

土 木 研 究 所 資 料

免震支承の動的特性に及ぼす温度依存性

および疲労特性に関する実験的研究

Effect of Temperature and Fatigue on Equivalent Stiffness
and Damping Factor of Isolation Bearings

平成8年11月

建 設 省 土 木 研 究 所

耐震技術研究センター・耐震研究室

Copyright ©1996 by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General 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、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

免震支承の動的特性に及ぼす温度依存性 および疲労特性に関する実験的研究

耐震研究室 前 室 長 大塚 久哲¹⁾
 前主任研究員 鈴木 基行²⁾
 佐藤 貴志

1) 現九州大学工学部教授

2) 現東北大学工学部助教授

要 旨

免震設計とは、免震支承を用いて、構造物の長周期化を図るとともに、減衰性能を向上させて地震時の構造物の振動を低減させる設計法である。構造物の固有周期は、免震支承等のアイソレータに必要な剛性を与えることにより任意に設定することが可能である。しかし、免震支承については、剛性や減衰特性が温度や繰返し载荷により影響を受けることが予測されるが、これについては十分検討されていない。

このため、鉛プラグ入り積層ゴム支承と高減衰積層ゴム支承とを対象に、等価剛性および等価減衰定数の温度依存性および疲労特性を実験的に検討した。本資料は、実験結果をまとめたものである。

キーワード： 免震支承, 等価剛性, 等価減衰定数, 温度依存性, 疲労特性, LRB, HDR

目 次

第1章 まえがき	1
第2章 既往の研究	2
第3章 材料試験	3
3. 1 試験方法および供試体	3
3. 2 試験結果	4
第4章 免震支承の載荷実験	8
4. 1 実験方法	8
4. 2 実験供試体	9
4. 3 実験内容	10
4. 4 実験結果	13
第5章 考察	90
5. 1 載荷振幅の違いによる等価剛性および等価減衰定数への影響	90
5. 2 免震装置の温度依存性および繰返し載荷に対する安定性の検討	94
5. 3 免震装置の載荷履歴経験に対する安定性の検討	99
5. 4 免震装置の疲労特性の検討	103
5. 5 免震装置の疲労試験における温度依存性の検討	110
第6章 まとめ	130
謝辞	131
参考文献	132
付属資料	付1

第1章 まえがき

免震設計とは、免震支承を用いて、構造物の長周期化を図るとともに、減衰性能を向上させて地震時の構造物の振動を低減させる設計法である。構造物の固有周期は、免震支承等のアイソレータに必要な剛性を与えることにより任意に設定することが可能である。しかし、免震支承については、剛性や減衰特性が温度や繰返し载荷により影響を受けることが予測されるが、これについては十分検討されていない。

このため、鉛プラグ入り積層ゴム支承と高減衰積層ゴム支承とを対象に、等価剛性および等価減衰定数の温度依存性および疲労特性を実験的に検討した。本資料は、これらの実験結果をまとめたものである。

第2章 既往の研究

低温域における免震支承の性能の変化を検討するため、北海道開発局開発土木研究所構造研究室と社団法人日本橋梁建設協会北海道事務所の共同研究において、一般国道44号根室市温根沼大橋において使用される免震支承の設計条件で製作された実物大模型を用いた実験が行われた。”

その結果、以下の点が明らかとなっている。

- ・免震支承の等価剛性は低温下で大きくなり、等価減衰定数はほとんど変化しない。
- ・等価剛性は、過去にそれ以上のせん断変形を経験したかしないかによって異なる。
- ・50回繰返しせん断载荷試験の結果、等価剛性は初期の剛性に比べてLRBが64%に、HDRが69%に低下するが、温度上昇のみならず繰返しせん断の影響もある。また、供試体温度は、50回のせん断によって約25℃上昇した。

第3章 材料試験

3. 1 試験方法および供試体

材料試験は、写真3. 1-1に示す試験装置を用いて、“JIS K6251 加硫ゴムの引張試験方法(1993年)”に基づき行った。“JIS K6251 加硫ゴムの引張試験方法(1993年)”では、図3. 1-1に示すダンベル状3号形試験片を標準試験片としている。

試験は500mm/minの一定速度で各3体の供試体を、切断に至るまで载荷を行った。

また、0~40℃の試験温度で引張試験を実施し、試験温度とゴムの伸びおよび引張強度の影響を検討した。



写真3. 1-1 材料試験に用いた試験装置

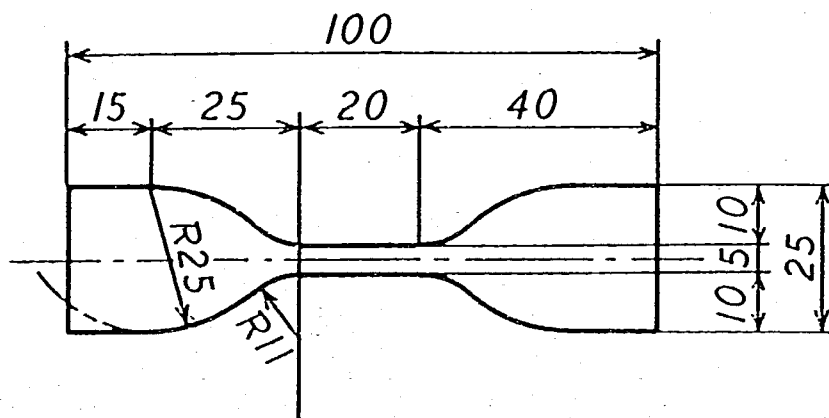


図3. 1-1 引張試験片 (ダンベル状3号形)

3. 2 試験結果

表3. 2-1に供試体の材料特性(規格値)、表3. 2-2に材料試験により得られた破断伸びおよび引張強度を示す。

LRB供試体の材料試験片は、試験装置の性能上切断に至らなかったが、切断に至らなかったにもかかわらず、引張強度は、すべての供試体が規格値を上回っており、伸びについても15体中9体が規格値(550%)を上回っておりおそらく全ての供試体が規格値を上回るものと思われる。HDRタイプA供試体およびHDRタイプB供試体の材料試験片は、全ての供試体が切断に至り、規格値を上回った。

材料試験の結果より、HDRタイプBに用いられているゴムは、タイプAに用いられているゴムよりも、破断伸びが18.7%小さく、引張強度が63.6%大きかった。

試験結果の一例として、試験温度20℃の応力～伸び関係を図3. 2-1に示す。HDRタイプBは、タイプAに比べて同一応力において伸びが少なく、どちらかという、LRB供試体とよく似た挙動を示している。

また、図3. 2-2(1)に示すように、試験温度と切断時の伸びとはあまり相関性がなく、0℃～+40℃程度の温度変化では、破断時伸びの温度変化による影響はほとんどない。また、図3. 2-2(2)に示すように、試験温度と引張強度とは相関性があり、試験温度が高くなると、引張強度が小さくなる。

図3. 2-3は、各供試体の500%伸び時における引張応力と試験温度の関係を示したものであり、試験温度が高くなると、500%伸び時の引張応力は小さくなることわかる。

表3. 1-3は、500%伸び時における引張応力の変化(試験温度0℃と40℃)を示したものである。LRB供試体では、0℃時の引張応力は40℃時の引張応力に比べて42.1%程度減少し、HDRタイプA供試体およびHDRタイプB供試体は、それぞれ35.1%、18.6%程度減少する。

表3. 2-1 材料特性(規格値)

LRB 供試体	鉛		純鉛 99.99%	
	ゴム	硬度(度)	50±5	
		破断伸び(%)	550以上	
		引張強度(kgf/cm ²)	150以上	
		25%応力(kgf/cm ²) ^{*)}	4.6	
HDR 供試体	ゴム		タイプA	タイプB
		硬度(%)	60	68
		破断伸び(%)	650以上	550以上
		引張強度(kgf/cm ²)	100以上	150以上
		25%応力(kgf/cm ²) ^{*)}	12.0±2.0	14.0±2.0

^{*)} 25%応力とは、25%伸び時における引張応力である。

表3. 2-2 材料試験結果(試験温度20℃)

	LRB	HDRタイプA	HDRタイプB
破断伸び(%)	502 (199)	748 (114)	579 (180)
(引張強度(kgf/cm ²))	524 (207)	712 (110)	564 (182)
	514 (193)	705 (108)	588 (190)

* LRB試験体については試験機の性能上、破断に至るまで引張ることが出来なかった。
また、LRB供試体の引張強度は、試験機の限界まで引張った時点の強度である。

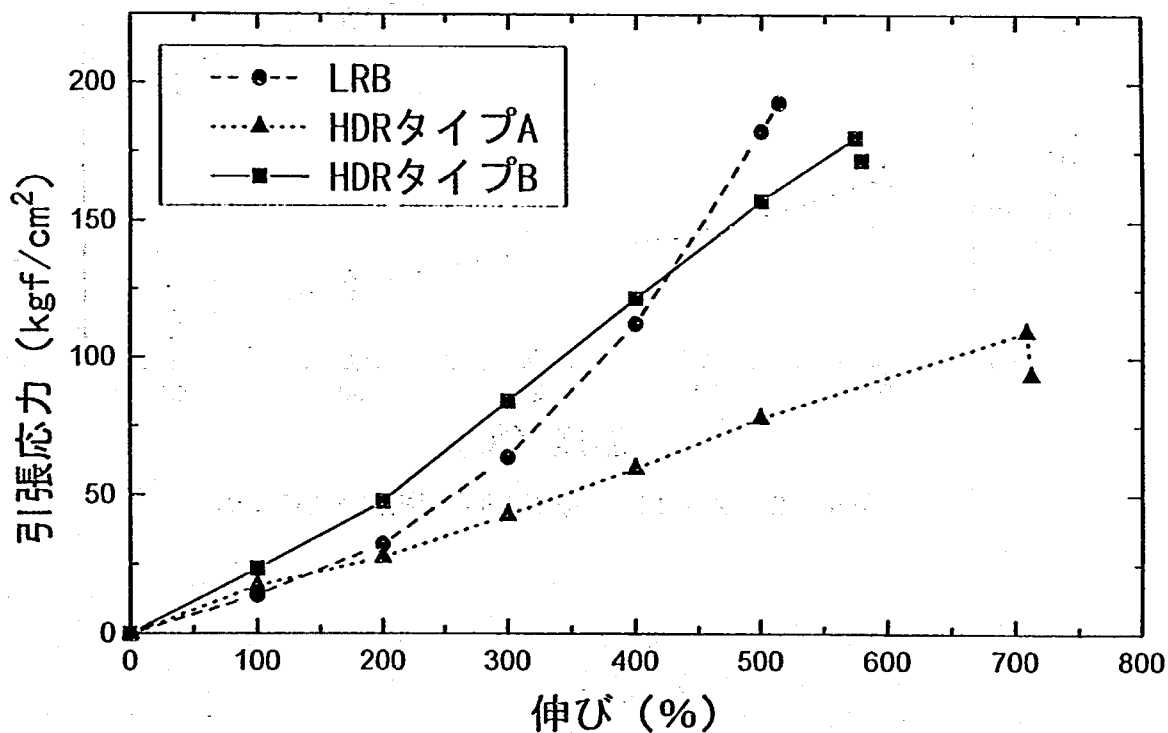


図3. 2-1 材料試験(+20℃)における応力～伸び関係

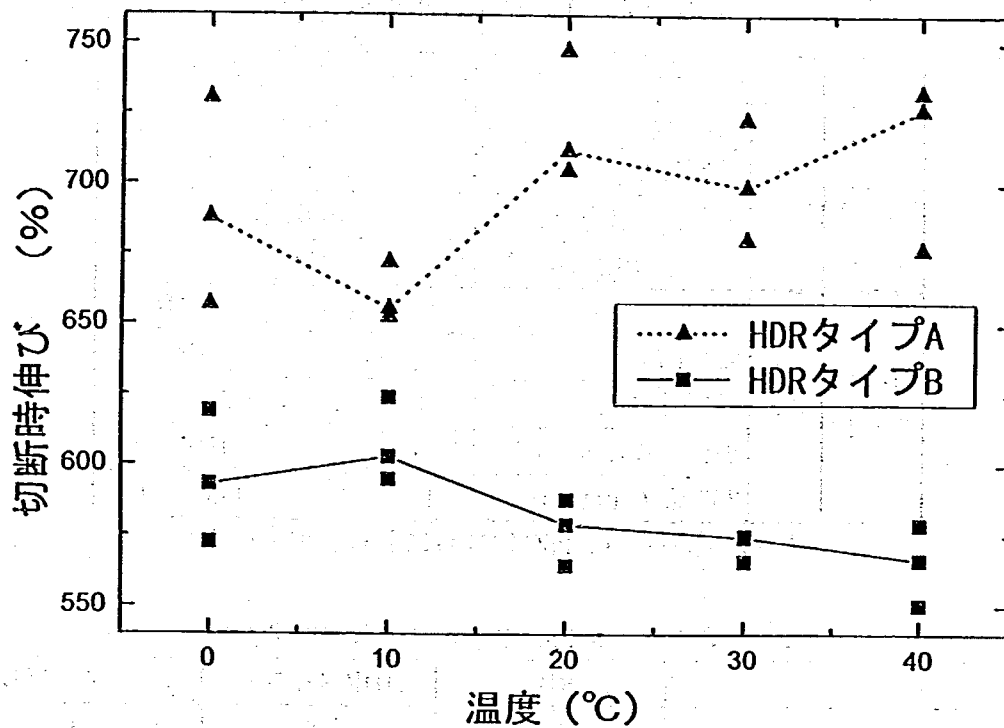


図3. 2-2 (1) 試験温度とゴム切断時伸びとの関係

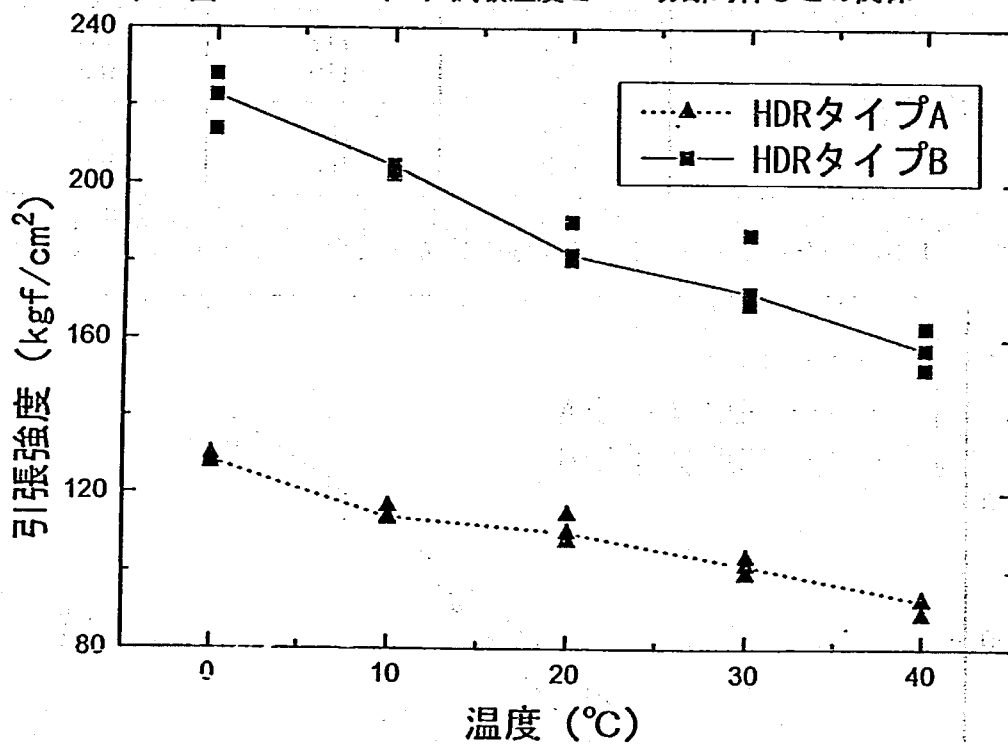


図3. 2-2 (2) 試験温度と引張強度との関係

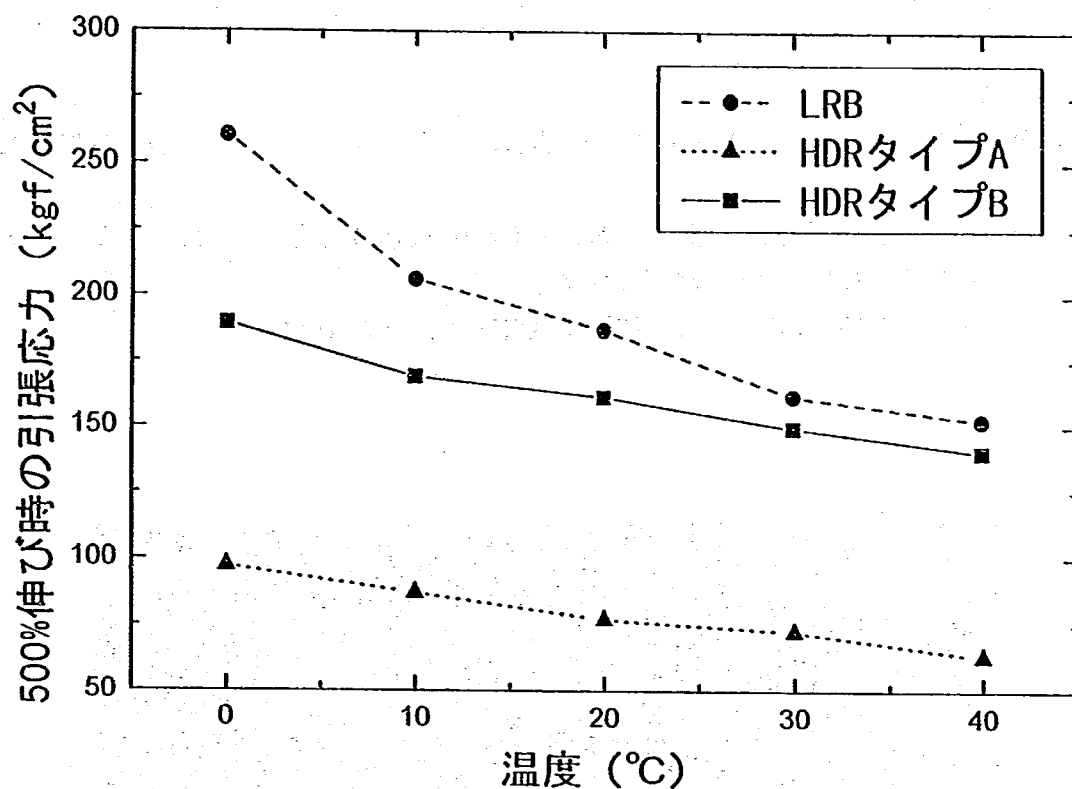


図3. 2-3 試験温度とゴムの引張応力(500%)との関係

表3. 2-3 500%伸び時における引張応力の変化 (kgf/mm²)

供試体	0℃時の引張応力	40℃時の引張応力	応力の変化率
LRB	2.607	1.510	-42.1%
HDRタイプA	0.970	0.630	-35.1%
HDRタイプB	1.574	1.282	-18.6%

第4章 免震支承の載荷実験

4. 1 実験方法

免震支承の載荷実験は、写真4. 1-1に示す試験装置を用いて行った。同装置の性能を表4. 1-1に示す。

本実験は、標準試験、温度依存性試験および疲労試験の3種類の実験を行った。また、標準試験および温度依存性試験を行う前には、予備載荷を行った。

予備載荷および全ての試験において、載荷周波数0.5Hzのsin波で載荷を行った。

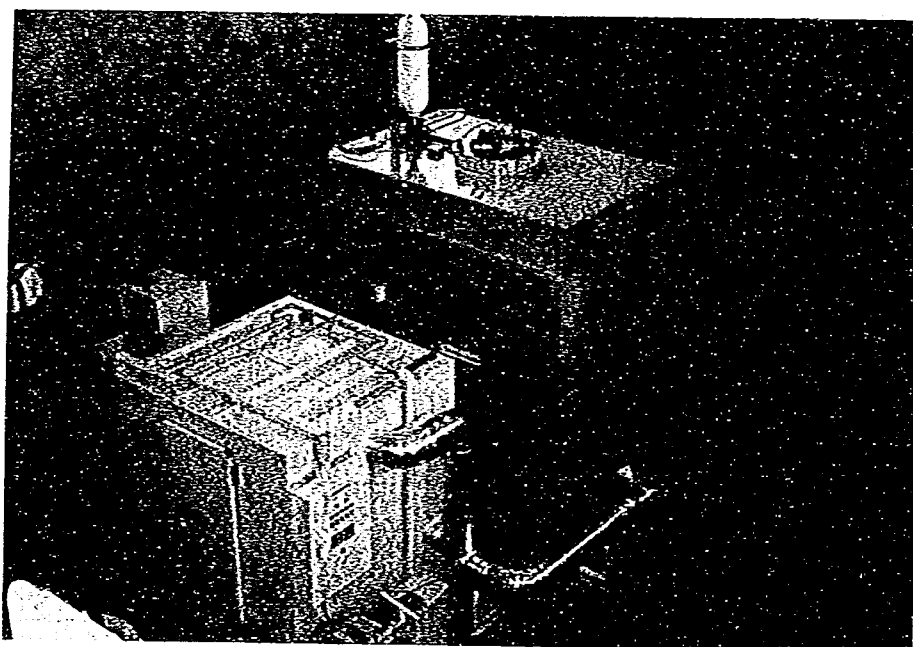


写真4. 1-1 試験装置

表4. 1-1 試験装置の性能

項 目	諸 元
最大鉛直力	200tf
最大水平力	±125tf
水平最大振幅	±300mm
水平加振周波数	DC~30Hz
最大供試体寸法	40cm×40cm
温度可変範囲	-30~+30℃
温度保持精度	±2℃

4. 2 実験供試体

実験に用いた供試体は、鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）と高減衰積層ゴム支承（HDR、タイプAとタイプBの2種類）の3種類である。HDRタイプA（HDR-01およびHDR-04～09）とタイプB（HDR-11およびHDR-14～19）とは、表3、2-1に示したようにゴムの材料特性のみが異なり、タイプBにはタイプAより硬度および引張強度が若干大きいゴムが用いられている。それぞれの供試体の形状寸法を図4、1-1（1）～（2）に示す。

また、供試体には、中央部および表面付近の地点に、熱電対を設置し、供試体の各部が所定の試験温度（ $\pm 3^{\circ}\text{C}$ を目安とした）に達するまで、温度調整を行った。

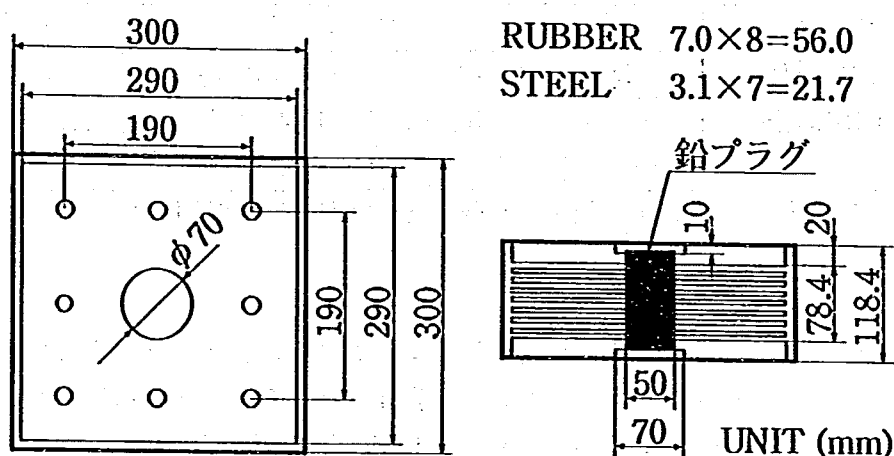


図4. 2-1（1） LRB供試体の断面寸法

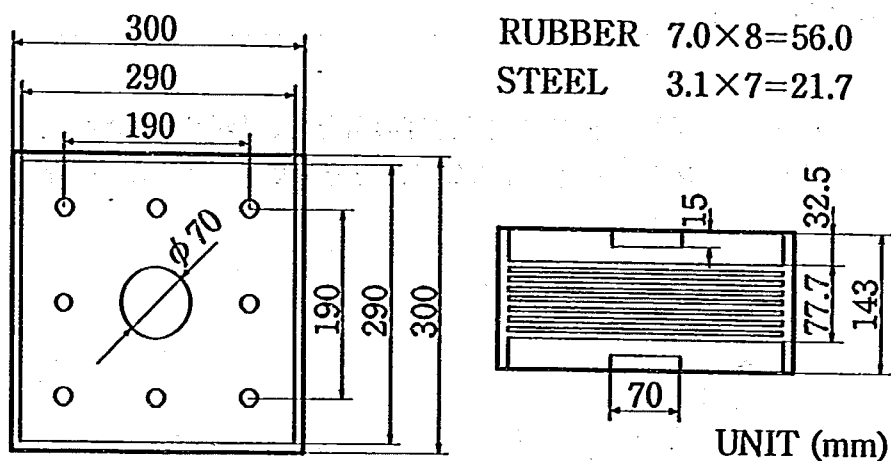


図4. 2-1（2） HDR供試体の断面寸法

4. 3 実験内容

(1) 予備載荷

試験に先立ち、20℃の試験温度のもとで、支承のならしとして予備載荷を行った。各供試体の載荷振幅および繰返し回数、鉛直荷重を表4. 3-1に示す。鉛直荷重は、全ての載荷実験において、LRBでは支圧応力度が60kgf/cm²、HDRでは支圧応力度が50kgf/cm²となるような標準的な荷重とし、繰返し載荷中においても、ほぼ一定の鉛直荷重を加えた。

実験において、載荷振幅とは水平載荷時におけるゴムのせん断ひずみであり、ゴム総厚に相当する水平変位を供試体頭部に与えた場合を載荷振幅100%とした。また、全ての載荷実験において、振動数0.5Hzの正弦波とした。

なお、以後の載荷実験結果と比較する基本ヒステリシスはLRBでは載荷振幅150%の3回目、HDRでは②載荷振幅150%の3回目の載荷で得られたものとした。

表4. 3-1 予備載荷

供試体	載荷振幅および繰返し回数	鉛直荷重
LRB供試体	50%(5回)→100%(5回)→150%(5回)	49.3tf
HDR供試体	①50%(3回)→100%(3回)→150%(3回) →②50%(3回)→100%(3回)→150%(3回)	42.0tf

注) 50%(5回)とは、50%のせん断ひずみを正負の方向に5回繰返すことを示す。

(2) 標準試験

標準試験は、20℃の試験温度のもとで、載荷振幅による等価剛性、等価減衰定数の変化および繰返し載荷に対する安定性を検討するために行ったもので、表4. 3-2に示す載荷振幅および繰返し回数で載荷を行った。載荷振幅は、50%程度の小さな変位、100%程度の中程度の変位、150%程度の大きな変位の3ケース行った。繰返し回数は「建設省道路橋の免震設計法マニュアル(案)」⁹⁾に従い、それぞれ10回とした。

表4. 3-2 標準試験

供試体	載荷振幅および繰返し回数	鉛直荷重
LRB-01	50%(10回)→100%(10回)→150%(10回)	49.3tf
HDR-01		42.0tf
HDR-11		

また、表4. 3-2の載荷が終了後、20℃の試験温度のもとで、載荷振幅200%による50回の正負連続繰返し試験を行い、免震装置に有害な損傷(免震効果に影響を及ぼすような構造的な損傷)があるかどうかを確認した。

(3) 温度依存性試験

温度依存性試験は、試験温度による等価剛性、等価減衰定数の変化を検討するため、表4. 3-3に示す試験温度、載荷振幅および繰返し回数で載荷を行った。当初-30℃～+30℃の試験温度で行う予定であったが、供試体内部まで-10℃以下に冷やすことが不可能であったため、-10℃～+40℃（LRB供試体については、-10℃～+30℃）の試験温度で行った。

また、第1回目載荷実験終了後、20℃の試験温度のもとで、履歴経験に対する安定性試験（第2回目載荷）を行った。

この試験は、免震装置がある温度で大変位を経験した後において、初期の諸特性を有しているかどうかを調べるためのものである。

第1回目載荷とは試験温度が異なるため、予備載荷により得られた、基本ヒステリシスとの比較を行った。

表4. 3-3 温度依存性試験

		供試体 No.	第1回目載荷実験		第2回目載荷実験	
			温度 (℃)	載荷振幅(%) ()内は繰返し回数	温度 (℃)	載荷振幅(%) ()内は繰返し回数
L R B	温度 依 存 性 試 験	LRB-04	-10	150 (10)	20	150 (10) (安定性試験)
		LRB-05	0			
		LRB-06	10			
		LRB-07	20			
		LRB-08	30			
H D R タ イ プ A	温度 依 存 性 試 験	HDR-04	-10	150 (10)	20	150 (10) (安定性試験)
		HDR-05	0			
		HDR-06	10			
		HDR-07	20			
		HDR-08	30			
		HDR-09	40			
H D R タ イ プ B	温度 依 存 性 試 験	HDR-14	-10	150 (10)	20	150 (10) (安定性試験)
		HDR-15	0			
		HDR-16	10			
		HDR-17	20			
		HDR-18	30			
		HDR-19	40			

(4) 疲労試験

疲労試験は、温度依存性試験（第2回目载荷）終了後、第1回目载荷と同じ試験温度で、以下に示す载荷振幅、繰返し回数で行った。

また、疲労試験における、载荷振幅および繰返し回数は、免震橋梁の供用期間中（100年間）に50%程度の小さな振幅が800回、150%程度の大きな振幅が200回程度起こると想定し、表4. 3-4に示すように決定した。

表4. 3-4 疲労試験

供試体	载荷振幅および繰返し回数	鉛直荷重
LRB	①50%(200回)→150%(50回)→②50%(200回)→150%(50回) →③50%(200回)→150%(50回)→④50%(200回)→150%(50回)	49.3tf
HDRタイプA		42.0tf
HDRタイプB		

なお、供試体に繰返し载荷を行うと、供試体の温度が上昇するが、50%(200回)→150%(50回)では連続して载荷し、①②③④の载荷前では供試体を所定の温度に戻した後、再び载荷を行った。

4. 4 実験結果

(1) 標準試験

予備載荷、標準試験および50回連続繰返し載荷試験により得られた、荷重～変位関係を図4. 4-1 (1)～(5)、図4. 4-2 (1)～(3) および図4. 4-3 (1)～(3) に示す。

載荷振幅の小さい範囲においては、LRBは、紡錘形のヒステリシスループを、HDRタイプA、HDRタイプBは、丸みをおびた楕円形のヒステリシスループを描いている。

載荷振幅が大きくなると、LRBは、平行四辺形のヒステリシスループを、HDRタイプAは、紡錘形と平行四辺形の間形状のヒステリシスループを、HDRタイプBは、ピーク値付近での勾配が急な逆S字形に近い平行四辺形のヒステリシスループを描いている。

勾配（剛性）は、HDRタイプB、LRB、HDRタイプAの順で大きくなっている。

また、いずれの供試体も、1回目の載荷で荷重が最も大きく、載荷の進行とともに減少する。しかし、いずれの供試体も、載荷回数増加に伴い、ある一定の値に収束していく。

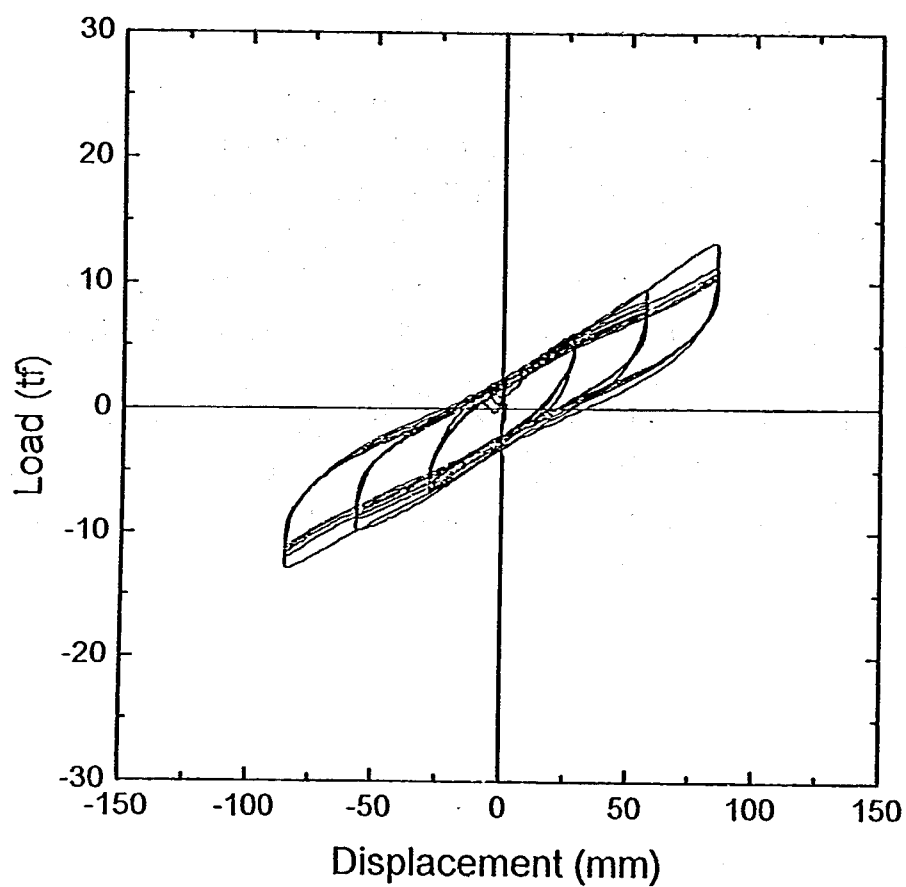


図4. 4-1 (1) 予備载荷 (LRB-01)

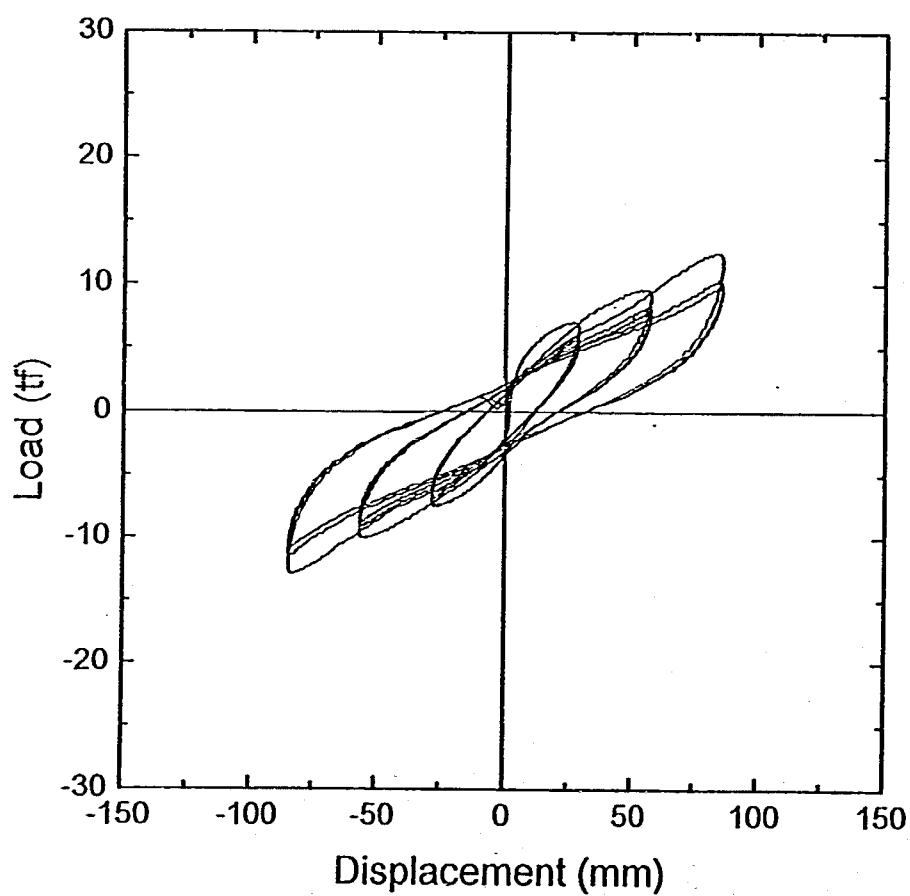


図4. 4-1 (2) 予備载荷1回目 (HDR-01)

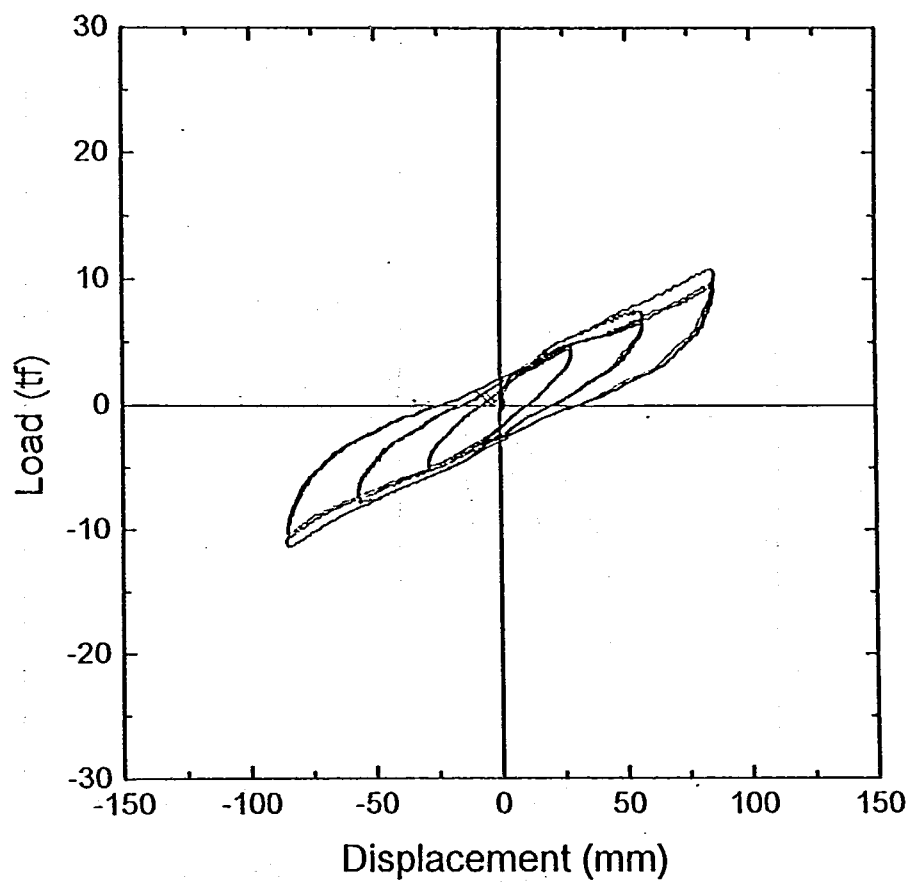


図4. 4-1 (3) 予備載荷 2 回目 (HDR-01)

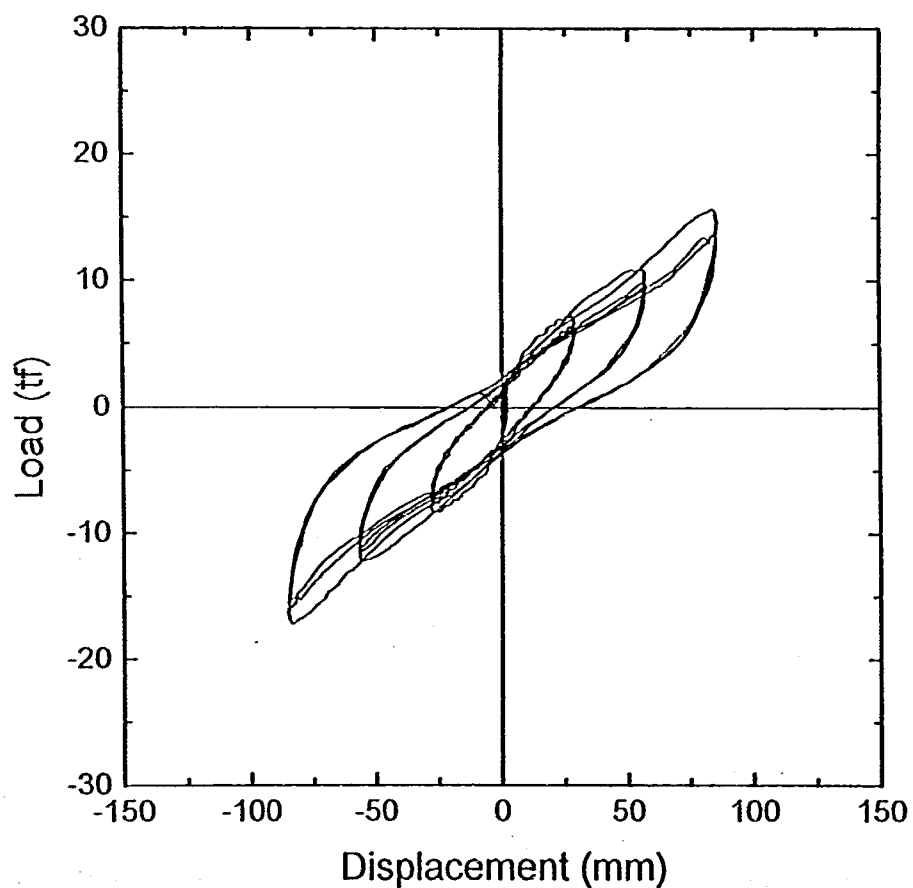


図4. 4-1 (4) 予備載荷 1 回目 (HDR-11)

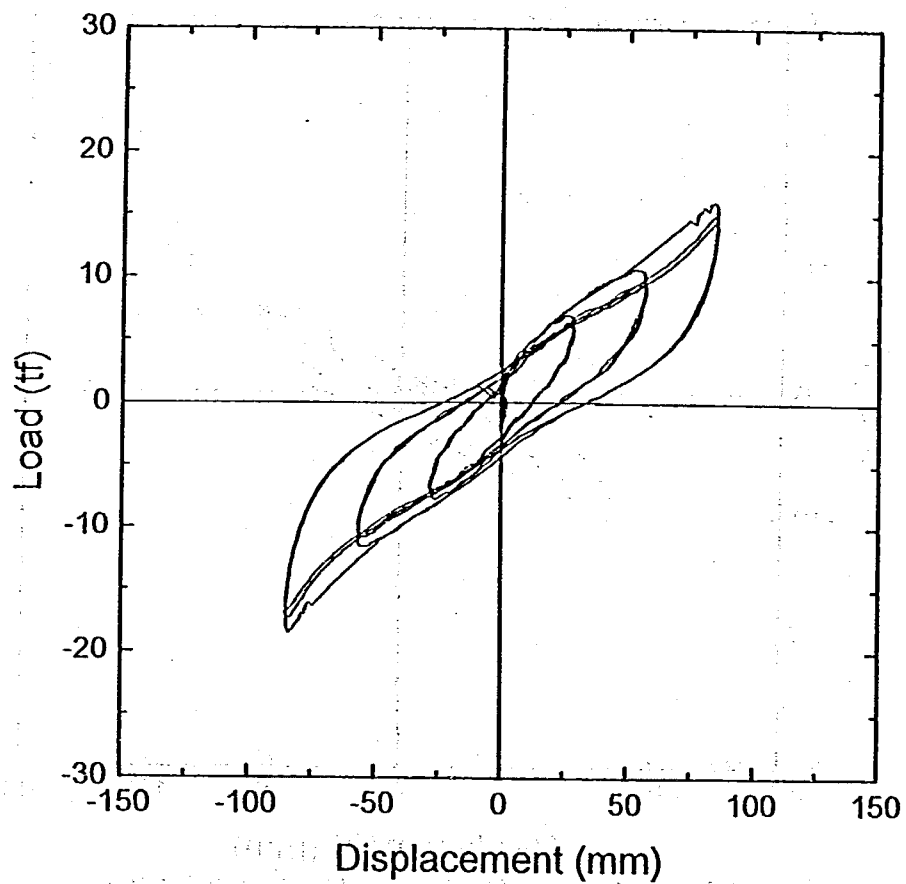


図4. 4-1 (5) 予備載荷2回目 (HDR-11)

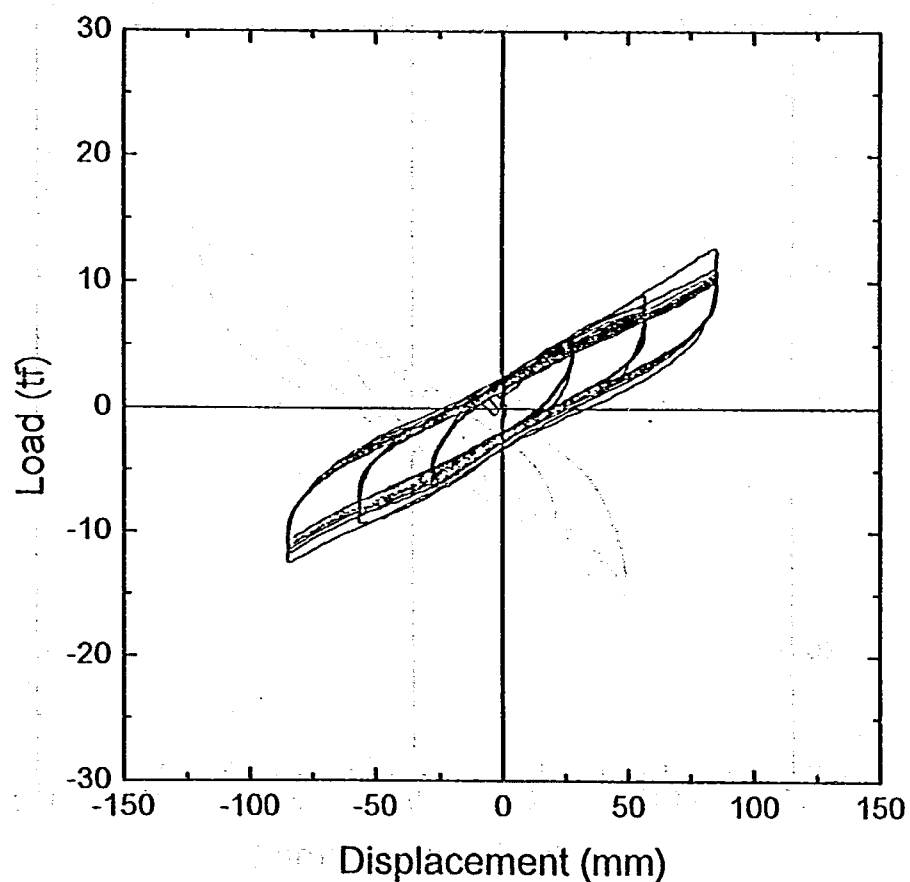


図4. 4-2 (1) 第1回目載荷 (LRB-01)

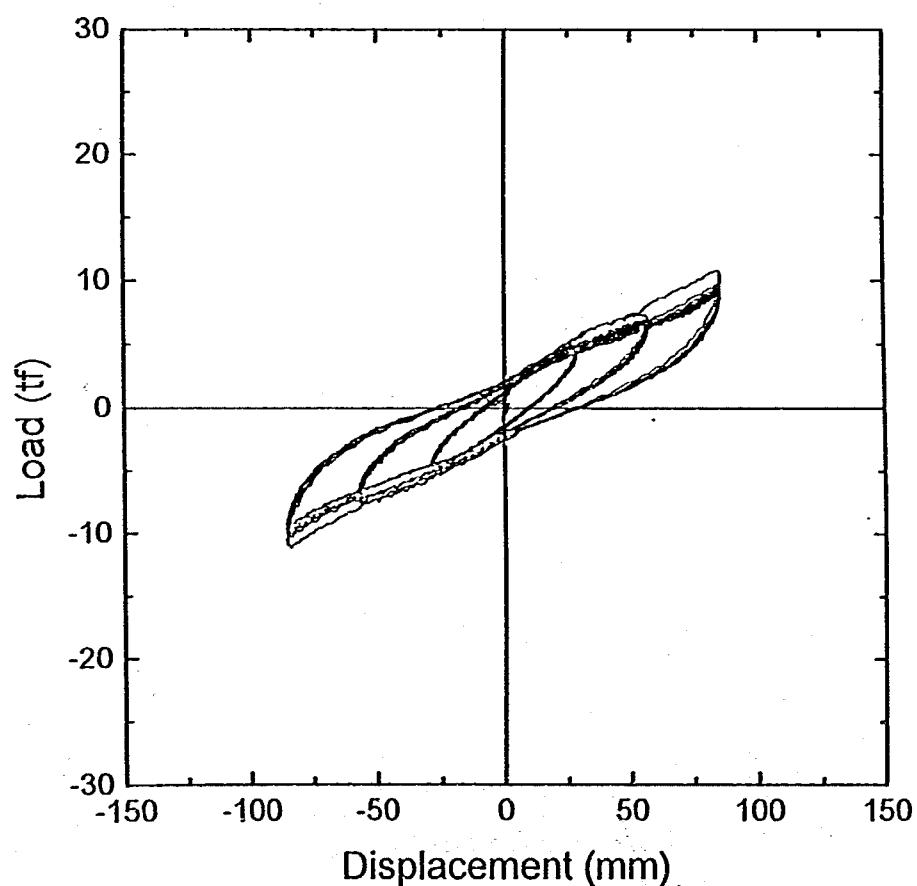


図4. 4-2 (2) 第1回目載荷 (HDR-01)

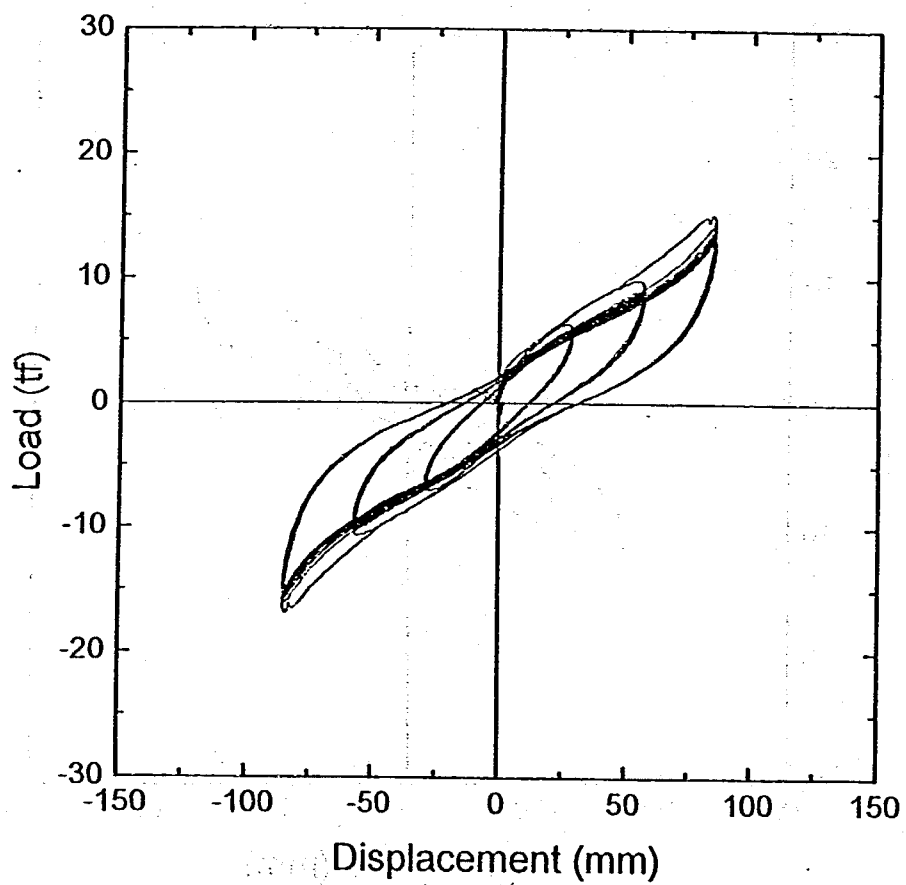


図4. 4-2(3) 第1回目載荷 (HDR-11)

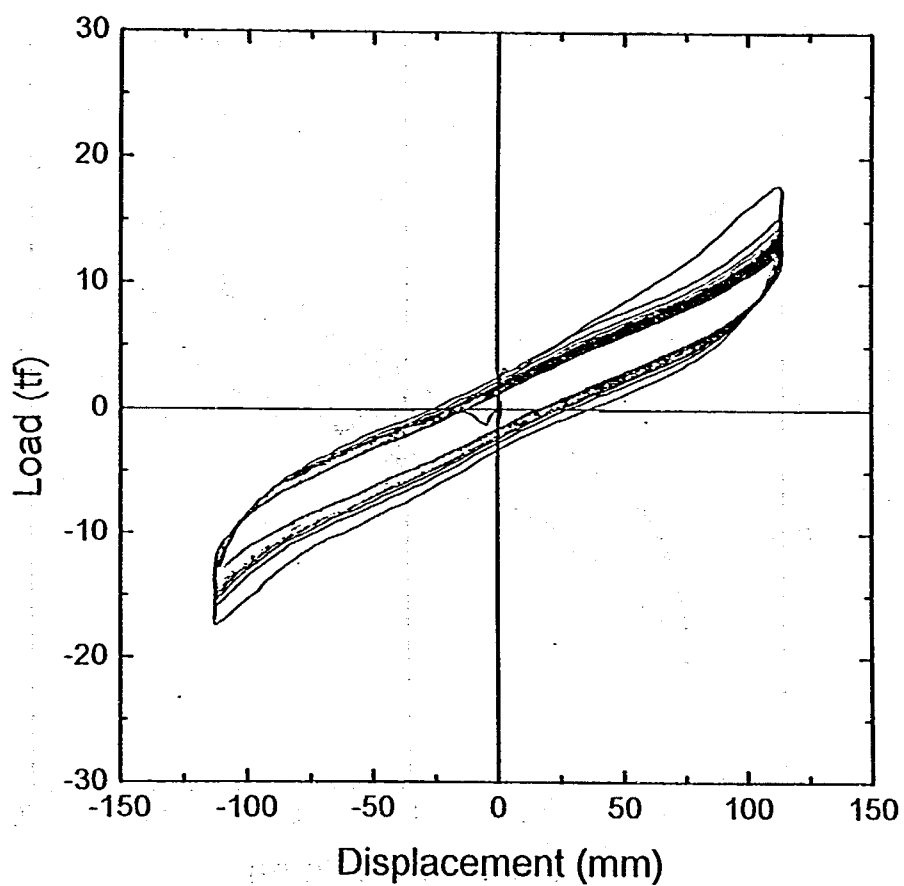


図4. 4-3 (1) 第2回目载荷 (LRB-01)

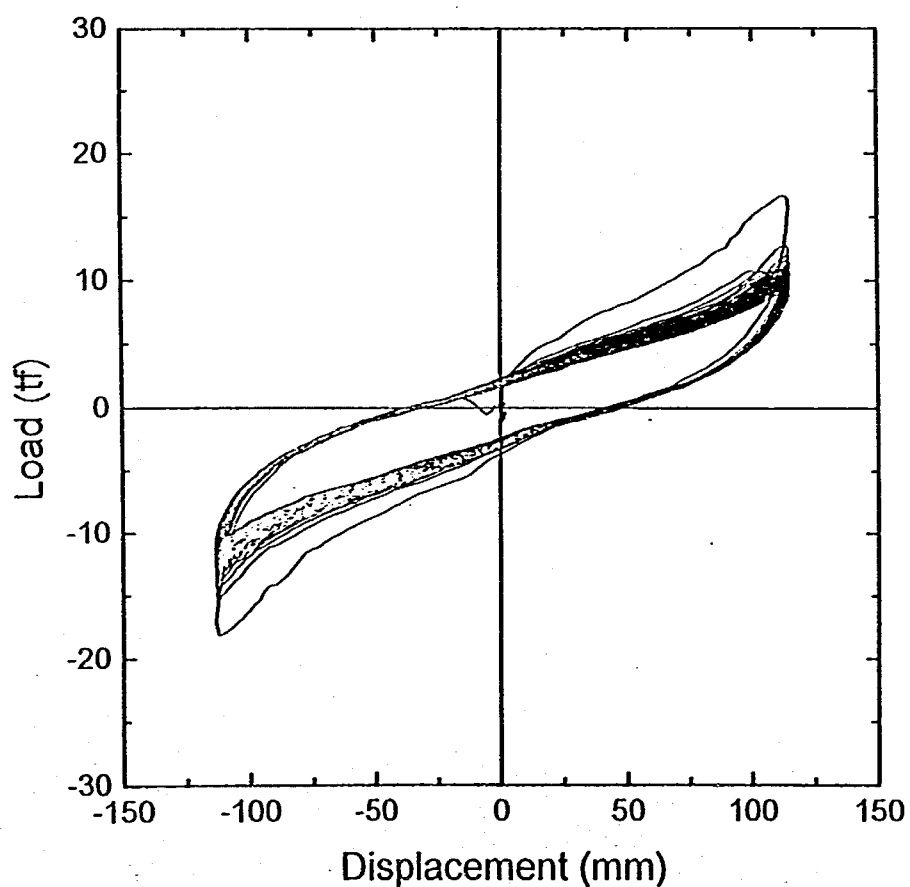


図4. 4-3 (2) 第2回目载荷 (HDR-01)

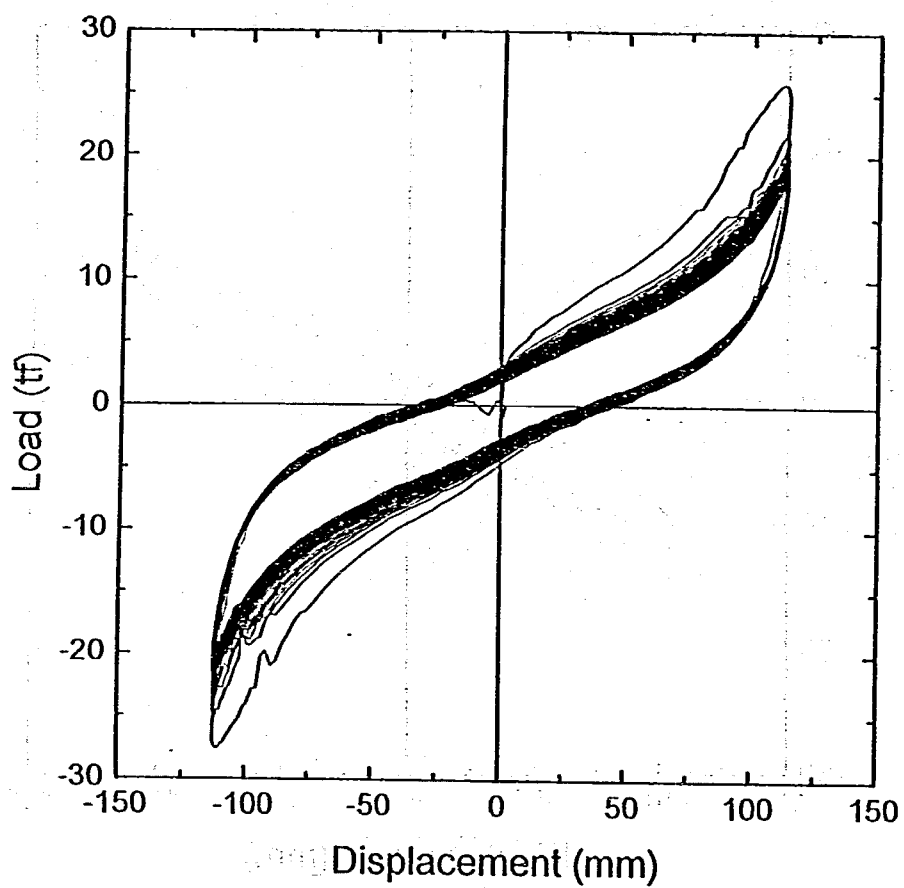


図4. 4-3(3) 第2回目载荷 (HDR-11)

(2) 温度依存性試験

予備載荷および温度依存性試験により得られた荷重～変位関係を、図4. 4-4 (1)～(29)および図4. 4-5 (1)～(17)に示す。

4. 4 (1)と同様に、LRBは、平行四辺形のヒステリシスループを、HDRタイプAは、紡錘形と平行四辺形の間形状のヒステリシスループを、HDRタイプBは、ピーク値付近での勾配が急な逆S字形に近い平行四辺形のヒステリシスループを描いている。いずれの供試体も、1回目の載荷で荷重が最も大きく、載荷回数の増加に伴い、ある一定の値に収束していく。

表4. 4-1に-10℃と+40℃の載荷により得られた第1波目の最大荷重、最小荷重を示す。-10℃と+40℃とでは、いずれの供試体とも、-10℃の方が荷重が大きく、温度変化に敏感であることがわかる。

表4. 4-1 -10℃および+40℃の最大荷重および最小荷重

供試体	温度	P_{max} (tf)	P_{min} (tf)	平均 (tf)
LRB	-10℃	14.437	13.500	13.968
	+30℃	11.887	11.737	11.812
HDRタイプA	-10℃	13.875	14.737	14.306
	+40℃	10.012	9.862	9.937
HDRタイプB	-10℃	22.087	21.075	21.581
	+40℃	13.875	15.150	14.513

また、温度依存性試験（第1回目載荷）後に行った、安定性試験（第2回目載荷）により得られた荷重～変位関係を、図4. 4-6 (1)～(17)に示す。

安定性試験においても、LRBは、平行四辺形のヒステリシスループを、HDRタイプAは、紡錘形と平行四辺形の間形状のヒステリシスループを、HDRタイプBは、ピーク値付近での勾配が急な逆S字形に近い平行四辺形のヒステリシスループを描いている。いずれの供試体も、1回目の載荷で荷重が最も大きく、載荷回数の増加に伴い、ある一定の値に収束していく。

表4. 4-2に試験温度20℃における第1回目載荷および第2回目載荷により得られた第1波目の最大荷重、最小荷重を示す。試験温度が同じ場合（20℃）、第1回目載荷と第2回目載荷とでは、ヒステリシスループはほとんど同じ形状であり、10回程度の載荷履歴経験ではほとんど影響がない。

表4. 4-2 第1回目載荷と第2回目載荷の最大荷重および最小荷重（20℃）

供試体		P_{max} (tf)	P_{min} (tf)	平均 (tf)
LRB	第1回目載荷	12.712	13.012	12.862
	第2回目載荷	12.150	12.337	12.244
HDRタイプA	第1回目載荷	11.175	12.225	11.700
	第2回目載荷	10.950	11.962	11.456
HDRタイプB	第1回目載荷	15.525	17.100	16.313
	第2回目載荷	15.862	17.025	16.444

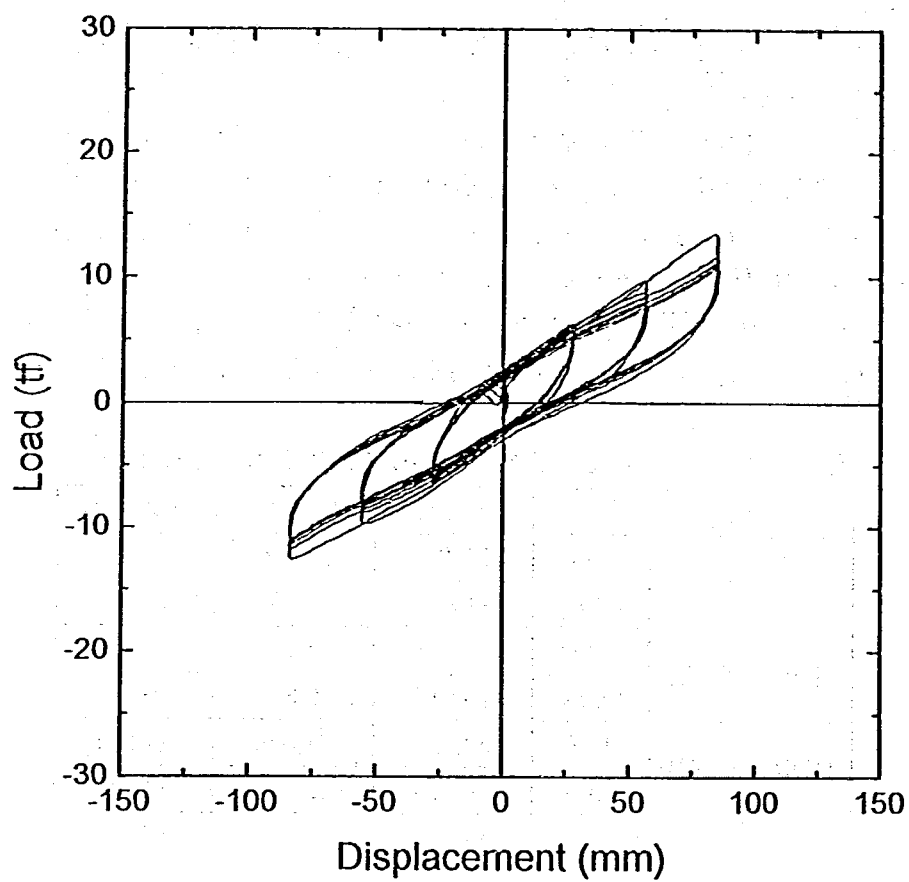


図 4. 4 - 4 (1) 予備載荷 (L R B - 0.4)

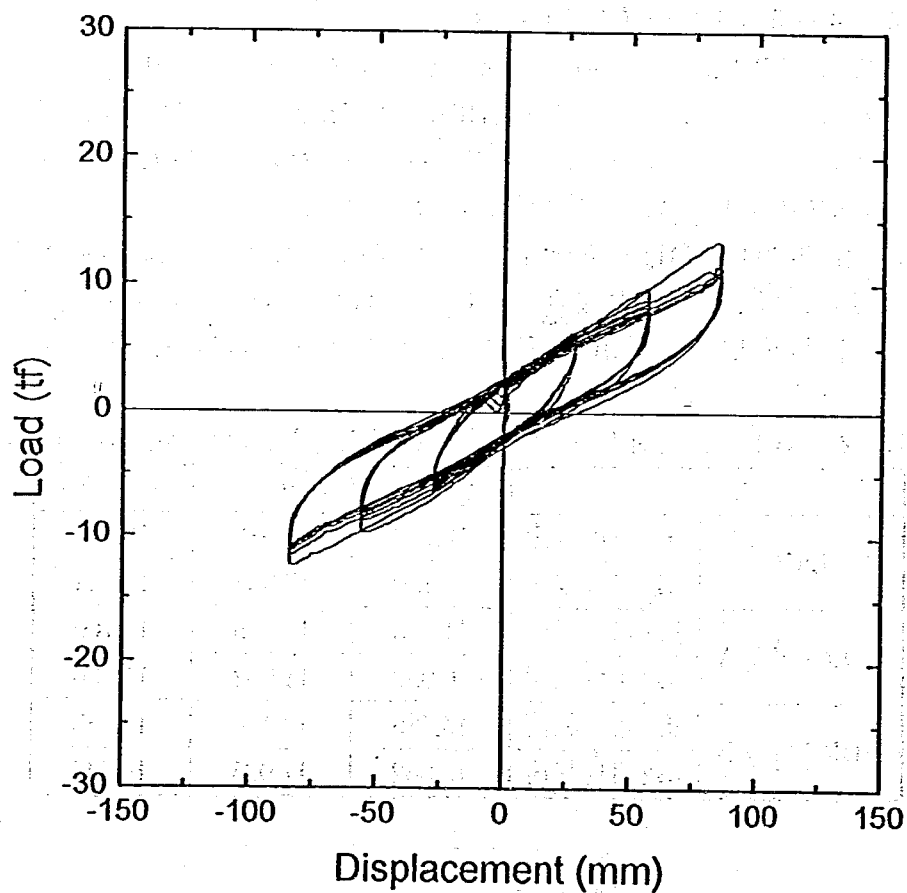


図 4. 4 - 4 (2) 予備載荷 (L R B - 0.5)

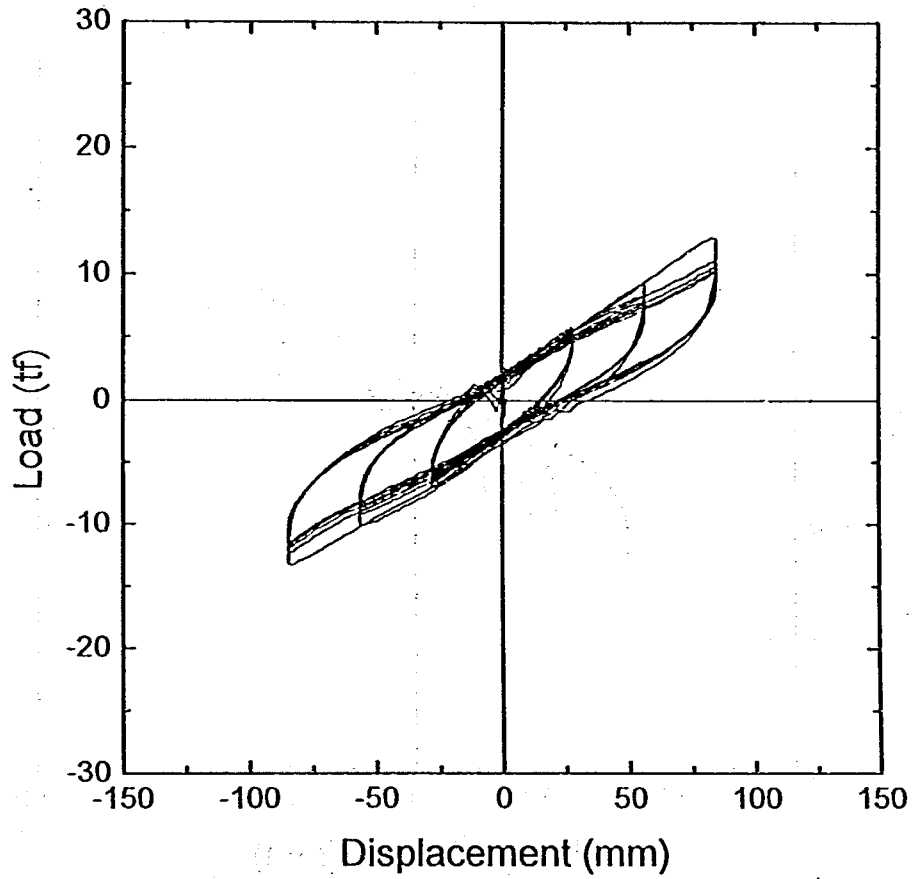


図4. 4-4 (3) 予備載荷 (LRB-06)

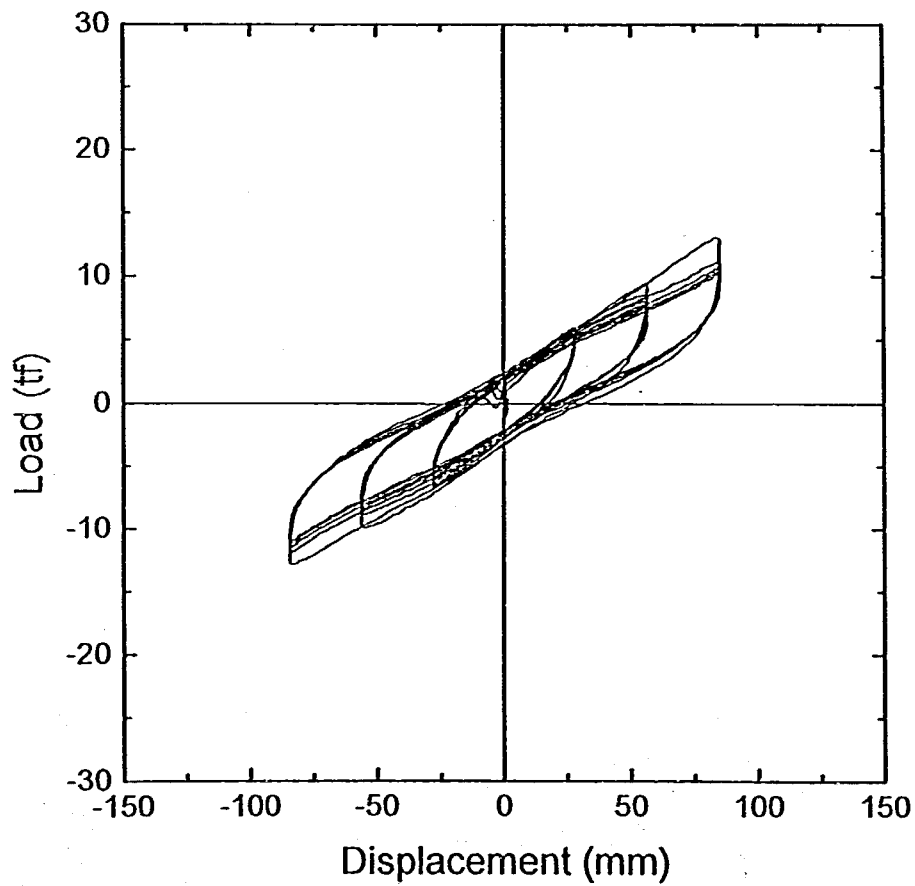


図4. 4-4 (4) 予備載荷 (LRB-07)

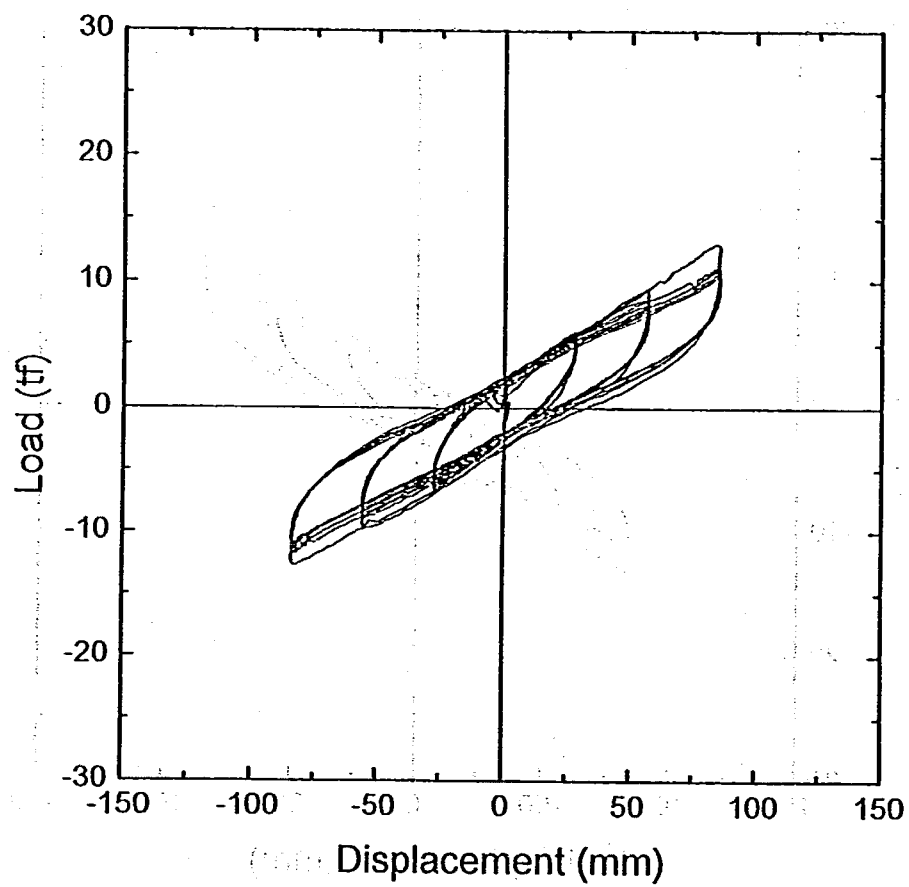


図4. 4-4(5) 予備載荷 (LRB-08)

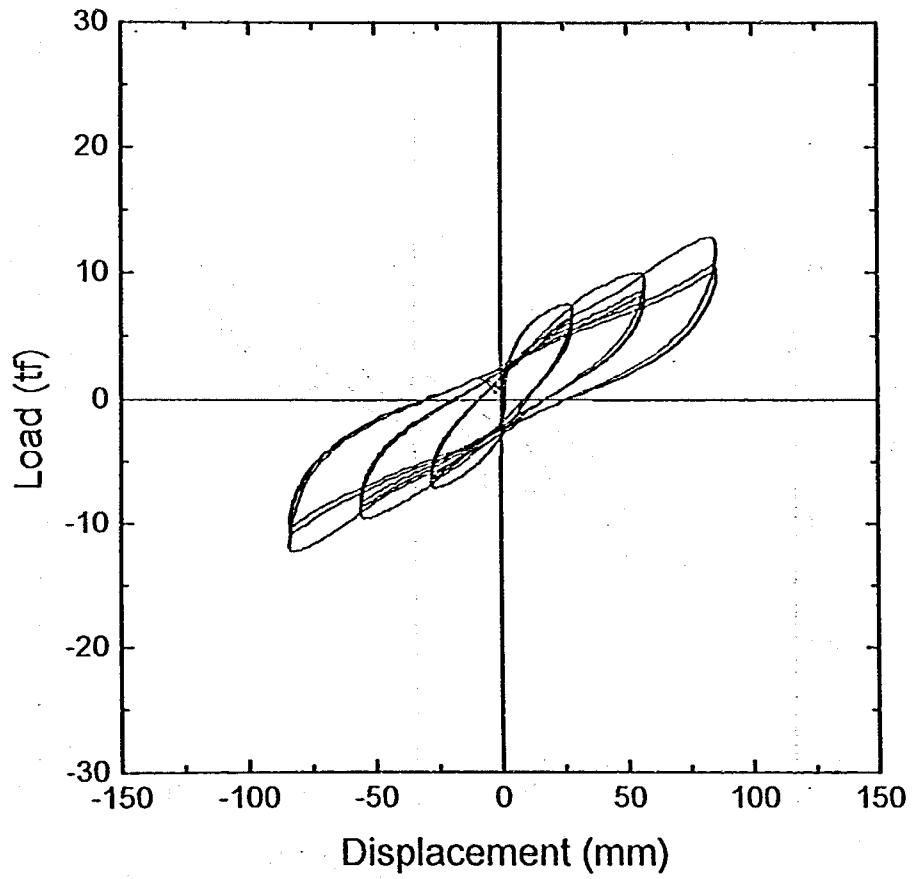


図4. 4-4 (6) 予備載荷1回目 (HDR-0.4)

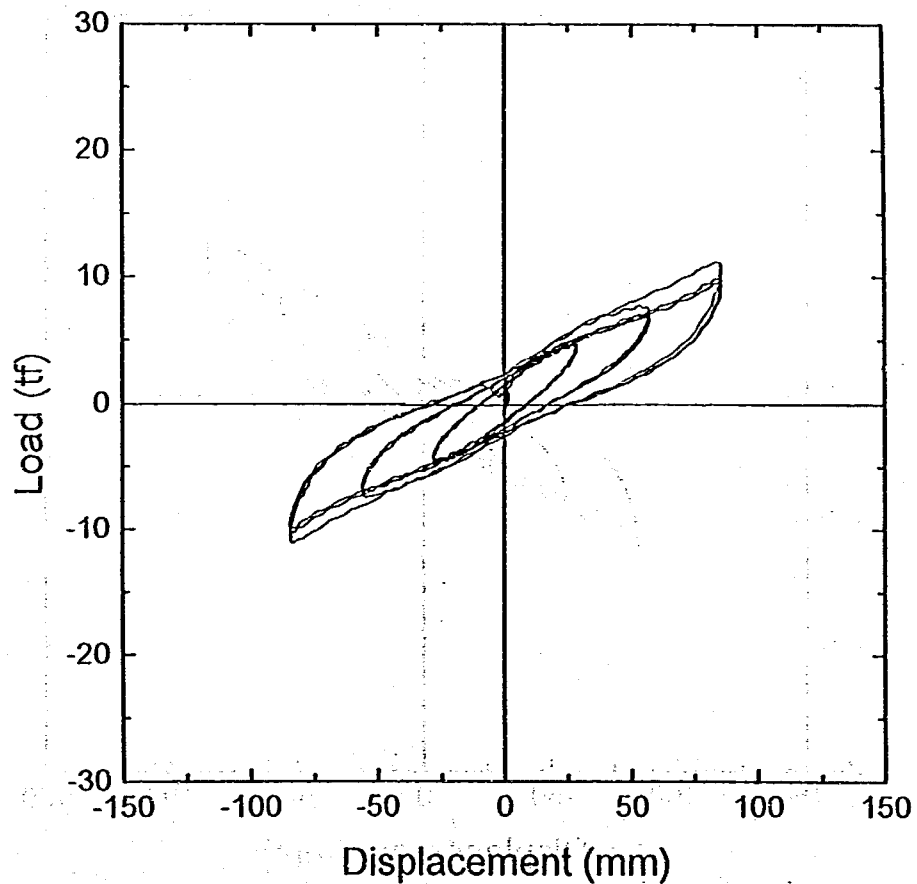


図4. 4-4 (7) 予備載荷2回目 (HDR-0.4)

