腐食した実吊橋ケーブルの腐食評価基準の検討

岐阜大学　正会員　○宮地　一裕，正会員　木下　幸治，（株）興栄コンサルタント　正会員　畑佐 陽祐
岐阜大学　学生会員　矢野　義知，舞鶴工業高等専門学校　正会員　玉田　和也

１．はじめに

吊橋や斜張橋などの吊り形式橋梁に用いられる主ケーブルやハンガーロープ，斜ケーブルは，主桁を支える命綱であり，長期の耐久性が求められる．ケーブルに使用される鋼線には亜鉛めっきが施され，耐食性の向上が図られているが，吊橋の主ケーブルやハンガーロープ，斜張橋の斜ケーブルが腐食した事例が国内外で多数報告されており深刻な問題となっている[1),2)]．既往の研究[1)]において，米国 Bear Mountain 橋で 77 年間供用されたハンガーロープの外側ストランドおよび中心ストランドの腐食調査が行われ，外側ストランド内部では赤さびが生成されていることが明らかとされている．一般に複数の素線が束ねられたケーブル内部の腐食状況を外観のみから評価することは非常に困難であることから，このような実ケーブルの解体調査，特に内部の素線 1 本 1 本の腐食状況に至るまで詳細に明らかにすることは，今後我が国の吊橋の健全性評価を行う上で非常に有用と考える．

そこで，著者らは，実吊橋で供用されていた主ケーブルの腐食状況を明らかにすることを目的として，実吊橋主ケーブルの目視による腐食調査および FT-IR 分析による腐食成生物分析を行った[3)]．その結果，対象とした実吊橋主ケーブルの腐食状況は，ロープ上面の腐食度の大きさに比例して，上面・下面ストランド内部の腐食が進行していることがわかった．また，外観の違いから腐食生成物の組成にも違いが見られることが分かった．しかし，各腐食レベルにおける組成調査および分類は未だ確立されていない．

そこで，本研究では，著者らの既往研究[3)]に継続し，各腐食レベルをさらに細分化した．その上で，組成分析結果を反映させた新たな腐食評価基準の検討を行った．

２．既往研究における腐食状況の調査結果[3)]

本橋は静岡県の山間部東西方向に架設され，架設後 50 年以上供用された吊橋である．海岸部から 50 km 以上離れた場所に位置していることから，飛来塩分の影響が少ない腐食性の低い環境が想定される．図 1 にハンガー定着部における主ケーブル全体の断面とそれぞれの配置位置を示す．主ケーブルは，φ65 mm のワイヤーロープ（以下，ロープ）6 本で構成されており，上段，下段に 3 本ずつ定着された構造となっている．1 本のロープは中心ストランド 1 本と外側ストランド 6 本で構成されており，それぞれ亜鉛めっきが施された素線 37 本を Z 撚りで撚り合わせて構成されている．ここでは，上段ロープ 3 本を No.1，No.2，No.3，下段ロープ 3 本を No.4，No.5，No.6 とした．ロープ表面に鉄特有の赤さびおよび亜鉛めっき特有の白さびが確認されることから，これらのさびの分布度合いを腐食度として定義する．本研究では，特に腐食度が大きかったロープ No.5 の解体調査を行った．ロープを切断し，外側ストランド，素線の順に 1 本ずつ解体しケーブル内部の腐食調査を実施した．腐食状況調査箇所は切断部から 20 mm 間隔で調査し，各断面に集約している．**表 1** に鈴村ら[4)]が提案している 4 段階の腐食評価基準と本ロープで見られた腐食状況を示す．腐食状況を可視化するため，鈴村らの腐食レベル[4)]を基に，腐食状況を分布化した．**図 2** にロープ No.5 断面の腐食状況を腐食レベルごとに色分けした分布図を示す．上面ストランド①については，表面および内部にまで赤さびが進行している腐食レベル 1～3 の状態であった．下面ストランド④については，表面はほぼ白さびで覆われているが内部では赤さびが確認され，上面同様に腐食レベル 1～3 の状態であった．中心ストランドについては，特に腐食は見られず，腐食レベル 0 の状態であった．

