疲労被害における未来効果*

河 本 実**

Future Effect on Fatigue Damage

by

Minoru KAWAMOTO

(Kyoto University)

The term "Fatigue Damage" is very ambiguous and has been used as different meanings. In some cases, fatigue damage is represented by the degree of changes in physical or mechanical properties of materials due to stress reversals, such as changes of shock resistance, damping coefficient, and others. But the author believe that these changes do not represent the true fatigue damage, because they do not always mean the decrease of fatigue life of materials. On the contrary, in some cases, they mean even the increase of it. In such cases, these changes are training rather than damage.

In some cases, fatigue damage has been represented with the decrease of the endurance limit of materials. But the author cannot agree with this representation, because it seems to contain the following unreasonableness. The term "Fatigue Damage" is used when we consider the fatigue life of materials at the stress levels over the endurance limit. If we attempt to keep working stresses always less than endurance limit, the conception of fatigue damage is needless, because fatigue failure does not occur at the stress levels below endurance limit. Fatigue damage is the matter concerning with fatigue life and not with endurance limit. So fatigue damage should not be represented with the decrease of endurance limit.

Then the author believe that it is most reasonable to represent fatigue damage as the rate of diminution of fatigue life in future. This representation has been already adopted by many researchers. (Refer to the Notes (2), (3) at the end of the paper.) If we adopt the representation, fatigue damage cannot be decided only by the stress history in past, but must be influenced by the stress which will be applied in future. It is self-evident that the life in future depends on the stress in future. This is the so-called future effect on fatigue damage.

In this paper the future effect on fatigue damage was obtained by experiments in some cases.

(Received July 2, 1958)

1. 緒 言

疲労被害度, 疲労損傷度あるいは疲労度などという語は材料の疲労の問題においてしばしば用いられる。これらはいずれも繰り返えし応力を受けたとき材料に生じている疲労被害の程度を指すものであって, 疲労現象の考察において重要な意義を有するものである。しかし, 従来多数の研究者によって用いられている疲労被害という語の意味は必ずしも同一ではなく, ある場合には本質不明のまま便宜上使用されている場合もあり¹⁾, また, ある場合にはその内容を適切に表わしていない場合もある。そこで著者は, まず疲労被害という語のもつ内容をもっとも適切に表わすような定義に

ついて考察し, 次いでそのような疲労被害は材料が過去に受けた履歴によってのみ決定されるものではなく, 未来に受ける応力によっても, また影響されるということを描きたい。現在の状態における材料の疲労被害度の判定が未来の応力によって影響を受けるということは一見不合理なようにも思われるが, それは疲労被害という語の内容から来る必然的なもので, 疲労被害度を単に過去に受けた応力ならびにその繰り返えし数のみの関数として表わそうとするならば, かえって不合理な結果を招くこととなるのである。

2. 疲労被害度の定義

材料が繰り返えし応力を受けると種々の物理的, あるいは機械的性質に変化をきたす。したがって, これらの性質の変化の程度をもって疲労被害度を表わす方法が古くからしばしば行われる。たとえば, 衝撃値の変

* 原稿受付 昭和33年7月2日, 昭和31年5月15日当協会第5期総会講演会で講演

** 正員 京都大学工学部

化あるいは減衰能の変化をもって表わす方法などである。しかし、著者はこれらの方法による疲労被害度は真の意味における疲労被害の程度を表わすものではないと考えている。なんとすれば、材料が繰り返し応力を受けてその物理的あるいは機械的性質が変化しても、それは必ずしも常にその材料の耐疲労性の減少を意味するものとは限らない。場合によっては、かえって耐疲労性の増大をきたしていることもある。この場合その繰り返し応力は疲労を進行せしめたというよりも、むしろ逆に材料に鍛練を与えたと解すべきであろう。また、このような極端な場合を考えなくとも、一般に疲労の進行にともなう性質の変化は応力繰り返し初期に急激に起り、以後はきわめて緩慢である場合が多い。このような場合は繰り返し応力による性質の変化がかなり起っていても、材料の耐疲労性はさほど減少していないことになる。これらのことより応力繰り返しに伴う材料の性質の変化の度合をもって疲労被害の程度を表わすことがきわめて不適切であることがわかる。

