

(42) FRP引抜成形材によるトラス橋の架設9年後の耐荷力ならびに材料劣化

佐々木 巖¹・西崎 到²

¹正会員 独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: isasaki@pwri.go.jp

²正会員 独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: nisizaki@pwri.go.jp

繊維強化プラスチック (FRP) は、耐食性を活かして塩害地域での防食材や構造材として利用されている。また、その比強度から上部工重量を大幅に軽減できるため、架設の迅速化、下部工の簡略化、耐震性の向上などの機能が期待されている。筆者らは、FRP引抜成形材によるトラス形式応急橋を製作し、その機能性や耐久性の評価を続けている。今回、屋外暴露9年間の耐荷力の変化や、材料劣化を調査した。その結果、構造材としての性状は変化しておらず、橋梁構造としての載荷変形応答は建設時と同じで耐荷性に変化は見られなかった。塗装や表面被覆が施されていないFRP外面には、表面の荒れや汚れがみられた。FRPは、意匠としての表面保護は必要であるものの、構造材料として優れた機能性および耐久性を有していることがわかった。

Key Words : FRP, loading test, exposure test, static load, durability

1. はじめに

近年、FRP材料の軽量性、易加工性、耐食性などの機能性が注目され土木構造物に適用する事例が増加しつつあり、耐久性の検証も進められている。これまでの研究において暴露試験などから耐久性を明らかにしようとの報告もあるが、その多くは試験板レベルでの材料試験¹⁾であり、実大規模の構造物で適用性や耐久性を調査した事例^{2) 3)}は多くない。長期間にわたる構造的耐久性についての検証が求められている。

土木研究所では、材料、橋梁、建設等の協会および民間5社による共同研究⁴⁾等により、構造材料としての事例調査やFRP橋梁の適用性の開発研究を行っている。その中で、FRPの軽量性、耐食性などの優れた特徴を活かし、災害時等の応急橋梁としての実用性⁵⁾に着目し、FRPトラス橋の製作および架設を行った。同橋は、長期耐久性調べるために、土木研究所の材料試験施設において屋外暴露され既に9年が経過している。ここでは、このFRPトラス橋の載荷試験による建設直後の変形挙動、ならびに9年経過後の耐荷力の変化について試験した結果を、材料劣化の外観観察の概要とあわせて報告する。

2. 試験方法

(1) FRPトラス橋

a) 試験の概要

試験対象のFRP橋(図-1)は、試験評価用の応急橋として、静岡県富士宮市朝霧高原の土木研究所の材料試験施設内に、2000年に製作架設された支間8.0m、上部工総重量3.8tonの上路トラス橋である。



図-1 FRPトラス橋

FRP材料の物性や適用性に関する基礎調査、同橋梁の設計や施工性評価の詳細は既報⁴⁾の通りであるが、今般、長期暴露後の載荷試験および外観観察を行った。

載荷試験後には、施設内の別の場所に移設し、同様の載荷試験を再度行って荷重応答の変化を評価した。

試験までの経緯は以下の通りである。

- 工場製作(材料加工, ブロック製作)
- 現場架設試験(施工性評価, 人力併用)
- 2000載荷試験(建設直後2ton載荷)
- <屋外暴露9年3ヵ月間>
- 2009載荷試験(2ton載荷の後5ton載荷)
- 移設(クレーンにより一括移設)
- 2009-移設後の載荷試験, 目視詳細観察

b) 設計諸元

F R Pトラス橋の一般図を図-2に示す。応急橋としての設定のもと、表-1の条件でF R P橋の設計を行った。適用基準は、F R P橋の設計として適しているとは限らないものの道路橋示方書-同解説を用いた。

