

# 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

目崎 裕太<sup>1</sup>・木下 幸治<sup>2</sup>・姫野 岳彦<sup>3</sup>・小澤 亨<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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)  
E-mail: x4523038@edu.gifu-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 岐阜大学准教授 工学部社会基盤工学科 (同上)  
E-mail: kinosita@gifu-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 博(工) 株式会社川金コアテック 技術本部 (〒332-0015 埼玉県川口市川口 2-2-7)  
E-mail: himeno@kawakinkk.co.jp

<sup>4</sup>正会員 株式会社川金コアテック 市場開発部 (〒530-0012 大阪府大阪市北区芝田 1-14-8)  
E-mail: ozawa@kawakinkk.co.jp

我が国で生じた大地震時におけるゴム支承の損傷事例を基に、ゴム支承の基本性能及び地震時性能検証の研究がこれまでに進められており、特に実物のゴム支承を対象とした試験データの蓄積は有用である。本研究では、実物の超高減衰ゴム支承を対象として載荷方向がゴム支承の変形挙動に及ぼす影響を把握することを目的とし、ここでは載荷方向を 0°と 45°方向とした水平 1 方向試験により比較検討した。その結果、実物ゴム支承が載荷方向によらず概ね同様の履歴特性を有していること、並びに本試験結果は既往の研究結果と同様であることが分かった。

**Key Words:** *actual super high damping rubber bearing, loading direction, deformation behavior*

## 1. 背景と目的

1995年兵庫県南部地震において、鋼製支承を用いた橋梁において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、免震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、それ以降免震ゴム支承の普及が拡大してきた<sup>1)</sup>。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震および2016年熊本地震において、平成8年道路橋示方書<sup>2)</sup>を基準にレベル2地震動に対して設計された橋梁のゴム支承に、ゴムと内部鋼板との接合部での破断、ゴム本体部での破断、取り付けボルトの破断といった様々な損傷が生じた<sup>3)4)5)</sup>。

これらのような我が国における大地震時に生じた橋梁損傷の経験より、ゴム支承の基本性能および地震時性能検証の研究がこれまでに進められてきており、特に実物のゴム支承を対象とした試験データの蓄積は有用である。

本研究では、実物の超高減衰ゴム支承(HDR-S)を対象とした性能検証試験として、ここでは載荷方向が実物ゴム支承の変形挙動に及ぼす影響を把握することを目的

とした。ここでは、載荷方向を 0°と 45°方向の変形挙動を水平 1 方向の正負交番試験により比較検討した。さらに、ゴム支承の軸方向特性の把握を目的とし、せん断ひずみを与えない単純圧縮、引張特性についても検討した。

## 2. 実物ゴム支承の設計概要

本研究で対象とした実物ゴム支承は、平成16年の道路橋支承便覧<sup>1)</sup>を基に免震支承としての設計照査が行われていた。当該ゴム支承は、レベル1地震動時は静的解析、レベル2地震動時には動的解析により照査されている。地盤種別はI種地盤である。ゴム沓部分は、常時移動量、レベル1, 2地震動に対して、鋼製部分はプレート境界型の大地震であるレベル2タイプ1地震動に対して設計されていた。レベル2地震動に対して照査する場合、地震動による設計水平地震力または設計鉛直地震力が作用した場合に、支承本体及び取り付け部材に生じる断面力が当該部材の耐力以下、もしくは支承部の変形量が

表-1 実物ゴム支承の変位追随照査結果（設計計算書から抜粋）

	せん断ひずみ(%)	
	橋軸方向	橋軸直角方向
レベル1地震動	1.5	0.0
許容値	150	150
レベル2地震動(タイプ1)	153.4	118.6
許容値	250	250
レベル2地震動(タイプ2)	86.8	65.7
許容値	250	250



