

積層ゴム支承の水平方向大ひずみ正負交番繰返し载荷実験

植田 健介¹・今井 隆²・崔 準祐³

¹正会員 ゴム支承協会技術委員会 委員（〒107-0051 東京都港区元赤坂1丁目5-26 東部ビル）
²正会員 ゴム支承協会技術委員会 委員長（〒107-0051 東京都港区元赤坂1丁目5-26 東部ビル）
³正会員 博（工） 九州大学大学院 工学研究院 助教（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地）

1. はじめに

平成23年東北地方に未曾有の災害をもたらした東北地方太平洋沖地震では、平成8年の道路橋示方書でレベル2地震動に対して道路橋の設計が行われるように基準化されて以降、多くの橋梁で採用されている積層ゴム支承の破断が報告された¹⁾。それら破断した積層ゴム支承の中には、3月11日の本震では損傷が確認されず4月7日の余震後に損傷が確認されたものがあつた。積層ゴム支承の終局限界状態は、一般的に水平変位単調载荷試験における破断またはせん断力の急激な低下などの安定性の失われた状態に対するひずみで評価しており、レベル2地震動に相当する大規模地震で支承部に生じるひずみ領域での繰返し回数がゴム支承の破断または力学特性の変化に与える影響については十分な知見が得られていない。そこで本研究では、現在用いられている積層ゴム支承を対象に、許容値前後の大ひずみによる水平方向正負交番繰返し载荷実験を実施し、大ひずみ領域でのゴム支承の繰返し挙動について調査した。

2. 実験概要

(1) 実験目的と実験供試体

本実験は、九州大学大学院とゴム支承協会で実施している「大規模地震を経験したゴム支承の残存耐震性評価に関する研究」において、水平繰返し载荷回数とゴム支承のせん断ひずみをパラメータとした実験を行うにあたり、载荷条件や供試体寸法を決定するための予備実験として実施したものである。実験は、天然ゴムを使用した線形性能をもつ積層ゴム（以下RB）と高減衰ゴム系積層ゴム（以下HDR）および鉛プラグ入り積層ゴム（以下LRB）各3体に対して行った。RBとLRBはJIS K 6411における標準試験体No.2の形状を用い、HDRは本研究とは異なる実験のために製作され実験に使用されなかった予備の供試体を用いている。実験供試体の形状を図-1に、諸元を表-1に示す。なお、ここでいうHDRは平成16年版道路橋支承便覧の参考資料に記載されている高減衰ゴムよりも減衰性能を高めたいわゆるHDR-Sのことを示している。

