

# 橋梁支承用天然ゴムの長期劣化予測に関する基礎的研究

伊藤義人<sup>1</sup>・佐藤和也<sup>2</sup>・顧浩声<sup>2</sup>・山本吉久<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 名古屋大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

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

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>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3丁目1番地)

橋梁用ゴム支承は、熱酸化劣化により、剛性が増加し変形性能が低下することが知られている。しかし、ゴム支承の長期劣化特性に関する基礎的データは少なく、ゴム材料の物性変化の定量評価やゴム支承の長期的な性能変化を考慮した設計法は確立されていない。本研究は、橋梁用ゴム支承に用いられる天然ゴムを対象に、劣化因子として最も重要な熱酸化劣化特性を加熱促進劣化実験により明らかにした。また、実験結果から、任意の環境下での橋梁支承用天然ゴム材料の物性変化を予測する手法を構築した。

**Key Words:** natural rubber; heat oxidation deterioration; performance change; accelerated exposure test

## 1. はじめに

橋梁用ゴム支承は、日本では1970年代に開発され現在多くの橋梁で用いられており<sup>1)</sup>、主に免震支承、反力分散支承およびコンクリート桁などに用いられるパッド型ゴム支承に分類される。免震ゴム支承は、上部工を支持するとともに、地震時に構造物を長周期化し震動エネルギーを散逸する。反力分散支承は、主に多径間連続橋に用いられ、地震時の慣性力を複数の橋脚に分散させる働きを持つ<sup>2)</sup>。ゴム支承の力学特性に関する研究は、これまで盛んに行われており<sup>3), 4)</sup>、支承としてのみならず橋脚の基部に用いる新たな試みもなされている<sup>5)</sup>。

しかし、長期間使用されたゴム支承は性能が変化することが知られており、特に剛性の増加と変形性能の低下が指摘されている<sup>6)</sup>。著者ら<sup>7), 8)</sup>は、橋梁支承用の天然ゴム材料と合成ゴム材料を対象に環境促進劣化実験を行った。劣化因子に熱酸化、オゾン、紫外線、塩水噴霧複合サイクルおよび酸性雨噴霧複合サイクルを設定し、各劣化因子についてゴム材料の物性変化を調べた。その結果、熱酸化劣化がゴム材料の物性変化に最も影響を与えることが分かり、70℃の条件下で1500時間程度の加熱促進劣化をさせた天然ゴム材料は、100%引張ひずみに相当する公称応力(M100)が初期値に対して約110%増加し、破断伸びは約50%低下した。

また、既往の報告により、熱酸化劣化によってゴム材料の物性変化が支承表面のみならず内部まで進行することが明らかにされている。

渡部ら<sup>9)</sup>は、イギリスLincorn市にあるPelham橋から約40年間使用された天然ゴム支承を回収し、その性能変化を調べた。その結果、ゴム支承の水平剛性が設計値に対して約10%増加していた。また、支承表面からおよそ50mmの深さに渡ってゴム材料物性が変化していた。

須藤ら<sup>10), 11)</sup>は、栃木県那須郡烏山町にある山あげ大橋から約10年間使用された高減衰ゴム支承を回収し、同一仕様の新規製品と性能を比較した。回収された支承の水平剛性は新規製品に対して3%~4%ほど大きく、等価減衰定数についても-2%~+4%の範囲で変化が見られた。また、支承内部の物性変化は表面から30mm程度の深さまで確認された。これらの事例により、長期間使用されたゴム支承は性能が劣化し、橋脚などへの負担を増加させると考えられる。

熱酸化劣化を受けるゴム支承の性能変化を明らかにすることが重要視されるようになり、日本が議長国として取りまとめている免震積層ゴムISO規格では、ゴム支承の長期耐久性評価の標準化が進められている<sup>12)</sup>。また、長期間使用されたゴム支承の実測や加熱促進劣化実験によりゴム材料の長期劣化予測も行われている<sup>13)</sup>。しかし、このような基礎的データは未だ不十分

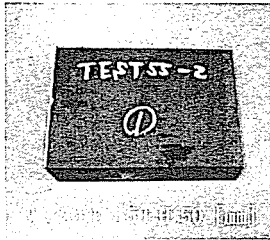


図-1 ゴムブロック供試体

表-1 実験条件

材料	実験温度 [°C]	実験時間 [days]
NR, HDR	60	31, 60, 100, 200, 300
	70	12, 22, 38, 75, 113
	80	4, 8, 14, 28, 42

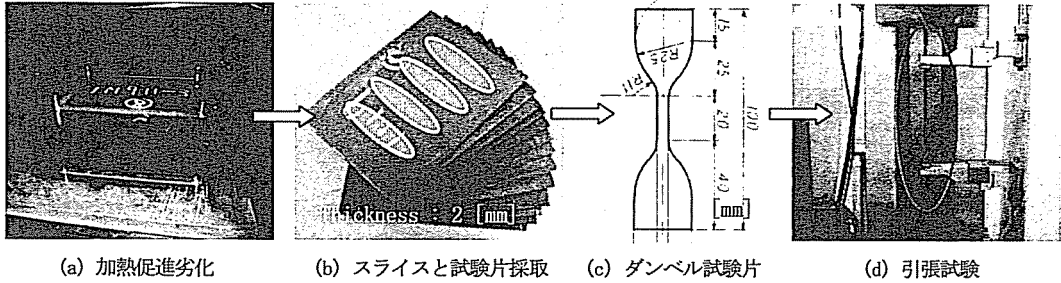


図-2 実験の流れ

であり、ゴム支承の劣化特性については不明確な点が多く残っている。まず、支承内部に進行する熱酸化劣化の影響を体系的に調べた例は少なく、多くは支承表面の材料物性変化の評価に留まっている<sup>14)</sup>。さらに、加熱促進劣化実験による材料レベルでの劣化予測はなされているが、支承内部に進行する熱酸化劣化を考慮した劣化予測は確立されていない。

本研究は、主に反力分散支承に用いられる天然ゴム (Natural Rubber, 以下 NR と略す) を対象に、これらの問題点を解決することを目的とした。ここで、橋梁用ゴム支承に用いられる NR 材料は、天然ゴムを主成分とし、そこにカーボンブラックや老化防止剤などを配合させ弾性率や耐久性を調整したものである<sup>15)</sup>。まず、NR 支承内部に進行する熱酸化劣化の影響を加熱促進劣化実験により調べた。次に、実験結果から NR 材料の熱酸化劣化特性を定量化し、NR 支承内部の物性変化を推定する劣化予測手法を考案した。

