炭素鋼焼なまし材の寸法効果について*

大内田 久** 岩崎 勤** 長尾 真人***

Size Effect on Fatigue of Annealed Carbon Steel

by

Hisashi OHUCHIDA, Tsutomu IWASAKI and Masato NAGAO

(Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., Hitachi)

The X-ray back diffraction method was used for the nondestructive direct detection of fatigue damage in the machine parts of larger size. The size effect on fatigue of annealed carbon steel was also studied.

The results obtained in this experiment are as follows.

(1) Whether the applied cyclic stress is larger or smaller than the fatigue limit of the specimen can be estimated by the back diffraction pattern in the case of unnotched test specimens, irrespective of the specimen sizes. On the other hand, the fatigue limit estimated from the X-ray pattern in the case of the specimen with a shoulder fillet is a little lower than the true fatigue limit. It is considered to be due to the stress gradient in the fillet.

(2) The changes in residual stress and half-value breadth of diffraction line width during the fatigue process in the case of unnotched specimens depend on the specimen size even under the same applied stress. This result shows also that the size effect on fatigue strength must vary according to the strength near the specimen surface, which will be emphasized by stress gradient.

It can also be concluded from the results obtained that the X-ray diffraction method is available for the detection of fatigue damage in the specimens of different size.

(Received Aug. 16, 1968)

1 緒 言

鋼材の疲労強度に及ぼす寸法効果の研究は、従来多くの研究者によって行なわれてきており、また、これらの研究結果についての総合的解説もなされている。

しかし、この寸法効果の研究は多大の費用と時間を要し、その上種々の困難を伴うため、今日においてもなお資料が不足している。そこで、多くの場合、大型機械部品を設計する際も、疲労強度の見積りは、小型試験片の疲労限度からある仮定をして求められている。このような事情からも疲労の検出を大型部材において行なうことが必要とされるゆえんがある。

大型試験片において（たとえば 100 ϕ ）試験片の受ける被害の様子を詳細に調べ、その機構を追求した例はみられない。一方、X線による疲労の検出に関する今日までの研究は、研究室の実験であり、疲労の機構の検討である。そこで、X線による疲労の検出を実物

大型機械部品に応用しようとする場合、はたして小型試験片にて得られた従来の検出法が、大型寸法部材にいかにあてはまるかを検討する必要がある。

すなわち、X線による観察は試験片のごく表面に限られるが、大型寸法部材においても疲労被害が検出できうるものか否かを検討することとした。

そのために、機械部品の代表的なものとして車軸を取り上げ、その実物寸法にかなり近い大型試験片（平滑材 100 ϕ 、段付材 80 ϕ ）を用いてX線の疲労の検出（半価幅変化および残留応力変化）に及ぼす寸法の影響を検討した。さらに、形状の影響（平滑材および段付材）を検討した。

2 研究の方法

2・1 試験片

試験片粗材は軟鋼 SF 55 (180 ϕ) であり、880 $^{\circ}$ C にて13時間空中焼ならしをしている。粗材の材質ならびに機械的性質を Table I に示す。試験片形状は Fig. 1 (a)~(e)に示すように、平滑試験片と段付試験片である。図中の寸法を Table II に示す。試験片名称は Table II に示すように平滑試験片にては、大型、中型、小型の3種類、段付試験片にては、大型、中型の

* 本報を「X線による機械部品の疲労の検出（第1報）」(X-Ray Investigation on the Detection of Fatigue Damage in Machine Parts, I) とする。

原稿受理 昭和43年8月16日

** (株)日立製作所日立研究所 日立市幸町

*** 正 会 員 (株)日立製作所日立研究所 日立市幸町

Table I. Chemical composition and mechanical properties.

Chemical composition (%)	C	Si	Mn	P	S
	0.33	0.30	0.58	0.013	0.010
Mechanical properties	Yielding point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Contraction of area (%)	Vicker's hardness <i>H_V</i>
	40.9	64.3	29.2	51.0	173

Table II. Specimen size and heat treatment.

