

## 大ひずみを複数回経験した積層ゴム支承の 残存耐震性評価確認実験

成炫禹<sup>1</sup>・岩本周哲<sup>2</sup>・今井隆<sup>3</sup>・植田健介<sup>3</sup>・崔準祐<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程  
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

<sup>2</sup>非会員 JFEエンジニアリング株式会社 鋼構造本部 (前 九州大学大学院 工学府)  
(〒230-8611 神奈川県横浜市鶴見区末広町2-1)

<sup>3</sup>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)

<sup>4</sup>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)

### 1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震では、橋梁に設置された多くの支承が被害を受けたことから、それ以降、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とした積層ゴム支承が広く採用され、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<sup>1)</sup>。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<sup>1)</sup>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、応答制御建築物調査委員会報告書<sup>2)</sup>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。さらに、2016年4月に発生した熊本地震では、複数の橋梁においてゴム支承の破壊が確認されたが<sup>3)</sup>、この地震では震度7を2回観測しているなど非常に強

い地震が複数回発生していることから、強い揺れの繰り返しにより破壊した可能性も排除できない。

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、大地震を複数回経験したゴム支承の残存耐震性評価については未だ実験事例が無く、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、或いは変状が確認されていなくてもレベル2地震動に対する設計変位に近い変形が生じていたと考えられる場合、今後起こりうる大規模な余震に対して該当ゴム支承が耐震性を有するか否か、現状では判断根拠となる資料が乏しい。こうしたゴム支承に対する残存耐震性は、支承部だけではなく橋全体の耐震性にも影響を及ぼすため、大規模地震を経験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能を評価することを目的とし、各種の積層ゴム支承の中で積層ゴム支承（RB）を対象として、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検討を行った。

## 2. 正負交番载荷実験

### (1) 実験供試体諸元

本実験に用いた供試体は積層ゴム支承（RB）3体であり、供試体寸法は著者らが事前に行った予備試験<sup>4)</sup>に基づいて決定した。実験供試体の構造図を図-1に、諸元を表-1に示す。平面寸法は300mm×300mmであり、総ゴム厚75mmの5層構造としている。また、一次形状係数 $S_1$ と二次形状係数 $S_2$ は、道路橋支承便覧<sup>5)</sup>に基づき、式(1a)、(1b)を用いて求めた。

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

$$S_2 = \frac{\min(a,b)}{\sum t_e} \quad (1b)$$

ここに、 $A_e$ ：ゴムの断面積

$a, b$ ：ゴム支承の平面寸法

$t_e$ ：ゴム1層の厚さ

本実験では、道路橋支承便覧<sup>5)</sup>における一次形状係数の最小値 ( $S_1 > 4$ ) に近くなるように、ゴム厚1層の厚さを15mm ( $S_1 = 4.68$ ) とした。本実験では、ゴム支承の厳しい条件下の限界状態を確認するために、あえて変状の出やすいと思われる厚さを採用した。

### (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

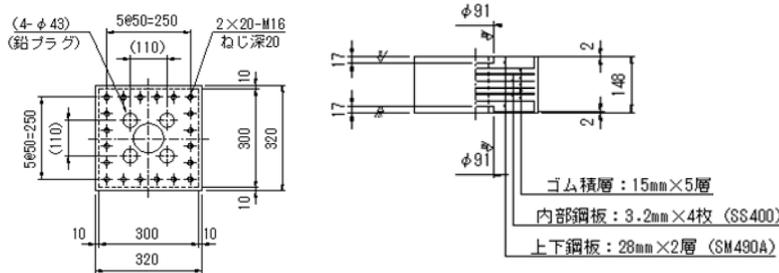


図-1 実験供試体の構造図（単位：mm）

表-1 実験供試体の諸元

		RB
平面形状	(mm)	300×300
単層厚	(mm)	15
積層数	(層)	5
総ゴム厚	(mm)	75
一次形状係数	—	4.68
二次形状係数	—	4.00
ゴム材の呼び	—	G12

