

# 腐食した橋梁用亜鉛めっき鋼線の強度特性

鈴村恵太<sup>1</sup>・中村俊一<sup>2</sup>・樽井敏三<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 新日本製鐵(株)相模原技術開発部 マネージャー (〒229-1131 相模原市西橋本 5-9-1)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D. 東海大学教授 工学部土木工学科 (〒259-1292 平塚市北金目 1117)

<sup>3</sup>新日本製鐵(株)鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主幹研究員 (〒293-0011 富津市新富 20-1)

吊橋や斜張橋ケーブルを構成する亜鉛めっき鋼線を対象とし、湿潤ガーゼ巻き腐食促進法により異なる腐食レベルの試験片を作成し、腐食度と強度の関係を研究した。腐食の進行により、公称引張破断応力は低下したが、実引張応力は変化しなかった。一方、亜鉛めっきが消費され地鉄の腐食が進行しはじめた時点から、伸び、ねじり強度および疲労強度は著しく低下した。また、腐食させた亜鉛めっき鋼線の鋼中水素量測定および疲労試験後の破面観察により、水素脆化の可能性は低いことを見出した。さらに、腐食により表面に凹凸が生じることを確認した後、表面凹凸を機械切削した鋼線の伸びが回復することを見出し、強度低下の主原因は腐食による表面凹凸であることを明らかにした。

**Key Words:** suspension bridges, cable-stayed bridges, cable corrosion, tensile strength, elongation, fatigue strength, hydrogen embrittlement

## 1. はじめに

吊橋の主ケーブルやハンガーロープおよび斜張橋ケーブルが腐食した事例は、国内外で数多く報告されている<sup>1)~5)</sup>。吊り形式橋梁においてケーブルは命綱であり、橋の安全性に直結する。しかし、腐食したケーブルがどの程度の残留強度を有するかについての研究は少ない。

橋梁用ケーブルは、多数の高強度亜鉛めっき鋼線で構成されており、ケーブル強度は個々の亜鉛めっき鋼線の強度に依存する。Mayrbau<sup>1)</sup>は、腐食した実吊橋ケーブルから腐食程度の異なる亜鉛めっき鋼線をサンプリングし、それらの引張試験を実施し、腐食した亜鉛めっき鋼線は伸びが低下することを報告している<sup>6)</sup>。しかし、疲労強度やねじり強度に関しては調査されていない。佐々木<sup>2)</sup>らは、亜鉛めっきを除去した裸鋼線を塩水噴霧により腐食促進させ、その疲労試験を実施し、腐食により疲労強度が大きく低下することを見出している<sup>7)</sup>。亜鉛めっきされていない鋼線を腐食促進させることは比較的容易であるが、亜鉛めっき鋼線は防錆能力が高く、実際のケーブル内の腐食環境を再現しつつ、これを腐食促進することは極めて難しい。これが、腐食度と機械的性質の関係を定量的に把握することを困難にしている。

筆者らは、最近実施した吊橋ケーブルの腐食研究において、亜鉛めっき鋼線を湿ったガーゼで包み、これを高温下に保持することにより腐食促進する技術を開発した<sup>1)</sup>。この方法を用いて得られた腐食亜鉛めっき鋼線は、実橋で観察された腐食状況に類似した性状を示すことも示されている。本研究では、この手法を用いて異なる腐食レベルの試験片を作成し、亜鉛めっき鋼線の腐食度と引張強度、伸び、ねじり強度、疲労強度の関係を統一的に研究する。

米国には古い吊橋が多く存在し、吊橋ケーブルを構成する亜鉛めっき鋼線の破断例が報告されている<sup>5)</sup>。亜鉛めっき鋼線は湿った環境にあり、それが腐食する過程で水素が吸収される。これが水素脆化すなわち遅れ破壊を引き起こし、鋼線破断にいたると考えられている。Barton<sup>3)</sup>らは複合サイクル試験により腐食させた亜鉛めっき鋼線では蓄積水素量が増加することを確認し、試験片の低速速度試験により水素脆化が生じる可能性を示している<sup>8)</sup>。しかし、Barton<sup>3)</sup>らは強酸性中で腐食促進させており、過剰に水素が蓄積されている可能性が高く、測定水素量の妥当性には疑問が残る。本研究では、実橋に近い環境で腐食させた亜鉛めっき鋼線内に蓄積された水素量を測定し、水素脆化の可能性についても検討する。

表-1 腐食試験体（亜鉛めっき鋼線）



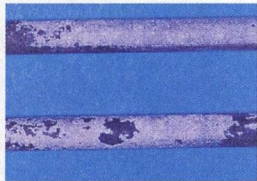



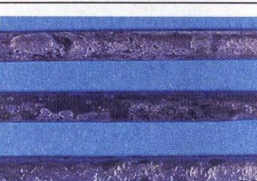
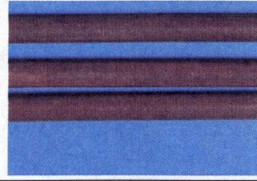

