

ボイドを有する免震積層ゴムのせん断負荷に対する力学特性[†]

納 富 充 雄* 下 坂 陽 男**
鈴 木 重 信*** 芳 沢 利 和***

Mechanical Property of Shear Loading for Seismic Isolation Rubber Bearing with Voids

by

Mitsuo NOTOMI*, Haruo SHIMOSAKA**, Sigenobu SUZUKI*** and Toshikazu YOSHIZAWA***

The mechanical properties of rubber that is the main member of a seismic isolation rubber bearing is evaluated for the cyclic tension, shear and torsion loading. The dimension of a specimen is a small size disk that imitates the bearing. The size and distribution of which the voids are nucleated inside rubbers applying tensile load depend on the rubber thickness. The preserving maximum shear stress rate (PMSSR) is defined as the shear stress at reaching the applying strain, 2 or 4 on each cycle divided by the shear stress on first cycle. The PMSSR on applying strain = 4 reduces with the increase of cycle numbers and more than on strain = 2. The tendency of reducing PMSSR depends on the thickness of rubber and the reduction attains about 20% at 30 cycles with more thickness than three millimeter and the reduction is enhanced by the voids inside rubber made by pre-tension. These results indicate that the assessment of durability will be needed for a post-seismic bearing.

Key words : Rubber material for seismic isolation, Tensile loading, Shear loading, Torsion loading, Voids

1 緒 言

地震に対する構造には、耐震構造、制震構造、免震構造の3種類がある。耐震構造は建物自体を強固にして地震の揺れに耐えられるように設計された構造で現在の主流である。制震構造は揺れに対して逆位相のゆれを強制的に発生させることにより、地震の揺れを抑えるように設計された構造である。高層ビルや超高層ビルなどに採用されており、地震以外の強風等の揺れにも対応している。一方、免震構造は、積層ゴムやダンパ等を設置して地面からの揺れに対して絶縁効果を期待するように設計された構造である。地震の揺れに対して、耐震構造では大きかった加速度や変形を低減し、建物の安全・安心性の向上、地震後の建物の機能を維持、設計の自由度が増すことができる。¹⁾従来、固有周期が長い高層建物や超高層建物等に対しては免震の効果が少ないと考えられており、制震構造が主流となっている。しかし、初期投資や保守管理を含めた経済性とそれに対して期待される効果の高さから、今後は高層建物、超高層建物等にも免震構造が採用されていくと考えられる。この免震機能を果たすデバイスとして最も広く用いられているのが免震積層ゴムである。このデバイスは薄い円盤状のゴムシートと銅板を交互に数十層ほど積み重ねて円柱形状とし、ゴムと銅板は加硫接着する。この構造によって、建物の重量を支える垂直方向（円盤の中心軸方向）には高い剛性を有し、

地震の振動と同じせん断方向の剛性は低くなっている。

高層建物のように建物自体が細長くなる（アスペクト比が大きくなる）ものは、転倒モーメントと建物の自重による反力モーメントの比が大きくなる。一旦、積層ゴムに引張力が負荷されると、外観上は損傷を受けていない場合でも、ゴム層内部でボイド（空隙）が発生している場合がある。²⁾ゴムに引張応力が負荷された時に発生するボイドの研究・成長は既にいくつかあるが、^{3)~5)}ボイドを有するゴムの機械的特性変化について調べた研究は見当たらない。ボイドの生成はデバイスの機能を損なう恐れがあるため、ボイドを考慮した耐久性の検討は重要である。例えば、ある地震動を受けた免震積層ゴムの廃棄・交換の是非については、法制化を含めた議論が行われていくであろう。

本研究では免震積層ゴムのゴム部分を模擬した小型試験片を用いて、繰返し引張試験、せん断試験およびねじり試験を行い、ボイドを有するゴム材の各種性能の変化について調べる。引張試験では、繰返し試験のひずみ速度が耐久性能を示す最大引張応力に及ぼす影響とゴム厚さがボイド生成に及ぼす影響について調べた。次にボイドの有無とゴム厚さの大小がせん断試験とねじり試験の繰返しによる最大せん断応力の変化に及ぼす影響について調べた。さらに地震動を受けてボイドが生成した場合の初期性能の維持に関して議論した。

