海岸部に位置する橋梁の 腐食環境モニタリングと統計的腐食因子分析

鈴木 啓悟¹・吉田 翔太²・佐々木 栄一³・竹谷 晃一⁴
前田 健児⁵・近藤 泰光⁶

¹正会員 福井大学講師 工学系部門建築建設工学分野 (〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1)

E-mail: suzuki-k@u-fukui.ac.jp

²非会員 福井県嶺南振興局 小浜土木事務所 道路課 小浜グループ (〒917-0241 福井県小浜市速敷 1-101)

(研究当時 福井大学大学院工学研究科 原子力・エネルギー安全工学専攻博士前期課程)

E-mail: s-yoshida-bt@pref.fukui.lg.jp

³正会員 東京工業大学准教授 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

E-mail: sasaki.e.ab@m.titech.ac.jp

⁴学生会員 東京工業大学 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

E-mail: takeya.k.aa@m.titech.ac.jp

⁵正会員 福井県建設技術研究センター研究員 (〒918-8108 福井県福井市春日 3-303)

E-mail: k-maeda@fklab.fukui.fukui.jp

⁶非会員 福井県建設技術研究センター主任研究員 (同上)

E-mail: y-kondo@fklab.fukui.fukui.jp

橋梁の腐食損傷は主として水分と塩化物の存在に影響を受ける。これらの腐食因子は風向、風速、気温、湿度、降雨、波浪などの気象外乱の複合作用により橋梁に到着する。本研究は、ACM センサで計測される腐食応答電流値を主とした 1 年間のモニタリングデータを基に、まず外乱となる気象データから重回帰式を求めた。次に重回帰式から過去 5 年分の気象データをもとにした ACM 電流応答の推定値を算出し、その季節変動に伴う応答傾向の再現性を検証したうえで、最後に重回帰式の各係数の t 値を評価することで、腐食応答に及ぼす原因について検証した。検証の結果、本研究の事例においては降雨と風の相互作用により、腐食応答が促進される可能性が示唆された。

Key Words: Bridge Monitoring, ACM sensor, Corrosion, Regression Analysis, t -statistic

1. はじめに

腐食損傷が橋梁の健全度に及ぼす影響は大きく、鋼製橋梁においては架替理由の 26%を占めている¹⁾。平成 18 年度の調査によれば、海岸から 300m 以内に位置する橋梁の損傷は鋼材の腐食、コンクリート桁の亀裂・剥離といった腐食に関連し得る損傷が、架替理由の 94%を占めると報告²⁾されている。腐食損傷は目視点検に基づいて、鉄筋の腐食膨張によるコンクリートのはく離、塗膜上に見られる錆汁の確認、鋼板の減肉など、損傷発生後に把握されることが多い。腐食損傷が懸念される地域において、腐食環境の厳しい橋梁を予め把握するための橋梁モニタリングが実現できれば、目視点検を支援する

だけでなく、点検計画の策定や予防保全型維持管理に貢献できる可能性がある。

腐食応答をモニタリングする手法は、コンクリート構造内の鉄筋の静電位を評価する等の橋梁躯体自体の応答を直接モニタリングする手法と、橋梁に添付する ACM センサやワッペン試験片の応答を記録し、間接的に橋梁の腐食環境を評価する手法に大別できる。特に後者については、先行研究が多々なされ、材料の腐食損傷や腐食特性の評価^{3,4)}、さらに腐食環境評価⁵⁾などにも多大な貢献を果たしている。

橋梁の腐食損傷は、水分、塩化物、硫酸化物などの供給レベルによって影響を受ける。特に我が国においては、水分と塩化物の橋梁躯体への付着、滞留が主たる原

因となることが報告されている⁵⁾。橋梁モニタリングにACM センサやワッペン試験片を用いるうえで、これら腐食の外乱事象を把握したうえで、その応答値を評価することが重要である。

