

腐蝕と繰返応力を受ける構造用鋼の強さ

— 腐 蝕 疲 労 に つ い て —

岡 本 舜 三・北 川 英 夫

ま え が き

機械・構造物材料の破壊原因は疲労によるものが過半を占めるといわれ、なかでも、腐蝕と繰返し応力を同時に受ける材料は、腐蝕疲労現象によって特にその破壊が促進されることが知られている。実際に、老朽化し疲労破壊した材料を調べてみると、破損の原因が腐蝕疲労に関係づけられる事例にしばしば出遭う。したがって、戦時中一時中断されていたかにみえていた腐蝕疲労の研究も、最近再び着目され、各所で研究が始められるようになった。

腐蝕疲労においては、普通の疲労の場合と違って鋼材でも明確な疲労限が存在しないこと⁽¹⁾、繰返し速度の影響が大きいこと⁽²⁾⁻⁽⁷⁾、引張応力と圧縮応力の効果が違うこと⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾、ノッチや表面処理の影響が少ないこと⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾など顕著な特徴を示すことがすでに確かめられており、また、種々の金属材料についての実用上の腐蝕疲労限⁽²⁾⁽⁶⁾、腐蝕疲労防止策⁽¹⁰⁾⁽¹⁴⁾⁻⁽²⁵⁾、腐蝕疲労が乾燥時疲労限に与える影響⁽²⁶⁾などについて多くの研究が行われている。

筆者らは、最近発生した鉄道橋の破損原因を調査し、鋼橋の耐久度を研究する立場から、腐蝕疲労の研究を行っている。研究対象を主として普通の構造用鋼におき、腐蝕疲労の進み方、腐蝕疲労を受けた鋼材の強度の考え方、応力変動の影響、腐蝕疲労亀裂の性質等を、主として従来よりの試験方法によって研究しており、そのうち、興味ある2、3の結果について述べようと思う⁽²⁷⁾。

1. 試験方法の改善

腐蝕そのものが複雑な現象であり、材料の疲労的性質も比較的バラツキの多い統計量である⁽²⁹⁾⁻⁽³⁶⁾といわれているほどなので、腐蝕疲労実験には長時間安定かつ簡単な諸条件が与えられることがまず必要である。従来は試験片を液中に浸漬するか、または、液を注ぎながら繰返応力をかけるものが多いが、腐蝕作用には空気存在が必要⁽³⁷⁾であるため液と空気との境界の条件が問題になる。筆者らはそれを避ける意味で、試験片を塩化ビニール製チャンバーで覆いその中を細かい水霧で飽和しかつ空気を導入し、試験片表面が一樣な水滴または水煙に囲まれる条件にして、繰返荷重をかけた。この水霧はノズルよりのジェットを傾斜板に当てるか、または高速回転円板に液を注入することによって作った。装置は数種類試作したが、そのうちの2種類を写真1および表紙写真

(ノズル式)にて示す。

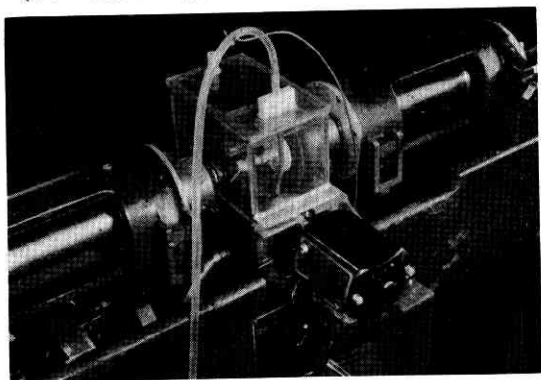


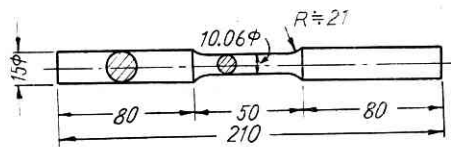
写真1 腐蝕装置（回転円板式）

使用液は、当所水道（地下水）を使用した液温は一連の関係実験中ほとんど一定であり $P_H=7$ であった。

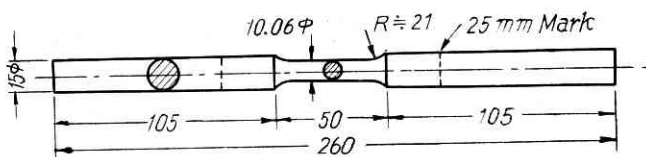
試験機は小野式回転曲げ疲労試験機を用い、荷重繰返し速度は約 1500 R. P. M. であった。

