

土木研究所資料

ゴム支承の動的繰返しせん断特性 に関する実験的検討

昭和60年3月

建設省土木研究所
地震防災部耐震研究室

Copyright © 1985 fiscal year by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。
したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ゴム支承の動的繰返しせん断特性 に関する実験的検討

耐震研究室	室長	川島	一彦
	研究員	長谷川	金二
		小山	達彦
		吉田	武史

要 旨

本報告は、実橋に使用されているゴム支承が地震時に示す挙動を把握することを目的として、実物大のゴム支承を用いた一定圧縮荷重下における静的および動的せん断実験を行い、ゴム支承の動的繰返しせん断特性を検討した結果をとりまとめたものである。

キーワード：耐震設計，ゴム支承

目 次

1. 実 験 目 的	1
2. 実験概要および実験装置	1
3. 供 試 体	4
3.1 供試体寸法	4
3.2 供試体の種類	4
3.3 せん断ばね係数	5
4. 実 験 内 容	17
4.1 静的せん断実験	17
4.1.1 実験ケース	17
4.1.2 供試体に加えたせん断変形	17
4.1.3 計 測	17
4.2 動的せん断実験	17
4.2.1 実験ケース	17
4.2.2 供試体に与えたせん断履歴	18
4.2.3 計 測	18
5. 実 験 結 果	26
5.1 静的せん断実験結果	26
5.1.1 静的せん断特性（載荷板とゴム支承の間に滑動が生じない場合）	26
5.1.2 静的せん断特性（載荷板とゴム支承の間に滑動が生じる場合）	27
5.1.3 繰り返し疲労せん断特性	27
5.2 動的せん断実験	28
5.2.1 履歴特性	28
5.2.2 せん断変位量の影響	29
5.2.3 せん断速度の影響	30
5.2.4 圧縮荷重の影響	31
5.2.5 初期せん断変形の影響	32
5.2.6 入力波形の影響	32
6. ま と め	59
謝 辞	61
参 考 文 献	62
付 属 資 料	65

1. 実 験 目 的

道路橋の支承としては、従来、線支承、支承板支承等鋼製の支承が用いられているが、近年、小規模橋梁用の簡易な支承としてゴム支承が用いられる事例が増えている。ゴム支承は、設置が簡単な他、温度応力を逃がしやすい等の特徴を有しているが、耐震性の面からは、上部構造に作用する地震時慣性力を下部構造へ比較的均等に分散できる他、場合によっては上部構造を積極的に長周期化することにより地震荷重の低減を図る等の効果が期待されている。ゴム支承がこのような目的にどこまで合致するかに関しては、現在まで十分検討されていない。このため、本実験では実物大のゴム支承を用いた動的繰返しせん断試験により、以下の項目について調査することとした。

- 1) ゴム支承の動的せん断剛性に及ぼす載荷変位振幅の影響
- 2) ゴム支承の動的せん断剛性に及ぼす載荷速度の影響
- 3) ゴム支承の動的せん断剛性に及ぼす圧縮荷重の影響と滑動状況の把握
- 4) ゴム支承の動的せん断剛性に及ぼす初期せん断変形の付与の影響
- 5) ゴム支承の動的せん断剛性に及ぼす地震入力波形の特性の影響
- 6) ゴム支承の履歴減衰特性に及ぼす載荷変位振幅の影響
- 7) ゴム支承の履歴減衰特性に及ぼす載荷速度の影響

2. 実験概要および実験装置

本実験では、実物大のゴム支承を用いて一定圧縮荷重下での静的および動的繰返しせん断特性を検討した。表2-1は実験の種類と測定項目を示したものである。

図2-1および写真2-1は実験に用いたせん断実験装置を示したものである。ゴム支承が受け持つ支承反力に相当する荷重を200 t圧縮機で与え、加振装置（部材耐震強度実験施設）でゴム支承に強制的にせん断変形を加えた。表2-2および図2-2は加振装置の主要諸元および加振性能曲線を示したものである。

なお、本実験ではせん断変形は変位制御で加えた。

表2-1 実験種類および測定項目

測定項目 実験種類	供試体の 外 観	圧 縮 荷 重	せん断 変 位	せん断 荷 重	供試体の 温度変化	加振装置 の加速度
静的せん断実験	○	○	○	○	○	
動的せん断実験	○	○	○	○	○	○

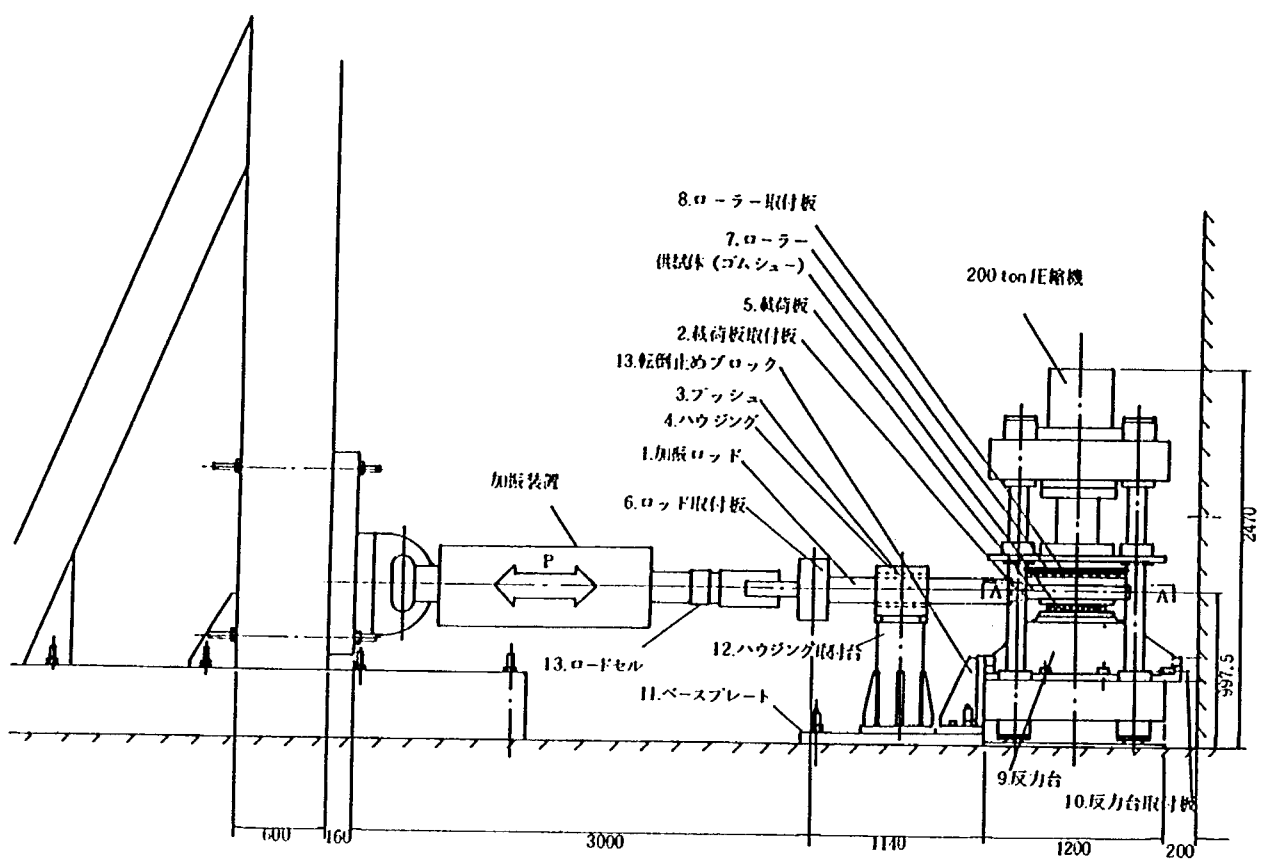


図 2 - 1 せん断実験装置

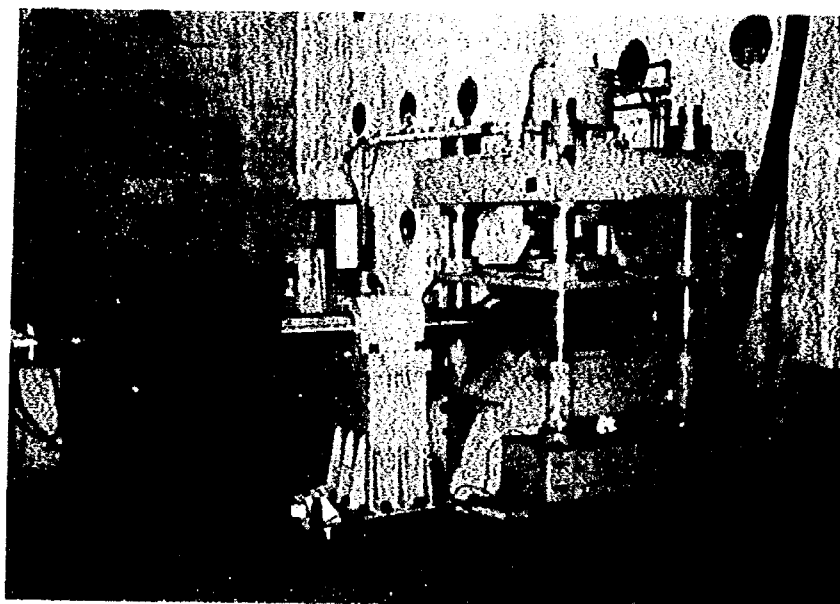


写真 2 - 1 せん断実験の状況

表2-2 加振装置の主要諸元

項 目	諸 元
加振力	$\pm 125 \text{ ton} \times 2 \text{ 台}$
最大変位振幅	$\pm 125 \text{ mm}$
最大速度	$\pm 1 \text{ m/sec}$
振動数範囲	DC ~ 30 Hz
加振波形	正弦波, 三角波, 矩形波, ランプ波, ランダム波
最大加振力持続時間	10秒 (最大速度正弦波加振時)
制御方式	アナログ制御, デジタル制御 (32KWミニコン使用)
制御量	荷重, 変位または加速度
油圧供給方式	アキュムレータ蓄圧方式 ($200 \text{ l}/10\text{sec}$) $\times 6 \text{ 台}$ 油圧ポンプ併用 ($300 \text{ l}/\text{min}$) $\times 2 \text{ 台}$

注) 今回の実験では, 制御量は
変位とした。

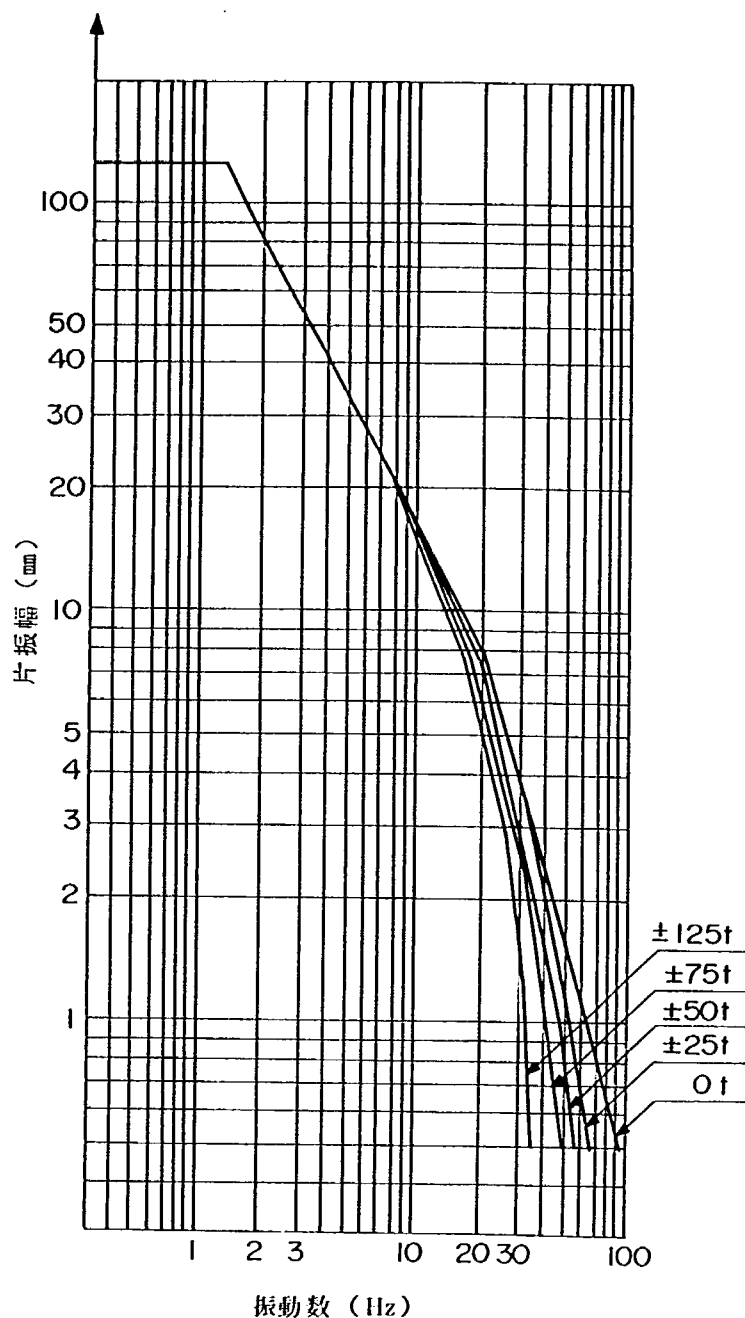


図2-2 加振性能曲線

3. 供 試 体

3.1 供試体寸法

道路橋支承便覧（日本道路協会 昭和48年4月）によれば，ゴム支承の所要支圧面積Aは以下のように決められる。

まず，許容圧縮応力度を 50 kg/cm^2 （ただし，台座に高強度のコンクリートを使用する場合は，ゴム支承体の種類によっては 70 kg/cm^2 程度までは増加してよい），滑動しないための最小荷重の許容値を 15 kg/cm^2 とすると，所要支圧面積 $A[\text{ cm}^2]$ は以下の条件を満足しなければならない。

$$\frac{R_{\max}}{50} \leq A \leq \frac{R_{\min}}{15} \quad \dots\dots\dots (3 \cdot 1)$$

ここに，

$R_{\max}$: 最大支承反力（死荷重＋最大活荷重）（kg）

$R_{\min}$: 最小支承反力（死荷重＋最小活荷重）（kg）

本実験ではゴム支承の平面寸法を約 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ （ $A = 1,600\text{ cm}^2$ ）としたが，この場合には式（3・1）によると許容最大支承反力および許容最小支承反力は，それぞれ80tおよび24tとなる。ゴムの厚さは加振装置の最大ストロークが $\pm 125\text{ mm}$ であること，および最大せん断変位としてゴムの厚さの300 %程度を加えること等を考慮して，16 mm厚 $\times$ 2層とした。

3.2 供試体の種類

実験は4種類のゴム支承を用いた。各供試体の特徴は以下の通りである。

1) 供試体H

図3－1および写真3－1は供試体Hの寸法および外観を示したものである。ゴム材料としてはクロロブレン系合成ゴムが使用されており，その物理的性質は表3－1に示す通りである。ゴム支承の上下面および中間面には圧縮荷重によるゴム材の膨出（図3－2参照）を防ぐために，厚さ1 mmの耐候性鋼板が接合されている。また，この上下面の耐候性鋼板にはせん断による滑動が生じにくいように，摩擦係数を向上させるための塗料（炭化けい素質研削材とエポキシ樹脂を混合したもの）が塗布されている。なお，実験に際しては，エポキシ樹脂でゴム支承を上下の載荷板（鋼板）に接着した場合と単に載荷板（コンクリート板）で挟んだだけの場合の両者のケースについて検討した（以下，供試体F，D，Rも同様）。

2) 供試体F

図3－3および写真3－2は供試体Fの寸法および外観を示したものである。ゴム材料としては前記の供試体Hと同様にクロロブレン系合成ゴムが使用されている。物理的性質は表3－1に示す通りであり，静的せん断弾性率，かたさ，伸び性能等は基本的に供試体Hとほぼ同じである。

なお、構造寸法等は供試体Hと変わらない。

3) 供試体D

図3-4および写真3-3は供試体Dの寸法および外観を示したものである。ゴム材料としてはクロロブレン系合成ゴムが使用されている。物理的性質は表3-1に示す通りであり、伸び性能は供試体H、Fよりもやや良いが、その他の耐震面に係る特性は、供試体H、Fと基本的に大きく変わっていない。ゴム支承の上下面および中間面には圧縮荷重によるゴム材料の膨出を防ぐために、厚さ1.5mmの鋼板が接合されている。ゴム支承の表面(上下面および側面)はなじみ層と呼ばれる軟質なゴムによって覆われている。

4) 供試体R

図3-5および写真3-4は供試体Rの寸法および外観を示したものである。ゴム材料としては天然ゴムが使用されており、その物理的性質は表3-1に示す通りである。これによれば、静的せん断弾性率、かたさはともに供試体H、F、Dよりもやや大きくなっている。また、伸び性能は供試体H、Fと同程度である。圧縮荷重によるゴム材料の膨出を防ぐために、ゴム支承の下面には厚さ1.6mmの鋼板が入れられており、中間部には直径13mmの鉄筋が埋め込まれている。

3.3 せん断ばね係数

ゴム支承を載荷装置に固定し、これにせん断力を加えた場合には、図3-6に示すような変形が生じる。この場合のゴム支承の全体としてのせん断ばね係数 K_s は次式により推定される。

$$K_s = \frac{P_s}{\delta_s} = \frac{GA}{\Sigma t_e} \dots\dots\dots (3 \cdot 2)$$

ここに、

P_s : せん断荷重

δ_s : せん断変位

G : ゴム材料のせん断弾性率 (表3-1参照)

A : 支圧面積

Σt_e : ゴムの総厚

表3-2は各供試体寸法ごとに式(3・2)を用いて求めたせん断ばね係数を示したものである。

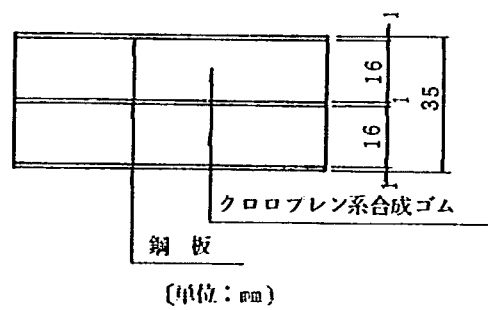
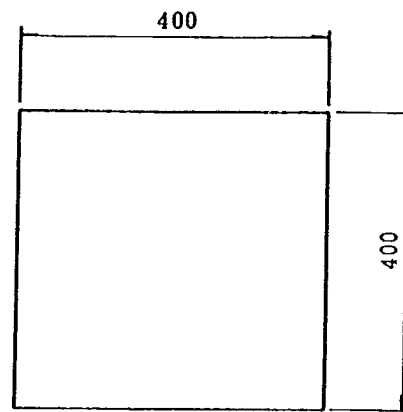
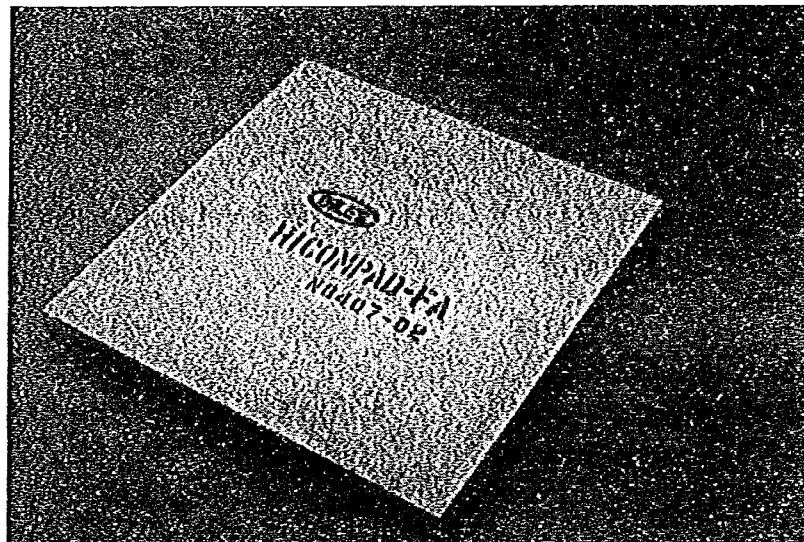


図 3-1 供試体 H の寸法

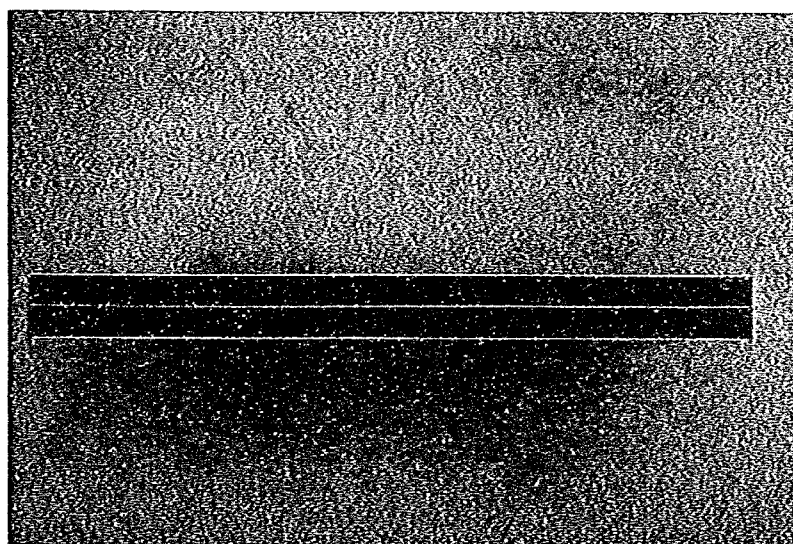


(1) 供試体 H の全景

写真 3-1 供試体 H の外観



(2) 供試体Hの上面（下面も同じ）



(3) 供試体Hの側面

写真 3 - 1 供試体 H の外観

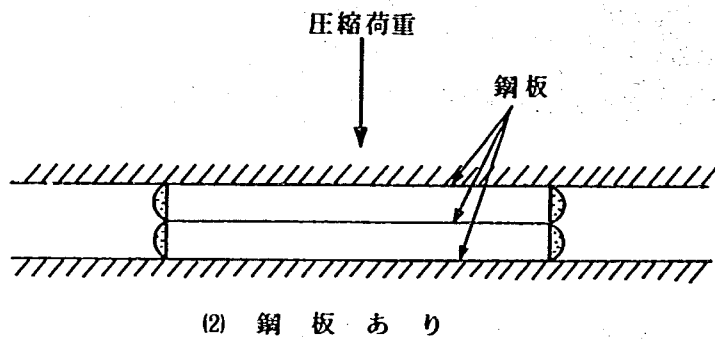
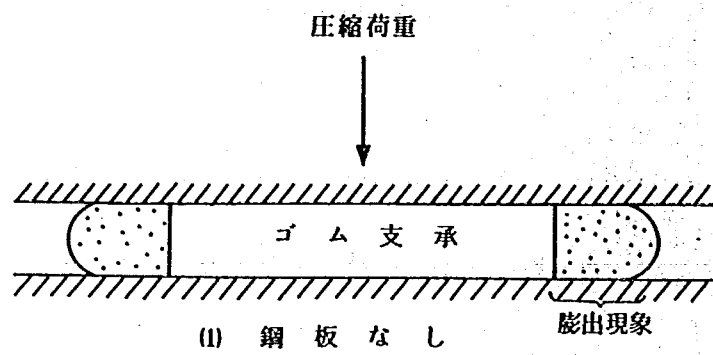


図 3 - 2 ゴム材料の膨出現象

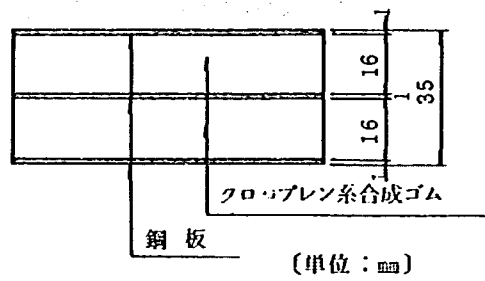
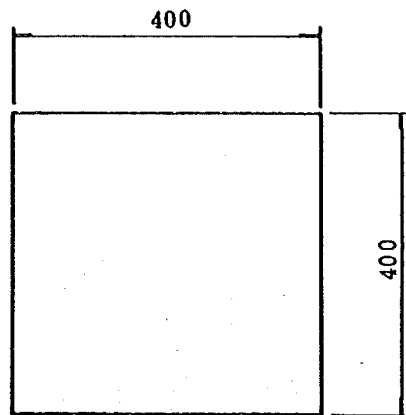
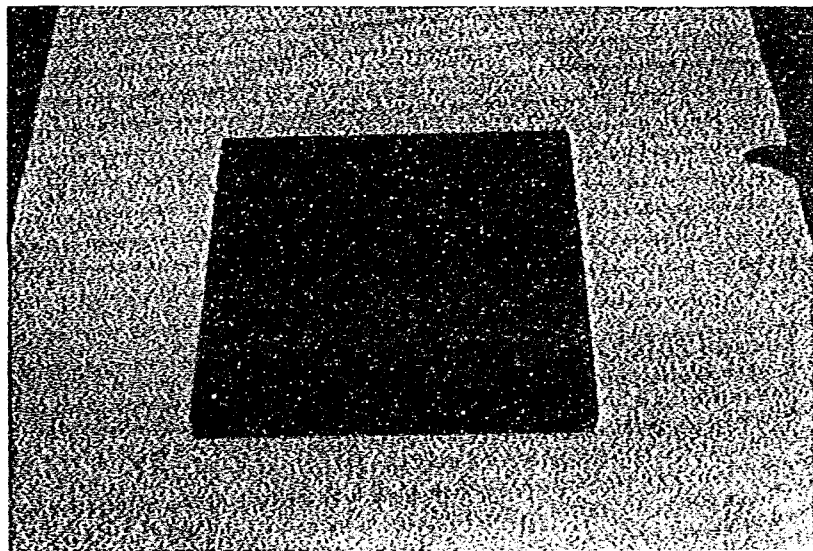
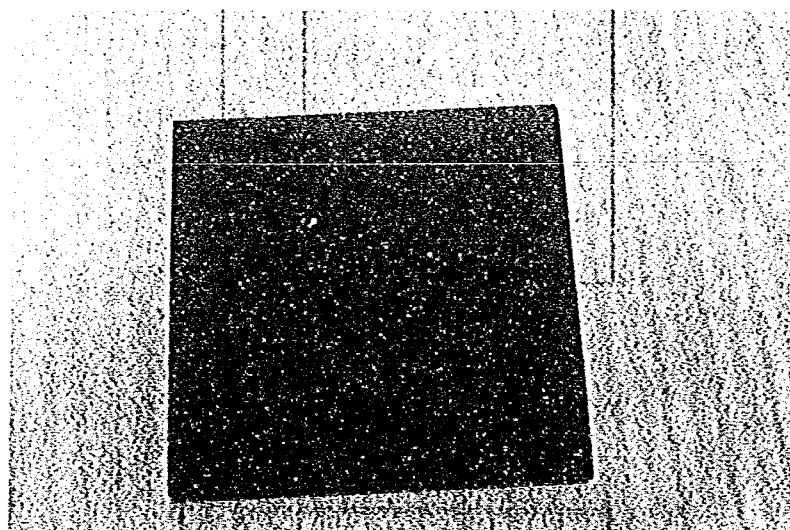