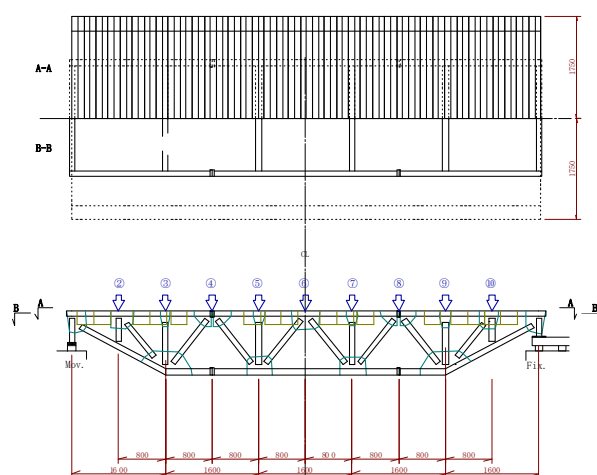


図-2 F R Pトラス橋一般図と載荷試験位置

表-1 F R P応急橋設計諸条件

項目	条件	摘要
形式	上路トラス	
荷重, 震度	T-4, Kh=0.25, Kv=0.0	2tonトラック相当
橋長, 支間, 幅員	8.3m, 8.0m, 3.5m	
部材形状, 架設	10ton車で運搬し25tonラフタクレーンで架設	

表-2 使用材料

	トラス主構	床版
材料	GFRP引抜成型材 SP103B	GFRP引抜成型材 SP103B
断面形状	103×103×t9.3mm	103×103×t9.3mm
繊維構成	80:20:0%*	43:19:38%*
引張	$\sigma=518\text{MPa}$, $E=24.0\text{GPa}$	$\sigma=141\text{MPa}$, $E=23.5\text{GPa}$
圧縮	$\sigma=430\text{MPa}$, $E=30.0\text{GPa}$	$\sigma=134\text{MPa}$, $E=30.0\text{GPa}$
曲げ	$\sigma=413\text{MPa}$, $E=11.9\text{GPa}$	$\sigma=129\text{MPa}$, $E=12.0\text{GPa}$
せん断	$\tau=183\text{MPa}$	
部材重量	358kg	1,776kg

*) 繊維構成 = 一方向ロービング : 無方向マット : クロス0/90°

トラス主構には、引抜成型法によって製造されたG F R P中空角柱パイプ(旭硝子マテックス(株)製PLALLOY)を用いた。設計に使用した引抜材の物性値を表-2に示す。中間対傾構や端横桁にはU型引抜材を。ガセットプレートや部材等固定用小部材にはハンドレイアップ成型によるG F R Pを用いた。橋梁の総重量は、3.8tonとなった。

設計では、図-3に示す骨組みを用いて解析を行い、応力およびたわみを確認した。圧縮力(Euler座屈荷重)、引張力が最大となる部材において、断面応力度を求め、これに安全率3.2をかけて照査した。

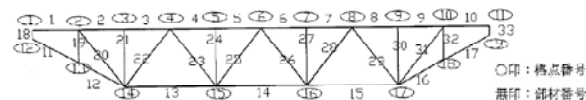


図-3 骨組み解析図

トラス格点部にはブラインドリベットCCP68を使用し、そのせん断強度4.9kN, 安全率3.0から必要本数を算出した。なお接着剤を併用したが、強度設計には接着強度は考慮していない。

応急橋としての建設であることから、主構の数により橋梁規模を選択できるブロック構造とし、図-2の④⑧位置に継手を設けた。現場での迅速な接合を可能とするために、フランジを持つS U S製ソケットと高力ボルトを使用した図-4に示すような引張接合とした。全長によっては、P C鋼棒による接合方法も考えられる。

中間対傾構は、風荷重および地震荷重により照査した。中間対傾構や端横桁、ソケット継手などは、M20ボルト接合とした。

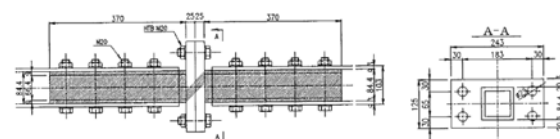


図-4 ブロック継手(HTB 引張接合)

床版は、G F R P中空角柱パイプを並べて3.5×1.6mの版を構成し、これを5枚使用した。人力施工を可能とするため角柱3本をあらかじめユニット化し、主構上に並べた後、地覆部の角柱で1.6mごとに連結した。図-5のように、ガイド材を用いて主構に固定するものの、構造的には連結されていない。

