620.194.8:539.43.019.1

腐食疲れにおける繰返し速度の影響について*

河本 実**, 中川隆夫***, 古茂田 弘****

Influence of Frequency on Corrosion Fatigue

by Minoru KAWAMOTO, Takao NAKAGAWA,
and Hiroshi KOMODA

In order to clarify the influence of the speed of stress cycles on the fatigue strength under corrosion, the following three kinds of corrosion fatigue tests were carried out on the carbon steels: (1) the ordinary corrosion fatigue tests for the three kinds of frequency, by rotating-beam bending, (2) the corrosion fatigue tests in which the repeated stressing under corrosion and the pure corrosion without repeated stressing are alternatively applied, by rotating-beam bending, and (3) the corrosion fatigue tests of the two kinds of frequency, by repeated impact. These test results were summarized and discussed as follows: (1) The influence of speed of stress cycles on the fatigue strength under corrosion should be determined by both the time rate of deformation and the time of corrosion. (2) The coefficient of fatigue effect which determines the factors dominating:

failure under corrosion-fatigue was proposed as the following expression: $k_f = -\frac{d(\log t)}{d(\log N)}$.

The reciprocal of this coefficient $1/k_f$ was termed as the coefficient of corrosion effect. The value of k_f depends not only upon the kind of material but upon the applied stress level.

1. 緒 言

腐食疲れにおいて繰返し速度が疲れ強さに著しい影響を及ぼすことは古くから知られている⁽¹⁾。しかし、この原因が単に繰返し速度の差異による破壊までの時間の差異、すなわち、腐食にさらされる時間の相違に起因するものか、あるいは繰返し速度が異なるために材料のうけるひずみ速度の違いが腐食下における疲れ強さを本質的に変化せしめるものかはまだ明らかにされていない⁽²⁾⁽³⁾。空中疲れ試験においても、わずかに認められる繰返し速度の影響は後者の原因によるものと思われる。

本研究においては、このような腐食疲れにおける繰返し速度の影響の原因を追求することを目的とし、鋼について繰返し速度を変えた場合の疲れ試験のほか、ひずみ速度は一定とし、破壊までの時間を変えた場合、あるいはひずみ速度も破壊までの時間もほぼ一定とした場合など特殊な疲れ試験を実施し、それらの結果より疲れ強さに及ぼす繰返し速度の影響について考察した。

2. 実験方法

第1図は本研究において行なった種々の場合の腐食疲れ試験における応力の変化の状態を示すもので、(a), (b), (c) および (d) は回転曲げ疲れ試験によるものであり、(e) および (f) は繰返し衝撃曲げ試験に

第1図 本実験における応力の変動状態
(試験の種類)

* 昭和34年4月2日 第36期通常総会講演会において講演、
原稿受付 昭和35年12月20日。

** 正員、京都大学工学部。

*** 正員、神戸大学工学部(神戸市灘区六甲台町1)。

**** 正員、品川白煉瓦会社。

よるものである。回転曲げ試験では繰返し速度 1730 および 3200 rpm に対しては Wöhler 式片持はり回転曲げ試験機、繰返し速度 7500 rpm に対しては西原式高速片持はり回転曲げ疲れ試験機を用いた。(a)、(b) および (c) は単に試験機の運転速度を変えた場合で、(a) は 1730 rpm, (b) は 3200 rpm, (c) は 7500 rpm である。このように運転速度を変えた場合には、一定繰返し数に達するまでの時間が必然的に相違するため、腐食にさらされる時間も相違し、そのため、運転速度の相違による疲れ強さの相違がひずみ速度の相違によるものか、あるいは腐食時間の相違によるものか判然としない。(d) はこの欠点を除去するために行ったもので、繰返し速度は 3200 rpm であるが、腐食疲れの間に繰返し応力を与えない単純腐食の時間を適当にそう入したものである。すなわち、まず 1730 rpm の繰返し速度で試験を行なって一定の応力レベルである繰返し数にて破断したとすると、次に 3200 rpm の繰返し速度で同一応力に対する腐食疲れを行なうに当たり、同一繰返し数に達するに要する時間が 1730 rpm の場合より短くなるので、その時間

の差を適当に等分（本実験では 10 等分）した時間だけ繰返し応力を与えない単純腐食を行なう。その単純腐食を与える時期は 1730 rpm にて破壊までの繰返し数を 10 等分し、その等分された各繰返し数の末期とする。したがってそう入した単純腐食の末期における応力繰返し数は 1730 rpm にて試験したときの同時期における繰返し数に等しい。

腐食疲れにおける変形速度の影響と時間の影響とを分離考察するには (d) の試験において繰返し数を与えるべく細分し、単純腐食をそう入することが望ましい。しかし、回転曲げ試験において繰返し数を極端に細分することは実際上困難であるから、ここではさらに (e) および (f) に示すような繰返し衝撃曲げ試験をも行なった。これには松村式繰返し打撃試験機を使用した。(e) は繰返し速度 29 打撃数/min, (f) は 103 打撃数/min である。繰返し衝撃曲げ試験では、荷重の作用はハンマの落下によるものであるから、同一衝撃エネルギーを与えるときは、繰返し速度（毎分の打撃数）を変えても試験片のひずみ速度は変わらず、ただ荷重が作用しない単純腐食の時間が異なるのみであり、腐食時間の影響を純粋にとり出して考察することができる。

腐食液はいずれの場合も水道水を用いた。また比較のため、腐食を行わない空中疲れ試験をもあわせ行なった。この場合の繰返し速度は回転曲げでは 1730 rpm, 繰返し衝撃では 81 打撃数/min とした。

3. 試験材料および試験片

本研究に用いた材料は高炭素鋼および中炭素鋼で前者は回転曲げ試験に、後者は繰返し衝撃曲げ試験に用いた。その化学成分を第 1 表に、機械的性質を第 2 表に示す。いずれの材料も圧延のままのものを使用し、機械加工により所要の寸法の試験片に仕上げた。試験片の形状および寸法を第 2 図に示す。片持はり回転曲げ試験片は直径 10 mm の平行部分を有する丸棒平滑試験片であり、繰返し衝撃試験片（両端支持、均一曲

(a) 低、中速用回転曲げ試験片 (Wöhler 式)

(b) 高速用回転曲げ試験片 (西原式)

(c) 繰返し衝撃曲げ試験片 ($\alpha_k=1.6$)

第 2 図 疲れ試験片

第 1 表 試験材料の化学成分 %

材 料	C	Si	Mn	P	S	備 考
硬 鋼	0.60~0.75	<0.02	0.60~0.90	<0.045	<0.05	回転曲げに使用
半 硬 鋼	0.36	0.24	0.62	0.026	0.028	繰返し衝撃に使用

第 2 表 試験材料の機械的性質

材 料	降 伏 点 σ_s kg/mm ²	引 張 強 さ σ_B kg/mm ²	真 破 断 力 σ_T kg/mm ²	伸 び δ %	絞 り ψ %	回転曲げ耐久限度 σ_w kg/mm ²
硬 鋼	41	80	100	11	25	34.4, 32.7
半 硬 鋼	32	53	62	22	36	23

げモーメント形)は直径 19 mm の丸棒の中央に切欠き底断面の直径 18 mm, 切欠き底丸み半径 2.5 mm の浅い環状切欠きを付したものである。切欠き部分の寸法の測定は万能投影機で行なった。曲げに対する形状係数 (Neuber によるもの) は $\alpha_k=1.6$ 程度である。

4. 実験結果

試験の結果を第3図および第4図に示す。第3図は回転曲げ疲れ試験における S-N 線図である。第3図に破線で示した 3200 rpm の曲線は腐食疲れと単純腐食とを交番させた試験 [第1図の (d)] の結果を示す。第4図は繰返し衝撃曲げ試験の結果で、種々の繰返し速度に対し、縦軸に与えた衝撃エネルギー E を、横軸に破断までの打撃回数 N をとり、S-N 線図と同様の表示を行なったものである。

