

# FRPスマートカバーの性能評価に関する研究

## Evaluation of FRP Plate elements for closing bridge cross-section



山下 修平\*<sup>1</sup>  
Shuhei YAMASHITA



有住 康則\*<sup>2</sup>  
Yasuhiro ARIZUMI



下里 哲弘\*<sup>3</sup>  
Tetsuhiro SHIMOZATO



矢吹 哲哉\*<sup>4</sup>  
Tetsuya YABUKI

### 要 旨

鋼橋では主たる損傷形態として「鋼材の腐食」が挙げられ、特に鋼桁間において腐食が進行しやすいことが知られている。これに対し、FRP製の防護板（以下、FRPスマートカバー）は、鋼桁間に設置することにより腐食促進因子の鋼桁間への侵入を防止する防食技術であり、同時に広範囲な点検用通路として活用することも可能であるため鋼橋における維持管理性能の向上に寄与する技術としても期待できる。

本研究では、FRPスマートカバーが採用された実橋における鋼桁間の環境調査を実施し、FRPスマートカバーの腐食促進因子の遮断性及び環境改善効果を検証した。また、琉球大学で荷重載荷試験を実施し、FRPスマートカバーの点検用通路としての耐荷力性能、耐久性能を検証した。

キーワード：FRPスマートカバー，飛来塩分，遮断性能，環境改善効果，維持管理性能

### 1. まえがき

公共事業において、ライフサイクルコストの縮減が社会的要請の一つと言われるようになって久しい。

鋼橋における耐久性損失の主な要因の一つは「鋼材の腐食」である。そのため、鋼材を腐食から守る防食技術の発展が、ライフサイクルコストの縮減に大きく寄与するものと考えられる。また、鋼橋における腐食部位に着目した場合、鋼桁間の腐食が進行しやすいことが知られている<sup>4)</sup>。これは、腐食促進因子が鋼桁表面に付着した場合、鋼桁間においては雨水による洗浄効果が乏しいことが原因の一つであると考えられている。この課題に対して筆者らは、鋼桁間にFRP製の防護板（以下、FRPスマートカバー）を敷設することで腐食促進因子の鋼桁間への侵入を遮断する技術を提案している（図-1）。

一方で、アセットマネジメントの観点からは、「予防保全」を行うことが補修費用の軽減にも繋がるものと考えられる。そのため、公共構造物においては維持管理を適切に行う事が重要であり、維持管理を容易にかつ確実にを行うことが求められている。鋼橋における維持管理については、通常上部工検査路が設置され鋼桁の損傷状態を管

理することになる。しかしながら、一般的に用いられる上部工検査路は歩行可能な範囲が狭く、遠隔からの目視点検に限定される場合が多い。提案しているFRPスマートカバーは、FRPパネルの敷設範囲において自由に歩行が可能となるという利点も有している。そのため、通常の上部工検査路と比較して広範囲にわたって近接的な点検を実施することが可能となり、維持管理性能の向上にも寄与することが期待できる。

本稿では、FRPスマートカバーにおける性能を検証すべく実施した、次の調査及び実験に関して報告を行う。

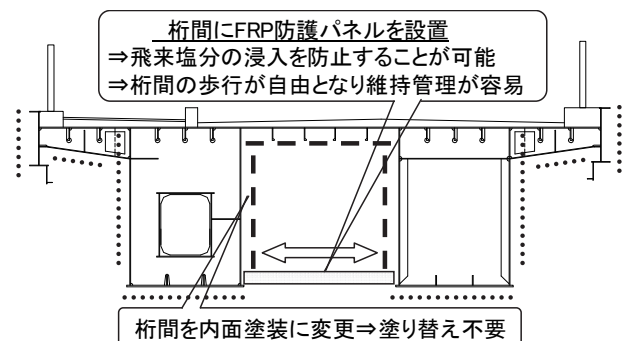


図-1 FRPスマートカバーのコンセプト

\*<sup>1</sup> 橋梁事業本部 千葉工場計画部計画グループ 主任

\*<sup>2</sup> 琉球大学 工学部環境建設工学科 教授

\*<sup>3</sup> 琉球大学 工学部環境建設工学科 准教授

\*<sup>4</sup> 琉球大学 名誉教授

- ① 鋼桁間の腐食環境改善性検証のための環境調査
- ② 上部工検査路としての性能評価実験

## 2. FRPスマートカバーの特徴

### (1) FRPの材料特性

FRPの強化繊維には、ガラス繊維、アラミド繊維、炭素繊維などがあるが、FRPスマートカバーの材料には、物性値や材料コストの観点からガラス繊維を用いたGFRP（Glass Fiber Reinforced Plastic）材を採用している。

