

実物超高減衰ゴム支承を用いた長期大気暴露実験システムの構築と2年間程度の暴露実験報告

目崎 裕太¹・木下 幸治²・姫野 岳彦³・小澤 亨⁴

¹学生会員 修(工) 岐阜大学大学院 工学研究科工学専攻 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

²正会員 博(工) 岐阜大学准教授 工学部社会基盤工学科 (同上)

³正会員 博(工) (株)川金コアテック 技術本部 (〒332-0015 埼玉県川口市川口 2-2-7)

⁴正会員 (株)川金コアテック 市場開発部 (〒530-0012 大阪府大阪市北区芝田 1-14-8)

1. 背景と目的

橋梁用積層ゴム支承の被覆ゴム表面に、き裂の発生が報告されている^{例え1)}。このき裂の発生位置、形状から、空气中に存在するオゾン分子が、き裂発生因子の一つとして考えられている²⁻⁴⁾。表面き裂が存在した状態で地震による荷重が作用した場合、表面き裂が起点となってゴム支承の破断が生じる可能性があるため、ゴム支承のオゾン劣化特性を把握することは重要である。

ゴム支承に使用されるゴム材料のオゾン劣化特性について、ダンベル試験片、及び小型ゴム支承試験体の劣化促進実験により検討されている²⁻⁴⁾。

廣畑⁴⁾は老化防止剤を含む天然ゴムのダンベル試験片、ゴム支承試験体に対し種々の条件でオゾン劣化促進実験を実施した。その結果、温度が高いほど、引張ひずみ量が大きいほどダンベル試験片に早期にき裂が発生し、ゴム支承試験体では引張ひずみが最大となる位置からき裂が発生するという、オゾン劣化の発生条件を明らかにした。また、単一のオゾン劣化の成長速度はオゾン濃度と線形的な関係にある⁵⁾ことが分かっているため、オゾン濃度が高いほど、ゴム支承表面のオゾン劣化の発生、進展がしやすいと考えられる。さらに、実際のゴム支承では温度変化に起因する桁の伸縮に伴うゴム支承のせん断変形により、上下鋼板とゴム層の境界位置の被覆ゴム表面に引張ひずみが継続的に導入されることが分かっている⁶⁾。以上より、実橋梁のゴム支承では、そのせん断ひずみ量がゴム支承のオゾン劣化を考えるにあたって重要と言える。

他方、ゴム支承のオゾン劣化対策としてゴム支承

表面にコーティングを施す工法⁷⁾が提案されている。伊藤⁸⁾はダンベル試験片を用いてオゾン劣化促進実験を行い、コーティング剤の基本的な性能を評価し、さらに、既往の研究⁴⁾で免震ゴム支承試験体に発生したオゾン劣化をコーティング剤を用いて補修し、オゾン劣化促進実験と繰り返し載荷実験を行うことでコーティング剤の耐オゾン性の高さを示した。

以上のように、ダンベル試験片、及びゴム支承試験体を用いた劣化促進実験から、ゴム材料のオゾン劣化に影響する環境因子とその条件、並びにその予防補修方法について検討されている。このような背景のもと、環境が時々刻々と変化する大気環境で実物のゴム支承を用いた暴露実験は、ゴム支承が設置されている実際の環境に近い条件で実施できることから、実物ゴム支承に生じるオゾン劣化を観察できるため、有用であると考えられる。

既往研究では、実物のゴム支承を橋梁⁹⁻¹²⁾、及び建築物¹³⁻¹⁶⁾から抜き取り、その基本力学特性、またはゴムの化学特性変化を調査しているが、暴露開始時から経過観察する本研究は実物ゴム支承表面の変化を捉えることができるため、重要である。

本研究では、ゴム支承の表面き裂発生を主要因と考えられるオゾン劣化に着目して、ゴム支承のせん断変形量が、き裂の発生寿命に与える影響、及びオゾン劣化防止コーティングのき裂発生抑制効果を把握することを最終目的とした。まず、実物超高減衰ゴム支承を、油圧ジャッキで、せん断変形させ、かつジャッキを取り外した後も、その変形を固定できる長期大気暴露実験システムを構築したうえで、大気暴露実験を開始した。本論文では、2年間程度の長期大気暴露実験結果を報告する。

