

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560582

研究課題名(和文) 耐候性鋼材における保護性さび生成メカニズムと再腐食プロセスの解明

研究課題名(英文) A study of the protective rust generation mechanism and re-corrosion process in weathering steel

研究代表者

麻生 稔彦 (ASO, TOSHIHIKO)

山口大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30231921

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、耐候性鋼材の腐食(さび生成過程)と供給塩分量の関係を曝露試験により検討した。その結果、指数関数により近似できることを示し、パラメーターを提案した。さらに、補修を施した耐候性鋼材の再腐食過程を、2種類の腐食環境における曝露試験により検討した。これより、部分補修塗装では素地調整および塗装部とさび部の境界条件により再腐食過程が異なることが明らかとなった。また、再腐食の抑制にはさび内塩分の除去が有効なもの、飛来塩分が多い環境においては、腐食の進行抑制が困難であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In this study, relationship between the corrosion (rust formation process) on weathering steel and the amount of supply salt was examined by exposure test. Test result shows that rust formation process can be approximated by an exponential function. Parameters in the function could be defined by salt amount. Furthermore, re-corrosion process of repaired weathering steel was examined by exposure tests in two different types of corrosive environments. In partial painting for repair, It became clear that the re-corrosion process is varies with grade of surface preparation. Although the suppression of re-corrosion is enabled with removal of salt in the rust, in the large airborne salt environment, it was revealed that inhibiting the progression of corrosion is difficult.

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ている。

一方、耐候性鋼材での保護性さびの生成には材料学レベルで含有元素に関する検証はなされているものの、実橋梁への適用にあたっては、「乾湿を適切に繰り返す」、「飛来塩分の影響を受けない」、「風通しがよい」など定性的な条件が示されているのみである¹⁾。また、道路橋示方書においても、耐候性鋼材を無塗装で使用する場合の適用地域が大まかに示されているのみであり、耐候性鋼橋梁を適切に計画、設計、維持管理するための定量的な指針は未だ整備されていない現状にある。

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行われてきた。申請者もこれまでに実橋梁を対象にした耐候性鋼橋梁の腐食要因に関する研究を進めている^{2), 3)}。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、条件によっては層状剥離さびまで進展したさびも散見される。実橋梁を対象にした研究は実環境下での腐食挙動を把握するために必要なものであるものの、様々な腐食要因が複雑に影響し個々の腐食要因の定量的な評価が困難である。さらに、耐候性鋼材の保護性さびの生成にはある程度の長年月が必要なため、実橋梁を対象とせざるを得ない状況にもある。そのため、保護性さびの生成メカニズムを明らかにするとともに、比較的短時間で保護性さびを生成させることが可能な試験方法の確立が急務である。

これまでに建設された耐候性鋼橋梁の中には、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。また、予防保全の立場から鋼橋の水洗いも多方面で研究されている。このような補修や維持管理の手法を開発するためには、さび除去後や表面塩分除去後の再腐食プロセスの解明が必要不可欠である。

2. 研究の目的

耐候性鋼材の保護性さびの生成には、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た知見はこれまでに得られていない。そこで本研究では供給される塩分量と、耐候性鋼材のさび生成の関係について明らかにする。このために暴露実験をおこない、得られた結果より定式化を試みる。

さらに、腐食を作成したさび試験片を用い、

高圧水洗やブラスト等による表面塩化物およびさびの除去をおこなう。この試験片を再暴露することにより補修後の耐候性鋼材の再腐食プロセスを解明する。

3. 研究の方法

(1) 腐食過程に与える塩分の影響と腐食モデル化

耐候性鋼材の腐食プロセスの定量的評価および腐食モデルの構築を目的とし、耐候性鋼材の試験片を用いて簡便な噴霧を伴う暴露実験を実施する。暴露実験は 70 × 150 × 9(mm)の耐候性鋼材(JIS-SMA)を試験片として使用する。暴露環境は密閉箱内、雨がかりあり、雨がかりなしの3条件とし、各暴露条件下で試験片を水平に設置した。これらの試験片に1日に1度塩化ナトリウムを純水で希釈し濃度を0.5%、1.0%、2.0%、3.0%としたもの(以後はそれぞれ0.5%、1.0%、2.0%、3.0%塩水とする)を霧吹きにより10回噴霧した。また、比較対象として各暴露条件下で噴霧なしおよび純水噴霧の試験片を用意した。試験片は各暴露条件下で噴霧条件ごとに2枚ずつの計12枚で行い、おおむね10日毎にさび厚およびイオン透過抵抗値を測定した。

