

構造物非弾性拳動影響調査

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)



2001年3月

川崎重工業株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2001

R100

(KO)

2001年3月

構造物非弾性挙動影響調査

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

報告書番号 TJ9420

報告書題名 構造物非弾性挙動影響調査

報告書提出者 島川 貴司*

島川 貴司*、中村 協正*

要旨

実用化戦略調査研究の一貫として、小型簡素なプラント機器を実現するため高温構造設計法の抜本的な高度化が求められている。その具体化方策として、非弾性解析による設計の実現を目指している。

本研究では、本格的開発に先立ち、非弾性解析により得られる非弾性挙動と設計評価対象である破損現象との関係を、メカニズムの観点から分析調査した。

負荷が荷重制御型に近づくと、非弾性解析により得られる応力評価誤差は小さくなるがひずみ評価誤差は大きくなる。また破損形式としては破断が生じ易くなる。

逆に変位制御型に近づくと応力評価精度は下がるが、ひずみに関しては構成方程式依存性が小さくなり、評価精度が向上すると考えられる。破損様式としてはクリープ疲労と変形が支配的となる。実際の高速炉機器では、弾性追従と若干の1次応力の存在により、荷重制御型と変位制御型の中位の負荷が生じる。

そこで実機条件を包含する範囲で、荷重制御型から変位制御型までの負荷条件を、弾性追従係数と1次応力／2次応力の割合を変化させることによって模擬出来る解析モデルを作成した。また実機で生じる中間保持を含む繰り返し荷重条件を作成した。

次に、非弾性解析に基づく設計への適用が期待されている各種構成方程式による弾塑性クリープ解析を実施し、非弾性膜ひずみ、クリープ疲労損傷、各項目の評価精度を分析し、非弾性解析により評価可能な破損モードと条件を摘出した。

また、1次応力および弾性追従が破損様式に与える影響について文献調査による調査を行った。

本報告書は、川崎重工業株式会社が核燃料サイクル開発機構殿との契約を基に実施した調査の成果である。

サイクル機構担当部及び担当者：

大洗工学センターシステム技術開発部 構造材料技術開発 Gr 笠原 直人

*川崎重工業株式会社 パワープラント事業部

March, 2001

目次

1. 研究目的および内容	1
2. 研究成果	2
2.1 荷重／変位制御モデルの作成	2
2.2 各種構成方程式による非弾性解析	7
2.3 非弾性解析結果と破損の分析	10
3. まとめ	80

1. 研究目的および内容

実用化戦略調査研究の一貫として、小型簡素なプラント機器を実現するため高温構造設計法の抜本的な高度化が求められている。その具体化方策として、非弾性解析による設計の実現を目指している。

負荷が荷重制御型に近づくと、非弾性解析により得られる応力評価誤差は小さくなるがひずみ評価誤差は大きくなる。また破損形式としては破断が生じ易くなる。

逆に変位制御型に近づくと応力評価精度は下がるが、ひずみに関しては構成方程式依存性が小さくなり、評価精度が向上すると考えられる。破損様式としてはクリープ疲労と変形が支配的となる。

本研究では設計法の本格的開発に先立ち、非弾性解析により得られる非弾性挙動と設計評価対象である破損現象との関係をメカニズムの観点から、以下のように分析調査する。

(1)荷重／変位制御モデルの作成

実際の高速炉機器では、弹性追従と若干の1次応力の存在により、荷重制御型と変位制御型の中位の負荷が生じる。そこで実機条件を包含する範囲で、荷重制御型から変位制御型までの負荷条件を、弹性追従係数と1次応力／2次応力の割合を変化させることによって模擬出来る解析モデルおよび実機で生じる中間保持を含む繰り返し荷重条件を作成する。解析モデルおよび荷重条件は以下のとおりとする。

材料 316FR

温度 550°C

弹性追従係数 $q=1, 2, 3, 10$

1次応力(MPa)/2次応力強さ範囲(MPa) 0/350, 0/500, 20/350, 120/350

クリープ保持時間 引張り側にて1000hr、中間保持にて1000hr

(2)各種構成方程式による非弾性解析

(1)で作成したモデルおよび条件にて、非弾性解析に基づく設計への適用が期待されている以下の構成方程式による弾塑性クリープ解析を実施する。

・弾塑性

弾完全塑性モデル

α リセット+2直線近似モデル

大野・王モデル

・クリープ

ブラックバーン型クリープひずみ式、ひずみ硬化則

(3)非弾性解析結果と破損の分析

(2)の解析結果に基づき、非弾性膜ひずみ、クリープ疲労損傷値の各項目の精度評価と、荷重形態の関係を分析し、非弾性解析を設計に適用する際の構成方程式の適用範囲を求める。

2. 研究成果

2.1 荷重/変位制御モデルの作成

(1) モデル

図 2.1-1 に示す 2 軸の膜応力を受ける 1 要素モデルを作成した。荷重は、X 方向に一定 1 次応力 P 、Y 方向には弾性追従を生じるように弾性バネを介して繰返し変位 $\Delta \delta$ を負荷する。1 要素モデルは平面応力要素(ABAQUS の 8 節点 2 次元平面応力要素:CPS8)とした。

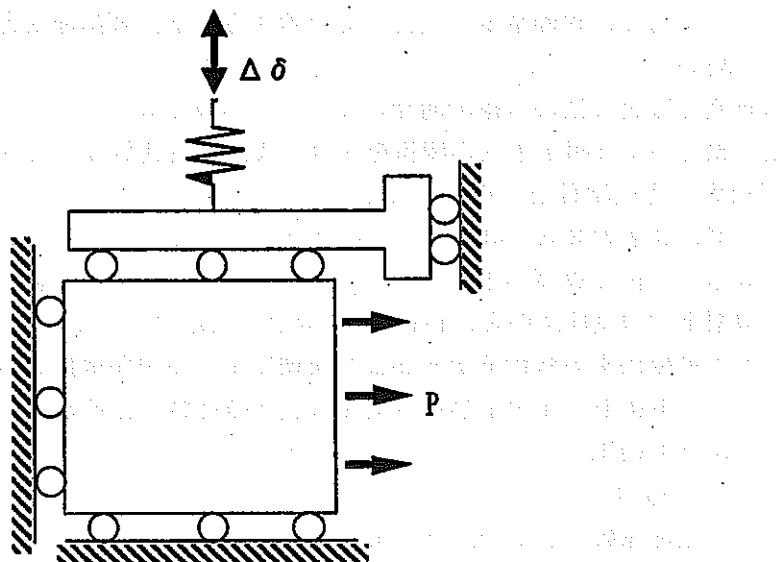


図 2.1-1 荷重/変位制御モデル

材料は 316FR 鋼、温度は 550°C とし、解析コードには ABAQUS を用いた。

(2) バネ定数、繰返し変位 $\Delta \delta$

弾完全塑性モデルで弾塑性計算を行って、2.2 項「各種構成方程式による非弾性解析」での解析パラメータである応力強さ範囲、弾性追従係数に応じたバネ定数を求めた。弾塑性計算では、応力強さ範囲 $S_n=500\text{ MPa}$ ($\Delta \sigma=250\text{ MPa}$) に相当する強制変位(強制変位 1mm の弾性計算から内挿し求めた)を与えた。結果を表 2.1-1 に示す。1 次応力/2 次応力応力強さ範囲(S_n)を 20MPa/350MPa の条件で算出したが、他の 1 次応力/2 次応力応力強さ範囲(S_n)においても同じバネ定数、繰返し変位を与えることとし、他の構成方程式においても同じ弾性追従係数の条件の場合には同じバネ定数、繰返し変位を用いることとする。なお、他の構成方程式で弾性追従係数 q の大きい場合には弾完全塑性モデルに比べ、 q は小さめの値となる。

本検討では、繰返し変位 $\Delta \delta$ は両振により与えるものとした。なお、片振により与えることも考えられるが、2 者の比較を構成方程式が動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、応力強さ範囲 $S_n=350\text{ MPa}$ 、弾性追従係数 $q=1.5$ の場合について行なった。図 2.1-2.

3にそれぞれの応力ひずみ関係(S22成分応力・E22成分ひずみ関係)、図2.1-4に非弾性膜ひずみの比較、図2.1-5に疲労損傷値の比較を示す。両振り、あるいは片振りでも初期の値が異なるものであり全体の傾向は変わらない。

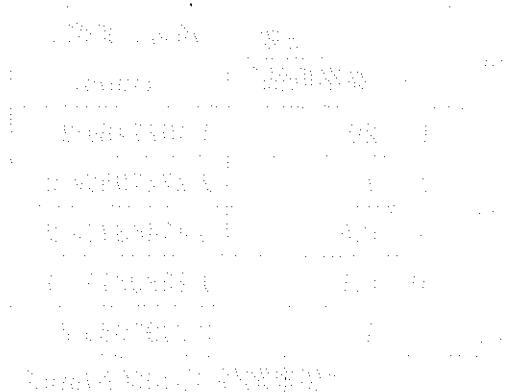


表 2.1-1 バネ定数、繰返し変位 $\Delta\delta$

Sn	q	バネ定数 要素剛性*	繰返し変位 $\Delta\delta$ (mm)
350	1	20	1.192748e-2
	2	1	2.2747952e-2
	3	0.5	3.4146341e-2
	10	0.1	1.2580877e-1
500	2	1	3.249708e-2

*要素剛性:154000N/mm²

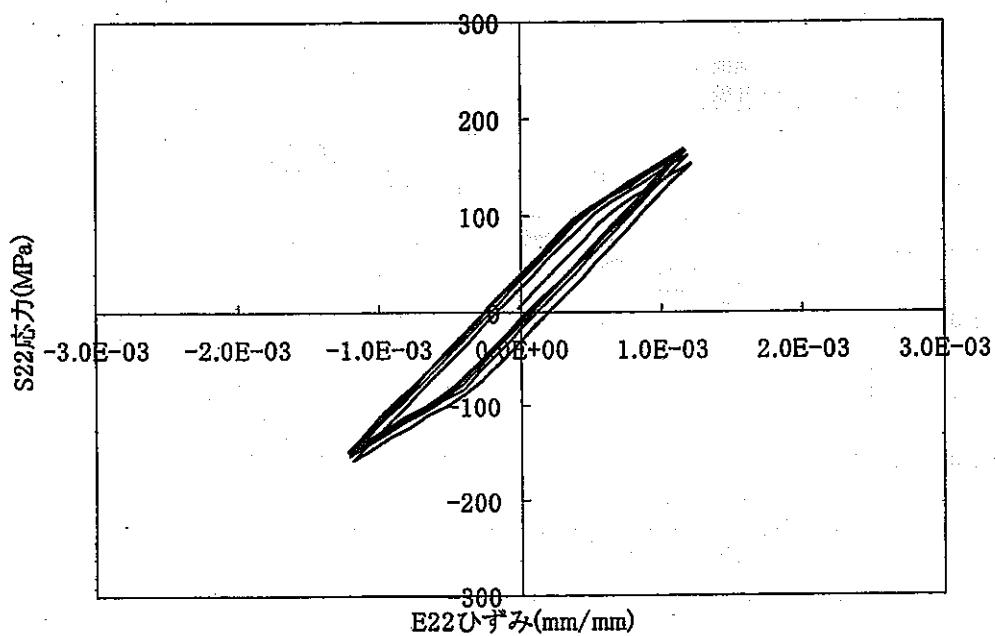


図 2.1・2 両振の場合の応力ひずみ関係($S_n=350\text{MPa}$ 、 $q=1.5$)

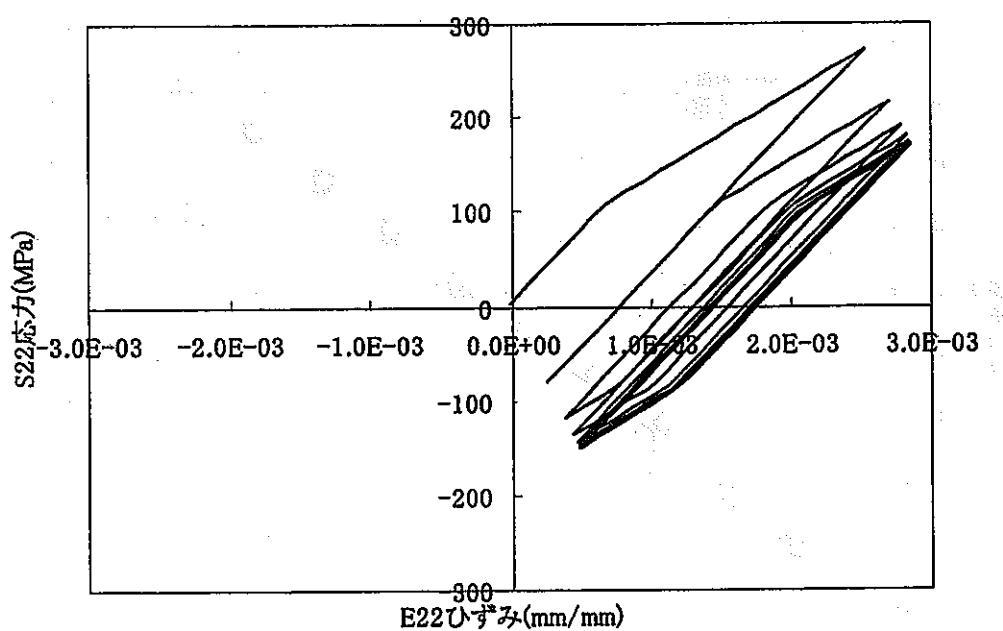


図 2.1・3 動的 2 直線式応力ひずみ関係(片振、 $S_n=350\text{MPa}$ 、 $q=1.5$)

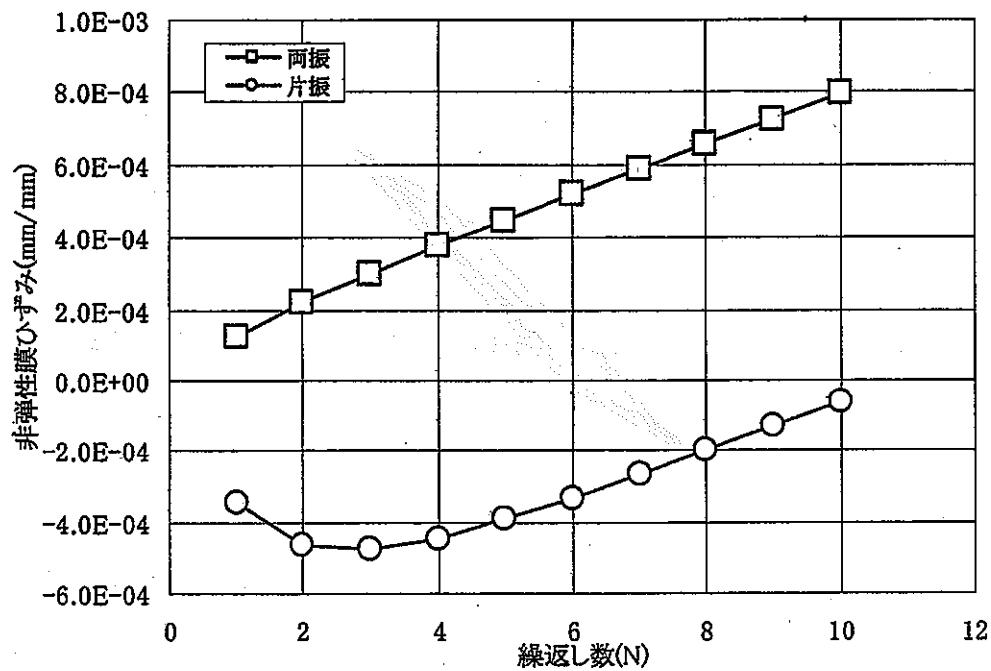


図 2.1-4 非弾性膜ひずみの比較($S_n=350\text{MPa}$ 、 $q=1.5$)

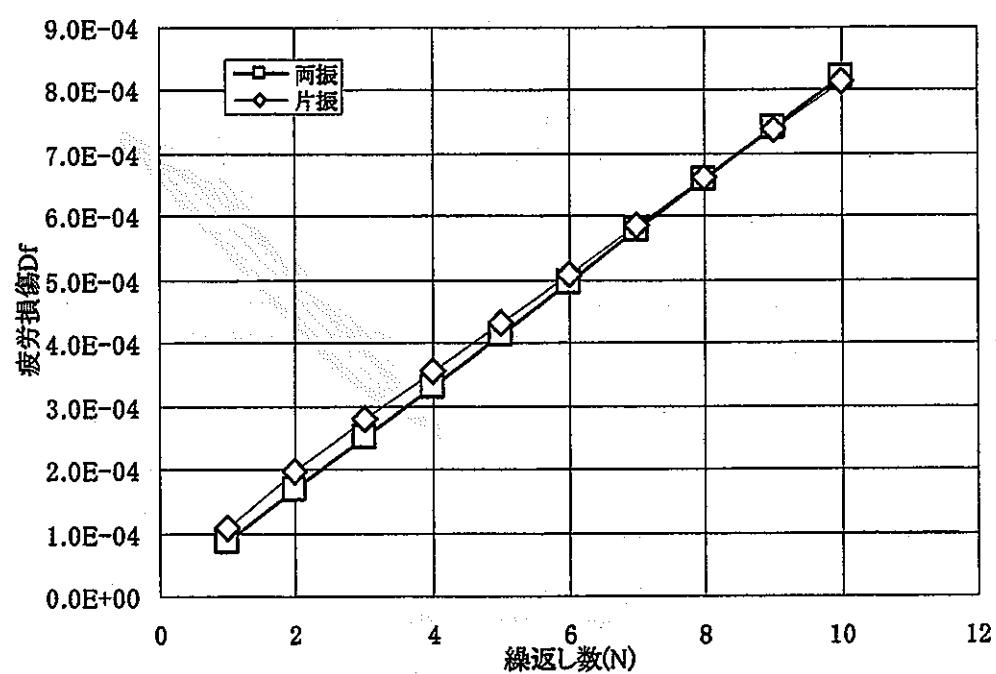


図 2.1-5 疲労損傷値の比較($S_n=350\text{MPa}$ 、 $q=1.5$)

2.2 各種構成方程式による非弾性解析

(1)構成方程式

以下の4種類の構成方程式を用いた。

①弾完全塑性モデル

加工硬化係数 $H'=5N/mm^2$ とした。他の材料物性は316FR鋼 550°CのDDS(案)材料強度基準等(案)に準じ、降伏応力 $\sigma_y=105MPa$ 、縦弾性係数 $E=154000N/mm^2$ とした。

②動的応力ひずみ関係式2直線近似 α リセットモデル

316FR鋼の動的応力ひずみ関係式の2直線近似式に、 α リセットを適用したモデルである。2直線近似式の σ_y, H' を求める際のひずみ範囲は、弾性追従係数を2.0と想定し、解析パラメータの応力強さ範囲 S_n から2.0の追従線を描いて DDS 案の応力-ひずみ関係式との交点から定めた。定めたひずみ範囲から、日本原子力発電(株)殿委託研究「構造設計方針に関する研究(その1)」平成11年度報告書付録1の表A1.3(2)-8(1/2)~(2/2)より内外挿し σ_y, H' を求めた。結果を表2.2-1に示す。

③弾塑性応力ひずみ関係式2直線近似 α リセットモデル

316FR鋼の弾塑性応力ひずみ関係式2直線近似式に、 α リセットを適用したモデルである。2直線近似式の算出方法は②項と同様で、参照したデータは②項と同文献の表A1.3(2)-5(1/2)~(2/2)である。結果を表2.2-2に示す。

④大野-王モデル

大野-王モデルでは、ABAQUSでの計算でクリープを考慮することができないため、クリープなしの場合のみ検討対象とした。

(2)解析パラメータ

弾性追従係数 q 、1次応力/2次応力応力強さ範囲(S_n)、クリープ保持時間、をパラメタとし、表2.2-3に示す組み合わせで解析した。

(3)損傷値の算出方法

疲労損傷の算出にはDDS最適疲労破損式を用い、設計値をサイクルごとに求めた。破損繰返し数 N_f の算出に使用した全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_t$ は、繰返し変位方向(Y)のひずみ成分が最大最小となる時点それぞれのミーゼス相当ひずみの差とした。ひずみ速度は $10^{-6}mm/mm/sec$ とした。

クリープ損傷はDDS主クリープ破断関係式を用いて算出した。クリープ疲労評価法には時間消費則を用いた。破断時間 t_R の算出に使用した応力 σ はABAQUSのクリープ計算ステップにおけるインクリメントごとのミーゼス相当応力を用い、保持時間の増分 Δt_h にはABAQUSの時間増分を充てた。クリープ係数 α_R は10とした。

表 2.2・1 動的応力ひずみ関係式の2直線近似の係数

応力強さ範囲 Sn(MPa)	最大想定ひずみ 範囲 $\Delta \varepsilon /2\%$	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	加工硬化係数 $H'(N/mm^2)$
350	1.164E-01	94.86	88225
500	1.800E-01	108.48	65585

表 2.2・2 弾塑性応力ひずみ関係式の2直線近似の係数

応力強さ範囲 Sn(MPa)	最大想定ひずみ 範囲 $\Delta \varepsilon /2\%$	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	加工硬化係数 $H'(N/mm^2)$
350	1.500E-01	96.76	24439
500	2.400E-01	108.05	16660

表 2.2-3 解析ケース一覧

構成方程式	q	1次応力/2次応力強さ範囲			
		0/350	0/500	20/350	120/350
①弾完全塑性	1			(17)[29]{37}	
	2	(1)	(2)	(3)[30]{38}	(4)
	3			(18)[31]{39}	
	10			(19)[32]{40}	
② α リセット +二直線近似 (動的応力ひ ずみ関係式)	1			(20)[33]{41}	
	2	(5)	(6)	(7)[34]{42}	(8)
	3			(21)[35]{43}	
	10			(22)[36]{44}	
③ α リセット +二直線近似 (単調応力ひ ずみ関係式)	1			(23)	
	2	(9)	(10)	(11)	(12)
	3			(24)	
	10			(25)	
④大野-王	1			(26)	
	2	(13)	(14)	(15)	(16)
	3			(27)	
	10			(28)	

(): 弾塑性、[]: 引張保持、{ }: 中間保持

数字はケース番号

（注）各構成方程式の強さ範囲は、引張強さを基準とした場合の強さ範囲である。

2.3 非弾性解析結果と破損の分析

(1) 解析結果

S22-E22 応力ひずみ関係、非弾性膜ひずみ、および損傷値算出の結果を、図 2.3-1～84 にパラメータごとにまとめて示す。表 2.3-1 に、各パラメータの解析結果内容と解析結果図の対応一覧を示す。

結果のなかで、弾完全塑性、 $q=2$ 、1 次応力 120MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性の S22-E22 応力ひずみ関係(図 2.3-4)が他の場合に比べ傾向が異なり、S22 応力の変動範囲が狭い。これは、図 2.3-85 に示す S11 応力・S22 応力の履歴からわかるように、1 次応力である S11 応力が高いため降伏曲面上方の限られた範囲で動いているためである。また、図 2.3-54 に示す、動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセットクリープ引張保持の場合の非弾性膜ひずみは、繰返しの初期と末期で $q=2 \sim 10$ でひずみ量の順位が入れ替わっている。これは、S22-E22 応力ひずみ関係を見ると、 q の大きいものほど繰返しが進むにつれシフトしてしまうためである。図 2.3-67、68 によると、 $q=2$ より大きい場合において 2 直線近似のほうが、非安全側となっている。これは、 $q=2$ の条件で 2 直線近似の近似式を算出したためである。

図 2.3-1～84 の解析結果を 10 サイクル目について荷重条件または弾性追従係数と非弾性膜ひずみ、損傷値との関係で整理した結果を図 2.3-86～105 に示す。図 2.3-106～113 には、引張保持および中間保持でのクリープ初期応力、クリープひずみの繰返し数に対する履歴を示す。

各構成方程式の評価精度について、以下のことがわかった。

- ・弾塑性応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセットでは弾性追従係数 $q=2$ までの場合においてサーベイしたすべての荷重条件に対し大野・王とよく一致した(図 2.3-47、48)。
- ・動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセットにおいて、 $q=10$ の場合はラチェットひずみの許容値である 1%までに大野・王を上回らないものと予想され、 $q=3$ 程度までが許容値までに安全側となる限界と考えられる(図 2.3-59、60)。
- ・図 2.3-61～64 に見られるように、1 次応力が疲労損傷値に影響を及ぼしているが、1 次応力 120MPa の場合を除外すると、どの構成方程式によってもほぼ同様な疲労損傷値となった。
- ・弾塑性応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセットと大野・王では、1 次応力 120MPa の場合が 2 次応力強さ範囲 500MPa とほぼ同等な疲労損傷値となった(図 2.3-63、図 2.3-64)。動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセットは加工硬化係数が大きいため、 q の変化に対しても疲労損傷値があまり変わらず、疲労に関しては非安全側となる(図 2.3-66)。疲労損傷が支配的な $q=10$ では弾完全塑性のほうが安全側であるが、 $q=3$ までは α リセットのほうが安全側である(図 2.3-69、70)。
- ・弾完全塑性では、中間保持でもクリープ疲労損傷値全体で見ると引張保持の場合と大きく変わらない(図 2.3-69、75)。

(2) 解析結果のまとめ

以上の非弾性解析結果を整理しまとめ、各構成則の適用範囲(弾性追従係数、一次応力)を算定した。各構成則での非弾性膜ひずみと繰返し数、損傷値と繰返し数の関係(図の縦軸は対数)を1次式で近似し、許容値(非弾性膜ひずみ：1.0%、損傷値：1.0)となる繰返し数を近似式から算出した。整理した結果を、図2.3-114～129に示す。図は許容繰返し数そのものをプロットした場合と許容繰返し数を無次元化してプロットした場合の2通りを示した。無次元化は、非弾性膜ひずみの場合は弾完全塑性での許容繰返し数で除算し、損傷値の場合はDDS予測値で除算した。

・ 非弾性膜ひずみに対する一次応力、弾性追従係数の影響

図2.3-114、115に示すように、繰返し数の無次元値が大野・王を下回る(=安全側)のは、動的応力ひずみ関係式2直線近似の α リセットで一次応力が20MPa程度まで、弾塑性応力ひずみ関係式2直線近似の α リセットで100MPa程度まで、の範囲となった。なお、一次応力が0MPaの場合は、弾完全塑性での許容繰返し数が ∞ (無限)となつたため、無次元値の方は、同じく無限となつた大野・王で1.0、その他の場合でほぼ0.0となる。一方、弾性追従係数については、図2.3-116、117に示すように動的が2程度まで、弾塑性が9程度までが、繰返し数の無次元値が大野・王を下回った。以上をまとめて、一次応力と弾性追従係数の平面で示すと、 $S_n=350\text{ MPa}$ における各構成則の非弾性膜ひずみに対する適用範囲は図2.3-118のようになる。

・ クリープ疲労損傷値に対する弾性追従係数の影響

図2.3-119、120に示すように、動的 α リセットは疲労損傷において弾完全塑性より非安全側になるがクリープ損傷が安全側となる分、クリープ疲労損傷(図2.3-121、122)では $q=\sim 3$ の範囲で弾完全塑性より安全側となる。逆に、弾完全塑性においては q の増加とともに疲労損傷が大きく増加するためクリープ損傷がほとんど現れていないにもかかわらず、クリープ疲労損傷においては $q=3$ 以上で動的 α リセットより安全側となる。

図2.3-123、124には各構成則の疲労損傷値に対する弾性追従係数の影響を示す。弾塑性応力ひずみ関係式の2直線近似の α リセットは大野・王と同等もしくはそれ以下となる筈であるが、本検討では近似式を $q=2$ の条件で作成したため、図のように $q=2$ 以上で一致が悪くなっている。同様に動的応力ひずみ関係式2直線近似の α リセットも若干は下方(=安全側)に修正されると思われる。

図2.3-125、126は各構成則の疲労損傷値に対する一次応力の影響を整理したものである。弾塑性 α リセットは、サーベイした範囲内で大野・王と同様な値を示している。疲労損傷についてまとめて、一次応力と弾性追従係数の平面で示すと、 $q=2$ における各構成則の疲労損傷に対する適用範囲は図2.3-127のようになる。

• 中間保持

ほとんどクリープ損傷が発生しておらず、保持なしの場合の結果と同様である(図2.3-128、129と図2.3-123、124)。

表 2.3-1 解析結果図の対応

パラメータ	解析結果内容	解析結果図			
		(1)~(4)	(5)~(8)	(9)~(12)	(13)~(16)
1次応力/2次応力強さ範囲	条件	(1)~(4)	(5)~(8)	(9)~(12)	(13)~(16)
	S22-E22応力ひずみ関係	図2.3-1~4	図2.3-5~8	図2.3-9~12	図2.3-13~16
	非弾性膜ひずみ	図2.3-45	図2.3-46	図2.3-47	図2.3-48
	損傷値	図2.3-61	図2.3-62	図2.3-63	図2.3-64
弾性追従係数	条件	(17),(3),(18),(19)	(20),(7),(21),(22)	(23),(11),(24),(25)	(26),(15),(27),(28)
	S22-E22応力ひずみ関係	図2.3-17~19	図2.3-20~22	図2.3-23~25	図2.3-26~28
	非弾性膜ひずみ	図2.3-49	図2.3-50	図2.3-51	図2.3-52
	損傷値	図2.3-65	図2.3-66	図2.3-67	図2.3-68
クリープ	条件	[29],[30],[31],[32]	[33],[34],[35],[36]	[37],[38],[39],[40]	[41],[42],[43],[44]
	S22-E22応力ひずみ関係	図2.3-29~32	図2.3-33~36	図2.3-37~40	図2.3-41~44
	非弾性膜ひずみ	図2.3-53	図2.3-54	図2.3-55	図2.3-56
	損傷値	図2.3-69,71,73	図2.3-70,72,74	図2.3-75,77,79	図2.3-76,78,80
構成方程式	条件	(17),(20),(23),(26)	(3),(7),(11),(15)	(18),(21),(24),(27)	(19),(22),(25),(28)
	S22-E22応力ひずみ関係	—	—	—	—
	非弾性膜ひずみ	図2.3-57	図2.3-58	図2.3-59	図2.3-60
	損傷値	図2.3-81	図2.3-82	図2.3-83	図2.3-84

条件の数字は表2.1-1のケース番号に対応

():弾塑性、[]:引張保持、{}:中間保持

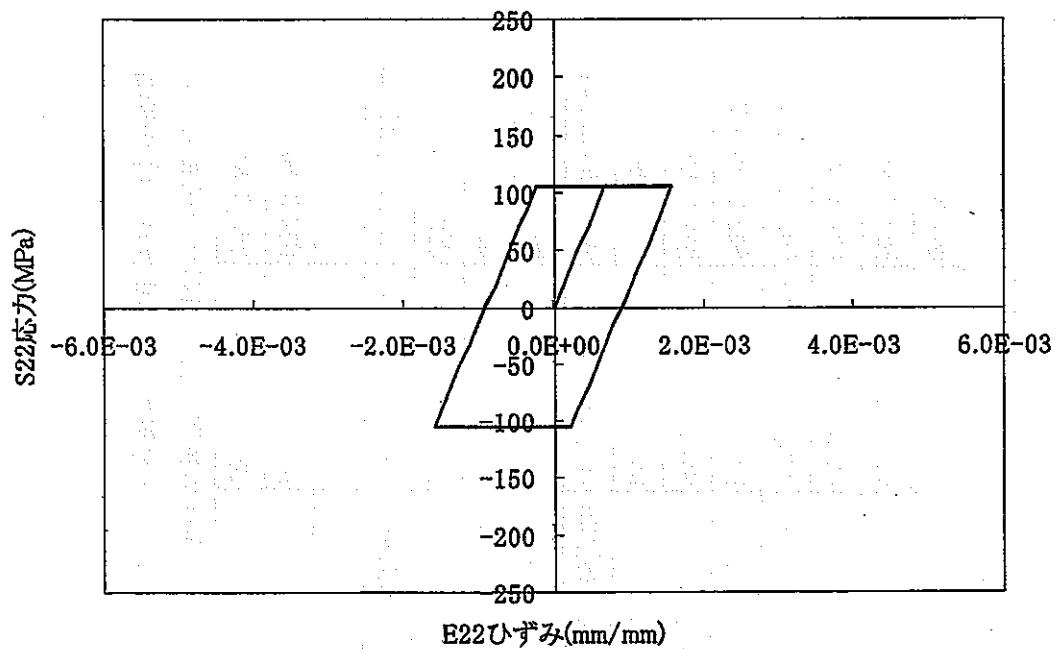


図 2.3-1 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=2$ 、1 次応力 0MPa/2 次応力強さ範囲
350MPa、弾塑性)

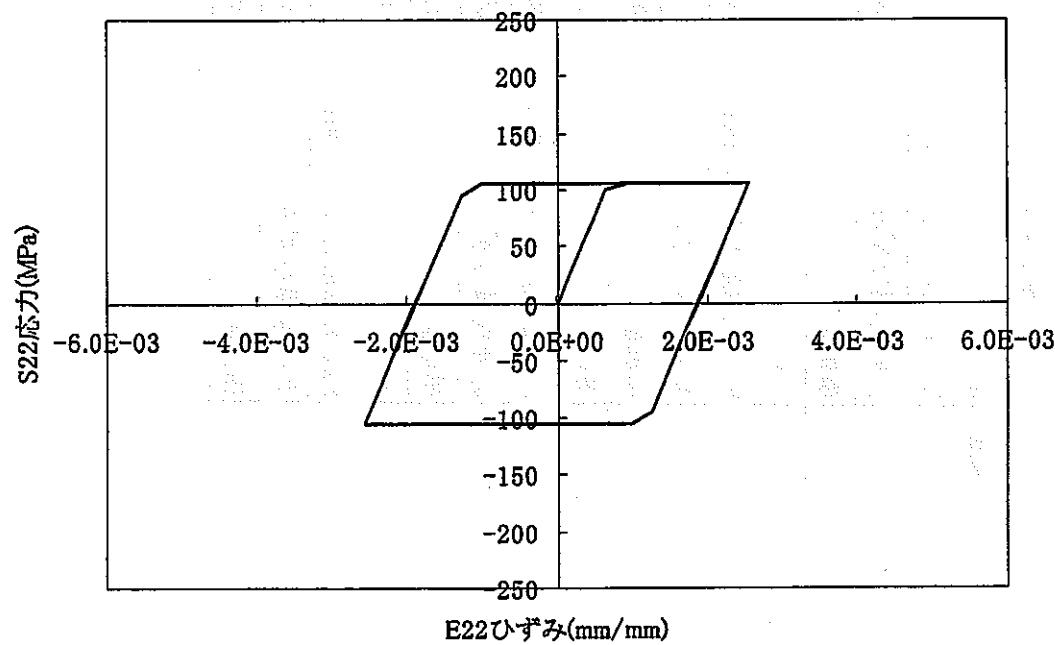


図 2.3-2 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=2$ 、1 次応力 0MPa/2 次応力強さ範囲
500MPa、弾塑性)

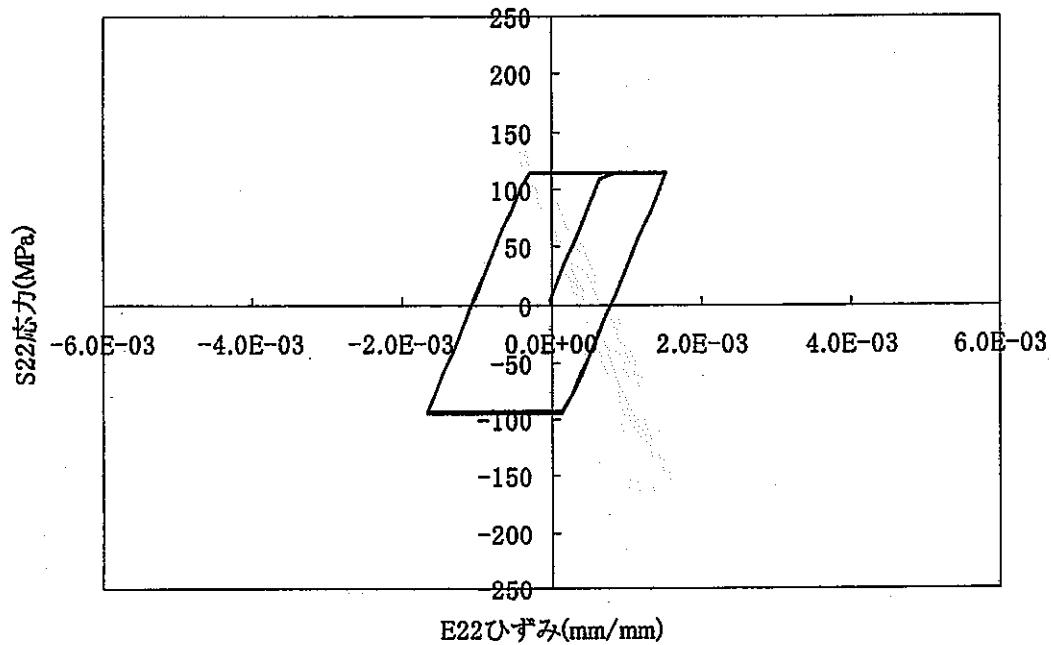


図 2.3-3 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=2$ 、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲
350MPa、弾塑性)

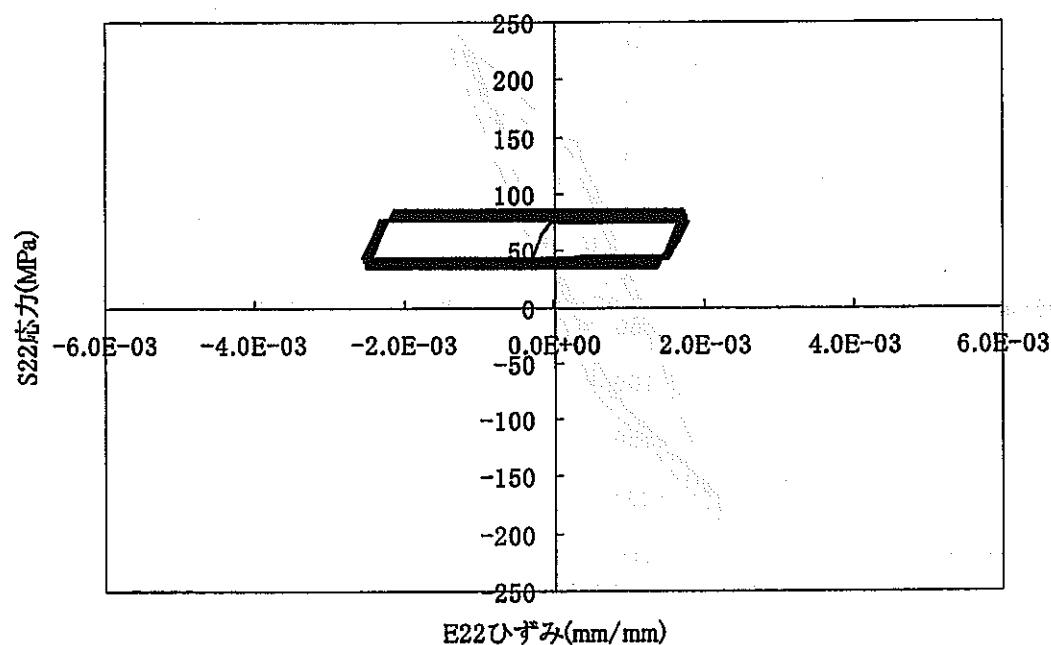


図 2.3-4 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=2$ 、1 次応力 120MPa/2 次応力強さ範囲
350MPa、弾塑性)

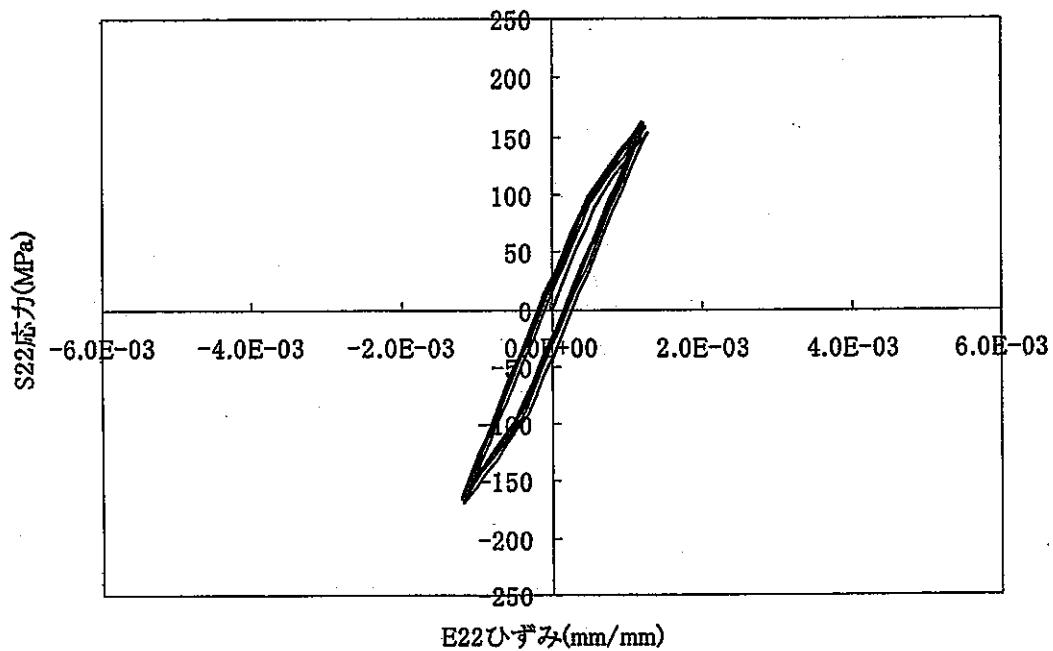


図 2.3・5 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=2$ 、1 次応力 0MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