## 2. 加熱促進劣化実験

NR 支承内部に進行する熱酸化劣化の影響を明らかにするため、加熱促進劣化実験を行った。以下に、実験手法と実験結果について述べる。

### (1) 実験方法

#### a) 供試体

供試体は、村松・西川<sup>16)</sup>の実験を参考に図-1 に示す

ような厚肉の NR ブロックを 15 体用いた。

#### b) 実験条件

加熱促進劣化実験は、ギヤオープン(東洋精機製作所製)を用いて行った。実験温度は 60°C、70°C および 80°C の 3 種類を設定し、各実験温度に応じた実験時間(オープンから NR ブロックを取り出すタイミング)を文献<sup>8)</sup>をもとに表-1 のように各温度ごとに 5 段階設定した。

#### c) 実験の流れ

図-2 に実験の流れを示す。NR ブロックをギヤオープンで加熱促進劣化させた後、厚さ約 2 mm 毎にスライスしたスライスシートを作成した。次に、そのスライスシートから 4 本の JIS3 号ダンベル試験片<sup>17)</sup>を採取し、引張試験を実施した。採取されたダンベル試験片の総数は 1305 本である。

#### d) 測定項目

引張試験から得られた応力-ひずみ曲線から特定の物性値を求め、NR ブロックの厚さ方向にプロットすることで内部に進行する熱酸化劣化の影響を調べた。なお、熱酸化劣化の影響はゴム材料のひずみエネルギーに強く現われる<sup>18), 19)</sup>。そこで、本研究では図-3 に示すように、応力-ひずみ曲線からひずみ 25%~500% 程度までに相当するひずみエネルギーを求め、その NR ブロックの内部分布を調べた。さらに、伸び性能の劣化特性を把握するために、NR 材料の破断伸びの内部分布も調べた。以下、図-3 に示すように、例えば引張ひずみ 100% までの範囲のひずみエネルギーを U100 と表す。また、NR ブロックの内部物性分布を物性プロファイル<sup>20)</sup>と呼び、U100 の NR ブロック内部分布を U100

プロファイルと記述する。

なお、NRブロックの内部位置は次式により求めた。

$$x_n = \sum_{i=1}^{n-1} t_i + \frac{t_n}{2} \quad (1)$$

ここで、 $x_n$ は $n$ 番目の測定点のNRブロック内部位置を示す。また、 $t_i$ は $i$ 番目のスライスシートの厚さであり、そのスライスシートから採取されたダンベル試験片の実測厚さの平均値(4本分)である。

## (2) 実験結果および考察

加熱促進劣化実験から得られた、NRブロックの物性プロファイルと、NRブロック表面および内部の物性変化の時系列変化を示す。紙面の都合により、以下ではU100と破断伸びを中心に述べる。

### a) 物性プロファイル

図-4と図-5に、NRブロックのU100プロファイルと破断伸びプロファイルをそれぞれ示す。ただし、図中のプロット1点はダンベル試験片4体の平均値であり、かつ各測定点を対応する内部位置の初期値で除すことにより、無次元化した相対変化を示している。また、横軸はNRブロック厚さ50mmに対する相対的な位置を表し、横軸の値が0と1のときNRブロックの表面を意味する。

図-4と図-5より、いずれの実験温度においても、NRブロック表面近傍でU100と破断伸びが大きく変化したことが分かる。特に、図-4(a)と図-5(a)より、60°Cで300日の実験条件ではU100が初期値の約2.5倍にも増加し、破断伸びは初期値に対して約60%低下した。しかし、ある内部位置(以下、クリティカル深さと称す)より内部では、U100と破断伸びは劣化前の初期値と変わらなかった。ただし、図-4(a)のU100に見られるように、60°Cで200日の条件の結果のみNRブロック内部で初期値よりも値が多少小さくなったが、これは劣化前のNRブロックが有していた物性の誤差に起因するものであり、熱酸化劣化による影響ではないと思われる。クリティカル深さは、実験時間の早い段階で決まり、時間の経過に伴って大きくなる傾向はほとんど見られなかった。ただし、このクリティカル深さは実験温度による違いは見られた。図-4(a)や図-5(a)より、60°C実験条件では相対位置で約0.25(ブロック表面から約12.5mm)であるのに対し、図-4(c)や図-5(c)より、80°C実験条件では約0.15(ブロック表面から約7.5mm)であった。NRブロック内部に進行する熱酸化劣化によるクリティカル深さは、劣化開始後の早期に平衡状態に達したことが分かる。また、高い温度に対し、クリティカル深さが小さくなる傾向が見

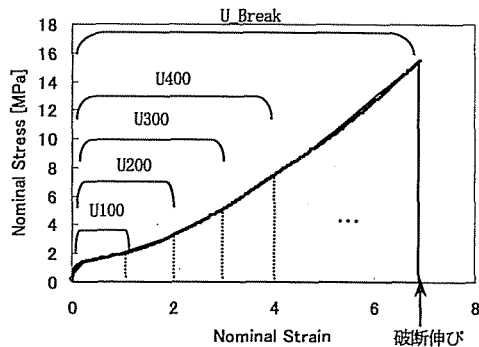


図-3 測定項目

られた。

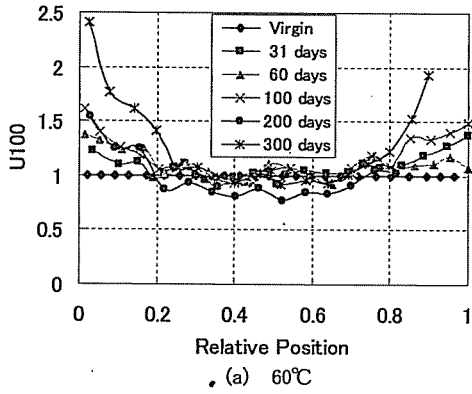
### b) 物性の時系列変化

a)で示した物性プロファイルのうち、NRブロック表面と内部のU100と破断伸びの変化に着目し、それぞれの時系列変化を調べた。なお、NRブロック表面の物性変化は最外縁のスライスシート2枚(試験片8本分)から得られたものを、NRブロック内部についてはブロックの内部位置が25mm(相対位置0.5)付近のスライスシート2枚(試験片8本分)から得られたものをそれぞれ用いた。

