



Title	鉛プラグ入り積層ゴムの水平二方向加力時の力学挙動に関する研究
Author(s)	仲村, 崇仁
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11132号
Issue Date	2013-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11132
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/53884
Type	doctoral thesis
File Information	Takahito_Nakamura.pdf



鉛プラグ入り積層ゴムの水平二方向加力時の
力学挙動に関する研究

仲村 崇仁

2013 年 9 月

鉛プラグ入り積層ゴムの水平二方向加力時の
力学挙動に関する研究

Mechanical Behavior of Lead Rubber Bearings
under Bi-directional Loading

北海道大学大学院工学院 建築都市空間デザイン専攻
空間構造環境学研究室

仲村 崇仁

論文要旨

近年、超高層免震建物の実地震応答特性を調べる目的で実大積層ゴム支承の水平二方向加力試験が実施され、主要な免震支承の一つである高減衰積層ゴム(以下、HDR)を水平二方向に加力すると、破断限界ひずみが水平一方向加力時よりも低下する現象が確認された。本来、地震動は三次元的に建物に入力されることから、水平二方向加力時における破断限界ひずみの低下現象は免震建物の安全性に直接的に関わる課題であるとの認識により、HDR の水平二方向力学挙動の解明が精力的に進められ、限界性能評価方法が確立されるに至った。一方、HDR とともに主要な免震支承の一つである鉛プラグ入り積層ゴム(以下、LRB)については、未だ水平二方向加力に関する検討事例はわずかであり、蓄積された知見も非常に少ない。LRB は HDR と同様に支承と減衰機能が一体となった免震支承である。減衰機能を有する免震支承が水平二方向に変形した場合、復元力の方向が変位の原点を向かないことによって、鉛直軸まわりにねじれモーメントが発生する。ねじれモーメントは積層ゴムに付加的なせん断ひずみを発生させ、それが破断限界ひずみの低下の要因とされている。HDR の破断限界ひずみの低下現象が減衰機能の発揮に起因していることから、LRB でも同様の現象が生じる懸念がある。本論文では、鉛プラグ入り積層ゴムの水平二方向力学挙動を解明しており、全 5 章で構成されている。各章の概要は以下の通りである。

第 1 章「序論」では、本研究の目的として免震構造に供用される積層ゴム支承の基本原則と要求性能を示した。また、近年の研究で課題となった水平二方向加力による HDR の履歴ループ面積の増大や破断限界ひずみの低下現象に関する知見をまとめた。続いて、LRB の水平二方向力学挙動の解明に必要とされる検討項目を整理し、それらの具体的な検討方法について示した。

第 2 章「実験計画」では、LRB の水平二方向特性を詳細に把握するための実験計画を策定した。初めに、LRB の水平二方向力学挙動に影響する設計因子を抽出し、試験体パラメータを設定した。試験体パラメータは丸型、角型の 2 種類の断面形状、ゴム層の構成、鉛プラグの断面積、角型断面の LRB については鉛プラグの配置と本数とした。次に LRB の水平二方向加力試験を行うため、三軸試験機を新たに設計し製作開発した。同試験機は鉛直軸、水平主軸、水平副軸の計三軸で構成され、これらを高精度に同時制御する水平二方向加力試験が可能である。最後に、加力試験に使用する水平二方向変位波形について検討を行い、一方向、楕円、真円の変位軌跡を統一的に表現可能な位相差入力を採用することで、積層ゴムに与えるエネルギー量が加力パターンによらず同等となる加力プログラムを作成した。

第 3 章「水平二方向加力時の復元力特性」では、LRB の水平二方向加力試験を行い、復元力特性の分析および解析を行った。水平二方向加力による LRB の履歴曲線には、HDR で確認された履歴ループ面積の顕著な増大は生じなかった。また、試験体断面形状による差も少なかった。復元力特性値に関する検討においては、降伏荷重において LRB の設計で

従来用いられている評価式が、水平二方向加力時の履歴曲線にも概ね適用できることが明らかとなった。しかし、降伏後剛性は水平二方向加力の影響により、一方向、楕円、真円加力の順に剛性が低下した。続いて、水平二方向加力の加力オービット上の復元力ベクトルを原点方向に向かう力を弾性力、接線方向に生じる力を減衰力として分析した結果、弾性力は積層ゴムのゴム部弾性剛性から計算される荷重に、減衰力は鉛プラグの降伏荷重に対応することが明らかになった。最後に LRB の水平二方向加力特性のシミュレーション解析を行い、試験結果を良好に再現できた。

第 4 章「水平二方向加力時の限界特性」では、LRB が破断あるいは座屈するまでの限界加力試験を行い、試験体形状パラメータによる限界特性の変化を明らかにした。試験の結果、LRB の限界ひずみは鉛プラグの無い天然ゴム系積層ゴム(以下、RB)と同等であり、水平二方向加力による限界ひずみの低下はあまり見られなかった。また、角型、丸型の断面形状および鉛プラグの配置や本数などの試験体形状による限界ひずみの差も見られなかった。LRB の水平二方向加力における限界ひずみの変化は、積層ゴムの幅と高さの比を表す二次形状係数の違いによってのみ生じ、限界ひずみは二次形状係数が大きくなるほど増大する。ねじれモーメントの最大値とひずみレベルの関係については、鉛プラグの配置と本数および断面形状の違いによる差は楕円加力、真円加力ともに小さい結果となった。次に、LRB のねじれ変形を画像解析により計測し、二方向加力によって生じる局部ねじれせん断ひずみと主軸せん断ひずみの関係について検討した。局部ねじれせん断ひずみは、低せん断ひずみ領域では試験体パラメータによる違いが影響するが、せん断ひずみ 400%以上の限界ひずみ領域ではその影響が小さくなる傾向が見られた。最後に LRB と RB の限界ひずみ領域における復元力ベクトルを分析し、LRB の限界ひずみが水平二方向加力において大きく低下しない要因について検討した。LRB は水平二方向加力時においても履歴ループ面積が増大せず、せん断応力も過度に増加しない。したがって、せん断ひずみが増加しても復元力ベクトルの方向は原点方向に収束するために、限界ひずみ低下の要因とされるねじれモーメントは増大せず、ねじれ変形も少ないことが原因であると結論づけた。

第 5 章「結論」では、本論文の成果をまとめ、今後の課題と展望について述べた。

関連発表論文

[論文]

1. 西村拓也, 山本祥江, 黒澤到, 菊地優, 甲斐芳郎, 仲村崇仁: 水平鉛直同時変動時の積層ゴムの大変形挙動特性 (多軸ばねモデルによる天然ゴム系積層ゴムの力学モデルの構築), 構造工学論文集, Vol.55B, pp.1-9, 2009 年 3 月
2. 竹中康雄, 近藤明洋, 高岡栄治, 引田真紀子, 北村春幸, 仲村崇仁: 積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 646 号, pp.2245-2253, 2009 年 12 月
3. 菊地優, 山本祥江, 仲村崇仁, 西村拓也, 田村和夫: 3 次元並列多軸ばねを用いた角型鉛プラグ入り積層ゴムの大変形挙動解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 638 号, pp.647-655, 2009 年 4 月
4. Masaru Kikuchi, Takahito Nakamura, Ian D. Aiken :Three-dimensional analysis for square seismic isolation bearings under large shear deformations and high axial loads, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 39, pp.1513-1531, 2010.
5. 仲村崇仁, 菊地優, 石井建, 河内山修: 鉛プラグ入り積層ゴムの水平二方向復元力特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 681 号, pp.1663-1671, 2012 年 11 月
6. 仲村崇仁, 菊地優, 石井建, 河内山修: 鉛プラグ入り積層ゴムの水平二方向限界特性, 日本建築学会技術報告集, 第 42 号, pp.471-476, 2013 年 6 月

[発表]

1. 仲村崇仁, 河内山修, 宮崎充, 高岡栄治, 竹中康雄, 北村春幸: 大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究 (その 3 実大鉛プラグ入り積層ゴム動的加振実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.871-872, 2007 年 8 月
2. 仲村崇仁, 宮崎充, 金子修平, 北村佳久, 西村拓也: 積層ゴムにおける傾斜角付加時の力学特性について (その 3) セン断特性試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.375-376, 2008 年 9 月
3. 藤田幸憲, 菊地優, 仲村崇仁: 角型鉛プラグ入り積層ゴムの極限挙動解析 (その 1 力学モデルの構築), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.825-826, 2009 年 8 月

-
4. 仲村崇仁, 菊地優, 西村拓也: 角型鉛プラグ入り積層ゴムの極限挙動解析 (その2 せん断加力試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.827-828, 2009年8月
 5. 菊地優, 仲村崇仁, 田村和夫: 角型鉛プラグ入り積層ゴムの極限挙動解析 (その3 解析手法の検証) 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.829-830, 2009年8月
 6. 仲村崇仁, 河内山修, 長田修一, 池永雅良, 和田章: 実大角型鉛プラグ入り積層ゴムの二方向加力実験, 日本建築学会関東支部研究報告集Ⅰ, pp.301-304, 2011年2月, (CD-R)
 7. 仲村崇仁, 菊地優, 石井建, 鈴木頼子: 鉛プラグ入り積層ゴムの水平二方向力学特性に関する研究 (その1 縮小試験体の水平二方向加力試験) 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.507-508, 2011年8月
 8. 菊地優, 石井建, 鈴木頼子, 仲村崇仁: 鉛プラグ入り積層ゴムの水平二方向力学特性に関する研究 (その2 並列軸ばねモデルによるシミュレーション解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.509-510, 2011年8月
 9. 仲村崇仁, 河内山修, 菊地優, 石井建, 山本雅史, 嶺脇重雄, 鴨下直登: 弾性すべり支承の水平二方向特性に関する実験的研究 (その1: 実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.315-316, 2012年9月
 10. 鴨下直登, 山本雅史, 嶺脇重雄, 菊地優, 石井建, 仲村崇仁, 河内山修: 鴨下直登: 弾性すべり支承の水平二方向特性に関する実験的研究 (その2: 実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.317-318, 2012年, 9月
 11. 菊地優, 石井建, 山本雅史, 嶺脇重雄, 鴨下直登, 仲村崇仁, 河内山修: 弾性すべり支承の水平二方向特性に関する実験的研究 (その3: シミュレーション解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.319-320, 2012年, 9月
 12. Takahito Nakamura, Osamu Kouchiyama, Masaru Kikuchi :Behaviors of lead rubber bearing under horizontal bi-directional loading test, Proceeding of the15thWorld Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012.9 (USB-Memory)
 13. Masashi Yamamoto, Shigeo Minewaki, Naoto Kamoshita, Masaru Kikuchi, Ken Ishii, Osamu, Kouchiyama, Takahito Nakamura : Behaviors of a Sliding Rubber Bearing under Horizontal Bidirectional Loadings, Proceeding of the15thWorld Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012.9 (USB-Memory)

謝辞

この研究は筆者が北海道大学大学院工学院建築都市空間デザイン専攻後期博士課程在学中に同大学大学院工学研究院教授 菊地優博士ご指導のもとに行ったものです。

筆者が免震構造に関する本研究を行ったのは、平成 11 年にオイレス工業に入社して鉛プラグ入り積層ゴム、以下 LRB の技術開発に従事することがきっかけとなりました。LRB の技術開発を遂行する過程において、平成 18 年に菊地優先生の実験のお手伝いをさせて頂き、当時困難であった大変形領域における履歴特性の解析が可能であることを知りました。これをきっかけに、先生から LRB の技術開発に多くのご指導ご助言を頂き、本研究テーマである「鉛プラグ入り積層ゴムの水平二方向加力時の力学挙動に関する研究」のご指導を賜るに至りました。

研究を遂行するにあたり、終始暖かい激励とご指導ご鞭撻を頂きました菊地優先生に、心より感謝申し上げます。

学位論文の審査において、貴重なご指導とご助言を頂いた北海道大学大学院工学研究院教授 緑川光正博士、同 特任教授 林川俊郎博士に心より感謝申し上げます。

実験や解析の実施にあたり、北海道大学 日本学術振興会特別研究員 石井建博士の協力を頂いたことを深く感謝申し上げます。

本研究を行うにあたり、新たに開発、製作した試験機はオイレス工業 足利工場 長田修一 工場長（当時、技術開発部 部長）の熱心なご指導と数多くのご助言なくしては、不可能であったことを記すとともに深甚の謝意を表します。

在学中、多忙極まる中、本研究に専念させて頂いたオイレス工業 技術開発部 宮崎充 部長、同 開発課 課長 河内山修 博士、佐藤新治さん、鈴木清春さん、長島和央さん、荒水照夫さん、田中剛さん、和氣知貴さん、岩崎雄一さん、藤井芳幸さん、北林良太さん、長弘健太さん、庄司嵩さん、由利健太さん、小林貴与子さん、並びに、建築設計課 佐々木和彦さん（当時 開発課）、足利工場 稲葉和則さん（当時 開発課）、同 藤生重雄さん（当時 開発課）に心より感謝申し上げます。

試験機の設計、製作、組み立てに協力頂いた、オイレス工業 技術開発部 支承設計課 小南雄一郎さん（当時 開発課）、同 鈴木敬崇さん（当時 開発課）に心より感謝申し上げます。

実験の実施にあたり素晴らしい試験体を製作して頂いた、オイレス工業 足利工場の皆様の協力を深く感謝申し上げます。

また、研究を遂行するにあたり、ご支援、ご協力を頂きなら、ここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々に心より感謝申し上げます。

最後になりますが、論文の執筆を見守って頂いた両親と、学位取得への挑戦を快く承諾し、どのような状況でも応援してくれた 妻 玲に心から感謝します。

2013 年 9 月 仲村 崇仁

目 次

論文要旨	i
関連発表論文	iii
謝辞	v
目次	vi
第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 既往の研究	9
1.3 研究の方法	20
第 1 章の参考文献	24
第 2 章 実験計画	26
2.1 概要	26
2.2 試験体	27
2.3 加力方法	35
2.4 まとめ	49
第 2 章の参考文献	50
第 3 章 水平二方向加力時の復元力特性	52
3.1 概要	52
3.2 実験結果	54
3.3 水平二方向加力のシミュレーション解析	77
3.4 まとめ	81
第 3 章の参考文献	82
第 4 章 水平二方向加力時の限界特性	83
4.1 概要	83
4.2 実験結果	85
4.3 ねじれ挙動	103
4.4 水平二方向限界特性に関する考察	116
4.5 まとめ	126
第 4 章の参考文献	128

第 5 章 結論	129
5.1 研究の総括	129
5.2 今後の課題	131

第1章

序論

1.1 研究の背景と目的

免震構造とは、建築物の基礎と上部構造の間、または中間層の柱間に積層ゴムに代表されるアイソレータを設置して、建物下部から入力される地震動を上部構造に伝えないように絶縁する構造である（図 1.1）。耐震構造は地震エネルギーを構造躯体の耐力で抵抗し、その応答は大きな加速度を伴う。また、レベル2以上の地震では構造躯体の塑性化を許容する。一方、免震構造はアイソレーターが大きく変形することにより小さな加速でゆっくりと揺れる。これにより、免震構造は上部構造に入力される地震エネルギーを大幅に減少させ、構造躯体を弾性範囲に留めることが可能となる。そのため、地震後の迅速な復旧および、継続使用が可能であり、防災拠点としての機能も果たす。免震構造に用いられるアイソレーターは前述の積層ゴム支承、積層ゴムにすべり機構を組み合わせた弾性すべり支承、ローラーやボール等により構成される、転がり支承等がある。免震用アイソレータには前述の変形性能に加えて、復元力や減衰力が必要であり、一般的に転がり支承や弾性すべり支承を主体に構築する免震構造は、復元力装置に積層ゴムや減衰装置にダンパーを併用して構築する。積層ゴム支承は天然ゴム材料による天然ゴム系積層ゴム支承（RB：Rubber Bearing）、鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB：Lead Rubber Bearing）および、高減衰積層ゴム支承（HDR：High Damping Rubber Bearing）が多く用いられている。特に LRB と HDR は復元力機能と減衰機能の両方を兼ね備えるため、単独で免震構造が構築可能である。本研究はこれら免震支承のうち、LRB を研究対象とする。

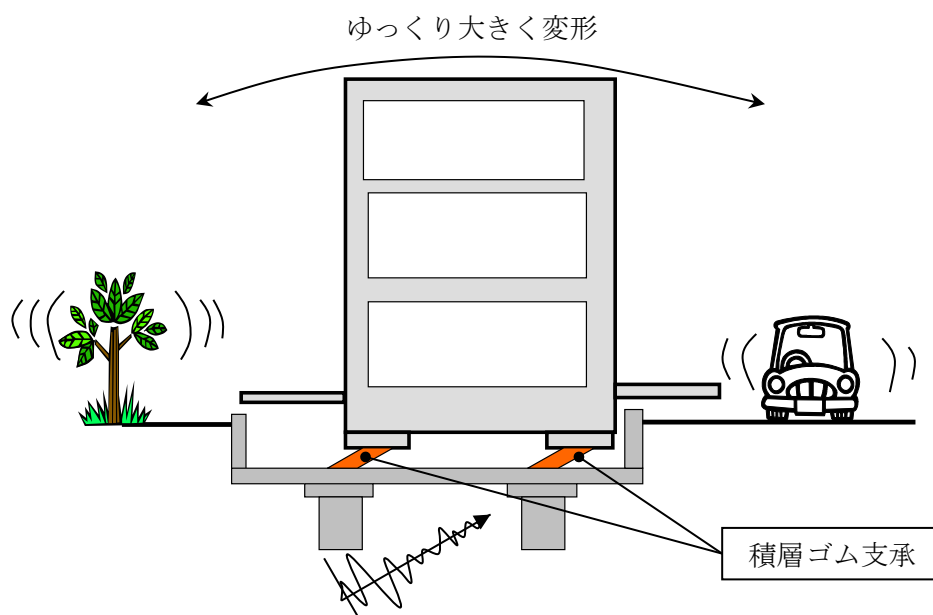


図 1.1 免震構造のイメージ

本研究で対象とする LRB を採用した免震建物としては、1986 年に竣工したオイレス工業テクニカルセンターがある。(写真 1.1)。その後、免震構造は 1994 年米国カリフォルニア州で発生したノースリッジ地震における南カリフォルニア大学病院、ならびに 1995 年兵庫県南部地震における旧郵政省 WEST ビル (写真 1.2) の両免震建物で免震効果が実証されたことで、大きく普及することとなった。現在、我が国の免震建物棟数は約 2800 棟となり、建築棟数では諸外国を大きく引き離して世界一となる免震大国となった。



オイレスTC棟
RC造5階建、延床面積4786㎡、LRB31基・RB4基

写真 1.1 オイレス工業 テクニカルセンター



写真 1.2 旧郵政省 WEST ビル

2003 年十勝沖地震では、鉛プラグ入り支承 4 基で支持された釧路市内に建つ免震建物において最大変形約 30cm のこれまで免震構造で最大の変位を記録した[1,2]。その後、当ビルに供された LRB を取出し、地震後の残存性能の確認およびその断面を観察し、出庫当時の性能を維持していること確認した。2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震では免震構造の建物は地震後の機能維持の点において大きな効果があることが実証されている[3]



(a) 建物全景

(b) けがき針変位計に記録された
変位オービット

写真 1.3 2003 年十勝沖地震で 30cm の変形を記録した釧路市内の免震建物

免震構造が建物に入力される地震エネルギーを最小限にするためには、水平方向の固有振動数を地震動の卓越振動数から離す必要があり、一般的に免震構造物の固有周期は2～4秒以上に設定される。そのため、積層ゴム支承には、鉛直方向に建物の重量を支持する高い剛性と、水平方向にはそれに相反する非常に低い剛性が要求される。このような特性を得るため積層ゴムは、厚さの薄いゴム層とそれと同等の厚さの薄肉厚の鋼板を積層した構造を採用している。このゴムと鋼板を積層する構造は、内部鋼板が鉛直荷重に対するゴムの横方向への膨らみを拘束するため、建築物の重量を支持するほどの剛性を生み出す（図1.2）。また、内部鋼板はゴムのせん断変形を拘束しないため、水平方向には非常に柔らかい剛性と大きな変形能力発揮することが可能となる。

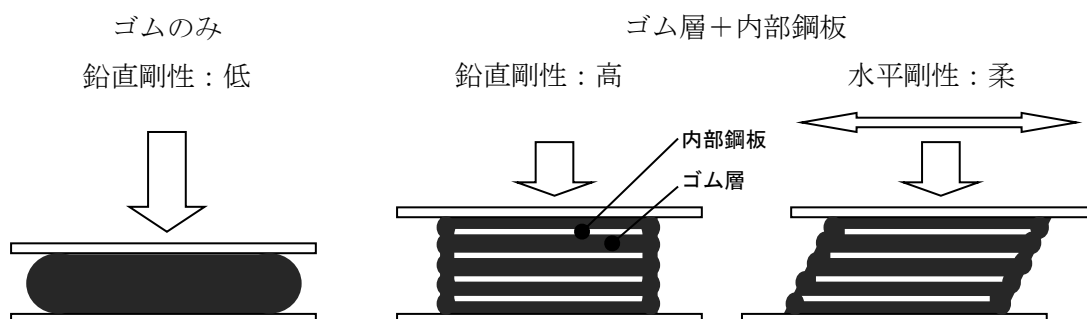


図 1.2 積層ゴムの荷重支持メカニズム

上記構造による積層ゴム支承は免震建物の免震性能の大部分を担う重要な装置である。地震時に積層ゴム要求される主な性能は以下の2つが挙げられる。

- ① 建物の重量を支持した状態で安定して変形する水平変形性能。
- ② 地震エネルギーを吸収し過大な水平変形を抑制する減衰性能。

また、積層ゴムには、地震時に水平変形する際、支持する建物の転倒モーメントに伴う鉛直軸力の変動が生じる。そのため、性能①は水平変形量と鉛直軸力との相互作用関係にある。具体的には、積層ゴムに過大な鉛直荷重が生じた場合、図1.3のように水平方向の復元力が消失する座屈現象が発生し、鉛直軸力が小さくなった場合には水平剛性が増大するハードニング現象が生じる。

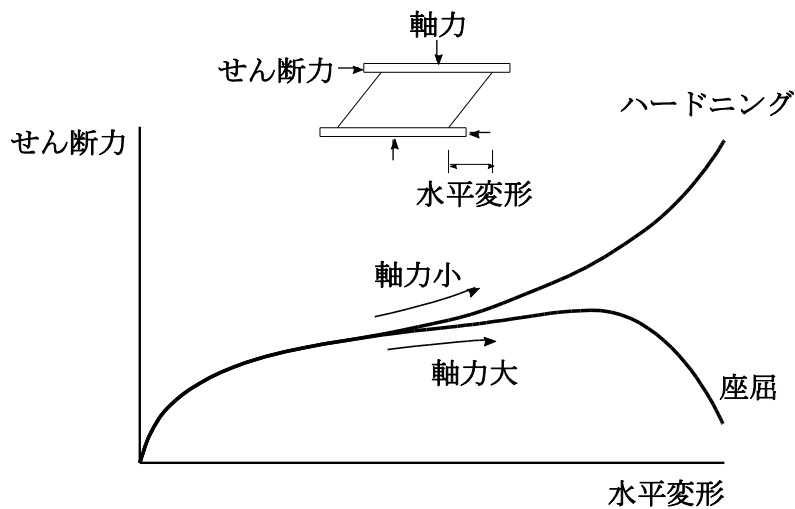


図 1.3 鉛直軸力に依存して変化するせん断特性

このような限界領域の積層ゴムの力学挙動を明らかにするためには、鉛直軸力の変動による水平剛性の変化を把握する必要がある。筆者は、文献[4]にて水平せん断変形に連動させて鉛直荷重を変化させる二軸加力実験を行い、軸力変動下における積層ゴム支承の履歴特性を調べた。また、この実験結果に基づき、並列軸ばねによる力学モデルに復元力特性として Kikuchi-Aiken モデル[5]を適用したシミュレーション解析を行い、小変形から大变形領域に至る履歴曲線の再現に成功している。すなわち、水平変形が過大となった場合の積層ゴムの荷重-変形関係は予測可能であるといえる。

また、②の減衰性能は図 1.4 に示す鉛プラグ入り積層ゴム支承 LRB や高減衰積層ゴム支承 HDR について考慮すべき課題である。LRB や HDR は支承単体で減衰性能を有しているため、免震層に外付けのダンパーを設置せずに免震構造が構築可能なオール・イン・ワンの支承である。LRB は図 1.4(a)の天然ゴム材料による積層ゴムに鉛プラグを封入したものであり、水平方向の復元力を積層ゴムの弾性力が担い、減衰力を鉛プラグの塑性変形が担う(図 1.5)。一方、図 1.4(b)の HDR は積層ゴムを構成するゴム材料に減衰性を付与させた物である。従って、LRB と HDR は互いにオール・イン・ワンの免震支承でありながら、機能構成が異なる。LRB は復元力を天然ゴムで、減衰力を鉛プラグが担う機能分離型の免震使用であり、HDR はゴム材料で復元力と減衰力の両方の性能を発揮させる機能複合型の免震支承である。この違いにより、LRB は復元力と減衰力が力学的に分離可能であり、設計による扱いが容易である。また、HDR は一つの材料で復元力と減衰力を担うため、構造がシンプルであるが復元力と減衰力の扱いが複雑となる。LRB と HDR は地震エネルギーを熱エネルギーに変換することで、減衰性能を発揮する。変換された熱エネルギーは積層ゴムの内部温度を上昇させ、それによって減衰性能が変化する場合がある。この減衰性能の変

化は、積層ゴムが大変形を多数回繰返すと顕著なる。そのため、2003年十勝沖地震や、2011年東北地方太平洋沖地震において観測された長周期・長時間地震動が免震建物に入力された場合、減衰性能が変化し、一定の履歴曲線による解析と実現象は整合しないと予想される。この減衰性能の変化を調べるため、筆者は文献[6]において実大積層ゴムと、そのスケールモデルについて動的繰返し試験をお行い、履歴面積の変化や、スケール効果を確認した。さらにその実験結果に基づいて、減衰性能の変化を反映した解析モデルも提案している。

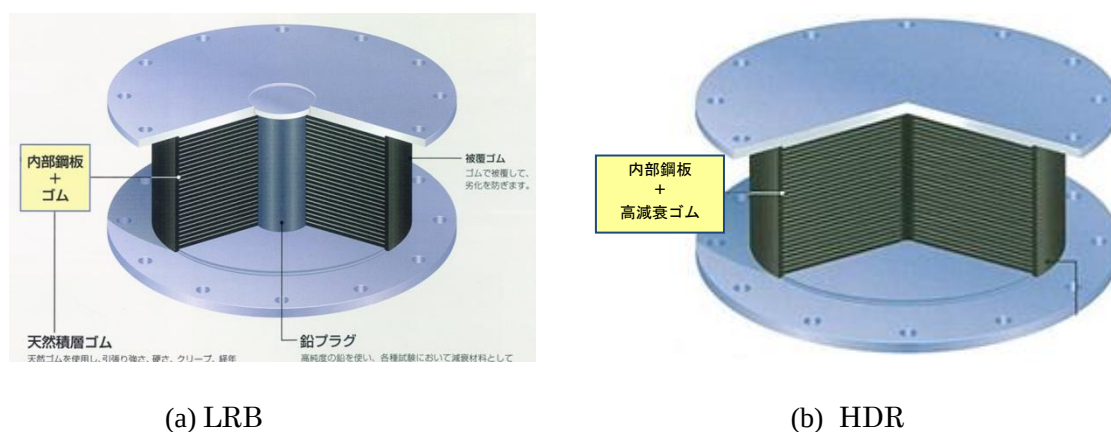
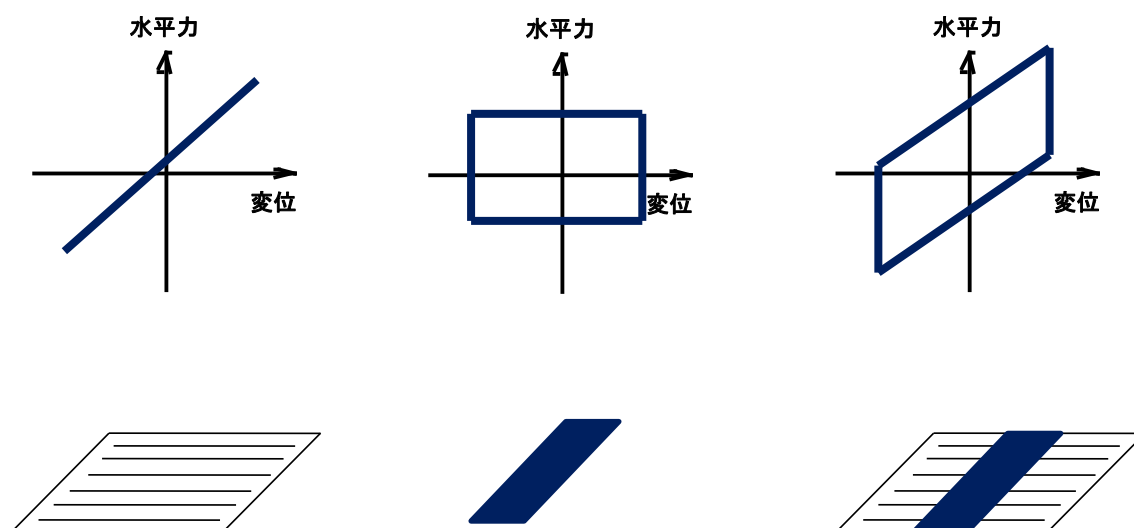


図 1.4 減衰性能を有する積層ゴム部材



上記の研究結果を応用すれば、積層ゴム支承の力学挙動を高精度に再現可能であると言える。しかし、これらは水平一方向加力の復元力特性について検討された結果である。近年、嶺脇、山本らは超高層免震建物の実地震応答特性を調べる目的で実大積層ゴム支承の水平二方向加力試験を行った[7]。この試験において HDR は水平二方向加力時に履歴ループ面積の増大、破断限界ひずみの低下が確認された。すなわち、積層ゴムの力学挙動を把握するには、一方向加力による検証のみでは不十分であり、水平二方向加力による検証が必要であると言える。積層ゴムの水平二方向加力は過去に、水越、八坂らが実施し、LRB や HDR の復元力特性が文献[8,9]において確認されている。しかし、この試験は積層ゴムに与えた最大せん断ひずみが 100%程度であったため、文献[7]のような履歴面積の増大や、限界ひずみの低下は確認されなかった。

水平二方向加力時の HDR はねじれ変形が発生し、このねじれ変形が水平せん断変形に付加されたため、限界ひずみが低下したとされている[10]。水平二方向加力における LRB や HDR 等の減衰性能を有する積層ゴムの復元力は減衰成分と弾性成分で構成される。図 1.6 のように積層ゴムの下側フランジを固定して、上側フランジが移動した場合の積層ゴムの復元力状態を考える。図中の左斜め下の一方向加力は、減衰成分と弾性成分が加力初期の方向（変位原点）に向かっているため、積層ゴムの復元力も変位原点方向に向かう。次に、一方向に変形した位置から、図中右回りの軌跡による加力を行うと（水平二方向加力）、減衰成分の方向と弾性成分の方向が一致しなくなる。具体的には、減衰成分が移動フランジの軌跡方向と逆向きに作用し、弾性成分が変位原点方向に作用する。すなわち、これらの合力である積層ゴムの復元力は変位原点を通らないため、鉛直軸方向にねじれモーメントが作用し、ねじれ変形が生じると考えられている。

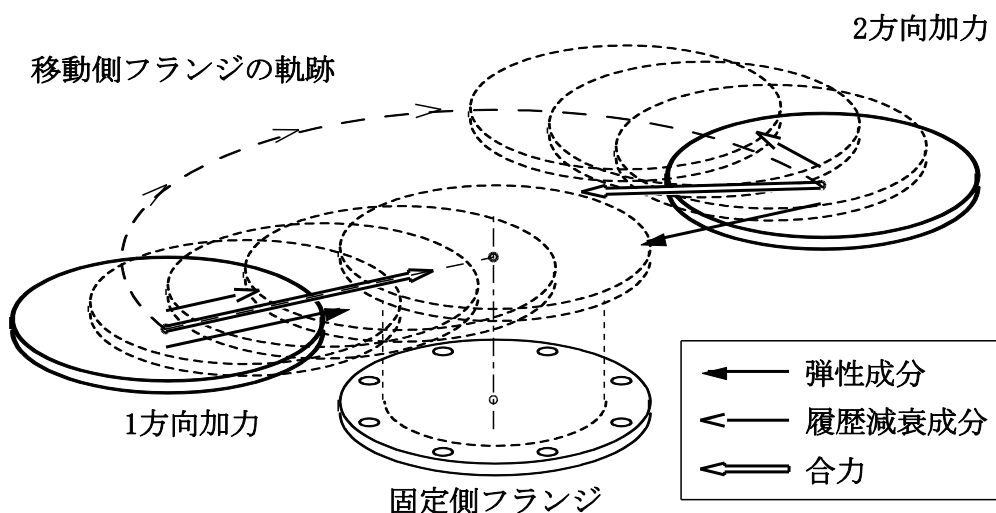


図 1.6 積層ゴムの水平二方向加力状態

山本らは文献[7]の試験結果より、HDR の復元力特性のモデル化を行い、そのシミュレーション解析を行っている。また、嶺脇らは二方向加力時の積層ゴムのねじれ変形を分析し、HDR の限界ひずみの低下はせん断変形にねじれ変形を加えて評価すると一方向加力と同様に扱えるとしている[10]。更に、減衰性能を有さない天然ゴム支承(以下 RB)や LRB は最大ひずみの低下は生じないとしている。これら既往研究は水平二方向加力で復元力特性が大きく変化する HDR に関する検討が主体であり、HDR 同様に減衰性能を有する LRB の力学挙動の検証は十分とは言えない。また、筆者は実大角型 LRB の水平二方向加力試験を行ったが、試験体数が限られていたため、その力学挙動を解明するには至らなかった[11]。LRB は丸型、角型の断面形状、ゴム層の構成、鉛プラグの断面積および配置本数と設計項目が多岐に渡るため、断面形状の違いによる力学挙動の解明が必要と考える。

そのため、本研究の目的は LRB の形状の違いによる影響も考慮した、水平二方向加力における力学挙動を解明することとする。

1.2 既往の研究

本研究の位置づけを明確にするために、積層ゴム支承が免震構造に実用化される過程の既往研究から近年の水平二方向加力における研究について、整理して述べる。

1.2.1 鉛プラグ入り積層ゴムの実用過程における既往研究

免震用積層ゴム支承の中で採用例の多い LRB は 1982 年にニュージーランドの W.H.Robinson により発明されたものである[12]。初期の LRB は、図 1.7 に示す角型断面の積層ゴムの中心に鉛プラグを挿入するものであった。Robinson が提案した LRB は、図 1.8 に示す積層ゴムの水平剛性（図中の破線）と鉛プラグの塑性力によるバイリニア履歴特性を有しており、現在の LRB の履歴特性の基礎となっている。

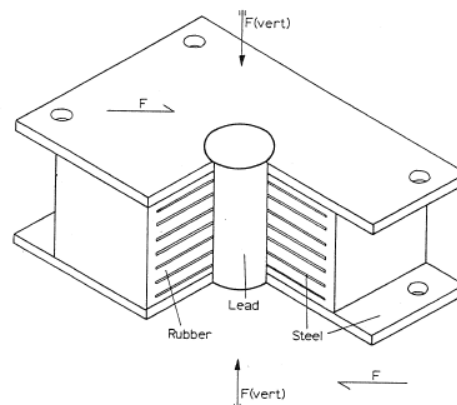


図 1.7 角断面の LRB[12]

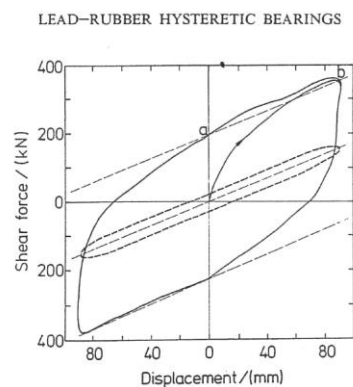


Figure 3. Force-displacement hysteresis loops for 650 mm diameter bearing ($F(\text{vert}) = 3.15 \text{ MN}$, 0.9 Hz , stroke $\pm 91 \text{ mm}$). Dotted line is for the bearing without a lead plug while the full line is for a lead plug of 170 mm diameter. Slope of dashed lines is k_r .

図 1.8 LRB の履歴特性[12]

日本における LRB の力学的検討については、1986 年に飯塚ら[13]が直径 $\phi 500$ の LRB に対して行っている。なお、この時の LRB の構造形式は、図 1.9 に示すようにフランジプレートがダボピンではめ込まれたダウエルタイプと、ボルト固定した形式であったが、近年はダウエルタイプはあまり見られなくなり、ボルト固定タイプとフランジプレートをゴム層に接着したフランジ一体タイプの 2 方式が主流となっている。飯塚らの研究において、図 1.10 に示すように LRB のひずみ依存性や振動数依存性および、圧縮特性などの今日の特性評価の基礎となる結果が示された。

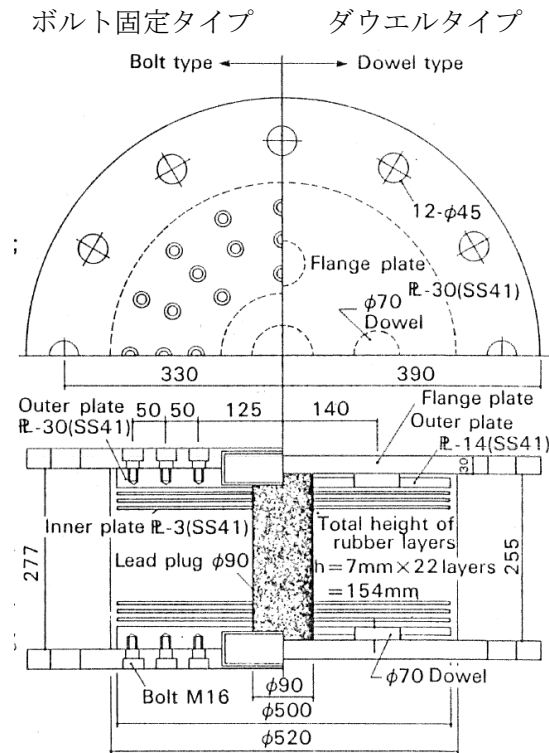


図 1.9 LRB $\phi 500$ [13]

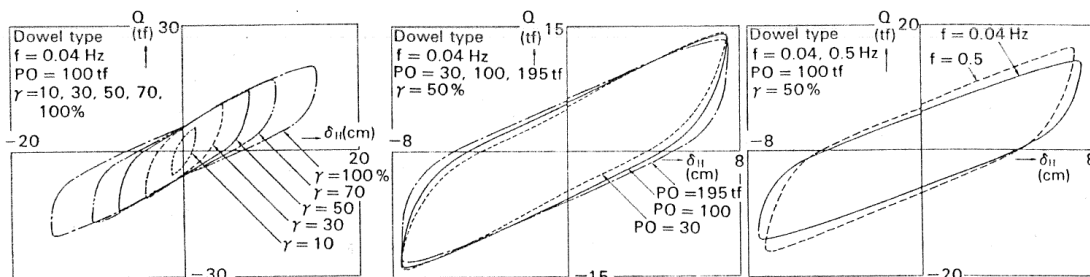


Fig.4 Shear Force-Horizontal Displacement Curves (Effect of frequency f , vertical load P_o and shear strain level γ on hysteretic characteristics.)

図 1.10 LRB $\phi 500$ の履歴特性[13]

その後、1995 年兵庫県南部沖地震をきっかけに免震構造の普及が進み、積層ゴムの技術開発と並行してその力学的特性の調査も行われた。その結果、近年では部材認定に代表される、免震用積層ゴムの限界せん断ひずみは 400%前後に定められることが多い。せん断ひずみ 400%前後の大ひずみ領域における積層ゴムの履歴特性は、積層ゴムの形状や鉛直荷重によって前述の図 1.3 のように変化する。筆者は Kikuchi-Aiken[5]モデルの復元力特性を図 1.11 の MSS (Multiple Shear Springs) [14]部に適用した並列軸ばねモデルにより角型 LRB のハードニングから座屈に至る履歴特性を再現した[4]。この解析は三次元解析であり、角型 LRB の断面内全方向における履歴曲線を極限状態まで再現可能であるが、加力方向は一方方向である。

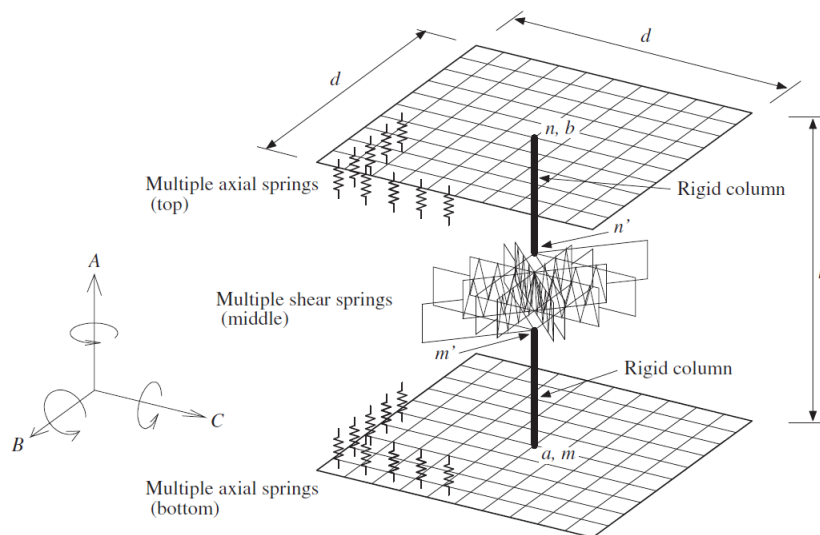


Figure 1. Three-dimensional multi-spring mechanical model.

図 1.11 三次元並列多軸バネモデル[5]

近年の免震構造は超高層化による柱軸力増大のため、積層ゴムの大型化が求められる。超高層化により上部構造の一次固有周期が長くなるため、積層ゴム支承には高面圧、大変形時の履歴安定性が要求される。この時の積層ゴムの挙動は上述の文献[5,6]の研究結果により検討可能であるが、2003 年十勝沖地震や、2011 年東北地方太平洋沖地震における観測記録および、発生が懸念される南海トラフ巨大地震等の、長周期長時間地震動への対応が求められる。高層免震構造は十分な免震効果を得るため、固有周期が 4 秒以上に設計される場合が多く、長周期長時間地震動が発生した場合には、積層ゴムは多数回の大変形を強いられることになる。減衰性能を有する、LRB や HDR は変形によるエネルギーを熱に変換するが、長周期長時間地震動では吸収エネルギー量が多くなるため、発熱による履歴特性の変化が生じる恐れがある。竹中らは文献[6]において実大サイズの LRB $\phi 1000$ とそのスケー

ルモデルの LRB $\phi 500$ および LRB $\phi 250$ の動的繰り返し試験において、エネルギー吸収による履歴曲線の変化、およびスケール効果の確認を行っている（図 1.12）。大変形の繰り返しにより、LRB は履歴面積が減少するため、長周期長時間地震動の影響を受ける。

そのため、同研究では、LRB の履歴エネルギー吸収による鉛プラグの温度上昇と、降伏荷重低下の関係を明らかにした。さらに、鉛プラグの発熱による熱伝導と、それに伴う力学挙動の変化を連成させた解析モデルを開発し、長周期長時間地震動に対応している。

上述の並列軸ばねモデルによる LRB の限界領域の力学特性や、熱力学連成挙動を組み合わせた検討を行えば、免震構造の力学挙動を解明可能である。しかし、これらはすべて水平一方向加力による検討であり、二方向加力時の LRB の力学挙動に関しては考慮されていない。

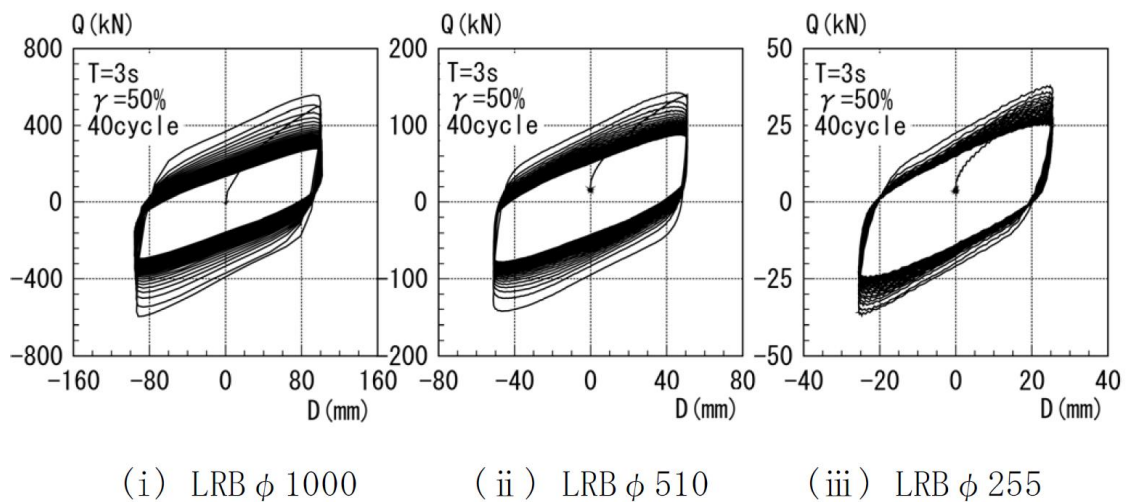


図 1.12 LRB のスケール効果[6]

1.2.2 水平二方向加力における既往研究

積層ゴムの水平二方向加力実験は実施例が少なく、その力学挙動の詳細は解明されていない点が多い。水越らは図 1.13 に示す試験機により鋼棒ダンパーと HDR の水平二軸（方向）加力実験を実施し、復元力特性の二軸（方向）効果を検討した[8]。この研究における履歴曲線（図 1.14）は、最大せん断ひずみ 100%以下の範囲で実施しており、二方向加力による履歴面積の増大や、ねじれ変形は報告されていない。また、前田らは引き続き LRB についてせん断ひずみ 100%以下の範囲において水平二方向加力実験を行い、その履歴特性の調査および、解析を実施している[9]。この時の LRB の履歴曲線は二軸（方向）効果として、ループ形状の変化と等価剛性の減少が生じたと報告されている（図 1.15）。この一連の研究において水平二方向加力におけるシミュレーション解析も実施され、HDR は Jennings の規則に基づいた復元力モデル、LRB は Hardin-Drnevich モデルに線形バネを組み合わせた復元力モデルを MSS モデルに適用し、履歴特性の同定を行っている。

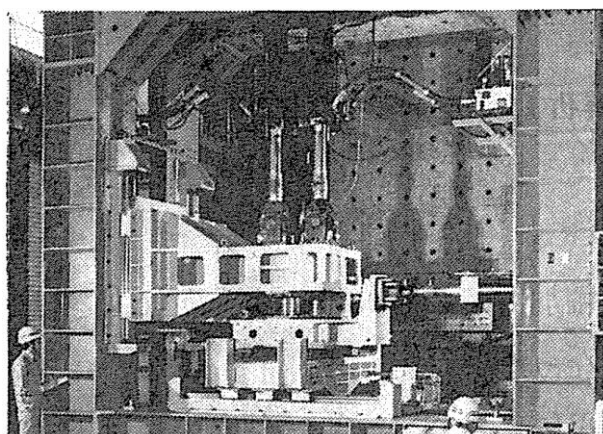


図 1.13 既往文献による加力試験機[9]

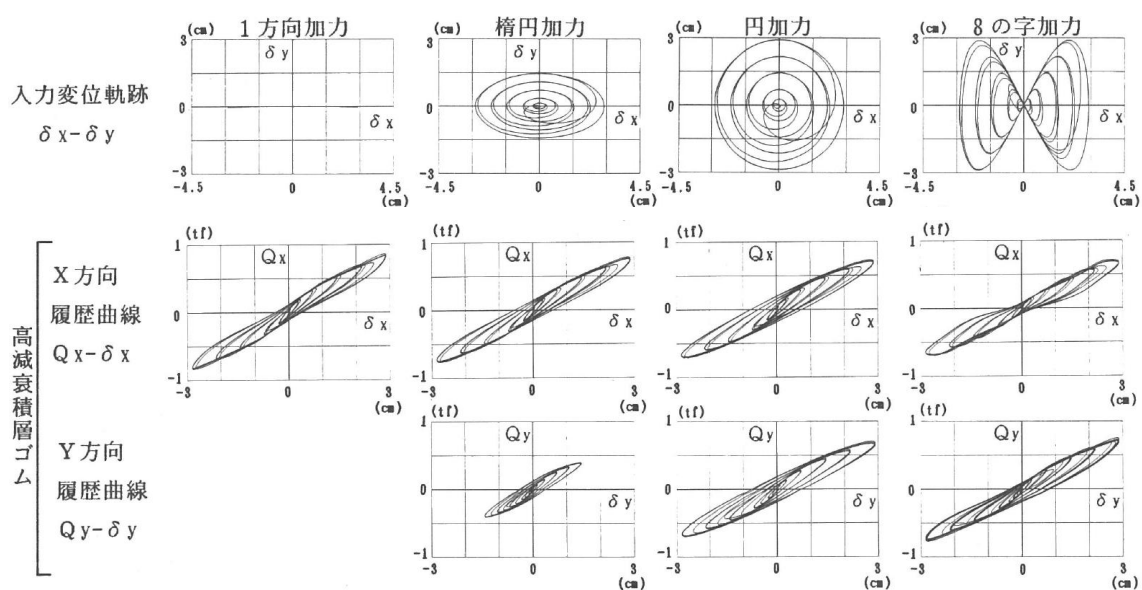


図 1.14 過去の水平二方向加力による履歴曲線 (HDR) [8]

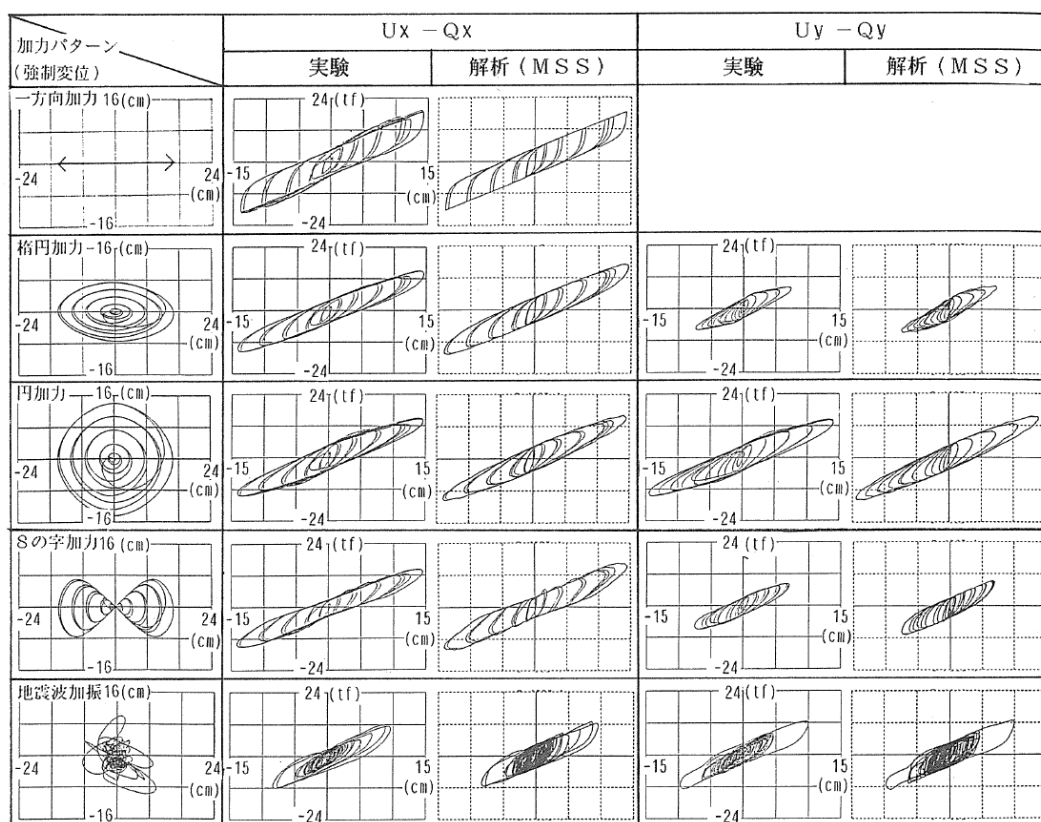


図 1.15 過去の水平二方向加力による履歴曲線 (LRB) [9]

