

実物の超高減衰ゴム支承の載荷実験

目崎 裕太¹・木下 幸治²

¹学生会員 岐阜大学大学院修士課程 自然科学技術研究科環境社会基盤工学専攻
(〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

²正会員 岐阜大学准教授 工学部社会基盤工学科 (同上)

1. 背景と目的

兵庫県南部地震において、鋼製支承を用いた橋梁では支承部に起因すると考えられる被害が多数見受けられた一方で、積層ゴム支承を用いた橋梁では比較的損傷が軽微であったことから、それ以降積層ゴム支承の普及が拡大してきた¹⁾。しかし、その後発生した東北地方太平洋沖地震では、平成8年以降の基準²⁾に準拠して設計された東部高架橋において、ゴム支承に破断やき裂等の損傷が初めて確認された^{3), 4), 5)}。さらに、熊本地震では、ゴム支承の破断のみならず、ゴム層の破断以前に支承取付ボルトが破断するといった損傷が生じた^{6), 7)}。

これまでの我が国における大地震時に生じたゴム支承の損傷の経験より、ゴム支承の基本性能および地震時性能検証に関する研究がこれまでに行われてきており、ゴム支承が損傷した要因とされている現行の設計にて考慮されていないゴム支承の曲げと載荷方向（2方向せん断）についても研究がなされている。それらの研究では、ゴム支承の純曲げ並びに、2方向のせん断ひずみの連成によりゴム表面に生じる引張ひずみあるいはゴム沓のねじれにより生じる局部せん断ひずみが要因であると確認されつつあるが、ゴム沓部分のみを対象とした研究が中心であり、支承取付部を含めて検討している研究は数少ない⁸⁾。そのため、取付部を含めた支承全体の破断メカニズムの解明が今後必要である。

他方、ゴム支承のみを対象とした研究は数多くなされてきているが、実物を対象とした載荷実験結果の蓄積は、著者らの実験結果⁹⁾を含めてもいまだ十分とはいえない。このため、今後も実物のゴム支承を対象とした実験データの蓄積は有用と考えられる。

本研究では、著者らの昨年度の研究で行った実物

の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験⁹⁾に引き続き、実物の超高減衰ゴム支承を対象として載荷実験を行うための実験システムを構築した結果について報告する。具体的には、新たに構築したゴム支承取付部（セットボルト）までを再現できる実験フレームを使用して、実物ゴム支承の載荷実験を行った。本論文では、本載荷実験より得られた荷重変位関係について報告する。

2. 実物ゴム支承概要

写真-1に実物ゴム支承の外観、図-1に実物ゴム支承の概要を示す。実物ゴム支承の種類は、免震用積層ゴム支承として広く使用されている超高減衰ゴム支承（HDR-S）である。実物ゴム支承は2014年9月に製造されたのち現場に搬入され、架設中に当該架橋位置において土砂災害を受けたため2015年1月に撤去されたものである。本研究において対象とした実物ゴム支承はA2橋台上に設置されていた2基のゴム支承のうち、G2桁側に設置されていた。撤去後のゴム支承は現地屋外にて保管され（写真-2参照）、2017年1月に本大学構内に移設されている。その後、実物ゴム支承は本大学構内においても屋外にて保管され（写真-1参照）、本載荷実験に至る。

実物ゴム支承は1辺が1050 mm（有効寸法）の正方形断面を有し、ゴム1層厚34 mm、ゴム層総数6層（ゴム層総厚204 mm）、厚さ4.5 mmの補強鋼板5枚、厚さ45 mmの上下鋼板2枚で構成されている。せん断弾性係数 G は1.0 N/mm²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。形状係数は道路橋支承便覧¹⁾を参考に式(1)、(2)を用いて算出した。