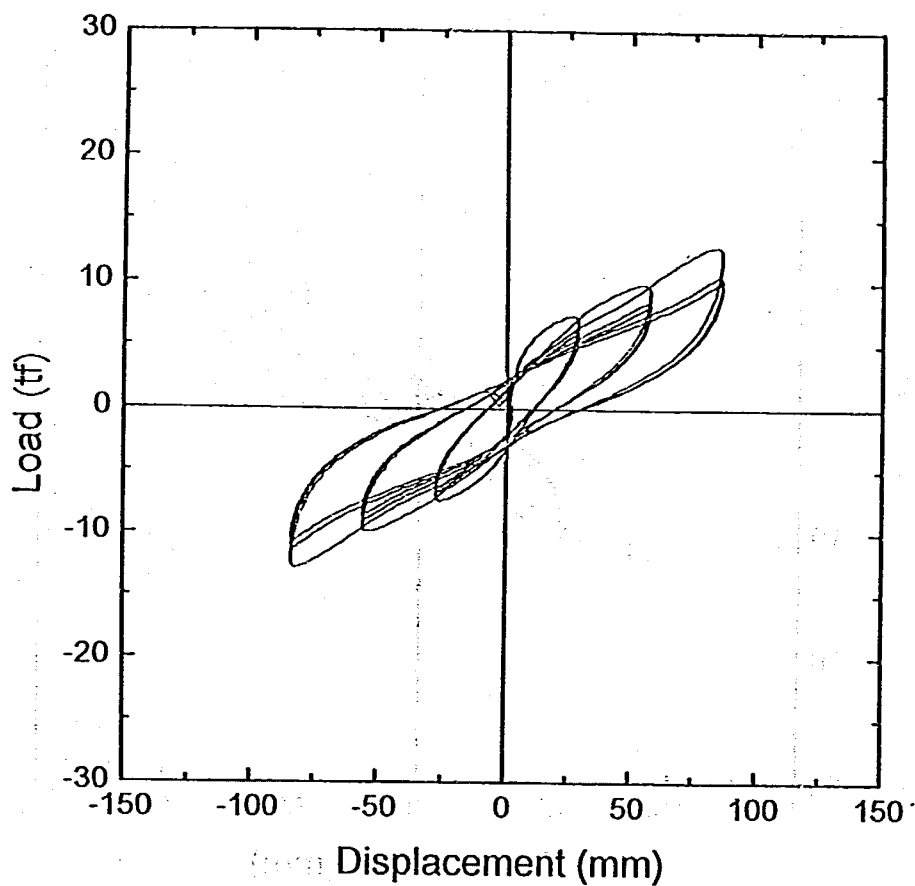


図4. 4-4 (8) 予備載荷 1 回目 (HDR-0.5)

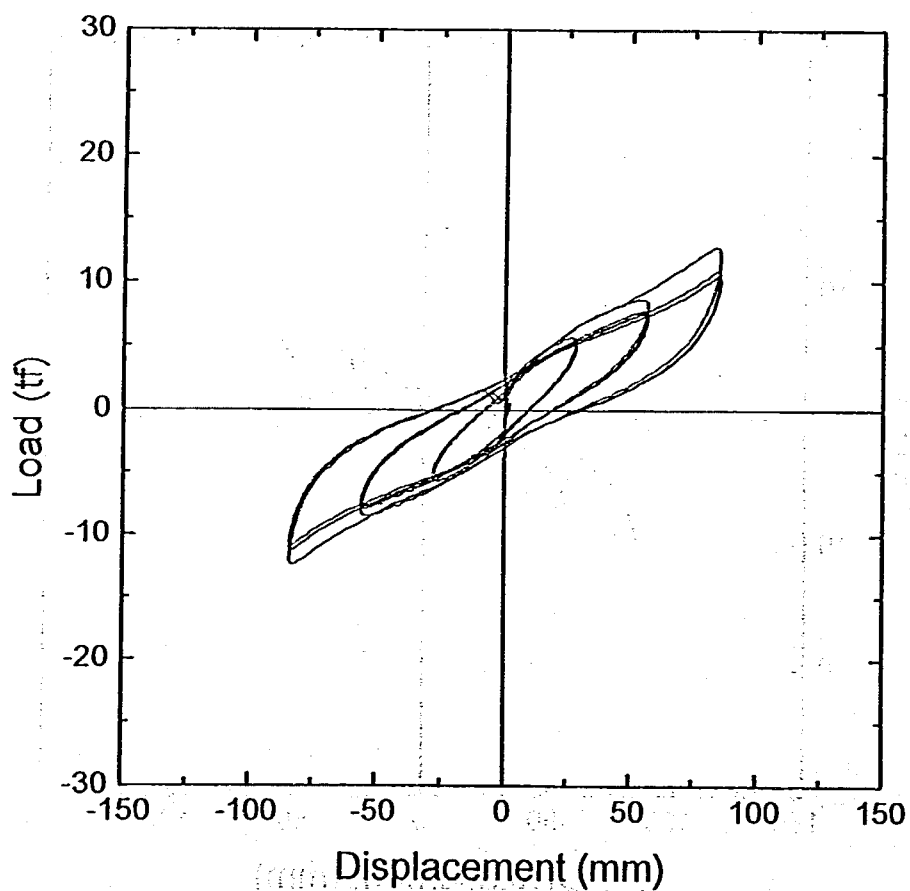


図4. 4-4 (9) 予備載荷 2 回目 (HDR-0.5)

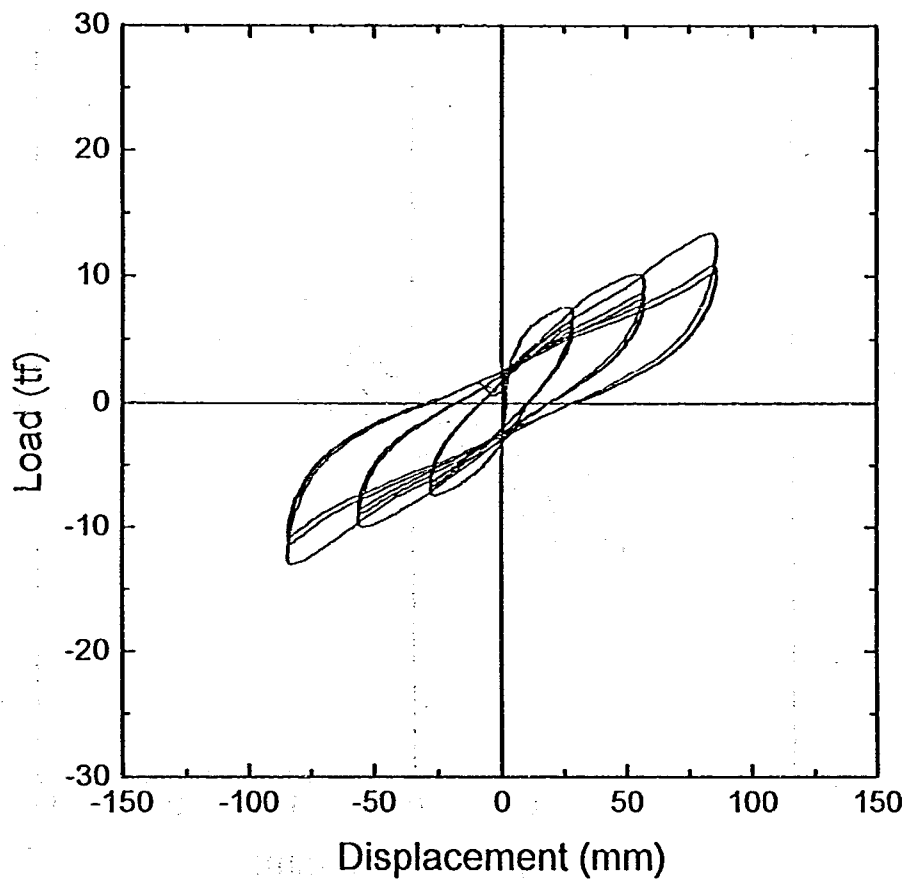


図4. 4-4 (1 0) 予備載荷1回目 (HDR-06)

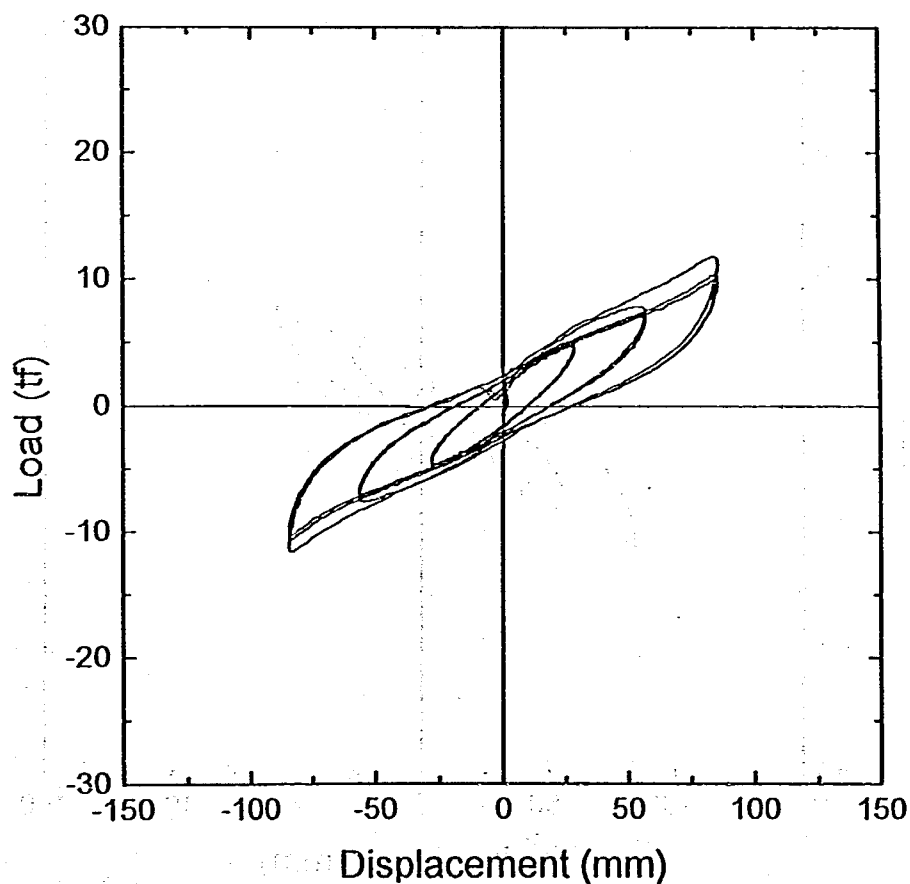


図4. 4-4 (1 1) 予備載荷2回目 (HDR-06)

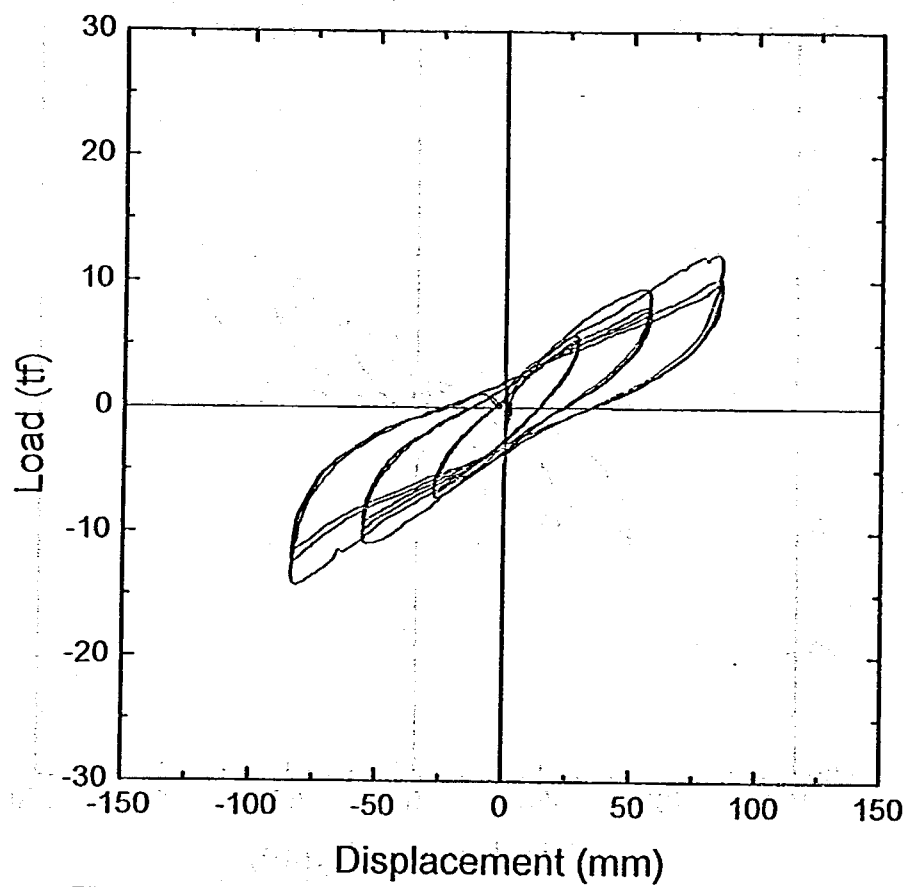


図4. 4-4 (1 2) 予備載荷 1 回目 (HDR-07)

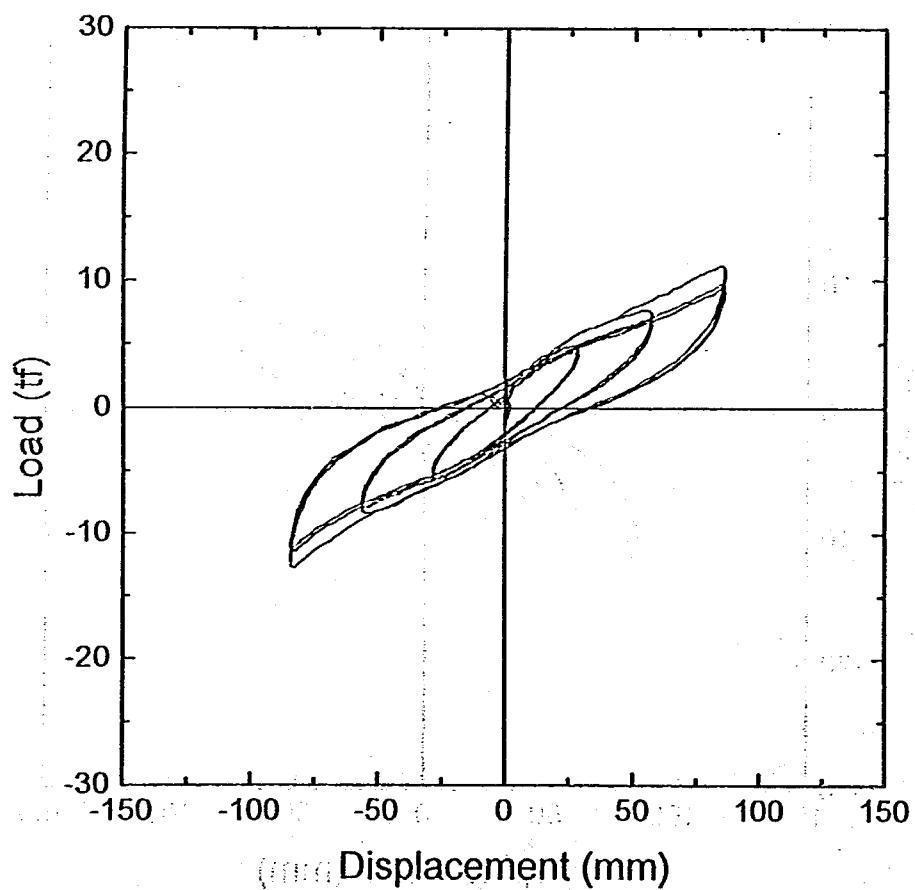


図4. 4-4 (1 3) 予備載荷 2 回目 (HDR-07)

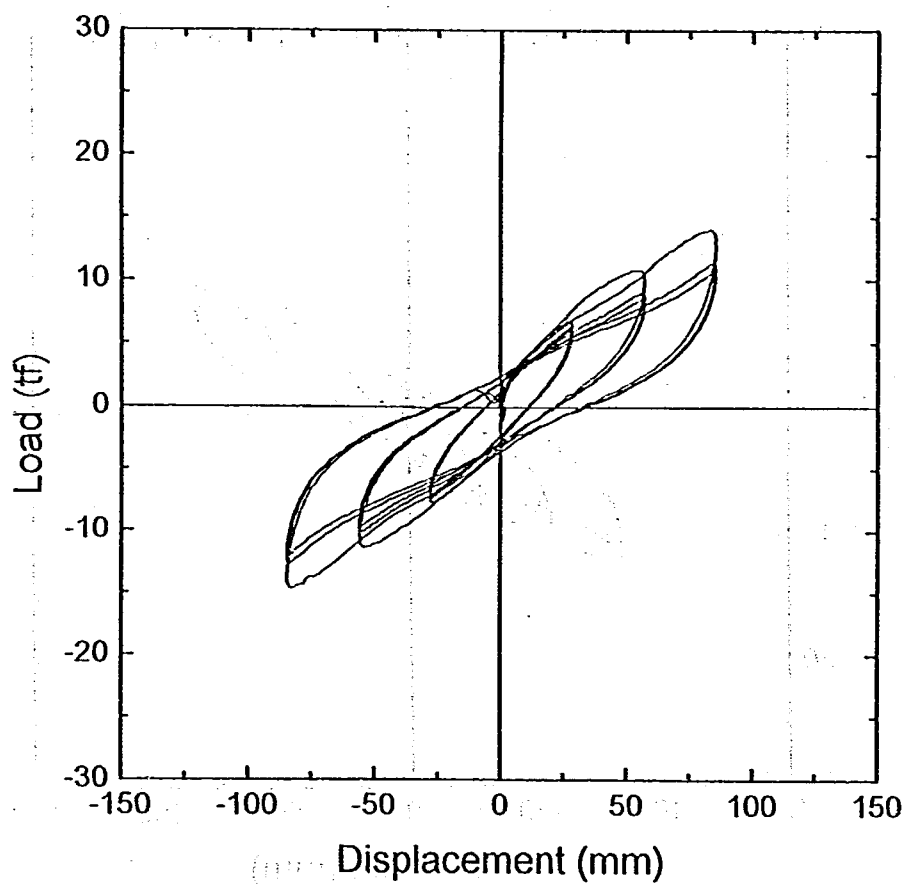


図4. 4-4 (1.4) 予備載荷1回目 (HDR-0.8)

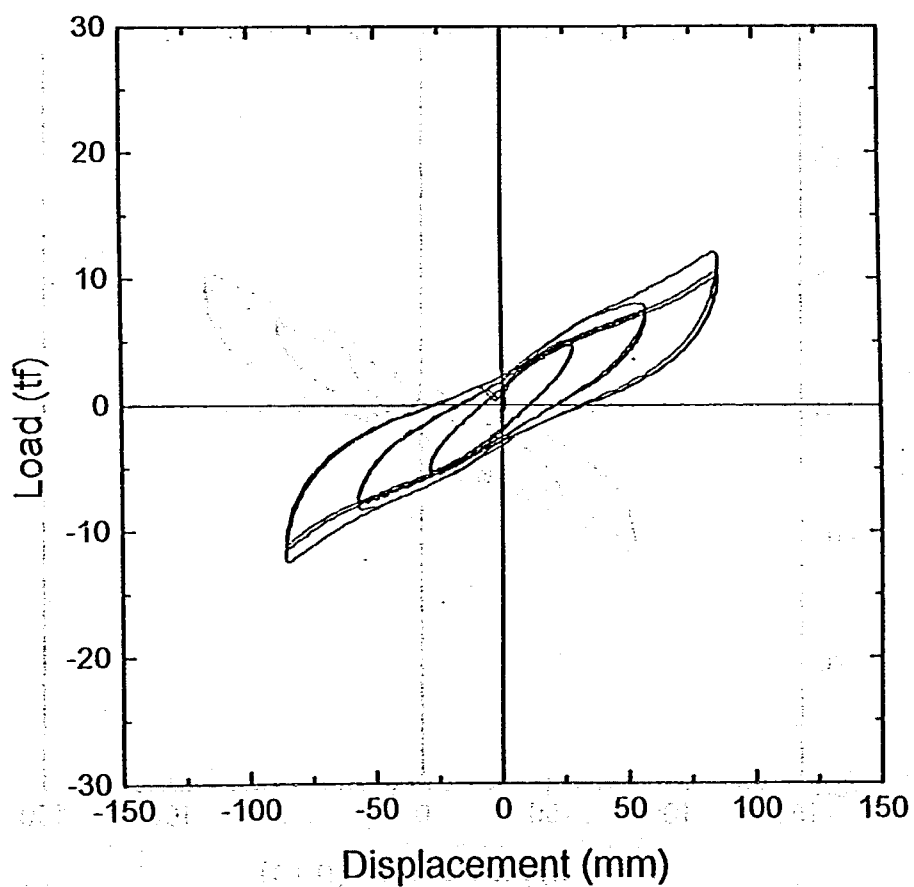


図4. 4-4 (1.5) 予備載荷2回目 (HDR-0.8)

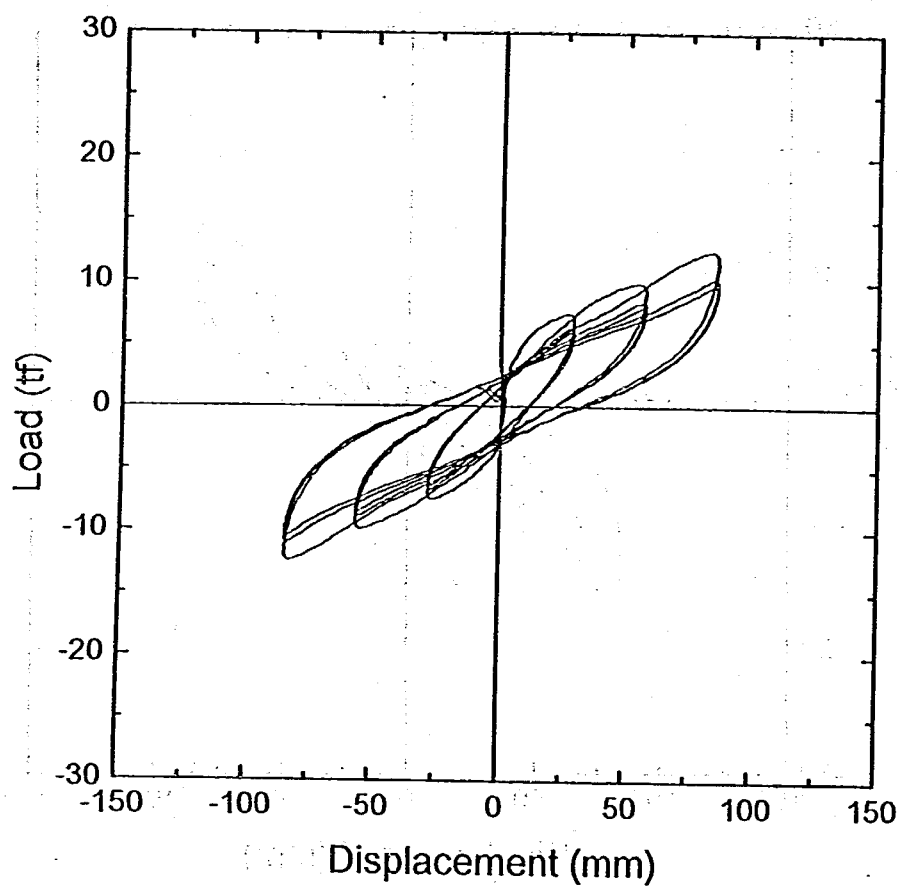


図4. 4-4 (1.6) 予備載荷 1 回目 (HDR-0.9)

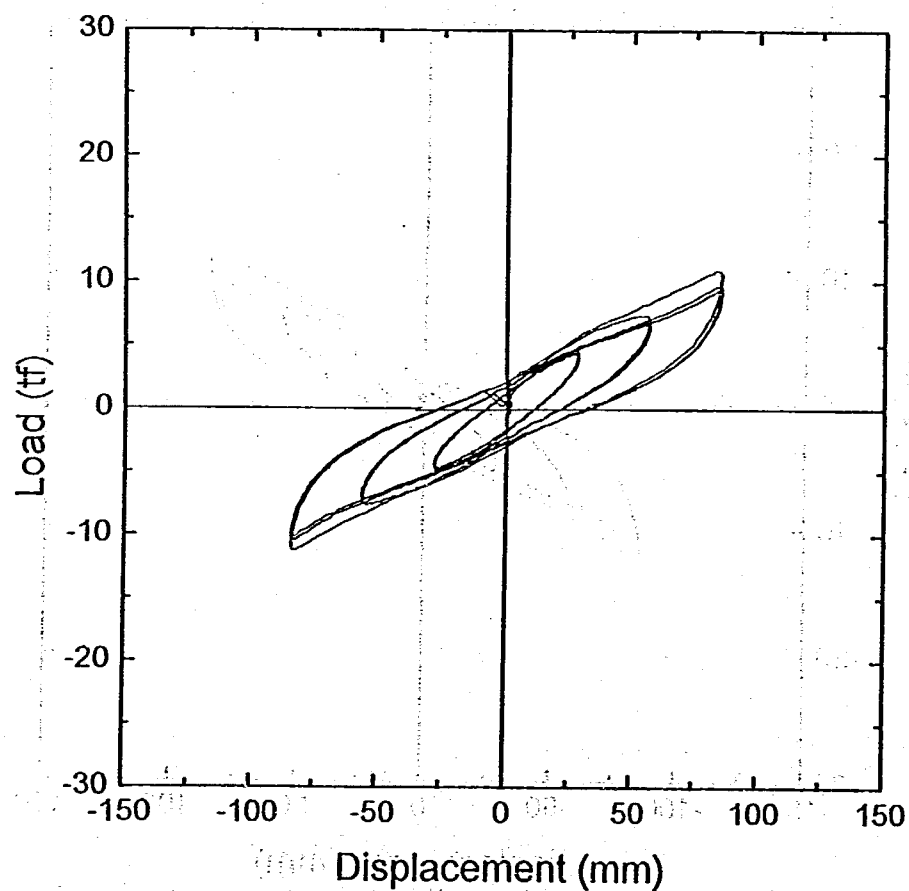


図4. 4-4 (1.7) 予備載荷 2 回目 (HDR-0.9)

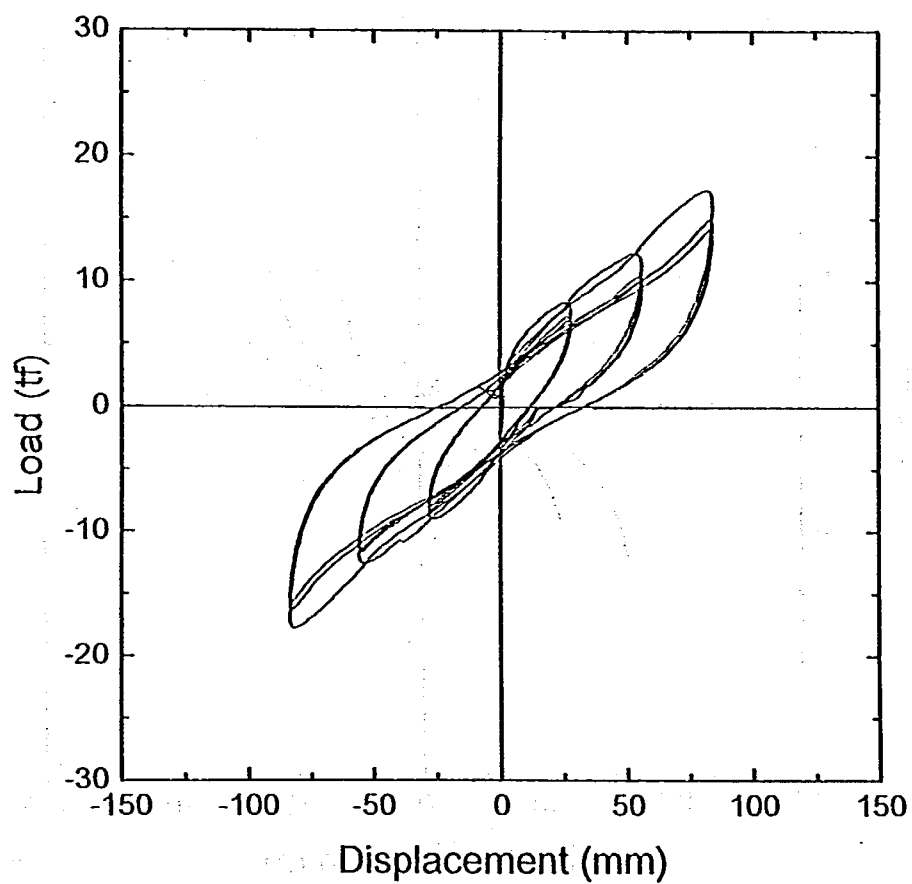


図4. 4-4 (18) 予備載荷1回目 (HDR-14)

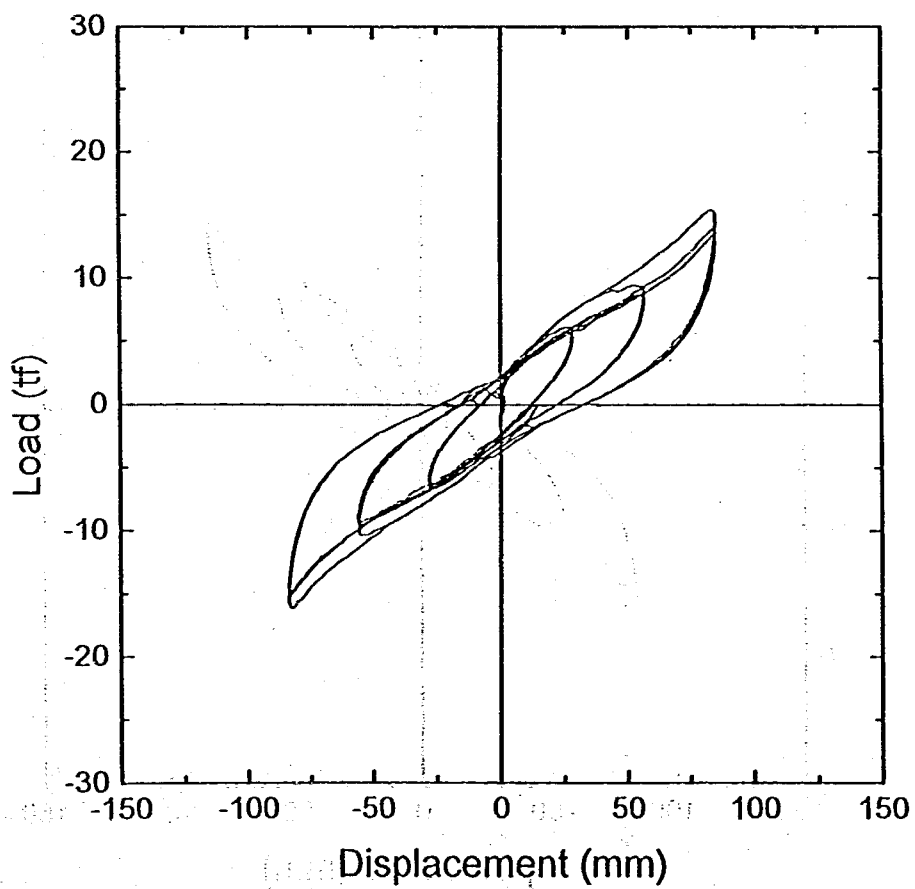


図4. 4-4 (19) 予備載荷2回目 (HDR-14)

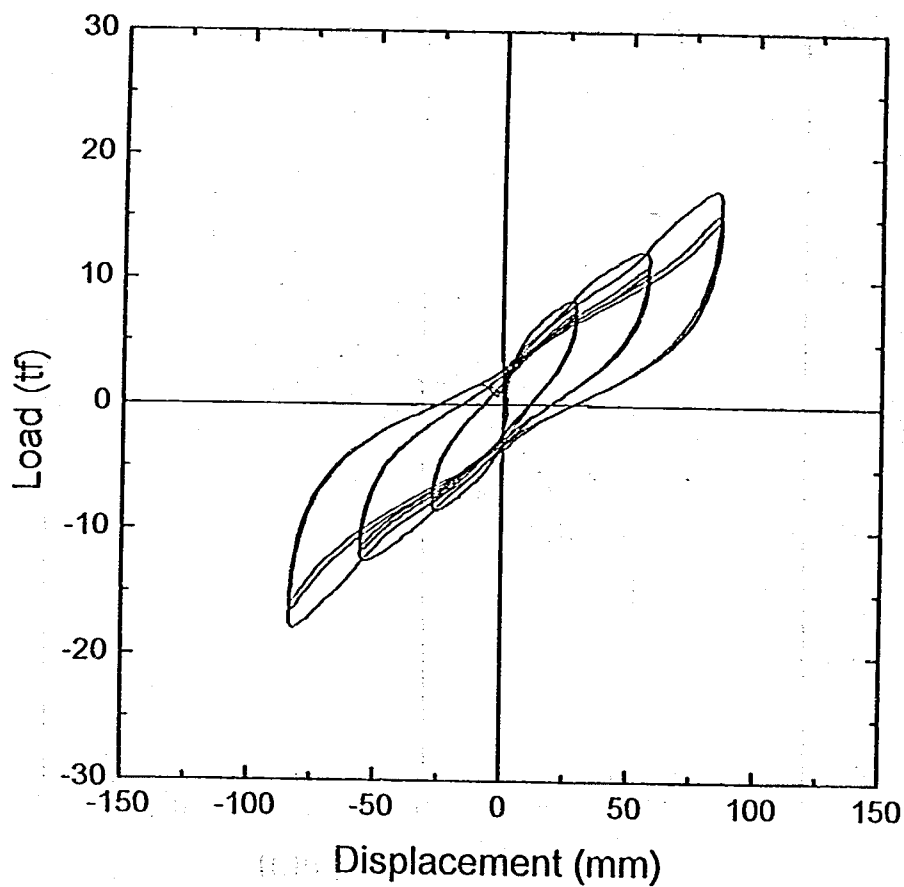


図4. 4-4 (20) 予備載荷1回目 (HDR-15)

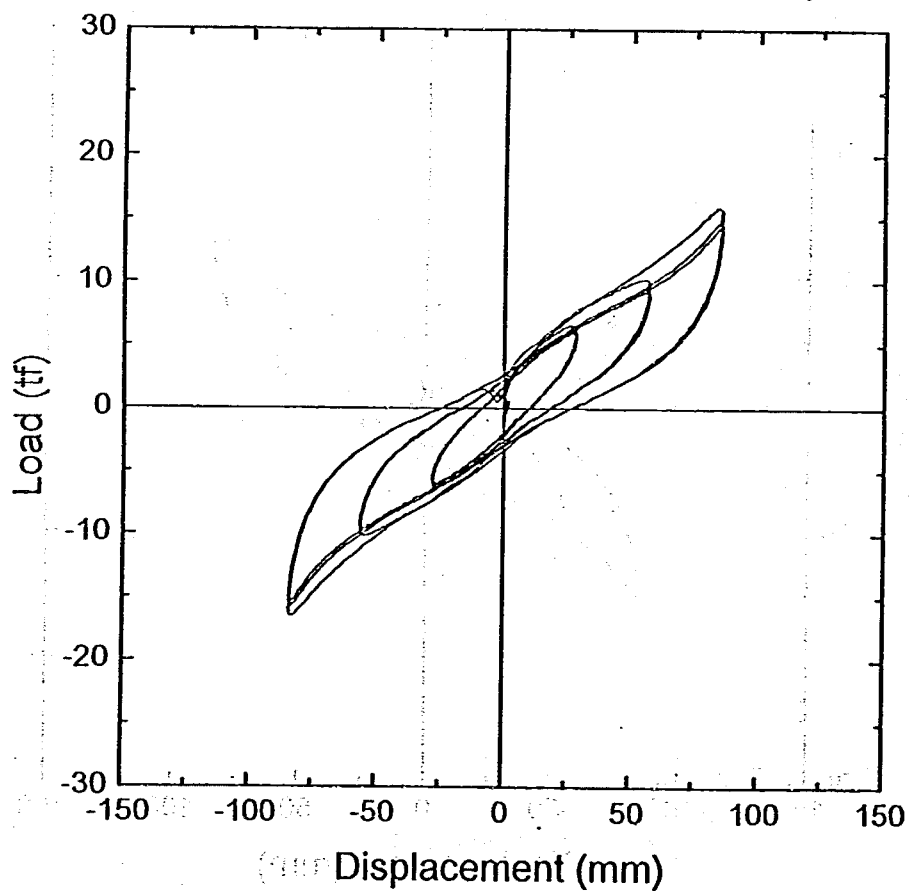


図4. 4-4 (21) 予備載荷2回目 (HDR-15)

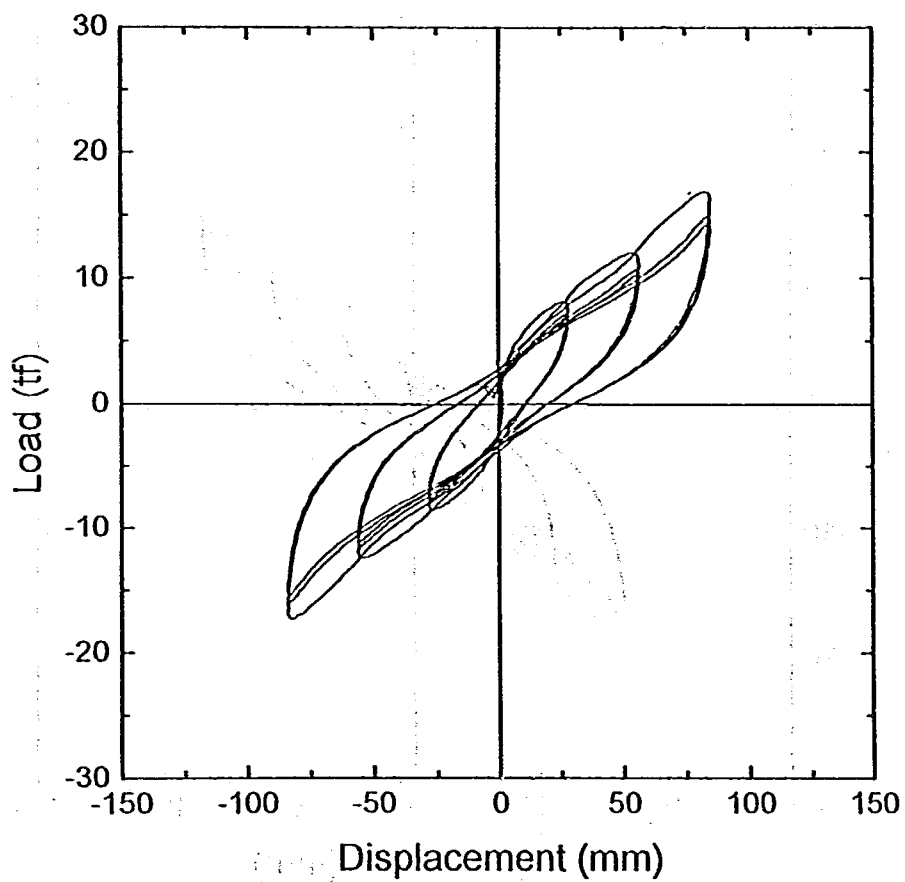


図4. 4-4 (2 2) 予備載荷 1 回目 (HDR-16)

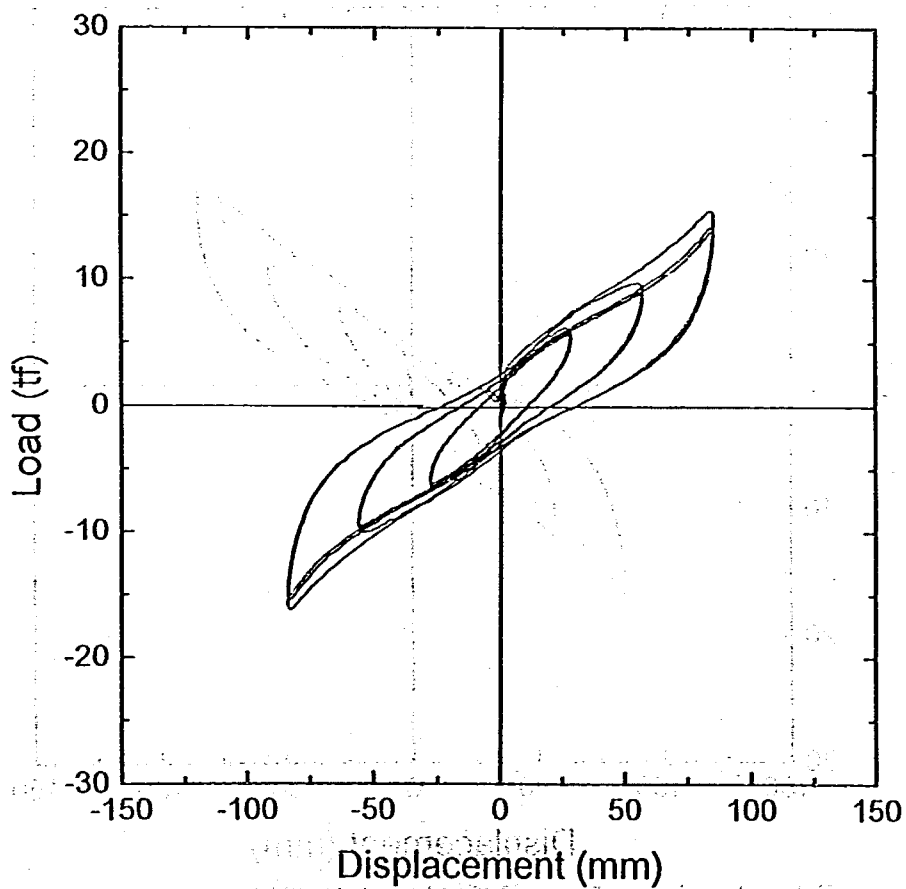


図4. 4-4 (2 3) 予備載荷 2 回目 (HDR-16)

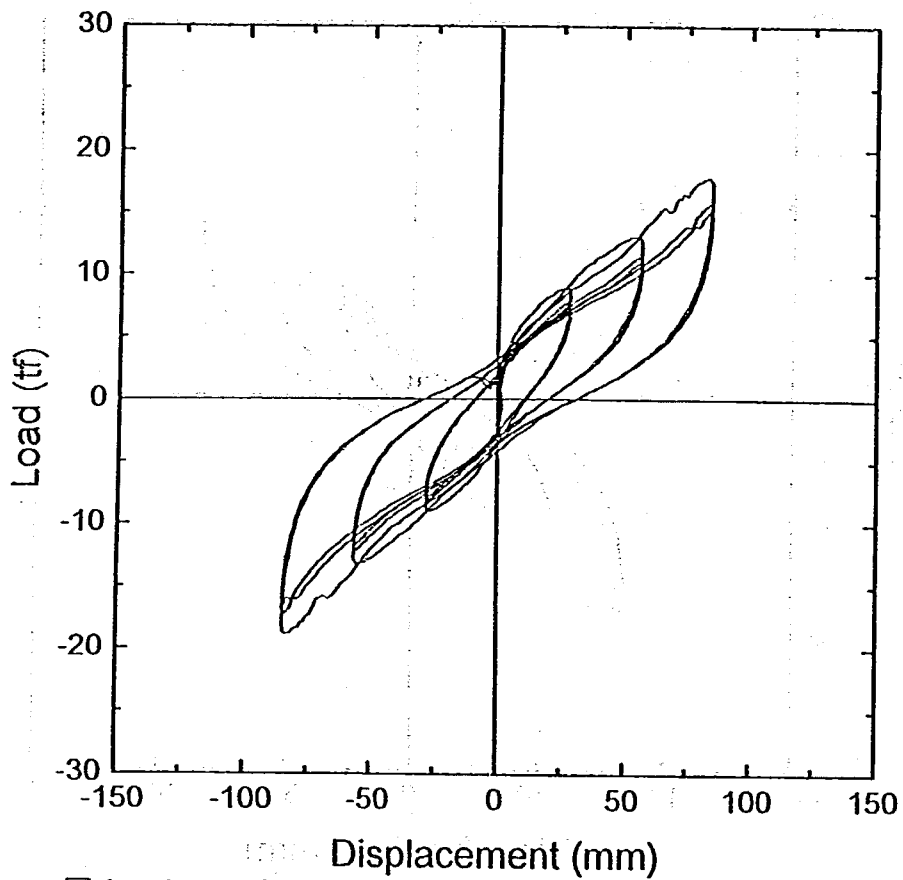


図4. 4-4 (24) 予備載荷1回目 (HDR-17)

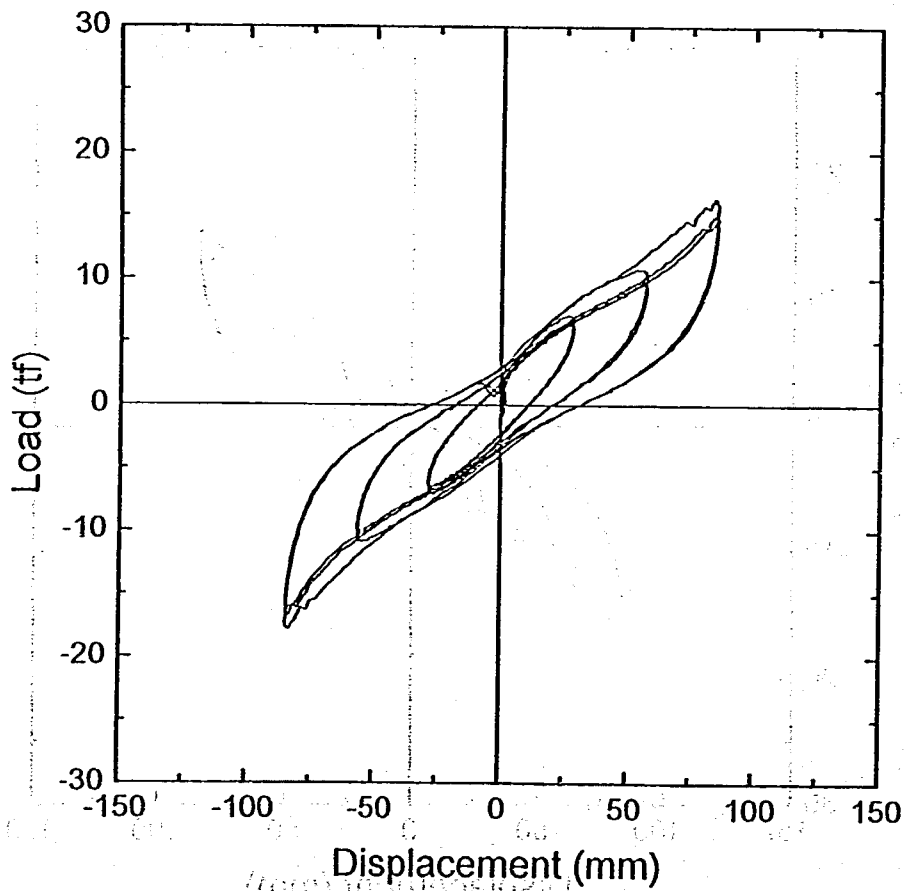


図4. 4-4 (25) 予備載荷2回目 (HDR-17)

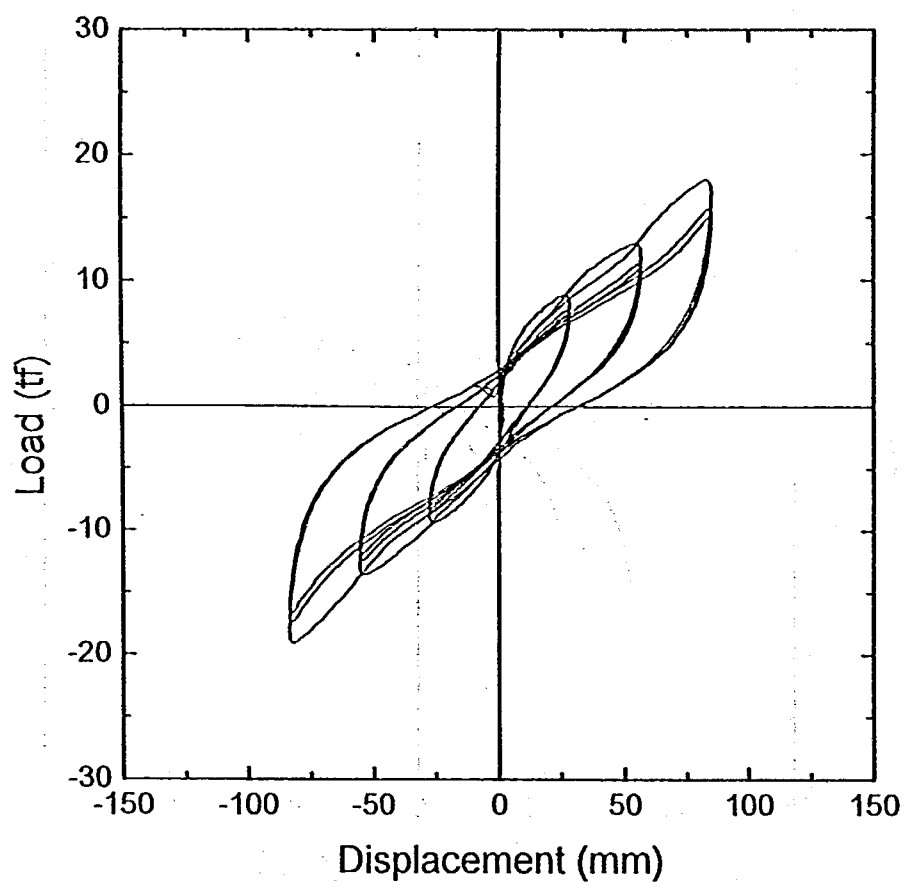


図4. 4-4(2.6) 予備載荷1回目(HDR-18)

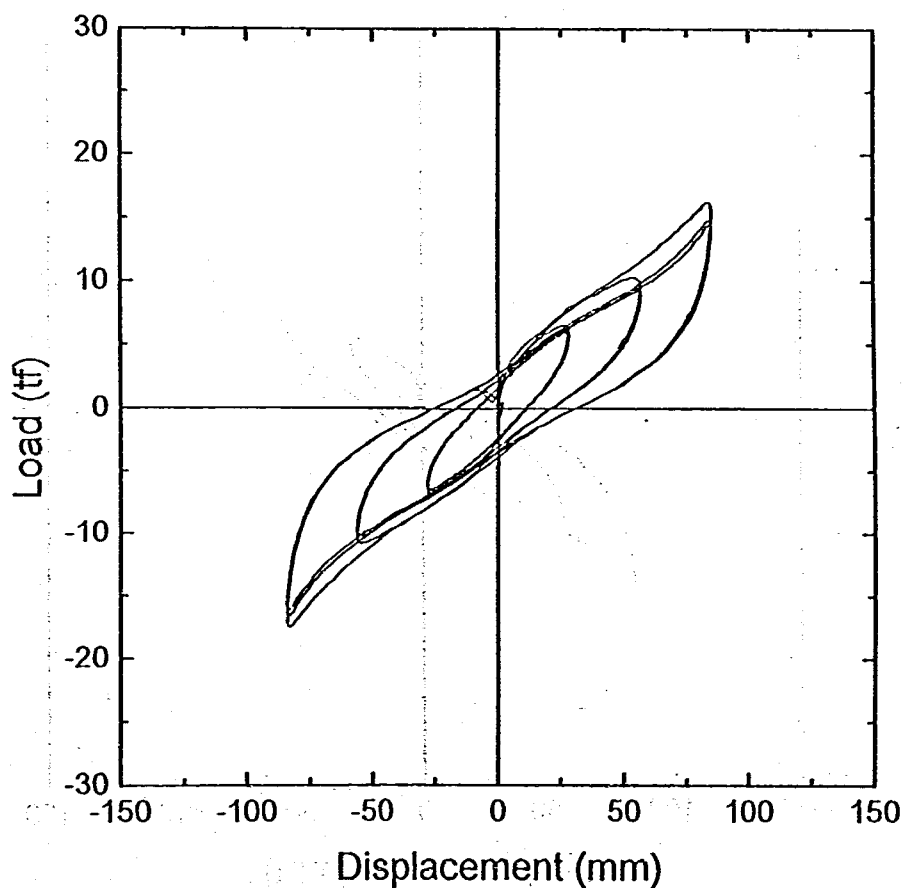


図4. 4-4(2.7) 予備載荷2回目(HDR-18)

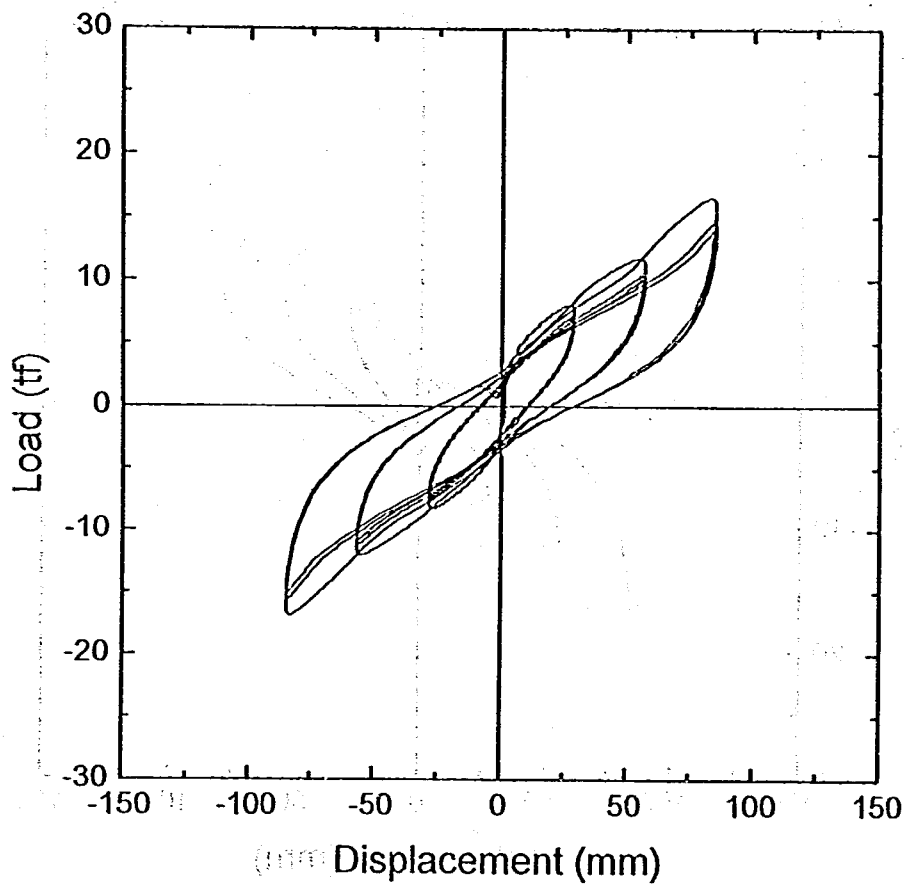


図4. 4-4 (28) 予備載荷1回目 (HDR-19)

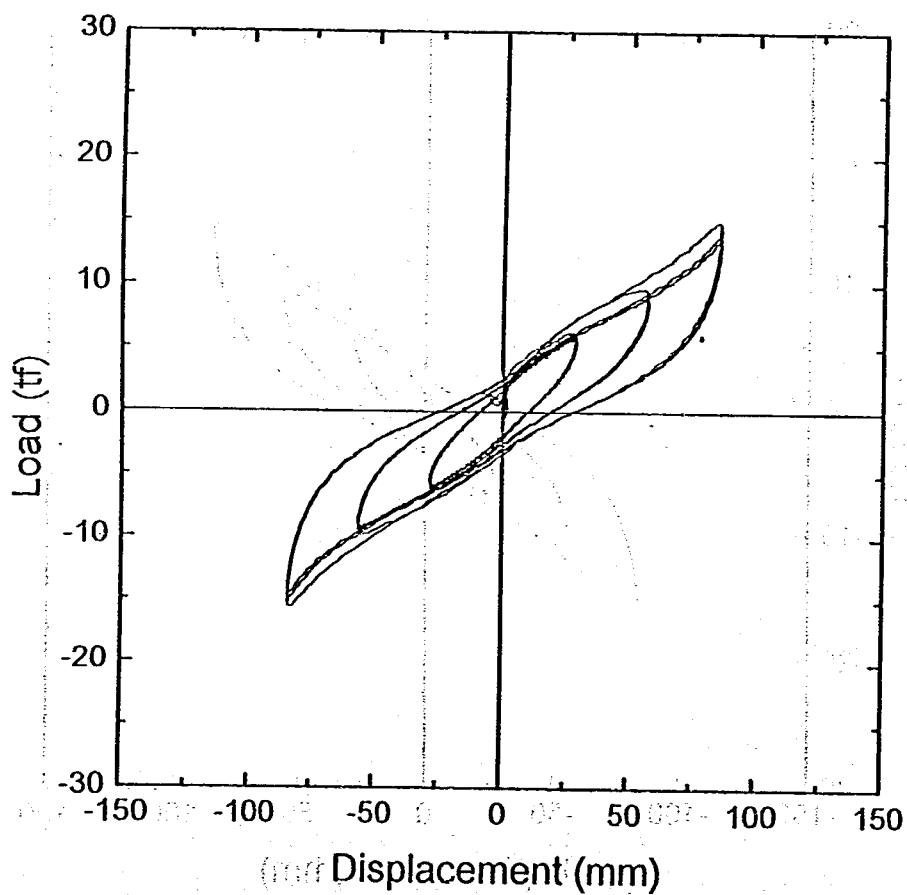


図4. 4-4 (29) 予備載荷2回目 (HDR-19)

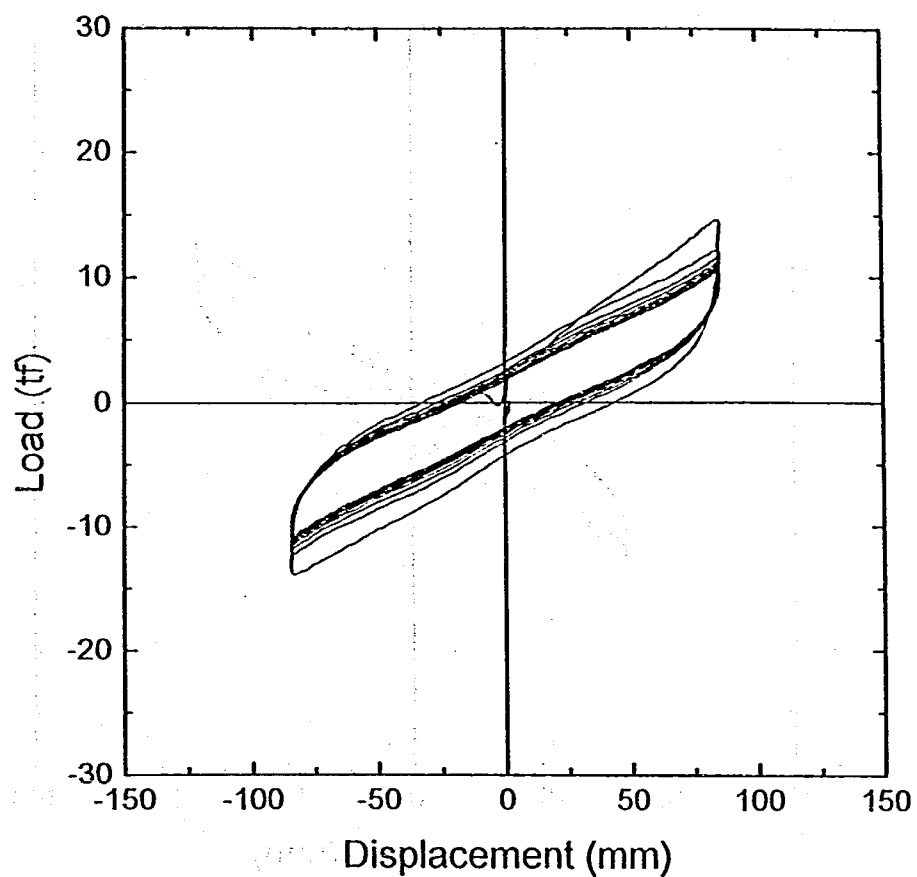


図4. 4-5 (1) 温度依存性試験 (LRB-04)

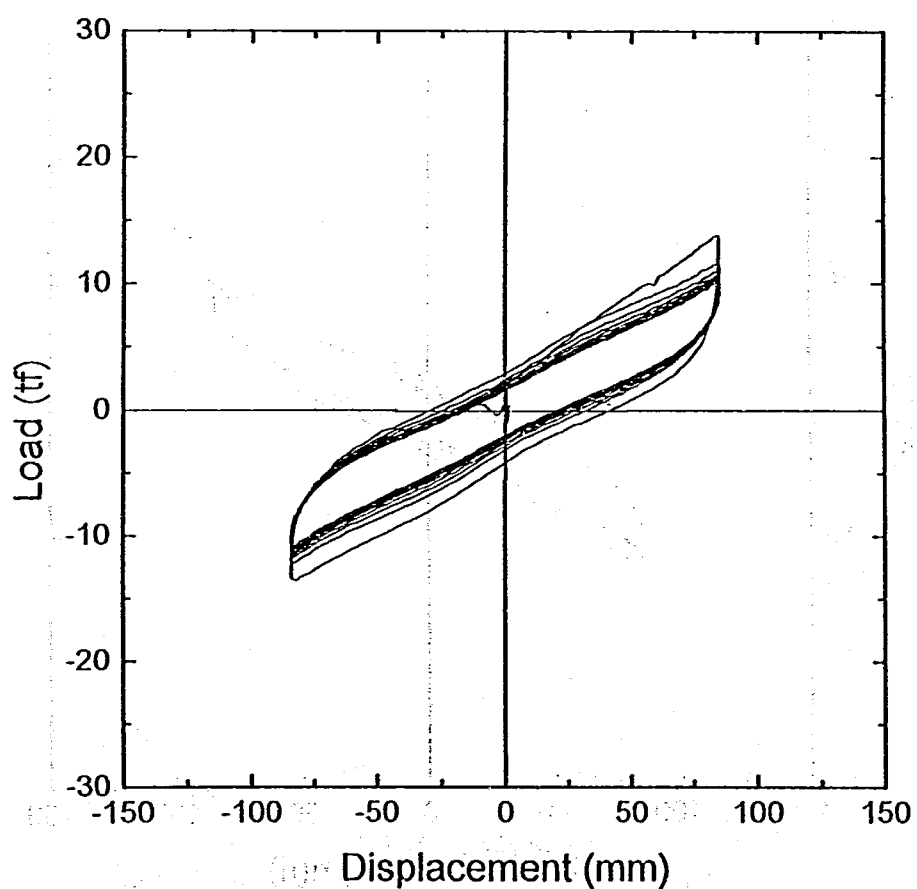


図4. 4-5 (2) 温度依存性試験 (LRB-05)

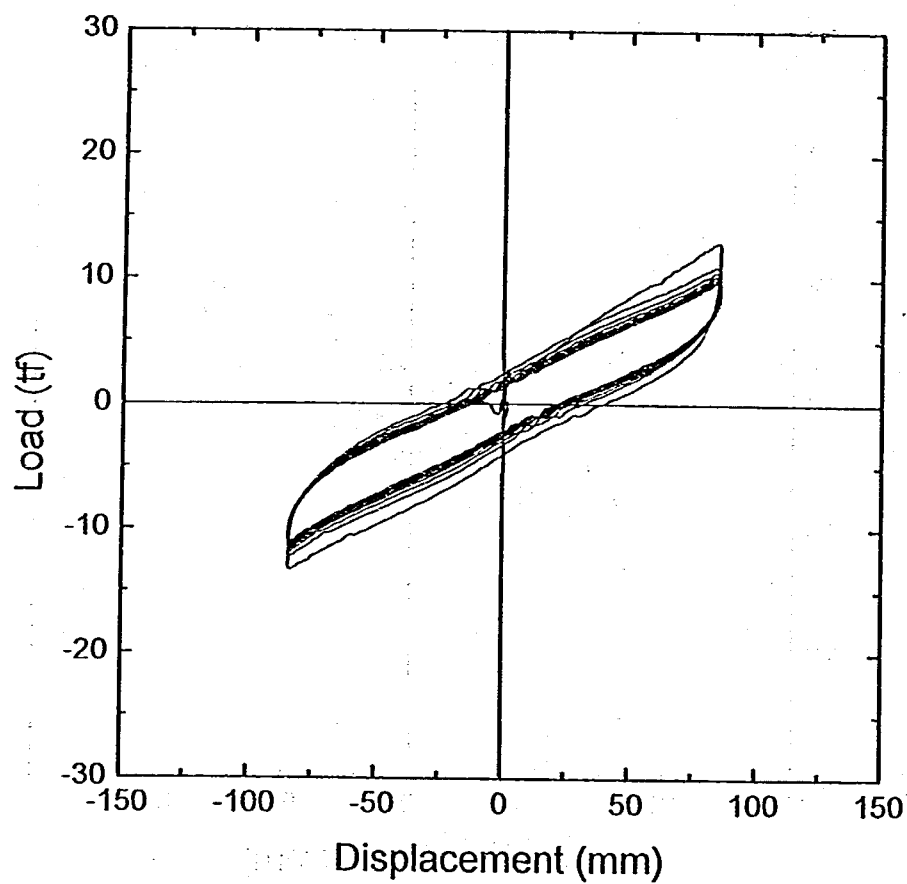


図4. 4-5 (3) 温度依存性試験 (LRB-06)

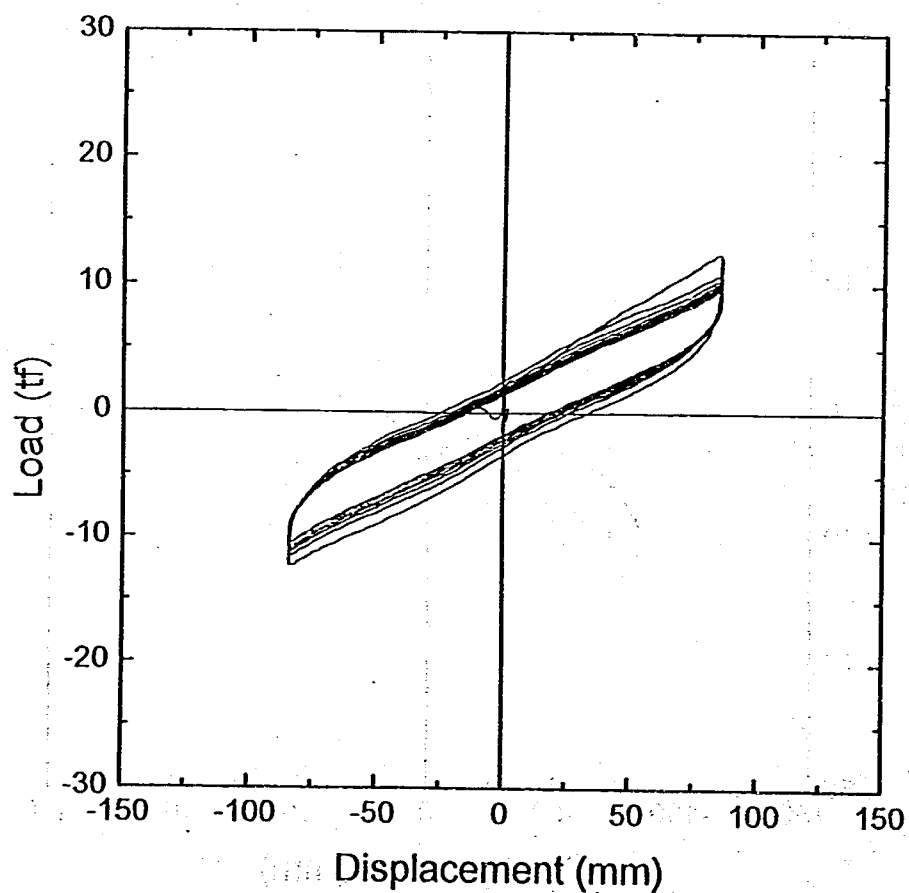


図4. 4-5 (4) 温度依存性試験 (LRB-07)

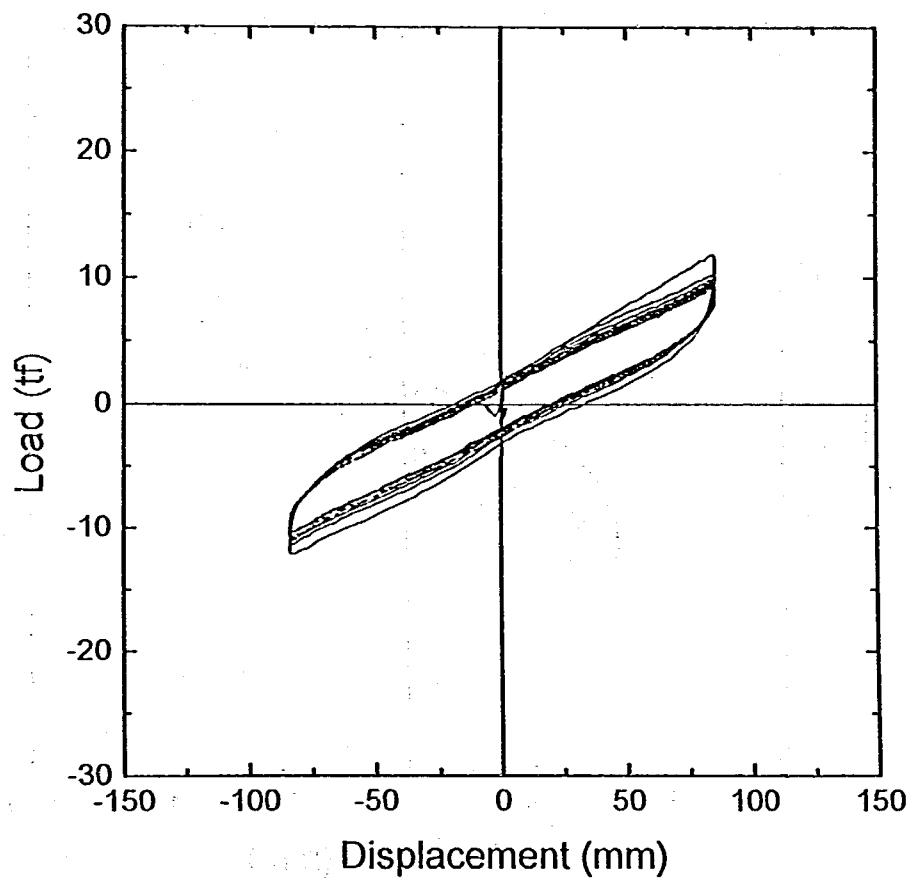


図4. 4-5 (5) 温度依存性試験 (LRB-08)

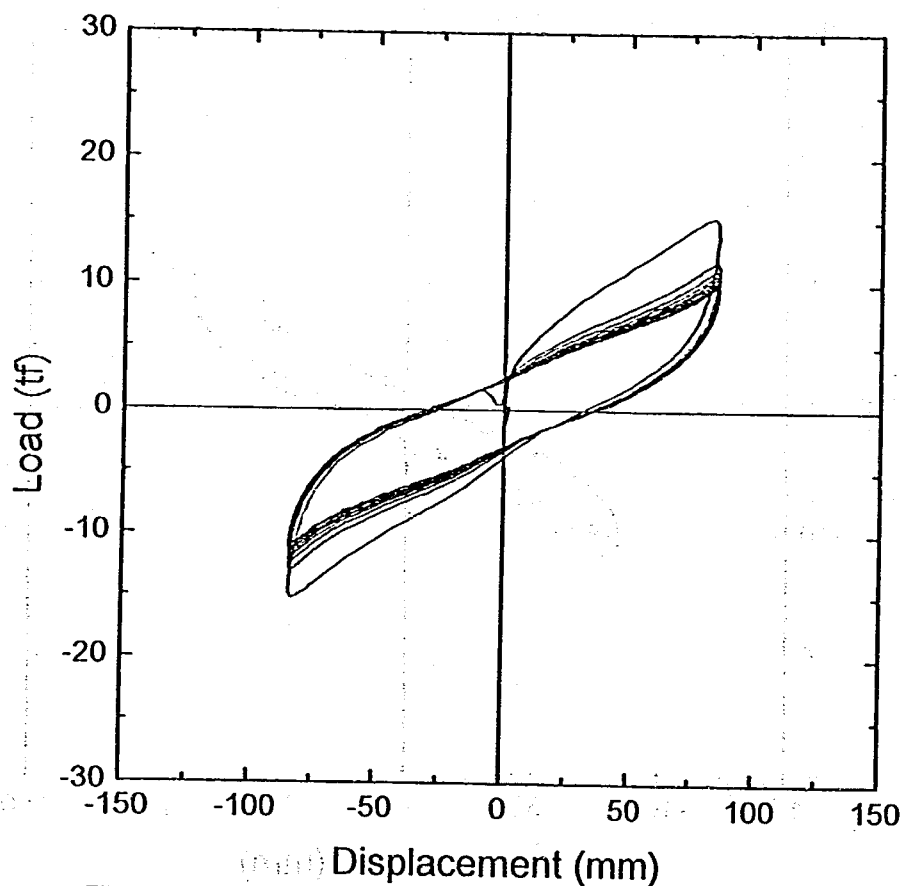


図4. 4-5 (6) 温度依存性試験 (HDR-04)

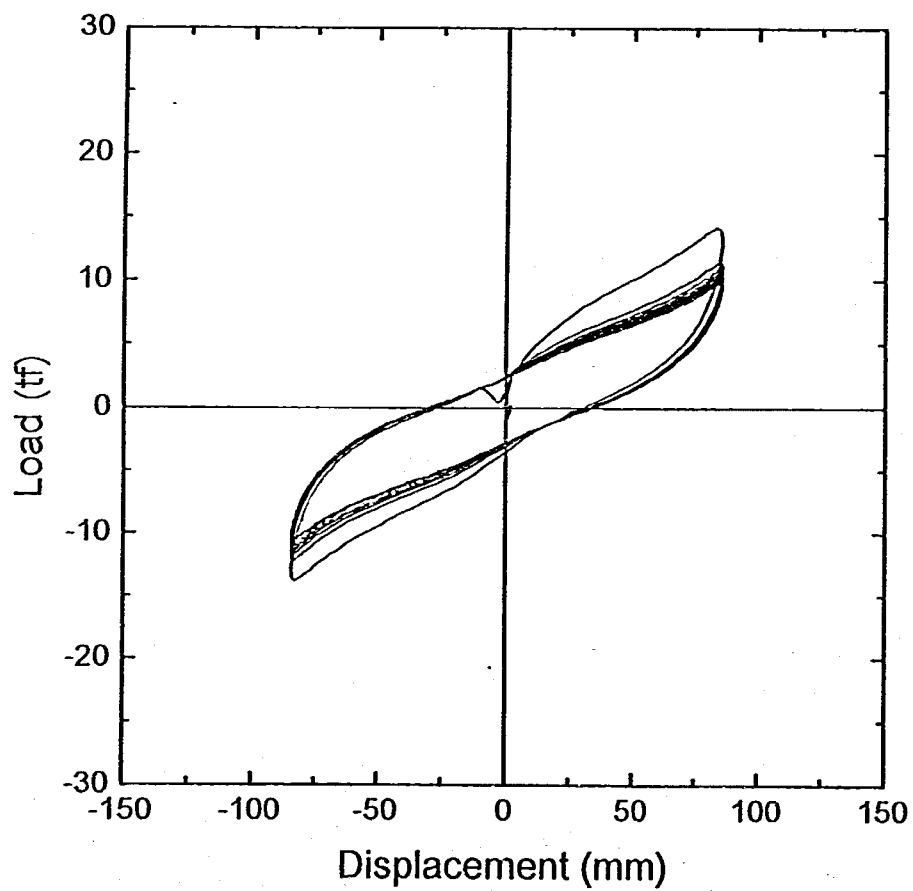


図4. 4-5 (7) 温度依存性試験 (HDR-05)

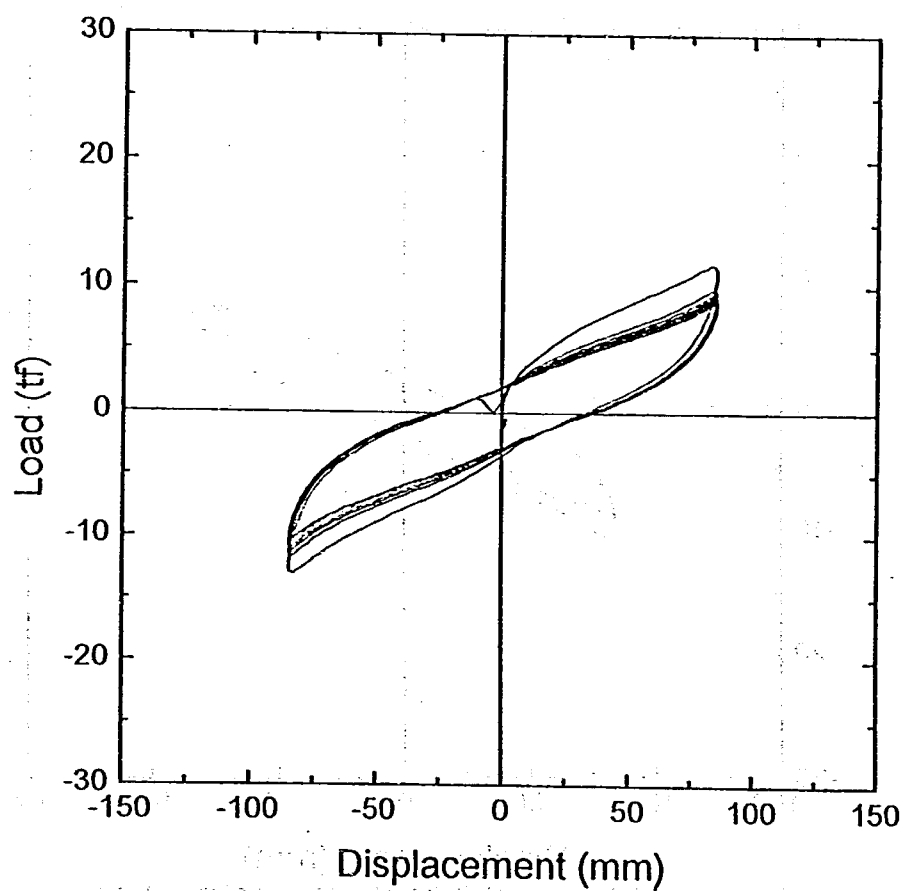


図4. 4-5 (8) 温度依存性試験 (HDR-06)

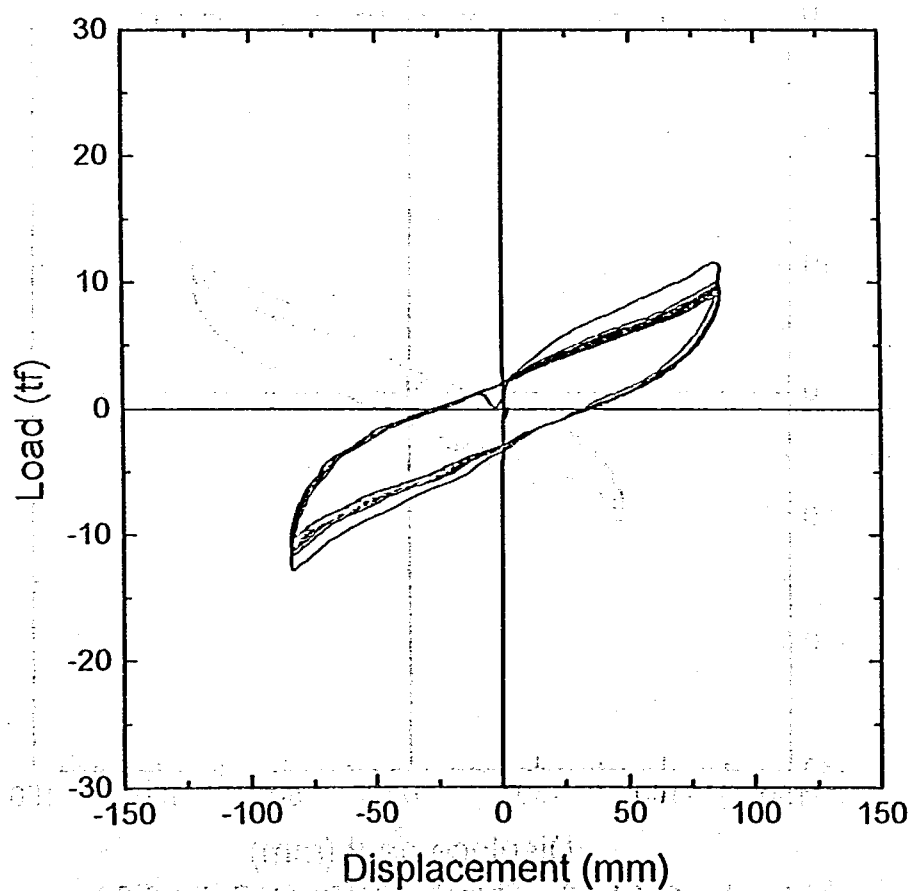


図4. 4-5 (9) 温度依存性試験 (HDR-07)