図 3 - 3 供試体 F の寸法

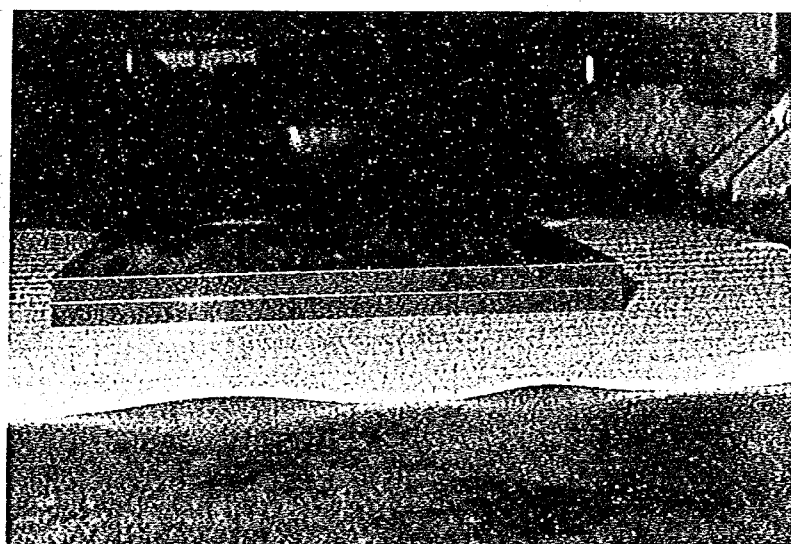


(1) 供試体 F の全景

写真 3 - 2 供試体 F の外観



(2) 供試体 F の上面 (下面も同じ)



(3) 供試体 F の側面

写真 3 - 2 供試体 F の外観

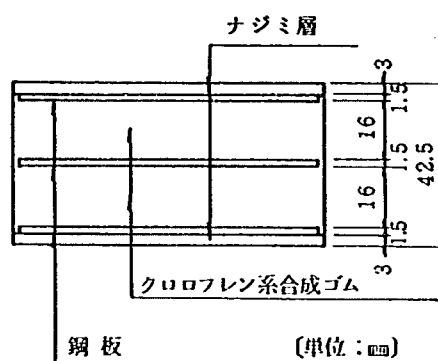
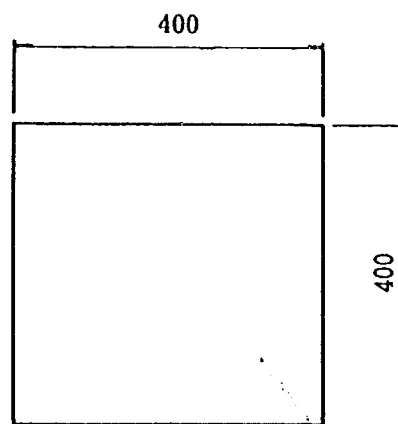
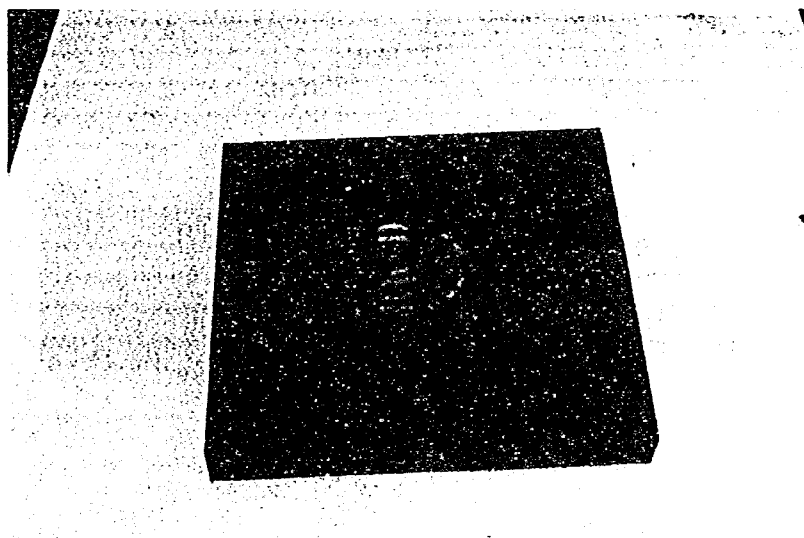
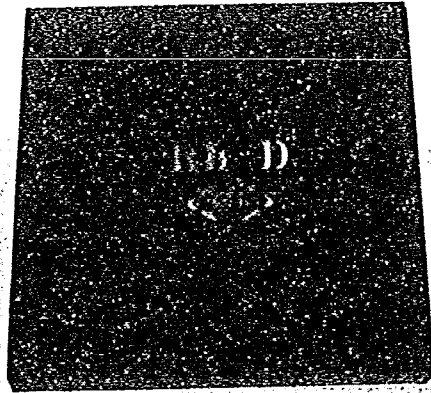


図 3 - 4 供試体 D の寸法

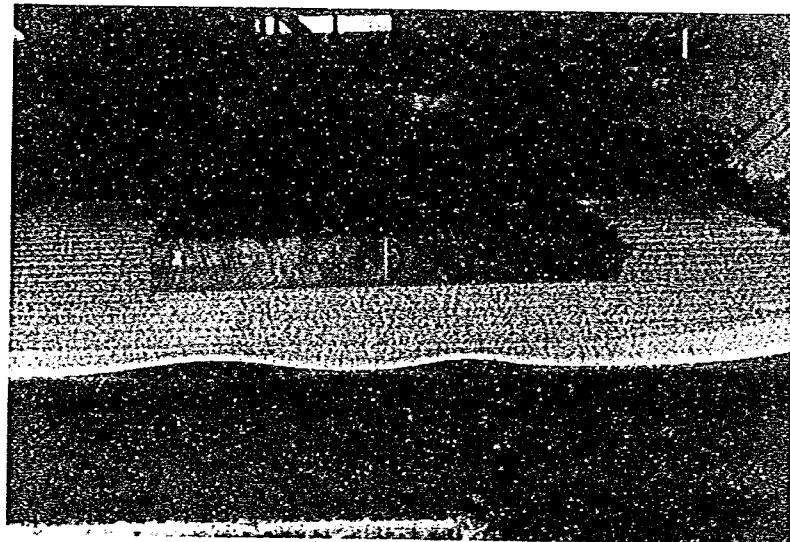


(1) 供試体 D の全景

写真 3 - 3 供試体 D の外観



(2) 供試体 D の上面 (下面も同じ)



(3) 供試体 D の側面

写真 3 - 3 供試体 D の外観

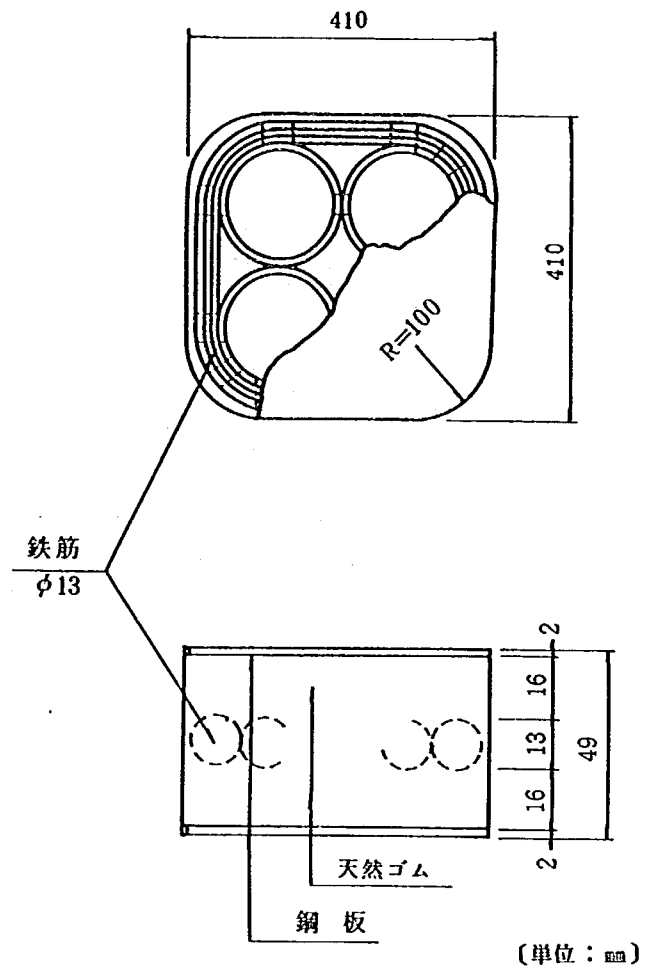
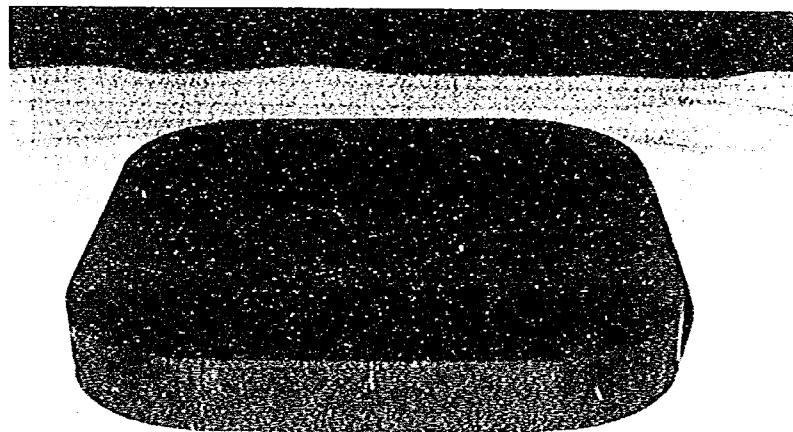
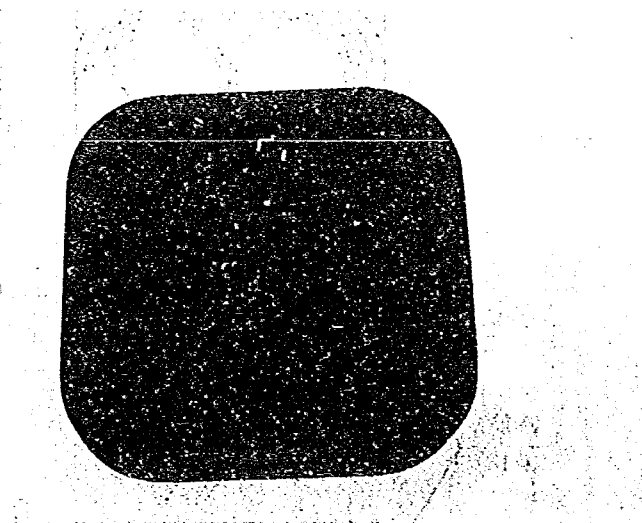


図 3 - 5 供試体 R の寸法

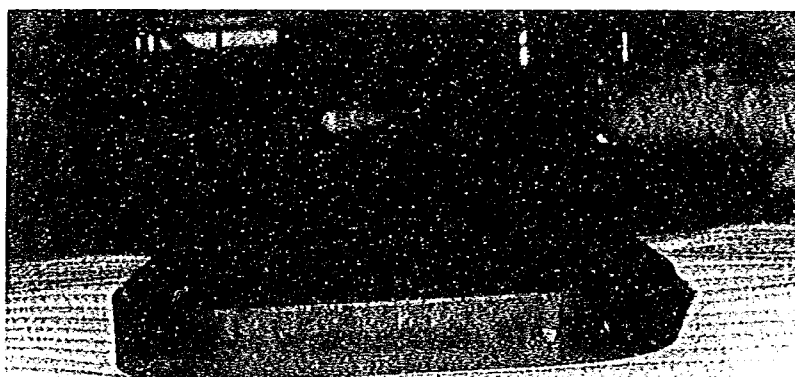


(I) 供試体 R の全景

写真 3 - 4 供試体 R の外観



(2) 供試体 R の上下面



(3) 供試体 R の側面

写真 3 - 4 供試体 R の外観

表 3 - 1 ゴム材料の物理的性質

		供試体 H	供試体 F	供試体 D	供試体 R	備考 (道路橋支承便覧) クロロブレン系合成ゴム に対する規格値 (1 種)
		クロロブレン系合成ゴム			天然ゴム	
静的せん断弾性率 G [kg/cm ²]		7.6	7.7	8.2	10.6	8 ± 1.0
か た さ		55	53	54	61	50 ± 5
伸び (最小値) [%]		530	535	710	580	400
耐油試験 [%] (体積変化率, 最大値)		+72.6	+64.0	—	—	+120
老化試験	25 % 伸張応力 (変化率)	+69.9	+45.0	+69.0	+4.9	-10 ~ +100
	伸び変化率 [%] (最小値)	-23.6	-21.0	-23.6	-9.8	-50 以上
圧縮永久ひずみ率 [%]		23	34	40.3	17	45 以下
耐オゾン性		異常なし	異常なし	異常なし	きれつなし	きれつおよびは なはだしい変化 を生じないこと
耐水性試験 [%] (重量変化率)		—	3.3	—	2.6	10 以下

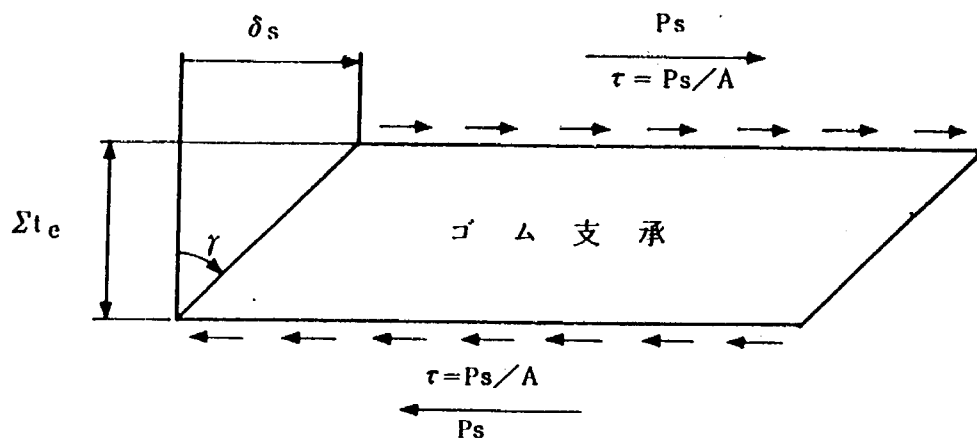


図 3 - 6 せん断荷重 P_s , せん断変位 δ_s , せん断応力 τ , せん断ひずみ γ , 支圧面積 A およびゴムの総厚 Σt_c の関係

表 3 - 2 せん断ばね係数 (計算値)

供試体種類	せん断弾性率 G [kg/cm^2]	支圧面積 A [cm^2]	ゴムの総厚 Σt_c [cm]	せん断ばね係数 K_s [t/cm]
供試体 H	7.6	1600	3.2	3.8
供試体 F	7.7	1600	3.2	3.9
供試体 D	8.2	1600	3.2	4.1
供試体 R	10.6	1595	4.5	3.8

注 1) 供試体 R の場合にはゴムの総厚 Σt_c に鉄筋部を含んでいる。

注 2) 供試体 D の場合にはゴム支承の上下のなじみ層 (軟質ゴム) を考慮していない。

4. 実 験 内 容

4.1 静的せん断実験

4.1.1 実験ケース

表4-1はゴム支承の静的せん断特性を検討するために行った実験ケースを示したものである。

ここで、ケースS-1, S-3およびS-5は、ゴム支承と上下の載荷板との間の滑動を防ぐために両者をエポキシ樹脂により接着して静的せん断特性を検討したケースである。また、ケースS-2, S-4およびS-6は、ゴム支承を上下の載荷板に接着せずに行った実験であり、この場合には後述するように圧縮荷重が小さいと、ゴム支承と上下の載荷板の間で滑動が生じている。

ケースS-7は、温度変化による上部構造の伸縮に伴ないゴム支承に作用する繰返し疲労せん断の影響を検討するために行ったものである。すなわち、供用年数を仮に40年程度とし、温度変化により1日に1回のせん断変形が生じるものとする、供用期間中の全繰返し回数は14400回程度になる。したがって、ケースS-7では80tの圧縮荷重下で振動数0.5Hz, 振幅22mmの繰返しせん断を合計14,400回加えた。この繰返し疲労せん断を行う前および行った後で上記ケースS-1～S-6と同様に静的せん断実験を行い、両者のせん断変形特性にどの程度の変化が生じたかを検討した。なお、せん断振幅22mmはゴムの総厚(16mm厚×2層)の70%に相当するものである。

4.1.2 供試体に加えたせん断変形

供試体には、図4-1に示すようにせん断速度2.4mm/secで一方向にせん断変形を与えた。各載荷段階ではせん断変位の最大値を15mmずつ増加させた。なお、載荷中に供試体が大きく滑動した場合には、その載荷段階で実験を終了した。

4.1.3 計 測

供試体に作用させたせん断力の大きさは図2-1に示したように加振装置のロードセル(図中の⑬)により、また、せん断変位は加振装置に内蔵した変位計および供試体の上下の載荷板間に設置した差動トランス型変位計(写真4-1参照)で測定した。また、圧縮荷重は200t圧縮機の油圧ゲージで測定した。

4.2 動的せん断実験

4.2.1 実験ケース

表4-2は動的せん断実験ケースを示したものであり、せん断変位量、せん断速度、圧縮荷重、初期せん断変形および入力波形が動的せん断特性に与える影響を調査するため、合計18ケースについて行った。

4.2.2 供試体に与えたせん断履歴

ケースD-1～D-10では、正弦波状のせん断変位を10秒間強制的にゴム支承に加えた。ここで、振動数および振幅は表4-2(I)に示した通りに変化させた。

ケースD-11～D-13では、振動数1Hz、継続時間10秒の正弦波状のせん断変位を強制的にゴム支承に加えた。ここで、変位振幅は図4-2のように各載荷段階で15mmずつ増加させた。

ケースD-14では、ゴム支承に初期せん断力が作用する状態で、繰り返しせん断変形が加わった場合の挙動を検討するために、中立点から一方向に22mmせん断変形させた位置を原点として振動数1Hzの正弦波状のせん断変位を10秒間加えた。この場合も、振幅はケースD-11～D-13と同様に図4-2のように各載荷段階で15mmずつ増加させた。

ケースD-15～D-18では、図4-3に示すように4種類の地震応答波形をせん断変位として加えた。ここで、これらの波形は、図4-4に示す2種類の上部構造—ゴム支承—橋脚系を一質点系にモデル化し、図4-5に示す2種類の入力地震波を作用させた場合にゴム支承に生じる応答変位波形である(表4-3参照)。4種類の応答波形の最大せん断変位は60mmに正規化した。

4.2.3 計 測

動的せん断実験時の計測は基本的に静的せん断実験の場合と同じである。ただし、加振装置のロードセルと供試体との間には、図2-1に示したように加振ロッド、載荷板等が存在する。このため、動的せん断実験では、ゴム支承に実際に加えられるせん断力と加振ロッド、載荷板等の質量に伴う慣性力との合力がロードセルにより測定されることになる。したがって、加振装置の加速度 α を測定し、次式により実際にゴム支承に加えられたせん断力 P_s を求めた。

$$P_s = P_L - W \times \frac{\alpha}{G} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ここに、

P_L : ロードセルにより測定された力

W : 加振ロッド、載荷板等の重量 (= 1.78tf)

G : 重力加速度

表 4 - 1 静的せん断実験ケース

実験ケース	圧縮荷重 P_c (t)	設置状況	備 考
S - 1	80	接 着	_____
S - 2		未接着	_____
S - 3	52	接 着	_____
S - 4		未接着	_____
S - 5	24	接 着	_____
S - 6		未接着	_____
S - 7	80	未接着	(繰り返し疲労せん断 振 動 数 0.5 Hz 振 幅 22 mm 繰り返し回数 14,400 回)

注 1) 「接着」とは上下の載荷板にゴム支承を接着した供試体を示す。

注 2) 「未接着」とは、上下の載荷板(コンクリート)にゴム支承を接着していない供試体を示す。

注 3) せん断変位振幅は図 4 - 1 参照

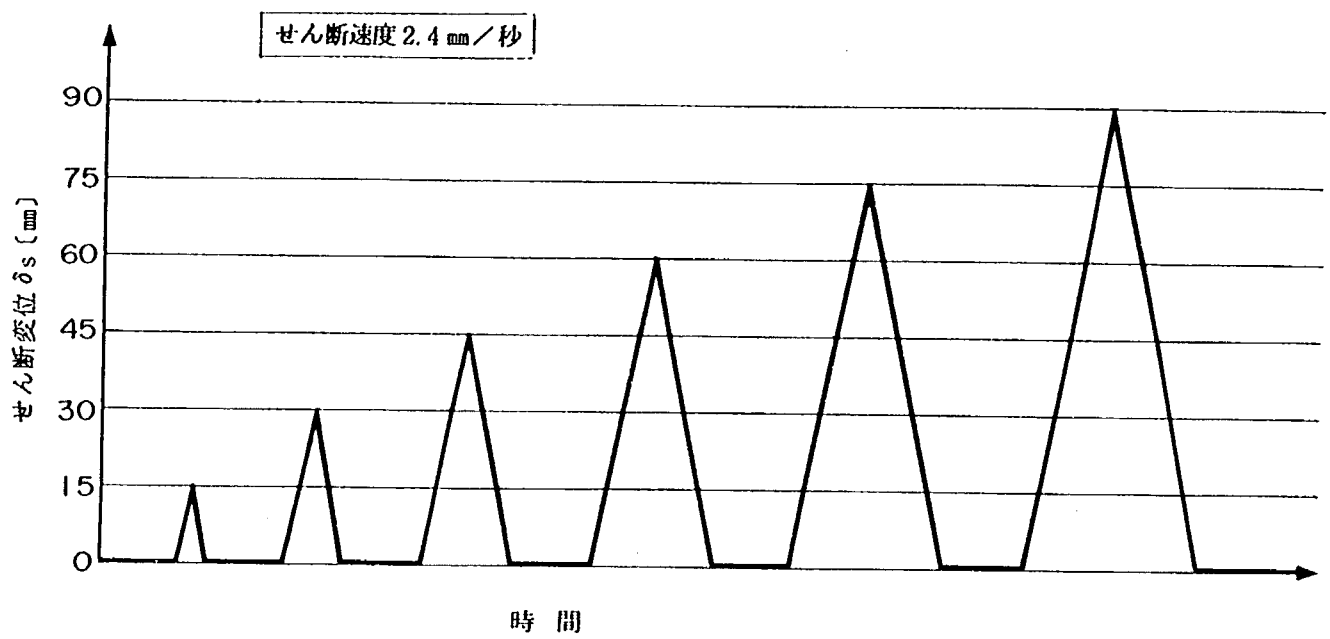


図 4-1 静的せん断実験のせん断変位履歴

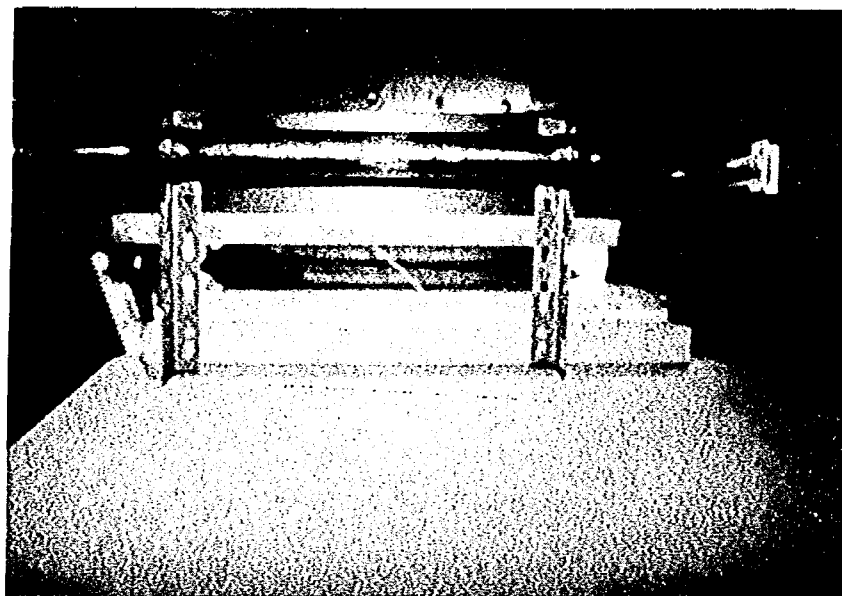


写真 4-1 供試体および変位計設置状況

表 4-2 動的せん断実験ケース

(1) せん断変位量およびせん断速度の影響

実験ケース	振 動 数 〔 Hz 〕	振 幅 〔 mm 〕	最 大 速 度 〔 cm/秒 〕	最大加速度 〔 gal 〕	設 置 状 況
D - 1	1	75	47.1	296	上下の載荷板 にゴム支承を 接着
D - 2		60	37.7	237	
D - 3		45	28.3	178	
D - 4		30	18.8	118	
D - 5	2		37.7	474	
D - 6	3		56.5	1,066	
D - 7	15	28.3	533	上下の載荷板 (コンクリート) に未接着	
D - 8		5	47.1		1,480
D - 9		7	66.0		2,902
D - 10		10	94.2		5,922

注 1) 圧縮荷重は全ケースとも 80t である。

注 2) ケース D-1～D-7 は昭和 58 年度に行った実験であり、ゴム支承は接着している。

注 3) ケース D-8～D-10 は昭和 59 年度に行った実験であり、ゴム支承は接着していない。

(2) 圧縮荷重、初期せん断変形の影響

実験ケース	圧 縮 荷 重 P_c [t]	初期せん断変位量 δ_{so} [mm]
D-11	80	0
D-12	52	
D-13	24	
D-14	80	22