† 原稿受理 平成 20 年 3 月 6 日 Received Mar. 6, 2008 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 明治大学理工学部機械工学科 〒214-8571 川崎市多摩区東三田, Dept. of Mech. Eng., Meiji Univ., Tama-ku, Kawasaki, 214-8571

** 明治大学理工学部機械工学科 〒214-8571 川崎市多摩区東三田, Dept. of Mech. Eng., Meiji Univ., Tama-ku, Kawasaki, 214-8571

*** (株)ブリヂストン 〒224-8510 横浜市戸塚区柏尾町, Bridgestone Corporation, Totsuka-ku, Yokohama, 224-8510

2 試験条件

試験は免震積層ゴムを模擬した小型試験片を採用した。これはゴム円盤の上下面を軟鋼 (SS400) で作られた円盤に加硫接着した円柱形状となっている。試験片形状を Fig. 1 に示す。ゴムは免震積層ゴムに実際に使用されているもので、主成分は天然ゴムであり、添加剤によりせん断弾性係数がほぼ 0.392 [MPa] (4kgf/cm^2) になるよう調整されている。試験片ゴム厚さを $t = 1, 3, 5, 7, 10$ [mm] の 5 種類とした。全ての試験で疲労試験機 (MTS 社製 810 型 Material Test System) を使用し、せん断負荷、ねじり負荷の試験用治具は自作した。負荷の様子を Fig. 2 に示す。図中の矢印は負荷変位の方向を示している。

繰返し引張試験では、変位制御でひずみ速度は 0.02 [mm/s] と 10 [mm/s] の 2 通り、繰返し数は 5 回、入力波形は sin 波で、 $\varepsilon_{\max} = 2$ の片振りの繰返し負荷を与えた。繰返しせん断試験では、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max} = 4$ と $\gamma_{\max} = 2$ の 2 通りでボイド有りとし無しの試験片を、繰返しねじり試験では $\gamma_{\max} = 2$ でボイド有りとし無しの試験片を供し、ひずみ速度は 0.6 [mm/s]、入力波形は sin 波で、繰返し数は最大 300 回とした。ここで引張負荷との繰返し数の違いは 1 回の地震動で受けるそれぞれの負荷の回数を基に設定したことによる。また、せん断負荷の最大せん断ひずみ条件は、免震構造設計指針⁶⁾に拠った。ボイド有りの試験片は繰返し試験前に引張ひずみ $\varepsilon = 2$ を与えることによりボイドを導入した。繰返し試験中の荷重から応力を求め、応力-ひずみ関係を得る。紙面の都合上、以後は主にゴム厚さ $t = 3$ [mm] における結果を示す。なお、ねじり試験ではゴム厚さ $t = 10$ [mm] は行っていない。

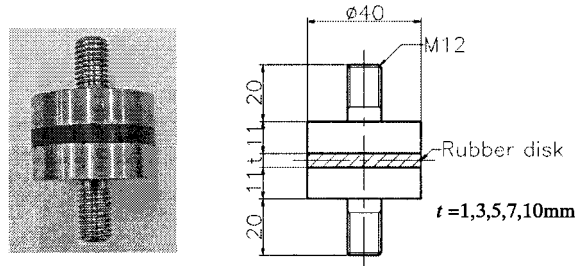


Fig. 1 Dimensions of the specimens.