Specimen	Fatigue machine	Specimen geometry	Specimen size (mm)	Condition of heat treatment after machine shaping
Small	Cantilever rotating bending	Smooth	$d=8$	650°C, 1 hr annealed in a vacuum furnace
Middle	Cantilever rotating bending	Smooth	$d=20$	650°C, 2 hr annealed in a vacuum furnace
		With a shoulder fillet	$d=15.62$ $D=16.40$ $r=0.50$	
Large	Rotating bending	Smooth	$d=100$	650°C, 3hr annealed in an Ar-gass
		With a shoulder fillet	$d=80$ $D=84$ $r=2.56$

(a) Unnotched specimen of large size
(b) Unnotched specimen of middle size ($\alpha_k \leq 1.002$)
(c) Unnotched specimen of small size ($\alpha_k \leq 1.002$)
(d) Specimen of large size with a shoulder fillet ($\alpha_k = 2$)
(e) Specimen of middle size with a shoulder fillet ($\alpha_k = 2$)

Fig. 1. Shape and dimension of test specimens.

2種類である。なお中、小型平滑試験片の応力集中係数は $\alpha_k = 1.002$ 以下となっている。段付試験片にて

は、段付部直径を D , d , 隅肉半径を r とした場合、形状係数 $\alpha_k = 2$ となるように Peterson の図表より $D/d = 1.05$, $r/d = 0.032$ と選び試験片形状寸法を求めた。各種試験片は同一粗材より採取し、中型、小型の試験片は、表面が大型試験片の外周に接する位置より採取した。粗材断面のかたさ分布は一様であり、 $173 \pm 3H_V$ であった。また顕微鏡写真にも焼なましむらは見られず、各種試験片は寸法形状を除いて同一条件とみなしてよい。各種試験片は所定の寸法に機械仕上した後 Table II に示すように小型、中型試験片は真空焼なまし、大型試験片はアルゴンガス中にて焼なましを行なった。試験片はすべて表面の薄い酸化膜を除くため過塩素酸と無水酢酸を 1 : 4 の割合で混合した電解研磨液で軽く電解研磨を施して試験に供した。

2・2 実験条件

小、中型材は片持回転曲げ疲労試験機 (20 kg・m 1400 rpm) 大型材は大型均一回転曲げ疲労試験機 (7.8 tm 400~500 rpm) にて疲労試験を行なった。各種試験片の $S-N$ 曲線を Fig. 2 に示す。明らかに試験片寸法により疲労強度が相当相違していることがわかる。なお、図中大型材については大内田⁵⁾による寸法効果の研究を参照して小型、中型材の $S-N$ 曲線より推定したものである。

X線回折写真撮影条件を Table III に示すように、CoK α 線による Fe の (310) 面回折である。半価幅

Fig. 2. S-N curve.

Table III. The exposure condition of X-ray back reflection camera.

	For half-value breadth measurement	For powder photograph
Characteristic X-ray	CoK α	CoK α
Measuring area (mm ϕ)	1	1
Tube voltage (kV)	20	20
Tube current (mA)	5	5
Filter	Fe	Fe
Film	Fuji 200 Type	Fuji 400 Type
Exposure time	40 min	2.00 hr

測定のためには試料表面に垂直入射X線のフィルム揺動写真を取り、マイクロフォトメータ（理学電機製 MP-3）にて黒化度曲線を求めた。フィルムの送りに対するチャート紙の送りは10倍に拡大してある。半価幅としては積分幅 b をとり、試料の処女状態における半価幅 B との比をもって半価幅変化とした。

X線残留応力測定は、CrK α 線によるFeの(211)面回折であり、測定条件をTable IVに示す。

3 実験結果と検討

3・1 静止写真による疲労限度の推定

焼なまし処女材の静止写真を、Fig. 3 (a)に示す。

Table IV. Measuring apparatus, method and condition of stress analyser with G.M. counter tube.

Measuring apparatus	Parallel beam type X-ray stress analyser with GM counter tube
Characteristic X-ray	Cr K α radiation
Measuring method	Sin $^2\psi$ method(=0°, 15°, 30°, 45°)
Measuring area (mm 2)	2 $\times$ 2
Tube voltage (kV)	20
Tube current (mA)	5
Count range of ratemeter (cps)	200
Time constant of ratemeter (sec)	8
Diffusion angle of slit (°)	0.17
Goniometer speed (°/min)	1
Recording paper speed (mm/min)	10
Measuring method of peak position of diffraction intensity curve	Half-value breadth method

