

材 料 の 表 面 と 疲 れ (1)

北 川 英 夫

金属材料の表面の条件、たとえば各種の表面処理や欠陥・腐食などにより、材料の疲れ特性はしばしば顕著に変わる。その現象を材質変化・切欠き作用・残留応力・加工硬化などに着目しつつ説明を試みる。
この(1)では、まず表面条件の影響に関する既知の事実を整理する。

1. 表面の条件と材料の強さ

延性が特に低くない金属材料では、静的荷重下での強さは、一般には*表面条件の影響を受けることが少ない。たとえば、軟鋼では、表面が錆びて一見老朽化したように見える状態でも、あらいう機械仕上げをしたままの状態でも、美しくみがき上げた状態でも同じ引張強さを示す。

衝撃荷重下での強さについては、これを示す尺度に何を選ぶべきかについてまだ定説がないので、表面条件の影響を一般的に議論することはできない。しかし、各種の衝撃破壊試験の経験を総合すると、表面の条件が大きく影響する場合もあるが**、一般には影響が少ないと考えておいてよいようである。***

これに対し、繰返し荷重下での強さ、すなわち疲れ強さに対する表面条件の影響は一般に大きい。その著しい場合には、表面の条件を変えただけで、その材料の部品または部材全体の疲れ強さが $1/10$ 程度に落ちることも、数倍に上がることもありうるのである。

したがって、

(1) 疲れにおける表面条件の影響は、疲れ事故の防止、疲れ設計の立場から重要な問題となる。すなわち、表面条件に基因する破断の発生を考えざるをえず、これを防ぎ、さらに進んではより強く材料を使う上からも表面の条件を適切に処理し利用することが必要である。また、疲れを考慮して、許容応力、安全率をきめるためには、表面の影響を考慮した係数を用いねばならない^{1),2)}。

注 * ただし拘束、低温などの条件下ではぜい性破壊が、特定の腐食性環境下では応力腐食われが起こりうることはよく知られている。

** 小形引張衝撃試験や、大形引張試験体の曲げ衝撃試験では、表面欠陥の影響が、小形曲げ衝撃試験では、局部的冷間加工や表面欠陥の影響が顕著に現われることがある。一般的には、温度効果、速度効果、拘束条件や組織の感受性を考慮しての検討が必要である。表面の条件は実際にはきわめて多様である。

*** 表面硬化処理を施しても、下地金属に適当な熱処理をしておくと、部品全体の靱性を十分高く保つことができると考えられている。

(2) 単に表面または表面付近の条件が変わっただけで、強度や寿命が顕著な影響を受けるという事実は、疲れ破壊の発生・進行機構の本質を究明する立場からも重要な問題となる。

疲れ破壊の多くが表面から始まることを考慮すると、理論と実際との間を橋渡しするためにも表面効果の解明は重視されてよいだろう。

2. 疲れにおける表面効果

仕上げ効果を含めて疲れにおける表面効果全般にわたり実験資料の収集整理を行なうため、昭和 35 年日本機械学会に“材料の疲れにおける表面効果資料調査分科会”が設けられ、以来 3 年間作業を続け最近その成果の大部分を学会誌上に発表した^{3~7)}。このときの命名にしたがって、ここでも、材料の表面条件が疲れ特性に及ぼす影響を総称して疲れにおける“表面効果”と呼ぶことにする。

表面効果の対象としては、疲れ特性に影響ありと思われるものはすべて包含すべきであろうが、具体的には次の諸事項が疲れ強さに与える影響をさすものと考えてよいであろう。

(1) 表面仕上げ……機械仕上げ・電解研磨のほか、鋳肌・鍛造肌・圧延肌・熱処理肌、脱炭など。

(2) 表面欠陥……表面に生成した欠陥のほか、内部欠陥の一部が表面に露出したものもある。成長途中の疲れき裂・砂きず・偏析割れ・打こん・圧こん・工作きず・焼割れ・研摩割れ・溶接欠陥などと、これらの影響を調べるために作った人工き裂を含む。

(3) 腐食性の液またはガスとの接触……

腐食した材料の疲れ強さ、腐食と繰返し荷重を同時に受ける腐食疲れと、ガス・蒸気など各種ふん囲気中での疲れ。

(4) 被覆………メッキその他の金属被覆、塗装・磷酸塩膜・アルマイトなど。

- (5) 表面冷間加工…ショットピーニング・表面圧延など、時により線引なども含める。
 (6) 表面硬化処理…高周波表面焼入れ、炎焼入れ、電解焼入れ、窒化、滲炭。
 (7) その他……フレッティングコロージョン・キャビテーションエロージョンなどと疲れとの共同作用。

いちおうあげただけでもこのように多種にのぼるが、まだこのほかにも多くの表面効果がありうるのであろう。先述の分科会の作業対象も上記のすべてにわたってはならず、われわれの現在有する資料は上記の大部分を包含しているとはいいがたいが、それでもなお膨大な数にのぼることは容易に推察できよう。

これらのうち(1),(2),(3),メッキ,(7)は通常は疲れ強さの低下をもたらす要因である。ただし、この場合の低下・向上を考える上での疲れ限度の基準値は、よく研磨され、あらさが $H_{max} \leq 1\mu$ で直径 10^6 程度の標準小形試験片⁸⁾ によって得られたものを一般には採用する。(4)の塗装などは影響が少ない。(5),(6)は使用法が適切ならば疲れ強さの向上をもたらす要因なので事故防止・強度改善のために意識的に適用されることもある。しかし、元来は、疲れ強さ向上のみを目的として開発された処理法ではない。

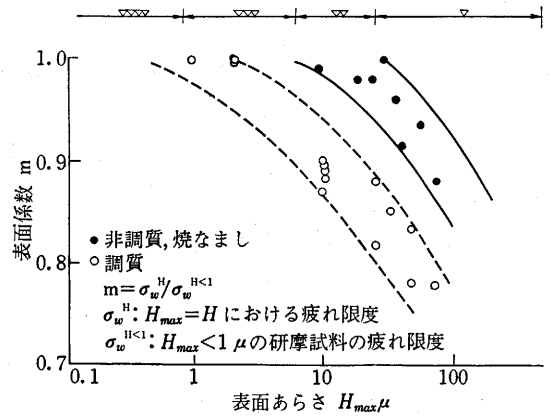
影響が特に大きいのは(3)の腐食と(6)の高周波焼入れおよび窒化である。

3. 表面効果に関する若干の実験的事実

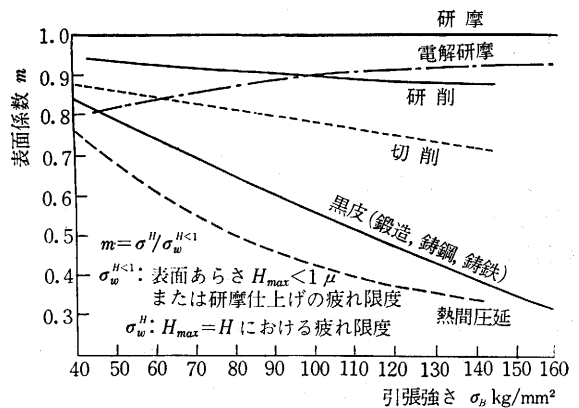
表面効果に関する実験結果はかなり多いが、ここではなるべく既述の材料の疲れにおける表面効果資料調査分科会の公表した整理結果^{3)~7)}を尊重し、これを中心にして、若干の実験的事実を示し、表面効果の内容を整理してみよう。

