

JAERI-Tech
2001-064



JP0150823



国際熱核融合実験炉 (ITER) における高面圧型免震要素の
特性評価研究 ー小中規模免震要素試験ー
(委託研究)

2001年11月

高橋 弘行*・中平 昌隆・矢花 修一*・松田 昭博*・大鳥 靖樹*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

国際熱核融合実験炉 (ITER) における高面圧型免震要素の特性評価研究
— 小中規模免震要素試験 —
(委託研究)

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部
高橋 弘行*1・中平 昌隆・矢花 修一*2・松田 昭博*2・大鳥 靖樹*2

(2001年9月7日受理)

国際熱核融合実験炉 (ITER) は、耐震設計条件として地表面で $0.2G(2 \text{ m/s}^2)$ の加速度が設定されており、 $0.2G$ を上回る地震動に対しては免震装置の適用が、研究されている。ITER では、建屋基礎盤の面積に比して支持重量が大きく、また、配置性の観点から設置できる免震要素の個数が制限されるため、 $7.35\text{MPa} \sim 14.7\text{MPa}$ 程度の面圧の「高面圧型免震要素」の使用が検討されている。これまでも、原子力施設への免震導入に関して、 $2.45\text{MPa} \sim 4.90\text{MPa}$ 程度の面圧の免震要素を中心に数多くの研究が行われてきたが、高面圧型免震要素に対する設計用のデータは十分に整っているとは言えない。このため、使用される高面圧条件下における積層ゴムの種々の力学特性、強度特性を評価し、設計用データの蓄積を図る必要がある。そこで、平成9年度から平成11年度にわたり高面圧型免震要素の特性評価研究として、小中規模の免震要素を中心に試験を実施した。本報告ではこの成果をまとめて報告する。

本報告書は、(財)電力中央研究所に委託研究として平成9年度から11年度にわたり実施した研究の成果をとりまとめたものである。

那珂研究所 (東海駐在) : 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

*1 (株) 日立製作所

*2 (財) 電力中央研究所

Characteristic Evaluation of High Compression Seismic Isolator
for International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)
— Verification Test of Sub-scaled Rubber Bearings —
(Contract Research)

Hiroyuki TAKAHASHI*¹, Masataka NAKAHIRA, Shuichi YABANA*², Akihiro MATSUDA*²
and Yasuki OHTORI*²

Department of Fusion Engineering Research
(Tokai Site)
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 7, 2001)

The International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) is designed to withstand the seismic load of 2 m/s^2 at the ground level as a standard seismic condition. In case of severe seismic load over 2 m/s^2 , an application of the seismic isolation to the tokamak building is studied so as to reduce the seismic load below 2 m/s^2 . The seismic isolation with high compressive pressure of 7.35MPa to 14.7MPa is considered as a candidate, because the tokamak weight is large to the building size and the number of seismic isolator (rubber bearing) is limited in the available space of the building. Although many studies were executed in the past in order to apply the seismic isolation to the nuclear plant, the test data can not be applied to the ITER due to low compressive pressure of about 2.45MPa to 4.90MPa.

Based on the above, it is therefore necessary to evaluate the various kinds of dynamic and mechanical characteristics of the rubber bearings under the high compressive pressure and to obtain the database for the design of the seismic isolation system of the ITER. The report describes the summary of the test results of the sub-scaled rubber bearings executed under the high compression condition in 1997 to 1999.

Keywords: Seismic Isolator, Rubber Bearing, Lead Rubber Bearing, Fusion, ITER, High Compression, Sub-scaled Rubber Bearing, Verification Test, Characteristic Evaluation

This research was conducted under the commission to the Central Research Institute of Electric Power Industry from 1997 FY to 1999 FY.

*1 Hitachi, Ltd

*2 Central Research Institute of Electric Power Industry

目 次

1. 緒言	1
2. 高面圧型免震要素の特性評価研究に関する全体計画	2
2.1 特性評価研究の目的	2
2.2 全体計画	2
2.3 各年度の研究計画	5
2.4 試験装置	6
3. スケール則の検討のための試験	13
3.1 試験目的	13
3.2 試験内容	13
3.3 試験結果	23
3.4 まとめ	64
4. 設計パラメータ選定のための検討	67
4.1 試験目的	67
4.2 試験内容	67
4.3 試験結果	75
4.4 まとめ	93
5. 経年変化試験	94
5.1 試験目的	94
5.2 試験内容	94
5.3 試験結果	96
5.4 まとめ	106
6. 結論	107
謝辞	109
参考文献	109
付録	110

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Characteristic Evaluation Study	2
2.1 Object of Characteristic Evaluation Study	2
2.2 Total Plan	2
2.3 Study Plan Every Each Year.....	5
2.4 Test Device	6
3. Performance Test for Study of Sub-scaled Seismic Isolator.....	13
3.1 Object	13
3.2 Substance	13
3.3 Result of Test	23
3.4 Summary	64
4. Study for Design Parameter Selection	67
4.1 Object	67
4.2 Substance	67
4.3 Result of Test	75
4.4 Summary	93
5. Aging Deterioration Test.....	94
5.1 Object.....	94
5.2 Substance	94
5.3 Result of Test	96
5.4 Summary	106
6. Conclusion	107
Acknowledgment	109
References	109
Appendix	110

1. 緒言

国際熱核融合実験炉 (ITER) は、現在、日本、EC、ロシアの3極 (1998年までは、米国を含めた4極) が工学設計活動を実施しており、我が国では日本原子力研究所が中心となって建設に必要な工学技術の研究・開発を進めている。ITERの耐震設計条件として地表面で $2 \text{ m/s}^2(0.2\text{G})$ の加速度が設定されており、この条件の下で各極が機器設計、開発を分担して進めている。我が国にITERを誘致、建設する際には、設計地震動として地表面最大加速度が $2 \text{ m/s}^2(0.2\text{G})$ を上回ることが予想されるため、機器への設計地震力を低減させるためにはITERへの免震の導入が必須と考えられている。ITERでは、建屋基礎盤の面積に比して支持重量が大きく、また、配置性の観点から免震要素の個数が制限されるため、一個あたりの支持荷重の高い「高面圧型免震要素」の使用が計画されている。これまでも、原子力施設への免震導入に関して数多くの研究が行われてきたが、通常の間震原子力施設においては高面圧型免震要素の使用は想定されておらず、高面圧型免震要素に対する設計用のデータは十分に整っているとは言えない。このため、使用される高面圧条件下における積層ゴムの種々の力学特性、強度特性を評価し、設計用データの蓄積を図るとともに、原子力施設での使用に際しての設計条件を満足することを明らかにする必要がある。本報告では、この為に平成9年度から平成11年度にわたり実施した「高面圧型免震要素の特性評価研究」の成果を報告する。尚、「高面圧型免震要素の特性評価研究」の実施にあたっては、核融合実験炉免震設計技術検討委員会(委員長 秋山宏)(平成8年度～平成11年度)において学識経験者による審議を受けている。

2. 高面圧型免震要素の特性評価研究に関する全体計画

2.1 特性評価研究の目的

ITER に用いる積層ゴム免震要素の設計鉛直応力（面圧）は、その設計条件から 7.35MPa～14.7MPa (75～150kgf/cm²) となることが想定される。この程度の面圧レベルはすでに一般建築では用いられているが、原子力分野においてはこれまで 2.45MPa～4.90MPa (25～50kgf/cm²) 程度の面圧を中心に検討が行われてきたため、設計用のデータが十分に整っているとは言えない。また、積層ゴム免震要素としては、天然ゴム系積層ゴム、鉛入り積層ゴム、高減衰積層ゴムなどがあるが、ITER においては配置性等の観点から現段階では鉛入り積層ゴムを中心に検討を行っている。

そこで、本研究では、免震技術指針の策定に資することを目的に面圧 7.35MPa～14.7MPa 程度で設計された鉛入り積層ゴム（LRB）についてその特性を把握し、実際に ITER に用いる免震構造の設計用パラメータを選定するためのデータを取得した。

2.2 全体計画

高面圧型免震要素の特性評価研究において実施する検討項目は以下の通りである。また、各項目ごとの年度展開を表 2.2-1 に示す。

(1) スケール則の検討

実機大の積層ゴムでは、試験装置の性能上の問題から、高面圧下での試験が困難になることが予想される。そこで、相似モデルを用いて、実機大の免震要素特性が予測可能であるか（または、予想可能範囲）を検討する。

(2) 設計パラメータ選定のための検討

ITER における免震設計用のパラメータを選定するために、数種類の形状設計の異なる鉛入り積層ゴムの縮小試験体を用いてその力学特性を把握する。

(3) 経年変化に関する検討

高面圧下における鉛入り積層ゴムの経年変化特性を把握するために、加熱促進劣化試験を行い、その前後の力学特性を把握する。

試験体は、以下の 3 種類の鉛入り積層ゴム（LRB）と天然ゴム系積層ゴム（NRB）であり、実際の試験ではこの試験体の縮小試験体を用いる。なお、NRB の試験体は、LRB における鉛プラグの影響を調べるためのものである。②、③は設計パラメータ選定のための検討のみに用いる。

いままでに試験に用いた試験体を表 2.2-2 に示す。

① 実機直径 ϕ 1200、設計変位 300mm

面圧 9.71MPa (99kgf/cm²) (設計支持荷重 10.2MN) 時の固有周期 4.0sec

1 次形状係数 32.3、2 次形状係数 6.0

縮小試験体直径 ϕ 200、 ϕ 280、 ϕ 500、 ϕ 700

② 実機直径 ϕ 1200、設計変位 400mm

面圧 7.45MPa (76kgf/cm²) (設計支持荷重 8.0MN) 時の固有周期 4.0sec

1次形状係数 32.8、2次形状係数 4.6

縮小試験体直径 ϕ 280、 ϕ 500

③ 実機直径 ϕ 1500、設計変位 400mm

面圧 7.35MPa (75kgf/cm²) (設計支持荷重 12.4MN) 時の固有周期 4.0sec

1次形状係数 34.0、2次形状係数 5.7

縮小試験体直径 ϕ 280、 ϕ 500

ここで、設計変位とは、線形限界変位に安全率 1.5 を見込んだ変位 (許容限界変位) である。本試験体においては、線形限界ひずみを 230% として線形限界変位を算定した。

各積層ゴム試験体のゴム材料はせん断弾性係数が 0.59MPa (6kgf/cm²、公称値) の天然ゴムを用い、鋼板には SS400 を使用した。また、鉛プラグの鉛は純度 99.99% 以上のものを用いた。

表 2.2-1 高面圧型免震要素の特性評価研究の全体計画

	平成 9 年度	平成 10 年度	平成 11 年度	平成 12 年度	平成 13 年度
(1) 設計パラメータ選定のための検討		←		→	
(2) スケール則の検討	←				→
(3) 経年変化に関する検討	←				→

表 2.2-2 試験体試験実施表

実機仕様	サイズ	積層ゴム種類	製品番号	試験体名	検討題目	試験体製作年度	基本試験実施年度	変形性能試験実施年度		
φ 1200-300 LRB	φ 200	LRB	98-LR200-1	LA01	スケール則	H10	H10	H10		
		LRB	LR200A-2	LA02	スケール則	H9	H9	H10		
		LRB	LR200A-3	LA03	スケール則	H9	H9	H10		
	φ 280	LRB	LR280A-1	LB01	設計パラメータ (座屈)	H9	H10	H10		
		LRB	LR280A-2	LB02	スケール則	H9	H9	H10		
		LRB	LR280A-3	LB03	スケール則	H9	H9	H10		
		LRB	LR280A-4	LB04	スケール則	H9	H9	H10		
		NRB* (電極付き)	LR280AI-1	LB09	経年変化	H9	H9 (H11)	H11		
		NRB* (電極付き)	LR280AI-2	LB10	経年変化	H9	H9 (H11)	-		
		LRB (電極付き)	LR280AI-3	LB05	経年変化	H9	H9 (H11)	H11		
		LRB (電極付き)	LR280AI-4	LB06	経年変化	H9	H9 (H11)	H11		
		LRB (電極付き)	LR280AI-5	LB07	経年変化	H9	H9 (H11)	H11		
		LRB (電極付き)	LR280AI-6	LB08	経年変化	H9	H9 (H11)	H11		
	φ 500	φ 1200	LRB	98-LR280-1	LB11	設計パラメータ (高面圧)	H10	H11	H11	
			LRB	LR500A-1	LE01	設計パラメータ	H9	H11	H11	
			LRB	LR500A-2	LE02	スケール則	H9	H10	H11	
			LRB	LR500A-3	LE03	スケール則	H9	H10	H11	
			LRB	LR500A-4	LE04	スケール則	H9	H10 (H11)	H11	
			φ 700	LRB	LR700A-1	LH01	スケール則	H9	H10	H11
				LRB	LR700A-2	LH02	スケール則	H9	H10	H11
LRB				LR700A-3	LH03	スケール則	H9	H11	H11	
LRB			99-LR1200-1	LI01	スケール則	H11	H11	H11		
φ 1200-300 NRB			φ 200	NRB	98-R200-1	NA01	スケール則	H10	H10	H10
	φ 280		NRB	R280A-2	NB02	スケール則	H9	H9	H10	
	φ 500	NRB	R500A-2	NE02	スケール則	H9	H10	H11		
	φ 700	NRB	R700A-1	NH01	スケール則	H9	H10	H11		
φ 1200-400 LRB	φ 280	LRB	LR280B-1	LC01	設計パラメータ	H9	H11	H11		
	φ 500	LRB	LR500B-1	LF01	設計パラメータ	H9	H11	H11		
φ 1500-400 LRB	φ 280	LRB	LR280C-1	LD01	設計パラメータ	H9	H11	H11		
	φ 500	LRB	LR500C-1	LG01	設計パラメータ	H9	H11	H11		

*: LRBであったものをNRBに改造。

2.3 各年度の研究計画

2.3.1 平成9年度の研究計画

(1) スケール則の検討

直径 200mm および 280mm の積層ゴムを用いて、基本的な力学特性を取得するための試験を行う。

(2) 経年変化に関する検討

経年変化前における積層ゴム（直径 280mm）の基本的な力学特性を取得する試験を行う。

2.3.2 平成10年度の研究計画

(1) スケール則の検討

試験体の寸法は、直径 ϕ 200mm, ϕ 280mm, ϕ 500mm, ϕ 700mm とする。また、鉛プラグの影響を把握するために、鉛プラグを挿入していない積層ゴム（天然ゴム系積層ゴム：NRB）についても試験を行う。

試験項目としては、基本特性試験および変形（限界）性能試験を行う。LRB においては同一試験体が 3 体ずつあり、基本特性試験において試験体のばらつきを確認するとともに、変形性能試験においてはそれぞれ違った載荷パターンで特性を把握する。

ϕ 200, ϕ 280 および ϕ 500（鉛直応力 4.9MPa (50kgf/cm²) までの基本試験) の試験体については、動的 2 次元試験装置を使用するため動的な加振も可能であるが、 ϕ 500 より大きい試験体については静的 2 次元試験装置を用いるため動的な試験はできない。そこで、 ϕ 200 および ϕ 280 の LRB 試験体各 1 体については、動的加振の影響を除くため、静的加振のみを行うこととする。

(2) 設計パラメータ選定のための検討

平成 10 年度はスケール則と同じ ϕ 280 の LRB 試験体（1 体）を用いて、基本試験および座屈特性を把握することを目的とした変形性能試験を実施する。

(3) 経年変化試験

鉛入り積層ゴムの高面圧下における経年変化特性を把握するために、恒温槽内に試験体を入れ、40 年相当の経年変化を与える試験を行う。試験としては、LRB ϕ 280 の 4 体および NRB ϕ 280 の 2 体（実機直径 ϕ 1200, 設計変位 300mm）の試験を行う。5 体は設計支持荷重相当を載荷し、LRB のうち 1 体は鉛直荷重を 0 とした条件で加熱促進変化させる。

2.3.3 平成11年度の研究計画

(1) スケール則の検討

これまでに、 ϕ 200 および ϕ 280 については試験がすべて終了しているため、平成 11 年度は、

φ 500、φ 700 および φ 1200 試験体の基本特性試験（φ 500 および φ 700 では一部実施済み）および変形性能試験を実施する。

(2) 設計パラメータ選定のための検討

ITER における免震設計用のパラメータを選定するために、3種類の形状設計の異なる鉛入り積層ゴムの縮小試験体を用いてその力学特性を把握する。試験体として、φ 280 および φ 500 の縮小試験体（各 1 体）を用いて基本特性試験および変形性能試験を実施する。

なお、①の試験体については、地震時の軸力変動等を考慮して、面圧 29.4MPa (300kgf/cm²) 下における特性を把握する。また、①の形状に関しては鉛プラグの挿入されていない NRB も製作済みであるが、これについては試験期間の制約から次年度に試験を実施する。

(3) 経年変化に関する検討

鉛入り積層ゴムの高面圧下における経年変化特性を把握するために、恒温槽内に試験体を入れ、40年相当の経年変化を与える試験を引き続き行う。試験としては、LRB φ 280 の 4 体および NRB φ 280 の 2 体（実機直径 φ 1200、設計変位 300mm）の試験を行う。5 体は設計支持荷重相当を載荷し、LRB のうち 1 体は鉛直荷重を 0 として促進劣化を行う。

促進劣化終了後、経年変化後の特性を把握するために、基本特性試験および変形性能試験を実施する。

2.4 試験装置

試験装置としては、(財)電力中央研究所我孫子研究所北第 4 実験棟に設置された通商産業省所有の動的 2 次元試験装置、静的 2 次元試験装置および促進劣化試験装置を使用する。

動的 2 次元試験装置の諸元および概要を表 2.4-1 および図 2.4-1 に示す。また、動的 2 次元試験装置の計測装置の仕様を表 2.4-2 に示す。

静的 2 次元試験装置の諸元および概要を、表 2.4-3 および図 2.4-2 に示す。また、静的 2 次元試験装置の計測装置の仕様を表 2.4-4 に示す。

経年変化試験を行うための促進劣化試験装置は恒温槽と鉛直荷重を一定に負荷するためのアクチュエータから構成されている。試験装置の概要および諸元を図 2.4-3 および表 2.4-5 に示す。変位計（耐熱型差動変圧式）の仕様を表 2.4-6 に示す。

写真 2.4-1 および写真 2.4-2 には、動的 2 次元試験装置と静的 2 次元試験装置における試験体の設置状況を示す。また、制御および計測装置の状況を写真 2.4-3～写真 2.4-8 に示す。

表 2.4-1 動的 2 次元試験装置諸元

加振方式	水平、鉛直2方向動的加振
制御モード	荷重制御/変位制御 (水平鉛直それぞれ単独)
水平加振機	加振力 : $\pm 490\text{kN}$ (50tonf) 変位 : $\pm 300\text{mm}$ (オフセット300mm可) 速度 : $\pm 70\text{mm/sec}$ (0.5Hzの正弦波)
鉛直加振機	加振力 : $\pm 981\text{kN}$ (100)tonf 変位 : $\pm 300\text{mm}$ (オフセット300mm可) 速度 : $\pm 50\text{mm/sec}$ ただし、最大350mm/sec (正弦波)
加振振動数	0~30Hz (水平、鉛直とも)

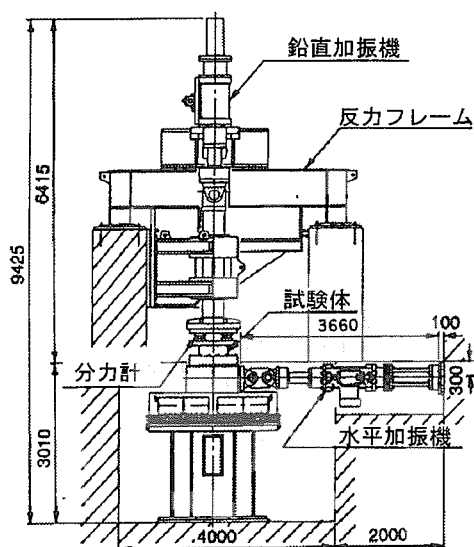


図2.4-1 動的2次元試験装置の概要

表2.4-2 動的2次元試験装置計測装置仕様

取り付け位置	種類	容量	仕様
水平加振機 (内蔵)	荷重計	$\pm 981\text{kN}$ (± 100 tonf)	LUK-100TBSD16、ひずみゲージ式、非直線性 0.2%
水平加振機 (内蔵)	変位計	± 300 mm	10000HR、電磁式、非直線性 1.0%
鉛直加振機 (内蔵)	荷重計	$\pm 1961\text{kN}$ (± 200 tonf)	LUK-200TBSD16、ひずみゲージ式、非直線性 1.0%
鉛直加振機 (内蔵)	変位計	± 300 mm	10000HR、電磁式、非直線性 1.0%
鉛直加振機 (外部)	分力計 (4台)	$\pm 981\text{kN}$ (鉛直) $\pm 490\text{kN}$ (水平) $\pm 373\text{kN}\cdot\text{m}$ (モーメント)	LSM-25TASA7、ひずみゲージ式、非直線性 1.0%
上下フランジ (外部)	変位計 (鉛直)	± 10 mm または ± 20 mm	CDP-10またはCDP-20、ひずみゲージ式、非直線性 0.5%

表 2.4-3 静的 2 次元試験装置諸元

加振方式	水平、鉛直2方向静的加振 (外部入力による任意波形)
制御モード	荷重制御/変位制御 (水平鉛直それぞれ単独)
水平加振機	加振力 : $\pm 5.88\text{MN}$ (600tonf) 変位 : $\pm 600\text{mm}$ 速度 : $\pm 5\text{mm/sec}$
鉛直加振機	加振力 : $\pm 5.88\text{MN}$ (600tonf) 変位 : $\pm 350\text{mm}$ 速度 : $\pm 5\text{mm/sec}$

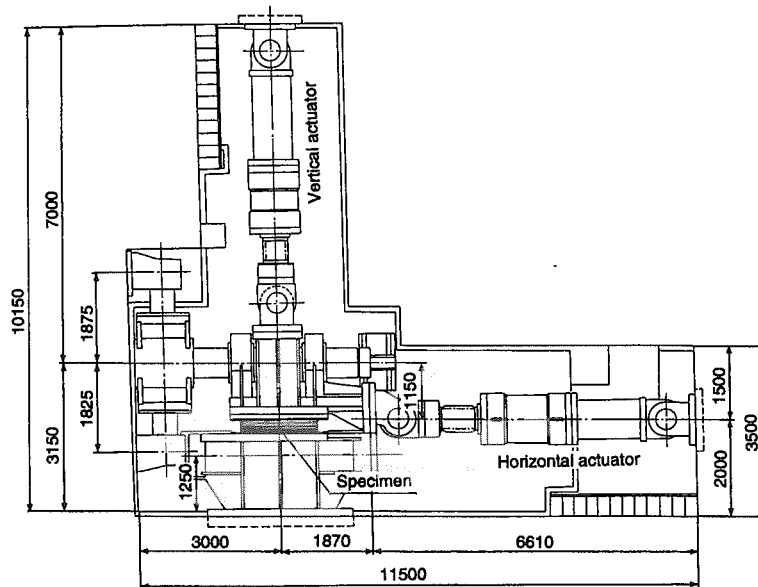


図 2.4-2 静的2次元試験装置の概要

表 2.4-4 静的2次元試験装置計測装置仕様

取り付け位置	種類	容量	仕様
水平加振機 (内蔵)	荷重計 (水平)	$\pm 5.88\text{MN}$ ($\pm 600\text{ tonf}$)	LUK-600TBSD52、ひずみゲージ式、非直線性 0.5%
下フランジ・面版 (外部)	分力計 (水平)	$\pm 1.57\text{MN}$ ($\pm 160\text{ tonf}$)	試験に応じて取り付け。共和電業LSM-40TCSA38を4台組み合わせ。非直線性 1%
水平加振機 (内蔵)	変位計 (水平)	$\pm 600\text{ mm}$	DCTM-60A、磁歪線式、非直線性 0.05%
鉛直加振機 (内蔵)	荷重計 (鉛直)	$\pm 5.88\text{MN}$ ($\pm 600\text{ tonf}$)	LUK-600TBSD52、ひずみゲージ式、非直線性 0.5%
鉛直加振機 (内蔵)	変位計 (鉛直)	$\pm 350\text{ mm}$	DCTM-36A、磁歪線式、非直線性 0.05%
上フランジ (外部)	変位計 (水平)	$\pm 600\text{ mm}$	DLT-600BM、インダクタンス式、非直線性 0.5%
上下フランジ (外部)	変位計 (鉛直)	$\pm 10\text{ mm}$ または $\pm 20\text{ mm}$	CDP-10またはCDP-20、ひずみゲージ式、非直線性 0.5%

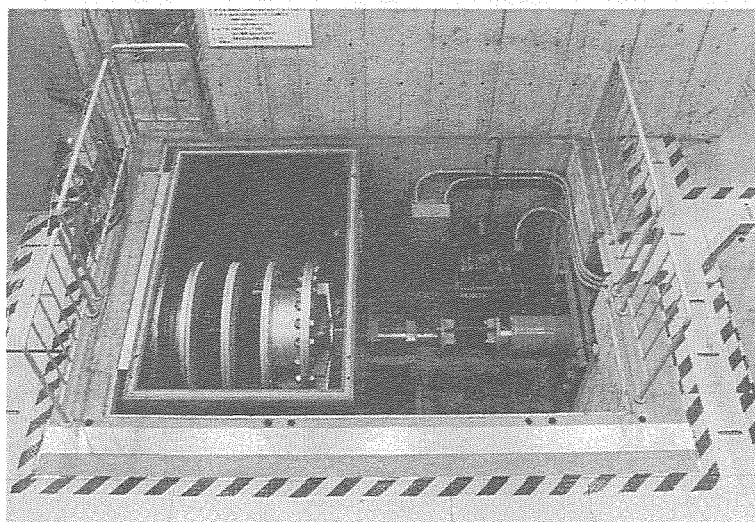


図2.4-3 促進劣化試験装置概要

表2.4-5 促進劣化試験装置諸元

温度設定範囲	20°C～150°C
最大軸力	1.96MN (200tf, 圧縮)
制御方式	温度一定制御、荷重一定制御

表 2.4-6 促進劣化試験装置用変位計仕様

型名	GP-DMR-217型 差動変圧器式変位計
適合差動変圧器	1533-9HR型 新光電機(株)製
励磁	2KHz, 5Vrms
測定範囲	0～20mm
出力	4～20mA または 1～5V
直線性	±1%以内/フルスケール
仕様温度範囲	-10～150°C

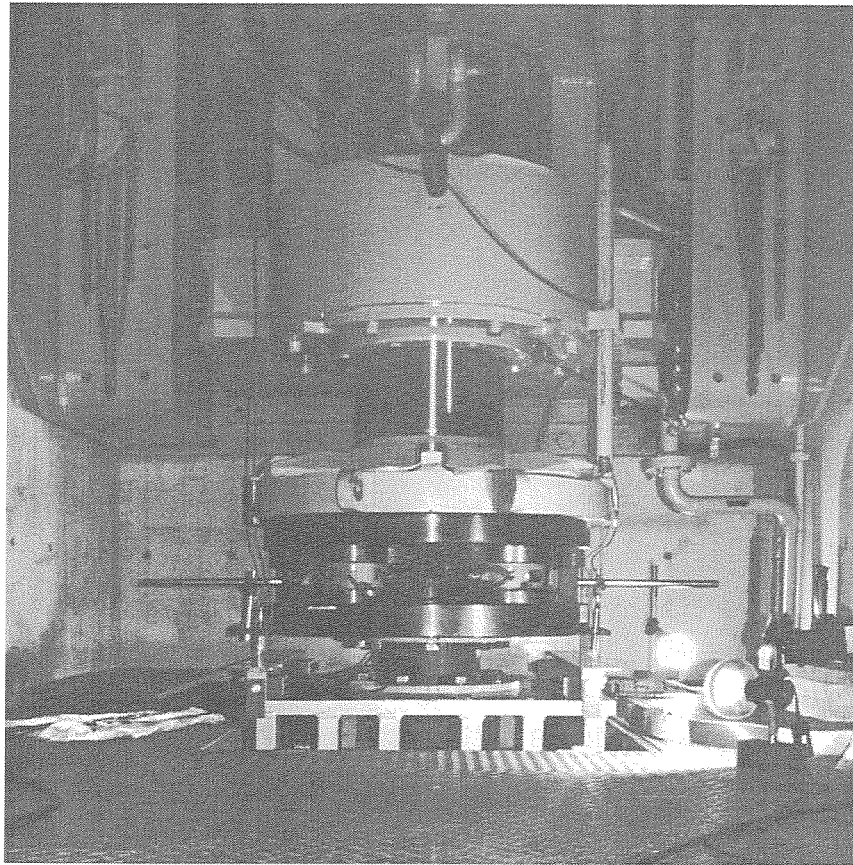


写真 2.4-1 動的 2次元試験装置への試験体の設置状況

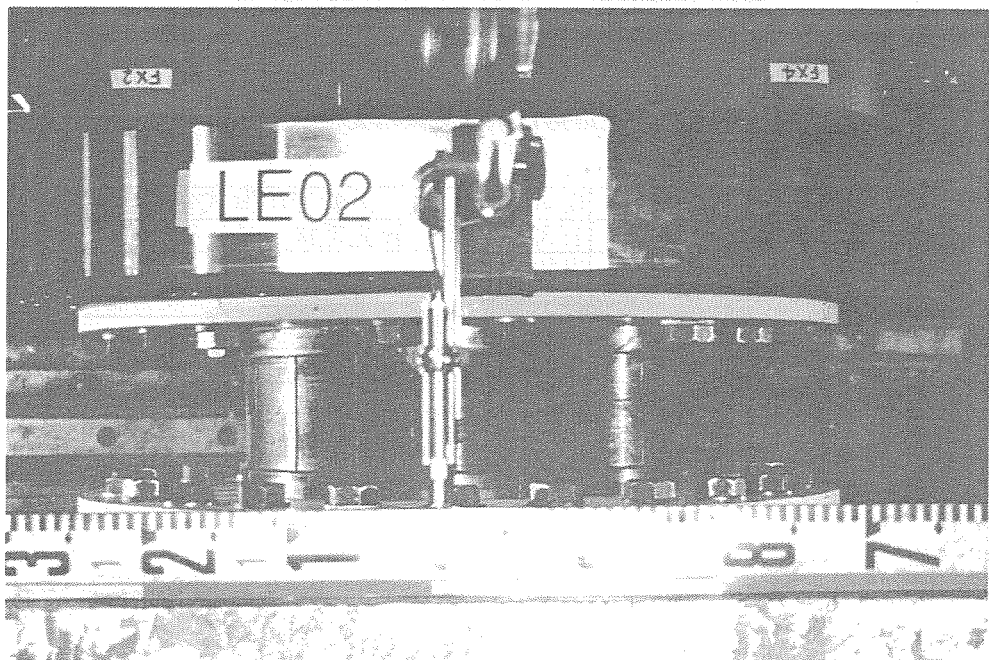


写真 2.4-2 静的 2次元試験装置への試験体の設置状況

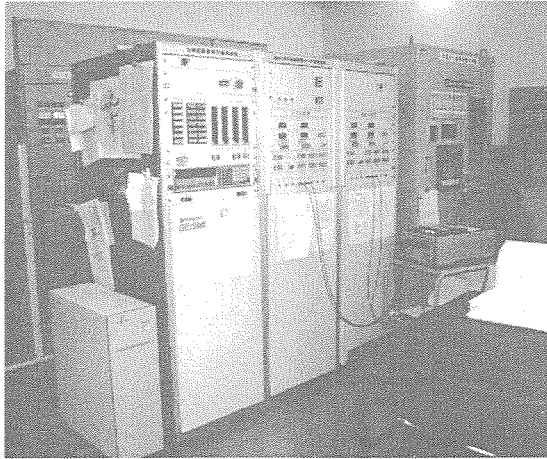


写真 2.4-3 動的 2次元試験装置制御盤

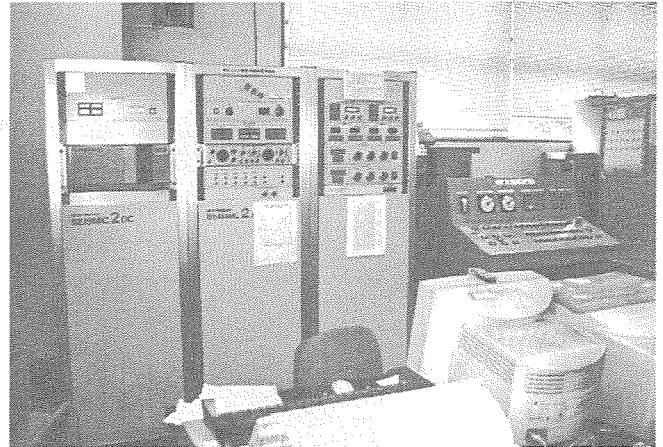


写真 2.4-4 静的 2次元試験装置制御盤

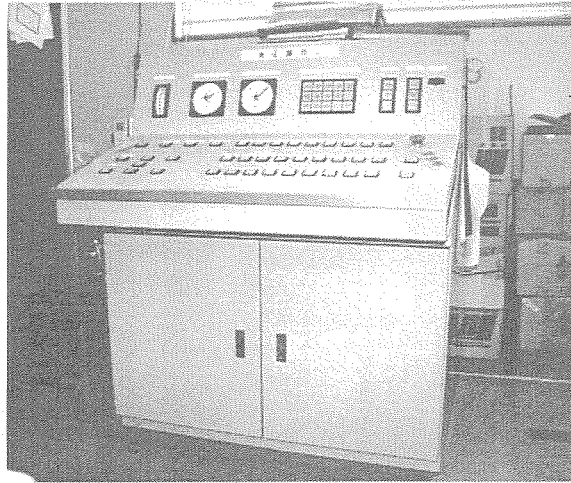


写真 2.4-5 油圧源操作盤

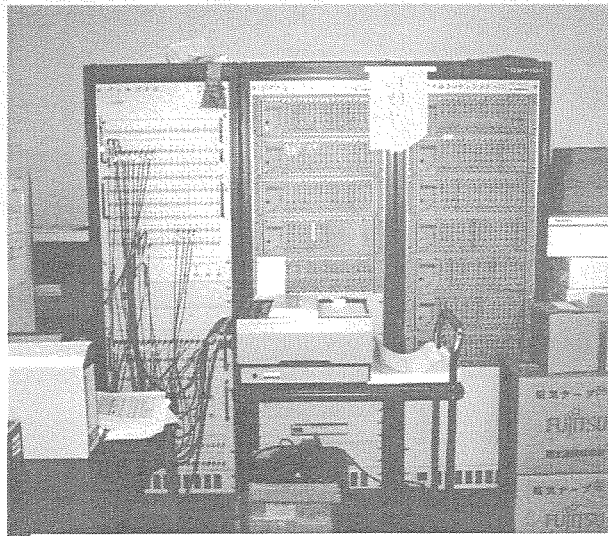


写真 2.4-6 シグナルコンディショナー

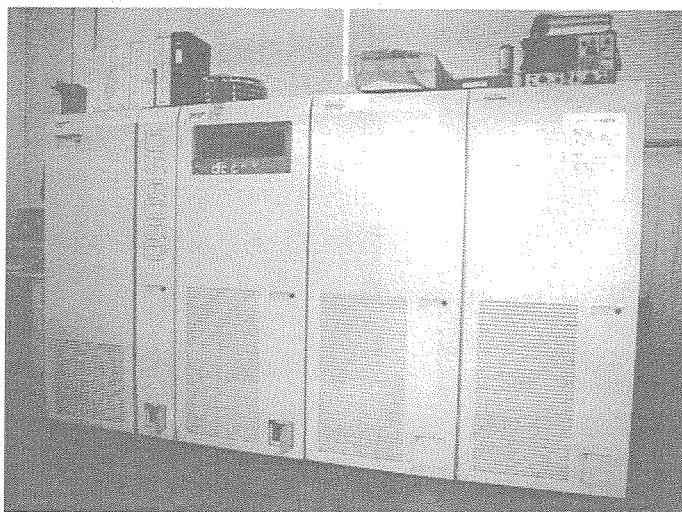


写真 2.4-7 計測用ミニコン（平成 11 年 9 月まで使用）

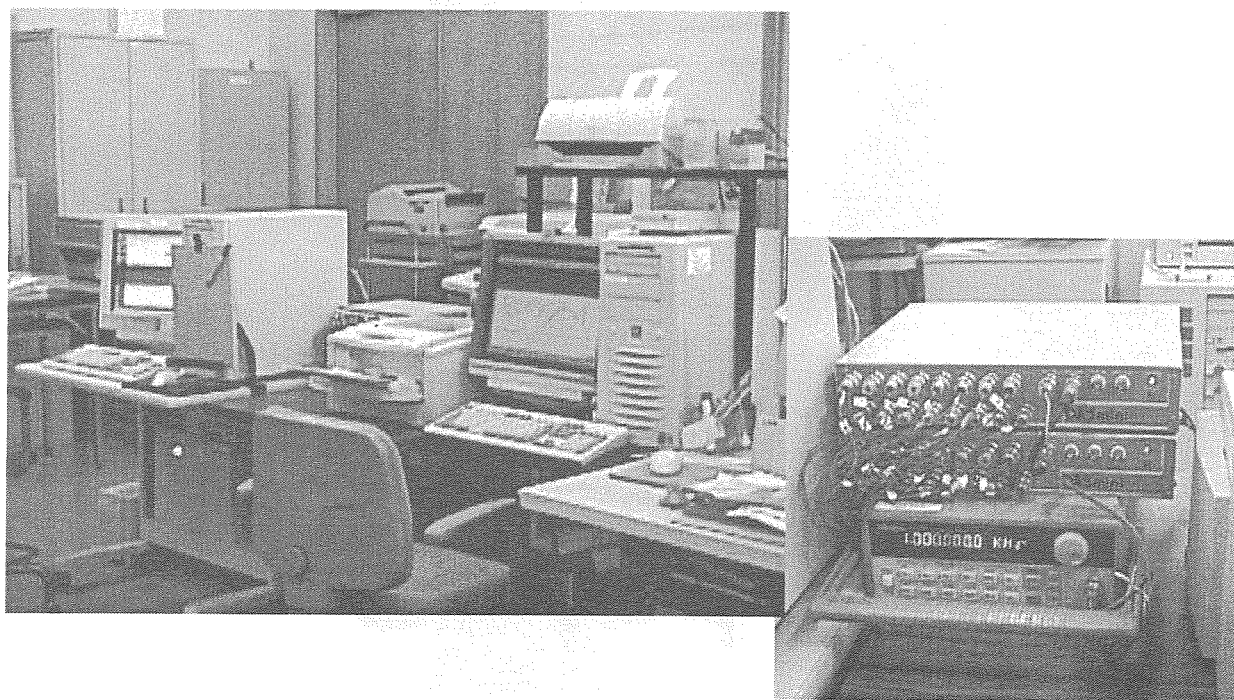


写真 2.4-8 計測システム（平成 11 年 10 月から使用）

3. スケール則の検討のための試験

3.1 試験目的

実機大の積層ゴムでは、試験装置の性能上の問題から、高面圧下での試験が困難になることが予想される。そこで、積層ゴム試験体のスケール則に関する検討を行うため、数種類の相似比の異なる縮小試験体を用いた試験を行う。これにより、縮小試験体により実機大の免震要素特性が予測可能であるか（または、予想可能範囲）について知見を得ることを目的とする。

試験体は、実機において直径1200mm、設計変位300mmの諸元を持つ鉛入り積層ゴム(LRB)の縮小試験体とする。試験体の寸法は、直径 ϕ 200mm、 ϕ 280mm、 ϕ 500mm、 ϕ 700mmおよび ϕ 1200mmとする。また、鉛プラグの影響を把握するために、鉛プラグを挿入していない積層ゴム（天然ゴム系積層ゴム：NRB）についても試験を行う。平成11年度は上記のうち、 ϕ 500mm（相似率：1/6）、 ϕ 700mm（相似率：1/4.29）試験体および ϕ 1200mm（実大）の基本特性試験と変形性能試験を行う。

3.2 試験内容

3.2.1 試験体

試験で用いる直径 ϕ 200mm、 ϕ 280mm、 ϕ 500mm、 ϕ 700mmおよび ϕ 1200mmの積層ゴム試験体を図 3.2.1-1～図 3.2.1-5 に示す。また、試験体の諸元を表 3.2.1-1 および表 3.2.1-2 に示す。試験体の相似則を表 3.2.1-3 に示す。相似則は、本研究においてすべてここに示すものを用いている。なお、同じスケールの鉛入り積層ゴム（LRB）試験体と天然ゴム系積層ゴム（NRB）試験体の違いは、積層ゴムの内部孔へ鉛プラグが挿入されているかいないかの違いだけであり、その他の形状はすべて同じである。ただし、NRB と LRB の 1 次形状係数は、両者で異なり、結果として鉛直ばね定数も同一とはならない。

表 3.2.1-4 には、平成 9 年度～平成 11 年度にわたり実施したスケール効果検討試験の全試験体の員数および試験体名を示す。

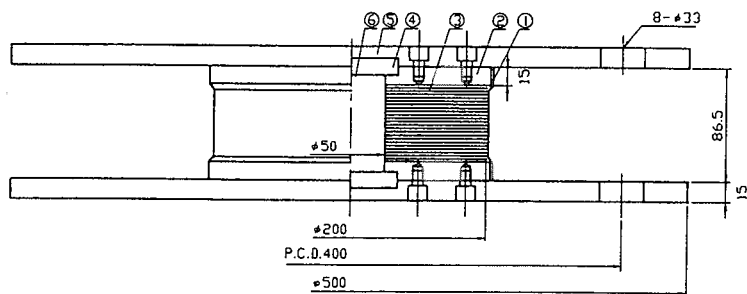


図 3.2.1-1 φ 200 LRB (NRB) 試験体 (実機 φ 1200、設計変位 300mm)

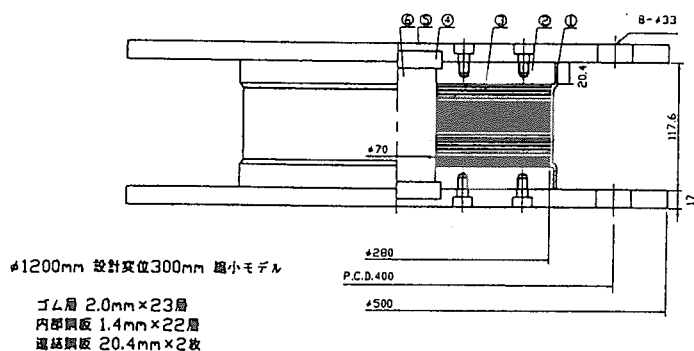


図 3.2.1-2 φ 280 LRB (NRB) 試験体 (実機 φ 1200、設計変位 300mm)

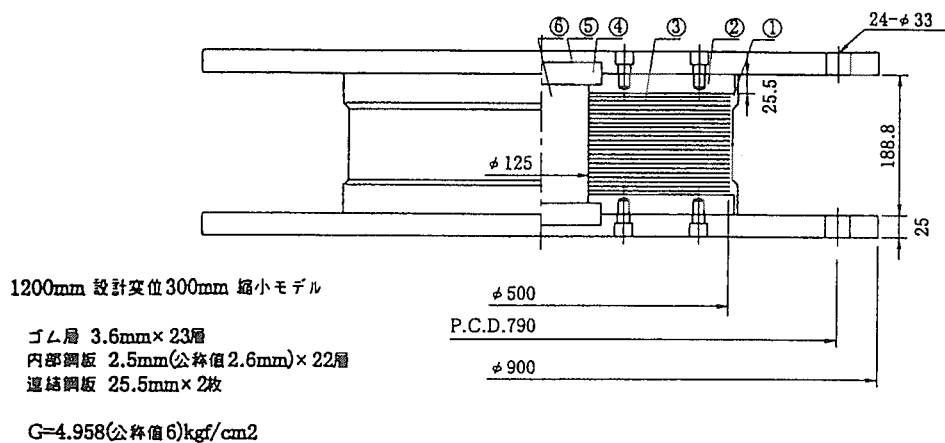


図 3.2.1-3 φ 500 LRB (NRB) 試験体 (実機 φ 1200、設計変位 300mm)

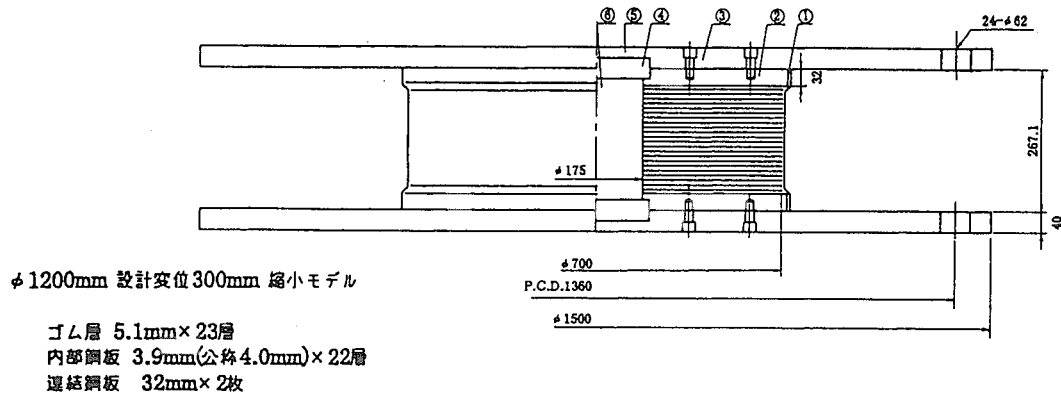


図 3.2.1-4 φ 700 LRB (NRB) 試験体 (実機 φ 1200、設計変位 300mm)

