF/GFRP ボルト接合の強度特性に関する実験的検討 (Takeshi Kishima, Tetsuya Watanabe: Experimental Study on the Strength Properties of CF/GFRP Bolted Joints) pp.63-68.
- 10) Seishi Yamada, ○Nobuhisa Yamamoto, James G.A. Croll, Phanthong Bounkhong: Local Buckling Criteria of Thin-Walled FRP Circular Cylinders under Compression, pp.69-76.
- 11) Seishi Yamada, ○Iwao Komiya, Yukihiro Matsumoto, Takashi Hiramoto: Fiber Bragg Grating Sensing for the Connection Failure of Fiber Reinforced Polymer Composite Structures, pp.77-80.
- 12) ○久保圭吾, 能登宥愿, 松井繁之, 長尾千瑛, 石崎茂, 平山紀夫, 宮永直弘, 小牧秀之: 鋼材と FRP のハイブリッド型枠を用いた合成床版の開発 (Keigo Kubo, Hiroyoshi Noto, Shigeyuki Matsui, Chiaki Nagao, Shigeru Ishizaki, Norio Hirayama, Naohiro Miyanaga, Hideyuki Komaki: Development of FRP Composite Slab Using a Hybrid Permanent Form of Steel and FRP) pp.81-84.
- 13) ○林健治, 三浦尚, 関根健一, 村山雅人, 長屋五郎, 小野昌二: FRP 格子筋による鋼床版舗装構造の改良と疲労耐久性の向上 (Kenji Hayashi, Takashi Miura, Kenichi Sekine, Masato Murayama, Goro Nagaya, Shoji Ono: Improvement on the Structure of Steel Plate Deck Pavement and Its Fatigue Durability) pp.85-92.
- 14) ○杉浦江, 大垣賀津雄, 長井正嗣, 稲葉尚文, 小林朗: 炭素繊維シート (CFRP) を用いた鋼橋の補修・補強に関する一検討 (Hiroshi Sugiura, Kazuo Ohgaki, Masatsugu Nagai, Naofumi Inaba, Akira Kobayashi: Study on Reinforcement and Repair Method for Steel Bridges by Carbon Fiber Sheets) pp.93-98.
- 15) ○立石晶洋, 小林朗, 濱田譲, 高橋輝光, 安森浩, 井上真澄, 葛目和宏: 炭素繊維プレート の定着特性および緊張工法による実橋への適用例 (A. Tateishi, A. Kobayashi, Y. Hamada, T. Takahashi, H. Yasumori, M. Inoue, K. Kuzume: Anchoring Characteristics of CFRP Strips and Application for an Existing Bridge with Tensioned CFRP Strip Method) pp.99-104.
- 16) ○Hitoshi Nakamura, Hiroyuki Suzuki, Ken-ichi Maeda, Takao Irube: Applicability of Repair Method Using CFRP Strips for Fatigue Cracks in Out-of-Plane Welded Gusset Joint, pp.105-110.
- 17) Hiroyuki Suzuki, ○Yousuke Okamoto: Improvement of Fatigue Strength of Cruciform Welded Joint by pasting up Glass Fiber Reinforced Polymers, pp.111-116.
- 18) 井林康, 渡辺正俊, ○齋藤明幸, 鈴木基行: FRP を用いたハイブリッドトラス橋の静的および動的特性に関する基礎的研究 (Kou Ibayashi, Masatoshi Watanabe, ○Akiyuki Saito, Motoyuki Suzuki: A Foundational Study on Static and Dynamic Characteristics of Hybrid Material Truss Bridge

with FRP) pp.117-124.

- 19) ○Xian Cui, Ken-ichi Maeda, Hitoshi Nakamura, Nobuhiko Kitayama, Tetsuya Watanabe: Structural Characteristics of Pedestrian Slab Bridge Using GFRP Pultrusion Profiles, pp.125-130.
- 20) ○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 (Masakazu Kamibayashi, Itaru Nishizaki, Yukio Takeuchi, Tetsuya Watanabe, Norio Hirayama, Naohiro Miyanaga: Study of Strength Design Method for Main Beam Component of FRP Footbridge) pp.131-138.
- 21) ○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 (Norio Hirayama, Naohiro Miyanaga, Tetuya Watanabe, Masakazu Kamibayashi, Itaru Nishizaki: Structural Design and FEM Analysis of Built-up FRP Bridge Girder) pp.139-142.

第3章 FRP 橋梁に関する海外調査団

3.1 はじめに

FRP 橋梁設計技術小委員会では、山田聖志委員長（豊橋技術科学大学教授）を団長とする米国調査団を組織し、FRP 橋梁建設の先進国である米国を訪問し、直接その建設状況を把握することを目的とした現地調査を実施した。調査期間は、2005 年 6 月 26 日から 7 月 2 日であるが、移動日を除くと調査期間は僅か 4 日間であった。200 橋以上の FRP 歩道橋および約 50 橋の FRP 床版の施工実績を持つ米国でも、その国土は広いためごく数橋の見学ではあったが、主要な FRP 床版橋および FRP 歩道橋を主体とした調査を実施した。調査団員は以下の 8 名である。

山田聖志（豊橋技術科学大学）
前田研一（首都大学東京）
立石寧俊（清水建設）
久保圭吾（宮地鐵工所）
玉木裕士（日鉄コンポジット）
松井孝洋（東レ）
小宮 巖（福井ファイバーテック）
西崎 到（独立行政法人土木研究所）

3.2 調査の概要

米国は世界で最も FRP 橋梁に関する研究・実用化が進んでいる国である。FRP 橋梁の実用性・適用性については様々な見方があるが、実際の橋梁の整備・維持管理に責任を持つ機関の FRP 橋梁に対する見解がどのようなものであるかを調査することは、参考になると思われる。このような観点から、FHWA（Federal Highway Administration: 連邦道路庁）を訪問し、FRP 橋梁に関する情報収集を行った。

FRP 橋梁は、①FRP 歩道橋、②FRP 道路橋、③FRP 床版の 3 つに大別できる。米国における FRP 歩道橋は、大断面引き抜き材を用いた桁橋（例えば Clear Creek Bridge など）も知られているが、代表的なものは、200 橋以上の実績があり比較的経済的とされる、E T Techtonics 社の Longspan Prestek System である。今回の調査では、この FRP 歩道橋の製作会社である Creative Pultrusion 社を訪問するとともに、実際の Longspan Prestek System の橋梁を視察した。また、米国の FRP 床版は、①Duraspan 型（引き抜き成形材を用いた FRP 床版、Superdeck を含む）、②Hardcore Deck 型（サンドイッチパネル型）、③Kansas deck 型（ハニカムサンドイッチ型）の 3 つに大別でき、約 50 橋の FRP 床版の施工実績がある。このなかでも特に施工実績の多い、Duraspan 型と、Hardcore Deck 型の 2 種類の FRP 床版橋を視察した。なお、Creative Pultrusion 社は Duraspan 型の FRP 床版製造会社でもあり、同社訪問にあたっては、FRP 床版についても情報収集・意見交換を行った。FRP 道路橋については今回調査対象としなかった。なお、本報告は同調査団における調査結果の概要をまとめたものであるが、調査の結果は各委員を通した本委員会の活動の中でも反映されている。

3.3 FHWA 訪問

実橋の見学に先立ち、ワシントン DC の郊外にある FHWA（ターナー・フェアバンク道路研究所）を訪問し、FRP 橋梁の研究担当者である Eric Munley 氏との意見交換を行った（写真 3.1）。

これまでの FHWA での FRP の橋梁への適用に関する研究・事業の変遷について、

- ・ FRP 床版の検討は 1975 年頃から実施してきていること、
- ・ FRP の適用が注目され始めたのはカリフォルニア地震後の橋脚補強に始まったこと、
- ・ FRP 床版の応力比 700 万回疲労試験を実施したこと、
- ・ 現在は信頼性に関する検討や材料仕様に関する検討を行っていること、
- ・ 今後の 10~15 年後では試験施工後の評価や基準類を見直す予定であること、

の説明を受けた。その後の質疑では、LCC を基とするコスト評価や、ASSHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) での FRP 床版 75 年耐用年数設定等について議論した。最後に、研究所施設内の実験施設を視察した。



写真 3.1 FHWA における意見交換

3.4 クリエイティブ・プルトルージョン(CPI)社訪問

ペンシルベニア州ピッツバーグ市から南東に 150km 程にある、景勝豊かなベトフォード地方の小さな町アルムバンク (Alum Bank) に、引抜成形 FRP を製造している CPI 社を訪ね、担当の Dustin Troutman 博士（写真 3.2 の中央）から話を伺うことができた。引抜成形法を用いることで、鋼材の圧延形材と類似の H 形や箱形などの長尺な形材を精度良く成形でき、各種 FRP 製造方法の中でも、材料コストが比較的小さくなることが知られている。実際、CPI 社ではほとんど全ての工程が自動化された結果、数名の要員で 41 もの製造ラインが稼動していた。写真 3.3 は、FRP 床版で使用されてきた代表的なものの実大模型であり、一番上は、Superdeck で比較的初期の形状のもの、下の DuraSpan deck は近年需要が多いとのことであった。バルサ材をウェブに充填したサンドイッチ FRP 版の紹介もあり、アイデア次第でいろいろな構造性能を付加した FRP 部材の開発が可能と感じられた。

施設内見学では、引抜成形過程、FRP 矢板の実大模型（写真 3.4、3.5 参照）、冷却塔とその架台の実大模型の展示などを視察した。



写真 3.2 CPI 社訪問



写真 3.3 FRP 床版用引き抜き成形材



写真 3.4 FRP 矢板の実物大模型



写真 3.5 FRP 矢板（断面）

3.5 Dunning Creek Bridge

Troutman 博士の案内で、CPI 社の近くの Dunning Creek Bridge を見学した（写真 3.6）。この橋は、日本における B 活荷重に相当する ASSHTO の HS25 荷重（25 トン車両対応）によって設計された 5 主桁鋼道路橋である（写真 3.7）。DuraSpan 766 deck（床版高 7.66 インチ＝195mm）の引抜 GFRP 製の床版を用いて、2002 年に老朽化した RC 床版を更新して敷設された。橋長は 27.6m、幅員は 6.7m で 2 車線となっている。床版端面は別の FRP 板でふさがれているので、現場では床版断面をみることはできず、先に写真 3.3 中下の実大模型をみせてもらったので、その断面形状は想像するしかなかった。舗装は普通モルタルで、説明では 5cm 厚とのことで、橋の下に入り込んで初めて床版が FRP と知ることができる。



写真 3.6 Dunning Creek Bridge 全景



写真 3.7 Dunning Creek Bridge の FRP 床版

3.6 Middlebury Run Park Bridge

ピッツバーグから北西に 140km 程の位置にオハイオ州アクロン（Akron）市がある。アクロン市は工業都市で世界最大のタイヤメーカーのグッドイヤー社（The Goodyear Tire & Rubber Co.）があり人口約 22 万人の中規模都市である。Middlebury Run Park Bridge はこのグッドイヤー社のすぐ近くに（写真 3.8 の背景の時計台はグッドイヤー社のもの）あった。



写真 3.8 Middlebury Run Park Bridge 全景



写真 3.9 Middlebury Run Park Bridge の木製床版支持状態

詳細な設置場所等が不明であったので、建設に関係したアクロン市役所の Michael Teodecki に案内と説明をお願いした。竣工は 2003 年 10 月、橋長は 17.7m、幅員 3.05m、材料費 53,400 ドル、木製床版の GFRP トラス歩道橋である。死荷重は約 3.2 トンで鋼橋とした場合の 9.1 トンの約 1/3 の軽量さであったとの説明があった。歩道橋ではあるが、1 トンまでの車両は通行できるように設計されている。この GFRP トラス橋システムは、チャンネルや箱型の引抜成形規格品をできる限り同じものを多く使用することでコスト削減を達成したもので、E. T. Techtonics 社の Longspan Prestek System と呼ばれている。主トラスの橋軸直角方向の剛性を高めるため橋の外にはみ出して三角形トラス構面を形成させている（写真 3.8 参照）。また、上・下弦材はチャンネル 2 つを背中合わせにして束材の箱形断面材をはさみこみステンレスボルト（SUS316）で接合し一体化されている（写真 3.10）。斜材は X 形であり、引張材を通し部材に圧縮材を分割している（写真 3.11）。

同社の Eric Johansen から後日ヒアリングしたところでは、内部に 3.8cm 角のロッドを挿入しているとのことであるが、1996 年に実用化されてから順次改良が重ねられてきたこともあり、その詳細について調査することは今回できなかった。



写真 3.10 上弦材の断面



写真 3.11 斜材交差部分

3.7 Carey Avenue Bridge

この橋はアクロン市内の住宅街の公園の一角にあり、先と同様 E. T. Techtonics 社製の GFRP 歩道橋である（写真 3.12）。写真 3.13 のように老朽化した RC 歩道橋を 2005 年春に全面架け替えをしたもので、橋長は約 15m で材料費は 40,000 ドルであった。



写真 3.12 Carey Avenue Bridge 全景



写真 3.13 更新前の Carey Avenue Bridge
(Teodecki 氏提供)

床版は木製で、ボルトにはステンレス（SUS316）が使用されている。施工時間が作業員 3 人で 3 時間という短さであったとの説明があった（写真 3.14）。前例と異なり、斜材は圧縮材のみとなっている。また、橋軸直角方向の安定性には、主トラス外側にサブトラスを配置することで（写真 3.15）、意匠上、スリムなデザインとなっている。GFRP 引抜材は引抜過程で顔料を挿入することで任意の色を得ることができるが、今回は、周りの公園の緑に合わせて深緑色の着色としている。ただ周辺住民（若者）のマナーは単車で乗り入れたりするなどかなり悪いようで、完成して

わずか数ヶ月であるにもかかわらず、落書きがひどく高欄にも一部損傷がみられた。



写真 3.14 Carey Avenue Bridge 施工中の状況
(Teodecki 氏提供)



写真 3.15 サブトラス

3.8 Bently Creek Bridge

ニューヨーク州のバッファロー市から南西に約 250km も離れたエルマイラ市まで貸切バスを走らせ、郊外の草原地帯に位置する Bently Creek Bridge を訪れた（写真 3.16, 3.17）。



写真 3.16 Bently Creek Bridge の全景



写真 3.17 Bently Creek Bridge の FRP 床版

Bently Creek Bridge は 1941 年に建設された 38m のトラス道路橋で、鋼部材に断面欠損がみられたことや、舗装による死荷重超過等のために 14 トン車両制限されていたものを改修工事した際に、床版を Hardcore Composites 社製の FRP 床版に更新している。床版厚さは 620mm（ただし歩道部は約 200mm）で、表面材に GFRP 板、腹材にはハニカム板に発泡ウレタンを内蔵している。補修結果として、死荷重が 265 トン軽減されたため交通規制を解除できたとしている。また、供用年数を 60 年から 90 年以上に延長でき、他の工法に比べ 100 万ドル安価となったとの情報が FHWA の URL で公開されているが、その詳細は不明である。舗装はポリマーコンクリートで厚さが数 mm と少なすぎることもあり、一部に欠損がみられ GFRP 表面材が露出していた。交通状況の相違が明確ではないものの、Dunning Creek Bridge の舗装は良好であったことから、適切な舗装材料

や厚さが必要と考えられる。

3.9 Bennetts Creek Bridge

エルマイラ市から西に約 10km の位置ある、橋長さ 7.8m, 幅員 10.1m の小さな道路橋である(写真 3.18, 3.19)。旧橋は 1926 年建設のコンクリート床版橋で、著しく劣化したために 10 トンの車両制限がなされていた。1998 年に Hardcore Composites 社製の FRP 床版橋に更新している。床版厚さは 620mm で Carey Avenue Bridge のそれと同様である。架設時間はわずか数時間であったため、工期が当初予定から 9 ヶ月も短縮したとされている。厚さ数ミリのポリマーコンクリート舗装表層もプレインストールしていたとのことであるが、やはりすでに舗装一部に欠損がみられ GFRP 表面材が露出してしまっている。高欄はコンクリート製であったが、GFRP のカバープレートで覆われていた。