なお、従来よく用いられる方法として、繰り返し応力を受けた材料の耐久限度の元の耐久限度に対する低下率をもって疲労被害度とすることがある。この方法においては、疲労被害度はある意味において耐疲労性の低下率を表わしており、一見合理的なようにも思われるが、詳細に考えるならば、やはり不適切なものであることがわかる。というのは、もともと疲労被害なるものは材料が耐久限度以上の繰り返し応力を受け、破壊までの寿命が問題となるようなとき起る概念であって、もし作用する繰り返し応力を、すべて耐久限度以下に止め永久の使用に耐えることを主眼とするときは、疲労被害という概念は不要である。なんとすれば、耐久限度以下の応力にては疲労被害が起らないからである。このように耐久限度を問題とせず、あくまでも破壊までの寿命を問題とすべき疲労被害度を表わすのに、耐久限度の低下率をもってするのは明らかに不合理というべきであろう。

しからば、疲労被害度としていかなる定義を与えるのがもっとも妥当であるかというに、著者の考えでは破壊までの寿命の減少率をもって表わすのがもっとも適切であると思う。すなわち、これによれば

D = ある繰り返し応力を過去に受けた材料のこ
うむっている疲労被害度

n_f = その材料が未来に受ける応力に対して耐える
繰り返し数

N_f = 処女材が未来に受けを応力に対して耐える繰
り返し数

とすれば、

$$D = \frac{N_f - n_f}{N_f} \quad (1)$$

疲労被害度をこのように表わすことは決して著者の創案ではなく、すでに多くの研究者によって採用せられている方法である。²⁾³⁾

3. 疲労被害における未来効果

前項の定義にしたがう疲労被害度 D がいかなる値をとるかについて考えてみよう。まず、作用する繰り返し応力の大きさが最初から破壊まで一定不変である場合を考える。この場合、その繰り返し応力に対し処女材の耐える繰り返し数を N_p 、過去に受けた繰り返し数を n_p とすれば、(1) 式において $N_f = N_p$ 、 $n_f = N_p - n_p$ となるから、疲労被害度 D は次のようになる。

$$D = \frac{n_p}{N_p} \quad (2)$$

すなわち、疲労被害の進行は繰り返し数とともに直線的である。これは疲労被害度が破壊までの寿命の低下率を表わすという定義から考えて当然のことである。

次に、過去に受けた繰り返し応力と未来に受ける繰り返し応力が相違する場合について考えて見よう。いま過去に受けた繰り返し応力を σ_p 、その繰り返し数を n_p とし、未来に受ける繰り返し応力を σ_f 、その繰り返し応力を n_f 回受けて破壊するものとする。なお、 σ_p あるいは σ_f の繰り返し応力が全寿命を通じて一定に作用したときの破壊までの繰り返し数をそれぞれ N_p あるいは N_f とすれば、現在の状態における疲労被害度 D は(1)式より

$$D = 1 - \frac{n_f}{N_f} \quad (3)$$

となる。さて、もし

$$\sum \frac{n}{N} = \frac{n_p}{N_p} + \frac{n_f}{N_f} = 1 \quad (4)$$

の関係が成立するものとすれば、(4)式を(3)式に代入し、 $D = n_p/N_p$ となり、これは(2)式の関係と同一となる。すなわち、疲労被害度は繰り返し数とともに直線的に進行する。しかし、後にも述べるように、(4)式の関係は一般には成立せず、 $\sum(n/N)$ の値は未来に受ける繰り返し応力 σ_f によって相違する。すなわち、 $\sum(n/N)$ は1ではなく σ_f の関数である。したがって、