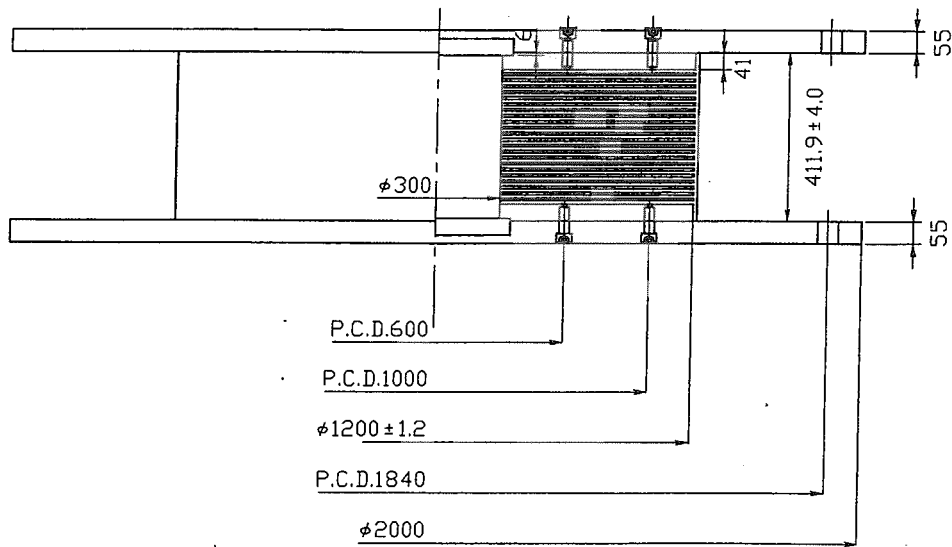


図 3.2.1-5 φ 1200 LRB フルスケール (実大) 試験体 (実機 φ 1200、設計変位 300mm)

表 3.2.1-1 試験体諸元 (実機直径 ϕ 1200、設計変位 300mm LRB)

	LRB ϕ 200	LRB ϕ 280	LRB ϕ 500	LRB ϕ 700	LRB ϕ 1200
試験体名	LA01-03	LB01-10	LE01-04	LH01-03	LI01
相似比	0.17	0.23	0.42	0.58	1.00
設計用支持質量M (kg)	2.90E+04	5.68E+04	1.81E+05	3.55E+05	1.04E+06
水平固有周期 T_H (sec)	1.66	1.92	2.57	3.06	4.00
上下固有振動数(Hz)	24.24	21.33	15.86	13.27	10.18
水平剛性 K_H (N/m)	4.15E+05	6.10E+05	1.08E+06	1.50E+06	2.58E+06
上下剛性 K_V (N/m)	6.73E+08	1.02E+09	1.80E+09	2.47E+09	4.27E+09
ゴム直径 D_R (mm)	200.00	280.00	500.00	700.00	1200.00
ゴム内径 D_I (mm)	50.00	70.00	125.00	175.00	300.00
断面積A (mm ²)	2.95E+04	5.77E+04	1.84E+05	3.61E+05	1.06E+06
ゴム層数n	23	23	23	23	23
ゴム1層の厚さ t_R (mm)	1.50	2.00	3.60	5.10	8.70
ゴム総厚さ h_R (mm)	34.50	46.00	82.80	117.30	200.10
内部鋼板の層数	22	22	22	22	22
内部鋼板1層の厚さ (mm)	1.00	1.60	2.50	3.90	5.90
連結鋼板の厚さ (mm)	15.00	17.00	25.50	32.00	41.00
キー溝深さ(mm)	10.00	12.00	18.00	25.00	6.00
試験体部分の高さ (mm)	86.50	115.20	188.80	267.10	411.90
設計鉛直応力 (面圧) σ (MPa)	9.66	9.66	9.66	9.66	9.66
1次形状係数 S_{F1}	31.25	32.81	32.55	32.17	32.33
2次形状係数 S_{F2}	5.30	6.09	6.04	5.97	6.00
せん断弾性係数 G_s (γ) (MPa)	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
縦弾性率 E_0 (MPa)	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
体積弾性率 E_∞ (MPa)	1182.68	1182.68	1182.68	1182.68	1182.68
ゴム硬度による補正係数 κ	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
ゴムの圧縮性を考慮した縦弾性率 E_c' (MPa)	788.09	813.31	809.25	803.18	805.70
見掛けの縦弾性率 E_s (MPa)	2362.10	2604.07	2562.93	2503.01	2527.72
鉛の降伏荷重特性応力 (MPa)	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69
鉛の降伏荷重特性値 Qd (N)	1.71E+04	3.34E+04	1.07E+05	2.09E+05	6.14E+05
鉛プラグ高さ (mm)	66.50	91.20	152.80	217.10	399.90
鉛の形状 H_p/D_p	1.33	1.30	1.22	1.24	1.33
内部被覆厚さ (mm)	0.50	0.50	0.50 *	0.50	0.50

*: LE05 試験体については、1mm

表 3.2.1-2 試験体諸元 (実機直径 ϕ 1200、設計変位 300mm NRB)

	NRB ϕ 200	NRB ϕ 280	NRB ϕ 500	NRB ϕ 700	NRB ϕ 1200
試験体名	NA01	NB01-02	NE01-05	NH01	
相似比	0.17	0.23	0.42	0.58	1.00
設計用支持質量M (kg)	2.90E+04	5.68E+04	1.81E+05	3.55E+05	1.04E+06
水平固有周期 T_H (sec)	1.66	1.92	2.57	3.06	4.00
上下固有振動数(Hz)	22.25	19.67	14.61	12.22	9.37
水平剛性 K_H (N/m)	4.15E+05	6.10E+05	1.08E+06	1.50E+06	2.58E+06
上下剛性 K_V (N/m)	5.67E+08	8.68E+08	1.53E+09	2.09E+09	3.62E+09
ゴム直径 D_R (mm)	200.00	280.00	500.00	700.00	1200.00
ゴム内径 D_I (mm)	50.00	70.00	125.00	175.00	300.00
断面積A (mm ²)	2.95E+04	5.77E+04	1.84E+05	3.61E+05	1.06E+06
ゴム層数n	23	23	23	23	23
ゴム1層の厚さ t_R (mm)	1.50	2.00	3.60	5.10	8.70
ゴム総厚さ h_R (mm)	34.50	46.00	82.80	117.30	200.10
内部鋼板の層数	22	22	22	22	22
内部鋼板1層の厚さ (mm)	1.00	1.60	2.50	3.90	5.90
連結鋼板の厚さ (mm)	15.00	17.00	25.50	32.00	41.00
キー溝深さ (mm)	10.00	12.00	18.00	25.00	6.00
試験体部分の高さ (mm)	86.50	115.20	188.80	267.10	411.90
設計鉛直応力 (面圧) σ (MPa)	9.66	9.66	9.66	9.66	9.66
1次形状係数 S_{r1}	25.00	26.25	26.04	25.74	25.86
2次形状係数 S_{r2}	5.80	6.09	6.04	5.97	6.00
せん断弾性係数 G_s (γ) (MPa)	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
縦弾性率 E_0 (MPa)	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
体積弾性率 E_∞ (MPa)	1182.68	1182.68	1182.68	1182.68	1182.68
ゴム硬度による補正係数 κ	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
ゴムの圧縮性を考慮した縦弾性率 E_c' (MPa)	663.66	691.86	687.29	680.46	683.30
見掛けの縦弾性率 E_c (MPa)	1512.26	1667.12	1640.79	1602.44	1618.25
鉛の降伏荷重特性応力 (MPa)	-	-	-	-	-
鉛の降伏荷重特性値 Qd (N)	-	-	-	-	-
鉛プラグ高さ (mm)	-	-	-	-	-
鉛の形状 H_p/D_p	-	-	-	-	-
内部被覆厚さ (mm)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

表 3.2.1-3 相似則 (λ : 相似率 = (縮小モデル寸法) / (実機寸法))

	実機	縮小モデル
長さ	L_p	$L_m = \lambda L_p$
面圧	P_p	$P_m = P_p$
時間	T_p	$T_m = \lambda^{1/2} T_p$
振動数	F_p	$F_m = \lambda^{-1/2} F_p$
質量	M_p	$M_m = \lambda^2 M_p$
重力加速度	G_p	$G_m = G_p$

表 3.2.1-4 スケール則に関する試験体数と試験体名

試験体直径	試験体種類	試験体数	試験体名	備考
φ 200	LRB	3	LA01, LA02, LA03	
	NRB	1	NA01	
φ 280	LRB	3	LB02L, B03, LB04	
	NRB	1	NB02	
φ 500	LRB	3	LE02, LE03, LE04	
	NRB	1	NE02	
φ 700	LRB	3	LH01, LH02, LH03	
	NRB	1	NH01	
φ 1200	LRB	1	LI01	

3.2.2 試験方法

(1) 試験項目

スケール則の検討のための試験項目としては、表 3.2.2-1 に示した基本特性試験（せん断ひずみ 200%までの試験。なお、せん断ひずみは水平変位をゴムの総厚さで除した値とする。）および積層ゴムの破断（限界）までの特性を把握するための変形性能試験を行う。

表 3.2.2-1 スケール則の検討における試験項目

	水平方向試験	鉛直方向試験
基本特性試験	鉛直荷重（圧縮）： 0, 2.45, 4.90, 9.81, 14.7MPa	オフセットせん断ひずみ： 0, 50, 100, 200%
	せん断ひずみ： 25, 50, 100, 200%	荷重振幅（圧縮）：2.45±1.23, 4.90±2.45, 7.35±3.68, 9.81±4.90MPa
	加振振動数： 0.01, 0.25, 0.50Hz	加振振動数： 0.01, 0.25, 0.50, 5.0, 10.0, 20.0Hz
変形性能試験	鉛直荷重：9.81, 14.7MPa または、引張りひずみ：150%の条件下で 漸増载荷試験（静的）	—

試験にあたっては、上記のパラメータを適宜選択し、組み合わせる。

(2) 試験ケース

φ 200 および φ 280 の試験体については、基本特性試験および変形性能試験を動的 2 次元試験装置により行うことが可能であり、基本特性試験においては動的加振も行う。φ 500 以上の試験体については、動的 2 次元試験装置の性能上の制約から基本的には静的 2 次元試験装置による静的加振を行う。ただし、φ 500 の試験体に関しては、動的 2 次元試験装置により面圧 4.90MPa (50kgf/cm²) 下までの水平方向試験は可能であるため、その条件を満たす試験については動的 2 次元試験装置を用いた試験も行う。表 3.2.2-2、表 3.2.2-3 に試験内容と加振順序を示す。試験ケースとしては、静的な加振のみを行う静的試験と動的・静的を含めた標準試験の 2 種類を行う。水平方向基本特性試験においては、鉛直荷重および加振振動数を加振パラメータとし、鉛直方向基本特性試験においては、せん断ひずみ、鉛直荷重振幅および加振振動数を加振パラメータとする。

表 3.2.3-2 水平方向基本特性試験の試験ケースと加振順序

鉛直応力 0MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz	1	2	3	4
0.25Hz	[28]	[29]	[30]	[32]
0.50Hz			[31]	

鉛直応力 2.45MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz	5	6	7	8
0.25Hz			[33]	
0.50Hz			[34]	

鉛直応力 4.90MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz	9	10	11	12
0.25Hz			[35]	[37]
0.50Hz			[36]	

鉛直応力 9.81MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz	13	14	15	16
0.25Hz	[38]	[39]	[40]	[42]
0.50Hz			[41]	

鉛直応力 14.7MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz	17	18	19	20
0.25Hz	[43]	[44]	[45]	[47]
0.50Hz			[46]	

(数字は加振順序。括弧内の数字は、標準試験のみの加振を表す。)

表 3.2.3-3 鉛直方向基本特性試験の試験ケースと加振順序

鉛直応力 (MPa)	オフセット せん断ひずみ	加振振動数 (Hz)					
		0.01	0.25	0.50	5.00	10.00	20.00
-2.45±1.23	0%	21				[48]	
-4.90±2.45	0%	22				[49]	
-7.35±3.68	0%	23				[50]	
-9.80±4.90	0%	24	[51]	[52]	[53]	[54]	[55]
-9.80±4.90	50%	25					
-9.80±4.90	100%	26					
-9.80±4.90	200%	27					

(数字は加振順序。括弧内の数字は、標準試験のみの加振を表す。)

(3) 基本特性試験により求められる特性値の定義

基本特性試験により求められる主な特性としては、水平ばね定数、鉛直ばね定数、降伏荷重特性値、減衰定数がある。各特性値の定義を以下に示す。なお、以下の定義は、他の章における試験にも適用される。

a. 水平ばね定数 K_H

水平ばね定数は、積層ゴムにある一定軸力を与えた状態で、水平方向に正弦波で変形を4回与えた時の3回目の水平荷重－水平変位曲線より求める。

履歴減衰を持たない天然ゴム系積層ゴムの水平ばね定数は、図 3.2.3-1 に示すように試験で得られた荷重－変形関係において、原点と最大荷重点を結ぶ勾配から定める。よって、この場合の水平ばね定数は(3.2.3-1)式によって求めることができる。

$$K_H = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3.2.3-1)$$

ここで、

Q_{\max} 、 Q_{\min} ：最大、最小荷重値

X_{\max} 、 X_{\min} ：最大、最小変位

履歴減衰を持つ鉛入り積層ゴムなどの水平ばね定数については、図 3.2.3-2 に示すように試験で得られた荷重－変形関係において、降伏荷重特性値を与える点と荷重最大点を結ぶ直線の勾配から定める。よって、この場合の水平ばね定数は(3.2.3-2)式によって求めることができる。

$$K_H = \frac{K_H^+ - K_H^-}{2} \quad (3.2.3-2)$$

ここで、

$$K_H^+ = \frac{Q_{\max} - Q_d^+}{X(Q_{\max})} \quad (3.2.3-3)$$

$$K_H^- = \frac{Q_{\min} - Q_d^-}{X(Q_{\min})} \quad (3.2.3-4)$$

Q_d^+ 、 Q_d^- ：正および負側の降伏荷重特性値

$X(Q_{\max})$ 、 $X(Q_{\min})$ ：最大荷重および最小荷重における変位。

b. 鉛直ばね定数 K_V

鉛直ばね定数は、積層ゴムにある一定のせん断変形と軸力を与えた状態で、鉛直方向に正弦波で鉛直軸力4回与えた時の3回目の鉛直荷重－鉛直変位曲線より算出する。試験で得られた荷重

—変形関係において、最大荷重点と最小荷重点を結ぶ勾配から定める。図 3.2.3-3 に鉛直ばね定数の定義を示す。

c. 降伏荷重特性値 Q_d

ある一定軸力を与えた状態で、水平方向に正弦波で変形を 4 回与えた時の 3 回目の水平荷重—水平変位曲線より、変位零におけるせん断力から定める（図 3.2.3-2）。

d. 等価（粘性）減衰定数 h_{eq}

等価（粘性）減衰定数は、積層ゴムにある一定軸力を与えた状態で、水平方向に正弦波で変形を 4 回与えた時の 3 回目の水平荷重—水平曲線より下式により求める。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{W_d}{W} \quad (3.2.3-5)$$

ここで、

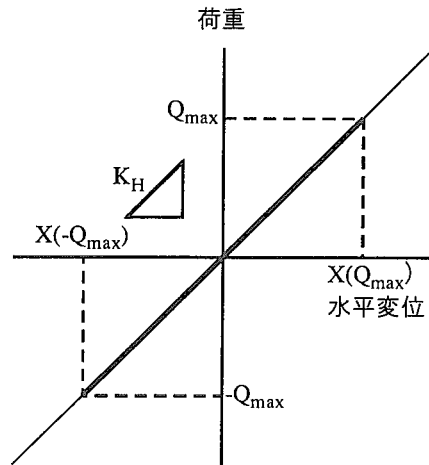
$$W = \frac{1}{2} K_t X^2 \quad (3.2.3-6)$$

$$K_t = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3.2.3-7)$$

W ：ひずみエネルギー

W_d ：1 サイクル（3 回目）における吸収エネルギー

X ：最大荷重時の水平変位。

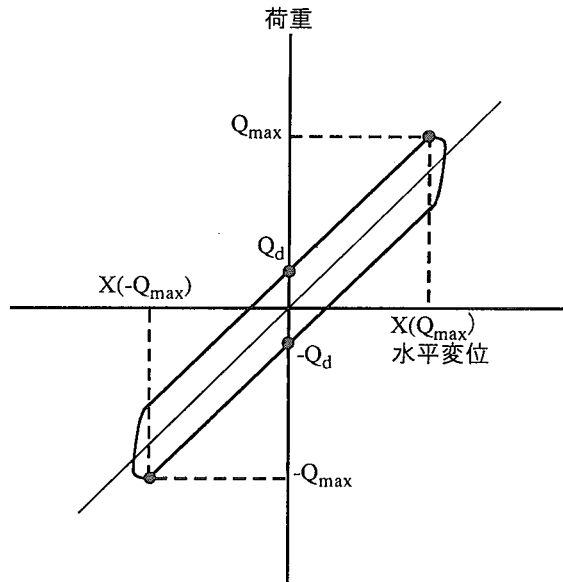


$$K_H^+ = \frac{Q_{\max}}{X(Q_{\max})}$$

$$K_H^- = \frac{-Q_{\max}}{X(-Q_{\max})}$$

$$K_H = \frac{K_H^+ + K_H^-}{2}$$

図 3. 2. 3-1 履歴減衰を持たない積層ゴムの水平ばね定数に関する定義

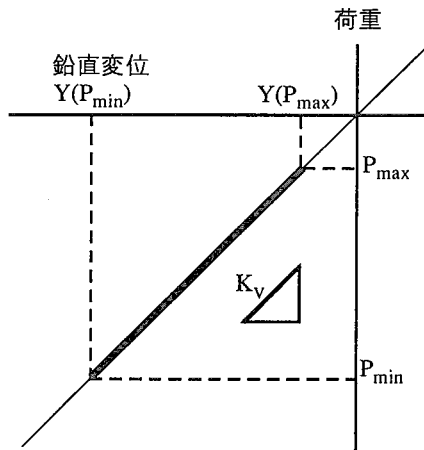


$$K_H^+ = \frac{Q_{\max} - Q_d}{X(Q_{\max}) - X(Q_d)}$$

$$K_H^- = \frac{-Q_{\max} + Q_d}{X(-Q_{\max}) - X(-Q_d)}$$

$$K_H = \frac{K_H^+ + K_H^-}{2}$$

図 3. 2. 3-2 履歴減衰を持つ積層ゴムの水平ばね定数に関する定義



$$K_V = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{Y(P_{\max}) - Y(P_{\min})}$$

図 3. 2. 3-3 鉛直ばね定数の定義

3.3 試験結果

3.3.1 基本特性試験におけるスケール則

(1) 水平方向基本特性試験

以下に水平方向基本特性試験の結果を示す。なお、実機相当のφ1200LRBの試験結果は、3.3.4項に別途記載する。試験結果のうち、φ200およびφ280の試験体の試験結果は動的2次元試験装置によるものであり、φ500およびφ700の試験体の試験結果は静的2次元試験装置によるものである（ただし、振動数依存性の検討に関してはすべて動的2次元試験装置の結果による）。なお、平成10年度に行った静的2次元試験装置による水平方向特性試験の結果には、試験装置の摩擦力（約1.5E-2MN）が含まれている。

a. 履歴曲線

図3.3.1-1には各LRBのスケールモデルの履歴ループ（面圧9.81MPa(100kgf/cm²）、加振振動数0.01Hz以下）を示す。φ500、φ700の履歴面積は、φ200、φ280と比較して若干小さくなっていることがわかる。また、φ200、φ280の履歴ループはせん断ひずみ100%程度まではせん断ひずみが大きくなるに従って第1剛性（または割線剛性）が高くなる修正バイリニア型の性状を示すのに対して、φ500、φ700の履歴ループはせん断ひずみ50%からも第1剛性が高くバイリニア型モデルに近い性状を示している。

各LRBのスケールモデルのせん断変形に伴う鉛直沈み込み（面圧9.81MPa(100kgf/cm²）、加振振動数0.01Hz以下）を図3.3.1-2に示す。面圧0MPaの場合には、せん断変形を与える前から2～6%程度の浮き上がりが生じている。これは、鉛プラグがこれ以前の加振により熱膨張しているためと考えられる。特にφ200およびφ280の試験体でφ500、φ700の試験体よりも浮き上がりが大きくなっている理由は、前者は後者よりも動的加振の試験ケースが入っているため加振回数が多くなっているためと考えられる。面圧0MPa以外の場合については、φ200の試験体で沈み込み量が左右対称となっていないものの、沈み込みの傾向はよく対応しており、せん断変形しても沈み込みがあまり大きくなっていないことがわかる。

b. せん断ひずみ依存性

図3.3.1-3には、各鉛直応力（面圧0、2.45、4.90、9.81、14.7MPa、加振振動数0.01Hz以下）下におけるスケールモデルのせん断ひずみに対する基準化水平ばね定数（設計値に対する試験値の比）を示す。昨年度試験を行ったφ200およびφ280の試験体では、せん断ひずみ100%未満では基準化水平ばね定数の変動が大きく現れたのに対して、今年度実施したφ500およびφ700の試験体においてはせん断ひずみ50%以下での変動はあるものの、その変動の大きさはφ200およびφ280と比べて小さい。一方、せん断ひずみ100%以上の領域においては、各スケールモデルの値はほぼ設計値となり、一致している。また、φ500とφ700の特性は、せん断ひずみ200%以下の全ひずみ領域でよく一致しているといえる。

図3.3.1-4には、各鉛直応力下におけるスケールモデルのせん断ひずみに対する基準化降伏荷重特性値（設計値に対する試験値の比）を示す。基準化降伏荷重特性値の変動の傾向は、基準化水平ばね定数と同様である。しかし、φ500およびφ700の試験体の降伏荷重特性値は、設計値に

対して 75～80%とやや低い値になっている。

図 3.3.1-5 には、各鉛直応力下におけるスケールモデルのせん断ひずみに対する等価減衰定数を示す。等価減衰定数は、 ϕ 200 および ϕ 280 においてはせん断ひずみ 25%時に 30%程度であるのに対して、 ϕ 500 および ϕ 700 においては 40～45%程度となっている違いがある。また、その他の領域では、 ϕ 500 および ϕ 700 の値が若干小さいものの、各スケールモデルともに値はほぼ対応している。

c. 振動数依存性

ϕ 500 の試験体において動的な加振は、加振機の性能上の制約から面圧 4.90MPa (50kgf/cm²) 以下でしか実施されていない。また、 ϕ 700 試験体は動的加振が行われていないため比較の対象外となる。

図 3.3.1-6 には、加振振動数に対する基準化水平ばね定数（せん断ひずみ 100%時）を示す。 ϕ 200 および ϕ 280 の試験体においては加振振動数が高くなるに従って、水平ばね定数が高くなる傾向がみられるが、 ϕ 500 の試験体においてその傾向は顕著ではない。

図 3.3.1-7 には、加振振動数に対する基準化降伏荷重特性値（せん断ひずみ 100%時）を示す。 ϕ 200 および ϕ 280 の試験体においては加振振動数が高くなるに従って、降伏荷重が減少する傾向にあるが、 ϕ 500 においては逆に増加する傾向を示している。

図 3.3.1-8 には、加振振動数に対する等価減衰定数（せん断ひずみ 100%時）を示す。これについては、降伏荷重特性値ほぼ同様の傾向を示していることがわかる。

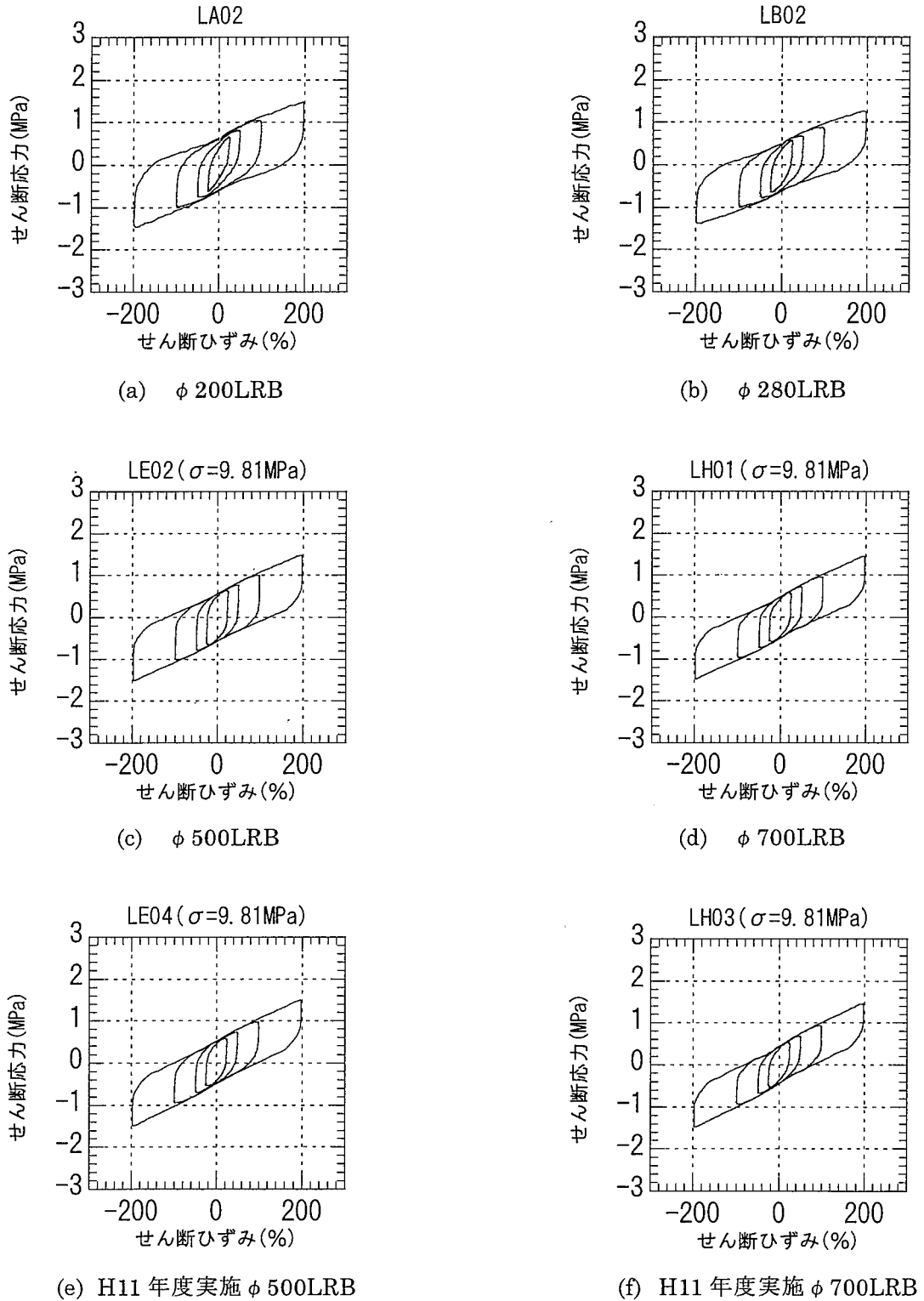


図 3.3.1-1 各 LRB のスケールモデルにおける水平方向履歴ループ
 (鉛直応力 $\sigma = 9.81\text{MPa}(100\text{kgf/cm}^2)$, 加振振動数 0.01Hz 以下)

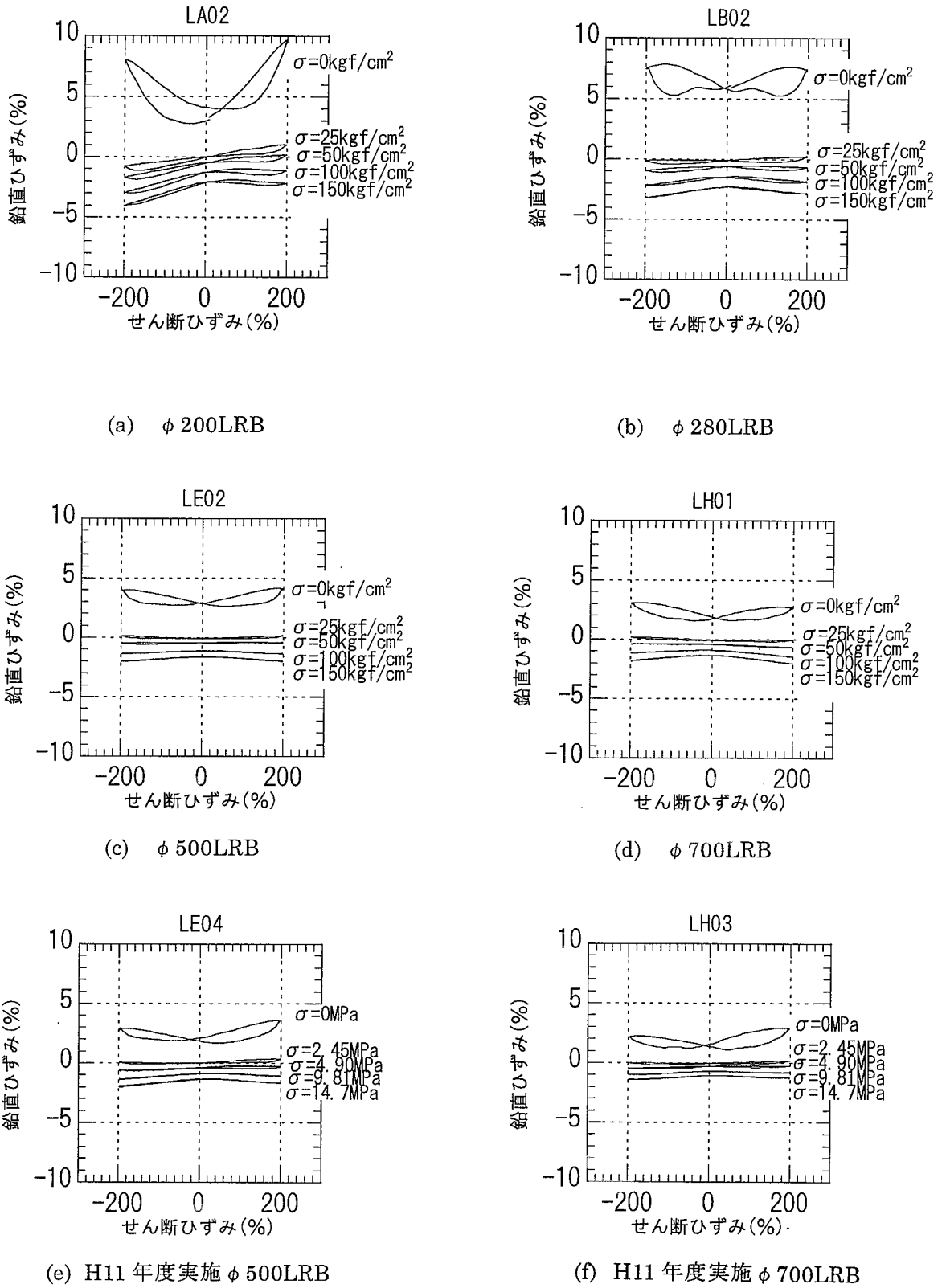


図 3.3.1-2 各 LRB のスケールモデルにおけるせん断変形に伴う沈み込み (加振振動数 0.01Hz 以下)

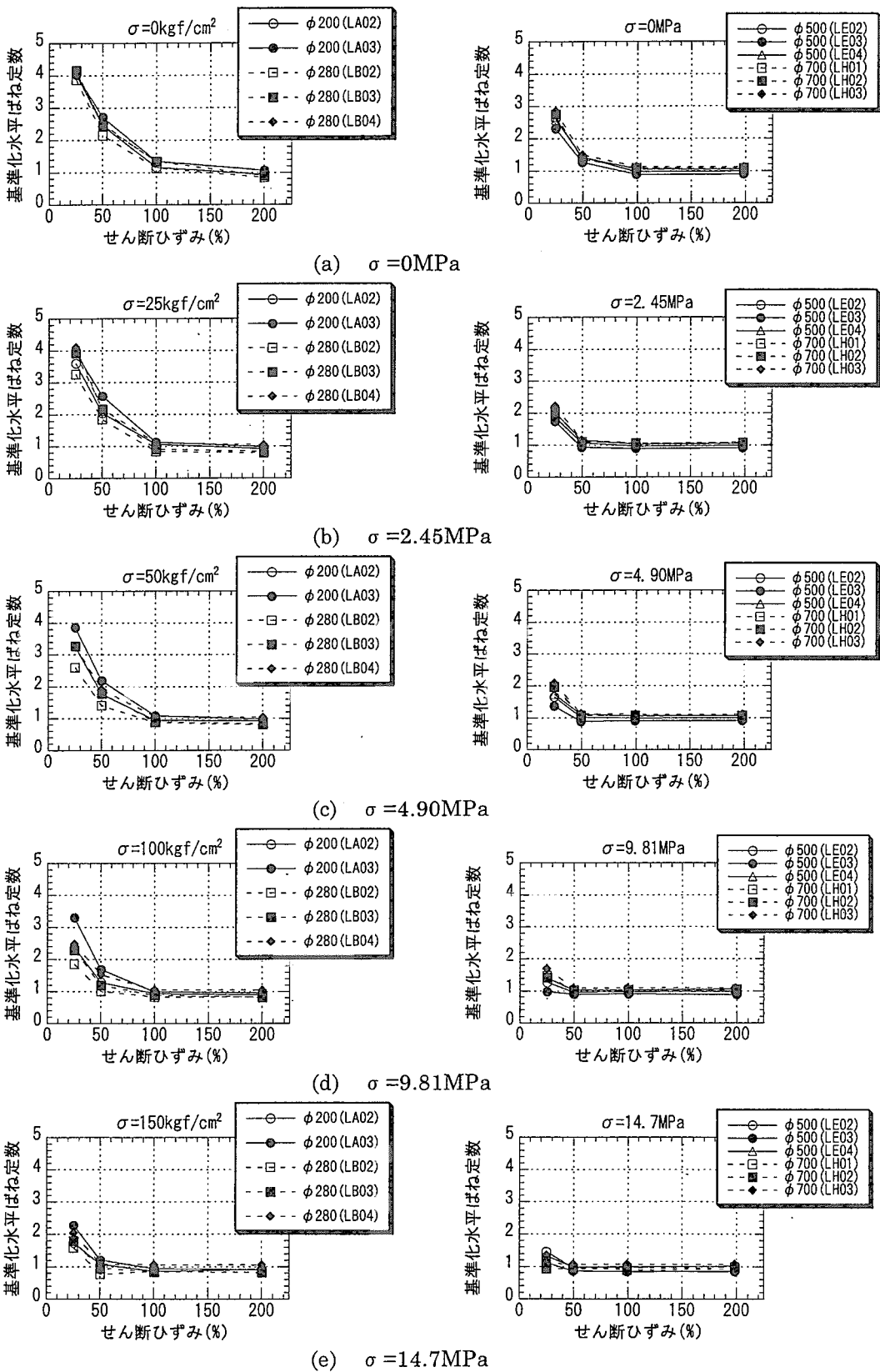


図 3.3.1-3 せん断ひずみに対する標準化水平ばね定数
 (加振振動数 0.01Hz 以下、 $\phi 200$ および $\phi 280$ は動的 2 次元試験装置、
 $\phi 500$ および $\phi 700$ は静的 2 次元試験装置で試験を実施)

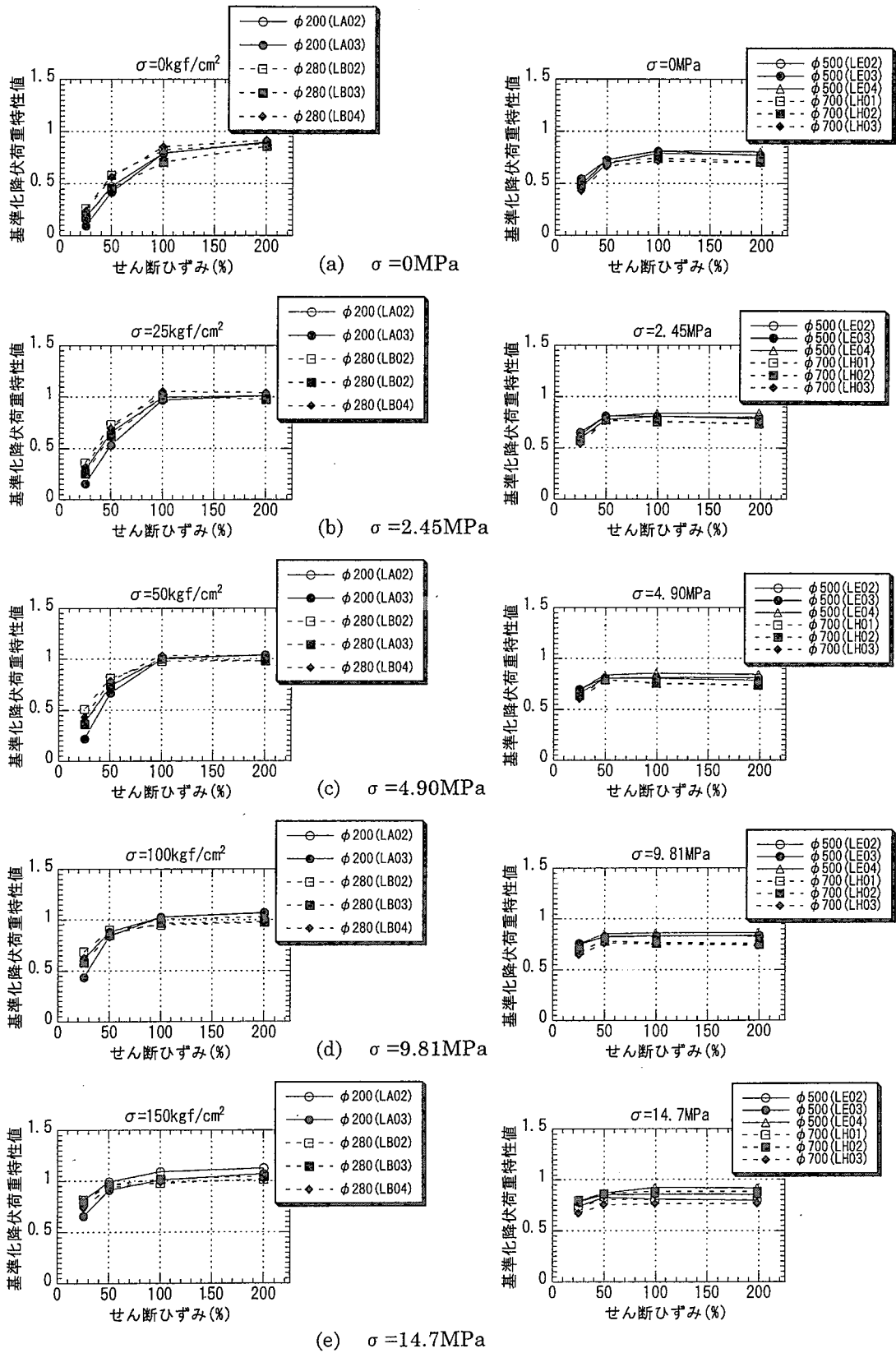


図 3.3.1-4 せん断ひずみに対する基準化降伏荷重特性値
 (加振振動数 0.01Hz 以下、 $\phi 200$ および $\phi 280$ は動的 2 次元試験装置、
 $\phi 500$ および $\phi 700$ は静的 2 次元試験装置で試験を実施)

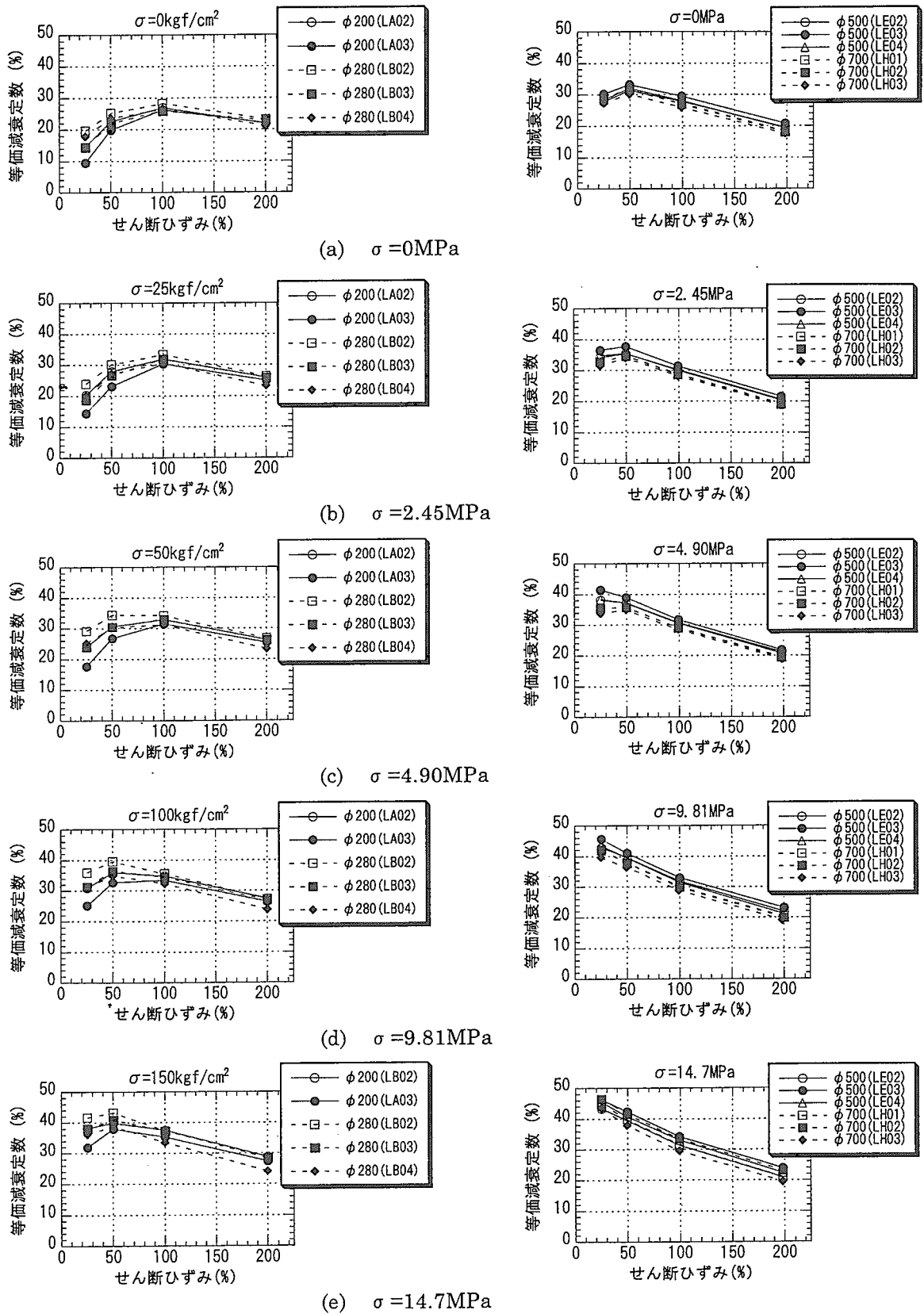


図 3.3.1-5 セン断ひずみに対する水平方向等価減衰定数
 (加振振動数 0.01Hz 以下、 $\phi 200$ および $\phi 280$ は動的 2次元試験装置、
 $\phi 500$ および $\phi 700$ は静的 2次元試験装置で試験を実施)

