0.82%C ピアノ線の腐食疲労被害について*

御 牧 拓 郎**

On Corrosion Fatigue Damage of 0.82%C Piano Wire

by

Takuro MIMAKI

(Faculty of Engineering, Doshisha University, Kyoto)

Though some investigations have been done to clarify the corrosion fatigue strength of steels, there is few investigation ever made on their corrosion fatigue damage.

In this paper some results of the corrosion fatigue test and the measurement of electropotentials are described to discuss the corrosion fatigue damage of 0.82%C piano wire.

From the results, the following conclusions were obtained ;

- (1) Piano wire of 0.82%C is heavily damaged within the first 20% of the total life.
- (2) The progress of the damage under the corrosion fatigue process is divided into three stages ; the first stage is the formation of corrosion pits, the second stage is the progression of some pits into cracks, and the third is a stage in which one of the crack propagates causing the specimen to break.
- (3) The number of cycles at which the electrode-potential reaches its maximum value, shows the end of the first stage.
- (4) The relation among the stress amplitude σ , the number of cycles to failure N and the number of cycles at maximum electrode-potential N_p is as follows.

$$\log_{10}\sigma = -0.65 \log_{10}N_p + 5.2$$

$$\log_{10}N = 2.32 \log_{10}N_p - 7.1$$

(Received Sep. 10, 1974)

1 緒 論

金属材料の腐食疲労強度に関しては、これまで種々の報告がなされている。^{1)~5)}しかしながら、これら金属材料特に実際に使用されている材料についての腐食疲労被害の進行過程についての報告は少ないようである。

本研究は実用材料として広範囲に使用されているピアノ線の腐食疲労被害の進行過程を明らかにすることを目的とするもので、本論文は0.82%Cのピアノ線について Wet-dry type の2段2重回転曲げ疲労試験、腐食電位測定などを行ない、ピアノ線の腐食疲労被害の進行過程について検討した結果について述べたものである。

2 試験片線材ならびに試験装置

本実験に使用した試験片線材は直径8mmの原線より6段階の引抜加工で直径4mm(全減面率75%)に引き抜かれた0.82%Cのピアノ線である。本試験片線材の化学成分を Table I に、機械的性質を Table II

Table I. Chemical compositions of specimen (%).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe
0.82	0.20	0.51	0.008	0.009	0.02	0.01	0.04	Bal.

Table II. Mechanical properties of specimen.

σ_B (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	Elongation (%)	Contraction of area (%)	Vickers hardness	
				Outside	Center
151.56	118.37	6.19	54.25	398	374

に示す。

本実験に使用した疲労試験機は島津中村式線材用高速回転曲げ疲労試験機である。また腐食疲労試験は試験片中央部が腐食ふん囲気⁶⁾にさらされるようになった特殊な腐食槽を取り付けて行なった。なお試験片線材に作用する応力繰返し速度は毎分4500回の一定に保った。

腐食剤としては、本学内の水道水(pH 7.8)を用い

* 原稿受理 昭和49年9月10日

** 正 会 員 同志社大学工学部 京都市上京区烏丸今出川

るとともに比較のため 3% NaCl 水溶液を用いた。

腐食電位の測定には飽和カロメル電極を用いるとともに、各応力における腐食電位を測定した。

3 実験結果ならびに考察

Fig. 1 に大気中ならびに腐食ふん囲気中（水道水ならびに 3% NaCl 水溶液噴霧中）において得られた S-N 曲線を示す。同図に示すごとく大気中における疲労限度は 50 kg/mm² である。一方水道水ならびに 3% NaCl 水溶液噴霧中の繰返し数 1×10^7 回での時間強度はそれぞれ 17 kg/mm², 10 kg/mm² と大幅に低下し、その低下率は約 66% および 80% である。

Fig. 1. S-N curves.

ピアノ線が腐食疲労によりどのように被害を受けるかを知るために、Fig. 1 の S-N 曲線を基に Wet-dry type の疲労試験を行なった。

岡本らは Wet-dry 試験を同一応力で第 1 次を腐食ふん囲気中で、第 2 次を大気中で行ない、被害率を第 2 次応力の繰返し数比で表わすことを提案している。しかしながら腐食疲労においては低応力領域においても被害は進行する。したがって第 2 次応力が大気中の疲労限度より低い場合が多く、この場合には第 2 次応力の繰返し数比は求められない。そこで本実験においては、この点を考慮して第 2 次応力は過大応力 (52 kg/mm²) を採用した。したがって求める被害 D は次のように表わせる。

$$D = (1 - N_1/N_2) \times 100 \quad (\%)$$

ここで N_1 は第 2 次応力での破断までの繰返し数、 N_2 は大気中疲労試験の過大応力 (52 kg/mm²) での平均破断繰返し数である。

なお、この被害を考察する場合、コーキング効果や応力の変動（過小応力から過大応力への変化）などの影響は無視した。

Figs. 2 および 3 に Wet-dry 試験の結果を示す。Fig. 2 に示すごとく第 1 次応力繰返し数が増すと第 2 次応力繰返し数は減少する。さらに第 1 次応力が大きくなるほどその減少の割合は大である。Fig. 3 に示すごとく 3% NaCl 水溶液噴霧中においても、これとほ

