

機械の疲労寿命算出法と今後の問題点 (5)

（株）川崎重工業 中 村 宏*

19.1.3 き裂の進展について

き裂の進展については 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12 および 13 でのべたが、考えれば考える程、実際のきづはどのようにすすむかわからなくなる。

従って、きづが入ればすぐ廃却してしまえばよいが実際には経済問題が入るので、そう簡単にはいかなくて、それぞれの担当箇所では、きづの許容限度をどの程度におさえるかについては苦慮している。

このような場合の目安として非常に大胆に考えて求めた実例を示そう。

車軸の例についてのべる。

応力頻度が図 69 のようにわかり、またきづ入りに対する限界が図 55 からでてくると、ある車軸の形と寸法が定めれば、きづ入り迄の寿命を求めることができる。

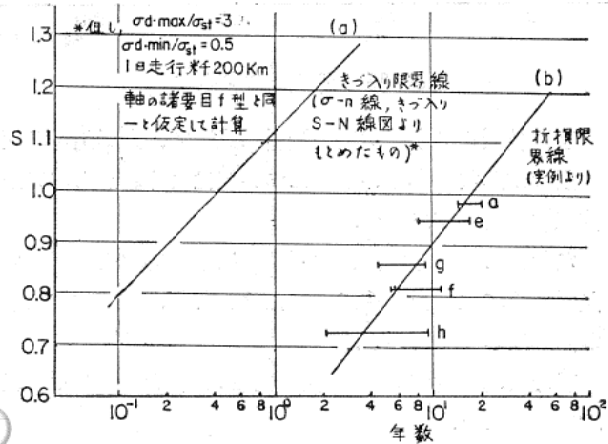


図103 きづ入り限界線と折損限界線の比較

昔よくおれた車軸⁶⁹⁾ についての計算例* が図103の(a)線である。(a)線はきづ入り迄の寿命と安全率との関係である。つぎに、応力頻度がわかり、又き裂深さを仮定すると、図49の資料から、あるき裂深さのある応力に対する応力1回ごとのき裂進展速さ ($d\lambda/dN$) がもたまるので、破断迄の寿命を求めうる。図103⁴⁶⁾ の(b)はこのよう

* 神戸市生田区東川崎町2-14
技術研究所第1機械研究室

* 応力頻度分布はこれ迄の実例⁵³⁾ から $\sigma_{d-max} = 3\sigma_{st}$, $\sigma_{d-min} = 0.5\sigma_{st}$ とした。

にして求めたものである。

図103の縦軸の安全率Sは車軸の設計式¹⁾⁶⁹⁾ によるものである。

(a)線と(b)線でおそそ50倍の寿命の差があることがわかり、きづ入り状態で直ちにすてるか、破断ぎりぎり迄つかうかによって経済的な面からの価値は非常に異ってくる。

20年前に車軸の設計式をつくった時には、Sが1.0以上あれば20年以上の寿命を保証するということがあったが、最近のようにきづ検査が厳しくなり、きづ入り限度でもって、20年以上を保証するとなると図103からみておよそSは1.5以上要ることになる。

わかりやすくするために、昔の車軸の一例と現在の新幹線車軸を比べると16表のようになり、いかに安全率がましているかがわかるであろう。

表16

	旧私鉄車軸	新幹線車軸
一軸負担荷重 kg	13,300	13,500
直径 mm	150	209
σ_{st} kg/mm ²	4.90	2.26
熱処理	焼ならし	高周波焼入

19.2 歯車について

歯車の強度については昔から問題を多く含んでいるのにもかかわらず、疲労試験が本格的になされるようになったのはごく最近のことである⁷⁰⁾。

また、応力測定も行なわれるようになったのも最近のことである⁷¹⁾。

筆者は、高周波焼入れを国鉄用歯車に適用する⁷²⁾ のにいざさか努力したものの一人であるので、それに関係して得た経験の二、三をここに取り上げよう。

19.2.1 疲労強度について

歯車の疲労強度については実物について求める方法⁷³⁾、小形歯車を用いて行なう方法⁷⁰⁾、iii) 歯車から切り出した試験片を用うる方法、普通の疲労試験片による方法⁷⁴⁾、がある。

実物大の歯車を用いる方法が最ものもましいが、疲労

試験装置が膨大になるので簡単にできない。小形歯車について行なう方法は京都大学会田教授のもとで行なわれている方法で費用はさほどかからない。大きな歯車からシェンク式の疲労試験機(4kg-m)があれば実施して簡単であるので、一度大型歯車についての疲労試験結果との照合がしてあればおおよその値を知るには便利である。普通の疲労試験片(特に回転曲げ)の値を用うる方法は便利であるが使用にあたっては後述の注意が必要である。

