

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：32657
研究種目：若手研究
研究期間：2020～2022
課題番号：20K14810
研究課題名（和文）吊形式橋梁ケーブルの錆組成と疲労強度を加味した腐食評価基準と腐食抑制工法の確立
研究課題名（英文）Establishment of corrosion inhibition method and corrosion evaluation criteria based on rust composition/fatigue strength on suspended bridge cables
研究代表者
宮地 一裕（Miyachi, Kazuhiro）
東京電機大学・理工学部・准教授
研究者番号：90810789
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：腐食した橋梁用ケーブルを対象に、外観から得られる錆色と表面形状から健全度評価の高度化を目指した。デジタルカメラで撮影する外観写真に対し、デジタル画像色解析システムに追加開発したことで、錆色分布率の定量化に特化した解析を可能とした。これにより、各腐食レベルにおける錆色分布率を定量的に把握することができ、断面損失率、腐食深さ、分布等の表面特徴の相関性の把握が可能となった。また、環境遮断剤を用いた維持補修対策において、防食効果の優位性を見出した。さらに、実験的腐食調査から、山間部等にある未被覆ケーブルは、日射・降雨・結露などの腐食要因が揃うとケーブル上面に偏って腐食する傾向があることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで腐食した橋梁用ケーブルの外観評価は、目視観察をベースとした評価に留まっていた。本研究での画像色解析手法により、目視観察を補完した定量評価技術の追加が可能となり、腐食表面特徴に対しても、感覚的な目視判断のみではなく、定量評価が可能となった。これらの成果により、外観から腐食の健全度がより正確に評価できる可能性がある。また、新たな維持補修工法および腐食機構の解明により、ケーブルの腐食・破断に対する点検手法と補修工法の高度化に寄与するだけでなく、必要または早すぎる補修を防止することによる大幅なコスト削減、所有者の資産に関連するリスクマネジメントにも繋がると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The aim was to improve the evaluation of corroded cables in bridges by utilizing rust color and surface characteristics from visual inspections. Developing an additional digital image color analysis system for photographs taken with a digital camera enabled specialized analysis for quantifying rust color distribution. This allowed for a quantitative understanding of rust color distribution at each corrosion level and comprehension of the correlation between surface features like cross-sectional loss, corrosion depth, and distribution. Furthermore, the benefits of using environmental isolation paint for corrosion protection were discovered in maintenance and repair strategies. Experimental corrosion investigations also revealed that uncovered cables in mountainous areas, among others, tend to experience preferential corrosion on the upper surface when exposed to factors like sunlight, rainfall, and condensation.

研究分野：構造工学，鋼構造学，橋梁工学，構造力学，腐食，疲労

キーワード：吊形式橋梁ケーブル 腐食 疲労 評価基準 Cable supported bridges Corrosion Fatigue Evaluation criteria

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまでの研究では、腐食したケーブルを対象として、腐食調査、耐食性向上技術の開発、腐食形状がもたらす破断への影響解析等、腐食及び防食、破断に繋がるメカニズムの解明についての研究が実施されてきた。一方で、いずれの研究も外観評価は目視観察や簡易的な形状測定に留まっており、精度の高い健全度評価を実現させるためには、更なる技術の組み合わせが必要である。

また、補修対策として、腐食要因となる水分を排除して腐食抑制する送気乾燥システムが導入されてきたが、同システム導入は経済的にも長大吊橋への導入に限られており、小中規模吊形式橋梁では、依然、簡易、安価で効果的な補修対策が求められている。また、近年一般鋼材において錆組成の安定化を利用した補修対策の開発が進められているが、本研究で対象とする橋梁ケーブルでは未だ適応されていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、「錆色分布率」、「腐食表面特徴」、「疲労強度」の3つの側面を考え、これらが持ちうる相関性に着目した。これらの相関の解明により、外観から得られる錆色と表面形状からケーブルの健全度評価の高度化が期待されるが、はたしてそれらに相関があるのかを解明する。

また、補修対策として「安定した錆組成の生成」を利用した工法が施せればケーブルの延命化が期待されるが、既にケーブル中に存在する水分をケーブル内に保持することになるため、かえって腐食進行する可能性を考え、この点を解明する。

