

防振ゴムの疲労特性

半坂 征則

材料技術研究部
(防振材料 主任研究員)

鈴木 実

同
(同 副主任研究員)

間々田祥吾

総務部
(課員)



はんさか まさのり



すずき みのる



ままだ しょうご

はじめに

鉄道において車両や軌道、構造物および電気設備の各分野で多種多様な防振ゴムが用いられています。例えば、軌道では一般にレール底面-締結装置間に軌道パッドが敷設されており、この材料がいわばクッションとなり車両走行に伴い発生する周期的・衝撃的な振動が締結装置以下の構造に直接伝わらないような働きをします。また、車両では図1および図2に示すように台車枠-車軸軸箱支持装置間を弾性連結する円錐積層ゴム式軸ばね（以下、軸ばねゴムと称します）や車体を弾性支持する空気ばねなどの防振ゴムが用いられています。これらは鉄道を安全かつ安定に運行させるうえで重要な部材である一方で、大きな繰り返

し荷重が載荷されるという厳しい条件において使用されるケースが多いといえます。また、一般に防振ゴムは紫外線や温度変化（高温度側の方が劣化因子として厳しい）等の環境劣化因子に影響を受けやすい性質を有する中、長期間使用されるケースが多いといえます。したがって、防振ゴムの劣化評価においては荷重のみならず温度（主として高温）等の環境劣化因子も考慮する必要があります。ここでは代表的な防振ゴムとして車両における軸ばねゴムを主な対象に、疲労劣化評価方法とそれによって明らかにされた劣化特性について概説します。

劣化メカニズム

まず、防振ゴムで想定される主要な劣化因子および劣化メカニズムについて考えます。ゴムにおいては一般に、図3に示すように、炭素と水素を中心とする原子が連続的に結合して分子と称される一群の原子の集合体を形成し、これが材料の骨格をなします。このとき分子は鎖状に形成されるので、これを分子鎖と呼ぶこともあります。ゴム材料の劣化はこの分子鎖の変状に起因するものと考えられます。

防振ゴムは使用に伴い様々な劣化因子の作用を受けます。その中で繰り返し応力の作用（以下、これによる劣化を疲労劣化と称します）に加えて、ゴム材料を構成する分子が空气中に存在する酸素と化学反応して変質する劣化（一般

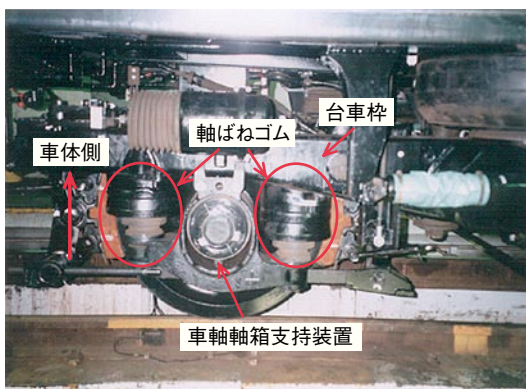


図1 軸ばねゴムの車両における搭載状況



図2 軸ばねゴムの断面

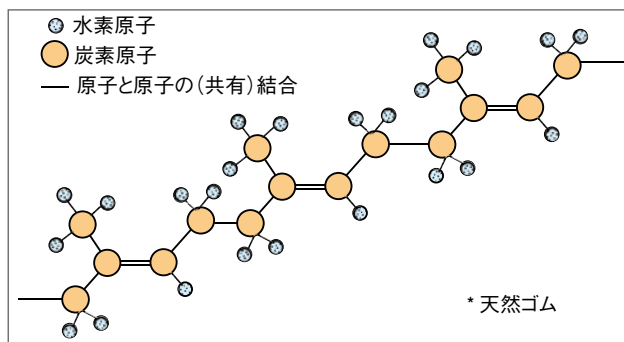


図3 ゴムの分子構造の例(天然ゴム)

