重複荷重疲労強度に関する一考察*

川 田 雄 —** 中 沢 —**

A Study on the Fatigue Life under Multiple Repeated Stresses

by

Yūichi KAWADA and Hajime NAKAZAWA

(The Tokyo Metropolitan University)

Rotary bending fatigue tests were carried out with specimens of 0.25% carbon steel, varying stress amplitude in two stages. After receiving any stress cycles at the first stage, the stress amplitude was changed to the second stage and fatigue tests were carried out till the test pieces were fractured. When the stress amplitude of the second stage is higher than that of the first stage, the cumulative cycle ratio exceeded unity, sometimes reaching infinity. When the stress amplitude of the second stage is lower than that of first stage, the cumulative cycle ratio exceeded also unity or was equal to unity.

Now, suppose that a material which received the repeated stress of the first stage by N_1 cycles, was fractured after receiving the same stress amplitude by N_2 cycles, then we are compelled to consider that the material was damaged by the repeated stress of the first stage and the residual life was shortened. In the present experimental results, the material was not only damaged but also strengthened by the repeated stress of the first stage if the repeated stress amplitude of the second stage is higher than that of the first. Therefore, we can not predict whether the repeated stress of the first stage damaged the material or not if the repeated stress amplitude of the second stage to be followed is not known.

Such a phenomena will be explained if we consider the process of fatigue as follows. The material is hardened gradually by the repeated stress, i.e. the material becomes brittle and proceed the way to fracture, reducing the residual life. At the same time, the material which has been hardened by the repeated stress receives artificial strain ageing by the action of the repeated stress and the material is strengthened, prolonging the life before cracks originate. These two actions coexist in the process of fatigue. By the change of the repeated stress from the first stage to the second which is, e.g. higher than the first, both weakening and strengthening actions are increased. If, in this case, the increment of both actions are the same, the cumulative cycle ratio is equal to unity, but if the increment of the strengthening action is larger than that of the weakening action, cumulative cycle ratio will exceed unity. (Received March 12, 1957)

1. ま え が き

材料の疲労において応力振幅の異なる繰返応力が、あい前後して加わる、いわゆる重複繰返応力における破壊までの寿命については、古くから多くの実験が発表されている。これらの実験は、いずれも累計回数比 $\Sigma(n_i/N_i)$ が 1 になるという簡単な関係が満されるかどうかを確かめることが一つの目標になっているようであるが、従来の結果の多くは、このような簡単な関係が成立しないことを示している。たとえば、重複繰返応力の最も簡単な場合の 2 段 2 重の場合においては、

2 次応力が 1 次応力より高い場合は累計回数比が 1 以上となり、2 次応力が 1 次応力よりも低い場合は累計回数比が 1 以下になるという結果が一般には多いようであるが、必ずしもこれと合致しない結果も発表されている。

材料の種類、熱処理条件、1 次応力、2 次応力の大きさの関係などによって累計回数比が異なることは当然であり、これらの関係が明らかにされるためには、なお今後この種の実験が多数発表されることが必要である。このような考えのもとに筆者らも実験を行ったが、必ずしも従来の結果と一致しない結果も得られているので、ここに発表することにした。

* 原稿受付 昭和32年3月12日 昭和32年3月21日 西原教授退官記念講演会において発表

** 正員 東京都立大学工学部

重複繰返応力による疲労が累計回数比の考え方，すなわち簡単な疲労度の考え方で説明できないことはいまや明らかであるが，これにかわるべき理論的な説明はいまだなされていない．筆者らはいまだ定性的な境を脱しない段階ではあるが，過小応力，過大応力による寿命についての実験結果を一応説明できる仮説をも考えついたので，あわせて発表するしだいである．

2. 供試材料ならびに実験方法

本実験に使用した材料は日本工業規格の機械構造用炭素鋼S25Cに該当するもので，その化学成分は Table 1 に，機械的性質は Table 2 に示すとおりである．素材は直径 18mm の丸棒で，これを Fig. 1 に示すような供試部分の直径 12mm の疲れ試験片に機械加工し，熱処理は特に行わないで納入状態のままで試験した．使用した試験機は小野式回転曲げ疲労試験機で，回転数は毎分 1400 回転である．

