

土木学会平成 20 年度全国大会
研究討論会 研－05 資料

FRP がつくる新たな複合構造

座 長	上田多門	北海道大学
話題提供者	細沼宏之	石川県
	小林 朗	日鉄コンポジット（株）
	睦好宏史	埼玉大学
	西崎 到	（独）土木研究所
	山藤家嗣	三菱レイヨン（株）
	杉浦邦征	京都大学

日 時	平成 20 年 9 月 10 日（水）16：10～18：10
場 所	東北大学 川内キャンパス Ⅱ-2 会場 B102

複合構造委員会

－目次－

趣旨説明	1
上田 多門 北海道大学 大学院工学研究科 教授	
海岸部における GFRP 橋の採用について	2
細沼 宏之 石川県土木部	
マーケティング手法を用いた新材料の複合構造への適用性の検討	4
小林 朗 日鉄コンポジット（株） 技術部 担当部長	
ハイブリッドFRP部材の開発	6
睦好 宏史 埼玉大学 大学院理工学研究科 教授	
FRP橋梁の耐久性について	8
西崎 到 (独)土木研究所 材料地盤研究グループ 上席研究員	
炭素繊維の環境負荷性能とリサイクル	10
山藤 家嗣 三菱レイヨン（株）炭素繊維複合材料事業部 品質保証部 部長	
FRP歩道橋設計ガイドライン策定に向けて	12
杉浦 邦征 京都大学 大学院工学研究科 教授	

趣旨説明

北海道大学 フェロー会員 上田 多門

本研究討論会は、「FRP がつくる新たな複合構造」と題して、コンクリート、鋼に続く、第三の建設材料として期待されながら、現実にはなかなか適用が進まない FRP について討論を行う。

複合構造委員会では、材料を特定せずに、異種材料からなる構造を扱うことから、FRP に関しても積極的に取り組むことを打ち出している。それゆえ、「新材料による複合技術小委員会」、「FRP 複合橋梁小委員会」、「FRP による鋼および複合構造の補修・補強小委員会」と、FRP 関連の 3 つの小委員会活動を展開している。本研究討論会の 6 件の話題提供のうち、2 件は小委員会活動に関するものである。

FRP の適用がなかなか進まない理由としては、①高価である、②長期的材料特性のデータが少ない、③設計・施工指針類の整備が不十分である、④リサイクル技術が確立されていない、⑤破壊性状が脆性的である、といったものがあげられる。これらの多くに対して、提供される 6 件の話題が、次のように解決の方策を示している。

- (1) 細沼宏之氏（石川県）の「海岸部における GFRP 橋の採用について」において、FRP の特徴である耐腐食性と軽量を生かして、LCC と初期施工費での優位性が、日本での 2 件目の橋梁の適用事例を通して示されている。
- (2) 小林朗氏（日鉄コンポジット㈱）の「マーケティング手法を用いた新材料の複合構造への適用性の検討」では、FRP のように前例の少ない新材料の適用を公共工事で進めるための手段として、他の工業製品等で適用されているマーケティング手法を紹介している。
- (3) 睦好宏史氏（埼玉大学）「ハイブリッド FRP 部材の開発」では、炭素繊維と比較して廉価なガラス繊維を生かした、炭素繊維とガラス繊維のハイブリッド部材の研究開発事例を示している。なお、この研究開発は、国交省の建設技術研究開発助成を受けている。
- (4) 西崎到氏（土木研究所）の「FRP 橋梁の耐久性について」においては、長期的材料特性として、光、水（湿気）、疲労・持続荷重の影響について概観するとともに、実橋の耐久性の状況、LCC の評価例と課題、を示している。
- (5) 山藤家継氏（炭素繊維協会）は「炭素繊維の環境負荷性能とリサイクル」と題して、炭素繊維の軽量を生かして環境負荷の低減が図れることから工業製品への適用が今後進むこと、および、リサイクル技術の現状と課題を紹介している。
- (6) 最後に、杉浦邦征氏（京都大学）から、「FRP 歩道橋設計ガイドライン策定に向けて」と題して、FRP 成形材を適用した構造物の設計指針類の国内外の現状と、複合構造委員会で作成を目指している FRP 歩道橋設計指針（案）の紹介が示されている。

建設材料としての FRP の諸課題をできる限り多方面からとらえるために、上記の話題提供者を選んだ。研究討論会をより有意義にするための、きっかけとなると確信している。

コンクリートや鋼と同様に、FRP も万能な建設材料ではない。適材適所に異なる材料を生かすという複合構造の概念が、本研究討論会で示された FRP の適用事例、諸課題の解決策、将来の方向性に相まって、FRP の活用が進み、さらに優れた社会基盤施設の構築や維持につながることを期待する。

海岸部における GFRP 橋の採用について

石川県土木部 細沼宏之

1. はじめに

石川県は周囲を日本海に囲まれ、その外周を廻る国道249号等の県管理道路では、塩害により架橋後30年足らずで、コンクリート橋にあってはPC鋼線の腐食、鋼橋にあっては桁端部の著しい損傷により、架け替えや大規模補修を止むなくされている。

今回報告するGFRP橋がある羽咋巖門能登自転車道線では、これまでも塩害対策としてCFRPを緊張材に採用したコンクリート橋を架設してきた。この路線で唯一の木橋である旧自転車道13号橋（キングポストラス）が、架設後13年で集成材結合部のボルト穴の腐食により柱材の脱落が発生した。この自転車道は通学路としても利用されているため、応急措置を施した上で架け替えの検討に入り、GFRP桁橋を採用するに至った。



図-1 自転車道13号橋 位置図



圖-2 旧橋損傷写真

2. GFRP橋の導入

旧橋は海岸から100m以下の至近距離にあり、一般的な鋼橋やPC橋による架け替えでは腐食の影響を避けることが困難であると想定され、より耐腐食性の高い構造が求められた。また、地元学生の通学路でもあることから、極力工期を短縮することも必須であった。

上部構造の検討に当たりライフサイクルコストを重視し、比較検討を行った。鋼橋やPC橋では上部工の死荷重が橋台1基当たりそれぞれ158kN、215kN

表-1 LCC比較表

橋梁形式		FRP単純版橋樑	鋼単純版橋樑	スラブ桁方式PC単純T橋樑
上部工標準断面図				
概算工費 (千円)	上部工	14,500	8,900	9,600
	下部工	2,000	5,000	5,000
	合計	16,500	13,900	14,600
	維持コスト	0	2,900	2,400
	LCC(50年)	16,500	16,800	17,000
上部工死荷重反力(kN)		43	158	215
評価	経済性	1.000	1.019	1.030
	施工性	ほぼ工場製作となり、現場施工性に優れる	現場施工が多いため、若干干る	比較的容易である
	構造性	軽量のため耐震性に優れる	比較的下部工への負担が少ない	剛性が高いため歩行性は良い
	維持管理	耐食性に極めて優れている	定期的な維持塗装が必要	飛来物分の影響を受けるため塗装が必要
	その他	下部工の軽微な改修が必要	下部工の撤去・新設が必要	下部工の撤去・新設が必要
総合評価		◎	△	○

