

表面硬化処理材の疲労特性に及ぼす硬さ分布の影響

加賀谷忠治 (中部大学)
立松英大 (立松モールド工業)

機械の省エネルギー、軽量化、高効率化の追求につれて、構造部品に対する疲労強度と安全性の向上が強く求められており、そのために種々の表面硬化処理が広く利用されている。しかし、これらの材料の S-N 曲線には、疲労限度として無限に繰返しても破断しないとされる折れ曲がりが見られず、 10^7 回を越える寿命域でも内部から破壊を生じることが大きな問題となっている。本研究では、各表面硬化処理材の疲労特性を硬さ分布と破面形態との観点から検討した。その結果、L-TEQ 処理材では再焼入れを施すことにより破面形態が表面起点型へと遷移し、高い疲労限度が得られた。また、これに FPB を施した場合にはフィッシュアイ破壊を呈するものの、 10^7 回での時間強度がガス浸炭処理材とほぼ同等になることなどを明らかにした。

1. はじめに

機械構造部品の疲労破壊が通常表面から生じるのは、これらの表面には様々な損傷が集中するためである。すなわち、曲げやねじりを受ける場合には応力は表面で最大となり、表面粗さ、溝や穴などの応力集中によって引張りの場合でも表面から破壊する。また、表面は摩耗や腐食損傷を受けやすい。そのため、構造部品の表面のみを改質して、耐疲労性、耐摩耗性、耐食性などの向上を図ることは、機械の軽量化、省エネルギー、破損事故防止の観点からも、きわめて重要な技術課題であり、種々の表面硬化処理法が利用されている¹⁾。そのうち、鉄鋼部品に対しては L-TEQ²⁾や浸炭処理³⁾、および微粒子衝突 (FPB) 処理⁴⁾が広く行われている。したがって、これらの処理により、いわば巨大欠陥である自由表面からの疲労破壊は防止できる。しかし、表面を硬化あるいは強化した場合には疲労破壊は内部から起こるようになり⁵⁾、これが疲労特性に大きく影響を及ぼすため、硬化層硬さと深さおよび心部硬さとの関係について詳しく調査することが必要である。

そこで本研究では、L-TEQ、真空浸炭および FPB 処理材の疲労特性に及ぼす断面硬さ分布と疲労破壊形態について検討した。

2. 実験装置および方法

2.1 供試材

供試材は直径 13mm の焼入れ性を保証した構造用合金鋼 SCM415-H で、その化学成分を表 1 に示した。これを図 1 に示すような、全長 90mm、平行部直径 8mm の平滑疲労試験片に機械加工した後、平行部表面をエメリー紙で #1500 まで順次磨いて用いた(以降、未処理材または UN 材と称す)。

表 1 化学成分 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.17	0.19	0.72	0.018	0.018	0.01	0.03	1.03	0.17

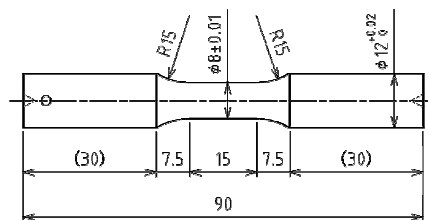


図 1 疲労試験片の形状寸法(mm)

2.2 L-TEQ 処理

L-TEQ 処理は図 2 に示すように、試験片を窒化・浸炭性ガス雰囲気(メタノール, アンモニア, プロパン)中で 780°C に加熱し, 120min 保持して窒素や炭素を浸透拡散させた後, 鋼の A₁ 点より低い 700°C で 60min 保持してから 120°C の油中に焼入れした. この場合は窒素・炭素の拡散層のみがマルテンサイト変態を生じる. 焼戻しは 180°C, 90min の空冷である. (以後, 低温焼入れ材または L-TEQ 材と称す).

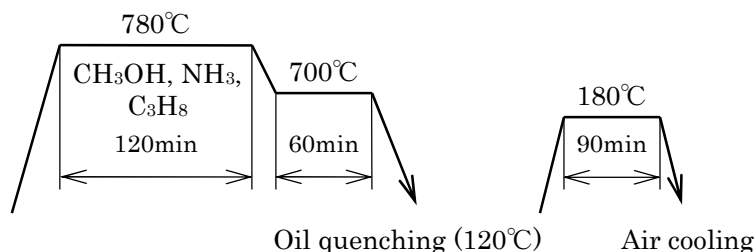


図 2 L-TEQ 熱処理パターン

2.3 再焼入れ処理

L-TEQ 材の断面硬さ分布を変えるために, L-TEQ 材を再度真空中で A₁ 点より高い 770°C に加熱し, 20min 保持してから, 15°C の水中に焼入れした. これにより L-TEQ 材の硬化層と心部が変態を起こす. その後, 180°C, 90min の焼戻しを施した(以後, 再焼入れ材または QT 材と称す). 熱処理パターンを図 3 に示した.

