

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06181

研究課題名(和文) 耐候性鋼材の長寿命化のための腐食進展モデルの構築と塩分除去技術の開発

研究課題名(英文) Development of corrosion evolution model and salt removal technique for life-prolonging of weathering steel

研究代表者

麻生 稔彦 (Aso, Toshihiko)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：30231921

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：耐候性鋼橋梁を適切に維持管理し、長寿命化をはかるためには、鋼材表面に生成するさびの評価手法、さび進展予測手法および効果的な補修技術の確立が必要不可欠である。本研究では、耐候性鋼材上の塩水により生成される初期さびの成長をモデル化した。また、塩化ナトリウムの潮解性による吸水挙動についても定式化した。

腐食した耐候性鋼材を補修する場合には、鋼材表面の塩分除去が必要である。そこで、本研究では炭酸ナトリウムによる内在塩分の除去を試みた。曝露試験の結果より、顕著な再腐食は認められず、内在塩分はある程度除去できたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：To properly maintain and manage weathering steel bridges and to prolong the life, it is necessary to establish the rust evaluation method which was generated on surface of steel, the subsequent rust development prediction method and effective repair technique. In this study, the early rust growth generated by salt water on weathering steel was modeled. We also formulated the water absorption behavior due to the deliquescence of sodium chloride. In repairing corroded weathering steel, it is necessary to remove the salt on steel surface. Therefore, in this study, attempt was made to remove the intrinsic salt content by sodium carbonate. From the result of the exposure test, no remarkable re-corrosion was observed, and it is considered that the intrinsic salt content could be removed to some extent.

研究分野：土木工学

キーワード：耐候性鋼材 腐食 補修

1. 研究開始当初の背景

耐候性鋼材は緻密な保護性さびを生成させることにより腐食速度を低下させ、防食性能を発揮させる鋼材である。そのため、耐候性鋼材は防食塗装を必要としない裸仕様が可能であり、LCC 低減の観点から近年において橋梁への適用が増加し、現在では新設される鋼橋の 25% 程度となっている。

これまでの耐候性鋼橋梁における保護性さび(あるいは腐食)に関する研究は、主として実橋梁を対象におこなわれてきた。これまでの研究より、全ての場合に良好な保護性さびが形成されるとは限らず、異常な腐食性のさびが生じ今後補修が必要な橋梁も少なくないことが明らかとなっている。

耐候性鋼橋梁を適切に維持管理し、長寿命化をはかるためには、鋼材表面に生成するさびの評価手法、さび進展予測手法および効果的な補修技術の確立が必要不可欠である。このうち、さびの評価手法についてはイオン透過抵抗による方法、セロテープ試験の高度化による方法等の研究が進んでいる。しかし、さび進展予測手法と効果的な補修技術についての研究は進んでいない現状にある。

さび進展予測は、対象とする部材の保有耐力を長期にわたり評価するために必要な技術である。腐食した鋼材の耐荷力を評価する場合、現状では鋼材表面の形状のみを確率論より擬似的に再現したモデルを使用することが多い。しかし、この手法は鋼材の腐食過程を考慮しておらず、将来的な腐食進展を考慮することはできない。そのため、長期的な耐荷力の評価は困難である。また、効果的な補修技術については、今後の需要が多いにもかかわらず、その実施例が少なく、ほとんど成果が示されていない。申請者らは実橋梁に対して部分補修塗装を実施し補修方法の一部を示した報告もあるが、本質的に重要なさび層内部の塩分除去に関する研究は進んでいない。

2. 研究の目的

耐候性鋼材の表面に発生するさびの生成には、塩化物(主として塩化ナトリウム)や温湿度および鋼材の濡れ時間が影響すると考えられている。しかし、これらの影響を定量的に評価しうるさび生成・進展モデルはこれまでに得られていない。そこで個々の影響を定量的に評価するための腐食実験を行い、さびの生成に与える影響を明らかにした上で、この成果をもとに、時間的空間的なさびの進展が評価可能なモデルの構築をめざす。

また、耐候性鋼材のさびが予想を超えて進行する場合、その多くは塩化物による促進作用を受けている。そのため、さび層内あるいはさび層下面の地鉄表面に存在する塩化物の除去が必要となる。従来、水洗いやブラストが行われているが、水洗いではさび層表面の塩化物しか除去できず、ブラストは設備が

大掛かりとなりその実施は困難な場合がある。申請者らは炭酸ナトリウムを用いることによりさびの進行が抑えられることを明らかにしており、これを援用して、新たな塩化物除去方法を検討する。