3. 研究の方法

(1) 「錆色分布率」、「腐食表面特徴」、「疲労強度」の相関検討

①錆色分布率解析

デジタルカメラで撮影する外観写真に対し、既存のデジタル画像色解析システムである Feelimage Analyzer に追加開発することで、錆色分布率の定量化に特化した解析を可能とした。本解析システムでは、画像内の全ピクセルが、色を定量的に表す体系であるマンセル・カラー・システム (Munsell color system: 以下、マンセル) の3要素: 色相 H (Munsell Hue), 明度 V (Munsell Value), 彩度 C (Munsell Chroma) で3次元表示される。解析方法は、画像中に含まれる色の色相: H, 明度: V, 彩度: C の3要素からなる色範囲を設定することで、対象とする錆色がどれだけ含まれているのかを定量的に示し、分類した(図1)。

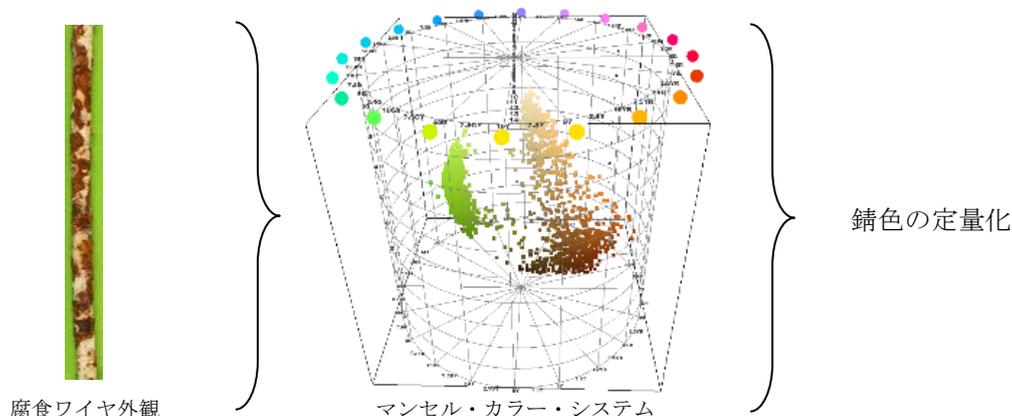
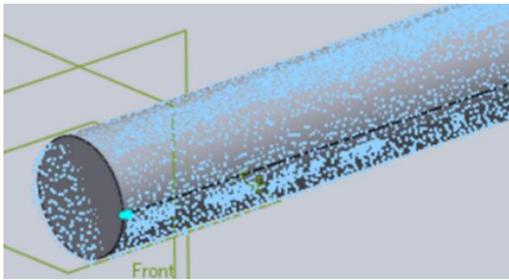


図1 錆色分布率解析

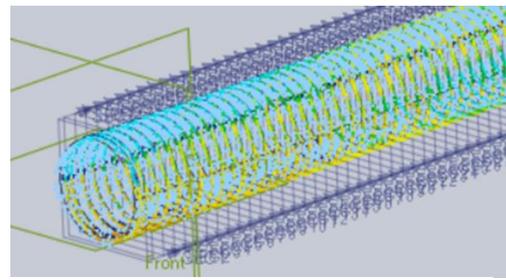
②腐食表面形状測定

腐食した試験体の腐食生成物を除去し、腐食表面形状解析測定法により、本試験体それぞれの腐食断面の直径、断面損失率、腐食ピット深さを定量的に把握する。錆色分布率解析後、表面の錆を除去し、ハンディ型 3D スキャナを用いて腐食ワイヤの表面特徴を測定した。スキャナは Artec (California, USA) 社製の Artec Space Spider を使用した。

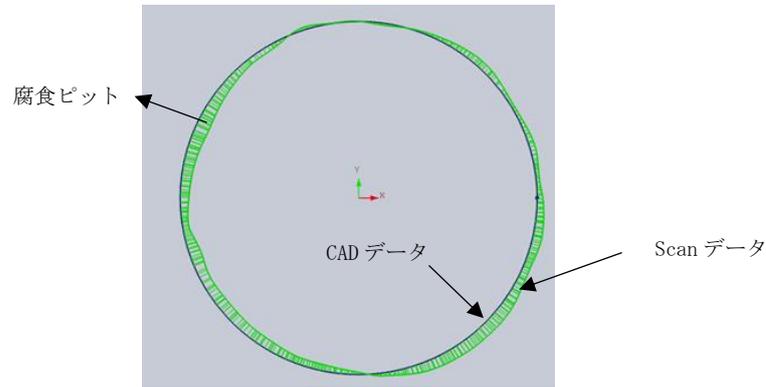
試験体のスキャン後、腐食表面形状、面積損失、腐食深さ、分布などを把握するために、3次元の腐食ワイヤ表面形状(以下、Scan データ)を解析した。QA-Scan (Next Engine 社製)を用いて、Scan データと CAD で生成された腐食していないワイヤデータ(以下、CAD データ)を同軸上に合わせることで、データ間の偏差から腐食による表面形状を可視化した(図2)。