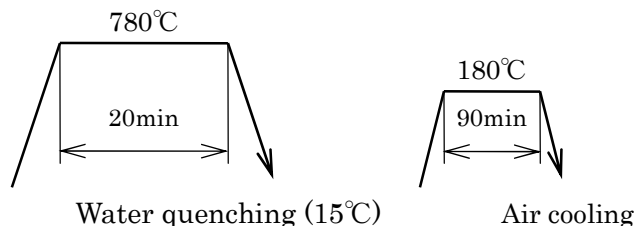


図 3 再焼入れおよび焼戻し熱処理パターン

2.4 ガス浸炭処理

ガス浸炭処理は, 試験片を浸炭性ガス雰囲気(ブタン, C₄H₁₀)中で, 940°C のオーステナイト域に保持して, 220min の浸炭, 60min の拡散処理を行った後, 140°C の油中に焼入れした. 焼戻しは 180°C, 90min である(以後, ガス浸炭材または GS 材と称す). 処理パターンを図 4 に示した.

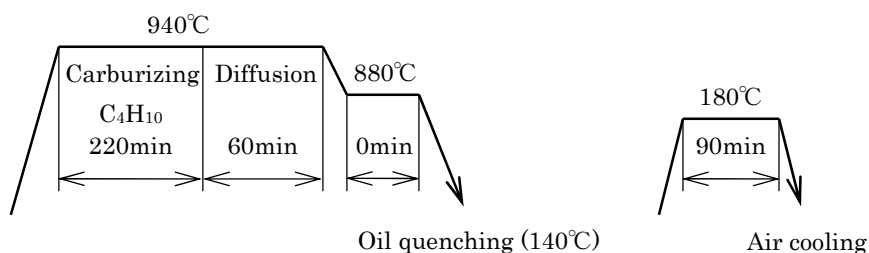


図 4 ガス浸炭熱処理パターン

2.5 微粒子衝突(FPB)処理

FPB処理は、L-TEQ材およびQT材に施したが(以後、それぞれ、FPB材、QT・FPB材と称す)、処理条件は表2に示したように、L-TEQ材にはハイスの1段処理、QT材にはハイスとセラミックスの2段処理を施した。表面粗さはハイスのみの場合、 Rz 約 $4.0\mu\text{m}$ 、 Ra 約 $0.6\mu\text{m}$ 、ハイス・セラミックスの場合、 Rz 約 $2.0\mu\text{m}$ 、 Ra 約 $0.3\mu\text{m}$ となり、2段処理で粗さは半分程に低減された。

表2 FPB処理条件

被処理材	FPB材	QT・FPB材	
		1段	2段
噴射方式	重力式	重力式	
微粒子	ハイス	ハイス	セラミックス
粒径 (μm)	40	40	
噴射圧力 (MPa)	0.6	0.6	0.4
噴射時間 (rpm-s)	14-30	14-30	

2.6 組織観察および硬さ測定

試験片の断面組織の観察には、試験片平行部を湿式切断機で切り出し、専用の埋め込み治具とホルダーを用いて、横断面をエメリー紙#1500 およびバフまで自動研磨機により仕上げた後、エッチングを施して組織を現出させた。

硬さはバフ仕上げ面の表面から内部方向に対して、顕微鏡用超微小硬度計(MHT-4、アンパール製)を使用して測定し、その分布を求めた。なお、測定荷重は $0.098\text{N}(10\text{gf})$ である。