橋梁における免震設計は橋軸方向を免震とし、橋軸直角方向は積層ゴムにストッパーを設けた耐震構造とする例が多い。しかし、阿部、吉田らは[15]橋梁における二方向免震設計を想定して、天然ゴム系積層ゴム支承 RB、HDR および LRB について二方向加力試験を実施した。この研究は HDR と LRB の水平二方向履歴特性を Ozdemire[20]の弾塑性モデルを拡張して、積層ゴムの二方向弾塑性モデルを理論的に導きこれらの同定を行っている。また、加力試験機は図 1.16 に示す試験体下側のテーブルを二方向に稼動させるものであり、試験において、HDR は図 1.17 のように円加力時の履歴面積が一方方向加力に対して増大する現象が確認された。一方、LRB は履歴面積の増大は生じていない（図 1.18）。しかし、この実験は積層ゴム支承が破断するような大変形を与えていないため、ねじれ変形に関する報告はされておらず、限界ひずみ領域の積層ゴムの力学挙動は不明である。

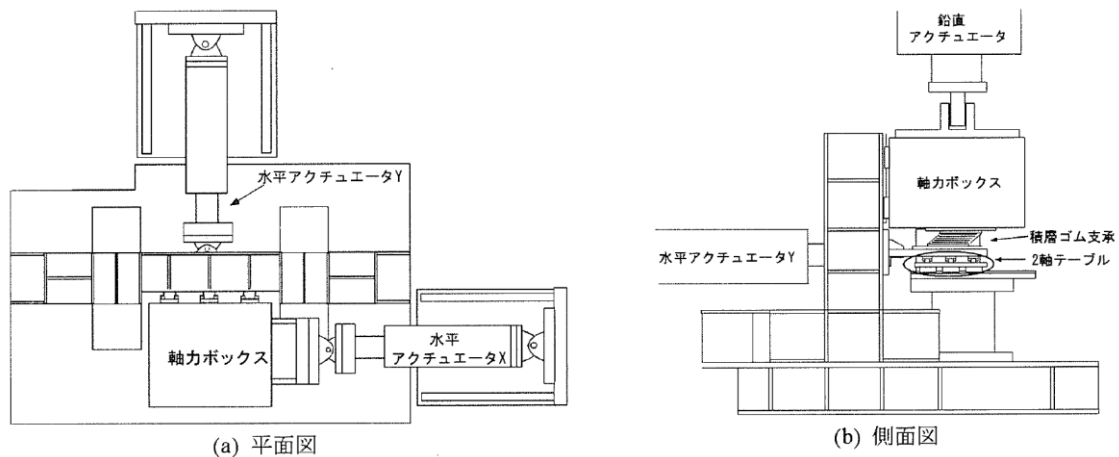


図 1.16 既往文献における加力試験機 [15]

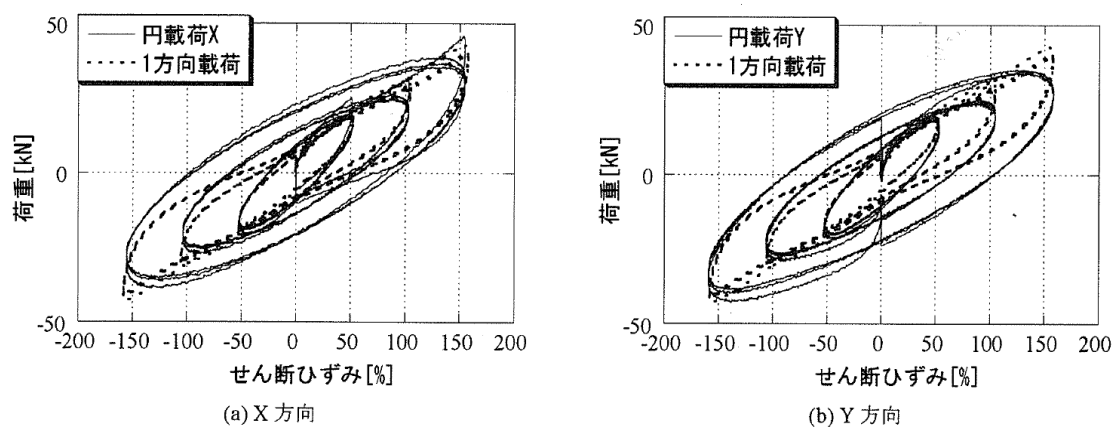


図 1.17 HDR の円加力における履歴曲線 [15]

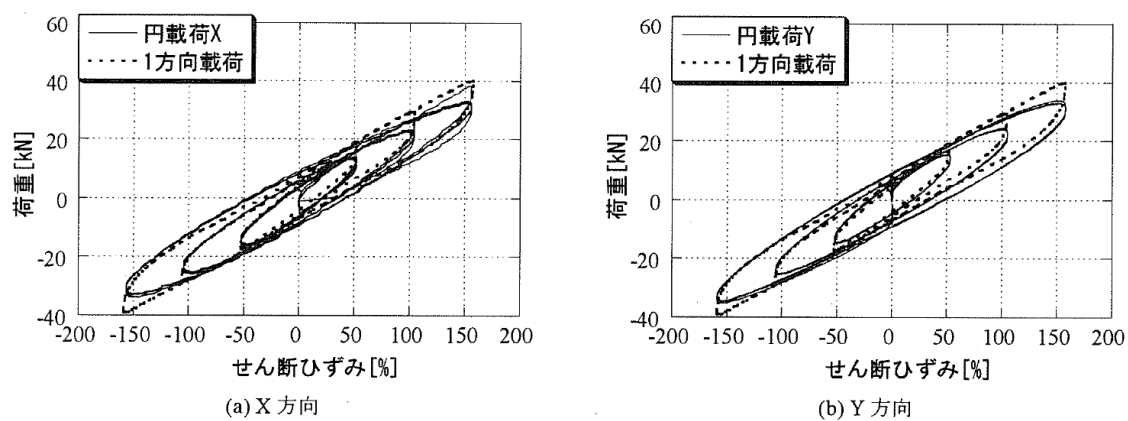


図 1.18 LRB の円加力における履歴曲線 [15]

1.2.3 近年の水平二方向加力に関する研究

水平二方向加力実験は加力試験機の構造が複雑となるため、実験の実施が困難であり、実大積層ゴムによる検証は殆どされていなかった。近年、カリフォルニア大学サンディエゴ校の試験機 Seismic Response Modification Device(SRMD)により (図 1.19)、実大試験体の水平二方向加力実験が可能となった[16]。SRMD は Caltrans (The California Department of Transportation) がカリフォルニア州の長大橋の耐震レトロフィットを行うため、免震積層ゴムや、ダンパーおよび補強部材の評価を目的として製作された。

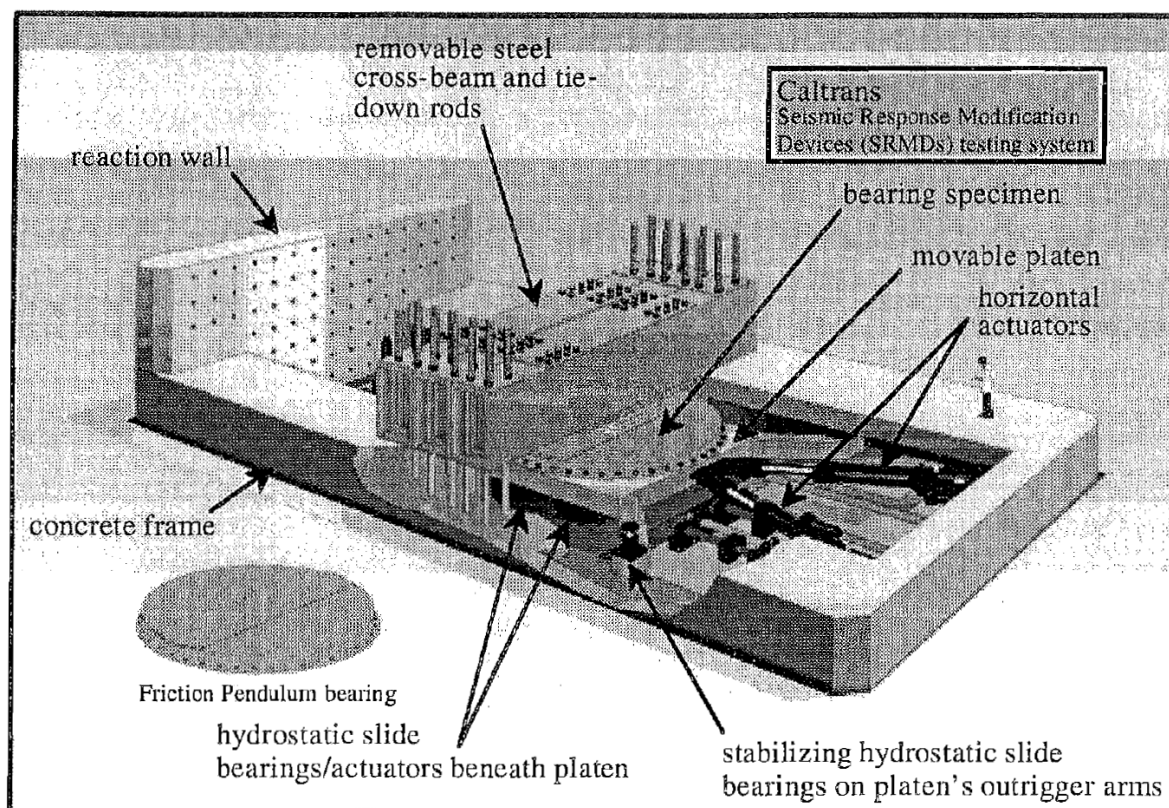


図 1.19 SRMD の外観図[16]

嶺脇らは SRMD を用いて実大サイズによる弾性すべり支承、HDR 及び LRB の水平二方向加力と鉛直変動荷重を組み合わせた試験を行った[7]。SRMD により実大免震支承の加力試験を実施した背景として、近年の超高層免震の普及が挙げられる。免震建物の超高層化には、既往免震建物より更なる長周期化が必要となる。免震建物の更なる長周期化により、積層ゴムには大変形時の安定性能が要求される。さらに、2011 年東北地方太平洋沖地震や懸念される南海トラフ巨大地震等では多数回繰り返し応答による安定性も必要となる。すなわち、近年の免震ゴムに必要とされる性能は、本章 1.1 節で述べたように鉛直軸力の変動を考慮した多数回繰り返し水平変形における力学挙動の安定性である。そのため、超高層免震建物の設計には実大試験体による地震応答特性の把握が必要となる。この試験におい

て楕円と、8の字を組合わせた図 1.20 の複合加力時に、HDR の限界ひずみの低下が確認された (図 1.21)。HDR は水平二方向加力時、水平せん断ひずみに加えて、ねじれ変形による局部せん断ひずみが付加されて限界ひずみが低下するとされている[10,17]。HDR の減衰はゴム材料の粘性減衰によるものであり、その減衰の大きさはゴム層のせん断ひずみに依存する。そのため、HDR は水平二方向加力時に生じるねじれ変形により、ゴム層のせん断ひずみが付加され、履歴面積の増加が生じると考えられる。水平二方向加力時の復元力特性について山本らは、二方向加力における HDR の復元力を原点に向かう力と移動原点に向かう力のベクトル和として求め、それらを各加力方向に分解して表現することにより、HDR の水平二方向加力時の荷重変形関係を再現している[18,19] (図 1.22)。

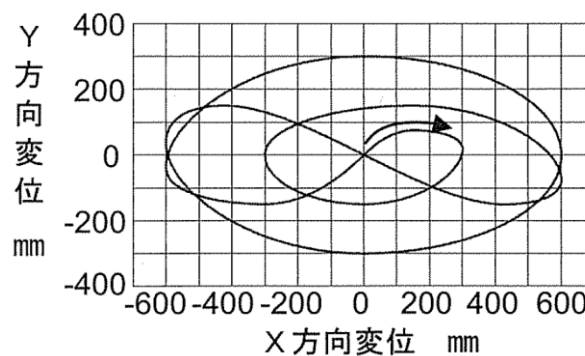


図 1.20 複合加力変位オービット [18]

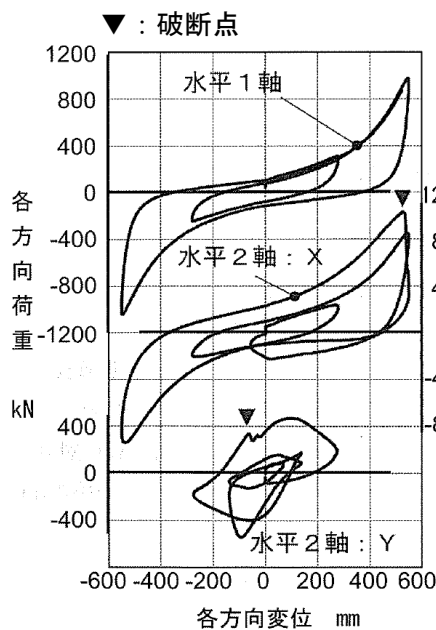
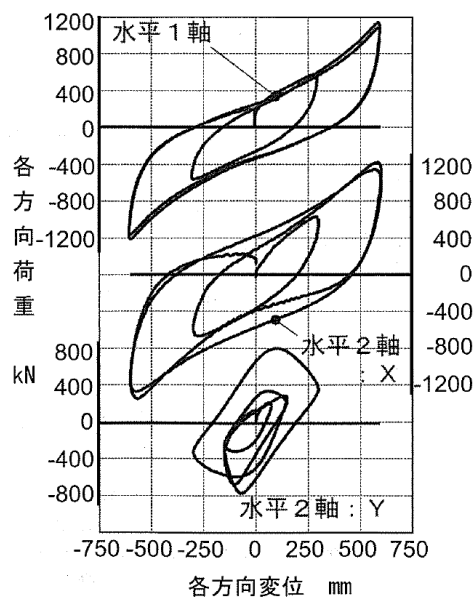
図 4 加力実験結果(HDR_{x6700})図 5 加力実験結果(HDR_{x61300})

図 1.21 水平二方向加力における HDR の限界ひずみの低下[18]

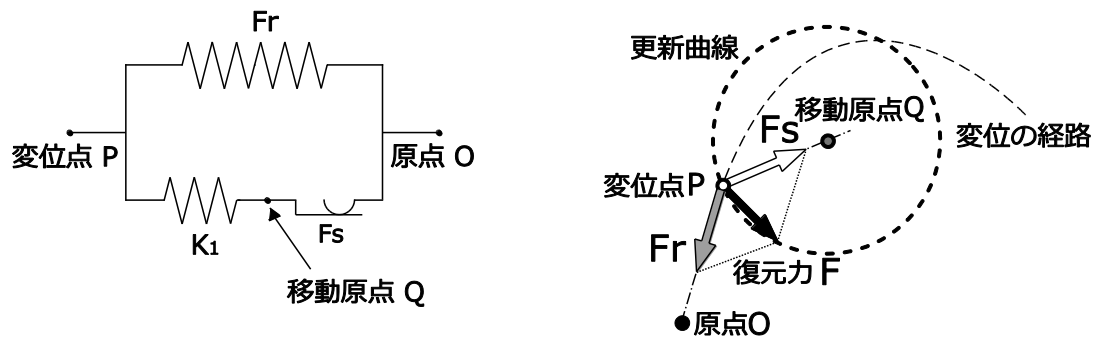


図 1.22 山本モデルの概念[18]

以上、既往の研究を概観した結果、HDR の水平二方向加力に関しては、試験結果および、力学挙動に関する知見が蓄積されつつあると判断できるが、LRB に関する研究はほとんど実施されていない。LRB も HDR 同様、履歴減衰を有する免震支承であるため、HDR のように復元力の方向が変位原点を通らず、ねじれ変形に起因する限界ひずみの低下が生じる可能性がある。しかし、LRB に関する検討は試験体形状が限られており、広範囲におよぶ設計条件の一部でしかない。また、LRB の限界ひずみ領域における応力状態等はまだ解明されていない。そのため、本論文は LRB の形状を考慮した水平二方向加力学挙動を解明するものである。

1.3 研究の方法

本節では、鉛プラグ入り積層ゴム支承 LRB の水平二方向加力における力学挙動を明確にするための研究方法について以下に記す。

1.3.1 試験体形状の設定

研究対象である LRB は図 1.23 に示すように丸型断面または角型断面から成るゴム層と鋼板の積層体である積層ゴムに鉛プラグを充填したものである。日本における建築用 LRB は丸型が多く用いられてきた。丸型 LRB は水平二方向に変形した際の荷重支持面積の変化に異方性がない。一方、角形 LRB は柱と同じ断面形状のため、設置場所あたりの断面積が大きくとれる。また、LRB を取り付けるアンカープレートスタッド類も角形に配置でき、RC 造の配筋の収まりが良い等の利点がある。また、製造上も材料の歩留まりが良く、製造性に関する利点も多い。しかし、前述のように、水平変形時は荷重支持面積の変化に異方性が生じる。この点が、丸型 LRB の採用例が多かった理由と考えられる。角形 LRB の異方性について筆者は文献[21]で調査を行っており、設計式の範囲内であるせん断ひずみ 250%以下の範囲であれば履歴曲線の、異方性は無視できるという結果が得られている。角型 LRB の異方性は限界挙動のハードニングや座屈に現れる。限界挙動の異方性は文献[4]に詳しい。以上のように LRB は断面形状の選択に始まり、鉛プラグ径、鉛プラグ配置本数が選択可能であり、設計自由度が広い。以上により、本研究では LRB 形状の違いによる水平二方向力学挙動を把握可能な試験体形状の設定を行うこととする。

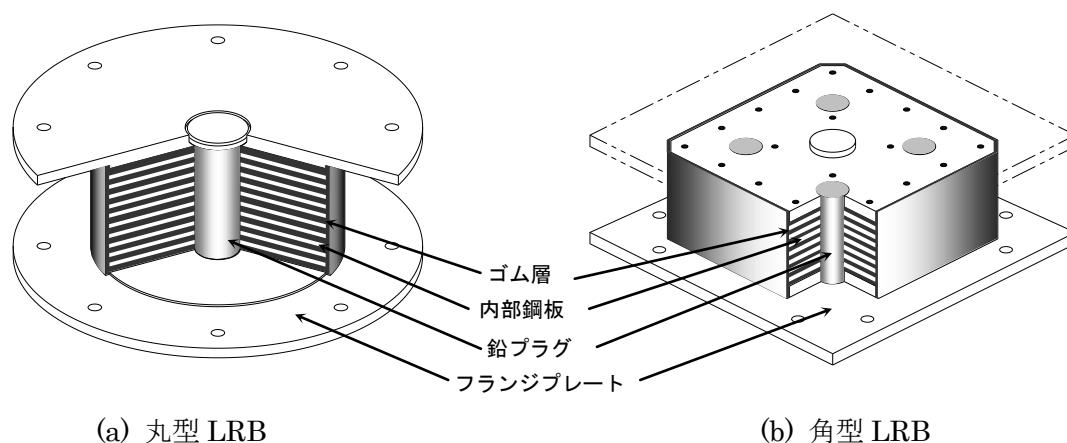


図 1.23 LRB の断面形状

1.3.2 加力試験機の開発

積層ゴム支承の水平二方向加力は、加力試験機に限られるため実施事例が少ない。文献[8,9,14]の既往研究は、複数の油圧アクチュエーターと汎用フレームの組み合わせで構築したものであり、実験作業や加力制御に困難な点があると予想される。そのため、本研究では LRB の水平二方向力学特性を高精度に制御・計測可能な図 1.24 に示す専用の加力試験機を新たに開発する。開発する加力試験機は、六分力計を設置することにより、水平二方向加力時の鉛直荷重、水平二方向の復元力、転倒モーメント二成分および、ねじれモーメントの六成分の力が高精度に計測可能である。

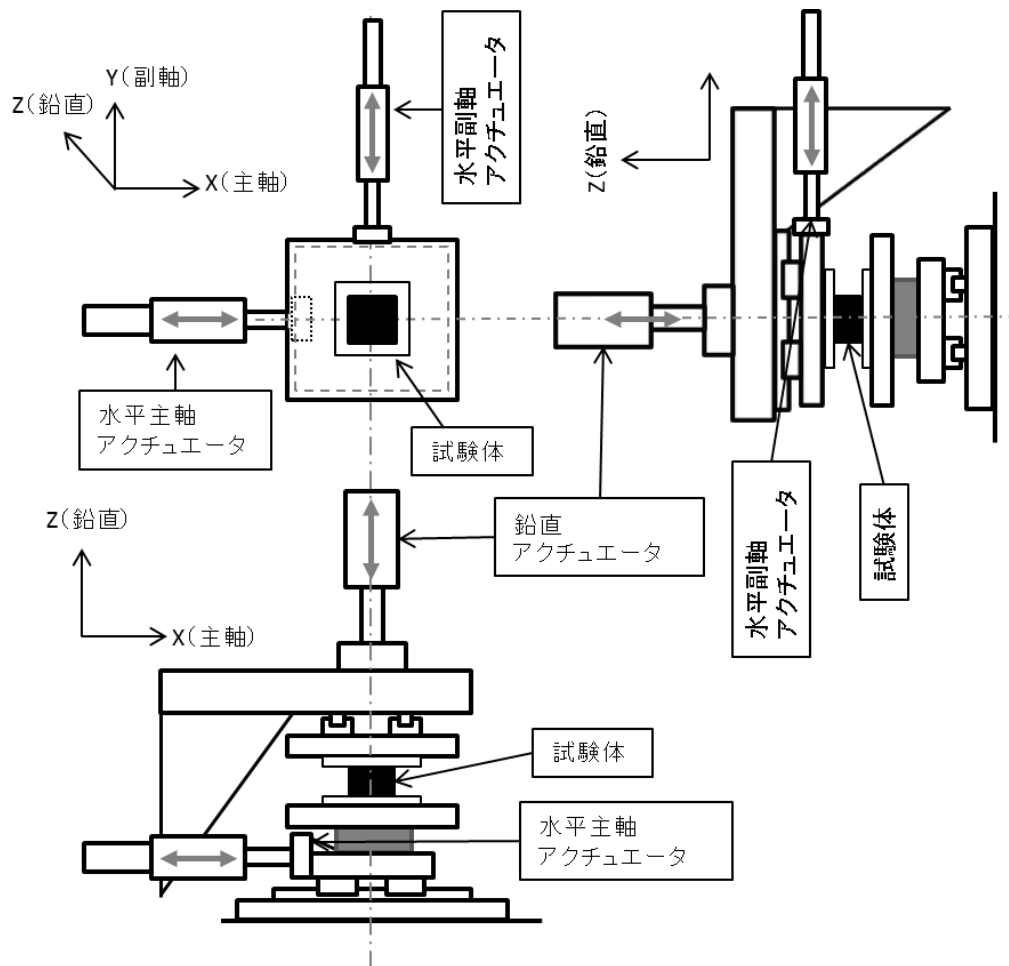
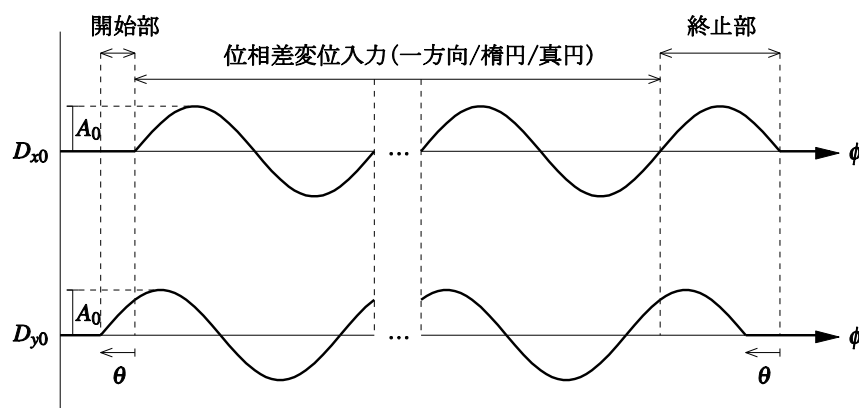


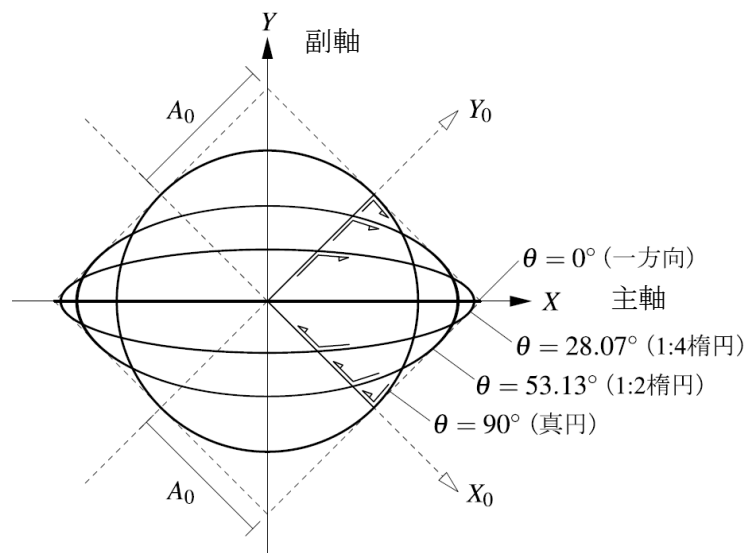
図 1.24 水平二方向加力試験機概略

1.3.3 加力波形の設定

水平二方向加力は加力波形の組み合わせから作成される加力パターンが多岐にわたる。そのため、LRB の水平二方向力学挙動の解明には、評価に適した加力波形の適用が重要である。また、適用する二方向加力波形が、一方向加力の検討結果と関連付け可能であれば、既往研究の成果を二方向力学特性に応用できる可能性がある。そこで、本研究では、LRB に作用するエネルギー量を一方向加力と二方向加力を同等とした『位相差入力』を用いる(図 1.25)。位相差入力の詳細は後述の 2.3.2 項加力波形及び加力プログラムで述べる。



(a) 二方向の変位時刻歴



(b) 二方向の変位オービット

図 1.25 水平二方向加力波形

1.3.4 水平二方向復元力特性の解明

LRR の水平二方向加力試験を行い、これによる履歴特性を明らかにし、一方向加力に対する復元力特性値の変化を調べる。また、水平二方向加力における復元力の発生機構を分析し、水平二方向力復元力特性を解明する。

1.3.5 水平二方向復元力特性のシミュレーション解析

試験により解明された復元力特性に基づき、MSS モデル[19]の復元力特性に Kikuchi-Aiken モデル[5]を適用した、シミュレーション解析を行う。

1.3.6 水平二方向限界特性の解明

LRB が破断に至るまでの大変形加力試験を行い、一方向加力に対する水平二方向加力の限界ひずみの変化を調べる。また、水平二方向加力時に生じるねじれ変形から、ねじれ変形による局部せん断ひずみと水平変形によるせん断ひずみの関係を明らかにする。最後に、LRB の限界ひずみ領域における力学的状態について考察する。

第1章の参考文献

- [1] 鈴木芳隆, 漆崎隆, 竹中康雄, 斉藤一: 2003 年十勝沖地震における釧路市内免震事務所ビルの地震挙動について その1 地震観測記録, 日本建築学会大会学術梗概集(北海道) pp.279-280, 2004 年 8 月
- [2] 金子修平, 五味正, 鈴木芳隆, 漆崎隆, 竹中康雄, 川口澄夫: 2003 年十勝沖地震における釧路市内免震事務所ビルの地震挙動について その2 鉛プラグ入り積層ゴムの健全性に関する検討, 日本建築学会大会学術梗概集(北海道) pp.281-282 2004 年 8 月
- [3] 仲山雅一, 大久保孝雄: 岩手県中部病院, 東北地方太平洋沖地震関連 JSSI MENSIN No.74 pp.14-17 2011 年 11 月
- [4] Masaru Kikuchi, Takahito Nakamura, Ian D. Aiken, Three-dimensional analysis for square seismic isolation bearings under large shear deformations and high axial loads, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 39, pp.1513-1531, 2010.
- [5] Masaru Kikuchi, Ian D. Aiken, An Analytical Hysteresis Model for Elastomeric Seismic Isolation Bearings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, pp.215-231, 1997.
- [6] 竹中康雄, 近藤明洋, 高岡栄治, 引田真規子, 北村春幸, 仲村崇仁: 積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集 第 646 号, pp.2245-2253, 2009 年 12 月
- [7] 嶺脇重雄, 山本雅史, 東野雅彦, 浜口弘樹, 久家英夫, 曾根孝行, 米田晴美, 和田章: 超高層免震建物の地震応答を想定した実大免震支承部材の性能確認試験, 構造工学論文集 Vol.55B, pp.1-9, 2009 年 3 月
- [8] 水越薫, 八坂厚彦, 飯塚真巨, 竹中康雄, 藤本信夫, 前田洋三: 建築物の免震防振構法の開発(その 12 弾塑性ダンパ及び高減衰積層ゴムの水平 2 軸加力実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) pp.395-396, 1988 年 10 月
- [9] 前田洋三, 竹中康雄, 飯塚真巨: 建物の免震防振構法の開発(その 19 鉛コア積層ゴムの水平 2 軸加力実験とシミュレーション解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州) pp.443-444, 1989 年 10 月
- [10] 嶺脇重雄, 山本雅史, 東野雅彦, 加藤秀章, 鈴木重信, 和田章: 積層ゴム支承の水平二軸変形特性, JSSI MENSIN No.63 pp.34-37, 2009 年 2 月

- [11] 仲村崇仁, 河内山修, 長田修一, 池永雅良, 和田章: 実大角型鉛プラグ入り積層ゴムの二方向加力実験, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.301-304, 2011,2
- [12] W.H.Robinson, Lead-Rubber Hysteretic Bearings Suitable For Protecting Structures During Earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, pp.593-604, 1982.
- [13] 飯塚真巨, 高林勝人, 八坂厚彦, 栗原雅樹: 高速増殖炉を対象とした免震構造導入に関する研究 その 3: 鉛ゴム支承の力学特性試験, 第 7 回日本地震工学シンポジウム pp.1664-1667 1986 年
- [14] 和田章, 広瀬景一: 2 方向地震動を受ける無限均等ラーメン構造の弾塑性応答性状, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 399 号, pp.37-47, 1989.5
- [15] 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 年 1 月
- [16] Jean Spangler Shortreed, Frieder Seible, Andre Filiatrault, Gianmario Benzoni :Characterization and testing of the Caltrans Seismic Response Modification Device Test System, The royal society Phil. Trans. R. Soc. Lond. A (2001) 359, 1829-1850
- [17] 加藤秀章, 森隆浩, 室田伸夫, 鈴木重信, 嶺脇重雄, 山本雅史, 米田晴美, 東野雅彦: 免震用積層ゴムの水平 2 方向加力時の限界特性に関する研究, 日本建築学会技術報告集 第 16 巻 32 号, 167-172, 2010 年 2 月
- [18] 山本雅史, 嶺脇重雄, 米田春美, 東野雅彦, 和田章: 高減衰積層ゴム支承の水平 2 方向変形時の力学特性に関する実大実験およびモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 638 号, pp.639-645, 2009.4
- [19] Masashi Yamamoto, Shigeo Minewaki, Harumi Yoneda, Masahiko Higashino: Nonlinear behavior of high-damping rubber bearings under horizontal bidirectional loading: full-scale test and analytical modeling, EARTHQUAKE ENGINEERING & STRUCTURAL DYNAMICS Earthquake Engng Struct. Dynamics. Vol. 41, pp.1845-1860, 2012.
- [20] Ozdemir, H. :Nonlinear transient dynamic analysis of yielding structure, Ph.D Dissertation, University of California, Berkeley, 1973
- [21] 仲村崇仁, 金子修平, 宮崎充, 川口澄夫: 建築用角型 LRB の方向依存性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) pp.447-448 2004 年 8 月

第2章

実験計画

2.1 概要

LRB は積層ゴムの内部構成、角型、丸型の断面形状、鉛プラグ径の大小および、配置と本数などを自由に選択可能であり、設計範囲が広い。そのため、本章では LRB の水平二方向力学挙動に影響を及ぼすと考えられる設計因子について検討し、実設計に供される LRB 形状の範囲に基づいた、試験体形状を設定する。

LRB の水平二方向加力は、従来から用いられている鉛直一軸、水平一軸の二軸試験機では不可能であり、多自由度を有する加力試験機が必要となる。多自由度試験機は、第1章で解説した六自由度の载荷が可能な SRMD [1]が著名である。SRMD は実大免震装置を対象とした大型試験機である。よって、積層ゴムに対して多数の設計因子を設定して、SRMD のような大型試験機を用いて複数の試験体による実験を行うと、試験体の製作費用ならびに実験費用が膨大となる。よって、本研究目的である多様な設計因子のもとでの LRB の力学挙動の解明には、縮小試験体による検討が現実的であると言える。本研究では縮小試験体による水平二方向加力を対象とした、専用の三軸試験機を新たに開発した。本章ではこの三軸試験機の基本的な機構および特徴について述べる。

水平二方向加力は 2 つの加力波形の組み合わせから、作成される加力パターンが多岐にわたる。水平二方向加力実験は、事例が少ないことから、加力波形に関する検討は少ない。本研究では LRB の水平二方向力学挙動の解明という観点から、位相差入力という新しい加力波形を採用する。位相差入力波形とは水平一方向加力と二方向加力の履歴特性を直接比較する目的で考案された波形であり、積層ゴムに入力されるエネルギーが加力方向によらず同等となる。本節では位相差入力波形の作成方法および、解析的に求めた入力エネルギー量を一方向加力、二方向加力と比較して示す。

2.2 試験体

2.2.1 試験体パラメータの設定

LRB は天然ゴムによるゴム層と内部鋼板および、上下フランジプレートから成る積層ゴム体の内径部に鉛プラグを封入したものである（図 1.23 参照）。LRB の変形性能は積層ゴム体の形状に大きく影響を受ける。積層ゴム体の形状安定性を意味する係数として、一次形状係数 S_1 と二次形状係数 S_2 がある。

S_1 は鉛直剛性を支配する係数であり、図 2.1 に示すゴム層の拘束面積と自由表面積の比を意味し、下式で定義される。

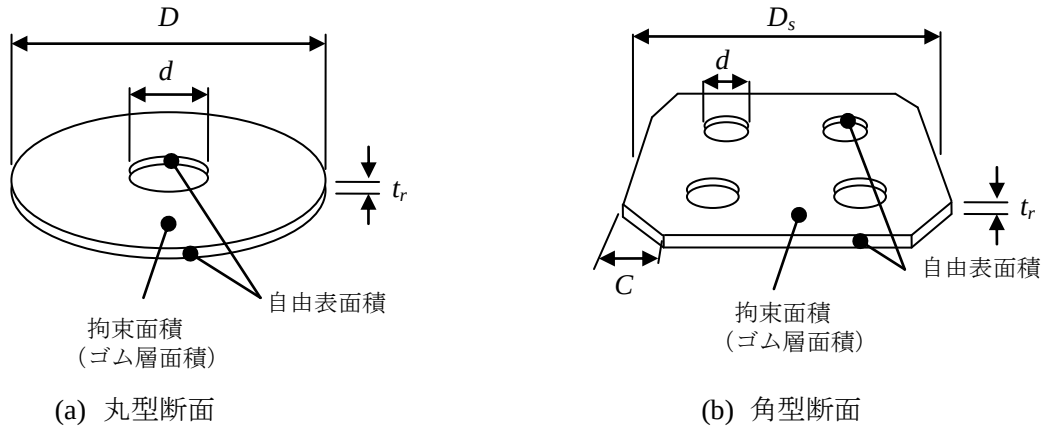


図 2.1 一次形状係数の概念

$$S_1 = \frac{\pi(D^2 - d)/4}{\pi(D + d)t_r} \quad (2.1a)$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D^2 / 4}{\pi \cdot D \cdot t_r} \quad (2.1b)$$

$$S_1 = \frac{D_2^2 - 2C^2 - \pi \cdot d^2}{4(D_2^1 - 2C + \sqrt{2}C + 4\pi \cdot d)t_r} \quad (2.1c)$$

$$S_1 = \frac{D_s^2 - 2C^2}{4(D_s - 2C + \sqrt{2}C)t_r} \quad (2.1d)$$

これら、(2.1a)式は丸型積層ゴム、(2.1b)式は丸型 LRB、(2.1c)式は角型積層ゴム、(2.1d)は角型 LRB の S_1 である。 D は丸型積層ゴムの外径、 d は内径、 t_r はゴム一層厚さである。また、 D_s は角型 LRB の外形、 C はコーナ一部の面取りを言う。建築用積層ゴムの一次形状係数は 30~40 程度に設定されることが多い。

二次形状係数 S_2 は積層ゴムの外径（形） D または D_s とゴム層総厚の比であり、下式により表せる。

$$S_2 = \frac{D}{n_r \cdot t_r} \quad (2.2a)$$

又は

$$S_2 = \frac{D_s}{n_r \cdot t_r} \quad (2.2b)$$

ここに n_r はゴム積層数を示す。 S_2 は建築用積層ゴムにおいて 3~8 程度に設定される水平剛性の安定性に関する係数である。一次形状係数は LRB の水平方向の加力特性に対する影響が小さいため、本研究の試験体形状のパラメータから除外する。 S_2 は水平変形の安定性に対して、支配的な影響がある。そのため、本研究の試験体パラメータとして扱う。

次に、ねじれ変形に関するパラメータの検討をする。積層ゴムのねじれ変形の大部分は、ゴム層に生じると考えられるので、単一材料のねじれ変形として扱う。単一材料のねじれ率 ρ_t は下式より表わされる。

$$\rho_t = \frac{M_t}{G \cdot I_p} \quad (2.3)$$

ここに、 M_t はねじれモーメント、 G はせん断弾性率、 I_p は断面二次極モーメントである。(2.3)式より積層ゴムのねじれ変形は使用するゴム材料が等しいとすると、ねじれモーメントに比例し、断面二次極モーメントに反比例する。丸型 LRB と角型 LRB は断面二次極モーメントが異なるため、試験体パラメータとして設定する必要がある。また、鉛プラグの配置および本数については、断面中心に一本配置するより、同じ断面積であっても断面中心から分散して複数本配置した方が断面二次極モーメントが大きくなる。よって、本研究では、鉛プラグの配置及び本数も、試験体パラメータとして設定する。

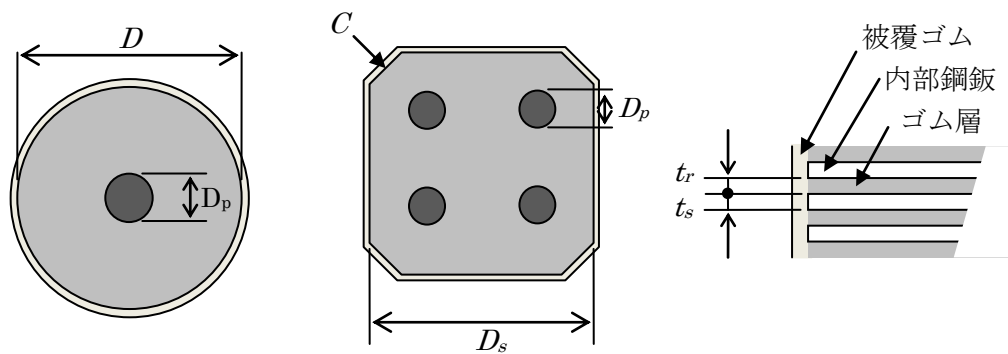
LRB は鉛プラグの断面積によって、減衰性能が自由に設計可能である。水平二方向加力時に生じるねじれ変形は、減衰性能が関係するため鉛プラグ断面積も試験体パラメータとする。

上述による試験体パラメータを整理して、以下にまとめる。

- ① 二次形状係数
- ② 丸型、角型の断面形状
- ③ 鉛プラグ配置及び本数
- ④ 鉛プラグ断面積（鉛プラグなしを含む）

2.2.2 試験体形状

本研究では LRB の水平二方向限界特性に影響をえ及ぼす要因として、断面形状、二次形状係数、鉛プラグ径および、鉛プラグ配置本数の 4 つの試験体パラメータと鉛プラグの有無について取り上げ、これらを変動させることで 8 種の形状を有する合計 15 体の試験体を製作した。以下に試験体パラメータの設定方法を記す。なお、LRB の設計パラメータに関する寸法定義を図 2.2 に示す。



D	: 外径(丸型) [mm]
D_s	: 外形 (角型) [mm]
C	: 角部面取り (角型のみ) [mm]
D_p	: 鉛プラグ径 (RB の場合は孔径: d) [mm]
n_p	: 鉛プラグ本数 (角型のみ)
t_r	: ゴム層厚 [mm]
n_r	: ゴム層数
t_s	: 内部鋼板厚 [mm]
H	: ゴム層総厚 ($=t_r \times n_r$) [mm]
A_r	: 積層ゴム断面積 (鉛プラグを除く) [mm ²]

図 2.2 設計パラメータ寸法の定義

断面形状は角型と丸型の2種類を設定した。また、角型 LRB については、鉛プラグ1本の S1 (図 2.3) と S1 に鉛プラグを封入しない S0 および、鉛プラグ4本の S2 (図 2.4) の3種類を設定した。本研究では S1, S2 と図 2.5 に示す丸型 LRB (R1) を基準試験体と位置づける。S1 試験体と R1 試験体の外観をそれぞれ写真 2.1 と写真 2.2 に示す。写真に示す通り試験体は水平二方向加力時に生じるねじれ変形を計測するため、被覆ゴムを2ヶ所除去して内部鋼板を露出させた。

試験体の形状は部材認定品である外形 $D_s=1000\times1000\text{mm}$ 、ゴム層厚 $t_r=7\text{mm}\times29$ 層 ($=203\text{mm}$)、鉛プラグ径 $D_p=\phi 100\text{mm}\times4$ 本の角型 LRB(LRB-S-1000)を基準として、LRB-S-1000 の内部構成を 1/5 に縮小したものが S2 試験体である。S2 試験体を基準に鉛プラグの断面積が等しくなるように鉛プラグを1本 ($D_p=\phi 40\text{mm}$) としたものが S1 試験体である。また、鉛プラグ有無の影響を調べるため、S1 試験体と同様の形状を有し鉛プラグを封入しない S0 試験体を用意した。さらに、ゴム部断面積と鉛プラグ断面積が角型 LRB の S1,S2 試験体と等しくなるように設定した丸型 LRB (外径 $D=\phi 225\text{mm}$ 、 $D_p=\phi 40\text{mm}$) が R1 試験体である。両断面形状の積層ゴム断面積 A_r がほぼ等しくなるように設定した結果、角型 LRB の S1,S2 試験体が $A_r=38,543\text{mm}^2$ 、丸型 LRB の R1 試験体が $A_r=38,504\text{mm}^2$ となった。これにより、鉛プラグ配置本数および、断面形状の違いによる二方向加力特性の違いを直接比較できる。また、丸型 LRB については、二次形状係数 S_2 と鉛プラグ径 D_p をそれぞれ3水準ずつ設定している。 S_2 は、R1 試験体の $S_2=5.5$ を基準に $S_2=8.9$ としたのが R2 試験体、 $S_2=4.5$ としたのが R3 試験体である。 D_p は同様に R1 試験体の $D_p=\phi 40\text{mm}$ を基準に $D_p=\phi 30\text{mm}$ としたのが R4 試験体、 $D_p=\phi 50\text{mm}$ としたのが R5 試験体である。これらの鉛プラグ径の設定範囲は前述の LRB-S-1000 における部材認定取得範囲の最小、最大径による断面積を縮小した値と等しい。

試験体はフランジ組立タイプとし、厚さ 16mm、外形 $300\times300\text{mm}$ のフランジプレートを、積層体の上下端に取り付けた。ゴム材料は G4 (せん断弾性率 0.4N/mm^2) の天然ゴムとし、内部鋼板は SPCC 材とした。全試験体の諸元を表 2.1 に示す。基準試験体である S1,S2,R1 試験体は各3体ずつ、R1 試験体は4体製作し、2.3 項で述べる一方向加力、2:1 楕円加力、真円加力に1体ずつ割り当て、R1 試験体は 4:1 楕円加力も行った。その他の試験体はすべて 2:1 楕円加力とした。このように製作した試験体の総数は写真 2.3 に示す、15 体となった。

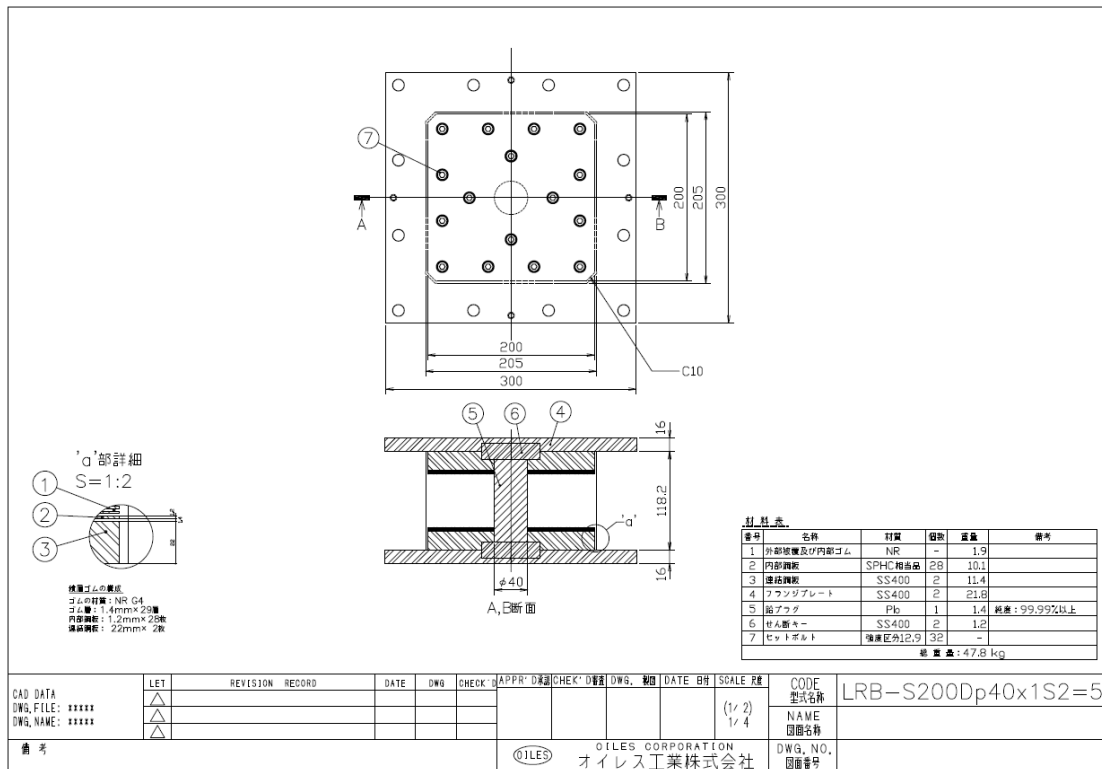


図 2.3 S1 試験体（角型断面，鉛プラグ 1 本タイプ）

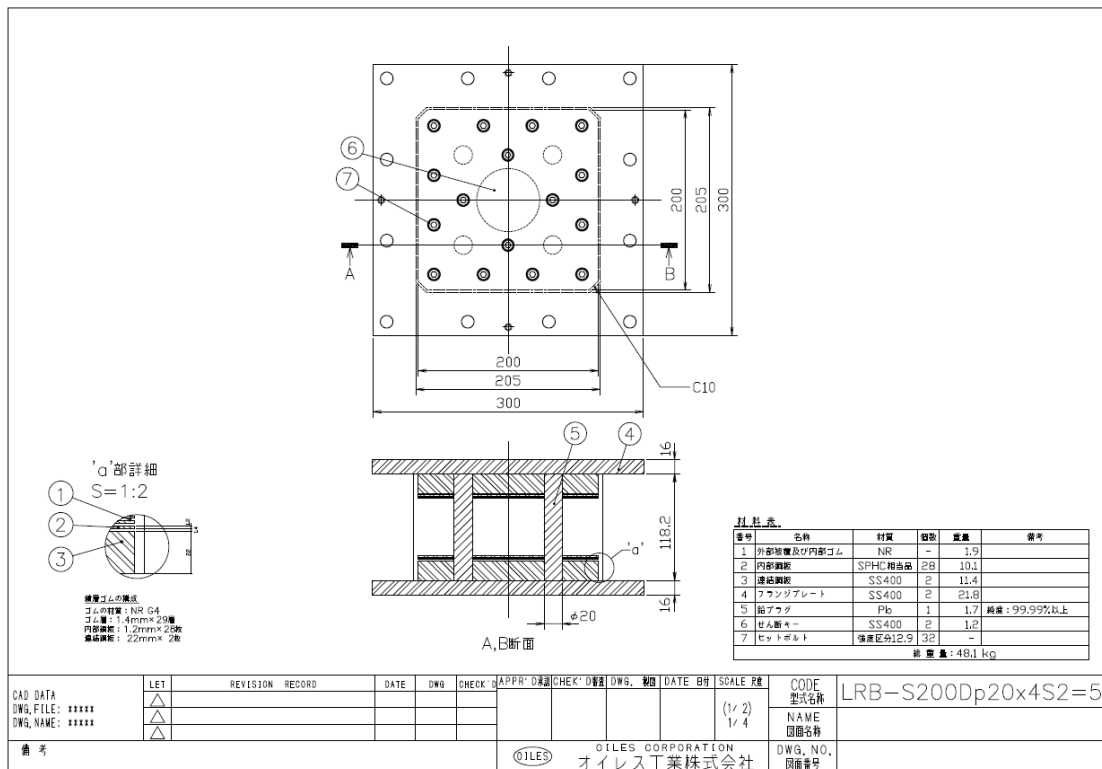


図 2.4 S2 試験体（角型断面，鉛プラグ 4 本タイプ）

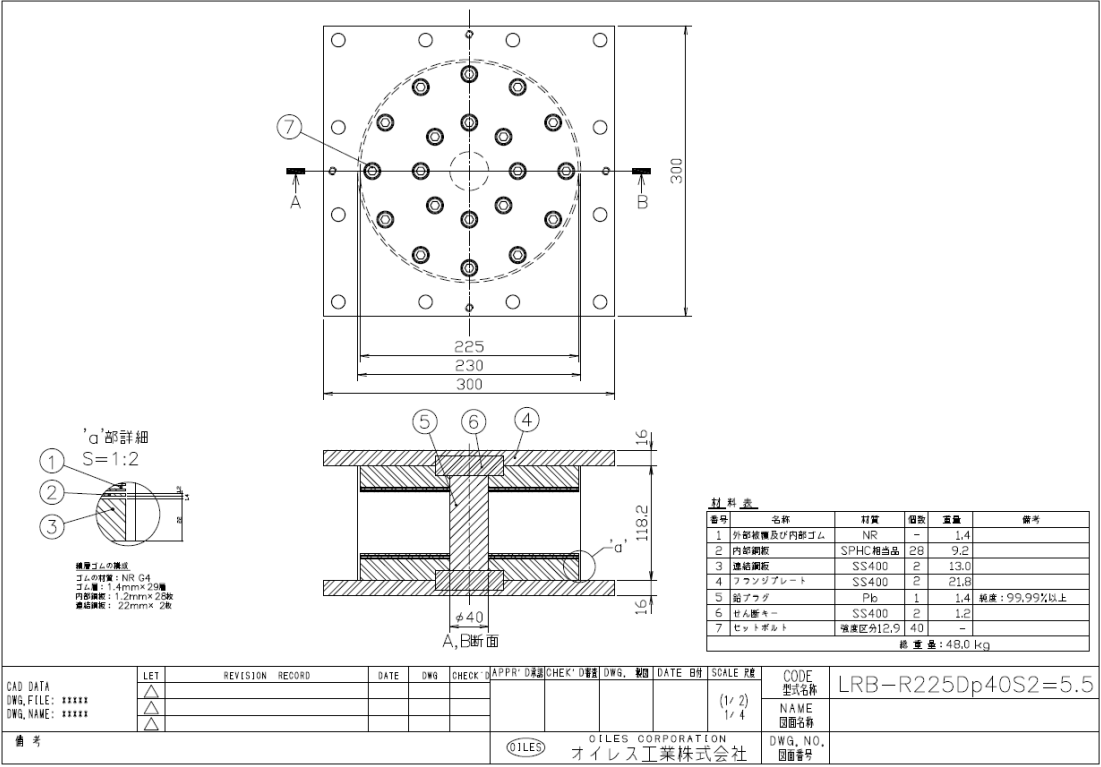


図 2.5 R1 試験体（丸型断面，鉛プラグ 1 本タイプ）

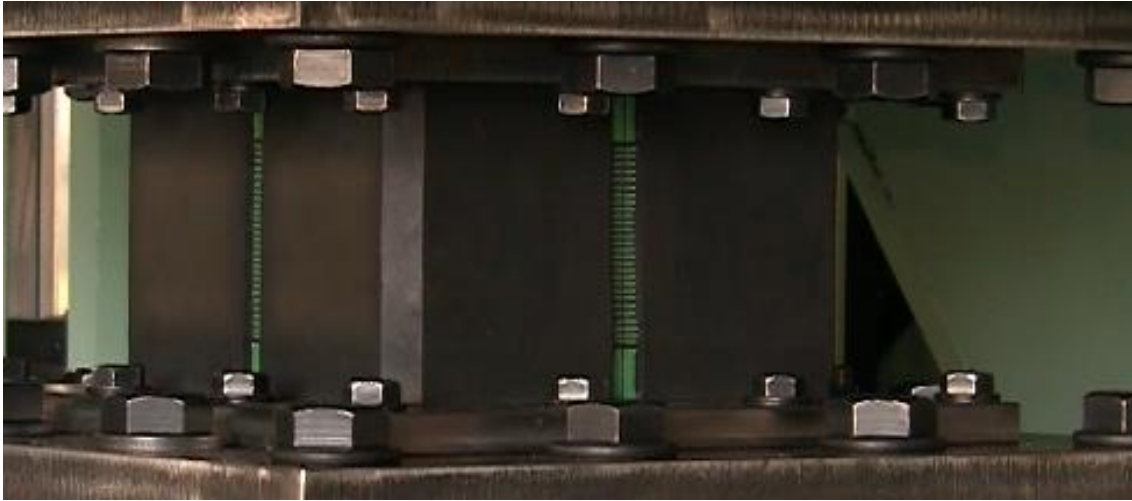


写真 2.1 S1 試験体

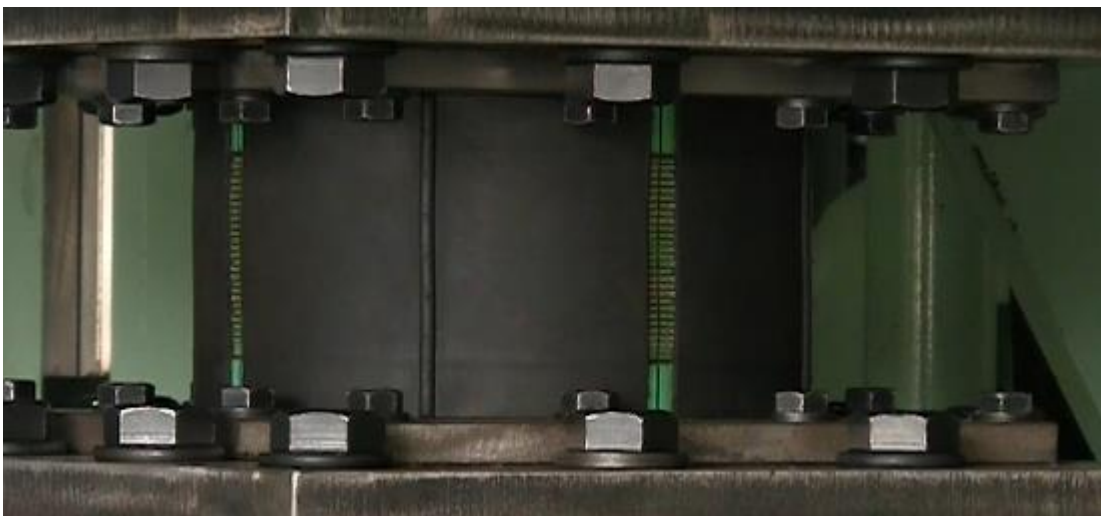


写真 2.2 R1 試験体

表 2.1 試験体諸元

項目 (単位=mm)	試験体名称							
	S0	S1	S2	R1	R2	R3	R4	R5
断面形状	角型			丸型				
外形 D_s ・外径 D	200	200	200	225	225	225	225	225
角部面取り C	10	10	10	-	-	-	-	-
鉛プラグ径 D_p	-	40	20	40	40	40	30	50
鉛プラグ数 n_p [本]	-	1	4	1	1	1	1	1
ゴム層厚 t_r	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
ゴム層数 n_r [層]	29	29	29	29	18	36	29	29
ゴム層総厚 H	40.6	40.6	40.6	40.6	25.2	50.4	40.6	40.6
内部鋼板厚 t_s	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
積層ゴム断面積 A_r [mm ²]	38543.4	38543.3	38543.3	38504.1	38504.1	38504.1	39053.9	37797.3
一次形状係数 S_1	30.5	36.6	36.6	40.2	40.2	40.2	40.2	40.2
二次形状係数 S_2	4.9	4.9	4.9	5.5	8.9	4.5	5.5	5.5
試験体数	1	3	3	4	1	1	1	1