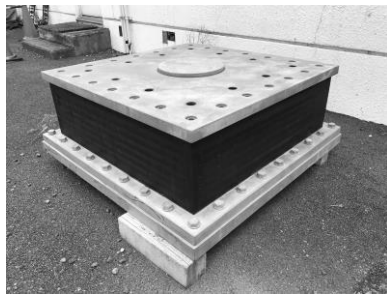


図-1 実物ゴム支承の外観 (S-70)

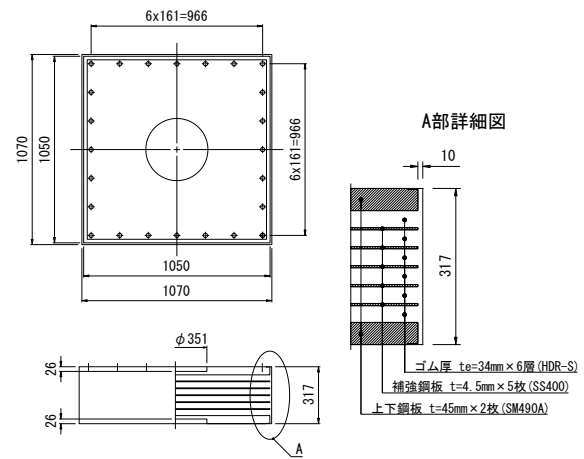
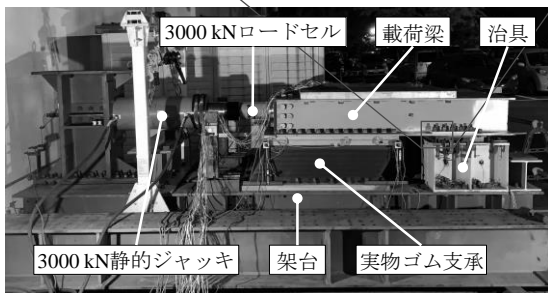
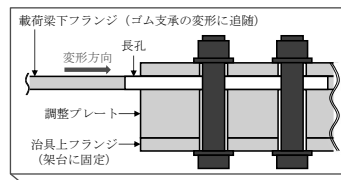


図-2 実物ゴム支承の寸法



(a) せん断変形の付与と固定



(b) 設置完了後

図-3 暴露実験システム (南側から撮影)

2. 大気暴露実験概要

(1) 実物ゴム支承概要

本実験では2基の同諸元の実物ゴム支承を使用した。2.(3)b)で後述するが、暴露実験中にせん断変形を与えないゴム支承をS-0、70%のせん断変形を与えるゴム支承をS-70とする。ゴム支承の種類は免震用積層ゴム支承として用いられている超高減衰ゴム支承 (HDR-S) である。ゴム支承は2014年9月に製造されたのち、2015年1月に実橋梁から撤去されたものである。ゴム支承は撤去後から暴露実験開始まで屋外で保管された。

図-1, 2に実物ゴム支承の外観、及び寸法を示す。ゴム支承の外観に有意な損傷は見られなかった。ゴム支承の諸元は断面が1050mm×1050mm (有効寸法)、ゴム層厚が $\Sigma t_e = 34\text{mm} \times 6\text{層} = 204\text{mm}$ 、被覆ゴム厚が10mm、内部鋼板が厚さ4.5mm×5枚、上下鋼板が厚さ45mm×2枚である。また、せん断弾性係数 G は 1.0N/mm^2 であり、1次形状係数 S_1 は7.72、2次形状係数 S_2 は5.15である。等価剛性、及び等価減衰定数の設計値は、それぞれ5.606kN/mm、17.3%である。