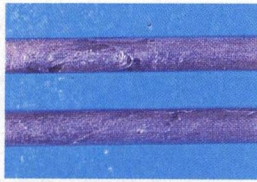


No.	腐食 レベル	亜鉛めっき鋼線の外観	
		腐食外観	腐食生成物除去後
a	初期		
b	1		
c	2		
d	3		

表-2 腐食試験体（裸鋼線）

No.	腐食 レベル	裸鋼線の外観	
		腐食外観	腐食生成物除去後
e	初期		
f	1		
g	2		

大西らは、塩水噴霧と乾湿繰り返しを組み合わせた複合サイクル試験によりPC鋼線を腐食促進させ、腐食により生じた表面凹凸を計測し、引張強度や伸びとの関係を研究している<sup>9),10)</sup>。PC鋼線は亜鉛めっきされていない高張力鋼線である。その結果、腐食損傷を受けたPC鋼線は、表面凹凸振幅とともに引張強度・伸びが減少することを見出している。本研究では、腐食により生じた試験片の表面凹凸を機械切削し、表面を平坦に戻した後、引張試験を実施する。これにより、表面凹凸が亜鉛めっき鋼線の強度低下にどの程度影響しているかについても研究する。

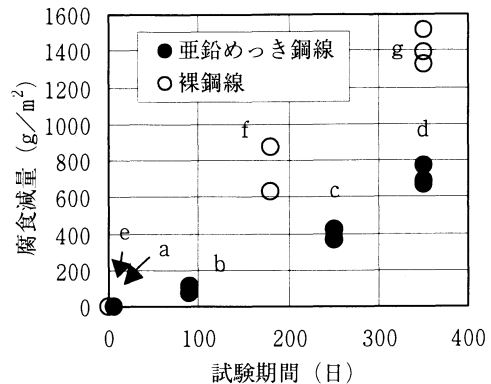


図-1 腐食減量

## 2. 腐食促進試験

### (1) 腐食促進方法

試験体は、5.09mm φ 径の溶融亜鉛めっき鋼線とした。鋼線への亜鉛めっき附着量は 350g/m<sup>2</sup>、規準引張強度は 1600MPa 以上である。

腐食促進方法は、湿ったガーゼを亜鉛めっき鋼線に巻きつけ、密閉容器に入れ、常時湿った状態を保持するよう恒温室に保管した。湿ったガーゼを巻きつけることにより、腐食に必要な水と酸素が十分に供給される厳しい腐食促進方法である。実橋で形成される腐食環境を再現しており、その腐食形態は実ケーブルの腐食形態に類似していることが過去の研究で明らかにされている<sup>1)</sup>。試験温度は 40℃とし、さらに水 1リットルに NaCl を 0.1g 添加した。この添加塩分濃度は、実橋でも観察されている濃度レベルである。

亜鉛めっき鋼線の腐食外観を表-1 に示す。試験体 a は亜鉛めっき鋼線の初期材、試験体 b は亜鉛の腐食生成物に覆われ、所々に点状の鉄さびの発生が認められる状態（腐食レベル 1）、試験体 c は亜鉛の腐食生成物に覆われ、局部的に鉄さびの発生が認められる状態（腐食レベル 2）、試験体 d はさらに腐食が進行し鉄錆発生面積が増大した状態（腐食レベル 3）である。

比較のため、裸鋼線の腐食試験も実施した。亜鉛めっき鋼線の亜鉛めっき層を 10%硫酸水溶液により除去し、その後十分に水洗して、100℃で 1日加熱乾燥し、裸鋼線を製作した。裸鋼線の腐食外観を表-2 に示す。試験体 e は裸鋼線の初期材、試験体 f は黒色の湿った鉄さびに覆われたレベル、試験体 g はさらに腐食が進行し、所々にあばた状の腐食が認められるレベルとした。

### (2) 腐食減量

初期重量から腐食生成物除去後の重量を減じて腐食減量を算定した。腐食生成物は、10%硫酸水溶液で浸した比較的粗めの不織布で腐食試験片をこすり、過酸洗に注意して亜鉛および鋼の腐食生成物を除去した。

亜鉛めっき鋼線および裸鋼線の腐食減量の経時変化を図-1 に示す。両者とも時間とともに腐食が進行している。亜鉛めっき鋼線の腐食速度は裸鋼線に比べ若干小さいが、時間の経過とともに腐食速度は高くなる。これは、亜鉛めっきが消費された後、腐食が加速されることを示している。

亜鉛めっき鋼線試験体 b の腐食減量は 72～116g/m<sup>2</sup> であり、亜鉛めっきは約 250g/m<sup>2</sup> 残存していると考えられる。試験体 c の腐食減量は 370～420 g/m<sup>2</sup> で、亜鉛めっきがほぼ消費された状態である。試験体 d の腐食減量は 670～770g/m<sup>2</sup> で、亜鉛は完全に消費され鋼の腐食が進行している状態である。裸鋼線試験体 f の腐食減量は 627～871g/m<sup>2</sup>、試験体 g の腐食減量は 1324～1513g/m<sup>2</sup> であった。

### (3) 亜鉛めっき鋼線の腐食による表面形状

腐食生成物を除去した後の亜鉛めっき鋼線の外観も表-1 に示す。溶融亜鉛めっきは通常、亜鉛層と亜鉛と鉄の合金層からなり、亜鉛層は銀白色に見え、合金層は黒く見える。亜鉛めっき鋼線試験体 b では亜鉛めっき層は残存しており、腐食による地鉄の腐食はほとんど認められず、表面は平滑であった。試験体 c ではまだ所々に亜鉛や亜鉛と鉄の合金層が認められるが、局部的に地鉄の腐食が認められ、その部分は深くはないが窪んでいた。