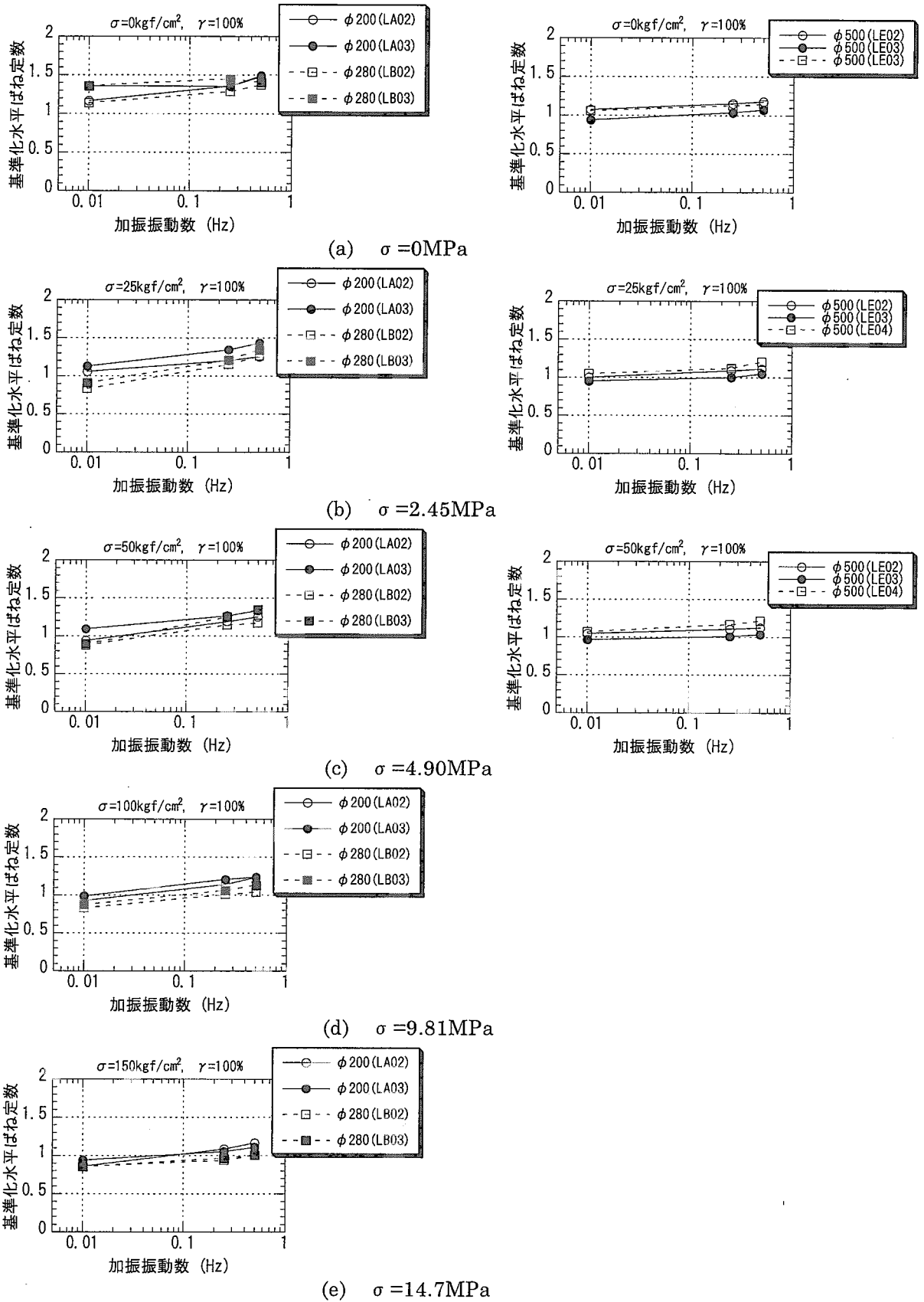


図 3.3.1-6 加振振動数に対する標準化水平ばね定数
(せん断ひずみ 100%)

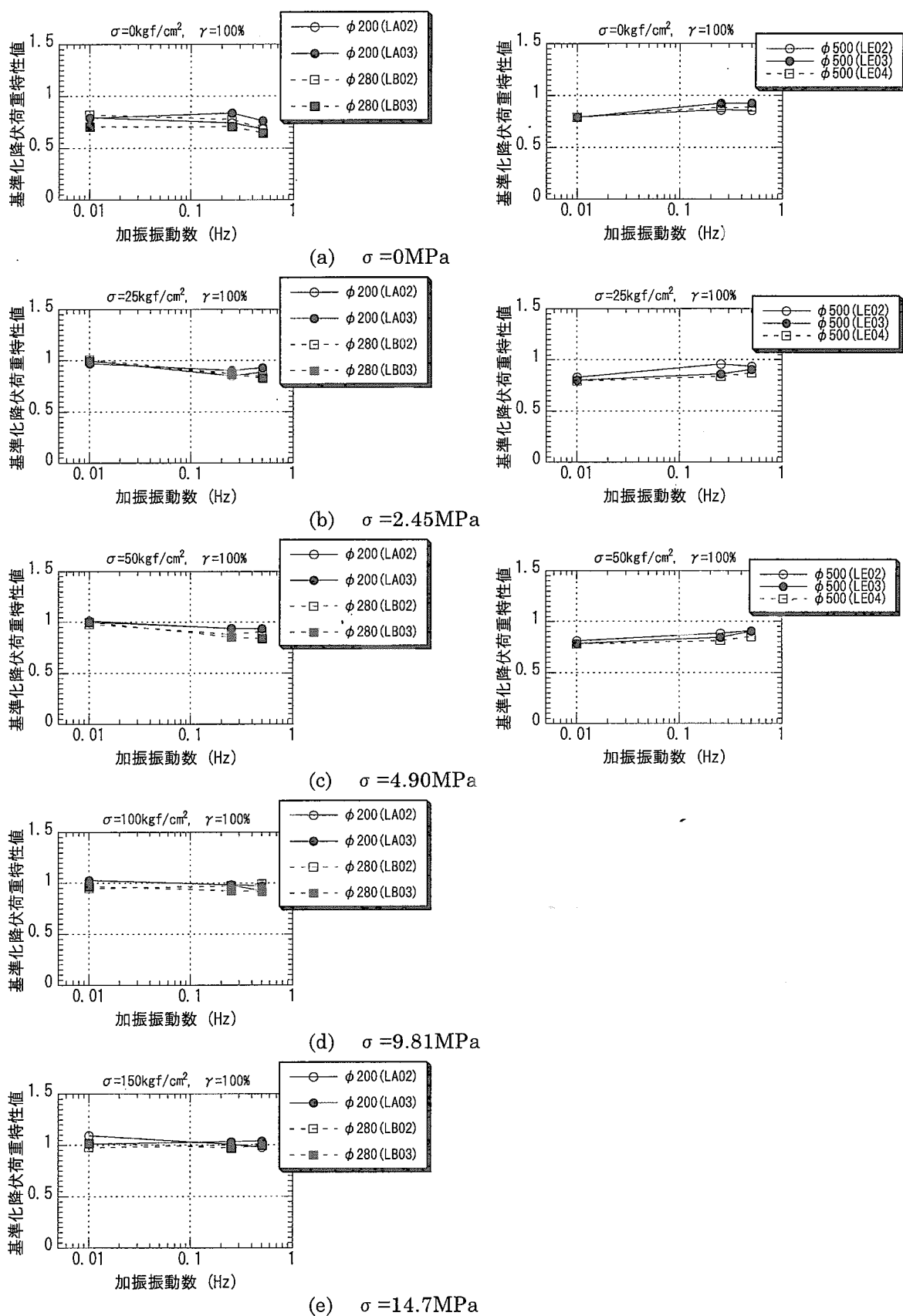


図 3.3.1-7 加振振動数に対する基準化降伏荷重特性値
(せん断ひずみ 100%)

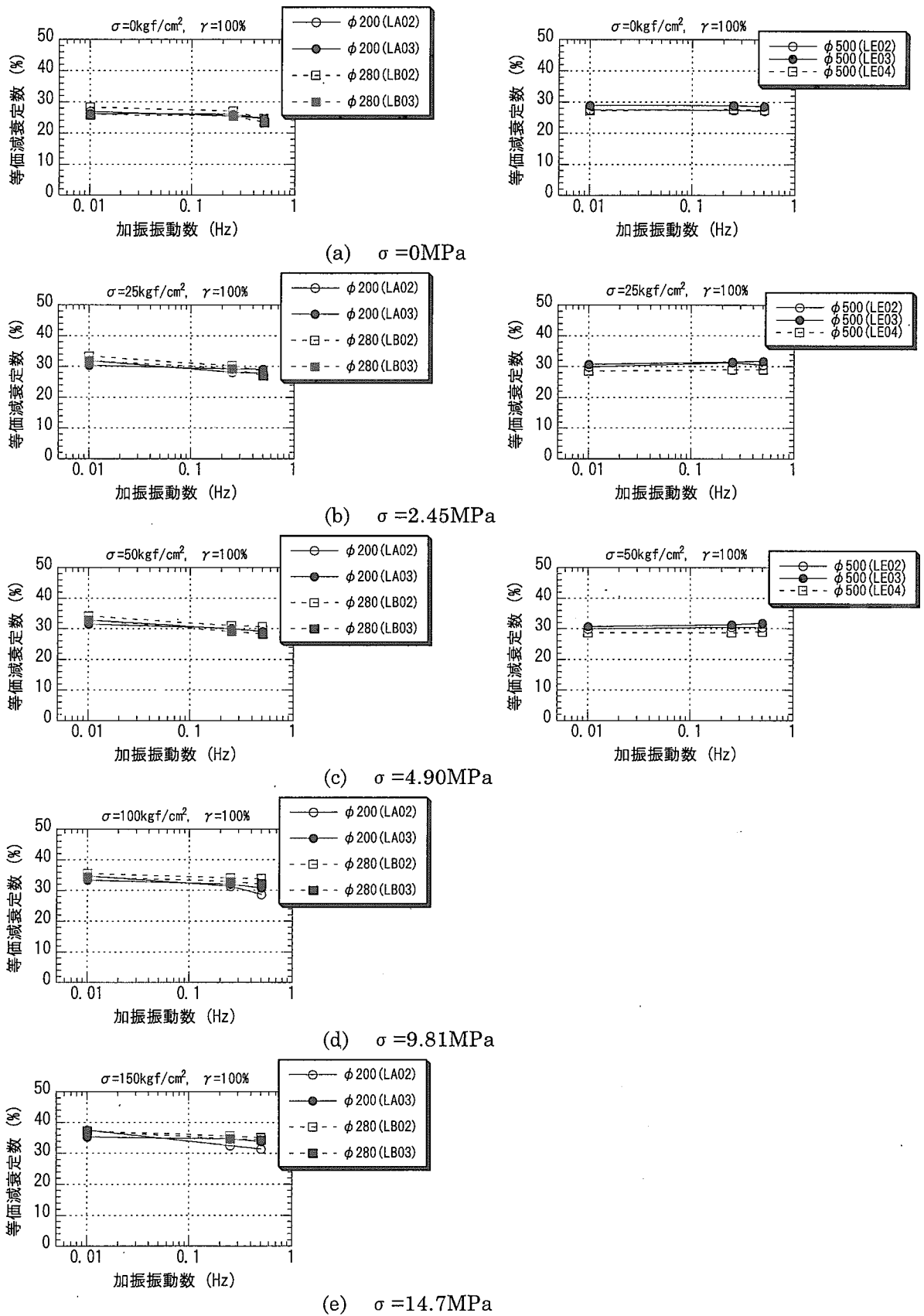


図 3.3.1-8 加振振動数に対する水平方向等価減衰定数
(せん断ひずみ 100%)

(2) 鉛直方向基本特性試験

a. 履歴曲線

図 3.3.1-9 には、 $\phi 200$ 、 $\phi 280$ 、 $\phi 500$ および $\phi 700$ の LRB における鉛直方向の応力ひずみ関係（加振振動数 0.01Hz 以下、鉛直応力 $9.81\text{MPa} \pm 4.90\text{MPa}$ 時）を示す。 $\phi 200$ と $\phi 280$ の履歴曲線はほぼ同一の性状を示しているが、 $\phi 500$ 、 $\phi 700$ とスケールが大きくなるにつれ、鉛直剛性が高くなっていることがわかる。また、 $\phi 700$ においては、若干履歴面積が大きくなっている。平成 11 年度実施の $\phi 500$ および $\phi 700$ の LRB ((e)、(f)) を平成 10 年度実施の LRB ((c)、(d)) と比較すると、鉛直ひずみが小さくなっており、上下鉛直ばね定数が増加している。

b. 鉛直応力依存性

図 3.3.1-10 には、各面圧下での基準化鉛直ばね定数（設計値に対する試験値の比）を示す。このとき、各面圧の 1/2 を片振幅として加振を行っている。履歴曲線の結果においても述べたように、 $\phi 500$ および $\phi 700$ の鉛直ばね定数は設計値に対して 1 倍～1.8 倍程度と高い値を示しており、 $\phi 200$ および $\phi 280$ の結果とは異なった性状を示している。特に、平成 11 年度実施の $\phi 700$ 試験体 (LH03) の鉛直ばね定数が高面圧域でかなり高くなっている。

図 3.3.1-11 には、各面圧下における等価減衰定数を示している。等価減衰定数においてもスケールによる違いが現れており、 $\phi 500$ 、 $\phi 700$ の試験体と $\phi 200$ 、 $\phi 280$ とでは、面圧に対する変化の傾向が異なっている。また、平成 11 年度実施の $\phi 500$ (LE04) および $\phi 700$ (LH03) の結果は、平成 10 年度実施した各 2 体の試験体とかなり違った性状を示している。

$\phi 200$ 、 $\phi 280$ の試験体と $\phi 500$ 、 $\phi 700$ の試験体における鉛直特性の違いにおいて、減衰が前者においては、LA02 試験体を除けば 1%～2%程度であるのに対して、後者のそれは 1%～5%とばらつきは大きいものの全体として大きな値を示している。通常の鉛入り積層ゴムの鉛直方向の等価減衰定数は 2%程度であることを考慮すれば、後者においては鉛プラグが作用していることも考えられる。もし鉛プラグが鉛直挙動に対して作用しているとする、後者の鉛直ばね定数が高くなることも予想される。しかし、上記の予測を証明できるだけの資料は現在なく、試験体のスケールにより鉛直特性が異なってくる原因については、今後の検討課題と考える。

c. オフセットせん断ひずみ依存性

図 3.3.1-12 にオフセットせん断ひずみに対する基準化鉛直ばね定数を示す。平成 9 年度行った $\phi 200$ および $\phi 280$ の試験体においては、オフセットせん断ひずみを与えても鉛直ばね定数の変化は小さいという結果が得られていたが、平成 10 年度実施の $\phi 500$ (LE02、LE03) および $\phi 700$ (LH01、LH02) の試験体においては、オフセットせん断ひずみが大きくなるに従って、鉛直ばね定数が低下する傾向が見られた。平成 11 年度実施の $\phi 500$ (LE04) および $\phi 700$ (LH03) においては、平成 10 年度実施分と比較し、鉛直ばね定数は高くなっているが、オフセットせん断ひずみが増加するに従って鉛直ばね定数が低下していく傾向は一致している。

図 3.3.1-13 には、オフセットせん断ひずみに対する鉛直方向の等価減衰定数を示す。等価減衰定数においても、 $\phi 200$ および $\phi 280$ の結果と $\phi 500$ および $\phi 700$ の結果は大きく異なっている。全体としてスケールが大きくなるほど、等価減衰定数が増加しており、 $\phi 500$ 、 $\phi 700$ の試験体では

オフセットせん断ひずみが増加するに従って等価減衰定数はどちらかといえば減少する傾向である。また、平成11年度実施分のφ500 (LE04) およびφ700 (LH03) の等価減衰定数は、他の試験体よりも値が小さくなっている。

d. 振動数依存性

c. 加振振動数依存性

図 3.3.2-14 には、加振振動数に対する基準化鉛直ばね定数および等価減衰定数（鉛直応力 $9.81\text{MPa} \pm 4.90\text{MPa}$ 時）を示す。基準化鉛直ばね定数については、加振振動数の影響はほとんど見られず、ほぼ一定の値を示している。それに対して、等価減衰定数は 0.5Hz 以上の領域で減少しており、10Hz 以上では負減衰となっている。これは、計測の位相ずれが生じている可能性もあり、今後検討が必要であろう。

試験体のスケールによる影響は、等価鉛直ばね定数および等価減衰定数ともに小さい。

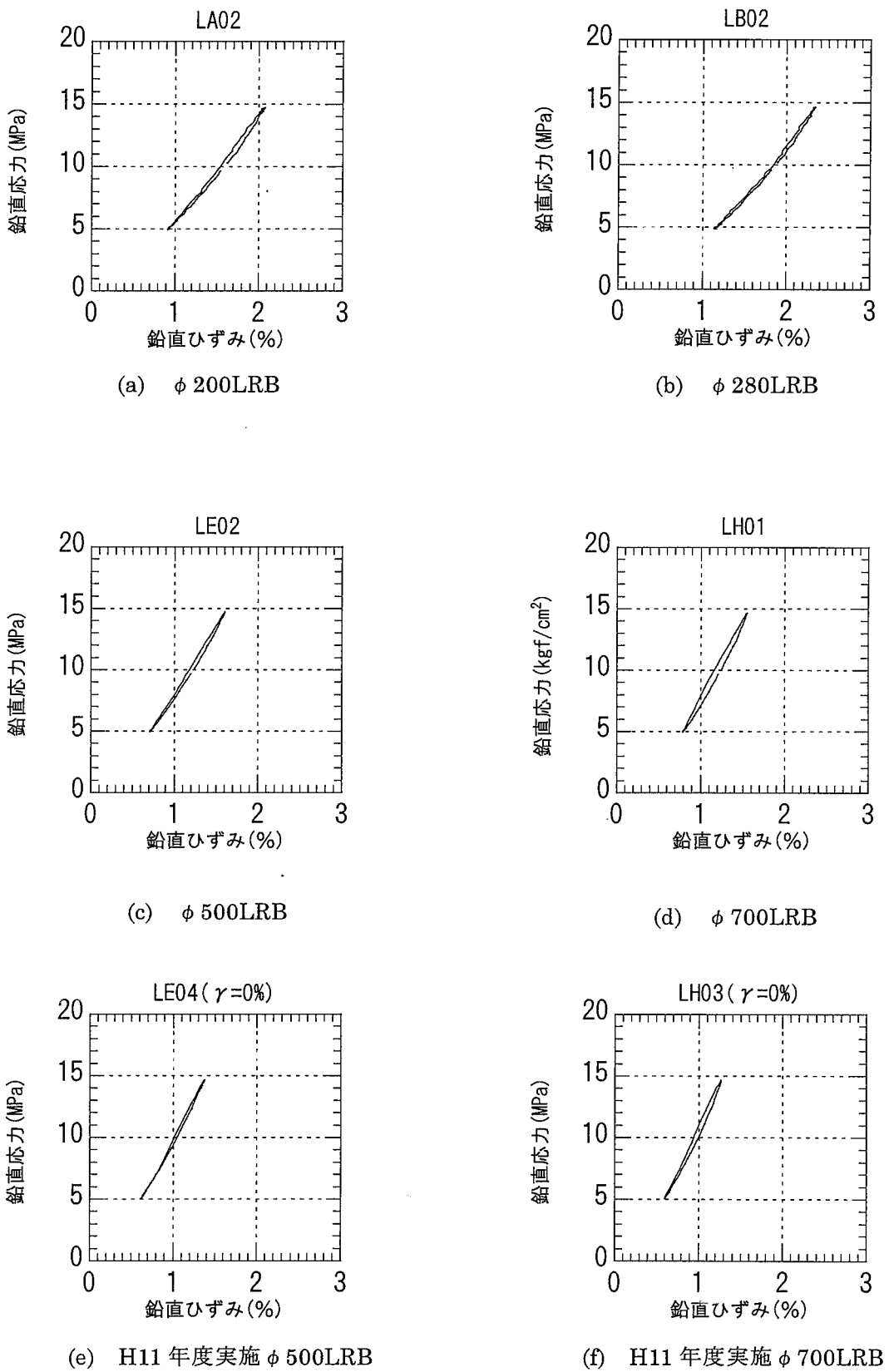


図 3.3.1-9 各 LRB のスケールモデルにおける鉛直方向履歴ループ
(加振振動数 0.01Hz 以下)

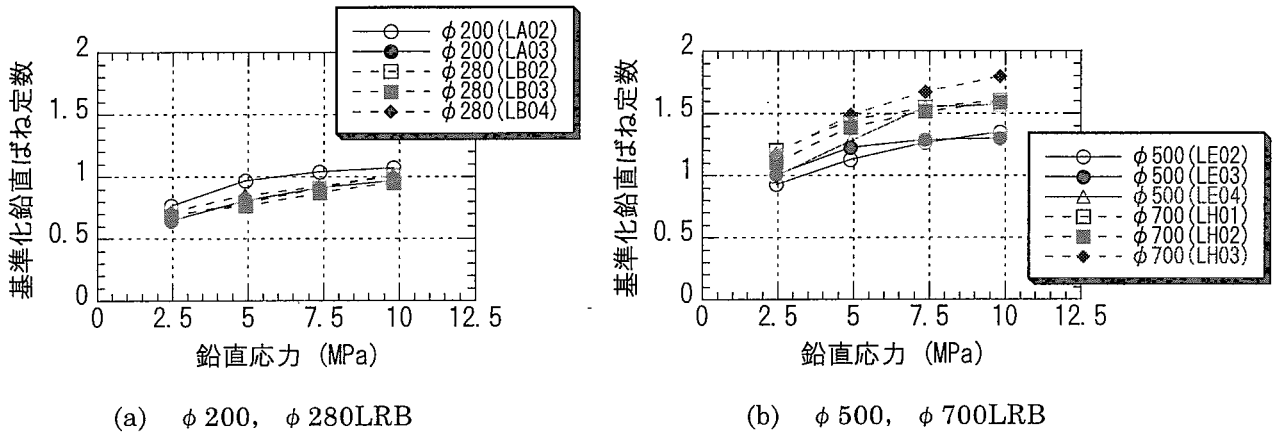


図 3.3.1-10 鉛直応力（面圧）に対する標準化鉛直ばね定数

（鉛直応力の 1/2 を加振振幅として与えている。加振振動数 0.01Hz 以下、
 ϕ 200 および ϕ 280 は動的 2 次元試験装置、
 ϕ 500 および ϕ 700 は静的 2 次元試験装置で試験を実施）

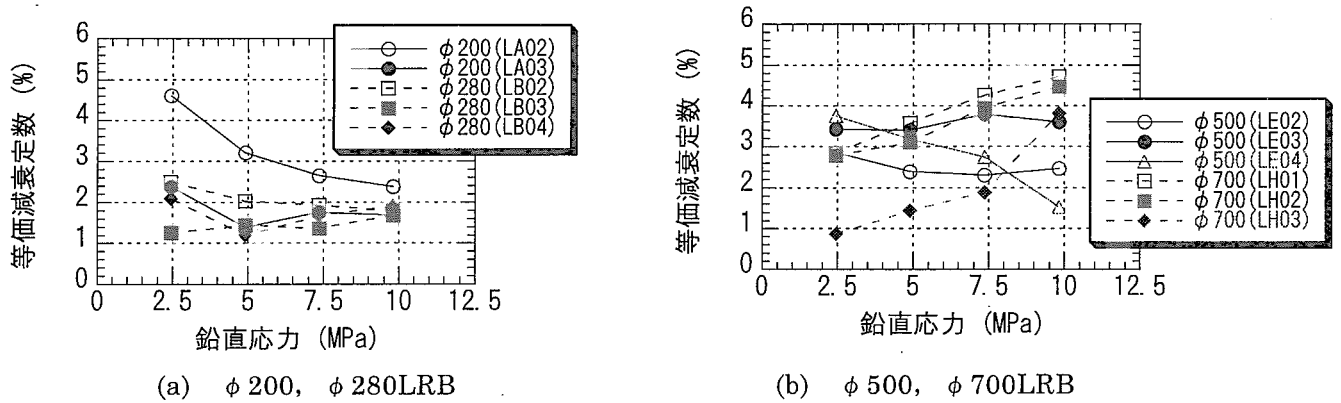


図 3.3.1-11 鉛直応力（面圧）に対する鉛直方向等価減衰定数

（鉛直応力の 1/2 を加振振幅として与えている。加振振動数 0.01Hz 以下、
 ϕ 200 および ϕ 280 は動的 2 次元試験装置、
 ϕ 500 および ϕ 700 は静的 2 次元試験装置で試験を実施）

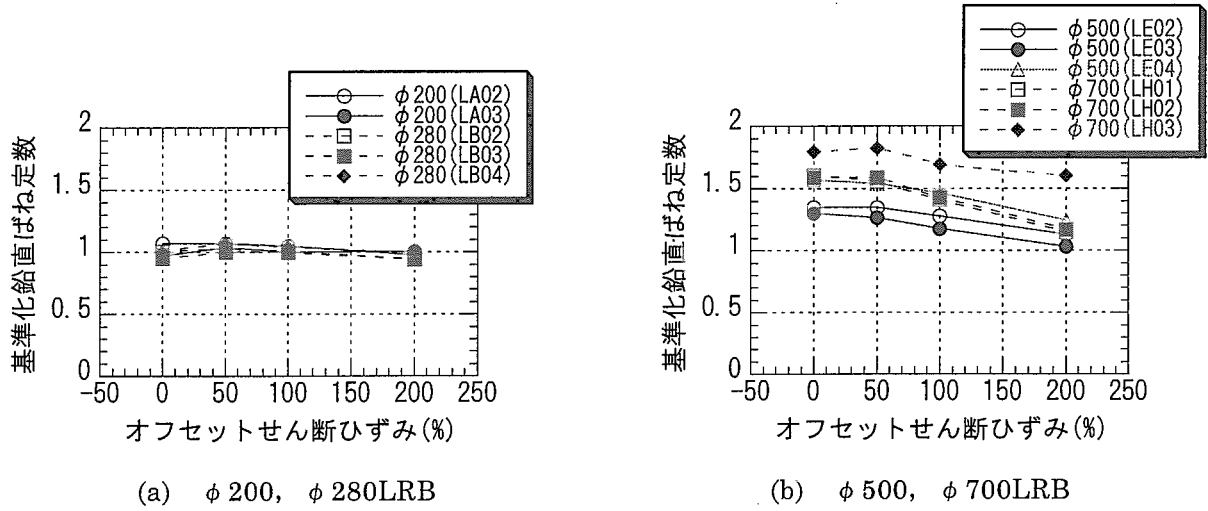


図 3.3.1-12 オフセットせん断ひずみに対する標準化鉛直ばね定数

(鉛直応力 9.81MPa±4.90MPa、加振振動数 0.01Hz 以下、

φ 200 および φ 280 は動的 2 次元試験装置、

φ 500 および φ 700 は静的 2 次元試験装置で試験を実施)

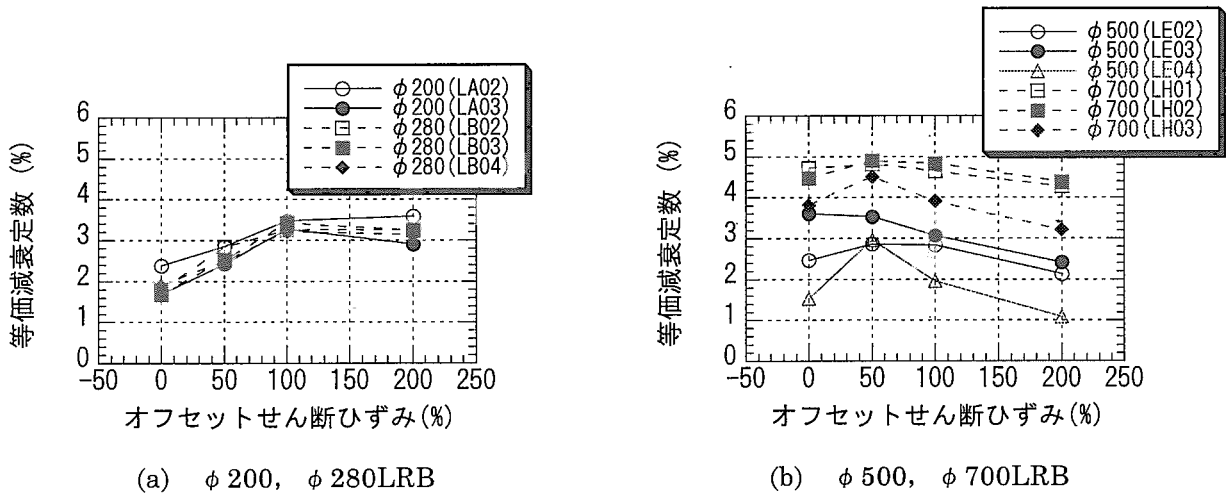


図 3.3.1-13 オフセットせん断ひずみに対する鉛直方向等価減衰定数

(鉛直応力 9.81MPa±4.90MPa、加振振動数 0.01Hz 以下、

φ 200 および φ 280 は動的 2 次元試験装置、

φ 500 および φ 700 は静的 2 次元試験装置で試験を実施)

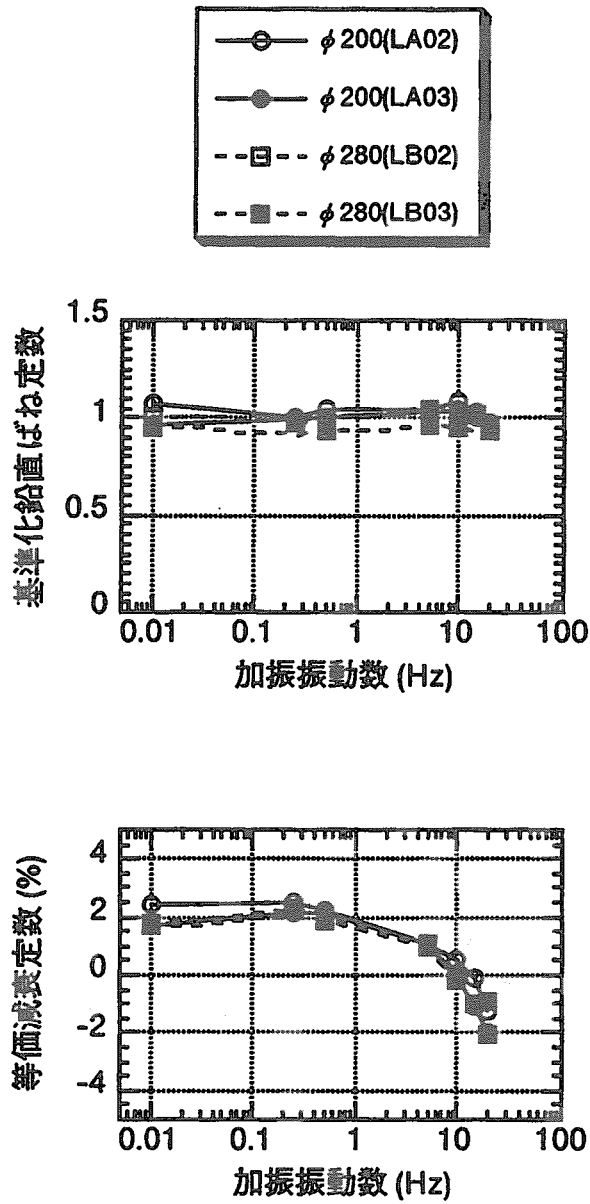


図 3.3.1-14 加振振動数に対する基準化鉛直ばね定数および鉛直方向等価減衰定数
(鉛直応力 $9.81\text{MPa} \pm 4.90\text{MPa}$)

3.3.2 鉛プラグの影響

(1) 水平方向基本特性試験

a. 履歴曲線

図 3.3.2-1 には、NRB の各スケールモデルにおける水平方向の履歴曲線（加振振動数 0.01Hz 以下）を示す。φ 500 および φ 700 の試験体においては履歴減衰を持っているように見えるが、これらの試験体は静的 2 次元試験装置により試験を実施したため、装置固有の摩擦力（1.5tonf 程度）を含んでいるためである。摩擦力の影響を無視すれば、せん断ひずみ 200%までの履歴曲線はほぼ線形である。

図 3.3.2-2 にはせん断ひずみに伴う NRB の沈み込み量（加振振動数 0.01Hz 以下）を示す。図 3.3.1-2 の LRB において見られた面圧 0MPa で見られた浮き上がりは生じておらず、前述のように鉛プラグの熱膨張が浮き上がりの原因であることが推察される。また、せん断ひずみに伴う沈み込みは図 3.3.1-2 の LRB と比較して沈み込みが若干大きくなっている。このことから、鉛プラグが沈み込みを抑えていることがわかる。

b. せん断ひずみ依存性

図 3.3.2-3 には、鉛入り積層ゴム（LRB）と天然ゴム系積層ゴム（NRB）のせん断ひずみに対する基準化水平ばね定数（加振振動数 0.01Hz 以下）について各スケールモデルでの比較を示す。NRB の各スケールモデルの基準化水平ばね定数は、ほぼ設計値と一致しており、これまでの試験データからは NRB におけるスケール則は、せん断ひずみ 200%以下の全ひずみ領域にわたってほぼ成り立っているといえる。また、このことは、LRB のせん断ひずみ 100%以下における各スケール間の性状の違いが鉛プラグ（またはその取り付け部）に起因していることを示唆している。

また、図 3.3.2-4 には、φ 200、φ 280 および φ 500 の NRB における等価減衰定数（加振振動数 0.01Hz 以下）の比較を示す。なお、静的 2 次元試験装置を用いた試験においては、摩擦の補正が必要となり、NRB のように等価減衰定数が低い場合には評価される減衰定数の誤差が大きくなるため、動的試験装置の結果のみを示す。等価減衰定数は面圧が増加するに従って若干大きくなる傾向にあるが、いずれのケースにおいても 1%~3%程度である。また、減衰定数の変化の傾向は、各スケールモデルともおおそ対応しており、NRB においては等価減衰定数に関してもスケール則がほぼ成立しているといえる。さらに、NRB の等価減衰定数は LRB と比較して非常に小さく、当然ではあるが、LRB の減衰のほとんどは鉛プラグによっていることがわかる。

c. 振動数依存性

図 3.3.2-5 には、加振振動数に対する LRB と NRB の各スケールモデルの基準化水平ばね定数についての比較（せん断ひずみ 100%時）を示す。NRB については各スケールモデルとも振動数依存性は顕著ではなく、LRB の振動数依存性が鉛プラグに起因していることがわかる。

図 3.3.2-6 には、加振振動数に対する NRB（φ 200、φ 280、φ 500）の等価減衰定数（せん断ひずみ 100%時）を示す。φ 200 および φ 280 の試験体においては加振振動数が高くなるに従って大きくなる傾向がみられるが、φ 500 の試験体ではそれほど顕著ではない。しかし、いずれの試験体においても、NRB の鉛直方向の等価減衰定数は 1.5%~3%程度であり、その変化は無視し得るものと考えら

れる。

d. 水平方向特性における鉛プラグの影響

上記の結果 (a. ~c.) より, LRBにおける水平方向の減衰特性は当然のことながら, 鉛プラグの影響が支配的であることがわかるとともに, 水平ばね定数のせん断ひずみ依存性や振動数依存性も鉛プラグに起因しているといえる。

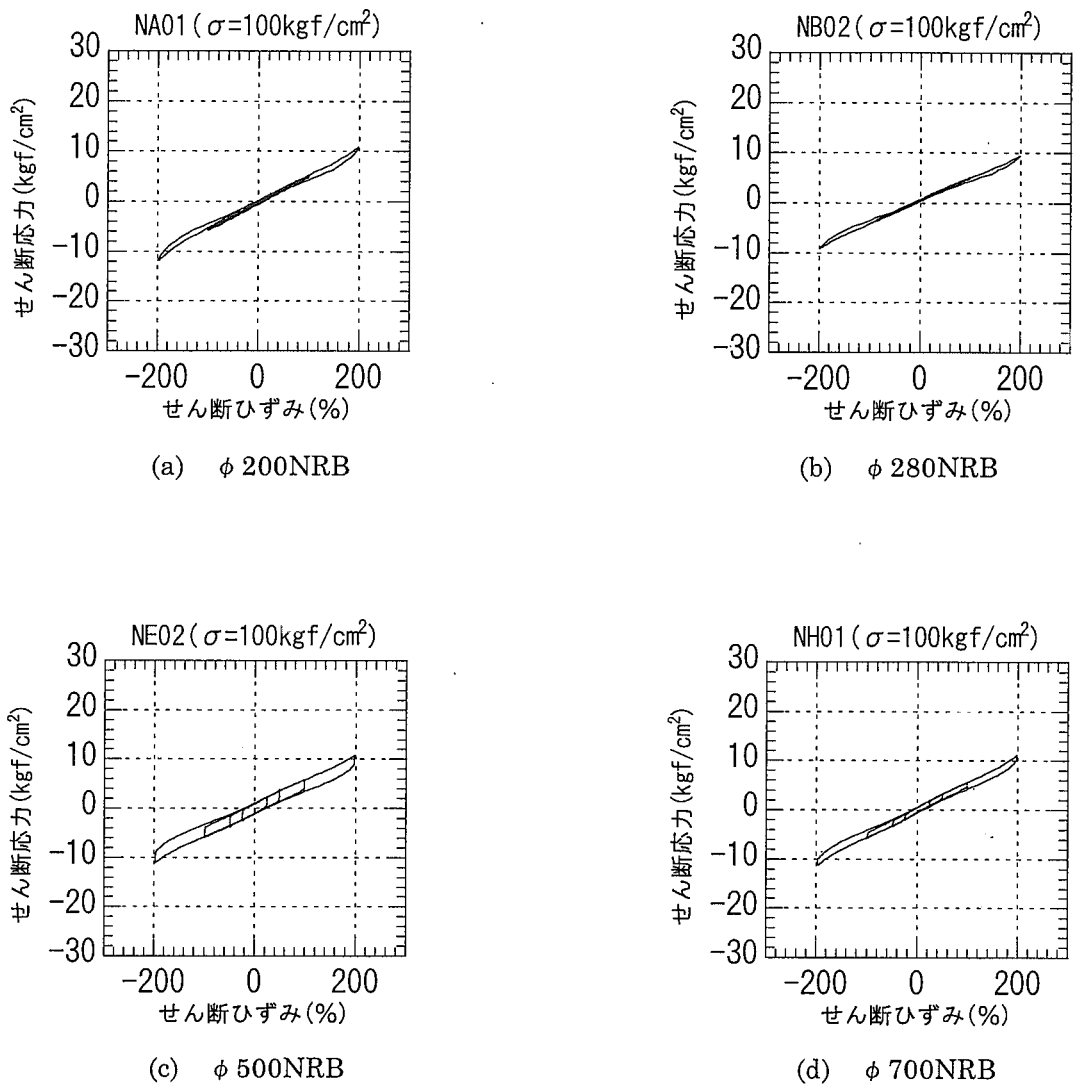
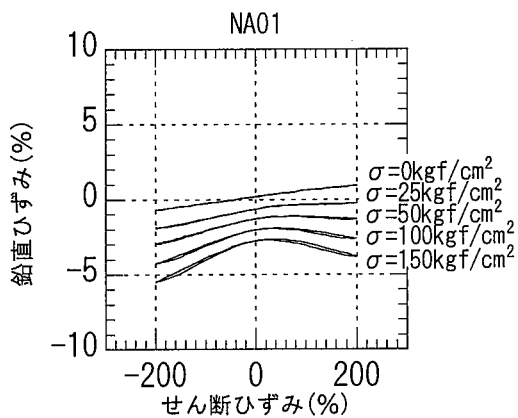
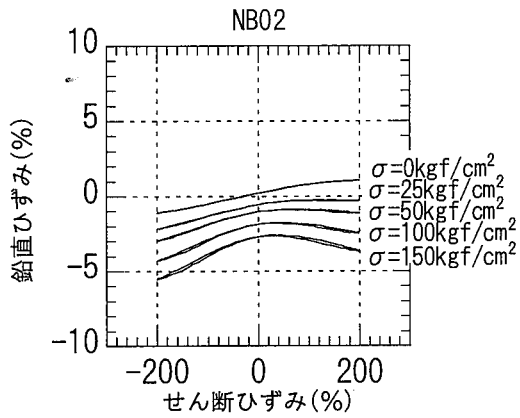


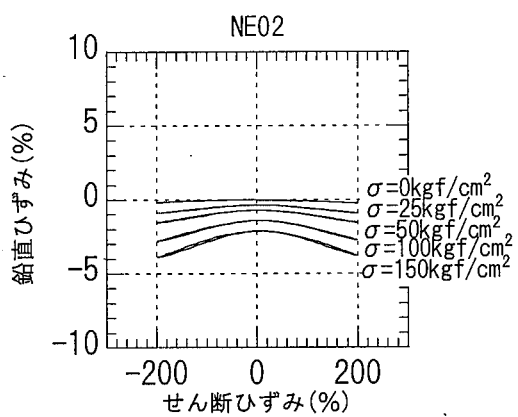
図 3.3.2-1 各 NRB のスケールモデルにおける水平方向履歴ループ
(加振振動数 0.01Hz 以下)



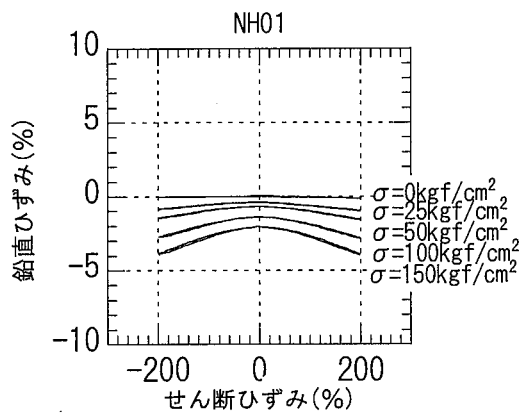
(a) ϕ 200NRB



(b) ϕ 280NRB



(c) ϕ 500NRB



(d) ϕ 700NRB

図 3.3.2-2 各 NRB のスケールモデルにおけるせん断変形に伴う沈み込み
(加振振動数 0.01Hz 以下)