(a) スキャンデータ（腐食後）と CAD データ（腐食前）の軸合わせ



(b) 長手方向に等間隔で断面を抽出



(c) 腐食表面凹凸の可視化および定量化により腐食状況を把握

図 2 腐食表面形状測定

③疲労試験

腐食表面形状の測定後、腐食による疲労強度低下の影響を検討するために、本研究で用いた腐食ワイヤおよび新品ワイヤに対して疲労試験を実施した。

図 3 に試験体の外観を示す。試験機は島津社製疲労試験機を用い、片振式引張疲労試験を実施した。試験体の長さは 380 mm 長とし、中央の 100 mm 長部の両端を試験機に固定した。最小応力を 500 MPa に設定し、応力範囲 600~700MPa、周波数 10Hz とした。また、疲労試験は 3 水準(700, 650, 600MPa)の応力範囲において、疲労限界を 2×10^6 として実施した。



図 3 疲労試験

(2) 環境遮断剤を用いた腐食抑制効果の検討

①腐食抑制効果の検討

イオン分子等を透過させない環境遮断剤を用いた橋梁ケーブルの腐食抑制効果を検討した。小中規模吊橋の主ケーブルやハンガーロープにも使用されているロープを試験体を使用し、環境遮断剤の表面塗装の有無により腐食抑制効果を比較・調査した(図 4)。



図 4 環境遮断剤有

②小中規模吊橋ケーブルの腐食機構

また、山間部に位置する吊橋主ケーブル一般部において、ケーブル上面側に偏って腐食する現象に着目し、その腐食機構を調査した。具体的には、模擬ロープを用いて腐食環境調査(図 5) および腐食促進試験を実施し、それらの結果からロープ上面に腐食促進する要因が含まれるのかどうかを明らかにする。



図 5 表面温度測定手法

4. 研究成果

(1) 「錆色分布率」, 「腐食表面特徴」, 「疲労強度」の相関検討

①錆色分布率解析結果

対象とする錆色は, ワイヤ表面の亜鉛めっき特有の白錆および地鉄特有の赤錆の2種類とし, 各色範囲(白色範囲・赤色範囲)を上記のマンセルから設定することで白錆・赤錆領域を分類した. 表1に解析結果の一例を示す. これにより, 各腐食レベルにおける錆色分布率を定量的に把握することが可能となった.

表1 各腐食レベルの錆色分布率結果

試験体名		試験体の腐食外観	白錆	赤錆
A1	表		76%	24%
	裏		75%	25%
B1	表		27%	73%
	裏		1%	99%

②腐食表面形状測定結果

研究代表者ら独自の腐食表面測定手法に基づき, 腐食ワイヤ表面を測定した結果, 本研究にて得られた各腐食レベルにおける試験体において, 断面損失率および腐食深さ, 分布などの表面特徴の定量化を図り, 本研究で設定した腐食レベルとの相関性の把握が可能となった.

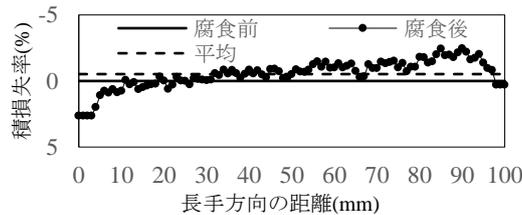


図6 断面損失率(試験体A1)

③疲労試験

①, ②で分類した腐食レベルでの試験体において疲労試験を実施した結果, 本研究で設定した腐食レベルから得られた試験体からは, 疲労強度は新品ワイヤと同等もしくはそれ以上の結果を示した. 図7に, 疲労試験から得られた, S-N曲線(S:Stress range「応力範囲」, N:Number of cycles「繰り返し回数」)を示す. また, 引張強度も同様の結果を示した. 本研究で設定された腐食レベル段階では, 疲労強度に大きな影響を与えない可能性があるとの結果が得られた. この結果から, 試験体数が少なかったことによるバラツキの考慮が不十分であったことや, 疲労強度に影響を与えるほど腐食が進行していなかった可能性があることに留意する必要がある.