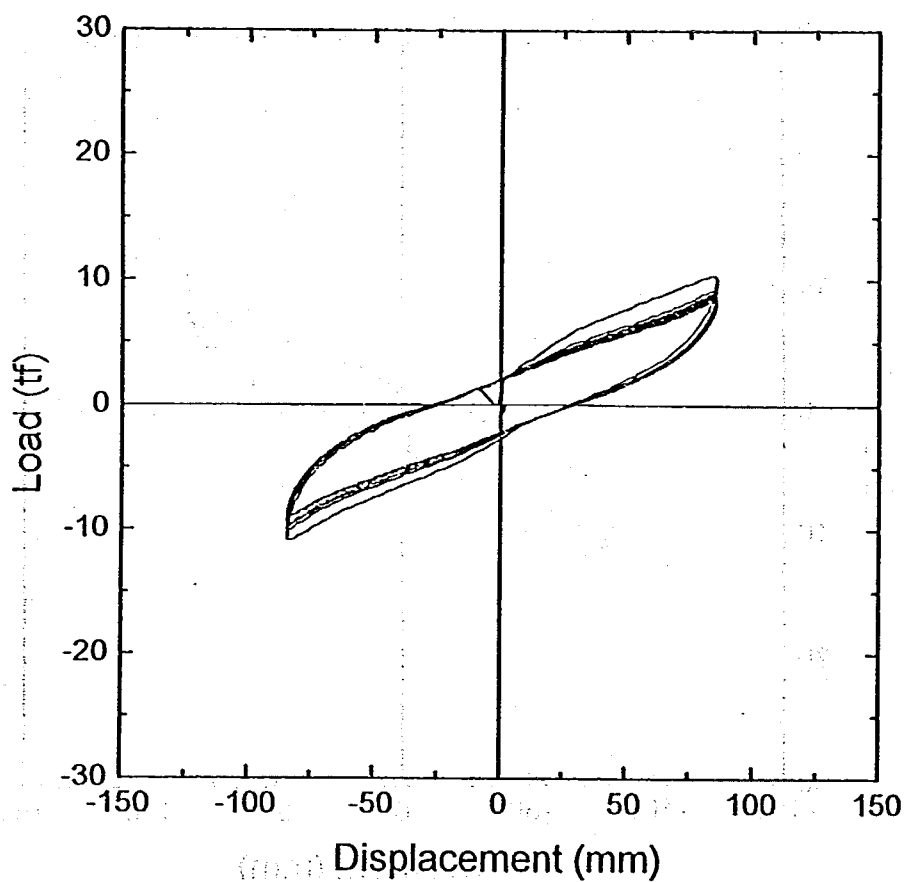


図4. 4-5 (10) 温度依存性試験 (HDR-08)

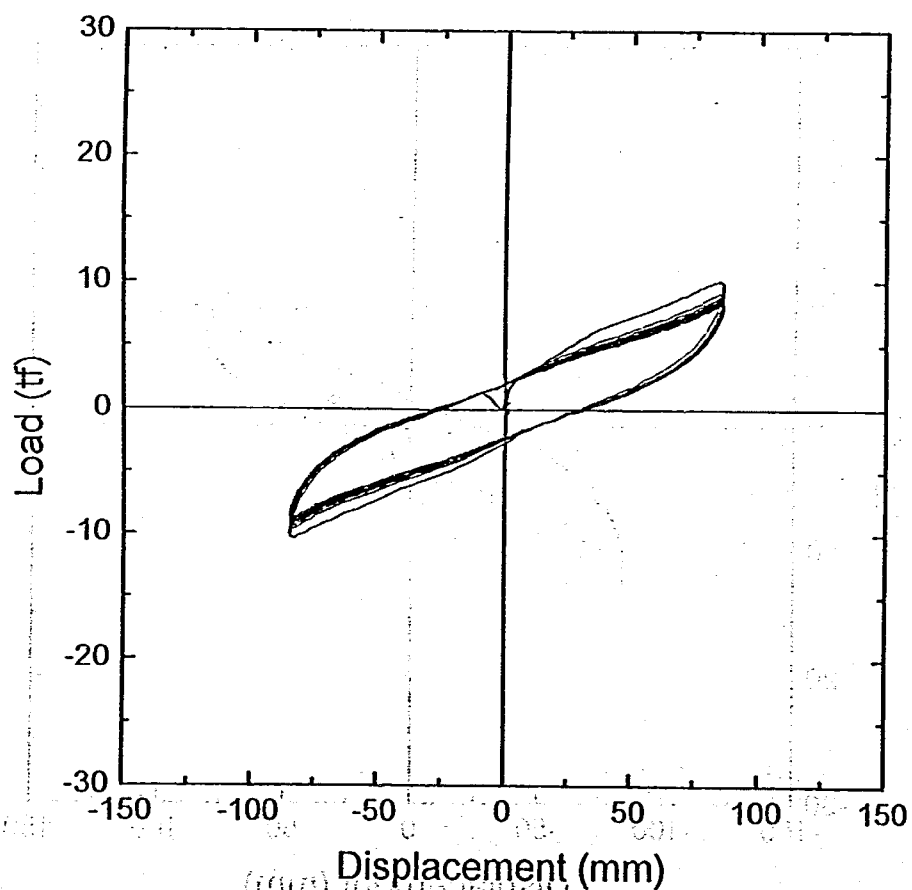


図4. 4-5 (11) 温度依存性試験 (HDR-09)

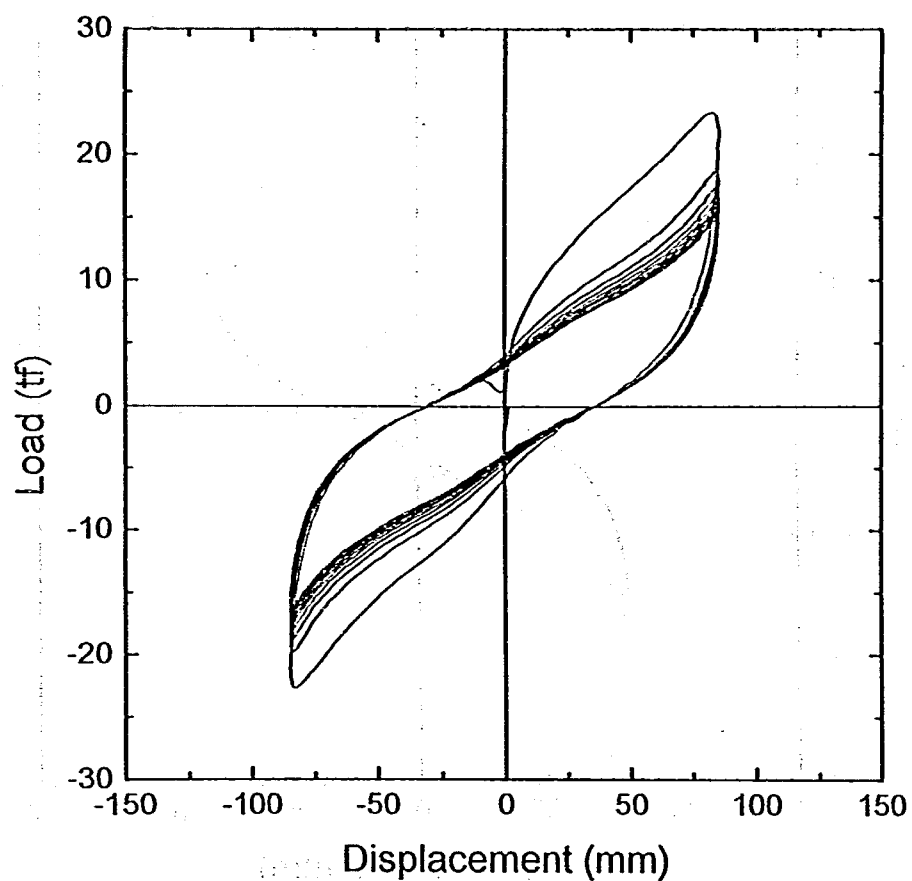


図4. 4-5 (12) 温度依存性試験 (HDR-14)

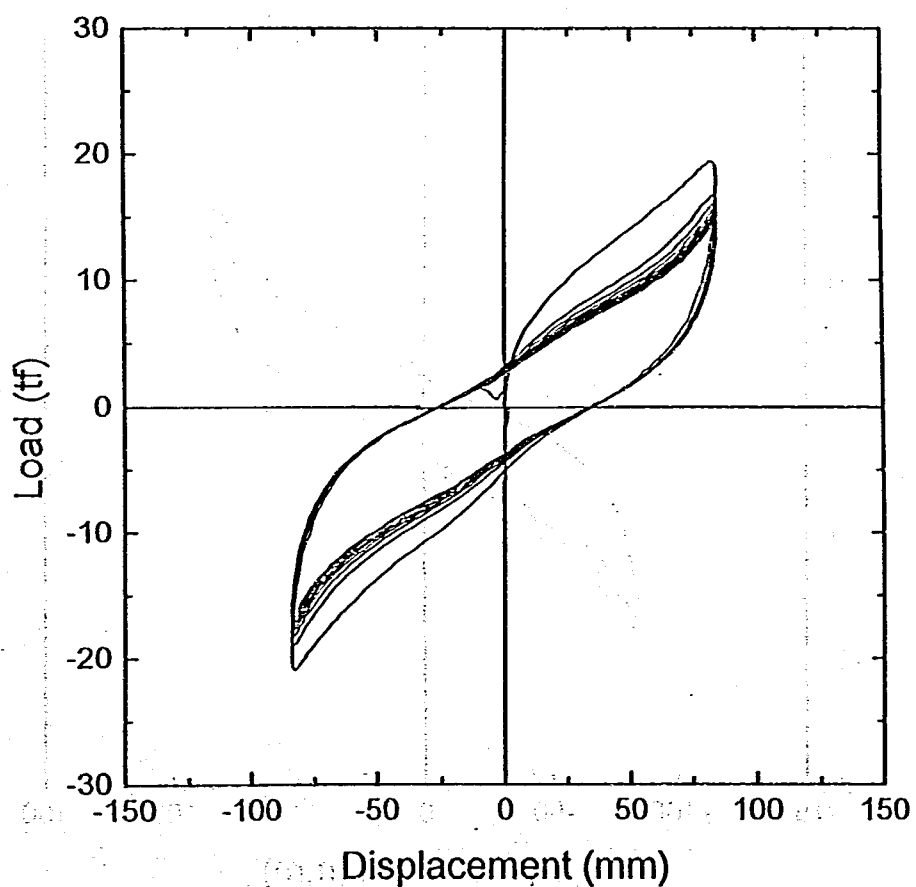


図4. 4-5 (13) 温度依存性試験 (HDR-15)

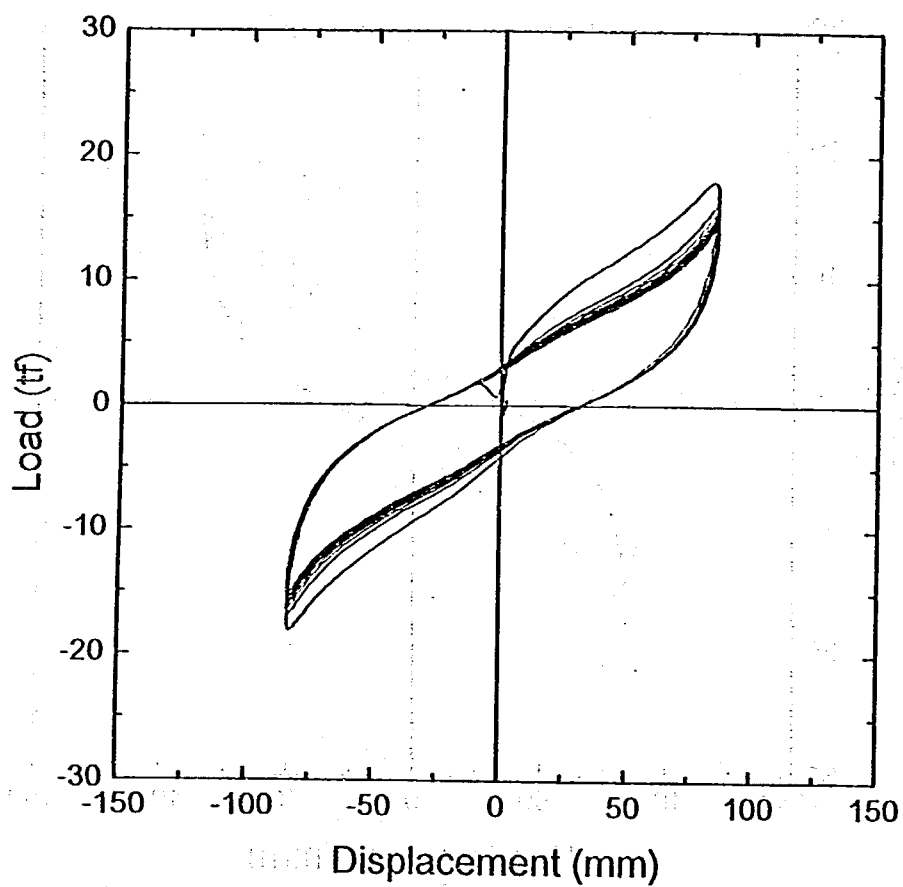


図4. 4-5 (14) 温度依存性試験 (HDR-16)

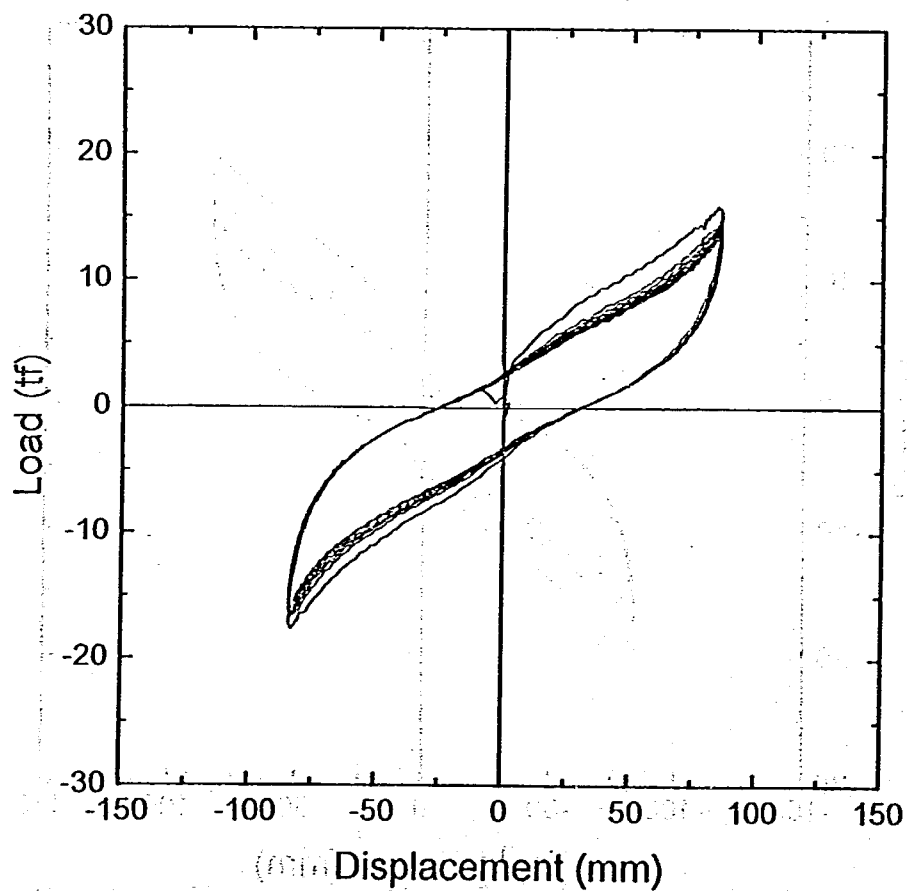


図4. 4-5 (15) 温度依存性試験 (HDR-17)

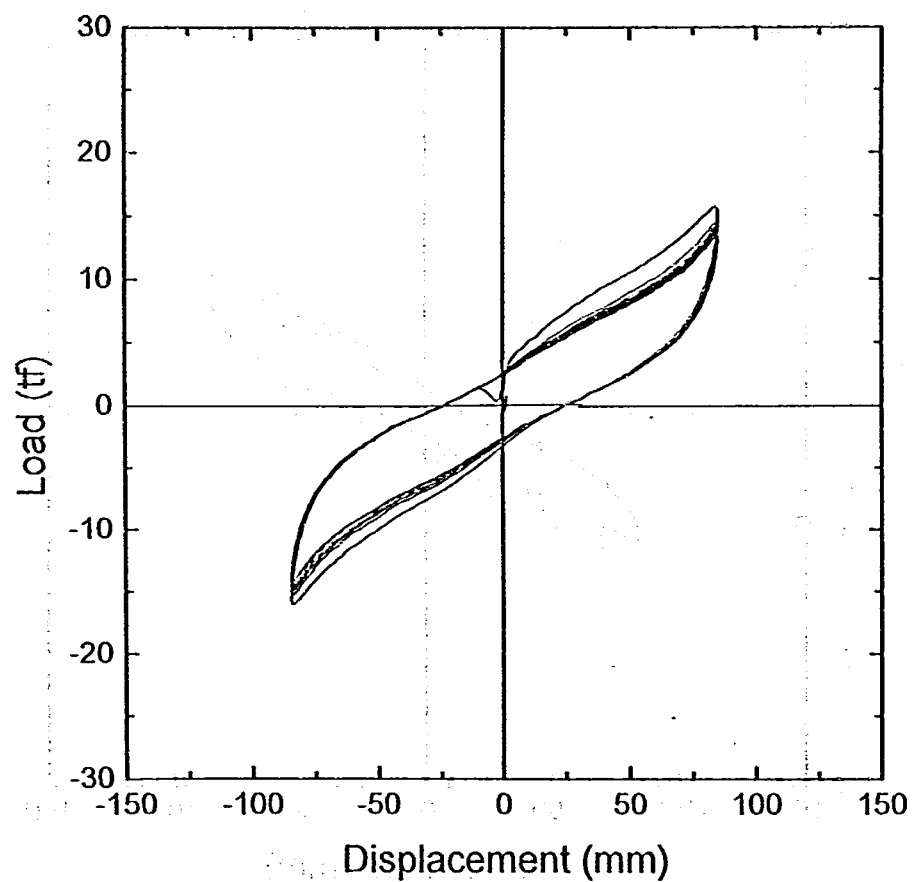


図4. 4-5 (16) 温度依存性試験 (HDR-18)

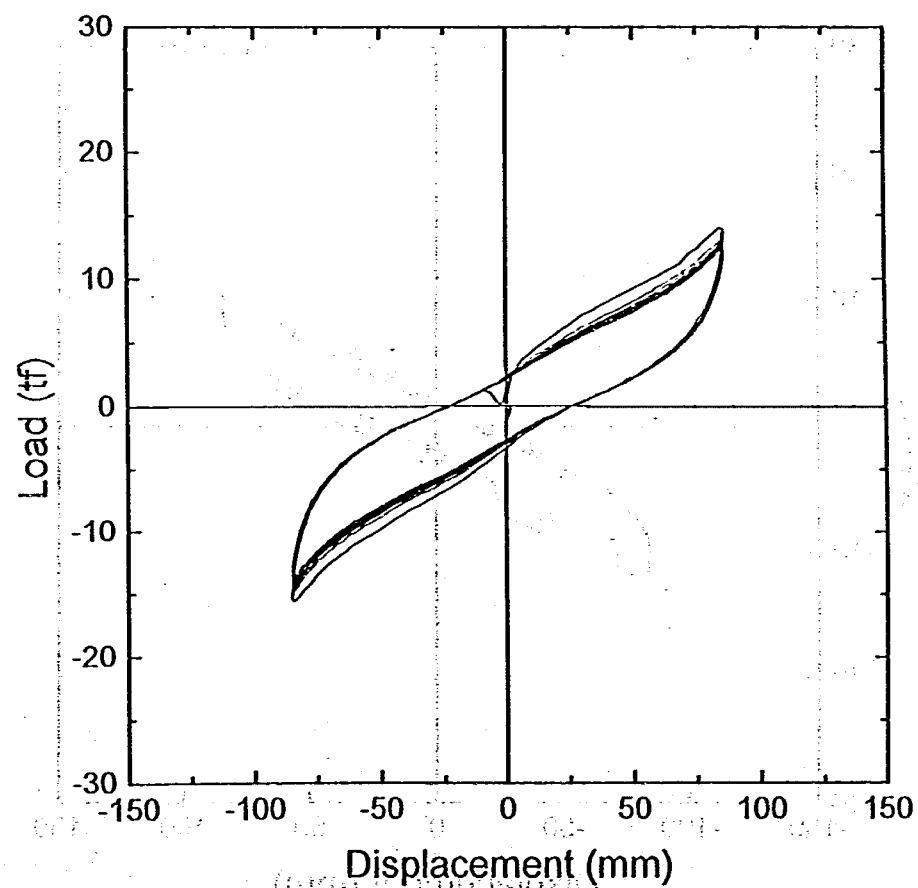


図4. 4-5 (17) 温度依存性試験 (HDR-19)

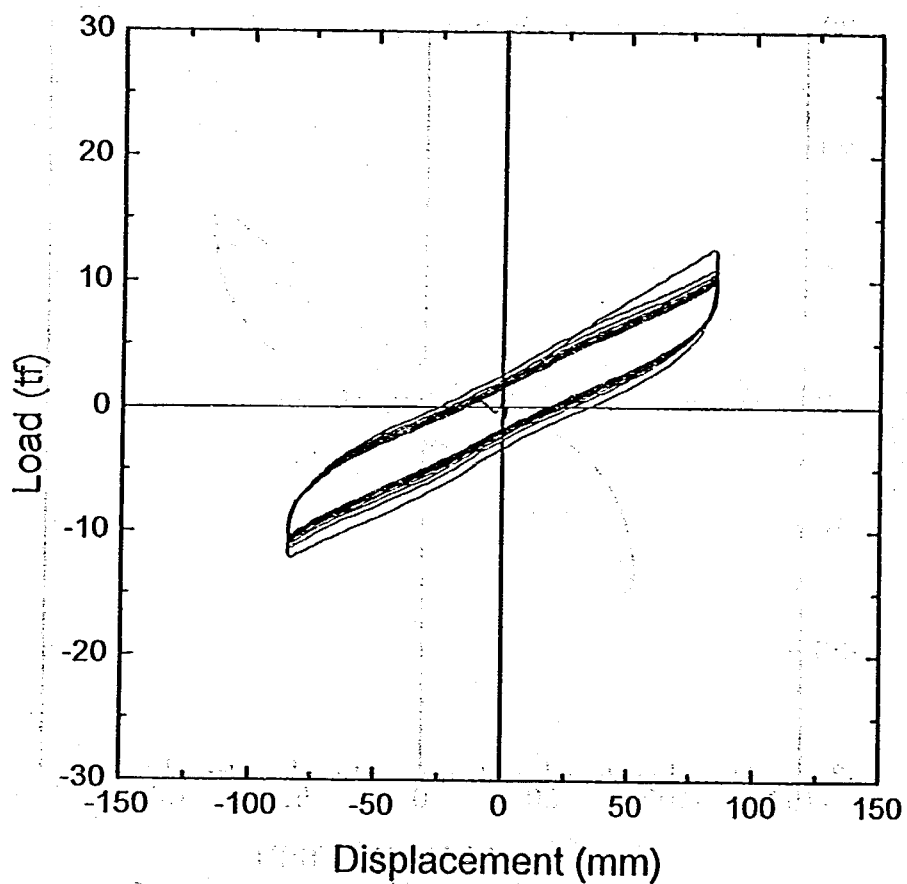


図4. 4-6 (1) 安定性試験 (LRB-04)

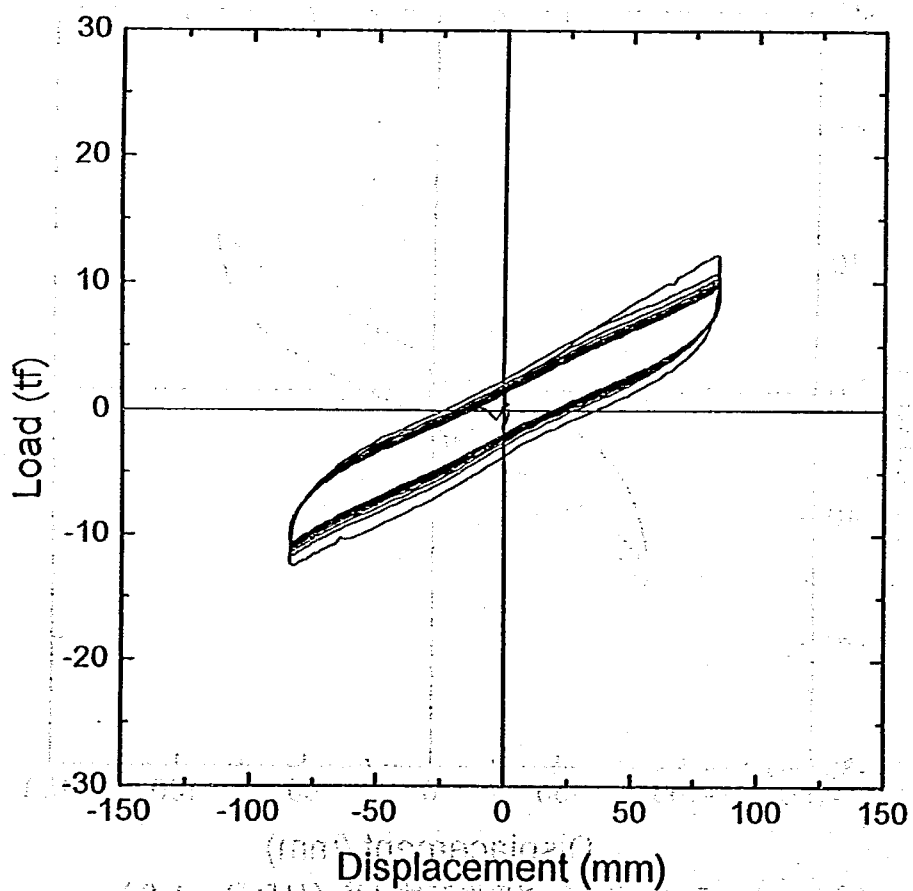


図4. 4-6 (2) 安定性試験 (LRB-05)

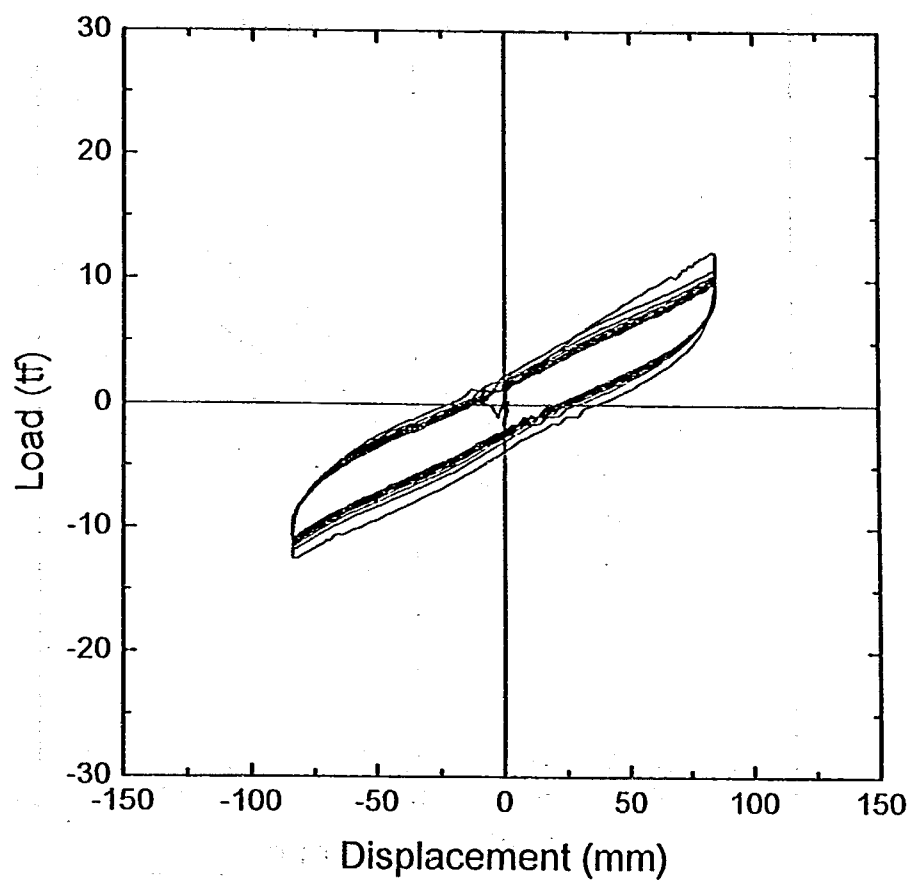


図4. 4-6 (3) 安定性試験 (LRB-06)

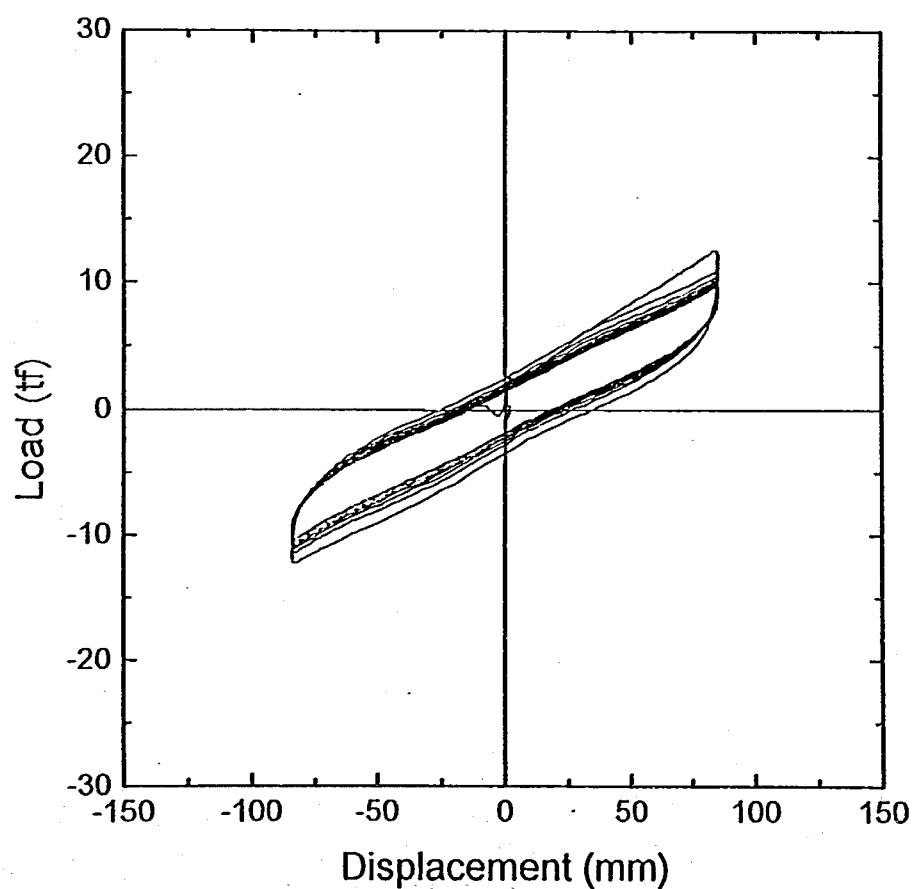


図4. 4-6 (4) 安定性試験 (LRB-07)

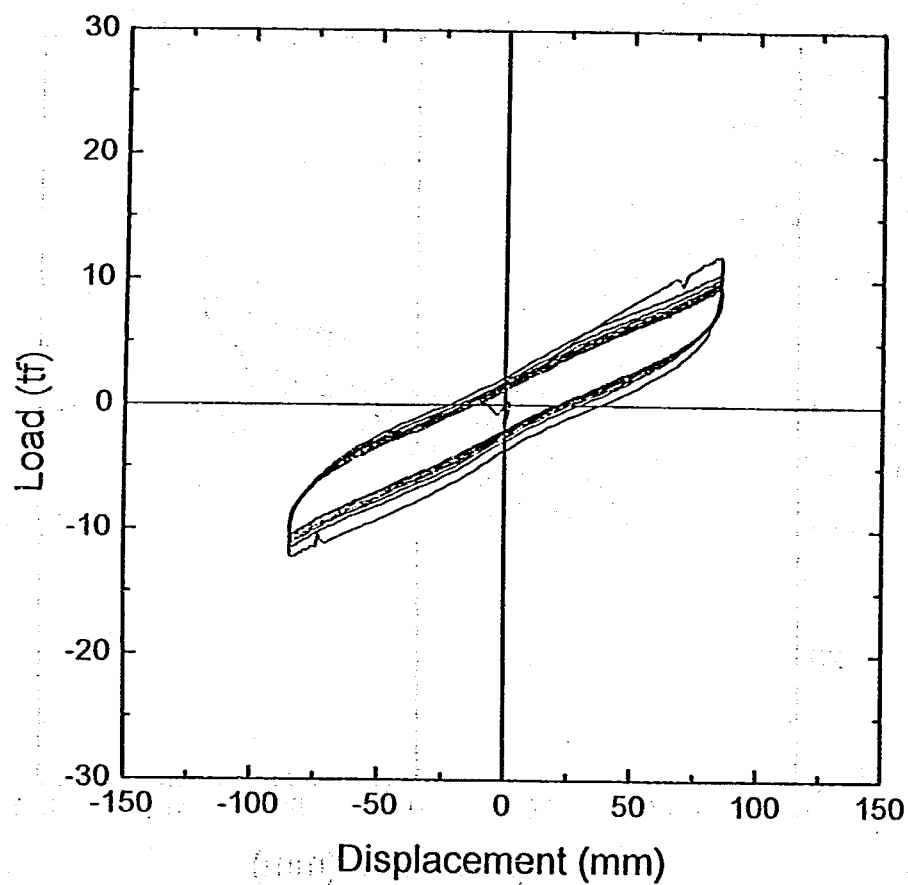


図4. 4-6(5) 安定性試験 (LRB-08)

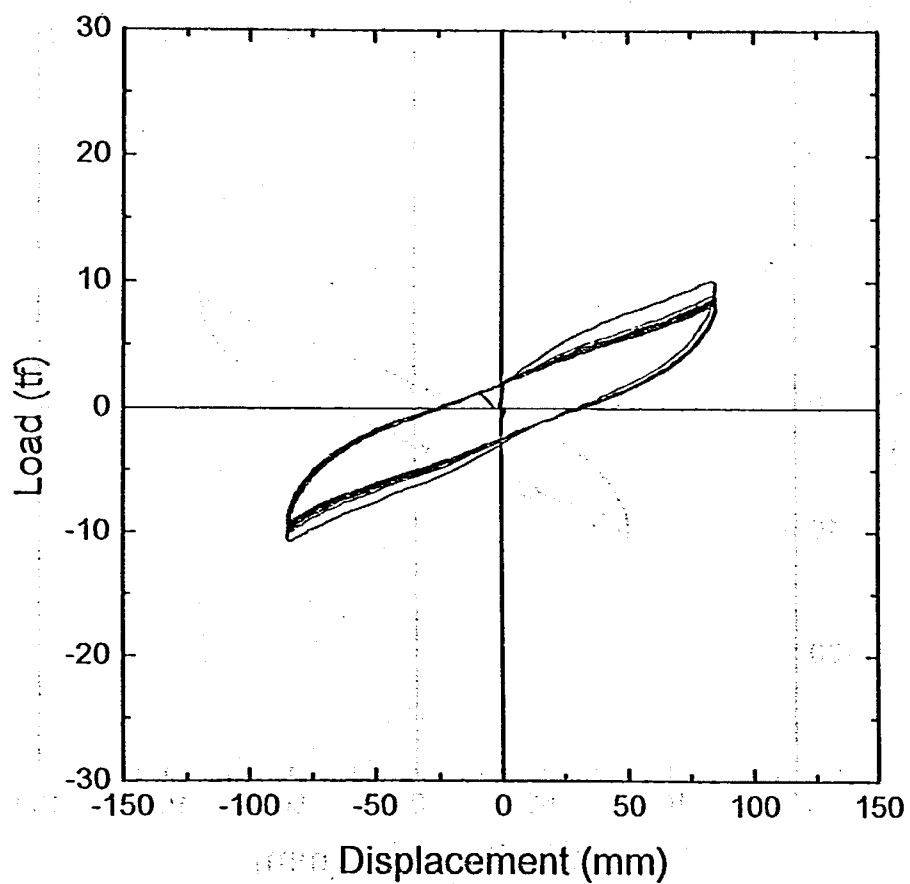


図4. 4-6 (6) 安定性試験 (HDR-0.4)

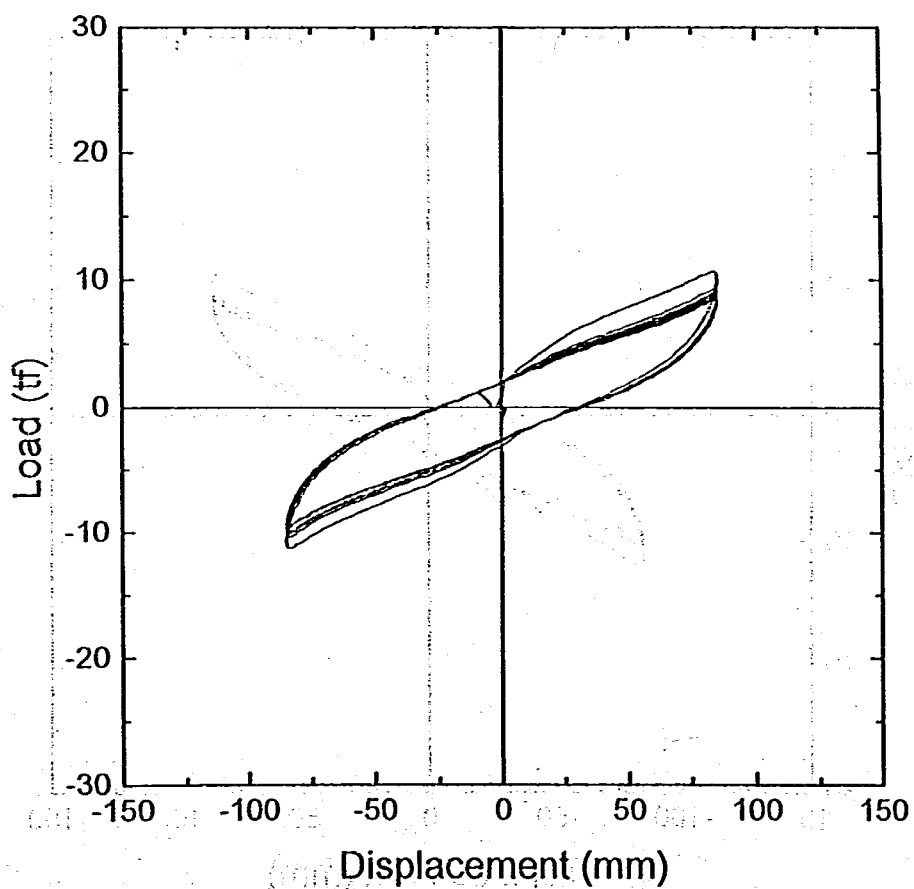


図4. 4-6 (7) 安定性試験 (HDR-0.5)

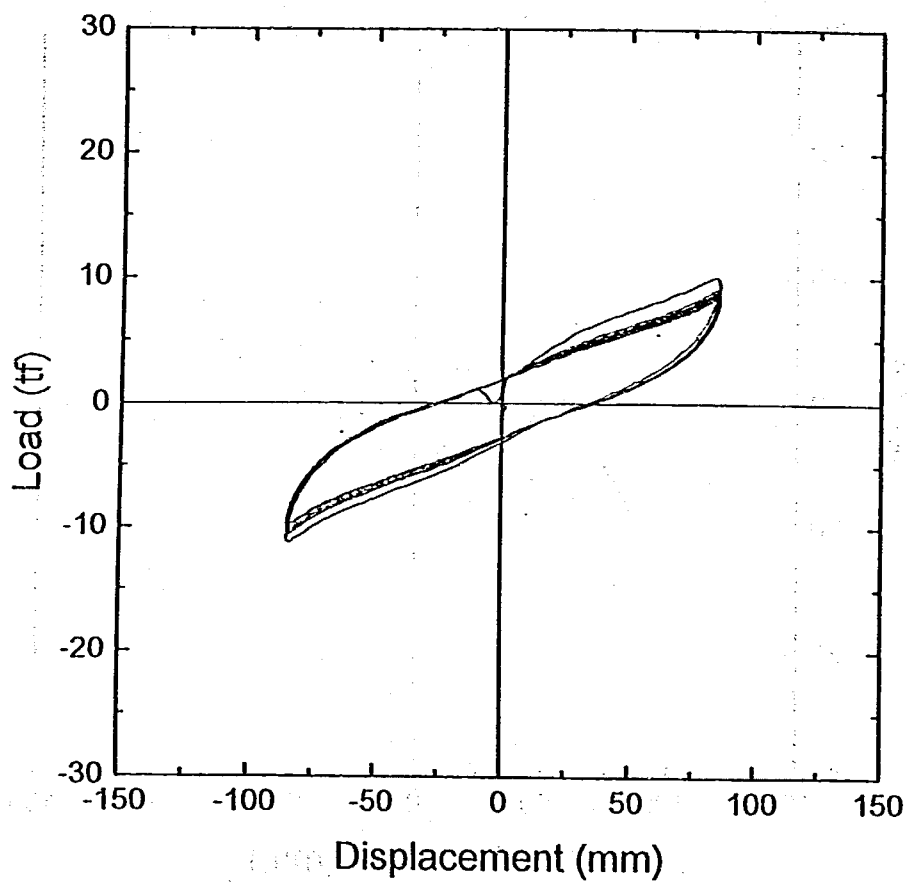


図4. 4-6 (8) 安定性試験 (HDR-06)

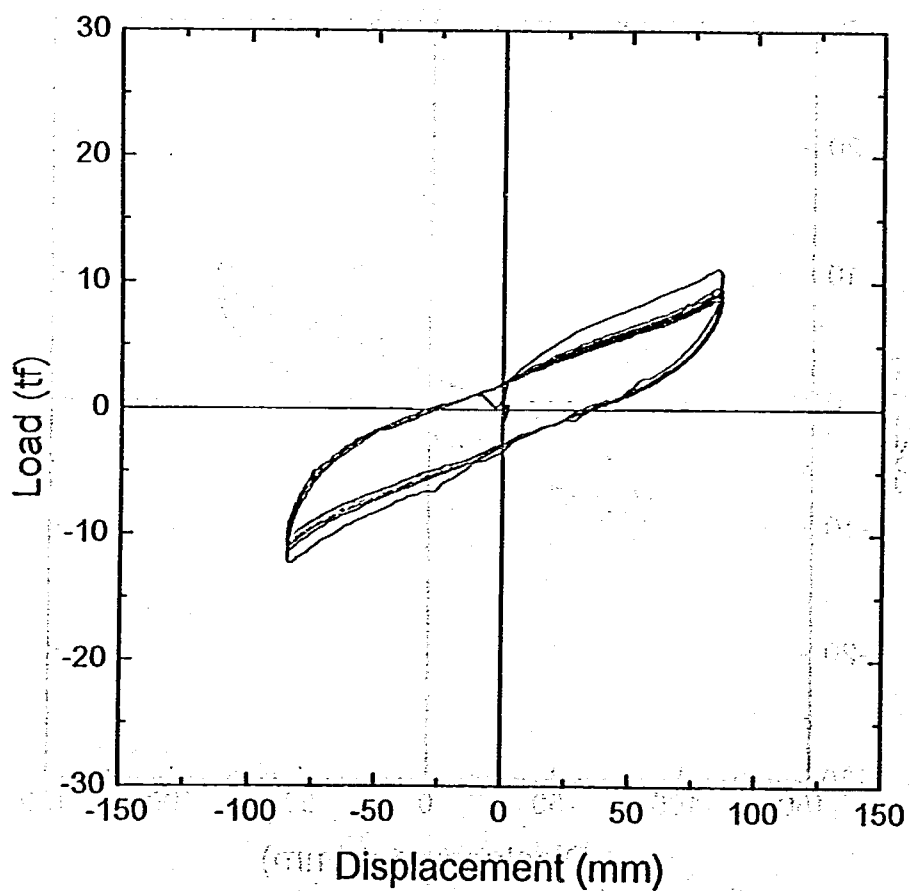


図4. 4-6 (9) 安定性試験 (HDR-07)

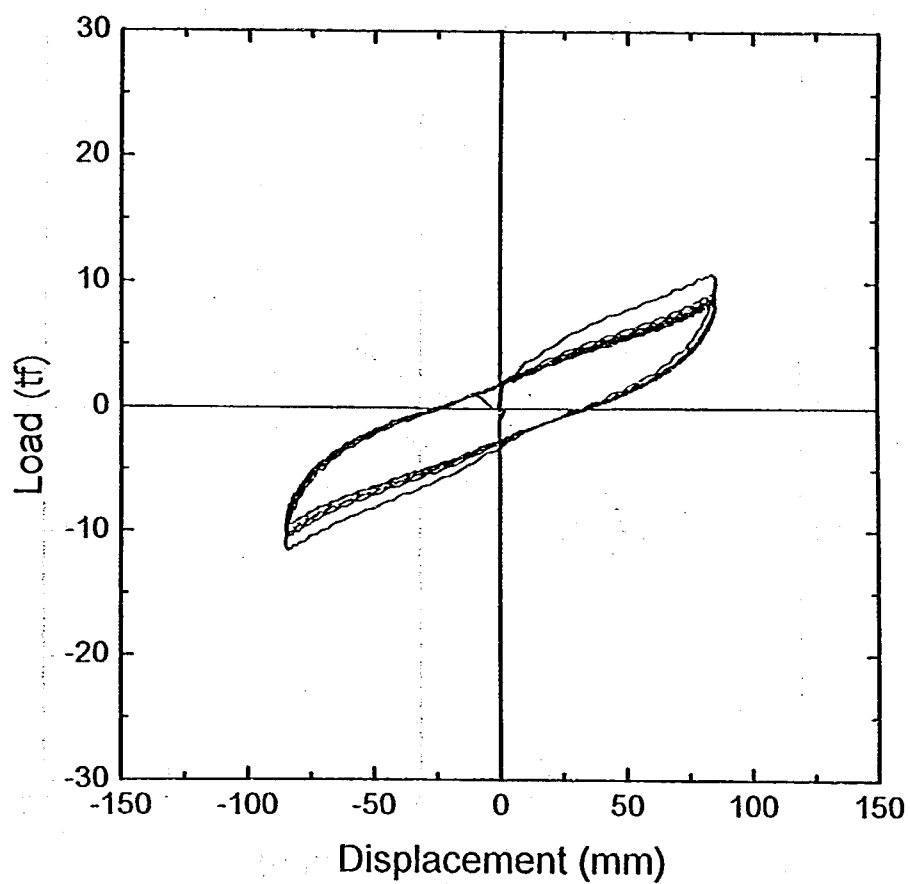


図4. 4-6 (10) 安定性試験 (HDR-08)

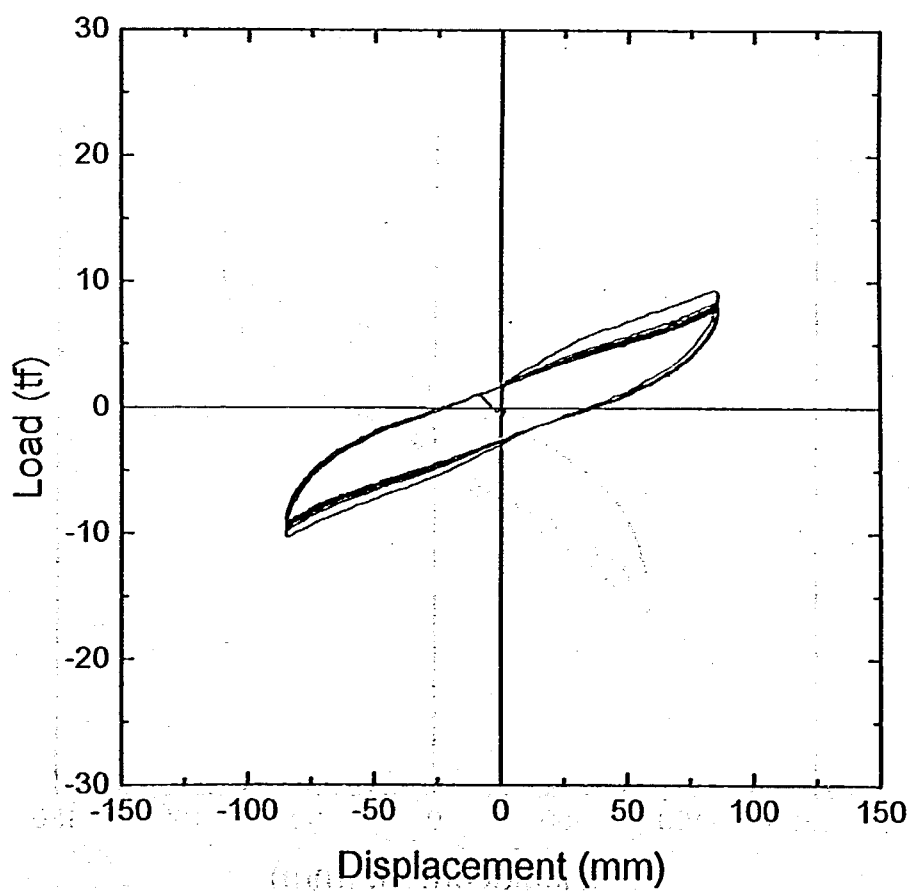


図4. 4-6 (11) 安定性試験 (HDR-09)

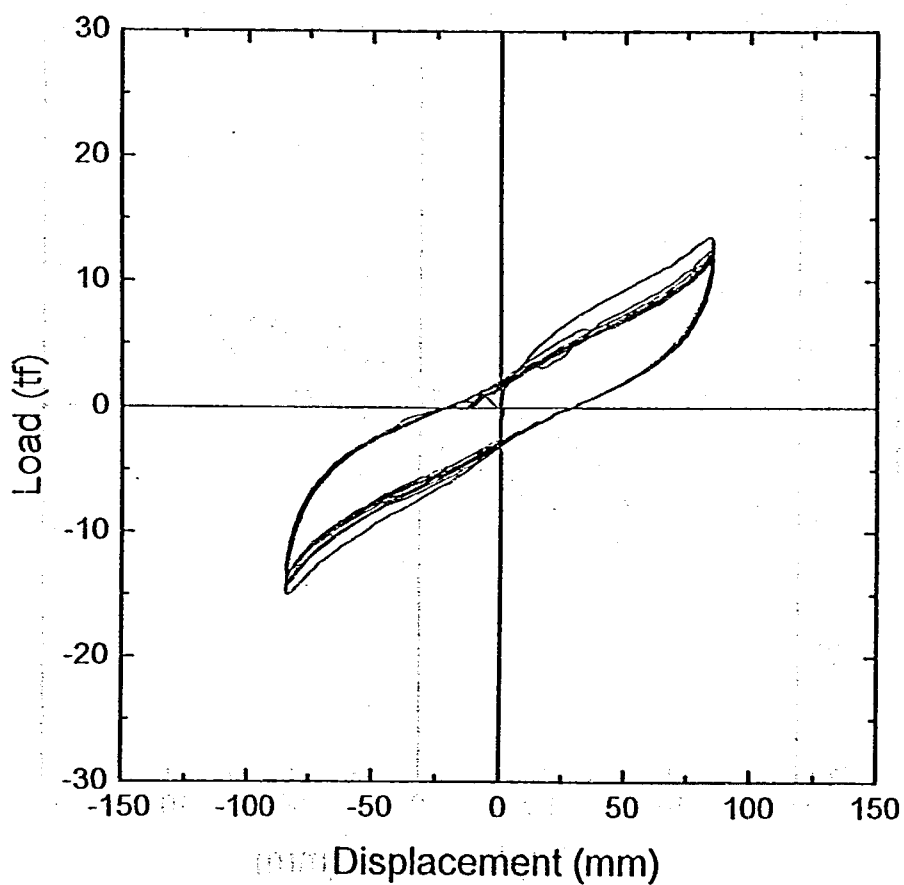


図4.4-6 (12) 安定性試験 (HDR-14)

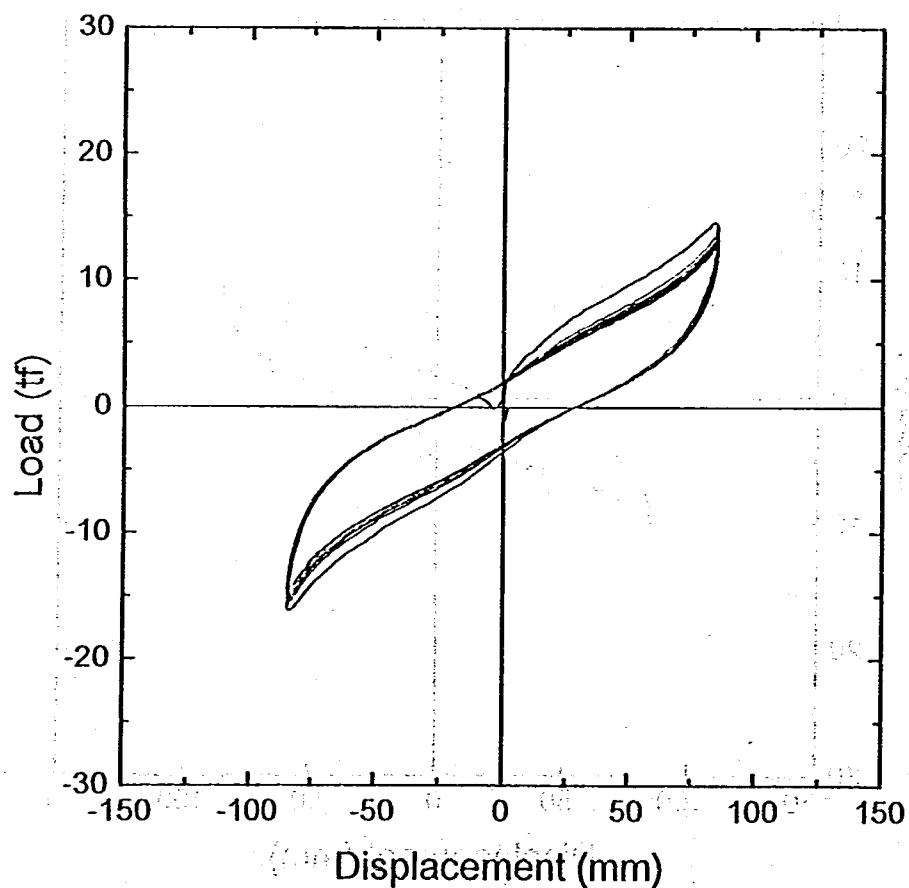


図4.4-6 (13) 安定性試験 (HDR-15)

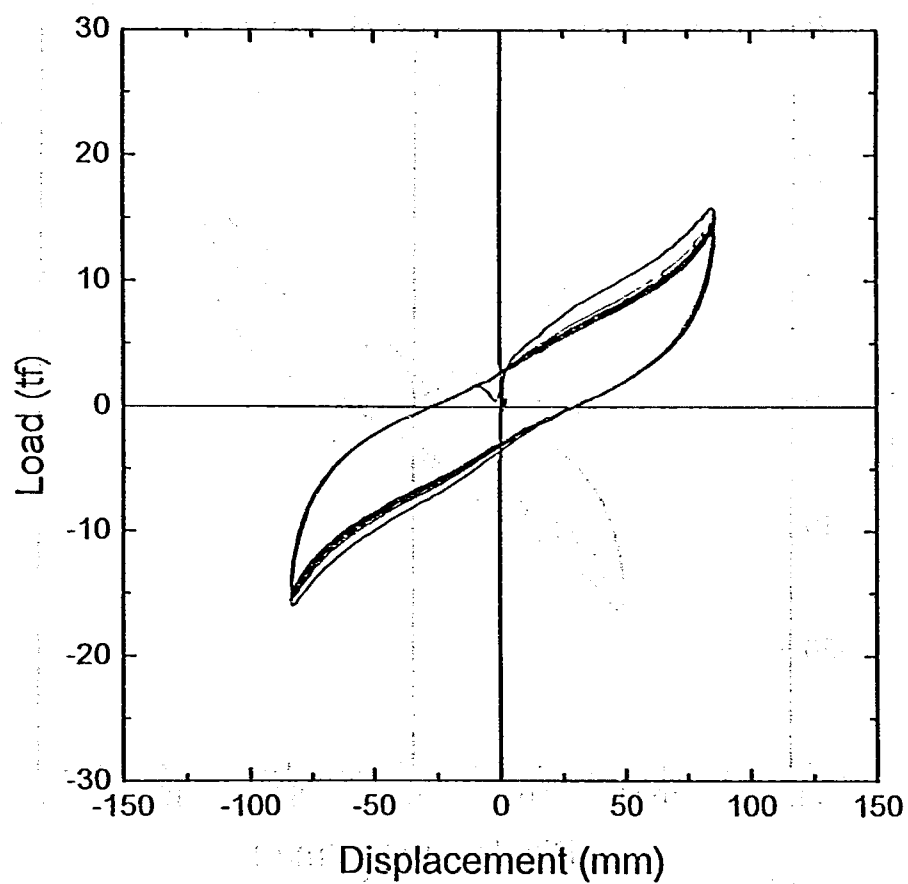


図4. 4-6 (14) 安定性試験 (HDR-16)

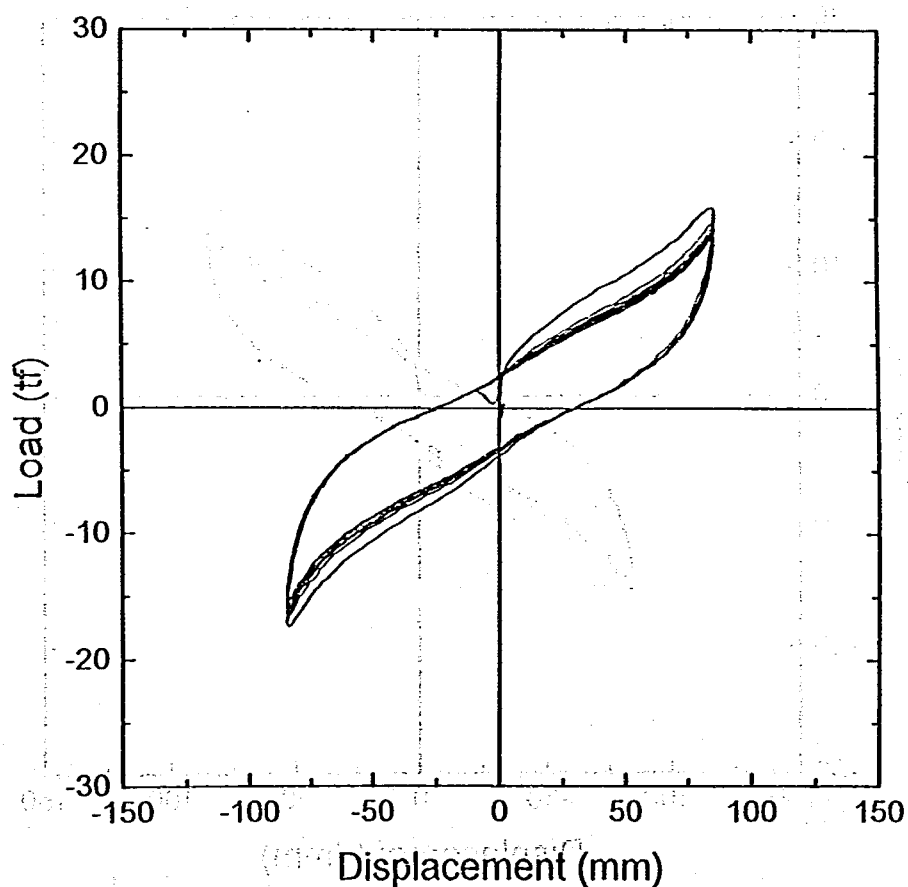


図4. 4-6 (15) 安定性試験 (HDR-17)

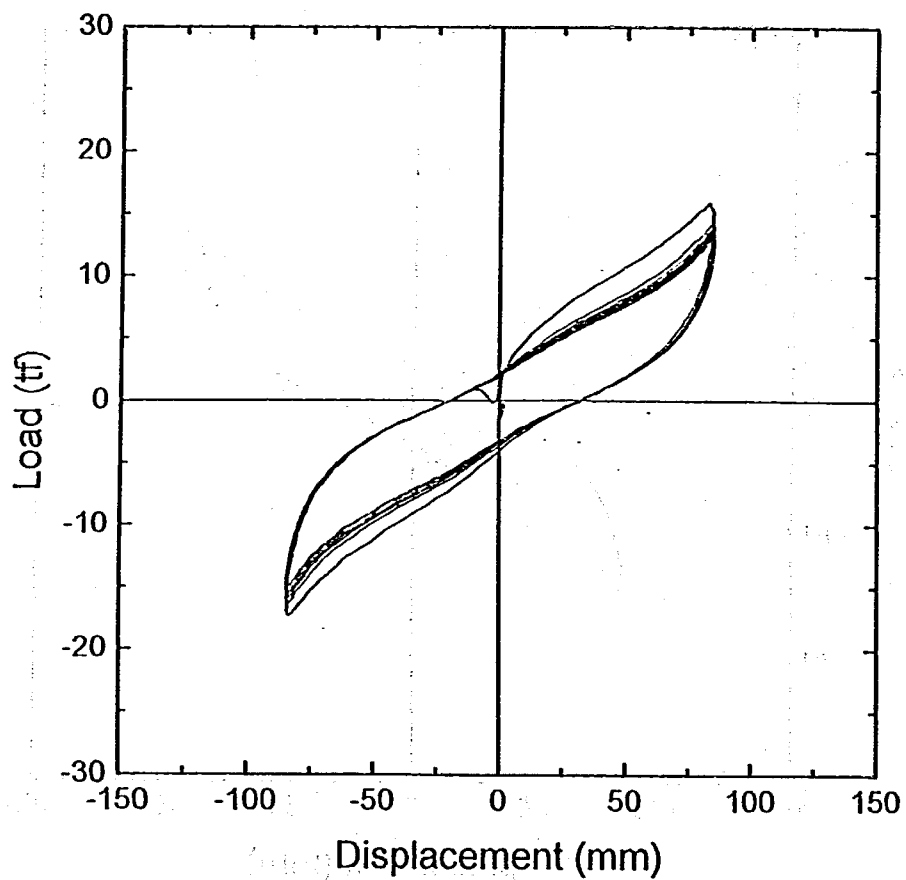


図4. 4-6 (16) 安定性試験 (HDR-18)

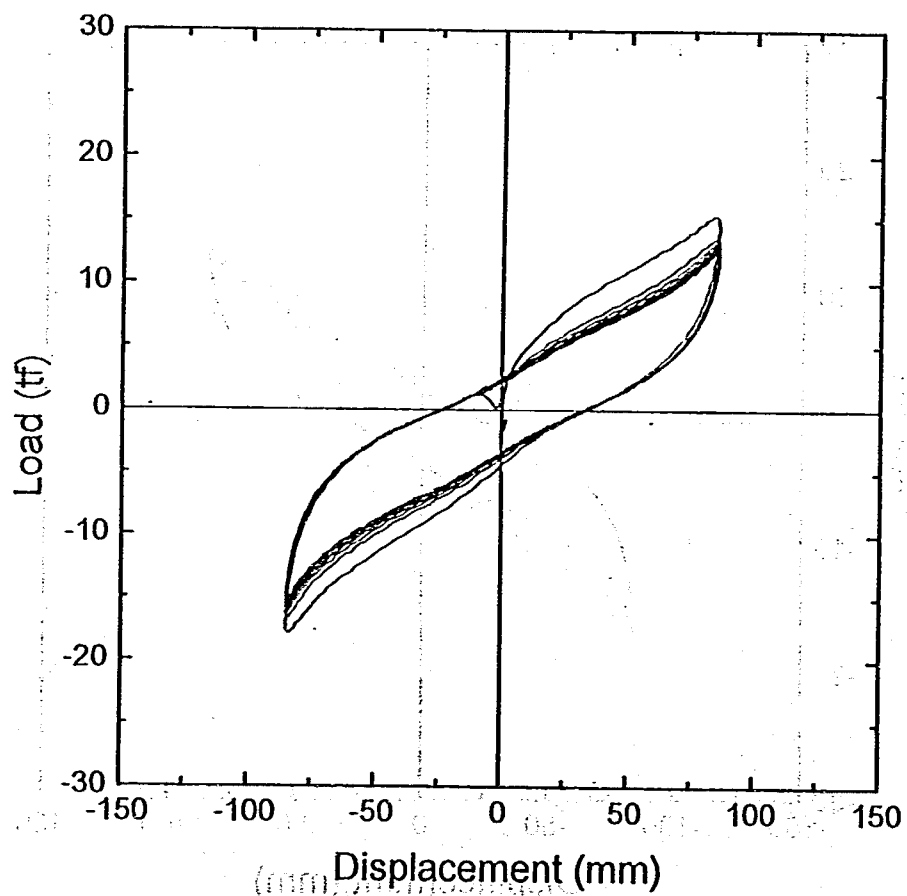


図4. 4-6 (17) 安定性試験 (HDR-19)

(3) 疲労試験

疲労試験により得られた荷重～変位関係を、図4. 4-7 (1)～(68)に示す。

疲労試験においても、载荷振幅の小さい範囲においては、LRBは、紡錘形のヒステリシスループを、HDRタイプA、HDRタイプBは、丸みをおびた楕円形のヒステリシスループを描いている。载荷振幅が大きくなると、LRBは、平行四辺形のヒステリシスループを、HDRタイプAは、紡錘形と平行四辺形の中間の形状のヒステリシスループを、HDRタイプBは、ピーク値付近での勾配が急な逆S字形に近い平行四辺形のヒステリシスループを描いている。いずれの供試体も、1回目の载荷で荷重が最も大きく、载荷回数の増加に伴い、ある一定の値に収束していく。

表4. 4-3に疲労試験50%振幅時(20℃)の①サイクル目と④サイクル目の第1波目における最大荷重、最小荷重を示す。荷重の低下が若干みられるが、ヒステリシスループは、①サイクル目と④サイクル目とでは、ほとんど同じ形状である。

表4. 4-3 ①サイクル目および④サイクル目の最大荷重および最小荷重(50%振幅時)

供試体	サイクル	P_{max} (tf)	P_{min} (tf)	平均 (tf)
LRB	①	5.400	6.037	5.719
	②	4.387	5.325	4.856
HDRタイプA	①	4.612	6.300	5.456
	②	4.425	5.437	4.931
HDRタイプB	①	6.375	6.375	6.375
	②	6.187	6.375	6.281

表4. 4-4に-10℃と+40℃の载荷により得られた50%振幅時の④サイクル目の第1波目における最大荷重、最小荷重を示す。疲労試験においても、-10℃と+40℃とでは、いずれの供試体とも、-10℃の方が荷重が大きく、温度変化に敏感であることがわかる。

表4. 4-4 -10℃および+40℃の最大荷重および最小荷重

供試体	温度	P_{max} (tf)	P_{min} (tf)	平均 (tf)
LRB	-10℃	5.175	5.550	5.363
	+30℃	4.387	5.250	4.819
HDRタイプA	-10℃	5.812	6.075	5.944
	+40℃	4.087	4.275	4.181
HDRタイプB	-10℃	8.812	9.187	9.000
	+40℃	5.437	5.850	5.644

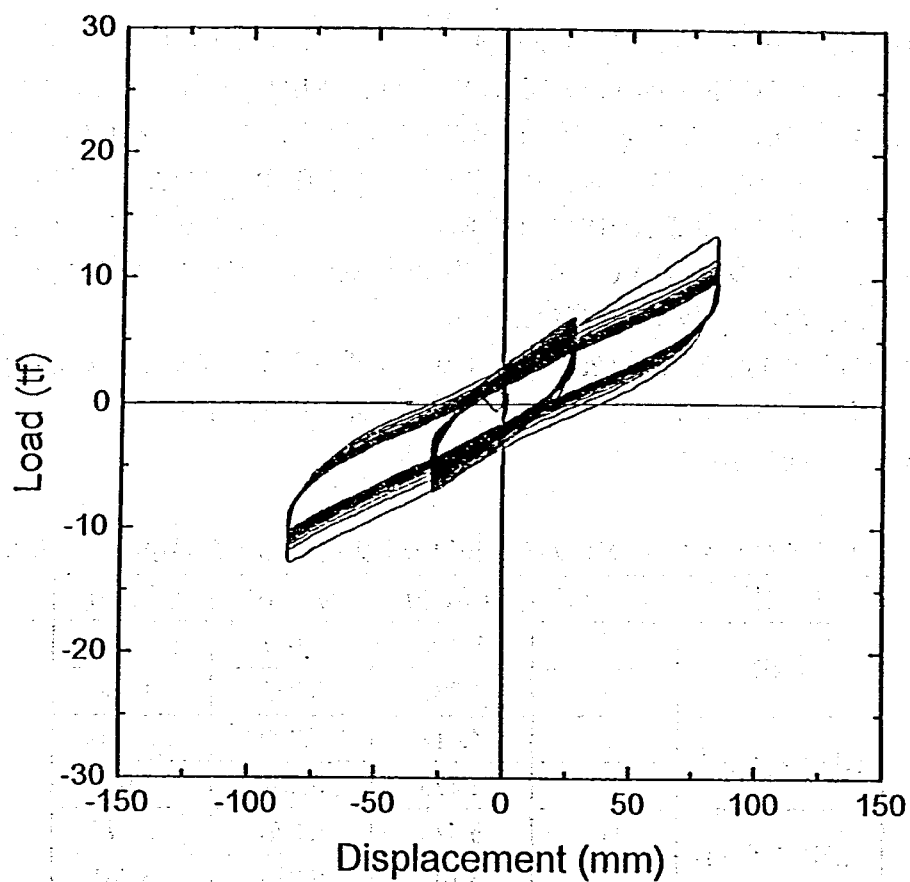


図4. 4-7 (1) 疲労試験①サイクル目 (LRB-04)

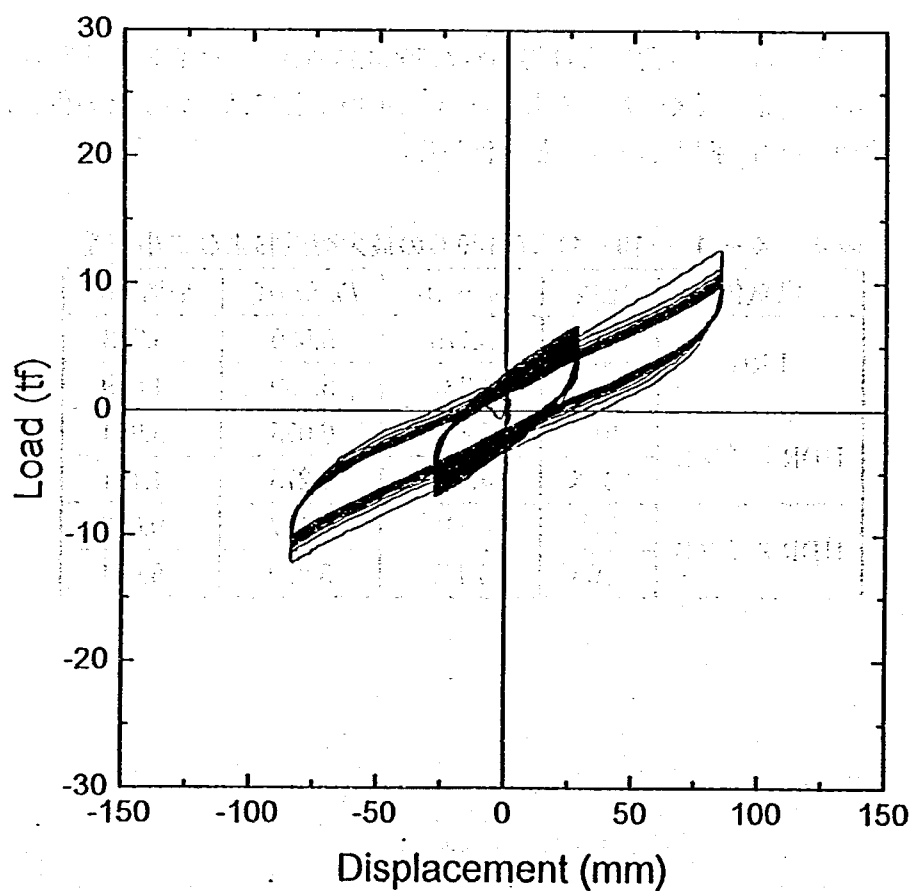


図4. 4-7 (2) 疲労試験②サイクル目 (LRB-04)

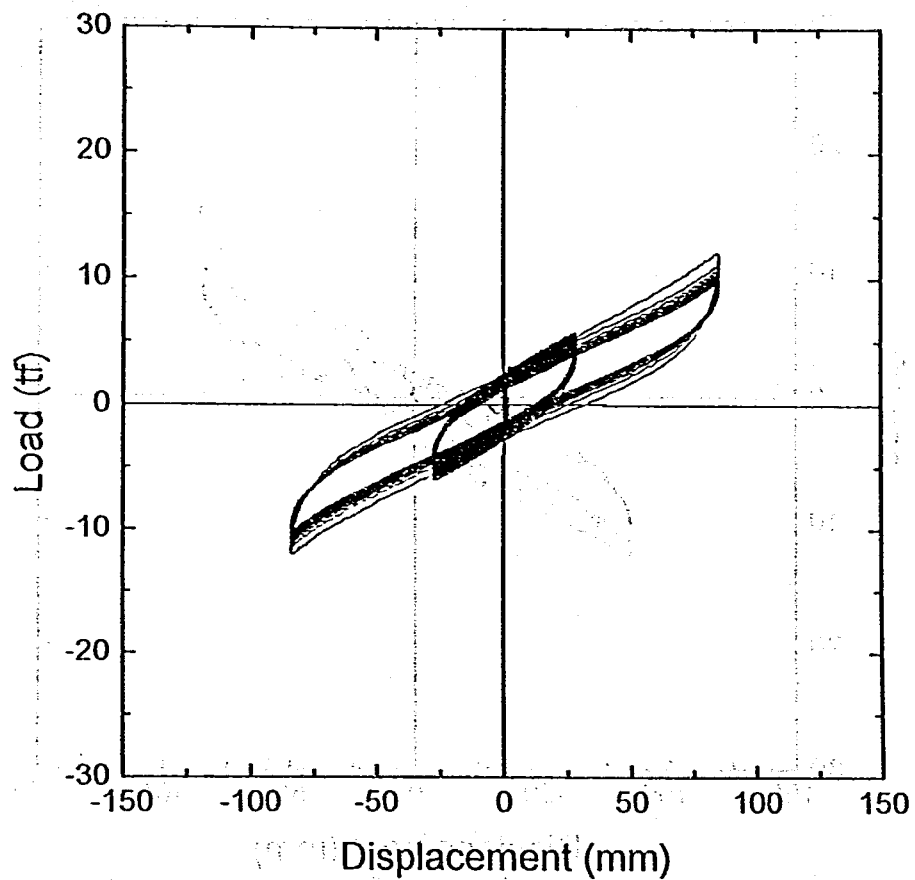


図4. 4-7 (3) 疲労試験③サイクル目 (LRB-04)

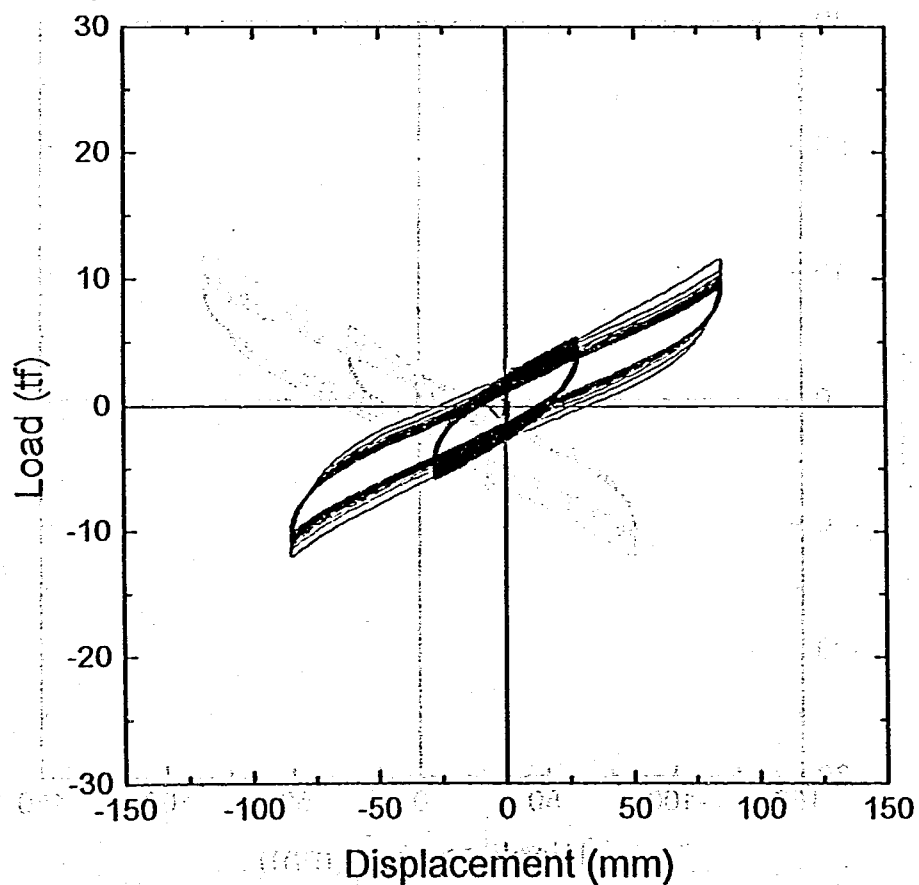


図4. 4-7 (4) 疲労試験④サイクル目 (LRB-04)