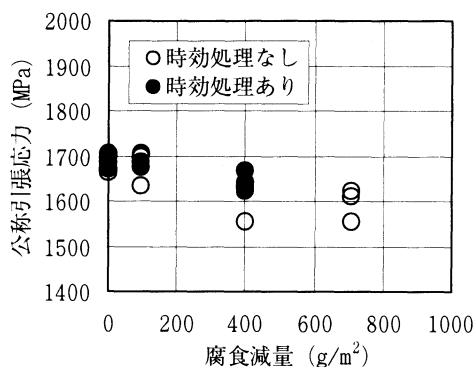


図-2 腐食亜鉛めっき鋼線の公称引張応力

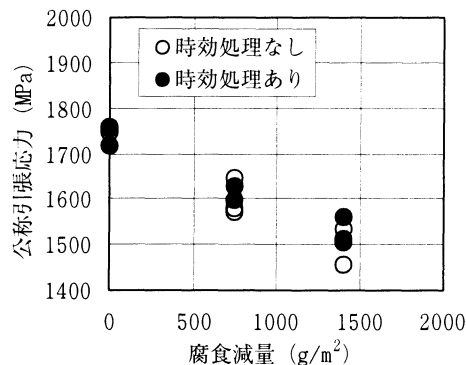


図-4 腐食裸鋼線の公称引張応力

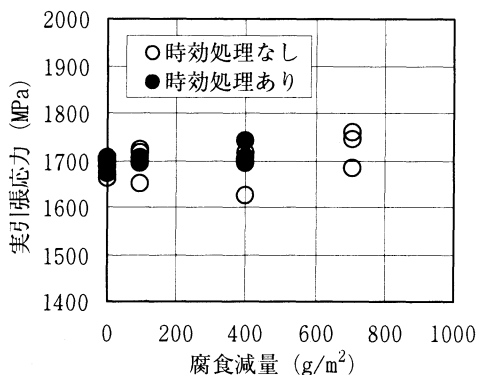


図-3 腐食亜鉛めっき鋼線の実引張応力

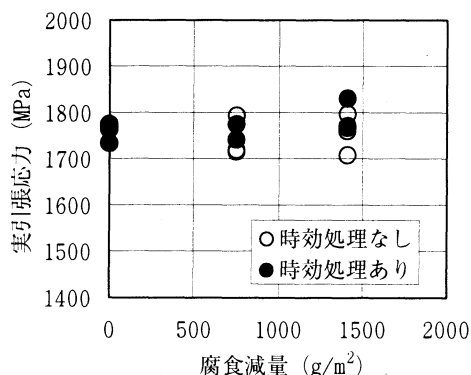


図-5 腐食裸鋼線の実引張応力

試験体 d では亜鉛めっきは腐食によりほとんど消費され、地鉄の腐食が局部的に進行し、表面に凹凸が生じていた。ただし、局部的にえぐれるように腐食するいわゆる孔食は見られなかった。

腐食生成物除去後の裸鋼線の外観を表-2 に示す。裸鋼線では、全面が比較的均一に腐食しており、表面は比較的平滑であった。腐食が進行した試験体 g は全面が腐食しており、一部でアバタ状の凹凸が認められたが、腐食は深くはなく、孔食も見られなかった。

### 3. 引張強度・伸び・ねじり強度

#### (1) 引張強度

腐食させた亜鉛めっき鋼線の引張試験を実施した。試験体は 500mm とし、中央 250mm 部分の両端を試験機に固定した。固定部分は腐食しないよう防食テープを巻いて保護した。腐食減量に対する亜鉛めっき鋼線の公称引張応力(破断力を初期公称断面積で除した応力)の変化を図-2 に示す。公称引

張応力は、腐食の進行とともに低下している。一方、図-3 に示す実引張応力は腐食が進行しても変化していない。ここで、実断面積は、亜鉛めっき鋼線の腐食減面部の直径をノギスで数箇所計測し、平均的な断面積を算出した。実引張応力は破断力をこの腐食後の平均実断面積で除した応力である。図-2 および図-3 より、1 本あたりの破断力は腐食により減少するが、実断面積あたりの引張応力は腐食前後では同一であることがわかる。

裸鋼線の引張試験結果を図-4 および図-5 に示すが、亜鉛めっき鋼線と同様に、腐食の進行に伴い公称引張応力は低下するが、実引張応力の低下は認められない。

水素発生を伴う条件下で腐食した高強度鋼中には水素が取り込まれ、水素脆化するおそれ破壊の危険性が増加することが知られている<sup>11)</sup>。ただし、鋼中水素は常温においても、乾燥状態に置かれると空气中に放出する。本試験では、鋼中水素の影響を調査するため、鋼中水素が放出しないよう、腐食試験槽から取り出した腐食亜鉛めっき鋼線は引張試験実施時までドライアイス保管した。