試験片は、第1図に示すような普通の型のもののほか第2図に示すような腐蝕疲労試験用の特殊な型のものを製作し、図に示す 25mm マークの所に、ゴムおよび塩化ビニール製の円板を装着して、試験機を腐蝕より保護するとともに絶えず空気がチャンバー内に供給されるようにした。

試験片素材は、普通の鉄道橋梁に現用されている SS 41 の 19mm 厚鋼板中より任意に1枚取り出したものから圧延方向に、回転曲げ疲労、板曲げ疲労、引張、衝撃、硬さ、化学分析等の諸試片を採取した。実際の使用状態での材料の強さを知る必要上から、実験のための試験片素材の熱処理は一切行わなかったが、腐蝕疲労においては熱処理の影響は一般的に少ない⁽³⁸⁾との事実も考慮し



第1図 M型試験片



第2図 MC型試験片

である。この材料の静的諸試験および化学分析の結果を第 1 表および第 2 表に示す。化学分析は含有金属元素の

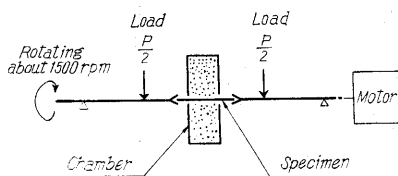
第 1 表

引張強さ σ_B	45.8 kg/mm ²
降伏点応力 σ_Y	27.1 "
真破断応力 σ_T	79.4 "
伸び率	26.6 %
断面収縮率	50.2 "
硬さ (Rockwell B)	74.3 (黒皮部 73.6)
回転曲げ疲労限 σ_w	22.5 kg/mm ²

第 2 表

C	P	S	Si	Mn	Cu	Cr
0.15 ~0.17	0.012 ~0.013	0.025 ~0.027	0.07	0.63 ~0.66	0.22 ~0.23	0.09 ~0.10

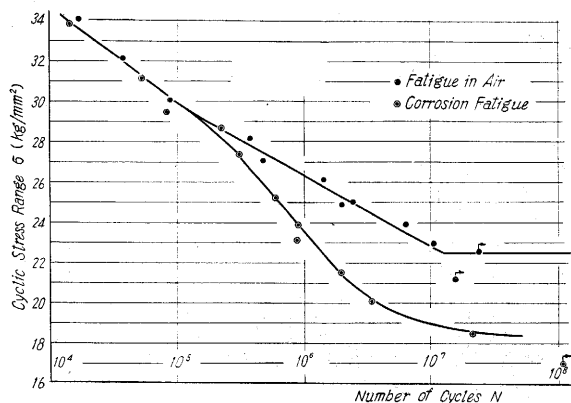
腐蝕疲労におよぼす影響を考へて、5 元素のほか特に Cu 等が加えてあるが、これは、たとえば炭素鋼中の含銅量が適当に多いと耐蝕性が増す⁽³⁹⁾⁻⁽⁴²⁾等の事実を考慮したものである。第 3 図に試験方法の概略を示す。



