大ひずみを複数回経験したゴム支承の 残存耐震性評価確認実験

崔 準祜1・成 炫禹2・今井 隆3・植田 健介4・和氣 知貴5

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:sung@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-gouda.co.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:ueda@mgb-gouda.co.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の破断や亀裂が生じ 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 る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能を評価することを目的とし、各種の積層ゴム支承を対象として、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。

Key Words : rubber bearing, cyclic 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⁹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³,この地震では震度7を2回観測,震度6 弱以上を7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^例 ^{えば、4,5,6},大ひずみ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、積層ゴム支承 (RB),鉛入り積層ゴム支承(LRB),超高減衰積層 ゴム支承(HDR-S)を対象として、許容ひずみ前後の大 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.また、その後の限界状態を評価するため、大ひず みを繰り返し載荷する限界状態確認実験を実施した.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. 正負交番載荷実験

(1) 実験供試体諸元

本実験に用いた供試体は、RB3体、LRB3体、HDR-S3



図-1 実験供試体の構造図(単位:mm)



図-2 実験装置の概要

$$S_1 = \frac{A_e}{2(a+b)t_a} \tag{1a}$$

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

本実験では、道路橋支承便覧 %における一次形状係数 S₁ が最小値(S₁>4)に近くなるように、ゴム一層の厚さを 15mm(S1=4.68~5.00)とした.また、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

		RB	LRB	HDR-S
平面形状	(mm)	300 × 300	300×300	300 × 300
単層厚	(mm)	15	15	15
積層数	(層)	5	5	5
総ゴム厚	(mm)	75	75	75
一次形状係数	-	5.00	4.68	5.00
二次形状係数	-	4.00	4.00	4.00
ゴム材の呼び	-	G12	G12	G12

表-1 実験供試体の諸元



図-3 実験供試体のセットアップ状況(RB)

に示す軸力載荷ジャッキにより供試体に軸力を,水平ジ 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.なお,本実験では, 実験装置の構造および供試体の二次形状係数の関係で, 大きな水平変位を与えた際に供試体に引張が発生しやす い条件となっている.

(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.

(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ものとした.鉛直荷重は荷重制御よ り、水平荷重は変位制御より与えた.また、本実験では、 載荷装置の能力から、水平方向載荷速度を 0.5mm/s と設 定して1日10回ずつ繰り返し載荷を行うこととし、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、 その後に5回繰り返し載荷を行う方法とした.

(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、JIS の試験方法 ⁹に基づき軸力を 6MPa (540kN) とし、せん断ひずみをレベル 2 地震動に対する許容値で ある 250% (187.5mm) とした. No.2 では、面圧依存性 を評価することを目的とし、供試体 No.1 から軸力を 1MPaと変化させ、せん断ひずみを 250%とした.一方、 供試体 No.3 では、軸力を 6MPa とし、せん断ひずみをレ ベル1 地震動を想定して 150%とした.

繰り返し載荷回数については、道路橋示方書V耐震設 計編¹⁰でレベル2地震動が作用したときに生じる許容変 位に相当する応答変位の繰り返し回数を5回と定めてい ること、また 2016 年熊本地震でレベル2相当地震が2 回続いて起きたことを勘案し、その後の残存耐震性を確 認するためレベル2地震動に対する道示規定の繰り返し 回数の4倍にあたる20回載荷後のゴム支承のせん断変 形性能を評価することとした。その後、ゴム支承の限界 状態を確認するために100回を限度として繰り返し載荷 を行った。供試体 No.3 では、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回加振した後、せん



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	
		±250%	±250%	±150%
せん断ひずみ	(%)	(100cycle	(100cycle	(100cycle終了後に
		載荷)	載荷)	±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、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		

断ひずみ250%を10回載荷した.

