

軸応力とせん断ひずみの変化に伴う ゴム支承の局部応力変化に関する解析的検討

成炫禹¹・原暢彦²・今井隆²・植田健介²・崔準祐³

¹正会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程
(現 (株)大日本コンサルタント 特殊構造技術室)
(〒170-0003 東京都豊島区駒込 3-23-1)

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)

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。これに伴い、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²⁾、鉛直力の変動時におけるゴム支承のせん断特性については実験等による検討事例が少なく、橋梁設計上考慮されていない。特に引張下におけるゴム支承のせん断特性についてはこれまで検討事例が無く、地震時支承部に上陽力と水平力が同時に作用する場合ゴム支承の限界状態が明らかにされているとは言い難い。そこで、筆者らは、ゴム支承の引張せん断特性を把握することを目的とし、過去に積層ゴム支承（RB）を対象に軸応力をパラメータとしたせん断実験を実施した。その実験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するとともに、外部から確認できるゴム支承の変形状態の変化について確認した^{3), 4)}。しかし、地震時ゴム支承の限界状態をより厳密に評

価するためには、大きなせん断変形が生じるゴム支承においてその内部の局部応力を把握する必要があるが、こうしたゴム支承内部の局部応力状態を評価するためには解析による推定評価しかできない現状である。

本研究では、筆者らが過去に実施した軸応力をパラメータとしたゴム支承のせん断特性確認実験に対し、3次元有限要素解析により実験結果の再現性を確認するとともに、軸応力とせん断ひずみの変化に伴うゴム支承内部の局部応力変化に関する検討を行った。

2. 解析概要

(1) 解析対象ゴム支承の諸元

本解析では、筆者らによる過去のゴム支承せん断特性確認実験に用いた実験供試体を対象とした。本

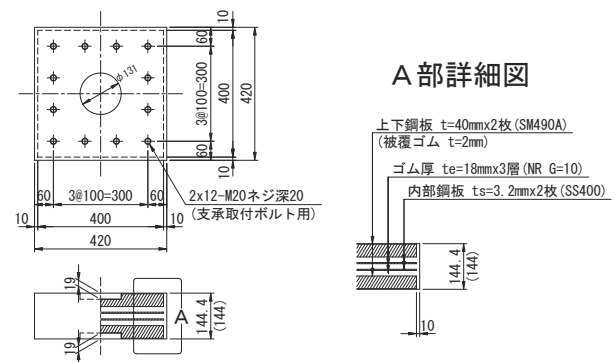


図-1 解析対象の実験供試体の構造図（単位：mm）

表-1 実験供試体の諸元

平面形状	(mm)	400×400
単層厚	(mm)	18
総ゴム厚	(mm)	54
内部鋼板厚	(mm)	2
1次形状係数	—	5.56
2次形状係数	—	7.41
ゴム材の呼び	—	G10
内部鋼板の材質	—	SS400

解析に用いた実験供試体の構造図を図-1に、諸元を表-1に示す。実験供試体は積層ゴム支承（RB，G10）であり、供試体寸法はJISの標準試験体⁵⁾に合わせ、平面寸法を400mm×400mmとした。また、総ゴム厚は54mmとし、1層のゴム厚を18mmとして3層とした。一次形状係数 S_1 と二次形状係数 S_2 は、道路橋支承便覧²⁾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における最小値4から最大値12の範囲で設定しており、今回解析対象とした実験供試体の場合ゴム単層が18mmと厚く、一次形状係数が5.56である。本検討では、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た。