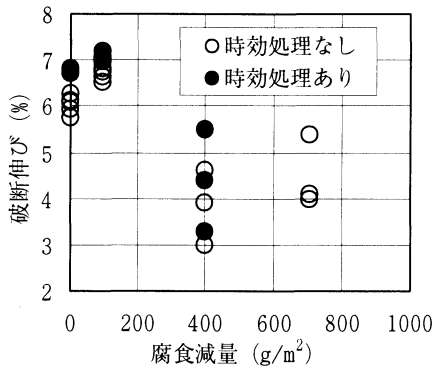


図-6 腐食亜鉛めっき鋼線の破断伸び

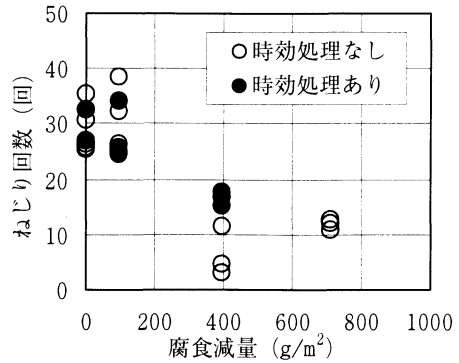


図-8 腐食亜鉛めっき鋼線のねじり回数

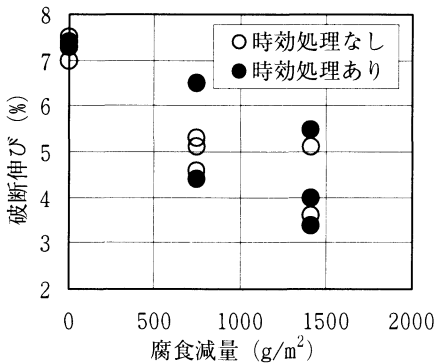


図-7 腐食裸鋼線の破断伸び

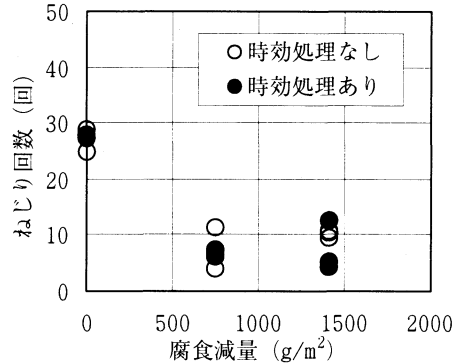


図-9 腐食裸鋼線のねじり回数

また、腐食後の亜鉛めっき鋼線を150℃で1時間加熱する処理(時効処理)を行うことにより鋼中水素を放出させた試験体もあわせて作成し、引張試験を行い、鋼中水素量の影響を探った。その結果、図-2から図-5に示されるように、亜鉛めっき線と裸鋼線のいずれも時効処理の有無による顕著な差は認められず、鋼中水素の影響は認められなかった。

## (2) 伸び

腐食の進行に伴う亜鉛めっき鋼線の引張破断伸びを図-6に示す。伸びは標点間距離を50mmとして測定した。亜鉛めっき鋼線において、腐食減量が100g/m<sup>2</sup>程度で亜鉛が残存している腐食レベル1では、伸びはほとんど低下していない。しかし、腐食減量が約400g/m<sup>2</sup>の腐食レベル2、すなわち亜鉛が腐食により消費され地鉄の腐食が進行し始めるレベルからは、伸びが著しく低下する傾向が認められる。裸鋼線の引張破断伸びを図-7に示すが、亜鉛めっき鋼線と同様、初期は7%であった伸びが、腐食の進行とともに著しく低下している。

また、亜鉛めっき鋼線と裸鋼線のいずれも、時効処理の有無によって、伸びには顕著な違いが認められない。したがって、腐食の進行による伸びの低下に対しても鋼中水素の影響は小さいと考えられる。

引張試験後の亜鉛めっき鋼線の破面は、亜鉛めっき鋼線および裸鋼線ともに、また腐食の有無および時効処理の有無に関係なく、全てカップコーン形状の延性破断形態であり、破断面の初期断面積に対する絞り値も約40%でほぼ一定であった。また、破面にはフィッシュアイなどの水素脆化の痕跡は見られなかった。なお、鋼線は腐食により生じた局所的な表面の凹凸部で破断していた。したがって、腐食亜鉛めっき鋼線の伸びの低下は表面凹凸には関連すると推定された。これに関する詳細は後述する。

なお、図-4, 5, 6, 7において、腐食減量が大きくなるほど、実験結果のばらつきが大きくなる傾向が見られる。これは、腐食が大きくなるほど表面凹凸が増大し、これに伴い亜鉛めっき鋼線の直径のばらつきも増大するため、実断面積の推定に誤差が生じたものと考えられる。

