

土木学会令和5年度全国大会
研究討論会(20) 資料

FRP をより上手に土木構造物に活かすには

座長	西崎 到	(一財) 土木研究センター
話題提供者	久保圭吾	宮地エンジニアリング(株)
	副島飛宙	パシフィックコンサルタンツ(株)
	阿部淳一	北武コンサルタンツ(株)
	神山宙大	(株) 高速道路総合技術研究所
	池田哲雄	(株) コムテック
	平沢秀之	函館工業高等専門学校
	大垣賀津雄	ものづくり大学

日 時	令和5年9月13日(水) 10:00~12:00
場 所	広島国際会議場 コスモス①

複合構造委員会

趣旨説明

(一財) 土木研究センター 正会員 西崎 到

FRP の土木構造物への活用は、この 20 数年の間に様々な試みがあるが、現状では一部を除きあまり普及が進んでいるとは言い難いように思われる。一方、FRP には鋼やコンクリートに比べ軽量かつ腐食しないなどの特長があり、これをより高機能・高耐久な社会資本の整備に活かすことが期待される。

これまでの研究で、FRP 構造物の設計・施工は大きな問題なく可能であり、そのための標準的手法の基準化も複合構造委員会等により進められてきたが、これらの知見の蓄積も直ちには FRP 構造物の普及にはつながらないようである。

そこで本討論会では、FRP 構造物の普及の現状の課題とその解決に向けた取り組みについて、FRP 活用に取り組んできた話題提供者を迎え議論する。

話題提供者のうちはじめの 3 名の方には、FRP 構造物の普及状況や活用における課題について、それぞれの立場から紹介していただく。

- (1) メーカーの立場から：久保圭吾氏（宮地エンジニアリング(株)）
- (2) 発注者の立場から：神山宙大氏（(株)高速道路総合技術研究所）
- (3) コンサルタントの立場から：副島飛宙氏（パシフィックコンサルタンツ(株)）

話題提供者のうち後半の 4 名の方には、FRP を活用する上で直面した課題を克服し、普及につなげた事例やその経験を通して必要と思われた事について、それぞれの経験から紹介していただく。

- (4) FRP の活用事例「公園内の歩道橋・通路・その他」：池田哲雄氏（(株)コムテック）
- (5) FRP の活用可能性「応急橋の可能性」①：緊急仮設橋：平沢秀之氏（函館工業高等専門学校）
- (6) FRP の活用可能性「応急橋の可能性」②：防衛省の FRP 応急仮設橋の開発事例：大垣賀津雄氏（ものづくり大学）
- (7) 一設計技術者からみた FRP 構造物設計の難しさと今後の展望：阿部淳一氏（北武コンサルタント(株)）

上記の話題提供の後、土木ではまだ新しい材料である FRP を土木構造物に上手に活かし、そのメリットをインフラの長寿命化などの高度化につなげるために必要な、研究開発や情報共有などについて議論する。本討論会における議論がこの新しい材料技術の有効活用のさらなる進展のきっかけになることを期待する。

FRP構造物の普及状況と活用上の課題

宮地エンジニアリング株式会社 久保 圭吾

1. はじめに

FRP材は、軽量、高強度で耐食性に優れることから船舶、住設機器などで多く用いられている。土木構造物に関しては、1990年頃から点検通路、合成床版への適用性の研究開発を行い、実用化しているものの、一般化には至っていない。ここでは、FRP材を構造材として適用した事例を示すとともに、活用上の課題について述べる。

2. FRP構造物の普及状況

(1) FRP合成床版^{1),2)}

FRP合成床版は、軽量で耐食性に優れたπ形のGFRP引抜成形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。FRP合成床版は、1998年に高知自動車道松久保橋で適用されて以降、腐食環境の厳しい場所や施工時の制約が厳しい場所での適用を中心に約20橋の適用実績がある。図-1(a)に海上の栈橋構造に適用した事例を、図-1(b)に海底トンネルの床版取替に適用した事例を、図-1(c)にクレーン架設が困難で人力架設した事例を示す。

(2) 橋梁検査路²⁾

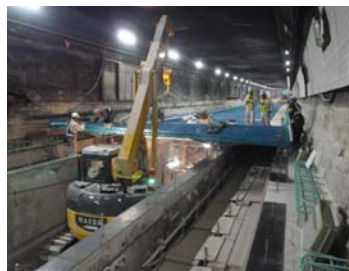
1992年に図-2に示す送電鉄塔巡視路として適用され、図-3に概念図を示す橋梁用の検査路としては、1999年に松山自動車道日之地橋で適用されている。日之地橋のFRP検査路は、図-4に示すように18年後に調査が実施され、若干汚れが見られるものの、変状は見られないことが確認されている。橋梁用検査路は、現在までに約130件の施工事例があり、近年はNEXCOの大規模更新において、検査路の取替や追加の際に採用される例が増加している。

(3) FRP歩道床版²⁾

FRP歩道床版は、既設橋梁に添架構造で拡幅する場合の、軽量化による既設構造物への負荷軽減や、路面の滞水などによる耐食性確保を目的に開発された工法である。この歩道拡幅構造としては、図-5に示すように、既設橋梁への取付け構造の違いから、床版上載タイプとブラケット支持桁タイプに大別できる。FRP歩道床版は、ブラケット支持桁タイプのみであるが、8件の施工実績があり、京奈和自動車道新木津川橋の下面状況を図-6に示す。



(a) 海上栈橋構造への適用例



(b) 海底トンネル床版取替への適用例



(c) 人力架設の例

図-1 FRP 合成床版の適用例



図-2 送電鉄塔巡視路

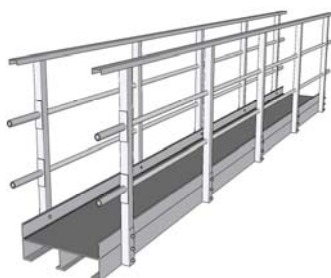


図-3 FRP検査路の概念図

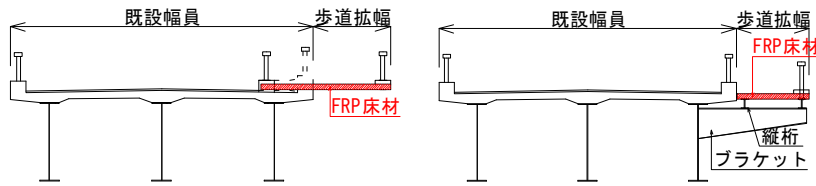


建設時(1999年)



18年経過時(2017年)

