

軸応力をパラメータとした積層ゴム支承のせん断特性確認実験

崔準祐¹・原暢彦²・今井隆²・植田健介²・成炫禹³

¹正会員 九州大学大学院 助教 工学研究院 社会基盤部門
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

²正会員 ゴム支承協会 技術委員会
(〒107-0051 東京都港区元赤坂 1-5-26 東部ビル 1F)

³学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、高速道路や幹線道路において鋼製支承に大きな損傷や破壊が生じ、橋梁としての機能を損なった被害が多かったことから¹⁾、近年は粘性の高いゴム材料を使用したゴム支承を導入し、上部構造の地震時水平力の分散やエネルギー吸収により橋梁に作用する地震力の低減を図った橋梁構造物が増えてきている。このことから、ゴム支承の水平方向に対する力学的特性や耐震性能については、これまで多くの実験により確認されてきており、その設計手法についても確立されている。

一方、ゴム支承の鉛直方向に対する力学的特性に関しては、これまで基本的な性能確認試験は過去に行われているものの、ゴム支承が圧縮力に対して十分な耐力を有していることや‘ゴム支承本体に引張力が生じる場合は原則としてゴム支承を採用してはならない’という規定²⁾があることから、実設計において厳密に考慮されていないのが現状である。しかし、地震時上部構造の鉛直方向の挙動が複雑といわれている曲線橋や支承高が高い高架橋、また鉛直方向の地震動が大きくなりやすい地盤上の橋梁においては、支承部に負反力が生じる可能性が高く、ゴム支承を採用する場合はこうしたゴム支承の鉛直方向の力学的特性を適切に考慮して設計する必要がある。特にゴム支承の引張特性に関しては、圧縮剛性に比べ引張剛性が非常に小さいことが過去の試験により明らかになっており³⁾、こうしたゴム支承の引張特性を取り入れて地震応答解析を行うと、現行の設計手法により求められた地震時応答と大きく異なる結果が得られることが知られている⁴⁾。また、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、曲線

高架橋において複数のゴム支承が破断する被害が発生⁵⁾、2016年に発生した熊本地震では複数の曲線橋においてゴム支承が破断する被害が発生している⁶⁾。このような被害については現在様々な観点から原因分析が進められていると思われるが、著者らは地震時上部構造の複雑な挙動によりゴム支承に引張力と水平地震力が同時に作用したことが一つの原因ではないかと考えている。

そこで、本研究では、ゴム支承の引張せん断特性を把握することを目的とし、積層ゴム支承（RB）に対し軸応力をパラメータとし、一次形状係数の異なる2種類のゴム支承を用いてせん断実験を実施した。実験により得られた水平荷重-変位履歴から、等価剛性、等価減衰定数などを軸応力ごとに整理し、ゴム支承に作用する軸応力がゴム支承のせん断特性に及ぼす影響について調査した。

2. 実験概要

(1) 実験供試体諸元

本実験に用いた供試体の構造図を図-1に、諸元を表-1に示す。本実験に用いた供試体は積層ゴム支承（RB）7体であり、供試体寸法はJISの標準試験体⁷⁾に合わせ、平面寸法を400mm×400mmとした。また、総ゴム厚は54mmとしたが、本実験では一次形状係数の違いがゴム支承の引張せん断特性に及ぼす影響を確認するため、2種類の異なる形状係数を有する供試体を作製した。ここでは、1層のゴム厚を18mmとして3層としたもの（以下、供試体A）、1層のゴム厚を9mmとして6層としたもの（以下、供試体B）を用いた。一次形状係数 S_1 と二次形状係数 S_2 は、道