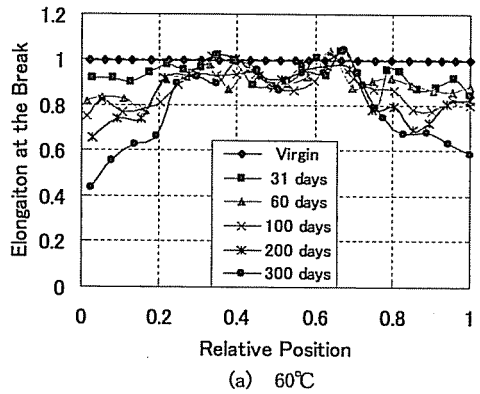
図-6に、NRブロックの表面と内部について、U100と破断伸びの時系列変化を実験温度ごとに示し、各実験時間につき試験片8体分のデータを示す。図-6(a)と図-6(c)より、NRブロック表面のU100と破断伸びは、時間と共に非線形に変化していることが分かる。時系列変化の勾配は時間の経過と共に緩やかになり、熱酸化劣化による物性の変化率が時間と共に小さくなっていることが分かる。熱酸化劣化による物性の変化率が時間と共に減少する理由は、次のように考えられる。実験開始直後はゴム材料の分子構造が熱酸化によって積極的に変化し、それに伴って材料物性も変化する。しかし、分子構造の変化が進行するにつれてゴム分子鎖が短くなり、ゴム材料の架橋密度が増加する<sup>18),19)</sup>。このとき、ゴム分子鎖は空間的な制約をより強く受け、分子構造の変化が生じにくくなると推測される。一方、図-6(b)と図-6(d)より、NRブロック内部については、図-4や図-5からも明らかのように、いずれの物性値も初期値に対して変化は見られなかった。

### (3) 活性化エネルギー

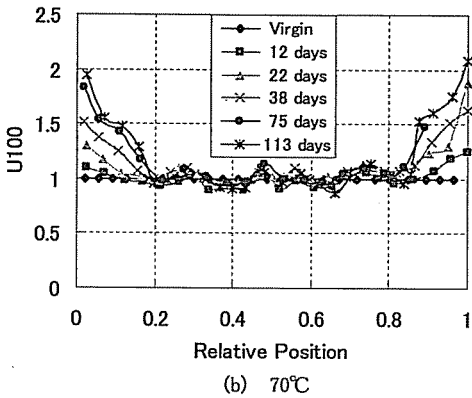
実験から得られたNRブロック表面の物性変化を用いて、活性化エネルギーを求めた<sup>2)</sup>。まず、ブロック表面の物性変化の時系列変化について、物性が20%変化したときの実験時間を求め、その対数と実験温度の逆数との関係(アレニウスプロット)<sup>2)</sup>を作成した。図-7に本実験結果をもとに作成したアレニウスプロット



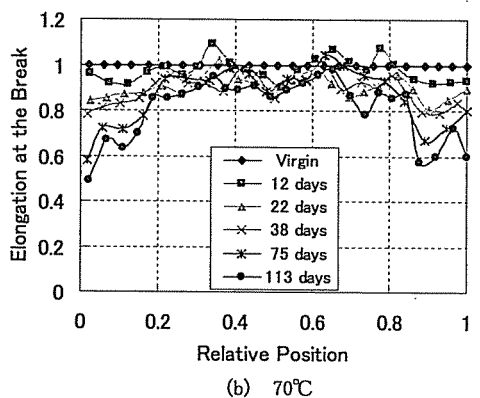
(a) 60°C



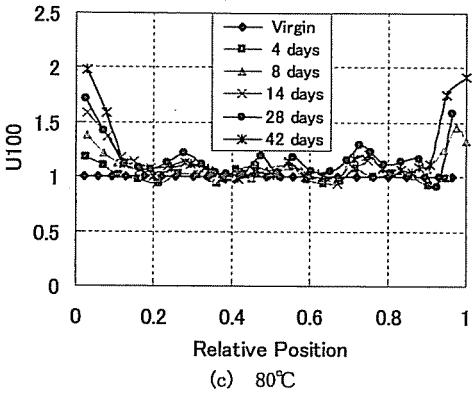
(a) 60°C



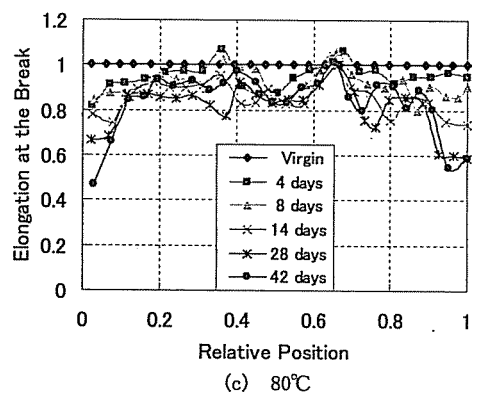
(b) 70°C



(b) 70°C



(c) 80°C



(c) 80°C

図-4 U100 プロファイル

図-5 破断伸びプロファイル

の一例を示す。次に、最小二乗法によりアレニウスプロットの回帰直線を求め、その傾きから活性化エネルギーを算出した。なお、この活性化エネルギーは後述する劣化予測で用いられる。

表-2 に、実験結果から求められた活性化エネルギーを示す。NR の U200 は、実験データのばらつきなどが影響して活性化エネルギーを求めることができなかった。表-2 より、NR の活性化エネルギーは物性によって多少値が異なるものの概ね  $9.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times$

$10^5$  [J/mol] 程度であり、著者らが文献 7) と 8) で取り扱ったものとはほぼ同じ値が得られた。

(4) 熱酸化劣化特性の定量化

実験結果から NR 材料の熱酸化劣化特性を明らかにし、後述する劣化予測に反映させた。実験により、NR ブロックの物性プロファイルは、模式的に図-8 のように描ける。図-8 の縦軸の  $U/U_0$  は、劣化による NR 材料物性の初期値  $U_0$  に対する相対変化を表し、横軸は