図-4 日之地橋での状況



(a) 床版上載タイプ (b) ブラケット支持桁タイプ
図-5 歩道拡幅構造の種類



図-6 新木津川橋の下面状況

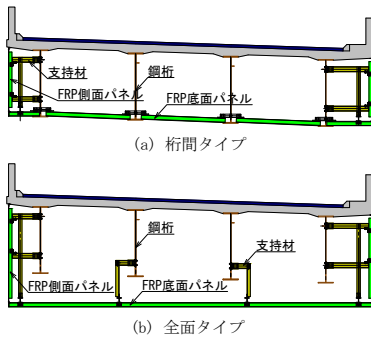


図-7 FRP防護板の種類



図-8 古間木橋（桁間タイプ）



図-9 寺田高架橋（全面タイプ）

(4) FRP防護板

FRP防護板は、橋梁の桁間あるいは全面を覆い鋼桁の腐食環境を改善するとともに、点検時の足場（常設足場）として使用するものであり、図-7に示す桁間タイプと全面タイプがある。FRP防護板は、13橋の実績があり、桁間に設置された古間木橋の事例を図-8に、全面を覆った寺田高架橋の事例を図-9に示す。

3. 活用上の課題

(1) FRP材料の規格

FRPは強化繊維と樹脂の複合材料であり、強度の大部分を繊維が負担することから、配置する繊維の種類、方向、量により物性が変わり、成形方法によっても繊維構成に制約がある。そのため、材料特性に関する規格がほとんどなく、設計時に材料強度の特性値を明確に定められないことが課題となっている。

(2) 設計手法

FRP引抜成形材の場合、引抜方向と引抜直角方向で繊維の量が大きく異なるため、異方性材料となる。このため、引抜成形材を曲げ部材として設計した場合においても、終局状態では曲げ破壊ではなく、せん断破壊となる場合もあることから、実物大実験などにより終局状態の確認が必要となる。

(3) 継手

FRP構造物の接合構造としては、ボルトやリベットによる機械接合、接着剤による接着接合、高力ボルト摩擦接合などがあるが、強度評価手法³⁾などが示されているものの、実構造物への適用にあたっては、母材の材料特性や施工誤差に対する取扱いが明確でないことが課題となっている。

(4) 維持管理

FRPは、材料コストが高価なことから、維持管理費を含むLCCで比較することで有利となる。しかしながら、FRPは耐食性が高いものの、全く劣化をしないことはないため、耐用年数や維持管理費用の算出方法が課題となっている。FRPの実構造物での供用年数としての歴史は浅く、促進試験と実構造物との相関も明確でないことから、これらのデータを収集することが重要と考えられる。

参考文献

- 1) 久保圭吾：FRP合成床版，コンクリート工学，Vol.51，No.1，pp.108-114，2014。
- 2) 久保圭吾：土木構造物へのFRP材料の適用事例，第7回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.51-60，2018。
- 3) 土木学会：FRP部材の接合および鋼とFRPの接着接合に関する先端技術，複合構造レポート09，2013。

FRP 土木構造物の普及状況や発注者の立場からみる活用における課題と今後期待すること

(株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 神山

1. はじめに

高速道路における FRP 土木構造物としては、平成のはじめ頃から FRP 合成床版を採用しており、その後は付属物に採用されることが多く、例えば検査路、橋梁上部工のマンホールや排水管と多岐に渡っている。ここでは、高速道路の橋梁をメインに FRP 材料を適用した事例を示すとともに、発注者の立場から活用上の課題および今後の期待することについて述べる。

2. FRP 材料の普及状況

高速道路で FRP 材料を使用する利点としては、腐食に強いこと、また鋼材と比較して軽量であること等が挙げられる。これまでに高速道路で適用した事例を以下に示す。

(1) FRP 合成床版

高知自動車道 松久保橋では、道路橋で初めて FRP の合成床版を採用した (写真 1)。その後も、海岸沿いや冬期の凍結防止剤を散布するような環境条件下で採用している。10 年ほど前には、関門トンネルの海中区間で FRP 合成床版を採用しているが、これも海中という腐食の著しい環境に対して長期耐久性の観点から FRP 材料の利点を活かしてのことである。また、床版下面が FRP パネルとなることからコンクリートのようなく落防止対策が不要となるため、鉄道と交差する高速道路などで採用している事例がある。

(2) 橋梁検査路

NEXCO3 社の技術基準には、鋼製検査路、アルミニウム合金製検査路、FRP 検査路の 3 種類が規定されている。道路法により、橋梁に対する 5 年に 1 度の定期点検が義務付けられており、定期点検では近接目視が原則であることから橋梁検査路の整備が進められている。現在は、大多数が鋼製ではあるものの、沿岸地域や重雪氷地域はもちろんのこと、鋼製と比較して軽量であることから FRP 検査路を採用する事例が増えつつある。また、検査路だけでなく昇降はしご (写真 2) も含めて FRP 材料を採用している現場もある。

(3) 橋梁付属物

橋梁付属物で FRP 材料を使用しているものとしては、排水ますをはじめ、排水管、油水分離ます (写真 3) や上部構造のマンホール等に使用されている。その他には、橋梁の壁高欄側面に埋め込まれる、照明等の電気配管のハンドホールに FRP 材料が採用された事例もあり、活用の幅が広がっている。



写真 1 松久保橋¹⁾



写真 2 昇降はしご



写真 3 油水分離ます

3. 活用における課題および今後の期待する事項

FRP 材料は、高速道路の様々な場面で活用されているが、より普及が進むために考えられる課題を以下に述べる。

(1) 長期耐久性と維持管理上の評価

FRP 材料の課題として、長期的な耐久性の評価が難しいことが挙げられる。全く劣化しない材料ではないため、適切な維持管理の手法、取替判断の定量化等、管理者として維持管理手法を明確化する必要があると考える。

(2) 材料規格の明確化

以前から指摘されていることではあるが、FRP 材料は規格化が進んでいないことが課題と考える。発注者側として、例えば JIS 規格等の客観的な規格が存在する材料の方が現場に展開する際に品質管理を統一的に行うことができるため、規格化が望まれる。

(3) 経済性

橋梁検査路に使用される材料を腐食環境に応じて選定する際、環境区分によってはアルミニウム合金製検査路の方が FRP 製検査路よりもライフサイクルコストの点で有利となる場合があることが示されている²⁾。また FRP 製検査路は、通常 FRP 材料のみで構成されているのではなく、ステンレス製ボルトが接合部に用いられている。このため、腐食環境の厳しい供用下ではステンレス製のボルトが先行して腐食することとなり、検査路の寿命を左右する。これは一般的に FRP 材料のボルトは引張に弱いとされているためであるが、この点についてはステンレス製ボルトと同等の力学特性を有する FRP 製ボルトの技術開発が進められることを望む。