3. 実験結果

本文では、ゴム支承の水平荷重-水平変位の履歴、繰り返し載荷に伴う水平最大荷重、等価剛性、等価減衰定数の変化についてゴム支承ごとに分析するとともに、各ゴム支承の損傷進展状況について確認した.ここで算定した等価剛性は、荷重-変位履歴における第一象限上の結果を対象に、最大耐力が生じた点と減点を結ぶ線の傾きで評価した.等価減衰定数は、道路橋支承便覧[®]に基づき、式(2)を用いて算出した.

$$h_B = \frac{\Delta W}{2\pi W} \tag{2}$$

ここに, W:ゴム支承の弾性エネルギー

ΔW:ゴム支承が吸収するエネルギーの合計

(1) RBの結果

a) 荷重-変位履歴の変化

RB の各実験ケースの荷重-変位履歴と、+側の最大水 平耐力の変化を図-5 に示す.これらの結果は、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 のバージン効果による耐力上昇が確認されたためである.

まず No.1 の荷重-変位履歴をみると,繰り返し回数が 増えても,履歴形状として大きな変化はないことがわか る.また5サイクル目と100サイクル目の最大耐力を比 較すると,5サイクル目では286kN,100サイクル目で は266kNであり,初期の最大水平耐力から7%程度減少 したものの,大きな変化はみられていない.

一方, No.2 では, 61 サイクル目にゴム支承の表面に おいて亀裂が発生し, 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. 損傷状況の詳細につい ては c)にて述べるが, この破断に至るまでの荷重-変位 履歴を調べるため, 図-5(b)には 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 では全体的に繰り返し載荷回数が増えるにつれて 最大耐力が低下している傾向がみられた.最大水平耐力 をみてみると、5 サイクル目で 293kN,破断した 73 サイ クル目では 216kN であり、初期の最大水平耐力から著し く低下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. このように、No.2 ではゴム支承表面の亀裂と破断に伴 い、最大水平耐力が変化していることがわかった.

No.3 においては、まずせん断ひずみ 150%の 100 回繰 り返し載荷において RB の最大水平耐力に着目してみる と、+側、一側ともに繰り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 155kN、100 サイクル目では 150kN であり、最大水平耐 力が僅かに低下しているもののほとんど変化はみられな かった.また、せん断ひずみ 250%の繰り返し載荷にお



図-5 RBの水平荷重-水平変位の履歴(5サイクルごとに表示)

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 316kN、110 サイク ル目では 301kN であり、これらを No.1 と比較すると耐 力がやや大きい結果となった. この原因は、実験供試体 のばらつき、また支承部に作用する引張力の具合が 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

各実験ケースの等価剛性と等価減衰定数の変化を図-6, 図-7 に示す. a)にて示した荷重-変位履歴と同様に、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.

まず, No.1 の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 えらえる.

No.2 の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、亀裂が生じた 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るが、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.

No.3 の等価剛性については、5 サイクルから 100 サイ クルまで繰り返し載荷回数が増えてもほぼ一定の値をと ることがわかった.また、等価減衰定数に関しても、5 サイクルから 100 サイクルまで繰り返し載荷回数が増え てもほぼ一定の値となっており、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 し載荷では、RB の等価剛性や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.

c) 損傷進展状況

RBの No.1~No.3の 20 サイクル目載荷時の状況とその 後の損傷進展状況を**写真-1~写真-3**に示す. No.1 の場合, 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



図-7 RBの等価減衰定数の変化(5サイクルごとに表示)



(a) 20サイクル目 (-250%)





(a) 20サイクル目 (+250%)





(a) 20サイクル目 (+150%)

(b) 100 サイクル目 (+250%)

写真-1 No.1の外観状況(RB)

(b) 61 サイクル目(+250%)

写真-2 No.2の外観状況 (RB)

写真-3 No.3 の外観状況 (RB)

(b) 110サイクル目 (+250%)

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.

No.2 の損傷状況については,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 において写真-2(b)に示すように支承下面において亀裂が 確認された.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の応答特性が変化したと考 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.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.

また、本載荷装置では、載荷変位が大きくなっていく と鉛直載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 載荷装置にて同条件の実験を実施したが、その実験では 100回載荷を行っても異常が見つからなかった.