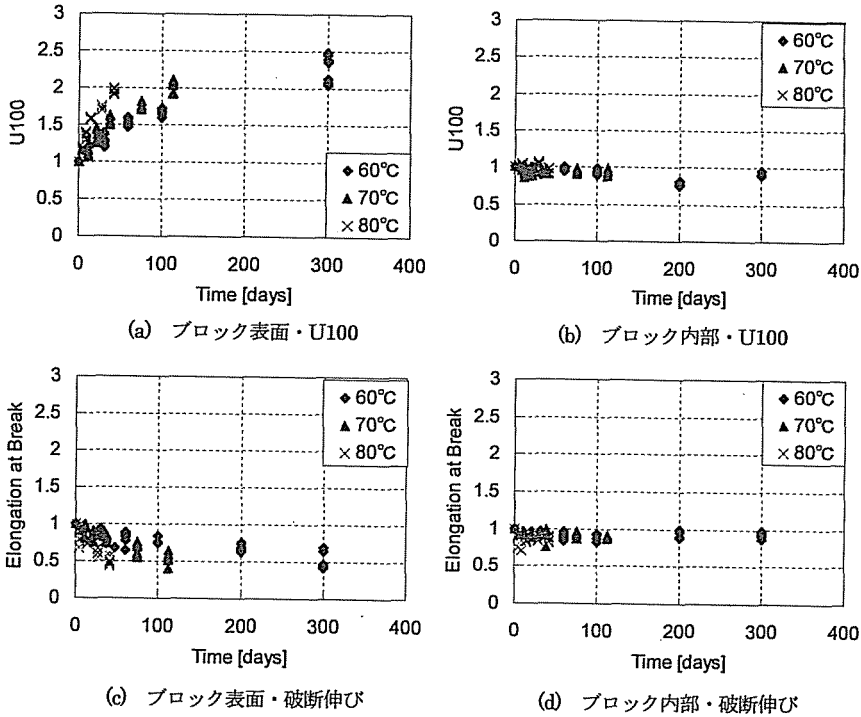


図-6 NR ブロック表面の U100 および破断伸び時系列変化

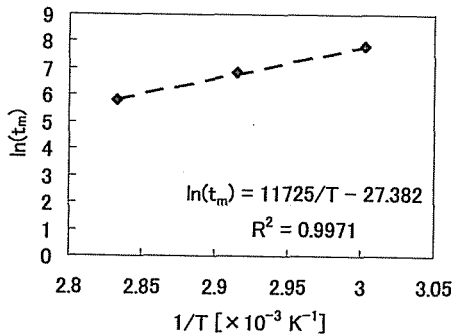


図-7 アレニウスプロットの例

表-2 活性化エネルギー

	NR (J/mol)
U25	$1.05 \times 10^5$
U50	$1.09 \times 10^5$
U100	$9.98 \times 10^4$
U200	—
U300	$1.53 \times 10^5$
UB	$9.63 \times 10^4$
EB	$8.68 \times 10^4$
Average	$9.94 \times 10^4$

NR ブロック内部の位置を示す。ブロックの表面で物性変化は最も大きく、その値  $\Delta U_i$  は時間とともに変化する。表面からブロック内部に進むにつれ徐々に変化量が小さくなる。クリティカル深さで、物性プロファイルの勾配がゼロとなり、物性の初期値に一致する。以下では、これらの熱酸化劣化特性と、1) 時間依存性、2) 温度依存性および 3) 物性による違いの定量化について述べる。さらに、物性プロファイル全体の形状を表す簡便な数式モデルを提案する。

a) クリティカル深さ

図-4 と図-5 で示したように、物性変化が一定となるクリティカル深さは、実験開始後の早期に現われ、

実験時間の経過と共に大きくなる傾向はほとんど見られなかった。また、U100 や破断伸びのような物性による違いは確認されず、主に実験温度による違いが見られた。

実験結果より、クリティカル深さは低い温度条件ほど大きくなった。このような傾向に対して、村松・西川<sup>16)</sup> はクリティカル深さと温度の関係を次式で与えている。

$$d^* = \alpha \exp\left(\frac{\beta}{T}\right) \quad (2)$$

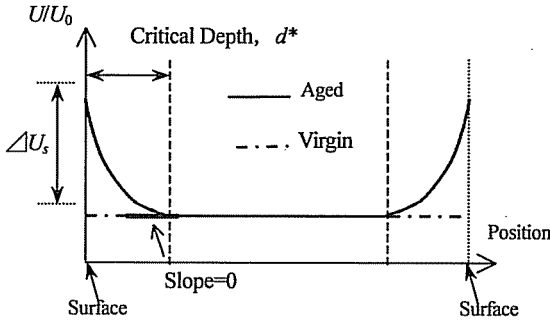


図-8 物性プロファイルの模式図

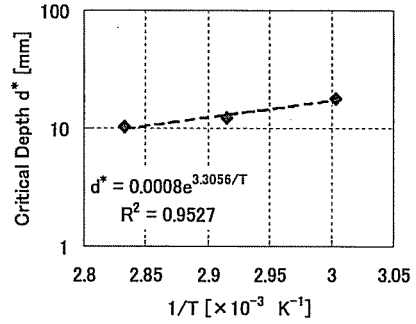
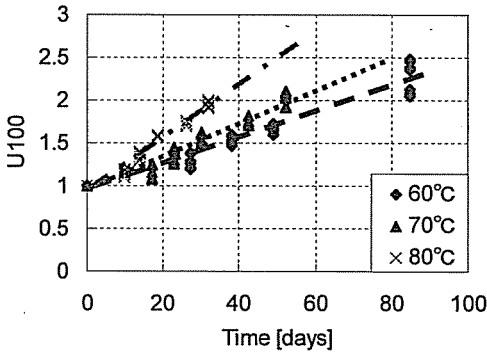
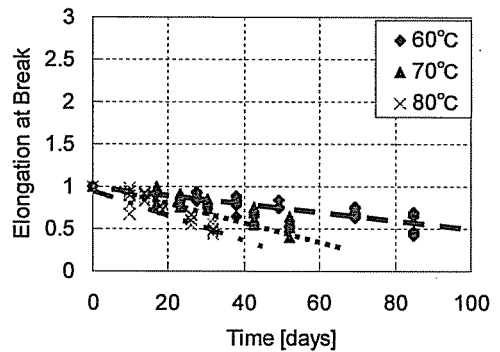


図-9 クリティカル深さと温度との関係



(a) U100



(b) 破断伸び

図-10 ブロック表面のU100と破断伸びの時系列変化( $\sqrt{t}$ による整理)

ここに、 $d^*$ はクリティカル深さを、 $T$ は絶対温度をそれぞれ示す。また、 $\alpha$ と $\beta$ は実験結果から定まる定数である。式(2)を本研究の実験結果に適用するため、図-4や図-5などの物性プロファイルからクリティカル深さを読み取り、それらの平均値を実験温度の逆数に対してプロットした。その整理結果を図-9に示す。

図-9より、クリティカル深さと温度の関係が式(2)で表せるとする仮定は実験データと整合的である。この結果、式(2)により、任意の温度下のクリティカル深さを求めることが可能となった。