表 1 検査路種別選定の一例²⁾

環境区分	鋼製 (亜鉛めっき) (重量：0.78 kN/m)	FRP製 (重量：0.26kN/m)	アルミニウム合金製 (重量：0.35kN/m)
【一般的な環境】 海岸から2 km以上 めっき皮膜の年間腐食減少量：3～10 g/m ²	◎ (119年) (LCC：78千円/m)	△ (塗装50年) (LCC：143千円/m)	○ (200年) (LCC：130千円/m)
【過酷な環境】 海岸から0.1～2 km未満 凍結防止剤の飛散の影響が予想される箇所 めっき皮膜の年間腐食減少量：10～30 g/m ²	△ (37年) (LCC：234千円/m)	○ (塗装50年) (LCC：143千円/m)	◎ (150年) (LCC：130千円/m)
【極めて過酷な環境】 海岸から0.1 km未満 凍結防止剤の飛散の影響が予想される箇所 めっき皮膜の年間腐食減少量：30～200 g/m ²	△ (11年) (LCC：780千円/m)	◎ (塗装50年) (LCC：143千円/m)	○ (50年) (LCC：392千円/m)

4. おわりに

FRP 材料は、歩道橋では主材料として採用された実績があり、今も供用されている。最近では、歩道橋の床版にも多く採用されている一方、高速道路橋の主構造に FRP 材料を採用することは、現時点では解決すべき課題が多い状況である。しかしながら、FRP 材料のもつ耐腐食性や軽量であるといった利点を生かし、今後も適材適所で取り入れていきたいと考える。

参考文献

- 1) 2019 新春インタビュー③西日本高速道路四国支社 長大特殊橋の耐震補強に着手：道路構造物ジャーナル NET
- 2) 高速道路橋におけるアルミニウム合金製検査路の技術基準の概要：稲荷雄太郎，橋梁と基礎，2018.4.

FRP 歩道橋の普及状況と課題

パシフィックコンサルタンツ(株) 副島 飛宙

1. はじめに

土木構造物の分野における FRP 構造物として歩道橋がある。国内初の FRP 歩道橋の施工事例は沖縄県にある「伊計平良川線ロードパーク連絡歩道橋」であり、2 径間連続 GFRP プレートガーダー歩道橋（鉸桁橋）である。これを基にいくつかの FRP 製の歩道橋が建設されてきたが、一般化には至っていない。ここでは FRP 歩道橋に着目し、これまでの普及の状況と課題について、設計者（建設コンサルタント）の立場として述べる。

2. FRP 歩道橋の普及状況

FRP 歩道橋の橋種はこれまで鉸桁橋、箱桁橋、ポニートラス橋、吊り橋で実績がある。主に沖縄県等の塩害地域で採用されているものが多く、ポニートラス橋が最も多い。また、図-2 に橋種ごとの支間長の実績を示す。鉸桁橋は主な支間長実績が 6～11m 程度（伊計平良川ロードパーク連絡歩道橋は 2 径間連続橋とし支間長約 20m の実績あり）であり、箱桁橋は鉸桁橋最大実績である約 11m から最大 17.5m 程度まで実績がある。ポニートラス橋は 5～17.5m まで実績がある。吊橋は最大支間長 50m まで実績があり、長支間に適用されている。



図-1 FRP 歩道橋の例

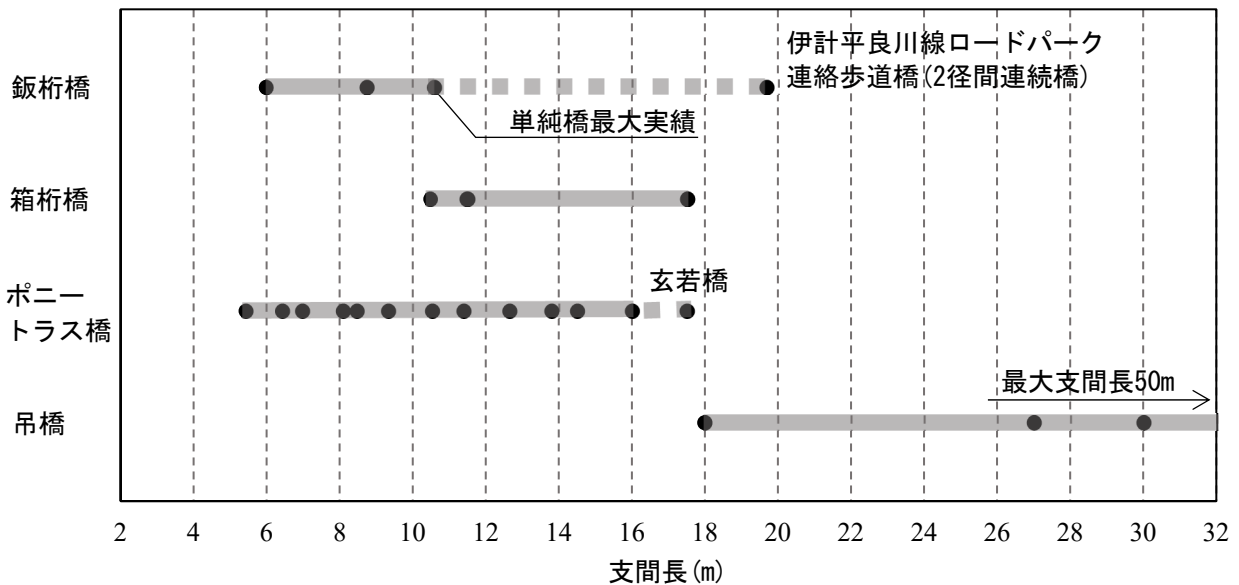


図-2 支間長の実績

3. FRP 歩道橋普及に向けた取り組みと課題

(1) 歩道橋の計画・設計における現状

歩道橋において、鋼橋は事例が豊富にあり、過去の事例を整理したデータブックや標準図集などが整備され、設計計算を行わなくても概略の形式や構造、工事費をある程度想定できる。また、細部構造の諸元や材料特性も標準化され、設計における諸条件の設定も容易である。一方、FRP 歩道橋では適用できる形式や構造寸法、工事費等が不明確である点や、細部構造、材料特性といった諸条件が鋼橋のように詳細には標準化されていないことから想定が難しい。特に FRP の設計経験がある技術者が少なく、FRP 歩道橋の認知度が低いことに加え、工事費が高いイメージもあり、計画、設計段階で比較検討対象にならないケースがほとんどである。

(2) FRP 歩道橋の普及に向けた事例収集とデータ整理

FRP 歩道橋の構造や特徴が把握できるよう、H218 小委にて、これまでに施工されてきた FRP 歩道橋の情報を収集し、これをベースにデータを整理した。具体的には、歩道橋の構造形式や構造寸法を把握するため、適用支間長（図-2）、桁高支間比（図-3 に箱桁の例を示す）を整理した。また、質量（表-1）やこれに対する概算工事費（表-2）を整理した。この中でも例えば鋼橋に対するメリットとして、質量では鋳桁で 0.109t/m^2 であり、これは「'21 デザインデータブック（一社）日本橋梁建設協会」¹⁾より、鋼製の横断歩道橋の鋼重実績値の約 $0.25\sim 0.35\text{t/m}^2$ （支間長 $12\sim 25\text{m}$ ）に対し $1/2\sim 1/3$ 程度軽量である結果であった。