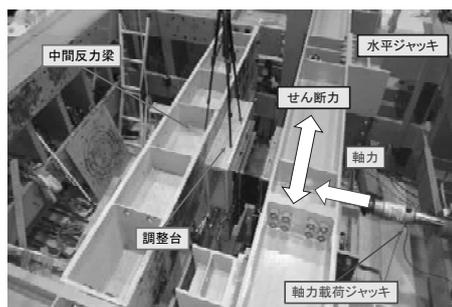


図-2 実験装置の概要

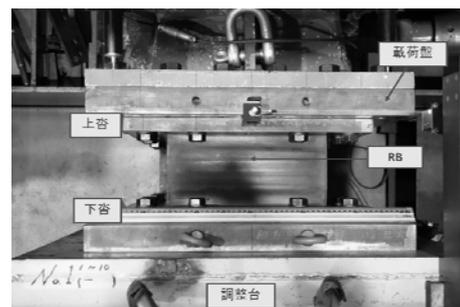


図-3 実験供試体のセットアップ状況

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、ゴム支承の上沓は载荷盤に固定し、図-2に示す軸力载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、軸力は頭部が水平方向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-25）との相対変位より求めた。また、繰り返し载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) 载荷方法

载荷方法は、図-4に示す軸力载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ものとした。本実験では、载荷装置の諸元上水平方向载荷速度を0.5mm/sと設定して1日10回ずつ繰り返し载荷を行うこととし、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う方法とした。

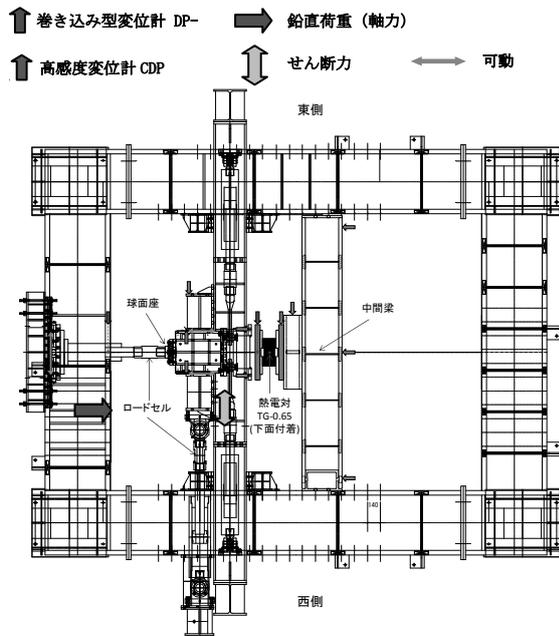


図-4 計測器の測定位置

表-2 荷重検討ケース

供試体No		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日の繰り返し回数	(回)	10	10	10
日数	(日)	10	10	11
合計繰り返し回数	(cycle)	100	100	110
軸応力	(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、5cycleと6cycle の間に2時間程度のインターバルを設けている		

### (5) 実験検討ケース

本実験の荷重検討ケースを表-2に示す。供試体No.1では、軸応力をJISの試験方法<sup>6)</sup>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こととした。橋梁の供用期間中にレベル2地震動により250%相当のせん断ひずみが100回生じることは考えにくいだが、今回の実験では厳しい載荷状況下においてゴム支承の変状や残存耐震性を評価することとしており、せん断ひずみ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、面圧依存性を評価することを目的とし、軸力を1MPaと変化させ、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、RB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、ゴム支承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。

### (1) 供試体No.1

#### a) 荷重-変位履歴の変化

供試体No.1の荷重-変位履歴を図-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。まずこの荷重-変位履歴において、せん断ひずみ250%時の最大水平耐力に着目してみると、繰り返し回数が増えても、履歴形状として大きな変化がないことが確認された。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286kN、-側-291kN、100サイクル目では+側266kN、-側-280kNであり、初期の最大水平耐力からわずかに減少したものの、ほとんど変化はみられなかった。

#### b) 等価剛性および等価減衰定数の変化

図-5(b)～図-5(d)は、繰り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-変位履歴において、+側と-側でそれぞれ最大耐力が生じた位置と原点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<sup>5)</sup>に基づき、式(2)を用いて算出した。

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

ここに、 $W$ : RBの弾性エネルギー

$\Delta W$ : RBが吸収するエネルギーの合計

まず、等価剛性から見てみると、繰り返し載荷回数が増えてもほぼ一定の値をとることが確認された。これはa)にて述べたように、繰り返し載荷回数が増えても最大水平耐力はほとんど変化しないためである。また、等価減衰定数についても等価剛性と同様に、繰り返し載荷回数が増えてもほぼ一定の値をとることが確認された。これは繰り返し載荷回数が増えてもRBが吸収する履歴吸収エネルギーがほぼ一定の値であったためと考えられる。