に酸化劣化と称されます)は、ゴム材料を大気中で使用する限りにおいて避けられない重要な劣化因子といえます。この酸化劣化過程は、一般に、高温(熱)の作用により促進されます。防振ゴムの使用環境を考慮しますと、自然の環境下でも長期間の使用に伴い繰り返し応力と酸化劣化因子が複合的に作用するうえに、ゴム材料は繰り返しの運動エネルギーを熱エネルギーに変換する性質を有するために、繰り返し応力が作用すると防振ゴムは蓄熱することになります。したがって、防振ゴムにおいては一層酸化劣化を促進する要素を抱えることになり、疲労劣化と酸化劣化の複合作用を考慮する必要があります。

これまでの研究知見によると、ゴム材料の疲労劣化と酸化劣化に関して図4に示すような分子モデルが考えられています。まず、疲労劣化については次の変化が考えられます。ゴム材料の主骨格は図3に示したように原子が鎖状に長く連なったもの(分子鎖)からなりますが、この分子鎖は、初期には図4(a)のように複雑に絡み合っていると考えられます。図の中の曲がりくねった線の1本1本が分子鎖を示します。分子鎖は立体(3次元)的に分布し(図4では1断面を2次的に示しますが、実際は3次元に分布しています)、かつ、分子鎖同士も一部交差点において結合しています。図4ではこの結合点を小黑点で示しています。ゴムにおいてはこのような分子鎖の絡み合いと3次元的な結合により弾力が与えられ、荷重を载荷してもこれに耐え、荷重を除くともとに戻る性質、即ち、弾性(ゴム状弾性)を有します。こうしたゴム材料に繰り返し応力が作用すると、図4(b)に示すようにこの絡み合いの一部がほどけ、ゴム状弾性が低下する、即ち、材料として軟化するものと考えられます。さらに応力が作用し続けると、図4(c)に示すように、一部の分子鎖が切断され、分子鎖密度が疎になることが推定されます。こうした過程により、材料は弱くなる、即ち強度が低下したり、载荷に対して形状が変化した後もとに戻らなくなる(圧縮の場合は「へたり」という現象が生じると考えられます。

次に、酸化劣化については以下のように考えられています。ゴム材料においては酸素は一旦分子鎖の一部を切断する働きをします。一部にはそのまま切断されたままとどまるものもあるのですが、切断された分子鎖の先端は他の分