第 3 図 実験装置説明図

2. 腐蝕疲労による強度の低下

前章の装置により、濡らしながら種々の値の正弦応力をかけて破断した腐蝕疲労の S-N 曲線と、比較のため同材料についての普通の乾燥時疲労による S-N 曲線を



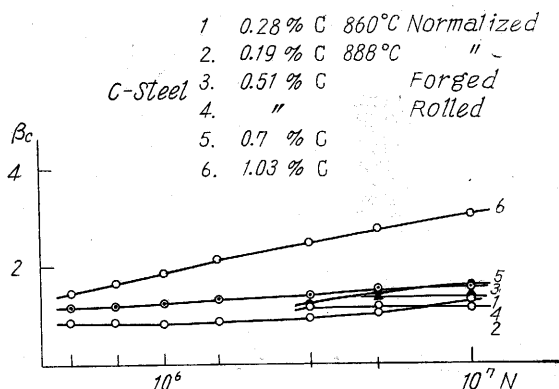
第 4 図 S-N 曲線

合わせて示したのが第 4 図である。横軸は破断までの総繰返し数、縦軸は初期の断面につき計算された公称曲げ応

力である。

この実験結果によれば、腐蝕疲労の S-N 曲線は 20~21 kg/mm² から、静的引張降伏点の少し上の 28~29 kg/mm² 付近まで直線性を示している。20 kg/mm² より下では、曲って約 18 kg/mm² の漸近線に接近していく傾向を示し、上方では、降伏点付近で折れて乾燥疲労の S-N 曲線と重なる。戦前は、この下方の水平に近い部分（いわゆる腐蝕疲労限）が主として問題にされたが、筆者らは、その上方の傾斜直線部を主な対象としている。それは、橋梁では繰返し数 2×10^6 回以下で実用上十分であること⁽⁴³⁾、破壊事故が 10^6 回以下で発生していること⁽⁴⁴⁾、また、腐蝕疲労の進行機構を知る上に扱い易い領域であること等の理由による。

腐蝕疲労の S-N 曲線は、一般に、水平部すなわち疲労限は現われず、どこまでも曲線が下って行くといわれているが、この実験にみられるように水腐蝕を受ける普通の構造用鋼（低炭素鋼）では、繰返し数の大なる所で傾斜が非常に緩慢となり、ほとんど疲労限と見做してよいものが現われるのは特徴的である。この事実、他の多くの研究者の実験結果⁽⁴⁵⁾を整理した結果から、ほぼ断



第 5 図

定してもよいと思われる。（第 5 図参照、 $\beta_c = \frac{\sigma_N}{\sigma_{NC}}$ ）

ただし、 σ_N 、 σ_{NC} は繰返し数 N で破断を生ずる乾燥疲労および水による腐蝕疲労の応力腐蝕疲労でも条件によっては疲労限の存在の可能性があることは、岩元氏らによっても指摘されている⁽³⁷⁾⁽⁴⁶⁾。

この S S 41 では、上記の考え方による腐蝕疲労限は約 18 kg/mm² で腐蝕の共働作用による疲労限の低下は約 20% である。しかし、疲労寿命の点から見るとその低下は大きく、22.5 kg/mm² では乾燥疲労に比し約 1/10 に低下する。

次に破断面の状態について説明を加えると、降伏点以上の応力、すなわち、両者の S-N 曲線が一致した領域では、破断面は腐蝕疲労と乾燥疲労の間に差が認められない（写真 2）が、S-N 曲線が分れた部分では、すで

によく知られているように同種の疲労破断面には明らかに差が認められ、乾燥疲労では一点より発生した亀裂が一平面に沿って発達するが、腐蝕疲労では各所よりの亀裂出発の跡が見られ(写真3)典型的なものはいわゆるカッター状(または放射状)破断面(写真4)となる。

3. 腐蝕疲労の進行

材料が腐蝕疲労により次第に損傷(Damage)を与えられ遂に破断に至るその過程を考察するための一つの手掛かりとして、腐蝕乾燥の2段階実験を行った。これはある任意の繰返数 N_1 まで腐蝕疲労を続けこれを第1段とし、続けてその試験片に第2段として同応力で乾燥疲労をかけて破断せしめるのであって、この乾燥疲労をかけた繰返数を N_2 とする。

これに類似の実験は、第1段応力が第2段応力より低い場合についてはすでに行われているが、⁽²⁶⁾⁽⁴⁶⁾ われわれは、1, 2段とも同じ応力で行ったのである。

その実験結果の1例を第6図に示す。横軸は第1段繰返数 N_1 または第1段繰返比 $R_1 = N_1/N_{1f} \times 100$ で、縦軸は損傷度 D_o 、または第2段繰返数 N_2 を上から下向にとったものである。損傷度としては、慣用に従って

の破断繰返数の平均値である。

第6図によれば、損傷度 D_o は、腐蝕疲労寿命の初期に ($R_1 \approx 15 \sim 20\%$ までに) $70 \sim 80\%$ 程度に達する。し

かも注目すべきことには、測定値の平均を結ぶ曲線はほぼ2本の直線におき得ることである。この場合 $R_1 \approx 15 \sim 20\%$ 付近にその折れ目があり、しかも、上部の緩傾斜の直線を D_o 軸の方に延長すれば、 N_2 に換算して約 4.1×10^5 の付近で D_o 軸と交わる。この 4.1×10^5 という数値は、 $R_1 = 100\%$ における N_1 すなわち終始腐蝕疲労を続けた場合の破断繰返数の平均値に相当しているから、第6図を N_1, N_2 に対して同一 Scale に取れば、いわゆる D-R 曲線(損傷度-繰返比曲線)は 45° の直線に沿ってくることになる。このことは $R_1 \approx 15 \sim 20\%$ 以後は腐蝕疲労のままでも乾燥疲労に切り換えられて

