

橋梁管理路に対するFRP適用に関する検討

大谷 康史¹・荻原 勝也²・貴志 友基²

¹本四高速㈱ 東京事務所 技術調整課付 (〒107-0052 東京都港区赤坂1-6-19)

²本四高速㈱ 長大橋技術センター 技術調整グループ (〒651-0088 神戸市中央区小野柄通4-1-22)

本四連絡橋は一般の橋梁と比較して厳しい海洋環境下にあり、設置されている鋼製亜鉛めっき管理路も比較的早期に腐食するため、補修が必要となる。本検討では、土木分野において比較的新材料であるFRPを橋梁管理路に適用することにより、橋梁管理路の維持管理コストの縮減を目指すものである。

本稿では、検討の背景、これまで実施した現地暴露試験、載荷試験、試験施工、耐火性試験で得られた知見を報告する。

キーワード FRP、橋梁管理路、維持管理コスト、現地暴露試験、載荷試験

1. はじめに

本四連絡橋は本州と四国を結ぶ本州四国連絡高速道路の海峡部長大橋の総称で、一般の橋梁と比較して厳しい海洋環境下にある。そのため、維持管理に必要な費用も一般の橋梁に比べて多大とならざるを得ず、当社にとって維持管理費を削減することは重要な課題である。現在、橋梁付属物のライフサイクルコスト(LCC)縮減を目的として、橋梁管理路(以下、管理路という)に対する繊維強化プラスチック (FRP)材料の適用性に関する検討を実施している。本稿では、検討の背景およびこれまで実施した現地暴露試験、載荷試験、試験施工、耐火性試験で得られた知見を報告する。

2. 検討の背景

(1) 本四連絡橋の維持管理計画

本四連絡橋では、主塔や補剛桁などの鋼製部材は塗装を施しており、適切な期間で塗り替えを行うことによって、構造物全体として健全なレベルを保持している。一方、橋梁付属物である管理路・鋼製防護柵等は建設時に

亜鉛めっきや塗装により防食を行っている。

表-1に主要な橋梁付属物の概算数量、防食方法等を示す。

これらの防食対策を行っている橋梁付属物について、維持管理計画において亜鉛めっき部材等は設置から30年程度で補修塗装などの補修が必要になると想定している。また、設置場所の腐食環境が厳しく、劣化が著しいものについては部材を交換する必要があると考えている。

(2) 橋梁付属物の現況

本四連絡橋は、建設当初から100年以上の長期にわたる供用年数を想定しており、付属物についても同じ期間の機能を提供することが求められている。本四連絡橋で初期に建設された橋梁の付属物において、既に供用期間、架橋位置、付属物の設置位置などに応じた劣化が見られ、他の部位より部分的に劣化している箇所も見られる(写真-1参照)。

このような状況の下で、既存部材の長寿命化および新しい材料の適用による維持管理費縮減の検討が求められており、その一環として腐食が激しい部位に対する耐久性に優れたFRPの適用を検討することとした。

(3) FRPの適用性と課題

現在の橋梁を構成する主要な材料は、鋼材及びコンク

表-1 主要橋梁付属物の維持管理計画

部材	数量(本四連絡橋計)	防食方法	設置から補修までの期間	補修方法	部材交換の考え方
管理路	約16,000t	亜鉛メッキ	30年	補修塗装	劣化の著しい部位は交換
鋼製防護柵	約90,000m	亜鉛メッキ	30年	補修塗装	補修のみ、交換無し
オープングレーチング	約7,800枚	亜鉛メッキ	40年	再メッキ	再メッキのみ、交換無し
船舶緩衝工	16カ所	塗装	30年	無し	全数取り替え

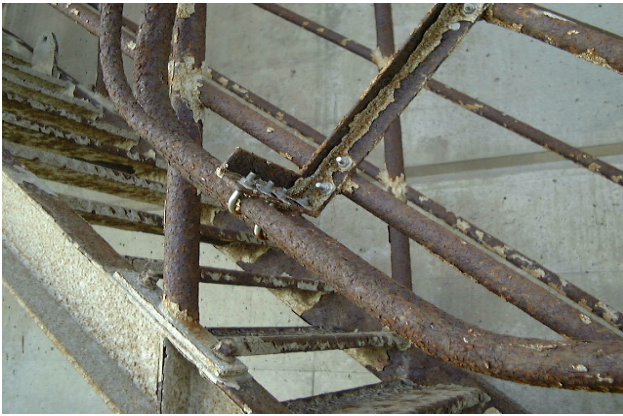


写真-1 付属物の劣化状況 (飛沫帯の管理路)