(1) 表面仕上げ

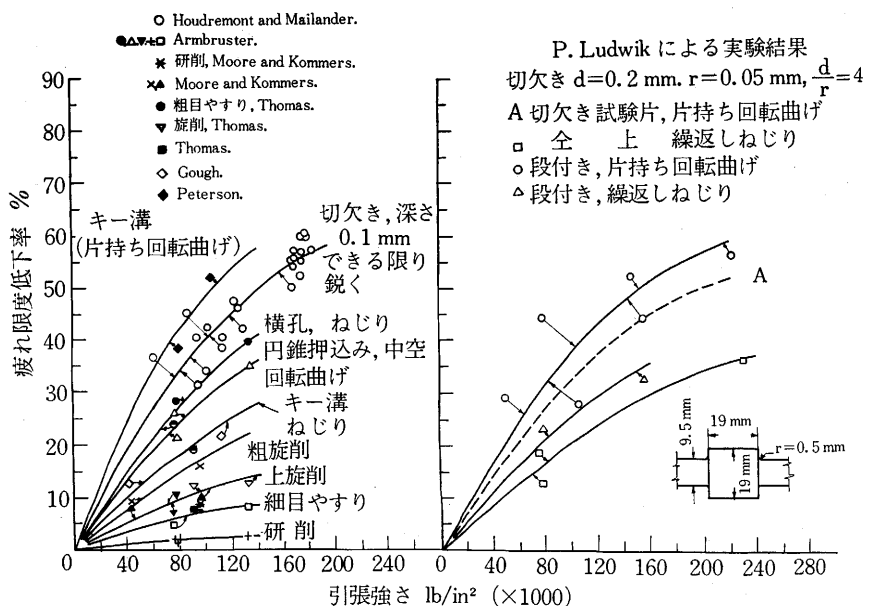
たとえば第1図³⁾に示すように表面仕上げの程度と材質により疲れ特性が変わり、面があらくなると鋼の疲れ限度は下がる。表面係数 m の意味は第1図中に示す。その強度低下の程度は、第2図³⁾に示すように、電解研磨の場合を除いては、材料が強いほど著しい。



第1図 鋼の引張圧縮疲れ限度と材料の表面あらさとの関係(模本)



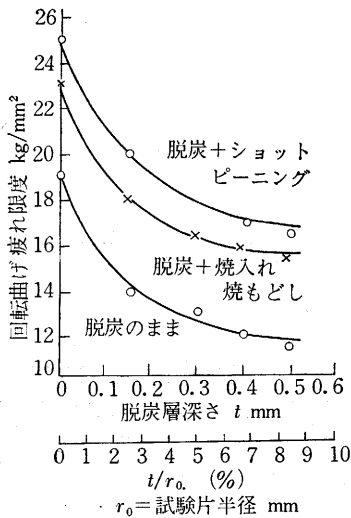
第2図 各種表面仕上げの鋼の曲げ疲れ限度と引張強さの関係(模本)



第3図 材料の引張強さと各種の切欠きや粗面による疲れ限度低下率との関係 (McAdam ほか)

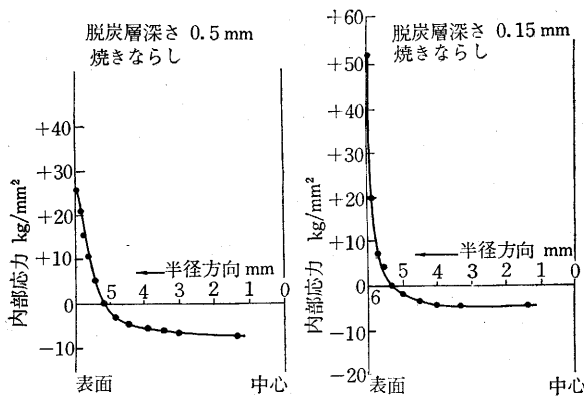
この関係は、たとえば第3図⁹⁾に示すような、切欠きについての既知の関係とよく類似しているの、第2図の関係は、まず凹凸による切欠き効果によるものと考えられよう。

しかし、機械仕上げによる強度低下はそれほど著しくなく、第2図の中で著しい低下は黒皮つきの材料に見られる。黒皮材は表面層の下に脱炭が起こっているといわれる⁹⁾。第4図¹⁰⁾に示すように表面に脱炭層をもつ材料



第4図 疲れ限度と脱炭層の深さ(上田ほか)

の疲れ強さは、それが無い材料の疲れ強さよりかなり低い。この低下に、表層材料の低炭素化と表面あらさの悪化による切欠き効果とが寄与しているのはいうまでもないが、そのほかに、第5図¹¹⁾に示すように脱炭層中には

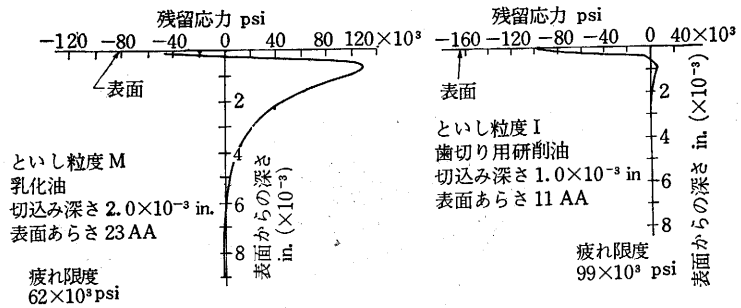


第5図 脱炭した棒鋼(直径12mm)(0.61%C炭素鋼)の断面の軸方向内部応力分布, 10%硝酸溶液使用(上田ほか)

一般に引張残留応力が存在していて、これが強度低下の有力な要因の一つになっていると考えられている^{7), 11), 12)}。その残留応力の値としては、50 kg/mm² 程度のも

のも得られている^{7), 12)}。

機械仕上げの場合にも、加熱・冷却や塑性変形によって、表面層中に引張や圧縮の残留応力が発生する。第6図¹³⁾は研削面に圧縮残留応力が得られた場合の1例で、同一材料でも研削方法の若干の相異により、表層の圧縮残留応力が数10 kg/mm²も異なっている。この場合疲れ限度の高低が残留応力だけに依存しているという保証はないが、高い疲れ限度は高い圧縮残留応力に対応して

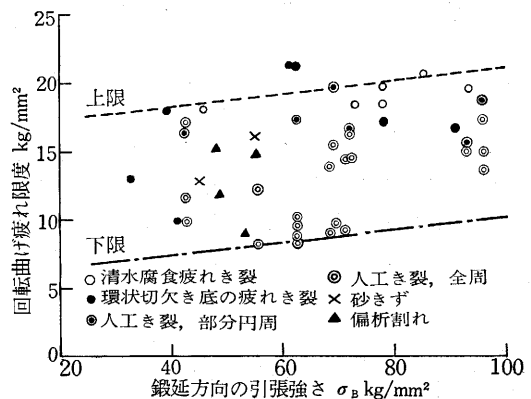


第6図 研削面の残留応力と疲れ限度(Tarasov-Hyler-Letner)