2基の実物ゴム支承は、それぞれ実橋梁から撤去後に、せん断ひずみ175%の正負交番載荷¹⁷⁾、または、

せん断ひずみ70%の片側交番載荷¹⁸⁾を受けている。それらの載荷結果から得られた荷重変位関係には、出荷時の性能確認試験と比較して、目立った変状は見られなかったことから、実物ゴム支承の性能は低下していないと考えられる。

(2) 暴露実験システム

図-3に使用した暴露実験システムを示す。このシステムは著者らが実物ゴム支承の載荷実験¹⁸⁾で使用したシステムである。このシステムは実物ゴム支承に、せん断変形を与えることができ、かつ、その変形を長期にわたって維持することができる。本研究では、図-3(a)のように、実物ゴム支承に取り付けた載荷梁を容量3000kNの油圧ジャッキで押すことにより、ゴム支承にせん断変形を与え、目標変位 (せん断ひずみ70%、水平変位142.8mm) に達した時点でジャッキを停止し、ゴム支承の変形を維持した。この変形を維持するために必要な水平力は約950kNであった。次に、載荷梁と治具との接触部に設けられた長孔に、載荷中のガイドの役割として、配置されたF10TM22の高力ボルトを締め付けることで、最終的に図-3(b)のように実物ゴム支承のせん断変形を固定した。高力ボルトは道路橋示方書に記載される、1本あたりの設計ボルト軸力の110%を目標にトルク

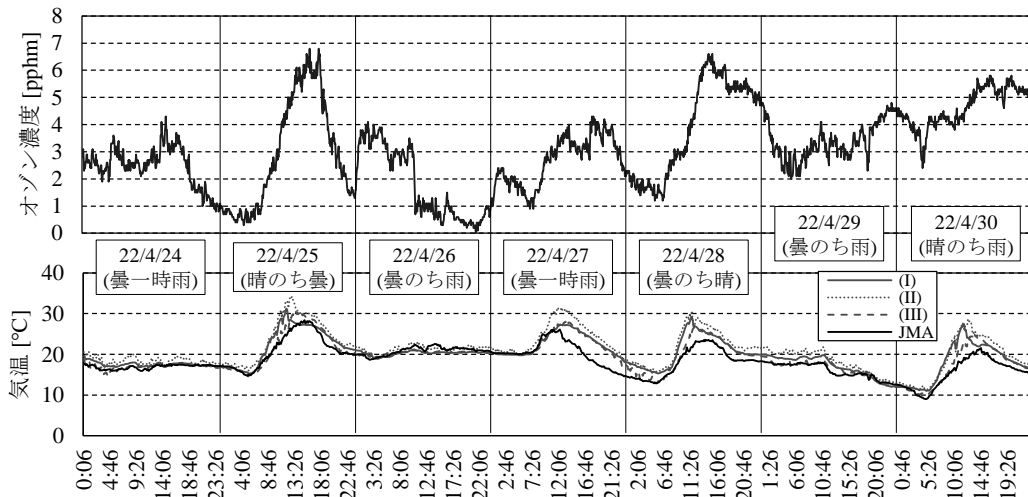


図-4 暴露位置でのオゾン濃度と外気温の計測結果

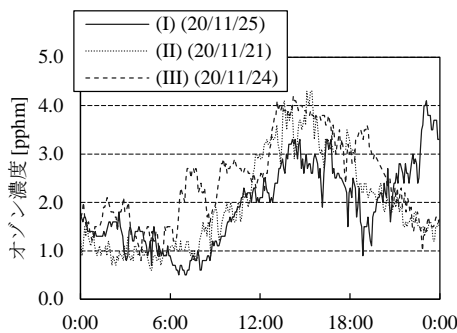


図-5 地点(I), (II), (III)でのオゾン濃度計測結果

— : K-Coat-R施工範囲

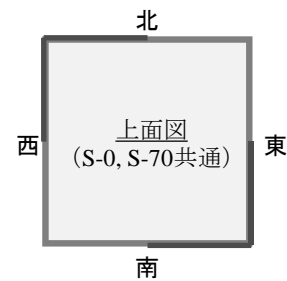


図-6 オゾン劣化防止コーティングの施工範囲

レンチを用いて、約 $650\text{N}\cdot\text{m}$ のトルクで締付けた。使用した高力ボルトの本数は36本である。これは、実物ゴム支承の固定に必要な水平力に対して高力ボルトが最終的にせん断耐力抵抗した場合に2倍程度の余裕が生まれるようにしたためである。最後に、油圧ジャッキを開放し、ジャッキと柱を撤去してできた範囲に、もう1基の実物ゴム支承を配置した。