#### c) 履歴吸収エネルギーの変化

図-5(e)に繰り返し載荷回数に対する履歴吸収エ

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、繰り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、繰り返し載荷回数が増えても履歴形状がほぼ同じであったためと考えられる。

#### d) 切片荷重の変化

図-5(f)に繰り返し載荷回数に対する切片荷重の変化を示す。5サイクル~20サイクルにおいて増加傾向にあるが、それ以降はほぼ一定の値をとることが確認された。このことから、初期載荷においては、ゴム支承の内部が比較的固くなっているが、繰り返し載荷回数が増えていくにつれて徐々にゴム支承の内部の変形が大きくなっていったと思われる。

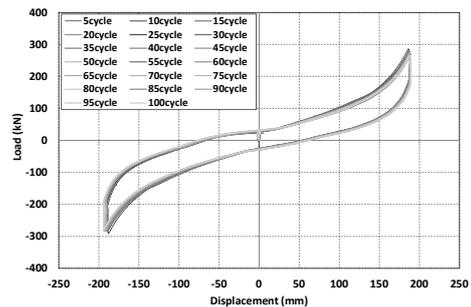
#### e) 2次剛性の変化

図-5(g)に繰り返し載荷回数に対する2次剛性の変化を示す。ここで示す2次剛性は、荷重-変位履歴において切片荷重の点とゴム支承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次剛性はわずかに低下し

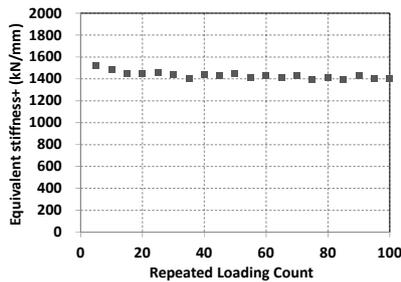
ていく傾向を示した。これは、a)にて述べた水平耐力の低下と、d)にて述べた切片荷重の増加によるものと考えられる。

#### f) 損傷進展状況

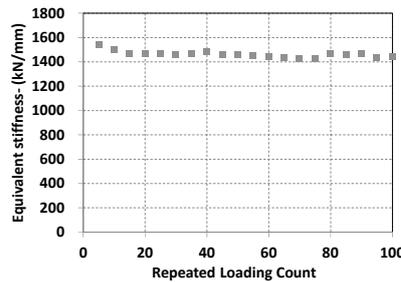
図-6に供試体No.1の損傷状況を示す。100サイクル載荷終了後にRBの外観を確認したところ、側面においていくつかの膨らみが発見されたものの、亀裂などの目立った損傷は現れておらず、1サイクルから100サイクルまで外観がほぼ同様であった。このように、せん断ひずみ250%を100回繰り返し載荷しても、1サイクルから100サイクルを通して、外観上の変状はほとんどみられなかった。



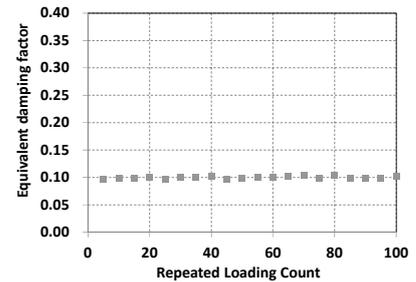
(a) 荷重-変位関係



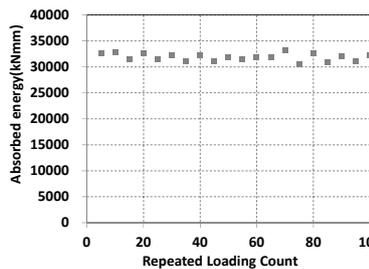
(b) 等価剛性 (+側)



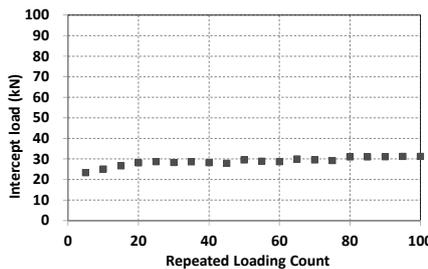
(c) 等価剛性 (-側)