すべての試験片処女材の静止写真はこのように回折はん点は鮮明であり、回折環上に一様に並んでいる。

3・1・1 平滑材の場合 疲労限度の応力振幅にては 10^7 回繰返し後も回折はん点のぼけはほとんどなく、処女材の回折はん点と同じである。この例をFig. 3 (b)に示す。しかし、疲労限度以上の応力振幅の場合はFig. 3 (c)の例に示すように、回折はん点はぼけて、ほとんど連続環を形成するに至り破断する。これは疲労限度以上の応力振幅では、たとえ降伏点以下の応力振幅であっても微視的には塑性変形が起り、進展し、き裂が発生することによって考えられる。疲労限度以下の応力振幅にては微視的塑性変形も生じないため回折はん点には変化をきたさないものと思われる。Fig. 3 (b), (c)に示したと同様の事実は平滑材の寸法をとわず認められた。したがって、平滑材の場合に静止写真

- (a) Unnotched specimen of middle size $N=0$
- (b) Unnotched specimen of middle size $\sigma_b=24 \text{ kg/mm}^2$ $N=10^7$ cycles
- (c) Unnotched specimen of middle size $\sigma_b=25.5 \text{ kg/mm}^2$ $N=3.0 \times 10^6$ cycles
- (d) At the toe of fillet of the large size specimen with a fillet $\sigma_b=13 \text{ kg/mm}^2$ $N=1 \times 10^6$ cycles ($\sigma_w=13 \text{ kg/mm}^2$)
- (e) At the end of large section of the large size specimen with a fillet $\sigma_b=13 \text{ kg/mm}^2$ $N=1 \times 10^6$ cycles ($\sigma_w=13 \text{ kg/mm}^2$)

Fig. 3. X-ray diffraction patterns.

による疲労限度の推定が可能であることがわかった。

3・1・2 段付材の場合 Fig. 3 (d) は, 大型段付材の疲労限度の応力 ($\sigma_b=13 \text{ kg/mm}^2$) にて 1×10^6 回の回折写真である。明らかに回折はん点はぼけており, ほとんど連続環を形成している。これに対し Fig. 3 (e) は, 参考のために同じ試験片の段の上における回折写真を示した。段の上では回折はん点はまだ鮮明であることがわかる。しかし, この試験片は $\sigma_b=13 \text{ kg/mm}^2$ の応力振幅にては 10^7 回以上の繰返しに耐え, 10^7 回後における段付底の回折写真は Fig. 3 (d) と同じであり, 回折はん点のぼけの進行はみられなかった。この事実は中型段付材においても確かめられた。したがって, 段付材では疲労限度あるいはその直下の応力振幅の繰返しにより X線回折はん点はぼけを生じて円周方向に広がるが, 試験片は破断にまでは至らないことがわかった。これは平滑材と異なる点である。

X線回折はん点にぼけを生ずるにもかかわらず, 段付試験片では疲労破断にまでは至らないことの原因を考えてみる。

(a) X線回折はん点にぼけを生ずるための条件, 換言すれば試験片表面に塑性変形が生ずる条件: (b) 疲労き裂が発生する条件: この(a), (b)の2条件を考えれば, 平滑材では(a)の条件を満たす場合はほとんど(b)の条件を満たす。ところが段付材の場合は, (a)の条件が満たされても必ずしも(b)の条件が満たされない場合がある。これは試験片に加わる応力の応力こう配の差に起因するものと推察できよう。この機構についてはさらに詳しく検討する予定である。

3・2 半価幅, 残留応力による疲労の検出 (寸法の相違による比較)

(1) 小型試験片の応力繰返しに伴う残留応力変化を Fig. 4 に示す。焼なまし材であるため初期残留応力は0であるが, 応力繰返しに伴って圧縮残留応力が生じ, ある繰返し数にてピークを生じた後減少する傾向にある。これは平, 本田らの研究³⁾と一致する。その変化の傾向は, 高応力振幅ほど早期に, そしてやや高い圧縮残留応力が生ずる。

(2) 同一応力振幅 ($\sigma_b=25.5 \text{ kg/mm}^2$) において,

Fig. 4. Change in residual stress in unnotched specimens of small size.

(Unnotched specimen, $\sigma_b=25.5 \text{ kg/mm}^2$)

Fig. 5. Change in residual stress under the same applied stress in the case of different sizes.