3. 研究の方法

(1) 耐候性鋼材表面のさび生成過程の解明

(a) さびの 2 次元的広がり

さびの進展は鋼材表面における 2 次元的進展と、鋼材の減耗あるいは腐食生成物の生起による 3 次元的な進展がある。このうち、本研究では 2 次元的進展を対象とする。曝露実験には 70 × 70 × 6(mm)の耐候性鋼材を使用する。鋼材には塩化ナトリウムを純水で希釈した 0.02ml の塩水を滴下した後、水分の乾燥を待って、小型環境試験器内に設置する。今回の実験では濃度 0.3%、1%および 3%の塩水を滴下した鋼材および塩水を滴下しない鋼材を同時に曝露する。表-1 に小型環境試験器の環境条件を示す。曝露実験開始後の鋼材は 1 日に 1 回写真撮影を行う。撮影した画像は滴下部分を中心に 280 × 280 画素にトリミングした後に、画像処理ソフトを用いて、RGB 成分の Green 成分のみを抽出する。Green 成分抽出画像において粒子解析を行い、腐食部分の面積率をこの抽出画像について算出する。ここで面積率とは、トリミング画像全面積に対するさび部分面積の割合とする。

表-1 環境条件、塩水条件

	温度-湿度	滴下塩水濃度
Case1	40 -95%	滴下なし
Case2	40 -50%	0.3%
Case3	20 -50%	1%
Case4	20 -95%	3%

(b) NaCl の保水挙動

塩分の潮解性による保水挙動を明らかにするために、塩化ナトリウムを用いた検討を行う。塩化ナトリウムをのせたシャーレを小型環境試験器内に設置する。本研究では単位面積当たりの塩分量が 11.83mg/m²、23.66 mg/m²、47.32 mg/m²、118.3 mg/m²、236.6 mg/m²、946.3 mg/m²、2366 mg/m²となるように塩化ナトリウムを供給した。実験開始後、シャーレ全体の質量を測定し、測定値より水分量を算出する。実験は湿度 75%以上の環境での吸水挙動および、湿度 75%以下での乾燥挙動を観察する。

(2) 炭酸ナトリウムによる腐食抑制効果の解明

3% wt-NaCl 散布試験によりさび外観評点 1 の層状剥離さびを生成させた JIS-SMA 耐候性鋼材(150mm × 70mm × 6t)について、Rc-1 による補修塗装の下地処理に炭酸ナトリウムを使用した場合と、通常のブラスト処理の場合、およびブラスト処理と水洗を組み合わせた場合の試験片を作成した。これらの試

試験片に対し、外界からの腐食因子の影響を受けない（腐食原因が排除できる場合）密封箱内曝露（山口県：平均相対湿度 77.3%，平均温度 18.5 ）および外界からの腐食因子の影響を受ける（腐食原因が排除できない）遮へい曝露（沖縄県：ISO9223-92 腐食分類 C₄）の 2 通りの曝露試験を実施した。なお、いずれの曝露試験も試験片は水平に設置した。

4. 研究成果

(1) 耐候性鋼材表面のさび生成過程の解明

(a) さびの 2 次元的広がり

図-1(a)および(b)に 3%塩水を滴下した後、温度 40℃、相対湿度 95%で曝露した鋼材の 1 日目と 30 日目の状況を示す。30 日の間に、塩水を滴下した箇所は色調が黒色に変化しており、さびの進展が明瞭に確認できた。塩水滴下箇所以外でも全面腐食の発生が認められるが、今回はこれらの全面腐食は検討対象としていない。図-1(b)に示す画像から Green 成分を取り出すと図-1(c)になり、これを粒子解析した結果を図-1(d)に示す。同様の手順により、すべての画像について面積率を算出した。図-2 は相対湿度が同じで、温度が異なる Case1 と Case4 の面積率の経時変化である。いずれの Case においても 3%塩水を滴下した鋼材での面積率が大きく初期に供給された塩分の影響が確認できる。しかし、Case1 と Case4 では面積率の増加傾向は異なっており、3%塩水滴下時に 20 日経過後には Case1 で面積率が 25%に対し、Case4 では 3%にとどまっている。この傾向は塩水濃度によらず示されており、さびの進展に温度が大きく影響することが明らかになった。この傾向は湿度を低くした Case2 と Case3 との比較でも確認できた。一方、温度が等しく、湿度が異なる Case1 と Case2, Case3 と Case4 の比較では両者に大きな差は認められ

