

青森中央大橋の健全度評価と補修方法

中野正則・安波博道・加納 勇・中島和俊

1. 概要

青森中央大橋は、青森県道120号荒川青森停車場線に位置する単純PC箱桁橋3連+4径間連続鋼床版箱桁橋+単純PC箱桁橋4連からなり、青森鉄道および青森信号場を跨ぐ橋梁である。このうち、鋼床版箱桁橋は表面処理剤が施された耐候性鋼橋梁である。

昭和61年の供用開始から21年を経た平成19年には詳細調査が行われ、桁端部等に生じた異常腐食に対する補修塗装ならびに一般部の表面処理再塗布が提案された。しかし、本橋は跨線橋であるため容易に補修が行えないことから、平成23年度に補修の可否に関する詳細な検討を実施し、さらに平成24・25年度に、再調査によって発見された箱桁内部の異常腐食に対する構造安全性の照査ならびに補修補強方法の検討を実施した。本文中では、青森県より受託した平成23年度以降の一連の業務成果を取りまとめて報告する。

2. 腐食損傷の調査

2.1 一般部の腐食損傷

桁端部では橋座面において伸縮装置からの漏水が滞水することにより、部分的に層状さびが生じていたため、桁端部は塗替え塗装による補修が必要であると判断した。

一方、桁端部以外の一般部の腐食損傷は、概ね次の二つに分けられる。

①排水管主桁貫通部の腐食（写真-1）

②主桁下フランジのフジツボ状腐食（写真-2）

このうち、排水管主桁貫通部の腐食は排水管からの漏水が腐食の原因であることは明白であり、同時に箱桁内部の腐食が懸念された。

主桁下フランジのフジツボ状腐食は、塗装橋や表面処理剤が施された耐候性鋼橋梁においてよく見られる腐食損傷であり、被膜が劣化した部分から腐食が進行するものと考えられる。