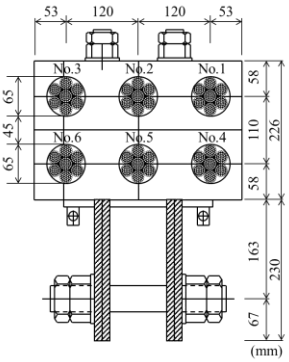


図１　主ケーブル断面

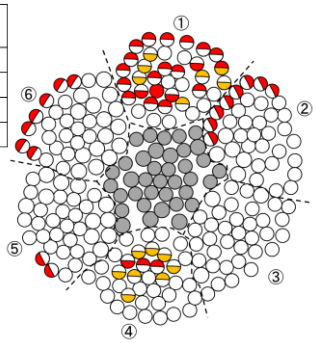
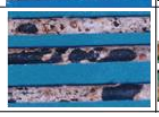
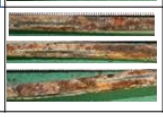


図２　ロープ No. 5 の腐食状況

表１　腐食評価基準

腐食レベル	亜鉛めっき鋼線の外観		
	既往文献[4)]	内部素線	表面素線
0			
1			
2			
3			

キーワード：ケーブル，腐食，FT-IR 分析
連絡先：〒501-1193　岐阜県岐阜市柳戸 1-1　岐阜大学工学部　社会基盤工学科　TEL：058-293-2424

© Japan Society of Civil Engineers

3．さび組成を反映させた腐食評価基準の提案

表 1 に示す鈴村ら[4]の腐食レベルの分類において，腐食生成物の外観をより詳細に調査した結果，腐食レベル 3 がさらに表 2 のように 3 段階に細分化できることが分かった．具体的には，全体的に白さびで覆われているが広範囲に赤さびが進行した箇所，全体的に赤さびで覆われているが局所的に白さびが存在する箇所，全体的に赤さびで覆われた箇所の 3 種類に分けられる．そこで，本研究では，3 段階に分類した腐食レベル 3 の FT-IR 分析を行い，さび組成分析に基づき，それらの差異を明確にすることとした．図 3 (a)～(c) に各々の FT-IR 分析結果を示す．

図 3(a)は，腐食レベル 3 の FT-IR 分析結果を示す．ここでは，塩基性炭酸亜鉛および酸化鉄の一種である α-FeOOH，Fe_3O_4 のピークが明確に見られた．防食効果が高い塩基性炭酸亜鉛に加え，活性の低い安定したさびである α-FeOOH と Fe_3O_4 が生成されており，それらが混在している状態であると考えられる．図 3(b)は，腐食レベル 3.1 の FT-IR 分析結果を示す．ここでは，塩基性炭酸亜鉛，Fe_3O_4，酸化亜鉛で小さなピークが見られた．塩基性炭酸亜鉛が少なくなる一方で保護効果の小さい酸化亜鉛が生成されていることから，亜鉛が消費され防食効果が小さくなっている状態と考えられる．図 3(c)は，腐食レベル 3.2 の FT-IR 分析結果を示す．ここでは，塩基性炭酸亜鉛，Fe_3O_4，α-FeOOH，γ-FeOOH のピークが見られた．γ-FeOOH は比較的活性が高いことから，鉄さびが進行している状態であることが分かる．