注 1) ゴム支承は全ケースとも上下の載荷板(コンクリート)に接着していない。

注 2) せん断変位履歴は図 4-2 に示す。

(3) 入力波形の影響

実験ケース	入 力 波 形
D-15	波形 A
D-16	波形 B
D-17	波形 C
D-18	波形 D

注 1) ゴム支承は全ケースとも上下の載荷板(コンクリート)に接着していない。

注 2) 圧縮荷重は全ケースとも 80t である。

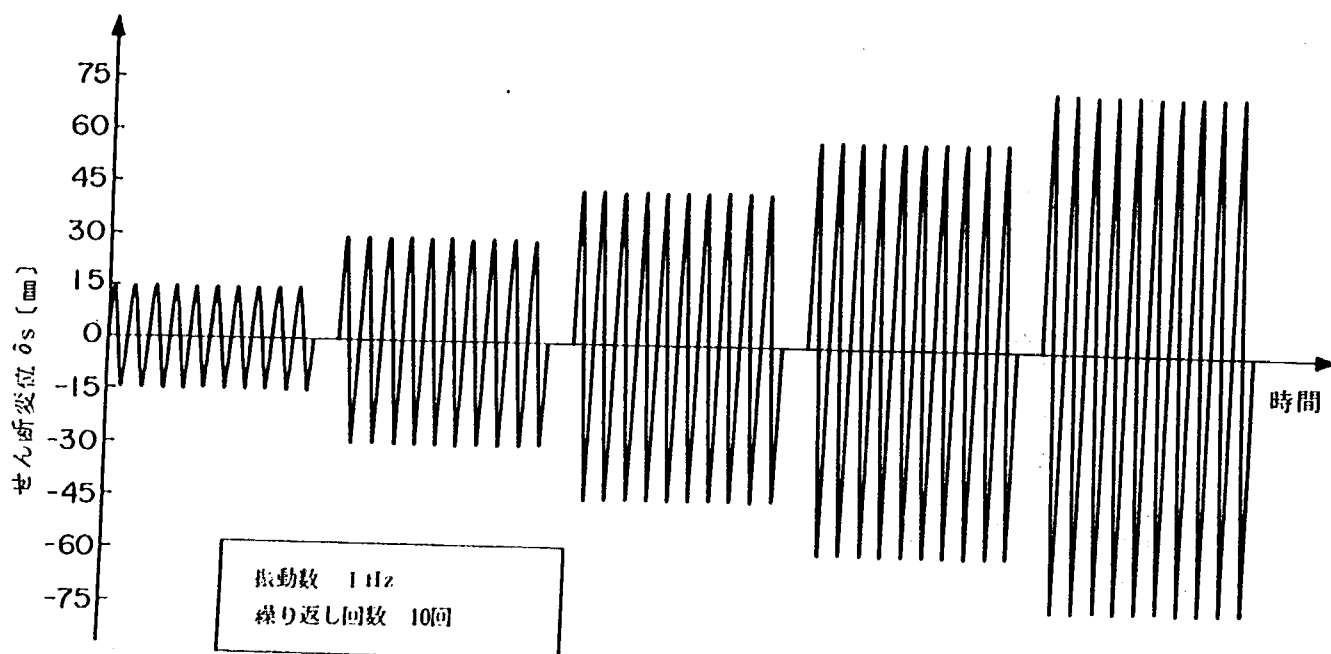
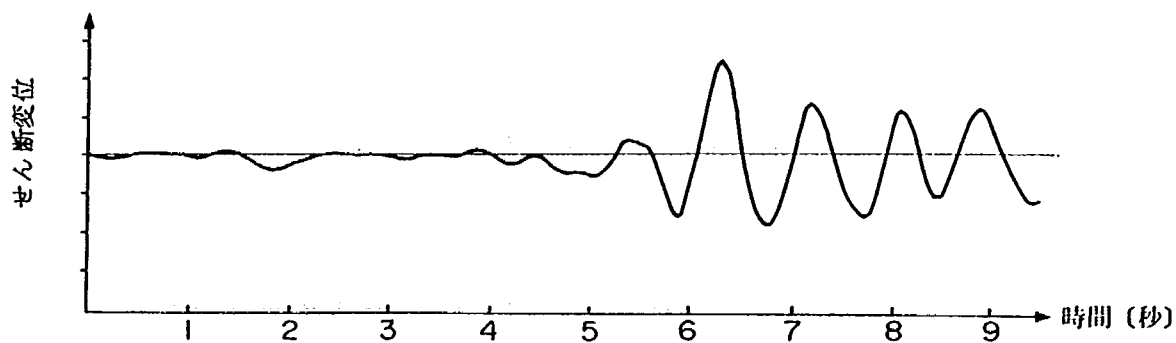
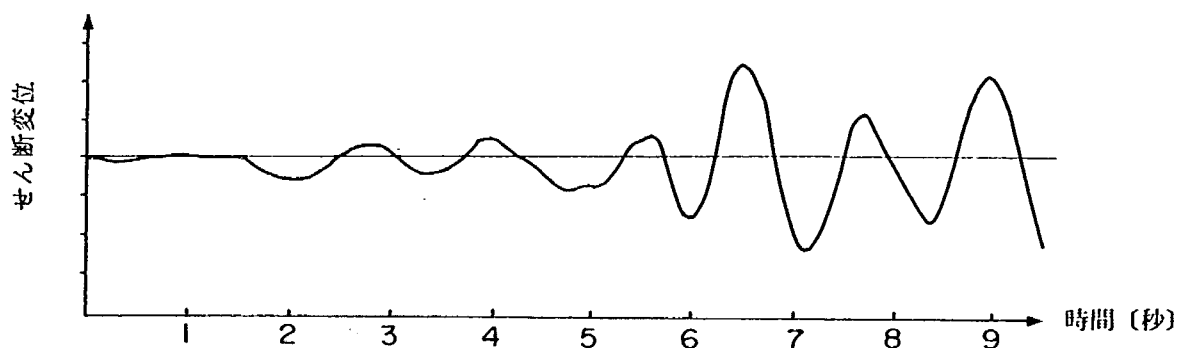


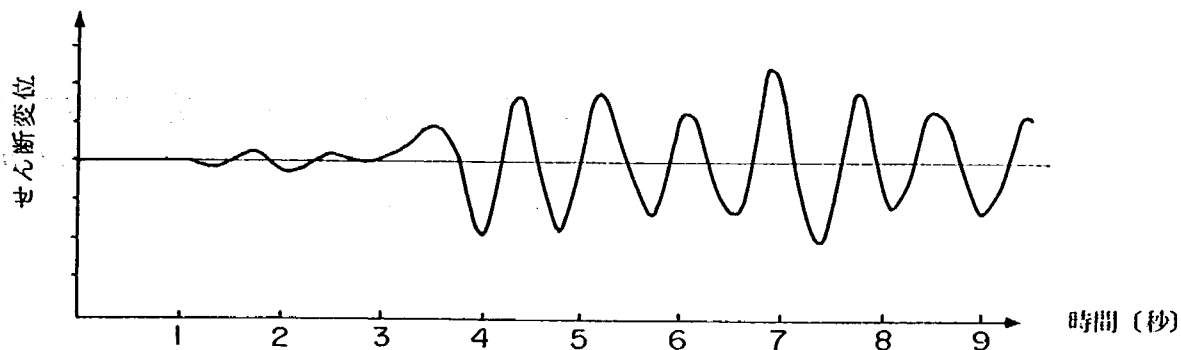
図4-2 動的せん断実験のせん断変位履歴 (ケースD-11~D-14)



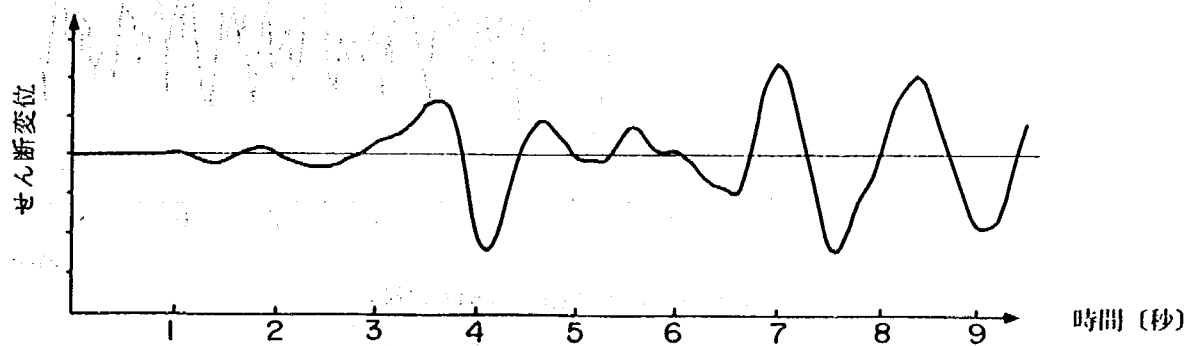
(1) 波形 A (ケース D-15)



(2) 波形 B (ケース D-16)



(3) 波形 C (ケース D-17)



(4) 波形 D (ケース D-18)

図 4-3 動的せん断実験のせん断変位履歴

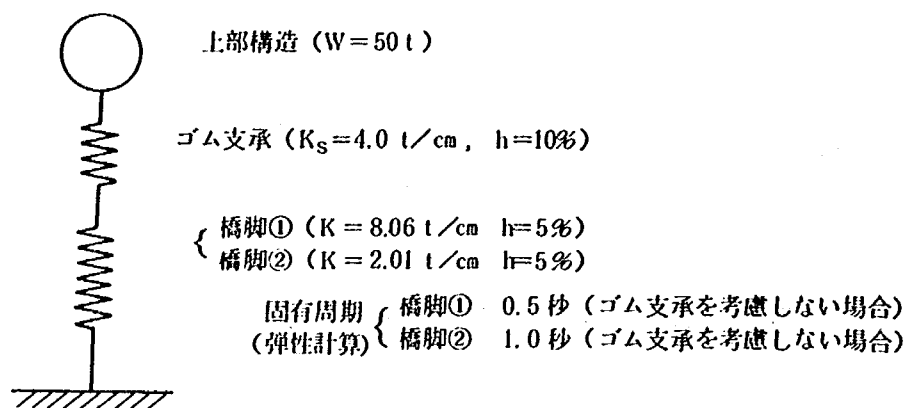
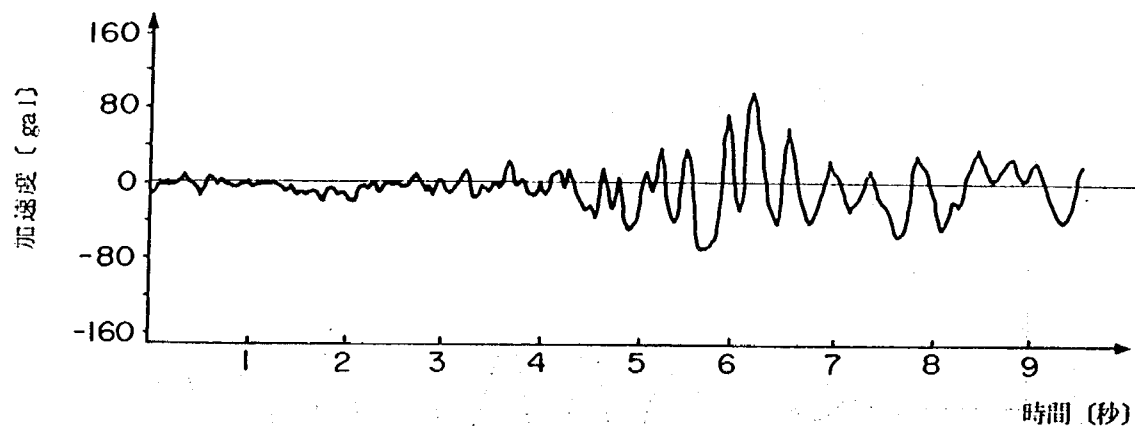
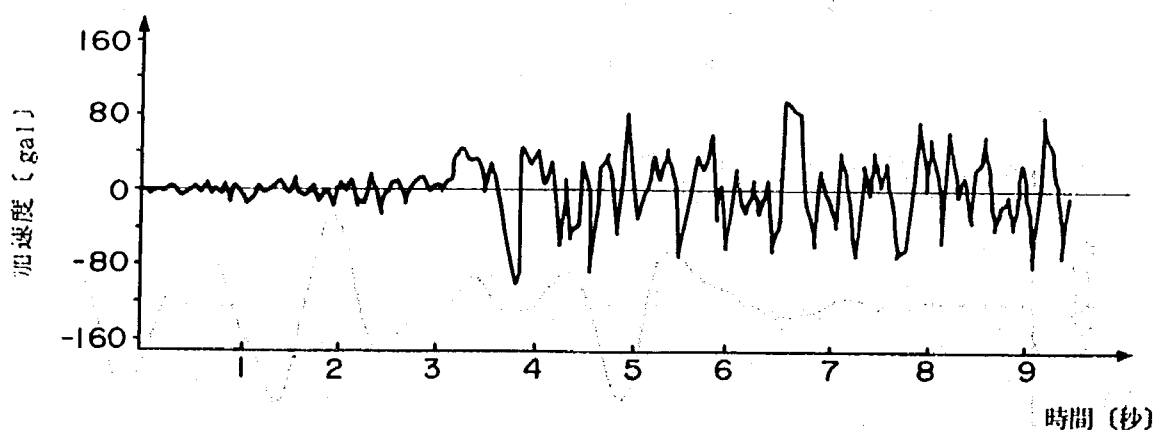


図 4-4 構造物モデル



(1) 入力地震動① (十勝沖地震, 八戸港記録)



(2) 入力地震動② (Kern County 地震, Taft 記録)

図 4-5 入力地震動の加速度記録

表 4-3 入 力 波 形

入 力 波 形	橋 脚 タイ プ	入 力 地 震 動
A	橋 脚 ①	入 力 地 震 動 ①
B	橋 脚 ②	入 力 地 震 動 ①
C	橋 脚 ①	入 力 地 震 動 ②
D	橋 脚 ②	入 力 地 震 動 ②

注 1) 橋脚タイプは図 4-5 参照

注 2) 入力地震動は図 4-6 参照

5. 実 験 結 果

5.1 静的せん断実験結果

5.1.1 静的せん断特性（載荷板とゴム支承の間に滑動が生じない場合）

ゴム支承を載荷板に接着し、両者の間に滑動が生じないようにした場合（ケースS-1, ケースS-3, ケースS-5）について静的せん断特性を示す。図5-1はケースS-1（圧縮荷重80t）の場合に対するせん断力 P_s とせん断変位 δ_s の関係（以後、せん断変位～せん断荷重の履歴曲線と呼ぶ）を示したものである。このような関係は、ケースS-3（圧縮荷重52t）、ケースS-5（圧縮荷重24t）の場合にも、基本的に同じような傾向を有している。また図5-2は、せん断変位～せん断荷重の履歴曲線の包絡線（履歴曲線の骨格曲線に相当する）をケースS-1, S-3, S-5について示したものである。これより、供試体ごとの静的せん断特性に関しては、以下の特徴があることが指摘される。

1) 供試体H, F, Rの場合には、履歴曲線は基本的に図5-2に示すような特性を示す。すなわち、荷重載荷段階では、せん断変位が過去に経験した最大せん断変位よりも小さい領域においては、接線せん断ばね係数は、過去の載荷時の値よりもやや小さい値を持つが、せん断変位が過去の最大せん断変位に近づくにつれて、せん断荷重は、過去の最大せん断荷重の発生点を目指すように増加する。また、せん断変位が過去の最大せん断変位点を超すと、せん断変位～せん断荷重の関係は、本来の骨格曲線に乗って変化ようになる。除荷時には、まず、せん断荷重が、急速に小さくなり、次に、せん断変位が減少する。今回実験した最大せん断変位が、80mm（ゴム支承の総厚の230%（供試体H, F）～160%（供試体R））程度までの載荷では、荷重を零にもどした際の残留変位は大きなものではなかった。

2) 供試体Dの場合には、荷重載荷段階の接線せん断ばね係数は、過去の載荷時の値とあまり大きく変わらない。また、除荷時にも上記供試体H, F, Rほど大きく、せん断荷重の低下は生じない。

3) 供試体H, F, Rの場合には、せん断変位が50mm以下の範囲では、履歴曲線の包絡線（図5-3参照）は、式（3-2）による値と比較的良く一致している。せん断変位が50mm程度を超えると、ゴム支承のせん断ばね係数は、計算値より大きくなるが、これは、ゴム材料のひずみ硬化によると考えられる。供試体H, F, Rの中では、ひずみ硬化の影響は、供試体Fの場合に最も大きく、供試体Hおよび供試体Rは、同程度となっている。また、供試体Dの場合には、履歴曲線の包絡線は式（3-2）による値に比較して、小さくなっている。これは、供試体Dでは、ゴム支承の上下面をなじみ層（弾性率の小さいゴム）で履っているためである。なお、供試体Dの場合には、せん断変位の増加とともにゴム支承のせん断ばね係数は低下しており、せん断変位が50mmまでの領域ではひずみ硬化は現れていない。

5. 1. 2 静的せん断特性（載荷板とゴム支承の間に滑動が生じる場合）

ゴム支承を載荷板に接着せず、両者を自由とした場合（ケースS-2，ケースS-4，ケースS-6）について静的せん断特性を示す。図5-4は、滑動が生じた供試体H，F，Rについて、せん断変位～せん断荷重の履歴曲線を示したものである。供試体Dについては、圧縮荷重が一番小さいケースS-6（24t）の場合においても滑動しなかったため、ここには示していない。当然ながら、この場合には、前述した滑動を生じさせないようにした場合の実験結果とほとんど同じ結果となっている。図5-3によれば、除荷途中にせん断荷重が0となっても、せん断変位が残っており、これだけの変位がおおむね載荷板とゴム支承間の滑動によることを示している。また、図5-4からは滑動が生じる場合にも、滑らかに滑るもの（供試体R）から激しく滑るもの（供試体F）まで、滑動の仕方に変化があることが分かる。これについては、動的せん断特性の項においても述べることにする。

以上の実験より、ゴム支承と載荷板（コンクリート板）との間の、静摩擦係数を求めた結果が、表5-1である。ただし、ここでは滑動が生じなかった場合の値も示しているが、これは、実際の静摩擦係数はこれ以上の値ということを示している。ゴム支承が滑った場合についてみると、静摩擦係数は、供試体Hでは0.58（圧縮荷重24tの場合）、供試体Fでは0.71（圧縮荷重24t）、供試体Rでは0.86（圧縮荷重24t）～0.48（圧縮荷重52t）となっている。供試体Rの例からわかるように、静摩擦係数が圧縮荷重によって変化していることが興味深い。ただし、この結果については供試体数が少なく、供試体ごとのばらつきを検討していないこと、また、載荷板自身も実験を繰り返すことにより、除々に表面が滑らかになっていること等から、今後検討の余地を残している。

滑動とは直接関係はないが、ゴム支承を上下の載荷板に接着していないため、写真5-1（供試体Hに75mmのせん断変位を与えた場合）に示すように支承の端部で反り上りが生じた。反り上りは圧縮荷重の大きさによらず、ゴム支承を接着しない場合には、各供試体で生じた。反り上りが生じると、この部分では、せん断力を伝えないため、支承の有効面積が減少することとなる。

5. 1. 3 繰り返し疲労せん断特性

ゴム支承を載荷板に接着しないで、80tの圧縮荷重を加えた状態で14400回の動的繰り返し疲労実験（振幅22mmの振動数0.5Hz）を行った後に得られたせん断荷重～せん断変位の包絡線を動的繰り返し疲労実験を行う前の結果と比較した結果が図5-5である。これより、供試体ごとの繰り返し疲労せん断特性に関しては以下の事項が指摘される。

1) 動的繰り返し疲労せん断実験により、外観上、変状を生じたのは、供試体Hおよび供試体Fである。

写真5-2は、供試体Hについて、動的繰り返し疲労せん断実験前後における外観（側面）を比較したものであり、2層のゴム層が中間の耐候性鋼板から分離（ただし、ゴム支承の内部までは確認していない）している状況を示したものである。ただし、このような変性を生じたにもか

かわらず図 5-5(1)に示したように、動的繰返し疲労せん断実験の前後において、せん断荷重～せん断変位の包絡線には著しい変化は認められない。供試体 F についても、供試体 H ほどではないが同様の変状が生じた。ただし、この場合にも図 5-5(2)に示したように、せん断荷重～せん断変位の包絡線は、動的繰返し疲労せん断実験の前後で、著しい差は生じていない。

2) 供試体 D および R では、動的繰返しせん断実験により、外観上顕著な変状は認められなかった。図 5-5(3)および(4)は、それぞれ、供試体 D および R に対する動的繰返し疲労せん断実験の前後におけるせん断荷重～せん断変位の包絡線を比較したものである。これによれば、供試体 D については、ほとんど変化が生じていない。これに対して供試体 R の場合には、動的繰返し疲労せん断実験の前に比較して、実際の後では、ゴム支承のせん断ばね係数が小さくなっている。この原因は、主として、載荷板とゴム支承の間に滑動が生じたことによると考えられる。

3) 表 5-2 は、動的繰返しせん断疲労実験の前後における供試体の温度変化を示したものである。それによれば、動的繰返し疲労せん断を加えることにより、各供試体とも 20℃～30℃の表面温度の上昇が見られる。

5.2 動的せん断実験

5.2.1 履歴特性

動的せん断実験によって得られたせん断荷重とせん断変位履歴曲線の 1 例としてケース D-11 (振動数 1 Hz, 振幅 15 mm～60 mm, 圧縮荷重 80 t) の結果を図 5-6 に示す。履歴曲線の形状は、ゴム支承と載荷板の間に滑動が生じない範囲では、図 5-1 の例と大きく変わらない。図 5-6 より各供試体の履歴曲線の特徴を示すと以下ようになる。

1) 供試体 H

履歴曲線は、滑らかな包絡線に内接する形で、せん断変位が小さい場合には紡錘形、せん断変位が大きくなると逆 S 字形に移行する。せん断変位がある程度 (30 mm 程度) 以上大きくなると、1 回目の載荷時のせん断ばね係数に比較して 2 回目以後の載荷時のせん断ばね係数が小さくなる傾向が認められる。ただし、2 回目以後の繰返し載荷に伴うせん断ばね係数の低下の度合いはそれ程大きいものではない。

2) 供試体 F

履歴特性は基本的に供試体 H と同様であるが、逆 S 字形の傾向については供試体 H よりも著しい。

3) 供試体 D

履歴曲線は、滑らかな包絡線に内接する形で、せん断変位量によらず紡錘形を示す。

4) 供試体 R

履歴特性は供試体 H と同様である。

5.2.2 セン断変位量の影響

等価せん断ばね係数 K_e および等価粘性減衰定数 h_e に着目して、せん断変位量およびせん断速度が動的せん断特性に与える影響を検討する。ここで、等価せん断ばね係数 K_e および等価粘性減衰定数 h_e は次式により求めた。(図5-7参照)。

$$\left. \begin{aligned} K_e &= \frac{AB}{OB} \\ h_e &= \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5 \cdot 1)$$

ここで、

O, A, B : 図5-7 参照

ΔW : CAD 間の面積

W : OAB の面積

等価せん断ばね係数 K_e および等価粘性減衰定数 h_e を求める際には、1回めの載荷を除いた2回め以後の履歴曲線のそれぞれに対して式(5・1)により K_e, h_e を求め、これらを平均して求めた。ただし、ここではゴム支承と載荷板の間に滑動が生じなかったケースD-1～D-7の結果だけを用いることとした。

図5-8はケースD-1(振動数1Hz, 振幅75mm), D-2(振動数1Hz, 振幅60mm), D-3(振動数1Hz, 振幅45mm), D-4(振動数1Hz, 振幅30mm), D-6(振動数3Hz, 振幅30mm)およびD-7(振動数3Hz, 振幅15mm)の実験結果を基にして等価せん断ばね係数 K_e がせん断変位振幅によりどのように変化するかを示したものである。図5-8には静的せん断実験(ケースS-2の場合)から得られた等価せん断ばね係数および式(3・2)を用いて計算によって求めたせん断ばね係数も示している。

一方、図5-9は上記と同じくケースD-1～D-7の結果をもとに等価粘性減衰定数 h_e がせん断変位振幅によりどのように変化するかを示したものである。以下、各供試体ごとに等価せん断ばね係数および等価粘性減衰定数がせん断変位振幅によりどのように変化するかについて示す。

1) 供試体H

等価せん断ばね係数はせん断変位振幅が約50mm よりも小さい領域では、せん断変位振幅が大きくなるほど低下するが、せん断変位振幅が50mm 程度を越えると、再び、大きくなる傾向がある。これは、図5-6に示したように、履歴曲線の形状がせん断変位が小さい間には紡錘形を示すのに対して、せん断変位が大きくなると逆S字形に移行することに対応するものである。また、同一のせん断変位振幅に対する等価せん断ばね定数は、振動数(静的の場合も含む)によって変化するが、これについては5.2.3に示す。一方、等価粘性減衰定数はせん断変位振幅が大きくなると減少する傾向にあり、せん断変位振幅が40mm の場合には

$h_c \doteq 0.08$ 程度の値をとる。

2) 供試体 D

等価せん断ばね係数および等価粘性減衰定数のせん断変位振幅依存性の関係については供試体 H とほぼ同様である。ただし、等価粘性減衰定数の値は供試体 H よりもやや大きい。

3) 供試体 D

等価せん断ばね係数および等価粘性減衰定数はともにせん断変位振幅が大きくなると小さくなる。ただし、等価せん断ばね係数の値は他の供試体に比較すると相対的に小さいが、これは 5. 1. 1 に示したように本供試体ではゴム支承の上下面をなじみ層で覆っているためである。

4) 供試体 R

等価せん断ばね係数はせん断変位振幅が大きくなるとともに低下するが、等価粘性減衰定数は反対に増加する傾向を示す。等価粘性減衰定数は他の供試体に比較して相対的に小さく、せん断変位振幅が 40 mm の場合には、0.05 程度の値をとる。

5. 2. 3 セン断速度の影響

図 5-10 はケース D-4 (振動数 1 Hz, 振幅 30 mm), D-5 (振動数 2 Hz, 振幅 30 mm), D-6 (振動数 3 Hz, 振幅 30 mm), D-7 (振動数 3 Hz, 振幅 15 mm), D-8 (振動数 5 Hz, 振幅 15 mm), D-9 (振動数 7 Hz, 振幅 15 mm, ただし、15 mm の目標値に対して、実際には 13.5 mm) および D-10 (振動数 10 Hz, 振幅 15 mm, ただし、15 mm の目標値に対して実際には 10 mm) の実験結果を基に等価せん断ばね係数 K_e がせん断振動数によってどのように変化するかを示したものである。ここでケース D-9 および D-10 のせん断ばね係数は、図 5-7 に示したケース D-6 (振動数 3 Hz, 振幅 30 mm) および D-7 (振動数 3 Hz, 振幅 15 mm) の値を外挿して、せん断変位振幅 15 mm に対応する等価せん断ばね係数に変換した値である。なお、図 5-10 では、せん断振動数 0 Hz のせん断ばね係数としては静的せん断実験から得られた等価せん断ばね係数を示している。また、式 (3・2) を用いて計算によって求めたせん断ばね係数も参考のため図中に点線で示している。一方、図 5-11 は上記と同じケース D-4 ~ ケース D-10 の結果から求めた等価粘性減衰定数 h_c のせん断振動数依存性の関係を示したものである。ここでケース D-9 および D-10 に対する等価粘性減衰定数も、等価せん断ばね係数と同じ方法で補正した値を用いている。以下、各供試体ごとに等価せん断ばね係数および等価粘性減衰定数がせん断振動数によりどのように変化するかについて示すこととする。

1) 供試体 H

載荷速度が速くなると等価せん断ばね係数はかなり大きくなる。たとえば、せん断振動数が 0 の場合の等価せん断ばね係数が 4.4 t/cm であるのに対し、せん断振動数が 10 Hz の場合には 5.4 t/cm となり 23% 程度増加することがわかる。ただし、振動数が 5 Hz を越えた領域では載荷振動数による等価せん断ばね係数の変化は著しくない。等価粘性減衰定数は載荷振動