$$S_1 = \frac{A_e}{2(a+b)t_e} \quad (1a)$$

$$S_2 = \frac{\min(a,b)}{\sum t_e} \quad (1b)$$

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

(2) 解析モデル

解析モデルを図-2に示す。本解析では汎用有限要素解析ソフトADINA（Ver.9.2.5）を用い、載荷板、

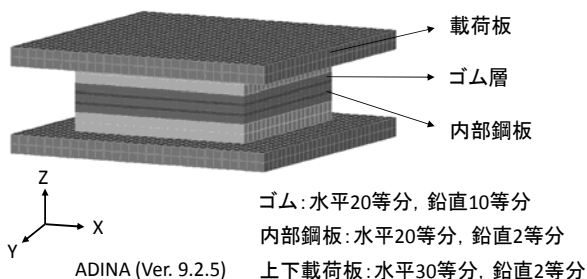


図-2 解析モデル図

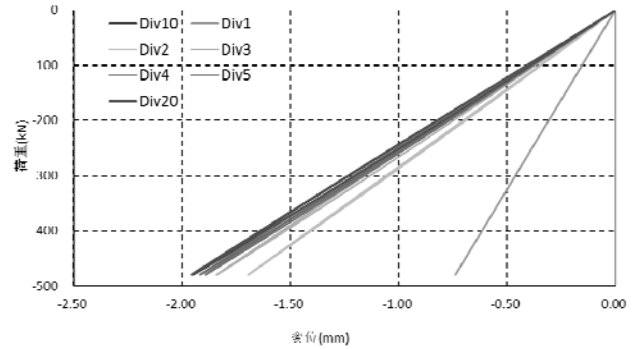


図-3 ゴム層の要素分割数を変化させた検討結果
(引張応力 3MPa 載荷)

ゴム、内部鋼板、上下鋼板に対しそれぞれソリッド要素でモデル化した。ゴム部の要素分割については、安定した解が得られるようにZ軸方向（鉛直方向）に対しても多く分割した。ゴム支承の高さ方向の要素分割数による影響を把握するため、ゴム支承の鉛直方向に載荷したケースに対し、要素分割数をパラメータとした検討を行った。図-3にはゴム1層の高さ方向に対し、要素分割数を1, 2, 3, 4, 5, 10, 20とし、ゴム支承の高さ方向に引張応力3MPaを載荷した結果を示す。要素分割数が1の場合、他の結果と離れた値を示しており、より多く分割する必要があることがわかる。本モデルの場合、要素分割数を4, 5以上にすると結果が一定の値に収束していく結果となり、本検討ではゴム支承の高さ方向に対する要素分割数を10とした。

(3) ゴム材料の超弾性モデル

ゴム材料は応力とひずみの強い非線形を有しており、有限要素法では超弾性体として取り扱われる場合が多い。超弾性体の応力ひずみについては、有限要素法では一般にひずみエネルギー関数を用いて表しており、これまで様々な種類のひずみエネルギー関数が提案されている。本検討では、ゴム材料のひずみエネルギー関数として多く用いられているOgdenモデル⁶⁾を採用して解析を実施した。OgdenモデルはOgdenが1972年提案したものであり、そのひずみエネルギー関数を式(2)に示す。

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (2)$$

ここに、 W ：ひずみエネルギー関数

λ ：ゴム実験体の各辺の伸長比

α ：Ogdenモデルの材料定数（単位は無

次元)

μ : Ogdenモデルの材料定数 (単位は弾性係数と同じ)

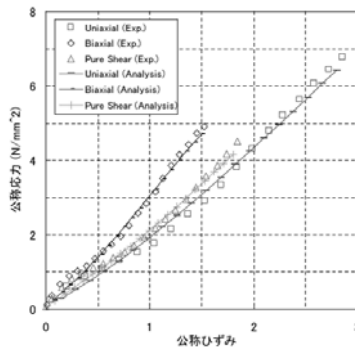


図-4 ゴム材料のひずみエネルギー関数⁷⁾

このひずみエネルギー関数を求めるためには、本来3種の材料試験 (単軸引張、二軸均等引張、純せん断) により関数を同定する必要があるが、本検討ではこれら材料試験を実施せず、非線形CAE協会が公開している材料試験データに基づくひずみエネルギー関数⁷⁾を引用することとした。非線形CAE協会が公開しているひずみエネルギー関数を図-4に示す。

また、ゴム材料のような高分子物質は弾性的かつ流体的であるため粘弾性を有しているが、本解析では上述したOgdenモデルにHolzapfelが提案した粘弾性効果⁸⁾を考慮することとした。この粘弾性効果を考慮することによって、ゴム支承の繰り返しせん断変形による履歴エネルギーを現すことが可能となる。なお、ゴム材料の内部摩擦等による損傷モデル (ダメージモデル) は採用していない。