実験は，まず試験片15本を用いて材料の S-N 曲線を求めた．次に 2 段 2 重重複繰返応力の実験を行った．この場合 1 次応力はこの材料の疲れ限度 28 kg/mm^2 より 1 kg/mm^2 高い 29 kg/mm^2 と 5 kg/mm^2 上の 33 kg/mm^2 にとった．1 次応力の繰返応力比，すなわち，実際に加えた回数と破断までの回数との比は，25%，50%，75% の 3 種類にとった．2 次応力は 1 次応力よりも高い場合と低い場合にとり，この 2 次応力で破壊するまでの回数を調べた．

Table 1. Chemical composition of tested material.

Chemical composition (%)							
C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr
0.25	0.50	0.26	0.027	0.017	0.20	0.80	0.10

Table 2. Mechanical properties of tested material.

Tensile strength (kg/mm^2)	Yield point (kg/mm^2)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Brinell hardness
55.2	38.3	32	60	156

Fig. 1. Form of specimen.

Fig. 2. S-N curve of virgin material.

Fig. 3.

3. 実験結果

まず，この材料の S-N 曲線を求めた結果を示すと Fig. 2 のとおりである．この結果によると応力の高いところでは破壊までの回数のばらつきは少ないが，応力の低いところではばらつきがやや大きいようであった．結局，図のように S-N 曲線を引くのが最も合理的と考えられる．疲れ限度は 28 kg/mm^2 と考えられる．

次に，2 段重複の疲労試験結果を Fig. 3～6 に示す．Fig. 3 は 1 次応力 33 kg/mm^2 の場合の試験結果を処女材料の S-N 曲線とともに示したもので，横軸には 1 次応力を受けたものを処女材料とみなして，2 次応力の繰返回数だけを示してある．

この結果のうちで，まず 2 次応力が 1 次応力よりも高い場合を見ると，1 次応力の回数比が 25% の場合はすぐ上の 2 次応力に対してほとんど損傷を与えていないが，さらに高い 2 次応力に対してはやや損傷を与えている．しかし 1 次応力の回数比が 50% になると，すぐ上の 2 次応力に対しては損傷を与えないばかりでなく，かえって強化している．1 次応力の回数比が 75% になると，すぐ上の 2 次応力に対しては損傷を与えるが，さらに高い 2 次応力に対してはほとんど損傷を与えていない．

次に、2次応力が1次応力よりも低い場合をみると、1次応力の回数比25%の場合は2次応力に対して全く損傷を与えないのみならず、むしろ強化しており、疲れ限度も処女材料が 28 kg/mm^2 であるのに対して 29.7 kg/mm^2 に上昇した。1次応力の回数比が50%では強化も損傷もほとんど認められず、75%になるとやや損傷を与えているようである。

Fig. 4 は同じ結果を横軸には1次応力の回数比だけ2次応力をすでに与えたと考え、その上に2次応力で与えた回数を加えたものを示してある。したがって、

Fig. 4.

Fig. 5.

Fig. 6.

累計回数比が1で破壊するものならば実験点は処女材料の S-N 曲線上にのるはずである。この結果をみると、1次応力の回数比のいかにかわらず、また、2次応力が1次応力の上でも下でも累計回数比は1以上または1に等しいことがわかる。

Fig. 5 は1次応力が 29 kg/mm^2 の場合の結果の Fig. 3 に相当する図であって、横軸には2次応力の繰返回数だけを示してある。この結果は2次応力が1次応力よりも高い場合も低い場合も2次応力に対しては損傷を与えておらず、2次応力が1次応力よりも高い場合はいくぶん強化作用を与えているように考えられる。特に1次応力の回数比が25%で、2次応力が1次応力よりも 1 kg/mm^2 高い 30 kg/mm^2 の場合は2次応力の繰返回数が 10^7 回に達しても破壊をせず、もし2次応力を1次応力と同じにした場合は約 7.5×10^5 回で破壊すべきものが、さらに 1 kg/mm^2 だけ高い応力に切り替えると 10^7 回以上の繰返しに耐えるという興味深い結果を得た。