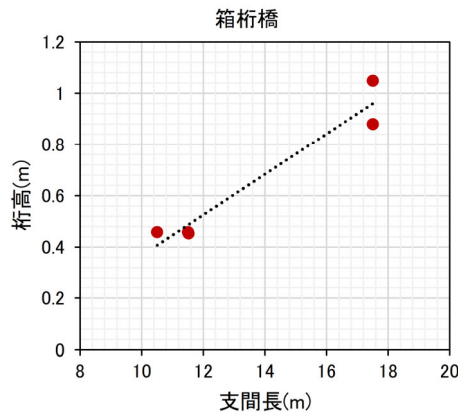


図-3 箱桁橋の桁高支間比

表-1 FRP 橋種別質量表

橋種	橋面積当り平均質量(t/m ²)
鋳桁橋	0.109
箱桁橋	0.156
ポニートラス橋	0.157

表-2 FRP 橋種別工事費表

橋種	質量当り平均工事費(千円/t)
鋳桁橋	5,956
箱桁橋	3,708
ポニートラス橋	3,549

(3) 今後の課題・展望

FRP 歩道橋の認知度向上とそれに必要な計画・設計のためのデータブックや規準類整備の観点では、(2)に示すように、計画段階で参考となる情報について取りまとめた。しかし、実績数が非常に少ないため、今後も FRP 歩道橋の普及と共にデータを蓄積し、更新していく必要がある。また、構造検討や詳細設計を進めていく上では、さらに具体的な情報が必要となる。鋼橋では、自動設計ソフトがあり比較的短時間で構造諸元の比較検討や詳細設計計算ができるが、FRP 歩道橋には自動設計ソフトがないため、設計に時間を要するほか、技術力も求められ、設計する上での障壁となっている。まずは設計手法の周知とともに、ソフト開発も促す目的で、設計計算例が必要と考えられる。また、設計図面作成では、例えば鋼橋の歩道橋の細部構造は標準図集や構造詳細の手引き等を参考に作図する。一方 FRP 部材は細部構造まで示された規準がないため、作図が難しい。参考資料として、鋼橋と同様構造詳細の手引きや標準図集が必要と考えられる。

FRP 歩道橋の採用（鋼橋との対比）に関する観点では、鋼橋に対し工事費が高くなるのが現状である。鋼橋に対する FRP 橋のメリットを多面的な観点から定量的に示せるようにする必要がある。例えば、FRP の耐腐食性能による LCC の低コスト化や、軽量であることによる施工時や架け替え時の優位性、下部基礎工のコンパクト化等、これらが比較検討できる情報や事例が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本橋梁建設協会：'21 デザインデータブック ,2021.

FRP 活用事例「公園内の歩道橋・通路・その他」

(株)コムテック 正会員 池田 哲雄

1. FRP との関わり

私は約 30 年前にハードウッドと呼ばれているイペ材やボンゴシ材等の外国産木材で木橋や展望台などの構造物を手がけてきた。海外では跨線橋や高速道路に架かる橋などに採用されていたのだが、高温多湿な日本では設置後の早い期間に腐朽菌による腐食が日本国内で散見され使用不能の事例が広がっていった。その後補修やメンテナンスに多大な費用と時間を費やす事となり、又、木材の伐採による環境問題も表面化した。そこで日本の気候により適した素材は無いかと探し続けていたところ、出会ったのが FRP である。元来、ランドスケープに活動拠点としていた私にとっては木材の良さもリスペクトしながら FRP 材の普及に取り組んでいる。

2. 活用事例

①せんだん轟の滝のトラス橋

熊本・宮崎・鹿児島県の県境に位置する五家荘の山中深くにある落差 70m の名瀑をめぐる散策路に架かる橋で常時、滝のしぶきが橋に降り注ぐ厳しい環境下にある橋の架け替え工事である。

施工現場へのアプローチは道幅が狭いゆえに高低差が大きく工事車両や重機の進入が出来ず、人力での資材搬入と施工が求められる一方でメンテナンスを極力軽減したいという観点から GFRP 引抜材のトラス橋が採用に至った。床版には泥や落ち葉が溜まりにくくするグレーチングタイプの床版を使用していて、橋を渡るワクワク感も演出している。



②比地大滝の吊橋

沖縄県北部の亜熱帯の深い森に囲まれた約 30m の落差をもつ沖縄県本島最大の滝へと導く吊橋である。当初は、外国産木材で架設されていたのだが、木材部の腐食が表面化し、全面改修工事をする事になった。

塔柱とケーブル以外は再利用とし、吊桁・床版・手摺は湿気や塩害に強い GFRP 引抜材が採用された。鋼材やアルミ合金も検討されたが、ケーブルに負担が掛からない事を条件に、軽量性と耐腐食性に優れている GFRP 引抜材が採用された。



③浦添大公園の歩道橋

沖縄県中部にあり県道を挟んで駐車場と公園を結ぶ歩道橋である。従来は県道を歩いて横断しなければならなかった為、事故の危険性を軽減する目的として歩道橋が計画された。

鋼橋やコンクリート橋等、他の工法と比較選定して、基礎工事が軽減でき、塩害にも強い GFRP 橋が採用された。FRP 橋が横断歩道橋として採用されたのは、国内で 2 例目である。この橋の特徴としては FRP 桁をボルトや金物を一切使用せずに、全て FRP 桁部材を接着接合したことである。そのことにより橋本体の重量が軽減でき、又、工場で製作した桁を運搬する事で、現地での施工も半日で終えることが可能となった。



キーワード 土木学会全国大会, 自然公園, 遊歩道, 橋梁, 木道, デッキ
連絡先 〒861-8019 熊本県熊本市東区下南部 3 丁目 6 番 80 号
(株式会社) コムテック TEL096-388-2081

④北明治橋

那覇市内中心部を流れる国場川へ架かる木橋の架け替え工事として、計画された事業である。以前は木橋が架かっていて緊急車両を通行可能なコンクリート橋で架設されていたが、地域に愛されていた木橋のイメージを残したいとの強い要望で、桁の化粧材としてアルミや鋼材等と比較選定して、設置当時の景観や軽量性、塩害、湿気に強い GFRP 引抜材の採用となった。また高欄も GFRP 引抜材である。



⑤某基地のイノシシの進入防止柵

基地の中での工事の為、場所は某基地としか公に出来ないが、近年イノシシの進入が度々発生する事例があり、埋設物や既存の施設に影響が出ている。これを防ぐために新たに設置した FRP 柵である。常時海風が吹くので風の影響を受けにくい事や塩害に強い事、又電波透過性に優れている事を比較検討して、FRP グレーチング柵が採用となった。



3. 今後の課題

- ①コスト・・・他の材料よりもイニシャルコストが高い(施工性の良さや維持管理の軽減、LCC の面で採用)
- ②リサイクル化・・・国内ではセメントの原料化・燃料化が主になっていて GFRP への再利用は出来ていない。
- ③FRP の広まり・・・土木構造物だと難しいイメージだが、ランドスケープ従事者からの活用を期待。
- ④FRP の耐用年数・・・LCC の比較でも重要な対象項目である。(暴露試験と塗装の膜厚減少を参考にしている)