2.7 疲労試験機

疲労試験には、小野式回転曲げ疲労試験機(98Nm、1800rpm)を用い、室温大気中で行い、繰返し数は 10^7 回で打ち切りとした。

3. 実験結果および考察

3.1 各処理材のマクロ断面組織

図5には、L-TEQ材、FPB材およびQT材の断面組織を示した。(a)のL-TEQ材の表面近傍には約 $50\mu\text{m}$ の深さにわたって主に窒素を多く含んだマルテンサイト組織が形成され、ここからさらに心部組織が現れる約 0.2mm 内部の深さが全硬化層深さに相当するものと推察される。(b)は、(a)にFPB処理を施したものであり、(a)との組織の差異はほとんど認められない。しかし、(a)を再加熱して 770°C から焼入れした(c)のQT材では、硬化層は微細なマルテンサイトになり、心部も変態を生じて、(a)、(b)のように硬化層と心部組織の明瞭な境界は判別しにくい。また、(d)のガス浸炭処理したGS材には、表面から $20\mu\text{m}$ 程度の深さまで黒くエッチングされた浸炭異常層^⑧が観察されるが、その直下はマルテンサイト組織である。

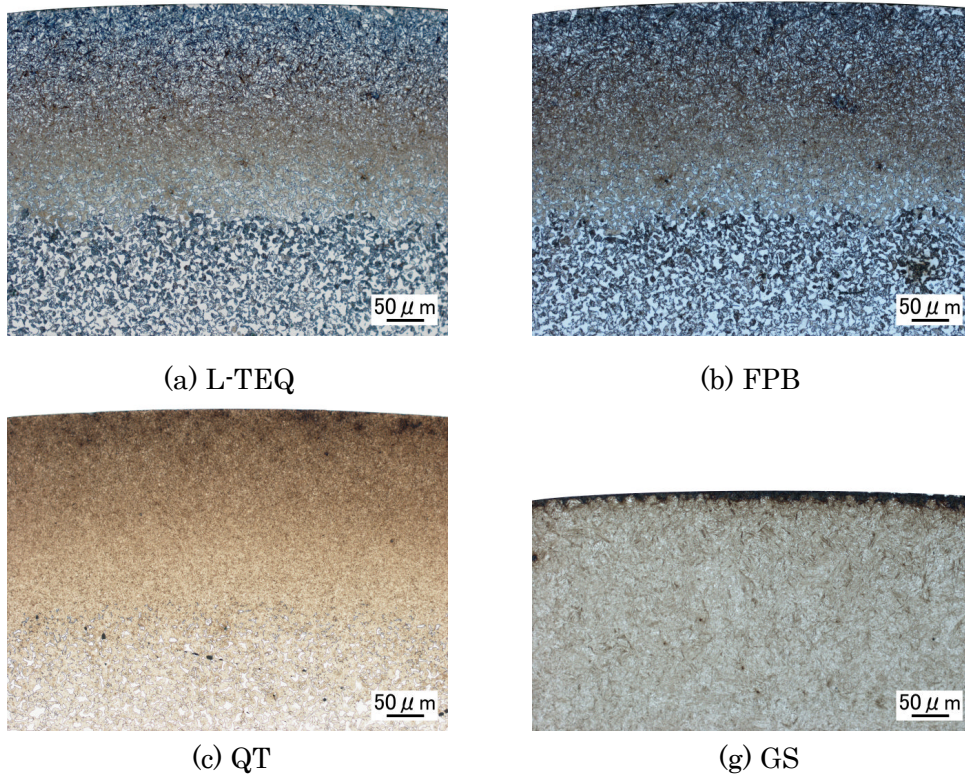


図5 各処理材の断面組織

3.2 各処理材のビッカース硬さ分布

図6は、各処理材の断面硬さ分布を示したものである。図から、低温焼入れのL-TEQ材は表面では約800HVと高硬さを呈し、全硬化層深さは約0.3mm、有効硬化層深さは約0.14mmである。これに#400(粒径 $55\mu\text{m}$)のハイスによる一段の微粒子衝突処理を施したFPB材は、表面硬さが著しく上昇(970HV)した。一方、再焼入れのQT材の場合、表面硬さはL-TEQ材と変わらないが、有効硬化層深さが約0.3mm、全硬化層深さが約0.4mmとともに若干深くなり、心部硬さも286HVと、L-TEQ材(148HV)に比べて約2倍上昇した。また、ガス浸炭処理を施したGS材の分布で表面硬さが低いのは浸炭異常層⁸⁾のためであるが、表面直下では約800HVを呈し、有効硬化層深さは約1.0mm、全硬化層深さは約1.4mmおよび心部硬さは約380HVである。これはL-TEQ材およびQT材に比較して硬化層が深く、心部硬さも高い。