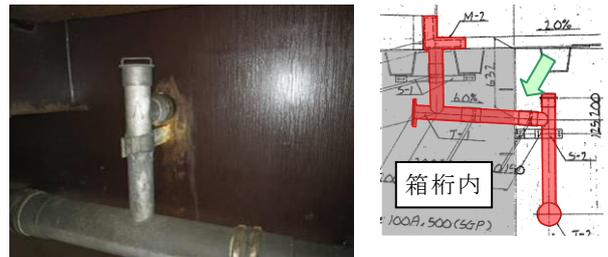


写真-1 主桁ウェブの排水管貫通孔部と腐食損傷

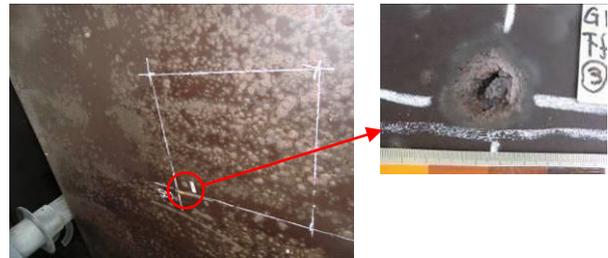


写真-2 主桁下フランジのフジツボ状腐食

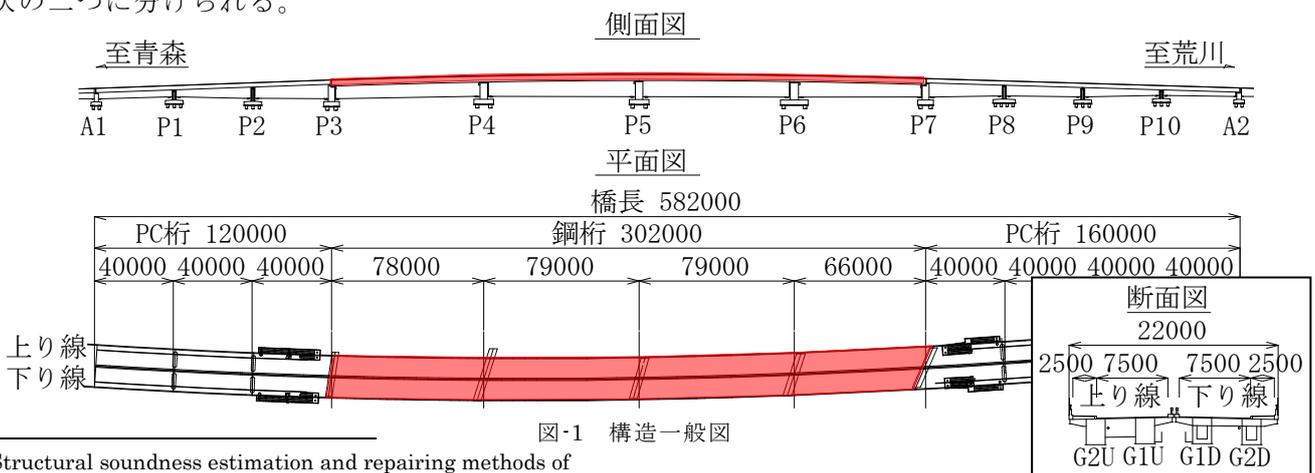


図-1 構造一般図

主桁ウェブに設けられた排水管貫通孔部では、貫通孔周辺の腐食量はごく僅かであったが、その下方のウェブ下端では比較的大きなこぶ状さびが生じていた。腐食部のさびを除去した後にシリコンゴムによりその形状を型取りし、XYZステージにて腐食量を測定したところ、最大約1mmの腐食が生じていた。腐食深さは大きいものの、その範囲が限定的であることから、構造安全性に問題はないと考えられる。腐食部の外観と計測状況を写真-3に、計測結果を図-2に示す。

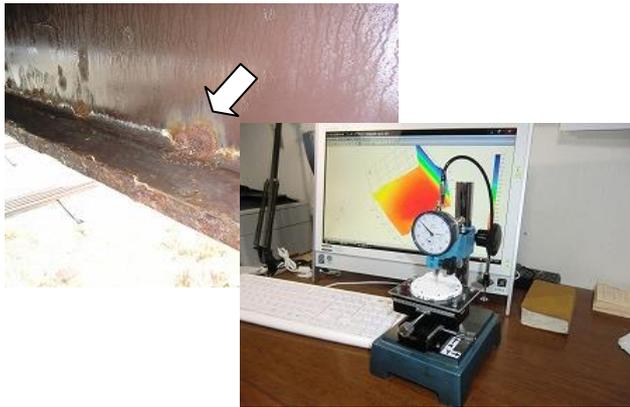


写真-3 こぶ状さび外観と型取りによる腐食量計測状況

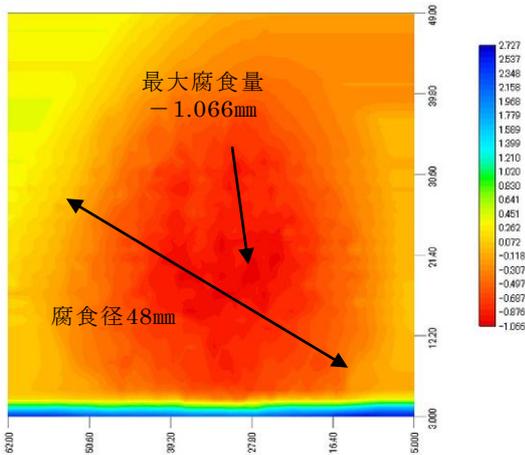


図-2 腐食量の計測結果

主桁下フランジのフジツボ状腐食は、下フランジ面のおよそ50%を占めているが、それ以外の部分は表面処理剤が残留している状態であった。フジツボ状腐食の直径は30mm以下であり、その腐食量は最大で0.3mm程度であった。