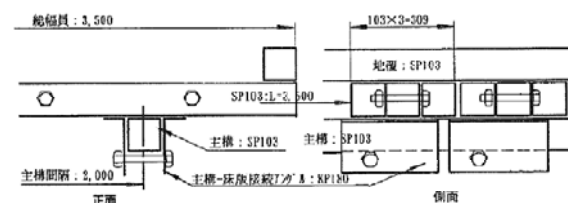


図-5 FRP床版(主構とは接合せず上載のみ)

(2) 静的載荷試験方法

静的載荷試験は、前述の通り建設直後に一度実施（以降、2000と表記）しており、今般、同様の載荷試験（同、2009）を実施した。2009載荷試験では、ひずみや変位の測定位置や条件は原則として2000と同一とし、経年による比較評価を試みた。あわせて、支承の拘束状態を把握するため支承変位も測定した。また、支間中央部の面外変位（トラス桁横倒れ）についても計測を行った。

荷重車は表-3に示すものを使用した。2009載荷試験では、2000載荷試験で使用した同一車両（以降、2ton）を再度使用し、これに加え、さらに重荷重の車両（同、5ton）でも試験を行った。なお、設計荷重を踏まえて4トン車を用意したが、架装機材の関係で5トン超の荷重となった。

表-3 荷重車

名称	2ton	5ton
車両	トヨタハイラックス	トヨタダイナ
前軸重	1,090kg	2,320kg
後軸重	830kg	2,858kg
ホイールベース	1,920mm	3,840mm



図-6 荷重車による載荷試験状況(2009 移設前)



図-7 移設状況

(3) 外観観察方法

長期暴露後の材料劣化の点検として、船舶、給水塔、工場設備などの他のFRP構造物の点検要領を参考に、材料劣化の外観調査を行った。FRPは、既往の橋梁材と比べて調査方法や点検記録等の要領が整備されていないことから、その確立に向けて、調査項目、点検要領、観察範囲(単位)、判定基準、標準写真、記録項目、点検表などを検討し、今回の調査で試行した。

3. 試験結果

(1) 支間中央部載荷時の変形挙動

載荷時の変位量計測結果を、支間中央部への載荷である載荷位置⑦と⑧の平均値として図-8に示す。2ton載荷時のトラス桁のたわみ量は、設計における計算値と概ね整合している。5ton載荷時のたわみは約2.5～2.8倍になっている。荷重車の総重量比は2.70であり、弾性変形していることがよくわかる。ただし、2ton載荷時の応答をよく見ると、2009載荷試験-移設後のたわみ量が設計値と非常に良く一致しているのに対して、2009(暴露後、移設前)の実測たわみはやや小さく、2000(建設直後)はその中間の値を示している。その理由としては、床版の剛性、支承の拘束状態、トラス形状（トラス主構が上弦材側で支持されている幾何形状）などが影響していると考えられる。

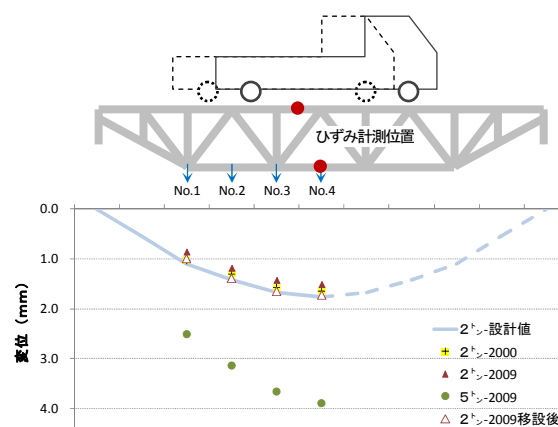


図-8 載荷時のトラス桁たわみ量
(支間中央部載荷⑦⑧の平均)