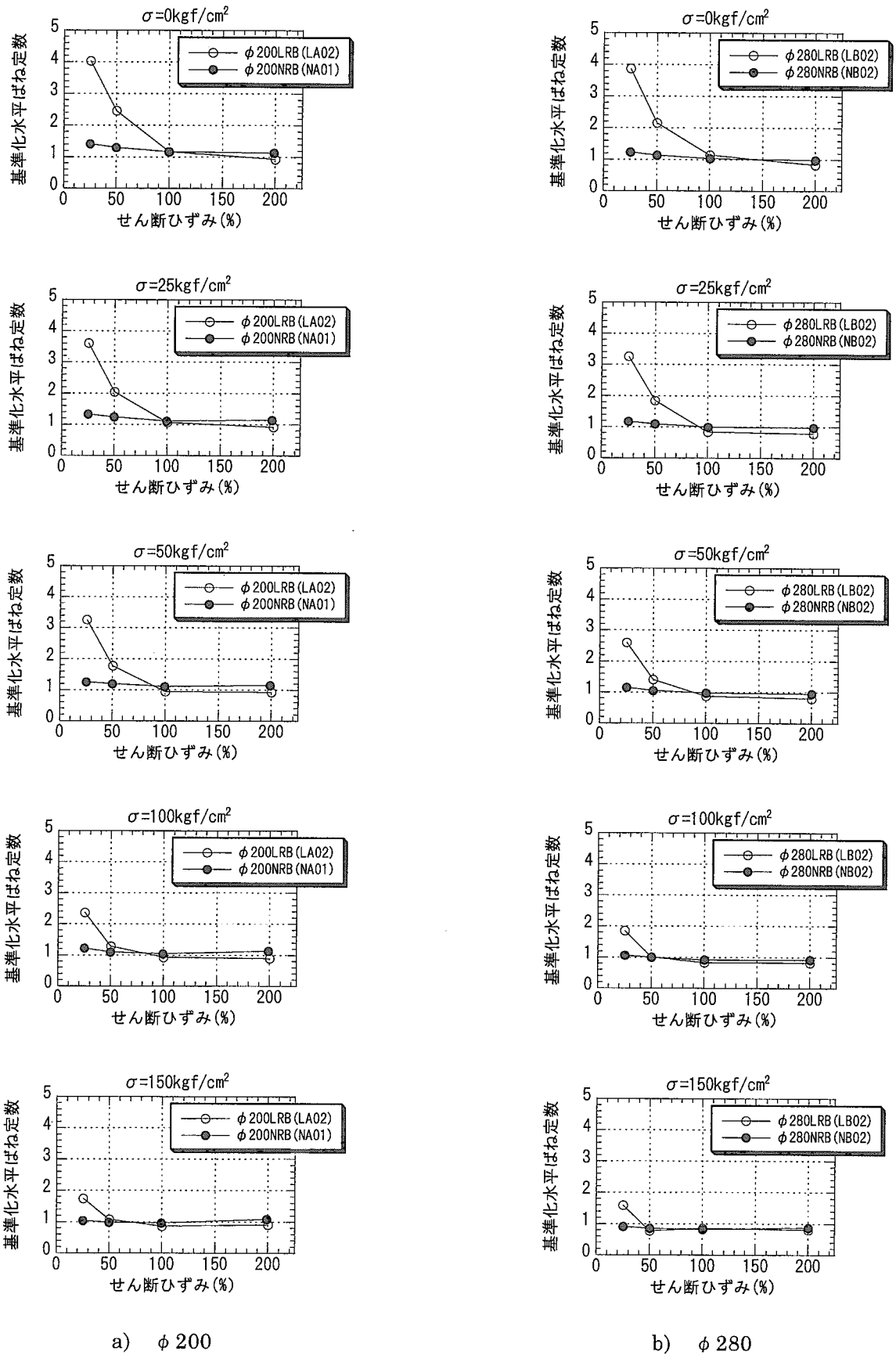
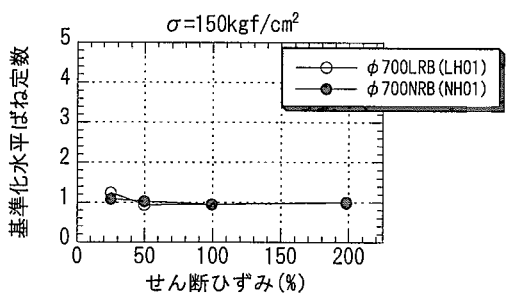
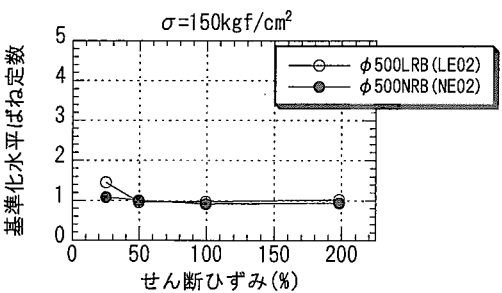
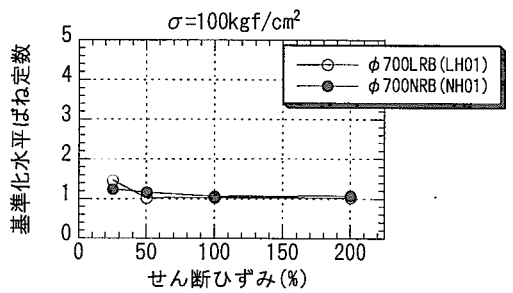
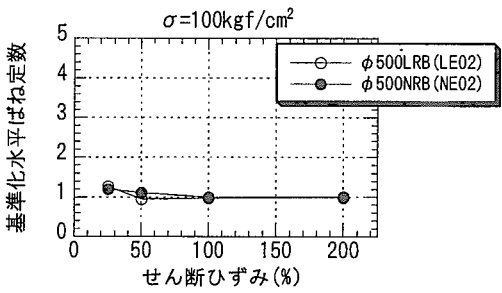
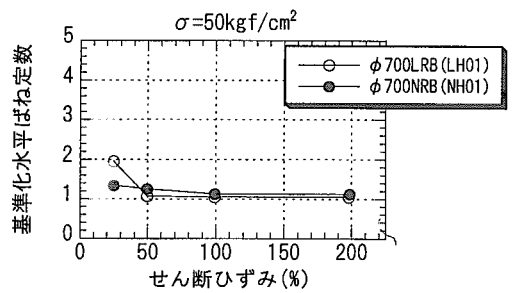
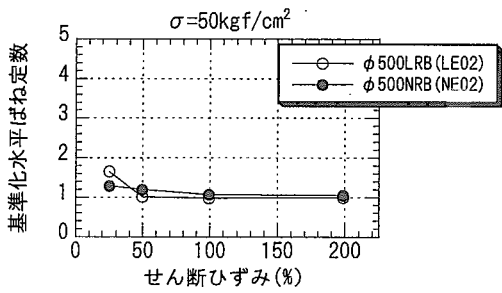
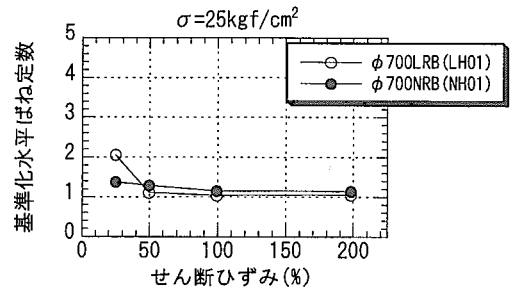
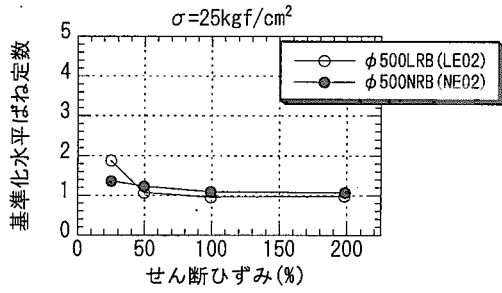
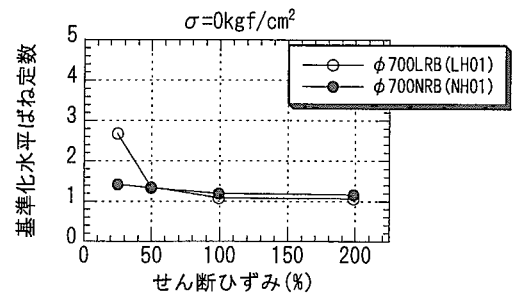
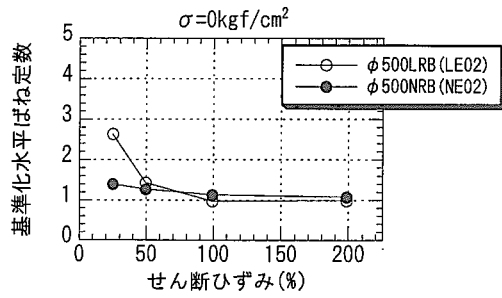


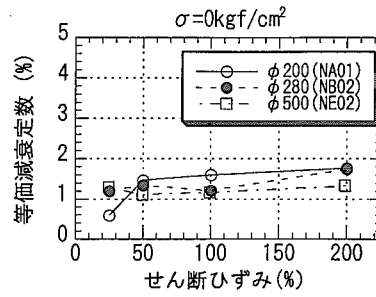
図 3.3.2-3(a) せん断ひずみに対する LRB と NRB の基準化水平ばね定数
(その 1 φ 200 および φ 280 試験体, 加振振動数 0.01Hz)



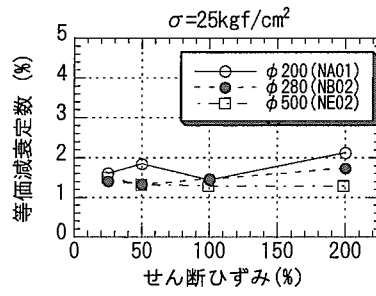
c) $\phi 500$

d) $\phi 700$

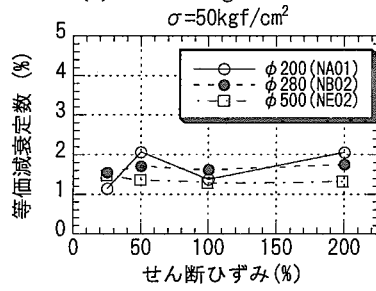
図 3.3.2-3(b) せん断ひずみに対する LRB と NRB の標準化水平ばね定数
(その 2 $\phi 500$ および $\phi 700$ 試験体, 加振振動数 0.01Hz 以下)



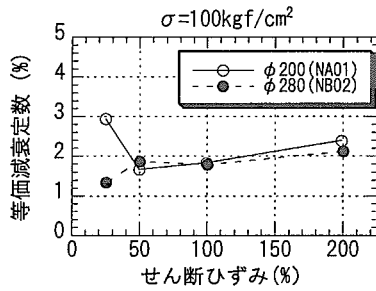
(a) $\sigma = 0 \text{ kgf/cm}^2$



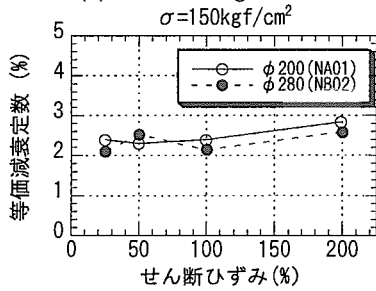
(b) $\sigma = 25 \text{ kgf/cm}^2$



(c) $\sigma = 50 \text{ kgf/cm}^2$

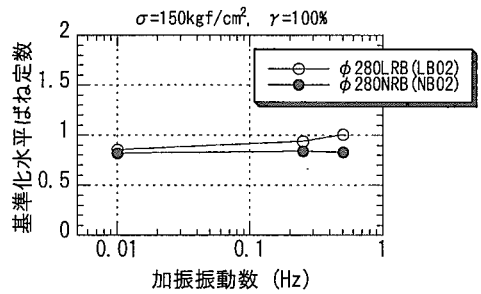
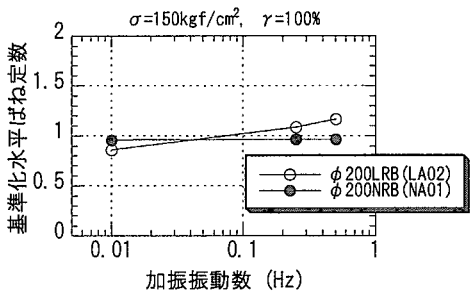
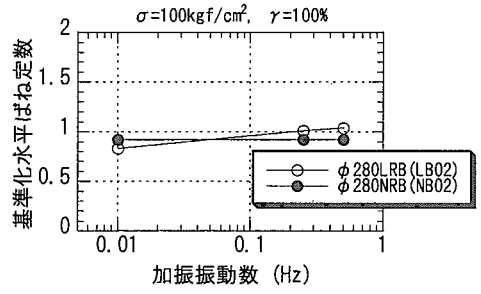
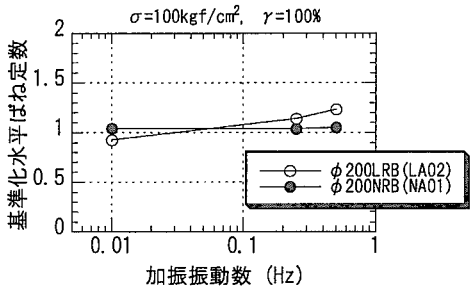
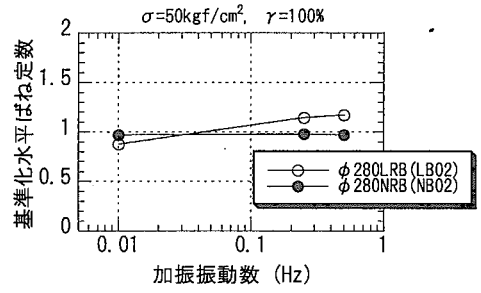
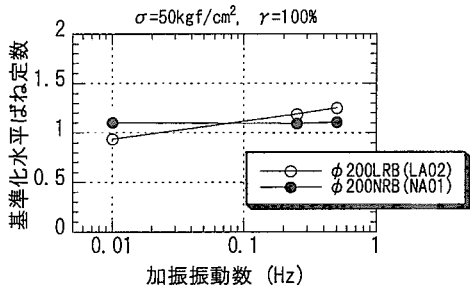
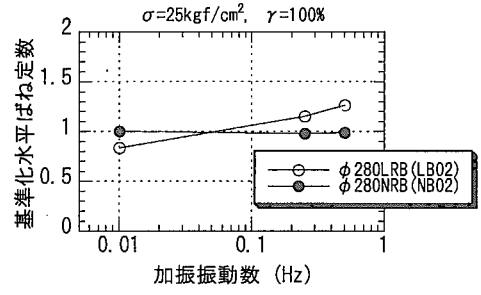
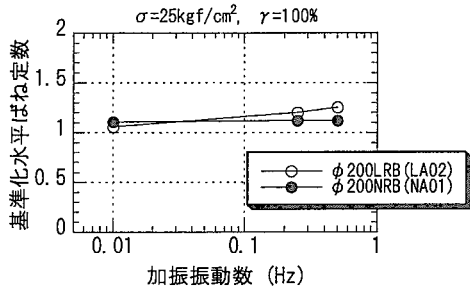
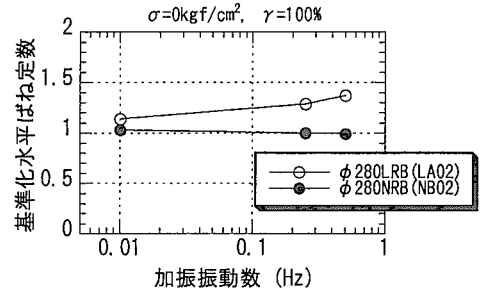
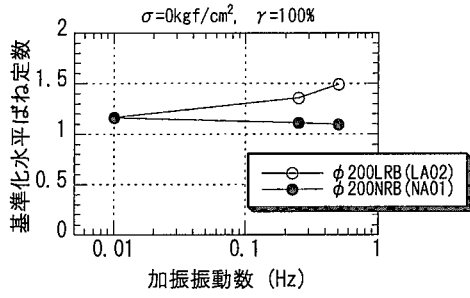


(d) $\sigma = 100 \text{ kgf/cm}^2$



(e) $\sigma = 150 \text{ kgf/cm}^2$

図 3.3.2-4 せん断ひずみに対する NRB ($\phi 200$, $\phi 280$, $\phi 500$) の
等価減衰定数の比較 (加振振動数 0.01Hz)



a) $\phi 200$

b) $\phi 280$

図 3.3.2-5(a) 加振振動数に対する LRB と NRB の基準化水平ばね定数
(その 1 $\phi 200$ および $\phi 280$ 試験体, せん断ひずみ 100%時)

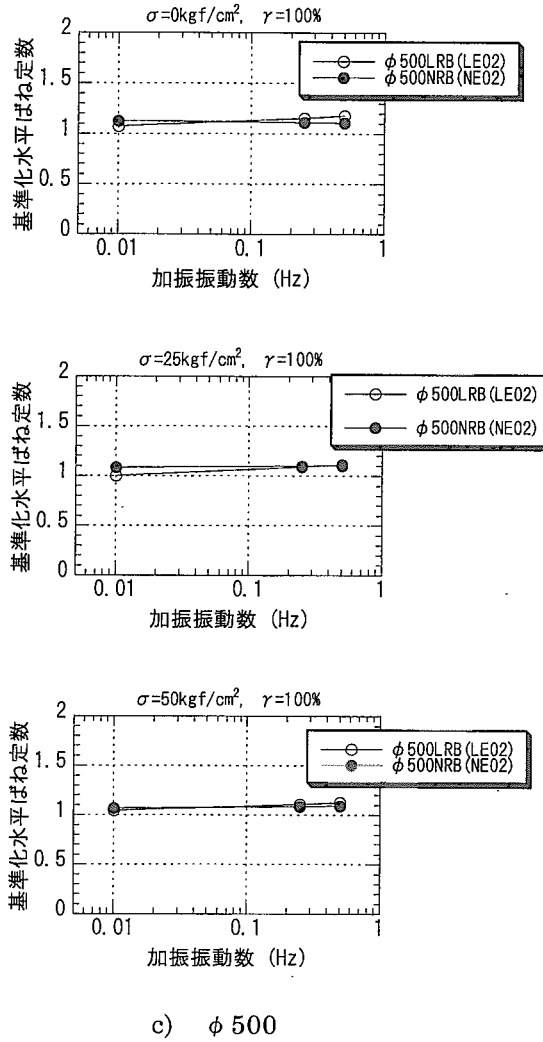
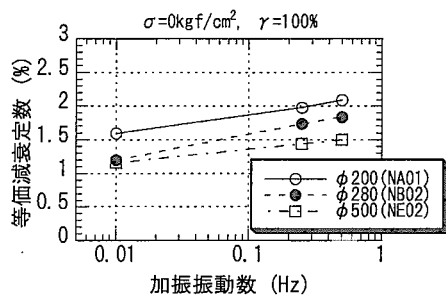
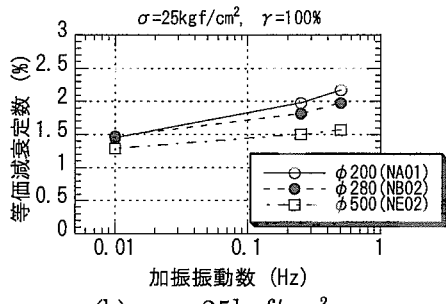


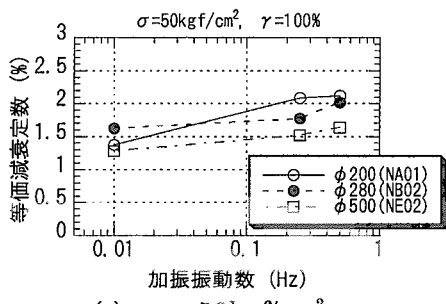
図 3.3.2-5(b) 加振振動数に対する LRB と NRB の標準化水平ばね定数
(その 2 $\phi 500$ 試験体, せん断ひずみ 100%時)



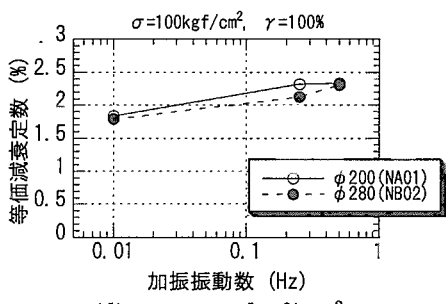
(a) $\sigma = 0 \text{ kgf/cm}^2$



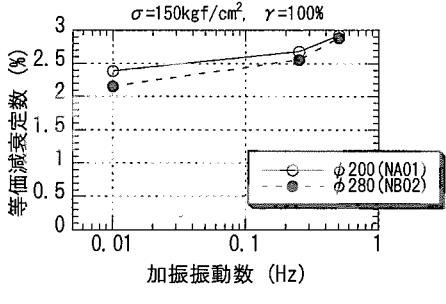
(b) $\sigma = 25 \text{ kgf/cm}^2$



(c) $\sigma = 50 \text{ kgf/cm}^2$



(d) $\sigma = 100 \text{ kgf/cm}^2$



(e) $\sigma = 150 \text{ kgf/cm}^2$

図 3.3.2-6 加振振動数に対する NRB ($\phi 200, \phi 280, \phi 500$) の
等価減衰定数の比較 (せん断ひずみ 100%時)

(2) 鉛直方向基本特性試験

a. 履歴曲線

各NRBスケールモデルの水平方向の履歴曲線（加振振動数0.01Hz以下，鉛直応力 $9.81\text{MPa} \pm 4.90\text{MPa}$ 時（ $100 \pm 50\text{kgf/cm}^2$ ））を図3.3.2-7に示す。いずれのモデルにおいても，ほぼ線形的な挙動を示しているが， $\phi 500$ ， $\phi 700$ と積層ゴムの直径が大きくなるほど鉛直剛性が大きくなっていることがわかる。これは，LRBの鉛直特性と同様である。

b. 鉛直応力依存性

図3.3.2-8には，各面圧下でのNRBの基準化鉛直ばね定数（LRBの鉛直ばね定数設計値に対する試験値の比，加振振動数0.01Hz以下）を示す。このとき，各面圧の1/2を片振幅として加振を行っている。また，NRBの鉛直ばね定数（LRBの鉛直ばね定数の0.84倍）を図中に破線で示している。 $\phi 200$ および $\phi 280$ の鉛直ばね定数は，設計値に対して全体に低く，面圧が高くなるに従いNRBの鉛直ばね定数の設計値に近づいている。一方， $\phi 500$ および $\phi 700$ のNRBの鉛直ばね定数は，面圧にほとんど依存せずにNRBの鉛直ばね定数よりも15%程度大きく（LRBの設計値程度に）なっている。

面圧に対する鉛直方向の等価減衰定数を図3.3.2-9に示す。等価減衰定数は，面圧に対する依存性はほとんど見られないものの，スケールが大きくなるに従って，大きくなる傾向が見られる。

c. オフセットせん断ひずみ依存性

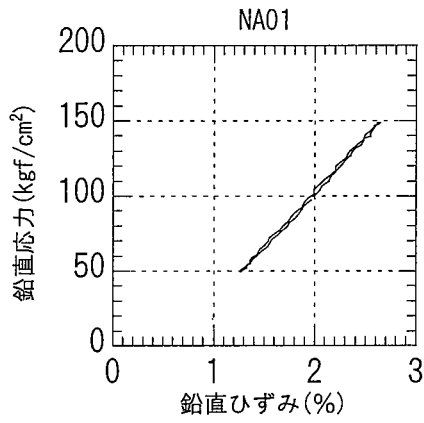
オフセットせん断ひずみに対する基準化鉛直ばね定数（LRBの鉛直ばね定数設計値に対する試験値の比，加振振動数0.01Hz以下，鉛直応力 $100 \pm 50\text{kgf/cm}^2$ ）を示す。また，NRBの鉛直ばね定数（LRBの鉛直ばね定数の0.84倍）を図中に破線で示している。オフセットせん断ひずみに対する鉛直ばね定数の変化の仕方は各スケールモデルでほぼ同様の傾向を示しているが， $\phi 500$ ， $\phi 700$ のNRBの方が $\phi 200$ ， $\phi 280$ に対して10%程度大きくなっている。

図3.3.2-11には，オフセットせん断ひずみに対する等価減衰定数を示す。等価減衰定数の変化の仕方は， $\phi 200$ と $\phi 280$ がほぼ一致しているのに対して， $\phi 500$ ， $\phi 700$ は若干異なった性状を示している。特に $\phi 700$ においては，他のスケールでは鉛直方向の等価減衰定数が2%程度以下であるのに対して，2~3%程度と若干高い値を示している。

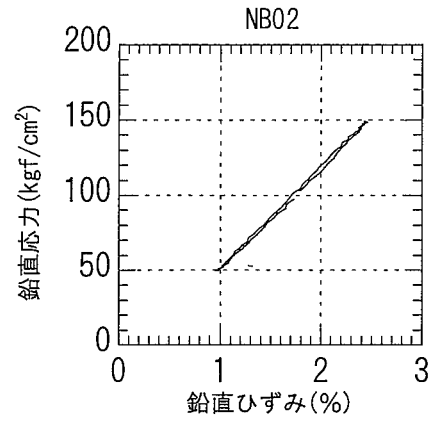
d. 鉛直方向特性における鉛プラグの影響

上記のスケールモデル間における鉛直方向特性の違い（a.～c.）は，LRBにおいても同様である。ただし，LRBにおいては，NRBより鉛直ばね定数および等価減衰定数が多少大きな値となっている。以上から，鉛直特性に関しては，NRBの鉛直方向特性がLRBの特性をかなり左右しており，それに鉛プラグの影響が累加され，鉛直ばね定数や等価減衰定数が増加しているといえる。

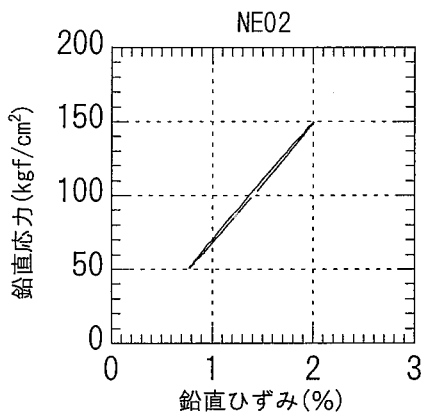
なお， $\phi 200$ ， $\phi 280$ の試験体と $\phi 500$ ， $\phi 700$ の試験体間にある特性の違いに関する原因については，今後検討する必要がある。



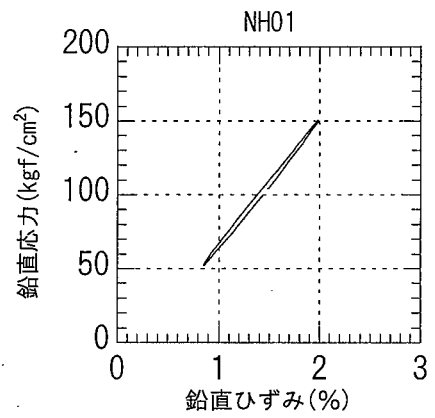
(a) φ 200NRB



(b) φ 280NRB

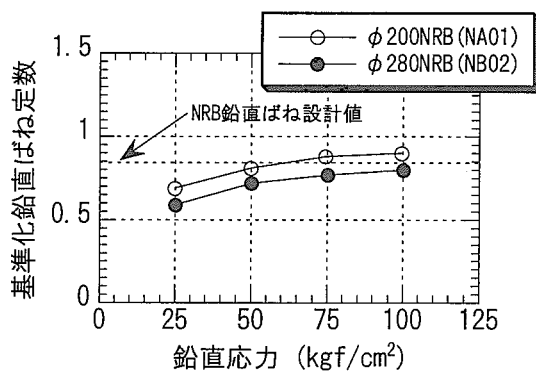


(c) φ 500NRB

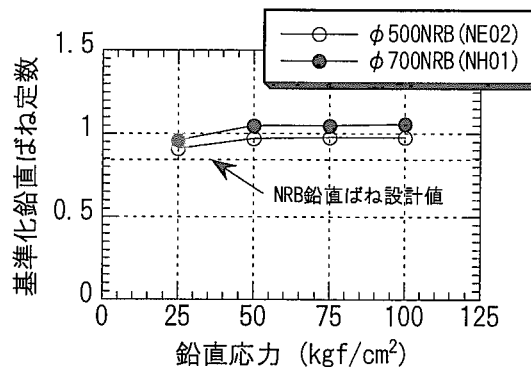


(d) φ 700NRB

図 3.3.2-7 各 NRB のスケールモデルにおける鉛直方向履歴ループ
(加振振動数 0.01Hz 以下)

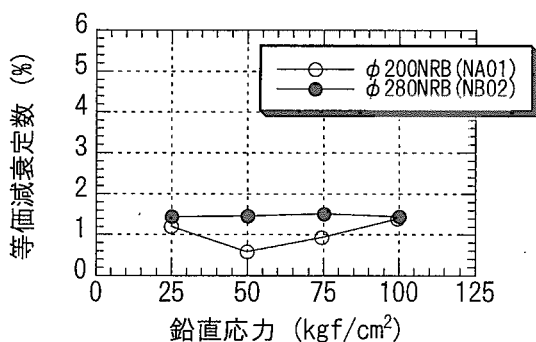


(a) φ 200, φ 280NRB

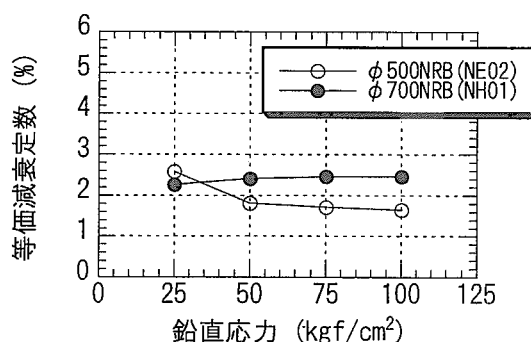


(b) φ 500, φ 700NRB

図 3.3.2-8 NRB の鉛直応力 (面圧) に対する標準化鉛直ばね定数

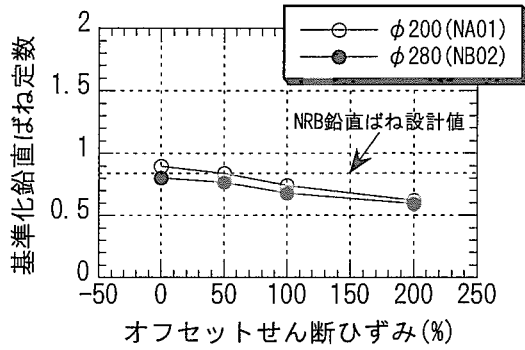


(a) φ 200, φ 280NRB

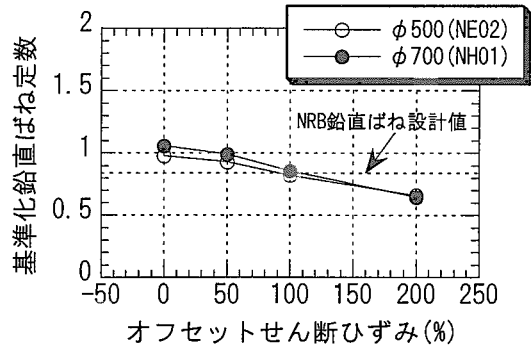


(b) φ 500, φ 700NRB

図 3.3.2-9 NRB の鉛直応力 (面圧) に対する鉛直方向等価減衰定数

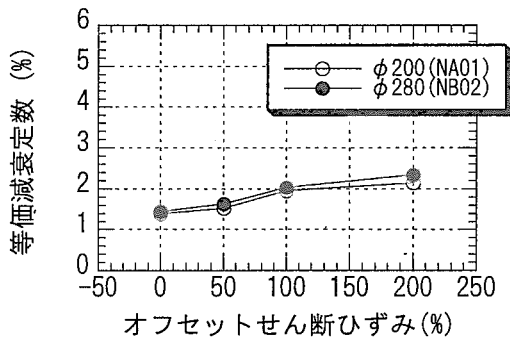


(a) $\phi 200$, $\phi 280$ NRB

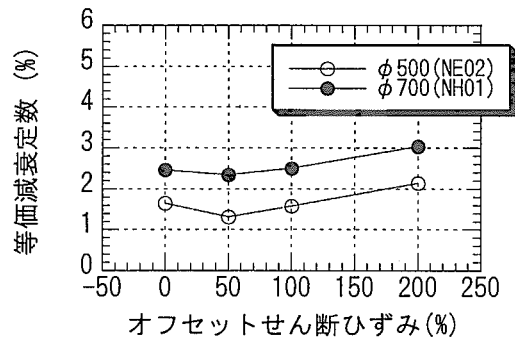


(b) $\phi 500$, $\phi 700$ NRB

図 3.3.2-10 NRB のオフセットせん断ひずみに対する標準化鉛直ばね定数



(a) $\phi 200$, $\phi 280$ NRB



(b) $\phi 500$, $\phi 700$ NRB

図 3.3.2-11 NRB のオフセットせん断ひずみに対する鉛直方向等価減衰定数

3.3.3 変形性能試験

図 3.3.3-1 および図 3.3.3-2 には、LRB の圧縮（鉛直応力 9.81MPa(100kgf/cm²)および 14.7MPa(150kgf/cm²)）時の漸増載荷破断試験における結果を示す。以下の結果については、すべて破断時までの履歴を示しているが、履歴図からは明瞭に破断がわからないものがある。なお、破断の判定は、最大荷重を記録したせん断ひずみを示している。φ200 および φ280 の試験体における破断ひずみは 500%程度となっている。それに対して、φ500 および φ700 の試験体における破断ひずみは、400%~500%と多少ばらつきが見られる。破断応力は、いずれも 3MPa 程度となっている。なお、漸増載荷試験であること、鉛プラグの径が太いこと、鉛直応力が高いことなどが原因となり、ハードニングはそれほど顕著には生じていない。

図 3.3.3-3 には、LRB を無負荷状態から引張りひずみ 150%までオフセットさせた際の履歴を示す。引張りひずみ 10%で引張応力は 2MPa 程度となり、降伏していることがわかる。図 3.3.3-4 には、LRB の引張り（引張りひずみ 150%）時の漸増載荷破断試験における結果を示す。破断ひずみは、250%~394%とややばらつきが大きく、スケールによる違い以上に個体差によるもの大きい可能性がある。

図 3.3.3-5 には、φ500 および φ700 の NRB における圧縮（鉛直応力 9.81MPa(100kgf/cm²)）時漸増載荷破断試験の結果を示す。NRB についても破断ひずみは 450%程度であり、LRNB の破断結果と比較して鉛プラグが破断に悪い影響を与えるといった現象は特に確認されない。しかし、NRB の破断応力は 4MPa 程度と LRB の破断応力より高くなっていると同時に、LRB と比してハードニングが顕著に生じている。

まとめとして、表 3.3.3-1 には各スケールの LRB および NRB の破断せん断ひずみを示す。破断ひずみについては以下のようにまとめられる。

- ① LRB の圧縮域における破断せん断ひずみは、スケールが大きくなるに従い若干破断ひずみが減少する傾向がうかがえるものの、それほど顕著なものではない。破断ひずみは面圧 9.81MPa 下では 400%~550%、面圧 14.7MPa 下では 470%~500%で変動は比較的小さい。
- ② LRB の引張り 150%ひずみ下における破断せん断ひずみは、250%~400%とばらつきが大きい。スケールの影響よりも試験体の特性のばらつきの方が結果に現れているものと思われる。
- ③ NRB の面圧 9.81MPa 下における破断ひずみは、スケールによらず 450%~500%であった。

表3.3.3-1 各スケールのLRBおよびNRBの破断せん断ひずみ(%)

破断試験条件	LRB				NRB			
	φ 200	φ 280	φ 500	φ 700	φ 200	φ 280	φ 500	φ 700
面圧9.81MPa	500	550	400	400	450	483	450	469
面圧14.7MPa	500	500	500	469	—	—	—	—
引張150%オフセット		300	394	250	—	—	—	—

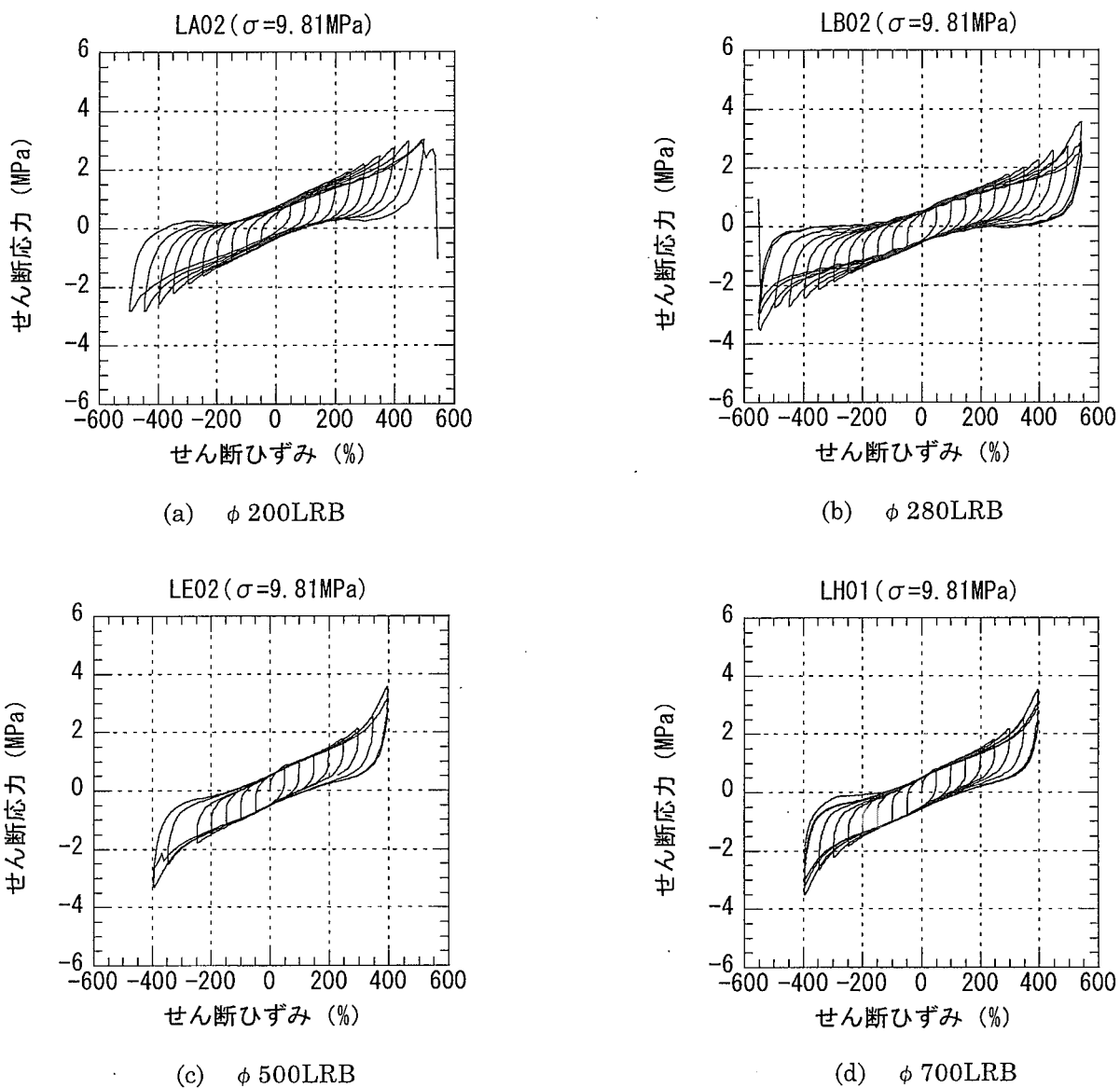


図 3.3.3-1 LRB 漸増載荷破断試験結果
 (鉛直応力 9.81MPa, 加振振動数 0.01Hz, せん断ひずみ 50%ずつ漸増)

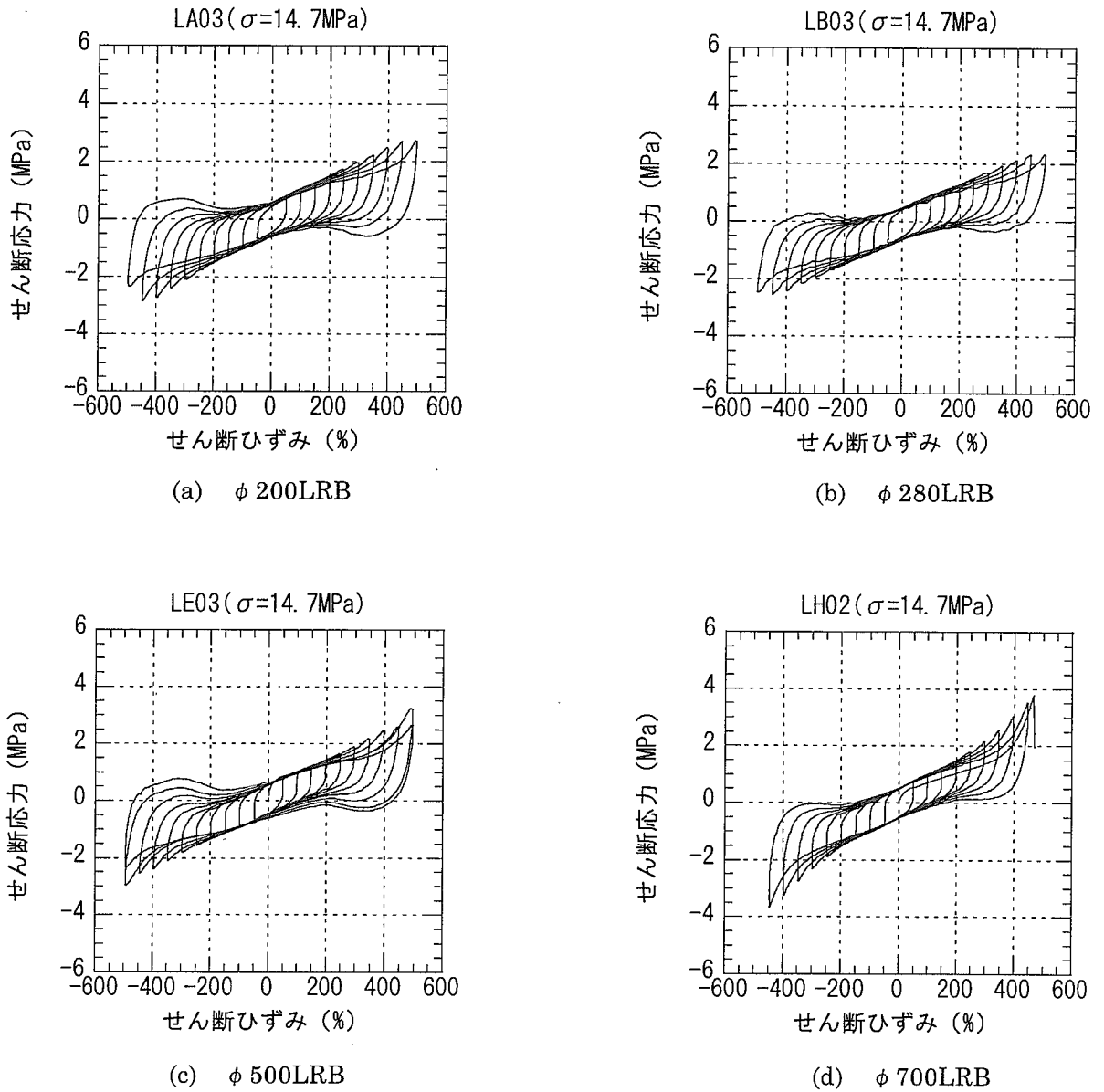
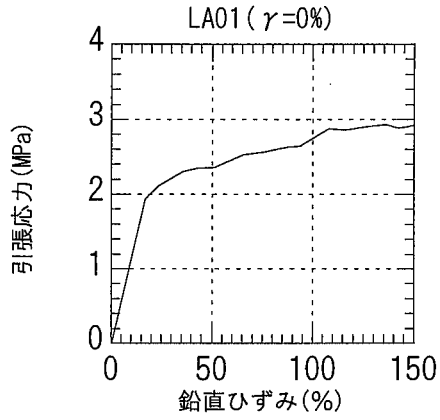
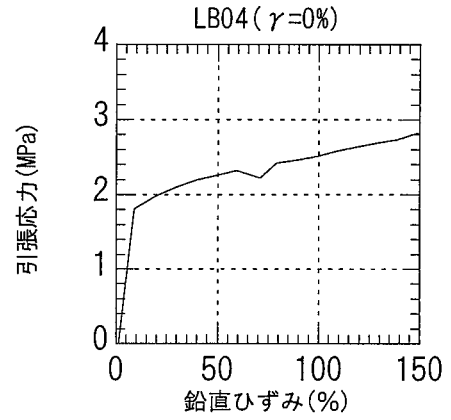


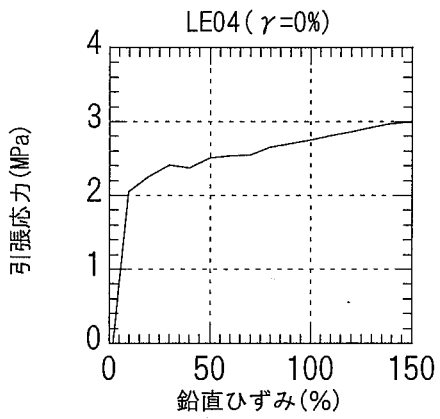
図 3.3.3-2 LRB 漸増載荷破断試験結果
 (鉛直応力 14.7MPa, 加振振動数 0.01Hz, せん断ひずみ 50%ずつ漸増)



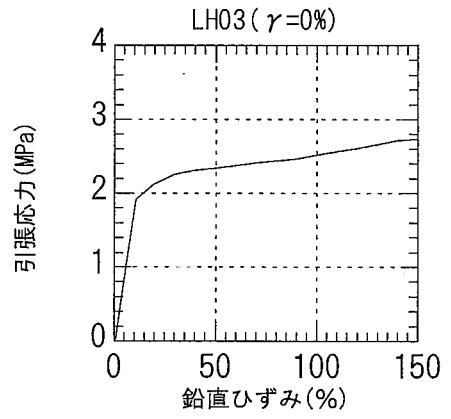
(a) φ 200LRB



(b) φ 280LRB

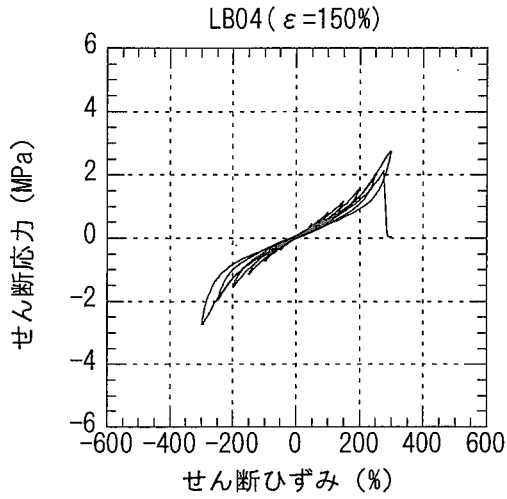


(c) φ 500LRB

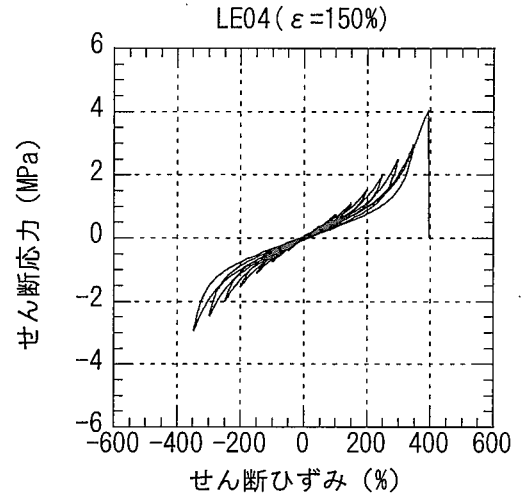


(d) φ 700LRB

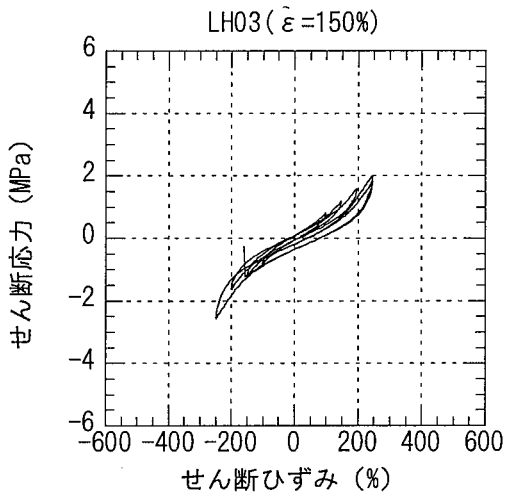
図 3.3.3-3 LRB 引張り履歴
(手動により 10%ずつ引っ張り漸増)



