539.389.4:539.431.3

鋼の回転曲げ塑性疲れ試験*

河本 実**, 伊吹幸彦**, 中村秀夫***

Rotating Bending Fatigue Tests of Steel
in the Plastic Rangeby Minoru KAWAMOTO, Yukihiko IBUKI,
and Hideo NAKAMURA

Constant stress and constant deflexion low cycle fatigue tests were carried out on 0.35% Carbon steel under the conditions of 110 rpm, 62 rpm and 62 rpm (air blast cooling) at room temperature, with a Wöhler type fatigue testing machine. Changes of vertical deflexion and horizontal deflexion at the loading end of test specimens were measured throughout the constant stress test; the change of stress, in another test. Process of crack initiation and propagation was also observed.

The main results obtained are as follows:

Effect of frequency and cooling was recognized in constant stress test, but not in another test. Changes of deflexion and stress showed perfectly opposite tendency. Process of crack initiation and propagation was quite different in the respective tests.

Moreover, both test results are compared and discussed on the basis of static bending test data.

1. 緒 言

最近の工業技術の進歩と弾塑性および塑性理論の発展に伴い、たとえば高压容器、航空機や自動車の部品、ガスタービンなどの動力機械、橋りょうその他の構造物などのように、材料が弾塑性あるいは塑性の応力あるいはひずみ状態で使用されることが少なからずおこり、したがって疲れの問題も必然的に塑性疲れ、すなわち高応力（あるいは大ひずみ）短寿命の疲れに関する研究が必要となってくる。それ以外にも最近特に盛んに行なわれている熱疲れの基礎的資料を提供する意味で、また疲れの機構そのものを解明するに足る資料を得るという意味でも、きわめて重要な意義をもつものである。このような観点から塑性疲れに関する研究もかなり行なわれており、興味ある実験結果も報告されている。またこれらに関する総説も一、二発表されているが⁽¹⁾⁽²⁾、本研究もこれらの範ちゅうに属するものである。

ところで塑性疲れと普通の疲れ現象との相違を考え

てみると、今日までに行なわれてきた金属の疲れに関する研究の大部分は、応力繰返し数が 10^5 以上を対象とするものであり、しかもその場合負荷される応力は、高くとも材料の降伏点を少し越える値をとるに過ぎず、耐久限度付近では材料の静的な弾性限度以下の値であるのが普通である。これに対して塑性疲れにおいては応力繰返し数が 10^4 以下の範囲を考察の対象とし、負荷する応力あるいはひずみは塑性域における値であり、その名の示すとおりに塑性域における疲れ現象そのものである。塑性疲れと普通の疲れとの大きな相違は以上の点にあるが、このために従来から行なわれている疲れ試験では問題とならなかった点が問題となってくる。たとえばヒステリシス エネルギーによる発熱の問題、応力あるいはひずみ繰回しのいずれを選ぶかという問題等である。前者についてみると応力が高いためにヒステリシス エネルギーが大きく、したがって発熱量も無視できぬものとなる。繰返し速度の大きい場合は特にそうであり、塑性疲れにおいては必然的に低繰返し速度の条件の下で実験を行なう必要がでてくる。また後者についてみると、弾塑性あるいは塑性域においては応力とひずみとの間に線形関係がなくなり、しかも繰返し応力をうけるか繰返しひずみをうけるかに

* 昭和 37 年 10 月 30 日 第 40 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 37 年 11 月 5 日。

** 正員、京都大学工学部。

*** 准員、京都大学工学部（京都市左京区吉田本町）。

よって材料のうける履歴や, 材料の内部におこる変化が異なってくるために, いずれの実験方法をとるかが問題となってくる。

本研究においては試験方式として回転曲げを採用したが, これは普通の疲れ試験において回転曲げ試験が最も一般的に行なわれているためであり, また回転曲げ塑性疲れの研究があまり行なわれていないためである⁽³⁾。回転曲げ方式を採用する場合特に考慮せねばならぬ問題は, 上に述べた発熱の影響を無視できぬ点であろう。それは引張圧縮やねじりの場合と異なり, 繰返し速度が必然的に大きくなるからである。この意味で本研究においてはこの点を明らかにするために, 繰返し速度の影響と冷却の影響とについて考察を加えることにした。

また実験方法としては定応力試験に対応するものとして定モーメント試験を, 定ひずみ試験に対応するものとして定たわみ試験を採用してこの両者について実験を行なったが, これは回転曲げであるために, 前者においては弾塑性あるいは塑性域における応力算定の困難さと, 試験中の試験片の形状変化による応力変化のために, 真の意味での定応力試験がほとんど不可能であるためであり, また後者においてもひずみの算定および設定の困難さのためである。しかしながら本論文においては, 設定モーメントから弾性式によって応力を計算し, この応力の値を一定に保ったという意味で, 以下においては定モーメント試験を定応力試験と称することにする。なおたわみのほうは応力のように簡単な計算でひずみに置換できないので, 定たわみ試験はそのままの名称で使用する。そしてこの両者のそれぞれについて考察を行ない, さらに両者を比較検討することによって定応力および定たわみ試験における塑性疲れ挙動を明確ならしめた。