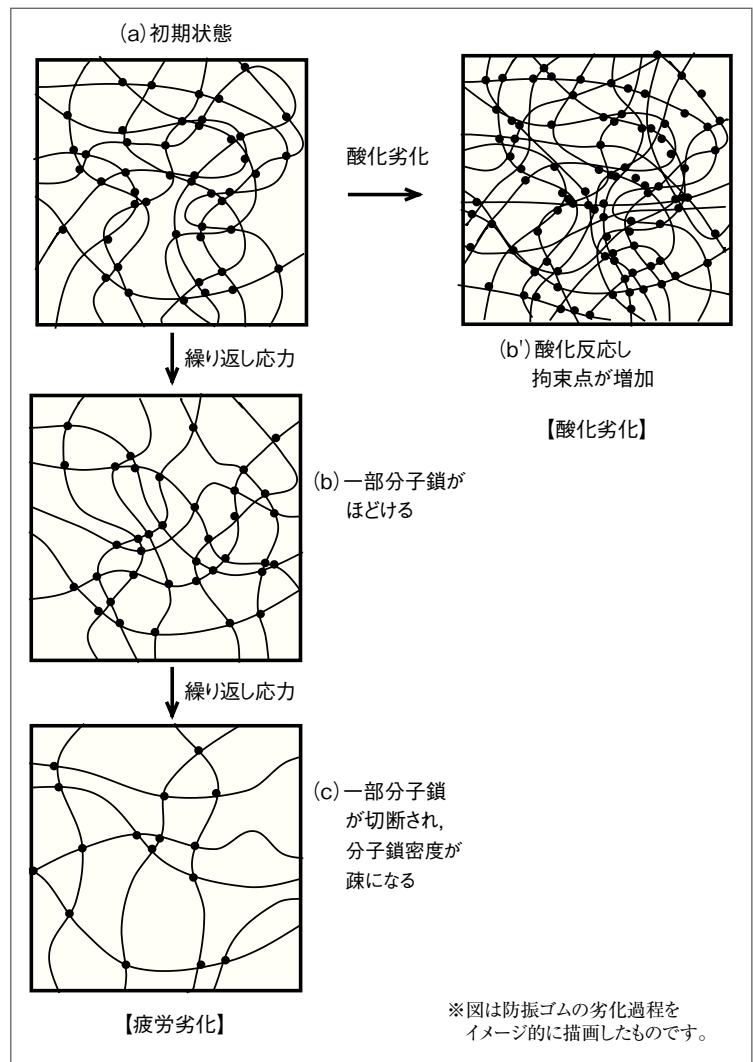


図4 防振ゴムの劣化モデル

子鎖と反応しやすい不安定な状態となっているため、多くは、また別の分子鎖と結合し、結果として、図4(b)のように拘束(結合)点を増加させることとなります。この状態は一見すると分子構造が頑丈になり、良い変化に見えます(実際に一時的に強度が増加する場合があります)が、外力の作用に対して局所的に応力が集中する箇所を発生させ、そこが弱点となって最終的には強度の低下をもたらします。また、分子は強く拘束されるため運動しにくくなり、材料としての柔軟性が損なわれることとなります。即ち、材料が硬く、もろくなります。この状態で繰り返し载荷されると、やはり形状が変化したままもとに戻らなくなったり(圧縮の場合はへたりが大きくなる)、破断したりするものと考えられます。

このように、防振ゴムにおいては疲労劣化と酸化劣化という2大因子が同時に作用することが考えられます。この2大因子の作用は最終的には強度の低下や破断という同一の劣化現象に至ることが想定されますが、そこに至る過程、特に初期においては矛盾する作用を有します。実際の防振

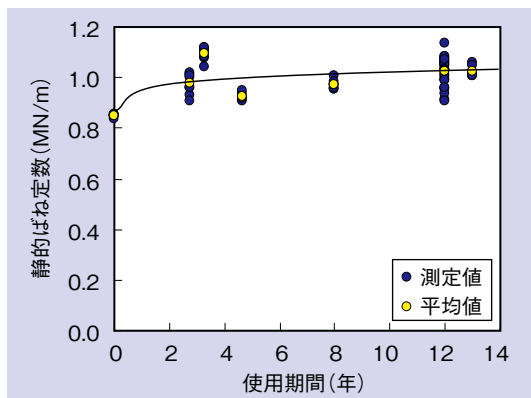


図5 軸ばねゴム現車使用品の静的ばね定数

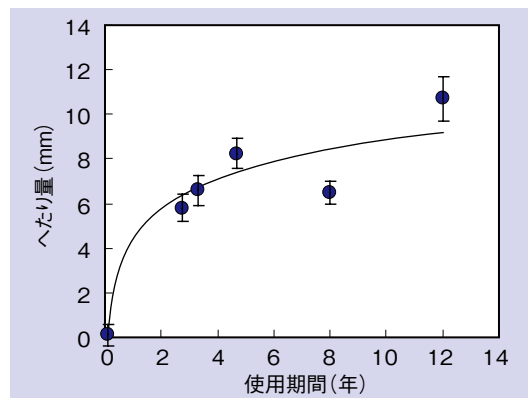


図6 軸ばねゴム現車使用品のへたり量

ゴムでは両因子が複合作用する中で、後述するように、使用条件によってどちらか一方の因子の影響が勝り、外見上は材料の軟化（疲労劣化が卓越した場合）、または硬化（酸化劣化が卓越した場合）という変化が観測されることとなります。

劣化評価法

次に、防振ゴムの劣化評価法について述べます。防振ゴムの劣化評価として、次の手法が考えられます。

- ①現車使用品の性能評価
- ②促進劣化試験

①は現車で一定期間使用された供試体を回収し、外観調査や寸法、静・動的ばね定数などの物性・性能評価を行うものです。②は、早期に劣化評価したい場合や、繰り返し応力や熱（酸化劣化）因子などの複合因子に対してそれぞれの影響を抽出するなどの目的のもと実施するもので、一例として次のような内容が考えられます。