(遊歩道の材料比較選定表)

製品	木材(国産)	GFRP	プラ擬木	再生木材	アルミ
イメージ図					
構造特性	<ul style="list-style-type: none"> 木材(主に杉材)に防腐材を加圧注入し、木材保護塗装を施した製品である。 日本国内で多様に使用されており、安価で入手が容易 耐久性や耐腐食性が他比較材より低い。 紫外線により、干割れや反りなどが生じることがある。 	<ul style="list-style-type: none"> 強化ガラス繊維と樹脂の複合製品である。 GFRP材は軽量かつ高強度で雨水や塩害にも強く耐腐食性にも優れている。 GFRP材は軽量なので人力による搬入や架設が可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> プラスチック廃材と鋼材を主材にしたプラスチック擬木製品である。 従来のコンクリート擬木よりも軽量の為、人力施工が可能になった。 工場加工製品の為、現地の状況変化による対応が難しい。 	<ul style="list-style-type: none"> プラスチック廃材と廃木粉を原料にした複合製品である。 温度変化による膨張・収縮が大きく、反りや割れが生じる。 物性値が低いので構造材に適さない。 	<ul style="list-style-type: none"> アルミニウム合金にアルマイト処理を施した製品である。 軽量かつ高強度で、耐候性や耐火性に優れる。 異種金属による接触腐食が発生する。 使用する上で、水溜り部分が出来ないように排水などの対策が必要である。
景観性	<ul style="list-style-type: none"> 天然素材のため、周囲の景観と調和する。 	<ul style="list-style-type: none"> 希望の色に着色できるので、木材のような茶系の着色を行うことによって周囲の景観にもなじみ易い。 	<ul style="list-style-type: none"> 色や形を木材に擬装しているため、周囲の景観にもなじみ易い。 	<ul style="list-style-type: none"> 多様な色を選定できるので周囲の景観にもなじみ易い。 	<ul style="list-style-type: none"> アルマイト処理による着色となるため、鋼材のイメージが少し強くなる。
維持管理	<ul style="list-style-type: none"> 設置1年後にボルトの増締めや設置2~3年後に美観及び耐久性向上のため、木材塗装が望ましい。 	<ul style="list-style-type: none"> 基本的にメンテナンスフリー 	<ul style="list-style-type: none"> 基本的にメンテナンスフリー 	<ul style="list-style-type: none"> 設置4~5年後にボルト・ピスの増締めや、反りや割れの部分交換が発生する。 	<ul style="list-style-type: none"> 基本的にメンテナンスフリー
耐用年数	約15年	約40年	約25年	約18年	約25年
概算直工費	概算直工費 ¥400,000/m ※基礎工事除く	概算直工費 ¥600,000/m ※基礎工事除く	概算直工費 ¥520,000/m ※基礎工事除く	概算直工費 ¥550,000/m ※基礎工事除く	概算直工費 ¥570,000/m ※基礎工事除く
50年後のLCC	50年÷15年=3.3 ¥400,000×3.3=¥1,320,000 ¥1,320,000	50年÷40年=1.25 ¥600,000×1.25=¥750,000 ¥750,000	50年÷25年=2 ¥520,000×2=¥1,040,000 ¥1,040,000	50年÷18年=2.8 ¥550,000×2.8=¥1,375,000 ¥1,375,000	50年÷25年=2 ¥570,000×2=¥1,140,000 ¥1,140,000
評価	4	1	2	5	3

FRPの活用可能性「応急橋の可能性」①－緊急仮設橋

函館工業高等専門学校 正員 平沢 秀之

1. はじめに

我が国では、1959年の伊勢湾台風、1995年の兵庫県南部地震、2011年の東日本大震災など、幾度も甚大な被害を経験してきた。これらの大災害は人々に防災意識を高めさせ、国や自治体が防災計画の策定に尽力する契機となった。特に東日本大震災以降、政府では国土強靱化政策の議論がなされ、国土強靱化基本法が2013年に制定された¹⁾。

この法律による国土強靱化政策は、「人命の保護」、「経済社会の維持」、「被害の最小化」、「迅速な復旧復興」の4つの柱から成る。災害時に交通路を確保していち早く人命救助を行うことや、人命保護や復旧のために物資輸送を行うことも、この強靱化政策に含まれよう。災害で道路が被害を受け、交通が遮断された場合に応急的に橋を架けることは重要であるが、このような応急的な橋の構造、材料、要求性能、架設工法、経済性等に関する研究はあまりなされておらず、参考資料も少ない。

学会活動としては、土木学会構造工学委員会内に、「災害時の緊急架設を目的とした緊急仮設橋に関する調査研究小委員会」が2019年に発足された。この小委員会では、災害時に早期かつ簡易に架設が可能な橋を「緊急仮設橋」と定義し、対象を緊急仮設橋に特化した調査研究を行っている。近年の各種災害による橋梁被害の状況、緊急仮設橋の現状と課題が取りまとめられている²⁾。また、2023年には、その後の委員会活動の成果を構造工学論文集中に9編の論文として取りまとめ発表した。ここでは、この委員会活動の成果の一部を紹介し、FRPも含めた軽量材料の緊急仮設橋への適用について述べる。

2. 災害復旧用仮設橋へのニーズ

災害時は災害発生直後から時間の経過とともに人々の行動形態が変化する。復旧活動も人命救助、避難支援からインフラの復旧、経済活動の再開等の変化があり、それに伴って仮設橋に必要な条件も変わりうる。表-1は、時間の経過とともに求められる仮設橋へのニーズをまとめたものである³⁾。ここで、「安全性」、「施工性」とは仮設橋の構造強度及び仮設施工の容易さを指し、「利用性」、「耐久性」とは仮設橋の利用のしやすさ及び長期に亘って耐えうる性能をいう。時間経過に応じたニーズの変化をおおまかに示すと、時間を経るとともに安全性は上昇、施工性は低下、利用性は上昇、耐久性も上昇になると考えられる。

表-1 時間経過と仮設橋へのニーズ

発災後からの経過時間	ニーズ・要求性能	安全性	施工性	利用性	耐久性
～6時間	この時間帯でできることはない／ニーズもない	—	—	—	—
～72時間	人命救助、搬送、避難の通路確保のための橋であれば、 ・最低限の安全が確保できればよい ・利用に制限や不便があってもやむをえない	○	◎	△	×
～2週間	最低限の生活に寄与できる橋であれば、 ・最低限の安全が確保できればよい ・利用性はある程度求められる	○	◎	○	×
～1年	復旧活動や避難生活に必要な橋であれば、 ・安全性はある程度必要 ・利用性はある程度求められる	◎	○	○	×
1年～	当面使用されることが想定される橋であれば、 ・通常の橋に準じた性能 ・ただし施工は迅速、容易であること	◎	○	◎	△

