

有孔平板繰返し変位負荷試験(CPVT)-I

1992年4月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

有孔平板繰返し変位負荷試験(CPVT)-I

柄谷 和輝*, 中村 貢**, 岡田 純二*,

月森 和之*, 岩田 耕司*

要 旨

非弾性解析の高度化のためには高精度の構成モデルが不可欠である。本研究は高速炉の主要構造部材であるオーステナイトステンレス鋼の非弾性挙動を精度よく表現する2曲面繰返し塑性モデルについて、その適用性と精度を実構造物において検証することを目的としている。このために、有孔平板繰返し変位負荷試験: CPVT (Cyclic Plasticity Verification Test)を実施し、ひずみ集中部における繰返し硬化挙動の観察を行った。また、この試験を模擬し、構成モデルとして2曲面繰返し塑性モデルを用いた詳細弾塑性解析を汎用構造解析プログラムFINASにより実施し、試験結果と比較検討した。

以下に本報の主な成果をまとめる。

- (1) 2曲面繰返し塑性モデルを用いた詳細弾塑性解析により、ひずみ集中部では繰返し硬化の進行とともに応力範囲の拡大とひずみ範囲の縮小が起ることを確認し、このモデルにより基本的な構造について高精度な解析が可能であることを示した。
- (2) CPVTにより塑性域におけるひずみ集中挙動を把握した。ただし繰返し硬化が顕著となる2%以上のひずみ範囲においてはひずみゲージの剥離によりその挙動を計測することができなかった。
- (3) 試験データに信頼性のあるひずみ範囲が小さく繰返し硬化が顕著でない領域(ひずみ範囲1%程度)においては試験と解析結果はよく一致し、2曲面繰返し塑性モデルが有効であることを示した。

* 機器構造開発部 構造工学室, **現在 川崎重工業株式会社

Cyclic Plasticity Verification Test - I

Kazuteru Garatani*, Mitsugu Nakamura**, Junji Okada*,

Kazuyuki Tsukimori*, Koji Iwata*

Abstract

The development of advanced constitutive models which can represent material behaviors precisely are key ingredients for accurate inelastic analyses. The aim of this research is to prove the performance of the two surface cyclic plasticity model which has been developed to represent detailed material behaviors of austenite stainless steel. Cyclic loading tests for slitted plate (CPVT:Cyclic Plasticity Verification Test) were conducted and cyclic hardening behaviors at the strain concentrated part was observed. The detailed elastoplastic analyses by the two surface cyclic plasticity model were performed using general purpose structural analysis program FINAS.

The following conclusions were obtained.

- (1) The magnification of stress range and the reduction of strain range at strain concentrated region of specimen was predicted from detailed elastoplastic analysis by the two surface cyclic plasticity model.
- (2) Strain concentration behaviors were analyzed by CPVT in plastic region. But the strain behaviors greater than 2% by range at which the typical cyclic hardening would reveal could not be measured, because most of the strain gauge come to peel off.
- (3) The experimental results coincided well with the analytical results small strain range region where the experimental data were available but the cyclic plasticity effect would not dominant.

* Structural Engineering Section, Oarai engineering Center, PNC

** Currently with Kawasaki Heavy Industries Co. Ltd.

目 次

緒 言	1
1. 試験方法	2
1.1 概 要	2
1.2 試験体	2
1.3 試験装置	3
1.4 計 測	4
1.5 試験条件	4
2. 試験結果	6
2.1 概 要	6
2.2 挙動試験	6
2.3 CPVT No.3	6
2.4 CPVT No.4	8
2.5 ひずみゲージ計測における原点シフトについて	9
2.6 予備試験(き裂の発生)	10
3. 解析方法	12
3.1 概 要	12
3.2 構造のモデル化	12
3.3 材料のモデル化	13
4. 解析結果	15
4.1 弾性解析	15
4.2 詳細弾塑性解析	16
4.3 3次元解析	18
5. 考 察	21
5.1 概 要	21
5.2 CPVT No.3	21
5.3 CPVT No.4	22
結 言	24
謝 辞	25
参考文献	26
付録 有孔平板繰り返し変位負荷試験(CPVT)データシート	27

List of Tables

Table 1.2-1	Chemical composition and Mechanical Properties of A4 Heat	32
Table 1.3-1	Main Specification of BHAT	33
Table 1.4-1	Strain Gauge Locations	34
Table 2.5-1	Origin Shift Feature of Measured Strain	9
Table 3.1-1	Analysis Condition	12

List of Figures

Fig. 1.2-1	Configuration and Dimensions of the Test Assembly	35
Fig. 1.2-2	Details of the Measured Section	36
Fig. 1.3-1	Flow Diagram of Emergency Halt Trap	37
Fig. 1.3-2	BHAT System	38
Fig. 1.4-1	Flow Diagram of Measurement and Record	39
Fig. 1.4-2	Strain Gauge Locations (1/4 Section)	40
Fig. 1.5-1	Loading Pattern	41
Fig. 2.2-1	Result of Behaviour Test (CPVT No. 3)	42
Fig. 2.2-2	Result of Behaviour Test (CPVT No. 4)	42
Fig. 2.3-1	Loading History of CPVT No. 3.....	43
Fig. 2.3-2	Displacement History at the 20Th Cycle (CPVT No. 3)	44
Fig. 2.3-3	Reaction Force-Displacement Relationship (CPVT No. 3)	45
Fig. 2.3-4	Reaction Force-Slit Tip Strain Relationship (CPVT No. 3)	45
Fig. 2.3-5	Reac. Force-Lig. Center Strain Relationship (CPVT No. 3)	46
Fig. 2.3-6	Reac. Force-Lig. Center Strain Relationship (CPVT No. 3)	46
Fig. 2.3-7	Strain Range Distribution at Ligament top (CPVT No. 3)	47
Fig. 2.3-8	Strain Range Distribution at Ligament bottom(CPVT No. 3)	47
Fig. 2.4-1	Displacement History at the 50Th Cycle (CPVT No. 4)	48
Fig. 2.4-2	Reaction Force-Displacement Relationship (CPVT No. 4)	49
Fig. 2.4-3	Reaction Force-Slit Tip Strain Relationship (CPVT No. 4)	50
Fig. 2.4-4	Reaction Force-Slit Tip Strain Relationship (CPVT No. 4)	50
Fig. 2.4-5	Reac. Force-Lig. Center Strain Relationship (CPVT No. 4)	51
Fig. 2.4-6	Reac. Force-Lig. Center Strain Relationship (CPVT No. 4)	51
Fig. 2.4-7	Strain Range Distribution at Ligament top (CPVT No. 4)	52
Fig. 2.4-8	Strain Range Distribution at Ligament bottom(CPVT No. 4)	52
Fig. 2.4-9	Reaction Force-Strain Relationship (G. No. 19, CPVT No. 4)	53
Fig. 2.5-1	Origin Shift of Measured Slit Tip Strain (CPVT No. 3)	53
Fig. 2.5-2	Origin Shift of Measured Strain History (CPVT No. 4)	54
Fig. 2.5-3	Origin Shift of Measured Strain (CPVT No. 4)	54
Fig. 2.6-1	Low-Cycle Fatigue Diagram for SUS304 Steel	55
Fig. 3.2-1	Mesh Division for 2-D Analysis	56
Fig. 3.2-2	Boundary Condition for FEM Analysis	57
Fig. 3.2-3	Mesh Division for 3-D Analysis	58

Fig. 4.1-1	Deformed Shape	(Elastic Analysis U=0.02mm)	59
Fig. 4.1-2	Mises Stress Contours	(Elastic Analysis U=0.02mm)	59
Fig. 4.1-3	σ_y Contours	(Elastic Analysis U=0.02mm)	60
Fig. 4.1-4	ε_y Contours	(Elastic Analysis U=0.02mm)	60
Fig. 4.1-5	Stress Distribution at Ligament	(Elastic Analysis U=0.02mm)	61
Fig. 4.1-6	Strain Distribution at Ligament	(Elastic Analysis U=0.02mm)	61
Fig. 4.1-7	Stress Distribution at Edge	(Elastic Analysis U=0.02mm)	62
Fig. 4.1-8	Strain Distribution at Edge	(Elastic Analysis U=0.02mm)	62
Fig. 4.2-1	Load-Disp. Relationship	(CPVT No. 3 Analysis)	63
Fig. 4.2-2	Stress-Strain Relationship at Slit Tip	(CPVT No. 3 Analysis)	63
Fig. 4.2-3	Load-Strain Relationship at Slit Tip	(CPVT No. 3 Analysis)	64
Fig. 4.2-4	Disp. -Strain Relationship at Slit Tip	(CPVT No. 3 Analysis)	64
Fig. 4.2-5	Stress Range at Ligament	(CPVT No. 3 Analysis)	65
Fig. 4.2-6	Strain Range at Ligament	(CPVT No. 3 Analysis)	65
Fig. 4.2-7	Peak Stress History at Ligament	(CPVT No. 3 Analysis)	66
Fig. 4.2-8	Peak Strain History at Ligament	(CPVT No. 3 Analysis)	66
Fig. 4.2-9	Deformed Shape	(CPVT No. 3 Analysis, 100Cycle)	67
Fig. 4.2-10	Mises Stress Contours	(CPVT No. 3 Analysis, 100Cycle)	67
Fig. 4.2-11	σ_y Contours	(CPVT No. 3 Analysis, 100Cycle)	68
Fig. 4.2-12	ε_y Contours	(CPVT No. 3 Analysis, 100Cycle)	68
Fig. 4.2-13	Stress Distribution at Ligament	(CPVT No. 3 Analysis, 100Cycle)	69
Fig. 4.2-14	Strain Distribution at Ligament	(CPVT No. 3 Analysis, 100Cycle)	69
Fig. 4.2-15	Stress Distribution at Edge	(CPVT No. 3 Analysis, 100Cycle)	70
Fig. 4.2-16	Strain Distribution at Edge	(CPVT No. 3 Analysis, 100Cycle)	70
Fig. 4.2-17	Load-Disp. Relationship	(CPVT No. 4 Analysis)	71
Fig. 4.2-18	Stress-Strain Relationship at Slit Tip	(CPVT No. 4 Analysis)	71
Fig. 4.2-19	Load-Strain Relationship at Slit Tip	(CPVT No. 4 Analysis)	72
Fig. 4.2-20	Disp. -Strain Relationship at Slit Tip	(CPVT No. 4 Analysis)	72
Fig. 4.2-21	Stress Range at Ligament	(CPVT No. 4 Analysis)	73
Fig. 4.2-22	Strain Range at Ligament	(CPVT No. 4 Analysis)	73
Fig. 4.2-23	Peak Stress History at Ligament	(CPVT No. 4 Analysis)	74
Fig. 4.2-24	Peak Strain History at Ligament	(CPVT No. 4 Analysis)	74
Fig. 4.2-25	Deformed Shape	(CPVT No. 4 Analysis, 50Cycle)	75
Fig. 4.2-26	Mises Stress Contours	(CPVT No. 4 Analysis, 50Cycle)	75
Fig. 4.2-27	σ_y Contours	(CPVT No. 4 Analysis, 50Cycle)	76
Fig. 4.2-28	ε_y Contours	(CPVT No. 4 Analysis, 50Cycle)	76

Fig. 4.2-29	Stress Distribution at Ligament(CPVT No. 4 Analysis, 50Cycle)	77
Fig. 4.2-30	Strain Distribution at Ligament(CPVT No. 4 Analysis 50Cycle)	77
Fig. 4.2-31	Stress Distribution at Edge (CPVT No. 4 Analysis, 50Cycle)	78
Fig. 4.2-32	Strain Distribution at Edge (CPVT No. 4 Analysis, 50Cycle)	78
Fig. 4.3-1	Deformed Shape (Elastic 3-D Ana. U=0.02mm)	79
Fig. 4.3-2	Mises Stress Contours (Elastic 3-D Ana. U=0.02mm)	79
Fig. 4.3-3	σ_y Contours (Elastic 3-D Ana. U=0.02mm)	80
Fig. 4.3-4	ϵ_y Contours (Elastic 3-D Ana. U=0.02mm)	80
Fig. 4.3-5	Stress Distribution at Center (Elastic 3-D Ana. U=0.02mm)	81
Fig. 4.3-6	Stress Distribution at Surface (Ela. 3-D Ana. U=0.02mm)	81
Fig. 4.3-7	Strain Distribution at Center (Ela. 3-D Ana. U=0.02mm)	82
Fig. 4.3-8	Strain Distribution at Surface (Ela. 3-D Ana. U=0.02mm)	82
Fig. 4.3-9	σ_y Distribution at Ligament (Ela. Analysis U=0.02mm)	83
Fig. 4.3-10	ϵ_y Distribution at Ligament (Ela. Analysis U=0.02mm)	83
Fig. 4.3-11	Stress Distribution at Center (EP. 3-D Ana. U=0.055mm)	84
Fig. 4.3-12	Stress Distribution at Surface (EP. 3-D Ana. U=0.055mm)	84
Fig. 4.3-13	Strain Distribution at Center (EP. 3-D Ana. U=0.055mm)	85
Fig. 4.3-14	Strain Distribution at Surface (EP. 3-D Ana. U=0.055mm)	85
Fig. 4.3-15	σ_y Distribution at Ligament (EP. Analysis U=0.055mm)	86
Fig. 4.3-16	ϵ_y Distribution at Ligament (EP. Analysis U=0.055mm)	86
Fig. 5.2-1	Load Displacement Relationship (Ana. & Exp. CPVT No. 3)	87
Fig. 5.2-2	Load Slit Tip Strain Relationship (Ana. & Exp. CPVT No. 3)	87
Fig. 5.2-3	Load lig. Center Strain Relationship (Ana. & Exp. CPVT No. 3)	88
Fig. 5.2-4	Strain Range Distribution (Ana. & Exp. CPVT No. 3)	88
Fig. 5.3-1	Load Displacement Relationship (Ana. & Exp. CPVT No. 4)	89
Fig. 5.3-2	Load Slit Tip Strain Relationship (Ana. & Exp. CPVT No. 4)	89
Fig. 5.3-3	Load lig. Center Strain Relationship (Ana. & Exp. CPVT No. 4)	90
Fig. 5.3-4	Strain Range Distribution (Ana. & Exp. CPVT No. 4)	90

List of Photographs

Photo. 1	BHAT System	91
Photo. 2	Attached Test Specimen	92
Photo. 3	Slit Tip Crack after Experiment	93

緒 言

大型高速炉では合理的な機器設計を実現し、建設費の低減を図るために非弾性解析を一層有効に活用することが期待されている。このためには非弾性解析法を高度化し、構造部材に発生する応力・ひずみ挙動を精度よく、かつ効率的に予測できるようにする必要がある。非弾性解析における適用性と精度は主に材料の力学的特性を記述する構成モデルに支配され、その高度化のためには材料挙動の記述性にすぐれ、計算効率のよい非弾性構成モデルの開発が不可欠である。

特に高速炉の主要構造材料であるオーステナイトステンレス鋼は塑性域において顕著な非線形硬化特性と繰返し硬化特性を示し、その材料挙動を精度よく表すためには従来用いられてきた2直線近似による移動硬化モデル等の古典的なモデルでは不十分であり、より高精度な構成モデルを用いる必要⁵⁾がある。このような構成モデル⁴⁾は近年各種提案されているが、この中でも2曲面繰返し塑性モデル⁹⁾は材料挙動の記述性と計算効率の面で特に優れており、非弾性解析の高精度化の核となることが期待されている。しかし今のところ2曲面繰返し塑性モデルは応力、ひずみ、温度の一定な材料試験においてその記述性を確認しているにすぎない。従って今後このモデルを実用化するためには応力、ひずみ、温度が分布する実際の構造物でその適用性と精度を評価する必要があり、このために構造工学室では非弾性挙動検証試験を実施している。これは基本的な構造物の非弾性挙動を高精度な構成モデルを用いた非弾性解析結果と比較・検討することにより、構成モデルの適用性と精度を評価することを目的としている。

本報告はこの試験の一環として実施した、SUS304鋼の有孔平板に繰返し変位を負荷して、室温の下でひずみ集中部における繰返し硬化挙動の観察を行うCPVT(Cyclic Plasticity Verification Test)と、この試験を模擬して行った2曲面繰返し塑性モデルによる非弾性解析に関する第一報である。

1. 試 験 方 法

1.1 概 要

オーステナイトステンレス鋼の材料特性である繰返し硬化が構造物においてどのような影響を及ぼすかを調査し、また近年提案されている高精度構成モデルによりこの挙動が表現できることを確認するために、CPVT (Cyclic Plasticity Verification Test) を実施した。CPVTではSUS304鋼の平板にひずみ集中構造を作るためのスリットを設けて室温において繰返し変位負荷を与え、その変形挙動の計測を行った。これまでに行われたCPVTの概略は巻末の付録に示すが、本報告は予備試験の後に行われた2体の試験体(CPVT No. 3, CPVT No. 4)に関するものである。

1.2 試験体

1.2.1 試験体仕様

試験体は当事業団の大気中構造材料試験に用いられているオーステナイトステンレス鋼の標準ヒート、A-4材¹⁾を機械加工して製作した。試験体は2体製作したが、両者は全く同一の形状・寸法・材質を持つ。寸法は全長1800mm, 全幅100mm, 標点間長さ200mm, 標点間の板厚10mmであり、試験体形状・寸法をFig. 1.2-1, 2に示す。ただしこの試験体において非弾性挙動の計測を行うのは長さ200mmの標点間部であり、他の部分は治具としての意味合いしか持たない。

本試験に使用された2体の試験体は、SUS304平板の1次・2次応力重畳下のクリープ挙動試験用²⁾のものを再加工して製作した。製作手順は、まず板厚30mmのクリープ挙動試験体に長さ50mm、幅10mmの両端を丸めたスリットを設け、その後標点間部200mmをフライス盤により板厚10mmまで削り出した。この後標点間部は切削加工で残った削りしろをバフにより仕上げ、特にスリットの内面は鏡面仕上げとした。