数によりばらついており、特に顕著な傾向は認められない。

2) 供試体 F

等価せん断ばね係数は振動数 3 Hz 付近では大きくなっているが、載荷振動数が 5 Hz を越えるとほぼ一定の値をとる。等価粘性減衰定数は、載荷振動数によらずほぼ一定であるが、載荷振動数 10 Hz では大きくなる傾向にある。

3) 供試体 D

等価せん断ばね係数は載荷振動数の増加に伴ないわずかに大きくなるが、3 Hz を越えた領域では載荷振動数によらずほぼ一定となる。等価粘性減衰定数は載荷速度によらずほぼ一定であるが、10 Hz 付近では大きくなっている。

4) 供試体 R

等価せん断ばね係数は載荷速度によらずほぼ一定である。等価粘性減衰定数は、載荷振動数の増加に伴ないおおむね単調に増加する。

なお、ケース D-1 ~ D-10 では表 5-3 に示すように実験の前後でゴム支承に最高 8 °C の温度上昇が観測された。温度上昇はせん断変位振幅が大きいほど、また、載荷速度が速いほど大きかった。

5.2.4 圧縮荷重の影響

圧縮荷重が動的履歴特性に与える影響を調査するため、ケース D-11 (圧縮荷重 80 t)、D-12 (圧縮荷重 52 t) および D-13 (圧縮荷重 24 t) の実験結果を比較検討した。図 5-12 ~ 5-15 は、それぞれ、供試体 H、F、D、R に対するケース D-11、D-12 および D-13 の履歴曲線(ただし、振幅 60 mm の履歴のみを示す)を示したものである。これより、各供試体ごとの履歴特性に関して、以下の事項が指摘される。

1) 供試体 H

圧縮荷重が 52 t および 80 t の場合には、ゴム支承と載荷板の間には滑動が生じないが、圧縮荷重が 24 t の場合には滑動が生じている。滑動が生じない場合には圧縮荷重の大きさにはよらず前述したように履歴曲線は逆 S 字形となる(5.2.1 参照)が、滑動が生じる場合には、せん断荷重は頭打ちとなり、履歴曲線は平行四辺形に近くなる。

2) 供試体 F

圧縮荷重が 52 t および 24 t の場合に滑動が生じた。本供試体では前述した静的せん断実験の場合(5.1.2 参照)と同様に供試体 H に比べて激しく滑動が生じるため、特に圧縮荷重 24 t の場合には滑動に伴うせん断荷重の変化が急激に生じ、履歴曲線は大きく波打っている。

3) 供試体 D

本供試体では、いずれの場合にも滑動は生じなかった。履歴曲線の形状は圧縮荷重によらずほぼ一定である。

4) 供試体 R

圧縮荷重が 52t および 24t の場合には滑動が生じたが、本供試体では、前述した静的せん断実験の場合（5.1.2 参照）と同様に滑動によりせん断荷重が急激に変化しないため、履歴曲線は供試体 F のように大きく波打ってはいない。

表 5-4 は滑動が生じたときのせん断荷重およびこれと圧縮荷重から求めた摩擦係数（摩擦が生じ始める段階の摩擦係数を表わしているため、静摩擦係数となる）を示したものである。これを表 5-1 に示した静的実験による静摩擦係数と比較すると、供試体 H では 0.58（静的実験）～0.63（動の実験）（圧縮荷重 24t の場合）、供試体 F では 0.71（静的実験）～0.75（動の実験）（圧縮荷重 24t の場合）、供試体 R では 0.86（静的実験）～0.88（動の実験）（圧縮荷重 52t の場合）、0.48（静的実験）～0.52（動の実験）（圧縮荷重 24t の場合）となっている。

供試体 H、F および R については静的実験から求めた摩擦係数と動の実験から求めた摩擦係数は比較的よく一致している。

5.2.5 初期せん断変形の影響

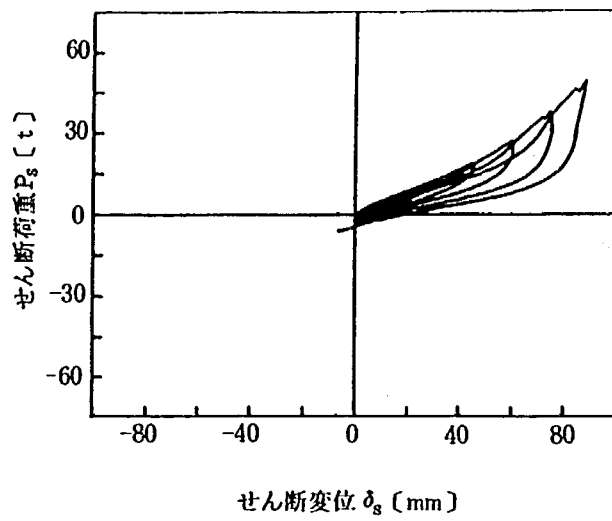
図 5-16 はケース D-14（初期せん断変位 22mm）に対するせん断荷重～せん断変位の包絡線を示したものである。図中には比較のため同一のせん断変位振幅および圧縮荷重の下で行われたケース D-11（ただし、初期せん断変位は 0）に対する包絡線も示している。両者を比較すると、各供試体とも包絡線の形状はほぼ一致しており、初期せん断変位が 22mm 程度の範囲ではせん断ばね係数に大きな影響を与えないといえることができる。

5.2.6 入力波形の影響

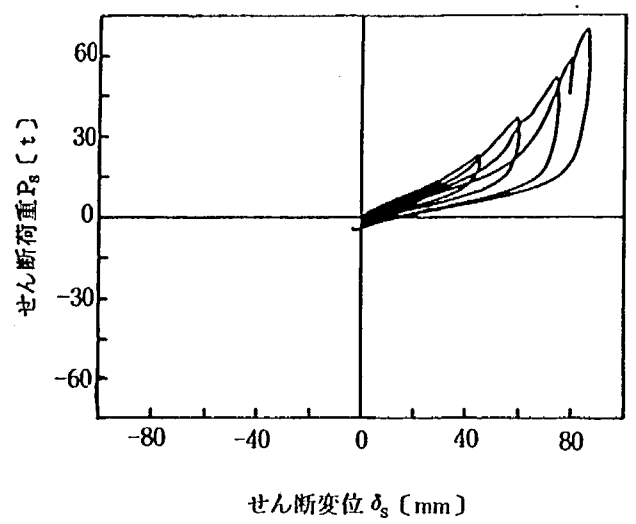
入力波形がゴム支承の動的せん断特性に与える影響を検討するために、図 5-17～図 5-20 にそれぞれケース D-15（入力波形 A）、D-16（入力波形 B）、D-17（入力波形 C）および D-18（入力波形 D）に対する履歴曲線の比較を示す。これより履歴曲線に及ぼす入力波形の影響に関しては、以下の事項が指摘される。

1) 同一供試体に対する履歴曲線（骨格曲線および基本的な履歴法則）は入力地震波により変化しない。

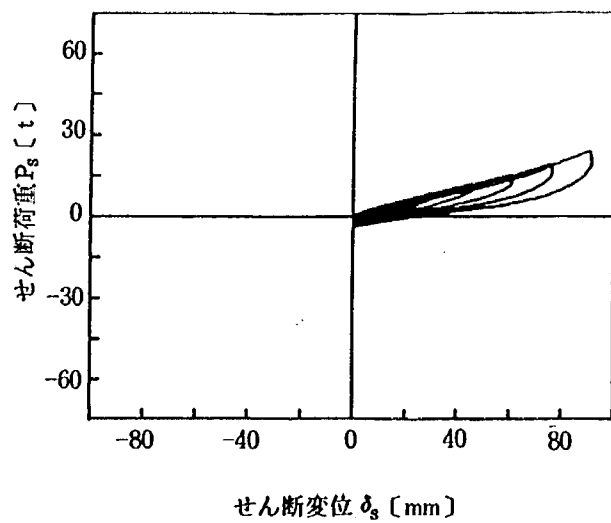
2) 入力波形を作用させた場合の履歴曲線は、図 5-6 に示した正弦波を入力した場合の履歴曲線と著しい違いはない。



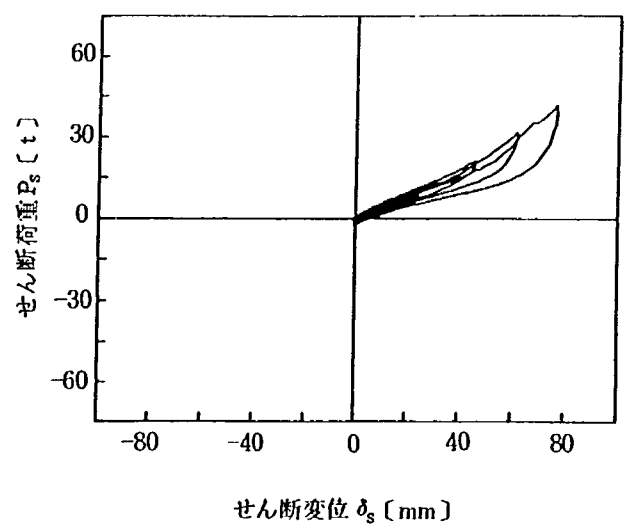
(1) 供試体 H



(2) 供試体 F



(3) 供試体 D



(4) 供試体 R

図 5-1 静的せん断実験の履歴曲線 (ケース S-1 の場合)

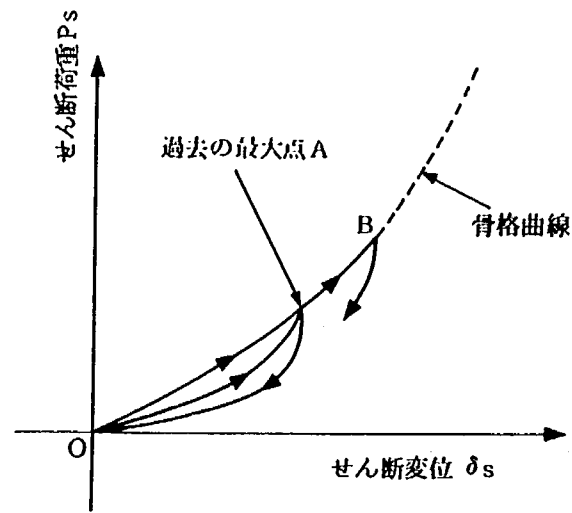
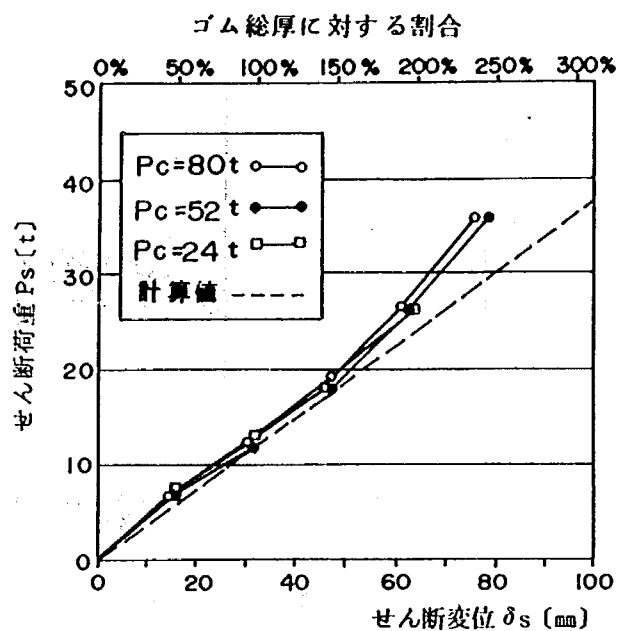
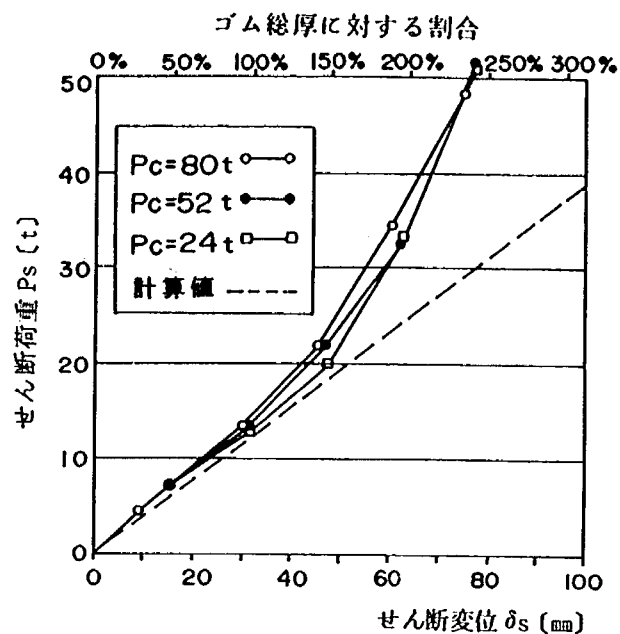


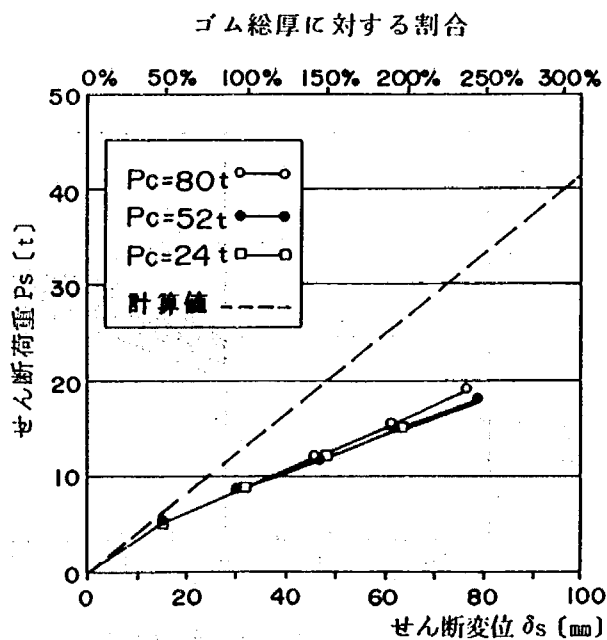
図 5 - 2 静的せん断の履歴曲線



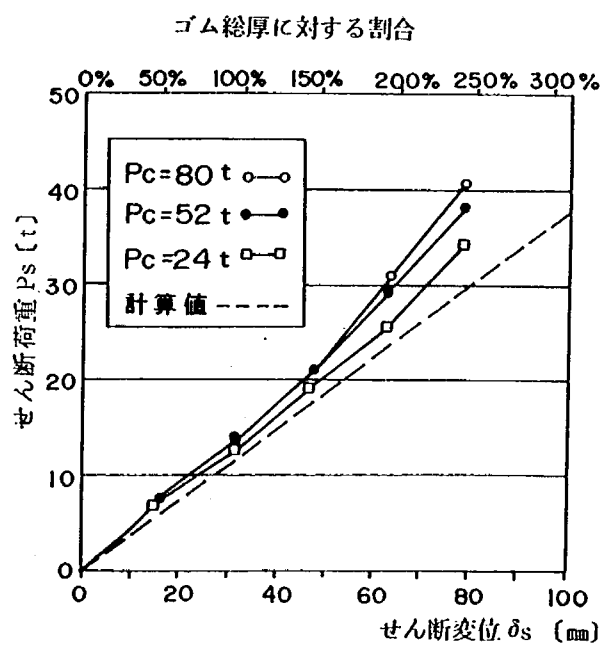
(1) 供試体 H



(2) 供試体 F

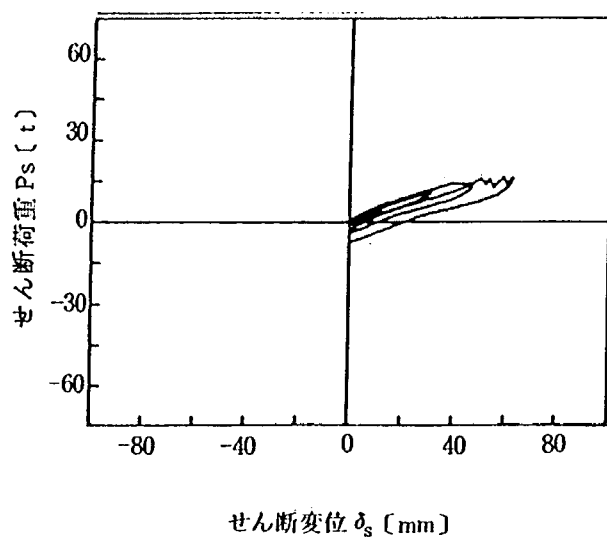


(3) 供試体 D

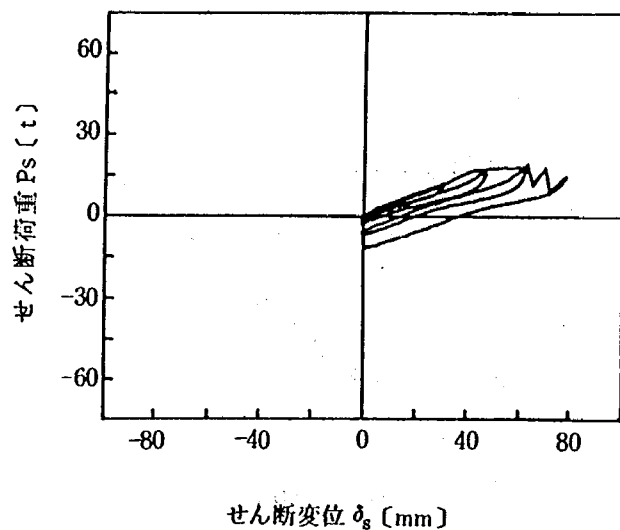


(4) 供試体 R

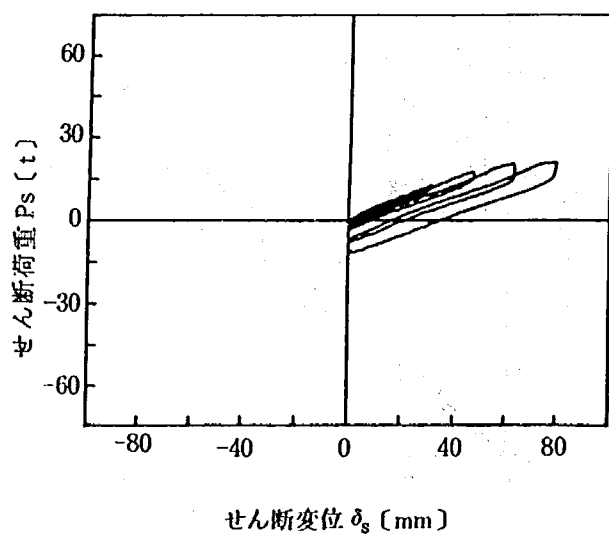
図5-3 静的せん断実験結果 (ケース S-1, S-3, S-5)



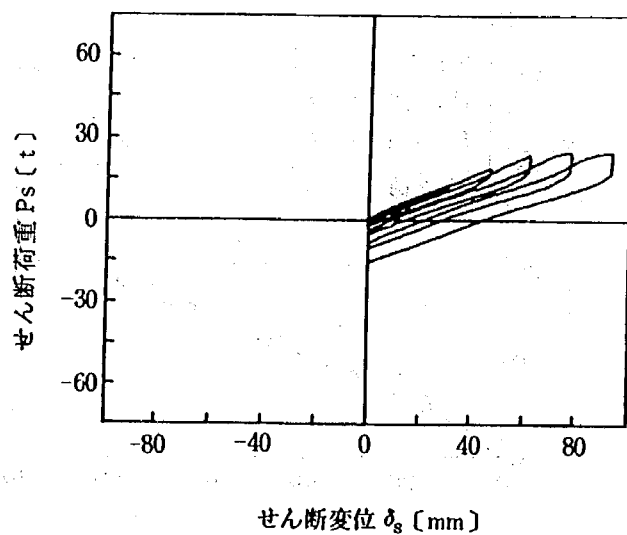
(1) 供試体II (圧縮荷重 24ton, ケースS-6)



(2) 供試体I' (圧縮荷重 24ton, ケースS-6)



(3) 供試体R (圧縮荷重 24ton, ケースS-6)



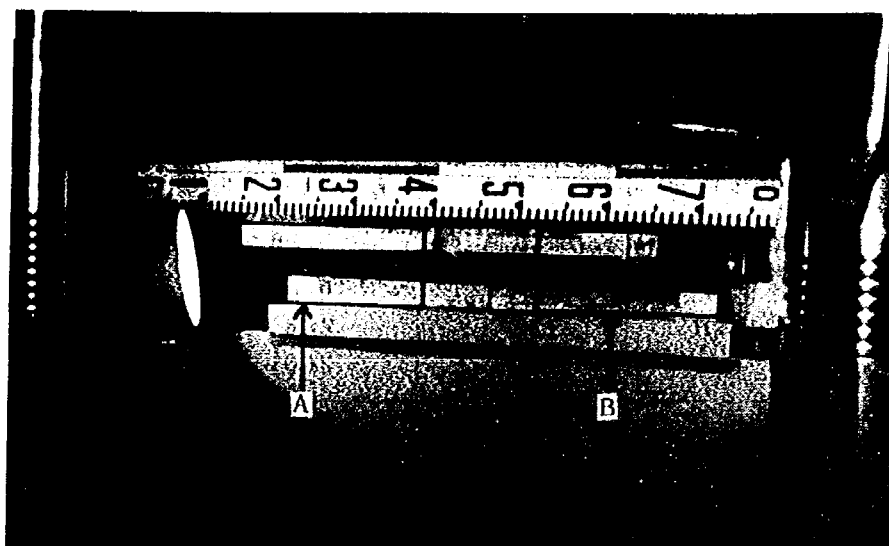
(4) 供試体R (圧縮荷重 52ton, ケースS-4)

図5-4 滑動が発生した静的せん断実験の履歴曲線

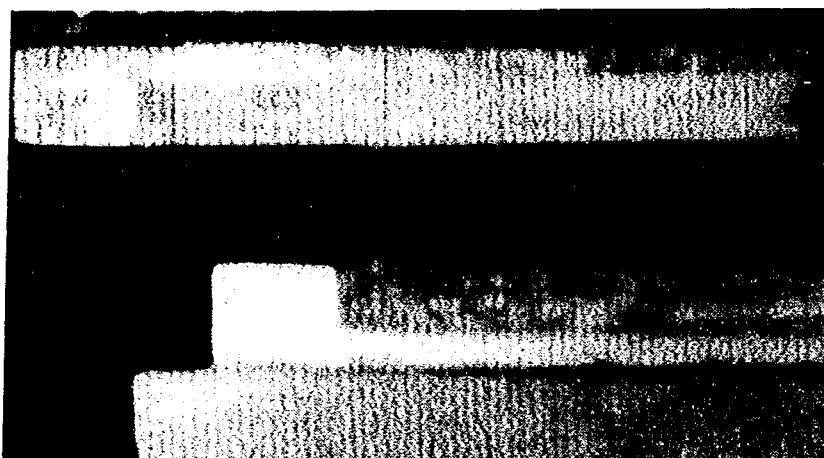
表 5 - 1 ゴム支承の静摩擦係数（静的せん断実験）

供試体種類	圧縮荷重 P_c [t]	滑動発生時の せん断荷重 P_s [t]	静摩擦係数 $\mu = P_s / P_c$
供試体 H	24	14.0	0.58
	52	24.8*	0.48 以上
	80	26.0*	0.33 以上
供試体 F	24	17.0	0.71
	52	27.5*	0.53 以上
	80	29.3*	0.37 以上
供試体 D	24	12.5*	0.52 以上
	52	16.9*	0.33 以上
	80	17.9*	0.22 以上
供試体 R	24	20.7	0.86
	52	25.1	0.48
	80	35.3*	0.44 以上

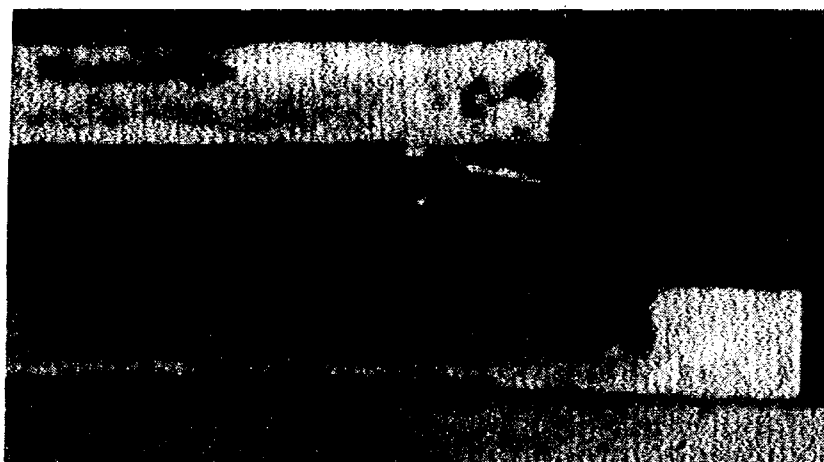
注) 「*」印は滑動が生じなかったケースであり、最大せん断荷重を示している。



(1) 反り上がり現象全景

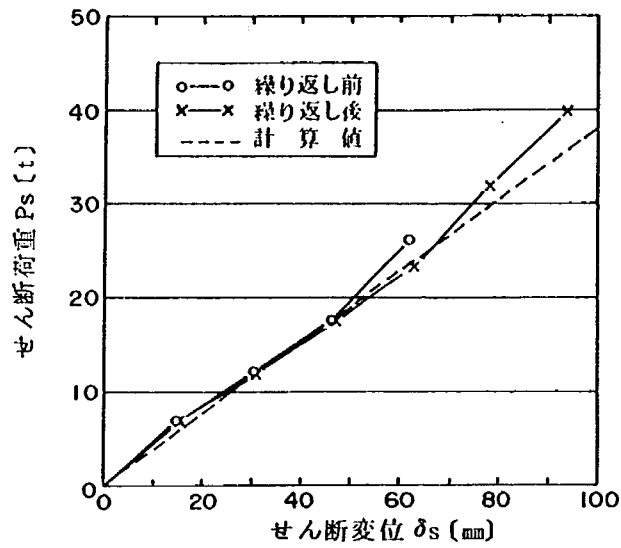


(2) 反り上がり現象 (Aのクローズアップ)

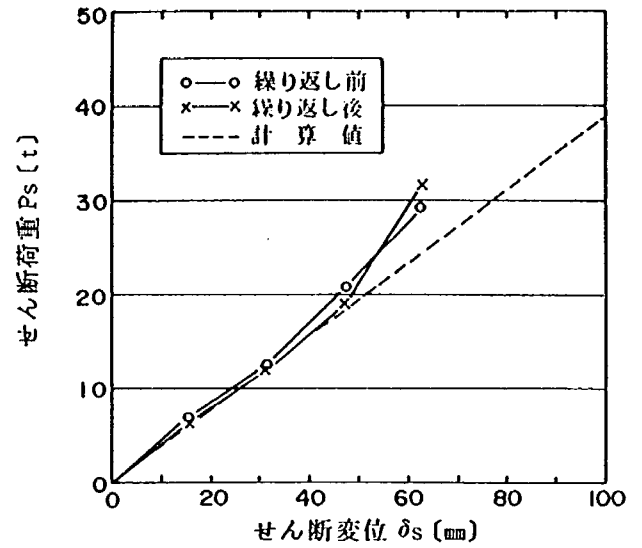


(3) 反り上がり現象 (Bのクローズアップ)

