

橋梁支承用ゴムの環境劣化特性 に関する基礎的研究

伊藤義人¹・矢澤晃夫²・佐藤和也²・顧浩声²・忽那幸浩³・山本吉久⁴

¹フェロー会員 名古屋大学大学院社会基盤工学専攻教授 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: itoh@civil.nagoya-u.ac.jp

²学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 日本道路公団中部支社 建設第二部構造技術課

(〒460-0003 名古屋市中区錦2-18-19三井住友銀行名古屋ビル)

⁴正会員 東海ゴム工業株式会社 免震デバイス事業室 (〒485-8550 愛知県小牧市東三丁目1番地)

兵庫県南部地震で鋼製支承の橋梁に大きな損傷を生じたことから免震支承の有効性があらためて認識され、免震ゴム支承は全国的に普及しつつある。免震ゴム支承の長期間に及ぶ使用実績が少ないため、信頼性の高い劣化特性の把握が望まれている。そこで、橋梁の性能照査型設計で地域特性や設置環境を考慮できる免震支承用ゴムの劣化特性予測を可能とするための基礎的研究を行った。劣化による材料特性値変化の基礎データ取得を目的とし、免震支承用ゴムの種々の環境条件下での長期的な環境促進実験を行った。実験条件には免震支承用ゴムの主要な劣化要因として認識されている熱酸化劣化、オゾン劣化、光劣化、海岸地域での飛来塩分や酸性雨の劣化環境を設定し、有効な基礎データを得た。

Key Words : bridge bearing, natural rubber, chloroprene rubber, accelerated aging test, lifecycle analysis

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震において、従来の鋼製支承を用いた橋梁に大きな損傷を生じたことから、橋梁分野においても免震技術が広く認識された。兵庫県南部地震をきっかけに免震構造物が増加し、今後もその傾向が続くものと思われる^{1),2),3)}。

免震ゴム支承には様々なタイプがあるが、最近では大型化するとともに橋梁全体の5~10%の大きなコストがかかるようになってきている。今後、免震ゴム支承は耐震性能を満足する重要な部材であるとともに、ライフサイクルでのコストならびに性能照査を考慮すべき重要な部材であると考えられる。

支承用ゴム材料や免震ゴム支承の力学性能に関しては、これまで多くの研究がなされている。吉田ら^{4),5)}は、高減衰ゴム材料の緻密な構成則を構築し、一般に困難とされていた高減衰積層ゴムの有限要素法解析を行うことで、その力学特性を究明した。さらに、支承のねじりや曲げ変形に関する設計式を考案した。本間・宇佐美⁶⁾は、水平反力分散ゴム支承を導入した多径間連続橋に対して地震応答特性を行い、水平反力の分散率が橋梁システムに与える影響を検討した。その結果、ある橋脚に損傷を集中させることにより、橋梁

システム全体の残留変位が低減されることが確認された。しかしながら、いずれも免震ゴム支承の経年劣化には触れられていない。

ゴム材料自体の経年劣化については、加硫法発見の前後から研究されている^{7),8)}。日本道路公団では、東名・東名阪高速道路で7年ないし10年間使用されたゴム支承を回収し、実物大圧縮試験、実物大圧縮せん断試験、化学成分分析および物理試験を実施して、同一仕様の新規製品との比較を行った。試験結果から、鉛直剛性は使用後の支承の方が新規支承に比べて大きかったが、水平剛性はどちらも同程度であった。また、化学的・物理的性能についても著しい変化は見られず、実用上問題はないと判断された^{9),10)}。イギリスのLicom市にあるPelham橋でおよそ40年間使用された天然ゴム支承が回収され、性能試験ならびにゴム支承内部の物性変化が確認された。ゴム支承の水平剛性は設計値と比較して約10%増加しており、また支承内部の約50mmに渡って材料物性が変化していた¹¹⁾。オーストラリアのメルボルン市内にある鉄道高架橋では、約100年間使用された天然ゴム防振パッドの性能変化が調査された¹²⁾。その結果、ゴム表面部においては、雨水やオゾン、熱酸化などによる亀裂を伴うダメージを受けていたが、表面から5mmほど内部に入るとゴムの

架橋密度、破断時伸び、破断強度はほとんど変化していないことが確認された。杉本・溝江¹³⁾は、低温地域におけるオゾン劣化によるきれつ発生メカニズムを明確にし、その防止方法および評価手法を考案した。しかし、いずれも限定された地域におけるゴム支承の劣化特性であり、種々の設置場所での劣化特性を定量的に評価するには至っていない。また、熱やオゾンなどの各劣化因子の影響を個別に検証し比較した例は少ない。

免震ゴム支承の性能照査型設計を行う上で、免震ゴム支承のライフサイクル性能を把握することは非常に重要である。本研究では、免震ゴム支承のライフサイクル性能を把握するための第1段階として、支承用ゴム材料の劣化特性の基礎的データを得るための環境促進劣化実験を行った。1)熱、2)オゾン、3)低温オゾン、4)光、5)塩水噴霧複合サイクルおよび6)酸性雨噴霧複合サイクルの6種の劣化条件について約9ヶ月間の長期間の環境促進実験を行い、各劣化因子が支承用ゴム材料に与える劣化特性を明らかにした。

2. ゴム材料の劣化メカニズム

ゴム材料は、図-1に示すように硫黄などにより架橋された三次元網目構造を有している。この網目構造を形成する長鎖分子や架橋部分は、熱やオゾンなどの劣化因子によって、切断と再結合といった分子構造変化が生じる。分子構造の変化が繰り返されるとともに、ゴム材料の伸びや破断強度といった材料特性も変化する¹⁴⁾。これがゴム材料の劣化である。以下に、代表的な劣化因子である熱酸化劣化、オゾン劣化および光劣化について、それぞれの劣化メカニズムを述べる。

(1) 熱酸化劣化

熱酸化劣化は開始反応で発生したラジカルが酸素と反応し、パーオキシラジカルを生成し、そのパーオキシラジカルがゴム分子から水素を引く抜き、新たなラジカルを発生させる連鎖反応で、その反応はゴムポリマーの構造や、配合剤の種類により大きな影響を受ける。また、酸化反応は反応の場の酸素濃度の影響を受け、酸素溶解度、酸素拡散速度および酸化反応速度によって変化する。特に、十分な濃度の酸素がある場合と無酸素の場合とでは反応機構が異なることが知られており、後者は単に熱劣化として区別される¹⁵⁾。

十分な濃度の酸素がある場合、ラジカル反応の開始剤が次々に再生され、反応が継続される。一方、無酸素状態の場合は開始剤が再生されないため、開始剤を生成するためのエネルギーが常に外部から供給されなければ進行しない。実際の熱酸化劣化は、十分な酸素

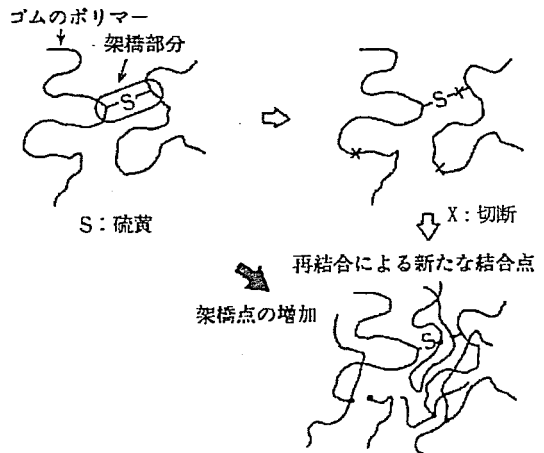


図-1 ゴム材料の劣化メカニズム¹⁴⁾

濃度下の場合および無酸素下の場合の、中間の反応が生じると考えられる。

(2) オゾン劣化

ゴム材料のオゾンによる劣化は、材料の表面に引張ひずみがある場合にクラックを発生させる。オゾンは紫外線を介して生成され、強い酸化力を持つ。ただし、一般に大気中のオゾン濃度は0.01~0.05ppmと低く、オゾン劣化の影響力はそれほど強くないと言われている¹²⁾。

オゾンによる劣化は、主にゴム表面の二重結合に作用し、分子の切断を引き起こす。分子の切断が集まってクラックを形成するが、引張ひずみを有している部分は著しくオゾンによる影響を受けることが知られている。橋梁の死荷重により、ゴム支承表面のはらみ出しによって発生する引張ひずみは40%以下であるが、オゾンによるクラックが発生しやすい範囲にあると言われている¹⁴⁾。

