

平成 21 年 5 月 10 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560470

研究課題名 (和文) 腐食した橋梁ケーブルの強度特性および補修法の研究

研究課題名 (英文) Study on mechanical properties of corroded bridge wires and repair methods

研究代表者

中村 俊一 (NAKAMURA SHUNICHI)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：40297198

研究成果の概要：腐食した橋梁ケーブルの破断原因は、米国の研究者が主張している水素ぜい化が主要因ではなく、腐食・繰返し応力・水素が複合的に作用したメカニズムであることを見出した。腐食したケーブルに対して種々の補修法を提案し、その優劣を比較検討した。その結果、ケーブル内部にエポキシ樹脂またはジンク塗料を充填した補修法が有望であった。これらの成果は、一流技術雑誌に2編、学会にて3編の論文を発表した。また、3編の論文を投稿中である。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,200,000	0	1,200,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	660,000	4,060,000

研究分野：工学、土木工学

科研費の分科・細目：土木工学、構造工学、維持管理工学、橋梁工学

キーワード：橋梁ケーブル、腐食、疲労、補修、耐久性

1. 研究開始当初の背景

長大吊橋の主ケーブルは、多数の亜鉛めっき鋼線を平行に束ねたものであり、補剛桁を支える吊橋の命綱である。通常、100年以上の耐久性が要求される。しかし、因島大橋・大鳴門橋の吊橋主ケーブルを現地調査した結果、完成後わずか数年で主ケーブルが部分的に腐食していることが発見された。米国には多くの古い吊橋があるが、ほとんどの吊橋ケーブルが腐食し、破断した鋼線も発見されている。なお、古い吊橋および中小吊橋にお

いては、亜鉛メッキ鋼線をよりあわせたケーブルが用いられている。また、吊橋ハンガーロープおよび斜張橋ステーには、亜鉛メッキ鋼線をよりあわせたケーブルが用いられるが、これらにも国内外において激しい腐食が発見されており、取り替えを余儀なくされた例がある。

2. 研究の目的

腐食した橋梁ケーブルの残存強度に関する

る研究は米国において活発に実施されており、腐食した亜鉛めっき鋼線は静的な引張強度はあまり低下しないが、伸びが小さいことがわかっている。また、亜鉛めっき鋼線の破断は水素ぜい化が原因であると推定されているが、立証に至っていない。我が国においては、この種の研究はほとんどなされておらず、立ち後れている。腐食ケーブルの残存強度を把握するためには、引張強度および伸びのみでは不十分である。また、吊橋ハンガーや斜張橋ステーには、交通荷重や風荷重により繰り返し応力が加わり、疲労問題が生ずる可能性がある。さらに、腐食の程度により、これらの機械的強度が異なることが推定される。本研究の第一の目的は、腐食した橋梁ケーブルの強度と破断原因の究明である。

腐食しているケーブルを現地で適切に防食補修する方法について研究された例は極めて少ない。ケーブルは数多くの鋼線を束ねた複雑な構造であり、ケーブル内部の鋼線に処理を施すことは困難である。一般的な補修方法としてケーブル表面をケレンして補修塗装を施す方法が考えられるが、この方法ではケーブル外部からの腐食因子の侵入を防止できるが、逆にケーブル内に浸入した水などを閉じ込め、湿った厳しい腐食環境を形成させることが懸念される。また、ケーブル内部のワイヤの防食はできない。本研究の第二の目的は、腐食した橋梁ケーブルの種々の補修法の有効性の究明である。

3. 研究の方法

亜鉛めっき鋼線単体および7本よりストランドを対象とし、4種類の腐食レベル（初期、亜鉛めっきのみの腐食、鉄錆の発生時、鉄錆の発展時）の試験体を作成する。そして、それらの引張強度、伸び、疲労強度を測定し、腐食レベルと強度との関係を見いだす。これらの実験により、腐食した橋梁ケーブル、ハンガーロープ、斜張橋ケーブルの残存強度を把握し、さらには腐食ケーブルの健全度の評価指標も確立する。また、亜鉛めっき鋼線に含有されている水素は、ぜい化を促進し、疲労強度を低下させる可能性がある（腐食疲労）。これまでに、腐食した亜鉛めっき鋼線の水素量の測定は報告されていないため、上記4腐食レベルの試験体の含有水素量を測定し、腐食レベルとの関係を調査する。さらに、荷重を載荷した状態で腐食させ疲労試験を行うことにより、供用状態にあるハンガーロープの疲労強度および水素の影響を調べ