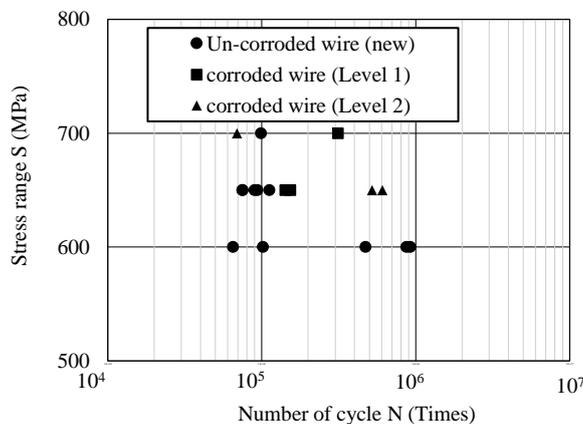


図7 疲労強度曲線

(2) 環境遮断剤を用いた腐食抑制効果の検討

①腐食抑制効果の検討

塩水噴霧試験法によって腐食促進試験を実施した結果、無塗装試験体外観に鉄特有の赤錆の発生が確認されたが、塗装試験体に錆は確認されなかった。しかし、試験進行中に環境遮断剤の塗膜割れおよび割れの進行が確認された(表2)。また、無塗装および塗装試験体のEPMA(電子線プローブマイクロアナライザー)による切断面における腐食生成物の元素分析結果において表面から内部への腐食状態を確認した結果、無塗装試験体では表面から内部にまで錆の進行が確認された。一方、塗装試験体では内部への錆がほとんど確認できず、健全性を保っていたことが分かった。さらに、環境遮断剤が外側ストランドの半分以上まで浸透していることが分かり、施工性においても優れていると考えられるが、ロープ中心部までの浸透が確認されていないため、更なる浸透性の向上および充填工法が必要であると考えられる。

表2 腐食促進試験後の外観

時間	0 h	2520 h
塗装無し		
塗装有り		

②小中規模吊橋ケーブルの腐食機構

山間部に位置する吊橋主ケーブル一般部を対象とした実験的腐食調査において、供用される吊形式橋梁ケーブルは、日射・降雨・結露などの腐食要因が揃うとケーブル上面に偏って腐食する傾向があることを見出した(図8)。ロープ表面では亜鉛めっきの腐食速度が最も高くなる温度域に達する期間があることが分かった。また、降雨や結露によってロープ上面に残留しやすい水分が日中に熱せられ、上面のみ偏って腐食する可能性を見出した。

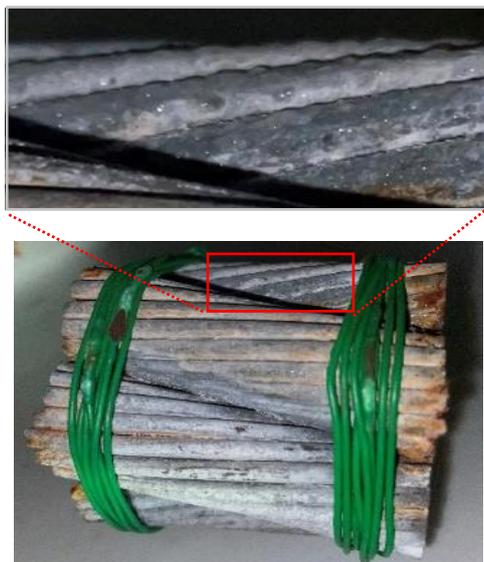


図8 結露発生調査

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Miyachi Kazuhiro, Chryssanthopoulos Marios, Nakamura Shunichi	4. 巻 178
2. 論文標題 Experimental assessment of the fatigue strength of corroded bridge wires using non-contact mapping techniques	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Corrosion Science	6. 最初と最後の頁 109047 ~ 109047
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.corsci.2020.109047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kazuhiro Miyachi, Koji Kinoshita
2. 発表標題 Corrosion suppression effect of bridge cables using environmental isolation paint
3. 学会等名 International Association for Bridge and Structural Engineering（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuhiro Miyachi, Koji Kinoshita, Rina Hasuike, Yoshitomo Yano, Yosuke Hatasa
2. 発表標題 Corrosion investigation of longitudinal direction of corroded main cable on an actual suspension bridge
3. 学会等名 International Association for Bridge and Structural Engineering（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuhiro Miyachi, Atsuto Kajita
2. 発表標題 Quantification of rust colour distribution rate of galvanized steel wires
3. 学会等名 Japan Society of Civil Engineers（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuhiro Miyachi, Atsuto Kajita
2. 発表標題 Correlation between the rust colour distribution rate and corroded surface characteristics of galvanized steel wires
3. 学会等名 International Association for Bridge and Structural Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関