(3) 暴露実験条件

S-70は2020年10月に、S-0は2020年12月に設置して暴露実験を開始した。

a) 暴露実験位置の周辺環境

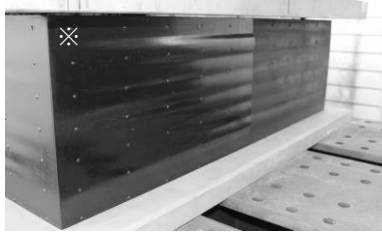
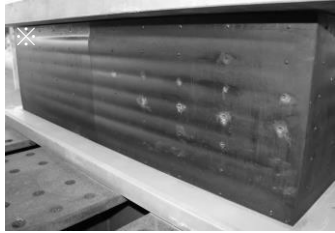
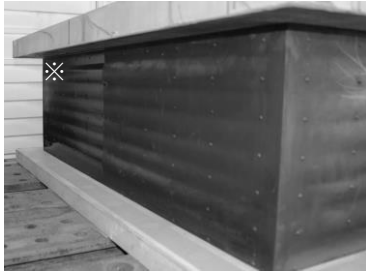
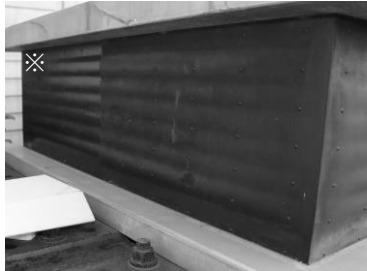
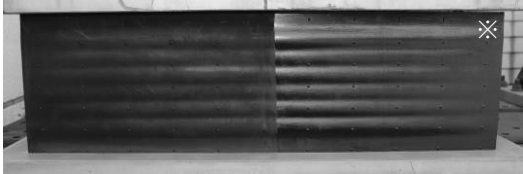
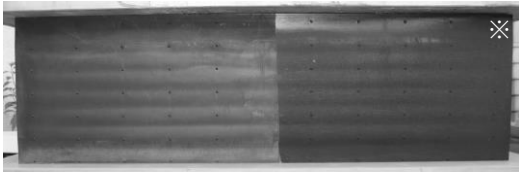
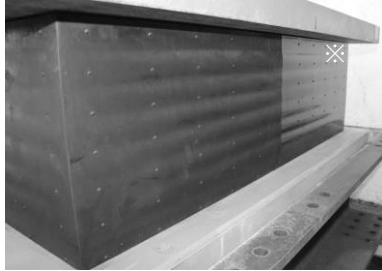
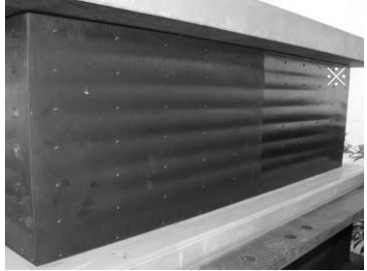
暴露実験フレームは岐阜大学実験棟の東側に設置した。そのため、フレームの周りには図-3の通り、西側に実験棟が、北側に小屋があり、東側と南側は開けている。

図-4に暴露位置の2022年4月24日から30日まで連続で計測したオゾン濃度、及び外気温の結果を示す。オゾン濃度の計測には2B-Technologies社製のOzone Monitor Model 106-Lを使用した。計測間隔は5分である。Model 106-Lは設定した計測間隔の間に計測した値の平均値を記録するため、図中の値は5分間の平均値である。オゾン濃度計測器はプラスチックのボ