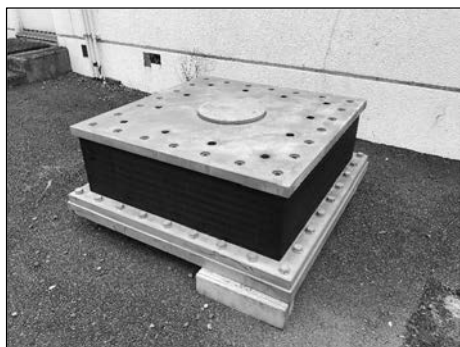


写真-1 実物ゴム支承外観



写真-2 実物ゴム支承現地保管状況

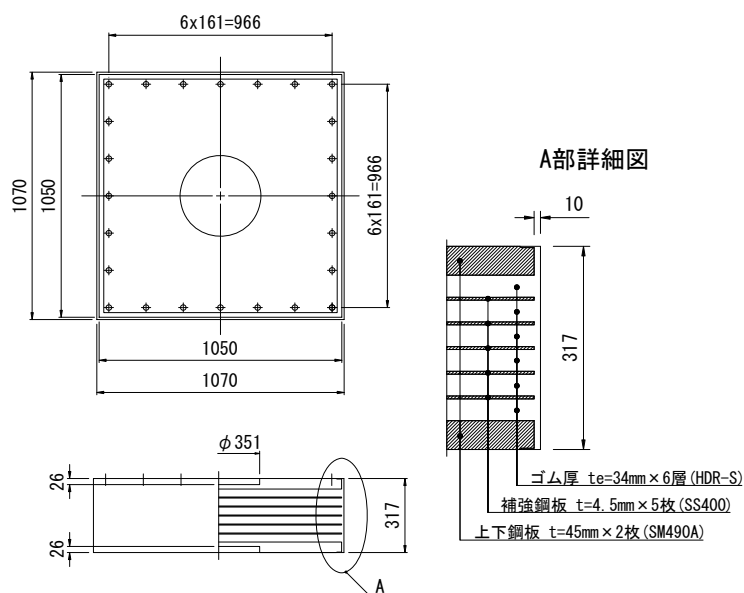


図-1 実物ゴム支承概要 (単位: mm)

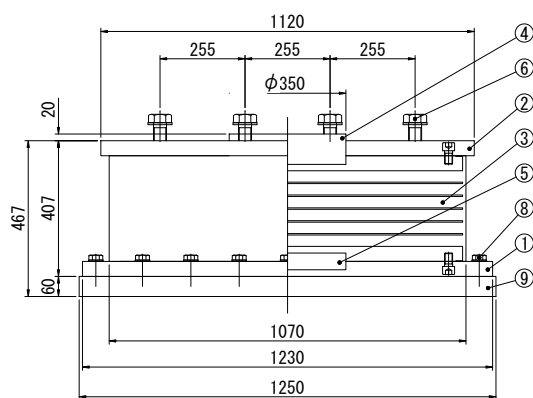


図-2 実物ゴム支承断面と部品番号
(単位: mm, 丸囲み数字: 部品番号)

表-2 実物ゴム支承に使用されている材料の規格値

部品番号	部品名	材質	備考
1	下沓	SM490A	
2	上沓	SM490A	
3	ゴム沓	HDR-S +SS400+SM490A	
4	せん断キ- (A)	SM490A	
5	せん断キ- (B)	SM490A	
6	六角ボルト・座金	—	JIS B 1180 JIS B1256
7	六角穴付ボルト	—	JIS B 1176
8	六角ボルト・座金	—	JIS B 1180 JIS B1256
9	ベースプレート	SM490A	

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

$$S_2 = \frac{\min(a,b)}{\sum t_e} \quad (2)$$

ここで、 S_1 : 1次形状係数、 S_2 : 2次形状係数、 A_e : ゴム支承の有効寸法より求めた面積、 a : 橋軸方向

の有効 (鋼板) 寸法、 b : 橋軸直角方向の有効 (鋼板) 寸法、 t_e : ゴム 1 層の厚さである。また、等価剛性および等価減衰定数の設計値は、それぞれ 5.606 kN/mm, 17.3 %である。外観に有意な損傷は見られなかった。図-2 に実物ゴム支承の断面寸法と部品番号、表-2 に実物ゴム支承に使用されている材