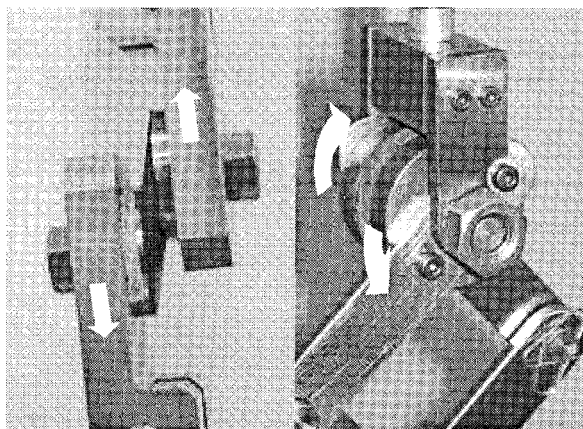


Fig. 2 Photos of the shear test and the torsion test.

3 引張試験

ゴム厚さ $t = 3$ [mm] に対してひずみ速度が 0.02 [mm/s] と 10 [mm/s] の場合の 1 回と 5 回の引張試験の結果を Fig. 3 に示す。ひずみ速度が 10 [mm/s] の場合は、0.02 [mm/s] の場合より 1 回の最大引張応力が大きくなり、これはひずみ速度が速い場合には剛くなるゴムの一般的な特性と符合する。また、1 回目においてはいずれのひずみ速度においても大きなヒステリシスを描いているが、5 回目のヒステリシスは小さくなっている。

1 回から 5 回までの各回における最大引張応力を Fig. 4 に示す。いずれのひずみ速度においても回数の増加とともに最大引張応力は減少するが、その減少量は異なっている。そこで、1 回の最大引張応力に対する各回における最大引張応力の比を最大引張応力維持率として Fig. 5 に示す。ひずみ速度が 10 [mm/s] の場合は、ひずみ速度が 0.02 [mm/s] の場合より最大引張応力の減少が大きい結果となった。これは、ひずみ速度が 10 [mm/s] の場合、応力が高い分、内部に生成されるボイドの量が多かったため、繰返しとともに損傷が蓄積したため考えている。

4 せん断試験

ボイドを有する試験片に対しては、予め引張試験によってボイドを導入した。引張負荷は先の引張試験と同様に、ひずみ速度を 0.025 [mm/s]、最大引張ひずみを 2.0 に設定した。ボイド導入前と導入後のゴム内部の様子を Fig. 6

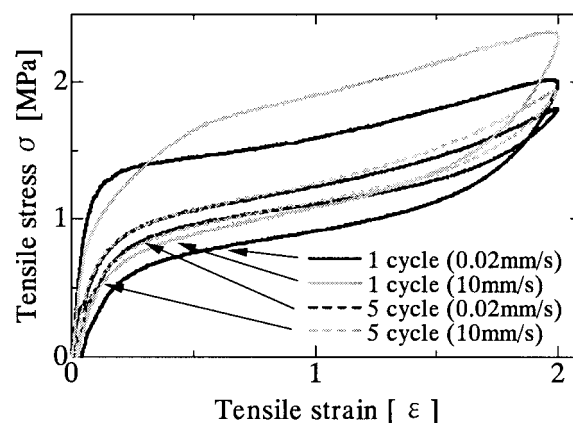


Fig. 3 Stress-strain curves of the tensile tests. ($t = 3$)

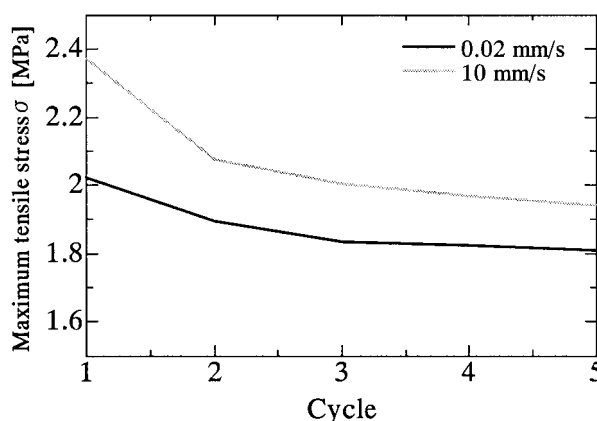


Fig. 4 Maximum tensile stress at each cycle of the tensile tests. ($t = 3$)