1.2.2 試験体の試験検査成績

CPVTに用いた試験体の製作前後における試験検査結果は以下の通りであった。

1) 素材の検査

素材のミルシートに記載されている化学成分及び機械的性質¹⁾がJISの規格に合格

していることを確認した。これらをTable 1.2-1に示す。

2)製品検査

試験体の形状寸法はJIS Z7701に基づいて製作され、仕上がった段階での寸法計測により、試験体の寸法が許容誤差内にあることを確認した。

1.3 試験装置

本試験には「構造物挙動試験装置」BHAT (Structural Behavior Testing Machine) を用いた。BHATは試験体に軸方向の引張り、圧縮変位を負荷することができる。

1.3.1 機構と制御

BHATによる試験体への変位負荷は、試験体の軸と同一線上に据付けた加振機により行った。この加振機は試験体取付治具、試験体取付フランジ、スライドベアリングを介して試験体に取り付けられている。BHATへの試験体取り付け状況をPhoto.1に示す。

BHATでは制御用電気信号がサーボ弁により圧油の流量信号に変換されて加振機が動作すると、その動作量の信号（今回の試験では標点間変位）がフィードバックされ負荷の制御が行われる。これ以外にもBHATでは、装置の故障等の異常が生じた際の試験体保護用として、変位及び荷重の上限と下限を設定できるアラーム回路を有しており、設定値を超えるとその時点で即座に試験装置が停止するようになっている。異常事象とこれに起因する非常停止までの流れをFig. 1.3-1に示す。

1.3.2 構成と能力

BHATは試験機本体、鋼製定盤、機枠等から成る。BHATの全体構成をFig. 1.3-2に示す。試験体に繰返し負荷を与えるための試験機本体は加振機、制御設備、油圧設備から成る。試験機本体は制御部に電気、動力部に油圧を用いた電気油圧式のもので、これにより最大軸変位 $\pm 50\text{mm}$ 最大軸荷重 $\pm 40\text{ton}$ を負荷することができる。試験機本体の主仕様をTable 1.3-1に示す。

1.4 計測

C P V Tでは試験体に軸方向繰返し変位を負荷した時の荷重、ひずみ、標点間変位を計測した。計測されたデータは増幅器を経てデータ集録装置へ送られ、デジタル値に変換して磁気テープへ記録した。テープに記録されたデータは大型コンピュータのデータ処理プログラムによって処理を行った。計測系統図をFig. 1.4-1に示す。また試験体への計測機器取り付け状況をPhoto. 2に示す。

1.4.1 荷重

試験体に発生した荷重はB H A T備え付けの軸方向荷重検出器（ロードセル）により計測した。ただし荷重の符号は試験体が引張りを受ける場合を正、圧縮を受ける場合を負とした。

1.4.2 変位

試験体の標点間変位は試験体の左右両側に取り付けた治具間の標点距離(200mm)の変化としてレーザ式外径測定器(光学式)によって計測した。なおこの計測値は左右の平均値としてのみ出力し、これを負荷の制御にも用いた。また試験中における試験体全体の軸方向変位を装置備え付けの軸方向変位検出器（差動トランス型）により計測した。

1.4.2 ひずみ

ひずみ計測には抵抗線型の室温用箔ひずみゲージを使用した。ひずみゲージの配置をTable 1.4-1に、配置図をFig. 1.4-2に示す。

1.5 試験条件

試験では室温において平均が零となるような軸方向の引張り、圧縮の繰返し変形を与えた。この変位負荷は試験体左右の標点間(200mm)伸びをレーザ変位計により計測し、この左右の平均伸び振幅が一定になるように制御した。試験条件としては挙動試験を弾性範囲内とし、C P V T No. 3, No. 4では詳細解析によりスリット端のひずみが各々 $\pm 6000 \mu$, $\pm 12000 \mu$ になるよう標点間伸び振幅を決定した。

1.5.1 挙動試験

試験体の基本挙動を確認するために試験体に弾性範囲で繰返し変形を与えた。挙動試験ではFig. 1.5-1に示す波形により負荷変位範囲 $\Delta U=0.04\text{mm}$ (P-P値)を10サイクル与えた。なおこの挙動試験はCPVT No. 3, No. 4両方の試験体について以下に示す本試験の前に行っている。

1.5.2 CPVT No. 3

挙動試験に引き続きFig. 1.5-2に示す波形により負荷変位範囲 $\Delta U=0.22\text{mm}$ を200サイクル与えた。なおその後予備試験としてスリット端で亀裂が発生, 進展するまで負荷を継続した。

1.5.3 CPVT No. 4

挙動試験に引き続きFig. 1.5-2に示す波形により負荷変位範囲 $\Delta U=0.44\text{mm}$ を200サイクル与えた。なおその後予備試験としてスリット端で亀裂が発生, 進展するまで負荷を継続した。

2. 試 験 結 果

2.1 概 要

試験結果は各計測値の中から有意なものを選択し、荷重、標点間の伸び、リガメント部のひずみについて整理を行った。

2.2 挙動試験

弾性範囲で行われた挙動試験では引張り及び圧縮側の負荷変位ピークにおいてリガメント部のひずみを観察し、FEM弾性解析結果と比較した。Fig. 2. 2-1にはCPVT No. 3ので引張り側ピーク負荷時に得られたリガメント部でのひずみ分布を解析結果とともに示す。またFig. 2. 2-2にはCPVT No. 4の圧縮側ピーク負荷時に得られたひずみ分布を同じく解析結果とともに示す。両者ともスリット端を除いて、解析と実験のひずみ分布はよく一致している。

2.3 CPVT No. 3結果

CPVT No. 3では制御変位が安全回路の設定値(制御変位の5%増, この後+10%増に変更)を上回ったために負荷が中断され、初期3サイクルは手動で負荷した。この試験開始時における起動, 停止の状況をFig. 2. 3-1に示す。従って、これらのサイクルでは負荷波形がFig. 1. 5-2に示すものと異なっている。しかしこの初期数サイクルを除けば試験による負荷は安定しており、数十サイクルでほぼ定常状態に達した。試験の整理結果より以下の代表的な図面を示す。

負荷波形(負荷変位-時間関係)	(20サイクル目)	Fig. 2. 3-2
荷重-変位関係	(1~20サイクル)	Fig. 2. 3-3
荷重-ひずみ関係(スリット端:16-3)	(1~20サイクル)	Fig. 2. 3-4
荷重-ひずみ関係(リガメント中央, 表面:13-2)	(1~20サイクル)	Fig. 2. 3-5
荷重-ひずみ関係(リガメント中央, 裏面:21)	(1~20サイクル)	Fig. 2. 3-6
リガメント部のひずみ範囲分布(表面)	(1~40サイクル)	Fig. 2. 3-7
リガメント部のひずみ範囲分布(裏面)	(1~40サイクル)	Fig. 2. 3-8

負荷波形(Fig. 2.3-2)によれば試験体には、ほぼ試験条件(負荷変位 $\pm 0.11\text{mm}$, 1サイクル30秒)通りの負荷が与えられたことが解る。負荷変位については20サイクル目は若干低めとなっているが、荷重-変位関係(Fig. 2.3-3)によれば引張り側が $0.105\sim 0.11\text{mm}$ 、圧縮側が $-0.1\sim -0.115$ であり試験条件との誤差は10%以内である。また、荷重-変位関係においてプロット値が階段状に変化しているのは変位計測において測定レンジを広く取りすぎたことに起因しており、実際の変位負荷にはこのような階段状変化は無かったことを確認している。荷重-スリット端ひずみ関係(Fig. 2.3-4)は、初期3サイクルに負荷の起動停止による乱れが認められるが、これ以降はほぼ安定している。ひずみ範囲については引張り、圧縮側ともそのピーク値が次第に小さくなっていることが観察される。しかしこの間特に引張り側で荷重の減少が認められ、さらにゲージ出力のシフトの影響もこれに重畳したと考えられ、このピークひずみの減少がどの程度繰返し硬化によっているのか判断することは難しい。荷重-リガメント中央ひずみ関係(Fig. 2.3-5, 6)はループの中心ひずみが表面で若干の引張、裏面で大きく圧縮側にシフトしており、さらにそのループの大きさも裏面の方が大きくなっている。これは試験体に上に凸の曲げ変形が発生し、その曲げ変形が圧縮負荷時にさらに大きくなったと思われる。また、本試験結果は初期引張りピーク負荷以降、荷重が零に戻ったときのひずみ値が圧縮側に大きく移動している。これについては、この間前述の負荷の中断があり、また計測が中断されていたため詳細は不明である。しかしループの圧縮側シフトと裏面でループの大きいことはこのような負荷の中断のないC P V T No. 4にも見られ、その定性的な傾向を議論するにおいて問題はないものとする。リガメント部のひずみ範囲分布(Fig. 2.3-7)についても表裏の値より試験体には曲げ変形が発生していたことが予測される。またこのひずみ分布についてはスリット端と裏面の引張り側を除いてはほぼサイクル数に依存せず安定している。スリット端については前述のように繰返し硬化とゲージ出力のシフトの影響が重畳しており、裏面の引張り側については曲げ変形の進行により、サイクル数の進行に従って値が変化したものとする。

2.4 CPVT No. 4結果

CPVT No. 4では負荷変位をNo. 3の2倍としたためスリット端のひずみが数%に達し、ひずみゲージの剥離が起ったため有意なデータが得られなかった。この試験においても、結果は数十サイクルで定常状態に達したため、50サイクル目までの結果より代表的な以下の図面を示す。

負荷波形(負荷変位-時間関係)	(50サイクル目) Fig. 2. 4-1
荷重-変位関係	(1~50サイクル) Fig. 2. 4-2
荷重-ひずみ関係(スリット端:16-3)	(1~50サイクル) Fig. 2. 4-3
荷重-ひずみ関係(スリット端:17-3)	(1~50サイクル) Fig. 2. 4-4
荷重-ひずみ関係(リガメント中央, 表面:13-2)	(1~50サイクル) Fig. 2. 4-5
荷重-ひずみ関係(リガメント中央, 裏面:21)	(1~50サイクル) Fig. 2. 4-6
リガメント部のひずみ範囲分布(表面)	(1~50サイクル) Fig. 2. 4-7
リガメント部のひずみ範囲分布(裏面)	(1~50サイクル) Fig. 2. 4-8
荷重-ひずみ関係(リガメント, 裏面:19)	(1~50サイクル) Fig. 2. 4-9

負荷波形(Fig. 2. 4-1)によれば負荷時に多少のオーバーシュートが見られるが、そのピークは引張り側が0. 212mm, 圧縮側が-0. 220mmでほぼ試験条件($\pm 0. 22$ mm)通りで安定している。荷重変位関係(Fig. 2. 4-2)によれば、引張り, 圧縮ピーク通過直後に若干この影響が見られ、また負荷変位幅も負荷初期数サイクルで $\pm 0. 23$ mmよりこの値に落ちついていく。従って本試験結果は試験開始後、初期数サイクルで負荷変位が10%ほど大きくなっている。荷重-スリット端ひずみ関係(Fig. 2. 4-3, 4)は、2サイクル以降にゲージの剥離が起こったと考えられるが、1サイクル目の値は16-3, 17-3両ゲージとも同様の値を示しているため信頼性はある。カタログデータによれば使用したゲージ(FXV-1)のひずみ限界は3%であるが、これは単調負荷の場合で、今回のようにひずみ範囲4%以上で剥離が起こるのはやむを得なかったと考える。荷重-リガメント中央ひずみ関係(Fig. 2. 4-5, 6)はCPVT No. 3同様ループの中心ひずみが表面での引張、裏面で圧縮側にシフトしており、さらにそのループの大きさも裏面の方が大きくなっている。これも試験体に発生した曲げ変形の影響と思われる。リガメント部のひずみ範囲分布(Fig. 2. 3-7)もNo.

3同様曲げ変形の発生を裏付けている。ただし、表面のスリット近傍の値については顕著な出力値のシフトが見られる。また裏面のゲージ近傍(ゲージNo. 19)の値には乱れが見られるが、これについては荷重-ひずみ関係(Fig. 2. 4-9)に示すようにゲージの剥離があったものと考ええる。

2.5 ひずみゲージ計測における原点シフトについて

今回のひずみ計測結果はその一部にひずみ値が引張り側に移動していく傾向(Fig. 2. 3-4, 7, 8, Fig. 2. 4-7, 8参照)が見られる。これはCPVT No. 3ではスリット端のみ、CPVT No. 4ではスリット端より1mm程度までの計測結果においてであり、いずれもひずみ範囲が大きい場合にこの傾向が現れている。これらの例から代表的なものとしてCPVT No. 3のスリット端とCPVT No. 4のスリット端から0.95mm位置におけるひずみ計測値をFig. 2. 5-1, 2, 3に示す。図より1サイクル当りほぼ一定量の原点移動が引張り側に発生していることが解る。またこのシフトの発生は継続的なもので計測を行った200サイクルにおいてほとんど変化が見られない。これら原点移動の傾向をTable 2. 5-1にまとめる。

Table 2.5-1 Origin Shift Feature of Measured Strain

計測位置	ひずみ範囲	1サイクル当りのシフト量
CPVT No3 スリット端	10500 μ	20 μ
CPVT No4 スリット端より0.95mm	12400 μ	66 μ

このような傾向は解析において負荷振幅の平均を零でなく引張り側に偏芯させたときにも表れるが、この場合1サイクルあたりの原点シフト量はサイクル数の進行とともに減少する。よって試験計測値で見られたようなひずみの継続的な原点シフトが実際に計測位置で起こっていたとは考え難く、計測系統の影響でこのような特性が発生した可能性がある。

この影響を調査するためにひずみゲージに繰り返しひずみを与えその特性を調査するひずみゲージ校正試験⁶⁾を実施した。これによればひずみ範囲7000 μ 以上においてひずみゲージ出力の原点が引張り側に移動する現象が認められた。また今回の試験と同種のひずみゲージFXV-1, FYV-1ではひずみ範囲13500 μ において、1サイクル当り18 μ ~93 μ 、

平均 56μ 程度の原点移動が発生することを確認している。この量はCPVT No. 4においてスリット端より 0.95mm 位置にあるひずみゲージのシフト量 66μ に対応しており、この原点移動がひずみゲージの特性により発生したものと結論することができる。

2.6 予備試験(き裂の発生)

CPVT No. 3, 4では200サイクルの負荷以降も予備試験として負荷を継続し、き裂の発生とその進展を調べた。この経過を以下に示す。

CPVT No. 3($\Delta u=0.22\text{mm}$)

- ・8501～8620サイクルの間にクラックが発生したことを目視により確認した。
- ・8620サイクル負荷時の観察によるとクラックは片側に発生し、その長さは裏面で 1mm 、板厚方向には貫通せず試験片の裏から 7mm まで達していた。
- ・9000サイクル負荷ではクラックは片側で長さが裏面で 3mm 、板厚方向には貫通せず試験片の裏から 8mm まで達した。
- ・10000サイクル負荷ではクラックは片側で長さが表裏とも $4\sim 5\text{mm}$ 、板厚方向に貫通していた。
- ・11000サイクル負荷ではクラックは片側で長さが表裏とも 5mm で、先の観察に較べクラックの進展はあまり見られなかった。
- ・12000サイクルの負荷後試験を終了した。試験後のクラックの状況をPhoto 3に示す。

CPVT No. 4($\Delta u=0.44\text{mm}$)

- ・941サイクルでひずみゲージ12-2の値が変化しクラックが発生したと認められた。
- ・1000サイクル負荷時の観察によるとクラックはスリットの両側に発生し、その長さは表裏面で 1mm 程度に達していた。また板厚方向には片側のみ貫通していた。
- ・2000サイクルの負荷後試験を終了した。

また、スリット端におけるひずみ範囲はCPVT No. 3では試験結果(Fig. 2. 3-4)より1.05%、CPVT No. 4では試験結果は得られていないものの4節に示す解析結果では2.6%程度であり、これに対してき裂が各々8600, 940サイクル程度で発生したことが解る。さて、SUS304鋼の室温における低サイクル疲労特性を文献¹⁰⁾よりFig. 2. 6-1に示す。ま

た同図には参考のために事業団で定めたSUS304の最適疲労特性式の425℃、ひずみ速度0.1%/secと事業団による試験結果も示している。これによれば、ひずみ範囲1.05%, 2.6%における N_f 値は各々9000, 700サイクル程度となり、今回の試験ではスリット先端においてほぼ N_f 程度の繰り返し負荷によりき裂の発生が認められたことになる。

3. 解 析 方 法

3.1 概 要

汎用非線形構造解析システムF I N A S^{7),8)}を用い、試験を模擬した有限要素法(F E M)による解析を実施した。解析では試験片の標点間を平面応力場と仮定した2次元モデルによる弾性解析と詳細弾塑性解析、及び3次元解析を実施している。各々の解析条件の概略をTable 3.1-1に示す。

Table 3.1-1 Analysis Condition

	構造モデル	材料モデル	負荷変位
弾性解析	2次元 1/4モデル	線形弾性	単調 U=0.22mm
詳細弾塑性解析	2次元 1/4モデル	2曲面塑性モデル ⁹⁾	繰返し $\Delta U=0.22, 0.44\text{mm}$
3次元解析	3次元 1/8モデル	弾性, 2直線移動硬化モデル	単調 U=0.22mm

弾性解析は、有限要素メッシュ分割の妥当性と解析における概略の傾向の把握及び挙動試験の検証のために行ったもので、線形弾性モデルを用いた。

詳細弾塑性解析はC P V T No. 3, No. 4の試験条件を模擬し、高精度の弾塑性モデルにより繰返し硬化の影響を詳細に検討するために実施した。よって材料モデルとしてはSU S304鋼の繰返し塑性挙動を精度よく再現する2曲面塑性モデル⁹⁾を用いている。なお解析は繰返し硬化の影響を見るためにC P V T No. 3では100サイクル、No. 4では50サイクルとした。

3次元弾塑性解析は試験片の板厚方向応力分布による3次元的影响を調査するために行ったもので、試験片の標点間の1/8について3次元要素によりモデル化した。材料モデルとしては線形弾性モデル及び従来の弾塑性解析においてよく用いられてきた2直線近似の移動硬化モデルとし、単調負荷の解析とした。

3.2 構造のモデル化

構造のモデル化は試験片の標点間のみを解析対象とし、線形弾性解析及び詳細弾塑性解析では平面応力場を仮定した2次元モデル、3次元解析では3次元モデルを用いた。

3.2.1 2次元モデル

2次元モデルは弾性解析および詳細弾塑性解析に用いたモデルであり、試験片の標点間に平面応力場を仮定した。また解析モデルは対称条件により1/4モデルとし、要素はQMEM8(8節点四辺形平面応力要素)を用いている。解析に用いたメッシュ分割と、境界条件をFig. 3.2-1, 2に示す。