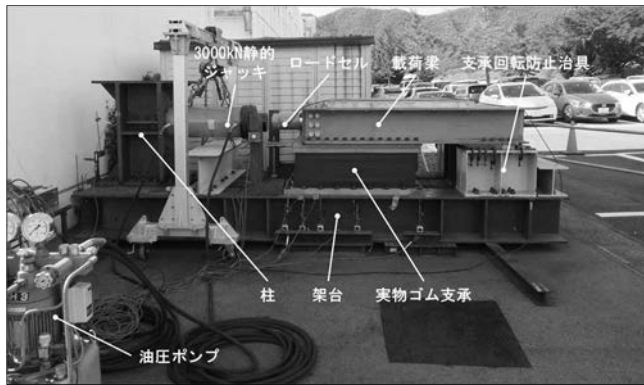


写真-3 実験システム全体写真

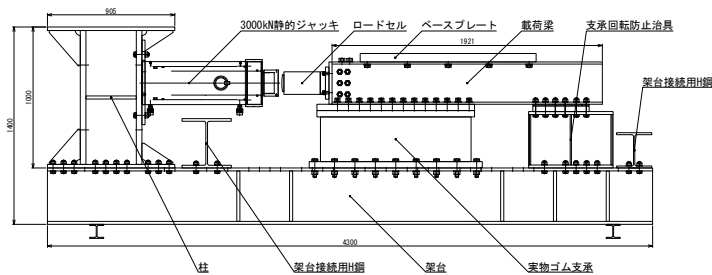


図-3 実験システム全体図面 (単位: mm)

料の規格値を示す。ゴム部には、超高減衰ゴムが使用されており、鋼材部には SS400, SM490A 材, JIS B 1180, JIS B 1256 の六角ボルト, JIS B 1176 の六角穴付きボルトが使用されている。

3. 実物ゴム支承実験概要

(1) 実験システム概要

写真-3, 図-3に大学構内に構築した実験システムの全体写真と図面を示す。実験フレームは2本のH鋼の上に設置した両端単純支持の自己つり合い式のフレームである。架台にはH鋼を3本使用し、それぞれが独立して動かないように奥行き方向に別のH鋼2本を渡し、架台とはボルトを使用して接続している。その架台の上に実物ゴム支承とゴム支承のせん断変形時に発生するゴム支承の回転を防止するための支承回転防止治具を設置し、さらにその上に2本のH鋼で作成した載荷梁を設置した。2本の載荷梁はゴム支承側においてボルトで剛結されており、支承回転防止治具側に関しては写真-4に示すように長孔に高力ボルトを挿すことで鉛直方向のみ固定されている。すなわち、ゴム支承のせん断変形時に載荷梁は水平方向に自由に移動し、ゴム支承の回転には載荷梁および架台の曲げ剛性で抵抗する。また、2本の載荷梁はズレの防止と載荷梁の曲げ剛性を高めるために、実物ゴム支承から取り外したベースプレートにて接