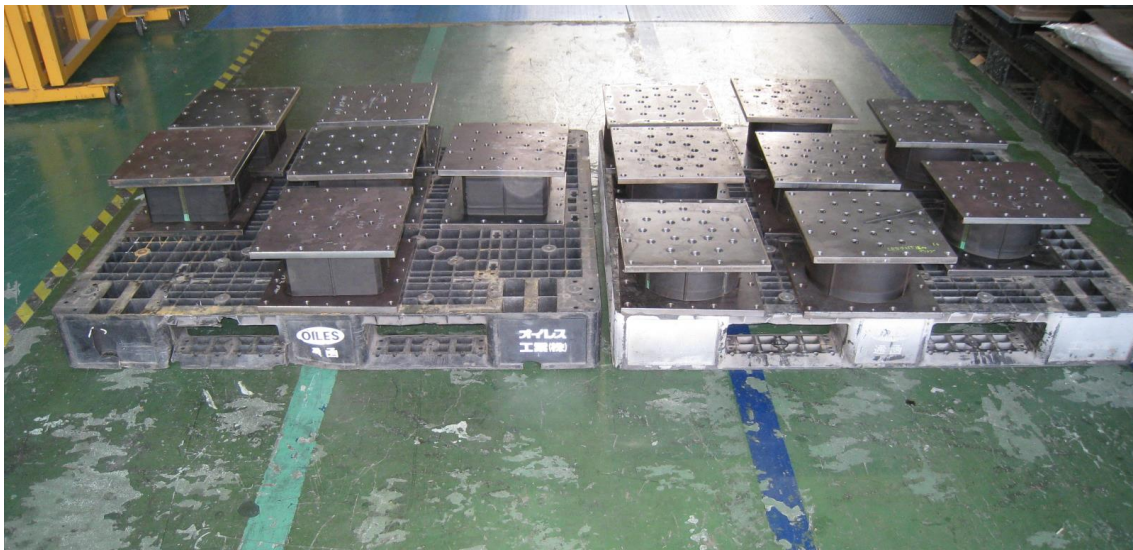


写真 2.3 全試験体

2.3 加力方法

2.3.1 加力試験機

免震用積層ゴム支承の水平二方向加力は、SRMD[1]に代表される多自由度を有する加力試験機が必要となる。SRMDは米国カリフォルニア大学サンディエゴ校にある試験機であり、日本国内では実大の免震用積層ゴムの二方向加力を行える試験機は無い。そのため、日本国内では、大型震動台のE-Defenseに特別に製作した加力フレームを用いて実験を行っているのが現状である[2,3,4]。E-Defenseは実大建物の振動台実験を想定して製作されたものであるため、実験準備作業に多くの時間を要することや、加力フレームのサイズにより試験体の形状に制約があること、また繰返し加力回数に限度がある。そのためE-Defenseは、複数の試験体を用い、多くの加力条件を行う実験には不向きである。また、その加力制御は変位制御とする必要があり、一定の鉛直荷重を保つために入力補償等の震動台特有の調整が必要となる。

以上のような日本国内における実験環境から、本研究では2.2節で定めた15体の縮小試験体による実験を行うために、専用の加力試験機が必要と判断し、写真2.3の三軸試験機を新たに製作した。



写真 2.3 三軸試験機

写真 2.3 の三軸試験機は、鉛直方向一軸、水平主軸、水平副軸の三軸を有しており、これらを高精度に同時制御して鉛直軸力および水平二方向を連動させた試験が可能である。三軸試験機の機構は図 2.6 に示すように鉛直アクチュエータに連結されたクロスヘッドに水平副軸方向に可動する上面盤を設け、これに副軸アクチュエータを連結している。主軸は試験機下部に副軸と直交して可動する下面盤を設け、これと主軸アクチュエータを連結する構造である。このように三軸試験機は、試験面盤をフレームの上下に直交して稼動させることにより、水平二方向加力を可能としている。この構造形式を採用する利点は、試験面盤を水平二方向に稼動させる必要が無い場合、シンプルなフレーム構造が構築できる点にある。そのため、試験機フレームに複雑なリンク機構が介在せず、ガタツキの生じない高精度な試験が可能となる。また、三軸試験機は下面盤と可動部の間に六分力計を設置している。この位置に分力計を設置することにより、可動部の摩擦力を排除して、試験体に作用する図 2.7 の並進 3 成分（軸力およびせん断力 2 成分）、回転 3 成分（ねじれモーメントおよび、曲げモーメント 2 成分）の合計 6 成分の荷重を計測可能である。表 2.2 に三軸試験機の能力を示す。

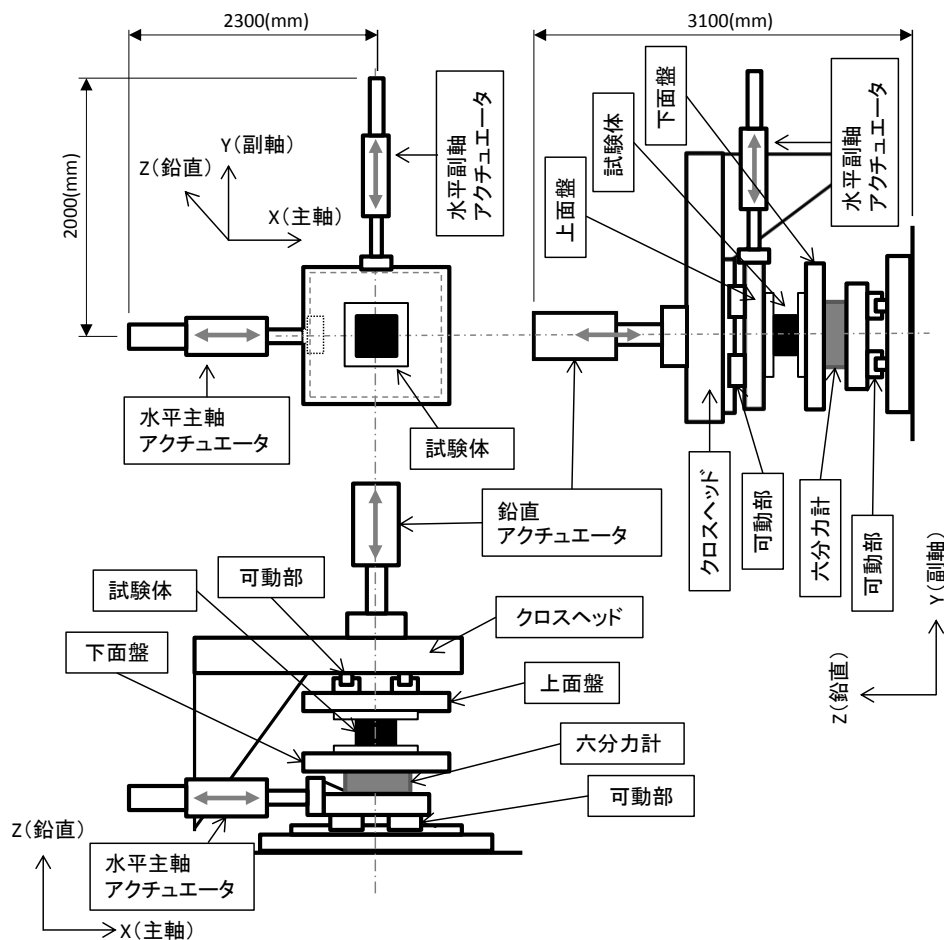


図 2.6 三軸試験機概略

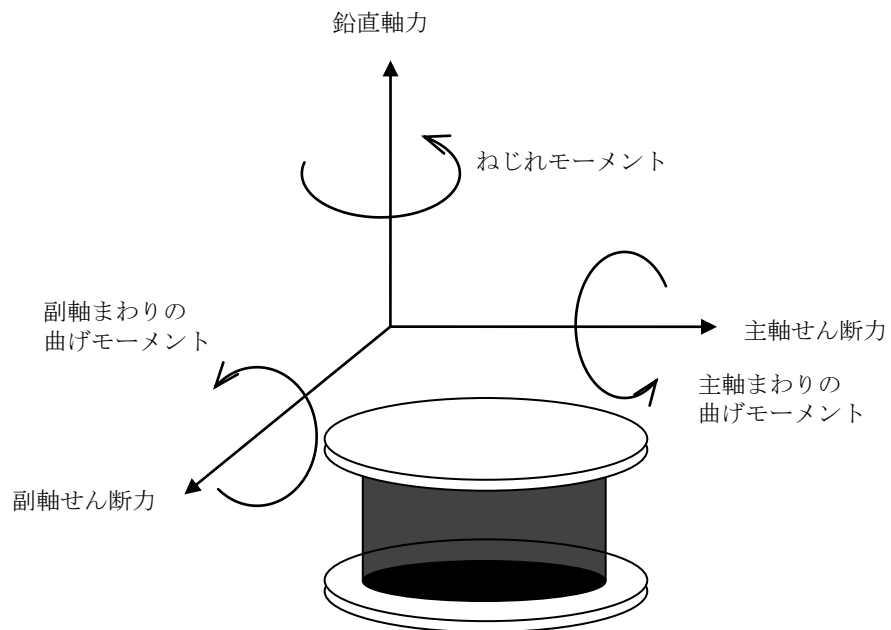


図 2.7 試験体に作用する成分力

表 2.2 三軸試験機の載荷能力

鉛直載荷能力	500kN (圧縮)
水平主軸載荷能力	200 kN
水平主軸ストローク	±250 mm
水平副軸載荷能力	100 kN
水平副軸ストローク	±250 mm

2.3.2 計測方法

本研究における計測は、図 2.8 の計測システムにより行う。LRB の水平主軸および副軸の変位はアクチュエータ内蔵の磁歪式変位により計測した。計測データサンプリング周期は、0.02 秒とした。主要な計測位置を図 2.9 に示す。

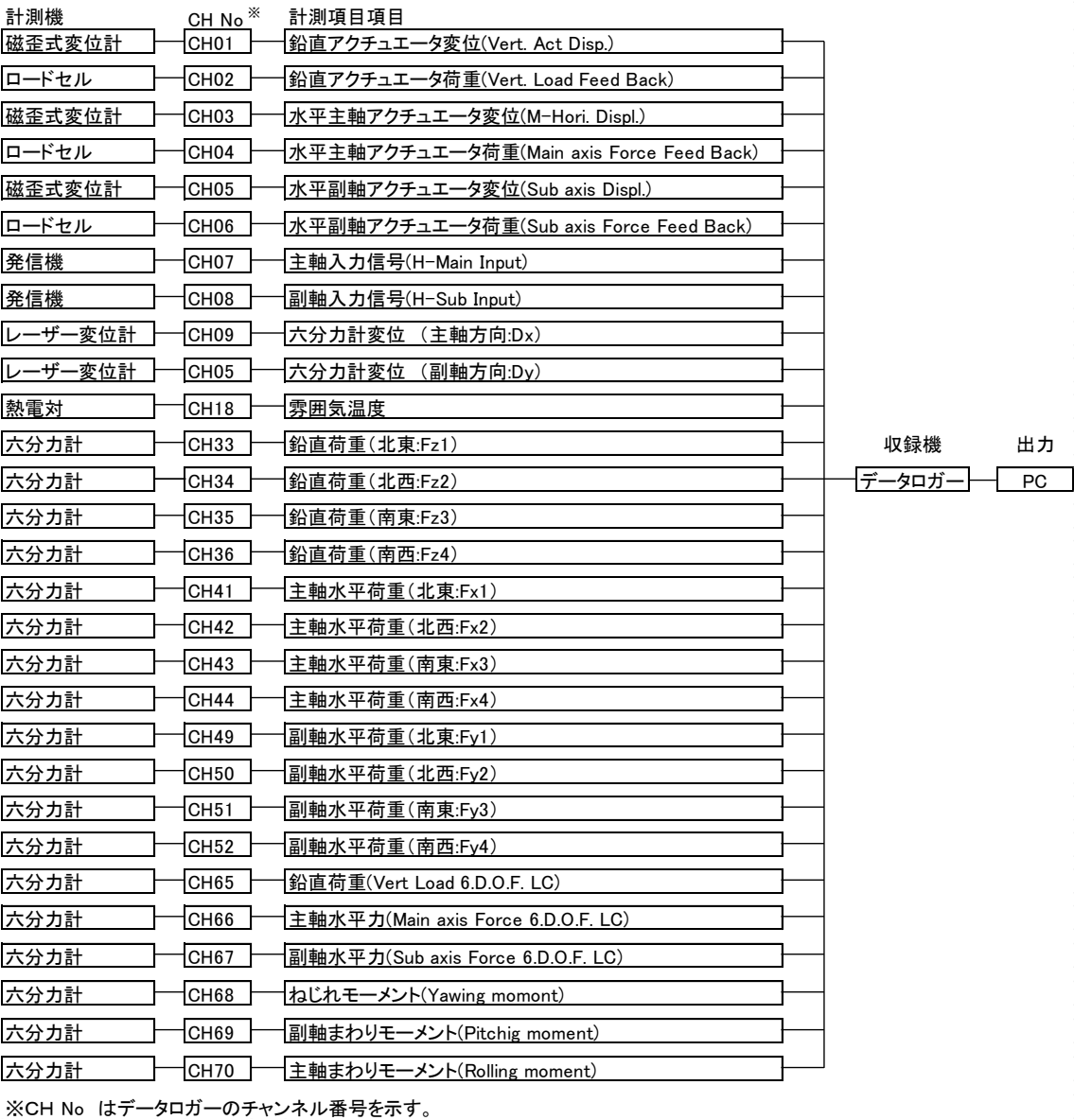


図 2.8 計測システム

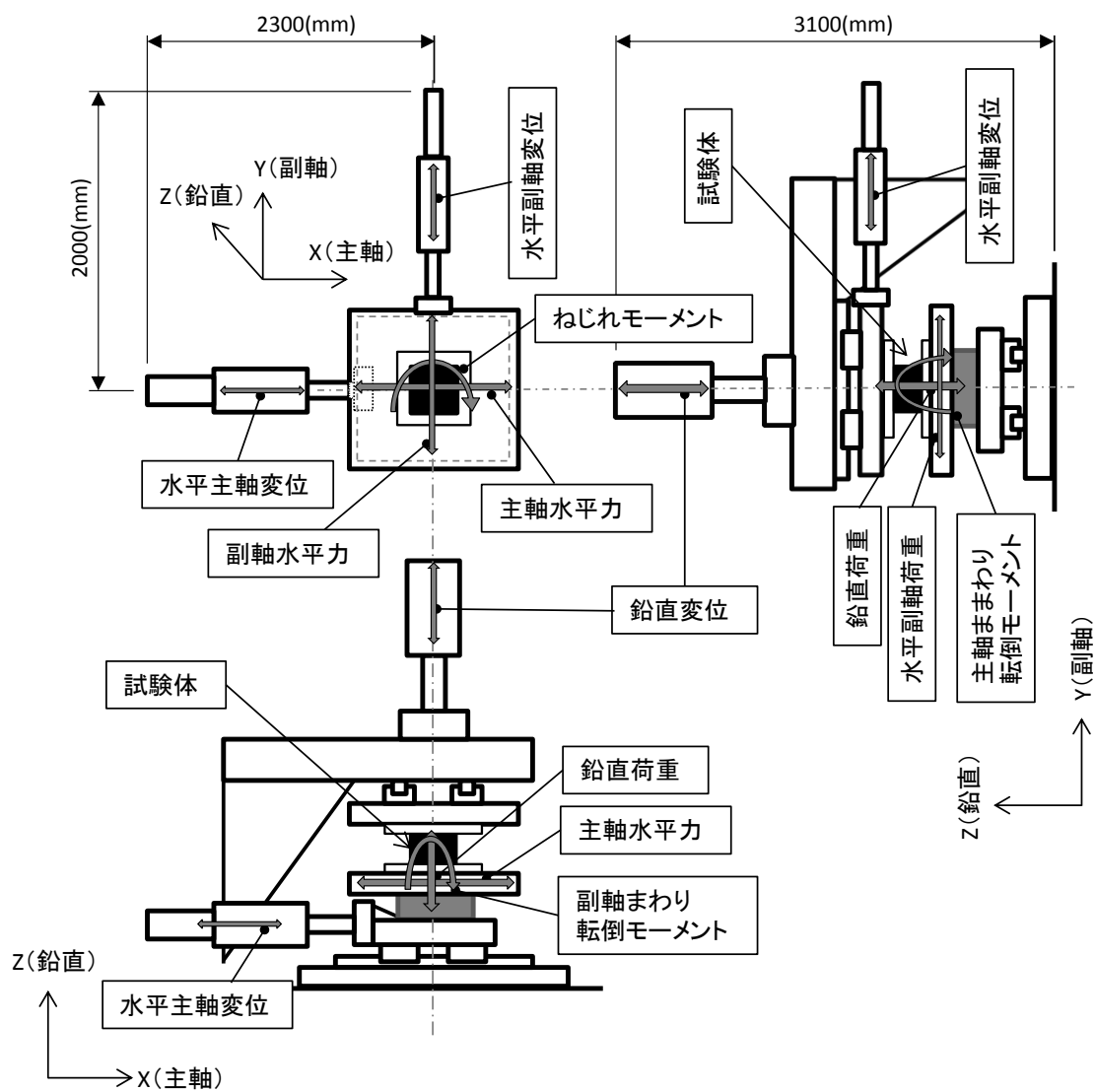


図 2.9 三軸試験機の主要計測位置

2.3.3 加力波形

水平二方向加力は、既往研究において長辺：短辺の振幅比が 2:1 の楕円波形や同様の振幅比による 8 の字波形[5,6]、楕円と 8 の字を組み合わせた複合波形や真円波形[7,8,9]で行われている。これらの水平二方向加力における最大変形量は楕円加力の場合、長径変位の 2 分の 1、円加力の場合は直径の 2 分の 1 で定義し、この変形量による結果を同一変形量の一方向加力と比較している。積層ゴム支承の水平二方向力学特性の解明には、波形が単純な楕円や、真円波形は復元力の分析に適している。しかし、楕円加力と真円加力の最大変位と一方向加力の最大変位が等しい場合、加力軌道上における移動距離は一方向加力と比較して、楕円加力は約 1.2 倍、真円加力は約 1.6 倍となる。本研究対象である LRB は履歴減衰を有する積層ゴム支承であり、エネルギー吸収量は移動距離に関係するため、このような比較は入力エネルギー量に差異が生じる。そこで、本研究は積層ゴムに入力されるエネルギー量を加力波形によらず同一とするため、文献[10,11]の位相差入力を採用する。位相差入力波形が既往研究と異なるのは加力オービットの最大変形量が図 2.10 に示すように、一致しない点にある。ただし、この加力オービットは同図に示す、主軸—副軸切片の移動距離が等しい。すなわち、位相差入力は加力オービット内の最大移動距離が加力パターンによらず等しい波形である。位相差入力波形の作成方法や加力パラメータの設定方法は次の 2.3.4 節で説明する。

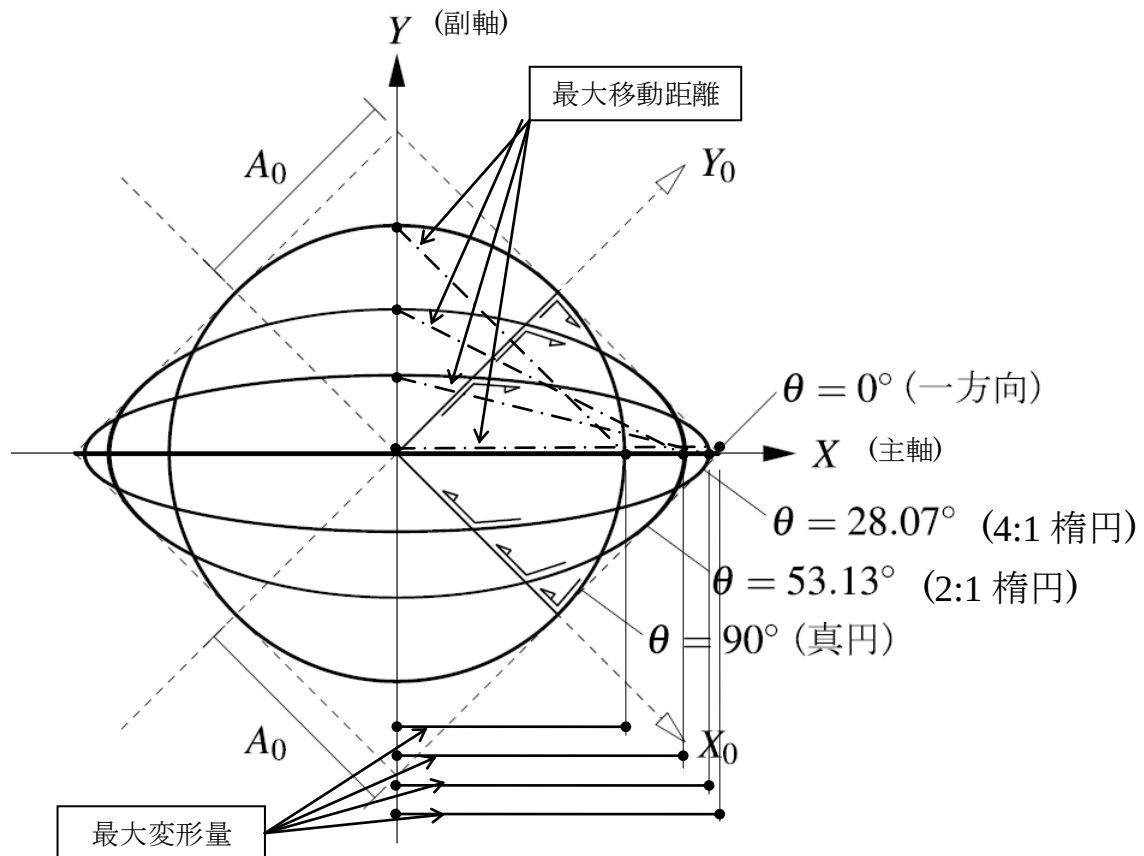


図 2.10 変位オービット

次に位相差変位波形を積層ゴムに入力した場合の入力エネルギーについて検討する[10,11]。まずは、位相差入力による入力エネルギーの検討のため、履歴減衰を有する積層ゴムの復元力特性のモデル化を行う。想定する積層ゴムのサイズは外径 $\phi 1000\text{mm}$ 、ゴム層総厚 200mm 程度として、一方向加力時の復元力特性をバイリニア型とする。想定積層ゴムの初期剛性 K は 500kN/m 、降伏荷重 Q_y を 10kN 、降伏剛性比 β を 0.1 とする(図 2.11 参照)。

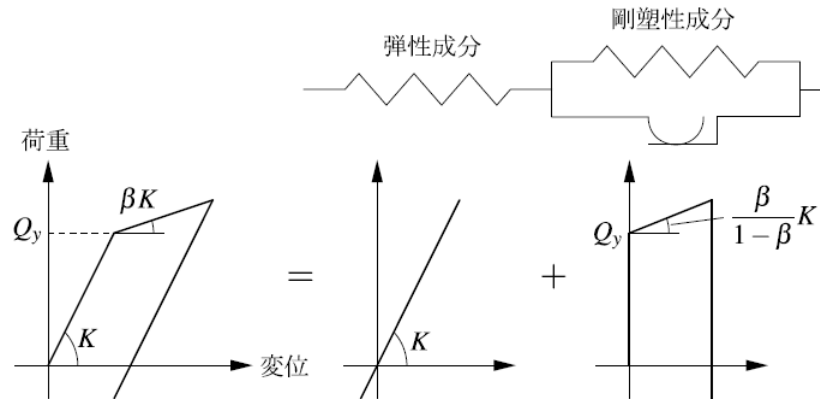


図 2.11 バイリニア復元力モデルの概要[11]

復元力は水平二方向に等方とし、Ziegler 則[12]に基づく移動硬化モデルを用いてバイリニア特性を二方向に拡張したものを用いる。移動硬化モデルは荷重の増分に応じて移動する降伏曲線を用いて変位の増分を求める計算モデルである（図 2.12）。

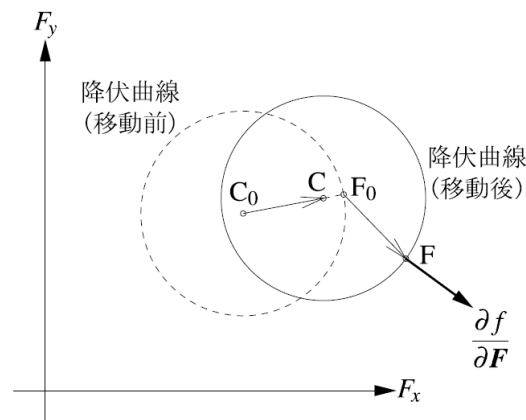


図 2.12 移動硬化モデルの概要[11]

図 2.12 の復元力特性が XY 平面内で等方的に再現されるように、降伏関数 f を (2.1)式で定義する。

$$f = |F - C|^2 - Q_y^2 \quad (2.1)$$

ここで、 $F = \{F_x, F_y\}^T$ は図 2.12 に示す荷重ベクトル、 $C = \{C_x, C_y\}^T$ は降伏曲線の中心荷重ベクトルである。降伏曲線の移動について、Ziegler 則は (2.2) 式で表せる。

$$dC = (F - C) \frac{(\partial f / \partial F)^T (\partial f / \partial F)}{(F - C)^T (\partial f / \partial F)} \quad (2.2)$$

ここで、 dC は降伏曲線の中心の移動量、 dF は荷重増分、 $\partial f / \partial F$ は F の位置における降伏曲線の法線ベクトルである。復元力モデルの変位と荷重の関係は(2.3)式で定まる。

$$dD = K^{-1} dF \quad (2.3)$$

ここで、 dD は変位ベクトル $D = \{D_x, D_y\}^T$ の増分である。 K^{-1} は柔性マトリクスであり、(2.4)式で定義される。

$$K^{-1} = \begin{cases} K_e^{-1} & (\text{降伏曲線が移動しない場合}) \\ K_e^{-1} + K_p^{-1} & (\text{移動する場合}) \end{cases} \quad (2.4)$$

ここに、 K_e^{-1} は弾性柔性マトリクス、 K_p^{-1} は塑性柔性マトリクスであり、次式で計算される。

$$K_e^{-1} = K^{-1} I \quad (2.5)$$

$$K_p^{-1} = \left(\frac{\beta}{1-\beta} K \right)^{-1} \frac{(\partial f / \partial F)(\partial F / \partial f)^T}{(\partial f / \partial F)^T (\partial f / \partial F)} \quad (2.6)$$

ここで、 I は単位行列である。各柔性マトリクスの係数部分は、図 2.11 に示すバイリニア復元力の弾性・塑性成分の柔性に相当する。

位相差入力の変位オービットとして、図 2.6 の一方向加力 ($\theta = 0^\circ$)、4:1 楕円加力 ($\theta = 28^\circ$)、2:1 楕円加力 ($\theta = 53^\circ$) および真円加力 ($\theta = 90^\circ$) について、想定積層ゴムの振幅レベル 200, 400, 800mm の解析結果を図 2.13 に示す。変位オービットが一方向～楕円～真円に変化するに従い、履歴曲線がバイリニアから紡錘形の履歴曲線に変化する。これは想定積層ゴムの水平力が二方向に分散するためである。

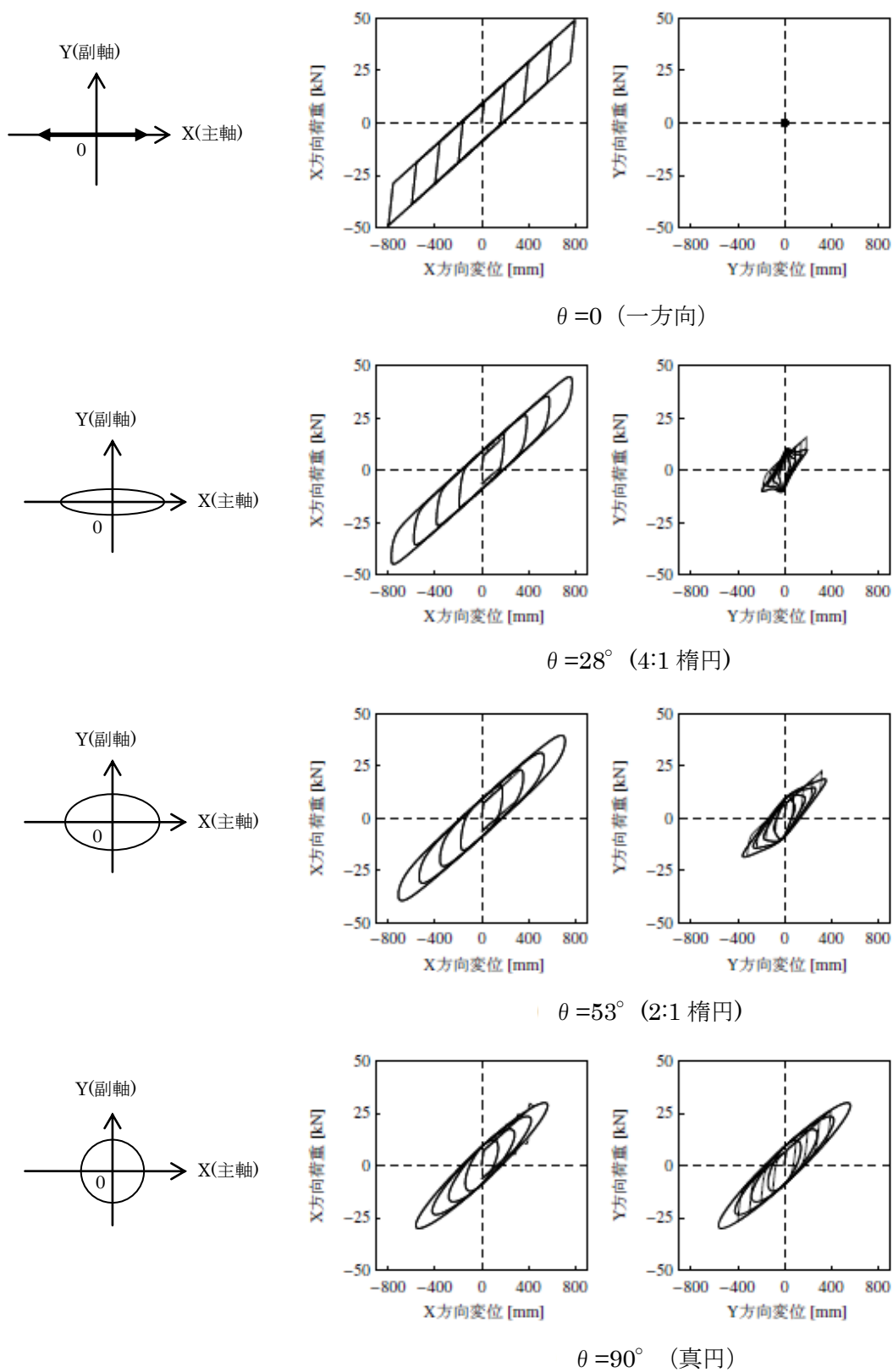


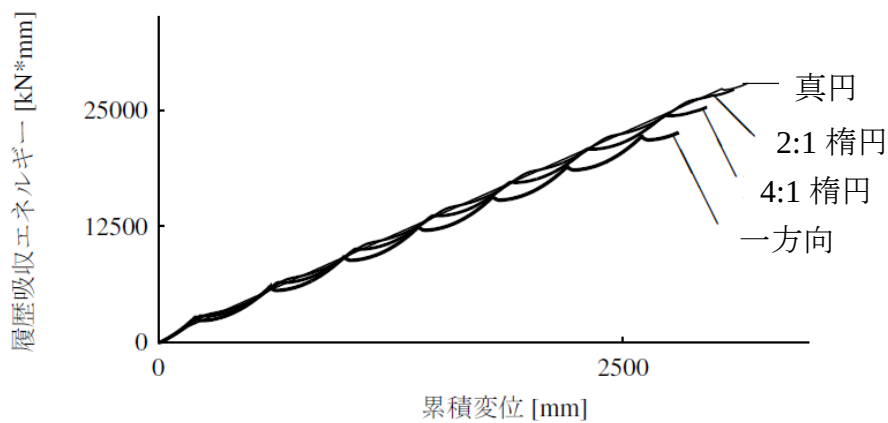
図 2.13 想定積層ゴムの解析結果[10]

解析より想定積層ゴムに入力されたエネルギーを調べるため、累積変位 S と履歴吸収エネルギーを W を算出し、加力パターン毎に位相差入力を与えるエネルギーを比較する。

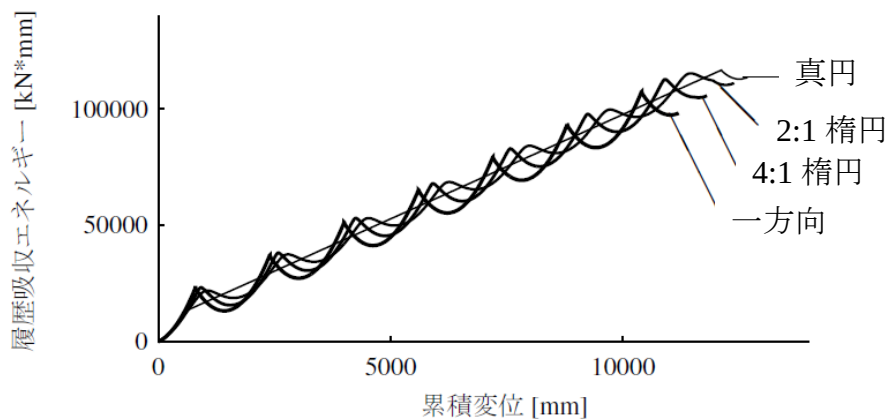
$$S(t) = \int_0^t \sqrt{dD \cdot dD} d\tau \quad (2.7)$$

$$W(t) = \int_0^T F \cdot dD d\tau \quad (2.8)$$

ここで、 dD は変位増分ベクトル、 F は荷重ベクトルである。図 2.14 に累積吸収エネルギーと累積変位の関係を示す。これより、振幅レベルが同じであれば、吸収エネルギーは加力オービットによらず、同程度である。すなわち、位相差入力を用いると積層ゴムに与えるエネルギー量が一方加力と二方向加力で同等であると言える。



(a) 振幅レベル 200 mm



(b) 振幅レベル 800 mm

図 2.14 累積吸収エネルギーと-累積変位の関係[10]

2.3.4 加力プログラム

本研究では LRB の水平二方向加力における力学挙動を、一方向加力と比較することを目的に、積層ゴムに与えるエネルギー量が加力方向によらず同等なる位相差入力を変位波形として用いる。位相差入力における水平二方向の変位波形 D_{x0} , D_{y0} は、(2.9) 式のように振幅 A_0 の正弦波に位相差 θ を与えて作成する。

$$\begin{cases} D_{x0} = A_0 \sin(\phi) \\ D_{y0} = A_0 \sin(\phi + \theta) \end{cases} \quad (2.9)$$

(2.9)式は水平一方向加力で従来から一般的に用いられている正弦波波形の作成手法を水平二方向に拡張したものであり、位相差 θ を変えることにより水平一方向～楕円～真円と変化する変位オービットを統一的に表現できる。この手法は、従来の入力変位を水平二方向に振り分けて時間差を導入することにより、同規模の地震入力群によって免震層に生じる様々な水平二方向応答を模擬できる。

加力波形では、変位オービットの開始点と終了点を原点とするために、変位軌道の繰り返し前後に開始部と終止部を設ける。位相差変位入力による変位波形を図2.15に示す。本研究では、位相差変位入力による一方向／楕円／真円軌道の繰り返し数を3回とした。また、水平主軸アクチュエータの方向を楕円軌道の主軸方向（図2.10のX方向）と一致させるために、主軸アクチュエータに与える変位 D_x 、および副軸アクチュエータに与える変位 D_y を(2.10)式で求めた。

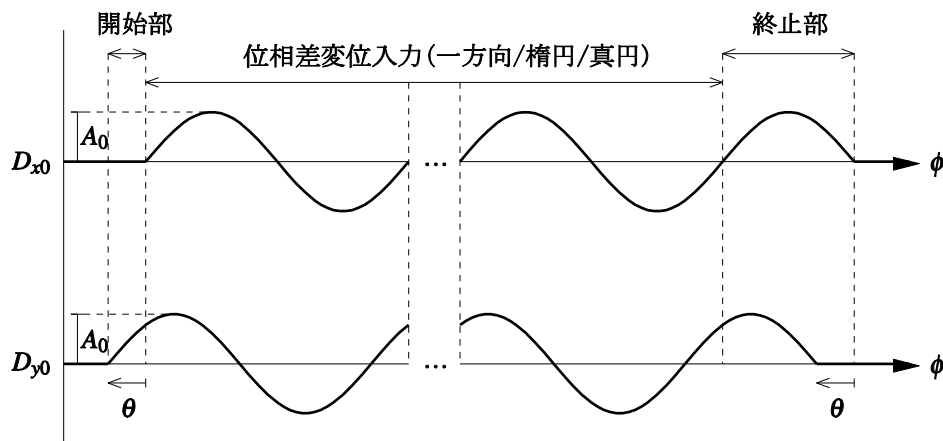


図 2.15 変位波形

$$\begin{Bmatrix} D_x \\ D_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & \sin 45^\circ \\ -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_{x0} \\ D_{y0} \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

入力変位オービットの形状については、振幅比 A_y/A_x を基準として、位相差 θ を(2.11)式で決定する。

$$\theta = 2 \tan^{-1}(A_y/A_x) \quad (2.11)$$

振幅比 A_y/A_x は 0, 0.25, 0.5, 1.0 の 4 水準を設定した。 $A_y/A_x=0$ は一方向軌道、 $A_y/A_x=0.25$ は短軸と長軸の長さ比が 4:1 となる楕円軌道、 $A_y/A_x=0.5$ は同様に 2:1 となる楕円軌道、 $A_y/A_x=1.0$ は真円軌道にそれぞれ対応する。また、その時の位相差は(2.11)式からそれぞれ $\theta=0^\circ, 28.07^\circ, 53.13^\circ, 90^\circ$ と求められる。

入力変位の振幅を定める際には、位相差 θ を 0° (一方向軌道) としたときの積層ゴムせん断ひずみを代表値とし、以降ではこの代表値をひずみレベルと呼ぶ。ひずみレベルは、50% を最小として 50% 毎に、試験体が破損するまで漸増させる。振幅パラメータ A_0 は(2.12)式で決定した。

$$A_0 = \frac{\gamma \cdot H}{\sqrt{2}} \quad (2.12)$$

ここに、 γ はひずみレベル、 H はゴム層総厚である。

表 2.3 に試験体と加力パターンの組み合わせおよび各加力パターンに対応する主軸と副軸の最大ひずみ振幅を示す。各ひずみレベルの加力繰り返し数は 3 回、速度は変位オービット進行方向に 30 mm/s、鉛直面圧を 10 MPa とした。基準試験体である S1, R1 試験体に対しては、一方向、2:1 楕円、真円の各変位軌道を 1 体ずつ適用した。4:1 楕円加力は R1 試験体のみ適用しひずみレベルは 400% までとした。以上のように設定した加力パターンにより、水平二方向加力による復元力特性の変化および水平一方向特性の把握を前提とした設計特性値との対応を把握する。その他の試験体については各 1 体を 2:1 楕円軌道に適用し、丸型の断面形状を共通としつつ、二次形状係数あるいは鉛プラグ径の違いが水平二方向特性に及ぼす影響を調べる。なお、本論文ではひずみレベル 50%~400% の試験結果を第 3 章の水平二方向加力時の復元力特性で分析し、ひずみレベル 400% 以上の試験結果を第 4 章に述べる水平二方向加力時の限界特性で分析する。

表 2.3 試験体と加力パターンの組み合わせおよび最大ひずみ振幅 [%]

試験体	S1, R1		R1		S0,S1, R1, R2, R3, R4, R5		S1, R1	
変位軌道	一方向		4:1 楕円		2:1 楕円		真円	
振幅比	0.0		0.25		0.5		1.0	
位相差 θ	0°		28.07°		53.13°		90°	
ひずみレベル	主軸	副軸	主軸	副軸	主軸	副軸	主軸	副軸
50	50.0	0.0	48.5	12.1	44.7	22.4	35.4	35.4
100	100.0	0.0	97.0	24.3	89.4	44.7	70.7	70.7
150	150.0	0.0	145.5	36.4	134.2	67.1	106.1	106.1
200	200.0	0.0	194.0	48.5	178.9	89.4	141.4	141.4
250	250.0	0.0	242.5	60.6	223.6	111.8	176.8	176.8
300	300.0	0.0	291	72.8	268.3	134.2	212.1	212.1
350	350.0	0.0	339.5	84.9	313.0	156.5	247.5	247.5
400	400.0	0.0	388.1	97.0	357.8	178.9	282.8	282.8
450	450.0	0.0	—	—	402.5	201.3	318.2	318.2
500	500.0	0.0	—	—	447.2	223.6	353.5	353.5
550	550.0	0.0	—	—	491.9	246.0	388.9	388.9
600	600.0	0.0	—	—	536.7	268.3	424.3	424.3
650	650.0	0.0	—	—	581.4	290.7	459.6	459.6
:	試験体破断まで							

その他加力条件

繰返し回数：3 cycle

加力速度：軌道方向に 30 mm/s

鉛直面圧：10 MPa 一定

2.4 まとめ

第2章では鉛プラグ入り積層ゴム LRB の水平二方向力学挙動を解明するための試験計画を策定した。

2.2 節では試験体の形状を定めた。LRB は設計範囲が広いため、水平二方向力学特性に影響を与える設計因子の抽出を行った。水平二方向加力で生じる特徴的な現象は、加力中に生じるねじれ変形であるため、ねじれ剛性に影響を与える定数である断面二次極モーメントに着目した。LRB の断面二次極モーメントは角型・丸型の断面形状および、鉛プラグの配置本数により変化するため、これらを試験体パラメータに設定した。また、ねじれ変形を生じさせる原因である減衰力を決定づける鉛プラグ径も試験体パラメータとした。最後に、水平変形の安定性を支配する二次形状係数を試験体パラメータに加えて、試験体形状の違いによる水平二方向力学特性を検証できるようにした。これら、試験体パラメータの設定は、部材認定取得範囲を包括するように定め、LRB が免震建物に供用される範囲の水平二方向力学挙動を把握可能とした。このように試験体を設定した結果、8 種類の形状の試験体を合計 15 体製作する事とした。

2.3 節では、LRB の水平二方向力学挙動を高精度に計測するため、三軸試験機の製作と加力波形の検討をし、加力プログラムを定めた。三軸試験機は鉛直一軸、水平主軸、水平副軸の三軸を同時制御して鉛直軸力および水平二方向を連動させた試験が可能なものとした。また、三軸試験機には六分力計を設置し、試験体に作用する並進 3 成分（軸力およびせん断力 2 成分）、回転 3 成分（ねじれモーメントおよび、曲げモーメント 2 成分）の合計 6 成分の荷重を計測可能とした。加力波形は、「位相差入力」という試験体に入力するエネルギーに着目した新たな加力パターンを採用した。位相差入力が試験体に与えるエネルギーを解析により調査した結果、エネルギー量は加力パターンによらず同等であった。この検討結果より、本研究は LRB の水平二方向加力における力学挙動を一方向加力と比較するために、位相差入力を採用した。位相差入力は水平一方向加力で用いられてきた正弦波波形を水平二方向に拡張して、位相差を与えることにより水平一方向～楕円～真円と変化する変位オービットを統一的に表現可能である。加力プログラムは位相差入力の位相差を、一方向、振幅比 1:4 楕円、振幅比 1:2 楕円および真円の 3 パターンに変化させ、これら加力パターンのせん断ひずみを漸増させて試験体が破断するまで変形を与える計画とした。

第2章の参考文献

- [1] Jean Spangler Shortreed, Frieder Seible, Andre Filiatrault, Gianmario Benzoni :Characterization and testing of the Caltrans Seismic Response Modification Device Test System, The royal society Phil. Trans. R. Soc. Lond. A (2001) 359, pp.1829-1850
- [2] 長島一郎, 佐藤栄児, 日比野浩, 飯場正紀, 欄木龍太, 北村春幸, 成原弘之: 大型震動台を用いた長周期地震動に対する実大免震部材の加力実験 その1: 実験手法の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) pp.395-396, 2012年9月
- [3] 日比野浩, 長島一郎, 欄木龍太, 新居藍子, 青野翔, 佐藤栄児, 飯場正紀: 大型震動台を用いた長周期地震動に対する実大免震部材の加力実験 その2: 弾性すべり支承(高摩擦), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) pp.397-398, 2012年9月
- [4] 欄木龍太, 長島一郎, 日比野浩, 新居藍子, 青野翔, 佐藤栄児, 飯場正紀: 大型震動台を用いた長周期地震動に対する実大免震部材の加力実験 その3: オイルダンパー, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) pp.399-340, 2012年9月
- [5] 前田洋三, 竹中康雄, 飯塚真巨: 建物の免震防振構法の開発(その19 鉛コア積層ゴムの水平2軸加力実験とシミュレーション解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州) pp.443-444, 1989年10月
- [6] 仲村崇仁, 菊地優, 石井建, 鈴木頼子: 鉛プラグ入り積層ゴムの水平二方向力学特性に関する研究(その1 縮小試験体の水平二方向加力試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) pp.505-506, 2011年8月
- [7] 嶺脇重雄, 山本雅史, 東野雅彦, 浜口弘樹, 久家英夫, 曾根孝行, 米田晴美, 和田章: 超高層免震建物の地震応答を想定した実大免震支承部材の性能確認試験, 構造工学論文集 Vol.55B, pp.1-9, 2009年3月
- [8] 嶺脇重雄, 山本雅史, 東野雅彦, 加藤秀章, 鈴木重信, 和田章: 積層ゴム支承の水平二軸変形特性, JSSI MENSIN No.63 pp.34-37, 2009年2月
- [9] 仲村崇仁, 河内山修, 長田修一, 池永雅良, 和田章: 実大角型鉛プラグ入り積層ゴムの二方向加力実験, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.301-304, 2011,2 (CD-R)

- [10] 石井建，菊地優，山本雅史：位相差変位入力を用いた免震積層ゴム水平二方向加力試験方法について，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海） pp.365-366, 2012 年 9 月
- [11] 石井建，菊地優，山本雅史：位相差変位入力を用いた免震積層ゴム水平二方向加力試験方法について，日本建築学会 北海道支部 研究報告集 No.85 pp.95-98 2012 年 6 月(CD-R)
- [12] H. Ziegler: A Modification of Prager's Rule, Quarterly of Applied Mathematics.vol. 17. No. 1, pp.55-65, 1959.