(3) 光劣化

地球に到達する太陽光の紫外線は、波長が290~400nm、エネルギーに換算すると99~72kcal/molであり、通常の有機化合物の結合解離エネルギーに相当する。特定の官能基が紫外線を吸収して励起・分解することにより、劣化反応を開始させる活性種が生成され、光劣化が進行する^{15), 16)}。

熱酸化劣化と同様に、光劣化においても酸素の有無により劣化機構が異なる。無酸素状態における劣化は酸素のある場合と比較して無視しうるほど小さいため、光劣化はゴム支承表面のような酸素が影響しうる範囲に限定されると考えられる。

3. 実験方法

ゴム支承の表面は大气と直接触れるため、劣化による影響を強く受ける。この論文ではゴム支承表面における劣化特性を明らかにするため、以下に述べる方法で実験を行った。実験条件の概要および試験片数を表-1に示す。

(1) 試験片

実験には、橋梁支承用ゴムに用いられる天然ゴム(Natural Rubber, 以下 NR と略す)と合成ゴム(Chloroprene Rubber, 以下 CR と略す)を用いた。これらの供試体は東海ゴムより提供を受けた。なお、通常 NR は被覆ゴムと本体が一体となったゴム反力分散支承を製作する際や免震ゴム支承の被覆用に用いられ、配合時に耐候性保護材が添加されている。また、CR は橋梁用ゴムパッドに用いられる。

試験片は、加硫したゴムシートから打ち抜いた 2 mm 厚の JIS 3 号 ダンベル形試験片を用いた。図-2 に、使用した試験片形状を示す。この試験片は引張試験用に規格化されたものであり、劣化による材料特性の変化を、引張試験を行うことで評価することができるものである。

一般に、同一仕様で製作されたゴム材料間においても、その破断時伸びや破断強度は 5~10% 程度のばらつきを有することが知られている。劣化特性をできる

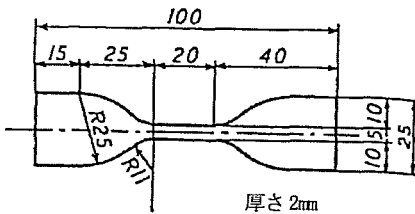


図-2 JIS 3号ダンベル形試験片の寸法(単位mm)

だけ精度良く得るため、試験片の数は材料、劣化環境や予ひずみ条件ならびに引張試験のための取り出し時期(測定回数)について、それぞれ 12 体ずつ用意した。環境促進実験の劣化環境因子に、1)熱、2)オゾン、3)低温オゾン、4)光、5)塩水噴霧複合サイクルおよび 6)酸性雨噴霧複合サイクルの 6 種を設定し、材料、予ひずみ、測定回数などは表-1に示すようであり、試験片の総数は 2088 である。

(2) 予ひずみ

ゴム支承は、上部工の死荷重ならびに活荷重により、鉛直方向の圧縮力を受ける。このとき、ゴム層は図-3のように外側へはらみ出すように変形する。ゴム支承の最外縁表面では、はらみ出しの影響で局部的に引張ひずみが生じた状態となる。この局所的な引張ひずみの大きさはゴム支承の寸法形状によっても異なるが、

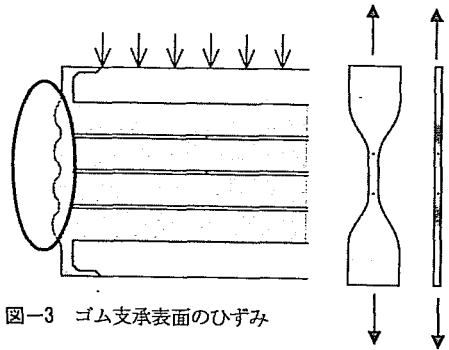


図-3 ゴム支承表面のひずみ

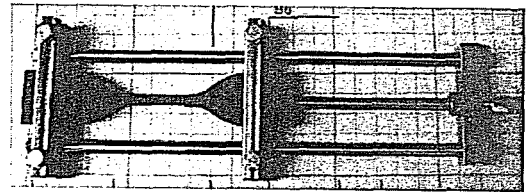


図-4 伸張治具に取り付けたダンベル試験片

表-1 環境促進実験の条件

	材料	予ひずみ	劣化環境因子	測定回数	試験片数
条 件	NR, CR	0,20,40%	熱	8	576 (2×3×8×12)
			オゾン	6	432 (2×3×6×12)
			低温オゾン	6	432 (2×3×6×12)
			光	3	216 (2×3×3×12)
			塩水複合	3	216 (2×3×3×12)
			酸性雨複合	3	216 (2×3×3×12)
計	2	3	6	29	2088

2次元 FEM 解析を行った結果、最大で約 40%であるという結果を得た。これは、日本道路公団(JH)の劣化試験(30日間)で考えられている値と同じである。

2. で詳述したとおり、ゴム支承表面の局部引張ひずみを生じる部分がオゾンの影響を強く受ける。本研究では、オゾン以外の劣化要因においても引張ひずみの影響を調べるため、図-4 に示す伸長ジグを用いて試験片に一定の引張ひずみ(以下、予ひずみ ε_p)を与えた。予ひずみ ε_p は、先の FEM 解析結果をもとにして、 $\varepsilon_p=0\%$ 、 $\varepsilon_p=20\%$ 、 $\varepsilon_p=40\%$ の3種類を設定した。

(3) 環境促進実験方法

実験では、通常のゴム支承が設置される環境条件を想定し、1)熱酸化劣化、2)オゾン劣化(40°C)、3)低温オゾン劣化(-30°C)、4)光劣化、5)海岸地域での飛来塩分および6)酸性雨による劣化を設定した。以下に各劣化要因における実験方法を述べる。また、図-6 に各促進劣化実験の様子を示す。

a) 加熱促進劣化実験

熱酸化劣化特性を明らかにするために行った加熱促進劣化実験は、高温環境下で材料を促進劣化させる実験である。ただし、100°C近い温度では通常の実環境下ではゴム材料に起こりえない変化が生じるため、できるだけ低い温度で実施することが望ましい。このことから、本実験では温度を70°Cとした。また、試験機はギャオープン式熱老化機(東洋精機製作所製)を用いた。

試験片を試験機から取り出すタイミングは、最短の96時間(4日間)を基準に、96、192、384、768、1536時間を設定した。ただし、後述するように熱酸化劣化の変化率は他の劣化因子に比べて大きかったため、6144時間まで延長して実験を行った。

b) オゾン促進劣化実験

オゾン促進劣化実験は、JIS K 6259 加硫ゴムのオゾン劣化試験方法、ならびに JH の構造物施工管理要領をもとに、オゾン濃度を0.5ppm、試験温度を40°Cとした。実験時間は、96時間を基準に1536時間(64日間)まで実施した。また、低温オゾン促進劣化実験は、温度を-30°Cに設定し、濃度や実験時間は40°Cのオゾン促進劣化実験と同様の条件で行った。

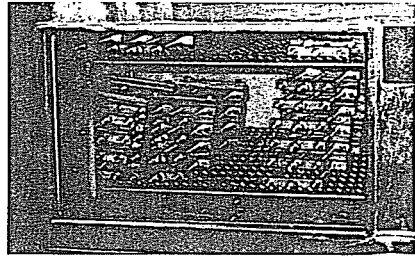
試験機は、オゾンウェザーメータ(東洋理化工業製)を用いた。

c) 光促進劣化実験

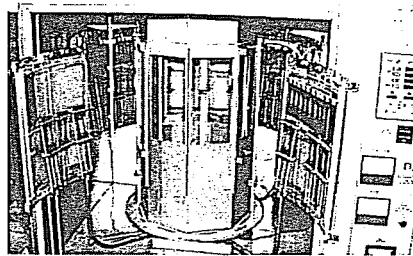
光促進劣化実験は、材料に人工太陽光を照射し、実際の太陽光による酸化劣化を再現するものである。本研究では、デューサイクルサンシャインウェザーメータ(スガ試験機製)を用い、カーボンを燃焼させて試験片にアーク光を照射した。なお、光促進劣化実験では、60分経過するごとに30分間純水を噴霧するサイクルで実施し、実験時間は720時間(30日間)に設定した。