(a) φ 280LRB



(b) φ 500LRB



(c) φ 700LRB

図 3.3.3-4 LRB 漸増载荷破断試験結果

(引張りひずみ 150%, 加振振動数 0.01Hz, せん断ひずみ 50%ずつ漸増)

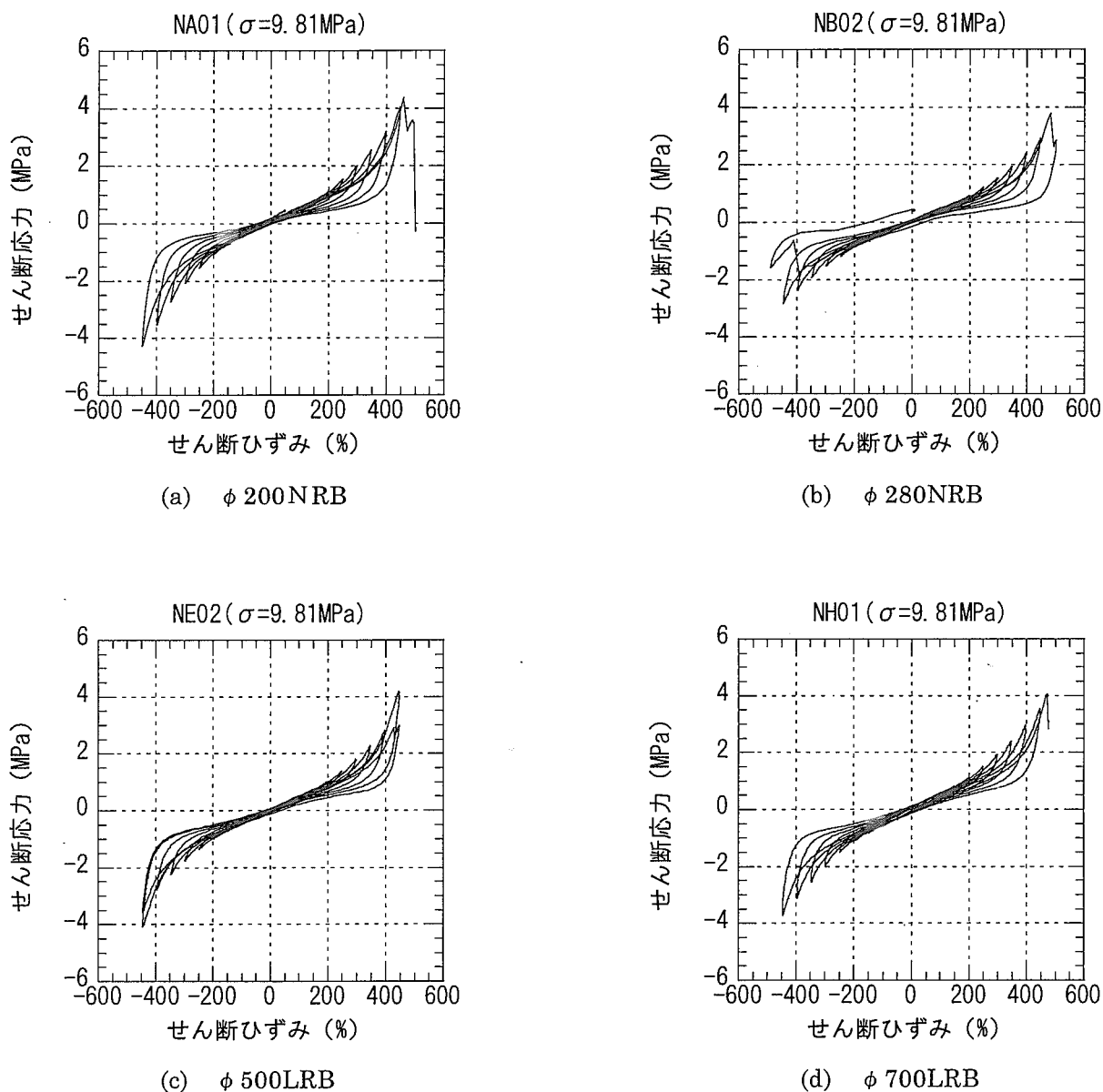


図 3.3.3-5 NRB 漸増载荷破断試験結果
(鉛直応力 9.81MPa, 加振振動数 0.01Hz, せん断ひずみ 50%ずつ漸増)

3.3.4 実大積層ゴムの特性

(1) 水平方向基本特性

直径 1200mm、設計変位 300mm の実大鉛入り積層ゴム (LI01) の水平方向の履歴ループおよび各スケールモデルとの履歴ループの比較 (面圧 4.90MPa) を図 3.3.4-1 に示す。縮小試験体の結果である図 3.3.1-1 と比較し、面圧は違うものの、 $\phi 500$ および $\phi 700$ の LRB の履歴ループと良く対応していることがわかる。

図 3.3.4-2 にはせん断変形に伴う沈み込み履歴を示す。図 3.3.1-2 の結果との比較から、縮小試験体の結果とさほど変わらぬ結果となっていることがわかる。

図 3.3.4-3 にせん断ひずみに対する実大 LRB の水平方向特性を示す。基準化水平ばね定数および基準化降伏荷重特性値はいずれも設計値により試験値を除き基準化した値である。これと対応する縮小試験体の結果 (図 3.3.1-3~図 3.3.1-5) と比較すると、 $\phi 500$ および $\phi 700$ の特性の変化と比較的類似の傾向を示している。しかし、特に、実大 LRB の基準化降伏荷重特性値はせん断ひずみ 25%において 0.8 程度でせん断ひずみによらずほぼ一定の値を示しており、せん断ひずみ 25%で 0.4~0.7 程度であった $\phi 500$ および $\phi 700$ の試験体とは若干異なった特性を示した。このことは、実大 LRB においては、縮小試験体よりもより低ひずみ域から鉛プラグが抵抗力を発揮していることとなる。この要因の一つとしては、鉛プラグと接する内部被覆厚さが、すべての縮小試験体および実大 LRB において 0.5mm で一定であるため、実大 LRB においては相対的に内部被覆ゴムが薄いこととなり、鉛と内部鋼板 (およびゴム) との力の伝達がよりダイレクトとなることが考えられる。

(2) 鉛直方向基本特性

図 3.3.4-4 には実大 LRB の鉛直方向履歴ループを示す。試験装置性能の制約から 4.90MPa までの加振のみしか行えないため、設計面圧 (9.66MPa) 前後での特性は把握できていない。

図 3.3.4-5 にはオフセットせん断ひずみに対する基準化鉛直ばね定数および鉛直方向等価減衰定数を示す。加振振幅は、面圧 2.45 ± 1.23 MPa である。基準化鉛直ばね定数は、せん断ひずみの増加に伴って 1.5 から 0.7 程度まで減少している。縮小試験体の結果である図 3.3.1-9 とは加振振幅が異なるため直接的な比較はできないものの、実大 LRB のオフセット依存性はやや大きいと考えられる。等価減衰定数についてもオフセットせん断ひずみ依存性が見られ、オフセットせん断ひずみが 100%までについてはせん断ひずみが増加するに従って等価減衰定数は増加し、それ以上のひずみではほぼ一定となっている。一般に天然ゴム系積層ゴムおよび鉛入り積層ゴムにおける鉛直方向の等価減衰定数が 2%程度であること¹⁾を考慮すると、このような性状は内部の鉛プラグがせん断変形をした際に鉛直方向の減衰として働いている可能性があることを示唆している。

(3) 変形性能試験結果

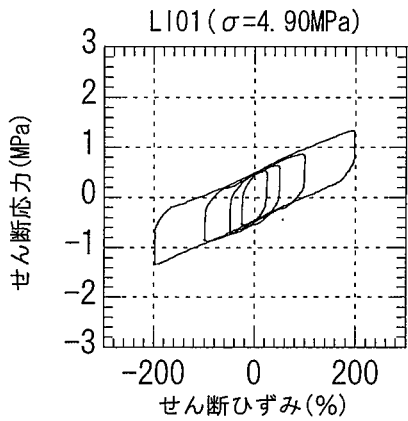
基本特性試験終了後、面圧 4.90MPa 下でせん断ひずみ 250%の正弦波 4 波を静的に加振し (図 3.3.4-6)、続いてオフセット引張りひずみを手動により引張りひずみ 150%まで載荷することとしていた。しかし、オフセットせん断ひずみを与えている途中、引張りひずみ 70%で最大荷重を記

録した後、一部破断し引張荷重は低下した。オフセット引張ひずみを与えた状況を図 3.3.4-7 にこの破断面を写真 3.3.4-1,写真 3.3.4-2 に示す。

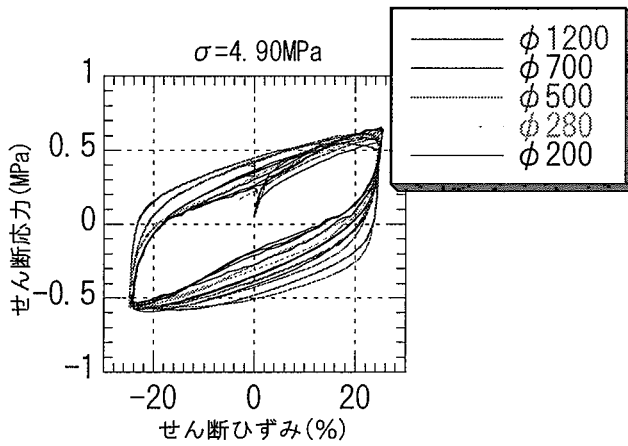
なお、せん断ひずみ 250%を与えた段階で、被覆ゴムに内部の損傷が発生した可能性のある横筋（ゴム層に沿ったもの）が数カ所観察されていた。

縮小試験体においては、いずれにおいても引張ひずみ 150%まで破断せずに載荷できている（図 3.3.3-3 参照のこと）。また、縮小試験体においては、引張ひずみ 10%を与えたとき引張応力が約 2MPa となり、降伏と見なせたが、実大 LRB においては、引張ひずみ 10%では引張ひずみ 1.3MPa と、縮小試験体と比べ低く、その後の荷重変化も徐々に荷重が増え降伏点あまり明瞭ではない。

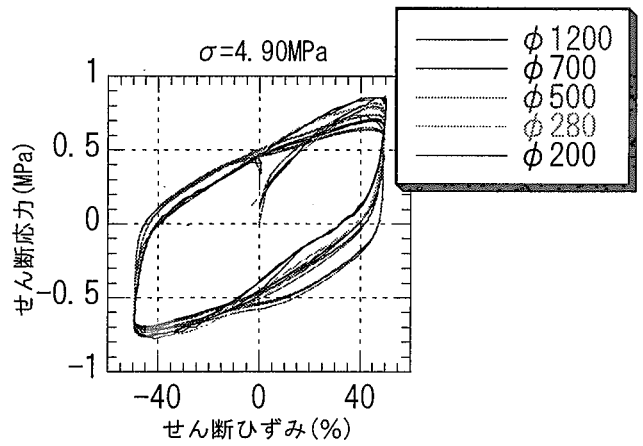
破断の原因については、接着剤の品質管理が問題であったことがわかっており、対策を実施した積層ゴムについてもデータを採取しているが、これについては今後 H12 年度～H13 年度の試験結果をまとめた際に報告する予定である。



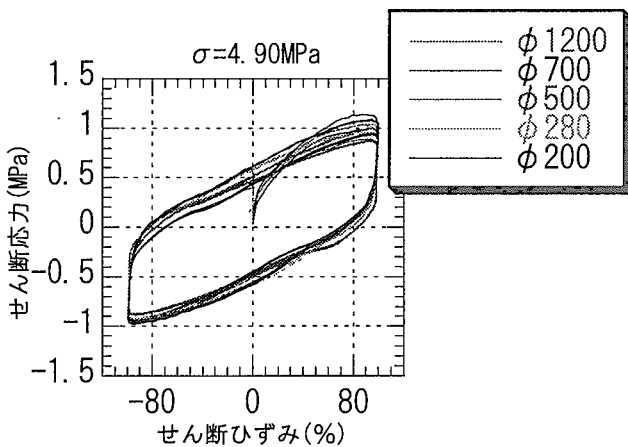
(a) 実大 LRB 履歴ループ



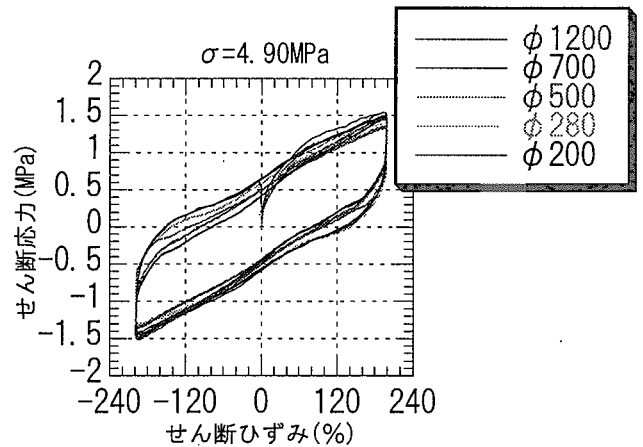
(b) 各スケールモデルの比較
(せん断ひずみ 25%)



(c) 各スケールモデルの比較
(せん断ひずみ 50%)



(d) 各スケールモデルの比較
(せん断ひずみ 100%)



(e) 各スケールモデルの比較
(せん断ひずみ 200%)

図 3.3.4-1 実大 LRB の水平方向履歴ループと各スケールモデルとの水平方向履歴ループの重ね書き
(鉛直応力 4.90MPa、静的載荷)

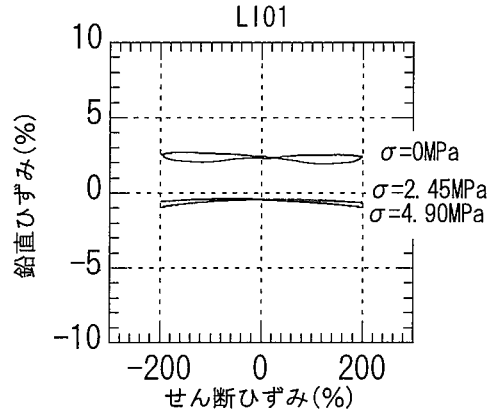
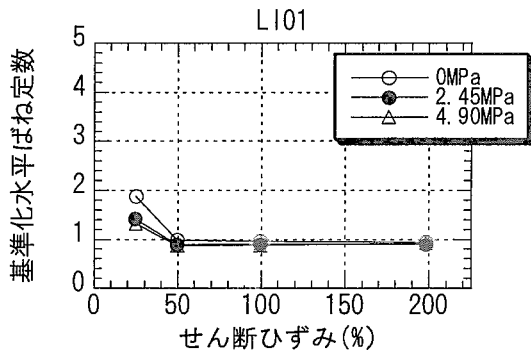
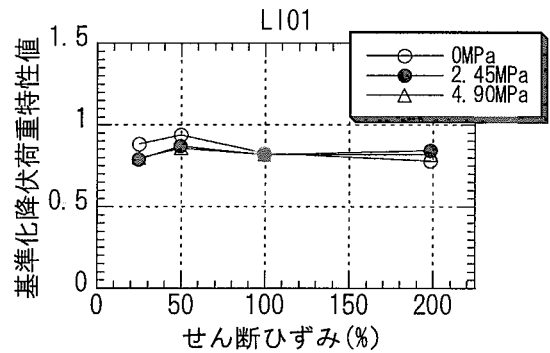


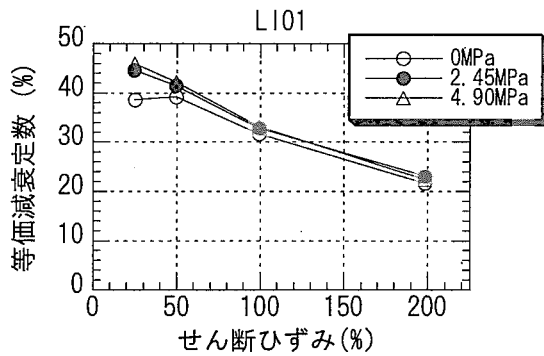
図 3.3.4-2 実大 LRB のせん断変形に伴う沈み込み
(鉛直応力 4.90MPa、静的載荷)



(a) 基準化水平ばね定数



(b) 基準化降伏荷重特性値



(c) 水平方向等価減衰定数

図 3.3.4-3 実大 LRB のせん断ひずみに対する水平方向基本特性
(静的載荷、面圧 4.90MPa 以下、凡例内の応力値は面圧を表す)

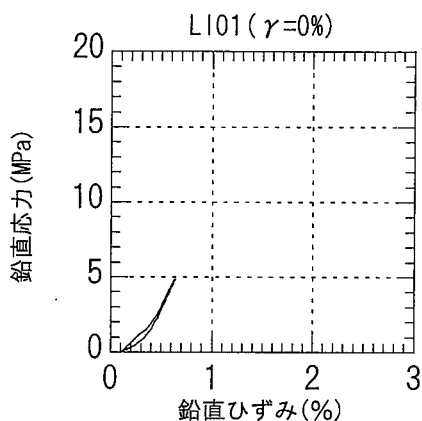
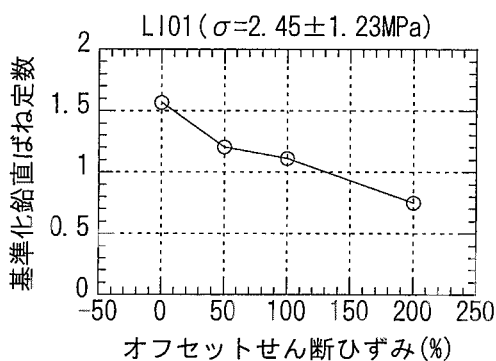
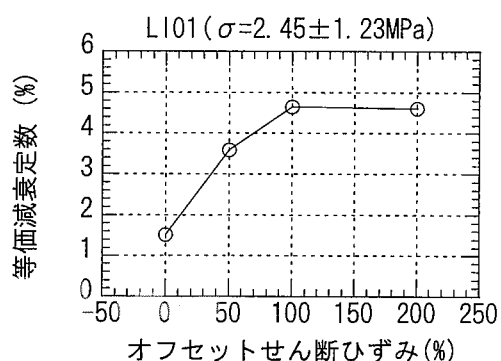


図 3.3.4-4 実大 LRB の鉛直方向履歴ループ
(静的載荷)



(a) 基準化鉛直ばね定数



(b) 等価減衰定数

図 3.3.4-5 実大 LRB のオフセットせん断ひずみに対する鉛直方向基本特性
(鉛直応力 2.45MP±1.23MPa、静的載荷)

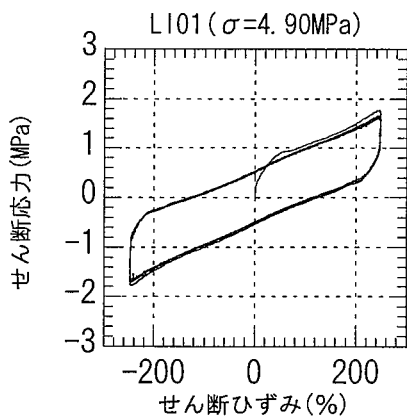


図 3.3.4-6 実大 LRB のせん断ひずみ
250%試験
(引張載荷直前、面圧 4.90MPa)

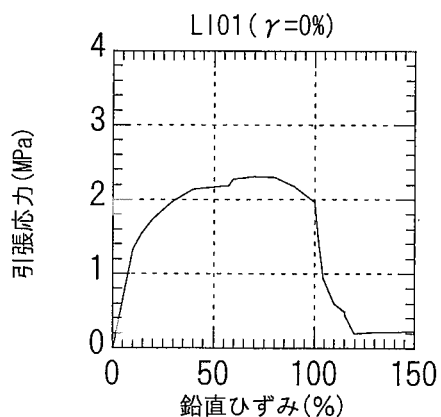


図 3.3.4-7 実大 LRB の引張履歴
(最大荷重点 引張ひずみ 70%、
引張ひずみ 10%ずつ漸増、手動載荷)

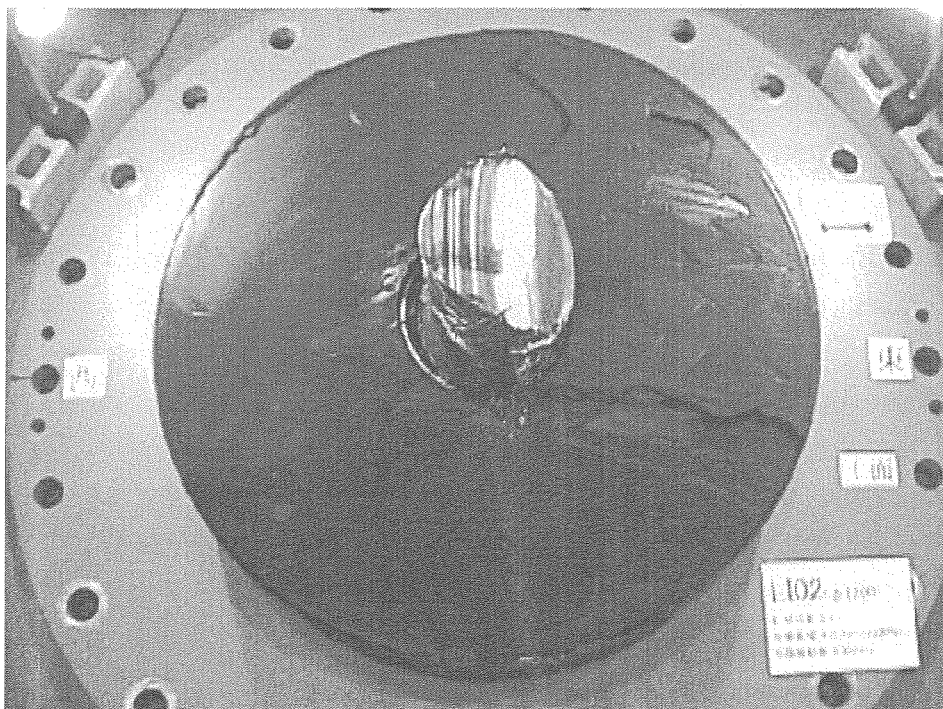


写真 3. 3. 4-1 実大積層ゴム破断面上面 (H12 年度製作直径 1200mm 設計変位 30cm)

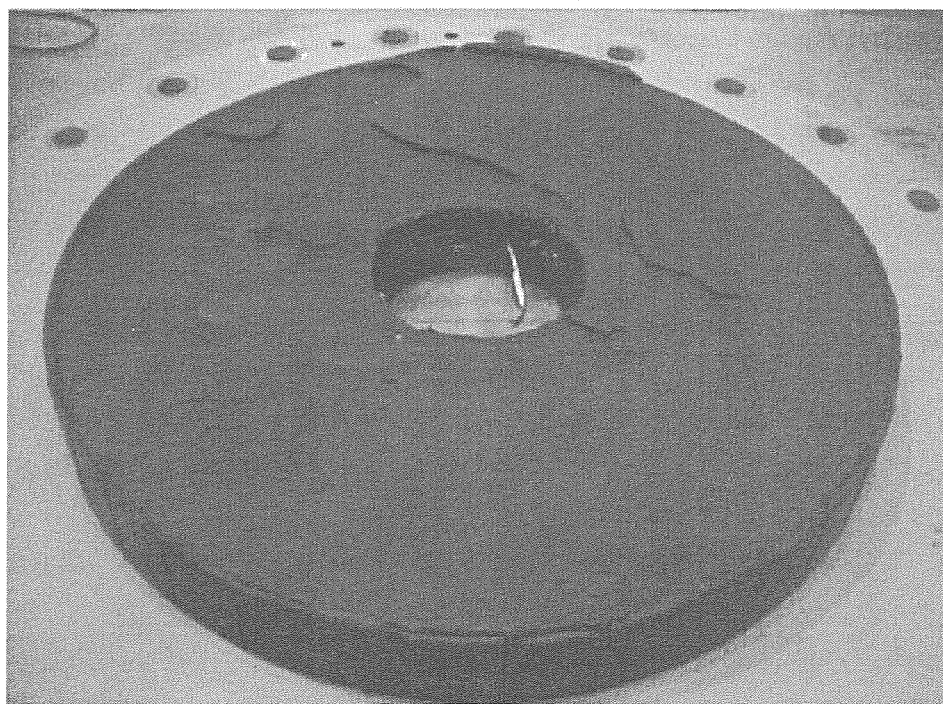


写真 3. 3. 4-2 実大積層ゴム破断面下面 (H12 年度製作直径 1200mm 設計変位 30cm)

3.4 まとめ

積層ゴム試験体のスケール則に関する検討を行うため、数種類の相似比の異なる縮小試験体を用いた試験を行い、以下の結果を得た。

(1) スケール則

a. 水平方向特性

- 1) せん断ひずみ 100%以上では試験体のスケールによる水平ばね定数の違いは顕著ではない。特に、 $\phi 500$ 以上の試験体においては、せん断ひずみ 50%以上でのスケール効果はほとんど見られない。上記の領域において、水平ばね定数はほぼ設計値と一致する。
- 2) 降伏荷重特性値はやはりせん断ひずみ 100%以上 ($\phi 500$ 以上の試験体においては、せん断ひずみ 50%以上) でほぼ一定となる。 $\phi 280$ 以下のスケールでは値が一定となるひずみ領域でほぼ設計値となるのに対して、 $\phi 500$ 以上の試験体では同領域で設計値の 75%~80%程度とやや低い値となる。
- 3) 水平方向の低ひずみ域 (せん断ひずみ 100%以下) におけるスケール間の特性の違いは、平成 10 年度実施した天然ゴム系積層ゴムではほとんど確認されていないことから、鉛プラグが原因となっていると考えられる。
- 4) 加振振動数に対しては相似率の小さい $\phi 200$ の試験体の基準化水平ばね定数が、 $\phi 280$ よりも多少大きな値となった。

b. 鉛直方向特性

- 1) $\phi 280$ 以下の試験体と $\phi 500$ 以上の試験体では鉛直ばね定数の特性は異なっている。前者は、設計値に対して 0.6 から 1.0 程度へ、後者は 1 から 1.8 程度へと鉛直応力の増加に伴って値が大きくなる。
- 2) 鉛直方向の等価減衰定数は、 $\phi 280$ 以下の試験体においては、1%~2%程度であるのに対して、 $\phi 500$ 以上の試験体では 1%~5%程度となった。通常の鉛入り積層ゴムの鉛直方向の等価減衰定数は 2%程度であることを考慮すれば、後者においては鉛プラグが作用していることも考えられる。
- 3) 鉛直ばね定数のオフセットせん断ひずみ依存性についても、上記の各々のグループで性状が異なっており、 $\phi 280$ 以下の試験体はオフセットせん断ひずみ依存性が比較的小さいのに対して、 $\phi 500$ 以上の試験体においてはオフセットせん断ひずみの増加に伴い鉛直ばね定数の低下がみられた。
- 4) 天然ゴム系積層ゴムの鉛直特性試験の結果においても、 $\phi 500$ 以上の試験体の鉛直ばね定数は、 $\phi 280$ の試験体のそれよりも 20%程度高くなっており、鉛プラグばかりでなく積層ゴム自体にもスケール効果が生じている可能性がある。
- 5) 加振振動数およびオフセットせん断ひずみに対する試験体のスケールの影響はほとんど見られなかった。

(2) 鉛プラグの影響

a. 水平方向特性

- 1) NRB の各スケールモデルの基準化水平ばね定数は、ほぼ設計値と一致しており、NRB におけるスケール則はせん断ひずみ 200%以下の全ひずみ領域にわたってほぼ成り立っている。このことは、LRB のせん断ひずみ 100%以下における各スケール間の性状の違いが鉛プラグ（またはその取り付け部）に起因していることを示唆している。
- 2) NRB については各スケールモデルとも振動数依存性は顕著ではなく、LRB の振動数依存性が鉛プラグに起因していることがわかった。

b. 鉛直方向特性

- 1) NRBのスケールモデル間における鉛直方向特性の違いは、LRBと同様に $\phi 500$ 、 $\phi 700$ 試験体の鉛直ばね定数が高いなどの傾向が見られる。鉛直特性に関しては、NRBの鉛直方向特性がLRBの特性をかなり左右して可能性があると考えられる。なお、 $\phi 200$ 、 $\phi 280$ の試験体と $\phi 500$ 、 $\phi 700$ の試験体間にある特性の違いに関する原因については、上記のLRBの鉛直方向基本特性と同様に今後検討していく必要がある。
- 2) LRBにおいては、NRBより鉛直ばね定数および等価減衰定数が多少大きな値となっており、これらは鉛プラグの影響によるものと考えられる。

(3) 変形性能

- 1) 圧縮域における破断せん断ひずみは 400%~550%程度であり、スケールによる影響は比較的小さい。
- 2) 引張域（引張ひずみ 150%下）の破断ひずみは、250%~400%とばらつきが大きい。スケールの影響よりも試験体の特性のばらつきの方が結果に現れているものと思われる。
- 3) NRB の圧縮域（面圧 9.81MPa 下）における破断ひずみは、スケールによらず 450%~500%であった。
- 4) 上記結果より、圧縮域における破断特性にはスケール効果の影響は比較的小さいと言える。

(4) 実大 LRB の特性

- 1) 実大 LRB の水平方向特性は、低ひずみ域（せん断ひずみ 25%程度）において降伏荷重特性値の傾向が若干違うことを除けば、 $\phi 500$ および $\phi 700$ の特性の変化と比較的よく対応している。
- 2) 鉛直ばね定数はオフセットせん断ひずみ 0%で設計値の 1.5 倍程度となっており、 $\phi 500$ 以上の試験体と類似の傾向が見られる。しかし、鉛直特性に関しては対応する縮小試験体の試験も少なく、スケール効果については今後のデータの蓄積が必要である。
- 3) 現在までに試験を実施した実大積層ゴムの変形性能は同様の仕様の $\phi 700$ に比して低く、早期に破断しており、今後接着剤の品質管理が必要である。

以上の結果より、水平方向特性については、せん断ひずみ 100%以上の領域ではスケールの影響

は少なく、かなり相似比の小さい試験体によっても実大 LRB の特性予測が可能であると考えられる。

せん断ひずみが小さい領域でのスケールによる特性の違いについては、今後検討が必要である。

また、鉛直方向特性に関しては、実大 LRB のデータの蓄積による縮小試験体との試験結果比較と設計値よりの鉛直ばね定数が高くなることに関する原因についての検討が今後、必要と考えられる。

4. 設計パラメータ選定のための検討

4.1 試験目的

ITERの仕様は現在検討段階であり、免震装置の仕様を1種類に絞り込むことはできない。そこで、ここでは3種類の仕様の免震装置を想定し、今後の設計絞り込みに資するデータを構築することを目的として、形状設計（設計パラメータ）の異なる鉛入り積層ゴムの縮小試験体を用いた力学特性試験を実施する。また、地震時の軸力変動等を考慮して、29.4MPa（300kgf/cm²）の高面圧下における鉛入り積層ゴムの特性の把握を一部の試験体を用いて行う。

また、積層ゴムに対する面圧を徐々に高くしていくと、水平方向の履歴曲線が負の剛性となる減少が現れる。この減少は、一般的に積層ゴムの座屈と呼ばれている。核融合実験炉に用いる積層ゴムは、75kgf/cm²～150kgf/cm²（7.35MPa～14.7MPa）程度の比較的高い面圧で設計されることが予想されるため、ここではさらに、座屈荷重に対する余裕度を明らかにすることを目的とした座屈試験を実施した。

4.2 試験内容

4.2.1 試験体

試験体は、直径および設計変位を変えた以下に示す①～③の3つの仕様（以下、仕様①、仕様②、仕様③と呼ぶ）とし、それぞれφ280およびφ500の縮小試験体を用いる。ここで、設計変位とは、線形限界変位に安全率1.5を見込んだ変位（許容限界変位）であり、本試験においては線形限界ひずみを230%として線形限界変位を算定した。設計に際しては、いずれの積層ゴムも実機の水平（免震）固有周期を4秒として設計を行った。

① 実機直径φ1200、設計変位300mm

面圧 9.7MPa（99kgf/cm²、設計支持荷重 10.2MN）時の固有周期 4.0sec

1次形状係数 32.3、2次形状係数 6.0

② 実機直径φ1200、設計変位400mm

面圧 7.45MPa（76kgf/cm²、設計支持荷重 8.0MN）時の固有周期 4.0sec

1次形状係数 32.8、2次形状係数 4.6

③ 実機直径φ1500、設計変位400mm

面圧 7.35MPa（75kgf/cm²、設計支持荷重 12.4MN）時の固有周期 4.0sec

1次形状係数 34.0、2次形状係数 5.7

図4.2.1-1～図4.2.1-4に上記の仕様②、③を示す。また、表4.2.1-1および表4.2.1-2にその諸元を示す。なお、仕様①については、スケール効果の検討に用いた試験体であり、3.2.1項を参考にされたい。

表4.2.1-3には、平成11年度までに実施した試験体数を示す。

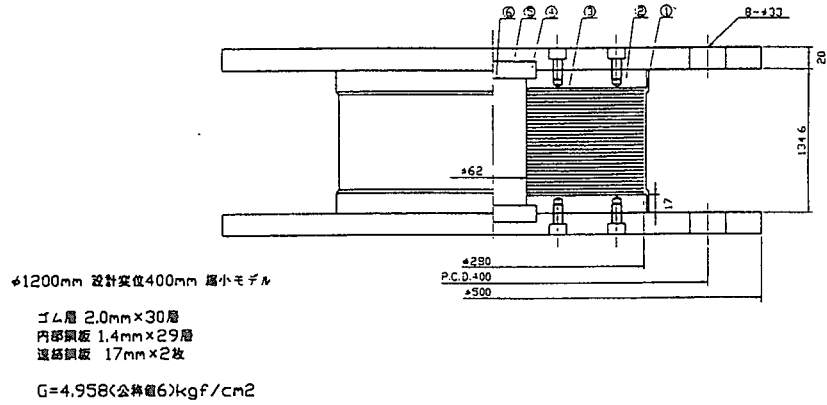


図4.2.1-1 仕様② φ 280LRB (試験体名：LC01、実機直径1200mm、設計変位400mm)

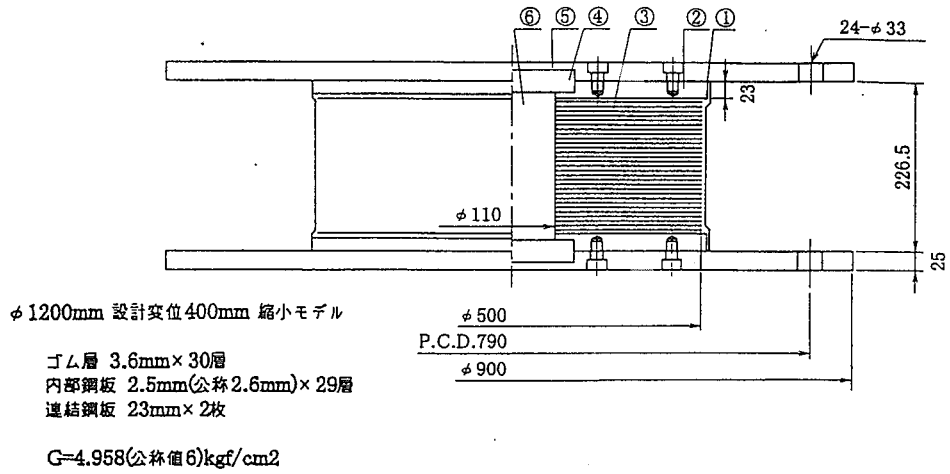


図4.2.1-2 仕様② φ 500LRB (試験体名：LF01、実機直径1200mm、設計変位400mm)

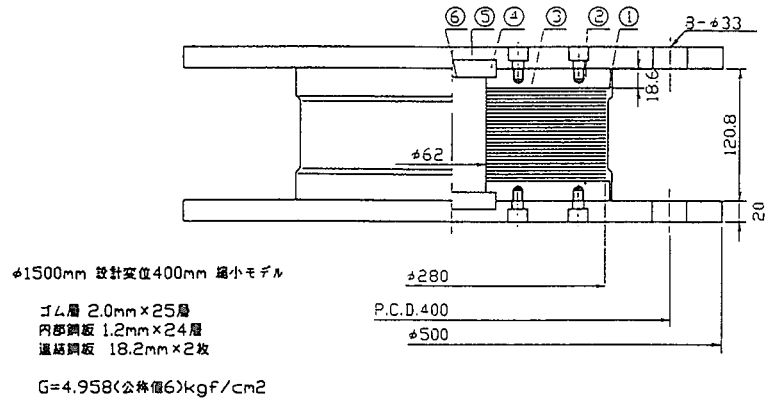


図4.2.1-3 仕様③ $\phi 280$ LRB (試験体名: LD01、実機直径1500mm、設計変位400mm)

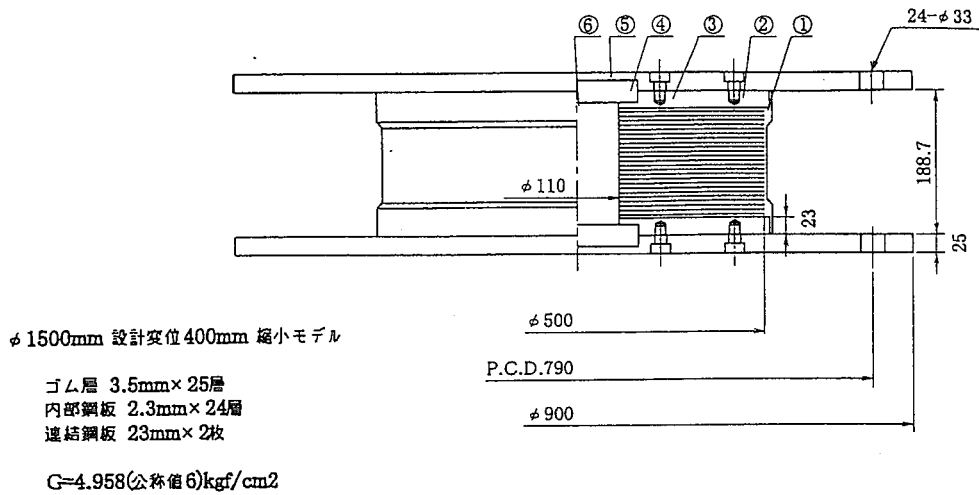


図4.2.1-4 仕様③ $\phi 500$ LRB (試験体名: LG01、実機直径1500mm、設計変位400mm)

表 4.2.1-1 仕様②試験体の諸元 (実機直径 ϕ 1200、設計変位 400mm)

	LRB ϕ 280	LRB ϕ 500	LRB ϕ 1200
試験体名	LC01	LF01	
相似比	0.23	0.42	1.00
設計用支持質量M (kg)	4.42E+04	1.41E+05	8.12E+05
水平固有周期 T_H (sec)	1.92	2.57	4.00
上下固有振動数(Hz)	21.42	15.93	10.23
水平剛性 K_H (N/m)	4.75E+05	8.41E+05	2.00E+06
上下剛性 K_V (N/m)	8.01E+08	1.41E+09	3.35E+09
ゴム直径 D_R (mm)	280.00	500.00	1200.00
ゴム内径 D_I (mm)	62.00	110.00	265.00
断面積A (mm ²)	5.86E+04	1.87E+05	1.08E+06
ゴム層数n	30.00	30.00	30.00
ゴム1層の厚さ t_R (mm)	2.00	3.60	8.70
ゴム総厚さ h_R (mm)	60.00	108.00	261.00
内部鋼板の層数	29.00	29.00	29.00
内部鋼板1層の厚さ (mm)	1.60	2.50	5.90
連結鋼板の厚さ (mm)	17.00	23.00	41.00
キー溝深さ (mm)	12.00	18.00	6.00
試験体部分の高さ (mm)	140.40	226.50	514.10
設計鉛直応力 (面圧) σ (MPa)	7.40	7.40	7.40
1次形状係数 S_{r1}	33.28	33.04	32.80
2次形状係数 S_{r2}	4.67	4.63	4.60
せん断弾性係数 G_s (γ) (MPa)	0.49	0.49	0.49
縦弾性率 E_0 (MPa)	1.42	1.42	1.42
体積弾性率 E_{∞} (MPa)	1182.68	1182.68	1182.68
ゴム硬度による補正係数 κ	0.85	0.85	0.85
ゴムの圧縮性を考慮した縦弾性率 E_c' (MPa)	820.51	816.83	813.13
見掛けの縦弾性率 E_c (MPa)	2679.40	2640.56	2602.27
鉛の降伏荷重特性応力 (MPa)	8.69	8.69	8.69
鉛の降伏荷重特性値 Qd (N)	2.62E+04	8.26E+04	4.79E+05
鉛プラグ高さ (mm)	116.40	190.50	502.10
鉛の形状 H_p/D_p	1.88	1.73	1.89
内部被覆厚さ (mm)	0.50	0.50	0.50

表 4.2.1-2 仕様③試験体の諸元 (実機直径 ϕ 1500、設計変位 400mm)

	LRB ϕ 280	LRB ϕ 500	LRB ϕ 1500
試験体名	LD01	LG01	
相似率	0.19	0.33	1.00
設計用支持質量M (kg)	43974	140222	1262000
水平固有周期 T_H (sec)	1.75	2.31	4.00
上下固有振動数(Hz)	23.53	17.90	10.34
水平剛性 K_H (N/m)	569416.01	1038253.65	3114760.96
上下剛性 K_V (N/m)	9.61E+08	1.77E+09	5.32E+09
ゴム直径 D_R (mm)	280.00	500.00	1500
ゴム内径 D_I (mm)	62.00	110.00	330
断面積A (mm ²)	58556.15	186846.22	1681616.01
ゴム層数 n	25	25	25
ゴム1層の厚さ t_R (mm)	2.00	3.50	10.5
ゴム総厚さ h_R (mm)	50.00	87.50	262.50
内部鋼板の層数	24	24	24
内部鋼板1層の厚さ (mm)	1.20	2.30	6.9
連結鋼板の厚さ (mm)	18.20	23.00	55
試験体部分の高さ (mm)	115.2	188.7	538.1
設計鉛直応力 (面圧) σ (MPa)	7.36	7.36	7.36
1次形状係数 S_{r1}	33.28	33.99	33.99
2次形状係数 S_{r2}	5.60	5.71	5.71
せん断弾性係数 G_s (γ) (MPa)	0.486213707	0.486213707	0.486213707
縦弾性率 E_0 (MPa)	1.42196425	1.42196425	1.42196425
体積弾性率 E_∞ (MPa)	1182.68199	1182.68199	1182.68199
ゴム硬度による補正係数 κ	0.85	0.85	0.85
ゴムの圧縮性を考慮した縦弾性率 E_c' (MPa)	820.51	830.90	830.90
見掛けの縦弾性率 E_c (MPa)	2679.40	2793.52	2793.52
鉛の降伏荷重特性応力 (MPa)	8.6886919	8.6886919	8.6886919
鉛の降伏荷重特性値 Qd (N)	26231.77	82571.40	743142.60
鉛プラグ高さ (mm)	93.6	152.8	488
鉛の形状 H_p/D_p	1.51	1.39	1.48

表 4.2.1-3 設計パラメータ選定のための試験体

縮小試験体 直径	①実機 ϕ 1200 設計変位 300mm		②実機 ϕ 1200 設計変位 400mm	③実機 ϕ 1500 設計変位 400mm	備考
	LRB	NRB	LRB	LRB	
ϕ 280	2	0(1)	1	1	①LRB : 高面圧 座屈
ϕ 500	1	0(1)	1	1	①LRB : 高面圧

()内の数値は平成12年度実施の試験体を示す。

4.2.2 試験方法

(1) 設計パラメータの異なる試験体の特性の検討

上記の仕様①の試験体は、スケール効果検討に用いている積層ゴムと同一のため、面圧14.7MPa (150kgf/cm²) 以下での特性は把握されている。よって、ここでは仕様②、③の試験体を用いて面圧14.7MPa以下における基本特性試験および変形性能試験を実施する。φ280試験体は動的2次元試験装置により、φ500試験体は動的および静的2次元試験装置により試験を行う。表4.2.2-1に仕様②、③の試験体を用いた基本特性試験の試験ケースと試験順序を示す。変形性能試験は、面圧9.8MPa下で、せん断ひずみを50%ずつ漸増させていくせん断ひずみ漸増破断試験を行った。

(2) 高面圧(29.4MPa)下での特性の検討

仕様①の試験体については、地震時の軸力変動を考慮した29.4MPa (300kgf/cm²) 下での特性試験を行う。試験装置としては、静的2次元試験装置を用いる。表4.2.2-2に仕様①の試験体の試験ケースと試験順序を示す。変形性能試験は、面圧29.4MPa下で、せん断ひずみを50%ずつ漸増させていくせん断ひずみ漸増破断試験を行った。

