

軟鋼棒の引張塑性範囲における引張圧縮疲労耐久限度線図

大野元明**・吉松靖雄*

Fatigue Limit Diagram of a Mild Steel under repeating Tension-compression with Tensile Static Stresses,

Motoaki ONO and Yasuo YOSHIMATSU

Abstract

Among many experimental results of fatigue limits of various materials under repeating tension-compression stresses, we find few reports under plastic tensile region in steels. Then we shall need more detailed experiments in this region for the research of fatigue phenomena or condition of fatigue rupture. This report state my experiments of mild steel specimens of the value of notch factor 1.4, tested by Nishihara's testing machine under above mentioned stresses. The essential result of this experiment is that the characteristic line of fatigue limit in the diagram of repeating stress amplitude against mean tensile stress has been formed of curve and straight lines in each elastic, plastic and rupture region. The Fatigue limit and the diagram of un-notched specimen which can be deduced from this experiment by multiplying the notch factor βk , shall be compared with the fatigue limit calculated from the equation (1).

1. 緒言

鋼の引張圧縮疲労耐久限度については古くから種々の材料について実験されているがその平均引張応力を上限応力が降伏点以上になるまで増大した塑性範囲内における疲れ限度については少数の実験報告がある程度であり詳しく実験されている訳ではない。一般にこの範囲は静的破損領域内にあり構造物設計の安全圏外であるから詳しい実験を必要としないのであるが、疲労の性質や疲労破壊法則などの研究には重要である。高林氏⁽¹⁾は軟鋼、Ni-Cr鋼についてこの範囲まで平均応力を上げて実験し上限応力が降伏点を超えると耐久限度線が弾性範囲における割合よりも著しく下降し始めて極限においては平均応力軸上の引張強さの点に向うことを示唆し、中西氏⁽²⁾はこの引張強さの点を過る耐久限度線の式を立案している。筆者は別報⁽³⁾において平均応力が引張の領域内の耐久限度線図を弾性領域と塑性領域の二つに分けて、その材料の繰返引張耐久限度 σ_u の平均応力 $\sigma_u/2$ を境にして

$$\left[1 + \alpha \frac{2\sigma_m}{\sigma_u} - \beta \left(\frac{2\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 \right] 2\sigma_{u1} + \rho\sigma_m^2 = 8\sigma_w^2$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[1 + \alpha \frac{2\sigma_m}{\sigma_u} - \beta \left(\frac{2\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 \right] 2\sigma_{u1} + \rho\sigma_m^2 \times \\ & \left(1 + \frac{\sigma_m - \sigma_u/2}{\sigma_B - \sigma_u} \right) = 8\sigma_w^2 \end{aligned} \right\} (1)$$

但し σ_m = 平均応力

σ_{u1} = σ_m における耐久限振幅

σ_u = 繰返引張耐久限

α, β, ρ = 実験的定数

σ_B = 引張強さ σ_w = 引張圧縮耐久限

の二つの式で構成することを試み耐久線の極限は上式にみるごとく σ_B を過ることを仮定した。しかしこれらはどれも耐久線を近似的に表わすための工夫であり、またとくに塑性範囲内では詳しい実験結果や理論がなく降伏をおこしたためどの程度繰返応力に対する強さが変化するかあるいは耐久線の平均応力軸に対する傾斜が如何になるべきかなどに関しては不明な事柄が多く、このような点について調べる積りで軟鋼材について疲れ実験を行った。使用した試験機は西原式繰返引張圧縮疲れ試験機でこれの標準試験片No. 2を用いたので平行部端の応力集中がかなり大きいことが予想されるから形状係数、切欠係数を算定して平滑材の耐久限度線図を求めることにした。

** 機械工学科

* 宇部興産KK派遣学生

2. 試験片材料, 形状

試験片材料の化学的成分はTable. 1に示すものでその顕微鏡組織を Fig. 1に示した. また機械的性質はTable. 2に掲げる通りである. 材料は市場供給のままの機械加工を行った. 試験片はFig. 2に示す形状寸法のもので直径6 mm平行部長さ50mmの両端部に1 mm半径の隅角丸味をもち, 平滑材としては扱い難く

