

ゴム支承用ゴムの耐オゾン性評価方法

江口康平・大住道生・菅原達也

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震以降、道路橋支承にゴム支承の適用が増加した。一般的な積層ゴム支承は、ゴムと鋼板からなる積層ゴム本体の周りに、劣化因子の侵入を抑制する目的の被覆ゴムが設けられている。この被覆ゴムは荷重を支持する部材として見込まれていないことから、損傷したとしても耐荷性能には直接影響しない。但し、被覆ゴムの亀裂が貫通し、支承本体に劣化因子が侵入すると、内部鋼板の腐食や、ゴムと内部鋼板の剥離により耐荷性能が低下する危険性がある。

近年、少数ではあるが被覆ゴムの「表面ひび割れ」、「変色・劣化」、「変形・欠損」の発生が報告されている。直轄管理橋梁における定期点検結果を図-1に示す。本研究では、ゴム支承用ゴムのひび割れの原因の一つであるオゾン劣化の影響を評価する方法を検討し、実環境における耐用期間推定方法を提案した。

2. ゴムの亀裂の原因及び課題

被覆ゴムにひび割れ等の変状が発生する原因としては、地震の作用によるものや設置時に何らかが接触して傷つける場合、環境作用によってゴムに亀裂が生じる場合がある。図-2には、オゾン劣化によるものと考えられるゴム支承の亀裂状況を示す。一般的なゴムに生じる環境劣化の原因としては、紫外線劣化や熱による酸化促進およびオゾン劣化等¹⁾があるが、支承に使われているゴムは、カーボンブラックを配合しているため紫外線の影響はほとんど受けず、また熱による酸化促進に関しても、橋梁支承部は極端な温度に曝されることが稀であり影響は小さいと考えられている。一方、空气中に存在するオゾンがゴムを構成する分子に作用してゴムの弾性を低下させるオゾン劣化は一定の条件下で発生することが知られており、道路橋支承便覧（平成30年）¹⁾（以下「支承便覧」と

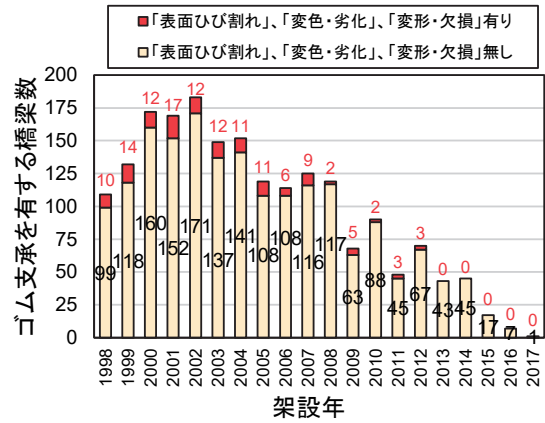


図-1 被覆ゴムに変状が生じた橋梁数 (H30年までの直轄橋梁の定期点検結果：国土技術政策総合研究所作成資料を編集)



図-2 オゾン劣化による支承の亀裂

いう。)では、支承用ゴムの耐オゾン性に関する試験方法及び規格値規定が設定されている。しかし、実環境におけるゴムの耐久期間の推定方法は確立されていない。

3. 実験概要

支承便覧では、ゴムの耐オゾン性を評価する方法として「JIS K 6259：加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—耐オゾン性の求め方」（以下「JIS法」という。）に基づくこととされている。支承便覧では同JISに定められる条件の内、試験温度40℃、オゾン濃度50pphm、50%伸長の条件で促進オゾン劣化試験を実施し、96時間後に表面に亀裂が無いことを確認することとしている。

著者等はJIS法に示される治具にロードセルを取付けて試験期間中の荷重低下を計測する方法を開発した。これは、試験片の亀裂開口を荷重低下として捉えることを意図したものである。試験に

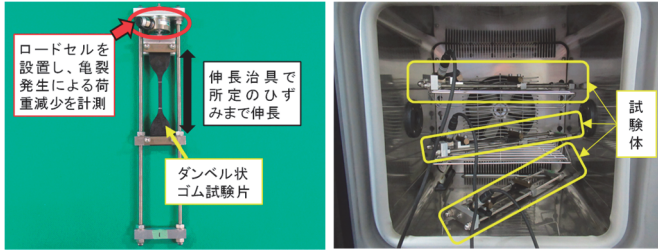


図-3 試験治具

図-4 試験状況

表-1 オゾン劣化試験条件

| ケース | 引張ひずみ (%) | 状態調節温度 (°C) | 試験温度 (°C) | オゾン濃度 (pphm) |
|-------------------|-----------|-------------|-----------|--------------|
| 40°C-50%-100pphm | 50 | 23 | 40 | 100 |
| 23°C-50%-100pphm | 50 | 23 | 23 | 100 |
| 0°C-50%-100pphm | 50 | 23 | 0 | 100 |
| -30°C-50%-100pphm | 50 | 23 | -30 | 100 |
| 40°C-80%-100pphm | 80 | 23 | 40 | 100 |
| 40°C-40%-100pphm | 40 | 23 | 40 | 100 |
| 40°C-20%-100pphm | 20 | 23 | 40 | 100 |
| 40°C-5%-100pphm | 5 | 23 | 40 | 100 |
| 40°C-50%-50pphm | 50 | 23 | 40 | 50 |
| 40°C-50%-10pphm | 50 | 23 | 40 | 10 |

