

# 切欠をもつCrMo鋼試験片の 疲労強度について\*

蒲原 明・真武友一\*

On the Fatigue Strength of Notched CrMo Steel Specimens\*\*

By

Akira KAMOHARA and Tomokazu MATAKE\*

Since the propagation and non-propagation of fatigue cracks seem to have a close relation with the stress-strain curve of the material, fatigue tests of notched CrMo steel specimens, having extremely different forms of stress-strain curves, were made under rotary bending stressing. The stress-strain curves of the specimens were varied by heat treatments, viz., by furnace cooling or by tempering after oil quenching.

The main results of the experiments can be summarized as follows;

1) In sharply notched specimen both annealed (for this material yield point is observed) or tempered material (for this material yield point is not observed) shallow non-propagating fatigue cracks were observed at the root of the notch.

2) Repetitions of stresses above fatigue limit change the form of the stress-strain curve of annealed specimens considerably, but little change of the curve is observed in the case of tempered specimens (by repeated stressing).

3) Value of  $\epsilon_0$  for annealed CrMo steel may be regarded to be  $\epsilon_0 = 0.043$  mm.

4) For annealed specimen the maximum stress at the root of the notched under the load of the branch point is nearly equal to the yield point of the material.

## 1. 目 的

繰返応力を受ける部材に切欠が存在すれば、応力が集中している切欠部に疲労き裂が発生し、伝播して部材の破壊が起こる。しかし切欠が鋭くなれば切欠部に疲労き裂は発生するが、伝播しないで部材全体の破壊に至らないことがある。このような進展しない疲労き裂は停留き裂といわれている。また切欠が鋭くなって、停留き裂が発生し始める点を分岐点<sup>1)</sup>といい、焼鈍した鋼<sup>2)</sup>、銅<sup>3)</sup>、フェライト系不銹鋼<sup>4)</sup>およびジュラルミン<sup>5)</sup>等については分岐点の性質が明らかにされている。すなわち焼鈍した鋼には明瞭な降伏点が存在し、

\* 水産講習所研究業績 第389号, 1962年8月20日 受理。

Contribution from the Shimonoseki College of Fisheries, No. 389. Received Aug. 20, 1962.  
昭和36年9月7日第5回材料試験連合講演会にて講演

\* 九州大学工学部

The Kyushu University, Faculty of Engineering.

分岐点における最大応力はほぼ降伏点の大きさに等しい。また焼鈍した鋼では降伏点は存在しないが、疲労限付近の応力を繰返した試験片の引張試験から求めた tangent modulus—応力線図で tangent modulus が急に変化する応力が分岐点の最大応力になっている。フェライト系不銹鋼 (SUS 1) は鋼と同様である。ジュラルミンにも明瞭な降伏点は存在しないが分岐点は存在する。しかしジュラルミンは異方性がつよく疲労き裂が最小断面を伝播しないため停留き裂が発生し易い状態にあり、分岐点における最大応力は降伏点や平滑材の疲労限とは無関係であることがわかっている。

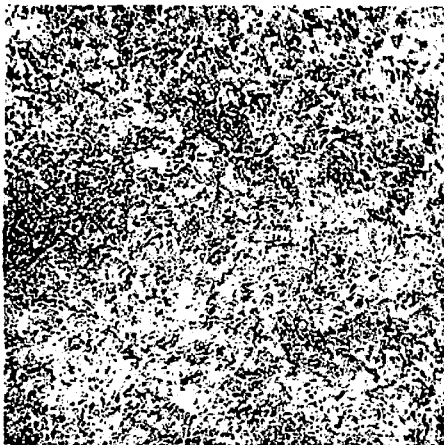
このようなことから考えると、停留き裂の存在および分岐点の性質には応力—ひずみ線図の形が影響するように思われる。CrMo 鋼を焼鈍すれば降伏点は明瞭に観測され、調質すれば降伏点は消失する。すなわち同一材料で熱処理を変えることによって異った応力—ひずみ線図を得ることができる。したがって CrMo 鋼の焼鈍材および調質材を用いて切欠試験片を作り、回転曲げ疲労強度を測定し、また引張試験を行なって分岐点その他の性質について研究するのが主目的である。

## 2. 材料および試験片

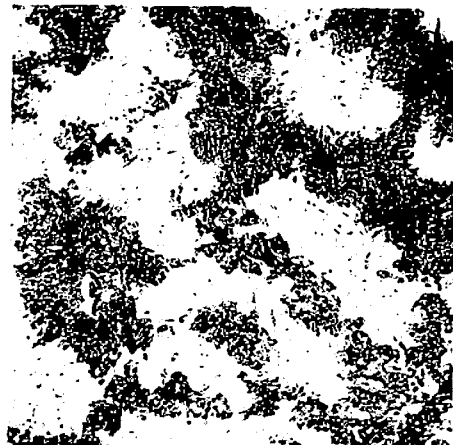
材料は日立金属安来工場において製造調質 (850°C 油冷, 560°C 水冷) された直径 30 mm の CrMo 鋼 (SCM 3) である。調質試験片は素材よりそのまま切出し、焼鈍試験片は調質されている素材を焼鈍 (870°C, 40分間保持) 後旋削した。また材料が不足したので棒の異なる CrMo 鋼(Ⅱ)(SCM 3)の調質材 (850°C 油冷, 560°C 水冷) をブリネル硬度で 10 以内の差で揃うように再調質して使用した。試料の化学成分および熱処理を第 1 表に、顕微鏡組織を第 1 図に示す。

Table 1. Chemical compositions and heat treatments of CrMo steels used.