なお、各試験とも正弦波により4サイクルの加振を行い、3サイクル目を用いて特性の評価を行った(特性値の評価方法については、3.2.3項を参照のこと)。

(3) 座屈試験

仕様①(LB01試験体)の基本特性試験は動的2次元試験装置により行い、その後座屈試験を静的2次元試験装置により行った。静的2次元試験装置を使用したのは、積層ゴムに座屈を起こさせるための高い面圧を載荷するためである。静的2次元試験装置では、LB01試験体に対しては、最大で1000kgf/cm²程度まで(実際の試験では900kgf/cm²まで)の面圧を載荷することが可能である。

基本特性試験は、3章の「スケール則の検討」において行った内容と同様とした。

座屈試験においては、ある一定面圧をかけた状態で、静的にせん断ひずみ100%の正弦波加振を行い、座屈現象が生じるかを確認する。座屈の判定は、水平方向の履歴曲線において鉛降伏後の剛性(第2剛性)が負となった鉛直応力を座屈応力とする。なお、座屈試験に先立って、線形限界変位(設計線形限界ひずみ230%)近傍における特性を把握するために、面圧100kgf/cm²下におけるせん断ひずみ250%の静的正弦波加振(0.01Hz)を行う。

表4.2.2-1(a) 仕様②、③試験体の基本特性試験の試験ケースと試験順序（水平方試験）

鉛直応力 0MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz	1	2	3	4
0.25Hz	[28]	[29]	[30]	[32]
0.50Hz			[31]	

鉛直応力* 2.45MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz	5	6	7	8
0.25Hz			[33]	
0.50Hz			[34]	

鉛直応力 4.90MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz	9	10	11	12
0.25Hz			[35]	[37]
0.50Hz			[36]	

鉛直応力 9.81MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz	13	14	15	16
0.25Hz	<38>	<39>	<40>	<42>
0.50Hz			<41>	

鉛直応力 14.7MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz	17	18	19	20
0.25Hz	<43>	<44>	<45>	<47>
0.50Hz			<46>	

([]はφ280およびφ500、<>はφ280のみ動的試験を行うことを表す)

表4.2.2-1(b) 仕様②、③試験体の基本特性試験の試験ケースと試験順序（鉛直方向試験）

鉛直応力 (MPa)	オフセット せん断ひずみ	加振振動数 (Hz)					
		0.01	0.25	0.50	5.00	10.00	20.00
-2.45±1.23	0%	21				[47]	
-4.90±2.45	0%	22				<48>	
-7.35±3.68	0%	23				<49>	
-9.81±4.90	0%	24	<50>	<51>	<52>	<53>	<54>
-9.81±4.90	50%	25					
-9.81±4.90	100%	26					
-9.81±4.90	200%	27					

表4.2.2-2(a) 仕様①試験体の高面圧 (29.4MPa) 下での基本特性試験の試験ケースと試験順序
(水平方向試験)

鉛直応力 0MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz以下	1	2	3	4

鉛直応力 4.90MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz以下	5	6	7	8

鉛直応力 9.81MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz以下	9	10	11	12

鉛直応力 19.6MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz以下	13	14	15	16

鉛直応力 29.4MPa

加振振動数	加振せん断ひずみ			
	25%	50%	100%	200%
0.01Hz以下	17	18	19	20

表4.2.2-2(b) 仕様①試験体の高面圧 (29.4MPa) 下での基本特性試験の試験ケースと試験順序
(鉛直方向試験)

鉛直応力 (MPa)	オフセット せん断ひずみ	加振振動数 (Hz)					
		0.01以下	0.25	0.50	5.00	10.00	20.00
-2.45±1.23	0%	21					
-4.90±2.45	0%	22					
-9.81±4.90	0%	23					
-14.7±14.7	0%	24					
-19.6±9.81	0%	25					
-19.6±9.81	50%	26					
-19.6±9.81	100%	27					
-19.6±9.81	200%	28					

4.3 試験結果

4.3.1 設計パラメータの異なる試験体の特性

(1) 水平方向基本特性

a. 履歴曲線

仕様②および③の試験体の水平方向履歴ループを図4.3.1-1、図4.3.1-2に示す。仕様②、③のせん断ひずみ200%までの履歴ループはほぼ同様の傾向を示しており、仕様による違いは少ない。各仕様ともに $\phi 280$ の試験体においては、履歴ループの傾きが、せん断ひずみの増加に伴い減少する傾向が顕著であるが、 $\phi 500$ の試験体ではさほどではない。この傾向は、仕様①においても見られたものである。

仕様②および③の試験体のせん断変形に伴う沈み込みを図4.3.1-3、図4.3.1-4に示す。これについても、特に、仕様の違いによる挙動の差は認められない。

b. せん断ひずみ依存性

図4.3.1-5、図4.3.1-6には、仕様②の $\phi 280$ および $\phi 500$ 試験体のせん断ひずみに対する水平方向特性を示す。また、図4.3.1-7、図4.3.1-8には、仕様③の $\phi 280$ および $\phi 500$ 試験体のせん断ひずみに対する水平方向特性を同様に示す。

仕様②および仕様③の試験体間での差はほとんどなく、また図3.3.1-3～図3.3.1-5に示す仕様①における水平特性とも同様の特性を示していることがわかる。試験結果を設計値と比較すると、どちらの仕様の試験体ともにせん断ひずみ100%以上の領域では、許容値以内に入っていると見なせる。

c. 振動数依存性

図4.3.1-9、図4.3.1-10には、仕様②の $\phi 280$ および $\phi 500$ 試験体の加振振動数に対する水平方向特性を示す。また、図4.3.1-11、図4.3.1-12には、仕様③の $\phi 280$ および $\phi 500$ 試験体の加振振動数に対する水平方向特性を示す。仕様②、③ともに、基準化水平ばね定数および基準化降伏荷重特性値は加振振動数の増加に伴い、増加する傾向にあるが、その傾向はあまり顕著ではない。

(2) 鉛直方向基本特性

a. 履歴曲線

仕様②および③の試験体の鉛直方向履歴ループ（加振振動数0.01Hz以下）を図4.3.1-13および図4.3.1-14に示す。仕様②と仕様③の結果を比較すると、若干仕様②の試験体の方が剛性が高くなっている。また、同じ仕様でのスケールによる違いをみると、 $\phi 500$ の試験体の鉛直ばね定数が高くなっていることがわかる。スケールによる違いは、仕様①の試験体においても確認されている。

b. 鉛直応力依存性

図4.3.1-15、図4.3.1-16には、仕様②の試験体の鉛直応力に対する基準化鉛直ばね定数および鉛直方向等価減衰定数を示す。また、図4.3.1-17、図4.3.1-18には、仕様③の試験体の鉛直応力に対する鉛直方向特性を示す。いずれにおいても、各鉛直応力下でその鉛直応力の1/2を片振幅として0.01Hz以下の加振を行っている。いずれにおいても、基準化鉛直ばね定数は、鉛直応力が上昇するに従って増加

している。これに対して、等価減衰定数はφ500の試験体では鉛直応力の上昇に伴い増加する傾向にあるものの、φ280の試験体においては2%程度でほぼ一定の値を示している。この傾向は、仕様①においてもほぼ同様であった（図3.3.1-10、図3.3.1-11参照）。

c. オフセットせん断ひずみ依存性

図4.3.1-19、図4.3.1-20に、仕様②の試験体のオフセットせん断ひずみに対する基準鉛直ばね定数と鉛直方向等価減衰定数を示す。また、図4.3.1-21、図4.3.1-22に、仕様③の試験体のオフセットせん断ひずみに対する鉛直方向特性を示す。いずれも、鉛直応力 $9.81\text{MPa} \pm 4.90\text{MPa}$ で加振振動数を0.01Hz以下として加振を行った。やはり、仕様差による違いは少なく、φ280とφ500のスケールの違いによる差違が大きい。φ280の試験体の基準化鉛直ばね定数はオフセットせん断ひずみの影響をあまり受けないに対して、φ500の試験体においてはオフセットせん断ひずみが200%まで増加するのに伴って、1.5から1.0程度へと減少している。仕様①においては、オフセットせん断ひずみ0%で1.3程度であったことは除けば、減少の傾向は一致している。等価減衰定数は、オフセットせん断ひずみの増加に伴い、φ280の試験体では増加傾向、φ500の試験体では減少傾向であった。これも、仕様①の試験体において確認されている現象と同じである。

d. 振動数依存性

図4.3.1-23には、仕様②のφ280試験体の加振振動数に対する鉛直方向特性を示す。また、図4.3.1-24には、仕様③のφ280試験体の加振振動数に対する鉛直方向特性を示す。いずれも、鉛直応力 $9.81\text{MPa} \pm 4.90\text{MPa}$ として加振を行った。どちらの仕様においても、基準化鉛直ばね定数は、加振振動数が5Hz程度までは上昇し、それ以上では減少している。また、等価減衰定数は0.5Hzまではほぼ一定であり、それ以上の振動数に対しては減少している。10Hz以上の負減衰の領域については計測上の問題が含まれているものと考えられる。

(3) 変形性能

図4.3.1-25、図4.3.1-26には、仕様②および③の試験体の破断試験結果を示す。試験は、鉛直応力 9.81MPa 下で、試験体が破断に至るまでせん断ひずみを50%ずつ正弦波の振幅を漸増させながら静的に加振を行ったものである。破断ひずみは、いずれの試験体においても400%であった。しかし、終局域での履歴ループの形状は若干異なり、仕様②においては破断後の剛性低下が仕様③の試験体より大きいことがわかる。これは、仕様②の二次形状係数が4.6なのに対して、仕様③のそれが5.7程度であることが影響しているものと考えられる。なお、仕様①の同じ条件による試験における破断ひずみは、400%~450%であった（図3.3.3-1参照）。

(4) まとめ

仕様②および③の試験およびスケール効果の検討で試験を行った仕様①の試験により、以下の結果が得られた。

- 1) 3つの設計仕様のいずれも、設計値で基準化した場合には同様の特性を示すことがわかった。

- 2) せん断ひずみ100%以上において、水平方向特性は設計の許容値を満たしている。
- 3) 鉛直方向特性は、 $\phi 500$ の試験体では設計値よりもかなり高くなる傾向が見られる。この原因については、今後の検討課題と考える。
- 4) 各仕様の積層ゴムの破断せん断ひずみ（面圧9.81MPa下）は、400%程度であり、大きな差はなかった。

以上より、鉛直特性においては若干の検討課題が残されるものの、上記の3つの仕様において同様の力学特性が得られていることから、与えられたいずれの設計条件にも対応可能であることと考えられる。

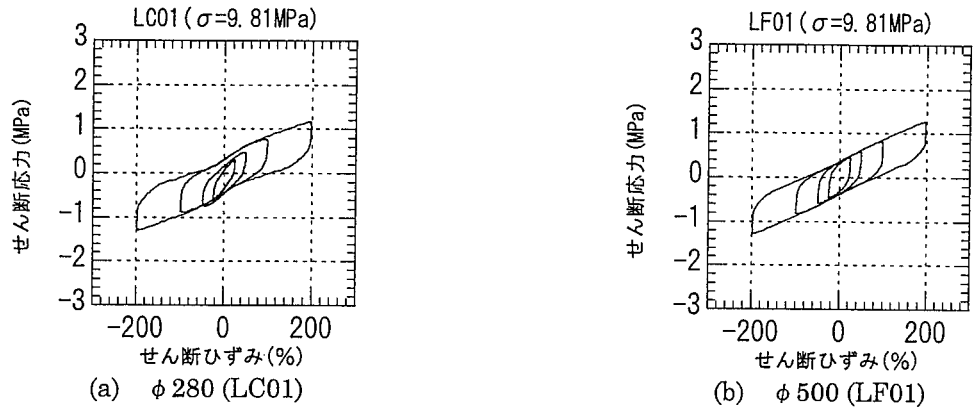


図 4.3.1-1 仕様②の水平方向履歴ループ (鉛直応力 9.81MPa、加振振動数 0.01Hz 以下)

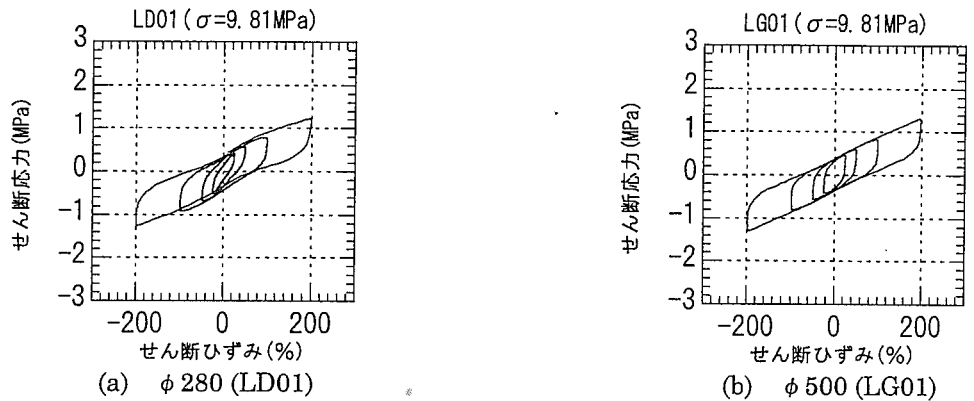


図 4.3.1-2 仕様③の水平方向履歴ループ (鉛直応力 9.81MPa、加振振動数 0.01Hz 以下)

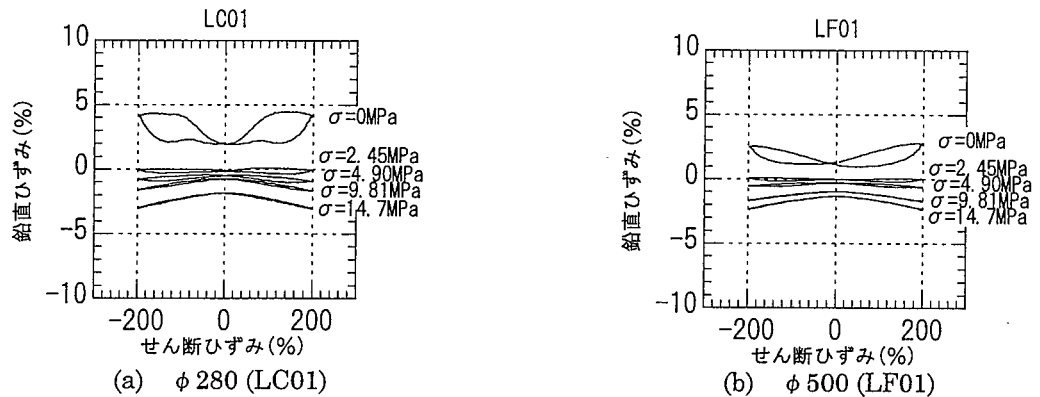


図 4.3.1-3 仕様②のせん断変形に伴う沈み込み (鉛直応力 9.81MPa、加振振動数 0.01Hz 以下)

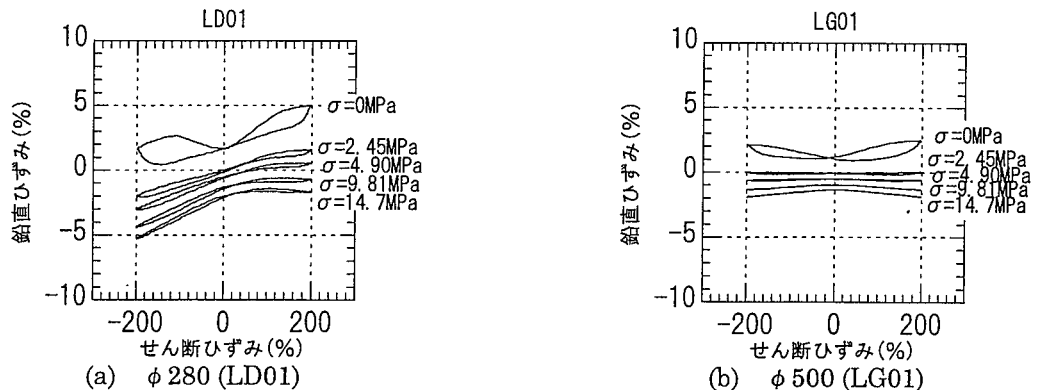


図 4.3.1-4 仕様③のせん断変形に伴う沈み込み (鉛直応力 9.81MPa、加振振動数 0.01Hz 以下)

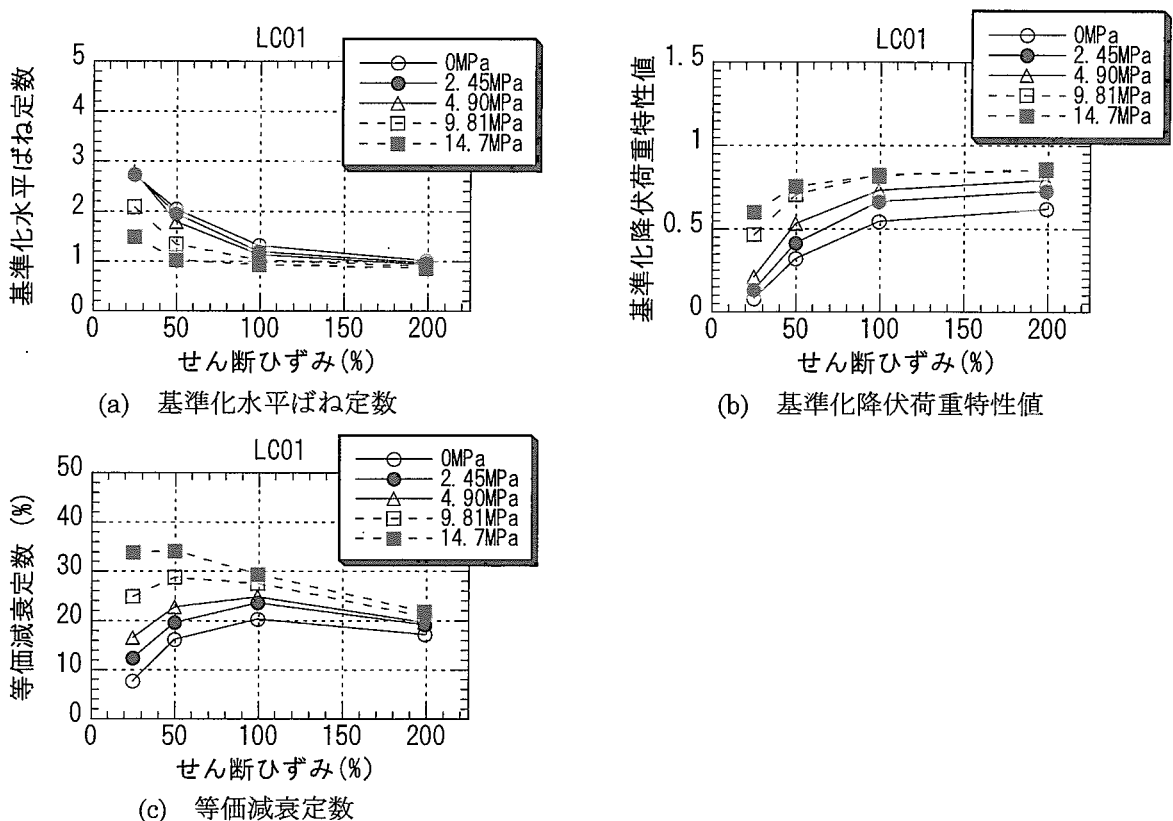


図 4.3.1-5 仕様②φ280 試験体 (LC01) のせん断ひずみに対する水平方向特性
(凡例内の応力値は鉛直応力を表す)

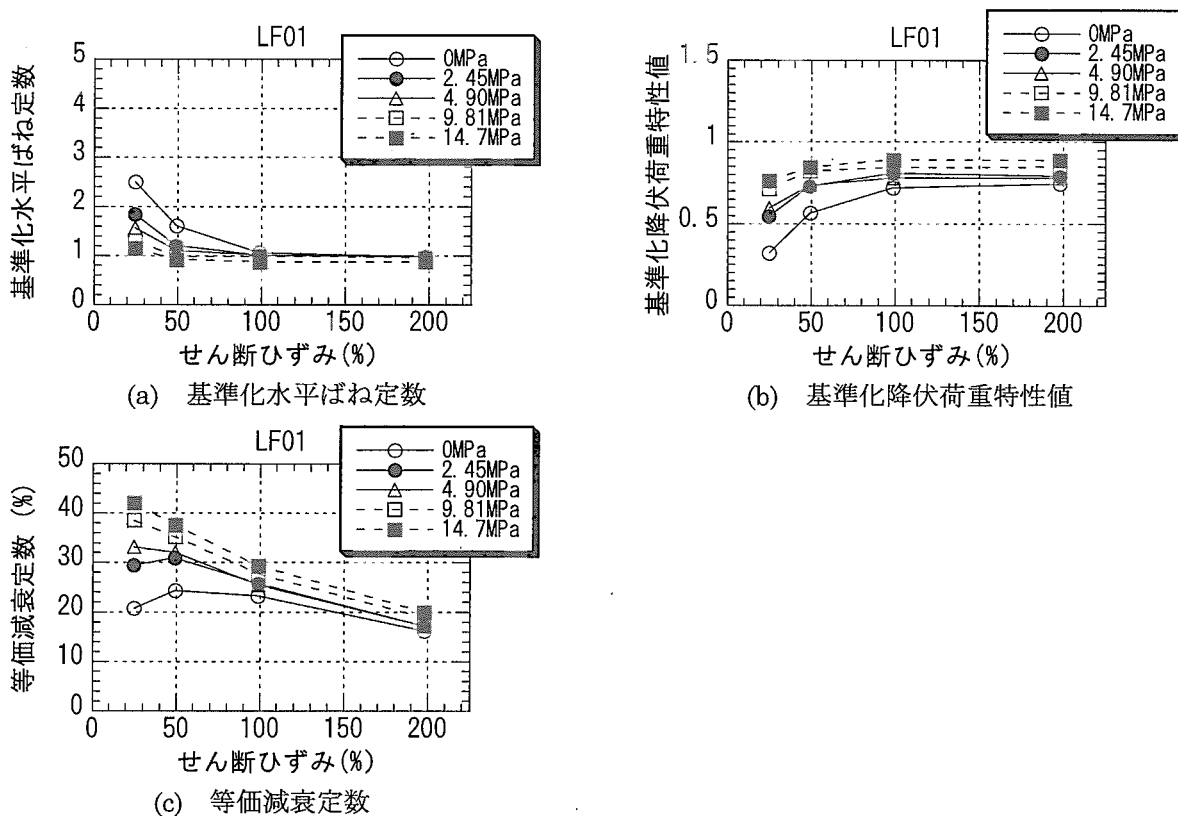


図 4.3.1-6 仕様②φ500 試験体 (LF01) のせん断ひずみに対する水平方向特性
(凡例内の応力値は鉛直応力を表す)

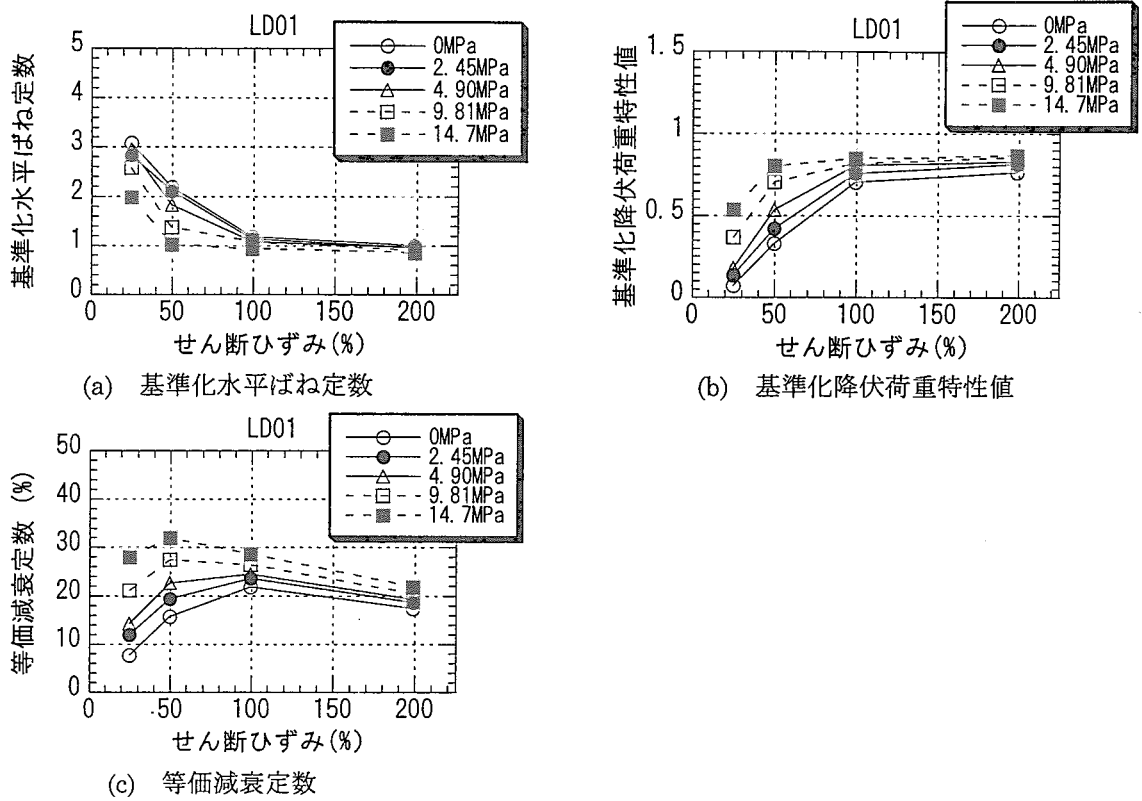


図 4.3.1-7 仕様③φ280 試験体 (LD01) のせん断ひずみに対する水平方向特性
(凡例内の応力値は鉛直応力を表す)

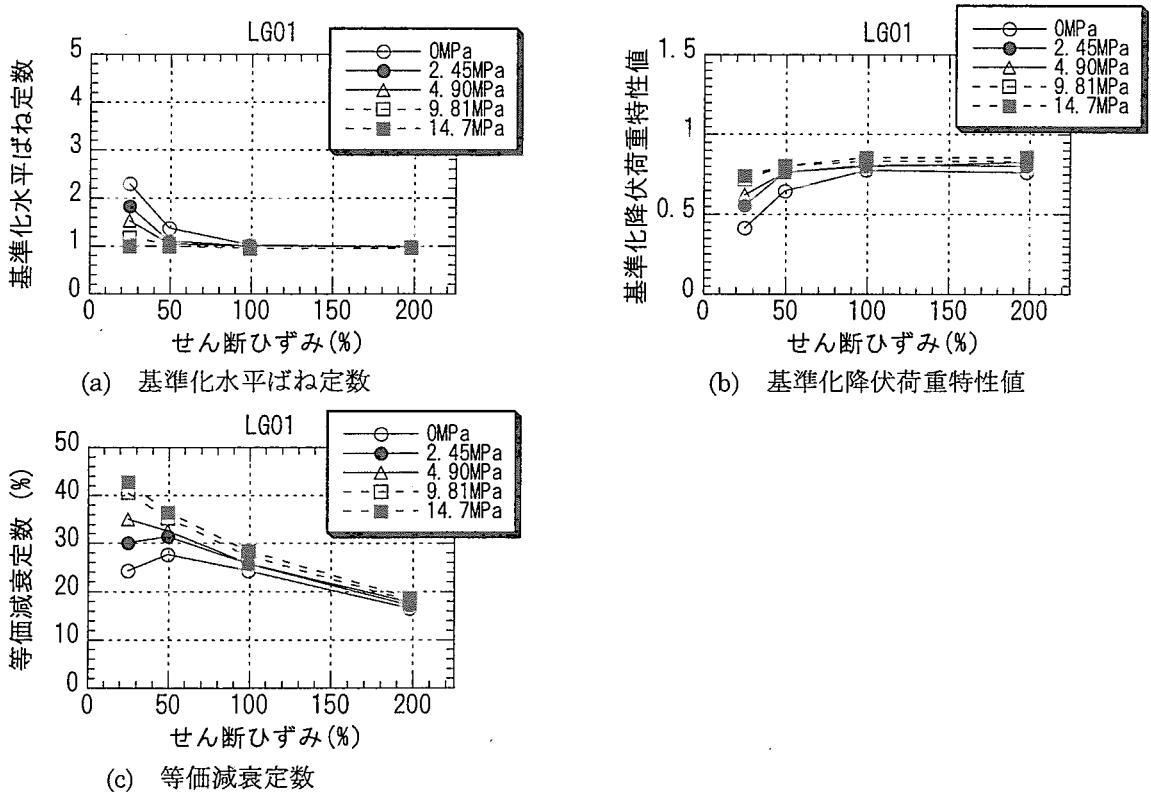


図 4.3.1-8 仕様③φ500 試験体 (LG01) のせん断ひずみに対する水平方向特性
(凡例内の応力値は鉛直応力を表す)

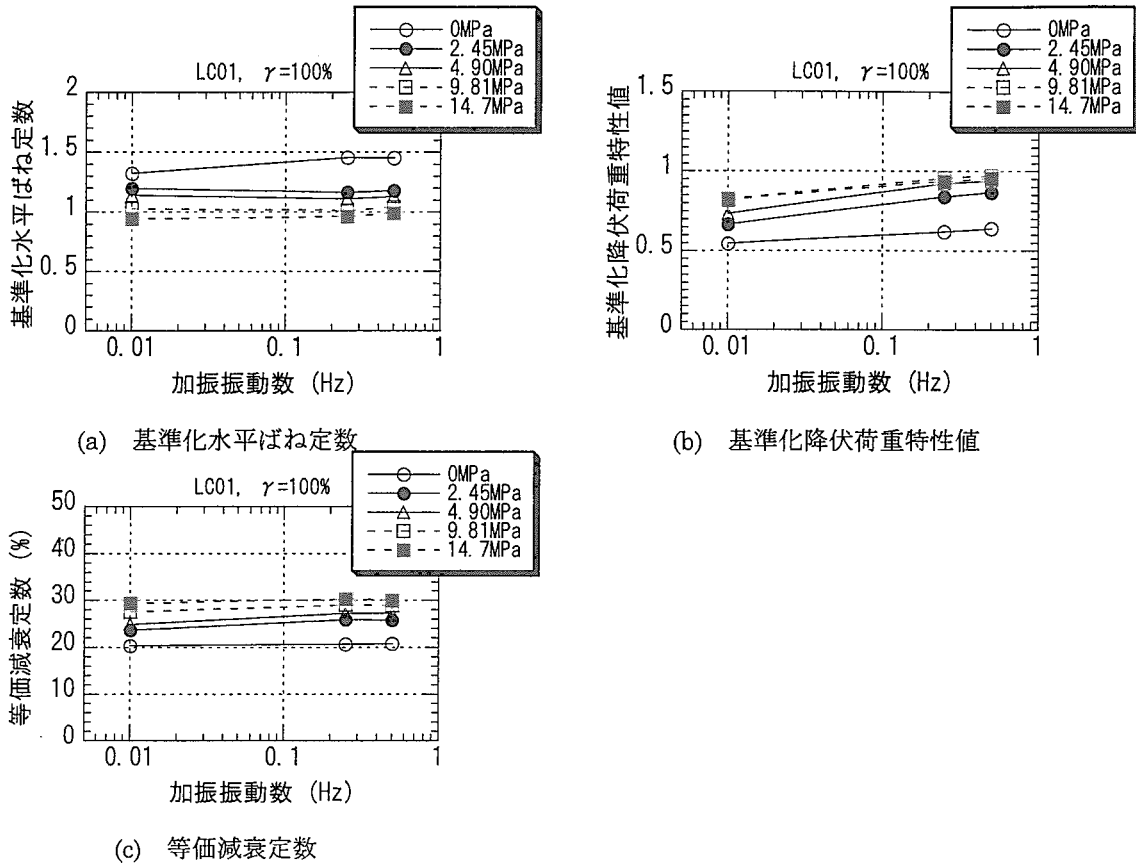


図 4.3.1-9 仕様②φ280 試験体 (LC01) の加振振動数に対する水平方向特性
(凡例内の応力値は鉛直応力を表す)

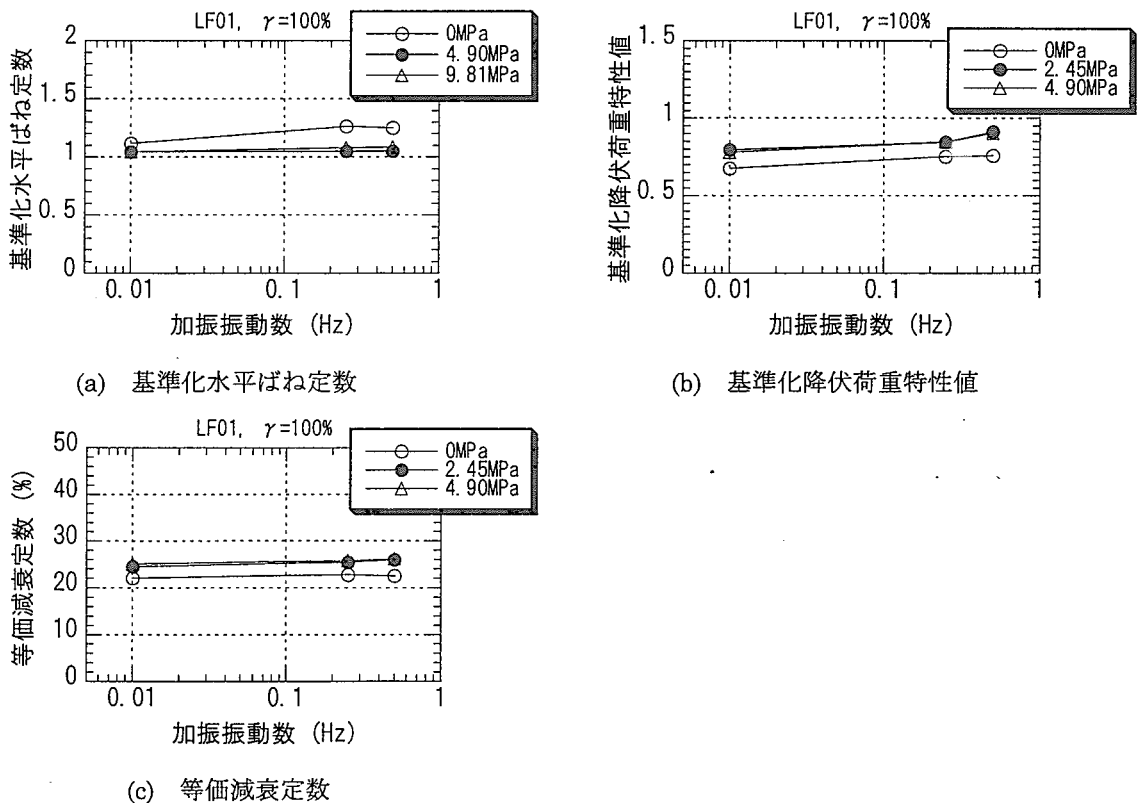
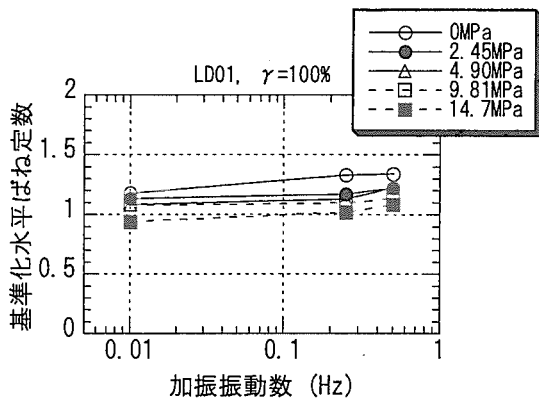
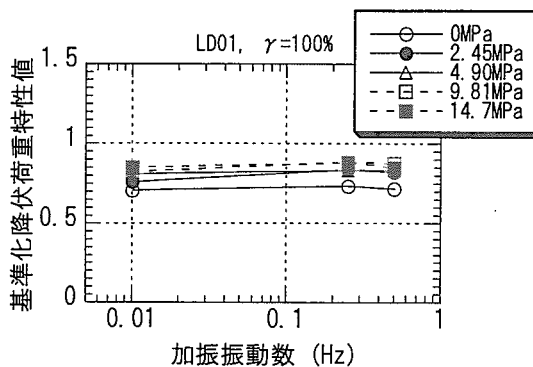


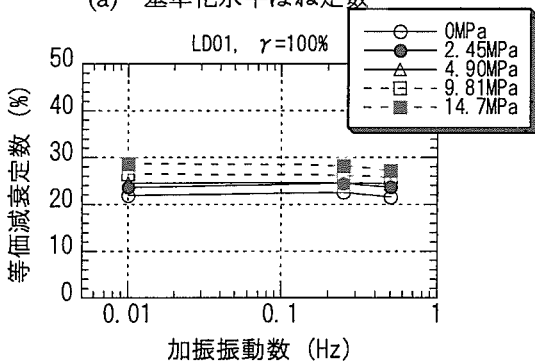
図 4.3.1-10 仕様②φ500 試験体 (LF01) の加振振動数に対する水平方向特性
(凡例内の応力値は鉛直応力を表す)



(a) 標準化水平ばね定数

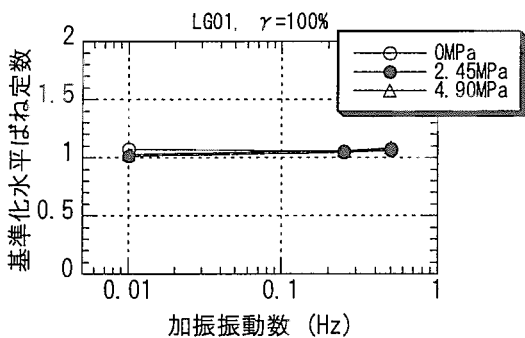


(b) 標準化降伏荷重特性値

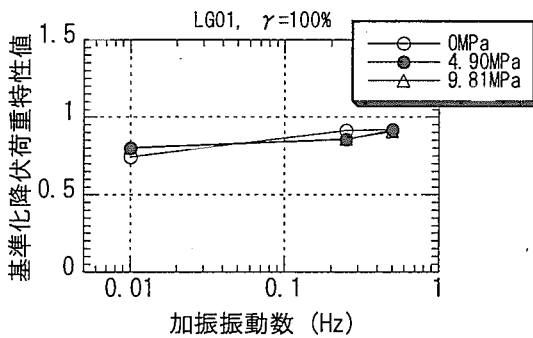


(c) 等価減衰定数

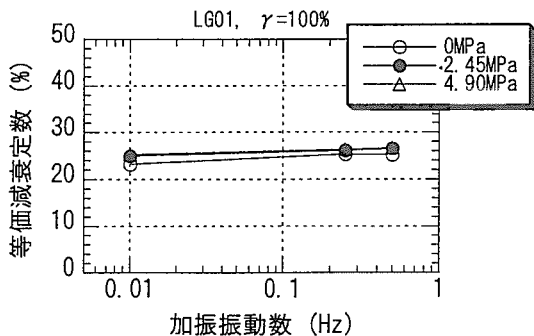
図 4.3.1-11 仕様③ φ280 試験体 (LD01) の加振振動数に対する水平方向特性
(凡例内の応力値は鉛直応力を表す)



(a) 標準化水平ばね定数



(b) 標準化降伏荷重特性値



(c) 等価減衰定数

図 4.3.1-12 仕様③ φ500 試験体 (LG01) の加振振動数に対する水平方向特性
(凡例内の応力値は鉛直応力を表す)

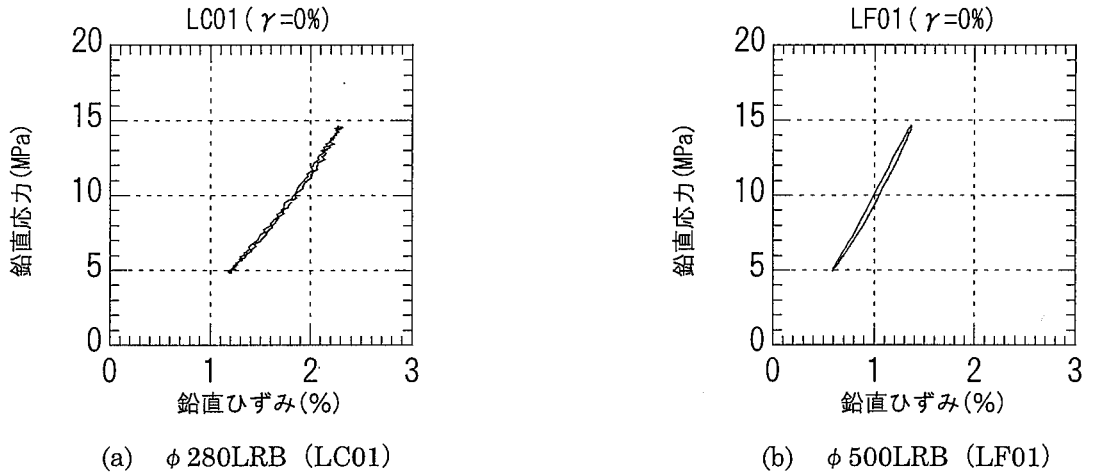


図 4.3.1-13 仕様②試験体の鉛直方向履歴ループ
(加振振動数 0.01Hz 以下)

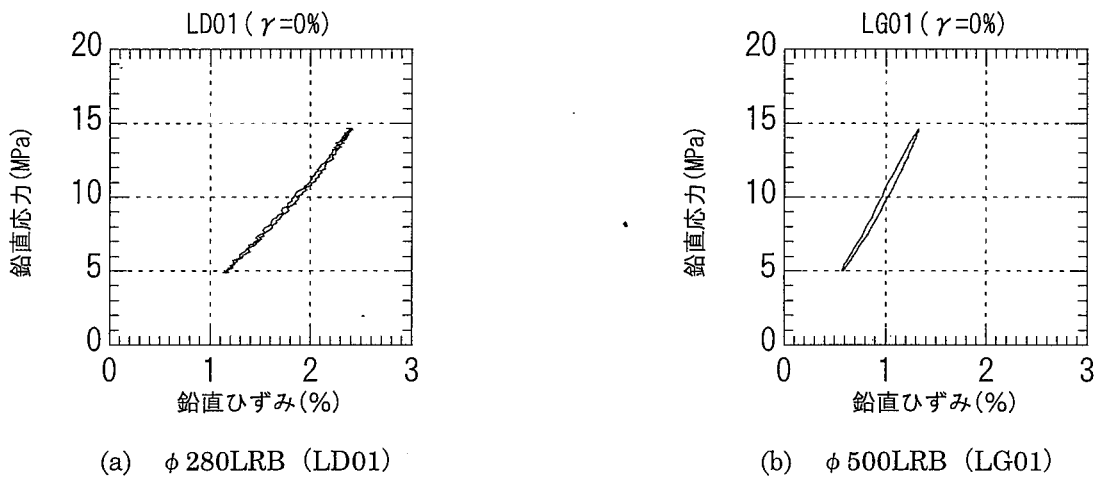
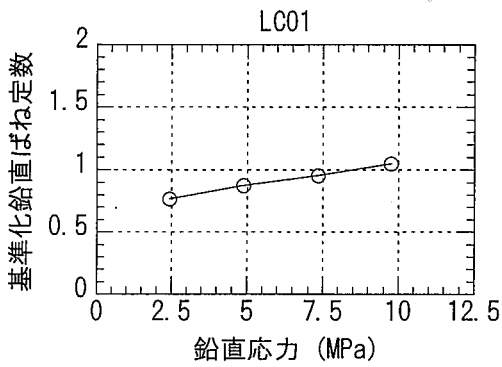
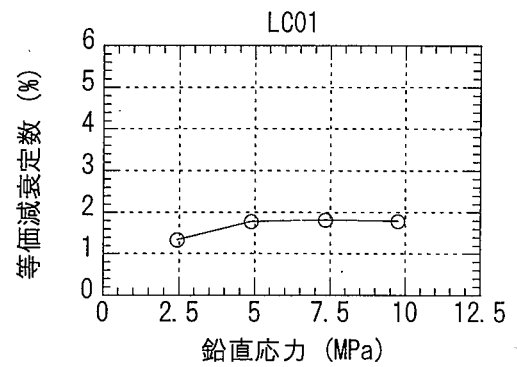


図 4.3.1-14 仕様③試験体の鉛直方向履歴ループ
(加振振動数 0.01Hz 以下)