キーワード：塩害，腐食，GFRP，ライフサイクルコスト

連絡先 〒929-0325 石川県河北郡津幡町加賀爪又111-1 津幡土木事務所 TEL 076-289-4161

となり、現下部工からの再築が必要となるが、これに対しGFRP橋では43kNで、上部工が軽量であるメリットにより、下部工についてはパラペットの高さ調整および取り付け舗装程度に収まるため、上部工の初期投資は大きくなるものの、50年間の維持管理コストまで含めると同等、それ以上の評価期間になればさらに有利になることが期待された。

本橋の特徴としては、引き抜き一体成形によるGFRP・I桁を主桁に採用しているため、継ぎ手が少ない。これにより、SUSボルトの交換本数も限定される。一方、鋼桁やコンクリート桁に比べ、GFRP桁は剛性に劣るため、たわみ制限 $L/400$ を保持すると下フランジにカーボン接着の必要があり、たわみの照査に当たっては、現実的なモデル荷重を想定し、 1.0kN/m^2 を採用することにより、コスト上昇を抑えた。

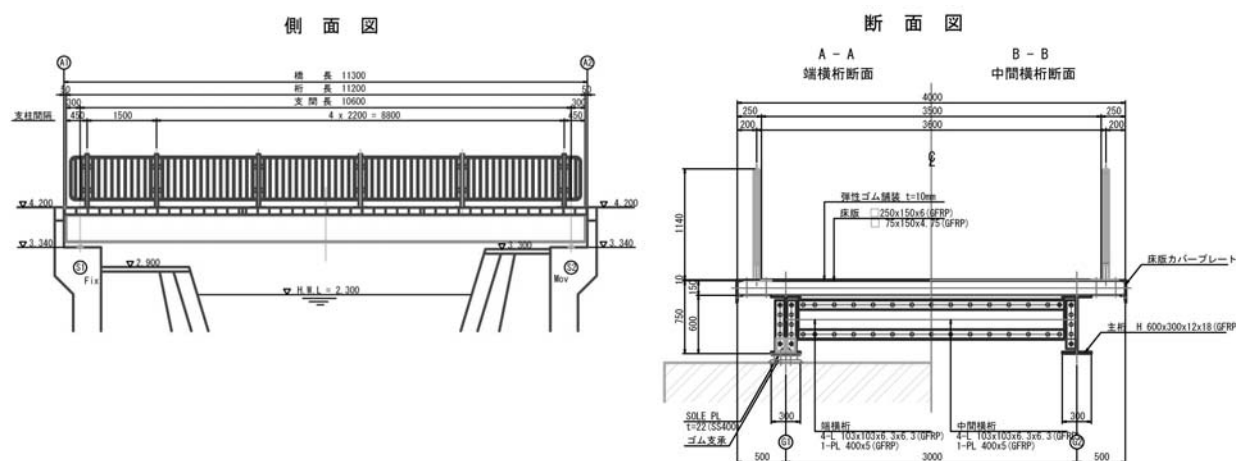


図-3 橋梁一般図



図-4 主桁架設



図-5 架設完了

3. おわりに

海岸線に沿った県管理道路延長の長い石川県において、今回、LCCを最優先課題として、耐食性能に優れた橋への架け替えを行った。FRPは、軽量であるため桁輸送に有利であり、架設時に大型重機が不要であるなど、架設条件の厳しい現場では有利であるが、長スパンについてはトラス構造が必要であるなど、検討課題も多い。今後、さらに合理的な設計手法を確立し、FRP橋梁の規格化を図ることにより、コストダウンが可能となるよう期待したい。

マーケティング手法を用いた新材料の複合構造への適用性の検討

日鉄コンポジット（株） 正会員 小林 朗

1. はじめに

FRP は、軽量・高強度・高耐食性などの優れた材料特性を持つが土木構造物の構造材料として広く利用されるには至っていない。FRP のみならずアルミニウム、ステンレス、ガラスなどの新材料を用いた複合構造は、公共事業として発注される土木構造物へ適用されるには多大の労力と時間を要するのが現状である。このような状況のもと土木学会複合構造委員会新材料による複合技術小委員会では、新材料を用いた新しい複合構造が、具体的にどのような市場性(新規市場開拓の可能性, 既存工法に対する優位点など)があるか整理するために、マーケティング手法を用いて工法分析を行ってきた¹⁾。この検討手法を概説するとともに、FRP を複合構造に適用した新工法の事業化に関するマーケティング手法を用いた分析事例について紹介する。

2. 新材料による複合技術の事業計画

FRP のような新材料を用いた複合技術が公共事業に採用され普及するためには、研究開発による技術の高度化のみならず、実績を積み上げると同時に、積算や設計施工に関する技術基準の整備、生産体制の整備や広報活動など多くの経営資源を長期にわたり投入して事業化する必要がある。研究開発ステージで発掘、開発された新技術が事業化に至る”死の谷”を渡れずに終息してしまうケースが多い。新材料を用いた複合新技術を有している企業が新工法を、利益の出せる事業にするために、環境分析を行い、客先ターゲットや事業開発を行う新工法の特徴(ポジション)を検討して、何をどのように作ればよいのかを考え一連の事業戦略を構築すれば、事業化の“死の谷”を越えることに繋がる。戦略的に事業化を進めるためには事業計画の立案が重要である。事業計画には、①ミッション(社会的役割や使命など)、②ビジョン(事業を進める上での将来像)、③事業コンセプトの3項目が明確に示されていなければならず、その立案にあたっては、マーケティング手法を用いて調査・分析を行い、事業を成功に導くために実施する戦略を明らかにすることが有効である。

3. マーケティング手法の概要と FRP を用いた新工法の分析事例

マーケティングの本質は、環境への適合活動である。ここで言う“環境”とは、新事業や新工法を取り巻く“状況”のことであり、新事業や新工法が成功するためには、環境適合の中でも特に“顧客ニーズへの適合”と“競争優位の構築”の2つが特に重要となる。

マーケティング戦略策定のプロセスは図-1 に示すように①環境分析、②基本戦略の立案、③具体的施策の立案、の3つのステップから成り立っている。ここでは、各分析手法について CFRP 板によるプレストレス補強工法を例にその一部を示している。