このように、桁端部を除く主桁一般部外面では、排水管からの漏水（アクシデント）を受けた箇所や、経年による表面処理剤の損耗とフジツボ状の腐食がみられるものの、腐食量はわずかであり、構造安全性に問題はないとの結果を得た。したがって、主桁一般部外面に対する補修は不要であ

ると判断した。また、参考文献1で提案した耐候性鋼橋梁のさび外観評価基準によっても評点は3-zであり、健全性に問題は無いと評価している。

なお、過年度においては表面処理剤の部分的な風化が景観を損ねるとして、表面処理剤の再塗布が提案されたが、このような対策は表面処理剤ならびに耐候性鋼橋梁の本来の使用方法から逸脱するものであり、本検討においては提案していない。

2.2 一般部のワッペン式暴露試験

一般部の腐食量について、ワッペン式暴露試験による腐食量測定ならびに長期腐食予測を実施した。ワッペン式暴露試験は、試験開始から1年・3年・5年・n年後の回収分析を予定し、現時点で1年目の結果が得られている。試験片の設置位置は、本橋の一般的な腐食環境評価を目的として、P3付近の一般部、P6-P7径間の中央、P7付近の一般部とし、主桁ウェブの桁外側および桁間、下フランジ下面に設置した。

1年間のワッペン式暴露試験結果を図-3に、長期腐食予測結果を図-4に示す。長期腐食予測にあたっては、一般に知られる鋼材の腐食予測式 ($Y=AX^B$) を適用し、腐食予測パラメータAは1年間の腐食量、Bは暫定的に日本鋼構造協会による全国41橋暴露試験結果による回帰式を適用した。

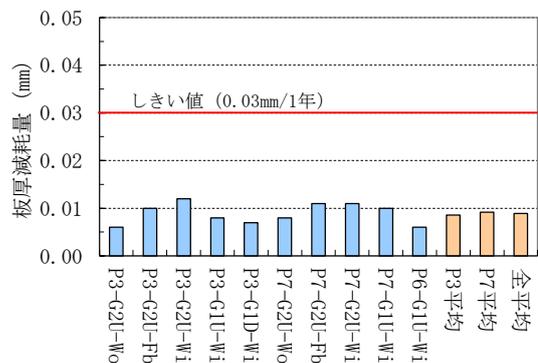


図-3 ワッペン試験結果（1年暴露）

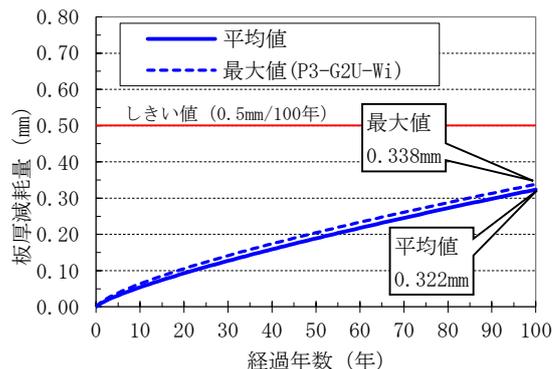


図-4 長期腐食予測

土研センター

以上のとおり、腐食量は耐候性鋼橋梁の適用可否しきい値²⁾を十分に下回る結果となり、本橋の一般部は漏水などのアクシデントが無ければ良好な腐食環境にあると評価できる。

2.3 桁内部の腐食損傷

一般部外面の腐食調査により排水管からの漏水が箱桁内部にも浸入していることが推察されたため、箱桁内部の腐食調査を行うこととなった。その結果、箱桁内部に設置された排水桝のほぼ全箇所が漏水し、主桁下フランジの大部分に異常腐食が見られた。損傷状況を写真-4、写真-5に示す。



写真-4 排水桝（鋼床版下面）の損傷



写真-5 箱桁内部の損傷（左上は健全部）

これらの腐食損傷のうち、腐食程度や断面変化位置等を参考に13箇所を選定して腐食量の調査ならびに応力照査を行った。結果を表-1に示す。なお、照査に使用した断面力は竣工図書における設計断面力であり、活荷重はTL-20である。