No.3 においては、せん断ひずみを 150%としていたこ ともあり、No.1 と同様に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 101 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.

d) 残存耐震性評価

No.1, No.2 ともに,許容せん断ひずみ±250%を 20 回 繰り返し載荷しても,荷重-変位履歴,最大耐力,等価 剛性,等価減衰定数の諸特性に大きな変化はなく,外観 上の変状もみられなかった.したがって,道示Vに規定 されるレベル 2 地震動が連続 2 回発生した場合を想定し た繰返し回数 10 回後におけるゴム支承の残存耐震性能 は確認された.No.3 試験体に対して実施した,レベル 1 地震動相当の許容せん断ひずみ±150%を 100 回繰返し 加振した後,レベル 2 地震動に相当するせん断ひずみ 250%を与えても,荷重-変位履歴,最大耐力,等価剛性, 等価減衰定数の諸特性に大きな変化はなく,外観上の変 状もみられなかった.

(2) LRBの結果

a) 荷重-変位履歴の変化

LRB の各実験ケースの荷重-変位履歴と、+側の最大 水平耐力の変化を図-8 に示す. LRB の結果についても RB と同様に各載荷日の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ている.

まず No.1 の荷重-変位履歴をみると,繰り返し回数が 増えるにつれて,最大耐力が少しずつ低下していくこと がわかる.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るにつれ,最大水平耐 力がほぼ一定間隔で小さくなっていく傾向を示したが, 40 サイクル目から LRB 側面の膨らみが大きくなり,荷 重低下がやや大きくなっている.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 310kN, 100 サイクル目では 202kN であり,初期の最 大水平耐力に比べ約 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 の最大水平耐力の低下 は,等価剛性の変化にも影響を及ぼすと考えられる.

No.2 の荷重-履歴においては、No.1 と同様に繰り返し 載荷回数が増えるにつれ、最大水平耐力がほぼ一定間隔 で小さくなる結果となった.5サイクル目と 100 サイク ル目の最大水平耐力を比較してみると、5 サイクル目で は 307kN、100 サイクル目では 227kN であり、No.1 と同 程度で低下していることがわかった.履歴形状について No.1 と比較してみると、軸力が小さいため、降伏耐力 が小さく、履歴面積も小さい結果となっている.

No.3 の荷重-変位履歴においては、まずせん断ひずみ 150%の 100 回繰り返し載荷において LRB の最大水平耐 力に着目してみると、繰り返し載荷回数が増加しても耐 力が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 170kN, 100 サイクル目では 171kN 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%繰り返し載荷において、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319kN、110 サイクル目では309kN 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回繰り返して与え ても、その後のLRBの水平耐力および荷重変位の履歴 特性は初期状態のそれら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

まず, No.1の等価剛性から見てみると, 繰り返し載 荷回数が増えるにつれ, 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**)にて述べたように繰り返 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,これは載荷中に軸力が少し 抜けていたことが原因である.一方,等価減衰定数につ いては,繰り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,繰り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



図-8 LRBの水平荷重-水平変位の履歴(5サイクルごとに表示)

れる.

No.2の等価剛性については、No.1と同様に繰り返し 載荷回数が増えるにつれ、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、切片荷重が40サイクル付近から少し低下する傾 向にあるため、これに伴い等価減衰定数も少し低下して いたが、全体的にみると繰り返し載荷回数が増えるにつ れて等価減衰定数の変化はほとんどないとみてよいと思 われる.

No.3 においては、No.1、No.2 とは異なり、繰り返し載 荷回数が増えるにつれ、等価剛性、等価減衰定数どちら も微少に増加しているものの、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 回程度の繰り 返し載荷下では、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った.また、せん断ひず み 250%載荷において 105 サイクル~110 サイクルの等価 剛性に着目してみると、等価剛性が減少しているが、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ことがわかった. の後の損傷進展状況を写真4~写真6 に示す. No.1 の場 合,20 サイクル目の載荷までは外観上の変化はみられ なかったが,21 サイクル目の載荷から LRB の側面が膨 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,40 サイクル 目には写真-4(b)に示すように LRB 上下部において膨ら みが確認された.その後 100 サイクルまで加振した結果, 性能上の大きな問題は生じていないが,鉛の吐出が確認 された.