3.2.2 3次元モデル

3次元モデルは3次元解析に用いたモデルで試験片の標点間の1/8を3次元的にモデル化した。有限要素はHEX20(20節点6面体3次元応力要素)とし、面内は2次元メッシュを用い、板厚方向に2層の分割(対称条件により実質的には4層の分割に等価)を行った。解析に用いたメッシュ分割をFig. 3.2-3に示す。

3.3 材料のモデル化

3.3.1 線形弾性モデル

線形弾性モデルは弾性解析および3次元解析に使用した。解析に用いた材料定数は文献³⁾における20℃の値であり、以下に示す。なおこの弾性の材料定数は他の解析でも共通に使用している。

線形弾性モデルの材料定数

弾性係数 : $E=19900\text{kg/mm}^2$

ポアソン比 : $\nu=0.264$

3.3.2 2曲面塑性モデル⁹⁾

2曲面塑性モデルは詳細弾塑性解析に用いた。このモデルはSUS304鋼の非線形硬化と繰返し硬化特性を精度よくかつ効率的に表現することができる。解析には事業団で定めたSUS304鋼の温度依存材料特性⁴⁾における20℃の値より材料定数を定めた。以下に解析に用いた材料定数を示す。

2 曲面モデルのモデル定数

弾性係数 : $E = 19900 \text{ kg/mm}^2$

ポアソン比 : $\nu = 0.264$

降伏応力 : $\sigma_y = 16.82 \text{ kg/mm}^2$

単調応力-ひずみ関係に関するパラメータ

$K = 43.95 \text{ kg/mm}^2, m = 0.28094$

繰返し応力-ひずみ関係に関するパラメータ

$K_1 = 1506.79 \text{ kg/mm}^2, m_1 = 0.81408$

繰返し硬化特性に関するパラメータ

$C = 6.7818, Q = 0.3333, n = 1.0,$

$D = 0.1694, R = 13.5636$

3.3.3 2直線移動硬化モデル

2直線移動硬化モデルは3次元解析に用いたものである。材料定数は事業団で定めたSUS304鋼の温度依存材料特性⁴⁾の値より、20℃にて1.2%ひずみまでの単調応力-ひずみ関係について、文献³⁾による2直線応力-ひずみ近似を行い降伏応力と加工硬化係数を定めた。以下に解析に用いた材料定数を示す。

2直線移動硬化モデルの材料定数

弾性係数 : $E = 19900 \text{ kg/mm}^2$

ポアソン比 : $\nu = 0.264$

降伏応力 : $\sigma_y = 25.35 \text{ kg/mm}^2$

加工硬化係数 : $H' = 1728 \text{ kg/mm}^2$

4. 解析結果

4.1 弾性解析結果

線形弾性解析では標点間($l=200\text{mm}$)に $U=0.02\text{mm}$ の引張り変位を与えた。この結果より代表的な以下の図面を示す。

変形図	Fig. 4.1-1
ミーゼス応力分布図	Fig. 4.1-2
Y方向応力分布図	Fig. 4.1-3
Y方向ひずみ分布図	Fig. 4.1-4
リガメント部の応力分布	Fig. 4.1-5
リガメント部のひずみ分布	Fig. 4.1-6
スリット円弧に沿った応力分布	Fig. 4.1-7
スリット円弧に沿ったひずみ分布	Fig. 4.1-8

応力、ひずみ分布図よりスリット部にこれらが集中し、スリット端でピーク値を取っている。またこれらの分布図を比較することにより、リガメント部よりスリット円弧に沿った方がスリット端において応力、ひずみ値の立ち上がりが穏やかであることが解る。このことはスリット円弧の内側にひずみゲージを貼り、ひずみの計測を行えば、ひずみ集中部の値を精度良く計測できる可能性があることを示している。これら解析により得られた応力、ひずみの値は全体に滑らかな分布を示すが、スリット円弧に沿ったせん断ひずみの分布には多少の乱れが見られる。これは図のプロットに要素座標系を用いているため、積分点位置により要素座標系とスリットの円弧方向に多少のずれが生じるためと考えられる。

この弾性解析結果からスリット端におけるY方向応力を要素積分点の応力値より2次式を用いて外挿すると 10.99kg/mm^2 が得られる。これよりスリット端のY方向応力とリガメント部の平均応力の比として応力集中係数: α を計算すると $\alpha=3.52$ となる。一方、光弾性による実験式¹¹⁾によればこの値として3.30が与えられる。よって解析で得られた応力集中係数は光弾性による実験式に較べ多少大きめであるが、さらに細かいメッシュ分

割を用いて解析をおこなってもこの値に変化が見られず、本弾性解析結果は妥当なもの
と考える。

4.2 詳細弾塑性解析結果

詳細弾塑性解析では2曲面塑性モデルを用い、CPVT No. 3, 4の試験条件を模擬し
て詳細なFEM解析を実施した。

4.2.1 CPVT No. 3解析結果

試験条件より標点間の変位を $\pm 0.11\text{mm}$ ($\Delta U = 0.22\text{mm}$)として100サイクルの負荷を与え
た。解析結果より以下の代表的な図面を示す。

荷重-変位関係		Fig. 4.2- 1
応力-ひずみ関係(スリット端)		Fig. 4.2- 2
荷重-ひずみ関係(スリット端)		Fig. 4.2- 3
変位-ひずみ関係(スリット端)		Fig. 4.2- 4
リガメント部の応力範囲		Fig. 4.2- 5
リガメント部のひずみ範囲		Fig. 4.2- 6
リガメント部のピーク応力履歴		Fig. 4.2- 7
リガメント部のピークひずみ履歴		Fig. 4.2- 8
変形図	(100サイクル目)	Fig. 4.2- 9
ミーゼス応力分布図	(100サイクル目)	Fig. 4.2-10
Y方向応力分布図	(100サイクル目)	Fig. 4.2-11
Y方向塑性ひずみ分布図	(100サイクル目)	Fig. 4.2-12
リガメント部の応力分布	(100サイクル目)	Fig. 4.2-13
リガメント部のひずみ分布	(100サイクル目)	Fig. 4.2-14
スリット円弧に沿った応力分布	(100サイクル目)	Fig. 4.2-15
スリット円弧に沿ったひずみ分布	(100サイクル目)	Fig. 4.2-16

解析結果より荷重-変位関係は、ほぼ線形関係を保ちほとんどヒステリシスが見られ
ない。これはリガメント部の応力範囲より解るように、CPVT No. 3の負荷条件では
スリット端近傍の10mm程度しか塑性領域に達しないためである。しかしスリット端の応

力-ひずみ関係には顕著な非線形性が見られ、綺麗なヒステリシスが得られる。この値には繰返し硬化の影響により、サイクル数の進行に伴い応力範囲の増大とひずみ範囲の減少が見られる。このような応力集中部の挙動は繰返し硬化材に特徴的なものである。リガメント部の応力範囲を見るとスリット端ではサイクル数の進行に伴い応力が増大しているが、内側に入るに従って逆に応力は減少に転じる。またひずみ分布についてはこれとは全く逆の傾向が現れる。これも繰返し硬化に特徴的なもので、硬化の進行に従って応力、ひずみの再配分が起こるためである。このことはリガメント部のピーク応力、ひずみ履歴に顕著に現れているが、この例では再配分が生じるのはスリット端より高々5mm程度までであることが解る。

また最終的に得られたリガメント部の応力分布を見ると、弾性から塑性への遷移のため、この近傍で折れ曲がりが見られる。ただしこれら応力、ひずみのスリット端における集中度合いは弾性解析に較べれば緩やかである。

なお本解析には5990ステップを要し、大洗工学センターのVP-2600でのCPU時間は約42分であった。

4.2.2 CPVT No.4解析結果

先に同様に試験条件より標点間の変位を $\pm 0.22\text{mm}$ ($\Delta U = 0.44\text{mm}$)として50サイクルの負荷を与えた。解析結果より代表的な以下の図面を示す。

荷重-変位関係		Fig. 4.2-17
応力-ひずみ関係(スリット端)		Fig. 4.2-18
荷重-ひずみ関係(スリット端)		Fig. 4.2-19
変位-ひずみ関係(スリット端)		Fig. 4.2-20
リガメント部の応力範囲		Fig. 4.2-21
リガメント部のひずみ範囲		Fig. 4.2-22
リガメント部のピーク応力履歴		Fig. 4.2-23
リガメント部のピークひずみ履歴		Fig. 4.2-24
変形図	(50サイクル目)	Fig. 4.2-25
ミーゼス応力分布図	(50サイクル目)	Fig. 4.2-26

Y方向応力分布図	(50サイクル目)	Fig. 4. 2-27
Y方向塑性ひずみ分布図	(50サイクル目)	Fig. 4. 2-28
リガメント部の応力分布	(50サイクル目)	Fig. 4. 2-29
リガメント部のひずみ分布	(50サイクル目)	Fig. 4. 2-30
スリット円弧に沿った応力分布	(50サイクル目)	Fig. 4. 2-31
スリット円弧に沿ったひずみ分布	(50サイクル目)	Fig. 4. 2-32

C P V T No. 4の負荷条件ではリガメント部が全断面降伏するため、No. 3に比較して非線形性が強く現れ、繰返し硬化の影響も顕著となる。特にスリット端における応力-ひずみ関係は初期に較べ定常状態では応力範囲で50%の増大、ひずみ範囲で40%の減少が見られる。この応力、ひずみ範囲の変化は先に述べたように繰返し硬化に特有なもので、サイクル数の進行により応力範囲が増大して硬化が起こるために逆にひずみ範囲が小さくなってこのような特徴が現れる。リガメント部の応力、ひずみ範囲についてもサイクル数の進行に伴う再配分により、先と同様スリット端近傍とこれより内側で逆の傾向が見られる。これもスリット端近傍ではひずみ範囲が大きいため繰返し硬化が顕著で応力範囲の増大とひずみ範囲の減少が起こるが、この内側ではひずみ範囲が小さいため繰返し硬化はあまり発生せず、むしろスリット端の応力が増加した分の釣合いのため応力が低下すると考えられる。

なお本解析には4980ステップを要し、大洗工学センターのVP-2600でのC P U時間は約40分であった。

4.3 3次元解析結果

2次元解析では試験片を平面応力状態と仮定したが、実際には板厚方向にも応力分布が存在する。この影響を考察するために3次元解析を実施した。ただし、3次元解析には膨大な計算時間(今回のモデルで2次元の10倍程度)を要し、繰返し負荷を詳細弾塑性解析により追跡することは困難なため、弾性解析と2直線移動硬化モデルによる単調負荷の解析を行い、その定性的な傾向を検討する。

4.3.1 3次元弾性解析結果

負荷変位は2次元の弾性解析に合わせ $U=0.22\text{mm}$ とした。3次元弾性解析結果より以下の代表的な図面を示す。

変形図	(表面)	Fig. 4.3-1
ミーゼス応力分布図	(表面)	Fig. 4.3-2
Y方向応力分布図	(表面)	Fig. 4.3-3
方向ひずみ分布図	(表面)	Fig. 4.3-4
リガメント部の応力分布	(表面)	Fig. 4.3-5
リガメント部のひずみ分布	(表面)	Fig. 4.3-6
リガメント部の応力分布	(板厚中心)	Fig. 4.3-7
リガメント部のひずみ分布	(板厚中心)	Fig. 4.3-8

応力、ひずみ分布図において表面も板厚中心も2次元の弾性解析結果とそれほどの差は見られない。ただしリガメント部の板厚中心には板厚方向の応力が 1 kg/mm^2 程度見られるがこれもY方向の応力に比べれば10%以下であり、この値も表面ではほとんど零になる。またスリット端のY方向ピーク応力値を求めると板厚中心で 11.5kg/mm^2 、表面で 10.4kg/mm^2 が得られるが、この値も2次元解析の結果 10.99kg/mm^2 との差は5%以下である。

次にこの解析結果を2次元解析の結果と比較するためにリガメント部のY方向応力、ひずみを重ねてプロットしたものをFig. 4.3-9, 10に示す。この図より3次元解析による板厚中心と表面における値は2次元の解析値をはさみ、その差は高々数%である。よって弾性領域においては特に3次元的な影響を考慮する必要はない。

4.3.2 3次元弾塑性解析結果

3次元弾塑性解析ではSUS304鋼の非弾性解析によく用いられる応力ひずみ関係を2直線近似した移動硬化モデルにより、C P V T No. 3の初期1/2サイクルに対応した標点間変位 $U=0.55\text{mm}$ を与えた。解析結果よりリガメント部の応力、ひずみ分布に注目し以下の図面を示す。

リガメント部の応力分布（板厚中心） Fig. 4. 3-11

リガメント部の応力分布（表面） Fig. 4. 3-12

リガメント部のひずみ分布（板厚中心） Fig. 4. 3-13

リガメント部のひずみ分布（表面） Fig. 4. 3-14

弾塑性解析結果では先の弾性解析結果に較べ板厚中心と表面での差が大きくなっている。特に板厚中心における板厚方向応力は 8 kg/mm^2 程度に達し、これはY方向のピーク応力の20%以上になる。これによりスリット端で応力の等方成分が増加するためY方向応力は表面より板厚中心で大きくなる。また弾性解析では表面でほとんど見られなかった板厚方向のひずみも弾塑性解析ではかなり発生しており、3次元的影响が現れている。

これら3次元的影响を比較するため、同じく2直線近似による移動硬化モデルを用いた2次元解析を実施し、比較したものをFig. 4. 3-15, 16に示す。これによると3次元解析による表裏面の応力分布は2次元解析をはさむような値となるが、ひずみ分布においては3次元と2次元で最大2割程度の差が発生している。つまりひずみ分布において3次元解析における板厚中央の値は2次元解析の値にほぼ等しいが、3次元解析における表面の値は2次元解析の値よりかなり低めとなり、その分布も2次元の値をスリット端側にシフトさせたような傾向が得られる。このことは弾塑性領域では、特にリガメント部のひずみ分布において3次元的影响が無視できないことを示している。

5. 考 察

5.1 概 要

ここでは試験結果とF I N A Sによる詳細弾塑性解析結果の比較検討を行う。さて、試験によるひずみ計測値は使用したゲージ長の平均値として得られているのに対し、解析値は要素積分点の位置における値を出力している。この差は一般には微少であるが、スリット端のようなひずみ集中部では数%程度の差が発生する。よって本報告は解析と試験結果の比較図面において、解析による値として要素積分点の値を2次曲線により補間し、これよりひずみゲージ長である1mm長さの積分平均を求め、試験によるひずみ計測結果に対応する値をプロットしている。従って本節にて示す解析値は全て計測値と直接の比較が可能である。

5.2 C P V T No. 3

Fig. 5. 2-1に試験による20サイクル目の荷重-変位関係を詳細弾塑性解析結果と共に示す。これより荷重及び変位が試験において多少引張り側に片寄っているものの、両者の振幅はよく一致している。また試験と解析のヒステリシス形状もよく合っている。しかし、この試験条件ではスリット近傍しか塑性化が起こらず、全体的な挙動を示す荷重-変位関係には非線形性があまり発生しないためにその差を議論することはできない。

Fig. 5. 2-2に試験のスリット端における20サイクル目の荷重-ひずみ関係を詳細弾塑性解析結果とともに示す。この試験値はスリット内面において表面から板厚方向に7.5mm位置の値である。試験結果の荷重が多少引張り側に片寄っているのは先に述べたように負荷が片寄っていたためで、ひずみの片寄りとは2.5節で述べたひずみゲージ出力特性によるものである。従ってこの結果はその振幅とヒステリシス形状において両者を比較すべきもので、この点を影響を考慮すると両者は非常によく一致している。

Fig. 5. 2-3に試験のリガメント中央における20サイクル目の表面および裏面の荷重-ひずみ関係を詳細弾塑性解析結果とともに示す。試験においてヒステリシスの中心が表面で多少引張り、裏面で大きく圧縮側にシフトしているのは試験体が上に凸の曲げ変形を起こしたためである。またそのヒステリシスの幅が引張り側より圧縮側で大きくなっていることから圧縮時に曲げ変形の加速が起こったものと考えられる。またヒステリシスの幅

が解析より試験で大きくなっているのは、この繰返し変位負荷による曲げ変形の影響と思われる。つまりこの試験体は上に凸の曲がりと、圧縮負荷による曲げ変形の両方が発生した。

Fig. 5.2-4に試験のリガメント部における20サイクル目の表裏面のひずみ範囲を詳細弾塑性解析結果とともに示す。ただし試験結果においてスリット端以外は表裏面の値であるが、スリット端のみはFig. 2.5-2に同様スリット内面において表面から板厚方向に7.5mm位置における値である。この図よりスリット近傍のひずみ集中部以外では試験における表面値が多少引張り側に片寄っているものの解析値とよく一致している。ここに裏面の値は先に述べた曲げ変形の影響が顕著なため、表面の値が解析値によく合うのは妥当な結果である。ただしスリット近傍においては、試験結果の方が解析結果より値が小さいが、スリット端ではその振幅において試験と解析値にはよい一致が見られる。これについては4.3節の3次元解析結果において2次元解析が3次元解析の板厚中央の値に近く、3次元解析の表面における値が2次元解析よりスリット近傍において小さめであったことに対応している。つまり試験におけるリガメント部のひずみ分布は表裏面における計測値であるため、3次元的な影響を考慮するとリガメント部において2次元の詳細弾塑性結果より小さくなり、またスリット端におけるひずみ分布は表面から板厚方向7.5mm位置であるために表面の値よりは2次元解析結果に対応した値が得られることが予測される。よって表裏面の試験結果がリガメント近傍において2次元詳細弾塑性解析結果より小さいのは3次元的な影響によるものである。

以上、試験時の曲げ変形の発生とひずみゲージ計測による原点移動、および解析が2次元モデルによることを考慮すると試験と解析結果はよく対応していることが確かめられた。ただしこの程度の負荷範囲ではスリット先端においても繰返し硬化が高々数%程度のため、繰返し硬化の影響を明確に検討することはできなかった。