また参考のために普通の疲れ試験もあわせ行ない, これとの比較も行なった。

第1表 材料の化学成分

材 料	化 学 成 分 %				
	C	Si	Mn	P	S
0.35% C 炭素鋼	0.35	0.16	0.59	0.026	0.017

第2表 材料の熱処理および常温における機械的性質

熱 処 理	引 張 試 験 結 果						曲 げ 試 験 結 果	
	上 降 伏 点 σ_{so} kg/mm ²	下 降 伏 点 σ_{su} kg/mm ²	引 張 強 さ σ_B kg/mm ²	真 破 断 力 σ_T kg/mm ²	伸 び ϕ %	絞 り ψ %	比 例 限 度 σ_p kg/mm ²	降 伏 点 σ_s kg/mm ²
830°C 30 分焼なまし	34.7	33.1	58.1	98.1	36.2	50.6	41.5	51.2

2. 実験材料および試験片

実験に使用した材料は 0.35% C 炭素鋼でその化学成分を第1表に, 熱処理および常温における機械的性質を第2表に示す。

試験片は直径 16 mm, 長さ約 6 m の圧延丸棒材から採取したもので, これに上記の熱処理を施した後機械仕上をしたものである。その形状および寸法を第1図(a)に示す。試験部分にテーパがついてあるのは次項で述べるように Wöhler 式疲れ試験機を使用するためであり, これによって応力一様部分を近似したのである。また試験片はチャッキング ロッドを使用するために試験片の中央部が最大応力部になるように製作されてある。チャッキング ロッドを用いて組立てたときの試験片全体(以下においてはこれを単に試験片, 第1図(a)に示す試験片を試験片本体と称することにする)の形状を第2図に示す。図に示すように荷重点から最大応力部までの腕の長さは 160 mm, また負荷装置をとめるボルトの先端から試験機に固定

(a) 塑性疲れ試験片

(b) 疲れ試験片

第1図 試験片の形状および寸法

① 試験片本体
② チャッキングロッド前部
③ チャッキングロッド後部

第2図 試験片全体の形状

する固定端までの長さは 315 mm で、後に述べるたわみはこの部分の先端のたわみを測定した値である。また以下において用いられる応力の値は、最大応力部における弾性学的に計算された公称応力値である。

なお第 1 図 (b) には参考のために行なった普通の疲れ試験において使用した試験片の形状および寸法を示す。

3. 実験装置および実験方法

使用した試験機は Wöhler 式片持回転曲げ疲れ試験機で、これによって定応力および定たわみの低繰返し速度短寿命の疲れ試験を行なった。そして定応力試験においては試験中のたわみの変化を、定たわみ試験においては応力の変化を測定した。

定応力試験はおもりを用いることによって行ない、試験中のたわみの変化はカセットメータで試験片先端の荷重方向およびそれに直角な水平方向についてそれぞれ測定した。

定たわみ試験は第 3 図にその概要を示すように、荷

- ④ 試験片本体
- ⑤ カセットメータ
- ⑥ 200 kg ループ ($f=0.0203P$)
- ⑦ ターンバックル

第 3 図 たわみ設定装置

重測定用のリングゲージとたわみ設定用のターンバックルとを用いて行ない、ターンバックルを操作することによって試験片の先端のたわみを一定値に保った。試験中の応力の変化は、リングゲージの読みから計算したものである。なお試験片先端のたわみは、一度ターンバックルによって設定すれば、試験中を通じて一定に保たれることはカセットメータによって確かめられている。

そして負荷に際しては、定応力試験においてはあらかじめ負荷装置に所定の荷重をのせて応力 0 の状態で試験機を作動し、一定の繰返し速度になるとすばやく荷重巻き下し装置によって負荷した。また定たわみ試

第 3 表 疲れ試験結果

負荷条件	実験条件	設定応力 σ kg/mm ²	設定たわみ mm		破壊までの 繰返し数 N
			縦たわみ δ_v	横たわみ δ_h	
定 応 力	110 rpm	67.1			365
		61.6			528
		53.9			1075
		51.5			1310
		45.2			3474
		41.1			6680
	62 rpm	68.3			258
		57.8			796
		54.1			1436
		43.4			4394
	62 rpm (冷却)	67.7			352
		56.5			1183
		53.3			1613
		44.0			4102
定 た わ み	110 rpm	26.0		27.15	354
		18.7		18.6	855
		12.2		6.4	3080
		8.3		4.4	7527
	62 rpm	26.65		27.6	316
		14.4		12.0	1363
		9.9		5.05	5163
	62 rpm (空冷)	28.85		28.95	247
		19.15		16.25	812
		15.10		12.25	1392
		8.10		3.8	7288
定 応 力	2680 rpm (小野式)	45.3			10300
		41.1			26400
		38.6			87400
		34.9			270000
		30.7			1227000
		29.5			1795700
		28.3			10000000