照査の結果、断面番号20を除いて許容応力度以下であることが確認された。ここで、断面番号20は、断面番号21との板継ぎ溶接線に沿って生じた橋軸直角方向の溝状の腐食損傷であり、腐食量も15%と比較的大きい。応力超過は4%弱に留まるものの、B活荷重ではさらに超過すること、当

初設計時の格子解析では仮定剛度と実剛度に最大22%（支間平均）の乖離がみられ、作用力が増大する懸念があることから、当該部位の詳細調査を実施する必要があると判断した。

表-1 腐食調査結果

| 断面番号 | 下フランジ板厚 | | 腐食率 (%) | 下フランジ応力度 | | 許容応力度 (N/mm ²) |
|------|-----------|-----------|---------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| | 設計板厚 (mm) | 残存板厚 (mm) | | 設計時 (N/mm ²) | 腐食後 (N/mm ²) | |
| 3 | 25 | 24.8 | 0.8 | 190.9 | 191.9 | < 210 |
| 4 | 19 | 18.5 | 2.6 | 180.0 | 182.9 | < 210 |
| 7 | 28 | 27.9 | 0.4 | -181.3 | -181.7 | < 210 |
| 8 | 36 | 35.9 | 0.3 | -195.2 | -195.5 | < 210 |
| 17 | 30 | 30.0 | 0.0 | -190.2 | -190.2 | < 210 |
| 18 | 22 | 21.5 | 2.3 | -174.8 | -177.1 | < 210 |
| 20 | 16 | 13.6 | 15.0 | 131.9 | 145.3 | > 140 |
| 21 | 25 | 23.4 | 6.4 | 127.2 | 133.2 | < 140 |
| 21 | 25 | 24.1 | 3.6 | 127.2 | 130.5 | < 140 |
| 24 | 25 | 24.7 | 1.2 | -171.9 | -173.1 | < 210 |
| 26 | 25 | 24.7 | 1.2 | -177.3 | -178.5 | < 210 |
| 29 | 28 | 26.9 | 3.9 | 128.4 | 132.2 | < 140 |
| 30 | 19 | 18.4 | 3.2 | 96.5 | 98.5 | < 140 |

3. 実橋載荷試験

箱桁内部の腐食損傷に伴う応力増加について、実橋載荷試験を行いその構造安全性を照査することとした。実橋載荷試験は、20トントラックを使用した静的載荷試験ならびに72時間の応力頻度測定により構成している。

3.1 静的載荷試験

断面番号20を含む延べ5断面における実応力度を評価するため、車両総重量を20トンに調整したトラックを3台橋梁上の所定位置に静止させ、無載荷状態からの変動をひずみゲージにより計測した。同等の荷重を格子解析にて再現し、発生する応力度の比較を行った。載荷試験状況を写真-6に、断面番号20に着目した載荷試験結果を図-5に示す。グラフ中の赤棒は格子解析結果（腐食を考慮しない設計板厚による応力）を示し、青棒は載荷試験結果を示す。



