防振ゴムの圧縮疲労における圧縮ひずみの 最大限度について*

榎 木 義 一** 福 田 正 成***

On the Maximum Limit of Compressive Strain in the Compressive Fatigue Test of Rubber Vibration Insulator under Constant Deflection

by

Yoshikazu SAWARAGI and Masayoshi FUKUDA
(Kyoto University) (Kyoto Gakugei University)

We have studied, as shown in this paper, on the maximum limit of compressive strain allowable for the rubber vibration insulator, through the fatigue test under constant deflection.

Paying attention towards the direction having an angle of 25° (or more) with the bonded plane, we have tried to explain the features of the wrinkle on the surface of the compressed rubber specimen, which melts and develops into a crack during the repetition of compressive strain.

Since our first consideration in the compressive fatigue of the cylindrical rubber specimen with fillet is to be given to the prevention of the formation of this wrinkle, the choice of the maximum compressive strain should be made with due regard to the form factor and the radius of fillet of the specimen. Within the range of $0.2 \sim 1.5$ of the form factor, the obtained results are as follows:

Maximum compressive strain: less than $22 \sim 7.3\%$, Radius of fillet (max): $1.5 \sim 3.9\text{mm}$.

(Received Jun. 17, 1959)

1. 緒 言

接着型圧縮用防振ゴムの形状係数ならびに圧縮ひずみまたは最適荷重の選定については、通常その静的ないし動的特性をもとにして種々論じられていることが多い。しかしその実用におけるより適切な値を得るためには疲労現象についても考慮を払わねばならないことはもちろんであるが、この方面の資料はまだ充分ではないようである。いま、圧縮用防振ゴムの使用基準としてすでに発表されている二、三のものを参照すると、いずれもその限度をひずみの値でもって与えているものが多い。そこで筆者らも圧縮疲労の見地よりする若干の考察を試みるに際し、ここには円柱状試料に加える圧縮ひずみの最大限度について、主として変形の面より検討した結果を報告する。すなわち、試料に与える圧縮ひずみは常に試料の形状係数ならびに接着端につけた丸味半径との関連において考えられるべきであるということを指摘する次第である。

2. 実験結果

(I) 試 料

Symbol	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7
D	30	20	30	20	30	30	20	30	30	30
H	50	20	10	20	15	10	20	15	15	15
R	0	0	0	2	2	2	4	4	6	7.5
Form factor	0.15	0.25	0.75	0.25	0.5	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5
Shore hardness	50	40	50	40	50	50	40	50	50	50

Fig. 1 Form of specimen

* 原稿受付 昭和34年6月17日
** 正員 京都大学工学部
*** 正員 京都学芸大学

Table 1 Chemical compositions of materials

Shore hardness	50	40
Rubber	50.00	50.00
Stearic acid	1.55	1.55
Pine tar	5.00	10.00
Antioxidant C	0.50	0.50
Antioxidant D	0.50	0.50
Zinc oxide	10.00	10.00
Calcium carbonate	29.55	24.55
Acetylene carbon	1.00	1.00
Sulfur	1.50	1.50
Accelerator DM	0.40	0.40
Total	100.00	100.00

Cure: 3.0kg/cm², (143°C), 50min

Fig. 2 Fatigue crack of specimen without fillet

実験に使用した試料の形状を Fig. 1 に、また配合成分を Table 1 に示す。

(II) 接着端に丸味をつけない場合の疲労き裂

いま、A-1, A-2 なる試料の一端を固定し、他端に振動数約 500 rpm で自然長から全振幅 10% の圧縮変形を繰り返して与えたとき発生した疲労き裂は、Fig. 2 に示すように接着面に対し 26°~28° の角度をなして接着端から試料内部へ進行していることがみられた。ただし、この測定はき裂の深さが 2mm 程度であること、接着端が研摩のためいくぶん丸味を帯びていることが多いことなどのためにいささか精確を期しがたい面があり、また、き裂の部分のゴムが溶けたようになってはみ出してくるので、例外的には約 33° に及んだものも観測されたことを付記しておく。