環境分析の手法としては、マクロ的な PEST 分析、業界環境を知るための 3C 分析、その結果から自社の

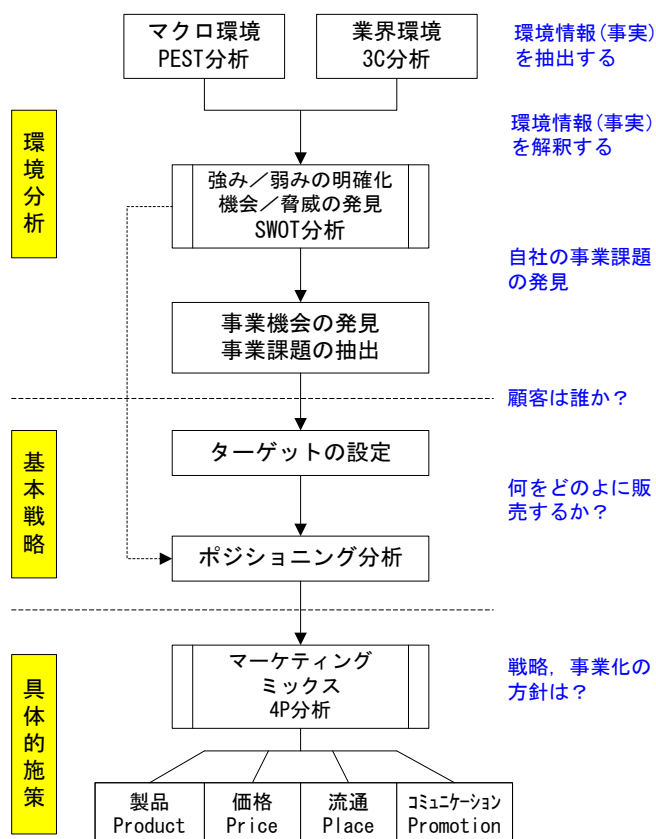


図-1 マーケティング戦略の策定プロセス

キーワード FRP, 事業計画, マーケティング, 工法分析, 複合構造

連絡先 〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8 日鉄コンポジット（株） TEL 03-5623-5558

強み、弱みを明確にして機会、脅威を発見する SWOT 分析がある。3C 分析の例を図-2 に示す。外部環境である市場 (Customer)、競合 (Competitor) と内部環境である自社 (Company) に分類してこれらの視点から事実を漏れ抜けなく抽出する。SWOT 分析は環境要因の分析手法であり、抽出したこれらの事実が、図-3 に示すように自社にとってどのような意味を持っているのかを強み (Strength)、弱み (Weakness)、機会 (Opportunity)、脅威 (Threat) の視点から解釈し、“内部環境／外部環境”それぞれの“プラス要因／マイナス要因”として整理し、俯瞰的に事業課題を発見する方法である。SWOT 分析により、①事業機会の抽出、②事業課題の明確化といった戦略オプションが明確化される。

市場／顧客 (Customer)	競合(他の競合材料) (Competitor)	自社(標記対象材料) (Company)
- 更新時期を迎える構造物が増加しており、20 年後には 4 兆円規模に達する。 - 航空機の構造材料として CFRP が大量に使用されている。 - コンクリート橋のひび割れ、鉄筋腐食などの劣化が進んでいる。	- GFRP は遅れ破壊、AFRP はクリープ破壊するので大きな緊張力が導入できない。 - 外ケーブル工法は、大きな緊張力を導入できるが大規模な定着ブロックの設置が必要である。	- CFRP 緊張材はプレストレスを導入するので、死荷重モーメントの大きい構造物や PC 構造にも補強効果があり、耐荷力および耐久性が向上する。 - 無緊張の連続繊維シート接着工法や CFRP プレート接着工法に比べて CFRP の高い引張り強度を有効に活用でき、少ない補強材量で補強可能である。

図-2 3C 分析の一例

Strength (強み)	Weakness (弱み)
プレストレスを導入するので桁の使用限界や疲労限界に対しても有効に補強でき、耐荷力や耐久性が向上する。	PC 鋼線に比べて、同等の緊張力を得るための価格が高い。
Opportunity (機会)	Threat (脅威)
ホロースラブ橋・箱桁橋・T 桁橋など RC および PC コンクリート橋への適用範囲が広い。	桁橋の RC 床版など活荷重の割合が大きく、必要補強量の少ない場合には、連続繊維シート接着工法は安価である。

図-3 SWOT 分析の一例

次のステップである基本戦略の構築では、どのような市場、顧客に対して営業するかを検討する①ターゲティングと、事業開発を行う新工法の特徴を明らかにする②ポジショニング分析の 2 つのステップがある。ターゲティングは、セグメント化された市場の中で最も自社がニーズに適合できるセグメントを発見し、経営資源や活動を、そのセグメントの攻略に絞り込んでいく。事例では対象構造物として経年劣化したコンクリート橋の主桁の曲げ補強などを選定し、客先となる組織、働きかける人物イメージを具体的に抽出した。

最後に、具体的な施策は、“マーケティングミックス”と呼ばれる製品 (Product)、価格 (Price)、流通 (Place)、プロモーション (Promotion) の 4 つの観点からの立案が有効である。マーケティングミックスとは、企業が顧客に影響を与え、購買行動を起こしてもらうために活用できる戦略の組合せを指す。具体的には、製品、価格、流通、コミュニケーションの 4 つの戦略と、これらの整合性により、ターゲットに対して自社の意図したポジションを具現化することである。

4. おわりに

ここに示したマーケティング手法を用いた工法分析は、公共事業の分野では見慣れたものではない。一方、下記のような優れた特徴を有しており、研究者、発注者、コンサルタント等の専門技術者が FRP のような新材料や新工法を理解する上でマーケティング手法を用いた分析法は有効であると考えられる。

- ①3C 分析により、顧客の視点や、競合の視点から新工法を分析できる。
- ②SWOT 分析から、強み、弱みを明確化にし、機会、脅威を発見することができる。
- ③各工法の事業機会と事業課題を浮き彫りにすることができる。
- ④顧客ターゲットと工法のポジショニングを明確にすることにより、具体的な施策を立案しやすくなる。
- ⑤製品、価格、流通、コミュニケーション戦略など、科学的な施策立案が可能である。

参考文献

- 1) 複合構造レポート 03 各種材料の特性と新しい複合構造の性能評価－マーケティング手法を用いた工法分析－，土木学会，2008 年 8 月

1. はじめに

本研究では、高応力の作用するフランジに炭素繊維を、ウェブに比較的安価なガラス繊維を配置したハイブリッドFRP部材を開発し、これを用いた橋梁の実用化を目指している。最初に、ハイブリッドFRP桁について、CFRPの積層割合やフランジ幅を変化させて曲げ載荷試験を行い、曲げ性状について検討を行った。次に、実用化の為に必要不可欠である接合部について、ボルト接合を用いた小型継ぎ手試験体を製作して、樹脂の有無および厚さ、ボルト本数などを変化させて引張試験を行い、最適な接合方法について検討を行った。さらに、ボルト接合を適用したハイブリッドFRP桁の曲げ載荷実験を行い、接合部の挙動および桁の挙動を実験的に明らかにした。

2. ハイブリッドFRP桁の曲げ試験

(1) 実験概要

表-1に示すように、積層構造を3通りに変化させて、4点曲げ載荷試験を行った。フランジ幅は座屈の検討をするため、90mmと250mmの2通りとした。供試体の諸元を図-1に示す。また、載荷点と支点のウェブに座屈を避けるためスティフナを設置した。写真-1に載荷実験の状況を示す。

表-1 各供試体の積層構造

	フランジ			ウェブ	
	CFRP 0°	GFRP 0°	GFRP ±45°	GFRP 0°	GFRP ±45°
CF55	55%	30%	15%	50%	50%
CF35	35%	50%			
CF15	15%	70%			