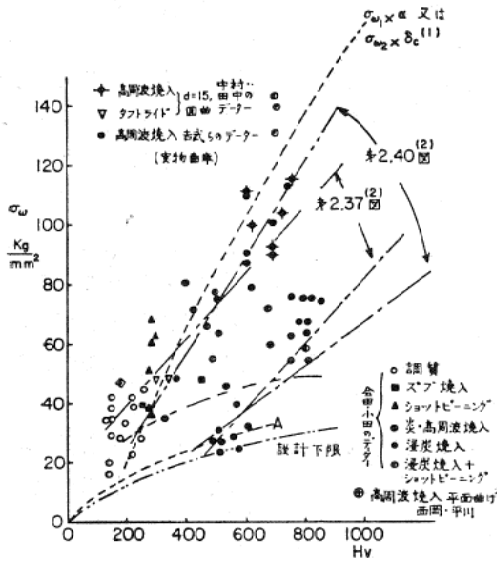


図104 Hv と σ_{w0} の関係

- (1) 中村「高周波焼入と疲労強度」P. 201 より
- (2) 中沢, 中村, 「軸と軸継手」より

以下、上述の事について気がついた事をのべよう。

19.2.1.1 図104は硬度と疲れ限度の関係を求めたものである。ここで“○”“■”…などの資料は小田⁷⁵⁾の学位論文より求めたもので、小形歯車についての実験結果をかき直したものである。

かき直すにあたっては供試歯車の疲労破断部の硬度と残留応力と疲れ限度がわかっているのので、図90のHvから σ_T をもとめ、残留応力は平均応力として図105のようにして、残留応力が0の状態の疲労限を推定したのである。

又、この図で第2.37図、第2.40図とあるのは何れも、文献(3)よりもってきたものであり、 $\sigma_{w1} \times \alpha$ または $\sigma_{w2} \times \delta_c$ * は文献よりもってきたものである。

この図からみよようにかなりなばらつきがあり、回転曲げ疲労試験の切欠試験片の資料は最高に近い値を示し平

* ここで α は応力集中率、 δ_c は σ_{w2} でのき裂深さを λ とする時に、弾性計算で切欠底より λ はいった所の計算応力を見掛けの応力でわったものである。従って $\lambda=0$ の時 δ_c は α となる。

滑試験片の資料のばらつきと小型歯車を用いて実験した疲労強度のばらつきはほぼ同じ程度の数値を示している。

19.2.1.2 大型歯車の資料

電気機関車の大型歯車を対称として日立製作所⁷³⁾で実験されたもので、19.2.1.1と同様な換算を行ったものである。

図104に“⊗”印がそれである。小形歯車の資料より一般に低い。

なお、本試験につかった歯車の応力集中率は約1.5である。また、応力の計算にはNiemannの比較応力 σ_0 ⁷³⁾に1.5をかけて計算した。

両振り疲れ限度の求め方については図105および第17表に示す。

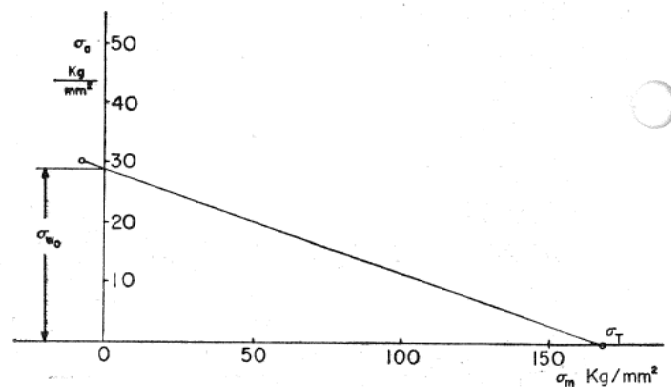


図105 疲労限の求め方

会田教授らの小形歯車の資料に比べて、大形歯車の疲労限度がかなり小さい理由についてはよくわからないが、注意する必要がある。

なお、この計算では、残留応力は平均応力として考え、図105図に示したように求めたけれども、後述するような問題はのこっている。

19.2.1.3 実物から切り出した試験片について疲労試験をすること。

19.2.1.2のようにして実物大の歯車について疲労試験をすることが最も望ましいけれども、実施する事は仲々困難であるので、事故の原因を究明したり、品物としての良否を定めるための確性試験をしたりする時にはこの方法が便利である。国鉄の歯車購入の際の確性試験には、この方法が上述19.2.1.2と共に推奨されている。

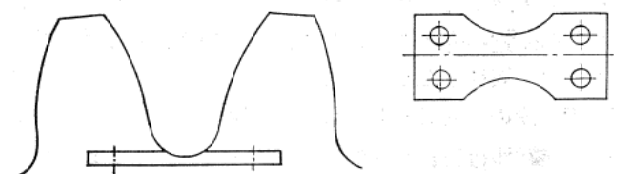


図106 歯車から平面曲げ疲労試験片を切り出す方法

表 17 歯車の疲労強度の求め方 (日立の研究結果)

