

構造物の免震に関する研究 (その2)

——実大免震装置の力学的特性——

武田 寿一	角田 智彦	岡田 宏
寺村 彰	関松 太郎	中村 嶽
内田 壘	野畑 有秀	

Study on Seismic Base Isolation System for Structures (Part 2)

——Mechanical Properties of Full-scale Base Isolation Devices——

Toshikazu Takeda	Tomohiko Tsunoda	Hiroshi Okada
Akira Teramura	Matsutaro Seki	Takashi Nakamura
Hiraku Uchida	Arihide Nohata	

Abstract

Three base isolation systems of Ohbayashi Corporation were recently developed. They consists of three base isolation devices; a combination of laminated natural rubber pads and steel bars, laminated natural rubber pads with a lead plug inserted at the center of the pads and laminated high-damping rubber pads, respectively.

In this study, from the viewpoint of practical application, the restoring force characteristics of the abovementioned three full-scale base isolation devices are investigated by static and dynamic tests, and furthermore, ultimate failure tests of small-scale laminated rubber pads are carried out to examine the ultimate capacity. The following are the results: (1) The restoring force characteristics of full-scale base isolation devices are obtained. (2) The horizontal shear deflection capacity of the laminated rubber pads are enough to sustain the large deflection caused by high intensity ground motion.

概 要

大林組では、3種類の免震装置、すなわち、①天然ゴムより成る積層ゴム（以下、標準積層ゴムと呼ぶ）と鋼棒ダンパーとの併用、②標準積層ゴムの中心に鉛プラグを挿入した鉛入り積層ゴム、③ゴム素材に減衰性をもたせた高減衰積層ゴム、を用いる免震構法システムを開発した。前報（その1）¹⁾では、上記免震装置①の小さいモデルの静的・動的実験を行なって力学的特性を把握し、免震装置の有効性を確認した。この報告では、上記の3種類の実大免震装置の諸特性を静的・動的実験により把握し、さらに、縮小積層ゴムの破断実験を行なった。この結果、①実大免震装置の力学的特性が明確にできたこと、②積層ゴムの変形能力は、許容変形に対して十分あることなどの知見を得た。

1. はじめに

大林組では、3種類の免震装置、すなわち、①天然ゴムより成る積層ゴム（以下、標準積層ゴムと呼ぶ）と鋼棒ダンパーの併用、②標準積層ゴムの中心に鉛プラグを挿入した鉛入り積層ゴム、③ゴム素材に減衰性をもたせた高減衰積層ゴム、を用いる免震構法システムを開発した。この報告では、これら3種類の実大免震装置の諸特性を静的・動的実験によって把握し、さらに、縮小積層

ゴムの破断実験を行なって変形限界の把握を行なう。

2. 実大積層ゴムの加力実験

2.1. 試験体

表一1に各積層ゴムの設計仕様を示す。各積層ゴムは、設計軸力250 ton、水平固有周期2.5秒、許容水平変位30 cm、水平変位30 cm繰返し時の等価粘性減衰定数約10%として設計されている。

2.2. 実験方法

項目	種類(会社名) 標準積層ゴム (ブリヂストン製)	鉛入り積層ゴム (オイレ工業製)	高減衰積層ゴム (東亜BIC社製)
設計軸力	250 ton		
水平剛性(固有周期)	1.6ton/cm (2.5sec)		
設計許容水平変位	30cm		
等価粘性減衰定数(heq)	水平変位30cm変形時に約10%		
鉛直剛性 (固有周期, 周波数)	2250ton/cm (0.067sec, 15Hz)	1600ton/cm (0.079sec, 12Hz)	