$$\sum \frac{n}{N} = \frac{n_p}{N_p} + \frac{n_f}{N_f} = f(\sigma_f) \quad (5)$$

とおき、(5)式の関係(3)式に代入すれば

$$D = 1 + \frac{n_p}{N_p} - f(\sigma_f) \quad (6)$$

となる。(6)式より明らかなように、疲労被害度 D は過去に受けた応力およびその繰り返し数のみならず、

未来に受ける繰返し応力によって定まる．このうち過去に受けた応力およびその繰返し数は、すでに定まった不変のものであるのに対し、未来に受ける繰返し応力は一般には自由に選ぶものである．したがって、現在の状態における疲労被害度 D は未来の応力の関数となるわけで、これが著者のいう疲労被害における未来効果である．

Table 1 Chemical composition of materials (%)

Materials	Symbol	C	Si	Mn	P	S
Mild steel	282A	0.13	0.35	0.54	0.013	0.012
Medium steel	6426	0.34	0.24	0.48	0.016	0.028
Hard steel	282B	0.63	0.13	0.73	0.041	0.025

Table 2 Mechanical properties of materials

Materials	Symbol	Yield point σ_s (kg/mm ²)	Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	Breaking strength on final area σ_T (kg/mm ²)	Elongation φ (%)	Reduction of area ψ (%)	Hardness shore H_s
Mild steel	282A	28.5	42.5	103.5	33.5	69.3	17.0
Medium steel	6426	31.8	55.3	89.9	22.6	48.5	21.0
Hard steel	282B	45.7	81.4	107.9	17.8	31.1	27.0

以上のように、疲労被害度は過去に受けた応力および繰返し数によって一義的に決定されるものではなく、未来に受ける繰返し応力をも考えなければ決定されない．現在の状態における疲労被害が未来に作用する応力によって影響を受けるということは決して不合理ではなく、疲労被害という語が未来に耐える寿命の減少を指しているのであるから、未来に受ける応力と関係があるのはむしろ当然というべきである．もし、疲労被害度を過去の履歴によってのみ決定され

るように定めるならば、そのような疲労被害度は必ず真の疲労の程度を表わしていないという不合理を招くこととなるのである．

Fig. 1 Form of specimen

Table 3 Kinds of repeated stress conditions of specimens applied to inspect fatigue damage

Materials	Repeated stress in past, σ_p	Number of repetition in past, n_p
Mild steel	29.1 kg/mm ² (at $N_p=10^6$)	0.5×10^6
		0.8×10^6
	32.5 kg/mm ² (at $N_p=10^5$)	0.5×10^5
		0.8×10^5
Medium steel	23.5 kg/mm ² (at $N_p=10^6$)	0.5×10^6
		0.8×10^6
	30.0 kg/mm ² (at $N_p=15^5$)	0.5×10^5
		0.8×10^5
Hard steel	31.0 kg/mm ² (at $N_p=10^6$)	0.5×10^6
		0.8×10^6
	38.0 kg/mm ² (at $N_p=15^5$)	0.5×10^5
		0.8×10^5

Fig. 2 Fatigue damage of mild steel

Fig. 3 Fatigue damage of medium steel

Fig. 4 Fatigue damage of hard steel

Fig. 5 Fatigue damage at cycle ratio 0.8
under past stress at $N_p=10^6$

4. 実験結果

疲労被害度が未来の応力によって実際どのように変化するかを著者の行った実験結果より求めてみよう。実験に供した材料は Table 1 に示すような化学成分を有する軟鋼、半硬鋼および硬鋼の 3 種とし、熱処理することなく供給状態のまま使用した。Table 2 はその機械的性質を示す。使用した試験機は小野式回転曲げ疲労試験機で、毎分 2600 回転にて実験した。Fig. 1 は試験片の形状、寸法を示す。