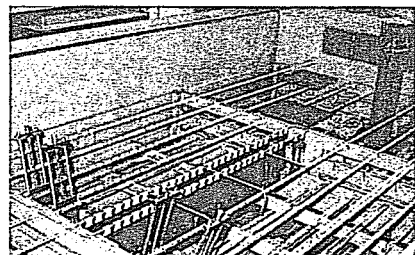
(a) 加熱促進劣化実験



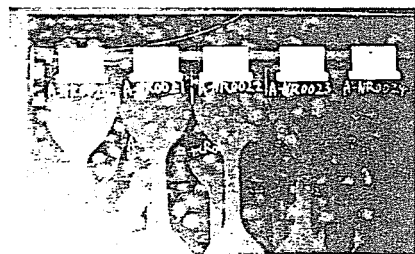
(b) オゾン促進劣化実験



(c) 光促進劣化実験



(d) 塩水噴霧複合サイクル実験



(e) 酸性雨噴霧複合サイクル実験

図-5 促進劣化実験の様子

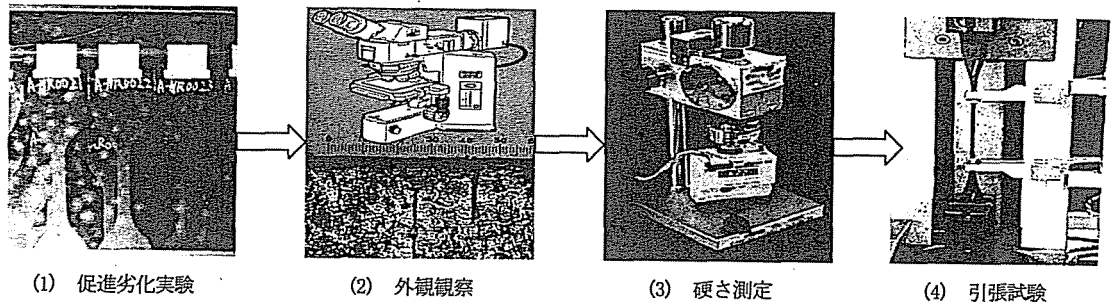


図-6 劣化の評価方法

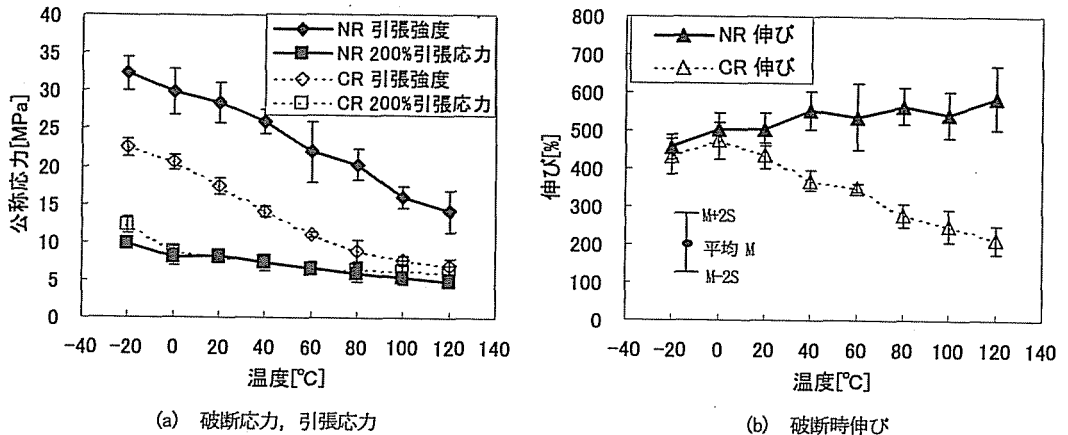


図-7 支承受用ゴムの温度依存性

この実験条件の雰囲気温度は 50°C.

d) 塩水噴霧複合サイクル実験

塩水噴霧複合サイクル実験は、ここでは実験槽内温度 $30 \pm 2^\circ\text{C}$ 、塩水噴霧を 30 分間行った後、同じ温度で 95%の湿潤 90 分、 $50 \pm 2^\circ\text{C}$ の熱風乾燥 120 分、 $30 \pm 2^\circ\text{C}$ の温風乾燥 120 分のサイクルを繰り返すものである。実験時間は、1440 時間(60 日間)まで実施した。このサイクルは、文献 17)で用いられた鋼材の耐候性試験の条件である。塩水がゴム材料に与える影響は、既往の浸漬試験結果から予測されたが、橋梁支承受用ゴムがさらされる湿潤と乾燥を繰り返すことにより劣化特性が得られるかどうかを検証するために、本実験を行った。試験機は、複合サイクル試験機(スガ試験機製)を用いた。

e) 酸性雨噴霧複合サイクル実験

酸性雨噴霧複合サイクル実験は、塩水噴霧複合サイクルで用いた 5%塩水を、pH3.5 の酸性溶液に置き換えて実施した。なお、試験機は実応力作用環境促進実験装置(スガ試験機製)の環境実験槽部分を使用した。

(4) 劣化の評価方法

環境促進実験後の劣化の評価方法を図-7 に示す。まず、目視と顕微鏡により外観変化を観察した。その後、硬さ測定と引張試験を実施し、ゴム材料の劣化特性を

定量的に評価した。硬さ測定は、引張試験前に硬さ測定器を用いてダンベル試験片のつかみ部で測定した。

劣化後の材料特性値を得るための引張試験方法は、JIS K 6251 と JIS K 6253 の試験方法に従った。なお、引張試験機は東洋精機製作所製 AE-CT ストログラフを用いて、応力-ひずみ曲線を得て、各種材料特性値はこの曲線から得た。

4. 実験結果と主な劣化要因の絞込み

(1) 初期状態におけるゴム材料の基本特性

はじめに、初期状態におけるゴム材料の基本特性を把握するため、実験に用いたゴム材料の温度依存性を調べた。恒温槽付きの引張試験機を用い、実験温度を $-20 \sim 120^\circ\text{C}$ までを 20°C 間隔で変化させて引張試験を実施した。実験には、温度条件ごとに新規の試験片 12 体ずつを用いた。図-8(a)に実験から得られた NR と CR の破断強度と 200%伸長応力を、また、図-8(b)に破断時伸びの温度依存性を示す。なお、図中には 12 体の平均値(M)と、平均値から標準偏差(S)の 2 倍で誤差評価した値($M \pm 2S$)を示す。図-8 より、NR、CR とともに、破断強度や 200%伸長応力は温度の増加とともに

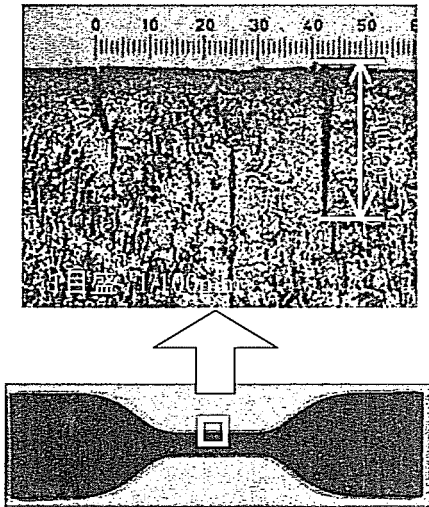


図-8 光劣化実験により発生したクラック
(NR $\epsilon_p=40\%$ 720時間劣化. 拡大倍率 10×10倍)

に低下していく傾向が確認された。しかし、破断時伸びについては、NR では高温になるほど上昇しているのに対し、CR では逆に低下していることが分かる。CR の伸びの低下は著しく、120°Cでは 20°C時の 50%程度まで低下した。このことから、高温環境下での CR は、常温のときよりも伸び性能が劣ることが分かった。

(2) 天然ゴム NR の劣化特性

天然ゴム NR の環境促進劣化後の、外観観察、硬さ試験ならびに引張試験結果を以下に示す。

a) 外観観察結果

試験片表面の観察は、クラックの発生と表面性状に着目し、光学顕微鏡を用いて行った。クラックが発生したのは、予ひずみ $\epsilon_p=40\%$ の試験片で、光促進劣化実験 720 時間経過後のみであった。試験片端部に予ひずみ方向に対して直角方向に、最大 0.4 mm のクラックが確認された。試験片端部におけるクラックの拡大写真を図-9 に示す。クラックの分布は、試験片表面の端部に集中していた。中央部にも細かいクラックが観察されたが、非常に微細であるため、肉眼ではほとんど確認できなかった。

これ以外の実験条件では、2 種のオゾン促進劣化実験も含めてクラックの発生は確認されなかった。表面性状については、NR は実験前から試験片表面に耐候性保護剤が浸出していた。

加熱促進劣化実験、オゾン促進劣化および低温オゾン促進劣化実験では、実験後も NR 試験片表面に耐候性保護剤の付着が見られた。耐候性保護剤をふき取って観察しても、実験前後で表面性状に特に変化は見られなかった。