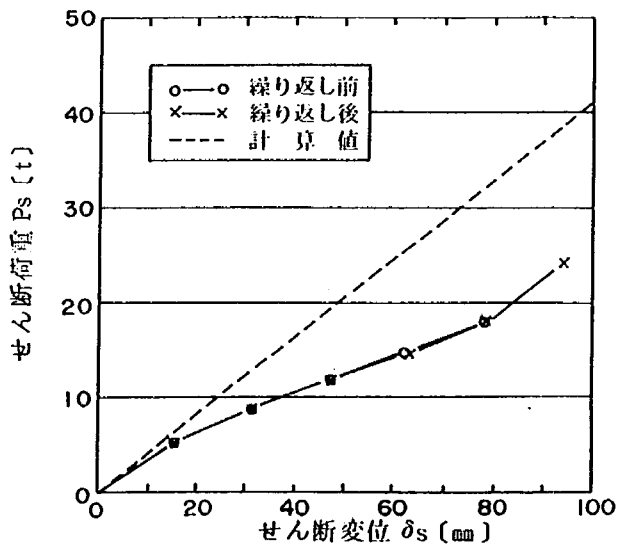
写真5-1 ゴム支承の反り上がり現象 (供試体H, ケースS-6)



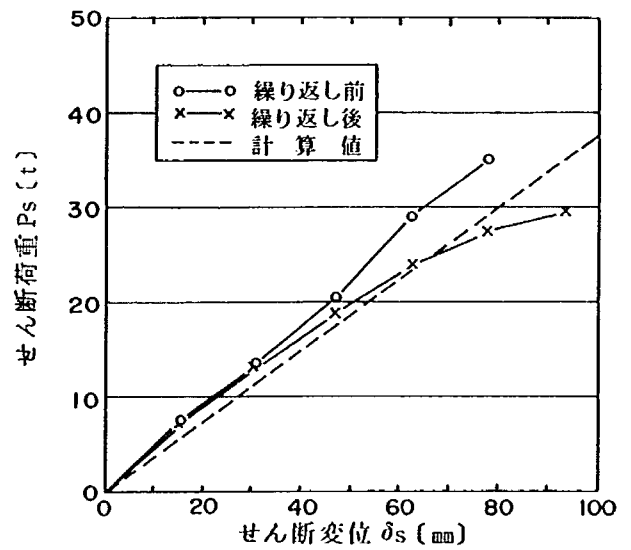
(1) 供試体 II



(2) 供試体 F



(3) 供試体 D



(4) 供試体 R

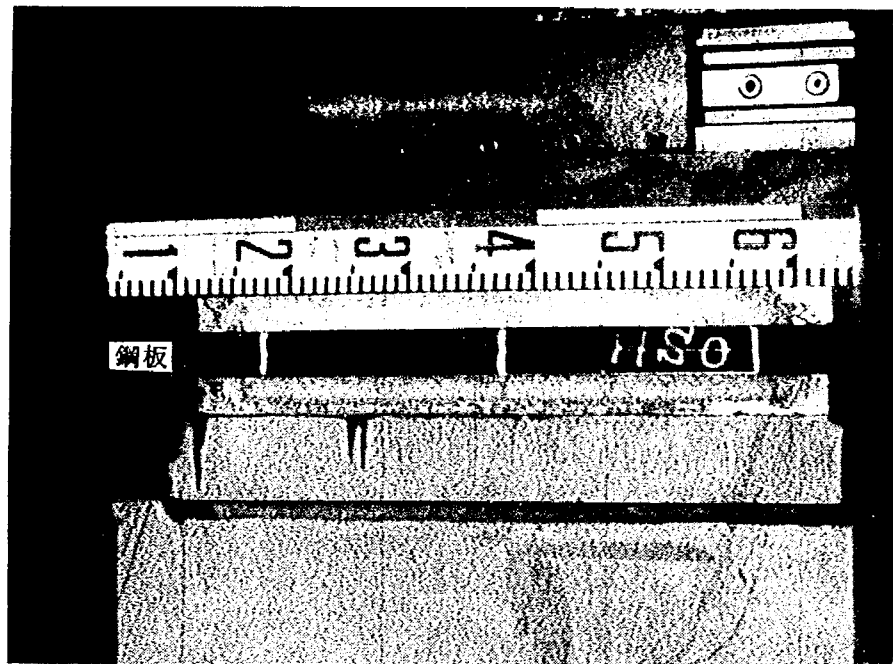
図 5-5 繰り返し疲労せん断の影響 (ケース S-7)

表 5 - 2 動的繰り返し疲労せん断実験前後の温度変化

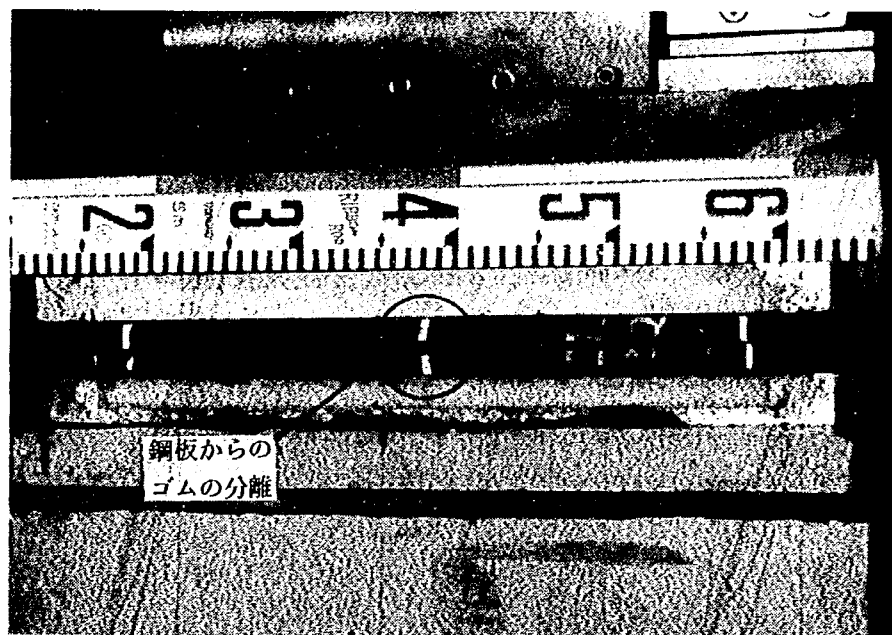
供 試 体 種 類	動的繰り返し 疲労せん断実験前	動的繰り返し 疲労せん断実験後
供 試 体 H	1 8	5 0
供 試 体 F	1 6	3 9
供 試 体 D	1 6	4 0
供 試 体 R	1 6	4 0

(単位：℃)

注) 動的繰り返し疲労せん断実験中の室温は 16℃～20℃でほぼ一定であった。

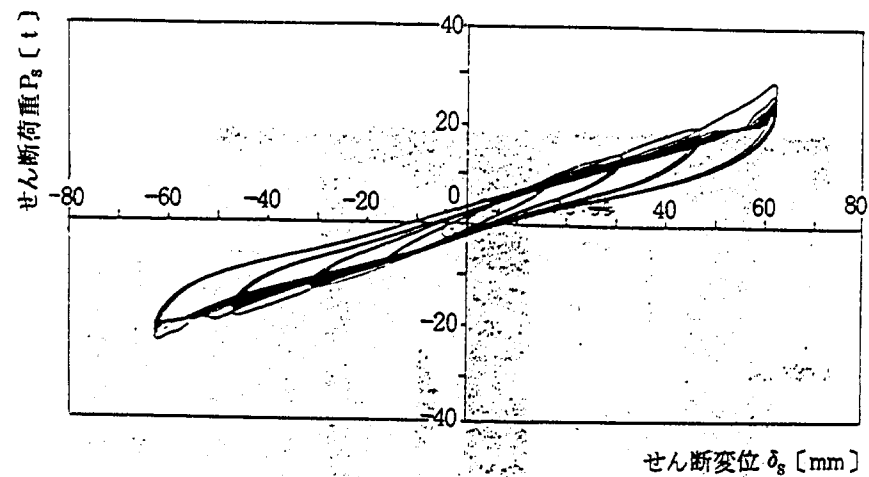


(1) 動的繰返し疲労せん断実験前（ゴムは中間の鋼板に接合されている。）

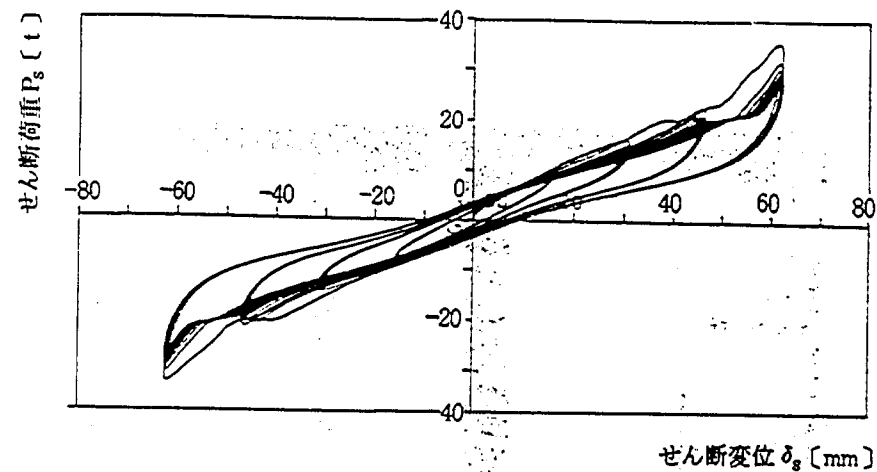


(2) 動的繰返し疲労せん断実験後（ゴムは中間の鋼板から分離し、外に向かって飛び出している。）

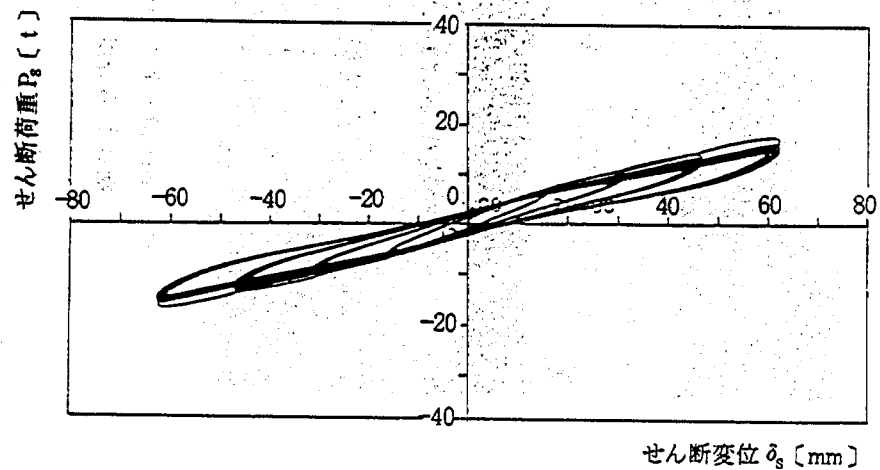
写真 5 - 2 動的疲労せん断によるゴムの分離（供試体 H）



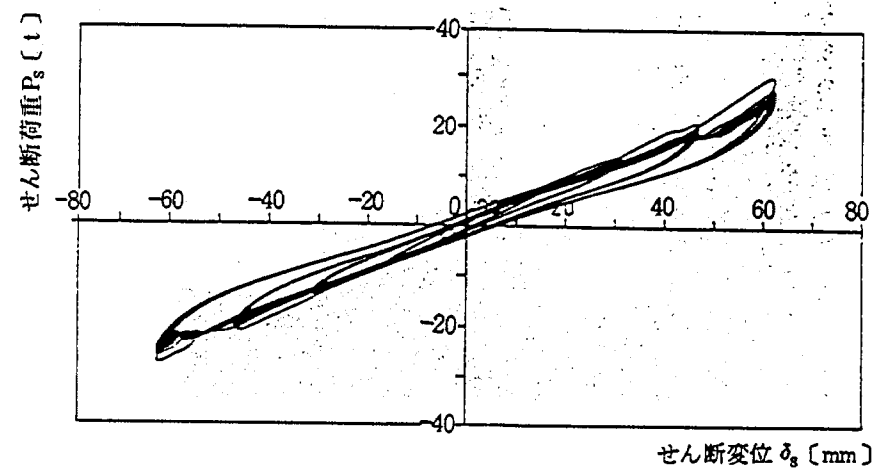
(1) 供試体 H



(2) 供試体 F



(3) 供試体 D



(4) 供試体 R

図 5 - 6 動的せん断実験の履歴曲線 (ケース D - 11)

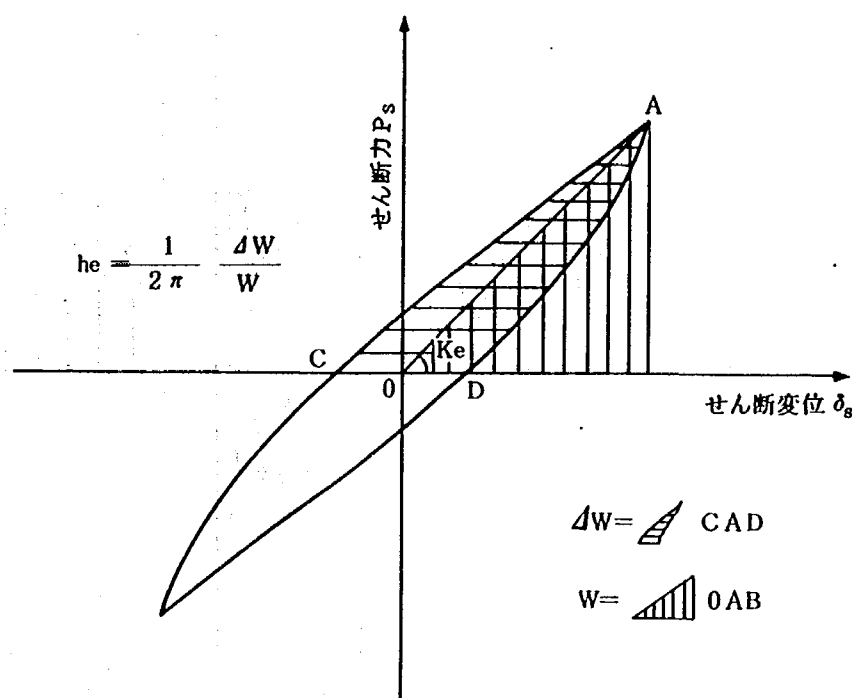
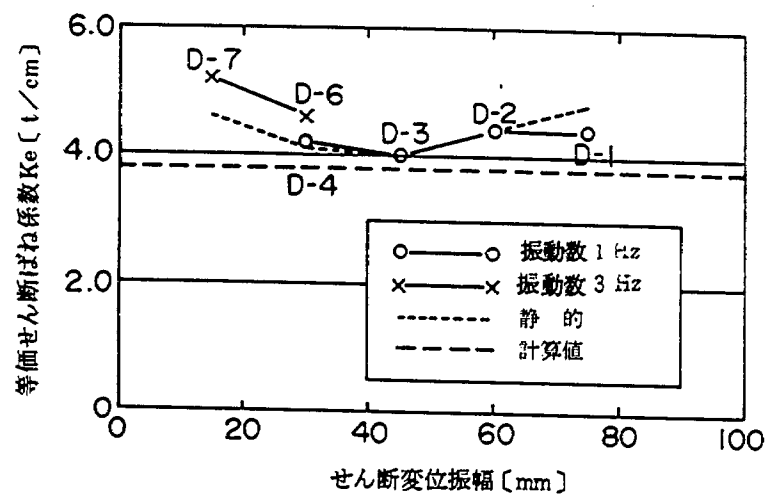
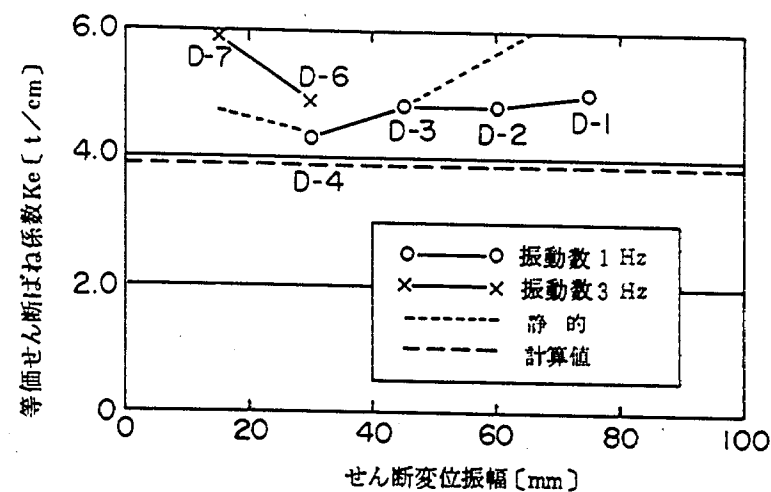