No.	歯車 諸元	材 質	焼入 条件	歯底あ らさ (μ)	歯元表面 かたさ (H_V)	硬化層 深さ (mm)	残留応力 kg/mm ²	σ_{w2} (片振) kg/mm ²	$\alpha\sigma_{w2}$ $\alpha=1.5$		* σ_T	σ_{w0}
1	A	S40C	I	6	553	1.6	-50	8~48.5	12~72.8	-50+12 +30.4±30.4 =-7.6 ±30.4	168	29
2	A	"	"	18	514	1.4	-55	8~46.5	12~69.8	-55+12 +28.9±28.9 =-9.1±28.9	164	27.5
3	A	S45C	II	18	578	1.9	-45	8~42.5	12~63.8	-45+12 +25.9±25.9 =-7.1±25.9	171	25
4	A	"	"	6	605	2.0	-45	8~51.8	12~77.5	-45+12 +32.8±32.8 =-0.2±32.8	174	32.8
5	B	"	I	18	489	1.4	-44	8~45.3	12~68.0	-44+12 +28±28 =-40±28	161	27.5
6	B	"	"	6	565	1.6	-33	8~56.2	12~84.2	-33+12 +36.1±36.1 =+15.1 ±36.1	169	39.5
7	B	S40C	II	6	517	1.8	-94	8~49.2	12~73.8	-94+12 +30.9±30.9 =-51.1±30.9	164	23.5
8	A	S40C	"	18	509	1.8	-55	8~51.8	12~77.5	-55+12 +32.8±32.8 =-10.2±3.28	163	31
9	A	S45C(S)	"	6	—	—	—	8~53.8	12~80.5			
10	B	"	I	6	588	2.5	—	8~64.9	12~97.0		172	

* H_V がわかれば図90より求められる。

図106 は切り出す方法を示したもので、この場合は大きな歯車ほど試験片が切り出し易く、また斜歯歯車でも実験が可能である。

$H_V \approx 300$ の CrMo 鋼について図107のような歯底の一部を含む平面曲げ疲れ試験片についての疲れ試験結果を図108に示す。この試験片の応力集中率は実測の結果1.45 であるから19.2.1.2の日立の実物歯車の応力集中率とはほぼ同様である。

図108のうち、“○”印は切欠底を丁寧に仕上げたもので、“●”印は実物から切り出したもので、仕上精度がわるいために疲労強度がおちたものと思われる。

ほぼ同じ応力集中率にても、このような試片と実物で

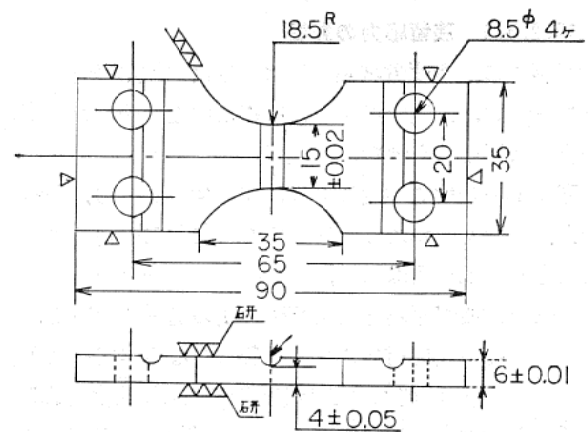


図107 歯車より切り出した平面曲げ疲労試験片

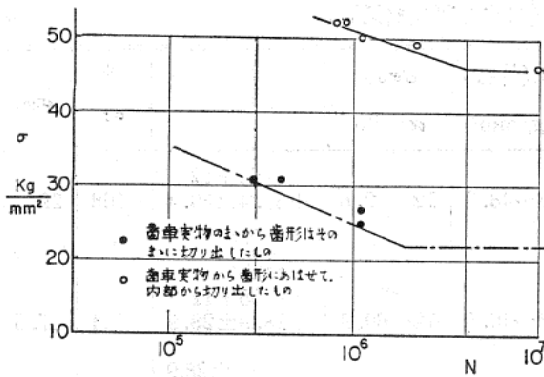


図108 歯形試片による疲労試験結果

はその場所が図109のように異り、き裂発生点異なるから厳密な比較はし難いが、数多くの資料を出して各種の判断を求めるためには便利である。

図104と図108を比べてみよう。Hv≒300に対して“⊗”印の資料からみて平均として $\sigma_w \pm 20 \text{ kg/mm}^2$ と考えられる。(AO線)

図108の値は疲れ限度として 22 kg/mm^2 であるが、この場合図104と比較のために、応力集中率1.45をかけると 32 kg/mm^2 となり、図104からえられた $\sigma_w = \pm 20 \text{ kg/mm}^2$ *に比べるとかなり高い値を示している。このような両者の応力の差については、両方を比較した実験がないからわからないが、差があるということは注意しておく必要がある。