いる。ここでわれわれは、機械仕上げによる残留応力は疲れ限度の高低に関係はするが黒皮材の場合ほど影響が大きいとはいえずである。ただし、ここでいう残留応力は、表面にもっとも近い位置に存在するものを考える。

(2) 表面欠陥

第7図³⁾は欠陥材の疲れ限度であり、総合的にみる



第7図 き裂材および欠陥材の回転曲げ疲れ限度と引張強さ(星野)

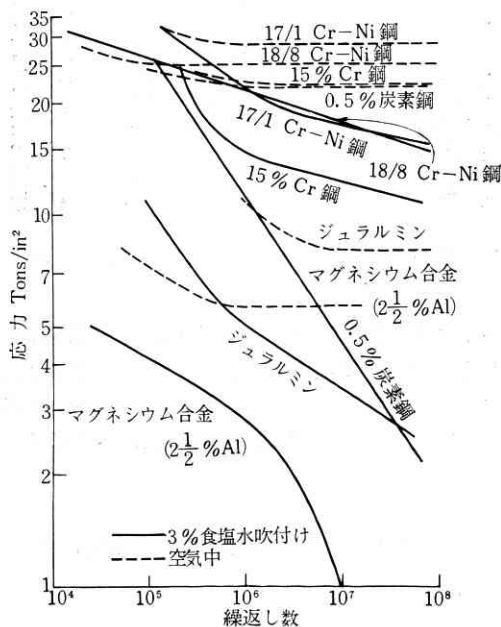
と、素材の強さにはほぼ無関係であることがわかる。人工き裂を別にすれば、無欠陥材を基準にとった場合の表面欠陥による疲れ強さ低下率は直接には決定しにくい。

両振れ疲れ試験より得られたこの図から推定できる限りでは、欠陥による疲れ強さ低下率と引張強さの関係は通常の切欠きにおけるものと異なるところがない

ように見える。ただし、その場合、無欠陥材の疲れ限度の平均値を、図示された引張強さの約45%と考えた。多くの欠陥材の特性は、き裂の挙動に左右されると考えてよいが、このき裂については後に述べる。

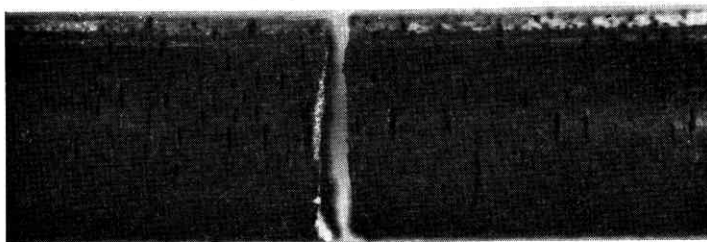
(3) 腐食性の液またはガスとの接触

吸着疲れ(adsorption fatigue)⁴⁾による強度低下は一般にそれほど激しくない。しかし、腐食疲れ(corrosion fatigue)では、疲れ強さの低下は時間とともに無制限に進行するので、疲れ限度が得られない。この間の事情と特性の多様性を第8図¹⁵⁾に示す。荷重繰返し速さ



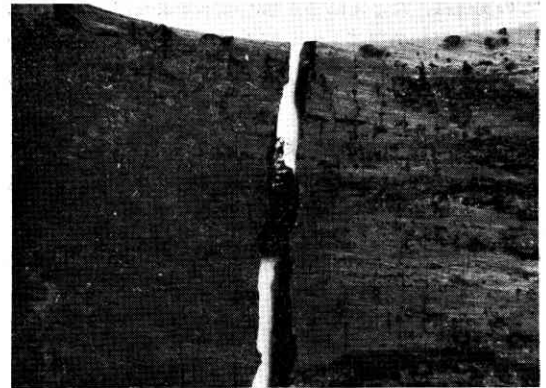
第8図 各種材料の両振れ引張圧縮腐食疲れ S-N 曲線 (Gough・Sopwith)

・液の種類・荷重繰返し数の選び方によって、常温での疲れにおける最大の強度低下を腐食疲れにおいて容易に実現することができる。腐食疲れを受けた材料の表面には、比較的早期、低応力でも容易に多数のき裂群(第9図、第10図)が発生することが知られていて、



第9図 腐食疲れき裂 回転曲げ、レール鋼、応力 6 kg/mm², pH 5.8 の硫酸中で腐食疲れを 2×10^7 回かけた後、引張試験に供した。

き裂の挙動を考慮しなくては、上記の激しい強度低下を説明できないことは明らかであると思われる。実際



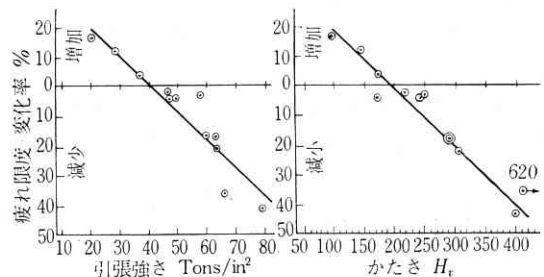
第10図 腐食疲れき裂 平面曲げ、レール鋼、応力 21 kg/mm², 3%食塩水中で、 1.54×10^7 回腐食疲れ

に腐食疲れではき裂材特有の特性がしばしば現われる^{16) 17), 18)}。また腐食疲れでは、後述するように残留応力の影響が大きい。

(4) 被覆

塗装や注油などで試験片表面を外気から遮断すると疲れ限度は普通は多少向上するか、またはほとんど変化が認められないかのいずれかであるが、その向上率もきわめてわずかである。

メッキは疲れ強さにかなり顕著な影響をもたらす。第11図¹⁹⁾に示すように、クロムメッキを施すとメッ

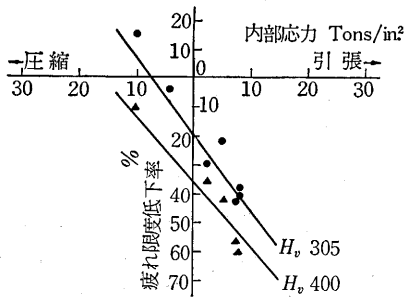


第11図 下地材料の引張強さまたはかたさと、クロムメッキによる疲れ限度の変化率(クロムの厚さ0.006 in, 内部応力 4 tons/in², 引張)(Williams・Hammond)

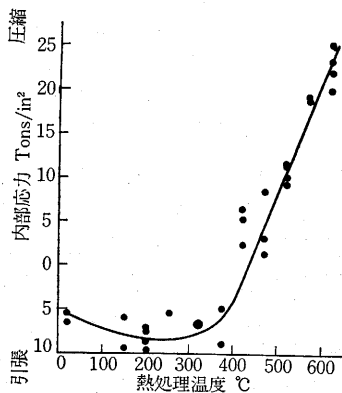
キ条件が一定ならば、下地金属の鋼が弱く軟いと疲れ強さの向上を招き、下地金属が強く硬いと疲れ強さの低下を招く。

