

大地震を経験したゴム支承の 残存耐震性評価に関する実験的研究

崔 準祐¹・岩本 周哲²・今井 隆³・植田 健介⁴・和氣 知貴⁵・山崎 智彦⁶

¹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)

E-mail:choi@doc.kyushu-u.ac.jp

²学生会員 九州大学大学院 修士課程 建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

E-mail:iwamoto@doc.kyushu-u.ac.jp

³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丁目5-26 東部ビル)

E-mail:imai@mgb.gr.jp

⁴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丁目5-26 東部ビル)

E-mail:ueda@mgb-gouda.co.jp

⁵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丁目5-26 東部ビル)

E-mail:wake@oiles.co.jp

⁶正会員 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

E-mail:t-yama@doc.kyushu-u.ac.jp

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、複数個所の道路橋においてゴム支承が破断や亀裂が生じる被害が発生した。それらの破断したゴム支承の中には、3月11日の本震では損傷が確認できなかったにもかかわらず、4月7日の余震後に損傷が確認されたものもあり、継続時間の長い本震と多数回の余震により繰り返し振動でゴム支承が損傷していた可能性も考えられる。そこで本研究では、大規模地震を経験したゴム支承の残存耐震性を確認するため、鉛プラグ入り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り返し載荷実験を実施し、ゴム支承の水平耐力、等価剛性、等価減衰定数、履歴吸収エネルギー、損傷状況などを分析し、繰り返し載荷回数がこれらゴム支承のせん断変形性能に及ぼす影響、また大ひずみのせん断変形を経験したゴム支承の残存耐震性について明らかにした。

Key Words : rubber bearing, cycling loading test, residual seismic performance

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震では、橋梁に設置された支承が大きな被害を受けたことから、それ以降、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た。そして、この道路橋示方書の改定に伴い、橋梁に作用する地震力の分散や橋梁の免震化を目的に積層ゴム支承（以下、ゴム支承）を採用し、耐震性能の向上が図られてきた。しかし、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、仙台東部道路を始め仙台北部道路や東水戸道路など、複数個所の道路橋においてゴム支承が破断や亀裂が生じる被害が発生した¹⁾。東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会の報告書²⁾によれば、仙台北部道路利府高架橋においては、3月11日の本震後の緊急点検では3基のゴム支承において破断が確認さ

れていたが、4月7日の余震（マグニチュード7.4）後の点検では、8基のゴム支承が新たに破断していたと報告されている。また、これらの被害は、本震により損傷した3基のゴム支承が水平力支持機能を失ったことで水平力分担のバランスが崩れ、4月7日の余震で新たな損傷が生じた可能性があるとしている。しかし、応答制御建築物調査委員会報告書³⁾によれば、継続時間の長い本震と多数回の余震により繰り返し振動を受けて免震装置に変状が発生した例があるとの報告もされており、該当支承が東北地方太平洋沖地震のような継続時間の長い巨大地震や複数回の大規模地震を経験していたとすれば、ゴム支承が耐震性を損なっていた状態で余震により破壊された可能性も考えられる。ゴム支承の耐震性能評価に関しては、これまで数々の実験や解析によりその性能確認が行われてきているが^{例えば、3) 4) 5)}、大地震を経験した

ゴム支承の残存耐震性については未だ実験事例がなく、
 解明されていないところが多数存在する。また、大規模
 地震後の点検でゴム支承に変状が確認された場合、または
 変状が確認されていなくてもレベル2の設計変位に近い
 変形が生じたと考えられる場合、今後起こりうる余震
 に対して該当ゴム支承が耐震性を有するか否かについて、
 現状では判断根拠となる資料が乏しく、ゴム支承のみな
 らず橋全体の耐震性を評価することが非常に困難であり、
 地震経験をしたゴム支承の残存耐震性評価は、道路橋の
 耐震性能評価において大変重要な課題であると考えられ
 る。

そこで本研究では、大規模地震を経験したゴム支承の
 残存耐震性を評価することを目的とし、鉛入り積層ゴム
 支承（以下、LRB 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た。
 そして、実験により得られたゴム支承の水平耐力、等価
 剛性、等価減衰定数、履歴吸収エネルギー、損傷状況な
 どを分析し、繰返し载荷回数がこれらゴム支承のせん
 断変形性能に及ぼす影響、また大ひずみのせん断変形を
 経験したゴム支承の残存耐震性について明らかにした。

2. 正負交番载荷実験

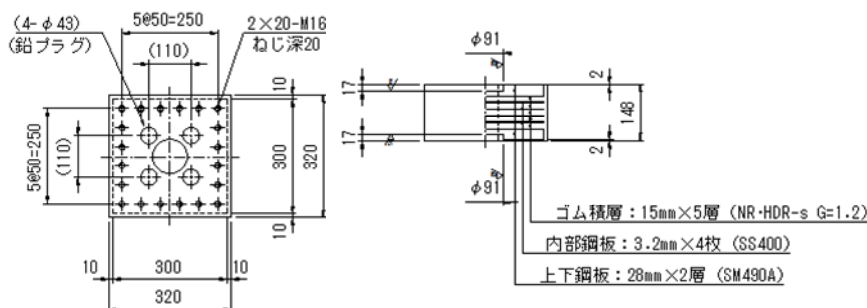


図-1 実験供試体の構造図（単位：mm）

表-1 実験供試体の諸元

		LRB
平面形状	(mm)	300×300
単層厚	(mm)	15
積層数	(層)	5
総ゴム厚	(mm)	75
鉛プラグ径	(mm)	43
鉛プラグ数	(本)	4
一次形状係数	—	4.68
二次形状係数	—	4.00
ゴム材の呼び	—	G12

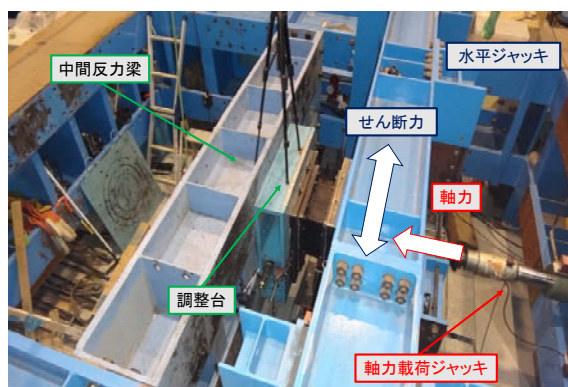


図-2 実験装置の概要

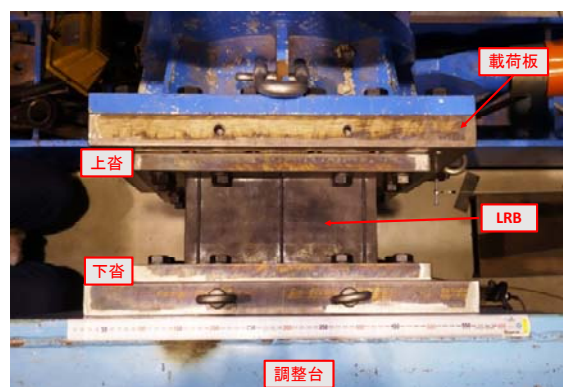


図-3 実験供試体のセットアップ状況

(2) 実験装置の概要

実験装置の概要図を図-2 に、実験供試体のセットアップ状況を図-3 に示す。図-2 に示す中間反力梁の上に高さ調整用の台を設置し、その調整台とゴム支承の下沓を固定した。また、ゴム支承の上沓は載荷盤に固定し、図-2 に示す軸力載荷ジャッキにより供試体に軸力を、水平ジャッキによりせん断力を与えた。なお、軸力は頭部が水平に変位しても常に軸方向に作用させることができるようにスライドする構造となっており、水平荷重、軸力は独立して作用させることができる。

(3) 測定項目と測定方法

計測器の測定位置を図-4 に示す。本研究では、ゴム支承の水平荷重と水平変位の履歴を中心に検討を行っており、水平荷重は水平荷重用ジャッキに設置したロードセルの値により、水平変位はゴム支承の上沓に設置した巻き込み型変位計 DP-E とゴム支承の下沓に設置した高感度変位計 CDP-50 との相対変位よりそれぞれ測定した。また、繰り返し載荷に伴い実験供試体の温度変化も考えられるため、本実験では供試体表面に温度計 T-G-0.65 を付着し、各サイクルごとに温度を計測した。

(4) 載荷方法

載荷方法は、図-4 に示す軸力載荷ジャッキから供試体に鉛直荷重(軸力)を与え、水平ジャッキから供試体にせん断力を与えることとした。本実験では、載荷装置の諸元上水平方向載荷速度を 0.5mm/s と設定し、1 日 10 回ずつ繰り返し載荷を行うこととした。また、5 回の繰り返し載荷を行った後に 2 時間程度実験を休止し、その後 5 回繰り返し載荷を行った。

(5) 実験検討ケース

本実験の載荷検討ケースを表-2 に示す。供試体 No.1 では、軸力を JIS の試験方法⁹⁾に基づき 6MPa (540kN) とし、せん断ひずみについてはレベル 2 地震動に対する許容値である 250% (187.5mm) を 100 回繰り返し載荷を行うものとした。橋梁の供用期間中にレベル 2 クラス地震により 250% 相当のせん断ひずみが 100 回生じるとは考えにくいだが、今回の実験では極めて厳しい状況下においてゴム支承の残存耐震性を評価することを目的とし、250% の 100 回繰り返し載荷を行うこととした。供試体 No.2 では、LRB の面圧依存性を評価することを目的とし、軸力を 1MPa とし、250% のせん断ひずみを 100 回繰り返し与えた。一方、供試体 No.3 では、橋梁の供用期間中にレベル 1 クラスの地震を多く経験したゴム支承の残存耐震性を評価することを目的とし、せん断ひずみ 150% を 100 回繰り返し載荷した後、せん断ひずみ 250% を 10 回繰り返し載荷を行った。

3. 実験結果

実験結果については、LRB の水平荷重-水平変位の履歴と、繰り返し載荷に伴う等価剛性、等価減衰定数、および履歴吸収エネルギー、切片荷重、2 次剛性の変化について分析するとともに、LRB の損傷進展状況を確認した。これらの結果を実験検討ケースごとに整理する。

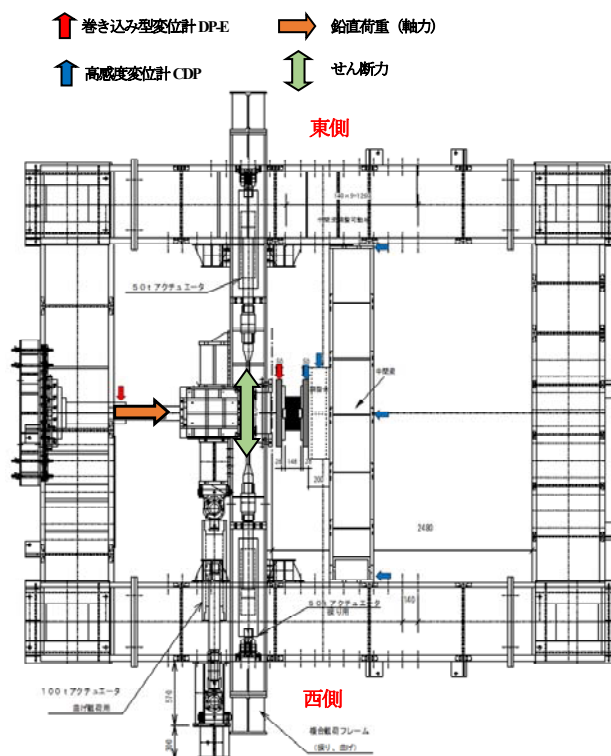
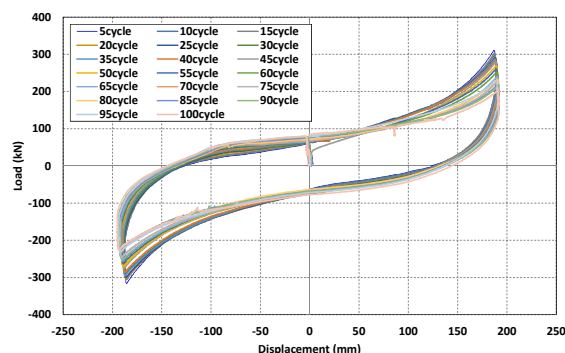


図-4 計測器の測定位置

表-2 載荷検討ケース

		No.1	No.2	No.3
せん断ひずみ	(%)	±250% (100cycle 載荷)	±250% (100cycle 載荷)	±150% (100cycle終了後に ±250%を10cycle)
1セットの繰り返し回数	(回)	10	10	10
セット数	(セット)	10	10	11
合計繰り返し回数	(cycle)	100	100	110
軸力	(MPa)	6	1	6
載荷速度	(mm/s)	0.5	0.5	0.5
インターバル	—	10cycle/日とし、各日、その日の5cycleと6cycleの間に2時間程度のインターバルを設けている		



(a) 荷重-変位関係

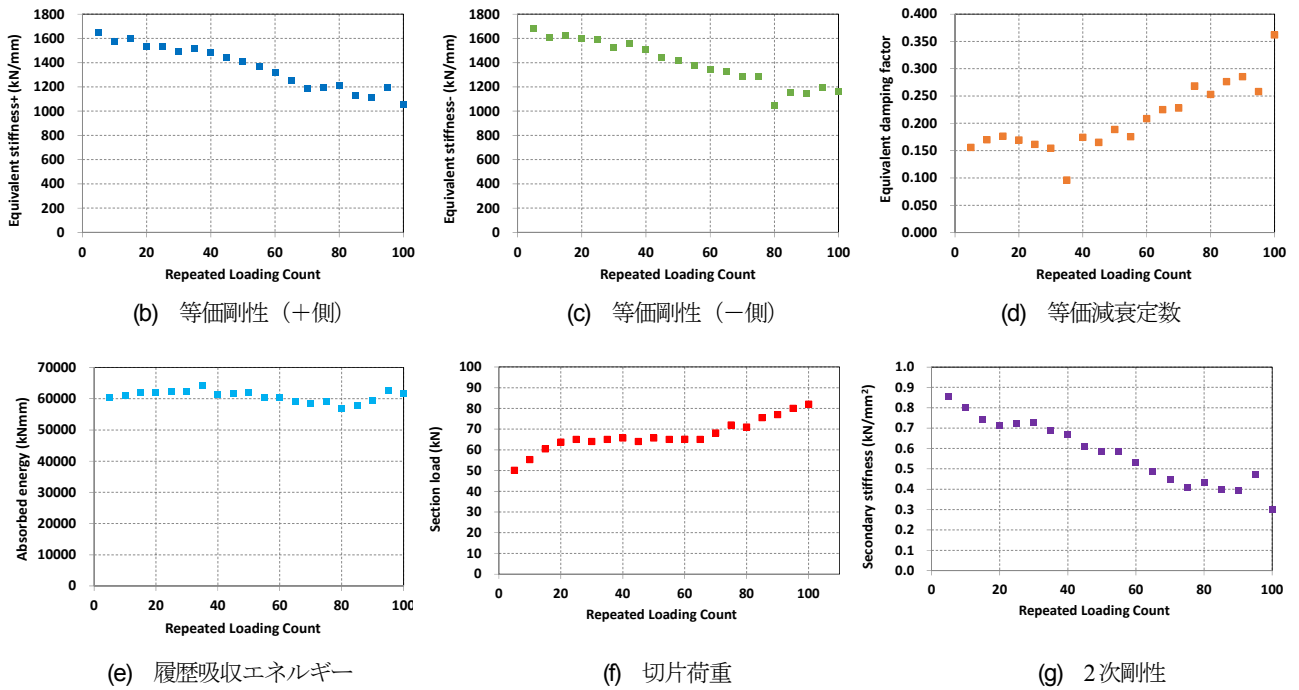


図-5 No.1 供試体の実験結果（軸力 6Mpa, せん断ひずみ±250%100回, 5 サイクルごとに表示）

(1) No. 1 供試体

a) 荷重-変位履歴の変化

No.1 供試体の荷重-変位関係を図-5(a)に示す。この結果は、各載荷日の 5 サイクルと 10 サイクル目の応答をそれぞれプロットしたものである。これらの応答で分析した理由は、1 サイクル目と 6 サイクル目の載荷においてゴム支承のバースン効果による耐力上昇が確認されたためである。この荷重変位関係において、まずせん断ひずみ 250%時の水平最大耐力に着目してみると、繰返し回数が増えるにつれ、+側と一側の水平最大耐力がほぼ一定間隔で小さくなっていく傾向にあることが確認された。また 5 サイクル目と 100 サイクル目の耐力を比較すると、5 サイクル目では+側 310kN, 一側-316kN, 100 サイクル目では+側 202kN, 一側-226kN であり、初期の水平最大耐力に比べ約 1/3 程度の耐力が小さくなっていたことがわかった。こうした LRB の水平最大耐力の低下は、等価剛性の変化にも影響を及ぼすと考えられる。

b) 等価剛性および等価減衰定数の変化

図-5(b)～(d)は、繰返し載荷回数に対する等価剛性および等価減衰定数の変化を 5 サイクルごとに示したものである。等価剛性は、図-5(a)に示す荷重変位関係において+側と一側で最大耐力が生じた位置と原点とを結ぶ線の傾きで評価することとした。等価減衰定数は、道路橋支承便覧⁷⁾に基づき、式(2)を用いて算出した。

$$h_B = \frac{2Q_d(u_{Be} + \frac{Q_d}{K_2 - K_1})}{\pi u_{Be}(Q_d + u_{Be}K_2)} \quad (2)$$

ここに、 h_B ：等価減衰定数

Q_d ：鉛プラグ入りゴム支承の降伏荷重 (N)

u_{Be} ：有効設計変位 (mm)

K_1 ：免震支承の一次剛性 (N/mm)

K_2 ：免震支承の二次剛性 (N/mm)

まず、等価剛性から見てみると、繰返し載荷回数が増えるにつれ、+側一側ともにほぼ一定の比率で減少していくことが確認された。これは a)にて上述したように繰返し載荷回数が増えるにつれて LRB の最大耐力が小さくなったためである。また、70 サイクル目から等価剛性が不規則に変化しているが、これは試験機のトラブルにより載荷中に軸力が少し変化したためである。

一方、等価減衰定数については、繰返し載荷回数が増えるにつれ、増加する傾向が見られた。これは、繰返し載荷回数が増えるにつれて切片荷重が大きくなったことが原因であると考えられる。切片荷重の増加については d)にて詳述する。

c) 履歴吸収エネルギーの変化

図-5(e)に繰返し載荷回数に対する履歴吸収エネルギーの変化を示す。履歴吸収エネルギーは、載荷サイクルごとに履歴面積を求めることで評価している。この結果より、繰返し載荷回数が増えても、履歴吸収エネルギーの変化はほとんどないことがわかる。これは、繰返し載荷回数が増えるにつれ、供試体の水平最大耐力は減少していく一方で、切片荷重は増加していく傾向であったため、結果的に各載荷サイクルの履歴面積がほとんど変化しなかったことによる結果であると考えられる。

d) 切片荷重の変化

図-5(f)に繰返し載荷回数に対する切片荷重の変化を示す。不規則ではあるが、繰返し載荷回数が増えるにつれ、切片荷重が増加していく傾向にあることが確認さ

れた。これは、繰り返し载荷回数の増加に伴い、LRB 内の鉛がゴム層に食い込んだことによりその界面近辺で生じる摩擦の影響が原因と考えられる。このため、+側、-側の等価剛性が小さくなっているにもかかわらず、履歴吸収エネルギーの変化はほとんどない結果が得られたと考えられる。

e) 2次剛性の変化

図-5(g)に繰り返し载荷回数に対する2次剛性の変化を示す。ここで示す2次剛性は、履歴が切片荷重の点とゴムのハードニング現象が生じる前のせん断ひずみ約150%に相当する点を結ぶ線の傾きとした。繰り返し回数の変化に伴い、規則的には変化しないが2次剛性は徐々に低下していく傾向を示した。これは、a)にて述べた最大水平耐力の低下と、d)にて述べた切片荷重の増加によるものと考えられる。

f) 損傷進展状況

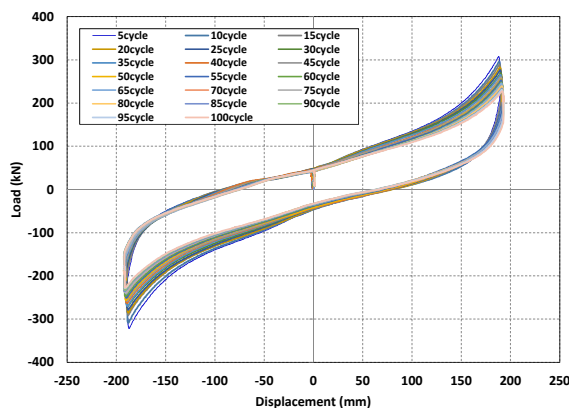
ここでは、繰り返し载荷回数の増加に伴うLRBの外観上の変状について述べる。LRBの西側側面において20サイクル目の载荷から側面が膨らみ始める様子が確認された。それ以降、サイクル数を重ねるにつれ、膨らみが両側側面に現れ、45サイクル目には支承部西側でゴム支承内部上下鋼板部分の被覆ゴムにめくれが生じ、鉛が露出した。そして、71サイクル目には支承部西側で鉛の一部が支承外部に押し出された。その後も、支承部両側の側面において鉛が押し出された。

こうしたLRBの外部損傷が見られても、図-5で示した荷重-変位関係や等価剛性においてはほぼ一定の変化が見られており、これらの特性が鉛の損傷によって急激

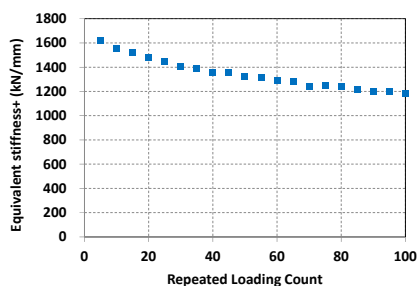
に変化することは確認されなかった。このことから、LRBの側面の膨らみや、ゴムと杓の接着部のめくれ、鉛の露出やゴム部の膨らみ、亀裂などの外傷が生じていても、LRBの性能としては十分な残存耐震性を有することがいえる。

g) 温度変化

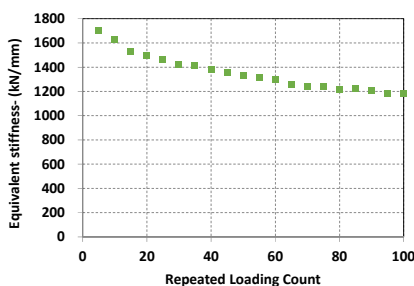
供試体の温度は各サイクルごとに測定した。1日10回ずつ繰り返し载荷を行い、5回の繰り返し载荷を行った後に2時間程度実験を休止し、その後に5回繰り返し载荷を行ったため、1サイクルから5サイクルまでの供試体表面の温度変化と、6サイクルから10サイクルまでの供試体表面の温度変化を調べ、その中での最大温度変化と最小温度変化をまとめた。その結果、繰り返し载荷回数の増加に伴う温度上昇は最大で3.8度であった。



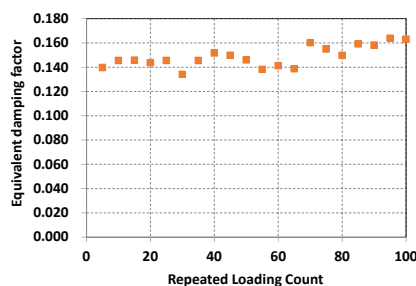
(a) 荷重-変位関係



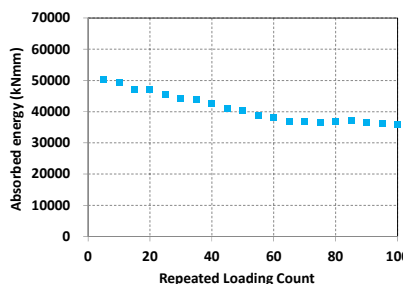
(b) 等価剛性 (+側)



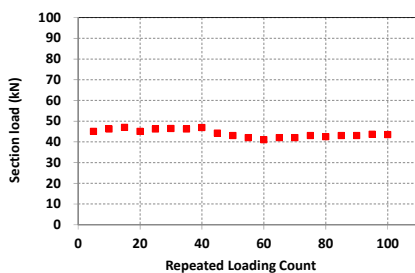
(c) 一側等価剛性 (-側)



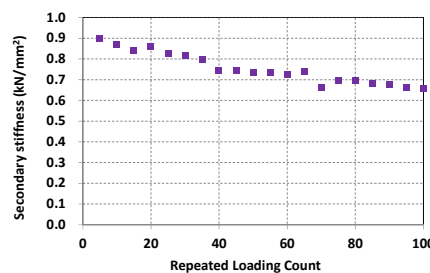
(d) 等価減衰定数



(e) 履歴吸収エネルギー



(f) 切片荷重の変化



(g) 2次剛性の変化

図-6 No.2 供試体の実験結果 (軸力 1MPa, せん断ひずみ±250%, 5サイクルごとに表示)

(2) No. 2 供試体

a) 荷重-変位履歴の変化

No.2 供試体の荷重-変位関係を図-6(a)に示す。結果はNo.1と同様に5サイクルごとにプロットしている。まず履歴形状についてNo.1と比較してみると、No.2の履歴形状が小さいことがわかる。軸力を小さくしたため、水平降伏耐力、ハードニング後の水平最大耐力ともに小さくなり、履歴面積が小さくなる結果となった。また、No.1と同様にせん断ひずみ250%時の水平最大耐力の変化に調べてみると、No.1と同様に繰り返し载荷回数が増えるにつれ、+側と-側の水平最大耐力がほぼ一定間隔で小さくなる結果となった。また5サイクル目と100サイクル目の水平最大耐力を比較してみると、5サイクル目では+側で307kN、-側で-321kN、100サイクル目では、+側で227kN、-側で-226kNであり、No.1と同様である。等価剛性については、No.1と同様に繰り返し载荷回数が増えるにつれ、+側-側ともにほぼ一定の比率で減少していくことが確認された。初期の等価剛性は約1600kN/mmでありNo.1とほぼ同値であるが、100サイクルでは耐力低下が大きくなかったため、等価剛性は1200kN/mmとNo.1より少し大きい値を示した。等価減衰定数については繰り返し载荷回数が増えるにつれて徐々に増加していく傾向にあるが、その増加量はNo.1ほどではない。

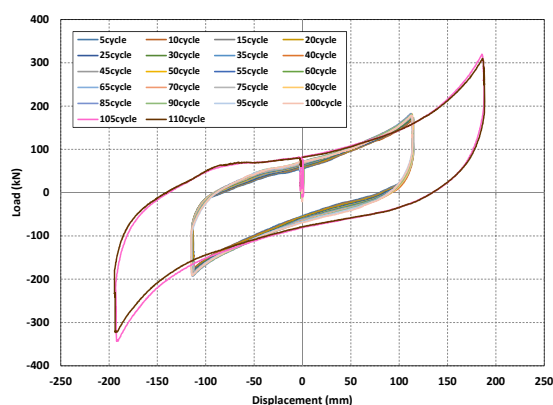
b) 等価剛性および等価減衰定数の変化

図-6(b)~(d)は、繰り返し载荷回数に対する等価剛性および等価減衰定数の変化を5サイクルごとに示したものである。等価剛性については、No.1と同様に繰り返し

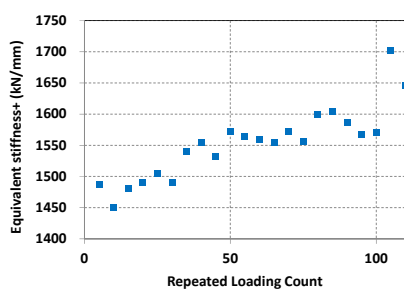
载荷回数が増えるにつれ、+側-側ともにほぼ一定の比率で減少していくことが確認された。初期の等価剛性は約1600kN/mmでありNo.1とほぼ同値であるが、100サイクルでは耐力低下が大きくなかったため、等価剛性は1200kN/mmとNo.1より少し大きい値を示した。等価減衰定数については繰り返し载荷回数が増えるにつれて徐々に増加していく傾向にあるが、その増加量はNo.1ほどではない。

c) 履歴吸収エネルギーの変化

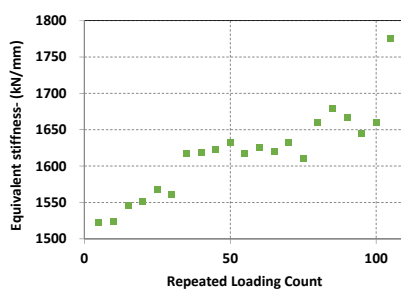
図-6(e)に繰り返し载荷回数に対する履歴吸収エネルギーの変化を示す。この結果より、繰り返し载荷回数が増えるにつれ、履歴吸収エネルギーは徐々に小さくなっていくことがわかる。No.1ではエネルギー吸収率が大きくなる傾向であったが、No.2では供試体の損傷がそれほど小さくなく、切片荷重の変化もほとんど現れてないことから、水平最大耐力低下によりエネルギー吸収率が



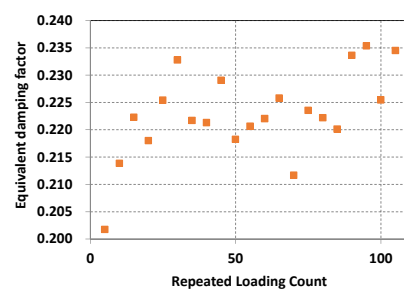
(a) 荷重-変位関係



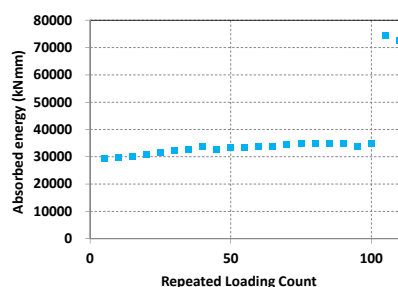
(b) 等価剛性 (+側)



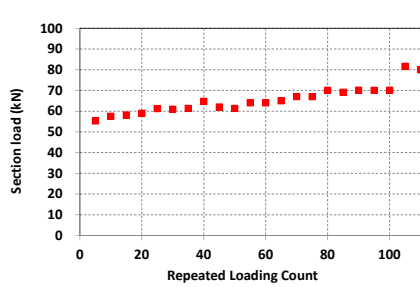
(c) 一側等価剛性 (-側)



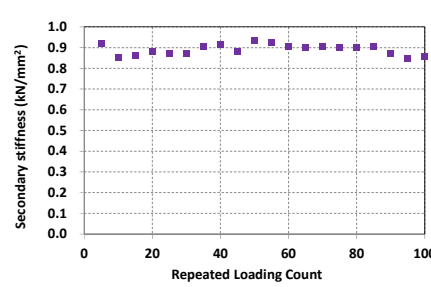
(d) 等価減衰定数



(e) 履歴吸収エネルギー



(f) 切片荷重の変化



(g) 2次剛性の変化

図-7 No.3 供試体の実験結果 (軸力 6Mpa, せん断ひずみ±150%, 100~110サイクルのみ±250%, 5サイクルごとに表示)

小さくなっていたと考えられる。

d) 切片荷重の変化

図-6(f)に繰返し載荷回数に対する切片荷重の変化を示す。繰返し載荷回数の増加に伴う切片荷重の変化はほとんど見られておらず、No.1 と異なる結果となった。No.1 に比べ損傷が小さく、LRB 内の鋼板と積層ゴムの摩擦もそれほど大きくなかったことが推察される。

e) 2次剛性の変化

図-6(g)に繰返し載荷回数に対する2次剛性の変化を示す。No.1 と同様に繰返し載荷回数が増えるにつれて、2次剛性が減少する傾向にあったが、No.1 供試体に比べると、その減少具合はなだらかであった。No.2 では切片荷重の変化がほとんどなかったことが原因として考えられる。

f) 損傷進展状況

No.2の損傷状況については、100サイクルの終了時にLRBの両側での膨らみ、また西側においては、ゴム部に亀裂が生じていた。しかし、LRB_No.2の供試体においては、LRB_No.1のような鉛が押し出されて露出するなどの大きな外傷はみられなかった。これは、No.2では軸力が小さいため、250%せん断ひずみが生じる際、鉛の負担が大きく軽減されたことが原因と考えられる。こうした供試体の外観上の損傷具合が異なるため上述したように繰返し載荷回数の増加に伴う等価剛性、等価減衰定数、履歴吸収エネルギーなどの諸特性の変化が変化したと考えられる。

g) 温度変化

No.1 供試体と同様に供試体の最大温度変化と最小温度変化を調べたところ、繰返し載荷回数の増加に伴う温度上昇は最大で2.8度であり、No.1 と比較すると最大温度変化が1度小さい。

(3) No. 3 供試体

a) 荷重-変位履歴の変化

No.3 の荷重-変位関係を図-7(a)に示す。結果は No.1, No.2 と同様に5サイクルごとにプロットしている。せん断ひずみ±150%の100回繰返し載荷において、LRBの最大水平耐力に着目し No.1 と比較してみると、+側、-側ともに繰返し載荷回数が増加してもほぼ一定であることがわかった。5サイクル目と100サイクル目の最大水平耐力を比較すると、5サイクル目では+側で170kN、-側で-172kN、100サイクル目では、+側で171kN、-側で-191kNであり、ほとんど変化がみられなかった。

また、せん断ひずみ±250%繰返し載荷において105サイクル目と110サイクル目の最大水平耐力を調べてみると、105サイクル目では+側で319kN、-側で-342kN、110サイクル目では+側で309kN、-側で-322kNであり、

110サイクル目の耐力が105サイクル目に比べ10kN～20kN程度低下していたが、これはNo.1の5サイクル目と10サイクル目の水平耐力の変化とほとんど変わっていない。すなわち、150%のせん断ひずみを100回繰返して与えても、その後のLRBの水平耐力および力学的特性は初期状態のそれとほとんど変わらないことがわかった。

b) 等価剛性および等価減衰定数の変化

図-7(b)～(d)は、繰返し載荷回数に対する等価剛性、等価減衰定数の変化を5サイクルごとに示したものである。No.3では、No.1, No.2とは異なり、繰返し載荷回数が増えるにつれ、等価剛性、等価減衰定数どちらもほぼ一定の値であることが確認された。このことから、せん断変形が150%程度のひずみレベルであれば、せん断ひずみ250%時に比べるとゴム支承にかかる負荷が小さく、100回の繰返し載荷の中では、LRBの剛性や等価剛性に対して大きな影響を及ぼさないことがわかる。また、105サイクル～110サイクルのせん断ひずみ250%載荷では、+側と-側のどちらも等価剛性の減少しており、その減少量はNo.1の5サイクル～10サイクル載荷時とほとんど変化していない。

c) 履歴吸収エネルギーの変化

図-7(e)に繰返し載荷回数に対する履歴吸収エネルギーの変化を示す。等価剛性、等価減衰定数と同様に、履歴吸収エネルギーも1サイクルから100サイクルまでほぼ一定の値であることが確認された。また、100サイクル～110サイクルにおける履歴吸収エネルギーは、No.1の初期10サイクルまでの履歴吸収エネルギーとほとんど変わらないことがわかった。

d) 切片荷重の変化

図-7(f)に繰返し載荷回数に対する切片荷重の変化を示す。繰返し載荷回数が増えるにつれ、切片荷重も少しずつ増加していく傾向がみられるが、No.1 供試体よりもその増加傾向はなだらかであることがわかった。

また、せん断ひずみ150%の100回繰返し載荷後のせん断ひずみ250%の載荷では切片荷重が80kN程度であり、No.1の初期の載荷時に比べ20kN程度増加していたことがわかった。これより、低ひずみレベルであってもLRBが水平方向に繰返し挙動を行うと切片荷重が増加していき、初期の状態と異なる可能性があることが明らかとなった。

e) 2次剛性の変化

図-7(g)に繰返し載荷回数に対する2次剛性の変化を示す。繰返し載荷回数が増えても、2次剛性はほぼ一定の値を維持することがわかった。また、150%100サイクル載荷後の250%載荷時においては、150%載荷時に比べて、ひずみ依存性により2次剛性が大きく減少する結果となっている。これはひずみレベルによる切片荷重の

変化によるものと考えられる。

f) 損傷進展状況

LRBの損傷状況については、No.3ではせん断ひずみを150%としていたため、LRB_No.1のような目立った外傷は確認されなかった。また、250%のせん断ひずみを与えていた100サイクル～110サイクルにおいても、特に目立った損傷は発生しなかった。

g) 温度変化

No.1 供試体と同様に供試体の最大温度変化と最小温度変化を調べたところ、繰り返し载荷回数増加に伴う温度上昇は最大で1.8度であり、No.1に比べ温度変化が小さい。

