FRP 桁を有する歩行者専用吊橋の試設計

東海大学大学院　学生会員　○太田　陽平
東海大学　　フェロー会員　　中村　俊一

1.　はじめに

近年，土木構造物にはメンテナンスフリーやライフサイクルコストを含めた維持管理費の低減が要求されている．繊維強化プラスチック (FRP) は，軽量で施工しやすく，耐食性に優れているという材料特性を有する．したがって, FRP は橋梁への適用が国内外を問わず注目されており, 今後の需要拡大が予測されている．本研究では，英国で実際に建設されたガラス繊維強化プラスチック (GFRP) を桁に用いたスパン 50 m の歩行者専用吊橋を試設計し，設計・製作・施工上の問題点を検討した．さらに，同一の条件で鋼桁を用いた吊橋を試設計し，両者の重量，変形量，断面力などを比較した.

2.　GFRP 製歩道橋概要

本研究では, 英国にある Nesscliffe バイパス道路を横切るように架けられた Wilcott Footbridge という GFRP 製歩道橋に着目し，この橋と同規模の歩行者専用吊橋を試設計した．スパン 50 m，総幅員 2.0 m，有効幅員 1.84 m のこの橋は，主桁を ACCS (Advanced Composites Construction System)と呼ばれる FRP で組まれた図-5 のようなパネル (80 mm×560 mm) 6 枚によって構成されている．パネル相互はスリーウェイコネクタ (図-6) とトグル (図-7) により機械的に連結されて一枚の版になる構造をしている．主塔は直径 558.8 mm，厚さ 16 mm の鋼管を使用し，高さは 7.2 m で後ろに 30 ° 傾いている．ケーブルは直径 45 mm のスパイラルロープ，ハンガーは直径 20 mm のストランドロープを使用した．FRP 橋の概要を図-1，2，3 に示す.