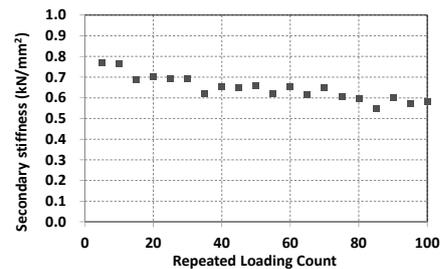
(d) 等価減衰定数



(e) 履歴吸収エネルギー

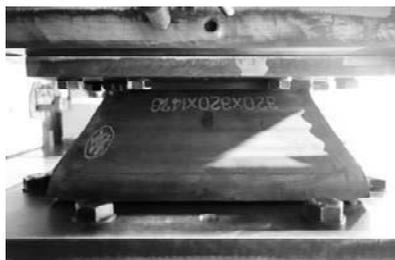


(f) 切片荷重



(g) 2次剛性

図-5 供試体 No.1の実験結果(軸力6MPa,せん断ひずみ±250%100回,5cycleごとにプロット)



(a) RB\_No.1 10サイクル(東側)



(b) RB\_No.1 100サイクル(東側)

図-6 供試体 No.1のせん断ひずみ250%載荷時の状況

(2) 供試体No. 2

a) 荷重-変位履歴の変化

供試体No.2の荷重-変位履歴を図-7(a)に示す。No.2では、73サイクル目にせん断変形250%を与えたところで破断が生じた。損傷状況についてはf)にて詳しく述べるが、この破断に至るまでの応答を調べるため、5サイクルから70サイクルまで5サイクルごとにプロットし、70サイクルから破断した73サイクルまでは1サイクルごとにプロットした。

まず履歴形状についてNo.1と比較してみると、No.2では最大水平耐力が5サイクル目では+側293kN、-側-302kN、破断した73サイクル目では+側216kN、-側-211kNであり、初期の最大水平耐力から著しく変化していることが確認された。5サイクルから60サイクルまで、5サイクルごとに約6kNの減少であったが、60サイクルから70サイクルにおいては、5サイクル毎に約16kNの減少、70サイクルから73サイクルにおいては、1サイクルごとに約12kNの減少となった。外観上の変状についてはf)にて詳述するが、61サイクル目の載荷時に初めて亀裂が生じ、72サイクルで亀裂が大きく進展していることから、こうしたRBの変状に伴い水平耐力が変化していることがわかった。

b) 等価剛性および等価減衰定数の変化

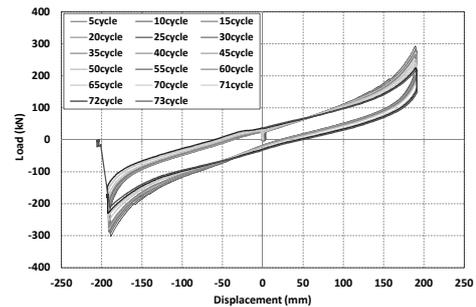
図-7(b)～図-7(d)は、繰り返し載荷回数に対する等価剛性および等価減衰定数の変化を5サイクルごとに示したものである。等価剛性については、5サイクルから20サイクルまでは減少傾向であったが、20サイクルから60サイクルまではほぼ一定の値をとり、60サイクルから破断した73サイクルの間におい

て再度減少していく傾向を示した。また、破断直前には急激な減少となっており、a)にて示した水平耐力と同様な傾向を示した。

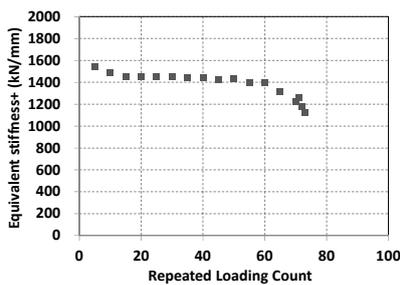
等価減衰定数については、5サイクルから60サイクル付近まではほぼ一定の値をとり、その後60サイクルから破断した73サイクルにおいて急激に増加した。これは、5サイクルから60サイクルにおいては、最大水平耐力の減少に伴い、式(2)における弾性エネルギーと履歴吸収エネルギーともに小さくなり、その減少率がほぼ等しいため等価減衰定数がほぼ一定の値となったと考えられる。また60サイクル以降については、RBの破断に伴い最大水平耐力が急激に減少したため、式(2)における弾性エネルギーの減少量が支配的となり、相対的に等価減衰定数が大きくなったと考えられる。

c) 履歴吸収エネルギーの変化

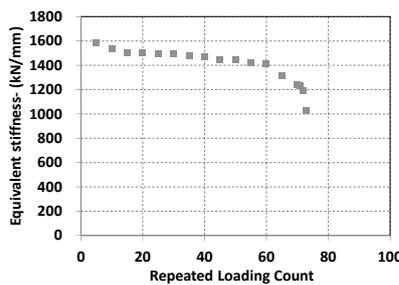
図-7(e)に繰り返し載荷回数に対する履歴吸収エネルギーの変化を示す。この結果より、履歴吸収エネルギーは5サイクルから60サイクルまではほぼ一定の値をとり60サイクル付近から破断した73サイクルにかけて増加していることがわかった。これは



