防振ゴムのせん断疲労に対する形状率ならびに 初期圧縮の影響*

榎 木 義 一** 福 田 正 成***

Influences of Form Factor and Initial Compression on Shearing Fatigue of Rubber Vibration Isolator

by

Yoshikazu SAWARAGI and Masayoshi FUKUDA

(Faculty of Engineering, Kyoto University) (Kyoto Gakugei University)

We have already reported that the radius of the fillet of the specimen has great influences upon the shearing fatigue life and the appearance of the fatigue crack. In this paper, we report on influences of the form factor and an initial compression on the shearing fatigue of the rubber vibration isolator. The test was performed under a constant repeating shear strain of 0~30% with a frequency of about 500 rpm, and using the specimens which had a thickness of 15 mm, diameters of 15, 20, 30 mm and radii of the fillet of 0, 2, 4, 6 and 7.5 mm.

From these papers, we may summarize the shape effect on the shearing fatigue as follows:

(1) The shearing fatigue life, which means the number of the strain repetitions up to the time when the fatigue crack appears on the surface of the specimen, gets longer as the radius of the fillet and the form factor increase. When an initial compression was given, the shearing fatigue life becomes longer.

(2) The shearing fatigue cracks appeared in the same manner irrespective of the radius of the fillet, the form factor and the initial compression. The position of the crack appeared when the pasted plane was at an angle of about 25° ~ 32° with the straight line connecting the edge of the fillet and the fatigue crack on the surface of the specimen.

(3) The explanation of the fatigue phenomena of the rubber vibration isolator, especially the computation of the fatigue life and the position where the crack appeared, may be given from the consideration of the stress or strain on the deformed surface of the specimen. It is difficult for us to explain the above facts using the apparent stress or strain.

(Received Jan. 7, 1961)

1. 緒 言

防振ゴムのせん断疲労における形状効果の一つとして、筆者らはさきにフィレット半径の影響¹⁾について報告した。本論文では、試料の形状率を変えた場合について検討した結果を報告する。また、試料にあらかじめ初期圧縮を与えておき、そのような状況下でせん断疲労試験を行なった場合の結果をあわせて報告する²⁾。特に前者の形状効果は、これを引張疲労試験結果と比較するならば、その原因が主として曲げ変形のために起きるものと考えられるのであって、そのような見地から、試料の表面における変形状態に注目して考察することにより、せん断疲労寿命に対する形状率の影響

について実験結果の説明をなすということが明らかにした次第である。

2. 実験方法

試料は Fig. 1 に示すように、円柱状のゴム2個を

Fig. 1 Test specimen

* 原稿受付 昭和36年1月7日、第4回材料試験連合講演会にて一部を講演(昭和35.9)

** 正員 京都大学工学部

*** 正員 京都学芸大学

軟鋼製金具に接着したものであって、その厚さ H を一定値 15 mm とし、直径 D を 15, 20, 30 mm の 3 種類に変え、また各々について、フィレット半径 R を 0, 2, 4, 6, 7.5 mm の 5 種類に選んだ。Table 1 には試料の配合成分を示す。このような試料の両側の金具を固定し、中央に自然長から 4.5 mm の範囲にわたるせん断変位(見掛けのせん断ひずみ 0~30% に相当する)を繰り返えし加えることによって実験を行なった。その繰返し振動数は約 500 rpm, 温度は室温であった。

3. せん断疲労寿命とき裂

上記の条件の下で得られた形状効果を示す実験結果を Fig. 2 に示す。ここに縦軸のせん断疲労寿命としては、試料の表面に疲労き裂が発生するまでの繰返し数をとってある。図によれば、まず、前報にも述べたように、せん断疲労寿命はフィレット半径 R の大きい試料におけるほど長くなっていることが知られる。ただし、 $R=0$ の試料は、すべて接着面で破断(はく離)した。次に、試料の形状率 $F=[(\text{ゴムの受圧面積})/(\text{自由表面積})]$, ただし計算に際しては、通常の慣例にしたがい、フィレットの部分が無視して算出した値 $D/4H$ をもって示した] に注目すると、その大きいほど、疲