- (1) 常温での繰り返し荷重試験：供試体を常温（約23℃）で繰り返し荷重します。上述のようにこの条件においても繰り返し応力と酸化劣化因子は複合的に作用することが想定されますが、次の(2)の条件より後者の程度は小さいと考えられ、(2)の結果と比較しつつ繰り返し応力の影響を評価します。
- (2) 高温条件下での繰り返し荷重試験：供試体を高温（約50℃または70℃）条件下で繰り返し荷重します。高温条件下により酸化劣化が促進されることが想定され、
 - (1) および次の(3)との比較においてそれぞれの因子の影響を評価します。
- (3) 加熱試験：供試体を荷重をかけない状態で加熱する試験です。繰り返し応力が作用しないので、酸化劣化因子のみの影響が評価できるものと考えられます。

(1)～(3)の試験後、現車使用品と同様に供試体の外観や性能を評価します。

軸ばねゴムの劣化評価

現車使用品の劣化評価

軸ばねゴムの現車使用品の劣化評価結果の例として、図5に静的ばね定数、図6にへたり量の経時変化を示します。これらは都市部を走行する通勤型電車の電動車台車から回収した軸ばねゴムを試験した結果です。静的ばね定数は、鉛直方向を試験速度約30mm/minで荷重したときの荷重-変位曲線から0.5kN-25kN間の値を求めました。例えば、初期試験品ではこの間の変形量として約29mmが計測されるため、静的ばね定数は約0.85MN/mと計算されます。へたり量は、回収した軸ばねゴムの高さを測定しその減少量から算出しました。この結果、図5に示すように、軸ばねゴムの静的ばね定数は初期に大きく増加し、その後もその程度は小さくなるものの経年に伴い徐々に増加してゆることが認められました。へたり量についても、初期に大きく増加しその後も経年に伴い増え続けるという同様の傾向が認められました。こうした、ばね定数とへたりの増加は他の車両部材や軌道パッド等軌道弾性材でも一般に認められることで、防振ゴムの経年劣化の大きな特徴のひとつといえます。

促進劣化試験品の劣化評価

次に、促進劣化試験結果について示します。図7に、軸ばねゴムの静的ばね定数の荷重試験および加熱試験による変化を示します。荷重試験は、常温、50℃および70℃の温度条件下において鉛直方向に2.5Hz・21.5kN-33.7kNの繰り返し荷重を最大2000万回荷重したものです。この荷重条件は車両において実際に軸ばねゴムに荷重される条件を考慮したものです。加熱試験では軸ばねゴムに荷重をかけずに70℃で最大1000時間加熱しました。この結果、図7に示すように、常温においては繰り返し荷重に伴いばね定数が低下する傾向が認められました。これは、繰り返し応力の作用に伴い分子鎖の絡み合いがほどけるなどの変化により材料が軟化したためと考えられます。上述のように繰り返し荷重に伴い酸化劣化因子も作用しそれは材料を