用いたゴム試験片は、厚さ2mmのダンベル状で、ロードセルを取付けた伸長治具を図-3に、促進試験の状況を図-4に示す。

試験条件は、試験温度、引張ひずみおよびオゾン濃度をパラメーターとして設定するものとし、表-1に示す。ここで各ケースの名称は「試験温度-ひずみ-オゾン濃度」を意味している（例えば、「40°C-20%-100pphm」は試験温度40°C、引張ひずみ20%、オゾン濃度100pphmを意味する）。添加剤には一般に使用されているアミン酸系老化防止剤(2phr)およびワックス(1phr)を使用した。老化防止剤はゴムの酸化反応を抑制し、ワックスはゴム内部から滲出して表層に耐候性保護膜を形成するものである。配合は、基準とする試験条件(40°C-50%-100pphm)で確実に亀裂が発生するようにしているため、H30支承便覧に規定される規格値を満足するゴムではない。試験時間は最大192時間までとし、試験時間経過または破断した

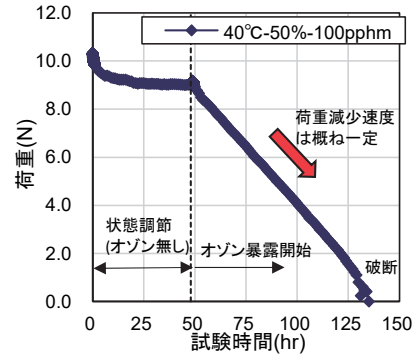


図-5 計測された試験中の荷重変化の例

後に、倍率10倍の光学顕微鏡で表面の性状を観察した。

4. 実験結果

4.1 オゾン劣化による荷重変化

図-5に試験期間中の荷重変化の一例を示す。ロードセルを取付けることで、試験期間中の荷重減少を把握できた。図中の状態調節とはゴムに変位を与えることで生じる初期の応力緩和の影響を軽減するための時間である。本検討では、いずれの条件でも応力緩和がほぼ収束する時間を状態調節時間に設定して、オゾン暴露を開始した。オゾン暴露中の荷重減少は、概ね一定の速度であったが、試験温度が低い条件では、傾きが変化するものもあった。詳細については後述する。本検討では、引張ひずみをパラメーターに設定しており、初期の荷重が異なるため、以降ではオゾン暴露開始時の荷重に対する減少率で表すこととした。