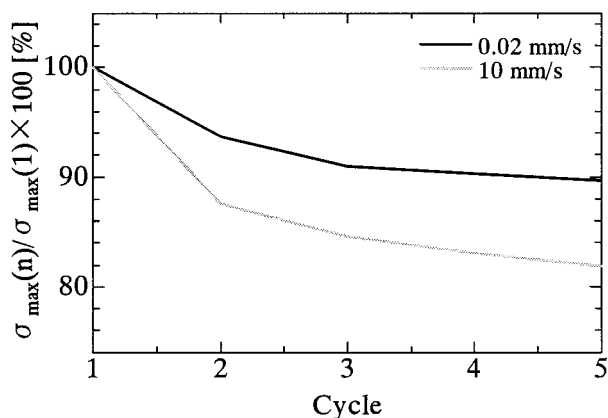


Fig. 5 Preserving maximum tensile stress ratio at each cycle of tensile test. ($t = 3$)

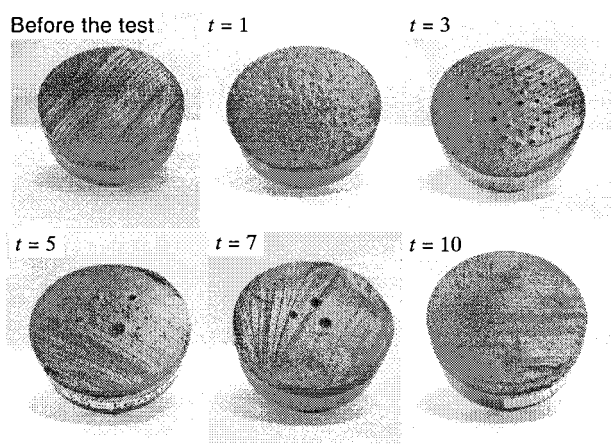


Fig. 6 Cross-sections inside the rubber disks after the tensile tests.

に示す。ボイドの分布と大きさはゴム厚さに大きく依存した。ゴムが薄いと小さなボイドが全面に生成し、ゴムが厚くなると比較的大きなボイドが試験片中心部に生成した。なお、ボイドの不均一生成に関しては参考文献2)で考察している。

ゴム厚さ $t = 3$ [mm] に対して最大せん断ひずみ $\gamma_{\max} = 2$ の場合のせん断試験結果を Fig. 7 に示す。1回目と300回目の両方で応力-ひずみ関係にヒステリシスはほとん

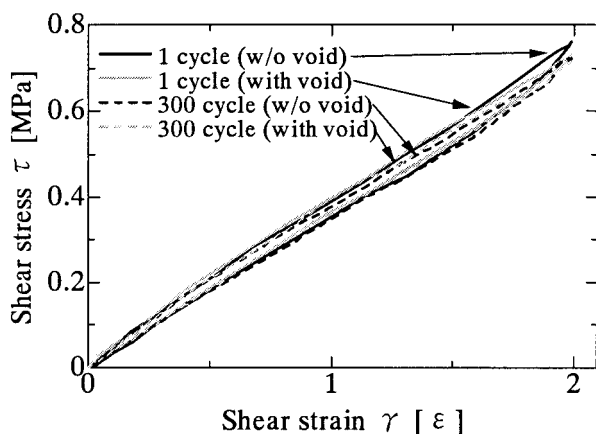


Fig. 7 Stress-strain curves of the shear test. ($\gamma_{\max} = 2, t = 3$)

どなく、ほぼ線形関係となった。ボイドが応力-ひずみ関係に及ぼす影響も小さく、ボイドの有無にかかわらず300回の繰返し負荷による最大せん断応力の低下はわずかであった。