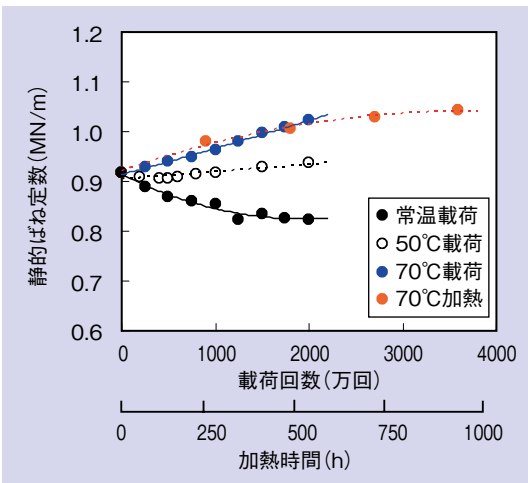


図7 軸ばねゴムの静的ばね定数の载荷試験および加熱試験による変化

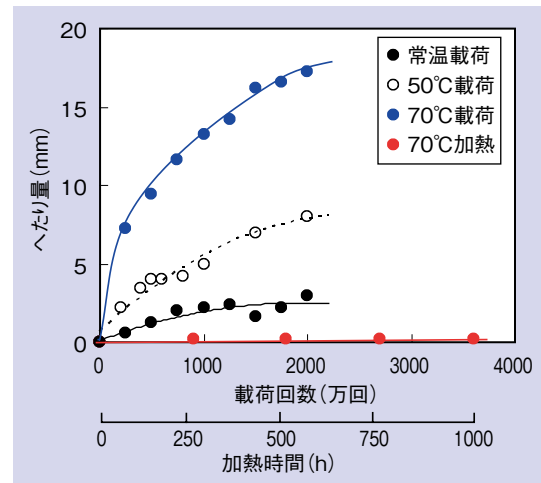


図8 軸ばねゴムのへたりの量の载荷試験および加熱試験による変化

硬くするなどばね定数を増加させる機能を有することが推定されますが、常温载荷においてはその作用よりも繰り返し応力による軟化の影響の方が卓越したものと考えられます。一方、加熱試験の結果、加熱に伴い軸ばねゴムの静的ばね定数がほぼ単調に増加する傾向が認められました。この結果は、高温条件下では酸化劣化が促進され材料が硬化したためと考えられます。さらに、図7より、50°Cまたは70°Cの温度条件下では载荷試験においてもばね定数の増加がもたらされていることが認められます。ばね定数の増加程度は50°Cより70°Cと、温度上昇に伴って大きくなっています。これらの理由として、高温条件下では酸化劣化が促進され、繰り返し応力による材料軟化の因子より酸化劣化による材料硬化の因子の作用が勝ったためであることが考えられます。なお、別途、材料の弾性率などの測定も行い、そこでも常温载荷後の弾性率低下および高温载荷後の弾性率増加などの特性を確認しています。

図8に、軸ばねゴムのへたりの量の载荷試験および加熱試験による変化を示します。図8より、加熱試験においては軸ばねゴムのへたりの量はほとんど0の値で推移しており、荷重負荷がないときには軸ばねゴムのへたりはほぼ発生しないことが確認されました。その一方で、载荷試験においてはへたりの量は常温、50°C、70°Cのいずれにおいても有意な値を示し、かつ、载荷に伴い増加する傾向が認められました。ただし、へたりの量は常温では大きなものではなく、50°C、70°Cと温度が上昇するのに伴い増加することも認められました。この理由についても温度上昇に伴う酸化劣化の促進が考えられます。即ち、酸化劣化が促進されて材料硬化が進む中で繰り返し载荷された場合にはゴム材料の永久変形量が増大するためと考えられます。こうしたへたりの増加、即ち高さ寸法の減少は、ばね定数の増加をもたらす方向に作用します。したがって、高温条件下で繰り返

返し载荷された場合にはへたりが増大し、このこともばね定数を一層増加させる要因となることが考えられます。

現車使用品と促進劣化試験品の劣化評価の比較

以上述べた現車使用品と促進劣化試験品の評価試験結果を比較しますと、次のことが推察されました。まず、常温での载荷試験結果に示されるように、繰り返し応力による材料軟化の作用が卓越する場合にはばね定数は载荷に伴って低下することが考えられます。しかしながら現車使用品においてはそれとは違う結果、即ち、経年によってばね定数が増加する結果となりました。この理由として、夏場の高温条件を含む長期間の使用に伴い酸化劣化因子が複合的に作用し、この寄与が繰り返し応力による材質軟化の影響より大きなものとなったことが考えられます。同時に、こうした酸化劣化の進展はへたりの量の増加ももたらします。へたりの量の増加もばね定数増加の因子として加えられたことが考えられます。

おわりに

以上、車両用円錐積層ゴム式軸ばね(軸ばねゴム)を例に、防振ゴムの劣化メカニズムと評価についてご説明しました。ここで示したように、現車使用品と促進劣化試験品の評価試験を組み合わせることにより、繰り返し応力による疲労劣化と熱により促進される酸化劣化の因子が複合的に作用する複雑な防振ゴムの劣化メカニズムを定性的に明らかにすることを可能にしました。その一方で、例えば両因子の作用を定量的に解析するなど、防振ゴムの劣化特性評価においては依然として多くの課題が残されています。また、保守省力化に対する志向の高まりを背景に防振ゴムの長寿命化のニーズが一層強まっており、長寿命品の開発のためにも劣化評価の精度向上と深度化が求められているものと考えています。[RRR]