Fig. 6 は1次応力が 29 kg/mm^2 の場合の Fig. 4 に相当する図で、2次応力が1次応力よりも高い場合は累計回数比は1以上になっていることがわかる。

4. 繰返応力による疲労の進行についての一考察

今回の実験結果のうち、2次応力が1次応力よりも高い場合に累計回数比が1以上になるということは、すでに周知の結果である。しかし、1次応力が疲れ限度のすぐ上でその回数比が25%という少ない場合で、2次応力もまた1次応力のすぐ上の場合には、2次応力で 10^7 回以上の回数に耐えるということは、同じ傾向とはいえず興味のある結果である。また、2次応力が1次応力よりも小さい場合は、いわゆる過大応力の影響で累計回数比が1以下になるという結果の発表が多いのであるが、今回の実験では累計回数比が1以上になった。材料の状態によっては、このようにあい反した結果の得られることもあるということを示すものであろう。

さて、1次応力のある回数 n_1 だけ繰返した後に2次応力として1次応力と同じ応力を継続して n_2 回繰返して破断したとする。この場合、1次応力はその材料を損傷し、その材料の残りの寿命を短縮したと考えざるをえない。しかるに1次応力を

n_1 回繰り返した後に 2 次応力として 1 次応力よりも高い応力を繰り返して、今回の実験結果のように初めから 2 次応力を繰り返して破断するまでの回数よりも、さらに多くの回数に耐えたとすると、この場合、1 次応力はその材料を損傷せしめたのではなくて、反対に強化したということになる。すなわち、1 次応力が材料を損傷せしめたか強化したかということは、その後続く 2 次応力が決らなければわからないのである。

このような現象は疲れの進行過程を次のように考えることによって初めてなっとくされるものである。すなわち、筆者らは繰返応力による疲労の過程を次の二つから成り立つものとする。ただし、材料は筆者らが今回の実験に使用したような鋼を対照とする。

(1) まず材料は応力の繰返しにより加工硬化の作用を受けしだいにぜい化し、遂にある繰返回数後に破断に至るものとする。この過程は次のように考えてもよい。応力の 1 サイクル中に描くヒステリシスループの面積は、応力繰返回数とともに硬化作用により減少してゆくが、この面積に相当するエネルギーの大部分は熱となり、一部分は材料の内部に蓄積せられ、その蓄積されたエネルギーが材料に固有のある量に等しくなったときに材料に微細な亀裂を生じ、この亀裂が進展して遂に材料が破断する。

(2) 塑性加工を受けた鋼には時効の現象があることは周知のことで、室温においても、あるいは低温にて焼鈍して人工時効を行っても、硬度の昇降、降伏点の昇降あるいは疲れ限度の向上が認められる。繰返応力の 1 サイクル中のヒステリシスループに相当するエネルギーの大部分は熱として放散されるが、この発熱による温度上昇ならびに応力の繰返作用は、その材料がそれ以前に受けた繰返応力による加工硬化に対して人工時効の作用をなし、材料を強化する。もしも繰返応力を受ける前に静的荷重により塑性加工を受けていれば繰返応力はその塑性加工に対しても人工時効の作用をなし、材料は強化され、疲れの寿命が延長されることはもちろんである。

以上の二つの作用を要約すると、材料は繰返応力によりしだいに硬化する。硬化するということは、しだいにぜい化して破断への道を進むということであり、繰返応力の回数とともに残された寿命は減少してゆく。それと同時に繰返応力は、それ以前に受けた繰返応力による加工硬化に対して人工時効の作用を及ぼし、材料は強化され、亀裂発生までの寿命を延長する。すなわち、繰返応力を受けている過程においては、まず硬化によるぜい化、したがって、弱化作用が起り、引続いてこの弱化作用と時効による強化作用が共存するようになり、これがシーソーゲームを続け、もしも弱化作用が大きければ亀裂から破断へと進み、強化作用