*) 長手方向に対する繊維の角度

(2) 実験結果

図-2は荷重－変位関係を示したものである。図から、CFRPの割合が高いほど剛性の高いことが分かる。しかし、終局荷重についてはばらつきが見られた。これは、破壊形式がそれぞれ異なることによると思われる。

フランジ幅が大きい場合には写真-2に示すように上フランジで局部座屈が生じ破壊し、フランジ幅が小さい供試体の破壊状況は、CF15ではスパン中央のウェブ圧壊もしくは界面剥離、CF35では載荷スパン内の上フランジにおける界面剥離、CF55では載荷点での応力集中により破壊に至ることが分かった。

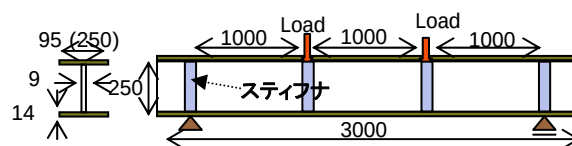


図-1 供試体の形状寸法 (単位: mm)



写真-1 載荷実験状況

3. ハイブリッドFRP部材の継手試験

(1) 実験概要

本実験では、CF35のフランジ部、ウェブ部と同様の積層構成を有する小型試験体にボルト接合を施して引張試験を行った。実験パラメーターとして、ボルト本数(2, 4, 8本)、エポキシ樹脂接着剤による接着接合との併用の有無とした。ボルト本数8本の場合の試験体図を図-3に示す。試験体の厚さはウェブの場合9mm、フランジの場合

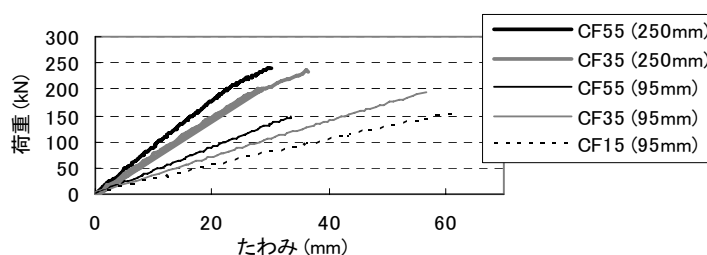


図-2 荷重－変位関係

14mmで、ボルトの配置はすべての試験体において2列とした。写真-3にセットアップ図を示す。実験は万能試験機を用い、荷重、スチールプレートとFRPの変位等を測定した。

キーワード ハイブリッドFRP, CFRP, GFRP, ボルト接合

連絡先 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学大学院理工学研究科 TEL048-858-3553

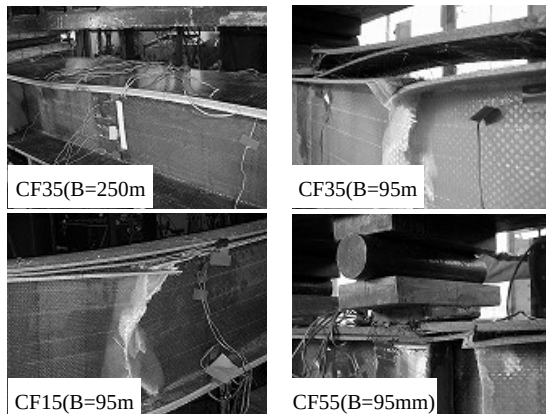


写真-2 破壊状況

(2) 実験結果

写真-4に破壊状況の一例を示す。すべてのフランジ試験体において支圧破壊が見られ、一部の試験体では界面剥離を生じ、CFRP 側のみでのせん断破壊が見られた。また、ボルトは湾曲し、破断したものもあった。機械接合の破壊形式としては支圧破壊が最も適切であることから、概ね良好な破壊性状であったと言える。CFRP 側のみでせん断破壊が起こったのは、GF は引張軸方向に対して 45° で配置されているが CF は軸方向に並行して配置されているため、せん断に対する抵抗力が小さかったためである。

また、フランジ試験体ではボルトの本数に比例して耐力が増加することが確かめられた。一方、ウェブ試験体においては、ボルト本数に関わらず、約 70kN で引張破壊もしくは引き裂き破壊を起こした (**写真-4**)。また、エポキシ樹脂による接着接合を併用すると、すべり出し荷重の増加およびすべり量(スチールプレートと FRP の変位の差)の抑制に効果があることが分かった (**図-4**)。このことより、エポキシ樹脂との併用が最も優れていることが確認できた。

3. 接合部を有するハイブリッドFRP桁の4点曲げ試験

構造部材としての接合部の挙動を検討するため、接合部を曲げスパンに有する I 型ハイブリッド FRP 桁による曲げ載荷試験を行った。本供試体は前述の I 桁と同様の諸元を持つものである。**図-5**に接合部の諸元を示す。接合部の有無、エポキシ樹脂による接着接合の有無の比較検討を行った。**図-6**は実験から得られた荷重—変位曲線を示す。図から、ボルト接合のみの場合、わずか 10kN ですべりが生じているが、エポキシ樹脂と併用した場合、継ぎ手のない試験体と同等の曲げ性状が得られることが明らかとなった。

4. まとめ

ハイブリッド FRP 桁の曲げ性状は弾性的であり、比較的安定した挙動を示す事が明らかとなった。一方、破壊は脆性的であり、フランジにおける界面剥離や層間剥離、ウェブ圧壊によるものであった。また、ボルト接合にエポキシ樹脂を併用することにより、継ぎ手として適用可能なことが明らかとなった。今後は、実構造物の適用に向けて、構造設計手法を開発する予定である。

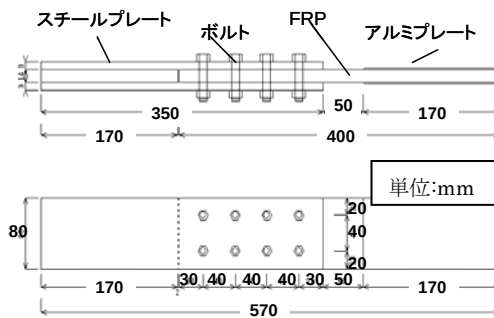


図-3 試験体図 (ボルト 8 本)



写真-3 セットアップ
(ボルト 8 本)

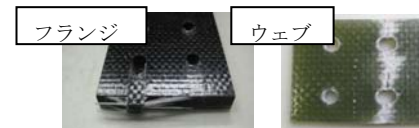


写真-4 試験体の破壊状況

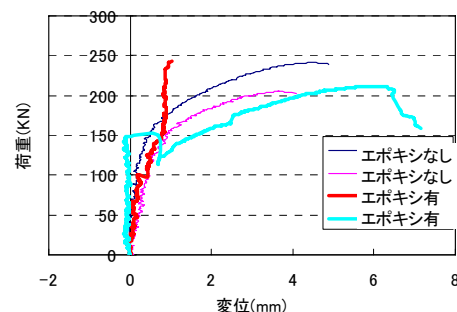


図-4 荷重—すべり量関係 (ボルト 4 本)