表-1 積層ゴムの設計仕様

実験装置を図-1に示す。鉛直荷重は300 ton 軸力用アクチュエータで、水平荷重は300 ton 静的アクチュエータ(ストローク ±37.5 cm) または、50 ton 動的アクチュエータ(±20 cm) で加力する。鉛直加力実験は、設計軸力 250 ton を上回るまで単調載荷し、静的水平加力実験では、水平変形 30 cm まで徐々に正負繰返し加力を行なう。動的水平加力実験では、定振幅繰返し、多数回繰返し、および、振動モデルの応答計算より求められる計算応答変位を強制する地震応答波入力²⁾の3種類の加力²⁾を行なう。

2.3. 実験結果

2.3.1. 静的加力実験 鉛直方向の荷重と変位の関係は、図-2に示すように、3種類の積層ゴムのいずれも

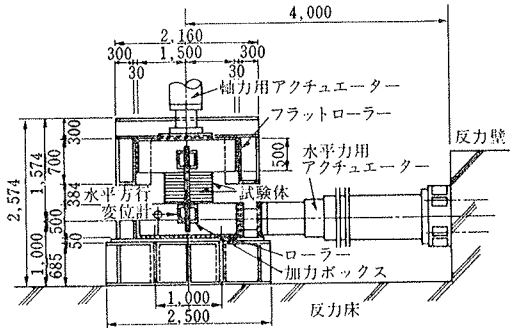


図-1 加力装置

実験の種類	内容
定振幅繰返し実験	正弦波 : 0.1Hz, 0.5Hz
	変位振幅: ±50, ±100, ±150, ±200mm
	繰返し数: 各変位振幅で5回
定振幅多数回繰返し実験	正弦波 : 0.5Hz
	変位振幅: ±200mm
	繰返し数: 50回
地震応答波入力実験	HACHINOHE-NS波50kine入力の応答位波形を実時間(約40秒)で入力