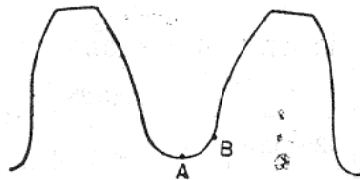


図109 応力集中の場所比較

- A. 試験片の応力集中の大なる処
- B. 歯車での応力集中の大なる処

19.2.1.4 残留応力の影響

試験片による疲労試験結果は通常巨視的な残留応力を含まないが、実際の歯車、特に表面処理をした歯車の場合は残留応力を含む。

残留応力の疲労強度におよぼす影響としては、残留応力が応力のくりかえしを受けても変化しない時には平均応力として取扱えばよい。

そこで、まづ平均応力と疲れ限度の関係について、主として硬度の高い材料について資料をならべてみよう。

図88は高周波焼入れした車軸から切り出した図87のような蒲鉾型の試片による $\sigma_m - \sigma_a$ 線図である。図110

* 応力集中率も含んでいる。数字である。

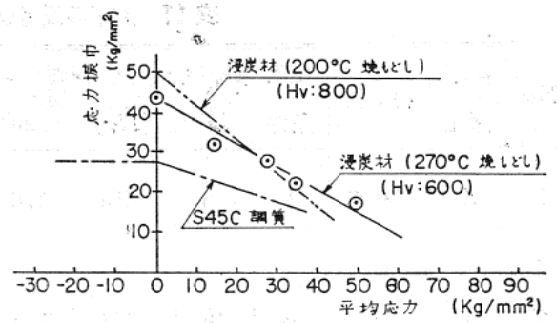


図110 浸炭試片の疲れ限度線図

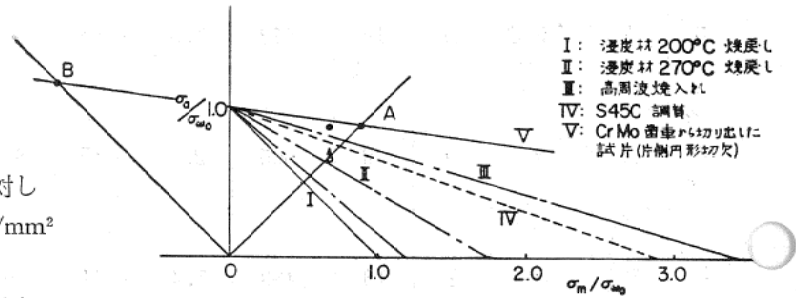


図111 疲れ限度に対する平均応力の影響

は浸炭材についての吉武らの資料⁷³⁾である。

図111はこれらをまとめて模型的にかいたもので、これから浸炭材の方が、 σ_m による疲れ限度の低下が甚し事がわかる。

$\sigma_m - \sigma_a$ 線図の両極端を示す場合についての疲れ限度に対する平均応力の影響の説明図を図112に示す。

浸炭材は図112の(B)にちかく、図88の高周波焼入れ材の場合は(A)にどちらかというに近い。図112の(A)の場合には残留応力の疲労強度におよぼす影響は全くなく、(B)の場合には著しい。(B)のような材料の時には、残留応力の挙動について充分な注意が必要である。

19.2.1.5 残留応力の影響について注意すべき事

19.2.1.2の資料において、疲れ限度引張側応力で表現したのであるが、疲れ限度において圧縮側においてきれつが入っていたものが多かった。

この歯車の場合、(圧縮側応力)/(引張側応力)≒1.3であるから⁷³⁾、図111で $\sigma_m - \sigma_a$ 線図の傾斜が図の中のV*よりゆるい時にはじめて、圧縮側よりきれつが入ることになる。高周波焼入れの場合、この例では図111のIIIであるから当然、引張側からき裂が入る筈である。

実際結果は必ずしも、そうでないのはつぎの理由による。

- i) 疲労き裂の発生が剪断応力によるものであれば、き裂発生に対して、残留応力の影響はない筈である。
- ii) 引張応力による破壊が主力であるならば、圧縮残

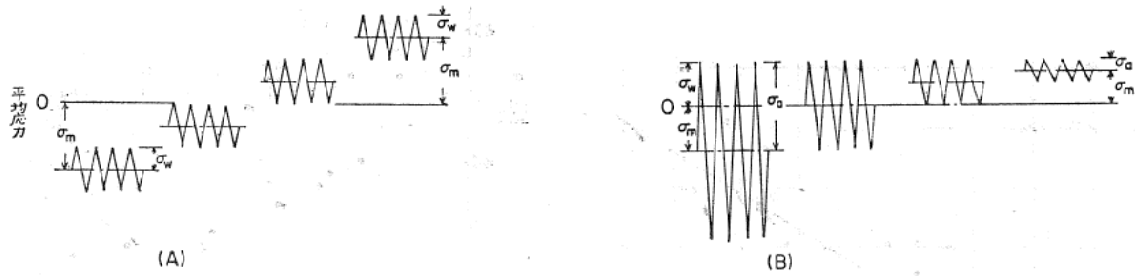


図112 疲れ限度に対する平均応力の影響についての説明図

留応力により疲労限度は上り，引張残留応力により疲労限度は低下する。

前者を支持する実験は図100，図101であり，また軟鋼V形切欠試片を高周波焼入した時の σ_{w1} が (σ_{w0}/α) であることを示す 図113 がそれである。