ることは重要である。

米国では、ハンガーロープの防食方法として防錆油を含浸させた例がある。しかし、その防食効果については詳細に検討されていない。また、この方法は油分による汚染も懸念される。国内において、最近、配管のフランジ部のように複雑で十分な補修塗装を行うことが困難な箇所に対し、鋼よりも電氣的に卑な金属である亜鉛末などを含む防錆材の適用により良好な防錆効果が認められた例がある。亜鉛による犠牲防食作用や、腐食に必要な酸素が亜鉛により消費されるなどの作用により腐食が低減されていると考えられる。この方法はケーブルの防食補修方法としても有効である可能性がある。また、乾燥空気をケーブル内に送り込み、強制除湿する方法も有効である。この方法は明石海峡大橋の主ケーブルに適用されているが、ハンガーロープや斜張橋ケーブルにも適用可能であると考えられる。本研究では、既設の腐食した橋梁ケーブルの防食補修方法として、ケーブル表層のみの再塗装、米国で実施例のある防錆油の含浸、亜鉛末による防錆材の塗布、強制除湿を選び、それらの防食効果を実験により比較検討する。

4. 研究成果

(1) 腐食した亜鉛めっき鋼線の疲労および含有水素の影響の検討

亜鉛めっき鋼線を用い、4種類の腐食レベル（初期、亜鉛メッキの腐食、鉄錆発生時、鉄錆進展時）の試験体を、腐食加速することにより作成した。それらの繰り返し載荷試験により疲労強度を把握し、腐食レベルとの関係を評価した。さらに、荷重を載荷した状態で疲労試験を行うことにより、腐食環境下にあるケーブルの腐食疲労強度を研究した。また、試験体内部の水素含有量を測定し、腐食度と水素含有量との関係を把握した。

次に、腐食孔を模倣した試験体を用いて疲労試験を行い、腐食孔の大きさと疲労強度との関係を把握した。供試材は5mm径の亜鉛めっき鋼線とし、中央に腐食孔（深さ0.6mm、幅3mm、6mm、10mmの3つ）を設けた。腐食孔の形状は、丸形、角形、そして角の谷部にダイヤモンドやすりでノッチをつけたものの3種類とした。実験結果より、0.6mm深さの腐食孔においては、腐食孔の幅が小さくなるに従い、少ない回数で破断することがわかった（図-1）。これは、腐食孔の幅が減少す

ることによって応力が集中しやすくなるためと考えられる。また、腐食幅が 10mm の時にはノッチをつけることにより破断回数が著しく減少するが、腐食孔の幅が 3.5mm の時には、さほど大きい差として現れなかった。これは、腐食孔の形状による応力集中が大きくなり、ノッチによる応力集中が支配的でなくなるためと考えられる。

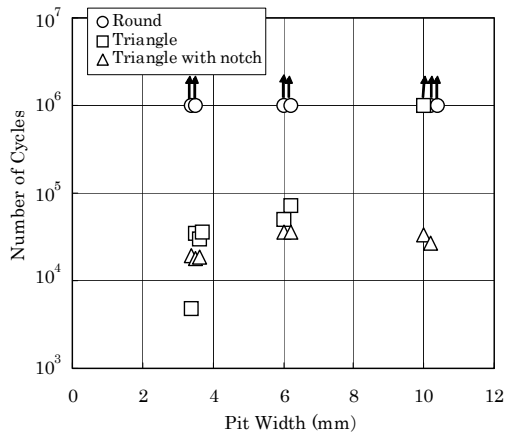


図-1 人工ノッチ鋼線の S-N 曲線

(2) 各種補修法を施工した亜鉛めっき鋼線の機械的特性

既設の腐食した鋼構造ケーブルの防食補修方法として、ケーブル表層のみの再塗装、防錆油の含浸、亜鉛粉末防錆材の塗布、強制除湿を対象とし、それらの効果を実験により比較検討中である。腐食させた亜鉛めっき鋼線に実際にこれらの補修法を施した試験体を製作し、引張試験および疲労試験を実施し、その機械的強度を把握した。

腐食したケーブルが、湿った厳しい腐食環境下にそのまま保持された場合、防食措置を行なった場合について、その腐食と防食効果を調べるために、新品の裸鋼線を 19 本束ねた試験体を用い、無防食の状態に湿った状態に保持した時と、試験体にいろいろな防食を施した時の腐食状況について比較した。