#### b) NRブロック表面の物性変化 時間依存性

図-6(a)と図-6(c)に示したように、ブロック表面の物性変化は時間と共に非線形に変化した。ここで、図-6(a)と図-6(c)のような物性変化を、横軸に実験時間の平方根をとってプロットしたところ、物性変化は時間の平方根に対して線形に変化する傾向が得られた。

図-10に、一例としてU100と破断伸びに関する結果を示す。図-10より、NRのU100と破断伸びは実験時間の平方根に対して線形に変化していることが確認

される。このような傾向は、NRブロック表面が外気に直接接触することに起因しており、主に熱酸化反応によって物性変化が生じるためと言われている<sup>10)</sup>。

NRブロック表面の物性変化の時間依存性は次式で表すことができる。

$$\Delta U_s = k_s \sqrt{t} \quad (3)$$

ここに、 $\Delta U_s$ はNRブロック表面の物性変化を、 $t$ は時間を表す。 $k_s$ は回帰直線の傾きを示し、図-10に示すような時系列データから回帰分析により求められる。

#### 温度依存性

図-6に示したように、NRブロック表面の物性変化には実験温度による違いが見られた。前述のように、NRブロック表面の物性は時間によっても変化するが、このような温度と時間に依存して変化する物性に対しては、一般に温度-時間換算則を用いて温度依存性が取り除かれる<sup>2)</sup>。NRブロック表面の物性変化の温度依存性については、3.で詳述する。

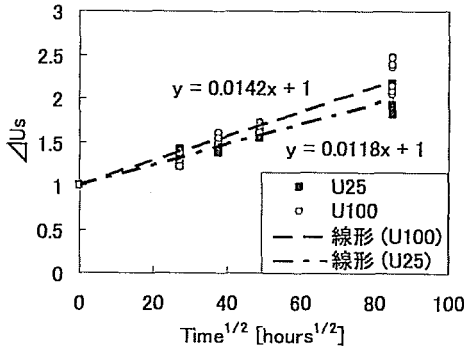


図-11 物性変化のひずみによる違い  
(60°C条件)

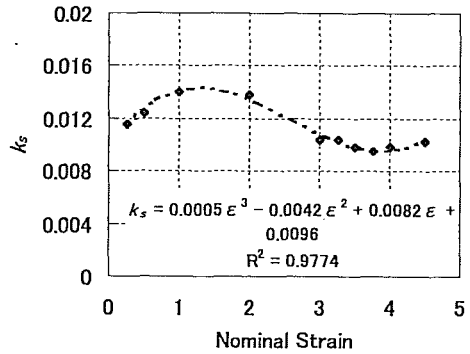


図-12 式(3)の  $k_s$  とひずみとの関係  
(60°C実験条件)

### 物性依存性

NRブロック表面の物性変化は、ひずみによって熱酸化劣化の影響度が異なった。図-11に、60°C実験条件における、NRブロック表面のU25とU100の時系列変化を示す。ただし、横軸は実験時間の平方根で整理してある。図-11に示すように、U25はU100よりも回帰直線の傾きが小さく、劣化の程度が小さいことが分かる。こうした現象がなぜ生じるのかは明確ではないが、本研究では、熱酸化劣化の影響度の物性による違いを実験結果から回帰分析により求め、3.で扱う劣化予測においてゴム材料の劣化した応力-ひずみ曲線を求める際に利用する。

図-11のように、NRブロック表面の物性変化のひずみによる違いは、式(3)の傾き  $k_s$  に現われるため、 $k_s$  とひずみとの関係を調べた。図-12に、一例として60°C実験条件における結果を示す。

図-12より、 $k_s$  とひずみとの間に3次曲線で表される関係が確認された。したがって、ブロック表面の物性変化率の物性による違いは、次のように近似できる。

$$k_s = a_1 \varepsilon^3 + a_2 \varepsilon^2 + a_3 \varepsilon + a_4 \quad (4)$$

ここに、 $a_1 \sim a_4$  は図-12に示す回帰分析から求まる定数である。式(3)、式(4)および後述する温度-時間換算則より、任意の温度、時間およびひずみ量でのNRブロック表面の物性変化を定量的に扱うことができる。

### c) 物性プロファイルの形状モデル

クリティカル深さとNRブロック表面の物性変化を用いて、物性プロファイル全体を記述する簡便な数式モデルを考案した。

図-8より、ブロック表面からクリティカル深さまでの範囲で相対位置に関する物性変化を2次の多項式で近似すると、最終的に次式が導かれる。

$$\frac{U(t)}{U_0} = 1 + w \Delta U_s \quad (5)$$

ここに、 $U(t)$  と  $U_0$  は、それぞれ時刻  $t$  における物性とその初期値である。 $\Delta U_s$  は、ブロック表面の物性変化を表す。 $w$  は、位置  $x$ 、クリティカル深さ  $d^*$  およびブロック厚さ  $l$  の関数であり、以下のように表される。

$$w = \begin{cases} \left( \frac{x-d^*}{d^*} \right)^2 & (0 \leq x \leq d^*) \\ 0 & (d^* \leq x \leq l-d^*) \\ \left( \frac{x-(l-d^*)}{d^*} \right)^2 & (l-d^* \leq x \leq l) \end{cases} \quad (6)$$

### (5) 実験結果との比較

3.で述べるように、実験条件下におけるNR支承の表面の物性変化は、本研究の実験結果から間接的に求めることができる。そこで、式(2)～式(6)を用いて、実験結果をよく説明できることを確認する。

式(2)～式(4)に含まれる定数を、60°C実験条件の結果から求めた。表-3に求められた定数の一覧を示す。図-13にU50およびU100プロファイルについて実験結果と式(5)、(6)から指定した曲線の比較を示す。図-13より、提案した数式モデルの精度が高いものであることが分かる。特に、ブロック表面の時間依存の変化量とクリティカル深さが実験結果とほぼ整合している。また、ブロック表面からクリティカル深さまでの領域における物性変化についても、概ね推定できていることが分かる。

表-3 実験結果から同定された定数

	$\alpha$ [ $10^{-4}$ mm]	$\beta$ [ $10^3$ K $^{-1}$ ]	$a_1$ [ $10^{-4}$ ]	$a_2$ [ $10^{-3}$ ]	$a_3$ [ $10^{-3}$ ]	$a_4$ [ $10^{-3}$ ]	$k_{bs}$ [ $10^{-3}$ ]
NR	8.0	3.3	5.0	-4.2	8.2	9.6	-4.9