Material	Chemical compositions, %						Heat treatment	
	C	Si	Mn	P	S	Cr Mo	Tempered	Annealed
CrMo steel	0.340	0.240	0.75	0.020	0.006	1.010.17	At 850°C, oil quenched. At 560°C, water quenched.	At 870°C, for 40 min.
CrMo steel (Ⅱ)	0.330	0.200	0.85	0.019	0.009	1.180.26	"	"



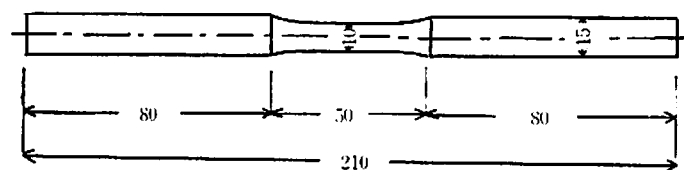
(a) Tempered



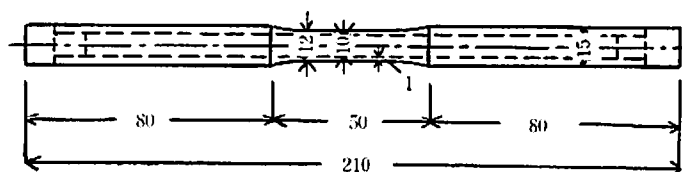
(b) Annealed

Fig. 1. Microphotographs of materials used ( $\times 400$ )

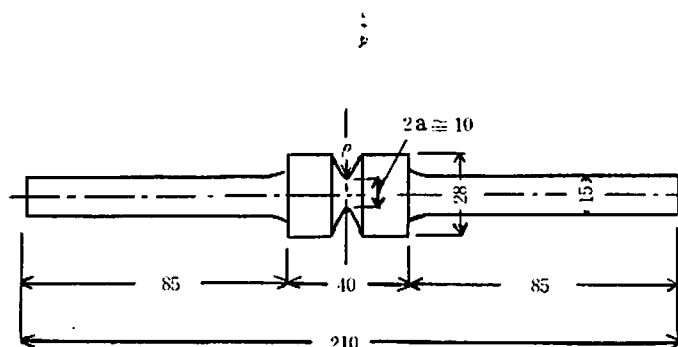
引張試験片(中実)は直径約10mm, 標線距離50mmで, 疲労試験後行なう引張試験の試験片(管状)の標線距離は20mmである。疲労試験片の寸法は第2図の通りで, 平滑試験片の試験部の直径は中実の場合



Plain specimen (Solid)



Plain specimen (Hollow)



Specimen with deep hyperboloidal groove

Fig. 2. Forms of fatigue specimens.

約10mmで, 管状の場合外径  $d_o \approx 12$  mm, 内径  $d_i \approx 10$  mm である。切欠試験片の谷底径は  $2a \approx 10$  mmで, 試験片は Neuber 型(双曲線型)の切込みを持っている。切欠の形状, すなわち形状係数  $\alpha$  は切欠半径  $\rho$  をかえて変化させた。試験片製作後切欠部を50倍に拡大して精査し, 拡大図から切欠半径を算出し, Neuber の式<sup>(9)</sup>にしたがって形状係数を求めた(付録参照)。 $\alpha \approx 8$  の切欠は  $\rho \approx 0.04$  mm で  $16.5^\circ$  のV形切欠である。

試験片の表面は平滑試験片では0/4のエメリー紙で研磨し, 切欠試験片では50倍に拡大して所定の双曲線に合致するよう整形されたバイトで旋削されたままである。

### 3. 実験結果およびその考察

調質材および焼鈍材の機械性質を第2表に、応力-ひずみ線図を第3図に示す。

Table 2. Mechanical properties of CrMo steels used

Specimen No.	Heat treatment	E	$\sigma_S, \sigma_{0.2}$	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\psi$	$\varphi$
8	Tempered	$2.13 \times 10^4$	$\sigma_{0.2} = 83.0$	97.0	160.6	59.8	17.6
23.2	Annealed	$2.16 \times 10^4$	$\sigma_S = 38.4$	67.4	116.9	55.2	26.0

- E : Modulus of elasticity,  $\text{kg/mm}^2$   
 $\sigma_S$  : Yield point,  $\text{kg/mm}^2$   
 $\sigma_{0.2}$  : Proof stress for 0.2% permanent set,  $\text{kg/mm}^2$   
 $\sigma_B$  : Tensile strength,  $\text{kg/mm}^2$   
 $\sigma_T$  : Actual stress at fracture,  $\text{kg/mm}^2$   
 $\psi$  : Area contraction, %  
 $\varphi$  : Elongation, %