ックスに入れて、外気の吸入口のみをボックス外に出し、2つの実物ゴム支承間に設置した。暴露位置のオゾン濃度は、4月の日中で $2\sim 7\text{pphm}$ 程度であり、最大で 6.8pphm であった。この計測結果は実橋梁の支承近傍のオゾン濃度計測結果¹⁹⁾と同程度である。また、供用から数年から10数年の橋梁用免震ゴム支承においてオゾンき裂の発生が確認されている²⁾ことから、本研究で対象とする2基の実物ゴム支承にも数年から10数年でオゾンき裂が発生すると考えられる。また、暴露実験フレーム周辺のオゾン濃度を調査するために、3地点(I), (II), (III)で大気中のオゾン濃度を計測した。地点(I)はS-0の西側、地点(II)はS-0とS-70の間、地点(III)はS-70の東側である。図-5に地点(I), (II), (III)でのオゾン濃度計測結果を示す。それぞれ異なる日に測定したため、天気の違いの影響を受けて各地点でのオゾン濃度履歴は完全には一致しないが、6時頃に最低となり、15時頃に最大となる傾向は一致した。このことから、3地点共に同様のオゾン濃度条件と言える。

外気温の計測にはT&D社製の「おんどとり」TR-72nwを使用した。計測間隔は10分である。気温計測器は3台使用し、それぞれを地点(I), (II), (III)に設置した。同グラフには合わせて、気象庁が岐阜市で観

表-1 S-0のゴム表面比較（コーティング施工領域に“※”を記している）

	暴露開始時	2年間程度経過後
東		
西		
南		
北		

測した10分おきの結果も示している。3地点共に同様の温度変化をしており、地点(II)については周りに遮るものがないことで、計測器が日光の影響を受けて多地点よりも最大気温が高いが、それを考慮すれば3地点共に同様の気温条件と言える。なお、オゾン濃度と外気温の計測は継続して実施している。

b) せん断変形量

ゴム支承のせん断変形量が、き裂の発生寿命に与える影響を把握するために、1基の実物ゴム支承には、せん断変形を与えずに（S-0）、もう1基のゴム支承には70%のせん断ひずみを与えた（S-70）。この70%の値はゴム支承の常時のせん断ひずみの許容値²⁰⁾である。なお、暴露実験フレームの都合上、2基の実物ゴム支承に鉛直荷重は与えていない。

c) オゾン劣化防止コーティング

オゾン劣化防止コーティングのき裂発生抑制効果を把握するために、2基の実物ゴム支承の表面にコーティングを施した。本暴露実験では、(株)川金コアテック社製の特殊弾性コーティング材（K-Coat-R）を用いたK-PRO工法⁶⁾を使用した。K-Coat-Rをゴム


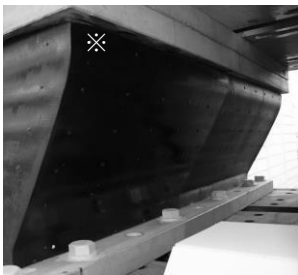
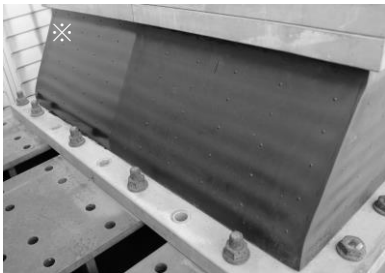

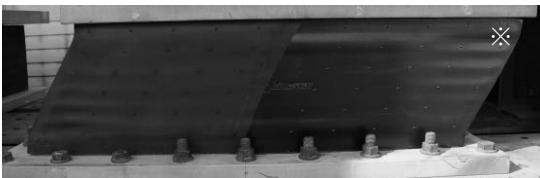
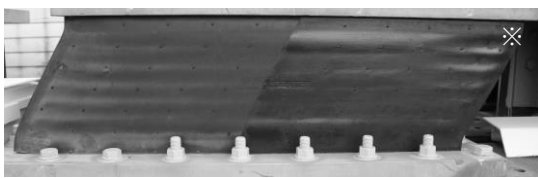


