

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的検討

目崎 裕太¹・木下 幸治²・姫野 岳彦³・小澤 亨⁴

¹学生会員 岐阜大学大学院 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 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

³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)

⁴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)

1. はじめに

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が、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いる¹⁾。しかし、東北地方太平洋沖地震および熊本地震において、ゴム支承の破断やき裂などの損傷が生じている^{例えば2),3)}。

このような我が国における大規模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行われてきており、今後も、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方向試験により比較検討した。並びに、ゴム支承の軸方向特性の把握を目的として、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. 実物ゴム支承の実験概要

(1) 実物ゴム支承試験体

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。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、図-2に示す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-1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-2に試験条件を示す。以下に、各試験内容を示す。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⁴⁾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、0 mm通過時に最大速度8.0 mm/sとなるように加振周波数を調整した。

b) 45° 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。

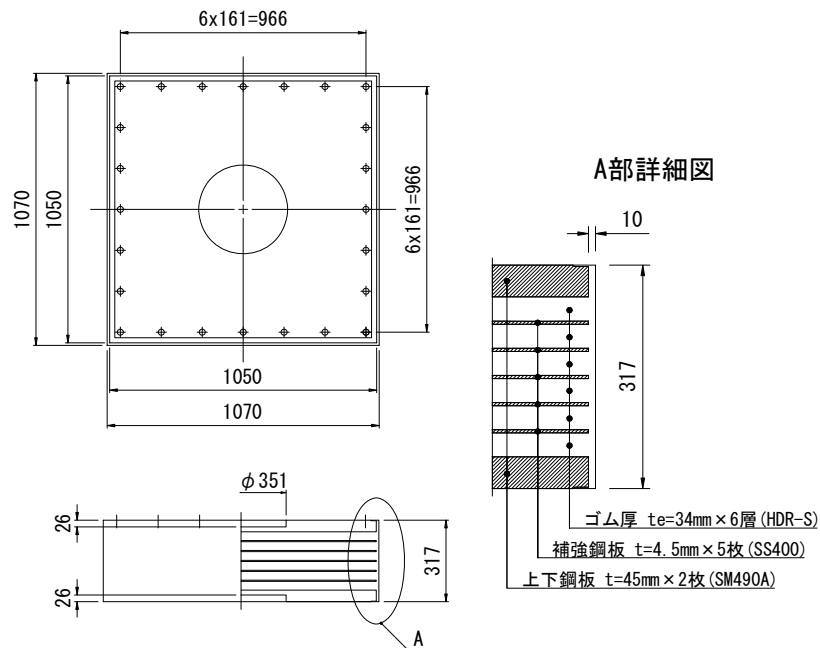


図-1 ゴム支承概要 (単位 : mm)



図-2 二軸載荷試験機

表-1 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-2 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	-	-	0.0167	3
			最大：13230				
10* ²	引張剛性	0°	最小：-1103	-	-	-	3
			最大：0				