労寿命は長くなっていることが認められる。たとえば $F=0.25$ の試料の場合の寿命に比較すると、 $F=0.33$ の試料の場合の疲労寿命は約 5 倍に、また $F=0.50$ の試料の場合には、寿命は約 10 倍に増大していることが知られるのである。

次に、疲労き裂の発生の様子について述べると、本報告で採り上げた形状率の異なる試料の場合においても、前報に述べた結論がやはり成立することを確認することができた。すなわち、Fig. 3 に示したように試料を原形にもどした状態において、かつ、変位方向を含む中心面上において、試料表面の疲労き裂の位置とフィレット端とを結ぶ直線を引きときは、それが接着面に対して約 $25^{\circ}\sim 32^{\circ}$ の角度をなしている。そうして、図によればこの関係はフィレット半径の大きさならびに試料の形状率によってほとんど影響を受けないものとみられることが明らかである。なお、前報にも述べたように、これらの疲労き裂の位置は、試料に更に大きいせん断ひずみを静的に加えたときに発生するしわの位置と、ほぼ一致していることが知られるのであるが、Fig. 4 には参考として、しわの発生したときの静的せん断ひずみの大きさと形状率ならびにフィレット半径との関係を示した。

Table 1 Chemical compositions of specimens

Rubber	Stearic acid	Pine tar	Zinc oxide	Sulfur
50.00	1.55	5.00	10.00	1.50
Antioxidant C	D	Calcium carbonate	Acetylene carbon black	Accelerator DM
0.50	0.50	29.55	1.00	0.40

Total : 100.00
Cure condition : 3.0 kg/cm² (143°C), 50 min
Shore hardness : 50 durometer

Fig. 2 Relation between shearing fatigue life and radius of fillet for various form factors

Fig. 3 Angle ϕ , for various form factors

Fig. 4 Shearing strain when wrinkle appeared

4. 初期圧縮を与えた場合

一例として、 $15\phi \times 15$ の試料に、あらかじめ3.5% および10%の初期圧縮を与えておき、これに前節と同じく0~4.5 mmのせん断変位を繰り返し加えた場合の疲労試験結果について述べる。得られた実験結果を Fig. 5 に示す。図によれば初期圧縮量を増加するにしたがい、せん断疲労寿命は増大していることが知られる。すなわち、まず3.5%の初期圧縮を与えておいた場合には、初期圧縮を全く与えなかった場合の疲労寿命に比較して、その約1.3~1.4倍に増大している。次に、10%の初期圧縮を与えたせん断疲労試験の場合には、試料の表面(引張側のフィレットの部分)に疲労き裂が発生するまでの寿命は、初期圧縮を与えなかった場合のそれに比較して、約3~8倍に増大している。ただし、この場合には、前報に指摘したところからも想像されるように、圧縮側のフィレットの部分にしわが現われ、それが繰返し作用のために溶けたようになるのであって、図の破線はそのような状態になったときを示す。したがって、しわの部分が溶けはじめるまでの繰返数を見掛けの疲労寿命とみなして、

Fig. 5 Relation between shearing fatigue life and radius of fillet under various initial compressions

Fig. 6 Angle φ , under 10% initial compression

これを初期圧縮なしの場合の寿命に比較してみると、結局約3~4倍の増加ということになる訳である。なお、このようなしわの発生による疲労寿命の低下は、特にRの小さい試料において注意を要することが知られる。

次に疲労き裂の発生の様子、ならびに上記のようなしわおよびその溶けた部分の試料表面における位置については、これを Fig. 3 の表現と同じく接着面に対する角度の関係によって表わすと、Fig. 6 に示すようである。図によれば、初期圧縮を与えたことによって前述の約25°~32°という角度にほとんど変化は認められない。したがって、疲労き裂の発生位置については、やはり前節に述べた結論が初期圧縮の有無にかかわらず、なりたつということが知られるのである。