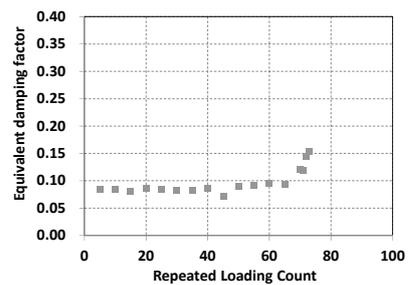
(a) 荷重-変位関係



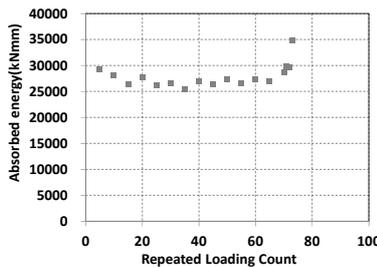
(b) 等価剛性 (+側)



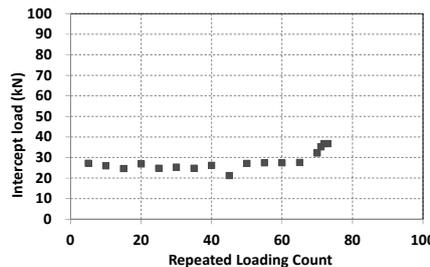
(c) 等価剛性 (-側)



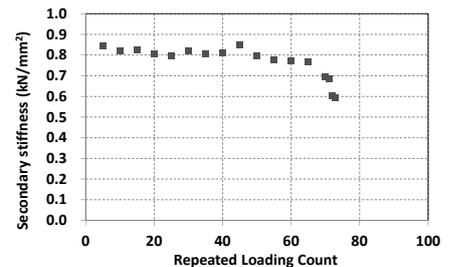
(d) 等価減衰定数



(e) 履歴吸収エネルギー



(f) 切片荷重



(g) 2次剛性

図-7 供試体 No.2の実験結果 (軸応力 1MPa, せん断ひずみ±250%100回, 5cycleごとにプロット)

RBの変形が大きくなるに伴い、切片荷重が増加し、履歴形状が大きくなったためであると考えられる。

#### d) 切片荷重の変化

図-7(f)に繰り返し载荷回数に対する切片荷重の変化を示す。この結果から、切片荷重は5サイクルから60サイクルまではほぼ一定の値をとり、60サイクルから破断した73サイクルにかけては増加していることがわかった。これは、ゴムの損傷の進展に伴い、ゴム内部の摩擦が大きくなったことが原因であると考えられる。

#### e) 2次剛性の変化

図-7(g)に繰り返し载荷回数に対する2次剛性の変化を示す。この結果から、2次剛性は多少のばらつきはみられるものの、5サイクルから60サイクルまではほぼ一定の値をとり、60サイクル付近からは急激に減少した。60サイクル付近から2次剛性が急激に減少したのは、b)で述べた60サイクル以降のRBの損傷に伴う最大水平耐力の減少と、d)で述べた切片荷重の増加が原因であると考えられる。

#### f) 損傷進展状況

図-8(a)～図-8(f)に供試体No.2の損傷状況を示す。60サイクルまでは初期状態とほとんど変化がみられなかったが、61サイクルにおいて支承下面において亀裂が確認された(図-8(d))。この亀裂の発生により、60サイクル付近から等価剛性や等価減衰定数等、前述した項目すべての応答特性が変化していったと考えられる。また、61サイクル以降は、支承下面と支承側面において亀裂が進展し、72サイクルにおいて支承下面と支承側面において大きな亀裂が生

じた(図-8(b)、図-8(e))。そして、73サイクル目において破断が生じ、RBの上下が完全に分離した(図-8(c)、図-8(f))。

なお、本载荷装置では载荷変位が大きくなっていくと鉛直载荷治具において若干の回転が生じうる機構となっており、今回の実験ではゴム支承が回転を伴うせん断挙動を行っていたため、亀裂が生じやすい環境であったと考えられる。同ロットの供試体ではないが、同寸法のゴム支承供試体を用いて鉛直ジャッキの回転が生じない载荷装置にて同条件の実験を実施したが、その実験では100回载荷を行っても異常が見つかっていなかった。

