

材 料 の 表 面 と 疲 れ (2)

北 川 英 夫

金属材料の疲れ特性は表面の条件により、しばしば顕著に変わる。この現象の説明を試みる。この(2)では、き裂を有する材料の疲れ強さに及ぼす残留応力と、材質の変化の影響についての筆者の一見解を述べる。

3. 表面効果の多様性

前回¹⁾では表面欠陥・表面冷間加工・表面硬化処理などが疲れ特性に与える影響、すなわち、疲れにおける表面効果について述べ、これら一見多様な表面効果を支配する共通な要因のうち比較的影響の大きいと思われるものを挙げた。その共通要因とは材料の特性と経歴に関する要因(化学成分・組織・加工硬化)と応力状態に関する要因(き裂・切欠きなどの stress raiser と残留応力)とであったが、その影響の仕方については主としてこれらがそれぞれ独立に影響する場合について述べた。

これらの要因のうち一つが特に卓越して影響する場合は現象の説明も比較的容易である。しかしながら、多くの場合、疲れ特性に対する表面効果の現われ方はかなり複雑である²⁾。たとえば、クロームメッキの厚さと疲れ強さの関係、ショットピーニングのショット速度と疲れ強さの関係のごとき、表面効果を規正する個々の条件と疲れ特性の関係は、単に例示することができるだけで、これを数量的かつ一般的に示すことはまだできない。

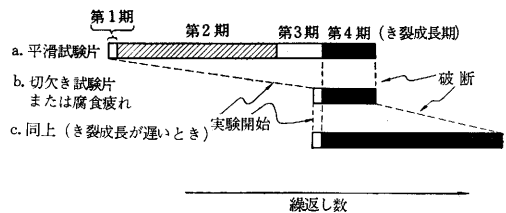
疲れにおける表面効果とその機構については未解決な問題があまりにも多く残されている現在まだ明言はできないが、以上の複雑さは、疲れの機構から考えると、一つには、各要因の存在の仕方が多様であることによる。たとえば、stress raiser のうちのき裂一つを取ってみても、その形状・寸法・方向・分布状態・開口度、先端の分岐状態、周辺条件、成立までの経歴を異にする多種多様なき裂が存在するのである。

複雑であることの他の理由としては、さらにまた、各要因の相互作用を挙げることができよう。多くの場合一つの表面条件にはいくつかの要因が同時に含まれ、これらの要因が互いに影響しつつ全体として疲れ特性に影響を及ぼすのである。今回は、その1例として、残留応力とき裂と材質変化の共存する場合について述べる。メッキした材料の疲れ強さ、メッキとショットピーニングを併用した場合の疲れ強さ、脱炭した材料にショットピーニングしたときの疲れ強さなどの問題、および腐食疲れ強

さやき裂欠陥材の疲れ強さを高周波焼入れで向上させる問題などを考える場合の一助になれば幸いである。

4. き裂とその非対称性

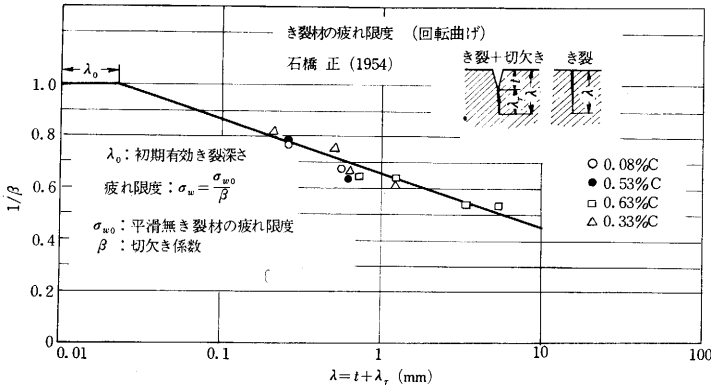
材料が疲れにより破壊するためには、その途中で長短の差はあれ、き裂の発生・成長の過程を経ねばならない。したがって、疲れの全過程は、き裂が準備されき裂が発生し成長し材料を破断に導く過程と考えてよい。



図・37 疲れ過程の段階的区分例
(横堀氏に準じて)