表-2 動的加力実験ケース

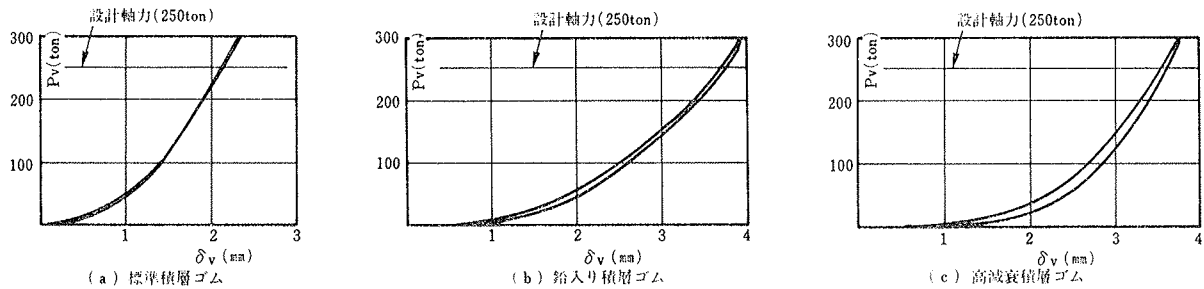


図-2 鉛直荷重-鉛直変位関係

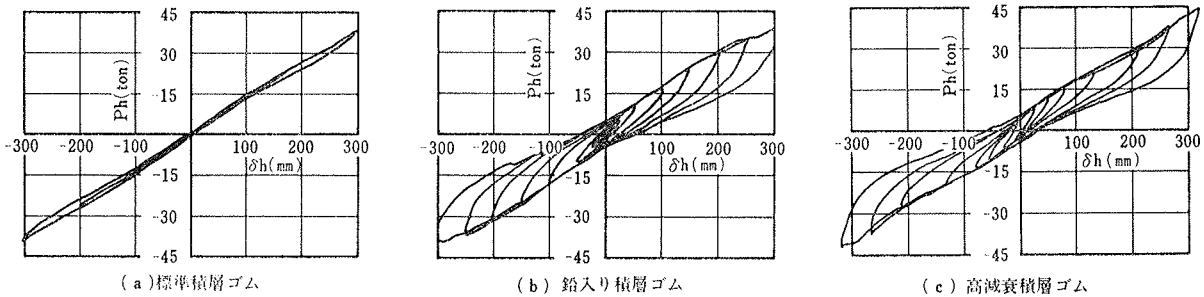


図-3 水平荷重-水平変位関係

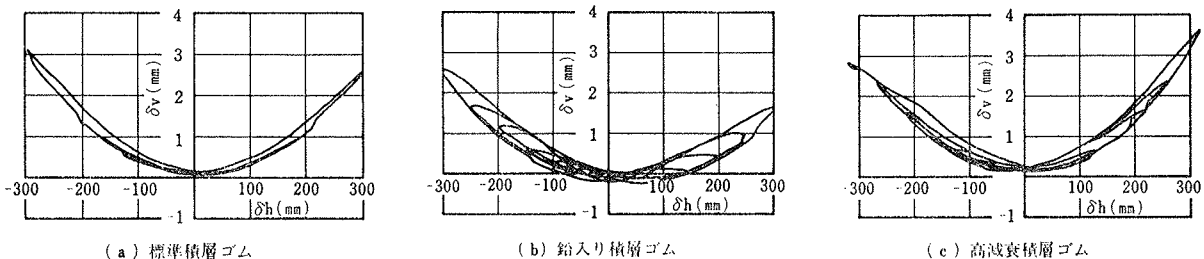
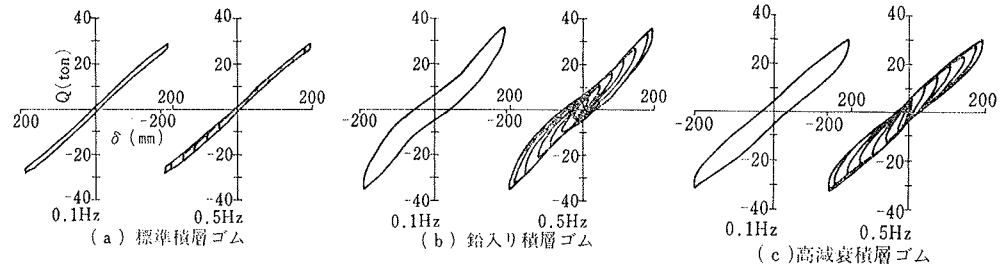


図-4 鉛直沈み込み量-水平変位関係

低荷重域では剛性が小さいが、荷重が設計軸力 250 ton に近付くに従って大きくなる。水平荷重—水平変位関係を図—3 に示す。標準積層ゴムの復元力特性は、許容変位 30 cm までほぼ線形で設計値と良い対応を示している。また、鉛入り積層ゴム、高減衰積層ゴムは、履歴エネルギー吸収を行なう復元力特性を示している。水平変位に伴う鉛直方向の沈み込み量を図—4 に示す。30 cm の水平変形時に、いずれの積層ゴムでも約 2~3 mm 程度であり、大変形時においても沈み込み量は少ないことが分かる。剛性(周期), 等価粘性減衰定数などは、動的加力実験結果と対比させて後述する。

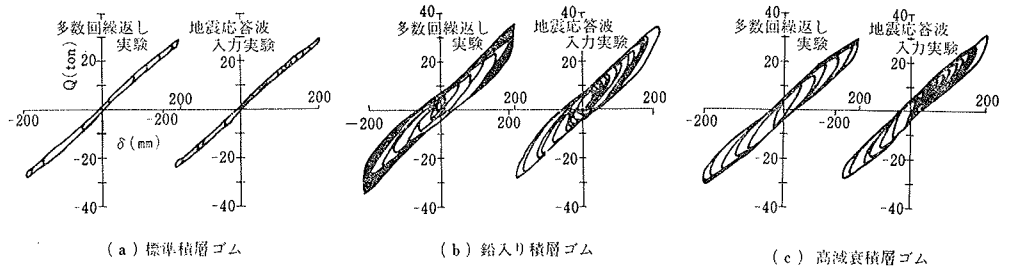
2.3.2. 動的加力実験

(1) 水平荷重と水平変位の関係 図—5 に定振幅繰返し実験で得た復元力特性を示す。いずれの積層ゴムも、静的に近い周波数 0.1 Hz (周期10秒) の場合と設計周波数 0.5 Hz (2.0秒) の場合の復元力特性は良い対応を示している。