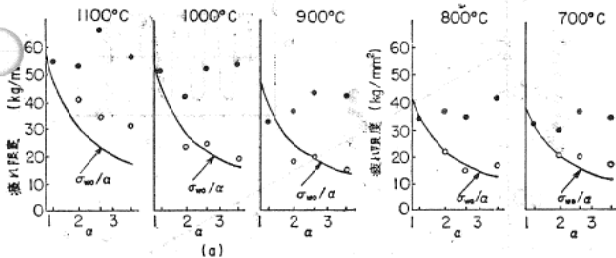


図113 加熱温度ごとの応力集中率 α と σ_{w1} , σ_{w2} の関係 (軟鋼，高周波焼入)

後者を支持する実験は中炭素鋼V形切欠試片を高周波焼入した時の σ_{w1} が (σ_{w0}/α) より遥かに高いことを示す 図114 である⁷⁶⁾。

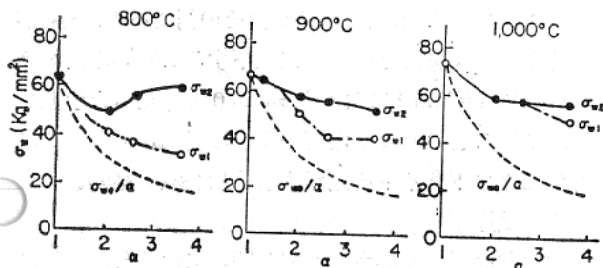


図114 加熱温度ごとの応力集中率と σ_{w1} , σ_{w2} の関係 (中炭素鋼，0.40% C鋼)

急速加熱焼入試片の疲労過程中的組織についての詳細な観察の結果，硬度のひくい所ではまづ σ りを発生し，のち，これがき裂に発展し，のち破断に到る⁷⁹⁾⁸⁰⁾。

$\sigma_m - \sigma_a$ 線図をえがく場合に，破断を対称にするか，きづ入りを対称にするか，また σ りを対称にするかによって $\sigma_m - \sigma_a$ 線図の形状は 図100, 101 に示すように変化するようである。しかし，このような見方をした実験

前頁 * $\sigma_B/\sigma_A=1.3$ である。

はあまりない。

$\sigma_{w1} = \sigma_{w0}/\alpha$ ということは，切欠底の残留応力の影響が殆んどないことを示し， $\sigma_{w1} > \sigma_{w0}/\alpha$ ということは切欠底の圧縮残留応力の影響があることを示す。

高周波焼入材の疲労過程中的組織の変化をみると，まづ析出物がで，その後きれつに発展する事が見出されているが⁸¹⁾⁸²⁾， $H_V=500$ という値が，之らの現象の境のようで，この硬度を境として σ り発生と分離破断にわかれるようである。

現在，このような事を厳密に分離した実験はないが， $H_V=500$ を境として， $H_V=500$ 以下の所がたとえわずかにあっても， σ りを発生してからき裂，発生，破断と進展し， $H_V=500$ 以上の時には所謂 σ りを伴わないでき裂発生，そして破断にいたるものと思われる。

その間，脆いものから粘いものにかけて $\sigma_m - \sigma_a$ 線図は 図112の(B)から(A)へ，図111の I, II, III, IV, V と推移していくものと考えられる。

以上のことをまとめてかくと，

i) $H_V=500$ を境として，硬度がひくい時には，剪断型となり，硬度が高い時には分離型となる。

ii) きづや σ りの見方を精密にすればする程，図 111 の II, III, IV のような中間型は現われなくて，図 112 の (A)は(B)となり，見方をひろい範囲にひろげる程，図 111 の(A)と(B)の混合型としての図111の II, III, IV が表われる。

表面硬化材については， $\sigma_m - \sigma_a$ 線図が不足であるから，今後の資料の蓄積がのぞましい。

19.2.1.6 タフトライドについて

a) 回転曲げ疲れ試験結果

最近タフトライド処理が表面処理の一つとして登場して来た。まだ資料は少いが，身近にあるものを二，三のべよう。

図104の“▽”印は， $d=15 \rho=1.0$ の車軸材でつくった試験片をタフトライドした時の実験結果である⁸³⁾。

図 104 の 2.37図 の曲線の上限に近い値を示している。

σ_{w1} , σ_{w2} と切欠底の表面硬度との関係について，まと

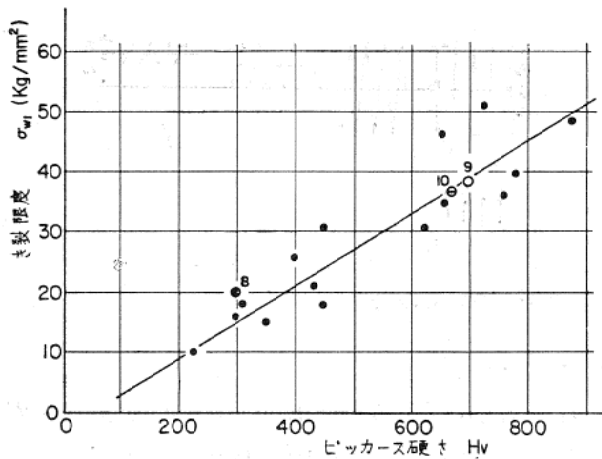


図115 高周波焼入れした試片の σ_{w2} と硬さの関係 ($\rho=0.25$)