*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、試験機のリミッターが作動して-500kNまでの実施

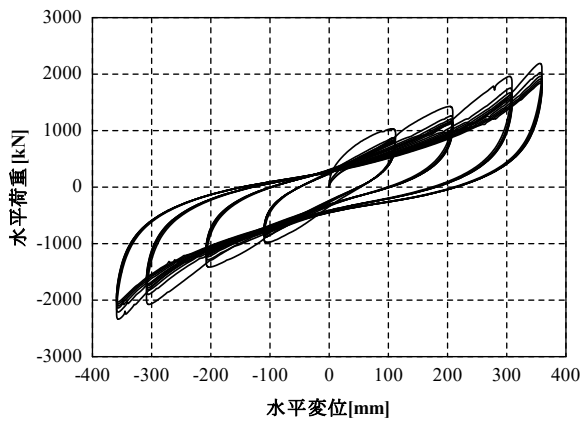


図-3 0°方向水平載荷試験結果

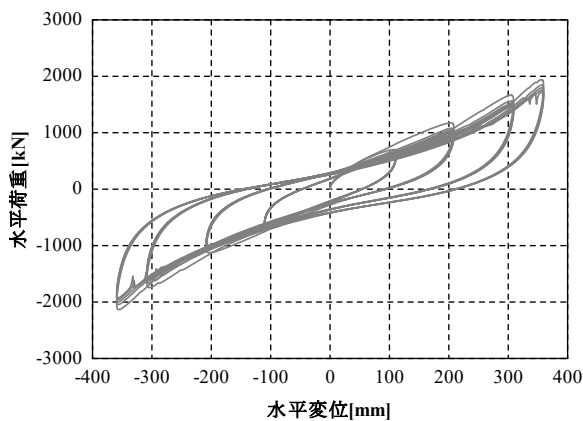


図-5 45°方向水平載荷試験結果

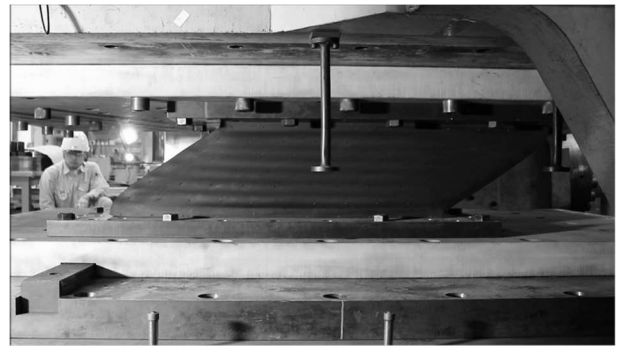


図-4 0°方向水平載荷試験状況



図-6 45°方向水平載荷試験状況

c) 圧縮剛性試験

せん断ひずみを与えずに面圧0.5～12 MPaのみの鉛直圧縮載荷を3ループ行ったり。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¹⁾に従い、3ループ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のみの鉛直引張載荷を3ループ実施予定であったが、試験機のリミッターが作動したため、-500 kNまでの実施となった。また、本試験では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載荷として実施した。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。

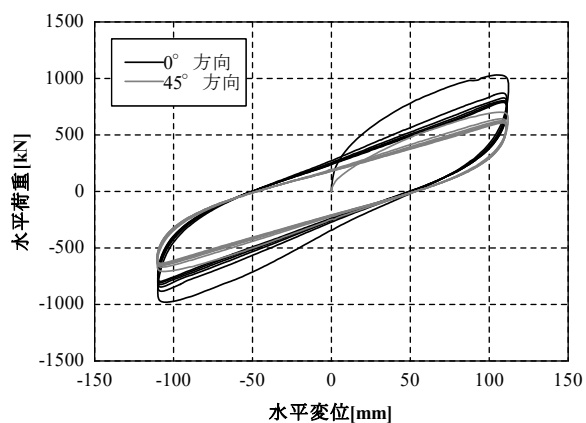
3. 実験結果

(1) 0° 方向水平載荷試験

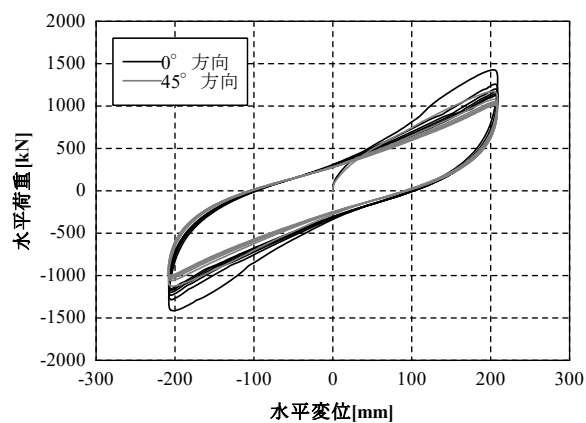
図-3、図-4に0°方向水平載荷試験から得られた結果と載荷試験状況をそれぞれ示す。175 %変形時の最大水平荷重は2109.9 kN、最大水平変位は359.5 mm（目標変位：357 mm）であった。各せん断ひずみともに、安定した履歴特性を有していた。各せん断ひずみにおいて、1ループ目にせん断剛性が上昇し、それ以降徐々に低下し安定するMullins効果が確認された。この現象は初期載荷状態のゴム支承に見られ、一度経験すると、それ以降は経験したせん断ひずみでは見られない現象である。しかし、製作後せん断ひずみ175 %の出荷試験を経験した実物ゴム支承において同様な現象が見られたことから、これは、実物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⁵⁾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。

(2) 45° 方向水平載荷試験

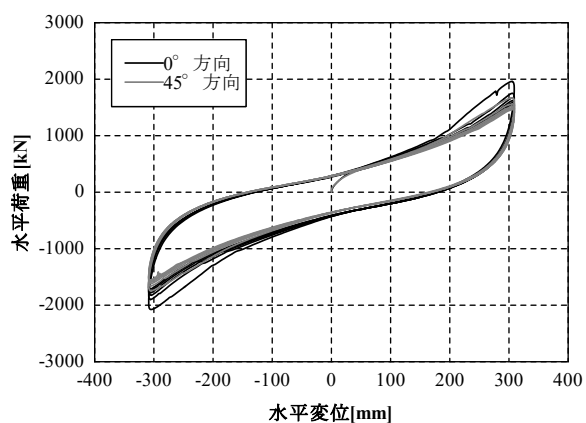
図-5、図-6に45°方向水平載荷試験から得られた結果と試験状況をそれぞれ示す。せん断ひずみ175 %変形時の最大水平荷重は2009.3 kN、最大水平変位は359.5 mm（目標変位：357 mm）であった。各