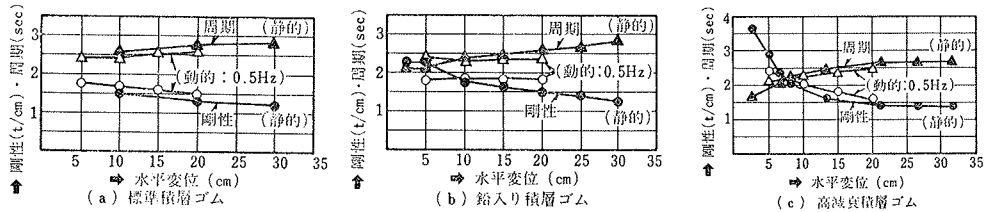
図—5 定振幅繰返し実験

図—6 には、±20 cm 水平変位 50 回の多数回繰返し実験と最大応答位を 20 cm に規準化した地震応答波入力実験の復元力特性を示す。標準積層ゴムと高減衰積層ゴムでは定振幅繰返し実験(図—5)、多数回繰返し実験および、地震応答波入力実験で得られる復元力特性はほぼ等しい。鉛入り積層ゴムの場合は、多数回繰返し実験において若干荷重が低下する傾向が見られる。

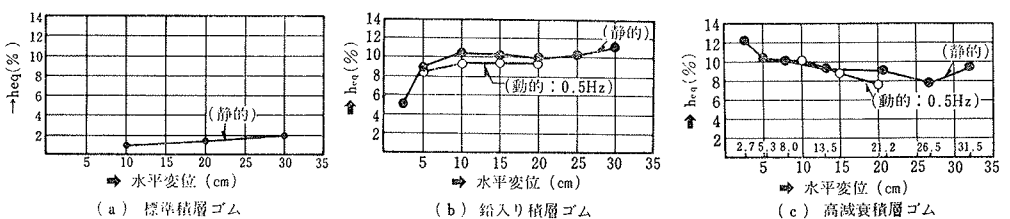


図—6 多数回繰返し実験と地震応答波入力実験

(2) 水平変位と剛性・周期の関係 図—7 に各積層ゴムの水平変位振幅と正負の最大変位点を結んだ直線の勾配で定義する等価剛性および、等価剛性



図—7 水平変位と剛性・周期



図—8 等価粘性減衰定数

より計算した周期との関係を示す。これによると、各積層ゴムの静的実験と動的実験との結果はほぼ等しい。高減衰積層ゴムの剛性は、標準積層ゴムおよび、鉛入り積層ゴムに比べて小変形時に大きな値を示している。また、変位 15 cm (ゴムの総厚に対するせん断歪約 50~70%) 程度になると、いずれの積層ゴムも剛性はほぼ一定となり、設計周期 2.5 秒程度になることが分かる。

(3) 等価粘性減衰定数 図—8 に各積層ゴムの等価粘性減衰定数 h_{eq} を示す。標準積層ゴムは小さく 1~2 % 前後である。鉛入り積層ゴムは小変形時に小さく、変位の増加とともに増大して水平変位振幅 10 cm 以上では設計値 10% にほぼ等しくなる。高減衰積層ゴムでは逆に小変形時に大きく、水平変位 5 cm 位までは徐々に減

少し、それ以上になると10%前後のほぼ一定値になる傾向がある。高減衰積層ゴムと鉛入り積層ゴムの静的実験と動的实验との結果はほぼ対応している。

(4) 温度変化 標準積層ゴムと高減衰積層ゴムの多数回繰返し実験時のゴムの表面付近(表面より約12.5 mm 内部)の温度変化を調べた。前者はほとんど変化が見られず、後者で2°C程度の温度上昇となった。