\*  $k_{bs}$ は、ブロック表面の破断伸びの変化率を示す。

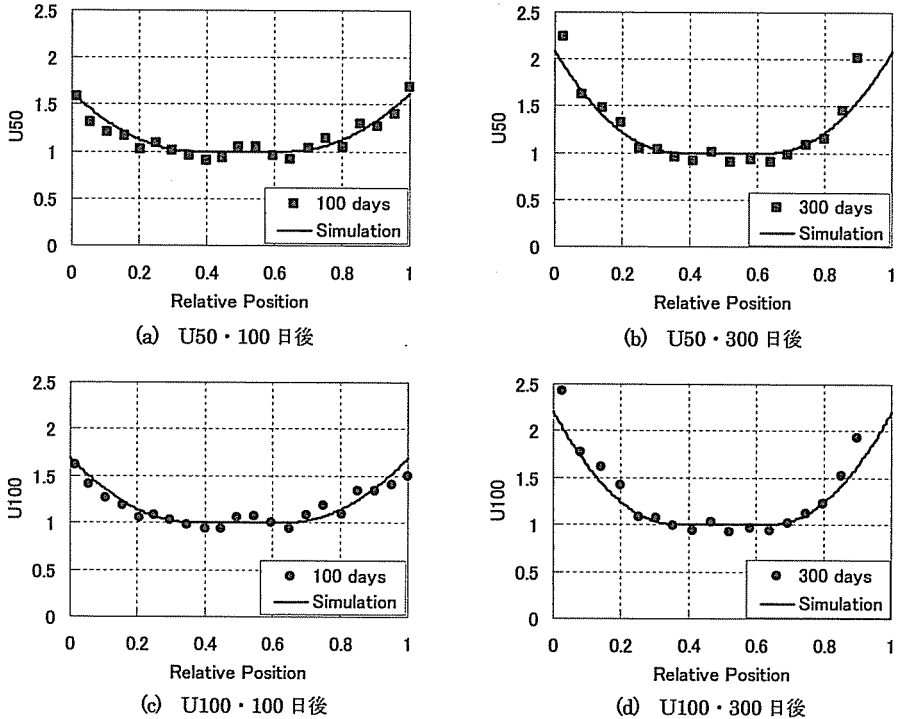


図-13 60°Cの物性プロファイルとモデルとの比較

### 3. 劣化予測

2. で明らかにした NR 材料の熱酸化劣化特性を用いて、実環境下で劣化した NR 支承の物性プロファイルと、NR 支承内部の任意の位置における劣化後の応力-ひずみ曲線を予測する手法を考案した。以下に、考案した予測手法を述べ、実測結果との比較により、その妥当性を示す。

#### (1) 劣化予測手法

##### a) 温度-時間換算則

実環境下の劣化を加熱促進劣化実験結果から推定するとき、温度-時間換算則が用いられる。これは、温度と時間に依存して変化する物性に対して適用され、その温度依存性を考慮する。図-14に、温度-時間換算則の適用方法の概要を示す。未知である実環境下の物性変化を求めるとき、ある促進劣化実験を基準条

件とし、その実環境温度での劣化時間を、温度-時間換算則を用いて、基準実験温度条件での相当劣化時間に変換する。基準劣化実験の物性変化は既知であるとし、相当時間に対応する基準温度での物性変化を実環境下のものと等価とする。

一般に広く利用されている温度-時間換算則として、化学反応速度論に基づいたアレニウス式が知られており、相当時間  $t_{ref}$  は次式により算出される<sup>2)</sup>。

$$\ln\left(\frac{t_{ref}}{t}\right) = \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \quad (7)$$

ここに、 $E_a$  は活性化エネルギーを、 $R$  は気体定数 (=8.314[J/mol/K]) を示す。また、 $T$ 、 $t$  は、それぞれ実環境の温度と時間である。活性化エネルギーは、2. で示したように加熱促進劣化実験から求めたものを用い



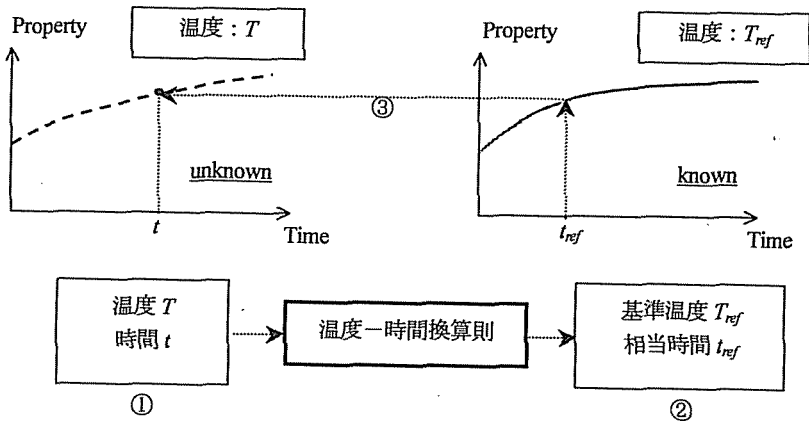


図-14 温度-時間換算則の概要

る。また、基準温度  $T_{ref}$  には加熱促進劣化実験温度 (60°C) が設定される。2. で示した NR ブロック表面の物性変化は、式(3)に式(7)から求められる相当時間を代入して計算される。

#### b) 劣化予測の流れ

劣化予測の流れを、図-15 に示す。図-15(a)は劣化予測の主処理のフローであり、図-15(b)は図-15(a)に含まれる劣化後のゴム材料物性を算出する副処理のフローを表す。以下に、劣化予測の中の各処理について述べる。

##### ステップ1 クリティカル深さの算出

実環境下におけるクリティカル深さは、式(2)に実環境温度を代入して求める。これにより、式(6)の関数  $w$  が定まる。

##### ステップ2 相当時間の算出

式(7)を用いて、入力された環境条件(温度と時間)に対する、基準温度での相当時間を求める。

##### ステップ3 破断伸びとひずみエネルギーの算出

ゴム支承の表面においては、ステップ2で求めた相当時間を式(3)に代入して表面の物性変化を求める。ただし、ひずみエネルギーについては式(3)と式(4)を用いて、任意のひずみに対するひずみエネルギーを求める。