材料が繰返し応力を受けき裂が準備され発生・成長する機構は現在まだ必ずしも明らかでない。しばしば、疲れの過程はこれを数段階に分けて説明される。たとえば、図・37のように第1期は加工硬化、第2期は超微視的き裂の準備、第3期は超微視的き裂の成長、第4期は巨視的き裂の成長から全体の破壊までと分けられることもある³⁾。また、第1、第2期をき裂の準備期、第3期を非伝播性のき裂の成長期、第4期は伝播性のき裂の成長期と考えることもある。この第4期が通常考えられているき裂の進行期である。しかし実際には、適用する測定法の精度の制限によってき裂進行期の長短が左右されると考えてよいようであり、ここでは、材料の強さを問題にする立場から、特に高倍率でない光学顕微鏡で確認できる程度以上のき裂を考え、このようなき裂の成立または発生を確認後材料が破断するまでをき裂の成長期とする。

通常、切欠きのついた試験片では、平滑試験片(切欠きのない試験片)の場合よりき裂の発生が早く、き裂成長期が材料の全疲れ寿命の大部分を占めることも多いよ

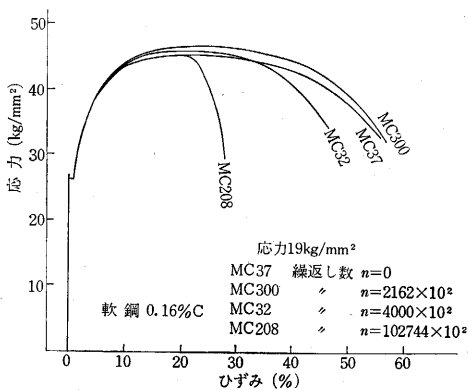


図・38 全周き裂の平均深さと炭素鋼の回転曲げ疲れ限度との関係 (実験値は石橋氏による)

うである。平滑材でも腐食液に接触したときなどはやはりき裂が早く発生する。き裂発生までの期間を短縮されても、後に例示するように適当な方法でき裂成長期を延ばすことができるならば、全寿命に関しては、その短縮を招かないようにすることができる (図・37)。

全疲れ寿命中、き裂進行期の占める比率が大きい場合は、見かけ上疲れ過程をき裂の進行過程に対応させて考えることができる。欠陥材・メッキ材・脱炭材・ショットピーニング材の疲れや腐食疲れではかかる扱いをしてもよい場合が多いものと考えられる。

材料にき裂が発生・成長すると、機械的特性が変わる。たとえば、図・38 は回転曲げ試験片の全周き裂についての石橋氏の実験結果⁴⁾であるが、これによると炭素鋼では、き裂による疲れ強さの低下率が炭素量に無関係にき裂の深さだけで決定され、深さが増すにつれて疲れ強さが落ちる。また図・39⁵⁾は図中に示す繰返し数まで腐



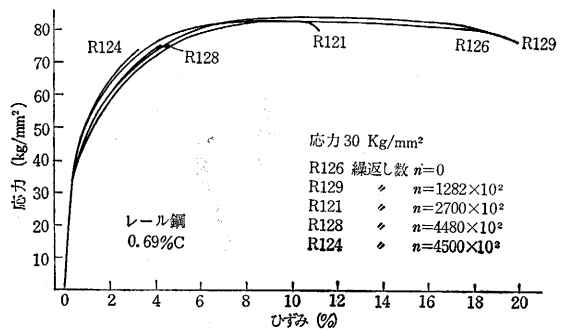
図・39 腐食疲れき裂をもつ軟鋼棒の引張試験による応力・ひずみ曲線 (それぞれ応力 19 kg/mm² で繰返し数 n まで回転曲げで淡水腐食疲れを与えてから引張った)

食疲れを受けた軟鋼の引張試験結果であり、繰返し数の大小はき裂深さの大小を示すものであるが、これによると、軟鋼では、き裂の成長に伴い引張試験の応力・ひずみ曲線の囲む面積が減少し、材料は見かけ上ぜい性化し、