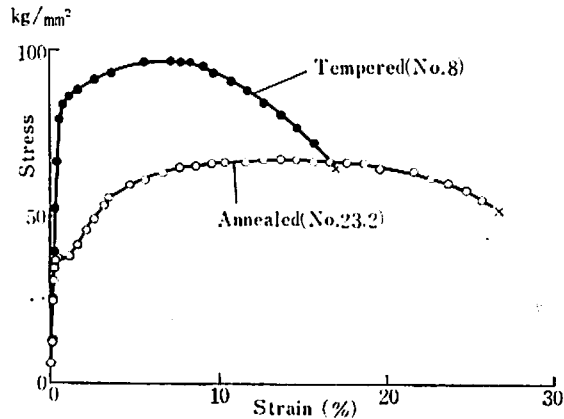


Fig. 3. Stress-strain Curves (after heat treatment)

疲労試験機は小野式回転曲げ試験機 (第4図) で応力繰返しの速さは毎分 2500~2600 回である。疲労試験の結果を第3, 4表に、また S-N 線を第5, 6図に示す。

第3表中の No. 24, J-21 は応力繰返しが応力-ひずみ線図に及ぼす影響をみるための管状試験片 (曲げの際の試験片中心部の低応力部分を除くため管状とした) で、疲労限付近の応力で回転曲げ試験を行なった後引張試験を行なった。中実の処女材 (調質材) の引張試験と併せて第7図に示す。

焼鈍材では材料が不足したので見当をつけるため CrMo 鋼 (II) を焼鈍 (870°C, 40 分間保持) して引張試験を行なった。その結果および回転曲げ応力を加えた管状試験片の引張試験結果も第7図に示した (この焼鈍材の平滑材の疲労限は  $\sigma_{w0} = 30 \text{ kg/mm}^2$  である)。

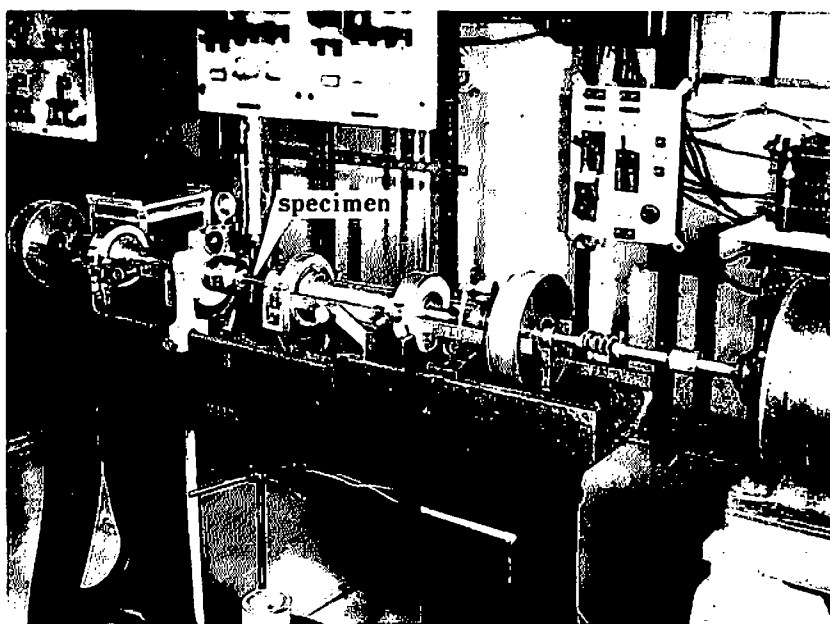


Fig. 4. The Ono's-type rotary bending fatigue testing machine.

Table 3. Results of rotary bending tests for tempered specimens.

Specimen, No.	Form of specimen			Stress, $\sigma_w$ kg/mm <sup>2</sup>	No. of repetitions, N 10 <sup>6</sup>	Notch factor, $\beta = \frac{\sigma_{w0}}{\sigma_w}$	B C		Remarks
	Notched section diameter, 2 $\phi$ mm	Root radius, r mm	Form factor, $\alpha$				N. C	N. B	
2	9.935	"	1.0	54.0	0.126		B	B = broken.	
3	9.858	"	"	48.0	0.229		B	C = cracked.	
5	10.035	"	"	45.0	0.517		B	N. C = not cracked.	
7	10.012	"	"	42.0	1.204		B	N. B = not broken.	
9	9.945	"	"	41.0	15.933		N. B	$\sigma_{w0}$ = fatigue limit = 41.0 kg/mm <sup>2</sup>	
4	9.996	"	"	40.0	11.738		N. B		
23	$d_o = 11.790$ $d_i = 9.760$	"	Hollow	40.0	1.076		B		
24	$d_o = 11.795$ $d_i = 9.770$	"	Hollow	37.0	11.429		N. B	No. 24---tensile test.	
20	9.857	2.13	1.54	34.0	0.923		B		
22	10.028	2.20	1.54	33.0	2.540		B		
14	9.981	2.24	1.53	32.0	13.229	1.28	N. C	$\sigma_{w1}$ = fatigue limit = 32.0 kg/mm <sup>2</sup>	
15	10.015	2.15	1.55	30.0	10.900		N. B		