も、残る寿命が同じであり、疲労の進行速度が同じであることを示している。このことから、 25kg/mm^2 の応力で腐蝕疲労を受ければ、全寿命の約15%の間は、腐蝕による材料の弱化(恐らく応力集中部の形成であろう)が急速にかつ一定速度で進み、約15%以後は、その弱化された材料がそのまま(換言すればある一定の集中応力により)普通の疲労作用によって、破断まで進むという考え方、または応力集中によって高められた有効な応力の値が第5図の両S-N曲線の合致点、すなわち静的引張降伏点以上に達して、腐蝕疲労と乾燥疲労による差

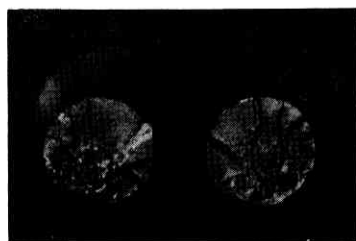


写真4 放射状亀裂
($\sigma \approx 21.56\text{kg/mm}^2$)



写真2 左 腐蝕疲労($\sigma \approx 31\text{kg/mm}^2$) 右 乾燥疲労($\sigma \approx 32\text{kg/mm}^2$)



写真3 左 腐蝕疲労($\sigma \approx 25\text{kg/mm}^2$) 右 乾燥疲労($\sigma \approx 25\text{kg/mm}^2$)

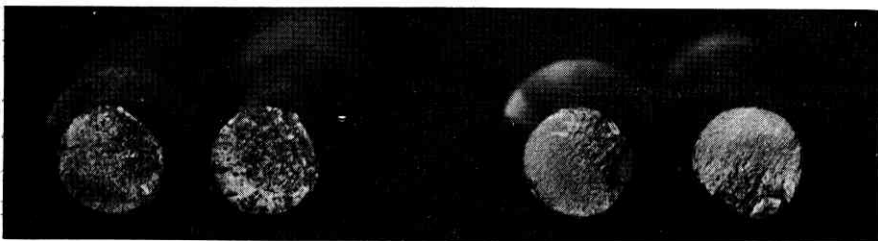
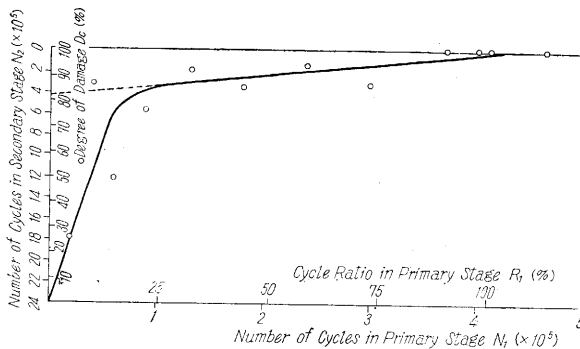


写真5 左 腐蝕疲労($\sigma \approx 23\text{kg/mm}^2$) 右 乾燥疲労($\sigma \approx 23\text{kg/mm}^2$)

$D_o = (1 - N_2/N_{2f}) \times 100$ を採用した。ここで、 N_{1f} 、 N_{2f} はそれぞれ腐蝕疲労のみ、または乾燥疲労のみを(この例では $\sigma = 25\text{kg/mm}^2$ で)継続して破断せしめた場合

が認められなくなったという考え方が導かれてくると思われる。したがって、この $R_1 = 15 \sim 20\%$ 以後の領域では、腐蝕疲労現象に簡単な関係が求められることが推測



第 6 図 蝕疲労損傷度曲線

される。次章の研究はその 1 例と見做してよいと思われる。

さらに付言すれば、この実験の直接の実用上の意義は腐蝕疲労によって老朽化した材料に対して、途中から防蝕を施した場合、残る寿命はいかに算出されるかという問題に解答を与えたことになる。すなわち、たとえば 25kg/mm^2 の応力で腐蝕疲労を $6 \sim 10 \times 10^4$ 回以上かけられた構造用鋼 S S 41 は防蝕措置を施しても、疲労寿命の上には何らそれによる効果がないということになる。もちろん、逆にその防蝕が途中でまた再び無効になって腐蝕疲労に変わってもやはり疲労の進行速度は同じであり、この事実を筆者らは、先述の実験と順序が反対の乾燥—腐蝕の 2 段階試験によってもほぼ確かめた。