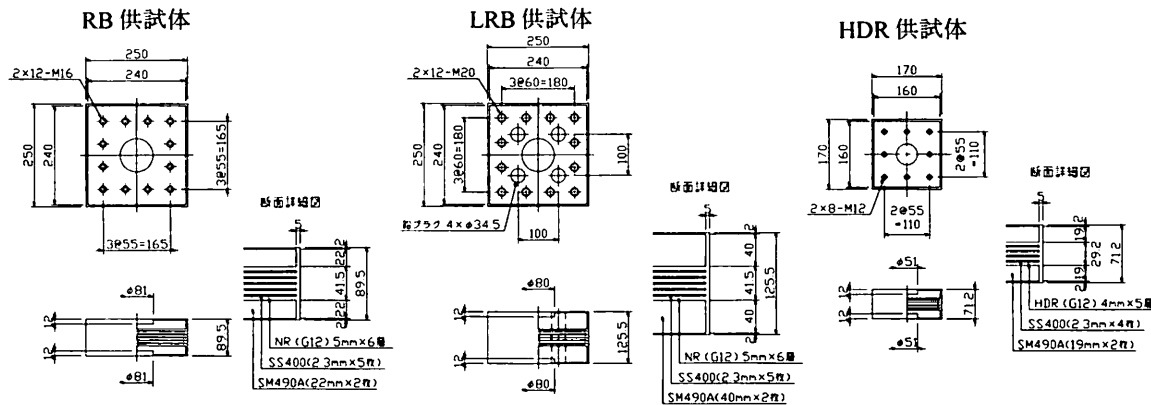


図-1 実験供試体

表-1 実験供試体諸元

		RB	LRB	HDR
平面形状	(mm)	240×240	240×240	160×160
単層厚	(mm)	5	5	4
積層数	(層)	6	6	5
総ゴム厚	(mm)	30	30	20
鉛プラグ径	(mm)	—	34.5	—
鉛プラグ数	(本)	—	4	—
一次形状係数	—	12.00	11.22	10.00
二次形状係数	—	8.00	8.00	8.00
ゴム材料の呼び	—	GI2	GI2	GI2

表-3 実験供試体諸元 (LRB)

		LRB		
		LRB_No.1	LRB_No.2	LRB_No.3
圧縮応力度	(N/mm ²)	10.0	6.0	10.0
せん断ひずみ	(%)	250%	300%	300%
1セットの繰返し回数	(回)	15	10	10
セット数	(セット)	7	5	5
合計繰返し回数	(回)	105	50	50
インターバル	—	8時間以上		

(2) 載荷条件

実験は、2軸試験機により鉛直方向に一定の圧縮力を載荷した状態でせん断変形を正負交替で繰返し与えて実施した。載荷条件を表-2～表-4に示す。なお、合計の繰返し回数は供試体の外観と荷重-変位の履歴データを確認しながら決定し、試験機はRB, LRB, HDRそれぞれ供試体を提供した製造会社のものを使用して行った。

a) RB

RBでは、圧縮力を一定にし、1回の載荷における繰返し回数の影響をみるために250%せん断ひずみで1セット10回の繰返しを10セット、1セット50回の繰返しを2セットで加振し、せん断ひずみの影響をみるために300%せん断ひずみで1セット10回の繰返しを10セットでそれぞれ加振した。圧縮力はJIS K 6411のせん断特性試験における規定値である圧縮応力度6N/mm²に相当する力を載荷している。なお、RBでは加振による供試体の発熱の影響は少ないと考えられることから、セット間のインターバルはセット毎のデータを確認する為の時間としたが、試験機の油温の上昇に伴い、油温を下げるため多少長くインターバルを取ったケースもあった。

b) LRB

LRBでは、圧縮力による影響を確認するため圧縮応力度6N/mm²に相当する力とより厳しい条件と考えられる圧縮応力度10N/mm²に相当する力を載荷し、300%せん断ひずみで加振した。また、せん断ひずみによる影響を調べるために圧縮応力度10N/mm²に相当する力を圧縮力として載荷し250%せん断ひずみで加振するケースも実施した。各セット間のイン

表-2 実験供試体諸元 (RB)

		RB		
		RB_No.1	RB_No.2	RB_No.3
圧縮応力度	(N/mm ²)	6.0	6.0	6.0
せん断ひずみ	(%)	250%	250%	300%
1セットの繰返し回数	(回)	10	50	10
セット数	(セット)	10	2	10
合計繰返し回数	(回)	100	100	100
インターバル	—	5分程度※		

※ 試験機の油温を下げるため長い目のインターバルを取ったケース有り

表-4 実験供試体諸元 (HDR)

		HDR		
		HDR_No.1	HDR_No.2	HDR_No.3
圧縮応力度	(N/mm ²)	6.0	6.0	10.0
せん断ひずみ	(%)	200%	300%	300%
1セットの繰返し回数	(回)	10	5	5
セット数	(セット)	53	22	28
合計繰返し回数	(回)	530	110	140
インターバル	—	8時間以上		

ターバルは積層ゴム本体の発熱の影響を考慮し8時間以上とし、実質的には各供試体を1日に1セットずつの加振とした。

c) HDR

HDRでは、LRBと同様に圧縮応力度6N/mm²と圧縮応力度10N/mm²に相当する力を圧縮力として載荷した状態で300%せん断ひずみの加振を行ったケースと、せん断ひずみの影響を調べるため圧縮応力度6N/mm²に相当する力を圧縮力として載荷し200%せん断ひずみで加振するケースを実施した。セット間のインターバルはLRBと同様8時間以上として実験を行った。