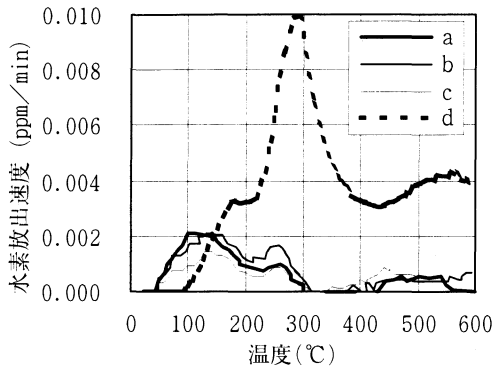


図-10 亜鉛めっき鋼線の鋼中水素放出曲線

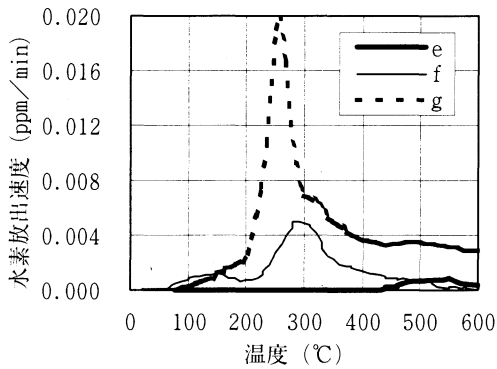


図-11 裸鋼線の鋼中水素放出曲線

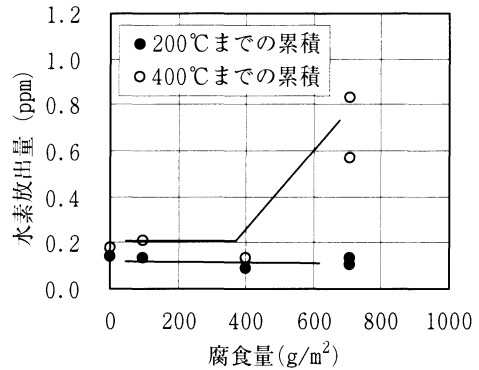


図-12 腐食亜鉛めっき鋼線の鋼中水素量

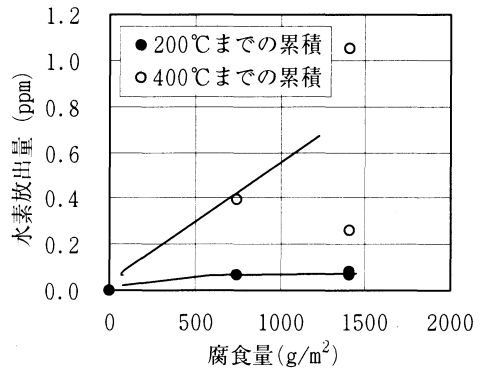


図-13 腐食裸鋼線の鋼中水素量

### (3) ねじり回数

橋梁用の亜鉛めっき鋼線はねじり試験が必須である。ねじり強度は鋼線のじん性と密接な関係があり、より線ロープは言うまでもなく平行線ケーブルに対しても、ねじり強度は重要な評価項目である。ねじり試験体は引張試験体の諸元と同一とし、500mm長の鋼線の中央250mm長部の両端を試験機に固定した。それをねじり回転させ、試験体が破断するまでの回転数を計測し、それをねじり強度として評価する。

亜鉛めっき鋼線の腐食減量と、破断にいたるまでのねじり回転数の関係を図-8に示す。伸びの結果と同様に、亜鉛が残存している状態ではねじり回数はほとんど低下していないが、亜鉛が腐食により消費され地鉄の腐食が進行し始めてからは著しくねじり回数が低下する。裸鋼線のねじり回数の変化を図-9に示すが、腐食の進行に伴い、ねじり回数の低下が認められる。ただし、亜鉛めっき鋼線と裸鋼線のいずれも、時効処理の有無に対しねじり回数の

顕著な違いは認められない。

ねじり試験における破壊形態は、通常、せん断形状である。しかし、ねじり回数の低下が認められた亜鉛めっき鋼線では、デラミネーション（らせん状やへき開などの異常破面）が認められた。腐食による表面凹凸に応力が集中し、じん性が低下し、このような破壊形態を示したものと推定される。

## 4. 腐食亜鉛めっき鋼線の水素量

### (1) 鋼中水素の測定方法

高強度鋼は鋼中に水素を吸収すると引張強度より低い応力で割れを生じることがあり、水素脆化あるいは遅れ破壊と呼ばれる。亜鉛めっき鋼線が腐食する場合には、水素が発生し、それが鋼中に蓄積される。しかし、過去において、腐食した亜鉛めっき鋼線に蓄積された水素量を測定された報告は国内外にほとんど例がない。

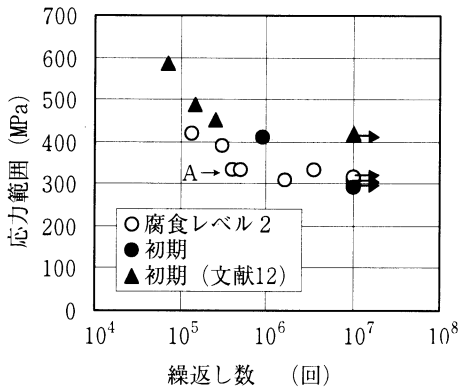


図-14 腐食亜鉛めっき鋼線の疲労強度

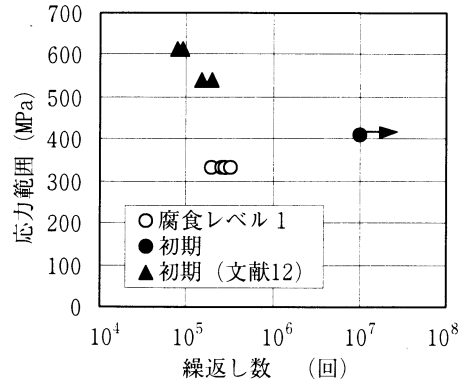


図-15 腐食裸鋼線の疲労強度

鋼中水素量は以下の手順で測定した。100mm 長さの亜鉛めっき鋼線および裸鋼線を腐食させた後、水素が放出しないようにドライアイスで保存した。測定直前に、鋼線表面の残留亜鉛めっきや腐食生成物をサンドブラストで除去した。これを、アルゴン雰囲気石英管内部に設置し、常温から 100℃/時間で加熱し、放出水素量をガスクロマトグラフィーにより測定した。