写真 3.18 Bennetts Creek Bridge 全景



写真 3.19 Bennetts Creek Bridge の FRP 床版

3.10 あとがき

我が国に初めの鉄橋が製作されたのは 1868 年であるのに対し、1939 年に鋼道路橋設計示方書案が出されたものの、1960 年代以降の一般道路鋼橋の普及までは約 100 年の長い年月が必要であった。FRP 橋梁の場合、米国でも 30 年、我が国では 10 年程度と現在未だ発展途上の技術である。その意味でも、FHWA が 10 年区切りの計画を着実に実施し、今後もそれにそった支援を産業界に行っている様子は、新しい技術を長期的な視点から育成することの重要性を再認識させるものであった。米国と比較して我が国の国家的な支援体制は大きく見劣りするのが現状である。我が国では、当面は試験施工的な適用とならざるを得ないかもしれないが、そうした実績を重ねることこそ、より大きな成果への確実なステップであると考ええる。

第4章 WG1（FRP 床版）報告

4.1 はじめに

近年、日本の道路橋床版においては、交通荷重の増大や交通量の増加による、床版の疲労損傷が問題化しており、軽量で耐久性の高い床版が求められている。このような背景のもと、軽量で高強度な FRP 材を用いた様々な床版構造が研究開発されており、実橋に適用された事例も報告されている。一方、海外では、融雪剤の多量散布による塩害が原因で、コンクリートの劣化や、床版鉄筋の発錆・破断により、床版の陥没等の問題が生じ、この解決のため、いくつかの FRP 床版が開発され、試験的に採用されている。

ここでは、「FRP 橋梁 ―技術とその展望―」¹⁾以降の FRP 床版の事例を中心に紹介するとともに、本小委員会にて実施した海外調査団（米国編）における FRP 床版の調査に関する部分の報告を行う。

4.2 日本での適用事例

日本における FRP 床版は、1990 年頃から FRP と鉄筋コンクリートの合成床版として研究開発が行われた FRP 合成床版が挙げらる。本床版は、新設橋を中心に、現在までに表 4.1 に示す 7 橋が実橋として施工されており、軽量で耐食性に優れるという特長から、床版打ち換えや、海上部の栈橋構造に適用された事例もある。また、近年になって、オール FRP の床版や、鋼管と FRP のハイブリッド構造のパネルと鉄筋コンクリートの合成床版なども開発されているが、これらについては研究開発段階であり、実施工の事例は報告されていない。

表 4.1 FRP 合成床版の施工実績

橋梁名	発注者	発注年度	受注者	橋梁形式	適用	床版支間 m	橋 長 m	幅 員 m	床版面積 ㎡
松久保橋	JH西国支社	平成 9年	酒井鉄工所	3 径間連続鉄桁	新設	2.5	124.5	9.9	1,230
西谷 3 号橋	水資源公団	平成10年	酒井鉄工所	2 径間連続鉄桁	新設	2.4	38.0	6.5	247
北谷川橋	JH北陸支社	平成13年	佐藤鉄工	単純狭小箱桁	新設	5.2	63.0	11.6	720
余呉跨道橋	JH北陸支社	平成15年	新日本海重工業	単純鉄桁	新設	3.8	30.4	6.8	203
西山橋	鯖江市	平成15年	酒井・福井・福岡 JV	斜張橋	新設	2.0	40.5	4.8	194
兔尻橋	秋田県	平成16年	宮地建設・タナックス JV	単純合成鉄桁	打換え	2.4	28.4 x 2	7.5	426
潮新町線	高知市	平成16年	宮地鐵工所	栈橋（道路橋）	新設	3.8	83.2	22.0	1,819

4.2.1 FRP 合成床版

（1）構造概要²⁾

FRP 合成床版は、軽量で耐食性に優れた FRP 材を支保工兼用の永久型枠として使用するもので、コンクリート硬化後の荷重に対しては鉄筋コンクリートと FRP の合成断面として抵抗する合成床版である。本床版の構造を図 4.1 に示す。FRP 型枠は、コンクリート打設時の支保工を省略できる程度の剛性を確保するため、床版支間方向にリブを配置した断面としており、このリブと下側配力筋が交差するため、交差部に貫通孔を設け、そこに下側配力筋を配筋する構造としている。このとき、FRP 材料の幅は、製作性・施工性を考えて、リブ 2 本を含んだ 600mm 幅とし、隣接部材とは、連続性を確保できる幅でラップさせ、接着剤により接合する。また、FRP 底板のコンクリート接触面に、砂を接着することにより、FRP とコンクリートの付着を確保している。

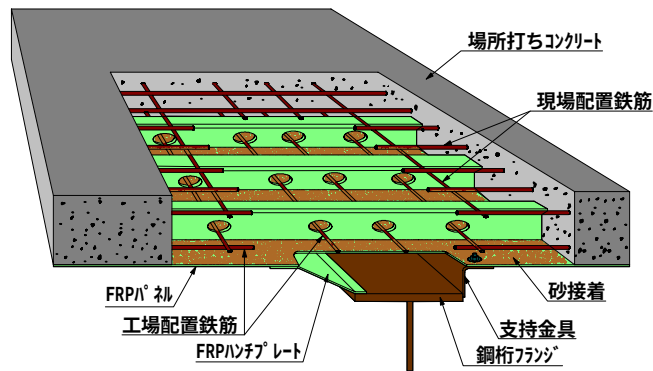


図 4.1 FRP 合成床版の概念図

(2) 経年変化調査事例³⁾

FRP 合成床版は、1997 年に実橋として初めて高知自動車道の松久保橋に適用された。この橋梁の床版に関しては、供用開始後約 6.5 年が経過した 2004 年 9 月 1 日に現地調査が行われ、床版下面からの目視点検が行われている。この結果、床版下面の状況（写真 4.1）は健全であり、床版下面の点検用開口部（写真 4.2）においてもひび割れ等の変状はなく、外観上問題ないことが確認されている。なお、本橋については、建設当初および、建設後約 3 年経過した時点における現場載荷試験が行われており、本床版の合成効果の経年変化や、自動車荷重の繰返し走行による剛性低下はほとんど生じず、健全性を確保していることが確認されている。



(a) 桁間部



(b) 張出部

写真 4.1 床版下面



写真 4.2 点検用開口部

(3) 床版打ち換えへの適用事例⁴⁾

FRP 合成床版は、RC 床版と比べ床版厚を薄くできる上、耐久性の向上が図れるという特長を有している。さらに、他の合成床版と比べ単位体積重量が小さいため、床版自重を軽量化することが可能となる。したがって、床版の取り替え工事に適用した場合、死荷重の増加が少ないため、桁や下部構造への負担を軽減でき、B 活荷重への対応などが可能となる。

このような観点から、昭和 41 年に建設された、秋田県北部の寒冷降雪地域に位置している兎尻（うさぎじり）橋（図 4.2）において、床版の打ち換えに FRP 合成床版が採用されている。なお、本橋の打ち換え前の床版は、交通荷重による疲労損傷および、凍害や融雪材による塩害の影響で、かなり損傷が激しい状態（写真 4.3）にあったが、FRP 合成床版を適用することで、耐食性の向上が図られている。

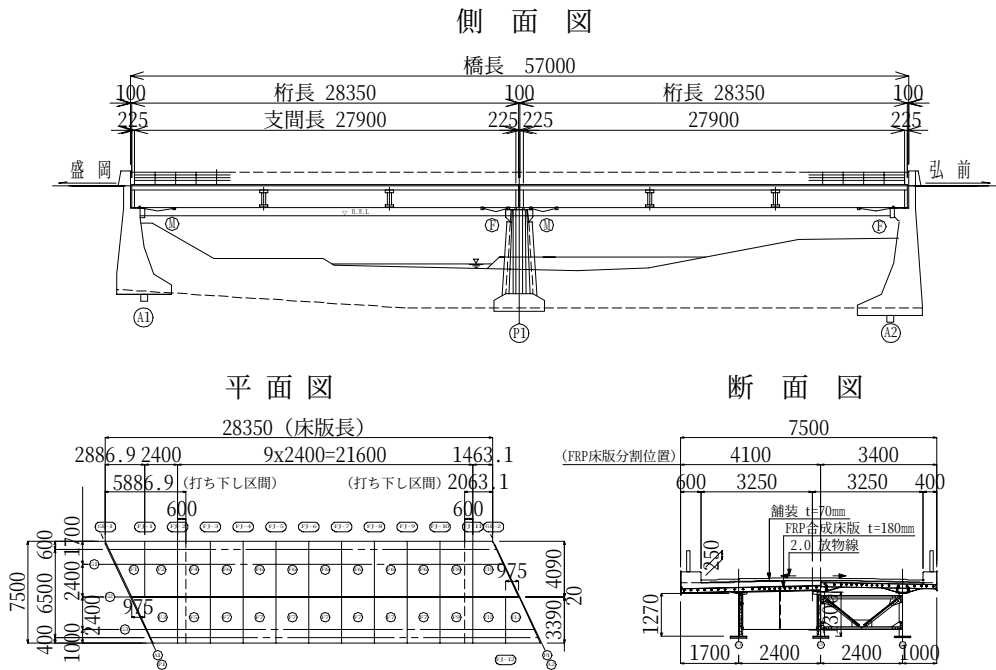


図 4.2 全体一般図



写真 4.3 工事前の状況

(4) 栈橋構造への適用事例⁵⁾

潮新町線橋梁は、排水機場の排出口により、埋め立てられずに取り残された入り江の部分に位置する公有水面に計画された都市計画道路の橋梁であり、橋梁形式として栈橋構造が採用されている。

本橋は、5m 間隔に配置された鋼管杭上に RC 桁を配置し、桁間に床版を設置する構造（図 4.3）であり、海面から非常に近い位置での施工となるため、床版型枠・支保工の施工が困難なことから、施工性、耐塩害性を考慮して、FRP 合成床版が採用されている。なお、合成床版は、3m を超えるような長支間床版に適用可能⁶⁾であるため、主桁間隔の拡大による杭本数の削減でコスト削減も図られている。本橋の施工状況を、写真 4.4、写真 4.5 に示す。

また、RC 桁が床版よりさらに低い位置にあり、満潮時には下面が水没してしまうため、耐塩害性に優れた FRP 材が永久型枠として使用された。

さらに、壁高欄においても、高潮時の防潮堤を兼用しており、路面からの高さが約 2.3m と非常に高く、外側に足場等の施工が困難であることから、外面に FRP 製の永久型枠が用いられている。

これらより、本橋では、高潮時、海水に接触する部分を、全て FRP で覆う構造とすることで、耐塩害性の向上が図られている。

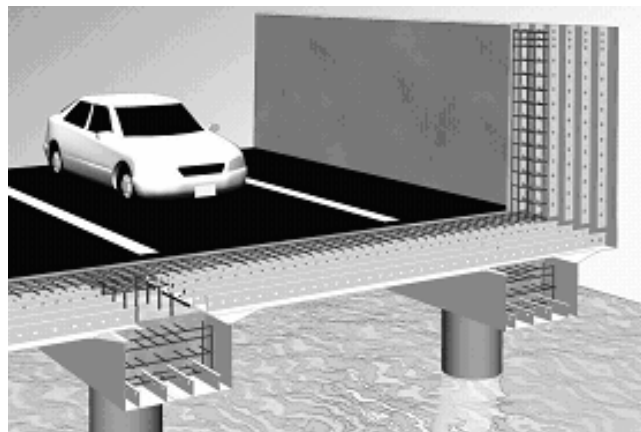


図 4.3 構造概念図



写真 4.4 横桁・床版パネルの設置状況



写真 4.5 完成

4.2.2 鋼材とFRPのハイブリッド型枠を用いた合成床版⁷⁾

本床版は、打ち換え用の床版として開発されたもので、軽量化と耐食性の向上のため、GFRP底面上に設置した角形鋼管を GFRP で覆った構造としており、角形鋼管内を中空とすることで軽量化が図られている。また、床版の部分打換えに適用する際、既設床版との取り合いが必要であり、FRP の断面形状にある程度の自由度を有する構造とするため、パネルの成形方法として、インフュージョン成形法※を採用している。図 4.4 に、本床版の概念図を示す。なお、本床版は、輪荷重走行試験により実橋床版としての疲労耐久性を有していることが確認されている。

※インフュージョン成形法とは、上型の代わりにフィルムやシリコンバックを用いて型を密閉し、真空圧にて樹脂を基材に充填・含浸させる閉塞型成形法

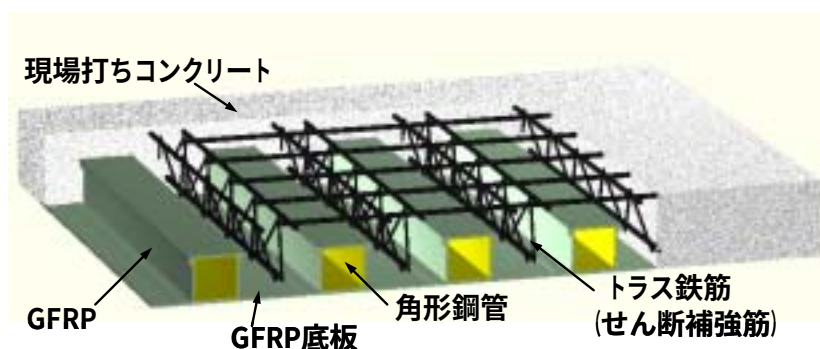


図 4.4 構造概念図

4.2.3 全FRP床版⁸⁾

全 FRP 床版は、図 4.5 に示すように、250mm×250mm (t=12mm) の引抜成形 FRP 角パイプに FRP 板を上下に接着接合した構造であり、軽量の FRP 材を中空断面で使用していることから、大幅な死荷重軽減が図られている。

本床版に関しては、道路橋床版への適用性を検討するため、輪荷重走行試験（写真 4.6）が実施されており、この結果、100kN の輪荷重を 70 万回走行させても特段の変状は見られていない。

このため、強度特性を明らかにした上で、異方性の影響などを勘案した適切な設計を行えば、力学的特性としては全 FRP 床版の適用は十分可能である。ただし、経済性の面では、従来の鉄筋コンクリート床版の方が優位となる結果となっており、今後の課題となっている。

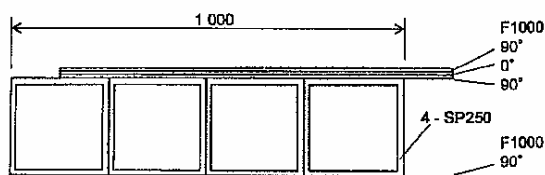


図 4.5 断面構成



写真 4.6 試験状況

4.3 海外での適用事例

海外では、主に米国、英国、カナダにおいて FRP 床版が開発され、実施工も行われている。ここでは、COBRAE（Composite Bridge Alliance Europe）にて報告されている欧米の適用事例を中心に報告する。また、近年、オーストラリアにおける実施工や、韓国での研究開発も報告されており、これらについても調査した。

さらに、米国では、本小委員会にて海外調査団（米国編）による実橋調査が行われており、この中の床版に関する事例について詳述する。

4.3.1 米国での適用事例

（1）はね橋の床版取り換えへの適用事例（Broadway Bridge）⁹⁾

本橋は、オレゴン州ポートランドのウイラメット川に架かる、1900 年代初期に建設された重交通の橋梁であり、1 日あたり 30,000 台以上の交通がある。なお、大きい船を通過させるため、2 枚羽根のはね上げ構造となっており、約 85m の支間、および 1112 m²の橋面積は、世界で 7 番目に長いはね橋である。全体で 2620 万ドルの復旧プロジェクトの一部として、はね上げ支間の損傷した鋼格子床版が、DuraSpan 500 FRP デッキに交換された。これは、急速施工が可能で軽量であることによるもので、DuraSpan パネルは昼夜 2 交代で架設され、自動車交通および川の交通を止める期間を最小とすることが可能となった。なお、本橋は、DuraSpan の 27 回目の施工であり、現在までで最大プロジェクトである。