4. 腐蝕疲労における 2 段重複繰返荷重の影響

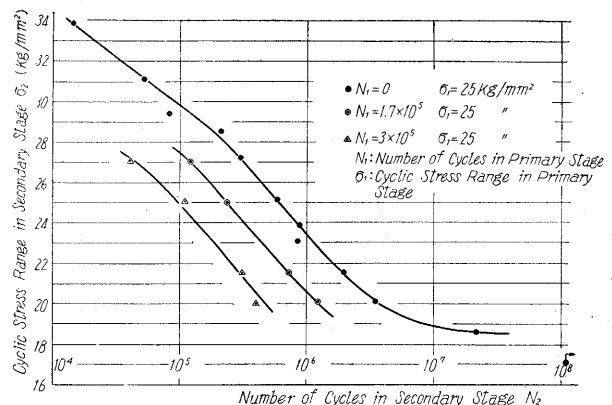
前章 3 で、われわれは腐蝕から乾燥への 2 段階に変る場合の影響を見たが、実際には、材料の最も苛酷な条件として継続して腐蝕疲労が行われると考えた方が安全であるし、理論的にも、腐蝕疲労の 2 段階試験によって、荷重変化の影響を見ることは、前章の結果と合わせ考えて重要なことであると思われるので、腐蝕疲労のみによる 2 段重複繰返荷重試験を行った。これは、 σ_1 なる応力で N_1 回腐蝕疲労を繰り返した後、 σ_2 なる応力に切り代えて、同じ腐蝕条件で続いて破断まで腐蝕疲労をかけるのである。実験の順序としては σ_1 , N_1 をある一定の値にとり、 σ_2 を数段に変えて実験を行い、各 σ_2 に対して σ_2 をかけた回数 N_2 を求める。 $\sigma_1 = 25\text{kg/mm}^2$ に対する 3 種の N_1 について N_2 を求め、その σ_2 — N_2 曲線 3 本を一括して第 7 図に示す。

ただし、この場合、 σ_1 (この図では 25kg/mm^2) に相当する点はこのだけは 1, 2 段とも同応力で、 $N_{1f} = N_{2f} = N_1 + N_2$ であるから、 σ_1 のみによる破断繰返数 N_{1f} より $N_2 = N_{1f} - N_1$ で求めたものである。この N_{1f} は、1 本の S—N 曲線ごとに求めて、補正のための基準値としたが、これは材料の採取箇所による差、製作に当る工具の個人差、実験の時期的ずれによる偏差等を除く

ためであり、疲労試験の性質上多数の試験片の平均値を取るよりもこの方がより实际的であると思われる。ただし、ここでは N_{1f} , N_{2f} はそれぞれ、第 1 段応力、または第 2 段応力のみによる破断繰返数である。

第 7 図によれば、第 1 段繰返数 N_1 が 0 回 ($R_1 = 0\%$)、 1.7×10^5 回 ($R_1 = 41.5\%$)、 3×10^5 回 ($R_1 = 73\%$) の 3 本の S—N 曲線は、 $20 \sim 27\text{kg/mm}^2$ の傾斜直線部で平行となった。

この事実から直ちに、同じ σ_2 に対する各 S—N 曲線の N_2 の比は σ_2 の取り方にかかわらず一定であることが分る。しかるに $N_1 = 0$ の曲線は同応力で継続して破断させた時の繰返数 N_{2f} を示しているから、