## (2) 鋼中水素量の測定結果

亜鉛めっき鋼線の鋼中水素放出曲線を腐食レベル毎に示した結果を図-10 に示す。初期試験体 a から腐食レベル 2 試験体 c まではほぼ同等であるが、腐食レベル 3 試験体 d では 300℃ 付近のピークの増大が認められる。

裸鋼線の結果を図-11 に示すが、初期試験体 e では全く放出は認められない。なお、裸鋼線のめっき層は 10% 硫酸水溶液により除去したため、これに伴って発生する水素の影響を除くため試験前に 100℃ で一日加熱処理した。腐食させた裸鋼線では 250~300℃ 付近のピークの増大が認められる。

亜鉛めっき鋼線において、200℃ 加熱までに放出した累積水素量と 400℃ 加熱までに放出した累積水素量を図-12 に示す。200℃ 以下での加熱により放出された鋼中水素量は腐食の進行によらずほぼ一定で、最大でも 0.2ppm 程度と小さい値を示した。図-13 に示すように、裸鋼線においても同様の傾向であった。

過去の研究により、200℃ 以下で放出される第 1 ピーク水素 (拡散性水素) が遅れ破壊に影響すること、しかし累積放出量が 0.7ppm 以下では遅れ破壊が生じないことがわかっている<sup>12), 13)</sup>。したがって、

今回の測定値は遅れ破壊は起こすレベルにないことが理解される。

一方、200℃ 以上で放出される第 2 ピーク水素 (非拡散性水素) は遅れ破壊には影響しないことは確認されている。しかし、疲労やねじり特性への影響度は明確にされておらず、今後の研究課題である。

なお、亜鉛めっき鋼線の初期材および軽度の腐食材に見られる拡散性水素は (図-10)、亜鉛めっきの製造過程で蓄積されたものと考えられる。一方、腐食が進行するにつれ増加する非拡散性水素は、腐食反応により発生した水素が鋼中に強固にトラップされ、逃げ場がなくなり累積されたと推定される。

## 5. 腐食亜鉛めっき鋼線の疲労強度

吊橋主ケーブルに発生する応力は死荷重によるものが支配的であり、活荷重による応力範囲は比較的小さい。一方、吊橋ハンガーロープや斜張橋ケーブルには活荷重や風による振動によって応力範囲は大きくなり、疲労の照査が不可欠である。ここでは腐食させた亜鉛めっき鋼線の疲労試験を行い、腐食の進行に対する疲労特性の変化について調査した。

疲労試験には電磁共振型疲労試験機を用い、片振式引張疲労試験とした。試験体は 350mm 長とし、中央の 100mm 長部の両端を試験機に固定した。試験体の両端は、ねじ切り加工し、ボルト止めにより試験機に定着した。載荷応力範囲は 300MPa~420MPa、最小応力は 550MPa、繰返し速度は 63Hz とした。

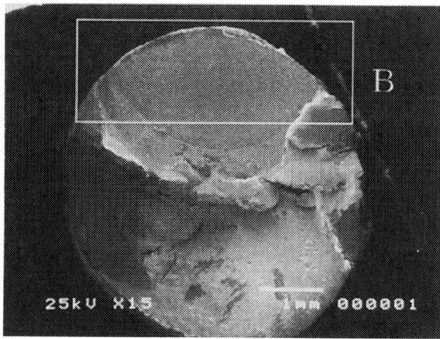


図-16 疲労試験破面の電子顕微鏡写真

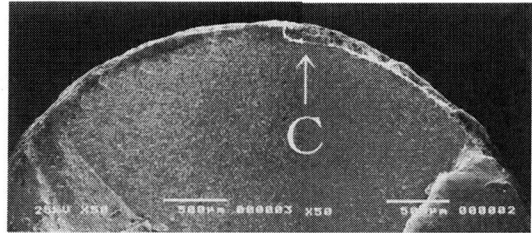


図-17 疲労試験破面の電子顕微鏡写真 (図-16のB部)

亜鉛めっき鋼線の疲労試験結果を図-14 に示す。図中には過去に実施された実験結果<sup>12)</sup>も示した。なお、これらの疲労試験は今回の疲労試験と同一の状態で実施されている。初期の亜鉛めっき鋼線は、応力範囲 400MPa に対し  $10^7$  回以上の繰返しでも疲労破壊しない。一方、腐食レベル 2 の亜鉛めっき鋼線では 320MPa の応力範囲に対し、約  $5 \times 10^5$  回で破断した。裸鋼線の疲労試験結果を図-15 に示す。亜鉛めっき鋼線と同様に、腐食裸鋼線は初期裸鋼線より疲労強度が低下している。以上のように、試験体の本数は十分とは言えないものの、腐食亜鉛めっき鋼線の疲労強度は初期材より大幅に低下することは明らかである。