写真4.7 ブロードウェイ橋

（2）FRP橋梁に関する海外調査団（米国編）での床版調査

a) FHWA（ターナーフェアバンク道路研究所）における研究開発

FRP の橋梁部材への適用は、軽量化、耐食性向上が主目的であり、床版の打ち換えや歩道橋に多く使用されている。米国における FRP 床版の実績は 200 橋近くあるが、試験施工的なものが多く、あまり大規模なものはない。なお、米国での活荷重たわみの制限値は L/800 であり、日本の L/2000 と比べ大きく、弾性係数の小さい FRP にとって有利な基準となっている。また、アメリカにおいても日本と同様に、高コスト、継手構造等が問題となっているが、FRP 活用のため、試験施工による評価や基準化が進められている。

FRP 床版の断面形状は、菱形と三角形の FRP 部材を組み合わせた構造（図 4.6）として開発されており、FRP の材料価格が高いため、急速施工が必要な取り換え、一時的な構造、可動橋、輸送が難しい現場など、非常に限られた範囲での適用となっている。

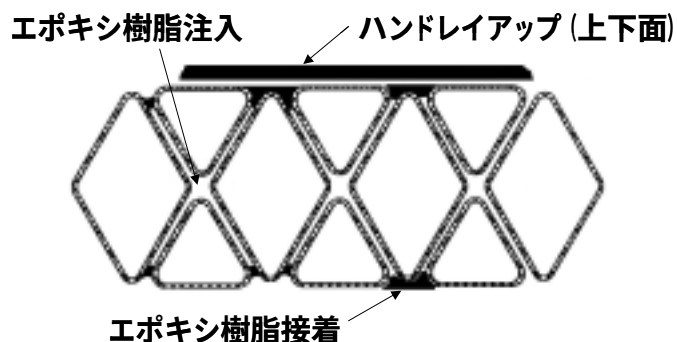


図 4.6 FRP 床版の断面形状

b) クリエイティブ・プルトルージョン社における開発状況

クリエイティブ・プルトルージョン社は、FRP の引き抜き成形品を製造している会社であり、FRP 床版に関しては、プロトタイプとして六角形と台形を組み合わせた断面 SuperDeck（写真 4.8 上）が開発され、台形を組み合わせたもの DuraSpan（写真 4.8 下）へと効率的に改良されてきた。FRP の成形方法として、引抜き成形はコストパフォーマンスが高いが、DuraSpan の材料（成形）費は、主桁間隔 5 フィート（約 1.52m）用で\$400~500/m²、主桁間隔 8 フィート（約 2.44m）用で\$800~900/m²と材料費はかなり高価である。



写真 4.8 床版用引拔材

しかし、実施工例では、FRP 床版のコストがコンクリート床版の 3 倍程度となるものの、工期短縮を理由に採用されたケースがあり、非常に限られた市場となっている。ただし、LCC の評価手法が確立されれば、市場は変化すると考えられている。また、コンクリートの打設が困難な気象条件の地域では需要がある。

FRP 床版上の舗装に関しては、これまで樹脂コンクリートが施工されていたが、ひび割れの発生があったため、現在では、通常のアスファルト舗装（5cm）が主流となっている。なお、アスファルト施工中の熱に関しては、強度低下や変形等は生じていない。

疲労耐久性に関しては、活荷重 HS-25（日本の B 活荷重相当）による 1000 万回の疲労試験が行われ、その結果、ユニット同士の接合箇所にはく離は見られるものの、クラック等の問題

は生じておらず、実用上問題ないことが確認されている。なお、ここでの試験は、定点載荷の疲労試験であり、日本で要求されている輪荷重走行試験ではない。

c) Dunning Creek bridge の現地調査(DuraSpan)

本橋は、ペンシルバニア州ベッドフォードに位置する、橋長 27.6m, 幅員 6.7m の橋梁であり、木床版の取換えだけでなく、損傷を受けた鋼桁も交換され、工事費\$485,000 で、2002 年に架け換えられたものである。床版の取り換えには、厚さ 195mm の DuraSpan が用いられ、RC 床版の 1/5 以下の重量と軽量であり、上部工死荷重が増加しないことから、橋台と橋脚は再利用されている。その上 DuraSpan は、軽量であることから急速施工が可能であり、床版の架設時間を従来床版のを施工時間と比べ、約 2~3 週間短縮した 1 日で設置でき、架設時間と人件費が劇的に減少した。

なお、高欄は、床版からの支持が困難なため、主桁外桁から片持ち支持された構造が採用されており、また、桁と床版の接続は、床版の空洞部にグラウトを充填することで、従来のスタッドにより鋼桁と結合している。



写真 4.9 橋面



写真 4.10 高欄



写真 4.11 床版下面（桁端部）



写真 4.12 床版下面（支間部）

d) Bently Creek Bridge の現地調査(Hardcore composites deck)

本橋は、ニューヨーク州シェマングに位置する、橋長 42.7m、幅員 7.6m の橋梁であり、1941 年に建設された鋼トラス桁は、鋼部材の断面欠損、舗装死荷重の超過等により、14 トンに荷重制限されていた。

このため、1999 年に、既設の RC 床版から、厚さ 350mm の Hardcore composites deck へ打ち換える工事が行われ、これにより死荷重が 265t 軽減され交通規制を解除した。また、この打換えは、桁の補強が不要となることから、他の工法に比べ 100 万ドル安価となる上、橋の耐用年数を 60 年から 90 年以上に延長することができた。

本橋の床版では、3.8m×14.3m の FRP パネルを 6 パネル使用しており、床版を横桁支持することで、断面欠損した縦桁で支持しないため、縦桁の補修が不要となった。なお、床版と桁との接続は、鋼桁と床版底板をボルトで接合している。



写真 4.13 全景



写真 4.14 側面



写真 4.15 床版下面（中間部）



写真 4.16 床版下面（張出部、歩道）



写真 4.17 歩道部床版断面



写真 4.18 車道と歩道の床版接続部

e) Bennetts Creek Bridge の現地調査(Hardcore composites deck)

本橋は、ニューヨーク州スチューベンに位置する、橋長 7.6m、幅員 10m、斜角 30°の床版橋であり、1926 年に建設された RC 床版橋が、著しく劣化し、10t に荷重制限されていたため、厚さ 610mm の Hardcore composites deck により、1998 年に架け換えられた（上部工工費：\$115,560）ものである。床版構造は、7.6m×5m のパネルを 2 パネル使用しており、現場架設は数時間で完了したため、工期を 9 ヶ月短縮することができた。

また、高欄は、FRP にコンクリートを充填した構造が採用されており、舗装は、工場にて予め樹脂コンクリートを施工後、現地架設している。しかし、写真 4.24 に示すように、車輛の通行により一部剥離している箇所が見られた。



写真 4.19 全景



写真 4.20 側面



写真 4.21 底面



写真 4.22 底面（橋軸方向継手部）



写真 4.23 高欄部



写真 4.24 路面（樹脂コンクリート）

4.3.2 欧州での適用事例

(1) ヨーロッパ大陸最初のGFRP道路橋 (ASSET) ¹⁰⁾

本橋は、ドイツのドレスデン近郊のクリップハウゼンに建設された、ヨーロッパ大陸におけるGFRPで作られた最初の橋である。合成材料で作られた橋は、主にライフサイクル上の利点と、施工の容易さにより、既設鋼製橋梁の取り換えに用いられている。本橋は、全てGFRPで製作され、スチールまたはコンクリート製の橋と同等の耐荷力を有している。

クリップハウゼンでは、2002年の洪水による氾濫により破壊された橋の架け替えをするために、2003年に歩道橋と自転車橋を4橋建設している。

伝統的なスチールや木製の橋は、建設費は安いですが、維持費が高価（湿度と腐食のため、1990年代初めに建設された橋の更新が必要）となる。一方、GFRP橋は長寿命で、腐食せず、最小のメンテナンスのみとなるため、クリップハウゼンではスチールと木材の代わりにGFRP構造が選択された。

ヨーロッパ中で、主に凍害と融雪剤による鉄筋の腐食、および既設の橋の多くが重交通で設計されていなかったため、多くの道路橋は損傷を受け、更新が必要となっている。

このとき、多くのケースでは、交通規制を最小限とするため、橋の設置は急速に行わなければならない。このため、軽量でプレファブ化が可能なGFRP橋は、大きな利点となる。

本橋では、2つのブロックで現場に搬入され、これらは川の上の設置場所で接合された。なお、社会資本投資の損失をなくすため、洪水の恐れがある時に橋を撤去するため、橋梁と橋台との連結はボルトにより固定されている。



写真 4.25 現場施工状況

4.3.3 オーストラリアでの適用事例^(11), 12)

(1) Coutts Crossing 試験橋梁

本橋は、1930年代に建設された橋梁（橋長 90m，幅員 7m）の 12m の側径間部における木橋の架け替えとして、オーストラリアでは最初に施工された FRP 橋である。図 4.7 に示すように幅 350mm×高さ 450mm の中空長方形断面の引抜き成形部材（ガラス繊維＋ポリエステル樹脂）を 20 本横に並べて（片側車線ごとに 10 本），エポキシ樹脂で接着し，上面には 100mm 厚の繊維補強コンクリートフェースを設置し，下面には一方向繊維強化プラスチック（炭素繊維）を接着して補強した床版橋である。ここでは，たわみ制限（スパン長/500）が設計を支配している。なお，腹板には，±45 度方向にガラス繊維を配置してせん断耐力を確保し，支点上では，FRP 製のダイアフラムを設置して，支圧強度を向上させている。また，洪水時の浮力に抵抗するように，橋台にはボルトで結合されている。

鉄筋コンクリート製のスラブと比較して，材料費は約 2 倍であるが，架け替え工事は 5 日で完了したなど，交通規制も限定的で，全体として工費も低く抑えられたと報告されている。

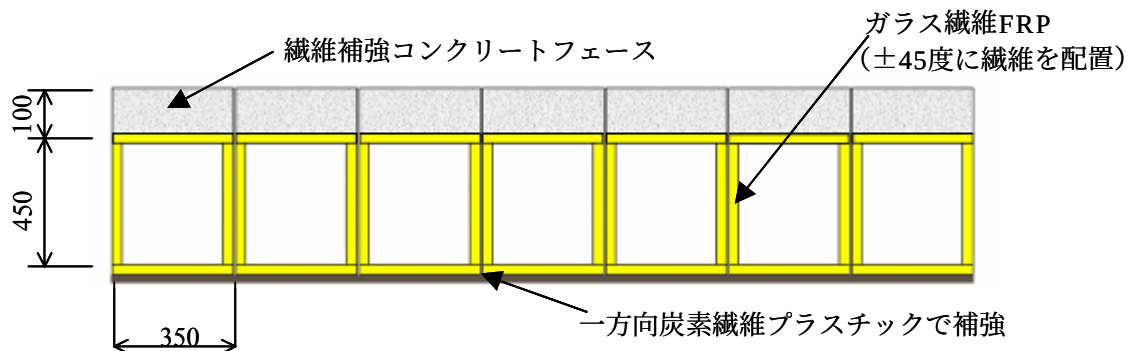


図 4.7 Coutts Crossing 試験橋梁の断面構成



(a) 架設状況



(b) 架橋状況

図 4.8 Coutts Crossing 試験橋梁の概要

(2) Taromeo Ck 橋梁

本橋は、2,500 台/日（大型車混入率約 16%）の交通量を有するクイーンズランドの道路路線において、一般的なコンクリート床版構造の約 2~3 倍の建設費（約 1,500US\$/m²）を投じて建設された 10m+12m の 2 径間からなる FRP 道路橋である。幅 2.1m と 2.6m のブロック 8 個により構成されているが、すべてのブロックの架設は 1 日で完了している。なお、スパン長 12m の橋梁重量は、約 70 トンで、コンクリート製橋梁の約 50%程度となっている。本橋の設計・施工段階では、①コンクリートスラブと FRP 腹板との付着、②コンクリートの収縮に対応するためのキャンバーの設計、③隣接 FRP デッキ間の機械的接合、④延性的な破壊モードを期待した設計等について検討されている。また、200 万回の疲労試験を行いその耐久性を検証している。図 4.9 に橋梁断面の概要を、図 4.10 に架設状況を示す。

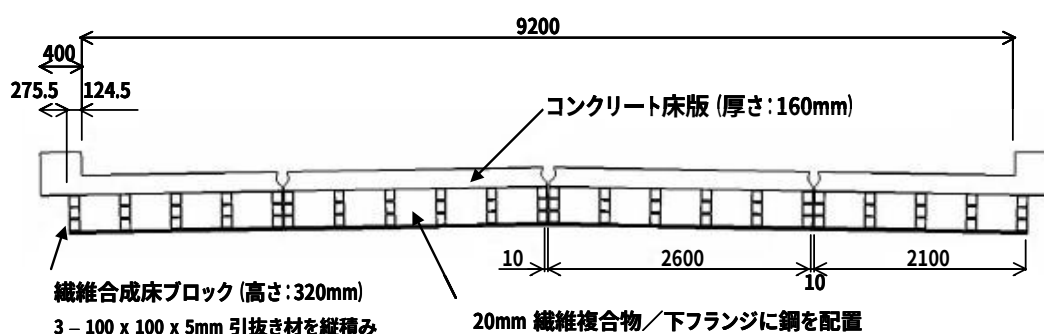


図 4.9 Taromeo CK 橋の桁・床断面形状



図 4.10 Taromeo CK 橋の架設状況

4.3.4 韓国での適用事例¹³⁾

(1) FRP床版

デルタデッキ（図4.11）は、2001年の試験施工により商業化され、その後、8橋の新設橋が施工された、韓国で最初のFRPデッキである（表4.2）。この中で、2006年に施工予定の、橋長300mのNulcha橋は、世界最大の施工事例となる。近年、KICT（韓国建設技術研究院：Korean Institute of Construction Technology）は、この床版の施工性を向上させるため、はめ込み式機械接合するFRPデッキを開発している。この床版は、引抜きにより成形されたパネルを一定サイズに工場で組み立て、現場でパネル同士をはめ込む構造であり、パネルは分解して再利用が可能である。

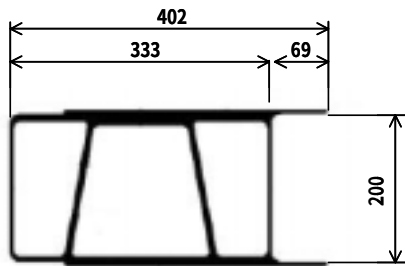


図4.11 デルタデッキの断面形状

表4.2 デルタデッキの施工実績表

橋梁名	架設位置	建設年	橋長 (m)	幅員 (m)	形式
Beoncheon	Jungbu expressway	2001.4	8	4	鋼鉄桁
Hyeongju	Gyeonbu expressway	2002.12	11	4.3	鋼鉄桁
Biwoodang	Cheonggye stream, Seoul	2004.6	44.5	9	鋼鉄桁
Gaejeong	Jangsu District, Province of Jeonbuk	2005.3	25	11	鋼鉄桁
Access bridge of Gwangyang Harbor	Gwangyang Harbor	2004.11	150	10.9	鋼鉄桁
Access bridge of Pyungtaek Harbor	Pyungtaek Harbor	2005.4	70.14	11.9	P C桁
Malmoo	Busan	2006後期*	120	30	鋼鉄桁
Nulcha	Busan	2006前期*	300	35	R C桁

*着工予定

(2) FRP-コンクリート合成床版

KICTの「BRIDGE 200」プロジェクト（2002~2006）により、FRPとコンクリートの長を生かした、FRP-コンクリート合成床版が開発された。

この合成床版は、引抜き成形により製作されたGFRPパネル上に、コンクリートを打設することにより作られるもので、FRPが引張りを負担し、コンクリートが圧縮を負担する構造となっている。その断面形状は、種々の解析と実験により改善されており、図4.12に形状の変遷を示す。2003年の原型断面では、市販品のFRP角パイプとFRP板を組み合わせることにより製造され、合成効果を確実にするために、コンクリートとFRPの間に砂が接着されている。このモデルの実橋への適用性を確認のための試験では、FRPとFRPの間で破壊する結果となった。このため、2004モデルでは、一体で引抜き成形されたGFRPパネルとされた。このモデルの静的試験では、十分な耐荷力を有することが確認されたが、疲労に対して弱いことが明らかとなった。最後に、2005モデルは、この問題を解決する方法として、FRPパネルにプレートによるシェアーコネクター取付ける構造が考えられ、200万回の輪荷重走行試験後も破壊していない。