第3章

水平二方向加力時の復元力特性

3.1 概要

LRB の復元力特性の研究や、製品出荷検査は一般的に一方向加力が採用されている。一方向加力による積層ゴムの反力は、図 3.1(a)の鉛直軸力、水平方向の弾性力、減衰力および回転モーメントである。一方、水平二方向加力における反力は一方向加力の各反力に加え、ねじれモーメントが生じる。ねじれモーメントが生じるのは、弾性力と減衰力の合力である復元力の方向が水平変位の原点に向かわないため、復元力とその方向の偏心距離により、ねじれモーメントが生じる（図 3.1(b)）。

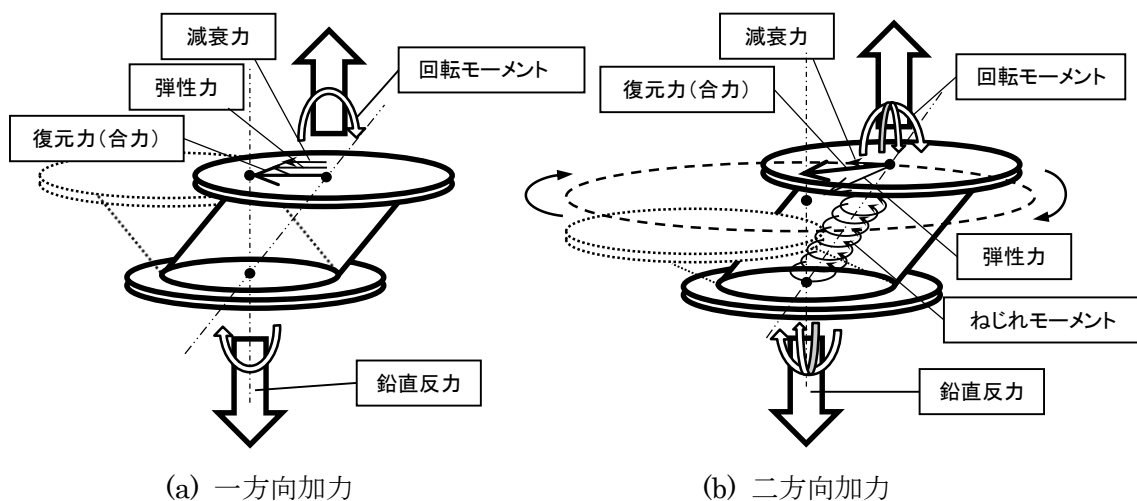


図 3.1 積層ゴムの反力

一方向加力による復元力は、反力の方向が同一であるため、水平変位－水平荷重関係による履歴曲線上に減衰力、弾性力が表現可能である。しかし、水平二方向加力は減衰力と弾性力の向きが異なることが原因となって、一方向加力時には生じないねじれモーメントが発生する。そのため、復元力特性を一つの履歴曲線で表現するのは困難である。したがって、**LRB** の水平二方向復元力特性の評価には、履歴曲線のみではなく、復元力の各成分力を個別に評価する必要がある。

本章では、**LRB** の水平二方向復元力特性を解明するため、加力試験による履歴曲線を一方向加力と二方向加力について比較する。次に履歴曲線より算出される降伏荷重および、降伏後剛性を一方向加力結果と比較し、その違いについて述べる。次に、水平二方向加力における復元力を減衰力と弾性力に分解して個別に評価する方法を提案し、分解した成分力を一方向加力による減衰力と弾性力に関連付けをし、水平二方向加力における **LRB** の復元力特性を解明する。最後にシミュレーション解析を行い **LRB** の水平二方向履歴曲線の再現をする。

3.2 実験結果

加力試験は図 3.2 に示す基準試験体の鉛プラグ配置本数、鉛プラグ径および、ゴム層総厚を試験体パラメータとして行った。また、鉛プラグ有無による履歴曲線の違いを確認するため、角型断面鉛プラグ 1 本配置の S1 試験体に鉛プラグを封入しない S0 試験体についても行った。これら試験体の諸元は表 3.1 に示す通りである。

本章では表 3.2 に示すひずみレベル 50%~400%の実験結果を対象とした、LRB の復元力特性について検討する。なお、ひずみの範囲を 400%までと規定したのは、部材認定において積層ゴムの最大水平変形性能を 400%に定めていることによる。

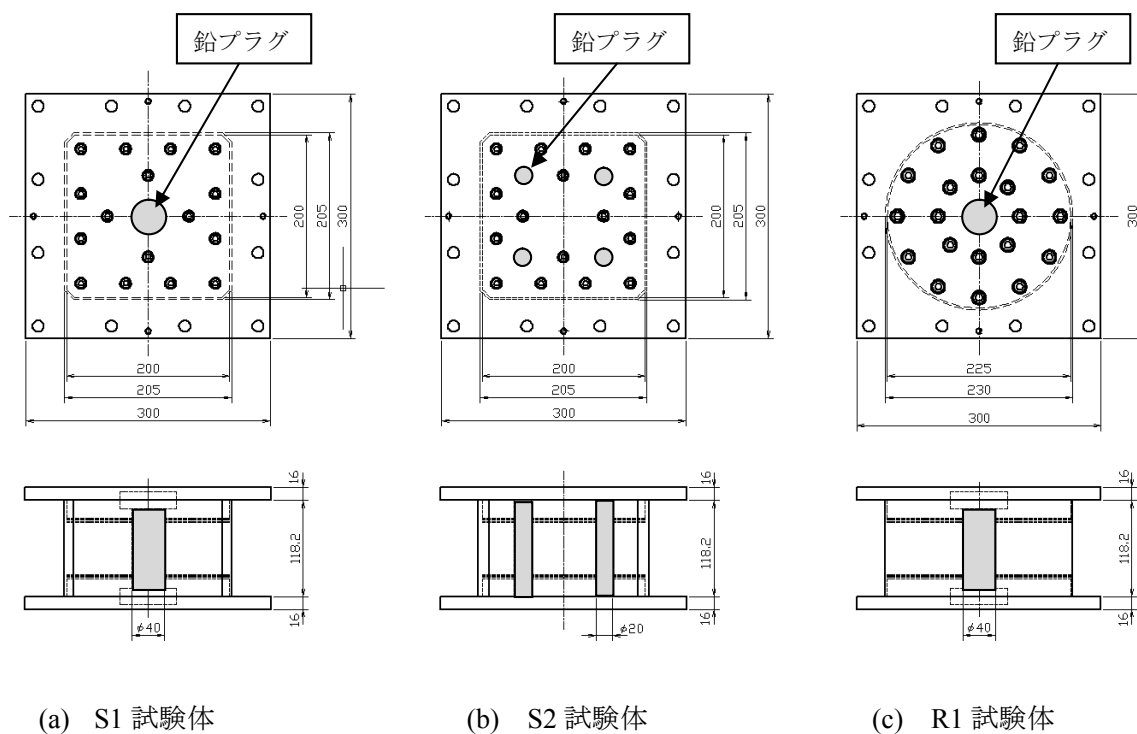


図 3.2 基準試験体

表 3.1 試験体諸元 (表 2.1 の再掲)

項目 (単位=mm)	試験体名称							
	S0	S1	S2	R1	R2	R3	R4	R5
断面形状	角型			丸型				
外形 D_s ・外径 D	200	200	200	225	225	225	225	225
鉛プラグ径 D_p	-	40	20	40	40	40	30	50
鉛プラグ数 n_p [本]	-	1	4	1	1	1	1	1
ゴム層厚 t_r	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
ゴム層数 n_r [層]	29	29	29	29	18	36	29	29
ゴム層総厚 H	40.6	40.6	40.6	40.6	25.2	50.4	40.6	40.6
内部鋼板厚 t_s	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
積層ゴム断面積 A_r [mm ²]	38543.3	38543.3	38543.3	38504.1	38504.1	38504.1	39053.9	37797.3
一次形状係数 S_1	30.5	36.6	36.6	40.2	40.2	40.2	40.2	40.2
二次形状係数 S_2	4.9	4.9	4.9	5.5	8.9	4.5	5.5	5.5
試験体数	1	3	3	3	1	1	1	1

表 3.2 試験体と加力パターンの組み合わせおよび最大ひずみ振幅 [%]

試験体	S1, R1		R1		S0, S1, R1, R2, R3, R4, R5		S1, R1	
変位軌道	一方向		4:1 楕円		2:1 楕円		真円	
振幅比	0.0		0.25		0.5		1.0	
位相差 θ	0°				53.13°		90°	
ひずみレベル	主軸	副軸	主軸	副軸	主軸	副軸	主軸	副軸
50	50.0	0.0	48.5	12.1	44.7	22.4	35.4	35.4
100	100.0	0.0	97.0	24.3	89.4	44.7	70.7	70.7
150	150.0	0.0	145.5	36.4	134.2	67.1	106.1	106.1
200	200.0	0.0	194.0	48.5	178.9	89.4	141.4	141.4
250	250.0	0.0	242.5	60.6	223.6	111.8	176.8	176.8
300	300.0	0.0	291	72.8	268.3	134.2	212.1	212.1
350	350.0	0.0	339.5	84.9	313.0	156.5	247.5	247.5
400	400.0	0.0	388.1	97	375.8	178.9	282.8	282.8

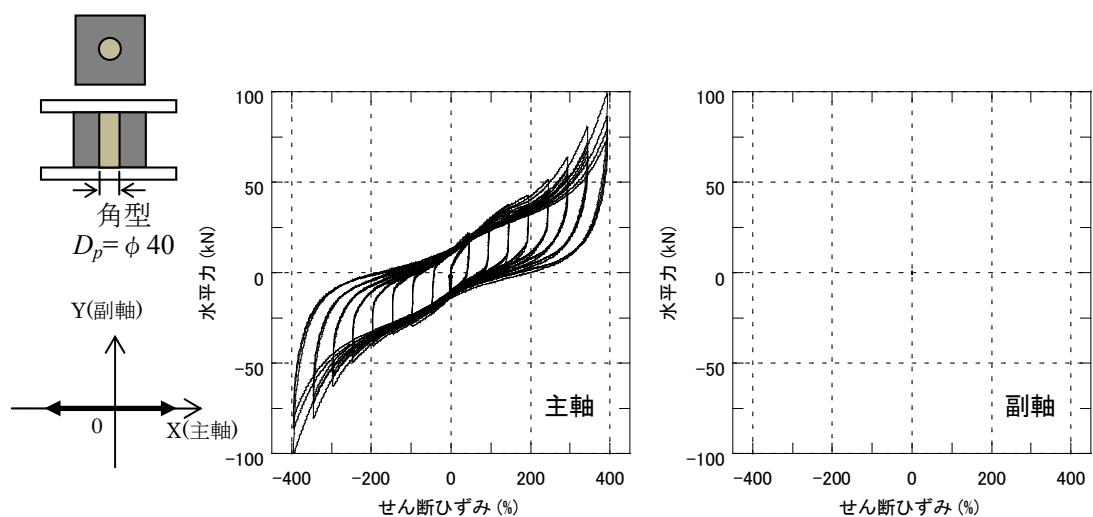
3.2.1 履歴曲線

初めに基準試験体 S1、S2、R1 の履歴曲線を図 3.3～図 3.5 に示す。基準試験体 S1 の履歴曲線（図 3.3(a)）は、一方向加力においてせん断ひずみ 300%からハードニング傾向を示し、著者が文献[1]で実施した実験結果や、文献[2]の結果と同様の履歴性状である。一方、水平二方向加力については 2:1 楕円加力（図 3.3(b)）、真円加力（図 3.3(c)）の順に水平二方向加力の影響が現れる。2:1 楕円加力は主軸方向でハードニング傾向が弱くなる。また、副軸は特徴的な菱形を示す。真円加力は主軸、副軸ともに紡錘形となる。

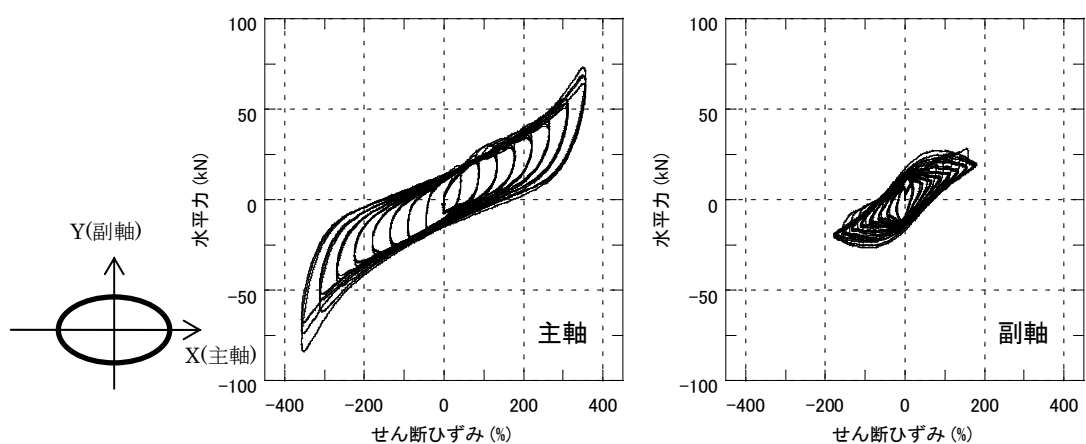
S1 試験体（1 本中心配置）と、鉛プラグの配置本数が異なる S2 試験体（4 本分散配置）の履歴曲線（図 3.4）を比較するとハードニングの発生するひずみ領域や、水平二方向加力の影響によるハードニングの低下傾向は同様である。しかし、S2 試験体の履歴面積は S1、R1 試験体より大きい。また、S2 試験体（角型）と鉛プラグ配置本数が等しいが、断面形状が異なる R1 試験体（丸型）の履歴曲線（図 3.5）も両者の間でハードニングの傾向や水平二方向加力の影響によるハードニングの低下傾向の違いはない。従って、基準試験体における LRB の履歴曲線は鉛プラグの配置本数および、断面形状による違いはないと言える。

図 3.6 に二次形状係数 S_2 の違いによる履歴曲線の比較を示す。 S_2 の違いは、主軸履歴曲線におけるハードニング傾向の違いとして現れる。その傾向は S_2 の小さい R2（図 3.6(a)）、R1（図 3.6(b)）、R3（図 3.6(c)）の順に小さい。これは、 S_2 の小さい R2 試験体は同一面圧条件において他の試験体と比べ座屈傾向が強く、ハードニングによる水平力の増加を打ち消すためである。 S_2 の大きい R3 試験体は座屈しにくい形状となるため、ハードニングによる水平力の増加が顕著に現れる。副軸の履歴曲線は、 S_2 によらず菱形の履歴曲線を示す。これは、副軸の最大ひずみが主軸の最大ひずみの 1/2 と小さいため、座屈傾向に起因する変化が生じないためと考えられる。

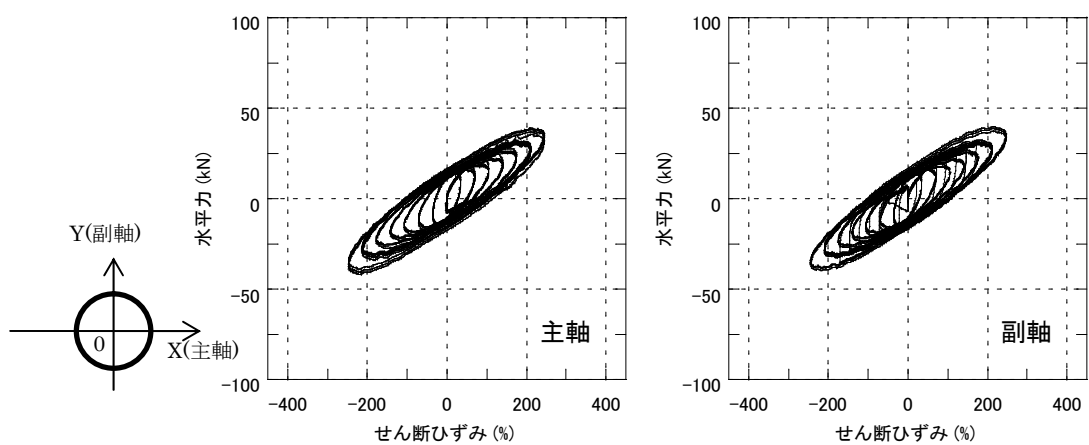
図 3.7 に鉛プラグ径 D_p の違いによる履歴曲線の比較を示す。なお同図には、鉛プラグ有無の比較をするため、角型、鉛無しの S0 試験体の履歴曲線も示す。鉛プラグの無い S0 試験体は、図 3.7(a)に示す通り、主軸、副軸ともに履歴ループの面積が極端に少ない。 D_p の違いによる履歴曲線は主軸、副軸ともに D_p の大きい、R5 試験体（図 3.7(b)）、R1 試験体（図 3.7(c)）、R4 試験体（図 3.7(d)）の順に履歴面積が大きい。また、主軸履歴曲線のハードニングは D_p が $\phi 30$ と小さい R4 試験体が顕著である。これは、 D_p が小さいため、履歴面積が小さく、相対的にゴムのハードニング現象が強く表れたことが原因と考えられる。また、ひずみレベル 400%における主軸の最大水平力は鉛プラグ径の違いによらず約 75kN を示す。これは、加力ひずみが大きくなると、P- δ 効果の影響で積層ゴムの鉛直方向に曲げ座屈変形が生じ、鉛プラグのせん断変形が阻害されるためと考えられる。



(a) 一方向加力

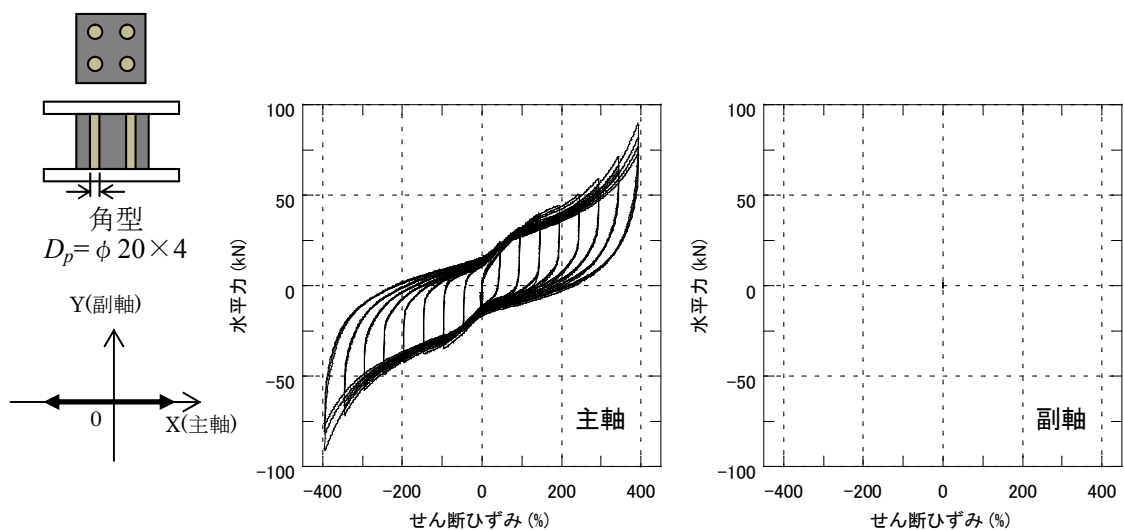


(b) 2:1 楕円加力

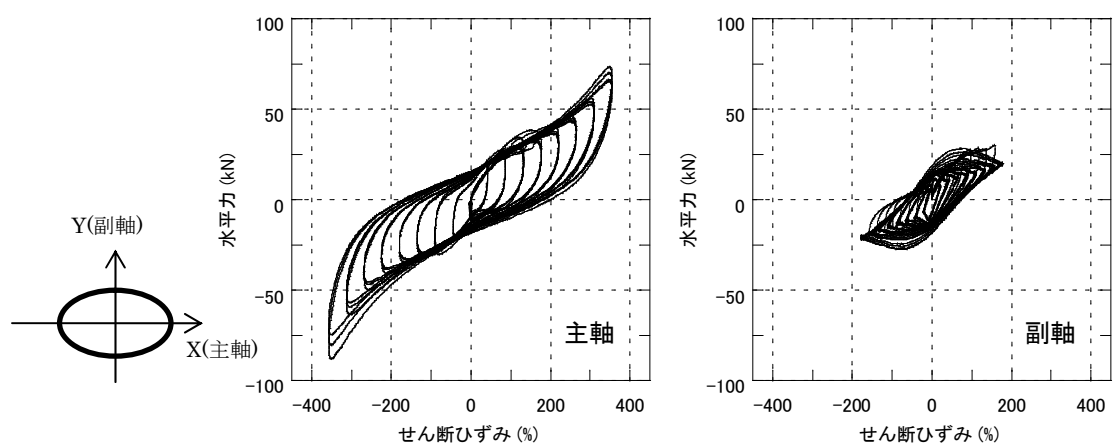


(c) 真円加力

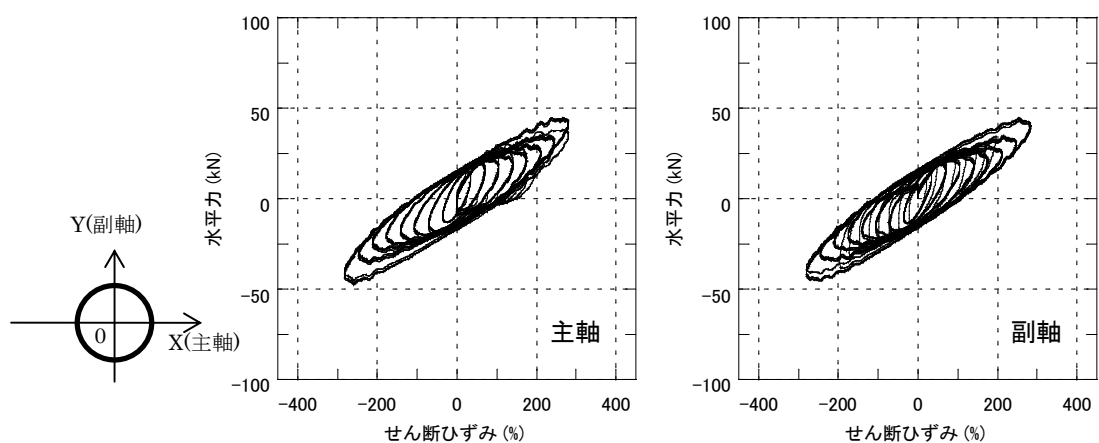
図 3.3 S1 試験体の履歴曲線 (角型 鉛プラグ $\phi 40 \times 1$ 本 $S_2=5$)



(a) 一方向加力

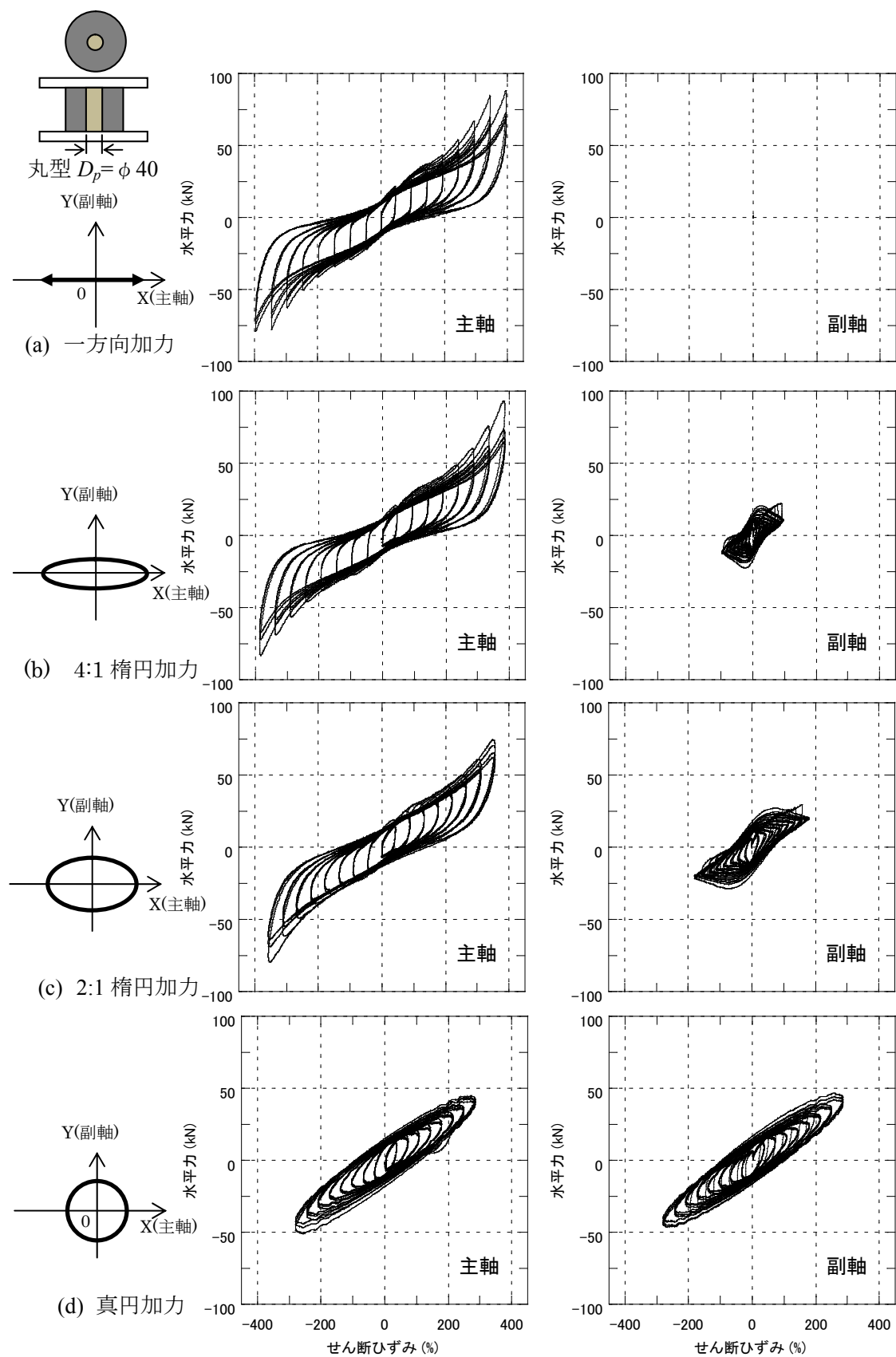


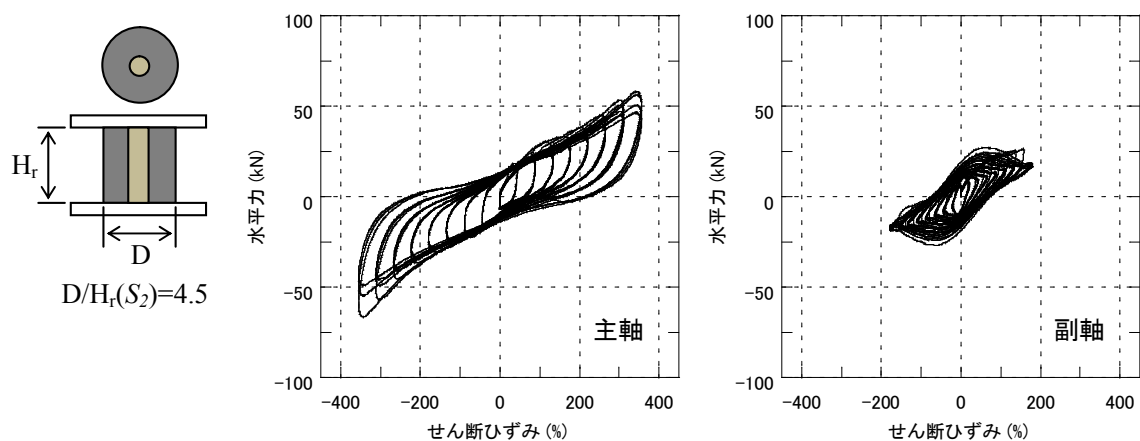
(b) 2:1 楕円加力



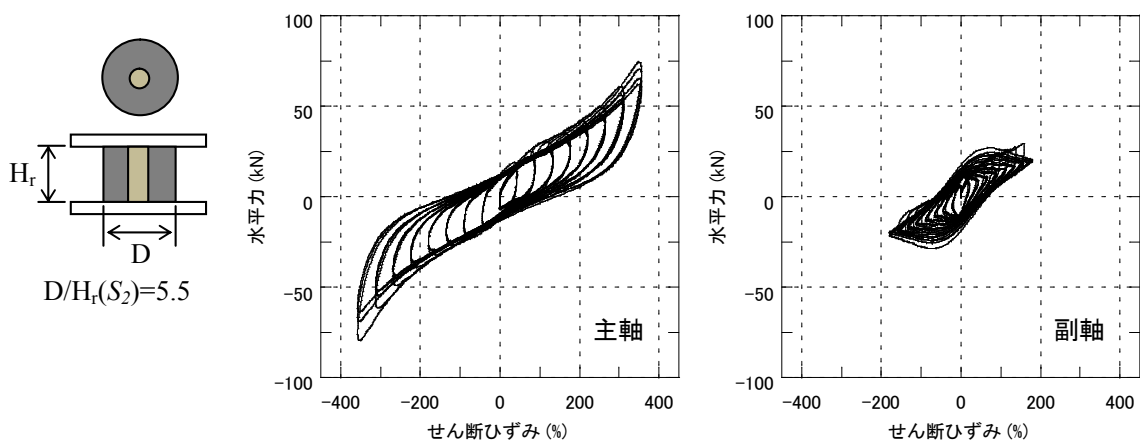
(c) 真円加力

図 3.4 S2 試験体の履歴曲線 (角型 鉛プラグ $\phi 20 \times 4$ 本 $S_2=5$)

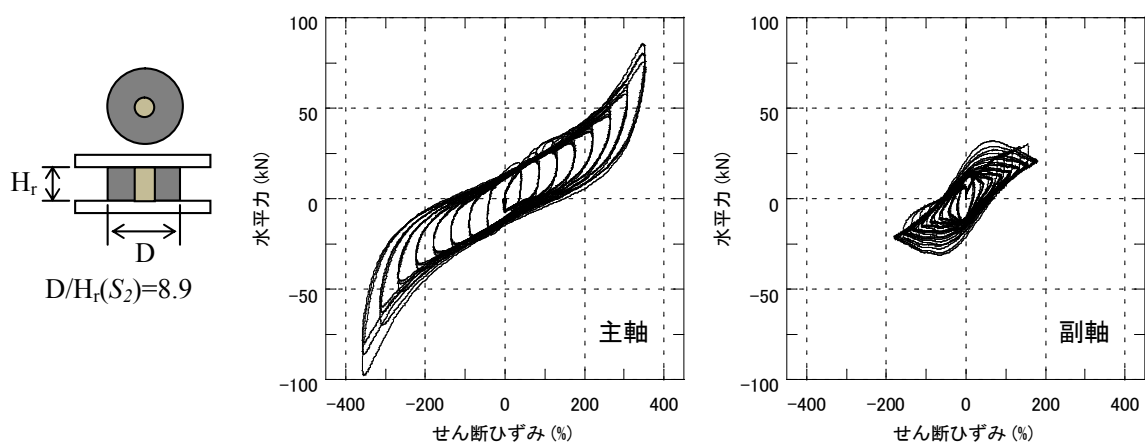

 図 3.5 R1 試験体の履歴曲線 (丸型 鉛プラグ $\phi 40 \times 1$ 本 $S_2=5.5$)



(a) R2 試験体の履歴曲線（丸型 鉛プラグ $\phi 40 \times 1$ 本 $S_2=4.5$ ）



(b) R1 試験体の履歴曲線（丸型 鉛プラグ $\phi 40 \times 1$ 本 $S_2=5.5$ ）



(c) R3 試験体の履歴曲線（丸型 鉛プラグ $\phi 40 \times 1$ 本 $S_2=8.9$ ）

図 3.6 二次形状係数の違いによる履歴曲線（2:1 楕円加力）

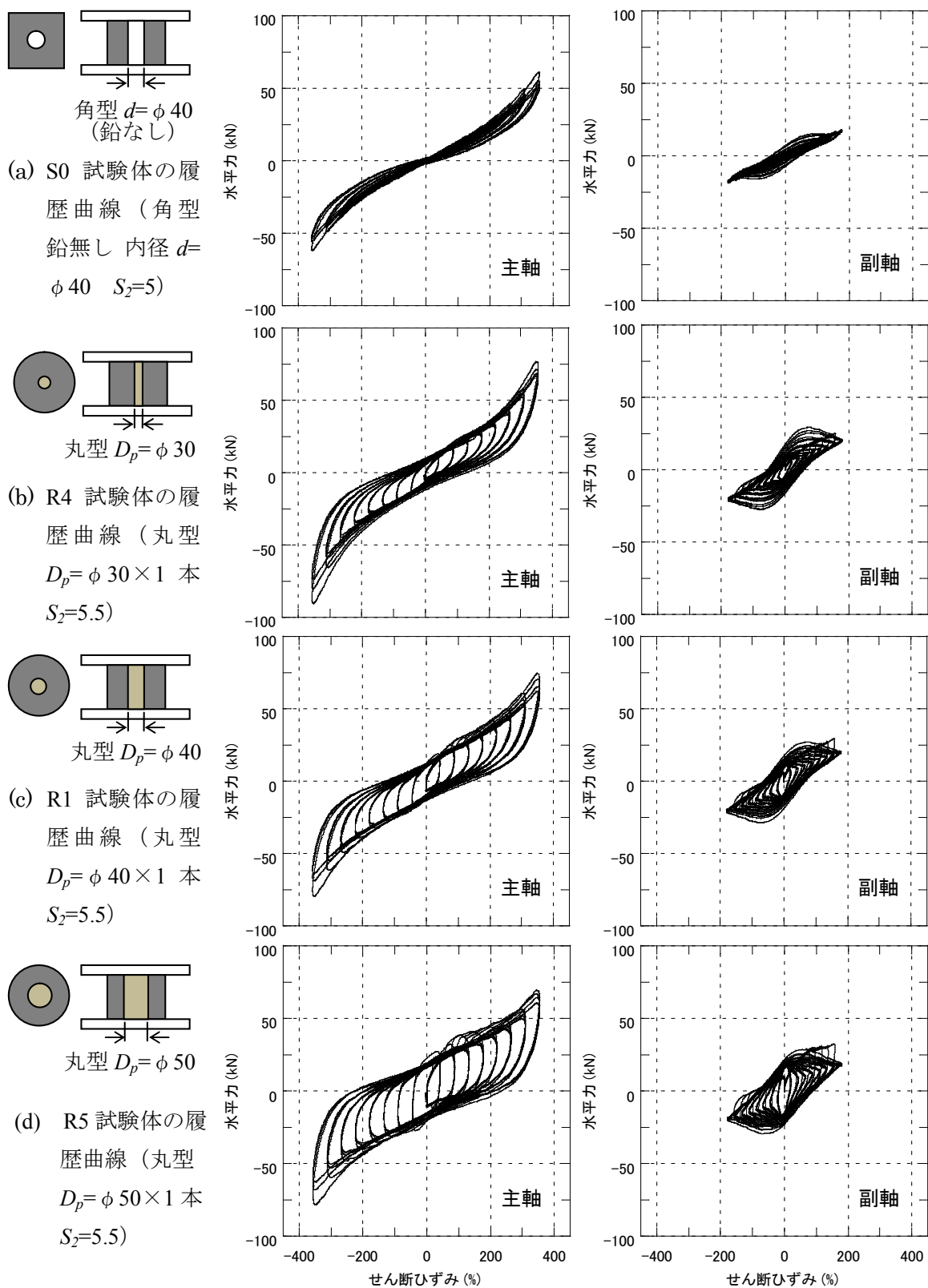


図 3.7 鉛プラグ径の違いによる履歴曲線 (2:1 楕円加力)

3.2.2 復元力特性値

本節では、LRB の復元力特性を表す代表的な指標として、降伏荷重 Q_d および降伏後剛性 K_d の復元力特性値に関する考察を行う。復元力特性値の定義を図 3.8 に示す。 Q_d 、 K_d の両特性値は、LRB の復元力特性をバイリニアモデルでモデル化することを前提として、提案されたものである。加力試験における降伏荷重 $_{exp}Q_d$ は(3.1)式による縦軸を横切るときの上下切片荷重の平均値とした。降伏後剛性 $_{exp}K_d$ については、(3.2)式に示す上側降伏後剛性 $_uK_d$ および下側の降伏後剛性 $_lK_d$ の平均値とした。

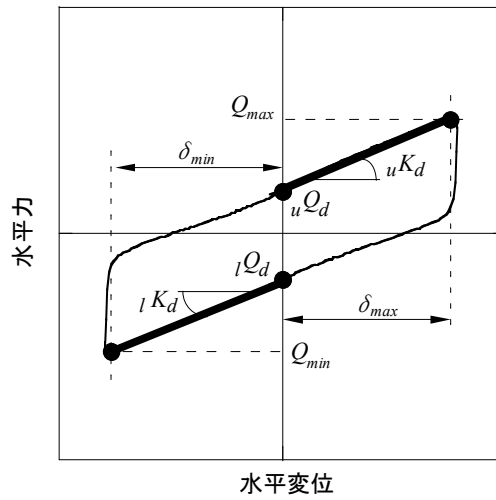


図 3.8 復元力特性値の定義

$$_{exp}Q_d = \frac{_{u}Q_d + _lQ_d}{2} \quad (3.1)$$

$$_{exp}K_d = \frac{_uK_d + _lK_d}{2} \quad (3.2)$$

$$_uK_d = \frac{Q_{max} - _uQ_d}{\delta_{max}} \quad (3.3)$$

$$_lK_d = \frac{Q_{min} - _lQ_d}{\delta_{min}} \quad (3.4)$$

LRB の設計降伏荷重 ${}_{cal}Q_d$ および、降伏後剛性 ${}_{cal}K_d$ の算出は以下の(3.5)～(3.10)式により求められる[5]。

$$\text{降伏荷重 : } {}_{cal}Q_d = CQ_d \cdot \sigma_p \cdot A_p \quad (3.5)$$

ここに、 σ_p は鉛の降伏せん断応力度 (8.33 N/mm²)、 A_p は鉛プラグの断面積、 CQ_d は降伏荷重のひずみ依存による修正係数であり、次式のせん断ひずみ γ の関数から計算される。

$$CQ_d = \begin{cases} 2.036 \cdot \gamma^{0.410} & (\gamma \leq 0.1) \\ 1.106 \cdot \gamma^{0.145} & (0.1 < \gamma \leq 0.5) \\ 1 & (0.5 < \gamma \leq 2.5) \end{cases} \quad (3.6)$$

降伏後剛性 ${}_{cal}K_d$ は以下に示す式より求められる。

$$\text{降伏後剛性 : } {}_{cal}K_d = CK_d \cdot (K_r + K_p) \quad (3.7)$$

ここに、 K_r はゴム部の剛性、 K_p は鉛プラグのみかけの剛性、 CK_d は降伏後剛性のひずみ依存による修正係数であり、それぞれ(3.8)～(3.10)式で計算される。

$$K_r = 0.392 \cdot \left(\frac{A_r}{H} \right) \quad (3.8)$$

$$K_p = 0.588 \cdot \left(\frac{A_p}{H} \right) \quad (3.9)$$

$$CK_d = \begin{cases} 0.779 \cdot \gamma^{-0.43} & (\gamma \leq 0.25) \\ \gamma^{-0.25} & (0.25 < \gamma \leq 1.0) \\ \gamma^{-0.12} & (1.0 < \gamma \leq 2.5) \end{cases} \quad (3.10)$$

ここに、 A_r はゴム部の断面積、 A_p は鉛プラグの断面積、 H はゴム層総厚である。

以上の設計式により算出される、各試験体の復元力特性値一覧を表 3.3 に示す。また、設計式による修正バイリニアーループと試験による履歴ループの対応を S1 試験体の 3 サイクル目について比較して図 3.9 に示す。LRB の履歴曲線は、設計式との対応が非常に良い。ただし、設計式の適用範囲はせん断ひずみ 250% までである。

表 3.3 設計特性値一覧

せん断 ひずみ [%]	試 験 体											
	S1,S2 (基準試験体)		R1 (基準試験体)		R2 ($S_2=8.9$)		R3 ($S_2=4.5$)		R4 ($D_p=\phi 30$)		R5 ($D_p=\phi 50$)	
	Qd	Kd	Qd	Kd	Qd	Kd	Qd	Kd	Qd	Kd	Qd	Kd
	[kN]	[kN/mm]	[kN]	[kN/mm]	[kN]	[kN/mm]	[kN]	[kN/mm]	[kN]	[kN/mm]	[kN]	[kN/mm]
50	10.5	0.46	10.5	0.46	10.5	0.63	10.5	0.37	5.89	0.46	16.36	0.47
100	10.5	0.39	10.5	0.39	10.5	0.63	10.5	0.31	5.89	0.39	16.36	0.39
150	10.5	0.37	10.5	0.37	10.5	0.60	10.5	0.30	5.89	0.37	16.36	0.37
200	10.5	0.36	10.5	0.36	10.5	0.58	10.5	0.29	5.89	0.36	16.36	0.36
250	10.5	0.35	10.5	0.35	10.5	0.56	10.5	0.28	5.89	0.35	16.36	0.35

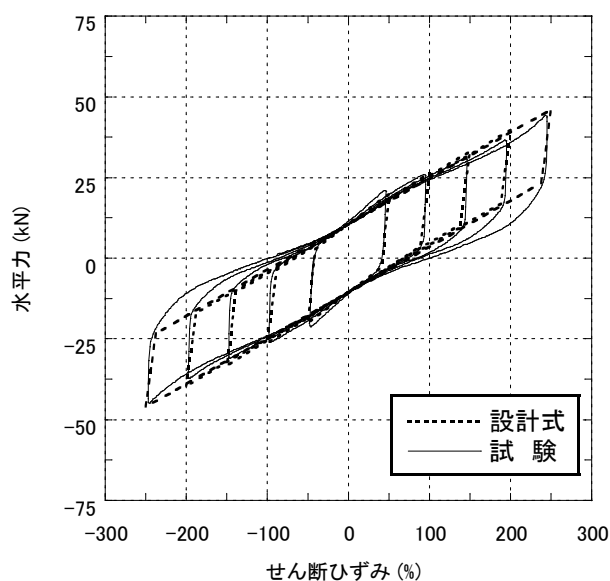
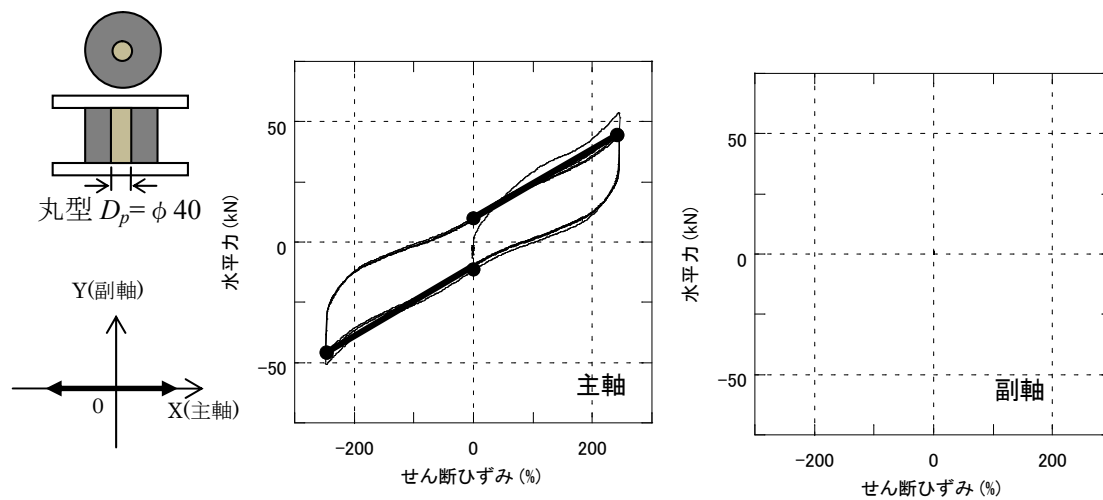


図 3.9 履歴曲線の比較 (S1 試験体)

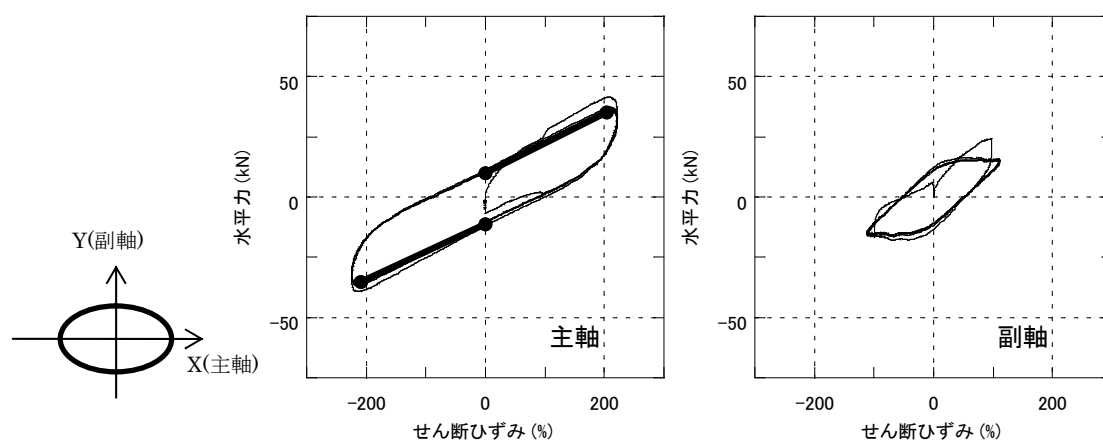
復元力特性値は主軸履歴曲線の3サイクル目について読取った(図3.10)。このように読取った復元力特性値の主軸せん断ひずみと降伏荷重 Q_d および降伏後剛性 K_d の関係を図3.11～3.13に示す。いずれの特性値も主軸履歴曲線の3サイクル目の値を採用した。なお、図3.11には(3.5)式～(3.10)式の設計式[4]から得られる値(ただし、適用せん断ひずみは250%まで)を併記した。基準試験体における一方向加力の復元力特性値は、図3.9(a)に示す通りせん断ひずみ250%までの範囲において設計値との対応は良い。しかし、角型断面4本鉛プラグのS2試験体はせん断ひずみ250%以上の Q_d が他の試験体より大きい。また K_d はせん断ひずみ50, 100%の値が大きい。2:1楕円加力と真円加力による Q_d はせん断ひずみ250%までは一方向加力同様、設計値との対応が良いが、4本鉛プラグのS1試験体はその上昇傾向が異なる(図3.11(b)、図3.11(c))。S1試験体は鉛プラグが4本分散して配置されているため、二方向加力時のねじれ変形の発生により鉛プラグの塑性変形が促進され Q_d が増加したと考えられる。 K_d は二方向加力の影響により履歴曲線が丸みを帯び、最大せん断ひずみ時の荷重が低下するため、2:1楕円加力、真円加力の順に低下する。しかし、その推移は試験体による差は少ない。すなわち、復元力特性値の変化傾向は断面形状、鉛プラグ配置本数の違いにおいて K_d は同様であり、 Q_d は鉛プラグ4本配置の場合、変化傾向が異なる。

二次形状係数 S_2 の違いによる復元力特性値と主軸せん断ひずみの関係を図3.12に示す。設計式による値が等しい Q_d は S_2 によらず主軸せん断ひずみに対する推移は等しく、設計値の10.5kN付近に分布する。 K_d の推移は試験体により異なる。これはハードニングの影響であり、 K_d は S_2 の大きいR2試験体($S_2=8.9$)、R1試験体($S_2=5.5$)、R3試験体($S_2=4.5$)の順に主軸せん断ひずみの増加に伴う上昇傾向を示す。図3.13に示す鉛プラグ径 D_p の違いによる Q_d は、鉛プラグ径の大きさに応じて値が大きくなる。 K_d は設計値がほぼ等しいため、同じ値に分布し、その推移も D_p によらず同様である。

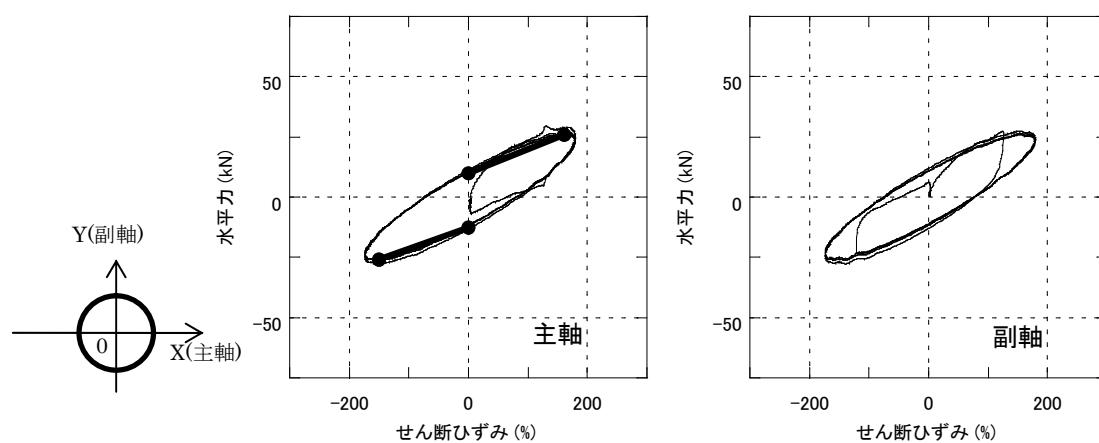
これら、 S_2 および D_p の違いによる主軸せん断ひずみに対する推移は、一方向加力と同様である。つまり、 S_2 、 D_p の違いによるひずみ依存性は、水平二方向加力による影響はないと言える。