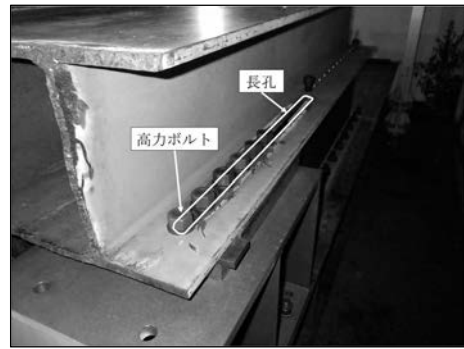


写真-4 長孔部

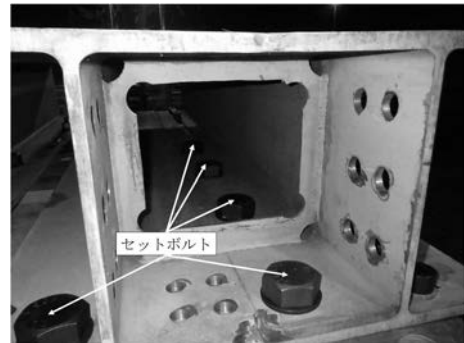


写真-5 セットボルト再現部

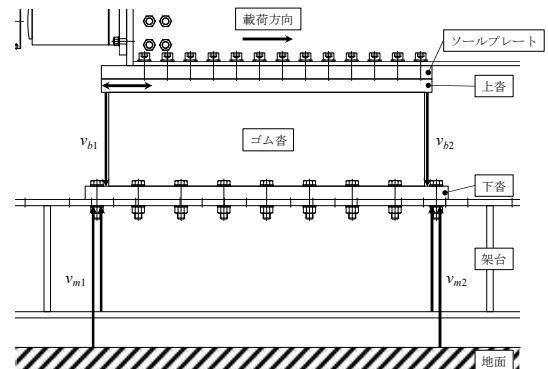


図-4 計測方法

続している。

写真-5にセットボルトの再現部を示す。実橋と同じ径、本数のM39、強度区分10.9の六角ボルト12本を実橋と同じ位置に配置した。導入トルクは支承製作会社の社内管理値と同等とした。

水平荷重は大阪ジャッキ社製3000 kN油圧ジャッキ1基を使用し、載荷梁に取り付けたロードセルを水平方向に片押しで押すことでゴム支承に与える。なお、鉛直荷重を与える機能はない。

(2) 実験フレームおよびゴム支承の挙動の計測方法

図-4に計測方法を示す。載荷実験ではゴム支承と実験フレームの変形成分を変位計により計測した。具体的には、ゴム支承のせん断変位は上査、上下査間の相対鉛直変位、架台の上フランジの対地面鉛直変位、架台の上下フランジの相対鉛直変位は下査取