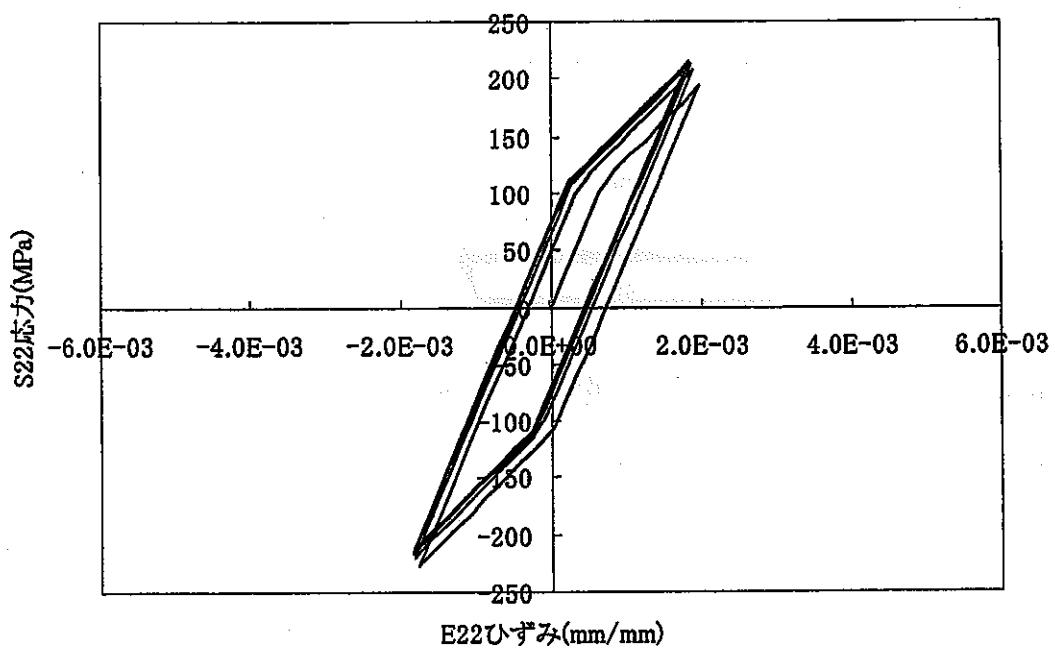


図 2.3・6 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=2$ 、1 次応力 0MPa/2 次応力強さ範囲 500MPa、弾塑性)

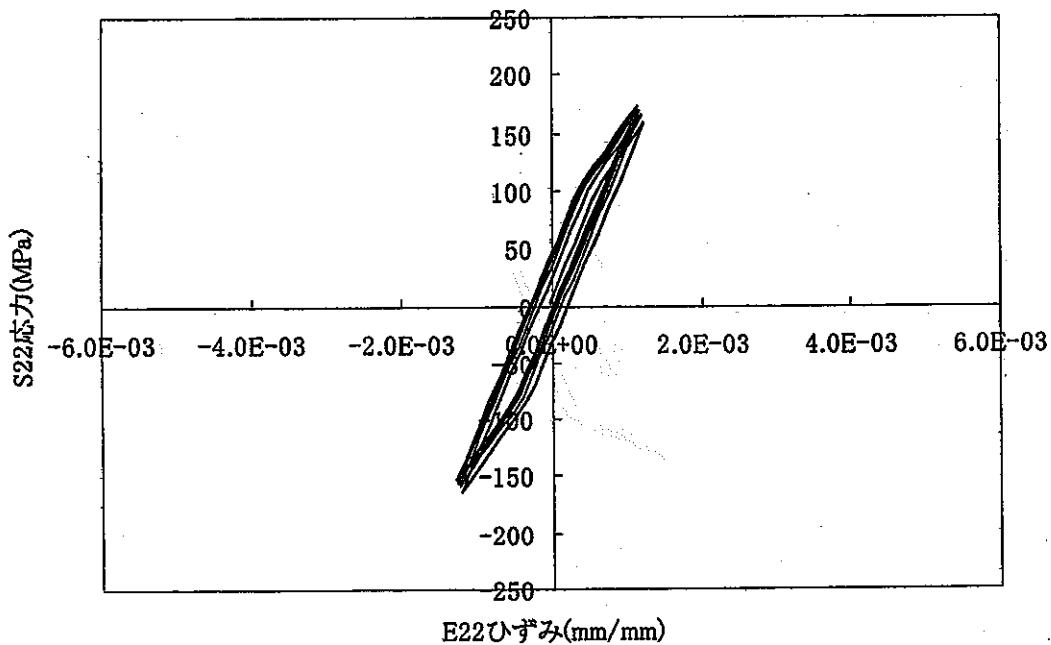


図 2.3-7 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=2$ 、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

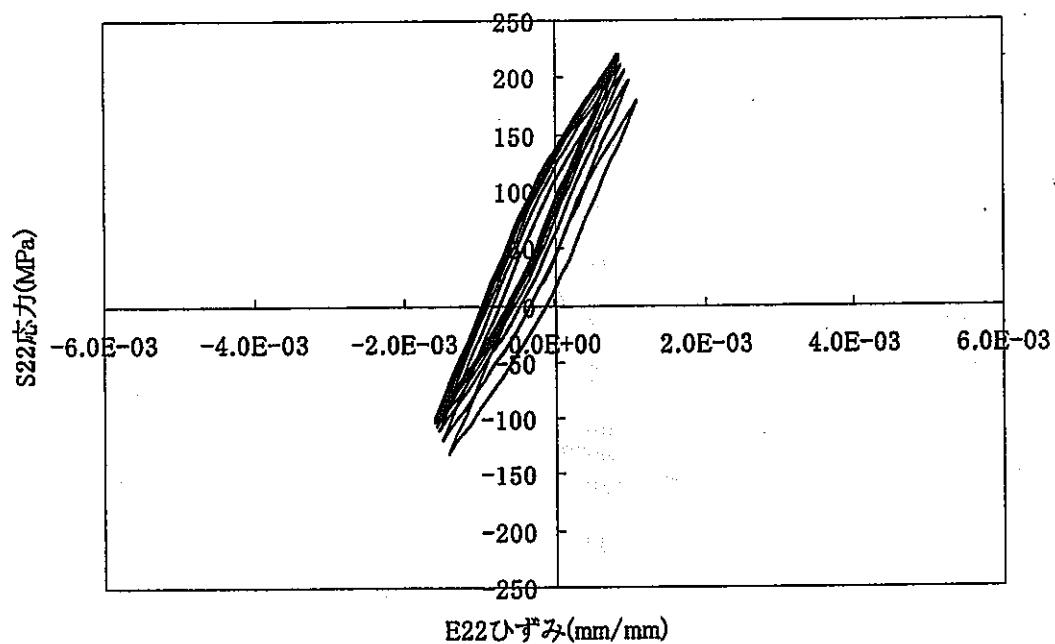


図 2.3-8 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=2$ 、1 次応力 120MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

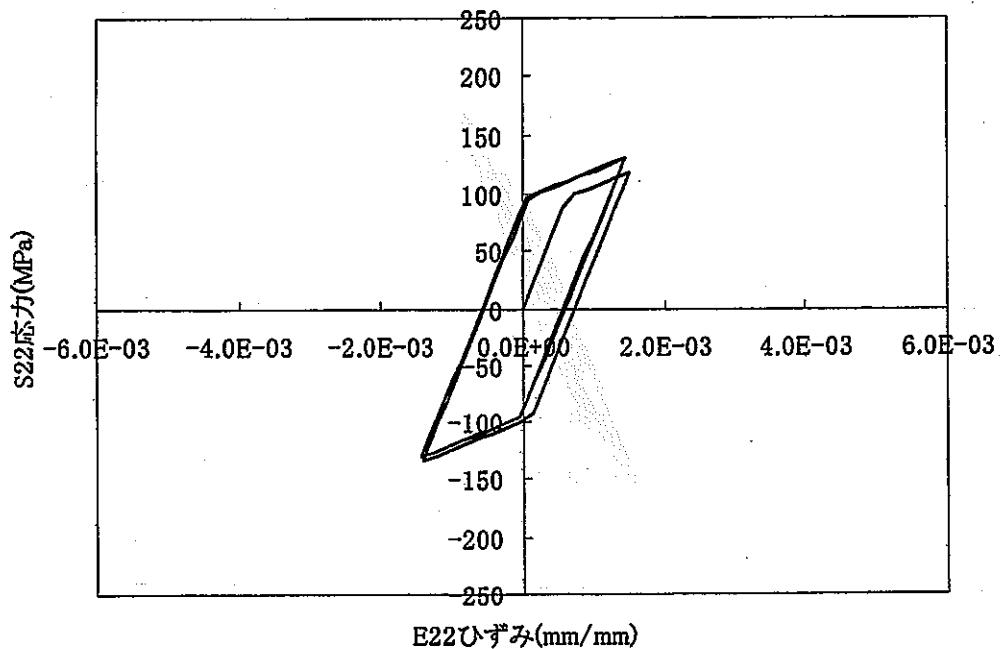


図 2.3-9 S22-E22 応力ひずみ関係(弾塑性応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=2$ 、1 次
応力 0MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

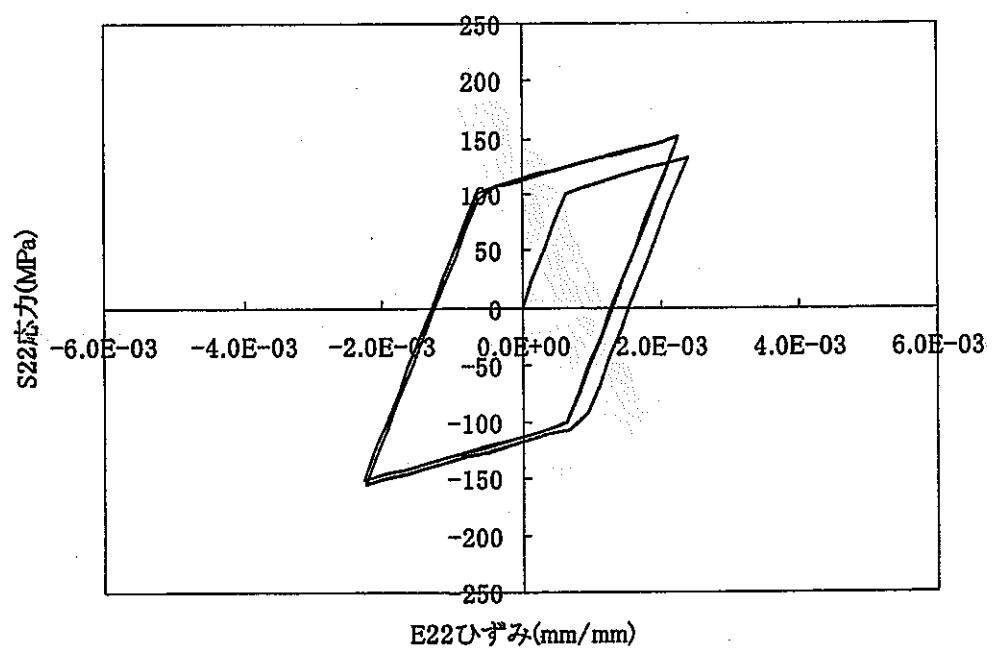


図 2.3-10 S22-E22 応力ひずみ関係(弾塑性応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=2$ 、1
次応力 0MPa/2 次応力強さ範囲 500MPa、弾塑性)

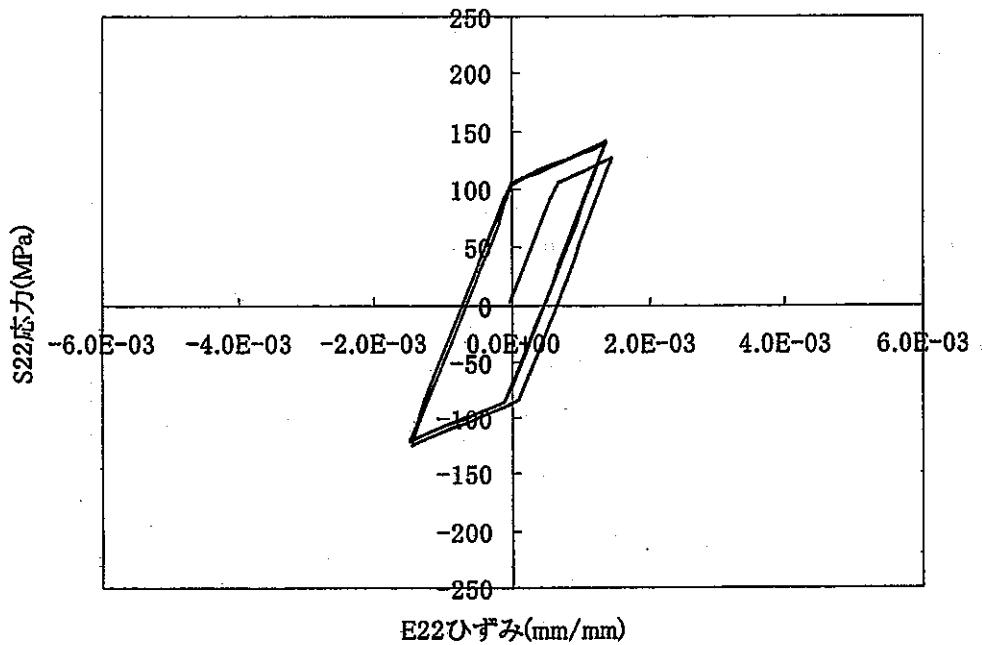


図 2.3-11 S22-E22 応力ひずみ関係(弾塑性応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=2$ 、 1
次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

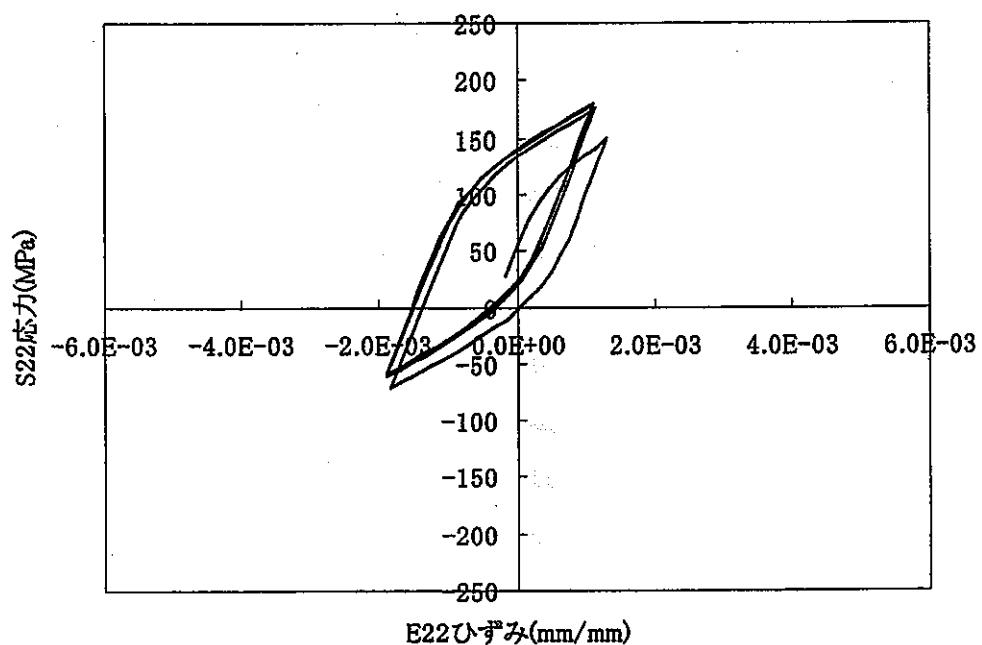


図 2.3-12 S22-E22 応力ひずみ関係(弾塑性応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=2$ 、 1
次応力 120MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

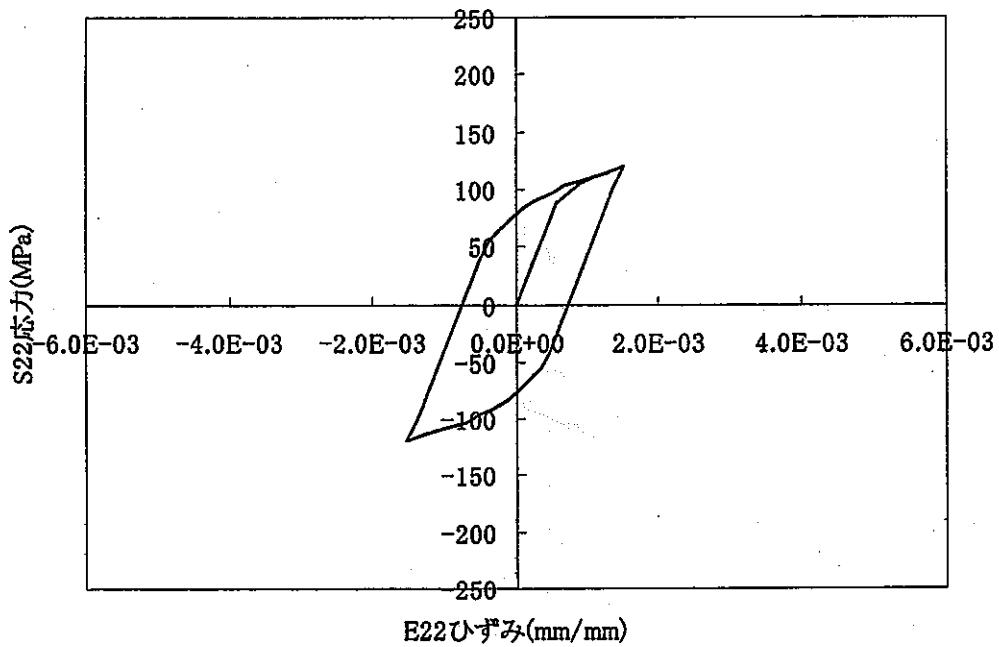


図 2.3-13 S22-E22 応力ひずみ関係(大野・王、 $q=2$ 、1 次応力 0MPa/2 次応力強さ範囲
350MPa、弾塑性)

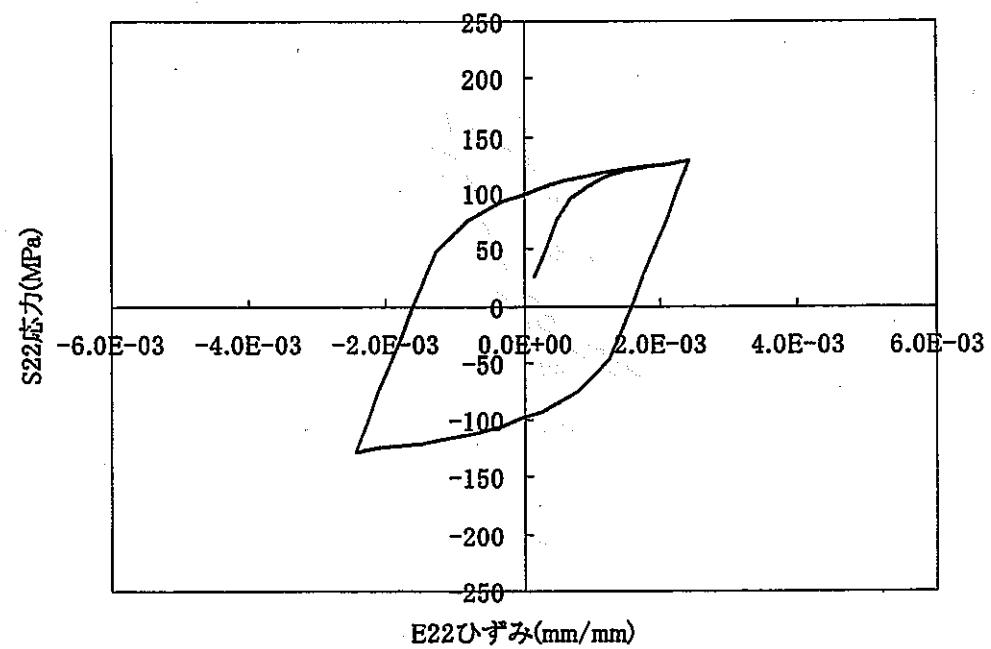


図 2.3-14 S22-E22 応力ひずみ関係(大野・王、 $q=2$ 、1 次応力 0MPa/2 次応力強さ範囲
500MPa、弾塑性)

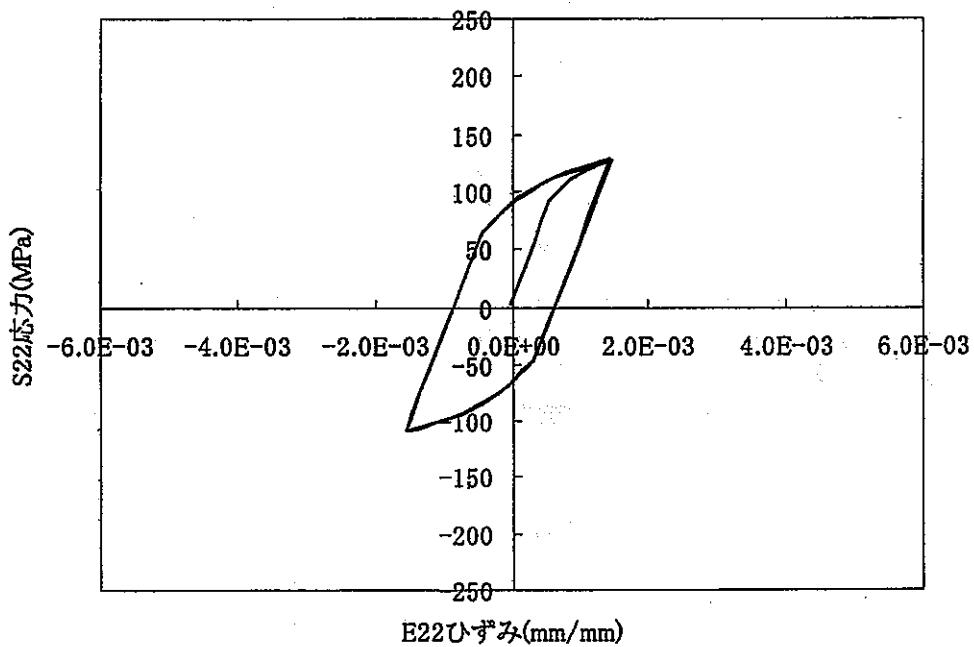


図 2.3-15 S22-E22 応力ひずみ関係(大野・王、 $q=2$ 、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲
350MPa、弾塑性)

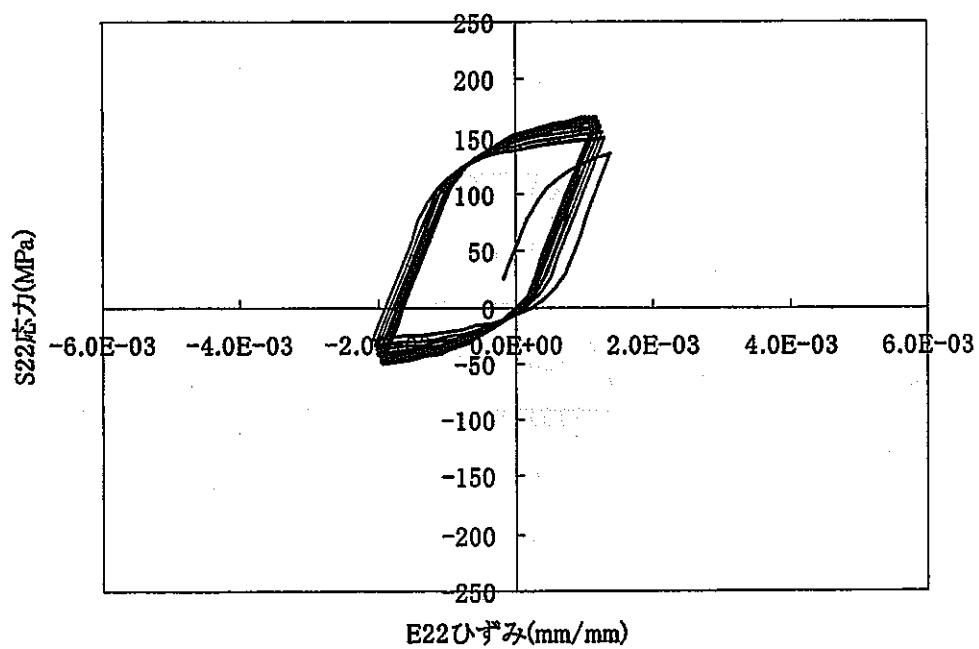


図 2.3-16 S22-E22 応力ひずみ関係(大野・王、 $q=2$ 、1 次応力 120MPa/2 次応力強さ範囲
350MPa、弾塑性)

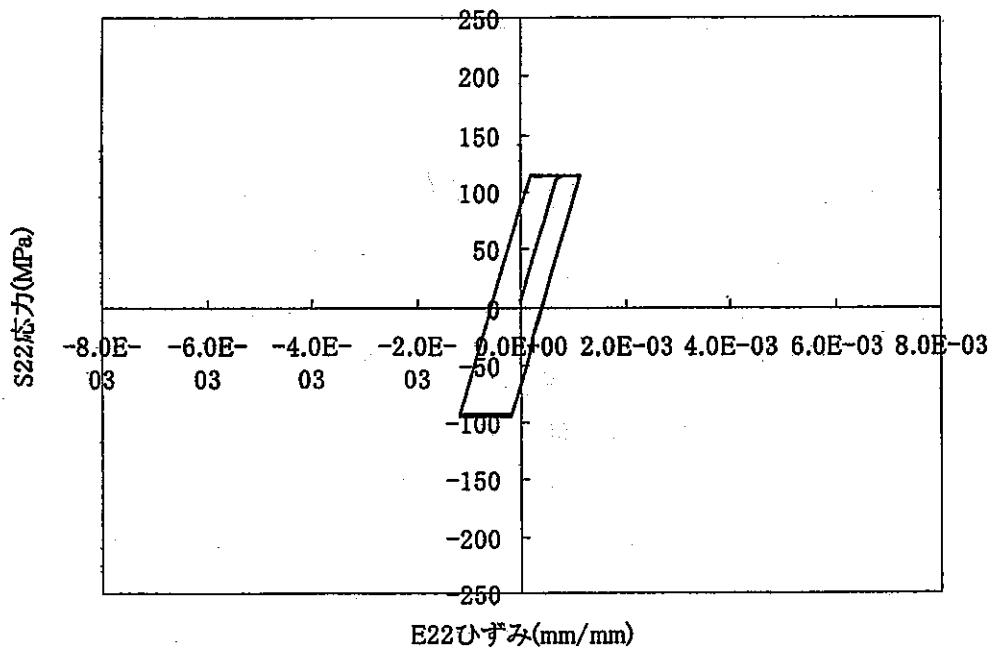


図 2.3-17 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=1$ 、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

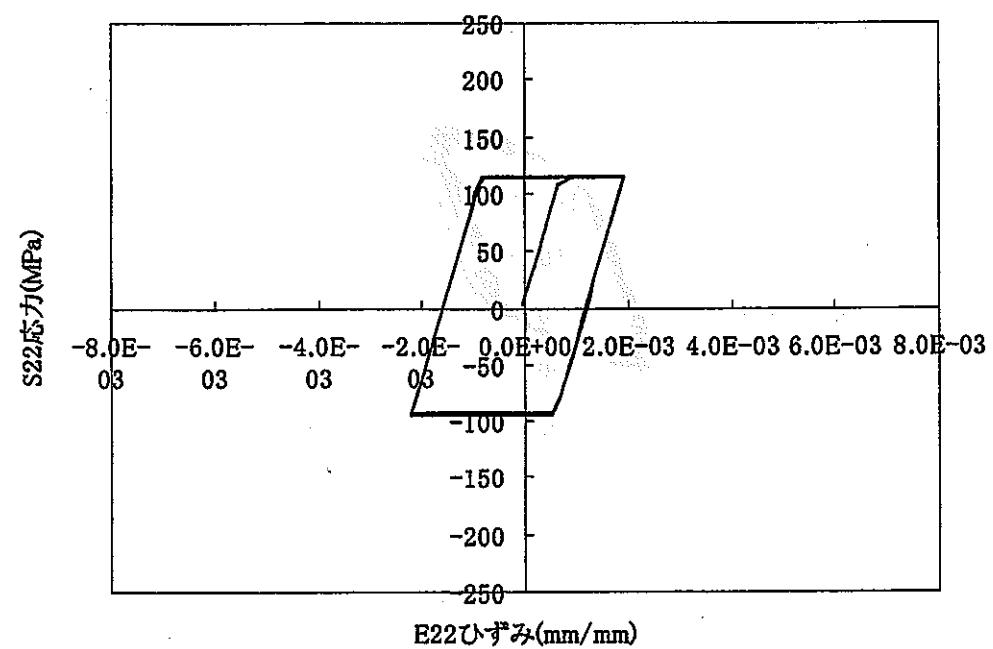


図 2.3-18 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=3$ 、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

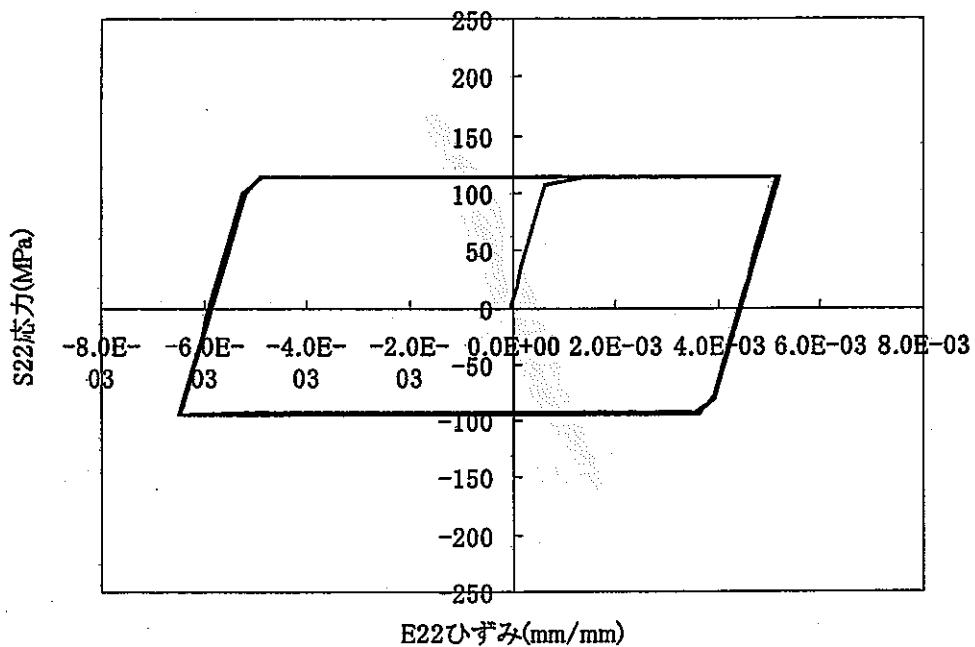


図 2.3-19 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=10$ 、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

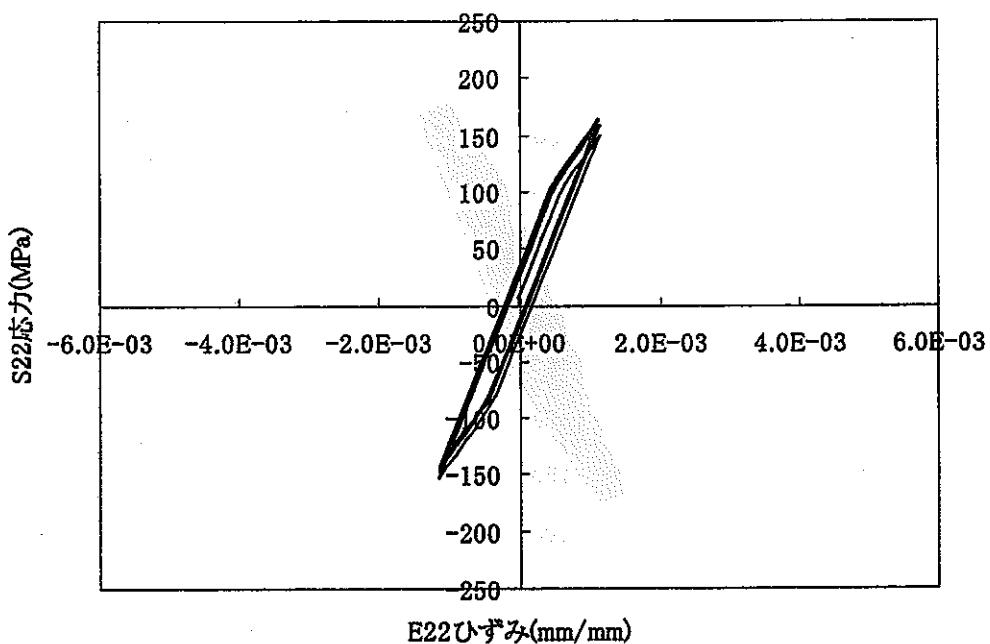


図 2.3-20 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=1$ 、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

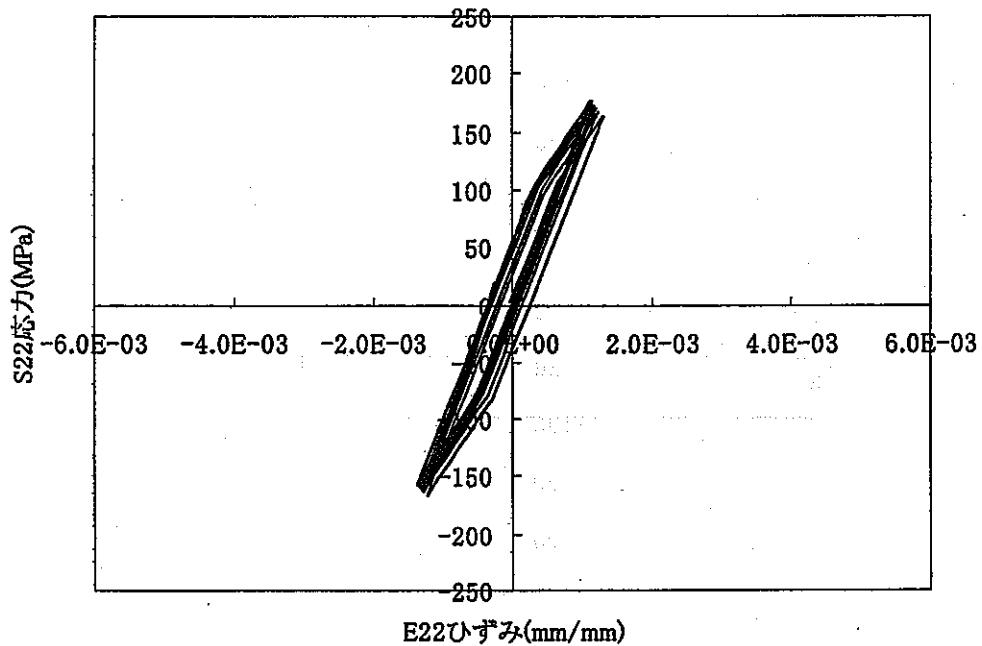


図 2.3・21 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=3$ 、1 次
応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

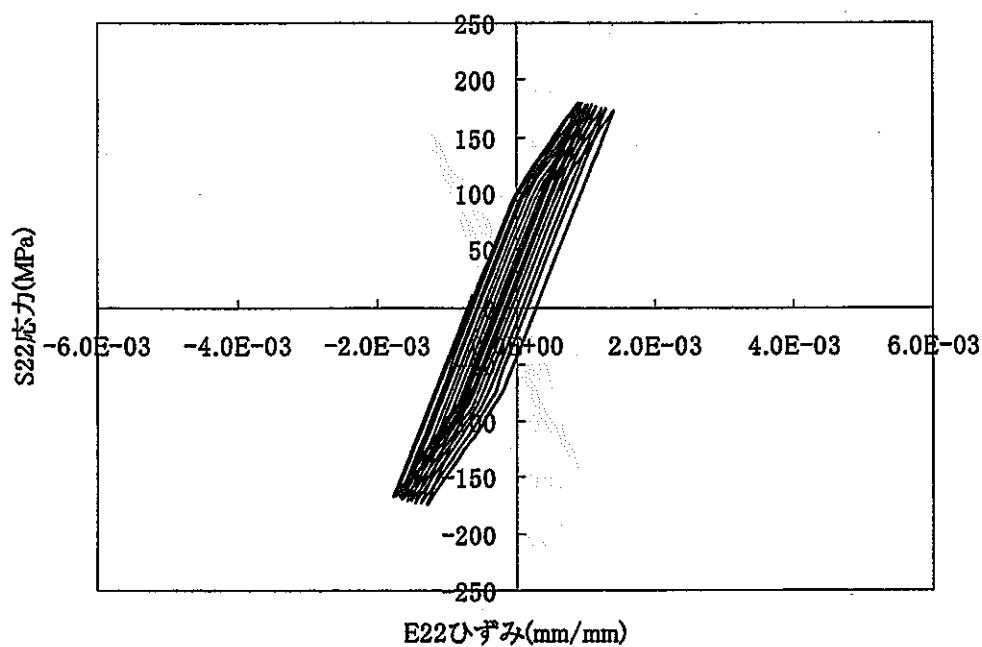


図 2.3・22 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=10$ 、1 次
応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

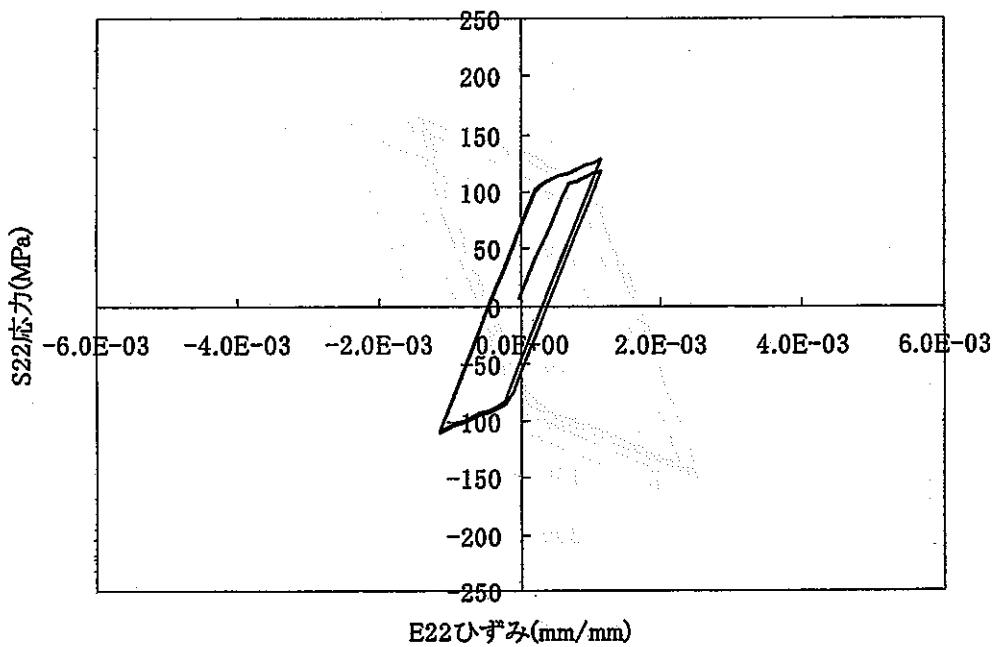


図 2.3-23 S22-E22 応力ひずみ関係(弾塑性応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=1$ 、1 セット)
次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