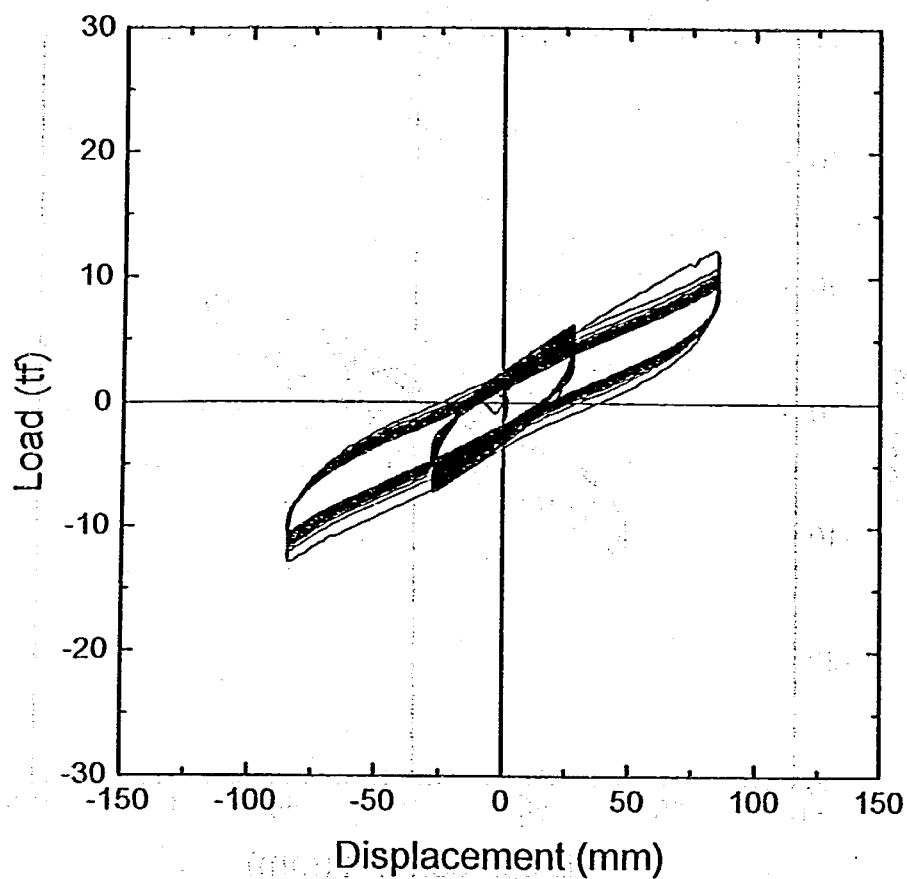


図4. 4-7 (5) 疲労試験①サイクル目 (LRB-05)

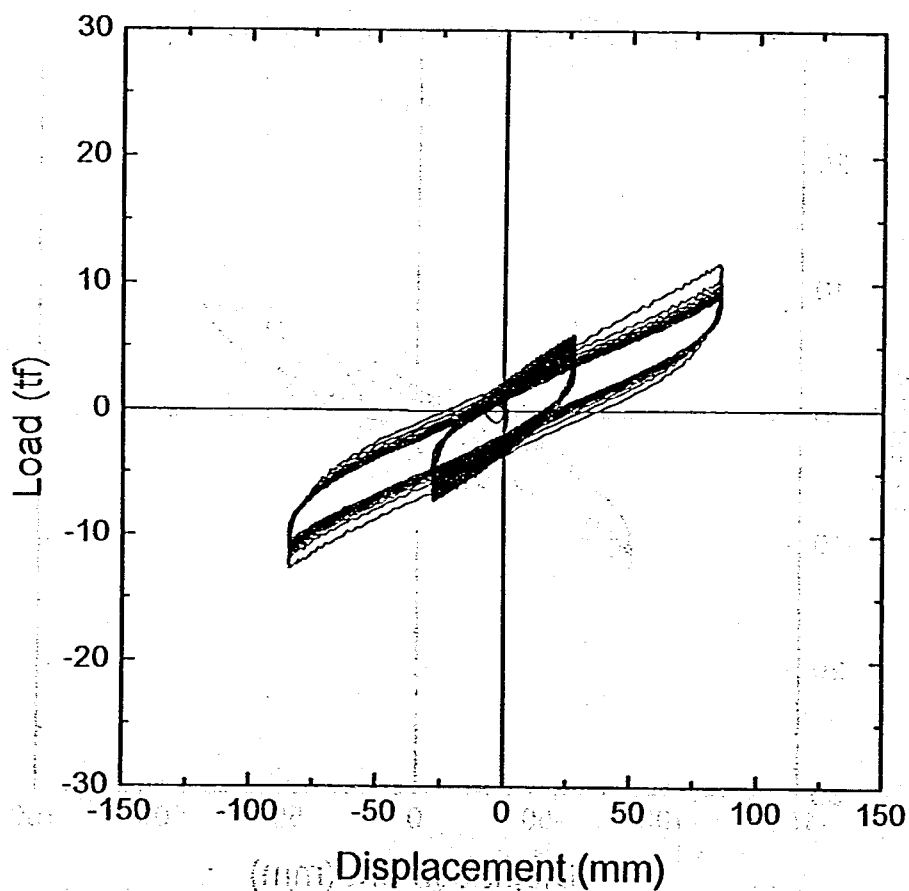


図4. 4-7 (6) 疲労試験②サイクル目 (LRB-05)

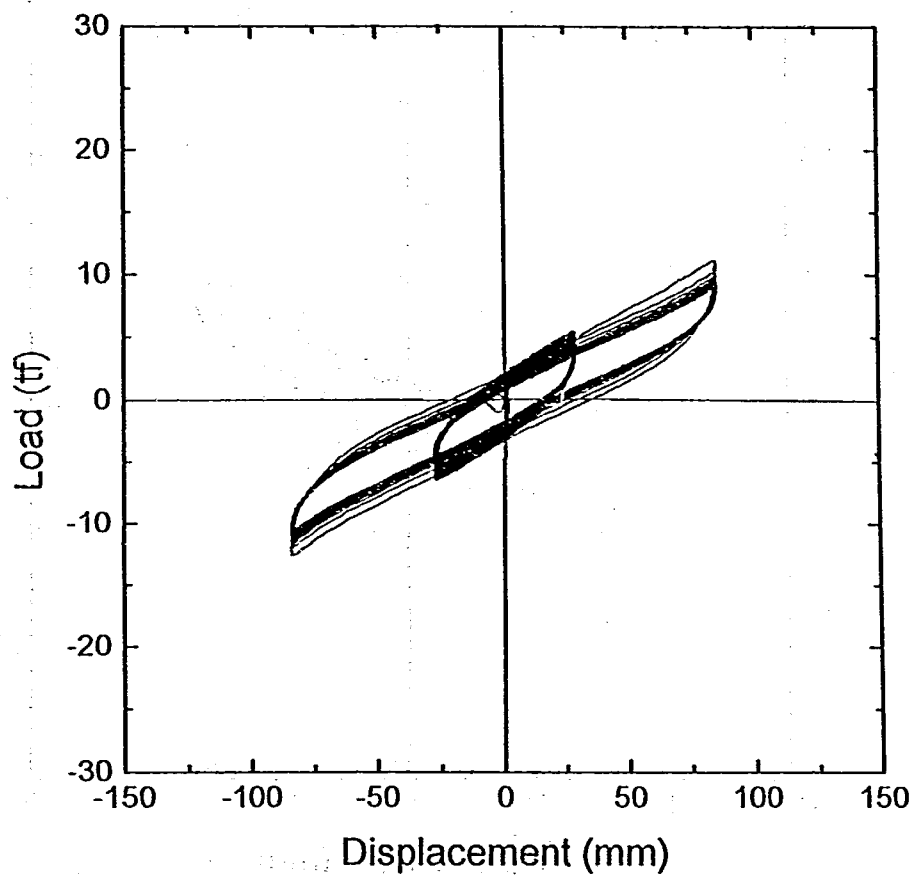


図4. 4-7 (7) 疲労試験③サイクル目 (LRB-05)

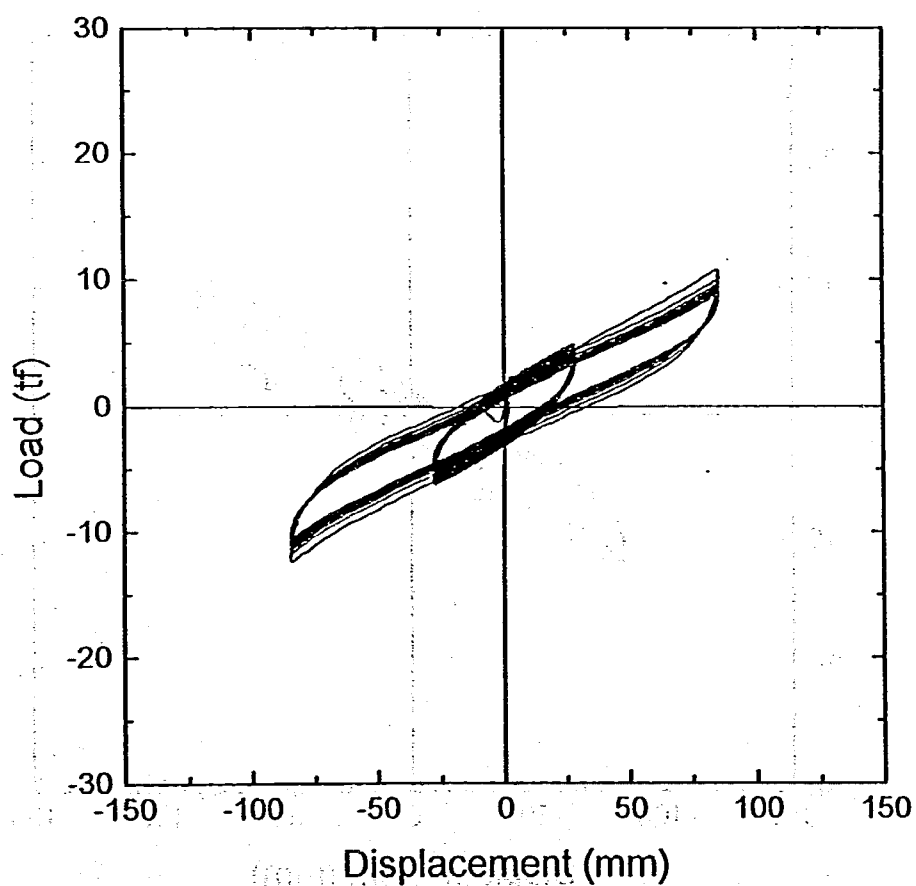


図4. 4-7 (8) 疲労試験④サイクル目 (LRB-05)

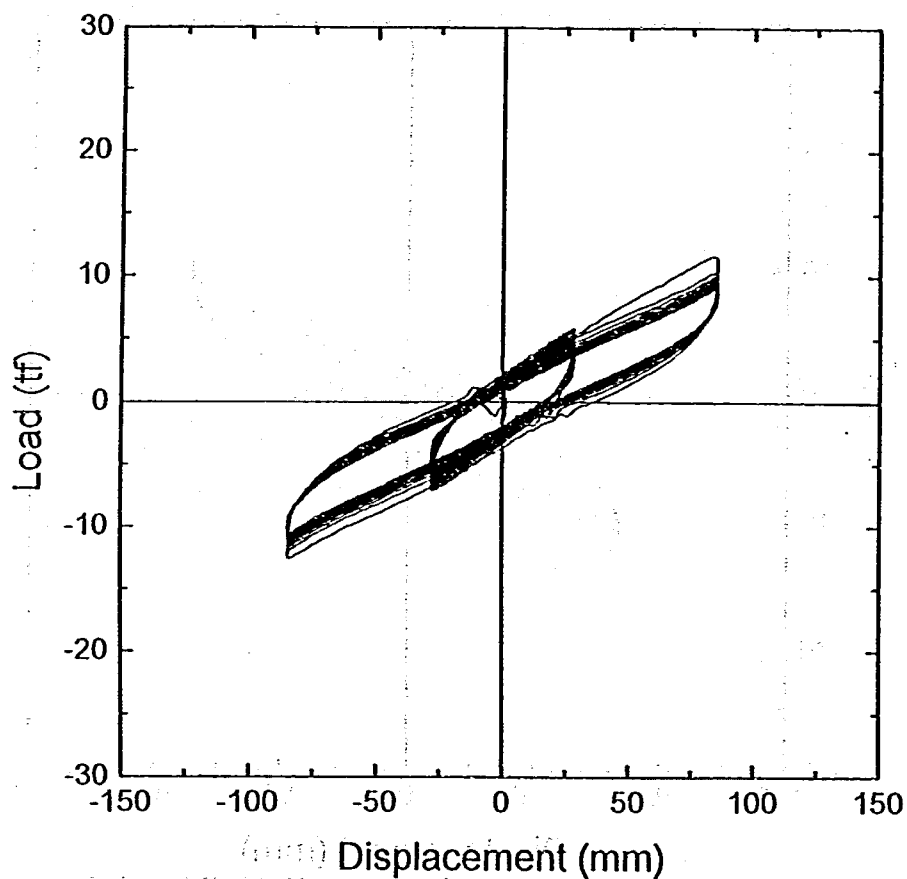


図4. 4-7 (9) 疲労試験①サイクル目 (LRB-06)

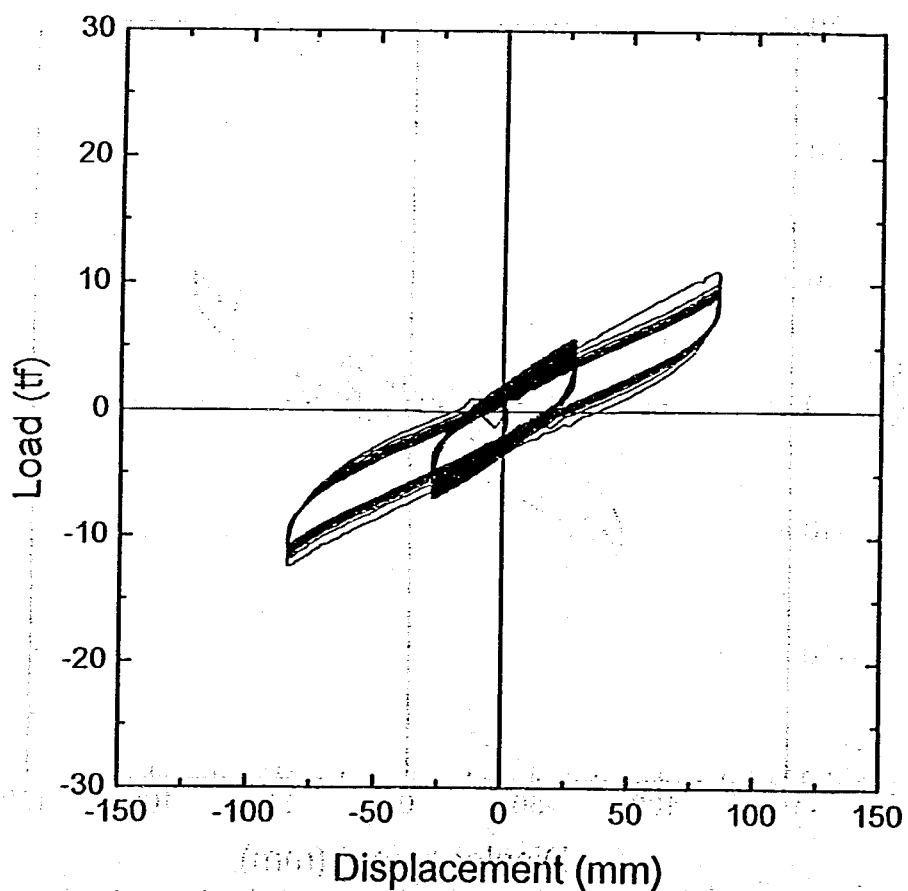


図4. 4-7 (10) 疲労試験②サイクル目 (LRB-06)

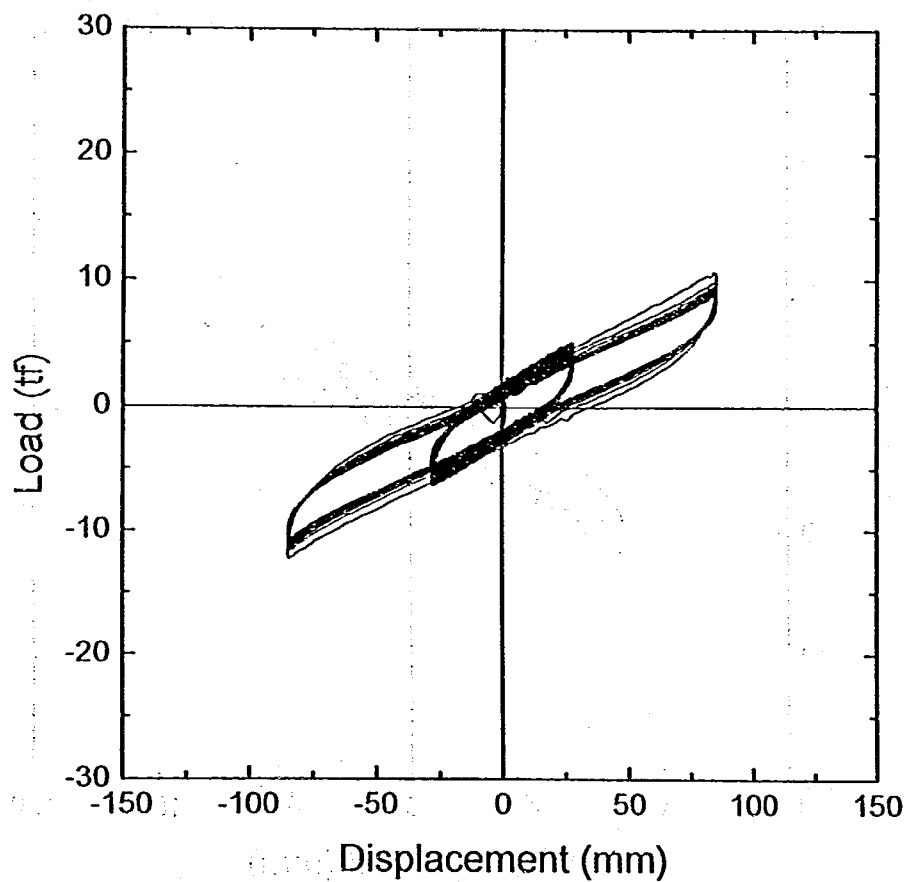


図4.4-7(11) 疲労試験③サイクル目 (LRB-06)

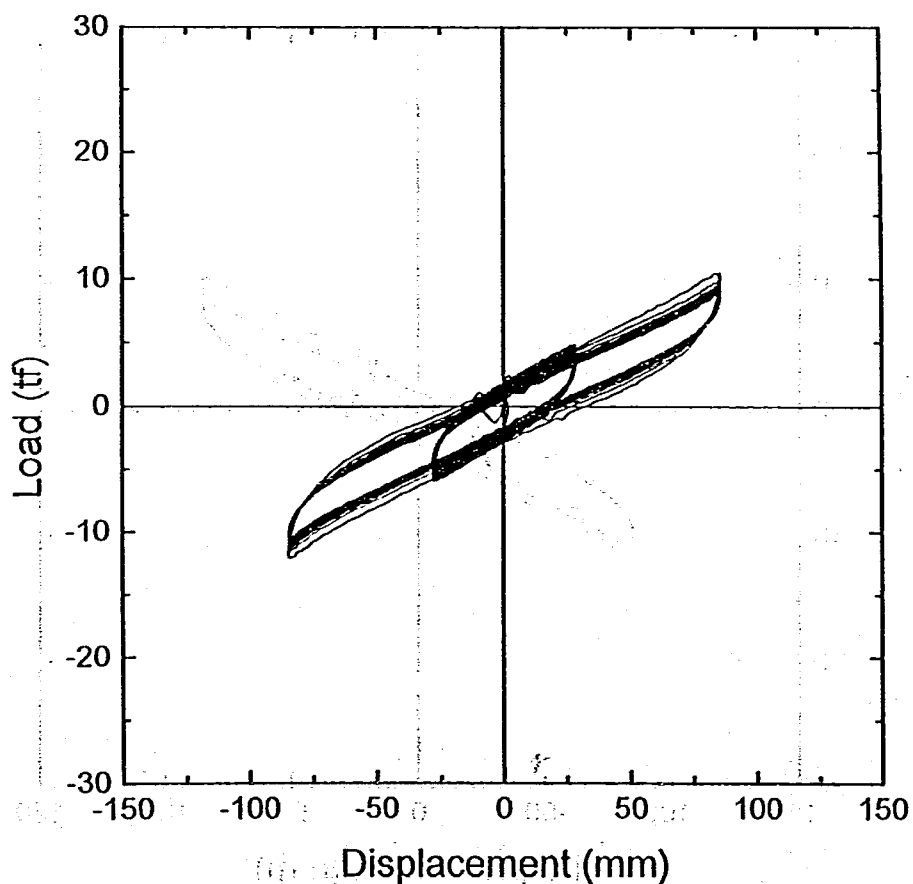


図4.4-7(12) 疲労試験④サイクル目 (LRB-06)

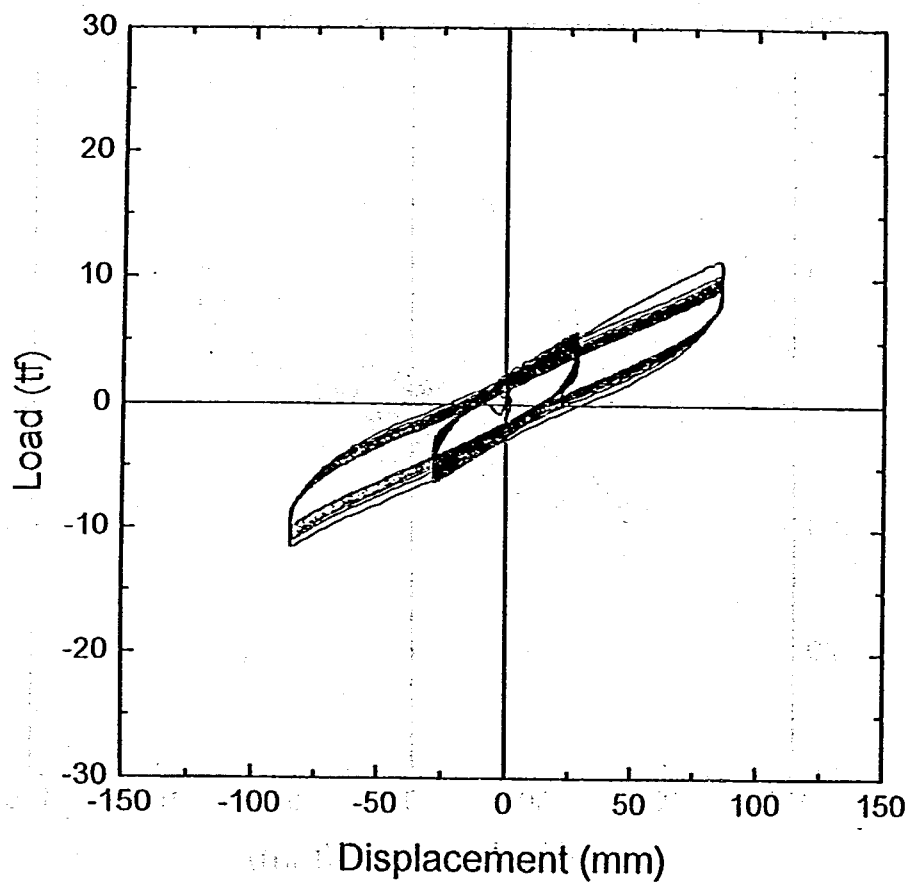


図4. 4-7 (13) 疲労試験①サイクル目 (LRB-07)

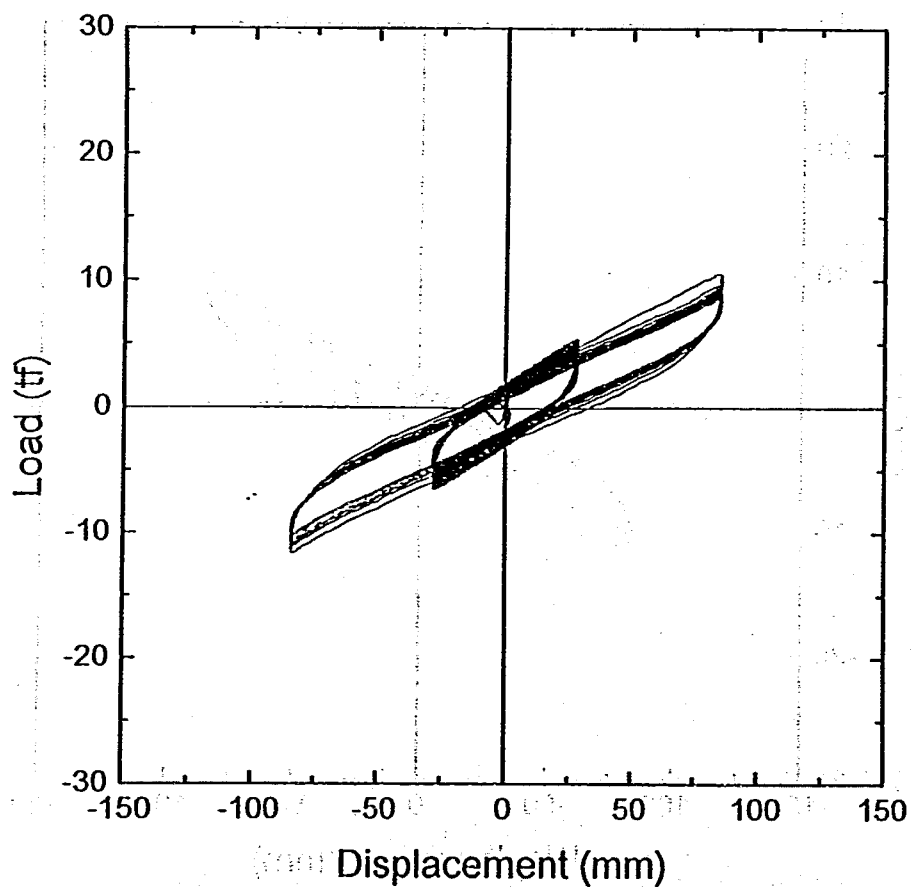


図4. 4-7 (14) 疲労試験②サイクル目 (LRB-07)

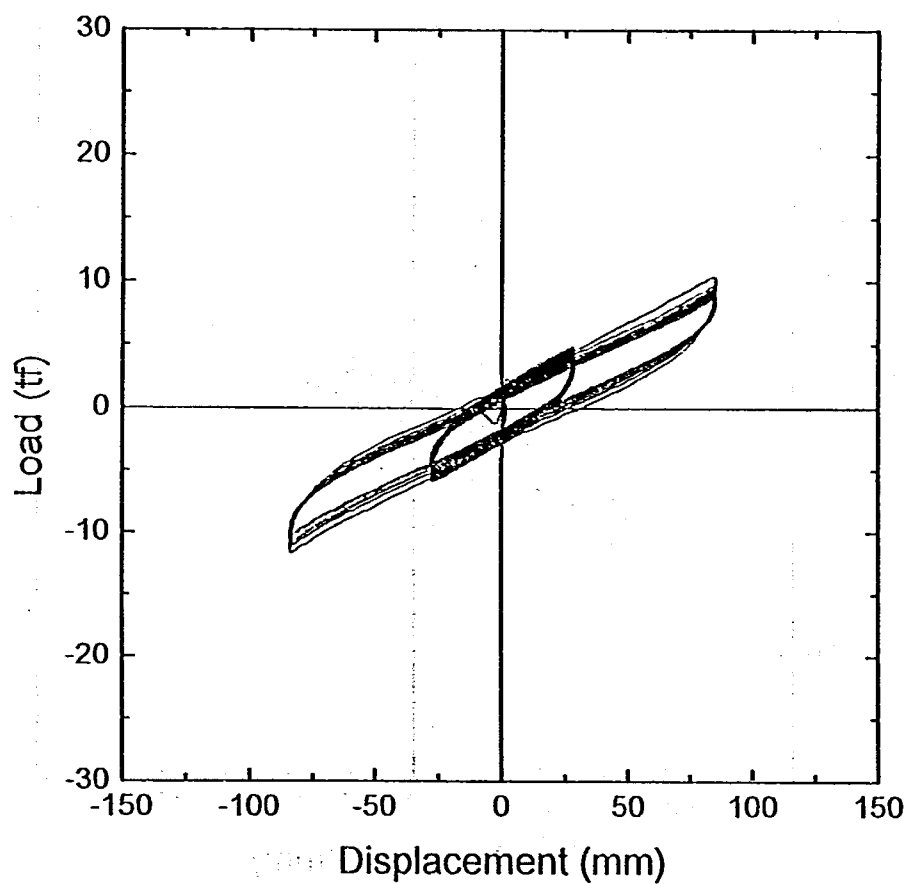


図4. 4-7 (15) 疲労試験③サイクル目 (LRB-07)

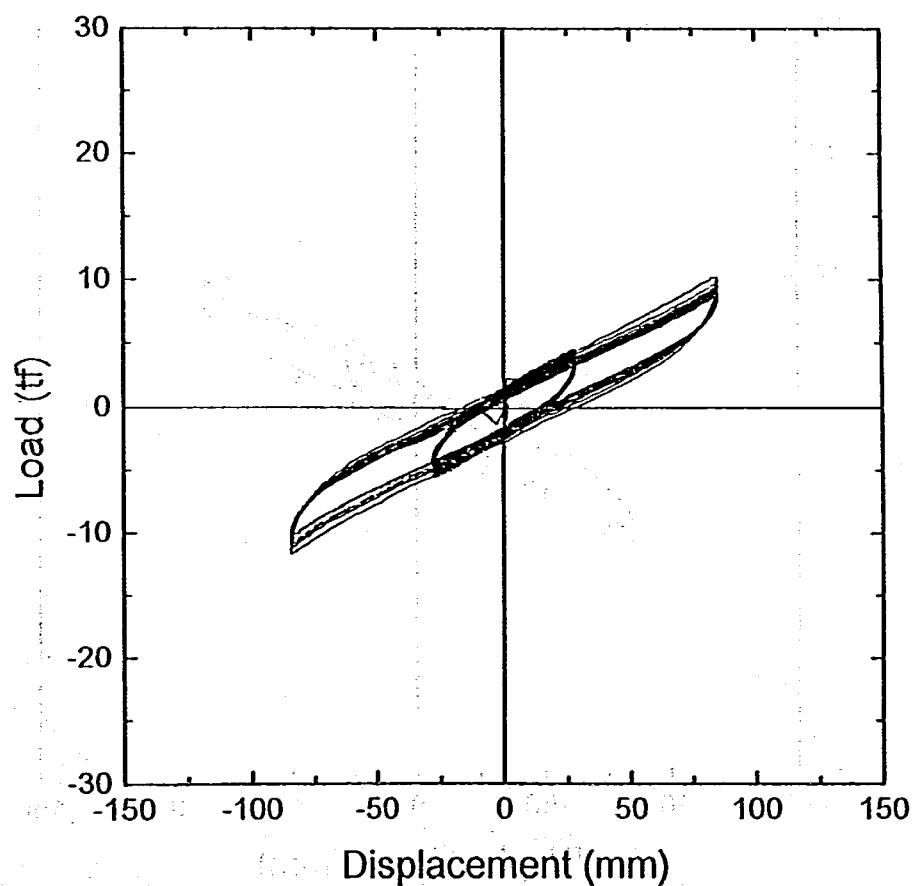


図4. 4-7 (16) 疲労試験④サイクル目 (LRB-07)

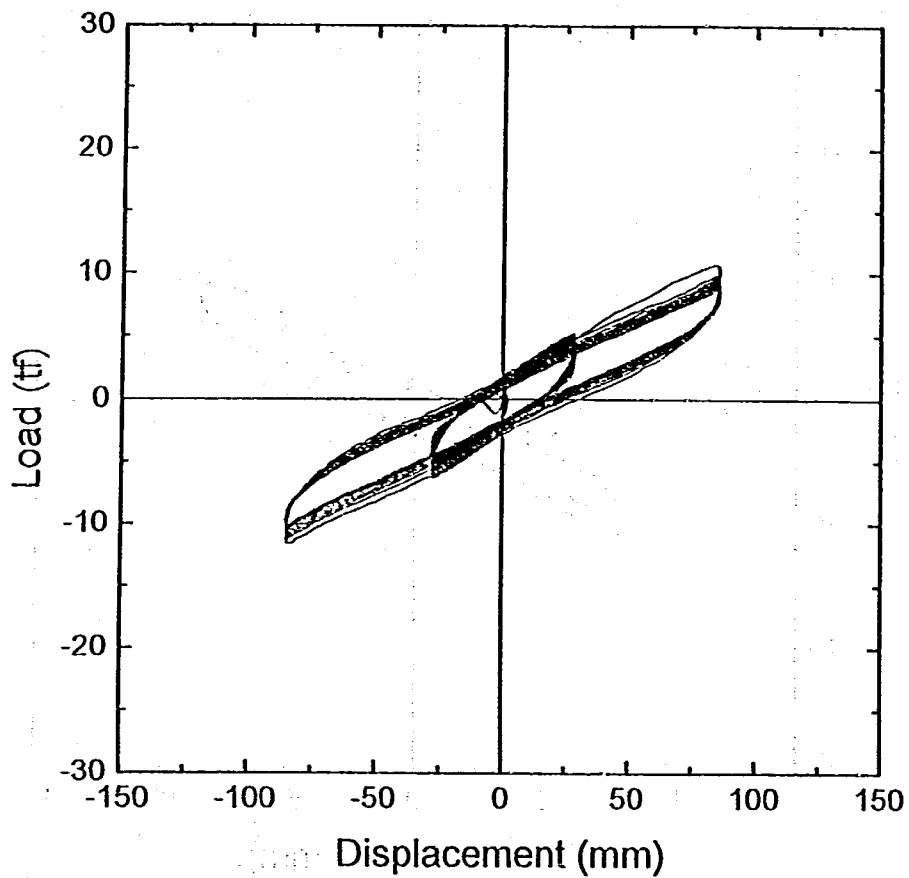


図4. 4-7 (17) 疲労試験①サイクル目 (LRB-08)

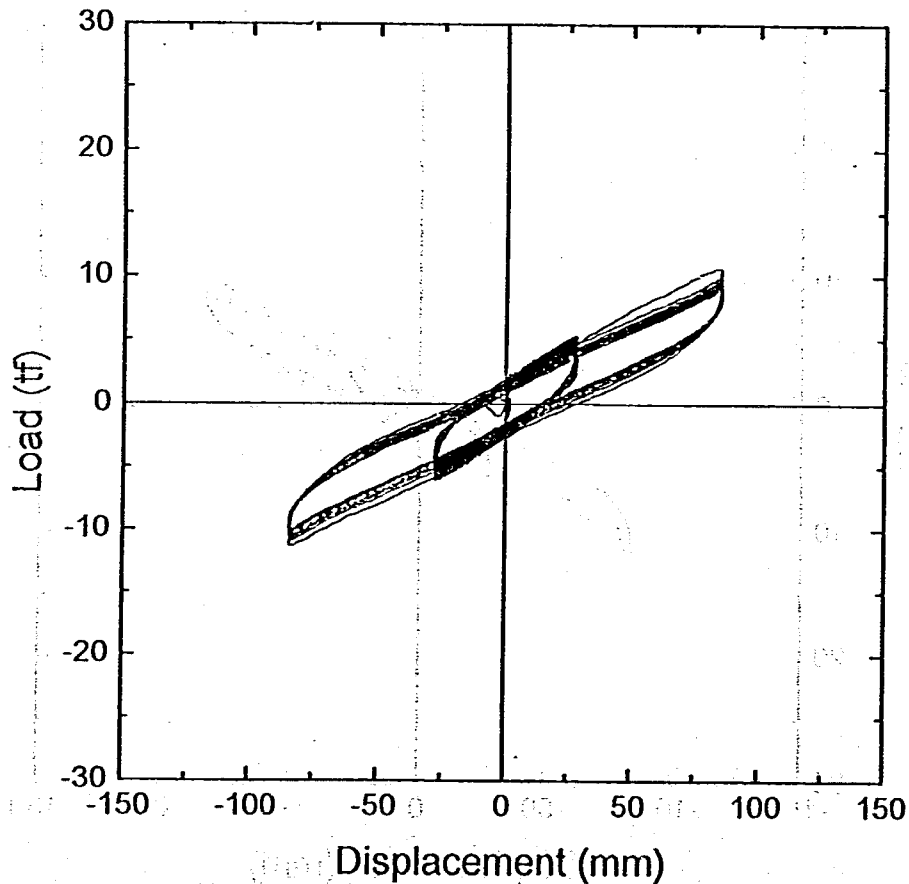


図4. 4-7 (18) 疲労試験②サイクル目 (LRB-08)

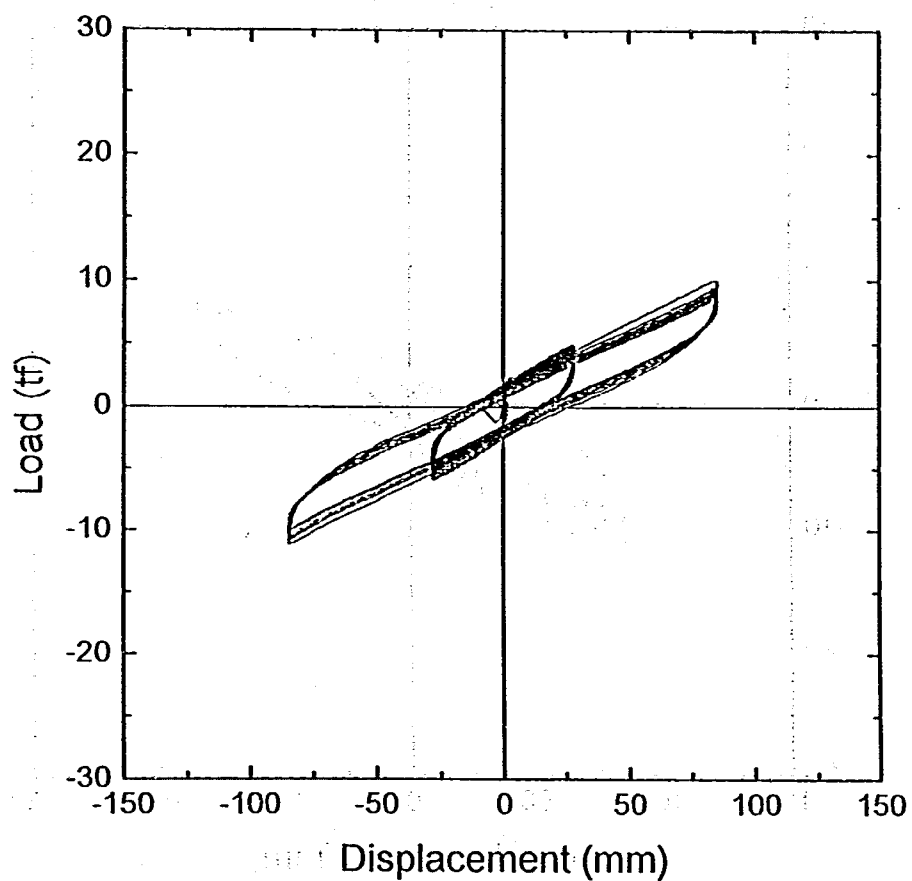


図4. 4-7 (19) 疲労試験③サイクル目 (LRB-08)

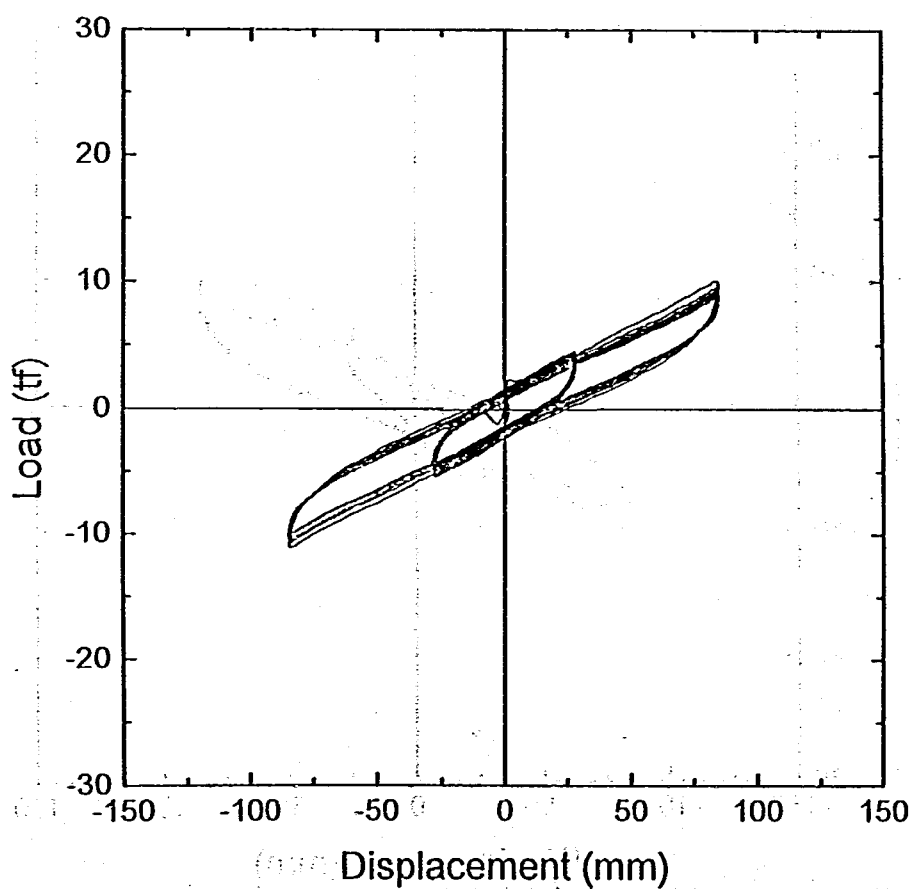


図4. 4-7 (20) 疲労試験④サイクル目 (LRB-08)

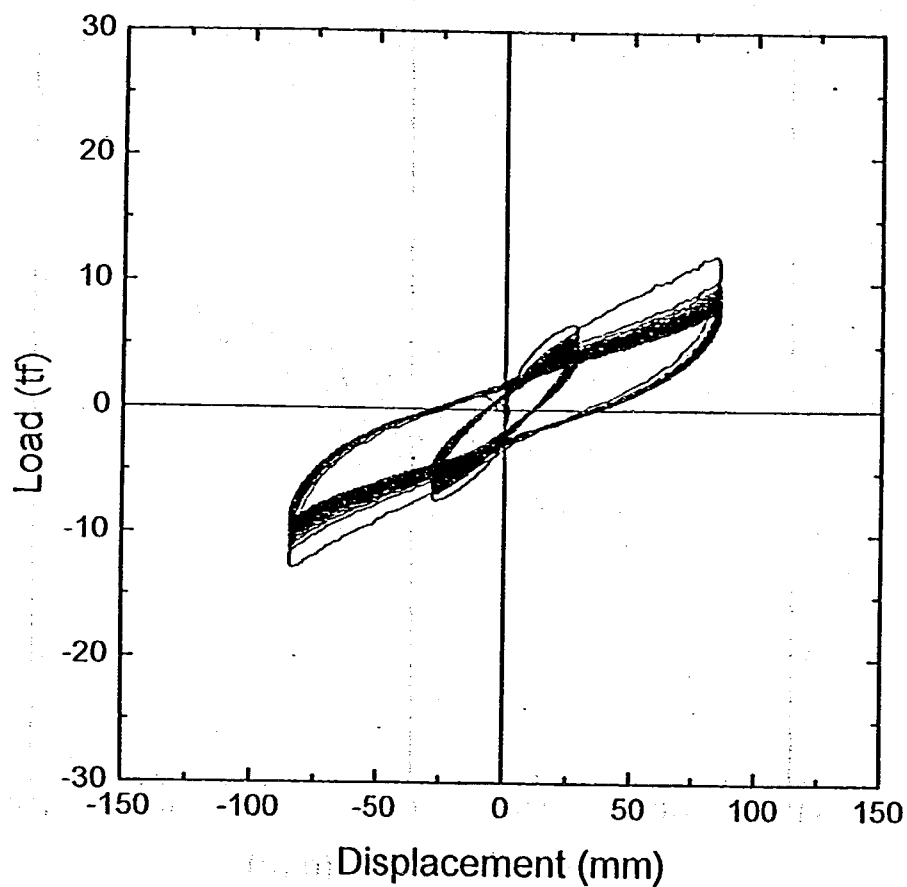


図4. 4-7 (21) 疲労試験①サイクル目 (HDR-04)

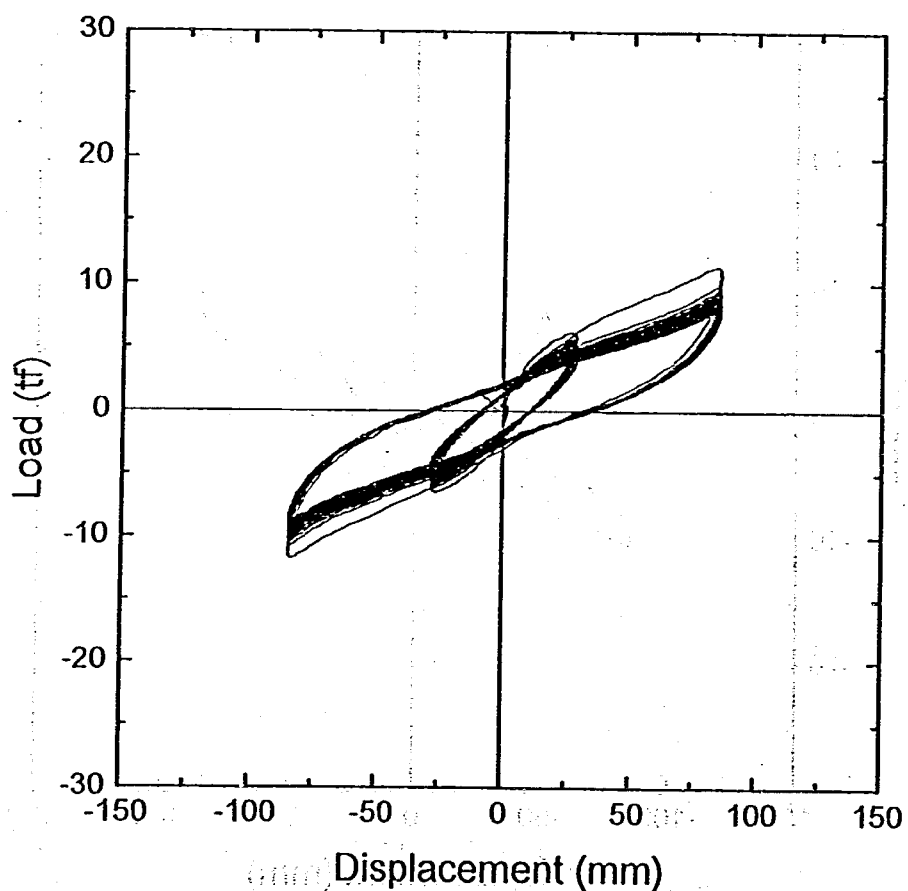


図4. 4-7 (22) 疲労試験②サイクル目 (HDR-04)

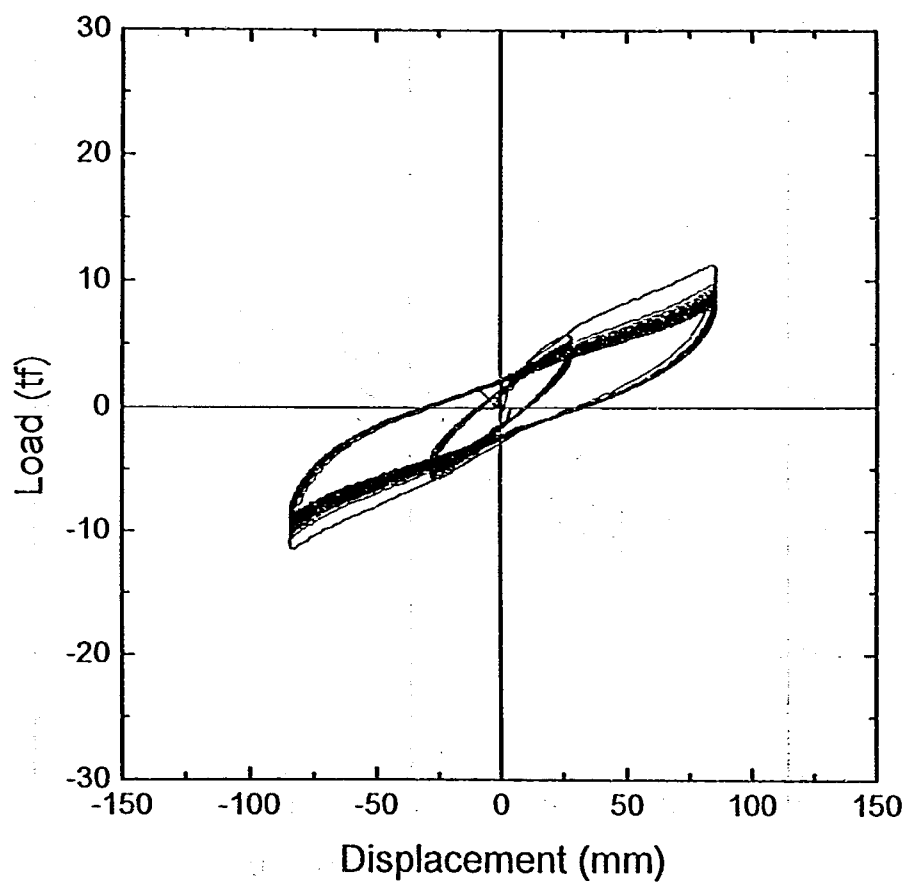


図4. 4-7 (2 3) 疲労試験③サイクル目 (HDR-0 4)

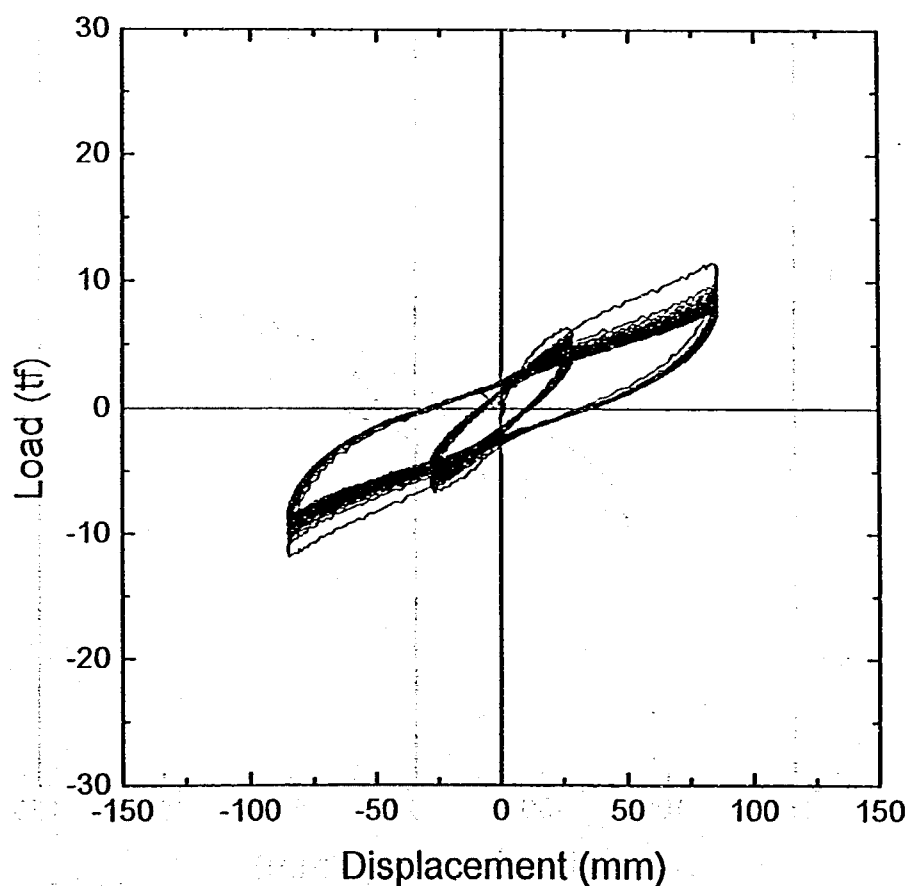


図4. 4-7 (2 4) 疲労試験④サイクル目 (HDR-0 4)

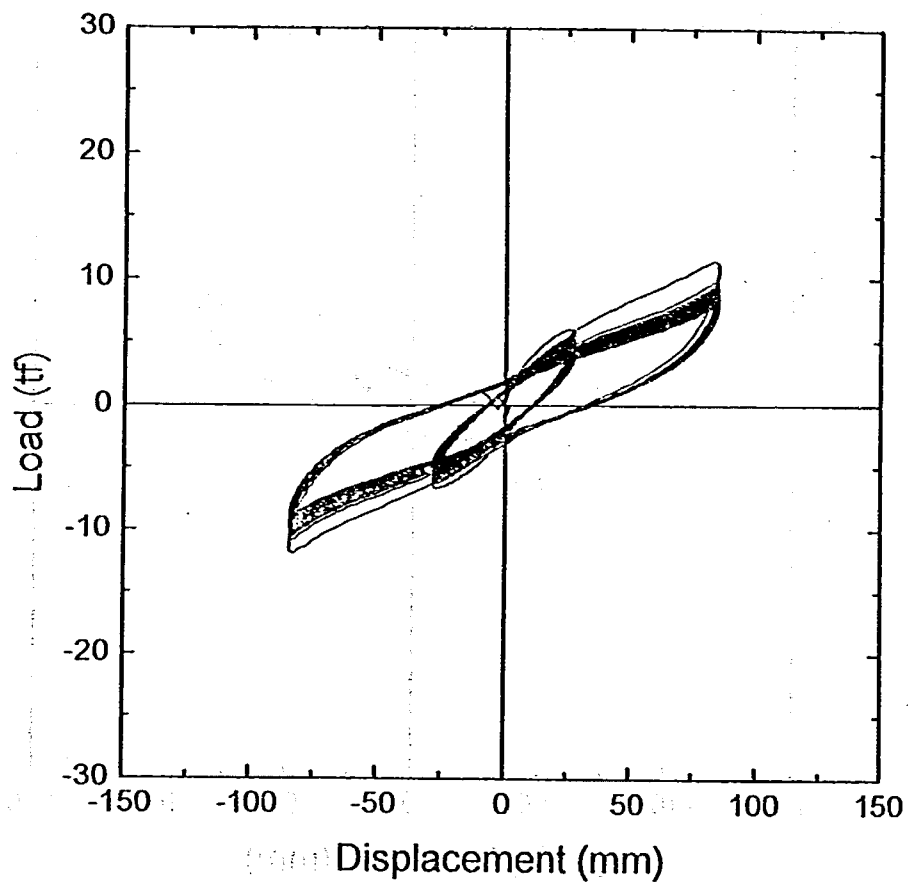


図4. 4-7 (2.5) 疲労試験①サイクル目 (HDR-0.5)

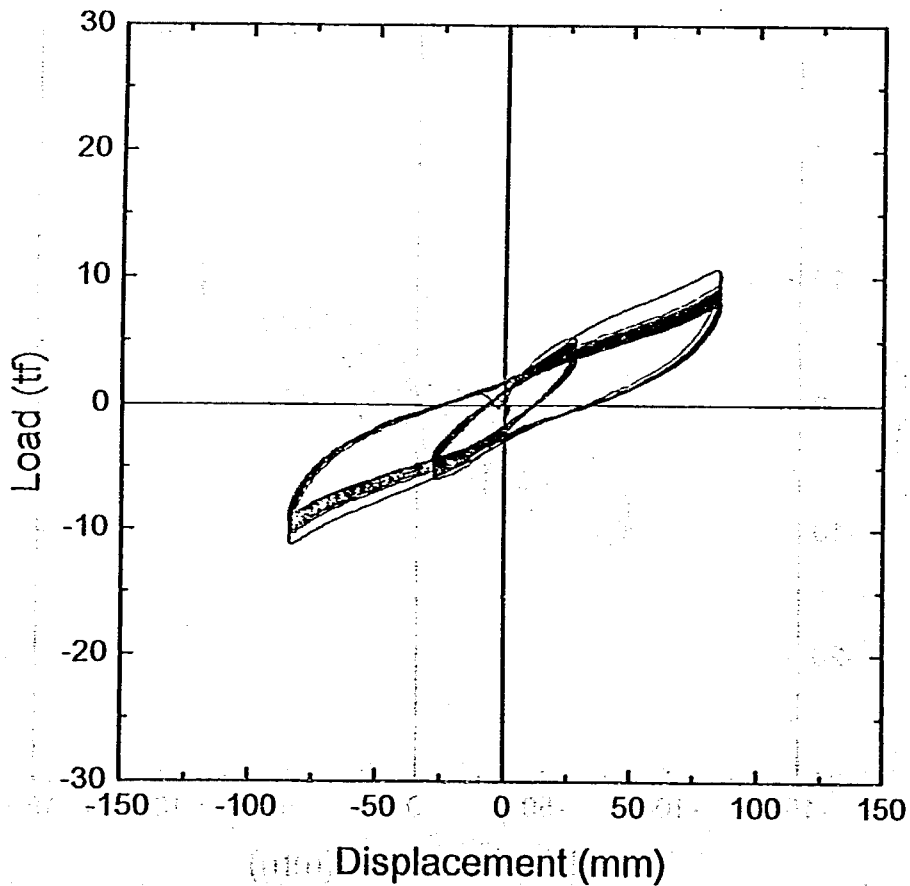


図4. 4-7 (2.6) 疲労試験②サイクル目 (HDR-0.5)

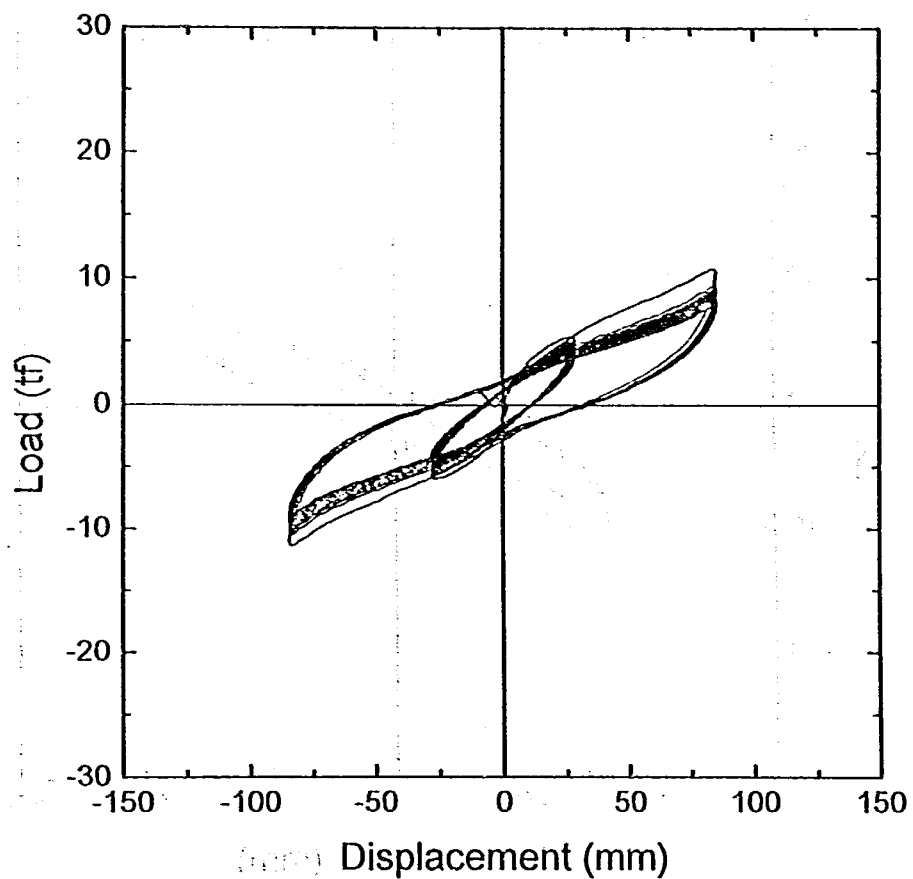


図4. 4-7 (27) 疲労試験③サイクル目 (HDR-05)

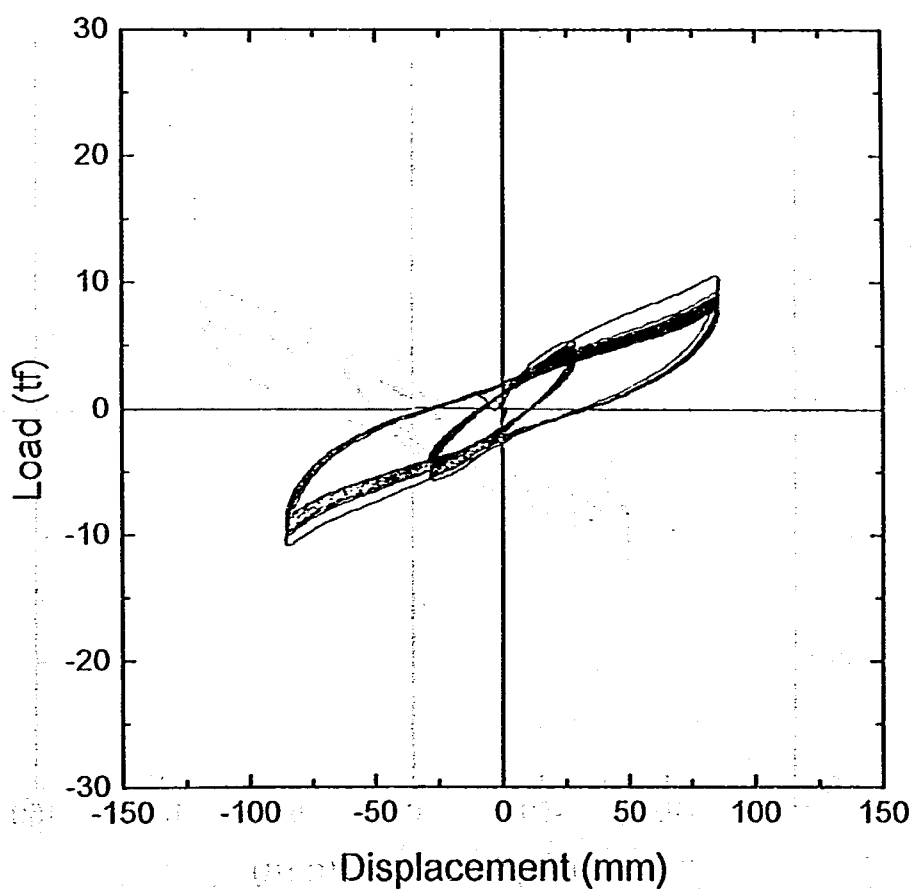


図4. 4-7 (28) 疲労試験④サイクル目 (HDR-05)

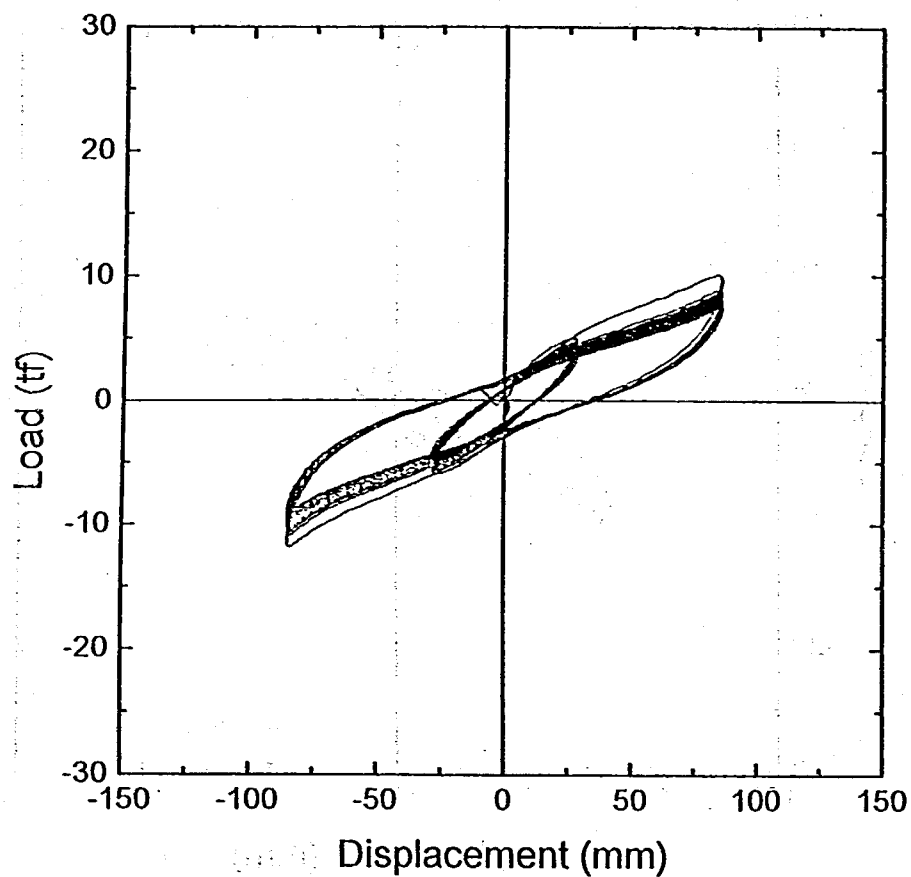


図4.4-7 (29) 疲労試験①サイクル目 (HDR-06)

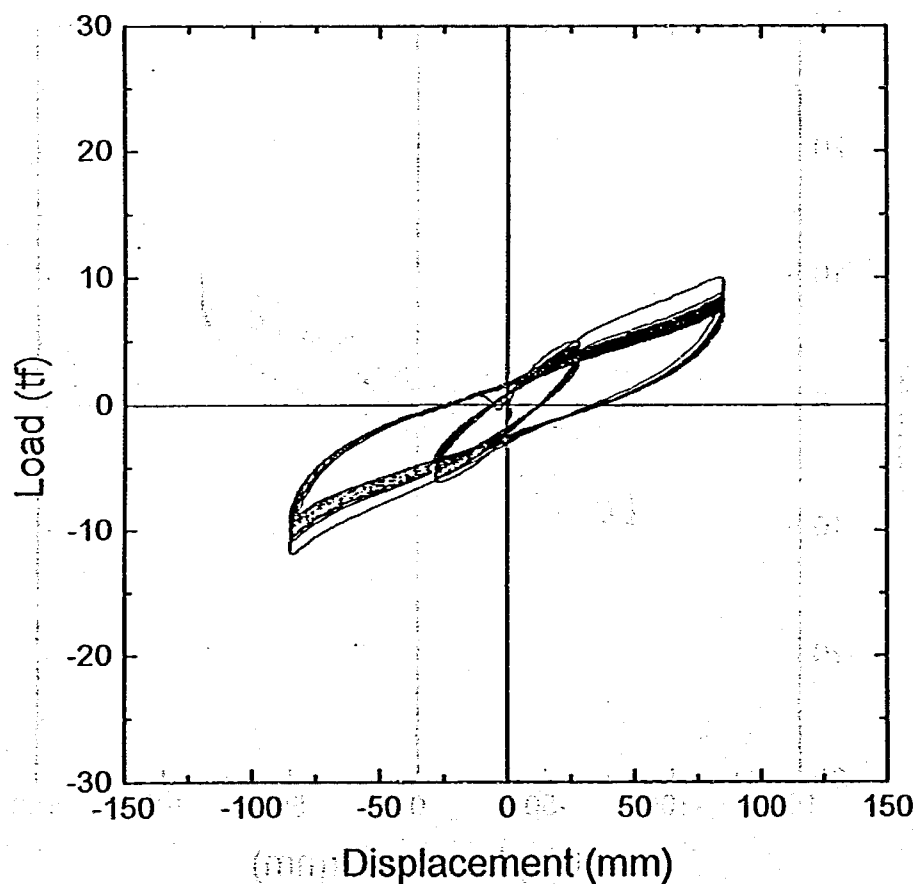


図4.4-7 (30) 疲労試験②サイクル目 (HDR-06)

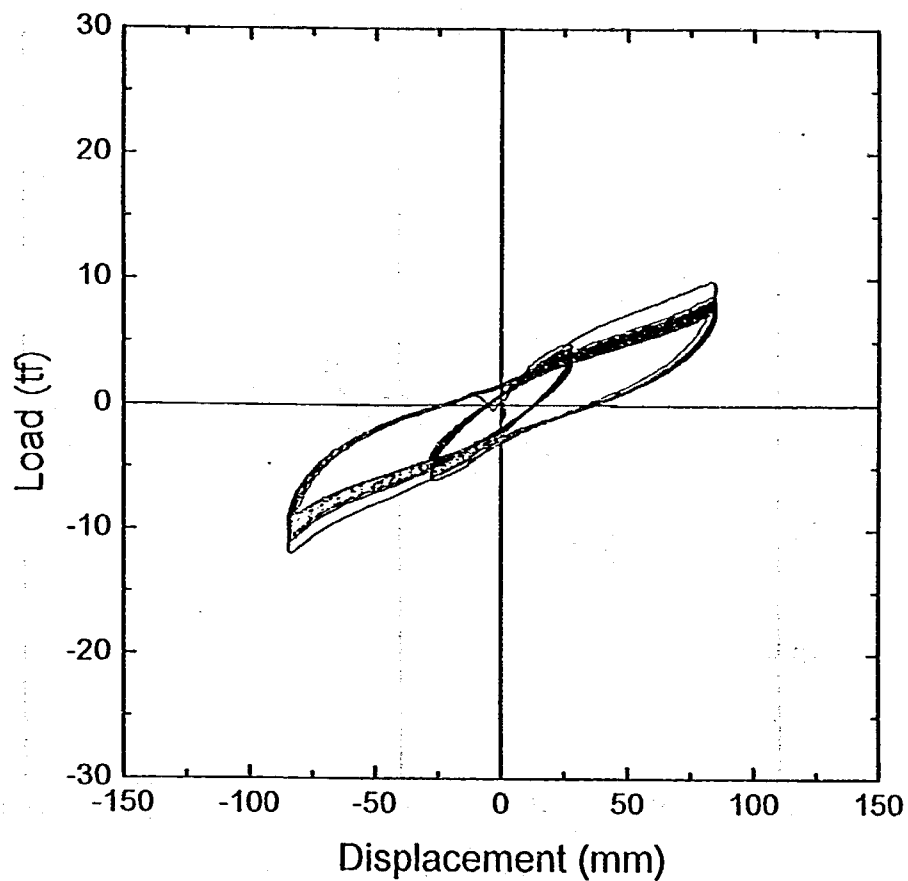


図4. 4-7 (3 1) 疲労試験③サイクル目 (HDR-0 6)

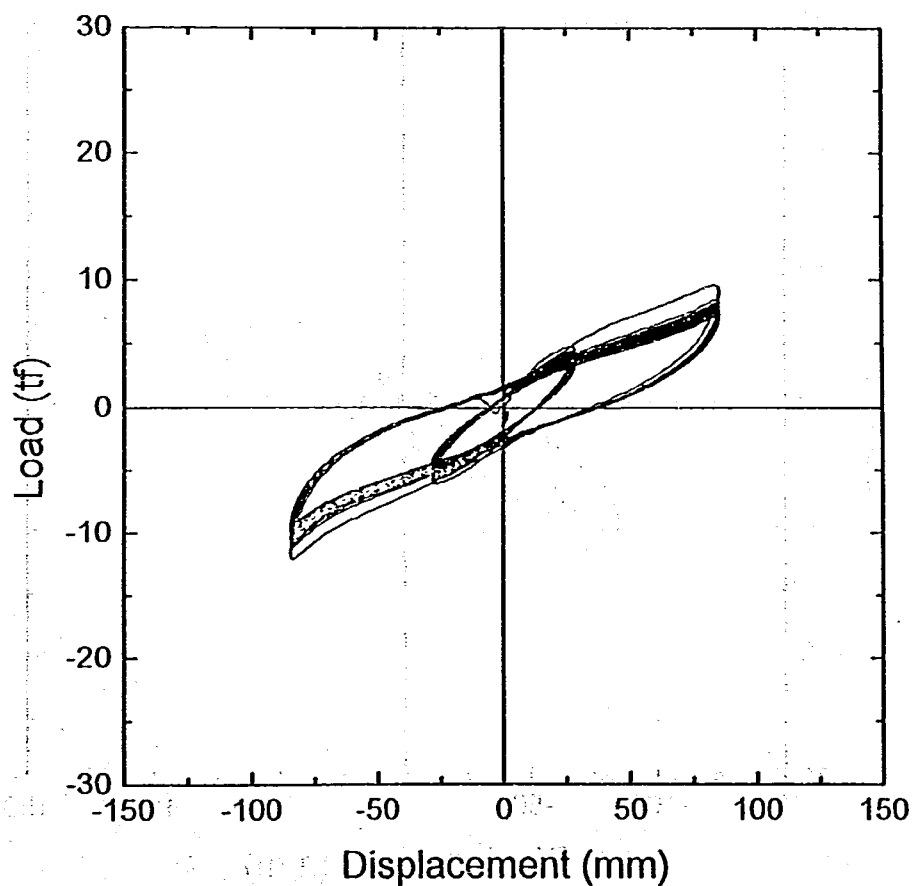


図4. 4-7 (3 2) 疲労試験④サイクル目 (HDR-0 6)

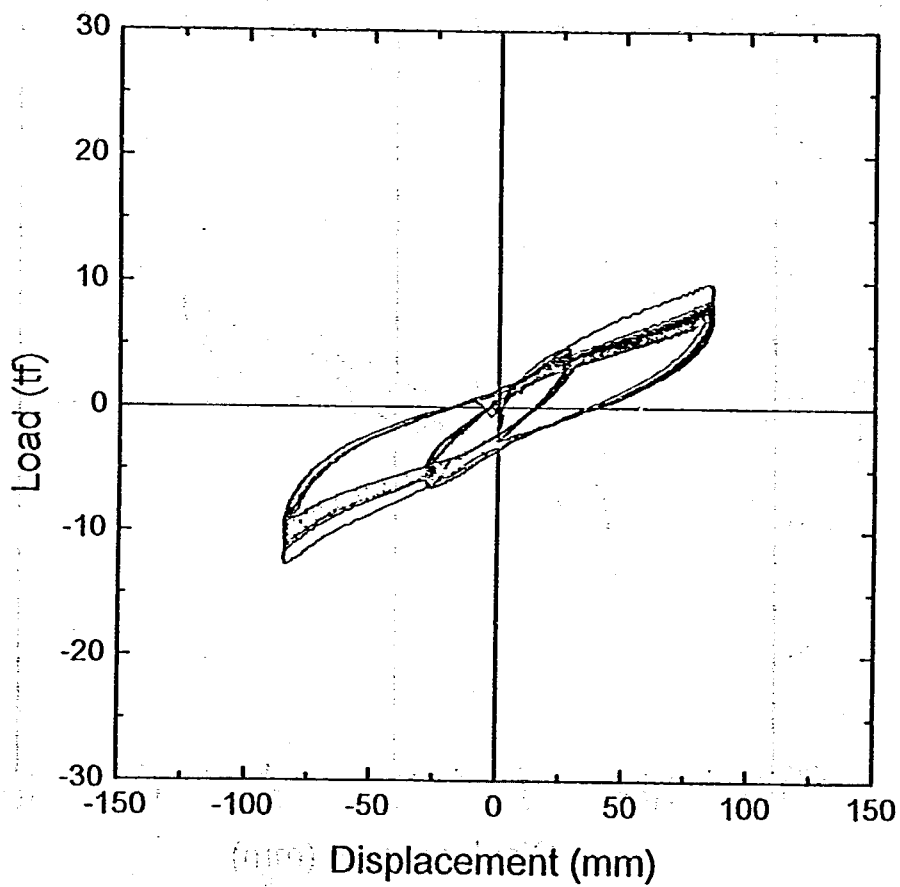


図4. 4-7(33) 疲労試験①サイクル目 (HDR-07)

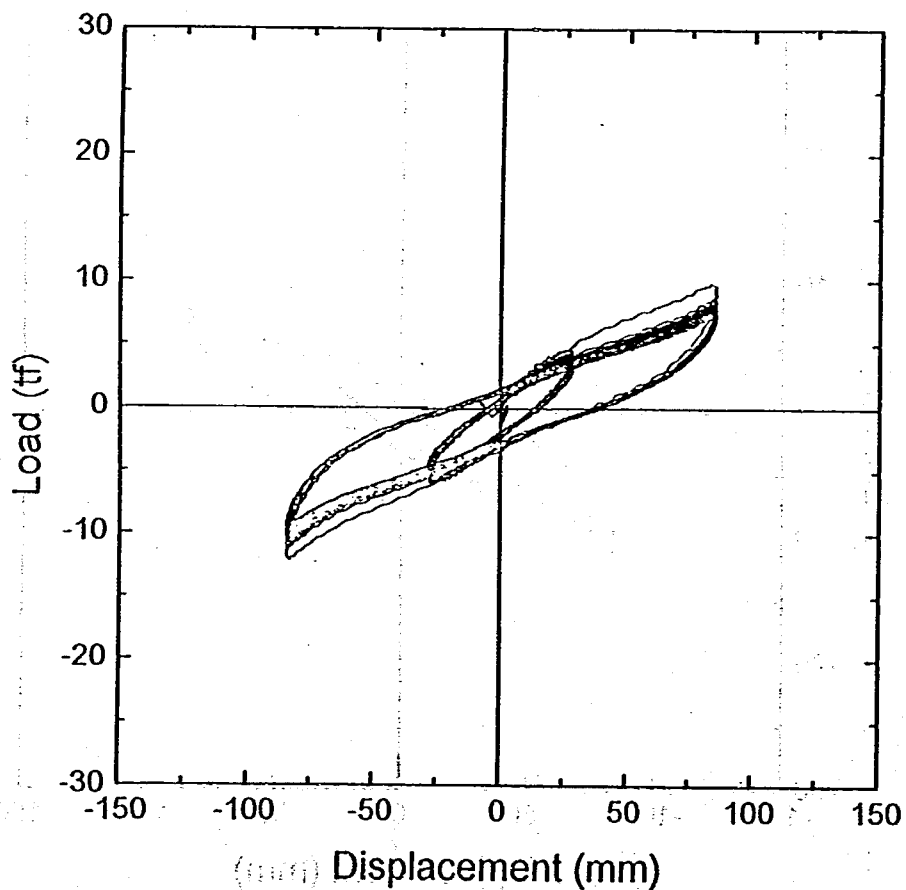


図4. 4-7(34) 疲労試験②サイクル目 (HDR-07)

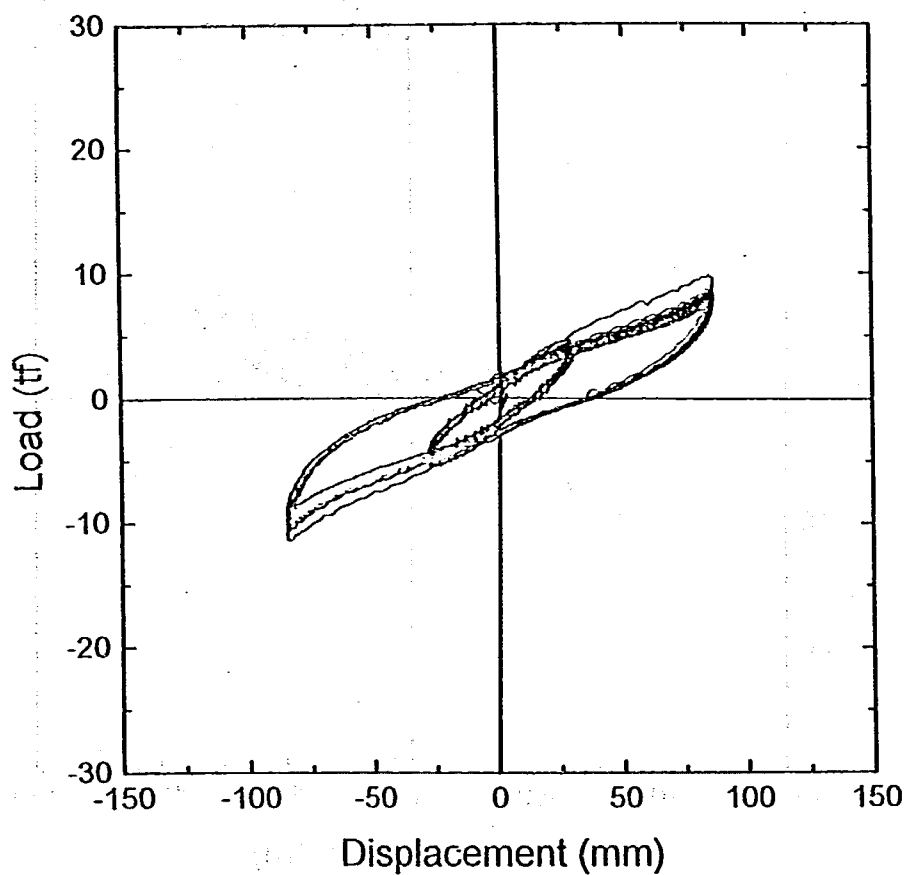


図4. 4-7 (35) 疲労試験③サイクル目 (HDR-07)