写真-6 静的載荷試験状況／ひずみゲージ設置状況

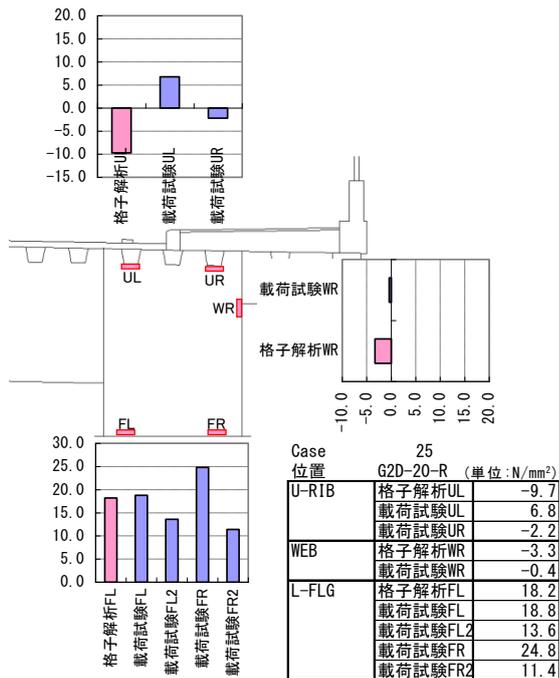


図-5 断面番号20 載荷試験結果

主桁下フランジでは、断面番号20の板継溶接線に沿った溝状腐食部のひずみ（載荷試験FL，FR）とともに、直近の腐食のない一般部（載荷試験FL2，FR2）でひずみを計測した。

計測の結果、溝状腐食部の応力比（実応力／解析応力）は平均102%となり、わずかな応力超過に留まる結果となった。ここで、解析応力は表-1に示した設計板厚と残存板厚の比により補正している。一方、腐食のない一般部の応力比は平均69%に留まる結果となった。

この結果から、本橋は腐食がない建設時の状態では実応力比が70%程度と十分な余裕を有していること、最大の腐食損傷を生じた部位でも実応力比は100%程度であり極端な応力度の増加がないことが判明した。

3.2 72時間応力頻度測定

本橋の構造安全性の照査を行うことを目的として、供用下における応力度を72時間測定した。測定は平成25年10月28日(月)23時59分から10月31日(木)23時59分の延べ3日間とし、静的載荷試験で計測した箇所をひずみ頻度を集計した。試験目的が腐食部の実応力度の把握であることから、集計は極大値・極小値法により評価を行った。計測のスライス幅は4μ（0.8N/mm²）とした。

測定結果において最大の発生ひずみを示した箇所は断面番号20の下フランジであり、腐食量、静的載荷試験結果とともに同部位が着目点となっ

ている。断面番号20の下フランジの極大値・極小値法による応力頻度測定結果を図-6に示す。

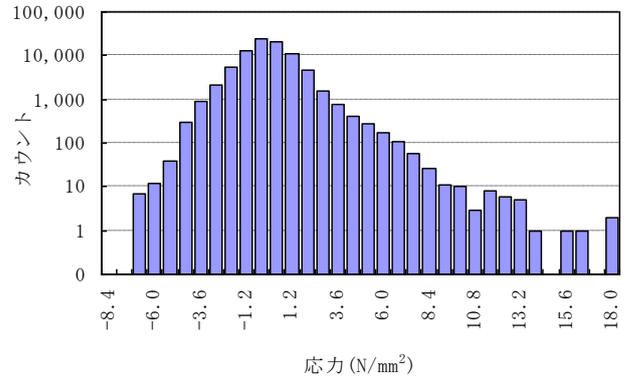


図-6 断面番号20の応力頻度

図-6によると、全計測回数は87073回で、その内の98%が-4.0～4.0 N/mm²のごく小さな応力範囲に留まり、最大応力範囲17.6～18.4N/mm²は2回のみであることがわかる。ここで、同部位の格子解析による死荷重応力度は64.0 N/mm²であることから、これらを足し合わせると82.4 N/mm²となり、許容応力度140 N/mm²に対して十分な余裕がある結果となった。

以上の結果から、箱桁内部では腐食損傷が進行しているものの、現時点では構造安全性に影響がある状態ではないことが判明した。

4. 補修方法の検討

箱桁内部の腐食損傷について、原因の排除とともに以降の腐食を抑制する補修方法について検討を行った。

4.1 排水装置の改良

箱桁内部の腐食損傷は、写真-1に示したように箱桁内部に設置した排水柵からの漏水が原因であり、鋼床版側にも腐食が見られることから、排水柵と鋼床版の廻し溶接の不良が最大の要因であると考えられる。補修方法として劣化した排水柵のみの取替えが考えられるが、今後このような損傷を再発する可能性が否定できない。このため、排水構造を全面的に変更し、路面上の地覆を排水樋として使用する鋼製排水溝方式へ変更することとした。写真-7に改良後の状況を示す。