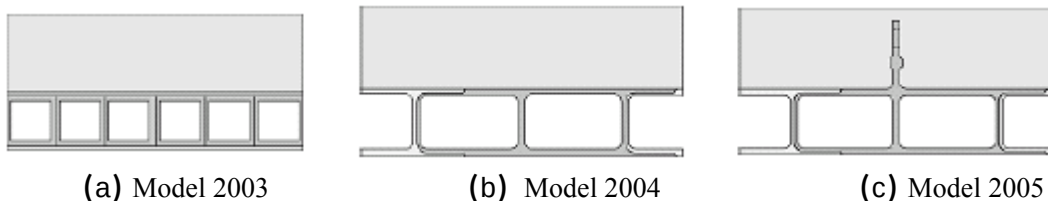


図4.12 FRP-コンクリート合成床版の断面形状の変遷

4.4 まとめ¹⁴⁾

道路橋床版部材として、国内では FRP 合成床版としての適用事例は多くあるが、FRP 床版の適用事例はない。欧米では、各種断面形状による FRP 床版が開発され、その多くが、実施工により試験されている。FRP 素材が高価であっても、下部工の数量低減・コスト低減、工期短縮、長期的な維持管理費の削減などを考慮すれば、LCC ベースで、FRP 床版の採用の可能性があることが示されてきた。ただし、更なるコスト削減を実現するためには、床版部材としての最適化、ならびに規格化による生産体制の整備が求められる。一方で、疲労耐久性に関する基礎データは極めて少なく、道路橋床版部材として積極的に用いるためには、これらの技術情報を集約・データベース化する必要がある。また、FRP 材料は、設計の自由度が高い構造材料であるが、接合方法には確立された手法がなく、多くの課題が残されている。橋構造では、床版同士の接合、桁構造との接合は不可欠であり、部材接合の構造詳細を、構造安全性・施工性の視点から十分に検討する必要がある。

[参考文献]

- 1) FRP 橋梁研究小委員会：FRP 橋梁－技術とその展望－，土木学会，構造工学シリーズ 14，2004.1
- 2) 久保圭吾，古谷賢生，能登宥愿：FRP 合成床版の紹介，宮地技報，No.20，pp23-28，2005.3
- 3) 高知自動車道松久保橋（上り線）FRP 合成床版の現地調査報告書，2004.9
- 4) 久保圭吾，松田芳昭，山口雅弘：FRP 合成床版を用いた床版の打換え（兎尻橋），宮地技報，No.21，pp14-27，2006.1
- 5) 久保圭吾，西田正人，河西龍彦，筒井秀樹，松井繁之：栈橋構造に適用した FRP 合成床版の設計と施工，第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp315-320，2006.7
- 6) 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物：土木学会，鋼構造シリーズ⑨B，pp71-96，1997.9
- 7) 久保圭吾，能登宥愿，松井繁之，長尾千瑛，石崎茂，平山紀夫，宮永直弘，小牧秀之：鋼材と FRP のハイブリッド型枠を用いた合成床版の開発，第 2 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集，pp81-84，2006.1
- 8) 村越潤，田中良樹，長屋優子：FRP の道路構造物への適用に関する調査，土木研究所成果報告書（平成16年度），pp.215-220，2005.3
- 9) COBRAE NEWS, No.08-04, 2004.9
- 10) COBRAE NEWS, No.11-04, 2004.12
- 11) Van Erp, Gm, Heldt, T., McCormick L., Carter, D., and Tranberg, C.: Development of an Innovative Fibre Composite Deck Unit Bridge, IABSE Symposium Melbourne 2002, Towards a Better Built Environment - Innovation, Sustainability, Information Technology, Melbourne, Australia, pp.1-13, 2002.
- 12) Department of Main Roads/Queensland Government: Fibre Composite Projects, Technical Note 54, 2006.3.
- 13) Byung-Suk Kim, Jeong-Rae Cho, Young-Jin Kim, Youn-Ju Jeong: The State of the Art of Bridge Deck Development in Korea, 土木学会第5回道路橋床版シンポジウム，2006.7
- 14) 土木学会技術推進機構・革新的構造材料の活用検討委員会：革新的構造材料の土木分野への活用，平成 18 年 8 月。

第5章 WG2（FRP 歩道橋）報告

5.1 概要

2004 年 1 月に出版した「FRP 橋梁—技術とその展望—」の成果および現在までの研究・実務の進捗状況を踏まえ、FRP 歩道橋設計マニュアル目次案の作成を目的として活動を実施した。これまでに下記に示す 11 回の WG 会議を開催し、FRP 歩道橋設計マニュアル目次案の他に、FRP 歩道橋設計マニュアルで主要項目となる要求性能の項目および内容について検討を行った。その結果、「FRP 歩道橋の性能照査型設計マニュアル目次案」および「要求性能」の素案を得ることができた。

第 1 回 WG（2005.1.28 開催）：

WG 計画および FRP 歩道橋設計マニュアル目次案の検討

第 2 回 WG（2005.4.17 開催）：

FRP 歩道橋設計マニュアル目次案の検討

第 3 回 WG（2005.6.21 開催）：

土木鋼構造物の性能設計ガイドラインに基づく要求性能の検討

第 4 回 WG（2005.8.30 開催）：

要求性能（耐風、継手・連結部、耐震、床版、使用性、耐久性）の検討

第 5 回 WG（2005.12.6 開催）：

要求性能（座屈・耐荷力、疲労）の検討

第 6 回 WG（2006.2.22 開催）：

FRP 歩道橋設計マニュアル目次案の検討

第 7 回 WG（2006.4.27 開催）：

FRP 歩道橋設計マニュアル目次案の検討

第 8 回 WG（2006.6.8 開催）：

要求性能（座屈・耐荷力、継手・連結部、使用性）の検討

第 9 回 WG（2006.7.18 開催）：

要求性能（座屈・耐荷力、継手・連結部）の検討

第 10 回 WG（2006.9.5 開催）：

要求性能（座屈・耐荷力、継手・連結部、使用性）の検討

第 11 回 WG（2006.10.3 開催）：

最終報告内容の検討

5.2 FRP 歩道橋の性能照査型設計マニュアル目次案

FRP 歩道橋設計マニュアル目次案を付録に示す。目次案作成にあたっての基本方針は下記の 2 点である。

- ① 近年の設計手法の流れを踏まえて、性能照査型の設計マニュアルとする。
- ② 現時点では、対象とする歩道橋の形式を、プレートガーダー形式、トラス形式、床版形式の 3 種類に固定しない。

マニュアル目次案は、「複合構造物の性能照査指針（構造工学シリーズ）」および「複合構造物

の性能照査例（複合構造シリーズ）」を参考に作成し、これらと同様のフォーマット形式を持つものとした。本報告書末尾の付録に、「FRP 歩道橋の性能照査型設計マニュアル目次案」を示す。

5.3 要求性能

「FRP 歩道橋の性能照査型設計マニュアル目次案」に記載する要求性能の項目および内容について検討を行った。要求性能としては、「土木鋼構造物の性能設計ガイドライン（日本鋼構造協会）」を参考に、安全性に関連する項目として「座屈・耐荷力」、「継手・連結部」を、使用性に関連する項目として「使用性」の各項目を設定した。「土木鋼構造物の性能設計ガイドライン」で取り上げられている「耐風」および「耐震」の各項目については、FRP 歩道橋に対する影響が現時点では不明確なため、本マニュアルの項目から除外した。「疲労」の項目については、歩道橋を対象とした設計マニュアルであるため、本マニュアルの項目から除外した。また、「耐久性」の項目については、より詳細な検討が必要との判断から、次期小委員会（FRP 複合橋梁小委員会）で検討することとした。

要求性能の下位表現（限界状態）としては、安全性に関連する項目である「座屈・耐荷力」については、終局限界状態に対応する「破壊限界」あるいは「座屈限界」を設定した。同じく、安全性に関連する項目である「継手・連結部」については、終局限界状態に対応する「破壊限界」の他に、使用限界状態に対応する「降伏限界」を設定した。また、使用性に関連する項目である「使用性」については、使用限界状態に対応する限界状態のみを設定した。

本章次頁以降のⅠ～Ⅲに、「FRP 歩道橋における座屈・耐荷力の要求性能」、「FRP 歩道橋における継手・連結部の要求性能」、および、「FRP 歩道橋における使用性の要求性能」の案を示す。

[I] FRP 歩道橋における座屈・耐力の要求性能（案）¹⁾

荷重作用 環境作用	照査方針			照査対象挙動 (評価性能)	照査指標	照査方法	
	上位表現	中位表現	下位表現 (限界状態)			応答値 S	限界値 R
設計供用期 間中の活荷 重	破壊しない	要素・部材 が最大耐力 を超えない *1	破壊限界	最大耐力	応力	作用応力	限界強さ*2
	有害な変形 を生じない	要素が局部 座屈しない *2	座屈限界	座屈耐力	応力	作用応力	限界応力
		部材が柱座 屈しない*2	座屈限界	座屈耐力	応力 断面力	作用応力 作用断面力	限界応力 限界断面力
		部材が横ね じれ座屈し ない*2	座屈限界	座屈耐力	応力 断面力	作用応力 作用断面力	限界応力 限界断面力
		構造物が全 体座屈しな い*3	座屈限界	座屈耐力	荷重	外力	限界荷重

[解説]

FRP 歩道橋の耐力・座屈における要求性能を、上位表現、中位表現、下位表現として表現する。上位表現は、設計供用期間中に作用する静的荷重に対して、材料に関しては、要素・部材が破壊しないこととし、座屈に関しては、有害な変形が生じないこととする。中位表現は、材料の破壊に関して、要素・部材が最大耐力を超えないことと、要素・部材・構造物全体の各座屈に関して表の4項目を挙げる¹⁾。下位表現（限界状態）は、材料の破壊限界（静的強さの限界）、座屈限界があり、限界状態の分類としては、終局限界とする。それぞれ、最大耐力、座屈耐力を評価性能とする。

以下、中位表現の分類に対して解説する。

- *1 材料破壊についての照査である。断面内の全ての点で、限界強さに対する照査を行うため、照査指標は応力とする。材料が確実に発揮することができる設計上の物性値を、「限界値」（限界強さ）として設定する。鋼材に対する安全率は、降伏点を基準とした場合 1.5~2 程度、引張強さを基準とした場合 2.2~3.2 程度をとっているが、FRP には鋼材に見られるような降伏点が現れないため、静的強さを基準として、相応した安全率（静的長期荷重の場合 3~6 程度）で除して限界強さを決める方法が一般的にとられている²⁾。静的強さに関して、さらに環境因子に対する物性保持率を掛けて低減したり、0.2~0.3% ひずみ耐力を用いたり、白化現象の観察や AE 計測による判断から限界強さを決定する場合もある。静的強さは、実験データに基づいて決定することとするが、板材のように 2 軸以上の複合荷重が作用する場合には、実験データに基づいて積層板の強度を決定する際には Hart-Smith 破壊基準を、実験データが不足する際には Tsai-Wu 破壊基準を採用すべきであるとしている⁴⁾。また、1 軸荷重の場合には、一般的に最大応力説や最大ひずみ説が用いられる。
- *2 「要素が局部座屈しない」はフランジやウェブといった要素のみが座屈する局部座屈、「部材が柱座屈しない」は部材全体が軸圧縮作用を受ける際の座屈、「部材が横ねじれ座屈しない」は部材全体が曲げ作用やねじり作用、その他曲げ圧縮作用、曲げせん断作用などの組

合せ作用を受ける際の横ねじれ座屈に対する照査である。FRP 積層板を等方性として扱える場合には、「部材が柱座屈しない」および「部材が横ねじれ座屈しない」の照査は、断面力を用いて、オイラー座屈理論などで部材座屈を照査することができる。しかし、FRP 積層板の積層構成によって座屈耐力に差が出る場合には、古典積層理論などで積層板の面外剛性を評価した座屈応力式を用いて照査を行い、局部座屈と部材座屈の関係を明らかにしておく必要がある^{5), 6)}。これらの FRP 板の座屈理論値以外に、座屈強度の実験データがある場合には、両者の低い方の値を限界値として採用することとしている³⁾。但し、積層材内部に空隙が存在する場合には、剥離によって相対的に薄くなった積層がより低い荷重で圧縮座屈する可能性があるため、積層材の白化現象等を確認することが必要である。

- *3 トラス、アーチ、ラーメンなど構造物全体の弾性安定についての照査である。一般的には、コンピュータによる有限要素解析などを用い、部材を梁要素などの線材でモデル化して、構造物全体の弾性安定問題を解く。場合によっては、初期不整や初期損傷を考慮に入れて座屈耐力（限界荷重）を求め、外力（設計荷重）と比較して安全性を評価する。さらに、幾何学非線形解析によって、座屈後挙動で安全性を照査する場合もある。板要素の局部座屈が、全体系の安定に影響を及ぼす恐れがある場合には、シェル要素などを用いて、より詳細なモデル化を行う¹⁾。

[参考文献]

- 1) 社団法人日本鋼構造協会：土木構造物の性能設計ガイドライン, JSSC テクニカルレポート No.49, p52, pp61-63, pp115-118, 2001.10
- 2) 社団法人強化プラスチック協会：FRP 構造強度計算の実際, pp207-209, 1984.10
- 3) 独立行政法人土木研究所ほか：FRP を用いた橋梁の設計技術に関する共同研究報告書（I）ービルトアップ法による FRP 歩道橋設計に関する検討ー, 共同研究報告書 整理番号第 324 号, pp13-16, 2005.12
- 4) John L. Clarke: Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP Design Code and Handbook, 1996
- 5) 山田聖志, 小宮巖, 中澤博之：連続引抜成形 FRP 箱形断面部材の軸圧縮による崩壊性状, 日本建築学会構造系論文集, No.518, pp.49-56, 1999.4
- 6) 山田聖志, 中澤博之, 小宮巖：引抜成形 FRP 柱材の圧縮力による崩壊メカニズム, 強化プラスチック, 強化プラスチック協会, Vol.46, No.6, pp.238-244, 2000.6

[II] FRP 歩道橋における継手・連結部の要求性能（案）*1

荷重作用 環境作用	照査方針			照査対象挙動*2 (評価性能)	照査指標		照査方法	
	上位表現	中位表現	下位表現 (限界状態)				応答値 S	限界値 R
設計供用期間中に作用する静的荷重	破壊しない	継手の作用力が継手の最大耐力を超えない	破壊限界	最大耐力*3	ボルト 応力	FRP ボルト	支圧応力 せん断応力	支圧強度 せん断強度
						金属 ボルト	せん断応力	せん断強度
					母材 力	FRP 母材	支圧応力 せん断応力 引張応力	支圧強度 せん断強度 引張強度
		継手の作用力が継手の降伏耐力あるいは摩擦接合すべり耐力を超えない	降伏限界	降伏耐力*4	ボルト 応力	FRP ボルト	支圧応力 せん断応力	支圧降伏強度 せん断降伏強度
						金属 ボルト	せん断応力	せん断降伏強度
					母材 力	FRP 母材	支圧応力 せん断応力 引張応力	支圧降伏強度 せん断降伏強度 引張降伏強度
					連結板 応力	FRP 連結板 金属 連結板	支圧応力 せん断応力 引張応力	支圧降伏強度 せん断降伏強度 引張降伏強度
				すべり耐力*5 (摩擦接合)	ボルト 力	FRP ボルト 金属 ボルト	1 本当たりのボルト力	1 本当たりのボルトすべり耐力

[解説]