(4) 上下部载荷板および内部鋼板のモデル

上下部载荷板や内部鋼板については鋼部材として設定しており、実験でこれらの部材が大きな変形を示していなかったことから、本解析ではまず弾性モデルとして検討を行った。また、ゴム層と内部鋼板の接着については、著者らが過去に実施した加硫接着されたテストピースによる接着剥離試験で剥離 (接着界面の破壊) よりもゴム材料の破断 (ゴム部での破断) が先行となり、ゴムの材料強度より接着強度の方が強いことが確認されたことや各種のせん断破壊実験ではゴムと内部鋼板の剥離現象が生じていないこと、また本研究で対象としている実験においてもゴムと内部鋼板が剥がれることが見られていなかったことから、本解析ではゴム層と内部鋼板を剛結合とした。

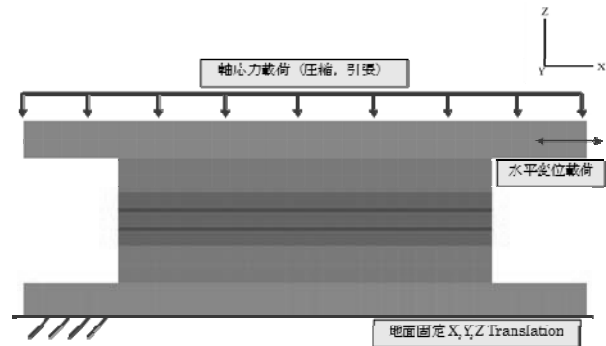


図-5 载荷方法および境界条件

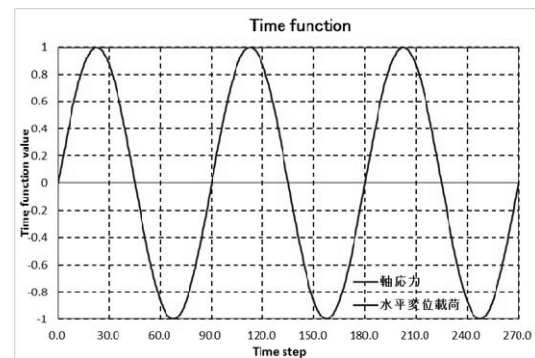


図-6 荷重ステップ

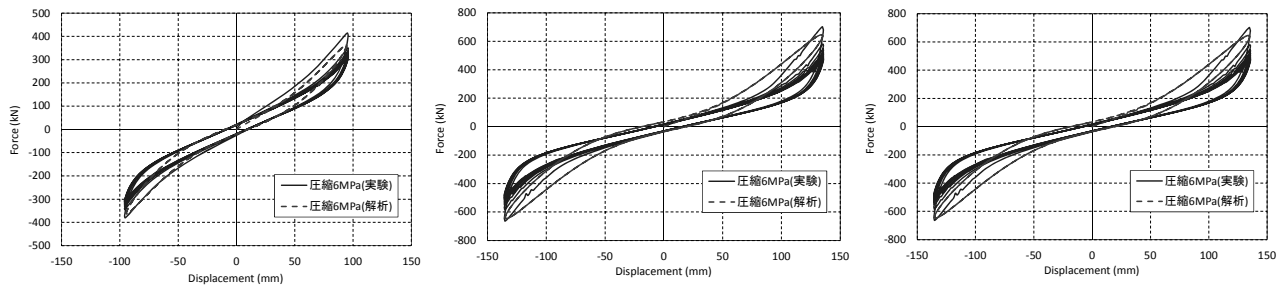
(5) 解析ケースおよび载荷条件

過去に実施した実験では、軸応力を圧縮6MPa, 0MPa, 引張1MPa, 引張2MPaとし、せん断ひずみ175%, 250%, 300%を繰り返して与えた。本解析検討では、軸応力として圧縮6MPaと引張2MPaを载荷したケースに対してのみ再現解析を実施した。载荷方法としては、軸応力については応力载荷、水平変位については強制変位を载荷する方法とした。载荷方法および境界条件を図-5に示す。軸応力の载荷はスタート時点から载荷が終わるまで同じ軸応力を载荷することにしており、水平変位载荷は実験で用いた载荷荷重と同じくsin波形で入力した。また、本解析では上述のようにゴム材料の超弾性モデルに粘弾性効果を考慮しているが、粘弾性効果を考慮すると応答が速度に依存するため、実験時の水平方向载荷速度と同じ速度に設定して载荷した。入力した荷重の時間関数を図-6に示す。