### (3) 供試体No. 3

#### a) 荷重-変位履歴の変化

供試体No.3の荷重-変位履歴を図-9(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。まず、せん断ひずみ150%の100回繰り返し载荷において、RBの最大水平耐力に着目してみると、+側、-側ともに繰り返し载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155kN、-側で-153kN、100サイクル目では、+側で150kN、-側で-152kNであり、最大水平耐力が僅かに低下しているがほとんど変化はみられなかった。

また、せん断ひずみ250%の繰り返し载荷において、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316kN、-側で-329kN、110サイクル目では+側で301kN、

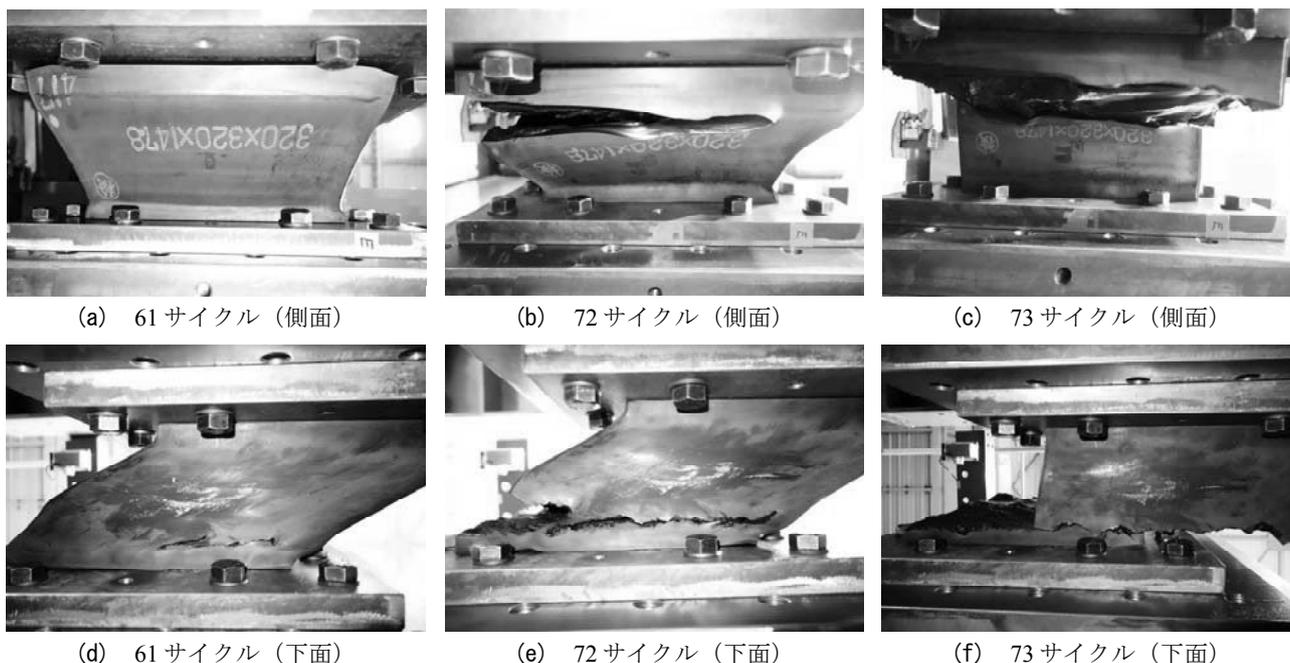


図-8 供試体 No.2の損傷状況

一側で-315kNであり、これらをNo.1と比較すると耐力がやや大きくなっている。この原因は、試験体のばらつき、また、上述したように支承部に作用する回転の具合がNo.1とNo.3で異なっていたことなどが考えられる。

#### b) 等価剛性および等価減衰定数の変化

図-9(b)～図-9(d)は、繰り返し载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、5サイクルから100サイクルまで繰り返し载荷回数が増えてもほぼ一定の値をとることがわかった。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RBにかかる負荷が小さく、100回程度の繰り返し载荷では、RBの等価剛性等価減衰定数に対してほとんど影響を及ぼさないことがわかった。