さて、このようなき裂の発生の様子は、初期圧縮を与えた定変位式振り疲労試験の場合についてすでに筆者らの報告した結果ともきわめてよく一致している。

したがって、接着端に丸味をつけない円柱状防振ゴムにおいては、圧縮作用が加わった場合、繰り返される変形が圧縮、振りのいずれであるかを問わず、また、その変形量の大きさにもほとんど関係なく、一般にそのような場合の疲労き裂は接着面に対し約 25° ないしは少し大きい角度をなす方向に発生しているということが知られるのである。

なお、上述のような圧縮疲労試験の場合、疲労き裂の発生するまでの繰返数、すなわち、寿命は比較的に短い。もとより微小なき裂の発生をそのきわめて初期において発見することにはやや困難を伴うが、だいたい $2 \sim 3 \times 10^6$ の繰返数でそうとう明瞭なき裂にまで成長していることがみられた。

(III) 接着端に丸味をつけた場合の疲労き裂

普通に使用されている圧縮用防振ゴムでは、金属とゴムとの接着端に沿ってゴムの部分に小さな丸味を与え、接着金属端がゴムの部分へくい込むことによってき裂の発生が早められることを避けている。いまそのような試料を圧縮した場合をみると、Fig. 3 は一例を示したものであるが、試料の中央部はふくれ両端近くの丸味の部分はくぼむ。さらに圧縮量を増加するとくぼんだ部分のある箇所が両側から巻き込まれるため、そこにしわが発生するに至る。そうして、このような状態で圧縮変形が繰り返されると、しわの部分が比較的わずかの繰返数で溶けたようになり、かつその部分に明瞭なクラックの発生していることが認められた。このことはきわめて大きい丸味ないしは曲率をつけた試料の場合においても同様であって、すなわち、このようなしわの発生が疲労における弱点となることは明らかである。

なお、ここでしわの発生に関連していま一つの実験結果をあげておこう。試料 B-1 および B-4 について 0~25% の圧縮疲労試験を行なうと、B-1 ではすでに 18% でしわの発生がみられるので、繰返数 $3 \sim 4 \times 10^6$ において試料の全周にわたって発生していたしわの部分が溶けたようになるのがみられたが、いっぽう、B-4 の試料では圧縮ひずみ 25% でちょうどしわの発生しはじめる状態に相当しており、したがって、しわに

Fig. 3 Deformed surface of specimen B-4

なっていた部分は溶けるが、しわの発生していない部分にはなんらの変化もなく、いいかえれば溶けた部分が試料の全周にわたることなく、繰返数 2×10^7 に至ってもこのことに変化はおこらなかった。

(IV) 圧縮変形によるしわの発生

いま圧縮した試料の外周面において、中央ふくれ部の先端と両端近くのくぼみ部の底、この両者の中間の(相加)平均位置を便宜上外周面の変形時における見かけの変位位置とみなし、それが圧縮ひずみの増加に従って半径方向へどのように変位するかをみると、Fig. 4 が得られる。もちろん、このようにしてとった変形時表面の平均位置によるときは、それから計算される見かけの横ひずみの値も近似的なものとなり、したがって、図においては一般に軟質加硫ゴムのポアソン比が $0.46 \sim 0.49$ といわれているのとそうとうの違いが認められるが、概略の傾向としては試料の形状係数にはあまり影響されず、接着端につけた丸味半径の大きいほど大きくなっていることが知られる。

そうして、図中の○印はしわの発生したときを意味するものであって、それらはだいたい圧縮ひずみが $15 \sim 25\%$ のところに相当している。いま、これらを試料の形状係数ならびに丸味半径 R に対する百分率で示すと Fig. 5 のようになる。すなわち、しわの発生についてはそうとうのばらつきを示しているのであるが、その最低限度としては上述の変形時表面の平均位置が R の $55 \sim 60\%$ をこえてさらに外方へふくれようとするような圧縮ひずみを受けるとき、しわの発生がみられるということを知るのである。