3. 実験結果

(1)RB

RB の等価剛性の繰返し回数に対する変化率を図-5に示す。どの供試体も繰返し回数3回目の等価剛性を基準とし、各セットの最終サイクルのデータを塗りつぶして表記している。どのケースにおいても繰返し回数初期に大きく剛性が低下し、その後緩やかな剛性低下となり、最終の変化率はRB_No.1 が 0.86, RB_No.2 が 0.84, RB_No.3 が 0.79 となった。同じせん断ひずみ 250%のRB_No.1 と RB_No.2 を比較すると、最終の変化率に大きな差はないが、変化率 0.90 を下回ったのがRB_No.1 は 40 回付近であるのに対して、RB_No.2 は 20 回付近となっている。この差異はせん断ひずみの繰返しによる積層ゴムの内部温度の上昇の

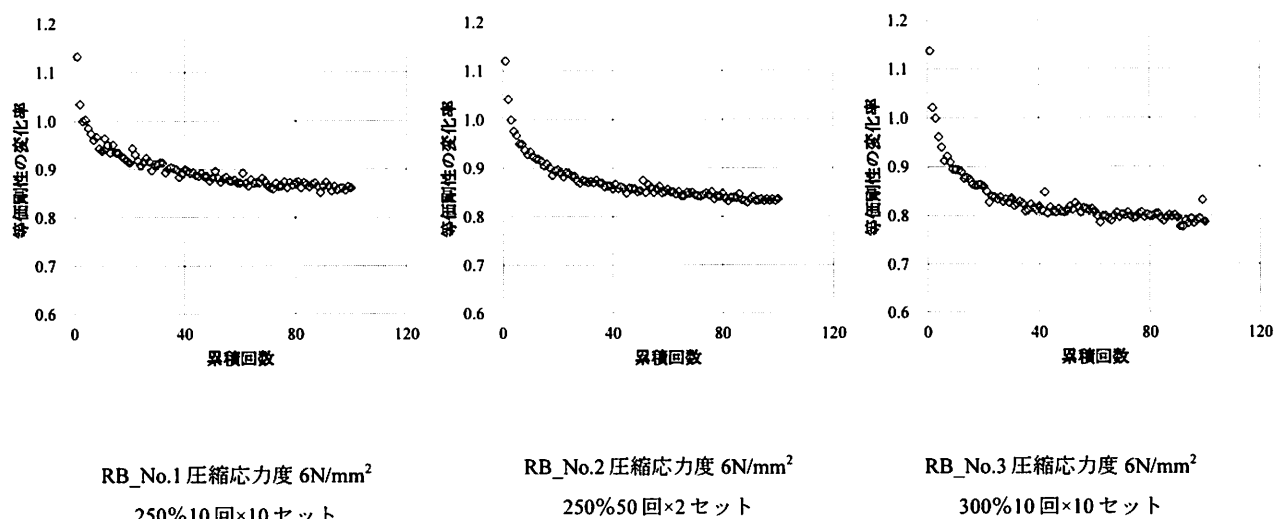


図-3 RB 実験結果

早さの違いと考えられる。RB_No.1 では各セット中の繰返しにより低下していた剛性がインターバルにより 2～3%程度戻る傾向をセット数初期では示していたが、セット数後半では剛性の戻りが見られなくなった。これはセット数初期の段階では加振により積層ゴム内部で発生した熱量が少ないため、インターバルの間にある程度積層ゴム表面や上下面から熱が放出されることで剛性が戻っていたが、セット数が進むに従いインターバル間で放出出来なかった熱が蓄積されることで剛性が戻らなくなったと思われる。一方、RB_No.2 では 1 セットあたりの繰返し回数が多いことで積層ゴム内部の温度上昇が RB_No.1 に比べて早く、それに伴い剛性低下も早い回数で進展したと考えられる。最終の変化率に大きな差がみられなかったのは、合計の繰返し回数が進むと発生する熱と放出される熱のバランスが取られることで積層ゴムの内部温度が安定し、かつ蓄積された熱もインターバルによる影響が少なくなる程度の熱量になったためではないかと思われる。