- *1 継手形式は、支圧継手、せん断継手、摩擦継手を対象とする。接着継手は、取り壊しや再利用が困難であるため除外している。
- *2 照査対象挙動（評価性能）を最大耐力とするか降伏耐力とするかは、構造物あるいは部材に求められる重要度から決定される¹⁾。継手部の強度は、鋼材の場合には対全強比（75%以上）で規定される。FRP 桁の場合は通常たわみで断面が決まり応力に余裕があるため、鋼桁と同じ考え方を適用するとボルト数が過剰になり継手設計が困難になる。従って、FRP 桁の継手設計では作用力以上に強度を確保することを基本とする。作用力が小さい場合には設計強度が低くなるが、これを著しく低下させずに剛性を確保し、部材の不連続性を避けることにより過大な応力集中が生じないように配慮する必要がある。
- *3 静的強さは実験データに基づいて決定することとする。板材のように 2 軸以上の複合荷重

が作用する場合には、Hart-Smith 破壊基準や Tsai-Wu 破壊基準を用いる²⁾が、1 軸荷重が作用する場合には、一般的に最大応力説や最大ひずみ説を用いる。静的強さに関して、さらに環境因子に対する物性保持率を掛けて低減したり、0.2~0.3%ひずみ耐力を用いたり、白化現象の観察や AE 計測による判断から限界強さを決定する場合もある。

- *4 FRP 材では鋼材に見られるような降伏点が現れないため、静的強さを基準として相応した安全率（静的長期荷重の場合 3~6 程度）で除して限界強さを決める方法が一般的にとられている³⁾。FRP の降伏点としては、樹脂と繊維の付着が切れ始める点や樹脂にマイクロクラックが発生する点などが考えられる。
- *5 摩擦接合のすべり耐力の照査として、ボルト 1 本に作用する力を求めてボルト強度と比較する方法の他に、断面全体のボルト群で評価し作用断面力と比較する方法があり、より合理的な設計ができる可能性がある⁴⁾。
- *6 わが国における唯一の実施例である「沖縄ロードパーク歩道橋」では、主桁部材の接合に PC 鋼棒を用いた特殊な接合構造を用いているが、設計にあたっては FEM 解析と継手部供試体による強度試験により照査を行い、更に実橋での載荷試験と振動試験により全体挙動を確認し安全性を検証している^{5), 6)}。

〔参考図〕 継手構造と破壊形態

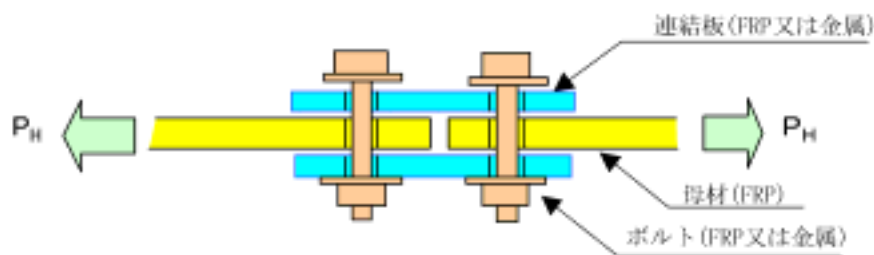


図 II.a 継手構造

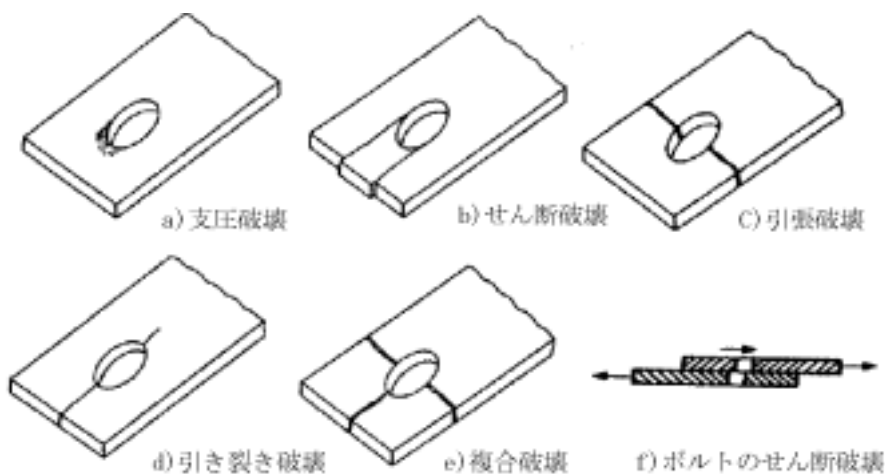


図 II.b 破壊形態⁷⁾



図 II.c セン断破壊の例⁸⁾ (図 II.b の b))

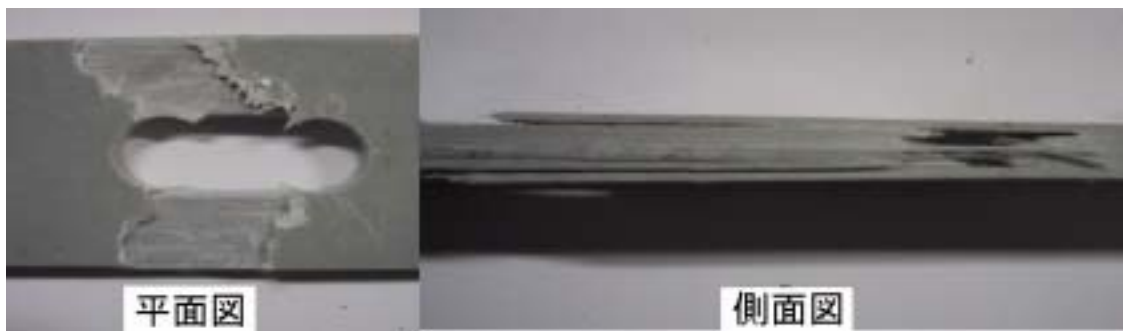


図 II.d 引張破壊の例 (図 II.b の c))

[参考文献]

- 1) 社団法人日本鋼構造協会：土木構造物の性能設計ガイドライン, JSSC テクニカルレポート No.49, p.65, 2001.10
- 2) John L. Clarke: Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP Design Code and Handbook, 1996
- 3) 社団法人強化プラスチック協会：FRP 構造強度計算の実際, 1984.10
- 4) 前掲 1), p.151
- 5) 北山他：沖縄ロードパーク歩道橋の設計, 第 1 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム, pp.103-106, 2001.1
- 6) 張他：GFRP 部材の接合方法, 第 1 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム, pp.107-112, 2001.1
- 7) 土木学会構造工学委員会 FRP 橋梁研究小委員会：FRP 橋梁—技術とその展望—, 2004.1
- 8) 木嶋他：CF/GFRP ボルト接合の強度特性に関する実験的検討, 第 59 回土木学会年次学術講演会, 2005.9
- 9) 独立行政法人土木研究所ほか：FRP を用いた橋梁の設計技術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—, 共同研究報告書 整理番号第 324 号, 2005.1

[III] FRP 歩道橋における使用性の要求性能（案）

荷重作用 環境作用	照査方針			照査対象挙動 (評価性能)	照査指標	照査方法	
	上位表現	中位表現	下位表現 (限界状態)			応答値 S	限界値 R
設計供用 期間中の 活荷重	使用者や周 辺の人が許 容限度以上 に不快感を 覚え、快 適に構造物 を使用する ことができる	利用者や構 造物に有害 なたわみが 発生しない	変形限界	剛性	たわみ	活荷重たわみ	たわみ限界*1
		利用者に不 快な振動 や、構造物 に損傷を与 える振動が 発生しない	振動限界	歩行性、共振、 振幅	速度 加速度 固有振動 数	応答速度 応答加速度 固有振動数	応答速度限界 応答加速度限界 限界振動数範囲 *2
設計供用 期間中に 想定され る荷重作 用	設計耐用期 間中に十分 に使用に耐 えうる	外観、耐久 性、水密性 に悪影響を 及ぼさない *3	限界ひび割 れ幅	外観	ひび割れ *4	目視、実測に よるひび割れ 幅	限界ひび割れ幅
			層間剥離の 有無		層間剥離 *5	層間剥離の状 況	層間剥離の有無
環境作用 (風・雪・ 地震)*6	使用者や周 辺の人が許 容限度以上 に不快感を 覚え、快 適に構造物 を使用する ことができる	利用者に不 快な振動 や、構造物 に損傷を与 える振動・ 変形が発生 しない	変形限界 振動限界	剛性 共振、振幅、 渦励振	たわみ 速度 加速度 固有振動 数	風荷重たわみ 応答速度 応答加速度 固有振動数	たわみ限界 応答速度限界 応答加速度限界 限界振動数範囲
環境作用 (気象条件 －時間降 雨量)*7	環境作用 (気象条件 －路面温 度)*7	歩行、走行 の妨げにな らない	歩行性の限 界	路面排水性 すべり抵抗性	勾配 すべり抵 抗性	横・縦断勾配 滑り抵抗値	限界勾配 すべり抵抗係数
環境作用 (気象条件 －路面温 度)*7				路面状態 (凍結、積雪)	温度	路面温度	限界路面温度

[解説]

- *1 現行の(鋼製)歩道橋の設計においては、たわみの限界値として $L/600$ (スパン: L) が用いられている¹⁾。FRP 歩道橋では、たわみ限界で断面が決定されることが多い。EUROCOMP では、用途に応じて $L/150 \sim L/500$ の範囲で規定されている²⁾。
- *2 振動の使用性に対する照査方法については、歩道橋の規模、利用目的の多様化により、振動数による共振の可能性の照査から、不快感などと直結する振動(加速度)振幅による照査(BS5400 など)が用いられるようになっている³⁾。
- *3 EUROCOMP に規定されている使用限界状態であり⁴⁾、具体的な照査方法に対する記述はないが、FRP 歩道橋の設計上、重要な因子であるため、ここでは中位表現として示す。
- *4 製作の段階で、外観の目視調査と計測により、限界ひび割れ幅以下であることを照査する。
- *5 製作の段階で、超音波探傷法により、積層間の空隙を含む層間剥離が無いことを確認する。引き抜き成形材では製造工程で金型により加圧されるため空隙が生じにくい、ハンドレイアップによる積層工程では空隙が生じやすいため注意が必要である。空隙そのものが断

面欠損に伴う初期不整となるばかりでなく、空隙に水が浸透し、凍結・融解を繰り返すことで、層間剥離を生じ、耐久性を低下させる要因となることが航空分野では報告されている。なお、上述のひび割れ幅、層間剥離や、樹脂やせについては、耐久性においても照査が必要であるが、層間剥離については、現場において超音波探傷法を適用する技術が十分に確立されていないのが現状である。

- *6 FRP 構造は、軽量で剛性が低いため、風雨などの環境作用によって、横揺れ、ねじれの発生が考えられるため、使用性として規定する。
- *7 文献 5) で規定されている荷重作用であるが、照査指針以下については具体的な記述はない。これらの環境作用に対しては、適切な横・縦断勾配を計画し、舗装材として排水性、滑り抵抗性を満たす材料を選定すればクリアできる問題であるため、ここでは、項目のみを示すこととする。なお、路面の凍結・積雪に対しては、必要に応じてロードヒーティングシステムなどを導入することも考えられる⁶⁾。

[参考文献]

- 1) 日本道路協会編：立体横断施設技術基準・同解説，pp.34-35，1979.1
- 2) John L. Clarke: Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP Design Code and Handbook, p.76, pp.82-83, 1996
- 3) 日本鋼構造協会編：これからの歩道橋—付・人にやさしい歩道橋計画設計指針，pp.120-123，1998.5
- 4) 前掲 2)，pp.27
- 5) 日本鋼構造協会 土木鋼構造物の性能設計に関する調査研究小委員会編：土木鋼構造物の性能設計ガイドライン，日本鋼構造協会，JSSC テクニカルレポート，No.49，2001.10
- 6) 前掲 1)，pp.57-58

第6章 WG3（FRP 橋梁のモニタリングとインテリジェント化）報告

6.1 はじめに

本章は WG3 における活動の報告として取りまとめる。WG3 では現在国内において FRP 橋梁のモニタリングが行われていないことなどから、橋梁全般のモニタリング技術に関する事例を収集することを活動とした。

本章では 2004 年「FRP 橋梁—技術とその展望—」¹⁾においてこれまでの事例をまとめてあるので、それ以降にモニタリングの事例が更新された部分について報告する。また、ものづくり大学で計画中の FRP 橋建設計画の進捗状況に合わせてモニタリングの実施を WG で検討することにした。現時点でこの計画は実施設計が完了した段階で、次年度から製作が始まる。

WG3 は、山田聖志、バセム・アブドゥーラ、稲田裕、幸左賢二、小宮巖、杉浦邦征、邊吾一、三上修一の委員によって構成され、ワーキンググループの会合としては 1 回集まりを持って活動方針を決定している。その後本報告書を取りまとめることになった。

特に本章ではインテリジェント化のためのセンサとして光ファイバセンシング、圧電材料によるセンシング、自己診断材料の可能性をもつ炭素材料による導電性を利用したセンシングに着目してまとめることにする。

6.2 光ファイバセンシングによるモニタリングの状況

光ファイバを用いたセンシングには、文献 1)でもまとめられているように連続的測定に適した OTDR（Optical Time-Domain Reflectometry）法や BOTDR（Brilliant Optical Time-Domain Reflectometry）法等の光ファイバ自身が変形するときの中を伝播する光の周波数特性の変化を測定する手法と FBG（Fiber Bragg Grating）や EFPI（Extrinsic Fabry-Perot Interferometric）等の着目点の高精度な変形を測定することが可能なセンサがある。FBG センサは一本の光ファイバに回折格子間隔の異なるセンサを用いることによって多点配置して変形を測定することが可能であるため構造物のモニタリングを行うセンサとして多くの研究が報告されている。従来、OTDR 法は距離分解能が低いという欠点が指摘されていたが、計測手法の高度化の研究も進められている。村山ら²⁾は大型複合材料のモニタリングとして、BOTDR 手法を用いたアメリカズカップ艇のヘルスモニタリングを実施し有効性を示すとともに、ブリルアンゲインスペクトルの形状変化に着目して、応力集中の検知の可能性を示している。檜ら³⁾は BOTDR と FBG を組合せたヘルスモニタリング手法を提案し、前述のデモンストレータを用いた損傷検知性能評価を行っている。

また、岩城ら⁴⁾は光ファイバセンサの操作性を改善するためにセンサ部をモジュール化し測定精度を検討している。この FBG 型光ファイバセンサはひずみセンサ、温度センサ、変位センサ、加速度センサ⁵⁾（BPS-701；東京測振）を想定して開発を行い、これらのセンサモジュールを日本女子大学百年館に実装して地震時の動的な構造ヘルスモニタリングを実施している。

山田らは、豊橋市をはじめとする東三河地域防災協議会の研究プロジェクトと地域企業による土木構造物のセンシング研究会を統合して、地域の橋梁の点検調査とその電子化構築システム⁶⁾、地震損傷や疲労損傷の光ファイバセンシングの実用化などの研究を 2003 年度～2005 年度の 3 年間、豊橋市からの委託研究として実施した⁷⁾。ここでは、先進的な回折格子型（FBG）センサを既設の鋼橋（豊橋市畑ヶ田橋）に貼付し、その長期間モニタリング実施状況について示す。尚、実験室レベルでは、FRP 内部に FBG センサを埋め込んで、そのマイクロクラック発生を検出する

ことにも成功しており、その詳細については、例えば既往の文献 8~11 を参考にすることができる。こうした成果を総合すれば、FRP 橋梁への FBG センシングも可能であり、低剛性の故に懸念される供用中の活荷重による振動性の評価や、各種外力による該当部位の内部変状の有無を容易に知ることができることとなる。

6.3 圧電材料によるモニタリングの状況

外力に応じた電圧を生じたり、電圧を加えると応力を発生したりする圧電効果（ピエゾ効果）を持つ材料である圧電材料は、アクチュエータとセンサの両方の機能を持ち、インテリジェント材料の実現を可能とする技術として注目されている¹²⁾。モニタリングに用いられる圧電材料としては、圧電セラミックスや圧電高分子材料などがある。PZT 圧電セラミックスを用いて弾性波を発信・受信して、コンクリートと鉄筋の剥離の検出に用いた研究¹³⁾や、交流電圧を使いインピーダンスの計測により応力状態を計測する手法の研究¹⁴⁾等が見られる。