つぎに、しわの入った場所(試料の外周面上における)についてみると Fig. 6 に示すようである。すなわち、試料を原形にもどした状態において、しわの発生した位置と接着面の周端とを結ぶときは、接着面に対し約 $26^\circ \sim 28^\circ$ の角度をなしており、かつ、この関係は試料の形状係数によってもほとんど左右されないことがわかる。ただ、丸味半径の大きい場合には図に示したように、しわが2本になることがみられる。

Fig. 4 Relation between apparent lateral strain and compressive strain

Fig. 5 Ratio of apparent lateral strain to radius of fillet

Fig. 6 Wrinkle in compression test and melted portion in fatigue test

3. 考 察

筆者らは接着端に丸味をつけない試料について、初期圧縮を受けた振り疲労試験の結果から、その疲労き裂が試料を原形にもどした状態においては接着面に対し約 25° の角度をなす方向に沿って発生していること、かつまた、このき裂の方向は圧縮時においては両接着面の周端をつらねた円柱面上にはほぼ一致していることを指摘した。すなわち、この方向が軸方向の圧縮変形と半径方向への変形との境界面に相当しているものとみなし、その結果としてここにきわめて大きい内部ひずみが発生するとの見方をもって疲労き裂の発生を理解してきたのであるが、上述の実験結果によると圧縮疲労試験の場合においても同様の考察がなしうことを知ったわけである。

なお、ここで上記の内部ひずみについて付言しておく。いま、Fig. 7 に示すように圧縮を受けた試料のふくらみを両接着面の周端をつらねる円柱面に沿って切除し、ふたたび試料を原形にもどすとくぼみができる。この凹曲面を両接着端近くの円錐台の部分と中央円柱部とに分け、かつ、ゴムの非圧縮性を仮定すれば、こ

Fig. 7 Process to produce specimen and approximation for the calculation

Fig. 8 Relation between angle of depression with bonded plane and compressive strain

Fig. 9 Change of strain on concave surface for 5% increase of compressive strain

れらは圧縮時においては一様な径の円柱に対応するのであるから、それらの対応関係を比較することにより両部分のひずみが計算できる。ただし、図の円錐部の角 θ と圧縮ひずみとの関係としては Fig. 8 の実験結果における破線の値を用い、試料の形状を $30\phi \times 30$ とした。Fig. 9 は任意の圧縮ひずみにおいてさらに 5% の圧縮ひずみを付加した場合について、凹曲面上の両端円錐部と中央円柱部におけるひずみの変化量を示す。図より軸方向圧縮ひずみの比較的小さい常用の範囲内では、その 5% の増加に対し凹曲面上の両端近くでは約 2 倍に及ぶひずみが発生していることが知られる。これより上述のようなクラックの発生の可能性、ならびにいわゆる最小ひずみ 0 の付近で寿命の最小が現わ

れること²⁾、すなわち、自然長にまたがるようなひずみを加えることの不利についても一応理解される。

つぎに接着端に丸味を有する試料が圧縮を受けた場合におけるしわの発生についても、同じく接着面に対し約 25° の角度をなす方向に注目するときは、近似的につぎのような結論に達するのである。すなわち、試料を原形にもどした状態において、接着面に対し約 25° の角度をなす面を丸味の部分に接するように置いたときの接点をとる位置 ($0.58R$ に相当する) をこえて、変形時の表面(平均位置)がさらに半径方向へふくれようとするときにしわの発生がみられ、かつ、そのしわの発生する場所は同じ 25° の角度の面を接着端をとるようにおいたとき、それが試料表面と交わる位置においてである。

さて既述のように圧縮疲労試験の場合、疲労き裂ないしは外周面の一部が疲労のため溶けたようになることを防ぐためには、まずその原因となるしわの発生を未然に防ぐことを要する。かつ、そのしわの発生については圧縮作用が静的であっても振動的であっても、まず影響を受けないものとみられるのであるから、したがってもし静的圧縮試験によってしわの発生する限度を知るならば、疲労試験の場合においてもその限度をこえるような圧縮ひずみが試料に加わることを避けるべきである。このような見地より円柱状防振ゴムに繰り返し与えうる圧縮ひずみの最大限度を定めることができる。