第 7 図 腐蝕疲労の 2 段重複試験による第 2 段 S—N

σ_1 , N_1 をきめれば、 N_2/N_{2f} は σ_2 にかかわらず一定となる。

しかるに、各 S—N 曲線は、 $\sigma_2 = 25\text{kg/mm}^2$ では $N_2 (=N_{1f} - N_1)$ を通るので、任意の σ_2 に対する N_2/N_{2f} は $\sigma_2 = 25\text{kg/mm}^2$ における $N_2/N_{1f} (=N_2/N_{1f} = 1 - N_1/N_{1f})$ に等しくなる。したがって $\sigma_1 = 25\text{kg/mm}^2$, $N_1 = 1.7 \times 10^5$, $N_1 = 3 \times 10^5$ に対して

$$\frac{N_1}{N_{1f}} + \frac{N_2}{N_{2f}} = 1$$

が第 2 段応力 σ_2 の如何にかかわらず成立することになる。

それ以外の N_1 について考えてみると、 $N_1 = 3 \times 10^5$ の場合は前章に述べたように $D_c > 90\%$ で、材料の元来の寿命の大部分が失われていて、破断はその機会が常にあり組織や表面条件等に支配され易く、しかも、この S—N 曲線が、比較的データが揃う換算累計回数⁽⁴⁷⁾⁽⁵⁰⁾による S—N 曲線でないため多少のバラツキが目立つが、それにもかかわらず、なお 3 本の S—N 曲線がこの程度の平行性を持つことを考えると、 $N_1 = 1.7 \sim 4.1 \times 10^5$ すなわち $R_1 = 41 \sim 100\%$ の間では

$$\sum_{n=1,2} \frac{N_n}{N_{nf}} = 1$$

が破壊法則として成立すると考えられる。筆者等はさらにこの法則が $\sigma_1=25\text{kg/mm}^2$ のみならず $\sigma_1=20\sim 27\text{kg/mm}^2$ の範囲で一般に成立することを実験的に示すことができたが、それは主として $R_1>40\%$ についてであり、第7図に示す緩傾斜の直線部 ($R_1>15\sim 20\%$) の範囲に入るの、前章の結果より大体想像しうることはある。もちろん、腐蝕-乾燥2段試験の損傷度曲線の緩傾斜部で上記の破壊法則が成立することを断定するには、なお多くのことを実験的に調べなければならないが後に述べる $R_1\leq 15\%$ についての実験や、軟鋼では平滑な場合より切欠がある方が $\sum \frac{N_n}{N_{nf}}=1$ に近づくと河本・関両氏による実験結果⁽⁴⁷⁾ 等より、一応の推定をしたのである。この間の立入った考察についてはまた別の機会に述べたい。

厳密な適用範囲については、未だ完全に解決されてはいないが、腐蝕疲労において、この破壊法則が相当広範囲に成立することは注目すべきことであって、乾燥疲労の2段重複試験では、かかる簡単な関係が一般には成立しないことがすでに多くの実験により⁽⁴⁸⁾⁻⁽⁵¹⁾、また筆者らの同材料についての実験によっても明らかにされており、上記の関係は腐蝕疲労に特に顕著に現われる現象としてその機構を解明するのに重要な手掛りになるかと考えられる。

また、この2段重複試験の結果が実用上直接意味するものは、腐蝕疲労で老朽化した材料が途中で荷重が変更された時、なお、どの程度の寿命が保証されるかを示すものである。荷重変更による寿命計算を、上記の法則から簡単に算出できることになる。

しかしながら、筆者らの実験によれば、この法則には例外があり $\sigma_1=20\text{kg/mm}^2$ および $\sigma_1=26\text{kg/mm}^2$ においては平行性が保証されず、 $20\sim 27\text{kg/mm}^2$ の第2段S-N曲線は、 $N_1=0$ の元曲線より緩傾斜となり、しかも、 $\sigma_1=20\text{kg/mm}^2$ 、 $\sigma_1=26\text{kg/mm}^2$ の両曲線の傾斜は全く一致する。また、第7図と同じ $\sigma_1=25\text{kg/mm}^2$ でも $R_1\leq 15\%$ の実験では、やはり平行性が成立しなかった。上記の不成立領域の存在は腐蝕疲労の進行の機構に関係し、上記の法則の内容をさぐる手掛りになるものと思われるが、今回はこれについては触れない。

5. 腐蝕疲労研究の当面の課題について

われわれは、他の多くの人々の研究成果により、また当研究室自身の手による実験により、腐蝕疲労の結果として現われる諸特性については、すでに幾多の事実を知っている。さらに一步、腐蝕疲労自身の機構について、具体的な知識が得られれば、すでに知っている諸特性について一貫性のある説明を行うことができ、従来個々の場合についてのみ個別に行われたか、または全く行われていない次の諸問題について、弾力性ある解決ができる