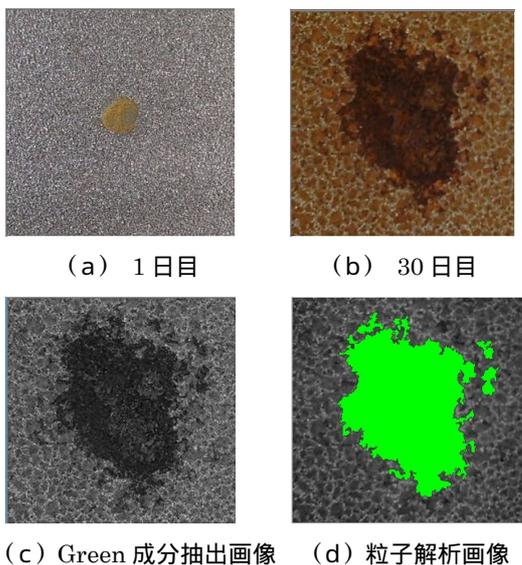


図-1 Case1 における 3%塩水滴下鋼材

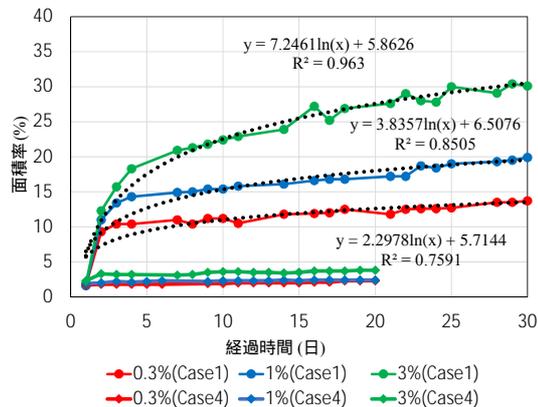


図-2 腐食部分の面積率の経時変化(Case1, Case4)

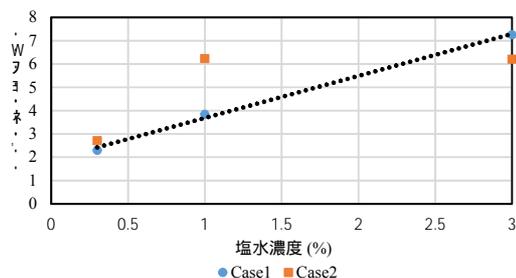


図-3 近似曲線式の係数と塩水濃度の関係

なかった。さびの進展が明瞭に認められた Case1 および Case2 についてさび面積率の近似式を求めた。図-2 中に対数式による近似式を破線で示す。これらの近似式は観測した面積率をよく近似しており、いずれの場合も決定係数は 0.75 以上であった。図-3 は Case1 と Case2 において得られた対数項の係数と塩水濃度との関係を示したものである。また、図-7 に対数項の切片と塩水濃度との関係を示す。Case1 では係数と切片のどちらも塩水濃度と線形関係が認められた。これらの結果より、Case1 におけるさび進展予測式を算出した。

$$y = (1.805c + 1.876) \ln(x) + 6.027 \quad (1)$$

ここで c : 塩水濃度(%), x : 経過日数(日), y : さび進展面積率(%)である。

Case1 においてすべての塩水濃度(0.3%, 1%, 3%)の場合で、(1)式より得られた予測値と実測値は同程度であった。一方、Case2 では係数と切片のいずれも塩水濃度と線形関係が認められなかった。これは Case2 の 1%塩水滴下鋼材において 10 日目以降のさびの進展が Case1 の場合と比べて大きいためである。この原因は不明であるため、再検討が必要である。また、実験条件を増やすことにより検討する必要がある。

(b) NaCl の保水挙動

塩化ナトリウムの保水挙動を検討するために、表-2 に示すパターンで実験を行った。図-4 にパターン 1 およびパターン 2 における吸水量の変化を示す。これよりパターン 1 において塩分量が多いほど吸水量が多くなっていることがわかる。パターン 2 においても

表-2 器内環境の設定パターン

パターン1	40	- 80%	40	- 70%
パターン2	40	- 95%	40	- 70%
パターン3	40	- 95%	40	- 70%
パターン4	40	- 95%	40	- 70% (3回繰り返し)
パターン5	40	- 95%	40	- 70% (4回繰り返し)
			80	- 40%