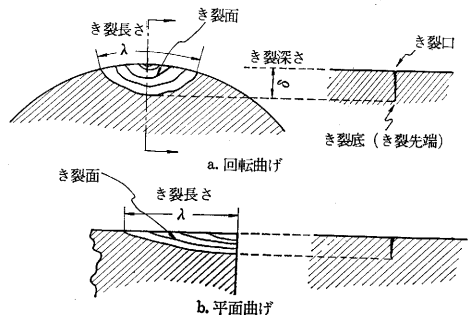
衝撃値も静的破壊における吸収エネルギーも低下する。この場合引張強さや弾性的挙動はき裂の有無により影響を受けていない。硬い鋼材では図・40⁶⁾のようにぜい性化が著しく引張強さまでも下がることもある。

多くの場合、疲れ過程の特に最終の段階を除いては、き裂は部材全体の大きさに比して十分小さい。たとえば、軟鋼の直径 10 mm の回転曲げ平滑試験片では応力 25 kg/mm² で地下水による腐食疲れを受けた場合にその疲れ寿命の 3/4 でき裂の最大深さが約 0.1 mm であった。乾燥状態での疲れ試験では同じ時期には、まだ認知すらで

きなかった。しかしながら、このき裂の成長により、やがては部材全体が破断すると考えると、少なくとも疲れ破壊に対する強さに関しては、き裂部の力学的特性が部材全体の特性を支配すると考えてさしつかえないであろう。



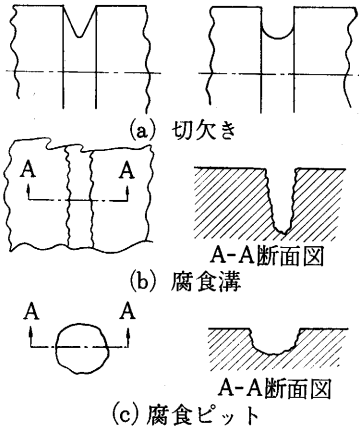
図・40 腐食疲れき裂をもつレール鋼の引張試験による応力・ひずみ曲線 (それぞれ応力 30 kg/mm² で繰返し数 n まで回転曲げで淡水腐食疲れを与えてから引張った)



図・41 モデル化したき裂の図式表示

図・41 は、力学的に扱うためにモデル化したき裂を示したものである。元来連続していた材料が部分的に分離して相対する 2 面のき裂面を発生する。疲れにより発生したき裂は、一般にき裂面のきわめて近傍を除いてはその周辺に見るべき塑性変形を伴っていないので、相対するき裂面は互いにきわめて相接近している。したがって、

このき裂の周辺部分にき裂面と垂直に引張の垂直応力がかかるとき裂は開口しようとしてき裂底に高い応力集中を生じるが、圧縮の場合には、き裂面の一部が互いに密着して圧縮力を伝え、き裂底の応力集中は引張の場合より十分低いと想像されている。すなわち、き裂とは、正負の荷重に対し異なった応力状態を与えるような力学的な境界条件である。この意味でまた、き裂は非対称性をもつ stress raiser であるといってもよい。このき裂の非対称性のために、き裂をもった材料の特性は荷重に対する非対称性を示すようになる。



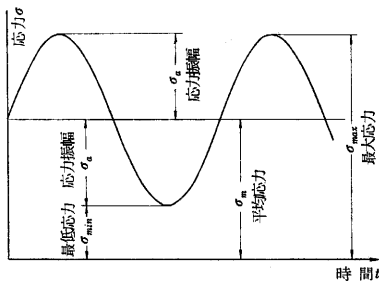
図・42 一般的切欠きの図式表示

これに対し、たとえば図・42 のように十分開いた切欠き、腐食溝、ピットなどは圧縮応力により相対する壁面が密着しないのが普通である。したがって、これらの切欠き底、溝底などには、正負の荷重に対して同大異符号の集中応力を生じる。すなわちこれら切欠き・溝・ピットなどは対称性をもつ stress raiser であるといえる。

疲れき裂についても、これが対称性をもつ stress raiser であるかのような結論を与えた論文もないではない⁷⁾。しかし多くの実験結果はやはり非対称性を肯定するものであると考える。

5. き裂材の疲れ強さに及ぼす平均応力の影響

今、時間とともに繰返し変動する荷重を、問題とする部分の公称応力で表わし、図・43 のように σ_m なる静的応力に、正負対称の片振幅 σ_a の両振れ振動応力が重