1	10.031	0.354	3.06	22.0	0.293		B	
13	10.057	0.370	3.00	20.0	0.883		B	
6	10.026	0.370	3.01	19.0	10.813	2.16	N. C	$\sigma_{w1} = 19.0 \text{ kg/mm}^2$
10	9.998	0.380	2.96	17.0	11.339		N. B	
11	9.995	0.371	2.99	14.0	13.519		N. B	
12	10.118	0.188	4.09	22.0	0.214		B	
18	10.148	0.182	4.16	20.0	0.299		B	
17	10.190	0.185	4.13	17.0	0.825		B	
19	9.969	0.183	4.11	16.0	3.879		B	
21	9.682	0.187	4.02	15.0	3.542		B	
16	10.084	0.188	4.08	14.0	13.533	2.93	N. C	$\sigma_{w1} = 14.0 \text{ kg/mm}^2$
45	10.051	0.0972	5.56	15.0	1.147		B	
47	10.042	0.0985	5.51	14.0	1.916		B	
46	10.002	0.0994	5.49	13.5	11.717		C	$\sigma_{w2} = \text{crack strength}$ $= 13.5 \text{ kg/mm}^2$
44	9.959	0.102	5.42	13.0	11.448		C	
43	9.888	0.0997	5.45	12.6	11.262		C	
50	9.944	0.102	5.41	12.0	10.434		C	
37.2	10.000	0.102	5.42	11.5	15.910	3.57	N. C	$\sigma_{w1} = 11.5 \text{ kg/mm}^2$
42	9.976	0.103	5.39	11.0	11.938		N. C	
45	10.051	0.0972	5.56	10.5	12.151		N. B	
II-21	$d_o = 11.987$ $d_i = 10.01$	—	Hollow	42.0	5.919		H <sub>B</sub> 302	SCM 3 (II) No. II-21...tensile test, At 850°C. oil quenched, At 600°C. water quenched.
II-51.3	9.852	0.04	8.0	16.5	1.747		B	298
II-54	9.102	"	"	15.5	2.414		B	313
II-55	10.102	"	"	15.0	10.0272		C	313
II-30.1	9.674	"	"	14.5	20.616		C	307
II-56	9.608	"	"	14.5	10.500		B	311
II-30	9.683	"	"	14.0	11.368		C	309 $\sigma_{w2} = 14.0 \text{ kg/mm}^2$
II-29	9.371	"	"	13.1	12.864		C	300
II-51.1	10.555	0.104	5.51	16.0	13.259		C	298
II-51.2	9.835	0.097	5.52	15.5	18.001		C	298
"	"	"	"	16.0	1.790		B	298
II-52	9.939	0.1038	5.36	15.5	1.420		B	307
II-53	10.001	0.098	5.53	15.0	2.111		B	307
II-61	10.036	0.094	5.64	14.0	3.742		N. B	307
"	"	"	"	15.0	1.001		N. B	307
"	"	"	"	16.0	0.672		B	307

H<sub>B</sub> : Brinell hardness, kg/mm<sup>2</sup>

Table 4. Results of rotary bending tests for annealed specimens.

Specimen No.	Form of specimen			Stress, $\sigma_w$ kg/mm <sup>2</sup>	No. of repetitions, N 10 <sup>b</sup>	Notch factor, $\beta = \frac{\sigma_{w0}}{\sigma_w}$	B C N, C N, B	Remarks
	Notched section diameter, 2 a mm	Root radius, r mm	Form factor, $\alpha$					
33	10.065	$\infty$	1.0	32.0	0.453		B	B = broken, C = cracked, N, C = not cracked, N, B = not broken. $\sigma_{w0}$ = fatigue limit = 28.0 kg/mm <sup>2</sup>
34	10.059	"	"	30.0	1.514		B	
35	10.055	"	"	29.0	2.902		B	
36	10.081	"	"	28.0	12.902		N, B	
41	10.012	0.362	3.02	13.0	3.047		B	$\sigma_{w1}$ = fatigue limit = 11.5 kg/mm <sup>2</sup>
40	10.013	0.364	3.02	12.0	1.125		B	
38	10.094	0.367	3.02	12.0	1.827		B	
48.2	9.944	0.364	3.01	11.5	14.556	2.43	N, B	
39	9.976	0.367	3.00	11.0	10.480		N, B	
26	9.754	0.185	4.05	13.0	0.908		B	$\sigma_{w1}$ = 10.5 kg/mm <sup>2</sup>
25	9.945	0.180	4.14	11.0	4.000		B	
28	10.096	0.199	3.98	10.5	13.758	2.67	N, C	
27	10.043	0.182	4.14	10.0	15.773		N, C	
49	9.887	0.149	4.51	10.0	6.525		B	$\sigma_{w1}$ = 9.5 kg/mm <sup>2</sup>
51	10.029	0.150	4.52	9.5	19.202	2.95	N, C	
52	10.008	0.151	4.51	9.0	18.630		N, C	
32	9.909	0.0945	5.60	11.0	1.842		B	$\sigma_{w2}$ = crack strength = 10.0 kg/mm <sup>2</sup>
37	9.997	0.0992	5.50	10.5	2.855		B	
31	9.897	0.0955	5.57	10.0	13.881		C	
29	9.957	0.0943	5.62	9.0	15.465		C	
30	10.020	0.0943	5.66	8.5	15.156	3.29	C	
48.1	10.165	0.0990	5.55	8.0	11.257	3.50	N, C	

第7図からわかるように調質材では応力を繰返さないものと繰返したものとは応力-ひずみ線図の変化が少い。しかし本実験の焼鈍材は第7図の焼鈍材と同様な傾向を持つと考えられるから、応力を繰返さないものは明瞭な降伏点を有するが、疲労限付近の応力を繰返したものでは降伏点は消失し、応力-ひずみ線図の形の変化は判然と区別されるであろう。