パターン1と同様に塩分量が多いほど吸水量が多くなっているため、同湿度における塩化ナトリウムの吸水量は塩分量により異なることが明らかとなった。図-4よりそれぞれの塩分量において吸水量はパターン2で大きくなっており、同量の塩化ナトリウムでの吸水量は湿度に依存することが明らかとなった。図-5にパターン2およびパターン3における乾燥挙動を示す。図-5よりパターン2およびパターン3における塩化ナトリウム2366mg/m²の乾燥挙動は対数関数により、測定値を近似可能である。塩化ナトリウム118.3 mg/m², 236.6mg/m²においても対数関数による近似式は測定値とほぼ一致することから、吸収水分の乾燥時間は、塩分量が同じ場合、水分量に依存しないことが明らかとなった。パターン4では乾湿を繰り返し、吸水挙動および乾燥挙動を3回観察した。この結果、塩化ナトリウム47.32mg/m²においても毎回の吸水量の差は小さい。塩化ナトリウム23.66 mg/m², 11.83mg/m²においても3回の吸水量の差は小さく、塩化ナトリウムの潮解性は吸収水分が乾燥後も繰り返し発揮されることが明らかとなった。

パターン4における乾燥挙動はパターン2およびパターン3と同様に対数関数での近似が可能であった。そこで各パターンの実験値から乾燥挙動は以下の式(1)で表現可能である。

$$y = a \ln(x) + b \quad (1)$$

a:係数, b:切片, x:経過時間(h), y:水分量(ml)
ここで、図-6、図-7に塩分量と近似式の係数aおよび切片bの関係を示す。これらより近似式の係数aと切片bのどちらも塩分量と比例関係が認められた。これにより乾燥時間は次式で表現可能である。

$$y = (-0.00005c - 0.0013) \ln(x) + (0.0002c - 0.0046) \quad (2)$$

ここで、c:塩分量(mg/m²), x:経過時間(h), y:水分量(ml)

図-8に耐候性鋼材上で実験を行ったパターン5における重量の変化を示す。図-8では水分乾燥後の重量は増加しており、一方吸水量は減少していることがわかる。水分乾燥後の重量の増加は腐食生成物によるものと考えられる。また耐候性鋼材上の腐食生成物が塩化ナトリウムを取り込んでいるため、乾湿を繰り返すごとに吸水量が減少していると考えられる。このことより耐候性鋼材上での塩化ナトリウムの潮解性はガラス上とは異なる挙動を示すと考えられる。