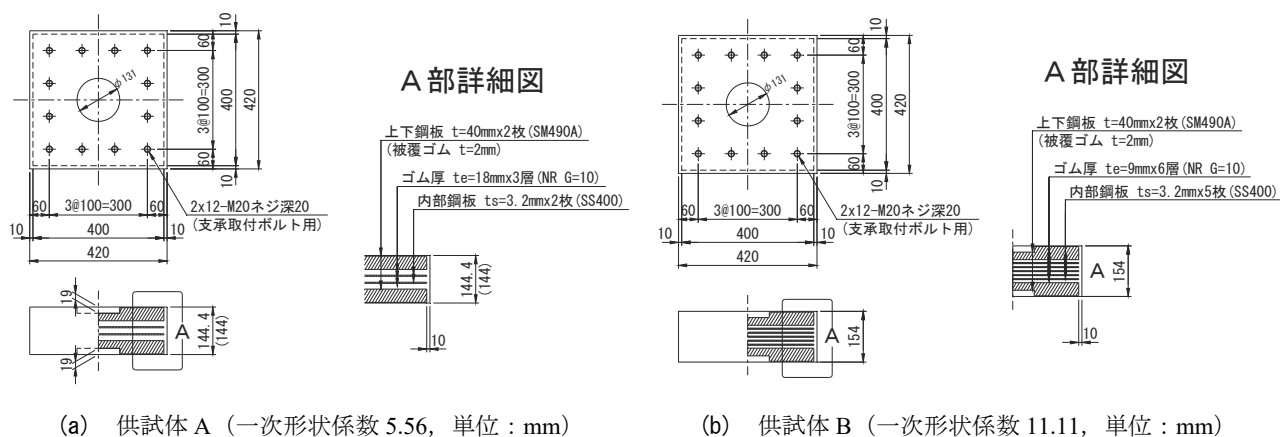


図-1 実験供試体の構造図 (単位 : mm)

表-1 実験供試体の諸元

	単位	供試体A	供試体B
平面形状	(mm)	400 × 400	400 × 400
単層厚	(mm)	18	9
総ゴム厚	(mm)	54	54
1次形状係数	-	5.56	11.11
2次形状係数	-	7.41	7.41
ゴム材の呼び	-	G10	G10

表-2 実験ケース

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7
軸応力 (Mpa)	6	0	-1	-2	6	-2	-2
供試体	A	A	A	A	A'	A'	B
载荷方法	軸力载荷後, せん断ひずみ±175%10回 → せん断ひずみ±250%10回 → せん断ひずみ±300%1回						

※軸応力の符号: 圧縮+, 引張-

※Case5, Case6の供試体A'は供試体Aと同諸元であるが, 製造メーカーが異なる

$$S_1 = \frac{A_e}{2(a+b)t_e}$$

(1a)

$$S_2 = \frac{\min(a,b)}{\sum t_e}$$

(1b)

ここに, A_e : ゴムの断面積

a, b : ゴム支承の平面寸法

t_e : ゴム1層の厚さ

路橋支承便覧⁸⁾に基づき, 式(1a), (1b)を用いて求めた。 S_1 については道路橋支承便覧⁸⁾における最小値4から最大値12の範囲で設定しており, 供試体Aの場合ゴム単層が18mmと厚く, 一次形状係数が5.56である。本実験では, ゴム支承の形状条件をできるだけ厳しいと考えられるゴム厚を用いることとし, 供試体Aを基本供試体とした。一方, 供試体Bはゴム単層が9mmと薄く, 一次形状係数が11.11である。

(2) 実験ケース

本実験の実験ケースを表-2に示す。Case1は供試体Aを用い, 軸応力をJISのせん断特性試験方法⁷⁾に基づき6MPaとし, 水平载荷をせん断ひずみ±175%を10回繰り返した後, せん断ひずみ±250%を10回繰り返して载荷, 最後にせん断ひずみ±300%を1回载荷したケースである。Case2はCase1から軸応力を0にしたケース, Case3はCase1から軸応力を-1MPaにして引張力を与えたケース, Case4はCase1から軸応

力を-2MPaにして引張力を与えたケースである。

Case5, Case6, Case7は, 形状係数の影響を確認するためのケースであるが, 供試体Bは供試体Aと製造メーカーが異なる関係で, 供試体Aと同諸元の供試体 (供試体A') を作製しCase1およびCase4と同実験を実施した (Case5, Case6)。

(3) 载荷装置および载荷条件

本実験では, 鉛直荷重 (圧縮最大20MN, 引張最大2MN, 鉛直ストローク最大500mm) と水平荷重 (最大±6MN, 水平ストローク最大±600mm) を同時に载荷することが可能な2軸試験機を用い, 軸力の载荷速度を1mm/sec, 水平力の载荷速度を10mm/secと設定して実験を行った。実験供試体のセットアップの状況を写真-1に示す。