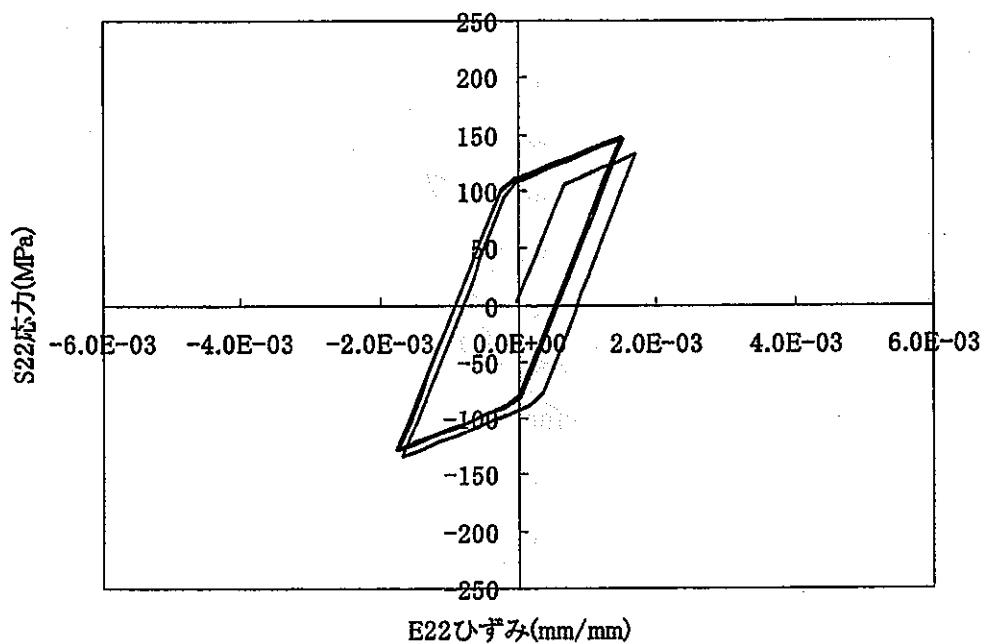


図 2.3-24 S22-E22 応力ひずみ関係(弾塑性応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=3$ 、1 セット)
次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

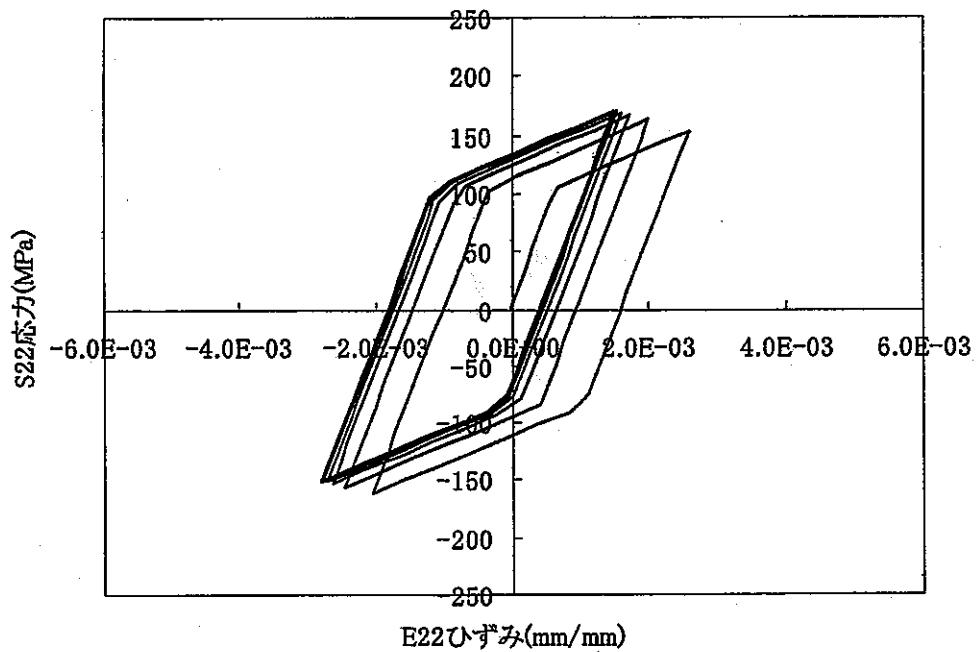


図 2.3-25 S22-E22 応力ひずみ関係(弾塑性応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=10$ 、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

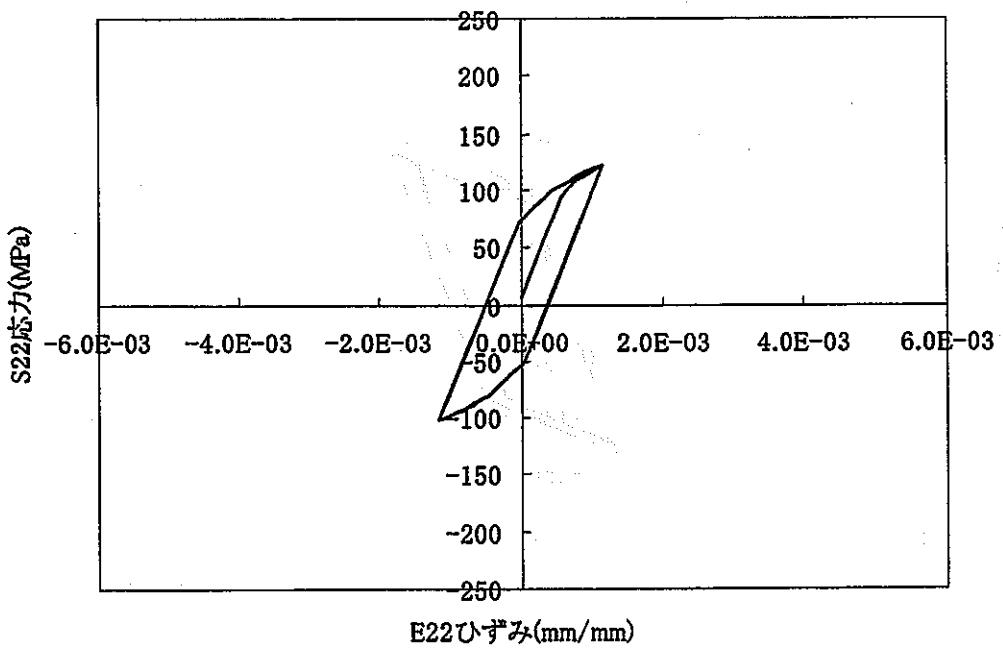


図 2.3-26 S22-E22 応力ひずみ関係(大野・王、 $q=1$ 、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

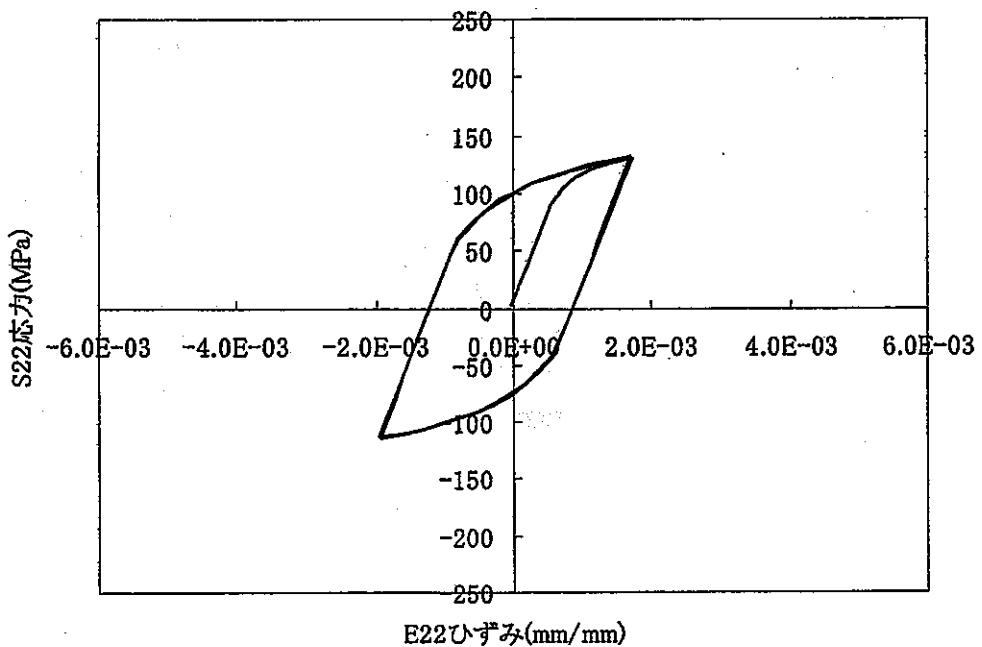


図 2.3-27 S22-E22 応力ひずみ関係(大野・王、 $q=3$ 、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

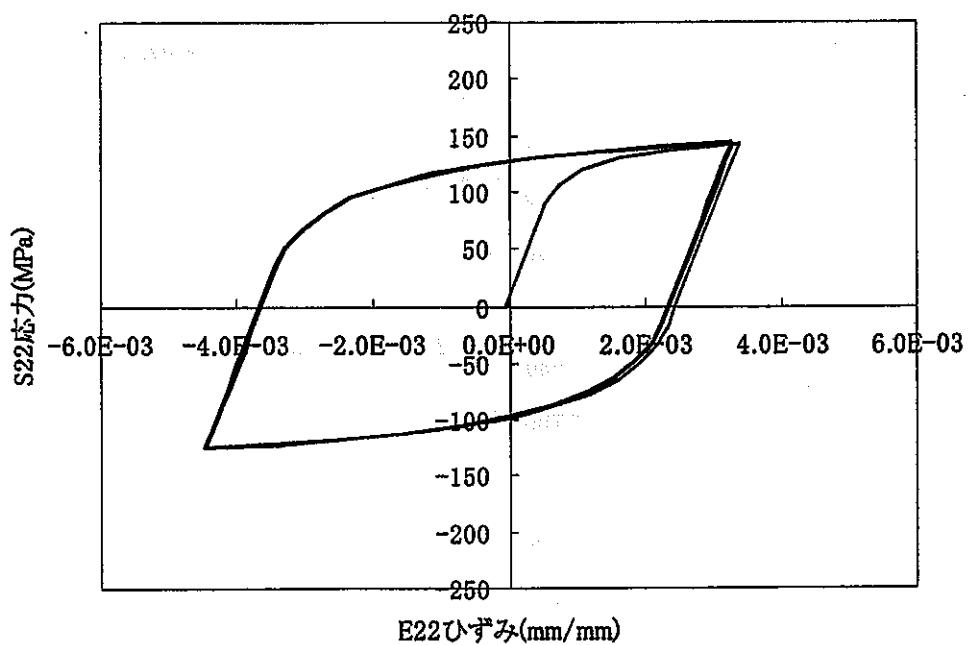


図 2.3-28 S22-E22 応力ひずみ関係(大野・王、 $q=10$ 、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、弾塑性)

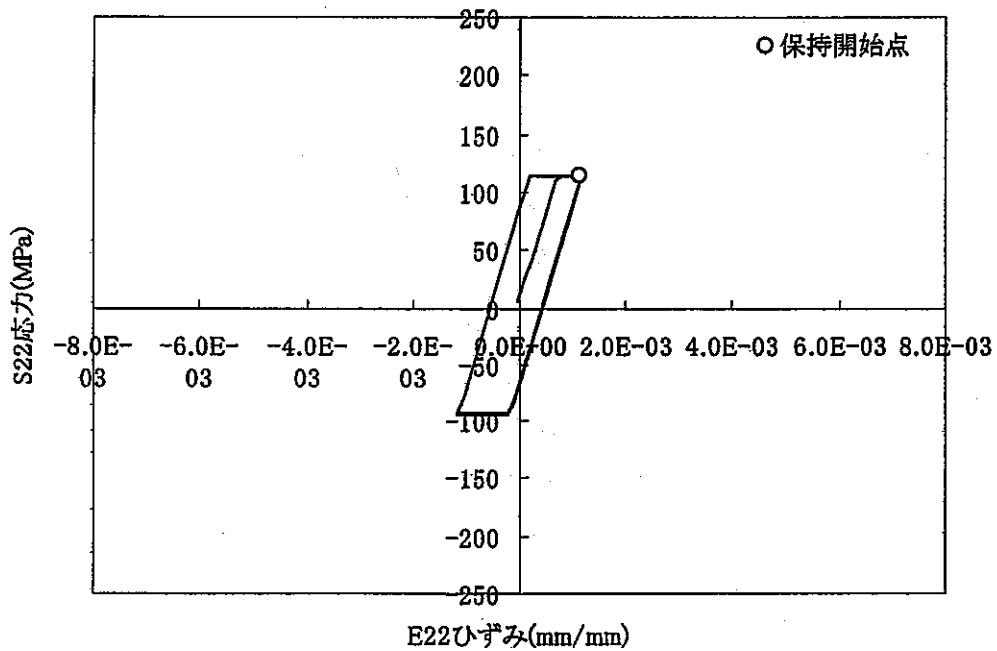


図 2.3-29 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=1$ 、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、引張保持)

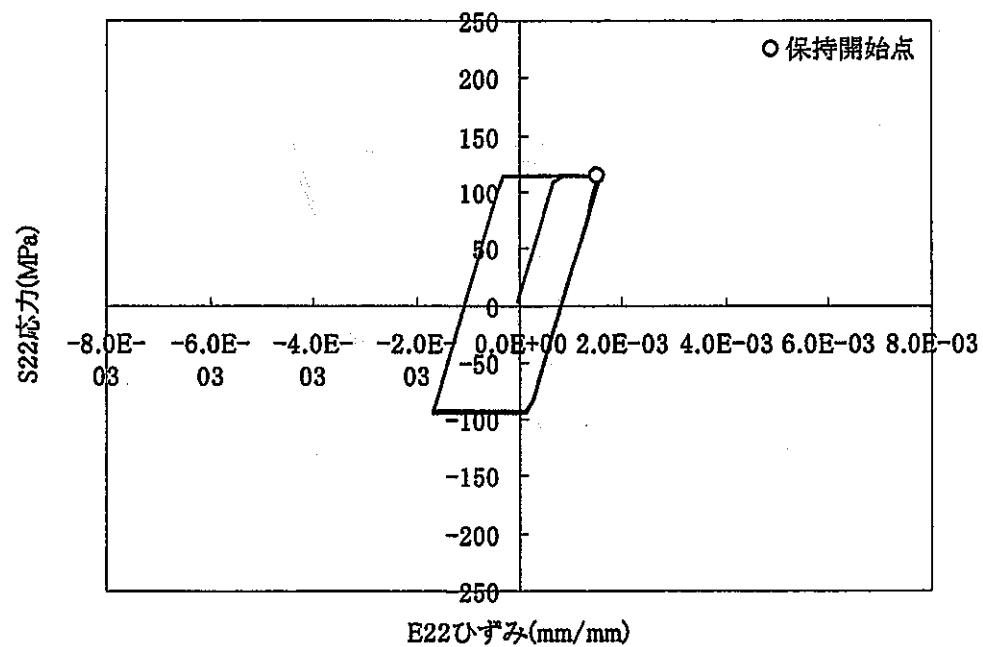


図 2.3-30 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=2$ 、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、引張保持)

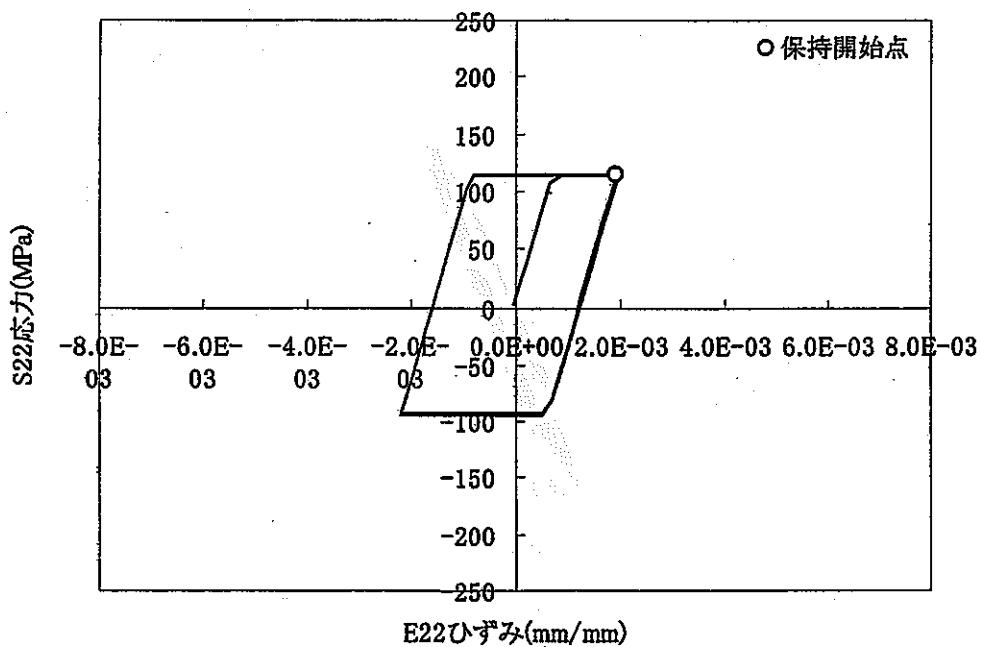


図 2.3-31 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=3$ 、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲
350MPa、引張保持)

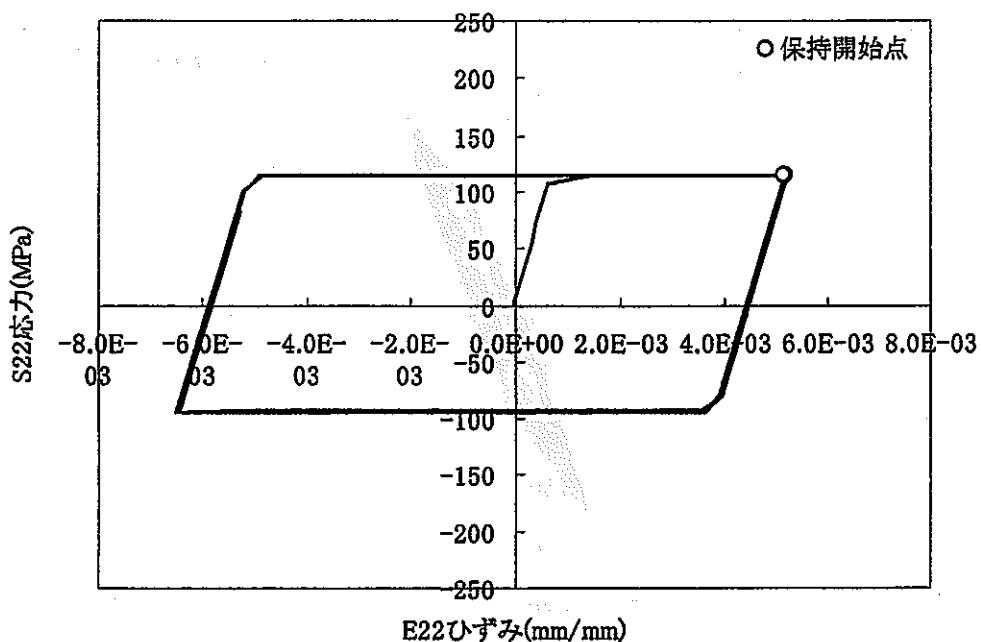


図 2.3-32 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=10$ 、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範
囲 350MPa、引張保持)

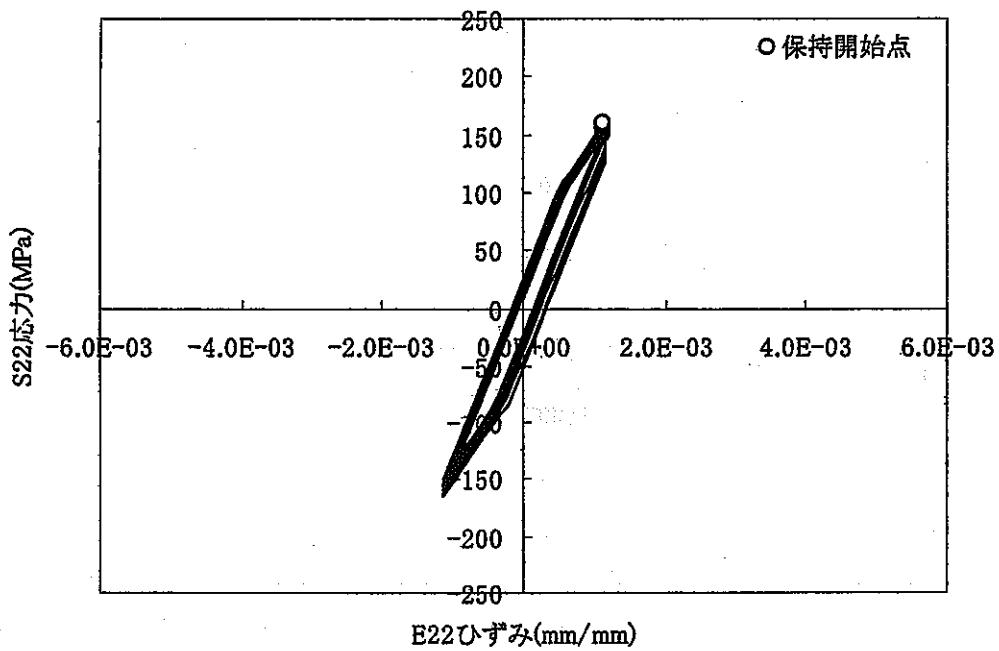


図 2.3-33 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=1$ 、1 次
応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、引張保持)

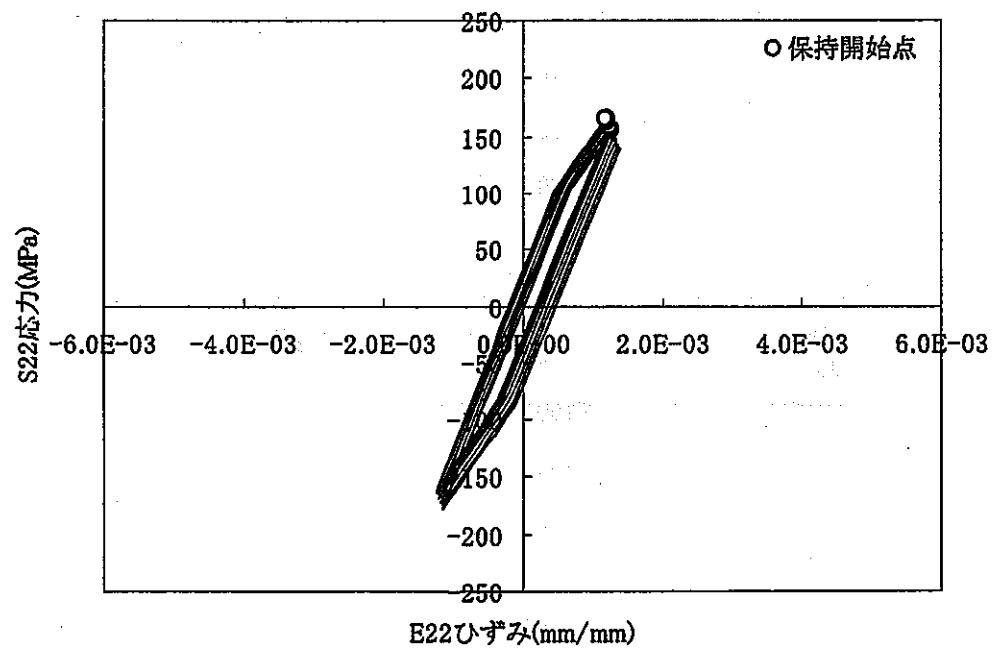


図 2.3-34 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=2$ 、1 次
応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、引張保持)

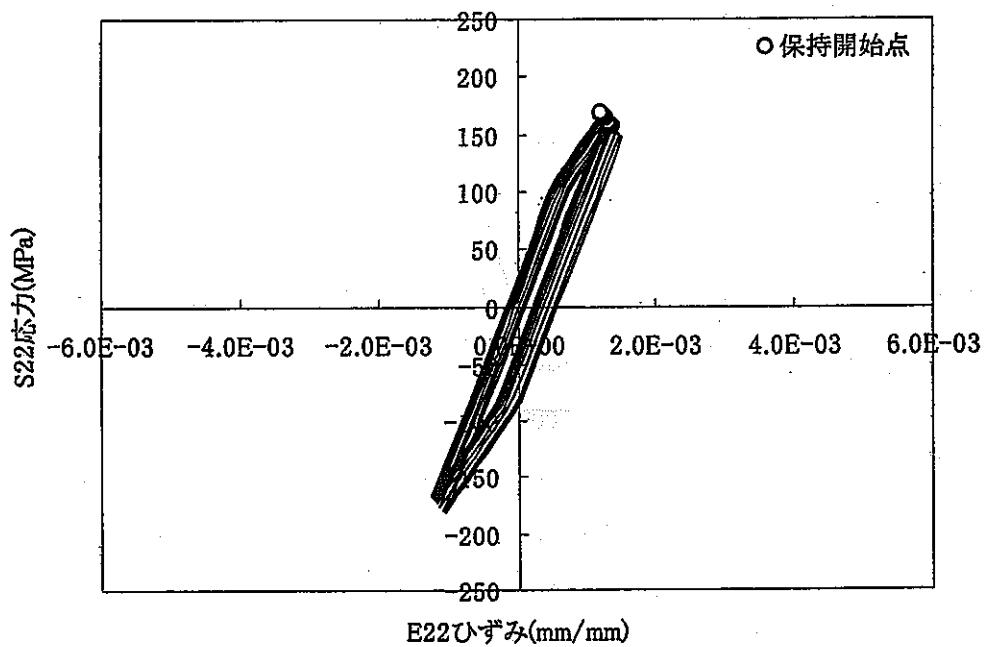


図 2.3-35 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=3$ 、1 次
応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、引張保持)

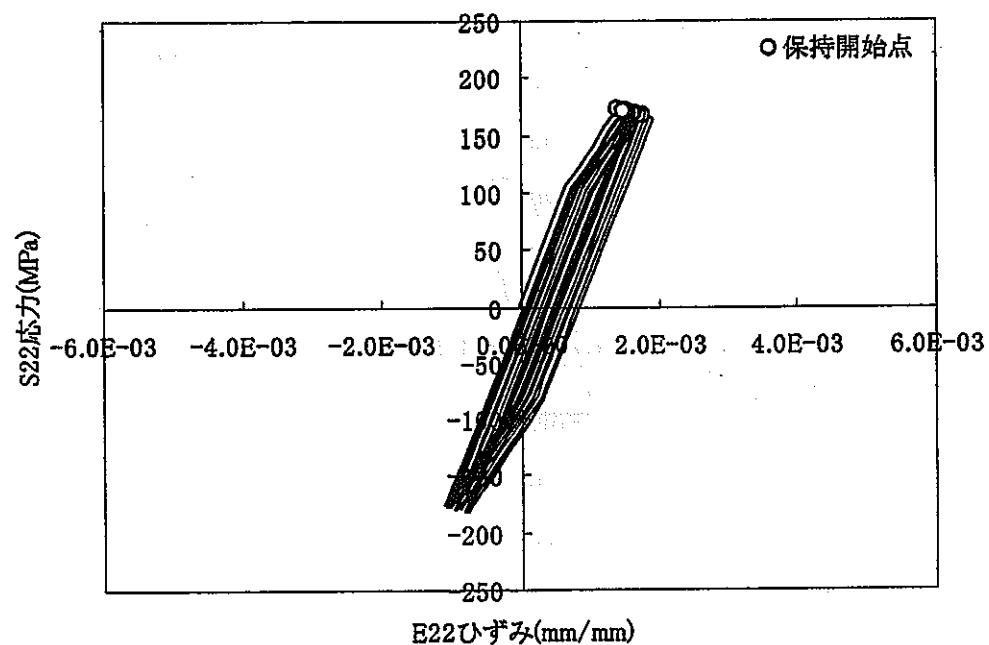


図 2.3-36 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=10$ 、1 次
応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、引張保持)

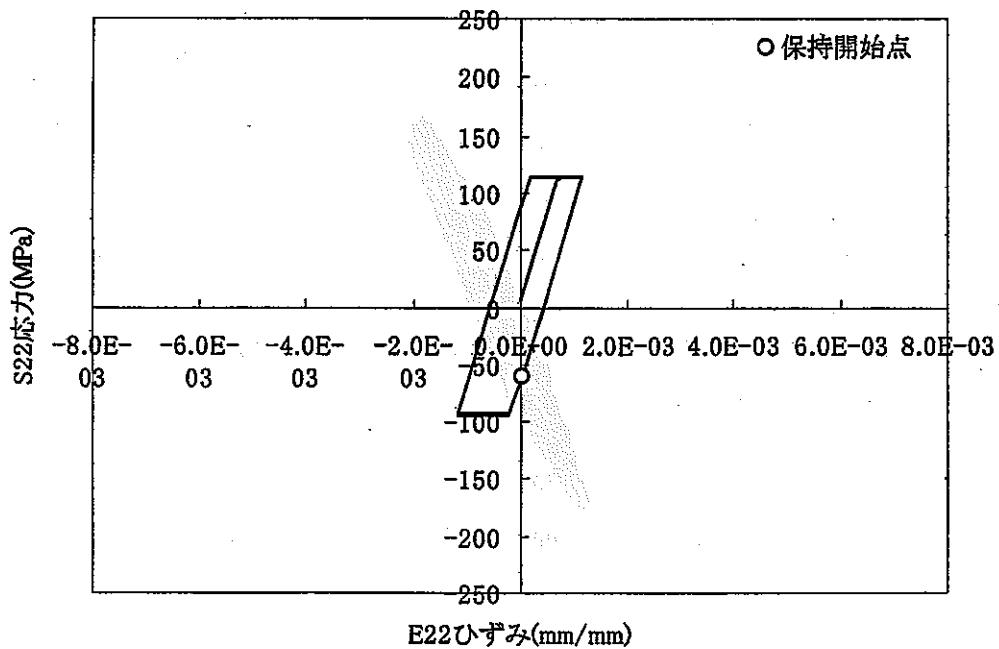


図 2.3-37 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=1$ 、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲
350MPa、○中間保持)

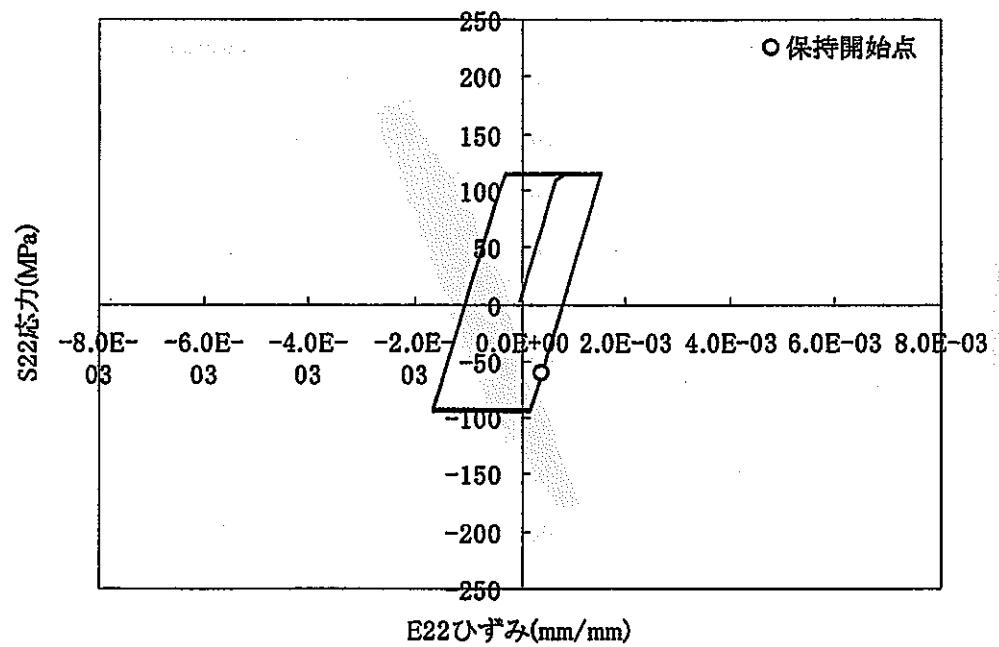


図 2.3-38 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=2$ 、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲
350MPa、○中間保持)

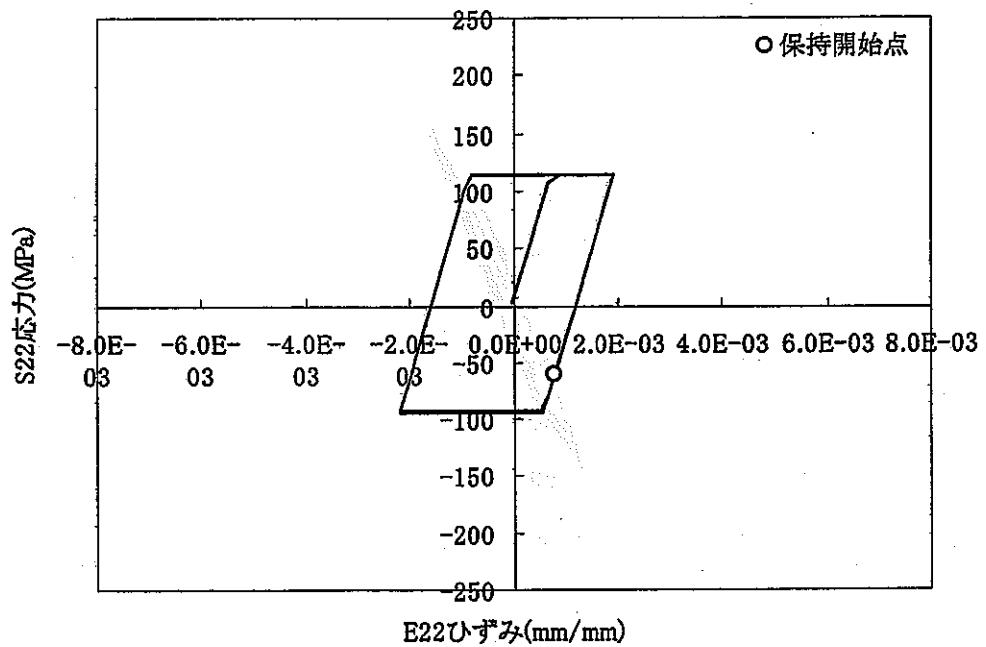


図 2.3-39 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=3$ 、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲
350MPa、中間保持)

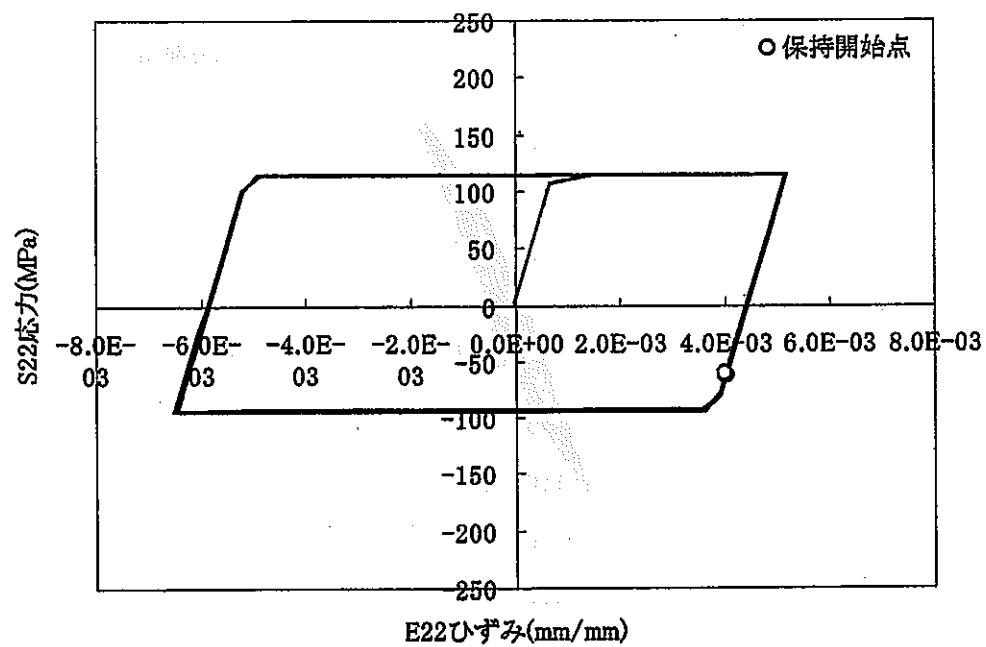


図 2.3-40 S22-E22 応力ひずみ関係(弾完全塑性、 $q=10$ 、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲
350MPa、中間保持)

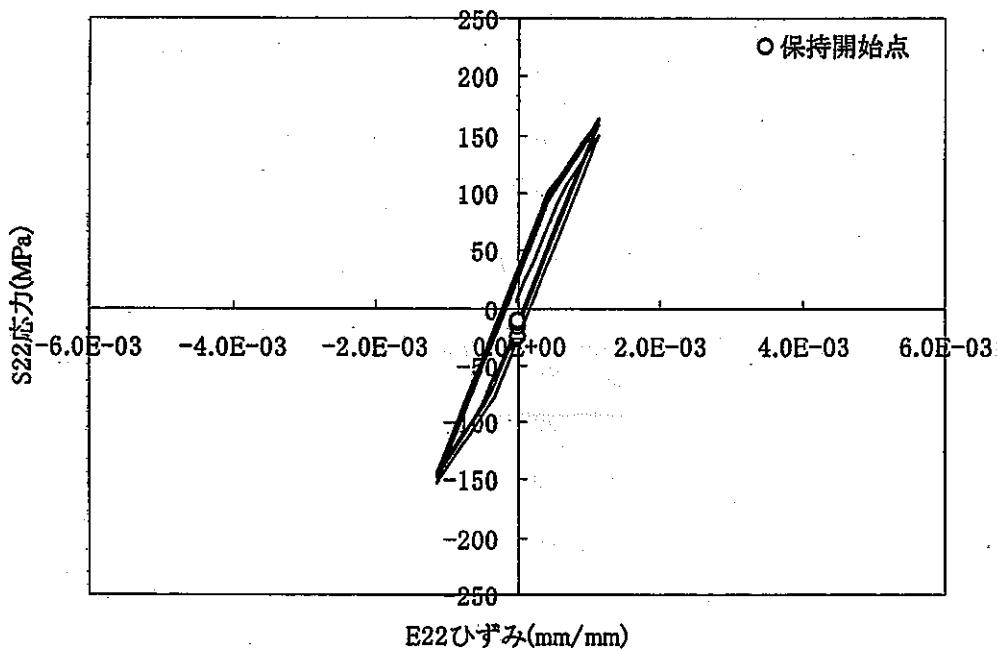


図 2.3-41 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=1$ 、1 次
応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、中間保持)

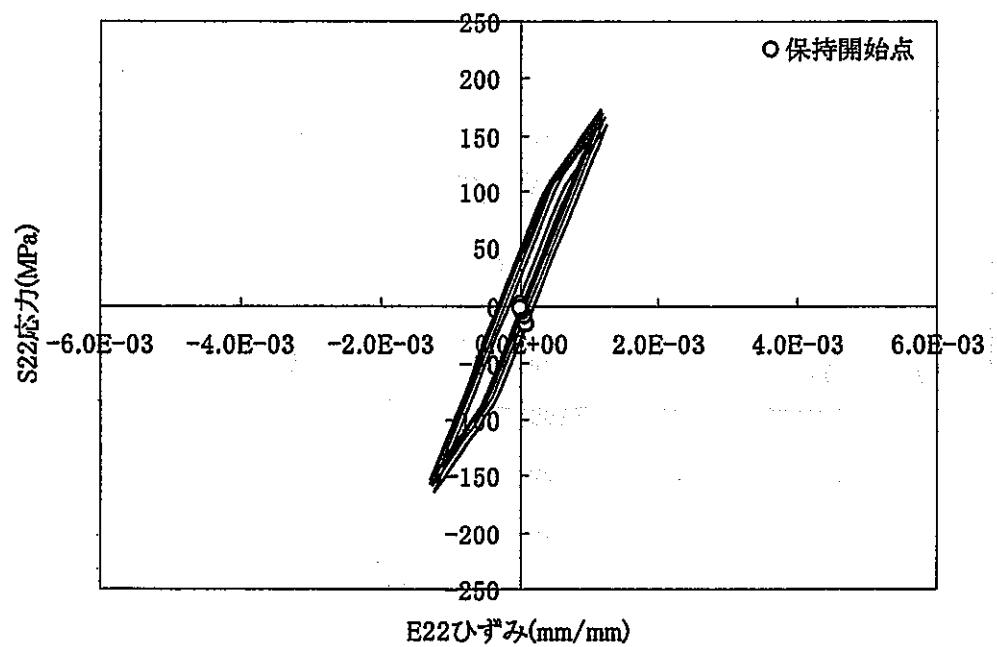


図 2.3-42 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=2$ 、1 次
応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、中間保持)