図-6には促進オゾン劣化試験中の荷重低下率を影響要因毎にそれぞれ示す。傾きが大きいものほど、オゾンクラックが急速に発生・伸展していることを意味している。

まず、試験温度の影響については、ゴムのオゾン劣化は化学反応であるため、温度が高いほど反応速度は大きくなると予想していた。しかし、実

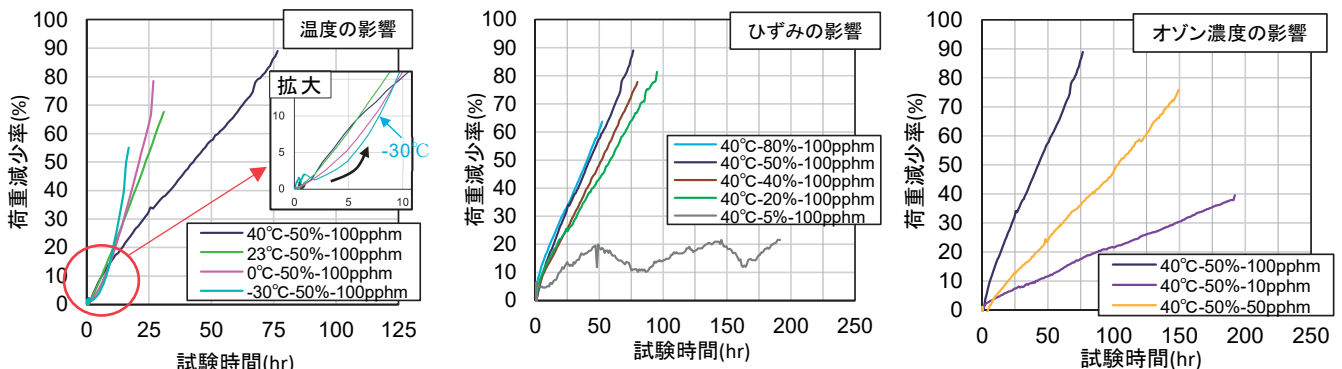


図-6 試験時の荷重減少率

際には試験時の温度が低い方が荷重の減少速度が大きい。一方で、今回の実験に使用したゴムと同じ配合で、ワックスおよび老化防止剤を添加しなかったゴムについても同様の温度条件で試験を行ったところ、いずれの温度条件もワックス等を添加した場合と比べて破断時間に明確な違いはなく、ワックス等の効果を確認できなかった。今回の検討で温度が高い方が、耐オゾン性が高かった原因については不明だが、実験結果に基づいて推定方法を検討した。なお、岩瀬等はワックスが配合されたゴムでは、温度によりワックスの析出挙動が変化することで、耐オゾン性と温度の関係が変化することを指摘しており²⁾、使用条件に適合した検討が必要と考えられる。

また、今回の検討の範囲では、支承便覧に寒冷地での試験方法として規定される-30℃の環境が最も破断までの時間が短かった。この現象について、試験後のゴム試験片の性状を図-7に示す。40℃および23℃で試験したものは、ゴムのオゾン劣化で通常確認される微細なひび割れが多数発生しており、オゾン暴露開始から広範囲で徐々に亀裂が増加および伸展して荷重が減少したと推察される。一方で、0℃および-30℃で試験したものは、亀裂数は少なく、大きな亀裂が少数発生していた。この原因について、岩瀬らはゴムに配合されるワックスの影響を指摘している³⁾。報告によると、温度変化によるワックスとゴムの収縮率の違いから、低温環境で固化したワックスがゴムの収縮に追従できず、ワックスに亀裂が生じたことでオゾンが局所的に作用し亀裂が急速に伸展すると考察している。図-6の10時間までを見ると、0℃および-30℃のものは試験中で荷重減少速度が増加しており、ワックスの固化および亀裂が生じ、オゾンが局所的に作用したことで、ゴムに急激な亀裂伸展が発生したと推察できる。以上より、低温環境ではゴムのオゾン劣化進行メカニズムが異なるため、試験結果の取り扱いには注意が必要となる。

次に、引張ひずみの影響に関して、ひずみ5%を除いた荷重減少率の傾きは20% < 40% < 50% ≒ 80%となっており、概ねひずみが大きい方が耐オゾン性は低下する結果となった。一方、ひずみ5%の試験片に関しては、荷重減少率に一定の傾きが見られなかった。試験後の試験片表面を見る

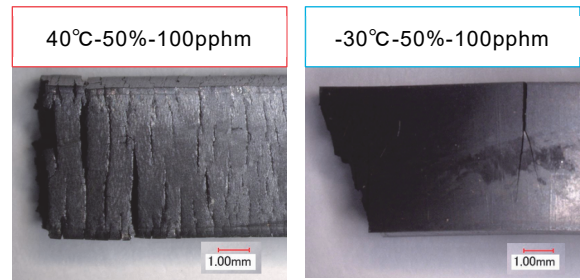


図-7 破断後のゴム表面の性状

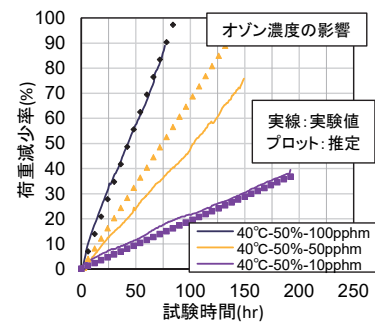


図-8 試験結果と推定結果の比較

と亀裂も発生しておらず、また、ひずみ5%に対する荷重減少率20%程度であることから、オゾン劣化の影響ではなく応力緩和および計測精度の影響と考えられ、ひずみ5%程度の環境ではオゾン劣化を考慮しなくて良いと考えられる。

次に、オゾン濃度の影響については、オゾン濃度が高いほど荷重の減少速度が大きい。これは、単純に空間内にオゾンが多数存在する方が、反応速度が大きくなったためと考えられる。

4.2 実環境における亀裂の進行速度の推定

本検討では、試験温度、引張ひずみおよびオゾン濃度を変化させた環境で試験を行い、得られた荷重の減少速度から定量的に亀裂がゴムを貫通するまでの期間について推定する方法を検討した。検討にあたっては、アレニウス則を拡張し、温度以外に任意のパラメーターを設定できるアイリングの式を適用した。推定式を式-1に示す。なお、前述したように温度変化によるワックスの影響が考えられるが、温度に関する係数にその影響は含まれていると考えている。

$$Ln(L) = C + a \left(\frac{1}{T} \right) - b \times Ln(\epsilon) - c \times Ln(S) \quad \dots(1)$$