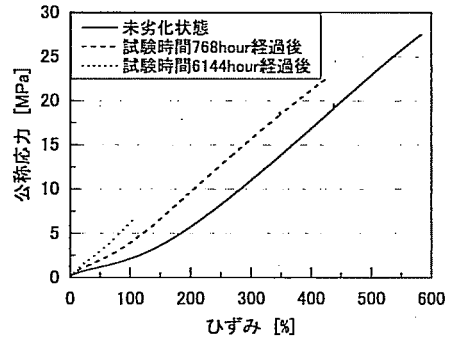


図-9 NR の加熱酸化劣化促進実験による公称応力-ひずみ曲線の変化

一方、光促進劣化実験、塩水噴霧複合サイクル実験および酸性雨噴霧サイクル実験では、定期的に噴霧する際に耐候性保護剤が洗い流されるため、促進実験終了後の試験片に耐候性保護剤は確認されなかった。

b) 劣化後の材料特性

引張試験により、劣化後の公称応力-公称ひずみ関係を求めた。図-10 に未劣化状態と NR の加熱促進劣化実験後(768 時間後と 6144 時間後)の試験片における公称応力-公称ひずみ曲線の代表例を示す。図-10 に示すような公称応力-公称ひずみ曲線から、剛性、破断強度、伸びなどの材料特性を得ることができる。ゴム材料の応力-ひずみ関係は、未劣化状態においても強い非線形性を有しているため、他の材料のように剛性を接線剛性で評価せず、あるひずみに達した時の応力値をもって剛性を評価する。本研究では、引張ひずみ 25%(M25)、50%(M50)、100%(M100)、200%(M200)および 300%(M300)での応力を求めた。また、式(1)のように表されるアレニウス式を基にして、70°C熱劣化実験結果から任意温度熱劣化実験を行った場合の特性値を推定可能であり、オゾン、光劣化、塩水噴霧複合サイクルおよび酸性雨噴霧サイクルの実験結果からそれぞれ温度条件の熱劣化による影響を差し引いて、各劣化因子のみの影響を計算した。

$$\ln \frac{y_0}{y_h} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)t \quad (1)$$

ここで、 y_0 、 y_h はそれぞれ材料の物理量の初期値、熱劣化後の値、 A は頻度因子、 E_a は材料のある特性値についての活性化エネルギー、 R は気体定数 (=8.314[J/mol/K])、 T は絶対温度、 t は時間である。

図-11 はオゾン劣化、光劣化、塩水噴霧複合サイクルおよび酸性雨噴霧サイクル実験において、M100 の変化がそれぞれ主な劣化要因による M100 の特性変化と、その温度での熱酸化劣化が与える影響を示す。オゾン劣化実験については、実験開始後 1536 時間程度までは、40°C の温度条件による M100 の変化がおおよそ

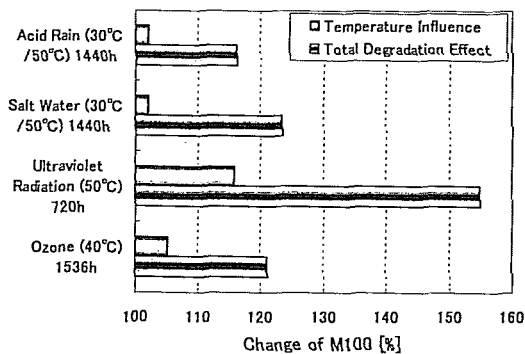


図-10 温度による熱酸化劣化の影響

25%となった。光促進劣化実験の雰囲気温度は 50°C であり、熱酸化劣化の影響は約 30%であった。塩水噴霧複合サイクルおよび酸性雨噴霧複合サイクル実験においては温度が与える影響は各劣化因子による M100 の上昇のもっと小さい程度であることが分かる。

図-12(a)~(h)に、実験から得られた NR の硬さ、M25、M50、M100、M200、M300、破断強度および破断時伸びの時系列変化(初期状態を 100%としたときの相対変化)を示す。なお、図-12 に示した実験結果は実際のゴム支承の設置環境に最も近いと考えられる予ひずみ $\varepsilon_p=40\%$ のものであり、また、線種の判別を容易にするため実験時間 1500 時間程度までの変化を示している。また、図-8 と同様に 12 体の平均値 M と平均値から標準偏差(S)の 2 倍で誤差評価した値(M \pm 2S)も示す。図-12 より、いずれの材料特性値に関しても実験時間の経過とともに変化率が小さくなる傾向があることが分かる。つまり、2. で述べた分子鎖の切断と再結合の頻度が劣化の進行と共に減少していると考えられる。

変化率が小さくなったときの材料物性値から、熱酸化劣化と光劣化の伸び特性値への影響が強いことが分かる。特に、熱酸化劣化における剛性の変化は、実験時間 1536 時間において 1.5~2.0 倍に変化している。実験で用いたダンベル試験片は厚さ 2 mm であり、十分な酸素濃度下における熱酸化劣化あるいは光劣化が生じたため、材料特性に大きな変化が見られたと思われる。

オゾン劣化、塩水噴霧複合サイクルおよび酸性雨噴霧複合サイクルについては、伸び性能保持率や剛性に変化が見られたが、熱酸化劣化や光劣化と比較すると変化量は小さい。破断強度に関しては著しい変化は見られなかった。

図-12 より、熱酸化劣化による材料特性の変化は、他の劣化因子よりも大きいことが確認された。そこで、加熱促進劣化実験の実験時間を延長し、3072 時間および 6144 時間まで実験を行った。図-13 に、延長して行った加熱促進劣化実験より得られた、予ひずみ $\varepsilon_p=40\%$ における NR の材料特性の時系列変化を示す。

図-12 と同様に、試験片 12 体の平均値(M)と、平均値から標準偏差(S)の 2 倍で誤差評価した値(M \pm 2S)を示す。図-13 より、実験時間 3072 時間以降はほとんど変化しないことが確認された。

また、材料物性によって劣化による変化量が異なった。硬さの変化が最も小さく、また剛性は M100 をピークにひずみレベルの大きさに応じて物性の変化量に差が見られた。実験時間 6144 時間に注目すると、M25 が初期値のおよそ 1.8 倍に増加したのに対し、M100 は約 2.7 倍に増加した。

c) 予ひずみの影響

予ひずみの劣化に与える影響を調べるため、NR の材料特性の時系列変化を、設定した予ひずみ $\varepsilon_p=0\%$ 、20%、40%で比較した。図-14 に、各劣化因子の M100 の時系列変化を予ひずみについて比較した結果を示す。図-14 のプロットは平均値(M)を示し、標準偏差(S)の 2 倍で誤差範囲を表している。

熱酸化劣化については、実験開始後 2000 時間程度までは、予ひずみの大きさに比例して M100 の劣化による変化率も大きくなった。しかし、実験時間 2000 時間以降は傾向が逆転し、予ひずみ 40%を与えた場合が最も変化率が小さくなった。実験時間 6144 時間においては、予ひずみ $\varepsilon_p=40\%$ では M100 が初期値の 2.7 倍程度の増加であるのに対し、その他の予ひずみにおいては約 3.0 倍であった。

光劣化については、予ひずみの大きさに比例して M100 の変化率も大きくなった。ただし、予ひずみによって M100 の劣化傾向に若干違いが見られた。予ひずみ $\varepsilon_p=0\%$ や $\varepsilon_p=20\%$ の条件では、M100 は線形的に増加しているのに対し、 $\varepsilon_p=40\%$ では非線形性を有していることが分かる。

塩水噴霧複合サイクルならびに酸性雨噴霧複合サイクルについても、予ひずみによる違いがわずかに見られた。ただし、前述の光劣化のような予ひずみによる明確な大小関係は見られなかった。

オゾン劣化と低温オゾン劣化については、予ひずみによる違いは見られなかった。また、硬さ、破断強度および破断時伸びについては、どの劣化因子においても予ひずみの明確な影響は見られなかった。