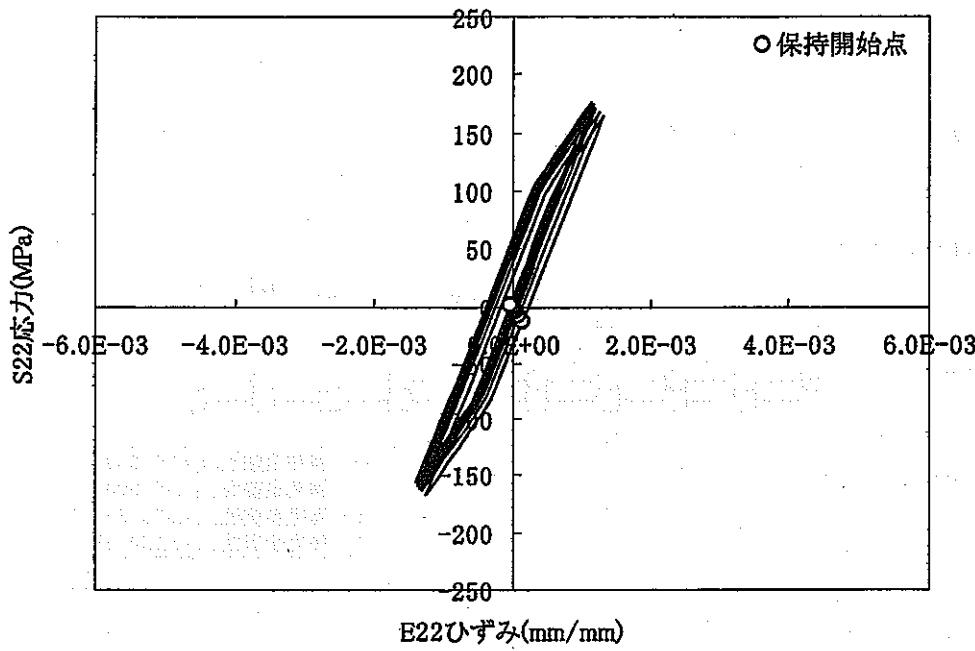


図 2.3-43 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=3$ 、1 次
応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、中間保持)

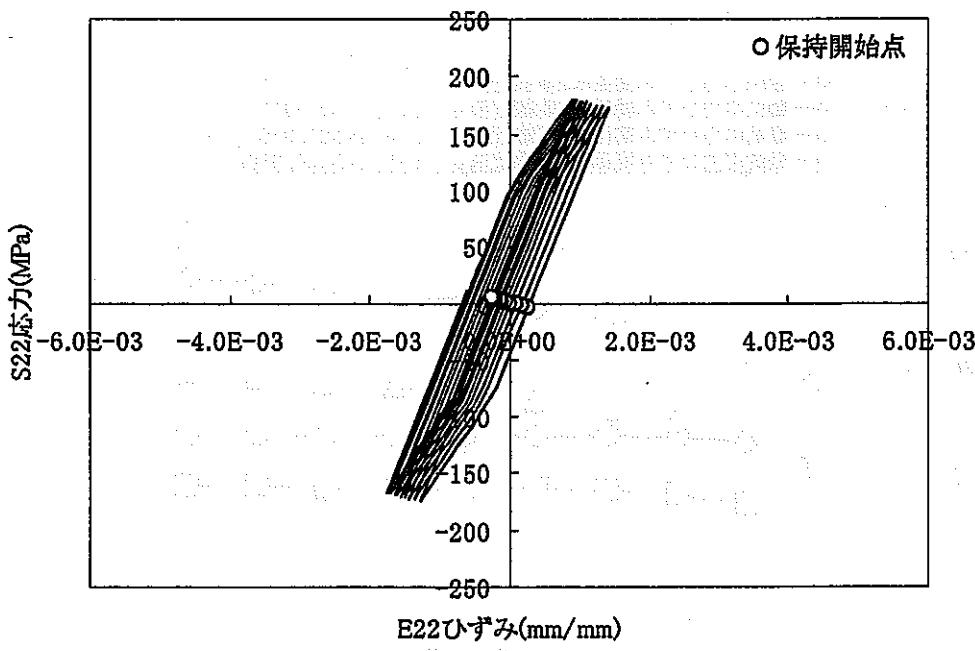


図 2.3-44 S22-E22 応力ひずみ関係(動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、 $q=10$ 、1 次
応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa、中間保持)

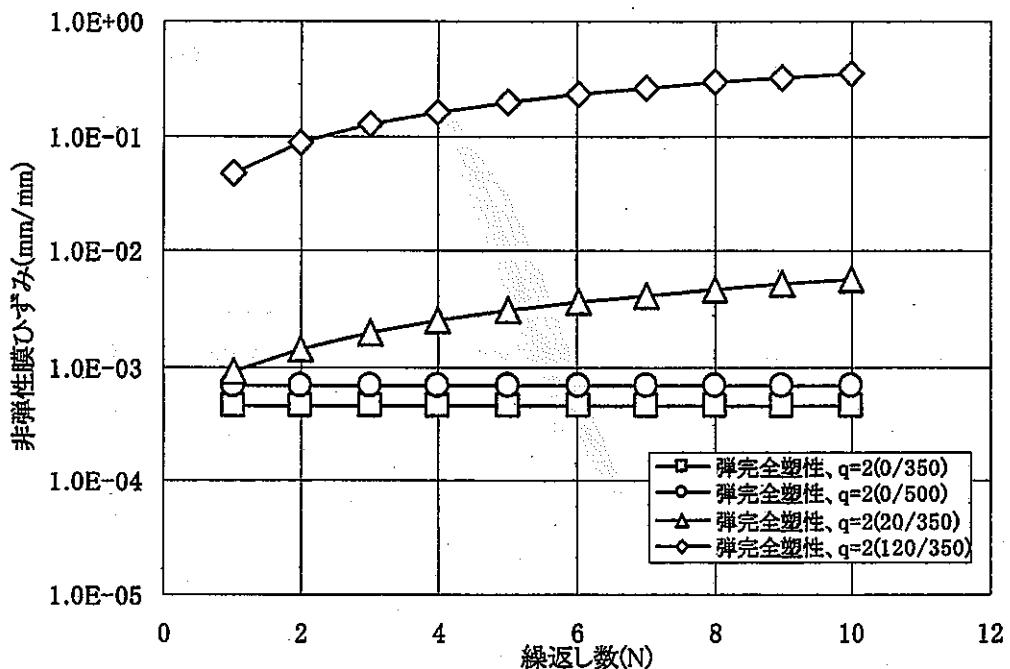
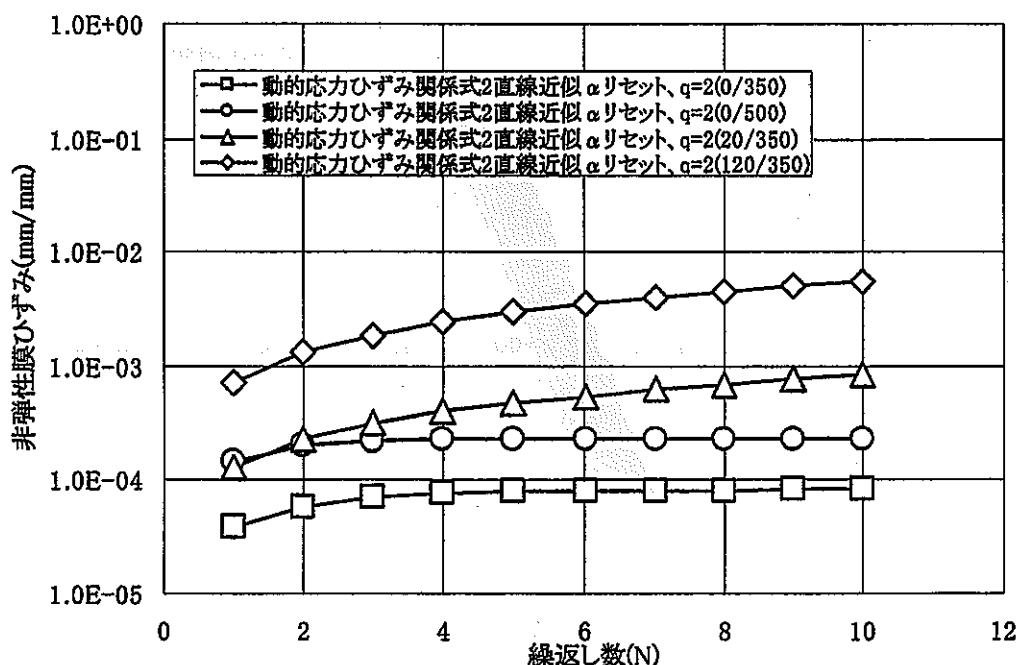


図 2.3-45 1 次応力/2 次応力強さ範囲の非弾性膜ひずみへの影響(弾塑性、弾完全塑性)

図 2.3-46 1 次応力/2 次応力強さ範囲の非弾性膜ひずみへの影響(弾塑性、動的応力ひずみ
関係式 2 直線近似 α リセット)

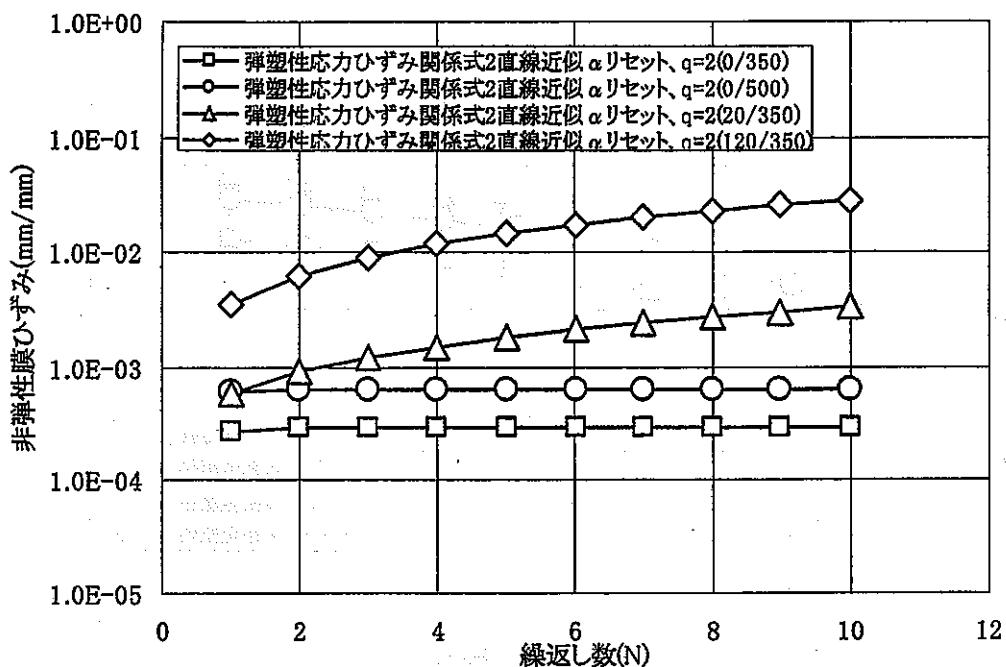


図 2.3-47 1 次応力/2 次応力強さ範囲の非弾性膜ひずみへの影響(弾塑性、弾塑性応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット)

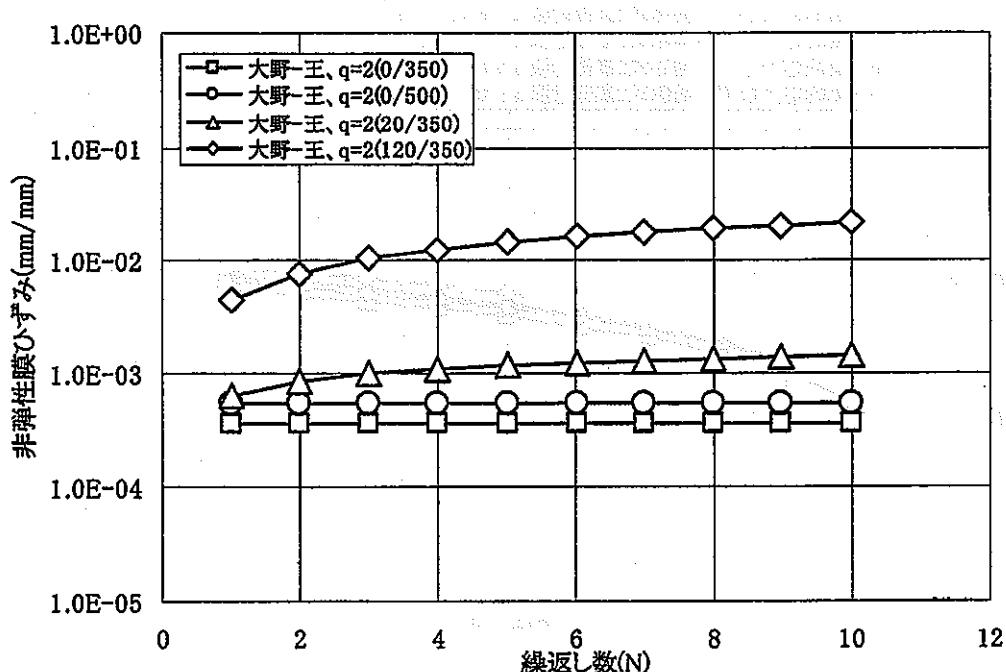


図 2.3-48 1 次応力/2 次応力強さ範囲の非弾性膜ひずみへの影響(弾塑性、大野・王)

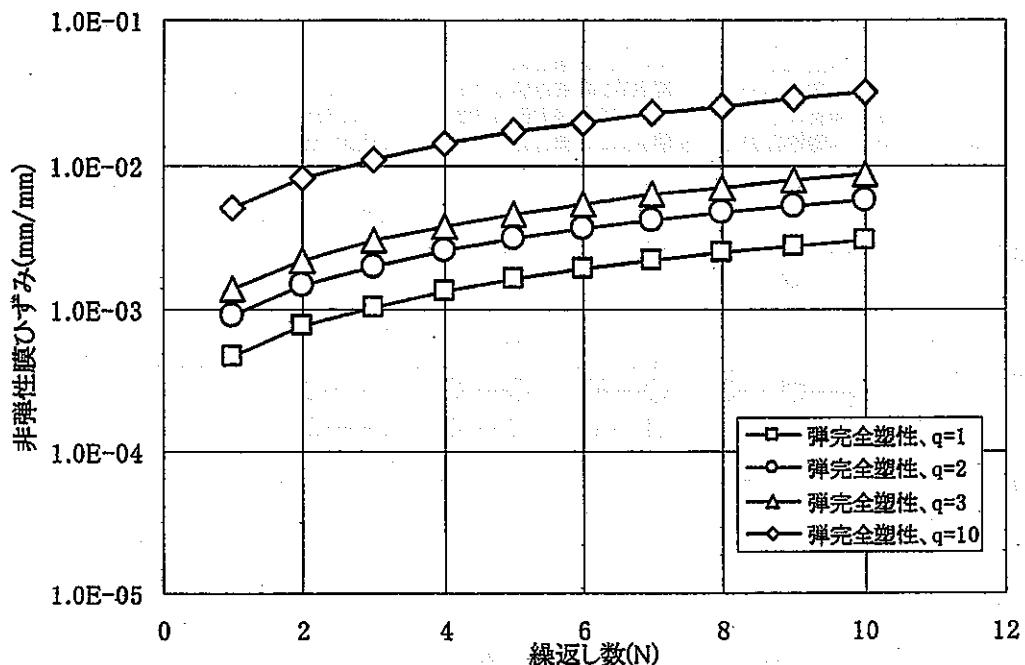


図 2.3-49 弾性追従係数の非弾性膜ひずみへの影響(弾塑性、弾完全塑性、1次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

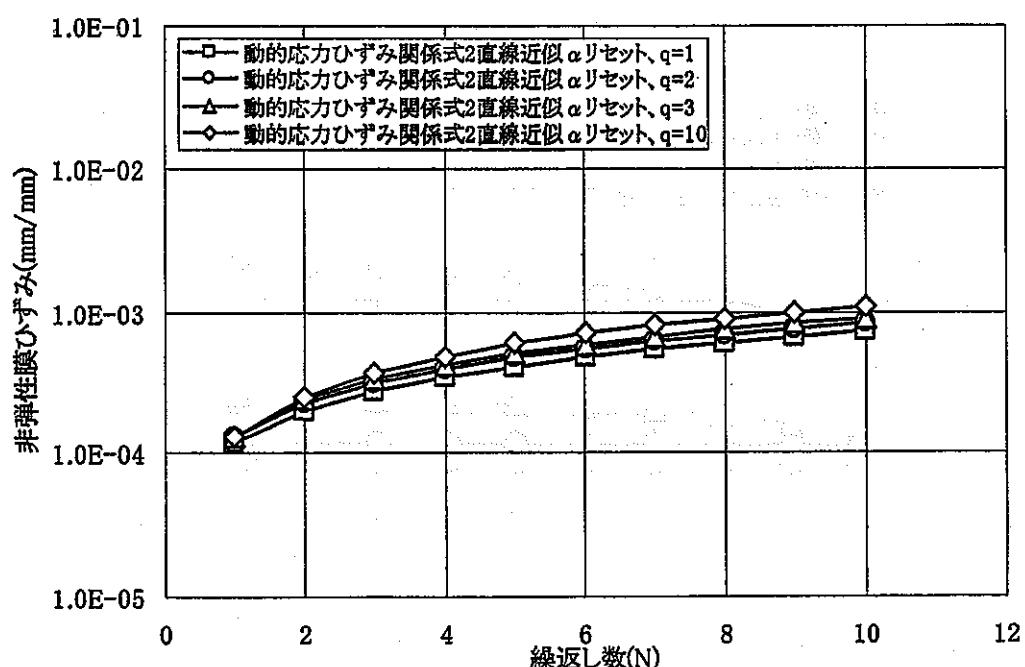


図 2.3-50 弾性追従係数の非弾性膜ひずみへの影響(弾塑性、動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α セット、1次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

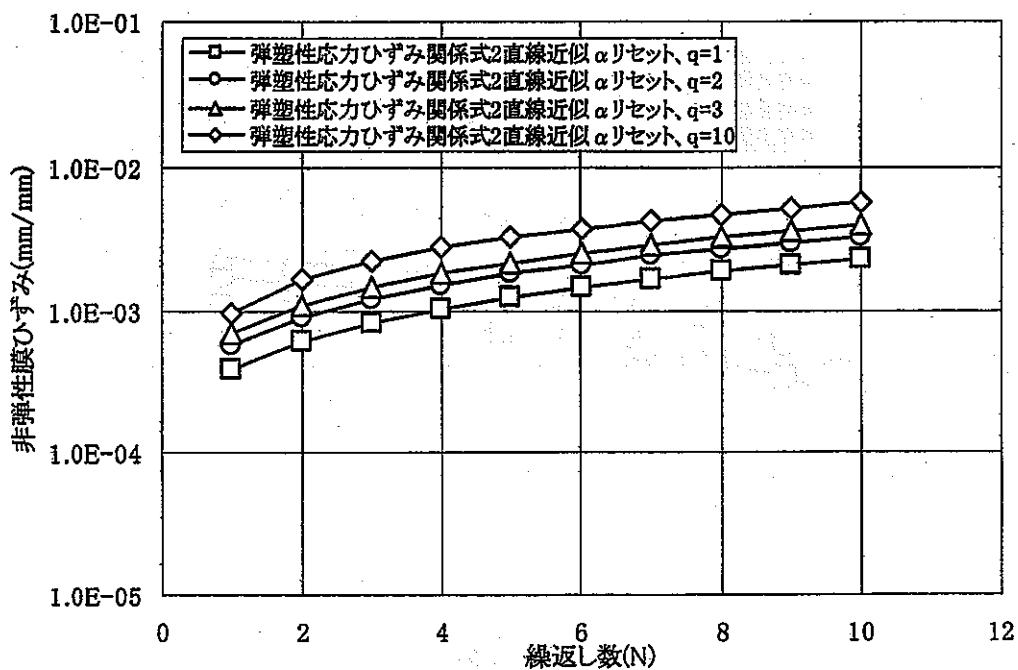


図 2.3-51 弾性追従係数の非弾性膜ひずみへの影響(弾塑性、弾塑性応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

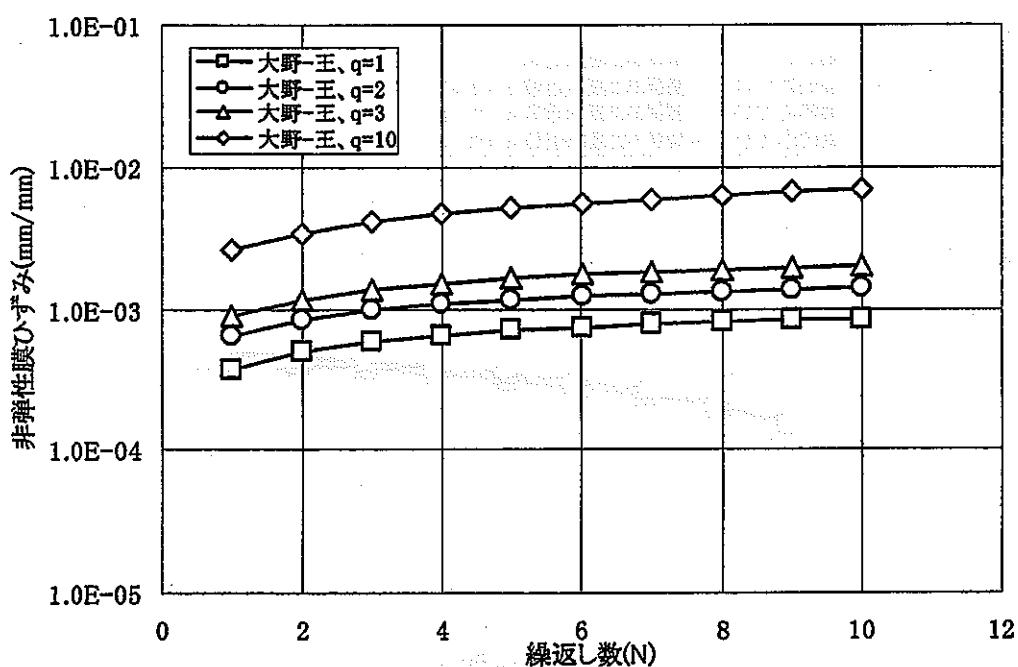


図 2.3-52 弾性追従係数の非弾性膜ひずみへの影響(弾塑性、大野・王、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

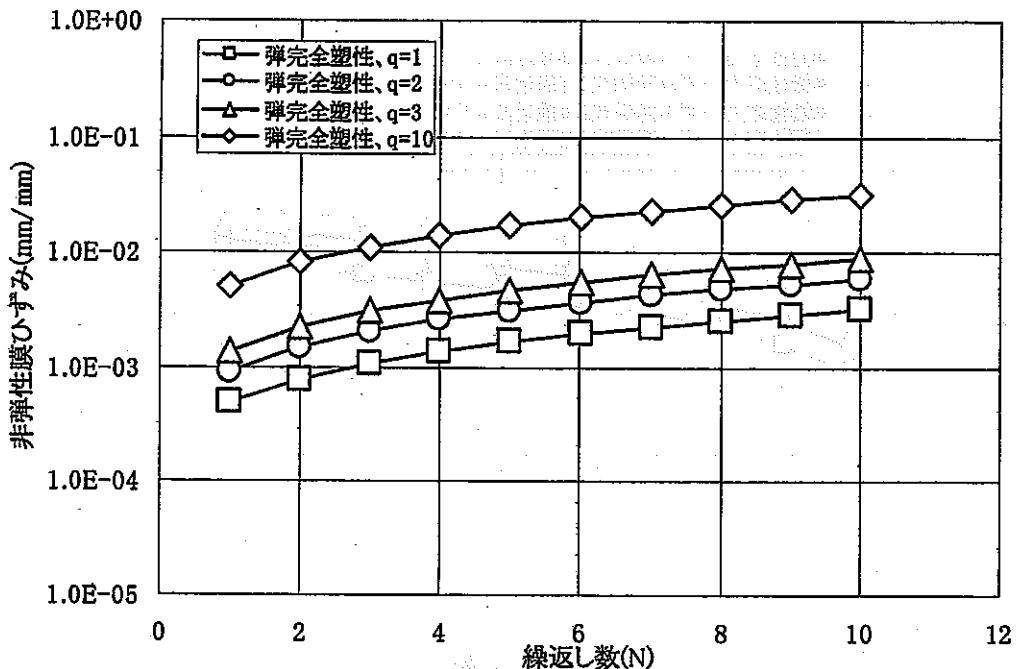


図 2.3-53 クリープの非弾性膜ひずみへの影響(引張保持、弾完全塑性、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

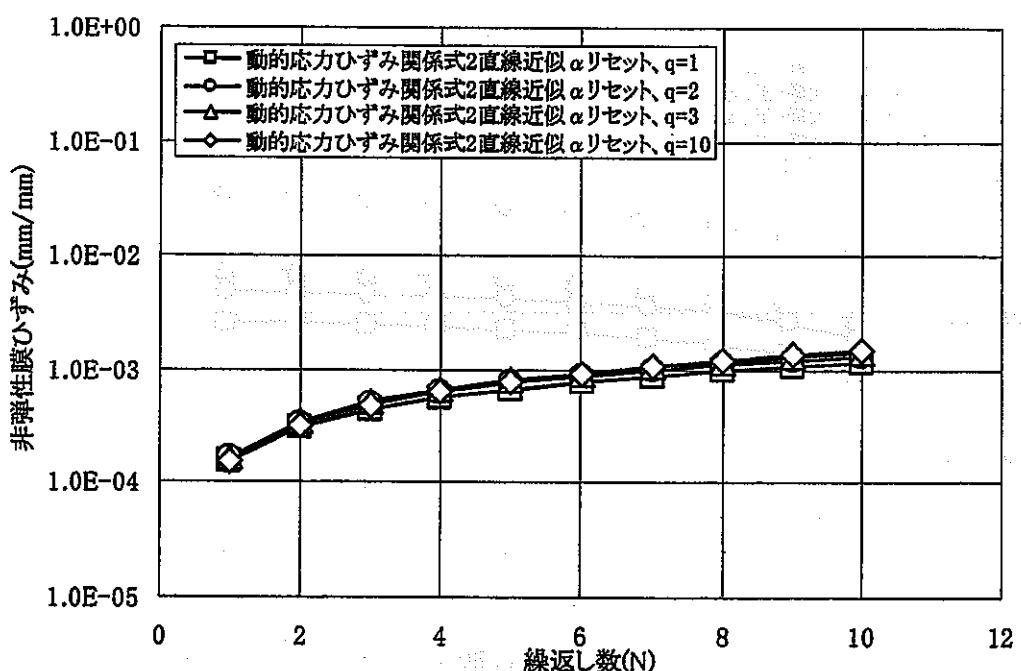


図 2.3-54 クリープの非弾性膜ひずみへの影響(引張保持、動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

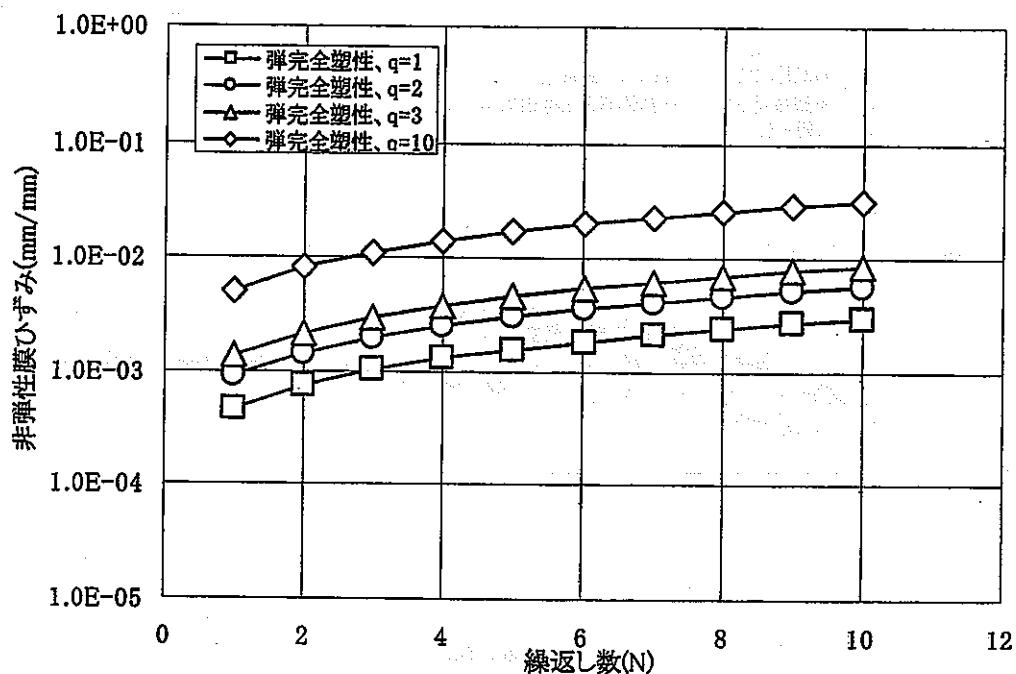


図 2.3-55 クリープの非弾性膜ひずみへの影響(中間保持、弾完全塑性、1次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

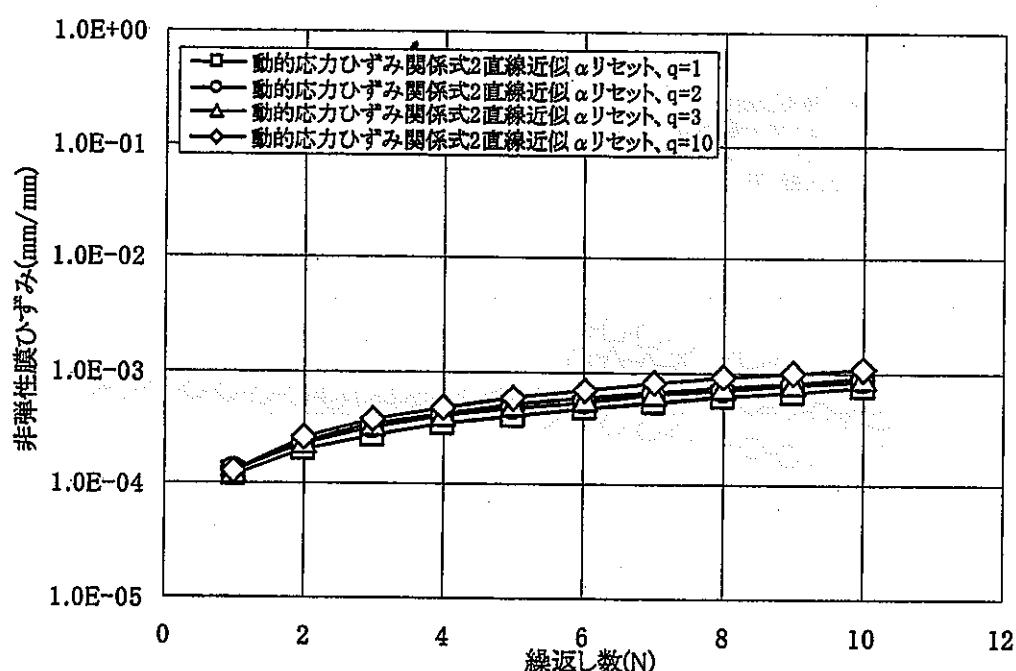


図 2.3-56 クリープの非弾性膜ひずみへの影響(中間保持、動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、1次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

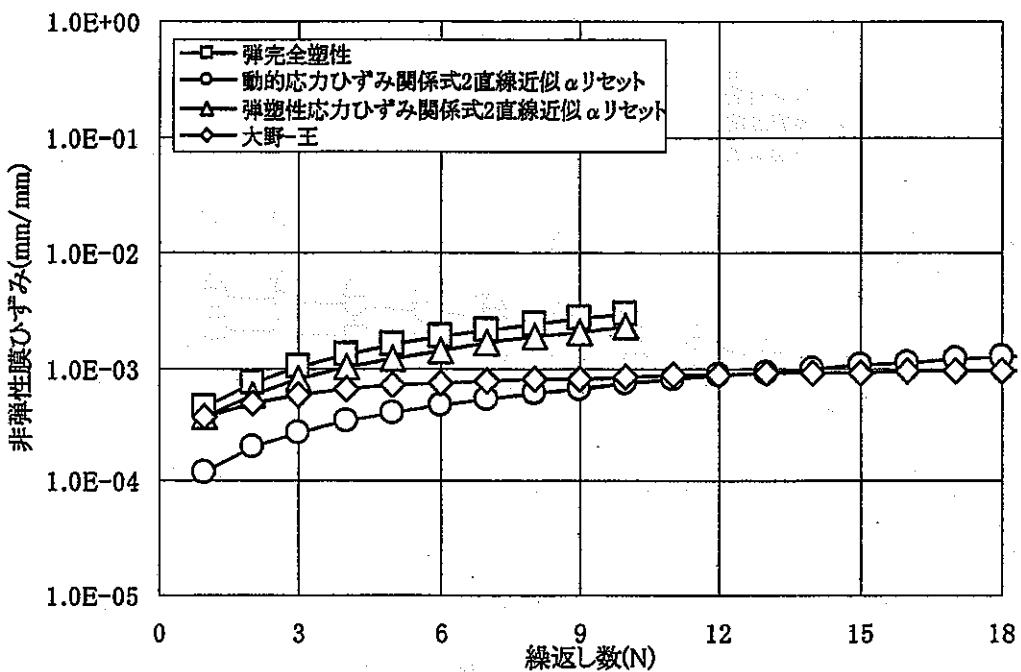


図 2.3-57 構成則の非弾性膜ひずみへの影響(弾塑性、 $q=1$ 、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

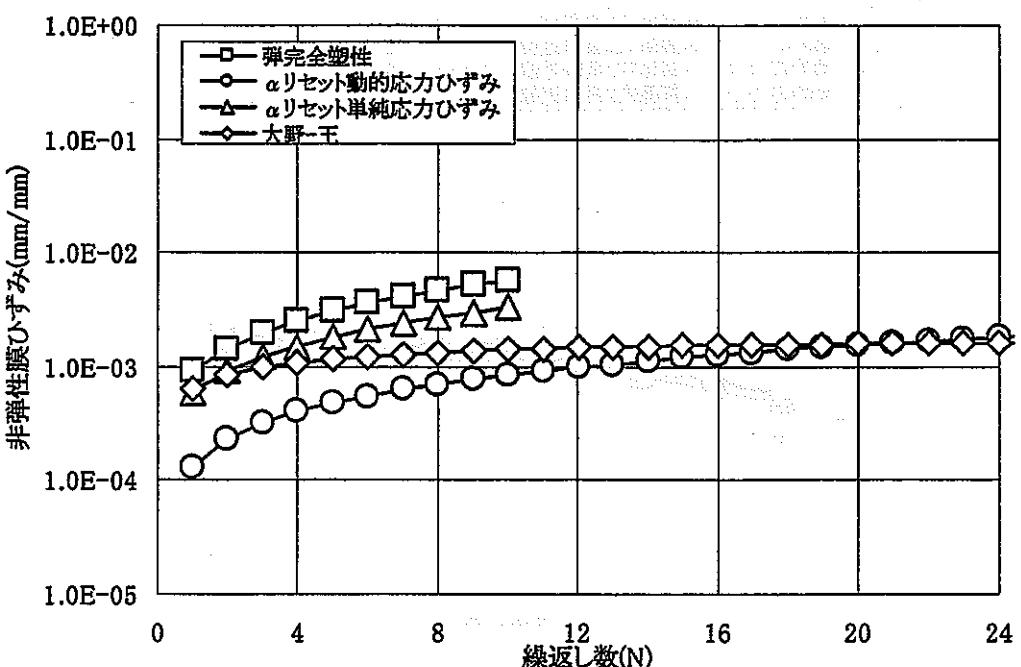


図 2.3-58 構成則の非弾性膜ひずみへの影響(弾塑性、 $q=2$ 、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

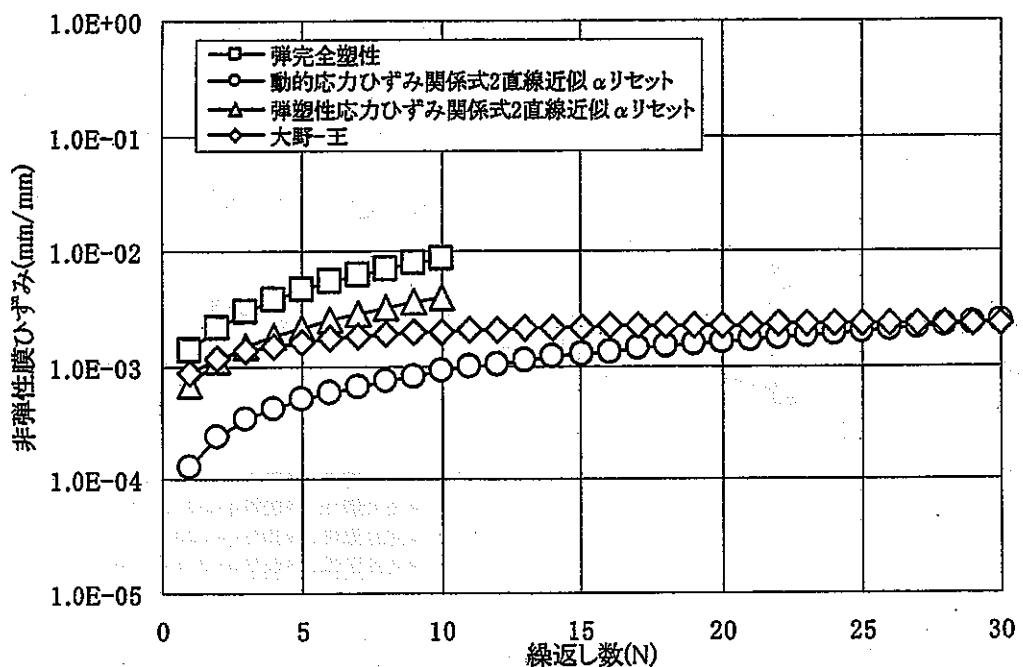


図 2.3-59 構成則の非弾性膜ひずみへの影響(弾塑性、 $q=3$ 、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

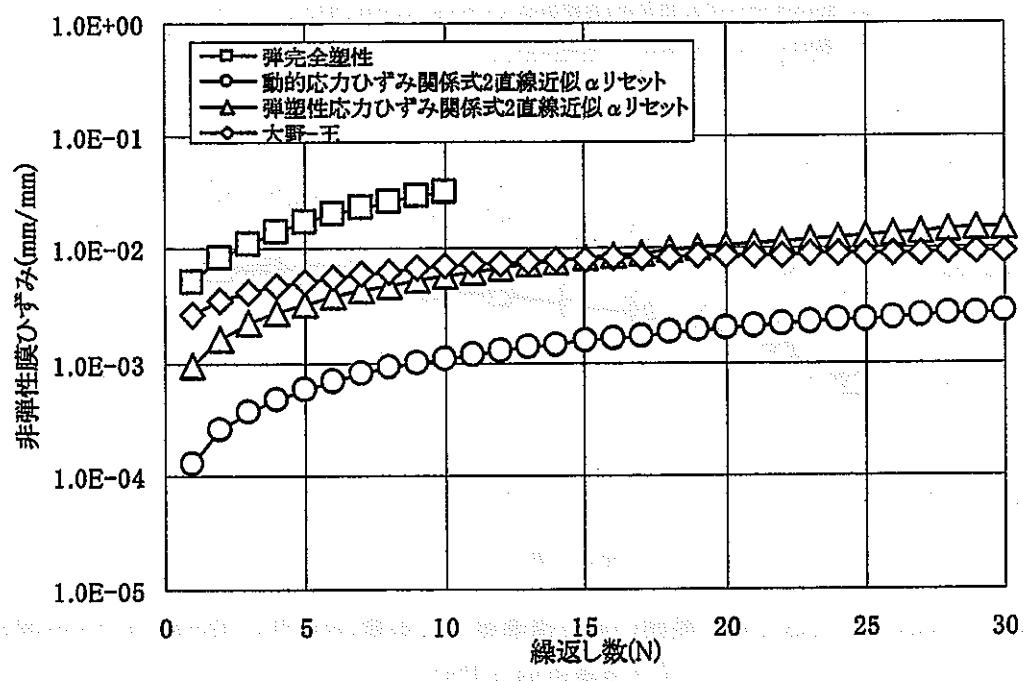


図 2.3-60 構成則の非弾性膜ひずみへの影響(弾塑性、 $q=10$ 、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

