

現地レポート：持続可能な社会の形成に資する材料資源研究

橋梁への新素材の適用による耐久性向上に向けた取り組み

細沼宏之・川畑勝嗣

1. はじめに

石川県は、北部が日本海に突き出した能登半島を形成し、その海岸線は長く約580kmにおよぶ。海岸線近くにある橋梁にあっては、季節風による波浪の影響により、厳しい塩害環境下に置かれている。このため、特に能登半島外周道路にある橋梁では、これまで多くの塩害が発生しており、既設橋梁の塩害による損傷に対し、様々な工法での補修が行われている。



図-1 位置図

構造物の塩害はコンクリートに埋設される鋼材の腐食に起因する現象である。これを抑制するには、塗装鉄筋を使用するなど鋼材自身を腐食しにくいものにしたたり、混和材料等によりコンクリートの密実性を向上させ鋼材に到達する塩分を抑制したり、腐食を生じない繊維系材料を使用する対策が考えられる。

石川県では、解決策の一つとして新素材を使用した橋梁の建設を行っており、炭素繊維強化プラスチック（以下CFRPと略）製の緊張材を1988年に世界で初めてPC橋に採用した新宮橋、1995年には横締材にもCFRPを採用した向橋、2008年にはガラス繊維強化プラスチック（以下「GFRP」という。）による全FRP橋である自転車道13号橋を建設した。本稿では、これらの建設に当たっての検討事項、経年変化およびその妥当性について報告する。

2. 新宮橋への緊張材としての適用

2.1 新宮橋の架け替え

主要地方道深谷中浜線の羽咋郡志賀町鹿頭地内に架かる新宮橋（旧橋）は、鉄筋コンクリート床

版橋で、鋼材の腐食が著しく、コンクリートの剥離も進行しており、塩害対策を施した新たな橋梁による架け替えの必要があった。1988年当時、ガラス繊維強化コンクリート、鋼繊維強化コンクリートとしての事例は多かったが、GFRP、アラミド繊維強化プラスチック（以下「AFRP」という。）、CFRPに代表される繊維系複合材料が、緊張材として必要な諸特性をどこまで満足するのか、PC鋼材と比較しての相違点を把握する必要があった。また、本橋が新素材を緊張材として使用する我が国最初の橋梁であることから、旧建設省土木研究所の指導のもとに各種試験・検討がなされた。

2.2 繊維系複合材料の選定

3種類の複合材料のコンクリート構造物用の緊張材として要求される諸特性の比較を表-1に示す。GFRPは、低強度でリラクセーション、クリープもPC鋼材より劣る傾向があり、特にコンクリート中において必要とされる耐アルカリ性の小さいことが最大の欠点である。AFRPは耐アルカリ性も若干低い傾向のうえにリラクセーション、クリープが著しく大きい。CFRPは最もPC鋼材の性能に近く、リラクセーションがPC鋼材より小さく、さらに軽量で耐食性に優れた材料であり、緊張材として適していると判断された。なお、FRP材料の数字は概略である。CFRPにはロッドタイプと撚合タイプの2種類がある。撚合タイプは撚りによる若干の強度損失を生ずるが、表面が平滑でないことによりコンクリートとの付着強度

表-1 繊維系複合材料の比較

項目	望ましい方向	PC鋼材	CFRP	AFRP	GFRP
引張強さ(kgf/mm ²)	大きい	○ (175)	○ (184)	○ (150)	× (125)
破断時伸び(%)	大きい	○ (3.5以上)	▲ (1.3)	▲ (3.5)	▲ (3.0)
弾性係数(kgf/mm ²)	大きい	○ (20,000)	▲ (14,000)	× (7,000)	× (7,000)
リラクセーション、クリープ	小さい	○	○	×	▲
疲労強度	大きい	○	○	○	○
耐アルカリ性	良い	○	○	▲	×
耐食性	良い	×	○	○	○
比重	小さい	×	○	○	○
磁性	(条件による)	磁性	微弱磁性	非磁性	非磁性