3. 実大鋼棒ダンパーの水平加力実験

3.1. 試験体

前章で述べた標準積層ゴムと組合わせて用いる減衰機として、図-10に示す鋼棒ダンパー装置を開発した。この装置は特殊鋼棒 ($\sigma_y=9.0 \text{ t/cm}^2$ 以上)の曲げ弾塑性履歴特性によるエネルギー吸収性能を利用するもので、固定端および3箇所の特種ベアリング支承で支持された3連続ばり形式のものである。

3.2. 実験方法

加力方法は前章で示したもの(図-1)を使用し、上下加力ボックス間に試験体を設置して変位制御で加力した。

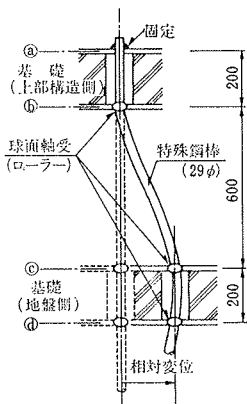


図-9 鋼棒ダンパー

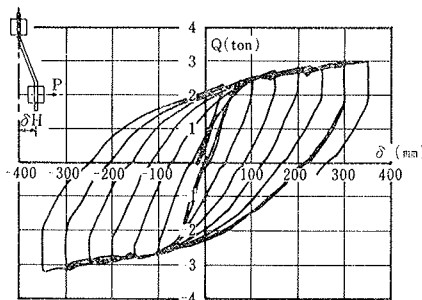


図-10 水平荷重—水平変位関係 (静的加力)

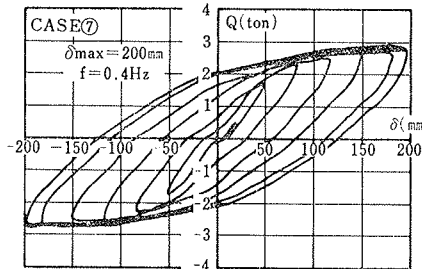


図-11 水平荷重—水平変位関係 (動的加力)

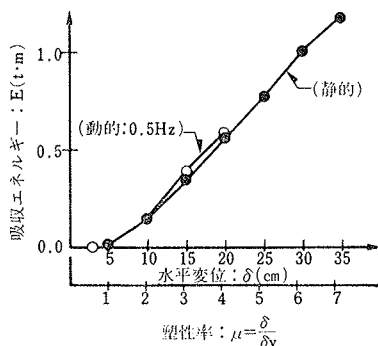


図-12 鋼棒の吸収エネルギー

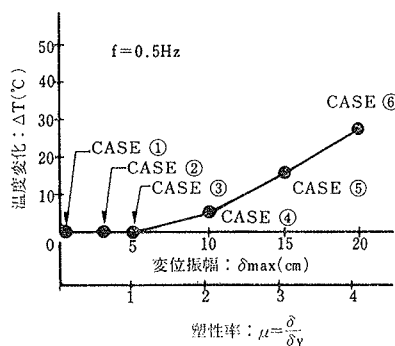


図-13 鋼棒の温度変化 (動的加力)

(1) 静的加力実験では変位振幅 $\pm 50 \text{ mm}$ から $\pm 350 \text{ mm}$ まで 50 mm ピッチで漸増繰返し変位を試験体に加えた。

(2) 動的加力実験では表-3に示す変位振幅について、それぞれ5サイクルを正弦波で加振した。加振振動数は 0.5 Hz (2.0 秒)を基本にした。

3.3. 実験結果

3.3.1. 復元力特性と減衰性能 静的・動的加力実験によって得られた水平荷重—水平変位関係の一例を図-10, 11に示す。いずれも紡錘形を示し、大変形に至るまで良好な形状を示している。図-12に各変位振幅1サイクルにおけるダンパー1本の吸収エネルギーを示す。静的・動的加力実験間の差は少なく同等の減衰性能がある。