RB_No.3 では変化率が 0.9 を下回ったのが 10 回付近と RB_No.2 よりも更に早い回数となっている。インターバルによる剛性の回復も殆んどみられず、最終の低下率は基準値に対して 20%以上の低下となり、せん断ひずみによる影響が確認された。

(2) LRB

LRBの繰返し回数に対する等価剛性、等価減衰定数および吸収エネルギーの変化率を図-4に示す。LRBでは繰返し回数5回目の値を基準とした変化率で表し、RBと同様に各セットの最終サイクルのデータを塗りつぶして表記している。ここで5回目の値を基準としたのは、現在免震支承の水平特性は初期载荷の影響を除いた10回の正負交番载荷試験により評価しているが²⁾、1波目を含んだ5波目

の特性がその平均値とほぼ同等である³⁾ことを理由としている。また、各セットの5波目の値が基準値に対してどのように変化したかを示したものが図-5である。

図-4をみるとどの供試体でも各セット内では繰返しとともに等価剛性と吸収エネルギーは低下する傾向は同じであるが、図-5をみると250%せん断ひずみにより加振したLRB_No.1では各セットの5波目の等価剛性は0.93～0.94、吸収エネルギーは0.97～1.05とあまり変化しないのに対して、300%せん断ひずみにより加振したLRB_No.2およびLRB_No.3ではセット数が進むに従い等価剛性および吸収エネルギーが低下し、最終セットの等価剛性がLRB_No.2で0.82、LRB_No.3では0.81、吸収エネルギーがLRB_No.2で0.86、LRB_No.3では0.89であり、せん断ひずみの違いによる影響があることが分かった。しかし圧縮応力度による影響を示す顕著な傾向は確認できなかった。

(3) HDR

HDRの繰返し回数に対する等価剛性、等価減衰定数および吸収エネルギーの変化率を図-6に示す。LRBと同様に繰返し回数5回目の値を基準とし、各セットの最終サイクルのデータを塗りつぶして表記している。RBおよびLRBでは等価剛性の変化は繰返し回数に伴い低下していたが、HDRでは上昇し、300%せん断ひずみによる加振を行ったHDR_No.2およびHDR_No.3では上昇のピークを迎えたあと等価剛性は低下した。

これに対し200%せん断ひずみによる加振を行ったHDR_No.1では等価剛性の上昇は400回付近で収まり、その後はほぼ一定の値を示し530回の繰返し回数の範囲では等価剛性の低下は確認されなかったことから、せん断ひずみの違いによる影響があることがわかる。図-7の結果では等価剛性の変化率は、