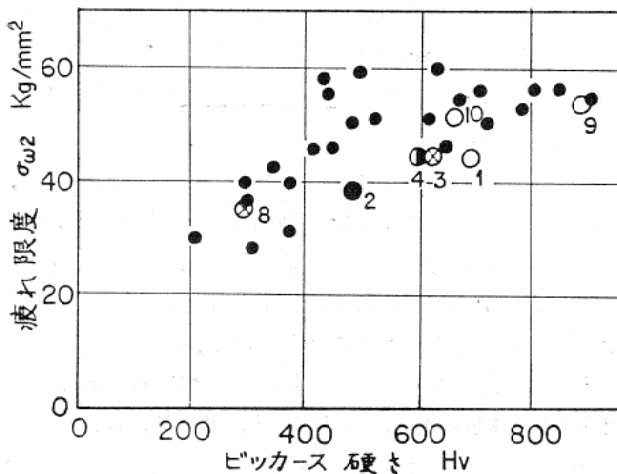


図116 高周波焼入れ材の硬度と疲れ限度 (σ_{w1}) の関係 ($\rho=0.25$)

めたものが 図115, 116 で⁸¹⁾ある*。

これらの図で、●印は高周波焼入れの資料であり、番号をつけたのは (i) タフトライド処理または (ii) タフトライド処理後高周波焼入れしたものの値である。

熱処理法の如何にかかわらず、硬度がひとしければほぼ同一の σ_{w1} , σ_{w2} を示す事がわかる。このような図からタフトライド処理材の表面硬度がわかるとその疲れ限度の凡そを知る事ができる。

b) 平面曲げ疲れ試験結果

図117は板厚 4mm の SS41 材についての平面曲げ疲れ試験の結果⁸⁴⁾であり、その表面の硬度は $H_v \approx 180$ であった。この試験結果を図104に植点すると、◇印である。この例では、硬度の割合に疲れ限度が高い事を示し、CrMo 鋼の平滑試験片の疲れ限度に近い。図88の高周波焼入れ材の平面曲げ疲れ限度に比べると、硬度の

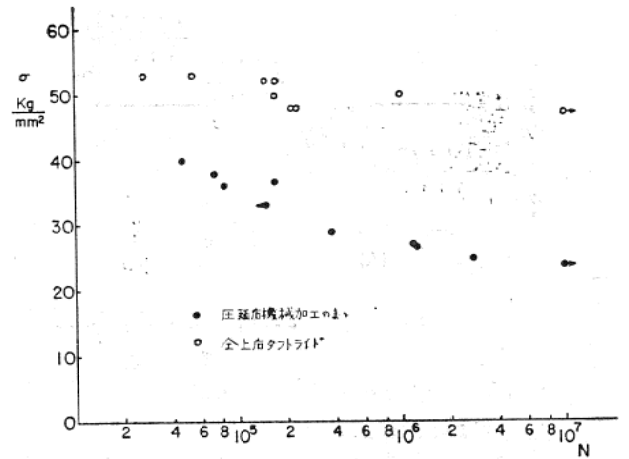


図117 SS41 板材平面曲げ疲れ試験結果

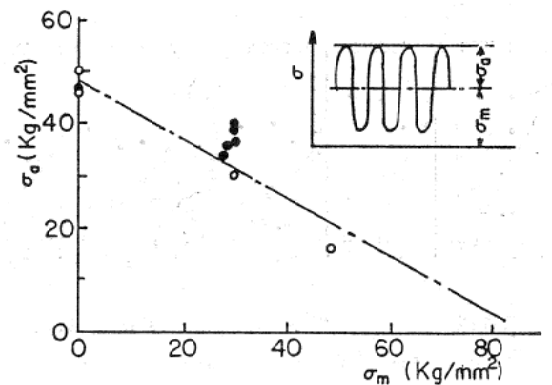


図118 σ_m - σ_a 線図

割合には高い疲れ限度を有している。

ただ、注意しなければならないことは、引張の平均応力が大きい時のことで、図 118 はその例である。 σ_m が大きくなると疲れ限度が急速に低下することがみとめられ、 $\sigma_m \approx 90 \text{ kg/mm}^2$ になると σ_w が 0 近くになると予想される。このことはボルトなどのように引張応力が大であるものにタフトライドを適用する時は注意を必要とする

c) 圧入試片

車軸などは圧入部の疲労強度が問題になることは19.1でのべた通りである。

この部分の疲労強度向上策としてタフトライドがよいということがいわれている⁸³⁾⁸⁶⁾。

このことについては小形試験片についての実験結果を紹介する。

図119は $d=10\text{mm}$ の圧入試片についての実験結果である。SCM2 材の無処理のものと、タフトライド処理およびタフトライド処理後高周波焼入れしたものの実験結果である。