(3) 合成ゴムの劣化特性

合成ゴム CR の外観観察では、実験の前後で特別な変化は見られなかった。よって、以下に CR の材料特性の時系列変化および予ひずみの影響を示す。

a) 劣化後の材料特性

図-15(a)~(h)に、図-12 と同様にまとめた CR の実験結果を示す。オゾン劣化実験と低温オゾン劣化実

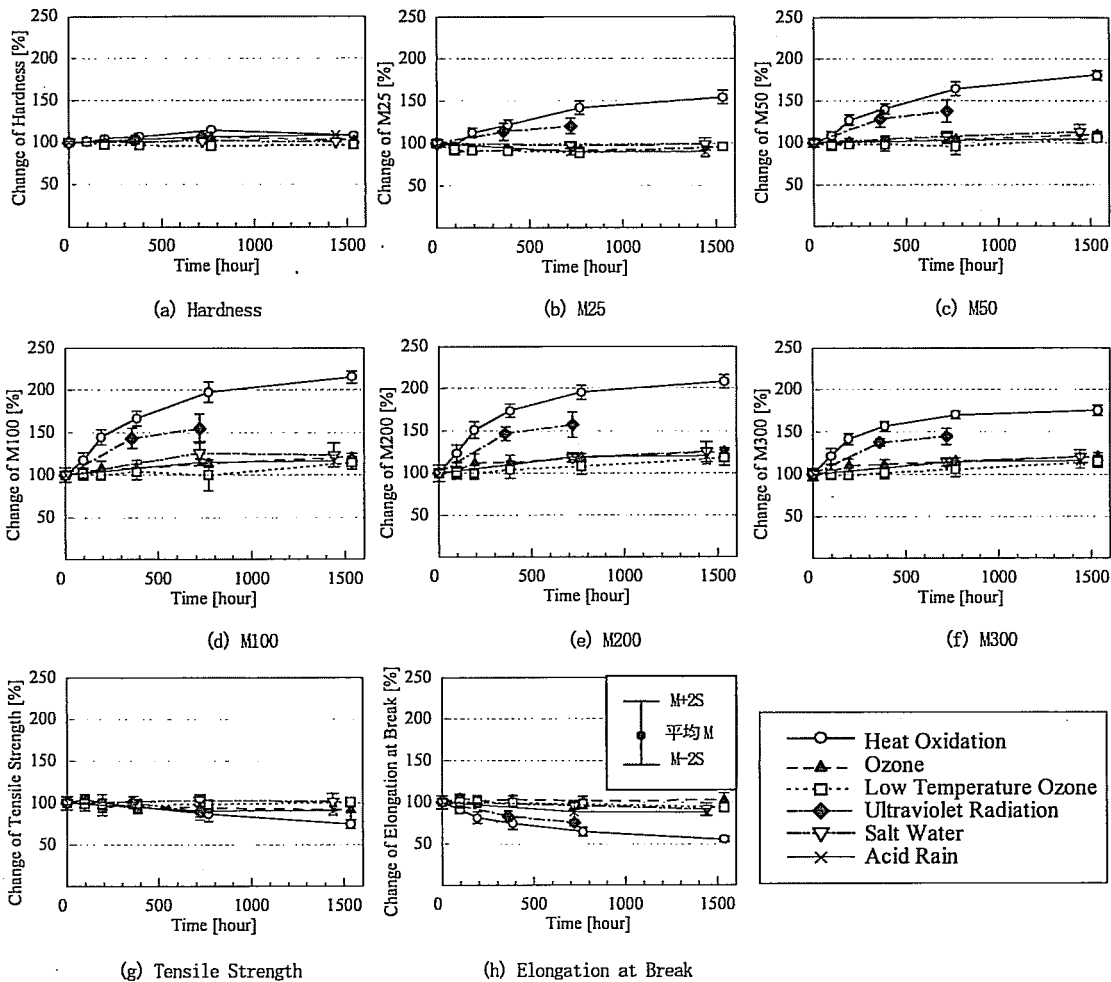


図-11 各劣化要因におけるNR材料特性の時系列変化
(予ひずみ $\epsilon_p=40\%$)

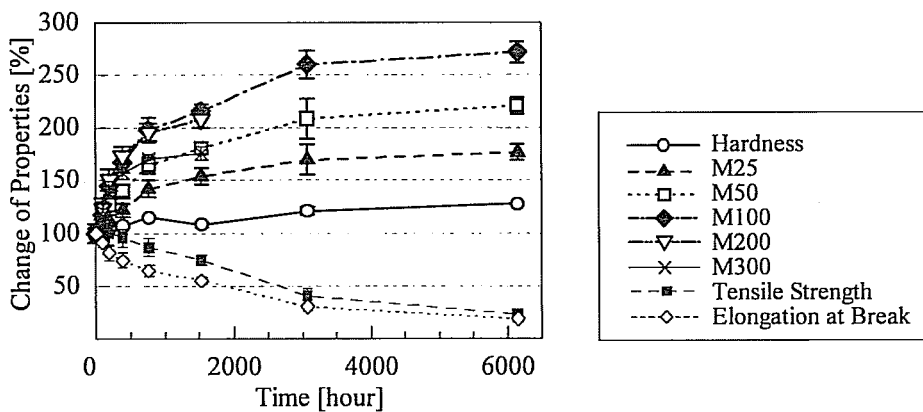


図-12 熱酸化劣化によるNR材料特性の時系列変化
(予ひずみ $\epsilon_p=40\%$)

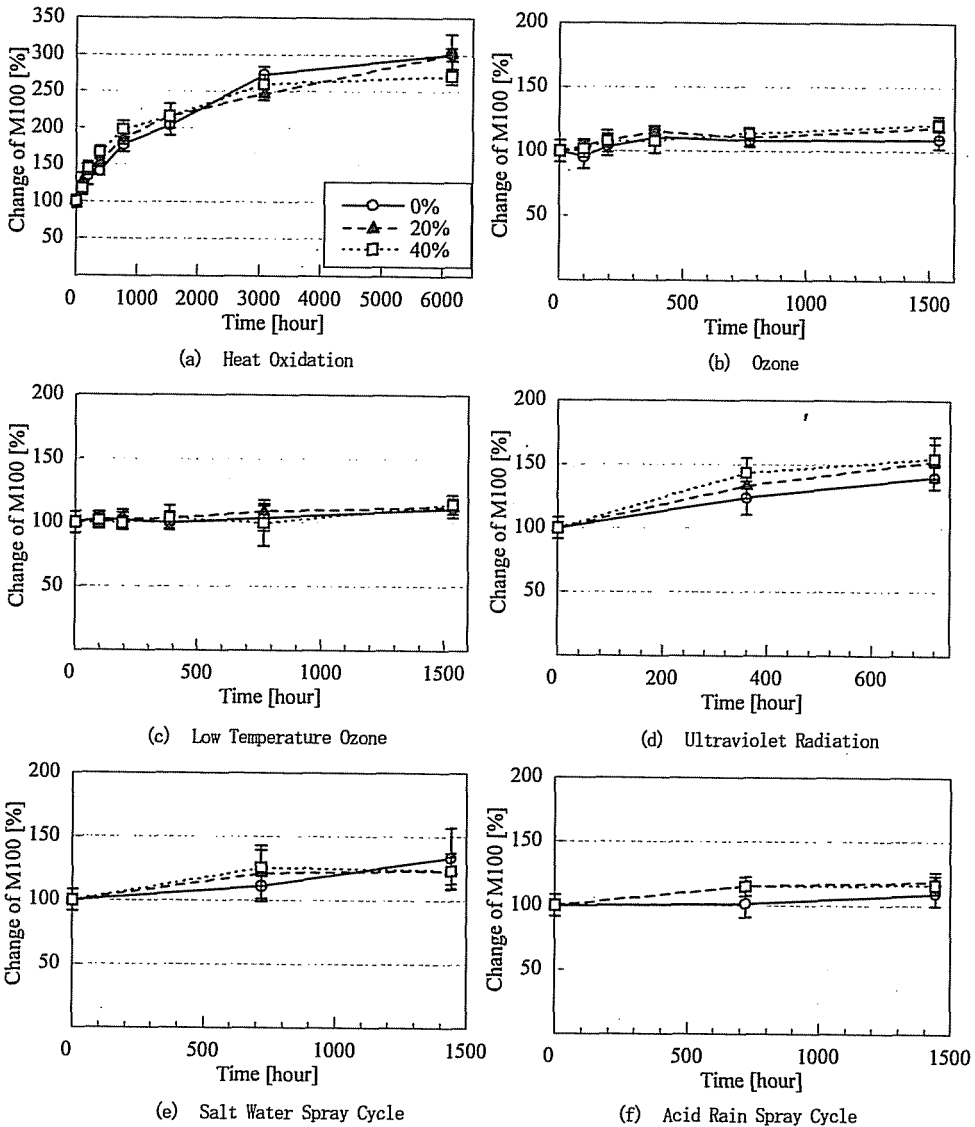


図-13 NR, M100時系列変化の予ひずみによる違い

験は、実験終了までに材料特性の変化率は非常に小さくなっている。熱酸化劣化および光劣化についても変化率は小さくなる傾向を示している。また、図-15より、塩水噴霧複合サイクルおよび酸性雨噴霧複合サイクルの環境因子はゴム材料の劣化に対して影響が少ないことが分かる。

NRと同様に、CRについても加熱促進劣化実験を6144時間まで延長して行った。延長して行った実験より得られた、CRの材料特性の時系列変化を図-16に示す。図-16より、硬さや剛性は先のNRの実験結果と傾向が類似しており、M100をピークとしてひずみレベルに応じた変化量を示している。ただし、実験時間6144時間においてCRのM25は初期値の約2.2倍に増