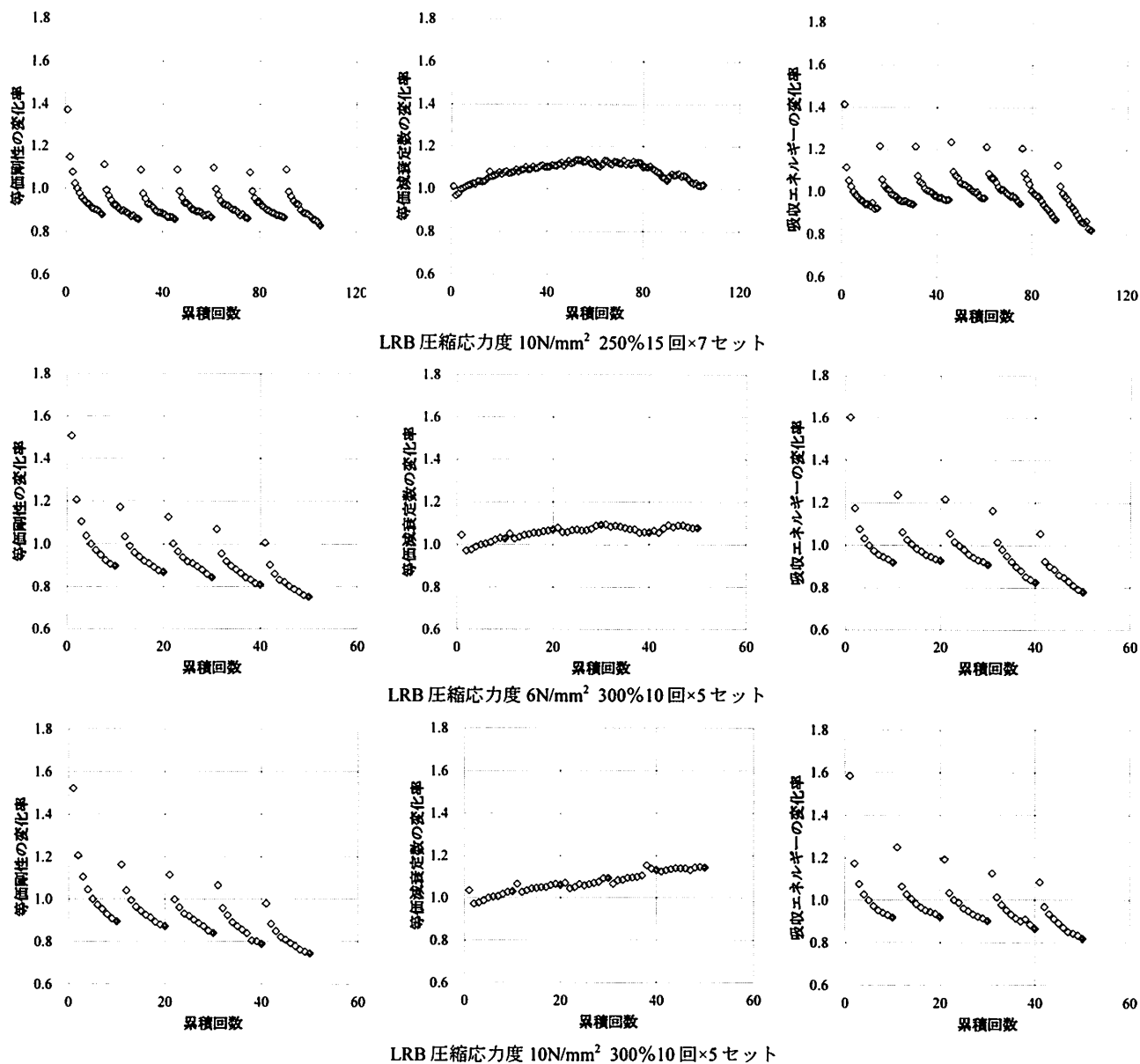


図-4 LRB 実験結果

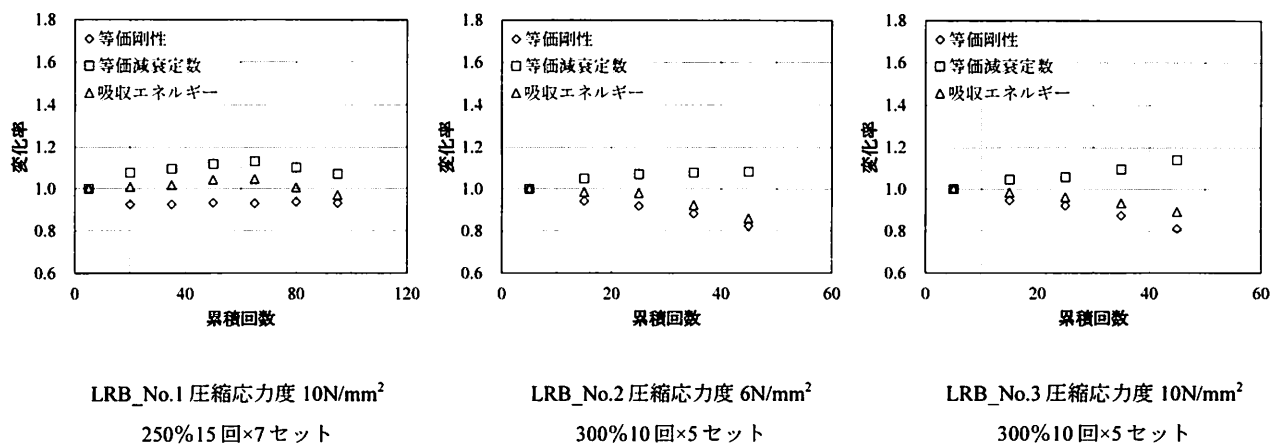
