

機関番号：17301
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560446
 研究課題名(和文) 定量的・客観的さび外観評価による耐候性鋼橋梁のマイクロ・マクロ劣化環境評価
 研究課題名(英文) Study on micro-macro deterioration assessment of weathering steel bridges by the quantitative and objective rust appearance evaluation
 研究代表者
 森田 千尋(MORITA CHIHIRO)
 長崎大学・生産科学研究科・准教授
 研究者番号：60230124

研究成果の概要(和文)：本研究は、ACMセンサーや温湿度計などを架設環境の異なる耐候性鋼橋梁に設置し、さびの生成状況とミクロ的な腐食環境との相関を定量的に評価することを目的としている。さびの生成状況の定量的・客観的な外観評価は、三次元写真計測システムを用いた計測方法を実橋梁に適用した。その結果、ACMセンサーと温湿度計による計測により、腐食状況を把握できることを確認し、また、三次元写真計測システムの実橋梁への適用性を実証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, deterioration assessment of weathering steel bridges constructed in different environment are investigated by employing the Atmospheric Corrosion Monitoring (ACM) sensor, Thermo-Hygro Meter (THM) and Surface Salt Meter (SSM). Moreover the surface roughness of weathering steel bridges is quantitatively evaluated by using Three-Dimensional photography measurement. The correlation of corrosion environment and rust state of weathering steel bridges is also clarified in this study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：構造力学、維持管理工学

科研費の分科・細目：土木工学／構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：維持管理、耐候性鋼橋梁、さび外観評価、劣化環境評価、三次元写真計測

1. 研究開始当初の背景

耐候性鋼材は、普通鋼材にCu, Cr, Ni等の合金元素を添加することにより、年月の経過とともに表面に緻密で密着性の高い保護性さびが形成され、腐食速度が普通鋼材に比べ低下する鋼材である。これを適切な計画、設計、施工の下で橋梁に使用することにより、無塗装の場合でも優れた防食性を発揮し、LCC(ライフサイクルコスト)の少ないミニマムメンテナンス橋梁が可能となる。このこ

とから、我が国の鋼橋建設量の中に占める耐候性鋼橋梁の比率は導入初期よりほぼ一環して増加の傾向を示しており、2005年には20%を超えている。

しかしながら、耐候性鋼橋梁の採用の背景には、メンテナンスフリーという意識があることから、管理者側においては、実態がどのようになっているかフォローされていない状況である。特に実橋梁におけるさびの生成状況と環境条件との相関を詳細に調査した

事例はあまりなく、また、鋼材の暴露試験の結果と実橋梁の状況との対応についても未解明な点が多く、一般的な耐候性鋼材を無塗装で問題なく使用するためのデータは必ずしも十分でないのが現状である。

一方で、耐候性鋼橋梁の成否は保護性さびの生成状況に大きく左右されるが、現在、この保護性さびの良し悪しを判断するさびの状態評価を行うには外観目視が基本とされている。外観評点の評価では、橋梁全体評価と局所評価に分けて、目視とセロファンテープ試験により5段階に評価している。しかしながら、目視がゆえに検査者の立場により評価がばらつき、客観性に欠ける可能性があるため、何らかの方法によりさび状態を定量化する必要がある。

以上のような状況を踏まえ本研究においては、さびの生成状況と腐食環境との相関を定量的に評価し、相関関係の妥当性を定量的に検証する。また、さびの生成状況の確認においては、三次元写真計測システムを用いた計測方法を適用し、実橋梁に対応した計測方法を検討する。

2. 研究の目的

本研究においては、ACM センサーと温湿度計をいくつかの橋梁に設置し、さびの生成状況とミクロ的な腐食環境との相関を定量的に評価する。さびの生成状況の定量的・客観的な外観評価は、三次元写真計測システムを用いた計測方法を適用し、実橋梁に対応した計測方法を検討するのが目的であり、以下の問題点について検討する。

(1) さびの生成状況と環境条件との相関の解明

過去の調査で明らかとなったさびの状態が著しく悪い九州内の耐候性鋼橋梁を抽出し、ACM センサー・温湿度計を設置して、年間の腐食電流と温湿度の計測によりミクロ的な環境条件を把握し、相関関係の妥当性を定量的に検証する。

(2) さび状態の定量化

三次元写真計測システムを用いて、さび表面を計測することによりさび状態を定量化する。照度、撮影距離など種々のパラメータによる計測により、このシステムの適用限界を明らかにする。

(3) 三次元写真計測システムの実橋梁への適用

実験室レベルにおいてさび状態を定量的に評価できたならば、実橋梁への適用可能性を検討する。実橋梁においては、十分な照度あるいは桁下空間が確保できない場合があるため、これらを克服できる計測方法を検討する。