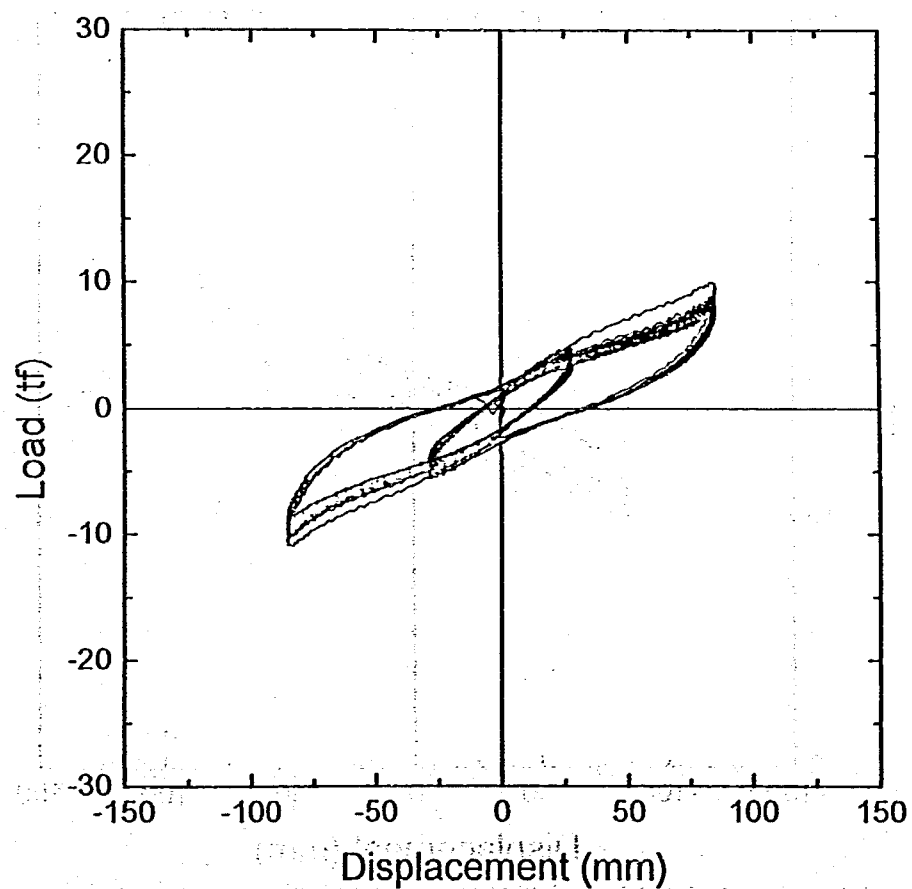


図4. 4-7 (36) 疲労試験④サイクル目 (HDR-07)

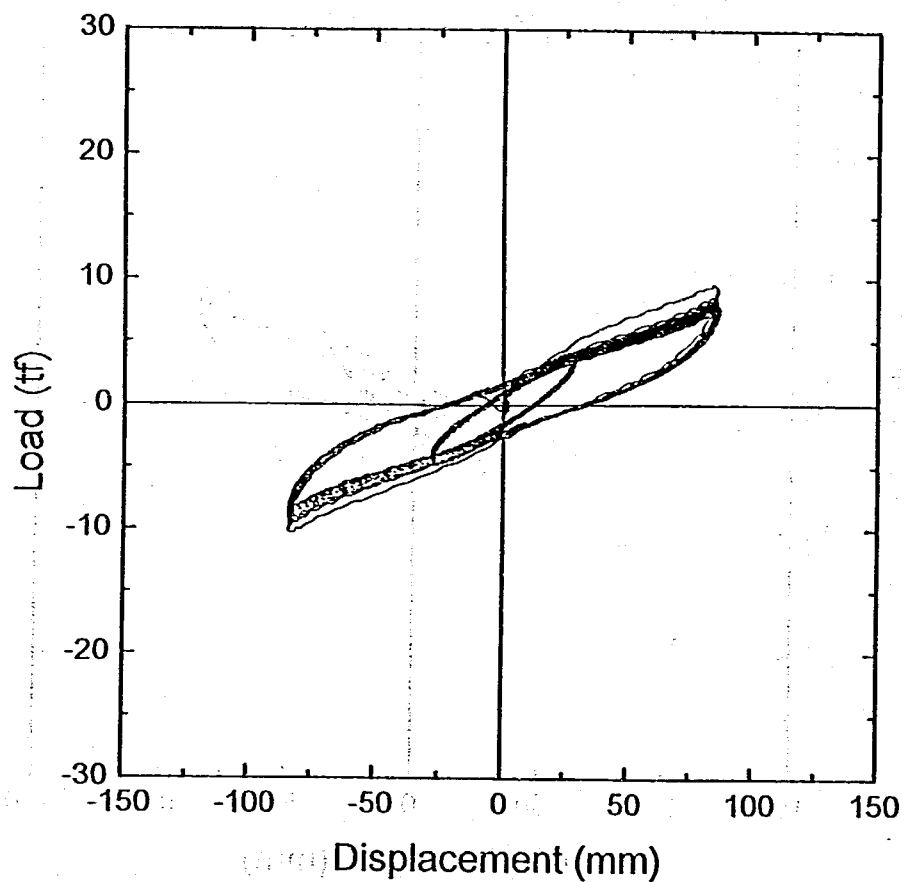


図4. 4-7 (37) 疲労試験①サイクル目 (HDR-08)

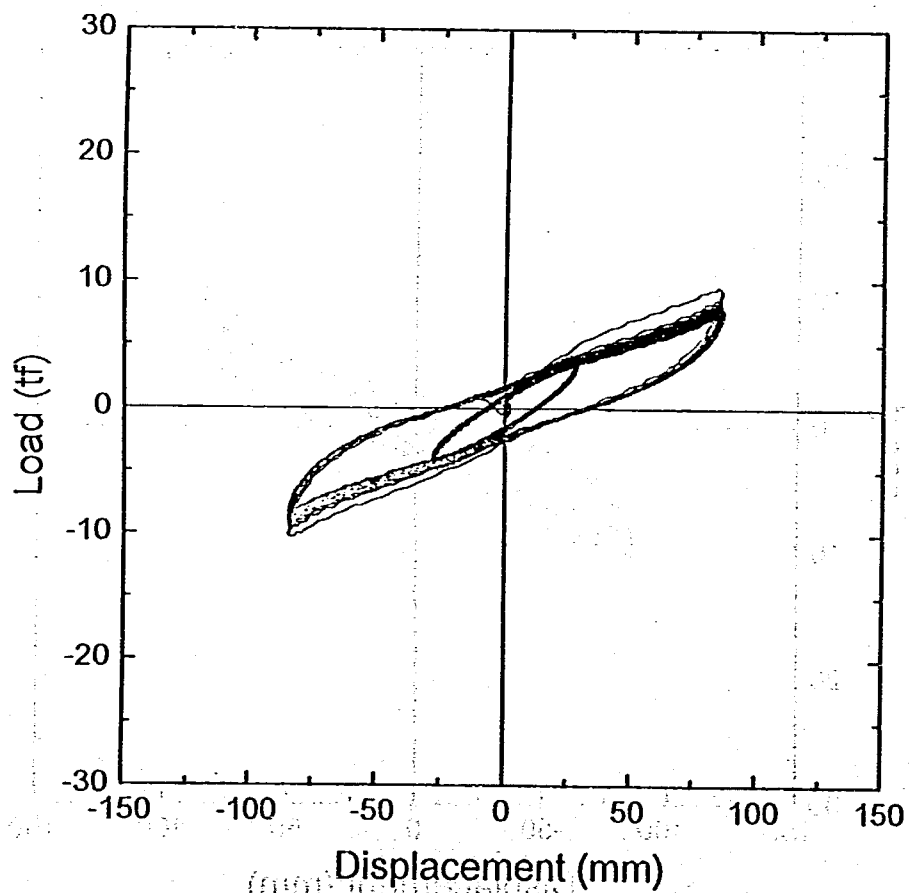


図4. 4-7 (38) 疲労試験②サイクル目 (HDR-08)

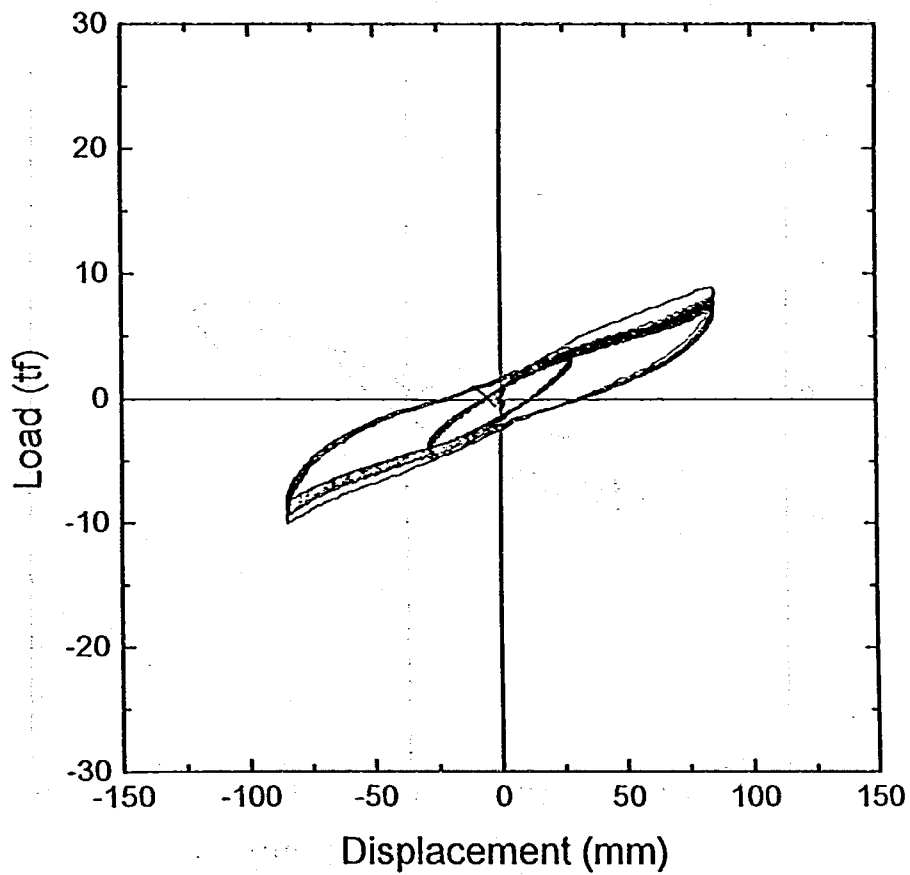


図4. 4-7 (39) 疲労試験③サイクル目 (HDR-08)

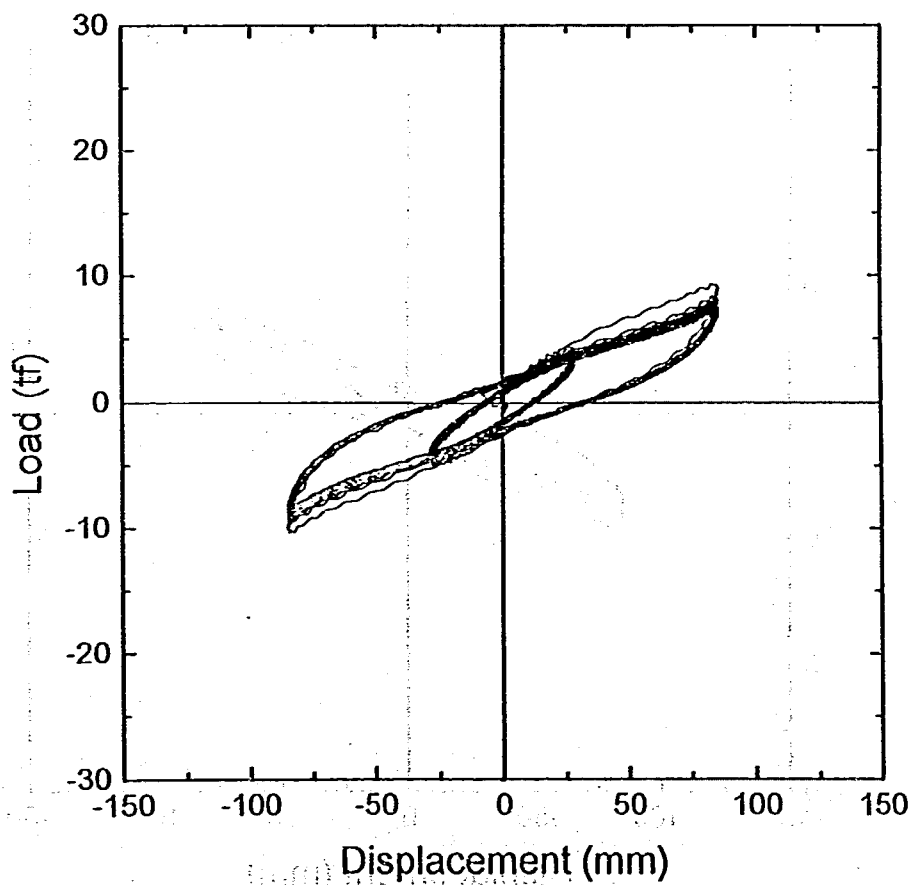


図4. 4-7 (40) 疲労試験④サイクル目 (HDR-08)

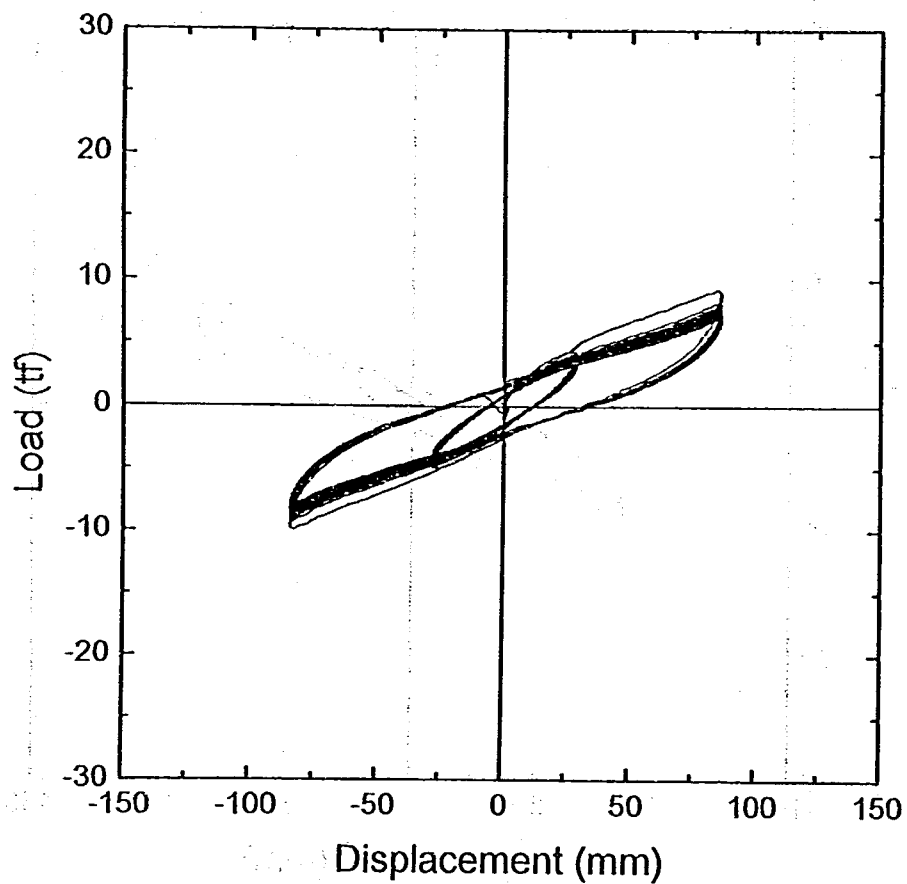


図4. 4-7 (4 1) 疲労試験①サイクル目 (HDR-0.9)

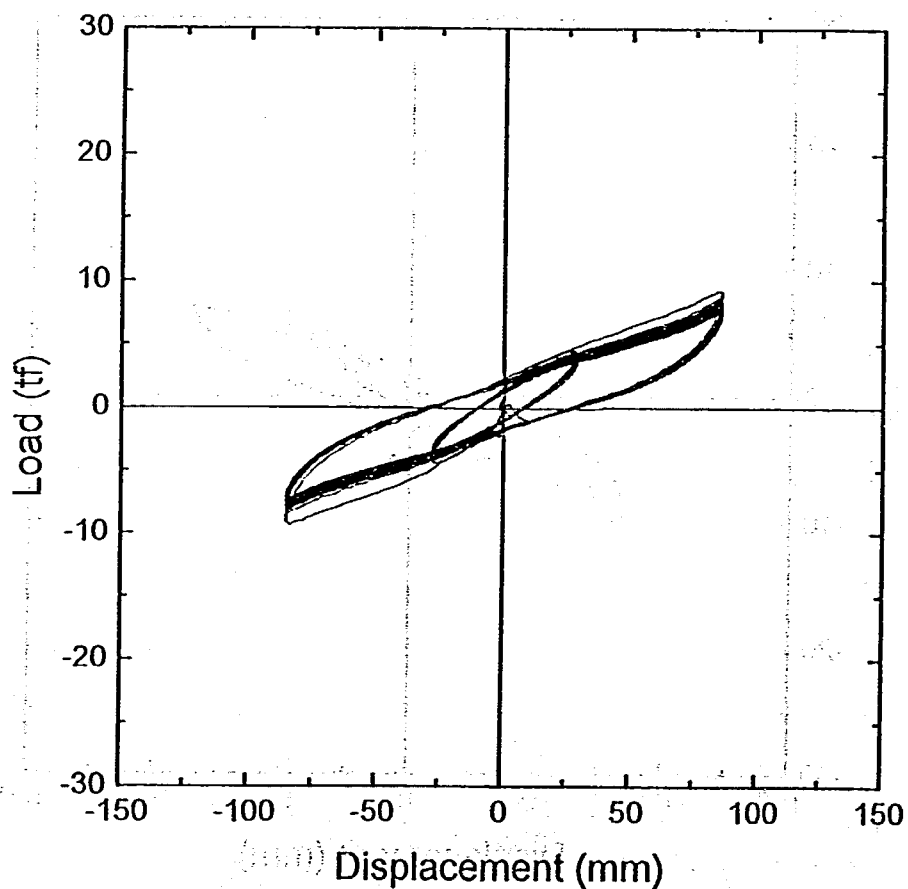


図4. 4-7 (4 2) 疲労試験②サイクル目 (HDR-0.9)

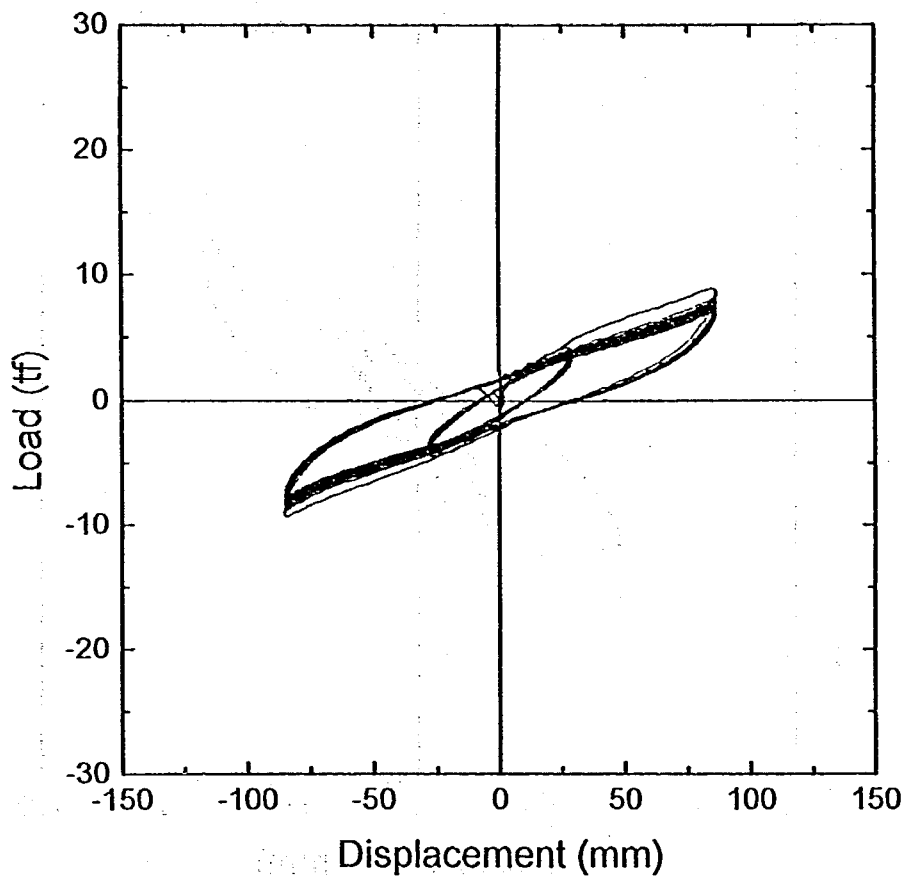


図4. 4-7 (4.3) 疲労試験③サイクル目 (HDR-09)

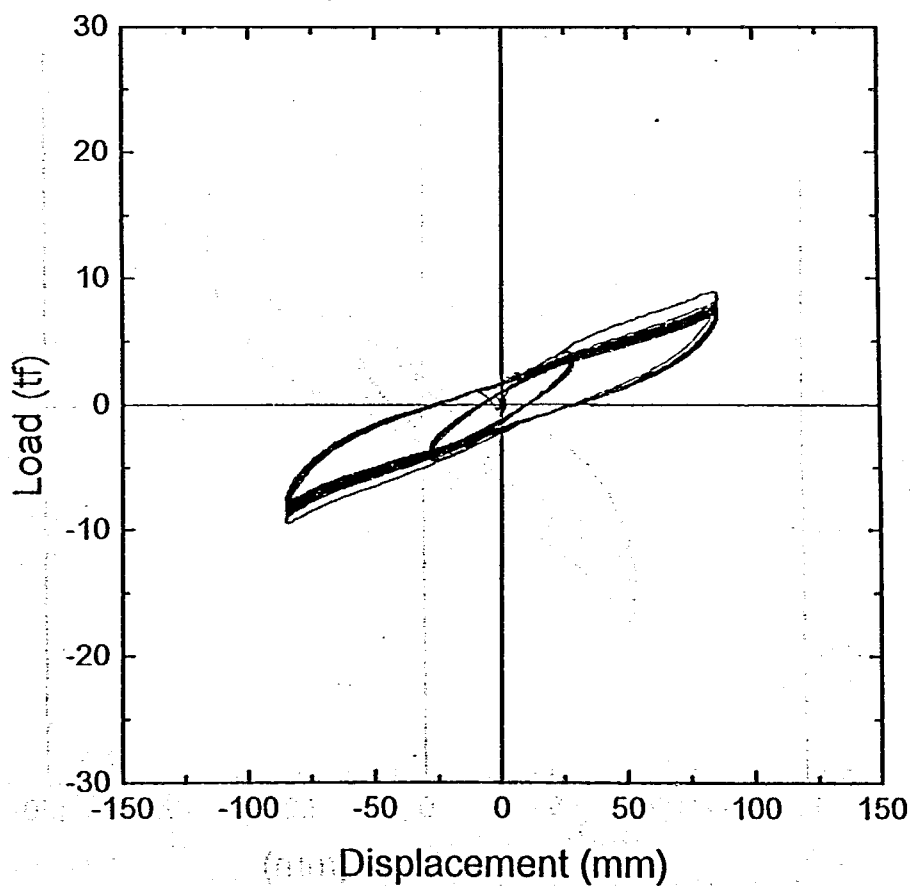


図4. 4-7 (4.4) 疲労試験④サイクル目 (HDR-09)

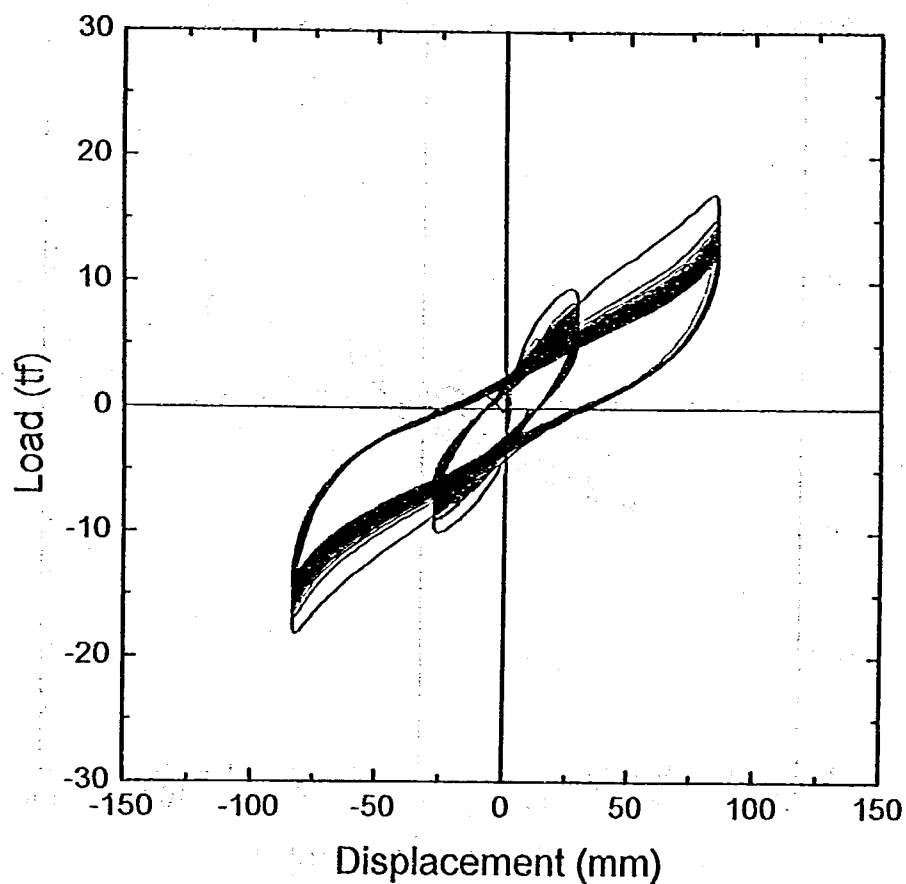


図4. 4-7(45) 疲労試験①サイクル目 (HDR-14)

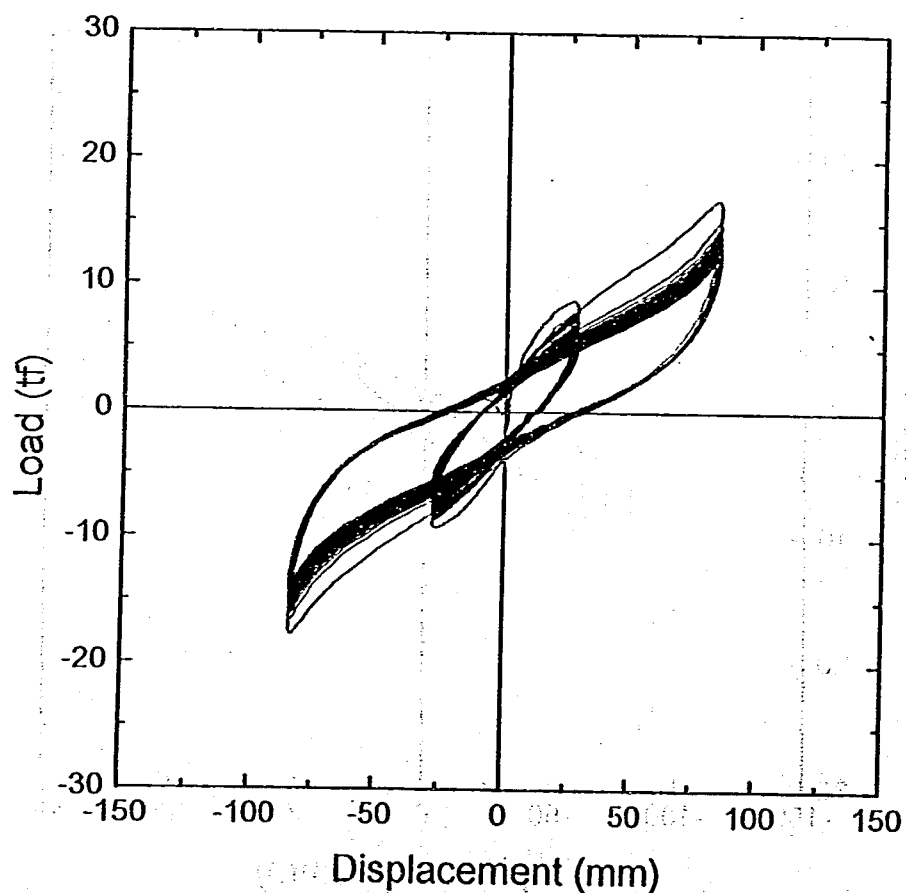


図4. 4-7(46) 疲労試験②サイクル目 (HDR-14)

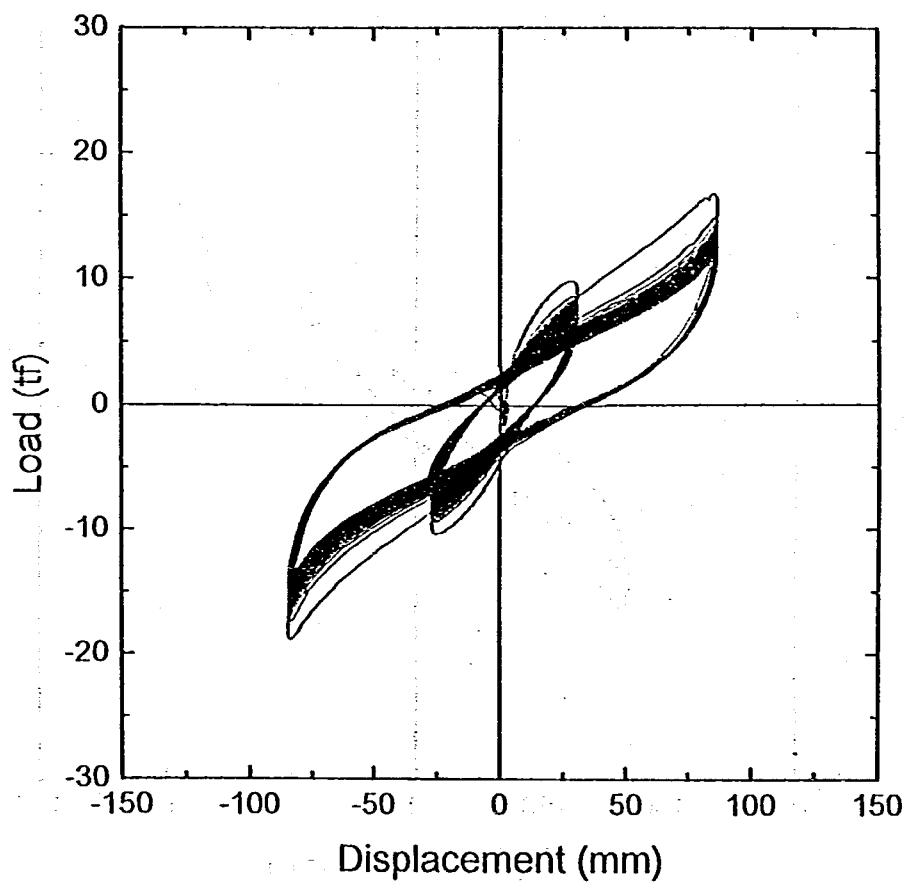


図4. 4-7(47) 疲労試験③サイクル目 (HDR-14)

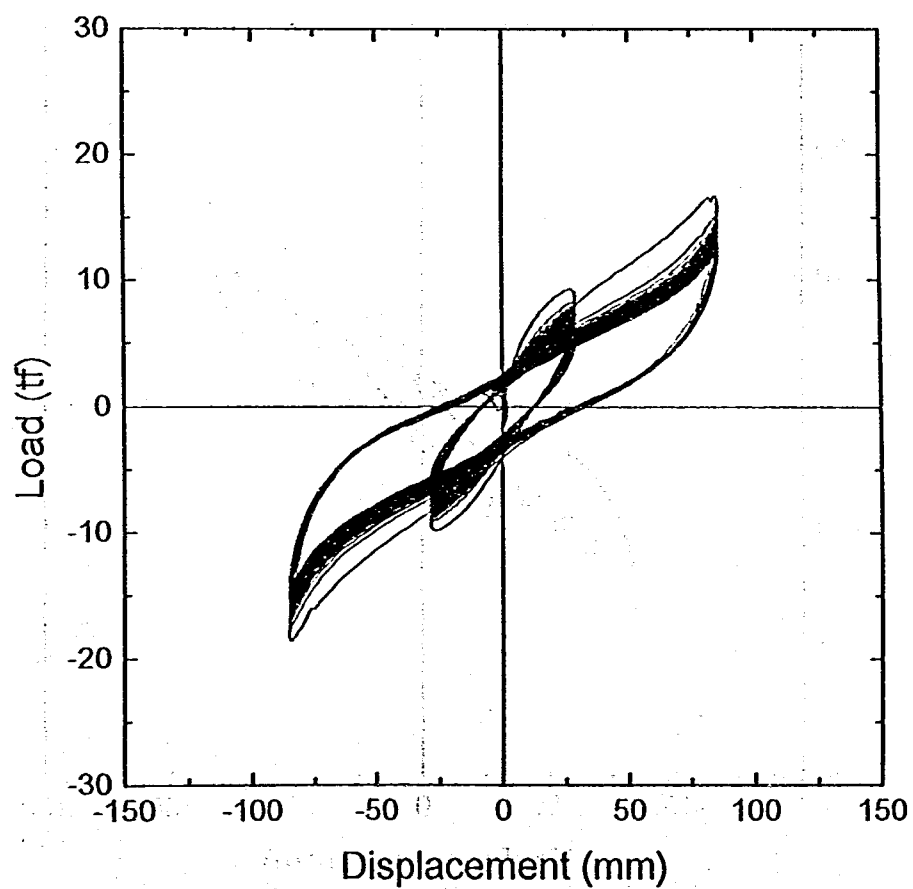


図4. 4-7(48) 疲労試験④サイクル目 (HDR-14)

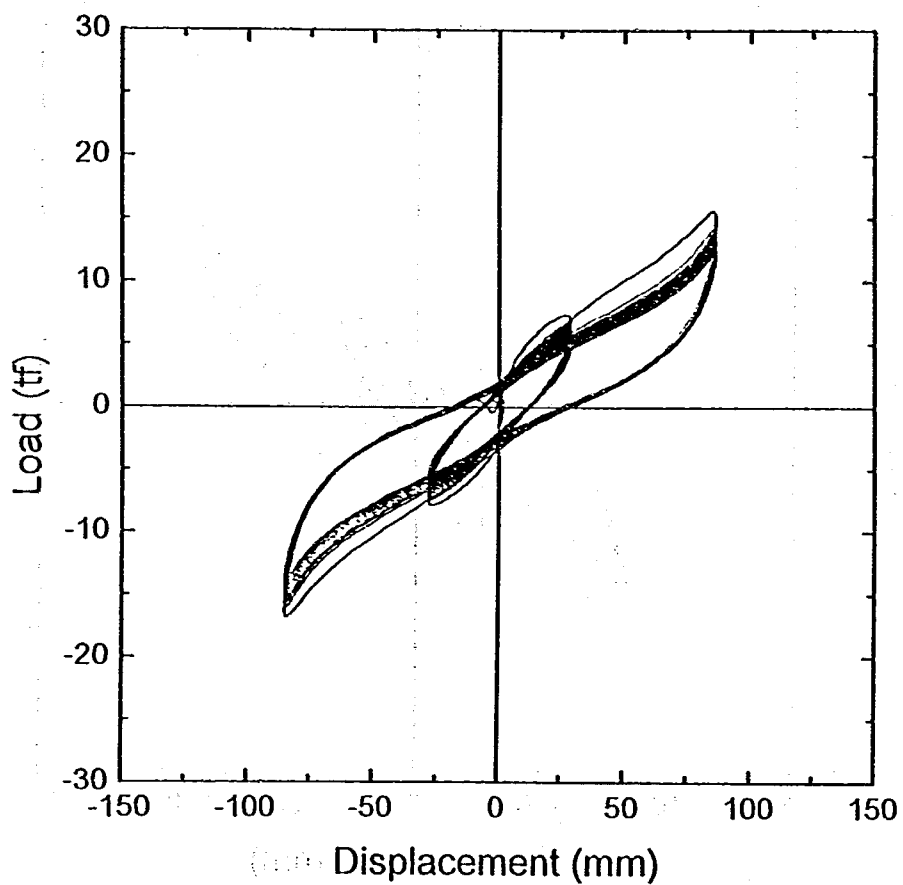


図4. 4-7 (49) 疲労試験①サイクル目 (HDR-15)

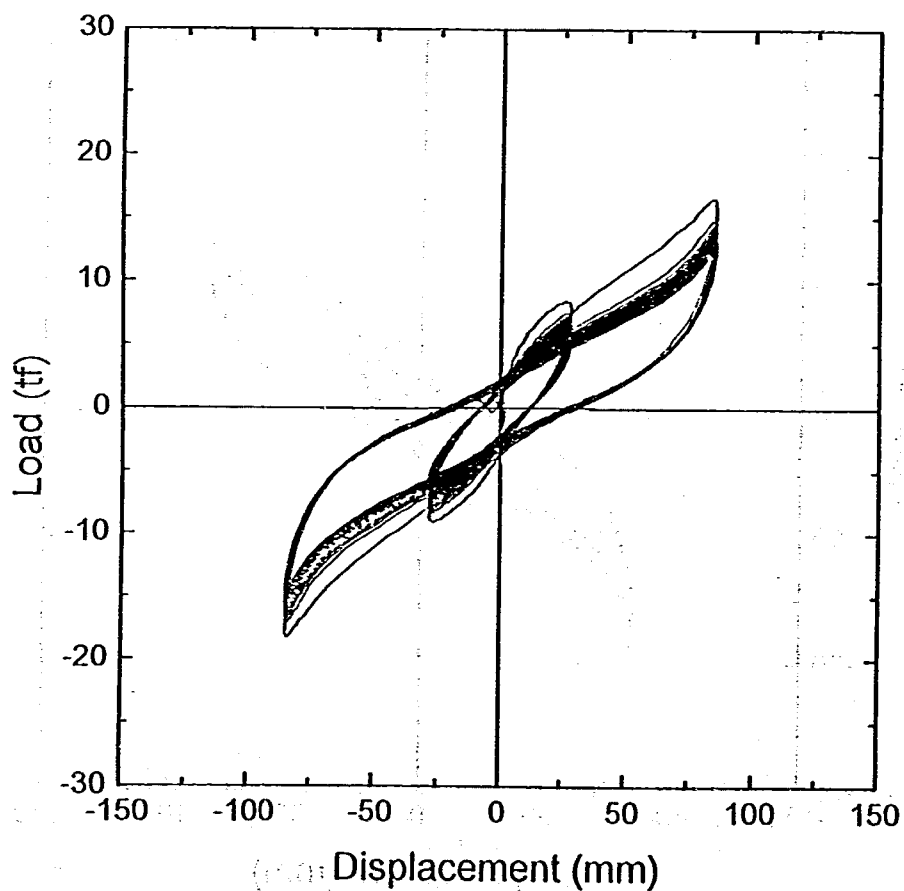


図4. 4-7 (50) 疲労試験②サイクル目 (HDR-15)

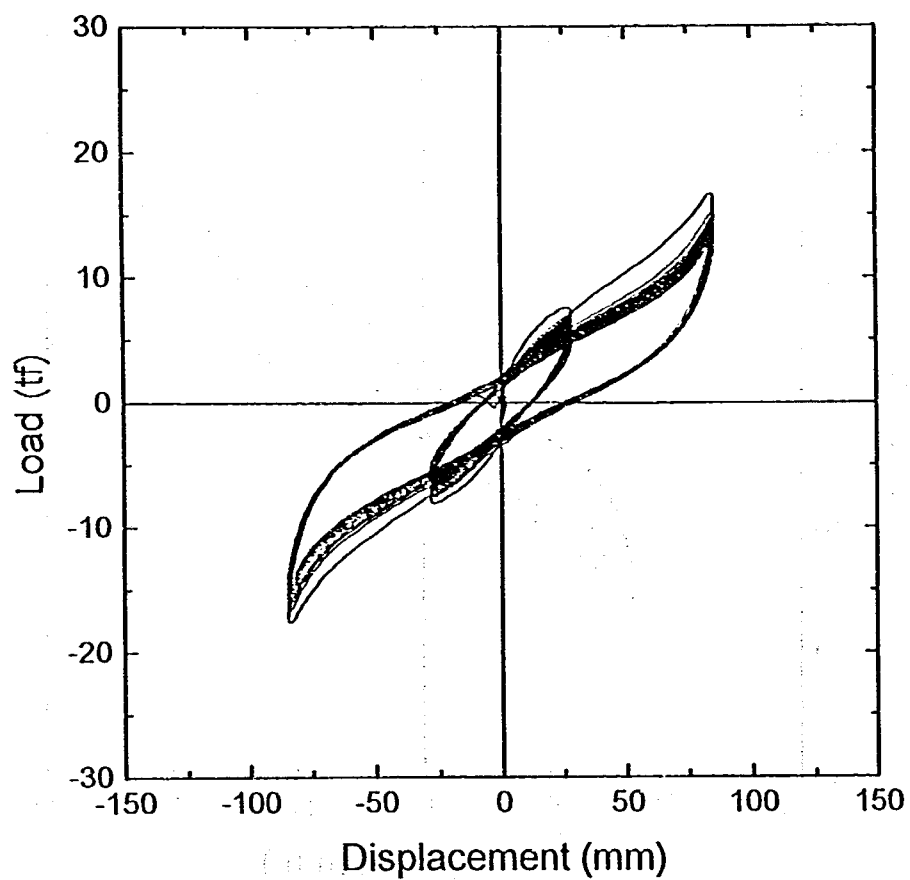


図4. 4-7 (5 1) 疲労試験③サイクル目 (HDR-15)

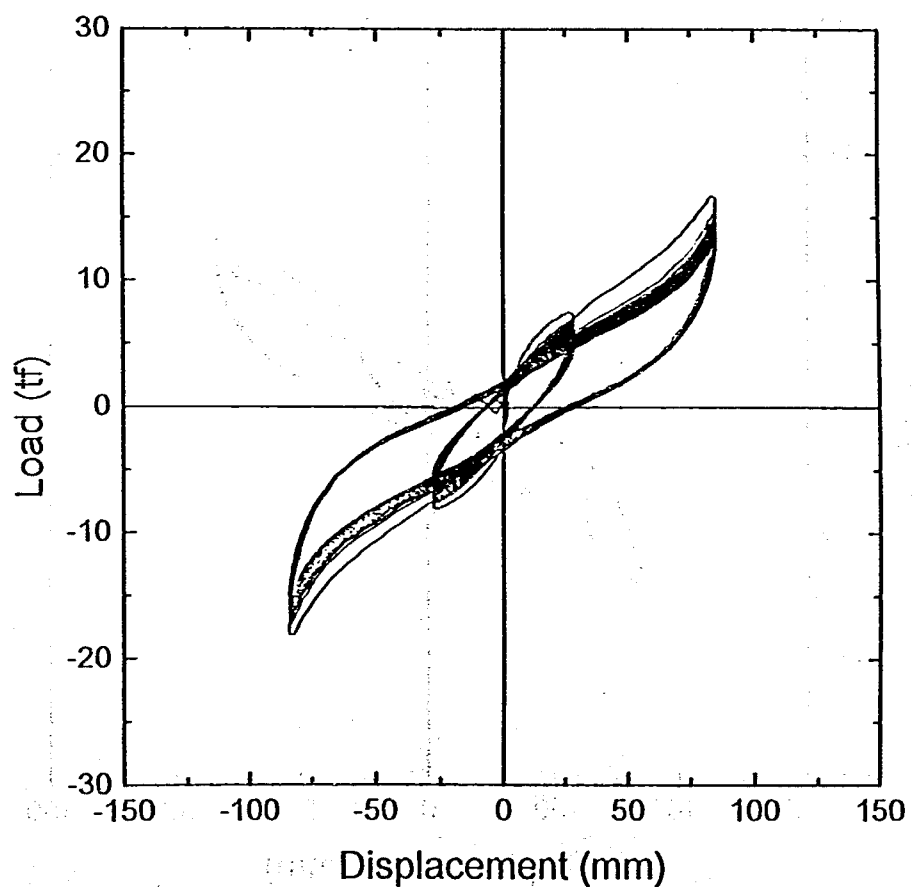


図4. 4-7 (5 2) 疲労試験④サイクル目 (HDR-15)

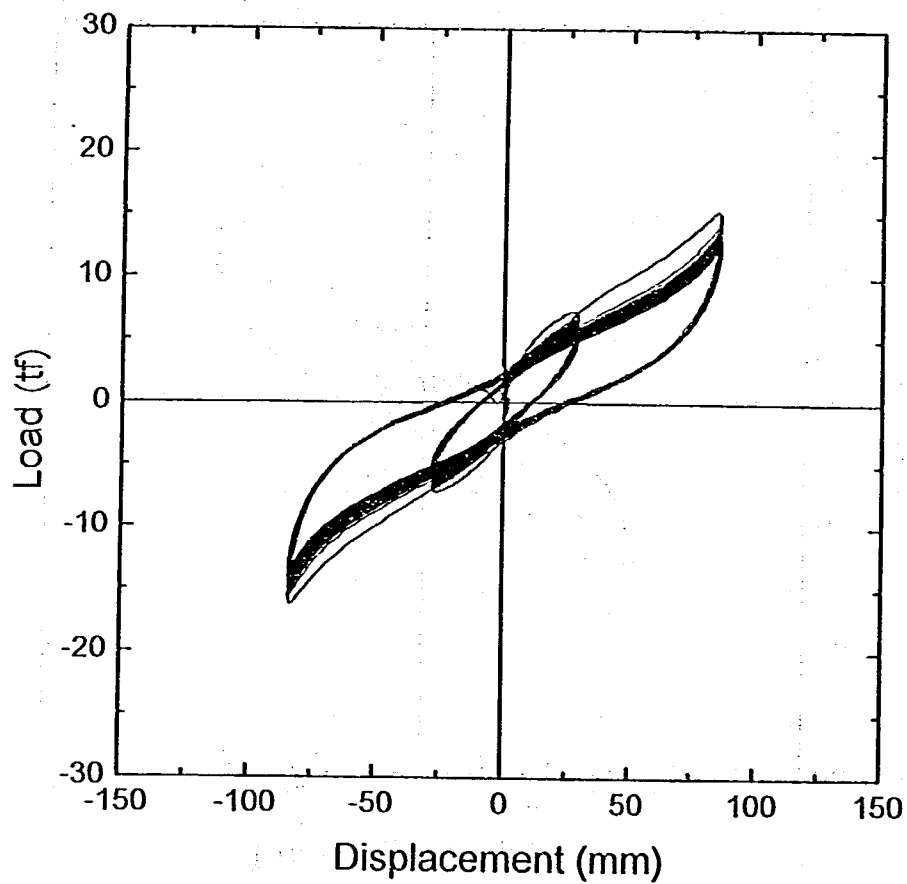


図4. 4-7 (53) 疲労試験①サイクル目 (HDR-16)

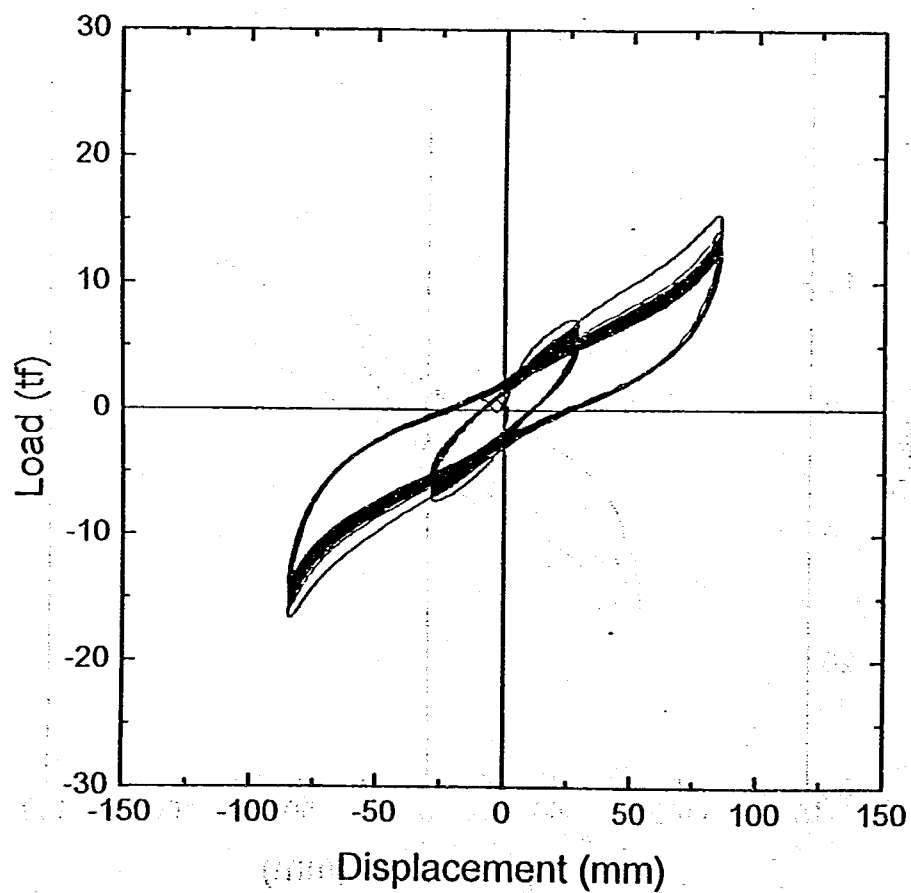


図4. 4-7 (54) 疲労試験②サイクル目 (HDR-16)

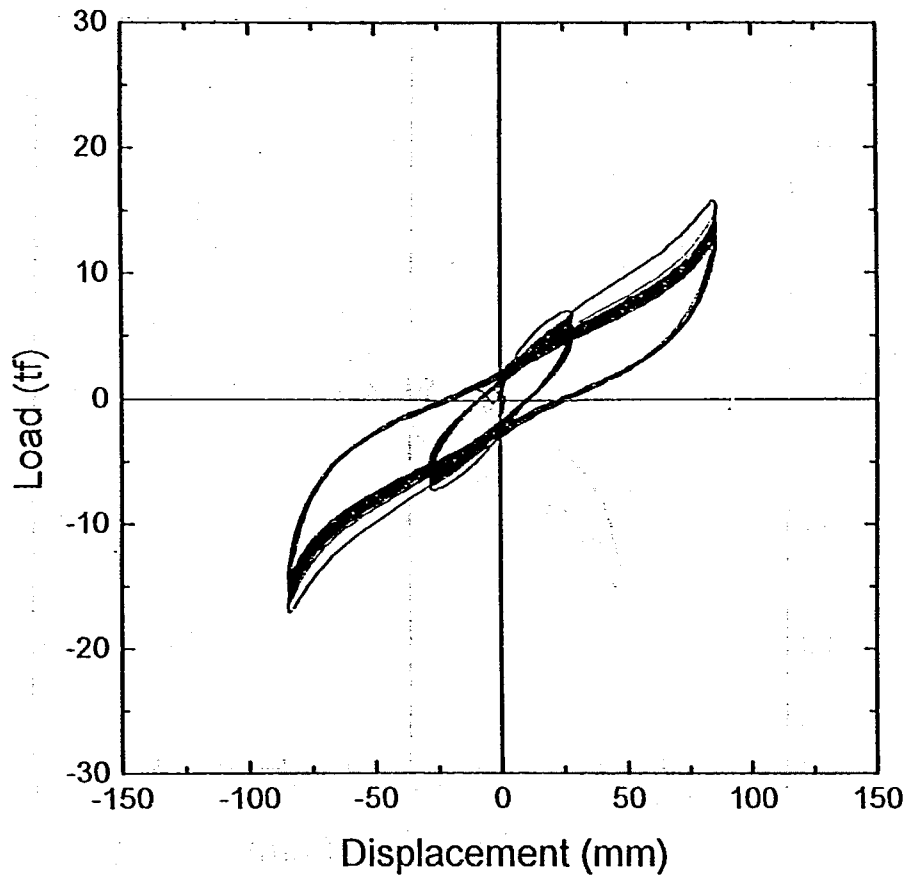


図4. 4-7 (55) 疲労試験③サイクル目 (HDR-16)

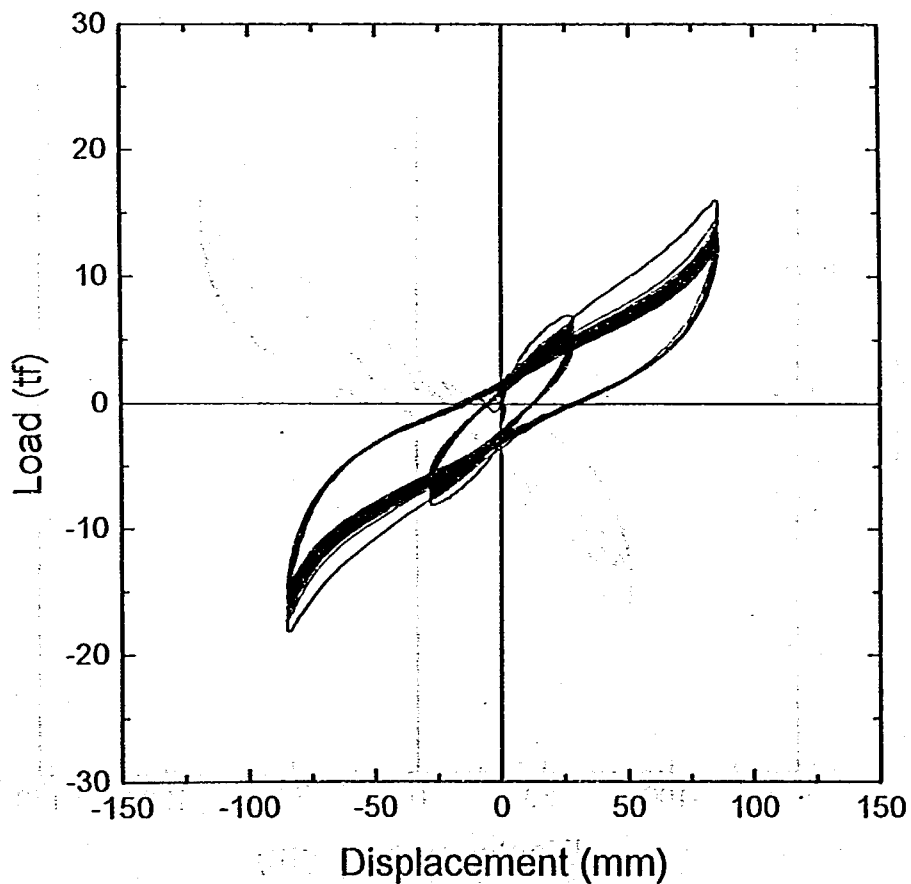


図4. 4-7 (56) 疲労試験④サイクル目 (HDR-16)

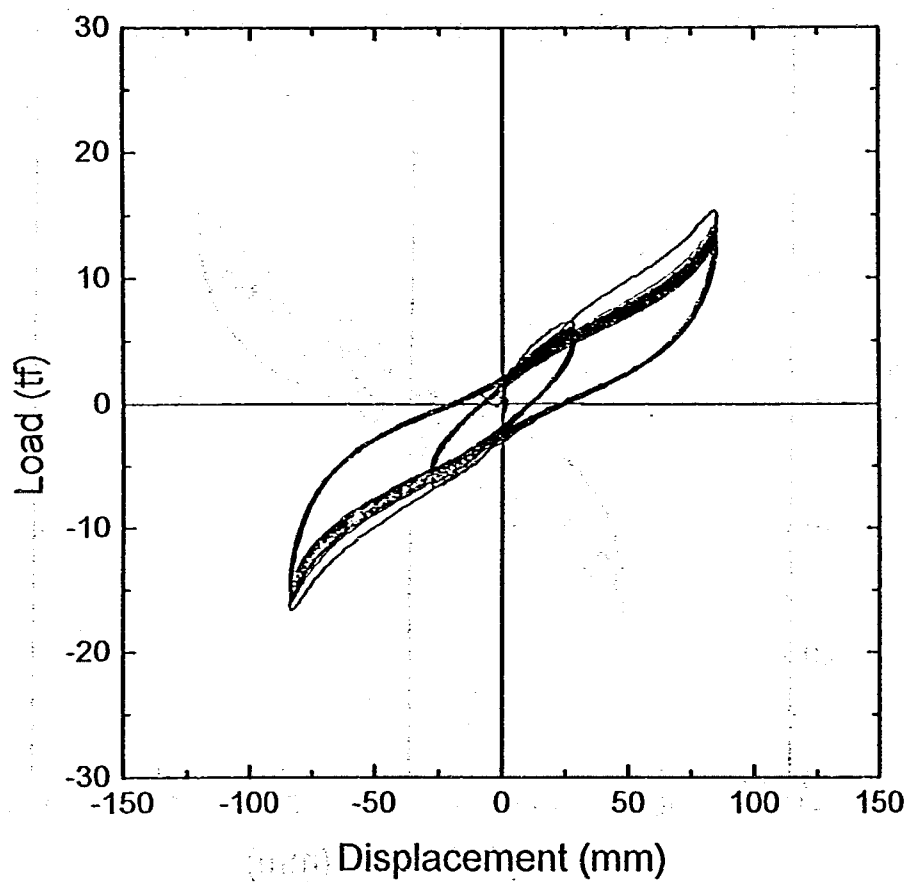


図4. 4-7 (57) 疲労試験①サイクル目 (HDR-17)

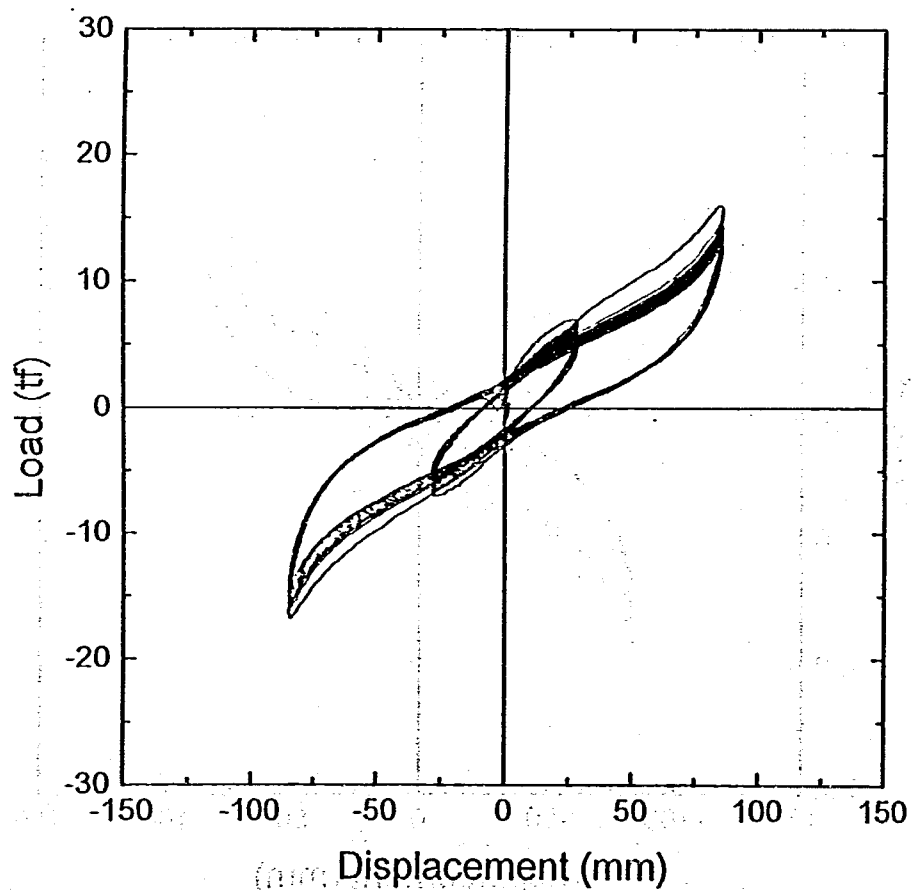


図4. 4-7 (58) 疲労試験②サイクル目 (HDR-17)

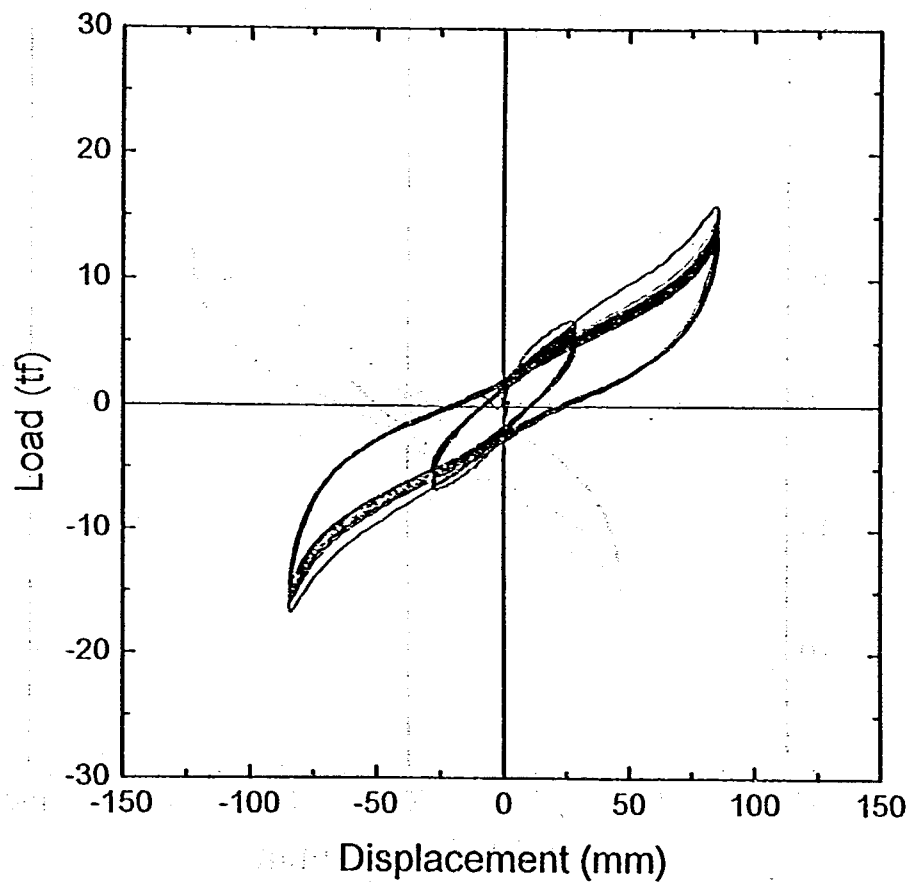


図4. 4-7 (59) 疲労試験③サイクル目 (HDR-17)

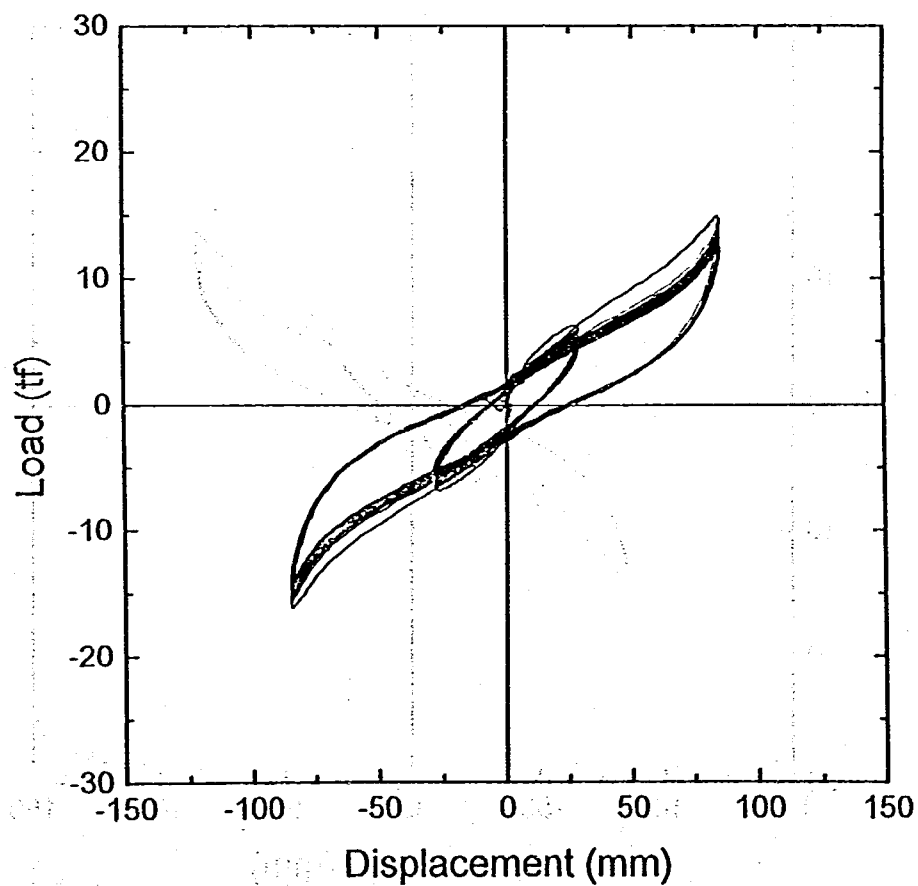


図4. 4-7 (60) 疲労試験④サイクル目 (HDR-17)

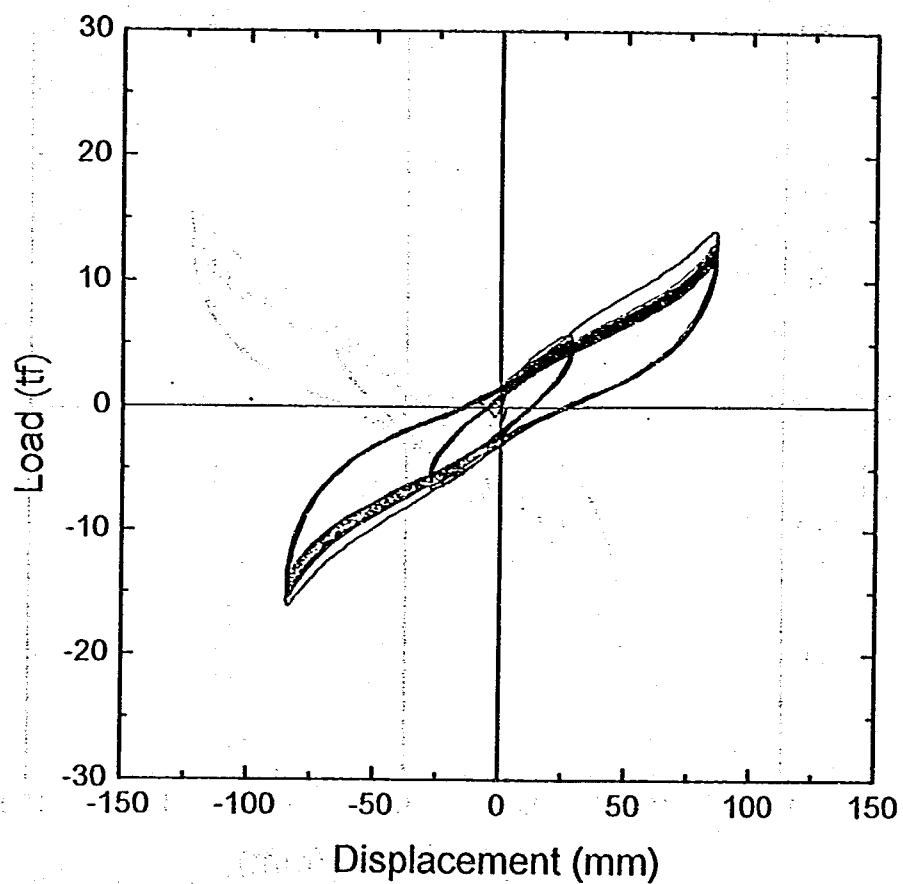


図4. 4-7 (61) 疲労試験①サイクル目 (HDR-18)

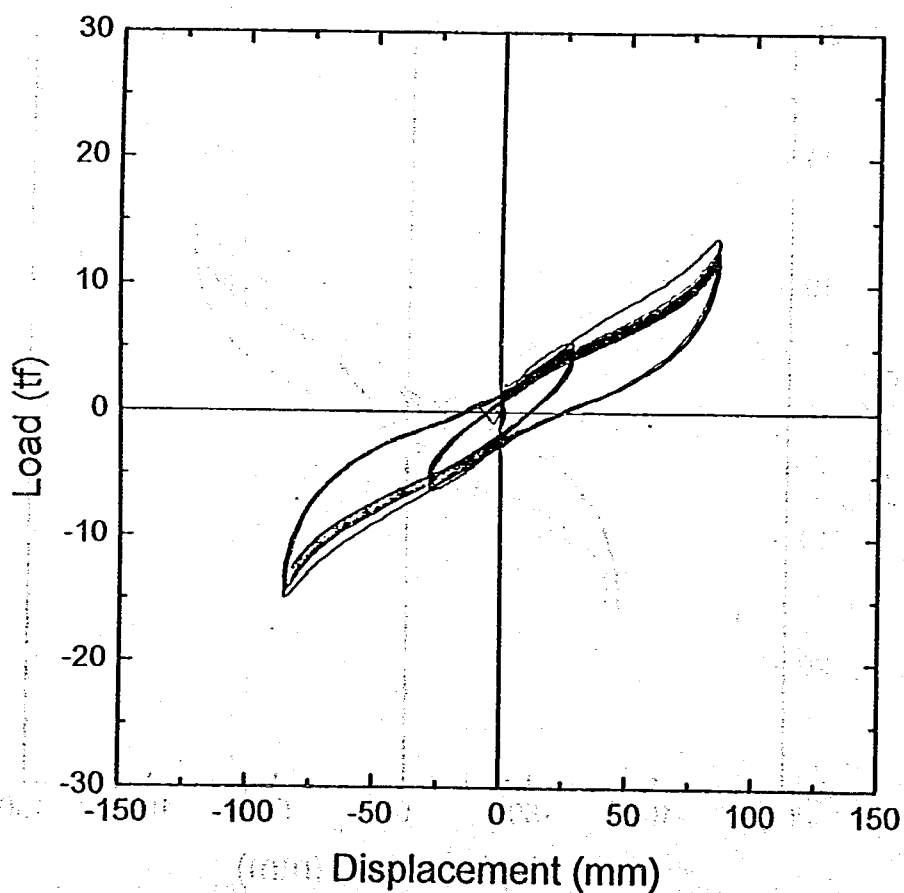


図4. 4-7 (62) 疲労試験②サイクル目 (HDR-18)

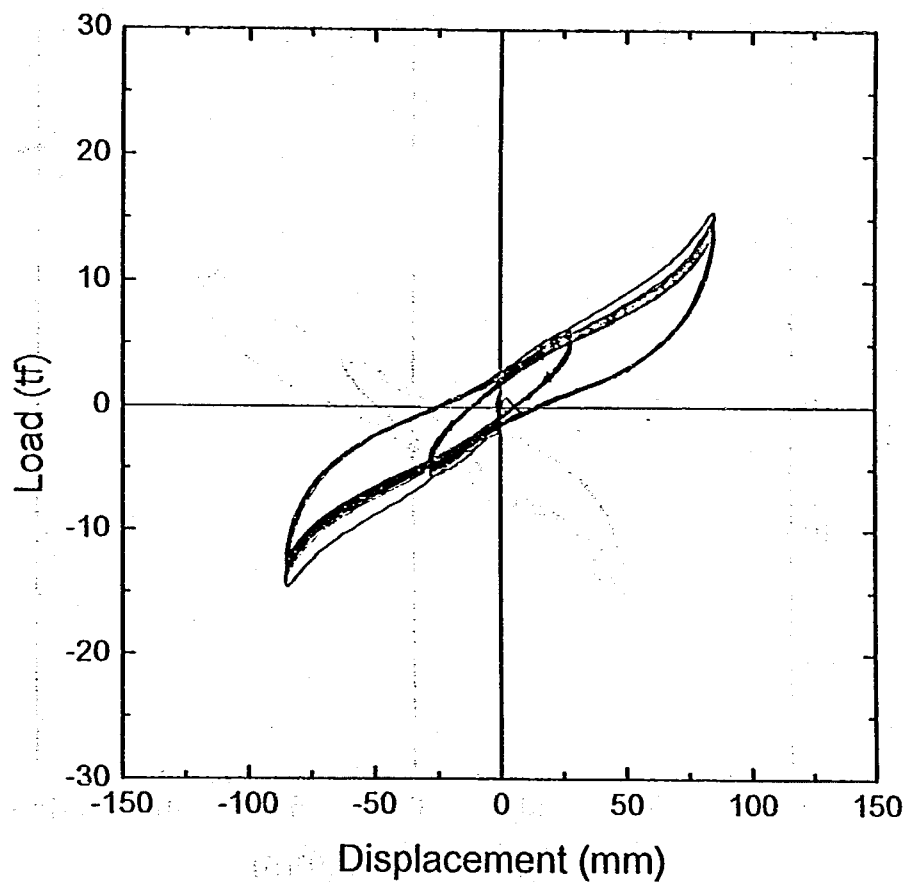


図4. 4-7 (63) 疲労試験③サイクル目 (HDR-18)

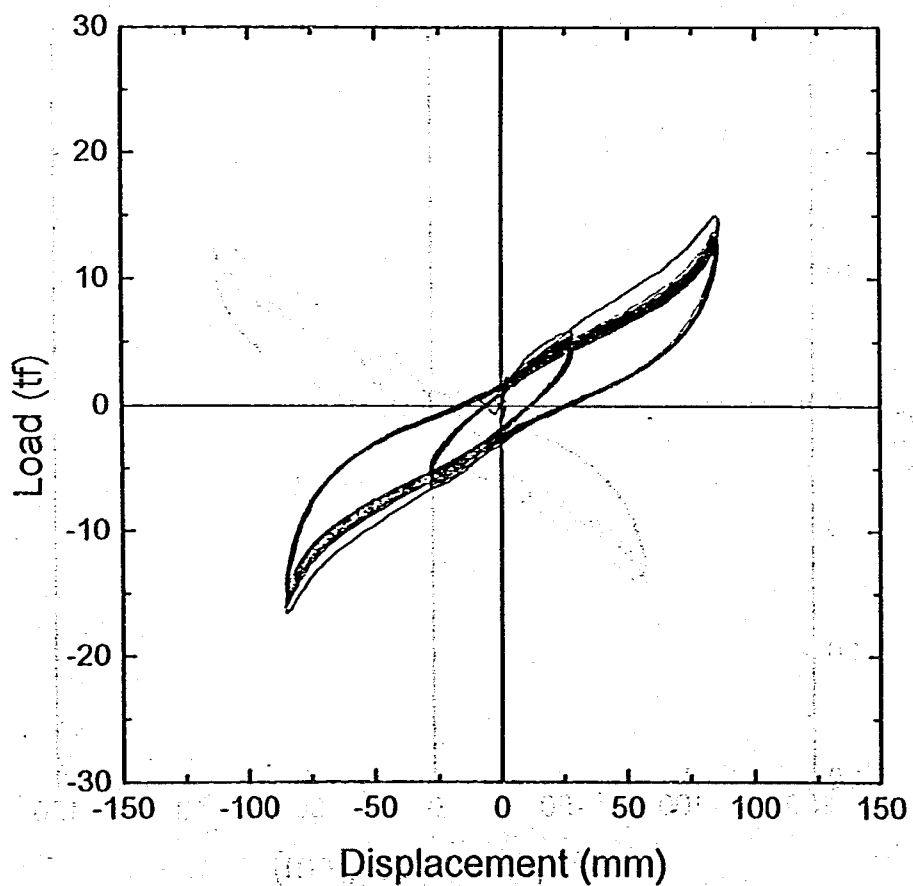


図4. 4-7 (64) 疲労試験④サイクル目 (HDR-18)

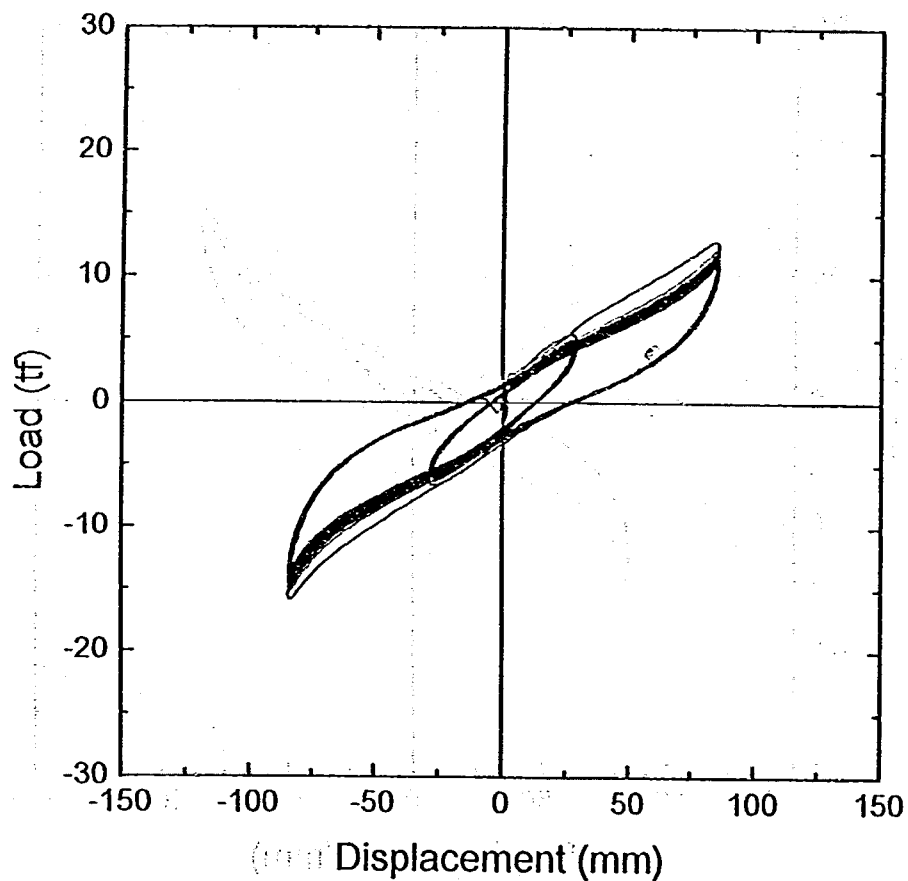


図4.4-7(65) 疲労試験①サイクル目 (HDR-19)

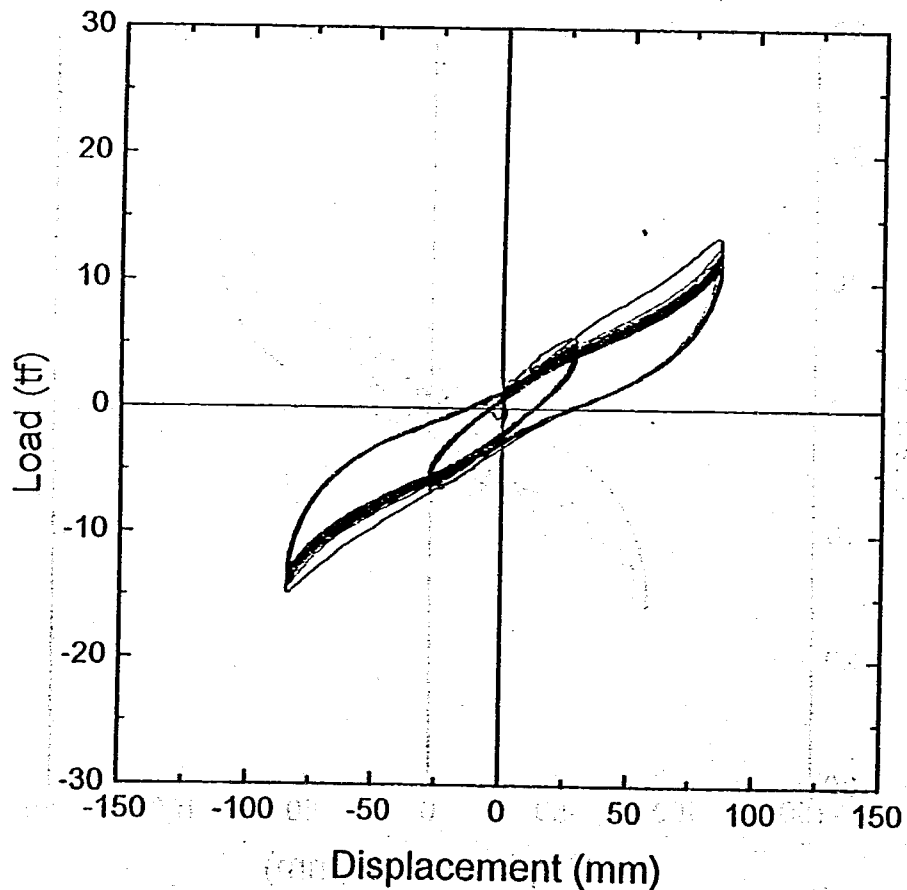


図4.4-7(66) 疲労試験②サイクル目 (HDR-19)