第 4 図 S-N 線 図

験においても試験機を作動して、一定の繰返し速度になった後にターンバックルによって所定のたわみに設定した。

試験温度は常温で、試験速度は 110 rpm および 62 rpm の 2 種を選び、さらに 62 rpm の繰返し速度においては圧縮空気を試験箇所へ吹きつけて空冷する場合も行った。これらは緒言において述べたように、繰返し速度および冷却の影響を調べるために行なったものである。なお実験は破壊までの繰返し数が 10^4 を越えない範囲にとどめた。

また参考のために小野式回転曲げ疲れ試験機を用いて普通の疲れ試験を行なったが、この場合の試験速度は 2860 rpm である。

4. 実験結果およびその考察

定応力および定たわみ塑性疲れ試験結果、ならびに普通の疲れ試験結果を第 3 表に示す。

4.1 定応力試験 **4.1.1 S-N 線図** (繰返し速度および冷却の影響) 縦軸に応力 σ kg/mm², 横軸に破壊までの繰返し数 N をとって片対数目盛に示したのが第 4 図である。図には塑性疲れ試験結果の他に、小野式疲れ試験機 (繰返し速度 2680 rpm) を用いて行なった普通の疲れ試験結果もあわせて示してある。

第 4 図を見ればわかるように、繰返し速度および冷却の影響は明らかにあらわれている。繰返し速度の影響を見ると、62 rpm と 110 rpm の結果から明らかにように S-N 曲線の形が異なっており、62 rpm では普通の S-N 曲線のように σ と $\log N$ が直線関係を示しているが、110 rpm では曲線関係を示している。そして応力の高いところでは 110 rpm のほうが強く、少し低くなると 62 rpm のほうが強くなっているが、さらに低いところではほぼ等しい強さをもつ傾向を示している。次に空冷の影響を見ると、図から明らかなように

第 4 表 定応力試験におけるヒステリシス エネルギーの値

実験条件	設定応力 σ kg/mm ²	横たわみ δ_h mm	ヒステリシス エネルギー E_H kg mm/mm ²
110 rpm	67.1	27.15	17.62×10^2
	61.6	20.30	12.50
	53.9	12.50	6.69
	51.5	11.05	5.69
	45.2	5.80	2.62
	41.1	4.05	1.65
62 rpm	68.3	27.35	18.68
	57.8	15.70	9.07
	54.1	11.30	6.12
	43.4	4.75	2.06
62 rpm (空冷)	67.7	24.40	16.52
	56.5	12.25	6.92
	53.3	9.20	4.90
	44.0	5.10	2.24

(δ_h は寿命の 1/2 における値)

うに同一繰返し速度の 62 rpm について、応力の高いほど冷却の効果が著しくあらわれ、冷却することによって寿命はかなり増加しているが、応力が低くなるとその効果はなくなりごく低いところでは寿命の差は認められない。しかも 110 rpm, 62 rpm および 62 rpm (空冷) の三つの異なった条件をもつ S-N 曲線が応力の低いところ、すなわち破壊までの繰返し数の大きいところ (ここでは $\sigma \approx 43$ kg/mm², $N = 5 \times 10^3$) ですべて一致する傾向を示しているが、これは普通の疲れ試験においては常温にて繰返し速度の影響がほとんど認められないという事実によく合致する。また普通の疲れ試験結果と比較すれば明かなように、試験条件に大きな相違があるにもかかわらず、応力の低いところ (塑性疲れに対して) では両者の S-N 曲線の傾斜はほとんど同じであり、試験条件に大きな差がなければ両者の S-N 曲線は連続した一つの曲線になるものと思われる。

ところで以上に述べた傾向が生じた原因として考えられるものにヒステリシスエネルギーによって生ずる試験片の発熱の影響がある。事実実験中、応力の高い場合においては試験箇所を手をふれることができないほどに試験片の表面の温度は高くなっており、応力の低い場合においても手に十分感じるほどに温度は上昇していた。さてヒステリシスエネルギーはヒステリシスループの面積によって代表されるものであり、今これを E_H であらわすものとすれば

$$E_H = K \sigma \delta_h \dots \dots \dots (1)$$

で与えられる。ここに σ は応力、 δ_h は回転のために生ずる試験片の横たわみ (ここでは試験片先端の横たわみ) であり、 K は試験片の形状、負荷装置、たわみ測定装置およびヒステリシスループの形状に関する係数である。この E_H を用いて上の傾向を説明するの

第 5 図 σ と E_H との関係 (定応力試験)