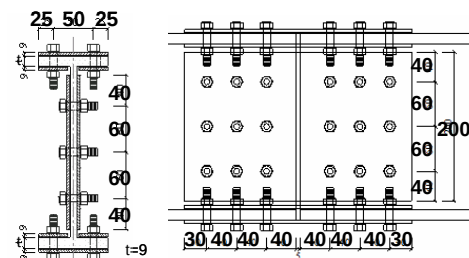


図-5 接合部の諸元 (単位: mm)

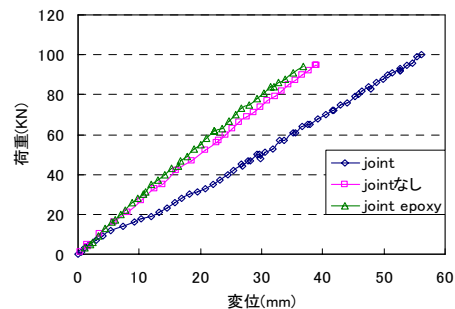


図-6 荷重—変位曲線

FRP 橋梁の耐久性について

土木研究所 正会員 西崎 到

1. はじめに

FRP が橋梁の主要構造材料に採用される大きな理由のひとつは、沿岸などの腐食環境における優れた耐久性であるが、全く劣化しない材料というわけではない。ここでは、FRP を橋梁の主構造材料とした場合の耐久性について調査した結果を紹介する。また、耐久性に優れた材料の適用は、LCC の低減につながることを期待されているが、FRP 橋梁の LCC を試算した事例についても紹介する。

2. FRP 材料の耐久性¹⁾

FRP の耐久性に関する一般的な知見を、文献や実験結果などより概略的にまとめた。FRP を橋梁に使用した場合の主要環境劣化因子には、日光、水（湿気）をあげることができる。また、繰り返し荷重や常時力がかかる場合には、その影響を考慮する必要があるものと考えられる。

（1）光による劣化

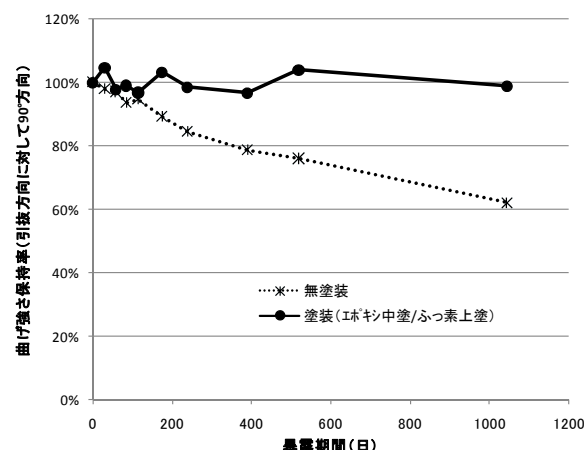
多くの GFRP（ガラス繊維 FRP）は、不飽和ポリエステル樹脂やビニルエステル樹脂とガラス繊維からできている。直射日光に長時間さらされると、表面の樹脂が劣化し始めることがある。これが進行すると表面近くの繊維が露出した状態となる（図－1）。劣化速度は樹脂の種類等によってかなり差がある。この劣化は、外観的な場合が多く FRP の力学的特性にはあまり影響はないとされている。FRP 表面への塗装や、ハンドレイアップ成形で使用されるゲルコートと呼ばれる保護樹脂層によって防ぐことができる。CFRP の場合は炭素繊維の最外層が保護層の役割を果たし、その内部への劣化を抑制する効果を発揮することもある。

（2）水（湿気）による劣化

水中や高湿度環境では、FRP 内部に水分が侵入する。樹脂が水を含む場合、樹脂の力学的物性は乾燥状態よりもやや低下することが多い。このため短期的には含水量の多い FRP は強度などがやや低下するが、乾燥させるとともに元に戻る。長期的には、水は樹脂の劣化や、樹脂と繊維の界面の付着特性を低下させる原因となる。樹脂や繊維と樹脂の界面付着が低下した FRP は、力学的特性もやや低下する。物性低下の程度を適格に評価して使用することが必要と考えられる。繊維自体は、通常の土木構造物の置かれる環境条件では、あまり劣化しないことが多いため、せん断特性や主たる繊維方向とは異なる方向の特性に変化が出やすい。FRP 表面への塗装は保護効果を発揮することが多い（図－2）。また、屋外環境では、通常、光と水の両方が相互に劣化因子として影響する。



図－1 FRP の繊維露出の事例



図－2 引抜成型 GFRP の屋外暴露試験事例

キーワード FRP, 複合材料, 劣化, 耐久性, 橋梁, LCC

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 (独) 土木研究所 材料地盤研究グループ TEL 029-879-6762

(3) FRP の疲労特性とクリープ特性

FRP も鋼材などと同様の疲労特性を有する。ただし、疲労限が現れない場合もあり、 10^7 回疲労強度をもって評価することが多い。 10^7 回疲労強度は、CFRP の場合は静的強度の 0.4~0.8 程度、GFRP では 0.22~0.41 程度との報告がある。ただし、実際の FRP 橋梁では、最大荷重時のたわみ制限により設計されることが多いため、強度的には余裕が大きく、疲労強度が問題となることは少ない。しかし、今後、効率的な設計方法が進むと、疲労に関する検討も必要となる可能性がある。

3. FRP 橋梁の耐久性

実際の FRP 橋梁・構造物の建設後の耐久性・経過報告事例をいくつか紹介する。

(1) 沖縄ロードパーク橋²⁾

日本最初の FRP 橋梁である沖縄ロードパーク橋は建設されてから 8 年が経過している。その間、FRP 自体には特に損傷や劣化は認められないが、厳しい腐食環境下で一部のステンレスボルト (SUS316) が腐食したため、ボルトの交換が行われた。FRP 橋梁は、通常 FRP 単独ではなく、ステンレス製材料がボルトや接合部に用いられることが多いため、これらの防食対策や維持管理が必要であるとともに、交換が困難な場合はより耐食性に優れた材料の適用を検討する余地があるものと考えられる。

(2) Pontresina 橋

スイスで 1997 年に架けられた Pontresina 橋は、冬季のみにスキーヤーのために架設され、夏季は倉庫で保管されている FRP トラス歩道橋である。2005 年夏の保管時（架設後 8 年）に詳細な劣化調査と完成時と同様の載荷試験が実施され、橋梁全体の性能に変化はないが、フランジ端部の損傷、部材の部分的ひび割れ等が認められたことが報告されている³⁾。これらの劣化の主要な要因は、架設時或いは移動時の部分的な衝撃、不適切な保管等に起因すると推定しており、GFRP の材料特性に適した取り扱いが行われれば、本来の耐久性を得るために必要であるとしている。