リートである。それぞれ優れた特性を持つが、鋼材は腐食するために防食対策が必要なこと、コンクリートは重くまた細かな構造には向いていないことという欠点を有している。それらに対し、錆びることなく、軽くて強度も有し、細かな構造にも対応できる材料としてFRPが考えられる。

しかしFRPにはまだいくつかの解決すべき課題があることから、橋梁分野への適用の歴史も浅く、広く利用されるまでには至っていない。以下にFRPを本格的に適用するために解決することが必要となる主な課題を示す。

- a) FRP製品の製造コストは従来の鋼製亜鉛めっきの製品よりも高くなることが多く、ライフサイクルコストで、鋼製亜鉛めっきよりも優位であることを確認する必要がある。
- b) FRPの引張強さは鋼材と同等の強度を有するが、引張弾性係数は鋼材よりも小さい。また、耐衝撃性や耐火性も明確ではないため、特性を十分に把握した上で適用する必要がある。
- c) FRPを母材とする接合の設計法は、応力伝達性状や破壊現象の多様性とも関係して、確立されているとはいえないため、接合部の合理的な構造を確定させる必要がある。¹⁾
- d) 本四連絡橋の架橋地点のような水、光、塩分等の作用が複合的に作用した場合、長期にわたる劣化状況の情報が少ないため、FRP材料の耐久性を把握する必要がある。

そこで、表-1に示す橋梁付属物の中から、将来必ず交換が想定され、なおかつ比較的作用応力の小さい管理路にFRPを適用することを検討対象とした。

3. 検討計画

(1) FRP材料の選定

使用するFRP材料について検討し、安価で強度が比較

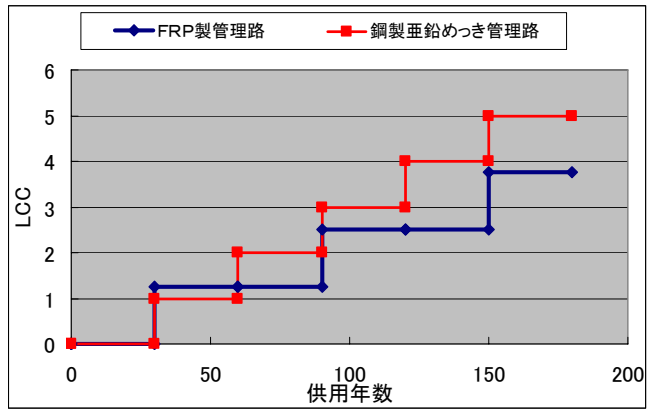


図-1 管理路のLCC比較

的高いガラス繊維強化プラスチック (GFRP)を選定した。GFRPには数種類の製作方法があるが、そのうち市中在庫が豊富で安価な引抜成形品を選定し、これを組み立てて、管理路を製作することとした。

(2) LCCの試算

製作メーカー等へのヒアリング結果によると、FRP製管理路の場合、鋼製亜鉛めっき管理路に比べて、製作費で50%、架設費まで含めて25%程度高くなると見込まれる。腐食環境の厳しいところに設置された鋼製亜鉛めっき管理路の寿命を30年と仮定し、FRP製管理路がその2倍の60年の耐用年数があると仮定してグラフ化したものを図-1に示す。

図-1は、建設当初に鋼製亜鉛めっき管理路を採用し、30年サイクルで交換する場合と、一回目の交換でFRPにしてその後60年サイクルで交換する場合を比較している。鋼製亜鉛めっき管理路が2回目の交換を行う供用開始後60年でFRP製管理路の方がLCCで優位になることがわかる。

ただし、LCCの算定にあたってはFRP製管理路の標準的な構造を確立した上で、確認する必要がある。

4. 現地暴露試験

(1) 試験の目的

FRP製管理路が想定した耐用年数を有するか確認するために必要な検討課題は以下のとおりである。

- a) 複合環境下におけるFRP材料の耐久性の調査
- b) 接合方法 (ボルト、接着剤等) と、その耐久性の調査

材料自体の耐久性も架橋地点のような複合環境下では完全に実証されていないと考えるが、管理路は一体もので製作しにくいいため、管理路の製作および橋梁本体に取り付けるために不可欠な接合部の耐久性が検証すべき重要な課題となる。接合には、ステンレスボルト、FRPボルトなどが使われており、FRP どちらの場合も接着剤の使用も可能である。しかし、それら接合部の耐久性は