Fig. 2. Results of wet-dry type fatigue test. (In sprayed tap water)

Fig. 3. Results of wet-dry type fatigue test. (In sprayed 3% NaCl solution)

ぼ同様の傾向を示す。第 1 次応力が小なる場合、水道水噴霧中における時間強度は 3% NaCl 水溶液噴霧中に比較して大幅に低下している。しかし第 1 次応力が大なる場合にはその差はあまり明確ではない。

なお両図中 $\sigma = 0$ kg/mm² の曲線は、試験片線材を無応力状態の所定の繰返し数だけ腐食ふん囲気さらした後、第 2 次応力で疲労試験を行なったもので、静的腐食による被害を表わすと考えてさしつかえない。

これらの図をもとに全被害率と第 1 次応力繰返し数比との関係を Fig. 4 に示す。繰返し応力が小さい領域 ($\sigma = 26$ kg/mm² 以下) において、被害曲線は繰返し初期に急激な立ち上がりを示し、全寿命の初期約 20% までに大きな腐食疲労被害を受けている。その後被

Fig. 4. Relation between total damage and cycle ratio under corrosion fatigue test. (In sprayed tap water)

害の進展速度は急激に緩慢になり破断にいたっている。一方繰返し応力の大なる領域 ($\sigma = 34 \text{ kg/mm}^2$ 以上) では、前述と同様の傾向を被害曲線に示しているが、顕著な変化は認められず、繰返し応力の小なる領域と区別することができる。これは高い応力領域では腐食疲労による被害よりも、大気中と同様繰返し応力による被害が大きく、逆に低い応力領域では腐食および腐食疲労による被害が大なるためである。これらの傾向は 3% NaCl 水溶液噴霧中においても同様である。

Fig. 5 に全被害率と第 1 次応力繰返し時間 (腐食疲労時間) との関係を示す。同図よりわかるごとく、第 1 次応力が小さくなるにつれて被害曲線の初期の立ち上がりの傾斜はゆるやかになっている。さらに繰返し応力が 34 kg/mm^2 以上では繰返し数が増すとともにほぼ直線的に破断にいたっている。繰返し応力が $16 \sim 34 \text{ kg/mm}^2$ の間では疲労試験開始後、数時間で約 75% もの被害を受けるが、それ以後は被害を受ける速度は緩やかになり破断にいたっている。また繰返し応力が 10 kg/mm^2 以下では被害の立ち上がりもあまり急激でなく、かつその進行も緩やかである。なお繰返し応力 0 kg/mm^2 すなわち静的腐食によっても約 40 時間後には約 36% もの被害を受けることがわかる。

Fig. 5. Total damage curves. (In sprayed tap water)

Fig. 6 に 3% NaCl 水溶液噴霧中において得られた結果を示す。同図からも明らかなごとく水道水噴霧中のものとはほぼ同様の傾向を示しているが、その被害率は大きくなり繰返し応力 0 kg/mm^2 の 40 時間後の被害は約 60% にまで達している。したがってこれらのこ

Fig. 6. Total damage curves. (In sprayed 3% NaCl solution)

とから腐食疲労被害を考える場合、静的腐食による被害を十分に考慮する必要がある。

ここで前述の腐食疲労被害を三つの要素に分類して考える。

A: 繰返し応力のみによる被害 (大気中疲労試験による被害)。

B: 繰返し応力と腐食作用の相互作用により促進される被害。

C: 腐食作用のみによる被害 (静的腐食による被害)。

そこで実被害 = 全被害 - C = A + B を考え実被害と第 1 次応力繰返し時間との関係を示したものが Fig. 7

Fig. 7. Net damage curves. (In sprayed tap water)

である。繰返し応力が大なる場合、実被害は第 1 次応力繰返し時間にほぼ比例しているが、繰返し応力が 26 kg/mm^2 以下では、実被害は繰返し初期に急激に増加しその後繰返し時間とともにほぼ一定値をとり破断にいたることが明らかである。3% NaCl 水溶液噴霧中においてもこの傾向は同様であるが、実被害の値は水道水噴霧中におけるよりも大幅に小となっている。これは前述の C 項 (静的腐食による被害) が非常に大きいためである。

また実被害曲線の初期立ち上がり部の被害速度を求め、繰返し応力との関係を示したものが Fig. 8 である。水道水、3% NaCl 水溶液噴霧中ともに被害速度は繰返し応力に比例するとともに、両者とも繰返し応力が $16 \sim 18 \text{ kg/mm}^2$ で直線のこう配が変化している。この原因についてはさらに検討を加える必要がある。

Fig. 9 に腐食電位と腐食疲労時間との関係を示す。

Fig. 8. Relation between initial rate of net damage and corrosion stress.