5.3 CPVT No.4

Fig. 5.3-1に試験による50サイクル目の荷重-変位関係を詳細弾塑性解析結果と共に示す。これによるとループの形状に多少の差は見られるものの試験と解析結果はよく一致していることが解る。

Fig. 5. 3-2に試験のスリット端における1.5サイクル目までの荷重-ひずみ関係を詳細弾塑性解析結果とともに示す。この図において試験のゲージ位置 16-3, 17-3は各々裏面より板厚方向に7.5mm, 2.5mm位置における計測値であり、比較を1.5サイクルまでとしているのはこれ以降ひずみゲージの剥離が発生したためである。これによると試験の計測値は多少引張り側に片寄っているものの、その振幅とヒステリシス形状は解析値によく一致している。

Fig. 5. 3-3に試験のリガメント中央における50サイクル目の表面および裏面の荷重-ひずみ関係を詳細弾塑性解析結果とともに示す。試験においてヒステリシスの中心が表面で多少引張り、裏面で大きく圧縮側にシフトし、またヒステリシスの幅は圧縮側で引張り側より大きくなっているのはC P V T No. 3同様曲げ変形の影響である。

Fig. 5. 3-4に試験のリガメント部における50サイクル目の表裏面のひずみ範囲を詳細弾塑性解析結果とともに示す。ただし試験結果においてスリット端以外は表裏面の値であり、スリット端の値は信頼性に欠けるためプロットしない。この図よりスリット近傍のひずみ集中部以外では試験における表面値が多少引張り側にかたよっているものの解析値とよく一致している。またスリット端より9.5mm位置では2.5節で述べたひずみ計測値の引張り側への原点シフトが見られる。さらに表裏面の試験結果がリガメント近傍において2次元詳細弾塑性解析結果より小さくなっているのはC P V T No. 3同様3次元的な影響による。

以上C P V T No. 3同様、曲げ変形と原点移動、解析が2次元モデルによることを考慮すると試験と解析結果はよく対応している。しかし繰返し硬化の影響が顕著なスリット端ではひずみ範囲が4%程度にも達し、ひずみゲージの剥離が起こったため初期サイクルのみしか計測ができなかった。この初期サイクルのひずみ挙動は解析結果によく対応するが、繰返し硬化によりひずみ範囲が減少していく過程とその収束値を捉えることはできず、この試験においても繰返し硬化の影響を検討することはできなかった。

結 言

本報では2曲面繰返し塑性モデルの適用性と精度を構造物において検証するために、C P V Tと2曲面繰返し塑性モデルによる詳細弾塑性解析を実施し、これらの結果を比較検討した。以下に本報の主な成果を示す。

- (1) 2曲面繰返し塑性モデルを用いた詳細弾塑性解析により、従来の構成モデルでは表現できなかった、ひずみ集中部における応力範囲の拡大とひずみ範囲の縮小が繰返し硬化の影響により起こることを確認し、この構成モデルにより高精度な非弾性解析が実施できることを示した。
- (2) 変位振幅が小さく繰返し硬化の影響が顕著でない領域(C P V T No. 3, スリット端ひずみ振幅1%程度)においては試験と解析の結果はよく一致し、2曲面繰返し塑性モデルの有効性を示すことが出来た。
- (3) ひずみ範囲が2%以上で繰返し硬化の影響が顕著になる領域(C P V T No. 4のスリット端)ではひずみゲージの剥離のため計測値が得られず、解析との比較が出来なかった。

以上のように繰返し硬化材に対してその影響を考慮するとひずみ集中部においてひずみ範囲が減少するため、疲労強度の評価をより合理化できる可能性がある。このためには本研究で用いた2曲面繰返し塑性モデルのような高精度の構成モデルを実用化し、繰返し硬化における力学的挙動を詳細に検討し、その影響を評価していくことが必要となる。これを可能とするために、今回の試験において発生した曲げ変形の発生防止を目的に試験体の改良と試験装置の変更を実施し、また2%以上の繰返しひずみを計測するため、ひずみ計測技術の改良を行いながらC P V Tを実施している。この結果については本報告書に引き続く、有孔平板繰返し変位負荷試験-IIで報告の予定である。

謝 辞

試験の実施にあたっては構造工学室の菊池政之氏の御協力を、同室の山下卓哉氏および材料開発室の川崎広嗣氏からは有用な助言をいただいた。また本試験の実施及び試験データ整理にあたっては、東興機械工業㈱の金子友好、根本一美、大和進、深作博、諸氏の御協力によるところが大きい。ここに深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 高速炉原型炉構造材料試験用の供試材料一覧 : PNC SN244 81-01 (1981)
- (2) SUS304平板の1次・2次応力重畳下のクリープ挙動に関する研究
: PNC SN9410 86-055 (1986)
- (3) 高速炉機器の非弾性解析に関する指針 : PNC SN9410 86-132 (1986)
- (4) SUS304繰返し塑性構成モデルの検討 : PNC SN9410 90-108 (1990)
- (5) 非弾性解析の高精度化に関する検討 : PNC SN9410 91-103 (1991)
- (6) ひずみゲージ校正試験 : PNC SN9410 92-069 (1992)
- (7) 汎用非線形構造解析システム"FINAS"拡張・整備報告書(Ⅲ)
: PNC SJ9270 90-001 (1989)
- (8) 汎用非線形構造解析システムFINAS (VERSION 11.0)使用説明書
: PNC N9520 89-019 (1989)
- (9) K. Iwata, A Constitutive Model for Cyclic Plasticity : SMiRT 11 (1991)
- (10) S. Yoshida, et al. Elevated-Temperature Fatigue Properties of Engineering
Materials Part I : Transactions of NRIM Vol. 19, No. 5 (1977)
- (11) 西田正孝、応力集中 増補版

付 録

有孔平板繰返し変位負荷試験(C P V T)データシート

試験番号：CPVT No. 2		試験期間：平成2年2月16日～3月15日
有孔平板繰り返し変位負荷試験(CPVT)データシート		
試験片	材 料	SUS304鋼 (A4材)
	形状・寸法	標点間：200×100×10mmの平板の中央に長さ50mm幅10mmで両端を半径5Rに丸めたスリット (Fig. 1.2-1, 2参照)
試験条件	試験機	BHAT
	負荷条件	レーザー変位計による標点間(1=200mm)伸び制御 $\Delta u = 0.22\text{mm} (\pm 0.11)$ を200サイクル (負荷波形はFig. 1.5-1参照)
	試験温度	室 温
試験結果	標点間伸び	$u = -0.11 \sim +0.11\text{mm}$
	荷 重	$P = -6.6 \sim 10.9\text{ton}$
	スリット端ひずみ	$\Delta \varepsilon = 1.01\%$
	(クラックの発生)	
備考	・レーザー変位計に異物が侵入したため負荷を中断。詳細なデータ整理なし	

試験番号：CPVT No. 3		試験期間：平成2年7月24日～8月21日
有孔平板繰り返し変位負荷試験(CPVT)データシート		
試験片	材 料	SUS304鋼 (A4材)
	形状・寸法	標点間：200×100×10mmの平板の中央に長さ50mm幅10mmで両端を半径5Rに丸めたスリット (Fig. 1.2-1,2参照)
試験条件	試験機	BHAT
	負荷条件	レーザー変位計による標点間(1=200mm)伸び制御 $\Delta u = 0.22\text{mm}(\pm 0.11)$ を200サイクル (負荷波形はFig. 1.5-1参照)
	試験温度	室 温
試験結果	標点間伸び	$u = -0.115 \sim +0.110\text{mm}$
	荷 重	$P = -8 \sim +9\text{ton}$
	スリット端ひずみ	$\Delta \varepsilon = 1.05\%$
	(クラックの発生)	8501～8620サイクル
備考	・スリット端のひずみ計測はできたが、ひずみ範囲が比較的小さかった(1%)ため、繰返し硬化によるひずみ範囲の減少を明確に観測できなかった。 また計測値には繰返し負荷時のひずみゲージ特性である原点移動が見られた。 ・初期3サイクルには、負荷の起動、停止が含まれる。 ・予備試験としてき裂を観察するために負荷は12000サイクルまで与えた。 (詳細については本報告書を参照)	

試験番号：CPVT No.4		試験期間：平成2年9月11日～10月3日
有孔平板繰り返し変位負荷試験(CPVT)データシート		
試験片	材 料	SUS304鋼 (A4材)
	形状・寸法	標点間：200×100×10mmの平板の中央に長さ50mm幅10mmで両端を半径5Rに丸めたスリット (Fig. 1.2-1, 2参照)
試験条件	試験機	BHAT
	負荷条件	レーザー変位計による標点間(1=200mm)伸び制御 $\Delta u = 0.44\text{mm} (\pm 0.22)$ を200サイクル (負荷波形はFig. 1.5-1参照)
	試験温度	室 温
試験結果	標点間伸び	$u = -0.212 \sim +0.220\text{mm}$
	荷 重	$P = -13.1 \sim +13.2\text{ton}$
	スリット端ひずみ	$\Delta \varepsilon = 4\%$ (第1サイクル)、以降はゲージ剥離により計測不能
	(クラックの発生)	941サイクル
備考	・スリット端のひずみはひずみゲージが第2サイクル以降剥離したため計測ができなかった。しかし、詳細解析によると繰返し硬化が飽和した後のひずみ範囲は2.6%程度であったと考えられる。 ・予備試験としてき裂を観察するために負荷は2000サイクルまで継続した。 (詳細については本報告書を参照)	

Table 1.2-1 Chemical Composition and Mechanical Properties of SUS 304, A4 Heat

Specifi- cation Material	Specimen	Chemical composition (WT%)							Tension test			Hard- ness HB
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Yield Strength	Tensile Strength	Elon- gation	
		×1000	×100	×100	×1000	×1000	×100	×100	kg/mm ²	kg/mm ²	%	
<JIS G-4304> SUS 304	(MIN.)						800	1800	21	53	40	
	(MAX.)	80	100	200	40	30	1050	2000				187
SUS 304	BM-1	50	58	100	28	7	910	1845	23	62	61	139

Reference (1)

Table 1.3- 1 Main Specification of BHAT

	Axial Load Actuator
Max Displacement	$\pm 50\text{mm}$
Max Force	$\pm 40\text{ton}$
Feedback Mode	Displacement or Force
Max Loading Speed	10mm/sec
Loading Form	Sin Wave, Trapezoid
Control Method	Closed Loop Control by Servo Mechanism with CPU

Table 1.4-1 Strain Gauge Locations

ゲージ 番 号	ゲージ位置			ゲージ 方 向	ゲージ種類
	X	Y	Z		
1	2.50	14.37	10.00	Y	単軸1mmゲージ
2	12.50	14.37	10.00	Y	"
3	21.75	15.87	10.00	Y	"
4	29.25	19.40	10.00	Y	"
5	31.25	8.75	10.00	Y	"
6	33.50	4.25	10.00	Y	"
7	2.50	25.00	10.00	Y	"
8	-50.00	47.50	5.00	Y	"
9-1	2.50	47.50	10.00	X	2軸2mmゲージ
9-2	2.50	47.50	10.00	Y	"
10-1	27.12	47.50	10.00	X	"
10-2	27.12	47.50	10.00	Y	"
11	50.00	47.50	5.00	Y	単軸1mmゲージ
12-1	25.95	0.00	10.00	Y	5連1mmゲージ
12-2	27.95	0.00	10.00	Y	"
12-3	29.95	0.00	10.00	Y	"
12-4	31.95	0.00	10.00	Y	"
12-5	33.95	0.00	10.00	Y	"
13-1	36.25	0.00	10.00	Y	"
13-2	38.95	0.00	10.00	Y	"
13-3	40.25	0.00	10.00	Y	"
13-4	42.25	0.00	10.00	Y	"
13-5	44.25	0.00	10.00	Y	"
24-1	46.45	0.00	10.00	Y	"
24-2	48.45	0.00	10.00	Y	"
14-1	0.00	5.00	5.00	θ	"
14-2	2.00	5.00	5.00	θ	"
14-3	4.00	5.00	5.00	θ	"
14-4	6.00	5.00	5.00	θ	"
14-5	8.00	5.00	5.00	θ	"
15-1	12.50	5.00	5.00	θ	"
15-2	14.50	5.00	5.00	θ	"
15-3	16.50	5.00	5.00	θ	"
15-4	18.50	5.00	5.00	θ	"
15-5	20.50	5.00	5.00	θ	"
16-1	21.00	5.00	2.50	θ	"
16-2	22.50	2.50	2.50	θ	"
16-3	25.00	0.00	2.50	θ	"
16-4	22.50	-2.50	2.50	θ	"
16-5	21.00	-5.00	2.50	θ	"
17-1	21.00	5.00	7.50	θ	"
17-2	22.50	2.50	7.50	θ	"
17-3	25.00	0.00	7.50	θ	"
17-4	22.50	-2.50	7.50	θ	"
17-5	21.00	-5.00	7.50	θ	"
18-1	2.50	47.50	0.00	X	2軸2mmゲージ
18-2	2.50	47.50	0.00	Y	"
19	28.20	0.00	0.00	Y	単軸1mmゲージ
20	33.20	0.00	0.00	Y	"
21	38.20	0.00	0.00	Y	"
22	43.20	0.00	0.00	Y	"
23	48.20	0.00	0.00	Y	"

単軸1mmゲージ:KFC-1-, 2軸2mmゲージ:KFC-2-D16 (共和電業)
 5連1mmゲージ:FXV-1-17 (東京測器研究所)