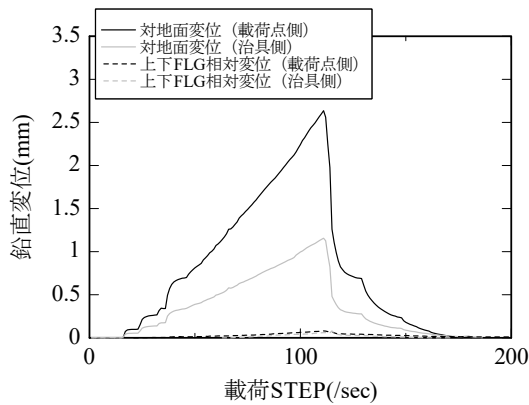


図-5 架台鉛直変位

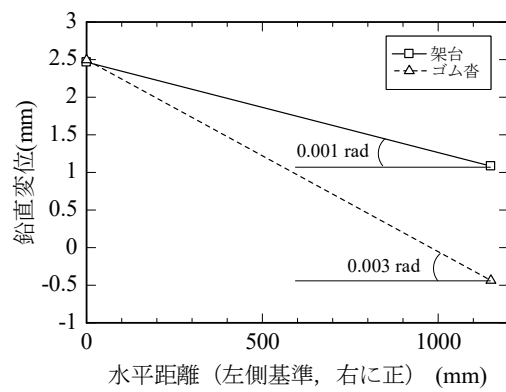


図-6 最大荷重時の下沓鉛直変位

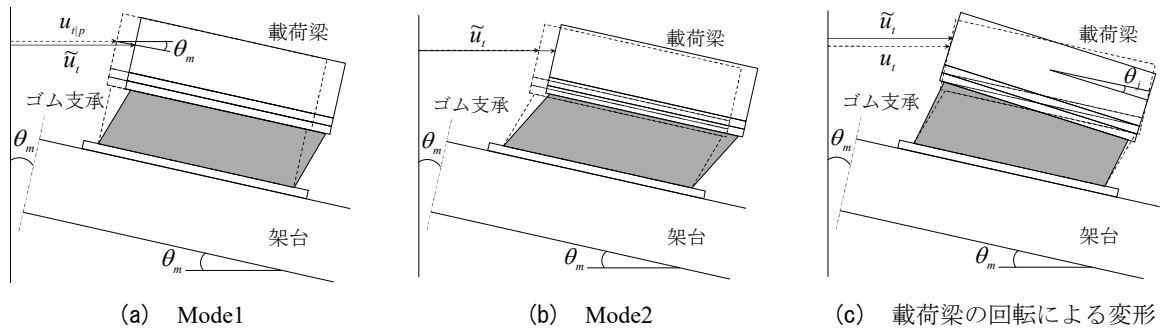


図-7 ゴム支承の変形モード¹⁰⁾

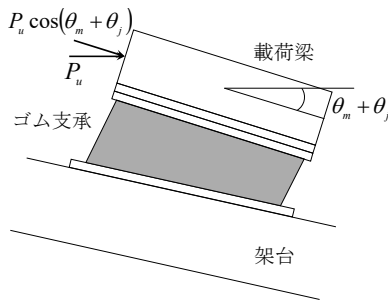


図-8 ゴム支承に作用する力¹⁰⁾

付ボルトの最外縁付近において計測した。

(3) 実験概要

本実験は、3. (1)で示した実験システムを使用し、鉛直荷重を与えずに $\gamma=50\%$ の載荷をインターバルを設けずに連続的に行った。水平方向は変位制御により行い、載荷速度については手動による載荷とし、一定の速度になるように調整した。

4. 載荷実験結果

ここでは、本載荷実験結果を示す。まず、変位計で測定された水平変位にはゴム支承の回転による水平変位が含まれているため、ゴム支承のせん断変形時の実験フレームとゴム支承の変位の計測結果から、

ゴム支承に生じる水平変位と作用する水平力の補正を行った。次に、本載荷実験の補正した荷重－変位関係を著者らの昨年度の実験結果⁹⁾と比較した。

(1) 実験フレームとゴム支承の変形挙動

図-5に $\gamma=50\%$ を1回目に与えた際の架台 (H鋼) の上フランジの対地面鉛直変位、上下フランジの相対変位の時刻歴を示す。上フランジの対地面鉛直変位が載荷にともなって上昇するのに従い、上下フランジの相対鉛直変位も上昇しているが、その量は微小である。従って、載荷中も架台のH鋼は上下フランジが独立して動くことなく、剛体として変位に追随していることが分かる。

図-6に $\gamma=50\%$ を1回目に与えた際の目標変位付近 (102 mm) における上下沓間の相対鉛直変位と架台 (H鋼上フランジ) の対地面鉛直変位を示す。横軸は水平距離であり、下沓取付ボルトの左側最外列から右側に向かって正をとっている。この架台とゴム沓の載荷軸方向の回転角は次式により算出した。

$$\theta_m = \frac{v_{m1} - v_{m2}}{d} \quad (3)$$

$$\bar{\theta}_b = \frac{v_{b1} - v_{b2}}{d} \quad (4)$$

ここで、 θ_m : $v_{m1} \sim v_{m2}$ 間の回転角、 $\bar{\theta}_b$: $v_{b1} \sim v_{b2}$ 間の回転角、 d : 鉛直変位の計測点間の距離 ($d=1150$)

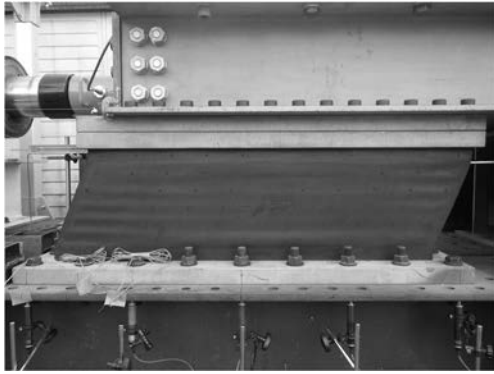


写真-6 $\gamma=50\%$ 実験状況

表-3 $\gamma=50\%$ 実験における水平荷重減少率

本実験 载荷回数	昨年度実験 水平荷重(kN)	本実験 水平荷重(kN)
1回目	846 ^{※1)}	837
5回目	760 ^{※2)}	788
減少率	10.2%	5.9%

※1) 2ループ目の値

※2) 6ループ目の値

mm) である。図-6より、架台とゴム沓は写真-3において、ともに右回りに回転をしており、また、架台の回転角よりもゴム沓自体の回転角の方が大きいことから、ゴム沓に回転変形が生じていることが確認された。この回転により、ゴム支承の変形にはせん断変形だけでなく回転変形も含まれており、さらに作用する水平力にも回転の影響が含まれている。従って、4. (2) において文献10)の補正方法を参考にゴム支承の回転の影響を補正したゴム支承に生じる水平変位と作用する水平力を算出した。