ものと思う。

- (a) 腐蝕疲労の防止についての時期と方法
- (b) 腐蝕疲労材の強度基準の考え方
- (c) 腐蝕疲労の早期発見と損傷度の判定
- (d) 腐蝕疲労材の回復
- (e) さらに進んで機械・構造物の設計への腐蝕疲労概念の導入
- (f) 腐蝕疲労研究の立場から一般の乾燥疲労の機構研究への寄与

また、腐蝕疲労を受ける材料の強さを実際の工学上の要求にそって判断するためには、次の諸項についての研究の蓄積を必要とする。すなわち、

(イ) 繰返速度の影響

特に非常に遅い場合を必要とする。従来の研究結果は毎分数サイクル程度までに過ぎない⁽²⁾。しかし、繰返し速度が小さい場合に特に各繰返毎の腐蝕疲労の被害が大きいの、従来の知識だけでは不十分である。

(ロ) 平均応力の影響

これについては、信頼すべきデータは非常に少ないようであるが重大な影響を持つといわれており⁽³⁹⁾、実際の問題では、平均応力に応力振幅が重畳した形の応力を受ける場合が相当ある。静的応力だけでも、応力腐蝕亀裂を生ずる場合があることはよく知られており⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾、応力の分布状態も影響すると思われるので、相当量のデータの蓄積を必要とする。

(ハ) 種々の材料と種々の腐蝕条件による腐蝕疲労

腐蝕という電気化学的現象を伴ったもの⁽²²⁾であるため、各種の材料と各種の腐蝕液の組合せについて、多数の実験より一般的な関係を求め得ることが望ましい。従来の研究は、主として、鋼材について水道水または食塩水によるものであったが、Cu合金についても別の腐蝕条件下で主要な事故が発生しているし、熱処理や添加合金元素によって強度を改善したはずの鋼材が、腐蝕作用によって驚く程の強度低下を見ることがあり得るし、また、逆に腐蝕疲労に対して特に強い材料を求め得ることも可能であろう。

(ニ) 亀裂の発生と進行についての解明

現在これについての研究は発展途上にあるように見受けられるが、それは別途に進められており、腐蝕疲労の研究と結びついていないように思われる。極言すれば、腐蝕疲労の研究上問題にしていたのは腐蝕孔から亀裂が発生する所までか、亀裂を念頭に入れても、それによって生ずる切欠効果の面だけであるか、または破断面の判定の手掛りのみに限られていたように思われる。しかし亀裂についての具体的な諸知識は実用上非常に有効であるのみならず、腐蝕疲労の機構についての認識をさらに深めるためにも必要である。またさらに、普通の疲労、腐蝕疲労、高温疲労、脆性破壊、衝撃破壊等を統一的に

解釈する重要な鍵かとも考えられるのである。

終りに本文に述べた研究は岡本研究室において北川の担当として行われたものであって、これについては大井東大助教授、遠藤広大教授、国鉄構造物設計事務所（旧施設局特殊設計室）、鈴木本所試作工場長の諸氏よりご助言ならびにご協力をうけ、また国鉄より研究費の補助をうけた。また、丸山製作所、松尾橋梁株式会社には材料、設備の点でご協力をいただいた。ここに感謝の意を表するものである。

(1957. 11. 30)