(2) 部分補修塗装を施した耐候性鋼材の再腐食

耐候性鋼材の補修塗装方法として、Rc- 塗装系による補修塗装とRc- 塗装系による補修塗装に着目し暴露実験をおこなう。この際、さびと塗装の境界部分からの腐食の進行条件を把握するために、さび部分と塗装部分の間に素地調整をおこなった余白部分を設けた試験片と余白部分を設けない試験片の2種類を用意した。

補修塗装後の再腐食過程を解明するため、山口大学構内および沖縄本島で暴露実験をおこなう。山口大学構内による暴露実験は箱内でおこない、濃度0.2%および0.01%の塩水を1日1回噴霧する。試験片は腐食事例が多く報告されている橋梁フランジを想定して水平方向に設置した。箱内による暴露実験としたのは、飛来塩分の影響を避けるためとともに高温多湿環境とすることで腐食を促進させるためである。一方、沖縄本島による暴露実験では飛来塩分の影響を考慮して大気暴露でおこなう。山口大学暴露実験と同様の補修塗装試験片を用意し、水平方向に設置した。なお、沖縄本島での暴露試験場の離岸距離は20m、平均飛来塩分量は0.35mddである。

(3) 腐食が進行した耐候性鋼材の腐食進行抑制に関する検討

腐食が進行した耐候性鋼材では、さび層に塩分が多量に含まれているため、腐食の進行抑制は困難である。そこで、実橋梁での補修を想定し、塩分の除去に主眼をおいた再腐食過程の観察を目的に、暴露試験をおこなう。腐食が進行した試験片を鋼面露出度が50%程度になるまでハンマー、グラインダー(ダ

イヤモンドツール)による素地調整を施す。素地調整後、1~3日間の炭酸ナトリウム処理期間を設ける。ここで、処理期間の1~3日間は実橋梁での補修を想定している。炭酸ナトリウムははけによる塗布、炭酸ナトリウム水溶液を含ませたガーゼの設置の2種類とする。はけによる塗布では、処理期間ごとに鋼材表面全体に炭酸ナトリウム水溶液を塗布する。炭酸ナトリウム水溶液を含ませたガーゼの設置では、鋼材表面にガーゼが4重になるように巻く。また、2~3日の処理期間では、ガーゼに炭酸ナトリウム水溶液を供給するために霧吹きによる炭酸ナトリウム水溶液の噴霧を行う。炭酸ナトリウム処理後、試験片表面に付着物質が発生し、試験片外観を損なう恐れがある。そこで、水拭きあるいはカップワイヤ処理によって試験片表面の付着物質の除去を行う。さらに、比較対象として素地調整のみの試験片を設ける。試験片は条件ごとに4枚ずつの計52枚設け、山口大学(密閉箱内曝露)と沖縄(日陰大気曝露)で曝露試験を実施する。

4. 研究成果

(1) 腐食過程に与える塩分の影響と腐食モデル化

さびの腐食プロセスを定量的に評価するため腐食モデルの確立を目指す。そこで既往の研究を参考に平均さび厚の経時変化を式(1)のべき乗による近似式で近似することを試みる。

$$Y = AX^B \quad (1)$$

ここでY:さび厚, X:曝露日数, AおよびB:定数

図-1より式(1)は平均さび厚の経時変化をよく近似できている。

べき乗による近似で得られた定数Aおよび定数Bと塩水濃度の関係を図-2に示す。図-2より、定数Aは塩水濃度が高くなるとほぼ線形で大きくなる。一方、定数Bは塩水濃度によらずほぼ一定であった。

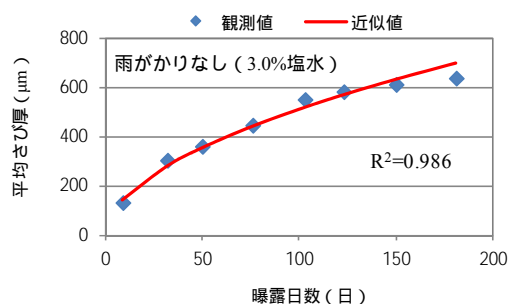
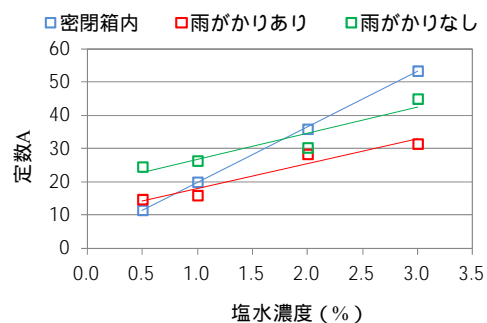
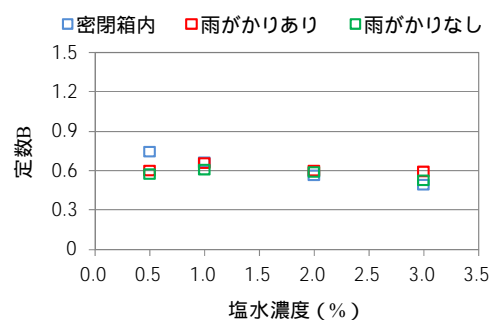