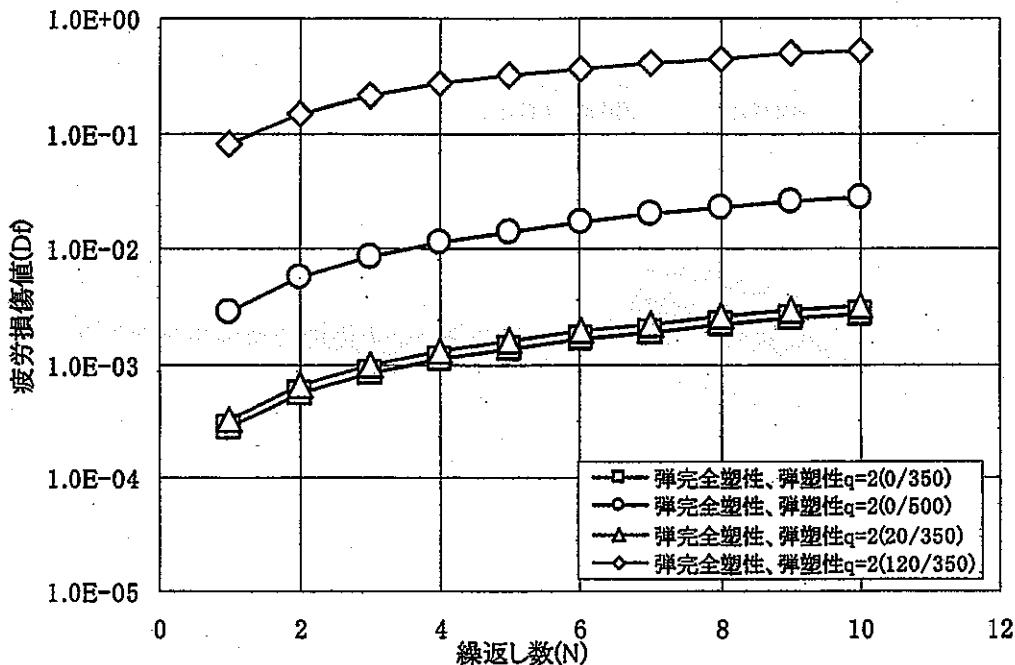
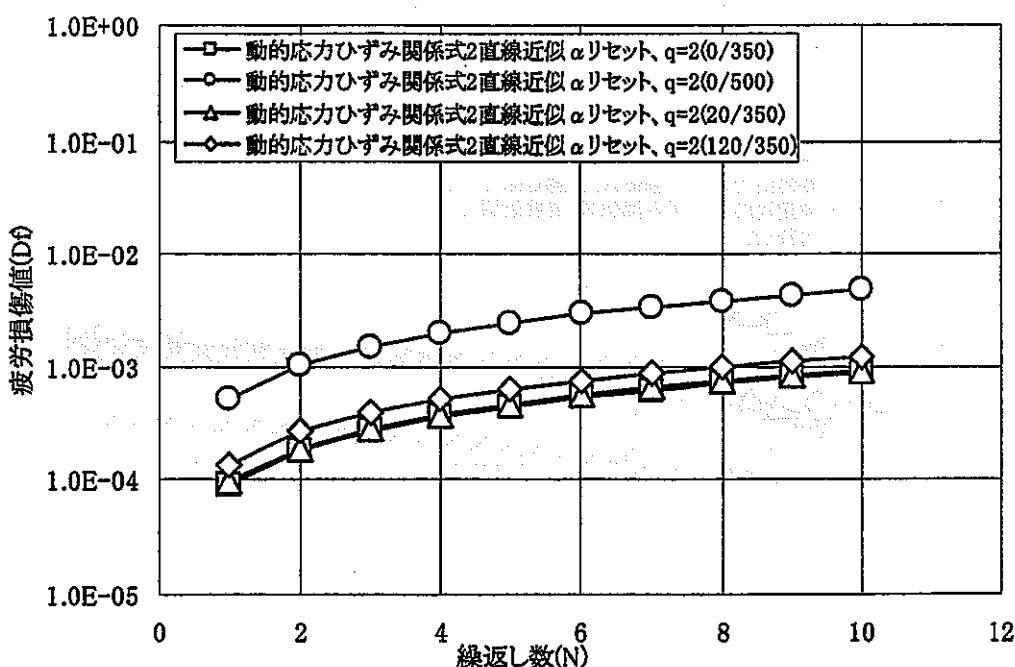


図 2.3-61 1 次応力/2 次応力強さ範囲の疲労損傷値への影響(弾塑性、弾完全塑性)

図 2.3-62 1 次応力/2 次応力強さ範囲の疲労損傷値への影響(弾塑性、動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット)

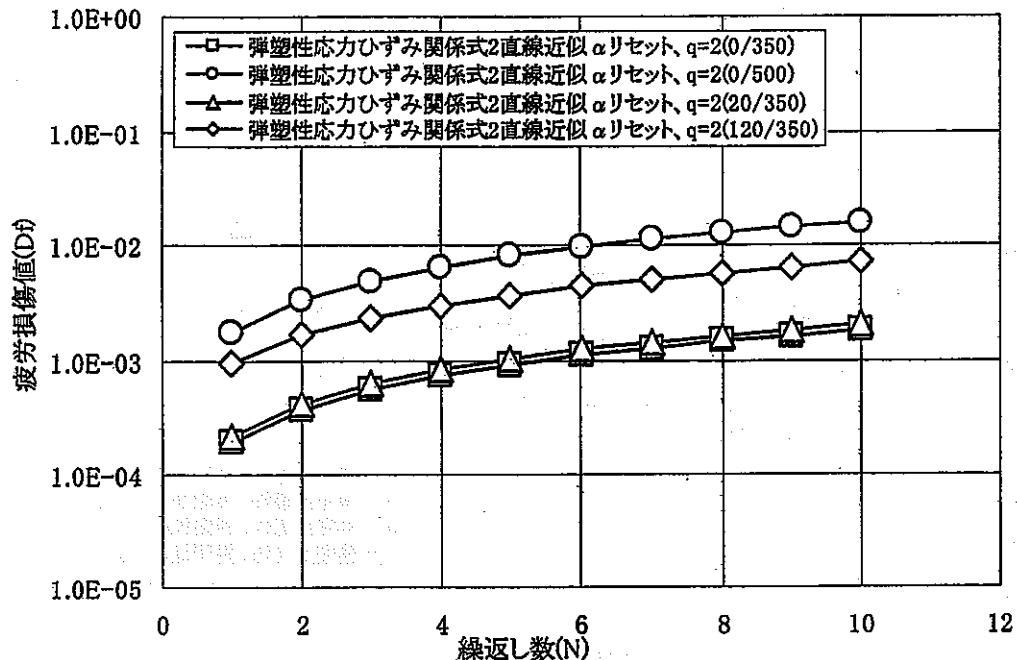


図 2.3-63 1 次応力/2 次応力強さ範囲の疲労損傷値への影響(弾塑性、弾塑性応力ひずみ関係式2直線近似 α リセット)

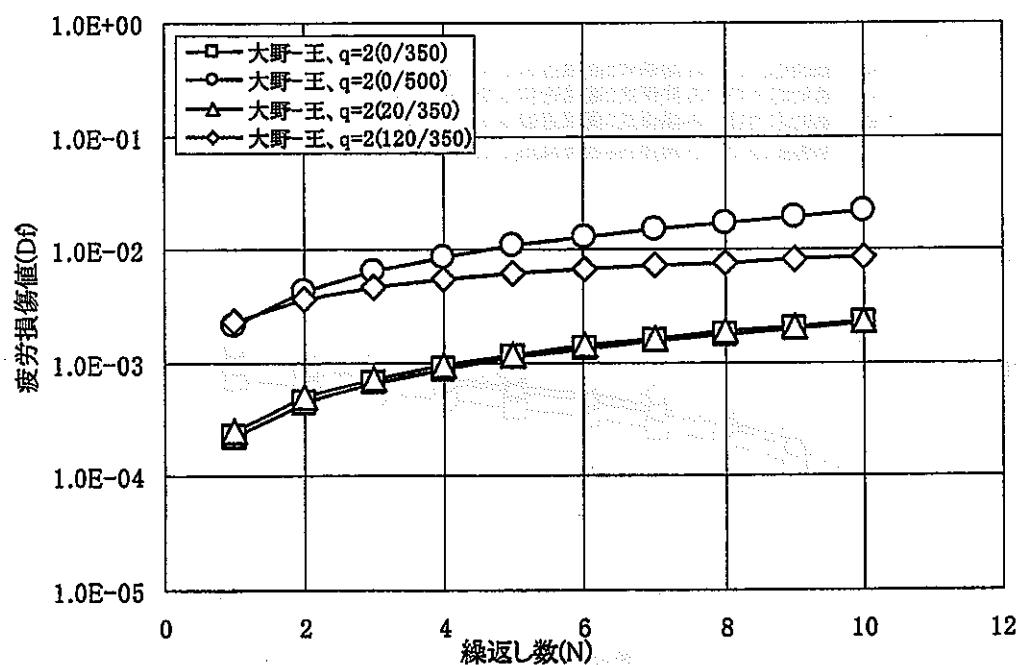


図 2.3-64 1 次応力/2 次応力強さ範囲の疲労損傷値への影響(弾塑性、大野・王)

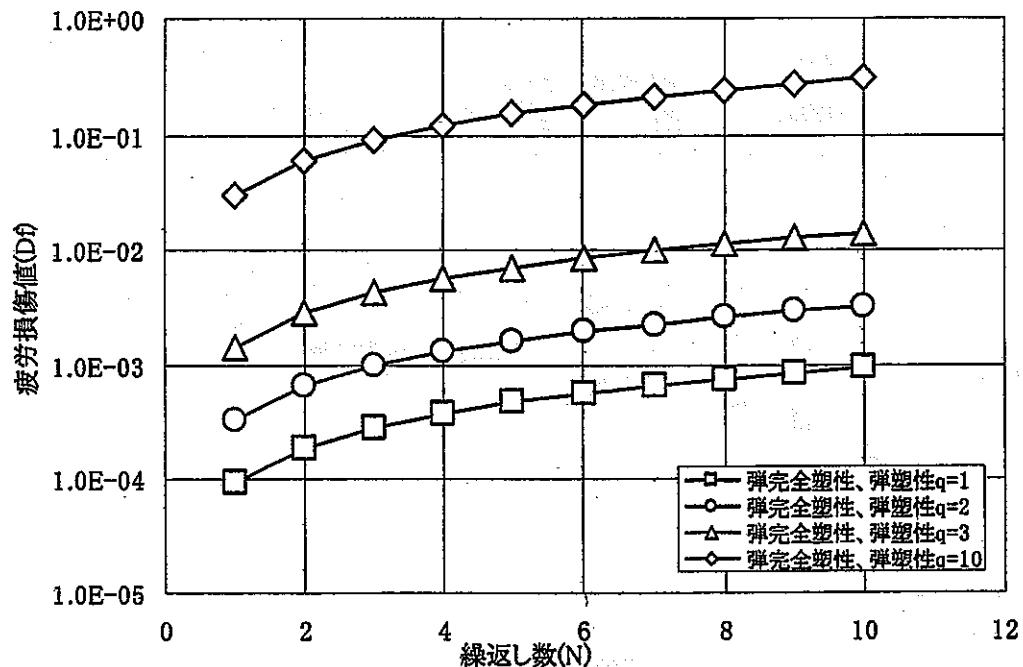


図 2.3-65 弹性追従係数の疲労損傷値への影響(弾塑性、弾完全塑性、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

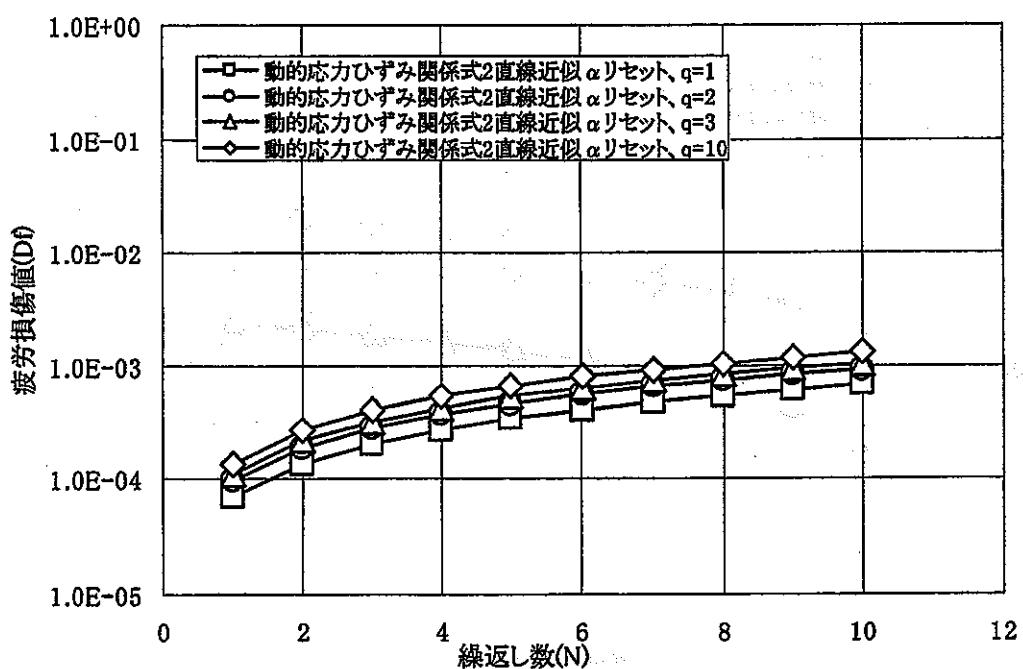


図 2.3-66 弹性追従係数の疲労損傷値への影響(弾塑性、動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

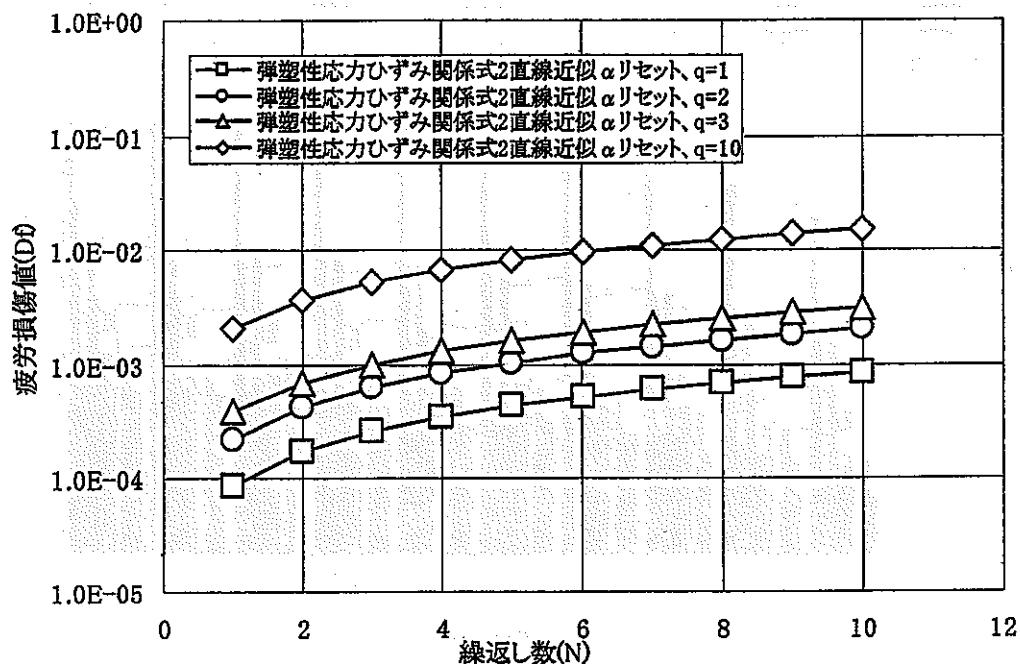


図 2.3-67 弹性追従係数の疲労損傷値への影響(弾塑性、弾塑性応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

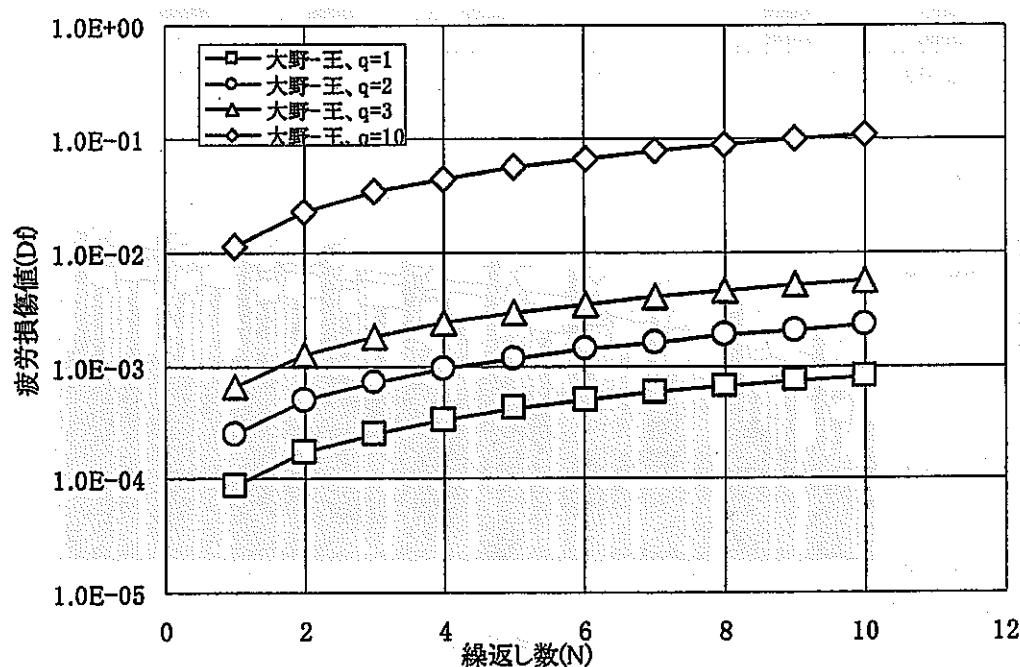


図 2.3-68 弹性追従係数の疲労損傷値への影響(弾塑性、大野・王、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

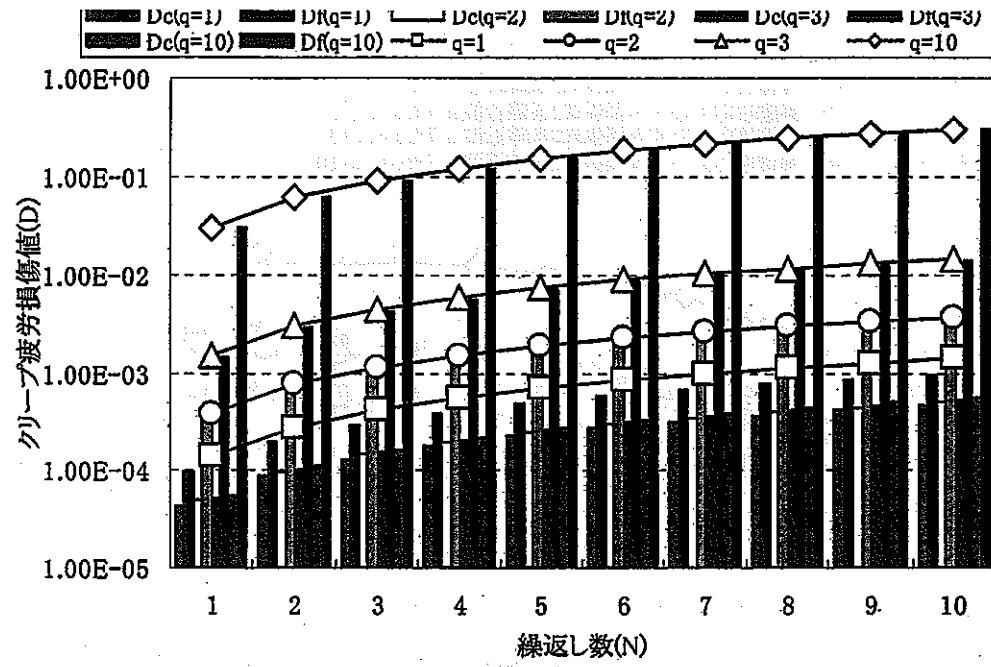


図 2.3-69 クリープのクリープ疲労損傷値への影響(引張保持、弾完全塑性、1次応力
20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

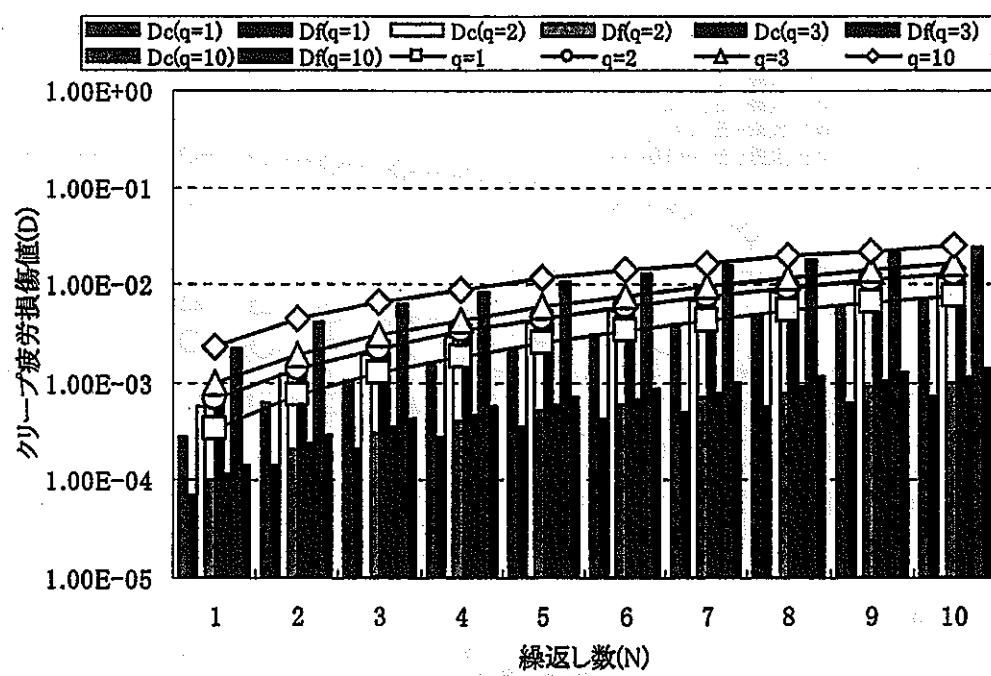


図 2.3-70 クリープのクリープ疲労損傷値への影響(引張保持、動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α セット、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

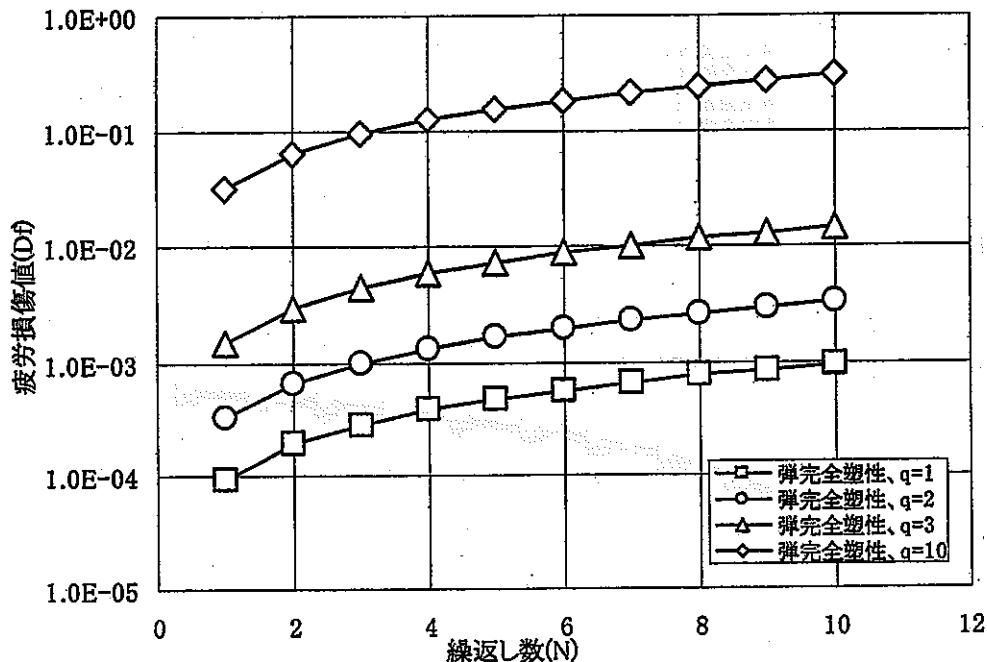


図 2.3-71 クリープの疲労損傷値への影響(引張保持、弾完全塑性、1次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

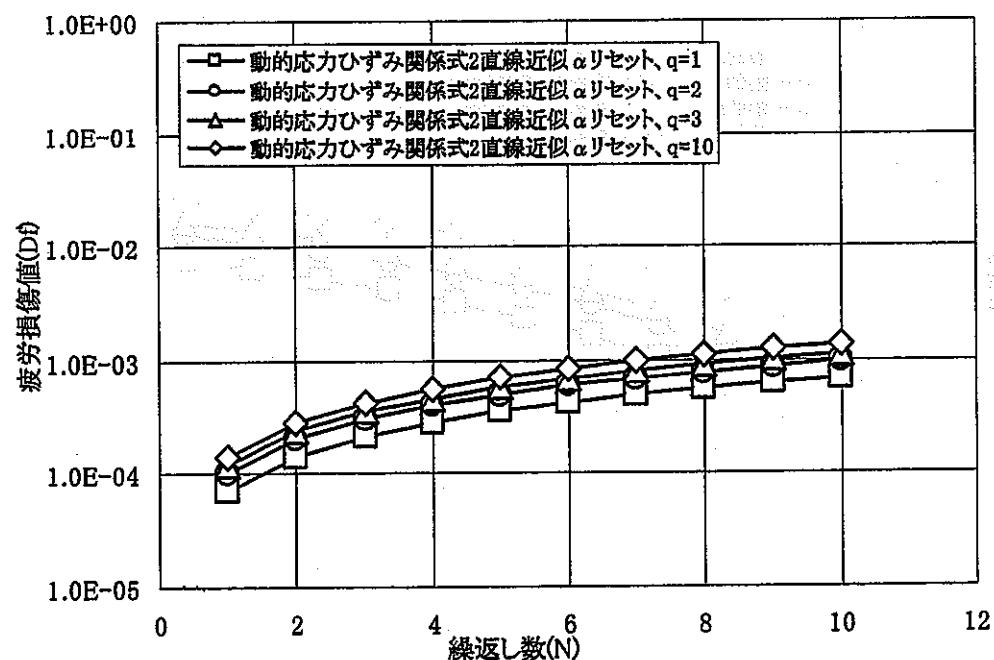


図 2.3-72 クリープの疲労損傷値への影響(引張保持、動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、1次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

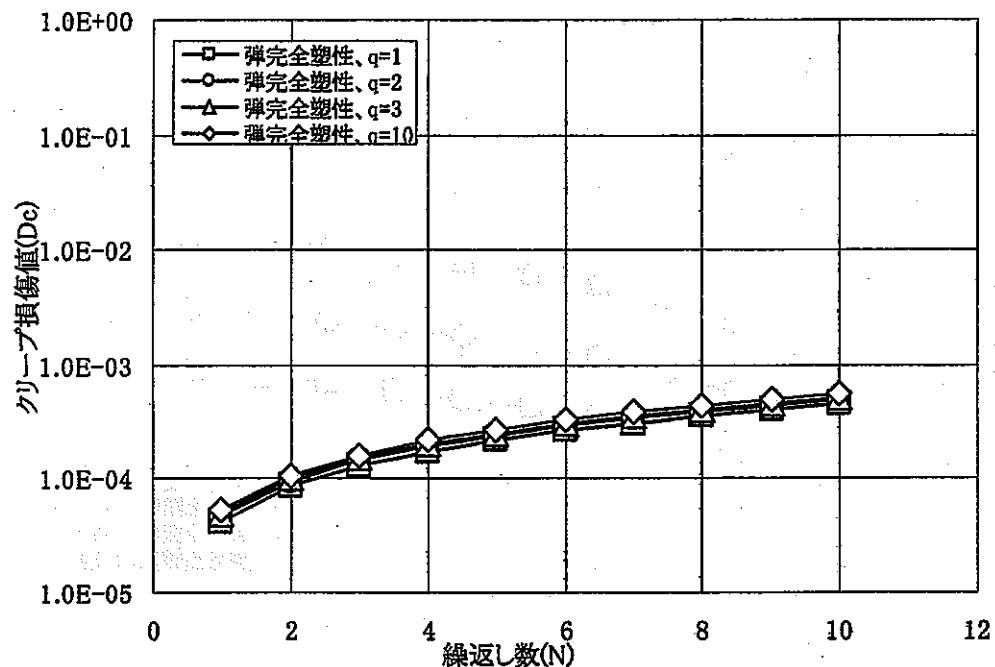


図 2.3-73 クリープのクリープ損傷値への影響(引張保持、弾完全塑性、1次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

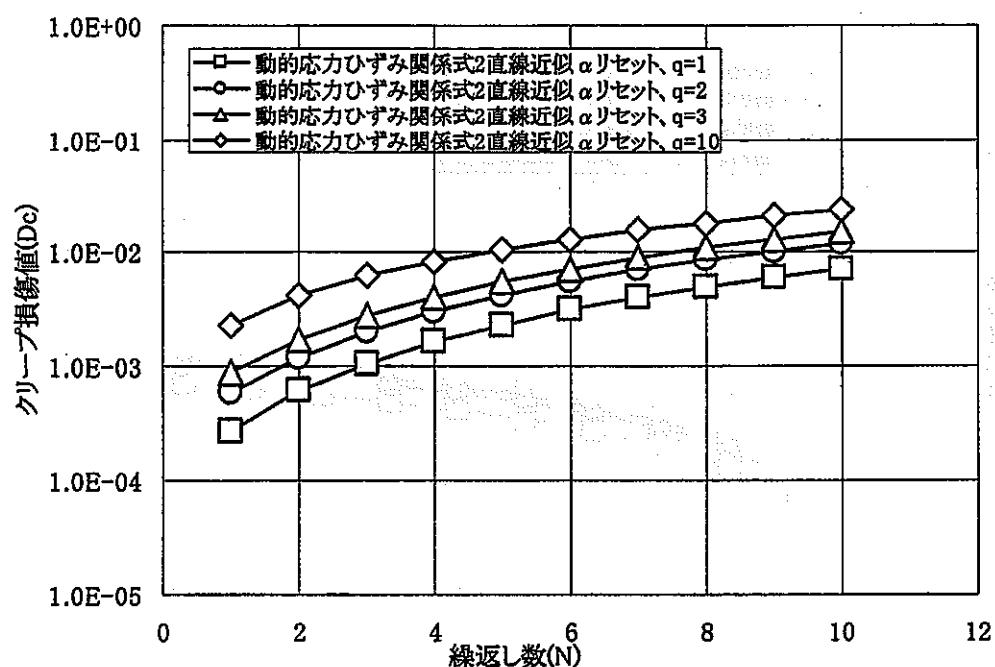


図 2.3-74 クリープのクリープ損傷値への影響(引張保持、動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、1次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

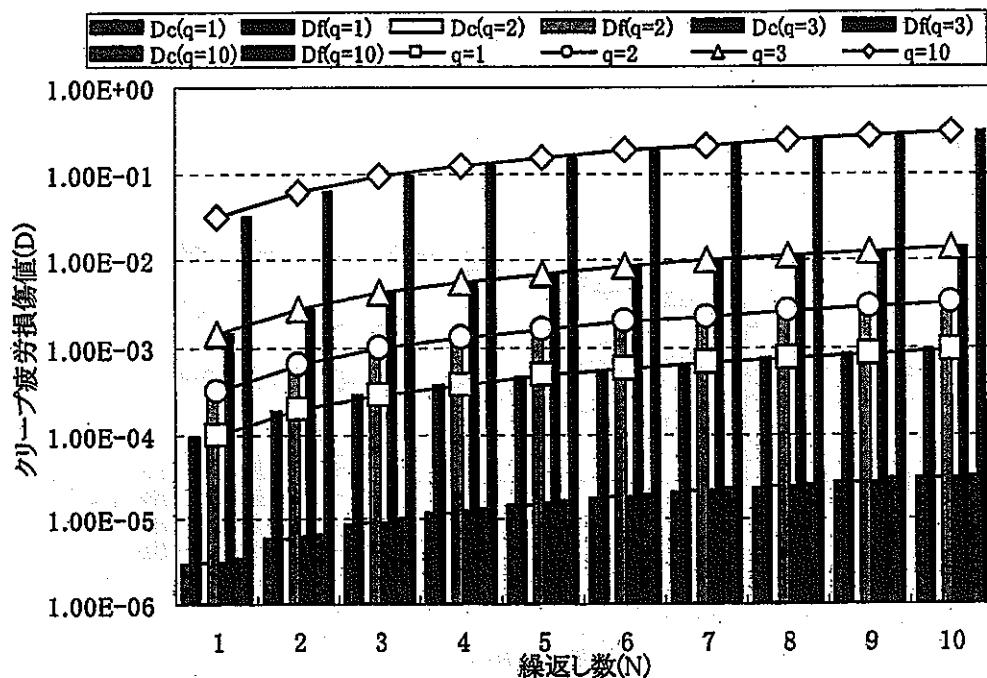


図 2.3-75 クリープのクリープ疲労損傷値への影響(中間保持、弾完全塑性、1次応力
20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

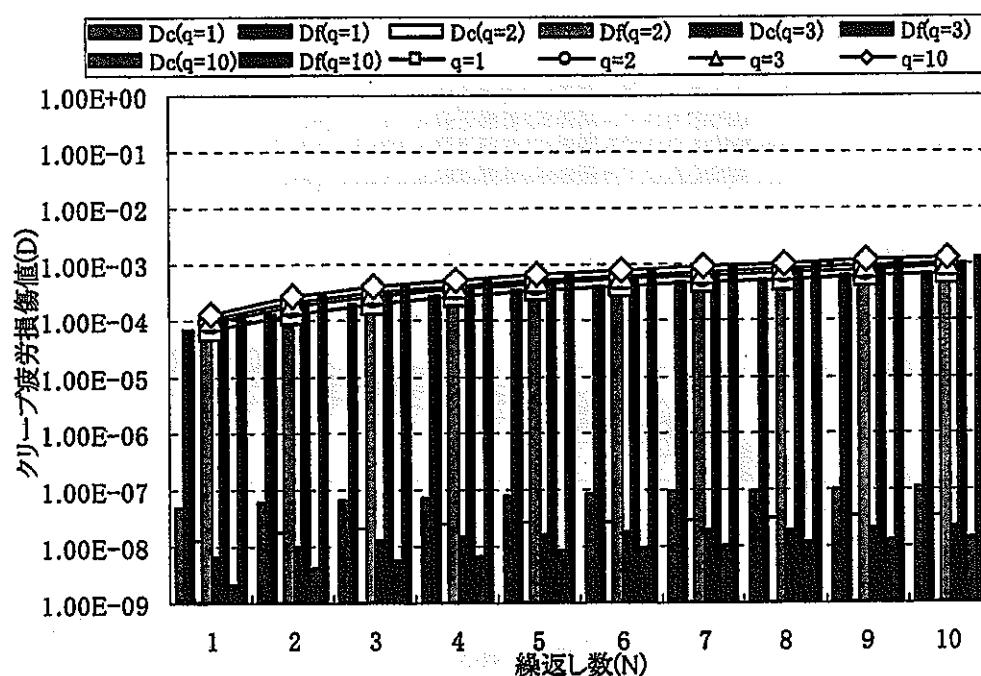


図 2.3-76 クリープのクリープ疲労損傷値への影響(中間保持、動的応力ひずみ関係式 2 直
線近似 α リセット、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

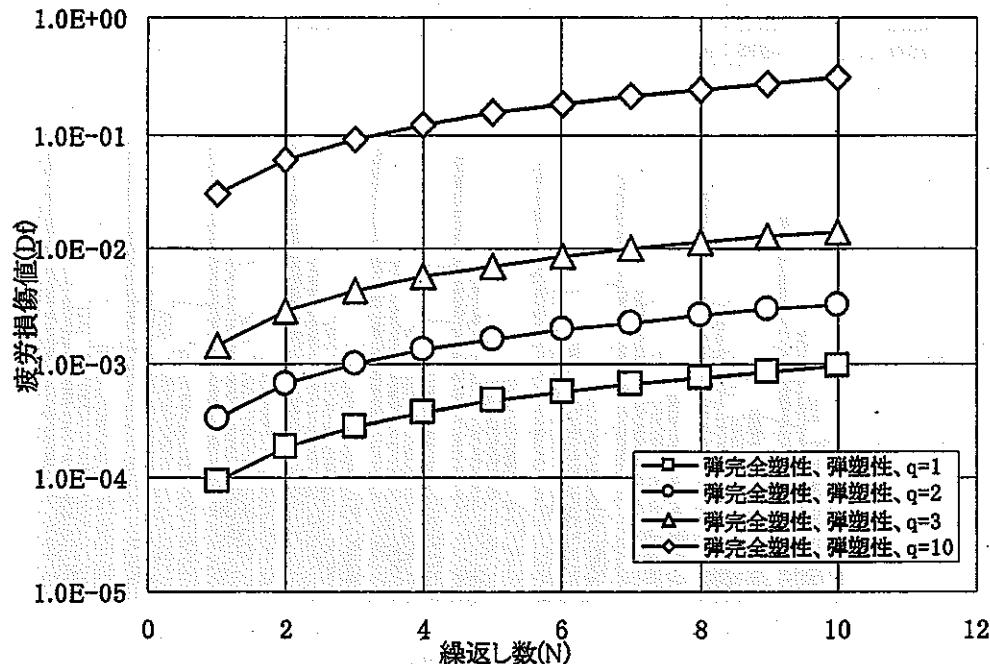


図 2.3-77 クリープの疲労損傷値への影響(中間保持、弾完全塑性、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

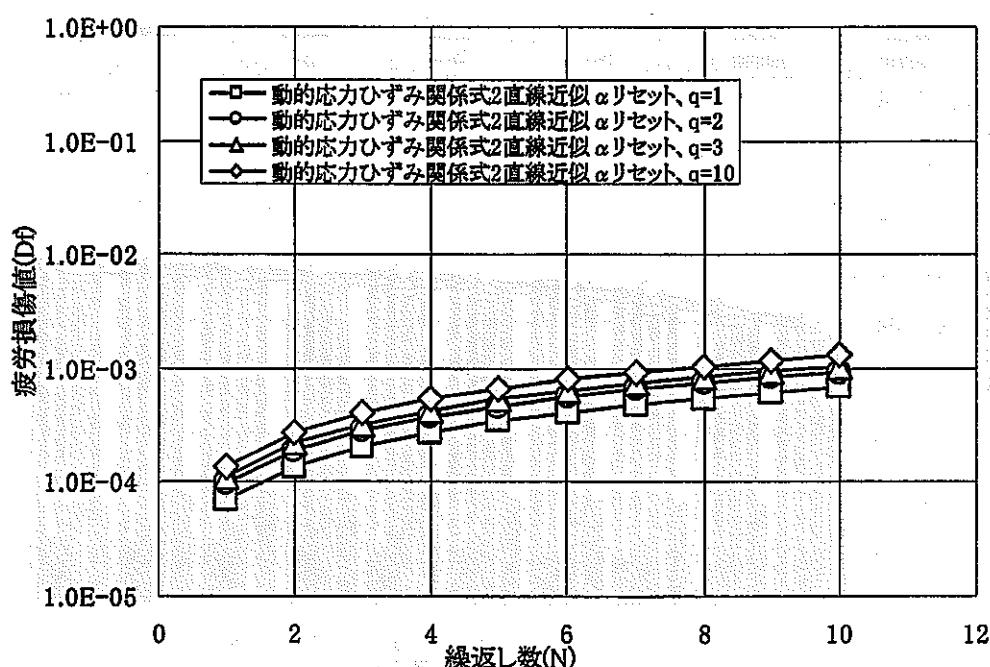


図 2.3-78 クリープの疲労損傷値への影響(中間保持、動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