第3, 4表および第5, 6図で、平滑試験片では10<sup>7</sup>回以上の応力繰返しに堪えて破断しない応力を疲労限 $\sigma_{w0}$ とし、切欠試験片では10<sup>7</sup>回以上の応力繰返後、破断しない試験片を軸を含む面で縦断し、顕微鏡で検査して疲労き裂のない最大応力を疲労限 $\sigma_{w1}$ （公称応力）とした。この際き裂が発生しておればこのき裂はこれ以上進展して試験片を破断に至らしめない停留き裂である。その一例を第8図に示す。停留き裂が発生する最大応力（公称値）を、き裂強さ $\sigma_{w2}$ とする。

実験結果を形状係数と疲労限、き裂強さとの関係で表わせば第9図のようになる。また形状係数と切欠形数との関係は第10図で表わされる。この図は形状係数が増加すれば切欠係数も徐々に増加しているが、増加

の割合は形状係数にくらべると少く、焼鈍材も調質材もほぼ同じ関係にあって、調質材は焼鈍材にくらべて切欠感度は高くないことを示している。

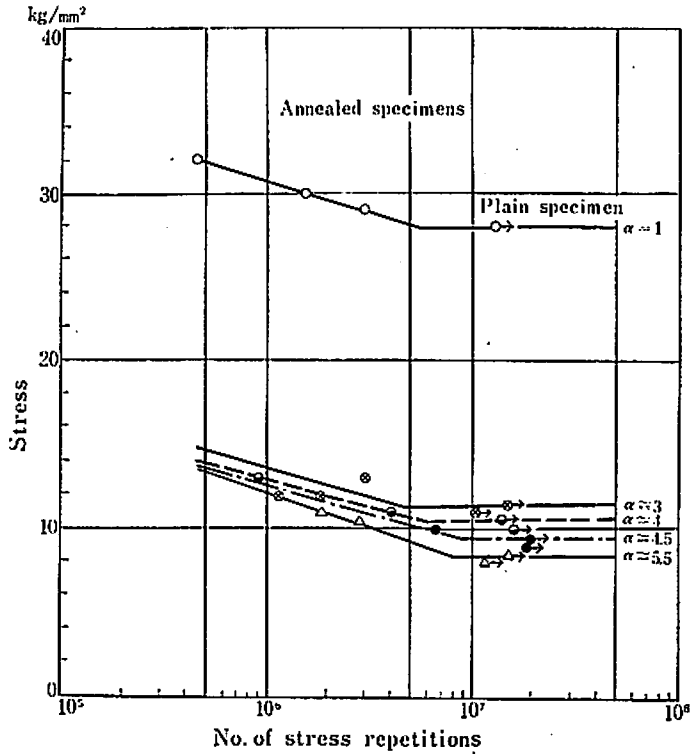


Fig. 5. S-N curves of tempered specimens.

切欠底より  $\epsilon_0$  内側の点が平滑材の疲労限  $\sigma_{w0}$  に等しくなったとき切欠底に疲労き裂が発生すると考えれば(第11図および付録参照), 第9図の  $\epsilon_0 = 0.043$  mm の線はほぼ焼鈍材の疲労限を通っている。なお  $\alpha = 5.5$  の疲労限は  $8 \text{ kg/mm}^2$  であるが, 上の理論が適用できるのは全周き裂であるから第9図では部分き裂を生じた  $8.5 \text{ kg/mm}^2$  の値を用いて計算している。一方調質材では実験点を通る一定の  $\epsilon_0$  は存在しない。

第3, 4表からわかるように, 焼鈍材, 調質材の  $\alpha \approx 5.5$  の試験片に, また調質材の  $\alpha \approx 8$  の試験片には停滞き裂が認められるので両材にはともに分岐点が存在する。明瞭な降伏点をもつ炭素鋼の分岐点  $\alpha_0$  についてはすでに, 明らかになっているように, 分岐点では  $\alpha_0 \sigma_{w1} = \alpha_0 \sigma_{w2} \approx \sigma_s$  なる関係がある。本実験の焼鈍材の分岐点は  $\sigma_0 = 4.3$ ,  $\sigma_{w1} = \sigma_{w2} = 9.8 \text{ kg/mm}^2$  で最大応力は  $\alpha_0 \sigma_{w1} = \alpha_0 \sigma_{w2} = 42.1 \text{ kg/mm}^2$  で



ある。この値は焼鈍材の降伏点 ( $\sigma_s = 38.4 \text{ kg/mm}^2$ ) と約 1 割の差があり、ほぼ降伏点に近い値である。

調質材では材料不足のため CrMo 鋼 (Ⅱ) を再調質して  $\alpha \approx 8$  および  $\alpha \approx 5.5$  についてき裂強さの測定を行なった (第 3 表) とし、 $\alpha \approx 8$  では  $\sigma_{w2} = 14.0 \text{ kg/mm}^2$ 、 $\alpha \approx 5.5$  では  $\sigma_{w2} < 14.5 \text{ kg/mm}^2$  であった。素材のき裂強さもこれと同じ傾向であると考えられるから  $\alpha \approx 5.5$ 、 $\sigma_{w2} = 13.5 \text{ kg/mm}^2$  を通って CrMo 鋼 (Ⅱ) のき裂強さに平行な線をき裂強さとした。き裂強さと疲労限との交点すなわち分岐点は  $\alpha_0 = 4.2$ 、 $\sigma_{w1} = \sigma_{w2} = 13.5 \text{ kg/mm}^2$  で、分岐点における最大応力は  $\alpha_0 \sigma_{w1} = \alpha_0 \sigma_{w2} = 56.8 \text{ kg/mm}^2$  となる。この値は調質材の引張試験では弾性限内の応力である (第 3 図)。

