

ゴム支承の温度依存性に関する研究と Mullins 効果のモデル化の検討

サンコーコンサルタント 正会員 ○石島慎也
 埼玉大学大学院 正会員 奥井義昭
 埼玉大学大学院 学生会員 Nguyen Anh Dung
 土木研究所寒地土木研究所 正会員 三田村浩
 ゴム支承協会 正会員 今井 隆

1. はじめに

ゴム支承は橋梁の免震装置として広く使用されている。その材料としてよく用いられている高減衰ゴムは優れた減衰性能を持つが、一方で周囲の温度により特性が変化する温度依存性や繰り返し载荷を受けることにより応力軟化がおこる Mullins 効果などの特性を持つことが知られている。これらの特性は現在、耐震設計で用いられているバイリニアモデルでは、十分考慮できていない。そこで、本研究では高減衰ゴム材料のせん断試験を行い、温度依存性の検討と Mullins 効果のモデル化の検討を行った。

2. 温度依存性試験

温度依存性が問題となるのは主に低温下のため、 $+23^{\circ}\text{C}$ 、 -10°C 、 -30°C 、 -40°C 下で試験を行い、低温下でのゴム材料の挙動を調べた。供試体の寸法は図-1 のとおりである。図-1 の中で黒く塗りつぶしたところが高減衰ゴムであり、図-1 の水平方向に軸力を作用させて、せん断変形をゴム材料に作用させた。

図-2 に示すひずみ履歴を与えた MSR 試験を行い、ゴム材料に無限に遅いひずみ速度で载荷したときの応答応力であるつり合い応答を求め、各温度で比較した結果を図-3 に示す。この図から、温度が低いほどつり合い応答応力は大きく、高ひずみ域で急激に応力が大きくなるハードニングが起こりやすいことがわかる。

MSR 試験やリラクゼーション試験などの結果から、耐震設計用に開発されているモデルであるレオロジーモデル¹⁾のパラメータを同定した。同定されたパラメータを用いて繰り返しせん断試験の4サイクル目の応答応力をシミュレーションした結果と、実験結果を比較した図を図-4 に示す。図-4 から、シミュレーションした結果は実験結果をよく表現できていることが分かる。このことから、低温下においても実験からパラメータを同定することによって、レオロジーモデルでシミュレーションを行うことが可能であるとわかった。