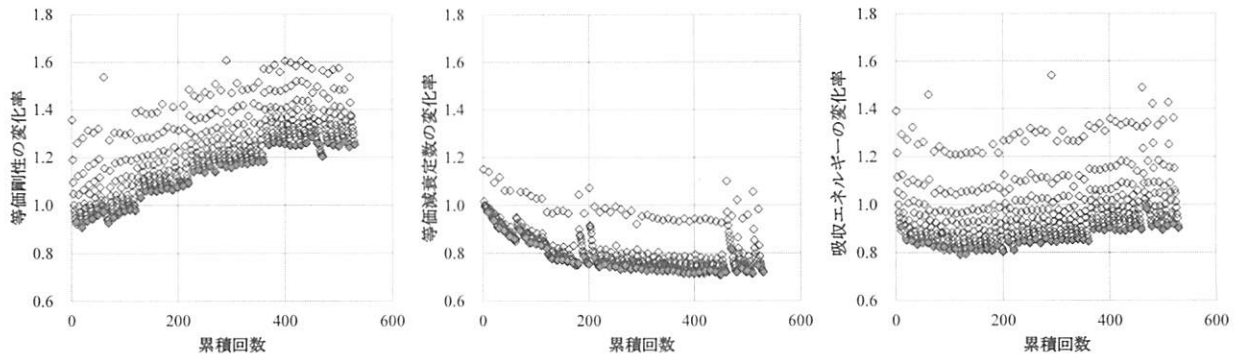
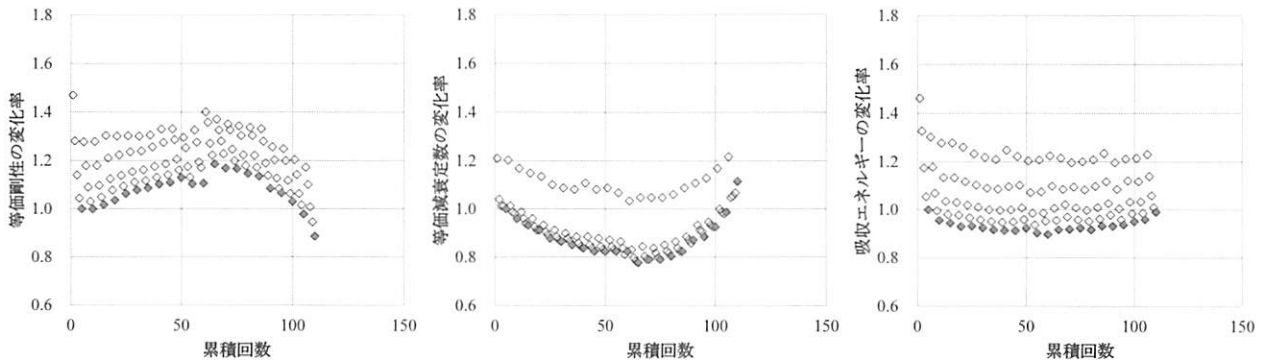