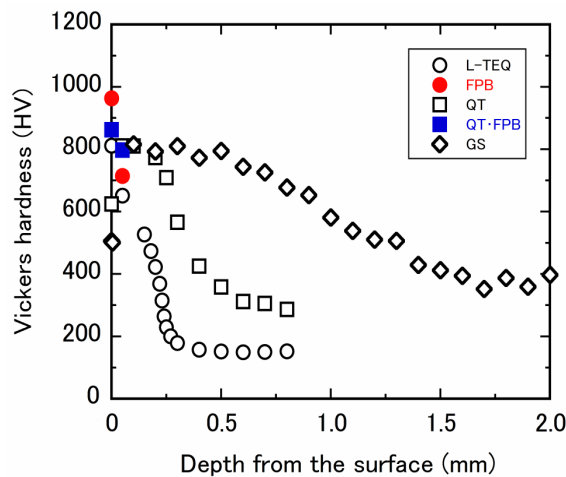


図6 各処理材の硬さ分布

3.3 各処理材の S-N 曲線

図 7 は、各処理材の S-N 曲線を示したものである。図中の記号 f は内部を起点としたフィッシュアイ破壊を表す。図において、未処理の UN 材(Δ)では、すべて表面起点破壊を起こし、S-N 曲線が繰返し数 10^6 回付近で水平に折れ曲がり、 10^7 回では 310MPa を呈した。この応力は疲労限度であり、これ以下の応力では無限に繰返しても破断しなくなる⁹⁾。また、L-TEQ 材(\circ)の場合は、高応力域の一点を除いてフィッシュアイ破壊へと破壊形態が変化し、破断寿命は UN 材より 1~2 桁延伸したが、S-N 曲線の折れ曲がりには現れず、疲労限度が存在するかどうかは明確ではない。ただし、 10^7 回での疲労強度は 420MPa である。このような現象は高強度鋼でも認められ、この場合には 10^7 回の繰返し数を越えても S-N 曲線は徐々に低下することが明らかにされている⁶⁾⁷⁾。したがって、表面を硬化した L-TEQ 材も同様に、 10^7 回以降でもフィッシュアイ破壊を生じ、疲労限度が定まらないことが推察される。

一方、L-TEQ 材に FPB による複合処理を施した FPB 材(\bullet)の S-N 曲線は、内部起点型破壊を生じて、L-TEQ 材の S-N 曲線に重なり、FPB 処理を施しても疲労挙動はまったく変化しない。これは内部から破壊するものに対しては、さらに FPB により表面を強化してもフィッシュアイ破壊を生じるだけで、疲労特性の改善には寄与しないことを示すものである。

そこで、L-TEQ 材に再焼入れを施し、硬化層深さと心部硬さを増加させた場合の疲労挙動について調べた。その結果、QT 材(\square)の S-N 関係は、L-TEQ 材、FPB 材のそれらより上方に移行し、破壊形態は表面起点型へと遷移して、 10^5 回付近から水平部が現れた。疲労限度を求めると 600MPa となり、L-TEQ 材の強度と比べて約 1.4 倍向上し、疲労特性が著しく改善された。また、QT 材に FPB 処理を施した QT・FPB 材(\blacksquare)の場合は、QT 材と異なり、すべてフィッシュアイ破壊であるが、時間強度が著しく高く 10^7 回では 650MPa を呈し、破断寿命の延伸も顕著である⁶⁾。なお、図 8 には参考のため、L-TEQ 材に対する FPB の 1 段および 2 段処理の S-N 曲線を示したが、両者はともにフィッシュアイを形成して破断し、疲労特性に差異がないことがわかる。したがって、QT・FPB 材の場合には FPB 処理による表面硬さの若干の上昇と圧縮残留応力が大きく寄与していることが推察される。さらに、図 7 のガス浸炭 GS 材の S-N 曲線(\diamond)は、低繰返し域では表面を起点として破断し、最も高い強度を呈したが、応力の低下につれてフィッシュアイ破壊へと遷移し、 10^7 回での強度は 665MPa となり、QT・FPB 材の時間強度と大差がない。これらの S-N 関係は各処理材の断面の疲労強度分布と負荷応力分布および破壊形態に強く依存していることが考えられる¹⁰⁾。