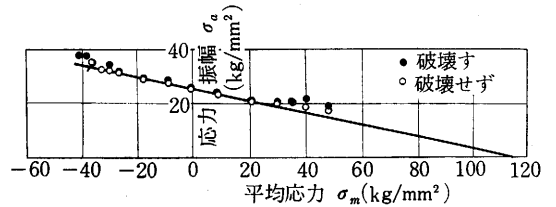
図・43 繰返し荷重の図式表示(公称応力で示す)

畳したものと考える。疲れでは、 σ_m を平均応力、 σ_a を応力振幅、 $\sigma_m + \sigma_a$ を最大応力 σ_{max} と呼んでいるが、この平均応力 σ_m は、正負の符号も含めて、荷重の非対称性を示す量的尺度であるといえることができる。

もし材料にき裂も切欠きもない場合には、鉄鋼のような延性材料では、この平均応力が疲れ限度に与える影響は大きくない。一般に疲れ限度は σ_m と σ_a の組合せで与えられ、任意の σ_m に対して疲れ限度を与える σ_a がそれぞれ求められるのであって、このような疲れ限度を与える σ_m と σ_a との関係を示す疲れ限度線図は、普通の鋼材の引張圧縮疲れ限度に関しては、 σ_m と σ_a を両座標とする図においては、真破断応力 σ_T と両振れ疲れ限度 σ_w とを通る直線、すなわち、

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_T} + \frac{\sigma_a}{\sigma_w} = 1$$

で与えられることが知られている(図・44)⁸⁾。この疲れ

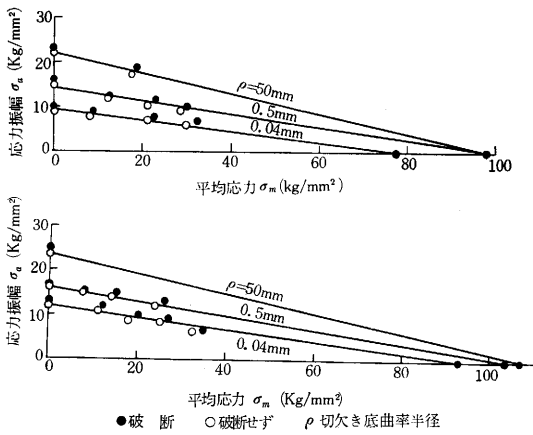


図・44 平滑試験片の引張圧縮疲れ限度に相当する σ_m と σ_a の関係を与える疲れ限度線図 (西原・桜井) 0.41% C 炭素鋼 引張強さ 71 kg/mm²、真破断応力 113kg/mm²

限度線の σ_m 軸に対する傾斜角は、かたくもろい材料ほど大きい傾向があるようであるが⁹⁾、構造用に用いられる普通の鋼材では、 σ_w/σ_T は 1/4~1/5 程度であり、疲れ強さに与える σ_m の影響は少ない。

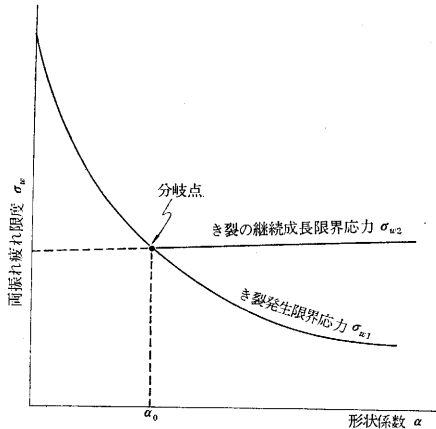
ここで、材料に残留応力が存在するという事は、その残留応力の存在する局部に関しては、この平均応力 σ_m の増減に相当すると考えることにする。元来平均応力は、疲れ試験において試験片全体に与えられた荷重について考えられた概念であるから、残留応力がこれに同質のものであり、平均応力に関して成立した諸関係がそのまま残留応力に関しても成立すると断定するには、多少の飛躍がある。しかし、かかる考え方で進められた他の多くの研究で、特にこのために生じたと思われる矛盾が報告されてはいないので今回もこの仮定を使うことにする。また、表面効果に関する実験の多くは $\sigma_m=0$ の実験、すなわち、両振れ疲れ試験であるから、これらの場合には残留応力は符号も含めてそのまま平均応力と見なすことになる。すなわちこの場合は、平滑材では残留応力が疲れ強さに与える影響が少ないということになる。

切欠きまたはき裂のある材料では疲れ強さに及ぼす平均応力ないしは残留応力の影響はどうであろうか。この

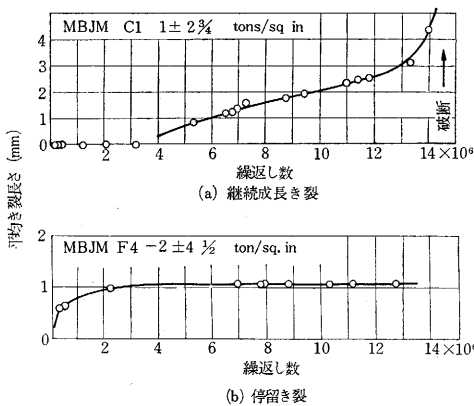


図・45 切欠き試験片の引張圧縮疲れ限度に相当する σ_m と σ_a の関係を与える疲れ限度線図 (河本・関)

(a) 0.13% C 炭素鋼 (b) 0.63% C 炭素鋼

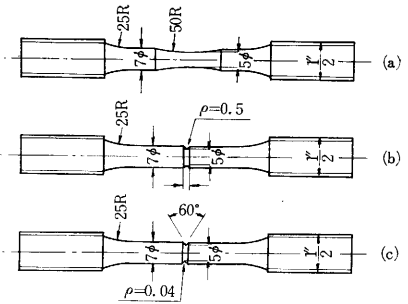


図・47 切欠き試験片のき裂の発生の限界応力 σ_{w1} とき裂の継続成長の限界応力 σ_{w2} とに及ぼす α の影響 (両振れ曲げまたは両振れ引張圧縮疲れ試験で)

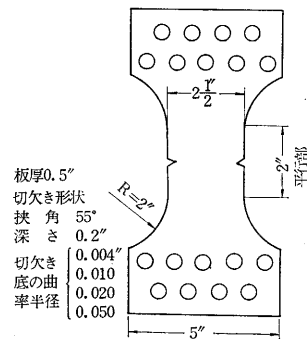


図・49 き裂進行曲線 (Frost・Dugdale)

問題についての実験は数少ないが、それを次に整理してみよう。図・45¹⁰⁾は図・46に示す円周切欠き試験片による引張圧縮疲れ試験によって得られた疲れ限度線図である。全体として平滑材の場合ときわめてよく類似しているが、ただ σ_a の値と σ_m 軸に対する傾斜 σ_w/σ_T とが



図・46 図・45の実験に使った試験片形状 (河本・関)



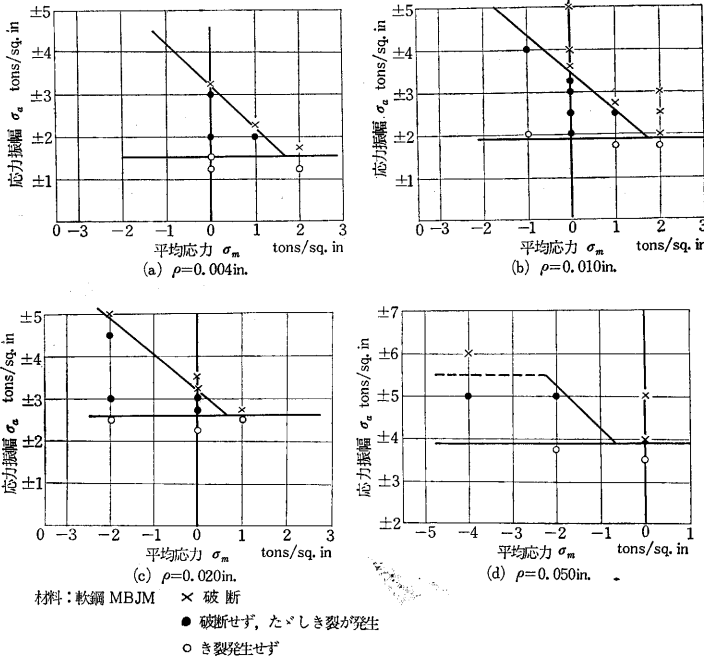
図・48 試験片形状 (Frost・Dugdale)