腐食の外乱事象として気象因子に着目すれば、直接的な水分の供給原因となる降雨のほか、結露や乾湿に影響を及ぼす気温、湿度、日照時間、水分・塩化物の供給と乾燥の両方に影響を及ぼし得る風向、風速などが主たる項目として挙げられる。そのほか、海岸部においては、水分、塩化物の両方を供給する波浪が、また寒冷地においては、路面への散水や塩化物を用いた凍結防止剤の散布なども供給の因子となる。

このように複合的な要因が互いに独立性や従属性を有しながら、橋梁の腐食に影響を与えていると考えられるが、気象情報等の外乱となるデータと腐食応答との関連付けができれば、腐食の原因となる事象の傾向を把握出来る可能性がある。そのためには、実橋で得られる腐食モニタリングデータを蓄積し、またデータ分析事例を積み重ねていくことが重要である。

本研究は、その一歩として、腐食損傷が懸念される地域の塗装鋼製橋梁に対し、腐食応答モニタリングを年単位で実施し、気象庁の気象観測データを外乱データとして援用することにより、重回帰分析に基づく腐食損傷に関する外乱と応答の関係づけを試みる。さらに得られた重回帰式の係数の t 値を評価することにより、腐食応答に及ぼす主たる原因の抽出を図る。

2. 対象橋梁と計測機器

図-1に対象橋梁の位置を示す。対象橋梁は福井県の越前海岸至近に位置する。この地域は、飛来塩分が非常に多く、対象橋梁から1km以内の位置で計測された飛来塩分量は年平均値で4310(mdd)である⁷⁾。福井県の中では比較的温暖な地域であり、対象橋梁に対する凍結防止剤散布量は少ない。援用する気象観測データは、降雨量、風向・風速、気温は越廼（こしの）観測所の記録、湿度は福井地方気象台の記録、波浪データとして用いる有義波高は経ヶ岬観測所の記録を使用した。

湿度と波浪データについては、記録している観測所が限られるため、対象橋梁よりやや離れた位置のものとなっている。これらのデータは必ずしも対象橋梁に及ぼす正確な外乱の数値を表しているとは言い難いが、気象情報のデータとしては対象橋梁に最も近い観測データであり、数値の季節的な傾向は、対象橋梁の位置のそれに比較的近いことを期待して用いることとした。

対象橋梁は単純支持形式の鋼床版箱桁橋(表-1、図-2)である。ACM センサー式およびワッペン試験片(写真-1)は支間中央部に設置した(図-2)。また付着塩分の計測も

写真-1 ワッペン試験片 (SM490A 材, 50×50×2mm)

図-1 対象橋梁と気象観測所の位置関係

表-1 橋梁諸元

橋梁形式	単純鋼床版箱桁橋
有効幅員	8.0m
支間長	60.8m
橋長	62.0m
離岸距離	0.1km

同位置で実施した。橋梁の腐食損傷は桁端部が顕著となる傾向があるが、桁端部の腐食応答はジョイント部からの排水状況に大きく影響を受け、気象的要因による腐食環境を検討するうえでは、排水状況等の構造的要因の影響を受けにくい中央部での評価が適当であると判断した。

(a) 側面図

(b) 断面図

図-2 計測位置

なお、河川上においては、河川からの湿気や水の飛散等も腐食に影響し得るが、桁端部の漏水等と比較するとその影響は小さいと考えた。

計測部位は雨がかりのない桁の内側面とした。これは雨がかりの影響のある部位は、付着塩分に大きなばらつきが生じる⁹⁾ためであり、逆に内側面は安定的なデータが得られることから、季節変動等も考慮した年間モニタリングには内側面が適すると判断したためである。

図-3にACMセンサの計測デバイス一式を示す。Zn-AgタイプのACMセンサのケーブルに100Ωの高精度抵抗を挟み込み、その両端の電位差を電圧ログで計測した。電圧ログは内蔵の電池ボックスに入れる単4乾電池4本で動作するが、電池交換の回数を減らすため、外付けの単3乾電池4本直列の電池ボックスを並列に接続した。この電力供給形態により、10分毎の電圧ログを半年以上継続させることが出来る。電圧ログは遮蔽物のない条件では100m程度までの範囲で親機との無線通信が可能であるため、比較的容易にデータの収集が可能である。以上のように半年に1回の電池交換、無線によるデータ回収と、計測労力を低減したモニタリングとした。