5. 実験結果の考察

第3図から明らかなように、空中疲れの耐久限度以上の応力範囲では、疲れ寿命に及ぼす繰返し速度の影響はほとんどみられないが、空中疲れの耐久限度以下の応力範囲では、腐食の影響が著しく、かつ疲れ強さに及ぼす繰返し速度の影響も顕著であり、繰返し速度が減るほど疲れ強さは低下している。第3図の横軸の破断繰返し数 N のかわりに破断までの時間 t で表わせば第5図のようになる。この図で、低応力範囲では破断繰返し数をとった場合と同様、繰返し速度が低いほど破断時間は短い。第3図の破線にみられるように、繰返し速度 3200 rpm の繰返し応力と、繰返し応力を与えない単純腐食とを交番作用させ、同一繰返し数に達するに要する時間を、1730 rpm の腐食疲れのそれとほぼ同一にした試験 [第1図 (d)] においては、この破線で示される曲線が破断繰返し数 N を横軸にとった第3図では 3200 rpm の腐食疲れの曲線に近いけれども一致しておらず、また破断時間 t を横軸にとった第5図でもこの曲線が 1730 rpm の腐食疲れの曲線と一致していないことから、繰返し速度の影響は破断繰返し数のみによって表わされるものではなく、また腐食時間のみでも表わさ

れ得ないものであることがわかる。この試験では、試験機の運転速度を変えれば当然試験片の変形速度が変化するから、これが疲れ寿命に及ぼす繰返し速度の影響の一つの原因であると思われる。

一方、第4図の繰返し衝撃試験結果においては、衝撃エネルギー E の大きい場合には、回転曲げの場合と同様に繰返し速度の影響はみられないが、衝撃エネルギーの低い場合には繰返し速度の影響は顕著であり、繰返し速度が低いほど破断繰返し数は少ない。この図の

第3図 硬鋼の S-N 線図 (回転曲げ)

第4図 半硬鋼の E-N 線図 (繰返し衝撃曲げ)

第5図 硬鋼の S-t 線図 (回転曲げ)

横軸を破断時間 t で書き直すと第 6 図のようになる。これによると、衝撃エネルギーが十分低ければ繰返し速度の異なる二つの曲線は接近しており、繰返し速度の

第 6 図 半硬鋼の $E-t$ 線図 (繰返し衝撃曲げ)

第 7 図 硬鋼の $t-N$ 線図 (回転曲げ)

第 8 図 半硬鋼の $t-N$ 線図 (繰返し衝撃曲げ)

相違による破断時間の差はわずかとなっている。前述のようにこの試験では運転速度を変えても、荷重または応力の波形は同じであるから、試験片の変形速度は変化せず、ただ応力を与えない単純腐食の時間が異なるのみである。したがって、この実験の結果は繰返し速度の影響の一因子である変形速度の相違を除き、純粹腐食の時間の影響を取出したことになる。繰返し速度を変えても、変形速度が変化しなければ、疲れ強さに及ぼす繰返し速度の影響としては主として腐食時間の影響が現われることを示している。

以上のように腐食疲れにおける疲れ破壊は繰返し数のみによって決定されるものでもなければ、また、時間のみによって決定されるものでもなく、応力繰返しと腐食時間の両方が同時に作用しているものと思われる。それゆえ材料に及ぼす応力繰返しの作用と腐食時間の作用のいずれがどの程度支配的であるかは、たとえば、縦軸に破断時間 t 、横軸に破断繰返し数 N を

とった $t-N$ 線図に実験結果を記入することによって表わされる。すなわち、ある応力(または衝撃エネルギー)に対し、繰返し速度を種々に変えた場合の $t-N$ 曲線が横軸に垂直に近ければ、破断は主として繰返し数で決まり、疲れの効果は大きい、横軸に平行ならば破断は主として時間で決定され、腐食時間の効果は大きい。それゆえ、ここでは破断繰返し数 N と破断時間 t との間に

$$t = f(N) \quad (\text{繰返し応力一定})$$

.....(1)