ゴム厚さ $t = 3$ [mm] に対してせん断ひずみ $\gamma_{\max} = 4$ の場合のせん断試験結果を Fig. 8 に示す。1回目の場合は、応力-ひずみ関係が非線形となり、 $\gamma = 3$ を超えた辺りで応力が急上昇するハードニング現象が認められ、大きなヒステリシスも存在した。最大せん断応力は、ボイド無しの方がボイド有りより高い。さらに、ボイド有無による最大せん断応力の差は、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max} = 2$ の場合より大きい。さらに、ボイド無しのゴムと有りのゴムの両方で、300回目の最大せん断応力は大きく減少した。

最大せん断ひずみ $\gamma_{\max} = 2$ と $\gamma_{\max} = 4$ の1回目から300回目までの各回における最大せん断応力の減少量を Fig. 9 に示す。 $\gamma_{\max} = 2$ の場合は1回目から300回目までの最大せん断応力の減少量を最大せん断ひずみ $\gamma_{\max} = 2$ と $\gamma_{\max} = 4$ の場合と比較すると、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max} = 2$ の場合は、ボイドの有無に関わらず、1回の剛性を維持していることがわかる。それに対して最大せん断ひずみ $\gamma_{\max} = 4$ の場合は、高ひずみ領域で応力が急激に増加するハードニング現象が見られたため、1回目は $\gamma_{\max} =$

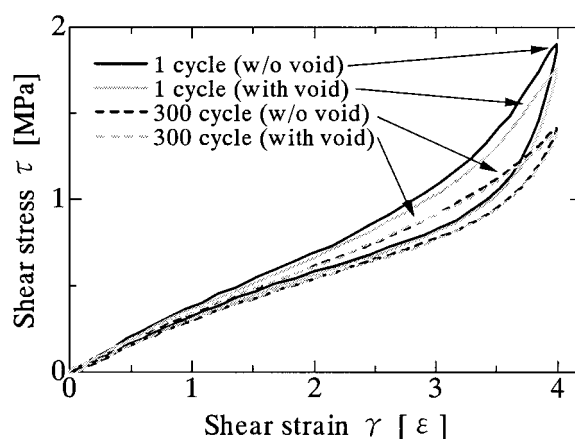


Fig. 8 Stress-strain curves of the shear test. ($\gamma_{\max} = 4, t = 3$)

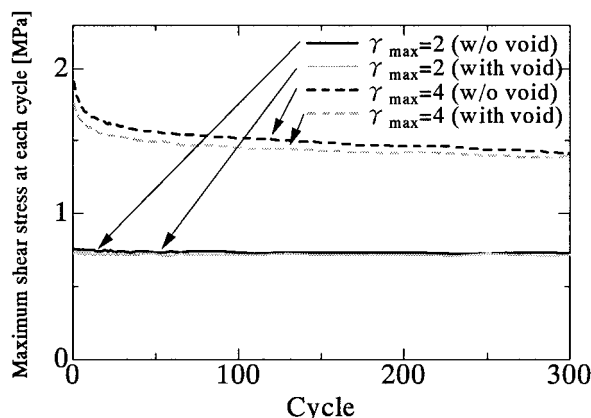


Fig. 9 Maximum tensile stress at each cycle of tensile test. ($t = 3$)

2の2倍以上の最大せん断応力を示している。最大せん断ひずみ $\gamma_{\max} = 4$ は積層ゴムの限界性能に近いため、十数回以降の最大せん断応力は、急激に低下し、その後、徐々に低下した。また、最大せん断応力に関してボイドの有無で比較した場合、ボイドなしの方が最大せん断応力の値は高いことが分かる。これは、ボイド導入時の大きな引張荷重によってゴム内の損傷やボイドの影響で剛性が低下した結果、1回目の最大せん断応力に違いが生じたと考えられる。また、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max} = 2$ の場合より最大せん断ひずみ $\gamma_{\max} = 4$ の場合の方がボイドの有無による最大せん断応力の値の差が大きい。さらに、 $\gamma_{\max} = 4$ の場合の最大せん断応力は数十回まで急激に減少し、その後、緩やかに減少している。