平滑材の場合より小さい。有孔板についての Pomp および Hempel¹¹⁾, Graf¹¹⁾, Ros¹²⁾による引張圧縮疲れ試験結果も、だいたい同様な傾向を示している。

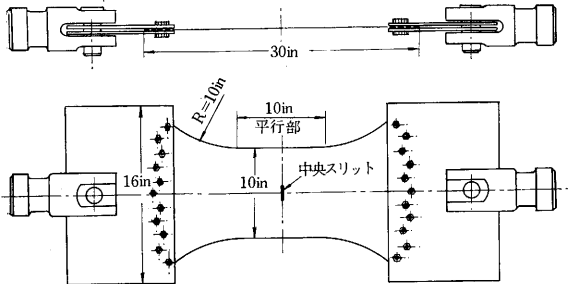
一般に切欠き試験片の両振れ疲れ限度には σ_{w1} と σ_{w2} とがあり、 σ_{w1} はき裂が発生するかしないかの限界応力であり、 σ_{w2} は切欠き底に発生したき裂が引き続き成長して試験片を破断に導きうるか否かの限界応力である¹¹⁾。

σ_{w1} と σ_{w2} は形状係数 α によって変わり、図・47のごとく、ある $\alpha(=\alpha_0)$ 以下の α では、 σ_{w1} 以上の応力で疲れ破断が生じるが、 α_0 以上の α では疲れ限度が σ_{w1} と σ_{w2} に分離し、この $\alpha > \alpha_0$ の領域では、 σ_{w1} より大きく σ_{w2} より小さい応力では、切欠き底にき裂が発生はするがある程度で成長を終わり、その後は成長なしに長期の繰返し応力にたえる、いわゆる停留き裂となる。 σ_{w1} 以下ではき裂は発生せず、 σ_{w2} 以上で破断が起こる。先述の図・45中○印でプロットした破断しない試験片には、停留き裂がまだ発見されておらず、この疲れ限度線の示すものはき裂発生限界応力である可能性が高い。

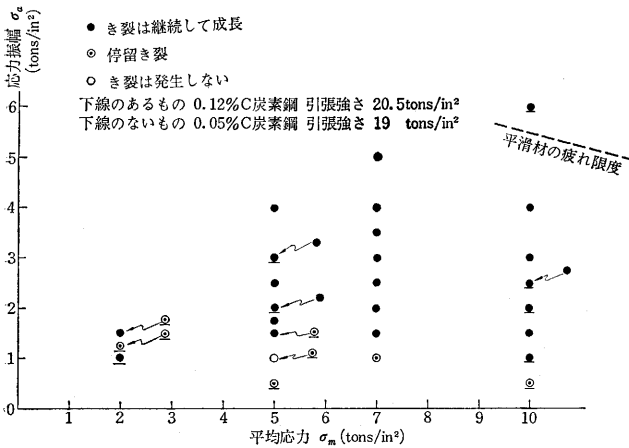
次に切欠き寸法に比べて比較的幅の広い板状切欠き試験片による引張圧縮疲れ試験結果について検討しよう。まず図・48の試験片による実験結果¹³⁾について述べる。材料は0.22% C 軟鋼、引張強さは28 tons/in²である。切欠き底のき裂は十分な精度で測定できて、図・49(a)のような引き続き成長するき裂と図・49(b)のような停



図・50 切欠きつき平板試験片の引張圧縮疲れ限度 (Frost・Dugdale) (ρ は切欠き底の曲率半径)



図・51 試験片形状 (Frost・Dugdale)



図・52 中央スリットのついた平板試験片の引張圧縮疲れ限度 (Frost・Dugdale)

留き裂とがはっきりと区別され、図・50 のように整理された。この図・50 から次のことがわかる。

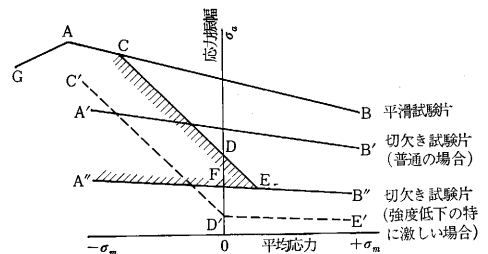
(i) σ_{w1} を含むき裂発生限界応力は平均応力 σ_m の影響をほとんど受けず主として応力振幅 $\sigma_a = \sigma_{w1}$ の値だけで支配される。その σ_a の値は切欠き底曲率半径が小さいほど低い。各図の水平線は Frost と Dugdale によるものであるが、正確にはやや右下がりになるものと推定される。