タフトライド処理することにより、その疲労限が 45 kg/mm^2 程度に達するのは興味あることである。タフト

* 但し、直径 10mm 程度の資料

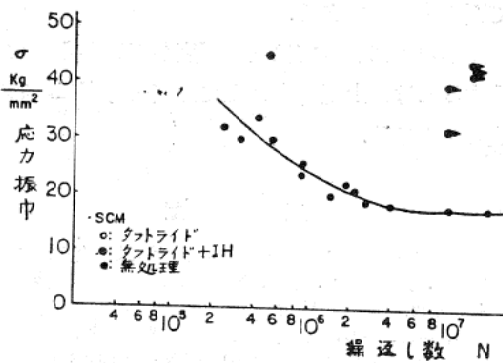


図119 圧入試片 S-N 曲線

ライド処理後高周波焼入れしたものは、32kg/mm²ではもっていたが、それ以上になると圧入部がめけてくるのでデータはとれなかった。

小形試験片の場合は硬化深度はそれ程問題がないが、実物の車軸や推進軸に適用しようとする時、硬化深度が問題になり、タフトライドの上に高周波焼入れすることの必要性が生じてくるものと思う。

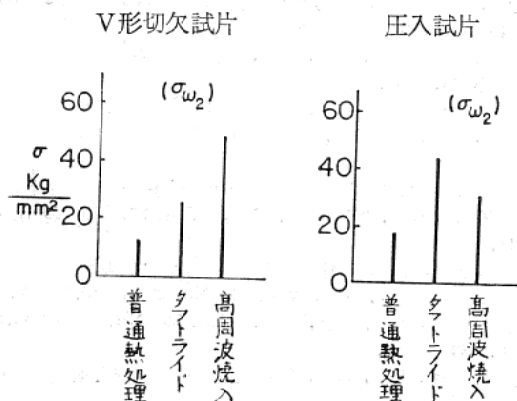


図120 各処理と疲労限の比較

図120⁸⁷⁾は、高周波焼入れとタフトライド処理のV形切欠、および圧入試片に対する影響力の比較をしたもので、V形切欠試片に対してはかえってタフトライドの方が、これ迄の実験結果ではよい値を示しているのは、注意すべきである。

V形切欠試片は応力集中のみであるのに対して、圧入試片は応力集中の他にボスと軸の相対送り(図98参照)による影響がからんでいることを考えると、逆にこのような実験から圧入部の疲労のメカニズムの一端を伺いすることができるであろう。

d) 有効硬化深度

図121の硬度分布を示す表面硬化した試験片がある時、これの疲れ限度を求めてみる。

硬度がわかれば、それに対応する疲れ限度は図90から求まるので、図121をかきかえて図122をうる。図122を得れば、之に例えば曲げ応力が加わると、応力集中率が1

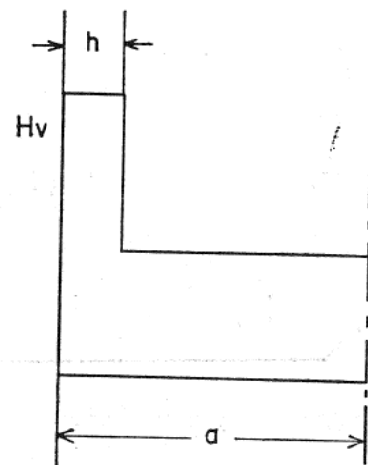


図121 モデル化した硬度分布

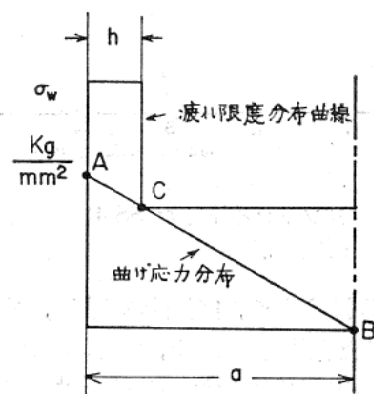


図122 モデル化した疲れ限度分布

の時には図122の線のようになり、疲れ限度曲線と応力分布曲線との交点Cから疲労破壊が初まる。

この時の硬化深度hと試験片の半径Rによって表面硬化材の疲れ限度は支配される。

応力集中率1の時の疲れ限度 σ_w は次の式で表わされる。

$$\sigma_w = \sigma_{wi} \times \frac{a}{a-h} \quad \text{---(7)}$$

ここで、 σ_{wi} 、母材の疲れ限度である。

タフトライドしたSS41材回転曲げ疲労試験片の断面硬度分布は図123のようであり、このものの疲れ限度は37kg/mm²であった。一方、母材の疲れ限度は σ_{wi} 22kg/mm²であったので、(7)式からhをもとめると* 2.4mmとなる。