最大せん断ひずみ $\gamma_{\max} = 2$ と $\gamma_{\max} = 4$ の各々の回における最大せん断応力維持率の変化を Fig. 10 に示す。最大せん断ひずみが $\gamma_{\max} = 2$ の場合は300回でも最大せん断応力維持率はほぼ100%を示していることから、300回負荷された場合でも $\gamma_{\max} = 2$ ならゴムの強度は維持されることがわかる。また、ボイドの有無による違いはほとんどない。一方、 $\gamma_{\max} = 4$ の場合は、ボイド有りの方がボイド無しより最大せん断応力維持率は若干高めに推移している。これは、ゴム内にボイドが形成された方が、ゴム内部に発生する応力が抑えられ、その結果、最大せん断応力の減少の程度が低く抑えられたためと考えられる。

Fig. 10 では、1回目に対する各回の最大せん断応力の変化について検討した。長期にわたる使用では、ある時の地震動によってゴムに引張力が負荷され、そのまま交換せずに使用し、次の地震を向かえる場合が想定される。そこで、ボイドなしの初期最大せん断応力（設計時に想定される最大せん断応力）を基準として、ボイド有りの最大せん断応力維持率を初期最大せん断応力維持率（Normalized by that of As-Received-Specimen : NARS）として再び算出した。その結果を Fig. 11 に示す。 $\gamma_{\max} = 2$ と $\gamma_{\max} = 4$ の両者において、ボイド有りの方がボイド無しより初期最大せん断応力維持率が低下した。特に $\gamma_{\max} = 4$ の場合は300回目で最大せん断応力の低下は23%となった。免震構造協会の規格では⁷⁾ 水平ばね定数の判定基準

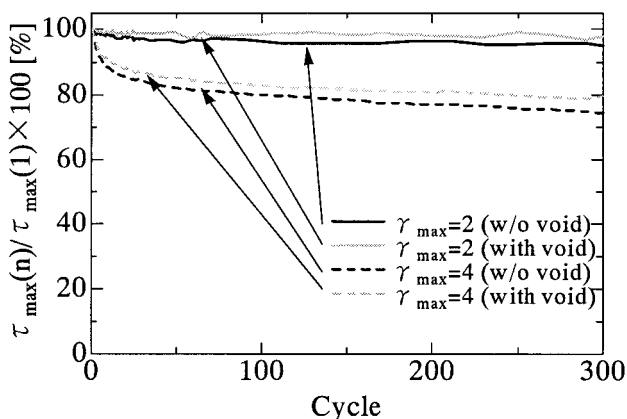


Fig. 10 Preserving maximum tensile stress rate at each cycle of tensile test. ($t = 3$)

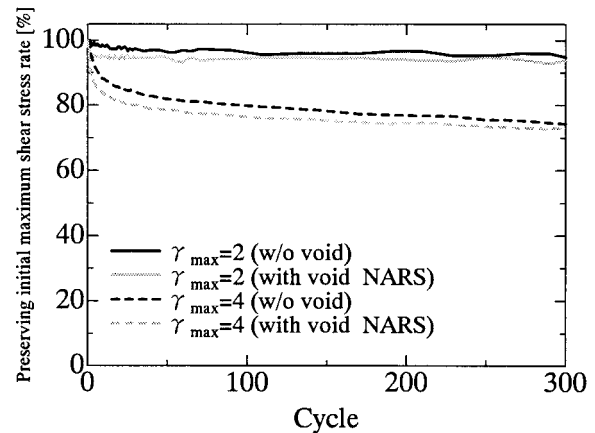


Fig. 11 Preserving initial maximum shear stress rate of the shear tests. ($t = 3$)

は設計値の $\pm 20\%$ 以内となっている。つまり、この結果から $\gamma_{\max} = 4$ の場合は、300回目でこの基準から逸脱することが示された。一旦、地震動を受けた免震積層ゴムの交換基準については、今後の検討が必須であろう。

各試験片厚さの最大せん断応力維持率を Fig. 12 に示す。図中には1, 30, 300回目による推移も示されている。その結果、試験片厚さが5mmを超えると、30回目ではほぼ20%の低下、さらに300回目では約50%の低下が認められた。一方、試験片厚さが1mmの場合は比較的安定した結果となっている。