加しており、NRのM25よりも大きな変化が見られた。これにより、CRはNRよりも低ひずみ領域における剛性が熱酸化劣化による影響を受けやすいと考えられる。一方、破断強度および破断時伸びについてはCRの方がNRよりも変化量が小さく、破断強度に関しては実験時間6144時間経過後においても5%程度の低下に留まった。

一般に、CRはNRよりも耐候性において優れているといわれており、本研究の実験結果からも、その傾向が確認された。

b) 予ひずみの影響

CRについても、4(2)(c)で述べたNRと同様に予ひずみの影響を調べた。熱酸化劣化および光劣化におい

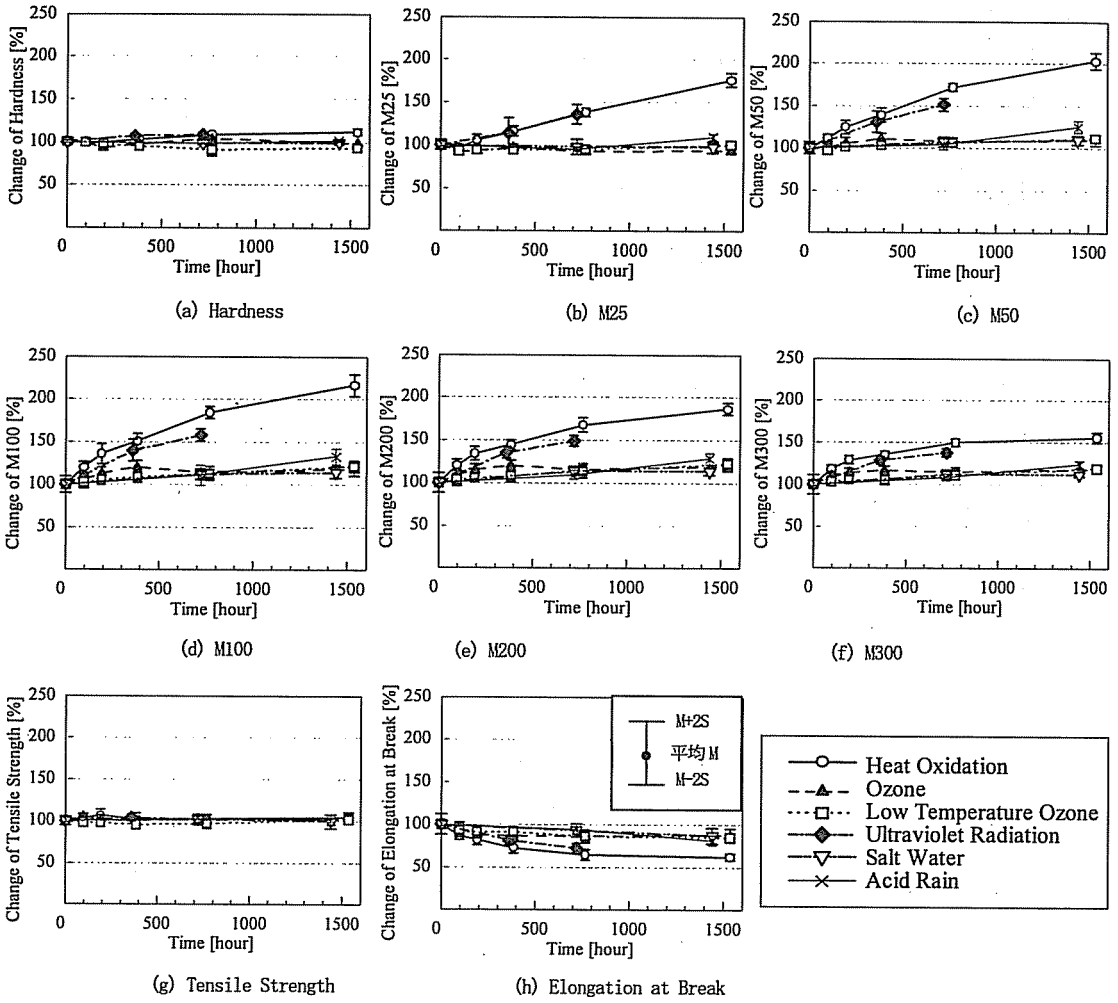


図-14 各劣化要因におけるCR材料特性の時系列変化
(予ひずみ $\epsilon_p=40\%$)

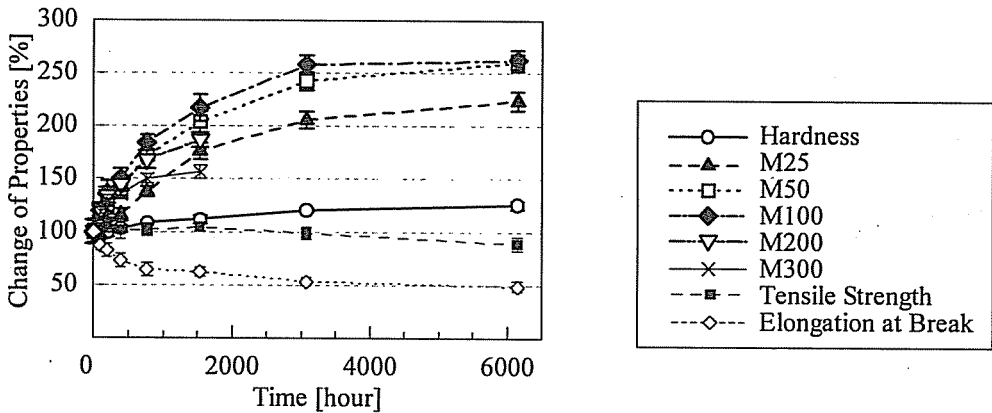
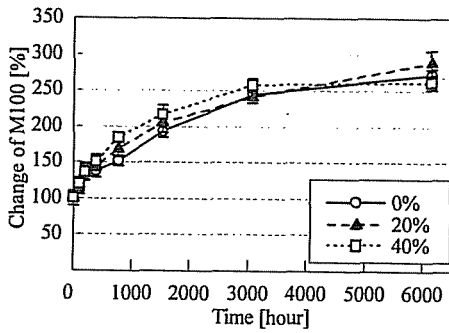
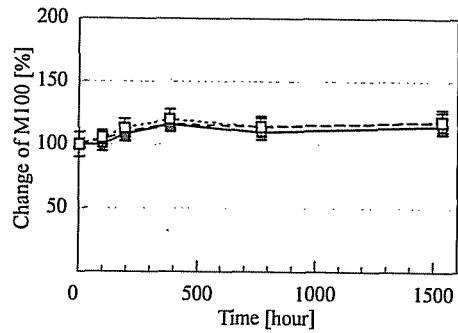


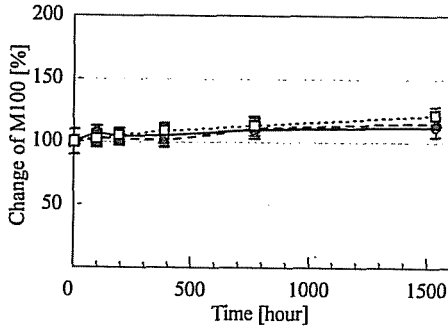
図-15 熱酸化劣化によるCR材料特性の時系列変化
(予ひずみ $\epsilon_p=40\%$)