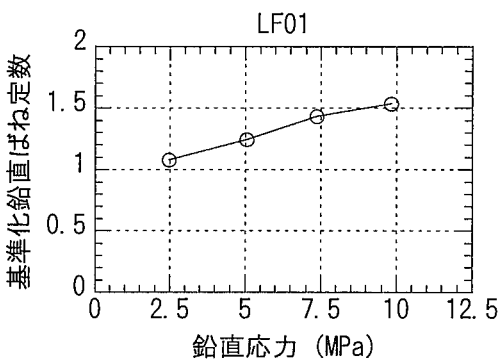


(a) 基準化鉛直ばね定数

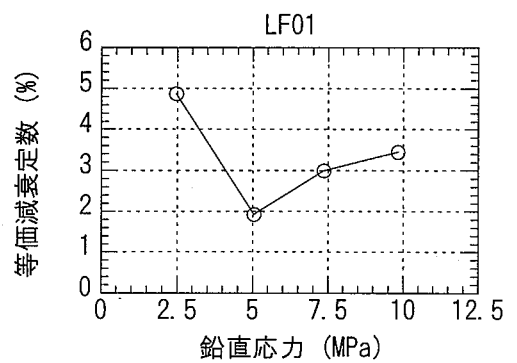


(b) 等価減衰定数

図 4.3.1-15 仕様②φ280 試験体 (LC01) の鉛直応力に対する鉛直方向特性

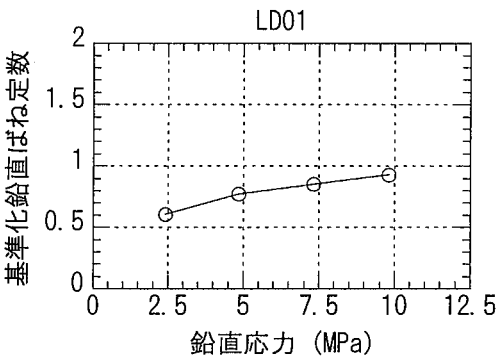


(a) 基準化鉛直ばね定数

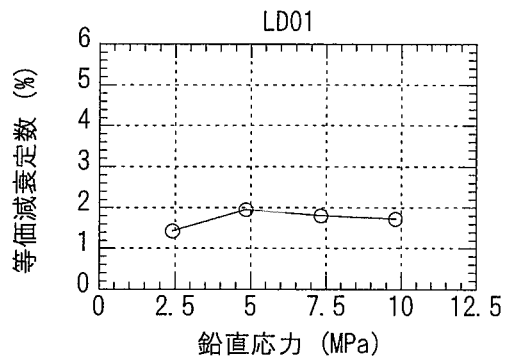


(b) 等価減衰定数

図 4.3.1-16 仕様②φ500 試験体 (LF01) の鉛直応力に対する鉛直方向特性

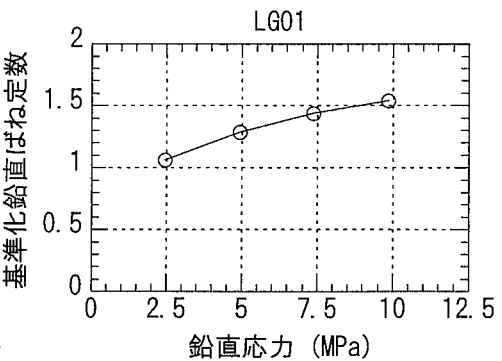


(a) 基準化鉛直ばね定数

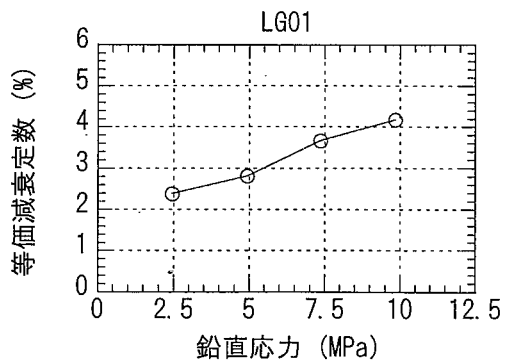


(b) 等価減衰定数

図 4.3.1-17 仕様③φ280 試験体 (LD01) の鉛直応力に対する鉛直方向特性



(a) 基準化鉛直ばね定数



(b) 等価減衰定数

図 4.3.1-18 仕様③φ500 試験体 (LG01) の鉛直応力に対する鉛直方向特性

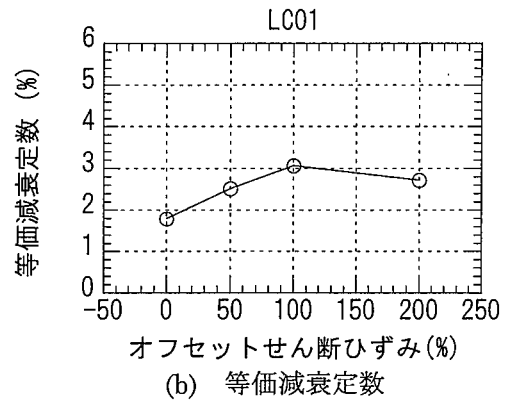
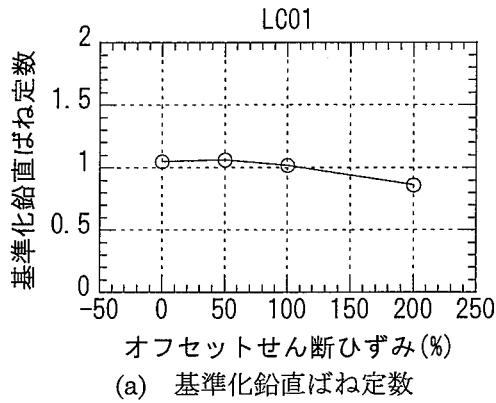


図 4.3.1-19 仕様②φ280 試験体 (LC01) のオフセットせん断ひずみに対する鉛直方向特性

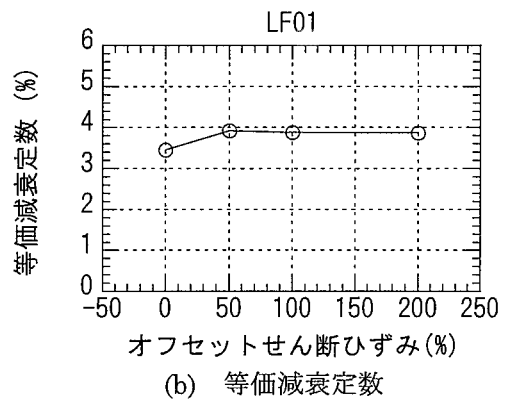
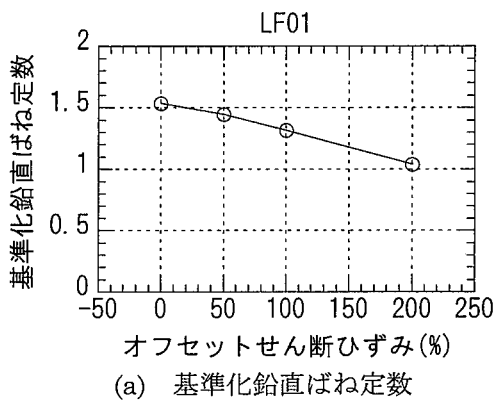


図 4.3.1-20 仕様②φ500 試験体 (LF01) のオフセットせん断ひずみに対する鉛直方向特性

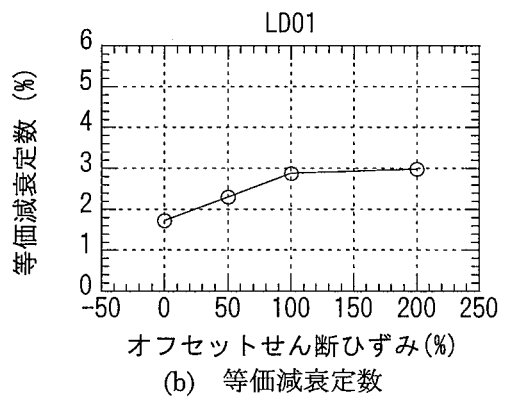
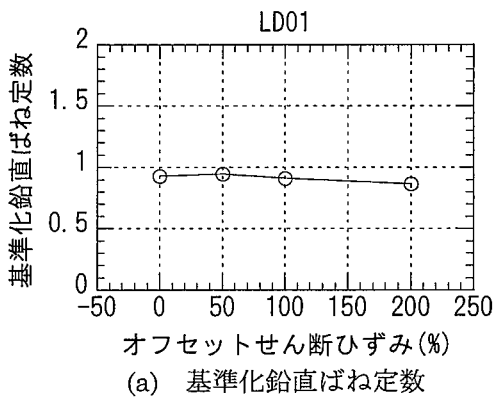


図 4.3.1-21 仕様③φ280 試験体 (LD01) のオフセットせん断ひずみに対する鉛直方向特性

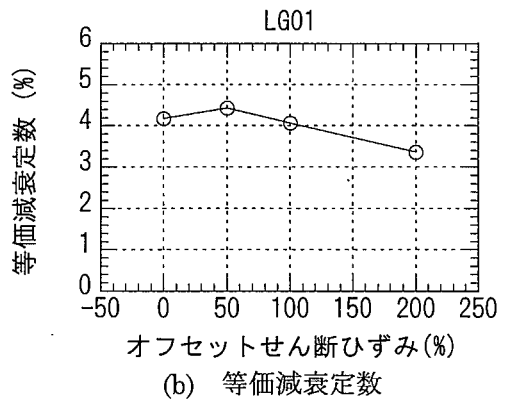
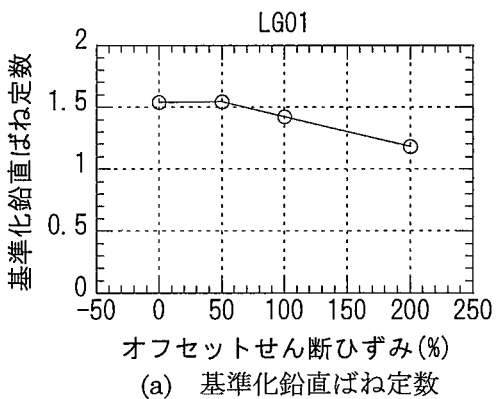
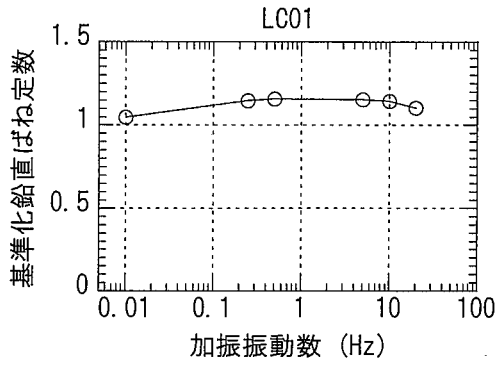
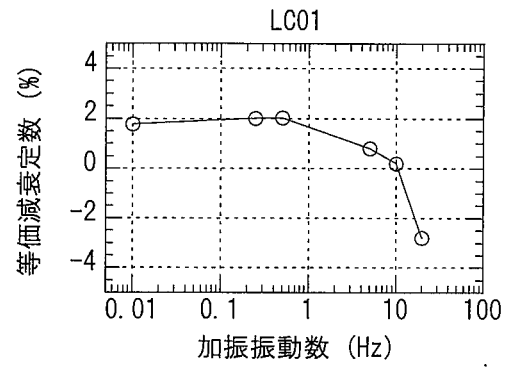


図 4.3.1-22 仕様③φ500 試験体 (LG01) のオフセットせん断ひずみに対する鉛直方向特性

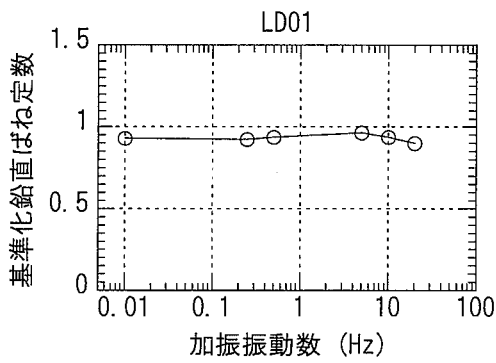


(a) 基準化鉛直ばね定数

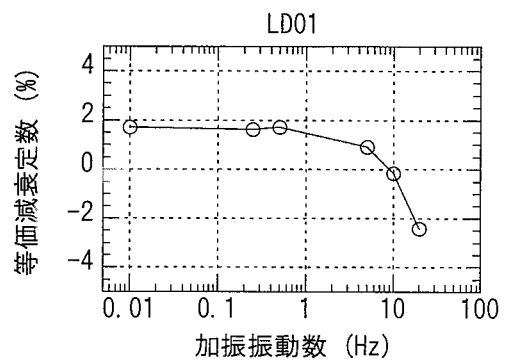


(b) 等価減衰定数

図 4.3.1-23 仕様② φ280 試験体 (LC01) の加振振動数に対する鉛直方向特性



(a) 基準化鉛直ばね定数



(b) 等価減衰定数

図 4.3.1-24 仕様② φ280 試験体 (LD01) の加振振動数に対する鉛直方向特性

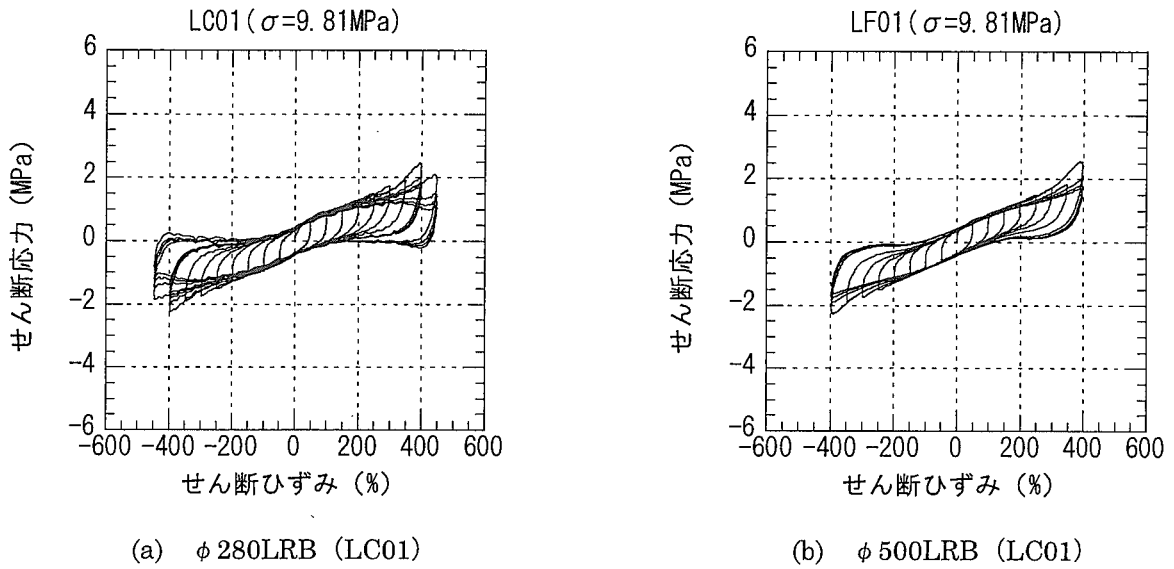


図 4.3.1-25 仕様②の試験体の破断試験結果
(鉛直応力 9.81MPa、加振振動数 0.01Hz 以下)

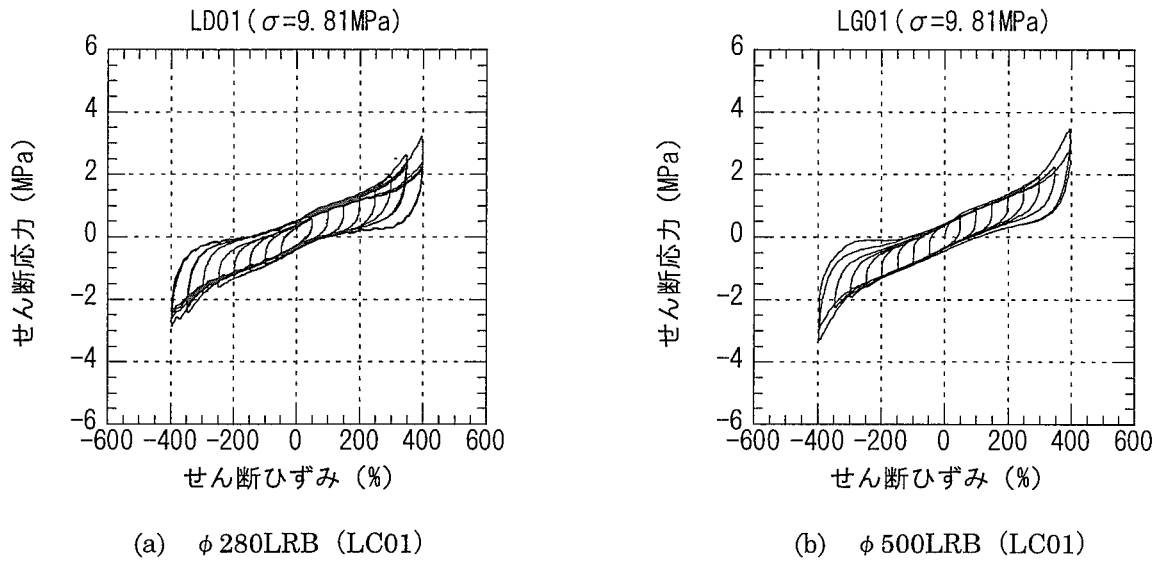


図 4.3.1-26 仕様③の試験体の破断試験結果
(鉛直応力 9.81MPa、加振振動数 0.01Hz 以下)

4.3.2 高面圧(29.4MPa)下での特性試験結果

(1) 水平方向特性

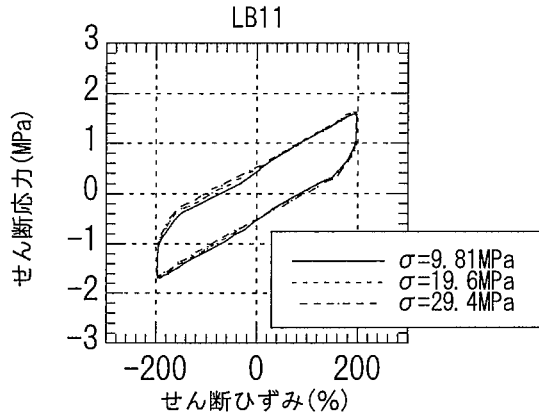
図 4.3.2-1 に面圧 σ を 0MPa、19.6MPa、29.4MPa とした時の水平方向復元力特性およびせん断変形に伴う沈み込みの履歴を示す。せん断ひずみが 200%までの領域において、せん断応力-せん断ひずみ関係は、面圧の影響をほとんど受けていないことがわかる。沈み込みは、当然のことながら、面圧が増えるに従って増大するが、せん断変形に伴う急激な沈み込みは見られない。

(2) 鉛直方向特性

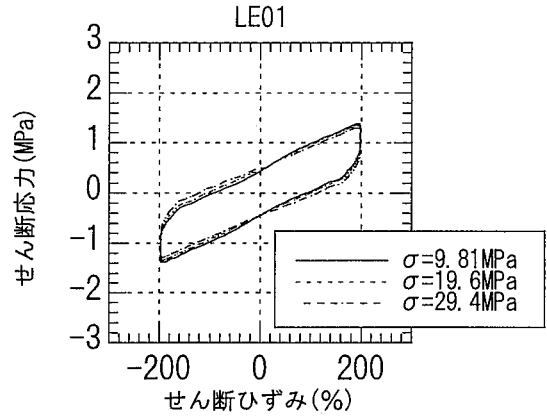
図 4.3.2-2 に鉛直応力を 0MPa~29.4MPa まで変化させたときの鉛直方向の復元力特性を示す。また、図 4.3.2-3 には、オフセットせん断ひずみを与えたときの鉛直方向復元力特性を示す。いずれにおいても、安定した復元力特性を示していることがわかる。

(3) 変形性能

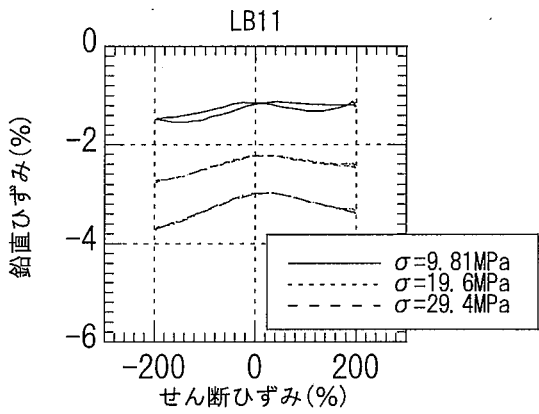
図 4.3.3-4 には面圧を 29.4MPa 下における漸増载荷破断試験の結果を示す。試験においては、各せん断ひずみで正弦波 4 波を与えながらせん断ひずみを 50%ずつ漸増させた。せん断ひずみ 300%を越える領域で履歴ループは除荷時にループが膨らみはじめ、剛性の低下が見られる。破断ひずみは 400%~500%であるが、せん断ひずみ 300%を越える領域では内部に損傷が生じていた可能性が高い。



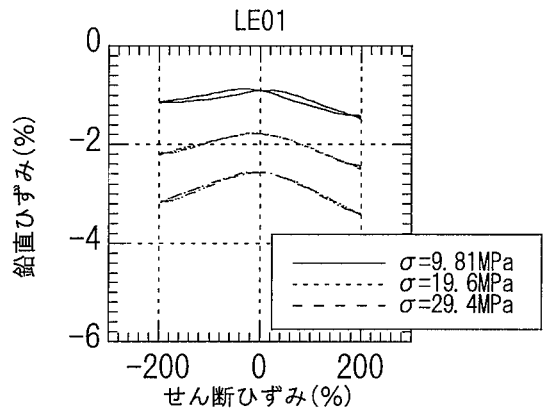
(a) φ 280 水平方向復元力



(b) φ 500 水平方向復元力



(c) φ 280 沈み込み特性



(d) φ 500 沈み込み特性

図 4.3.2-1 水平方向復元力特性とせん断変形に伴う沈み込み

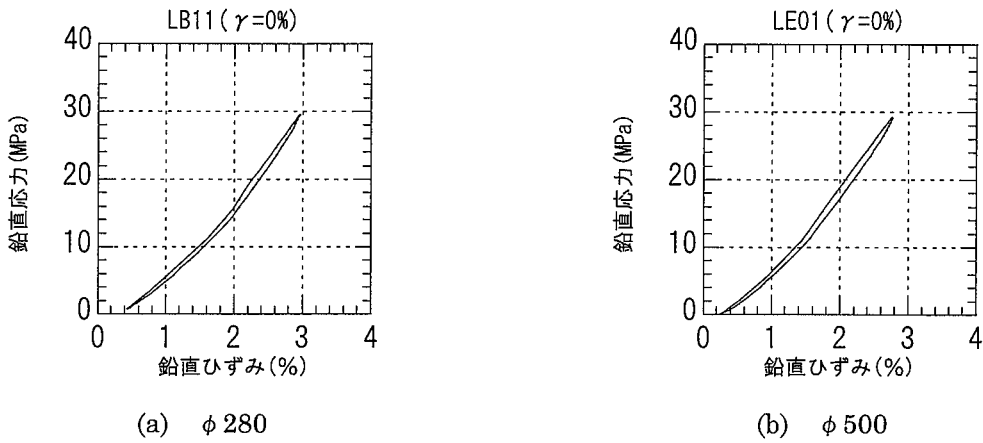


図 4.3.2-2 鉛直方向復元力特性 (3 波目)

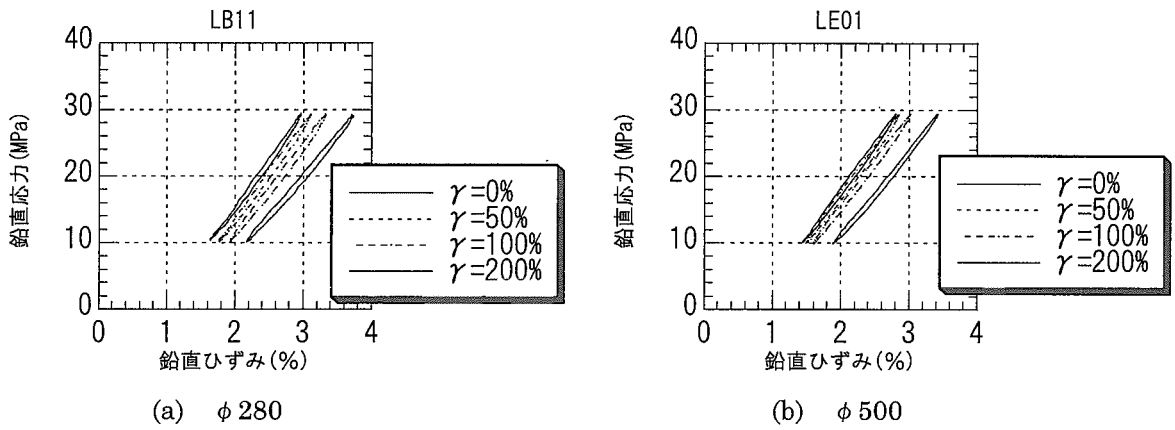


図 4.3.2-3 せん断変形オフセットによる鉛直方向復元力特性の変化

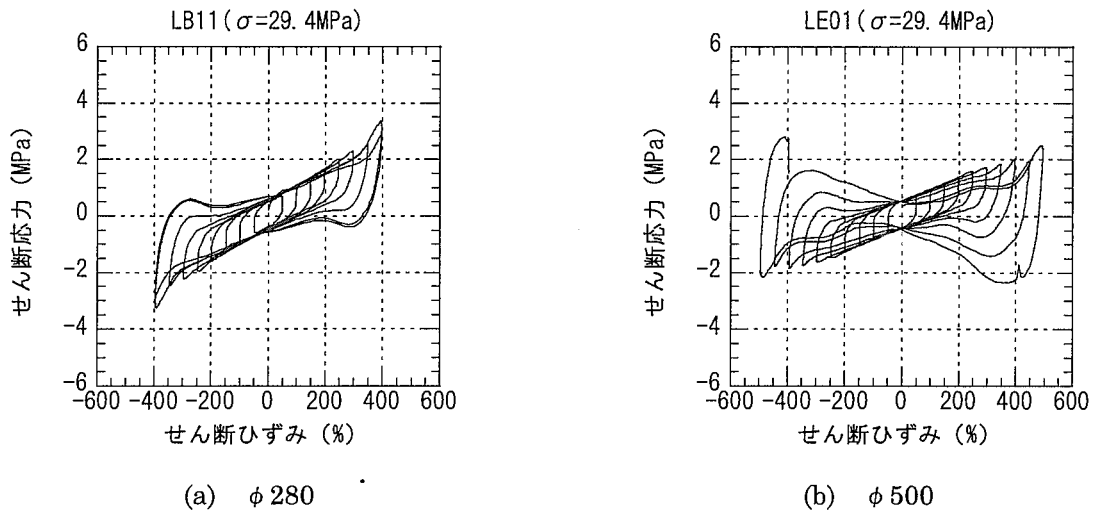


図 4.3.2-4 変形性能試験結果

(面圧: 29.4MPa、破断時加振以外は 3 波目)

4.3.3 座屈試験

図 4.3.3-1 に座屈試験結果を示す。面圧 29.4MPa～88.3MPa(300kgf/cm²～900kgf/cm²)までのせん断応力-せん断ひずみ関係を各々面圧 19.6MPa(200kgf/cm²)のものと比較している。面圧を高くするほど、降伏後の第 2 剛性は低くなり、鉛直応力 58.8MPa(600kgf/cm²)ではほぼ第 2 剛性は 0 の完全弾塑性型の履歴性状を示している。さらに、面圧 68.6MPa(700kgf/cm²)では第 2 剛性は若干負勾配となり、面圧 78.5MPa(800kgf/cm²)および 88.3MPa(900kgf/cm²)では負勾配が非常に顕著となっている。以上より、本試験体における座屈応力は、68.6MPa(700kgf/cm²)程度といえる。

また、試験終了後も試験体には、くの字型に残留変形が残っており、内部鋼板には塑性変形が生じたことがうかがえる。

以上の試験結果を従来提案されている座屈応力との比較を行う。Haringx 理論による座屈応力 σ_{cr} は近似的に以下のように示される²⁾。

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{2} G \frac{H}{t_R} \sqrt{\left(\pi S_{f1} S_{f2} \frac{t_R}{H} \right)^2 \frac{\kappa}{2(1+2\kappa S_{f1}^2 G/E_{\infty})}} = \zeta G S_{f1} S_{f2} \quad (6.1)$$

ただし、

$$\zeta = \sqrt{\frac{\kappa}{8(1+2\kappa S_{f1}^2 G/E_{\infty})}}$$

ここで、

- S_{f1} : 1 次形状係数
- S_{f2} : 2 次形状係数 S
- G : ゴムのせん断弾性係数
- t_R : ゴム 1 層の厚さ
- H : ゴム層と鋼板の総厚さ
- E_{∞} : ゴムの体積弾性率

上式に表 3.2.1-1 の積層ゴムの諸元に基づく値を代入すると、 ζ は以下のようになる。

$$\zeta = \pi [0.85 / \{8(1+2 \times 0.85 \times 32.81^2 \times 4.958 \text{kgf/cm}^2 / 12060 \text{kgf/cm}^2)\}] = 0.77$$

よって、座屈応力の理論値は、以下のように求められる。

$$\sigma_{cr} = 0.77 \times 4.958 \times 32.81 \times 6.09 = 762.8 \text{kgf/cm}^2 = 74.8 \text{MPa}$$

以上より、今回の試験より得られた座屈応力は、理論値よりも若干下回ってはいるものの、ほぼ理論値に対応しているといえる。

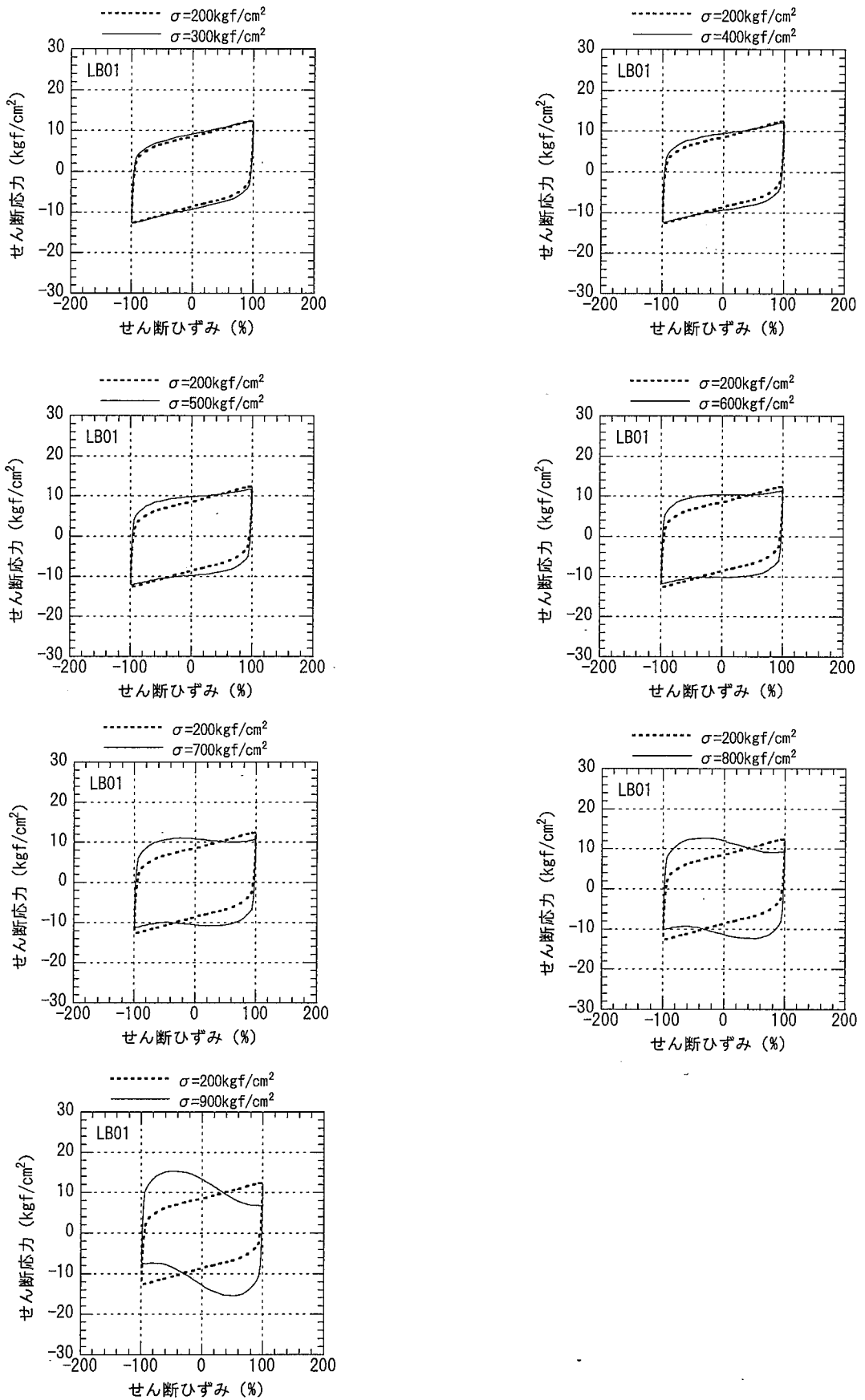


図 4.3.3-1 座屈試験結果

各面圧下におけるせん断ひずみ－せん断応力関係を面圧 19.6MPa(200kgf/cm²)時と比較

4.4 まとめ

今後の設計絞り込みに資するデータを構築することを目的として 3 種類の仕様（設計パラメータ）の異なる鉛入り積層ゴムの縮小試験体を用いた力学特性試験を行うとともに、地震時の軸力変動等を考慮した 29.4MPa (300kgf/cm²) の高面圧下における鉛入り積層ゴムの特性の把握を行った。

試験の結果をまとめると以下の通りである。

(1) 設計パラメータの異なる試験体の特性

3種類の仕様の異なる試験体を用いた特性試験より以下の結果が得られた。

- 1) 3つの設計仕様（①実機ゴム直径1200mm、設計変位300mm、②実機直径1200mm、設計変位400mm、③実機直径1500mm、設計変位400mm）のいずれも、設計値で基準化した場合には同様の特性を示すことがわかった。
- 2) せん断ひずみ100%以上において、水平方向特性は設計の許容値を満たしている。
- 3) 鉛直方向特性は、φ500の試験体では設計値よりもかなり高くなる傾向が見られる。この原因については、今後の検討課題と考える。
- 4) 各仕様の積層ゴムの破断せん断ひずみ（面圧9.81MPa下）は、400%程度であり、大きな差はなかった。

以上より、鉛直特性においては若干の検討課題が残されるものの、上記の3つの仕様において同様の力学特性が得られていることから、与えられたいずれの設計条件にも対応可能であることと考えられる。

(2) 高面圧(29.4MPa)下での特性試験結果

せん断ひずみ 300%を越える領域で水平方向の履歴ループは除荷時にループが膨らみはじめ、剛性の低下が見られるものの、せん断ひずみ 300%以下においては面圧の違いによる水平方向特性の変化は少ない。よって、せん断変形が設計範囲の場合には、高面圧 (29.4MPa) の影響を考慮する必要はないものと考えられる。

(3) 座屈試験

φ280のLRB試験体を用いた試験による座屈応力値はほぼ68.6MPa(700kgf/cm²)程度となり、理論値ともほぼ対応していることが確認された。

5. 経年変化試験

5.1 試験目的

本試験では、高面圧下における鉛入り積層ゴムの経年変化特性を把握するために、加熱促進試験を行い、その前後の力学特性を把握することを目的とする。

平成9年度には、試験体の経年変化前の初期特性を試験により把握した。平成10年度は、恒温槽を用いた経年変化（加熱促進）試験を実施した。平成11年度は、加熱促進試験を継続・完了し、経年変化後の特性を把握するための力学（基本特性、変形性能）試験を実施した。

5.2 試験内容

5.2.1 試験体

試験体としては、鉛プラグ入り積層ゴムφ280（実機直径φ1200、設計変位300mm）4体と天然ゴム系積層ゴム（実機直径φ1200、設計変位300mm、もともと鉛プラグ入り積層ゴムであった試験体を鉛プラグを除去し天然ゴム系積層ゴムとした。）2体の試験体を用いる。積層ゴムの諸元は先に示した表2.3-3の通りである。

5.2.2 試験方法

鉛プラグ入り積層ゴム3体および天然ゴム系積層ゴム2体は設計支持荷重相当557kN（56.8tonf、面圧9.66MPa（98.5kgf/cm²））を载荷し、鉛プラグ入り積層ゴムのうち1体は鉛直荷重を0として経年変化（加熱促進）試験を行う。試験としては、恒温槽（促進温度60℃）に入れる前後において、積層ゴムの特性を把握する。

ゴム材料の経年的な物性変化は化学反応速度論の中のアレニウス式（(5.2.2-1)式）により求めることができる。アレニウス式に基づくゴムの促進時間 t_s は（5.2.2-2）式の通りである。

$$K = A \exp(-E/RT) \quad (5.2.2-1)$$

ここで、 K : 反応速度定数（時間⁻¹）

A : 頻度因子

R : 気体定数

T : 絶対温度

E : 活性化エネルギー

$$\ln \frac{t_i}{t_s} = \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_s} \right) \quad (5.2.2-2)$$

ここで、 T_i : 想定環境温度（K）

T_s : 促進温度（K）

t_i : 想定環境温度に対する実相当時間。

上式から、ゴムの促進時間を算出するためには活性化エネルギーが必要となることがわかる。電力中央研究所が通産省の委託を受けて実施した FBR 免震確証試験においては、今回使用している同一ゴムの活性化エネルギーが求められており、その値は 18.3kcal/mol（破断伸びに対する値）である²⁾。これに基づいて、促進温度を 60℃とし、想定環境温度（常温）20℃で 40 年間放置した場合の促進日数を算定すると、338 日間となる。今回の試験条件を表 5.2.2-1 に示す。促進温度は 60℃としているが、FBR 確証試験の知見に基づき雰囲気温度を促進温度よりも 5℃高く設定している。

各試験体の荷重条件を表5.2.2-2に示す。

表 5.2.2-1 経年変化試験条件（φ280LRB および NRB 使用）

	恒温槽内雰囲気温度	時間
予備加熱	70℃	48時間
本試験	65℃ (促進温度：60℃)	338日 (40年相当)

表5.2.2-2 各試験体の荷重条件

試験体名	試験体種類	面圧
LB05	LRB	9.66MPa
LB06	LRB	9.66MPa
LB07	LRB	9.66MPa
LB08	LRB	0MPa
LB09	NRB	9.66MPa
LB10	NRB	9.66MPa

5.3 試験結果

5.3.1 経年変化試験経過

経年変化試験は、表5.3-1に示すように1998年8月31日より予備加熱を開始した。本試験開始後、経年変化の途中の特性を把握するために、10年経過相当の85日目（1998年11月26日）で一旦加熱を停止し、常温下でのインピーダンス計測等を行った。インピーダンス計測の結果については、5.1節で述べることとする。また、1999年2月19日試験装置に不具合が生じ、試験装置が停止してしまっていたが、2月22日に試験装置を再立ち上げし、2月24日に本試験を再開した。さらに、3月18日および8月17日に停電のため中断があった。

以上のような経過の後、40年経年変化相当にあたる1999年9月1日に試験を終了した。

表5.3-1 経年変化試験工程

	年月日	時刻	備考
予備加熱開始	1998年8月31日	14:00	
本試験開始	1998年9月2日	14:00	
一時加熱停止	1998年11月26日	14:00	(10年相当)
予備加熱再開	1998年12月7日	15:00	中断日数：
本試験再開	1998年12月9日	15:00	13日
試験装置停止	1999年2月19日	12:00	
予備加熱再開	1999年2月22日	9:30	故障中断：
本試験再開	1999年2月24日	9:30	5日
試験装置停止	1999年3月18日	15:00	
予備加熱再開	1999年3月18日	16:30	停電中断：
本試験再開	1999年3月19日	15:00	1日
試験装置停止	1999年8月17日	9:30	
予備加熱再開	1999年8月23日	9:30	停電中断：
本試験再開	1999年8月24日	9:30	7日
試験終了	1999年9月1日	12:30	加熱日数：338日

5.3.2 経年変化後の基本特性

経年変化前後の特性変化を把握するために、経年変化試験を行ったすべての試験体に対して要素特性試験ならびに変形性能試験を行った。

(1) 水平方向基本特性試験

図5.3.2-1に鉛プラグ入り積層ゴム4体、天然ゴム系積層ゴム2体の各スケールモデルにおける経年変化前および変化後の水平方向の履歴曲線（加振振動数0.01Hz、支持荷重相当565kN（面圧9.81MPa））を示す。経年変化前および変化後の履歴曲線から天然ゴム系積層ゴムのばね定数が上がっていることと、鉛プラグ入り積層ゴムの履歴面積が減少していることがわかる。

図5.3.2-2にせん断ひずみに伴う沈み込み量（加振振動数0.01Hz）を示す。経年変化前および変化後の履歴曲線から、経年変化による沈み込み量の変化は鉛プラグ入り積層ゴムと天然ゴム系積層ゴムで

ほとんどないことがわかる。また、経年変化前に行った試験で生じた沈み込み量の方向性は経年変化後も同様に生じている。

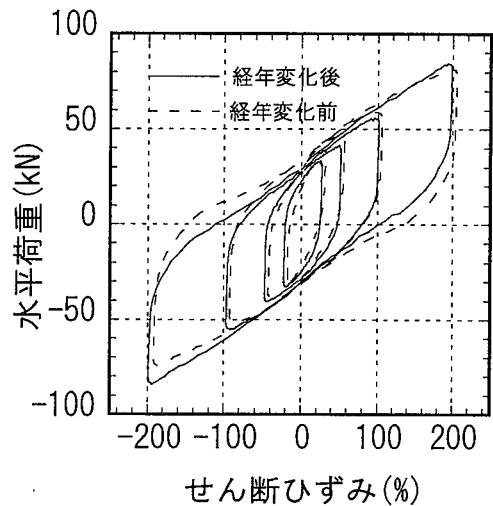
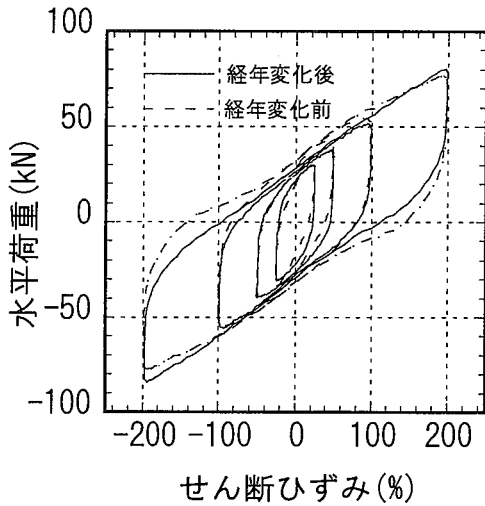
図5.3.2-3に経年変化前および変化後における水平方向特性値の変化を示す。図中の値は経年変化後の特性値を変化前の特性値でそれぞれ割って基準化している。

(a)水平ばね定数に関して、天然ゴム系積層ゴムのばね定数が経年変化によっておおよそ15%ほどすべての加振振幅で大きくなっているのに対して、鉛プラグ入り積層ゴムのばね定数は鉛プラグの影響の大きい加振振幅25%から100%で水平ばね定数が下がっており、鉛プラグの影響の小さい200%では天然ゴム系積層ゴムと同様に20%程度大きくなっている。

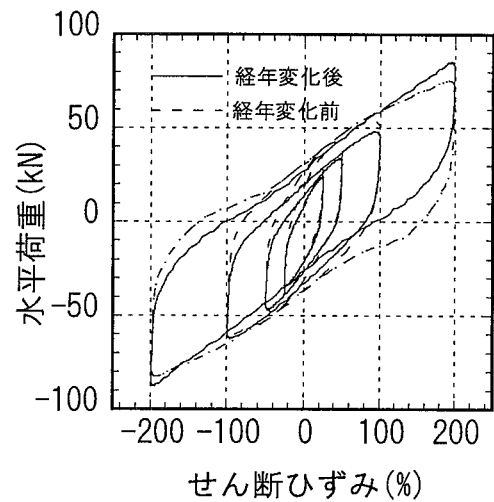
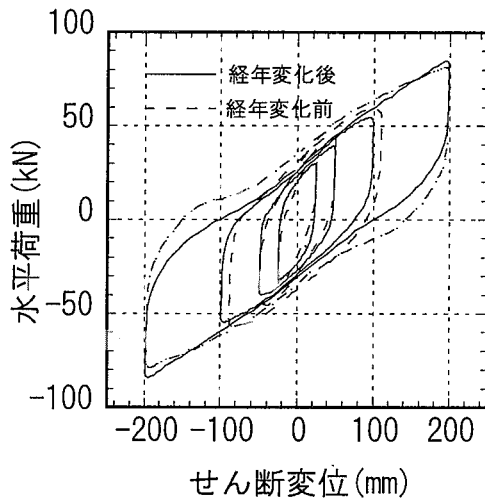
(b)等価減衰定数に関して、天然ゴム系積層ゴムの等価減衰定数はすべての加振振幅で経年変化後に大きくなっているのに対して、鉛プラグ入り積層ゴムの等価減衰定数は加振振幅が大きい領域では逆に2割ほど小さくなっている。また、面圧を加えずに経年変化した鉛入り積層ゴム(LB08)の等価減衰定数が25%と50%の加振振幅で他の鉛入り積層ゴムと異なり減少している。