図-1 べき乗による近似



a) 定数 A



(b) 定数 B

図-2 定数Aおよび定数Bと濃度の関係

(2) 部分補修塗装を施した耐候性鋼材の再腐食

補修塗装を施した試験片のうち余白部分を有する試験片について、余白部分のさび厚より、Rc- 塗装系の際にグラインダー処理を施した試験片は、Rc- 塗装系の際にブラスト処理かつ高圧水洗を施した試験片に比べて腐食の進行が早いことが認められた。これは、グラインダー処理がブラスト処理かつ高圧水洗に比べて鋼材内部に塩分およびさびが残存しているため、腐食が進行しやすいことが考えられる。以上の補修塗装試験片(余白部分)の測定結果から、素地調整でブラスト処理と高圧水洗を施した Rc- 塗装系の試験片は、グラインダー処理を施した Rc- 塗装系の試験片に比べて再腐食の進行を低減していることが明らかとなった。

一方、補修塗装を施した試験片のうち塗装部分の膜厚については、曝露実験開始から1年3ヶ月が経過しても塗装仕様の違いに関わらずほぼ初期膜厚のままであり、塗膜の劣化(傷、割れ、剥がれ等)も観察されなかった。

塗膜の密着性試験について、密着力の測定結果を表1に示す。表1(a)(c)より、Rc- 塗装系を施した試験片の方が Rc- 塗装系を施した試験片に比べて密着力があることが明瞭に認められた。また、余白部分の有無について、Rc- 塗装系を施した試験片でも余白部分を設けることで塗膜の密着力を保つことが認められた。一方で Rc- 塗装系を施した試験片では、余白部分の有無に関わらず腐食が進行しており密着力に差異はみられないことが確認された。密着性試験後における塗膜の剥離形態について、例として

山口大学(箱内:塩水0.2%噴霧)で曝露した試験片のうち余白部分を有する試験片の剥離形態を図3に示す。図より、Rc-塗装系を施した試験片では全体の7割が中塗りでとどまっているのに対して、Rc-塗装系を施した試験片ではさびおよび素地が観察されるまで剥がれたことがわかる。

表 1 塗膜の密着力

(a) 山口大学曝露(箱内:塩水0.2%)


余白あり	Rc-塗装系	Rc-塗装系
密着力(MPa)	>7.0	2.5
余白なし	Rc-塗装系	Rc-塗装系
密着力(MPa)	5.0	3.2

(b) 山口大学曝露(箱内:塩水0.01%)

余白あり	Rc-塗装系	Rc-塗装系
密着力(MPa)	5.0	4.4
余白なし	Rc-塗装系	Rc-塗装系
密着力(MPa)	6.0	5.6

(c) 沖縄曝露(大気:噴霧なし)

余白あり	Rc-塗装系	Rc-塗装系
密着力(MPa)	5.2	>7.0
余白なし	Rc-塗装系	Rc-塗装系
密着力(MPa)	5.2	3.8



	色	割合
さび	黒	15%
素地	銀	5%
下塗り	赤	80%
中塗り	グレー	0%
上塗り	白	0%

図 3 剥離形態(山口大学曝露 箱内 塩水0.2% Rc-塗装系 余白あり)

(3) 腐食が進行した耐候性鋼材の腐食進行抑制に関する検討

図-4 および図-5 は山口大学(密閉箱内曝露、曝露日数 140 日目)と沖縄(日陰大気曝露、曝露日数 142 日目)における平均さび厚の増加量である。図-4 より、腐食抑制効果が大きい処理方法はガーゼを 2~3 日間設置し、後処理として水拭きを施したものである。これは、常にガーゼが当たる面で炭酸ナトリウムを供給し続け、霧吹きによる噴霧をおこなうのに対し、はけでは炭酸ナトリウムを供給しきれず、腐食の進行を抑制できないと考える。また、炭酸ナトリウム処理後のカップワイヤ