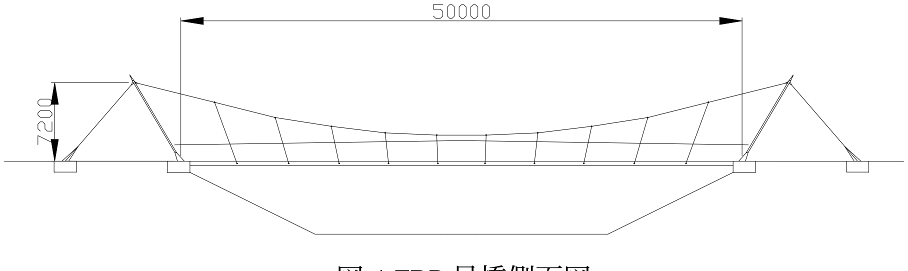


図-1 FRP 吊橋側面図

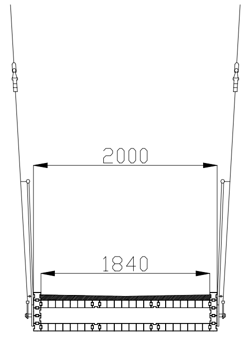


図-2 FRP 吊橋断面図

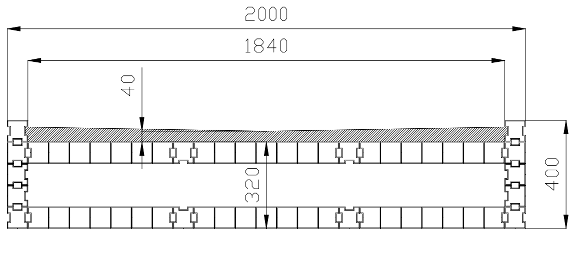


図-3 ACCS 構造

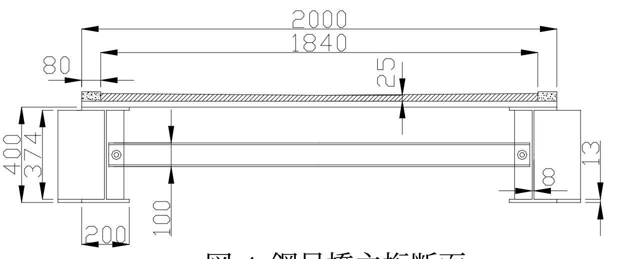


図-4 鋼吊橋主桁断面

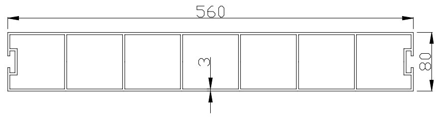


図-5 パネル

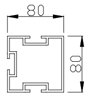


図-6 スリーウェイコネクタ

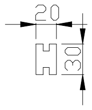


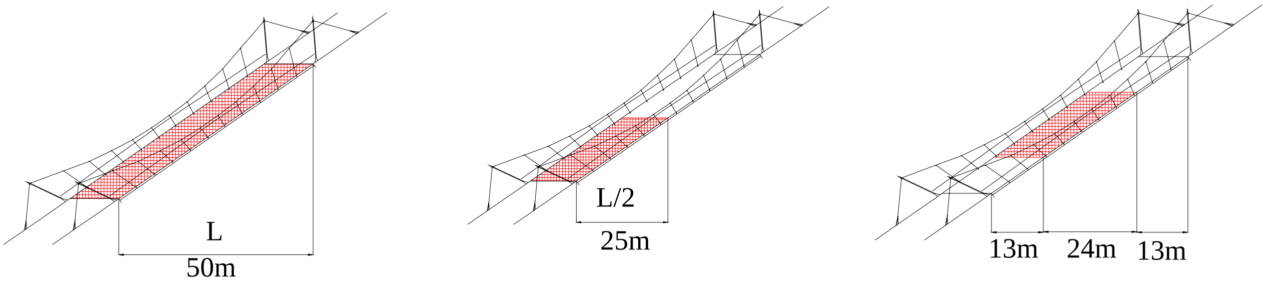
図-7 トグル　(mm)

キーワード：FRP，吊橋，歩道橋
連絡先：〒259-1292　平塚市北金目 1117　東海大学　TEL 0463-58-1211　E-mail snakamu@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

3.　構造解析・照査

構造特性を把握するため，梁要素で構成をした 3 次元骨組みモデルを作成し，弾性有限変位解析により静的構造解析を行った．活荷重は，道路橋示方書に従い等分布荷重 3.5 kN/m^2 を歩行者群集荷重として，有効幅員 1.84 m に載荷した．活荷重載荷パターンは図-8 の 3 パターンを仮定し，死荷重，活荷重載荷時の断面力とたわみを算出した．部材断面は許容応力度法により曲げとせん断を応力照査した．

材料の設計基準強度は，引き抜き成形された GFRP の一般的な値を使用した．安全率は，参考文献 1) に示されている英国の FRP 製歩道橋が設計された際の値，すなわち曲げ応力度に対しては 2.0，せん断応力度に対しては 3.0 を使用した．主桁の応力照査結果を表-1 に示す．ただし，この安全率の妥当性の根拠は不明であった．さらに，ACCS 構造ではパネル間を繋ぐトグルとスリーウェイコネクタが重要であるが，それらの強度についても裏付けとなる資料は見出せなかった．



(a) LC1　　(b) LC2　　(c) LC3

図-8 活荷重載荷パターン

表-1 FRP 橋主桁応力照査結果

	曲げ応力度		せん断応力度
	引張	圧縮	
発生応力 σ (N/mm^2)	26.71	20.16	0.829
設計基準強度 σ_u (N/mm^2)	300	300	50
安全率 ν	2.0	2.0	3.0
許容応力度 σ_a (N/mm^2)	150.0	150.0	16.66
σ / σ_a	0.178	0.134	0.0498

4.　鋼吊橋の試設計

次に FRP 橋梁と同規模の鋼吊橋を設計し，両者の重量，変形量，断面力を比較した．鋼吊橋の主桁は H 形鋼（400×200×8×13）2 本を主桁とし，主桁間には溝形鋼を用いた横桁を設けた．主桁断面図を図-4 に示す．鋼吊橋の有効幅員および桁高は FRP 吊橋と同じ値に設定し，さらに主塔，ケーブル，ハンガーも FRP 吊橋と共通のものを使用した．活荷重強度も道路橋示方書に従い FRP 吊橋と同じ値を使用した．断面力等の算出には 3 次元骨組みモデルを作成し，弾性有限変位解析を用いた．この鋼吊橋も同じく許容応力度法により応力照査を行った．主桁には SS400 を用い，許容応力度は道路橋示方書に従い，曲げは 140 N/mm^2，せん断力は 80 N/mm^2 とした．