こうした LRB の外観変状がみられても、図-8(a)に示 したように荷重-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、これらのゴム支承のせん断変 形特性が支承の外観変状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 の側面に膨ら みが生じたとしても、直ちに性能が変化することはなく、 LRB としては十分な残存耐震性を有していることが確 認された.

No.2 の損傷状況については、30 サイクル目から LRB 側面において膨らみがみられ、100 サイクル目の載荷で は**写真-5(b)**に示すような膨らみが確認されたが、No.1 の ような外観変状はみられなかった.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、支 承の負担が大きく軽減されたことが原因と考えられる.

d) 残存耐震性評価

No.1, No.2 ともに, 許容せん断ひずみ±250%を 20 回 繰り返し載荷しても, 荷重-変位履歴, 最大耐力, 等価



図-10 LRBの等価減衰定数の変化(5サイクルごとに表示)

LRBの No.1~No.3の 20 サイクル目載荷時の状況とそ

c) 損傷進展状況



(a) 20サイクル目 (+250%)



(b) 40 サイクル目 (+250%)

写真-4 No.1 の外観状況(LRB)



(a) 20サイクル目 (-250%)



(b) 100サイクル目 (-250%)

写真-5 No.2 の外観状況 (LRB)



(a) 20サイクル目 (-150%)



(b) 110サイクル目 (+250%)

写真-6 No.3 の外観状況 (LRB)

剛性,等価減衰定数の諸特性に大きな変化はなく,外観 上の変状もみられなかった.したがって,道示Vに規定 されるレベル2地震動が連続2回発生した場合を想定し た繰返し回数10回後におけるゴム支承の残存耐震性能 は確認された.No.3試験体に対して実施した,レベル1 地震動相当の許容せん断ひずみ±150%を100回繰返し 加振した後,レベル2地震動に相当するせん断ひずみ 250%を与えても,荷重-変位履歴,最大耐力,等価剛性, 等価減衰定数の諸特性に大きな変化はなく,外観上の変 状もみられなかった.

LRB 実験においても実験供試体が回転を伴うせん断 挙動を行っていたため、RB と同様に損傷が生じやすい 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 転が生じない載荷装置にて同条件の実験を実施したが、 その実験では今回の実験結果のような大きな変状はみら れず鉛の吐出もなかった.

(3) HDR-Sの結果

a) 荷重-変位履歴の変化

HDR-S の各実験ケースの荷重-変位履歴と、+側の最 大水平耐力の変化を図-11 に示す. HDR-S の結果につい ても、RB、LRB と同様に各載荷日の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ている.

まず No.1 の荷重-変位履歴をみると,20 サイクル目までは、履歴形状が繰り返し回数が増えるにつれてほとんど変化が見られていないが、25 サイクル目の結果からせん断ひずみ100%付近から耐力が低下しており、履歴形状が大きく変化していることがわかる.これは、23

サイクル目の載荷時に HDR-S の下面において亀裂が発 生したことが原因である.この亀裂に伴いゴムの内部摩 擦が大きくなったため切片荷重が増加,履歴形状も大き くなっていく結果となったが、25 サイクル以降からは ほとんど同じ履歴ループを描くことがわかった.またせ ん断ひずみ 250%時の最大水平耐力に着目してみると、 10 サイクル目では 354kN, 20 サイクル目では 356kN で あり、20 サイクルまではほとんど変化が見られなかっ たが、25 サイクル目では 225kN, 45 サイクル目では 221kN に低下しており、初期の最大水平耐力に比べ約 38%程度の耐力が小さくなっていたことがわかった.

No.2 の荷重-変位履歴においては,30 サイクルまでは 繰り返し回数が増えるにつれて履歴形状はほとんど変化 しなかったが,40 サイクル目の-250%載荷時に HDR-S が 破断したため,せん断ひずみ-200%付近で耐力が急激に 落ちる結果となった.またせん断ひずみ 250%繰り返し 載荷における最大水平耐力をみてみると,25 サイクル 目から徐々に低下していき,30 サイクル目からは減少 幅は大きく傾向にあった.39 サイクル目までは外観上 特に損傷はみられていなかったが,繰り返し載荷回数が 増えるにつれて残留変形が大きくなっていたことから, HDR-S がかなりやわらかい状態になっていたと推察さ れる.

No.3 の荷重-変位履歴においては、まずせん断ひずみ 150%の 100 回繰り返し載荷において HDR-S の最大水平 耐力に着目してみると、繰り返し載荷回数が増加しても 耐力が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179kN, 100 サイクル目では 191kN であり、耐



図-13 HDR-Sの等価減衰定数の変化(5サイクルごとに表示)

カがやや増加しているもののほとんど変化がないといえ る.また,せん断ひずみ 250%繰り返し載荷において, 110 サイクル目の最大水平耐力は 372kN であり, No.1 の 10 サイクル目の耐力よりやや大きくなる結果となった が,大きな差異ではないとみてよいと思われる.このこ とから,150%のせん断ひずみを 100 回繰り返して与え ても,その後の HDR-S の水平耐力および荷重変位の履 歴特性は初期状態のそれら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

まず,No.1の等価剛性から見てみると、20サイクルまでは繰り返し載荷回数が増えるにつれてほとんど変化しないが、下面に亀裂が生じた23サイクル以降からは最大水平耐力の減少に伴い、等価剛性が急激に減少していることがわかる.一方、等価減衰定数については、繰り返し載荷回数が増えるにつれて増加していく傾向を示しているが、特に亀裂が発生した23サイクル以降から等価減衰定数が大きく増加する傾向が見られた.これは、 a)にて述べたようにHDR-Sに亀裂が生じてからはゴムの内部摩擦が大きく増加したため、切片荷重の上昇に伴い履歴形状が大きくなったためと考えられる.

No.2の等価剛性については、最大水平耐力の変化と 同様に25サイクルまではほとんど変化がみられていな いが、25サイクルから徐々に等価剛性が低下していく ことが確認された. 亀裂が生じた40サイクル目の等価 剛性は1329kN/mmであり、初期の等価剛性に比べ20% 程度低下していたことがわかった. 等価減衰定数につい ては、25サイクル目から上昇していたが、その上昇幅 はHDR-Sが破断するまではそれほど大きくない. a)に て述べたように今回用いた HDR-S は繰り返し載荷回数 が増えるにつれて残留変形が大きくなっていたが, No.2 では軸力が小さく,内部摩擦が小さかったためと考えら れる.

No.3 においては、No.1、No.2 とは異なり、繰り返し載 荷回数が増えるにつれ、等価剛性は微小に増加、等価減 衰定数は微少に減少しているものの、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回程 度の繰り返し載荷下では、繰り返し載荷回数が等価剛性, 等価減衰定数に及ぼす影響は小さいことがわかった.ま た、せん断ひずみ 250%載荷において 110 サイクル目の 等価剛性は 1963kN/mm であり、No.1 の 10 サイクル目の 等価剛性に比べやや大きいが、それほど大きな差はみら れていない.

c) 損傷進展状況

HDR-Sの No.1~No.3の 20 サイクル目載荷時の状況と その後の損傷進展状況を写真-7~写真-9 に示す. No.1の 場合, 20 サイクル目の載荷までは載荷後の残留変形が みられたものの,外観上大きな変状はみられなかった. しかし,23 サイクル目の-250%載荷時に HDR-S上面にお いて亀裂が発生し(写真-8(a)),その後 25 サイクル目 +250%載荷時に下面の下プレート近傍で初めて亀裂が発 生した.40 サイクル目の+250%載荷後には,下面の下層 において内部鋼板がはみ出ており,内部のゴム層と鋼板 が切り離れた状態が確認された.

No.2 の損傷状況については、30 サイクル載荷までは、 繰り返し載荷回数が増えるにつれてゴムの下層において



(a) 20サイクル目 (-250%)



(b) 23 サイクル目(-250%)写真-7 No.1の外観状況(HDR-S)



(a) 20 サイクル目 (-250%)



(b) 40 サイクル目 (-250%)

写真-8 No.2 の外観状況 (HDR-S)



(a) 20サイクル目 (-150%)



(b) 110サイクル目(-250%)写真-9 No.3の外観状況(HDR-S)

残留変形が少しみられたものの、大きな外部損傷はみられなかった. 40 サイクル目の-250%載荷時に、下面において大きな亀裂が発生すると同時に破断した.

No.3 の損傷状況については,繰り返し載荷回数が増 えるにつれてゴムの下層において残留変形が少しみられ たものの,せん断ひずみを 150%としていたこともあり, No.1 と No.2 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 101 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.

d) 残存耐震性評価

No.1, No.2 ともに,許容せん断ひずみ±250%を 20 回 繰り返し載荷しても,荷重-変位履歴,最大耐力,等価 剛性,等価減衰定数の諸特性に大きな変化はなく,外観 上の変状もみられなかった.したがって,道示Vに規定 されるレベル 2 地震動が連続 2 回発生した場合を想定し た繰返し回数 10 回後におけるゴム支承の残存耐震性能 は確認された.No.3 試験体に対して実施した,レベル 1 地震動相当の許容せん断ひずみ±150%を 100 回繰返し 加振した後,レベル 2 地震動に相当するせん断ひずみ 250%を与えても,荷重-変位履歴,最大耐力,等価剛性, 等価減衰定数の諸特性に大きな変化はなく,外観上の変 状もみられなかった.

HDR-S 実験においても RB, LRB と同様に実験供試体 が回転を伴うせん断挙動を行っていたため,損傷が生じ 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載荷装置にて同条件の実験を実施し たが,その実験では No.1 の場合 45 サイクル載荷時に, No.2 の場合 85 サイクル載荷時にそれぞれ亀裂が発生し た.

4. まとめ

本研究では、大ひずみを複数回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、RB、LRB、HDR-S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.本研究では、まずレベル2地震動が2回連続発生した場合を想定し、せんひずみ250%を10回繰り返し載荷したときのせん断特性を評価することにより、ゴム支承の残存耐震性を評価した.また、その後の限界状態を評価するため、No.1では軸力を6MPa、No.2では軸力を1MPaとしてせん断ひずみ250%を100回まで繰り返し載荷した.No.3ではレベル1地震動を想定し、軸力を6MPaとしてせん断ひずみ150%を100回載荷した後せん断ひずみ250%を10回載荷した後せん断ひずみ250%を10回載荷した後せん断ひずみ250%を10回載荷した実験を行った.本研究によ

り得られた知見を以下に示す.

(1) RBの結果について

許容せん断ひずみ 250%を 20回まで繰り返し載荷した 結果をみると、No.1, No.2, No.3 ともに荷重-変位履歴, 最大耐力,等価剛性,等価減衰定数の諸特性に大きな変 化はなく,外観上の変状もみられなかった.したがって, レベル2地震動2回に対する残存耐震性を有していると いえる.

また,その後の載荷に対してケースごとに整理すると, まず No.1 においてはせん断ひずみ 250%を 100 回繰り返 し載荷しても荷重-変位履歴,最大耐力,等価剛性,等 価減衰定数の諸特性に大きな変化はなく,外観上の変状 もみられなかった.一方, No.2 においては,せん断ひ ずみ 250%を 60 回載荷したところまでは異常はみられな かったが,61 サイクル目の載荷時に RB 表面に亀裂が発 生,73 サイクルで破断した.これに伴い,60 サイクル 付近から等価剛性や等価減衰定数の応答特性が変化した. No.3 の場合は,せん断ひずみが 150%と小さかったため, 外観上目立った損傷も無く,荷重-変位履歴,等価剛性, 等価減衰定数もほとんど変化しない結果となった.

(2) LRB の結果について

許容せん断ひずみ 250%を 20回まで繰り返し載荷した 結果をみると、LRBにおいても No.1、No.2、No.3 ともに 荷重-変位履歴,最大耐力,等価剛性,等価減衰定数の 諸特性に大きな変化はなく,外観上の変状もみられなか った.したがって,レベル 2 地震動 2 回に対する残存耐 震性を有しているといえる.