FRP の母材よりも低いと予測されるため、接合部の強度を確認し、管理路への適用性を評価する必要がある。

FRP 材料の耐久性に関しては、サンシャインカーボンアーク形ウェザーメーターによる促進試験等で、表面の光沢度は低下するが、強度低下はほとんどないという結果が得られている。また、耐海水性については、塩水噴霧試験等により耐食性の確認が行われている。しかし、このような、作用を複合的に受けた場合の材料への影響は定量的に確認されていないのが現状である。また、それぞれの促進試験の結果と、実環境での相関も不確かなものとなっており、接合部の試験例も多くはない。以上より、FRP の実環境での耐久性を確認するためには、現地における暴露試験が適切と判断した。

(2) 現地暴露試験

FRPの現地暴露試験は写真-2に示すとおり、本四連絡橋の中で最も腐食環境の厳しい大鳴門橋で実施している。実際の使用状態で確認するために、管理路型試験体を大鳴門橋淡路島側側径間の管理路上に設置した(写真-3)。この試験体は、市中在庫が豊富で安価なGFRP製の引抜成形品を組み立てて製作した。

また、FRP材の力学特性の変化を確認するために、材料供試体と接合部供試体を四国側アンカレッジ付近に設

置した。同時に、促進試験や他の暴露試験との整合性を取るために、暴露試験位置での環境調査(飛来塩分量、紫外線量等)も行っている。

現地暴露試験は平成17年度末より開始し、現在も継続中である。²⁾

(3) 引張試験

FRPの劣化度合いを評価するために、適宜引張試験を行い、強度低下を調査する計画である。平成17年度末より1年ごとに暴露の影響を把握する目的で引張試験を実施した。材料試験体についてはJIS K 7054 に基づき、引張強度試験を行っている。

表-2にFRP接合部試験体の引張試験結果を示す。破壊時の強度は、接着剤に比べてボルトを使用した接合方法の方が高い結果となった。製作時と暴露後と比較すると一部で暴露1年後に強度が増加する結果が見られた。これは、FRPが初期の段階で硬化する場合があります、これによって強度が増加したものと考えられる。なお、試験体によるばらつきがあるなど、一定の傾向が見られないため、今後評価方法を再検討する必要があると考える。

また破壊形態について、ボルト接合ではいずれも母材端部に破壊が生じており、接着剤は母材破壊前に接着面がはく離する結果となった。これは、製作時の破壊試験、



写真-2 暴露試験位置

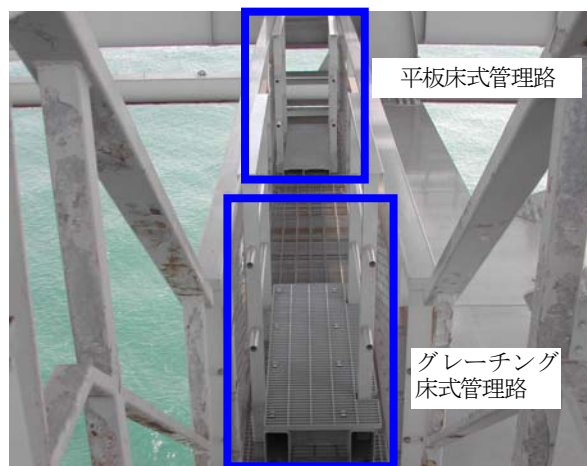


写真-3 管理路型試験体

表-2 FRP 接合部試験体の強度

接合方法	製作時		暴露1年後		暴露2年後	
	強度比	破壊形態	強度比	破壊形態	強度比	破壊形態
接着剤のみ	61%	接着面はく離	71%	接着面はく離	51%	接着面はく離
接着剤+ブラインドリベットφ4.8	66%	接着面はく離	52%	接着面はく離	50%	接着面はく離
FRP ボルト (M12)	97%	母材端部の破壊	89%	母材端部の破壊	88%	母材端部の破壊
ステンレスボルト (M12)	100%	母材端部の破壊	114%	母材端部の破壊	100%	母材端部の破壊