クロムメッキのメッキ層中にはき裂と残留応力が存在し、この残留応力とメッキ材の疲れ限度との間には第12図¹⁹⁾のような関係が得られていて、引張残留応力の増大とともに、疲れ限度が下がっている。ニッケルメッキについても同様な関係が各種のメッキ条件について得られている。この残

留応力は、メッキ層厚さ・メッキ液温度・メッキ後熱処理温度などにより変わるが（たとえば第 13 図¹⁹⁾）、熱処理を受けるとメッキ層のかたさも変わり、総合してけっきよく第 14 図¹⁹⁾のような結果になる。



第 12 図 クロムメッキした鋼の疲れ限度変化率とクロム中の内部応力との直線関係、ベーキング後 (Williams・Hammond)

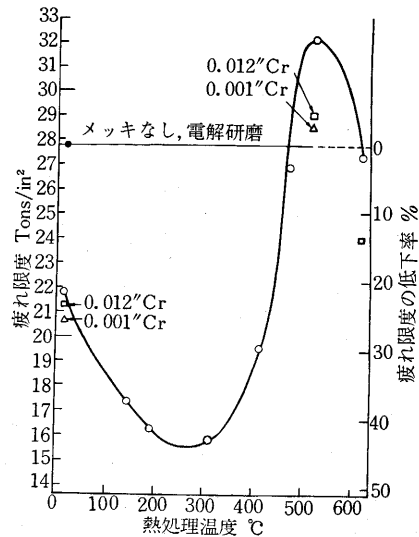


第 13 図 クロムメッキ層中の残留応力に与える熱処理の影響、メッキ層厚さ 0.001 in. (Williams・Hammond)

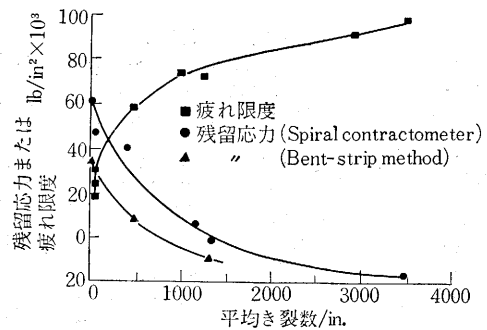
メッキ層中のき裂はきわめて密に発生することがあり、このき裂密度が増加すると引張残留応力が解放され、かえって疲れ強さが向上するのであると考えられるような実験結果も第 15 図¹⁹⁾ のように与えられている。

(5) 表面冷間加工

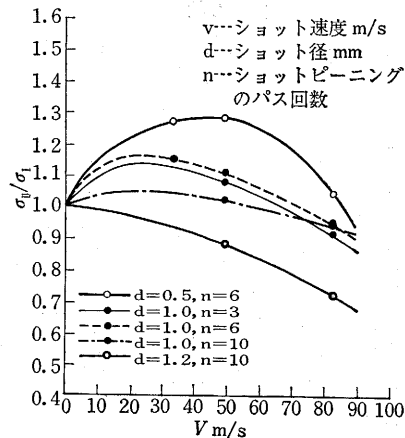
ショットピーニングを施した材料の疲れ強さ σ_{II} と施さない材料の疲れ強さ σ_I との大小関係は単純でなく、たとえば第 16 図⁹⁾ のようになる。ショットピーニングを施した表面は圧縮残留応力の発生と、局部的な加工硬化とによって強化され、一方表面の凹凸その他による応力集中源の発生により弱化され、その複合した効果によって強度が左右されると考えられている。その残留応力分布もたとえば第 17 図⁹⁾ のように、材料や施工方法の相違により大きく変化する。凹凸や



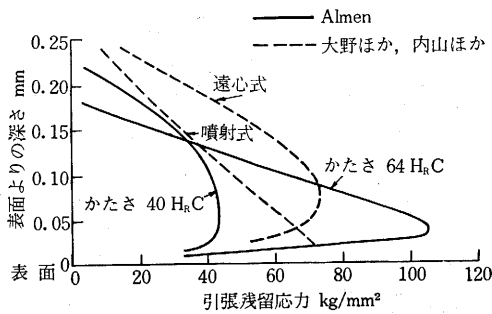
第 14 図 クロムメッキした鋼（引張強さ 60 tons/in²）の疲れ限度に及ぼす熱処理の影響、メッキ層厚さ 0.006 in (Williams・Hammond)



第 15 図 クロムメッキした鋼の疲れ限度とクロム層中の内部応力およびき裂密度との相互依存性 (Stareck ほか)



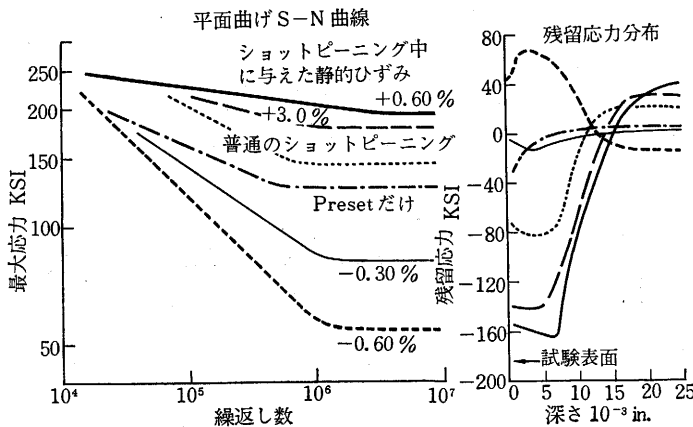
第 16 図 ばね鋼 (SUP 6) の片振れ平面曲げ疲れ限度に及ぼすショットピーニング施工条件の影響
 σ_I : ショットピーニングしない材料の疲れ限度
 σ_{II} : ショットピーニングした材料の疲れ限度 (山本)



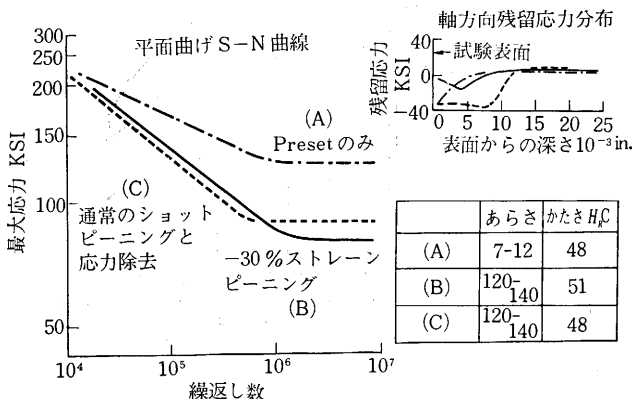
第 17 図 材質とショットピーニング方法が残留応力分布に支える影響 (山本)