(2) ゴム支承の回転変形の補正方法¹⁰⁾

ここでは、架台の回転によってゴム支承に生じる回転量が架台の回転量と一致すると仮定し、式(3)、(4)より得られた架台とゴム沓の回転角を用いて载荷梁の回転角 θ_j を次式により求めた。

$$\theta_j = \bar{\theta}_b - \theta_m \quad (5)$$

また、水平方向の変位計で計測される全体系の水平変位 u_i には、前述した载荷梁の回転角 θ_j によって生じる水平変位 u_j が含まれるため、ここでは、全体系に生じる水平変位 $\tilde{u}_i$ を次式により補正した。

$$\tilde{u}_i = u_i - u_j \quad (6)$$

ここで、载荷梁の回転角 θ_j によって生じる水平変位 u_j は、载荷梁のソールプレートと重なっている部分の载荷軸方向長さを D_j (=1120 mm) とおき、次式により求めた。

$$u_j = \frac{1}{2} D_j (1 - \cos \theta_j) \quad (7)$$

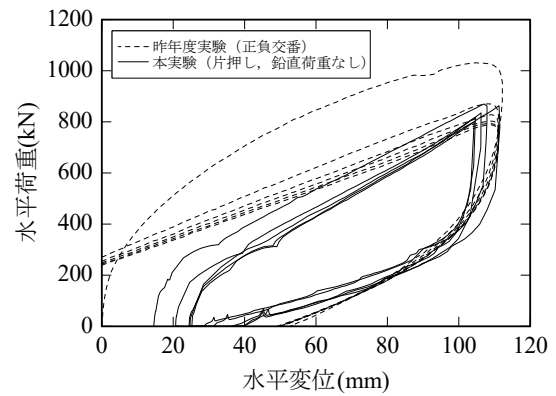


図-9 $\gamma=50\%$ 実験と昨年度実験の結果比較

ゴム支承＋载荷梁の変形は、図-7に示すMode1、Mode2の2つの変形モードの重ね合わせによって生じると考えられる。Mode1はゴム支承のせん断変形によって载荷梁も追随するモードで、Mode2は载荷梁が並進してゴム支承の変位がこれに追随するモードである。これらの2つの変形モードを考慮すると、ゴム支承に生じる水平変位 $\tilde{u}_b$ は式(3)～(7)を用いて次式のように求められる。

$$\tilde{u}_b = \frac{\tilde{u}_i - u_{ip}}{\cos(\theta_m - \theta_{md2})} \cos \theta_{md2} \quad (8)$$

ここで、 u_{ip} ：架台の回転角 θ_m の寄与によって载荷点に生じる水平変位、 θ_{md2} ：Mode2の寄与による回転角である。しかし、本実験では上下沓の相対変位において载荷点側の値に比べ回転防止治具側の変位はその1/6程度であることから回転変形が主であり、载荷梁の並進がゴム支承に生じる水平変位へ与える影響は少ないと考えられる。従って、ここでは θ_{md2} は0と近似できるとし、ゴム支承に生じる水平変位 $\tilde{u}_b$ を次式より求めた。

$$\tilde{u}_b = \frac{\tilde{u}_i - u_{ip}}{\cos \theta_m} \quad (9)$$

また、図-8によるとゴム支承に作用する水平力 P_u^b は次式のように求められる。

$$P_u^b = P_u \cos(\theta_m + \theta_j) \quad (10)$$

以上より、ゴム支承の水平力－水平変位の関係を求めると図-9のようになる。

(3) 荷重－変位関係の比較

写真-6、図-9に $\gamma=50\%$ 時の実験状況、補正後の荷重－変位関係を示す。図-9中の昨年度実験は著者らの研究で行った1基目の実験結果 ($\gamma=50\%$) ⁹⁾ である。本実験の载荷1回目の開始時水平変位が0 mmでないのは、本载荷実験前に $\gamma=40\%$ 以下の载荷実験を複数回行っていることにより発生した残留変位の影響で