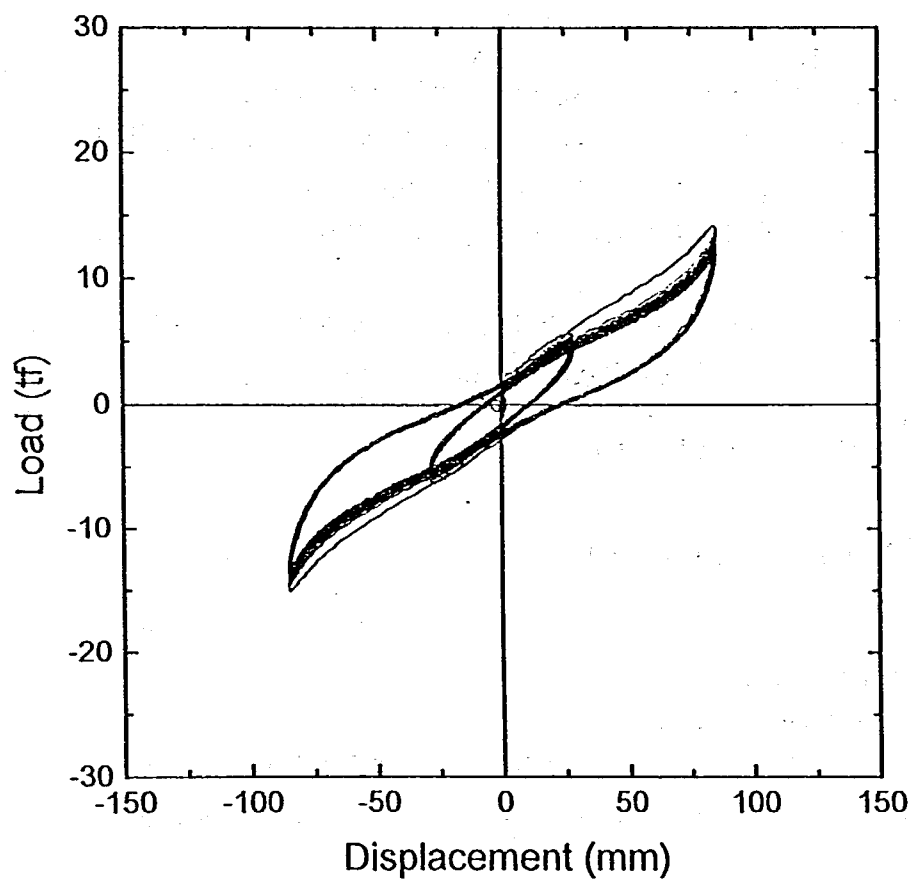


図4. 4-7 (67) 疲労試験③サイクル目 (HDR-19)

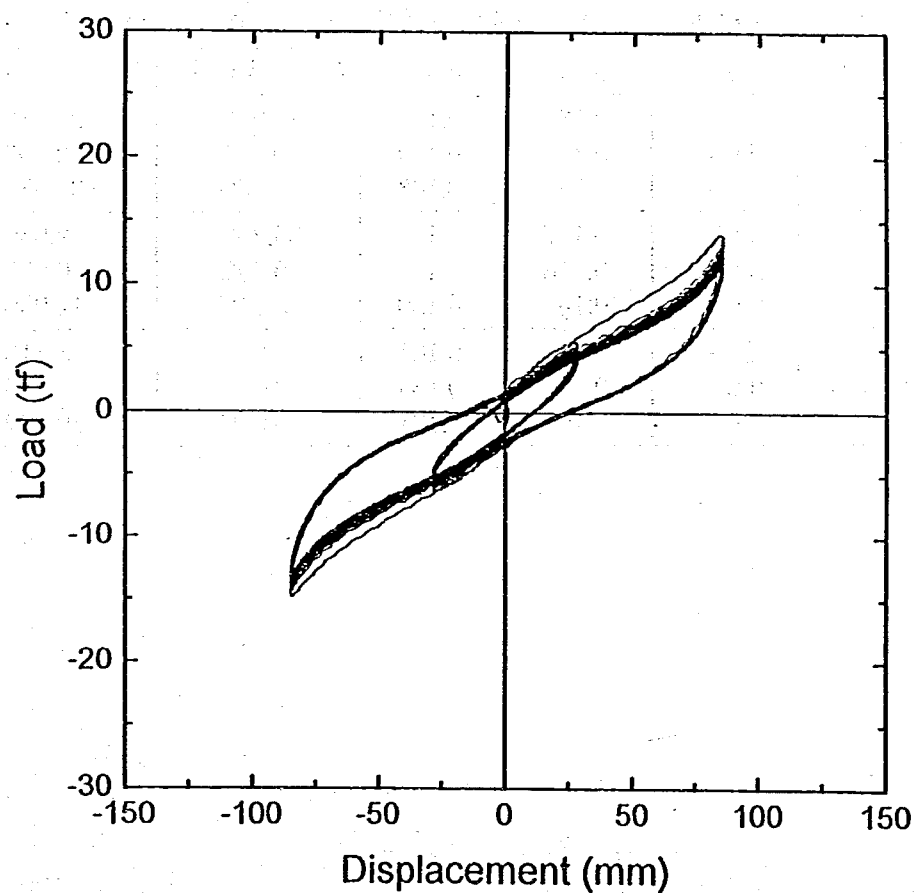


図4. 4-7 (68) 疲労試験④サイクル目 (HDR-19)

第5章 考察

5. 1 載荷振幅の違いによる等価剛性および等価減衰定数への影響

標準試験において実施した、載荷振幅50%, 100%, 150%の平均等価剛性および平均等価減衰定数を図5. 1-1～図5. 1-2に、100%振幅に対する変化率を表5. 1-1に示す。

また、50回連続繰返し載荷により得られた等価剛性および等価減衰定数を図5. 1-3～図5. 1-4に示す。

なお、平均等価剛性および平均等価減衰定数は、(財)土木研究センター発行「建設省道路橋の免震設計法マニュアル」に記されている以下の式により算出した値である。

$$K_{Bm} = \frac{1}{7} \sum_{j=1}^{10} K_{Bj} \quad \text{式 (5-1)}$$

$$h_{Bm} = \frac{1}{7} \sum_{j=1}^{10} h_{Bj} \quad \text{式 (5-2)}$$

ここに、

K_{Bm} : 免震装置の平均等価剛性

h_{Bm} : 免震装置の平均等価減衰定数

K_{Bj} : 10サイクルの繰返し載荷を行った場合の第jサイクル目の等価剛性

h_{Bj} : 10サイクルの繰返し載荷を行った場合の第jサイクル目の等価減衰定数

表5. 1-1 平均等価剛性および平均等価減衰定数の100%振幅に対する変化率

供試体No.	載荷振幅	K_{Bm}	h_{Bm}	K_{Bm} の変化率	h_{Bm} の変化率
LRB-01	50%	0.185	0.195	45.94%	22.95%
	100%	0.127	0.159	0.00%	0.00%
	150%	0.123	0.108	-3.16%	-31.95%
HDR-01	50%	0.157	0.165	33.29%	2.95%
	100%	0.118	0.160	0.00%	0.00%
	150%	0.108	0.139	-8.14%	-12.95%
HDR-11	50%	0.202	0.161	30.08%	5.71%
	100%	0.155	0.153	0.00%	0.00%
	150%	0.165	0.121	6.07%	-20.58%

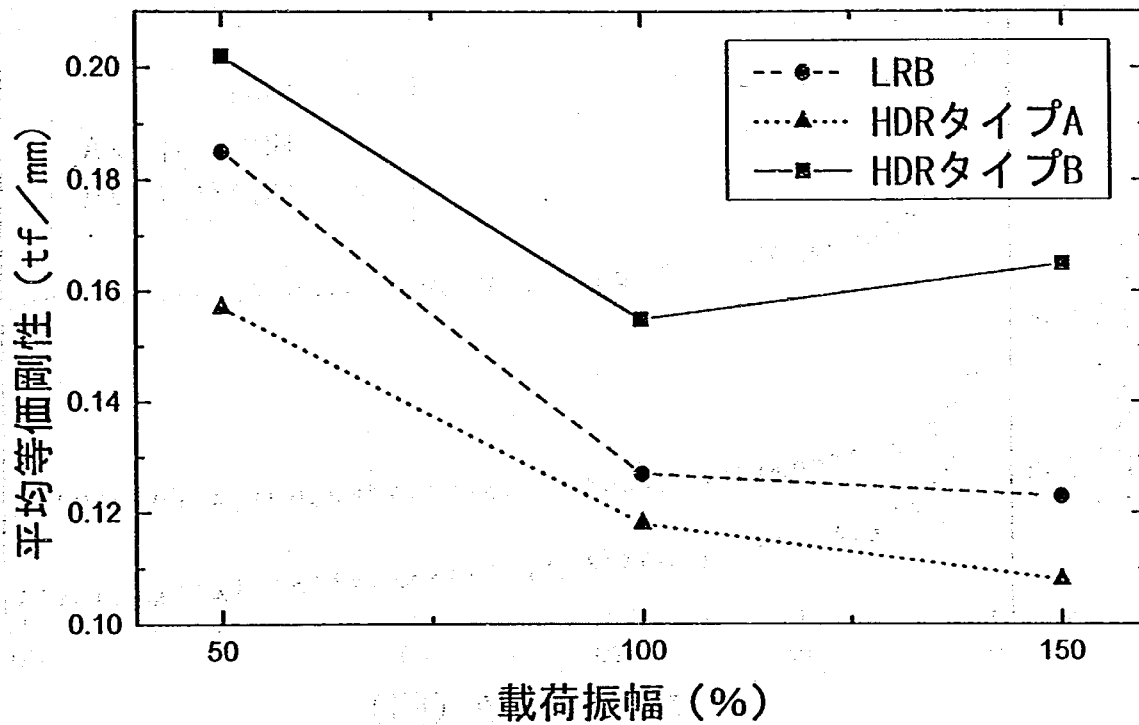


図5. 1-1 载荷振幅50%, 100%, 150%における平均等価剛性

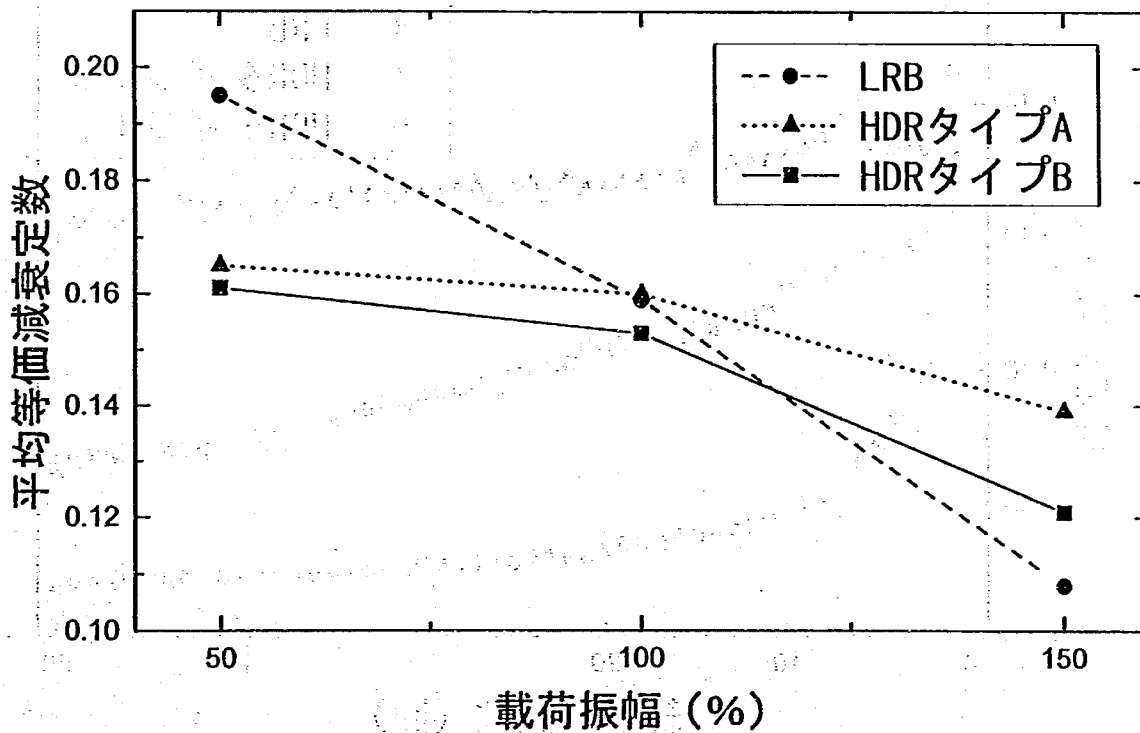


図5. 1-2 载荷振幅50%, 100%, 150%における平均等価減衰定数

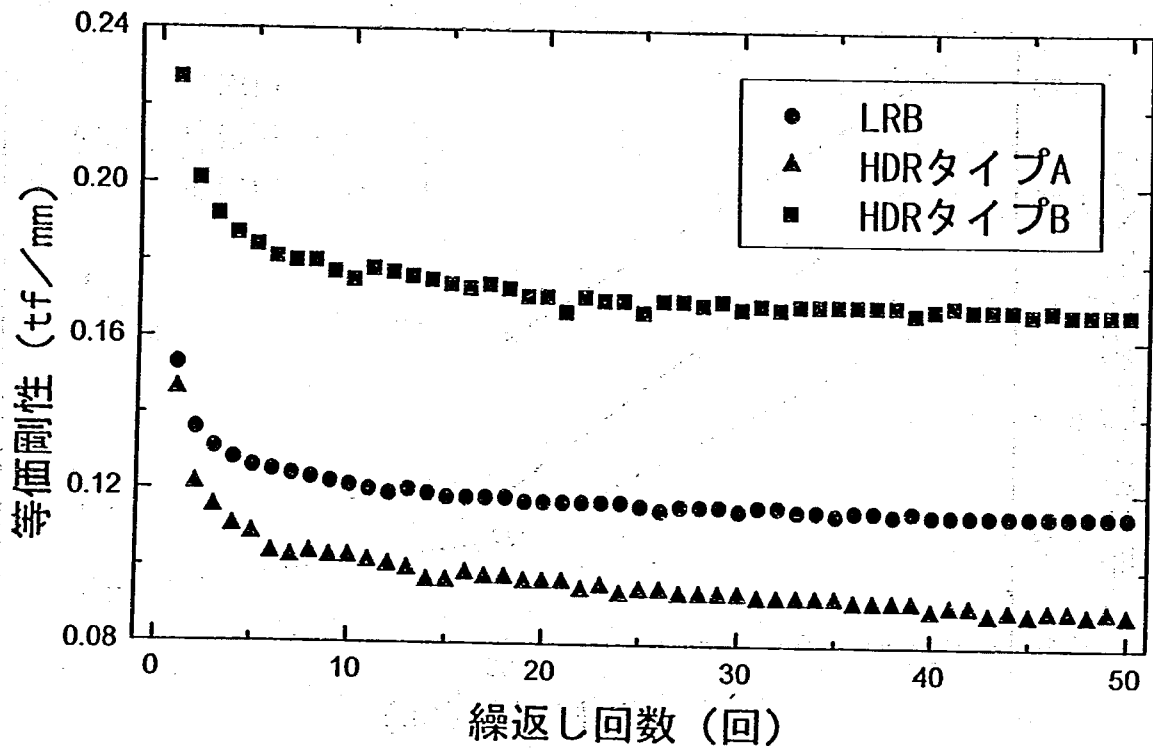


図5. 1-3 50回連続繰返し载荷における等価剛性

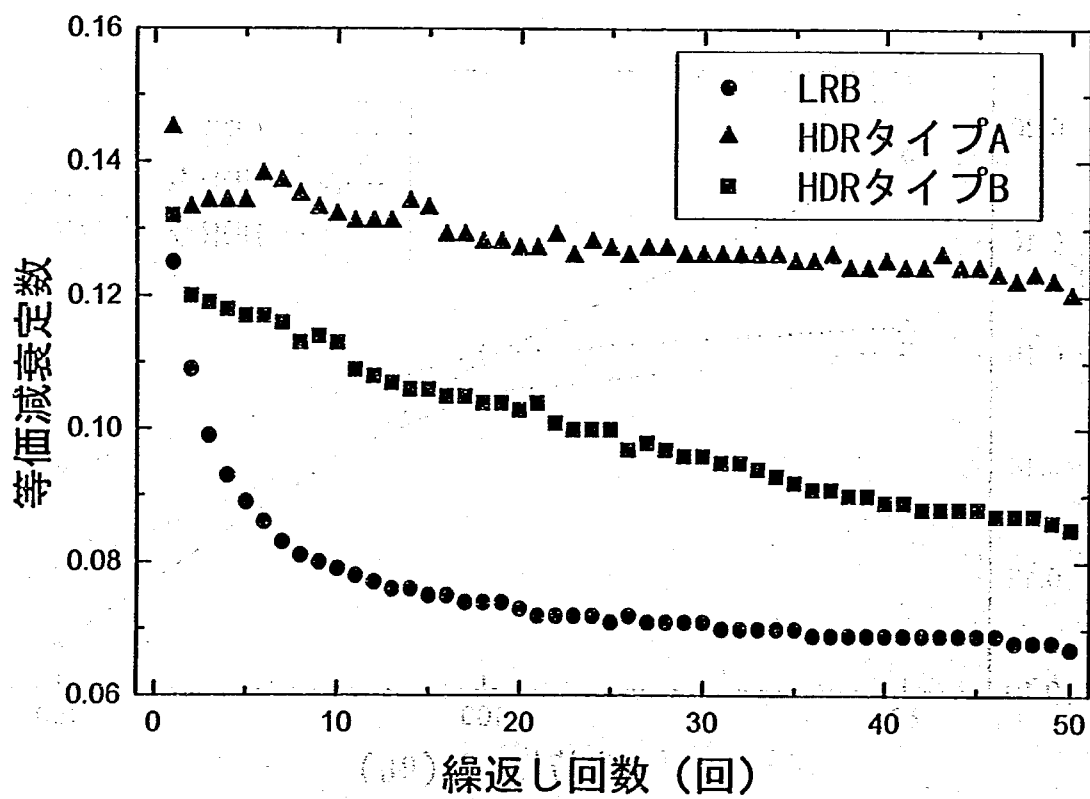


図5. 1-4 50回連続繰返し载荷における等価減衰定数

各供試体とも載荷振幅が大きくなると、等価剛性および等価減衰定数が低下する。

等価剛性は、50%～100%においては、LRBでは46%、HDRタイプAでは33%、HDRタイプBでは30%程度増加する。100%～150%においては、LRBでは3%、HDRタイプAでは8%程度低下し、HDRタイプBでは、6%程度増加する。

等価減衰定数は、50%～100%においては、LRBでは23%、HDRタイプAでは3%、HDRタイプBでは6%程度増加する。100%～150%においては、LRBでは32%、HDRタイプAでは13%、HDRタイプBでは、21%程度減少する。

また、50回連続載荷実験では、等価剛性は、各供試体とも10回程度の載荷までは減少するが、その後はほぼ一定の値に収束する。

等価減衰定数は、LRB供試体では10回程度の載荷までは減少するが、その後はほぼ一定の値に収束し、HDRタイプAおよびHDRタイプB供試体では、ほぼ直線的に低下する。

各供試体とも、50回連続載荷実験後においても免震効果に影響を及ぼすような構造的な損傷は見られなかった。

5. 2 免震装置の温度依存性および繰返し載荷に対する安定性の検討

温度依存性試験により得られた、温度の違いによる平均等価剛性および平均等価減衰定数を図5. 2-1～図5. 2-2に示す。

また、温度依存性試験（第1回目載荷）における免震装置の安定性を図5. 2-3～図5. 2-4に示す。

なお、免震装置の温度依存性および繰返し載荷に対する安定性は、土木研究センター発行「建設省道路橋の免震設計法マニュアル」に記されている以下の式により、検討を行った。

$$R_{Kt} = \frac{|K_{Bm1} - K_{Bm2}|}{K_{Bm1}} \leq 0.3 \quad \text{式 (5-3)}$$

$$R_{ht} = \frac{|h_{Bm1} - h_{Bm2}|}{h_{Bm1}} \leq 0.2 \quad \text{式 (5-4)}$$

ここに、

R_{Kt} : 温度変化による免震装置の平均等価剛性の変化率

R_{ht} : 温度変化による免震装置の平均等価減衰定数の変化率

K_{Bm1} : 温度が+20℃の場合の免震装置の平均等価剛性

K_{Bm2} : 温度が-10℃および+40℃の場合の免震装置の平均等価剛性

h_{Bm1} : 温度が+20℃の場合の免震装置の平均等価減衰定数

h_{Bm2} : 温度が-10℃および+40℃の場合の免震装置の平均等価減衰定数

$$R_{Kc} = \frac{|K_{Bj} - K_{Bm}|}{K_{Bj}} \leq \begin{cases} 0.3 (j=1,2,3) \\ 0.1 (j=4,5\cdots 10) \end{cases} \quad \text{式 (5-5)}$$

$$R_{hc} = \frac{|h_{Bj} - h_{Bm}|}{h_{Bj}} \leq \begin{cases} 0.3 (j=1,2,3) \\ 0.1 (j=4,5\cdots 10) \end{cases} \quad \text{式 (5-6)}$$

ここに、

R_{Kc} : 免震装置の等価剛性の変化率

R_{hc} : 免震装置の等価減衰定数の変化率

K_{Bj} : 10回繰返し載荷をした場合の第jサイクル目の免震装置の平均等価剛性

K_{Bm} : 免震装置の平均等価剛性

h_{Bj} : 10回繰返し載荷をした場合の免震装置の平均等価減衰定数

h_{Bm} : 免震装置の平均等価減衰定数

式(5-3)～式(5-4)により求めた値を、表5. 2-1に示す。

表 5. 2 - 1 平均等価剛性および平均等価減衰定数の変化率

供試体No.	K_{Bm}	h_{Bm}	R_{Kl}	R_{hl}
LRB-04	0.127	0.124	0.057	0.135
LRB-05	0.124	0.121	0.036	0.109
LRB-06	0.124	0.115	0.031	0.059
LRB-07	0.120	0.109	0.000	0.000
LRB-08	0.116	0.105	0.031	0.035
HDR-04	0.125	0.155	0.097	0.050
HDR-05	0.121	0.152	0.067	0.028
HDR-06	0.114	0.148	0.001	0.006
HDR-07	0.114	0.147	0.000	0.000
HDR-08	0.104	0.141	0.089	0.043
HDR-09	0.100	0.145	0.124	0.016
HDR-14	0.188	0.151	0.095	0.182
HDR-15	0.184	0.138	0.075	0.079
HDR-16	0.172	0.135	0.004	0.059
HDR-17	0.171	0.128	0.000	0.000
HDR-18	0.161	0.122	0.063	0.044
HDR-19	0.153	0.123	0.108	0.034

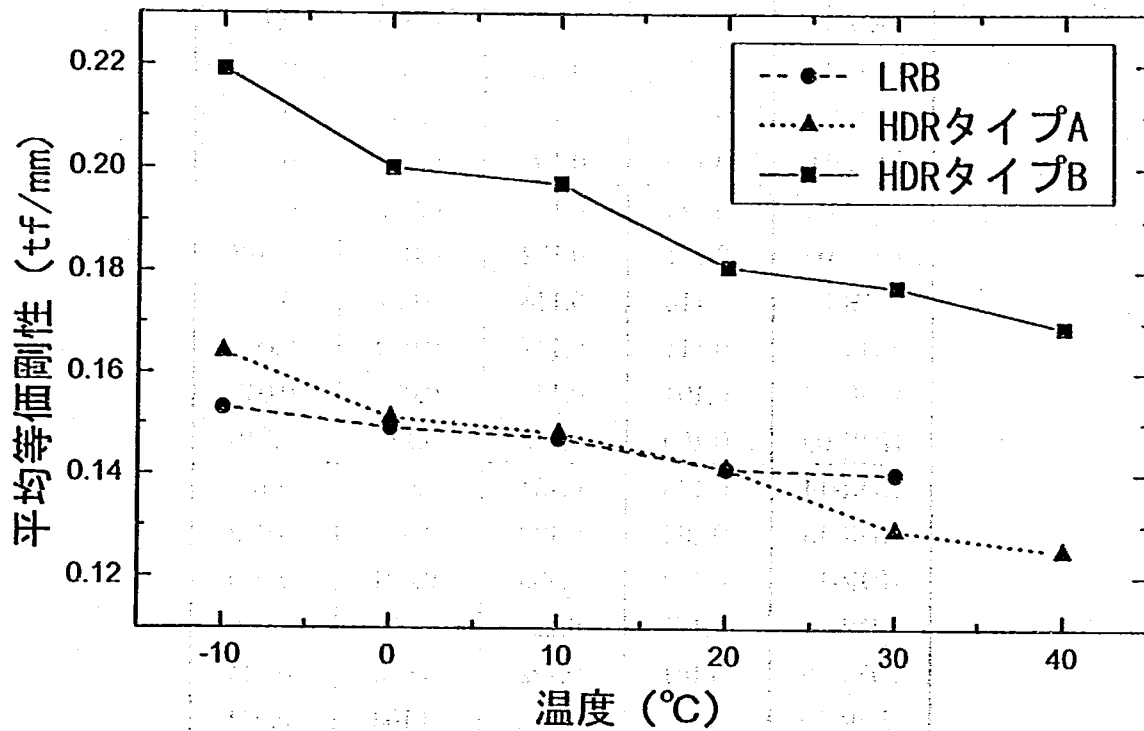


図5. 2-1 温度の違いによる平均等価剛性

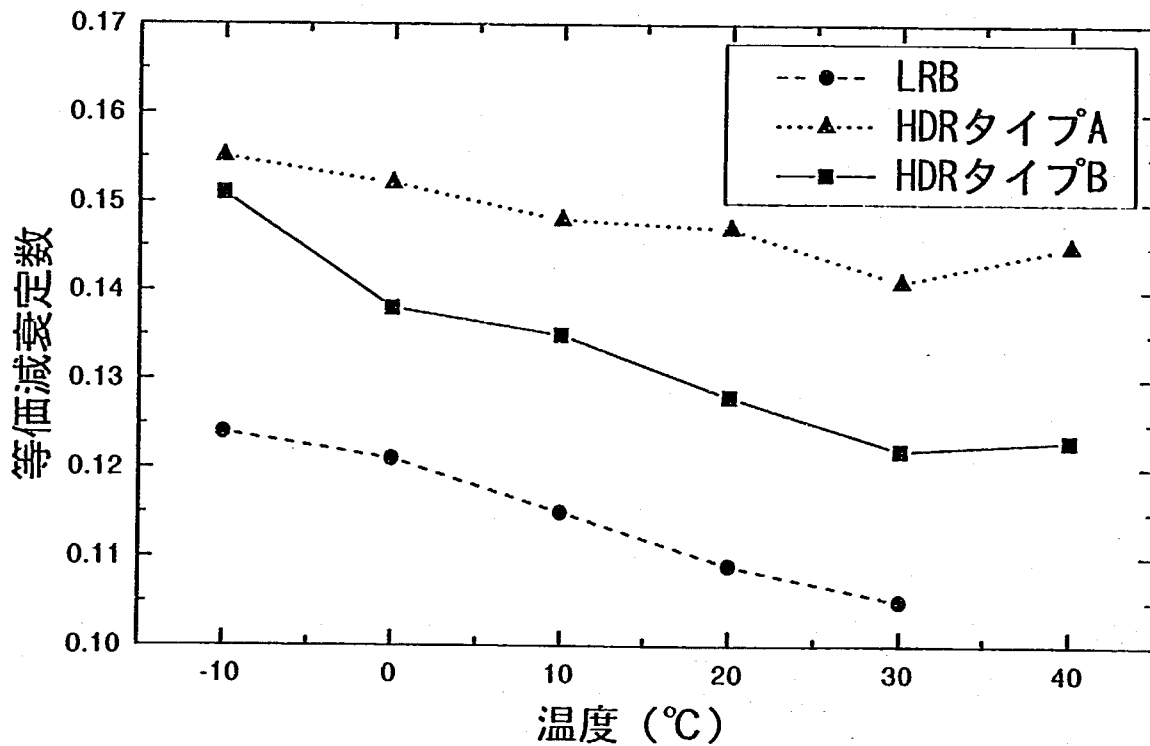


図5. 2-2 温度の違いによる平均等価減衰定数

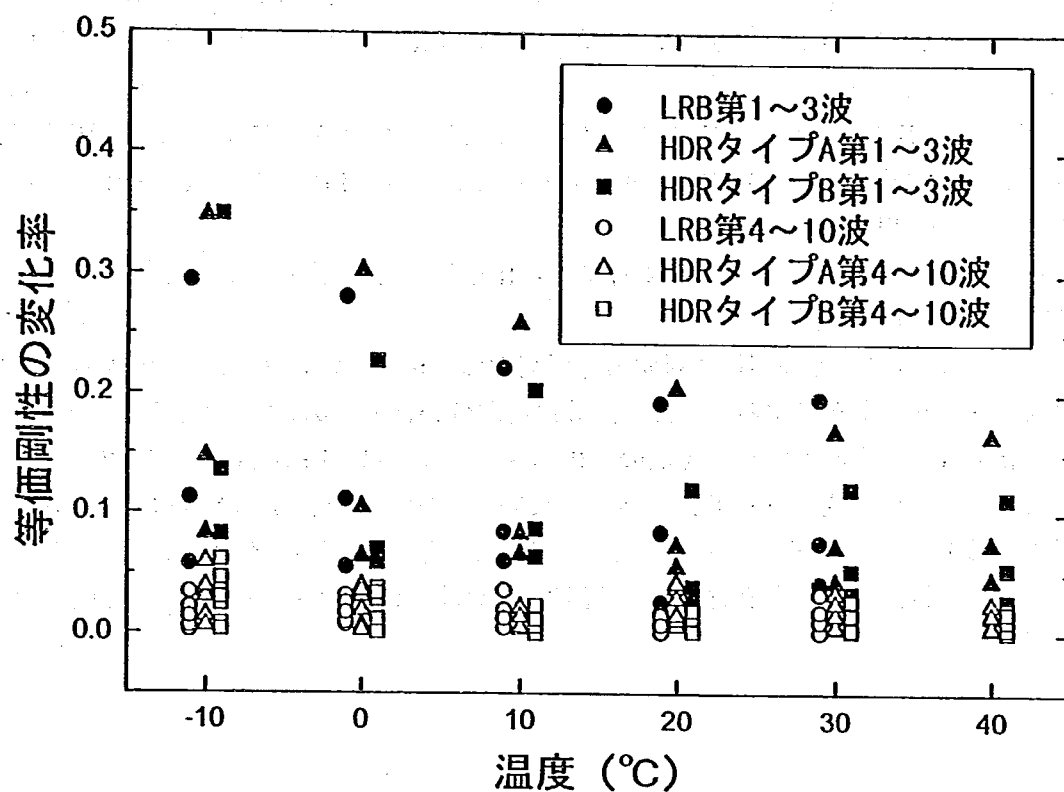


図5. 2-3 第1回目载荷における等価剛性の安定性

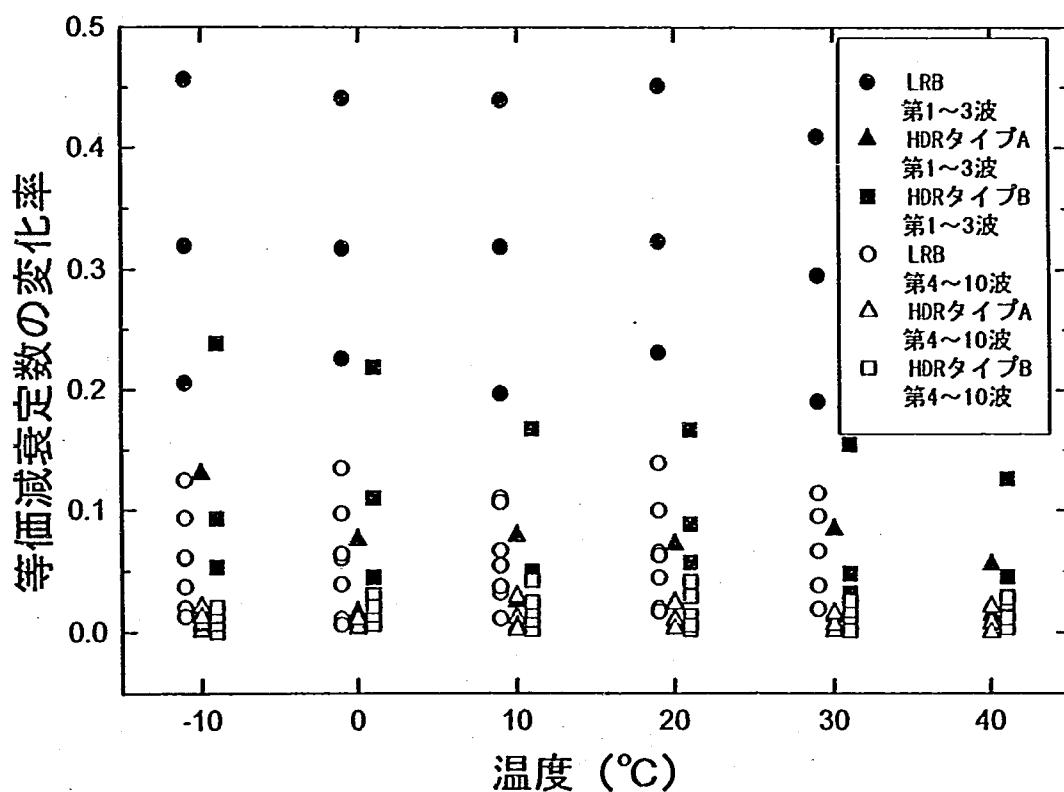


図5. 2-4 第1回目载荷における等価減衰定数の安定性

試験温度が高くなると、各供試体とも、ほぼ一定の割合で、等価剛性および等価減衰定数が低下する。

等価剛性は、 $-10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ においては、LRBでは6%、HDRタイプAでは10%、HDRタイプBでは10%程度増加する。 $20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ （LRBでは $+30^{\circ}\text{C}$ ）においては、LRBでは3%、HDRタイプAでは12%、HDRタイプBでは11%程度低下する。

等価減衰定数は、 $-10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ においては、LRBでは14%、HDRタイプAでは5%、HDRタイプBでは18%程度増加する。 $20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ （LRBでは $+30^{\circ}\text{C}$ ）においては、LRBでは4%、HDRタイプAでは2%、HDRタイプBでは、3%程度減少する。

-10°C と 40°C （LRBでは $+30^{\circ}\text{C}$ ）の 20°C に対する変化率は、等価剛性、等価減衰定数とも、式（5-3）および式（5-4）を満足する。

第1回目载荷における平均等価剛性に対する等価剛性の変化率（安定性）は、HDR-04、HDR-14の第1波目以外は式（5-5）を満足する。また、試験温度が低いほど、第1波目の変化率（安定性）が大きい。

平均等価減衰定数に対する等価減衰定数の変化率（安定性）は、LRBでは、第1～2波目および第4～5波目はほとんどの供試体が式（5-6）を満足しない。HDRタイプAおよびHDRタイプBは、全ての供試体が式（5-6）を満足する。また、等価剛性は、試験温度が低いほど、第1波目の変化率（安定性）が大きいかったが、等価減衰定数は、試験温度と第1波目の変化率（安定性）とは関係がない。

(7) 結果

(7) 結果

5. 3 免震装置の载荷履歴経験に対する安定性の検討

すべての供試体の試験温度を、20℃にした後に行った、第2回目载荷（安定性試験）における免震装置の安定性を図5. 3-1～図5. 3-5に示す。

安定性を検討するため、以下の2点に着目した。

- ①第1回目载荷で150%振幅の载荷履歴を10回経験しているが、免震装置の性能を载荷履歴経験後も保持しているか。
- ②5. 2同様、免震装置の等価剛性および等価減衰定数が繰返し载荷中に、なるべく一定であるか。

①については、第1回目载荷とは試験温度が異なるため、以下の式に示すように基本ヒステリシスとの比較を行った。（図5. 3-1～図5. 3-2）

$$\frac{\text{安定性試験の平均等価剛性および等価減衰定数}}{\text{基本ヒステリシスの等価剛性および等価減衰定数}} \quad \text{式(5-7)}$$

また、②については5. 2と同様に式(5-5)および式(5-6)を用いて検討を行った。（図5. 3-3～図5. 3-4）

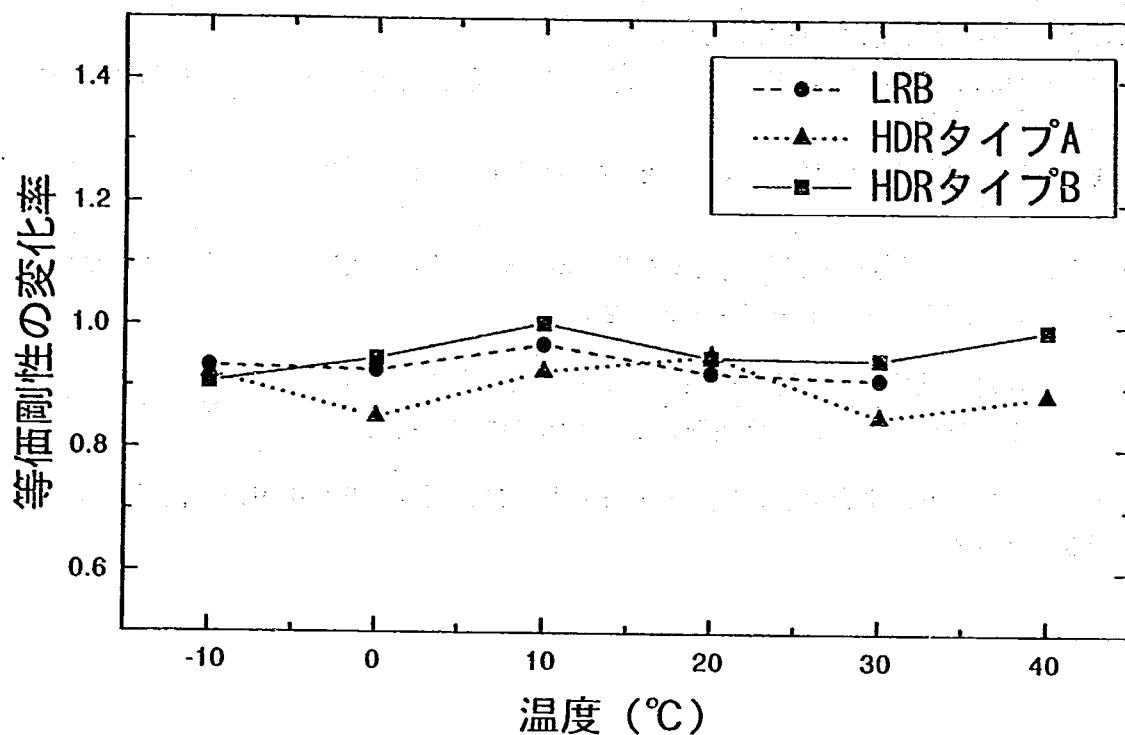


図5. 3-1 基本ヒステリシスとの平均等価剛性の違い

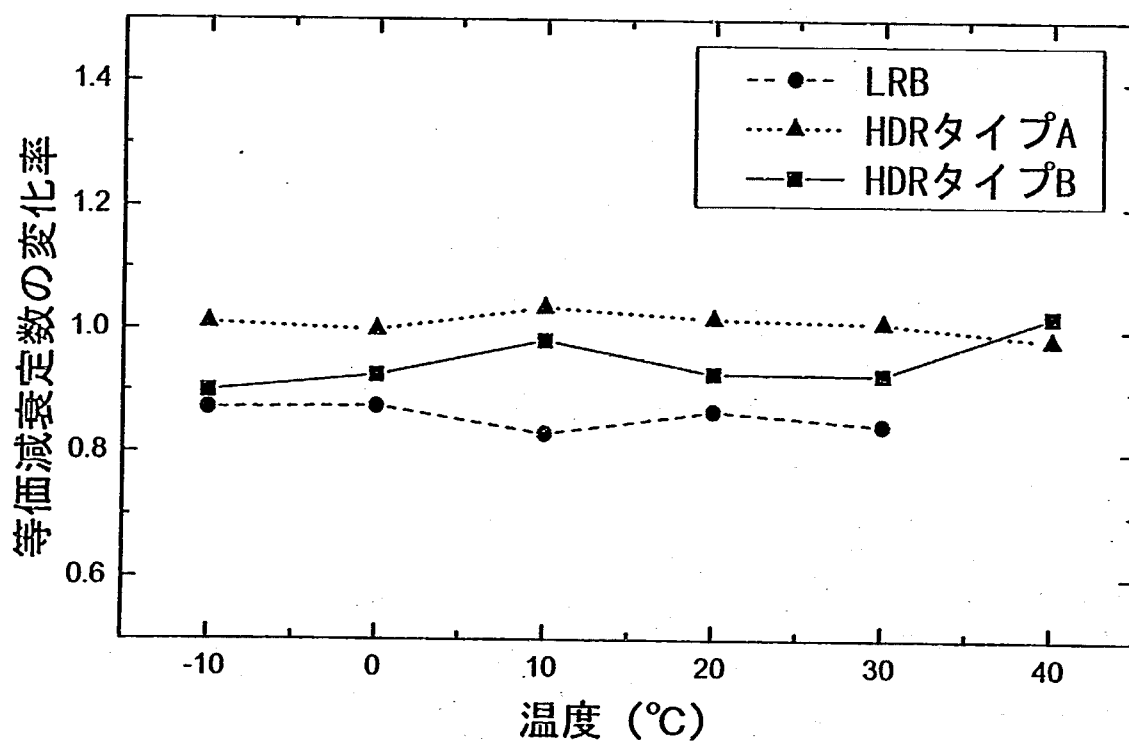


図5. 3-2 基本ヒステリシスとの平均等価減衰定数の違い

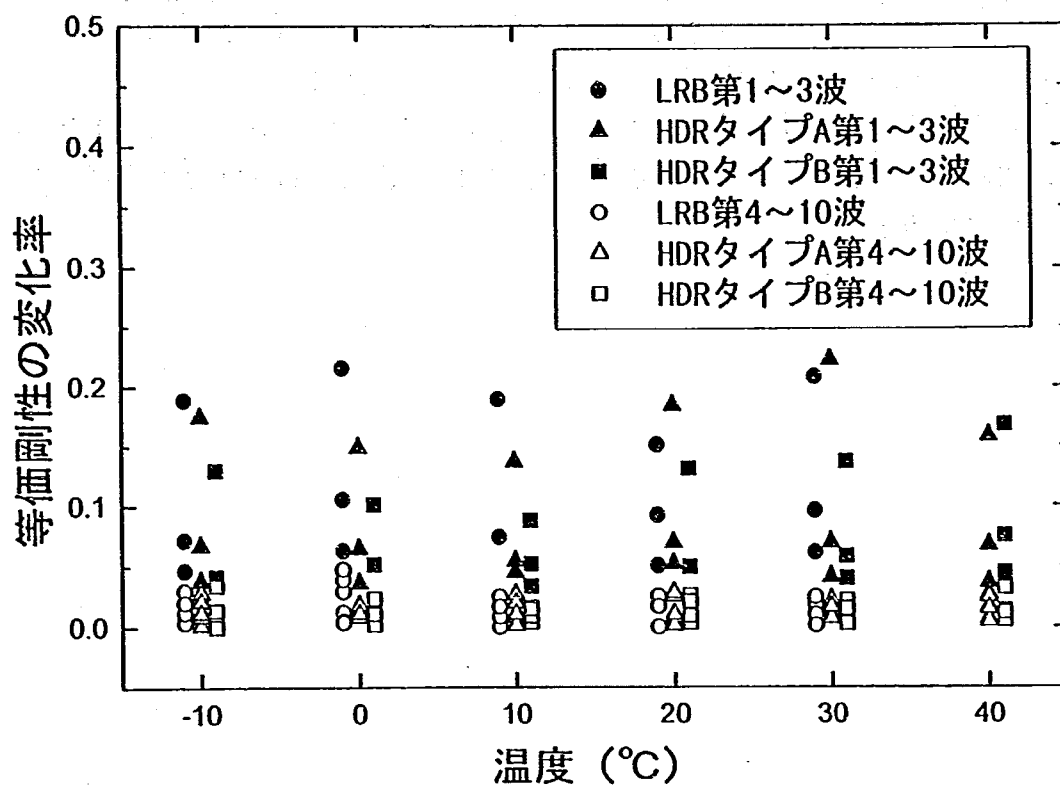


図5. 3-3 第2回目载荷における等価剛性の安定性

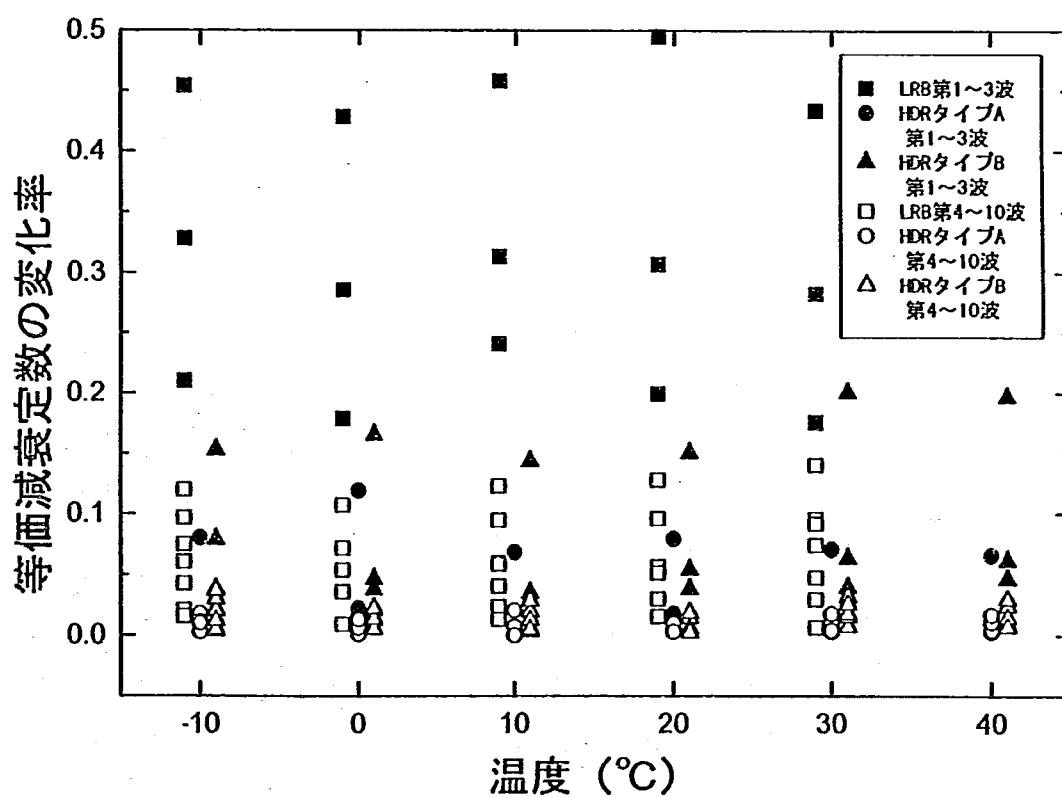


図5. 3-4 第2回目载荷における等価減衰定数の安定性

各供試体とも基本ヒステリシスとの違いは最大15%程度であり、免震装置の性能は、第1回目載荷で150%振幅の載荷履歴を10回経験しているが、免震装置の性能を載荷履歴経験後も保持している。

また、第2回目載荷における等価剛性の安定性は、等価剛性については、第1回目載荷において満足しなかったHDR-04、HDR-14の第1波目についても式(5-5)を満足する。

等価減衰定数については、LRB供試体では、第1回目載荷と同様に、第1～2波目および第4～5波目はほとんどの供試体が式(5-6)を満足していない。HDR供試体は、第1回目載荷と同様に、全の供試体が式(5-6)を満足している。

5. 4 免震装置の疲労特性の検討

疲労試験(20℃)により得られた、載荷振幅50%, 150%の等価剛性および等価減衰定数の変化を図5. 4-1(1)~図5. 4-3(2)に示す。

また、50%振幅時、150%振幅時の第11波目以降の等価剛性および等価減衰定数を平均したもの(疲労試験における平均等価剛性および平均等価減衰定数)の変化を図5. 4-4(1)~(2)および表5. 4-1に示す。

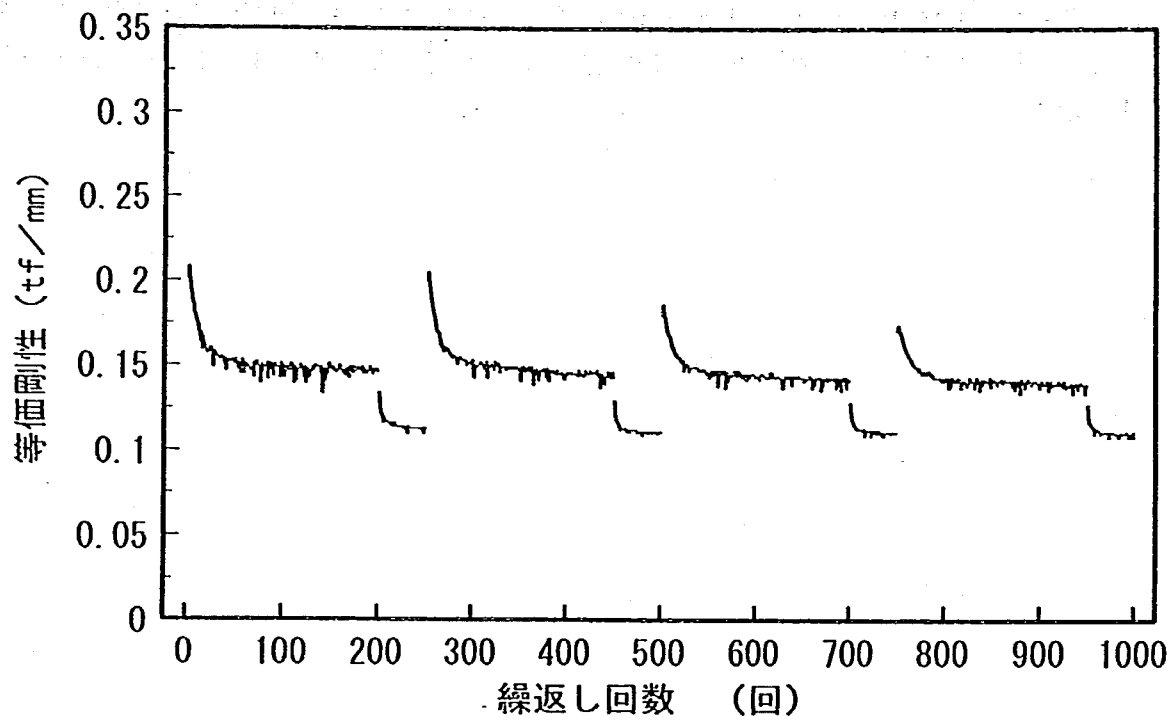


図5. 4-1 (1) 等価剛性の変化 (LRB-07)

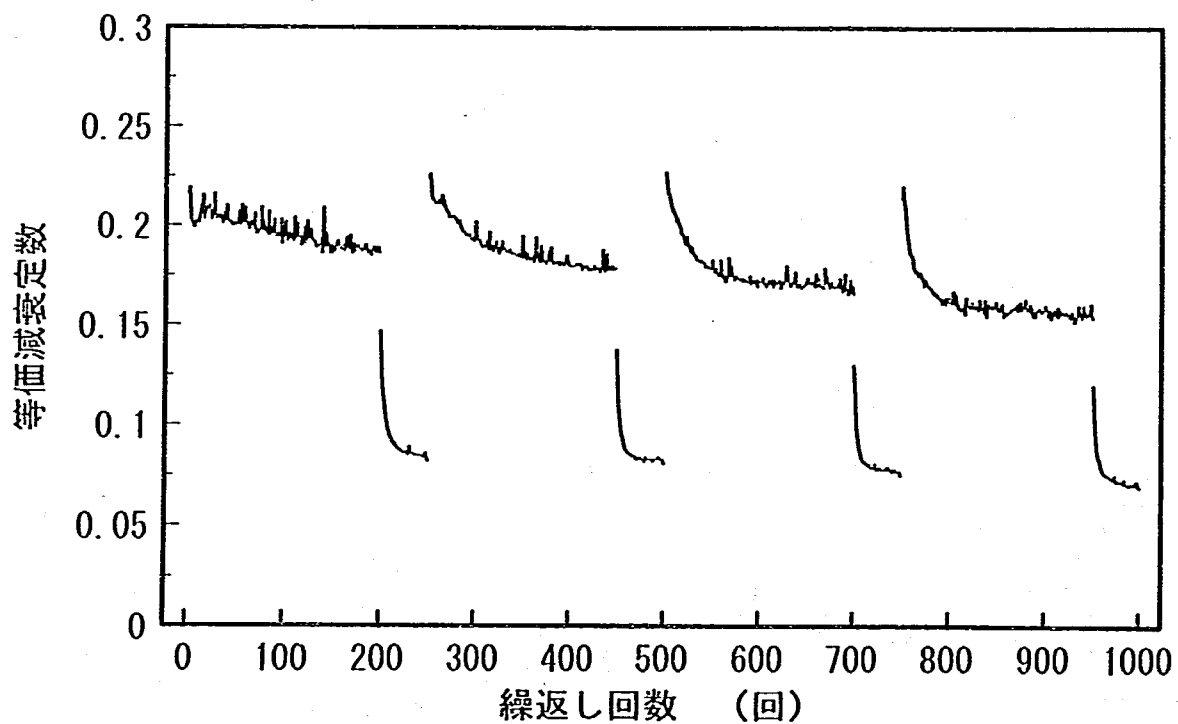


図5. 4-1 (2) 等価減衰定数の変化 (LRB-07)

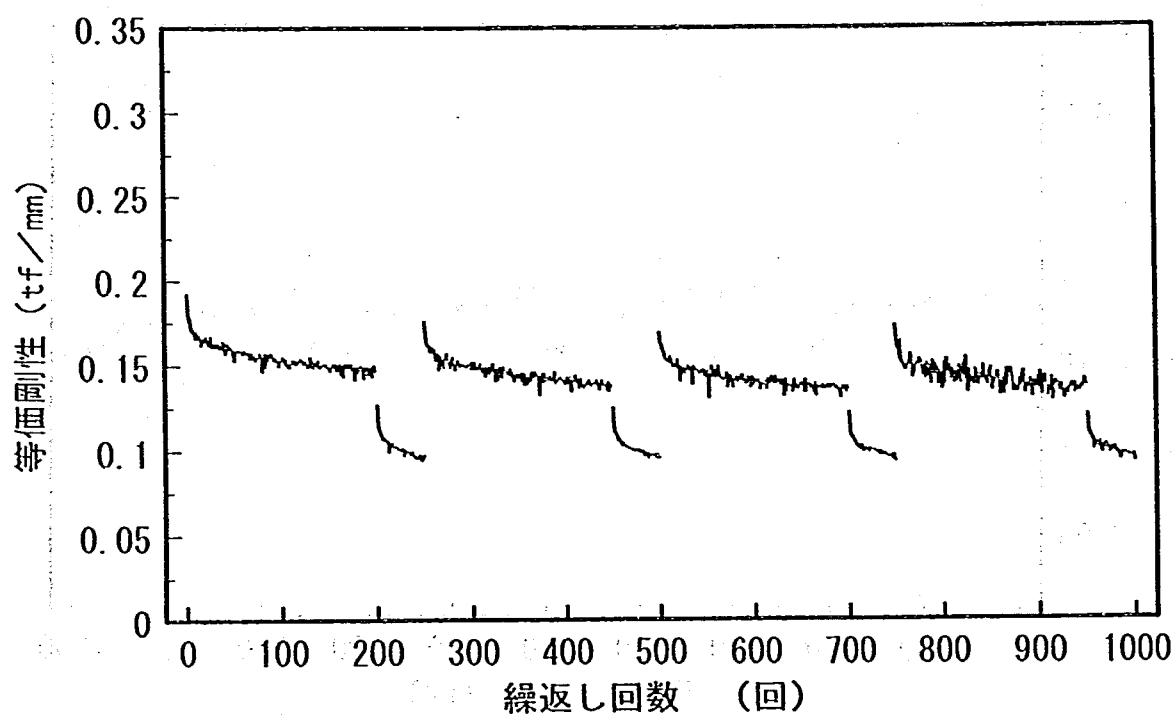


図5. 4-2 (1) 等価剛性の変化 (HDR-07)

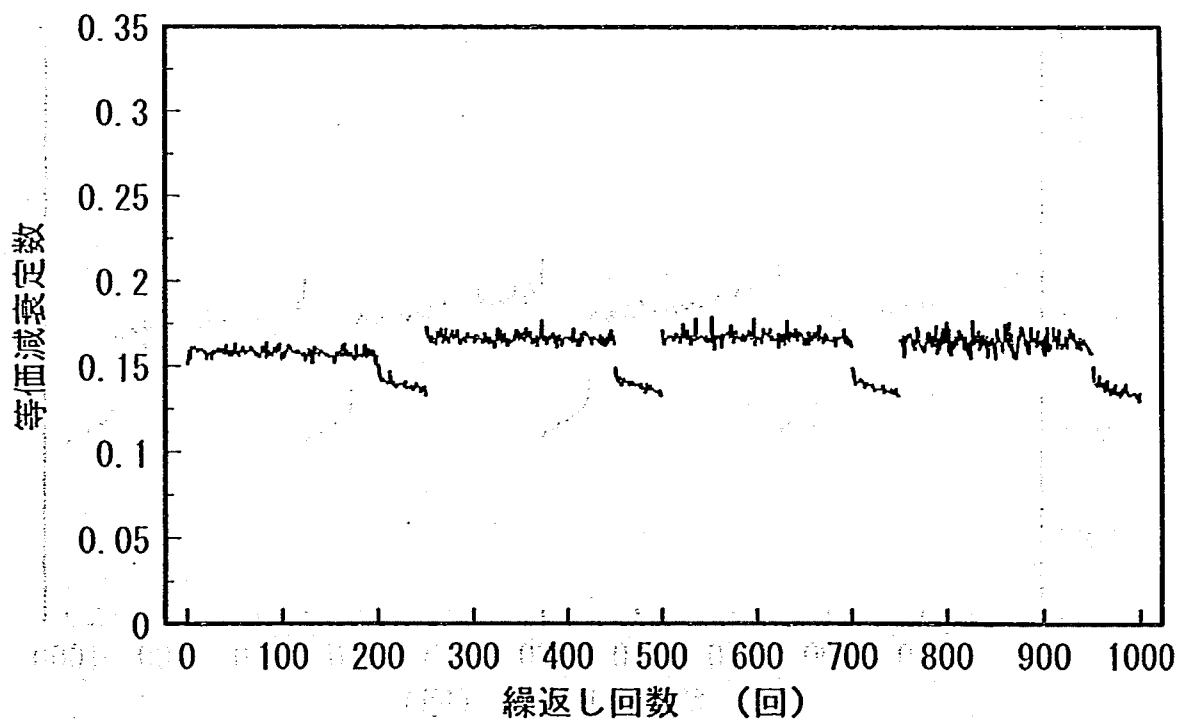


図5. 4-2 (2) 等価減衰定数の変化 (HDR-07)

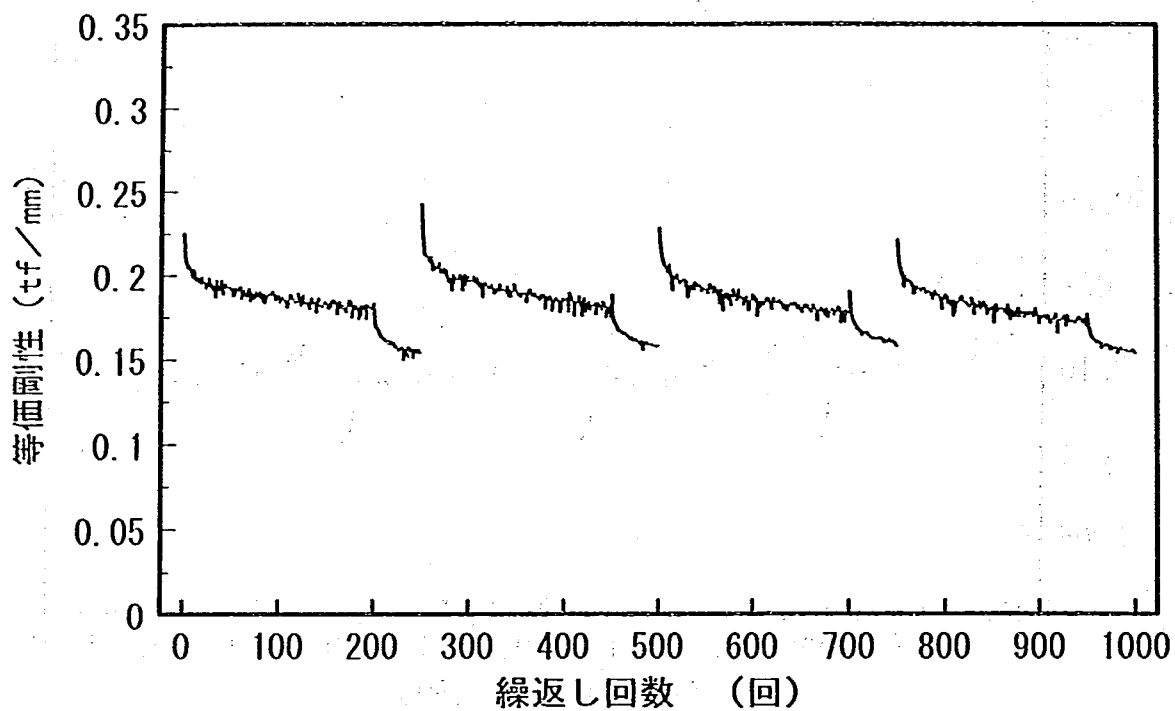


図5. 4-3 (1) 等価剛性の変化 (HDR-17)

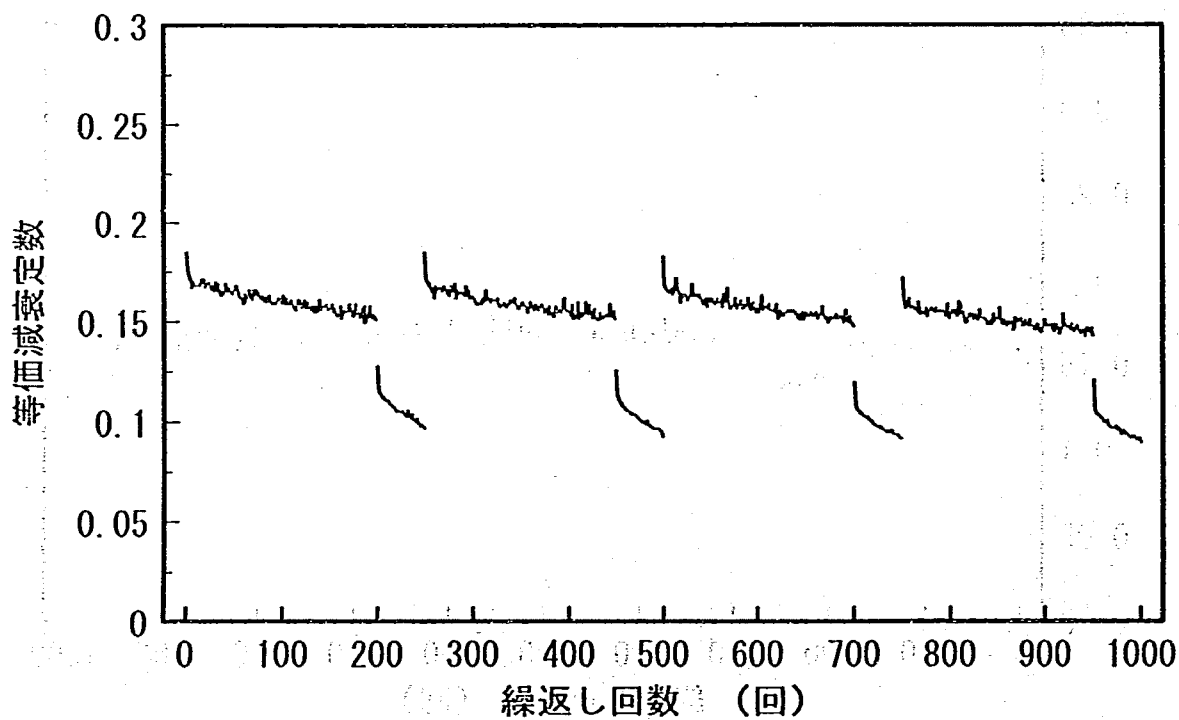


図5. 4-3 (2) 等価減衰定数の変化 (HDR-17)

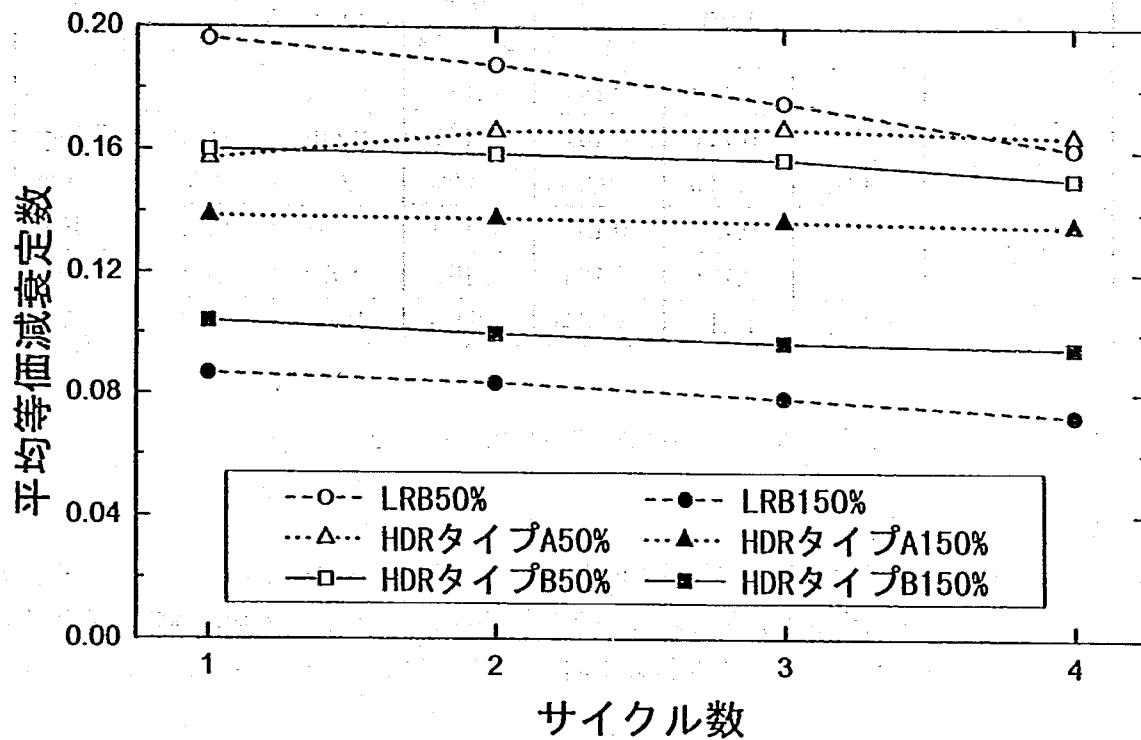


図5. 4-4 (1) 疲労試験における平均等価剛性の変化

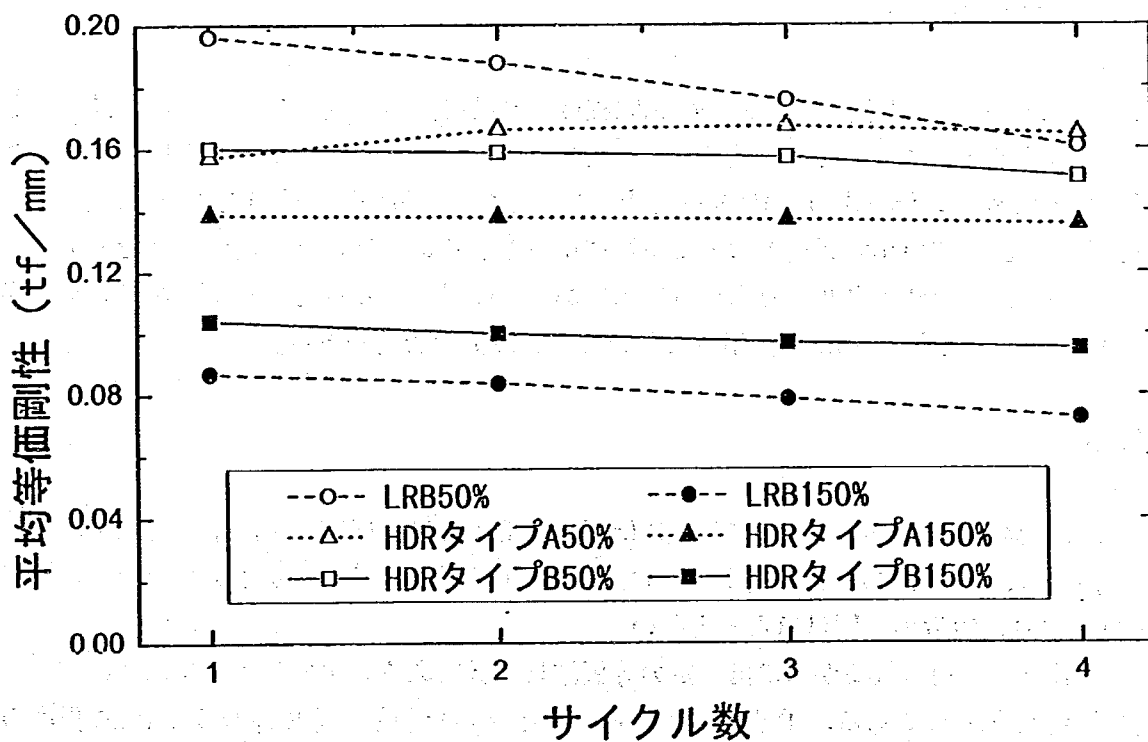


図5. 4-4 (2) 疲労試験における平均等価減衰定数の変化

表5. 4-1 等価剛性および等価減衰定数の変化

		50%振幅時			150%振幅時		
		LRB	HDR タイプA	HDR タイプB	LRB	HDR タイプA	HDR タイプB
等価剛性 (tf/mm)	①	0.150	0.154	0.187	0.114	0.100	0.157
	④	0.141	0.141	0.181	0.110	0.099	0.157
	変化率	-5.4%	-8.3%	-3.2%	-2.8%	-1.5%	0.0%
等価減衰 定数	①	0.196	0.157	0.160	0.087	0.139	0.104
	④	0.161	0.165	0.151	0.072	0.136	0.095
	変化率	-18.1%	+4.6%	-5.9%	-16.6%	-2.1%	-8.7%

疲労試験における、等価剛性および等価減衰定数の変化の特徴を以下に示す。

LRB

・50%振幅時

等価剛性は、最初の10回程度の載荷で急激に低下し、その後は、ほぼ一定の値に収束する。サイクルを重ねるごとに、最初の10回程度の載荷での低下の割合が小さくなり、その後の剛性は前サイクルとほぼ同じである。①サイクル目と④サイクル目の平均等価剛性の低下は5%程度であり、疲労の影響はほとんどない。

等価減衰定数は、①サイクル目ではほぼ一定の割合で低下する。次のサイクルにおいては、最初の10回程度の載荷で急激に低下し、その後はほぼ一定の割合で低下する。サイクルを重ねるごとに最初の10回程度の載荷での低下が大きくなり、その後も一定の割合で低下する。④サイクル目では、載荷回数の増加に伴い、ある一定の値に収束する。①サイクル目と④サイクル目の平均等価減衰定数は18%程度の低下であり、疲労の影響がある。

・150%振幅時

等価剛性は、50%振幅時と同様に、最初の10回程度の載荷で急激に低下し、その後はほぼ一定の値に収束する。次のサイクルにおいては、前サイクルとほぼ同じ値である。①サイクル目と④サイクル目の平均等価剛性は3%程度の低下あり、150%振幅時においても、疲労の影響はほとんどない。

等価減衰定数は、最初の10回程度の載荷で急激に低下し、その後はほぼ一定の割合で低下する。次のサイクルにおいては、前サイクルよりも小さい値である。①サイクル目と④サイクル目の平均等価減衰定数は17%程度の低下であり、150%振幅時においても、疲労の影響がある。

HDRタイプA

・50%振幅時

等価剛性は、最初の10回程度の載荷で急激に低下し、その後は、ほぼ一定の割合で低下する。次のサイクルにおいても、前サイクルとほぼ同じ剛性である。①サイクル目と④サイクル目の平均等価剛性は8%程度の低下あり、疲労の影響はほとんどない。

等価減衰定数は、最初の載荷からほぼ一定の等価減衰定数である。次のサイクルにおいても、最初からほぼ同じ等価減衰定数である。①サイクル目と④サイクル目の平均等価減衰定数は5%程度の増加しており、疲労の影響はほとんどない。

・150%振幅時

等価剛性は、最初の10回程度の载荷で急激に低下し、その後は、ほぼ一定の割合で低下する。次のサイクルにおいても、ほぼ同じ剛性である。①サイクル目と④サイクル目の平均等価剛性は2%程度の低下あり、疲労の影響はほとんどない。

等価減衰定数は、最初からほぼ一定の割合で低下する。次のサイクルにおいても、前サイクルとほぼ同じ等価減衰定数である。①サイクル目と④サイクル目の平均等価減衰定数は2%程度の低下あり、疲労の影響はほとんどない。

HDRタイプB

・50%振幅時

等価剛性は、最初の10回程度の载荷で急激に低下し、その後は、ほぼ一定の割合で低下する。次のサイクルにおいても、ほぼ同じ剛性である。①サイクル目と④サイクル目の平均等価剛性は3%程度の低下あり、疲労の影響はほとんどない。ほとんど疲労の影響はない。

等価減衰定数は、最初の10回程度の载荷で急激に低下し、その後は、ほぼ一定の割合で低下する。次のサイクルにおいても、前サイクルとほぼ同じ等価減衰定数である。①サイクル目と④サイクル目の平均等価減衰定数は2%程度の低下あり、疲労の影響はほとんどない。

・150%振幅時

等価剛性は、最初の10回程度の载荷で急激に低下し、その後は、ほぼ一定の割合で低下する。次のサイクルにおいても、ほぼ同じ剛性である。①サイクル目と④サイクル目の平均等価剛性は同じであり、疲労の影響はほとんどない。

等価減衰定数は、最初からほぼ一定の割合で低下する。次のサイクルにおいても、前サイクルとほぼ同じ等価減衰定数である。①サイクル目と④サイクル目の平均等価減衰定数は9%程度の低下あり、疲労の影響はほとんどない。

5. 5 免震装置の疲労試験における温度依存性の検討

疲労試験により得られた、载荷振幅50%、150%の等価剛性および等価減衰定数の変化を図5. 5-1(1)～図5. 5-17(2)に示す。

また、温度の違いによる疲労試験における平均等価剛性および平均等価減衰定数の変化を表5. 5-1および図5. 5-18(1)～(2)に示す。

また、温度依存性を検討するにあたり、④サイクル目の平均等価剛性および平均等価減衰定数を平均したものをを用いることとした。

なお、平均等価剛性、平均等価減衰定数等の定義が異なるが、式(5-3)および式(5-4)を用いて、検討を行った。

表6. 0. 1 平均等価剛性、平均等価減衰定数およびその変化率

供試体No.	KB_m	hB_m	RK_t	Rh_t
LRB-04	0.153	0.178	0.079	0.111
LRB-05	0.149	0.171	0.054	0.063
LRB-06	0.147	0.171	0.039	0.066
LRB-07	0.141	0.161	0.000	0.000
LRB-08	0.140	0.163	0.012	0.013
HDR-04	0.164	0.163	0.159	0.008
HDR-05	0.151	0.163	0.066	0.010
HDR-06	0.148	0.166	0.050	0.008
HDR-07	0.141	0.165	0.000	0.000
HDR-08	0.129	0.164	0.086	0.005
HDR-09	0.125	0.158	0.116	0.039
HDR-14	0.219	0.173	0.210	0.145
HDR-15	0.200	0.161	0.105	0.068
HDR-16	0.197	0.152	0.090	0.010
HDR-17	0.181	0.151	0.000	0.000
HDR-18	0.177	0.152	0.022	0.006
HDR-19	0.169	0.146	0.066	0.030

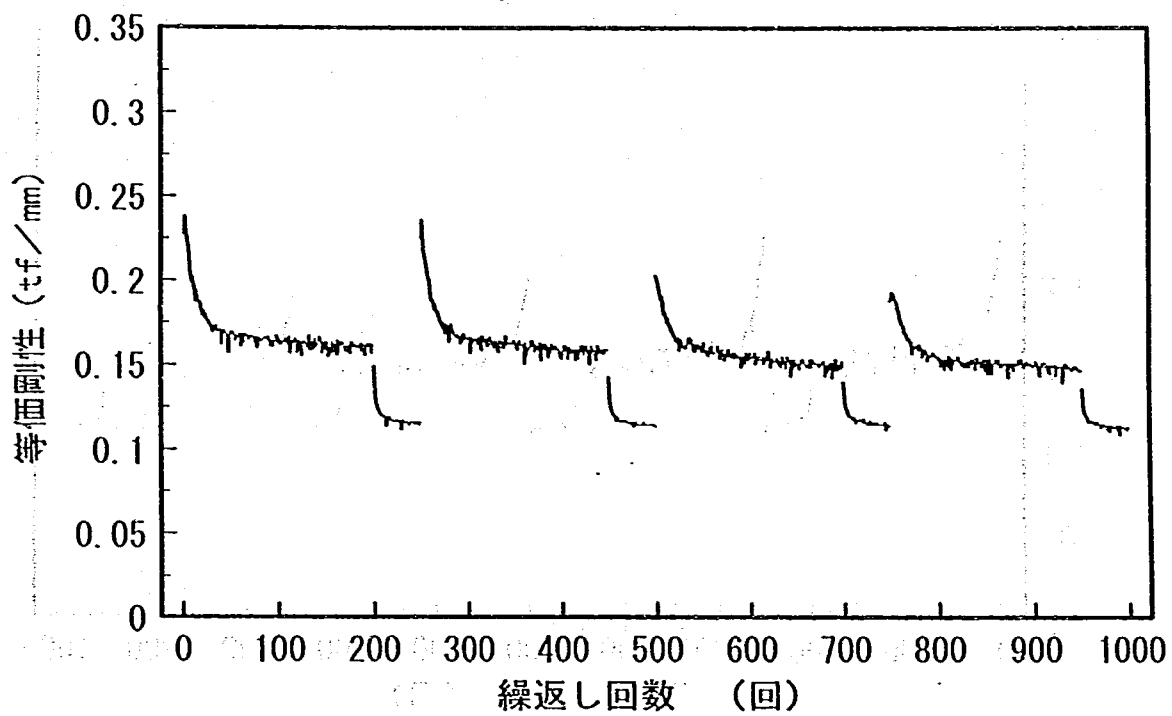


図5. 5-1 (1) 等価剛性の変化 (LRB-04)

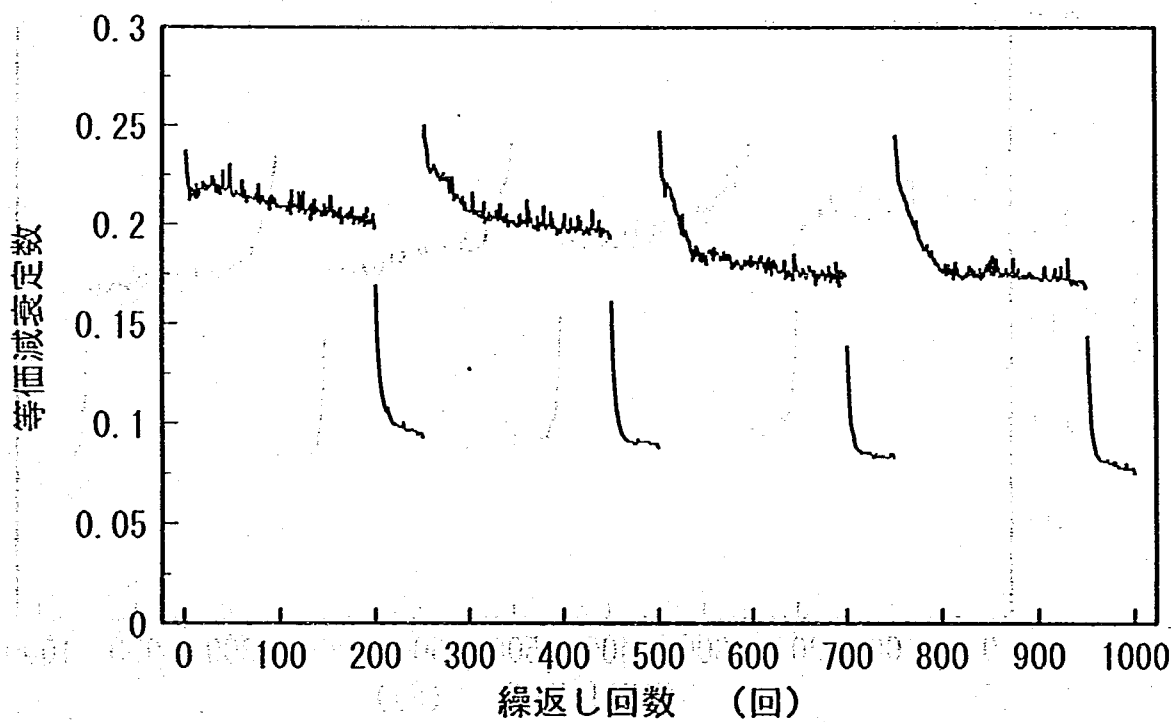


図5. 5-1 (2) 等価減衰定数の変化 (LRB-04)

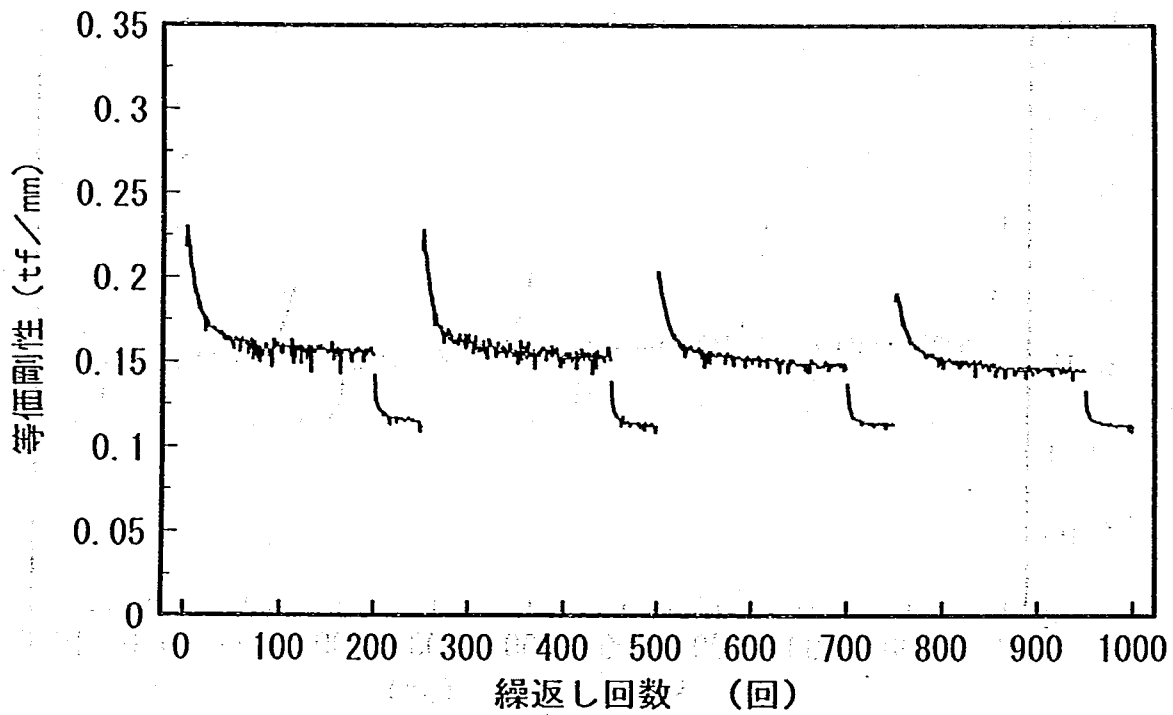


図5. 5-2 (1) 等価剛性の変化 (LRB-05)

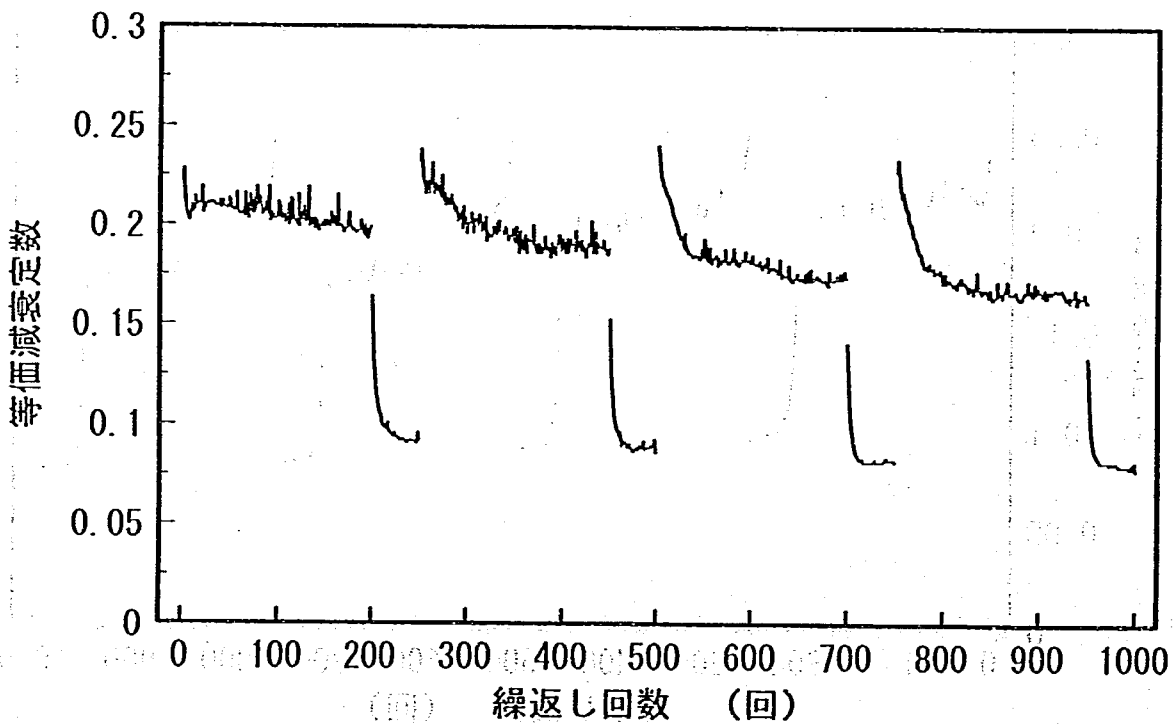


図5. 5-2 (2) 等価減衰定数の変化 (LRB-05)

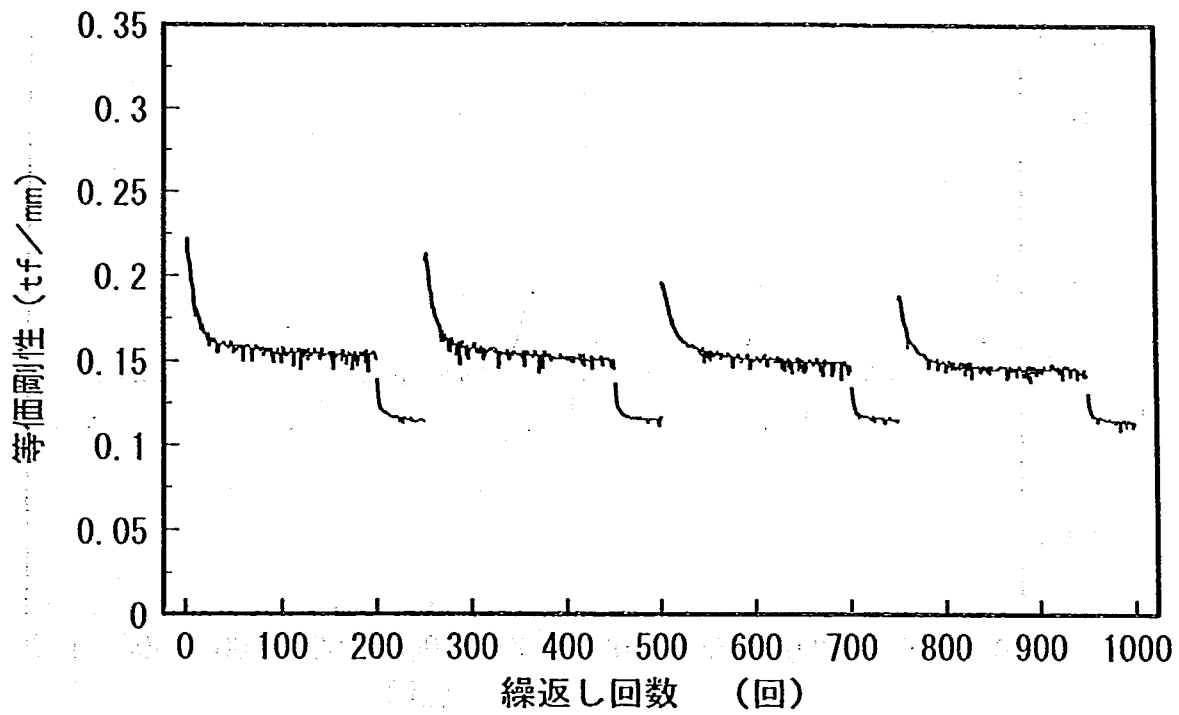


図5. 5-3 (1) 等価剛性の変化 (LRB-06)

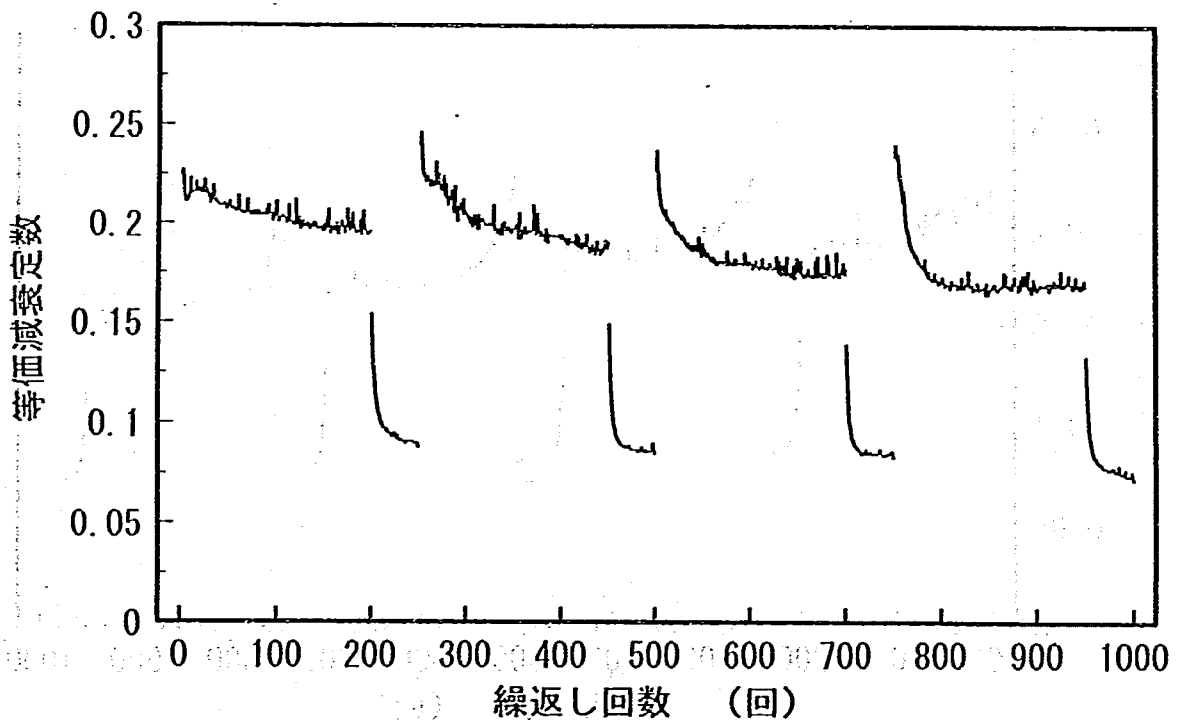


図5. 5-3 (2) 等価減衰定数の変化 (LRB-06)

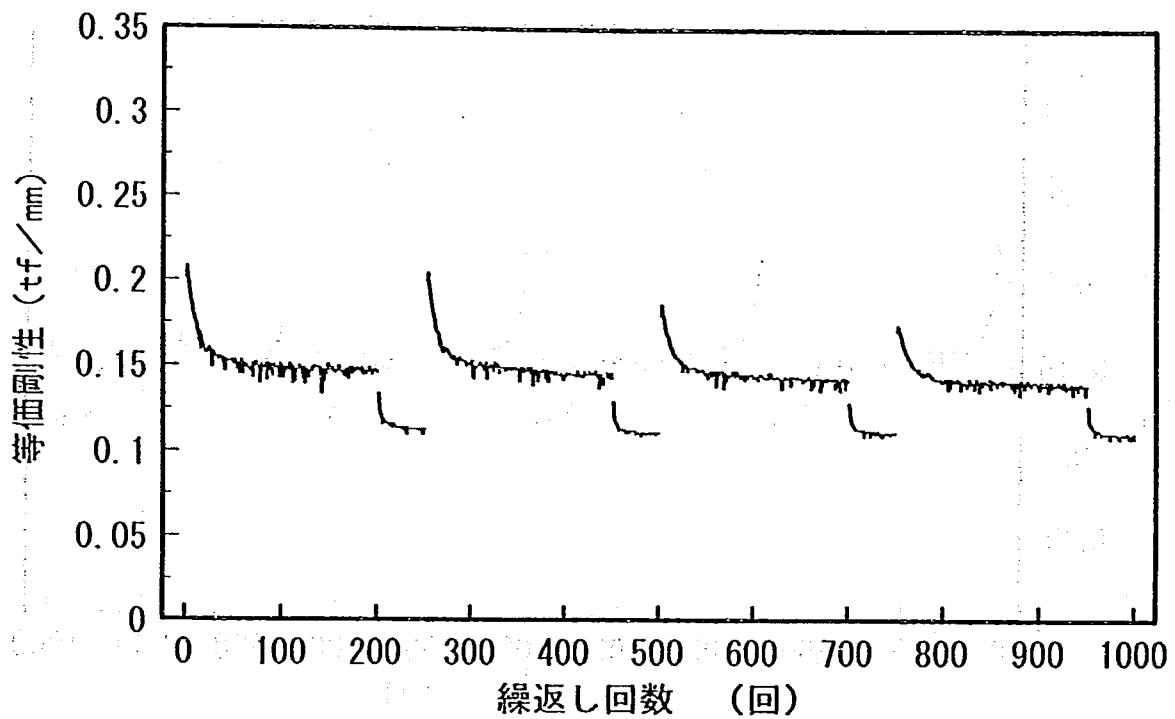


図5. 5-4 (1) 等価剛性の変化 (LRB-07)

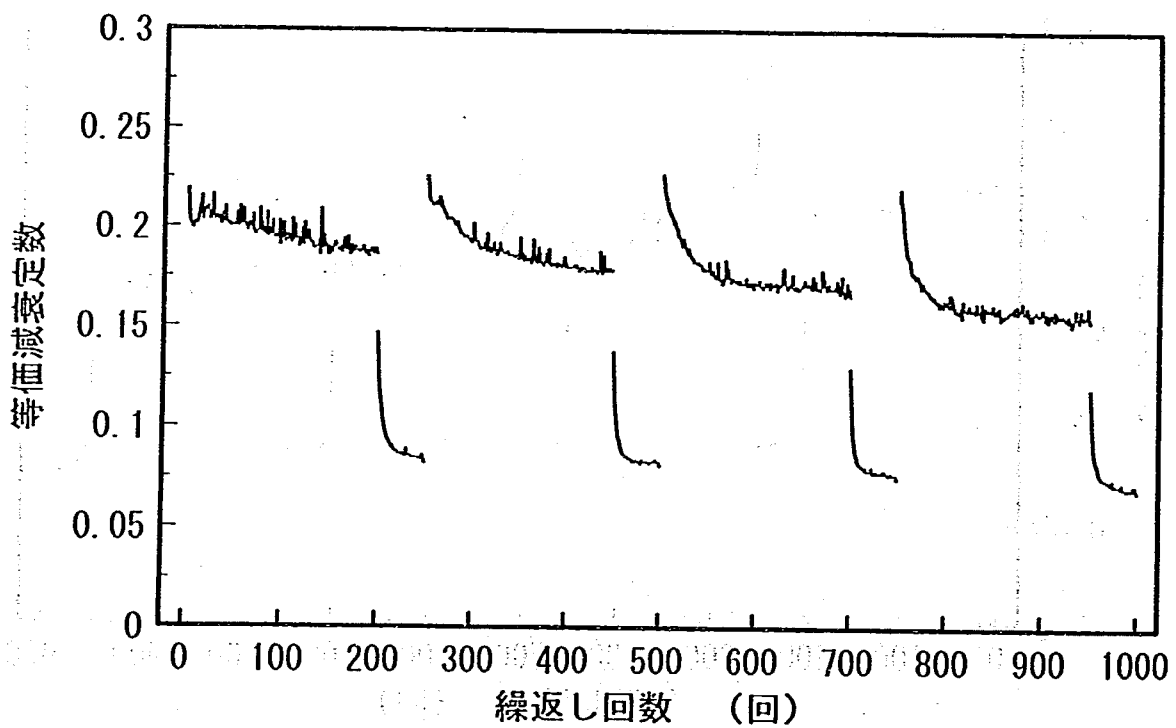


図5. 5-4 (2) 等価減衰定数の変化 (LRB-07)

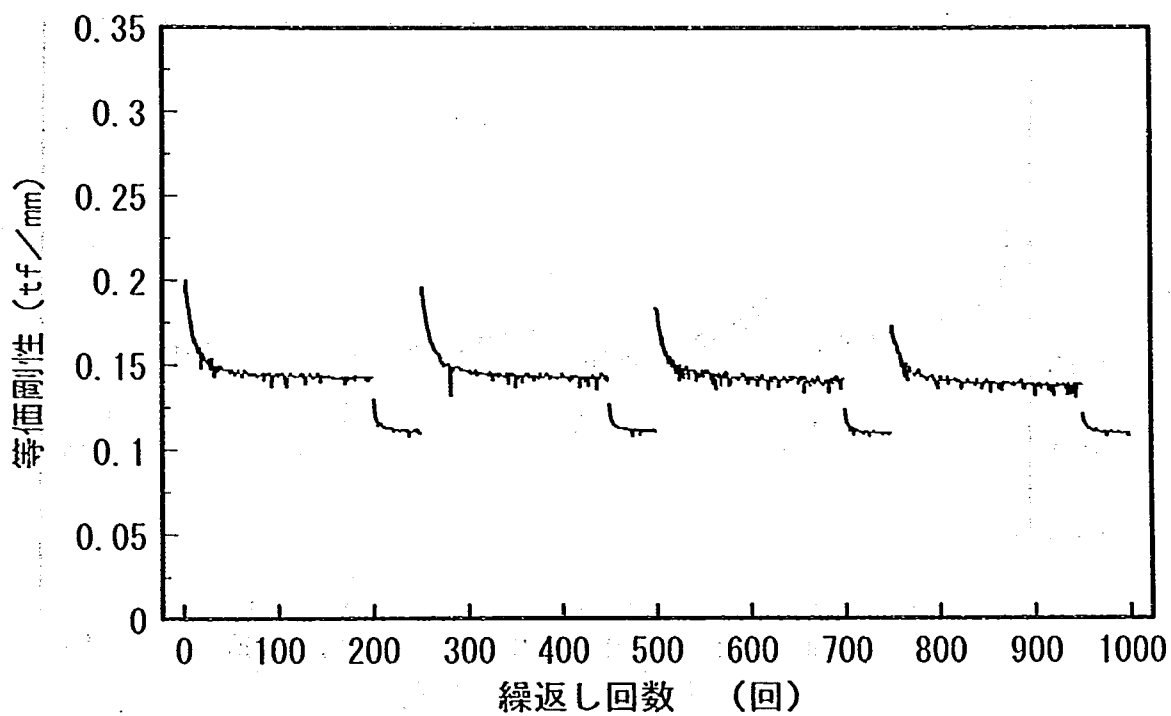


図5. 5-5 (1) 等価剛性の変化 (LRB-08)

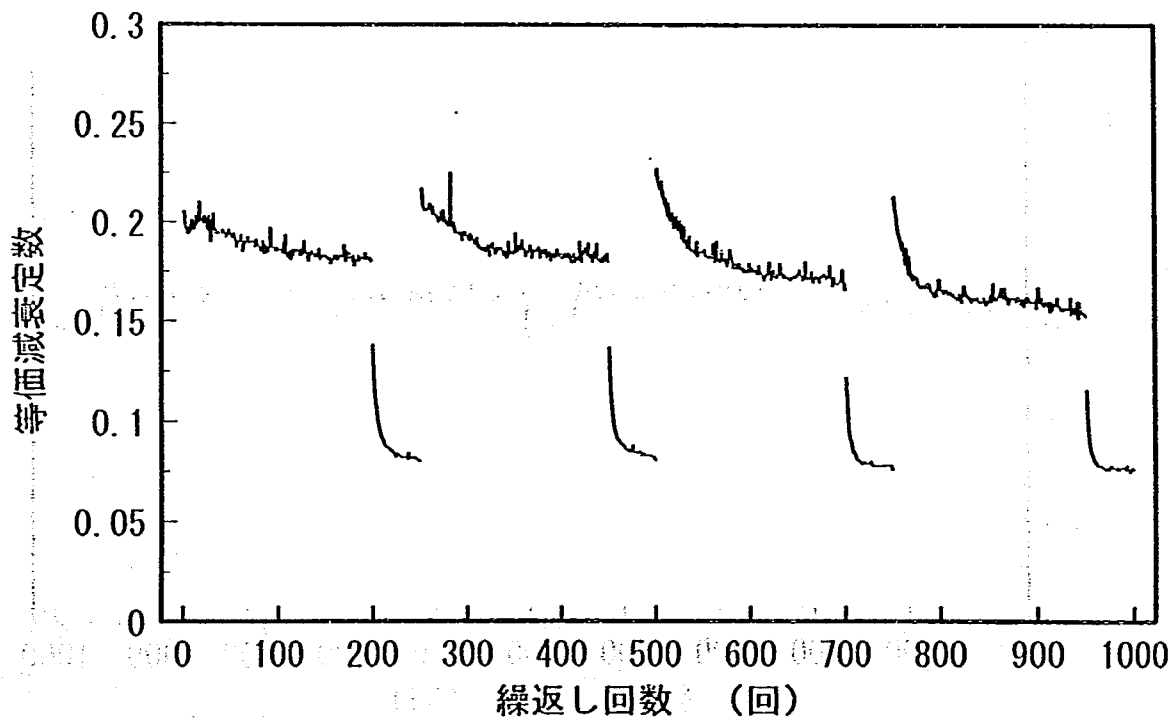


図5. 5-5 (2) 等価減衰定数の変化 (LRB-08)

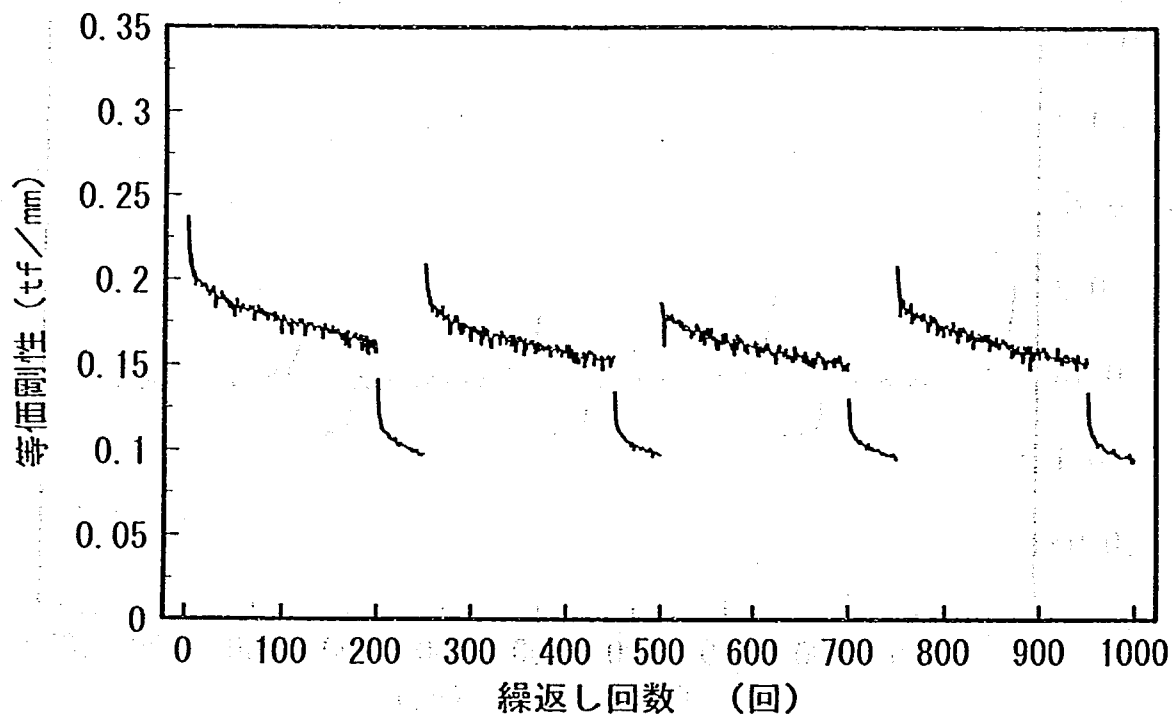


図5. 5-6 (1) 等価剛性の変化 (HDR-04)

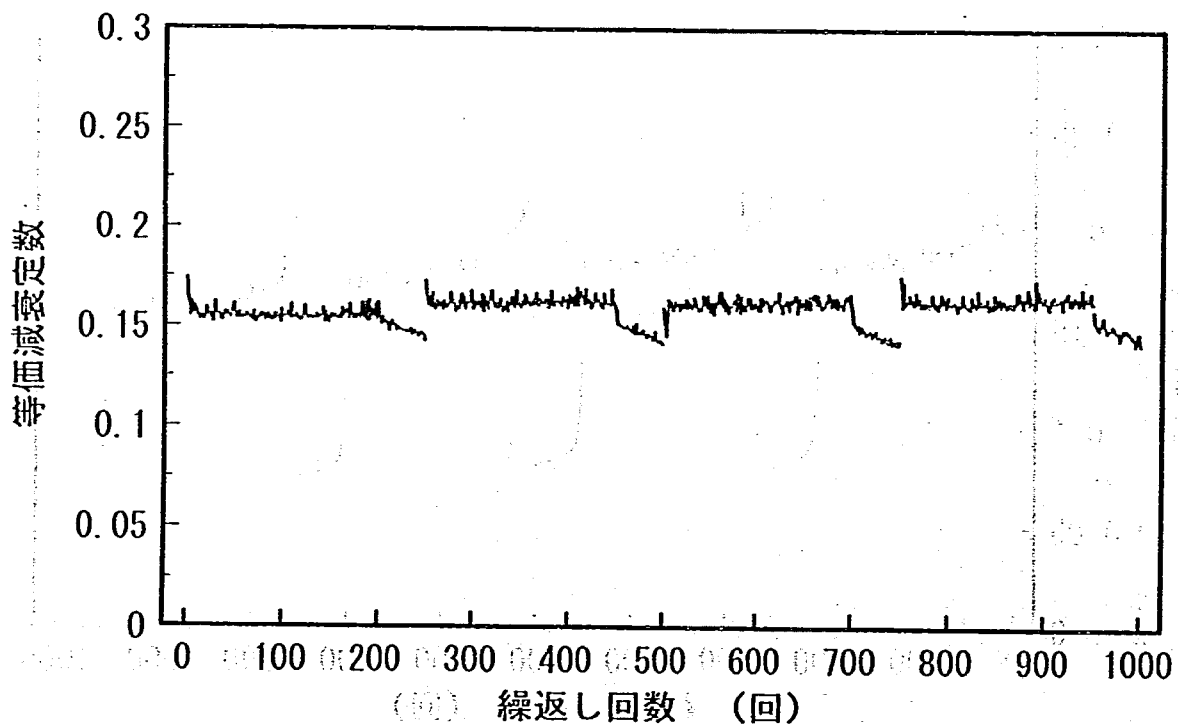


図5. 5-6 (2) 等価減衰定数の変化 (HDR-04)

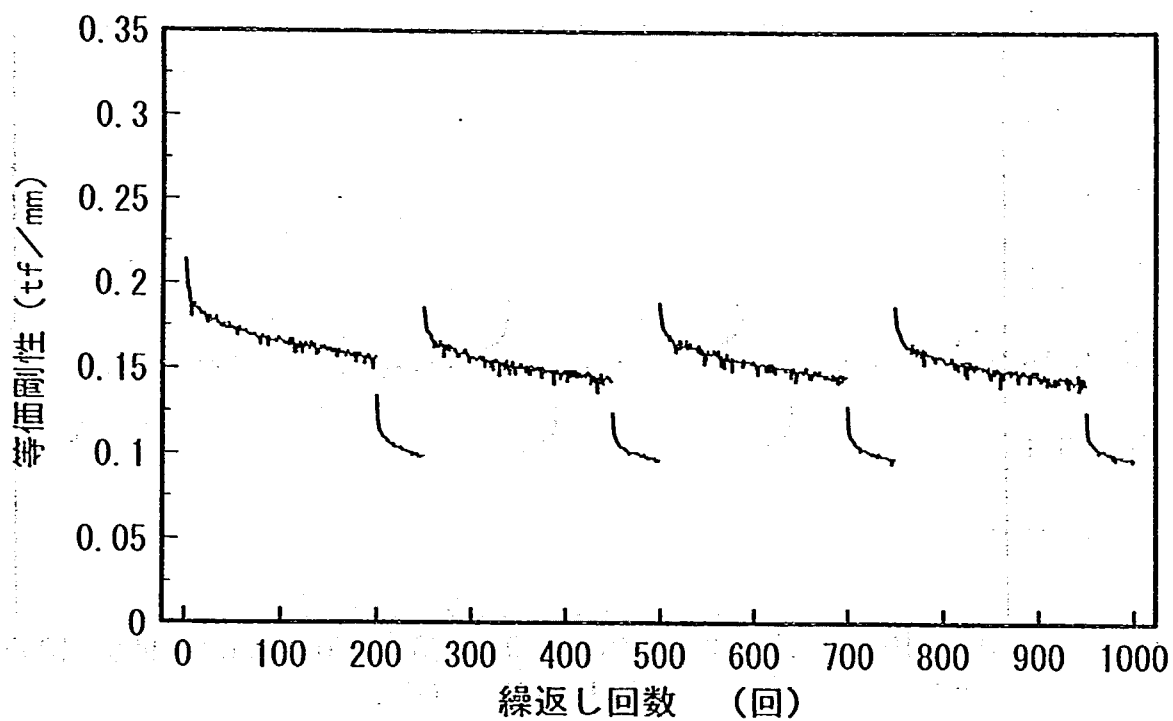


図5. 5-7 (1) 等価剛性の変化 (HDR-05)

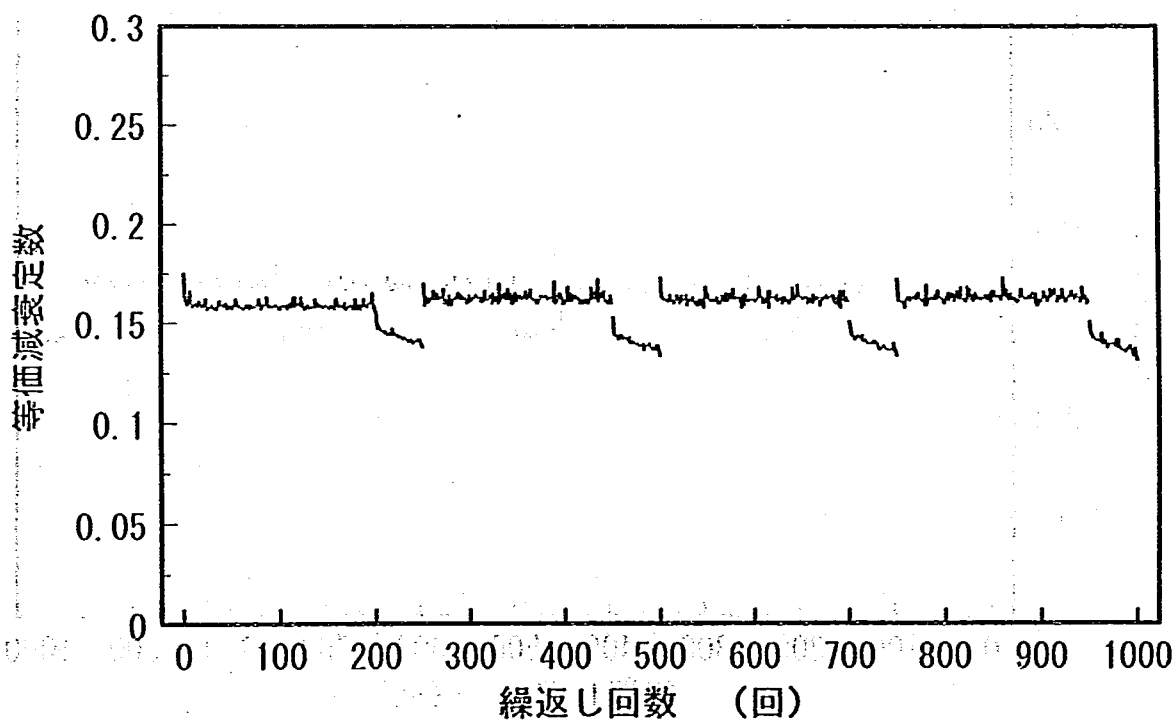


図5. 5-7 (2) 等価減衰定数の変化 (HDR-05)

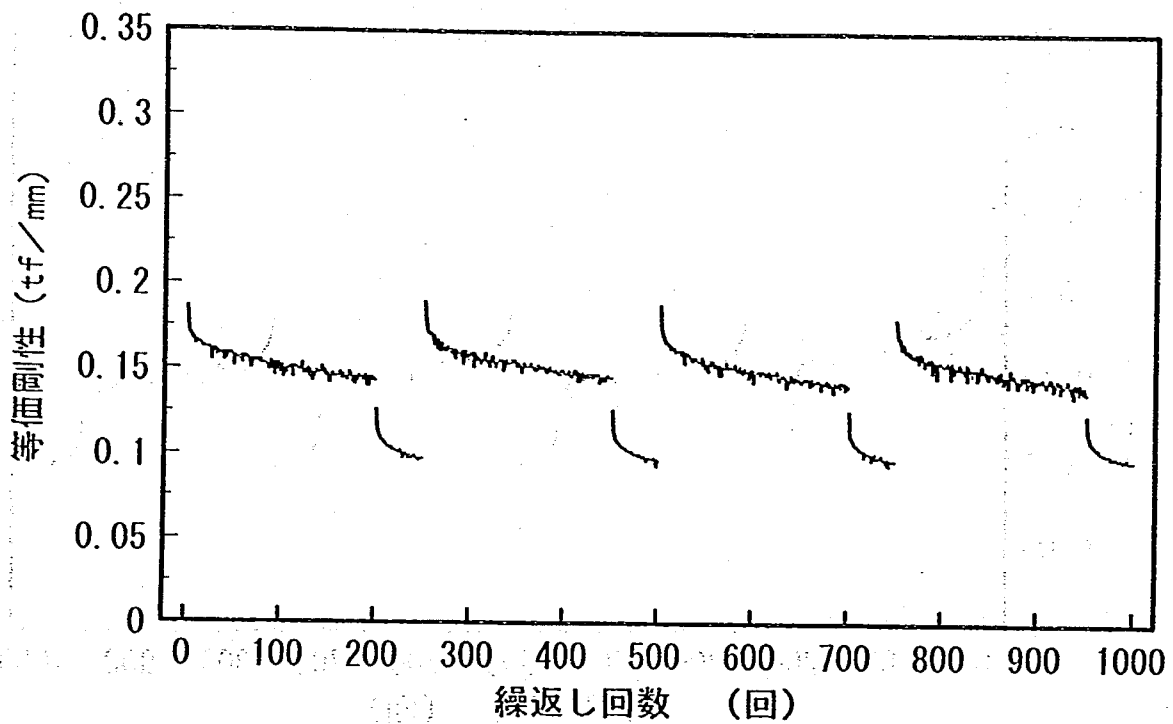


図5. 5-8 (1) 等価剛性の変化 (HDR-06)

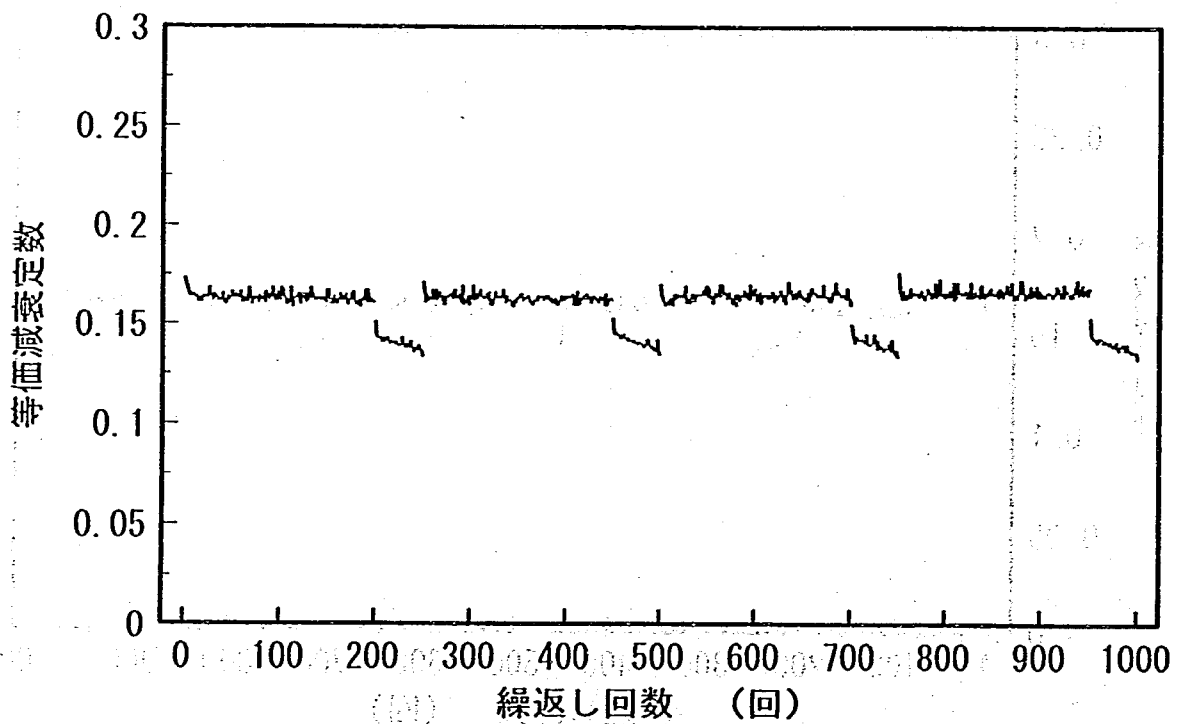


図5. 5-8 (2) 等価減衰定数の変化 (HDR-06)

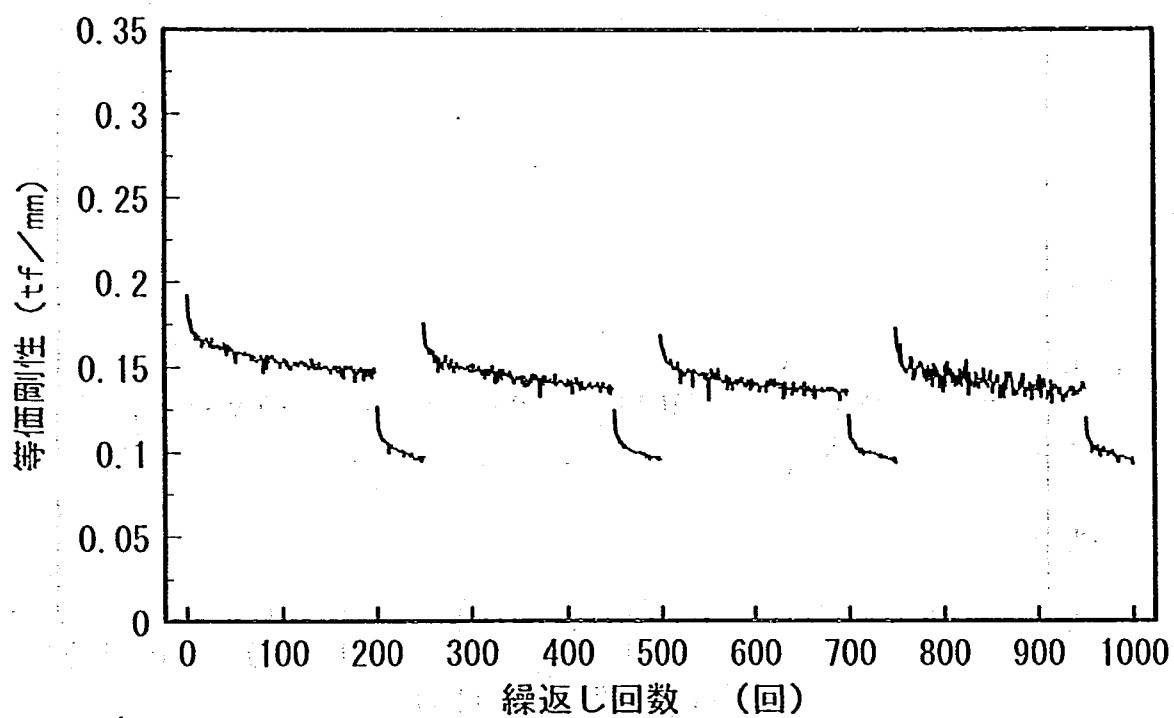


図5. 5-9 (1) 等価剛性の変化 (HDR-07)

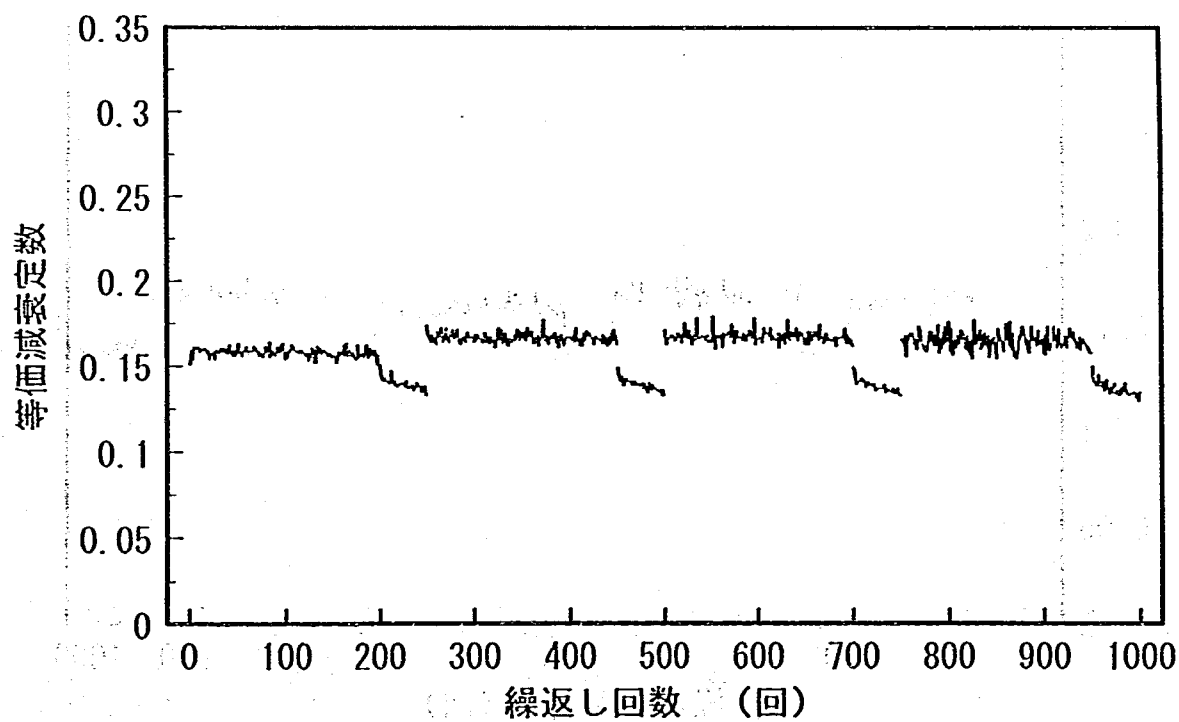


図5. 5-9 (2) 等価減衰定数の変化 (HDR-07)

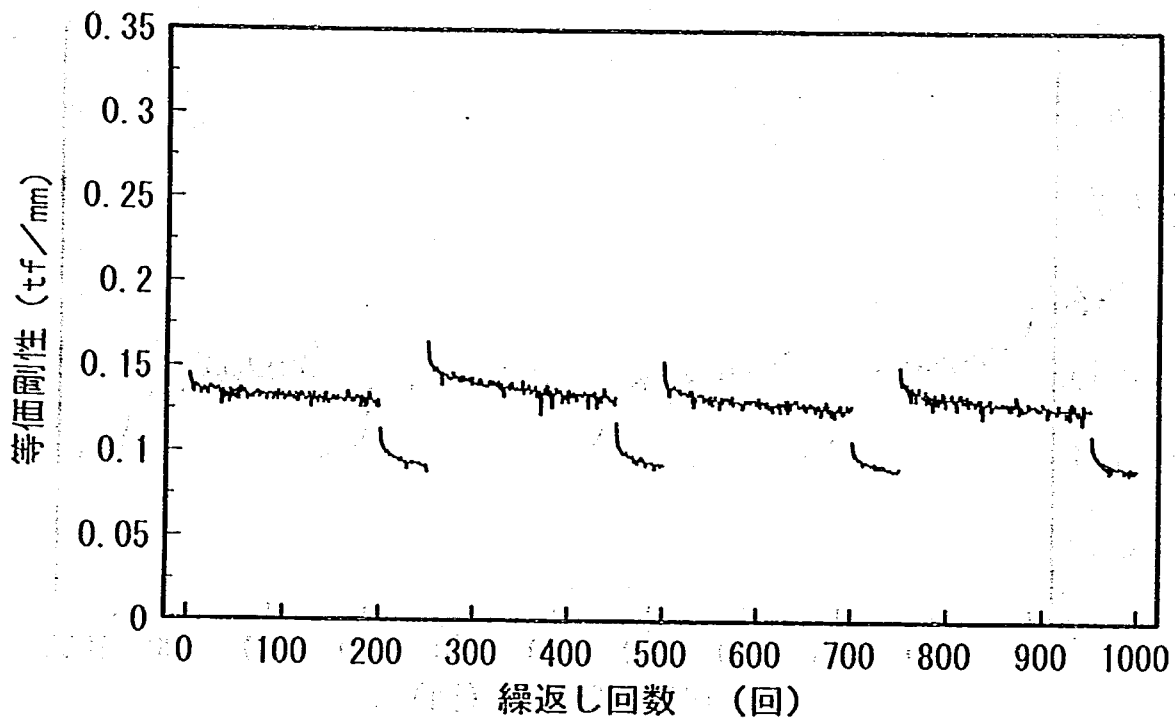


図5. 5-10 (1) 等価剛性の変化 (HDR-08)

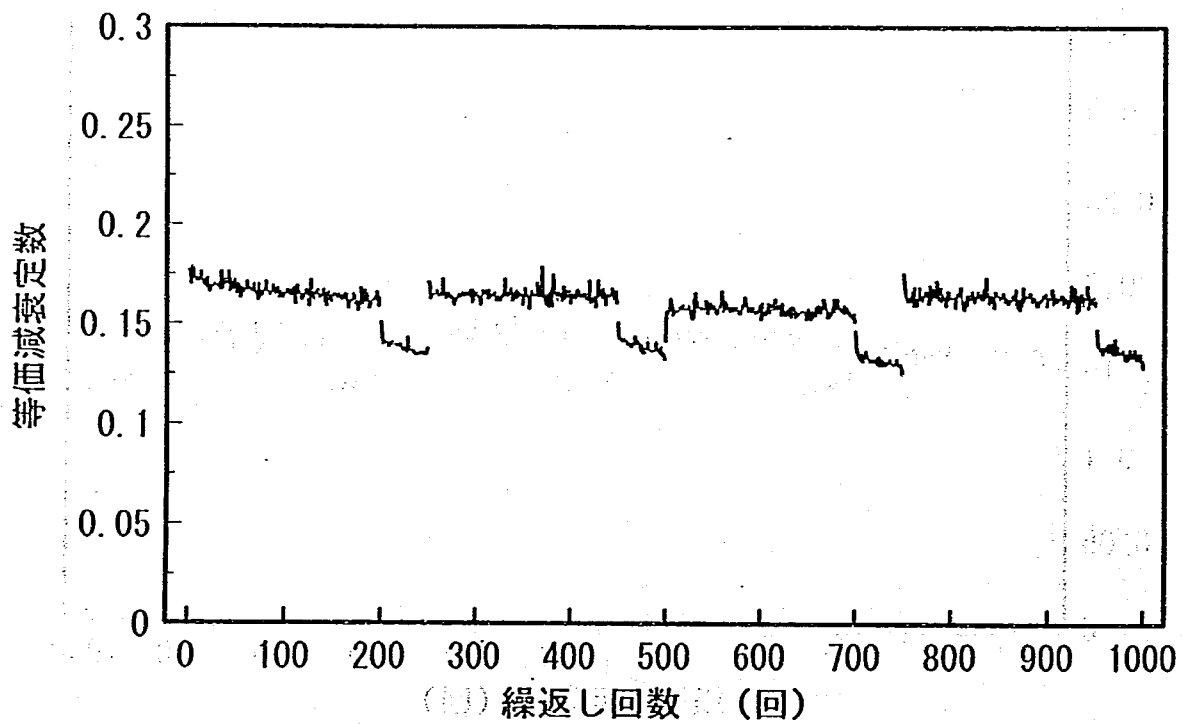


図5. 5-10 (2) 等価減衰定数の変化 (HDR-08)

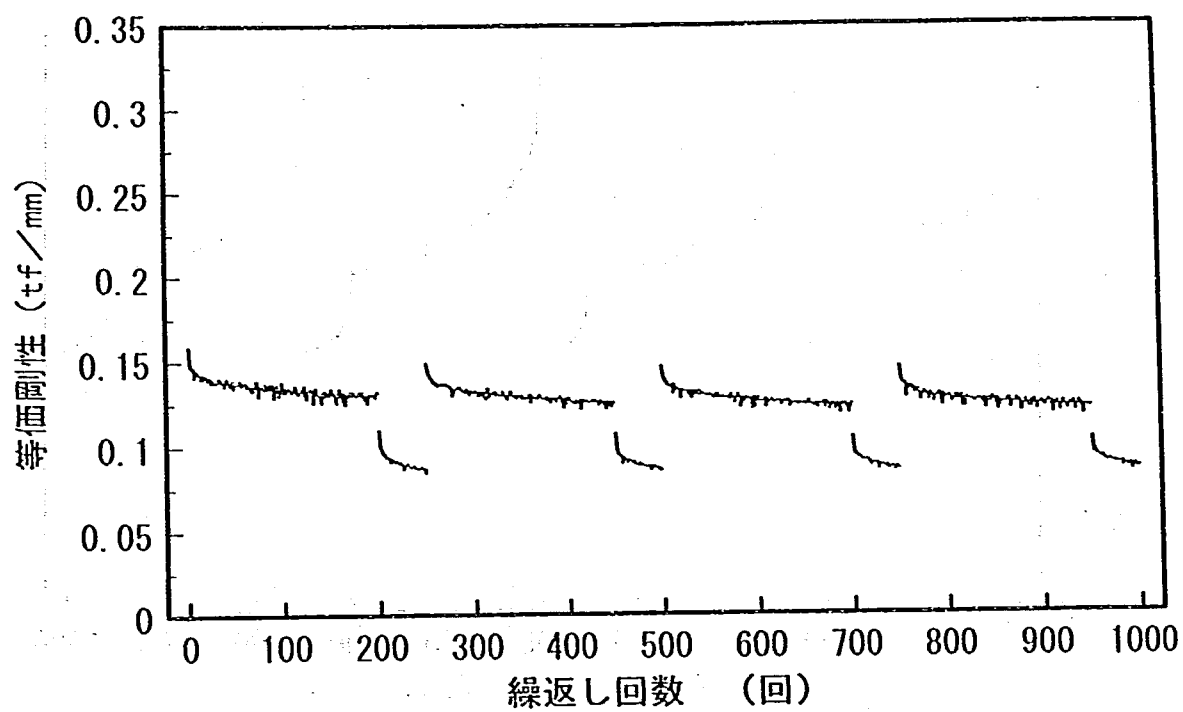


図5. 5-11 (1) 等価剛性の変化 (HDR-09)

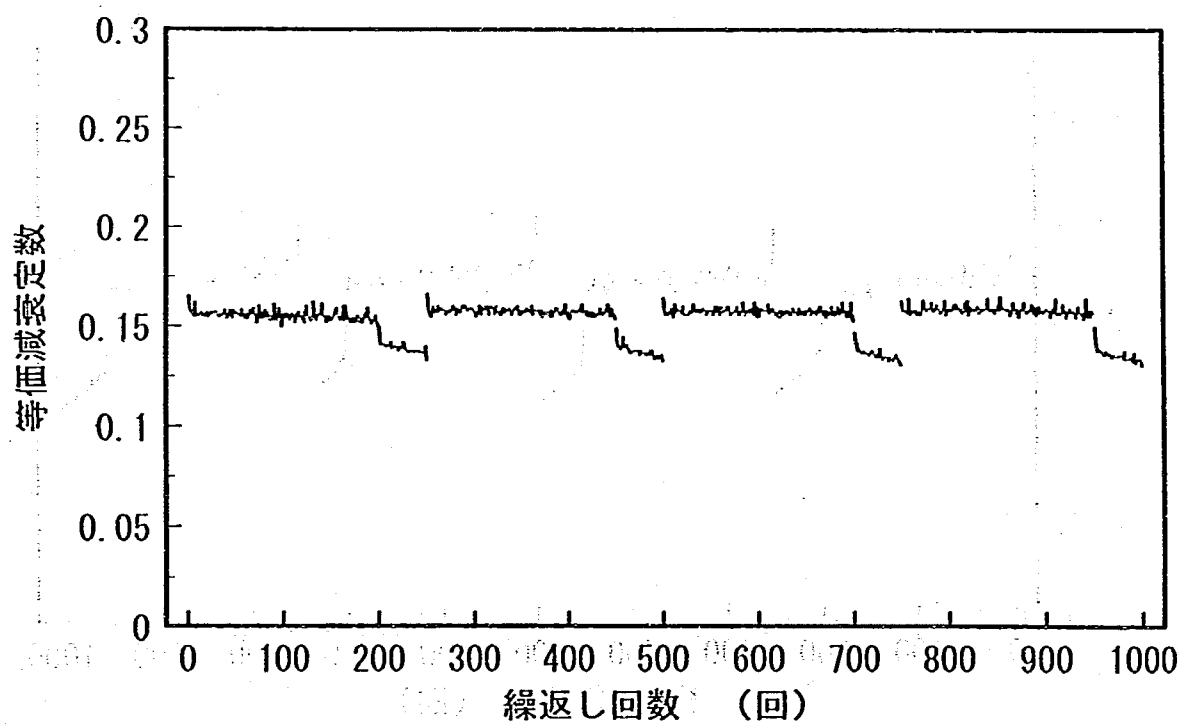


図5. 5-11 (2) 等価減衰定数の変化 (HDR-09)

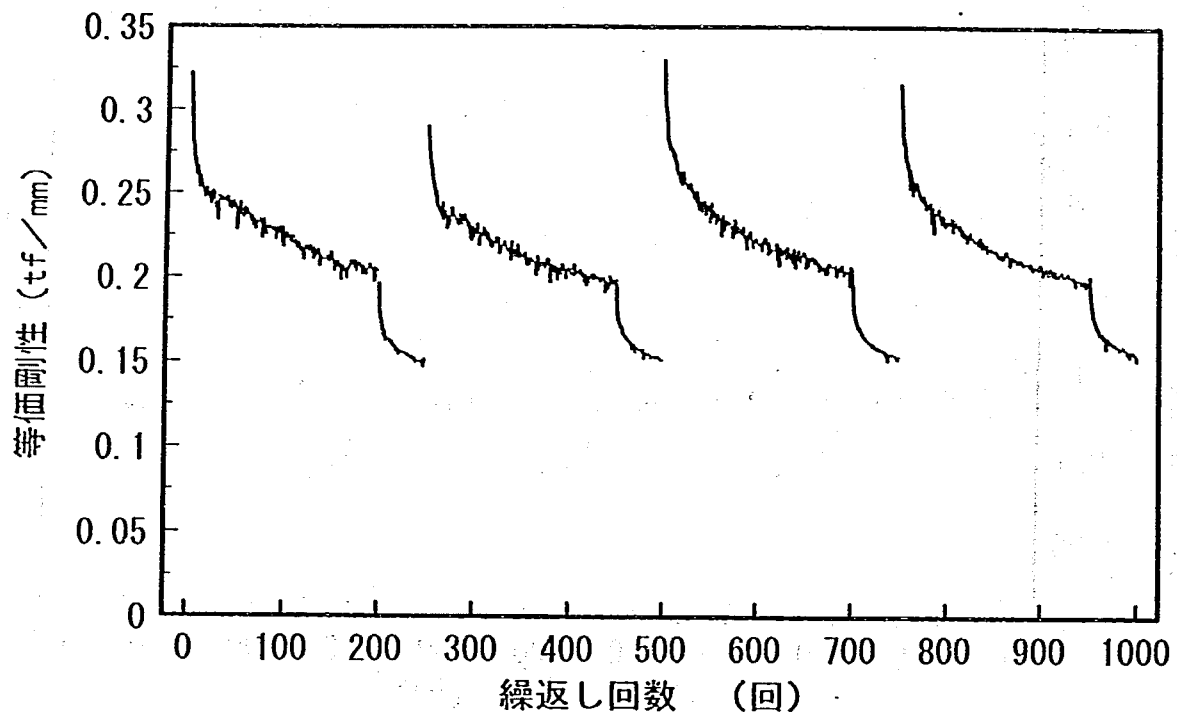


図5. 5-12 (1) 等価剛性の変化 (HDR-14)

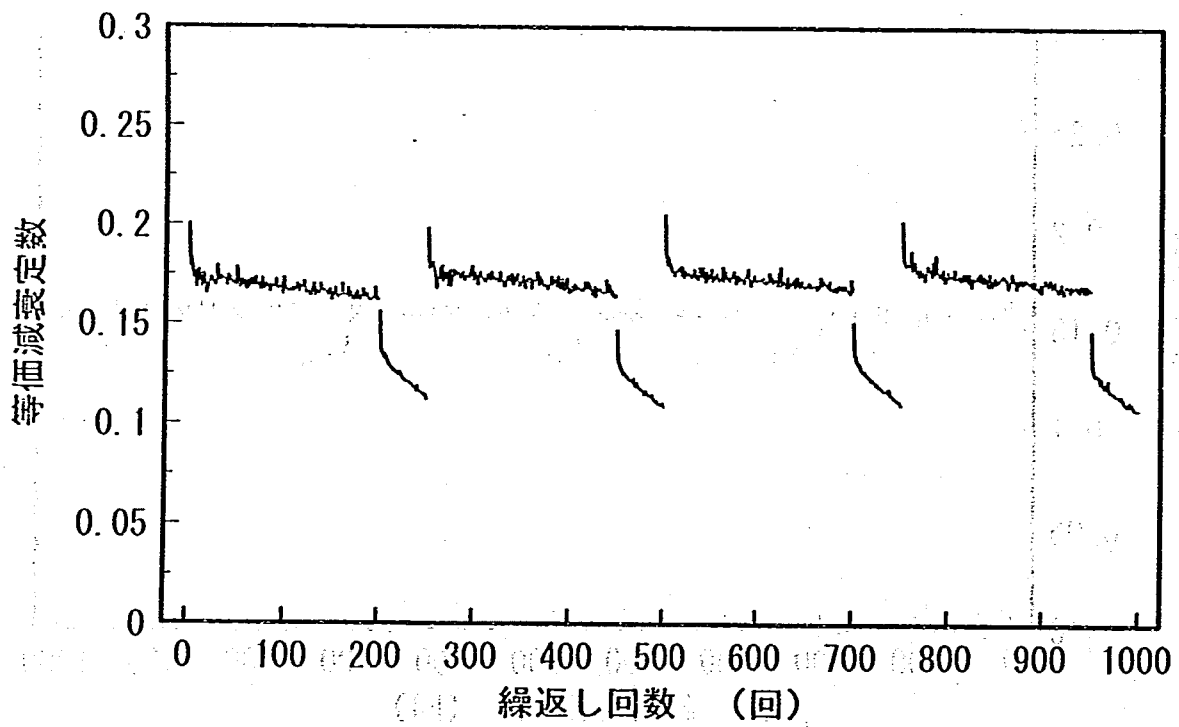


図5. 5-12 (2) 等価減衰定数の変化 (HDR-14)

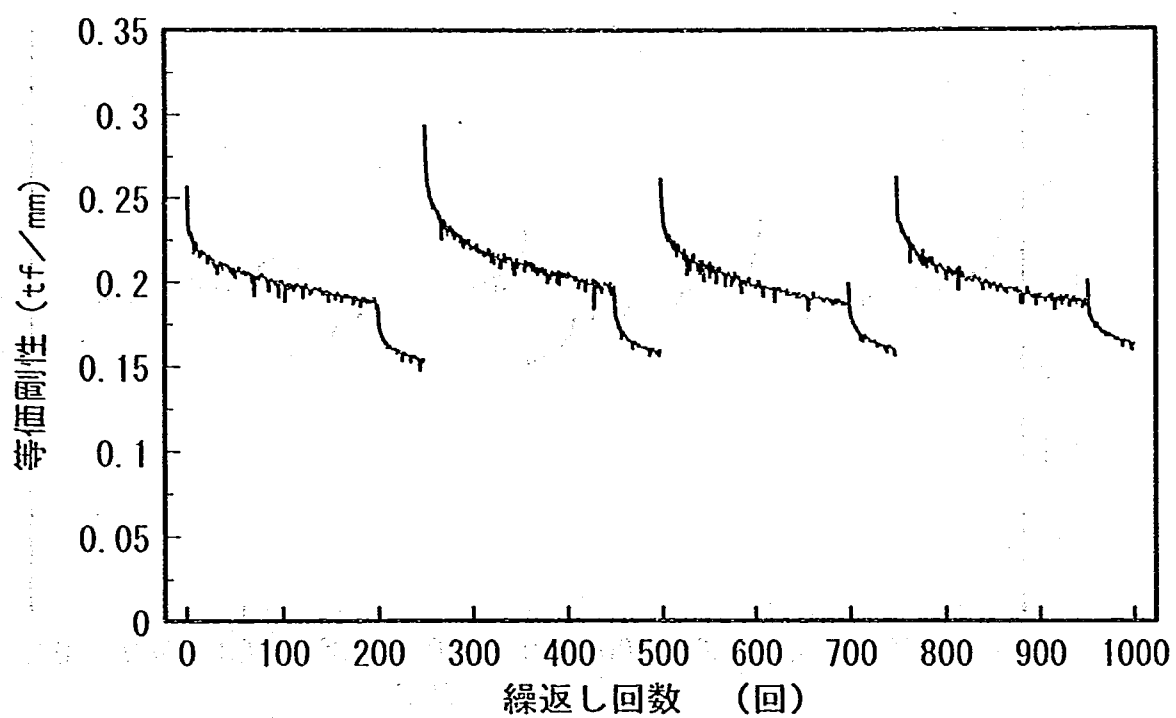


図5. 5-13 (1) 等価剛性の変化 (HDR-15)

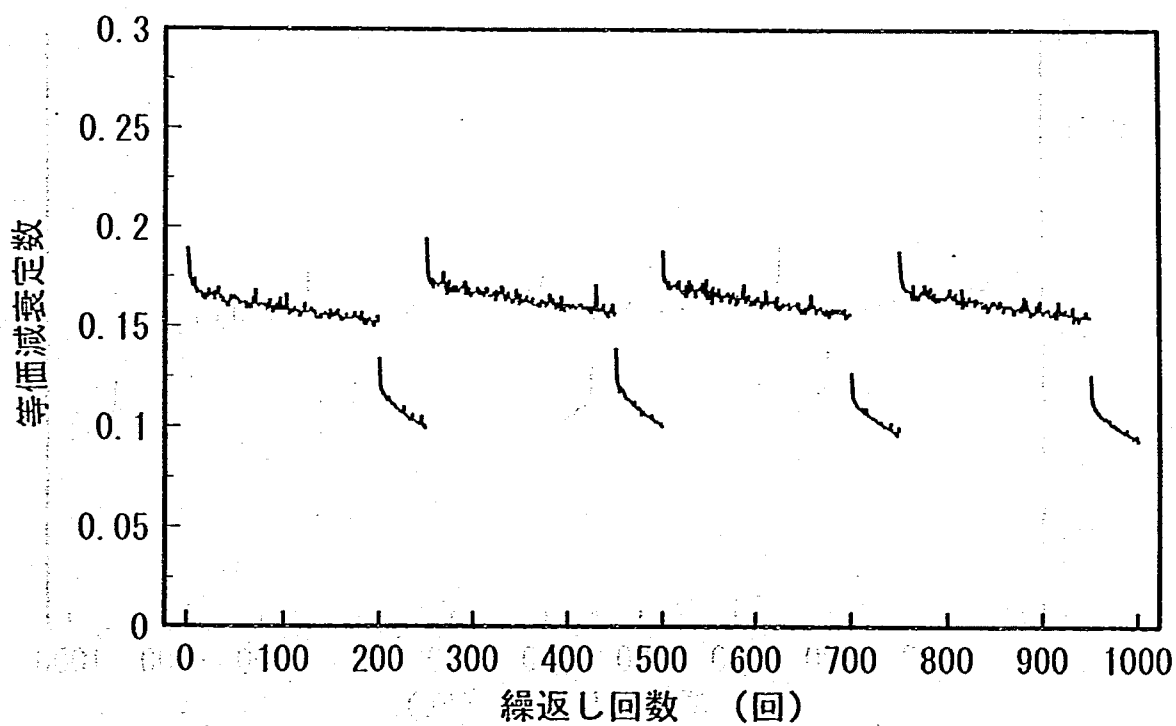


図5. 5-13 (2) 等価減衰定数の変化 (HDR-15)

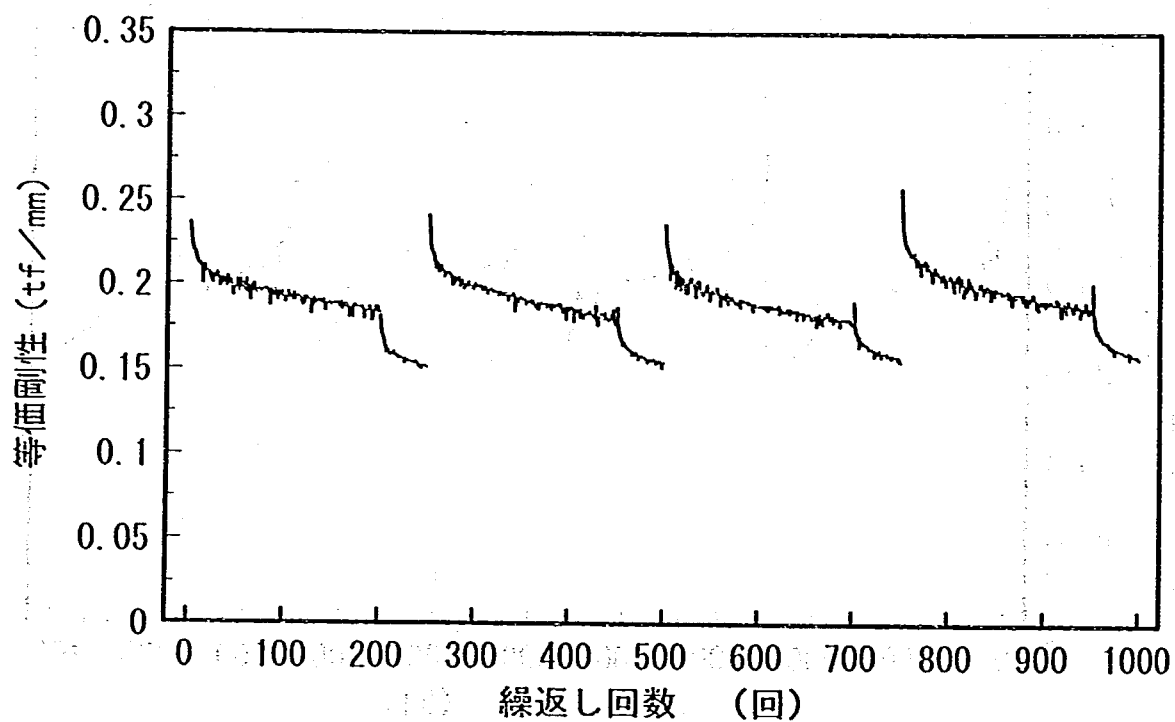


図5. 5-14 (1) 等価剛性の変化 (HDR-16)

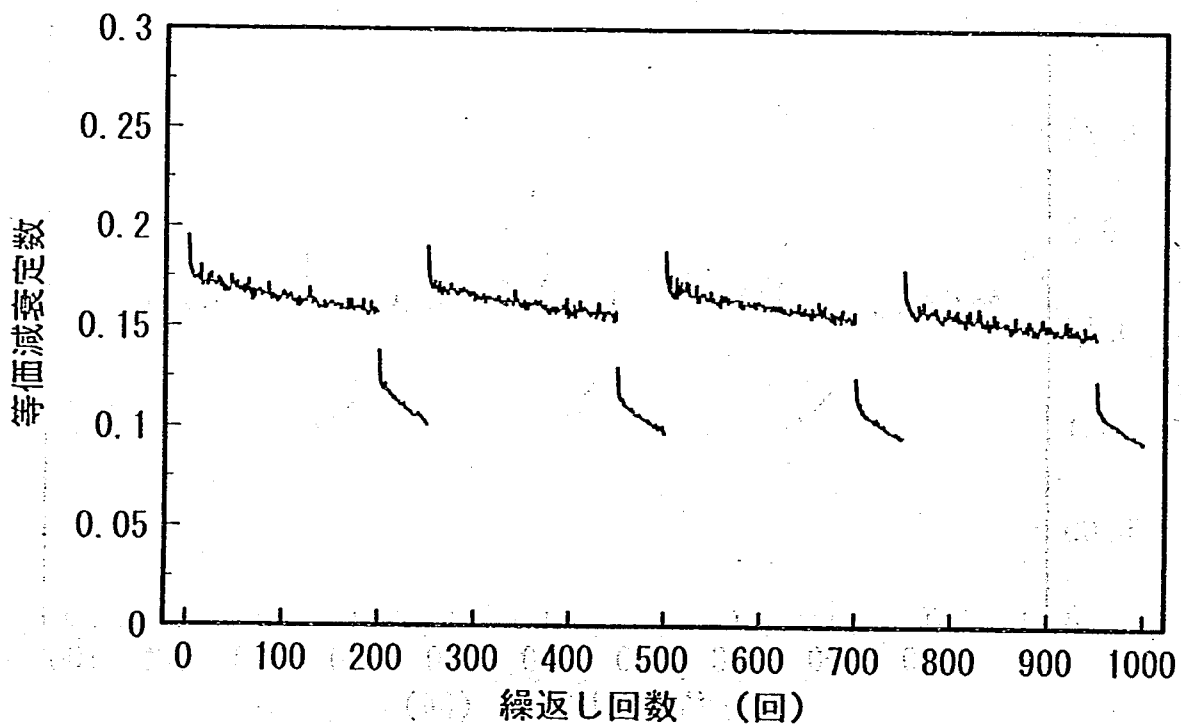


図5. 5-14 (2) 等価減衰定数の変化 (HDR-16)

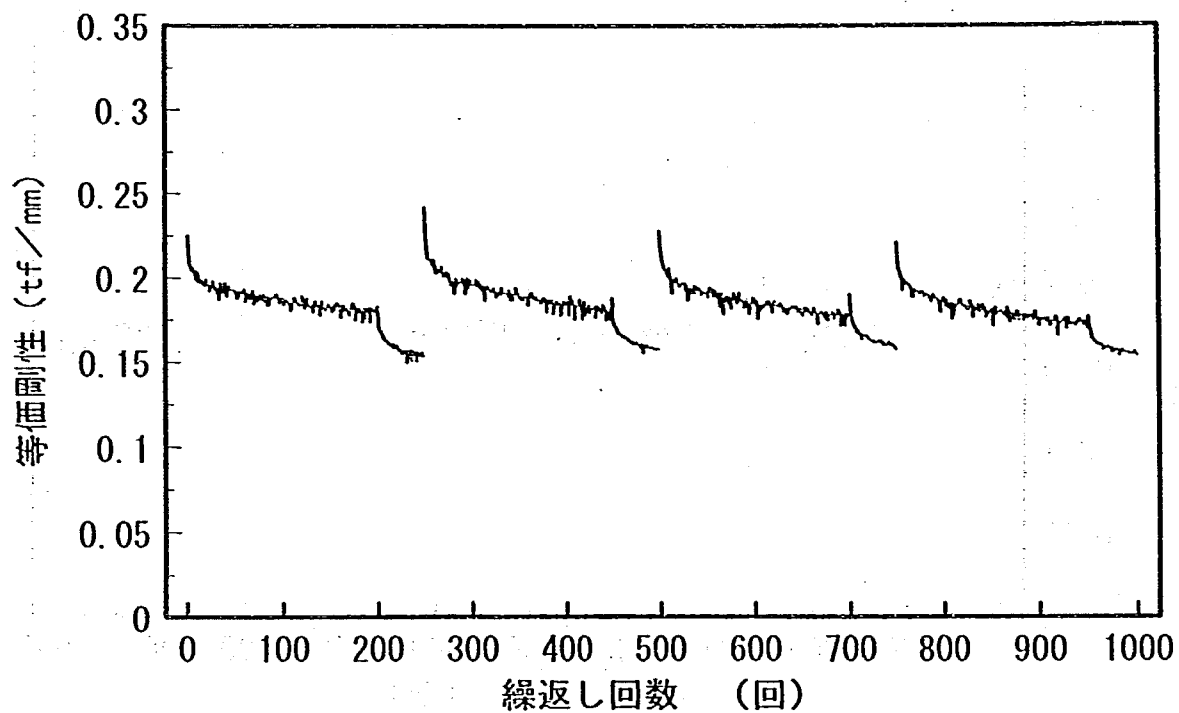


図5. 5-15 (1) 等価剛性の変化 (HDR-17)

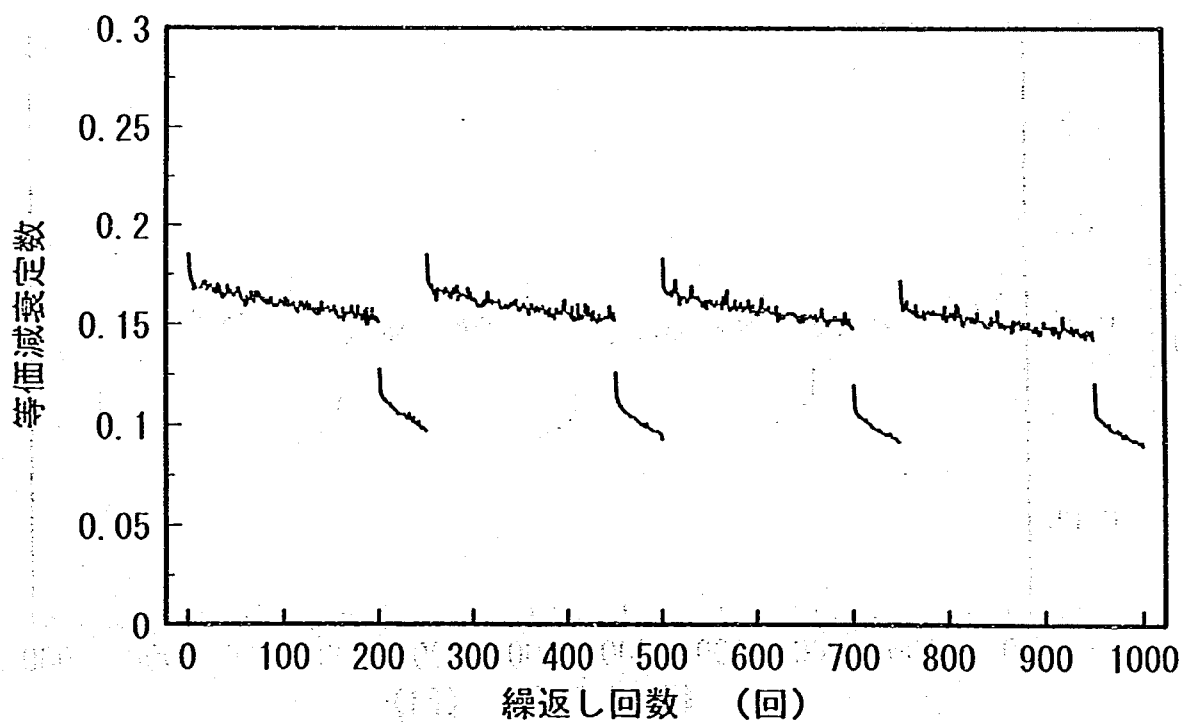


図5. 5-15 (2) 等価減衰定数の変化 (HDR-17)

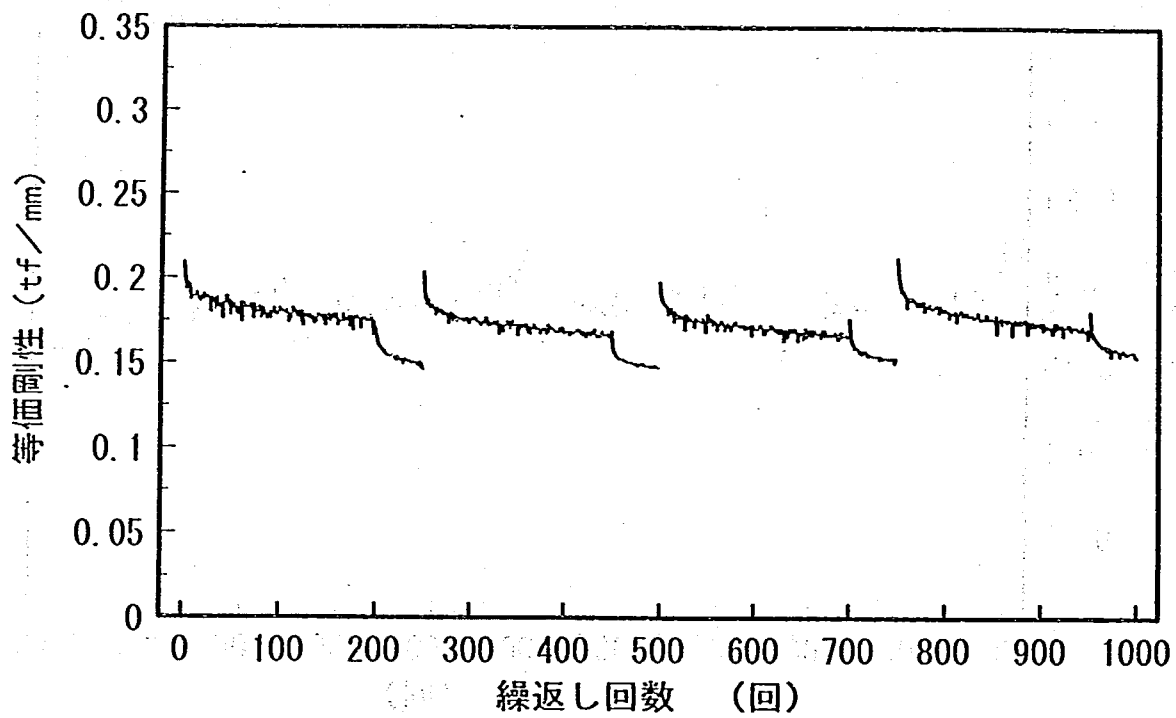


図5. 5-16 (1) 等価剛性の変化 (HDR-18)

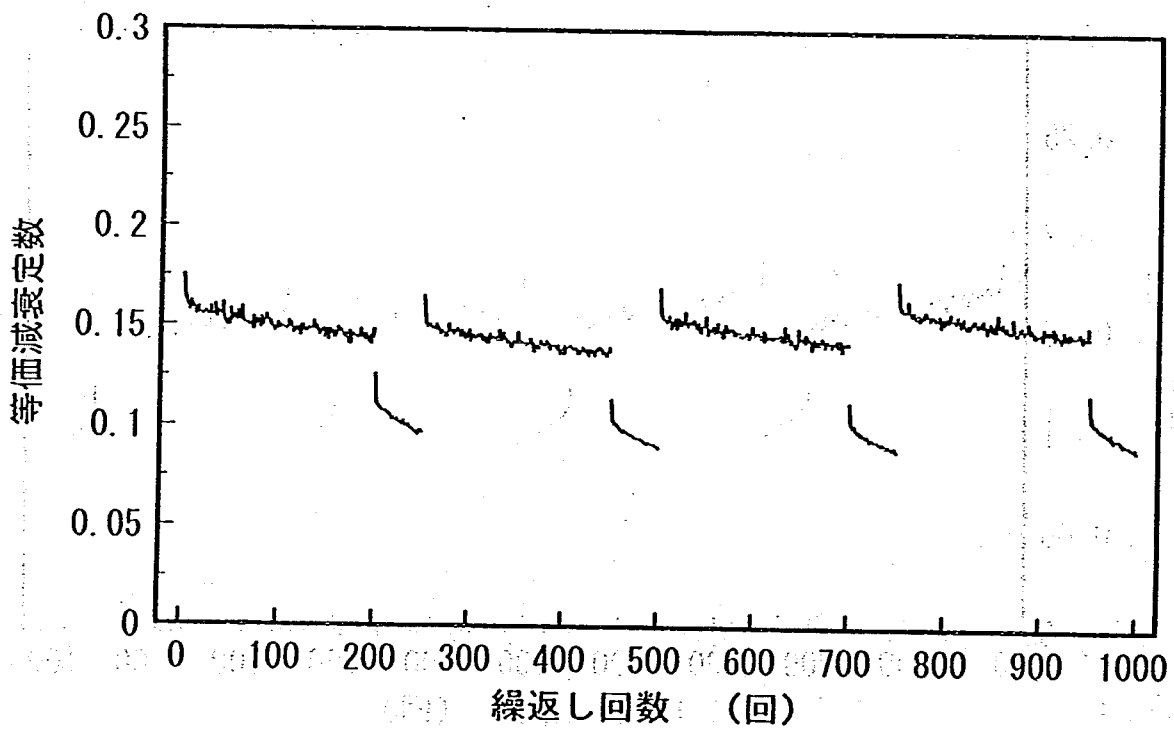


図5. 5-16 (2) 等価減衰定数の変化 (HDR-18)

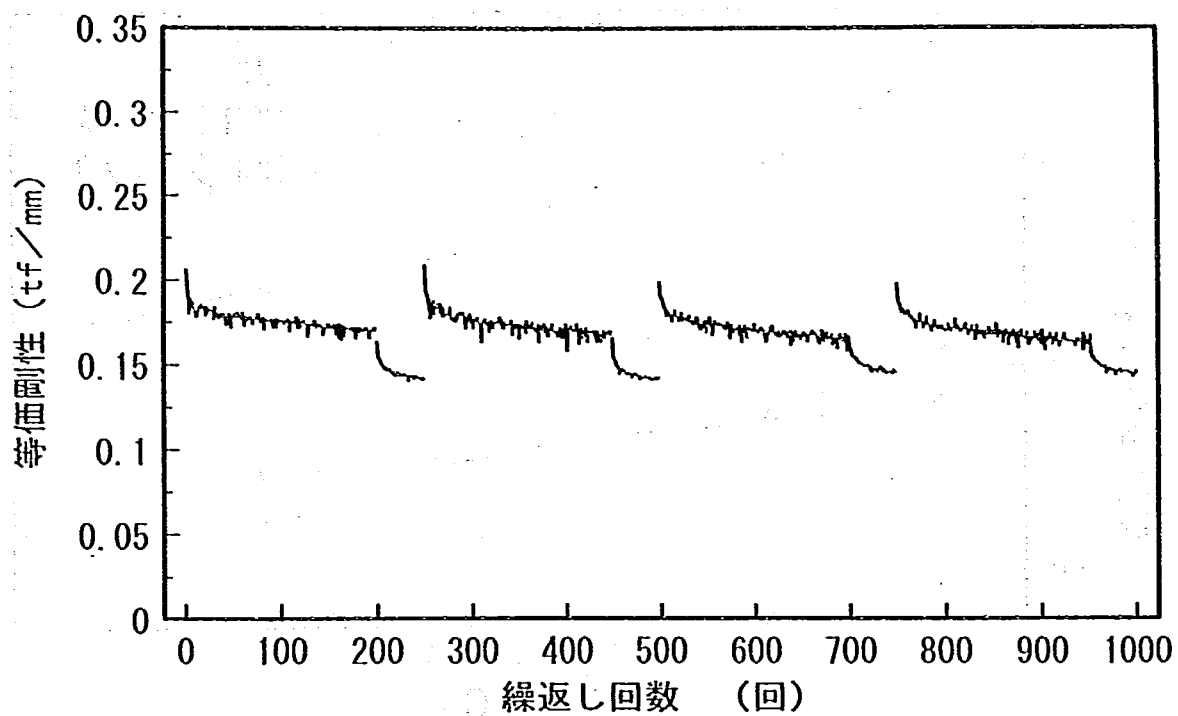


図5. 5-17 (1) 等価剛性の変化 (HDR-19)

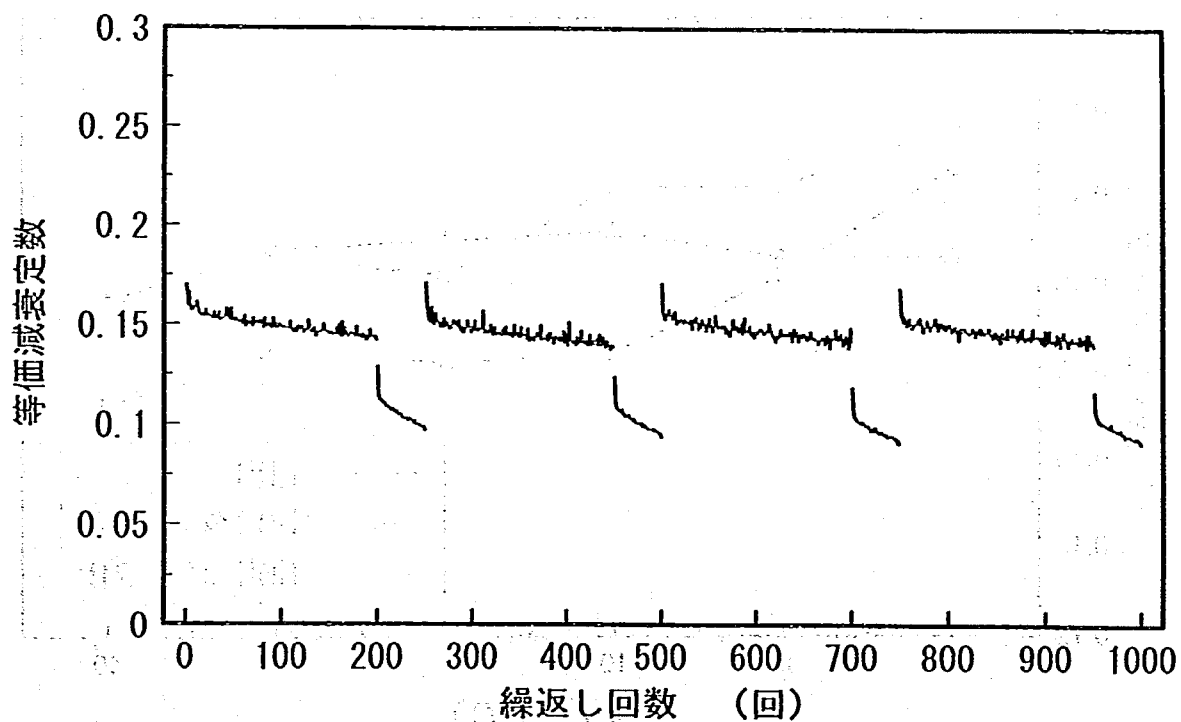


図5. 5-17 (2) 等価減衰定数の変化 (HDR-19)

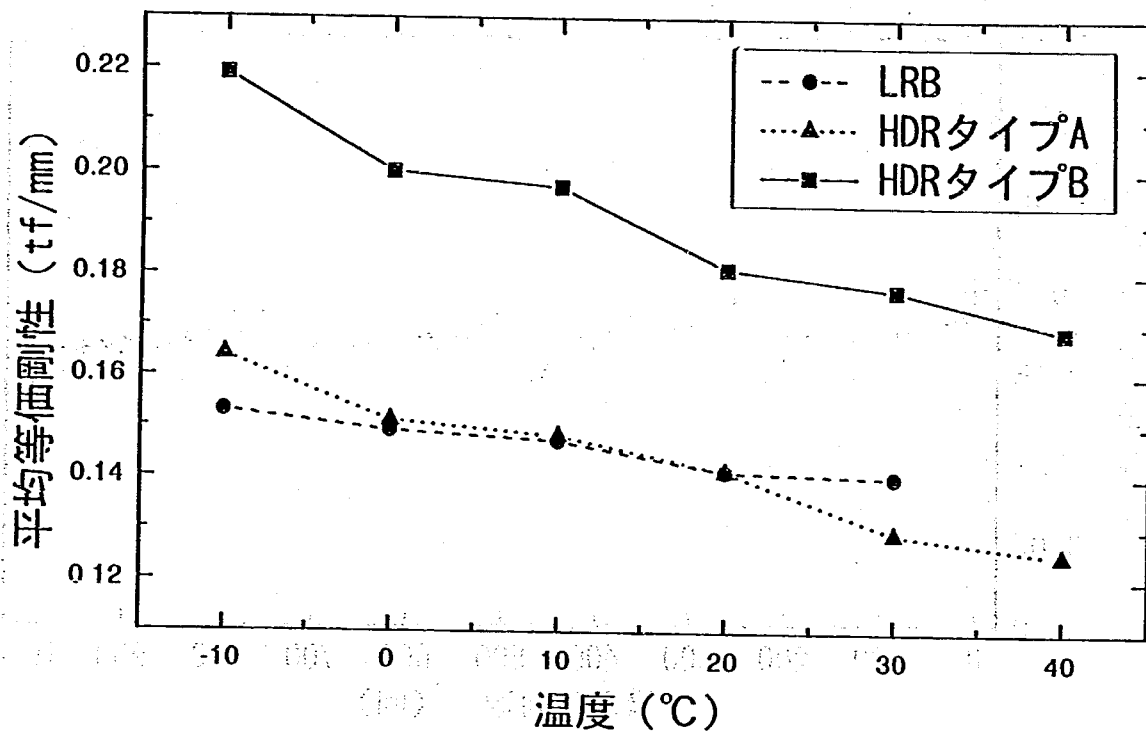


図5. 5-18(1) 温度の違いによる疲労試験における平均等価剛性

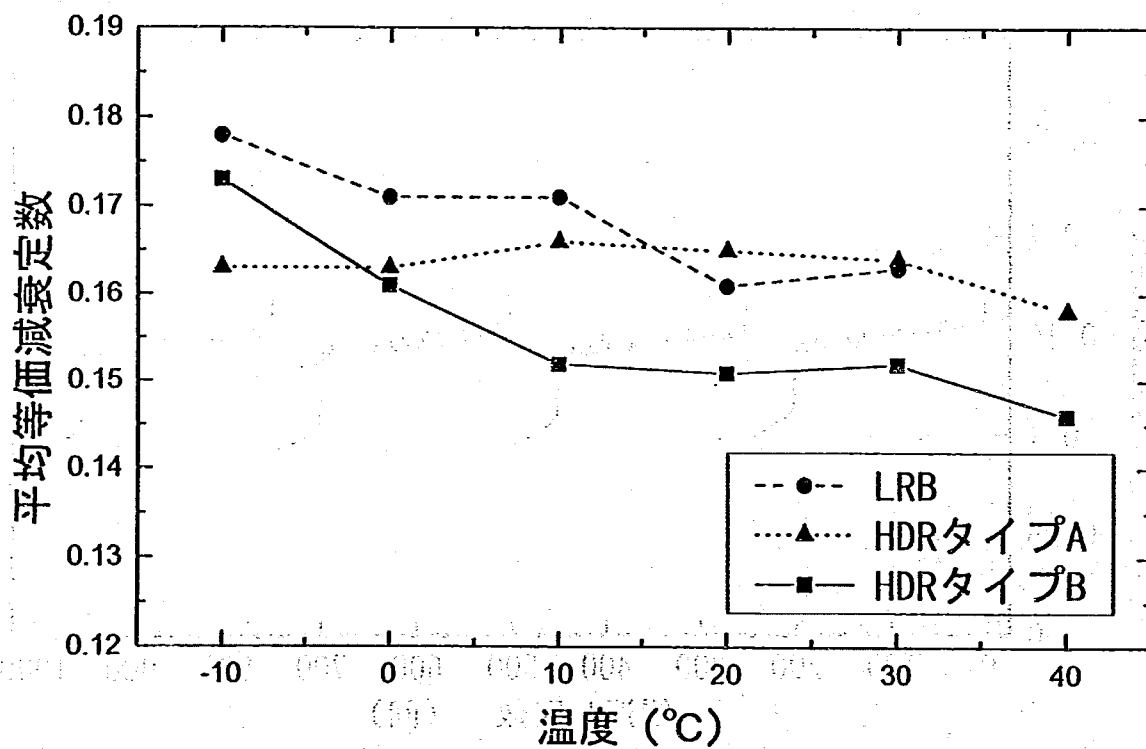


図5. 5-18(2) 温度の違いによる疲労試験における平均等価減衰定数の変化

試験温度が高くなると、各供試体とも、ほぼ一定の割合で、等価剛性および等価減衰定数が低下する。

等価剛性は、 $-10^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ においては、LRBでは8%、HDRタイプAでは16%、HDRタイプBでは21%程度増加する。 $20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ （LRBでは $+30^{\circ}\text{C}$ ）においては、LRBでは1%、HDRタイプAでは12%、HDRタイプBでは7%程度低下する。

等価減衰定数は、 $-10^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ においては、LRBでは11%、HDRタイプAでは1%、HDRタイプBでは15%程度増加する。 $20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ （LRBでは $+30^{\circ}\text{C}$ ）においては、LRBでは1%、HDRタイプAでは4%、HDRタイプBでは、3%程度減少する。

-10°C と 40°C （LRBでは $+30^{\circ}\text{C}$ ）の 20°C に対する変化率は、等価剛性、等価減衰定数とも、式（5-3）および式（5-4）を満足する。

第6章 まとめ

本研究は、鉛プラグ入り積層ゴム支承と高減衰積層ゴム支承(タイプAおよびタイプB)とを対象に、これらの支承の等価剛性および等価減衰定数の載荷振幅による影響、温度依存性および疲労特性を実験的に検討した結果、以下の点が明らかとなった。

- ①載荷振幅が大きくなると、平均等価剛性および平均等価減衰定数は低下する。
- ②載荷振幅200%で50回連続載荷実験を行ったが、免震効果に影響を及ぼすような構造的な損傷はみられなかった。
- ③温度依存性試験においては、試験温度が高くなると、等価剛性および等価減衰定数は低下し、変化率は20℃と比較して最大18%程度である。
- ④第2回目載荷における平均等価剛性および平均等価減衰定数と基本ヒステリシスとの違いは、最大15%程度である。
- ⑤疲労実験における①サイクル目と④サイクル目の平均等価剛性および平均等価減衰定数の変化率は、最大18%程度である。
- ⑥疲労試験においても、試験温度が高くなると、等価剛性および等価減衰定数は低下するが、変化率は20℃と比較して最大20%程度である。

謝辞

免震装置に用いたゴムの引張試験（付属資料）に際しては、兵庫県立工業技術センターの多大な協力を賜った。ここに記して厚く謝意を表する次第である。

参考文献

- 1)北海道開発局開発土木研究所構造研究室：低温域における免震支承の実験的研究報告書、構造研究室資料第14号、平成3年3月
- 2)(財)日本規格協会：加硫ゴムの引張試験方法 JIS K 6251-1993、平成5年2月
- 3)川島一彦他：道路橋の免震構造システムの開発に関する共同研究報告書(その1)、共同研究報告書第44号、平成2年3月
- 4)川島一彦他：道路橋の免震構造システムの開発に関する共同研究報告書(その2)、共同研究報告書第60号、平成3年7月
- 5)川島一彦他：道路橋の免震構造システムの開発に関する共同研究報告書(その3)、共同研究報告書第75号、平成4年10月
- 6)建設省：道路橋の免震構造システムの開発、土木研究所彙報第60号、平成4年10月
- 7)佐藤貴志、大塚久哲、鈴木基行：免震支承の温度依存性および疲労特性に関する実験的検討、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、平成8年9月

付属資料

免震装置に用いたゴムの引張試験結果

1 目的

免震装置の温度依存性実験を行うにあたり免震支承を構成するゴムの性質を把握する必要がある。そこで3種類の免震支承（LRB、HDR標準タイプおよび改良タイプ）に使用されているそれぞれのゴム（天然ゴム(NR)、高減衰ゴム(KLおよびBT))の破断時伸びや引張応力が、温度変化によってどのように変化するのか調査し、免震支承の温度依存性試験の参考とする。

2 試験場所および試験施設

本材料試験は兵庫県立工業技術センター所有の高延性材料試験機を用いて試験を行った。

3 試験供試体

本試験に用いた供試体は、LRB、HDR標準タイプおよび改良タイプに使用されているゴム（以下NR、KLおよびBTという）を試験用のダンベル状3号形に加工したものである。

4 切断時伸び、引張応力の測定方法および試験結果

3種類の試験片(NR、KLおよびBT)を試験装置に設置し、所定の試験温度(0℃～40℃)内において500mm/minの一定速度で切断に至るまで載荷した。このとき切断時伸び、引張応力等の測定は、試験装置に取り付けられたレーザー式伸び計より測定した。

材料特性値および試験結果を付表1～付表15および付図1～付図15に示す。

なお、免震装置の温度依存性試験と同じ試験温度（-10℃～40℃）で引張試験を行う予定であったが、-10℃においては標線間距離を測定するレーザー式伸び計が十分機能しなかったため、-10℃での試験は行わなかった。

付表1 引張試験結果 (NR、0℃)

載荷破断試験 (0℃) V=500mm/s

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR001	2.10	5.00	10.50	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.693	20.00	0.161
2	200.00	4.556	40.00	0.434
3	300.00	9.394	60.00	0.895
4	400.00	16.619	80.00	1.583
5	500.00	26.354	100.00	2.510
最大荷重点	555.25	33.119	111.05	3.154

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR002	2.03	5.00	10.15	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.626	20.00	0.160
2	200.00	4.356	40.00	0.429
3	300.00	9.474	60.00	0.933
4	400.00	17.503	80.00	1.724
5	—	—	—	—
最大荷重点	494.25	27.759	98.85	2.735

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR003	2.11	5.00	10.55	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.726	20.00	0.164
2	200.00	4.556	40.00	0.432
3	300.00	9.715	60.00	0.921
4	400.00	17.543	80.00	1.663
5	500.00	28.532	100.00	2.704
最大荷重点	517.50	30.068	103.50	2.850

付表2 引張試験結果 (NR、10℃)

載荷破断試験 (10℃) V=500mm/s

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR101	2.00	5.00	10.00	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.445	20.00	0.145
2	200.00	3.553	40.00	0.355
3	300.00	7.206	60.00	0.721
4	400.00	12.806	80.00	1.281
5	500.00	20.634	100.00	2.063
最大荷重点	580.50	28.623	116.10	2.862

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR102	2.00	5.00	10.10	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.385	20.00	0.137
2	200.00	3.372	40.00	0.334
3	300.00	6.784	60.00	0.672
4	400.00	12.183	80.00	1.206
5	500.00	19.610	100.00	1.942
最大荷重点	586.75	27.539	117.35	2.727

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR103	2.20	5.00	11.00	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.706	20.00	0.155
2	200.00	4.496	40.00	0.409
3	300.00	9.927	60.00	0.843
4	400.00	16.318	80.00	1.483
5	500.00	26.411	100.00	2.310
最大荷重点	562.25	32.296	112.45	2.936

付表3 引張試験結果 (NR、20℃)

載荷破断試験 (20℃) V=500mm/s

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR201	2.10	5.00	10.50	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.488	20.00	0.1417
2	200.00	3.438	40.00	0.3274
3	300.00	6.956	60.00	0.6625
4	400.00	12.444	80.00	1.1851
5	500.00	20.546	100.00	1.9567
最大荷重点	502.00	20.868	100.40	1.9874

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR202	2.01	5.00	10.05	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.417	20.00	0.1410
2	200.00	3.217	40.00	0.3201
3	300.00	6.454	60.00	0.6421
4	400.00	11.379	80.00	1.1322
5	500.00	18.797	100.00	1.8703
最大荷重点	524.50	20.808	104.90	2.0704

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR203	1.98	5.00	9.90	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.387	20.00	0.1401
2	200.00	3.187	40.00	0.3219
3	300.00	6.333	60.00	0.6370
4	400.00	11.137	80.00	1.1249
5	500.00	18.094	100.00	1.8276
最大荷重点	514.75	19.099	102.95	1.9291

付表4 引張試験結果 (NR、30℃)

載荷破断試験 (30℃) V=500mm/s

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR301	2.02	5.00	10.10	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.345	20.00	0.133
2	200.00	3.091	40.00	0.306
3	300.00	6.142	60.00	0.608
4	400.00	10.778	80.00	1.067
5	500.00	18.024	100.00	1.785
最大荷重点	551.50	21.738	110.30	2.152

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR302	2.11	5.00	10.55	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.407	20.00	0.133
2	200.00	3.115	40.00	0.295
3	300.00	6.109	60.00	0.579
4	400.00	10.530	80.00	0.998
5	500.00	17.082	100.00	1.619
最大荷重点	548.00	21.041	109.60	1.994

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR303	2.13	5.00	10.65	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.407	20.00	0.132
2	200.00	3.135	40.00	0.294
3	300.00	6.069	60.00	0.570
4	400.00	10.450	80.00	0.981
5	500.00	16.901	100.00	1.587
最大荷重点	588.75	24.196	117.75	2.272

付表5 引張試験結果 (NR、40℃)

載荷破断試験 (40℃) V=500mm/s

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR401	2.02	5.00	10.10	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.311	20.00	0.130
2	200.00	2.890	40.00	0.286
3	300.00	5.610	60.00	0.555
4	400.00	9.534	80.00	0.944
5	500.00	15.395	100.00	1.524
最大荷重点	603.75	23.745	120.75	2.351

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR402	2.06	5.00	10.30	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.325	20.00	0.129
2	200.00	2.931	40.00	0.285
3	300.00	5.600	60.00	0.544
4	400.00	9.474	80.00	0.920
5	500.00	15.224	100.00	1.478
最大荷重点	598.50	22.942	119.70	2.273

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
NR403	2.06	5.00	10.30	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.365	20.00	0.133
2	200.00	3.011	40.00	0.292
3	300.00	5.701	60.00	0.553
4	400.00	9.675	80.00	0.939
5	500.00	15.556	100.00	1.510
最大荷重点	601.00	23.665	120.20	2.298

付表6 引張試験結果 (KL、0℃)

載荷破断試験 (0℃) V=500mm/s

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL001	2.34	5.00	11.70	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	2.288	20.00	0.196
2	200.00	3.663	40.00	0.313
3	300.00	5.620	60.00	0.480
4	400.00	7.788	80.00	0.666
5	500.00	9.926	100.00	0.848
最大荷重点	720.75	14.913	144.15	1.275
破断点	730.00	7.648	146.00	0.654

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL002	2.33	5.00	11.65	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	2.369	20.00	0.203
2	200.00	4.095	40.00	0.351
3	300.00	6.383	60.00	0.548
4	400.00	8.832	80.00	0.758
5	500.00	11.300	100.00	0.970
最大荷重点	674.00	15.094	134.80	1.296
破断点	687.50	14.010	137.50	1.203

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL003	2.33	5.00	11.65	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	2.509	20.00	0.215
2	200.00	4.175	40.00	0.358
3	300.00	6.544	60.00	0.562
4	400.00	9.093	80.00	0.780
5	500.00	11.682	100.00	1.003
最大荷重点	644.25	14.933	128.85	1.282
破断点	656.50	5.620	131.30	0.482

付表7 引張試験結果 (KL、10℃)

載荷破断試験 (10℃) V=500mm/s

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL101	2.39	5.00	11.95	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	2.108	20.00	0.176
2	200.00	3.473	40.00	0.291
3	300.00	5.520	60.00	0.462
4	400.00	7.838	80.00	0.660
5	500.00	10.317	100.00	0.863
最大荷重点	642.00	13.528	128.40	1.132
破断点	655.50	11.260	131.10	0.942

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL102	2.31	5.00	11.55	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	2.108	20.00	0.182
2	200.00	3.553	40.00	0.308
3	300.00	5.602	60.00	0.487
4	400.00	7.868	80.00	0.681
5	500.00	10.096	100.00	0.874
最大荷重点	659.50	13.428	131.90	1.163
破断点	672.00	5.680	134.40	0.492

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL103	2.34	5.00	11.70	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	2.077	20.00	0.178
2	200.00	3.493	40.00	0.299
3	300.00	5.550	60.00	0.474
4	400.00	7.808	80.00	0.667
5	500.00	10.176	100.00	0.870
最大荷重点	648.25	13.287	129.65	1.136
破断点	652.50	11.521	130.50	0.985

付表8 引張試験結果 (KL、20℃)

載荷破断試験 (20℃) V=500mm/s

供試体番号	厚さ (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL201	2.20	5.00	11.00	
中間荷重	伸び (%)	引張力 (kgf)	標線間距離 (mm)	引張応力 (kgf/mm ²)
1	100.00	1.850	20.00	0.168
2	200.00	2.915	40.00	0.265
3	300.00	4.564	60.00	0.415
4	400.00	6.474	80.00	0.589
5	500.00	8.444	100.00	0.768
最大荷重点	725.75	12.585	145.15	1.144
破断点	747.50	7.861	149.50	0.715

供試体番号	厚さ (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL202	2.28	5.00	11.40	
中間荷重	伸び (%)	引張力 (kgf)	標線間距離 (mm)	引張応力 (kgf/mm ²)
1	100.00	1.958	20.00	0.172
2	200.00	3.120	40.00	0.274
3	300.00	4.865	60.00	0.427
4	400.00	6.803	80.00	0.597
5	500.00	8.894	100.00	0.780
最大荷重点	708.25	12.497	141.65	1.096
破断点	712.00	10.687	142.40	0.937

供試体番号	厚さ (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL203	2.26	5.00	11.30	
中間荷重	伸び (%)	引張力 (kgf)	標線間距離 (mm)	引張応力 (kgf/mm ²)
1	100.00	1.962	20.00	0.174
2	200.00	3.124	40.00	0.276
3	300.00	4.801	60.00	0.425
4	400.00	6.723	80.00	0.595
5	500.00	8.685	100.00	0.769
最大荷重点	698.50	12.151	139.70	1.075
破断点	705.00	9.272	141.00	0.321

付表9 引張試験結果 (KL、30℃)

載荷破断試験 (30℃) V=500mm/s

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL301	2.22	5.00	11.10	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.716	20.00	0.155
2	200.00	2.730	40.00	0.246
3	300.00	4.235	60.00	0.382
4	400.00	5.982	80.00	0.539
5	500.00	7.778	100.00	0.701
最大荷重点	678.50	10.999	135.70	0.991
破断点	699.00	9.113	139.80	0.821

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL302	2.23	5.00	11.15	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.756	20.00	0.158
2	200.00	2.931	40.00	0.263
3	300.00	4.556	60.00	0.409
4	400.00	6.393	80.00	0.573
5	500.00	8.290	100.00	0.743
最大荷重点	669.25	11.300	133.85	1.013
破断点	680.50	8.410	136.10	0.754

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL303	2.39	5.00	11.95	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.827	20.00	0.153
2	200.00	3.011	40.00	0.251
3	300.00	4.717	60.00	0.395
4	400.00	6.644	80.00	0.556
5	500.00	8.651	100.00	0.724
最大荷重点	710.50	12.344	142.10	1.033
破断点	723.00	7.246	144.60	0.606

付表 10 引張試験結果 (KL、40℃)

載荷破断試験 (40℃) V=500mm/s

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL401	2.34	5.00	11.70	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.616	20.00	0.138
2	200.00	2.589	40.00	0.221
3	300.00	4.014	60.00	0.343
4	400.00	5.660	80.00	0.484
5	500.00	7.367	100.00	0.630
最大荷重点	713.00	10.839	142.60	0.926
破断点	732.50	3.653	146.50	0.312

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL402	2.33	5.00	11.65	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.626	20.00	0.140
2	200.00	2.569	40.00	0.221
3	300.00	3.974	60.00	0.341
4	400.00	5.600	80.00	0.481
5	500.00	7.286	100.00	0.625
最大荷重点	711.50	10.758	142.30	0.923
破断点	726.50	4.155	145.30	0.357

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
KL403	2.32	5.00	11.60	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	1.646	20.00	0.142
2	200.00	2.650	40.00	0.228
3	300.00	4.135	60.00	0.356
4	400.00	5.781	80.00	0.498
5	500.00	7.567	100.00	0.652
最大荷重点	660.75	10.277	132.15	0.886
破断点	677.00	5.038	135.40	0.434

付表 1 1 引張試験結果 (B T、0°C)

載荷破断試験 (0°C) V=500mm/s

供試体番号	厚さ (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm ²)	備 考
B T 0 0 1	2.19	5.00	10.95	
中間荷重	伸び (%)	引張力 (kgf)	標線間距離 (mm)	引張応力 (kgf/mm ²)
1	100.00	2.810	20.00	0.257
2	200.00	5.982	40.00	0.546
3	300.00	11.019	60.00	1.006
4	400.00	16.211	80.00	1.480
5	500.00	20.734	100.00	1.894
最大荷重点	591.25	24.367	118.25	2.225
破 断 点	593.00	17.623	118.60	1.609

供試体番号	厚さ (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm ²)	備 考
B T 0 0 2	2.26	5.00	11.30	
中間荷重	伸び (%)	引張力 (kgf)	標線間距離 (mm)	引張応力 (kgf/mm ²)
1	100.00	2.991	20.00	0.265
2	200.00	6.624	40.00	0.586
3	300.00	12.023	60.00	1.064
4	400.00	17.292	80.00	1.530
5	500.00	21.818	100.00	1.931
最大荷重点	611.00	25.752	122.20	2.279
破 断 点	619.00	14.150	123.80	1.252

供試体番号	厚さ (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm ²)	備 考
B T 0 0 3	2.26	5.00	11.30	
中間荷重	伸び (%)	引張力 (kgf)	標線間距離 (mm)	引張応力 (kgf/mm ²)
1	100.00	3.061	20.00	0.271
2	200.00	6.523	40.00	0.577
3	300.00	11.762	60.00	1.041
4	400.00	16.941	80.00	1.450
5	500.00	21.356	100.00	1.890
最大荷重点	571.25	24.146	114.25	2.137
破 断 点	572.50	21.918	114.50	1.940

付表 1 2 引張試験結果 (BT、10℃)

載荷破断試験 (10℃) V=500mm/s

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
BT 1 0 1	2.22	5.00	11.10	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	2.589	20.00	0.233
2	200.00	5.420	40.00	0.488
3	300.00	9.956	60.00	0.897
4	400.00	14.933	80.00	1.345
5	500.00	19.329	100.00	1.741
最大荷重点	589.50	22.701	117.90	2.045
破 断 点	595.00	15.375	119.00	1.385

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
BT 1 0 2	2.21	5.00	11.05	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	2.549	20.00	0.231
2	200.00	5.279	40.00	0.478
3	300.00	9.534	60.00	0.863
4	400.00	14.351	80.00	1.299
5	500.00	18.687	100.00	1.691
最大荷重点	599.00	22.581	119.80	2.044
破 断 点	603.00	14.331	120.60	1.297

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
BT 1 0 3	2.16	5.00	10.80	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	2.549	20.00	0.236
2	200.00	5.179	40.00	0.480
3	300.00	9.133	60.00	0.846
4	400.00	13.609	80.00	1.260
5	500.00	17.543	100.00	1.624
最大荷重点	617.50	21.838	123.50	2.022
破 断 点	624.00	21.196	124.80	1.963

付表 13 引張試験結果 (BT、20℃)

載荷破断試験 (20℃) V=500mm/s

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
BT201	2.18	5.00	10.90	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	2.537	20.00	0.233
2	200.00	5.187	40.00	0.476
3	300.00	9.176	60.00	0.842
4	400.00	13.277	80.00	1.218
5	500.00	17.153	100.00	1.574
最大荷重点	574.00	19.662	114.80	1.804
破断点	579.00	18.757	115.80	1.721

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
BT202	2.17	5.00	10.85	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	2.589	20.00	0.239
2	200.00	5.332	40.00	0.491
3	300.00	9.465	60.00	0.872
4	400.00	13.695	80.00	1.262
5	500.00	17.627	100.00	1.625
最大荷重点	559.25	19.722	111.85	1.818
破断点	564.50	15.540	112.90	1.432

供試体番号	厚さ(mm)	幅(mm)	断面積 (mm ²)	備 考
BT203	2.17	5.00	10.85	
中間荷重	伸び(%)	引張力(kgf)	標線間距離(mm)	引張応力(kgf/mm ²)
1	100.00	2.573	20.00	0.237
2	200.00	5.428	40.00	0.500
3	300.00	9.610	60.00	0.886
4	400.00	13.920	80.00	1.283
5	500.00	17.507	100.00	1.614
最大荷重点	583.00	20.627	116.60	1.901
破断点	588.00	9.992	117.60	0.921

付表 1 4 引張試験結果 (B T、3 0℃)

載荷破断試験 (30℃) V=500mm/s

供試体番号	厚さ (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm ²)	備 考
B T 3 0 1	2.17	5.00	10.85	
中間荷重	伸び (%)	引張力 (kgf)	標線間距離 (mm)	引張応力 (kgf/mm ²)
1	100.00	2.248	20.00	0.207
2	200.00	4.777	40.00	0.440
3	300.00	8.681	60.00	0.800
4	400.00	12.655	80.00	1.166
5	500.00	16.148	100.00	1.488
最大荷重点	564.00	18.326	112.80	1.689
破 断 点	574.50	9.012	114.90	0.831

供試体番号	厚さ (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm ²)	備 考
B T 3 0 2	2.06	5.00	10.30	
中間荷重	伸び (%)	引張力 (kgf)	標線間距離 (mm)	引張応力 (kgf/mm ²)
1	100.00	2.459	20.00	0.239
2	200.00	5.339	40.00	0.518
3	300.00	9.464	60.00	0.919
4	400.00	13.629	80.00	1.323
5	500.00	17.151	100.00	1.665
最大荷重点	560.00	19.249	112.00	1.869
破 断 点	566.00	16.559	113.20	1.608

供試体番号	厚さ (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm ²)	備 考
B T 3 0 3	2.16	5.00	10.80	
中間荷重	伸び (%)	引張力 (kgf)	標線間距離 (mm)	引張応力 (kgf/mm ²)
1	100.00	2.248	20.00	0.208
2	200.00	4.667	40.00	0.432
3	300.00	8.491	60.00	0.786
4	400.00	12.545	80.00	1.162
5	500.00	16.158	100.00	1.496
最大荷重点	570.25	18.566	114.05	1.719
破 断 点	575.00	17.021	115.00	1.576

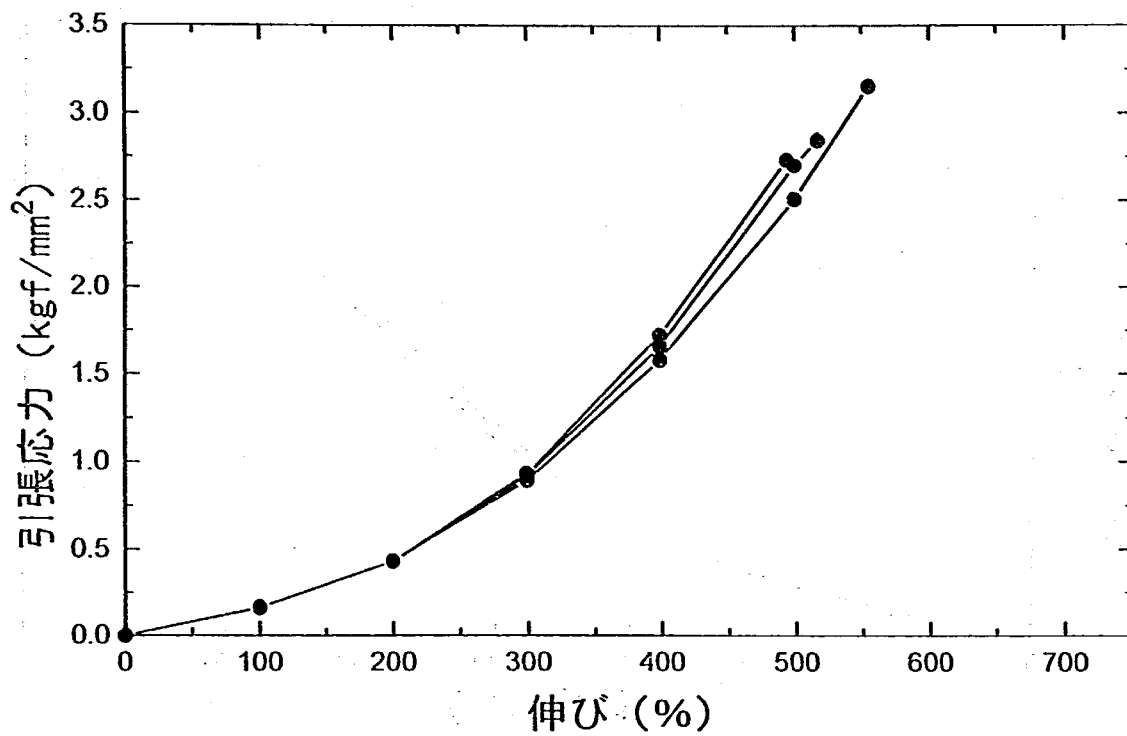
付表 15 引張試験結果 (BT、40℃)

載荷破断試験 (40℃) V=500mm/s

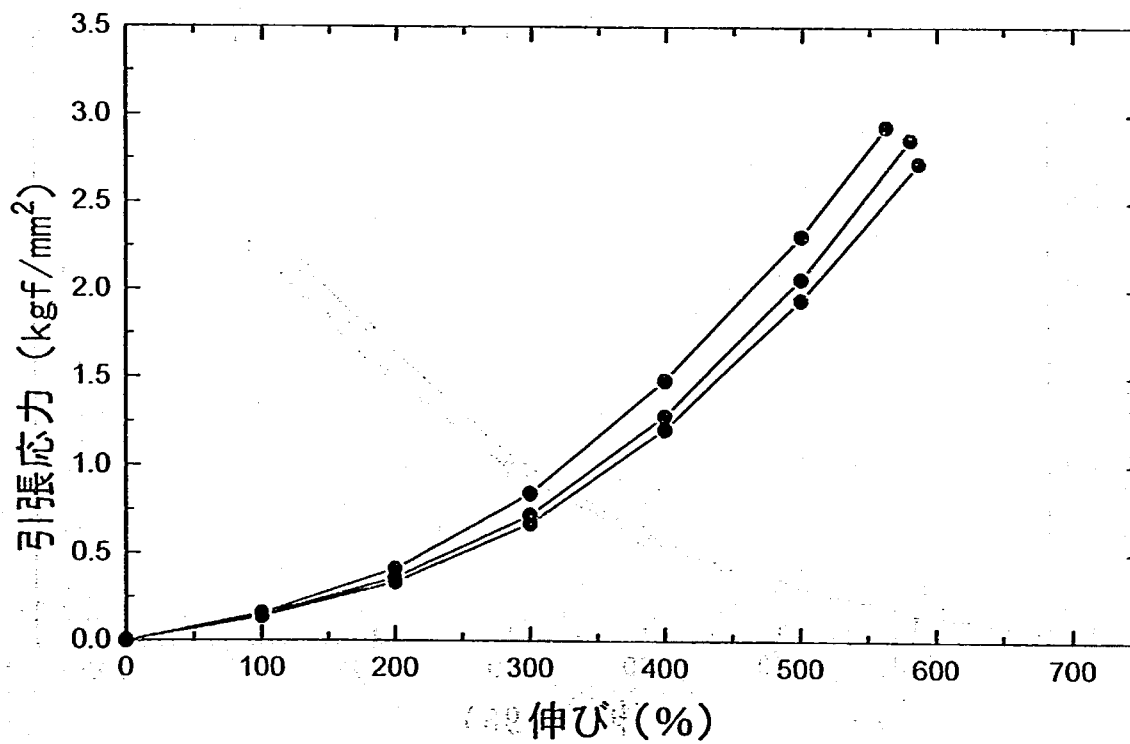
供試体番号	厚さ (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm ²)	備 考
BT401	2.26	5.00	11.30	
中間荷重	伸び (%)	引張力 (kgf)	標線間距離 (mm)	引張応力 (kgf/mm ²)
1	100.00	2.208	20.00	0.195
2	200.00	4.546	40.00	0.402
3	300.00	8.320	60.00	0.736
4	400.00	12.274	80.00	1.086
5	500.00	15.857	100.00	1.403
最大荷重点	564.75	17.384	112.95	1.574
破断点	566.50	12.203	113.30	1.080

供試体番号	厚さ (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm ²)	備 考
BT402	2.21	5.00	11.05	
中間荷重	伸び (%)	引張力 (kgf)	標線間距離 (mm)	引張応力 (kgf/mm ²)
1	100.00	2.268	20.00	0.205
2	200.00	4.958	40.00	0.449
3	300.00	8.741	60.00	0.791
4	400.00	12.545	80.00	1.135
5	500.00	15.917	100.00	1.440
最大荷重点	572.50	18.024	114.50	1.631
破断点	579.00	8.109	115.80	0.734

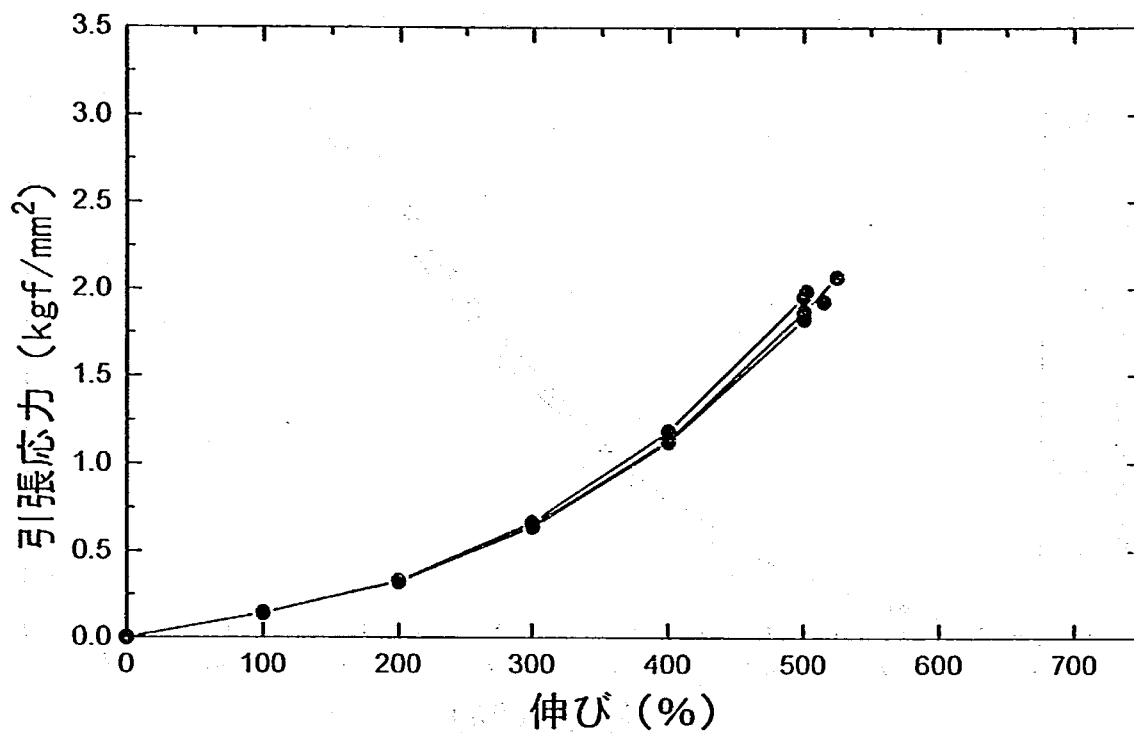
供試体番号	厚さ (mm)	幅 (mm)	断面積 (mm ²)	備 考
BT403	2.13	5.00	10.65	
中間荷重	伸び (%)	引張力 (kgf)	標線間距離 (mm)	引張応力 (kgf/mm ²)
1	100.00	2.118	20.00	0.199
2	200.00	4.336	40.00	0.407
3	300.00	7.848	60.00	0.737
4	400.00	11.431	80.00	1.073
5	500.00	14.793	100.00	1.389
最大荷重点	540.25	16.218	108.05	1.523
破断点	550.50	12.264	110.05	1.152



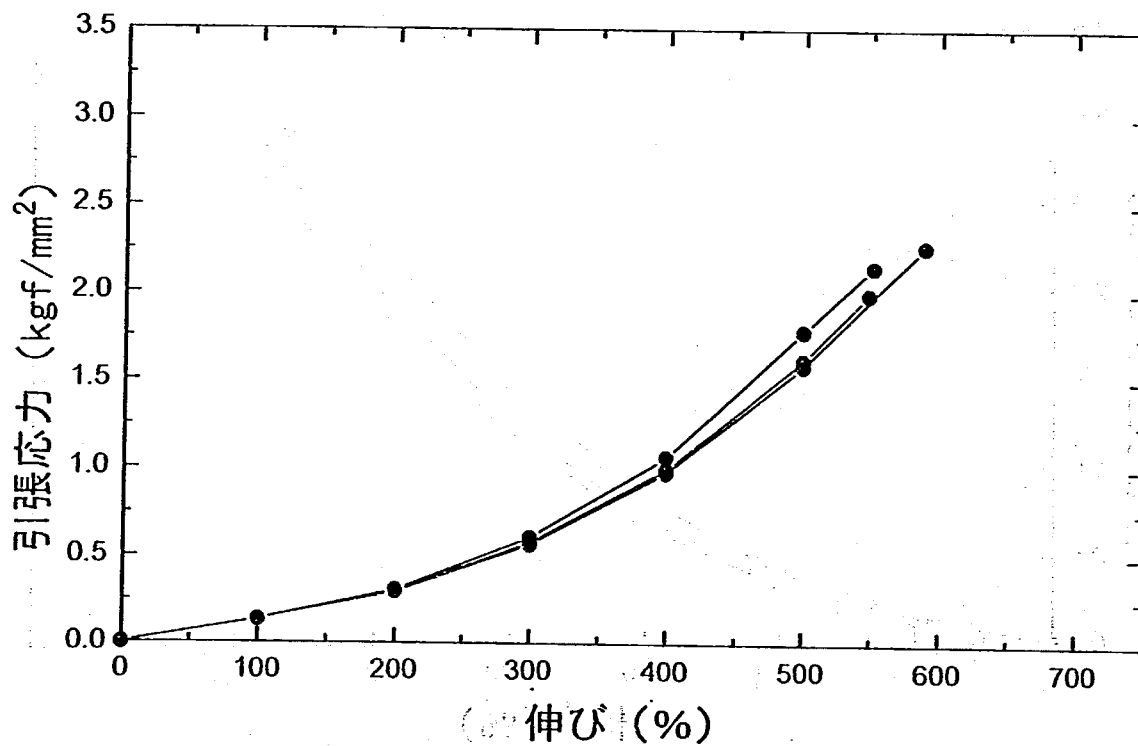
付図1 引張試験結果 (NR、0°C)



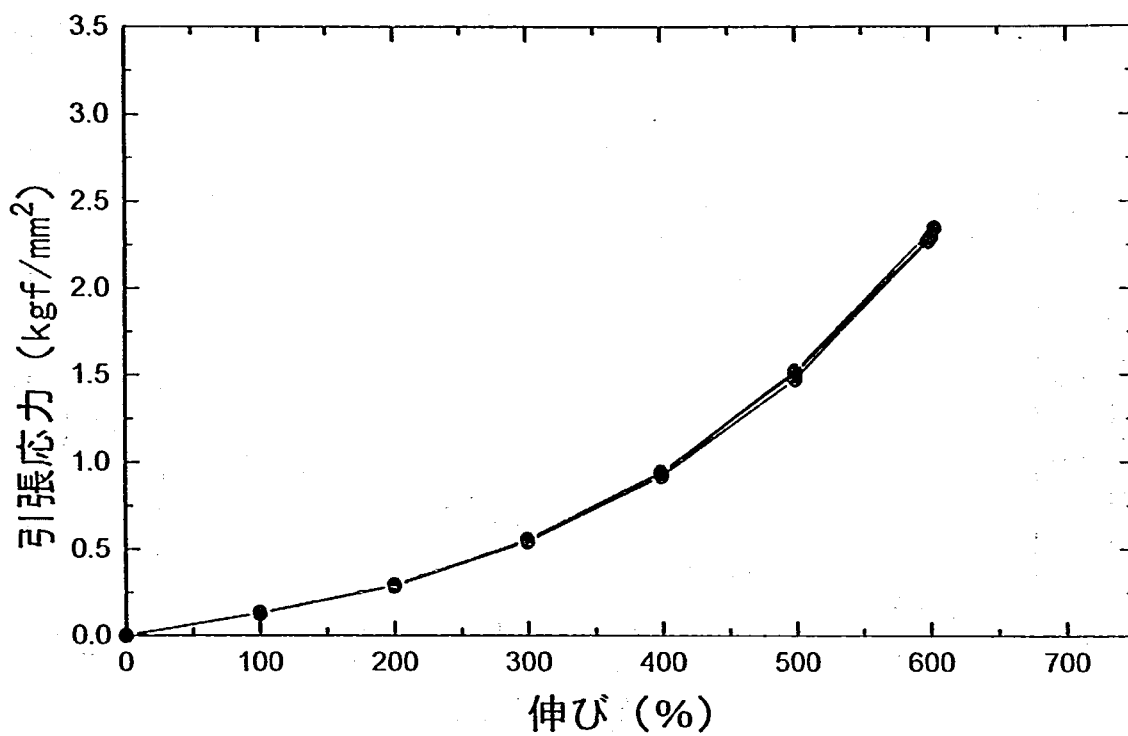
付図2 引張試験結果 (NR、10°C)



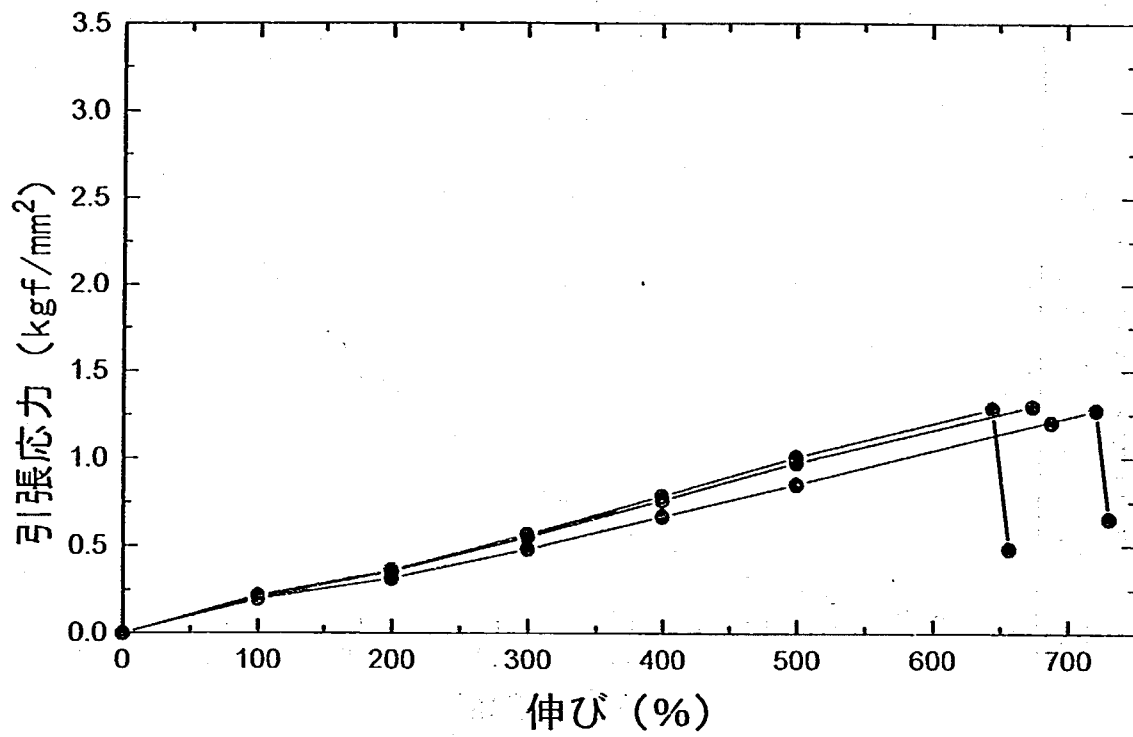
付図3 引張試験結果 (NR、20°C)



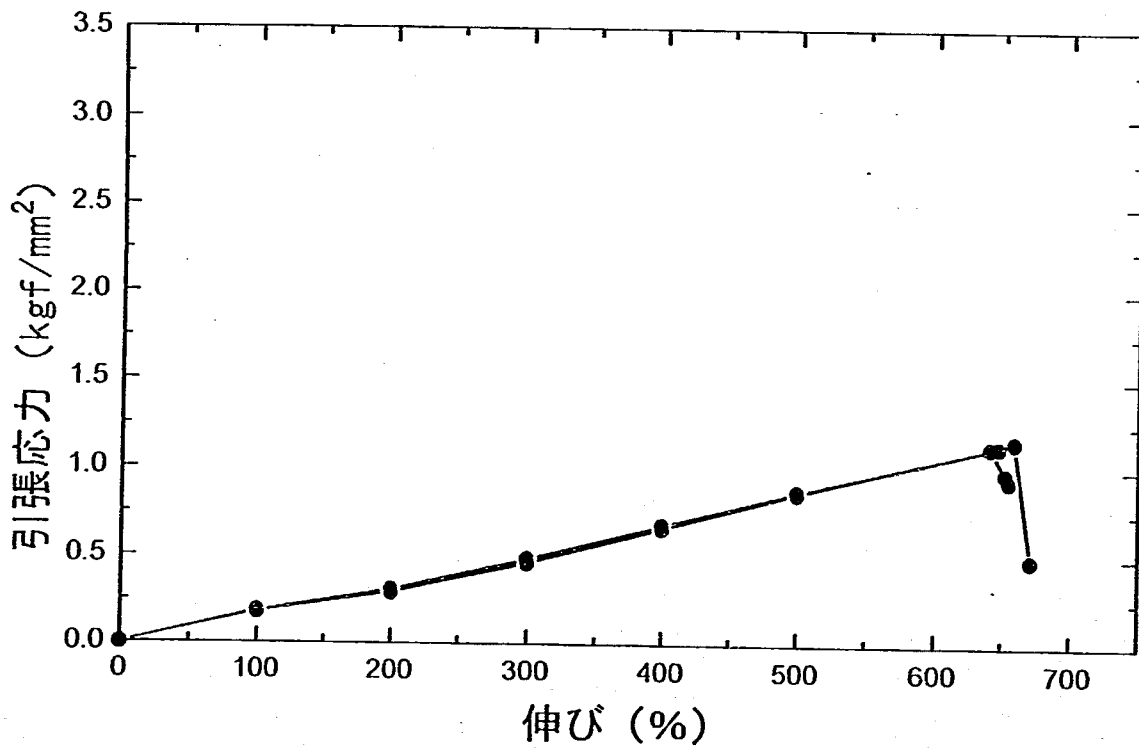
付図4 引張試験結果 (NR、30°C)



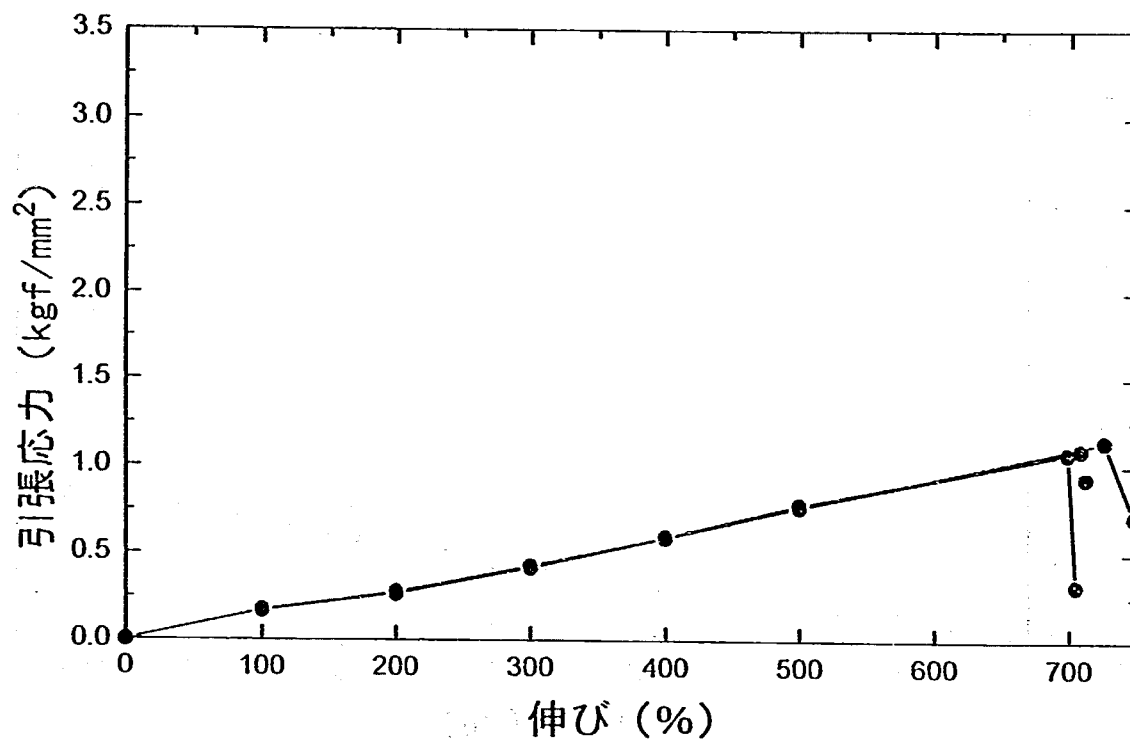
付図5 引張試験結果 (NR、40°C)



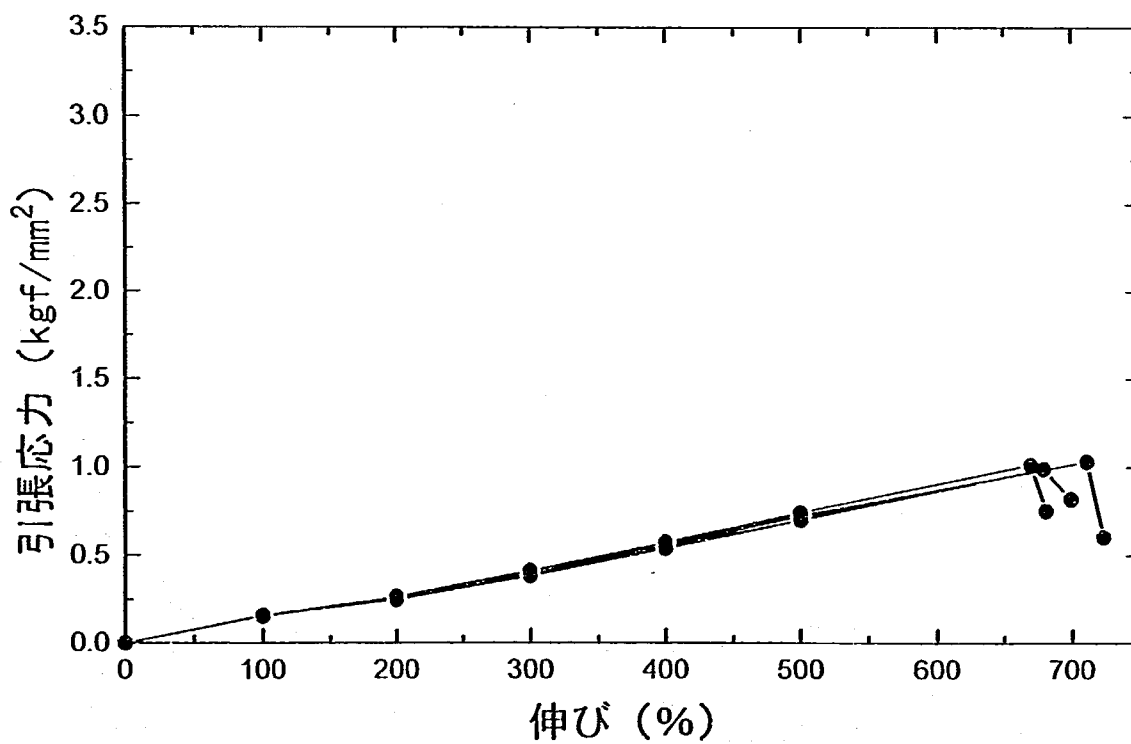
付図6 引張試験結果 (KL、0°C)



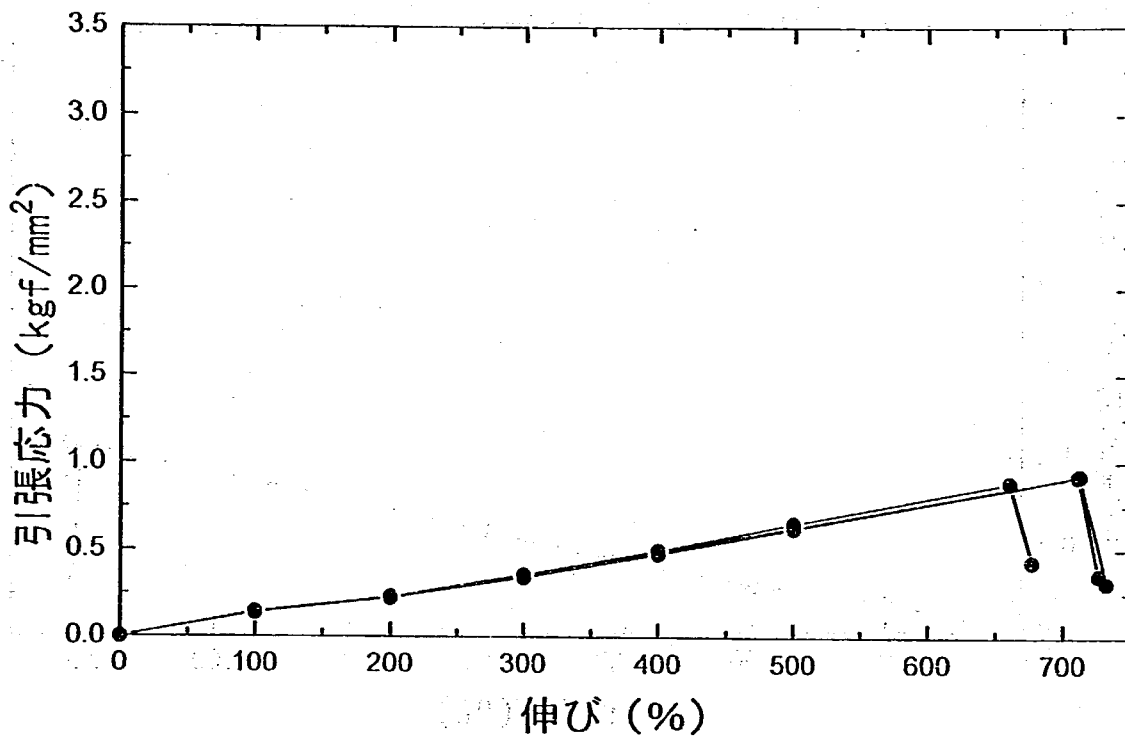
付図7 引張試験結果 (KL、10°C)



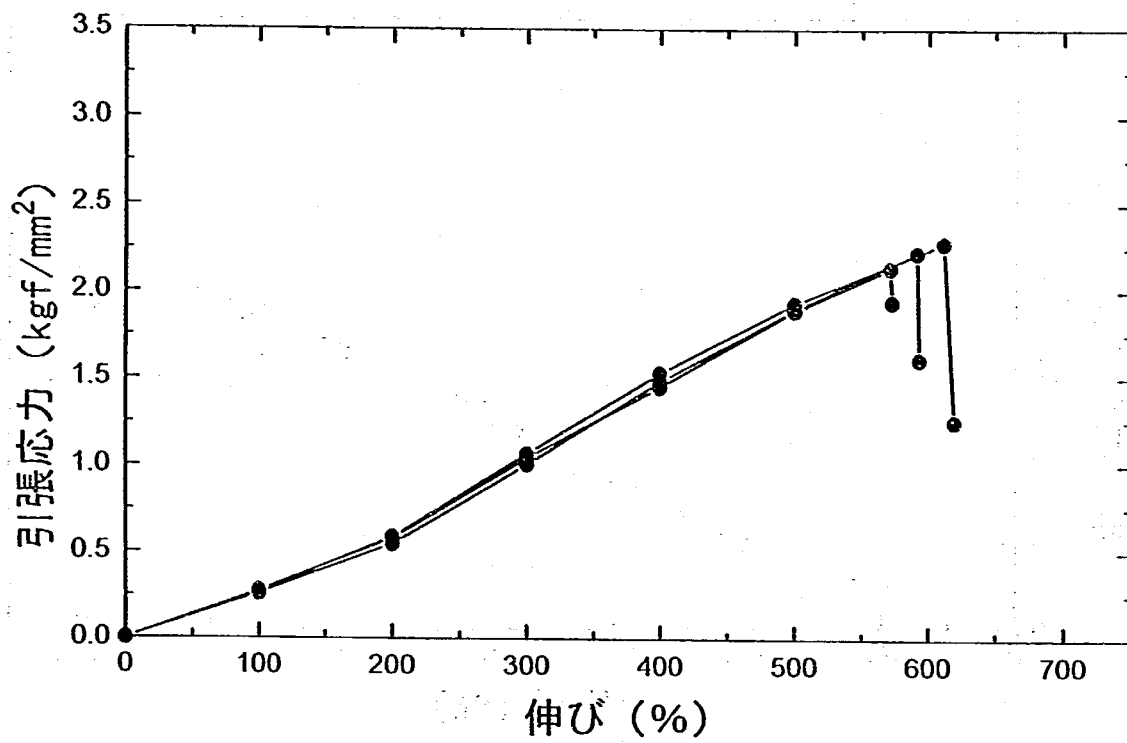
付図8 引張試験結果 (KL、20℃)



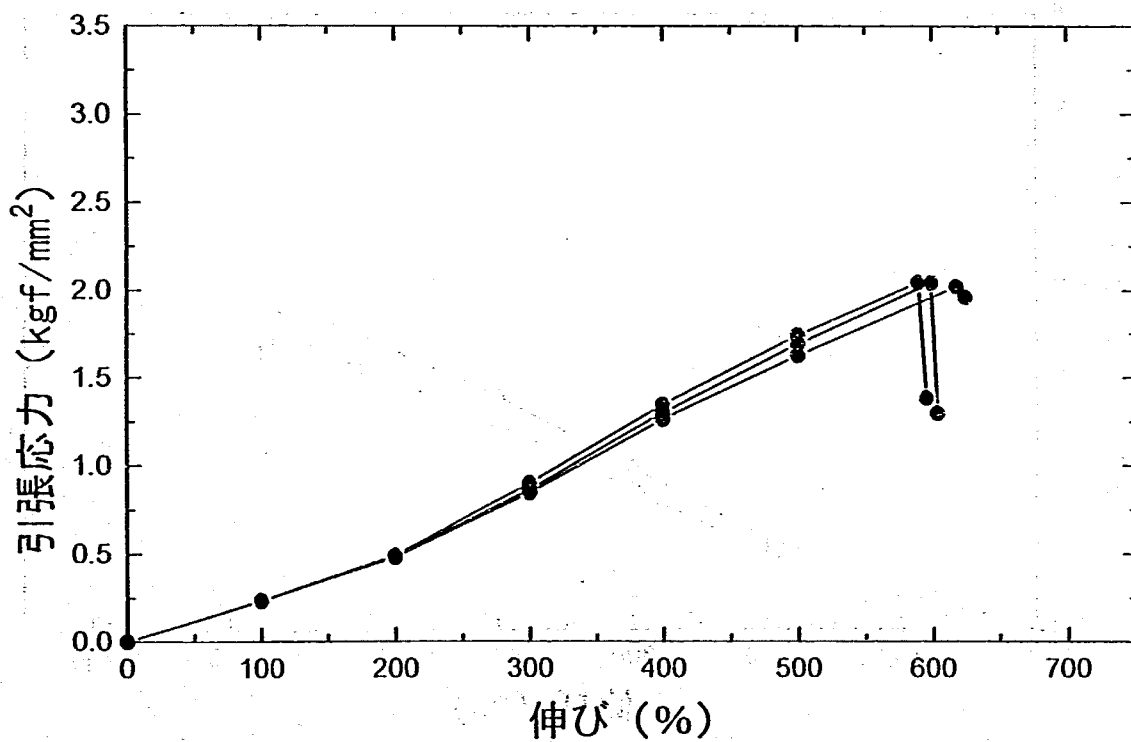
付図9 引張試験結果 (KL、30℃)



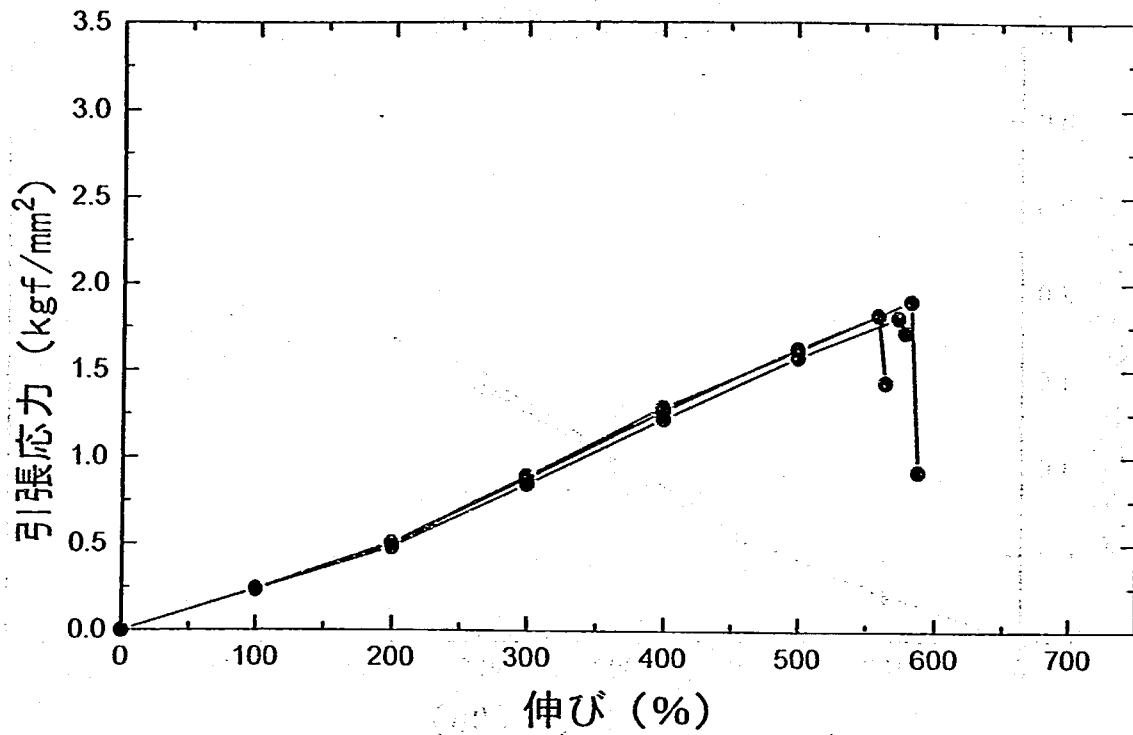
付図10 引張試験結果 (KL、40°C)



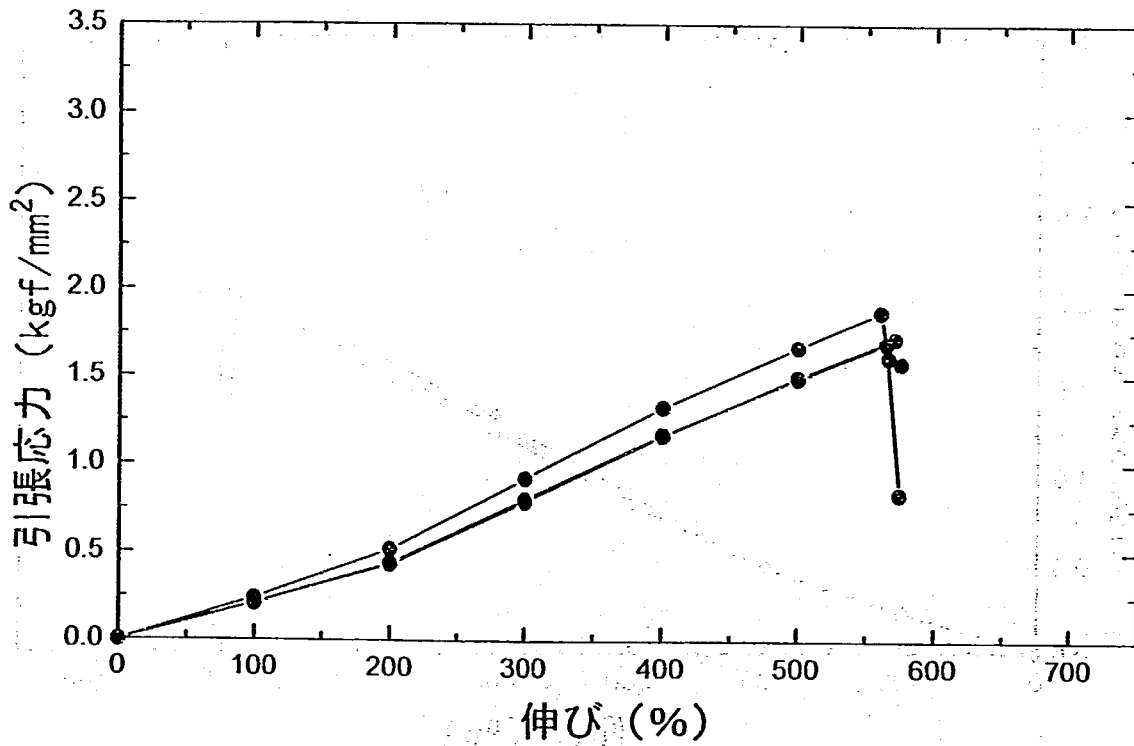
付図1 1 引張試験結果 (BT、0°C)



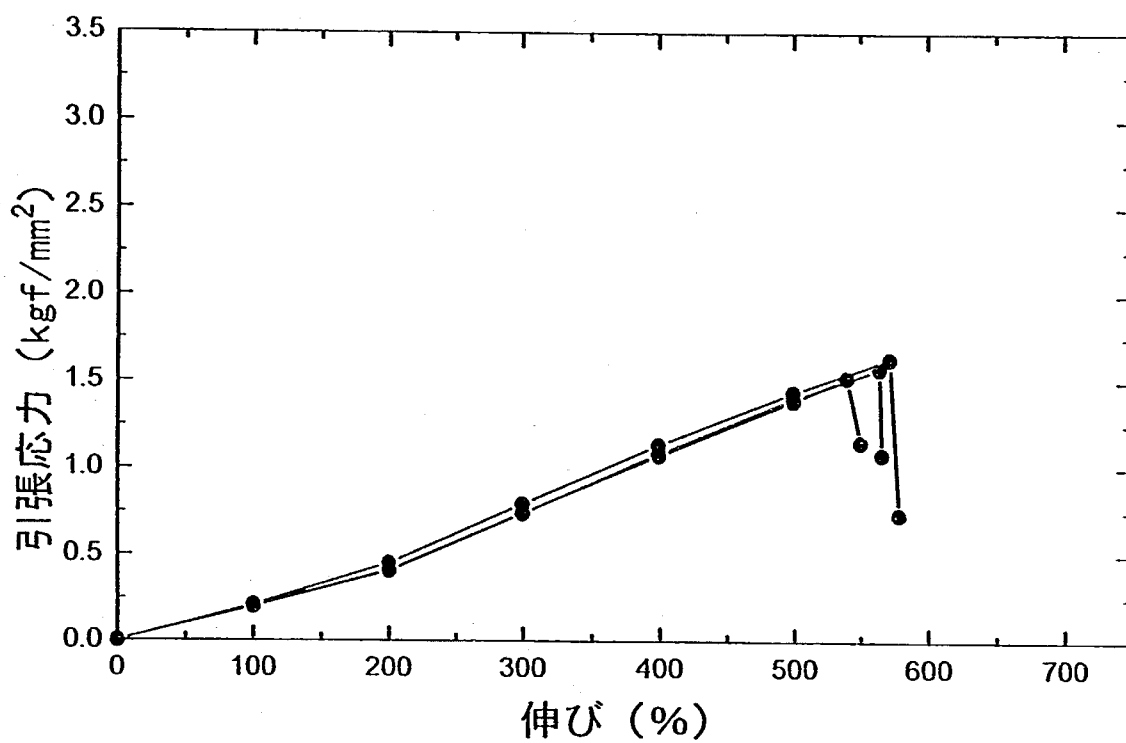
付図1 2 引張試験結果 (BT、10°C)



付図 1 3 引張試験結果 (BT、20°C)



付図 1 4 引張試験結果 (BT、30°C)



付図15 引張試験結果 (BT、40℃)

免震支承の動的特性に及ぼす温度依存性および疲労特性に関する実験的研究

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3465号
平成 8 年 11 月 (1996)

大塚 久哲
鈴木 基行
佐藤 貴志

要 旨 : 免震設計とは、免震支承を用いて、構造物の長周期化を図るとともに、減衰性能を向上させて地震時の構造物の振動を低減させる設計法である。構造物の固有周期は、免震支承等のアイソレータに必要な剛性を与えることにより任意に設定することが可能である。しかし、免震支承については、剛性や減衰特性が温度や繰返し载荷により影響を受けることが予測されるが、これについては十分検討されていない。

このため、鉛プラグ入り積層ゴム支承と高減衰積層ゴム支承とを対象に、等価剛性および等価減衰定数の温度依存性および疲労特性を実験的に検討した。本資料は、実験結果をまとめたものである。

キーワード : 免震支承、等価剛性、等価減衰定数、温度依存性、疲労特性、LRB、HDR

郵便はがき

50円切手
をはって
下さい

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

耐震技術研究センター・耐震研究室 行

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 3465 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属(住所)

氏 名 印

土木研究所資料第 3465 号