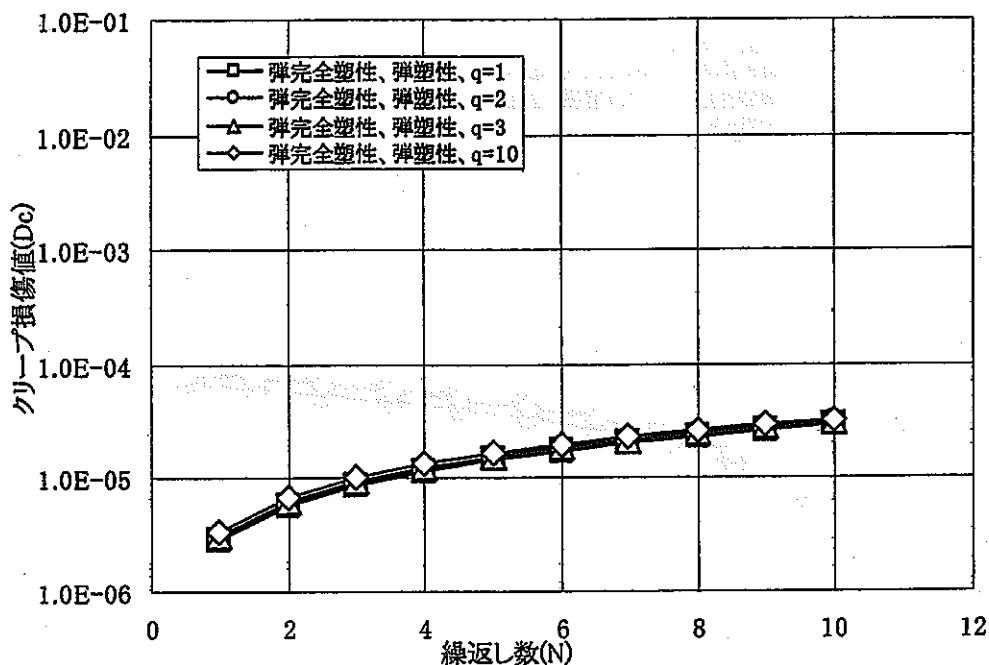


図 2.3-79 クリープのクリープ損傷値への影響(中間保持、弾完全塑性、1次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

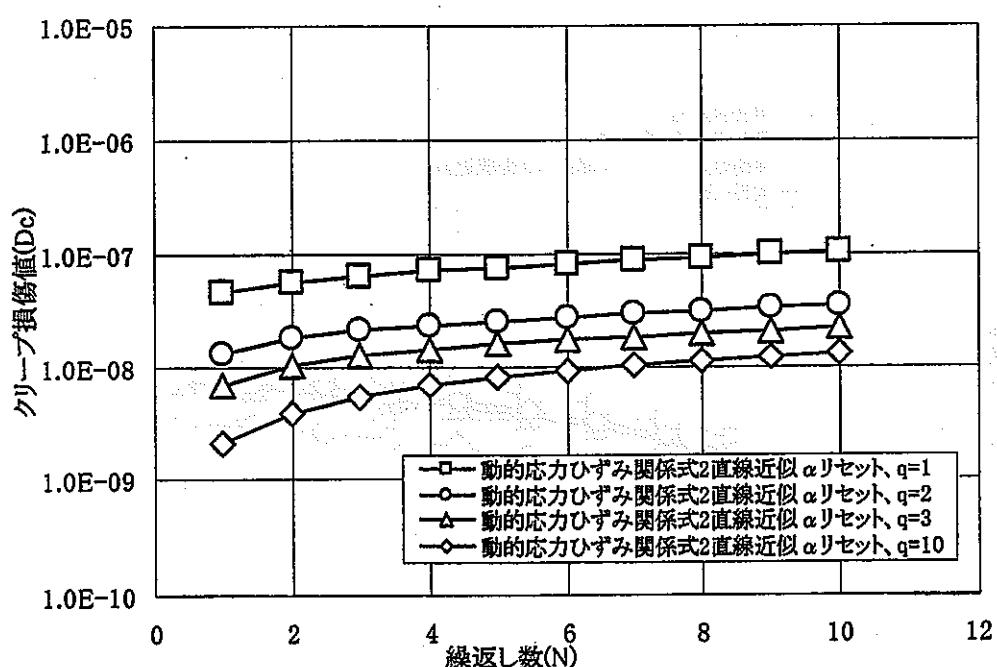


図 2.3-80 クリープのクリープ損傷値への影響(中間保持、動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α リセット、1次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

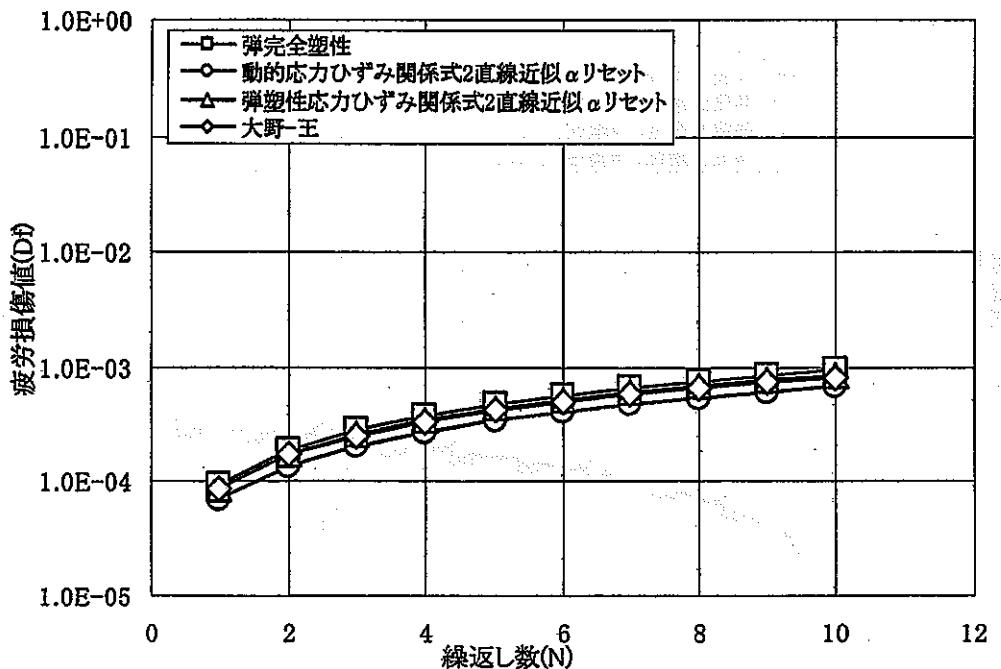


図 2.3-81 構成則の疲労損傷値への影響(弾塑性、 $q=1$ 、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲
350MPa)

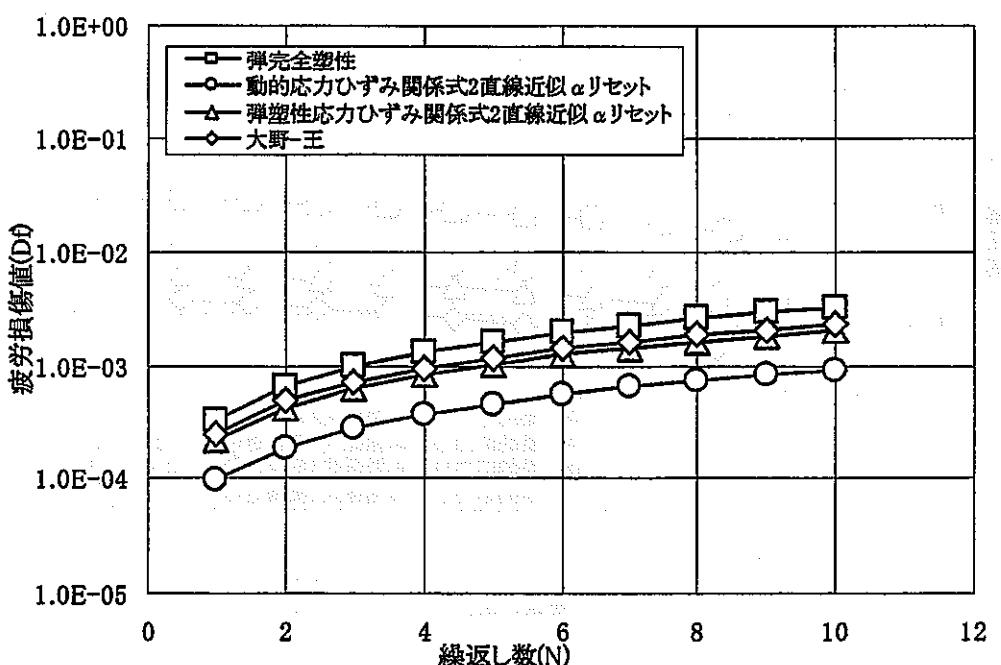


図 2.3-82 構成則の疲労損傷値への影響(弾塑性、 $q=2$ 、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲
350MPa)

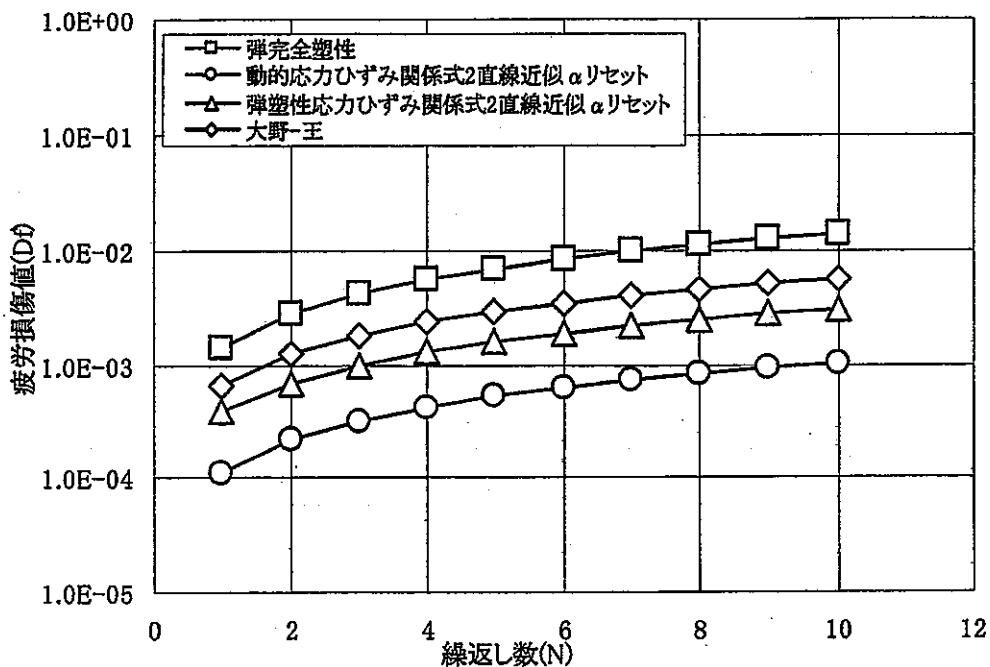


図 2.3-83 構成則の疲労損傷値への影響(弾塑性、 $q=3$ 、1次応力 $20\text{MPa}/2$ 次応力強さ範囲 350MPa)

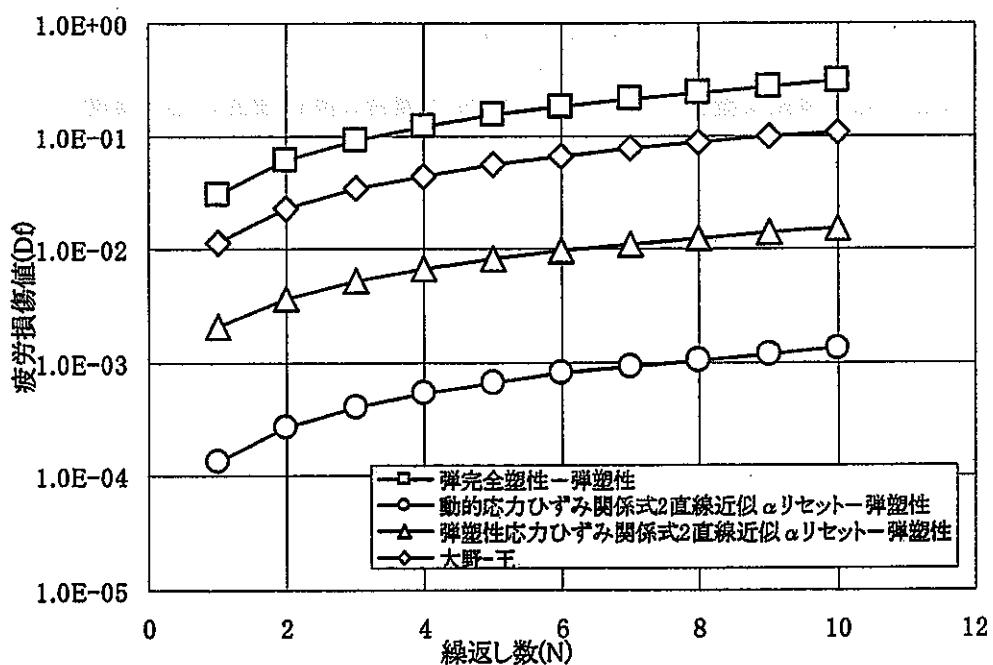


図 2.3-84 構成則の疲労損傷値への影響(弾塑性、 $q=10$ 、1次応力 $20\text{MPa}/2$ 次応力強さ範囲 350MPa)

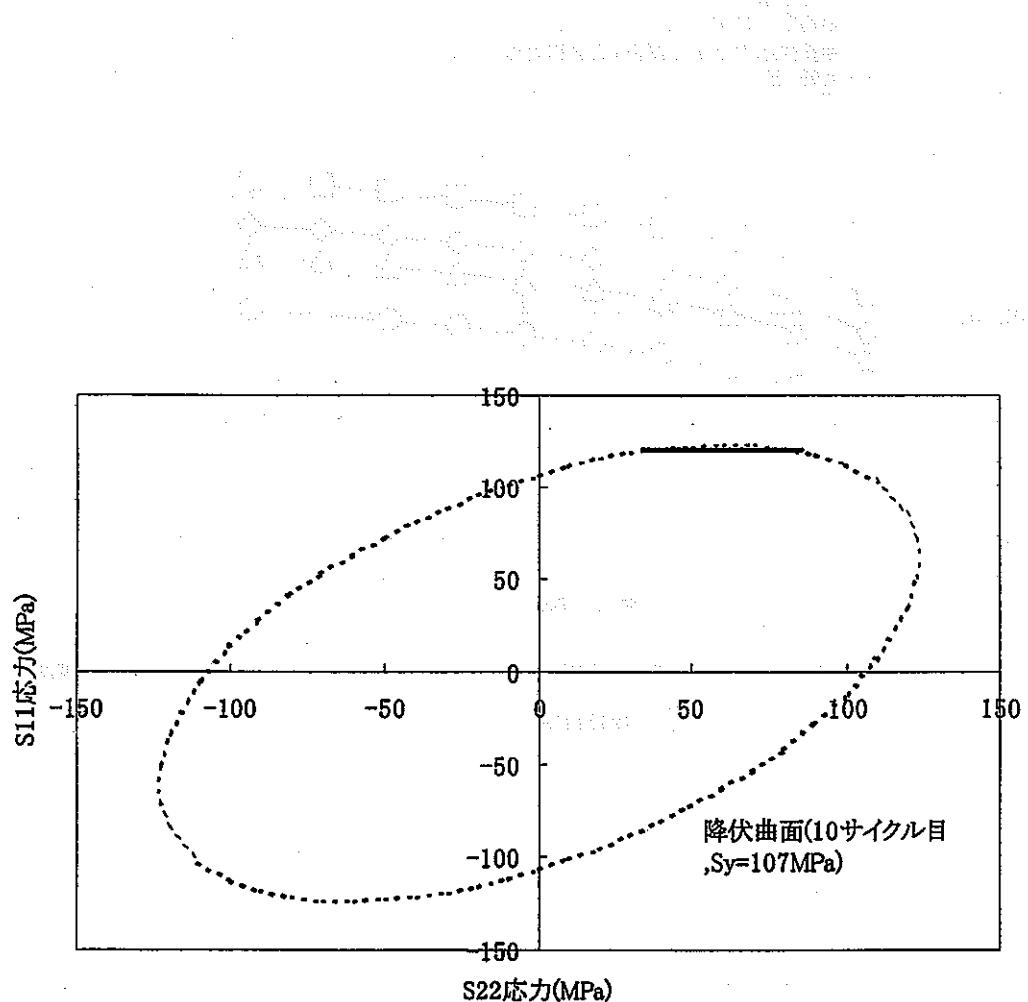


図 2.3-85 弾完全塑性 1 次応力 120MPa の場合の降伏曲面と応力履歴

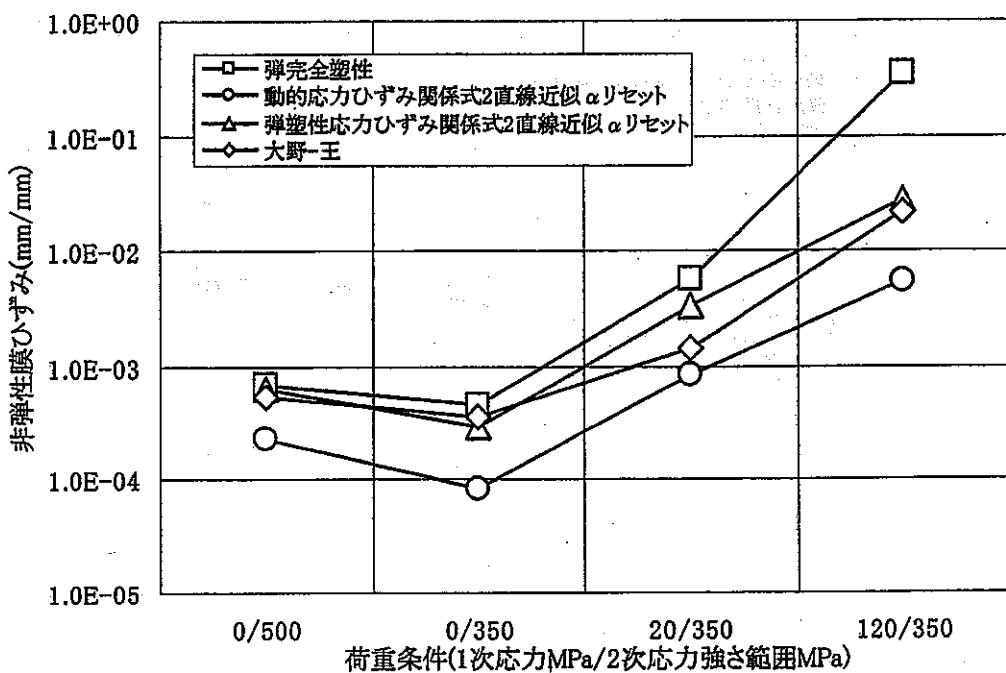


図 2.3-86 荷重条件の非弹性膜ひずみへの影響(10 サイクル目、弾性追従係数 q=2)

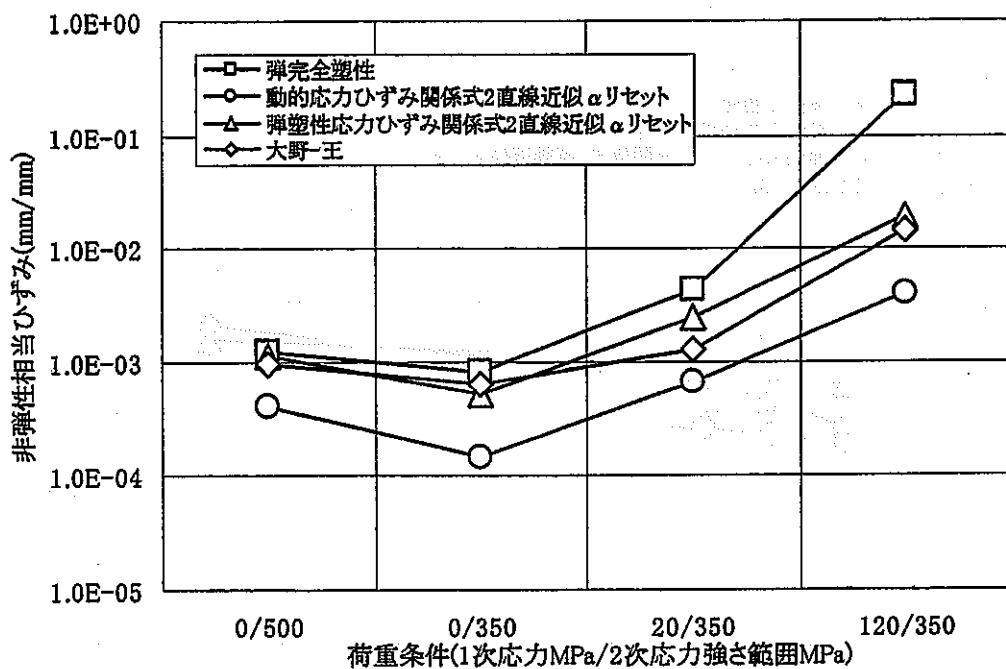


図 2.3-87 荷重条件の非弹性相当ひずみへの影響(10 サイクル目、弾性追従係数 q=2)

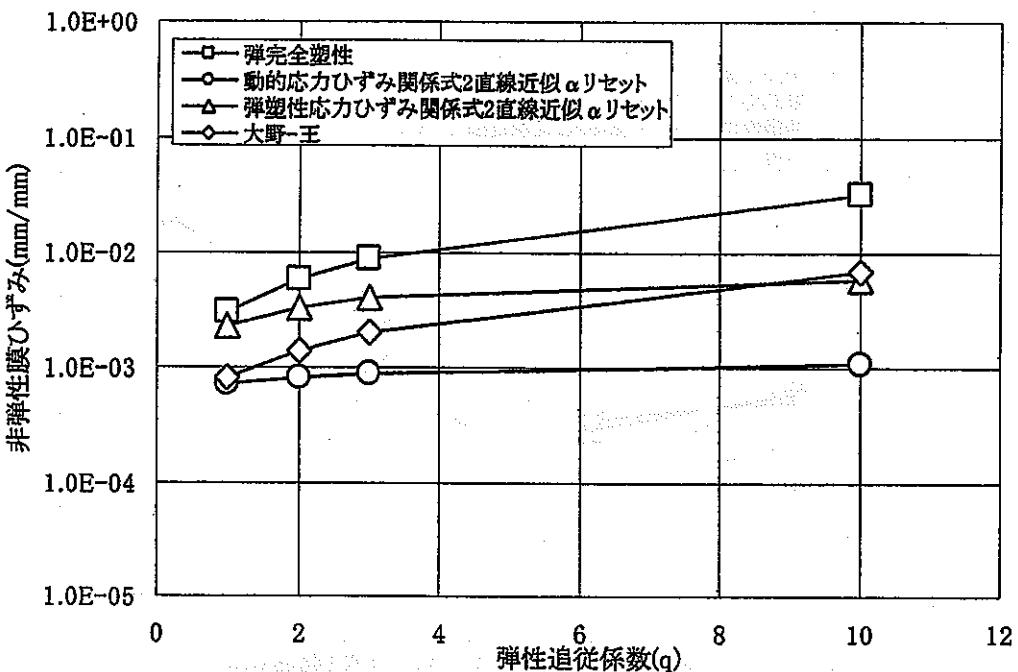


図 2.3-88 弹性追従係数の非弹性膜ひずみへの影響(10 サイクル目、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

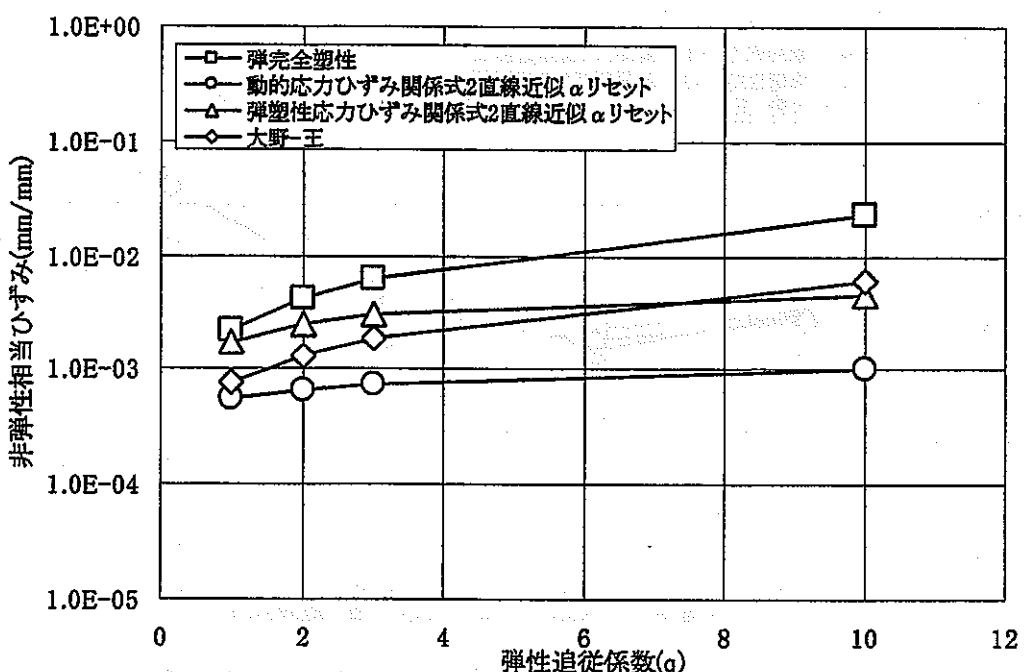


図 2.3-89 弹性追従係数の非弹性相当ひずみへの影響(10 サイクル目、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

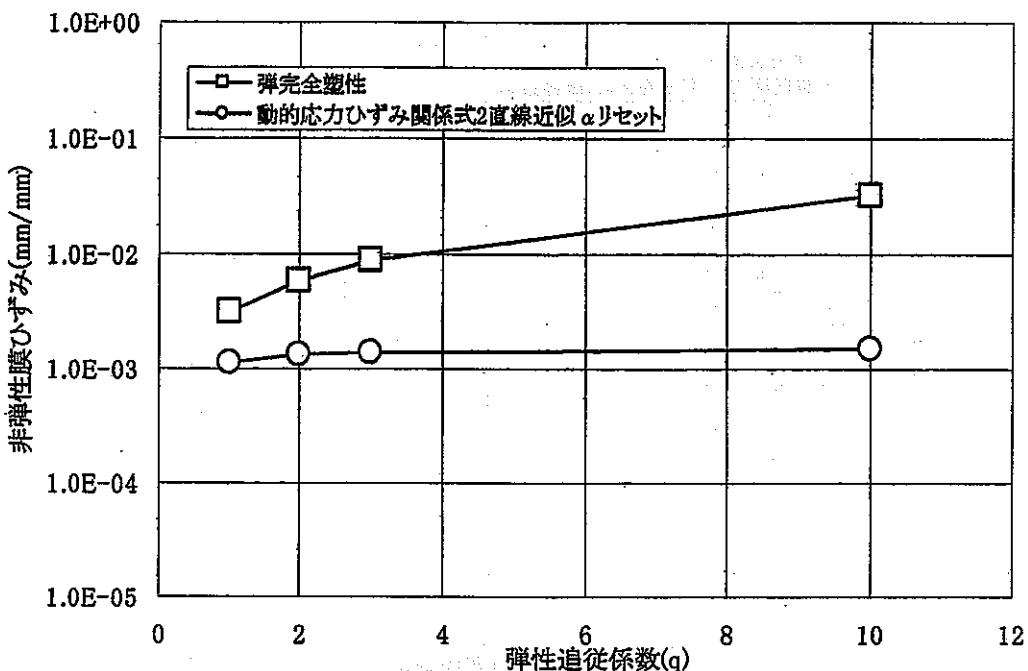


図 2.3-90 弹性追従係数の非弾性膜ひずみへの影響(10 サイクル目、引張保持、1 次応力
20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

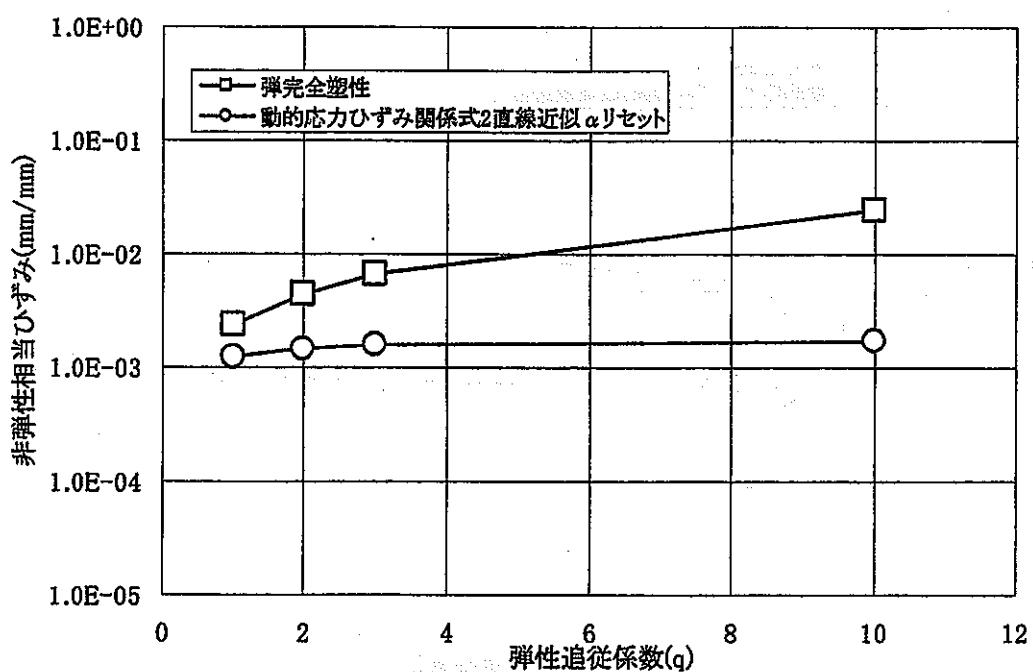


図 2.3-91 弹性追従係数の非弾性相当ひずみへの影響(10 サイクル目、引張保持、1 次応力
20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

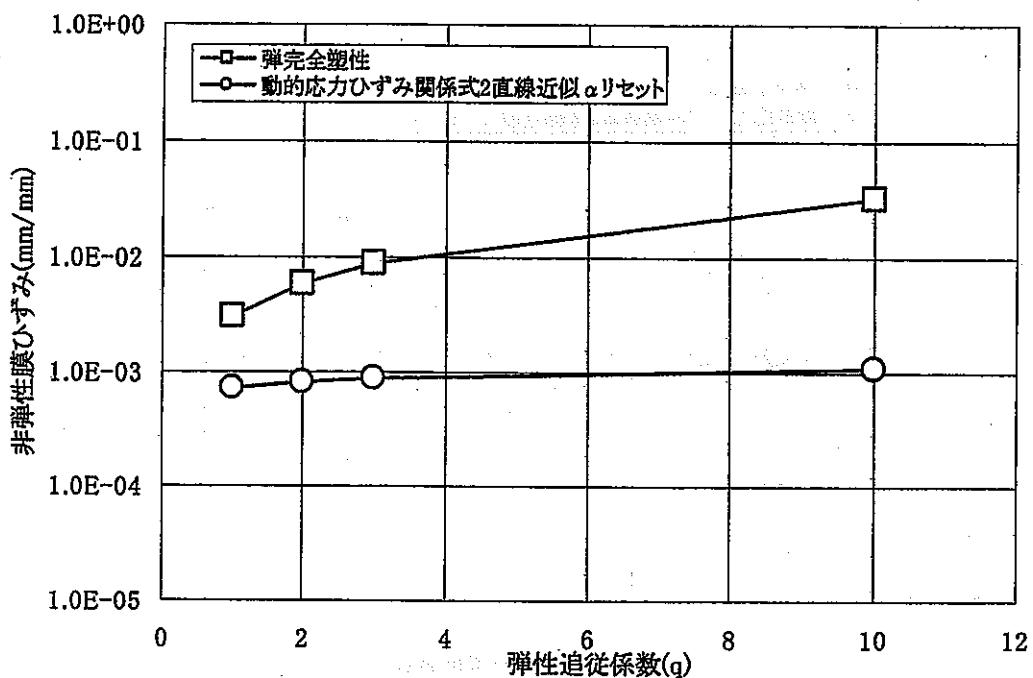


図 2.3-92 弹性追従係数の非弹性膜ひずみへの影響(10 サイクル目、中間保持、1 次応力
20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

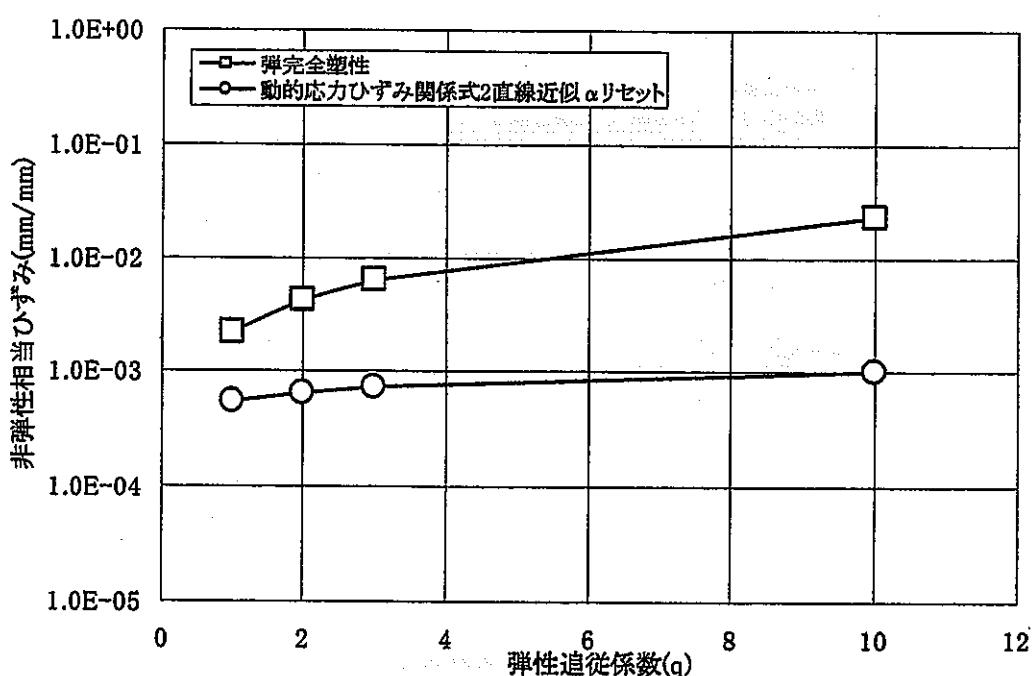


図 2.3-93 弹性追従係数の非弹性相当ひずみへの影響(10 サイクル目、中間保持、1 次応力
20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

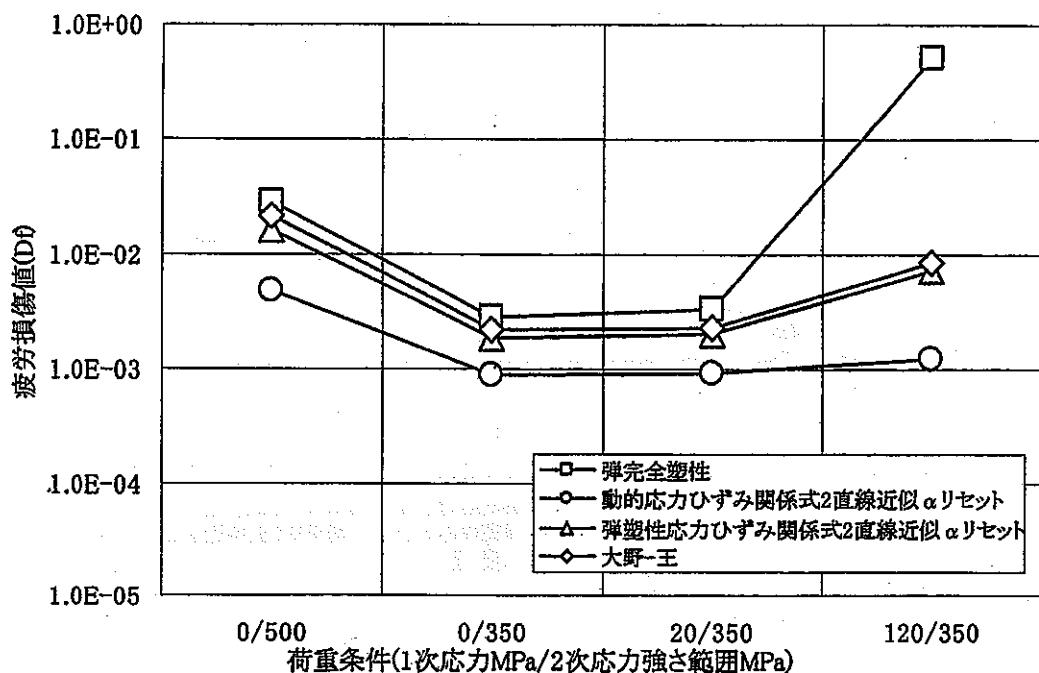
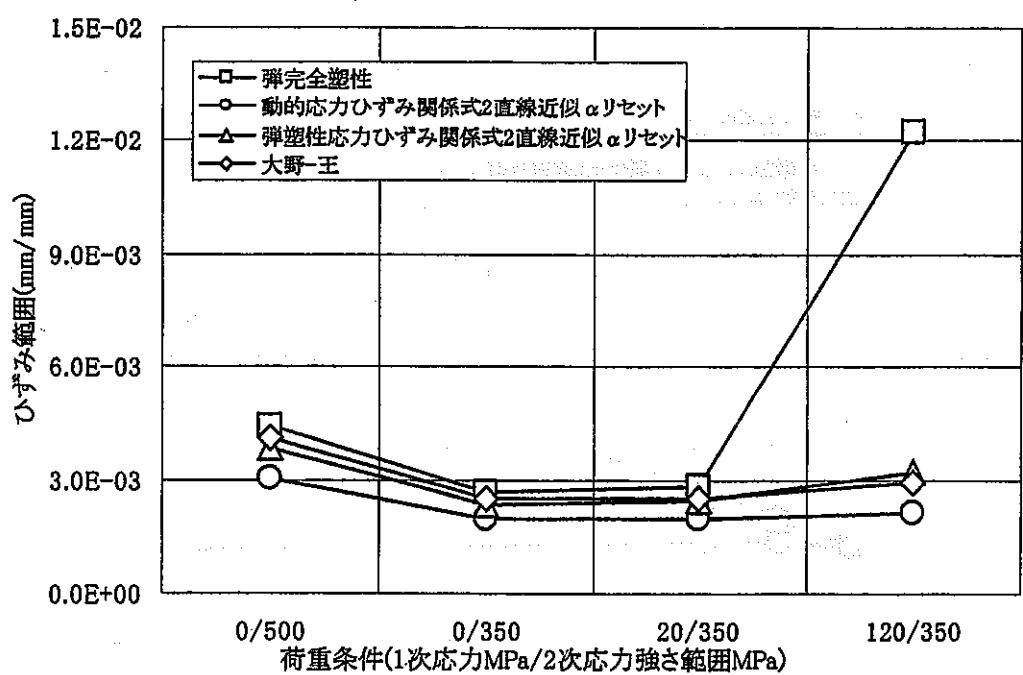
図 2.3-94 荷重条件の疲労損傷値への影響(10 サイクル目、弹性追従係数 $q=2$)

図 2.3-95 荷重条件のひずみ範囲への影響(10 サイクル目、弹性追従係数

 $q=2$

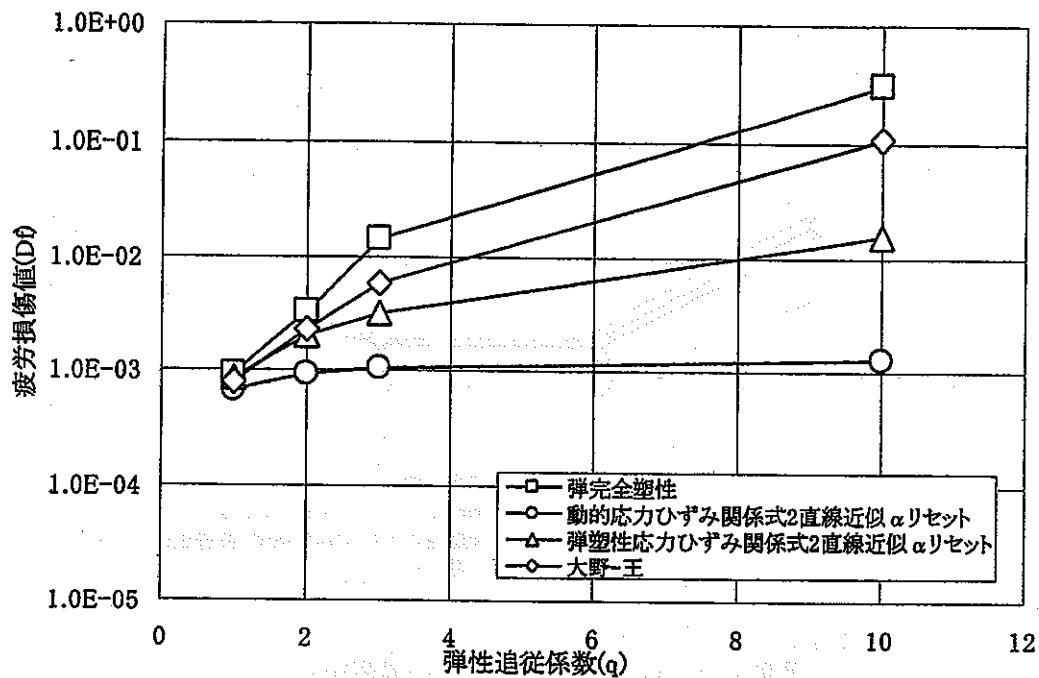


図 2.3-96 弹性追従係数の疲労損傷値への影響(10 サイクル目、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