(注)○=緊張材として望ましい ▲=緊張材として若干望ましい ×=緊張材として望ましくない

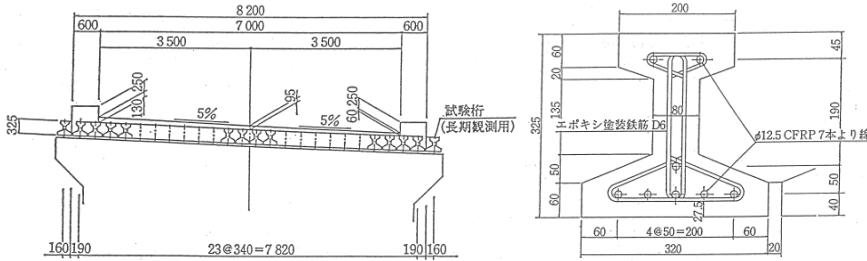


図-2 新宮橋橋梁断面図・桁断面図

が大きくなる。加えて可撓性がPC鋼材よりも大きく、施工性も優れる撓合タイプを選定した。

2.3 炭素繊維複合材による緊張材

スパン6m程度のプレテンションPC桁の緊張材として、従来PC鋼7本より線φ10.8~φ12.4mmが使用されており、これを考慮しCFRPの緊張材として線条体7本を撚り合わせたCFRP7本より線を使用することとした。CFRP緊張材の品質は、各種試験結果等の検討とPC鋼材との力学的性質との比較から、部材の設計・施工に関して基本的に従来のPC鋼材と同様な取り扱いができることが明らかになった。

2.4 載荷試験

新宮橋の諸元を図-2に示す。設計条件は当時の基準による一等橋、支間5.76m、幅員7.0mである。橋梁構造は、スパンが小さいことから、プレテンション方式によるプレキャストPC桁を架設し、現場で桁間にコンクリートを打設する中埋合成床版形式とした。桁断面は、プレキャストPC桁の旧JIS規格であるJISA5313のI型断面が採用された。

CFRP緊張材は、径12.5mmのCFRPより線を使用し、その設計値は、表-2に示すとおりとした。これらの数値は、各種試験の結果および試験条件を考慮し、また、新宮橋が最初のCFRP緊張材の採用例となることから、PC鋼より線（SWPR7A）

表-2 CFRP緊張材の性質

項目	単位	CFRP緊張材	PC鋼線緊張材
許容引張応力	プレストレッシング中	0.6 σ_{pu}	0.8 σ_{pu} または 0.9 σ_{pu}
	kgf	8,400	12,510
	kgf/mm ²	110	135
プレストレッシング直後	kgf	7,700	11,410
	kgf/mm ²	101	127
	使用状態(設計荷重作用下)	0.45 σ_{pu}	0.6 σ_{pu} または 0.75 σ_{pu}
弾性係数	kgf/mm ²	6,300	9,780
ポアソン比	-	83	105
熱膨張係数	/°C	1.4 × 10 ⁻⁶	2.0 × 10 ⁻⁶
見かけのリラクゼーション率	%	2 × 10 ⁻⁶	10 × 10 ⁻⁶
		5	5

と比較し、十分に安全側の設定とした。また、スターラップには、耐食性材料としてエポキシ樹脂塗装鉄筋を採用した。なお、この新橋の横締めには、塩害対策上必要十分なかぶりを確保できることから、通常のPC鋼材を使用すること

とした。現場施工にあたり、新宮橋に使用するCFRPより線を使用した試験桁と、通常のPC鋼材を使用した試験桁を製作し、曲げ試験を実施した。載荷は、サイクル1として、試験桁に設計曲げモーメントが発生する設計荷重である3.6tfまで段階的に加え、その後段階的に除荷した。サイクル2は、最大荷重を設計荷重の2倍とし、同様に荷重を加えた。最後に、サイクル3では、試験桁が破壊するまで載荷した。CFRP桁は、サイクル2で設計荷重の2倍で中央部にひび割れが発生した。ひび割れの発生にもかかわらず、残留たわ

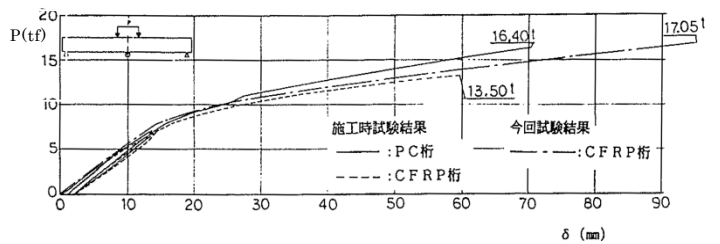


図-3 試験桁載荷試験

みは2mmと小さく、復元性には問題がないことが確認された。サイクル3では、荷重の増加に伴いひび割れが伸長し、13.5tfで上縁のコンクリートが圧壊した。PC鋼材の試験桁についても同様に16.4tfで圧壊した。