また、その後の載荷に対してケースごとに整理すると、 まずNo.1においては、繰り返し回数が増えるにつれて最 大耐力が少しずつ低下し、これに伴い等価剛性も低下す る傾向を示した。40サイクル目からはLRB側面の膨らみ が大きくなり、最大水平耐力や等価剛性の低下度合が大 きくなった。No.2においては、No.1と同様に繰り返し載 荷回数が増えるにつれ、最大水平耐力がほぼ一定間隔で 小さくなる結果となり、等価剛性はほぼ一定の比率で減 少していたが、等価減衰定数はほとんど変化しないこと が確認された。No.3においては、繰り返し載荷回数100 回を経験しても、最大水平耐力がほぼ一定であり、等価 剛性、等価減衰定数においてもどちらも微少に増加して いるものの、ほぼ一定の値であることが確認された。

(3) HDR-Sの結果について

許容せん断ひずみ 250%を 20回まで繰り返し載荷した 結果をみると, HDR-Sにおいても No.1, No.2, No.3 とも に荷重-変位履歴,最大耐力,等価剛性,等価減衰定数 の諸特性に大きな変化はなく,外観上の変状もみられな かった.したがって、レベル2地震動2回に対する残存 耐震性を有しているといえる.

また,その後の載荷に対してケースごとに整理すると, まず No.1 においては,20 サイクル目までは,履歴形状 が繰り返し回数が増えるにつれてほとんど変化が見られ ていないが,23 サイクル目の載荷時に亀裂が発生し, それ以降水平耐力や等価剛性が大きく低下した.No.2 においては,40 サイクル目の載荷時に大きな亀裂が発 生すると同時に破断する結果となった.No.3 において は,RB,LRB と同様に外観上の変状はなく,最大水平 耐力や等価剛性,等価減衰定数にも大きな変化はみられ なかった.

本実験では、実験装置の構造および二次形状係数 (S₂=4)が不利な供試体を使用した関係で、大きな水平 変位を与えた場合供試体に引張が発生し、ゴム支承によ り厳しい条件下での実験となった.そのため、引張が生 じない実験装置を所有する支承製造会社にて再現実験を 実施しており、その結果供試体に外観上異常が生じる繰 返し回数が増加したことが確認された.

謝辞:今回の実験にあたり実験供試体の提供および実験 に協力していただいたゴム支承協会技術委員の皆様に感 謝の意を表します.

参考文献

 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.

- 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) 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.
- 5) 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.
- 6) 林訓裕,足立幸郎,甲元克明,八ッ元仁,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.
- 植田健介,今井隆,崔準祜: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.
- 8) (社)日本道路協会:道路橋支承便覧, 2004.
- 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.
- (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2012.
- 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 LARGE DEFORMATIONS BASED ON CYCLIC LOADING TESTS

Joon-Ho CHOI, Hyunwoo SUNG, Takashi IMAI, Kensuke UEDA and Tomotaka WAKE

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 earthqukaes as like the above great earthquakes has not been identified. In this study, in order to investigate the residual seismic performances of Rubber Bearings (RB), Lead Rubber Bearings (LRB) and High Damping Rubber-super (HDR-S), load-displacement hysteresis, equivalent stiffness, equivalent damping, cyclic loading tests using 3 test pieces per each type of rubber bearing were conducted. No.1 was subjected to axial force with 6MPa and 100 cycles lateral loadings with shear strain of 250%. No.2 was subjected to the axial force with 1MPa and 100 cycles lateral loadings with the shear strain of 250%. No.3 was subjected to the axial force with 6MPa and 100 cycles lateral loadings with the shear strain of 250%. No.4 was subjected to the axial force with 6MPa and 100 cycles lateral loadings with the shear strain of 250%. No.4 was subjected to the axial force with 6MPa and 100 cycles lateral loadings with the shear strain of 250%. No.4 was subjected to the axial force with 6MPa and 100 cycles lateral loadings with the shear strain of 250%. No.4 was subjected to the axial force with 6MPa and 100 cycles lateral loadings with the shear strain of 250%.