(a) 一方向加力

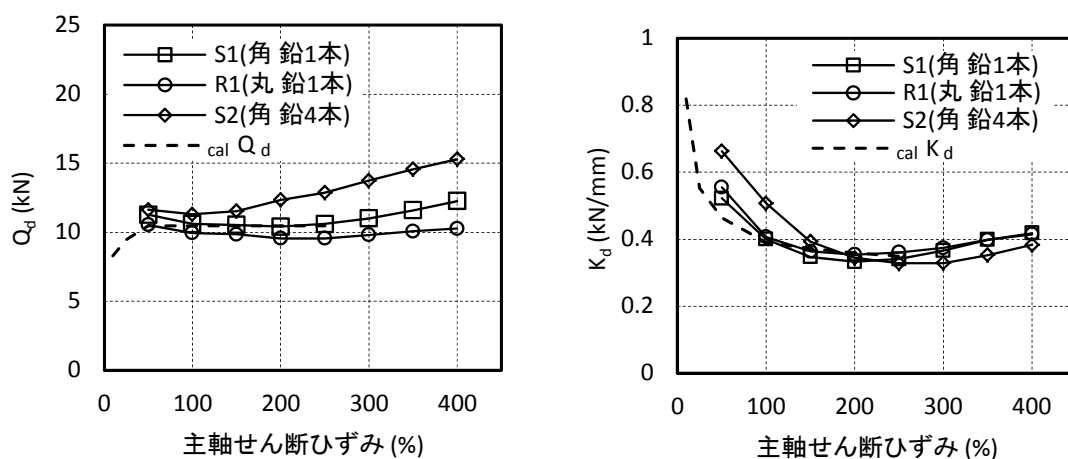


(b) 2:1 楕円加力

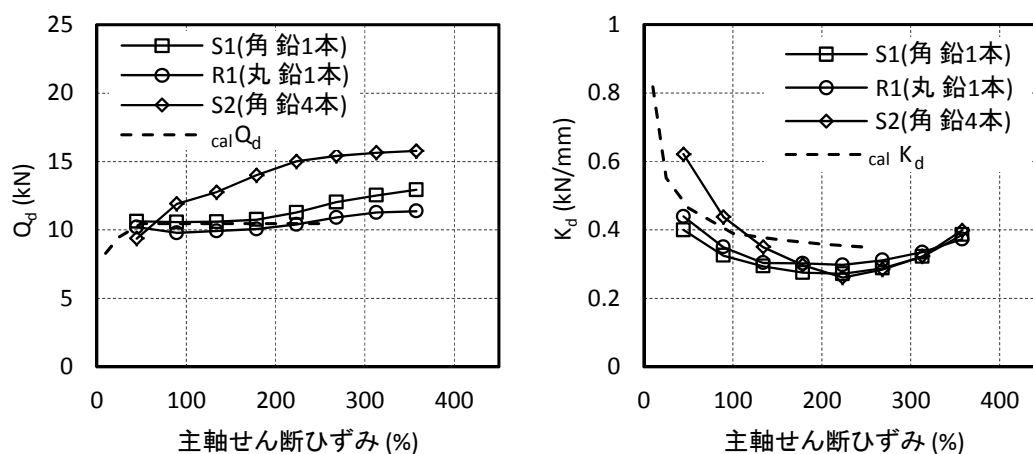


(c) 真円加力

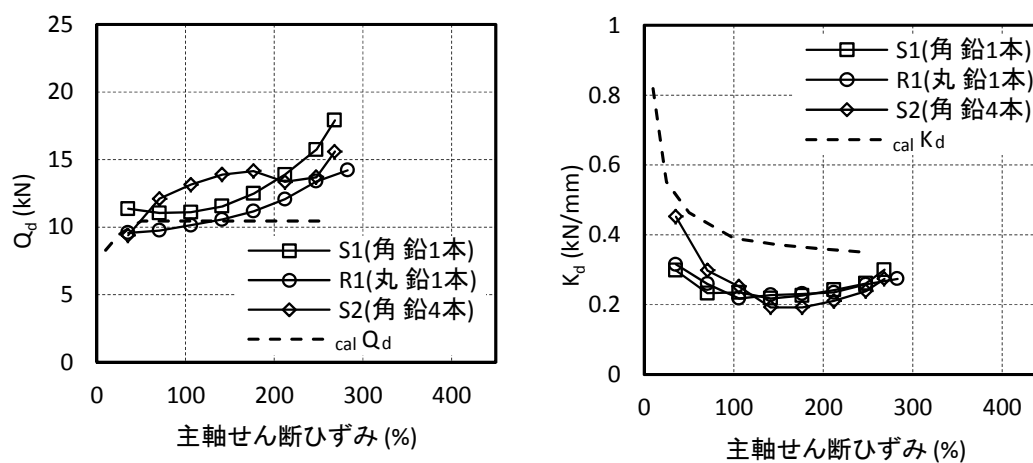
図 3.10 復元力特性値の読取り (R1 試験体 ひずみレベル 250%)



(a) 一方向加力



(b) 2:1 楕円加力



(c) 真円加力

図 3.11 基準試験体の復元力特性値

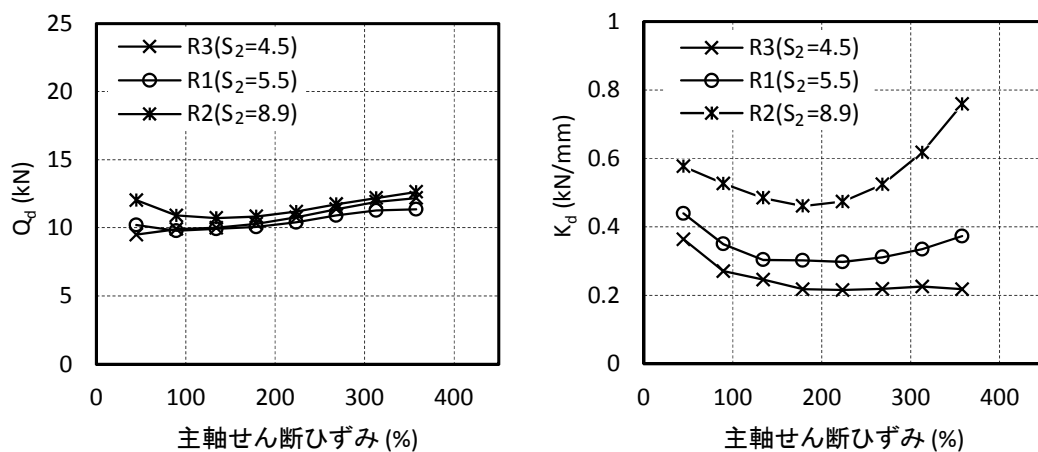


図 3.12 二次形状係数の違いによる復元力特性値 (2:1 楕円加力)

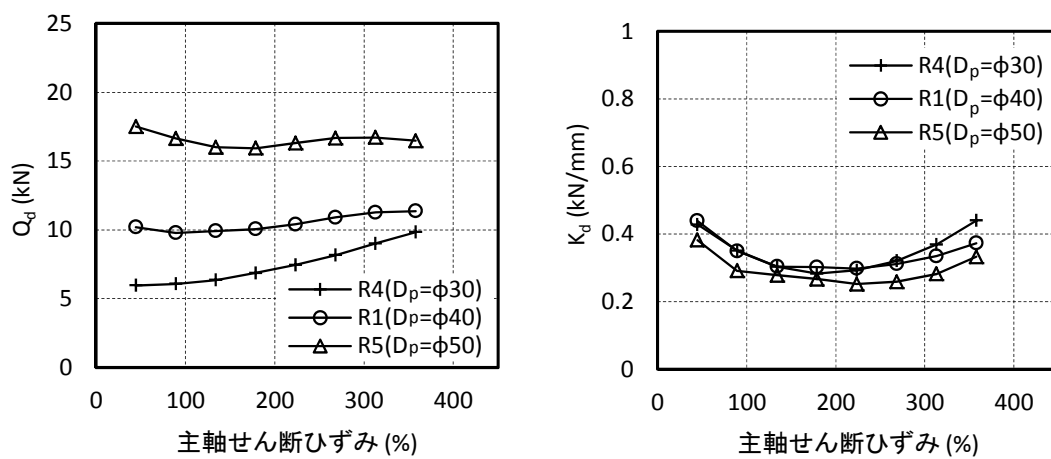


図 3.13 鉛プラグ径の違いによる復元力特性値 (2:1 楕円加力)

3.2.3 復元力ベクトル

水平二方向加力における復元力ベクトルを分析することで、LRB の復元力の発現機構について検討する。図 3.14~図 3.24 は各試験体による 3 サイクル目の復元力ベクトルと分力である。ここでは図 3.13 と図 3.14 の S1 試験体と代表させて論じる。図の(a)は加力オービット上の復元力ベクトルである。なお、加力試験はピーク時のひずみレベルを 50%刻みで増分させたが、ここではベクトル表示の錯綜を避けるため、ひずみレベル 100%ごとにプロットした。また、図の(b),(c)はそれぞれ復元力ベクトル①,②の位置における分力である。これら分力は復元力ベクトルを原点方向の力を弾性力、オービットの接線方向の力を減衰力として分解して、その大きさとせん断ひずみの関係をプロットしたものである。

図に示した復元力ベクトルのうち、弾性力は LRB を構成するゴム部の復元力によるものであり、(3.8)式によるゴム部のせん断剛性 K_r に原点からの変形量 R (=原点からのせん断ひずみ $\gamma_R \times$ ゴム層総厚 H) を乗じた力 F_r として(3.11)式で評価できると考えられる。

$$F_r = K_r \cdot R \quad (3.11)$$

一方、復元力ベクトルを構成する減衰力については、厳密には(3.5)式で計算される鉛プラグの降伏荷重とゴム部に存在する粘性減衰力で構成されるが、ゴム材料が天然ゴムであることから減衰力の大半は鉛プラグの降伏荷重であると判断できる。また、鉛プラグの塑性変形はオービット接線方向に生じ、接線方向に生じる力は降伏荷重 Q_d 相当であると考えられる。

以上に述べたような、二方向加力時に LRB が発揮する復元力と、それを構成する弾性力および減衰力に関する解釈を確認する。S1 試験体の 2:1 楕円加力および真円加力について、(3.11 式で計算される $_{cal}F_r$ と(3.5)式で計算される降伏荷重の設計値 $_{cal}Q_d$ を図 3.14 と図 3.15 に比較して示した。復元力ベクトルを分解して求めた弾性力と $_{cal}F_r$ および、減衰力と $_{cal}Q_d$ の対応は、2:1 楕円加力の図 3.14 と真円加力の図 3.15 とともに良い。したがって、LRB の復元力の発現機構は、概ね上述の解釈で説明できる。なお、図 3.14(b)の原点からのせん断ひずみ 100%以上で弾性力が $_{cal}F_r$ より低下するのは、2:1 楕円加力により①の位置以上のひずみを②の位置で経験するため、積層ゴムの経験ひずみ依存性が生じたと考えられる。また、図 3.14 (c)の原点からのせん断ひずみ 100%以下において弾性力が F_r より大きい点についても、積層ゴムのひずみ依存性が影響していると考えられる。

以上の分析結果により、水平二方向加力による LRB の復元力は加力ひずみが大きくなると、ゴムの復元力により原点方向に向かう弾性力が増加するが、加力オービット接線方向に作用する減衰力は、ほぼ一定値を保って推移することが分かる。そのため、LRB は水平二方向加力を行っても、履歴ループの増大が生じないと言える。このことは、LRB の水平

二方向履歴曲線は山本モデル[4]のような力学モデルを必要としない可能性を示唆している。次節では、二方向力学特性を表現する際によく用いられる MSS モデル[5]による LRB のシミュレーション解析を試みる。

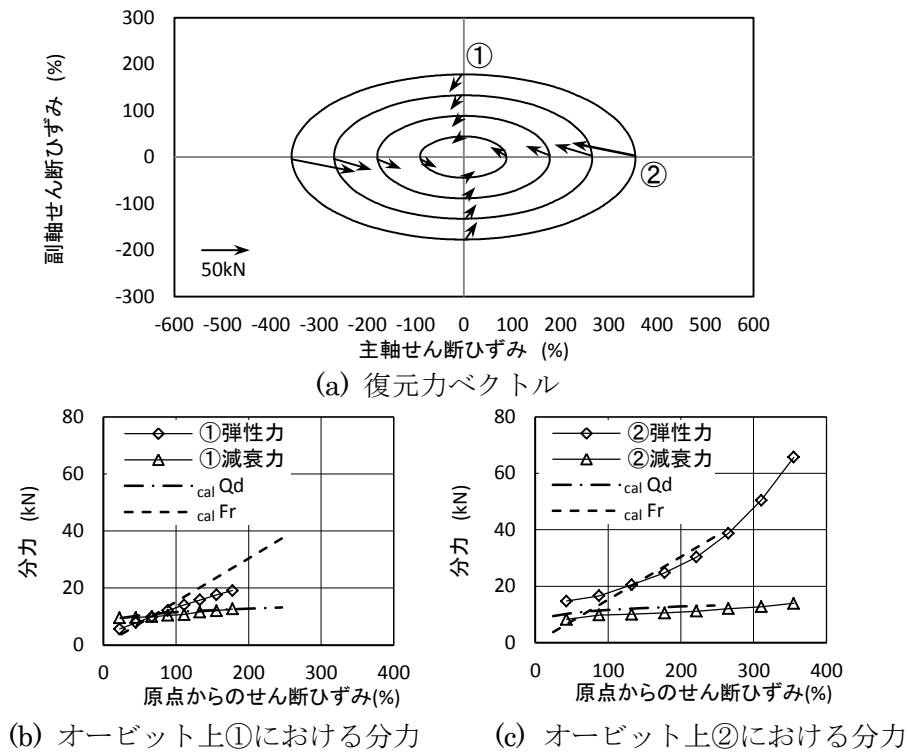


図 3.14 S1 試験体の復元力ベクトルと分力 (2:1 楕円加力)

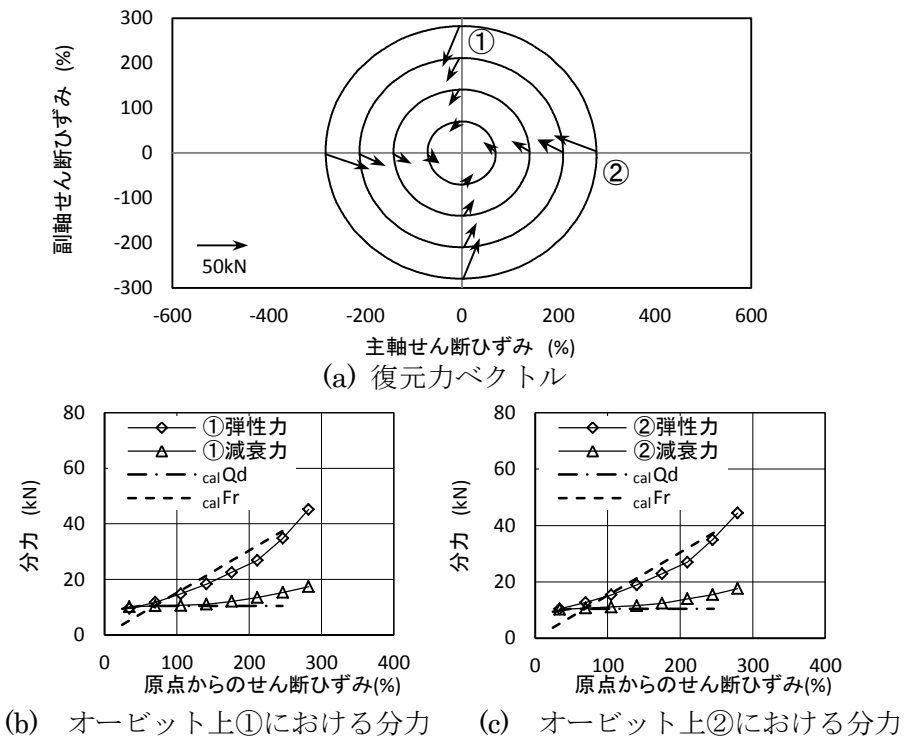


図 3.15 S1 試験体の復元力ベクトルと分力 (真円加力)

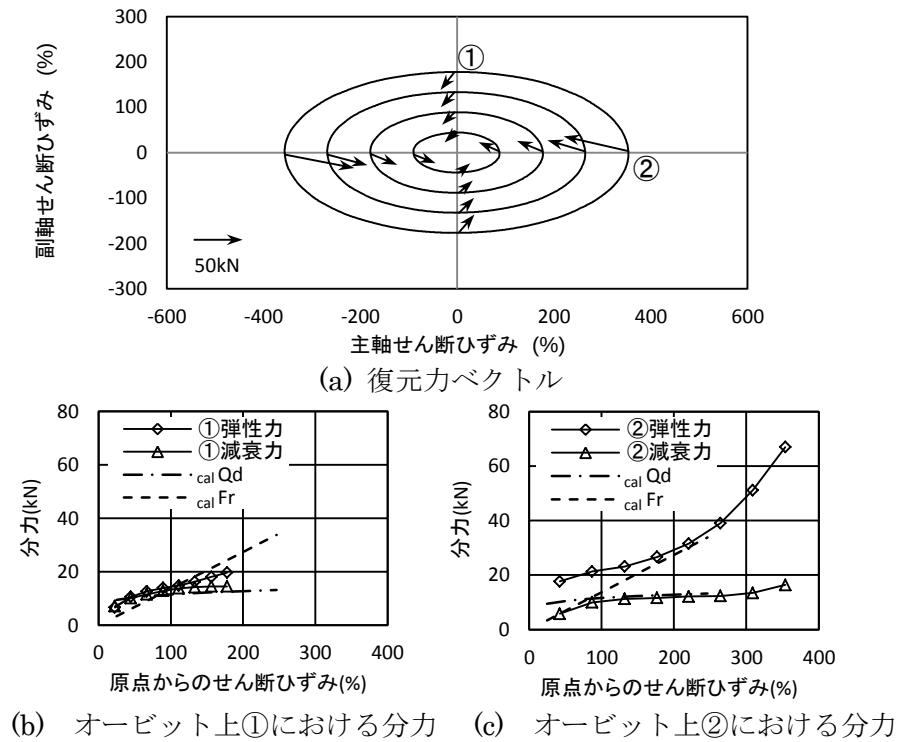


図 3.16 S2 試験体の復元力ベクトルと分力 (2:1 楕円加力)

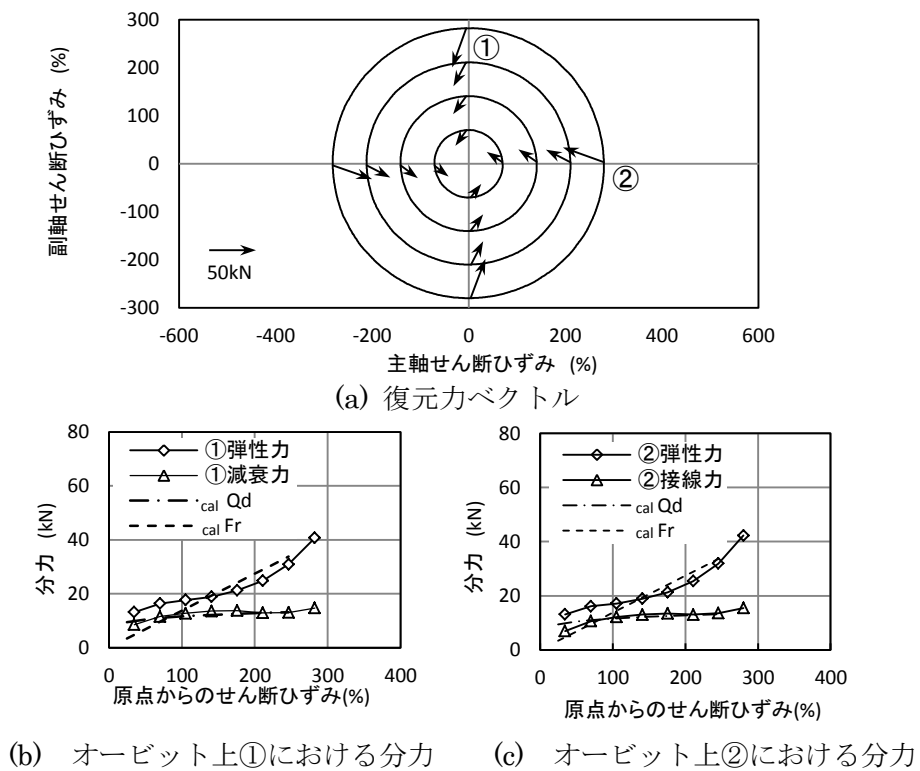


図 3.17 S2 試験体の復元力ベクトルと分力 (真円加力)

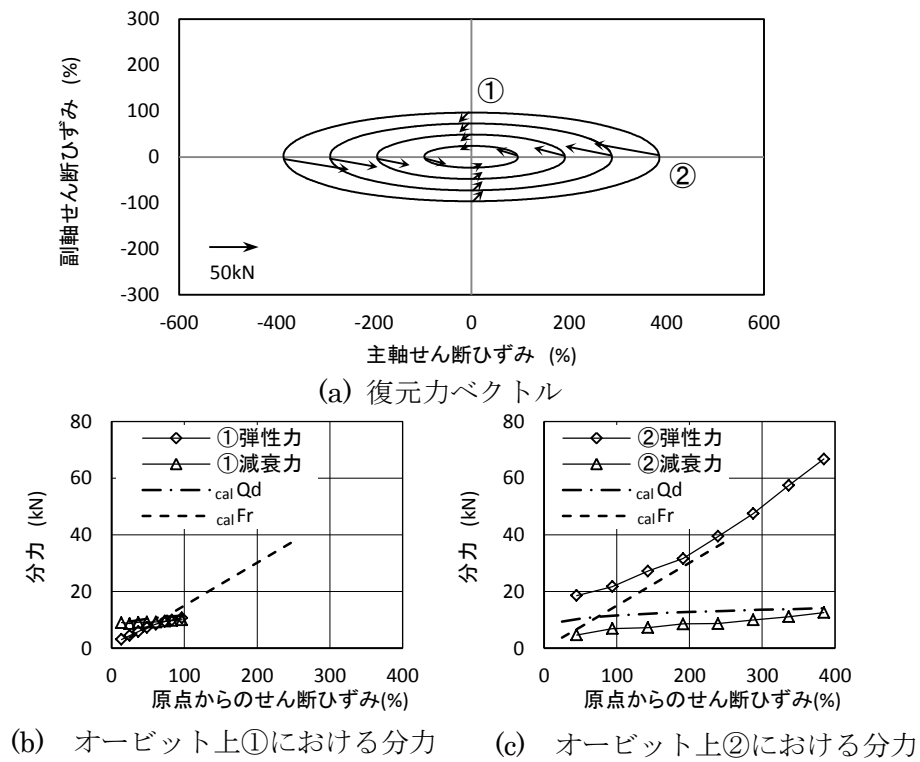


図 3.18 R1 試験体の復元力ベクトルと分力 (4:1 楕円加力)

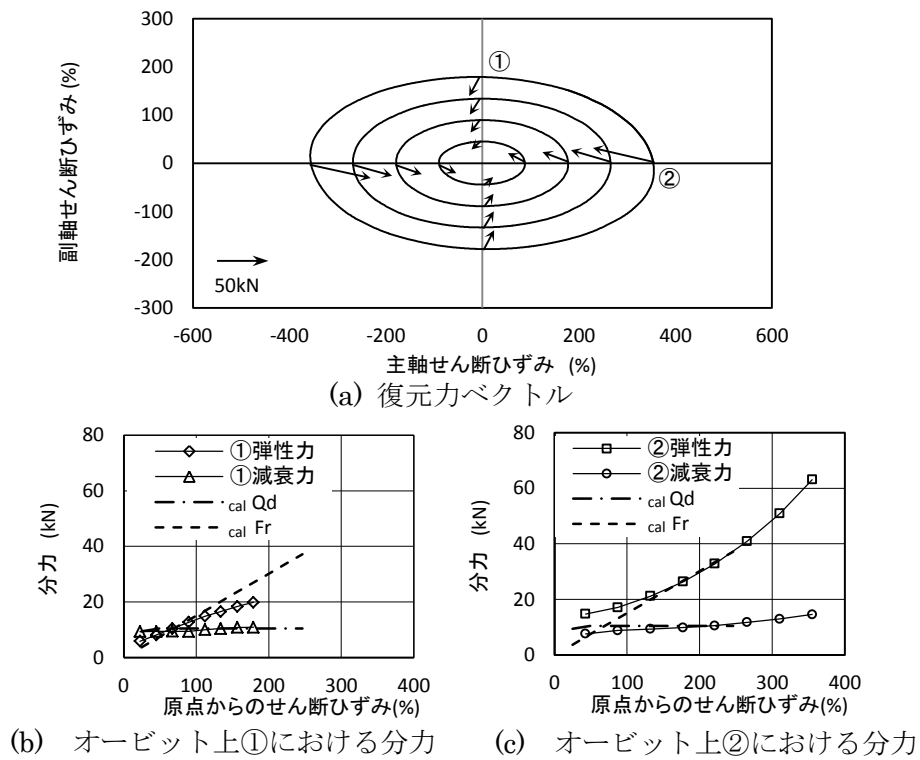


図 3.19 R1 試験体の復元力ベクトルと分力 (2:1 楕円加力)

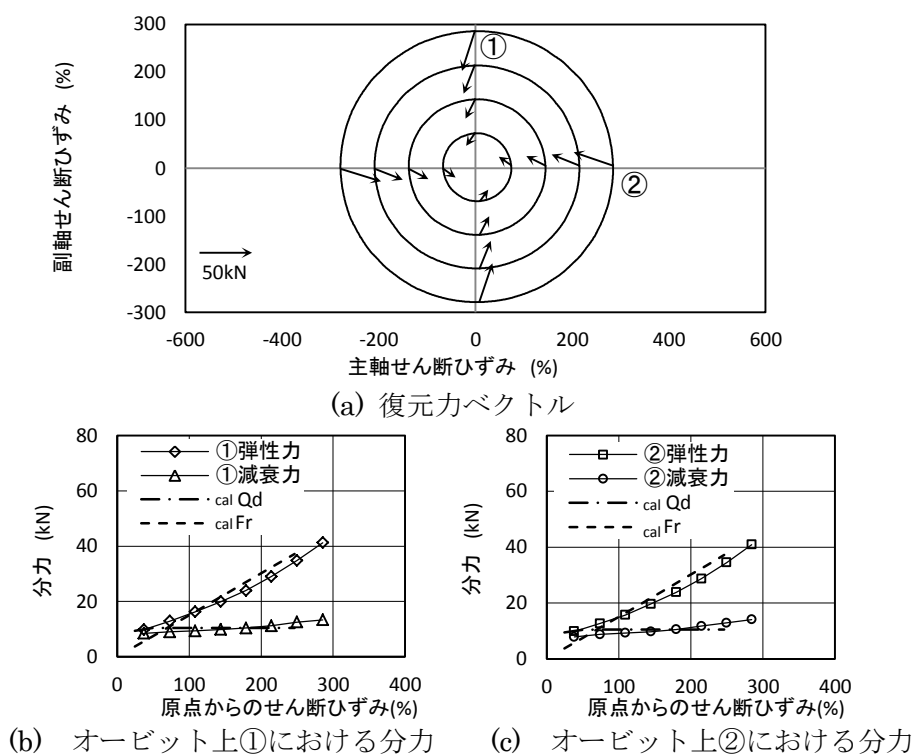
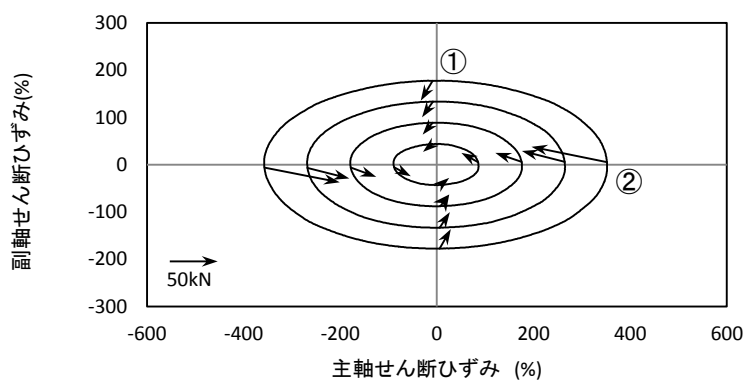
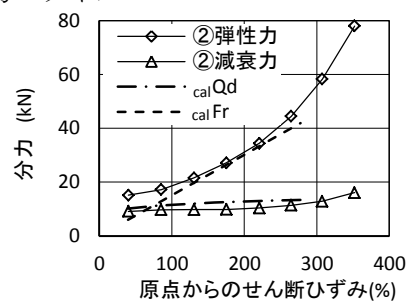
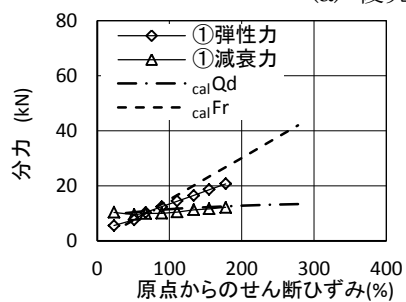


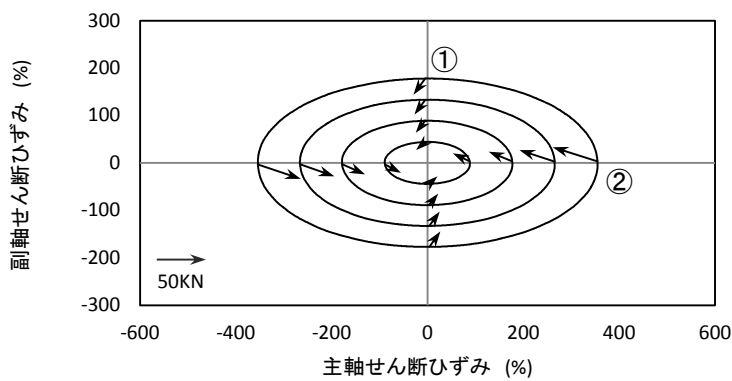
図 3.20 R1 試験体の復元力ベクトルと分力（真円加力）



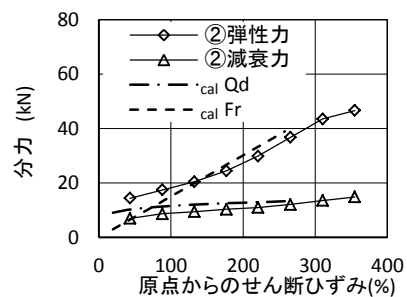
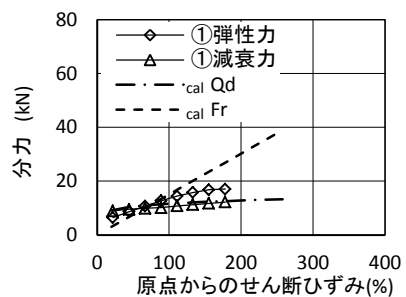
(a) 復元力ベクトル



(b) オービット上①における分力 (c) オービット上②における分力

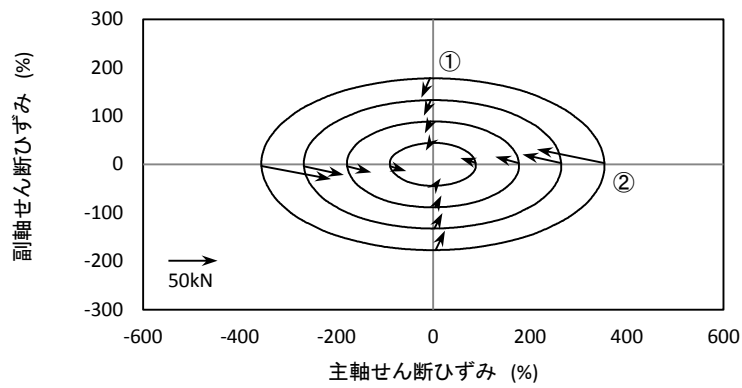
 図 3.21 R2 ($S_2=8.9$) 試験体の復元力ベクトルと分力 (2:1 楕円加力)


(a) 復元力ベクトル

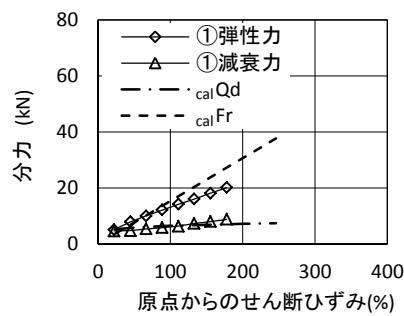


(b) オービット上①における分力 (c) オービット上②における分力

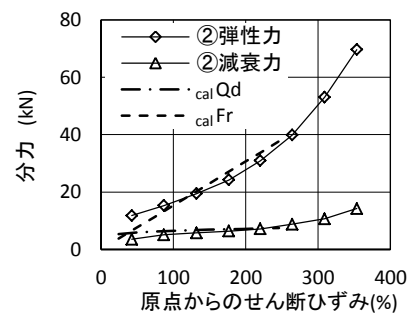
 図 3.22 R3 ($S_2=4.5$) 試験体の復元力ベクトルと分力 (2:1 楕円加力)



(a) 復元力ベクトル

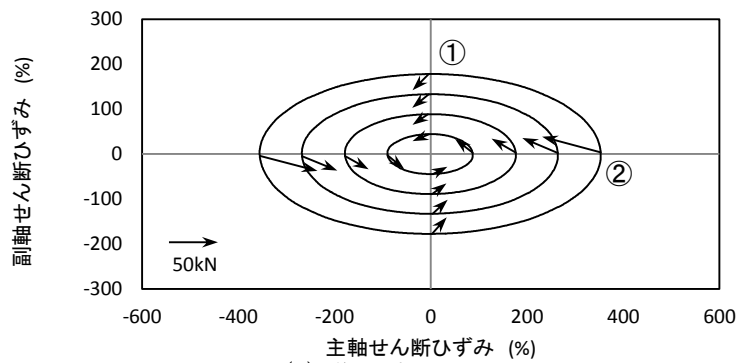


(b) オービット上①における分力

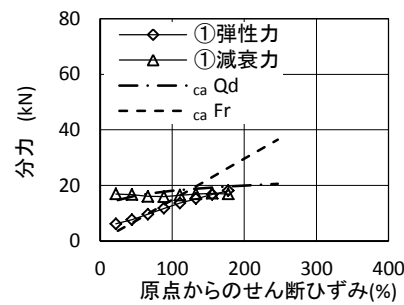


(c) オービット上②における分力

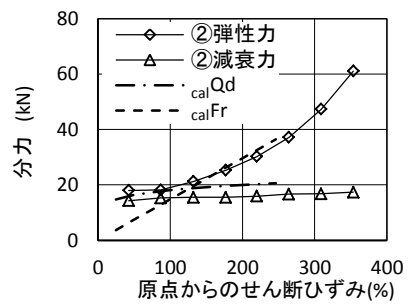
図 3.23 R4 ($D_p = \phi 30$) 試験体の復元力ベクトルと分力 (2:1 楕円加力)



(b) 復元力ベクトル



(b) オービット上①における分力



(c) オービット上②における分力

図 3.24 R5 ($D_p = \phi 50$) 試験体の復元力ベクトルと分力 (2:1 楕円加力)

3.3 水平二方向加力のシミュレーション解析

本節では免震支承の水平二方向特性を表現する力学モデルとして用いられることの多い MSS モデル[5]によって、水平二方向加力試験結果の再現を試みる。MSS モデルは図 3.25 に示す概念に基づくもので、原点指向型の復元力ばねを円周方向に等分割に配置して構成される。そのため、復元力は、上下節点の水平方向の変位に作用するが、ねじれ方向には作用しない。HDR のように復元力が粘弾性による場合、減衰力の発現は変形量に依存するため、ねじれ変形に作用しない MSS モデルによる解析は整合しない[6]。一方、LRB の場合、減衰力は鉛プラグの塑性変形によるものであり、ねじれ変形と無関係であるため、MSS モデルによるシミュレーション解析が可能であると判断し、以降でシミュレーション解析を行う。

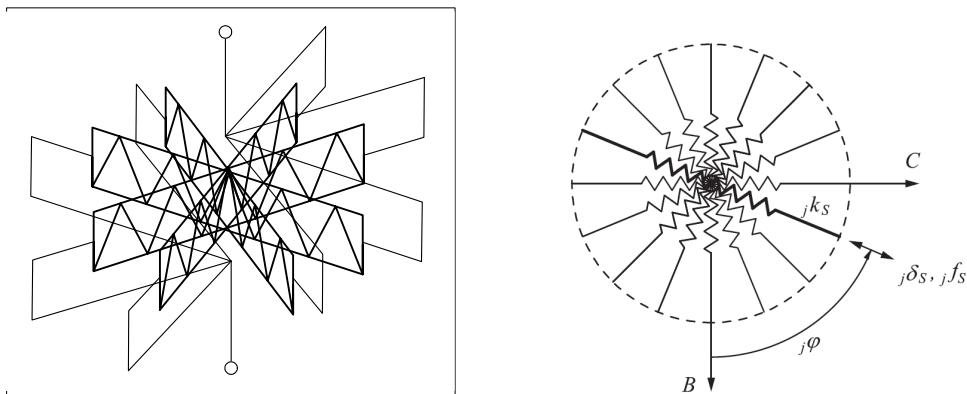


図 3.25 MSS モデルの概念

3.3.1 解析モデル

MSS モデル[6]は同一の復元力特性を有する多数のせん断ばねを円周方向に等分割して配置したモデルであり、LRB に対しては修正バイリニアモデルを適用することが一般的である。しかし、本研究で実施した加力試験ではひずみレベルが 400%に達しているものがあることから、MSS を構成するせん断ばねの復元力モデルには適用限界ひずみが 250%である修正バイリニアモデルは適用できない。そこで、大変形時のハードニングまで表現可能な Kikuchi-Aiken モデル[7]を適用する。以下に、Kikuchi-Aiken モデルの概要を記す。

スケルトンカーブは荷重を Q 、変形を δ として (3.12)式のように表現される。

$$Q = Q_d + K_d \quad (3.12)$$

ここに Q_d は(3.2)式で計算される降伏荷重 $_{cal}Q_d$ であり、 K_d は(3.4)式で計算される降伏後剛性 $_{cal}K_d$ である。ただし、 K_d についてはせん断ひずみ 250%以上に見られるゴムのハードニング現象を表現するために、ひずみ依存による修正係数 CK_d は(3.7)式に代えて、(3.13)式で評価する[8]。

$$CK_d = \begin{cases} 0.779 \cdot \gamma^{-0.43} & (\gamma \leq 0.25) \\ \gamma^{-0.25} & (0.25 < \gamma \leq 1.0) \\ \gamma^{-0.12} & (1.0 < \gamma \leq 2.0) \\ 0.1034(\gamma - 2.0)^2 + 0.9202 & (2.0 < \gamma \leq 4.0) \end{cases} \quad (3.13)$$

スケルトンカーブからの除荷時の履歴ループは、復元力 Q を非線形弾性成分 Q_1 と履歴減衰成分 Q_2 に分離して (3.14)~(3.16)式のように表現する。各成分の位置づけは図 3.26 の概念図に示す通りであり、 Q_1 がハードニング特性を含めた剛性を表現し、 Q_2 が履歴減衰性能を表現する。

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (3.14)$$

$$Q_1 = (1-u)f_m \left\{ (1-p)\xi + \text{sgn}(\delta)p|\xi|^n \right\} \quad (3.15)$$

$$Q_2 = \pm u f_m \left\{ 1 - 2e^{-a(1 \pm \xi)} + b(1 \pm \xi)e^{-c(1 \pm \xi)} \right\} \quad (3.16)$$

(符号順、 $\dot{\xi} > 0$ のとき+、 $\dot{\xi} < 0$ のとき-)

ここに、 ξ は変形 δ の無次元量 ($\xi = \delta / \delta_m$)、 u は荷重切片比 ($= Q_d / Q_m$)、 δ_m と Q_m はスケルトンカーブからの除荷時の変形および、荷重の最大値である。また、 u, n, a, b, c, p は履歴曲線の形状を操作するパラメータであり、各パラメータの設定方法は LRB の水平一方向大変形試験を実施した文献[2,8]に詳しい。

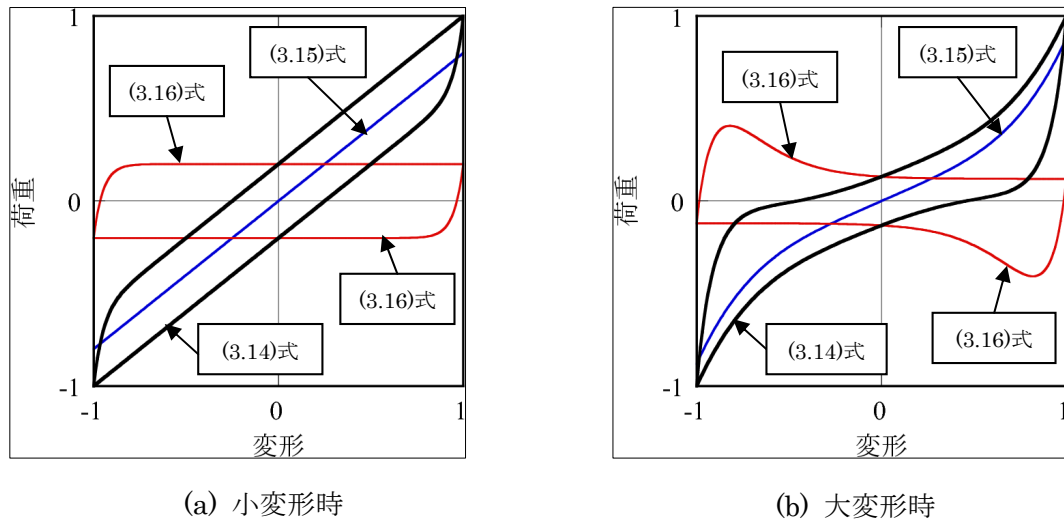


図 3.26 Kikuchi-Aiken モデルの概念

MSS モデルが円周方向を等分割した n 本のせん断ばねで構成される場合、各せん断ばねの剛性 k とモデル全体のせん断剛性 K との間には、(3.17)式の関係が成立する。

$$K = \sum_{i=1}^n k \cos^2 \left(\frac{\pi(i-1)}{n} \right) \quad (3.17)$$

本解析ではせん断ばねの本数を $n = 8$ とする。この場合には(3.14)式によれば、積層ゴムのゴム層総厚はそのままとし、ゴム部および鉛プラグの断面積を 1/4 にしたときの復元力モデルの設定値を各せん断ばねに与えれば良いことになる。解析対象は R1 試験体とするが、復元力モデルの設定値はゴム部と鉛プラグの断面積およびゴム層総厚によって決定されるため、ゴム部の断面積のみが僅かに異なる S1 試験体でもほぼ同じ結果を与える。

3.3.2 解析結果

解析結果を図 3.27 に示す。一方向、楕円、真円の各加力パターンにおける履歴曲線の配置は、図 3.4 と同じである。解析結果では、一方向加力におけるハードニング現象を精度良く再現できている。また、1:4 楕円加力、2:1 楕円加力ともに主軸方向のハードニング現象の緩和や、副軸における菱型の履歴曲線も良好に再現されている。真円加力においても主軸、副軸ともに試験結果との対応は良い。

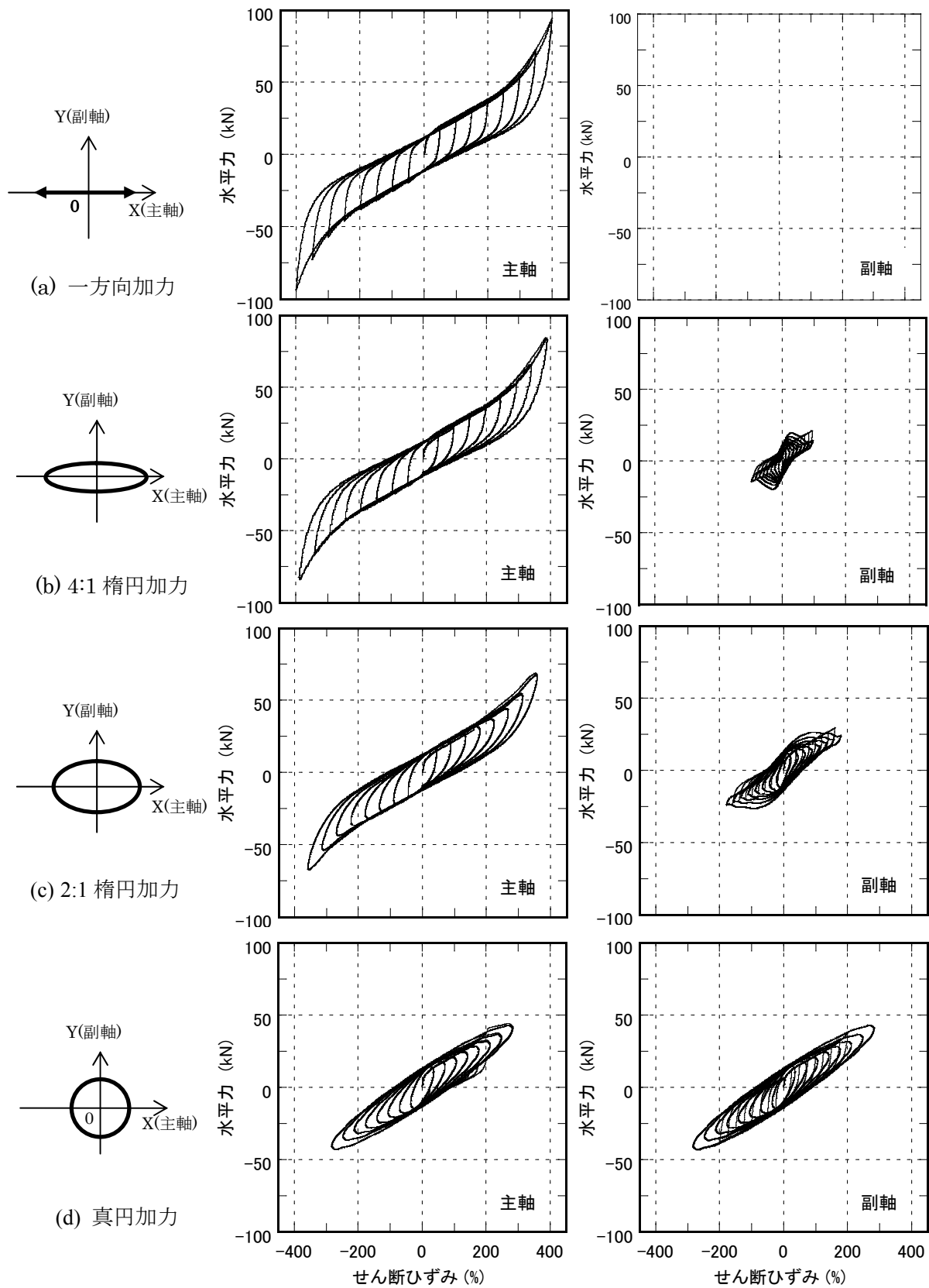


図 3.27 解析結果 (R1 試験体)

3.4 まとめ

第3章ではLRBの水平二方向加力における復元力特性の分析および解析を行った。

3.2節では水平二方向加力におけるLRBの履歴曲線を示し、その復元力特性値について検討調査した。LRBの水平二方向加力における履歴曲線は、楕円加力、真円加力の順に水平二方向加力の影響が現れた。楕円加力は主軸方向でハードニング傾向が弱くなった。また、副軸は特徴的な菱形を示した。真円加力は主軸、副軸ともに紡錘形となった。鉛プラグ本数配置、および断面形状が異なる試験体の履歴曲線はほぼ同じ形状を示し、二方向加力による鉛プラグ配置本数および断面形状の差はなかった。二次形状係数 S_2 の違いは主軸履歴曲線のハードニング傾向の違いとして現れ、 S_2 が大きいほどハードニングが顕著であった。鉛プラグ径 D_p の違いは履歴面積の変化として現れ、鉛プラグ径の大きさに応じて、履歴面積も増大した。

復元力特性値と主軸せん断ひずみの関係における鉛プラグ配置本数および断面形状を比較した結果、降伏荷重 Q_d は加力方向に関係なくせん断ひずみ250%までの範囲において、設計値と良く対応した。しかし、角型断面の鉛プラグ4本配置の Q_d は設計値に対し大きくなり、ねじれ変形の影響と考えられる異なる傾向を示した。降伏後剛性 K_d は、二方向加力の影響により一方向、楕円、真円加力の順に設計値に対して値が低下するが、主軸せん断ひずみに対する推移は断面形状による違いは少なかった。すなわち、復元力特性値の推移は断面形状、鉛プラグ配置本数の違いにおいて K_d は同様であり、 Q_d は鉛プラグ4本配置の場合、変化傾向が異なる結果となった。 S_2 の違いについて復元力特性値を比較すると、 Q_d は S_2 によらず主軸せん断ひずみに対する推移は等しかった。 K_d の推移はハードニングの影響により、 S_2 の大きいR2試験体($S_2=8.9$)、R1試験体($S_2=5.5$)、R3試験体($S_2=4.5$)の順に主軸せん断ひずみの増加に伴う上昇傾向を示した。鉛プラグ径 D_p の違いによる主軸せん断ひずみと Q_d の関係は、鉛プラグ径に応じて Q_d が増大した。 K_d は設計値がほぼ等しいため、同じ値に分布した。これら、 S_2 および D_p の違いによる主軸せん断ひずみに対する推移は、一方向加力における変化傾向と同様であり、水平二方向加力による影響は生じなかった。

水平二方向加力の加力オービット上の復元力ベクトルを原点方向に向かう力を弾性力、接線方向に生じる力を減衰力と分解して分析した。分析の結果、弾性力はLRBを構成するゴム部の復元力から計算できる水平力、減衰力はLRBの Q_d に対応した。また、水平二方向加力によるLRBの復元力は加力ひずみが大きくなると、弾性力が増加するが、加力オービット減衰力は、ほぼ一定値を保って推移することが分かった。このことが、LRBは水平二方向加力を行っても、履歴ループ面積の増大が生じない理由であると判明した。

3.3節ではLRBの水平二方向加力特性についてMSSモデルの復元力特性にKikuchi-Aikenモデルを適用したシミュレーション解析を行った。解析の結果、楕円加力における主軸方向のハードニングの緩和や、副軸の菱形の履歴曲線および、真円加力における紡錘形の履歴曲線を良好に再現できた。

第3章の参考文献

- [1] Masaru Kikuchi, Takahito Nakamura, Ian D. Aiken, Three-dimensional analysis for square seismic isolation bearings under large shear deformations and high axial loads, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 39, 1513-1531, 2010.
- [2] 山本祥江, 菊地優, 越川武晃, 上田正生: 変動軸力の影響を考慮した鉛プラグ入り積層ゴムの限界特性に関する検討, *日本建築学会構造系論文集*, 第73巻, 第634号, pp.2101-2110, 2008.12
- [3] オイレス工業株式会社: LRB 技術資料 2000.6
- [4] 山本雅史, 嶺脇重雄, 米田春美, 東野雅彦, 和田章: 高減衰積層ゴム支承の水平2方向変形時の力学特性に関する実大実験およびモデル化, *日本建築学会構造系論文集*, 第74巻, 第638号, pp.639-645, 2009.4
- [5] 和田章, 広瀬景一: 2方向地震動を受ける無限均等ラーメン構造の弾塑性応答性状, *日本建築学会構造系論文報告集*, 第399号, pp.37-47, 1989.5
- [6] 水平二方向加力時の高減衰系積層ゴム支承の性状についてー応答特性ー, *JSSI MENSIN* No.70, pp.27-32 2011.11
- [7] Masaru Kikuchi, Ian D. Aiken, An Analytical Hysteresis Model for Elastomeric Seismic Isolation Bearings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, 215-231, 1997.
- [8] 小槻淳, 山本祥江, 菊地優, 越川武晃, 上田正生: 鉛プラグ入り積層ゴムの大变形復元力モデルに関する研究, *構造工学論文集*, Vol.53B, pp.9-16, 2007.3

第 4 章

水平二方向加力時の限界特性

4.1 概要

免震構造の安全性確保のためには、地震応答を正確に把握し、それに対する設計余裕度の確保が重要である。特に積層ゴム支承は免震構造の地震応答性能を支配する装置であり、この限界性能は免震構造の限界性能と同意である。HDR 等の減衰性を有する積層ゴム支承の水平二方向限界挙動は、図 4.1 のねじれ変形による局部せん断ひずみが、水平せん断ひずみに付加され、早期に破断が生じるとされている[1,2,3]。一方、減衰性を有さない RB および、LRB はねじ変形の発生がほとんどなく、早期破断は生じないと報告されている。しかし、この研究結果は丸型断面の中央に一本の鉛プラグを封入した結果によるものである。筆者は断面形状の違いや鉛プラグ配置本数が異なる角形 LRB に関する検討を行ったが、水平に二方向加力による限界特性を確認するまでには至っていない[4]。