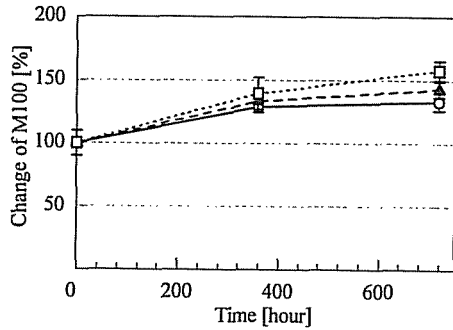
(a) Heat Oxidation



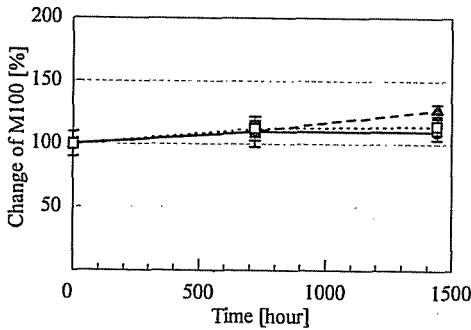
(b) Ozone



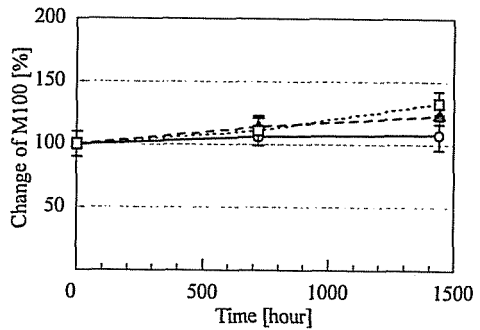
(c) Low Temperature Ozone



(d) Ultraviolet Radiation



(e) Salt Water Spray Cycle



(f) Acid Rain Spray Cycle

図-16 CR, M100時系列変化の予ひずみによる違い

て、予ひずみの影響が顕著に現れた。図-17 に CR について、NR の図-14 と同様に整理した結果を示す。

熱酸化劣化については、実験開始後 3000 時間までは、予ひずみの大きさに比例して M100 の変化率も大きくなった。実験時間 1536 時間に着目すると、予ひずみ $\varepsilon_p=40\%$ 条件では M100 が初期値の約 2.2 倍に増加しているのに対し、予ひずみ $\varepsilon_p=0\%$ では 1.9 倍程度であった。3000 時間以降については NR で見られた傾向と類似しており、予ひずみ $\varepsilon_p=40\%$ 条件の M100 の変化率が減少した。

光劣化については、予ひずみの大きさに比例して M100 の変化率も大きくなった。ただし、先の NR とは異なり、実験時間とともに予ひずみによる違いが拡

大していく傾向が確認された。実験時間 360 時間において、予ひずみ $\varepsilon_p=40\%$ 条件と $\varepsilon_p=0\%$ 条件との差は 10% 程度であるが、実験時間 720 時間においてはその差が約 30% に増加していることが分かる。

酸性雨噴霧複合サイクルについては、実験時間 720 時間までは予ひずみによる違いはほとんど見られないが、720 時間以降は予ひずみの大きさに比例して M100 の変化率も多少大きくなった。実験時間 1440 時間において、予ひずみ $\varepsilon_p=40\%$ と予ひずみ $\varepsilon_p=0\%$ との違いは、およそ 30% であった。

オゾン劣化、低温オゾン劣化および塩水噴霧複合サイクルについては、予ひずみの明確な影響が見られなかった。さらに、どの劣化因子においても、硬さ、破

断強度および破断時伸びについては予ひずみの明確な影響は見られなかった。

(4) 橋梁支承重用ゴムの主要な劣化要因

NR, CR ともに, 材料特性の変化が最も顕著に表れたのは熱酸化劣化であった。予ひずみ $\epsilon_p=40\%$, 実験時間 6144 時間では, NR, CR の初期値に対する M100 の変化率はそれぞれ 2.7 倍, 2.5 倍となった。NR の破断強度や破断時伸びについては 80%程度低下したが, CR の場合は変化率が NR よりも小さく, 破断強度は約 5%, 破断時伸びについては約 50%低下した。ただし, 2 種類の材料ともに, 70°C で 6000 時間以上の熱酸化劣化によって材料特性の変化がほぼ収束することが確認された。

次に影響が大きかったのが光促進劣化であった。破断時伸びと M100 に影響が強く現われ, 予ひずみ $\epsilon_p=40\%$ 条件ではそれぞれ 25%と 50%程度の変化が見られた。図-12 や図-15 での劣化傾向をみると, 変化率が収束するまでにさらに劣化が進むことが予想される。光による劣化は, 日射の無い設置環境ではほとんど影響を受けないと思われるが, 本実験において唯一 NR 試験片(予ひずみ $\epsilon_p=40\%$)にクラックを発生させた。よって, 支承重用ゴムの主要な劣化因子の一つとして考慮すべきであると思われる。

オゾン劣化, 低温オゾン劣化, 塩水噴霧複合サイクルおよび酸性雨噴霧複合サイクル実験は, 実験を行った時間の範囲内では材料特性値に大きな変化を与えないことが確認された。ただし, 酸性雨噴霧複合サイクル実験においては硬さに特徴的な変化が見られた。酸性雨噴霧複合サイクル実験は, 硬さの上昇が他の特性値の項目と比較して 12%と大きい。酸性雨噴霧複合サイクル実験によるゴムの劣化では特に酸化以外の化学反応が生じ, その影響が硬さの変化に現れたと考えられる。

オゾン劣化は, 従来からゴム材料の主要な劣化因子として挙げられていた。理由は, 引張ひずみを生じているゴム材料にクラックを発生させる性質を有しているからである。しかし, 本実験ではクラックは発生せず材料特性の変化も最大 10%程度に留まった。低温オゾン劣化でもクラックは発生せず, 材料特性の変化も通常のオゾン劣化と同程度であった。酸性雨複合サイクルや塩水噴霧複合サイクルについては, オゾン劣化と同程度かあるいはそれ以下であった。オゾン劣化によるクラックの発生がなかったのは, オゾンクラックの発生を抑制するように改良された材料の配合などが効果的に働いたためと思われる。

以上より, 橋梁支承重用ゴム材料の主要な劣化因子は, 熱および光による劣化であると考えられる。

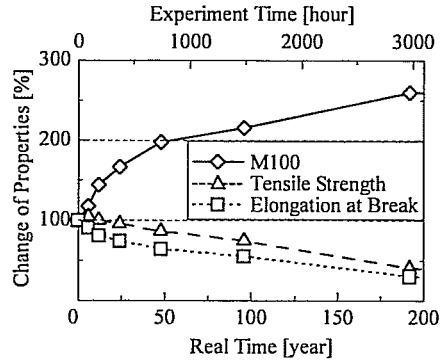


図-17 東京での NR の経年劣化推定値 (15.9°C)

(5) 橋梁支承重用ゴムの劣化予測への応用

ゴム材料の劣化, 特に熱酸化劣化については促進劣化実験から実環境下における劣化を予測することができる。加熱促進劣化実験は化学反応速度論に基づいた実験手法であり, 3. で述べたように低温環境下で低速に進む熱酸化劣化を高温環境下で高速に再現する。両環境下での反応時間, すなわち劣化時間の関係は, Arrhenius 式を基に以下のように表される¹⁴⁾。

$$\ln\left(\frac{t_r}{t}\right) = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \quad (2)$$

ここに, t_r , t はそれぞれ実環境下と実験環境下での時間を, T_r , T は各環境下の温度を示す。 E_a と R はそれぞれ活性化エネルギーと気体定数(=8.314[J/mol/K])を表す。

本研究で用いた天然ゴムの活性化エネルギーはおおよそ 9.6×10^4 [J/mol] であるので²⁰⁾, 式(2)を利用して, 本研究で行った 70°C の促進劣化実験の時間を実環境における時間に変換することができる。例えば, 東京の平均気温は 15.9°C であり, 促進劣化条件に 70°C で 1536 時間を与えると, 式(2)によりおおよそ 96 年間相当の熱酸化劣化と推定される。東京で実時間に対応する天然ゴムの M100, 破断伸びおよび破断強度の変化を図-18 に示す。ただし, ゴム支承を考えたとき, 表面のみの劣化を扱ったことであり, ゴム支承全体の劣化特性とは別であることを注意しなければならない。

5. 結論

環境促進劣化実験により, 様々な劣化因子の影響を受ける橋梁支承重用ゴムの劣化特性を実験的に検証し, 主要な劣化因子を明らかにすることで, 定量的に劣化特性を明らかにした。以下に本研究から得られた主な結論をまとめる。

1) 橋梁用ゴム支承に使用される天然ゴムと合成ゴムに

ついて、熱、オゾン、光、塩水噴霧複合サイクル、酸性雨噴霧複合サイクルの各劣化因子による長期劣化特性を環境促進実験によって定量的に明らかにした。

- 2) 橋梁支承用の天然ゴム、合成ゴムの両方にとって主要な劣化因子は、熱ならびに光であることを明らかにした。オゾン劣化、塩水噴霧複合サイクル、酸性雨噴霧複合サイクルによる影響は小さく、これらの劣化要因による材料特性の変化は早期に収束することを確認した。
- 3) 6144 時間 (約 8.5 ヶ月) の加熱促進劣化実験結果より、天然ゴムおよび合成ゴムともに 100%伸長応力 (M100) と破断時伸びに大きな変化が確認された。100%伸長応力については、天然ゴムおよび合成ゴムとも初期値の約 2.5 倍に増加した。破断時伸びについては、天然ゴムでは 80%、合成ゴムでは 54% だけそれぞれ低下した。ただし、破断強度については 2 種類の材料でその劣化傾向が異なり、天然ゴムが 80% 程度低下しているのに対し、合成ゴムでは 5% 程度の低下に留まった。
- 4) 720 時間 (12 日) の光促進劣化実験結果より、いずれの材料についても 100%伸長応力 (M100) と破断時伸びに影響が強く現れた。100%伸長応力については、天然ゴムおよび合成ゴムとも初期値の約 1.5 倍に増加した。破断時伸びについては、天然ゴムでは約 25%、合成ゴムでは約 30% だけそれぞれ低下した。
- 5) オゾン劣化、低温オゾン劣化、塩水噴霧複合サイクル実験および酸性雨噴霧複合サイクル実験を約 2 ヶ月間の実験を行った。全ての材料特性において、その変化はおよそ 10% 程度であり、オゾン劣化については早期に変化率が小さくなることが分かった。
- 6) 予びずみがゴム材料に与える影響は、熱酸化劣化ならびに光劣化において顕著であり、剛性においてその影響を強く受けることが分かった。オゾン劣化と低温オゾン劣化については、予びずみの劣化特性に与える明確な影響は見られなかった。