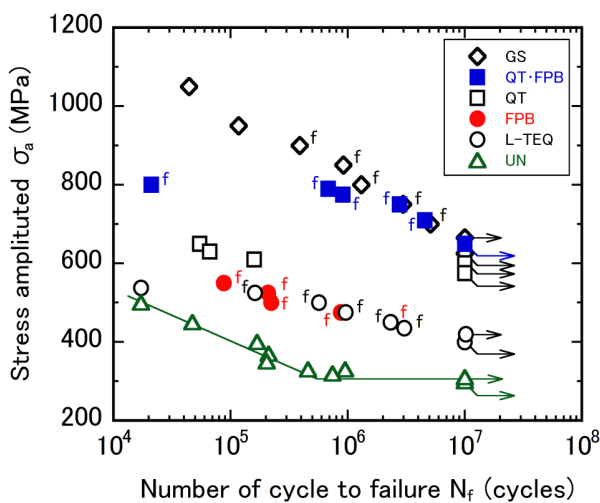


図 7 各処理材の S-N 曲線

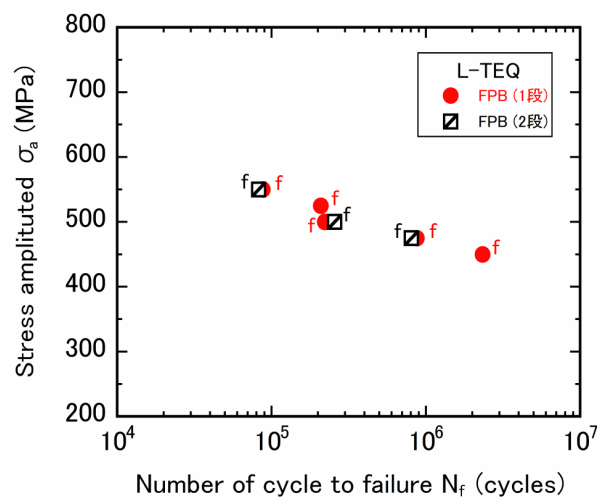


図 8 FPB1 段および 2 段処理の S-N 関係

3.4 各処理材の疲労破面

図9に、疲労破面の例を示す。(a)のUN材には表面の1点を起点とした放射状の模様が見られ、表面から破壊していることがわかる。(b)はL-TEQ材に現れたフィッシュアイである。フィッシュアイの起点から表面までの距離は $h=1.20\text{mm}$ とかなり深く、その平均直径も $d=1.54\text{mm}$ と大きい。(c)のFPB材ではやはりフィッシュアイが形成され、表面からその起点までの深さは $h=0.73\text{mm}$ とやや小さく、したがって、フィッシュアイの平均直径も $d=0.99\text{mm}$ と小さい傾向がある。(d)のQT材は表面起点破壊へと遷移し、これにFPBを施したQT-FPB材の(e)の場合はフィッシュアイ破壊を生じ、フィッシュアイの起点から表面までの距離は $h=0.47\text{mm}$ 、平均直径は $d=0.63\text{mm}$ となり、最も表面に近く小さなフィッシュアイが形成されている。これに対して、GS材の(f)ではきわめて大きなフィッシュアイを伴った破壊を生じ、その起点は $h=1.64\text{mm}$ と最も深く、平均直径も $d=2.57\text{mm}$ であり、同等の応力レベルである(e)との相違は顕著である。これは、GS材のように硬化層の深い高硬さ分布の場合には、全硬化層深さ付近を起点としてフィッシュアイが形成され、その成長と大きな応力集中によって硬化層を容易に突破する。一方、QT-FPB材の場合には、表面から 0.5mm 付近の深さに小さいフィッシュアイを生じ、応力集中も小さいのでFPBによる硬さの増加と圧縮残留応力の付与によって、その進展が抑制されるためと考えられる。したがって、表面硬化処理による疲労特性の改善には、表面でのすべり変形に対する抵抗を高めるか、あるいは限りなく微小なフィッシュアイが生じるような硬さ分布を形成させることが効果的であり、特に硬さ・強度とじん性の適切なバランスが重要である。