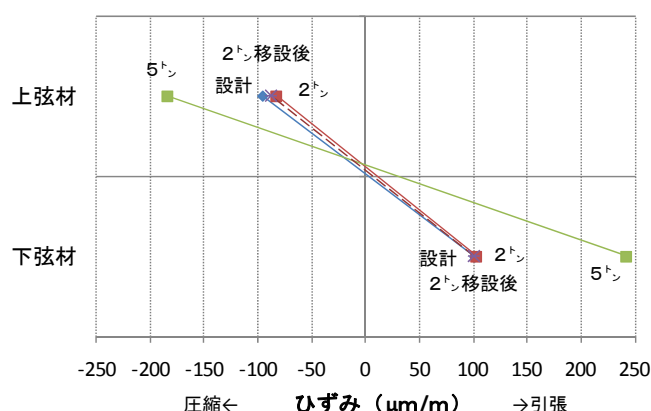


図-9 載荷時のトラス桁ひずみ量
(支間中央部載荷⑦⑧の平均)

図-9に中央部載荷時のトラス主構のひずみ量を示す。下弦材のひずみ量は、設計計算値との対応も非常に良く、5ton載荷時のひずみは、ほぼ2.5倍の値を示している。

一方、上弦材のひずみ量は、設計値との対応もやや悪く、5ton載荷時のひずみは2倍程度の値である。つまり荷重が大きくなると中立軸が下弦材側に移動することがわかる。これは、床版の剛性が大きく寄与しているものと考えられる。下弦材が負担する荷重が変化せず、上弦材の荷重が低下するという事は、床版が圧縮荷重の一部を負担していることを意味する。前述の通り、床版は分割されたものが上載されているだけで、構造的に接合されておらず、死荷重のみを考慮している。しかしながら、長期暴露後には塵埃や局部変形等により接触部分に癒着のような状況が生じるほか、荷重が増大すると摩擦応力により合成床版的な挙動を示すことから、床版に圧縮の荷重負担が生じ、全体の剛性が見かけ上向上したものと考えられる。実際、5ton載荷および移設による大きな変形等の履歴を受けた後である2ton移設後は、荷重およびたわみとも設計計算値に整合していることは、この証左であろう。なお、支承拘束状態の変化についてはあらためて次節で述べる。

9年間の屋外暴露による変化に関しては、載荷荷重に対する挙動の変化はみられず、材料の劣硬化や主構造の接合状態の変化などは全く生じていないと言える。

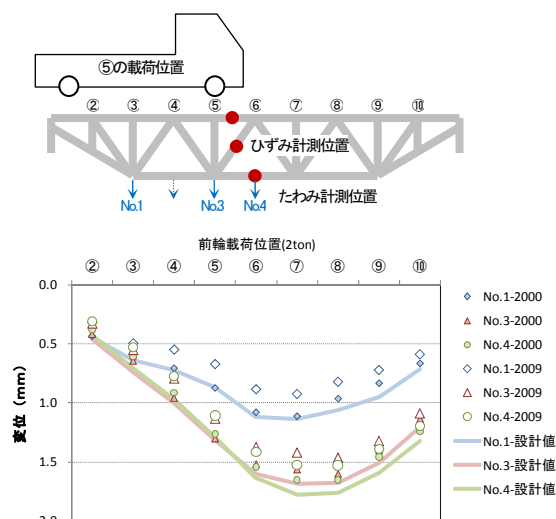
(2) 載荷位置と変形挙動

荷重車による載荷位置を変化させた場合の、トラス主構の荷重ひずみおよびたわみ変位の挙動を図-10に示す。

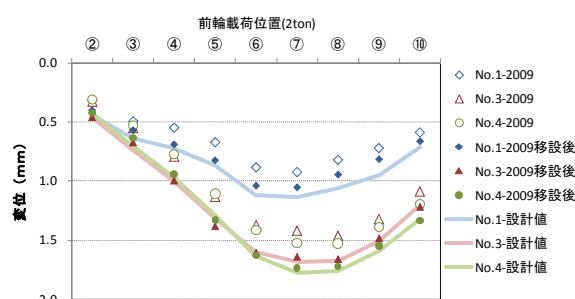
図-10(a)に示した暴露直後(2009載荷試験-移設前)のたわみ量は、図-8と同様に、2000載荷試験に比べてやや小さくなり、設計計算値との整合もあまりよくない。一方、図-10(b)のように、2009載荷試験-移設後は、特に下弦材側では設計計算値と非常によく対応している。上弦材側のずれは、前節で述べたように床版の剛性によるものが大きいとみられるが、支承拘束の影響もあると考えられる。