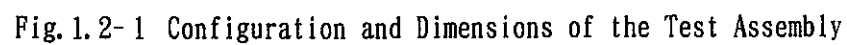


Fig. 1.2-1 Configuration and Dimensions of the Test Assembly

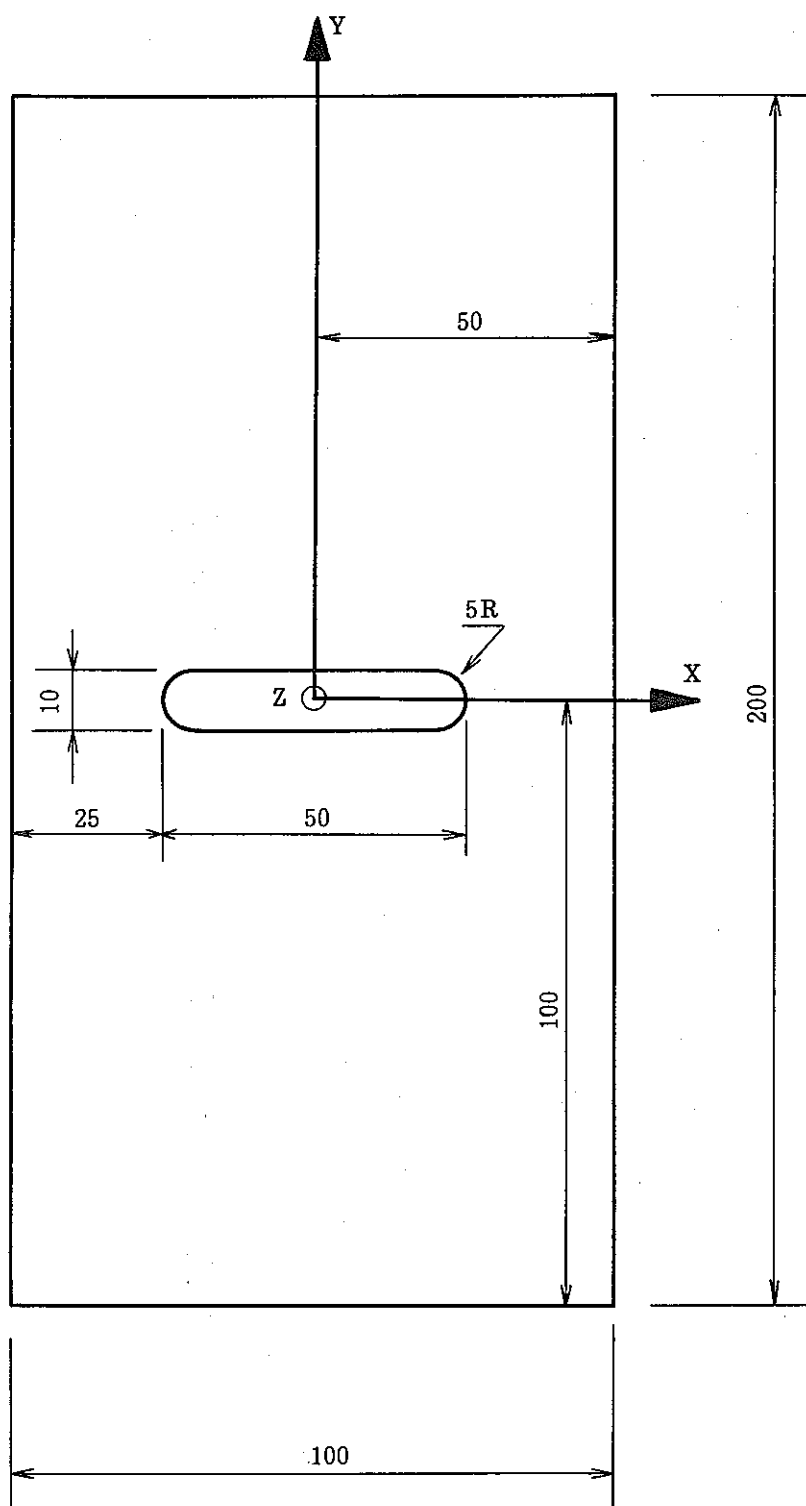


Fig. 1.2- 2 Details of the Measured Section

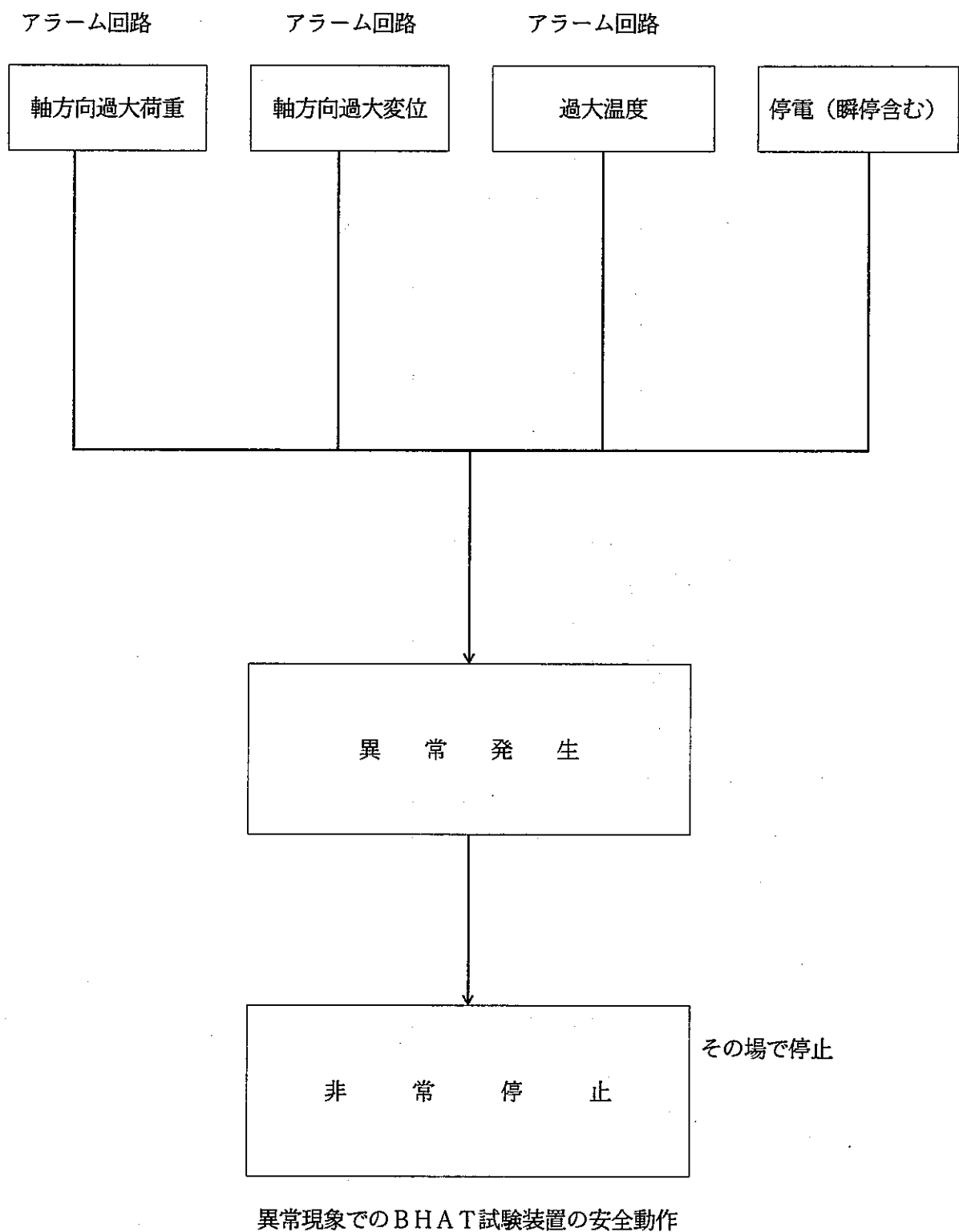


Fig. 1.3-1 Flow Diagram of Emergency Halt Trap

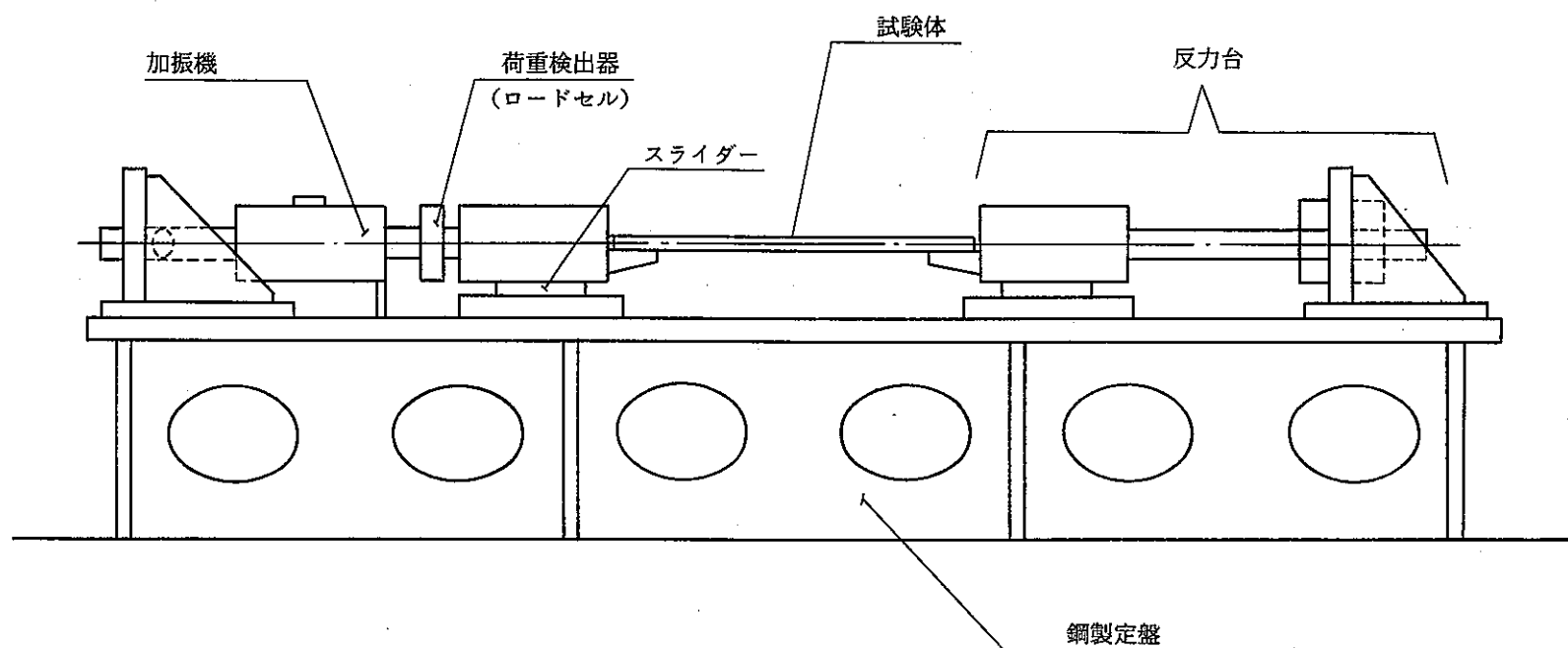
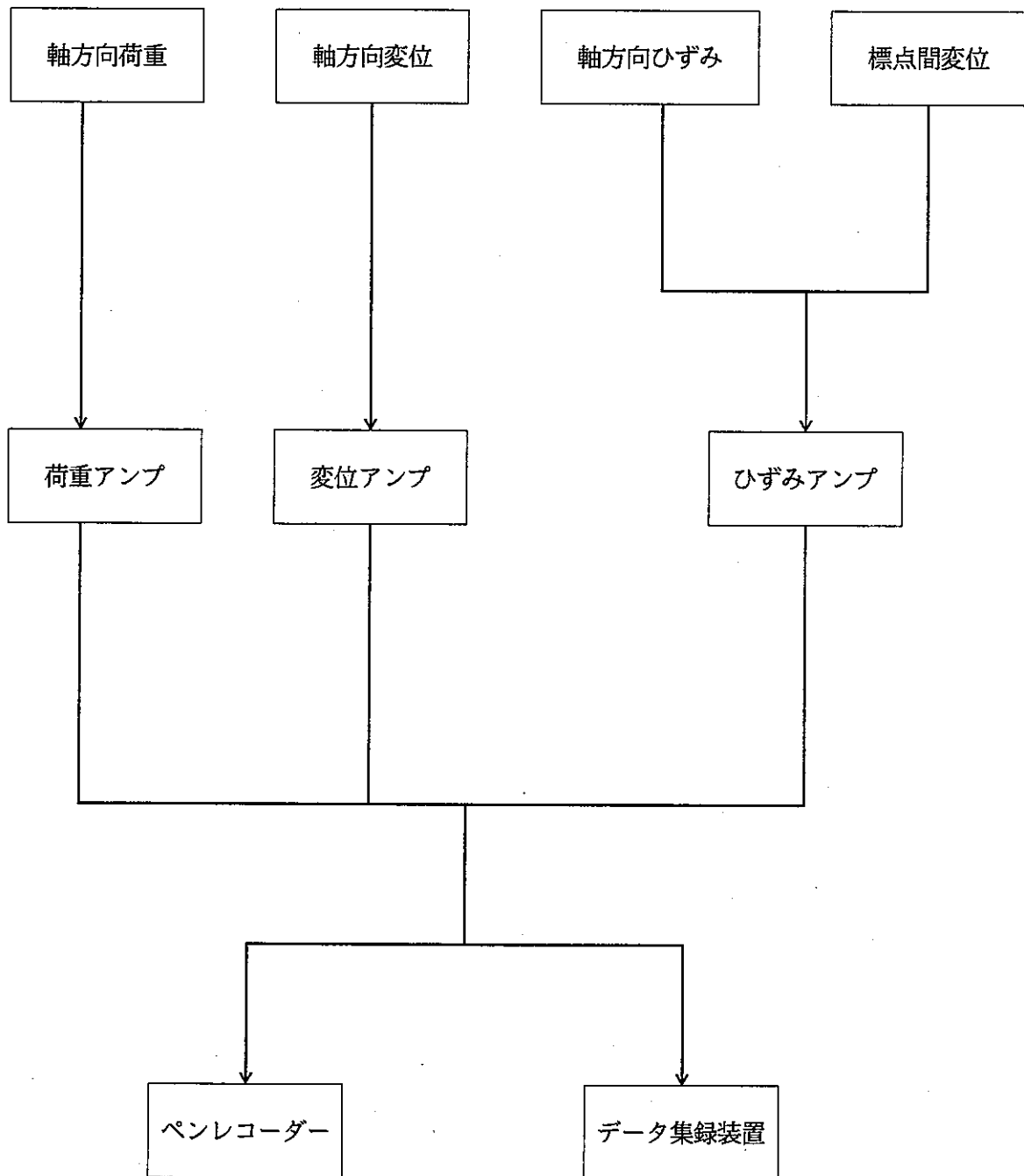
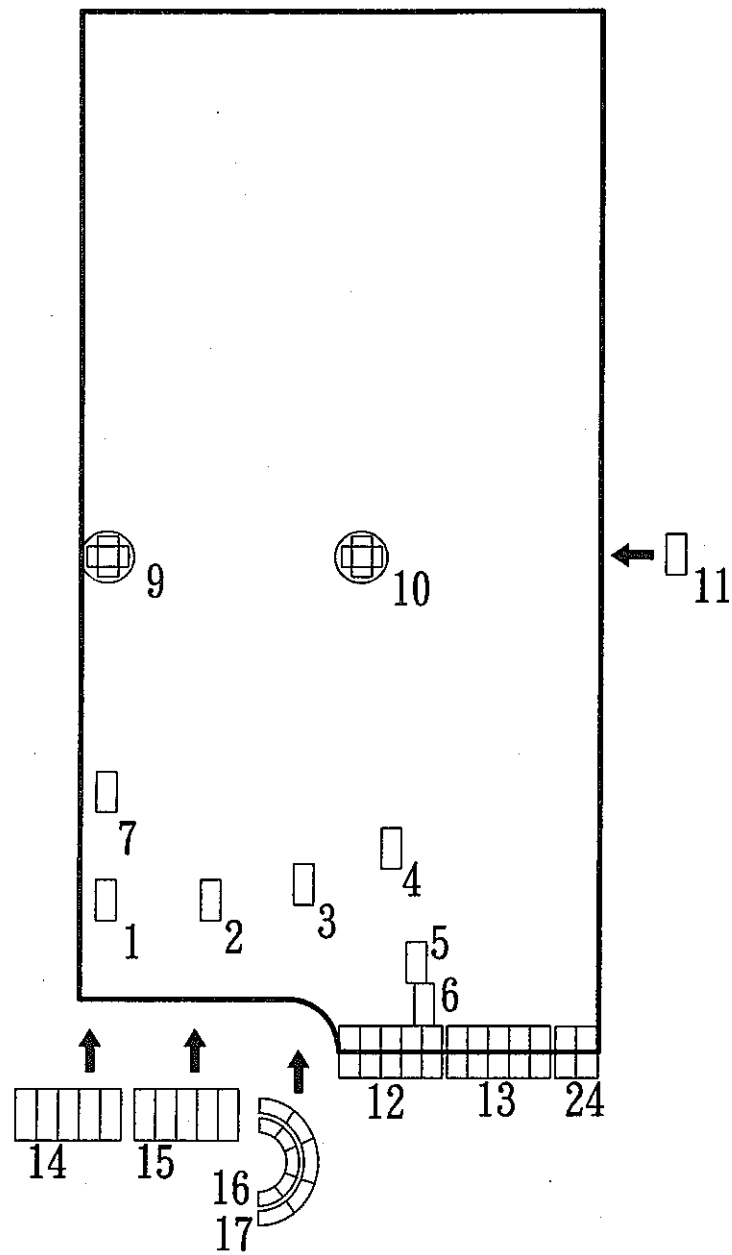


Fig.1.3-2 BHAT System



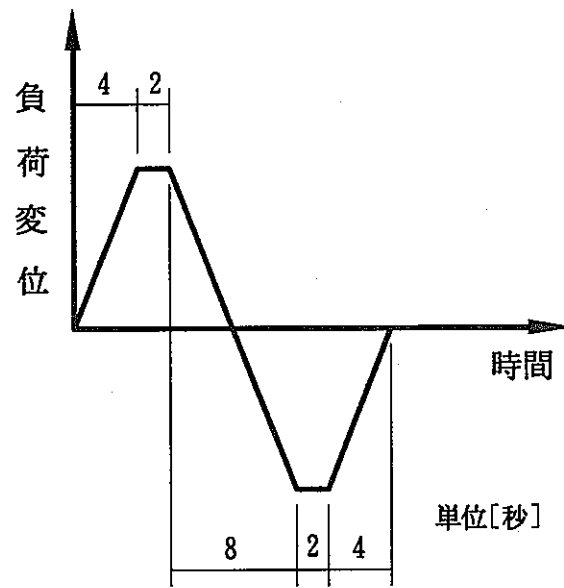
計測系統図

Fig. 1.4-1 Flow Diagram of Measurement and Record

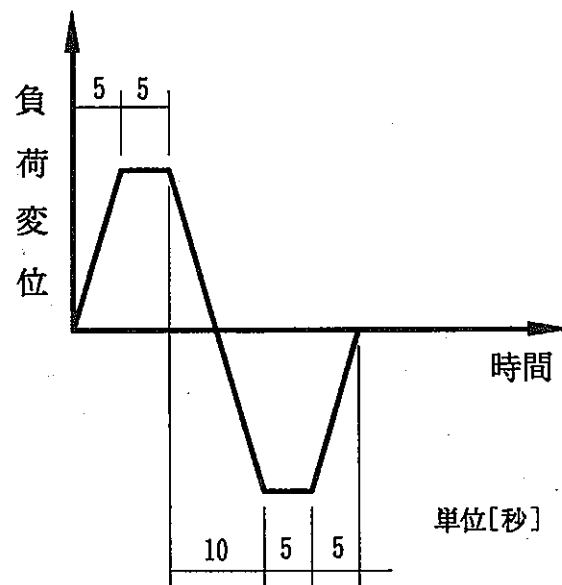


11, 14, 15は板厚中心位置
 16, 17は下面より各々2.5, 7.5mm位置
 12～17, 24は5連ゲージ
 9, 10は2軸ゲージ
 その他は単軸ゲージ

Fig. 1.4-2 Strain Gauge Locations (1/4 Section)