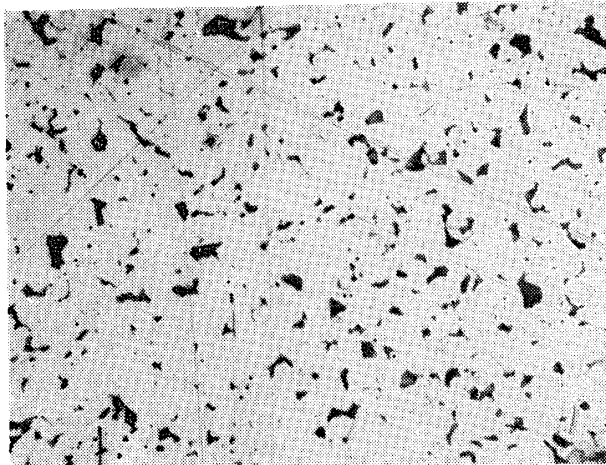


Fig. 1 Microstructure, ×300

むしろ二段直径軸に属するもので隅角部に応力集中があるからその形状係数ならびに切欠係数を考慮せねばならない. 形状係数の計算は筆者の立案した次式による. Fig. 3の寸法記号によって, 形状係数 α_K は $P/\pi a^3$ を基準応力として

$$\alpha_K = 1 + \left(\frac{a}{H}\right)^2 \left\{ \left(1 + \frac{\rho}{a}\right) \left(K_\rho + \frac{t_0}{l_0 - \rho}\right) - \frac{\rho}{a} \lambda_\rho + \frac{t_0^2}{2a(l_0 - \rho)} \right\} \quad (2)$$

$$l_0 = \left\{ 1.85 + 0.1\sqrt{t/H} + 2.5\frac{a}{H} \left(\frac{t_0}{t}\right)^2 \right\} \rho$$

但し $K_\rho = -\frac{\pi}{2} + \frac{2l_0}{\sqrt{l_0^2 - \rho^2}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{l_0 + \rho}{l_0 - \rho}}$

$$\lambda_\rho = \frac{l_0}{\rho} \left(\log e \frac{l_0}{l_0 - \rho} - \frac{\rho}{l_0} \right)$$

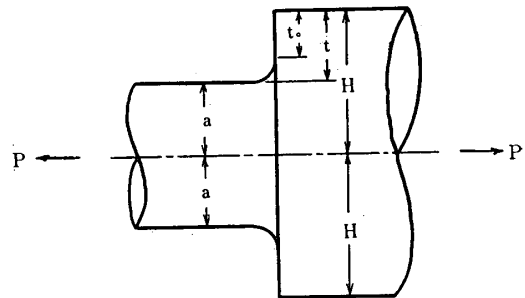


Fig. 3 Size notation for the equation(2)

C	Si	Mn	P	S
0.11	0.28	0.52	0.029	0.027

Table 1. Chemical Composition

σ_{SU} kg/mm ²	σ_{SL} kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	σ_T kg/mm ²	ϵ %	ϕ %	Hv
32.6	29.6	44.0	159.9	32	75	93

Table 2. Mechanical Properties

- σ_{SU} = Upper Yielding pt.
- σ_B = Tensile Strength.
- ϵ = Elongation.
- Hv = Vickers Hardness.
- σ_{SL} = Lower Yielding pt.
- σ_T = True Rupture Stress.
- ϕ = Sectional Area Contraction.