##### ステップ4 応力-ひずみ曲線の算出

ステップ3により、劣化後のひずみエネルギー-ひずみ関係が得られる。よって、次式から単軸引張変形場の応力が求まる。

$$\sigma = \frac{\partial U}{\partial \varepsilon} \quad (8)$$

ここに、 $\sigma$ は単軸引張変形場における公称応力を、 $\varepsilon$

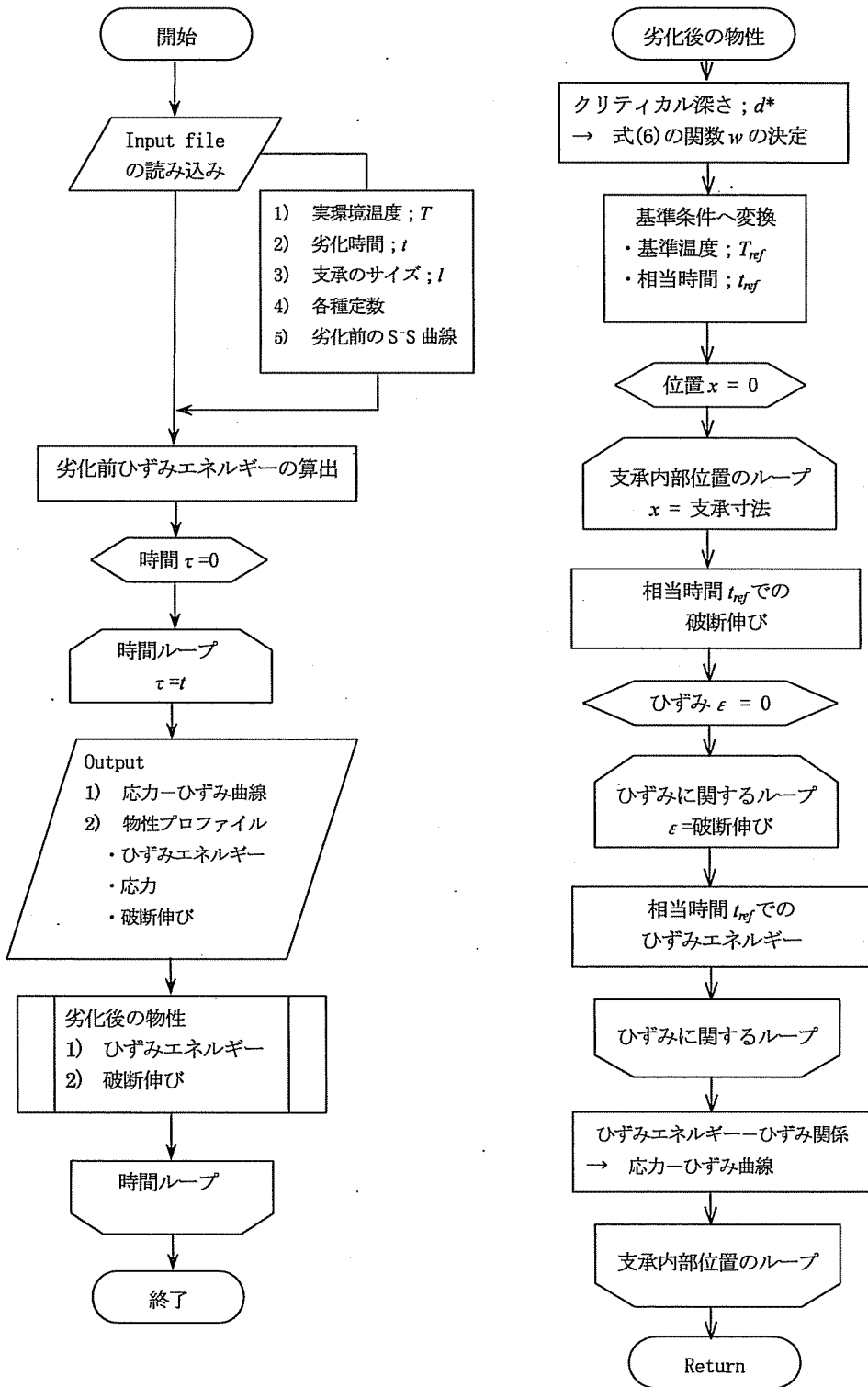
は公称引張ひずみを、 $U$ はひずみエネルギーをそれぞれ示す。

ステップ3とステップ4の処理を、支承内部の全ての位置について行う。すなわち、式(5)と式(6)を用いて支承内部の任意の位置に応じた物性変化を求める。最終的に、支承内部の任意の位置における、劣化後の応力-ひずみ曲線が求まる。得られた応力-ひずみ曲線から、100%引張応力(M100)などの物性を抽出し支承内部位置に対してプロットすれば、劣化したゴム支承の物性プロファイルが予測できる。

#### (2) 劣化予測の妥当性の検討

実測結果との比較により、考案した劣化予測の妥当性を検討した。実測結果は、イギリスのLincorn市(年平均気温9.2°C)にあるPelham橋から約38年間使用されたNR支承の内部物性分布<sup>9)</sup>を対象にした。活性化エネルギーは、表-2に示した全ての物性値から求められたものの平均値を用いた。また、劣化予測に必要な定数は表-3に示したのものを用い、NRブロック表面の物性変化は、温度-時間換算則を用いて本実験の60°C条件の結果から算出した。

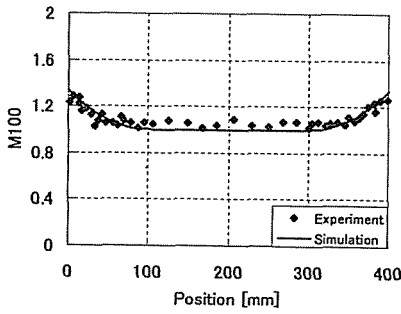
図-16に、物性プロファイルの実測結果と劣化予測による結果とを示す。なお、図-16の実測結果については、渡部ら<sup>9)</sup>の報告を参考に物性プロファイルを初期値で無次元化した。図-16より、100%引張応力(M100)と破断伸びのいずれについても、劣化予測が実測結果とほぼ整合していることが確認された。図-16(a)のM100プロファイルについて着目すると、支承表面のM100は実測結果が約30%増加であるのに対し、劣化予測ではおおよそ28%増加となった。また、クリティカル深さは、劣化予測により約80mmと予測された。