3. 研究の方法

調査対象橋梁は、九州内に既設する耐候性鋼橋梁である。対象橋梁の詳細を表1に、橋梁の外観写真を写真1、2に示す。

表1 調査橋梁詳細

橋梁	A	B
竣工年月	1999年3月	2009年3月
離岸距離	12km	2km
構造形式	単純鋼桁橋	4径間連続箱桁橋
主桁数	4主桁	2主桁
橋長	54m	228m
支間長	53m	61m(最大)
総幅員	8.2m	12m
橋軸方向	南北	東西



写真1 橋梁Aの外観写真



写真2 橋梁Bの外観写真

橋梁Aは、桁端部での桁下空間は高さ0.5m~3mと非常に狭く、周囲は植物に覆われているため、空気の滞留がみられる。また、離岸距離は約12kmと十分な距離があり、凍結防止剤を使用していないことから、飛来塩分の影響はないと考えられる。橋梁Bは、外海からは約5kmと離れているが、入り組んだ地形を考慮すると、離岸距離は約2km程度である。海水流路上に架かっており、下を流れる海水流路が静穏な時には、波浪による飛沫などはほとんど観測されないが、桁下空

間が低い箇所もあり、台風などの暴風時には海水飛沫が直接降りかかることも十分に想定される。

橋梁 A に関しては、桁下空間が狭いことと周囲を植物に覆われているという点、橋梁 B に関しては、さびの生成段階であり海水流路上という点を考慮し、この 2 橋を調査橋梁とした。

(1) さびの生成状況と環境条件との相関の解明

腐食環境調査に用いる計測器具を、写真 3 に示す。ACM 型腐食センサーとは、互いに絶縁された二つの異種金属 (Fe/Ag) で構成される。センサーは大気環境下に放置されると降雨や結露により表面に薄い水膜を張り、それが Ag, Fe 両金属を連結し、腐食電池を形成し、腐食電流を流すことになる。このようにして計測された電流値より、腐食速度の算出ができる。ただし、腐食速度を求める式は炭素鋼で用いる計算式であるため、耐候性鋼材にそのまま用いることは有用ではなく、あくまでも相対的に比較するために用いる。この電流を計測した結果、温湿度計による計測結果、気象庁より得た調査対象橋梁の架設位置に最も近い気象観測点の 24 時間の降水量データ、さらに、表面塩分計を用いた飛来塩分量の計測結果より、周囲の環境を解析することで、腐食環境調査を行った。



写真 3 ACM センサー、温湿度センサー、USB 型温湿度計、表面塩分計

橋梁 A について、計測器具の設置箇所を図 1 に示す。計測器具は、南側支承から約 3m 付近に設置した。また、計測対象とした G1 桁、G4 桁外内側におけるさびの状態を写真 4 に示す。橋梁 A のさびの状態に関して、桁下空間が狭く、植物に覆われている G4 桁は G1 桁に比べ、さびの状態が悪く、特に内側では水の伝ったあとや層状剥離さびが多く見られる。

橋梁 B について、計測器具の設置箇所を図 2 に示す。計測器具は、東側支承から約 1~

2m 付近に設置した。また、計測対象とした G1 桁、G2 桁のうち、G1 桁外側、内側のさびの状態を写真 5 に示す。橋梁 B に関しては G1 桁、G2 桁におけるさびの状態の違いはほとんどなく、特に問題のあるさびは発見されていない。

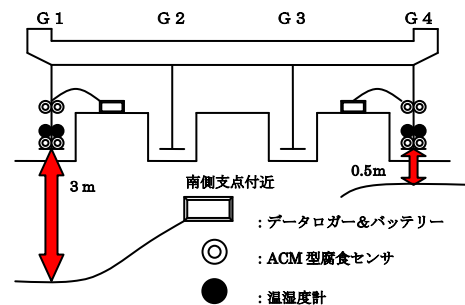


図 1 橋梁 A の計測器具設置箇所



写真 4 橋梁 A のさびの状態
(左上: G1 桁外側、右上: G1 桁内側
左下: G4 桁外側、右下: G4 桁内側)

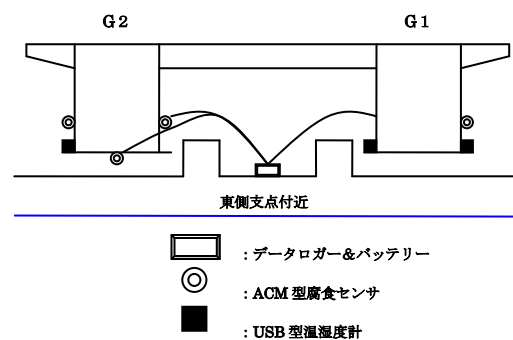


図 2 橋梁 B の計測器具設置箇所



写真 5 橋梁 B のさびの状態
(左: G1 桁外側、右: G1 桁内側)