のほうが大きければ破断に至らないということになる。

この仮説を用いて 2 段 2 重重複応力による疲労実験の結果を説明してみる。1 次応力 σ_1 だけを加える場合は N_1 回で破断すべきところを n_1 回加えたとすると、そのときの疲労度は n_1/N_1 と考える。1 次応力 n_1 回の後に 1 次応力よりも高い 2 次応力 σ_2 に切り替えたとすると、2 次応力に切り替えてからも弱化作用は応力が高いだけにさらに急速に進行するが、時効による強化作用も 2 次応力が高いために 1 次応力をそのまま継続するよりはさらに大きい。この 2 次応力に切り替えてからの弱化作用の増大分と強化作用の増大分が等しければ、互いに打消し合って累計回数比が 1 で破断することになるが、等しくなければならない理由はない。累計回数比が 1 より大きいということは、強化作用の増大分が弱化作用の増大分よりも大きいと解すべきである。

Fig. 3 または 4 の実験結果についてこれを当てはめてみる。1 次応力は 33 kg/mm^2 で 2 次応力が 34 kg/mm^2 の場合を見ると、1 次応力の回数比 n_1/N_1 が 25 % の場合は弱化作用の増大分より強化作用の増大分が大きく、累計回数比は 1 をわずかに越えている。1 次応力の回数比が 50 % になると 1 次応力での弱化作用はまだ充分に進んでいないが、加工硬化はほぼ完了して 2 次応力に入ってから時効作用は大きく、結局累計回数比は延びている。1 次応力の回数比が 75 % になると弱化作用の増大分が大きく現われて累計回数比は最も少ない。2 次応力が 1 次応力と比較していちじるしく大きくなると、1 次応力の影響はしだいに微弱なものとなり、累計回数比は 1 に近づくのではなからうか。その他の場合についても、この弱化作用と強化作用の増大分または減少分の大小によって説明することができると考えている。

2 段 2 重重複繰返応力による寿命は、累計回数比の式を修正して次式によって求められるであろう。

$$\frac{n_1}{N_1} + \alpha \frac{n_2}{N_2} = 1 \quad (1)$$

α は材料の化学成分のほか繰返荷重を受けるまでの経歴、1 次応力、2 次応力、1 次応力の回数比などに関係する係数であり、

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} > 1 \quad \text{ならば} \quad \alpha < 1$$

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} < 1 \quad \text{ならば} \quad \alpha > 1$$

であって、2 次応力の繰返回数を、材料の強化の増大分が多いか ($\alpha < 1$)、あるいは弱化の増大分が多いか ($\alpha > 1$) などに応じて修正すべき係数である。

* せん断応力の振幅の部分と考えるのが妥当であろう。

鋼においては引張強さが同じであっても、疲労強度はかなり大きくばらつくことが知られている。材料の納入状態のもと焼鈍を行ったもので引張強さには大差がないにもかかわらず、疲労強度は大きく変ることも知られている。このような事実は疲労の場合には繰返応力による時効の作用があるということで充分説明できると思う。

5. む す び

(1) 0.25% C 炭素鋼の納入状態の材料について 2 段 2 重重複繰返応力に対する疲労試験を行い、次のような結果を得た。(a) 2 次応力が 1 次応力よりも高い場合は累計回数比が 1 以上となったが、累計回数比が ∞ となるような場合もありうるということがわかった。(b) 2 次応力が 1 次応力よりも小さい場合も本実験では累計回数比が 1 以上または 1 となった。

(2) このような重複荷重による疲労の寿命は、疲労の進行過程を次のように考えることによって初めて説明できることを示した。すなわち、(a) 材料は応力の繰返しによりしだいに硬化し、ぜい化して破壊への道を進む。すなわち、弱化してゆく。(b) それと同時に繰返応力はそれ以前に受けた繰返応力による加工硬化に対して人工時効の作用を及ぼし材料を強化する。(c) 重複荷重において 1 次応力から、より高い 2 次応力に切り替える場合は弱化作用も強化作用もともに増