また、Stanford 大学で開発された PZT 圧電セラミックスを用いたセンサ／アクチュエータは、Acellent Technologies 社により SMART（Stanford Multi-Actuator-Receiver Transduction）Layer とコンピュータ診断システム SMART Suitcase として商品化されている。センサは厚さ 0.254mm と非常に薄い圧電素子を配した回路基盤である。また SMART Suitcase は SMART Layer のセンサやアクチュエータを多点制御して診断ソフトを組み合わせで損傷診断をすることが出来る。松本ら¹⁵⁾は SMART Layer を用いてアルミニウム板を対象とした衝撃荷重の同定を行っている。また、三田ら¹⁶⁾は SMART Suitcase を用いてコンクリート中の鉄筋破断を検知する基礎的研究も行われている。このセンサはアクチュエータとしての起振力が小さいため実構造物に対するモニタリング事例は報告されていない。

S. Beskhyroun ら¹⁷⁾は、積層圧電アクチュエータと圧電型加速度計（小野測器社製）を用いて実構造物（使われなくなった鉄道用の転車台を用いて、転車台中央部ウェブに山形鋼を重ねた部材がボルト 13 本で接合されている）の部材のボルト接合した状態を健全状態とし、ボルトを外した状態を損傷状態として損傷の程度を変えて損傷位置と損傷の程度を評価する手法について検討している。この結果、損傷位置と損傷の有無の同定が可能であったことが報告されている。

圧電材料を用いた構造物モニタリングは実構造物に対するセンサシステムと損傷診断技術の開発検討段階である。

6.4 炭素材料の導電性によるモニタリングの状況

上記のモニタリング技術は、いずれもセンシング機能を持つ材料を構造物中に埋め込むことによりモニタリングの実現を図るものである。一方、複合材料を構成する材料自体の性質をセンサとして用いる手法の研究も行われている。複合材料では、CFRP 部材の炭素繊維が持つ導電性に着目して、抵抗値の計測によって構造物の健全性をモニタリングする手法が良く知られている。炭素繊維の導電性を利用したセンサの考え方は比較的古くから提案されており、様々な研究が行われている。

土木構造物、建築物を対象とした研究としては、柳田¹⁸⁾が炭素繊維ガラス繊維強化プラスチック（CF/GFRP）を鉄筋コンクリート構造物の鉄筋に代わる補強部材として用い、構造物として機能すると同時に、自ら損傷を検知する自己診断機能を持たせ、インテリジェント材料として提案したものがある。この材料では歪みが除去された後も抵抗値が残留するため、過去の歪みの記憶性能を持つことが示されている¹⁹⁾。炭素繊維を検知材としてコンクリート構造物の損傷検知に適

用した研究は、石井ら²⁰⁾がコンクリート杭の健全性モニタリングのためのセンサを開発し、構造体試験や実構造物への適用により有効性を示したものがある²¹⁾。また、奥原ら²²⁾は炭素粒子を用いた自己診断機能を持つ複合材料として、長繊維強化複合材料のマトリックス樹脂中に炭素粒子を分散させた材料を、自己診断材料として提案している。小さな歪み領域からの検知機能を持つ材料や、受けた歪みの最大値を記憶する機能を持つ材料などが開発され、土木構造物・建築構造物への適用性の実験的な検討も進められている²³⁾。これらの研究は主にコンクリート部材の損傷検知を図ったものであるが、複合材料に対しても適用可能性を有すると考えられる。

一方、CFRP 部材のモニタリングへの適用に関しても、最近様々な研究が進められている。黄木ら²⁴⁾は、CFRP 単層板および積層板のヘルスモニタリングの実現に向けて電気抵抗特性の定量的評価を行うとともに、損傷抑制効果を検討している。また、Park ら²⁵⁾は単一の炭素繊維や CFRP 複合材料の引張試験を行い、CFRP 材が引張歪みを受けたときの電気抵抗変化について、破断箇所を迂回する導電パス (Conductive Path) の形成を考慮した評価モデルを提案している。さらに、Schulte²⁶⁾は CFRP 部材の損傷検知のための抵抗計測方法について詳細な検討を行い、直流、交流計測による計測結果の特性評価や Electrical Impedance Tomography (EIT) による損傷箇所と程度の検知の提案を行っている。単純な抵抗計測以外にも、轟ら²⁷⁾は電気ポテンシャル法の損傷検知への適用を図り、CFRP 積層板の層間剥離の検知の可能性を実験的・解析的に示している。

CFRP の導電性を利用したセンサの設置方法としては、上記のような埋め込みによる方法の他に貼付けによる方法が考えられる。吉岡ら²⁸⁾は CFRP を利用した貼付け型のスマートパッチを開発し、前述のデモンストレータに繊維破断型のスマートパッチを装着し、損傷検知性能の検討を行っている。また端面乖離型のスマートパッチについて、電位分布変化計測による累積歪検出の可能性を示している。また、Wu ら²⁹⁾はコンクリート部材の補強用に用いられる CFRP シートに損傷検知性能を付加する研究を進め、特性の異なる繊維種を複合した材料を用いることによって、幅広い歪範囲において段階的に抵抗変化を生じるセンサを開発した成果を示している。土木構造物、建築物用の複合材料として、補強材や緊張材用の CFRP より線も開発され、適用が図られている。本山ら³⁰⁾はそのような CFRP ケーブルの引張特性の評価を行うとともに、引張時の抵抗変化を計測することによるモニタリングの可能性を検討している。

6.5 海外のモニタリングの状況

ISIS (Intelligent Sensing for Innovative Structures) ではカナダ国内で図 6.1 に示すように 5 箇所のモニタリング事例が紹介されている。このうち Taylor Bridge (Headingley) , Portage creek Bridge (Victoria) , North Perimeter Hwy/Red River Bridge (Winnipeg) , Esplanade Riel Pedestrian Bridge (Winnipeg) の 4 箇所は補修や耐震補強された橋梁のモニタリング事例として継続的にモニタリングが公開されている。マニトバ大学には構造物の健全度モニタリングサポートセンターが設置され ISHMII (International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure) のホームページ³¹⁾には北米はもちろんアジア、ヨーロッパ、オーストラリアの社会基盤に対する健全度モニタリングの事例が集められている。



図 6.1 ISIS のホームページ（図中の○印はモニタリング実施箇所）

6.6 まとめ

FRP 橋梁は建設資材の廃棄量を低減し、環境維持とエネルギーコスト削減を目的として、使用年数をできる限り長くする FRP 構造材を利用した長寿命型構造が注目される。しかし、このような長寿命化構造を合理的に実現するには、供用期間中の安全性を保証することも要求されるようになるであろう。

FRP 橋に対するインテリジェント化技術をワーキンググループで検討するに当たり、現在、日本における FRP 橋梁の建設計画はものづくり大学における歩道橋の建設計画があるが、ほとんどは既存橋梁の補修補強を目的に FRP が補強部材もしくは補強材料として使用される例が多い。今後も構造物のインテリジェント化に向けたセンシング技術や制御技術に関する研究は盛んに行われるので FRP 橋梁への応用を考慮した技術開発が必要と考えられる。

今後、構造物のインテリジェント化に向けた検討項目としては次のような点が挙げられる。

- (1) 開発されたセンシング技術を FRP 部材へ組込む技術の開発
- (2) CFRP のような材料そのものが自己診断機能を持つ材料の検討
- (3) 腐食環境の測定ような FRP 部材を利用するための新しいセンシング技術の開発
- (4) 実構造物に対するセンシング技術の摘要と長期モニタリングの実施

[参考文献]

- 1) 土木学会構造工学委員会 FRP 橋梁研究小委員会：FRP 橋梁—技術とその展望—第 5 章インテリジェント材料としての適用の検討と事例，土木学会，pp.131-146，2004
- 2) 村山英晶，影山和郎，成瀬央，島田明佳：ブリルアンゲインスペクトルの形状変化を利用した複合材料の損傷検知法，日本複合材料学会誌，Vol.28，No.6，pp.241-248，2002

- 3) 檜孝志, 永井謙宏: 分布型光ファイバセンサによる複合材料のヘルスモニタリング, 第4回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, pp.67-71, 2003.1
- 4) 岩城英朗, 柴慶治, 武田展雄: FBG 型光ファイバセンサを用いた構造ヘルスモニタリングシステム, 応用力学論文集, Vol.6, pp.1113-1129, 2003.8
- 5) 三田彰他: 構造ヘルスモニタリング用の FBG 加速度センサの最適設計と寿命推定, 日本建築学会技術報告集, No.14, pp.79-82, 2001
- 6) <http://www.st.tutrp.tut.ac.jp/ToyoHashi/>
- 7) 山田聖志: 幹線道路における橋梁の耐震性・地震損傷センシング, 受託研究報告書, 豊橋市, 2006
- 8) 山田聖志, 中澤博之, 小宮巖: 光ファイバセンサを用いた FRP 母材の損傷モニタリング, 土木学会第 58 回年次学術講演会論文集第 1 部, pp.1401-1402, 2003
- 9) 土木学会: FRP 橋梁—技術とその展望—, 構造工学シリーズ, 2004
- 10) 山田聖志, 中澤博之, 小宮巖: FRP 形材を骨組とした膜構造のクランプ部破壊性状と光ファイバセンサによる内部損傷モニタリング, 日本建築学会構造系論文集, No.564, pp.71-77, 2003.
- 11) Yamada, S., Nakazawa, H.Y. and Komiya, I.: Health monitoring of long-lived structural members reinforced with fiber multi-axial netting polymer layers having fiber optic sensors, Advancement of Material and Processing Engineering, SAMPE, pp.183-186, 2003
- 12) 日本機械学会: インテリジェント技術, 日刊工業新聞社, 218p, 2001.3
- 13) Wu, F., Chang, F-K: Diagnosis of Debonding in Steel-Reinforced Concrete with Embedded Piezoelectric Elements, Proc. 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CRC Press, pp.670-679, 2001.9
- 14) 宮下剛, 阿部雅人, 藤野陽三: ピエゾインピーダンス法による梁の張力同定, 土木学会論文集, No.710, pp.373-384, 2002
- 15) 松本賢, 田島賢典, 福永久雄: ひずみセンサを用いたアルミニウム板の衝撃荷重同定, 応用力学論文集, Vol.6, pp.1065-1072, 2003.8
- 16) 近藤智佳子, 三田彰: 波動伝播とパターン認識を用いたコンクリート部材の損傷診断, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 2003.9
- 17) S. Beskhyroun, S.Mikami, T.Oshima: Nondestructive damage detection scheme for steel bridges, 応用力学論文集, Vol.9, pp.63-74, 2006.8
- 18) 柳田博明: 次世代材料 インテリジェントマテリアル「賢い材料」が築く 21 世紀の技術, 講談社ブルーバックス, 966p., 1993
- 19) Muto, N., Yanagida, H., Nakatsuji, T., Sugita, M. and Ohtsuka, Y.: Preventing Fatal Fractures in Carbon-Fiber-Glass-Fiber-Reinforced Plastic Composites by Monitoring Change in Electric Resistance, Journal of American Ceramic Society, Vol.76, No.4, pp. 875-879, 1993
- 20) 石井清, 稲田裕, 杉村義広: 炭素繊維束センサの開発と性能評価 杭の健全性モニタリング手法の開発 (その 1), 日本建築学会構造系論文集, No.557, pp.129-136, 2002.7
- 21) 稲田裕, 石井清, 杉村義広, 佐々木建一: 炭素繊維束センサの杭損傷検知に対する性能評価 杭の健全性モニタリング手法の開発 (その 2), 日本建築学会構造系論文集, No.563, pp.91-98, 2003.1
- 22) Okuhara, N., Shin, S-G, Y., Matsubara, H., Yanagida, H. and Takeda, N.: Development of Conductirve FRP Containing Carbon Particle for Self-Diagnosis Structures, Proc. SPIE's Smart Structures and

- Materials, pp.314-322, 2001.3
- 23) H. Inada, H. Kumagai, and Y. Okuhara: Experimental Study on Structural Health Monitoring of RC Columns using Self-Diagnosis Materials, Proc. SPIE's Smart Structures and Materials, pp.609-617., 2004.3
 - 24) 黄木景二, 高尾義裕: 炭素繊維強化プラスチックの電気抵抗特性とその応用, 日本複合材料学会誌, Vol.28, No.6, pp.228-234, 2002
 - 25) Park, J. B., Okabe, T., Takeda, N. and Curtin, W. A.: Electromechanical modeling of unidirectional CFRP composites under tensile loading condition, Composites, Part A 33, pp. 267-275. 2002
 - 26) Schulte, K.: Sensing with Carbon Fibers in Polymer Composites, Material Science Research International, Vol.8, No.2, pp.43-52, 2002
 - 27) 轟章, 田中雄樹, 島村佳伸, 小林英男: 多点電圧変化による CFRP 平板の埋没はく離知的検出構造, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.67, No.658, pp.78-84, 2001.6
 - 28) 吉岡健一, 村井彰児, 北野彰彦, 宋東烈, 朴宰範: 電気抵抗変化を利用した CFRP スマートパッチによる歪履歴検出, 第 4 回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, pp.73-77, 2003.1
 - 29) Wu, Z.S., Yang, C.Q., Harada, T. and Tobe, Y.H.: In-situ Damage Detection of Concrete Beams Strengthened with Hybrid CFRP Sheets by DC Electrical Resistance Measurement, Proc. Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Vol.2, pp.853-866, 2003.11
 - 30) 本山泰之, 志賀浩介, 守屋一政, 太田俊昭: 炭素繊維複合材ケーブルの回転拘束および回転自由引張試験と電気抵抗法によるモニタリング, 日本複合材料学会誌, Vol.28, No.5, pp.196-293, 2002
 - 31) ISHMII Case study collection: http://www.ishmii.org/Case_Studies/

第7章 WG4（既設橋の補修・補強への FRP の活用）報告

7.1 はじめに

既設 RC 橋・鋼橋の補修と補強の合理的工法に関する研究は、維持管理・地震対策・社会資本の延命化の観点から、当面の緊急課題となってきた。土木学会コンクリート委員会の「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」（2000）や日本建築学会「連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案」（2002）では、既に炭素繊維シートや FRP 棒材を用いた RC 構造物の補修・補強工法がまとめられている。一方、近年、FRP プレートや FRP 形材を、RC 橋脚や鋼桁などの補修・補強に活用する事例が次第に報告されるようになってきており、国内外の事例調査や関連の研究動向とその合理性に関する検討結果を取りまとめることを目的として本ワーキンググループは設けられた。

7.2 ワーキンググループの活動概要

本ワーキンググループでは、委員会、幹事会の方針、すなわち

- 1) 既設橋の補修・補強への FRP の活用に関する国内外の事例の収集に努める。
- 2) 内外の研究事例あるいは実施事例を収集して、FRP を用いた鋼橋やコンクリート橋の補修・補強に関する項目を整理する。
- 3) FRP 材料を適用する構造物は、鋼とコンクリートの両方とする。

にしたがって、本ワーキンググループの活動方針を

- a) 対象構造物は、鋼橋、コンクリート橋、橋脚、床版とする。
- b) FRP 材料としては、炭素繊維、ガラス繊維、アラミド繊維を対象とする。
- c) FRP の形状は、板、ケーブルの 2 種類とする。
- d) FRP シートについては土木学会のコンクリートライブラリー101 にすでに纏められているので、本 WG ではシートについては参考程度にとどめる。

とした。

ワーキンググループは下記の 6 回開催され、

- 第 1 回；平成 17 年 3 月 22 日（火）
- 第 2 回；平成 17 年 5 月 13 日（金）
- 第 3 回；平成 17 年 7 月 7 日（金）
- 第 4 回；平成 17 年 10 月 7 日（金）
- 第 5 回；平成 18 年 1 月 26 日（木）
- 第 6 回；平成 18 年 4 月 20 日（木）

次のような資料を得た。

- 資料1: A. Chacon, M. Chajes, M. Swinehart, T. Miller, D. Richardson, and G. Wenczel: Steel bridge rehabilitation using advanced composites, Proc. of The Second International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (CD-ROM), 2004.
- 資料2: T.J. Wipf, B.M. Phares, F.W. Klaiber, Y.S. Lee, A.H. Al-Saidy, A. Abu-Hawash, and C. Monk: Use of CFRP Plates in the Strengthening of Steel Girder Bridges, Proc. of The Second International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (CD-ROM), 2004.
- 資料3: 榎本剛：炭素繊維ケーブル“CFCC”の技術開発, JETI, Vol. 51, No. 13, pp.140-142, 2003.