注：強度比は製作時のステンレスボルト接合の破壊強度を1とした場合の値。破壊強度として各接合方法3体の中央値を用いた。接着剤の塗布長さは、引張方向に40mm。

暴露後の試験いずれも同じ現象である。

5. 載荷試験

(1) 試験の目的

a) FRP製管理路のたわみ特性の把握

GFRP の引張強度は鋼材と同程度であるが、弾性係数は鋼材に比べてかなり小さい。そのため当社の管理路の設計基準³⁾により設計した場合、断面決定要因は部材の応力ではなく管理路のたわみ量となり、この条件で設計を行うと強度には余裕のある部材断面となる。

そこで、FRP 製管理路のたわみ特性を把握するとともに、たわみ量の制限により設計した管理路の実耐荷力を把握するために試験を行った。

試験体は後述する瀬戸大橋の海中基礎に施工試験に使用した管理路の構造を基本とし、載荷試験装置に合うように調整して製作した。また試験では、設計荷重を作用させた場合のたわみ量、終局状態の耐荷力とたわみ量を計測するものとした。

b) FRP製管理路の破壊形態の確認

GFRP製の引抜成形品を組み立てた製品の破壊試験事例が少ないため、終局状態まで載荷し桁等の挙動及び接合部の状況について把握するものとした。

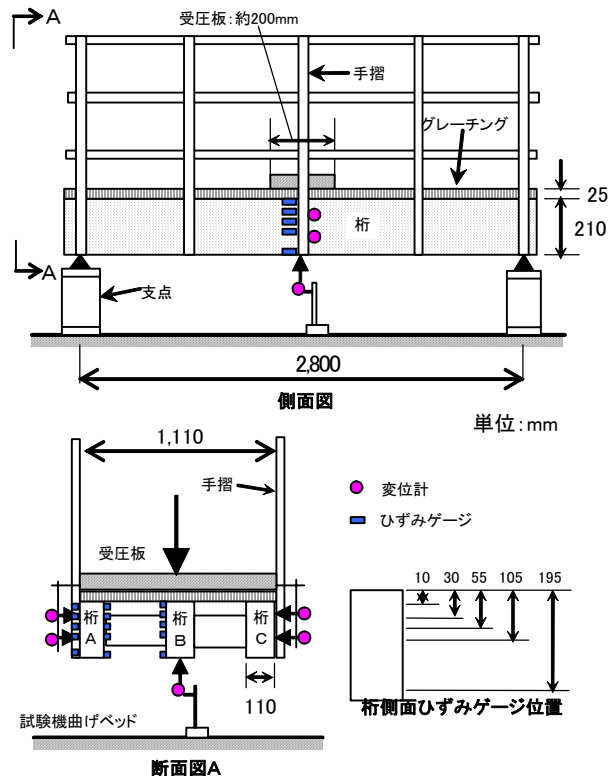


図-2 試験体概略図
(概略図のため、一部を誇張している)

(2) 試験体の設計と製作

試験体の概略図を図-2 に示す。設計は管理路の設計基準³⁾に従い、たわみ基準(L/500)を満足するように行った。荷重の分配は、桁中央の横梁とグレーチングによる。

図-2の部材は必要断面を上回る最も近い既製品を用いたため、設計荷重(3.5kN/m²)を作用させた場合のたわみ量の計算値は、桁の剛性のみを考慮し1本の梁と仮定して3.8mm (L/743)を得た。使用材料は既製のGFRP引抜成形品とし、桁と手摺支柱、桁と横桁の接合部にはSUSボルトを用いた。

(3) 等分布載荷試験

設計荷重載荷時の挙動を把握するために等分布荷重載荷試験を行った。等分布荷重は土嚢(245N/袋)を43袋(10.5kN)載荷することで3.5kN/m²を作用させた。その場合、中央の桁B(図-2)のたわみ量は2.7mmであった。このとき、中央の桁Bのひずみゲージの計測値は、端の桁Aの2倍の量の軸方向ひずみを示していた。これより、中央の桁Bには全体の1/2の荷重が作用していることが確認できる。たわみ量が計算値より小さくなった結果を踏まえ、材料や管理路全体の剛性、桁の荷重分担を再確認して設計に反映させる必要がある。