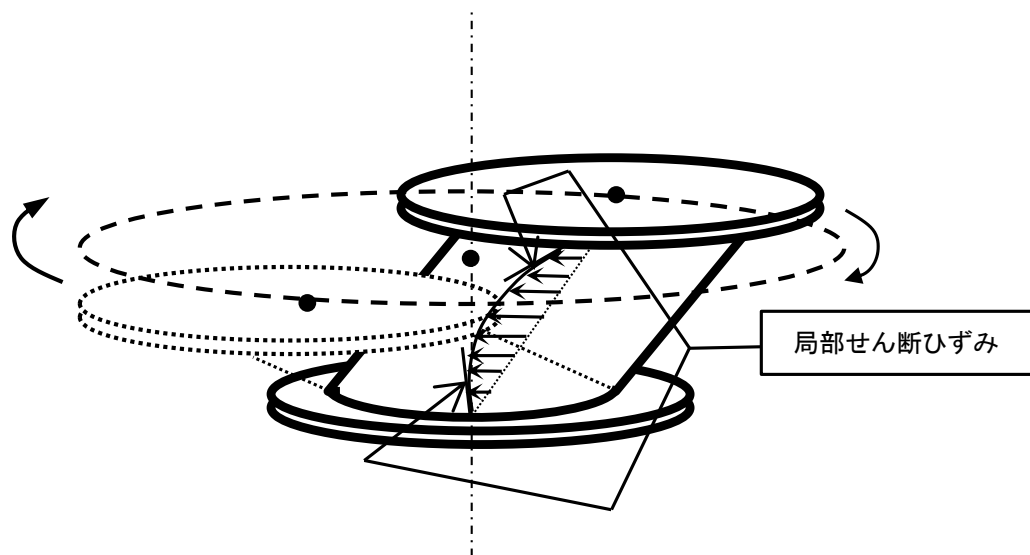


図 4.1 水平二方向加力時のねじれ変形による局部せん断ひずみ

角型 LRB は断面中心から分散して鉛プラグが配置されるため、ねじれ変形が生じた場合、鉛プラグの負担するせん断力が積層ゴムのねじれ変形を保持するように働き、局部せん断ひずみを増加させる懸念ある（図 4.2）。

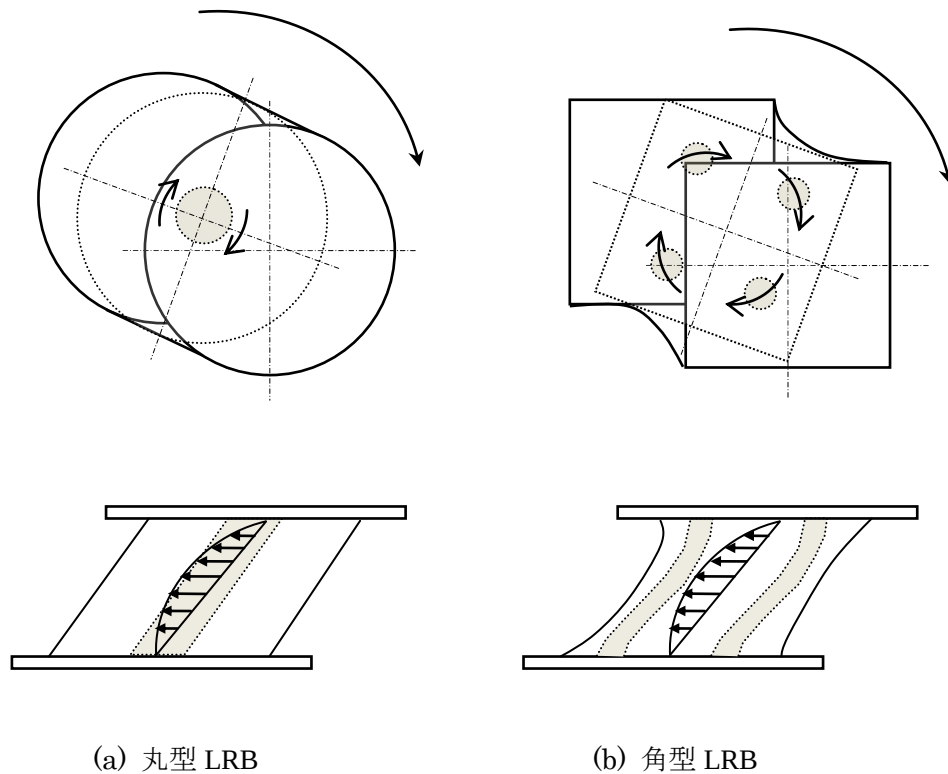


図 4.2 二方向加力における LRB 面内の変形

また、減衰性能に関係する鉛プラグ径の違いによる限界特性も検討されていない。このように、既往研究における LRB の水平二方向限界特性に関する検討は不十分であり、この特性を把握するためには試験体パラメータに基づく系統的な実験による検討が必要である。

本章は LRB の水平二方向限界特性を把握するため、第3章の復元力特性の検討につづき、LRB が破断するまでの限界加力を行い、試験体パラメータによる限界特性を明確にする。また、水平二方向加力時に生じた LRB のねじれ変形より、ねじれによる局部せん断ひずみを算出し、試験体形状の違いによる比較検討を行う。最後に限界ひずみ領域における復元力ベクトルの分力および、復元力ベクトルの方向について分析し、LRB の水平二方向限界特性に関する考察を行う。

4.2 実験結果

LRB の水平二方向加力時における限界特性の把握は図 4.3 の基準試験体に加え、鉛プラグの影響を確認するため、角型断面、鉛プラグ 1 本配置の S1 試験体に鉛プラグを封入しない S0 試験体を加えて行った。試験体の諸元を表 4.1 に示す。

本章ではひずみレベル 450%以上の試験結果を対象に限界特性を把握する。表 4.2 に加力プログラムを示す。また、本研究における加力プログラムと、部材認定において定められる使用限界の対応関係を図 4.4 に示す。なお、限界特性試験は第 3 章の復元力特性試験の後に時間をおいて改めて実施した。そのため限界特性試験では、試験体の残存応力確認のため、ひずみレベル 400%から加力を開始し、50%刻みで振幅を漸増させて試験体が限界ひずみに至るまで加力を行った。ただし、S0 試験体はひずみレベル 50%から限界ひずみまで連続して 2:1 楕円加力を実施している。そのため、S0 試験体の比較対象である S1 試験体は、データ連続性の観点から、S0 試験体と同様にひずみレベル 50%から再度加力を行った。

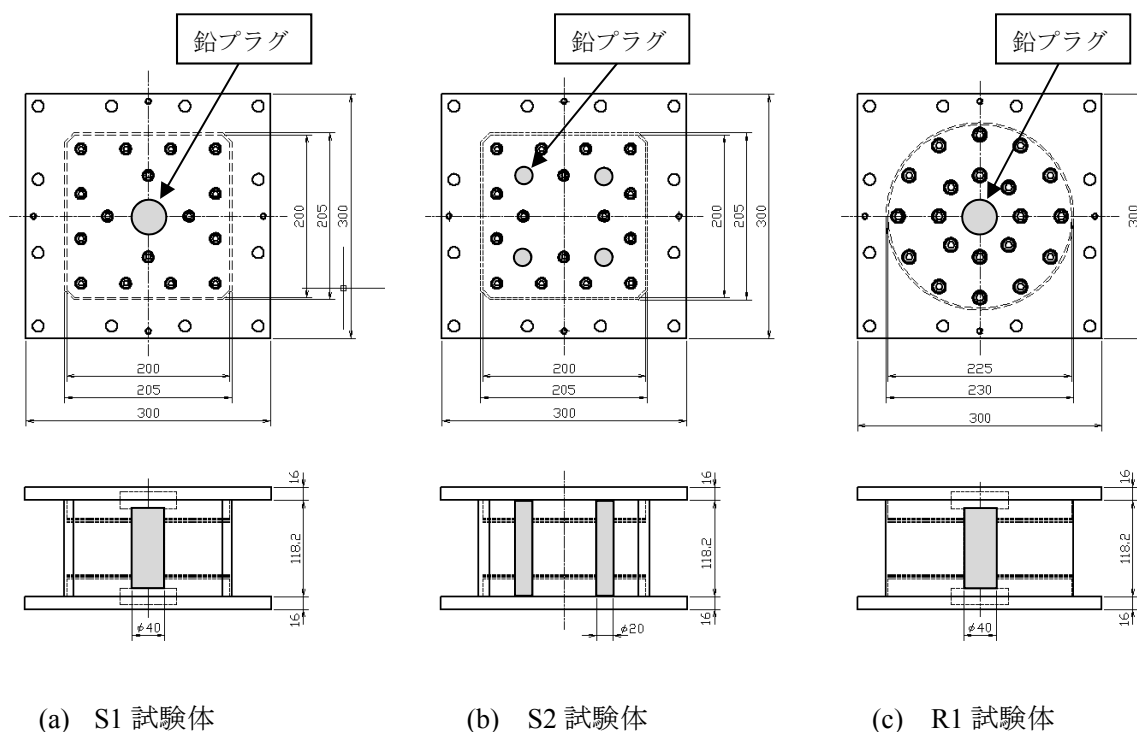


図 4.3 基本試験体（図 3.2 の再掲）

表 4.1 試験体諸元 (表 2.1 の再掲)

項目 (単位=mm)	試験体名称							
	S0	S1	S2	R1	R2	R3	R4	R5
断面形状	角型			丸型				
外形 D_s ・外径 D	200	200	200	225	225	225	225	225
鉛プラグ径 D_p	-	40	20	40	40	40	30	50
鉛プラグ数 n_p [本]	-	1	4	1	1	1	1	1
ゴム層厚 t_r	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
ゴム層数 n_r [層]	29	29	29	29	18	36	29	29
ゴム層総厚 H	40.6	40.6	40.6	40.6	25.2	50.4	40.6	40.6
内部鋼板厚 t_s	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
積層ゴム断面積 A_r	38543.4	38543.3	38543.3	38504.1	38504.1	38504.1	39053.9	37797.3
一次形状係数 S_1	30.5	36.6	36.6	40.2	40.2	40.2	40.2	40.2
二次形状係数 S_2	4.9	4.9	4.9	5.5	8.9	4.5	5.5	5.5
試験体数	1	3	3	3	1	1	1	1

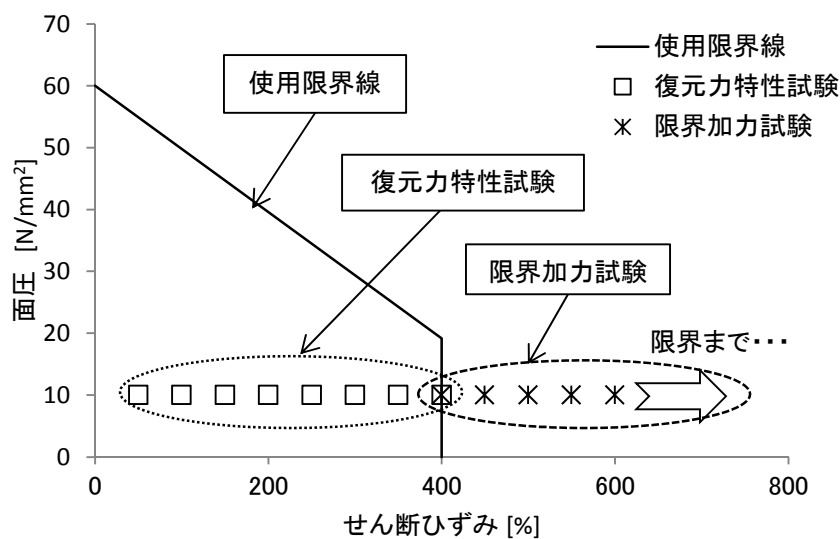


図 4.4 基準試験体 S1 の使用限界と本実験の関係

表 4.2 試験体と加力パターンの組み合わせおよび最大ひずみ振幅 [%]

試験体	S1,S2R1		S0,S1		S2,R1, R2,R3,R4,R5		S1,S2,R1	
変位軌道	一方向		2:1 楕円		2:1 楕円		真円	
振幅比	0.0		0.5		0.5		1.0	
位相差 θ	0°		53.13°		53.13°		90°	
ひずみレベル	主軸	副軸	主軸	副軸	主軸	副軸	主軸	副軸
50	—	—	44.7	22.4	—	—	—	—
100	—	—	89.4	44.7	—	—	—	—
150	—	—	134.2	67.1	—	—	—	—
200	—	—	178.9	89.4	—	—	—	—
250	—	—	223.6	111.8	—	—	—	—
300	—	—	268.3	134.2	—	—	—	—
350	—	—	313.0	156.5	—	—	—	—
400	400.0	0.0	375.8	178.9	375.8	178.9	282.8	282.8
450	450.0	0.0	402.5	201.3	402.5	201.3	318.2	318.2
500	500.0	0.0	447.2	223.6	447.2	223.6	353.5	353.5
550	550.0	0.0	491.9	246.0	491.9	246.0	388.9	388.9
600	600.0	0.0	536.7	268.3	536.7	268.3	424.3	424.3
650	650.0	0.0	581.4	290.7	581.4	290.7	459.6	459.6
:	破断まで							

4.2.1 限界ひずみレベルにおける履歴曲線

限界特性試験の結果のうち、鉛プラグの封入されていない角型断面を有する S0 試験体と、鉛プラグの封入された S1 試験体の履歴曲線を比較する（図 4.5, 図 4.6）。なお、同図に示す履歴曲線はひずみレベル 100%から 100%刻みで、ゴム層破断に至ったひずみレベル 600%までを表示している。履歴曲線上の矢印は試験体が限界ひずみに達した点を示し、ゴム破断または座屈破壊の破壊モードを併記する。なお、本研究における『ゴム破断』はゴム層が破断した状態を言い、履歴曲線に負勾配が生じた場合も含む。また、『座屈破壊』は試験体の座屈により内部鋼板が圧壊した状態を言う。これら状態の詳細は 4.2.2 項で述べる。

2:1 楕円加力における S0 試験体と S1 試験体の限界ひずみは等しく、両試験体ともひずみレベル 600%（最大ひずみ 537%）の正側最大ひずみを経験した後に、負側で破断した。ひずみレベル 600%は試験体の外形を超える変形であるため、履歴曲線に負勾配が生じた。また、主軸履歴曲線においてせん断ひずみが 400%を超えると、鉛プラグのない S0 試験体において履歴面積の増加が顕著となる。さらに、このひずみ領域における副軸の履歴曲線の面積は鉛プラグを有する S1 試験体と同等となる。

続いて、試験体形状の違いによる履歴曲線を比較する。基準試験体である S1 試験体、S2 試験体、R1 試験体の履歴曲線をそれぞれ図 4.7, 図 4.8, 図 4.9 の順に示す。なお、S1 試験体の一方向加力は、本研究で新たに製作した三軸試験機の载荷能力の制限により、同試験機とは別の 3MN 二軸試験機を用いた[5]。3MN 二軸試験機は試験体に対し、鉛直荷重の载荷能力が大きいと、鉛直荷重の追従が鈍く、履歴性状が異なっている。基準試験体による限界ひずみ領域の履歴曲線は、一方向加力の結果を除いて、S1 試験体と S2 試験体はほぼ等しい。R1 試験体は角型断面の S1,S2 試験体と比較して、座屈による負勾配の発生が少ない。これは、R1 試験体の二次形状係数 S_2 が角型断面の S1,S2 試験体の $S_2=5$ に対して $S_2=5.5$ と大きいためである。

S_2 の違いによる履歴曲線の違いは、図 4.10 で明確に現れる。同図(a)に示す R3 試験体 ($S_2=4.5$) の履歴曲線は不勾配が卓越し試験体の限界ひずみは履歴曲線が負勾配となったピークの座屈破壊となる。一方、 S_2 が 8.9 の R2 試験体は履歴曲線に不勾配は発生せず、限界ひずみはゴム破断となる。

鉛プラグ径 D_p の違いについて比較すると、 D_p が $\phi 30$ と小さい R4 試験体のみ座屈破壊による限界を示し、履歴曲線に負勾配が発生する（図 4.11）。しかし、それ以外の R1 試験体、R5 試験体はゴム破断による限界となり、履歴曲線においても負勾配は発生しない。

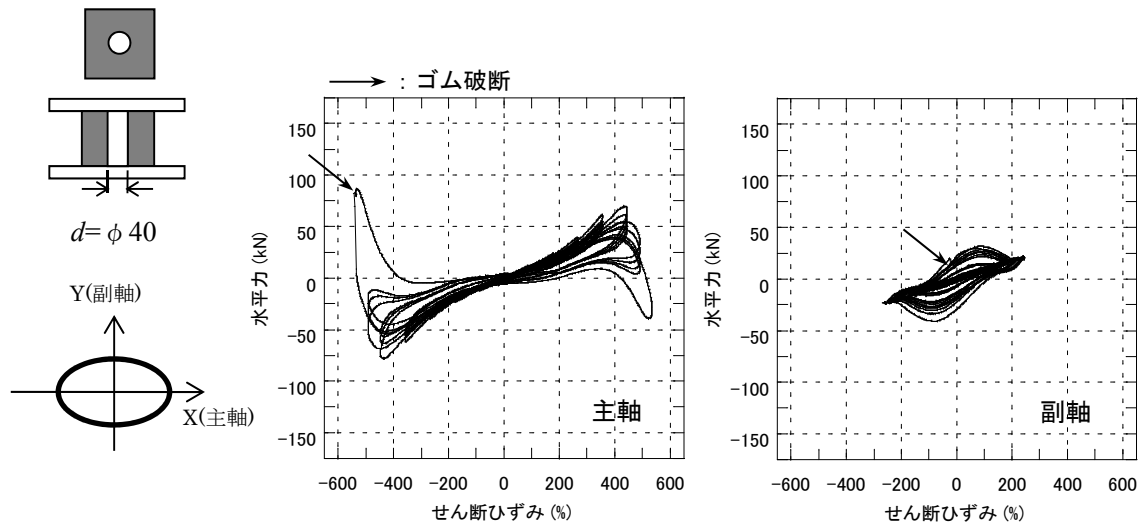


図 4.5 2:1 楕円加力における S0 試験体の履歴曲線
(角型 鉛プラグ無し $\phi 40 \times 1$ 穴 $S_2=5$)

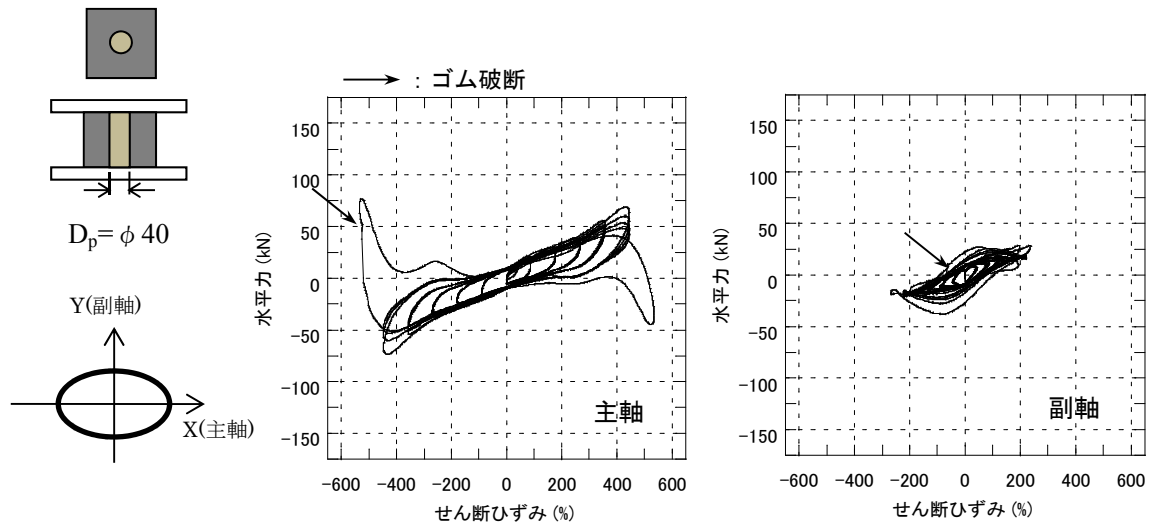
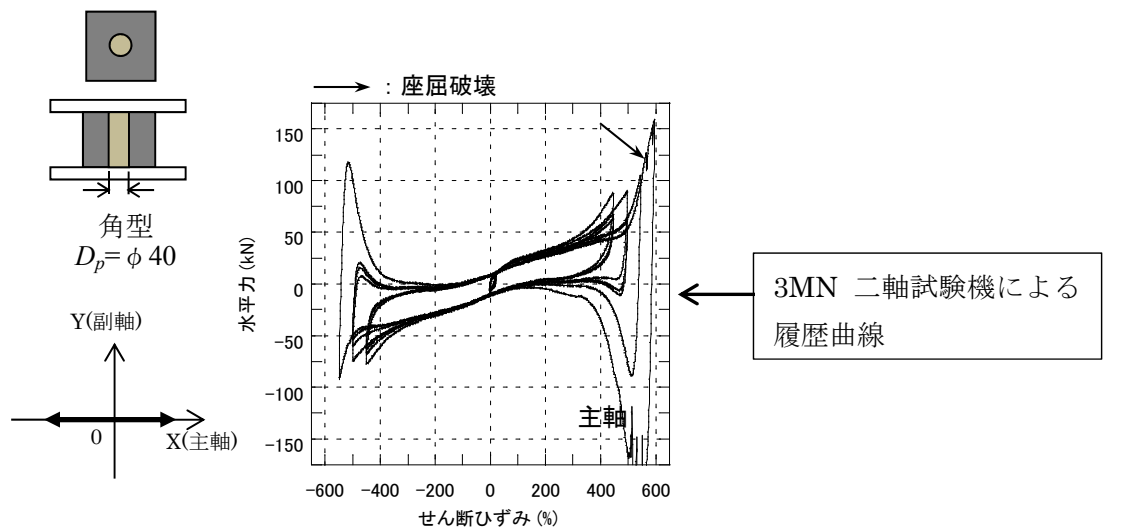
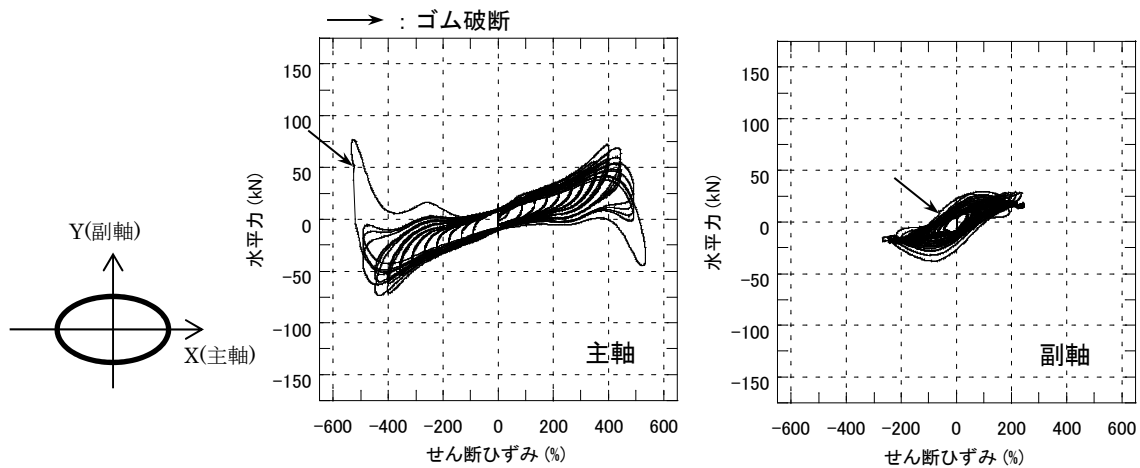


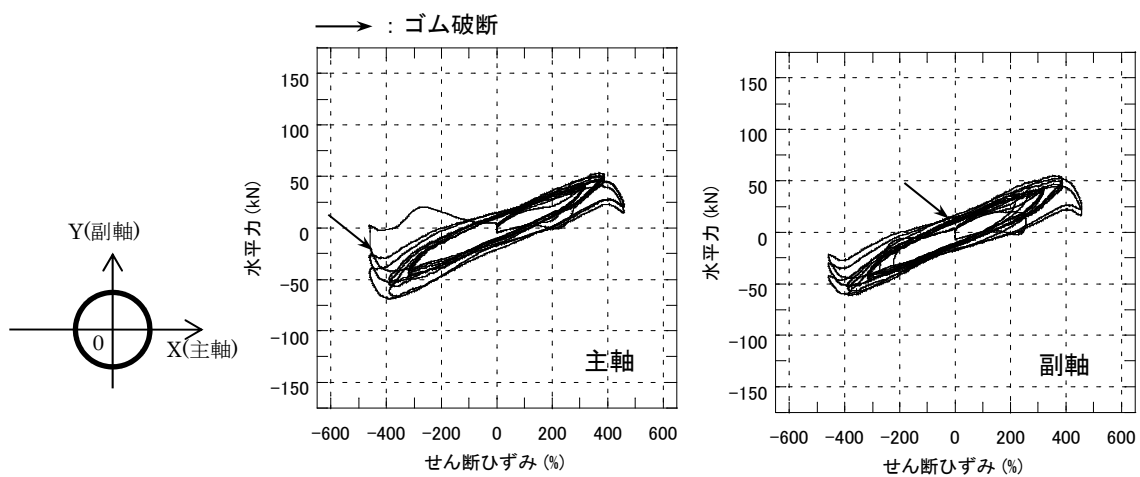
図 4.6 2:1 楕円加力における S1 試験体の履歴曲線
(角型 鉛プラグ $\phi 40 \times 1$ 本 $S_2=5$)



(a) 一方向加力

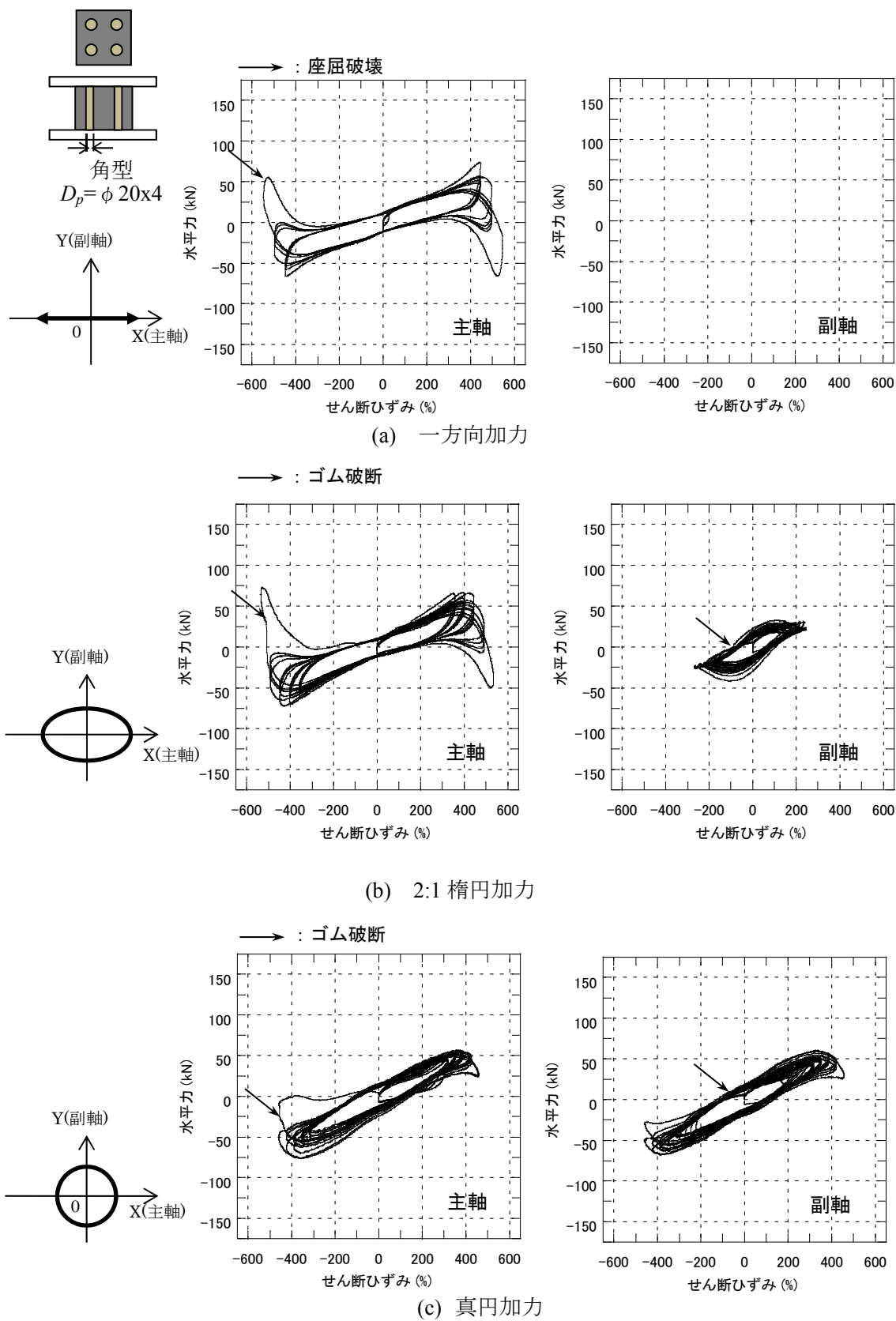


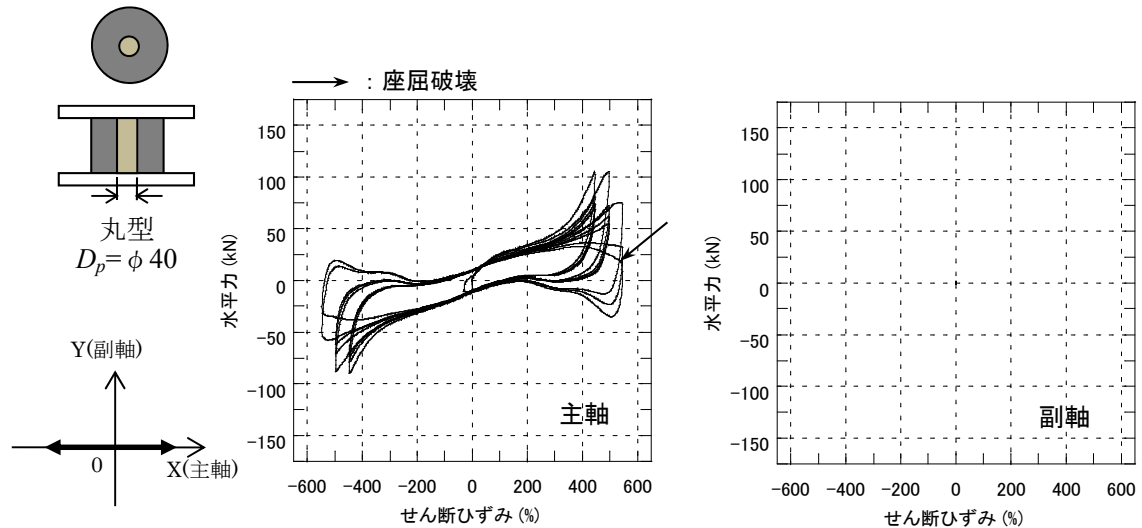
(b) 2:1 楕円加力



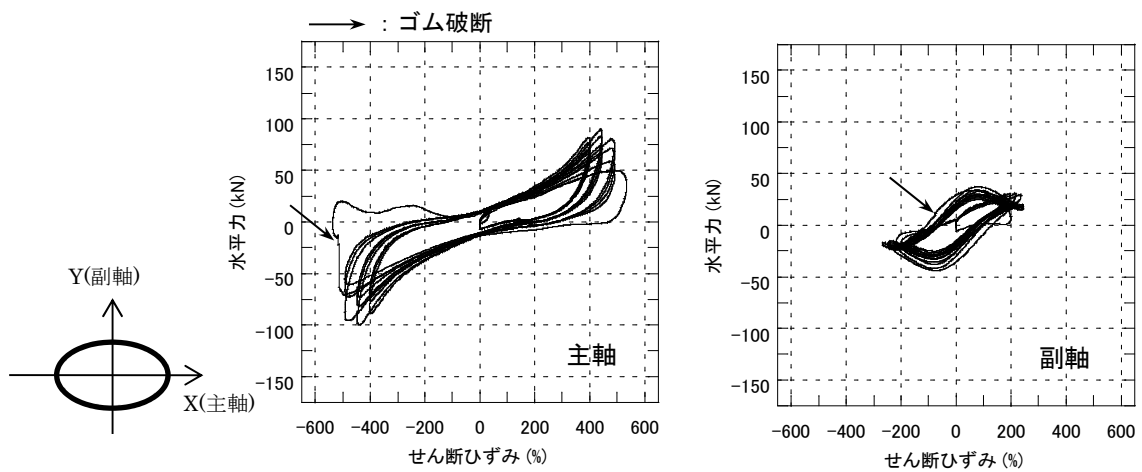
(c) 真円加力

図 4.7 S1 試験体の履歴曲線 (角型 鉛プラグ $\phi 40 \times 1$ 本 $S_2=5$)

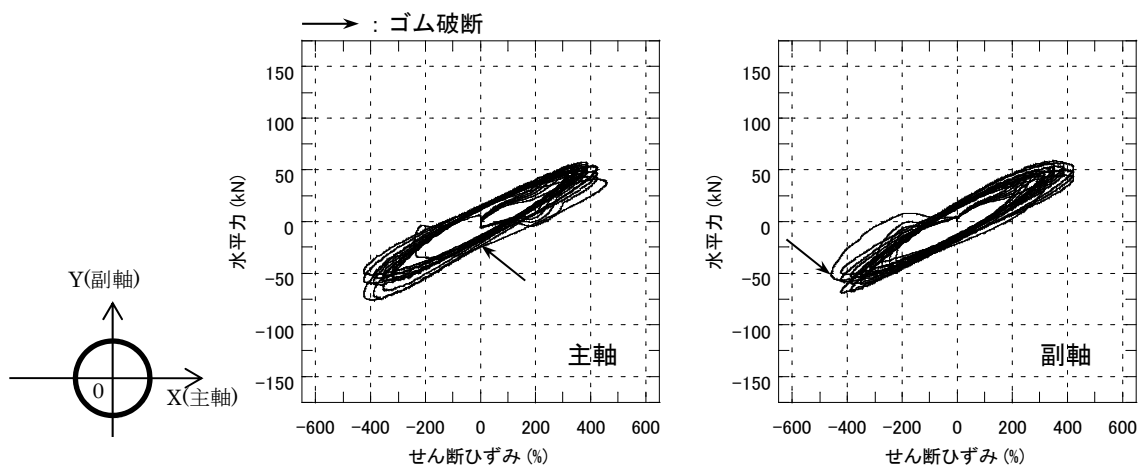

 図 4.8 S2 試験体の履歴曲線 (角型 鉛プラグ $\phi 20 \times 4$ 本 $S_2=5$)



(a) 一方向加力

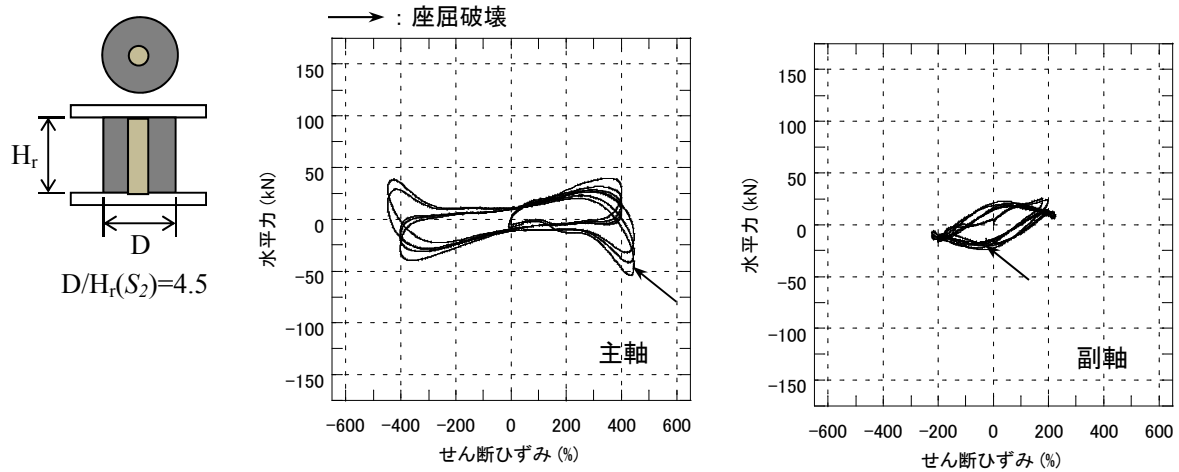


(b) 2:1 楕円加力

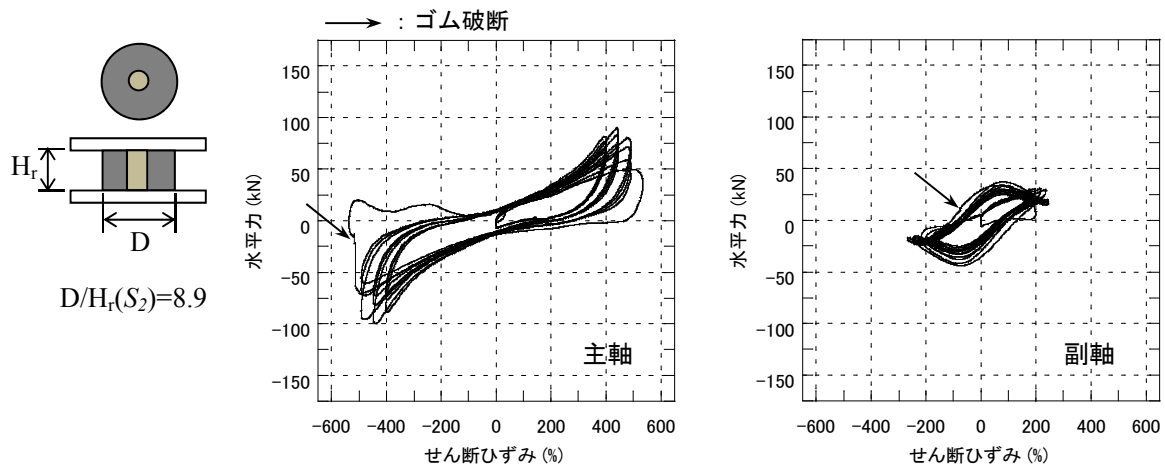


(c) 真円加力

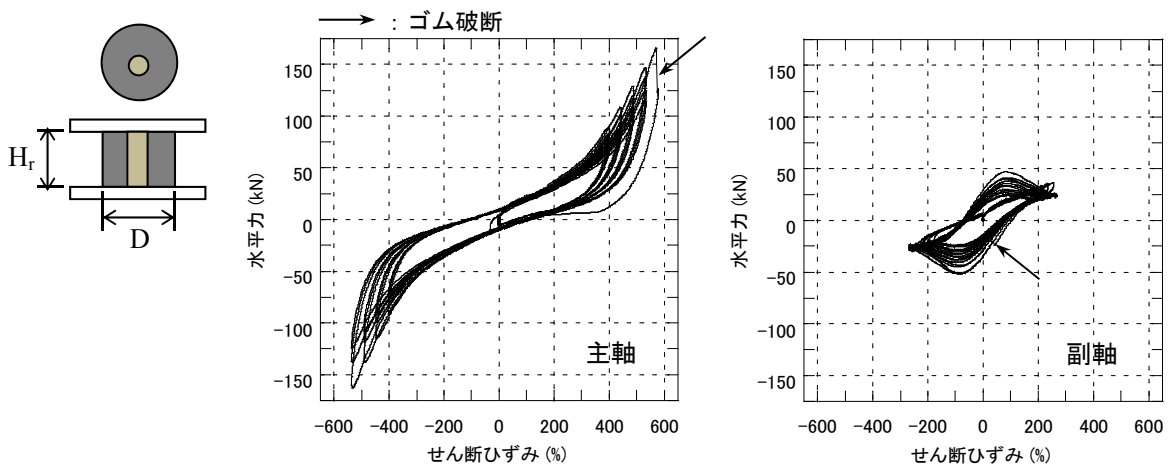
図 4.9 R1 試験体の履歴曲線 (丸型 鉛プラグ $\phi 40 \times 1$ 本 $S_2=5.5$)



(a) R3 試験体の履歴曲線（丸型 鉛プラグ $\phi 40 \times 1$ 本 $S_2=4.5$ ）

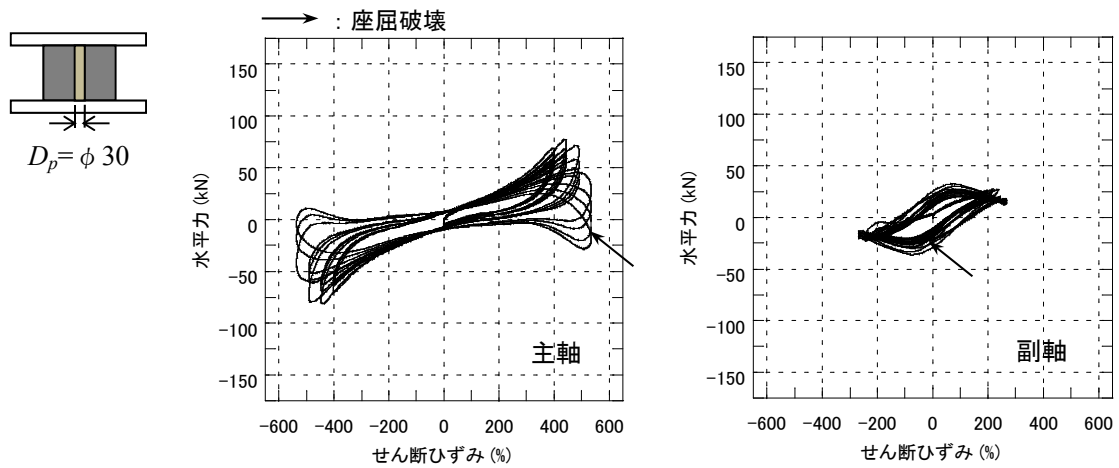


(b) R1 試験体の履歴曲線（丸型 鉛プラグ $\phi 40 \times 1$ 本 $S_2=5.5$ ）

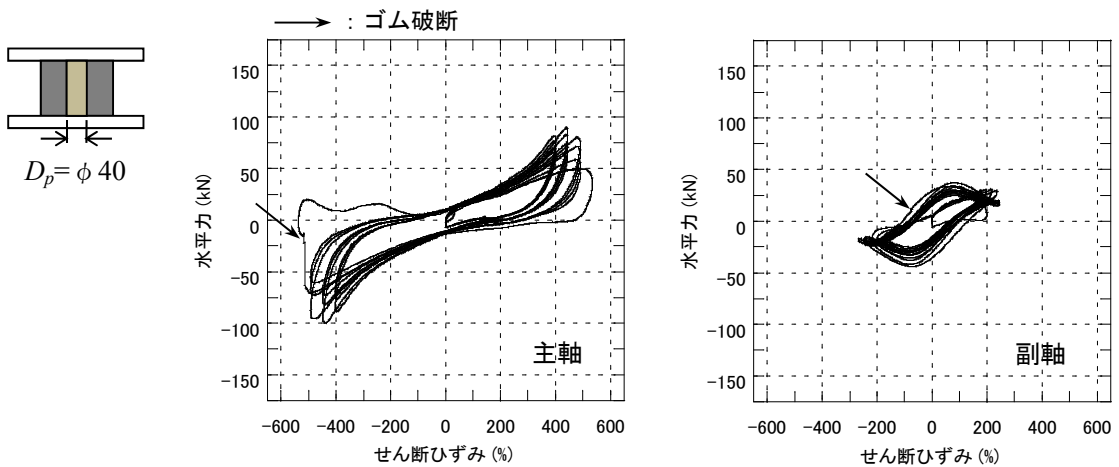


(c) R2 試験体の履歴曲線（丸型 鉛プラグ $\phi 40 \times 1$ 本 $S_2=8.9$ ）

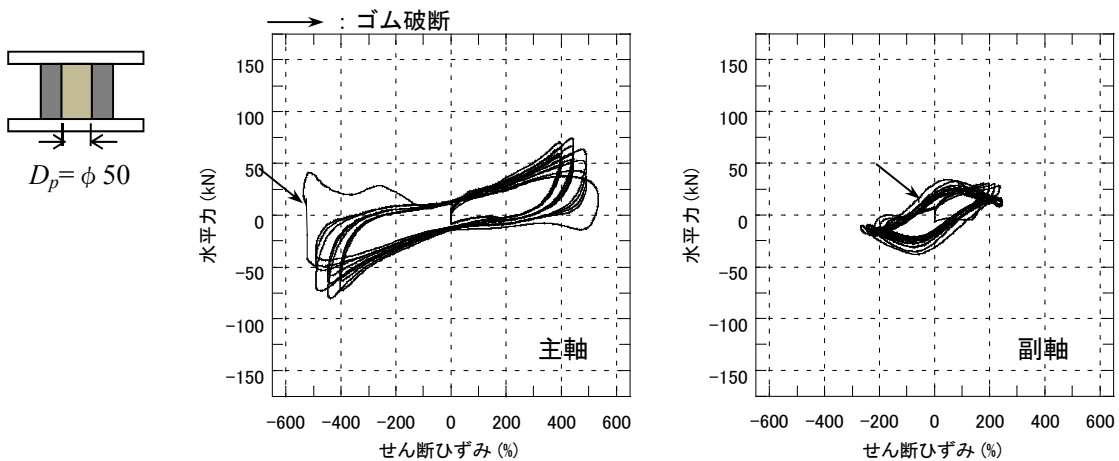
図 4.10 二次形状係数の違いによる履歴曲線（2:1 楕円加力）



(a) R4 試験体の履歴曲線 (丸型 鉛プラグ $\phi 30 \times 1$ 本 $S_2=5.5$)



(b) R1 試験体の履歴曲線 (丸型 鉛プラグ $\phi 40 \times 1$ 本 $S_2=5.5$)



(a) R5 試験体の履歴曲線 (丸型 鉛プラグ $\phi 50 \times 1$ 本 $S_2=5.5$)

図 4.11 鉛プラグ径の違いによる履歴曲線 (2:1 楕円加力)

4.2.2 限界ひずみ

本研究において定義する『ゴム破断』の状態を写真 4.1 に示す。写真は真円加力における S1 試験体のひずみレベル 650% の状況である。破断は一層目のゴム層（写真右上）で生じている。これは、二方向加力によって生じるねじれモーメントが、LRB の上下端で最大となるためと考えられる。つづいて、『座屈破壊』の状況を写真 4.2 に示す。写真は R3 試験体（ $S_2=4.5$ ）の楕円加力、ひずみレベル 500% の状況である。本研究における座屈破壊は、内部鋼板が圧壊した場合を言い、座屈破壊が生じると試験体表面に内部鋼板が飛び出す（写真 4.3）。

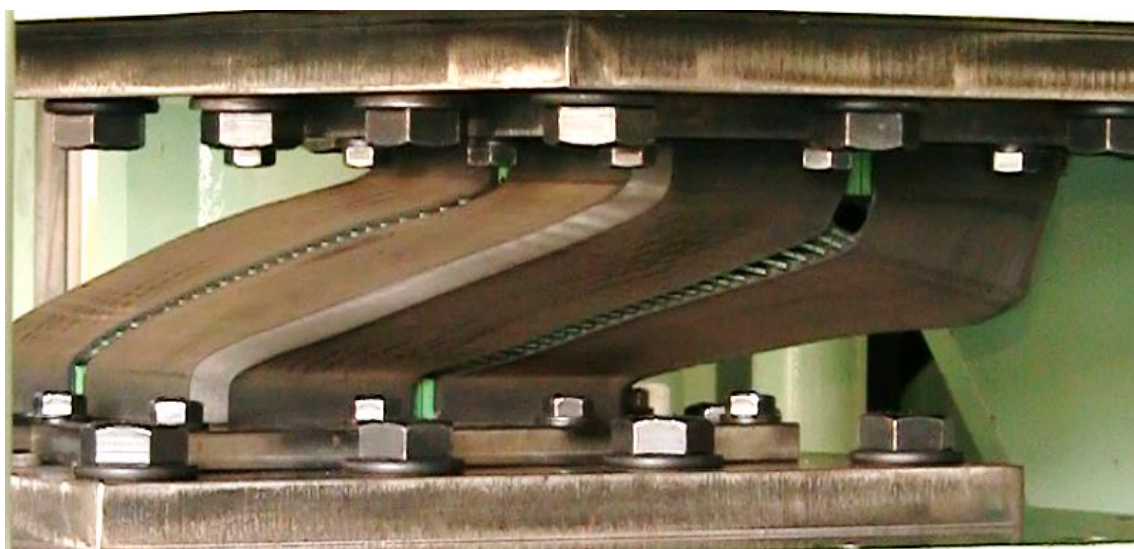


写真 4.1 S1 試験体の破断状況（真円加力 ひずみレベル 650%）

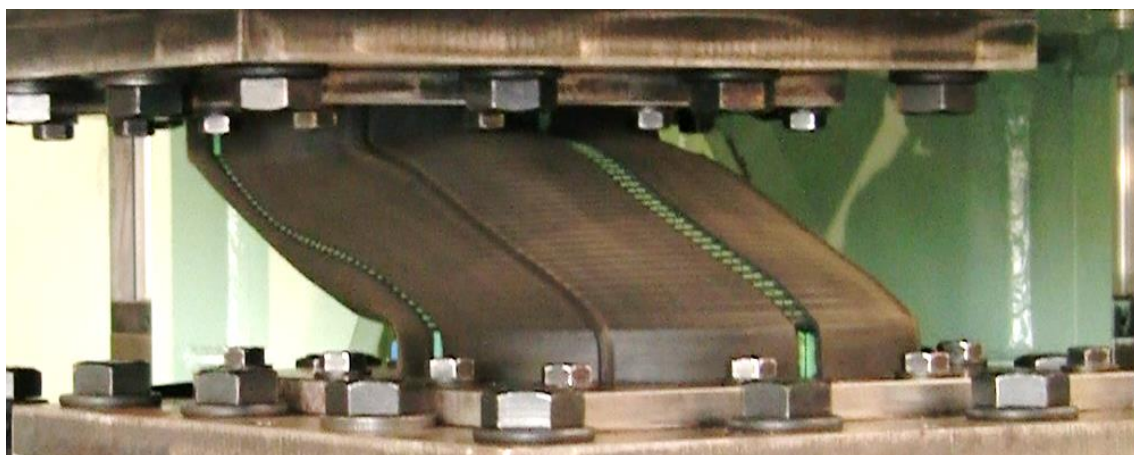


写真 4.2 R3 試験体の座屈状況（楕円加力 ひずみレベル 500%）



写真 4.3 座屈破壊による内部鋼板の圧壊

以上のように定義した限界ひずみの一覧を表 4.3 に示す。表中の○は 3cycle の加力が可能であった場合であり、試験体が限界ひずみに達したひずみについては、ゴム破断または座屈破壊の限界状態を記した。また、各試験体の主要因子を表中の試験体名称に括弧で併記した。なお、縮小試験体による限界ひずみは実大試験体より大きい傾向にあるため、本研究の限界ひずみを、そのまま実大試験体に適用できない点に注意を要する。表より基準試験体(S1,S2,R1)について加力パターン別に限界ひずみを比較すると、一方向加力（550%）、1:2 楕円加力（537%）、真円加力（460%）の順に小さくなる。また、基準試験体の限界ひずみは同一加力パターンにおいて等しいため、LRB の限界ひずみは基準試験体間のある断面形状、鉛プラグ配置本数には影響を受けないと言える。また、鉛プラグ径 D_p の異なる R1($D_p = \phi 40\text{mm}$)、R4($D_p = \phi 30\text{mm}$)及び、R5($D_p = \phi 50\text{mm}$)においても限界ひずみの違いはない。二次形状係数 S_2 の違いによる限界ひずみは S_2 の小さい R3 ($S_2=4.5$)、R1($S_2=5.5$)、R2($S_2=8.9$)の順に大きくなる。つまり、水平二方向加力における LRB の限界ひずみは、断面形状、鉛プラグ配置本数および鉛プラグ径による影響は無く、 S_2 のみ影響を受ける。このことに関する詳細は 4.3 節で考察する。