加工硬化についても同様なことがいえるであろう。ショットピーニングを施した材料の疲れ強さの多様性もかかる事情によるのかも知れない。

静的に曲げ変形を与えた状態でショットピーニングを行なうことにより残留応力だけを種々に変えた試験片を作り、この疲れ限度を求めた実験によれば、第18図²⁰⁾のように表面における圧縮残留応力の大小の順序



第 18 図 各種のショットピーニングを施したバネ鋼の平面曲げ S-N 曲線と残留応力 (Mattson・Roberts)

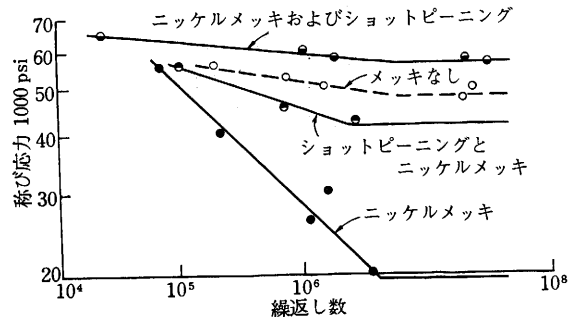


第 19 図 表面あらさと圧縮残留応力のおおのが疲れ特性に与える影響の分離 (Mattson・Roberts)
注. あらさの単位は microinch (算術平均)

がそのまま疲れ限度の高低の順序になった。

ショットピーニング後熱処理によって残留応力を減少させた試験片を作り、この疲れ試験結果をショットピーニングを施さず残留応力とかたさが同じで表面が平滑な別の試験片の疲れ試験結果と比較して、表面の凹凸の影響を分離抽出しようと試みたのが第20図²⁰⁾である。この図によるとこの例では凹凸のみによる疲れ限度の低下率は約 30 %であった。

ショットピーニングをすると、鋼材表面には通常厚



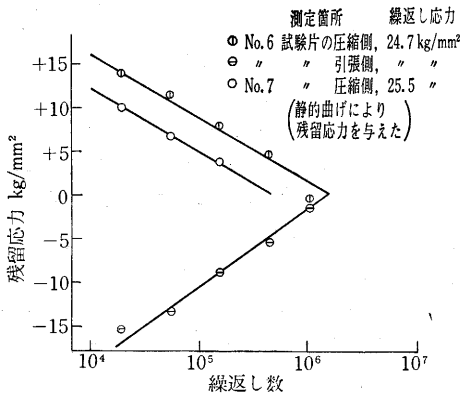
第 20 図 ニッケルメッキした鋼 (引張強さ 55 tons/in²) の回転曲げ疲れ強さに及ぼすショットピーニングの影響 (Almen ほか)

さ 0.1~1.0 mm の冷間加工層を生じ、圧縮の残留応力が発生する。したがって、既述の脱炭材、クロムメッキ材のように、表面層に引張残留応力が存在し、このことが疲れ強さの低下の主要因の一つであるとの疑いがある材料にショットピーニングを施せば、低下した強度をかなり回復できる見込がある。脱炭材に用いた例を既述の第4図に併記し、ニッケルメッキ材に用いた例を第20図²¹⁾に示す。ニッケルメッキ材の場合ほどではないが、クロムメッキ材に用いた場合もかなり有効で 30~40 %程度も疲れ限度が上がる。このようにいずれも良好な強度低下の防止ないしは強度向上が得られている。

表面圧延は各種の点でショットピーニングと類似の現象であるといわれる。疲れ限度の向上がたかだか 30~40 %である点、施工時の加圧力を増すに従い疲れ限度が増大—最大値—減少と変わる点、これらの現象が材料表面の局部的冷間加工による点などがそれである。

表面冷間加工により得られた疲れ強さの向上率は一般にはあまり大きくない。この理由の一つに、繰返し荷重下での残留応力の減衰を上げてよいであろう。残留応力が繰返し

荷重のもとで漸次減少するかどうかについては信頼すべき資料がきわめて少ない。これは残留応力の測定が一般に試験片の破壊を必要とすること、非破壊的である X 線応力測定については現状ではその再現性や精度について種々問題が残されていることなどによるものと思われる。したがって、あまり一般的結論はいえないが、塑性変形により与えられた残留応力については、荷重の繰返しとともに減少するというを示す X 線による実験結果²²⁾があり、その 1 例を第 21 図²²⁾

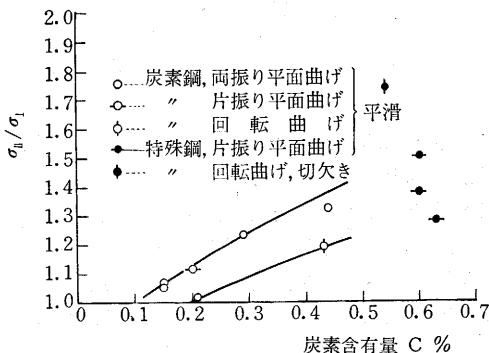


第 21 図 繰返し応力を受ける炭素鋼 (6.2290°C) の残留応力の変化: X 線応力測定法による (西原・平ほか)

に示す。この場合外部より加える繰返し応力が大きいほど残留応力の減衰の程度は大きい、疲れ限度より低い繰返し応力でも減衰が起きている。

ただし、この場合の材料は焼なましした約 0.22%C の炭素鋼 ($\sigma_B = 43.2 \text{ kg/mm}^2$) であるらしいとのことである。これに対し第 18 図に示したバネ鋼の実験では疲れ限度付近の応力では容易に減衰が生じなかった。

このことから、軟質の鋼では残留応力が繰返し荷重により減衰しやすく、硬質の鋼では減衰にくいこともあるのではないかと想像される。ショットピーニン



第 22 図 ショットピーニングした炭素鋼および特殊鋼の曲げ疲れ限度と素材の炭素量含有との関係 σ_I, σ_{II} は第 16 図と同じ (山本)

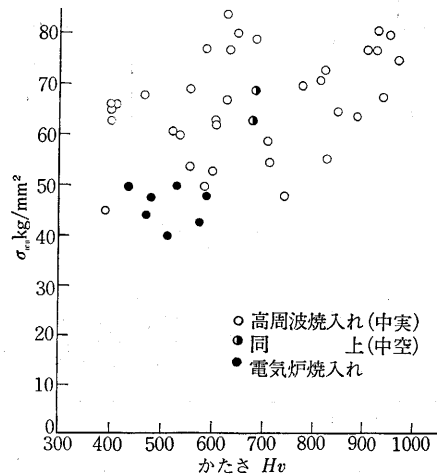
グによって最初に得られる圧縮残留応力は材料がかたいほど高いようであるが⁶⁾、このことも含めて、硬質の材料ほど消滅しにくいのではないかと考えられる。

第 22 図⁶⁾ は素材の炭素含有量とショットピーニング材の σ_{II}/σ_I との関係である。

これらによるとやはり結果的には、表面冷間加工の効果は硬質材料ほど大きいようである。しかも、ショットピーニング、表面圧延のいずれもが、切欠き材に対して特に効果があるのは注目すべきことである。