であるが、比較に際しては、試験片形状および実験装置は同じであり、しかもほぼ同じ応力段階について行なうために、ここでは上述の定数 K をのぞいた

$$E_H' = \sigma \delta_h$$

を一つの比較すべき量として、この値をもってヒステリシス エネルギーと定義する。そして以下においては E_H' を改めて E_H と記する。

次項において明らかになるように横たわみ δ_h は試験中を通じて多少変化しているが、近似的には寿命の大部分を通じて寿命の半分における値をとると考えてよい。そこでこの δ_h 値をもって E_H を求め、この E_H に関して比較することにした。 δ_h およびそれから計算した E_H の値を第 4 表に、 σ と E_H との関係を片対数目盛で第 5 図に示す。第 5 図から明らかなように応力の低いところでは 110 rpm, 62 rpm および 62 rpm (空冷) のいずれの場合においても σ - E_H 曲線は一致しており、これは第 4 図の傾向と合致する。応力が高くなると同じ応力段階に対してヒステリシス エネルギー E_H は 110 rpm, 62 rpm, 62 rpm (空冷) の順で大きくなり、 E_H が大きいほど第 4 図から明らかなように寿命は短くなっている。またそれ以上の応力になると 62 rpm における $\sigma=68.3 \text{ kg/mm}^2$ の点をのぞけばやはり E_H の大きいほど寿命は短くなっている。そしてヒステリシス エネルギーと破壊までの繰返し数との関係を示す第 6 図から明らかなように、62 rpm における $\sigma=68.3 \text{ kg/mm}^2$ に相当するヒステリシスエネルギーの点をのぞけばすべての E_H - N の関係が両対数目盛で一直線になることを考えると、実際はこの応力に対するヒステリシス エネルギーの値もかなり高いと考えられ、したがって第 5 図の 62 rpm における $\sigma=68.3 \text{ kg/mm}^2$ に相当する点も多少右手に移動することになり第 4 図の説明がつく。すなわちヒステリシス エネルギーの量の

第 6 図 E_H と N との関係
(定応力試験)

大きいほど、換言すれば試験片に生ずる発熱量が大きいほど寿命は短くなる。

次に第 5 図について考えよう。応力の低いところではいずれの場合においてもエネルギーの量に差はないが、応力が高くなるとその差があらわれてくる。110 rpm と 62 rpm とを比較すると、110 rpm においては繰返し速度が大きいために熱の発散が 62 rpm における場合よりも少なく、試験片に蓄積される熱が多くなり、したがって試験片の温度上昇が著しく、その結果試験片の変形量も大きくなる。そのためにエネルギー量が多くなる。62 rpm と 62 rpm (空冷) の場合においても同様に、62 rpm (空冷) においては空冷することによって熱の発散が容易になり、その結果上と逆に考えてエネルギー量が少なくなる。応力の高い場合の 110 rpm と 62 rpm においては、110 rpm の場合熱の蓄積量が多いために試験片の温度が青熱ぜい性があらわれるような範囲にまで上がり、その結果変形量が少なくなつて 62 rpm におけるよりもエネルギーの量が少なくなったものと考えられる。このように考えれば第 5 図に示される傾向は自ら明らかになる。

また第 6 図に示すように、ヒステリシス エネルギー E_H と破壊までの繰返し数 N とが、両対数目盛で条件のいかににかかわらず一直線上にならぶのは興味ある事実で、結論的にいえばエネルギー量が等しい条件下においては、繰返し速度の影響や冷却の影響はあらわれないということになる。

4.1.2 試験中のたわみの変化 定応力の片持回転曲げ試験においては、荷重方向に生じる縦たわみとそれに直角な水平方向に生じる横たわみとがあり、前者はヒステリシス ループの主柱になる動弾性係数に関係し、後者はヒステリシス ループの横幅すなわち塑性ひずみに起因して生ずると考えられているが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、後に述べるように、この考え方はさらに検討を加える必要があるように思われる。しかしながら横たわみが塑性ひずみに起因することは否定できず、したがってヒステリシス エネルギーが前項で述べた (1) 式であらわされるのは明らかである⁽⁶⁾。

定応力試験中を通じて縦たわみおよび横たわみが、繰返し数の増加に従っていかに変化するかの一例を第 7 図に示す。上図は縦たわみを、下図は横たわみをそれぞれ縦軸に、繰返し数を横軸にとって示したものであり、62 rpm における例であるが、110 rpm および 62 rpm (空冷) にても本図と同様な変化を示し、本質的に異なった傾向を示していないので、以下の記述はいずれの場合においてもあてはまると考えてよい。

まず縦たわみの変化について見よう。図において

$n=1$ の点は設定応力に対応する静たわみを参考のために示してあるが、この点をのぞけばいずれの応力に対してもたわみは寿命のごく初期において著しく増加し、ついでやや減少しながら寿命の大部分を通じてほぼ一定の値をとり、そして破断前において激増している(図には破断点およびその近辺の点は示していないが、これは試験箇所になきき裂が発生すると、試験片先端の振れが著しくなり、正確なたわみの値を読み取れないためである)。これは初め負荷することによって変形は増加していくが、しだいにその増加分が塑性変形のために生ずる材料の変形に対する抵抗(いわゆる加工硬化)と互に打消しあってほぼ一定の値をとり、明確なき裂が発生するとそこに応力が集中してたわみが激増するものと考えられる。