次に、限界ひずみと位相差入力の関係について考察する。位相差入力は試験体に入力されるエネルギーが一方向加力と二方向加力において同等に設定されている。この波形設定条件を考慮して、加力方向と限界ひずみの対応を比較すると、基準試験体の一方向加力における限界のひずみレベル 550%に対し楕円加力は 600%、真円加力は 650%である。一方、主軸の最大せん断ひずみについて同様に比較すると、一方向加力の 550%に対し、楕円加力

は 537%、真円加力は 460%である。一方向加力に対する限界ひずみの対応は、楕円加力において主軸最大せん断ひずみの方が良い。しかし、真円加力における限界ひずみ対応はひずみレベル、主軸最大ひずみともに約 100%の差異が生じる。このような違いが生じたのは、本研究における試験体の破断がゴム破断と座屈破壊の 2 つのモードとなったためと考えられる。試験体の破断モードが R2 試験体のように、履歴曲線が不勾配とならずに、ゴム破断に至る場合、その破断ひずみはゴム材料の限界ひずみまたは、せん断応力が支配的となる。しかし、内部鋼板の圧壊等で破断した場合、積層ゴムに生じる応力が異なるため、入力波形による限界ひずみの比較が不可能となる。ゴム破断に着目すると、基準試験体の破断ひずみレベルは楕円加力が 600%、真円加力が 650%となり、その違いは 50%程度となる。一方向加力は全て座屈破壊なので、ゴム層のせん断応力はまだ余裕があったと考えられる。その場合、破断ひずみレベルは 600%以上と考えられるので、位相差入力における限界ひずみは、同様に扱える可能性がある。このことを詳細に検討するため、次項では位相差入力による試験体の吸収エネルギーについて考察する。

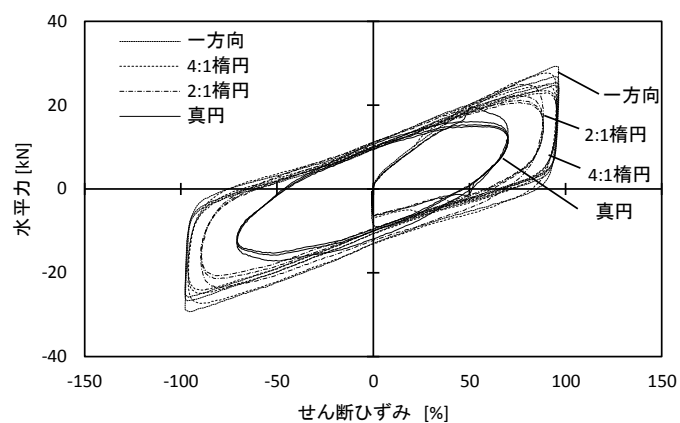
表 4.3 限界ひずみの一覧

加力 パターン	試験体	ひずみレベル[%]			
		500	550	600	650
一方向	主軸最大ひずみ[%]	500	550	600	650
	S1(角型, 鉛 1 本)	○	座屈破壊		
	S2(角型, 鉛 4 本)	○	座屈破壊		
	R1 (丸型)	○	座屈破壊		
2:1 楕円	主軸最大ひずみ[%]	447	492	537	581
	S0 (角型, 鉛無し)	○	○	ゴム破断	
	S1(角型, 鉛 1 本)	○	○	ゴム破断	
	S2(角型, 鉛 4 本)	○	○	ゴム破断	
	R1 (丸型)	○	○	ゴム破断	
	R2(丸型, $S_2=8.9$)	○	○	○	ゴム破断
	R3(丸型, $S_2=4.5$)	破壊座屈			
	R4(丸型, $D_p=\phi 30$)	○	○	座屈破壊	
	R5(丸型, $D_p=\phi 50$)	○	○	ゴム破断	
真円	主(副)軸最大ひずみ[%]	354	389	424	460
	S1(角型, 鉛 1 本)	○	○	○	ゴム破断
	S2(角型, 鉛 4 本)	○	○	○	ゴム破断
	R1 (丸型)	○	○	○	ゴム破断

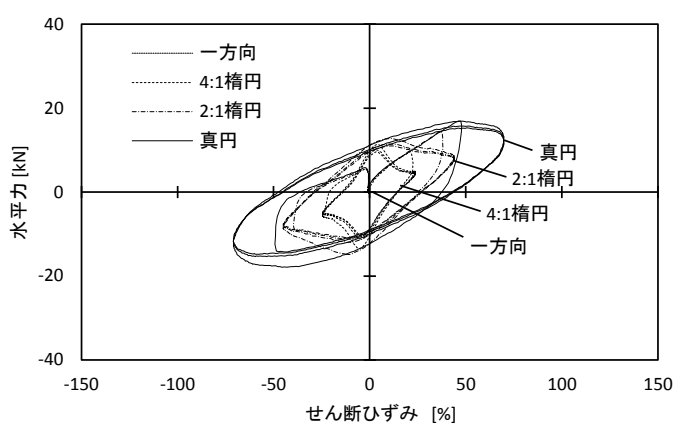
4.2.3 位相差入力における吸収エネルギー

限界加力試験による各試験体の破壊モードはゴム破断と座屈破壊の2つのモードとなり、位相差入力における限界ひずみを加力方向によらず一義的に扱えなかった。そのため、本項では水平二方向加力における位相差入力の位置づけを明確にするため、位相差入力による吸収エネルギーについて考察する。位相差入力による R1 試験体の履歴曲線および累積吸収エネルギーと累積変位の関係をひずみレベル 100%、250%、400%、550%を代表させて図 4.12~15 に示す。LRB の設計式の範囲であるひずみレベル 100% (図 4.12(c))、250% (図 4.13(c)) の累積吸収エネルギーと累積変位の関係は加力方向によらず傾きがほぼ等しい。これより、ひずみレベル 250%までの範囲において位相差入力は積層ゴムに与えるエネルギー量が加力方向によらず同等であり、設定コンセプトを満足していることが分かる。一方、ひずみレベル 400%(図 4.14)、550% (図 4.15) の限界ひずみ領域において累積吸収エネルギーと累積変位の傾きは一方向、1:4 楕円 (ひずみレベル 550%は未実施)、1:2 楕円、真円加力の順に小さい。これは、次のことが原因と考えられる。LRB は設計範囲の 250%を超えるせん断ひずみを与えると、ハードニング現象が生じる。ハードニング現象が生じるひずみ領域において繰返し変形を与えると、ゴムの経験ひずみ依存性により、応力緩和が生じる。そのため、ハードニングを伴う大ひずみ領域の累積吸収エネルギーの傾きは繰返し加力に伴い低下する。しかし、位相差入力における 1:4 楕円、1:2 楕円、真円加力は、この順番で一方向加力に比べ最大せん断ひずみが小さい。つまり、同じひずみレベルにおいて、ハードニングが小さい。そのため、ゴムの経験ひずみ依存性が小さくなり、加力方向による累積吸収エネルギーの傾きに差異が生じる。

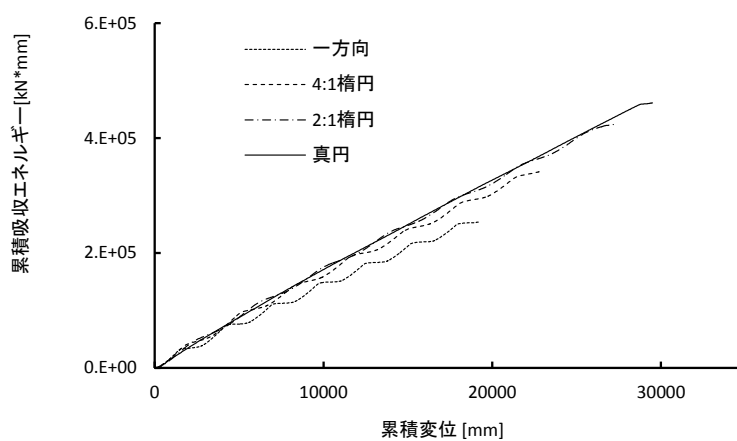
以上により、位相差入力における一方向加力と二方向加力の復元力特性の比較は、ハードニングが生じないせん断ひずみ 250%までは、吸収エネルギーが等価であるという工学的意味を持つと言える。ただし、ハードニングを伴う大ひずみ領域においては、試験体が吸収するエネルギーに差異が生じるため、扱いに注意する必要がある。今後、限界ひずみ領域における位相差入力の扱いを確立するため、試験体の破壊モードが同一となるように設定した試験体形状による検討が望まれる。



(a) 主軸履歴曲線

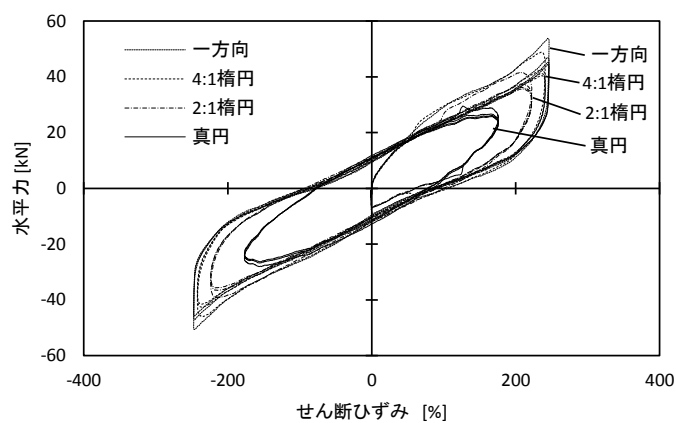


(b) 副軸履歴曲線

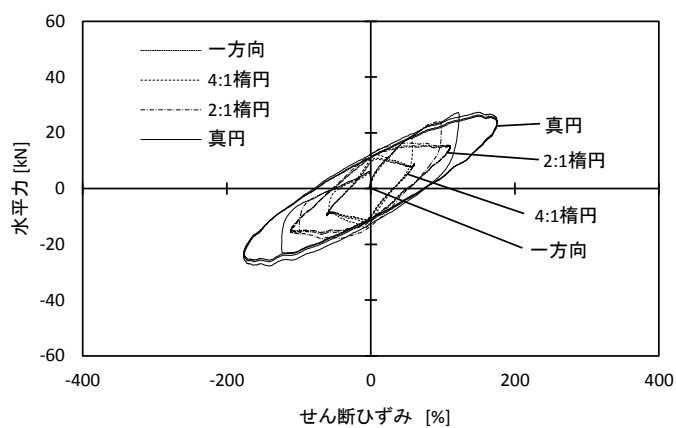


(c) 累積吸収エネルギーと累積変位の関係

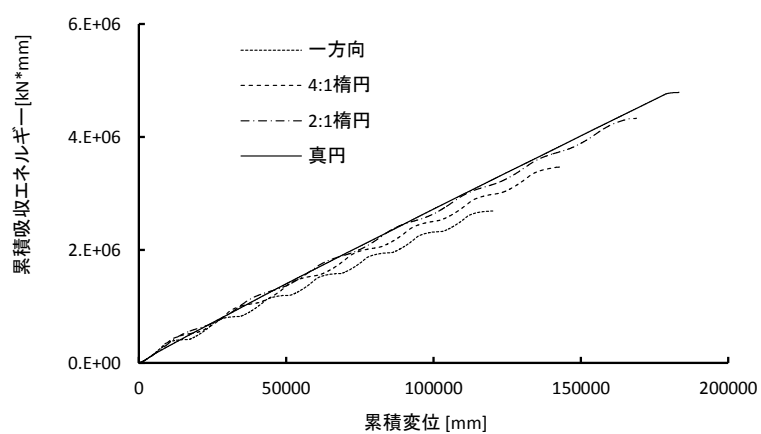
図 4.12 ひずみレベル 100%における履歴曲線と累積吸収エネルギー (R1 試験体)



(a) 主軸履歴曲線

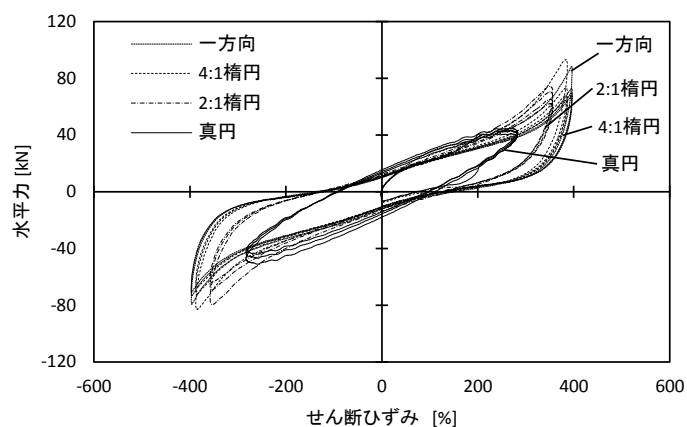


(b) 副軸履歴曲線

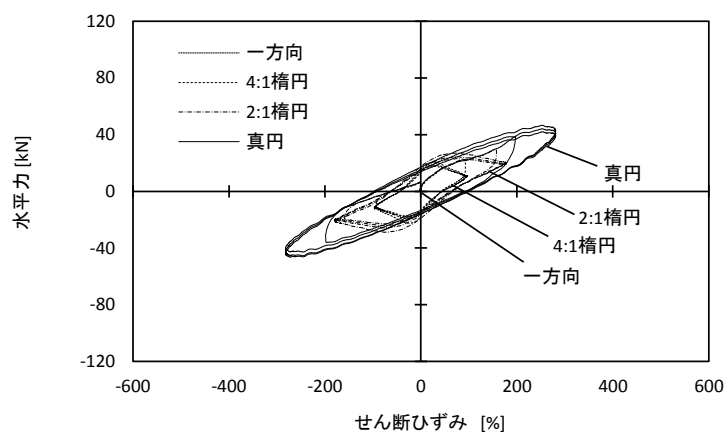


(c) 累積吸収エネルギーと累積変位の関係

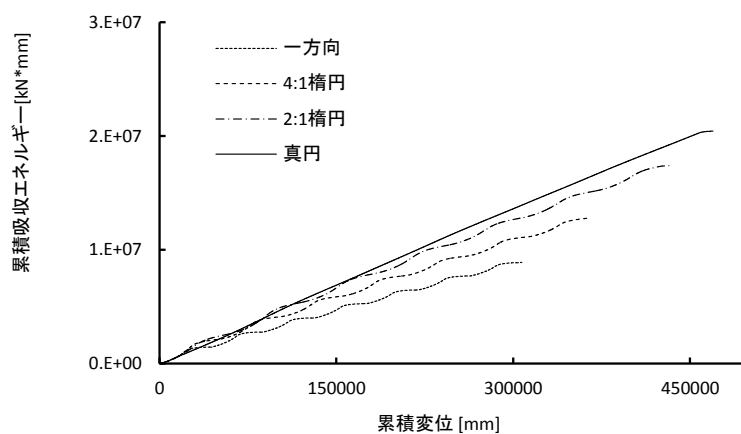
図 4.13 ひずみレベル 250%における履歴曲線と累積吸収エネルギー (R1 試験体)



(a) 主軸履歴曲線

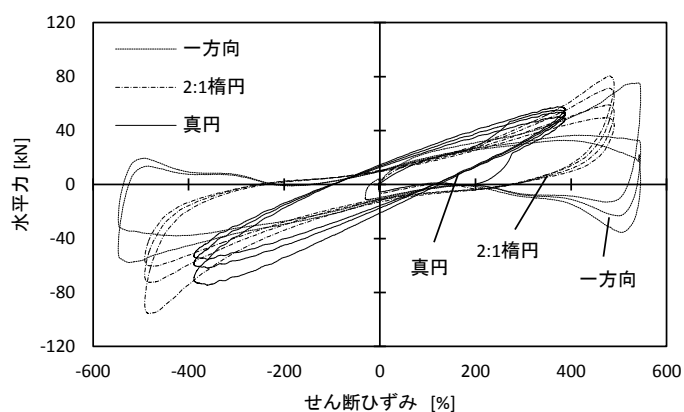


(b) 副軸履歴曲線

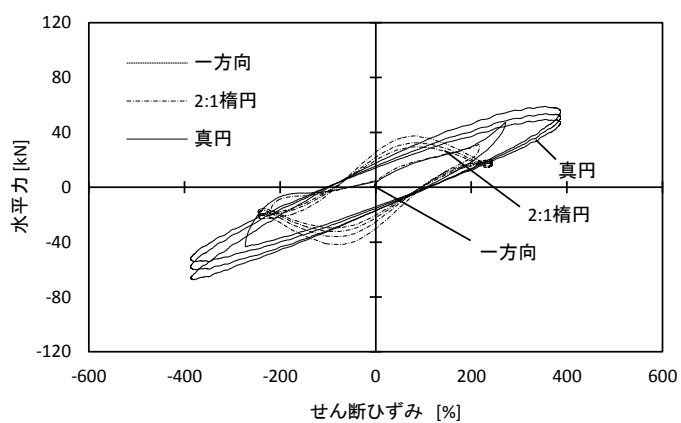


(c) 累積吸収エネルギーと累積変位の関係

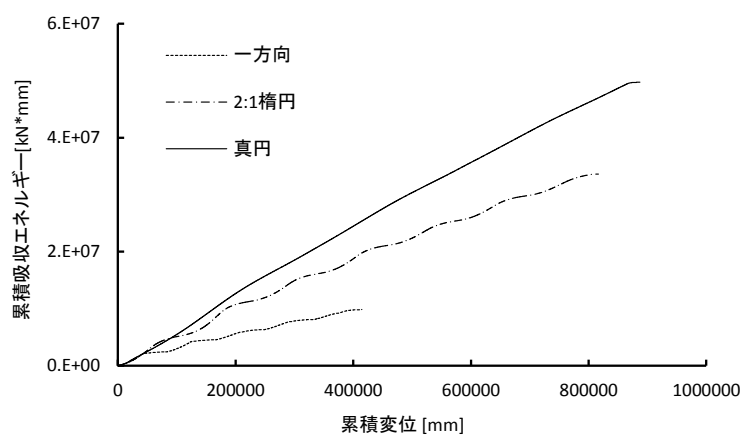
図 4.14 ひずみレベル 400%における履歴曲線と累積吸収エネルギー (R1 試験体)



(a) 主軸履歴曲線



(b) 副軸履歴曲線



(c) 累積吸収エネルギーと累積変位の関係

図 4.15 ひずみレベル 550%における履歴曲線と累積吸収エネルギー (R1 試験体)

4.3 ねじれ挙動

LRB 等の減衰性を有する積層ゴム支承の水平二方向加力を行うと、高さ方向にねじれ変形が生じる。本節では LRB の水平二方向加力におけるねじれ挙動を把握するため、水平二方向加力試験によって生じた、ねじれモーメント、ねじれ変形および、ねじれ変形によって生じる局部せん断ひずみの発生状況を明らかにする。

4.3.1 ねじれモーメント

減衰力を有する積層ゴム支承の水平二方向加力を行うと、図 4.16 のように原点方向に向かう弾性力に加えてオービットの接線方向に減衰力が生じることで、弾性力と減衰力の合力である復元力ベクトルは原点を通らない。その結果、積層ゴムの鉛直軸まわりにねじれモーメントが作用し、積層ゴムには並進成分によるせん断ひずみに、ねじれモーメントによるせん断ひずみが付加されることになる。

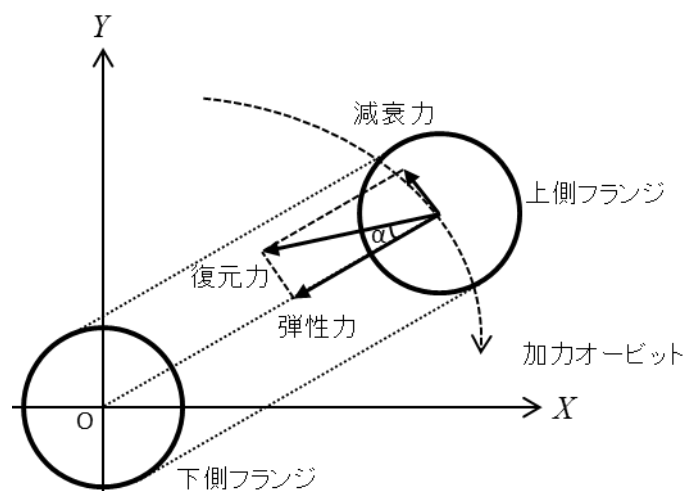


図 4.16 ねじれモーメントが生じるメカニズム

二方向加力で発生したねじれモーメントの最大値と主軸せん断ひずみの関係を調べた。基準試験体のねじれモーメントは楕円加力（図 4.17）、真円加力（図 4.18）ともに差は少なく、断面形状の影響は小さい。つぎに R1, R2, R3 の二次形状係数 S_2 の違いによる 3 つの試験体を比較すると、ねじれモーメントは S_2 の小さい R3, R1, R2 の順に大きくなっている（図 4.19）。同一の断面形状を有する試験体においてせん断ひずみが等しい場合は、二次形状係数が小さいほどゴム層総厚が大きくなるため、水平変形量が大きくなる。すなわち、二次形状係数が異なっても、同じせん断ひずみで発生するせん断力がほぼ等しいために、水平変形量が大きいほど偏心距離が大きくなり、結果的にねじれモーメントの増大となる。鉛プラグ径 D_p の違いによるねじれモーメントの比較は、主軸せん断ひずみ 400%未満の復元力特性試験において D_p が太い R5 ($D_p = \phi 50$) , R1 ($D_p = \phi 40$) , R4 ($D_p = \phi 30$) の順にねじれモーメントが大きくなる（図 4.20）。鉛プラグ径が大きくなると鉛プラグの抵抗が増加し、その大半は図 4.16 に示した減衰力に寄与することになる。減衰力が増大すると、復元力ベクトルと原点の偏心距離および復元力ベクトルの大きさが増大するために、ねじれモーメントも増大することになる。また、限界加力試験において R1 試験体と R5 試験体の大小関係が逆となるのは、限界加力試験開始時の R5 試験体の残存応力が小さいためである。

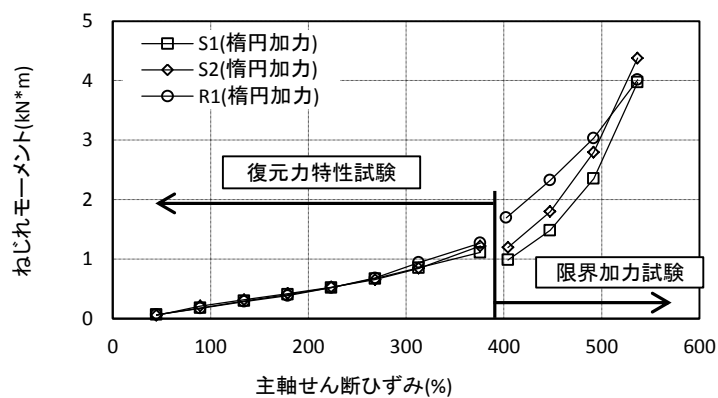


図 4.17 基準試験体のねじれモーメントの比較（2:1 楕円加力）

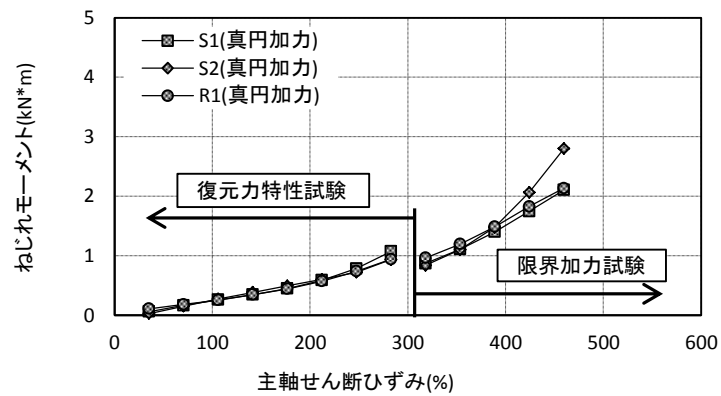


図 4.18 基準試験体のねじれモーメントの比較(真円加力)

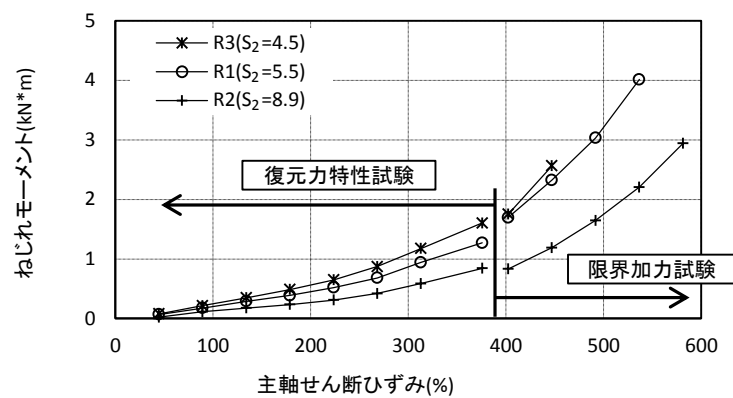


図 4.19 二次形状係数の違いによる
ねじれモーメントの比較 (2:1 楕円加力)

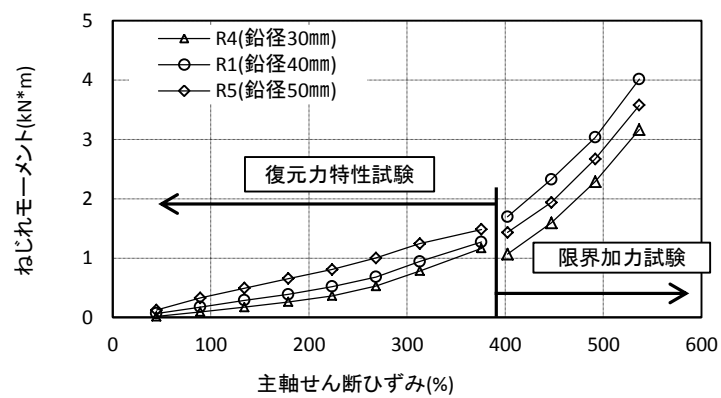


図 4.20 鉛プラグ径の違いによる
ねじれモーメントの比較 (2:1 楕円加力)

4.3.2 ねじれ変形

真円加力のひずみレベル 600%における S1 試験体および、楕円加力ひずみレベル 550%における R1 のねじれ変形の発生状況をそれぞれ写真 4.4、写真 4.5 に示す。試験では試験体側面の被覆ゴムの一部を除去して、内部鋼板の動きを直接観察した。写真より LRB は水平二方向加力時にねじれ変形が生じることがわかる。試験体の上下端部は試験機に固定されているため、ねじれ変形の分布は上下端部でゼロ、中間部で最大となるパラボラ状の形状となる。

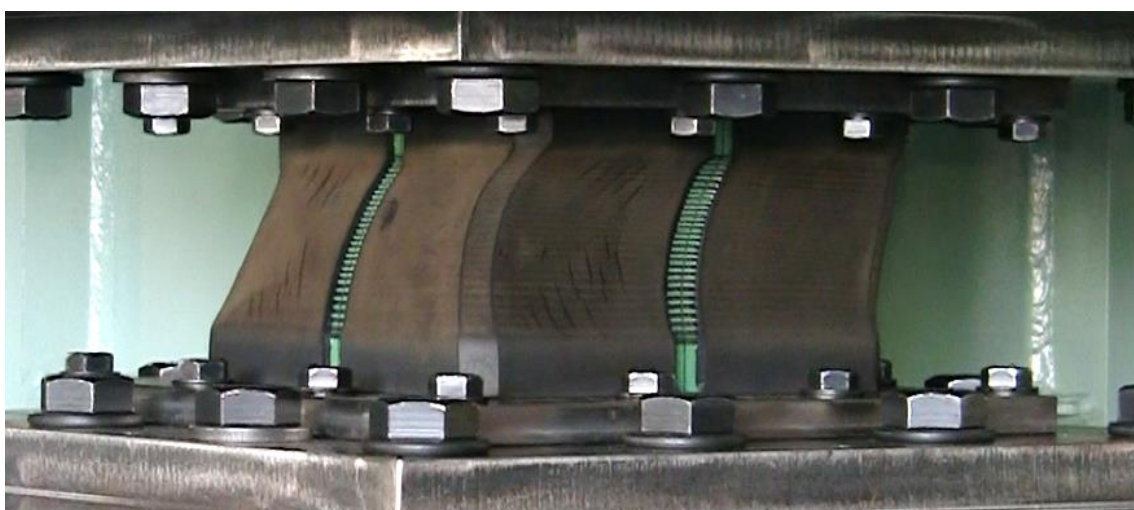


写真 4.4 S1 試験体のねじれ変形（真円加力 ひずみレベル 600%）

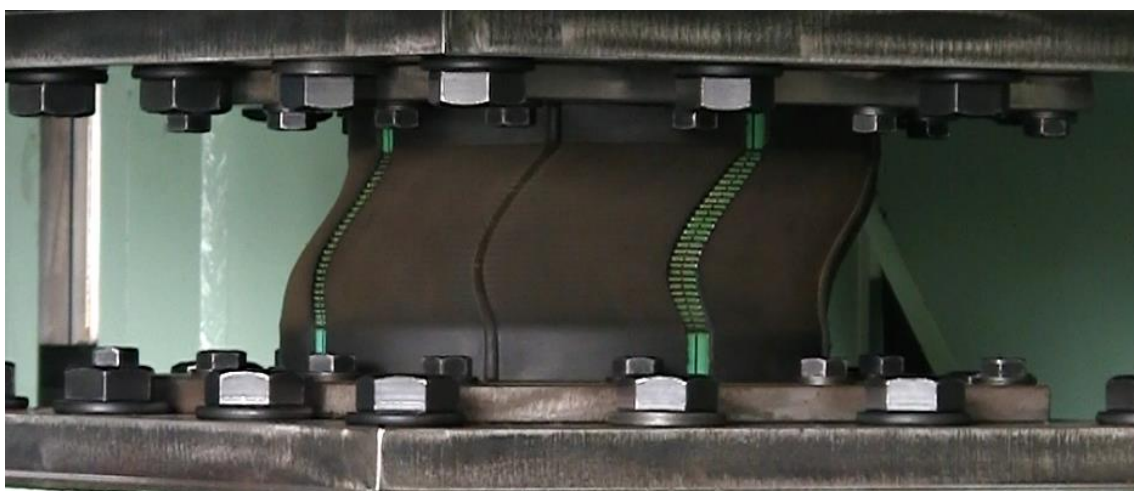


写真 4.5 R1 試験体のねじれ変形（楕円加力 ひずみレベル 550%）

二方向加力における各試験体のねじれ変形を調べるため、撮影したビデオの画像解析を行った。画像解析は写真 4.6 に示すように、試験体高さ方向に配置した追跡マーカーの水平方向の変位量を算出して行った。なお、ねじれ変形の読取は図 4.21 に示す加力オービット 3 サイクル目の②の位置について行った。

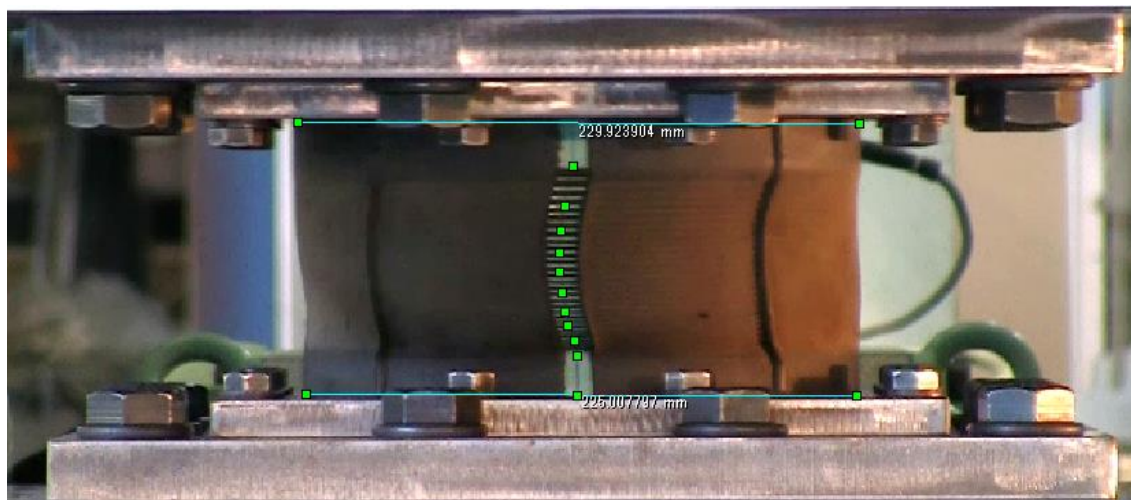


写真 4.6 ねじれ変形の画像解析（R5 試験体 楕円加力 ひずみレベル 500%）

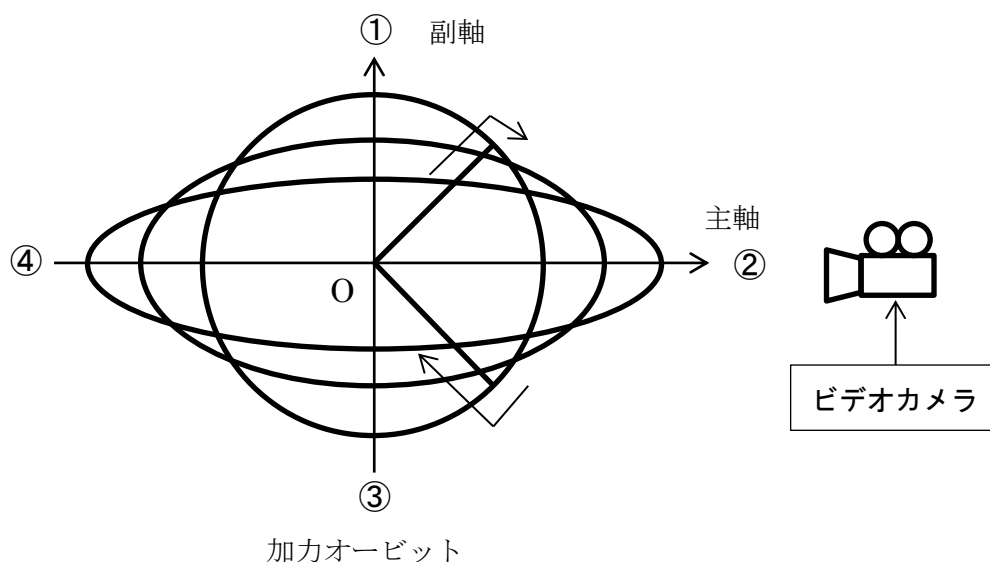
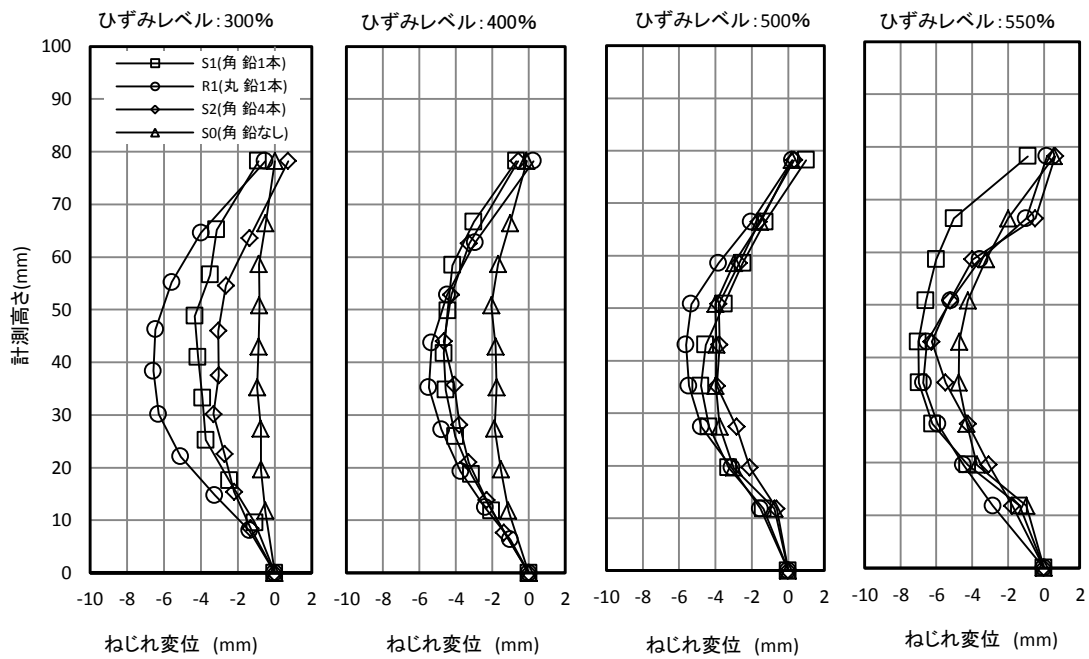


図 4.21 ねじれ変形読取位置

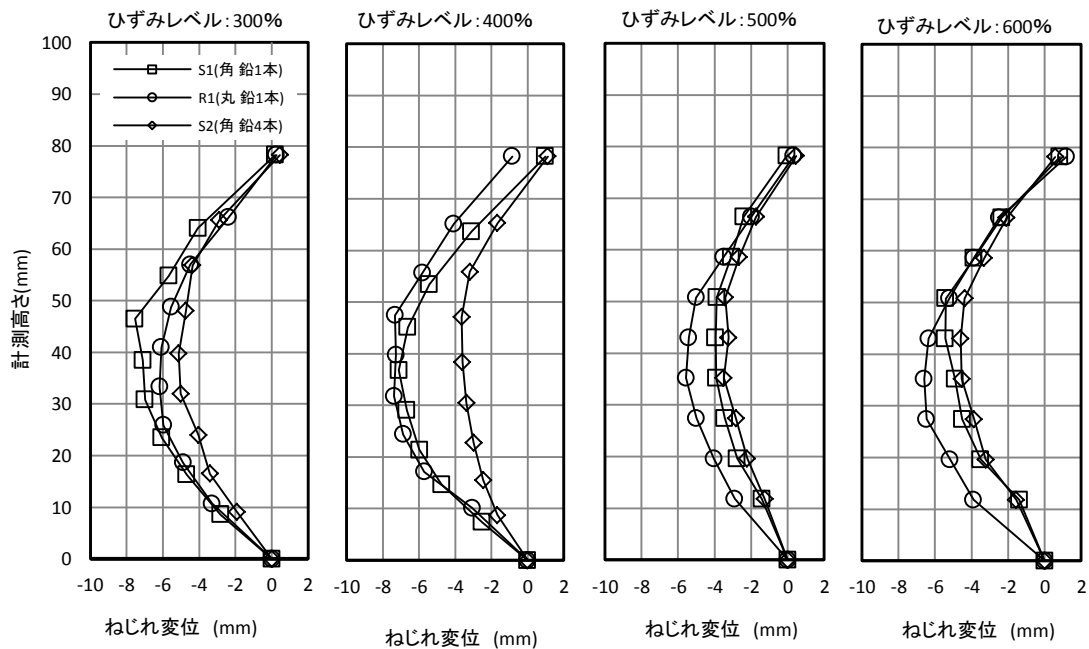
図 4.22 に基準試験体におけるねじれ変形をひずみレベル 300%, 400%, 500%, 550% (真円加力は 600%) を代表させて示す。同図(a)の S1,S2,R1 試験体の断面形状の違いについて比較すると、鉛プラグを 4 本有する S2 試験体のねじれ変形がひずみレベル 300%において小さく、丸断面の R1 試験体のねじれ変形が大きい。しかし、ひずみレベル 400%においては断面形状の違いはほとんどなく、ひずみレベル 550%においては S1 試験体のねじれ変形がもっとも大きい。ひずみレベル 300%加力において S2 試験体のねじれ変形が小さいのは、鉛プラグが断面図心から分散して配置されることにより、試験体の断面極二次モーメントを大きくするためと考えられる。ただし、鉛プラグの降伏力は一定であるため、ひずみレベルが大きくなると、復元力の釣合いは積層ゴムのゴム部による弾性力が支配的となり、ひずみレベル 300%以上の加力において、ねじれ変形が鉛プラグの配置本数によらず一定となっていると考えられる。また、鉛プラグのない S0 試験体のねじれ変形は、ひずみレベル 300%, 400%において極端に小さく、ひずみレベル 550%で LRB に近づく。

図 4.23 に示す二次形状係数 S_2 の違いによるねじれ変形は、 S_2 の小さい R3 試験体 ($S_2=4.5$)、R1 試験体 ($S_2=5.5$)、R2 試験体 ($S_2=8.9$) の順に大きい。これは、同一断面の試験体においてせん断ひずみが等しい場合、水平力は同等であるが、 S_2 が小さいとゴム層総厚が厚くなり、積層ゴム体のねじれ剛性が低下するためである。

鉛プラグ径 D_p による比較においてねじれ変形は鉛プラグ径が最も大きい R5 ($D_p=50\text{mm}$) が大きく、R1, R5 はほぼ同様である (図 4.24)。これは、 D_p が太いため、図 4.10 に示した変形進行方向逆向きに生じる減衰力が大きくなり、試験体に生じるねじれモーメントが増加したためと考えられる。



(a) 2:1 楕円加力



(b) 真円加力

図 4.22 基準試験体のねじれ変形

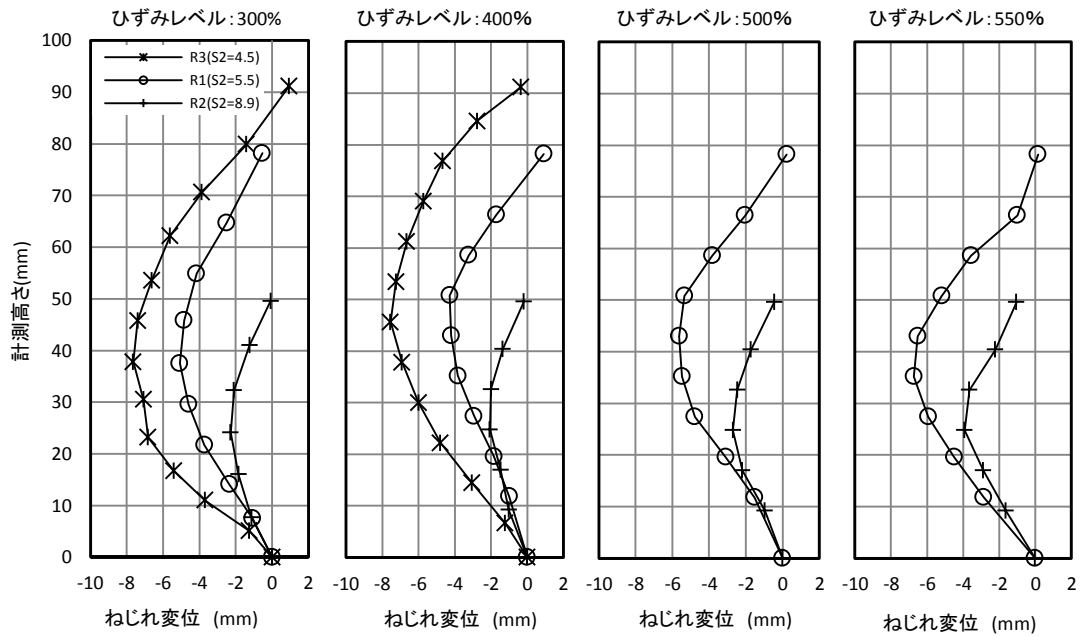


図 4.23 二次形状係数の違いによるねじれ変形の比較 (2:1 楕円加力)

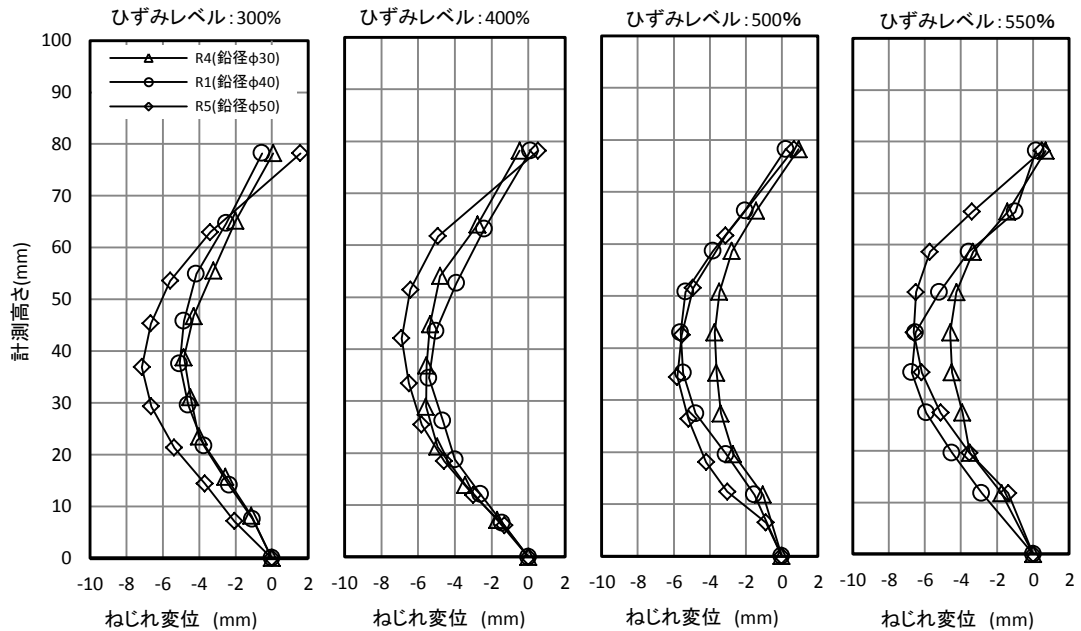


図 4.24 鉛プラグ径の違いによるねじれ変形の比較 (2:1 楕円加力)

4.3.3 局部せん断ひずみ

前項で読取った LRB のねじれ変形により生じる局部せん断ひずみ γ_ϕ を算出し、試験体形状による比較を行う。 γ_ϕ は、読取ったねじれ変形を図 4.15 に示すように高さ方向の二次曲線 $f(h)$ に回帰して算出する。

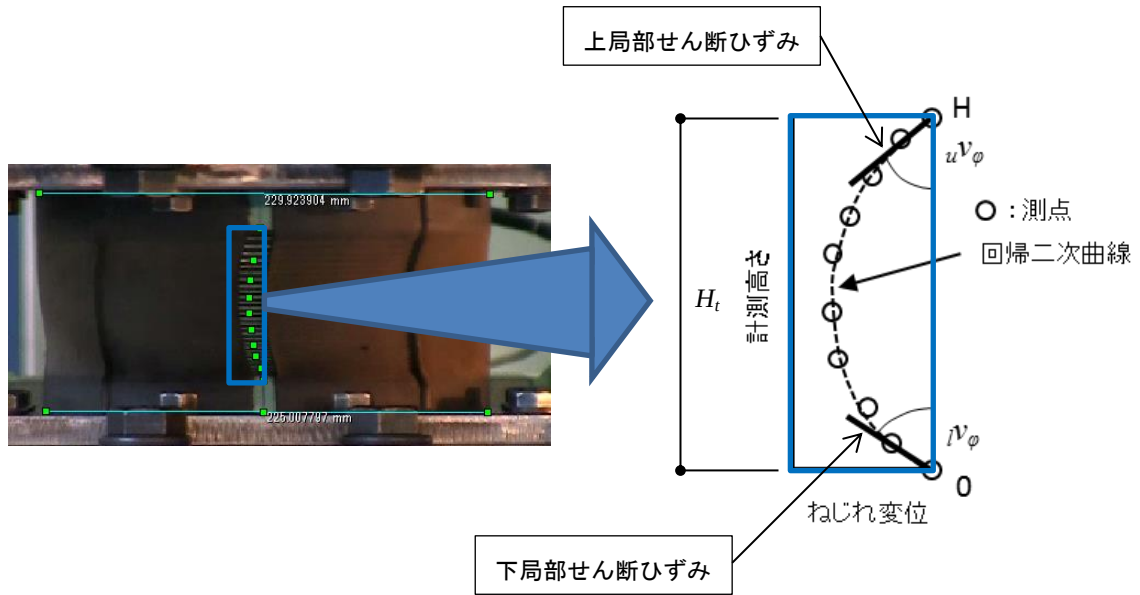


図 4.25 ねじれに変形による局部せん断ひずみの算出

$$f(h) = ah^2 + bh + c \quad (4.1)$$

ここに、 a, b, c は回帰定数。

次に $f(h)$ を一回微分してねじれ変形による上下端の局部せん断ひずみによるねじれ変形率 ${}_u v_\phi$, ${}_l v_\phi$ を算出し、その平均値 v_ϕ を求める。

$${}_u v_\phi = f'(H) = 2aH_t \quad (4.2)$$

$${}_l v_\phi = f'(0) = b \quad (4.3)$$

$$v_\phi = \frac{{}_u v_\phi + {}_l v_\phi}{2} \quad (4.4)$$

ここに、 H_t は試験体のゴム層と内部鋼板の積層総高さである。また、LRB の内部鋼板はねじれ変形しないので、以下に示す補正係数 λ に v_ϕ を乗じてゴム層のねじれ変形による最大せん断ひずみ γ_ϕ を求める。

$$\lambda = \frac{(n-1)t_s + nt_r}{(n-1)t_s} \quad (4.5)$$

$$\gamma_\phi = \lambda \cdot v_\phi \quad (4.6)$$

ここに、 n はゴム層数、 t_r はゴム層厚、 t_s は内部鋼板板厚を示す。

以上により算出した γ_ϕ と主軸のせん断ひずみの関係について述べる。図 4.26 に示す楕円加力の γ_ϕ は、角形断面の S1 試験体と S2 試験体で違いはなく、主軸せん断ひずみ 200%~400% の範囲において、約 40% で推移する。また、この範囲において丸型断面の R1 試験体の γ_ϕ は S1、S2 試験体より大きく約 60% である。しかし、主軸せん断ひずみが最大となる 450% 付近の γ_ϕ は R1 (約 60%)、S1 (約 55%)、S2 (約 40%) の順に大きく、500% ではほぼ同じ約 70% となる。鉛プラグのない S0 試験体の γ_ϕ は、主軸せん断ひずみ 400% 以下において 20% 以下に分布し極端に小さい。しかし、それ以上のせん断ひずみにおいて S0 試験体の γ_ϕ は LRB に漸近し、その最大値は主軸せん断ひずみ 500% における約 50% である。図 4.27 に示す真円加力の γ_ϕ と主軸のせん断ひずみの関係は、主軸せん断ひずみ 200% 付近までは各試験体とも線形的に増加するが、200% を超えると S2 試験体の γ_ϕ が減少する。また、S1 試験体、R1 試験体の γ_ϕ は主軸せん断ひずみ 300% 以上で低下する。これら基準試験体の γ_ϕ は、主軸せん断ひずみが 350% を超えると再び増加し、最大ひずみの 450% 付近で、楕円加力同様 R1 試験体 (約 75%)、S1 試験体 (約 60%)、S2 試験体 (約 50%) の順になる。総じて、水平二方向加力時の γ_ϕ は、丸型断面より角型断面の方が小さく、また鉛プラグ 1 本配置より 4 本配置の方が小さいと言える。二次形状係数 S_2 の比較において、R3 試験体 ($S_2=4.5$) と R1 試験体 ($S_2=5.5$) の γ_ϕ はともに主軸せん断ひずみ 300% までの推移は等しい。しかし、 S_2 の大きい R2 試験体 ($S_2=8.9$) の γ_ϕ は小さい (図 4.28)。これは、 S_2 の大きい R2 試験体は積層ゴムのねじれ剛性が高くなるためと考えられる。鉛プラグ径 D_p の比較において、主軸せん断ひずみ 250% を頂点に γ_ϕ は D_p の太さに応じて大きい (図 4.29)。これは D_p が大きくなるに従い、水平二方向加力におけるねじれモーメントが大きくなるため、 γ_ϕ も大きくなると考えられる。しかし、それ以上のせん断ひずみにおいて、 γ_ϕ は減少し、主軸せん断ひずみ 400% では、R5 試験体と R1 試験体の γ_ϕ はともに約 60% となる。その後 γ_ϕ は再び上昇し主軸せん断ひずみ 500% 時の γ_ϕ は R1, R5 試験体が約 70%、R4 試験体が約 50% を示す。