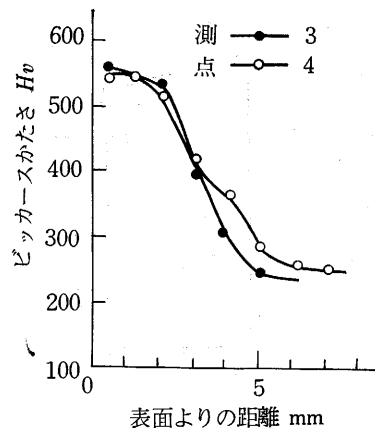
(6) 表面硬化処理

高周波焼入れの疲れ強さ向上能力は特に著しく、平滑材の疲れ限度の実験値を第 23 図⁷⁾ に示す。この効



第 23 図 高周波焼入れした平滑試験片 (直径約 10 mm) の疲れ限度 σ_{e0} とかたさ

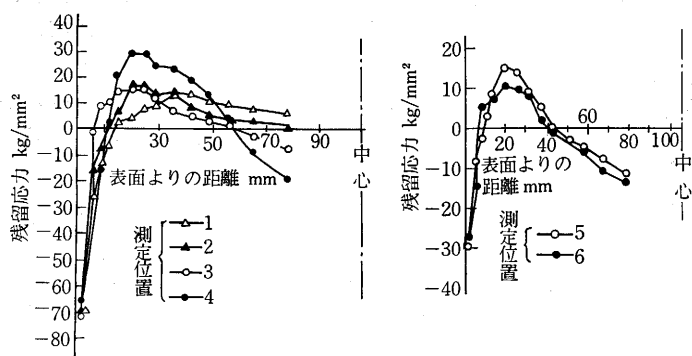
果は材質の硬化と圧縮残留応力の発生とによるものであるといわれている。かたさの分布はたとえば第 24 図²³⁾ のように内部より表面で高く、他の表面硬化処理



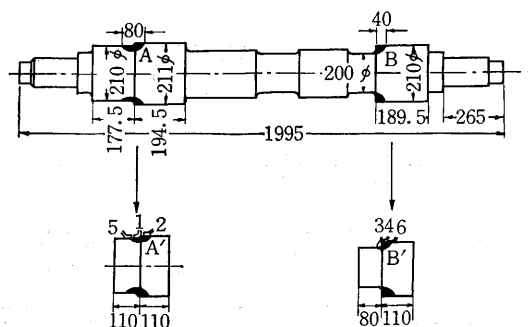
第 24 図 高周波焼入れした車軸 (第 26 図) の断面内かたさ分布 測点 1, 2 についての実験値もこれとほぼ同じ (嵯峨・高橋)

にくらべて、この硬化深さを大きくすることは容易である。この表面硬化層中に高い圧縮の残留応力が生じる。第24図の測定対象であった車軸についての残留応力の測定例を第25図²⁴⁾に、その測定位置を第26図²⁴⁾に示す。

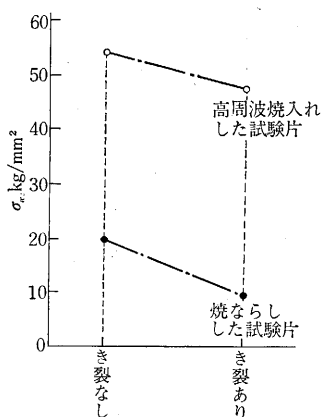
高周波焼入れによる上記の効果は切欠きやき裂があるときに特に著しい。第27図⁷⁾はき裂材に高周波焼



第25図 高周波焼入れした車軸(第26図)の軸方向残留応力測定例(嵯峨・高橋)



第26図 高周波焼入れした車軸の残留応力およびかたさ測定位置(嵯峨・高橋)

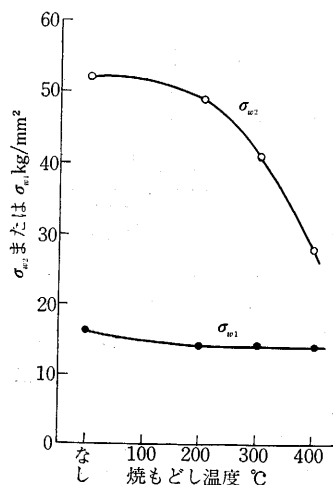


第27図 き裂を入れた試験片と、き裂のない試験片との疲れ強さに及ぼす高周波焼入れの影響(中村)

入れをするとき裂がない材料とほとんど同じ程度まで強度を高めることができることを示す。

高周波焼入れしたV形切欠き試験片は、焼もどすと焼もどし温度が400℃に上がるまでに急速に強度を失う。ここで、切欠きの底にき裂を発生する限界応力を σ_{w1} 、そのき裂がさらに引続き成長を続ける限界応力を $\sigma_{w2}(\sigma_{w2} \geq \sigma_{w1})$ とすれば、 $\sigma_{w1} \cdot \sigma_{w2}$ と焼もどし温度との関係は、第28図⁷⁾のようになる。焼もどし温度の変化により、残留応力は第29図⁷⁾のように変わるので、この第29図と第28図とを合わせて考えると、 σ_{w1} は残留応力の変化の影響を受けにくく、圧縮残留応力があっても切欠き底のき裂発生を抑えることは難しいことになり、一方き裂材としての強さを示す σ_{w2} が残留応力の影響を受けるのであることがわかる。

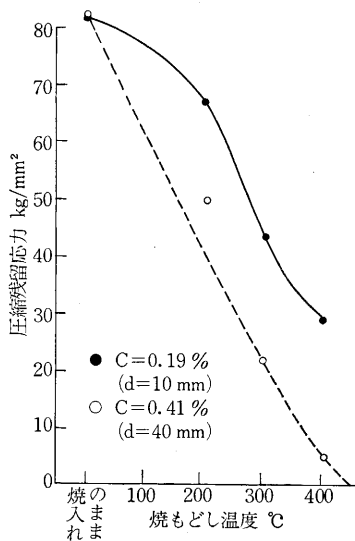
滲炭し焼入れ焼もどしをすると、疲れ強さが向上する。これは主として滲炭により表面層が高炭素化することによるも



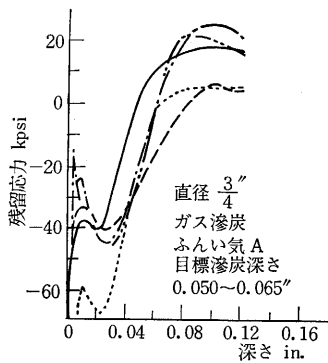
第28図 高周波焼入れしたV形切欠き試験片の $\sigma_{w1} \cdot \sigma_{w2}$ と、焼もどし温度の関係(直径約10mm, 切欠き底の曲率半径0.25mm, 0.19%C炭素鋼)(中村)

のであろうが、そのほか、滲炭層中には一般に圧縮残留応力がある。焼入れ条件や素材の太きを変えると、第30図²⁵⁾のように各種の残留応力分布が得られるが、かかる多様性は残留応力にとってある程度共通した特性であるように思われる。滲炭材の疲れ限度の実験値はたとえば第31図⁷⁾のごとくである。この図の増加率は滲炭をしない材料に対するものである。