次に横たわみの変化を見るに、第7図から明らかなようにこの場合も縦たわみと同様に初めたわみは増加するが、たわみがピークに達すると縦たわみよりは著しい割合で減少をつづけ、応力の高くなるにつれて定常状態はあらわれにくい、それでもほぼ一定の値を保っている。そして破断前にいたるとやはり増加している。また横たわみは一定応力下においては、(1)式から明らかなようにヒステリシス エネルギーをあらわしているから、ヒステリシス エネルギーも繰返し数の増加とともに上述の変化を示すものと考えられ、定応力下においては変形に対する材料の抵抗はヒステリシス エネルギーを減少せしめる傾向にあることがわかる。

以上のたわみの変化において注意すべきことは、縦たわみ横たわみとも曲げ降伏点以下の応力 $\sigma=43.4 \text{ kg/mm}^2$ においても降伏点以上の応力における同様の变化を示すことであり、このことは定応力回転曲げ塑性疲れにおいては試験片表面のごく一部が塑性域に

はいれば、他の部分がいかなる領域にあらうとも塑性疲れ挙動を示すことを意味している。

また縦たわみと横たわみの繰返し数に対する変化が同一でないという事実、および高応力の $\sigma=68.3 \text{ kg/mm}^2$ においては縦たわみよりも横たわみの値が大きいという事実は、縦たわみおよび横たわみとヒステリシスループとの関連性についてさらに検討する必要があることを示しているものと思われる。

4.1.3 き裂の発生成長のようなす き裂の発生成長のありさまを見るに、いずれの場合のいずれの応力段階においても、負荷されると徐々に試験箇所のすべての部分で円周方向にすべり線があらわれ、繰返し数が増加するに従って著しくなり、試験片表面の光沢はなくなっていく。繰返し速度 110 rpm および 62 rpm においては、応力の高い場合(ここでは $\sigma \geq 60 \text{ kg/mm}^2$)、寿命の約 80~90% のところで見た眼には突然き裂らしきものが円周方向に生じ、すぐに明らかなき裂となり、それと同時に試験片先端の振れが著しくなって破断にいたる。応力の低い場合には寿命の約 50~60% のところで円周方向に他のすべり線とは異なった1本の線がはいり、繰返し数の増加とともにその線がはっきりとしてきて、寿命の約 90% をすぎたところでき裂になり、き裂の成長とともに先端の振れが大きくなって破断にいたる。

一方 62 rpm (空冷) の場合は、応力の大小にかかわらず寿命の約 90% までき裂らしきものはあらわれず、これがあらわれると直ちにき裂に成長し、あとは上と同様にして破断にいたる。これは冷却することによって試験片表面が多少とも硬化するために、き裂があらわれにくいものと思われる。

以上のいずれの場合においてもき裂がひとたび発生

すれば、他の箇所に別のき裂が発生することはなく、初めあらわれたき裂から破断にいたる。これはき裂が生ずるとそこに応力集中がおこり、さらにき裂を成長せしめるためと考えられる。またき裂らしきものがあらわれても、たわみそのものには変化はほとんどおこらず、明確なき裂が生じてたわみが増え始め、破断にいたる。

4.2 定たわみ試験 4.2.1 $\delta-N$ 線図 (繰返し速度および冷却の影響) 定たわみ試験においても、第3図に示されるような途中に接点をもつたわみ設定装置を使用したために、縦たわみと横たわみが生じる。そしてその荷重方向は縦

第7図 定応力試験におけるたわみの変化 (62 rpm)

たわみの方向と一致しないが、荷重方向と鉛直方向とのなす角が極小であるために、以下においては設定縦たわみ横たわみを、そのまま 4・1 において述べた縦たわみ横たわみと同じものとみなして考察をすすめることにする。

第 8 図は縦軸に縦たわみ δ_v mm を、横軸に破壊までの繰返し数 N をとって両対数目盛で示したものであるが、図から明らかなようにすべての点が一直線上にある。これは定たわみ試験においては繰返し速度および冷却の影響が現われないことを意味する。

また 4・1 で述べたと同様にして計算したヒステリシスエネルギーの値を第 5 表に示す。定たわみ試験においては、次項において明らかになるように、試験中を通じて応力は変化するが、寿命の大部分を通じてほぼ一

第 5 表 定たわみ試験におけるヒステリシスエネルギーの値

実験条件	設定たわみ mm		応力 σ kg/mm ²	ヒステリシスエネルギー E_H kgmm/mm ²
	縦たわみ δ_v	横たわみ δ_h		
110 rpm	26.0	27.15	65.5	17.78×10^2
	18.7	18.6	57.3	10.68
	12.2	6.4	48.3	3.09
	8.3	4.4	39.4	1.76
62 rpm	26.65	27.6	72.8	20.07
	14.4	12.0	54.4	6.52
	9.9	5.05	44.7	2.26
62 rpm (空冷)	28.85	28.95	78.3	22.65
	19.15	16.25	63.6	10.33
	15.10	12.25	54.5	6.68
	8.10	3.8	43.3	1.65

(σ は寿命の 1/2 の値)