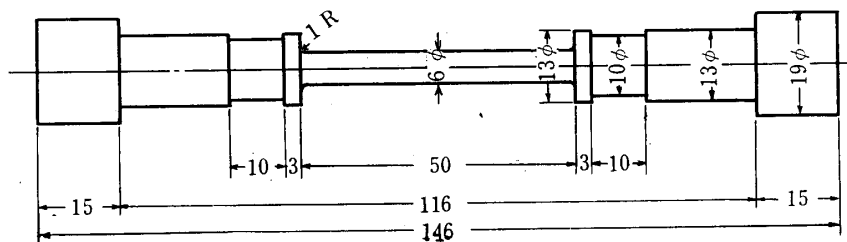


Fig. 2 Dimension of Test Piece

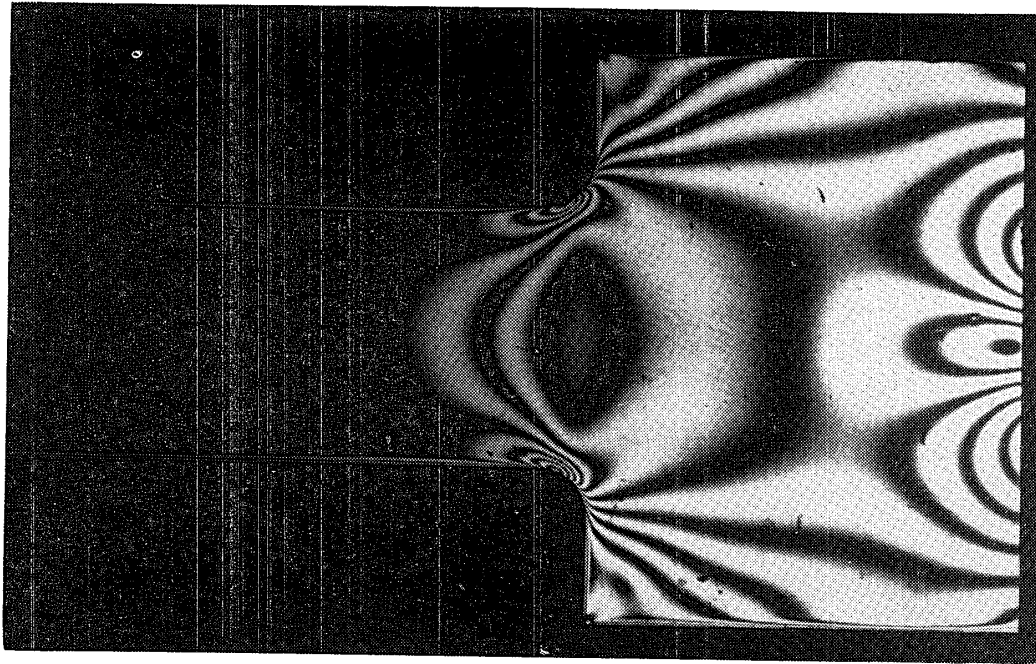


Fig. 4 Photoelastic Pattern

この式で α_K を求めるには与えられた寸法によって l_0/ρ を求め K, λ, ρ を計算して α_K の式に入れる. なおこの式の誘導法は別報⁽⁴⁾に記述する予定である. 試験片の寸法について(2)を計算すると $\alpha_K = 1.8$ となる.

また試験片縦断面と相似形のエポキシ樹脂板について光弾性実験を行い応力繰回数から α_K を求めると 1.9 となる. Fig. 4 はその縮写真である,

かかる二段軸形に属する実験の例としては“ボルト頭部における応力集中と引張圧縮疲れ強さ”の西原氏⁽⁵⁾の実験報告がある, その中で特種塗料および光弾性実験結果による形状係数の測定値がボルトの軸半径 a と頸部の隅角丸味半径 ρ との比 a/ρ を横軸にとって表わされているがこれと照合してみても上記の計算値は

適正であることがわかる. また同報告中に形状係数 α_K と切欠係数 β_K との関係が図示されているがこれによって試験片の β_K を求めると約 1.4 となる. よって応力集中のない平滑材の耐久限度はこの試験片で測定される値の約 1.4 倍となる筈である. なお, 非常に応力集中の大きい場合は別としてこの程度の α_K をもつ試験片で測定される所謂耐久限度線図の特性は平滑材のものほとんど変わらないと考えられる.

Fig. 5 は筆者が 0.15% C 鋼の耐久限度線図として $\alpha = 0.4121, \beta = 0.0461, \rho = 1.025$ を(1)式に入れて求めた耐久限度線図であり, これの縦座標の値を 1.4 分の 1 に縮少すれば本実験によって求められる耐久限度線図とはほぼ一致しなければならないことになる.