ワッペン試験片の腐食応答については、およそ1ヶ月おきに計測する試験片表面9点の膜厚値を平均した値を使用した。膜厚値は電磁・渦電流式兼用の測定方式によるデュアルタイプ膜厚計（ケツト科学研究所製LZ-990）を用い計測した。計測の精度は50μm未満で±1μm、50μm以上1000μm未満で±2%という仕様である。膜厚は腐食減肉と異なるデータとなるが、直接雨がかりの無い部位ではワッペン表面に形成される腐食生成物の落下現象の発生が少ない⁹⁾ため、膜厚を腐食応答として利用することとした。

このほかに、ポータブル表面塩分計（東亜ディーケーケー製SSM-21P）を用いて橋梁躯体に付着する塩分のモニタリングも実施した。この塩分計は真水の精製水を用いて付着塩分を攪拌採取し、電気伝導率から付着塩分量

(a) 模式図

(b) 設置状況（ワッペン試験片も含む）

図-3 ACMセンサー式

図-4 付着塩分量

を0~1999(mg/m²)の範囲で数値化するものである。付着塩分の計測に際しては、精製水による洗い流しの影響を避けるため、既計測位置と重複しないよう、計測毎に僅かに計測位置をずらした。

以降の説明において、海側ボックス桁の山側面を「山側面」、山側ボックス桁海側面を「海側面」として議論を進める。図中の“海側B山側”は海側ボックス桁の山側面を示し、“山側B海側”は山側ボックス桁の海側面を示す。

3. 応答値の季節変動

まず、橋梁躯体へ付着した塩分量のおよそ2年間の記録を図-4に示す。海側を向いている面、山側を向いている面ともに、12月～2月の冬期には付着塩分量が増加するという傾向が見られる。特にモニタリング開始直後のデータは1999(mg/m²)、つまり計測上限値かそれ以上の数値を記録しており、橋梁へ来着する飛来塩分量の多さ

を示している。その後は計測上限値に達する記録は得られていないが、気象条件による飛来塩分の運搬が記録開始前と比べて軟調であった可能性がある。冬期は付着塩分量が増加する一方で、6月～8月の夏期はその逆の傾向が見られる。直接雨がかりが無い部位にも関わらず、このような季節的増減傾向を示すことは興味深い。日本海の波浪は夏期には穏やかであり、飛来塩分の来着量が小さくなること、また乾燥した橋梁躯体表面から風の影響により付着塩分が剥がれ落ちること等の理由が考えられる。

次に ACM 電流値の月間積分値 (C) の推移を図-5 に示す。冬期に電流値が大幅に増加する傾向を示しており、付着塩分の推移と同様に日本海沿岸地域特有の傾向を示している。海側ボックス山側面と山側ボックス海側面を比較すると、山側ボックス海側面の電気量が大きく、特に冬期にその差が拡大することがわかる。本橋の海側を向く面は、海からの潮風の影響を受けやすいことがその理由として考えられる。

最後にワッペン膜厚値の推移を図-6 に示す。ワッペン膜厚についても山側ボックス海側面の値が卓越しており、海から吹き込む潮風の影響が現れている可能性がある。

4. 重回帰分析による外乱と応答の評価

(1) 重回帰分析の留意事項

外乱と応答の関係を重回帰分析に基づいて検証する。外乱は気象データのみならず、1年間かそれ以上の記録を月毎の変化量または、積分値として評価する。なお、付着塩分とワッペン膜厚については、計測の都合上、計測間隔が1ヶ月以上となっている期間がある。付着塩分量、ワッペン膜厚は月毎の変化量、ACM 電流値、風の影響、降水量、温度、湿度は月毎の積分値を用いることとした。