支承の水平変位は、暴露直後(2009載荷試験-移設前)は計測最大値でも2ton載荷では0.01mm未満、5ton載荷で0.05mm程度であり、拘束固定されていると言ってよい状況であった。これは、支承台の腐食によりローラが動き難くなったことが影響しているとみられる。移設後は、2ton載荷の最大時に、支間長が0.15mm程度縮む動きとして観測された。2000載荷試験時には支承変位を計測していないが、移動支承の動きは円滑であったと思われる。これらから、長期暴露後や重荷重時に拘束が増していることがわかり、支承拘束がたわみ量の低下に影響したものとみられる。

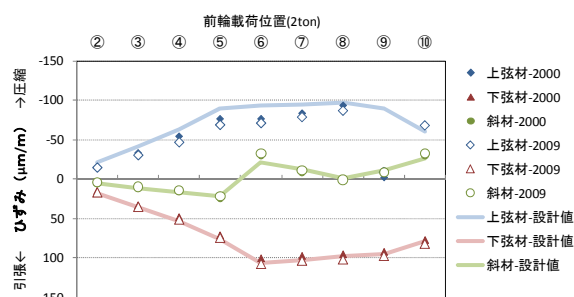
面外変形は、今回の試験(橋軸中心線上の載荷)においては、5ton載荷の最大時でも0.5mm程度以下であり、横倒れはほとんど計測されなかった。



(a) たわみ変位-9年暴露前後



(b) たわみ変位-2009 移設前後



(c) 荷重ひずみ

図-10 載荷位置とトラス桁の変形挙動

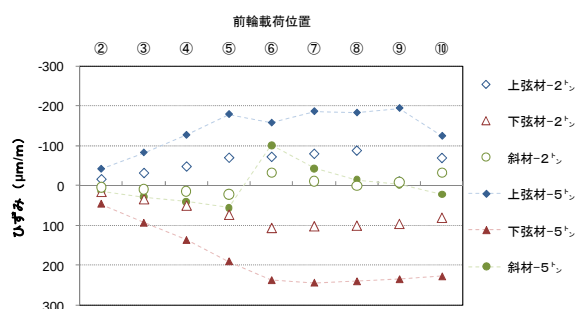


図-11 トラス材のひずみと載荷荷重

荷重ひずみについては、たわみ量が最大となる支間中央付近の載荷位置である前輪載荷位置⑦⑧付近で、上下弦材のひずみも大きな値を示すことが図-10(c)からわかる。斜材のひずみは、前輪が当該斜材をまたぐ⑤⑥間で引張から圧縮に変化していることが確認できる。さらに、荷重車の前後軸間（上弦材⑤～⑧，下弦材⑥～⑨）はトラス桁に対する4点曲げ載荷状態となり、この区間の荷重ひずみはほぼ水平となる。5ton載荷時の荷重ひずみを図-11に示すが、やはり同様の結果であり、その値は、いずれも約2.5倍となっていることがわかる。

荷重ひずみについては、建設当初と9年後の計測ともに、設計計算値とよく整合した値が計測された。

(3) 屋外暴露後の外観劣化状況

ガセットプレートをはじめとした塗装部分は、良好な外観状態であった。無塗装部分のFRP表面は、図-12のように苔等とみられる暗褐色の汚れが多数みられた。また、樹脂が分解し繊維分が露出しはじめている箇所も一部に見られた。FRPは耐食性には優れているものの耐候(光)性は十分でない場合もあり、表面からわずかに成型用樹脂の分解が進むため、美観の保持とあわせて、耐候性に優れた樹脂による表面保護層を適用すべきであろう。