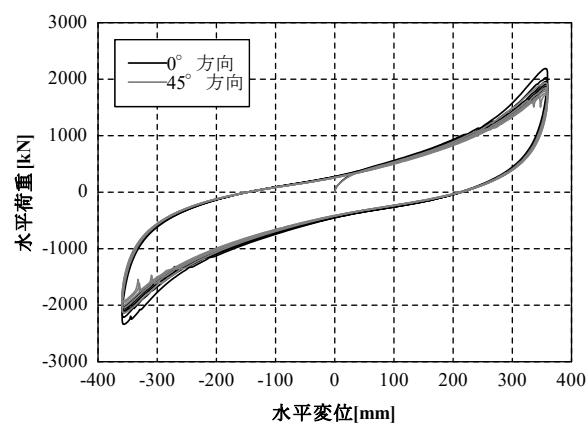
(a) $\gamma=50\%$



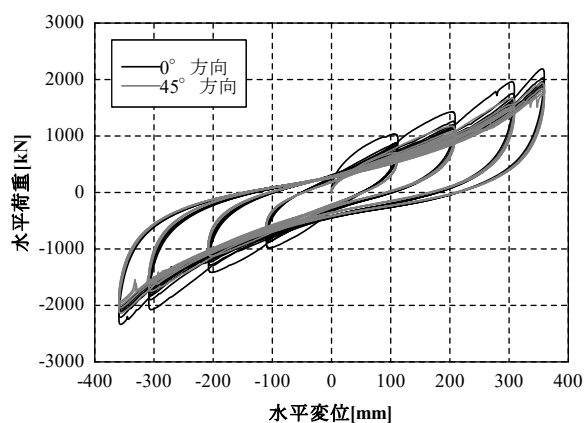
(b) $\gamma=100\%$



(c) $\gamma=150\%$



(d) $\gamma=175\%$



(e) $\gamma=50\%, 100\%, 150\%, 175\%$

図-7 0°方向および45°方向水平載荷試験の比較

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、外観にき裂や膨れなどの異状な変形は見られなかった。0°方向載荷との比較は次節で検証する。

(3) 0° 方向および45° 方向水平載荷試験の比較

図-7に0°方向水平載荷試験および45°方向水平載荷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°方向載荷ほど見られず、当初から安定していた。これは、本試験が0°方向、45°方向載荷の順で実施したことによる繰り返し載荷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°方向載荷の履歴

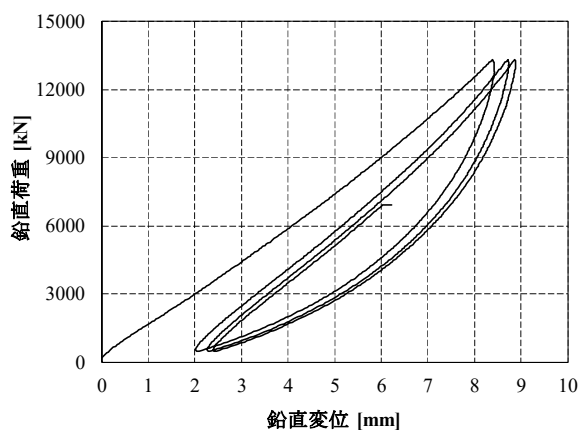


図-8 圧縮剛性試験

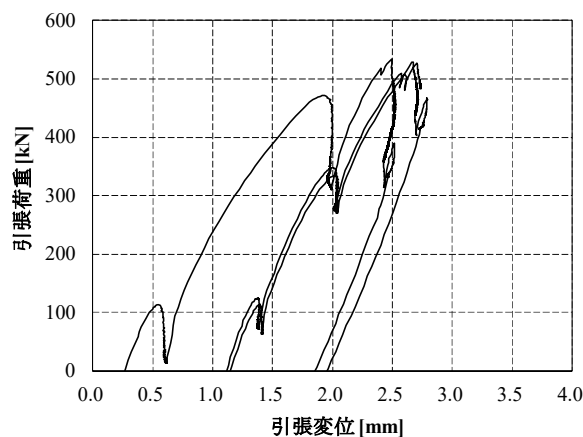


図-9 引張剛性試験

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°方向載荷と45°方向載荷におい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^{6),7)}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。

(4) 圧縮剛性試験

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) 引張剛性試験

図-9に引張剛性試験結果を示す。荷重載荷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。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。

4. 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。
- ・ 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。

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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.

- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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，No4，pp.311-325，2013.