支承表面に塗布することで、保護皮膜が形成され、ゴムの耐オゾン性を確保することができる工法である。なお、本研究では、K-Cort-Rの光沢を抑えるためのツヤ消しコーティング²¹⁾をK-Cort-R表面に施している。図-6にコーティングの施工範囲を示す。コーティングは2基のゴム支承の各表面で、その有無を比較することができるように施工した。S-0へのコーティングの施工は著者らの実験遂行の都合上、支承製作会社屋内で2020年12月に実施した。また、S-70への施工は、暴露実験フレーム上で70%のせん断ひずみを維持した状態で2021年2月に実施した。

3. 2年間程度の暴露実験結果

表-1, 2に2年間程度経過した暴露実験中の実物ゴム支承表面を示す。実物ゴム支承表面にはオゾン劣化に起因したき裂は見られなかった。

S-0では南面と東面、S-70では南面と西面に色の变化が表れた。両者南面の非コーティング面ではゴ

表-2 S-70のゴム表面比較（コーティング施工領域に“※”を記している）

	暴露開始時	2年間程度経過後
東		
西		
南		
北		

ムの黒色が褪せて部分的に白くなっている。特に、積層ゴムが側面に膨出している部分が白くなっている。対してコーティング面では暴露直後はS-0とS-70どちらも均一に黒色であったが、現在は黒色の濃淡が不規則に表れている。両者の南面に変化が現れたのは、常に直射日光が当たる方向に面するからと考えられる。また、S-0の東面と比較してS-70の西面の方が、両者南面のような色の変化が大きいのが、これはS-70の西面は実物ゴム支承がせん断変形をしており、面が上空を向いているため、受ける直射日光量がS-0の東面よりも多いからと考えられる。

しかし、いずれのコーティング施工面においても、コーティングは剥がれていないことから、K-Cort-Rの保護被膜効果は維持され、ゴムの耐オゾン性は確保されていると考えられる。

S-0の西面と北面、及びS-70の東面と北面は直射日光が当たりづらいためか、暴露開始時と2年間程度経過時を比較して変化は見られなかった。

以上より、2年間程度の大気暴露では実物ゴム支承にオゾン劣化に起因したき裂は発生しなかった。また、実物ゴム支承表面に現れた色の変化は、暴露実験地周辺のオゾン濃度、外気温条件は同様であることから、各面の直射日光量の違いが影響していると考えられる。

4. 結論

本研究では、ゴム支承の表面き裂発生の主要因と考えられるオゾン劣化に着目して、ゴム支承のせん断変形量が、き裂の発生寿命に与える影響、及び、オゾン劣化防止コーティングのき裂発生抑制効果を把握することを最終目的とし、実物超高減衰ゴム支承を用いた長期大気暴露実験システムを構築したうえで、大気暴露実験を開始した。本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) せん断ひずみ70%の変形を維持可能な実物の超高減衰ゴム支承の大気暴露実験システムを構築した。
- 2) 構築した暴露実験システムを屋外に設置し、2基の実物超高減衰ゴム支承を用いて大気暴露実験を開始した。1基にはせん断ひずみ70%を与え、残る1基のせん断ひずみは0%とした。また、2基の実物ゴム支承各面の縦半分にオゾン劣化防止コーティングを施工した。
- 3) 2年間程度の暴露実験の結果、実物ゴム支承にオゾン劣化に起因したき裂は発生しなかった。実物ゴム支承表面に色の変化が表れたが、直射日光の当たらない面と比較した結果、その変化は直射日光によるものだと考えられる。

今後も暴露実験は継続し、実物ゴム支承表面の変化を観察する。

謝辞：浜松市市役所道路企画課の山本正孝氏、K-PRO工法の日程調整、及び施工をしていただきました(株)川金コアテックの社員の皆様には多大な協力をいただきました、ここに深く謝意を示します。また、オゾン計測器は日本支承協会からお借りしました。ここに深く謝意を示します。