大するが、後者の増大分がより大きいために累計回数比が 1 以上になると解すべきである。(d) したがって、2 段 2 重重複荷重の場合の寿命は累計回数比の式を修正した次式によって求められるであろう。

$$\frac{n_1}{N_1} + \alpha \frac{n_2}{N_2} = 1$$

ただし、 α は材料とその経歴、1 次応力、2 次応力、1 次応力の回数比などに関係する係数で、累計回数比が 1 以上の場合は $\alpha < 1$ であり、累計回数比が 1 以下の場合は $\alpha > 1$ である。

注：一

1) たとえば、佐藤、金属学会誌、6-12、617頁(昭17)

H.W. Russell and W.A. Welcker, ASTM, 36, p. 118 (1936)

西原、河本、機械学会論文集、6-25 I-47頁(昭15-11)

J.B. Koppers, ASTM Proc., 45, p. 532 (1945)

J.B. Koppers, Proc. Soc. Exp. Stress Anal., 3-2, p. 137 (1946)

T.J. Dolan, T.E. Richart and C.E. Work, ASTM Proc., 49 p. 646 (1949)

W.M. Murray, Fatigue and Fracture of Metals, MIT and John Wiley, New York p. 197 (1952)

S.M. Marco and W.L. Starkey, Trans. ASME., 77, p. 627 (1954)

河本、材料試験協会講演会前刷(昭31-5)

2) 河合、金属の研究、10-7(昭8)

中村、材料試験、3-14(昭29)

3) 川田、中沢、機械学会論文集、23-12/(昭32-3)

金属の疲労に関する国際会議

昨1956年9月10日より14日まで5日間にわたりロンドンにおいて金属の疲労に関する国際会議 International Conference on Fatigue of Metals が開催され、多くの国から約 600 人の代表者が参集し、空前の成功をおさめた。この会議は英国の Institution of Mechanical Engineers (IME) と American Society of Mechanical Engineers (ASME) との共催によって行われ、英国の多くの学協会がこれに参加した。開会式の冒頭に行われた開会の辞において、H.J. Gough 博士が金属疲労の問題の変遷について講演し、特に1939年に行われた最初の会議にとりあげられた問題について述べ、次いで1946年(Melbourne, Australiaにおいて)および1950年に(MIT, U.S.A.において)行われた同様の会議において討議された各種の問題に関し、かなり詳細な解説を行った。当日午後から始まった technical session は (1) 応力分布、(2) 温度、繰返速度および外的条件、(3) 冶金学的様相、(4) 基礎理論、(5) 工学ならびに工業における重要な命題の 5 部に大別して行われ、約 80 件の論文が提出せられ、

約 90 件の討論が活発に行われた。(1) の部門では、疲労強度に及ぼす切欠および形状の影響や内部欠陥による応力集中の問題が最も多く議論されており、変動応力ならびに疲労度に関する問題がこれに次いでいる。変動応力の研究においては累積疲労度に対する討論、車輛や航空機に作用する不規則変動荷重の問題ならびに鋳鉄の変動応力試験などが議題として提出された。このほか、平均応力の影響や組合せ応力状態の疲労強度ならびに残留応力の影響などが議論され、また、寿命の短い範囲の疲労試験が報告されたのは注目されよう。反面、疲労強度の統計的分布の問題がきわめて少ないのはいささか意外に思われる。(2) の部門以下の主な問題は、温度、腐蝕、接触応力による疲労、繰返速度、クラックの発生および進行の問題、疲労のメカニズムに関する論文などである。実用方面では船舶やレールにおける疲労、溶接欠陥の影響、航空機の設計に関する問題がとりあげられている。(The Chartered Mechanical Engineer, 3, No. 9 (1956) p. 453/457 および p. 472/477 による。)