の関係があるとし、腐食疲れにおける疲れ効果をこの曲線のこう配

$$-\frac{dt}{dN} = k_f \quad \text{.....(2)}$$

で表わし、腐食時間の効果をその逆数で表わす。 k_f を疲れ効果係数、 $1/k_f$ を時間効果係数と呼ぶことにする。 k_f の値は材料によって異なるのはもちろんであるが、繰返し応力の大きさにも依存する。すなわち、同一材料でも繰返し応力が高ければ k_f の値は大きく、応力が低ければ k_f の値は小さい。第 7 図および第 8 図は前述の実験結果を両対数目盛の $t-N$ 線図に描いたものである。 t と N とは両対数目盛でほぼ直線関係にあるものと仮定し、

$$tN^m = C \quad (m, C \text{ は定数}) \quad \text{.....(3)}$$

とおくと、この式の定数 m は両対数目盛にとったときの $t-N$ 関係を表わす直線のこう配を示す。よって(2)式のかわりに、ここでは疲れ効果係数 k_f を

$$k_f = -\frac{d(\log t)}{d(\log N)} = m \dots\dots\dots (4)$$

で表わすことにすれば, この m の値は破断が繰返し数または時間のいずれによって決定されるかを定量的に示すものとなる. 第7図および第8図より明らかに, 応力が高いときには $\log t \sim \log N$ 関係を表わす曲線は横軸に垂直な直線であり, 破断が主として繰返し数で決定されるが応力が低くなるにつれて直線は水平となり, 破断が時間で決定されるようになる. 第7図および第8図より k_f の値をもとめ, これを縦軸にとり, 繰返し応力 (または繰返し衝撃エネルギー) を横軸にとって, 疲れ効果の応力依存性を図示したものが第9図と第10図である. 第9図にみるように, 回転曲げでは k_f の値は繰返し応力の増加とともに直線的に増大するが, 第10図の繰返し衝撃曲げでは k_f の値は繰返し衝撃エネルギーの増加につれてやはり増大し, その関係は直線的でなく, 繰返し衝撃エネルギーの高いほど, その増加率は大きい. 第7図 (回転曲げ) において, 繰返し応力が 32 kg/mm^2 以下のときは $t-N$ の関係は直線的でなく, しかも右上がりの曲線となっており, このため k_f の値は負となっているが, これは次のように考えられる. 腐食疲れの場合, 繰返し速度が異なれば耐久限度が異なり, 繰返し速度が高いほど耐久限度が高いことは, 第3図にすでに示した

第9図 疲れ効果係数の応力依存性
(硬鋼, 回転曲げ)

第10図 疲れ効果係数のエネルギー依存性
(半硬鋼, 繰返し衝撃曲げ)

とおりであり, このため同じ繰返し応力といえども, 繰返し応力の低いとき, 低速の場合には σ/σ_w の値が, 比較的大きいから破壊が起るけれども, 高速の場合には, 耐久限度が高いので σ/σ_w の値は比較的小さく, したがって破壊は起らない. それゆえ, 第7図では, 破断を表わす実験点は繰返し速度を表わす右上がりの直線の上の無限遠方に位置するから, $t-N$ の関係はこの直線に漸近する曲線となり, このため k_f の値は負となる. 応力 32 および 30 kg/mm^2 , 繰返し速度 3200 rpm の二つの実験点は時間のみによる破壊 ($t-N$ 関係が横軸に平行な場合) と非破壊との中間の過渡的な場合に相当する. 疲れにおける耐久限度の存在がまだ十分に解明されていない現在の段階では, この中間の段階についてはよくわからない. いずれにしても, $t-N$ の関係が直線からはずれ, k_f の値が負となりはじめるのは繰返し速度が高い場合の耐久限度と作用繰返し応力とが等しくなったときであると考えられる.

以上のように疲れ効果係数 k_f の値は繰返し応力が高いときには $t-N$ の関係が繰返し速度に関せず直線になるとみられるので, k_f の値は繰返し速度に無関係であるが, 応力が低くなると上に述べた理由で, $t-N$ の関係は直線とはならず, したがって k_f の値は繰返し速度に依存する.

最後に疲れ効果係数 k_f は単に疲れの効果と時間の効果の割合を示すという理論的考察のために用いたものであるけれども, もしこの k_f の値が種々の材料, 種々の繰返し応力値に対して既知であるならば, 逆に腐食疲れにおける繰返し速度の影響を知ることができて, 腐食疲れ試験としては1種類の繰返し速度について行なっておけばよいことになる. また, この値の大小によって材料の腐食疲れにおける腐食時間によって破壊する難易の度が示され品質判定の一つの目安となるように思われる.