写真-1 実物ゴム支承外観

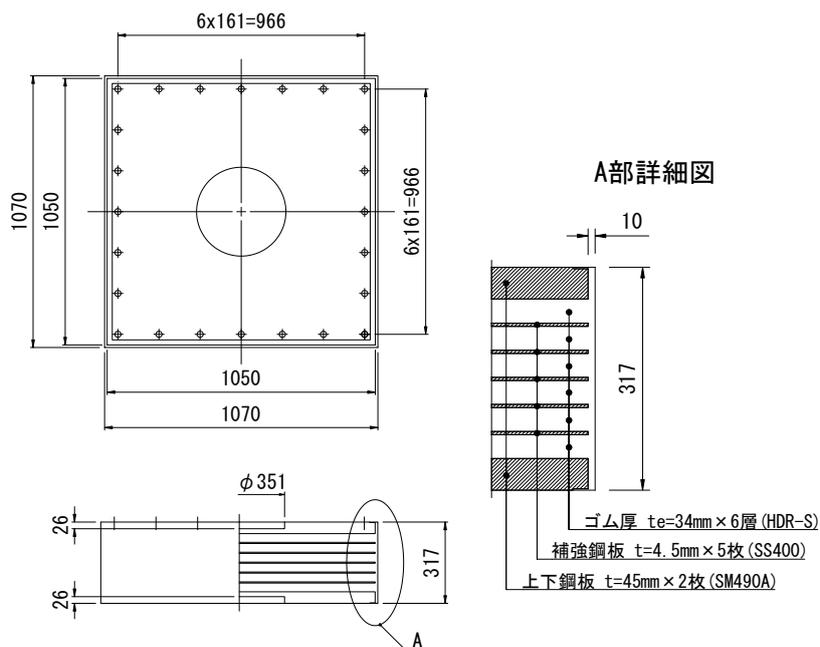


図-1 実物ゴム支承概要（単位：mm）

許容値以下となることを照査するように規定されているため、表-1 に示すゴム沓の変位追随の照査においても、変形量が許容値以下となるように照査されていた。表-1 に示すようにレベル1地震動作用時の橋軸直角方向の変形量が0.0%であるのは、レベル1地震動時の橋軸直角方向は固定とされているためである。レベル1、レベル2地震動に対する照査のいずれにおいても変形量は許容値以下であった。また、変形量はレベル2地震動に対するせん断変形の許容値 $\gamma=250\%$ の0.7倍となるせん断ひずみ（有効設計変位）である $\gamma=175\%$ 以下であった。

### 3. 実験概要

本章では、本試験で使用した実物ゴム支承の概要、試験システム、試験項目について示す。

#### (1) 実物ゴム支承

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）であり、2014年9月に製造されたものである。1辺が1050mm（有効寸法）の正方形断面を有し、ゴム1層厚34mm、ゴム層総数6層（ゴム層総厚204mm）、厚さ4.5mmの補強鋼板5枚、厚さ45mmの上下鋼板2枚で構成されている。せん断弾性係数 $G$ は $1.0\text{ N/mm}^2$ 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。また、等価剛性及び等価減衰定数の設計値はそれぞれ、 $5.606\text{ kN/mm}$ 、17.3%である。外観に有意な損傷は見られなかった。

#### (2) 試験システムと試験項目

本試験は、写真-2に示す（株）川金コアテック所有の大型二軸載荷試験機を使用した。表-2に二軸載荷試験機の仕様を示す。この試験機は鉛直載荷、水平載荷ともに上下の面板が稼働することによって荷重および変位を与え



写真-2 二軸載荷試験機

表-2 二軸載荷試験機の仕様

仕様	鉛直方向	水平方向
最大荷重	圧縮：24000 kN 引張：2400 kN	±10000 kN
最大変位	700 mm	±650 mm
最大速度	—	8.0 mm/s

表-3 試験条件

試験番号	試験方法	加振方向	鉛直荷重	ひずみ	加振変位	加振周波数	加振回数
		°	kN	%	mm	Hz	回
1	水平載荷	0°	6113.9	50	102	0.0125	6
2				100	204	0.0062	
3				150	306	0.0042	
4				175	357	0.0036	
5		45°		50	102	0.0125	
6				100	204	0.0062	
7				150	306	0.0042	
8*1				175	357	0.0036	
9	圧縮剛性	0°	最小：551.3 最大：13230	-	-	0.0167	3
10*2	引張剛性	0°	最小：-1103 最大：0	-	-	-	3

\*1：加振回数が増えるにつれて試験体と面板のズレが増大したため、5ループで試験を終了

\*2：予定では0~-1103kNであったが、設置した試験治具の都合により-500kNまでの実施

ることができる。この機能を用いて死荷重相当の鉛直載荷と同時に水平載荷を行った。表-3に試験条件を示す。以下に各試験内容を示す。なお、すべての試験は常温で実施した。