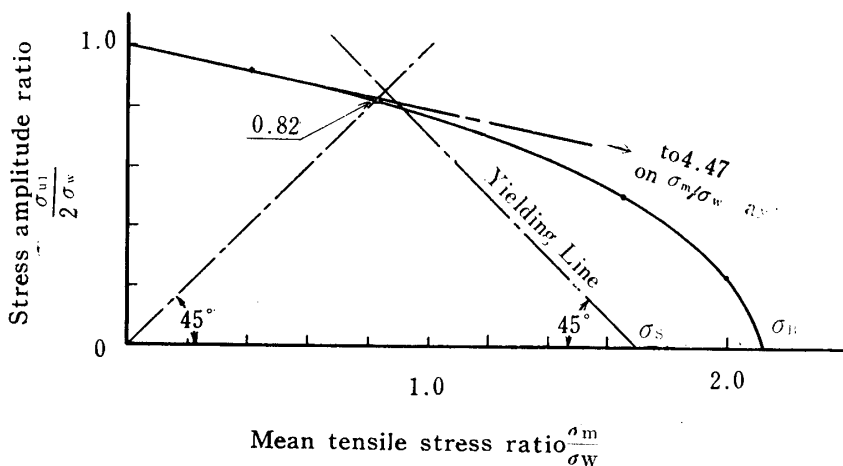


Fig. 5 Fatigue Limit with the Mean Tensile Stress Calculated from the Equation σ_w = Fatigue Limit under tension-compression

3. 実験方法

試験機は平均引張荷重最大 1 トン, 繰返荷重最大 ± 1 トンの西原式引張圧縮疲れ試験機で応力繰返数は 1,800 回/分, 応力波形は試験片に歪計を貼付けオシログラフで検査し正弦形であることを確めた. 各試験片とも一定平均応力, 一定繰返応力のもとに風間だけの連続運転を行い夜間の休止期間中は繰返応力だけを休止し平均応力はそのまゝ一定に放置した.

	diameter d	mean stress σ_m kg/mm ²	Stress amp. σ_a kg/mm ²	repeated number N × 10 ⁶	Out-rupture. × rupture.	length l'/mm	remarks
0	6.00	0	17.7	10.6400	○		
1	6.00	0	17.7	0.6744	×		
2	6.00	0	15.92	7.4235	×		
3	6.00	0	14.17	11.0000	○		
4	6.00	7.9	12.4	10.6846	○		
5	6.00	7.9	14.17	1.6414	×		
6	6.00	7.9	13.3	10.0798	○		
7	6.00	11.75	13.3	10.7081	○		
8	6.00	7.9	13.6	0.7181	×		
9	6.00	11.76	13.8	1.3641	×		
10	6.00	11.76	13.45	1.4836	×		
11	6.00	15.76	12.4	11.3355	○		
12	6.00	15.76	13.45	12.3111	○		
13	6.00	19.63	13.45	0.4509	×		
14	6.00	19.63	12.04	—	×		
15	6.00	19.63	10.96	11.2619	○		
16	6.00	24.85	10.96	2.8206	×		
17	6.00	24.85	18.9	11.7213	○	51.8	
18	6.00	28.35	8.9	9.8245	○	51.65	
19	6.00	28.35	8.49	10.2055	○	52.55	
20	6.00	28.35	10.62	0.5170	×		
21	6.00	31.5	8.0	2.7680	—		trouble in T • M
22	6.00	31.5	8.0	8.6844	○	54.05	
23	6.00	31.5	8.49	11.3079	○	52.35	
24	6.00	31.5	9.2	11.1014	○	53.55	
25	6.00	31.5	9.9	11.4810	○	50.9	
26	6.00	31.5	10.62	4.4571	×		
27	6.00	35.3	8.0	11.0801	○	55.4	
28	6.00	35.3	8.49	10.2885	○	55.55	
29	6.00	35.3	9.9	3.3254	×		
30	6.00	38.8	8.49	0.0078	×		
31	6.00	36.4	8.49	0.0084	×		
32	6.00	36.4	8.0	0.0094	×		
33	6.00	35.3	8.4	10.0429	○	58.10	
34	6.00	38.8	4.25	10.3351	○		
35	6.00	38.8	7.08	0.0072	×		
36	6.00	40.0	4.96	0.0728	×		

Table 3. Result of experiments.

note. length l' = length of l in test piece
after test.