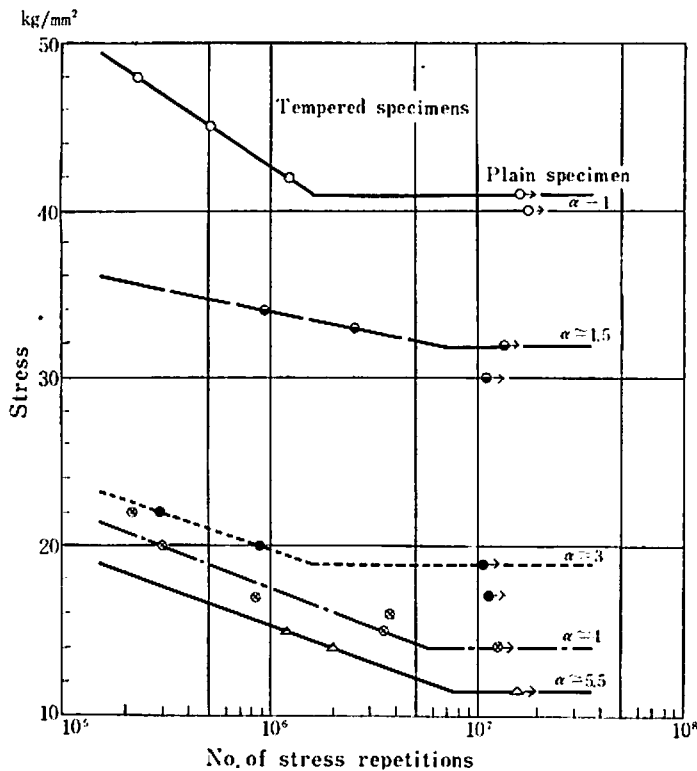


Fig. 6. S-N curves of annealed specimens.

第 7 図で説明したように調質材では降伏が起り始める点は明瞭でなく、応力繰返しの影響は応力-ひずみ線図には現われ難い。この原因の一つは調質の際に生ずる残留応力のため加工硬化した状態と同じになっていると思われる。これらのことから調質材では応力を繰返しても切欠底やき裂先端の強さの変化は少く、き裂が発生しても巨視的な塑性域はできないと考えられ、き裂先端の応力集中は大きいと思われる。一方切

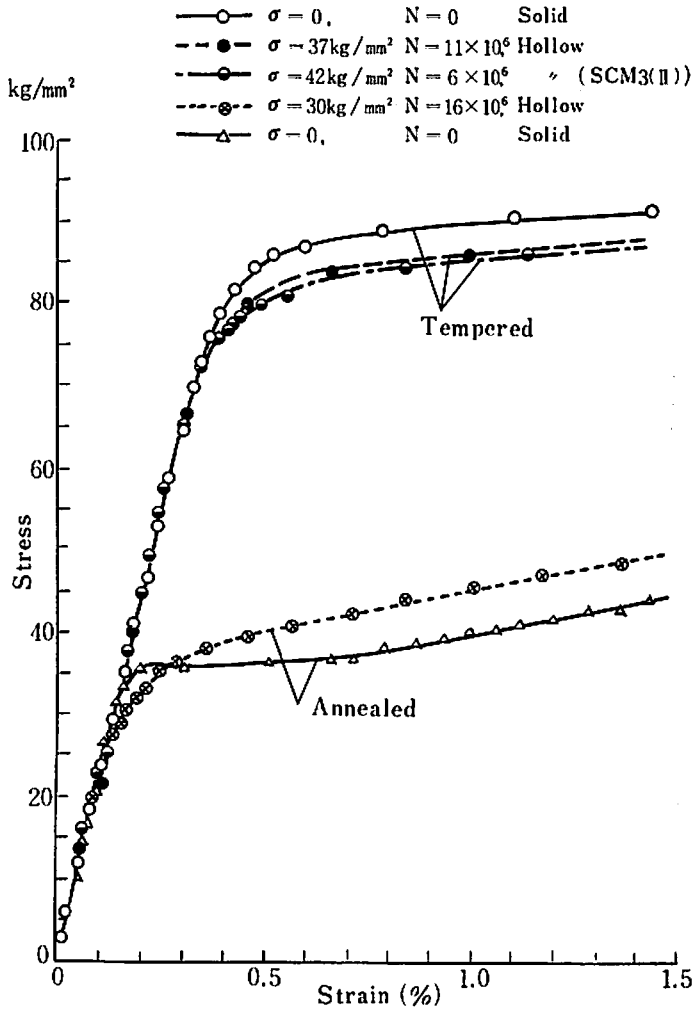
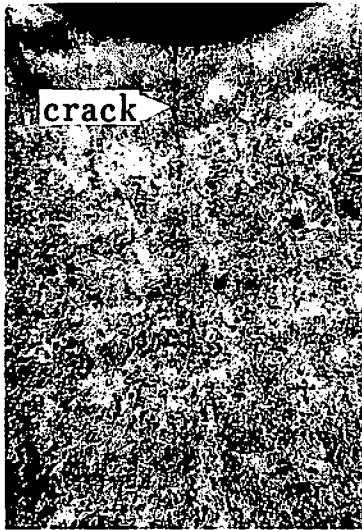
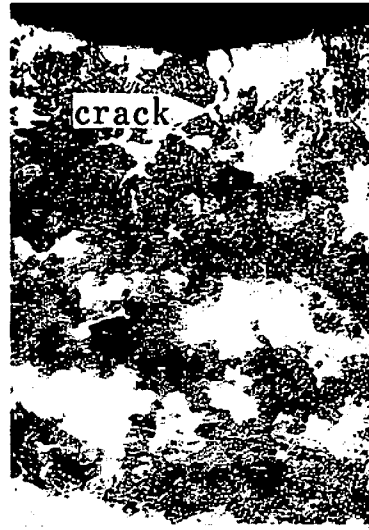