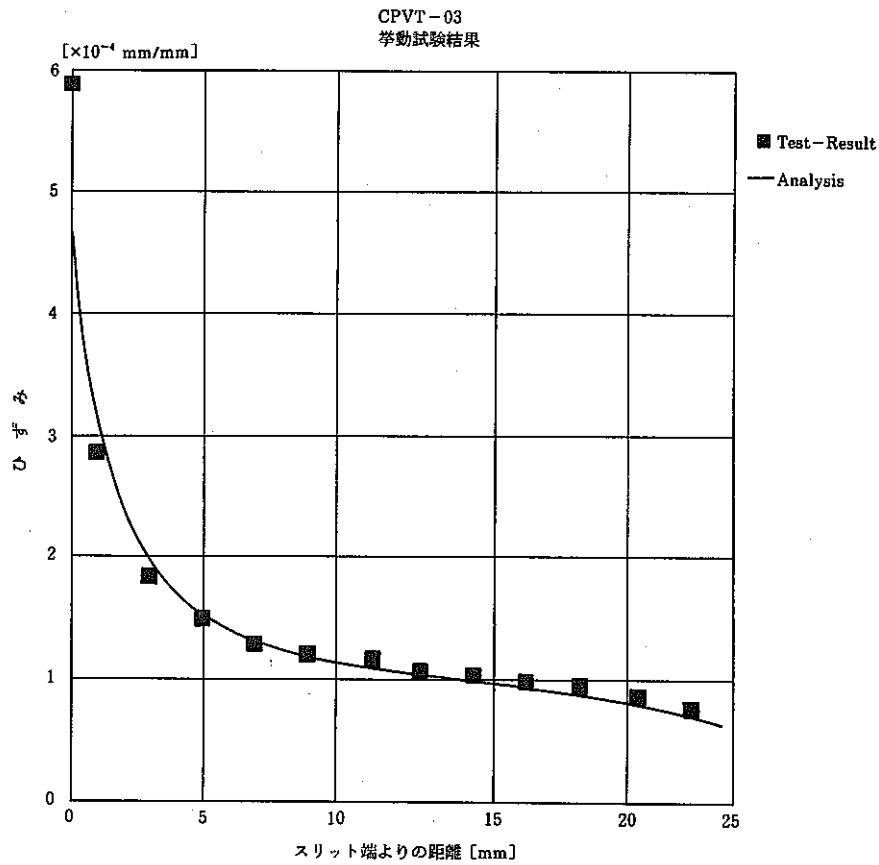


挙動試験での負荷波形



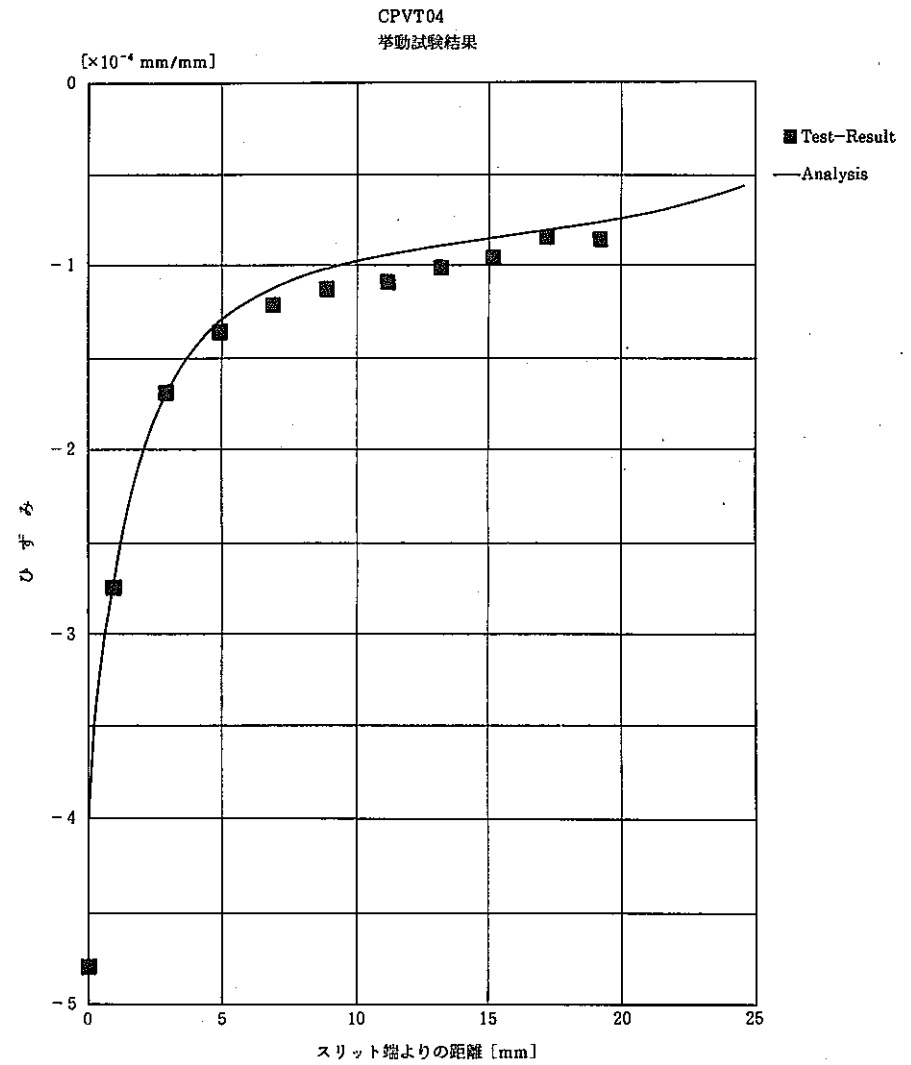
CPVT No. 3, No. 4での負荷波形

Fig. 1.5-1 Loading Pattern



引張ピーク負荷時のリガメント部におけるひずみ分布 (CPVT No.3)
標点間変位: 0.0188 mm

Fig. 2.2-1 Result of Behavior Test (CPVT No.3)



圧縮ピーク負荷時のリガメント部のひずみ分布 (CPVT No.4)

Fig. 2.2-2 Result of Behavior Test (CPVT No.4)

CPVT No.3 試験開始時の起動停止状況

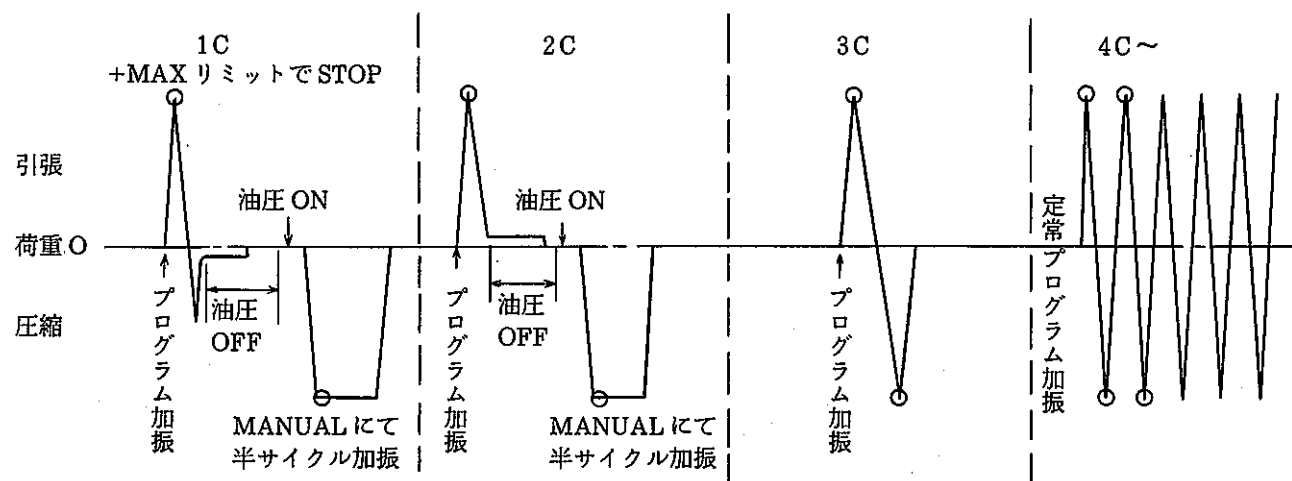
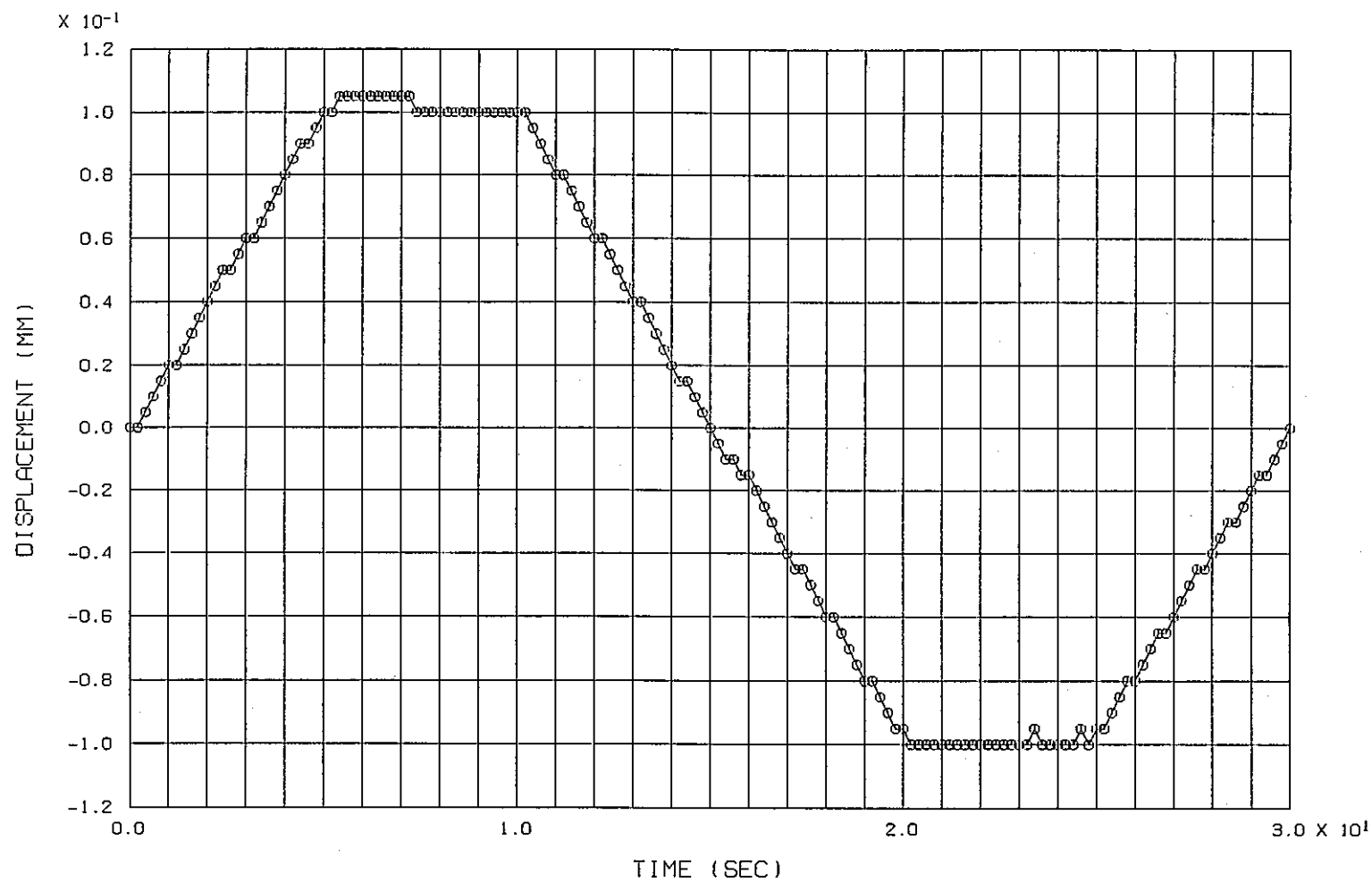
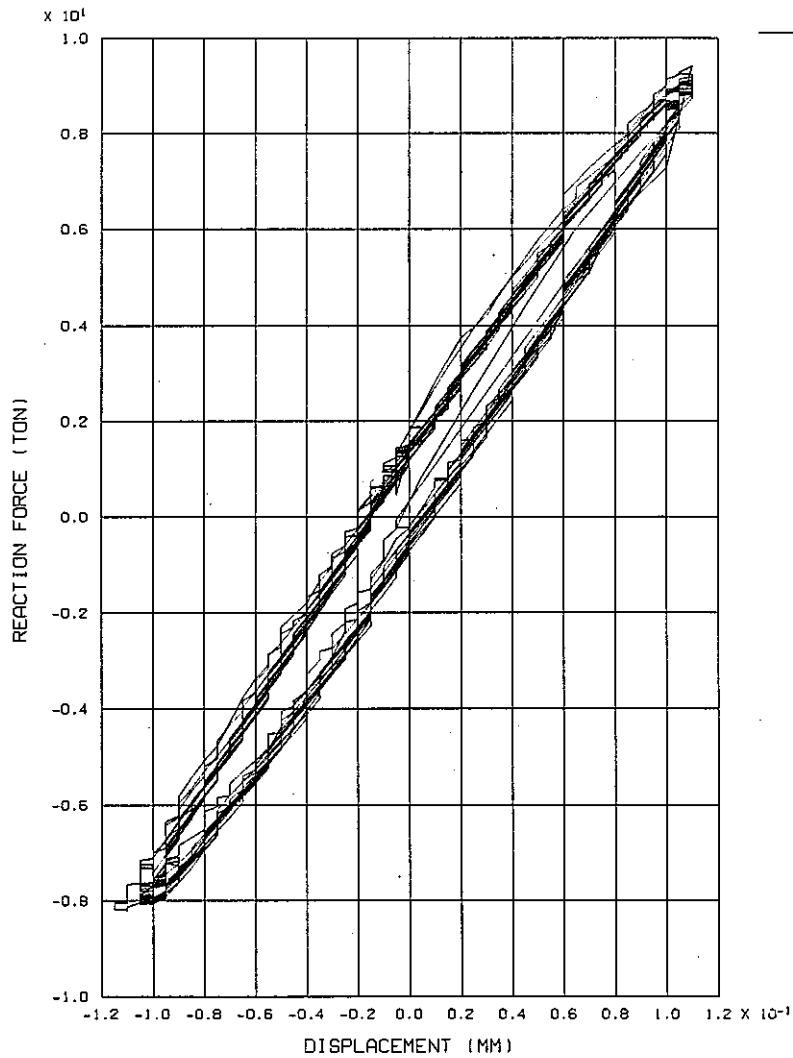


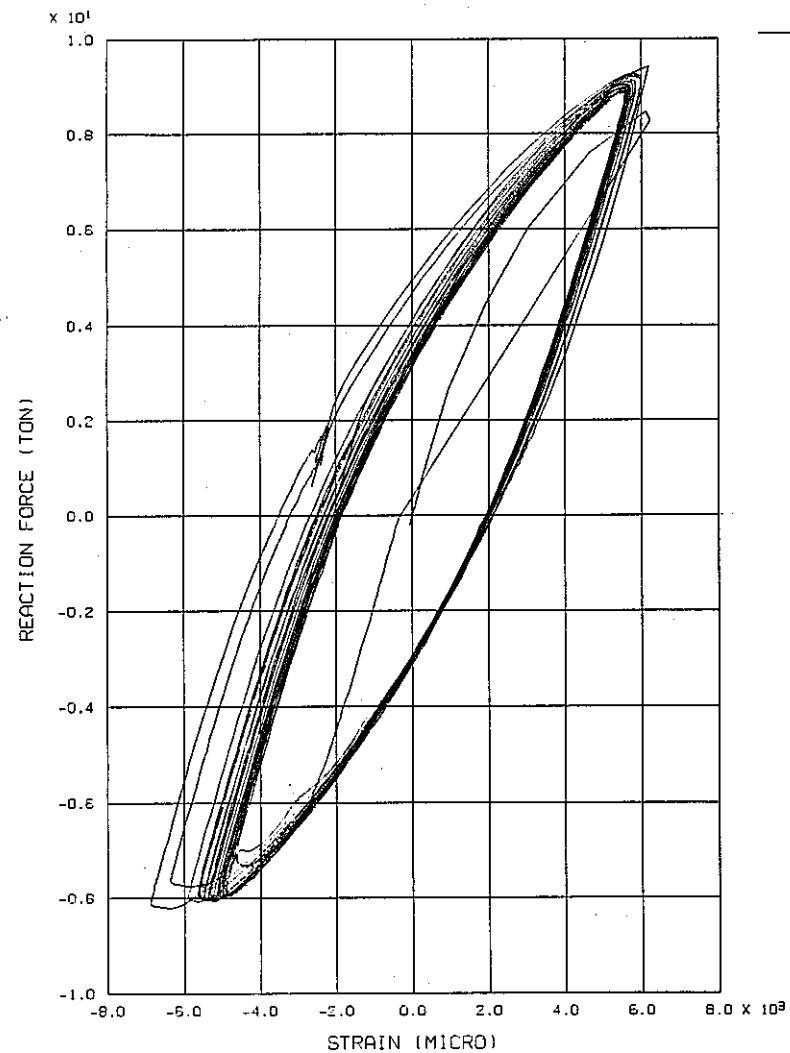
Fig. 2.3-1 Loading History of CPVT No.3





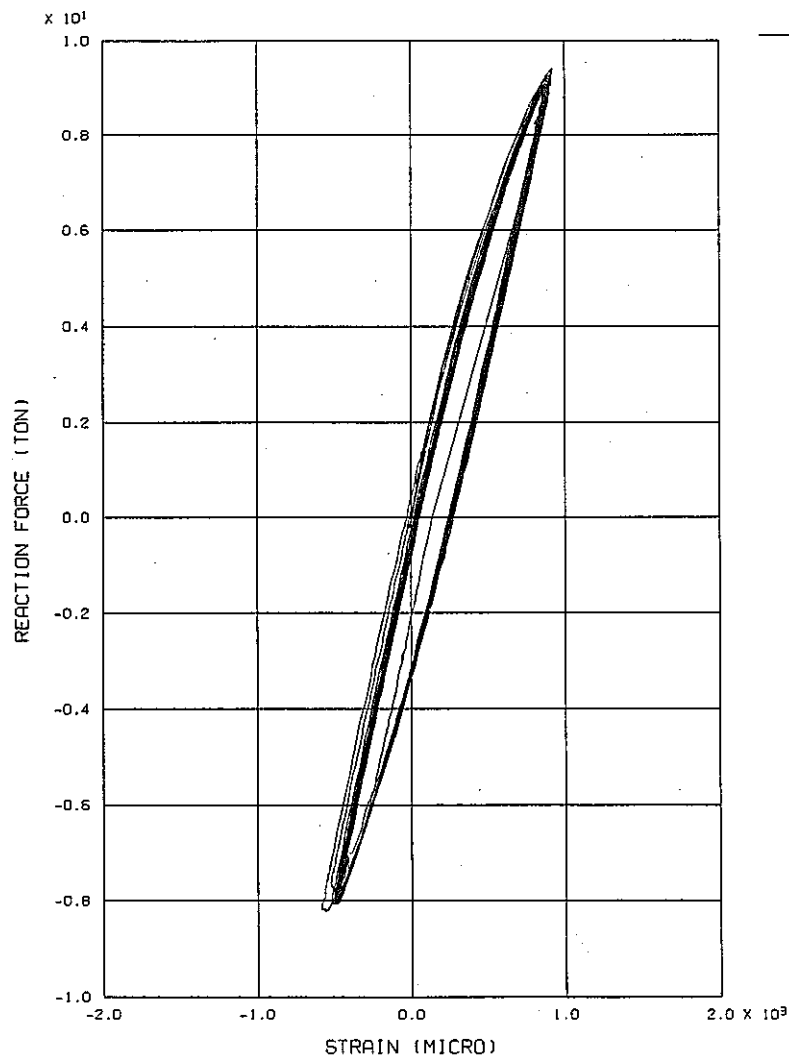
P - U
CPVT NO.3 (DU=0.22MM) // 1 TO 20 CYCLE //

Fig. 2.3-3 Reaction Force-Displacement Relationship
(CPVT No. 3)