損傷箇所として、水平対傾構および横桁に、図-13のような微細な表面クラックがみられた。通常の供用状態では過大な荷重が生じない場所であることから、移設時の吊り上げやトラック積載時に局部変形がかかったものと思われる。外観からは、表面樹脂層あるいはマット層のみの亀裂に見えるが、試料を採取し断面観察や強度特性等を評価して原因調査を進める必要がある。



図-12 FRP表面の汚れ



図-13 FRPのクラック

4. まとめ

9年間屋外暴露されたFRPトラス橋の載荷試験では、橋梁構造としての載荷変形は建設時とはほぼ同じで、耐荷性に変化は見られなかった。FRPは構造材料として優れた耐久性および機能性を有していることがわかった。ただし、塗装等の無い表面には汚れや樹脂劣化による荒れがみられ、意匠面を含め表面保護は必要である。

このFRP橋には活荷重がほとんど作用しないため疲労性能については不明である。FRP橋はたわみ制限になる事が多く、荷重には十分な余裕があり疲労はあまり問題とならないと思われるが、今後、接合部を中心に構造体としての疲労性能を検証する必要がある。

謝辞

本研究で試験したFRP橋は、平成9年度から11年度にかけて、建設省土木研究所化学研究室、(社)強化プラスチック協会、石川島播磨重工業(株)、佐藤工業(株)、ショーボンド建設(株)、東急建設(株)、(株)富士ピー・エスの7者により実施された「繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究」において模型橋梁として製作架設したものである。今般、当該共同研究参加各社から引き続き協力を得て、土木研究所が9年後の載荷試験を行った。関係各位にあらためて感謝する次第である。

参考文献

- 1) Nishizaki, I., Kishima, T. and Sasaki, I. "Deterioration of mechanical properties of pultruded FRP through exposure tests", *Proceedings of the third International Conference on Durability and Field Applications of FRP Composites for Construction (CDCC 2007)*, pp.159-166, 2007.
- 2) Bank, L., et. al. "Long-term performance of pultruded light frame canopy structure", *Proceedings of the third International Conference on Durability and Field Applications of FRP Composites for Construction (CDCC 2007)*, pp.91-100, 2007.
- 3) Keller, T., Bai, Y. and Vallee, T. (2007). "Long-term performance of the Pontresina GFRP pedestrian bridge", *Proceedings of the third International Conference on Durability and Field Applications of FRP Composites for Construction (CDCC 2007)*, 345-352, 2007.
- 4) 建設省土木研究所, (社)強化プラスチック協会, 石川島播磨重工業(株), 佐藤工業(株), ショーボンド建設(株), 東急建設(株), (株)富士ピー・エス, 土木研究所共同研究報告書第252号, 2000.
- 5) 宇野 名右衛門, 鈴木 統, 張 惟敦, 明嵐 政司, 小山 達雄, "FRPの応急橋梁への適用", 土木学会第54回年次学術講演会, pp.14-15, 1999.

LOAD BEARING PROPERTY AND MATERIAL AGING OF A PULTRUDED FRP BRIDGE AFTER NINE YEARS EXPOSURE

Iwao SASAKI and Itaru NISHIZAKI

FRP is used as corrosion protection and/or structural members utilizing its anti-corrosion properties. Moreover, because the weight of superstructure can be considerably reduced due to its specific strength, FRP application is expected to open up structural functionalities such as rapid construction, substructure downsize, and seismic improvement. The authors constructed an all FRP bridge made of pultruded and hand-lay-up GFRP materials, and have been investigating its functionality and durability. This paper states the change of structural load bearing behaviours and material aging for nine years field exposure. Loading response of the FRP bridge is almost same as the behaviour just after the completion, no structural performance deterioration has been confirmed for nine years, although FRP members without paint coating become a rough surface and changed to black because of stain. The results prove that FRP materials have good durability and functionality for long term field exposure as a structural material for a bridge structure, though surface coating may be essential for design and aesthetic purposes.