参考文献

- 1) ゴム支承協会：柏崎市鯖石川他に架かる6橋における平成19年（2007年）新潟中越沖地震を受けた後のゴム支承の調査報告書，ゴム支承協会技術資料，2009。
- 2) 杉本博之，溝江実，山本吉久，池永雅良：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/VI-53, pp. 73-86, 2001。
- 3) 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，No. 794/I-72, pp. 253-266, 2005。
- 4) 廣畑幹人，伊藤義人，汪深：環境劣化因子とひずみによる天然ゴム支承のき裂発生に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol. 61A, pp. 302-312, 2015。
- 5) 久留宮弘幸：オゾン劣化試験方法とその評価方法，日本ゴム協会誌，Vol. 40, No. 4, pp. 270-289, 1967。
- 6) 篠原聖二，林訓裕，足立幸郎，長弘健太，河内山修，五十嵐晃，高橋良和：鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）に緩速繰返しせん断変形が及ぼす影響の分析，第21回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 103-110, 2018。
- 7) K-PRO工法研究会ホームページ，<http://kpro-a.jp/>。
- 8) 伊藤康晃，伊藤義人，廣畑幹人：免震ゴムのオゾン劣化特性とクラック補修法に関する研究，構造工学論文集，Vol. 63A, pp. 373-384, 2017。
- 9) 宇佐美民雄，渡邊正夫，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，Vol. 54, No. 3, pp. 174-183, 1981。
- 10) 渡部征男，加藤朝郎，米田玄次，広谷勉：約40年経過した積層ゴムの経年変化調査，土木学会第1回免震・制震コロキウム講演論文集，pp. 439-446, 1996。
- 11) 須藤千秋，西敏夫，島田源一，矢崎文彦，奥津宣幸：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，土木学会第58回年次学術講演会，I-382, pp. 763-764, 2003。
- 12) 大住道夫，中尾尚史，高野真：経年劣化がゴム支承に与える影響に関する事例検討，土木学会第73回年次学術講演会，I-308, pp. 615-616, 2018。
- 13) 市川一美，加藤千博，川久保政茂，高木俊也，松平康彰，芳沢利和：免震積層ゴムの交換及び経年変化に関する実験（その2 積層ゴムの経年変化），日本建築学会大会学術講演梗概集 B2, pp. 575-576, 1997。
- 14) 舒木哲夫，寺村彰，中村嶽，岡田宏：免震建物の維持管理に関する研究（その3：実大積層ゴムの経年による剛性変化），日本建築学会大会学術講演梗概集 B2, pp. 695-696, 1998。
- 15) 持丸昌己，池永雅良，下田郁夫，宮崎充：LRB免震建物における実免震装置の経年変化に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 B2, pp. 697-698, 1998。
- 16) 東野雅座，相沢党，米田去次，芳泥利和，末安知昌：10年間使用した積層ゴムの経年変化に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 B2, pp. 567-568, 1997。
- 17) 木下幸治，目崎裕太，姫野岳彦，小澤亨：超高減衰ゴム支承の変形挙動に及ぼす載荷方向の影響に関する実物載荷実験，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol. 75, No. 4(地震工学論文集第38巻)，pp. 754-762, 2019。
- 18) 目崎裕太，木下幸治：実物超高減衰ゴム支承の曲げせん断変形に起因した取付ボルトの引張挙動，構造工学論文集，Vol. 68A, pp. 235-249, 2022。
- 19) 朝倉康信，鶴野禎史，原田孝志，斎藤次郎，小南雄一郎，若松徹：支承近傍のオゾン濃度計測，土木学会第68回年次学術講演論文集，I-306, pp. 611-612, 2013。
- 20) 日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善，2018。
- 21) 杉村直人，鶴野禎史，菱山知幸：ツヤ消しコーティングによるK-Coat-Rの光沢抑制方法，土木学会第73回年次学術講演論文集，VI-323, pp. 645-646, 2018。