L : 荷重減少率の傾き

T : 環境温度(K)

ϵ : 引張ひずみ(%)

S : オゾン濃度(pphm)

C : 定数

a, b, c : 重回帰分析により決定された係数

表-2 試算条件および試算結果

| | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 0.1mm亀裂 発生時間 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| 温度(°C) | 6.6 | 8.1 | 11.1 | 13.9 | 20.1 | 21.9 | |
| ひずみ(%) | 25.0 | 44.0 | 25.0 | 11.0 | 11.0 | 25.0 | |
| オゾン濃度(pphm) | 2.3 | 2.4 | 3.3 | 3.8 | 4.1 | 2.9 | |
| | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 10mmゴム 破断時間 |
| 温度(°C) | 24.1 | 28.5 | 23.3 | 19.7 | 14.8 | 9.3 | |
| ひずみ(%) | 45.0 | 66.0 | 45.0 | 25.0 | 11.0 | 11.0 | |
| オゾン濃度(pphm) | 1.8 | 1.9 | 2.2 | 2.4 | 1.8 | 1.7 | |

任意の条件を入力し算出された荷重減少率の傾きに時間を乗じることで、荷重減少率が100%になる時間を求めることができる。図-8には、図-6に示したオゾン濃度の影響に関する実験値（実線）と推定式から算出した推定値（プロット）の関係を示す。推定式により算出された荷重減少率は、実際の試験結果と概ね程度一致していた。

本稿では、この推定式を用いて、H30支承便覧に規定される温度40°C、引張ひずみ50%、オゾン濃度100pphmの環境で試験を行い、96時間経過直後に幅0.02mmの亀裂が発生するゴムを仮定して、実環境条件で厚さ10mmの被覆ゴムが破断する期間についても試算した。算出条件は、気象庁および環境省が公表している東京都の温度およびオゾン濃度の値を参考とし、引張ひずみについては丸山らの報告⁴⁾を参考にして、11~66%の範囲で設定した。試算条件および試算結果を表-2に取り纏めて示す。試算によると、実環境で供用開始から4150時間（5.7ヶ月）程度で幅0.1mmの亀裂が発生し、47年程度で亀裂が10mm厚の被覆ゴムを貫通する結果となった。解析条件は支承便覧の規格値を丁度満足する条件（促進試験96時間経過直後に亀裂発生）としているため、実際のゴム支承に使用される被覆ゴムはそれ以上の耐オゾン性を有していると考えられる。但し、過去には被覆ゴムにH30支承便覧と同等の試験を通過した天然ゴムを使用したとされる支承で、試算結果よ

りも短期間で亀裂が確認された事例もある。実環境におけるオゾンクラックは急速に伸展するものではないが、予防保全の観点から定期点検等で亀裂の発生を注意深く確認するのが良い。

5. まとめ

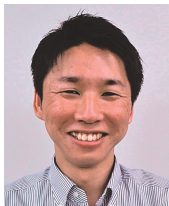
本検討では、オゾンクラックの伸展を荷重変化として捉える方法を検討し、また、「温度」、「引張ひずみ」、「オゾン濃度」をパラメーターとした複数の条件で試験を行うことで、オゾンクラックの伸展速度を定量的に推定する方法を開発した。

但し、本検討で低温環境では局所的にオゾンクラックが伸展することが確認されたことも踏まえ、実環境で長期供用されたゴム支承の情報を収集して本手法の適用性を検証する必要がある。また、亀裂が発生した場合、どの程度伸展したら補修すべきかについては明らかになっておらず、予防保全の観点から、今後適切な補修時期決定方法についても検討を進める予定である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会、道路橋支承便覧平成30年改訂版、pp.69~71、232、2019。
- 2) 岩瀬由佳：ゴムのオゾン劣化現象の実態～環境因子と配合因子～：ゴム協会誌、Vol.92、No.10、pp.383~389、2019。
- 3) 岩瀬由佳、進藤徹、近藤寛朗、大武義人、河原成元：老化防止剤ワックスが低温化における加硫ゴムのオゾン劣化に与える影響、日本ゴム協会誌、Vol.89、No.10、pp.317~322、2016。
- 4) 丸山健司、稲荷優太郎、神田智之、中村昌弘：橋梁用ゴム支承の被覆ゴムの耐オゾン性に関する研究その1：FEMによる橋梁用ゴム支承の表面ひずみの検討、土木学会第73回年次学術講演会、pp.301~302、2018。

江口康平



土木研究所構造物メンテナンス
研究センター橋梁構造研究グループ 研究員、博士(工学)
Dr. EGUCHI Kohei

大住道生



土木研究所構造物メンテナンス
研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員、博士(工学)
Dr. OHSUMI Michio

菅原達也



土木研究所構造物メンテナンス
研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員
SUGAWARA Tatsuya