写真-7 鋼製排水溝

土研センター

4.2 箱桁外面の塗装

過年度においては桁端部の補修塗装にあたり、耐候性鋼材のさびが固く、ブラストを含む一般の工具では除去出来ないとして、ダイヤモンドディスクによる除錆が提案されていた。これに対し、動力工具は孔食部で健全部を傷めなければ除錆できず、ブラストと比較して不十分な素地調整となりやすいことから、適用性に疑問が生じた。このため、桁端部端横桁の一部を用いてブラストによる素地調整の試験施工を実施し、その適用性を検証した。試験施工箇所は表面処理剤が風化し、大部分がさびと被膜の混在する状態であった。ブラスト装置は小型のバキュームブラストマシン(FDO-G1-KA)を使用し、研削材はスチールグリッド、フェロニッケルスラグの2種を使用した。試験施工の結果、いずれの研削材によっても十分な素地調整が可能であることを確認した(写真-8)。



写真-8 試験施工結果

4.3 箱桁内面の塗装

写真-5に示したとおり箱桁内面は排水装置からの漏水によって下フランジ全面積の約50%に異常腐食が生じる状態であった。また、排水柵からの漏水は路面に散布された凍結防止剤を多量に含むため、箱桁内においても2000mg/m²を超える高い付着塩分が検出された。箱桁内部では高圧水洗が困難であるため、付着塩分の除去は素地調整において行うことが必要となり、補修塗装に先だって付着塩分の効率的な除去方法の検討を行うこととなった。

平成17年の鋼道路橋塗装・防食便覧では、箱桁内部の塗替え塗装系としてRd-Ⅲ塗装系(3種ケレン)を示しているが、本橋のように異常腐食が進行し、多量の塩分を含む場合には、3種ケレンでは十分な塗装耐久性が得られないことが想定された。このため、1種ケレン(バキュームブラスト)、2種ケレン(カップワイヤ、グラインダ等)による付着塩分の除去、ならびに施工歩掛の集計を目的とした試験施工を実施した。なお、2種ケレンは青森県の塗替え塗装における標準仕様

である。また、箱桁内面の試験施工に用いたブラスト装置は、支間長約80mに対して施工可能な大型のバキュームブラスト装置を使用した。

各施工法による付着塩分量の推移を図-7、図-8に示す。1種ケレンでは1回目の施工(Sa2 1/2に達した時点)で概ね50mg/m²の付着塩分量に低下する結果を得た。一方、2種ケレンでは、1回目の施工でほとんどのさびが除去されたものの、さび内部に侵入していた塩分が表出したことにより、場所によってはケレン前よりも高い付着塩分量が検出される結果となった。2回目は凹部を選択的に施工したが、依然として100~200 mg/m²程度残存していた。3回目は現実的な施工ではないが、凹部のさびとともに周辺鋼材を切削する施工を行い、50mg/m²程度の付着塩分に低下することを確認した。

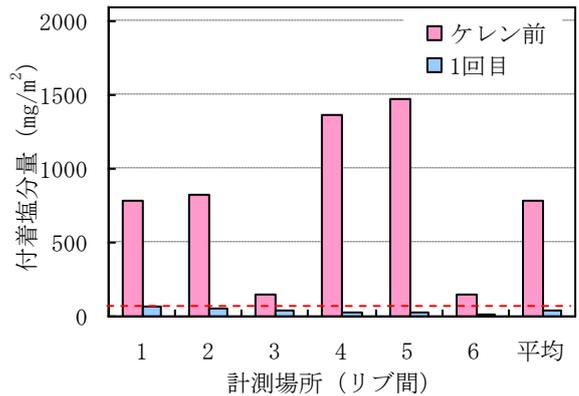


図-7 付着塩分量の推移 (1種ケレン)