(2) さび状態の定量化

本研究に用いる三次元写真計測システムは、三角測量を基本とするステレオ法により、撮影対象の三次元座標を算出することが可能である。写真計測に用いる画像の撮影方法の概要は、図3に示すとおりデジタルカメラを用い、3枚の異なる方向の画像をデータとする。

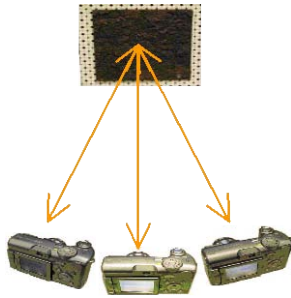


図3 撮影概要

これにより得られた三次元座標から、JIS B 0601-1994に定義されている工業製品の表面粗さを表すパラメータである算術平均粗さ (Ra) を算出し比較する。

4. 研究成果

(1) さびの生成状況と環境条件との相関の解明

各橋梁の計測期間は、橋梁 A においては2008年6月～2011年3月、橋梁 B においては2009年7月～2011年3月である。

ある期間の橋梁 A の ACM センサーで計測した電流値と、降水量データの一例を図4に示す。電流値は降水量の増加とともに増加しており、特に桁外側に関しては、内側に比べ直接降雨にあたることから、降水量が高いと電流値が高くなっていることが分かる。

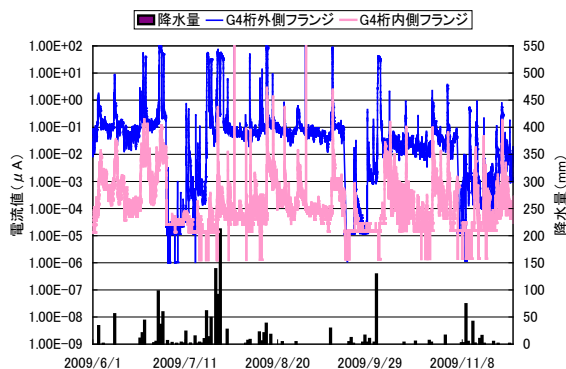


図4 橋梁 A : G4 桁の電流値と降水量

次に、橋梁 A の部位別の電流値から求めた腐食速度と平均湿度を表2、3にそれぞれ示す。腐食速度および平均湿度は G4 桁が明ら

かに高く、G4 桁に関しては外側と内側との差は少ないことが言える。G1 桁に関しては、桁下空間が広いとため、雨が直接降りこみやすく、空気の循環も比較的良好であるため、濡れやすく、乾燥もしやすいと考えられる。これらの結果は、橋梁 A の腐食状況と一致している。

表2 橋梁 A の腐食速度の比較

G1 桁外側	G1 桁内側	G4 桁内側	G4 桁外側
0.1711	0.1810	0.2731	0.3278

単位[mm/year]

表3 橋梁 A の平均湿度の比較

G1 桁外側	G1 桁内側	G4 桁内側	G4 桁外側
78.94 %	65.87 %	82.25 %	83.86 %

さらに、橋梁 B において、計測された電流値より求めた腐食速度を表4に示す。表より、内側と下フランジの腐食速度は非常に低く、箱桁のような構造形式では直接雨が当たりにくいのではないかと考えられる。また、G1 桁、G2 桁ともに外側の腐食速度は高いが、橋梁 A と比較すると、比較的良好な G1 桁外側よりも低い値である。橋梁 B の腐食状況は特に問題ないことから、これらの結果も実状を表している。

表4 橋梁 B の腐食速度の比較

G2 桁外側	G2 桁下	G2 桁内側	G1 桁外側
0.0929	0.0088	0.0075	0.1229

単位[mm/year]

橋梁 B は、離岸距離が 2km で海水流路上にあり、飛来塩分の影響が考えられるため、表面塩分計を用いた計測を行った。付着塩分量計測の代表的な計測位置を図5に示す。