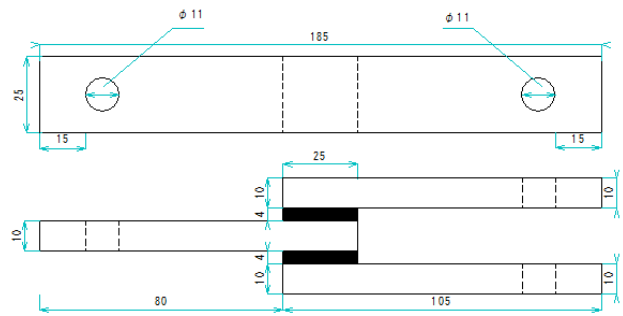


図-1 供試体の寸法 単位 mm

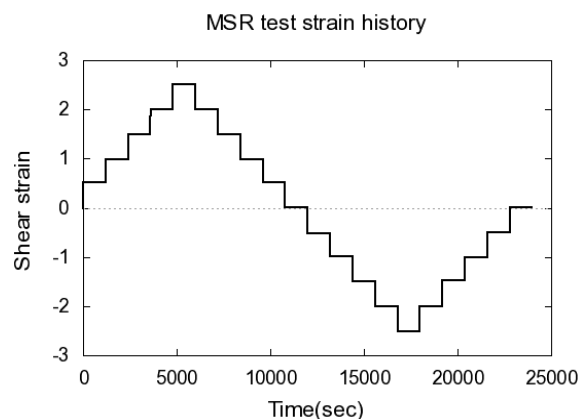


図-2 MSR 試験の入力ひずみ

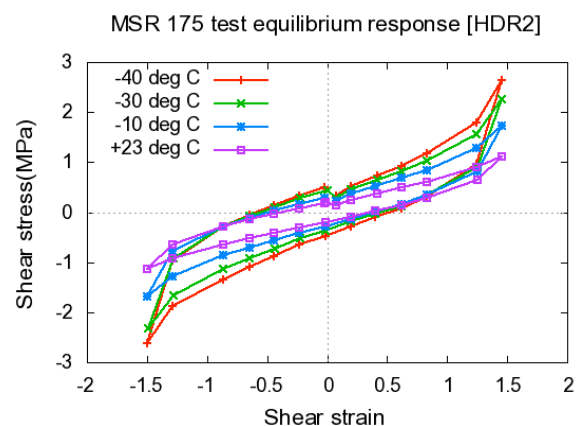


図-3 つり合い応答における温度依存性

キーワード：高減衰ゴム, 低温特性, Mullins 効果

連絡先：〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学大学院 TEL: 048-858-3558

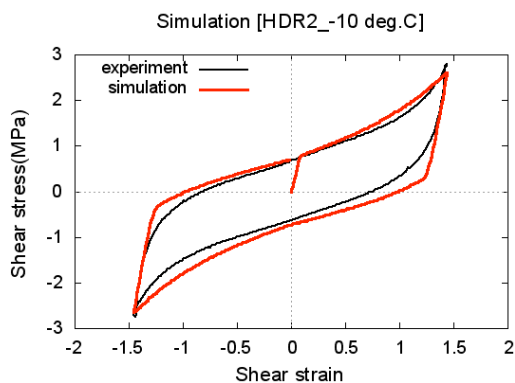


図-4 実験結果とシミュレーション結果の比較

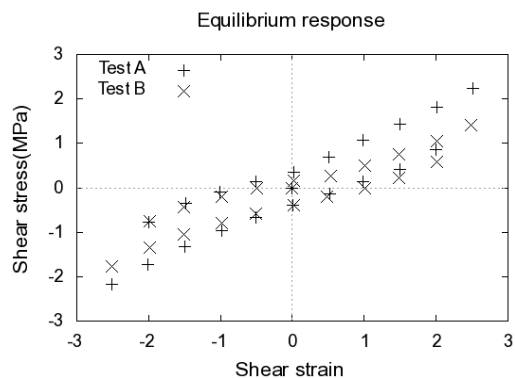


図-5 つり合い応答における Mullins 効果の影響

3. Mullins 効果の検討

つり合い応答における Mullins 効果を検討するため、図-2 に示すひずみ履歴を用いて MSR 試験を行った。バージンの供試体を用いた試験(試験 A)とプレローディングをかけた供試体を用いた試験(試験 B)を行い、つり合い応答の比較を行った結果を図-5 に示す。図-5 から、つり合い応答において試験 A は試験 B に比べて大きな応答応力を示すことがわかる。載荷時には応力低下が大きく、除荷時には小さい。試験 B の応答応力に対する試験 A の応答応力の比を計算すると、ひずみが 2.5 のとき 1.5 以上となる。

次に、ひずみ振幅を 10 サイクルごとに变化させた繰り返しせん断試験(CSVA 試験)を行った。CSVA 試験の最大経験ひずみが等しいところで、繰り返し載荷による応力低下が収束した後の応力に対する現在の応力の比(応力比)を計算し、散逸エネルギーとの関係をプロットした結果を図-6 に示す。CSVA 試験で最大経験ひずみが等しい間は、散逸エネルギーが増加すると応力比が低下していくことがわかる。ところが、最大経験ひずみが更新されると、応力比は再び大きな値をとる。また、応力比の散逸エネルギーに対する傾きを計算したところ、応力比とほぼ線形の関係を持つことがわかった。しかし、その大きさは各ひずみ振幅で大きく異なったため、応力比

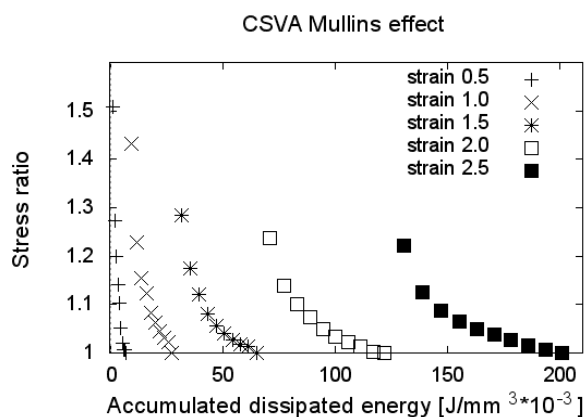


図-6 応力比と散逸エネルギーの関係

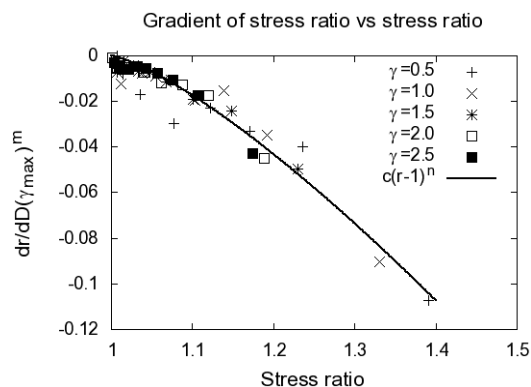


図-7 応力比の発展方程式と実験値の比較

に関する発展方程式を次式のように提案した。

$$\frac{dr}{dD} (\gamma_{\max})^m = c(r-1)^n \quad (1)$$

ここで、 m, c, n は定数、 $\gamma_{\max}$ は最大経験ひずみ、 r は応力比、 D は散逸エネルギーを表す。応力比の散逸エネルギーに対する傾きにおいて、式(1)から得られる計算値と実験値を比較した結果を図-7 に示す。図-7 から、計算値は実験値と良い対応を示していることがわかる。

4. 結論

温度依存性試験では、温度低下によって常温下よりも応答応力が大きくなり、応力-ひずみ関係がバイリニアモデルと異なることを示した。

Mullins 効果による応力低下はゴム材料のつり合い応答においても発生する。また、応力比の散逸エネルギーに対する傾きは応力比とほぼ線形の関係を持つことを示した。さらに、応力比の発展方程式を提案し、最大経験ひずみの更新がない間は、応力比の低下が表現できることを確認した。

参考文献 1) Bhuiyan *et al.*, A rheology model of high damping rubber bearings for seismic analysis: Identification of nonlinear viscosity, *Int. J. of Solids and Struct.* 46(7/8):1778-1792, 2009