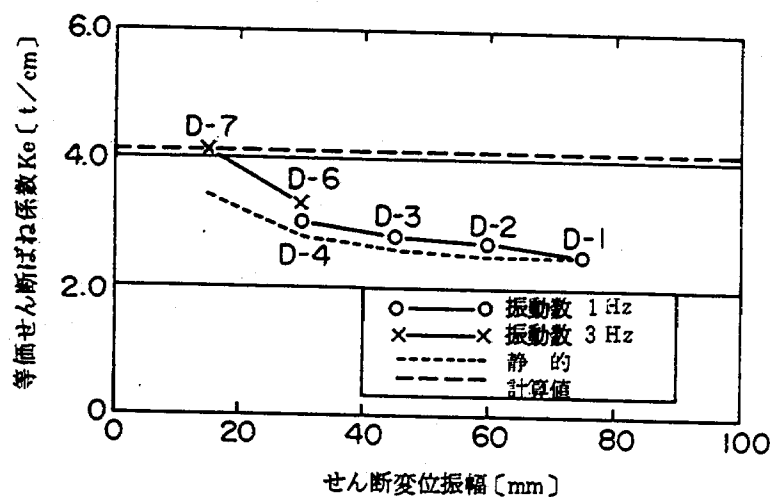
図 5 - 7 等価せん断ばね係数 K_e および
等価粘性減衰定数 h_e



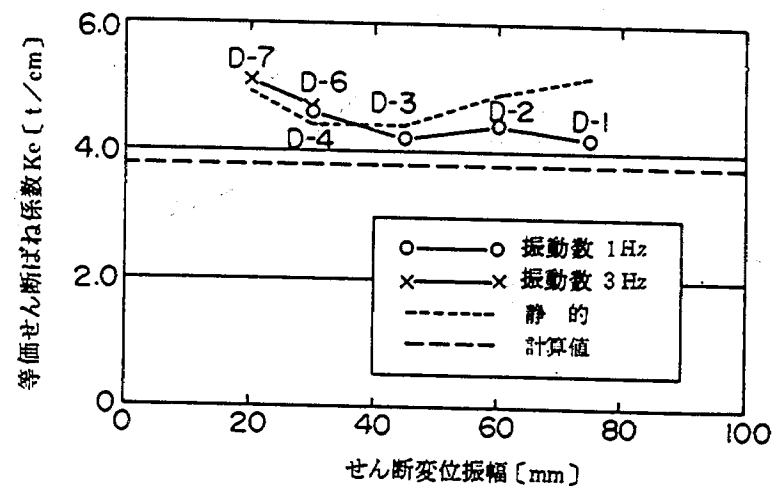
(1) 供試体 H



(2) 供試体 F

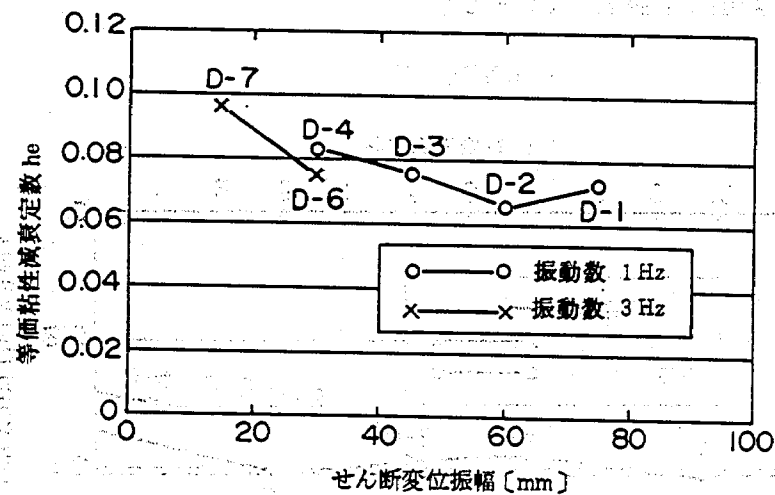


(3) 供試体 D

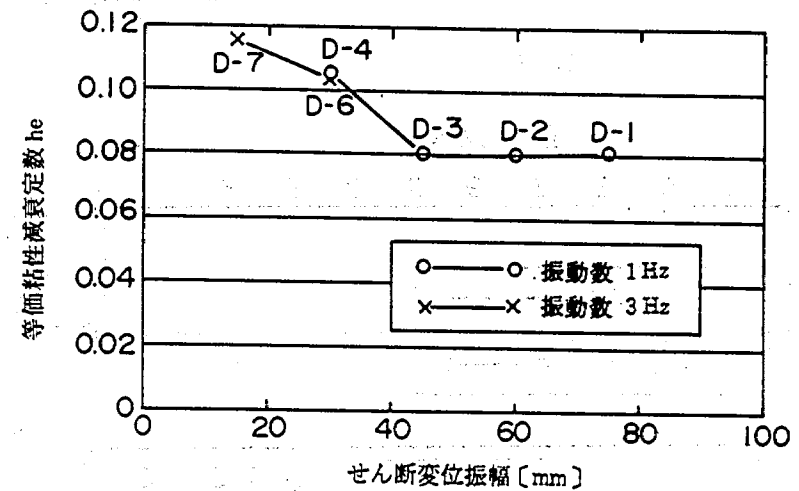


(4) 供試体 R

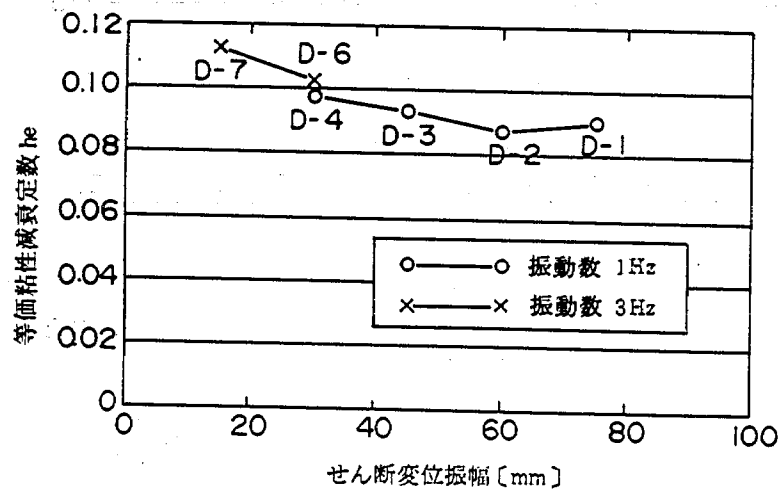
図 5 - 8 セン断ばね係数 K_e とセン断変位振幅の関係



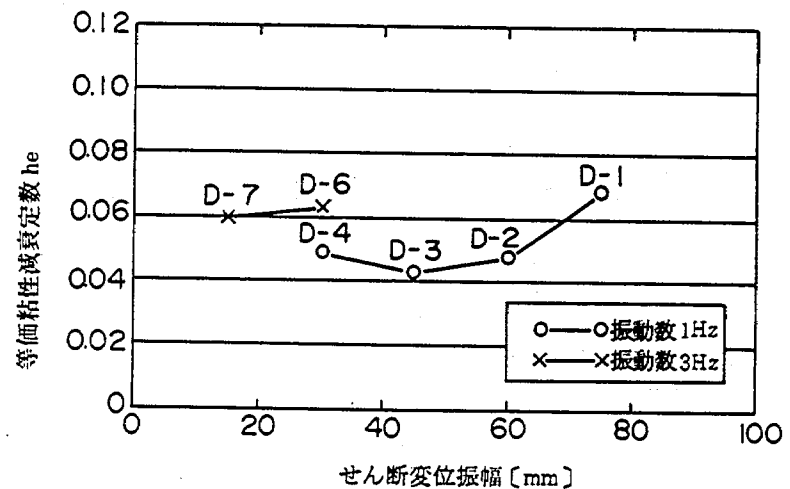
(1) 供試体 H



(2) 供試体 F

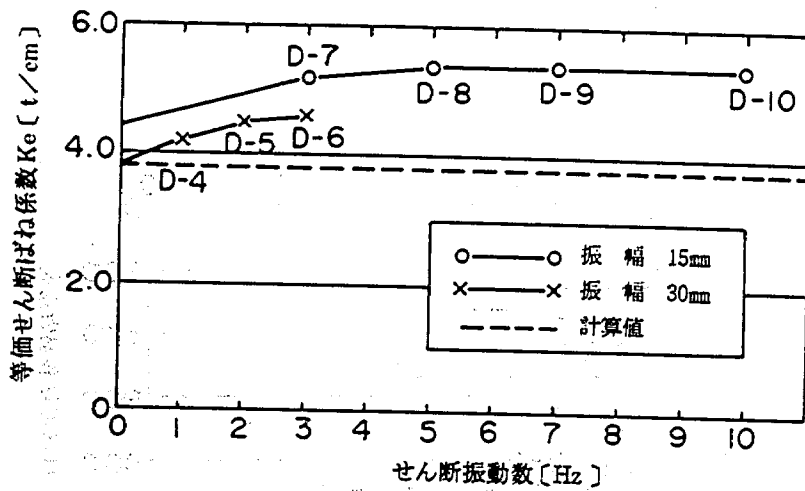


(3) 供試体 D

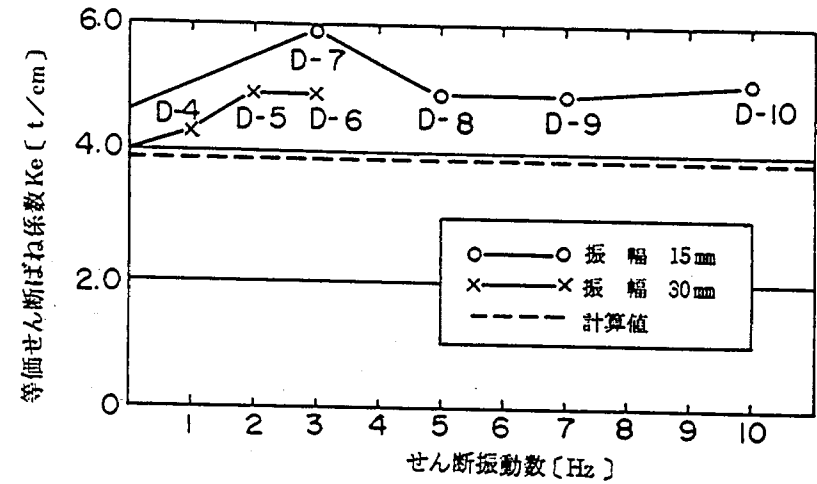


(4) 供試体 R

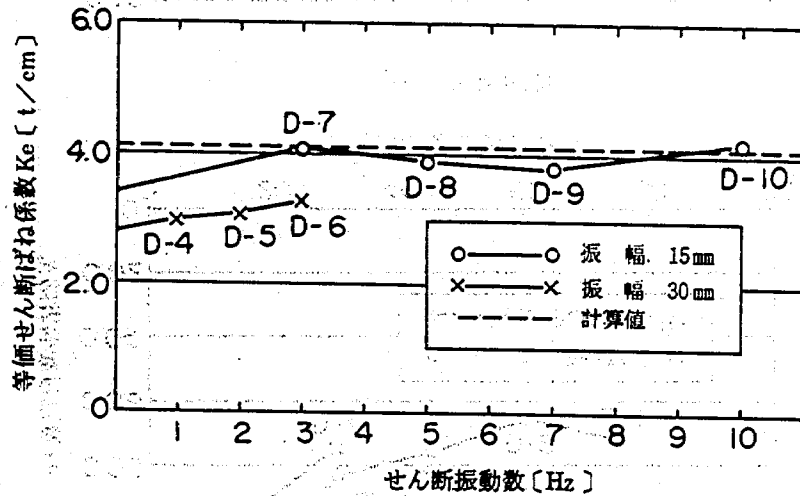
図 5 - 9 等価粘性減衰定数 h_e とせん断変位振幅の関係



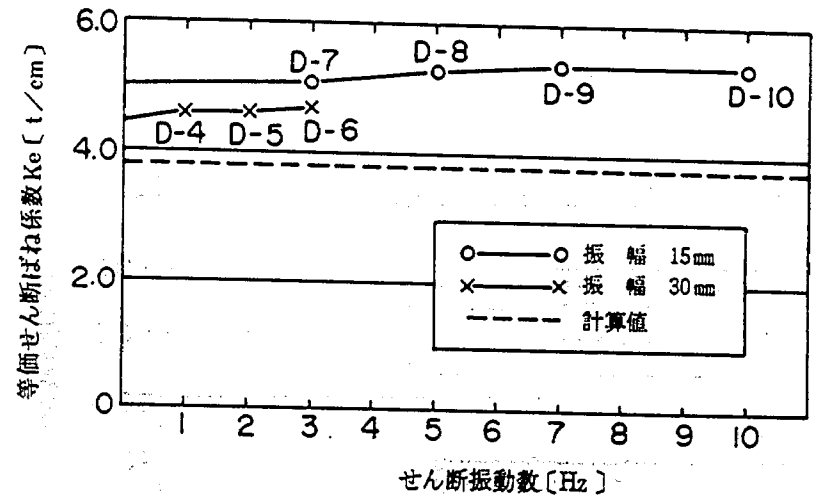
(1) 供試体 H



(2) 供試体 F

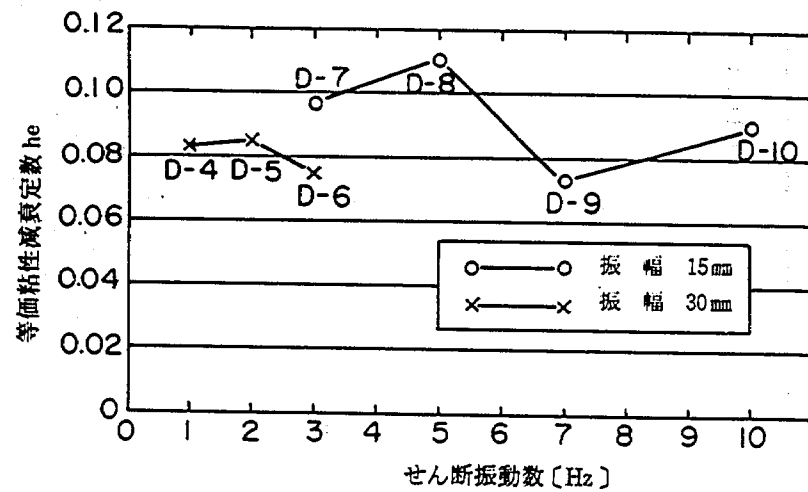


(3) 供試体 D

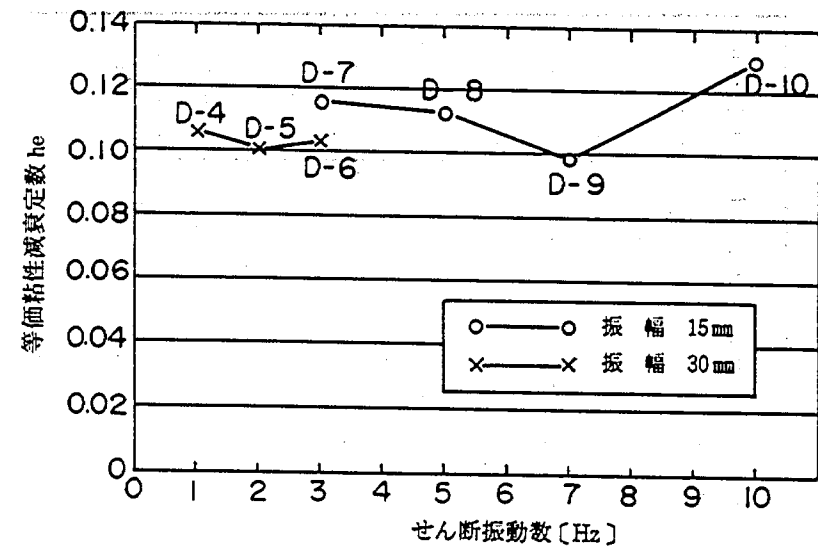


(4) 供試体 R

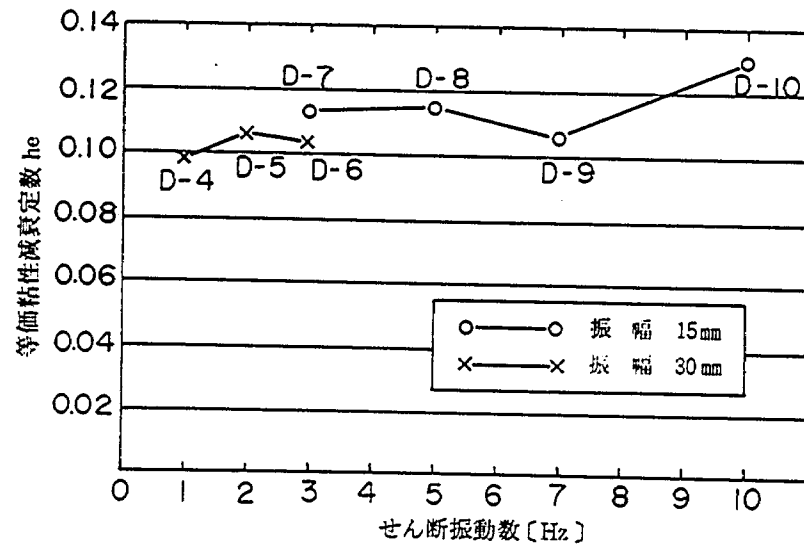
図 5-10 等価せん断ばね係数 K_e とせん断振動数の関係



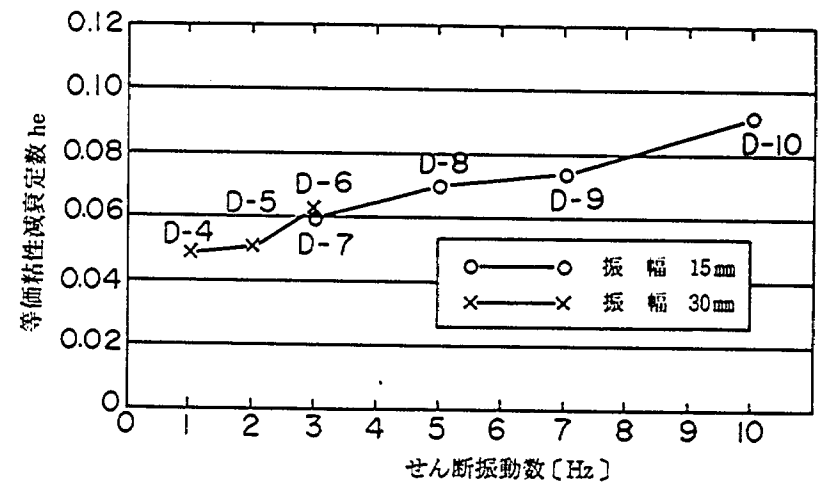
(1) 供試体 H



(2) 供試体 F



(3) 供試体 D



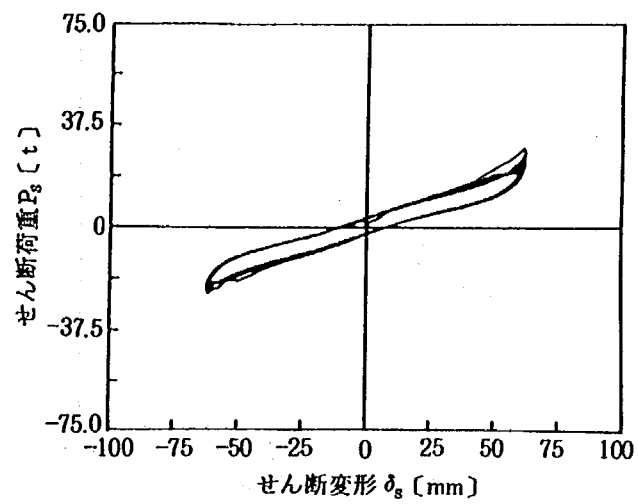
(4) 供試体 R

図 5 - 11 等価粘性減衰定数 h_e とせん断振動数の関係

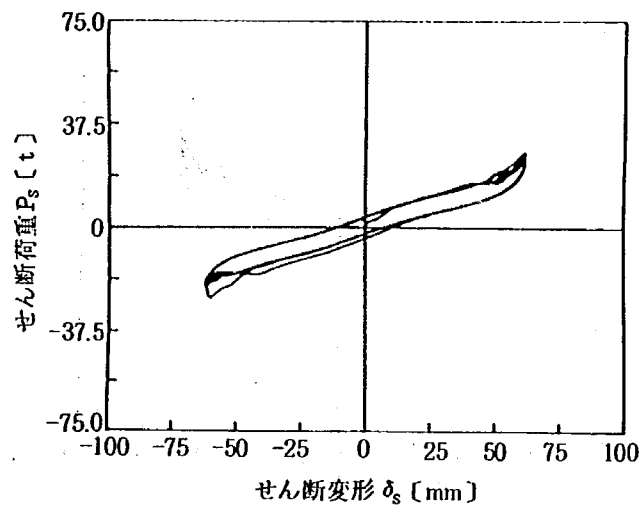
表 5 - 3 供試体の温度変化

ケース	せん断振動数 [Hz]	せん断変位振幅 [mm]	供試体H	供試体F	供試体D	供試体R
D-1	1	75	-	+8	+2	+2
D-2	1	60	+2	+4	+1	+2
D-3	1	45	+2	+3	+1	+1
D-4	1	30	-	+2	-	-
D-5	2	30	+2	+3	+2	+2
D-6	3	30	+3	+4	+1	+1
D-7	3	15	+1	+2	+1	0
D-8	5	15	+1	+1	0	0
D-9	7	15	+1	+1	+1	+1
D-10	10	15	+1	+2	+1	+1

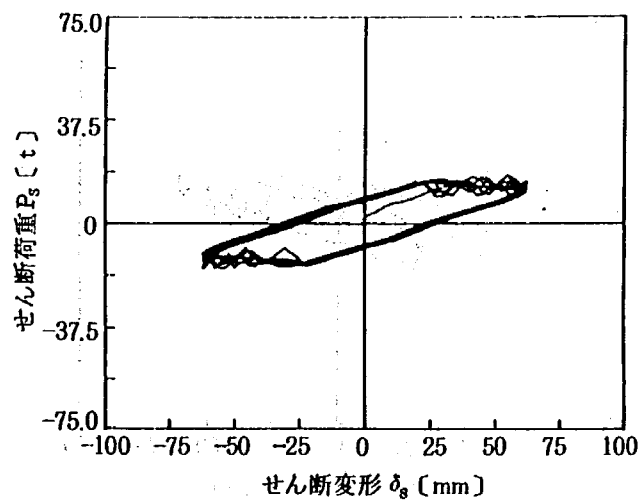
(単位:℃)



(1) ケース D-11 (圧縮荷重 80 t)

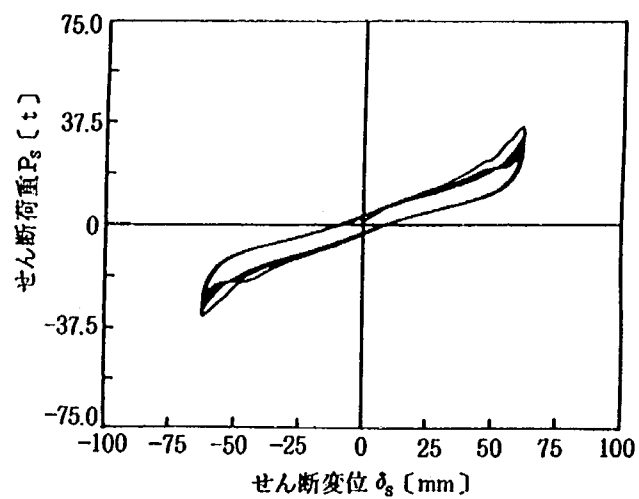


(2) ケース D-12 (圧縮荷重 52 t)

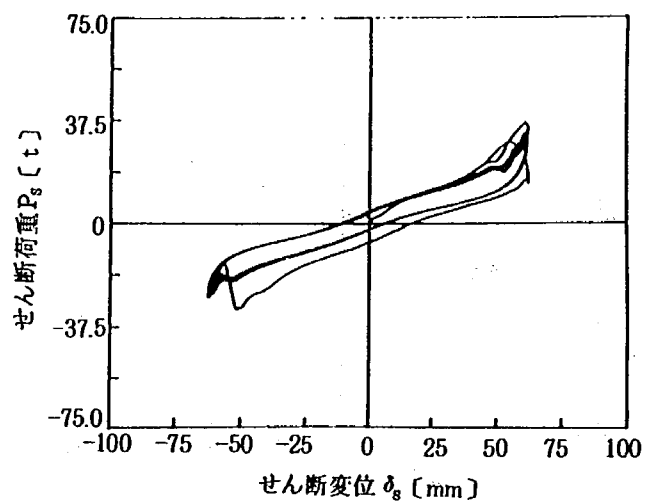


(3) ケース D-13 (圧縮荷重 24 t)

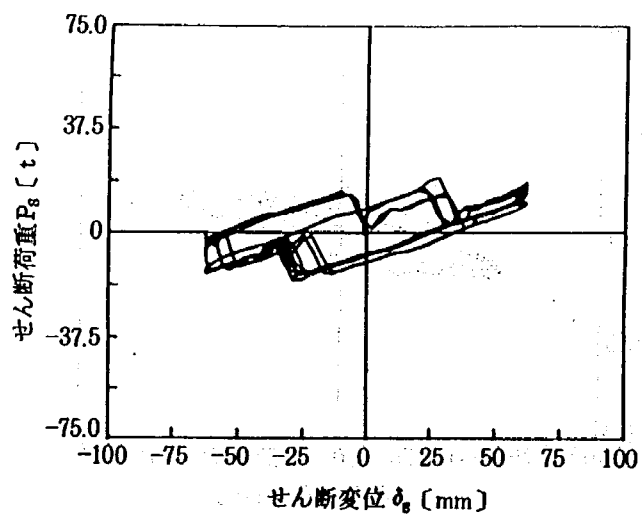
図 5-12 供試体 H の履歴曲線



(1) ケース D-11 (圧縮荷重 80 t)

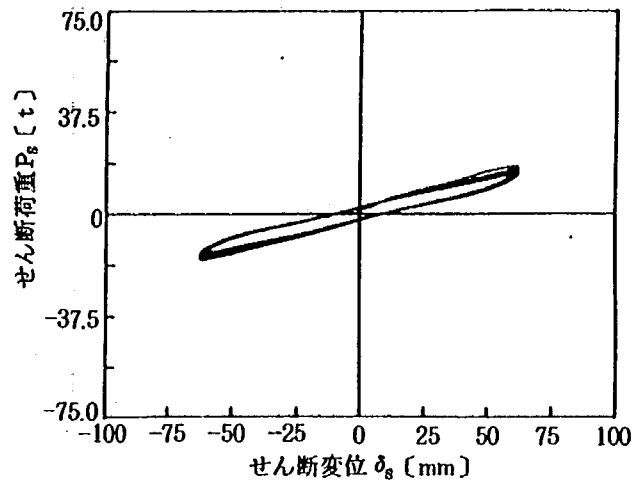


(2) ケース D-12 (圧縮荷重 52 t)

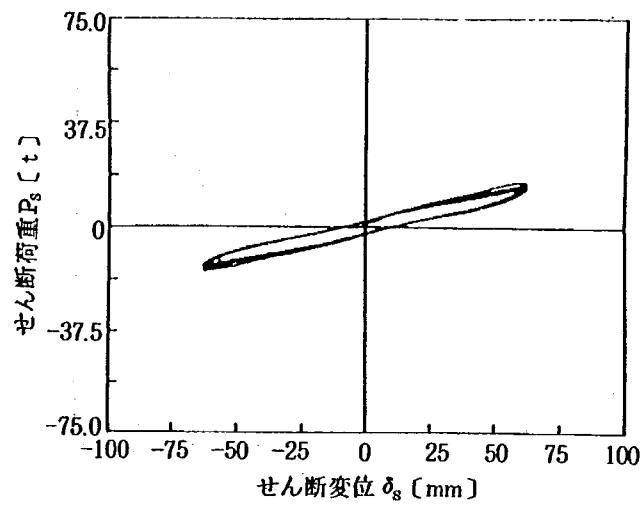


(3) ケース D-13 (圧縮荷重 24 t)

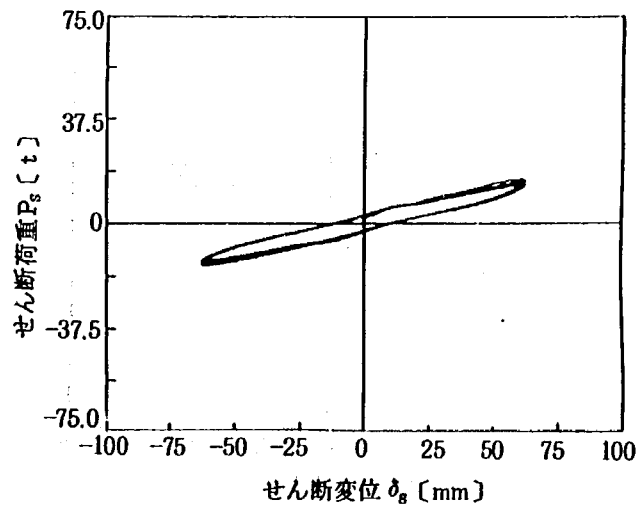
図 5-13 供試体 F の履歴曲線



(1) ケース D-11 (圧縮荷重 80 t)

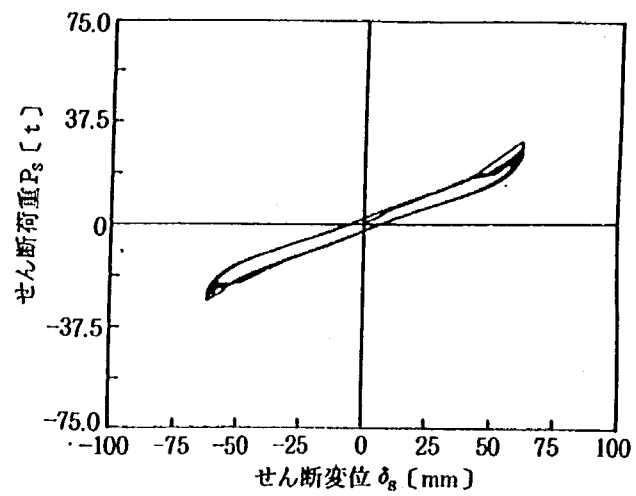


(2) ケース D-12 (圧縮荷重 52 t)

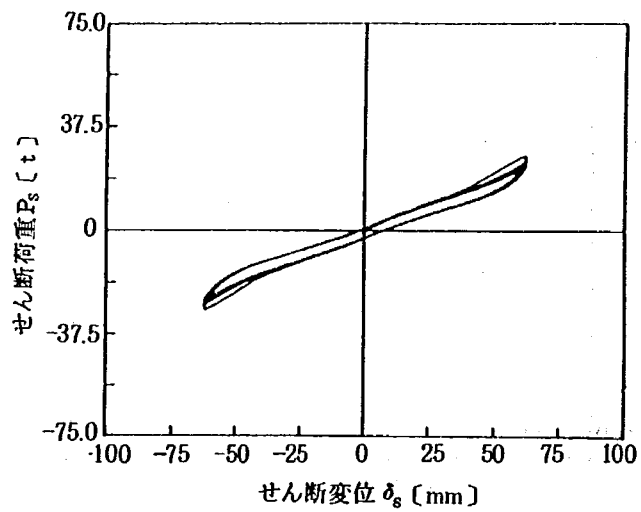


(3) ケース D-13 (圧縮荷重 24 t)

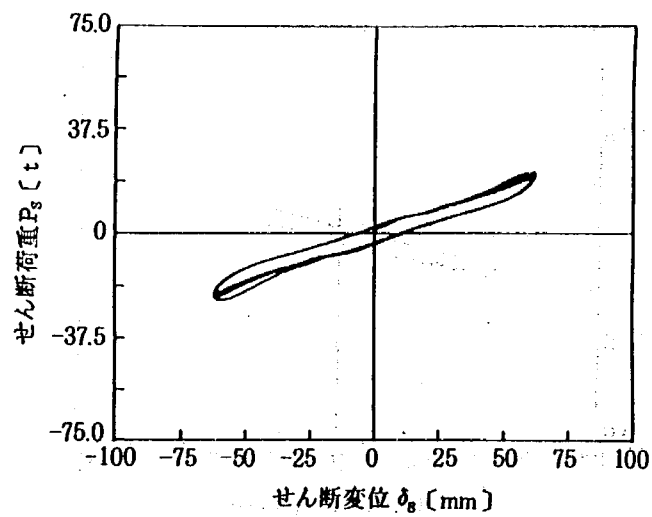
図 5-14 供試体 D の履歴曲線



(1) ケース D-11 (圧縮荷重 80 t)



(2) ケース D-12 (圧縮荷重 52 t)



(3) ケース D-13 (圧縮荷重 24 t)

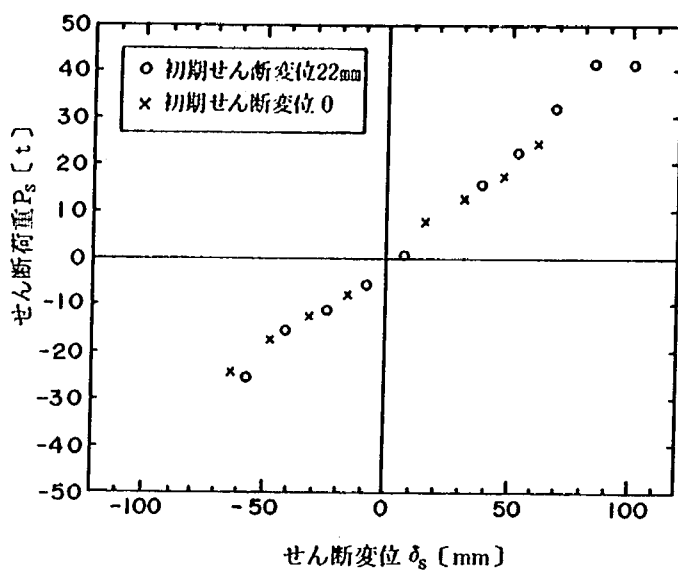
図 5-15 供試体 R の履歴曲線

表 5 - 3 ゴム支承の静摩擦係数（動的せん断実験）

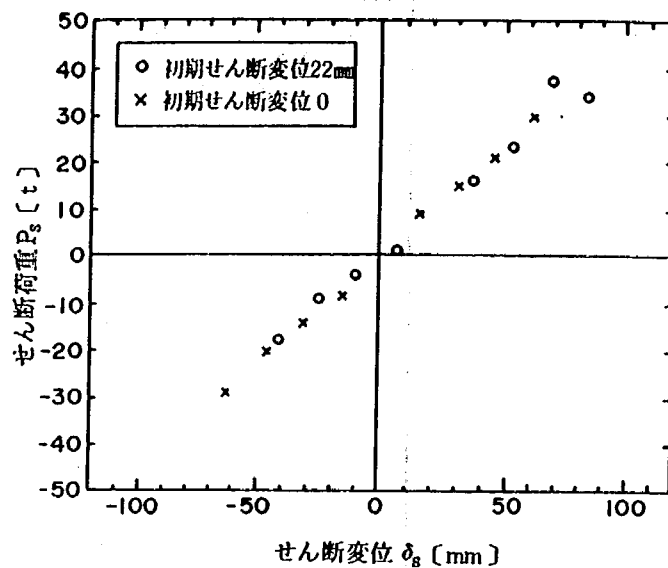
供試体種類	圧縮荷重 P_c [t]	滑動発生時の せん断荷重 P_s [t]	摩擦係数 $\mu = P_s / P_c$
供試体 H	24	15	0.63
	52	28*	0.54 以上
	80	29*	0.36 以上
供試体 F	24	18	0.75
	52	30	0.58
	80	36*	0.45 以上
供試体 D	24	16*	0.67 以上
	52	16*	0.31 以上
	80	17*	0.21 以上
供試体 R	24	21	0.88
	52	27	0.52
	80	30*	0.38 以上

注 1) 「*」印は滑動が発生しなかったケースであり，最大せん断荷重を示している。

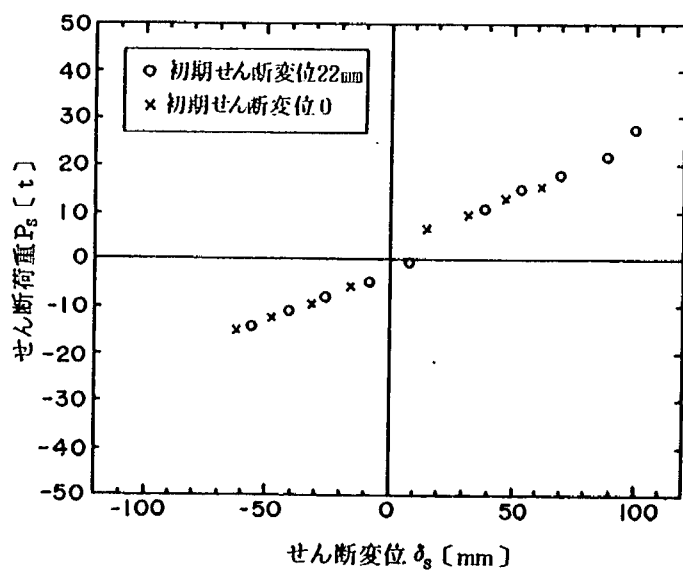
注 2) 供試体 R では滑動発生時のせん断荷重が明確でないので，最大せん断荷重を示している。