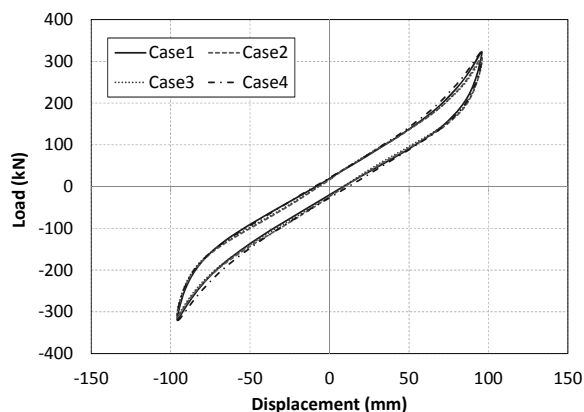
写真-1 実験供試体のセットアップ状況

3. 実験結果

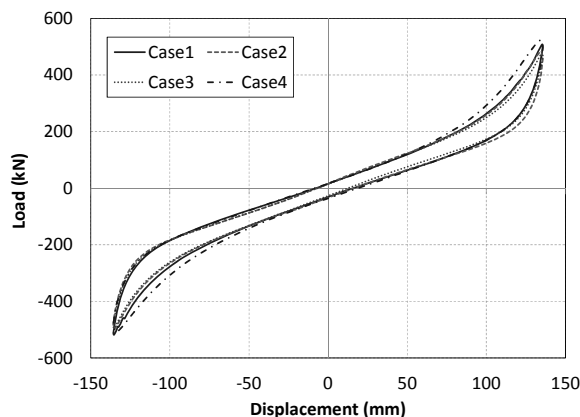
(1) 水平荷重-変位履歴

せん断ひずみ175%、250%、300%載荷時のCase1～Case4の水平荷重-変位履歴を図-2に示す。せん断ひずみ175%と250%の載荷では、それぞれ10回ずつ繰り返し載荷を行っているが、ここでは荷重-変位履歴をケース別に比較しやすくするため、バージン効果が見られる1回目の履歴を除いて2回目から10回目の履歴を平均化したもので示している。

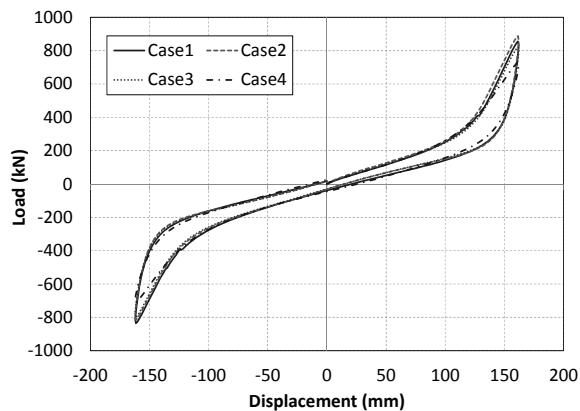
まず、せん断ひずみ175%載荷時の結果をみると、軸応力が変化しても水平荷重-変位の変化はほとんどみられていない。一方、せん断ひずみ250%載荷では、Case1、Case2、Case3の履歴においてはほとんど変化がみられていないが、Case4の履歴においては他のケースに比べせん断変位約60mm（せん断ひずみ111%）から履歴がやや膨らんでいく現象がみられた。ゴム支承が2MPaの引張応力を受けながらせん断変形することで、ゴム自体の変形が大きく変わったことが原因である。すなわち、ゴム支承に作用する軸応力の変化により、ゴム支承の変形が変わったことによるものと考えられるが、各ケースのせん断ひずみ250%載荷時の変形様子を比較してみると、Case4ではゴム支承が鉛直方向に大きく伸びた状態でせん断変形し、8回目以降の載荷からは内部鋼板が上下方向に変形していることが確認された（写真-2）。このようにゴム支承が引張力を受けた状態でせん断ひずみ250%程度せん断変形していくと、ゴムが鋼板から剥がれ、やわらかくなった状態でせん断変形を行ったことが考えられるが、せん断ひずみ250%10回の載荷が終わるまでゴムに亀裂が入るなどの損傷はみられなかった。また、せん断ひずみ300%載荷時の履歴を比較してみると、Case1、Case2、Case3ではせん断ひずみ250%載荷時と同様に履歴の変化がほとんどみられていないが、Case4ではせん断変位約140mm（せん断ひずみ約260%）付近から荷重が低下する傾向を示しており、せん断ひずみ250%を超えると引張の影響がみられた。せん