その結果、防食を施さなかった試験体は、外層ワイヤには錆瘤状の大きい腐食が生じた。内層ワイヤは、全体に腐食するが、ワイヤの接触部に筋状に伸びる腐食を生じた。ただし、腐食量は外層ワイヤに比べ小さかった。外層ワイヤの腐食が大きいのは、腐食に必要な酸素が多く供給されることと、ガーゼに接した部分で錆瘤が発生していることから酸素濃淡電池による

腐食が生じたためと考えられる。酸素濃淡電池とは、酸素が供給されやすい部分と酸素が供給されにくいところで、環境の違いにより電池を形成し、酸素の供給されにくいところが局部的に腐食する現象である。

防食を施すことにより、外層ワイヤには防食効果が認められたが、ケーブル内部のワイヤの防食効果が認められないものが多かった(図-2, 3)。ただし、エポキシ充填を充填したものや、送気乾燥したものは、内部まで防食効果が確認された。腐食したケーブルをそのまま湿った状態に保持した場合には、さらに腐食が進行する。その防止には、外層を被覆することが効果的である。ただし、外層を被覆しても内層までは防食することは困難であるが、エポキシなどの樹脂を積極的に充填し、腐食の原因となる水や酸素の供給を低減するか、あるいは送気乾燥して湿った環境から回避することにより、内部も防食可能なことがわかった。

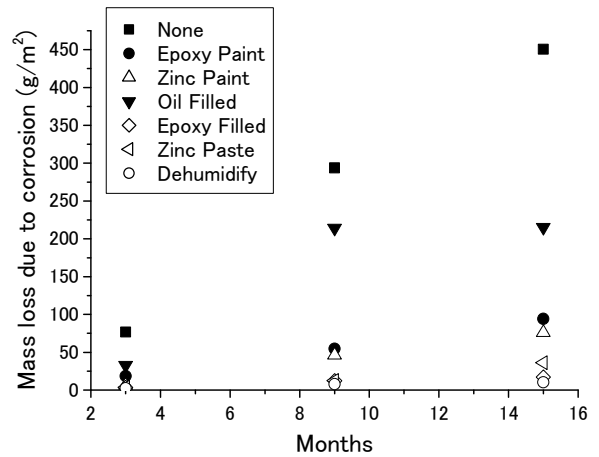


図-2 表面ワイヤに対する補修効果

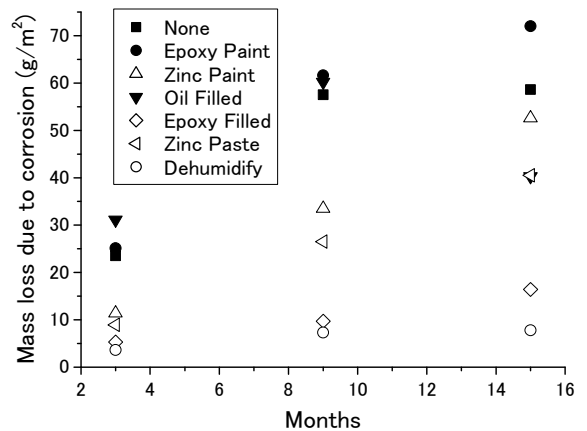


図-3 内部ワイヤに対する補修効果

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 鈴木恵太、中村俊一、樽井敏三：腐食した橋梁用亜鉛めっき鋼線の疲労特性、土木学会論文集A、No.62, No.3, 614-622, 2006, 査読有り.
- ② Shunichi Nakamura, Keita Suzumura: Hydrogen embrittlement and corrosion fatigue of bridge wires, Journal of Constructional Steel Research, Vol.64, No.2, 247-252, 2009, 査読有り.

[学会発表] (計 3 件)

- ① Shunichi Nakamura, Keita Suzumura: Fatigue and Fracture of Corroded Bridge Wires, First International Conference on Fatigue and Fracture in the Infrastructure, Vol.1, 1-14, 2006, 査読有り.
- ② 鈴木恵太、中村俊一：腐食した橋梁用亜鉛めっき鋼線の拡散性水素濃度について、鋼構造年次報告集、Vol.14, 219-224, 2006, 査読有り.
- ③ Shunichi Nakamura, Keita Suzumura: Strength of corroded bridge wires and repair methods, 17th Congress of IABSE, Chicago, 2008, 査読有り.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 俊一 (NAKAMURA SHUNICHI)
東海大学・工学部・教授
研究者番号：40297198

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし