

西松式免震構法の開発（その2） 構造実験

The Development of Nishimatsu Construction Base Isolation System (Part 2) Experimental Study

長谷部 廣行* 山内 次郎**
Hiroyuki Hasebe Jirō Yamanouchi
笠松 照親*** 飯塚 信一****
Teruchika Kasamatsu Shin-ichi Iizuka

要 約

その1で報告したように西松式免震工法は、鋼棒を使用した弾性ダンパー方式と、鉛心入りの積層ゴムによるものと、高減衰積層ゴムによるものの三つのタイプがある。これらの中で鋼棒のリングを利用したダンパー形式の免震工法は西松独自のもので、数々の優れた特性をもつ。そこで、このリング形式のダンパーの特性を正確に把握するため一連の実験を行い、当初の目的とした特性を確認した。まず第一に、大地震時の大きな相対変形(30cm)にも十分追従でき、破壊することなく十分な減衰性能を発揮し、免震の機能を保持することを確認した。また、積層ゴムについても数々の実験を行い、十分な変形能力と耐久性が立証された。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 試験体
- §3. 実験概要
- §4. 実験結果
- §5. まとめ

§1. はじめに

積層ゴムとリングダンパーとからなる免震装置におけるリングダンパーの役割は、他の鋼材ダンパーと同様に鋼材の塑性変形により地震力エネルギーを吸収することである。本加力試験の目的は、積層ゴムの耐久性を確認することと、リングダンパーの復元力特性・エネルギー吸収能力及び初期剛性を求めることと、免震装置に要求

される大きな変形能力を確認することである。なお、積層ゴムは設計荷重100tf用のものと200tf用の2種類について実験を行ったが、今回は100tf用のものにかぎり報告する。

§2. 試験体

2-1 積層ゴム

本積層ゴムは、Fig. 1に示すように、薄いゴムシートと鉄板を交互にはり合わせ、外周を耐候性に優れたゴムで被覆した構造となっており、荷重支持能力・免震性能及び大変形能力を兼ね備えるとともに、長期間の使用に耐えるよう設計されている。

積層ゴム本体部分を構成する内層ゴム・内部鉄板・外層ゴム及び端用鉄板は一体加硫接着されており、フランジと本体部分を高力ボルトにより接合する構造となっている。

本試験に使用した積層ゴムを Fig. 1 に示す。

Table 1 に示すように本積層ゴムは、積層ゴム本体、

*技術研究部原子力室係長
**技術研究部副部長
***技術研究部原子力室課長
****技術研究部原子力室

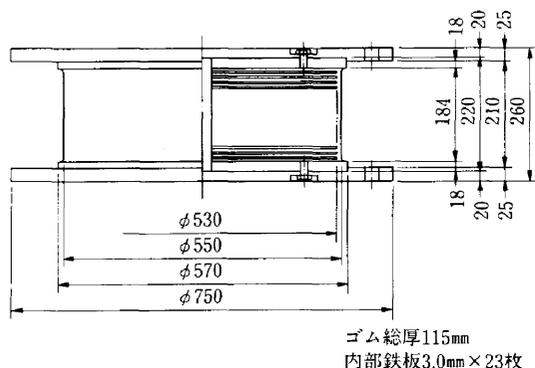


Fig.1 積層ゴムの構造

Table 1 積層ゴム構成部材

構成部材	材質	備考	
積層ゴム本体	内層ゴム	天然ゴム	
	外層ゴム	天然ゴム/合成ゴム	
	内部鉄板	SPCC	JIS G 3141
	端用鉄板	SS41	JIS G 3101
フランジ	SS41	JIS G 3101	
フランジ固定用ボルト	F10T	JIS B 1186	

Table 2 内層ゴムの標準配合

成分	重量比 (%)
天然ゴム	73
充填材	10
加硫剤	2
その他 老化防止剤 可塑剤 他	15

Table 3 内層ゴムの基本物質

硬さ (JIS A)	25%伸長応力 (kgf/cm ²)	伸び率 (%)	引張強さ (kgf/cm ²)
40±5	3.2±1	600 以上	200 以上

本体を建物の基礎に固定するためのフランジ及び、本体とフランジを連結するためのボルトより構成されている。また、積層ゴム本体は、主要部材である内層ゴムと、内部鉄板のほかに、それらを保護する外層ゴム及び、フランジ締結のための端用鉄板より構成される。

Table 4 外層ゴムの標準配合

成分	重量比 (%)
天然ゴム/合成ゴム ブレンド	59
充填剤	23
加硫剤	1
その他 老化防止剤 可塑剤 他	17

Table 5 外層ゴムの基本物性

硬さ (JIS A)	25%伸長応力 (kgf/cm ²)	伸び (%)	引張強さ (kgf/cm ²)
50±5	4±1	600 以上	150 以上

Table 6 ステンレス鋼材の材料特性

機械的性質	JIS 基準値
耐力 (kgf/mm ²)	21 以上
引張強さ (kgf/mm ²)	53 以上
伸び (%)	40 以上
絞り (%)	60 以上
HB	187 以下
HRB	90 以下
HV	200 以下

Table 7 引張試験結果

	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	伸び率 (%)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
生材	2673	6843	64.3	1.84×10 ⁶
曲げ戻し	2906	7244	57.0	1.82×10 ⁶

Table 2 及び Table 3 に内層ゴムの配合とゴムの基本物性を示し、Table 4 及び Table 5 に外層ゴムの配合と基本物性を示す。

2-2 リングダンパー

リングダンパーの素材には、ステンレス鋼 (SUS304) を採用した。このステンレス鋼材を採用した理由としてステンレスの防錆性、鉄と同等以上の強度、大きな伸び量等が上げられる。ステンレス鋼材 (SUS304) の材料特性と引張り試験結果を Table 6, Table 7 に示す。基本的なリングダンパーの形状を Fig. 2 に示す。実験に使用したリングダンパーは、断面形状30mm×30mmのステンレス棒鋼を半径400mmに曲げたものを2つ溶接したもので

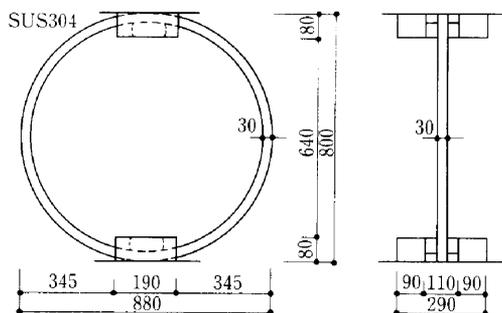


Fig.2 リングダンパーの構造

Table 8 疲労試験条件

	小振幅実験	大振幅実験
雰囲気	空气中	空气中
温度条件(°C)	室温	室温
振動数(Hz)	0.5	—
振幅(mm)	±95	±300
変形回数(回)	1,000	10
鉛直荷重(tf)	100	100

Table 9 動的加力実験パラメータ

試験体	加力方向	振幅(mm)	周期(sec)	加振速度(cm/s)
1 S	せん断	40	1.0	25.1
2 S			2.0	12.6
3 S		90	5.0	28.3
4 S			11.6	
5 S			16.3	
1 P	引張圧縮	40	1.0	25.1
2 P			2.0	12.6
3 P		90	5.0	28.3
4 P			11.3	
5 P			16.3	

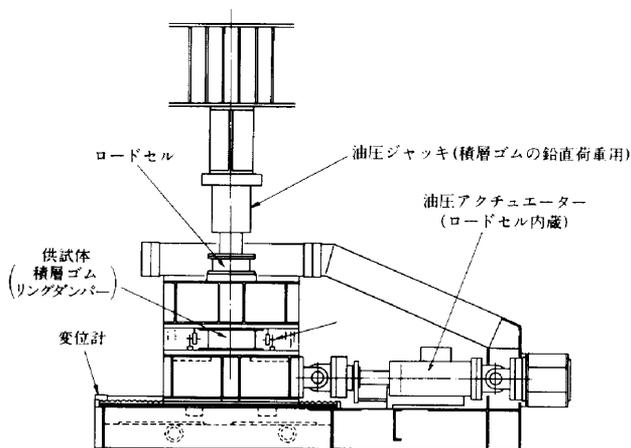


Fig.3 加力装置

ある。このリングの両端には、固定用のダボピンを設けている。

リングダンパーは水平方向に設置して使うが、予備実験からダンパー1体では加力方向(せん断方向、引張圧縮方向)によって荷重と変形との関係が異なってしまう。そこで、本リングダンパーは4個を1組と考え、その1組をもって1つのダンパーとしての機能をもつものとして取り扱う。この考え方によりリングダンパーは、無方向性のダンパーとして取り扱うことができる。

§ 3. 実験概要

3-1 積層ゴムの実験概要

本実験に使用した加力装置を Fig. 3 に示す。

積層ゴム試験体については、設計鉛直荷重(100tf)を油圧ジャッキでかけた状態でせん断特性試験、疲労試験などを行った。なお、せん断特性はせん断変形量が±100mm, ±200mm, ±300mmの位置で計測した。

また長期老化後の積層ゴムのばね定数変化、及びその

間に発生する地震によるばね定数の変化を推定する目的で、実大積層ゴムを加熱促進老化させた後、小振幅及び大振幅のせん断疲労試験を実施し、その間のせん断ばね定数の変化を測定すると共に、外層ゴムの異常の有無を観察する。せん断疲労試験時の諸条件を Table 8 に示す。加熱促進老化は、雰囲気温度100°Cの中で159時間(内層ゴムで30年、外層ゴムで82年相当の老化) 放置したものと、318時間(内層ゴムで60年相当の老化)の2種類行った。

また、促進老化及び繰り返し変形を与えた試験体と、オリジナルの試験体について破壊試験を実施し、極限の変形能力を測定する。試験体には鉛直荷重100tfを負荷した状態でせん断変形を与え、試験体が破壊するまでのせん断変形量と、せん断荷重を測定する。なお、老化促進条件は前述の60年相当老化とした。

3-2 リングダンパー実験概要

リングダンパーについては、試験機の都合上、4個を同時に加力することはできず1本ずつの加力を行い、それを数学的に重ね合わせるにより1組のリングダン

パーの荷重と変形との関係を求めることにした。

加力方向としては、せん断方向、引張圧縮方向、斜め(45度)方向について考えた。

加力は100tfアクチュエータによる変位制御によって行い、アクチュエータの最大加振能力であり、本免震装置の設計変形能力である±300mmまで加力した。また、動的50tfアクチュエータによる加力も行った。動的実験のパラメータを Table 9 に示す。

荷重はアクチュエータのロードセルにより、変位は加力治具に取り付けた変位計により計測した。また、動的

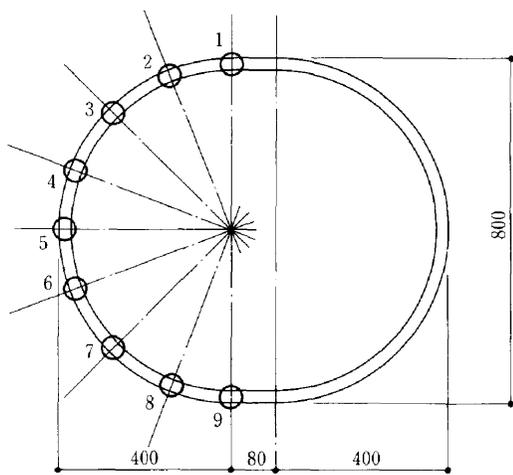


Fig.4 熱電対取り付け位置

Table 10 積層ゴムのせん断バネ定数

変位振幅(mm)	せん断バネ定数(tf/cm)
±100	0.864
±200	0.802
±300	0.808

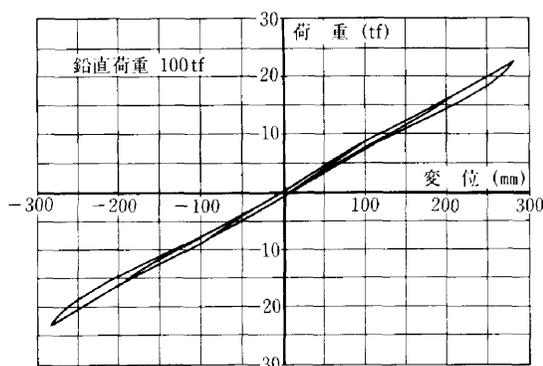


Fig.5 積層ゴムせん断特性

実験では熱電対をはり付け温度上昇を一定時間毎に計測した。熱電対はり付け位置を Fig. 4 に示す。

§ 4. 実験結果

4-1 積層ゴム実験結果

(1) せん断バネ特性

鉛直荷重100tf時のせん断バネ定数を、Table 10 に示す。

鉛直荷重100tf時のせん断特性を Fig. 5 に示す。

また、積層ゴムが大きなせん断変形を受けたときの様子を Photo 1 に示す。

(2) 鉛直バネ特性

鉛直バネ定数を Table 11 に示す。

積層ゴムの鉛直バネ特性を Fig. 6 に示す。

(3) 耐久性

加熱促進老化させた積層ゴムのせん断バネ定数の変化と、繰り返し変形を与えた後のバネ定数の増減の変化を Table 12 に示す。

また、これらの耐久性試験を行った後の積層ゴムの外層ゴムには、何ら異常は見られなかった。

(4) 破壊試験

加熱促進老化(60年相当)させた後繰り返し変形を与えた試験体と、老化や繰り返し試験などを経験していないオリジナルの試験体について破壊試験を行った。試験体には設計鉛直荷重の100tfを負荷した状態でせん断変形を与え、試験体が破壊するまで加力を行ったが、その

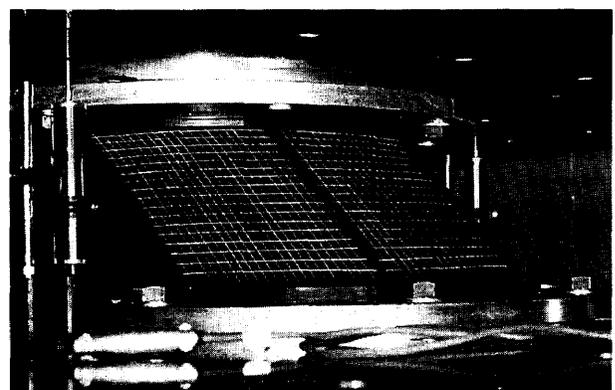


Photo 1 積層ゴムの変形状態

Table 11 積層ゴム鉛直バネ定数

鉛直バネ (tf/cm)	1055
--------------	------

結果を Fig. 7 に示す.

4-2 リングダンパー実験結果

(1) 静的実験

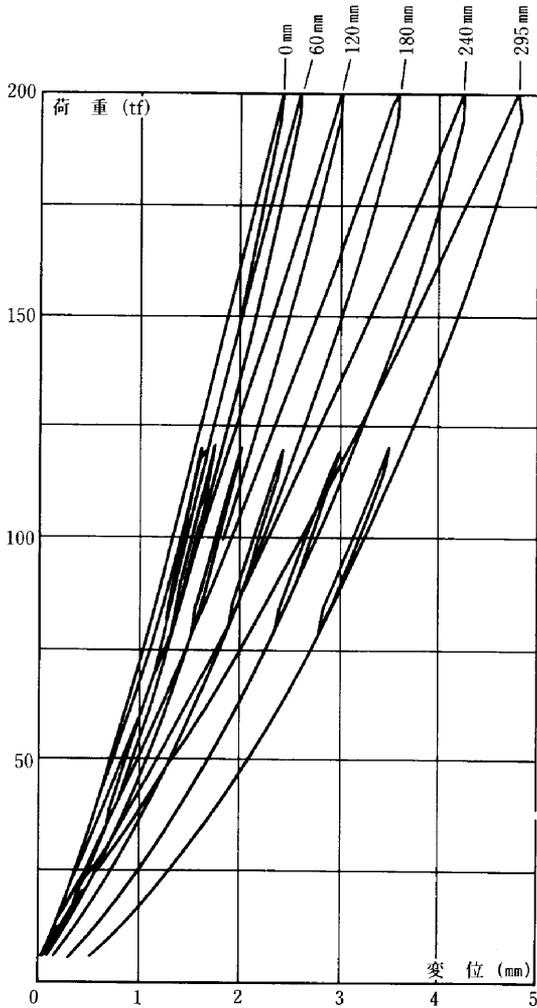


Fig.6 鉛直バネ特性

Table 12 バネ定数の変化(対オリジナル)

	せん断バネ定数変化率 (%)		
	±100mm	±200mm	±300mm
内層ゴム30年相当 老化後	+2.1	+2.0	+1.9
内層ゴム60年相当 老化後	+0.8	+0.9	+0.9
95mm×1000回 繰り返し変形後	+0.8	+0.8	+1.1
300mm×10回 繰り返し変形後	-0.1	+0.1	-0.4

静的加力によるリングダンパーの実験結果、荷重-変形を Fig. 8~9 に示す. せん断方向加力の結果は、最大荷重で正負とも約1.8tf あったが、引張圧縮方向加力については、正(引張側)、負(圧縮側)で最大荷重が異なり、正側で約7.8tf、負側で約3.2tfであった. この各加力方向の実験結果を数学的に重ね合わせて、1組のリングダンパーとしての荷重と変形との関係を表したものが

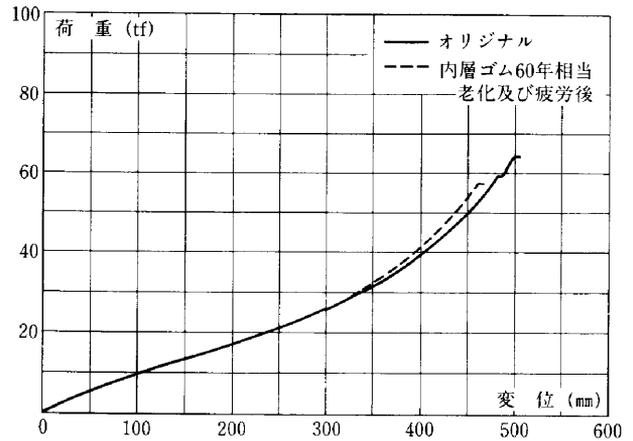


Fig.7 破壊試験結果

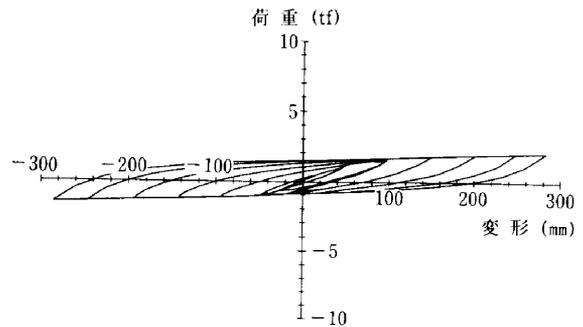


Fig.8 荷重-変形関係(せん断方向)

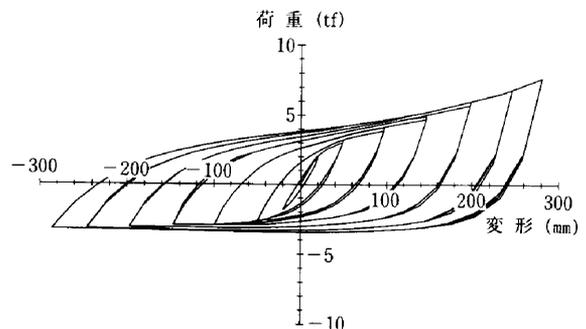


Fig.9 荷重-変形関係(引張圧縮方向)

Fig. 10である。この荷重と変形との関係を使いリングダンパーの復元力特性の検討を行う。

また、斜め(45度)方向の加力試験結果も、上と同じように4個1組のリングダンパーと考えて重ね合わせた結果は、Fig. 10の荷重と変形との関係とほぼ一致した。このことからリングダンパーは、4個1組で考えれば無方向性の復元力が得られることがわかった。

Photo 2 にリングダンパーの加力状況を示す。

(2) 動的实验

Table 9にある周期と振幅をパラメータとして行った動的加力実験のせん断方向加力結果、引張圧縮方向加力結果の荷重と変形との関係の一例を Fig. 11~12に示す。

動的实验結果の一覧を Table 13 に示す。この動的实验から以下のことがわかった。

- ① 振幅が大きいものほど、破断までの繰り返し数は少ない。
- ② 同一振幅の加力であれば、周期が変化してもほぼ同程度の繰り返し回数で破断する。
- ③ せん断方向加力と引張圧縮方向加力では、せん断

方向加力の方が破断までの繰り返し回数が多い。

- ④ 破断までの履歴ループ面積の合計は、加力方向による差はあるが、同一加力方向については周期、振幅の影響は無い。

(3) 实验結果の比較

静的实验結果と動的实验結果の荷重と変形との関係の比較を、せん断方向、引張圧縮方向それぞれについてみ

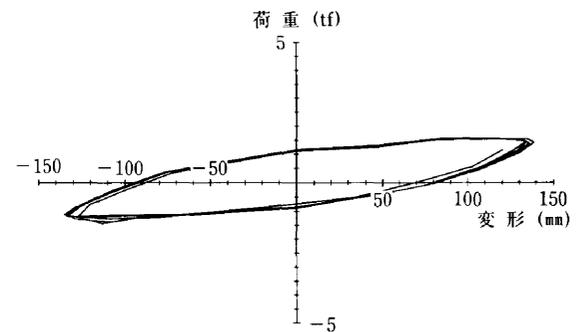


Fig.11 動的荷重-変形関係(せん断方向)

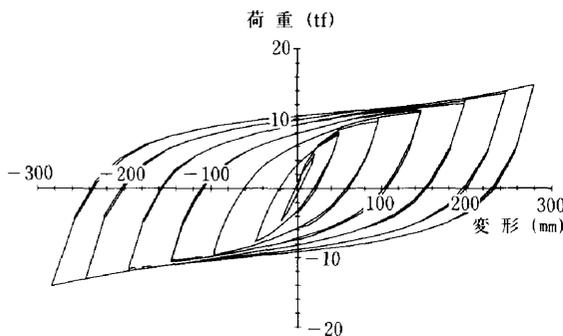


Fig.10 荷重-変形関係(4個1組)

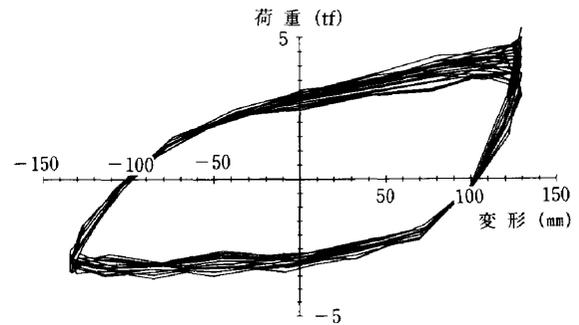


Fig.12 動的荷重-変形関係(引張圧縮方向)

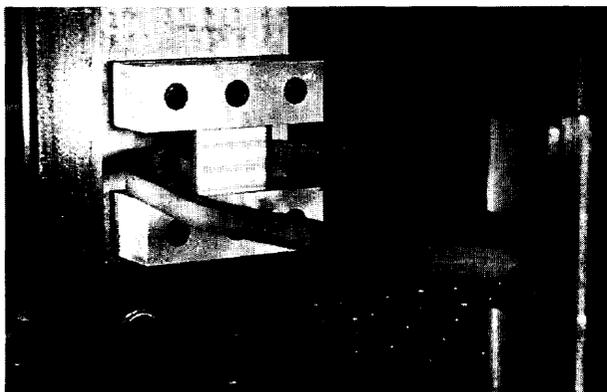


Photo 2 リングダンパー加力状況

Table 13 動的加力实验結果

試験体名	周期	振幅	破断時サイクル	1ループの面積	累積エネルギー
1 S	1 秒	4 cm	* 10,000	約 2tcm	約 20,000tcm
2 S	2 秒	4	* 10,000	約 2	約 20,000
3 S	2 秒	9	1,120	約 19	約 21,280
4 S	5 秒	9	1,320	約 16	約 21,120
5 S	5 秒	13	579	約 37	約 21,423
1 P	1 秒	4	498	約 20	約 9,960
2 P	2 秒	4	579	約 17	約 9,843
3 P	2 秒	9	121	約 77	約 9,317
4 P	5 秒	9	125	約 70	約 8,750
5 P	5 秒	13	67	約124	約 8,308

*破断せず

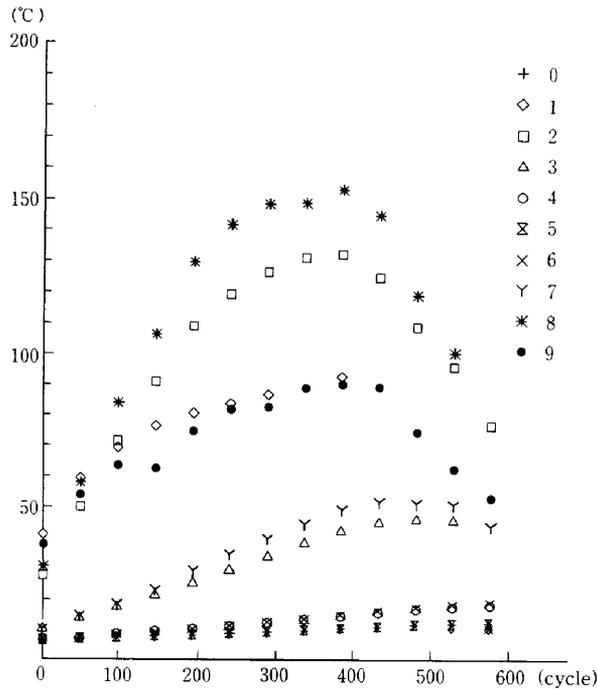


Fig.13 温度上昇図(せん断方向)