Fig. 7. Stress-strain curves for tempered and annealed specimens.

欠底にき裂が発生すれば、き裂の先端では応力は片振りになると考えられる<sup>10)</sup>から、この片振りによる応力状態改善と、き裂による断面減少、応力集中のかね合いで調質材のき裂は停留すると考えられる。



( a ) Tempered (  $\times 200$  )  
No. 44  
 $\sigma_w = 13 \text{ kg/mm}^2$   
 $N = 11,448 \times 10^6$



( b ) Annealed (  $\times 400$  )  
No. 29  
 $\sigma_w = 9.0 \text{ kg/mm}^2$   
 $N = 15,465 \times 10^6$

Fig. 8. Non-propagating fatigue cracks.

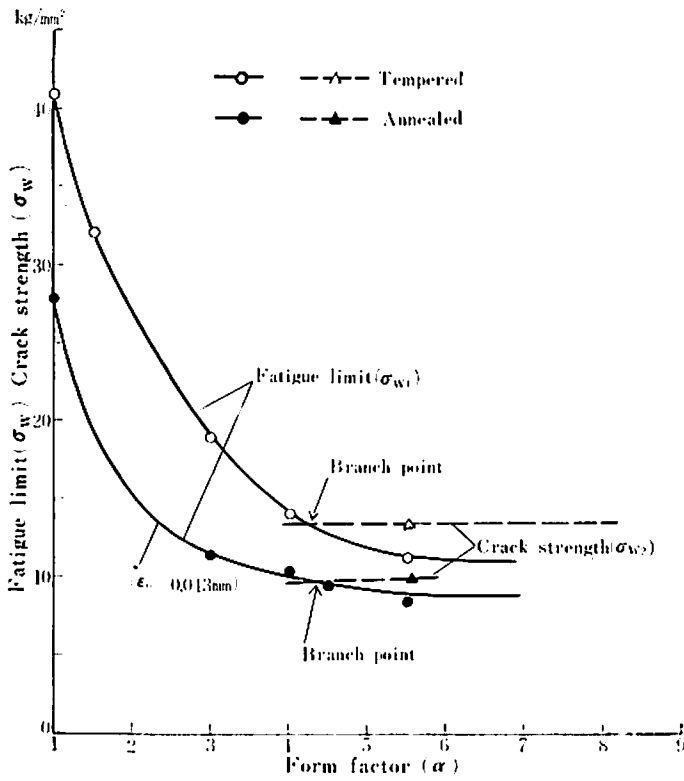


Fig. 9. Relation between  $\alpha$  and  $\sigma_{w1}$  or  $\sigma_{w2}$ .

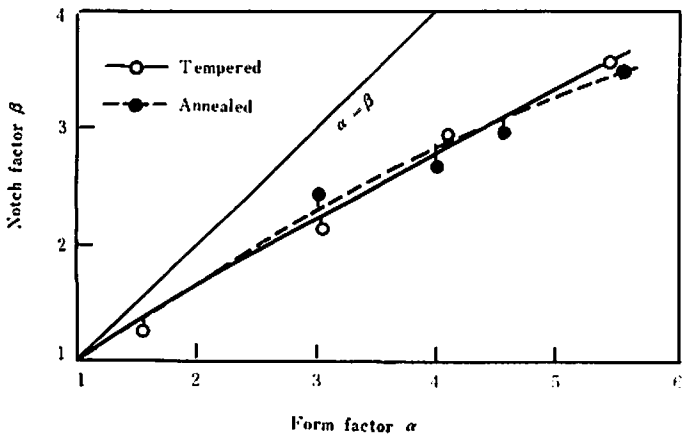


Fig. 10. Relation between  $\alpha$  and  $\beta$ .

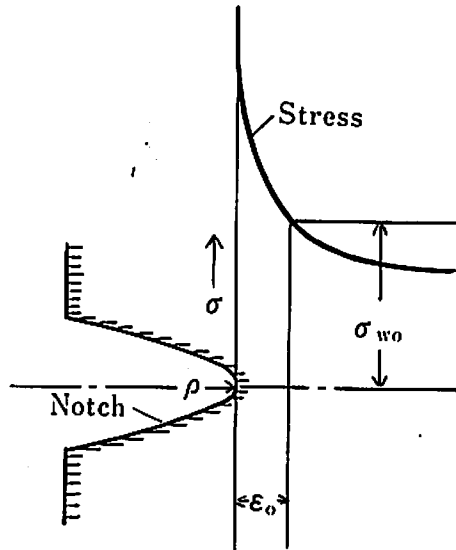


Fig. 11. Stress distribution at the root of a notch.