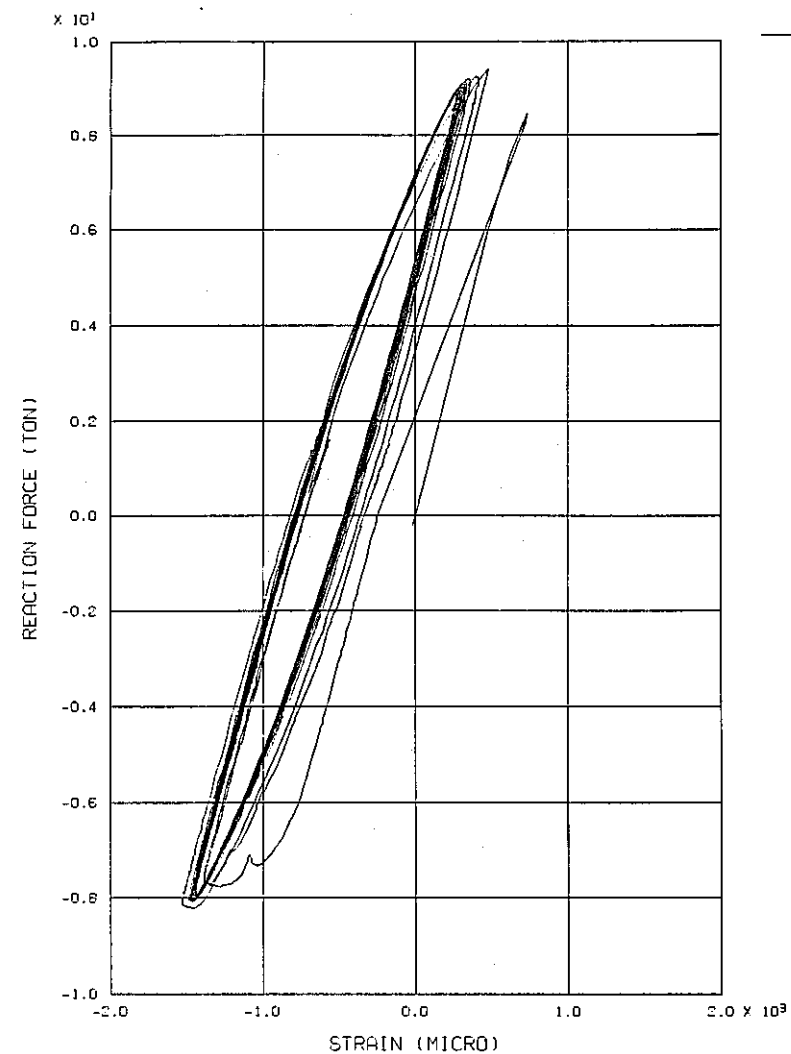
P - EPS-Y RELATIONSHIP AT SLIT TIP (NO.16-3)
CPVT NO.3 (DU=0.22MM) // 1 TO 20 CYCLE //

Fig. 2.3-4 Reaction Force-Slit Tip Strain Relationship
(CPVT No. 3)



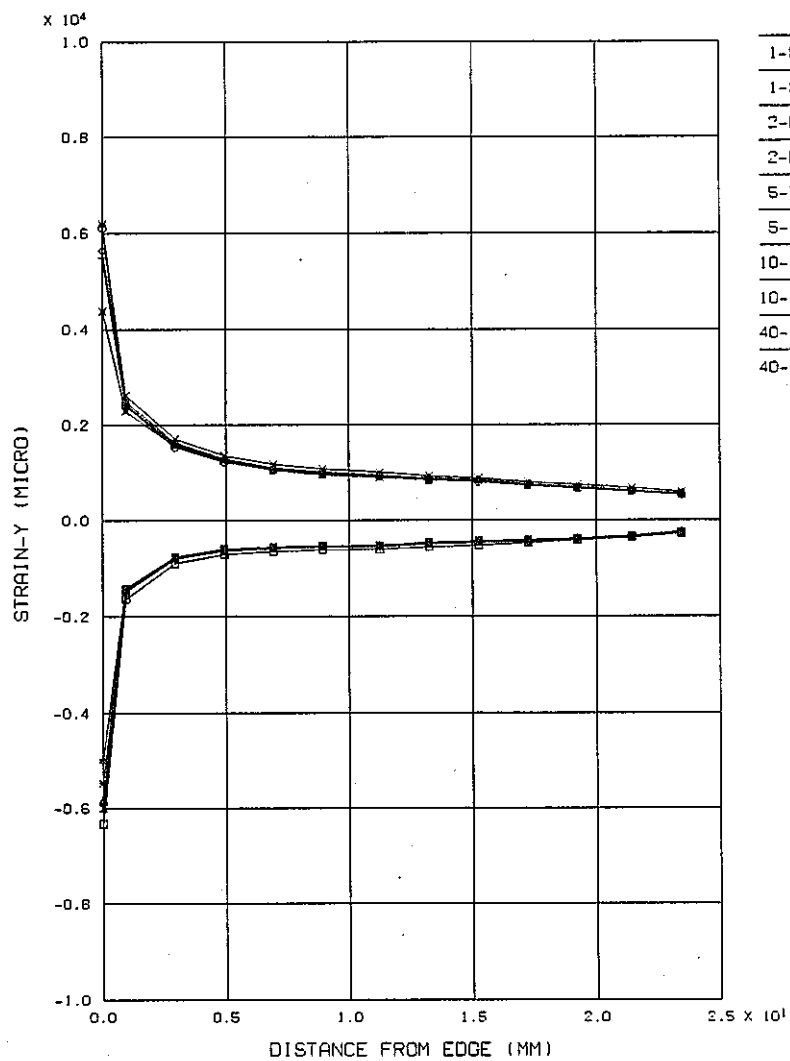
P - EPS-Y RELATIONSHIP AT LIGAMENT CENTER (TOP, NO. 13-2)
 CPVT NO. 3 (DU=0.22MM) // 1 TO 20 CYCLE //

Fig. 2.3-5 Reaction Force-Ligament Center Strain Relationship
 at Top (CPVT No. 3)



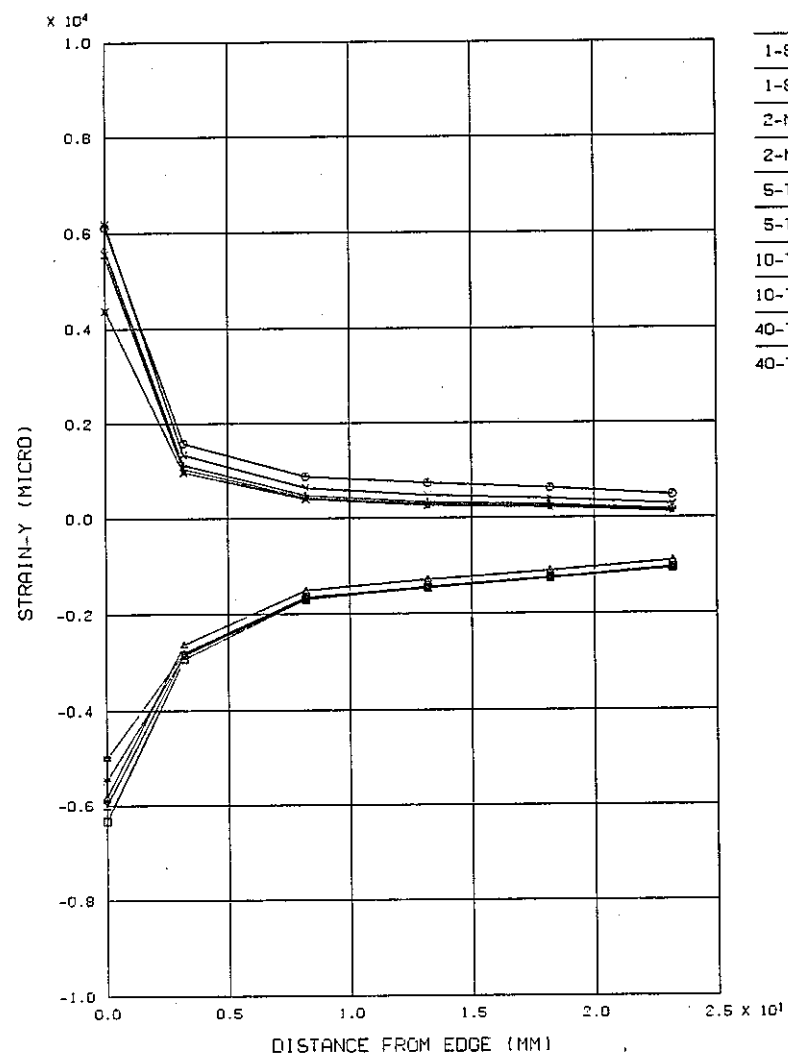
P - EPS-Y RELATIONSHIP AT LIGAMENT CENTER (BOTTOM, NO. 21)
 CPVT NO. 3 (DU=0.22MM) // 1 TO 20 CYCLE //

Fig. 2.3-6 Reaction Force-Ligament Center Strain Relationship
 at Bottom (CPVT No. 3)



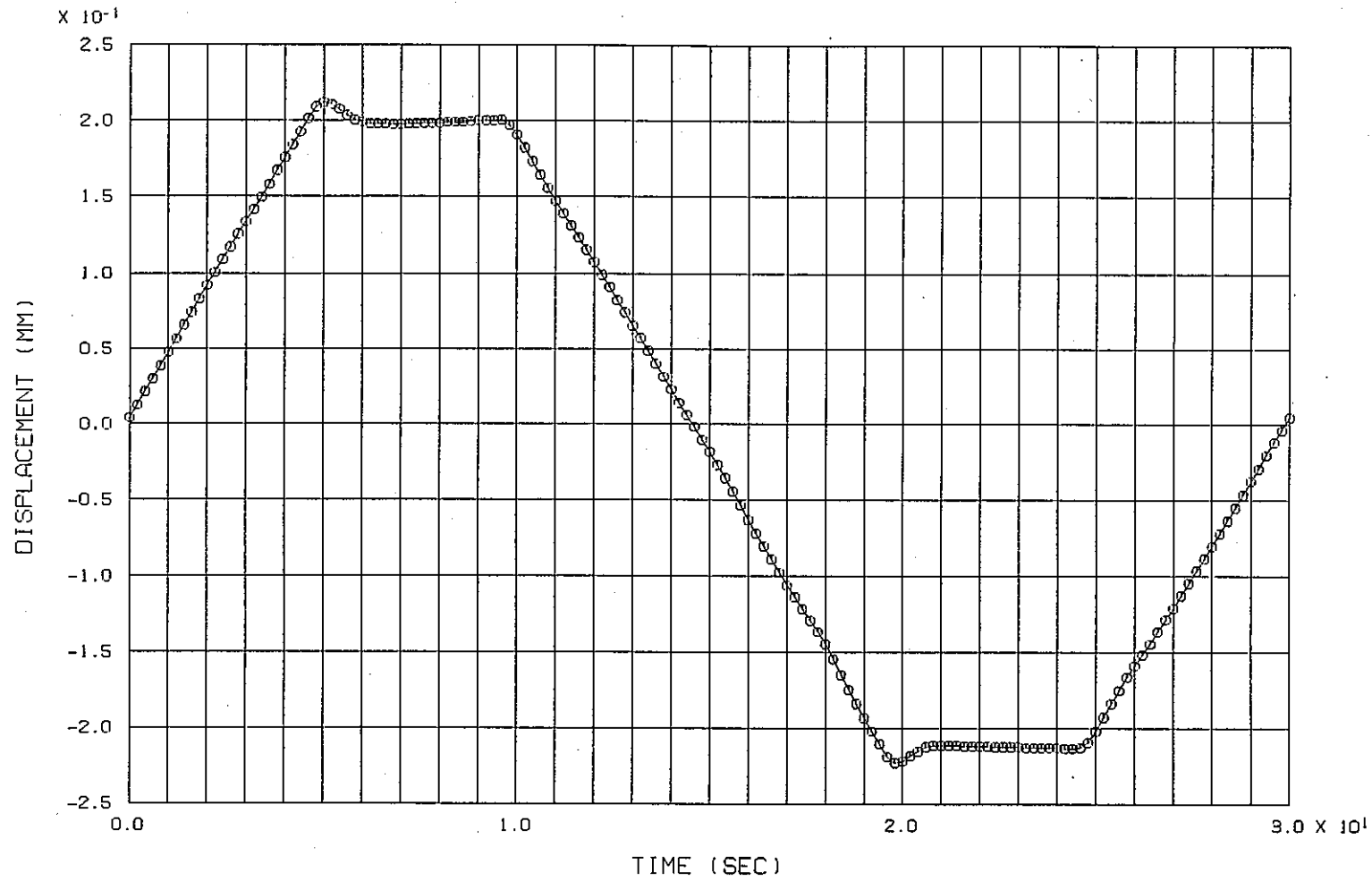
STRAIN DISTRIBUTION AT CENTER LINE (TOP)
CPVT NO.3 (DU=0.22MM)

Fig.2.3-7 Strain Range Distribution at Ligament top
(CPVT No.3)



STRAIN DISTRIBUTION AT CENTER LINE (BOTTOM)
CPVT NO.3 (DU=0.22MM)

Fig.2.3-8 Strain Range Distribution at Ligament bottom
(CPVT No.3)



DISPLACEMENT HISTORY AT 50 CYCLE

CPVT NO.4 (DU=0.44MM)

Fig.2.4-1 Displacement History at the 50Th Cycle (CPVT No.4)

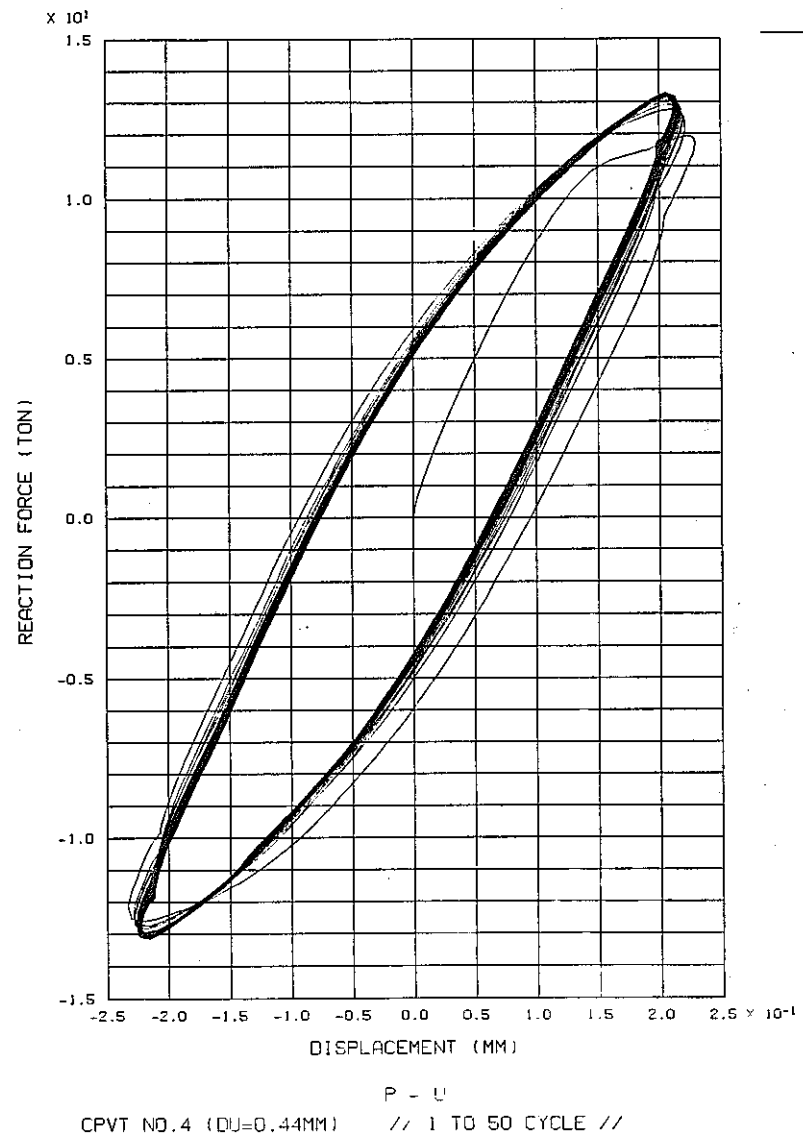
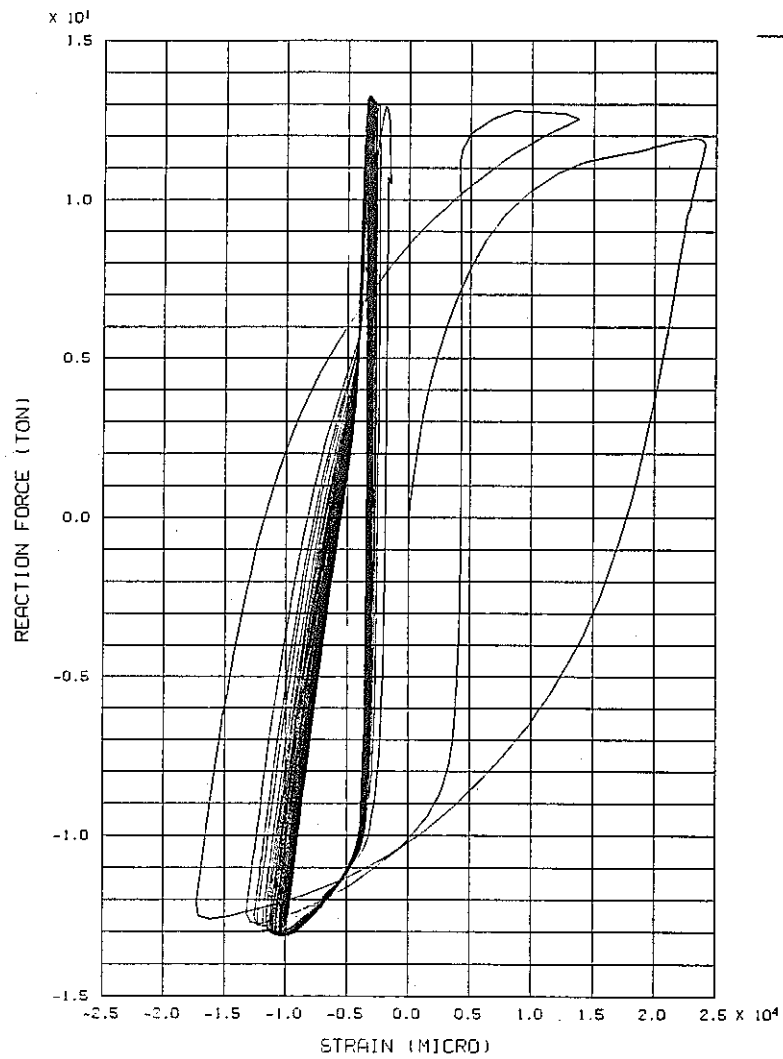
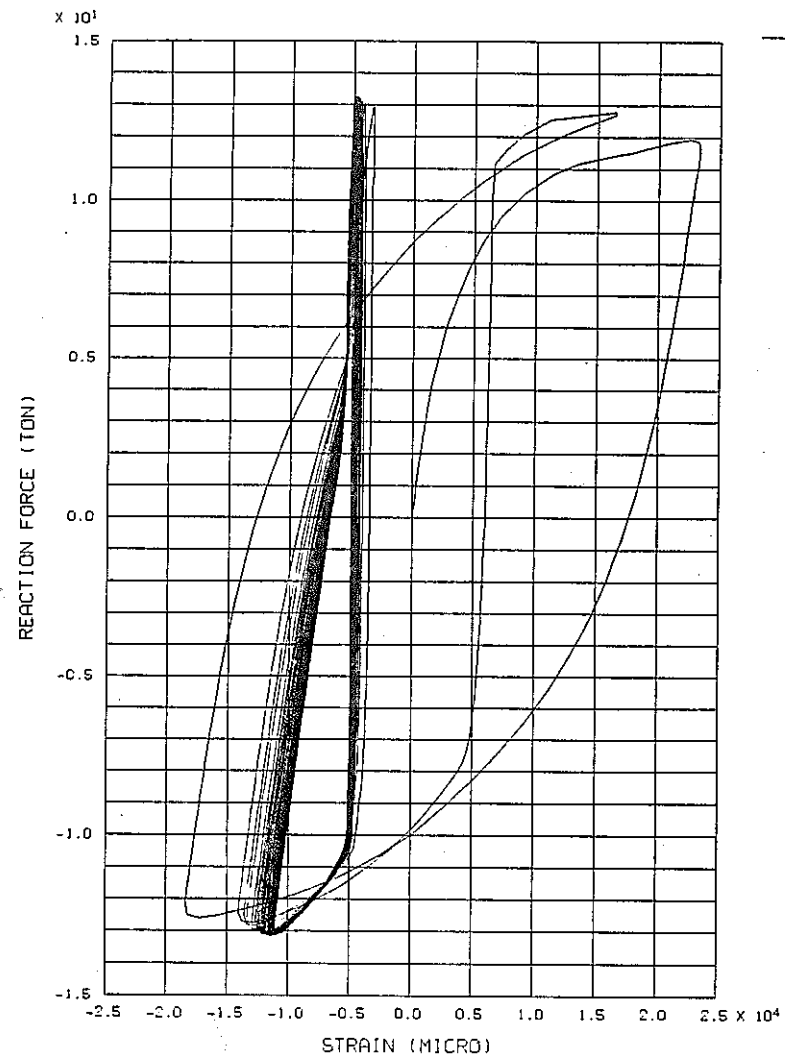