5.　たわみおよび断面力の比較

表-2 は GFRP と鋼（SS400）の物性値の比較，表-3 は GFRP 吊橋と鋼吊橋の死荷重強度の比較である．表-3 より，GFRP 吊橋の死荷重強度は鋼吊橋に比べ 78 %であることがわかる．図-9 は GFRP 吊橋と鋼吊橋の主桁に発生するたわみの比較図である．図-9 (e)は LC1 載荷時の死荷重を考慮していない場合の活荷重たわみの比較図であるが，桁中央部の最大たわみは FRP 吊橋では 219.18 mm であるのに対し，鋼吊橋では 206.69 mm とほぼ同じ値であることがわかる．しかし，図-9（c)の D+LC2 載荷時の最大たわみを比較すると，GFRP 吊橋では 631 mm で鋼吊橋では 307 mm と GFRP 吊橋は鋼吊橋に比べ，206 %の最大たわみが発生している．活荷重の載荷パターンによっては，FRP 吊橋と鋼吊橋では変形量に大きな違いが見られた．また，鋼吊橋では全ての活荷重載荷パターンにおいて放物線を描いて変形しているのに対し，FRP 吊橋では不規則な変形をしていることがわかる．この原因については FRP 吊橋と鋼吊橋の主桁の曲げ剛さの違いによるものだと考えられる．FRP 吊橋の曲げ剛さが 7140 kN·m^2 であるのに対し，鋼吊橋では 99540 kN·m^2 と FRP 吊橋の曲げ剛さは鋼吊橋と比べるとわずか 7 %である．つまり，主桁の曲げ剛性が低いため，FRP 吊橋の主桁は不規則に変形したと考えられる．

図-10 は GFRP 吊橋と鋼吊橋の主桁の曲げモーメントの比較である．本図よりすべての活荷重載荷ケースにおいて，FRP 吊橋よりも鋼吊橋の方が大きい正の曲げモーメントが発生していることがわかる．FRP 吊橋では，局所的に負の曲げモーメントが発生しているが，この原因についても FRP 吊橋の主桁の曲げ剛さが鋼吊橋よりも低いためと考えられる．

6.　まとめ

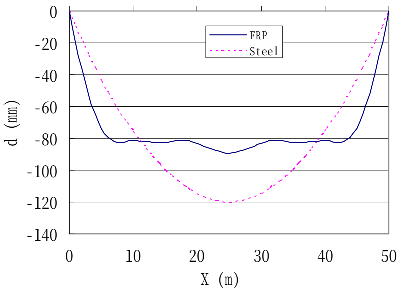
本研究では，スパン 50 m の歩行者専用吊橋を設計したが，主桁を鋼から GFRP にすることによって，死荷重強度を 78 %に抑えられた．活荷重全載荷時のたわみは FRP 吊橋と鋼吊橋でほぼ同一であるが，活荷重載荷パターンによっては大きな違いが見られた．また，FRP 吊橋の応力照査用の安全率に関して，今回の研究では英国で実際に歩行者専用橋が設計されたときに使用された値を用いたが，この値の妥当性は検討すべき課題である．さらに ACCS 構造について，パネルとパネルを繋ぐトグルやコネクタの強度についても不明であった．FRP 橋梁の設計に関しては，道路橋示方書のような設計基準がないため，現在は実際に FRP 床版に載荷実験を行い，その結果から安全率が設定されている．国内ではまだ FRP 橋の施工例が少ないのもこのためである．今後予想される FRP 橋需要拡大に備えるためには更なる研究が必要であると考える．

表-2 GFRP と鋼（SS400）の物性値比較

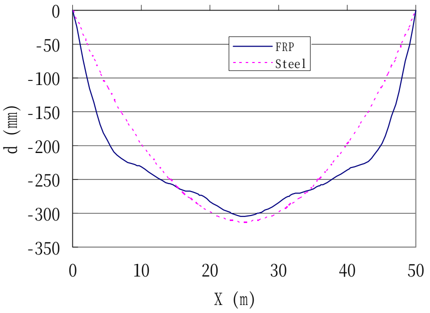
	GFRP	SS400
単位重量（kN/m^3）	17.8	77.0
引張強度（MPa）	300	400
ヤング係数（GPa）	10	210
ポアソン比	0.26	0.3