今回の結果は、橋梁用ゴム支承の表面近傍の劣化を取り扱ったものであり、現在ゴム支承全体の長期劣化を推定するために、支承内部に進行する熱酸化劣化の影響などを実験的に検討中である。これらの実験から得た基礎データを用いて実環境下でのゴム支承の性能変化を定量的に予測し、ゴム支承の設置場所に応じた取替え基準を考慮した橋梁のライフサイクルアナリシスに活用する予定である。

謝辞

本論文を作成するにあたり、日本道路公団および東海ゴム工業株式会社の技術者の方々には研究に関して有益なご助言とご助力、そして貴重な資料をいただきました。なお、本研究の一部は文部科学省科学研究費

補助金・基盤研究(B)(2)(研究代表者：伊藤義人、課題番号：1560237)の助成を受けて行ったものである。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：阪神大震災における鋼構造物の被害報告と今後の耐震設計について、土木学会、1995。
- 2) 土木学会：鋼橋の耐震設計し新案と耐震設計のための新技術、土木学会、構造委員会鋼構造新技術省委員会耐震設計研究 WG、1996。
- 3) 土木学会：阪神・淡路大震災震災調査報告、土木構造物の被害原因の分析、コンクリート構造物、鋼構造物、土木学会、阪神・淡路大震災調査報告編集委員会、1997。
- 4) 吉田純司、阿部雅人、藤野陽三：高減衰ゴム材料の構成則、土木学会論文集、No.710, pp.209-224, 2002。
- 5) 吉田純司、阿部雅人、藤野陽三：高減衰積層ゴム支承の 3 次元有限要素解析法、土木学会論文集、No.717, pp.37-52, 2002。
- 6) 本間大介、宇佐美勉：水平反力分散率に着目した多径間連続橋の大地震時応答、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.55, pp.470-471, 2000。
- 7) 宇佐美民雄、渡辺正夫、橋田敏之、米浜光郎、林邦明、長野悦子：ゴム支承の経年変化と静的特性、日本ゴム協会誌、No.54, Vol.3, pp.70-79, 1981。
- 8) 宇佐美民雄、渡辺正夫、橋田敏之、米浜光郎、林邦明、長野悦子：ゴム支承の経年変化と活荷重の影響、日本ゴム協会誌、No.55, Vol.12, pp.57-63, 1982。
- 9) 中村正人、宮川政勝：ゴム支承の耐荷力に関する試験、日本道路公団業務研究発表会、pp.803-807, 1983。
- 10) 石橋 忠、中村正人、宮川政勝：道路橋ゴム支承の耐久性に関する載荷試験、日本道路公団試験所報告、pp.100-110, 1984。
- 11) 渡部征男、加藤朝郎、米田玄次、広谷 勉：約 40 年を経過した積層ゴムの経年変化調査、第 1 回免震・制振コキウム、pp.439-446, 1996。
- 12) 日本免震構造協会編：免震積層ゴム入門、オーム社、pp.89-92, 1997。
- 13) 杉本博之、溝江実：天然ゴム支承の低温耐候性に関する研究、土木学会論文集、No.693, pp.73-86, 2001。
- 14) 日本ゴム協会 免震用積層ゴム委員会：設計者のための免震用積層ゴムハンドブック、理工図書、pp.307-328, 2000。
- 15) 斉藤孝臣：各種ゴムの劣化機構、日本ゴム協会誌、Vol.68, No.5, pp.284-296, 1995。
- 16) 日本ゴム協会環境劣化研究分科会編：エラストマーの耐候 (光) 性、第一次共同研究報告、武蔵野クリエイト、pp.9-25, 1994。
- 17) 藤原 博、田原芳雄：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究、土木学会論文集、No.570, pp.129-140, 1997。

- 18) 阿部雅人, 吉田純司, 藤野陽三: 免震用積層ゴム支承の水平 2 方向を含む復元力特性とそのモデル化, 土木学会論文集, No.696, pp.125-144, 2002.
- 19) 小池迪夫, 田中享二: 合成高分子防水層の耐候性 (その6) —光熱酸化劣化における光と熱の定量的評価, 日本建築学会論文報告集第 289 号, pp.1-10, 1980.
- 20) 社団法人 日本ゴム協会: 免震ゴム利用技術特別委員会, 免震用積層ゴムの利用技術に関する研究報告書, 192p.
- 21) 中村秀雄: 100 年以上も耐えてきたゴムの実証, 新素材, Vol.3, pp.27-30, 1996.
- 22) 松田泰治, 茂木正史, 石田勝彦, 塩尻弘雄: 大型免震要素試験: その 1 鉛入り積層ゴムの経年変化特性, 日本建築学会大会学術講演会講演概要集, B-2 分冊, pp.611-612, 1991.
- 23) 山田善一, 家村浩和, ウィリアムタンゾー, 鶴野禎史, 中村鎮雄: ハイブリッド地震応答載荷実験手法による高減衰ゴム支承の免震効果, 構造工学論文集, Vol.37-2, pp.851-862, 1991.
- 24) 吉田好孝, 北村岳伸, 長友浩信, 谷倉泉, 渡康裕: 18 年間の供用で損傷した積層ゴム支承の物性調査, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.56, pp.654-655, 2001.
- 25) Itoh, Y., Yazawa, A., Kitagawa, T., Kainuma, S., Yamamoto, Y. and Kutsuna, Y.: Study on Environmental Durability of Rubber Bearing for Bridges, IABSE Symposium Melbourne, 2002, pp.268-269.
- 26) Sayigh, A.A.M.: *Solar Energy Application in Buildings*, Academic Press, pp.1-39, 1979.
- 27) LaCount, B.J., Castro, J.M. and Ignatz-Hoover, F.: Development of a Service-simulating, Accelerated aging Test Method for Exterior Tire Rubber Compounds II. Design and Development of an Accelerated Outdoor Aging Simulator, *Polymer Degradation and Stability* 75, pp.213-227, 2002.
- 28) Bystritskaya, E.V., Pomerantsev, A.L. and Rodionova, O.Ye.: Evolutionary Design of Experiment for Accelerated aging Tests, *Polymer Testing* 19, pp.221-229, 2000.
- 29) Mitsuhashi, K., Shinohara, A. and Suga, S.: Development of New Oven Test Instrument, *Polymer Testing* 14, pp.381-399, 1995.
- 30) Kim, D.K. and Mander, J.B.: Temperature and Strain Rate Effects on the Seismic Performance of Elastomeric and Lead-Rubber Bearings, American Concrete Institute, SP-164, pp.309-322, 1996.
- 31) Stevenson, A. and Maxwell, D.L.: Low Temperature Stiffening of Structural Rubber Bearings, *Proceedings of the International Rubber Conference*, Vol.2, pp.424-430, 1986.

(2005. 1. 14 受付)

STUDY ON ENVIRONMENTAL DETERIORATION OF RUBBER MATERIAL FOR BRIDGE BEARINGS

Yoshito ITOH, Akio YAZAWA, Kazuya SATOH, Haosheng GU, Yukihiro KUTSUNA and Yoshihisa YAMAMOTO

An accurate estimation for long-term deterioration characteristics of bridge rubber bearings has been needed because of few data of the deterioration. This paper presents six types of accelerated aging tests that were implemented so as to research environmental deterioration characteristics of rubber materials for bridge bearings. For quantitative evaluation of deterioration of the rubber, heat oxidation, ozone, low temperature ozone, ultraviolet rays, salty water spray cycle system and acid water spray cycle system were considered. It was found that the damage due to the heat and the ultraviolet rays deterioration was severer than the other factors of deterioration.