(c)降伏荷重特性値に関して、鉛プラグ入り積層ゴムの降伏荷重特性値は等価減衰定数と同様な傾向を示している。

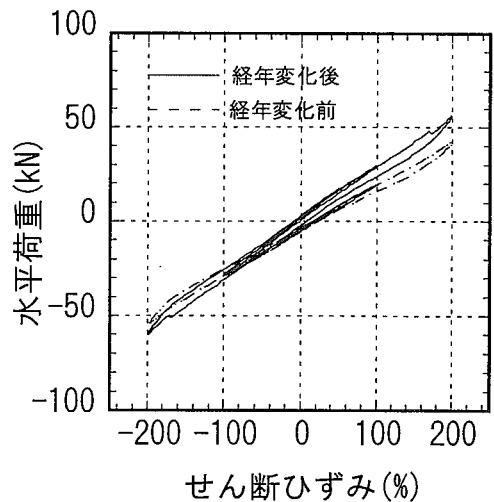
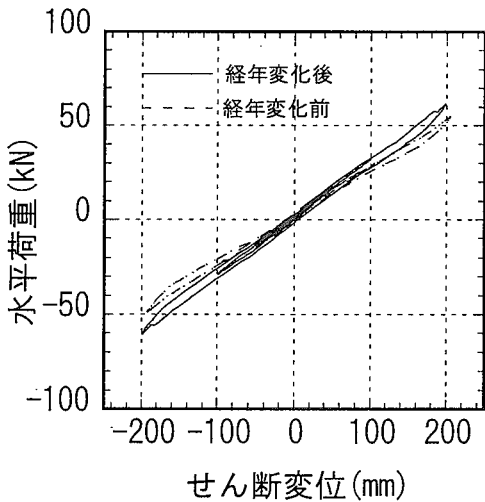
今回試験を行った天然ゴム系積層ゴムの経年変化による特性値の変化傾向は過去に得られた知見と一致している。鉛プラグ入り積層ゴムの剛性、減衰とも加振振幅の小さい領域でこれまでと異なる特性となったが、これらの傾向は面圧を加えて経年変化試験を行った鉛プラグ入り積層ゴムの3試験体すべてに共通して現れている。また、面圧を加えずに経年変化した鉛入り積層ゴム(LB08)の特性値も加振振幅の小さい領域で他の鉛入り積層ゴムと異なっている。さらに、天然ゴム系積層ゴムが鉛入り積層ゴムの鉛プラグを抜き取って作成されていることなどから、大型化した鉛プラグが何らかの影響を特性値に与えていると考えられる。



(a) LB05(ϕ 280,LRB,面圧9.66MPaで促進劣化) (b) LB06(ϕ 280,LRB,面圧9.66MPaで促進劣化)

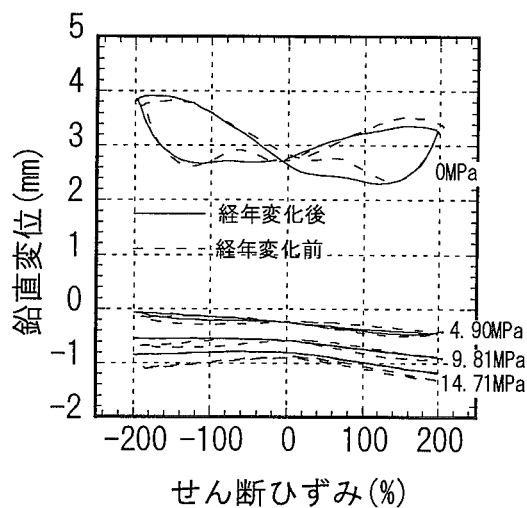
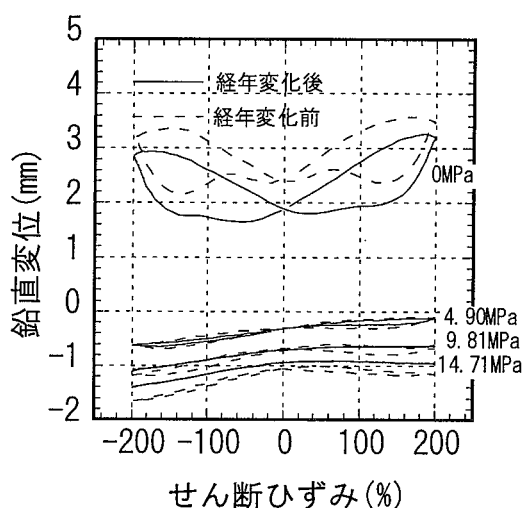


(c) LB07(ϕ 280,LRB,面圧9.66MPaで促進劣化) (d) LB08(ϕ 280,LRB,面圧0MPaで促進劣化)

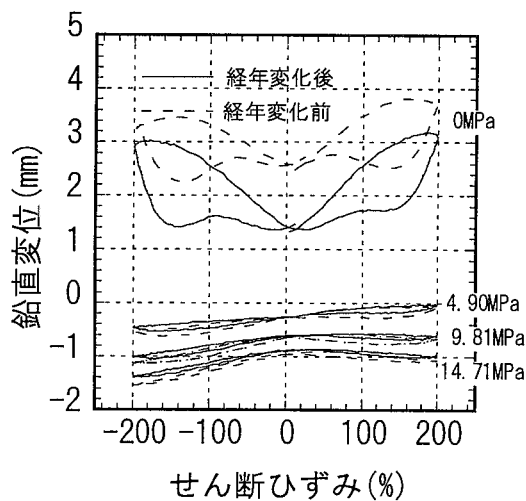
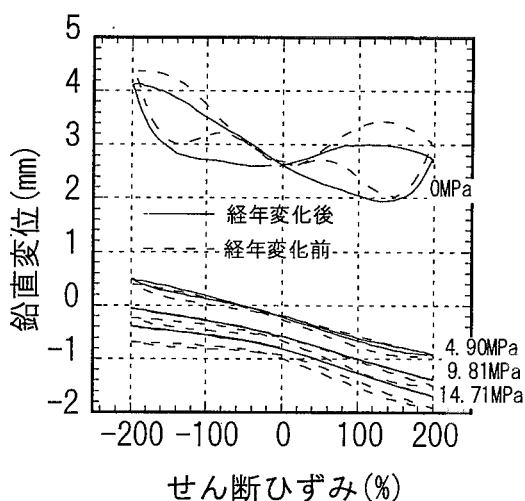


(e) LB09(ϕ 280,NRB,面圧9.66MPaで促進劣化) (f) LB10(ϕ 280,NRB,面圧9.66MPaで促進劣化)

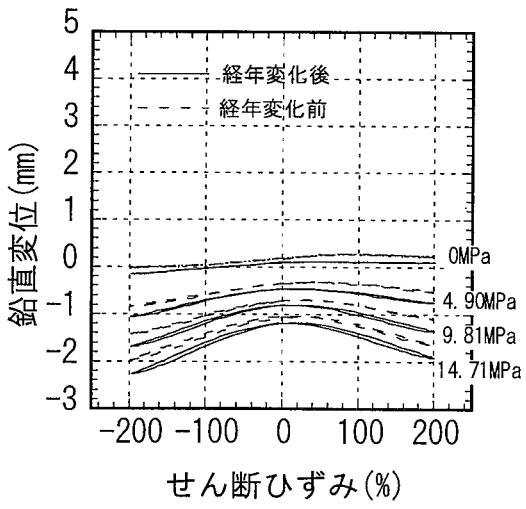
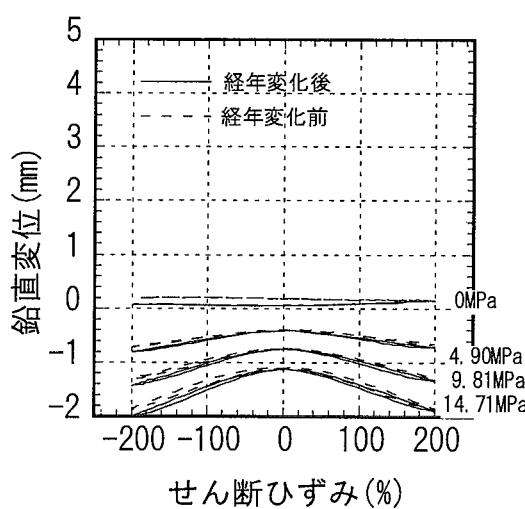
図5.3.2-1 経年変化前および変化後の水平方向の履歴曲線
(加振振動数0.01Hz, 支持荷重相当565kN (面圧9.81MPa))



(a) LB05(φ 280,LRB,面圧9.66MPaで促進劣化) (b) LB06(φ 280,LRB,面圧9.66MPaで促進劣化)

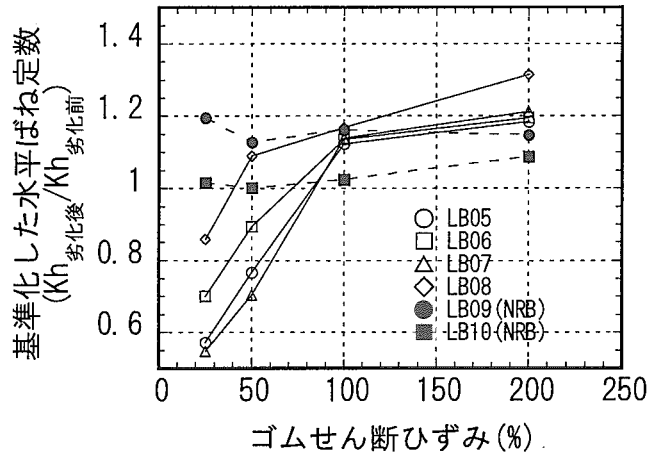


(c) LB07(φ 280,LRB,面圧9.66MPaで促進劣化) (d) LB08(φ 280,LRB,面圧0MPaで促進劣化)

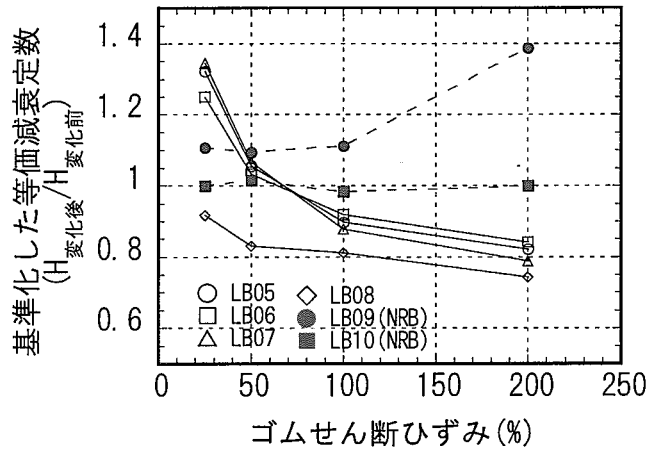


(e) LB09(φ 280,NRB,面圧9.66MPaで促進劣化) (f) LB10(φ 280,NRB,面圧9.66MPaで促進劣化)

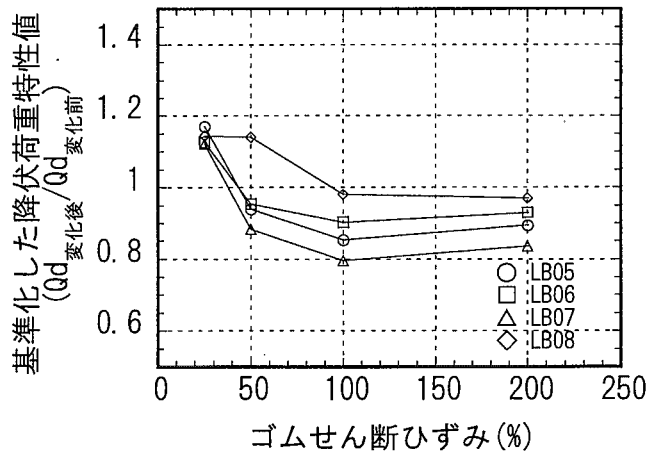
図5.3.2-2 せん断ひずみに伴う沈み込み量 (加振振動数0.01Hz)



(a) 水平ばね定数



(b) 等価減衰定数



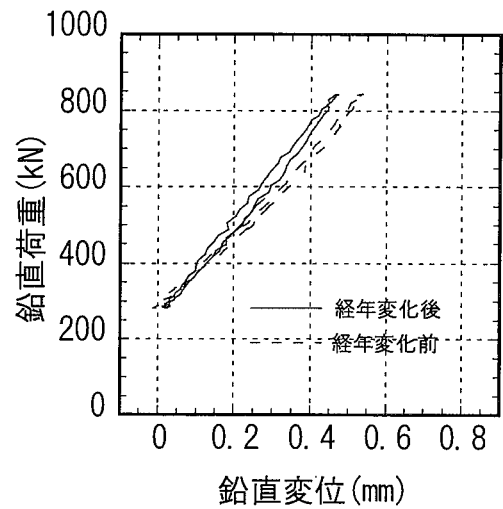
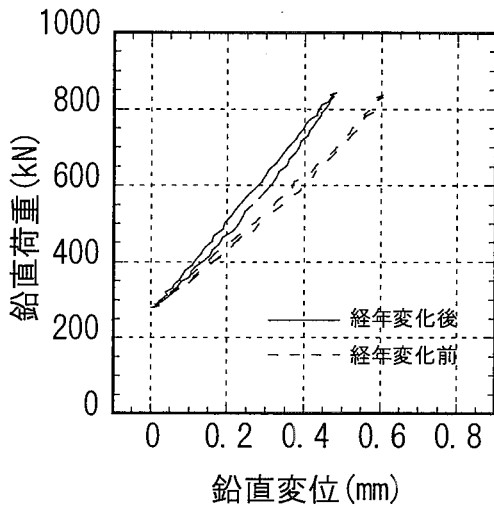
(c) 降伏荷重特性値

図5.3.2-3 経年変化前後における水平方向特性値の変化
(加振振動数0.01Hz, 支持荷重相当565kN (面圧9.81MPa))

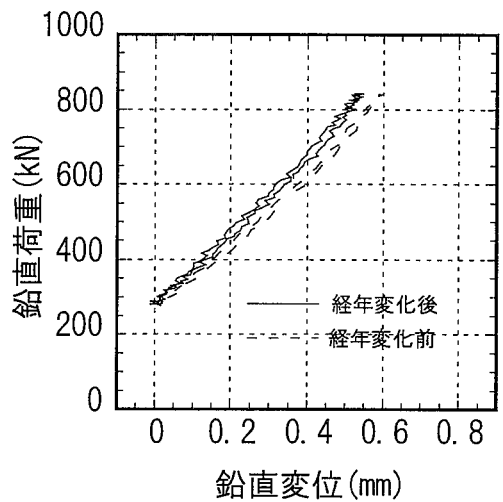
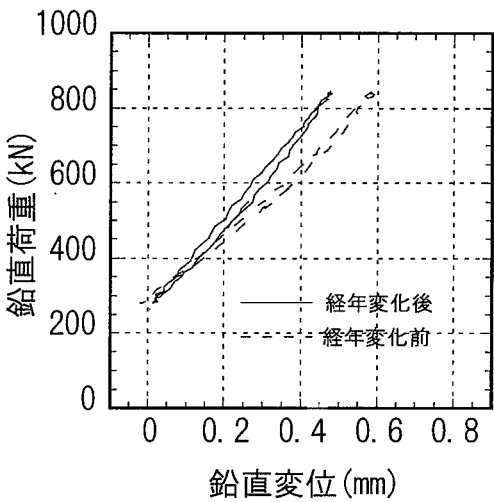
(2) 鉛直方向基本特性試験

図 5.3.2-4 に鉛プラグ入り積層ゴム 4 体, 天然ゴム系積層ゴム 2 体の各スケールモデルにおける経年変化前および変化後の鉛直方向の履歴曲線 (加振振動数 0.01Hz, 鉛直応力 $9.81 \pm 4.9\text{MPa}$) を示す。図で示す履歴曲線は, 面圧 9.81MPa を加えた時点での変位を零にオフセットしている。経年変化試験中の鉛直変位は表 5.2.2-2 に示す配置で計測を行っている。図より, 天然ゴム系積層ゴムと比較して鉛入り積層ゴムの鉛直ばね定数の経年変化後の変化が大きいことがわかる。また, 履歴形状には経年変化前後で変化はほとんどない。

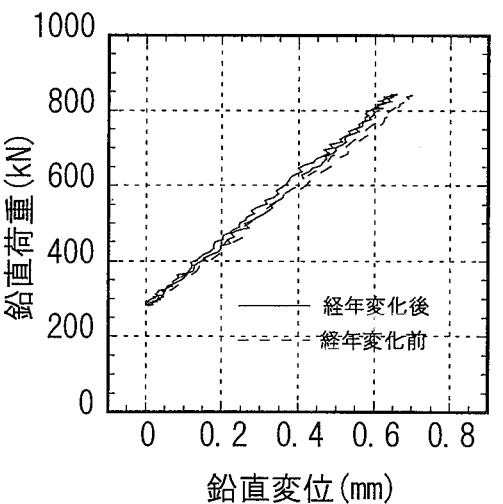
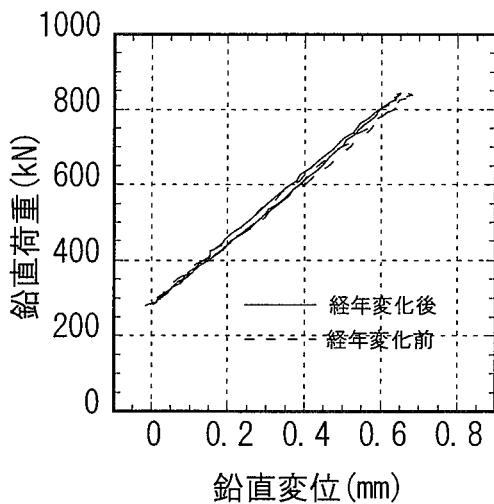
図 5.3.2-5 に経年変化前および変化後における鉛直方向特性値の変化を示す。図で示すデータは経年変化前の特性値を, オフセットせん断ひずみが一致した変化後の特性値で割って基準化した。鉛入り積層ゴムの経年変化後の鉛直ばね定数の変化は天然ゴム系積層ゴムと比較して大きく, オフセットせん断ひずみが無い場合, 経年変化後におおよそ 2 割程度大きくなっている。オフセットせん断ひずみが大きくなると天然ゴム系積層ゴムの傾向に漸近してくる。面圧を加えずに経年変化した鉛入り積層ゴム LB08 の鉛直剛性の変化は他の鉛入り積層ゴムと比較して小さくなった。



(a) LB05 ($\phi 280$, LRB, 面圧9.66MPaで促進劣化) (b) LB06 ($\phi 280$, LRB, 面圧9.66MPaで促進劣化)



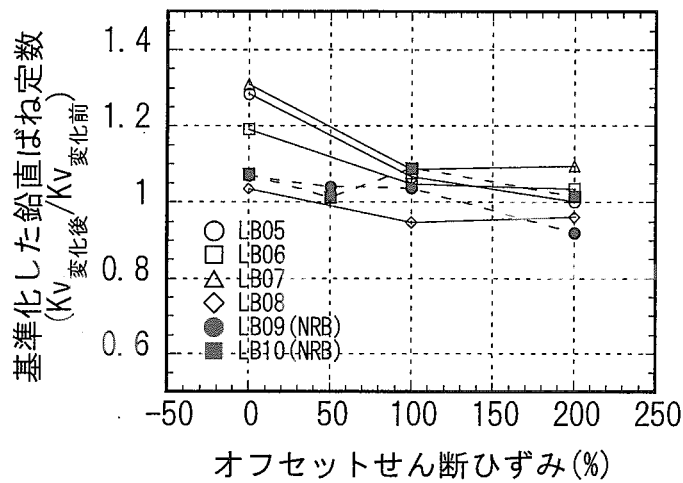
(c) LB07 ($\phi 280$, LRB, 面圧9.66MPaで促進劣化) (d) LB08 ($\phi 280$, LRB, 面圧0MPaで促進劣化)



(e) LB09 ($\phi 280$, NRB, 面圧9.66MPaで促進劣化) (f) LB10 ($\phi 280$, NRB, 面圧9.66MPaで促進劣化)

図5.3.2-4 経年変化前および変化後の鉛直方向の履歴曲線

(加振振動数0.01Hz, 鉛直応力 9.81 ± 4.9 MPa, オフセット0%)



(a) 鉛直ばね定数

図5.3.2-5 経年変化前後における鉛直方向特性値の変化
(加振振動数0.01Hz, 鉛直応力 9.81 ± 4.9 MPa)

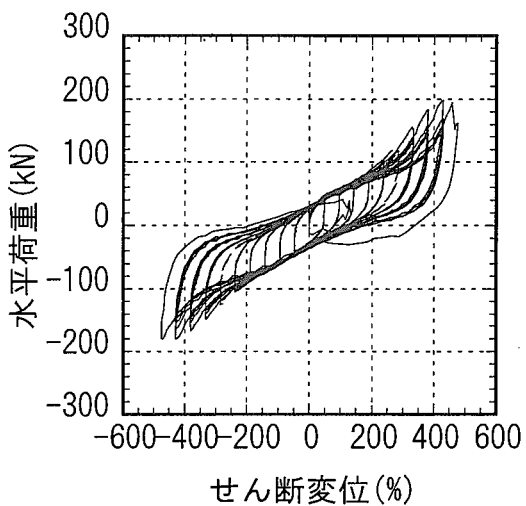
5.3.3 経年変化後の変形性能

図5.3.3-1に経年変化後の漸増载荷破断試験の結果を示す。破断試験は要素ごとに面圧を変更して行った。図に示すいずれのケースでも破断せん断変位はせん断ひずみ450%から500%程度であった。鉛プラグ入り積層ゴムの試験結果で面圧が上がると破断応力が下がる傾向があり、面圧14.71MPaのケースでは履歴ループの形状に変化が現れている。また、天然ゴム系積層ゴムと比較して鉛プラグ入り積層ゴムのハードニングの傾向が小さいことがわかる。

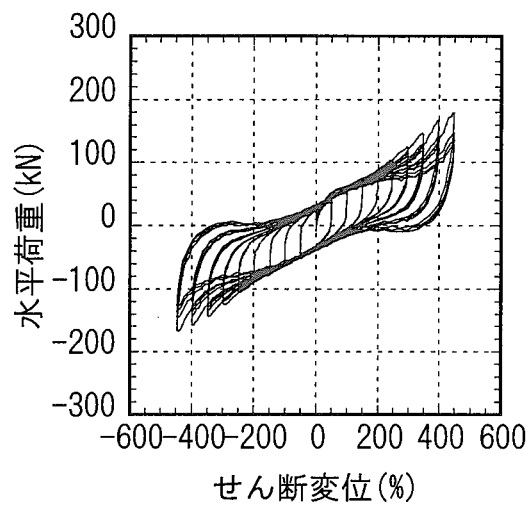
LB05とLB08は恒温層内で加えた軸力がそれぞれ0MPaと9.66MPaで、破断試験の条件は一致している。破断試験の結果を比較すると、LB05の履歴曲線がわずかに逆S字となり、それに伴って破断応力がわずかに低くなった。

LB07に関しては引っ張り変形を鉛直ひずみ150%相当加えた後にせん断変形によって破断試験を行う計画であったが、鉛直ひずみ140%程度で破断に至った。

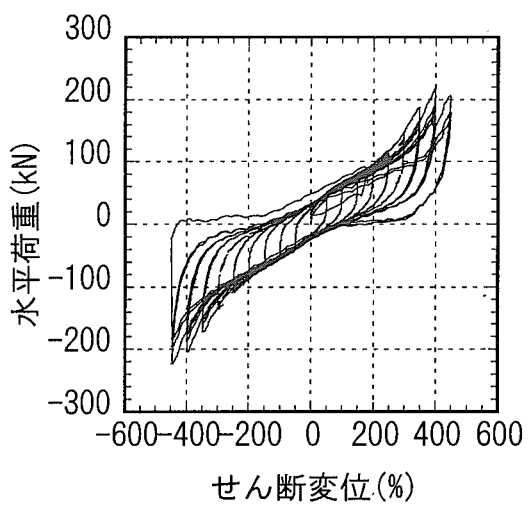
試験後に各試験体の破断面を観察したところ、破断面の外側10mm~20mmの円周部に内部の破断面とは異なる傾向が確認された。その部分の剛性が弱くなったことが原因で引張時には予想以下の鉛直ひずみで破断したと考えられる。写真5.3.3-1にLB07の破断面を示す。これが製作段階での接着および加硫段階で発生したのか、酸化劣化して発生したのかは現在のところ不明である。



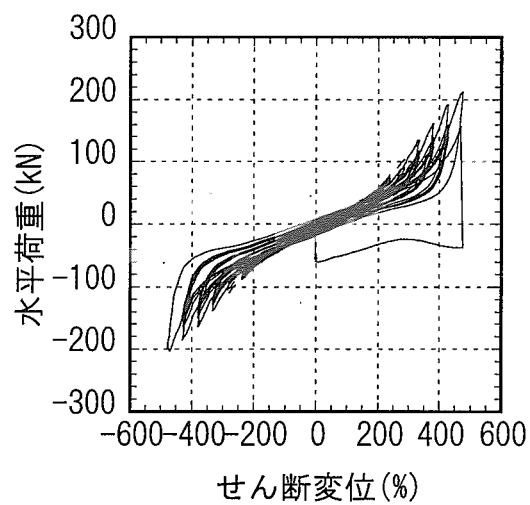
(a) LB05 (面圧9.81MPa, ϕ 280, LRB)



(b) LB06(面圧14.71MPa, ϕ 280, LRB)

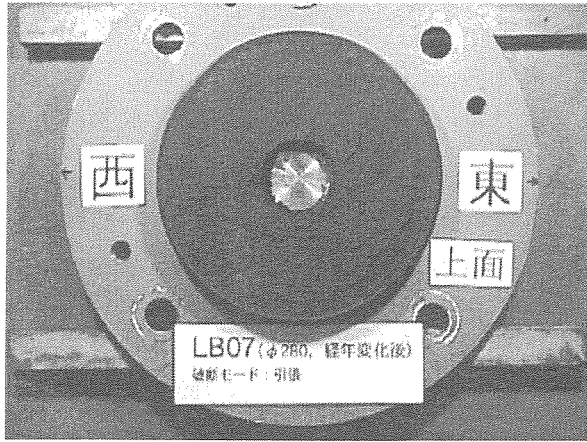


(c) LB08(面圧9.81MPa, ϕ 280, LRB)

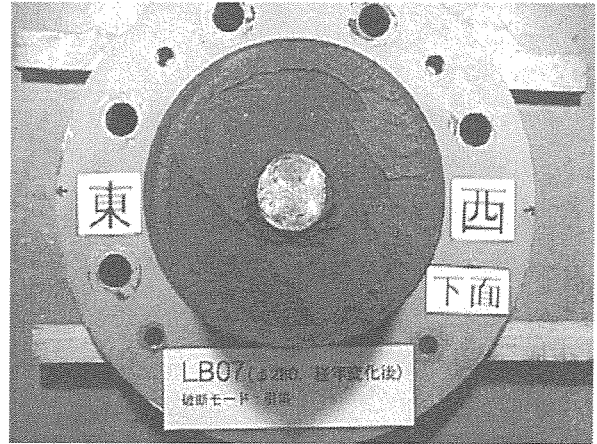


(d) LB09(面圧9.81MPa, ϕ 280, NRB)

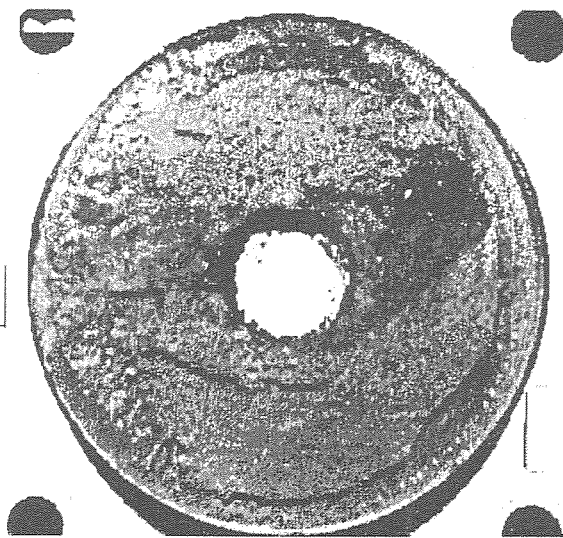
図 5.3.3-1 経年変化後の漸増荷破断試験結果
(加振振動数0.01Hz, せん断ひずみ50%ずつ漸増)



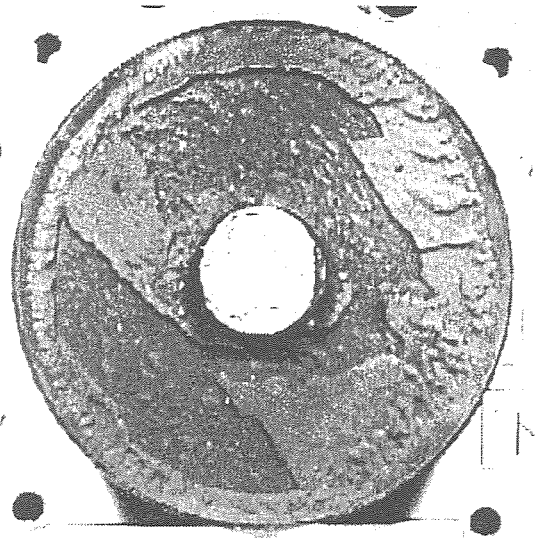
(a)上面



(b) 下面



(c)上面(画像処理後)



(d) 下面(画像処理後)

写真5.3.3-1 LB07の破断面

5.4 まとめ

鉛入り積層ゴム 4 体と天然ゴム系積層ゴム 2 体について 40 年相当の促進経年変化試験を行った。経年変化試験の前後に要素特性試験を行い、要素特性の変化を調べた。得られた結果を以下に示す。

(1) 経年変化前後の特性値

天然ゴム系積層ゴムの経年変化後における水平ばね定数は平均して 1 割ほど、鉛直ばね定数は 1 割ほど経年変化前と比較して上がった。

鉛入り積層ゴムの経年変化後における水平方向の特性値は、水平加振振幅がゴムせん断ひずみ 25%、50%と 100%、200%の場合で異なる傾向を示した。鉛直ばね定数は、オフセットせん断ひずみが小さい領域で天然ゴム系積層ゴムと比較して変化が大きく、オフセットせん断ひずみが大きい領域では天然ゴム系積層ゴムと同様の傾向を示した。

(2) 経年変化後の限界変形特性

天然ゴム系積層ゴム、鉛入り積層ゴムともおよそせん断ひずみ 450~500%で破断した。鉛入り積層ゴムでは 2 ケースの面圧条件(9.81MPa, 14.71MPa)で試験を行ったところ、履歴の形状にわずかに変化があったものの、破断変位に変化はなかった。

鉛入り積層ゴムで引っ張り方向に鉛直ひずみ 150%を加えた後にせん断変形で破断させる試験では、鉛直ひずみ 140%程度で引っ張り破断した。試験体の破断面外側円周部に接着の傾向が内部と異なる部分が確認された。

6. 結論

「高面圧型免震要素の特性評価研究」の主な成果及び今後の課題を以下に示す。

(1) スケール則に関する検討

積層ゴム試験体のスケール則に関する検討を行うため、数種類のスケールの異なる縮小試験体を用いた試験を行い、以下の結果を得た

1) 水平方向特性

せん断ひずみ 100%以上では試験体のスケールによる水平ばね定数の違いは顕著ではない。特に、 $\phi 500$ 以上の試験体においては、せん断ひずみ 50%以上でのスケール効果はほとんど見られない。上記の領域において、水平ばね定数はほぼ設計値と一致する。

降伏荷重特性値は、せん断ひずみ 100%以上 ($\phi 500$ 以上の試験体においては、せん断ひずみ 50%以上) でほぼ一定となる。 $\phi 280$ 以下のスケールでは値が一定となるひずみ領域でほぼ設計値となるのに対して、 $\phi 500$ 以上の試験体では同領域で設計値の 75%~80%程度とやや低い値となる。

水平方向の低ひずみ域 (せん断ひずみ 100%以下) におけるスケール間の特性の違いは、平成 10 年度実施した天然ゴム系積層ゴムではほとんど確認されていないことから、鉛プラグが原因となっていると考えられる。

2) 鉛直方向特性

$\phi 280$ 以下の試験体と $\phi 500$ 以上の試験体では鉛直ばね定数の特性は異なっている。前者は、設計値に対して 0.6 倍から 1.0 倍程度へ、後者は 1 倍から 1.8 倍程度へと鉛直応力の増加に伴って値が大きくなる。

鉛直方向の等価減衰定数は、 $\phi 280$ 以下の試験体においては、1~2%程度であるのに対して、 $\phi 500$ 以上の試験体では 1~5%程度となった。通常の鉛入り積層ゴムの鉛直方向の等価減衰定数は 2%程度であることを考慮すれば、後者においては鉛プラグが作用していることも考えられる。

鉛直ばね定数のオフセットせん断ひずみ依存性についても、上記の各々のグループで性状が異なっており、 $\phi 280$ 以下の試験体はオフセットせん断ひずみ依存性が比較的小さいのに対して、 $\phi 500$ 以上の試験体においてはオフセットせん断ひずみの増加に伴い鉛直ばね定数の低下がみられた。

天然ゴム系積層ゴムの鉛直特性試験の結果においても、 $\phi 500$ 以上の試験体の鉛直ばね定数は、 $\phi 280$ の試験体のそれよりも 20%程度高くなっており、鉛プラグばかりでなく積層ゴム自体にもスケール効果が生じている可能性がある。

3) 変形性能

圧縮域における破断せん断ひずみは 400%~550%程度であり、スケールによる影響は比較的小さい。

引張域 (引張ひずみ 150%下) の破断ひずみは、250%~400%とばらつきが大きい。スケールの影響よりも試験体の特性のばらつきの方が結果に現れているものと思われる。

NRB の圧縮域 (面圧 9.81MPa 下) における破断ひずみは、スケールによらず 450%~500%であった。

上記結果より、圧縮域における破断特性にはスケール効果の影響は比較的小さいと言える。

4) 実大 LRB の特性

水平方向特性については、せん断ひずみ 100%以上の領域ではスケールの影響は少なく、かなり相似比の小さい試験体によっても実大 LRB の特性予測が可能であると考えられる。また、鉛直方向特性に関しては、実大 LRB のデータの蓄積による縮小試験体との試験結果比較と設計値より鉛直ばね定数が高くなることに関する原因について、今後検討が必要と考えられる。また、現在までに試験を実施した実大積層ゴムの変形性能は同様の仕様の $\phi 700$ に比較して低く、早期に破断しており、今後原因の解明が必要である。

(2) 設計パラメータに関する検討

今後の設計絞り込みに資するデータを構築することを目的として 3 種類の仕様（設計パラメータ）の異なる鉛入り積層ゴムの縮小試験体を用いた力学特性試験、及び、地震時の軸力変動等を考慮した 29.4MPa (300kgf/cm^2) の高面圧下における鉛入り積層ゴムの特性の把握を行った。

1) 設計パラメータの異なる試験体の特性

3つの設計仕様のいずれも、設計値で基準化した場合には同様の特性を示すことがわかった。

せん断ひずみ100%以上において、水平方向特性は設計の許容値を満たしていた。また、鉛直方向特性は、 $\phi 500$ の試験体では設計値よりもかなり高くなる傾向が見られた。この原因については、今後の検討課題と考える。

各仕様の積層ゴムの破断せん断ひずみ（面圧9.81MPa下）は、400%程度であり、大きな差はなかった。

以上より、鉛直特性においては若干の検討課題が残されるものの、上記の3つの仕様において同様の力学特性が得られていることから、与えられたいずれの設計条件にも対応可能であると考えられる。

2) 高面圧(29.4MPa)下での特性試験結果

せん断ひずみ 300%を越える領域で水平方向の履歴ループは除荷時にループが膨らみはじめ、剛性の低下が見られるものの、せん断ひずみ 300%以下においては面圧の違いによる水平方向特性の変化は少ない。よって、せん断変形が設計範囲の場合には、高面圧 (29.4MPa) の影響を考慮する必要はないものと考えられる。

3) 座屈試験

$\phi 280$ の LRB 試験体を用いた試験による座屈応力値はほぼ 68.6MPa(700kgf/cm^2)程度となり、理論値ともほぼ対応していることが確認された。

(3) 経年変化試験

鉛入り積層ゴム 4 体と天然ゴム系積層ゴム 2 体について 40 年相当の促進経年変化試験を行った。経年変化試験の前後に要素特性試験を行った。

1) 経年変化前後の特性値

天然ゴム系積層ゴムの経年変化後における水平ばね定数は平均して 1 割ほど、鉛直ばね定数は 1 割ほど経年変化前と比較して上がった。

鉛入り積層ゴムの経年変化後における水平方向の特性値は、水平加振振幅がゴムせん断ひずみ 25%,50%と 100%, 200%の場合で異なる傾向を示した。鉛直ばね定数は、オフセットせん断ひずみが小さい領域で天然ゴム系積層ゴムと比較して変化が上きく、オフセットせん断ひずみが大きい領域では天然ゴム系積層ゴムと同様の傾向を示した。

2) 経年変化後の限界変形特性

天然ゴム系積層ゴム、鉛入り積層ゴムともおよそせん断ひずみ 450~500%で破断した。鉛入り積層ゴムでは 2 ケースの面圧条件(9.81MPa, 14.71MPa)で試験を行ったところ、履歴の形状にわずかに変化があったものの、破断変位に変化はなかった。

鉛入り積層ゴムで引っ張り方向に鉛直ひずみ 150%を加えた後にせん断変形で破断させる試験では、鉛直ひずみ 140%程度で引張り破断した。

なお、試験体の破断面外側円周部に接着の傾向が内部と異なる部分が確認された。

謝辞

本研究を行うにあたり、核融合実験炉免震設計技術検討委員会(委員長 秋山宏)(平成 8 年度~平成 11 年度)において学識経験者の方々に御審議を頂き、深く感謝致します。

また、本研究を進めるにあたり、ITER 開発室、建設課の方々に有意義な御助言を頂いたことにつきましても、深く感謝致します。試験の実施につきましては、電力中央研究所でご協力頂いた方々に深く謝意を表します。最後に本研究に多くのご支援を頂いた関昌弘核融合工学部長に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 平田和太、矢花修一ほか：高速増殖炉免震設計法に関する研究
免震要素特性データ集、電力中央研究所報告、総合報告 U34、平成 10 年 12 月
- 2) 高山峯夫：免震構造用天然ゴム系積層ゴムアイソレータの限界性能、日本建築学会技術報告集
第 1 号、1995 年 12 月、pp.160-165

付録

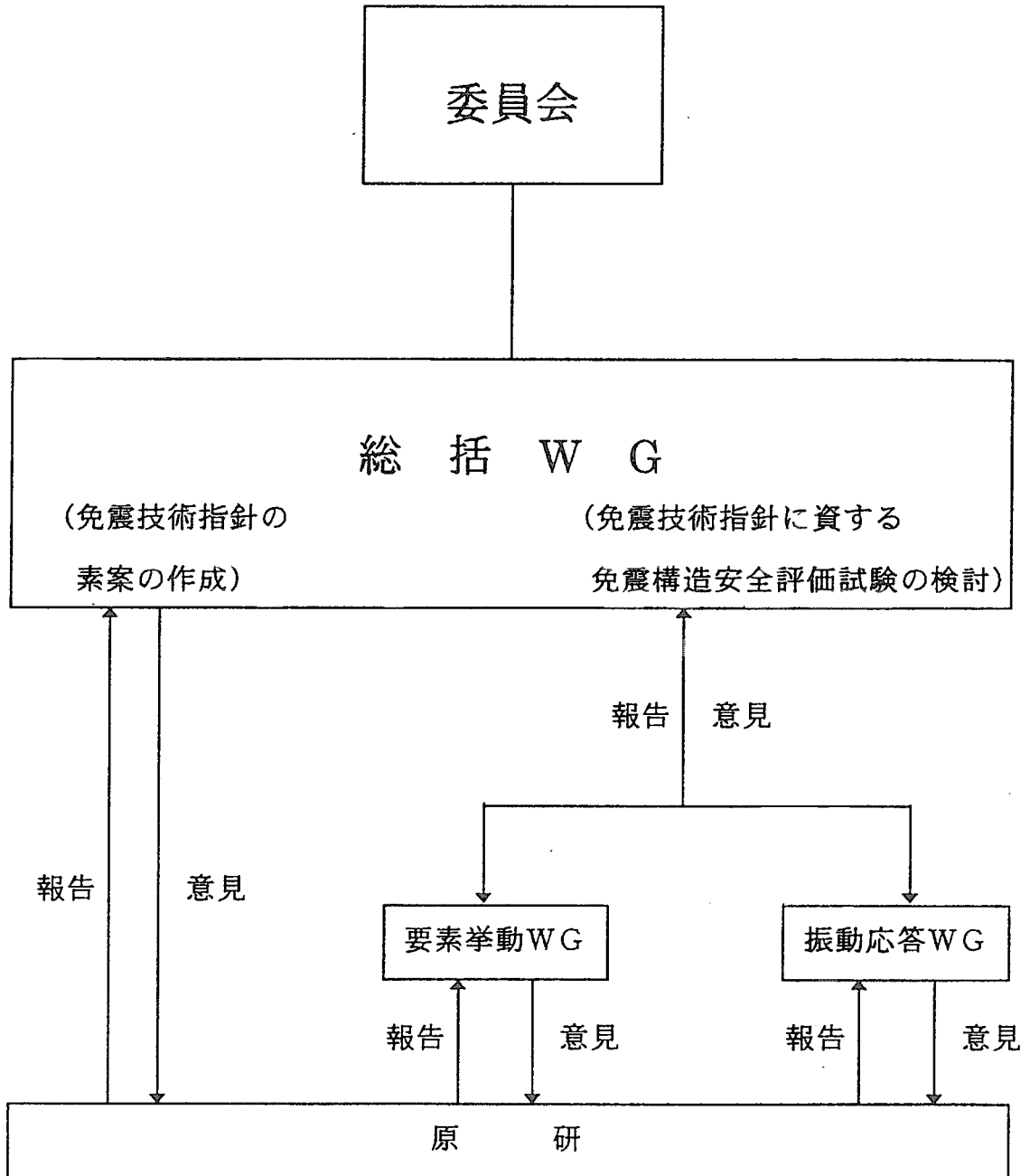


図 A.1 核融合実験炉免震設計技術検討委員会実施体制

表 A.1 核融合実験炉免震設計技術検討委員会委員(平成 11 年 3 月現在)

(順不同、敬称略)

核融合実験炉免震設計技術検討委員会

委員長	秋山 宏	東京大学工学部教授
委員長代理	藤田 隆史	東京大学生産技術研究所教授
委員	石田 勝彦	(財)電力中央研究所我孫子研究所部長
"	大谷 圭一	防災科学技術研究所防災総合研究部長
"	高山 峯夫	福岡大学工学部助教授
"	長橋 純男	千葉工業大学工学部教授
"	藤田 聡	東京電機大学工学部教授
オブザーバー	瓜生 満	核燃料サイクル開発機構東海事業所 建設工務管理部建設グループリーダー

総括ワーキンググループ

主 査	藤田 隆史	東京大学生産技術研究所教授
委員	石田 勝彦	(財)電力中央研究所我孫子研究所部長
"	高山 峯夫	福岡大学工学部助教授
"	藤田 聡	東京電機大学工学部教授
オブザーバー	瓜生 満	核燃料サイクル開発機構東海事業所 建設工務管理部建設グループリーダー

要素挙動ワーキンググループ

主 査	高山 峯夫	福岡大学工学部助教授
委員	矢花 修一	(財)電力中央研究所我孫子研究所地盤耐震部主任研究員
"	松田 昭博	(財)電力中央研究所我孫子研究所地盤耐震部研究員
"(H9年度迄)	大鳥 靖樹	(財)電力中央研究所我孫子研究所地盤耐震部主任研究員

振動応答ワーキンググループ

主 査	藤田 聡	東京電機大学工学部教授
委員	古屋 治	都立工業高等専門学校講師

事 務 局 日本原子力研所建設部
(株)日建設計

協 力

日本原子力研究所 ITER 業務推進室
日本原子力研究所 ITER 開発室
日本原子力研究所 核融合工学部

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつ SI 組立単位

量	名称	記号	他の SI 単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SI と併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

表4 SI と共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バル	bar
ガール	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 u の値は CODATA の 1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は, JIS では流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「気圧の単位」 mmHg を表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (=10⁵ P(ポアズ)) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

巨震動を耐える鋼筋コンクリート（RC）にはおける高直圧型免震要素の特性評価研究
— 小中規模免震要素試験 — (委託研究)