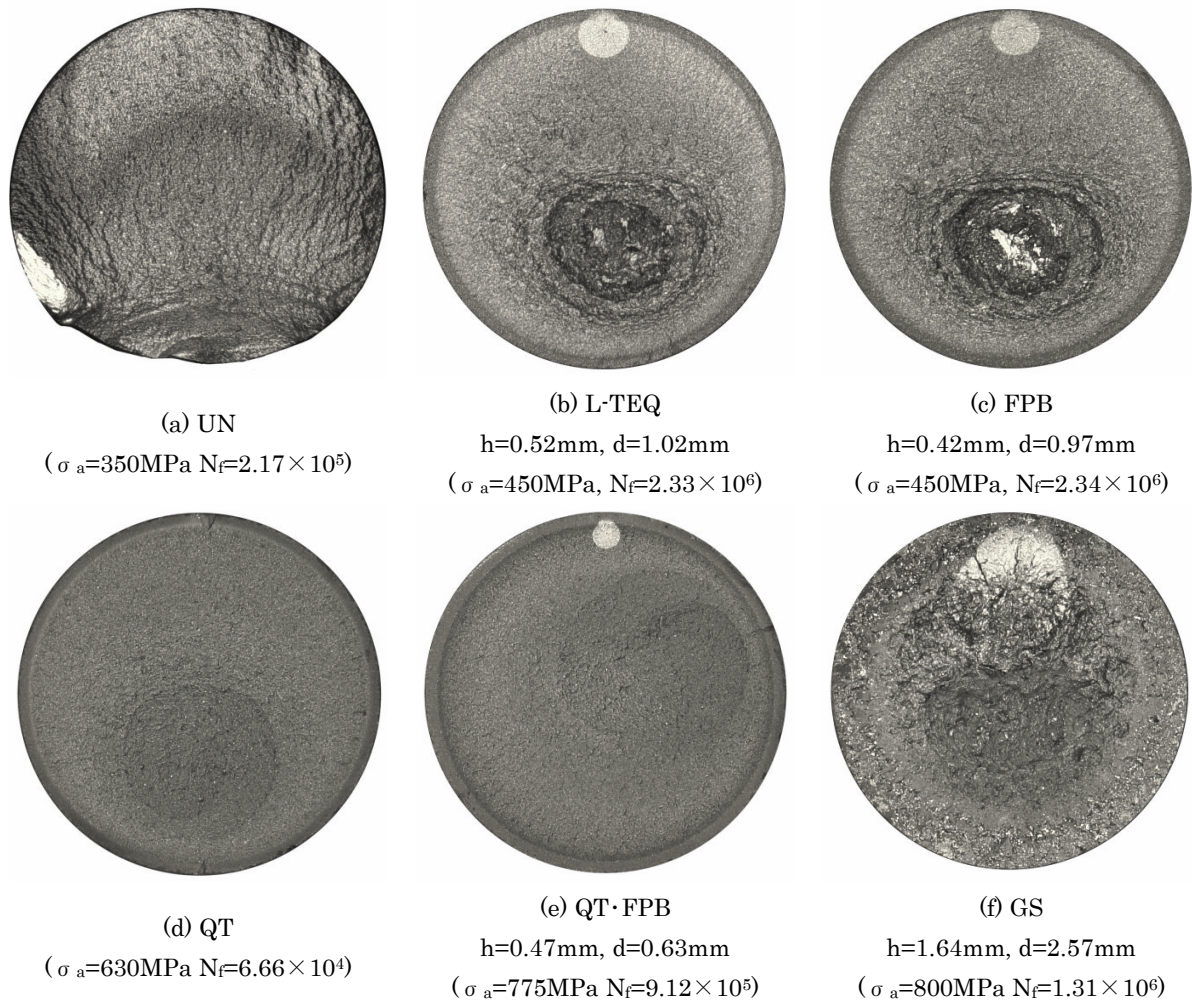


図9 各処理材の疲労破面例

3.4 各処理材のフィッシュアイ形成の様相

図 10 は、各処理材のフィッシュアイ起点深さとフィッシュアイの大きさの関係をまとめて示したものである。図から明らかなように、表面からフィッシュアイの起点までの深さの増加に伴って、フィッシュアイの平均直径が大きくなり、どれも一点鎖線のバンド内に分布している。しかし、L-TEQ 材の場合は傾きが緩やかであり、これに FPB を施すとフィッシュアイの起点が浅く、その直径も小さくなる傾向にあるが、起点深さに対してフィッシュアイの大きさは若干ばらついている。また QT・FPB 材ではバンド幅の下方に分布し、L-TEQ 材に比較してフィッシュアイの平均直径は小さい。この場合、S-N 曲線の 10^7 回での時間強度は約 55%の向上を示した。これらに対して、GS 材のフィッシュアイは最も深い内部を起点として、最も大きく成長している。しかし、QT-FPB 材と GS 材の 10^7 回での強度はほぼ同等である。