第 8 図 δ_v - N 線図

定であるために、表における値は寿命の 1/2 における応力値をもって計算した値である。この表から縦軸に縦たわみ δ_v mm、横軸にヒステリシス エネルギー E_H kg mm/mm² をとって両対数目盛で示したのが第 9 図である。図から明かなように δ_v と E_H との関係は条件のいかんにかかわらず両対数値でほぼ一直線をなす。すなわちこれはいずれの条件下においても、同じ縦たわみに対するヒステリシスエネルギーが等しく、したがって試験片の発熱量も等しいことを意味し、このために第 8 図に示されるように繰返し速度と冷却の影響が現われないといえる。

ところで Coffin らは定ひずみ塑性疲れにおいて、塑性ひずみ振幅 ϵ_p と破壊までの繰返し数 N との間には $\epsilon_p N^k = C$ (2) なる関係が成立することを多くの材料について実験的に見出しているが⁽²⁾⁽⁷⁾、この式を本実験結果にあては

第 9 図 δ_v と E_H との関係

第 10 図 δ_h - N 線図

第 11 図 定たわみ試験における応力の変化 (62 rpm)

めてみよう。もちろんここでは ϵ_p のかわりに塑性ひずみによって生ずる横たわみ δ_h を用いるわけであるが、縦軸に横たわみ δ_h mm を、横軸に破壊までの繰返し数 N をとって両対数目盛で示した第 10 図からわかるように、 δ_h と N とは図において一直線にならず、(2) 式と同様の関係式が成立しないことを示している。一方第 8 図から明らかなように、縦たわみ δ_v と破壊までの繰返し数 N との間には (2) 式と同様の関係式が成立することがわかる。しかも実験点のばらつきも少なく、したがって定たわみ試験においてはデータの整理にあたって δ_v - N 線図を用いればよいようである。参考のためにこの直線の方程式を求めると

$$\delta_v N^{0.369} = 62.4 \quad \dots\dots\dots (3)$$

4.2.2 試験中の応力の変化 第 11 図は縦軸に応力 σ kg/mm² を、横軸に繰返し数 n をとって、定たわみ試験において繰返し数の増加とともに応力がいかに変化するかを示したものであるが、これは定応力試験におけるたわみの変化を示した第 7 図と同様に 62 rpm の場合の例であり、また $n=1$ は静曲げ試験の結果を図示したものである。図から明らかなように、応力の高い場合と低い場合とにおいてはそれほど明らかではないが、いずれの場合にも $n=1$ の点を除けば、まずたわみを設定すると応力は降下し、ついでやや上昇しつつ定常状態にいたり、破断前になると急激に減少している。これは 110 rpm および 62 rpm (空冷) の場合においても同様であるが、62 rpm (空冷) の場合には降下後の上昇の割合が大きく空冷の効果が現われているようである。またこのように一度降下した後再び上昇する傾向を示すのは、やはり加工効果の影響を示すものと考えられ、4.1.2 で述べたと同様の説明が可能である。すなわち、たわみを設定すると繰返し数の増加とともに応力が降下して一定値にいたり、ついで加工効果の影響があらわれて応力が上昇してほぼ一定の状態を保ち、破断前になるとき裂の発生とあいまって応力は降下する傾向を示すのである。

4.2.3 き裂の発生成長のようす いずれの条件のいずれの応力段階においても、定応力試験における同様にたわみを設定すると、繰返し数の増加に従って円周方向に数多くのすべり線が発生してきて試験片表面の光沢がなくなる。そして寿命の 50% 以上になると表面はますますあれてくるが、あれが著しいためにき裂らしいものを判別できないうちに寿命の 80~90% にいたる。そこにいたって初めてそれと明らかにわかるき裂が 2, 3 箇所が生じ、それとともに応力は減少する傾向を示す。そして試験片先端の振れはしだいに著しくなり、破断前には特に横方向に大きくなって破

断にいたるが、定応力試験におけるよりも大きく振れる期間は長い。

以上に述べたことは 110 rpm, 62 rpm および 62 rpm (空冷) のいずれの場合にもあてはまり、定応力試験におけるような明確な区別は見られなかった。

4.3 定応力試験と定たわみ試験との比較 4.3.1

S-N 線図と δ_v - N 線図 定応力試験における S-N 線図、定たわみ試験における δ_v - N 線図の両者を比較する。以下に述べるのは 62 rpm における例であるが、他の場合も全く同様な傾向を示している。

第 12 図は (a), (b), (c) の 3 図からなり、(a) 図は縦軸に応力 σ kg/mm²、横軸に縦たわみ δ_v mm をとった σ - δ_v 線図である。図中の曲線は静的な応力-たわみ線図であり、線上の白丸および黒丸は定応力および定たわみ試験における実験点で、設定応力および設定たわみに対応する静たわみおよび静応力の位置にし