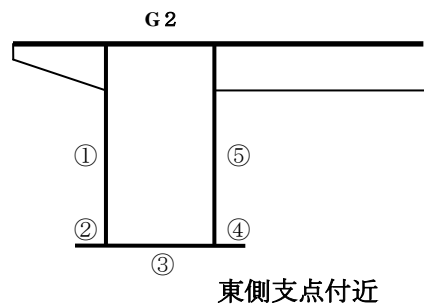


図5 橋梁 B の付着塩分計測位置

塩分の蓄積を確認するため、計測後、洗浄を行っている定点とは別に、別点1、別点2で計測を行った。蓄積された付着塩分の計測結果を表5に示す。表より、ウェブ (①, ⑤) は定点とほぼ同じであるのに対し、下フランジ上面 (②, ④) および下フランジ下面 (③)

では、定点よりも非常に高い値を示している。この値は、初期状態に望まれる付着塩分許容量 100mg/m² を超える結果となっており、付着塩分が蓄積されていることが考えられ、本橋梁のような架設環境における橋梁の各部位における付着塩分の堆積傾向を確認した。

表 5 付着塩分の蓄積

	①	②	③	④	⑤
定点	13.6	82.0	84.2	61.0	38.4
別点 1	14.1	107.2	354.0	95.4	60.1
別点 2	13.8	112.7	436.0	99.7	52.7

単位[mg/m²]

(2) さび状態の定量化

計測に用いる供試体は写真 6 に示すような「さびサンプル携帯版」を使用した。さびサンプルは評点 1 から評点 5 までを各 3 枚ずつとし、計 15 枚で計測を行った。写真計測の精度の確認には触針試験を用いた。



写真 6 さびサンプル携帯版
(左: 評点 2、右: 評点 3)

実橋梁における桁下等では十分に照度が得られない場合があり、照度を変化させた計測が可能か調べるため、自然光のみでの写真計測を評点 2 と評点 3 のさびサンプルを用いて行った。両者の計測結果と触針試験の算術平均粗さを表 6 に示す。表より、照度 100lx 未満ならば大幅な誤差が生じたが、100lx 以上ならば比較的妥当な結果が得られた。よって自然光のみでも 100lx 以上であれば計測可能であると考えられる。

表 6 照度変化の計測結果 (単位: mm)

照度 (lx)	評点 2	評点 3
800 以上	0.80	0.49
400~600	0.86	0.43
200~400	0.84	0.46
100~200	0.92	0.51
100 未満	1.25	0.78
触針試験	0.85	0.50

橋梁によっては桁端部まで近づけない場合があり、近距離での撮影が困難な状況がある。様々な地形に存在する橋梁に対応するため撮影距離を変化させたときの計測結果を表 7 に示す。撮影距離を 4.0m とした場合で

も 1.0m の場合と大差なく、評点 2 と評点 3 の判別が明確であると考えられる。

表 7 撮影距離変化の計測結果 (単位: mm)

撮影距離	評点 2	評点 3
1.0m	0.89	0.52
2.0m	0.80	0.53
4.0m	0.80	0.53
触針試験	0.85	0.50

さらに、表 8 に示す画素数の変化では、200 万画素までは誤差は少なく、携帯電話搭載の CCD カメラでの計測においても他と遜色ない結果が得られ、比較的低い画素数のカメラであっても評点の判別が可能であると考えられる。

表 8 画素数変化の計測結果 (単位: mm)

画素数	評点 2	評点 3
710 万画素	0.81	0.41
約 500 万画素	0.86	0.38
約 315 万画素	0.88	0.45
200 万画素	0.83	0.45
CCD カメラ	0.85	0.30
触針試験	0.83	0.37

以上の結果から、供試体を様々な撮影条件で計測したデータから得られた算術平均粗さと評点の相関を図 6 に示す。この評点判別基準値を用いることにより、実橋梁でのさび外観評価を行った。

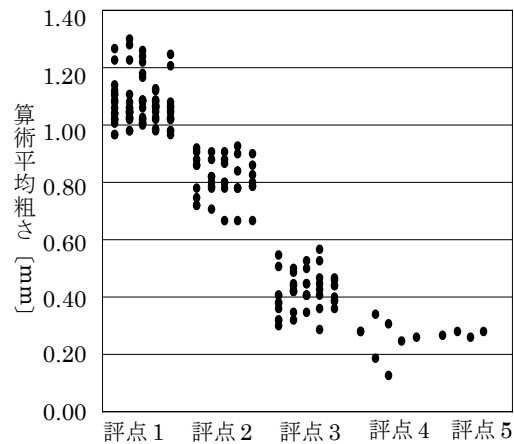


図 6 算術平均粗さと評点の相関
(評点 1: 悪い~評点 5: 良い)