窒化も疲れ強さを向上させる上に非常に有力な表面処理方法であり、第32図⁷⁾のような高い疲れ限度の



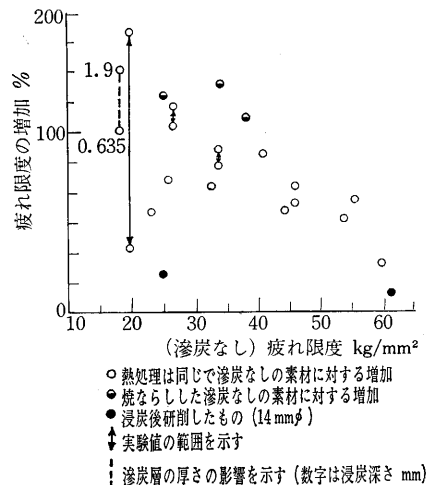
第 29 図 高周波焼入れした炭素鋼試験片の表面における残留応力と焼もどし温度との関係 (中村)



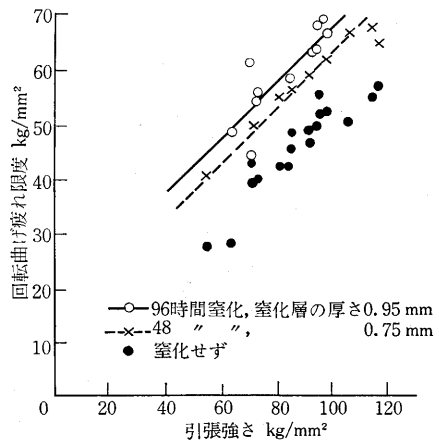
第 30 図 滲炭した丸棒の残留応力分布に及ぼす材料および焼入れ条件の影響。滲炭温度 1675~1700°F (920°C), 焼もどしなし, 材料 No は SAE No. (Coleman・Simpson)

材 料	焼 入 れ	試験片番号	中心部かたさ Rc
—— 8617	Brine (4 sec) to Oil	11	39.5
--- 8617	Oil	20	34.5
- - - 9310	Oil, Frozen Twice	105	37.0
- - - 9310	Salt (3 min) to Oil	107	35.0
..... 1010	Brine	110	(3)

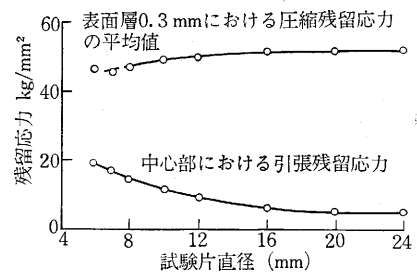
値が得られている。切欠きには特に強い。この場合も高周波焼入れや滲炭と同様に表面近くには高いかたさの材質とたとえば第 33 図⁷⁾のような圧縮残留応力とが存在する。ただし、窒化や滲炭では一般に硬化層の厚



第 31 図 滲炭しない鋼の疲れ限度と、滲炭による疲れ限度の増加率との関係 (吉武, 原典は Love)



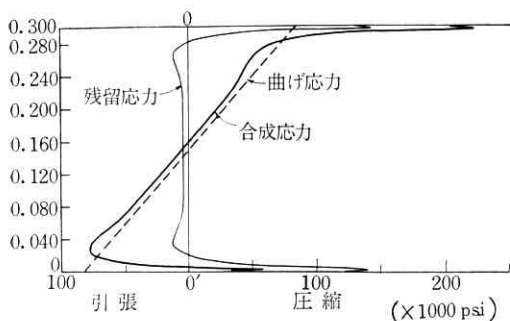
第 32 図 窒化した平滑丸棒の回転曲げ疲れ限度と試験片中心部の引張強さとの関係 (吉武, 原典 Mailänder)



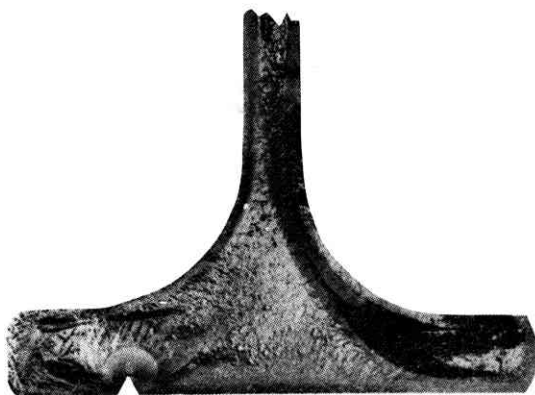
第 33 図 各種直径の窒化した丸棒試験片の表面層および中心部の残留応力 (吉武, 原典 Mailänder) 比容積を測定し, これを使って残留応力を計算したものであるという。

材料: 0.3% C, 1.3% Cr, 1.0% Al

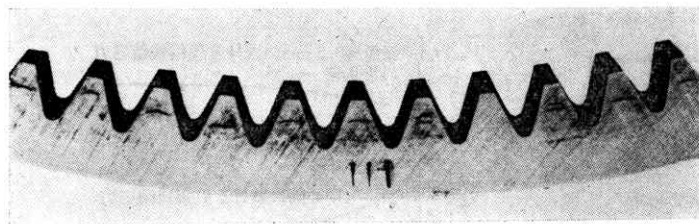
さが薄いので、表面近くだけが局部的疲れ限度が高い。たとえば第34図²¹⁾のような応力状態であったとすると、破壊は引張側で開始しやすいから、強化層の内側に相対的に弱い箇所が現われ、破壊が材料の内部から始まることもある。内部き裂の例を第35図²¹⁾(窒化したコネクティングロッド)、第36図²¹⁾(滲炭した歯車)に示す。



第34図 窒化した材料が曲げを受けたときのある瞬間の応力分布。曲げ応力は刻々変化する (Almen)



第35図 窒化したコネクティングロッドの表面層下で開始した疲れ破壊 (Almen・Black)



第36図 滲炭した歯車の歯の内部に生じた破壊 (Almen・Black)

高周波焼入れや窒化では高い安定した疲れ強さが得られているので、表面冷間加工の場合に比し、残留応力が長時間安定に維持されているものと思われるが、実験結果はまだきわめて少ない。

4. 表面効果を構成する主要因

以上は、表面効果に関する多数の実験値中、疲れ強

さに影響を与えると思われる諸要因に関するデータの一部を抽出したものである。

その“疲れ強さに影響を与えると思われる諸要因”とは次のようなものである。

- ① 表面の材質の変化 { 化学成分
組織
- ② き裂または表面の凹凸による切欠き作用
- ③ 残留応力
- ④ 加工硬化

各種の表面効果の主要因をこの4項目でカバーし、多少性質の異なった要因も、この4項目の考え方を拡大解釈して説明しようというのである。

ただし、疲れににおける吸着の影響¹⁴⁾、fretting fatigue²⁶⁾などもいちおう上記4項目中に含めて考えようとするのであるが、現段階ではこれらはまたそれぞれ別個に現象の内容を追求すべき必要があるものと考えられる。