(a) σ - δ_v 線図

(b) S-N 線図

(c) δ_v - N 線図

繰返し速度 62rpm, $n=0$

第 12 図

るしたものである。(b) 図は縦軸に (a) 図の応力に対応して応力 σ kg/mm² を、横軸に破壊までの繰返し数 N をとって片対数目盛で示したものであり、

(c) 図は縦軸に (a) 図の縦たわみに対応して縦たわみ δ_v mm を、横軸に (b) 図の破壊までの繰返し数に対応して破壊までの繰返し数 N をとって片対数目盛で示したものである。そして (b) 図および (c) 図における定応力試験の $S-N$ 曲線および定たわみ試験における δ_v-N 曲線は、実験中の定応力および定たわみをそのまま示したものであるが、定たわみ試験の $S-N$ 曲線および定応力試験の δ_v-N 曲線は、それぞれ静的な応力-たわみ曲線の関係から求められたものである。

静的な $\sigma-\delta_v$ 線図をもとにして定応力試験と定たわみ試験とを比較すると、第 12 図から明らかなように、

(b) 図についてみると降伏点以上の応力においては定応力の寿命のほうが定たわみのそれよりも大きく、降伏点以下になるとそれと逆の傾向を示している。そして (c) 図についても同様に、降伏点に対応するたわみの下限よりも大きなたわみに対しては、定応力の寿命のほうが定たわみのそれよりも大きく、それ以下のたわみに対しては定たわみの寿命のほうが定応力の寿命よりも大きい。

第 13 図 σ と E_H との関係 (62 rpm)

第 14 図 δ_v と E_H との関係 (62 rpm)

第 13 図は縦軸に定応力試験においては設定応力を、定たわみ試験においては設定たわみに対応する静応力を取り、横軸には第 4, 5 表に示されたヒステリシス エネルギーをとって片対数目盛で示したものである。図から明らかなように第 12 図 (b) に示される傾向と合致しており、ヒステリシス エネルギーの値の大きいほうが寿命は短くなっている。また第 14 図は縦軸に定たわみ試験においては設定たわみを、定応力試験においては設定応力に対応する静たわみを取り、横軸にヒステリシス エネルギーをとって両対数目盛で示したものであるが、上に述べたと同様に本図は第 12 図 (c) の傾向によくあっている。すなわち第 12 図に示される傾向は、ヒステリシス エネルギーを考慮に入れば十分に説明される。

さらに第 12 図 (b), (c) の傾向を現象的に説明

(a) $\sigma-\delta_v$ 曲線

(b) $\sigma-n$ 線図 (定たわみ)

(c) δ_v-n 線図 (定応力)

繰返し速度 62 rpm

第 15 図

してみよう. 第 15 図は第 12 図と全く同様な手順によって描いたものであるが, (a) 図は第 12 図 (a) と同一であり, (b) 図は定たわみ試験における応力の変化を横軸に繰返し数 n をとって, 特に $n=1$ には設定たわみに対応する静応力をとってしるしたものである. また (c) 図は定応力試験におけるたわみの変化を (b) 図と同様にしるしたものである. 設定応力あるいはたわみが降伏点以上の場合, 定応力においては第 15 図 (c) から明らかなように, 動たわみは静たわみの値よりも小さく, 定たわみにおいては第 15 図 (b) から明らかなように, 動応力は静応力の値よりも小さい. 一方降伏点よりも小さい値をとるときは, 第 15 図 (b), (c) から明らかなように上に述べた傾向とは逆に, 定応力においては動たわみは静たわみよりも大きな値を取り, 定たわみにおいては動応力は静応力よりも小さな値をとっている. すなわち定応力と定たわみとを比較する場合, 第 12 図 (b), (c)

および第 15 図 (b), (c) から明らかなように, 設定応力あるいはたわみに対応する静たわみおよび静応力と動たわみおよび動応力とを比較し, 静的な値よりも動的な値の大きいほうが寿命は短く, 動的な値よりも静的な値の大きいほうが寿命は長くなっている. したがって第 15 図により定応力および定たわみ寿命の大小を予知することができる.

また第 16 図は参考のために, 定応力試験における縦たわみおよび定たわみ試験における応力の変化が, ほぼ一定になる寿命の半分におけるそれぞれの値をもとにして, 第 12 図と同様にして図示したものである. (a) 図の破線は定応力における動的応力-たわみ線図を, 実験は定たわみにおけるそれを示している. そして (b) 図においては定応力における動的応力-たわみ線図をもとにし, (c) 図においては定たわみにおけるそれをもとにしてそれぞれの $S-N$ 線図, δ_v-N 線図を描いたものであるが, (b) 図から明らかなように定応力と定たわみとを定常状態におけるたわみ, および応力値をとって $S-N$ 線図で比較すればほぼ同一であることがわかる.

なお第 4 表と第 5 表とから, 定応力および定たわみ試験におけるヒステリシス エネルギー E_H と, 破壊までの繰返し数 N との関係を両対数目盛で示したのが第 17 図である. 図から明らかなように, これらの実験点はほぼ一直線上にのり, したがってヒステリシス エネルギーをとれば, 定応力定たわみのいかに問わず, また試験条件のいかに問わずにその寿命は同一であることがわかる. またこの事実は第 13, 14 図において行なったヒステリシス エネルギーによる比較の正当性を示している.