文 献

- (1) D. J. McAdam; Proc. ASTM, Vol. 26, p. 224 (1926), ただし間接に。
- (2) D. J. McAdam; Congress Intern. Essai, Material, Amsterdam, (I) p. 305 (1927)
- (3) 遠藤吉郎, 宮尾義治; 機械学会第 34 期通常総会前刷, p. 21 (1957)
- (4) 遠藤吉郎, 宮尾義治; 機械学会60周年第 5 区講演会前刷, p. 5 (1957)
- (5) F. N. Speller; Proc. ASTM, Vol. 29, (II) p. 411 (1930)
- (6) H. J. Gough; J. Inst. Metals, Vol. 49, II, p. 117 (1932)
- (7) M. Vater, M. Henn; Korrosion und Metallschutz, Vol. 20, No. 6, p. 179 (1944)
- (8) H. J. Gough, D. G. Sopwith; J. Iron Steel Inst., Vol. 135, p. 293 (1937)
- (9) 岩元兼敏; 機械学会第 34 期通常総会前刷, p. 25 (1957)
- (10) A. Thum, H. Ochs; Korrosion und Dauerfestigkeit, VDI-Verlag, Heft. 9 (1937)
- (11) T. J. Dolan; Univ. Illinois Engi. Experi. Station Bulletin No. 293 p. 39 (1937)
- (12) T. J. Dolan; J. App. Mech., Vol. 5, p. A 141 (1938)
- (13) T. S. Fuller; Trans. ASST. 19, p. 97 (1931)
- (14) 南義雄; Proc. 6th Japan Nat. Congress App. Mech. (1956)
- (15) 山口啓一, 呂本広志; 材料試験 Vol. 6, No. 46, p. 474, (1957)
- (16) R. Mailänder; Zeits. VDI, 77, p. 271 (1933)
- (17) R. Mailänder, O. Hengstenberg; Zeits. VDI, 74, p. 1126 (1930)
- (18) F. N. Speller, McCorkle, P. F. Mumma; Proc. ASTM, 28, (II), p. 159 (1928)
- (19) P. Ludwick, R. Scheu; Zeits. VDI, 76, p. 68. (1932)
- (20) Trans. ASM. (1956)
- (21) J. Iron and Steel Inst. Aug. (1951)
- (22) U. R. Evans; Failure of Metals by Fatigue (A Symposium Melbourne) p. 84 (1946)
- (23) H. Buchholtz, K. Krekeler; Stahl u. Eisen Vol. 53, p. 671 (1933)
- (24) A. J. Gould; Engineering, Vol. 136, p. 453 (1933)
- (25) D. G. Sopwith, H. J. Gough; J. Iron Steel Inst., Vol. 135, p. 315 (1937)
- (26) D. J. McAdam; Proc. ASTM, Vol. 28, (II), p. 117 (1928)
- (27) 岡本舜三, 北川英夫; Proc. 7th Japan, Nat. Congress. App. Mech.
- (28) ASTM Spec. Tech. Publ. No. 137(1952)
- (29) ASTM Spec. Tech. Publ. No. 121(1951)
- (30) 横堀武夫; J. Phys. Soc. Japan, 6, p. 81,(1951)
- (31) " ; " , 8, p. 265,(1953)
- (32) " ; 東大理工研報告, 8, p. 5 (1953)
- (33) A. M. Freudenthal; ASTM, Spec. Tech. Publ.
- (34) " , E. J. Gurnbel; Proc. Roy. Soc., A216, p. 309, (1953)
- (35) A. M. Freudenthal; Fatigue in Aircraft Structure (1956)
- (36) 篠塚正宣; 材料試験, Vol. 4, No. 25, p. 433 (1955)
- (37) R. Cazaud; Fatigue of Metals, p. 209(1953)
- (38) W. Lequis, H. Buchholtz, E. H. Schultz; Stahl Eisen, 53, p. 1133 (1933)
- (39) 石橋正; 金属の疲労と破壊の防止, p. 279(1956)
- (40) 大和久重雄; 鉄道技研, 未発表
- (41) Iron Carbon Monograph Series, Copper and Its Alloy (1934)
- (42) 森岡進, 多賀谷正義; 耐蝕合金, 日本金属学会篇 p. 44 (1954)
- (43) 土木学会; 鋼鉄道橋設計示方書解説, p. 34(1950)
- (44) 岡本舜三, 久保慶三郎, 北川英夫; 鉄道業務研究資料, Vol. 13. No. 19, p. 13, (1956)
- (45) 河本実, 水上嘉明; 材料試験 Vol. 3, No. 17, p. 427 (1954) に掲載されている文献より採用
- (46) 岩元兼敏; 機論, Vol. 23, No. 127, p. 238(1957)
- (47) 河本実, 関護雄; 材料試験協会第 6 期総会前刷 p. 29 (1957)
- (48) 鵜戸口英善; 材料試験 Vol. 6, No. 45, p. 361 (1957)
- (49) 川田雄一, 中沢一; 材料試験 Vol. 6, No. 45, p. 368 (1957)
- (50) 河本実, 伊吹幸彦; 材料試験 Vol. 5, No. 36, p. 544 (1956)
- (51) J. B. Kommers; Proc. ASTM, 45, p. 532(1945)
- (52) 金森政雄; 金属防蝕技術総覧(下), p. 353 (1952)
- (53) Symp. Stress Corrosion Cracking Met. (Philadelphia, 1944)