

ゴムの応力ひずみ曲線の Mooney-Rivlin 式による検討

0317034 河野 学

指導教員 皆川 勝 吉田 郁政 飯島 正徳

1. 研究背景

大地震が発生した際、隣接桁間・桁と橋台間では衝突が発生し、その際高い衝突力が作用する。これにより桁・橋台、さらには落橋防止構造までもが損壊し、落橋に至る危険性が高い。これを受けて、大地震時に隣接桁間・桁と橋台間で生じる衝突力を緩和するため、緩衝材を設置することが推奨されている¹⁾。

緩衝材に求められる性能として、衝突力の低減効果とエネルギーの吸収性が挙げられる。現在、鋼材等に比べ剛性が低く、衝突力の低減効果に優れること、繰り返し衝突に対応できること、比較的 low コストであることなどから、緩衝材としてゴムが用いられる機会が多くなっている。

2. 研究目的

ゴムの弾性は主に分子鎖が乱雑な状態になろうとして生じるエントロピー弾性であるため、ゴムの応力-ひずみ関係は非線型挙動になる²⁾。このようにゴムの変形挙動は複雑なため、ゴム製品の設計において応力-ひずみ関係の検討が重要になる⁴⁾。本研究ではより簡便で正確な試験方法の確立とゴム製品の設計のため以下の2つについて検討した。

- ① ゴムの材料物性を知るための試験方法に関する検討。
- ② ゴムの応力ひずみ曲線の Mooney-Rivlin 式による検討。

3. 実験

[試料・試験体形状] 試料にはスチレンブタジエンゴム(SBR)、市販の天然ゴムバンド(NR-band)を選択した。SBRはカーボンブラックのみで硬度を55, 65, 75に調節したものを用いた。試料名はゴムの種類に硬度を添えて示す。NR-bandにはカーボンブラックは配合されていない。試験体は引張試験においてNR-bandは図-1に示すような折径100mm, 幅6mm, 厚さ1.1mmの試験体をSBRは図-2に示すようなチャック間が10mm, 幅2mm, 厚さ2mmの試験体を用いた。圧縮試験においては直径6mm, 厚さ2~2.5mmの円盤状の試験体を用いた。

[試験機] 試験機は島津製作所製のオートグラフAGS-J 1kNを使用した。引張試験に使用するチャックと圧縮試験に使用する圧盤を図-3に示す。

[入力条件] 引張試験は変位速度 300mm/minで試験体の破断まで、圧縮試験は変位速度 10.0mm/minで荷重 900Nになるまで行った。

4. Mooney-Rivlin 式と Mooney プロット

ゴムの応力-ひずみ関係を記述する式として式-1の Mooney-Rivlin 式がある。

$$\frac{\sigma}{(\lambda - 1/\lambda^2)} = 2C_1 + 2C_2 \frac{1}{\lambda} \quad (\text{式-1})$$

ここで σ は応力, λ は伸長率, C_1 と C_2 は未定定数である。この式はゴムのよう到大変形が可能な材料が応力を受けてひずんだとき, 外部から与えられたエネルギーをひずみエネルギーという形でゴム試料の中に貯蔵される仮定をしており, そのひずみエネルギーをひずみ関数として多項式で表したのから求めたものである²⁾。実験結果を $1/\lambda$ と $\sigma/(\lambda - 1/\lambda^2)$ の関係としてプロットする Mooney プロットでは式-1は直線となる。しかし図-5に示すNR-bandの Mooney プロットは部分的にしか直線にならないことがわかる。 C_1 と C_2 を決定することができるのはプロットが直線となる範囲であることから, プロットが直線となる範囲が式の適用範囲となる。

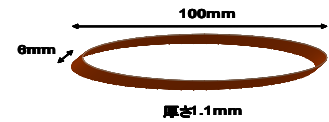


図-1 バンド状試験片

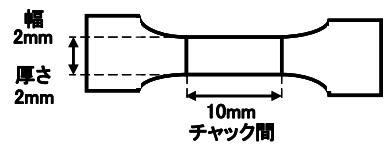
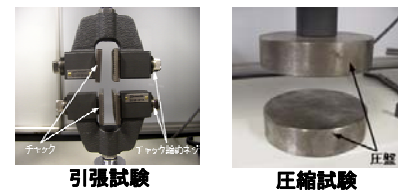


図-2 ダンベル状試験片



引張試験

圧縮試験

図-3 試験機のチャックと圧盤

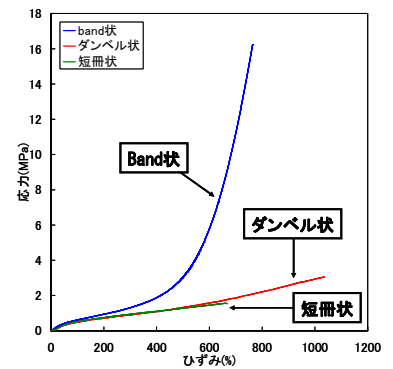


図-4 試験体形状による
応力-ひずみ関係の変化

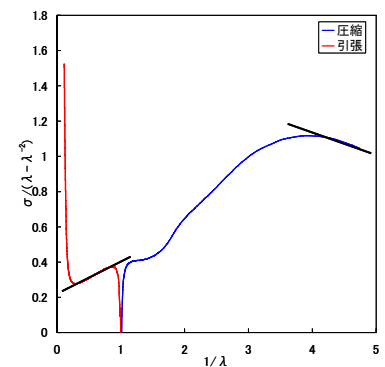


図-5 NR-band の Mooney プロット

4. 結果と考察

①試験体形状に関する検討

短冊状, ダンベル状, バンド状のNR-bandの応力-ひずみ曲線を図-4 に示す. 図-4 からわかるように, 滑りやチャックの挟みによる破断のないバンド状はゴムの大変形領域までの挙動をみる事ができる. 短冊状, ダンベル状に関してはNR-bandと比較すると同じひずみでも応力が低くなっていることから, 共にひずみ 100%以上からすべりが生じているといえる. しかし, 短冊状に比べチャックで挟む面積の大きいダンベル状の方がより大きなひずみまでの挙動を見ることができる. これより簡便な応力-ひずみ関係を求めるにはバンド状が適しており, 短冊状・ダンベル状はひずみ 100%までは信頼性があるといえる.