表-3 GFRP 吊橋と鋼吊橋の死荷重比較（kN/m）

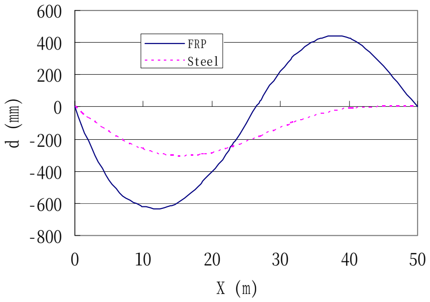
		FRP 吊橋	鋼吊橋
死荷重	主桁	0.798	1.624
	横桁		0.034
	ケーブル	0.189	0.189
	ハンガー	0.024	0.024
	アスファルト舗装	1.660	1.528
	地覆	0.039	0.078
	計	2.710	3.477



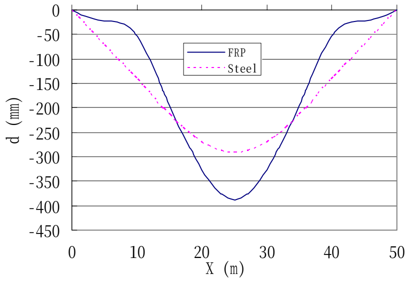
(a) D のみ載荷時



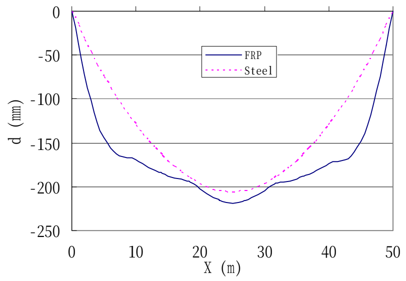
(b) D+LC1 載荷時



(c) D+LC2 載荷時

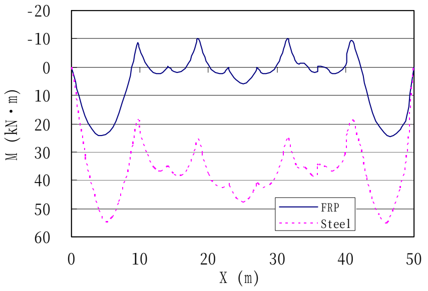


(d) D+LC3 載荷時

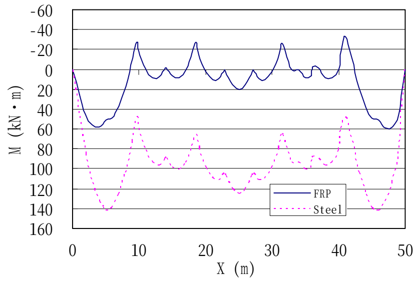


(e) LC1 載荷時

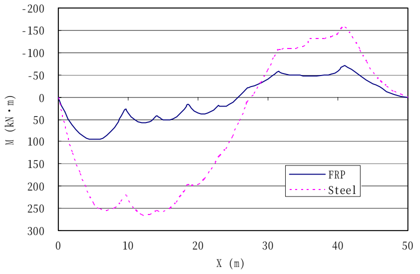
図-9 FRP 吊橋と鋼吊橋の主桁のたわみ



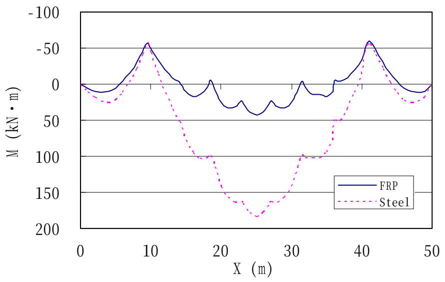
(a) D のみ載荷時



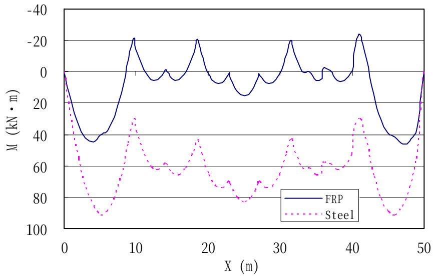
(b) D+LC1 載荷時



(c) D+LC2 載荷時



(d) D+LC3 載荷時



(e) LC1 載荷時

図-10 FRP 吊橋と鋼吊橋の主桁の曲げモーメント

参考文献

1)土木学会：FRP 橋梁，技術とその展望，2004.
2)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編，2002.