3.3.2. 温度変化 図-13に動的加力実験時の鋼棒の温度変化を示す。吸収エネルギーの増加(図-12)に従い温度が上昇し、 20 cm 水平変形時に約 30°C 上昇する。

3.3.3. 累積吸収エネルギー 図-14に、大地震時にダンパーに必要とされる総エネルギー量を応答解析によって推定した結果²⁾を示す。これは、鋼棒

実験ケース	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
変位振幅 δ_{max} (mm)	5	30	50	100	150	200	200
周波数(Hz)	0.5						0.4

表-3 動的加力実験ケース

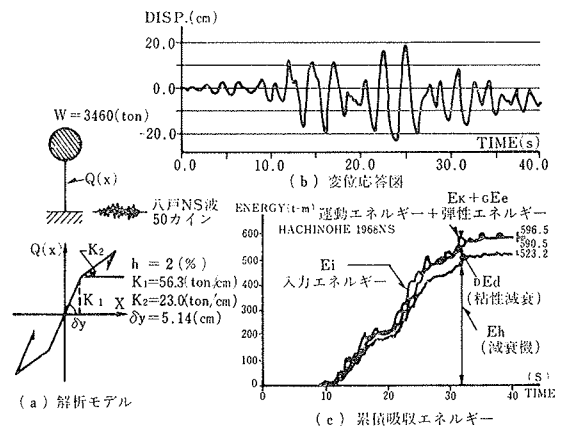


図-14 1質点免震建物モデルの地震応答解析

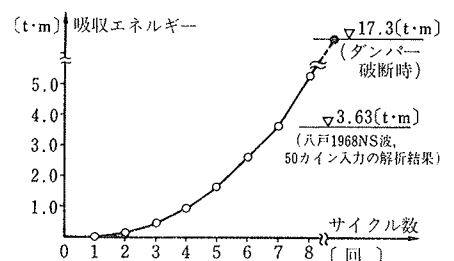


図-15 累積吸収エネルギー (静的加力と地震応答)