4.3.2 たわみおよび応力の変化, その他 定応力試験におけるたわみおよび定たわみ試験における応力の変化については, 既に 4.1.2 および 4.2.2 におい

て詳細に述べてあるが、ここではその両者の変化の状態を比較してみると、第 15 図 (b), (c) から明らかなように、たとえば破断前のたわみは増加するが応力は減少する。また $n=1$ の点をのぞく初期のうちはたわみは増加するが応力は減少するというように、たわみと応力の変化は全く逆の傾向を示しており、静たわみ静応力を考慮に入れても同様である。

次に繰返し速度と冷却の影響については、4・1・1 および 4・2・1 にて述べたように、定応力試験においては両者の影響は明らかに認められるが、定たわみ試験においては全然認められない。これは定応力試験と定たわみ試験とにおいて材料のうける履歴が異なることによるものと思われるが、換言すれば定たわみ試験におけるよりも定応力試験においては試験条件に著しく敏感であることを示している。

最後にき裂の発生成長の過程についてみると、これも 4・1・3 および 4・2・3 において詳述してあるが、定応力と定たわみとにおける最も大きな差は、前者においてはただ 1 箇所にかき裂が発生して破断にいたるが、後者においては 1, 2 箇所に別々にかき裂が発生して破断にいたる点である。その他の細かい点は既述のとおりである。

5. 結 言

0.35% C 炭素鋼を使用して、常温において 110 rpm, 62 rpm および 62 rpm (空冷) の三つの条件の下で定応力および定たわみの片持回転曲げ疲れ試験を行ない、高応力(または大たわみ)短寿命の塑性疲れ挙動を明らかにした。得られたおもな結果は下のとおりである。

(1) 定応力試験においては繰返し速度と冷却の影

響は明らかに認められたが、定たわみ試験においては認められない。

(2) 定応力および定たわみ試験の結果を静的な応力-たわみ線図に基いて比較したところ、S-N 線図では降伏点以上の応力に対しては定応力における寿命が定たわみにおけるそれよりも大きく、降伏点以下の応力では逆に定たわみにおける寿命が長くなっている。 δ_0 -N 線図においても同様の傾向を示す。

(3) (1), (2) に述べた傾向は、ヒステリシス ループの面積によってあらわされるヒステリシス エネルギーを考えることによって説明されるが、ヒステリシス エネルギーを用いれば、定応力定たわみあるいは試験条件のいかなを問わず、同一のヒステリシス エネルギーに対して同一の寿命をもつ。

(4) 定応力試験においては試験中を通じてたわみが増加し、定たわみ試験においては応力が増加するが、その変化のようすは全く逆の傾向を示す。そしてその変化のようすから (2) に述べた傾向をあらかじめ知ることができる。

(5) 定応力および定たわみ試験におけるき裂の発生成長のようすは多少異なっている。

文 献

- (1) P.P. Benham, *Metallurgical Review*, 3-11 (1958), 203.
- (2) J.F. Tavernelli & L.F. Coffin, Jr., *Trans. ASM*, 51 (1959), 438.
- (3) 中川・入江・ほか, 関西支部第 36 期定時総会講演会前刷, (昭 36-3), 7.
- (4) 西原・樺木・田賀, 機械学会論文集, 5-20 (昭 14-8), I-34.
- (5) B.J. Lazan & T.Wu, *Proc. ASTM*, 51 (1951), 649.
- (6) N.P. Inglis, *Metallurgist*, 3 (1927-2) 23.
- (7) L.F. Coffin, Jr. & J. Tavernelli, *G.E. Research Lab., Report No. 58-RL-2100* (1958-10).

国際技能五輪大会 日程決定

技能五輪大会事務局にこのほどもたらされた情報によるとアイルランド、ダブリン市(場所はカレッジ・オブ・テクノロジー)で開かれる第 12 回国際技能五輪大会は 7 月 7 日に開会式を行ない、8 日から 13 日までの 6 日間(最長競技時間 33 時間 15 分)にわたって競技を行なうことになった。

この大会の技術代表および技術補助員の到着は 6 月 29 日、公式代表および選手の到着は 7 月 6 日、競技結果に対する表彰式は 7 月 18 日、帰国出発は 7 月 19, 20 日の予定が組まれている。

なお、ダブリン大会の競技課題選考専門委員会では、職種ごとに次の 7 グループにわかれることに決定

した。

▽第 1 グループ=機械組立工, 旋盤工, フライス盤工, 機械製図工, ▽第 2 グループ=電気溶接工, 酸素アセチレン溶接工, 配管工, 建築板金工, 木型工, ▽第 3 グループ=機械鍛造工, 構造物鉄工, 鋳物工, ▽第 4 グループ=家具工, 建具工, 建築大工, ▽第 5 グループ=れんが積工, 石工, 塗装工, ▽第 6 グループ=電工, 電機組立工, 第 7 グループ=銀細工工, 宝石工。

なお、このため日本の代表を決める大会は 5 月 11, 12 日の両日に東京において全国から 15 職種, 146 名の選手が集り東京都中央職業訓練所ほか 7 競技場で決定される。
(服部 敏夫)