4. 最大圧縮限度(圧縮用防振ゴムの使用基準)

Fig. 10 において ACEG を圧縮前の試料表面、ACE を半径 R の丸味部分、また BCD を接着面に対し 25° の角度をなす方向とする。前節の結果によれば試料に加える圧縮ひずみは変形時表面の平均位置が接点 C をとおる位置に達したときが最大限度である。いま表面が理想的に一樣に半径方向へ変位して ACJK になったものとみなし、かつゴムの非圧縮性を仮定すれば、最大圧縮ひずみはけっきょくつぎの式で与えられる。

Fig. 10 Notations for the calculation

$$\epsilon_{\max} = (H - H')/H$$

$$\text{ただし, } H' = H - \frac{2}{r'^2}(r' - y)s$$

$$r' = r_0 + 0.5774 R$$

$$y = R^2(0.1667 H - 0.1430 R)/s$$

$$s = R(0.5774 H - 0.4311 R)$$

Fig. 11 は試料の厚さ $H=15\text{mm}$ を一定とし、中央平行部の半径 r_0 を $6\sim 50\text{mm}$ の範囲に変化させて計算したものであり、形状係数 F は $r_0/2H$ として求めている。図によれば $\epsilon_{\max}$ は試料の接着端に付与する丸味半径 R を大きくするほど大きい値までとりうる。また、同じ R に対しては形状係数 F の小さいものほど大なる $\epsilon_{\max}$ をとりうることが知られる。

しかしながらここで考慮しなければならないことの一つは、試料中央部における横ひずみの圧縮ひずみに対する割合についてである。すなわち、特に丸味半径の大きく形状係数の小さい場合においてはなほだしいのであるが、中央部における横ひずみが圧縮ひずみに比べてそうとう大きくなり、いいかえれば横ひずみによるクラックの危険を生ずる。上式では外周面が一樣に変位するものとして計算を行なったから、実際には試料中央のふくらみ部では、さらに大きい横ひずみがひき起されていることになる。そこで前掲の実験結果によると、変形時表面の平均位置から求められる見かけの横ひずみと圧縮ひずみとの比について Fig. 12 が得られるが、このようにしてとった見かけの横ひずみにおいてもなお R の小さいものでは小さく、 R の大きいものでは大きく観測されている傾向にあることを考

Fig. 11 Maximum compressive strain

Fig. 12 Apparent poisson's ratio

Fig. 13 Relations between compressive strain, radius of fillet and form factor

慮し、けっきょく見かけの横ひずみ ϵ' の 1.5 倍が $\epsilon_{\max}$ をこえないようにすることにして上述のような不都合のおこることを避ける。Fig. 11 中の○印はこの限界を意味する。このようにして得られる圧縮ひずみの最大限度、ならびにそのときの丸味半径の値を形状係数に対してとると Fig. 13 が得られる。

以上のようにして、筆者らは圧縮用円柱状防振ゴムが定変位型の繰返圧縮を受ける場合における圧縮ひずみの最大限度を得た。つぎに、この結果をすでに発表されている二、三の使用基準の値と比較してみよう。ただ、その際通常の防振ゴムではある大きさの静的圧縮ひずみを与え、それを中心としてさらに適当なひずみ振幅の選ばれることが多く、かつ、自然長にまたがるような変形を繰り返すことは不利であるとされている。そうして筆者らの場合、本報告ではさしあたり圧

縮ひずみの最大限度について考察したのであるから、また、強度ならびに寿命の点よりする検討は目下なお継続中の段階にあるので、静的圧縮ひずみとひずみ振幅とをどのような割合に選ぶのがよいかということについて、直ちに結論を下すことはできない次第であるが、いま、比較の便宜上、上記の諸点を考慮した一般の使用例を参照して一応 $\epsilon_{\max}$ の $2/3$ を静的圧縮ひずみ ϵ とし、また、 $\epsilon_{\max}/3$ をひずみ振幅 $\Delta\epsilon$ として採用することにしよう。すると Fig. 13 の破線に示したような関係になる。そこで、まず防振ゴム研究会の基準をみると、