処理では、表面だけでなく、さび層の炭酸ナトリウムを削り取ったためであると考え。また図-4 より、山口大学(密閉箱内曝露)のいずれの試験片の平均さび厚の増加量も素地調整のみに比べ小さいが、図-5 より、沖縄(日陰大気曝露)の平均さび厚の増加量は素地調整のみに比べ大きい試験片が存在する。飛来塩分が存在する環境下では腐食の進行を抑制する効果は小さくなるが、異常さびが発生した腐食耐候性鋼材は、素地調整を施した後、炭酸ナトリウム処理をおこなうことで耐候性鋼材の腐食の進行を抑制できると考える。耐候性鋼材の腐食を抑制する効果が大きいものは、素地調整をおこない、2~3 日間の処理液を含ませたガーゼの設置期間を設け、水拭きをおこなうことである。しかし、実橋梁での補修を想定した際に、処理方法のガーゼの設置ははけによる塗布に比べ困難である。また、はけによる塗布はガーゼの設置に比べ腐食抑制効果は小さいものの、素地調整のみに比べ平均さび厚は小さいため、腐食抑制効果は十分に期待できる。

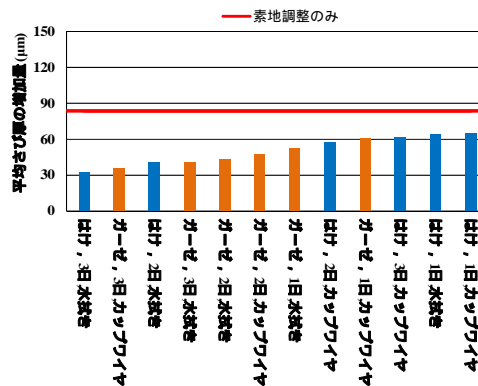


図-4 平均さび厚の増加量(山口大学)

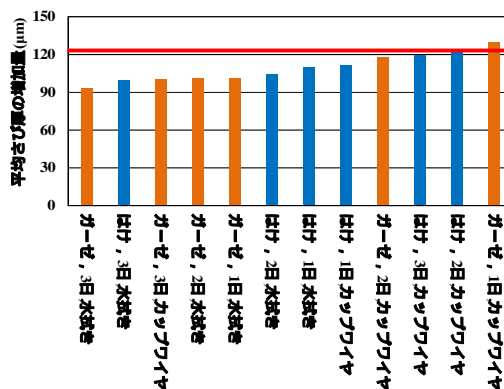


図-5 平均さび厚の増加量(沖縄)

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2件)

- 1) T. Utsumi, T.Aso, The Corrosion Behavior of Weathering Steel Under Different Corrosive Environments, Sustainable

Solutions in Structural Engineering and Construction, 査読有, pp.71-76, 2014.

- 2) A. Imai, T. Aso, S. Shimahara, M. Ohya and M. Takebe, Study on quick protective-rust generation and re-corrosion of weathering steel, Proceedings of The 13th Inspection, Appraisal, Repairs and Maintenance of Structures, 査読有, pp. 103-109, 2012.

〔学会発表〕(計8件)

- 1) 今井篤実, 麻生稔彦, 空谷謙吾, 耐候性鋼材における補修塗装端部処理方法に関する検討, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014年9月10日, 大阪大学(大阪府豊中市).
- 2) 空谷謙吾, 麻生稔彦, 後藤悟史, 今井篤実, 炭酸ナトリウムによる耐候性鋼材の腐食制御に関する検討, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014年9月10日, 大阪大学(大阪府豊中市).
- 3) 内海貴裕, 麻生稔彦, 塩分環境下における耐候性鋼材のさび生成プロセス, 第66回土木学会中国支部研究発表会, 2014年5月31日, 松江高専(鳥根県松江市).
- 4) 空谷謙吾, 成清允, 麻生稔彦, 後藤悟史, 今井篤実, 耐候性鋼材におけるさびの制御に関する検討, 土木学会第68回年次学術講演会, 2013年9月4日, 日本大学(千葉県習志野市).
- 5) 倉田展浩, 麻生稔彦, 耐候性鋼材におけるさび厚さの経時変化に関する検討, 第65回土木学会中国支部研究発表会, 2013年5月25日, 鳥取大学(鳥取県鳥取市).
- 6) 成清允, 空谷謙吾, 麻生稔彦, 後藤悟史, 今井篤実, 耐候性鋼材のさび制御に関する基礎的研究, 第65回土木学会中国支部研究発表会, 2013年5月25日, 鳥取大学(鳥取県鳥取市).
- 7) 今井篤実, 羽田野勝登, 麻生稔彦, 耐候性鋼材における早期保護性さび生成と再腐食に関する検討, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年9月5日, 名古屋大学(愛知県名古屋市).
- 8) 後藤悟史, 和多田康男, 麻生稔彦, 空谷謙吾, 耐候性鋼橋梁における保護性さびの早期生成に関する検討, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年9月5日, 名古屋大学(愛知県名古屋市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

麻生 稔彦 (Aso Toshihiko)

山口大学大学院・理工学研究科・教授

研究者番号: 30231921