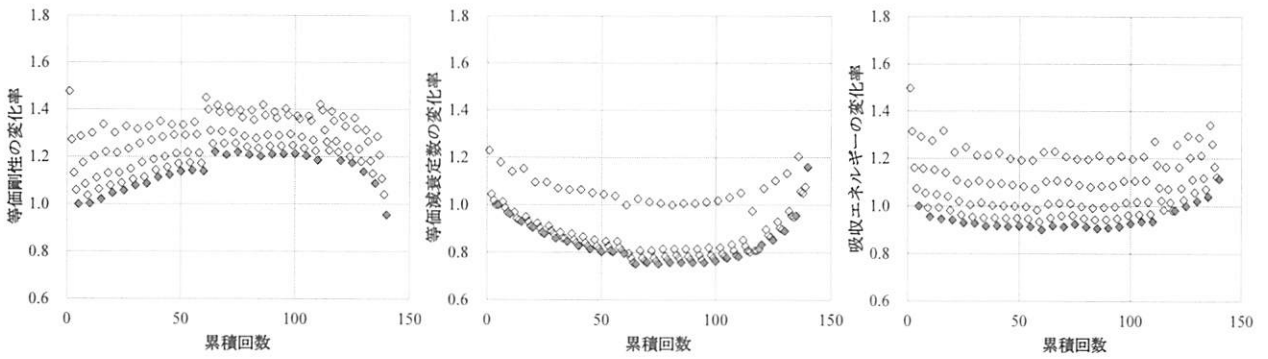
図-5 LRB 実験結果 (各セット 5 波目)



HDR 圧縮応力度 6N/mm^2 200%10回×53セット

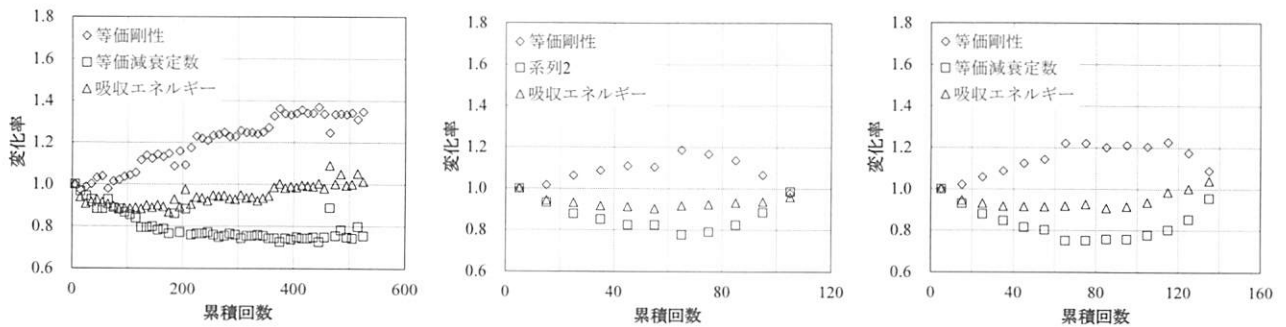


HDR 圧縮応力度 6N/mm^2 300%5回×22セット



HDR 圧縮応力度 10N/mm^2 300%5回×28セット

図-6 HDR 実験結果



HDR_No.1 圧縮応力度 6N/mm^2
200%10回×53セット

HDR_No.2 圧縮応力度 6N/mm^2
300%5回×22セット

HDR_No.3 圧縮応力度 10N/mm^2
300%5回×28セット

図-7 HDR 実験結果 (各セット 5 波目)

HDR_No.1で0.97～1.37, HDR_No.2で0.98～1.19, HDR_No.3では1.02～1.23であったのに対し, 吸収エネルギーはHDR_No.1が0.87～1.09, HDR_No.2が0.90～0.96, HDR_No.3が0.91～1.04と等価剛性に比べて変化の幅は小さかった。

また, 圧縮応力度の異なるHDR_No.2とHDR_No.3では圧縮応力度の低いHDR_No.2が等価剛性の上昇後の低下が早く起こっていることから, 圧縮応力度の違いが等価剛性の変化に影響を与えていることが考えられる。