実験はそれぞれの材料について、まず、普通の疲労試験を行い、 $S-N$ 曲線を決定する。次にこの $S-N$ 曲線より 10^5 または 10^6 の繰り返し数にて破壊するような応力を求め、それらの応力をそれぞれの破壊までの繰り返し数の 50% または 80% だけ与えた状態で試験を中止し、それらの状態における試験片の疲労被害度を求めた。すなわち、疲労被害度判定に供した試験片の過去に受けた応力条件の種類を表示すれば Table 3 のようである。すでに述べたように、疲労被害度は未来の応力によって相違するゆえ、次に加えるべき応力の大きさを変化させ、それぞれの応力のもとにおける破壊までの繰り返し数を求め、それより (6) 式を用いて Table 3 の各状態について、種々の未来応力に対する疲労被害度 D を算出したのである。

実験の結果、得られた疲労被害度を Figs. 2~8 に図示した。そのうち Figs. 2~4 はそれぞれ軟鋼、半硬鋼および硬鋼について、横軸に過去に与えた応力の繰り返し数比をとり、未来応力をパラメータとして疲労被害度を図示した。Figs. 5~8 は過去に受けた応力条件を一定とし、横軸に未来応力の大きさをとり、疲労被害度が未来応力によっていかに変化するかを、材料の種類をパラメータとして示した。これらの図より疲労被害度が未来応力によって相違する様子の一端を知ることができる。たとえば、図よりわかるように、疲労被害度が負になる場合も少なくなく、また、Fig. 5 および Fig. 7 に見られるように、1 次応力が比較的小なる場合、軟鋼および半硬鋼にて、未来応力が過去応力に等しいとき疲労被害度が最大で、未来応力がそれより大きくても、また、小さくても疲労被害度は小

Fig. 6 Fatigue damage at cycle ratio 0.8 under past stress at $N_p=10^5$

Fig. 7 Fatigue damage at cycle ratio 0.5 under past stress at $N_p=10^6$

となる。

Fig. 8 Fatigue damage at cycle ratio 0.5 under past stress at $N_p=10^5$

5. 結 論

繰り返えし応力を受けた材料の疲労の程度を指す疲労被害度、疲労損傷度、あるいは疲労度などと呼ばれるものは、過去に受けた応力のみによって決定されるものではなく、その材料が将来受ける応力によっても影響を受けるものであることを指摘した。しかして、数種の場合について疲労被害度が未来応力によって、いかに変化するかを実験結果より示した。

参 考 文 献

- 1) F.E. Richart and N.M. Newmark, ASTM Proc., **52**, 733 (1952)
- 2) J.A. Bennet, ASTM, Proc., **46**, 693 (1946)
- 3) T.J. Dolan and H.F. Brown, ASTM, Proc., **52**, 733 (1952)
- 4) 河本, 伊吹, 材料試験, **5**, 36, 544 (昭31.9)

高温におけるタングステンの引張およびクリープ性質

[Tensile and Creep Properties of Tungsten at Elevated Temperatures, by J.W. Pugh, Proc. ASTM, Vol. **57**, (1958), pp. 906/915. 図13, 表3]

全金属中でタングステンが最高の融点 6170°F (3410°C) をもつという点から, 超高温において良好な機械的強度をもつものと考えられる。本研究は常温から 2200°F (1204°C) までの範囲での強度を調べた結果について報告したものである。結論は次のとおりである。

1. タングステンの短時間引張試験(ひずみ速度 20 および 2%/mm, 真空中)における強度は常温から 2000°F (1093°C) までの温度において他の代表的な耐熱金属の強度よりも大きい。

2. タングステンのクリープ破断強度(アルゴンふんい気中)は, 1600°F (871°C) から 2200°F (1204°C) の範囲で, 他の市販オーステナイト系合金およびモリブデンの強度に比べ, さらに良好である。タングステンの強度-重量比は特に良好ではないが, 2000°F (1093°C) においてはモリブデンよりややすぐれている。2000°F 以上の温度においては急速にタングステンの優秀性が顕著になるものと考えられ, 超高温材料としての前途は従来の期待以上に大きなものと考えられる。(大路清嗣)