②Mooney-Rivlin式のフィットによる結果

NR-band のMooneyプロットを図-5 に示す. この図から引張・圧縮共に直線になっている範囲を読み取り, 得られた範囲でフィットした結果と実験値を図-6, 図-7 に示す. 図-6 より引張は適用範囲に関する検討を行ったフィット結果が伸長率で約 4 程度まで実験値と近似している. また図-7 より圧縮は適用範囲に関する検討を行ったフィット結果がほぼ実験値と近似していることがわかる. これらのことからMooneyプロットを行なうことにより, 実験値とよく近似するフィット結果を導くことができ, 伸長率が約 0.2~4 までは記述できることがわかった. しかし図-6 からわかるように適用範囲の検討を行っても引張の大変形領域までは記述することができない.

③カーボンブラック配合量による適用範囲の変化

SBRのMooneyプロットを図-8 に示す. これよりカーボンブラックの配合量の増加に伴い直線の傾きが急になっていく傾向があることがわかる. 図-9 に示す直線の傾きとカーボンブラック重量分率の関係からもカーボンブラックが増加するにつれて傾きが急になっていることがわかる. 式-1 より直線の傾きは C_2 , 直線の切片は C_1 であることから, C_2 の変化は擬似的な架橋点の数に関係しており C_1 は硫黄による架橋を表している²⁾. これは図-10 のように硫黄による架橋点に加えてカーボンブラックが多くなることで擬似的な架橋点が生じることによるものであると考察できる³⁾. また図-8 よりカーボンブラック配合量が増加していくにつれ直線的になる範囲が狭くなっていくことがわかる.

5. 結論

本研究ではMooney-Rivlin式を用いゴムの応力-ひずみ関係の適用について検討した. その結果示されたことを以下にまとめる.

- Mooney-Rivlin式は適用範囲が限定されており, NR-bandでは伸長率が約 0.2 ~4 までの範囲のみ適用することができる.
- Mooney-Rivlin式中の未知定数 C_2 はカーボンブラックによる擬似的な架橋点の数に関係している.
- カーボンブラックの配合量が増加すると Mooney-Rivlin 式で記述できる応力-ひずみ曲線の範囲が狭くなっていく.

[参考文献]

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.12.
- 2) 村上兼吉：レオロジー基礎論, 産業図書株式会社, 1997.3.
- 3) 日本ゴム協会：ゴム技術の基礎, 日本ゴム協会 1983.4.
- 4) 飯塚博, 山下義裕：ゴム材料の力学特性と FEM 解析への利用, 日本ゴム協会誌, vol77, pp306-311, 2004.9

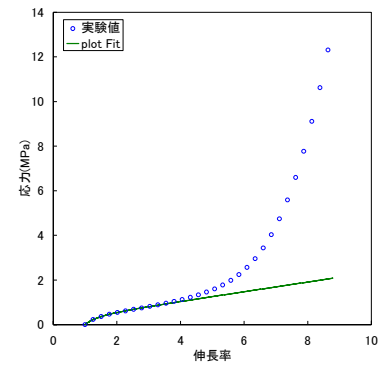


図-6 NR-band の引張フィット結果

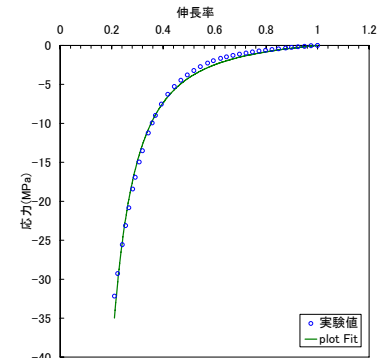


図-7 NR-band の圧縮フィット結果

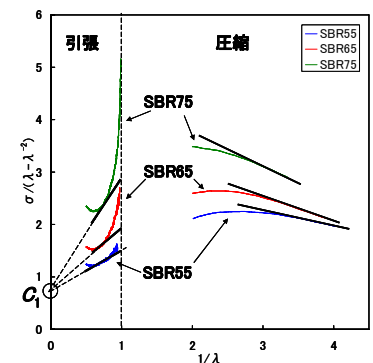


図-8 SBR の Mooney プロット

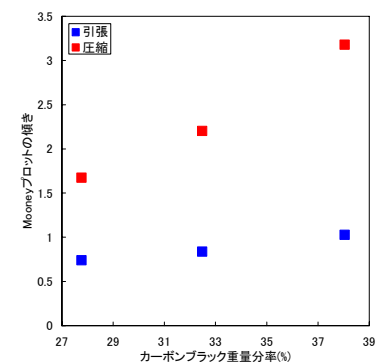


図-9 配合による C_2 の変化

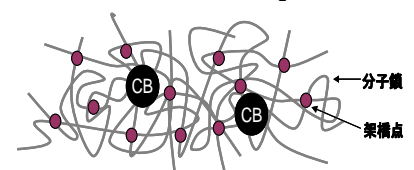


図-10 ゴムの分子構造