Testpiece No.	Length l' mm	Elongation λ	Elongation ϵ %	Diameter d' mm	Minimum diameter mm	Area-con traction. ψ %	Yielding Point, kg/mm ²	Tensile Strength kg/mm ²	Actual bra- king Strength kg/mm ²
17	51.80	12.05	23.3	5.88	3.55	63.6	40.6	48.8	103.2
18	51.65	12.59	24.4	6.02	3.60	64.2	40.1	49.2	110.0
19	52.55	9.52	18.2	5.88	3.35	67.5	44.9	50.5	122.5
22	54.05	9.22	17.1	5.80	3.60	61.5	45.5	51.8	108.0
23	52.35	12.64	24.2	5.87	3.45	65.5	44.4	50.7	120.9
24	53.55	11.04	20.6	5.81	3.10	71.5	46.45	49.4	143.1
25	50.90	11.89	23.4	5.97	3.25	60.5	42.9	47.9	137.4
27	55.40	9.63	17.4	5.70	3.15	69.5	50.15	50.6	136.3
33	58.10	3.70	6.33	5.55	3.40	62.4	—	59.9	103.5

Table 4. Mechanical properties after fatigue test for undamaged test piece.

Test piece dimension after fatigue test. (undamaged) Mechanical properties of tension test.