また、せん断ひずみ250%载荷において105サイクル～110サイクル+側の等価剛性に着目してみると、1700kN近い値が出ており、No.1の5サイクル载荷時の等価剛性よりやや大きな値となった。これは、a)で述べたように、No.3の105サイクル～110サイクルにおける最大水平耐力がNo.1、No.2よりも大きかったためと考えられる。

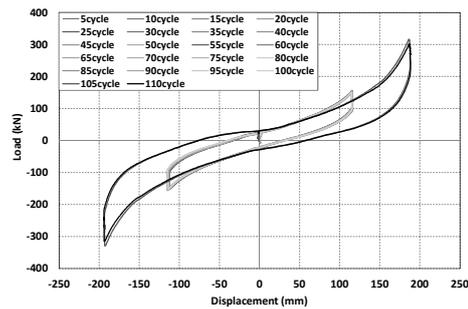
等価減衰定数に関しては、5サイクルから100サイクルまで繰り返し载荷回数が増えてもほぼ一定の値をとり、105サイクルより減少した。これはせん断ひずみ250%载荷時にはRBにハードニング現象が生じることにより、式(2)に示す弾性エネルギー $W$ がせん断ひずみ150%载荷時に比べ大きく増加したためと考えられる。

#### c) 履歴吸収エネルギーの変化

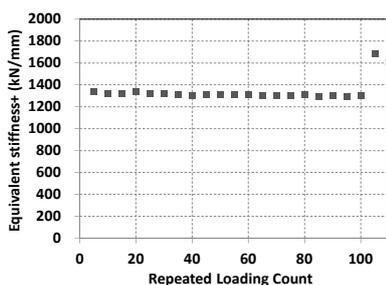
図-9(e)に繰り返し载荷回数に対する履歴吸収エネルギーの変化を示す。等価剛性、等価減衰定数と同様に、履歴吸収エネルギーも5サイクルから100サイクルまではほぼ一定の値であることが確認された。一方、105サイクル～110サイクルにおける履歴吸収エネルギーは、No.1の初期10サイクルまでの履歴吸収エネルギーと比べてみると、約4000kNmm程度大きくなる結果となった。これは、a)で述べたように、No.3の105サイクル～110サイクルにおける最大水平耐力がNo.1の初期10サイクルに比べやや大きかったこと、またNo.3の105サイクル～110サイクルにおいて切片荷重がNo.1の初期サイクルに比べ大きくなったことが原因であると考えられる。

#### d) 切片荷重の変化

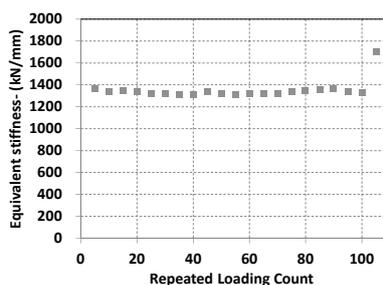
図-9(f)に繰り返し载荷回数に対する切片荷重の変化を示す。多少のばらつきは見られるが、せん断ひずみ150%载荷を行った5サイクルから100サイクルにおいては、繰り返し载荷回数が増えてもほぼ一定の値をとることがわかった。また、その後のせん断ひずみ250%の载荷時には、切片荷重が30kN程度



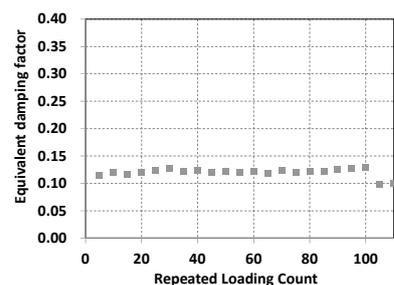
(a) 荷重-変位関係



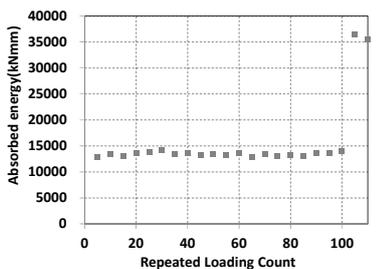
(b) 等価剛性 (+側)



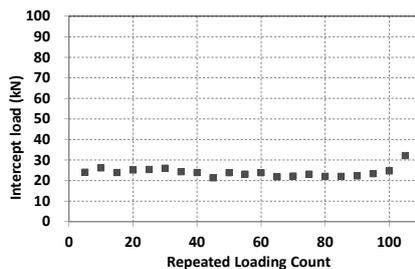
(c) 等価剛性 (-側)