(4) 集中荷重載荷試験

破壊形態を確認する集中載荷試験では、図-3に示す桁中央に設置した剛性の高い支圧板を介して変位を作用させた(写真-4)。この試験における荷重とたわみの関係を図-3に示す。この試験では、ひずみゲージの計測結果より、荷重ピーク α までは中央の桁Bのひずみは端部の桁Aのひずみの85~100%であり支圧板により概ね均等に変位が生じたと考えられる。試験体の挙動を以下に示す。
a) 荷重ピーク α までは、荷重とたわみは概ね比例して増加し、 α で大きな破断音が生じ、桁下で計測していた変位と荷重が減少した。このとき桁部材Bのひずみが大きく変化しており、局所的な変形が生じたと推測される。

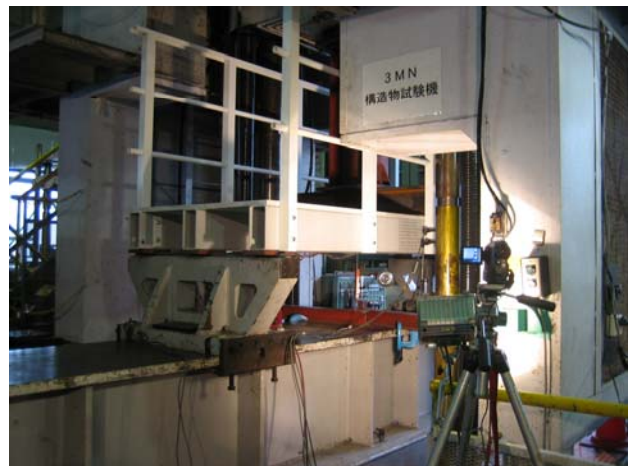


写真-4 集中荷重載荷試験

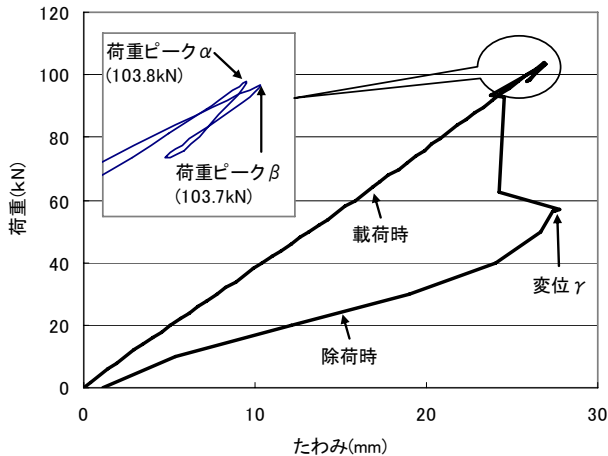


図-3 集中荷重載荷試験時のたわみ

この間、50kN程度載荷以降、試験体より破断音が随時発生していた。

- b) 荷重ピークαの後載荷を継続した結果、荷重ピークβで端の桁A、中央の桁Bに外観でわかる大きな変形が生じ、この時を終局状態と判断した。このとき、桁以外の手摺、グレーチング等の部材や接合部のボルトに外観で分かる異状は生じていなかった。なお、荷重ピークαの後は、桁断面形状が変化した状態で試験を継続している。
- c) 除荷時の約57kN時に変形部分の形状が大きく復元したため、このとき計測たわみとして最大値(変位γ)が計測された。除荷完了後には、座屈変形の有無が目視では確認できない程度まで復元し、変形部跡には桁Aでは鉛直方向に、桁Bでは水平方向に、ひび割れが確認された。

(5) 載荷試験のまとめ

- a) 静的載荷試験の設計荷重時のたわみは、計算値の約2/3であり、この原因としてFRP部材の設計値と実際の強度差、グレーチング床版の影響等が考えられる。
- b) 本検討により、横梁とグレーチングによる3本の桁への荷重分配状況が把握できたため本結果を設計・照査方法等に今後反映させる。
- c) 集中荷重載荷試験より、荷重ピークα(103.8kN)までは弾性挙動を示すことから、管理路としての強度は問題ないと考えられる。また、終局状態の変形まで、接合部、その他の部材に異状は認められなかった。

6. 試験施工

FRP製管理路の適用性評価にあたり、実際の管理路を試行的にFRPで設置することも必要と考えた。

そこで、平成19年度に管理路の交換が計画されていた瀬戸大橋の海中基礎において試験施工として、交換する管理路の一部をFRP製管理路とした(写真-5)。この



写真-5 FRP製管理路の設置状況



写真-6 FRP製管理路の設置作業

施工を通して、現地施工性、使用性などを調査した。(写真-6)