Fig. 9. Relation between corrosion potential and first period.

同図に示すごとく腐食疲労試験開始直後、試験片線材の腐食電位は急激に貴性化している。その後繰返し応力の大なるものを除いて腐食電位は徐々に卑となり、破断直前になると急激に卑性化する。そこでこれら Figs. 5, 7, 9 より腐食疲労被害の進行過程を次に示すごとく3段階に分ける。

第1期：繰返し応力と腐食作用の相互作用により急激かつ集中的に被害を受ける期間。

第2期：腐食作用の停留により、主に繰返し応力のみによって緩慢に被害を受ける期間。

第3期：き裂が急激に発展し、破断にいたる期間。

第1期での被害が急速に増大するのは、試験片線材が腐食剤に接しアノード腐食をし、繰返し応力の作用によるすべり線の増加や、材料表面の組織の不均一などにより試験片線材表面に食孔が数多く発生するためである。しかし腐食電位の貴性化は試験片線材が腐食されにくい状態に進んでいることを示すものである。したがって腐食作用が鈍くなると、繰返し応力と腐食作用の相互作用による被害の進行が鈍り、腐食電位が最高値に達すると徐々に第2期に移行すると考えられる。

しかしながら Figs. 5, 7, 9 からわかるごとく、繰返し応力が大きい場合や、腐食作用の強い場合などでは第2期にあたる過程はほとんど認められず第1期より直接第3期にいたっている。

Fig. 10. Relation between maximum corrosion potential and corrosion stress.

Fig. 10 に最高腐食電位と繰返し応力との関係を示す。繰返し応力 26 kg/mm² 以下においては、最高腐食電位は繰返し応力に比例してわずかながら低下しているが、26 kg/mm² 以上になるとその低下の割合は急激に大となっている。したがって繰返し応力が大きくなると腐食されやすさが増すため腐食疲労被害は大となり、前述の事柄と一致する。

Fig. 11 に繰返し応力 σ および破断までの繰返し数 N と腐食電位が最高となる繰返し数 N_p との関係を示す。 $\sigma-N_p$ ならびに $N-N_p$ の関係はそれぞれ次のように表わすことができる。

$$\log_{10}\sigma = -0.65 \log_{10}N_p + 5.2$$

$$\log_{10}N = 2.32 \log_{10}N_p - 7.1$$

これら Figs. 9 ならびに 11 より腐食電位が最高となるのは前述の第1期の終了と考えられる。

Fig. 11. Relation between N , σ , and N_p .

4 結 論

以上の結果よりピアノ線の腐食疲労被害に関して、次のような結論を得た。

(1) ピアノ線の腐食疲労による被害は全寿命の初期 20% までに集中的に受ける。

(2) 腐食疲労被害の進行過程は次の3段階に分けられる。第1期：繰返し応力と腐食の相互作用により急速かつ集中的に被害を受ける期間。第2期：腐食作用の停留により主に繰返し応力による疲労により緩慢に被害を受ける期間。第3期：試験片線材表面に生じたき裂が急速に進展し破断にいたる期間。

(3) 繰返し応力が大であり、腐食剤の腐食作用が強くなるとともに第2期は短くなり第1期より直接第3期に進展する。

(4) 腐食電位が最高値を示す繰返し数は、第1期の終了と考えられる。さらに $\sigma-N_p$ ならびに $N-N_p$ の関係は次のようになる。

$$\log_{10}\sigma = -0.65 \log_{10}N_p + 5.2$$

$$\log_{10}N = 2.32 \log_{10}N_p - 7.1$$

本研究を行なうにあたり種々有益な助言を賜った同志社大学工学部三木英雄教授ならびに多大のご助力

を賜った日立電線株式会社下嶋清志氏に深く感謝の意を表する次第である。

(昭和48年 5月22日 日本材料学会第22期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 中村 寛, 御牧拓郎, 材料, **15**, 595 (1966).
- 2) Gough, H.J., J. Inst. Metals, **49**, 17 (1962).
- 3) 遠藤吉郎, 材料試験, **9**, 97 (1960).

- 4) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 日本機械学会論文集, **34**, 44 (1968).
- 5) 岩元兼敏, 日本機械学会論文集, **36**, 1052 (1970).
- 6) Nakamura, H., and T. Mimaki, Proc. 6th Japan Cong. on Testing Materials, 146 (1963).
- 7) McAdam, D.J., J. Proc. ASTM, **28-II**, 117 (1928).
- 8) 岡本舜三, 北川英夫, 日本機械学会誌, **62**, 204 (1959).