重回帰分析を適用するうえでの留意事項は次の3点である。

- 1) 重回帰式が一般性を有するか不確実
 - 2) 外乱の係数評価が必ずしも原因の度合いを表しているとは限らない
 - 3) 外乱と応答の関係が線形関係とは限らない
- 1), 2)については、対象期間のみ実測値と重回帰式に基づく計算値がフィッティングする可能性があること、3)については、重回帰式が基本的に多元一次方程式で表現されること、によるものである。これら留意事項を踏まえ、算出する重回帰式の正当性については過去のデータを用い、重回帰式が応答値の季節変動を表現できるかどうかを確認する。さらに係数の評価については、腐食応答に正の相関のある ACM センサとワッペン膜厚について同様の傾向にある係数を評価することとする。

図-5 ACM センサ電気量

図-6 ワッペン試験片膜厚値

図-7 橋梁の向きと風の方向角

風の影響値は式(1)、式(2)を用いて算出する。北を0度として時計回りに角度(図-7)をとり、橋梁の向きを 349.5 度として入力した。これに最大風速記録時の風速を入力し、橋梁ウェブの海側面、山側面に及ぼす影響値を求め。最大風速は日毎で記録される 10 分間平均風速(m/s)の最大値であるため、式(1)、式(2)に 600 秒を掛けている。

【海側面への影響】(m)

$$= \Sigma \text{最大風速} \times \sin(\text{橋梁の向き} - \text{風向}) \times 600(s) \quad (1)$$

【山側面への影響】(m)

$$= \Sigma \text{最大風速} \times \sin(180^\circ + \text{橋梁の向き} - \text{風向}) \times 600(s) \quad (2)$$

表-1 説明変数

W:風の影響(m)	T:気温(℃)	Wave:有義波波高(m)
R:降雨量(mm)	H:湿度(%)

$$\Delta S_s = 877 + 1016T - 2831H + 2837Wave + 175T \cdot H$$

図-8 付着塩分量の実測値と計算値および重回帰式, t 値

(2) 重回帰式の係数設定

重回帰式は表-1 に示す説明変数を用いた式(3)の 9 項からなる式とした。

$$X = a_0 + a_1W + a_2R + a_3T + a_4H + a_5Wave + a_6W \cdot R + a_7W \cdot Wave + a_8T \cdot H \quad (3)$$

第 7 項以降は相互作用効果を考慮した項である。例えば第 7 項は、風と雨の両方が同時に作用する月間には応答値に影響を及ぼすことを意味する。評価対象気象データと応答モニタリングデータの期間は 2015 年 1 月～12 月の 1 年間とした。

回帰式の導出は、まず重回帰分析により算出される応答値（以下、計算値と称する）と計測値の誤差二乗和が最小となるように係数を決定し、次に赤池情報量基準¹⁰⁾が最小となるように説明変数を選択し、係数を再決定する。各説明変数に入力する外乱の値は、期間中の最大記録値の値を 1 とし、正規化した数値を用いている。

(3) 重回帰式と係数の t 値

図-8～10 にそれぞれ付着塩分量の変化量、ワッペン膜厚増分、ACM 電気量に関する実測値の推移と重回帰式

$$\Delta t_s = 958 - 8133W - 1073R - 363T + 285H + 3353Wave + 12686W \cdot R - 2469W \cdot Wave - 5607R \cdot Wave$$

図-9 ワッペン膜厚の実測値と計算値および重回帰式, t 値

$$A_s = 405 - 234W - 57R - 503T - 336H - 66Wave + 388W \cdot R + 129W \cdot Wave + 499T \cdot H$$

図-10 ACM 電気量の実測値と計算値および重回帰式, t 値

図-11 重回帰式の基づいて推定した ACM 応答値

表-2 説明変数にかかる係数の t 値

	W	R	T	H	Wave	W*R	W*Wave	R*Wave	T*H
ワッペン	-2.27	-2.21	-1.77	0.99	2.00	2.16	-1.91	-2.21	0.00
ACM	-3.19	-1.62	-4.29	-3.55	-1.92	2.94	1.72	0.00	3.74
ワ*ACM	7.23	3.59	7.62	-3.52	-3.84	6.36	-3.28	0.00	0.00