5 ねじり試験

ねじり試験によるゴム厚さ $t = 3$ [mm]の最大せん断ひずみ $\gamma_{\max} = 2$ と $\gamma_{\max} = 4$ の場合の1回目と300回目の応力-ひずみ関係を Fig. 13 に示す。せん断試験の $\gamma_{\max} = 2$ の試験結果と比較して、ねじり試験の場合はヒステリシスがが大きくなった。しかし、ハードニング現象は見られなかった。次に、1回目から300回目までの各回における最大せん断応力の変化を Fig. 14 に示す。数回の繰返しまで最大せん断応力が増加するが、その後徐々に減少した。ボイド有りの場合は、ボイド無しに比べて最大せん断応力はわずかに小さいが先の傾向は同じであった。なお、除荷直後の応力の急激な減少は治具の問題であるが、ここでの議論に影響しないと考えている。

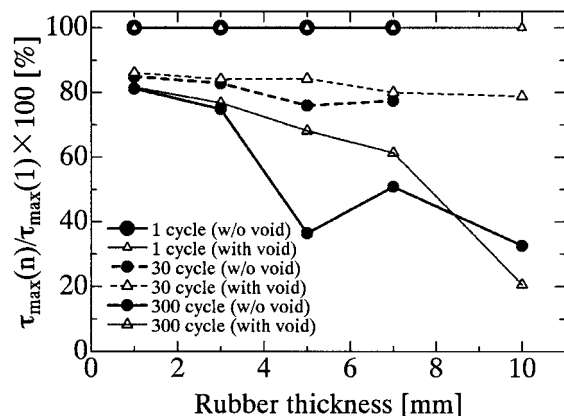


Fig. 12 Preserving maximum shear stress rate as a function of the rubber thickness.

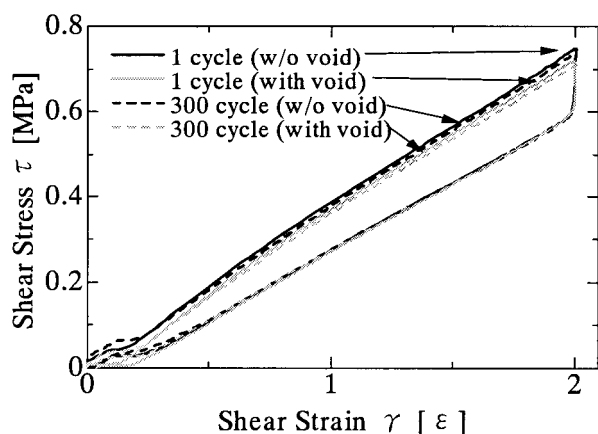


Fig. 13 Reduction rate of maximum shear stress of the torsion tests. ($t = 3$)

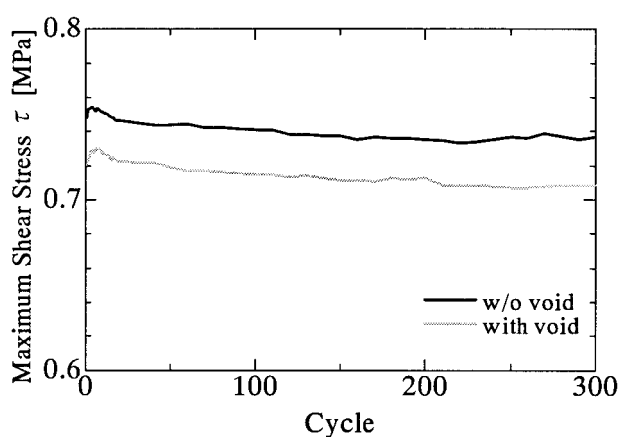


Fig. 14 Reduction rate of maximum shear stress of the torsion tests. ($t = 3$)