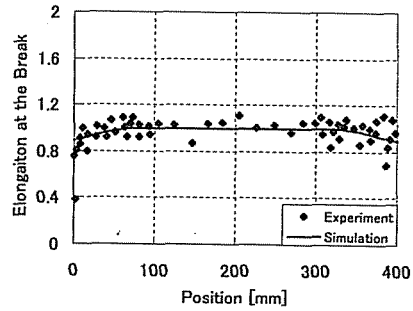
(a) 主処理

(b) 副処理

図-15 劣化予測の流れ



(a) M100



(b) 破断伸び

図-16 Pelham 橋回収支承の物性プロファイルとその予測結果

#### 4. 結論

本研究は、橋梁用天然ゴム支承の長期劣化特性を明らかにすることを目的とし、橋梁支承用天然ゴム材料の熱酸化劣化特性を明らかにするために、ゴムブロック供試体を用いた加熱促進劣化実験を行った。また、得られた実験結果を基に、橋梁支承用天然ゴムの劣化特性を予測する手法を考案した。以下に、本研究で得られた主な結論を示す。

- 1) 橋梁支承用天然ゴム材料は、ブロック表面近傍の物性が大きく変化するが、あるブロック内部深さ(クリティカル深さ)までしか劣化が進行しないことが分かった。
- 2) 実験結果から、熱酸化劣化特性と温度、時間およびひずみとの関連をまとめ、それらを定量化した。クリティカル深さと温度の間には、指数関数的な関係が見られた。ブロック表面の物性変化は、実験時間の平方根に比例して変化することを明らかにした。ブロック表面の物性変化にはひずみ依存性が見られ、3次曲線を当てはめることができた。
- 3) 実験から得られた物性変化のブロック内部分布(物性プロファイル)を表す、簡便な数式モデルを考案した。実験結果との比較を試み、考案した数式モデルが物性プロファイルを精度良く再現できることを確認した。
- 4) 物性プロファイルの数式モデルを用いて、実環境下でのゴム材料の物性変化を予測する高精度の劣化予測手法を考案し、任意の支承内部位置での劣化したゴム材料の応力-ひずみ曲線を求めることが可能となった。

今後、材料レベルでの劣化特性をゴム支承全体に拡張し、天然ゴム支承の長期劣化特性を明らかにする。

また、天然ゴム支承と同様に、免震支承に用いられる高減衰ゴム支承の性能変化も検討している。さらに、劣化したゴム支承を有した鋼製橋脚の動的応答解析を行うことで、ゴム支承の取替え基準を明らかにし、任意の橋梁建設場所でのゴム支承の性能変化を考慮した設計法を確立する予定である。

謝辞：本論文を作成するにあたり、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をいただきました。ゴム材料の劣化機構および劣化予測について、名古屋大学マテリアル理工学専攻の武田邦彦教授からご助力を頂きました。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) 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.
- 2) 社団法人日本ゴム協会: 設計者のための免震積層ゴムハンドブック, 理工図書, 2001.
- 3) 家村浩和: 極限地震動に対する要求性能と設計法のあり方—耐震設計から先端技術を応用した免震・制震設計へ—, 土木学会論文集, No. 623/VI-43, pp. 1-8, 1999.
- 4) 金田一智章, 宇佐美勉, 中島大輔: 免震支承を有する鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験, 土木学会論文集, No. 654/I-52, pp. 245-257, 2000.
- 5) 山岸睦功, 川島一彦: 免震ゴムビルトイン型 RC 橋脚の開発, 土木学会論文集, No. 752/I-66, pp. 43-62, 2004.
- 6) 深堀美英: 免震積層ゴムの長期劣化特性予測, 日本ゴム協会誌, Vol. 69, No. 4, pp. 233-246, 1996.
- 7) 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, pp.268-269, 2002.
- 8) 伊藤義人, 矢澤晃夫, 佐藤和也, 顧浩声, 忽那幸浩, 山本吉久: 橋梁支承用ゴムの環境劣化特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 土木学会論文集, No. 794/I-72, pp. 253-266, 2005.
- 9) 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・制振コロキウム, pp. 439-446, 1996.
- 10) 須田勤, 岡田孝一, 山家弘行, 西敏夫, 新井達夫: 免震支承の経年変化評価を目的とした支承交換工事, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol. 58, pp. 761-762, 2003.
- 11) 須藤千秋, 島田源一, 奥津宣幸, 西敏夫, 矢崎文彦: 10 年間使用後の免震支承の性能変化評価と内部物性分布, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol. 58, pp. 763-764, 2003.
- 12) 松田泰治, 西敏夫, 須藤千秋, 矢崎文彦, 末安知昌: 10 年間使用後の免震支承性能変化実測による経年変化予測技術の妥当性評価と ISO 規格化, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol. 58, pp. 765-766, 2003.
- 13) 富板崇: 発展型アレニウスモデルと環境劣化因子データベースを結合した特性変化シミュレーション手法, マテリアルライフ学会誌, Vol. 14, No. 3, pp. 134-140, 2001.
- 14) 日本道路公団: ゴム支承の特性に関する試験方法, 日本道路公団規格, pp. 6-9, 2004.
- 15) 社団法人日本道路協会: 道路橋支承便覧, 日本道路協会, pp. 151-240, 2004.
- 16) 村松佳孝, 西川一郎: 免震アイソレータの耐久性評価に関する検討, 昭和電線レビュー, Vol. 45, No. 1, pp. 44-49, 1995.
- 17) 財団法人日本規格学会: JIS ハンドブック 19 ゴム, 日本規格学会, 1999.
- 18) 斎藤孝臣: 各種ゴムの劣化機構, 日本ゴム協会誌, Vol. 68, No. 5, pp. 284-296, 1995.
- 19) 山下晋三: ゴムの劣化とその防止, 日本ゴム協会誌, 第 42 巻, 第 9 号, pp. 661-690, 1969.
- 20) Wise, J., Gillen, K.T. and Clough, R.L.: Quantitative Model for the Time Development of Diffusion-limited Oxidation Profiles, *Polymer*, Vol.38, No.8, pp.1929-1944, 1997.

(2005. 4. 11 受付)

## STUDY ON THE LONG-TERM DETERIORATION OF NATURAL RUBBER OF BRIDGE BEARINGS

Yoshito ITOH, Kazuya SATOH, Haosheng GU and Yoshihisa YAMAMOTO

Rubber bearings show large changes in their performances when they are used for a long time. However, the quantitative evaluation and the design method considering their performance changes are not established because of few data of the deterioration. In this research, the deterioration characteristics of natural rubber materials of bridge bearings due to the heat oxidation which is the most important factor were investigated experimentally. From the test results, performance changes of natural rubber materials at any site could be estimated.