に基づく計算値、また重回帰式とその係数の t 値を示した。これらは応答値が大きい海側面の結果を示している。計算値と実測値が概ね一致していることが見てとれる。 t 値は、係数の影響度の度合いを表す指標として用いることができる。図-8 の付着塩分量の t 値に着目すると、5%有意水準で有意となった説明変数は湿度と波浪であった。前者はマイナス値、後者はプラス値を示している。これは湿度が上がれば付着塩分は減少し、波の有義波高が高ければ付着塩分は増大することを示唆している。ワッペン膜厚増分と ACM 電気量については t 値の正負や有意性について一部異なるが、これらの評価については後述の(4)節にて改めて議論する。

月毎の応答値を記録できている ACM 電気量について、過去 5 年分の気象データを入力し、重回帰式に基づいて応答値を推定した結果を図-11 に示す。冬期に腐食が進行する日本海沿岸地域特有の傾向を示すことが出来ており、算出した重回帰式に一定の妥当性を与えている。さらに海側面の応答値が山側面のそれと比較して卓越している点についても実測値と同様の傾向を示せており、重回帰式の妥当性を高めている。

(4) 気象外乱が腐食応答へ及ぼす影響の検証

回帰式の係数に着目し、外乱が腐食応答へ及ぼす影響について t 値の値を検証する。ACM センサの積分値とワッペン膜厚の応答には正の相関(図-6 の各計測間隔毎の増分量と、その期間に応じた図-5 の各計測間隔毎の積分値の相関係数 0.5004)があり、両腐食応答に共通する係数を把握することで、外乱が腐食応答に及ぼす影響の一般的な傾向の把握を試みた。

ACM 電流値とワッペン膜厚の回帰式について t 値を表-2 にまとめた。表中の最下段は各説明変数の t 値同士を掛け合わせた値である。 t 値の積が正の値であれば、同じ傾向を示している可能性があり、太字で表している。

t 値の積が正の値を示した説明変数の内、マイナス値同士の積であったのは、風、雨、気温であった。一方、プラス同士の積は、風と雨の相互作用変数であった。この結果によれば、風、雨、それぞれが単体で作用すること、また気温の上昇によって、腐食進行を抑える効果があることを示唆している。風、気温は表面の乾燥に寄与すること、雨については、塩化物等の躯体表面の付着物を落とす影響を有する可能性が考えられる。雨と風の相互作用については、同時に作用するときに腐食応答を増加させることを示唆している。風と雨の同時作用により水分が供給される現象があり得ること、また対象橋梁が海岸部に位置する条件から、風と雨が同時に作用する状況は波浪が激しい場合と同時生起することが多いため、飛来塩分の供給が風と雨の項目に含まれていることなどの現象が考えられる。

5. 結言

本研究は、飛来塩分量の多い海岸部に位置する橋梁に対し、1 年以上の腐食応答モニタリングを実施した。また、風、降雨量、気温、湿度、波浪の気象データを外乱値として援用し、腐食応答値を目的変数とした重回帰分析を行った。重回帰式の妥当性を、腐食応答の季節変動性、及び海側面、山側面の腐食応答レベルの大小関係から確認したうえで、各説明変数にかかる t 値を評価し、腐食要因を洗い出した。以下に得られた知見と今後の課題をまとめる。

- 1) 飛来塩分が多く、なおかつ腐食応答に季節依存性がある地域の橋梁において、橋梁躯体に付着した塩化物量は、時期によっては雨がかりが無い部位において、減少する場合がある。
- 2) 1 年間蓄積する腐食応答データに対し、気象データを外乱の説明変数として用い、相互作用項を入れた重回帰分析を行うことで腐食応答傾向を表す評価式を導出することができる。ただし、評価式の妥当性は対象とする橋梁の腐食応答の季節変動性や部位別の差異等の応答性状を反映しているかを確認することが必要である。
- 3) 重回帰式で算出される各係数の t 値について、正の相関のある腐食応答値に着目し、互いに同符号である変数を把握することにより、腐食因子の洗い出しを進めることができる。本研究の例においては、風と雨の同時作用により腐食に及ぼす影響が大きいことが示唆された。