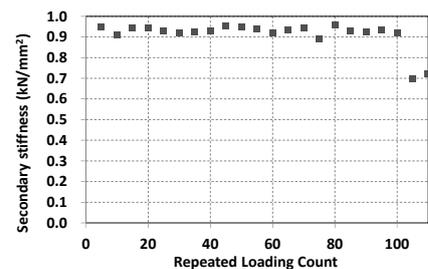
(d) 等価減衰定数



(e) 履歴吸収エネルギー



(f) 切片荷重



(g) 2次剛性

図-9 供試体 No.3 実験結果 (軸力 6MPa, せん断ひずみ±150%, 100~110cycleのみ±250%, 5cycleごとにプロット)

生じており、No.1の初期の載荷時に比べ10kN程度増加していた。これは、せん断ひずみ150%を100回繰り返し載荷したことで、載荷回数と共にゴムと鋼板の境界面付近で摩擦が生じたことが原因であると考えられる。しかし、5サイクルから100サイクルにかけて、載荷回数が増えても切片荷重の変化はほぼ見られなかったことから、せん断ひずみ150%では切片荷重の応答傾向に与えるほどの大きな摩擦は生じなかったと思われる。

#### e) 2次剛性の変化

図-9 (g) に繰り返し載荷回数に対する2次剛性の変化を示す。多少のばらつきはあるものの、せん断ひずみ150%載荷を行った5サイクルから100サイクルにおいては、繰り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、その後のせん断ひずみ250%の載荷時には、せん断ひずみ150%載荷時に比べ、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。

#### f) 損傷進展状況

ゴム支承の損傷状況については、供試体No.3ではせん断ひずみを150%としていたため、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10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。このことから、レベル1クラスの地震動の最大振幅を100回程度経験しても十分な耐震性能を有していることがわかった。

## 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、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た。本研究により得られた知見を以下に示す。

軸応力6MPa下でせん断ひずみ250%を100回繰り返し載荷した供試体No.1では、せん断ひずみ250%を100回繰り返し載荷を行っても、外部損傷はほとんどみられず、1サイクルから100サイクルを通して、各検討項目の応答特性に大きな変化がみられなかった。

供試体No.1から軸応力を1MPaと低くしてせん断ひずみ250%を100回繰り返し載荷した供試体No.2では、61サイクル載荷時に表面で亀裂が発生し、73サイクル載荷時に破断する結果となった。こうした損

傷に伴い、耐力や等価剛性が低下する傾向を示したが、今回の実験ではせん断変形が大きくなるに伴い載荷治具が若干回転していた関係でゴムの損傷が生じやすくなったと思われる。また、61サイクル載荷時に亀裂が生じてから73サイクルで破断に至るまで10サイクル程度の載荷を要しており、RBに亀裂が生じたとしても、すぐに破断することなく、レベル2クラス地震動の最大振幅を10回程度であれば耐える残存耐震性を有していることがわかった。

一方、せん断ひずみ150%を繰り返し載荷した供試体No.3では、No.1とNo.2に比べるとひずみレベルが小さかったため、1サイクルから100サイクルを通して、各検討項目の応答特性にも大きな変化はみられなかった。外観上の損傷もみられず、レベル1クラスの地震動の最大振幅を100回程度経験しても十分な耐震性能を有していることがわかった。

表-3 各供試体検討項目のまとめ

検討項目	供試体No.1	供試体No.2	供試体No.3
等価剛性	ほぼ一定	60サイクル以降急激に減少	ほぼ一定
等価減衰定数	ほぼ一定	60サイクル以降急激に増加	ほぼ一定
履歴吸収エネルギー	ほぼ一定	60サイクル以降急激に増加	ほぼ一定
切片荷重	ほぼ一定	60サイクル以降急激に増加	ほぼ一定
2次剛性	減少傾向	60サイクル以降急激に減少	ほぼ一定
損傷状況	ほぼ変化なし	61サイクル:亀裂発生 73サイクル:破断	ほぼ変化なし

謝辞：本研究では、ゴム支承協会の技術委員会の皆様に多大なご協力をいただきました。ここに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) 公益社団法人土木学会：土木学会西部支部「2016年熊本地震」地震被害調査報告会（ホームページ），<http://committees.jsce.or.jp/report/node/117>
- 4) 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載荷実験，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。
- 5) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，2004。
- 6) 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，JIS K 6411，2012。