5. 結果の考察

筆者らは前報において、試料の表面に引き起こされるひずみの大きさを近似的に求めることによって、フィレット半径の大きい試料におけるほどせん断疲労寿命の長いこと、また、疲労き裂は試料の形状率のいかににかかわらず、すべて引張側のフィレットの部分に同じように発生することを説明した。同じようなことは、また、引張疲労における形状効果の取扱いについても既に指摘したところである。

さて、筆者らは以下にせん断疲労寿命に対する試料の形状率の影響について考察をしようとするのであるが、ここで、このような形状効果が主としてどのような原因によって起こるものと判断されるかについて述べておこう。本報告の場合と同じ種類の試料を用いて行なった筆者らの引張疲労試験の結果によると、極端な形状、すなわち、フィレット半径Rが0ならびに7.5 mm (この場合には中央平行部がない) の試料の場合を除けば (ただし、これらの試料においても、形状率の影響は認められない)、引張疲労寿命に対する形状効果、すなわちフィレット半径ならびに形状率の影響はほとんど見られなかったのである。そこで、本実験の場合のような防振ゴムのせん断変形を近似的に引張りと曲げとの組合わせと考えると、前述のようなせん断疲労寿命に対する形状率の影響は、主として曲げ変形のために引き起こされるものであることが結論されてくるのである。

いま周知のように、接着型防振ゴム ($R=0$) が荷重Pを受けたときのせん断変形 δ を純粹のせん断変形 δ_s と曲げ変形 δ_B とが合成されたものと考え、 δ は

$$\delta = \delta_s + \delta_B = \frac{PH}{GA} + \frac{PH^3}{12EI}$$

で近似される。ここに、Gはせん断弾性率、Eはヤング率、また、Iは断面二次モーメントで、円柱状試料では $\pi D^4/64$ に等しい。更にゴムの非圧縮性を仮定し

$E=3G$ を用いて上式を書き替えると,

$$\delta = \frac{PH}{GA} \left(1 + \frac{1}{36F^2} \right) \quad (1)$$

となる。ただし、 F は試料の形状率であって円柱状試料では $D/4H$ に等しい。そこで

$$G / \left(1 + \frac{1}{36F^2} \right) = G^* \quad (2)$$

とおき、これを見掛けのせん断弾性係数と呼ぶことにすると、物質定数としての G は一定 (本報告の試料では約 6.7 kg/cm^2) とみなすことができ、一方、上式の分母は F の増大に伴って減少 (Table 2 参照) するから、したがって、 G^* の値は形状率 F の大きい試料におけるほど大である。Fig. 7 はこの関係を示す実験結果を掲げたものである。なお図においては、フィレット半径 R の大きくなるにしたがい、 G^* の値も増大することが認められるが、このことは本報告の場合の試料が中央部の直径 D を同じにしてこれに各種の R のフィレットをつけたのであるから、当然の結果として了解されるであろう。

さて一般に、せん断型防振ゴムの動的特性に関する多くの論議は、すべてこの G^* を採用することによって、きわめてよく説明がなされているのである。ところが、せん断疲労寿命の長短について同じようにこの G^* によって得られる傾向、すなわち、見掛けの応力をもって評価しようとするときは、充分な説明を行なうことができないのであって、やはり筆者らがはじめに指摘したように、試料の表面における変形状態、いかえれば、試料表面における応力あるいはひずみに着目して考察しなければならないことが知られるのである。すなわち、まず試料がせん断変形を受けた場合 (1), (2) 式に示した関係

$$P/A = G^* \delta / H \quad (3)$$

が成立する。ここに定変位式による本実験の場合、せん断変位 δ は一定であり、かつ、試料の厚さ H を一定に選んでいるので、せん断ひずみ δ/H もまた一定である。そこで、試料には G^* に比例するような見掛けのせん断応力が誘起されているはずである。よって上に述べた F による G^* の変化の傾向からみて、当然、形状率 F の大きい試料におけるほど見掛けの応力 P/A