ある。本実験1回目の最大水平荷重は837 kN、最大水平変位は102.3 mm（目標変位102 mm）であった。本実験では載荷を繰り返すことにより、昨年度実験と同様にMullins効果¹¹⁾による最大水平荷重が低下して収束する傾向が見られた。また、二次剛性が昨年度実験と比較して高い結果となった。

最大水平荷重の収束について、表-3に昨年度実験と本実験の最初と最終載荷時の目標水平変位（102 mm）付近の水平荷重を示すとともに、その減少率を示す。昨年度実験では6ループの載荷を行っているが、1ループ目に初期載荷時の影響が確認されたため、2ループ目と6ループ目の水平荷重と減少率を示してある。昨年度実験が10.2 %の減少、本実験が5.9 %の減少となっており、概ね同等の減少率を示した。

次に、二次剛性の相違については各載荷時の残留変位が異なっているが、最大水平荷重は各載荷とも同等な値を示していることから、残留変位の影響と考えられる。また、本実験では鉛直荷重が作用していないが、鉛直荷重を変化させて載荷した既往の研究^{12), 13), 14)}において鉛直荷重を圧縮側で変化させたところ、荷重変位の変化はほとんど見られない、または、若干の変化があることが確認されている。このことから、本実験において鉛直荷重を与えていないことが二次剛性に与える影響は小さいと考えられる。

以上の本実験結果を昨年度実験結果と比較した結果、本実験結果は載荷条件下において妥当であり、新たに構築した実験フレームを使用して、昨年度の実験結果を概ね再現できたといえる。

5. 結論

本研究では、著者らの昨年度の研究で行った実物の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験⁹⁾に引き続き、実物の超高減衰ゴム支承を対象として載荷実験を行うための実験システムを構築して載荷実験を行った。具体的には、新たに構築したゴム支承取付部（セットボルト）までを再現できる実験フレームを使用して、実物ゴム支承の載荷実験を行った。

本実験結果より、ゴム支承に生じた回転を補正した荷重変位関係は載荷条件下において妥当であることが確認された。この結果より、新たに構築した実験フレームを使用して、昨年度の実験結果を概ね再

現できたといえる。

謝辞：浜松市市役所道路企画課の山本正孝氏、瀧上工業株式会社技術開発グループの櫻井勇太氏には、多大なご協力をいただきました。ここに深く謝意を示します。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善，2018.
- 2) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，1996.
- 3) 曾田信雄，山田金喜，木水隆夫，広瀬剛，鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により破断した積層ゴム支承の性能試験，構造工学論文集，Vol. 59A, pp. 516-526, 2013.
- 4) 山田金喜，曾田信雄，木水隆夫，広瀬剛，名古屋和志，鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により被災した東部高架橋のゴム支承に関する解析的検討，構造工学論文集，Vol. 59A, pp. 527-539, 2013.
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所，（独）土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第814号／土木研究所資料第4295号，2014.12.
- 6) 大住道夫，星隈順一：熊本地震により被害を受けた道路橋の損傷跡に基づく要因分析，第20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，2017.7.
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所，（独）土木研究所：平成28年（2016年）熊本地震土木施設被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第967号／土木研究所資料第4359号，2017.3.
- 8) 後藤芳顕，奥村徹，海老澤健正：連続高架橋の多方向地震動下でのゴム支承と支承取付部の曲げせん断挙動，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 73, No. 3, pp. 532-551, 2017.
- 9) 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(2019), No. 4, [特]地震工学論文集，Vol. 38, 2019.（登載予定）
- 10) 庄司学，川島一彦，加藤享二：高減衰積層ゴム支承の設計における橋脚の回転変形の影響，構造工学論文集，Vol. 48A, pp. 851-861, 2002.3.
- 11) (社) 日本ゴム協会免震用積層ゴム委員会：設計者のための免震用積層ゴムハンドブック，理工図書，2000.1.
- 12) 深堀美英：高減衰免震ゴム，日本ゴム協会誌，第62巻，第5号，1989.
- 13) 鶴野禎史，炭村透，金井宏司：各種ゴム支承の引張条件下における水平特性に関する研究，土木学会論文集，No. 190, 2003.
- 14) 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実験，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 73, No. 4（地震工学論文集第36巻），I_457-I_466, 2017.