- 資料4: コニシ(株): 接着剤について, パワーポイント配布資料.
- 資料5: カボコン工法研究会: 炭素繊維集成板を用いた構造物の補修・補強 — CABCON 工法施工事例集 —.
- 資料6: Technical Data 0204-XN: Granoc Yarn XN Series, Nippon Graphite Fiber Corporation.
- 資料7: アウトプレート工法研究会: アウトプレート工法.
- 資料8: 濱田譲, 井上真澄, 小林朗, 高木宣章, 児島孝之: 緊張した炭素繊維プレートによる既設コンクリート部材の補強に関する研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, 27-44, 2002.8.
- 資料9: 藤田真実, 井村正和, 松田義則, 駒田憲司, 高橋輝光: 調布高架橋のアウトプレート工法による補強工事と実橋載荷試験, 橋梁と基礎, Vol.38, No.10, 1-5, 2004-10.
- 資料10: 西崎到: FRP の土木構造用途における劣化と耐久性, 非破壊検査第 54 巻 1 号, pp.20-25, 2005-1.
- 資料11: Abdel-Hady Hosny: The Fourth Middle East Symposium on Structural Composites for Infrastructure Applications, Egyptian Society of Engineers.
- 資料12: 連重俊, 平野廣和, 青木徹彦, 井田剛史, 袁涌, 松井謙典: 紫外線硬化型樹脂による補強対策を施した長柱の疲労実験, 土木学会論文集, No.784/VI-66, 99-107, 2005.3.
- 資料13: 稲葉尚文, 富田芳男, 紫桃孝一郎, 鈴木博之, 岡本陽介: GFRP シート貼付によるリブ十字溶接継手の補強に関する一提案土木学会論文集, No.798/VI-68, 89-99, 2005.9.
- 資料14: 岡本陽介, 鈴木博之: GFRP を用いた疲労き裂の補修に関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp.81-88, 2005-11.
- 資料15: 鈴木博之, 稲葉尚文, 富田芳男, 岡本陽介: プライマーを塗布された面外ガセット溶接継手の疲労試験, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 平成 17 年 9 月.
- 資料16: 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, pp.82-86, 2001 橋梁特集号.
- 資料17: 張惟敦, 鎌田敬治, 佐伯彰一, 山城和男: 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, pp.77-81, 2001 橋梁特集号.
- 資料18: 山本尚樹, 張惟敦, 佐伯彰一, 山城和男: FRP 製歩道橋の主桁継手部に関する解析的評価, 石川島播磨技報, pp.73-76, 2001 橋梁特集号.
- 資料19: 張惟敦, 鎌田敬治, 佐伯彰一, 山城和男: FRP 製歩道橋の機械的接合部に関する実験的評価, 石川島播磨技報, pp.69-72, 2001 橋梁特集号.
- 資料20: 鈴木博之, 岡本陽介: CFRP 板を用いた疲労き裂の補修工法の提案, 明星大学理工学部研究紀要, 第 41 号, pp.171-183.

第 1 回のワーキンググループでは, アメリカで CFRP 板を実橋の補強に適用した事例が紹介された(資料 1, 2)。補強前後の実橋の構造特性が計測され, 性能が改善されているとのことであった。また, 炭素繊維ケーブルの技術開発について話題提供があった(資料 3)。炭素繊維ケーブルとしては, NM グラウンドアンカー, 斜張橋・吊橋用ケーブル, 外ケーブル, 架空送電線の補強芯材などの施工実績があるとの報告があった。

第 2 回のワーキンググループでは, コニシ(株)の辻本仁氏, 伊藤秀治氏に接着剤について説明していただいた(資料 4)。「接着剤とは」, 「接着の理論」, 「接着剤の分類」, 「硬化方法」, 「接着剤の選び方」, 「接着剤の特徴」, および「土木・建築への応用」について詳細な説明があった。接着剤の耐久性に関する質問があり, 鋼板接着工法で補強された床版に関して調査された例があると

のことであった。また、接着剤の人体への影響に関する質問があった。また、炭素繊維集成板の施工事例について紹介があった（資料 5）。最初に、炭素繊維集成板の概要、特徴について説明があり、その後、炭素繊維集成板を用いた補修・補強事例として、桜の目橋（鋼トラス橋）、高橋（RC 桁橋）などの紹介があった。「補修・補強前後の構造物の性能が調査されていない点が残念である」とのコメントがあった。これに関連して、1996 年施工のボックスカルバートを 2002 年に調査したところ、特に問題はなかったとのことであった。

第 3 回のワーキンググループでは、CFRP の用途、各種 CF の製造方法および特性、CFRP の基礎理論、ピッチ系高弾性率 CF の特長と用途（資料 6）、およびピッチ系低弾性率 CF の特長と用途（資料 6）について詳細な紹介があった。また、炭素繊維プレートによる既設コンクリート構造物の補強に関する理論と実施工例が報告された（資料 7, 8, 9）。この事例は平成 18 年 1 月に開催されるシンポジウムに投稿することとなった。続いて、FRP の劣化と耐久性について紹介があった（資料 10）。多くの実験例が実際の環境条件とはややかけ離れた条件で行われたものではあるが、貴重なデータが提供されているとのことであった。さらに、平成 17 年 5 月 20～23 日にエジプトのアレキサンドリアで開催されたシンポジウム「The Fourth Middle East Symposium on Structural Composites for Infrastructure Applications」について報告があった（資料 11）。

第 4 回のワーキンググループでは、中央大学の平野廣和先生に「紫外線硬化型樹脂による補強対策を施した長柱の疲労実験」（資料 12）についてご講演いただいた。主な内容は、（1）紫外線硬化型樹脂は疲労き裂発生寿命にあまり効果がなかった、（2）垂鉛メッキの問題は特に認められなかった、（3）試験施工は既に行っており、現在、経過を観察中である、とのことであった。また、FRP 水門に関する調査結果について報告があった。外観調査の結果によれば、ほとんど問題はなかったが、中には太陽光による表面樹脂の劣化が認められた水門もあった。35 年経過した材料の引張強さ、弾性係数に大きな低下はなく、耐食性も良好であった。FRP 水門のメリットは経済性、海水耐食性、設置環境に対する汎用性などであり、一方、問題点は基準類の整備の遅れなどであるとのことであった。

第 5 回のワーキンググループでは、GFRP を用いた疲労き裂の補修・補強、およびプライマーを用いた疲労き裂の補強に関して説明がなされた（資料 13, 14, 15）。鋼材と GFRP の弾性係数に大きな違いがあるのに疲労強度を改善する理由、GFRP の効果とプライマーの効果、GFRP の最終の剥離状況、プライマーの種類の違いなどについて議論があった。また、GFRP の成形方法、用途、用途別出荷量などの紹介があった。GFRP 使用のメリットは、軽量化が可能であること、耐食性が高いこと、絶縁性を有していることなどであり、デメリットは、コスト、耐久性などであるとのことであった。なお、紫外線による劣化が懸念される場合にはウレタン塗装を施して対処するとのことであった。

第 6 回のワーキンググループでは、2000 年 4 月に竣工した伊計平良川線ロードパーク連絡歩道橋について紹介があった（資料 16, 17, 18, 19）。本橋は塩害対策としてのパイロット事業であり、コストメリットはない、設計においては、橋梁の 1 次振動数が 1.5～2.3 に入らないよう配慮した、現在、ボルトおよびリベットの一部に腐食が見られるなどの説明があった。続いて、CFRP 板によって補強されたき裂を有する鋼板の静的引張試験結果に基づいて、き裂を有する部材の力学的挙動に及ぼす CFRP 板の幅、および長さの影響について説明があった（資料 20）。さらに、CFRP 板によって補強されたき裂を有する鋼板の疲労試験結果および弾塑性解析結果に基づいて、CFRP 板を疲労き裂の補修に用いることの可能性、および適用可能な場合の留意点について説明があった。

7.3 あとがき

本ワーキンググループの活動を通して、既設鋼橋の補修・補強に FRP を活用するための研究は活発に行われてはいるものの試験施工を含む実施工が少ないように感じられた。したがって、本ワーキンググループの目的の一つである研究動向とその合理性に関する検討については一応の成果が得られたものと考えているが、国内外の事例については必ずしも十分な調査ができたとは言えないように思われる。特に、国内の事例が乏しく、国内の橋梁管理者においては、FRP を既設橋の補修・補強に適用するための研究が活発に行われていることは把握しながらも、なかなか実用できないでいる現状のようである。土木学会を始め国内の各学協会においてさまざまな調査研究が行われており、また、International Association for Bridge Maintenance and Safety や 2003 年 3 月に土木構造物への FRP の適用を推進するために設立された国際学会 International Institute for FRP in Construction などにおいても活発な活動が行われているようであるので、今後は、これらの機関とも協力して世界の研究動向、施工事例を収集したいと考えている。

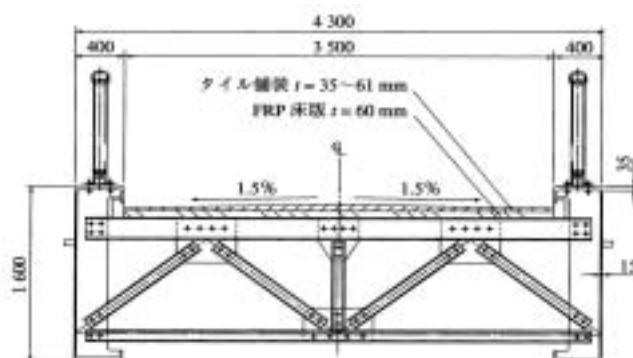
第8章 FRP 橋梁の今後の展望

8.1 我が国における FRP 橋梁の開発状況

我が国における FRP 橋梁の実橋は、沖縄の伊計平良川線ロードパーク橋（支間割 19.7m+17.2m の 2 径間連続 FRP 桁橋，2000 年完成），ただ 1 橋（歩道橋）のみである。



(a) 全景



(b) 断面図

図 8.1 伊計平良川線ロードパーク歩道橋

しかしながら，その後も，各所で，様々な形式の FRP 歩道橋に対して，試設計に基づく実大模型による実証試験を含む研究開発が活発に実施されている。首都大学東京における「GFRP 引き抜き成形材の接着断面構造を用いた床版橋形式歩道橋」，ものづくり大学における「GFRP 引き抜き成形材を用いたポニートラス歩道橋」，および，土木研究所の「ビルトアップ法によるハイブリッド 2 主桁歩道橋」の開発などであり，本章の末尾にそれらの概要（研究開発Ⅰ～Ⅲ）を添付しているので参照されたい。特に，ものづくり大学における画期的な構造のポニートラス歩道橋は，平成 19 年度前期に学生実習の形で実際の建設が予定されており，構内連絡橋としてではあるが，我が国最初の FRP トラス橋の実橋の出現が間近に迫っている。

したがって，我が国における FRP 橋梁の道路橋への適用の途は極めて険しいといえる状況であることはいうまでもないが，歩道橋については，適材・適所の形で，鋼橋やコンクリート橋，および，各種複合橋梁などと共存し得るようになる時代の到来もそう遠くはないことが予感されるといっても過言ではなかろう。

8.2 革新的構造材料の活用検討委員会について

土木学会では，材料メーカーおよびゼネコグループの委託により，平成 16 年 5 月，「革新的構造材料の活用検討委員会」（委員長：北海道大学・上田多門教授）を技術推進機構に設置し，産・官・学の異分野の研究者によって，材料開発から，地中・海洋・橋梁等構造物への適用検討，LCC および環境負荷評価までの一貫した調査・研究開発を 2 年間にわたって実施した。その成果は，成果報告書その 1（平成 16 年度），および，成果報告書その 2（平成 17 年度）に取りまとめられ，特に，成果報告書その 2 については，それを用いた講習会を土木学会で平成 18 年 8 月に開催するとともに，同年 12 月には，体裁を整えて，複合構造シリーズとして出版予定である。

本検討委員会は，当初，府省連携プロジェクトとして，府省横断の大型研究開発予算獲得を目指したものであったが，期待した適切な受け皿を見出すことができず，結局は，文部科学省の科

学技術振興調整費や国土交通省の建設技術研究開発助成制度など、各省単独ではあるものの比較的大型の研究開発予算に応募することとなった。

各年度の成果を踏まえて、平成 16 年度末に文部科学省科学技術振興調整費、平成 17 年度末には同科学振興調整費と国土交通省建設技術研究開発助成制度に応募した結果、下記に示すように、平成 18 年度～20 年度にわたって国土交通省建設技術研究開発助成制度による助成金を受けられることが決定した。

なお、本検討委員会解散後も随時応募を積極的に行っていくものとし、その応募および採択後の実施に際しては適宜必要な WG を設置して対応することとなった。

8.3 国土交通省・建設技術研究開発助成制度による共同研究について

上述のように、平成 17 年度末公募の国土交通省・建設技術研究開発助成制度に、『テーマ 12. 長期的な機能保持とライフサイクルコストの低減』で応募し、採択された研究課題は、「革新的材料を用いた社会基盤施設の再構築（建設用ハイブリッド FRP 構造部材の開発、期間：平成 18 年度～20 年度）」であった。研究代表者は埼玉大学・睦好宏史教授であり、同大学、首都大学東京、長岡技術科学大学、土木研究所、首都高速道路、清水建設、大林組、東レ、JR 東日本による共同研究を行うこととなった。本研究課題は、「革新的構造材料の活用検討委員会」における成果を最大限に活用したものであり、共同研究メンバーは同委員会の橋梁・ペDESTリアンデッキに関する WG と LCC および環境負荷評価に関する WG のメンバーを中心に構成された。

本研究課題の達成目標は、異種繊維材料から成る、軽くて、錆びない高強度なハイブリッド FRP 構造部材を開発して、性能照査型設計法、ライフサイクルコストと環境負荷評価手法を開発することである。さらに、これにより、老朽化した都市部の社会基盤施設の再構築、ならびに歩道橋、ペDESTリアンデッキ、バリアフリーを目指したビル間を結ぶ連結道路などへの実用化を図ることである。