#### a) 0° 方向水平載荷試験

鉛直荷重として死荷重相当面圧を載荷した状態で、せん断ひずみ 50%，100%，150%，175%の試験を既往研究<sup>7)</sup>を参考に各6ループずつ行った。水平方向は変位制御により行い、0mm通過時に最大速度8.0mm/secとなるように加振周波数を調整した。本試験では、等価剛性と等価減衰定数により評価を行った。これらは、せん断ひずみ175%時の履歴曲線により式(1)、(2)を用いて等価剛性及び等価減衰定数を算出し、第5ループ目で代表させて特性値とした。なお、等価剛性と等価減衰定数は速度(周期)2sec、温度23°Cで補正後の値を示してある。

$$K_{eq} = \frac{P(\delta_{max}) - P(\delta_{min})}{\delta_{max} - \delta_{min}} \quad (1)$$

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

ここに、 $K_{eq}$ ：等価剛性 (kN/mm)

$h_{eq}$ ：等価減衰定数

$P(\delta_{max})$ ,  $P(\delta_{min})$ ：最大最小水平変位時の水平荷重 (kN)

$\delta_{max}$ ,  $\delta_{min}$ ：最大最小水平変位 (mm)

$W$ ：弾性ひずみエネルギー

$\Delta W$ ：履歴吸収エネルギー

である。

#### b) 45度方向水平載荷試験

載荷方向をゴム支承の角部方向に向けて、a)と同様な試験を行った。ただし、せん断ひずみ175%の試験において加振回数が増えることにつれて、試験体と面板のズレにともなう音が増大したため、5ループで試験を終了した。評価方法はa)と同様である。

#### c) 圧縮剛性試験

せん断ひずみを与えずに面圧0.5~12MPaのみの鉛直圧縮載荷を3ループ行った<sup>7)</sup>。本試験では、圧縮剛性により評価を行った。道路橋支承便覧<sup>8)</sup>に従い、3ループ

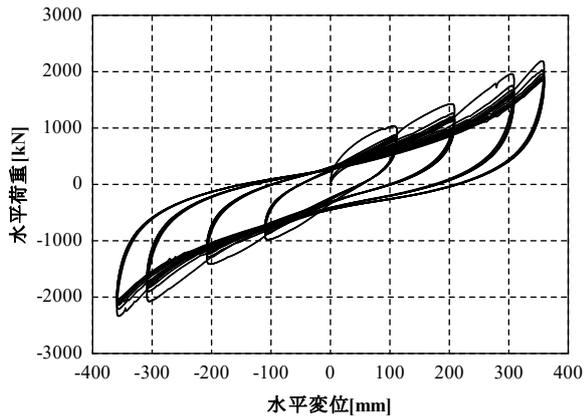


図-2 0°方向水平載荷試験結果



図-3 0°方向水平載荷試験状況

表-4 等価剛性と等価減衰定数の変化

	出荷時		本試験 (0°方向)		本試験 (45°方向)	
	等価剛性	等価減衰定数	等価剛性	等価減衰定数	等価剛性	等価減衰定数
	kN/mm	%	kN/mm	%	kN/mm	%
代表値	5.897	18.58	6.231	15.9	5.985	16.83
出荷時比率	—	—	106%	85%	101%	91%

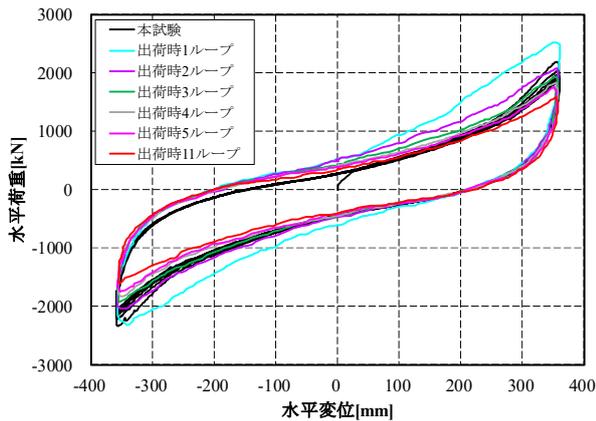


図-4 出荷時データとの比較

目の履歴における載荷時の面圧 1.5~6.0 MPa に相当する範囲の割線剛性を圧縮剛性とした。

#### d) 引張剛性試験

引張剛性試験については、変位制御により行った。せん断ひずみを与えずに面圧 0.0~1.0 MPa のみの鉛直引張荷重を 3 ループ実施予定であったが、設置した試験治具の都合により、-500 kN までの実施となった。また、プログラム制御による変位入力ができなかったため、手動による断続的な荷重として実施した。本試験では、引張剛性により評価を行った。3 ループ目の履歴における載荷荷重が圧縮から引張に変化した点から最大引張荷重までの範囲の割線剛性を引張剛性とした。