6. 結 言

鋼について腐食条件下で, 種々の繰返し速度で回転曲げ疲れ試験および繰返し衝撃曲げ試験を行ない, 腐食疲れ強さに及ぼす繰返し速度の影響ならびにその原因を研究した. 得られたおもな結論は次のとおりである.

(1) 腐食疲れ強さに及ぼす繰返し速度の影響は材料の変形速度と腐食時間の両方によって決定されるもので, このうちのいずれか一方によって決定されるものではない.

(2) 腐食疲れにおける破壊が繰返し数または時間

のいずれによって決定されるかは時間-繰返し数曲線 ($\log t \sim \log N$) のこう配を示す次の式

$$-\frac{d(\log t)}{d(\log N)} = k_f$$

なる疲れ効果係数を用いて定量的に表わすことができる。

(3) k_f の値は材料によって異なり、また繰返し応力に依存する。応力が高くなるにつれて k_f の値は増加する。すなわち、高応力では破壊は主として繰返し数で決定されるが、低応力では破壊は時間によって支配される。

(4) 耐久限度に近い低応力の場合を除けば、 k_f の

値は繰返し速度に無関係である。

本研究における回転曲げ疲れ試験は京都大学学生 (当時) 近山 進および前川寿三郎、繰返し衝撃試験は京都大学学生 (当時) 岸本秀弘が行なったものである。

文 献

- (1) D.J. McAdam, *Congres internat. l'essai Materiaux* (Amsterdam, 1928) I, 305.
- (2) 河本, 古茂田, 近山, 前川, 日本材料試験協会 第 4 期総会講演会前刷 (昭 30-5), 12.
- (3) 遠藤, 宮尾, 機械学会論文集, 24, 139 (昭 33-3), 167.

539.431.6.01:539.389.4:620.178.311.64

定応力および定ひずみ疲れ試験における ひずみおよび応力の挙動について*

河 本 実**, 中川隆夫***, 柴田俊忍****

On the Phenomena of Change of Amplitude of Strain and Stress Accompanied by the Constant Stress and Strain Amplitude Test

by Minoru KAWAMOTO, Takao NAKAGAWA,
and Toshinobu SHIBATA

The characteristics of the stress and strain amplitudes accompanied by the strain and stress cycling of constant amplitudes were investigated during the all life of test. Their phenomena are divided into five stages. If stress or strain amplitude has a value enough to fracture within 1000 cycles, the first and the second stages vanish. The fatigue strength of constant stress amplitude cycling is a little larger than the fatigue strength of the constant strain amplitude cycling. This may be explained by the phenomena of double repeated stress in two levels. The change of stress-strain hysteresis loop accompanied by cyclings is different from the changes of stress amplitude; although the dynamic modulus of elasticity does not change from about half life to fracture, the form of hysteresis loop changes and the area of loop decreases there.

1. 緒 言

従来、低応力疲れ試験における変形や⁽¹⁾⁽²⁾、定ひずみ試験における relaxation の試験結果⁽³⁾が報告されているが、いずれも平均荷重あるいは平均ひずみを与えた場合についての実験が多い。低繰返し数で破断する疲れが最近重要視され、定ひずみを与えた際の応力

の変化などについての実験結果⁽⁴⁾も発表されている。また、両振りの長時間疲れの場合について、定応力試験におけるひずみの変化や定ひずみ試験における応力の変化に関する実験結果も若干発表されているが⁽⁵⁾⁽⁶⁾、繰返し開始直後から破断直前までのこれらの挙動についての報告はほとんどない⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

本報告では、低炭素鋼について降伏点近傍の定繰返し両振りねじり応力、および定繰返し両振りねじりひずみを与えたときのひずみおよび応力の変化、およびヒステリシスループの変化を実験的に求め、これらの

* 昭和 35 年 11 月 2 日 第 38 期全国大会講演会において講演，原稿受付 昭和 36 年 4 月 12 日。

** 正員，京都大学工学部。

*** 正員，神戸大学工学部。

**** 准員，京都大学大学院 (京都市左京区吉田本町)。