(a) 175%載荷時の荷重-変位履歴



(b) 250%載荷時の荷重-変位履歴



(c) 300%載荷時の荷重-変位履歴

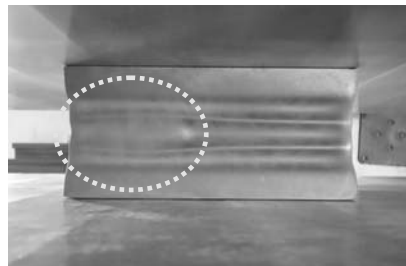
図-2 実験供試体の水平荷重-変位履歴



(a) 250%載荷時の様子 (Case1)

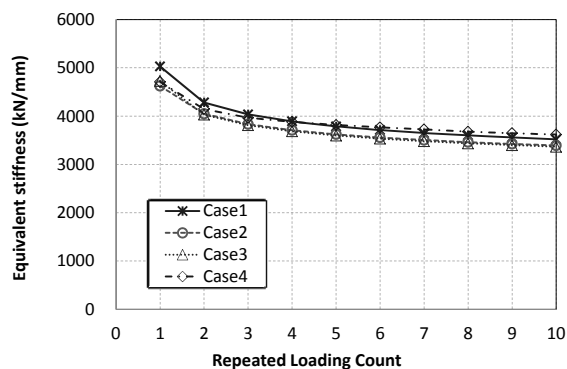


(b) 250%載荷時の様子 (Case4)

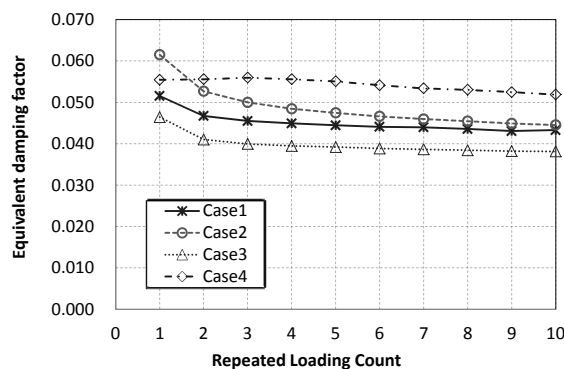


(c) 250%載荷後の様子 (Case4)

写真-2 Case1 と Case4 の引張せん断実験時の供試体の様子



(a) 等価剛性の変化



(b) 等価減衰定数の変化

図-3 実験供試体の等価剛性および等価減衰定数の変化（せん断ひずみ 250%10 回載荷時の記録から）

断ひずみ250%まではゴム支承が弾性範囲にとどまっているため、ゴム分子間の亀裂が少ないために耐荷力の増加範囲であったが、せん断300%時点ではゴム分子間の結合が切れ出して弾性を失いつつある現象となっているため、耐荷力が低下したと思われる。

(2) 等価剛性および等価減衰定数の変化

図-3は、各ケースにおいてせん断ひずみ250%を10回繰り返し載荷した結果から、等価剛性および等価減衰定数を載荷回数ごとにプロットしたものである。等価減衰定数は、等価減衰定数は、道路橋支承便覧⁸⁾に基づき、式(2)を用いて算出した。

$$h_B = \frac{\Delta W}{2\pi W} \quad (2)$$

ここに、 W ：ゴム支承の弾性エネルギー

ΔW ：ゴム支承が吸収するエネルギーの合計

まず、等価剛性については、図-3(a)より、すべてのケースにおいて、初期載荷時のバージン効果により1, 2回目の載荷時に等価剛性が高くなり、その後徐々に等価剛性が低下してくる傾向を示していることがわかる。等価剛性の変化をケースごとに比較してみると、ゴム支承に圧縮応力を6MPa載荷したCase1の等価剛性が他のケースに比べやや高く評価されていること、引張応力-2MPa載荷したCase4の等価剛性が繰り返し載荷回数が増えるにつれてそれほど大きく低下していないことは確認されたが、等価剛性の変化は全ケースでほとんど同じ傾向を示しており、ゴム支承に作用する軸応力による影響は小さいと考えられる。