腐食亜鉛めっき鋼線(図-14のA点)の破面の電子顕微鏡写真を図-16 に示す。図-16 中のB部を拡大した図-17 より、約  $100 \mu\text{m}$  深さの腐食部Cを起点とした亀裂が入り、それが伝播して破壊したと推定される。この破断面は、典型的な疲労破壊の破面形態を示している。腐食の進行に伴い、亜鉛めっき鋼線表面に凹凸が生じ、この部位に応力集中するため疲労特性が低下したものと推定される。

過去の研究により<sup>14)</sup>、腐食環境下にある高強度鋼では、応力範囲が小さい領域においても疲労限が存在しないことがわかっている。疲労限が存在しない場合には、小さな応力範囲でも繰返し回数が多くなると疲労破断に至る可能性があり注意を要する。また、今回は試験片が乾いた状態で疲労試験を実施したが、試験中も湿った環境に設置すれば、疲労強度がさらに低下する可能性もある。今後、種々の応力範囲や平均応力に対する疲労試験、湿润状態を保持した疲労試験などを実施する必要がある。

## 6. 強度特性の低下原因の推定

### (1) 腐食部の断面光学顕微鏡観察

単位断面積あたりの引張応力が変化していないことから、亜鉛めっき鋼線の材料そのものは変化していないと考えられる。したがって、伸び、ねじり強度や疲労特性が低下した原因は、腐食による亜鉛めっき鋼線の表面凹凸であると推定される。腐食亜鉛めっき鋼線と裸鋼線の代表的な腐食部の断面光学顕微鏡写真を表-3 および表-4 に示す。

腐食レベル 1 に見られるように、亜鉛めっきが残存し地鉄の腐食が進行していない場合には、地鉄はほとんど平坦である。しかし、腐食レベル 2 に見られるように、腐食の進行とともに腐食により地鉄表面に凹凸が生じている。この部分に応力が集中し、伸びやねじり破断回数が低下したものと考えられる。ただし、腐食レベル 3 に見られるように、さらに腐食が進行しても腐食部の形状は比較的平坦であり、表面凹凸の形状は大きく変わらない。したがって、伸びおよびねじり強度は大幅に低下しなかったと考えられる。

### (2) 腐食面を機械切削した亜鉛めっき鋼線の伸び

腐食により生じた表面凹凸の強度低下への影響を明確にするため、腐食凹凸を機械切削した亜鉛めっき鋼線を作成し、その引張試験を実施した。腐食した試験体を、凹凸が無くなるまで(約 4mm 径)まで機械切削した。亜鉛めっき鋼線と裸鋼線の凹凸切削前後の破断伸びを図-18 および図-19 に示す。腐食した亜鉛めっき鋼線および裸鋼線では、腐食に伴って破断伸びは低下しているが、凹凸を機械切削した試験片では、亜鉛めっき鋼線および裸鋼線のいずれも、破断のびは初期材と同等レベルに回復した。



表-3 腐食亜鉛めっき鋼線断面の光学顕微鏡写真

腐食レベル	外観	光学顕微鏡 25倍	光学顕微鏡 100倍
初期			
1			
2			
3			

表-4 腐食裸鋼線断面の光学顕微鏡写真

腐食レベル	外観	光学顕微鏡 25倍	光学顕微鏡 100倍
初期			
1			
2			

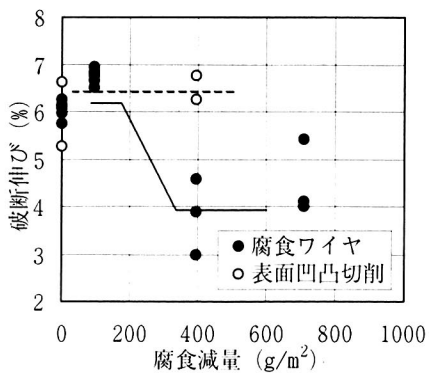


図-18 凹凸を切削した亜鉛めっき鋼線の破断伸び

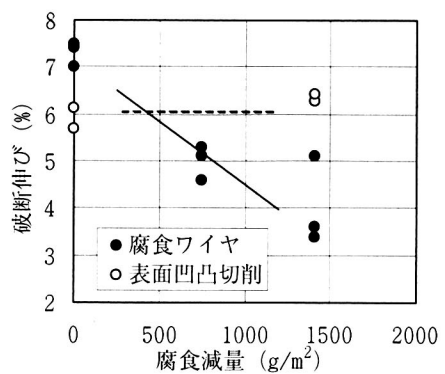


図-19 凹凸を切削した裸鋼線の破断伸び

このことにより、表面凹凸が伸び低下の主原因であることが明確である。腐食による疲労強度の低下についても表面凹凸が影響していると考えられ、今後、同様の試験により確認する予定である。また、鋼材に関する既研究においても、腐食した鋼板の伸びが低下すること、および、その原因は表面凹凸部での応力集中であるとの解析結果が報告されている<sup>15)</sup>。今後、腐食した亜鉛めっき鋼線に関しても、破断面の詳細観察および腐食により生じた表面凹凸の計測を実施し、強度低下と腐食度との関係を理論的に解明する計画である。