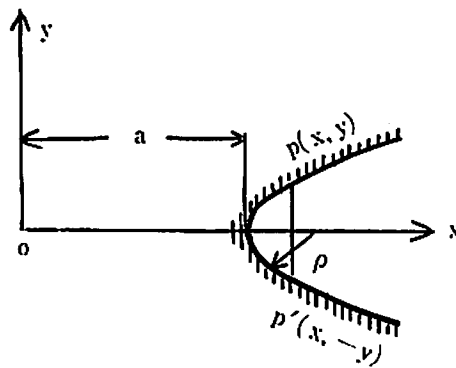


Fig. 12. Co-ordinates of a hyperbolic notch.

## 4. 結 論

上述の実験結果より次の結論が得られた。

a) 鋭い切欠をもつ CrMo 鋼試験片では明瞭な降伏点を有する焼鈍材にも、降伏点が観測されない調質材にも停滞き裂が観測された。

b) 焼鈍材の応力-ひずみ線図は繰返応力を加えないものと疲労限付近の応力を繰返したものとでは変化するらしいが、調質材ではその変化は少い。

c) 焼鈍材の疲労限は  $\epsilon_0 = 0.043 \text{ mm}$  で表わされる。

d) 焼鈍材の分岐点での最大応力はほぼ降伏点になると考えられるが、調質材では弾性限以下である。本研究については、九州大学工学部教授石橋正先生に終始ご指導を賜わった。ここに厚く感謝致します。

## 文 献

- 1) 石橋 正, 1954: 金属の疲労と破壊の防止, 養賢堂, 東京.
- 2) 石橋 正, 1957: 日本機械学会誌, 60 (465).
- 3) 石橋 正, 1956: 日本機械学会誌, 22 (115).
- 4) 石橋 正, 1960: 3rd Japan Cong. Testing Materials.
- 5) 石橋 正・真武 友一・末吉 高文, 1960: 材料試験, 9 (83).
- 6) H. Neuber, 1937: Kerbspannungslehre.
- 7) T. Isibasi, and T. Uryu, 1956: Reports of Research Inst. for Appl. Mec., Kyushu University, 4 (16)
- 8) 石橋 正, 1958: 機械の研究, 10 (5).

## 付 録

1. 切欠半径  $\rho$  と形状係数  $\alpha$  の求め方

50倍に拡大された切欠試験片の切欠部の投影図を写して、第12図のように座標を定めて切欠底に極く近い点  $p(x, y)$ ,  $p'(x, -y)$  の距離  $pp' = 2y$  を測定すれば切欠半径  $\rho$  は次式のようなになる。  
( $a$  は実測値)。

$$\rho = \frac{a y^2}{x^2 - a^2} \quad (1)$$

この  $\rho$  と  $a$  を用いて深い双曲線型切込みの形状係数  $\alpha$  は Neuber の式<sup>6)</sup>によって求めた。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{0.75}{N} \left( \sqrt{\frac{a}{\rho} + 1} + 1 \right) \left( 3 \frac{a}{\rho} - 0.4 \sqrt{\frac{a}{\rho} + 1} + 4.3 \right), \\ N &= 3 \left( \frac{a}{\rho} + 1 \right) + 2.2 \sqrt{\frac{a}{\rho} + 1} + \frac{1.3}{1 + \sqrt{\frac{a}{\rho} + 1}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

2.  $\epsilon_0$  の求め方

最小断面における半径方向の応力分布は第11図のように、内側では急速に減少している。切欠底より  $\epsilon$  だけ内側の点の応力は Neuber<sup>6)</sup>によれば

$$\sigma = (A + B \tan^2 v) \tan v,$$

$$A = K (8.4 - 2.24 \cos v_0 + 15.68 \cos^2 v_0),$$

$$B = K 8.4 \cos^2 v_0,$$

$$K = \sigma_n \frac{3}{11.2} \frac{\sin^3 v_0}{(1 - \cos v_0)^2 (6 + 10.4 \cos v_0 + 4.4 \cos^2 v_0 + 2.6 \cos^3 v_0)}.$$

$$\sigma_n = \frac{4}{\pi} \frac{M}{a^3},$$

$$\sin v_0 = \sqrt{\frac{\frac{a}{\rho}}{1 + \frac{a}{\rho}}}, \quad \cos v_0 = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{a}{\rho}}}, \quad \tan v = \frac{\sin v}{\sqrt{1 - \sin^2 v}}, \quad \sin v = \left(1 - \frac{\varepsilon}{a}\right) \sin v_0,$$

(3)

ここで  $a$  = 最小断面の半径, mm,

$\rho$  = 切欠半径, mm,

$M$  = 曲げモーメント, kg-mm,

$\sigma_n$  = 公称曲げ応力, kg/mm<sup>2</sup>,

上式より求めた  $\sigma - \varepsilon$  線 (第11図) で  $\sigma = \sigma_{w0}$  なるときの  $\varepsilon$  が  $\varepsilon_0$  である。