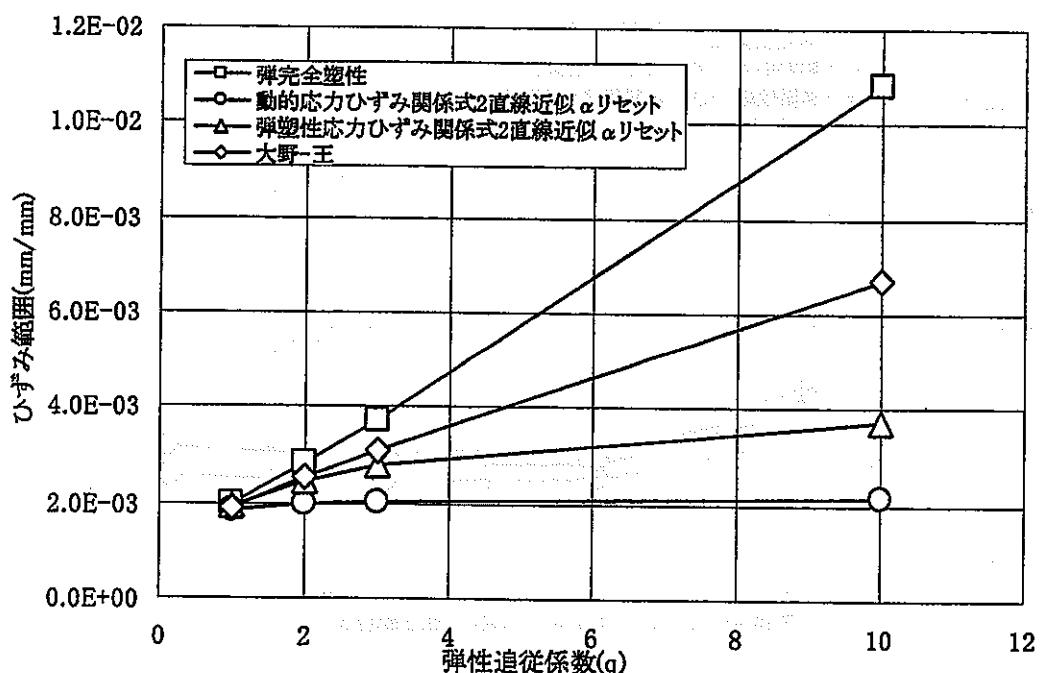


図 2.3-97 弹性追従係数のひずみ範囲への影響(10 サイクル目、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

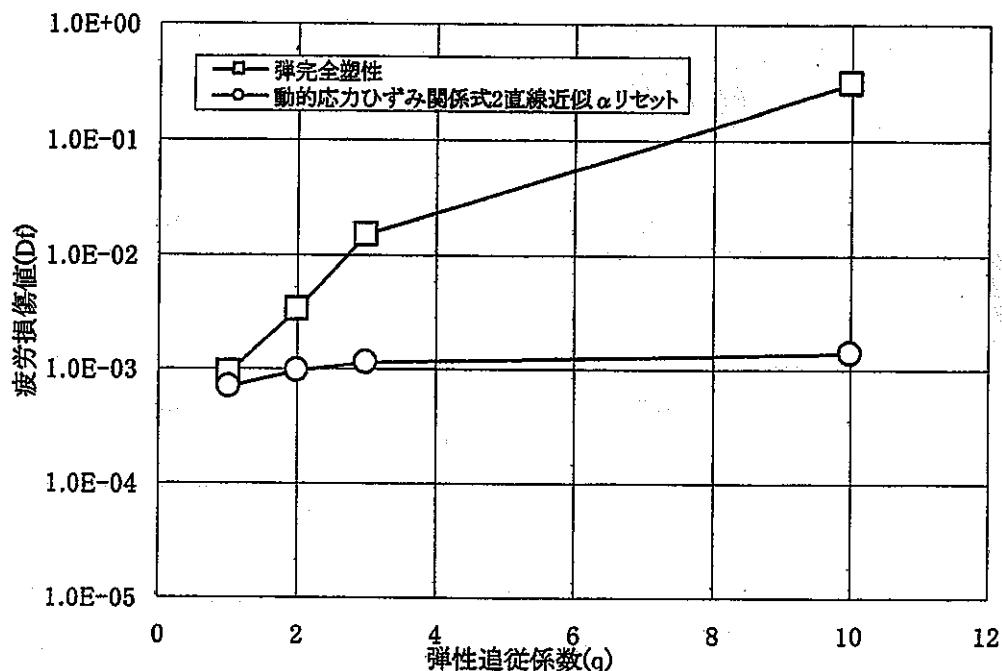


図2.3-98 弹性追従係数の疲労損傷値への影響(10サイクル目、引張保持、1次応力 20MPa/2
次応力強さ範囲 350MPa)

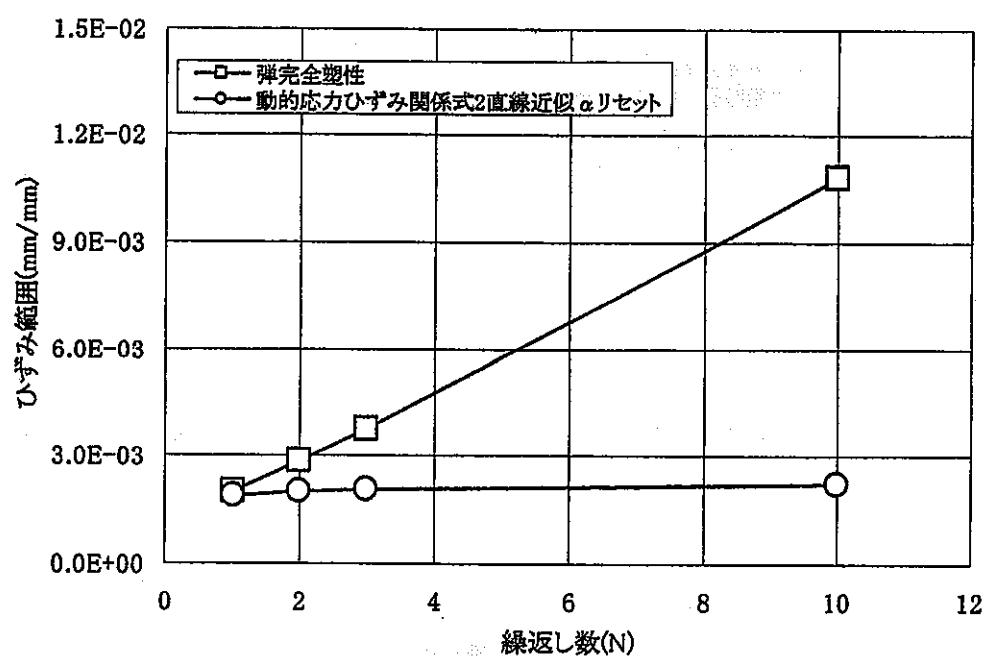


図2.3-99 弹性追従係数のひずみ範囲への影響(10サイクル目、引張保持、1次応力 20MPa/2
次応力強さ範囲 350MPa)

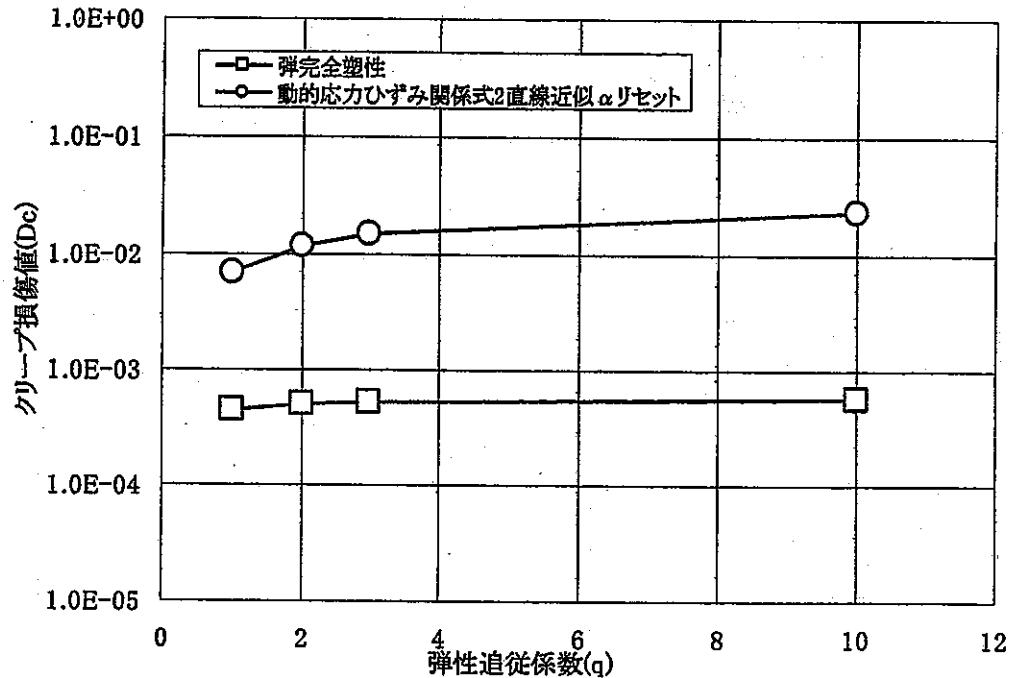


図 2.3-100 弾性追従係数のクリープ損傷値への影響(10 サイクル目、引張保持、1 次応力 $20\text{MPa}/2$ 次応力強さ範囲 350MPa)

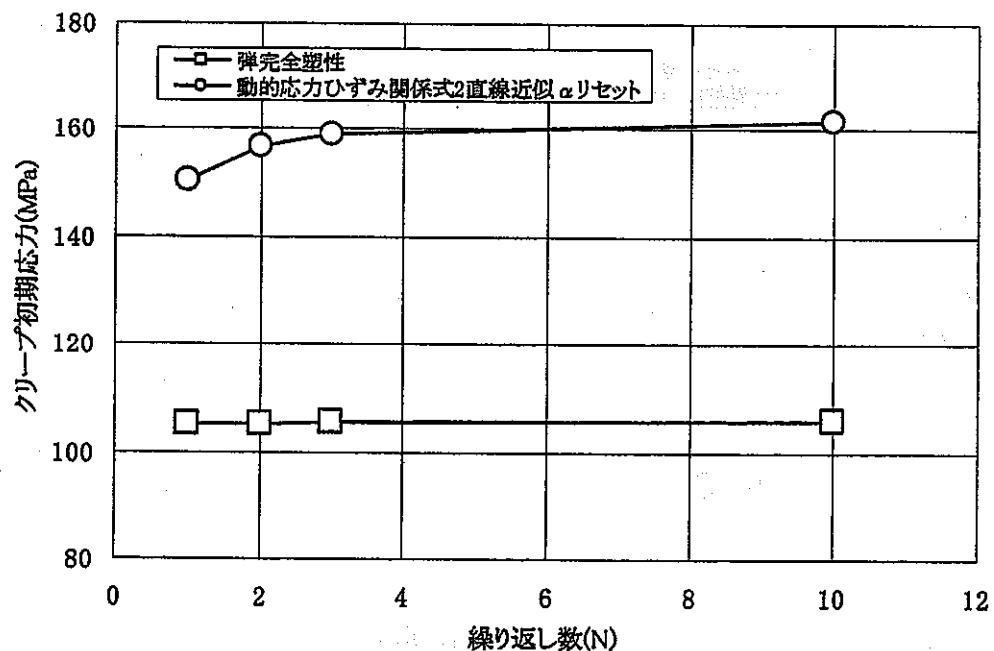


図 2.3-101 弾性追従係数のクリープ初期応力への影響(10 サイクル目、引張保持、1 次応力 $20\text{MPa}/2$ 次応力強さ範囲 350MPa)

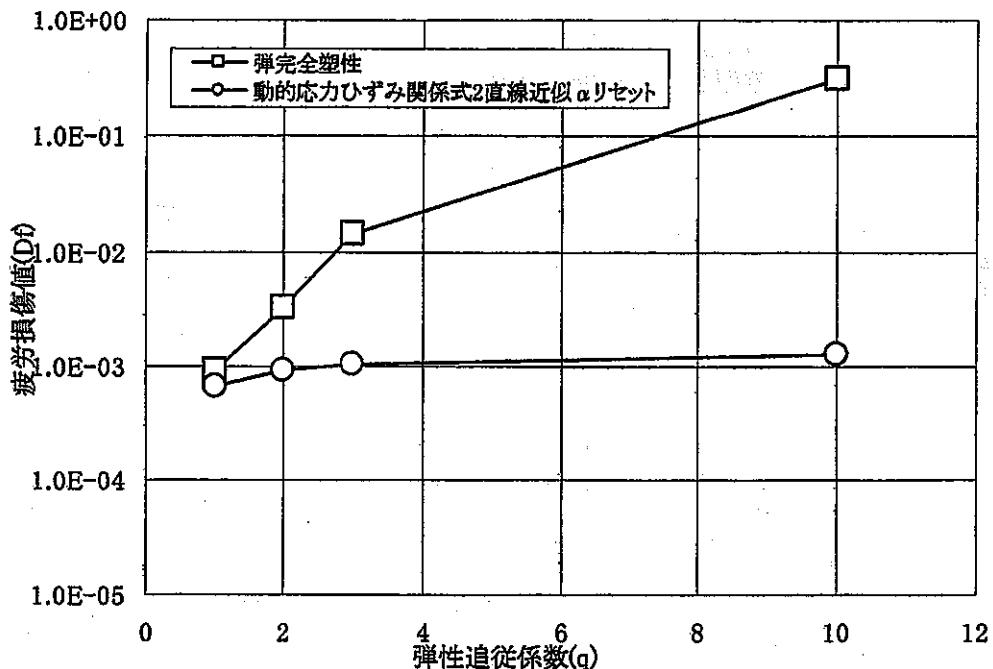


図 2.3-102 弹性追従係数の疲労損傷値への影響(10 サイクル目、中間保持、1 次応力
20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

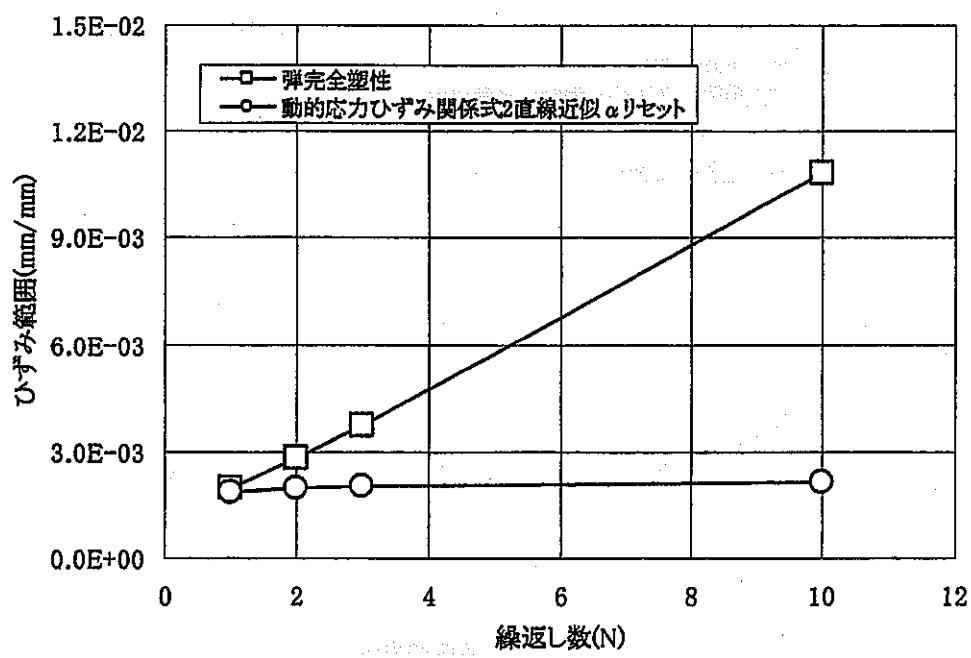


図 2.3-103 弹性追従係数のひずみ範囲への影響(10 サイクル目、中間保持、1 次応力
20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

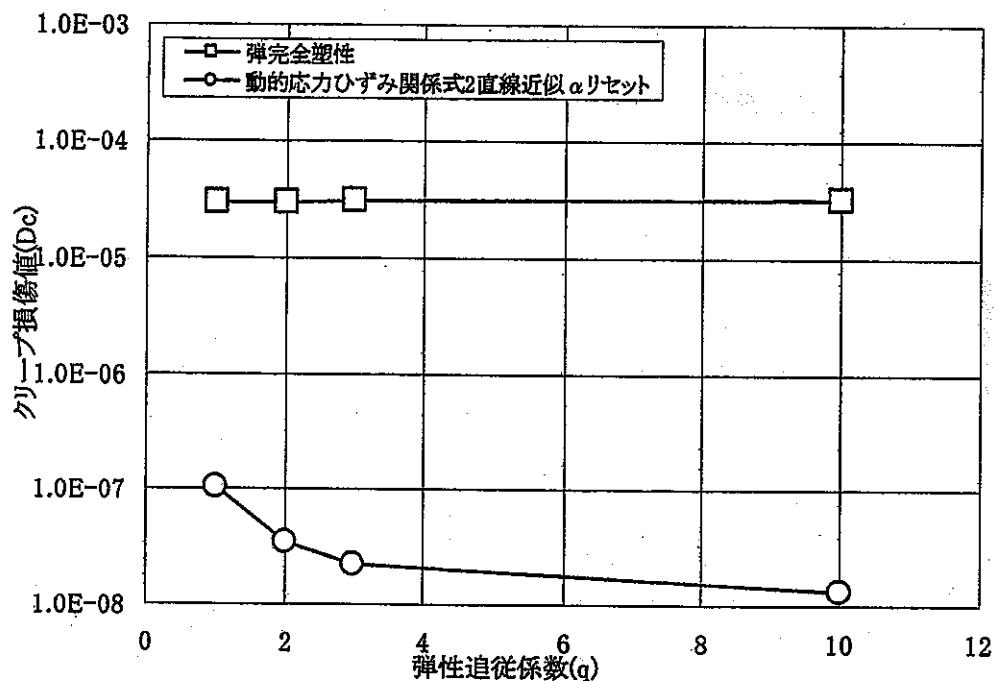


図 2.3-104 弾性追従係数のクリープ損傷値への影響(10 サイクル目、中間保持、1 次応力 $20\text{MPa}/2$ 次応力強さ範囲 350MPa)

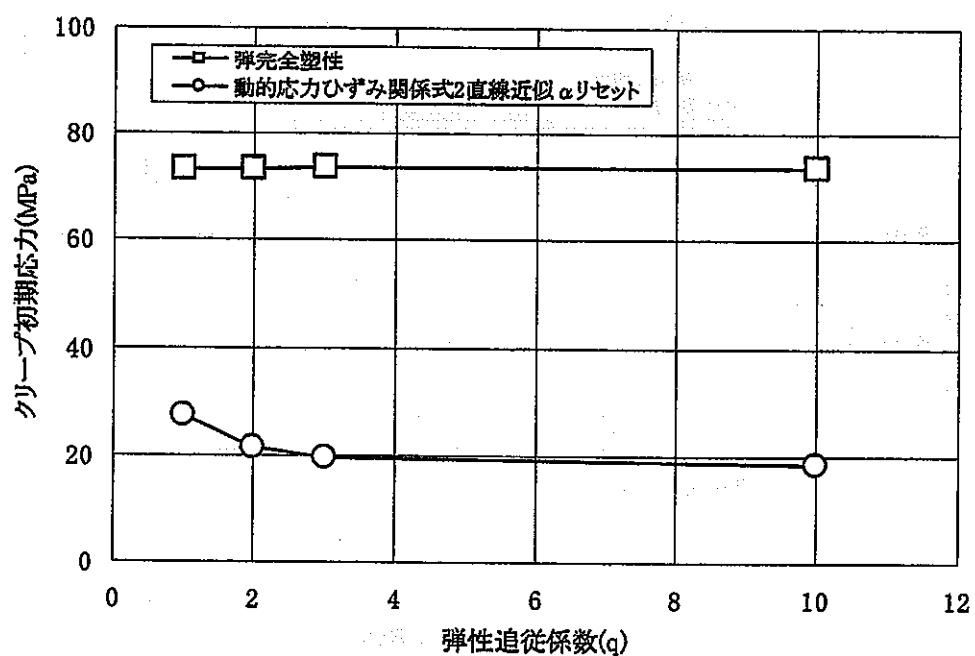


図 2.3-105 弾性追従係数のクリープ初期応力への影響(10 サイクル目、中間保持、1 次応力 $20\text{MPa}/2$ 次応力強さ範囲 350MPa)

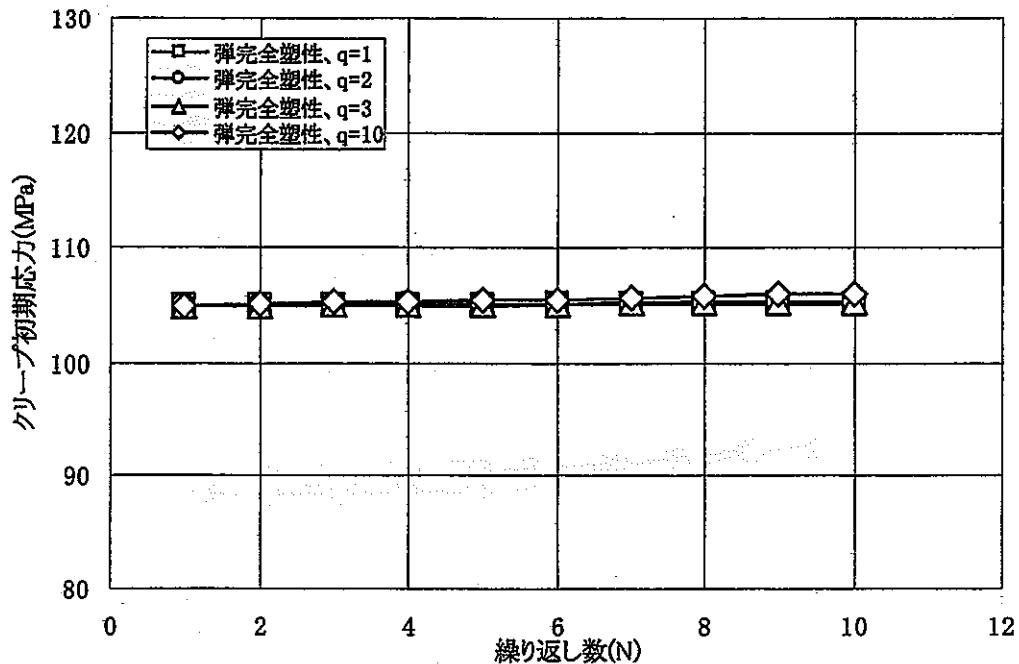


図 2.3-106 弾性追従係数のクリープ初期応力への影響(引張保持、弾完全塑性、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

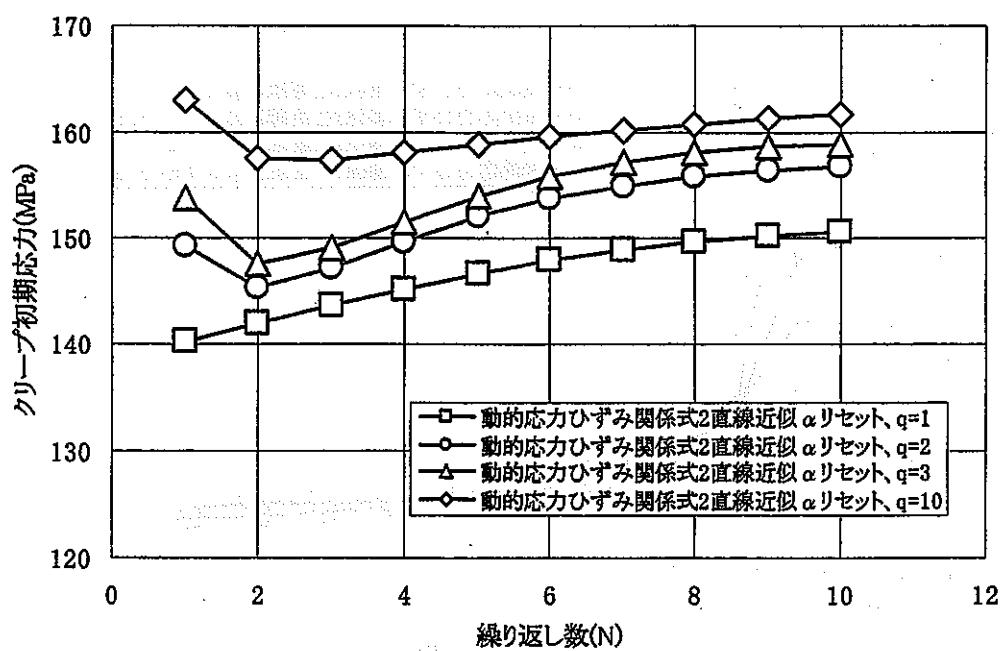


図 2.3-107 弾性追従係数のクリープ初期応力への影響(引張保持、動的応力ひずみ関係式 2 直線近似 α セット、1 次応力 20MPa/2 次応力強さ範囲 350MPa)

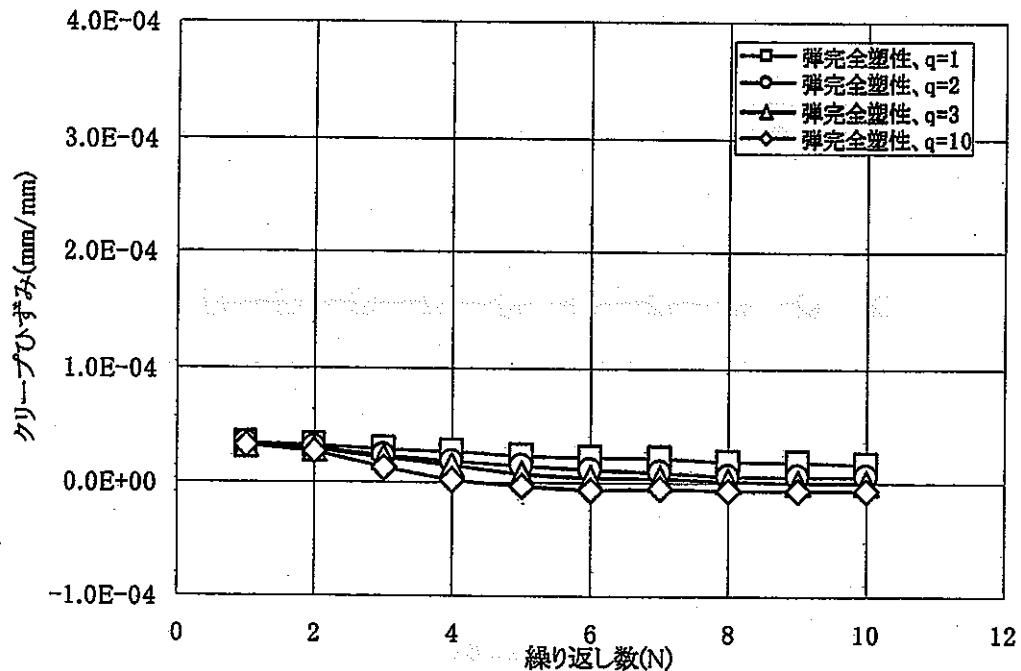


図 2.3-108 弾性追従係数のクリープひずみへの影響(引張保持、弾完全塑性、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

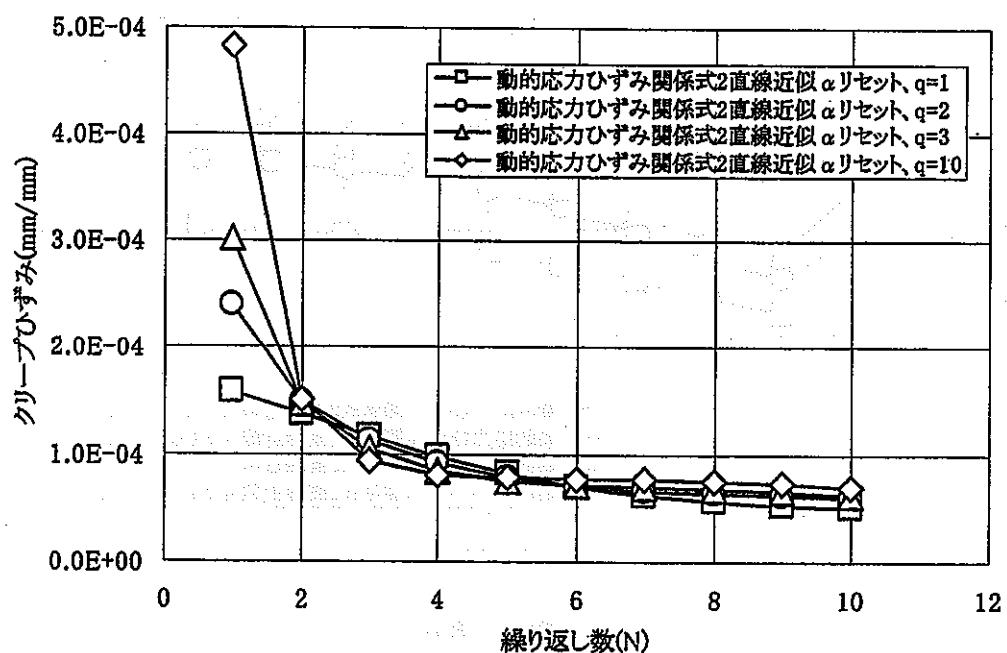


図 2.3-109 弾性追従係数のクリープひずみへの影響(引張保持、動的応力ひずみ関係式2直線近似 α リセット、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

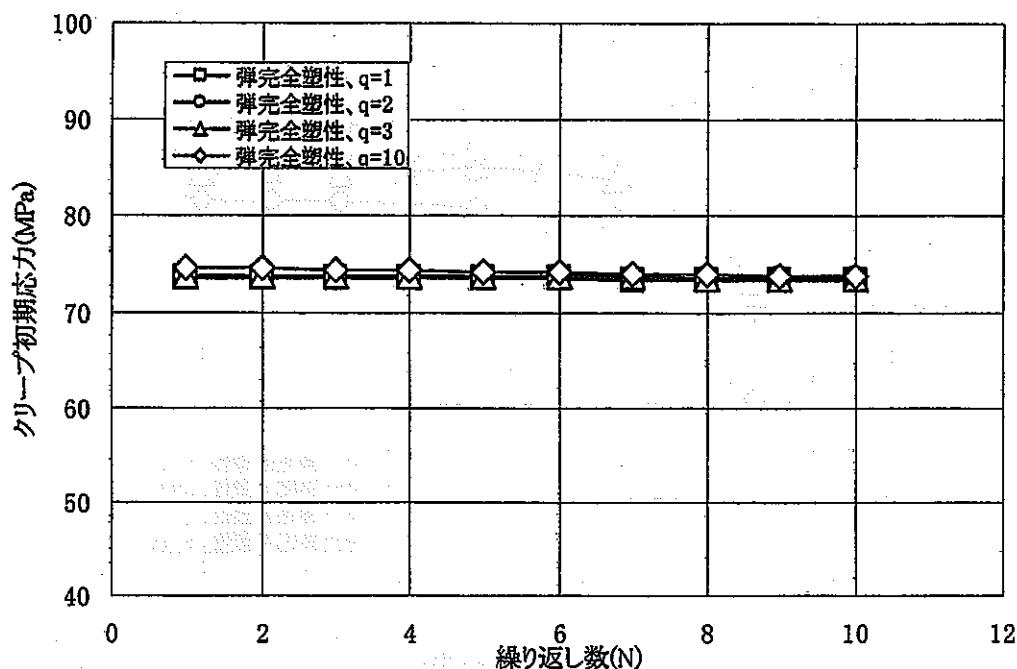


図 2.3-110 弾性追従係数のクリープ初期応力への影響(中間保持、弾完全塑性、1次応力
20MPa/2次応力強さ範囲350MPa)

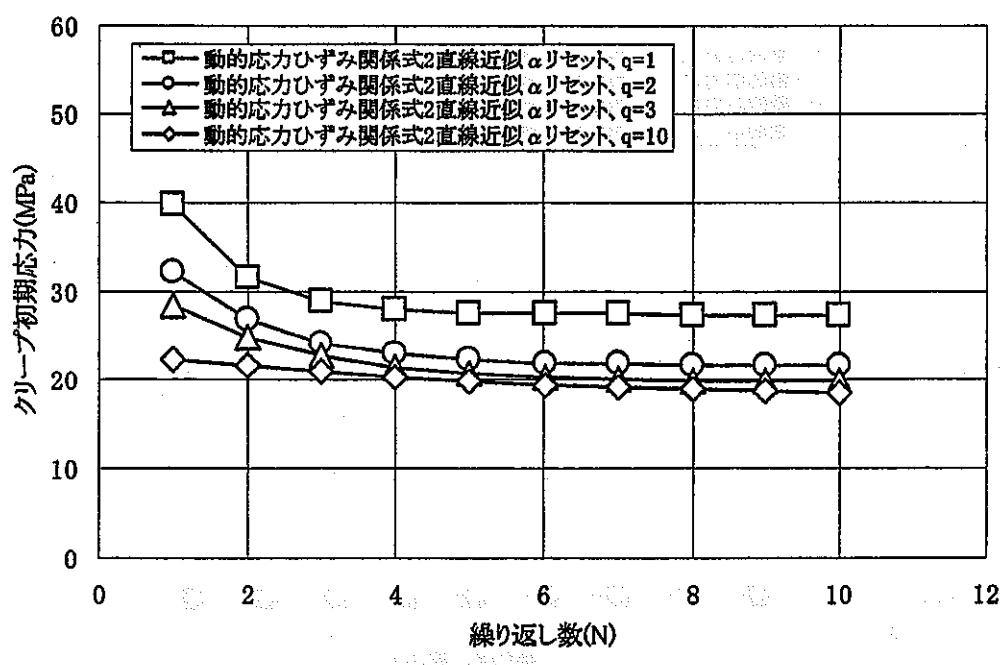


図 2.3-111 弾性追従係数のクリープ初期応力への影響(中間保持、動的応力ひずみ関係式 2
直線近似 α リセット、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

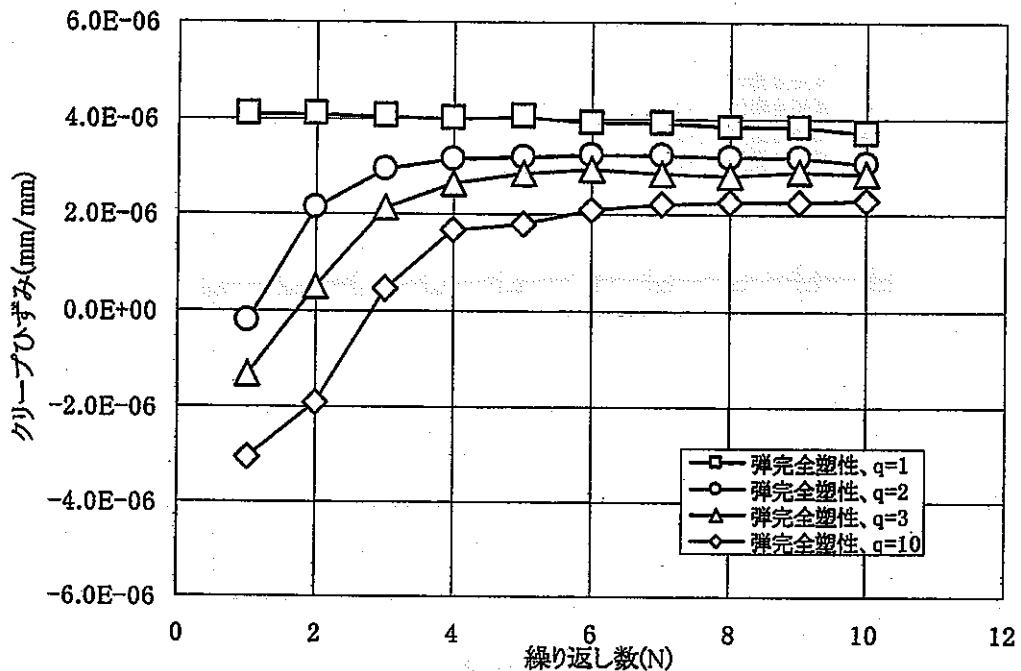


図 2.3-112 弾性追従係数のクリープひずみへの影響(中間保持、弾完全塑性、1次応力
20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

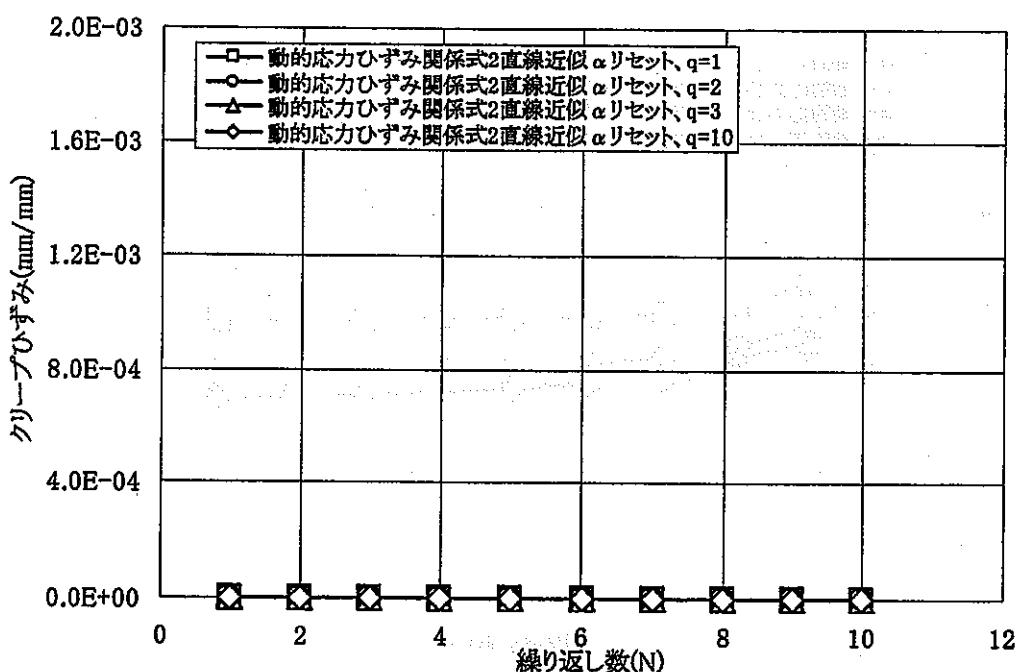


図 2.3-113 弾性追従係数のクリープひずみへの影響(中間保持、動的応力ひずみ関係式 2
直線近似 α リセット、1次応力 20MPa/2次応力強さ範囲 350MPa)