3. 解析結果

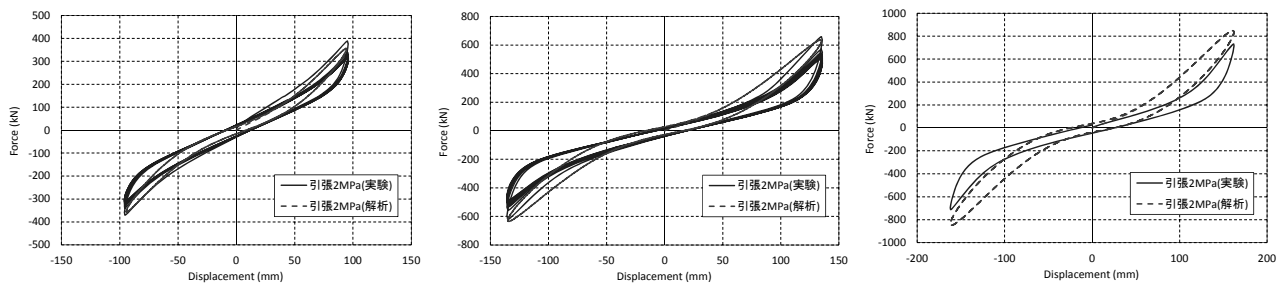
(1) 実験結果に対する再現性

図-7と図-8は、ゴム支承に対して軸応力を圧縮



(a) 圧縮 6MPa, せん断ひずみ 175% (b) 圧縮 6MPa, せん断ひずみ 250% (c) 圧縮 6MPa, せん断ひずみ 300%

図-7 水平荷重-水平変位履歴の比較（軸応力：圧縮 6MPa）



(a) 引張 2MPa, せん断ひずみ 175% (b) 引張 2MPa, せん断ひずみ 250% (c) 引張 2MPa, せん断ひずみ 300%

図-8 水平荷重-水平変位履歴の比較（軸応力：引張 2MPa）

6MPaと引張2MPaを载荷した状態で、せん断ひずみ175%、250%を10回繰り返し载荷、せん断ひずみ300%を1回繰り返し载荷を行った際の水平荷重-水平変位履歴を実験と解析で比較したものである。本検討では、上述のように粘弾性効果を考慮しており、解析モデルに粘性特性を与える必要があるが、ここでは解析により得られる履歴形状が実験で得られた履歴形状に近づくよう、繰り返し計算により粘性特性を決定した。履歴形状において、解析で得られた切片荷重、最大荷重、履歴吸収エネルギーが実験値に近づくように設定した。

図-7と図-8より、切片荷重、最大荷重、履歴吸収エネルギーに関しては、実験値と解析値が近似していることが確認できるが、せん断ひずみが100%程度を超えてからは履歴形状が両者少し異なっていることがわかる。特にハードニング領域において実験と解析結果の乖離が大きくなっているが、これは本解析で用いたゴム材料のひずみエネルギー関数が実験で用いたゴム材料に基づいておらず、高ひずみ領域においてひずみエネルギー関数が適切に反映されていないためと考えられる。これについては、今後実験で用いた材料に近いひずみエネルギー関数を求める必要があるが、切片荷重、最大荷重、履歴吸収エネルギーに関しては圧縮6MPa、引張2MPaの両载荷ともに解析値が実験値に近似しており、実験時の

軸応力の変化に伴うゴム支承内部の局部応力変化の傾向を把握するには、精度上大きな問題は無いと思われる。

(2) ゴム支承の局部応力状態評価

ここでは(1)にて紹介した実験ケースに対し、解析によりゴム支承内部の局部応力状態を評価した。各ケースの内部応力を評価するにあたっては、平均応力（静水圧応力）により応力状態を評価することとした。