## 4. 実験結果

### (1) 0° 方向水平載荷試験

図-2、図-3 に 0° 方向水平載荷試験から得られた結果と載荷試験状況をそれぞれ示す。外観にき裂や膨れなどの異常な変形は見られなかった。175%変形時第 5 ループ目の最大水平荷重は 2065.6 kN、最大水平変位は 359.5 mm (目標変位: 357 mm) であった。各せん断ひずみともに、安定した履歴特性を有していた。また、各せん断ひずみにおいて、1 ループ目にせん断剛性が上昇し、それ以降徐々に低下し安定する Mullins 効果が確認された。この現象は初期載荷状態のゴム支承に見られ、一度経験すると、それ以降は経験したせん断ひずみでは見られない現象である。しかし、製作後せん断ひずみ 175% の出荷試験を経験した実物ゴム支承において同様な現象が見られたことから、これは、実物ゴム支承が除荷された状態で保管されており、ゴム分子と充填剤の結合がある程度回復したため<sup>8)</sup>であると考えられる。また、等価剛性は 6.231 kN/mm であり設計値に対して 111% の増加、等価減衰定数は 15.9% であり設計値に対して 92% に減少していた。

表-4 に両者の等価剛性と等価減衰定数の計算結果を示す。また、図-4 に実物ゴム支承の出荷時の水平性能試験の 1 ループ目から 5 ループ目、最終ループである 11 ループ目と本試験の 0° 方向せん断ひずみ 175% 試験結果を重ね合わせた荷重-変位曲線を示す。出荷時の水平性能試験では 1 ループ目と 2 ループ目の等価剛性を比較する

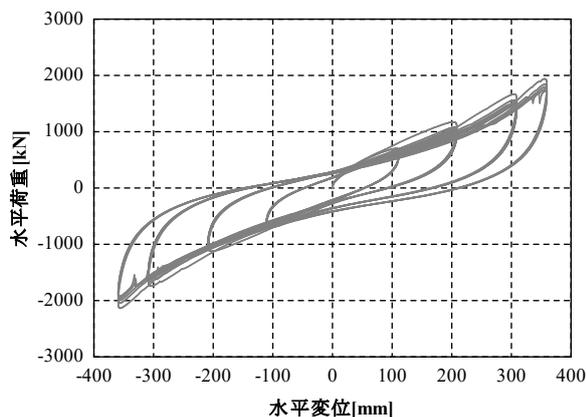


図-5 45°方向水平荷重試験結果

と 86%に剛性が低下となっており，0°方向水平荷重試験では 95%に剛性が低下となっている．0°方向水平荷重試験では，前述したとおり Mullins 効果は見られるが，出荷時ほどの 1 ループ目の剛性上昇は確認できなかった．これは繰り返し荷重における最大経験ひずみの違いであると考えられる．

また，0°方向水平荷重試験では 5 ループ目においても 1 ループ目と比較して等価剛性の減少が小さく，出荷時より値が増加している．この等価剛性の増加は経年劣化によるものであると考えられる．

## (2) 45° 方向水平荷重試験

図-5，図-6 に 45°方向水平荷重試験から得られた結果と試験状況をそれぞれ示す．外観にき裂や膨れなどの異状な変形は見られなかった．せん断ひずみ 175%変形時第 5 ループ目の最大水平荷重は 1923.9kN，最大水平変位は 359.4mm（目標変位：357mm）であった．各せん断ひずみとともに，安定した履歴特性を有していた．せん断ひずみ 175%変形時の履歴曲線に見られる水平荷重の低下は，試験体と試験機を締結しているせん断キーやボルト部の隙間の影響により，鉛直荷重に起因する摩擦力を越えた時点で発生したすべりによるものである．また，等価剛性は 5.985 kN/mm であり設計値に対して 107%に増加，等価減衰定数は 16.8%であり設計値に対して 97%に減少していた．0°方向荷重との比較は次節で検証する．