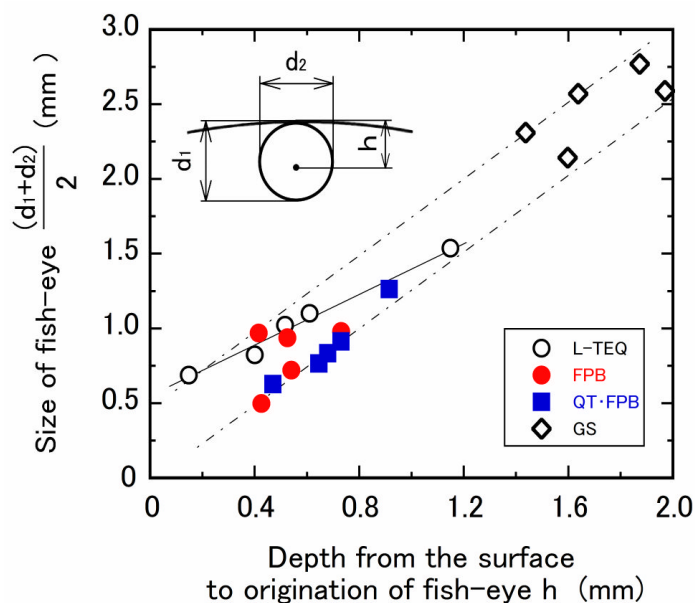


図 10 フィッシュアイの起点深さと大きさ

4. おわりに

本研究では、構造用合金鋼 SCM415-H の表面硬化処理材を対象に、疲労特性と硬さ分布および破壊形態との関係について検討した。得られた結果を要約すれば、以下ようになる。

- (1) SCM415 未処理材は表面起点型破壊を生じ、S-N 曲線には明瞭な折れ曲がりが見られ、疲労限度は 310MPa を呈した。
- (2) SCM415-H 鋼に L-TEQ 処理を施すと、 10^5 回以上の繰返し数では内部起点型破壊へと変化し、折れ曲がりが見られなくなり、 10^7 回での時間強度は 420MPa と未処理材より約 35% 上昇した。
- (3) L-TEQ 材に FPB 処理を施した FPB 材の S-N 曲線は L-TEQ 材のそれに重なり、フィッシュアイを形成して破断した。
- (4) そこで、L-TEQ 材に再焼入れを施した QT 材について調べたところ、QT 材の場合は表面起点型へと変化し、水平な折れ曲がりが見られて、疲労限度は 600MPa となり、L-TEQ 材より約 43% 改善された。
- (5) QT 材に、さらに FPB を施した QT-FPB 材の疲労挙動は、フィッシュアイを伴った内部破壊へと遷移し、 10^7 回での時間強度は 650MPa となり、L-TEQ 材に比較して約 55% 向上した。これはガス浸炭の QS 材(665MPa)とほぼ同等であり、QT 材よりも疲労寿命が顕著に延伸したが、折れ曲がりは見られなかった。

参考文献

- 1) 加賀谷忠治, 森田辰郎 : 材料, 52, 5(2003)p.546-551.
- 2) 加賀谷忠治 : 金属, 90/6 臨時増刊号(1990) p.25-29.
- 3) 不二越表面強化研究会 : 知りたい表面強化(1988) p.90-95, ジャパンマシニスト社.
- 4) 加賀谷忠治 : 中部大学工学部紀要, Vol.42(2006) p.1-12.
- 5) Chuji Kagaya and Yoshiro Yamada: ICSP10th Conference Proceedings (2008) p. 191-196.
- 6) 中島正貴, 酒井達雄, 清水利弘 : 日本機械学会論文集, 65, 640, A(1999) p.2504-2510.
- 7) H.N.Ko, C.Kagaya, H.Itoga, K.Tokaji and M.Nakajima: Surface Treatment V(2001) p.313-322.
- 8) 内藤武志 : 浸炭焼入れの実際(1980) p.180-185, 日刊工業新聞社.
- 9) 日本材料学会 : 機械材料およびその機械的性質と試験法(1981) p.106, 日本材料学会.
- 10) 加賀谷忠治, 加藤政則 : 熱処理, 32, 4(1992) p.220-227.