1回目から300回目までの各回における最大せん断応力維持率を Fig. 15 に示した。ボイド有りの場合はせん断試験の場合と同様に初期最大せん断応力維持率も示している。Fig. 14 でも述べたように、最大せん断応力維持率の変化はボイドが有る場合と無い場合でほとんど同

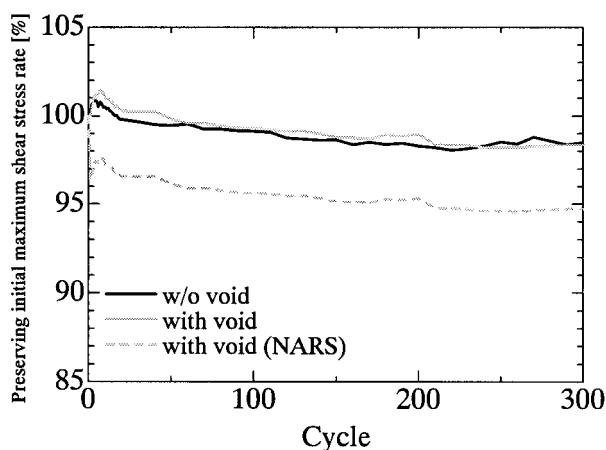


Fig. 15 Preserving maximum shear stress of the torsion tests. ($t = 3$)

じであり、ボイド有無の影響をほとんど受けない。一方、初期最大せん断応力維持率を見ると、最初の段階で約5%と低下し、この状態が最後まで続いていることが分かる。このことから、ねじりに負荷に対してはボイドの発生の有無に注意すべきである。

6 結 言

免震積層ゴムのゴム材を模擬した小型試験片に引張、せん断、ねじり負荷を与え、負荷ひずみに対する応力値の変化を調べた。さらに、それらのデータから最大応力維持率を定義し、繰返し数の増加による減少を観察した。その結果、引張負荷の繰返しによって、最大引張応力維持率は減少するが、この程度はひずみ速度に大きく依存した。せん断負荷の繰返しによって最大せん断応力維持率は減少するが、その減少の程度は負荷せん断ひずみ $\gamma_{\max} = 4$ の方が $\gamma_{\max} = 2$ の場合よりも大きい。特に $\gamma_{\max} = 4$ の場合は、厚さ 3mm を超えると 30 回程度で水平剛性の判定基準である 20% を上回る減少率が認められることが分かった。特に引張負荷によって発生したボイドを有する試験片の場合は、最大せん断応力維持率の低下が著しい。一方、繰返しねじり負荷の場合は、最大せん断応力維持率の減少の程度はボイドの有無による違いは少ないが、ボイドの導入による最大せん断応力の低下は存在する。このことから、一旦、地震動を受けた免震積層ゴムの交換基準については、交換の是非に関するさらなる検討が必須であると考えられる。なお、実験は松島千裕氏（明治大学大学院、当時）の協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) J. M. Kelly, "Earthquake-Resistant Design with Rubber 3rd ed.", pp.1-18 (2005) Tokyo Denki University Press.
- 2) M. Notomi, H. Shimosaka, H. Shimoda, S. Suzuki and T. Yoshizawa, "Void nucleation of rubber material for seismic isolation due to tension load", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.68, No.669, pp.744-749 (2002).
- 3) A. N. Gent, Ed. J. E. Mark, B. Erman and F. R. Eirich, "Science and Technology of Rubber", pp.483-486 (1994) Academic Press.
- 4) Y.-W. Chang, A. N. Gent and J. Padovan, "Expansion of a cavity in a rubber block under unequal stresses", International Journal of Fracture, Vol.60, pp.283-291 (1993).
- 5) A. N. Gent, "Elastic instabilities in rubber", International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol.40, pp.165-175 (2005).
- 6) Architectural Institute of Japan, "Recommendation for the Design of Base Isolated Buildings", p.47 (1993) Maruzen.
- 7) Nihon-menshinkouzou-kyoukai, "Menshin Sekiso Gomu Nyumon", p.135 (1997) Ohumu-Sya.