※ ◎：強く求める， ○：求める， △：求めなくてもよい， ×：不要

3. 緊急仮設橋の位置付け

表-1のニーズを基に、図-1に被災後の経過時間に応じて求められる橋梁タイプを示す。ここで、災害直後の2週間までに架橋できるものを「緊急仮設橋」、それ以降に架橋できるものを「応急組立橋」と定義している³⁾。応急組立橋には、国土交通省が国内各地域で保有している支間長40m程度までの車道橋が該当する。一方、緊急仮設橋はそれより小スパンで、輸送も小型・中型トラックの機動力を生かし、人力やユニッククレーンでの架設が想定される。

キーワード：緊急仮設橋、FRP、アルミニウム、木材

連絡先：〒042-8501 函館市戸倉町 14-1、TEL&FAX 0138-59-6390

荷重も自家用車や群集荷重の軽量なものを対象としている。緊急仮設橋の発災から短時間の間に架設できることが望まれるため、架設時間が極めて短時間であること、架設方法が単純で人力を主とする方法が求められる。そのためには橋梁を構成するパーツ重量が軽量であることが最重要と考えられる。

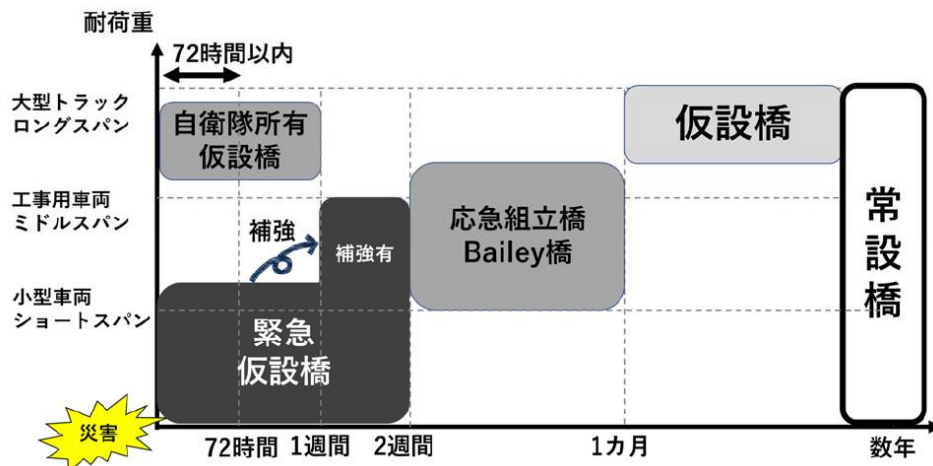


図-1 被災後の経過時間に応じて求められる橋梁タイプ

4. 軽量材料の緊急仮設橋への適用性

軽量材料として、FRP、アルミニウム、木材を取り上げ、比較のために従来からの材料である鋼材と併せて表-2にそれらの特徴をまとめた。FRPは、力学的性質に関しては軽量かつ高強度であるため、緊急仮設橋の材料に適しており、入手性に関しては受注生産及び個別対応となるケースが多い。また耐久性については、平時における保管では直射日光に注意し、供用時は紫外線劣化に注意が必要となる。

表-2 材料比較

項目	FRP		アルミニウム			木材			鋼材	
	CFRP 繊維方向： 一方向	Hybrid FRP 繊維種類： CF+GF 繊維方向： 0/45/90/-45	A6061-T6	A5083-O	A6005C-T5	スギ	カラマツ	集成材 E95-F270	SS400	
力学的性質	比重	1.59	1.8	2.7	2.66	2.7	0.8		7.7	
	引張強度 [MPa]	2754	1162	310	290	270	16.2 (甲1級)	18.0 (甲1級)	18.6	400
	引張弾性率 [GPa]	160	72	68.9	70.3	68.9	7.0	9.5	8.5	200
入手性	在庫	受注生産		平板、丸棒：市場流通有 その他形状：受注生産			市場流通有		受注生産	市場流通有
	流通状況	個別対応		多数あり			多数あり		個別対応	多数あり
耐久性	保管方法	直射日光が当たらない所で保管		基本は水に濡れない所で保管 (屋内保管推奨)			水分の侵入を避ける保管 (腐朽対策) 風通しを良くする(カビ対策)			基本は水に濡れない所で保管 (屋内保管推奨)
	劣化	紫外線劣化による表面荒れ		屋外、屋内共通で異種金属との接触部(Cu,Fe など)			腐朽菌、シロアリによる生物劣化、紫外線劣化、風化、乾燥割れ。			屋外、屋内共通で腐食、異種金属接触腐食、隙間腐食

5. おわりに

FRPの土木分野への利用用途拡大を図るに当たり、緊急仮設橋への適用を紹介/提案した。緊急仮設橋は通常の橋に求められる要求性能とは異なり、短時間で架設できること、供用期間も短期間であること、施工方法が簡易であること等が挙げられる。そのためには橋を構成するパーツ重量が軽量で、人力運搬が可能であることが望ましい。それらの点において、FRPは優位な材料と言える。一方、緊急仮設橋の設計基準を整備すること、FRPの材料価格を低減させることが課題となっている。

参考文献

- 1) 強くしなやかな国民生活の実現を図るための防災・減災等に資する国土強靱化基本法, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/hourei.html, 2022. 9. 22.
- 2) 災害時の緊急架設を目的とした緊急仮設橋に関する調査小委員会：活動報告，土木学会構造工学委員会，2020.
- 3) 中沢正利，小野秀一，近広雄希，木下幸治：応急組立橋の使用状況調査及び緊急仮設橋の基準整備に向けた提言，構造工学論文集Vol. 69A, pp. 1208-1278, 2023.
- 4) 平沢秀之，小野秀一，中村繁央，岩丸弘，大久保宣寿，青柳有輝：軽量材料の緊急仮設橋への適用性，構造工学論文集Vol. 69A, pp. 1198-1207, 2023.