以上より、本実験で用いたLRBは、せん断ひずみ150%を100回繰り返し挙動を行った後も、250%のせん断ひずみに対して初期の耐震性能と同等な性能を有していることが確認された。

4. まとめ

本研究では、大規模地震を経験したゴム支承の残存耐震性を評価することを目的とし、LRB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り返し载荷実験を実施した。本研究により得られた知見を以下に示す。

(1) LRB_No. 1 供試体とLRB_No. 2 供試体の比較

繰り返し载荷回数増加に伴うLRBの耐震性能変化において、面圧依存性を確認することを目的とし、LRB供試体に対し軸力を変化させた繰り返し载荷実験を行った。No.1供試体では軸力を6Mpa（540kN相当）、No.2供試体では軸力を1Mpa（90kN相当）とし、両ケースともにせん断ひずみ250%の100回繰り返しを与えた。両ケースの応答を比較してみると、等価剛性の低下においてはそれほど大きな違いはみられなかったが、等価減衰定数や履歴吸収エネルギーにおいてはその応答の違いが確認できた。これは、LRBに作用する軸力の違いにより切片荷重の応答特性が変化することが原因であると考えられる。

また、No.1供試体とNo.2で外観上の違いを比較すると、No.1供試体ではゴム部の膨れや、被覆ゴムのめくれたことによる鉛の露出、ゴム部の亀裂の発生などの大きな外傷が発生したが、No.2では実験後半にゴム部の膨れが現れるものの、No.1供試体のような大きな外傷はみられなかった。こうした外観上の違いも軸力の影響によるものと考えられる。

(2) No. 1 供試体とNo. 3 供試体の比較

No.3 ではせん断ひずみ150%を100回繰り返し载荷し

た後せん断ひずみ250%を10回を载荷しており、橋梁の供用期間中にレベル1クラスの地震を多く経験したゴム支承の残存耐震性について評価した。せん断ひずみ250%を100回与えたNo.1と比較してみると、No.1供試体ではLRBに大きな損傷が確認されたのに対し、No.3供試体ではそのような目立った外傷は確認されなかった。このため、荷重-変位履歴、等価剛性、等価減衰定数等の諸特性も繰り返し载荷に対して大きな変化はみられなかった。また、せん断ひずみ150%の100回载荷後に、行ったせん断ひずみ250%の10回载荷では、外観上の変化も見られず、履歴によるエネルギー吸収も良好であることが確認できた。このことから、レベル1クラス地震動によりLRBが100回ほど繰り返し挙動を行っていても、その後のLRBは十分な残存耐震性を有していると考えられる。

謝辞：今回実験にあたり予備の供試体を提供して頂いた実験供試体の提供および試験に協力して頂いたオイレス工業（株）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) 公益社団法人土木学会：東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会最終報告書，2014。
- 2) 一般社団法人日本免震構造協会：応答制御建築物調査委員会報告書，2012。
- 3) 伊藤義人，廣畑美幹人，汪深：荷重および環境因子作用下における免震ゴム支承のき裂発生に関する基礎的研究，土木学会第69回年次学術講演会，pp.111-112，2010。
- 4) 七戸文雄，久慈茂樹，宇野裕恵，小坂晃，今井隆：橋梁用LRBの性能安定性に関する実験的研究，土木学会第58回年次学術講演会，pp.739-740，2010。
- 5) 林訓裕，足立幸郎，甲元克明，ハッ元仁，五十嵐晃，党紀，東出知大：経年劣化したゴム支承（LRB）の残存耐震性に関する実験的考察，第16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.449-456，2013。
- 6) 植田健介，今井隆，崔準祐：積層ゴム支承の水平方向大ひずみ正負交番繰り返し载荷実験，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，pp.221-226，2015。
- 7) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，2004。
- 8) 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，JISK 6411，2012。
- 9) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2012。
- 10) 日本地震工学会他：東日本大震災合同調査報告共通編1，2014。

EVALUATION OF RESIDUAL SEISMIC PERFORMANCE OF RUBBER BEARINGS EXPERIENCED GREAT EARTHQUAKES BASED ON CYCLIC LOADING TESTS

Joon-Ho CHOI, Hirosato IWAMOTO, Takashi IMAI, Kensuke UEDA, Tomotaka WAKE and
Tomohiko YAMASAKI

Couple of rubber bearings on highway bridges were damaged by 2011 Tohoku Pacific Offshore Earthquake. Eventhough the seismic design using the rubber bearings has been wided since 1995 Kobe Earthquake, the residual seismic performance of the rubber bearing which were experienced great earthquakaes as like the above great earthquakes has not been identified. In this study, in order to investigate the residual seismic performance of Lead Rubber Bearings (LRB), load-displacement hysteresis, equivalent stiffness, equivalent damping, cyclic loading tests using 3 LRB test pieces were conducted. No.1 LRB was subjected to axial force with 6Mpa and 100 cycles lateral loadings with shear strain of 250%. No.2 LRB was subjected to the axial force with 1Mpa and 100 cycles lateral loadings with the shear strain of 250%. No.3 LRB was subjected to the axial force with 6Mpa and 100 cycles lateral loadings with the shear strain of 150% and the axial force with 6Mpa and 10 cycles lateral loadings with the shear strain of 250%. From these experimental results, eventhough the capacities, load-displacement hysteresis, equivalent stiffness, et al. of LRB were declined and leads and rubber were damaged by increasing cyclic loading numbers, it was clarified that LRB had the influent residual seismic performance of LRB for Level 2 earthquake.