図-9は、軸応力を圧縮6MPa、せん断ひずみを175%、250%、300%に载荷した場合のゴム支承中央部におけるXZ平面の静水圧応力分布を示したものである。図-9から、せん断ひずみを175%载荷した場合には、圧縮応力が作用する領域が支承中央部を中心にして広範囲で広がっているが、せん断ひずみが大きくなるにつれて圧縮応力を受ける領域が徐々に減っていくことが確認された。せん断ひずみを300%载荷した場合には、圧縮応力を受ける領域が半分程度まで減り、せん断ひずみを厳しく受ける左右の端部には引張応力を受けるところも現れ、せん断ひずみの変化によってゴム支承の内部応力が大きく変化していくことがわかった。

図-10は、軸応力を引張2MPa、せん断ひずみを175%、250%、300%に载荷した場合の静水圧応力分

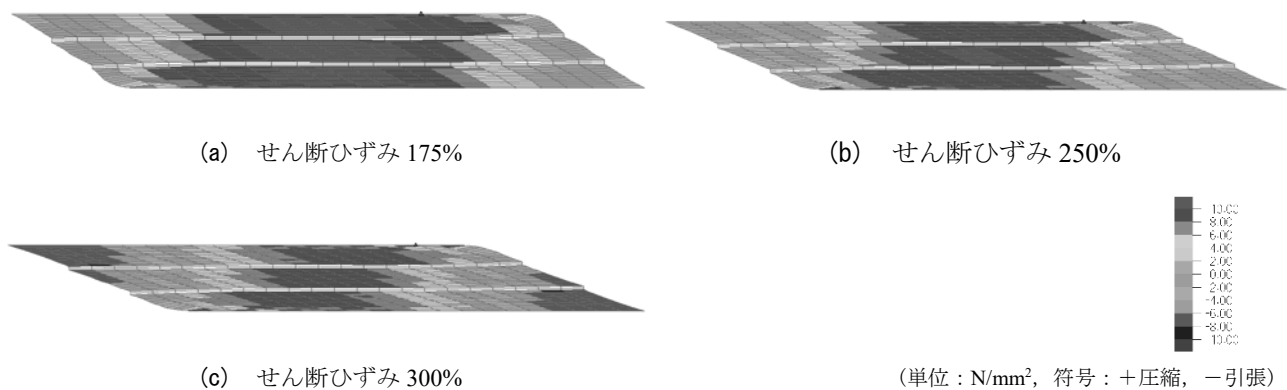


図-9 静水圧応力の比較（軸応力圧縮 6MPa）

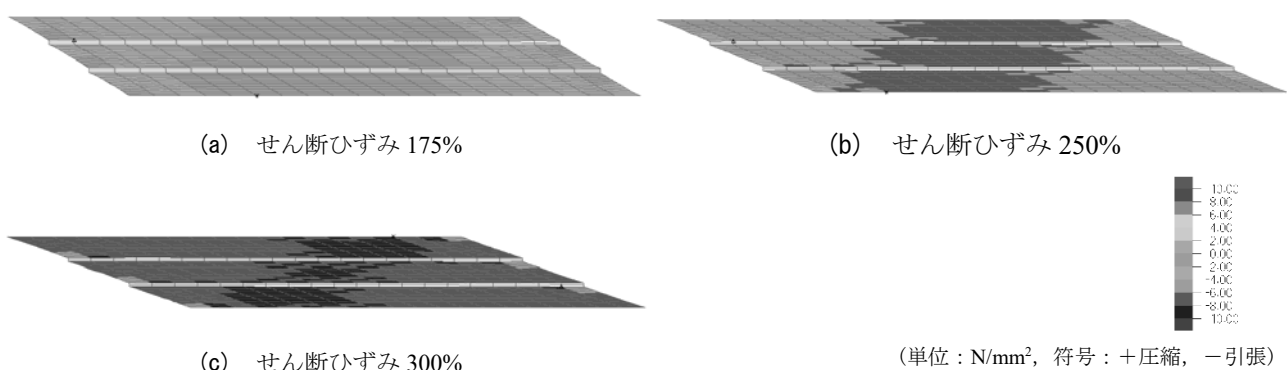


図-10 静水圧応力の比較（軸応力引張 2MPa）

布を示したものである．せん断ひずみ175%を載荷した場合には，圧縮応力載荷時と同様に支承中央部を中心に引張応力を受ける領域が広がっているが，せん断を受けることでゴム部材がさらに引張を受けることになり，せん断ひずみが大きくなるにつれて支承中央部の引張応力がより上昇していく傾向を示した．しかし，せん断ひずみの増大に伴い，引張応力の分布も変化しており，ゴム内部で最大引張応力

が発生する領域はせん断変形方向の反対の対角方向に分布することがわかった．このことより，ゴム支承が引張応力下においてせん断を受ける場合には，ゴムの上下層の端部で引張応力を厳しく受けることが考えられる．実験においてもゴム層間でゴムの伸びが不均等に大きく内部鋼板がそれに沿って変形していたが，破断には至らず荷重解放後の外観に異常は無かった（写真-1）．

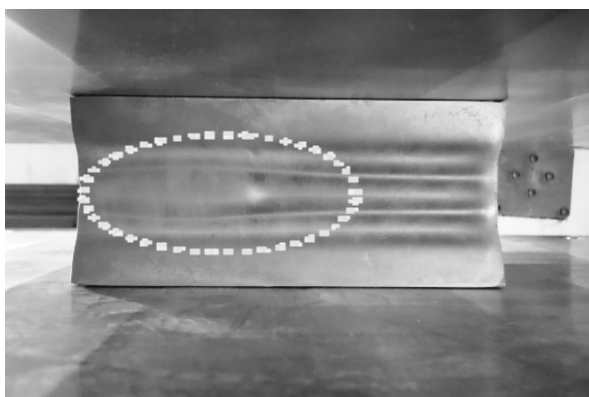


写真-1 軸応力引張 2MPa, せん断ひずみ 300%を載荷した後のゴム支承の変形様子

4. まとめ

本検討では，筆者らが過去に実施した軸応力をパラメータとしたゴム支承のせん断特性確認実験に対し，3次元有限要素解析を行った．本解析検討により，実験結果の再現性を調査するとともに，軸応力の変化に伴うゴム支承内部の局部応力変化について分析した．本検討により得られた知見を以下に述べる．

(1) 実験結果に対する再現性