大型 (100 ϕ) 中型 (20 ϕ) および小型 (8 ϕ) の残留応力変化を比較したものが Fig. 5 である。すべての試験片において応力繰返しに伴って圧縮の残留応力が生じ, ある繰返し数にてピークを生じ, やがて減少する。この傾向は平, 本田らの結果³⁾と同じである。しかし, 大型寸法になるに従い早期に圧縮残留応力のピークが生じ, しかもその値が比較的大きいことは注目すべきと考えられる。すなわち, 大型試験片の表面残留応力の変化は小型試験片の, より高応力振幅に相当する変化を示す。一方, 大型材は小型材に比べて疲労寿命が少ないから, 残留応力変化は, 試験片に実際に生ずる疲労被害に対応しているといえる。

(3) 同じく同一応力振幅 ($\sigma_b=25.5 \text{ kg/mm}^2$) における大, 中, 小型試験片の半価幅変化を比較したものが Fig. 6 である。

(Unnotched specimen, $\sigma_b=25.5 \text{ kg/mm}^2$)

Fig. 6. Change in half-value breadth under the same applied stress in the case of different sizes.

いずれも単調に増加し, その増加の割合は繰返し数³⁾を対数目盛に表わせば直線的になる。これも平, 本田らの結果と一致するものである。

さて, Fig. 6 に示されるように大, 中, 小型材の順に半価幅の増加割合が大きい。すなわち, 半価幅の変化は, 負荷される応力に依存するのではなく, 試験片の寿命に依存するようである。換言すれば, X線にて検出される試験片の表面の受ける疲労被害の程度は, 試験片の寿命に密接に関係しているようである。そこで各種寸法の試験片における半価幅変化を繰返し数比

Fig. 7. Change in half-value breadth.

N/N_f (N_f : 破断繰返し数) を横軸にとって表わしたのが Fig. 7 である. おおよそ一本の単調増加直線にまとまるようである.

これより, 寸法の相違によらず半価幅は試験片の受ける実際の疲労被害の程度に依存して変化することがわかった. すなわち, 疲労強度に及ぼす寸法効果の影響がある場合にも, 焼なまし炭素鋼においては疲労破壊の予知が可能である. Fig. 5, 6 に示される事実は寸法効果の機構を検討する上に, 試験片表面の受ける被害が重要なことを示すものであろう. この原因として, 寸法の差異によらず, 少なくとも X 線的に検出される一定の層の被害が応力こう配の差により強調されることが考えられる.

4 結 言

焼なまし炭素鋼 (SF 55) の同一粗材より採取した平滑試験片 (大型 100 ϕ , 中型 20 ϕ , 小型 8 ϕ) および段付試験片 (大型 80 ϕ , 中型 15.65 ϕ) において X 線的

疲労の検出を試みた結果, 次のことがわかった.

(1) 粉末写真により, 平滑試験片には負荷応力振幅が疲労限度以上か以下かの判定が, 寸法のいかんにかかわらずほぼ可能である. 段付試験片には疲労限度あるいはその直下の応力振幅においても X 線回折はん点はぼけを生ずるため, 粉末写真によって実際の疲労限度よりもわずかながら小さい応力振幅をもって疲労限度と判定される.

(2) 疲労強度に及ぼす寸法効果の影響がある場合にも X 線的には試験片の寿命に依存して, 半価幅, 残留応力が検出されることがわかり, 試験片表面の X 線の観察にて疲労検出が可能である.

終わりに本研究を行なうにあたり, 実験上の便宜をはかっていただいた武蔵工大の吉岡氏に感謝します. また有益なご助言を賜った当所楠本主任研究員, 実験に協力された根本, 久保木の両氏に厚くお礼申し上げます.

(昭和43年7月18日 第7回 X 線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば大内田久, Bulletin of JSME, **15**, 587 (1962).
- 2) たとえば大内田久, 日本材料学会編, “金属の疲労”, p.244 (1964) 丸善
- 3) たとえば平 修二, 本田和男, 日本機械学会論文集, **26**, 167 (1960).
- 4) Peterson, R. E., Stress Concentration Design Factors (1958) John Wiley, New York.
- 5) 大内田久, 日本機械学会論文集, **28**, 185 (1962); 日本機械学会誌, **62**, 484 (1960); **64**, 505 (1962).