## (3) 0° 方向および 45° 方向水平荷重試験の比較

図-7 に 0°方向水平荷重試験および 45°方向水平荷重試験から得られた結果を比較した荷重－変位曲線を示す．Mullins 効果が 0°方向荷重ほど見られず，初期段階から安定していた．これは，本試験が 0°方向，45°方向荷重の順で実施したことによる繰り返し荷重の影響であると考えられる．この Mullins 効果の見られる部分を除けば，0°方向と 45°方向荷重の履歴特性が概ね一致することが確認できる．

以上の，履歴特性が 0°方向荷重と 45°方向荷重におい



図-6 45°方向水平荷重試験状況

て概ね一致する結果は，小型のゴム支承試験体を対象とした既往の研究結果<sup>9)10)</sup>と同様であり，実物大ゴム支承においても同様の結果が得られることが確認されたことから，既往の実験結果を裏付けることができる．

また，0°方向，45°方向荷重ともに出荷時試験と比較して等価剛性が増加し，等価減衰定数が減少した．0°方向については，等価剛性が 105%に増加，等価減衰定数が 84%に減少している．また，45°方向については，等価剛性が 101%に増加，等価減衰定数が 91%に減少している．これまでに設置から約 10 年が経過したゴムダンパー（HDR-S）を実橋から撤去して試験を行った結果，等価剛性が 143%に増加，等価減衰定数が 84%に減少していることが分かっている<sup>11)</sup>．これは，等価減衰定数は履歴面積と等価剛性が関係しているため<sup>12)</sup>，経年劣化によるゴムの硬化により等価剛性が増加し，等価減衰定数が減少したと考えられており，本研究結果についても同様の要因が考えられる．

## (4) 圧縮特性試験

図-8 に圧縮剛性試験結果を示す．面圧 12 MPa まで安定した履歴を有しており，圧縮剛性は 1680 kN/mm であった．外観にき裂や膨れなどの異状な変形は見られなかった．

## (5) 引張特性試験

図-9 に引張剛性試験結果を示す．荷重荷重方向の変位を正として表示した．引張剛性は 329.3 kN/mm であった．手動による断続的な荷重のため，荷重停止時に鉛直荷重の低下が見られるが，これは超高減衰ゴムの特性である粘性による応力緩和<sup>13)</sup>であると考えられる．また，外観にき裂や膨れなどの異状な変形は見られなかった．