(ii) σ_{w2} を含むき裂の継続成長限界応力は $\sigma_m \cdot \sigma_a$ 図では約 45° の直線で表わされ、この直線と σ_a 軸との交点は、切欠き底曲率半径の大きさにかかわらず大きな変化がない。すなわち破断の有無に関する切欠き材の強さは $\sigma_m + \sigma_a = \sigma_{max} = \sigma_{w2}$ の値によって支配され、この σ_{max} の値は切欠き底曲率半径の影響をあまり受けない。

以上からき裂の影響が著しいときの材料の強さは最大応力 σ_{max} で支配されると考えてもよいであろう。

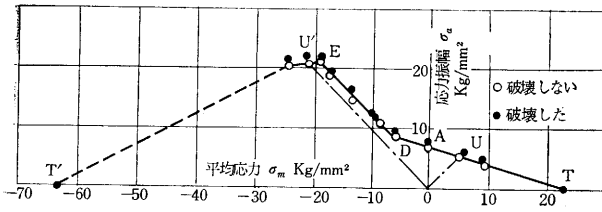
次に図・51 のごとき中央に人工のスリットをもった軟鋼の板状試験片による実験結果¹⁴⁾を 図・52 に示す。これは疲れ限度における σ_a/σ_m が十分小さい領域での実験結果に相当する。また、き裂発生限界応力が 1 ton/in^2 以下というきわめて低い場合であったことになり、 σ_m の広い範囲にわたって疲れ限度線は水平に近い。

以上の諸実験結果を総合して試みに、切欠きまたはき裂のある試験片の疲れ限度線図を一括して 図・53 のようにモデル的に示すこととしよう。



図・53 切欠き試験片およびき裂試験片の疲れ限度線図のモデル的表示

AB, A'B', A''B'' はいわゆる疲れ限度線でき裂発生限界応力を示す。平滑からしだいに切欠きによる強度低下が激しくなるにつれて上の AB から順に下方の A''B'' へと移るが、 σ_m 軸との交点は延性材料ではあまり変化しないので、下がると同時に σ_m 軸に対する傾斜は小さくなる。き裂が入った平滑試験片を用いた場合や、切欠き試験片でもき裂が停滞しこのき裂によって試験片全体としてはき裂試験片と同様な挙動を示す場合には、その疲れ限度は



図・54 鋳鉄の引張圧縮疲れ限度線図 (西原・桜井)
 引張強さ 23 kg/mm²
 圧縮強さ 63 kg/mm²

CDE または C'D' のような 45° の傾斜直線、すなわち、 $\sigma_m + \sigma_a = \sigma_{max} = \sigma_{w2}$ で示される。すなわち、CDE など はき裂の継続成長限界線である。したがって、総合した破断疲れ限度は、今たとえば A'B'' を採用する場合は GACDEB'' となり、両振れき裂発生限界応力 σ_{w2} (き裂強さ) は OD で示され、停留き裂存在領域は CE と A''E とにはさまれた領域であり、き裂の発生しない領域は A'B'' の下の領域である。A'B'' を十分低くおさえた場合直線 CDE の下限は、先述の図・52 を参照すれば、あるいは C'D'E' のごとくなるのではないとも考えられるが、この点に関してはまだ単なる想像の域を出ない。

図・53 を使った以上の説明は一つの仮定である。しかし、一種のき裂試験片である鋳鉄の疲れ限度線図は図・54¹⁵⁾のごとくなり、この仮定によりよく説明できる。また、クロムメッキやニッケルメッキをした鋼試験片はメッキ層に多数のき裂をもった一種のき裂試験片である場合が多いようであるが、その見かけの両振れ疲れ限度と残留応力との関係は図・12 に示したように約 45° の直線となり、これも筆者の仮定とよく一致する。