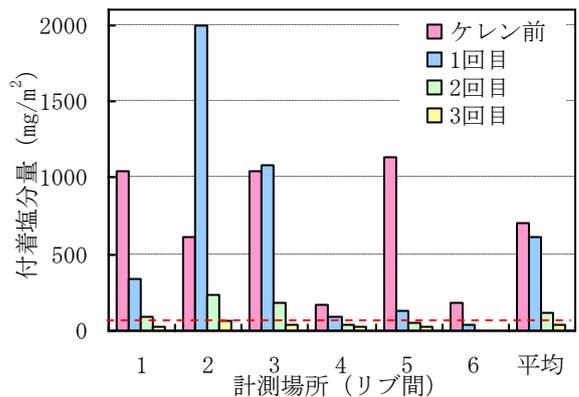


図-8 付着塩分量の推移 (2種ケレン)

1種ケレン後の腐食部外観を写真-9に、2種ケレン後(2回目)の腐食部外観を写真-10に示す。1種ケレンでは凹部の中まで良好な素地が得られているのに対し、2種ケレンでは凹部の周囲が削られ、最奥部のケレンが不十分であることがわかる。



写真-9 1種ケレンの仕上がり状態 (1回目)



写真-10 2種ケレンの仕上がり状態 (2回目)

5. まとめ

青森中央大橋の健全度評価と補修方法に関し、主に次の3項目について検討した。

- ① 耐候性鋼橋梁の外観による健全度評価
- ② 箱桁内部の腐食損傷に対する構造安全性評価
- ③ 各損傷に対する補修方法の検討

このうち、①については、参考文献1で提案した表面処理剤が塗布された耐候性鋼橋梁のさび外観評価基準を基に調査を行い、桁端部や排水管貫通孔からの漏水を除いて健全な外観を呈すること

を確認した。また、ワッペン式暴露試験より、一般部の腐食量はわずかであり、漏水などのアクセシビリティが無ければ良好な腐食環境にあると評価した。本試験は、今後3年・5年・n年目に回収分析を行い、腐食予測の精度向上を図る予定である。

②については、箱桁内部に生じた腐食損傷に対して、その損傷程度を詳細に調査し、静的荷重載荷試験や72時間応力頻度測定を行うことにより、現行活荷重に対して構造安全性が保たれていることを確認した。

③については、箱桁外面におけるブラストの試験施工によって耐候性鋼橋梁のさび除去に問題が無いことを確認し、また箱桁内面の付着塩分の除去にあたってバキュームブラストが十分な効果を発揮することを確認した。ただし、試験施工ではブラストの施工歩掛が10m²/日以下であり、国土交通省 土木工事標準積算基準書 共通編（建設物価調査会，2013）に示されるブラストの標準施工歩掛70m²/日と大きな乖離が生じている。実際の工事では、施工中の付着塩分量の管理とともに、施工能率の向上が課題であると考えている。

今回の箱桁内部の腐食損傷は、排水管貫通孔付近の異常腐食など、損傷の原因から腐食損傷を推察する手がかりがありながら、定期点検ならびに過年度詳細調査で見逃されていた損傷である。今後、他の橋梁で同様の事態が生じることを防ぐためにも、点検者の技能向上（損傷に対する原因の推察）、点検範囲の拡大（箱桁内部の点検）が課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 佐藤雅之、中野正則、安波博道、市川和臣、中島和俊：「さび安定化補助処理が施された耐候性鋼橋梁の外観評価と腐食実態」、土木技術資料、第53巻、第7号、pp.58～63、2011
- 2) 日本鋼構造協会：「耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術」、テクニカルレポートNo.73、2006.10

中野正則



(一財)土木研究センター
常務理事
Masanori NAKANO

安波博道



(一財)土木研究センター
材料構造研究部長、工博
Dr.Hiromichi YASUNAMI

加納 勇



(一財)土木研究センター
材料構造研究部
主幹研究員
Isamu KANO

中島和俊



(一財)土木研究センター
材料構造研究部 主任
研究員
Kazutoshi NAKASHIMA