(3) Canopy at the Catholic University of America

FRP 橋梁と同様の材料・手法で 1994 年に作られた、米国の大学のホール入り口屋根の供用後 12 年目の耐久性調査結果が報告されている⁴⁾。FRP 表面の退色、亜鉛めっきボルト・ナットの腐食、ボルト接合部分近傍の繊維方向に沿った部分的なひび割れ、繊維露出などが、主な劣化として見つかったが、全体としては良好な状態であったと報告されている。また、調査の結果から、亜鉛めっきボルトではなくステンレスボルトの使用、ポリウレタン樹脂塗料などによる被覆などを推奨している。

4. FRP 橋梁のライフサイクル (LCC) 評価例

沖縄ロードパーク橋の事例を参考とした LCC 評価事例²⁾では、厳しい腐食環境などの、従来の材料では何らかの対策（防食など）が必要な場合には、LCC 評価は FRP 橋梁に有利になる結果が得られている。LCC の算出にあたっては、初期費用、維持管理費用、廃棄費用を検討すべきと考えられるが、FRP 橋梁については維持管理事例が少ないため、その見積もりが困難であるのが課題であり、今後、適切な手法の検討が望まれる。

5. おわりに

FRP は、鋼材などが腐食しやすい沿岸などの環境で優れた耐食性を発揮する。FRP は「全く劣化しない材料」というわけではなく、水や光によって劣化することがあるが、FRP の劣化を防ぐ方法があり、適切な使用方法をとれば、良好な高耐久性材料として適用できる。しかし、このような FRP の土木構造材料としての取り扱い方をまとめたものはまだないので、早期の取り組みが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 前田編「FRP 橋梁 ―技術とその展望―」構造工学シリーズ No. 14, pp. 34-39, pp. 71-74 (2004).
- 2) 上田編「先進複合材料の社会基盤施設への適用」複合構造レポート NO. 1, pp. 174-177 (2007).
- 3) T. Keller et al., Proceedings of CDCC-07, pp. 345-352, Quebec, May (2007).
- 4) L. C. Bank et al., Proceedings of CDCC-07, pp. 91-100, Quebec, May (2007).

1. はじめに

炭素繊維はアクリロニトリル（AN）あるいは石油/石炭ピッチを素原料にして、プレカーサー(前駆体)繊維を製造した後、耐炎化(Oxidation)、炭素化(Carbonization)、黒鉛化(Graphitization)の各工程を経て製造される。軽くて強いことを特長とするが、それは比引張強度や比弾性率という指標に現れ、鉄やアルミの数倍の値を示し、具体的には軽量化でその効果を最大に発揮する。

炭素繊維の商業生産は 1970 年代に遡るが、ゴルフクラブ等スポーツ用途に採用されたことを皮切りに民間航空機に採用され、最近では石油燃料の高騰や環境問題があり、それらを改善する素材として脚光を浴びている。

現在、炭素繊維市場は拡大を続けている。スポーツ用途だけでなく工業材料への使用が拡大しつつあり年率 10%以上の成長率が期待されている。その中でその需要の多くは PAN(ポリアクリロニトリル)繊維をベースとする炭素繊維が占めている。

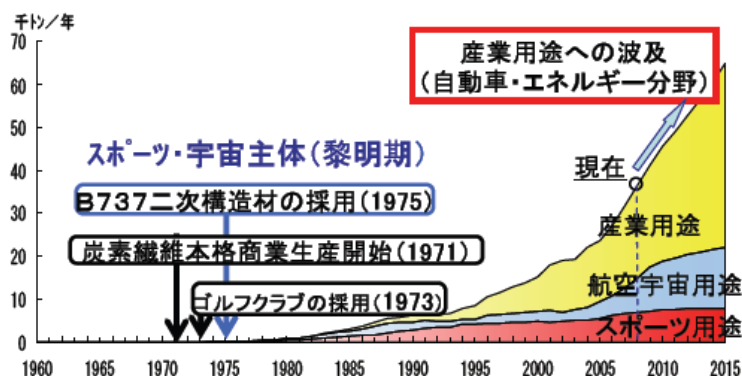


図-1 炭素繊維の需要

今後の大型需要を支えるのは環境関連の用途にあり、特に省エネルギーや温暖化ガスの削減目標を達成するために炭素繊維は必須の素材である。

炭素繊維協会（正会員 7 社、賛助会員 3 社から構成）は LCA（Life Cycle Assessment）モデルを構築し、自動車や民間航空機を想定し素材から使用段階そして廃棄までのライフサイクルにおいて環境負荷やエネルギー負荷を評価した。炭素繊維を使用しない現状の自動車では、使用段階(自動車運転段階)の二酸化炭素排出量はライフサイクル全排出量の 83%、民間航空機では使用段階（運航段階）の二酸化炭素排出量は全排出量の 99%になると算出した。これら自動車、航空機に炭素繊維を適用し軽量化した場合、使用しない場合に比べて二酸化炭素総排出量の削減は使用段階で顕著に現れ、これらの用途へ炭素繊維がさらに普及すると環境改善効果は益々大きくなることを見出した。

ライフサイクルを考慮した場合、リサイクル技術の確立や環境負荷を試算検証することは非常に重要であり、現在経済産業省の補助事業で炭素繊維協会リサイクル技術のパイロットプラントを建設しリサイクル技術の実証試験と事業化検討を実施している。

2. 炭素繊維廃棄物の分類

現在、リサイクル処理が必要な主要な炭素繊維廃棄物は CFRP(繊維強化複合材料)である。これらはガラス繊維複合材料いわゆる FRP の廃棄物放置が社会の問題になって FRP の廃棄物処理が進んだことと類似した状況と言ってよい。炭素繊維協会は CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics）廃棄物 に付け加え、炭素繊維屑系、プリプレグ（マトリックス樹脂含浸炭素繊維シート）廃棄物も取り扱う対象と考えている。

3. リサイクル品の期待される商品形態

リサイクル品をどのような商品形態として再生させるかがリサイクル品を社会で流通させるための一つの課題である。フレッシュ品と同様の性能/品質の製品として社会に還元できればその商品価値は高い。しかし、

キーワード：炭素繊維、環境、省エネルギー、リサイクル、LCA

連絡先：〒103-0023 東京都中央区日本橋本町 3-1-11 繊維会館 6F（日本化学繊維協会内）TEL 03-3272-7108

現状の CFRP 廃棄物には雑多な炭素繊維品種が混在しており、フレッシュ品に近い製品が得られるのかは、いわばコスト(手間)と品質のトレードオフの関係になる。コストを考えるとフレッシュ品と同等品質の提供は難しく、リサイクル品という新たなジャンルが設置されるのかは今後の開発次第である。現在、チョップドファイバーやミルドファイバーレベルの切断繊維として流通させる試みが主流となっている。

4. リサイクルの技術と事業化

リサイクル技術の最も重要な要素技術は炭素繊維とマトリックス樹脂分離技術にあると言ってよい。分離技術と言っても実際には樹脂の分解で最終的に繊維と樹脂を分離する。熱分解法(Pyrolysis)、触媒分解法、超臨界液体分解法等の樹脂分解技術が開発されているが、その中で現在主流となっているのは熱分解法である。