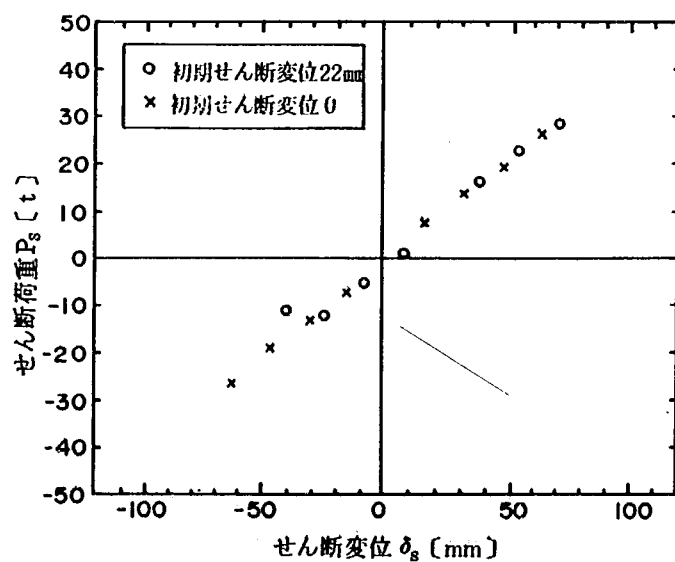
(1) 供試体 H



(2) 供試体 F

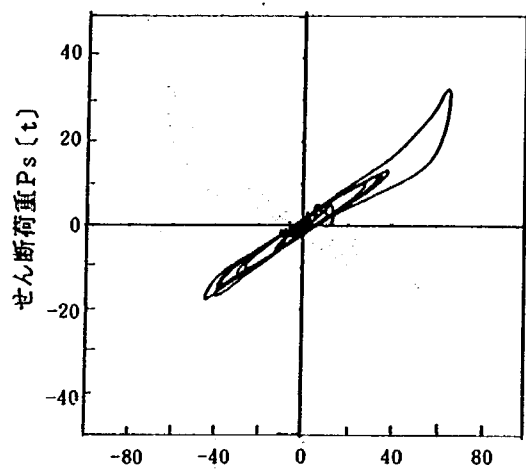


(3) 供試体 D



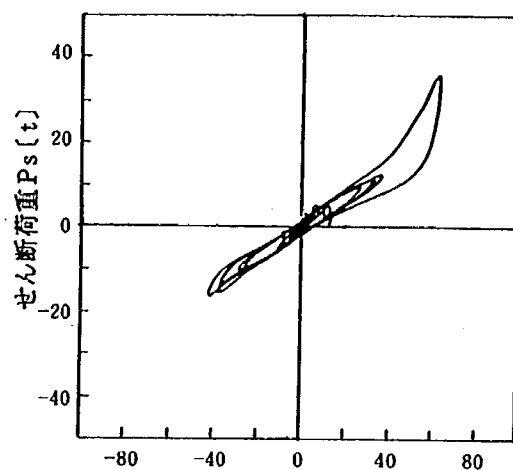
(4) 供試体 R

図 5 - 16 初期せん断変位の影響 (ケース D - 14)



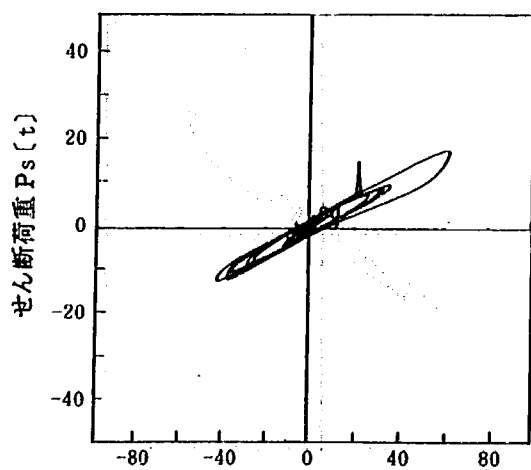
せん断変位 δ_s (mm)

(1) 供試体 H



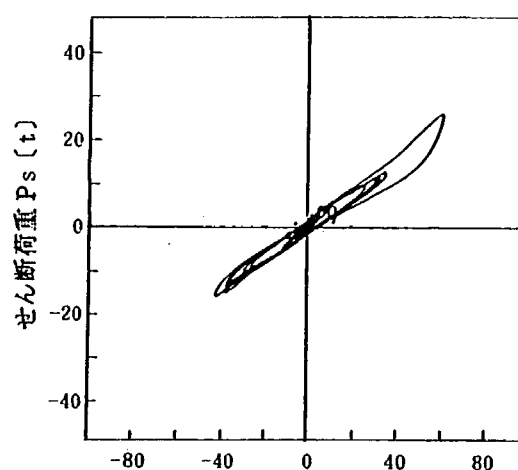
せん断変位 δ_s (mm)

(2) 供試体 F



せん断変位 δ_s (mm)

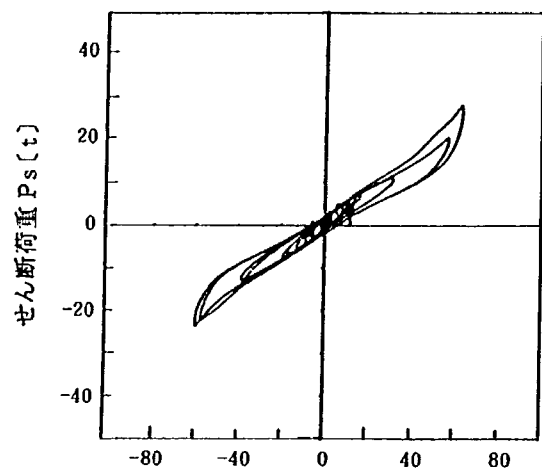
(3) 供試体 D



せん断変位 δ_s (mm)

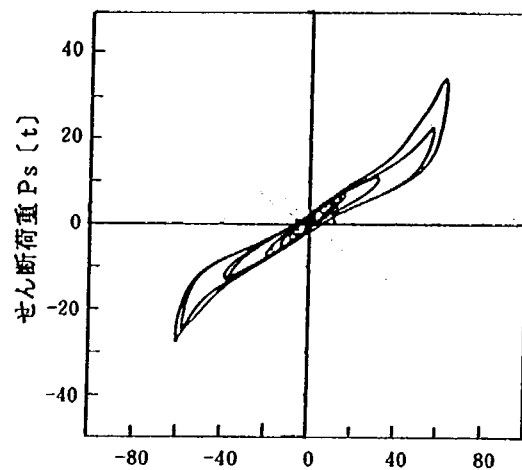
(4) 供試体 R

図 5 - 17 入力波形 A による履歴曲線 (ケース D - 15)



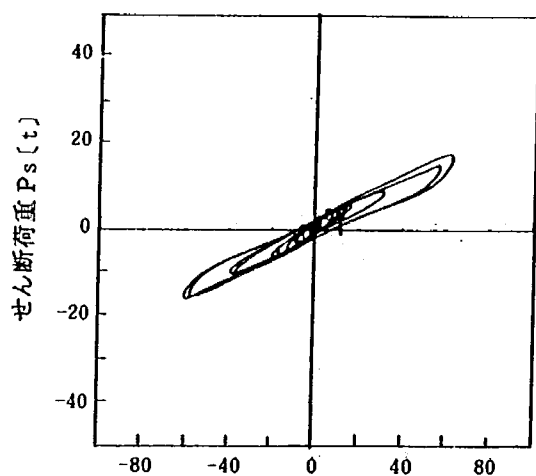
せん断変位 δ_s (mm)

(1) 供試体 H



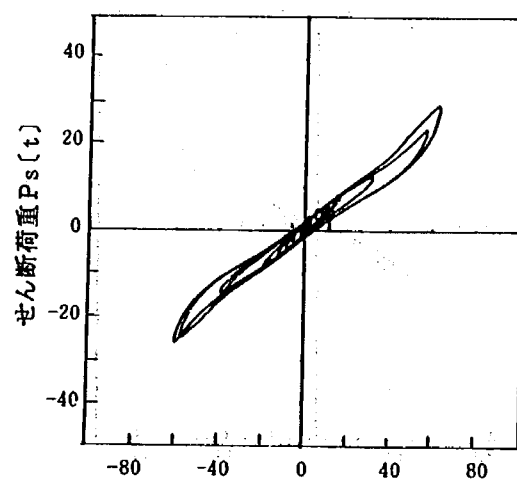
せん断変位 δ_s (mm)

(2) 供試体 F



せん断変位 δ_s (mm)

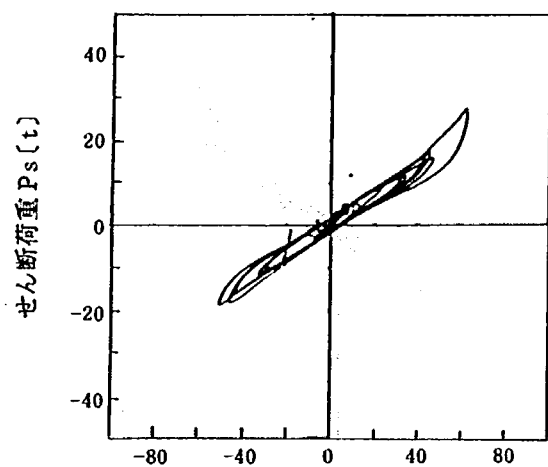
(3) 供試体 D



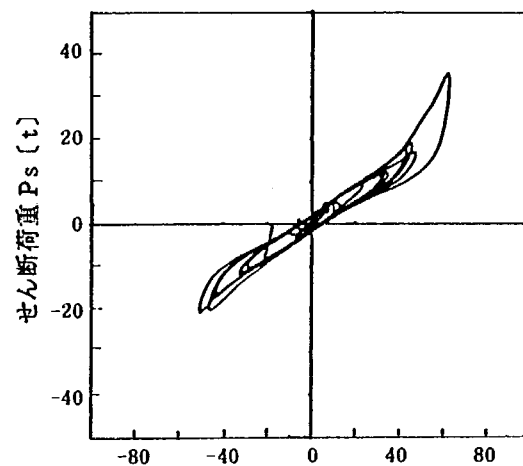
せん断変位 δ_s (mm)

(4) 供試体 R

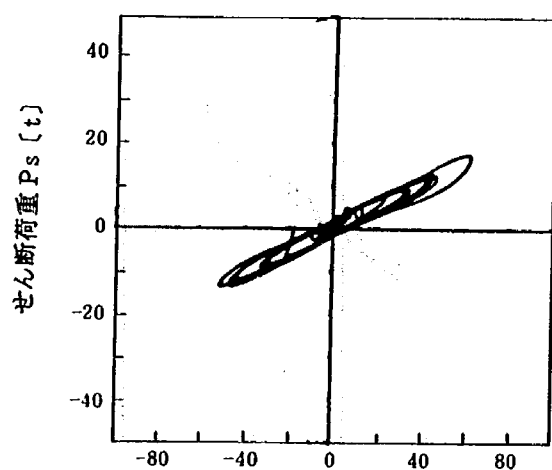
図 5-18 入力波形 B による履歴曲線 (ケース D-16)



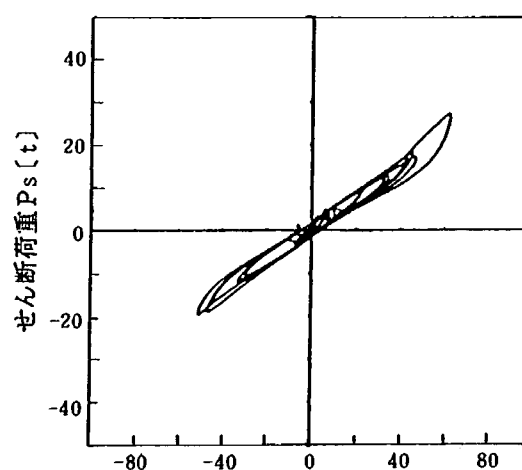
せん断変位 δ_s (mm)
(1) 供試体 H



せん断変位 δ_s (mm)
(2) 供試体 F

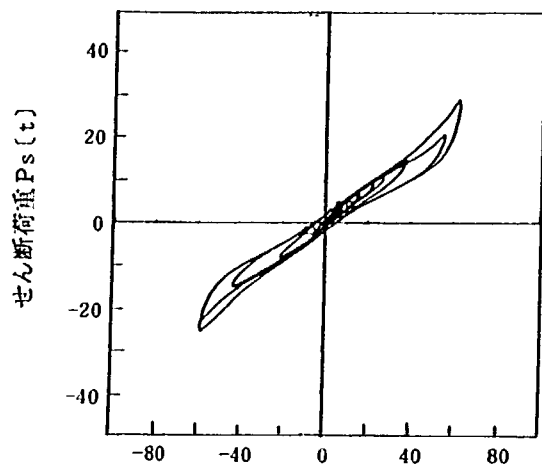


せん断変位 δ_s (mm)
(3) 供試体 D

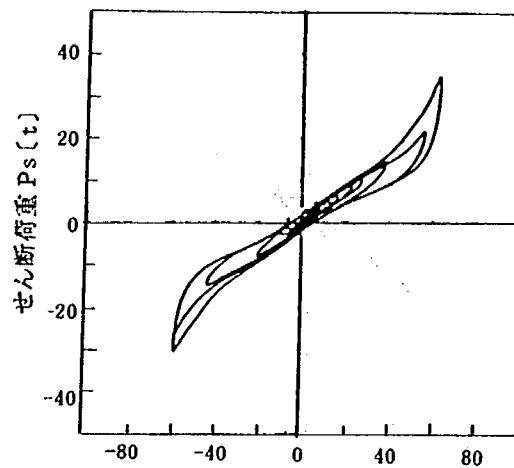


せん断変位 δ_s (mm)
(4) 供試体 R

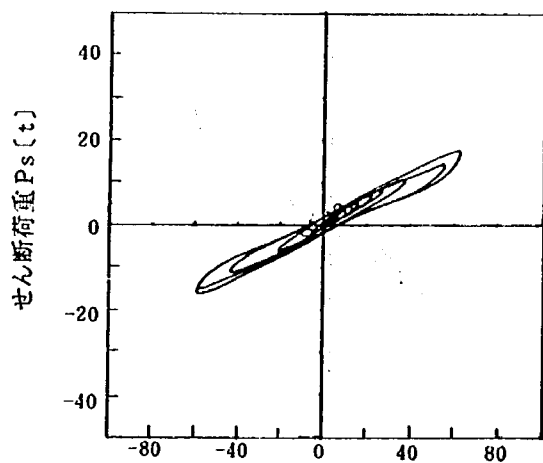
図 5-19 入力波形 O による履歴曲線 (ケース D-17)



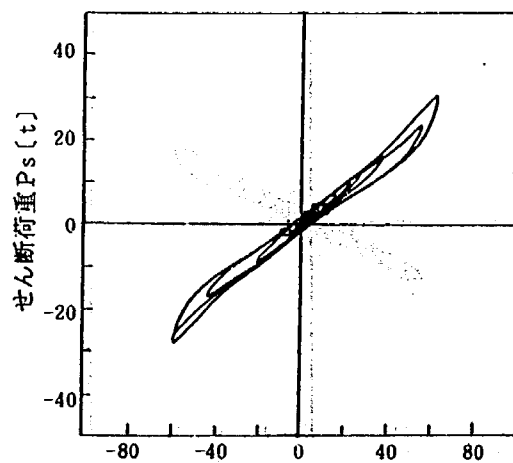
せん断変位 δ_s (mm)
(1) 供試体 H



せん断変位 δ_s (mm)
(2) 供試体 F



せん断変位 δ_s (mm)
(3) 供試体 D



せん断変位 δ_s (mm)
(4) 供試体 R

図 5 - 20 入力波形 D による履歴曲線 (ケース D - 18)

6. ま と め

実橋に使用されているゴム支承が地震時に示す挙動を把握することを目的として、実物大のゴム支承を用いた一定圧縮荷重下における静的および動的せん断実験を行い、ゴム支承の動的繰返しせん断特性を検討した。本実験に用いたゴム支承は表 3-1 に示した 4 種類（供試体 H, F, D, R）であるが、これらについて本検討を通して得られた結果をまとめると、以下の通りとなる。

1) 供試体 H, F, R においては、履歴曲線は基本的に図 5-2 に示すような特性を有する。これらの供試体では、せん断変位の増加とともにゴム支承の等価せん断ばね係数は増加する（ひずみ硬化）。このような傾向は、静的および動的（ただし、振動数 10Hz まで）のいずれにおいても基本的に大きな変化はない。これに対して、供試体 D においては、履歴曲線の形状は過去の履歴によって上記供試体 H, F, R ほど大きく変わらない。また、供試体 D では、せん断変位の増加とともにゴム支承の等価せん断ばね係数は減少する。このような傾向は、静的および動的（ただし、振動数 10Hz まで）のいずれにおいても基本的に大きな変化はない。

2) 供試体 H, F, R については、せん断変位が 50 mm 以下の範囲では静的な等価せん断ばね定数は式 (3・2) による推定値と比較的良く一致する。ただし、せん断変位が 50 mm を超えると上述した 1) のひずみ硬化の影響により、静的な等価せん断ばね定数は式 (3・2) による推定値よりも大きくなる。一方、供試体 D については、ゴム支承の上下面にあるなじみ層の影響により、静的な等価せん断ばね定数は式 (3・2) による推定値よりもかなり小さな値をとる。

3) 動的せん断実験により得られるせん断荷重～せん断変位の履歴曲線は、供試体 H, F, R の場合には、せん断変位が小さい間は紡錘形となるが、せん断変位が大きくなるとともに逆 S 字形に移行する。これに対して、供試体 D の場合にはせん断荷重～せん断変位の履歴曲線はせん断変形によらず紡錘形を示す。これに伴ない、動的な等価せん断ばね係数 Ke^D および等価粘性減衰定数 he^D は、i) 供試体 H では Ke^D はせん断変位振幅が約 50 mm 以下ではせん断変位振幅が大きくなるとともに低下するが、せん断変位振幅が約 50 mm 以上となると再び増加する。 he^D はせん断変位振幅が大きくなるとともに低下するが、40 mm のせん断変位振幅に対しておおむね 0.08 程度の値をとる、ii) 供試体 F では Ke^D , he^D ともに供試体 H と同様の傾向を示すが、 he^D の値自身は供試体 H の場合よりやや大きい、iii) 供試体 D では、 Ke^D , he^D ともにせん断変位振幅が大きくなるとともに増大する。ただし、 Ke^D の値自身は他の供試体より小さいが、これは上記 2) に示したなじみ層のためである、iv) 供試体 R ではせん断変位振幅が大きくなると Ke^D は低下するが、 he^D は反対に増加する。ただし、 he^D の値自身は他の供試体に比較して相対的に小さく、40 mm のせん断変位振幅に対しておおむね 0.05 程度の値をとる。

4) 動的な等価せん断ばね係数 Ke^D を静的な等価せん断ばね係数 Ke^S と比較すると、i) 供試体 H の場合には、載荷振動数が増加するとともに Ke^D は Ke^S よりも大きくなり、振動数 10 Hz で

は Ke^D は Ke^E の 23% 増し程度の値をとる、ii) 供試体 F および D の場合にも、載荷振動数が増加するとともに Ke^D は Ke^E よりもやや大きくなる傾向が認められるが、供試体 H 程著しいものではない、iii) 供試体 R の場合には、載荷振動数によらず、 $Ke^D \simeq Ke^E$ となっている。

5) 80t の圧縮荷重下で振幅 22mm、振動数 0.5Hz 動的繰返しせん断を 14,400 回加えた疲労試験の結果、供試体 H および F ではゴム層と中間の鋼板が分離するのが認められたが、供試体 D および R では外観上顕著な変状を生じなかった。また、供試体 H、F、D においては、動的繰返しせん断疲労実験の前および後に実施した静的実験（圧縮荷重 80t）による等価せん断ばね係数には著しい変化は見られなかったが、供試体 R の場合には、動的繰返しせん断疲労実験の前に比較して実験の後では等価せん断ばね係数が低下した。

6) ゴム支承を上下の載荷板に接着しない場合には、静的実験、動的実験を問わず、両者の間に滑りが生じる場合がある。滑動の起こり方にも供試体により違いがあり、供試体 F では比較的是っきりと滑りが生じるのに対して、供試体 R は滑らかに滑る。さらに、ゴム支承を載荷板に接着していない場合には、せん断力を加えることにより、載荷方向の支承の端部に反り上りが生じる。

謝

辞

本実験は、昭和58年度および昭和59年度の2ヶ年にわたり、阪神高速道路公団より「北神戸線P C高架橋ゴム支承の耐震性に関する調査」として土木研究所が受託して行ったものである。実験に際しては阪神高速道路公団の御関係の皆様に変にお世話になりました。ここに示して厚くお礼申し上げる次第です。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋支承便覧，昭和48年4月
- 2) Megget, L. M: The Design and Construction of A Base-isolated Concrete Frame Building in Wellington, New Zeland, Proc of 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, CA, U.C.A., 1984.
- 3) Kelly, T.E., Jones L.R. and Mayes, R.D: Seismic Retrofit of Bridges Utilizing Ductile Base Isolation Concepts, Proc of 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, CA., U.S.A., 1984.

付 属 資 料

1. 鉛ゴム支承の動的せん断実験
2. 等価せん断ばね係数および等価粘性減衰定数
3. 研 究 体 制

THE HISTORY OF THE

AMERICAN PEOPLE

FROM THE FIRST SETTLEMENTS TO THE PRESENT

BY

付属資料 1. 鉛ゴム支承の動的せん断実験

図付-1 および写真付-1 は、実験に用いた鉛ゴム支承の寸法および外観を示したものである。ゴム材料としては、天然ゴム（せん断弾性率 $G = 6.6 \text{ kg/cm}^2$ ）が使用されている。このゴム支承の特徴は、支承中心部に鉛の円柱（直径 50 mm）が入っていることである。このゴム支承にせん断変形を加えると、鉛円柱が塑性変形を起し、比較的大きな履歴減衰効果を持つとされている。

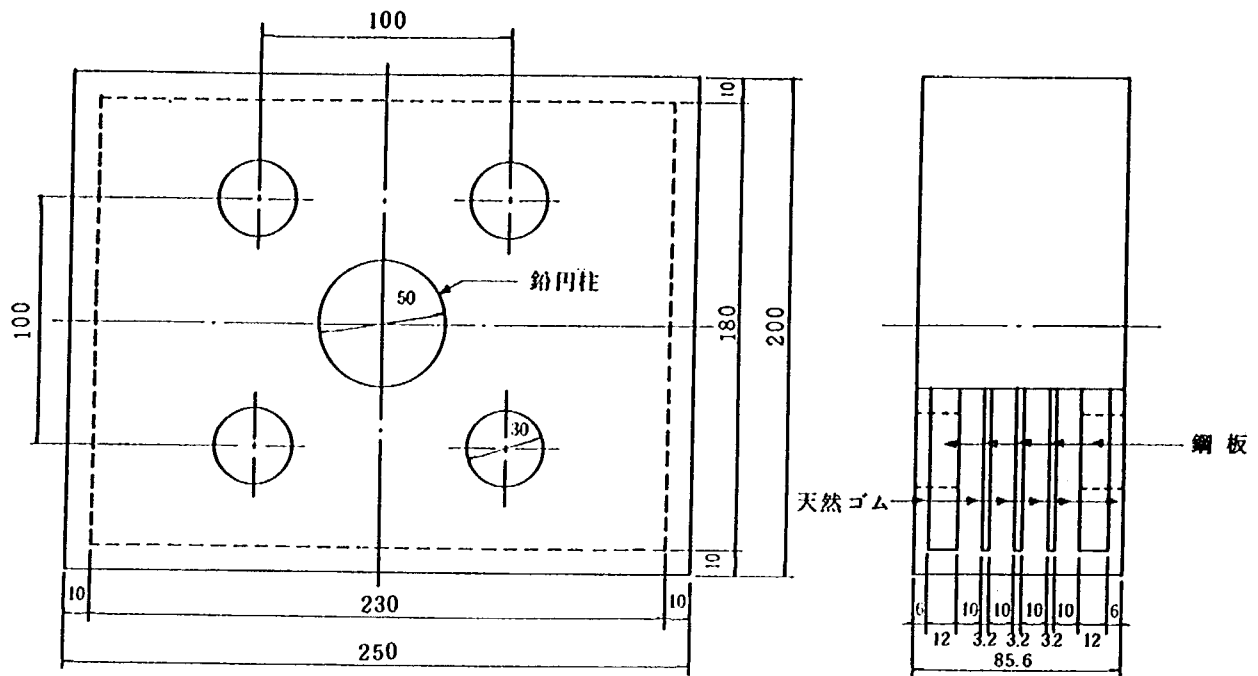
20t の一定圧縮荷重下で図付-2 に示すように 2 種類の地震応答波形を用いて動的せん断実験を行った。ここで、図付-2 の波形は図付-3 に示すように上部構造-ゴム支承系を一質点系にモデル化し、本文中の図 4-6 に示した 2 種類の入力地震波を作用させた場合にゴム支承に生じる応答変位波形である。ただし、ゴム支承に作用させる最大せん断変位は、波形 A および波形 B に対してそれぞれ 60 mm および 30 mm とした。図付-4 は、この実験から得られたせん断変位～せん断荷重の履歴曲線を示したものである。なお、この実験では鉛部の塑性変形によりエネルギーが吸収されるために、鉛部を含めた支承全体の温度が上がる。

本実験では地震波形を入力としたために、本文中の式（5・1）により等価減衰定数を求めることができない。このため、履歴曲線のかこむ範囲から以下のようにして等価減衰定数を近似的にまとめることとした。

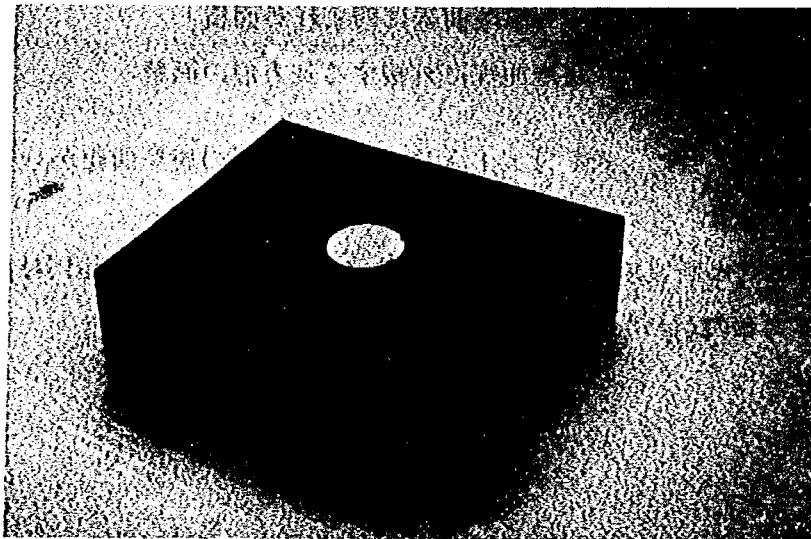
$$h_e = \frac{2}{\pi} \frac{\text{履歴曲線に囲まれる面積}}{\text{履歴曲線に外接する長方形の面積}} \dots\dots\dots (\text{付} \cdot 1)$$