上記①～④の各項の影響が特に強い表面条件を述べれば次のとおりである。

- ① 化学成分の変化は脱炭・滲炭・窒化などで著しく、金属被覆などは、表層がまったく異なった化学成分の材料に置き換ったと考えてもよい。このように化学成分の変化のあるときはもちろん、高温にさらされたとき、欠陥や表面仕上げを考えるとときも組織の変化を考える。
- ② き裂と凹凸とこの両者の切欠き作用には共通点も多いが、後に述べる“き裂の非対称性”、“破壊の時間的な進行過程”、“強度低下の激しさ”などを考えるとき裂と凹凸とは別のカテゴリに入れてもよい。き裂には、いわゆる“き裂”のほかはその成因とは無関係に、力学的にき裂と類似の挙動を示すものはすべてき裂に含めてよい。

き裂による切欠き作用を考える必要があるのは、

メッキ・ショットピーニング・表面欠陥・黒皮・脱炭・滲炭・腐食疲れやある種の機械仕上げの場合、鋭い切欠きと表面処理との合成作用を考える場合などである。凹凸が問題になるのは、表面仕上げ・表面冷間加工・表面欠陥・腐食・塗装下地になどにおいてである。

- ③ 電解研摩・塗装を除いてはほとんどの場合残留応力を考慮した方がよい。

問題なのは、残留応力の測定結果の信頼性で、特に疲れ試験と結びつけて行なった場合の結果である。

- ④ 表面冷間加工、機械仕上げ、打こん・圧こんなどの表面欠陥では加工硬化を考慮した方がよい。

既知の実験的事実から上記①～④の各項の機能を要約すると次のようにいえる。すなわち、疲れ強さを上げる

には④の材質の強化が最優先する必要がある。下がる場合も表面の強度が材質的に下がったものは救済の方法が少ない。最上層が強化されても強化層が浅すぎると内部から破壊が起こりうる。疲れ強さの低下の大部分は⑤の切欠き作用、特に激しい低下はき裂による切欠き作用を伴っている。⑥の残留応力は圧縮が疲れ強さの向上を、引張が低下をもたらすことは一般的にいえる。しかし、残留応力の影響の大小については、一般的にはどちらともいえない。⑦の加工硬化が疲れ強さに与える影響は一般には大きくない。通常は加工硬化を与えられと強度が上がるが、その加工硬化の程度と素材の材質いかんにより疲れ強さの向上に役立つことも、ほとんど影響がないことも、時には低下をもたらすこともある。

④～⑦の各項の機能を上記のようにおのおの単独に論じると、しばしば実情にそわないこともある。④～⑦の各項は互いにきわめて有機的な関連を有しているのが実情である。たとえば、残留応力の発生には材質の変化か加工硬化が伴う。また、そのいずれを伴うかによって、その後の残留応力の消長が支配されることがあるようである。その残留応力の成立しうる限界は材質によって異なる。また、材質の差をかたさの差で示すことが多いがこのかたさの測定値は残留応力によって影響を受けることがあるといわれている。

き裂は、その発生は残留応力の影響をあまり受けないが、成長速度は影響される。き裂材の疲れ強さは残留応力と材質の変化に支配される。切欠き作用の強弱は材質によっても大きく影響される。……等々である。

したがって、表面効果について詳しい正確な認識を得るためには総合的で、かつ具体的な検討が必要である。次に、き裂の挙動と残留応力の関係から、この検討を行なってみよう。

(1965年3月20日受理)

(つづく)

文 献

- 1) 金属材料疲れ強さの設計資料 (昭36) 日本機械学会

- 2) 川田雄一, 金属の疲労と設計 (昭34) オーム社
- 3) “材料の疲れにおける表面効果整理資料”
日本機械学会誌, 67, 543 (昭39—4), 594
- 4) “同上”, “ ”, “ ”, 544 (“ —5), 758
- 5) “ ”, “ ”, “ ”, 546 (“ —7), 1029
- 6) “ ”, “ ”, “ ”, 547 (“ —8), 1190
- 7) “ ”, “ ”, “ ”, 548 (“ —9), 1387
- 8) 形状は
“JIS 回転曲げ疲れ試験方法 (案)”
“JIS 疲れ試験方法通則 (案)”
材料, 13, 131 (昭39—8) 640
- 9) D. J. McAdam, Jr.・R. W. Clyne, J. Res. NBS, 13, 527 (1934)
- 10) 上田太郎・上田祐男, 材料試験, 9, 80 (昭35—5) 380
- 11) 上田太郎・上田祐男, 材料試験, 8, 75 (昭34—12) 913
- 12) 石橋正, 金属の疲労と破壊の防止 (昭29) 養賢堂
- 13) L. P. Tarasov・W. S. Hyler・H. R. Letner
Proc. ASTM, 57 (1957), 601
- 14) V. I. Likuhtman. P. A. Rebinder・G. V. Karpenko,
Effect of a Surface-Active Medium on the Deformation of Metals (1958), Her Majesty's Stationery Office, London
- 15) H. J. Gough・D. G. Sopwith, J. Iron. Steel Inst., 127, 1 (1933), 301
- 16) 岡本舜三・北川英夫, 日本機械学会誌, 62, 481 (昭34—2), 204
- 17) S. Okamoto・H. Kitagawa, Proc. 7th Japan Nat. Cong. Appl. Mech., 1957 (1958—3), 27
- 18) H. Kitagawa・M. Sato, Proc. 4th Jap. Cong. Test. Mat., (1961), 29, JSTM
- 19) R. A. F. Hammond・C. F. Williams, Met. Reviews, 5, 18 (1960), 165
- 20) R. L. Mattson・J. G. Roberts, Internal Stresses and Fatigue in Metals (1959), 337, Elsevier Publishing Company
- 21) J. O. Almen・P. H. Black, Residual Stresses and Fatigue in Metals (1963), McGraw-Hill
- 22) 西原利夫・平修二・常田弘・落合竜雄, 日本機械学会論文集, 18, 68 (昭27), 112
- 23) 中村宏, 高周波焼入れと疲労強度, (昭38) 日刊工業新聞社
- 24) 嵯峨敏郎・高橋秀雄, 日本機械学会論文集, 30, 218 (昭39—10), 1135
- 25) W. S. Coleman・M. Simpson, Fatigue Durability of Carburized Steel, (1957), 47, ASM
- 26) R. B. Heywood, Designing Against Fatigue (1962), 157, Chapman and Hall, London

次 号 予 告 (6月号)

研究 解 説

- 船舶実験用水槽について……………田 宮 真
 組合せ応力を受ける鉄筋コンクリートはり部材の終局せん断耐力理論および実験……………末 永 保 美
 —(その2) せん断力をうけるコンクリートはり部材のコンクリート部分の挙動についての基礎的な実験—

技 術 メ モ

- 測定値を結んで曲線を描くときに便利な放物線の性質……………大 井 光 四 郎

速 報

- 無方向性磁束計の試作……………沢 井 善 三 郎
 ……森 浩 一
 ……村 司
 ……高 橋 幸 伯
 ……小 畑 和 彦
 ……佐 野 謙 一
 ……能 勢 義 昭
- 低サイクル疲労試験装置……………