防衛省のFRP 応急仮設橋の開発事例

ものづくり大学 正会員 大垣 賀津雄

1. はじめに

東日本大震災等では、防衛省陸上自衛隊は、被災者の人命救助、行方不明者の捜索、避難者の生活支援、および被災したインフラ施設の応急復旧等を実施した¹⁾。現在の自衛隊用応急橋梁は、車両への搭載・運搬や現地での迅速な架設の必要性から、主要構造部をアルミニウム合金による溶接組み立て構造（以下、アルミ構造と記す）とすることを基本としている。今後、搭載車両の多様化や径間長の延伸などの高性能化を考えると、従来のアルミ構造では各種制約条件のもとで要求仕様を満足できない場合が生じる。

そこで、アルミニウム合金よりも比強度の高い炭素繊維強化ポリマー（Carbon Fiber Reinforced Polymer、以下、CFRPと記す）に着目し、自衛隊用応急橋梁の主要構造部へのCFRP適用性に関する研究を実施してきた。平成29年度から令和3年度にかけて実施した「将来軽量橋梁技術の研究」^{2),3)}において、CFRPを適用した軽量の自衛隊用応急橋梁の概略設計を実施し、強度評価を行うための各種試験供試体および主要部分の部分構造供試体を製作し、载荷試験を行っている。

2. CFRP 応急仮設橋

(1) 構造概要

本研究試作では、総質量25t程度の各種装輪車や大型トラック等が搭載可能な橋長22mの応急橋梁を想定し、橋梁システム全体の概要設計が行われている。図1に本応急橋梁の概要を示す。本応急橋梁の形式は、既存の自衛隊用応急橋梁の形式に倣い、通過車両の左右それぞれの踏面を形成する上路式の4個の導板を連結した構成である。導板は単純支持された箱桁構造であり、その上面を車両が走行する。本導板は曲げモーメント分布を考慮した3角形のテーパ構造としており、支間中央部に接合部を設けて輸送しやすい長さとしている。

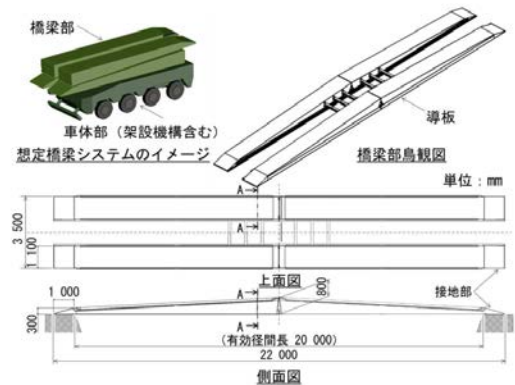


図1 研究試作された応急橋梁の構造²⁾

導板の主要断面は、各種形式から質量や製造コストを比較検討し、CFRPとアラミドハニカムコアによるハニカムサンドイッチパネルを主部材としており、隅角部にアルミ合金製の結合金具を介して締結した箱形断面としている。図2(a)に導板部の主要断面を示す。また、同図(b),(c)に隅角部に配置したハニカムサンドイッチパネル間の結合金具部を示す。床版と腹板間の結合金具部では、特に床版のハニカムコアが厚く、ボルト締結が困難であることから、同

図(b)に示すように常温硬化型エポキシ樹脂接着剤を使用している。また、腹板-底板間の結合金具部は同図(c)に示すように、結合金具を介したボルト締結としている。

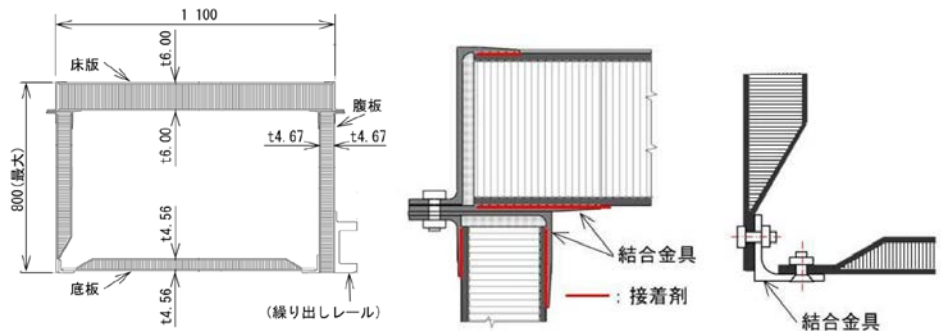


図2 研究試作された応急橋梁の断面構造²⁾

キーワード 応急橋梁, CFRP, 防衛省, アルミ合金, 導板

連絡先 〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地 ものづくり大学建設学科 TEL048-564-3907

(2) 構造諸元

図1に示した応急橋梁の概要設計を踏まえ、導板、連結部および床版部の強度特性を取得するための1/2スケールの縮尺模型が製作されている。CFRPの材料強度は成形時の微少な空隙等の影響を受け、板厚に依存する傾向があることから、CFRP部の板厚のみを想定橋梁と同じ板厚となる1/1として製作されている。図3に導板模型の構造概要を、写真1に導板模型の外観をそれぞれ示す。

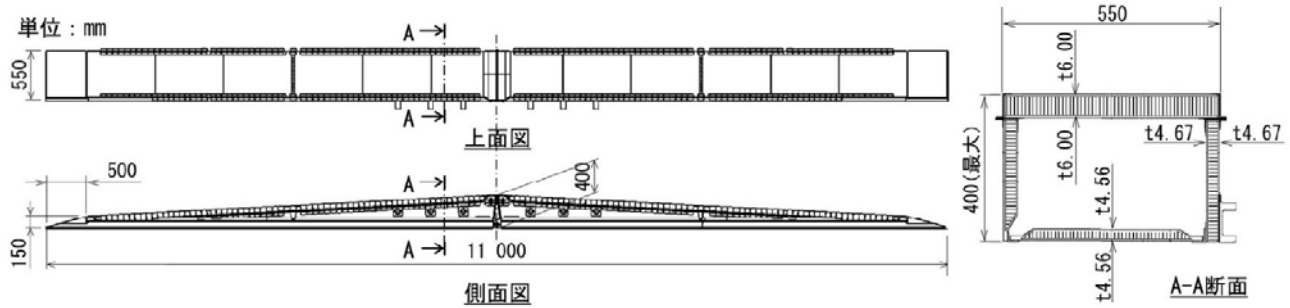


図3 製作された導板模型の構造概要²⁾

3. 構造物の特長

CFRPを適用して開発した応急橋梁（以下、想定橋梁と記す）について軽量化の効果を検討するため、想定橋梁と同じ耐荷重294kN、橋長22mの主要構造部をアルミ構造（使用材料A7N01-T6）とした応急橋梁（以下「比較橋梁」と記す）の概要設計を行い、質量の比較検討を行った。

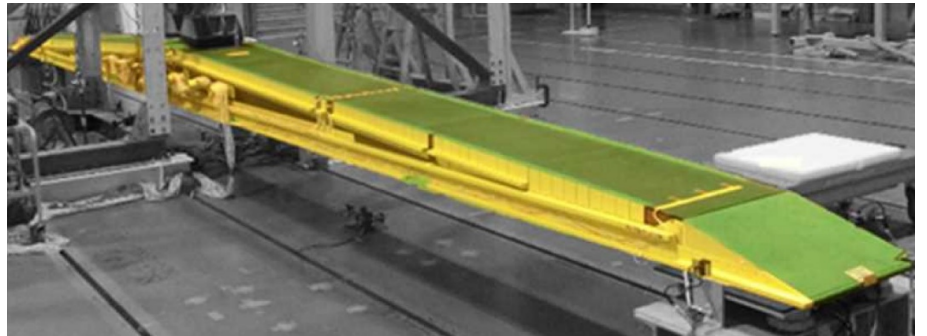


写真1 製作された導板模型の外観²⁾

図4に比較橋梁の概要を、表1に想定橋梁と比較橋梁の質量をそれぞれ示す。同表からCFRPを適用した想定橋梁では、アルミ構造に比べて左右連結部の取付け構造などの付加構造やアルミ構造では特別な処置の必要のない舗装など質量が増加する部分もあるものの、主要構造の質量を大幅に低減できていることから、全体として26%の質量低減を達成できる見込みを得た。