現地施工を行った担当者へのヒアリング結果により、従来の鋼製管理路に比べ部材が軽いことで、施工性が良いことが確認された。また、実際に管理路としての使用感については、床材のFRPグレーチングの強度は十分だが、手摺りは力をかけた時に鋼製よりもたわみが大きく改善が望まれるとのことであった。

これらの意見を参考に今後構造の検討を行っていく。

7. 耐火性試験

FRPを管理路に適用するにあたっては、強度、長期耐久性の他にも、工具等を落とした場合でも安全か(耐衝撃性)、補修作業時に生じる火花等に対して安全か(耐火性)などを確認する必要がある。ここでは、それらの検証事項のうち、FRPの耐火性について報告する。

燃焼試験は、建築用薄物材料の難燃性試験方法(JISA1322)に従い実施した。具体的には、写真-7に示す



写真-7 燃焼試験の様子

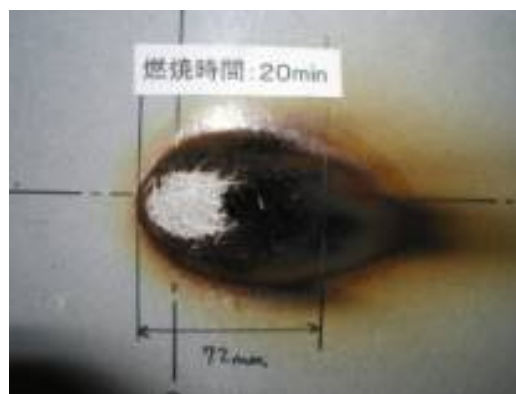


写真-8 燃焼試験後のFRP材料

表-3 燃焼試験による材料の減厚と強度変化

項目	燃焼による試料の板厚の変化			燃焼による引張強さの変化		
	燃焼前の板厚 (mm)	燃焼後の板厚 (mm)	板厚比 (後/前)	燃焼前 [Mpa]	30分燃焼後 [MPa]	応力比 (後/前)
試料1	5.68	5.30	0.93	361.9	331.0	—
試料2	5.59	4.92	0.88	388.8	320.0	—
試料3	5.55	4.74	0.85	391.6	234.2	—
試料4	5.54	4.71	0.85	375.2	310.4	—
試料5	5.64	5.01	0.89	375.1	321.9	—
平均	5.61	4.99	0.89	380.8	295.1	0.77

ように、試験器の中でガスバーナーによる局地的な炎を用い、燃焼時間は5, 10, 15, 20, 30の5ケース実施した。写真-8に20分間燃焼した後のFRP材を示す。

この結果より、炎の影響の大きい熱源に近い部分の燃焼はあるものの、影響の少ない離れた部分は燃焼をしないことが分かる。試験後、材料の減少および強度変化を調査した。結果は、表-3 に示すように、板厚は約 9 割、強度は約 8 割に減少しており、熱影響を受けた部材としては7割程度に減少している。

よって、長時間の炎の影響を受けた部分を継続使用することはできないが、FRPが軽微な火で燃えることはなく、管理路として必要とする耐火性は有すると考える。

8. まとめ

本稿では、本四連絡橋の管理路に対するFRPの適用性の検討について報告した。本検討の結果をまとめると、以下のとおりである。

a) LCCの算定にあたっては、FRP製管理路の標準的な構造を確立した上で、製作費・架設費を詰める必要がある。

b) 現地暴露試験も開始から2年半程度であり、一定の傾向が見られない。そのため、他の暴露試験等の結果も参考に評価方法を再検討する必要がある。

c) 載荷試験結果から、FRP製管理路のたわみ特性や破壊形態を確認することができた。その結果をFRP製管理路の標準的な構造に対する設計・照査方法等に反映させる予定である。

d) 施工試験から現地施工性は良好であることが確認できたが、使用性では手摺りのたわみを改善する必要があることがわかった。

FRPに適用にあたっては、上記結果を踏まえた上で未解決の課題の解決に向けた検討を継続する必要があると考える。

参考文献

- 1) 大谷：橋梁管理路の維持管理ライフサイクルコスト縮減策の検討、国土交通省近畿地方整備局発表会、2007
- 2) 秦・大谷・薄井：橋梁管理路に対するFRP材料の適用性検討、本四技報 第109号、2007.9
- 3) 本四公団：上部構造設計基準・同解説、1989.4