が大となり、その結果として、せん断疲労寿命としてはこの逆の傾向、すなわち、形状率 F の大きい試料におけるほど疲労寿命が短くなるということが推論されてくるのであるが、これは明らかに Fig. 2 に示した実験結果と矛盾する。

そこで、試料の表面における変形状態に注目しよう。既に述べたように、形状率の影響は主として曲げ変形によって誘起されるものと考えられるのであるから、試料表面における応力あるいはひずみの大きさを評価するには、近似的に曲げ応力の表式によれば充分である。いま、曲げモーメントを M とすれば、これは PH に等しく、また断面係数を $Z = \pi D^3/32$ とすれば、試料表面における最大曲げ応力 σ は

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{PH}{\pi D^3/32} = \frac{PH}{AD/8} = \frac{2P}{AF} \quad (4)$$

で与えられる。ただし、 A は試料の断面積で $\pi D^2/4$ に等しい。一方、本実験の場合、せん断ひずみ δ/H は一定であり、また G も一定とみなすことができるのであるから、したがって (1) 式より K を比例定数とすれば

$$\frac{P}{A} = \frac{\delta G}{H \{1 + (1/36F^2)\}} = \frac{K}{1 + (1/36F^2)}$$

となる。これを (4) 式に代入すると、結局

$$\sigma = \frac{2K}{F \{1 + (1/36F^2)\}} \quad (5)$$

を得る。上式で与えられる曲げ応力が試料の表面に誘起されているものと考えられるのである。Table 2 には、上式についての計算結果を示す。これによって σ は形状率 F の大きい試料におけるほど小さいことが明らかである。そうして、このような応力の繰返しのために、形状率 F の大きい試料におけるほどその疲労寿命が長いということ、すなわち、Fig. 2 に示した実験結果が理解されるのである。

次に Fig. 5 に示したように、初期圧縮を与えた場合のせん断疲労寿命が長くなることについては、多くを論じるまでもないであろう。それは初期圧縮を与えたことによって、結局、試料の受けるせん断変形 (あるいは試料表面のひずみ) をより小さい値に制限したことになるからである。また一方、圧縮ひずみが約 15% 以下の場合においては、防振ゴムの寿命は

Fig. 7 Apparent shear modulus

Table 2 Calculated values of $1/F \{1 + (1/36F^2)\}$ for various form factors

$D \times H$	F	$1 + \frac{1}{36F^2}$	$\frac{1}{1 + \frac{1}{36F^2}}$	$\frac{1}{F(1 + \frac{1}{36F^2})}$
30φ×15	0.50	1.11	0.900	1.802
20φ×15	0.33	1.25	0.800	2.424
15φ×15	0.25	1.44	0.693	2.778

約 10^8 にも達するものと考えられ、したがって、初期圧縮を与えることによって寿命が短くなるということとはまったく考えられず、むしろ逆に Fig. 5 の程度の寿命よりは長くなる傾向が期待されるからである。

6. 結 言

以上には、防振ゴムのせん断疲労に対する試料の形状率ならびに初期圧縮の影響について、得られた実験結果を示し、特に、前者に対する考察の結果を示した。せん断疲労に対するフイレット半径の影響について論じた前報の結果と、本報告の結果とをあわせると、結局、防振ゴムのせん断疲労における形状効果として次のようなことが明らかである。

(1) せん断疲労寿命は、フイレット半径の大きい試料におけるほど長く、また、形状率の大きい試料におけるほど長い。初期圧縮を与えると、せん断疲労寿命は増大する。

金属材料のクリープに及ぼす荷重変動および温度変動の影響 (A Survey of the Effect of Nonsteady Load and Temperature Conditions on the Creep of Metals) S.S. Manson and W.F. Brown, ASTM, STP., No. 260 (1959), p. 65