また、等価減衰定数についても、等価剛性と同様にすべてのケースにおいて、初期載荷時のバージン

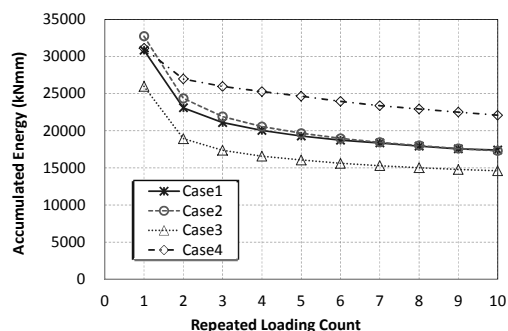


図-4 実験供試体の履歴吸収エネルギー

効果により1, 2回目の載荷では履歴が膨らむ形となり等価減衰定数が高くなるが、その後徐々に低下し3, 4回目の載荷からはほとんど変化がみられていない。また、ケースごとに等価減衰定数を比較してみると、Case1, Case2では0.045～0.05程度の等価減衰定数が得られているが、Case3では等価減衰定数がやや減少、Case4では増加していく傾向を示した。これは、実験供試体のばらつきも一因と考えられるが、ゴム支承の荷重-変位履歴の変化に伴い、履歴吸収エネルギーが変化したことも原因であり、図-4に履歴吸収エネルギーを示すとおり、Case3とCase4の値が大きく異なっていることがわかる。Case4において履歴吸収エネルギーが大きくなった理由は、上述のとおりCase4ではゴムが大きく変形していたため、その変形に伴い内部摩擦が増加し、履歴形状が膨らんでいったためと考えられる。

(3) 一次形状係数の違いによる影響

Case5, Case6, Case7のせん断ひずみ175%, せん断ひずみ250%, せん断ひずみ300%載荷時の荷重-変位履歴を図-5に示す。履歴形状の変化について着目してみると、せん断ひずみ175%載荷ではすべてのケースでほとんど変化はみられず、せん断ひずみ250%載荷では引張応力-2MPaを与えたCase6とCase7

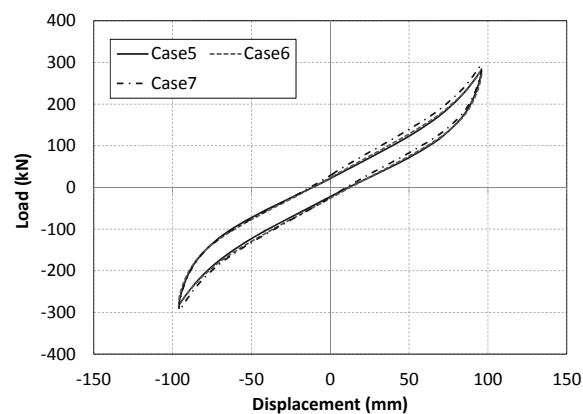
において履歴形状が少し大きくなるものの、全体を通してほとんど変化はみられていない。一方、せん断ひずみ300%载荷では、一次形状係数が5.56であるCase6においてせん断変位135mm（せん断ひずみ250%）を超えてから耐力が低下することが確認されたが、一次形状係数が11.11であるCase7においては、履歴形状がCase5とほとんど変わっておらず、耐力の低下もみられていない。これにより、Case6の履歴形状も変化し、等価剛性や等価減衰定数、履歴吸収エネルギーも変わる結果となった。

また、写真-3にCase7のせん断ひずみ250%载荷時の様子と、Case6とCase7のせん断ひずみ300%载荷後の供試体の様子を示す。写真-3 (b) より、一次形状係数が低いCase6では内部鋼板の変状を伴うせん断変形を行っていたが、Case7ではゴムが鉛直方向に伸びているものの内部鋼板の変状等はみられていないことがわかる。以上のように、ゴム支承が引張応力を受けている状態では、形状係数の変化がゴム支承のせん断特性に及ぼす影響は大きい。

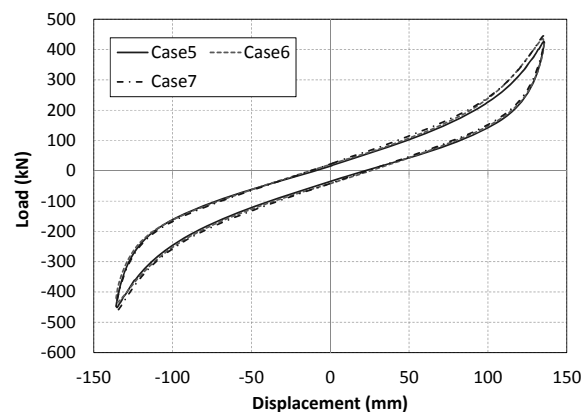
4. まとめ

本研究では、ゴム支承の引張せん断特性を把握することを目的とし、積層ゴム支承（RB）に対し軸応力をパラメータとし、一次形状係数の異なる2種類のゴム支承を用いてせん断ひずみを175%、250%、300%を与えた繰り返し载荷実験を実施した。本実験により得られた知見を以下にまとめる。