GFRPの材料特性を表-1に示す。GFRPは構造用鋼と比較して比重が1/3程度と軽く、腐食耐久性に優れているという特徴を有している。また、アルミニウムと比較しても軽量で高強度の材料であるという事が言える。

表-1 材料特性の比較表

項目	単位	構造用鋼	アルミニウム	GFRP
比重	—	7.8	2.7	1.6~2.0
引張強さ	MPa	400~510	150~470	250~550
引張弾性率	GPa	200~230	75	15~30
線膨張率	10 <sup>-5</sup> /°C	1.2	2.3	1.1
熱伝導率	W/(m・K)	76	188	0.3

### (2) FRPスマートカバーの構造

FRPスマートカバーを構成するパネルは、引き抜き成形法により成形された材料を使用しており、FRP合成床版のパネルとしても広く活用されているものである。本パネルでは曲げ剛性を確保するため、橋軸直角方向に30cm間隔でリブが設けられており、FRPパネル同士は接着剤を塗布した接合面をステンレス製のリベットで密着させ接合している。

鋼桁との接合方法は、図-3に示す①スタッドタイプ接合 ②クリップタイプ接合の2種類を提案している。スタッドタイプ接合は、鋼桁下フランジにスタッドを溶接しFRPパネルをナットで固定する構造となっている。一方でクリップタイプ接合は、鋼桁下フランジをFRPパネル同士で挟み込む構造となっている。そのため、FRP

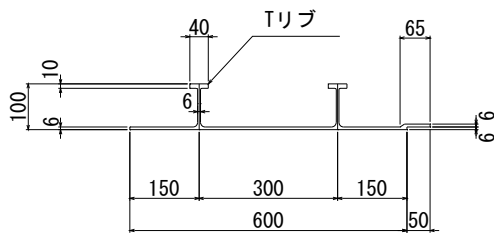


図-2 FRPパネル断面

スマートカバーの設置に際して、一般的に鋼桁への加工が不要となり既設桁への適用も容易となる。

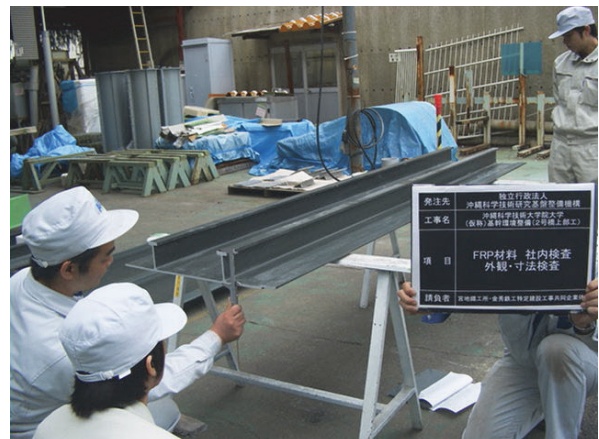


写真-1 FRPパネル

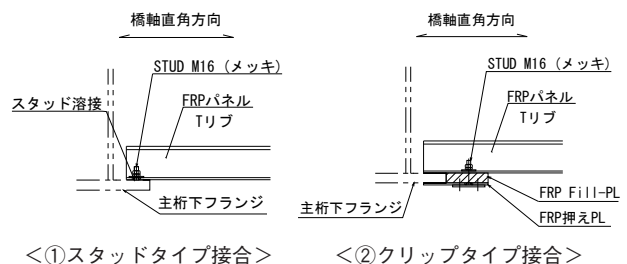


図-3 接合形式

## 3. 鋼桁間の環境調査

### (1) モニタリングテストの概要

#### 1) 調査橋梁概要

FRPスマートカバーを採用した橋梁は、沖縄県中部に位置する国頭郡恩納村に新設された「沖縄科学技術大学院大学」キャンパス内に位置している。架橋地点は海岸線より約700mの丘陵地帯に位置しており、桁下から飛来塩分の進入を受けやすい環境と言える。構造形式は橋長67.4mの単純2主鋼床版箱桁橋であり、塗装仕様は外面：C-5系・内面：D-5系である。本橋は平成22年10月に架設されており、FRPスマートカバーも橋梁新設時に敷設された。

#### 2) 調査項目

モニタリングテストでは、以下の調査を実施した。

- ① 温湿度データロガーを用いた温湿度調査
- ② ドライゲージ法による飛来塩分量の計測
- ③ ワッペン式曝露試験による腐食環境調査

温湿度調査においては、温湿度データロガーを用いて毎月の温湿度を調査した。使用した温湿度データロガーの測定範囲は、温度が-30℃～80℃、湿度が0%～100%である。また、測定精度は、温度が±1℃で湿度が±3.5%である。