これは図123のタフトライドの硬度が変化しはじめる深さ1.2に比して約2倍である。

このような場合のh=2.4mmを有効硬化深度と名づけているが、図123より予測した値よりかなり深いのはタフトライド材の特長である。

* 但し a=6mm

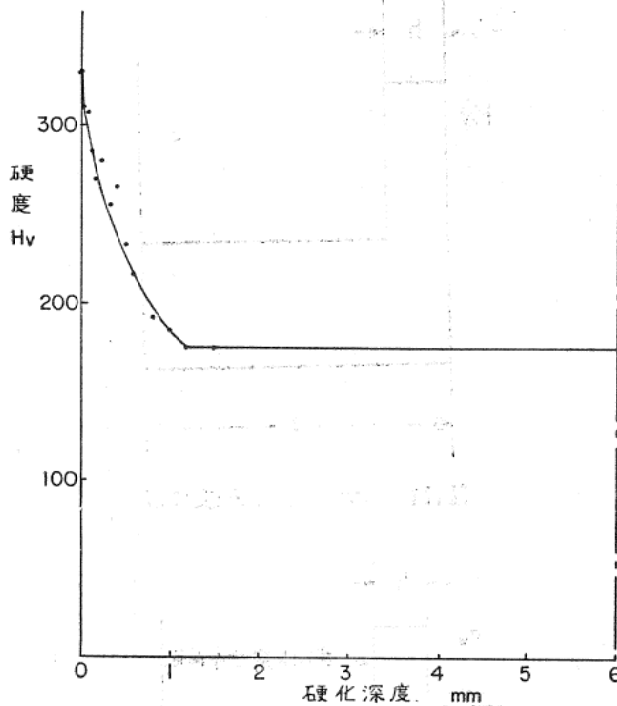


図123 タフトライドした SS 41 材の断面
硬度分布

高周波焼入材⁸⁸⁾⁸⁹⁾ や、窒化材の場合⁷⁶⁾、疲労試験の結果から求めた有効硬化深さと、実測の硬度分布で硬度の立上りまでの硬化深さはおよそ一致しているのと比べると一つの特長である。

19.2.2 その他

対ピッチングに対しては硬度が低いから、高周波焼入れほどではないことが報告されている⁹⁰⁾。この方法の特長は 570~580°C より急冷するので、高周波焼入れに比

べて歪の少ない点である。

しかし場合によっては硬化深度が浅いから大物部品に適用するには、上記の有効硬化深度を考慮に入れて注意する必要がある。

文 献

- 69) 中村 “車軸の研究” 車軸折損事故防止対策委員会資料 (昭24.2)
- 70) 例えば、会田, 寺内, 中村, 簗田, 高橋, 材料試験, Vol.6. No. 45 (昭32.6)
- 71) 藤田, 中村, 小西, 鉄研中間報告, 7-179 (昭32.1)
- 72) 中村, 鉄道業務研究資料, Vol. 8. No. 9 (昭26.4) P. 7
- 73) 例えば, 吉武, 早山, 日立評論, Vol. 49. No. 12 (昭42.12) P. 1238
- 74) 中村, 田中, 夏井, 吉武, 材料学会講演論文集 (43.5) P. 7
- 75) 小田, “平歯車の曲げ疲れ強さに関する研究”, 学位論文, 京都大学 (昭43)
- 76) 中村, “高周波焼入と疲労強度” 日刊工業新聞社 (昭38)
- 77) 中村, 鉄道業務研究資料, 8.18 (昭26.11) P. 1
- 78) 吉武, 早山, 機械学会講演論文集, No.198 (昭43.9) P. 131
- 79) 山田, 清水, 国尾, 中村, 高橋, 機論, Vol. 34. No. 257 (昭43.1) P. 31
- 80) 山田, 清水, 中村, 国尾, 機論 Vol. 34. No. 258 (昭43.2) P. 237
- 81) 中村, 山本, 清水, 堀川, 機械学会講演会関西支部前刷集 No. 37 (昭43.11) P. 37
- 82) 清水, 矢田, 鈴木, 中村, 山本, 機械学会関西支部第44期講演論文集 (昭44.3) P. 53
- 83) 田中, 初野, 夏井, 中村, 材料学会講演前刷集 (昭43.5)
- 84) 中村, 堀川, 清水(視), 蔵田, 第47期全国大会講演論文集 (昭44.10)
- 85) 文献 (76) P. 21, 参照
- 86) 大内田, 久保木, 西岡(章), 機論, Vol. 35, No. 269 (昭44.1) P. 9
- 87) 中村, 山本, 堀川, 第47期全国大会講演論文集 (昭44.10)
- 88) 中村, 星野, 高橋, 機論, Vol. 31, No. 230 (昭40.10) P. 1447
- 89) 中村, 星野, 新井, 高橋, 機論, Vol. 33, No.2 50 (昭42.6) P. 883
- 90) 会田, 藤尾, 松浦, 西川, 機械学会関西支部講演会前刷 (昭44.3)