以上の結果より，引張剛性は圧縮剛性と比較して低く，圧縮剛性に対する引張剛性の比率は 20%程度であることが確認された．

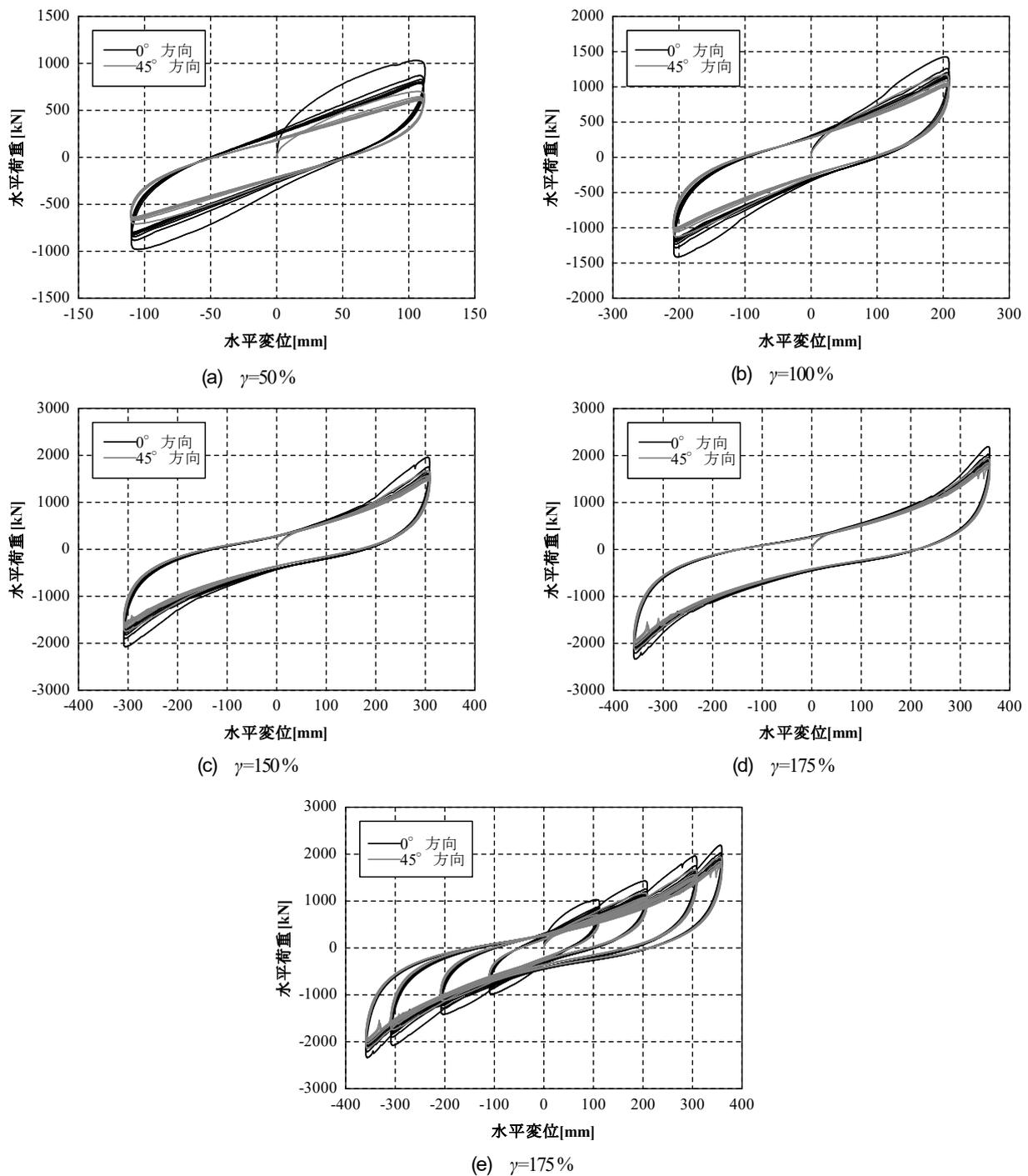


図7 0°方向および45°方向水平載荷試験の比較

## 5. 結論

本研究では、実物の超高減衰ゴム支承 (HDR-S) を対象とした性能検証試験として、ここでは載荷方向がゴム支承の変形挙動に及ぼす影響を把握するため、載荷方向を0°と45°方向の変形挙動を水平1方向試験により比較検討した。並びに、ゴム支承の軸方向特性を把握するため、単純圧縮、引張特性についても検討した。本研究から得られた結論は以下の通りである。

- 0°方向水平載荷試験より、実物ゴム支承に初期載荷

状態のゴム支承に見られる初期載荷時のせん断剛性の上昇が確認された。これはゴム支承が除荷された状態で保管された場合、ゴム分子と充填剤の結合がある程度回復する現象によると考えられる。

- 0°方向および45°方向水平載荷試験の履歴特性は概ね同様であった。この実物大のゴム支承の実験結果は、小型のゴム支承試験体を対象とした既往の研究結果と同様であり、既往の実験結果を裏付けることができた。
- 0°方向、45°水平載荷試験ともに等価剛性が上昇し、