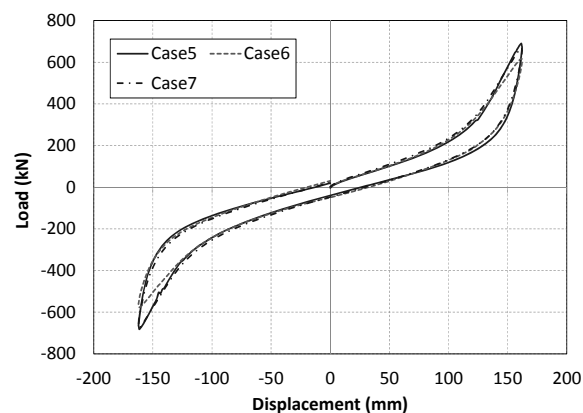
せん断ひずみ175%の载荷では、軸応力の変化によるゴム支承の荷重-変位履歴に変化はほとんどみられておらず、軸応力の影響はみられなかったが、せん断ひずみ250%と300%の载荷では、引張応力-2MPaを与えた場合ゴム支承が鉛直方向に大きく伸びた状態でせん断変形し、内部鋼板が上下方向に変形していることが確認され、これによりゴム支承のせん断特性が変わる結果となった。



(a) 175%载荷時の荷重-変位履歴



(a) 250%载荷時の荷重-変位履歴

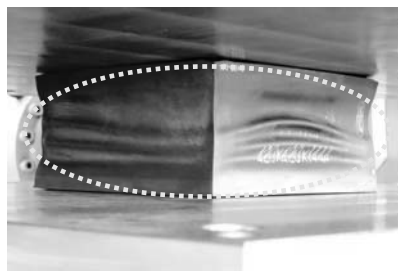


(b) 300%载荷時の荷重-変位履歴

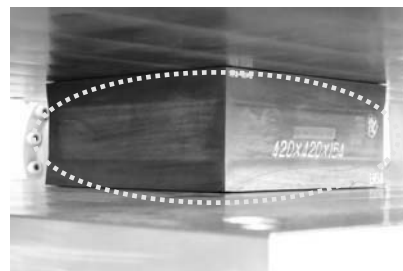
図-5 実験供試体の水平荷重-変位履歴



(a) 250%载荷時の様子 (Case7)



(b) 300%载荷後の様子 (Case6)



(c) 300%载荷後の様子 (Case7)

写真-3 Case6 と Case7 の引張せん断実験時の供試体の様子

また、一次形状係数の違いによる影響については、ゴム支承が引張応力を受けている状態では、形状係数の変化による影響を受けやすく、形状係数が低いゴム支承では大せん断ひずみ時に内部鋼板が大きく変状し、水平耐力や等価剛性が低下する結果となり、引張応力下においてはゴム支承の一次形状係数の影響は大きいと考えられる。

謝辞：本研究はJSPS科研費15K18107の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書，1995.
- 2) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2012.
- 3) 植田健介，星隈順一，岡田太賀雄，堺淳一：鉛プラグ入り積層ゴムの引張特性に関する研究，土木学会第65回年次学術講演会，pp. 65-66，2010.
- 4) 崔準祐，岩本周哲，植田健介：ゴム支承の引張特性試験に基づく解析モデルを用いた橋梁全体系解析によるゴム支承の地震時挙動特性とコンパクト化について，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.71，No.4（地震工学論文集第34巻），pp.I_650-I_658，2015.
- 5) 村田宣幸：東北地方太平洋沖地震に伴うゴム支承の応急復旧 - 仙台北部道路利府高架橋 -，プレストレストコンクリート工学会第21回シンポジウム論文集，2012.
- 6) 公益社団法人土木学会：平成28年（2016年）熊本地震 地震被害調査結果速報会 ホームページ掲載資料，ホームページ：<http://committees.jsce.or.jp/eec2/node/76>
- 7) 日本工業標準調査会：道路橋免震用ゴム支承に用いる積層ゴム試験方法，JIS K 6411，2012.
- 8) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.