飛来塩分量の計測はJIS Z 2382に準じてドライゲージ法により行い、毎月の飛来塩分量を計測した。

ワッペン式暴露試験においては、50mm×2mm×50mmの耐候性鋼材（JIS G 3114）の小型試験片を設置し、毎月の錆厚を計測しながら腐食状態を観察した。小型試験片は両面テープでアクリル板に固定し、片面のみ腐食するようにした。

これらの機器は、FRPスマートカバーで塞がれた橋長67.4mの鋼桁間において、桁端部より0m、10m、30mの位置に設置した。また、箱桁内・外にも機器を設置し、FRPスマートカバーにおける環境改善効果を検証した。これらの機器の設置箇所および設置状況を図-4に示す。

モニタリングテストは、2011年4月～2012年9月の約1年間実施した。なお、測定期間中においては、大型の台風が数回架橋地点の近傍を通過している。

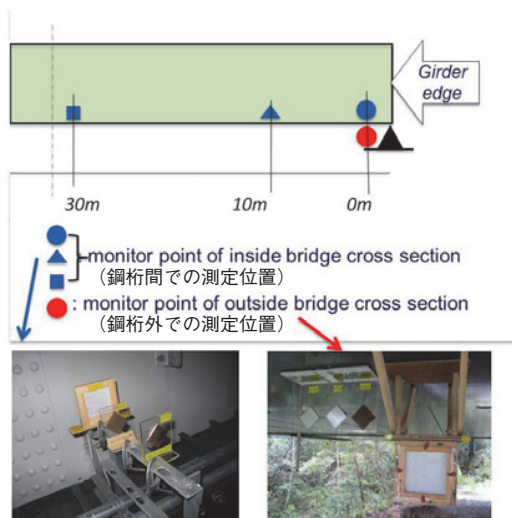


図-4 環境状況測定箇所および測定状況

## (2) モニタリングテストの結果

### 1) 温湿度調査結果

図-5、6に温湿度の計測結果を示す。また、図-7には測定された温湿度から算出した、毎月の濡れ時間割合を示す。

スマートカバー内での平均温度は23.5℃、桁外での平均温度は20.9℃であった。一方平均湿度は、スマートカ

バー内で75.9%、桁外で84.8%であった。これらの温湿度から算出した毎月の濡れ時間割合においては、桁外で毎月の平均が65.9%、箱桁内では53.9%、そしてスマートカバー内では32.3%という結果であった。

箱桁内とスマートカバーで塞がれた鋼桁間における環境を比較しても、鋼桁間において気温は高く、湿度が低くなっていることから、濡れ時間割合においても箱桁内に比べ低くなる結果となった。これは、鋼と比較してFRPの熱伝導率が低く、FRPスマートカバー内の環境が安定していることが要因の一つであると考えられる。

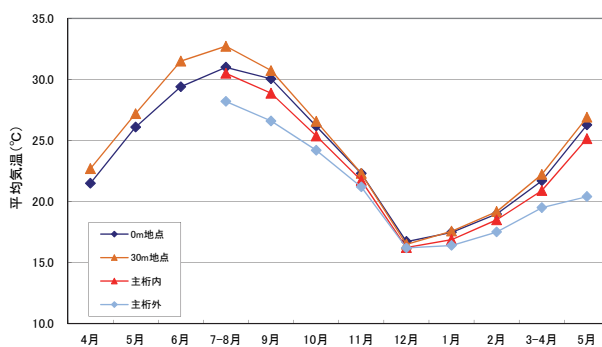


図-5 温度測定結果

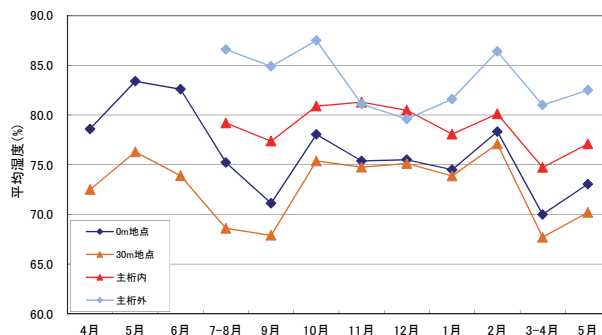
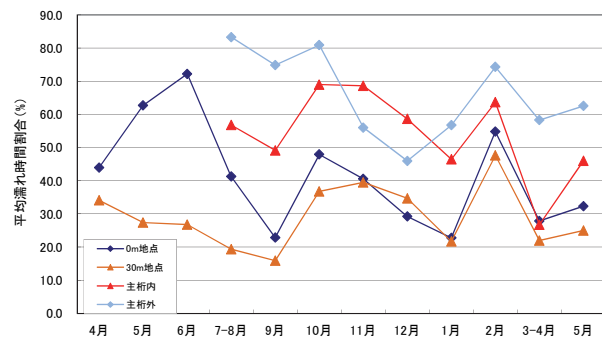