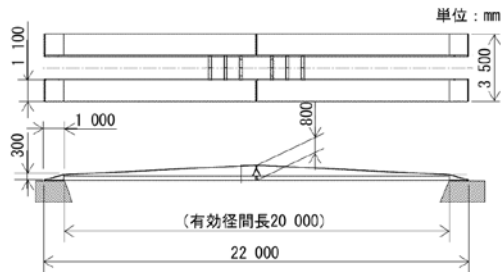


図4 比較橋梁の概要²⁾

表1 想定橋梁と比較橋梁の質量²⁾

部位	想定橋梁 (CFRP適用) の質量(kg)	比較橋梁(アルミ構造) の質量(kg)	質量比
主要構造 ^{※1}	3 416	6 544	-47%
付加構造 ^{※2}	1 794	1 042	+72%
舗装・ボルト ^{※3}	412	-	-
合計	5 622	7 588	-26%

※1：想定橋梁におけるCFRP適用部（床版、底板、腹板及び横桁（結合金具含む））
 ※2：想定橋梁において金属材料を使用した部位（接地部、連結金具、左右連結部及び繰り出しレール）
 ※3：アルミ構造では不要な質量

参考文献

- 1) 伊藤一雄：陸上自衛隊の架橋器材の概要と災害派遣事例，橋梁と基礎，2012.8
- 2) 鈴木洋史，山田順一，市川智隆，間山利勝，浅倉太一，中田光洋：応急橋梁へのCFRPの適用に関する実験的検討，土木学会第9回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム，2022.11
- 3) 防衛装備庁陸上装備研究所：将来軽量橋梁技術の研究，外部評価報告書，2023.3

技術検討会 話題提供（案）

「一設計技術者からみた FRP 構造物設計の難しさと今度の展望」

概要：

FRP 歩道橋である、「玄若橋」の設計を過去に会社で行った経験から、FRP 構造物の設計の難しさと、FRP 構造物の普及について提案する。

内容：

過去に、FRP 歩道橋である、「玄若橋」の設計を社内で行った。この FRP 歩道橋の設計においては、「FRP 歩道橋 設計・施工指針」に倣い照査を行った。この設計指針では、性能照査型設計法が取り入れられている。私は普段、鉄道構造物の設計に携わっているが、鉄道構造物の設計においては、性能照査型設計法が行われているため、性能照査においては慣れているが、FRP 歩道橋の設計においては、照査を進めるのが困難であった。この過去の記憶を振り返り、その設計の難しさを明確にし、FRP 構造物の普及を図るためにはどうすればよいのかを、一設計技術者の目線で提案する。

構造物の設計における照査は、一般的に、

材料の設定→断面の仮定→構造解析→限界値の算定→照査

の順に行われる。

材料の設定においては、例えば私は普段コンクリート構造物の照査に多く携わっているが、コンクリートだと設計基準強度が数種類あり、鉄筋も実用的な鉄筋強度が数種類ある。このいくつかの材料の中から、対象とする構造物に適切な材料を選定し、照査を始める。適切というのは、架橋環境であったり、経済性であったり、構造物の種類であったりである。

一方、初めて FRP 歩道橋の設計のために指針を眺めた時を思い出すと、まず材料強度を調べるために、色々とわからないことが多々あった。

- ① FRP といっても、樹脂の種類、繊維の種類が複数あり、どれを使うべきかわからない。
（一般的なものはあるのか）
- ② 成形方法が色々ある。成形法が異なることによって、材料物性値がどのように異なるのか、作れるものと作れないものがあるのか、よくわからない。
- ③ 材料係数と FRP 材の組み合わせがよくわからない。一般値はあるのか？（たとえばコンクリートの場合、コンクリートは 1.3、鉄筋は 1.0 を用いる）

結局、良くわからず、FRP メーカーに聞くことになった。何か一般的な値があれば少しは検討できたのだが・・・

構造解析においては、一般的な設計照査においては、骨組み解析を行うことになるが、異方性材料を扱うことが難しい。一般的な骨組み解析で応答値の算定が可能となるような仕組みがあれば良かった。

余談：自社で設計した歩道橋は、試作段階で手すりが大きく振動し、剛性を上げることが必要となった。FRP 材料は比較的柔らかいため、構造部材ではないものについても適切に検討する必要があることを学んだ。

限界値の算定においては、耐力の算定方法を指針等に倣い自ら作成した。煩雑かつ信頼性も低いため、断面照査プログラムがあれば良かった。

FRP 構造物の普及に向けて

橋梁構造物の計画時には、いくつかの設計案から最も妥当と考えられる案を比較選定することが一般的である。このとき、上述のように材料選定や構造解析、照査の仮定が煩雑であり、FRP に精通していない一般の設計技術者が概略で構造寸法を決定することは非常に難しく、材料メーカーや FRP メーカーに頼ることになると考えられる。一方で、材料メーカーや FRP メーカーによっても施工可能なものであったり、大きさであったり、コストが異なることがあり、FRP 構造物を比較設計の土俵に上げることも難しいことが現状である。このような観点から、以下のようなものを作成することを考える。

橋梁構造物に用いる FRP 材料の一般値(案)

■成形法

部材寸法 ○○mm～○○mm → JIS 規格 形鋼 ○○成形法

○○mm～○○mm → 大型製品 ○○成形法

→部材寸法に応じて一般的な成形法を提示

■材料物性値

○○材 ○○級 ○○級 ○○級 (各 FRP メーカーが作成可能なものを包含)

○○級：弾性係数○○kN/mm²，引張強度○○N/mm²，圧縮強度○○N/mm²

○○級：弾性係数○○kN/mm²，引張強度○○N/mm²，圧縮強度○○N/mm²

○○級：弾性係数○○kN/mm²，引張強度○○N/mm²，圧縮強度○○N/mm²

→繊維補強材別に、規格を数種類設定する。材料物性値の一般的な値を揭示。応答値の算

定，照査時に等方性材料と見做せる繊維補強量とする。

■単価

〇〇級 (unit/ton), 〇〇級 (unit /ton) , 〇〇級 (unit /ton)

→繊維補強材別に設定した規格に対し，コストの相対関係を掲示する。

なお，FRP 材料は本来，自由度が高く，構造物の性能や目的に応じた合理的な設計を可能にする材料である。一方で設計は，設計空間が広いほど，最適な設計解を選定することが非常に困難である。FRP を土木構造物に普及させるため，たとえば概略設計時には材料の設計空間を狭め，鋼やコンクリートの比較対象として並べるようにし，詳細設計時においては，材料の自由度を十分に発揮するよう設計体系を整備することも必要であると考えられる。