以上より，既往の研究で提案された腐食評価基準のレベル 3 を外観のみならずさび組成分析に基づき 3 段階に細分化した新腐食評価基準を提案した．

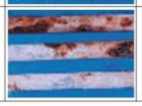
4．腐食評価基準の比較

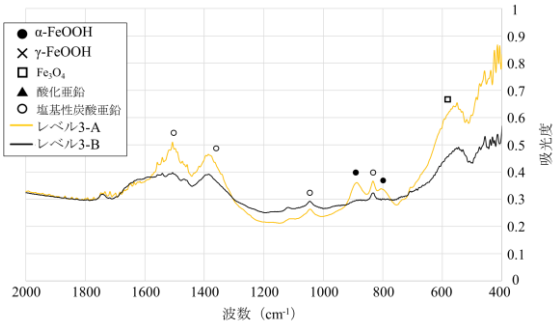
図 4 にさび組成を反映させた新腐食評価基準を適用し，新たに断面の腐食状況を示した分布図を示す．これにより，外側ストランドにおいて，ストランド同士が隣接しない表面では腐食レベル 3.2，各外側ストランドが隣接する表面では腐食レベル 3.1 および内部では腐食レベル 3 の傾向を示すことから，ストランド同士が隣接しない表面の腐食レベルが高いことが分かった．

以上のことから，腐食レベルの細分化により，提案した新腐食評価基準を用いて，外側ストランドの外観と内部の違いを詳細に検討した結果，ケーブル腐食状況の点検時には，ストランド同士が隣接しない表面の腐食状況から健全度を判定できる可能性がある．

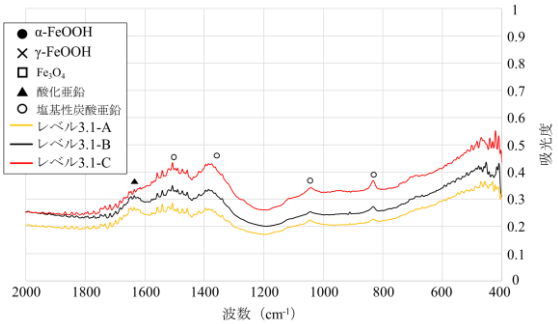
参考文献：1)鈴村ら：77 年間供用された吊橋ハンガーロープの引張強度および腐食調査，土木学会論文集，Vol.58，No.728，pp.67-77，2003. 2)古家ら：吊橋ケーブルの腐食機構に関する研究，土木学会論文集，Vol.45，No.637，pp.103-114，1999. 3)宮地ら：腐食した実吊橋主ケーブルの腐食調査，鋼構造年次論文報告集，pp.768-775，2018. 4)鈴村ら：腐食した亜鉛めっき鋼線の疲労特性，土木学会論文集，pp.614-622，2006.

表 2　新腐食評価基準

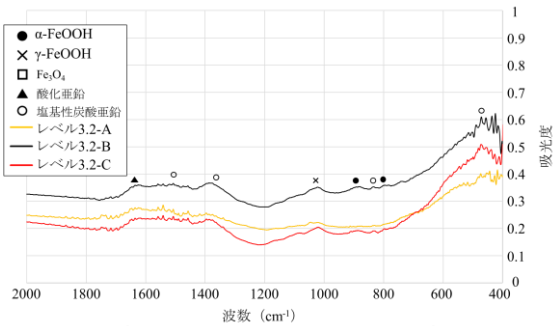
腐食レベル	既往文献	素線の外観	腐食レベル	既往文献	素線の外観
0		金属光沢 黒い油成分	3		全体的に白さび 広範囲に赤さび
1		全体的に白さび	3.1		全体的に赤さび 局所的に白さび
2		全体的に白さび 局所的に赤さび	3.2		全体的に赤さび



(a) 腐食レベル 3 の FT-IR 分析結果



(b) 腐食レベル 3.1 の FT-IR 分析結果



(c) 腐食レベル 3.2 の FT-IR 分析結果

図 3　FT-IR 腐食レベル 3 の組成分析結果

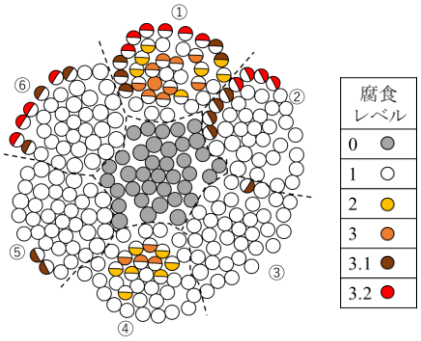


図 4　新腐食評価基準を適応した ロープ No. 5 の腐食状況

© Japan Society of Civil Engineers