図-6 湿度測定結果



$$(\text{濡れ時間割合}) = \left\{ \sum (T_{150}) \right\} / (\text{計測時間}) \times 100$$

※ $T_{150}$ : 湿度80%以上、気温0℃以上の時間

図-7 濡れ時間割合結果



## 2) 飛来塩分量の計測結果

図-8に、毎月の飛来塩分量の測定結果を示す。鋼桁間においても、0.004mdd程度に飛来塩分量が抑えられている。箱桁内でも同程度に飛来塩分量が測定されていることから、FRPスマートカバーにより飛来塩分の流入は十分に遮断されていると言える。また、測定期間中においては、最大瞬間風速50m/sを超える大型の台風が、6月～9月にかけて架橋地点に数回接近している。台風通過後の翌月も鋼桁間の飛来塩分量は、0.004mdd～0.005mddと台風通過前と同程度の値を示していることから、台風時の飛来塩分の遮断性についても十分な性能を有していると言える。

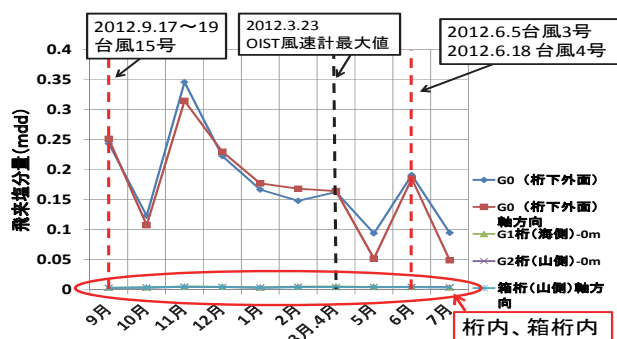


図-8 飛来塩分量測定結果



写真-2 鋼板試験片の腐食状況 (カバー内)



写真-3 鋼板試験片の腐食状況 (鋼桁外)

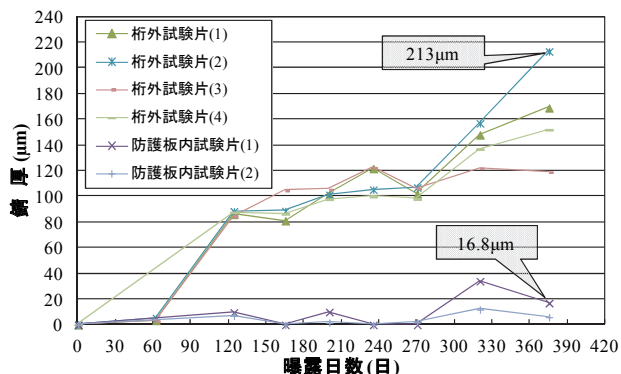


図-9 錆厚測定記結果

## 3) ワッペン式曝露試験による腐食環境調査結果

写真-2、3に、鋼板試験片の設置前及び約1年経過後の腐食状況を示す。鋼桁外側に設置していた鋼板試験片には、層状さびが発生しているのが分かる。一方、FRPスマートカバーで閉じられた鋼桁間に設置していた鋼板試験片は、点錆が見られるものの様な錆は発生していないことが分かる。図-9に鋼板試験片の毎月の錆厚の変化を示す。鋼桁外側に設置された試験片の錆厚は、毎月増加していき、375日後においては213.1 $\mu$ mの値を示した。鋼桁間に設置した試験片の錆厚は、毎月若干の変動はあるものの375日で16.8 $\mu$ mであった。

ワッペン試験片を1年間暴露して求めた腐食減耗量から算出した、経年腐食減耗量を図-10、11に示す。(社)日本鋼構造協会では、予め想定する腐食減耗量の範囲として、表-2に示す耐腐食性能レベルを示している。これによると、鋼桁外面は性能レベルⅢとなり、厳しい腐食環境であると言える。一方で、FRPスマートカバーで塞がれた鋼桁間の耐腐食性能レベルはⅠという評価となり、耐候性鋼材を裸仕様でも適用可能な環境であると言える。

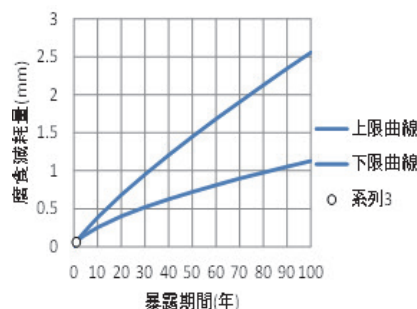


図-10 鋼桁外の腐食減耗曲線

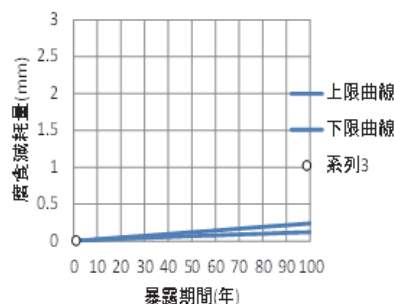


図-11 FRPスマートカバー内の腐食減耗曲線

表-2 耐候性鋼材における耐腐食性能レベル

性能レベル	腐食減耗量	さび外観評点
Ⅰ 設計供用期間中の腐食減耗量が、設計上耐荷力性能に影響がない範囲に留まるレベル	平均 0.5mm/100年以下	評点3～5
Ⅱ 予め設計上腐食代を見込む事により、設計上耐荷力性能に影響がない範囲となるレベル	平均 1.0mm/100年以下	評点2
Ⅲ 一般に取替えを前提とする部材に適用する	—	評点1でも許容

## 4. 上部工検査路としての性能評価試験

### (1) 性能評価試験の概要

本研究においては、上部工検査路が受ける静的及び動的な荷重に対して、FRPスマートカバーが耐力性能、疲労耐久性能を満足しているかについて実験的検証を実施した。表-3に試験の内容と照査項目について示す。

各試験で使用した試験体は2枚のFRPパネルを接合し、幅1215mm、長さ3500mmのものを使用した(図-12)。荷重は油圧ジャッキにより載荷し、載荷に際しては700mm×200mmの載荷板を使用した。また、試験体は桁との接合構造の違いにより、実橋で採用されたスタッドタイプ接合と、新規に考案されたクリップタイプ接合の2種類の試験体を製作し、荷重載荷実験をおこなった。

表-3 上部工検査路における要求性能

試験内容	照査項目	測定項目
静的・動的試験	検査路としての耐荷性	変位、ひずみ
疲労試験	検査路としての耐荷性・耐久性	変位、ひずみ、変形・破損
歩行試験	検査路としての耐荷性 歩行時の使用性	変位、ひずみ、使用性
風荷重破壊試験	飛来塩分防護板としての耐荷性	変位、破壊荷重

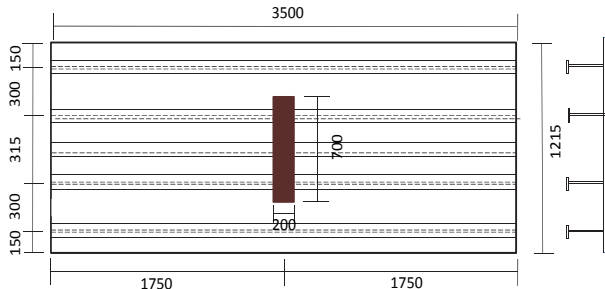


図-12 FRP試験体寸法



写真-4 FRP試験体設置状況

### (2) 静的・動的荷重載荷試験

#### 1) 試験方法

静的荷重載荷試験においては、FRPパネルの中心に集中荷重を載荷し鉛直方向の変位を計測した。荷重は5kN

間隔で15kNまで載荷した。なお載荷荷重の15kNは、通常の検査路設計に使用される設計荷重(3.5kN/m<sup>2</sup>)を集中荷重に換算した値である。

動的載荷試験においては、静的荷重載荷試験と同様にFRPパネルの中心に5kN~10kNの荷重振幅幅で動的載荷を行い変位及びひずみを計測した。

#### 2) 試験結果

静的載荷試験結果を図-13に示す。最大荷重15kNを載荷した場合でも、FRPパネルは弾性挙動を示していることが分かる。また、FRP材は引張弾性率が鋼の1/10であり、たわみを生じやすいという特徴があるため、点検者が歩行した場合のたわみ値についても着目する必要がある。10kN載荷時のたわみをみると、FRPパネルの許容たわみ $L/400=8.75\text{mm}$ 以下を満足する結果となっている。実際に行われる点検時の荷重を3kN程度(=点検者2名+点検道具)と考え、FRPパネルは点検用通路としての変形性能を満足していると考えられる。

動的載荷試験での変位については、静的載荷試験と同様の結果を示した。また、荷重を動的に載荷することによる、FRPパネルの共振等は確認できなかった。

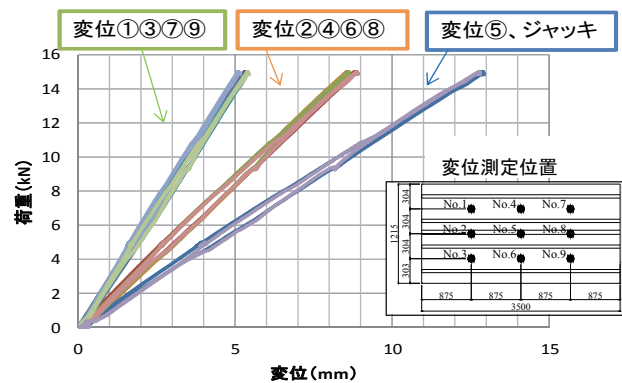


図-13 静的荷重載荷試験結果

### (3) 疲労荷重載荷試験

#### 1) 試験方法

FRPパネルの中心に動的荷重を載荷し、変位及び損傷の有無を調査した。荷重は2kN~10kNで動的載荷を1Hzで行い、載荷回数は100,000回として試験を行った。載荷回数は、100年の間に毎月点検者5名が10回点検用通路を通ると仮定した回数である。

#### 2) 試験結果

図-14に、疲労試験開始直後と疲労試験終了直前の

変位比較を行った結果を示す。疲労試験開始直後と疲労試験終了直前では、ほぼ同様の変位を示していることから、FRPスマートカバーは点検用通路としての疲労耐久性を十分に満足しているということが言える。

また、疲労試験後にFRPパネルの損傷調査を目視により実施したが、FRPパネルの割れなどの損傷は確認出来なかった。

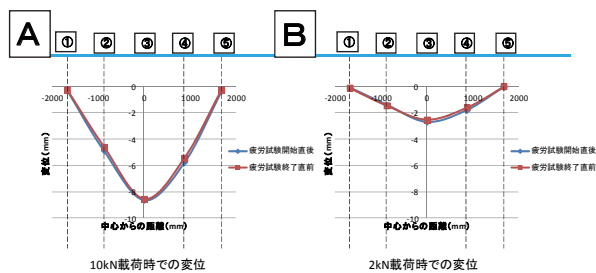


図-14 疲労試験開始直後と疲労試験終了直前の変位比較

#### (4) 風相当荷重破壊試験

##### 1) 試験方法

FRPパネル下面から作用する風荷重を模擬し、反転したFRPパネルの中心に静的荷重をFRPパネルが破壊に至るまで載荷した。荷重載荷時においては、FRPパネルの状態を目視により観察しひび割れ発生時、FRPパネル破壊時の状況を観察した。

##### 2) 試験結果

図-15、16にスタッドタイプ及びクリップタイプのひび割れ及び破壊状況を示す。

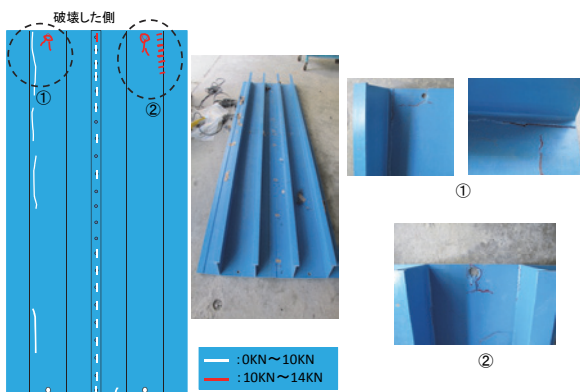


図-15 ひび割れ及び破壊状況図 (スタッドタイプ)

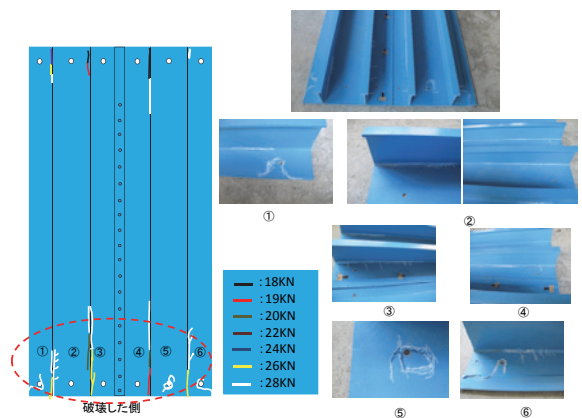


図-16 ひび割れ及び破壊状況図 (クリップタイプ)

スタッドタイプにおいては、8kN載荷時にTリブと底鋼板の接合部よりひび割れが発生した。12kN載荷時で端部継手部から亀裂が発生し、14kN載荷時で同様に端部の継手から破壊した。一方クリップタイプでは、18kN載荷時にスタッドタイプと同様にリブと底鋼板との境界部よりひび割れが発生し、28kN載荷時で端部の継手部及びリブと底鋼板の接合部より破壊した。

接合構造で比較すると、クリップタイプ継手の方が約2倍の耐荷力を有しているという結果となった。クリップタイプでは、スタッドタイプと異なり面接触により架台との固定を行っているため、破壊箇所となる端部継手部の応力集中を緩和できていることが要因であると考えられる。

#### (5) 最大耐風速の算出

##### 1) 最大耐風速の算出方法

FRPスマートカバーの最大耐風速は、風相当荷重破壊試験の結果をもとに、次に示す手順により算出した。最初に風相当荷重破壊試験をFEM解析により再現し、破壊試験により確認された破壊箇所の応力を算出した(図-17に示す手順①)。次に算出した応力と同箇所の応力が同じ値を示す等分布荷重を、同様にFEM解析により算出した(図-17に示す手順②)。算出された破壊時の等分布荷重を式-1に代入して、最大耐風速を算出した。ここでの風荷重は、下から吹き上げる風の揚力と横から当たる風の抗力の荷重比を1:1としており、安全側での検討であると言える。

$$p_{cr} = \frac{1}{2} (\rho U_{d,cr}^2 C_d) \quad (式-1)$$

ここで、Pは風荷重 (N/m<sup>2</sup>)、U<sub>d,cr</sub>は風速 (m/s)、C<sub>d</sub>は抗力係数 (=1.2)、ρ:空気密度 (=1.23kg/m<sup>3</sup>)を示す。



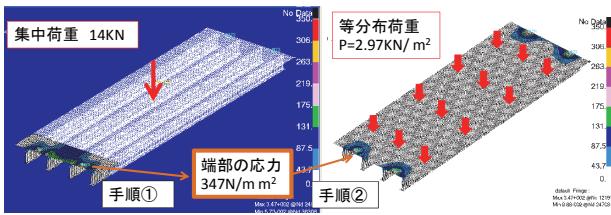


図-17 FEM解析を用いた最大耐風速の算出手順

## 2) FEM解析モデル

FEM解析において、スタッドタイプではシェル要素、クリップタイプではシェル要素及びソリッド要素にて解析モデルを作成した。下記に各要素モデルの解析条件を示す。

### (a) シェル要素

ヤング率： $2.55 \times 10^4 \text{N/mm}^2$

ポアソン比：0.24

境界条件：

- ① スタッドタイプ…両端4か所でxyz方向固定
- ② クリップタイプ…両端12か所でxyz方向固定

### (b) ソリッド要素

ヤング率： $2.55 \times 10^4 \text{N/mm}^2$

ポアソン比：0.24

境界条件：

FRP押え板とFRPパネルとで架台を挟み込んで固定していることをモデル化するために図-18に示す箇所を固定とした。FRPパネルとFRP押え板はボルト孔でのみの結合とした。



図-18 ソリッド要素の境界条件

## 3) 最大耐風速算出結果

シェル要素及びソリッド要素での解析結果を図-19～21に示す。シェル要素では、両接合タイプのモデル共に固定した箇所で最大応力が発生した。一方ソリッド要素では、リップ端部の底鋼板との境界部で最大応力が発生した。

FEM解析より算出された等分布荷重より、式-1を用いて換算された最大耐風速は、シェル要素のスタッドタイプ

で63.4m/s、クリップで128.7m/sとなった。また、ひび割れ時においては、スタッドタイプで48.0m/s、クリップで103.1m/sとなった。一方でソリッド要素（クリップタイプ）での最大耐風速は174.6m/s、ひび割れ時で140.2m/sという結果となった。

本結果より、クリップタイプ継手においては、最大耐風速100m/s以上の性能を有していると言える。一方でスタッドタイプ継手においては、強風時の継手部の損傷に配慮した設計を行う必要があると考えられる。