本研究で提案する分析手法は、腐食の外乱と応答に線形関係があることを基にしている。風の影響に伴う飛来塩分の飛散は累乗平均に依存し得ること¹¹⁾や、桁内空間への気流の巻き込みによる非線形性¹²⁻¹⁴⁾により、非線形項を入れた分析によっては、より高度な評価式を提案できる可能性があり、この点は今後の課題である。

参考文献

- 1) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文集 No.668/I-54, pp.299-311, 2001.
- 2) 玉越隆史, 大久保雅憲, 市川明広, 武田達也: 橋梁の架替に関する調査結果 (IV), 国土技術政策総合研究所資料 No.444, 2008.3.
- 3) 下里哲弘, 本田博幸, 有住康則, 淵脇秀晃: 約 30 年曝された無塗装仕様耐候性鋼橋のさび評価と腐食減耗特性, 鋼構造論文集, 第 21 巻, 第 81 号, pp.79-87, 2014.
- 4) 田辺篤史, 佐々木栄一, 三木千壽: 腐食環境センサ計測に基づく耐候性鋼材の腐食量推定法, 土木学会

- 論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.2, pp.275-282, 2013.
- 5) 広瀬望, 武邊勝道, 大家誠, 佐藤誠: 腐食環境評価の高度化に向けた鋼材への付着塩分量の推定のための基礎的検討, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.605-612, 2014.
 - 6) 紀平寛, 田辺康児, 楠隆, 竹澤博, 安波博道, 田中睦人, 松岡和巳, 原田桂幸: 耐候性鋼の腐食減耗予測モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.780/I-70, pp.71-86, 2005.
 - 7) 福井県橋梁管理マニュアル, 2009.
 - 8) 吉田翔太, 鈴木啓悟, 佐々木栄一, 近藤泰光: 日本海沿岸地域に位置する鋼橋の付着塩分量調査研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol.22, pp.482-488, 2014.11
 - 9) 平尾みなみ, 貝沼重信, 道野正嗣, 今村壮宏: 鋼道路橋の各部位に設置した裸鋼板の腐食生成物層の厚さと平均腐食深さの相関評価, 第 62 回材料と環境討論会, C-103, pp.213-215, 2015.11
 - 10) 北川源四郎: 時系列解析入門, pp55-59, 岩波書店, 2005.
 - 11) 岩崎英治, 永藤壽宮, 湯浅昭, 西剛広: 凍結防止剤の飛散と鋼橋の腐食, 構造工学論文集 Vol.58A, pp.665-667, 2012.
 - 12) チェンデラ・ロナルド, 勝地弘, 山田均, 佐々木栄一: 橋桁周りの飛来塩分挙動推定に関する研究, 構造工学論文集 Vol.58A, pp.528-541, 2012.
 - 13) 岩崎英治, 伊藤俊, 小島靖弘, 長井正嗣: 数値シミュレーションによる橋梁断面周辺の飛来塩分の推定, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, 2010.
 - 14) 小畑誠, 長谷川高士, 永田和寿, 後藤芳顕: 固気相流解析による飛来塩分の付着シミュレーション, 構造工学論文集 Vol.54A, pp.590-598, 2008.

(2016.6.24 受付)

CORROSIVE ENVIRONMENT MONITORING FOR BRIDGES IN COASTAL AREA AND STATISTICAL ANALYSIS FOR CORROSIVE FACTORS

Keigo SUZUKI, Shota YOSHIDA, Eiichi SASAKI, Koichi TAKEYA,
Kenji MAEDA and Yasumitsu KONDOH

Corrosive sources, such as water and chlorides, for infrastructures are influenced by wind direction, wind velocity, temperature, humidity, rainfall, sea waves and so on. This study discusses relations on corrosive damage on bridges between meteorological data and corrosive responses. With the multiple regression model, the seasonal tendency of corrosive responses is shown; in addition, the evaluation of t-values shows that the simultaneous effects of rainfall and wind predominantly affect to induce corrosive responses.