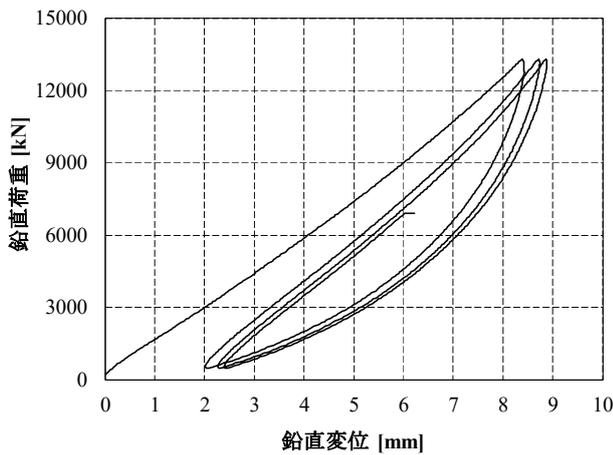


図-8 圧縮特性試験

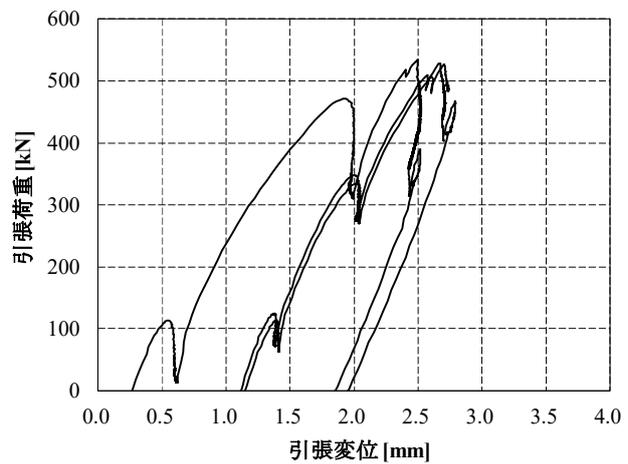


図-9 引張特性試験

等価減衰定数が減少した。これは、経年劣化によりゴムが硬化することで等価剛性が上昇し、等価減衰定数の算出式の特性上、それにともない等価減衰定数が減少したと考えられる。

- ・ 圧縮特性は面圧 12 MPa まで安定した履歴を有していること、引張剛性は圧縮剛性と比較して低く、圧縮剛性に対する引張剛性の比率は20%程度であることが確認された。また、引張剛性試験において、断続的載荷時に鉛直変位が一定にもかかわらず荷重が低下する応力緩和が確認された。

謝辞：浜松市役所様、瀧上工業株式会社様には、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) (株)日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.4.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1996.12.
- 3) 山田金喜，曾田信雄，木水隆夫，広瀬剛，早坂洋平，名古屋和史：東北地方太平洋沖地震により被災した東部高架橋の被災要因の推定について，第15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，2012.7.
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所：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，国総研資料，第814号，2014-Dec..
- 5) 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.
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所：平成28年（2016年）熊本地震土木施設被害調査報告，国総研資料，第967号，2017-Mar..
- 7) 袁涌，青木徹彦，山本吉久：高減衰積層ゴム支承の動的特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.51A，2005年3月.
- 8) 中村昌弘：低温環境下における高減衰ゴム支承および耐震緩衝材の機能特性に関する研究，技術報告，北見工業大学，2010. 博士（工学），乙第22号，00001570020.
- 9) 阿部雅人，吉田純司，藤野陽三：免震用積層ゴム支承の水平2方向を含む復元力特性とそのモデル化，土木学会論文集，No.696/I-58，pp.125-144，2002.1.
- 10) 五十嵐晃，党紀，村越雄太，伊藤俊彦：免震ゴム支承の水平2方向復元力特性に関する載荷実験および復元力モデルの比較検討，土木学会論文集，Vol.69，No.4，pp.311-325，2013.
- 11) 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，第73回年次学術講演会，2018.8.
- 12) 大門大，中山裕昭，水谷明嗣，林田慈大，鈴木森晶，後藤芳顕：経年劣化により損傷したゴムダンパー（HDR-S）の耐震性能の確認試験および考察，第18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（2015年7月）.
- 13) 吉田純司，阿部雅人，藤野陽三：高減衰ゴム材料の構成則，土木学会論文集，No.710，I-60，pp.209-224，2002.7.

(2018. 9. 7 受付)

# EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON INFLUENCE OF LOADING DIRECTION ON DEFORMATION BEHAVIORS OF ACTUAL SUPER HIGH DAMPING RUBBER BEARING

Yuta MEZAKI, Koji KINOSHITA, Takehiko HIMENO and Toru OZAWA

From the damage experience that occurred at a large earthquakes, studies on basic performance and seismic performance on rubber bearings become active. In particular, data accumulation for actual rubber bearings are useful.

This study aims to investigate the loading direction of deformation behaviors on actual rubber bearing, so that this study performed loading test of actual super high damping rubber bearing. This study compared the deformation behavior on loading direction of  $0^\circ$  and  $45^\circ$  by horizontal uniaxial testing. As a result, hysteresis loops of  $0^\circ$  agree well with that of  $45^\circ$  and this result is similar to results of previous study.