図-3は、たわみについてPC桁とCFRP桁を比較したものであり、特にひびわれ荷重以上になるとCFRP桁はPC桁以上に変形することが示されている。

2.5 耐久性試験

上部工の施工時に、CFRP桁の耐久性に関するデータ収集を目的として、橋梁の上下流の両側に1本ずつの試験桁を架設している。活荷重等の繰り返し荷重による挙動を本橋と同一にするため、本体とは別の横締め工により一体化させた。

施工後6年経過した段階で海側の試験桁1本を取り出し、載荷試験を行った。破壊荷重は17.05tfであり、建設時と比べ26%の伸びを示している。また、破壊形態も前回と同様にコンク

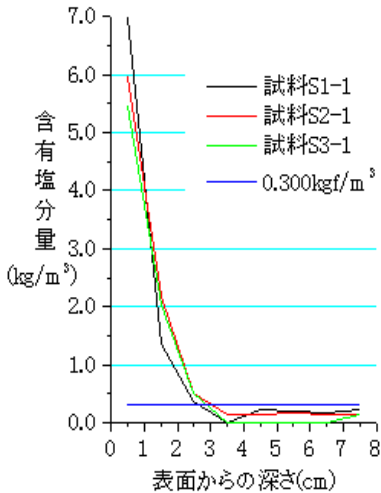


図-4 含有塩分量



写真-1 新宮橋



写真-2 向橋

リートの圧壊によって起こっている。荷重と変位も、図-3に示すとおり前回と

同様の傾向にあり、破壊荷重が大きく伸びたことについては、6年を経過し、桁の強度が伸びたものと考えられる。

以上の結果から、CFRP桁の挙動は、PC桁とほぼ同様であり、実橋に採用される桁として、所定のプレストレスが導入されたこと、かつ破壊耐力についても道路橋示方書以上であること、施工後6年を経過しても十分な破壊耐力を有していることが確認された。

6年後の試験桁の海側表面からの含有塩分量は、図-4に示すとおりで、この桁の鋼材のかぶり厚は2.5cmであることから、その位置での含有塩分量は0.4~0.5kg/m³となっており、これは道路橋示方書に規定された0.3kg/m³を超えている。これは、新宮橋の置かれた環境がかなり厳しいことを示すものであり、CFRP桁を採用したことが妥当であったと考えられる²⁾。

緊張材そのものに関しては、外観、形状、重量、引張強度の変化は認められなかった。写真-1は、2015年3月に撮影した新宮橋であり、架設後27年を経て健全な状態を保っている。

3. 定着具を使用しないPC桁の横締め

3.1 向橋の建設

新宮橋建設以降、1991~1992年に同じくCFRPを使用した羽咋巖門自転車道15・16・17号橋を建設した。しかし、横方向PC鋼材の代わりとなるCFRPの定着具は鋼製かつ大型になるため、横締めに関しては、従来のPC鋼材を使用している。当然、塩害の影響を受けることとなり、最終的には腐食を防ぐことはできない。また、定着具を耐

食材料で製作すると経済面で非常に不利になることが課題であった。一般国道249号鳳珠郡穴水町根木地内に建設される向橋においては、定着具を使わずにセメントグラウトとCFRPとの付着力により横締めの緊張力を保持する工法が試みられた。

3.2 グラウト定着工法

定着の原理は、一般的な定着具の機械的な固定によるものではなく、シーす内グラウトの硬化後、定着具を取り除き、一度定着具により保持したCFRPの緊張力をPCグラウト材とCFCCの付着力により保持するものである。

コンクリートとPC鋼より線の組み合わせの付着力によるプレテンション工法の定着長が、

$$L = 65 \phi \text{ ----- 式(1)}$$

L: 定着長、 ϕ : PC鋼より線径

で計算されるのに対し、CFRPとPCグラウト材によるグラウト定着工法における定着長も式(1)を満足することが実験および実橋での試験で確認された。付着強度に関しては、セメントミルクの方はコンクリートには劣るものの、付着性能はCFRPがPC鋼より線より優っており、セメントミルクとCFRPの組み合わせでもコンクリートとPC鋼より線の場合と同等の付着力を確保できると考えられる。