4. まとめ

現在用いられている積層ゴム支承を対象に, 許容値前後の大ひずみによる水平方向正負交番繰返し載荷実験を実施し, 大ひずみ領域でのゴム支承の繰返し挙動について調査し以下のような結果を得た。

(1) RB

RBに一定の圧縮力を載荷した状態でせん断ひずみと1セットあたりの繰返し回数を変えながら1供試体あたり100回の水平方向正負交番繰返し載荷を行った。

- ・繰返し回数3回目を基準にした等価剛性の変化率は, 250%せん断ひずみによる載荷で0.84～0.86, 300%せん断ひずみによる載荷で0.79となった。
- ・1セットあたりの繰返し回数は, 載荷初期の低下率には影響があったが, 最終的な等価剛性の低下率への影響は小さかった。

(2) LRB

LRBに対しては圧縮力とせん断ひずみに着目して実験を実施し, 繰返し回数5回目のサイクルを基準として等価剛性, 等価減衰定数および吸収エネルギーの変化率を調べた。

- ・250%せん断ひずみによる加振では各セット5波目の変化率の最大は, 等価剛性が0.93, 吸収エネルギーが0.97であったのに対して300%せん断ひずみによる加振における変化率の最大は同じ圧縮力を載荷した状態で等価剛性が0.81, 吸収エネルギーが0.89とせん断ひずみの違いによる影響が確認された。
- ・同じ300%せん断ひずみによる加振に対し 6N/mm^2 と, 10N/mm^2 の圧縮応力度で載荷した等価剛性の変化率の最大が0.82と0.81, 吸収エネルギーの変化率の最大が0.86と0.89と差は少なく圧縮力の違いによる影響はそれほど大きくないことが確認さ

れた。

(3) HDR

HDRでもLRBと同様せん断ひずみと圧縮力に着目して繰返し回数5回目のサイクルを基準とした等価剛性, 等価減衰定数および吸収エネルギーの変化率を調べた。

- ・HDRの加振ではRBやLRBと異なり繰返し回数に対して等価剛性が上昇する現象が確認された。300%せん断ひずみによる加振では上昇後に等価剛性の低下が確認されたが, 200%せん断ひずみによる加振では等価剛性の低下は確認されなかったことから, せん断ひずみの違いが挙動に影響することが分かった。
- ・同じ300%せん断ひずみによる加振では, 圧縮応力度の低い場合の方が等価剛性の上昇後の低下が早く起こっていることから圧縮力の違いによる影響が確認された。

今回得られた結果はRB, LRB, HDRそれぞれ1種類の形状に対して実施した実験によるものであるが, 現在使用されている地震時の許容ひずみ内の繰返しの変形に対しては特性値の変化は顕著ではなく, 50回程度の繰返しによる等価剛性の変化は20%を超えたものはなく, 250%の許容せん断ひずみの上限値の1.2倍に相当する300%せん断ひずみで直ちに終局状態となることもなかった。このような結果を参考に今後実施する実験の供試体形状および載荷条件の選定に反映させて大規模地震を経験した積層ゴムの残存耐震性能の評価に繋げていきたい。

謝辞：今回実験にあたり予備の供試体を提供して頂いた（国研）土木研究所寒地土木研究所の関係者と実験供試体の提供および試験に協力して頂いた㈱ブリヂストン, 東京ファブリック工業㈱, ㈱ビービーエムの関係者ならびに実験へのご意見を賜りましたゴム支承協会技術委員の皆様にご感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) (社)日本道路協会, 道路橋支承便覧, pp.197-205, 2004.
- 3) T.Imai, A.R.Bhuiyan, M.K.Razzaq, Y.Okui, and H.Mitamura：Experimental studies of rate-dependent mechanical behavior of laminated rubber bearings. JOINT CONFERENCE PROCEEDINGS 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) & 5th International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE), pp.1921-1928, 2010