$$\epsilon = 5 \sim 15 \% \text{以下}$$

$$\Delta\epsilon = 5 \% \text{以下}$$

となっており、これは本報告の $F=0.2 \sim 1.5$ の範囲における値ときわめてよく一致している。また、戸原⁴⁾氏によれば暫定的な基準として、

$$\epsilon + \Delta\epsilon = 15 \% \text{以下}$$

$$\Delta\epsilon = 7 \% \text{ (できれば } 5 \% \text{以下)}$$

となっており、これは本報告の $F=0.5$ の場合にほぼ一致していることが知られる。いっぽう、ゴムの接着周端につける丸味半径については、過大な R をつけると加硫中に生地のはみ出しのため欠陥を生ずることが多いので通常 $2R$ 程度にとどめるのが適当とされているが、本報告の結果では R は圧縮ひずみの大きさに応じて定まるのではあるが、充分な変形の余裕を与えるためいまだ大きく、最大 $4R$ 程度にまで及ぶのが望ましいということになる。たとえば、2 段の丸味をつけることなども、それによって一つにはより大なる R の効果を期待しているものと思われる。

5. 結 言

防振ゴムの定変位式圧縮疲労試験においてみられる疲労き裂は、接着端に丸味をつけない試料においては接着面に対し約 25° ないしは少し大きい角度をなして接着端から試料内部へ進行しているが、いっぽう、丸味をつけた試料の場合には、まず、圧縮によって生じたしわの部分が溶けたようになり、さらに、そこにクラックの発生が認められるようになる。そうして、そのしわの発生については圧縮作用が静的であると振動的であることによってほとんど影響されることがないことを知った。

通常(後者)の防振ゴムの圧縮疲労による破壊はこのようにしわの問題と関連するのであって、本報告はそのしわの発生を未然に防ぐという見地から試料に与える繰返圧縮ひずみの最大限度について考察したものである。すなわち、防振ゴムの圧縮ひずみの選定はその形状係数ならびに接着端につけた丸味半径を充分考慮してなされるべきであることを指摘し、筆者らの得た最大限度を示した。

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、防振ゴムの試料の製作にあたっては住友電気工業株式会社ならびに朝日金属精工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, 福田, 材料試験, 7, 57, 321 (昭33)
- 2) S.M. Cadwell, R.A. Merrill, C.M. Sloman and F.L. Yost, Ind. Eng. Chem., Anal. Ed., vol. 12, No. 1, p. 19 (1940)
- 3) 防振ゴム研究会編, 防振ゴム, 32 (昭30)
- 4) 日本機械学会機械力学部門委員会編, 機械振動とその対策, 112 (昭27)

平板のすみの近くにある円孔が静水圧的に荷重されたときの応力分布

(Stress Distributions around Hydrostatically Loaded Circular Holes in the Neighbourhood of Corners) A.J. Durelli and A.S. Kobayashi, J. App. mech., Vol. 25, No. 2, pp. 178~183, (Jun. 1958) 図10, 表なし

平板のすみ部にある円孔が周囲から Hydrostatically 荷重されるとき応力分布が、偏光弾性実験とゼー性塗料法により決定された。この実験における偏光弾性方法は Diffused-Light Polariscopes が用いられ、等色曲線を決定し、ゼー性塗料法は主応力の方向を決定するのに用いられた。実験は円孔の半径と円孔から平板への外周へ至る距離の比 (R/L) の異なる6つの平板試験が用いて行なわれた。偏光実験用模型はコロンビア樹脂 CR-39 である。平板の対角線に沿う

最大せん断応力、平板の外周、および円周における主応力、および円孔中心から平板の周辺への垂直線に沿う最大せん断応力が (R/L) との関係で示されている。これらの図では、円孔の周辺と平板の周辺の二、三の点における応力が、厚く円筒に対する Lame Equation を用いて計算した応力と、半無限平板にある一円孔が周辺から Hydrostatic 圧力を受けたときの Jeffery による結果とも比較されている。

(伊藤勝彦)