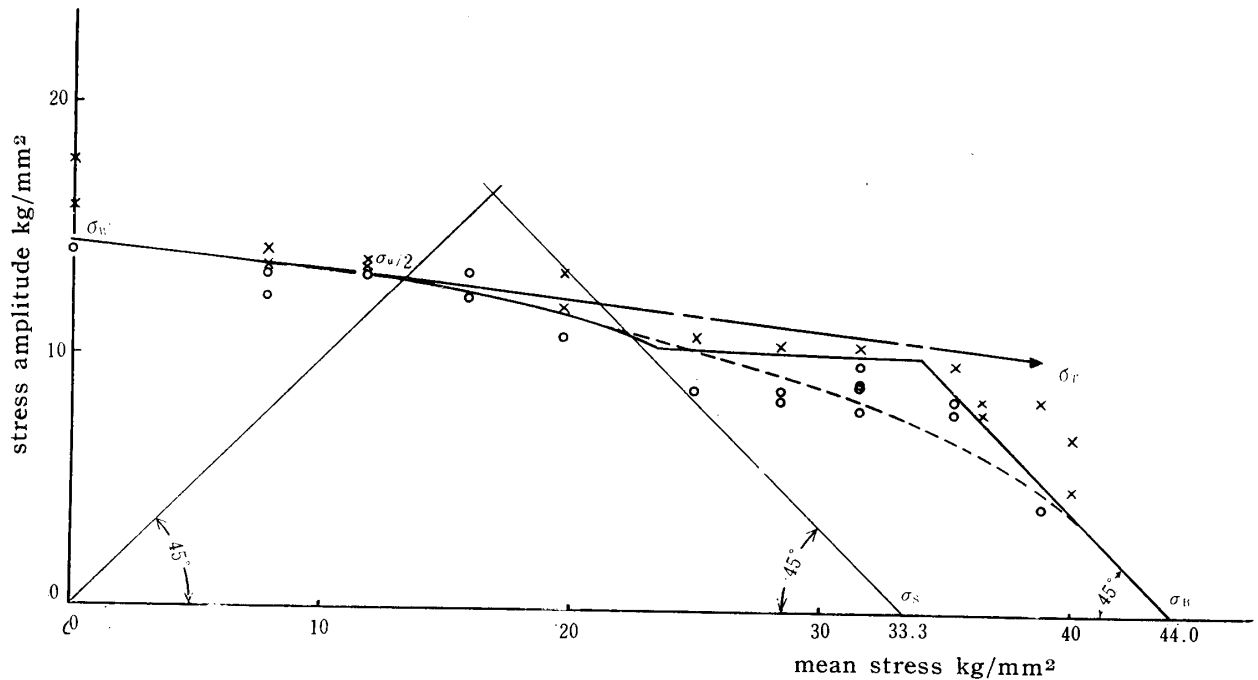


Fig. 6 Fatigue Limit Diagram

 σ_s : Yielding point σ_B : Tensile Strength σ_T : True rupture stress

かかる試験方法によって休止期間中の疲労回復はほとんどないものとした。各試験片について107回の繰返し数に耐えたものは非破断として取外し引張試験を行い機械的性質を調べ、107回以下で破断したものは破面の状況を検し破断部附近の硬度分布を微小硬度計によって測定した。

4. 実験結果

Table. 3に各試験片の平均応力、繰返応力、繰返数などを掲げた。これによって耐久限度線図を画くとFig. 6となる。前記応力集中のあるため測定された耐久限度の値は平滑材の値より当然低く縦軸の応力の値を1.4倍したものが平滑材の耐久限度線図となる。よってFig. 5をこの上に重ねてみると点線のごとくなり σ_m の高い範囲において測定線が上方に外れている。この結果から平均応力が高く降伏をおこすと繰返応力に対する抵抗が増大することがわかる。このような結果は高林氏の実験結果には見られないが西原氏の0.44% C鋼について降伏点を超えてある範囲まで平均応力を上げて実験したものではその傾向が現われているようである。

上限応力が引張強さに達する繰返応力では試験機の運転を始めると同時に試験片に著しい伸を生じ遂に局

部収縮をおこし少繰返数の後破断をおこす。しかし引張強さよりも少し低い上限応力の場合は107回以上の繰返し数に耐えているからこの範囲の σ_m に対する耐久限度線は静破壊の限界を与える図示のごとき傾斜直線で表わすのが適當のように思われる。

疲労破壊は前記のように試験片の頸部の応力集中個所から発生し破断の方向はほぼ軸に直角である。破断面近傍の硬化程度を調べるためFig. 8に示す個所でビッカース硬さを測った結果は破面に近い1, 2, 3のところでは約160, 7, 8, 9のところでは140位である。これはしかし統計的に調査する必要があるので後報に譲る。

未破断の試験片はその機械的性質の変化を調べるために引張試験を行ったが、これらの試験片はいずれも平均引張をうけているのでTable. 4の第1欄に示すごとく平行部の長さが最初の長さ50mmよりも伸びており材料の硬化程度もかなり著しく荷重伸線図の形も相当変化している。表中に見られるように降伏点の上昇は著しく、伸率、断面収縮率は何れも低下し、真破断強さも減少している。