ると、静的実験結果と動的实验結果はほぼ一致しており、応答解析用の復元力特性を決めるためには、静的実験結果のデータを用いても実用上支障がないと考えられる。(動的实验は、アクチュエータの能力限度から±130mmまでの実験しか行っていない為)

また、本実験では試験機の能力上、ダンパーの破断変位を把握することができなかった。しかし、動的实验からリングダンパーの能力を、破断するまでの累積エネルギーで評価することができた。

(4) 温度の影響

本実験では、リングダンパーの発熱温度上昇を測定した。静的実験では動的实验に比べ大変形の加力を行っているが、ほとんど温度上昇がみられなかった。

動的实验によって計測した温度上昇の代表的な例をFig.13~14に示す。温度上昇は、せん断方向加力ではリングダンパーの固定端付近が最も高く、引張圧縮方向加力では両固定端付近と中央部が高くなっている。

破断時における最高温度は、試験体によりやや差があるが、本実験においては約150°C程度であった。

§5. まとめ

積層ゴムのばね定数、変形能力等については、60年程度の経年後でも急激な特性の変化は見られず、初期の特性を十分に保持し、免震構造体の一構造部品としての安

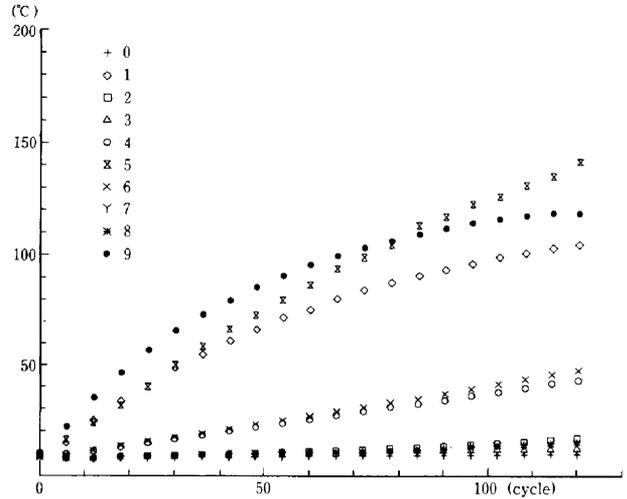


Fig.14 温度上昇図(引張圧縮方向)

定性、耐久性は十分に満足のものであった。

リングダンパーは力を受ける方向によって特性が異なるので4個1組として扱い、この1組としてのダンパーの種々の特性を評価すると、変形性能、耐久性、特にエネルギー吸収量についても十分に満足できるものであることが確認できた。リングダンパーの破断までのエネルギー吸収量は、前述したようにせん断方向と引張圧縮方向とでは差がみられたが、周期、振幅の影響を受けずほぼ一定であった。このことからリングダンパーは1組を単位としたエネルギー吸収量で安全側に評価してみると、

総エネルギー吸収量＝

引張圧縮方向のエネルギー吸収量

+引張圧縮方向ダンパー破断時までのせん断方向
エネルギー吸収量

となる。(約20,000t cm)

この値は30×30mmのリングダンパー1組によるエネルギー吸収量であるが、一般の建物(数階建ての建物)を免震構造とするには、約400,000t cm相当のダンパーが必要となる。一般の建物が大地震に見舞われたときに受ける総エネルギー量が数万~約十万 t cmと考えると、数倍から十数倍の安全性が確保されていることになり、当免震構法の積層ゴム及びリングダンパーの諸性能は当初の目的を十二分に満足したことになる。

なお、当西松式免震構法の開発に当たり、数々の御助力をいただきました横浜ゴム(株)の遠藤和夫氏、山田親文氏、他の皆様に謝意を表します。