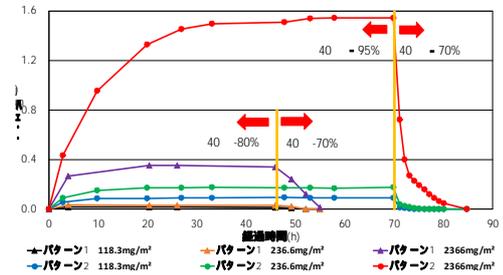


図-4 パターン1・パターン2における水分量の変化

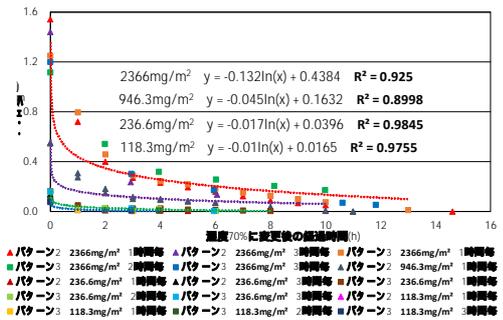


図-5 パターン2・パターン3の乾燥挙動

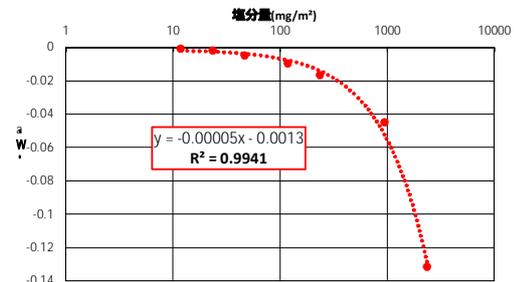


図-6 塩分量と近似式の係数 a の関係

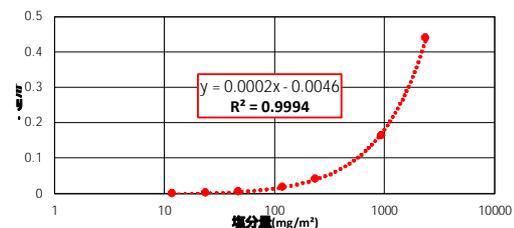


図-7 塩分量と近似式の切片 b の関係

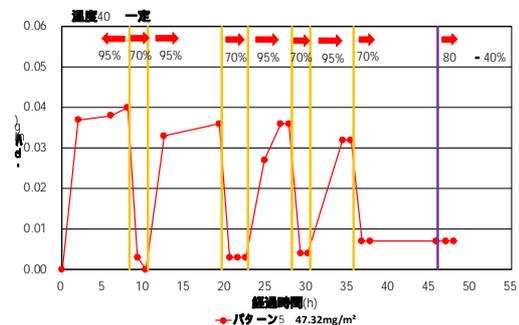


図-8 パターン5における重量の変化

(2) 炭酸ナトリウムによる腐食抑制効果の解明

表-3 に Rc-1 の下地処理として3種類の処理を施した試験片の、カット部平均最大ふくれ幅を示し、表-4 にカット部平均最大さび幅を示す。いずれの下地処理においても、飛来塩分が供給されない密閉箱内では劣化および再腐食はみられない。一方、飛来塩分の影響をうける遮へい曝露では、カット部にさびの生成がみられる。試験条件が少ないため、確定的な評価は困難であるものの、炭酸ナトリウムを用いた場合には、最大さび幅が他の処理よりも小さくなっている。水洗の場合には洗淨水の処理が問題となるため、耐候性鋼材の補修にあたって炭酸ナトリウムの使用も効果的であると考えられる。

表-3 カット部ふくれ幅

密閉箱内曝露 カット部平均最大ふくれ幅 (mm)					
	H28.3	H28.7	H29.1	H29.8	H29.12
プラスチックのみ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
炭酸ナトリウム+プラスチック	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
プラスチック+水洗	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

遮へい曝露 カット部平均最大ふくれ幅 (mm)						
	H27.8	H28.1	H28.7	H29.1	H29.8	H29.12
プラスチックのみ	0.0	1.1	1.1	2.0	3.4	3.4
炭酸ナトリウム+プラスチック	0.0	1.4	1.4	3.7	5.2	5.3
プラスチック+水洗	0.0	0.7	0.7	1.9	5.6	6.0

表-4 カット部さび幅

密閉箱内曝露 カット部平均最大さび幅 (mm)					
	H28.3	H28.7	H29.1	H29.8	H29.12
プラスチックのみ	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
炭酸ナトリウム+プラスチック	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
プラスチック+水洗	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

遮へい曝露 カット部平均最大さび幅 (mm)						
	H27.8	H28.1	H28.7	H29.1	H29.8	H29.12
プラスチックのみ	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	0.6
炭酸ナトリウム+プラスチック	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3
プラスチック+水洗	0.0	0.0	0.1	0.3	0.4	0.4

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- 1) T. MIYASO, K. TAJIMA, and T. ASO, Temperature and humidity environment among cross section of plate girder bridges, Proc. of International Conference on Durability of Building and Infrastructures, 査読有, pp.263-266, 2018.
- 2) K. Kitamura, S. Tachibana, K. Tajima and T. Aso, Water retention behavior of sodium chloride due to deliquescence, Pro. of International Conference on Durability of Building and Infrastructures, 査読有, pp.128-131, 2018.
- 3) R. Nagata, S. Tachibana and T. Aso, The Influence of Temperature and Humidity on Rust Growth on Weathering Steel, Integrated Solutions

for Infrastructure Development, 査読有, doi: 10.14455/ISEC.res.2016.144, 2016.

〔学会発表〕(計5件)

- 1) 永田隆弥, 麻生稔彦, 今井篤実, 西山研介, 秋田悠太, 耐候性鋼材の補修方法に関する基礎的実験, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, pp.13-14, 2017年9月, 九州大学(福岡県福岡市).
- 2) 宮宗哲也, 丸山和人, 麻生稔彦, 田島啓司, 多主桁鋼鈹桁橋の横断面に着目した温湿度環境, 第69回土木学会中国支部研究発表会講演概要集, 1-4, pp.7-8, 2017年5月, 広島大学(広島県東広島市).
- 3) 北村浩太郎, 永田隆弥, 立花周作, 麻生稔彦, 塩化ナトリウムの潮解性による保水挙動に関する基礎的実験, 第69回土木学会中国支部研究発表会講演概要集, 1-3, pp.5-6, 2017年5月, 広島大学(広島県東広島市).
- 4) 今井篤実, 佐野大樹, 麻生稔彦, 腐食原因排除の有無における耐候性鋼橋梁の最適補修方法の検討, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集, pp.87-88, 2016年9月, 東北大学(宮城県仙台市).
- 5) 永田隆弥, 松隈駿, 立花周作, 麻生稔彦, 耐候性鋼材のさび生成に与える温湿度の影響, 第68回土木学会中国支部研究発表会講演概要集, 1-26, pp.51-52, 2016年5月, 広島工業大学(広島県広島市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

麻生 稔彦 (Aso Toshihiko)
山口大学・大学院創成科学研究科・教授
研究者番号: 30231921