5. 結論

本実験は低炭素鋼において特に平均引張応力の高い

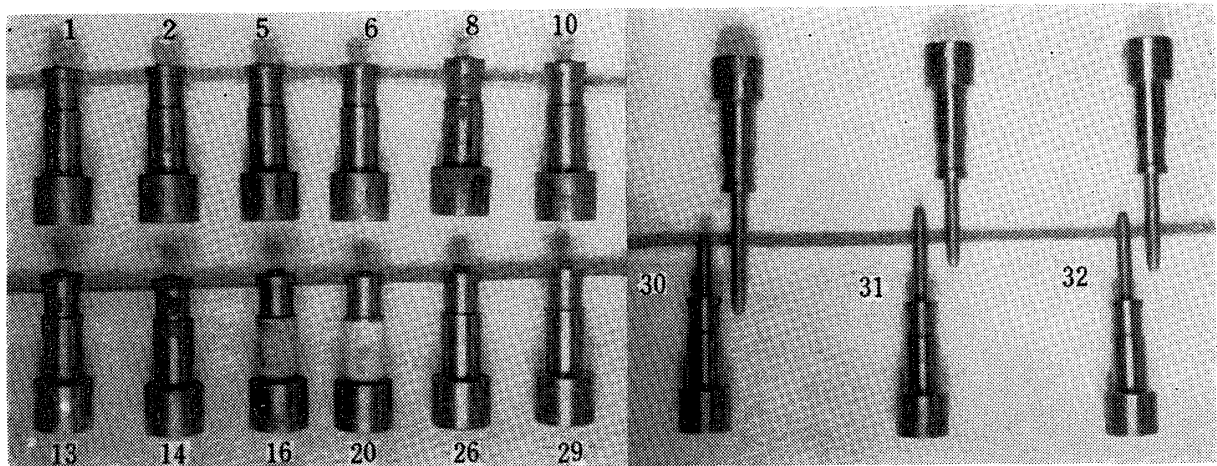


Fig. 7 Fatigue Test Pieces

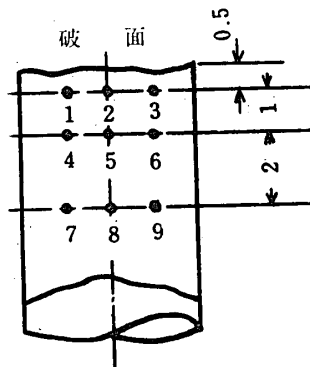


Fig. 8 Position of hardness test

範囲の耐久限度図を求めることを目的としたが使用した試験片の平行部両端に応力集中のあるため測定された耐久限度の値は平滑材における値より当然低い、よって別に試験片の形状から切欠係数を算定して測定値に乗じて平滑材の耐久限度線図とし、かつその特性はこの程度の応力集中に対してほとんど変らないものと考えてもよいと思う。平均応力零の場合の所謂引張圧縮耐久限度の値はこの材料では約 $18\text{kg}/\text{mm}^2$ で、H. J. Tapsell の $0.17\% \text{C}$ 鋼の $19.7\text{kg}/\text{mm}^2$ 、H. J. Gough の $0.13\% \text{C}$ 鋼の $20.2\text{kg}/\text{mm}^2$ などと同程度であり、かつ筆者が別報に $0.15\% \text{C}$ 鋼の耐久限度線図として掲げた(1)式の計算による Fig. 5 の線図とほぼ一致している。

引張降伏点を越えた上限応力をもつ繰返応力を作用せしめるときは繰返数の初期において材料は降伏をおこして硬化し繰返応力に対する抵抗が増大する傾向が見られ平均応力を増しても疲れ限度はほとんど変わらず

平均応力軸にほぼ平行になる。しかし上限応力が静引張強さに到達する範囲の耐久限度線はほぼ 45° の傾斜線をもって平均応力軸上の引張強さの点に向って下降する。

以上の結果から引張降伏をおこした範囲の疲れ現象あるいは疲れ限度などは弾性範囲内におけるものとは別個に考えられるべきであり塑性力学的な条件によって定められるべきものと推定される。(1)式はこの意味において弾性範囲と塑性範囲に分けて立案したもので、ただ塑性範囲内の条件として塑性歪を除外して弾性歪のみに対する全弾性歪エネルギーを一定とする条件を仮定している、この限界は曲線的で実験結果の直線限界よりも低くなっているが実用上は差支えないだろう。

高い平均引張応力と繰返応力をうけた材料の硬化は相当著しいものがあり、機械的性質が変化していることを表示したが、これらについては更に調査を行い後報に記述する予定である。

参考文献

- (1) 南大路, 高林. 機械学会論文集 7-29 (昭. 16-11) 1-5
- (2) 中西. 機械学会論文集 18-65 (昭. 27) 114
- (3) 大野. 機械学会論文集 30-212 (昭. 39) 449
- (4) 大野. 機械学会金沢地方講演会前刷 (昭. 41.9)
- (5) 西原. 機械学会論文集 18-65 (昭. 27)
- (6) " 機械学会論文集 7-29 (昭. 16)

(昭和41年6月15日受理)