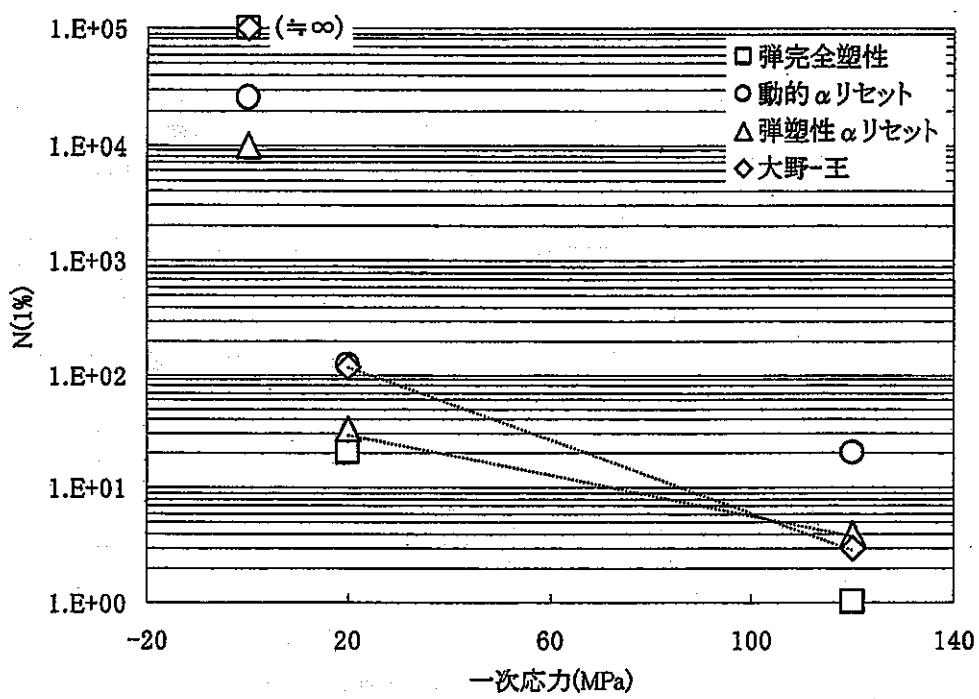


図 2.3-114 非弾性膜ひずみと一次応力の関係(保持なし、 $q=2$ 、 $S_n=350$ MPa)

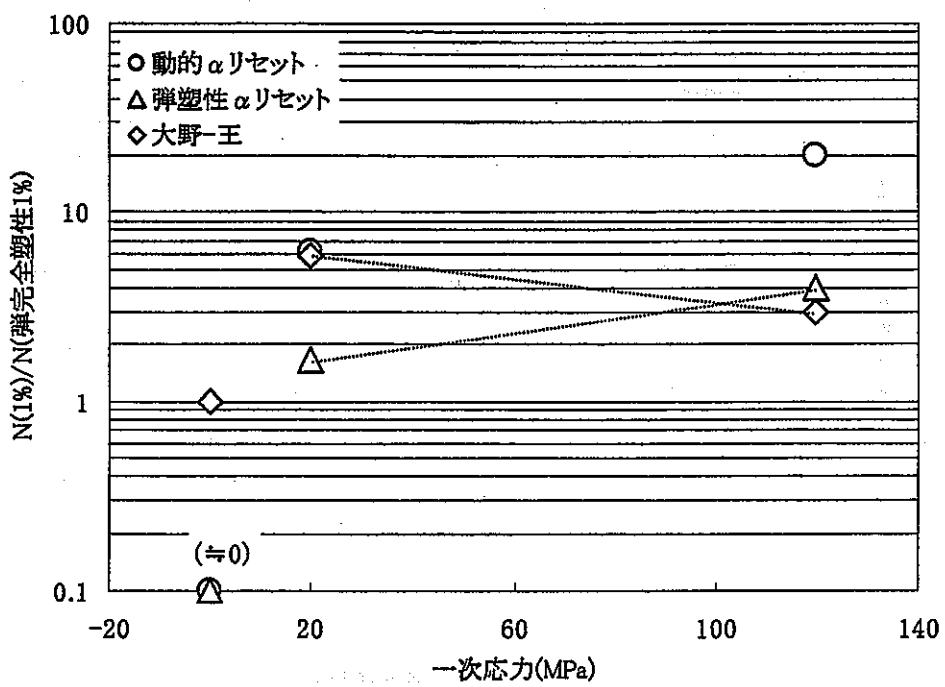


図 2.3-115 非弾性膜ひずみと一次応力の関係(保持なし、 $q=2$ 、 $S_n=350$ MPa、無次元化)

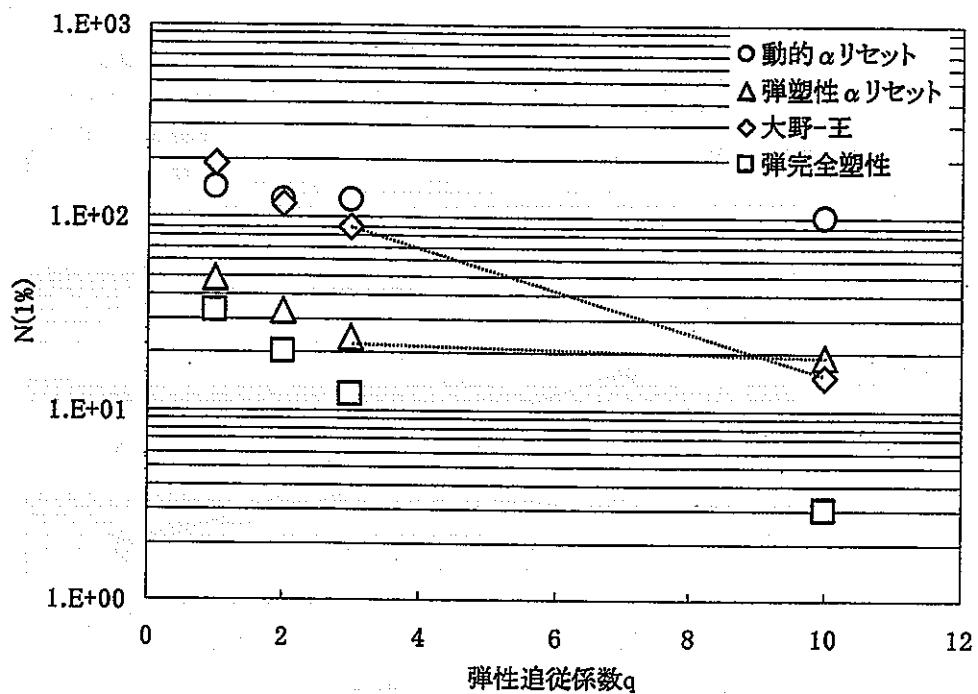


図 2.3-116 非弾性膜ひずみと弾性追従係数の関係(保持なし、 $S_n=350\text{MPa}$ 、一次応力 20MPa)

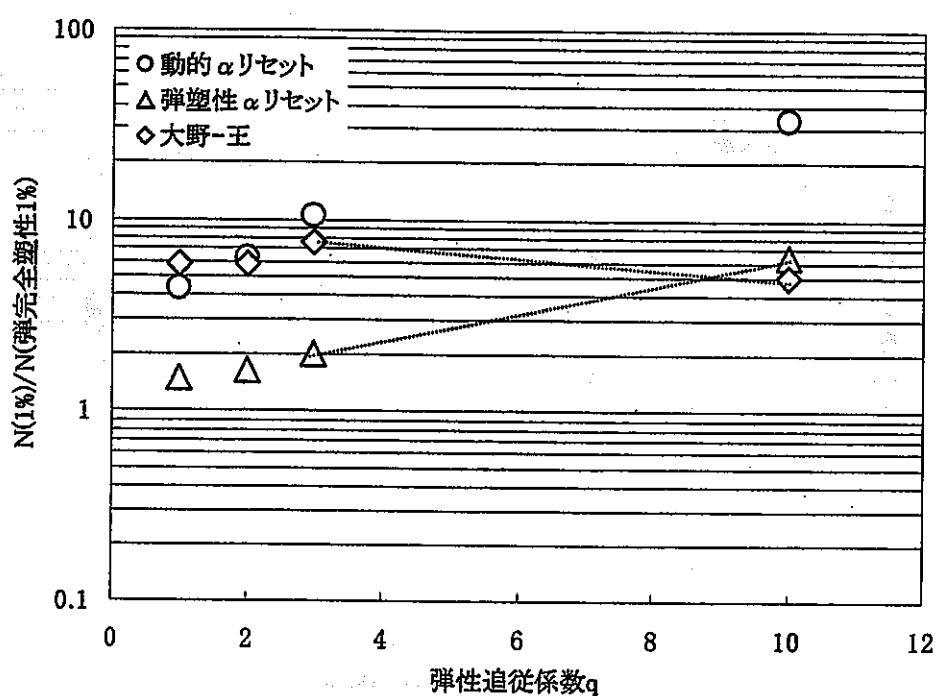


図 2.3-117 非弾性膜ひずみと弾性追従係数の関係(保持なし、 $S_n=350\text{MPa}$ 、一次応力 20MPa 、無次元化)

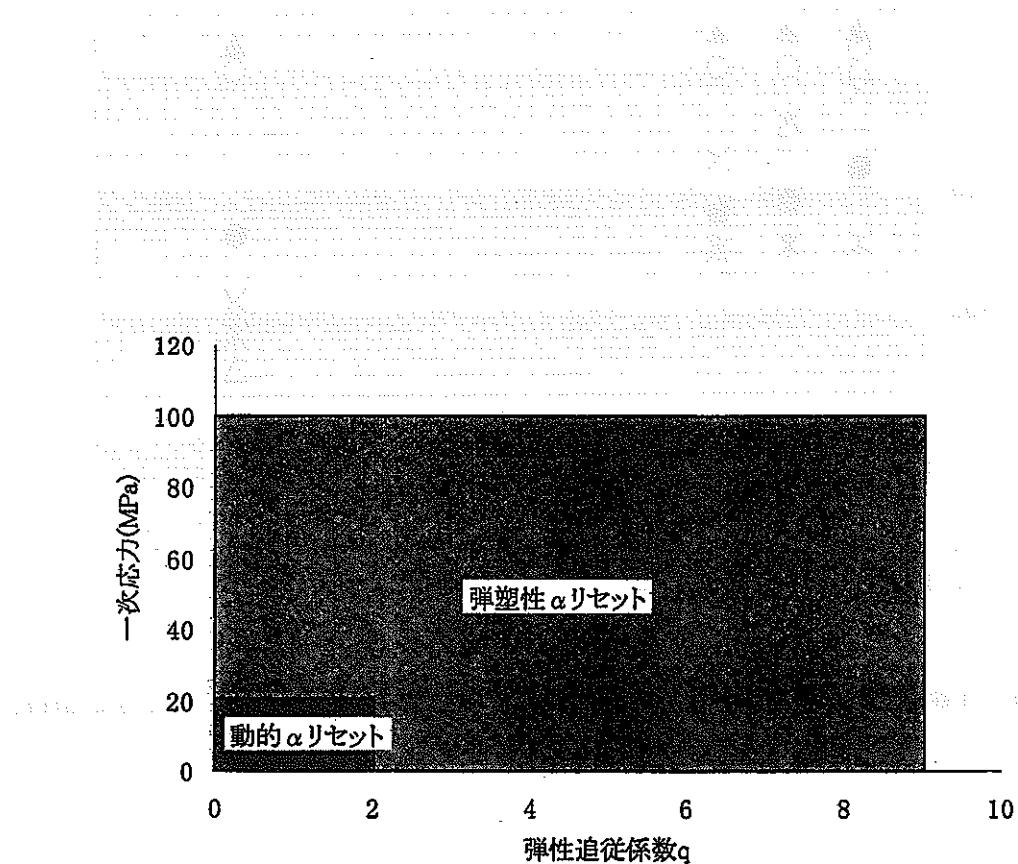


図 2.3-118 非弾性膜ひずみに対する構成則の適用範囲

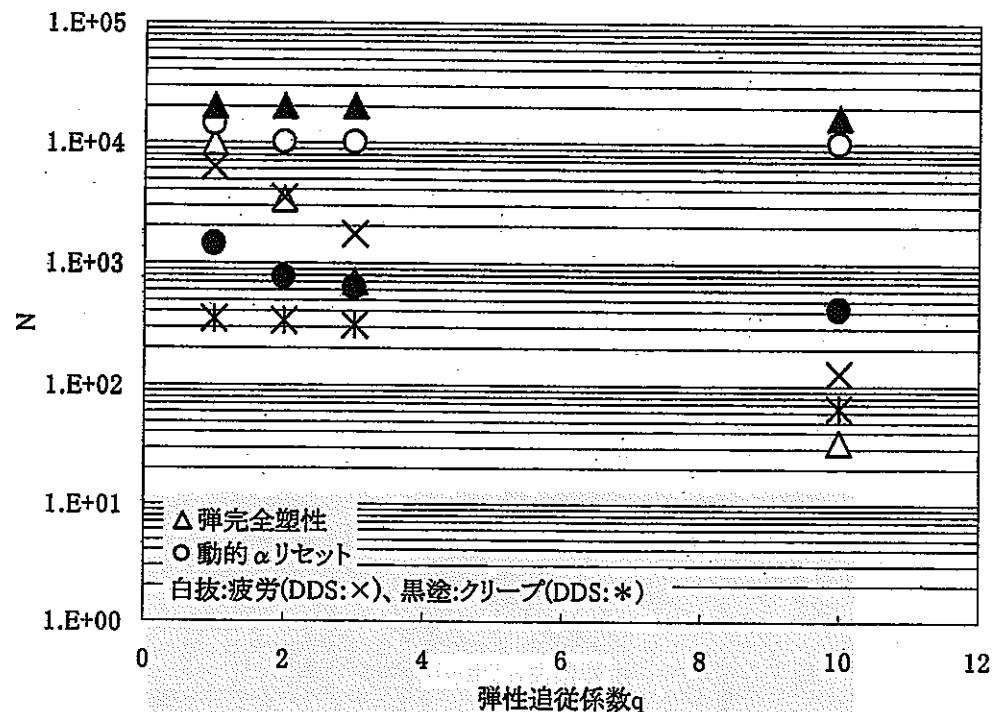


図 2.3-119 許容線返し数と弾性追従係数の関係(引張保持、 $S_n=350\text{MPa}$ 、一次応力 20MPa)

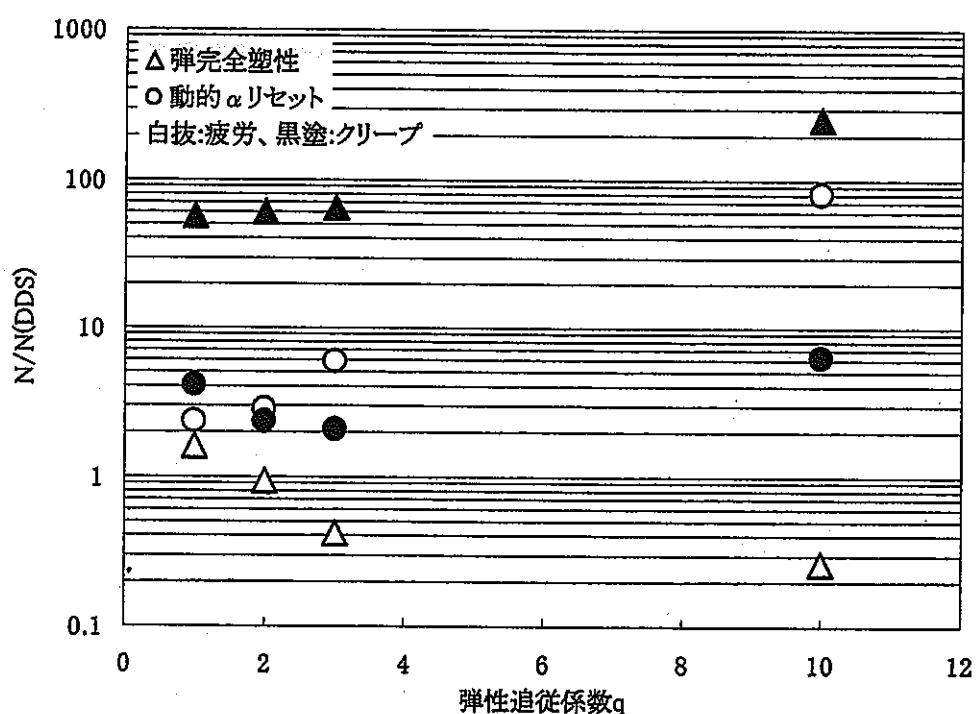


図 2.3-120 訸容線返し数と弾性追従係数の関係(引張保持、 $S_n=350\text{MPa}$ 、一次応力 20MPa 、無次元化)

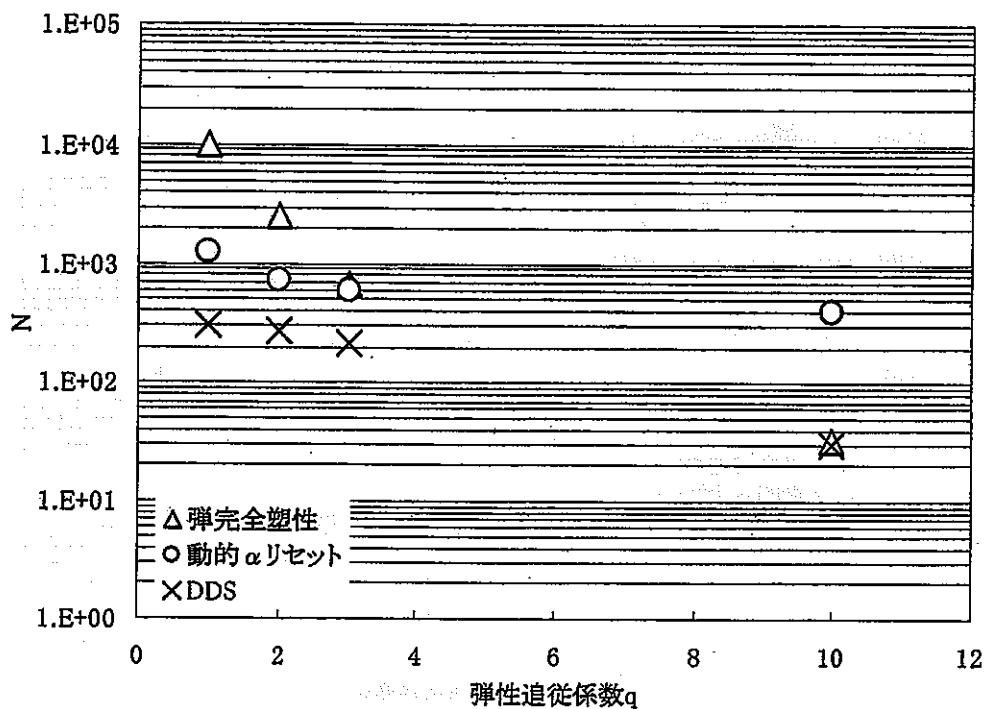


図 2.3-121 クリープ疲労の許容繰返し数と弾性追従係数の関係(引張保持、 $S_n=350\text{MPa}$ 、一次応力 20MPa)

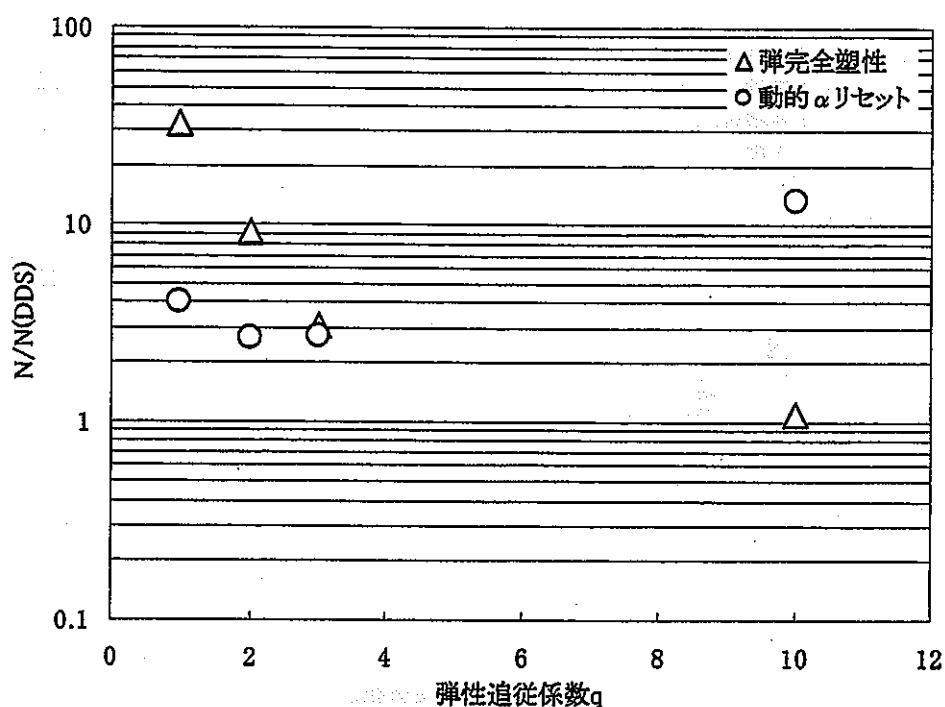


図 2.3-122 クリープ疲労の許容繰返し数と弾性追従係数の関係(引張保持、 $S_n=350\text{MPa}$ 、一次応力 20MPa 、無次元化)

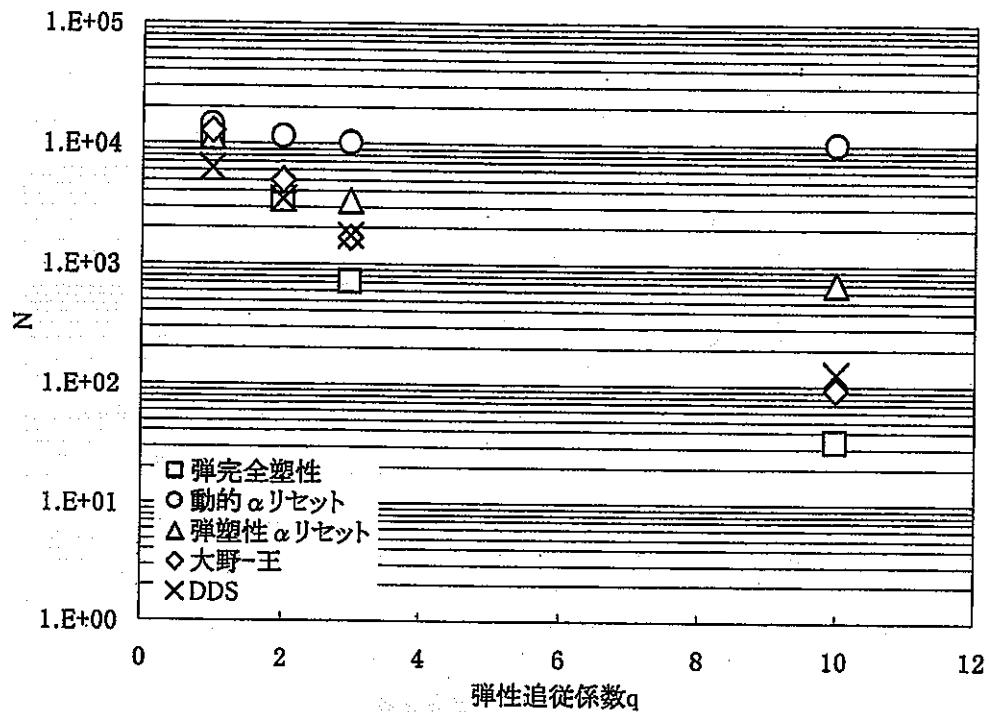


図 2.3-123 疲労の許容繰返し数と弾性追従係数の関係(保持なし、 $S_n=350\text{MPa}$ 、一次応力 20MPa)

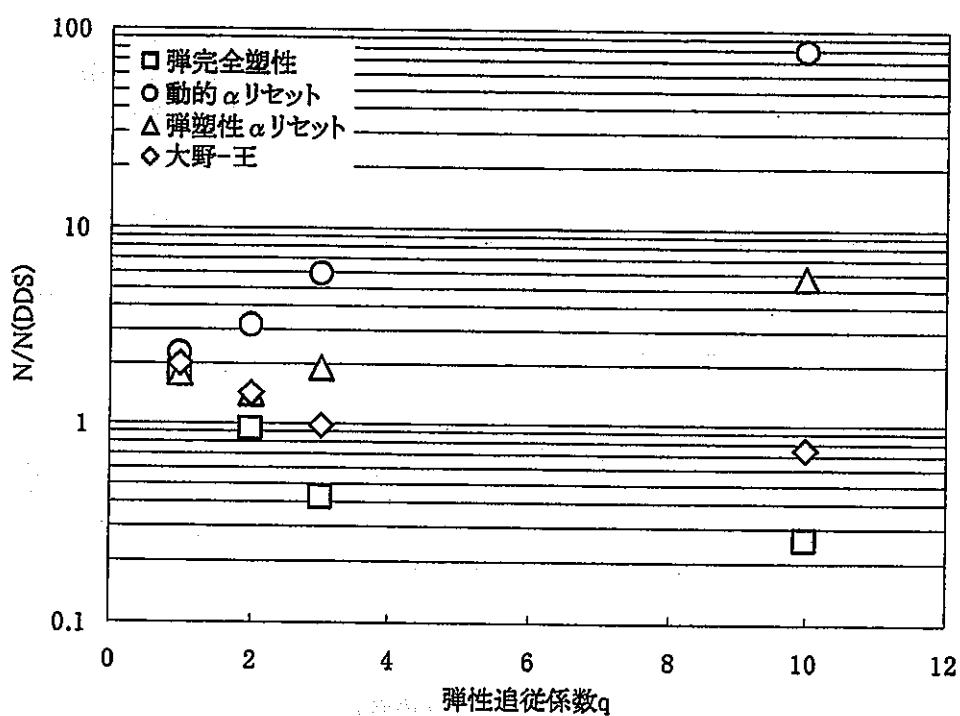


図 2.3-124 疲労の許容繰返し数と弾性追従係数の関係(保持なし、 $S_n=350\text{MPa}$ 、一次応力 20MPa 、無次元化)

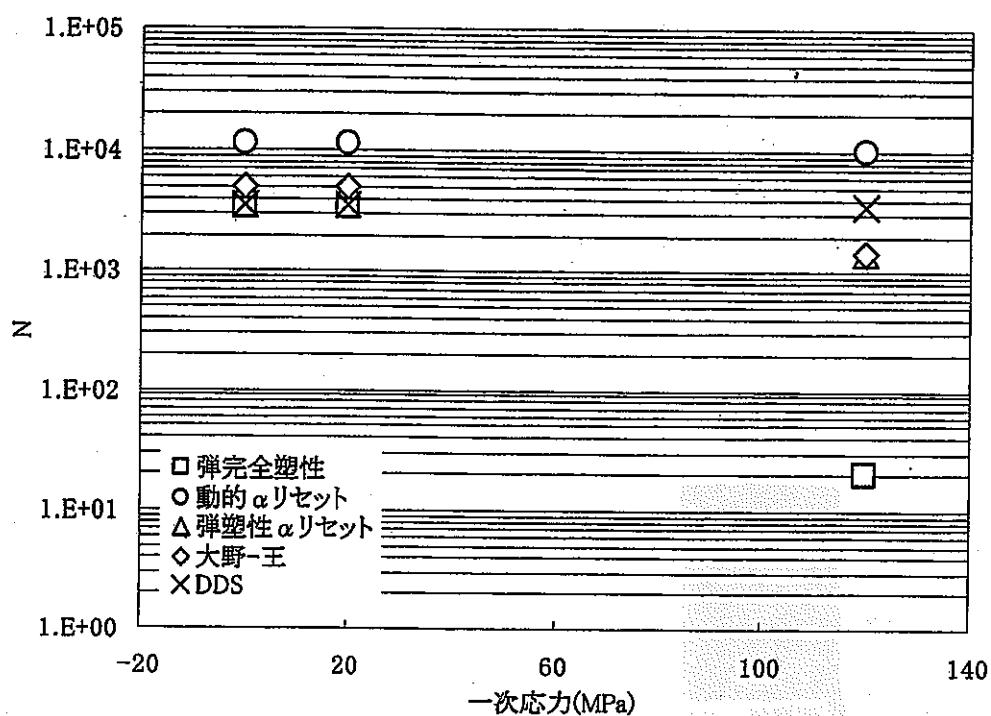


図 2.3-125 疲労の許容繰返し数と一次応力の関係(保持なし、 $q=2$ 、 $S_n=350$ MPa)

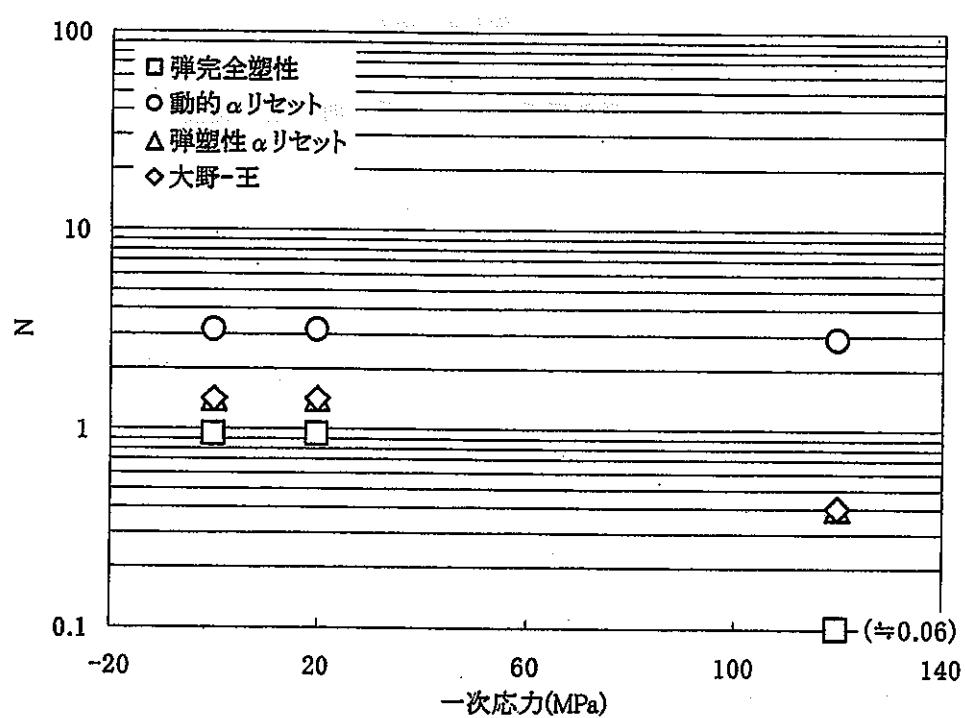


図 2.3-126 疲労の許容繰返し数と一次応力の関係(保持なし、 $q=2$ 、 $S_n=350$ MPa、無次元化)

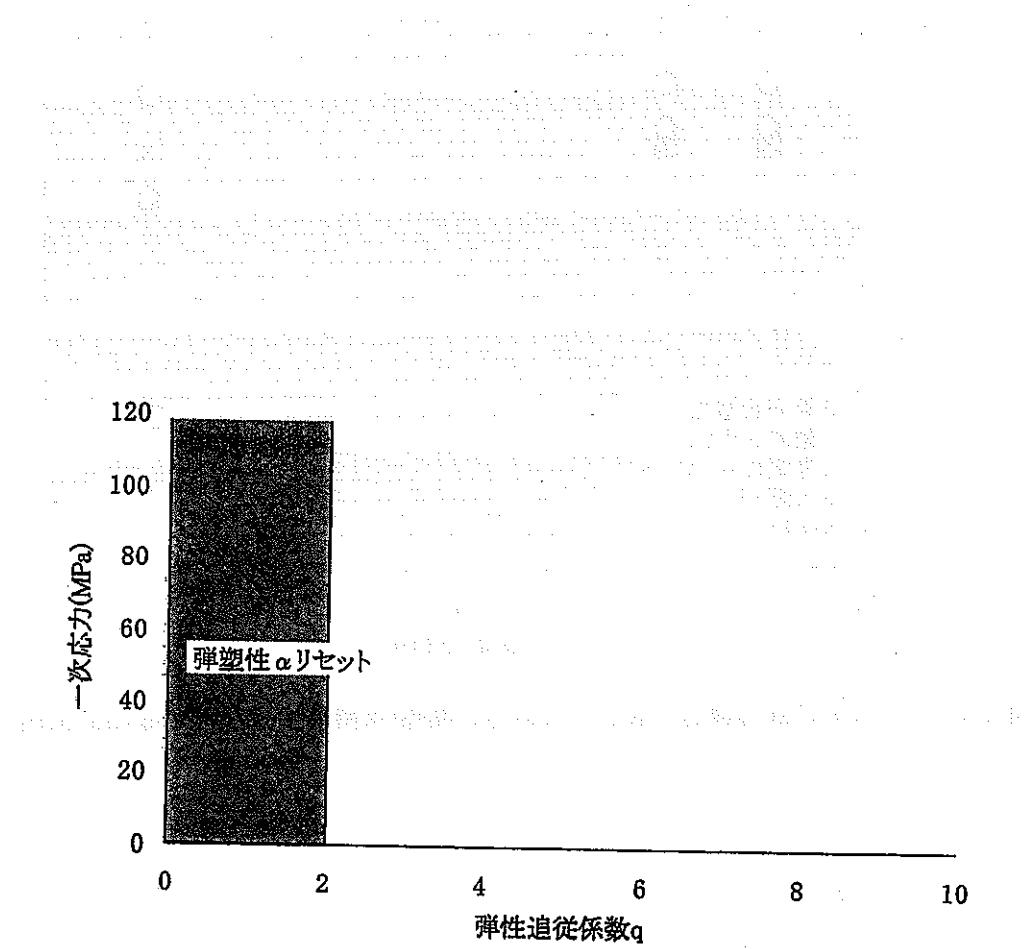


図 2.3-127 疲労損傷に対する構成則の適用範囲

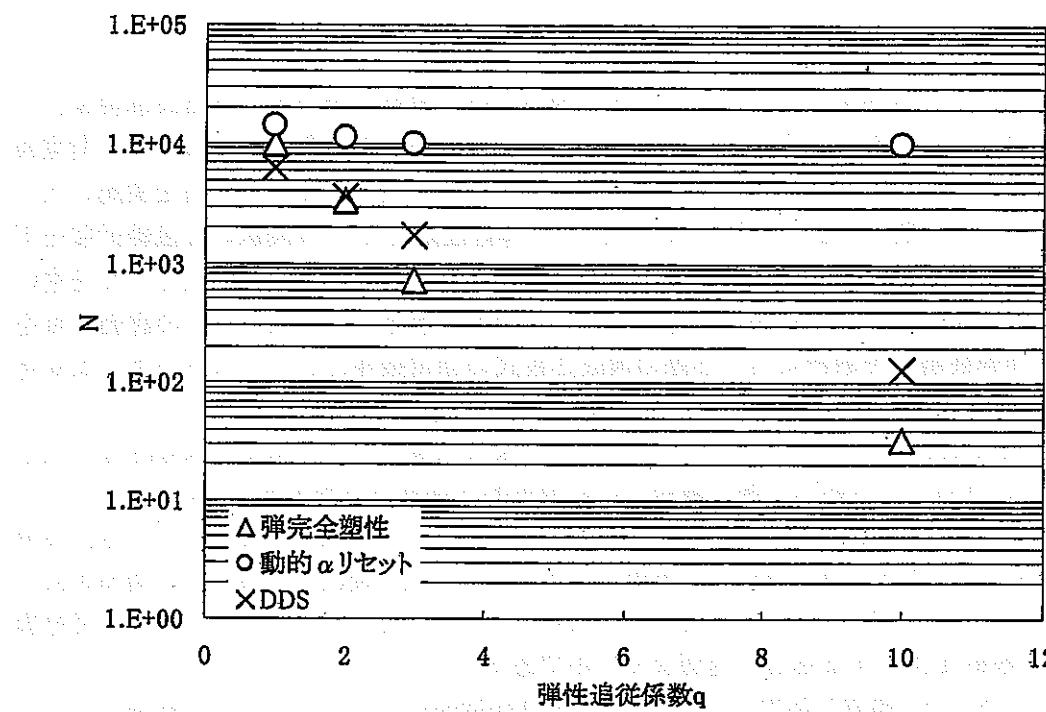


図 2.3-128 クリープ疲労の許容繰返し数と弾性追従係数の関係(中間保持、 $S_n=350\text{MPa}$ 、一次応力 20MPa)

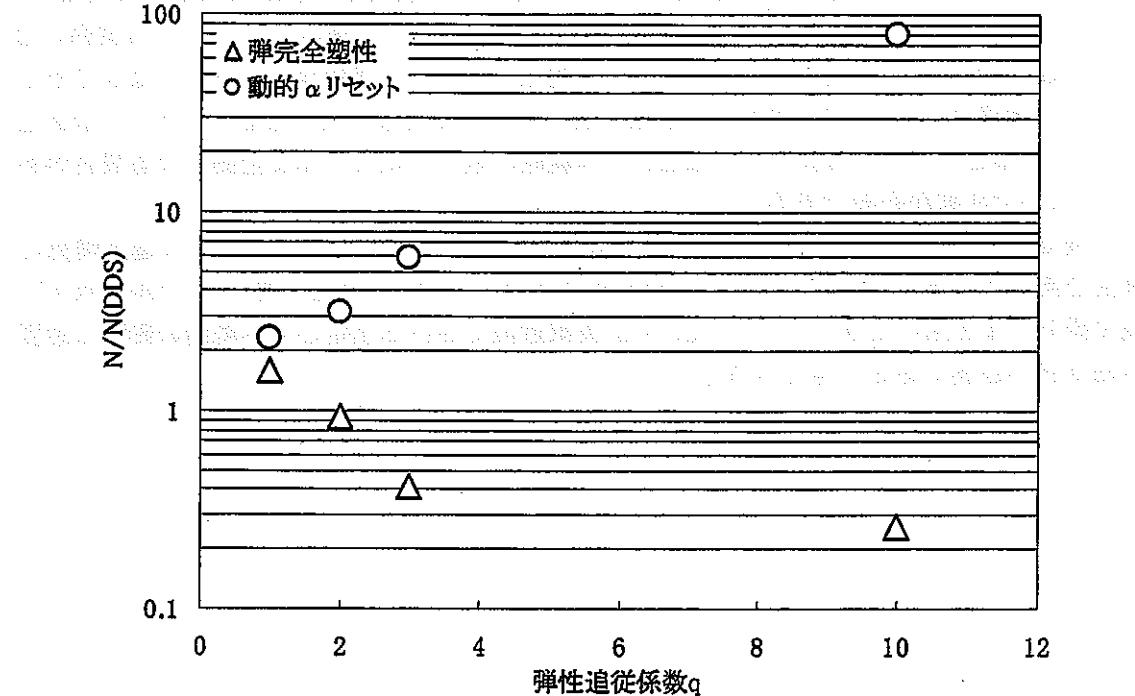


図 2.3-129 クリープ疲労の許容繰返し数と弾性追従係数の関係(中間保持、 $S_n=350\text{MPa}$ 、一次応力 20MPa)

3. まとめ

本研究では、非弾性解析により得られる非弾性挙動と設計評価対象である破損現象との関係をメカニズムの観点から分析することを目的に、1要素の単純解析モデルおよび荷重条件を作成し、一次応力、弾性追従係数をパラメータとして弾塑性クリープ解析を実施した。構成則としては、弾完全塑性モデル、 α リセット+弾塑性応力・ひずみ関係の2直線近似モデル、 α リセット+繰返し応力・ひずみ関係の2直線近似モデルならびに大野・王モデルを用いた。解析の結果から、非弾性膜ひずみ、クリープ疲労損傷値の各破損モードの評価精度を分析し、非弾性解析を設計に用いる際の構成方程式の適用条件として、以下のような知見を得ることができた。

- (1) 弾完全塑性モデルは、ラチェットひずみ、疲労損傷について過度に保守的な予測を与える、さらに一次応力が高い場合には非現実的な挙動を予測する。
- (2) α リセット+弾塑性応力・ひずみ関係の2直線近似モデルはラチェットひずみ、疲労損傷ともにほぼ妥当で保守的な予測を与えるが、繰返し硬化による応力の増加があらわすことが出来ずクリープ損傷の予測は非保守的となる。ラチェットひずみや疲労損傷が設計を支配する場合に適切なモデルである。
- (3) α リセット+繰返し応力・ひずみ関係の2直線近似モデルは、クリープ損傷を保守的に予測し、ラチェットひずみに関しても一次応力や弾性追従が小さい場合には許容値近傍では保守的な予測となる。クリープ損傷が設計を支配する場合には適切なモデルである。
- (4) ラチェットひずみ評価では、一次応力<20MPaかつ $q<2$ を満足する条件では、 α リセット+繰返し応力・ひずみ関係の2直線近似モデルが、それ以外では α リセット+弾塑性応力・ひずみ関係の2直線近似モデルが設計用非弾性解析法として妥当である。
- (5) クリープ疲労評価では、ピーク保持に対して α リセット+繰返し応力・ひずみ関係の2直線近似モデルが妥当な手法であり、中間保持ならびに保持なしに対しては α リセット+弾塑性応力・ひずみ関係の2直線近似モデルが妥当な手法となる。ただし、 $q>2$ となる場合には、2直線近似の想定ひずみ範囲の取り方により非安全側となる場合があるので注意が必要である。

今後は、さらにパラメータ数を増やした詳細なサーベイを行なうことにより適用範囲の精度を向上させるとともに、クリープ疲労損傷について調べるため大野・王モデルに代えて電中研モデルを用いたサーベイ、および2直線近似における想定ひずみ範囲の影響の感度評価などが必要であると考えられる。