この仮定が正しいものとする、き裂またはき裂に発展しやすい切欠きや欠陥を表面にもつ材料では表面における圧縮残留応力の強度向上効果はきわめて大で、与えた圧縮応力と等量だけ疲れ限度を上げることができる。しかし図・53 に示すごとく、き裂継続限界応力を示す EDC 線に沿って左上方に上昇させてもその上限はたかだか平滑材の疲れ限度までであり、材質的強化が優先し

なければならないことがわかる。いかに圧縮残留応力を高めても、平滑材の疲れ限度線はたとえば図・53 の A から左では AG のごとくむしろ低下を示すから、圧縮残留応力による強化の限界は A 点までである。また圧縮残留応力を、これに重畳すべき繰返し応力に耐えて材料内に維持するには、それに必要な材質の強度がなければならないことはいうまでもない。

以上の諸見解を腐食疲れにおける平均応力の影響の解明ならびに腐食疲れ強さの向上に適用した筆者の研究結果を次に述べ、この見解の応用的価値を確認したい。
 (1965 年 11 月 15 日受理)

文 献

- 1) 北川英夫, 材料の表面と疲れ (1), 生産研究, Vol. 17, No. 5 (昭 40-5) p. 103
- 2) 金属材料疲れ強さの設計資料 (II), 表面効果, 昭 40, 日本機械学会
- 3) 横堀武夫, 材料強度学, 昭 30, 技報堂, p. 169
- 4) 石橋正, 金属の疲労と破壊の防止, 昭 29, 養賢堂 [この図は北川英夫・堀内正明, 腐食疲れき裂をもつ鋼材の疲れ強さ, 日本機械学会第 43 期全国大会前刷集 No. 141 (昭 40-10) p. 193 より]
- 5) 岡本舜三・北川英夫, 腐食疲れに関する一考察, 日本機械学会誌 Vol. 62 No. 481 (昭 34-2) p. 204
- 6) 岡本舜三・北川英夫・ほか, レール鋼の腐食疲労強度に関する研究報告書 (昭 36-3), 日本保線協会
- 7) N. E. Frost・C. E. Phillips, The Fatigue Strength of Specimens Containing Cracks, Proc. IME, Vol. 170 (1956) p. 713
- 8) 西原利夫・桜井忠一, 繰返し引張圧縮応力を受ける鋼の強さ, 機論, Vol. 5, No. 18 (昭 14-2) p. 93
- 9) 西原利夫・遠藤吉郎, 疲れ破損の法則に関する研究, 機論, Vol. 17, No. 61 (昭 26) p. 147
- 10) 河本実・関護雄, 切欠きを有する鋼の部分片振り引張応力に対する強さ, 材料試験, Vol. 4, No. 27 (昭 30-11) p. 571
- 11) 石橋正, 4) に挙げたと同じ単行本
- 12) 石橋正・河野高顕, 多結晶金属の平滑および切欠き材の両振り疲れ限度と片振り疲れ限度の関係について, 機論, Vol. 31, No. 230 (昭 40-10) p. 1441
- 13) N. E. Frost・D. S. Dugdale, Fatigue Tests on Notched Mild Steel Plates With Measurements of Fatigue Cracks, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 5, No. 3 (1957) p. 182
- 14) N. E. Frost・D. S. Dugdale, The Propagation of Fatigue Cracks in Sheet Specimens, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 6, No. 2 (1958) p. 92
- 15) 西原利夫・桜井忠一, 鋳鉄の繰返し引張圧縮応力に対する強さ, 機論, Vol. 4, No. 16 (昭 13-5) p. 105

次 号 予 告 (2 月号)

研 究 解 説

スポット・ダイアグラムを用いた解像力の計算	高 島 松 雄
瞬間抵抗焼結	原 坂 井 善 四 郎

海 外 事 情

サウジアラビア紀行	坪 井 善 勝
-----------------	---------

研 究 速 報

東京カテドラル聖マリア大聖堂の構造設計	坪 名 須 井 川 善 良 勝 平
P-トリール酸アミドのホフマン分解	永 後 上 井 藤 野 芳 信 恒 男 行 明
Thermal Desorption による残留気体の分析	齊 土 富 藤 満 水 恒 信 五 成 男 郎
B-A 型電離真空計と水素の反応	齊 辻 藤 恒 成 泰