地震波形を入力した場合に、式（付・1）により最も外側の履歴曲線から等価粘性減衰定数を求めると、0.26 となる。

写真付-2 は動的せん断実験後の鉛ゴム支承を示したものである。鉛円柱が繰り返し、塑性変形により変状しているのがわかる。

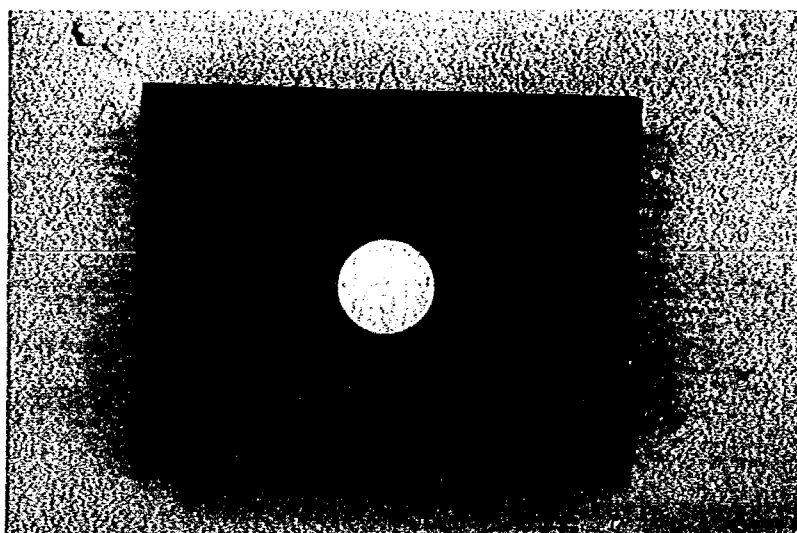


図付－１ 鉛ゴム支承の寸法

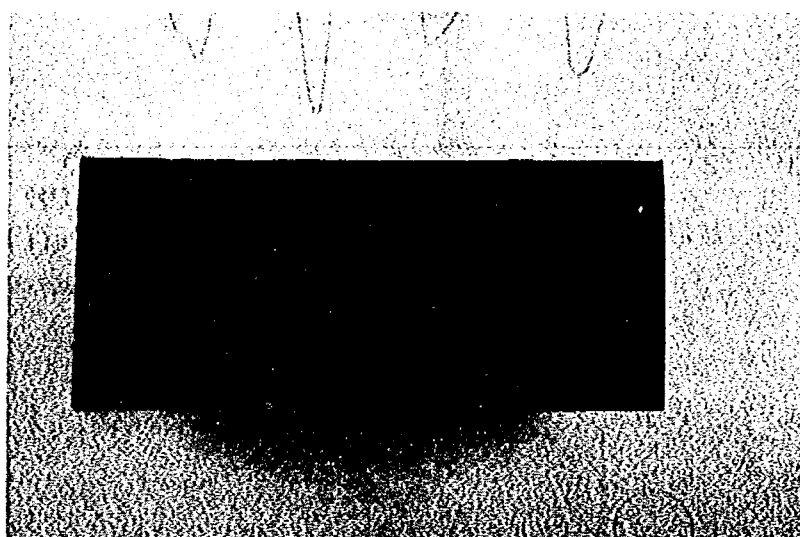


(I) 鉛ゴム支承の全景（中央の白い部分が鉛円柱）

写真付－１ 鉛ゴム支承の外観

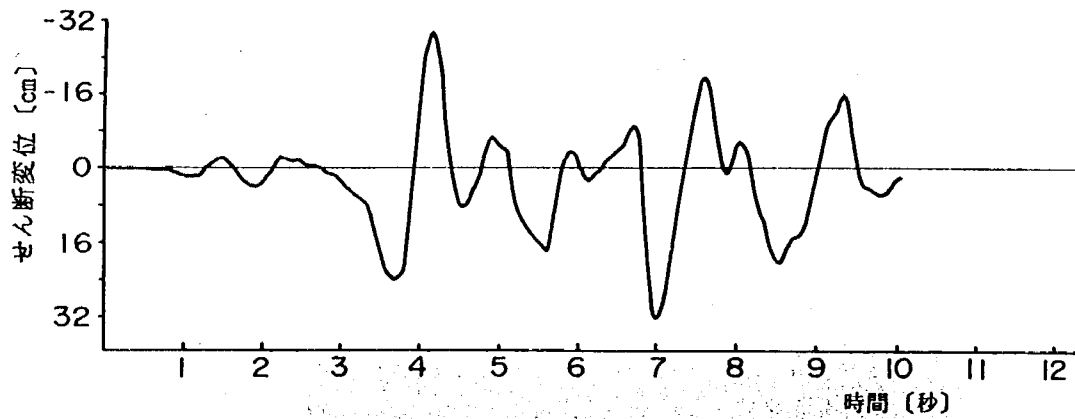
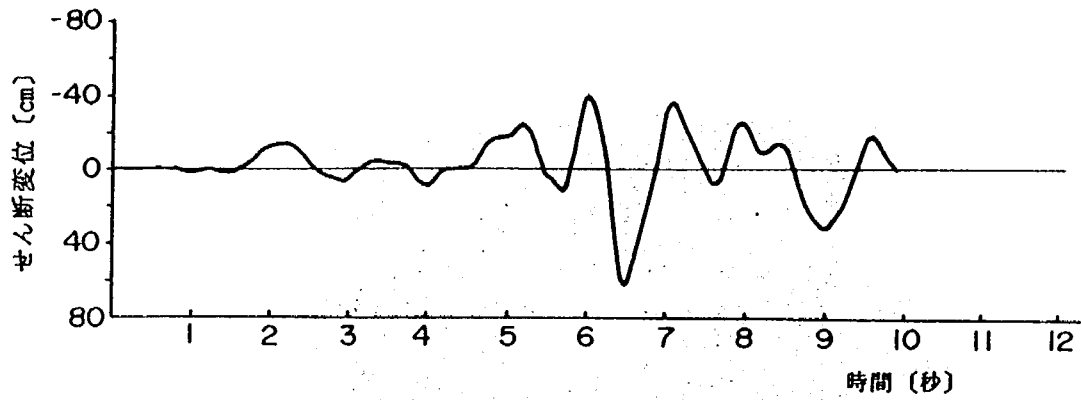


(2) 鉛ゴム支承の上下面（中央の白い部分が鉛円柱）

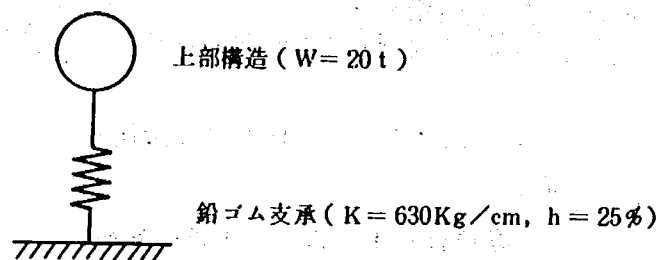


(3) 鉛ゴム支承の側面（短辺側）

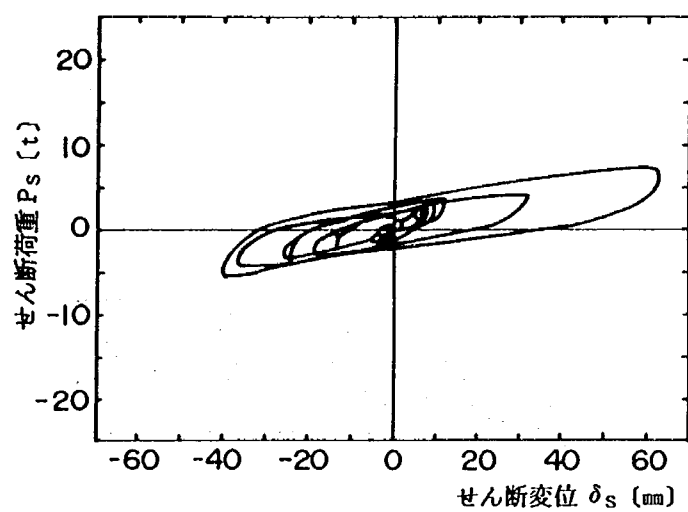
写真付－1 鉛ゴム支承の外観



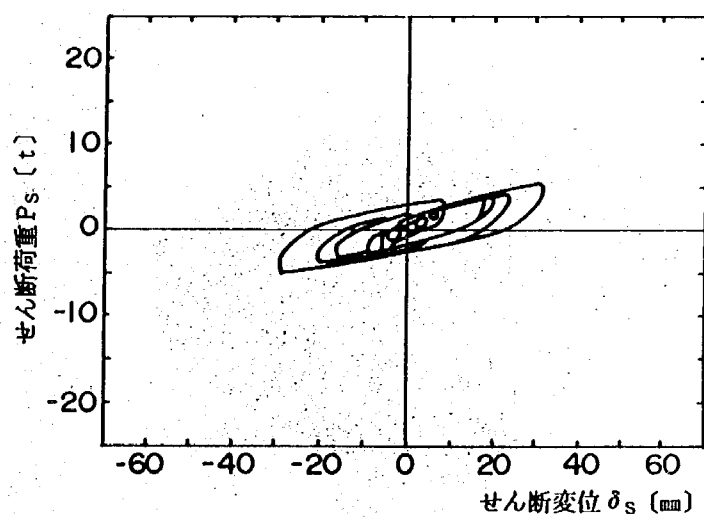
図付-2 せん断変位履歴



図付-3 構造物モデル

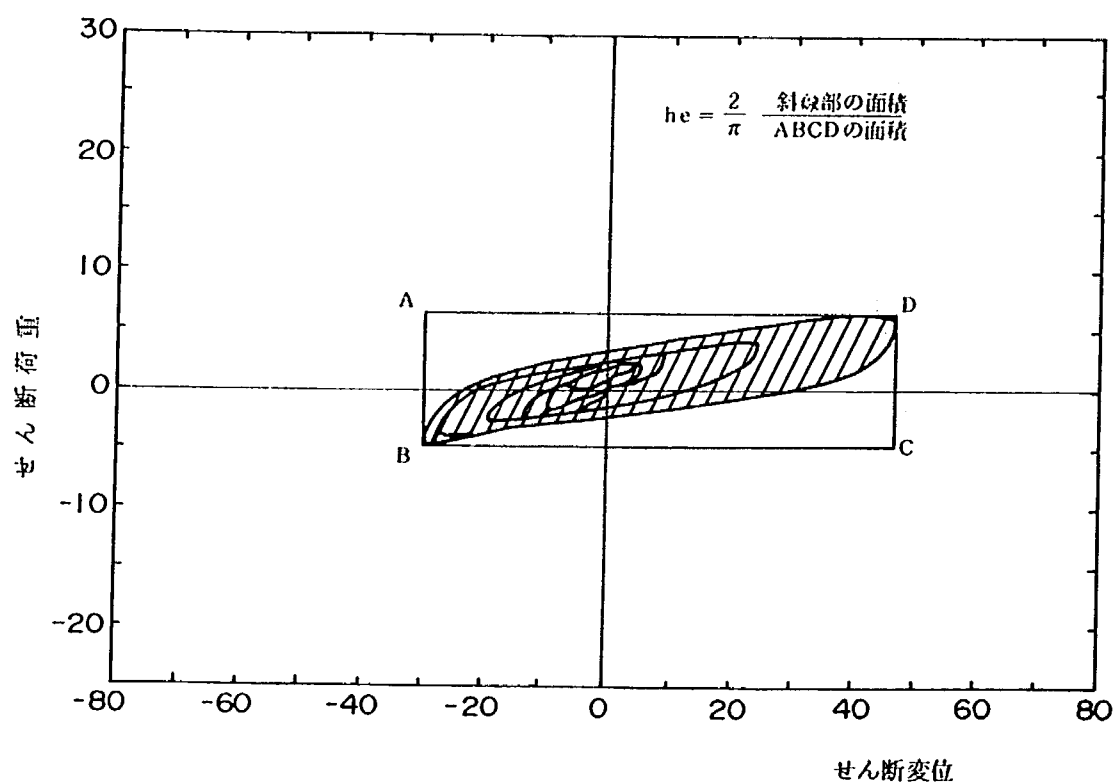


(1) 入力波形 A

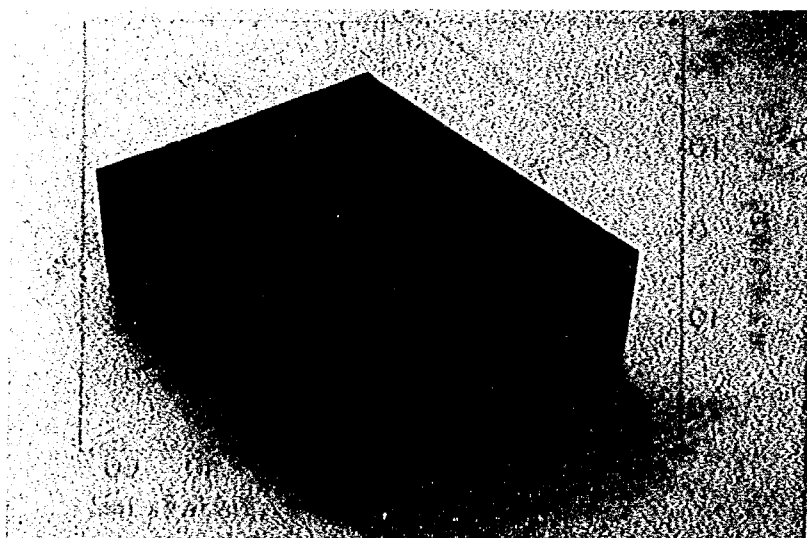


(2) 入力波形 B

図付-4 履歴曲線



図付－5 等価粘性減衰定数



写真付－3 実験後の供試体外観

付属資料 2. 等価せん断ばね係数および等価粘性減衰定数

表付-1は、静的せん断実験（ケース S-1～S-6）から得られた最大せん断荷重 $P_{\max}$ ，最大せん断変位 $\delta_{\max}$ および等価せん断ばね係数をまとめて示したものである。表付-2は、動的せん断実験（ケース D-1～ケース D-11）から得られた最大せん断荷重 $P_{\max}$ ，最大せん断変位 $\delta_{\max}$ ，等価せん断ばね係数 K_e および等価粘性減衰定数 h_e をまとめて示したものである。

表付一 1 静的せん断実験結果

(1) 供試体 II

実験ケース		圧縮荷重 (t)	目標せん断変位注1) (mm)	最大せん断荷重 Pmax (t)	最大せん断変位注1) δmax (mm)	等価せん断ばね係数 Ke (t/mm)
S-1	接	80	15	6.8	14.87	0.457
			30	12.2	30.10	0.405
			45	18.1	45.34	0.399
			60	26.4	60.35	0.437
			75	35.9	75.15	0.478
S-3	着	52	15	6.7	15.38	0.436
			30	11.9	31.20	0.381
			45	17.7	46.88	0.378
			60	26.1	61.96	0.421
			75	35.9	77.78	0.462
S-5	着	24	15	7.4	15.97	0.463
			30	12.9	31.42	0.411
			45	19.2	46.80	0.410
			60	26.1	62.55	0.417
			75	35.8	77.86	0.460
S-2	未	80	15	6.8	15.45	0.440
			30	11.8	31.13	0.379
			45	17.4	46.66	0.373
			60	26.0	62.11	0.419
			75			
S-4	接	52	15	7.0	15.89	0.441
			30	11.8	31.42	0.376
			45	16.7	47.24	0.354
			60	24.8	62.77	0.395
			75			
S-6	着	24	15	7.3	15.60	0.468
			30	11.7	31.42	0.372
			45	14.0	47.31	0.296
			60	16.1	63.06	0.255
			75			

注1) 目標としたせん断変位に対して、実際に供試体に生じた最大せん断変位

表付-1 静的せん断実験結果

(2) 供試体 F

実験ケース		圧縮荷重 (t)	目標せん断変位注1) (mm)	最大せん断荷重 Pmax (t)	最大せん断変位注1) δ_{max} (mm)	等価せん断ばね係数 Ke (t/mm)
S-1	接	80	15	7.0	14.94	0.469
			30	13.3	30.32	0.439
			45	21.6	45.34	0.476
			60	34.5	60.35	0.572
			75	48.3	74.93	0.645
S-3	着	52	15	7.0	15.09	0.464
			30	13.1	30.69	0.427
			45	21.7	46.66	0.465
			60	32.5	62.04	0.524
			75	51.7	76.90	0.672
S-5	着	24	15	7.1	15.16	0.468
			30	12.7	31.13	0.408
			45	19.9	47.09	0.423
			60	33.3	62.26	0.535
			75	51.0	77.49	0.658
S-2	未	80	15	7.2	15.82	0.455
			30	12.7	31.57	0.402
			45	20.7	47.17	0.439
			60	29.3	62.48	0.469
			75			
S-4	接	52	15	7.0	15.67	0.447
			30	12.3	31.35	0.392
			45	19.2	47.17	0.407
			60	27.5	62.84	0.438
			75			
S-6	着	24	15	6.7	15.38	0.436
			30	11.7	31.05	0.377
			45	16.6	47.31	0.351
			60	17.5	62.92	0.278
			75	14.5	78.66	0.184

注1) 目標としたせん断変位に対して、実際に供試体に生じた最大せん断変位

表付一 1 静的せん断実験結果

(3) 供試体 D

実験ケース		圧縮荷重 (t)	目標せん断変位 ^{注1)} (mm)	最大せん断荷重 Pmax (t)	最大せん断変位 ^{注1)} δ_{max} (mm)	等価せん断ばね係数 Ke (t/mm)
S-1	接	80	15	5.1	15.16	0.336
			30	8.5	30.32	0.280
			45	12.0	45.92	0.261
			60	15.3	61.16	0.250
			75	18.7	76.25	0.245
S-3	着	52	15	5.3	15.09	0.351
			30	8.6	30.54	0.282
			45	11.8	47.39	0.249
			60	15.0	62.84	0.239
			75	17.9	78.52	0.228
S-5	着	24	15	5.3	15.82	0.335
			30	8.8	31.71	0.278
			45	12.0	47.75	0.251
			60	14.8	63.28	0.234
			75	17.8	78.96	0.225
S-2	未	80	15	5.2	15.45	0.337
			30	8.7	31.35	0.278
			45	11.7	47.24	0.248
			60	14.6	62.70	0.233
			75	17.9	78.37	0.228
S-4	接	52	15	5.6	15.38	0.364
			30	8.8	31.27	0.281
			45	11.5	46.80	0.246
			60	14.0	62.77	0.223
			75	16.9	78.30	0.216
S-6	着	24	15	4.9	15.53	0.316
			30	7.7	31.42	0.245
			45	10.3	47.09	0.219
			60	12.5	63.21	0.198
			75			

注1) 目標としたせん断変位に対して、実際に供試体に生じた最大せん断変位

表付-1 静的せん断実験結果

(4) 供試体 R

実験ケース		圧縮荷重 (t)	目標せん断変位注1) (mm)	最大せん断荷重 Pmax (t)	最大せん断変位注1) δ_{max} (mm)	等価せん断ばね係数 Ke (t/mm)
S-1	接	80	15	7.5	15.23	0.492
			30	13.7	31.27	0.438
			45	20.9	47.02	0.444
			60	30.7	62.40	0.492
			75	40.6	77.71	0.522
S-3	着	52	15	7.4	15.97	0.463
			30	13.6	31.20	0.436
			45	20.8	47.09	0.442
			60	29.0	62.11	0.467
			75	38.0	77.78	0.489
S-5	着	24	15	6.8	14.79	0.460
			30	12.4	30.91	0.401
			45	19.0	46.00	0.413
			60	25.4	62.11	0.409
			75	34.1	77.12	0.442
S-2	未	80	15	7.9	15.75	0.501
			30	13.8	31.35	0.440
			45	20.6	47.09	0.437
			60	29.3	62.48	0.469
			75	35.3	77.93	0.453
S-4	接	52	15	7.3	15.53	0.470
			30	12.9	31.35	0.411
			45	18.7	46.73	0.400
			60	23.2	62.55	0.370
			75	23.7	78.30	0.303
S-6	着	24	15	7.1	15.31	0.464
			30	12.6	31.35	0.402
			45	17.6	48.05	0.366
			60	19.9	63.21	0.315
			75	19.7	79.39	0.248

注1) 目標としたせん断変位に対して、実際に供試体に生じた最大せん断変位

表付一 2 動的せん断実験結果

(1) 供試体 H

実験ケース	目標せん断振幅 (mm)	振 動 数 (Hz)	最大せん断荷重 Pmax (t)	最大せん断変位 δ_{max} (mm)	等価せん断ばね係数 Ke (t/mm)	等価粘性減衰定数 he
D-1	75	1	34.00	77.62	0.438	0.073
D-2	60	1	27.40	62.04	0.442	0.066
D-3	45	1	18.48	46.50	0.397	0.076
D-4	30	1	13.08	31.10	0.420	0.083
D-5	30	2	13.64	30.30	0.450	0.085
D-6	30	3	13.36	29.25	0.457	0.075
D-7	15	3	7.86	15.21	0.517	0.097
D-8	15	5	7.86	14.68	0.535	0.111
D-9	15	7	7.23	13.54	0.534	0.074
D-10	15	10	5.58	10.34	0.540	0.098
D-11	15	1	7.81	15.48	0.505	0.085
	30	1	12.87	30.87	0.417	0.081
	45	1	17.65	46.38	0.381	0.078
	60	1	24.43	62.15	0.393	0.079

表付一 2 動的せん断実験結果

(2) 供試体 F

実験ケース	目標せん断振幅 (mm)	振 動 数 (Hz)	最大せん断荷重 Pmax (t)	最大せん断変位 δ_{max} (mm)	等価せん断ばね係数 Ke (t/mm)	等価粘性減衰定数 he
D-1	75	1	38.73	77.48	0.500	0.082
D-2	60	1	29.69	61.86	0.480	0.081
D-3	45	1	22.33	46.44	0.481	0.081
D-4	30	1	13.40	31.09	0.431	0.106
D-5	30	2	14.75	30.31	0.486	0.101
D-6	30	3	14.34	29.27	0.490	0.104
D-7	15	3	8.76	14.96	0.586	0.116
D-8	15	5	7.07	14.67	0.482	0.113
D-9	15	7	6.68	13.42	0.498	0.099
D-10	15	10	5.28	10.35	0.510	0.134
D-11	15	1	8.55	15.49	0.552	0.095
	30	1	14.38	30.75	0.467	0.091
	45	1	20.72	45.68	0.454	0.089
	60	1	29.35	61.90	0.474	0.079

表付—2 動的せん断実験結果

(3) 供試体 D

実験ケース	目標せん断振幅 (mm)	振 動 数 (Hz)	最大せん断荷重 Pmax (t)	最大せん断変位 δ_{max} (mm)	等価せん断ばね係数 Ke (t/mm)	等価粘性減衰定数 he
D-1	75	1	19.50	77.20	0.253	0.093
D-2	60	1	16.75	61.86	0.271	0.088
D-3	45	1	13.08	46.30	0.283	0.094
D-4	30	1	9.14	30.99	0.295	0.098
D-5	30	2	9.53	30.33	0.314	0.106
D-6	30	3	9.66	29.30	0.330	0.103
D-7	15	3	6.13	15.09	0.406	0.113
D-8	15	5	5.62	14.57	0.386	0.114
D-9	15	7	5.26	13.55	0.388	0.106
D-10	15	10	4.38	10.27	0.426	0.133
D-11	15	1	6.12	15.49	0.395	0.094
	30	1	9.78	30.85	0.317	0.092
	45	1	12.87	46.36	0.278	0.090
	60	1	15.45	61.80	0.250	0.090

表付—2 動的せん断実験結果

(4) 供試体 R

実験ケース	目標せん断振幅 (mm)	振 動 数 (Hz)	最大せん断荷重 Pmax (t)	最大せん断変位 δ_{max} (mm)	等価せん断ばね係数 Ke (t/mm)	等価粘性減衰定数 he
D-1	75	1	32.22	77.66	0.415	0.069
D-2	60	1	27.26	62.03	0.439	0.048
D-3	45	1	19.59	46.69	0.420	0.043
D-4	30	1	14.22	31.16	0.456	0.049
D-5	30	2	14.01	30.59	0.458	0.051
D-6	30	3	13.76	29.52	0.466	0.063
D-7	15	3	7.85	15.31	0.513	0.060
D-8	15	5	5.62	14.57	0.386	0.114
D-9	15	7	5.26	13.55	0.388	0.106
D-10	15	10	4.38	10.27	0.426	0.133
D-11	15	1	7.53	15.55	0.484	0.053
	30	1	13.52	31.06	0.435	0.046
	45	1	19.31	46.66	0.414	0.047
	60	1	26.36	62.11	0.424	0.058

付 属 資 料 3 研 究 体 制

本実験は、昭和58年度および昭和59年度の2ヶ年にわたり阪神高速道路公団より「北神戸線P C高架橋ゴム支承の耐震性に関する調査」として土木研究所が受託して行ったものである。各年度の研究実施担当者（敬称略）は以下の通りである。

	耐 震 研 究 室	阪 神 高 速 道 路 公 団
昭 和 58 年 度	室 長 岩 崎 敏 男 研 究 員 萩 原 良 二 " 長 谷 川 金 二 小 山 達 彦 吉 田 武 史	工務部設計課長 江 見 晋 工務部調査役 水 元 義 久
昭 和 59 年 度	室 長 川 島 一 彦 研 究 員 長 谷 川 金 二 小 山 達 彦 吉 田 武 史	工務部設計課長 江 見 晋 工務部調査役 水 元 義 久 工務部設計係長 北 沢 正 彦

ゴム支承の動的繰返しせん断
特性に関する実験的検討

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2170号
昭和60年3月(1985)

川島一彦
長谷川金二
小山達彦
吉田武史

キーワード 耐震設計、ゴム支承

要 旨 本報告は、実橋に使用されているゴム支承が地震時に示す挙動を把握することを目的として、実物大のゴム支承を用いた一定圧縮荷重下における静的および動的せん断実験を行い、ゴム支承の動的繰返しせん断特性を検討した結果をとりまとめたものである。



郵便はがき

下を40
さは円
いっ切
て手

3 0 5 -

建設省土木研究所
耐震研究室 行

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No. 161

No. 161

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2170号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏名



土木研究所資料第2170号
ゴム支承の動的繰返しせん断特性に
関する実験的検討