これと同時に耐久性試験として、CFRPとPC鋼より線をそれぞれノングラウトで緊張力を保持し、2年8ヶ月後に取り出し、力学的試験、化学的分析を行った。力学的特性については両者とも差は認められなかったが、PC鋼より線については、腐食が発生しており、腐食の進行が、力学的特性の低下を招くことは明らかであると考えられる。

4. 全FRP橋梁の架設

4.1 自転車道13号橋の架け替え

羽咋市柴垣地内に架かる羽咋巖門自転車道13

号橋（旧橋）は、日本海沿いを走る自転車道に架かる木橋であった。集成材からなる主構造に腐食や割れ等の劣化が生じたため、架け替えを検討することとなり、塩害対策も考慮し、LCCを重視した比較検討を行った。鋼橋やPC橋では上部工の死荷重が大きく、下部工の再構築が必要となるのに対し、軽量のGFRP橋は下部工の高さ調整に留まるため、上部工の初期投資は大きくなるものの、50年間のLCCは同等で、それ以上の評価期間になればさらに有利になると期待された。また、旧橋の橋梁諸元は、土木研究所他により製作されたFRP模型橋とほぼ同じスペックであり、ここで得られた知見を基にした橋梁の設計・製作が可能であった。

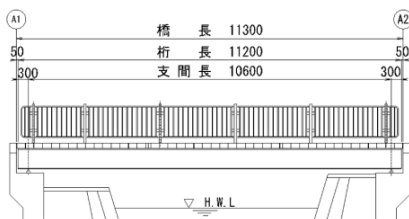


図-5 自転車道13号橋側面図

4.2 構造概要

図-5に、新13号橋の側面図を示す。主桁には大型引抜成形材H600x300(GFRP)を使用し、

1径間を1部材で構成した。材料強度は、引張強度400MPa、引張弾性率24GPaとし、材料試験により妥当性を確認した。床版は引抜成形材□-250x150x6(GFRP)を敷き並べて床版とし、舗装材はゴム系を採用した。連結部、ボルトにはステンレス材を採用した。

4.3 検討課題

GFRPは鋼材(SS400)と同等の引張強度を有するが、弾性係数は1/10程度と遥かに小さく、主要構造は部材耐力ではなく活荷重たわみで決定される。活荷重強度3.5kN/m²に対するたわみの許容値として支間長の1/400を適用すると、主桁剛性を向上させるためのCFRPによる主桁補強が必要となり、コスト高となる。本橋では、自転車専用道路であることから、実情にあった活荷重強度を採用し、



写真-3 自転車道13号橋

電動アシスト自転車および搭乗者の重量と占有面積から算定される1.0kN/m²とし、照査・確認を行った³⁾。

4.4 施工

主桁の架設は、主桁重量が1部材当たり400kgfであり、10tfトラッククレーンにより単材架設を行った。床版材は1部材当たり36kgfと軽量であり、人力により設置した。

材料が軽量かつ搬入・架設が容易であることから、狭隘な現場にある橋梁や検査路等での腐食対策としてのGFRPの適用の有効性を示している。

5. まとめ

本稿では、石川県内で塩害対策として新素材を採用して建設された橋梁に関する報告を行った。これらの橋梁は、経年後も桁の劣化が見られず、新素材の適用が、耐久性を向上させる解決策の一つとして有効であると考えている。今後、さらに点検を重ねながら、耐久性について検証を行っていく。また、過去の試験データを引用した結果、単位表示が混在していることについては御容赦いただきたい。

謝辞

本検証にあたり、土木研究所の西崎到上席研究員、(一財)土木研究センターの安波博道部長、中島和俊主任研究員、(株)ピーエス三菱の小林和弘氏、松本一昭氏にご指導を賜った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 石川県土木部：新素材によるPC橋・[塩害対策]「新宮橋」検討報告書、1988.6
- 2) 神田博行、木内武夫、松本一昭：新素材PC橋の実橋試験桁の載荷試験報告、プレストレスコンクリート技術協会、第5回シンポジウム論文集、pp.529～532、1995
- 3) 石川県土木部：一般県道羽咋巖門自転車道線道路環境改善整備工事（設計）報告

細沼宏之



石川県奥能登土木総合事務所次長、博（工）
Dr.Hiroyuki HOSONUMA

川畑勝嗣



石川県土木部道路整備課専門員
Katsushi KAWABATA