現在、唯一商業化しているのは Milled Carbon Ltd 社(英)であり、連続熱分解法でミルドファイバーあるいはチョップドファイバーを製造しその生産能力は年産 500 トンレベルにある。

5. 炭素繊維協会の炭素繊維リサイクルへの取り組み

炭素繊維協会では 1990 年代からリサイクル技術の検討を開始し、触媒分解法の検討も行ったが、最終的には熱分解法を採用した。触媒法では分解して炭素繊維そのものにダメージを与えないが分解させるために高圧が必要であり、溶剤の回収等でプロセスが複雑になる、さらに分解までに時間がかかるなどデメリットが存在する。それに比べ、熱分解法は基材となる炭素繊維が加熱によりダメージが懸念されるが、比較的容易にマトリックス樹脂を分解する事が出来ること、さらに連続プロセスが適用できるということが採用の動機となった。

6. 経済産業省補助事業リサイクル実証プロジェクト

現在、2006 年から 3 年間で経済産業省の補助事業(テーマ名：エネルギー使用合理化繊維関連次世代技術開発)『炭素繊維製造エネルギー低減技術の研究開発』を推進中である。主な目的はリサイクル技術のパイロットプラントを建設し、リサイクル基本技術の実証をおこない、廃棄物回収システム及びリサイクル市場性を検討することが主たる目標である。実証試験設備の規模は年間 1000 トンの処理量であり、CFRP、プリプレグ、炭素繊維廃棄物を対象としている。プロジェクトの最終報告として性能/品質の確認そしてコスト競争力の見極め、さらに事業性の確認を行なっていく予定である。

7. 終わりに

炭素繊維は民間航空機、風力発電、圧力容器、自動車等環境/エネルギー関連だけでなく、炭素繊維の腐蝕しないという特性をいかした土木建築用途での構造物補強補修材料として需要や、導電性をいかしたパソコン筐体等の需要も高まってきている。炭素繊維業界としては炭素繊維のさらなる普及を願っているが、それにはリサイクルシステムを社会に定着させることと、炭素繊維製造工程の環境およびエネルギー負荷を最低限に抑え、しかも効率的な生産を実現し、拡大することが炭素繊維業界の重要課題であると認識している。

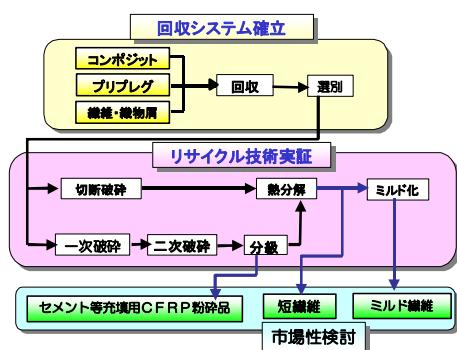


図-2 実証試験

炭素繊維リサイクルプロセス



図-3 リサイクルパイロットプラント

FRP 歩道橋設計ガイドライン策定に向けて

京都大学 正会員 ○杉浦 邦征
豊橋技術科学大学 正会員 山田 聖志
(独)土木研究所 正会員 西崎 到

1. はじめに

20 世紀後半には、革新的な性能を有する材料として繊維強化プラスチック (FRP: Fiber Reinforced Polymers) が開発され、宇宙・航空産業ならびに運輸施設に限定されてはいたが、ものづくり技術の著しい発展を促した。しかし、年間約 30 万トン (全体の約 20%) の社会基盤施設への使用実績があるものの、主要部材として積極的に使用するなど、構造材料として本格的に適用できる状況にはない。このような状況ではあるが、例えば、米国の CONMAT 計画 (<http://www.tfhr.gov/pubrds/winter96/p96w40.htm>, The High-Performance CONstruction MATerials and System Program) に見られるように、「新世紀に相応しい建設構造材料」というコンセプトで、主にインフラ構造物を対象とした材料開発計画が 20 世紀末から 21 世紀初頭にかけて進められてきた。ここで、特に注目されたのは FRP を中心とする複合材料およびインテリジェント材料 (スマート材料) であり、歩道橋および道路橋、道路橋用床版などに多く適用されている。なお、歩道橋についてはかなり長支間のものも建設されているが、道路橋については未だ試験的なものがほとんどである。

これら欧米における FRP 橋梁の研究動向は、IABSE (国際構造工学会) の会誌 Structural Engineering International で特集が組まれるなど、多くの技術者、研究者によって周知のこととなったが、我が国での実績は、2000 年に完成した沖縄県の海中道路に架かる先駆的な歩道橋と、2008 年 3 月の時点で 2 橋目となった石川県 FRP 自転車道橋 (自転車道 13 号橋) のみである。なお、ものづくり大学においても、校舎間の連絡橋に FRP トラス構造が採用され、現在建設中であるが、欧米ほどの適用事例は無い。

2. 土木学会でのこれまでの活動状況

土木学会構造工学委員会では、FRP 橋梁の発展と普及を図るために、2000 年から 2 年間「FRP 橋梁研究小委員会 (委員長: 北見工業大学・大島俊之教授)」が組織され、さらに 2 年間の継続的な活動 (委員長: 首都大学東京・前田研一教授) により、FRP 橋梁技術の State of the Art をとりまとめ、土木学会の出版物として「構造工学シリーズ 14: FRP 橋梁—技術とその展望—」を発刊した。この出版物は、設計マニュアルや、設計ガイドラインの性格を持つものではないが、FRP 橋梁の実際の計画・設計・施工・維持管理などで必要となる有用な情報について多く紹介されている (図 1 参照)。その後、「FRP 橋梁設計技術小委員会 (委員長: 豊橋技術科学大学・山田聖志教授)」によって FRP 橋梁に関する国際コロキウムの開催などを通して技術の普及活動が継続され、2006 年末からは、異種の各種 FRP の組み合わせや、FRP と鋼材などによる複合形式の橋梁を建設する技術と設計法の開発を目的として「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)」を設立し、一層の技術開発を進めている。なお、本小委員会は、技術検討 WG (FRP を橋梁へ適用する場合に有望と考えられる具体的な構築技術や適用方法の他、ライフサイクルコスト、維持管理、環境負荷等について調査研究) および設計法 WG (FRP 橋梁の設計を効率的かつ合理的に行うガイドライン整備を目的とし、FRP 歩道橋設計指針 (案) の策定に向けて活動を行う) から構成されている。



図 1 FRP 橋梁—技術とその展望—

キーワード FRP, 複合構造, 歩道橋, 設計基準

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 075-383-3160

3. FRP 関連の設計基準整備の動向

わが国における繊維強化複合材料の土木・建築分野での適用は、1993 年道路橋示方書の改訂による設計活荷重増大に伴う既設道路橋の補強工法や 1995 年阪神淡路大震災以後の構造物の耐震補強工法の確立に際して、精力的な開発が進められ、関連学協会から多くの設計基準、指針が整備されてきた。特に、高強度軽量材による補強であるため補強後の構造物の安全性評価において死荷重の増加を見込む必要が無く、しかも施工上においても、大型重機が不要で、溶接のように熟練工が不可欠な工法ではないためである。しかし、構造部材としての設計にあたり、①弾性係数が構造用鋼材よりも低く、強度設計と剛性設計による限界状態にひらきが大きく、設計のバランスが悪い；②疲労、クリープ、耐食など高耐久性に関する性能の裏付けデータが不足している；③強度や弾性係数などが材料特性において著しい異方性を有し、載荷パターンが変動する構造物に適用する場合には、対応が難しいなどの力学的短所に対処する必要がある。