(3) 三次元写真計測システムの実橋梁への適用

最後に、三次元写真計測システムの実橋梁への適用性を検討するために、橋梁 A、B において写真計測を行った。計測箇所を図 7、8 に示す。

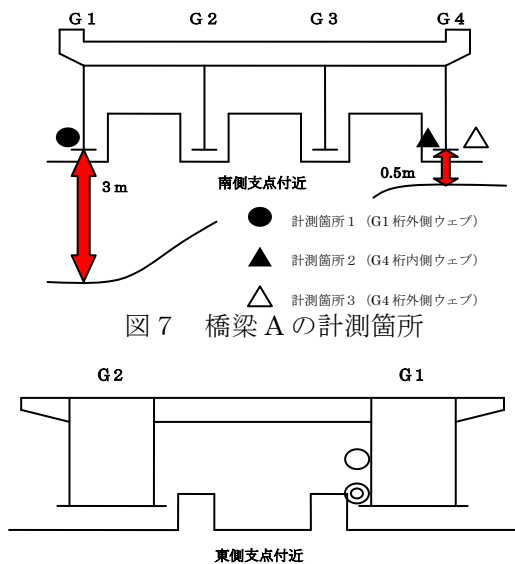


図7 橋梁 A の計測箇所

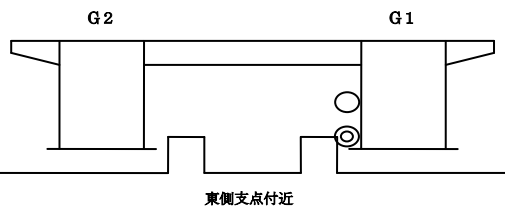


図8 橋梁 B の計測箇所

表9には、写真計測結果とともに既往の判定基準である、セロファンテープ試験およびさび厚計測による評点を示している。表より、写真計測による評点は、セロファンテープ試験またはさび厚計測による結果とほぼ同様の結果となった。

表9 実橋梁の計測結果

計測箇所	写真計測 (mm)	セロファンテープ試験	さび厚計測 (μm)
1	評点 5 (0.15)	評点 3	評点 5 (161.8)
2	評点 2 (0.77)	評点 2	評点 3~4 (367.4)
3	評点 2 (0.78)	評点 2	評点 3~4 (367.4)
4	評点 5 (0.14)	評点 4~5	評点 5 (51.5)
5	評点 3 (0.39)	評点 3	評点 5 (178.1)

これらの結果と腐食環境調査との関係を考察すると、橋梁 A では、腐食速度が低い G1 桁側 (計測箇所 1) は評点 5 であり、腐食速度の高い G4 桁側 (計測箇所 2, 3) の評点が 2 となり一致している。橋梁 B では、腐食環境調査結果は比較的良好で、計測結果の評点も 3~5 と良好な結果であり、腐食環境調査結果とさび外観評価の相関性を確認した。

以上により、本研究においては、定量的・客観的さび外観評価手法を検討し、耐候性鋼橋梁のマイクロ・マクロ劣化環境を評価できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① 森田千尋、池田喜輝、松田浩、出水亨、白濱敏行、架設環境の異なる耐候性鋼橋梁の劣化環境評価に関する研究、鋼構造年次論文報告集、査読有、第 18 巻、2010、pp.571-578
- ② 森田千尋、魚住正春、松田浩、出水亨、白濱敏行、耐候性鋼橋梁の腐食環境調査と三次元写真計測の適用について、鋼構造年次論文報告集、査読有、第 17 巻、2009、pp.739-744
- ③ 奥松俊博、B.A.Jawaid、岡林隆敏、下妻達也、遠隔モニタリングによる離島架橋の風速と振動数推定精度の検証、構造工学論文集、査読有、Vol.55A、2009、pp.275-283
- ④ 森田千尋、魚住正春、松田浩、黄美、白濱敏行、耐候性鋼橋梁の腐食性評価および外観評価に関する研究、査読有、第 16 巻、2008、pp.657-662

[学会発表] (計 5 件)

- ① 三明宏志、長崎市周辺にある小規模鋼橋の劣化状況について、平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会、2011 年 3 月 5 日、九州工業大学 (北九州)
- ② 池田喜輝、架設環境の異なる耐候性鋼橋梁の劣化環境評価について、土木学会第 65 回年次学術講演会、2010 年 9 月 1 日、北海道大学
- ③ 魚住正春、耐候性鋼橋梁の腐食環境およびさび外観評価に関する研究、土木学会第 64 回年次学術講演会、2009 年 9 月 2 日、福岡大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田 千尋 (MORITA CHIHIRO)
長崎大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60230124

(2) 研究分担者

松田 浩 (MATSUDA HIROSHI)
長崎大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20157324
奥松 俊博 (OKUMATSU TOSHIHIRO)
長崎大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：30346928