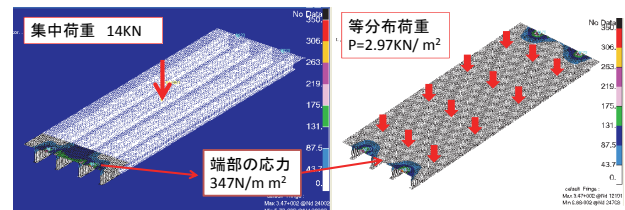


図-19 シェル要素の結果（スタッドタイプ）

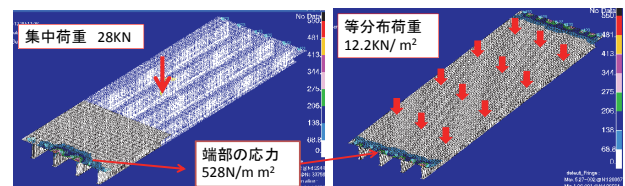


図-20 シェル要素の結果（クリップタイプ）

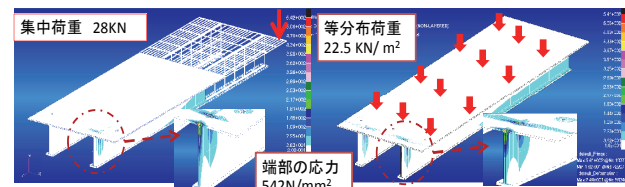


図-21 ソリッド要素の結果（クリップタイプ）

## 5. まとめ

実橋に採用されたFRPスマートカバーのモニタリングテストにおいては、FRPスマートカバーの腐食促進因子の遮断性及びFRPスマートカバーを敷設した鋼桁間の腐食環境の改善効果が確認された。

点検用通路としての性能確認試験においては、FRPスマートカバーが鋼橋の点検用通路に求められる各種性能を満足している事が確認された。ただし、継手においてスタッドタイプを採用する場合には暴風時における警戒が必要であることから、架橋地点によってはクリップタイプの継手を採用することが望ましいと言える。

これらの研究結果から、FRPスマートカバーを鋼桁間

へ敷設する技術は、鋼橋における防食性能の向上及び維持管理性能の向上の観点から有効な技術であるという事が言える。

本研究は、共同執筆者であります先生方の多大なるご指導の下、琉球大学と宮地エンジニアリング（株）の共同研究として行われました。最後に、ご指導を賜りました先生方、及び共同研究に携わって頂いた琉球大学の学生の方々に心から御礼を申し上げます。

### <参考文献>

- 1) 耐候性鋼橋梁の適用性評価と防食予防保全，(社)日本鋼構造協会，2009.9.
- 2) 久保，亀子，山下，下里，有住，矢吹：FRP防護板を用いた鋼桁間の腐食環境改善に関する研究，土木

学会第67回年次学術講演会，2012.9

- 3) 山下，久保，下里，有住，矢吹：FRP防護板における点検用通路としての性能確認試験，土木学会第68回年次学術講演会，2013.9
- 4) T. YABUKI, Y. ARIZUMI, T. SHIMOZATO, S. YAMASITA : SMART FRP USAGE FOR PREVENTION IN STEEL GIRDER BRIDGES AGAINST CHLORIDE ATTACK, Proceeding of Proc. of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, June 2012, Rome, Italy, Paper No.13-166
- 5) S. YAMASHTIA, Y. ARIZUMI, T. SHIMOZATO, S. YABUKI : FRP plate elements for closing bridge cross-section, proceeding of 10<sup>th</sup> Pacific Structural Steel Conference, June 2013, Singapore, Paper No.092

2014.2.17 受付

## グラビア写真説明

### 圏央道清水橋

本橋は首都圏中央連絡自動車道の茨城県稲敷市清水地区に架る橋梁です。

平成26年4月12日に開通した稲敷東IC～神埼IC間に位置します。周囲は田園地帯で霞ヶ浦も近いことから自然環境が豊かな地域であり、希少動物の産卵から巣立ちまでの期間は工事を一時中止するなど、自然環境に十分配慮された施工が行われました。

(熱海 晋)

### 粟嶋橋

本工事は、二級河川栗山川に架かる横芝光町道の農道橋を粟嶋橋上部工の製作及び架設工事です。

本工事は架橋位置から上流にある町道橋の老朽化で通行止めになったことに伴い、本橋を架けることになりました。上部構造は、3径間連続非合成板桁で斜角77度・縦断勾配6%の橋梁です。

手延べ機を用いた送り出し工法で架設をしました。

(伊藤 浩之)

### 備前堀橋2期

本橋は埼玉県主要地方道さいたま栗橋線における備前堀橋上部工の架替え工事です。

架替えは1期工事と2期工事に分かれており、本工事はそのうちの2期工事です。1期工事において、備前堀橋の上り線側の架替が完了し先に供用されていました。2期工事では1期工事との連結部を除いて床版コンクリートの打設までの作業を完了させ、カウンターウェイトによりキャンバー差を相殺した状態で、両者の横桁のボルトを連結するとともに、RC床版の間詰めコンクリートには超早強コンクリートを使用して最短時間の通行止めを実現しています。

(清水 康史)