一方、①価格：軽量性を重視した高速施工による施工コストの低減、高耐久性を視野に入れた LCC 評価によるライフタイムコストでの競争力アップなどの取り組みが不可欠で、合理的なユニット構造（モジュール化）の採用など、規格品の大量生産・機械化加工により、低コスト化を進める必要がある；②信頼ある接合法の確立：繊維強化複合材料は、剥離・加工孔・切欠き等に対しては、非常に脆弱であるため、フェイルーセーフ的な、接合構造形式の開発が望まれる；③合理的な性能評価：材料設計から構造設計まで一貫して行われることから、有限要素解析に代表される数値シミュレーションを効率よく進められるよう、FRP 材料の物性値の規格化、設計者の材料選択に有用な物性値のデータベースの充実などを進める必要があるなどの欠点も指摘されている。

しかし、もっとも重要なことはこれらの情報を取りまとめ、信頼ある設計基準が提供されていないことにある。現時点で、系統だった設計基準としては、欧州の多くの FRP 橋梁の設計・施工経験を基に整備されてきた EUROCOMP が挙げられるのみである(図 2 目次参照)。

4. まとめ

FRP 複合橋梁小委員会では、平成 21 年夏までに FRP 歩道橋設計指針(案)とりまとめ、第 3 回 FRP 橋梁シンポジウムの開催時にその内容を紹介する予定である。なお、参考文献には、FRP 材料・構造に関する国内外の主な参考資料を一覧として取りまとめたので、この分野の研究開発活動に役立ててもらいたい。

参考文献

1) 土木学会・構造工学シリーズ 14 FRP 橋梁 - 技術とその展望 -, 2004. 1, 2) 強化プラスチック協会: FRP 構造設計便覧, 技報堂, 1994, 3) 土木学会・コンクリートライブラリー 88 号 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案), 1996. 9, 4) 土木学会・コンクリートライブラリー 101 号 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. 7, 5) New Materials in Construction, Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 1, No. 2, 1998. 1, 6) Thomas Keller: Use of Fiber Reinforced Polymers in Bridge Construction, Structural Engineering Documents 7, IABSE, 2003, 7) The European Structural Polymetric Composites Group: Structural Design of Polymer Composites -EUROCOMP Design Code and Handbook-, edited by J. L. Clarke, 1996, 8) ICE Design and Practice Guides: FRP Composites - Life Extension and Strengthening of Metallic Structures, edited by Stuart S. J. Moy, 2001. 1, 9) 日本鋼構造協会: 新材料の構造部材への適用調査, JSSC テクニカルレポート No. 23, 1993, 10) 土木学会・複合構造委員会: 複合構造レポート 01 先進複合材料の社会基盤施設への適用, 2007. 2, 11) 日本材料学会編: 材料と評価の最前線, 培風館, 2001.

EUROCOMP DESIGN CODE

1	INTRODUCTION	7
1.1	SCOPE OF EUROCOMP DESIGN CODE	7
1.2	DISTINCTION BETWEEN PRINCIPLES AND APPLICATION RULES	7
1.3	ASSUMPTIONS	8
1.4	DEFINITIONS	8
1.5	S.I. UNITS	20
1.6	SYMBOLS COMMON TO ALL EUROCODES	20
1.7	SPECIAL SYMBOLS USED IN THE EUROCOMP DESIGN CODE	22
1.8	CO-ORDINATE SYSTEMS	22
2	BASIS OF DESIGN	25
2.0	NOTATION - SECTIONS 2.1 TO 2.4 (SEE ALSO SECTIONS 1.6 AND 1.7)	25
2.1	FUNDAMENTAL REQUIREMENTS AND WARNING OF FAILURE	26
2.2	DEFINITIONS AND CLASSIFICATIONS	27
2.3	DESIGN REQUIREMENTS	33
2.4	DURABILITY	42
2.5	ANALYSIS	43
3	MATERIALS	55
3.0	GENERAL	55
3.1	REINFORCEMENT	55
3.2	RESINS	59
3.3	CORES	64
3.4	GEL COATS	66
3.5	SURFACE VEILS	67
3.6	ADDITIVES	67
3.7	REFERENCES	68
4	SECTION AND MEMBER DESIGN	73
4.0	NOTATION	73
4.1	ULTIMATE LIMIT STATE	73
4.2	SERVICEABILITY LIMIT STATE	75
4.3	MEMBERS IN TENSION	77
4.4	MEMBERS IN COMPRESSION	78
4.5	MEMBERS IN FLEXURE	81
4.6	MEMBERS IN SHEAR	84
4.7	STABILITY	86
4.9	PLATES	94
4.10	LAMINATE DESIGN	98
4.11	DESIGN DATA	116
4.12	CREEP	125
4.13	FATIGUE	129
4.14	DESIGN FOR IMPACT	134
4.15	DESIGN FOR EXPLOSION/ BLAST	136
4.16	FIRE DESIGN	138
4.17	CHEMICAL ATTACK	141
4.18	DESIGN CHECK-LIST	142
5	CONNECTION DESIGN	147
5.1	GENERAL	147
5.2	MECHANICAL JOINTS	159
5.3	BONDED JOINTS	183
5.4	COMBINED JOINTS	235
6	CONSTRUCTION AND WORKMANSHIP	239
6.1	OBJECTIVES	239
6.2	MANUFACTURE AND FABRICATION	240
6.3	DELIVERY AND ERECTION	243
6.4	CONNECTIONS	245
6.5	SEALANT JOINTS	246
6.6	REPAIR OF LOCAL DAMAGE	247
6.7	MAINTENANCE	247
6.8	HEALTH AND SAFETY	248
7	TESTING	251
7.1	GENERAL	251
7.2	COMPLIANCE TESTING	252
7.3	TESTING FOR DESIGN AND VERIFICATION	255
7.4	ADDITIONAL TESTS FOR SPECIAL PURPOSES	262
8	QUALITY CONTROL	267
8.1	SCOPE AND OBJECTIVES	267
8.2	CLASSIFICATION OF THE CONTROL MEASURES	267
8.3	VERIFICATION SYSTEMS	268
8.4	CONTROL OF DIFFERENT STAGES	268
8.5	CONTROL OF DESIGN	268
8.6	CONTROL OF COMPONENT MANUFACTURE	268
8.7	CONTROL OF COMPONENT DELIVERY	270
8.8	CONTROL OF ASSEMBLY	271
8.9	CONTROL AND MAINTENANCE OF COMPLETED STRUCTURE	272

図 2 EUROCOMP 目次