本論文は種々の金属および合金のクリープに及ぼす荷重変動および温度変動の影響について今までに報告された資料を基にして総説的に論じたものであり、除荷時のクリープひずみの回復問題を主題とする安定材料に対する基礎的研究結果、複雑な荷重および温度の変動条件下にある工業材料のクリープ資料の総括、および変動条件下のクリープを静クリープから計算するための解析基準という三部門について述べたものである。結言として要旨以下のことがらをあげている。すなわち、金属材料の変動条件下のクリープは複雑であって金属組織学および機械的(力学的)諸因子に大きく影響され、現状ではその挙動を定量的にまとめることは不可能であるが、しかしながら少なくとも変動条件を考慮せる設計を行なう際のこれらの諸因子の内容をほぼ知ることができるとしている。これらの因子としては (i) クリープにおける非弾性効果、(ii) クリープひずみの回復、(iii) 組織変化、(iv) 不均一加熱に基づく熱応力等があげられ、これらは材料および変動条件によって左右されるものである。

まず、変動条件下におけるクリープの非弾性効果は実際問題としては無視しうが、RC 130 A チタニウムに対する実験結果から間けつ変動負荷時におけるクリープ速度の減少を一応考慮に入れなければならない。また、Zenner が指摘する非弾性回復の加速クリープの促進についても留意すべきことを指摘している。

次に応力減少時において温度が充分高いときに起こ

(2) せん断疲労き裂は、フイレット半径の大きさならびに形状率の相違にかかわらず、また、初期圧縮の有無にも無関係に、フイレットの部分の同じような関係位置(接着面に対する角度が約 $25^\circ \sim 32^\circ$)に発生する。

(3) 防振ゴムの疲労、特にその疲労寿命ならびに疲労き裂の発生位置を評価するには、試料の表面における応力あるいはひずみに注目して考察することが必要である。

終りに、本研究に際して有益な御教示を賜った京都大学国井教授に深甚の謝意を表する。また、防振ゴム試料の製作にあたっては住友電気工業株式会社の絶大な御支援を得たことを記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 榎木義一, 福田正成, 材料試験, **9**, 83, 529 (1960)
- 2) 榎木義一, 福田正成, 材料試験, **10**, 93, 480 (1961)
- 3) 榎木義一, 福田正成, 材料試験, **8**, 73, 803 (1959)

るいわゆるひずみの回復は再負荷時にクリープひずみの過渡的増加を引き起し、かかる過渡現象については Kennedy による鉛の間けつ負荷時の実験やその他アルミニウム合金, 7075-T 等においても見受けられる。

また、組織変化の問題としては過時効、再結晶の問題が含まれ、合金のクリープ抵抗が析出組織に依存する場合には過時効、したがってクリープ強度の減少が温度が時効温度に近いとき減少期間において起きる。かかる例は Shepard および Guarnieri がアルミニウム合金に対する間けつ負荷時の実験において確かめられており、更にある場合には、間けつ負荷によって過時効が加速される場合があり、また過時効は温度がクリープ試験中で急激に上昇することによっても起こりうる。また、時効がクリープ中で変動条件下で助長されることが観測されており、ある場合には時効はクリープ抵抗を増加せしめる意味で有効である。しかし他方じん性がかかなり減少して寿命を縮める場合のあることから実際問題としては応力集中の存在する場合に問題となる。

最後に熱応力は温度変動を受ける部材において、その不均一加熱に起因して生ずるものであり、これは Guarnier およびその他により指摘されたようにクリープ速度を増加せしめまた破断寿命を減少せしめることから実際問題として重要なことがらである。また、粒界破壊が定常クリープ中において起こるような場合には粒界クラックの伝ばが温度変動により加速され、さらに粒界酸化の起こる場合にはそれがまた温度変動によって加速され粒界における応力集中の一因ともなる。その他熱膨張係数の非等方性による熱応力の問題にも触れている。

(大南正瑛)