ダンパーをバイリニア型、積層ゴムを線型にモデル化した1質点系モデルに、八戸1968

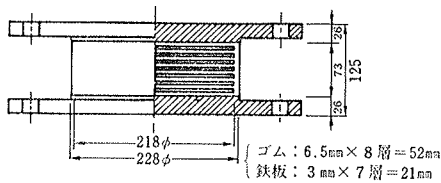


図-16 試験体

NS波、50カイン相当の地震波を入力したものである。図-15に示すように、応答解析によって求められたダンパー1本当りに必要な総エネルギーを静的実験結果(図

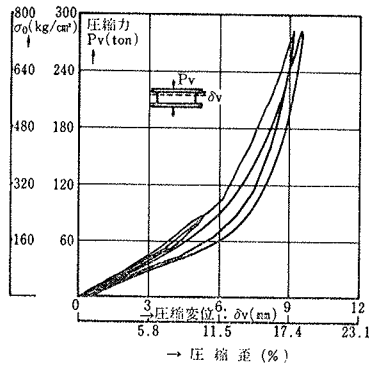


図-17 純圧縮実験

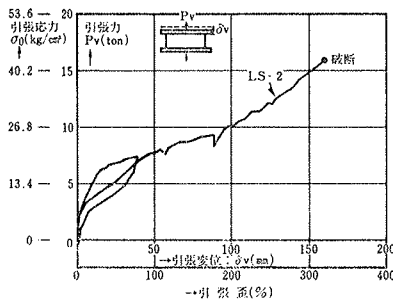


図-18 純引張実験

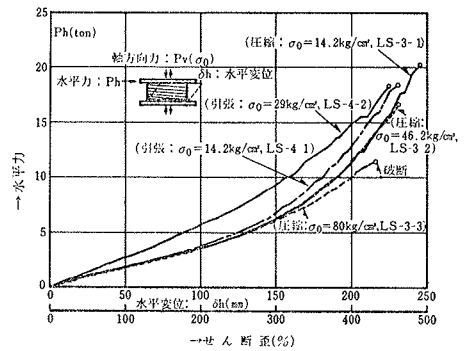


図-19 水平方向せん断実験

10)の累積吸収エネルギーは十分上回っており、変形の繰返しパターンは異なるが、鋼棒ダンパーは大地震時に必要とされるエネルギー吸収性能を十分満足しているといえる。

4. 縮小積層ゴムの限界実験

4.1. 試験体

図-16に試験体を示す。1, 2章で述べた実大標準積層ゴムと同一のゴム厚と鉄板厚をもつ縮小積層ゴムである。

4.2. 実験方法

図-1の加力装置を用いる。表-4に実験ケースを示す。実験は、純圧縮(LS-1)、純引張(LS-2)、圧縮+せん断(LS-3)、および、引張+せん断(LS-4)の4種類行なった。純圧縮は、加力装置の能力より、面圧約800 kg/cm²まで加力し、他の実験は積層ゴムが破断するまで加力した。

4.3. 実験結果

4.3.1. 純圧縮実験(図-17) 面圧が150 kg/cm²程度までは面圧と縮み量の関係はほぼ線形である。それ以後はハードニング現象を示し、剛性が徐々に増加した。

4.3.2. 純引張実験(図-18) 引張の初期段階では剛性が高く、面圧約20 kg/cm²以後急激に剛性が低下してゴムの総厚に対する引張歪が約300%に達して破断した。

4.3.3. 水平方向せん断実験(図-19, 20) 水平荷重と水平変位の関係を図-19に示す。鉛直力が引張、圧縮に関係なく、水平方向の剛性はほぼ類似している。また

実験種類	実験内容	試験体名	備考
純圧縮	単調圧縮	LS-1	非破壊
純引張	単調引張	LS-2	破壊
圧縮+せん断	圧縮力 $\sigma_0 = 14.2 \text{ kg/cm}^2$ 46.2 80.0	LS-3-1 LS-3-2 LS-3-3	破壊
引張+せん断	引張力 $\sigma_0 = 14.2 \text{ kg/cm}^2$ 29.0	LS-4-1 LS-4-2	破壊

表-4 限界実験ケース

破断変位は約220 mm(ゴム総厚に対して約450%)で、各試験体間の差は小さい。引張破断局部歪650%に相当する限界水平変位³⁾と実験結果とを比較すると、各ケースとも、

一般に設計許容変位の2倍とされている限界水平変位に対して十分余裕があることが分かった。

5. まとめ

以上、実大免震装置の静的・動の実験、および、縮小積層ゴムの限界実験より以下の知見が得られた。

(1) 実大免震装置の力学的特性が明確となり、また、設計仕様を満足することを確認した。

(2) 積層ゴムの変形能は、設計許容変形に対して十分余裕があると考えられる。

参考文献

- 1) 武田, 他: 構造物の免震に関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 30, (1985), pp. 66~75
- 2) 武田, 他: 構造物の免震に関する研究(その6), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1985), pp. 485~486
- 3) 藤田, 他: 積層ゴムによる重量機器の免震支持(その1), 生産研究, 34巻, 2号, (1982.2), pp. 26~29

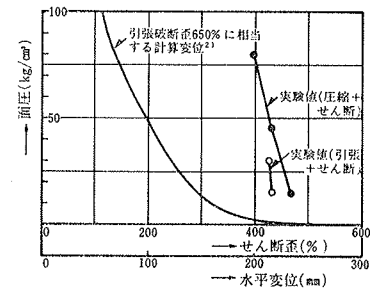


図-20 破断時水平変位