## 7. まとめ

湿潤ガーゼ巻き付け法により腐食促進させた亜鉛めっき鋼線および裸鋼線の強度特性について研究した。得られた知見を以下に述べる。

- 1) 亜鉛めっき鋼線に関しては、腐食の進行に伴い公称引張応力は低下したが、実引張応力は低下しなかった。しかし、亜鉛めっきが腐食により消費され地鉄の腐食が進行しはじめた時点から、伸びおよびねじり強度が著しく低下した。
- 2) 裸鋼線に関しても、腐食により公称引張応力は低下したが、実引張応力は低下しなかった。しかし、腐食に伴い伸びおよびねじり強度が低下した。
- 3) 腐食した亜鉛めっき鋼線の鋼中水素量を測定した。吸収水素量は、伸びやねじり強度の低下および遅れ破壊を生じさせるレベルには達していなかった。
- 4) 腐食させた亜鉛めっき鋼線の疲労試験を実施した(応力範囲: 300MPa~420MPa, 最小応力: 550MPa)。試験体数は十分でないものの、腐食亜鉛めっき鋼線および裸鋼線の疲労強度は初期材より大幅に低下することが明らかであった。
- 5) 腐食部の断面光学顕微鏡観察より、腐食に伴い表面凹凸が生じることを確認した。腐食した亜鉛めっき鋼線の表面凹凸を機械切削した後、引張試験を実施したところ、腐食試験体の伸びは初期試験体と同等レベルに回復した。したがって、腐食に伴い表面凹凸が生じ、その部分に応力集中が生じ、伸び、ねじり強度、疲労強度の低下を生じさせると推定された。

本研究では、亜鉛めっき鋼線の腐食度と強度の関係を統一的に研究した。得られた腐食と強度に関する基礎データは、橋梁ケーブルの維持管理や安全性評価にきわめて有用であると考えられる。今後、ケーブルの腐食と強度に関する研究を続行し、既存ケーブルの合理的で安全な検査維持管理手法を確立していく計画である。

## 参考文献

- 1) 古家と彦, 北川 信, 中村俊一, 鈴木恵太, 聖生守雄: 吊橋ケーブルの腐食機構に関する研究, 土木学会論文集, No.637/V1-45, pp.103-114, 1999.
- 2) 北川 信, 古家と彦, 中村俊一, 鈴木恵太: 吊橋ケーブル送気乾燥システムの防食性能に関する研究, 土木学会論文集, No.672/V1-50, pp.145-154, 2001.
- 3) 湊理宙, 杉井謙一: 橋梁用ケーブルの損傷と補修, 神戸製鋼技報, Vol.38, No.1, pp.48-50, 1988.
- 4) 前田泰男: 因島ハンガーローブ開放調査について, 本四技報, Vol.25, No.97, pp.16-22, 2001.
- 5) Stahl, F.L. and Gagnon, C.P.: *Cable Corrosion*, ASCE Press, 1996.
- 6) Mayrbaul, R.M.: Corrosion in Suspension Bridge Cables, *16th Congress of IABSE*, pp.397-397, 2000.
- 7) 佐々木佳男, 木内見, 新家徹, 湊理宙, 西壽樹, 杉井謙一: 腐食ワイヤーの疲労強度解析, 神戸製鋼技報, Vol.38, No.1, pp.63-66, 1988.
- 8) Barton, C., Vermaas, G., DUBY, P., West, A. and Betti, R.: Accelerated Corrosion and Embrittlement of High Strength Bridge, *J. Materials in Civil Engineering*, pp.33-38, 2000.
- 9) 大西宏志, 梅原由紀夫, 松井繁之, 溝口茂, 岡村司: 張力を導入した PC 鋼材の腐食損傷と機械的性能の相関, 鋼構造年次論文報告集, 第 8 巻, pp.247-254, 2000.
- 10) 大西宏志, 松井繁之, 梅原由紀夫, 溝口茂: 腐食 PC 鋼棒の表面形状と残存性能, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1055-1062, 2001.
- 11) エリック, レヴィー: 腐食反応とその制御 (第 3 版), 産業図書, 1994.
- 12) 高橋稔彦, 樽井敏三: 橋梁ケーブル用高強度亜鉛めっき鋼線の開発, 製鉄研究, No.332, pp.53-58, 1989.
- 13) Tarui, T., Maruyama, N., Eguchi, T. and Konno, S.: Development of High Strength Galvanized Steel Wire for Bridge Cable, *IABSE Conference in Soul*, pp.114-115, 2001.
- 14) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎: 金属の腐食疲労と強度設計, 養賢堂, 1982.
- 15) 岡 実, 北田博重, 渡辺富雄: 腐食材の静的強度に関する実験的考察, 日本造船学会論文集, 第 167 号, pp.229-236, 1990.

(2002. 8. 5 受付)

## STRENGTH CHARACTERISTICS OF CORRODED GALVANIZED BRIDGE WIRES

Keita SUZUMURA, Shun-ichi NAKAMURA and Toshimi TARUI

Strength of corroded galvanized bridge wires were studied in this paper. Galvanized wires were wrapped with wet gauze and kept at high temperature, producing corroded galvanized specimens in different corrosion levels. Actual tensile strength of the corroded wires did not depend on the corrosion level. On the other hand, elongation and torsional strength decreased sharply after the zinc layer consumed and the steel started corrosion. It was estimated that this deterioration was caused by the surface roughness due to corrosion. This was verified by the tests which showed that elongation was recovered after the surface roughness of corrosion was smoothed. Volume of hydrogen absorbed in the corrode wires was measured, indicating that it did not reach a level to cause embrittlement.