実験と解析で得られたゴム支承の水平荷重-水平

変位の履歴を比較したところ、ハードニング領域において両者の履歴形状に乖離があるものの、切片荷重、最大荷重、履歴吸収エネルギーに関しては両者近似する結果となった。ハードニング領域における再現性を向上するためには、今後実験で用いた材料に近いひずみエネルギー関数を求める必要がある。

(2) ゴム支承の局部応力状態評価

本解析検討より、せん断ひずみの変化によってゴム支承の内部応力が大きく変化していくことがわかった。特に軸応力として引張応力を受ける場合には、せん断ひずみが大きくなるにつれて引張応力が増大し、上下層の端部において引張応力を厳しく受けることが考えられる。

謝辞：本研究はJSPS科研費15K18107の助成を受けたものです。また、本解析検討を遂行するにあたり、(株)構造計画研究所の秦逸平氏より多大な助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

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)日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.
- 3) 崔準祐，原暢彦，今井隆，植田健介，成炫禹：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，土木学会第19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，pp.295-300，2016.
- 4) 崔準祐，原暢彦，今井隆，植田健介，成炫禹：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，第36回土木学会地震工学研究発表会，CD-ROM Paper No.947，2016.
- 5) 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.
- 6) Ogden, R.W., Proc.Roy.Soc.London, A326, pp.565-584, 1972.
- 7) 特定非営利活動法人非線形CAE協会ホームページ：<http://www.jancae.org/cgi-bin/gatex/annex2006DB/gatex.cgi>
- 8) Holzapfel, G. A., Int.J.Num. Methods Eng., 39, pp.3903-3926, 1996.