以上、LRB のねじれ変形による局部せん断ひずみ γ_ϕ は試験体形状にかかわらず、主軸せん断ひずみ 300% 付近まで増加するが、そこから 400% にかけて減少した後、再び増加する。

HDR の γ_ϕ は文献[3]によれば増加傾向のみ示すが、LRB の γ_ϕ とせん断ひずみの関係は増減と伴う結果となった。これは、LRB の鉛プラグの減衰力は接線方向に一定力を保って作用するが、積層ゴムの部復元力による弾性力は原点方向に線形的に増加するため、この二つの力の釣り合い関係がせん断ひずみの増加に伴い変化するためと考えられる。HDR は最大せん断ひずみに γ_ϕ を加えたひずみと一方向加力における最大ひずみが概ね一致するとされている。しかし、本研究における γ_ϕ は、試験体形状による違いがあるにも関わらず、限界ひずみは試験体形状による違いは生じない。つまり LRB は HDR のように γ_ϕ と破断ひずみの合算による、限界ひずみの評価は困難であると言える。そのため次節では LRB の限界ひずみ領域における復元力状態を調査し、LRB の限界特性の考察をする。

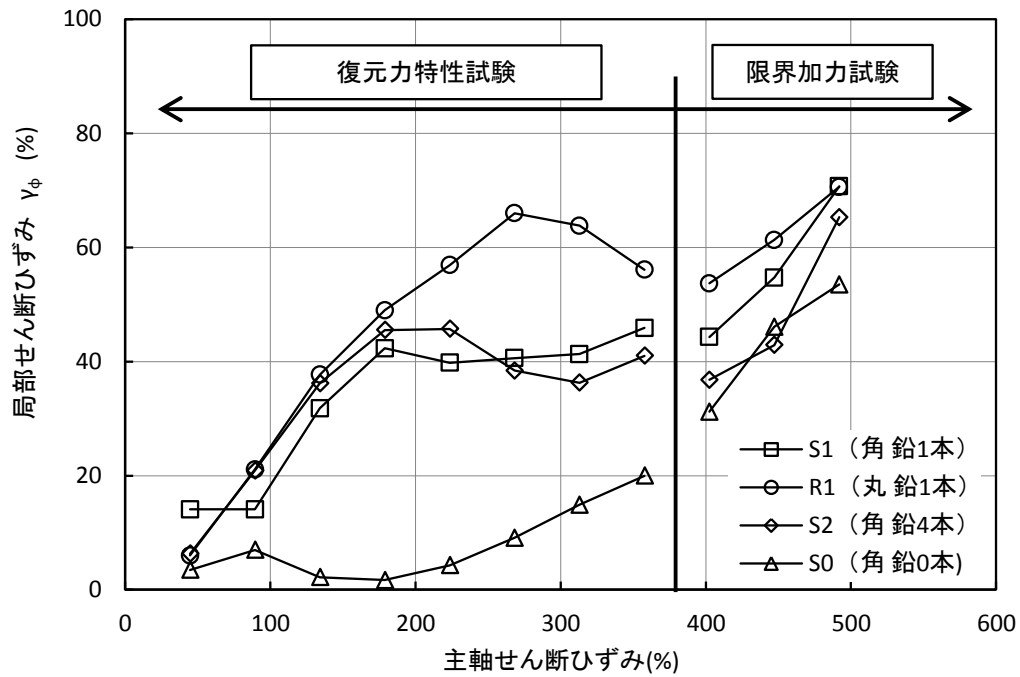


図 4.26 基準試験体の最大ねじれせん断ひずみ (2:1 楕円加力)

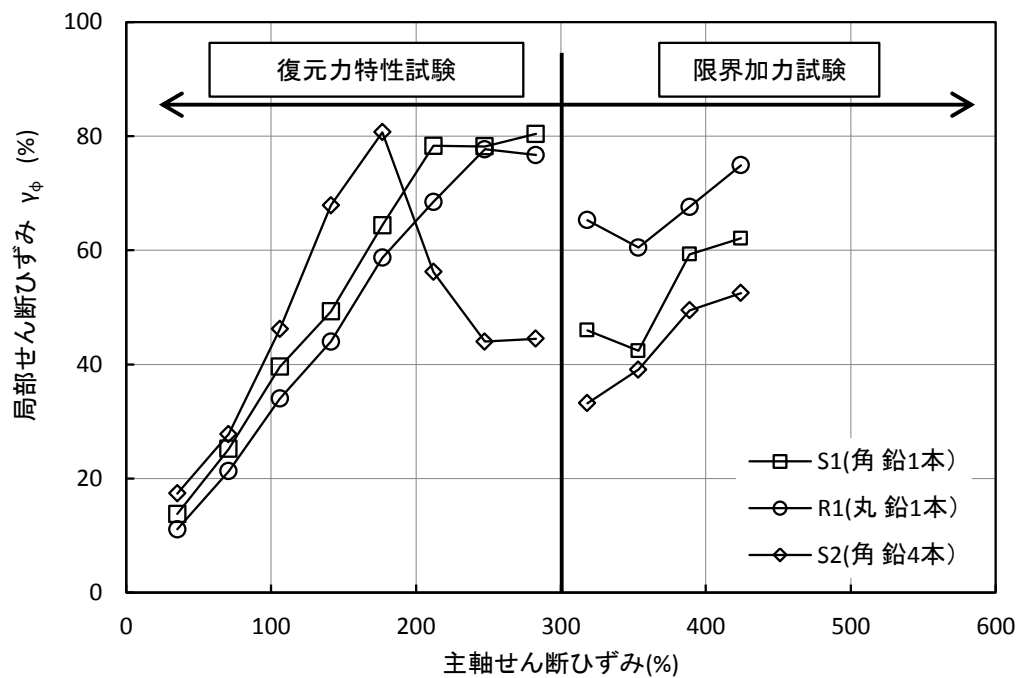


図 4.27 基準試験体の最大ねじれせん断ひずみ (真円加力)

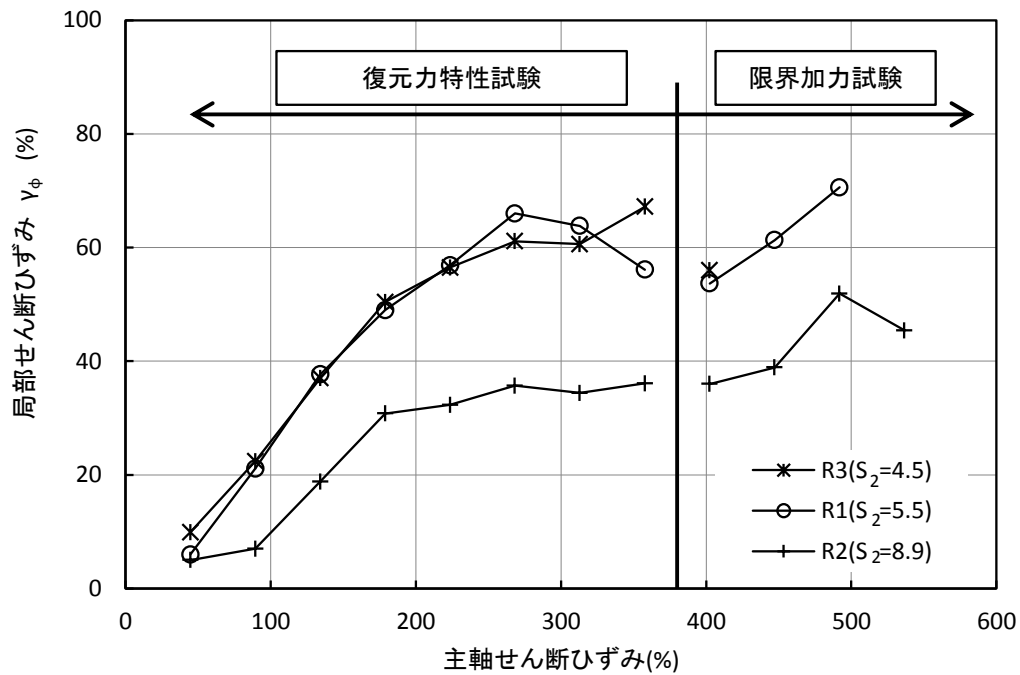


図 4.28 二次形状の違いによる最大ねじれせん断ひずみの比較 (2:1 楕円加力)

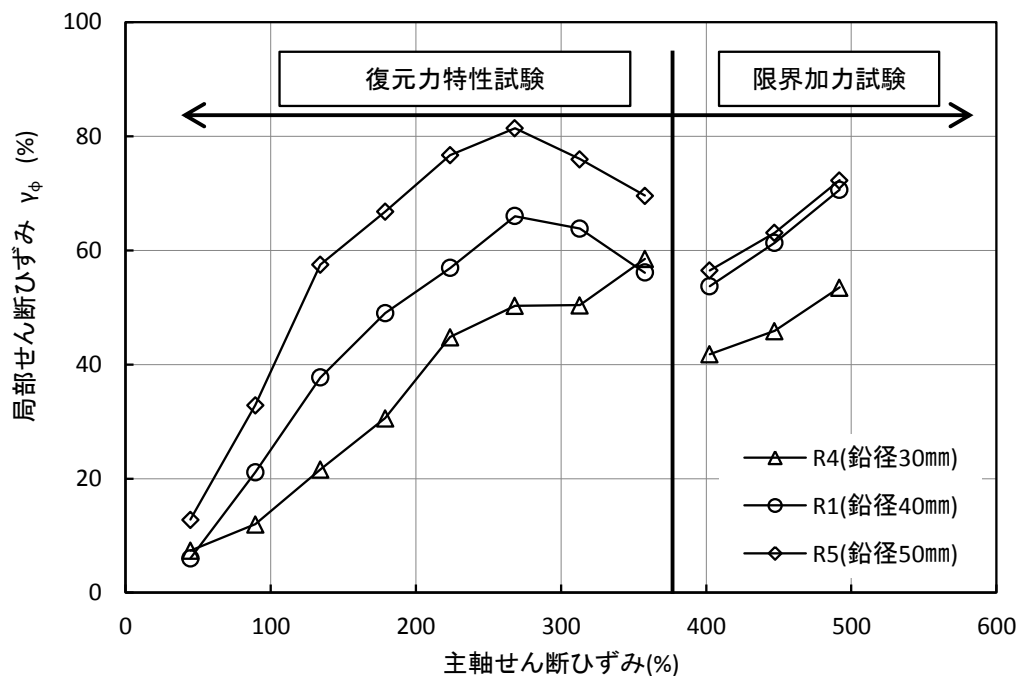
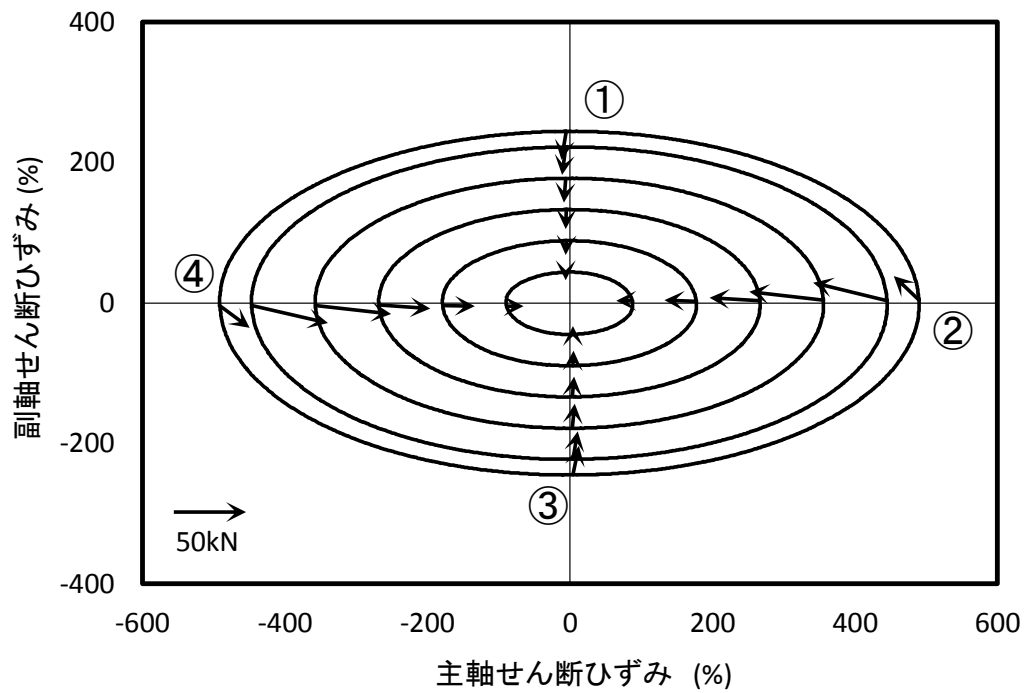


図 4.29 鉛プラグ径の違いによる最大ねじれせん断ひずみの比較 (2:1 楕円加力)

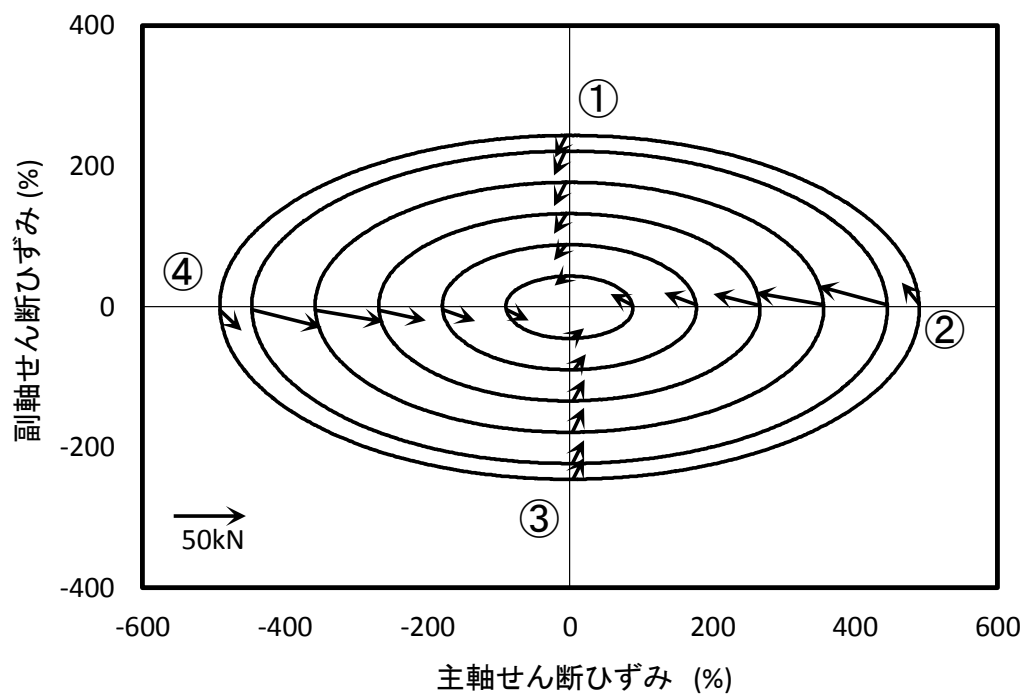
4.4 水平二方向限界特性に関する考察

LRB の二方向加力における限界ひずみは、角型、丸型の断面形状や鉛プラグの配置本数および、鉛プラグ径に依存しないものであった。また、鉛プラグの有無による違いも見られなかった。LRB は鉛プラグにより減衰性能が付加されるため、水平二方向加力ではねじれ変形に起因する限界特性の低下が懸念されたが、それによる影響はないことが、本研究で明らかになった。本節では LRB の限界特性が水平二方向加力を行っても限界ひずみの変化が少なく、天然ゴム支承と同じである原因について考察する。

LRB の水平二方向加力時における限界状態を調べるため、図 4.30 に角形断面の鉛プラグのない S0 試験体と一本鉛プラグの S1 試験体の復元力ベクトルを比較した。同図は 2:1 楕円加力の 3 サイクル目におけるオービットであり、図の錯綜を防ぐため、ひずみレベル 100%, 200%, 300%, 400%, 500%, 550% について、鉛プラグのない S0 試験体を (a) に、鉛プラグのある S1 試験体を (b) に示した。オービット①, ③の位置での復元力ベクトルを比較すると、S1 試験体の復元力ベクトルは原点に向かっていない。これは鉛プラグによる減衰力がオービット接線方向に作用したためである。②, ④の位置における S0 試験体の復元力ベクトルはひずみレベル 300% 以下において原点に向かっていないが、それ以上のひずみレベルにおいて原点方向を向かない。また、S1 試験体の復元力ベクトルはひずみレベル 100% から原点を向かない。また、ひずみレベル 400% 以上の復元力ベクトルは S0 試験体との違いは無い。このことについて、以降で復元力ベクトルを減衰力と弾性力に分解して考察する。



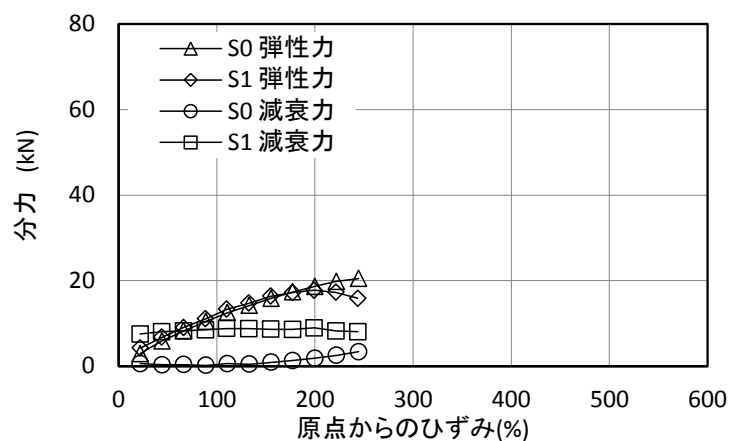
(a) S0 試験体



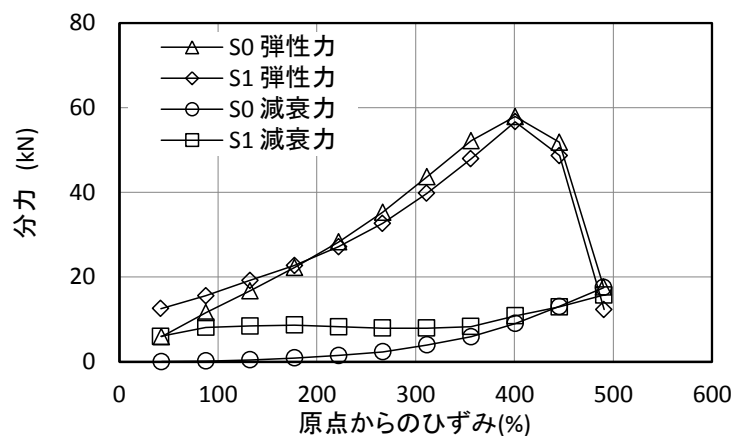
(b) S1 試験体

図 4.30 鉛プラグの有無による復元力ベクトルの比較 (2:1 楕円加力)

S0 試験体と S1 試験体の復元力ベクトルについて原点方向の力を弾性力、接線方向の力を減衰力として分解し、原点からのひずみとの関係を図 4.31 に整理した。同図(a)、(b)はそれぞれ図 4.30 で示したオービット上の①、②の位置での値である。弾性力はオービット①、②の位置ともに S0 試験体と S1 試験体ではほぼ等しい。従って水平二方向加力における弾性力は積層ゴムのゴム部の復元力であると理解できる。なお、②の原点からのひずみが 400% を超えると弾性力が低下するのは、履歴曲線が負勾配となったためである。S1 試験体の減衰力は原点からのせん断ひずみが 400%未満の領域において約 10kN を保って推移する。この値は LRB の設計降伏荷重(10.5kN)と同等であるので、二方向加力における LRB の減衰力は加力オービットの接線方向にほぼ一定値を保って発生すると言える。S0 試験体の減衰力は、原点からのせん断ひずみが 400%以上の限界ひずみ領域になると大きくなり、S1 試験体とほぼ等しくなる。これは大変形時の変位折り返しにおいて、S0 の履歴減衰が顕在化するためである (図 4.5 参照)。



(a) オービット①の分力



(b) オービット②の分力

図 4.31 加力オービット上における復元力ベクトルの分力

次に、図 4.16 に示した復元力ベクトルの原点方向に対する角度 α を S0 試験体および、S1 試験体について図 4.32 に示す。同図(a)は図 4.30 に示したオービット①における α と原点からのひずみの関係であり、(b)は②の位置におけるものである。①における α は鉛プラグがない S0 が小さく、原点からのひずみの増加に伴い角度が増える。また、S1 はその逆の傾向を示す。②の S0 の α は、ひずみの増加に伴い増加し、S1 は①の位置と同様にその逆の傾向を示す。さらに、原点からのひずみが 400%以上になると、両試験体の値はほぼ等しくなる。原点からのせん断ひずみが 500%で急に角度が増すのは、履歴曲線が負勾配となるため原点に向かう弾性力が低下することに加え、減衰力が増加するためである。

以上の分析の結果、LRB はねじれ変形に大きな影響をおよぼす復元力ベクトルの方向がせん断変形の増加にともない原点方向に収束し、限界ひずみ領域においては鉛プラグを有さない天然ゴム系積層ゴム支承 RB とほぼ等しくなることが分かった。

LRB は二方向加力をおこなっても限界ひずみが大きく低下しない原因を以下に述べる。LRB は水平二方向加力時に履歴ループ面積が増大しないため、ゴム層のせん断応力も過度に増加しない。そのため、せん断ひずみが増加しても、復元力ベクトルの方向が原点方向に収束するため、限界ひずみ低下の要因とされるねじれモーメントが増大せず、ねじれ変形も少ないことが原因である。また、水平二方向加力における LRB の破断ひずみが RB と同様である結果は、二次形状係数 S_2 が異なる試験体($S_2=8.33$)について文献[1]で示されている。しかし、座屈や履歴曲線の履歴曲線の負勾配特性が卓越し、比較的小さいひずみ領域で限界状態が定義される加力条件、あるいは積層ゴム形状の場合、復元力ベクトルの方向が RB と同様とならないことが予想される。この場合、限界ひずみが RB と同様に扱えない可能性がある。

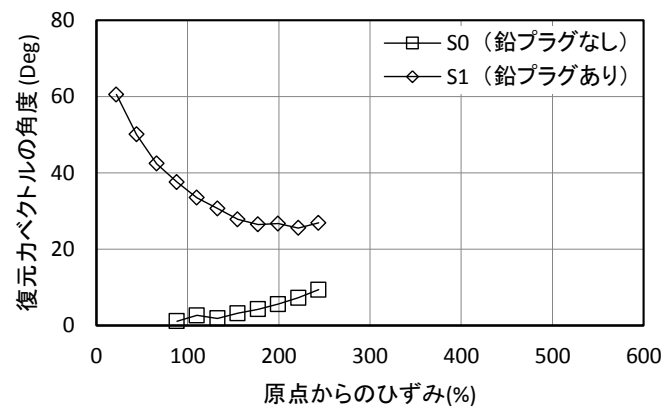
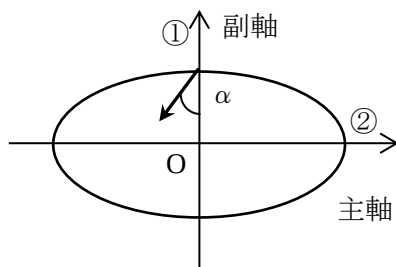
次に、試験体パラメータによる復元力ベクトルの原点方向に対する角度を整理する。なお、S0 試験体と S1 試験体の 2:1 楕円加力以外は、ひずみレベル 450%以上の限界加力試験を復元力特性試験の後に時間をおいて行っているため、この間のプロットは不連続となっている。図 4.33 に示す基準試験体の復元力ベクトルの角度は、同図(b)の②に位置において試験体形状による違いはないが、原点からのせん断ひずみ 500%において R1 試験体の角度が小さい。これは、丸型断面の R1 試験体の二次形状係数 S_2 が 5.5 と角型断面の S1、S2 試験体の $S_2=5$ より大きく、座屈傾向が小さいためである。また、主軸せん断ひずみ 100%以下において、鉛プラグが 4 本分配置された S2 試験体の角度は①、②の位置ともに小さい。この傾向は図 4.34 に示す真円加力においても同様である。

図 4.35 の S_2 の違いによる復元力ベクトルの角度は、同図(b)の原点からのひずみ 400%以上において、 S_2 の小さい R3、R1、R2 試験体の順に角度が増すが、それ以下のひずみ領域においては S_2 による違いは少ない。これは、400%以下のひずみ領域の履歴曲線は安定であるため、各試験体のせん断応力が等しく、復元力ベクトルの方向に違いが生じないことによる。(a)の①の位置では、復元力ベクトルの角度の増加が原点からのひずみ 200%以上で生じる。これは、①の位置で 400%以上のひずみを経験したため、座屈による影響を受けた

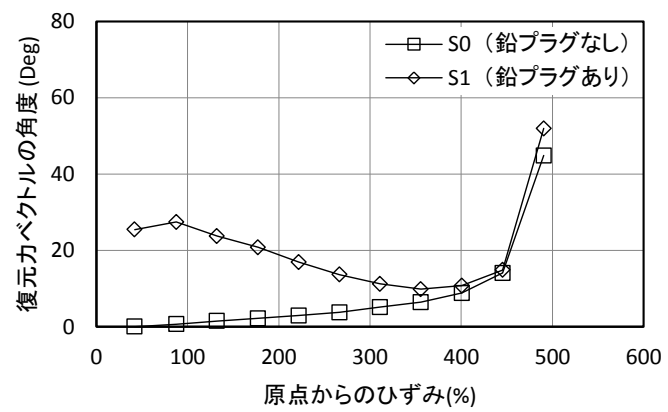
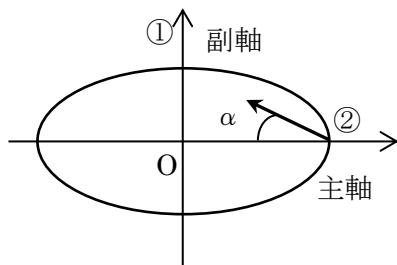
と考えられる。

鉛プラグ径 D_p の違いによる復元力ベクトルの角度は図 4.36(b)の②の位置において、原点からのひずみ 300%以下の範囲で鉛プラグ径の大きさに応じて大きくなる。しかし、原点からのひずみ 350%以上ではほぼ等しくなる。これは、次の要因による。せん断ひずみ 350%以下の力の釣合いはゴムの弾性力に対し、相対的に鉛プラグの減衰力が大きいため、復元力ベクトルの角度が原点を向かない。しかし、鉛の減衰力はせん断ひずみにかかわらず一定であるため、350%以上のせん断ひずみ領域は、ゴムの弾性力が支配的となり、復元力の方向が原点に向かうため、 D_p の違いによる差がなくなる。

以上により、LRB の水平二方向加力における限界状態の復元力ベクトルは、 S_2 が同等であれば（本研究では $S_2=5$ ，又は 5.5）、限界ひずみ領域における復元力ベクトルの原点方向に対する角度は、断面形状によらず同じ角度に収束する（本研究では約 20° ）。そのため、LRB は断面形状が異なっても限界ひずみが等しくなる。

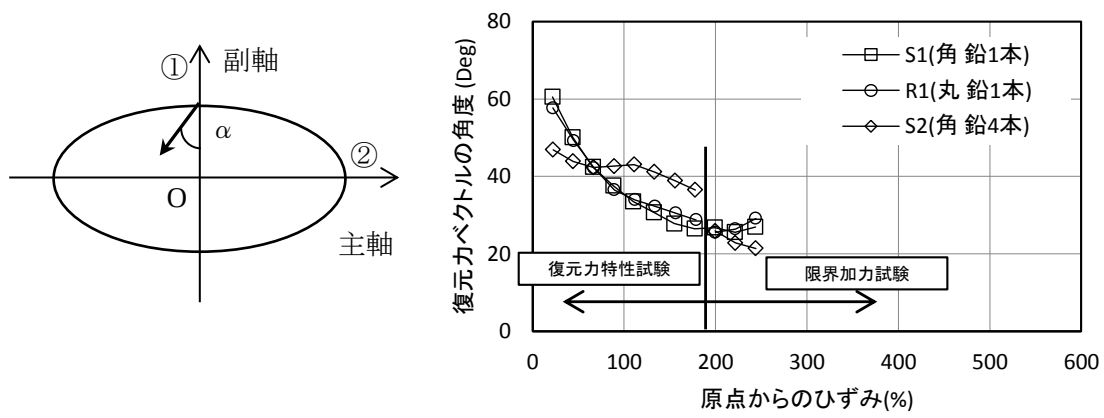


(a) オービット①の角度

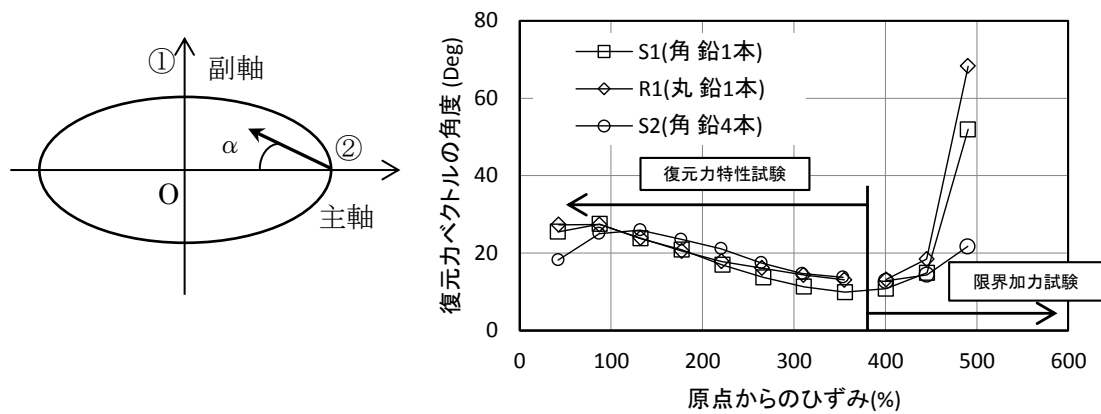


(b) オービット②の角度

図 4.32 鉛プラグの有無における原点方向に対する
復元力ベクトルの角度(2:1 楕円加力)

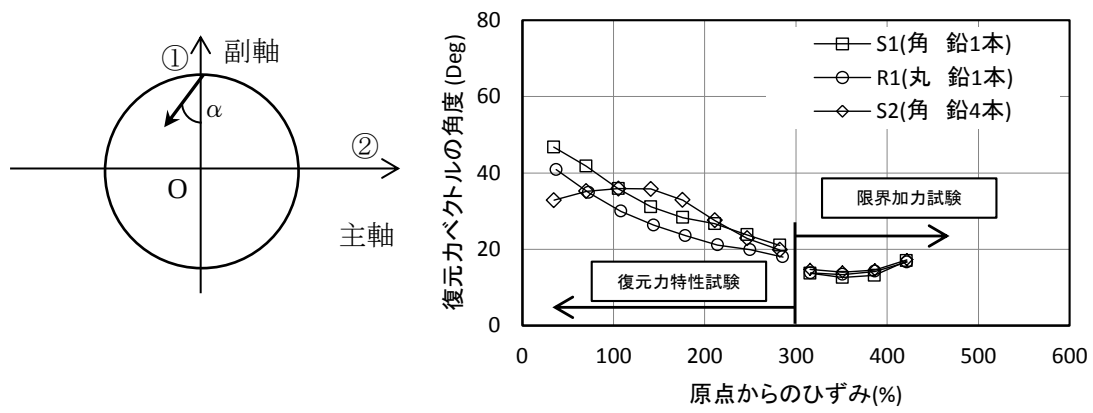


(a) オービット①の角度

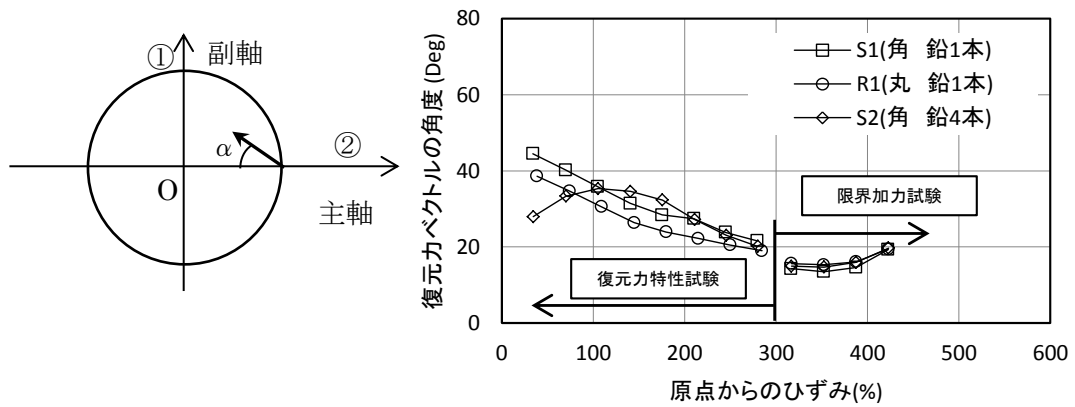


(b) オービット②の角度

図 4.33 基準試験体における原点方向に対する
復元力ベクトルの角度 (2:1 楕円加力)

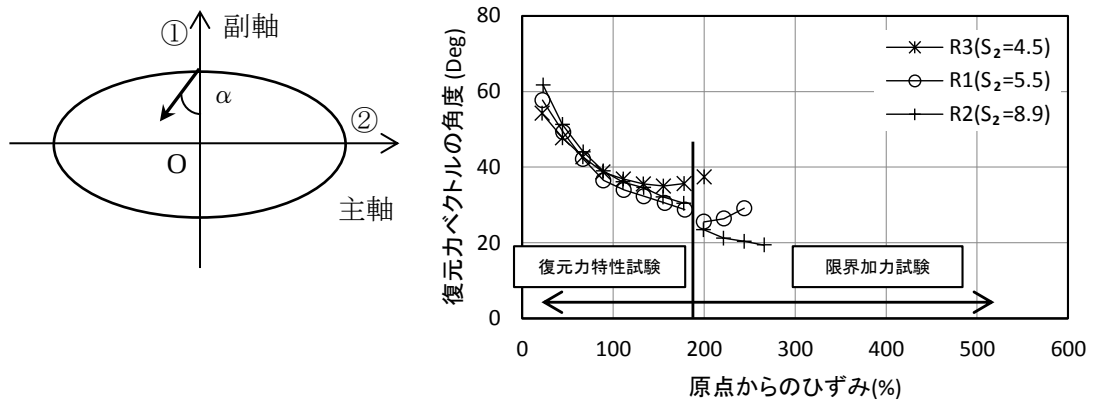


(a) オービット①の角度

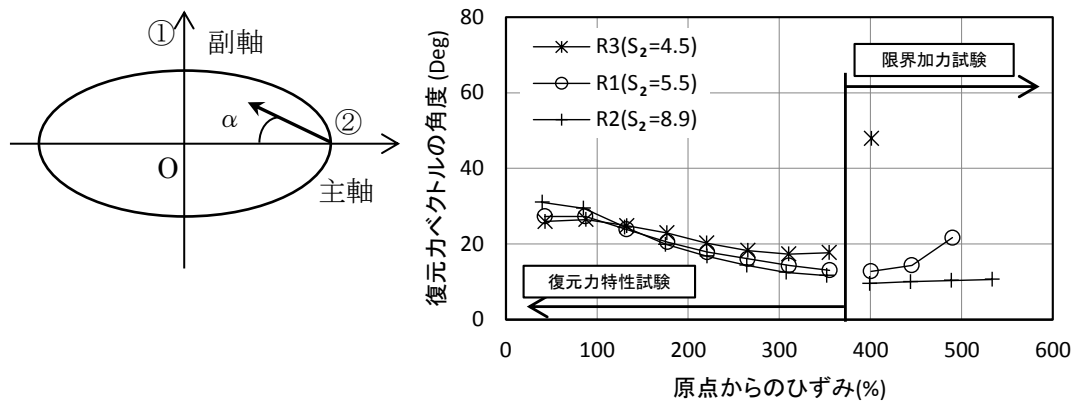


(b) オービット②の角度

図 4.34 基準試験体における原点方向に対する
復元力ベクトルの角度 (真円加力)

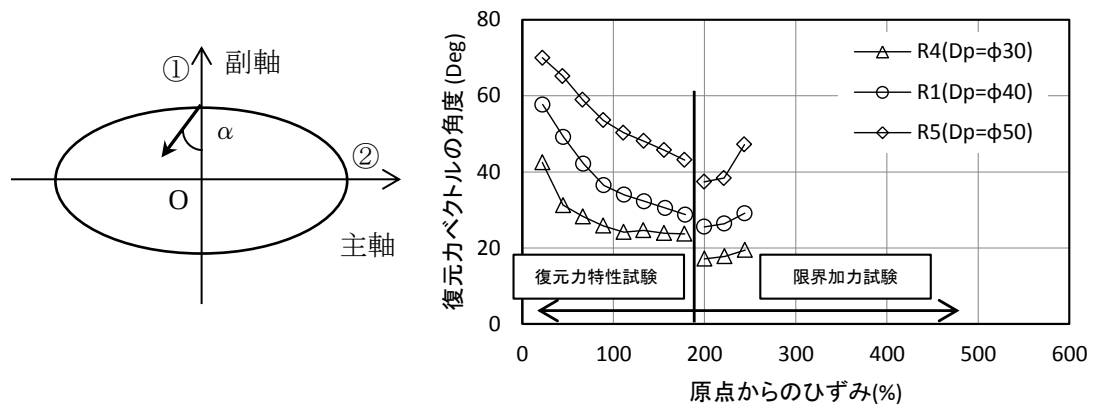


(a) オービット①の角度

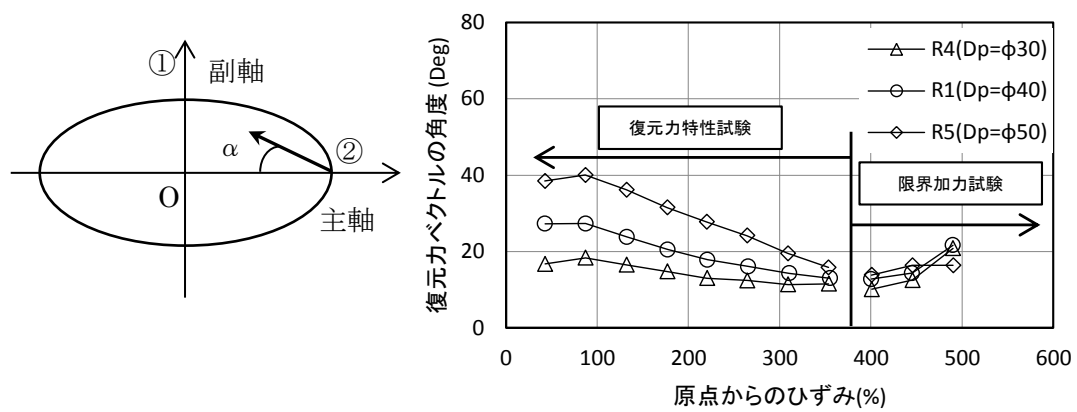


(b) オービット②の角度

図 4.35 二次形状係数の違いによる原点方向に対する
復元力ベクトルの角度の比較 (2:1 楕円加力)



(a) オービット①の角度



(b) オービット②の角度

図 4.36 鉛プラグ径の違いによる原点方向に対する
復元力ベクトルの角度の比較 (2:1 楕円加力)

4.5 まとめ

第4章ではLRBの水平二方向加力における限界特性について検討した。

4.2節では各試験体が破断するまで位相差入力による水平二方向限界加力試験を行い、ひずみレベル400%を超える限界ひずみ領域の履歴特性を明らかにした。その結果、積層ゴムの二次形状係数 S_2 が等しい場合、LRBの限界ひずみは鉛プラグのない天然ゴム系積層ゴム支承RBと等しかった。二次形状係数 S_2 の違いによる履歴曲線は、負勾配の発生に明確な違いが現れた。鉛プラグ径 D_p の違いによる比較では、 D_p が最も小さい試験体のみ負勾配を示し、他の試験体は負勾配を示さなかった。

試験体形状による限界ひずみを比較すると、限界ひずみは、角型、丸型の断面形状に無関係であった。また、鉛プラグ径による限界ひずみの違いも生じなかった。LRBの水平二方向加力における限界ひずみの変化は S_2 の違いによってのみ生じ、限界ひずみは S_2 の大きい順に大きくなった。一方向加力に対する、楕円加力、真円加力の限界ひずみは位相差入力によるひずみレベルおよび、加力波形による最大せん断ひずみともに対応せず、限界ひずみを加力波形によらず一義的に定めることは困難であった。また、位相差入力によるLRBの累積吸収エネルギーを調べた結果、設計範囲のせん断ひずみ250%までは、位相差入力を与えるエネルギーは加力方向によらず同等であり、波形設定のコンセプトを満たしていること確認できた。しかし、せん断ひずみ250%を超えるひずみ領域では、LRBのハードニングによる経験ひずみ依存性の影響により、累積吸収エネルギーと累積変位関係の傾きが一方向、4:1楕円、2:1楕円、真円加力の順に小さい結果となった。

LRBのねじれ変形を画像解析により計測し、二方向加力によって生じるねじれ最大せん断ひずみ γ_ϕ と主軸せん断ひずみの関係を調べた。 γ_ϕ は主軸せん断ひずみ300%以下において、試験体形状パラメータによる違いが現れるが、400%以上の限界ひずみ領域においてその差が小さくなる傾向を示した。

4.3節ではLRBとRBの限界ひずみ領域における復元力ベクトルを分析し、LRBの二方向限界特性の考察をした。分析の結果、LRBの復元力ベクトルは終局状態において、RBと同様であることが判明した。この結果より、LRBの限界ひずみが水平二方向加力において大きく変化しない要因について検討した。LRBは水平二方向加力時においても履歴ループ面積が増大しないため、せん断応力も過度に増加しない。したがって、せん断ひずみが増加しても復元力ベクトルの方向は原点方向に収束するため、限界ひずみ低下の要因とされるねじれモーメントは増大せず、ねじれ変形も少ないことが原因であると結論づけた。

試験体パラメータによる、復元力ベクトルの分析の結果、角型、丸型の断面形状および鉛プラグ配置本数が異なる基準試験体による復元力ベクトルの角度に違いは見られなかった。 S_2 の違いによる復元力ベクトルの角度は、原点からのせん断ひずみが300%以下の範囲では違いはなく、それ以上のひずみ領域において試験体の S_2 の大きさに応じて角度が増した。 D_p の違いによる復元力ベクトルの角度は、原点からのせん断ひずみ300%以下の範囲に

において、鉛プラグ径の大きさに応じて大きい角度を示すが、それ以上のひずみにおいてほぼ等しくなった。

以上の検討結果から、**LRB** の水平二方向加力による限界ひずみが、断面形状が異なっても等しくなる原因は、復元力ベクトルの方向が断面形状にかかわらず、同じ角度に収束するためであると判明した。

第4章の参考文献

- [1] 嶺脇重雄, 山本雅史, 東野雅彦, 加藤秀章, 鈴木重信, 和田章: 積層ゴム支承の水平二軸変形特性, JSSI MENSIN No.63 34-37, 2009年2月
- [2] 加藤秀章, 森隆浩, 室田伸夫, 鈴木重信, 嶺脇重雄, 山本雅史, 米田晴美, 東野雅彦: 免震用積層ゴムの水平2方向加力時の限界特性に関する研究, 日本建築学会技術報告集 第16巻 32号, 167-172, 2010年2月
- [3] 高減衰ゴム系積層ゴム支承の水平2方向加力時における限界性能に関する新たな知見について, JSSI MENSIN No.67 26-29 2010年2月
- [4] 仲村崇仁, 河内山修, 長田修一, 池永雅良, 和田章: 実大角型鉛プラグ入り積層ゴムの二方向加力実験, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp301-304, 2011,2, CD-R
- [5] 竹中康雄, 近藤明洋, 高岡栄治, 引田真規子, 北村春幸, 仲村崇仁: 積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集 第646号, 2245-2253, 2009年12月

第5章

結論

5.1 研究の総括

本論文では、鉛プラグ入り積層ゴムの水平二方向力学挙動を解明しており以下に研究の成果をまとめる。

第1章「序論」では、本研究の目的として免震構造に供される積層ゴム支承の基本原則と要求性能を示した。また、近年の研究で課題となった水平二方向加力によるHDRの履歴ループ曲線の増大や、破断限界ひずみの低下現象に関する知見をまとめた。続いて、LRBの水平二方向力加力における既往研究成果を概観し、この力学挙動解明のため必要とされる検討項目を整理して示した。

第2章「実験計画」では、LRBの水平二方向力学挙動を詳細に把握するための実験計画を策定した。初めに、LRBの水平二方向力学挙動に影響する設計因子を抽出し、試験体パラメータを設定した。試験体パラメータは、LRBのねじれ剛性に着目し、ねじれ剛性に影響を与える設計項目を検討した。この結果、試験体パラメータには角型、丸型の2種類の断面形状、ゴム層の構成、鉛プラグの断面積、角形断面のLRBについては鉛プラグの配置本数とした。これら、試験体パラメータは、部材認定取得範囲を包括するように定め、LRBが免震建物に供される範囲の水平二方向力学挙動を把握可能とした。このように試験体を設定した結果、8形状の試験体を合計15体製作した。つぎにLRBの水平二方向加力試験を行うため、三軸試験機を新たに設計し製作開発した。同試験機は鉛直軸、水平主軸、水平副軸の計三軸で構成され、これらを高精度に同時制御することで水平二方向加力試験を可能とした。また、三軸試験機には六分力計を設置して、試験体に作用する6成分の荷重を計測可能とした。最後に、加力試験に使用する水平二方向変位波形について検討を行った。変位波形は積層ゴムに入力されるエネルギー量を加力方向によらず同等となる位相差入力を採用した。加力プログラムは位相差入力の位相差を、一方向、振幅比4:1楕円、2:1楕円および真円の4パターンに変化させ、これら加力パターンのせん断ひずみを漸増させて試験体が破断するまで変形を与えることとした。

第3章「水平二方向加力時の復元力特性」では、LRBの水平二方向加力試験を行い、その復元力特性の分析および解析を行った。水平二方向加力によるLRBの履歴曲線には、HDR

で確認された履歴ループ面積の顕著な増大は生じなかった。4:1 楕円および 2:1 楕円加力の履歴曲線は主軸方向において一方向加力に対して、ハードニング傾向が弱くなった。また、副軸は特徴的な菱形を示した。真円加力は副軸、主軸とも紡錘形を示した。また、試験体断面形状による差も少なかった。二次形状係数 S_2 の違いによる履歴曲線は、 S_2 の大きさに従いハードニングが顕著であった。鉛プラグ径 D_p の違いによる水平二方向履歴曲線は D_p の大きさに応じて、履歴ループ面積が増大した。復元力特性値に関する検討において、LRB の設計式で従来用いられている評価式が水平二方向加力時の履歴曲線にも概ね適用できることが明らかとなった。しかし、降伏後剛性は二方向加力の影響により一方向、2:1 楕円、真円加力の順位に剛性が低下した。続いて、水平二方向加力の加力オービット上の復元力ベクトルを原点方向に向かう力を弾性力、接線方向に生じる力を減衰力として分析した結果、弾性力は積層ゴムのゴム部弾性力から計算される荷重に、減衰力は鉛プラグの降伏荷重に対応することが明らかになった。最後に LRB の水平二方向加力特性についてシミュレーション解析を行い、LBB の履歴曲線を良好に再現できた。

第4章「水平二方向加力時の限界特性」では、LRB がゴム破断あるいは座屈破壊するまでの限界加力試験を行い、試験体形状パラメータによる限界特性の変化を明らかにした。試験の結果、LRB の限界ひずみは鉛プラグの無い天然ゴム系積層ゴム RB と同等であり、水平二方向加力による限界ひずみの低下はあまり見られなかった。また、角型、丸型の断面形状、鉛プラグ径、および鉛プラグ配置本数等の試験体形状による限界ひずみの差も見られなかった。LRB の水平二方向加力における限界ひずみの変化は S_2 の違いによつてのみ生じ、限界ひずみは S_2 が大きくなるほど増大する結果となった。ねじれモーメントの最大値とひずみレベルの関係については、鉛プラグ配置本数および断面形状の違いによる差は 2:1 楕円加力、真円加力とも小さい結果となった。 S_2 が異なる場合、ねじれモーメントはせん断変形量の違いによる偏心距離の差により、 S_2 が小さいほどねじれモーメントが大きくなった。また、 D_p の違いによるねじれモーメントの最大値は、 D_p 拡大による減衰力増加のため、 D_p の大きさに従いねじれモーメントが大きくなった。次に、LRB のねじれ変形を画像解析により計測し、二方向加力によって生じる局部ねじれせん断ひずみ γ_ϕ と主軸せん断ひずみの関係をについて検討した。 γ_ϕ は主軸せん断ひずみ 300%以下において、試験体パラメータによる違いが影響するが、400%以上の限界ひずみ領域ではその影響が小さくなる傾向が見られた。最後に LRB と RB の限界ひずみ領域における復元力ベクトルを分析し、LRB の限界ひずみが水平二方向加力において大きく低下しない要因について検討した。LRB は水平二方向加力時においても履歴ループ面積が増大せず、せん断応力も過度に増加しない。したがって、せん断ひずみが増加しても復元力ベクトルの方向は原点方向に収束するため、ねじれモーメントは増大せず、ねじれ変形も少ないことが原因であると結論づけた。また、LRB の水平二方向加力による限界ひずみが、断面形状が異なっても等しくなる原因は、復元力ベクトルの方向が断面形状にかかわらず、同じ角度に収束するためであると解明した。

5.2 今後の課題

本研究では鉛プラグ入り積層ゴム LRB の水平二方向加力実験を行い、LRB の力学挙動について論じた。以降に LRB をはじめとする、免震用積層ゴムの水平二方向力学挙動に関する研究課題と展望について述べる。

本研究で用いた二方向加力波形は、LRB の力学挙動を解明するため、単純な楕円軌道と真円軌道を採用した。また、鉛直面圧および速度も一定として試験を行った。このように試験条件を設定したのは、面圧依存性、速度依存性による履歴曲線の変化を排除して、LRB の水平二方向力学挙動を明確にするためである。しかし、地震時は本研究の加力条件に含まれない、鉛直荷重の変動や速度変化が伴う。今後の展望として、鉛直面圧の変動を考慮した二方向復元力特性の再現や、加力速度による熱力学連成挙動および、多数回繰り返し安定性に関する検討が望まれる。

限界ひずみについて、LRB は天然ゴム系積層ゴム支承 RB と同様であることが明らかになった。しかし、本研究における試験体は破断モードがゴム層の破断と、座屈による内部鋼板の圧壊と2つとなったため、限界ひずみと位相差入力に対応関係の把握が不十分である。今後、試験体の破断モードが同一となる試験体形状の設定を行い、位相差入力と限界ひずみの対応関係の解明が望まれる。また、限界ひずみは、本研究で用いたような縮小試験体による評価は実大試験体より大きい傾向がある。そのため、実大サイズの水平二方向限界ひずみの検討が望まれるが、現状では実施できる試験機が限定される。今後、日本において、実大試験体の水平二方向加力実験が可能な大型多軸試験機の開発を行い、縮小試験体の検証結果に基づいた、実大試験体の水平二方向加力実験の実施が望まれる。