8.4 今後の土木学会における活動について

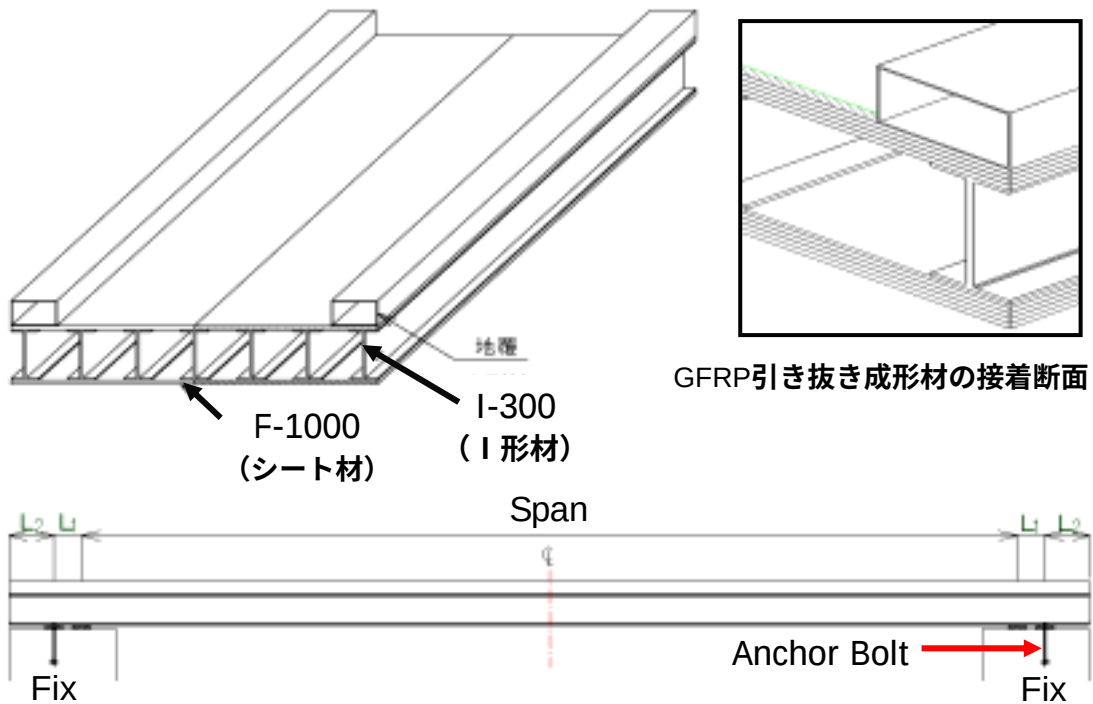
構造工学委員会「FRP 橋梁設計技術小委員会」では、その成果の一つとして、「FRP 歩道橋の性能照査型設計マニュアル（仮称）」の目次案を策定しており、これを引き継ぐ形で、平成 18 年 10 月に新たに発足した複合構造委員会「FRP 複合橋梁小委員会」（委員長：豊橋技術科学大学・山田聖志教授）では、本目次案をたたき台にして「設計指針」へと発展させ、複合構造シリーズとして土木学会より出版することを目指している。

本小委員会では、設計指針を審議する設計法 WG に加えて、上述の国土交通省・建設技術研究開発助成制度による共同研究グループの主要構成員を核とした技術検討 WG も設けられることになっており、両 WG の連携によって互いの成果がより実りあるものとする計画である。遅くとも 3 年後には、実際の設計に十分に供し得る「FRP 歩道橋の性能照査型設計指針」が取りまとめられる予定であり、我が国における FRP 歩道橋の普及および発展に大きく寄与することが期待される。

なお、既設橋の補修・補強に関する FRP の活用に関する調査・研究については、複合構造委員会に「FRP による鋼および複合構造の補修・補強小委員会」（委員長：明星大学・鈴木博之教授）が別途設けられることになっており、IIFC（International Institute for FRP in Construction）などと協力して最新情報を収集・発信するとともに、同様に複合構造シリーズとして「設計・施工指針」を土木学会から出版することを目的としている。

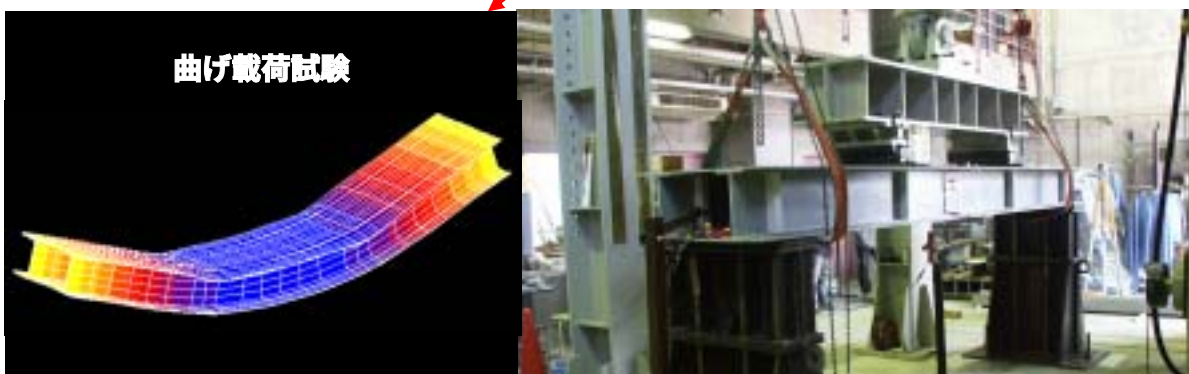
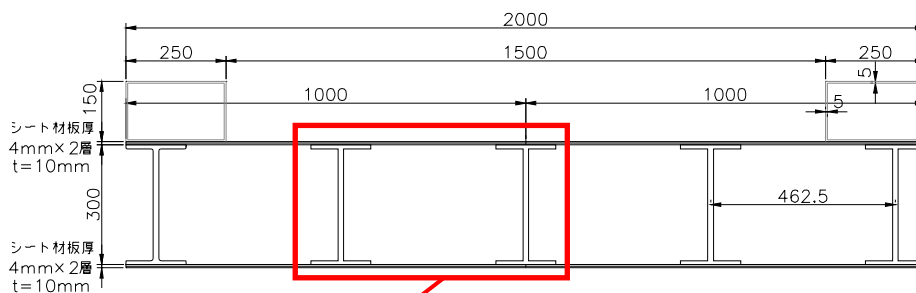
【I.GFRP引き抜き成形材の接着断面構造を用いた床版橋形式歩道橋】

出典：“Structural Characteristics of Pedestrian Slab Bridge Using GFRP Pultrusion Profiles”,
Tokyo Metro. Univ., Proc. of Int. Colloquium on Application of FRP to Bridges, JSCE, 2006.



疑似両端固定支持条件

試設計断面 (Span 16m)



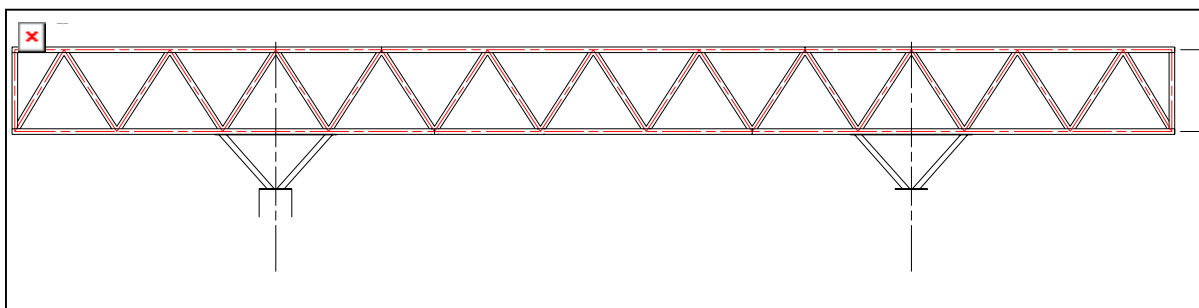
【II .GFRP引き抜き成形材を用いたポニーートラス歩道橋】

資料提供：ものづくり大学建設技能工芸学科 増渕 文男 教授



木床版

側面図



3 パネル試験製作



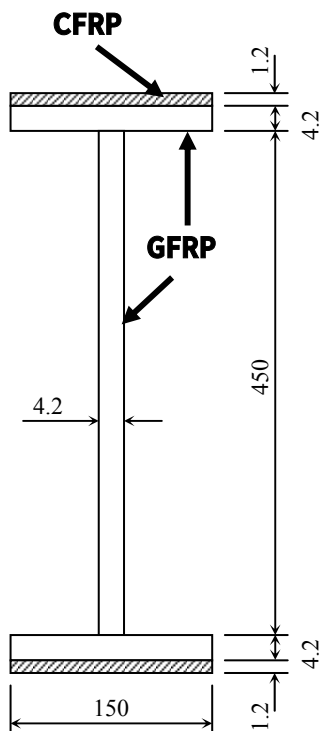
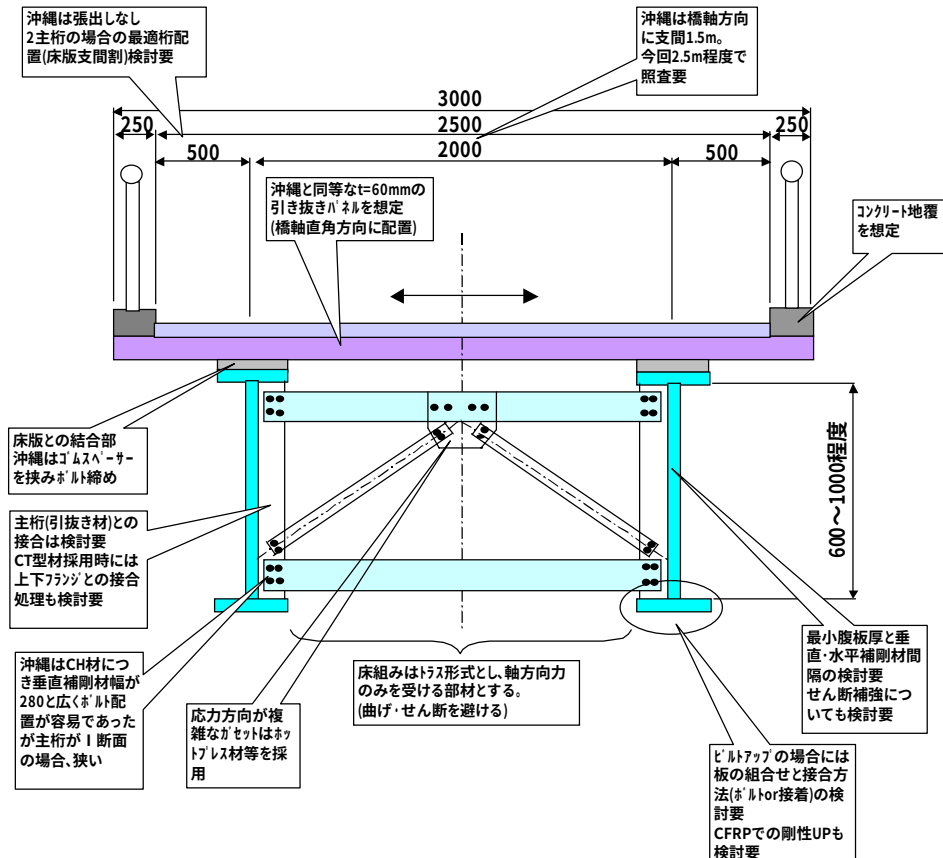
現場架設テスト状況



【Ⅲ.ビルトアップ法によるハイブリッド2主桁歩道橋】

出典：「FRPを用いた橋梁の設計技術に関する共同研究報告書(Ⅰ)」(整理番号第324号)

独立行政法人 土木研究所 (平成17年12月)



付録 FRP 歩道橋の性能照査型設計マニュアル目次（案）

1. 総 則

- 1.1 適用範囲
- 1.2 用語の定義
- 1.3 記 号

2. 要求性能と照査方法 *指針共通編 2., 照査例共通編 2., はり編 2. と同一の表現

- 2.1 一 般 *指針共通編 2.1
- 2.2 要求性能と目標性能
*指針共通編 2.2, *照査例共通編 2.1, はり編 2.1 に対応
 - 2.2.1 一 般
 - 2.2.2 安全性
 - 2.2.3 使用性
 - 2.2.4 復旧性
- 2.3 性能照査手法と安全係数
*指針共通編 2.3, 2.4 *照査例共通編 2.2, はり編 2.2 に対応
 - 2.3.1 一 般
 - 2.3.2 安全性
 - 2.3.3 使用性
 - 2.3.4 復旧性
- 2.4 設計供用期間 *指針共通編 2.5
- 2.5 性能の経時変化に対する照査 *指針共通編 2.6

3. 荷重作用

- 3.1 一 般 *指針共通編 3.1
- 3.2 照査に用いる荷重作用
*指針共通編 3.2 *照査例共通編 3.1 に対応（取り扱い方）
- 3.3 設計荷重作用 *指針共通編 3.3, 3.4 *照査例共通編 3.2 に対応（基本的考え方）
- 3.4 荷重作用の種類 *指針共通編 3.5（クリープ、施工時荷重は荷重の一種として）
- 3.5 荷重作用の特性値 *照査例共通編 3.3, はり編 3.1 に対応
- 3.6 荷重作用の組み合わせと荷重係数 *照査例共通編 3.3, はり編 3.2 に対応

4. 使用材料の設計用値

*指針共通編 5. と同一の表現

- 4.1 一 般 *指針共通編 4.1
- 4.2 成形方法
 - 4.2.1 構造材料（引き抜き、ハンドレイアップ等）
 - 4.2.2 ケーブル材料
- 4.3 使用材料と特性値（材料設計） *指針共通編 4.2～4.4 *照査例はり編 4.1 に対応
 - 4.3.1 構造材料

4.3.2 ケーブル材料

4.4 構造材料の照査用値

＊照査例は編4.2 に対応

4.4.1 物理定数（弾性係数，せん断弾性係数，ポアソン比等）

4.4.2 強 度（引張，圧縮，曲げ，せん断等）

4.4.3 その他（減衰性能，衝撃性，耐火性，耐化学性等）

4.5 ケーブル材料の照査用値

＊照査例は編4.2 に対応

4.5.1 物理定数（弾性係数，せん断弾性係数，ポアソン比等）

4.5.2 強 度（引張，圧縮，せん断等）

4.5.3 その他（減衰性能，衝撃性，耐火性，耐化学性等）

5. 接合材料および接合部の設計用値

＊指針共通編4.5

5.1 一 般

5.2 接合方法（ボルト接合，リベット接合，接着接合等）（支持構造への適用も含む）

5.3 使用材料と特性値

5.4 接合材料および接合部の照査用値

5.4.1 接合材料の物理定数

5.4.2 接合材料および接合部の強度

5.4.3 その他（ボルト軸力の経時変化）

6. 構造解析と応答値の算定

6.1 一 般

＊指針共通編5.1

6.2 性能照査のための構造解析手法（接合部の評価とせん断変形）

6.3 構造物のモデル化

＊指針共通編5.2 ＊照査例は編5.1 に対応

6.4 構造解析係数

＊照査例は編5.2 に対応

6.5 応答値の算定

＊指針共通編5.3

7. 安全性の照査

7.1 一 般

7.2 部材破壊に対する照査

7.2.1 断面力による照査

(1) 軸方向力

(2) 曲げモーメント

(3) せん断力

7.2.2 座屈に対する照査

(1) 柱座屈

(2) ねじれ座屈

(3) 局部座屈

7.2.3 その他

7.3 接合部破壊に対する照査

7.3.1 断面力による照査

7.3.3 その他

- 7.4 その他の照査
- 8. 使用性の照査
 - 8.1 一般
 - 8.2 歩行性に対する照査（振動加速度応答，活荷重たわみ制限）
 - 8.3 外観に対する照査（製作時着色材料の退色などを含む）
 - 8.4 その他
- 9. 復旧性の照査
 - 9.1 一般
 - 9.2 照査内容（自動車の衝突，火災（難燃、耐熱），落橋防止システム等）
- 10. 性能の経時変化に対する照査
 - 10.1 一般
 - 10.2 照査内容（構造材料の紫外線劣化，接合材料の腐食等）
- 11. 構造細目
 - 11.1 一般
 - 11.2 製作キャンバー
 - 11.3 最小厚，細長比（計算上以外の条件）
 - 11.4 補剛材
 - 11.5 対傾構，横構
 - 11.6 接合部（補強構造を含む）
 - 11.7 支承部（補強構造を含む）
 - 11.8 床版と床組
 - 11.9 地覆と高欄
 - 11.10 路面，伸縮継手および排水
 - 11.11 安全施設（自動車衝突防止用ガード等）
 - 11.12 その他
- 12. 施工および維持管理
 - 12.1 一般
 - 12.2 工場製作（成形，着色，加工，接合，各種検査などを含む）
 - 12.3 輸送および現場架設（部材防護や，現場接合，各種検査などを含む）
 - 12.4 部材精度と組立精度（組立精度は架設終了時）
 - 12.5 変形，応力の検討（設計時に考慮した施工法または施工順序が異なる場合）
 - 12.6 防食，防錆および耐火（UV 吸収剤，コーティング，塗装，難燃剤，耐熱板等）
 - 12.7 点検およびモニタリング（架設時・完成時も対象とし，設備施工などを含む）
 - 12.8 その他
- 13. 試設計例（FRP 桁橋，FRP 床版橋，FRP トラス橋等）