Fig.2.4-2 Reaction Force-Displacement Relationship (CPVT No.4)



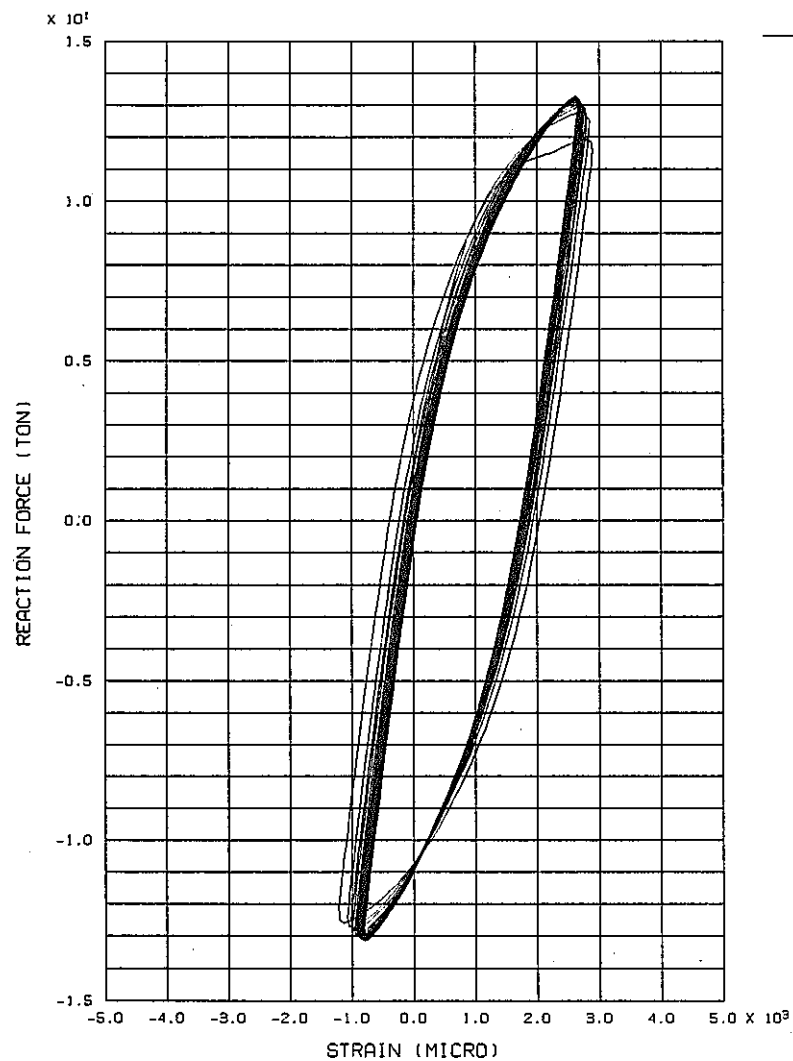
P - EPS-Y RELATIONSHIP AT SLIT TIP (NO.16-3)
CPVT NO.4 (DU=0.44MM) // 1 TO 50 CYCLE //

Fig. 2.4-3 Reaction Force-Slit Tip Strain Relationship
(CPVT No. 4)



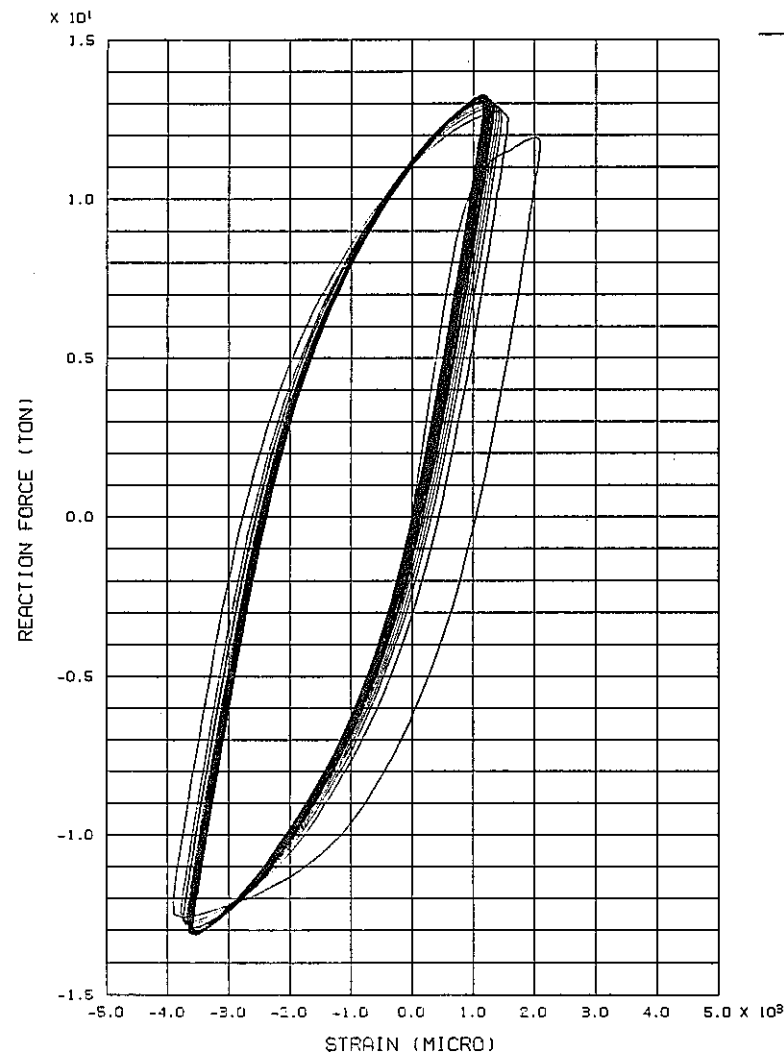
P - EPS-Y RELATIONSHIP AT SLIT TIP (NO.17-3)
CPVT NO.4 (DU=0.44MM) // 1 TO 50 CYCLE //

Fig. 2.4-4 Reaction Force-Slit Tip Strain Relationship
(CPVT No. 4)



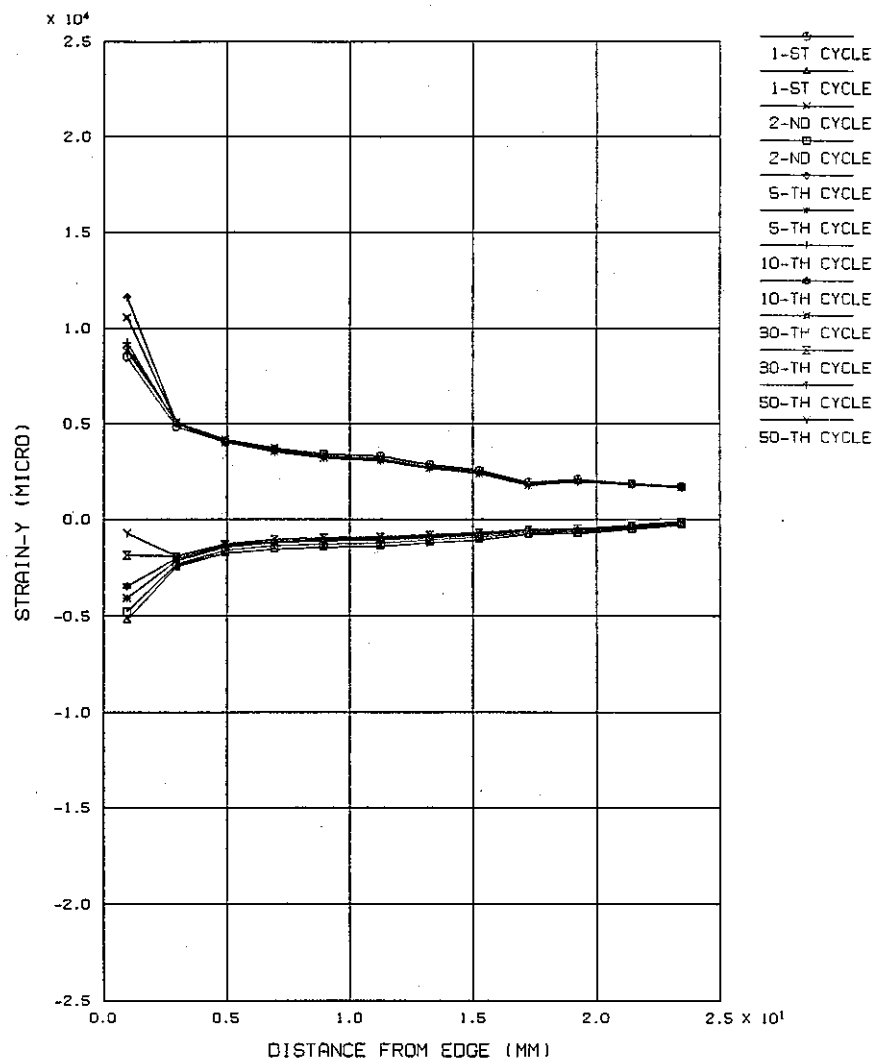
P - EPS-Y RELATIONSHIP AT LIGAMENT CENTER (TOP.NO.13-2)
CPVT NO.4 (DU=0.44MM) // 1 TO 50 CYCLE //

Fig. 2.4- 5 Reaction Force-Ligament Center Strain Relationship
(CPVT No. 4)



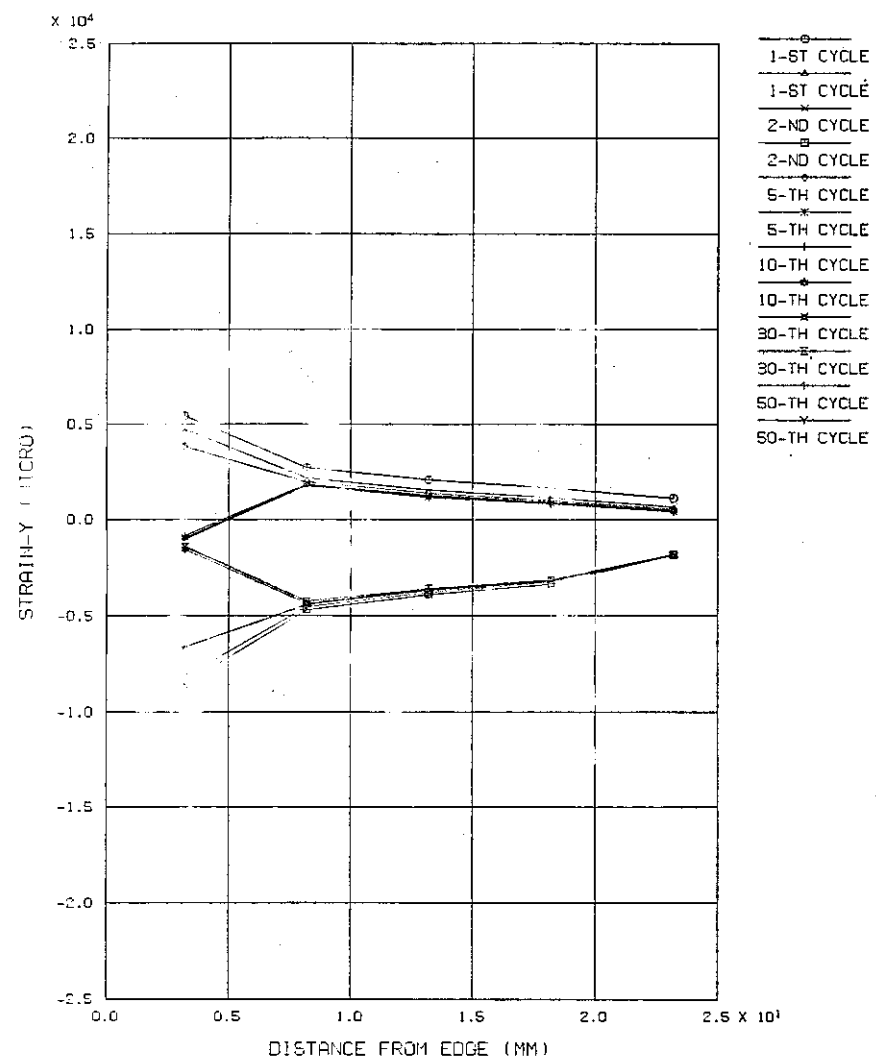
P - EPS-Y RELATIONSHIP AT LIGAMENT CENTER (BOTTOM.NO.21)
CPVT NO.4 (DU=0.44MM) // 1 TO 50 CYCLE //

Fig. 2.4- 6 Reaction Force-Ligament Center Strain Relationship
(CPVT No. 4, Bottom)



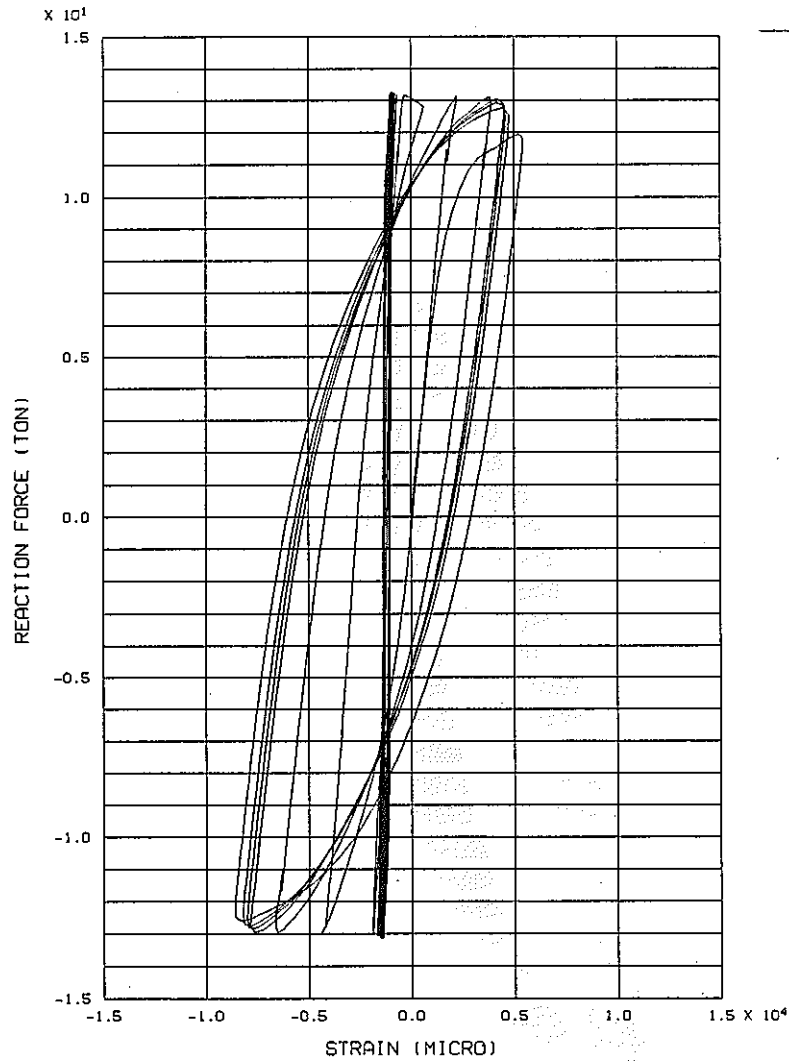
STRAIN DISTRIBUTION AT CENTER LINE (TOP)
CPVT NO.4 (DU=0.44MM)

Fig.2.4-7 Strain Range Distribution at Ligament top
(CPVT No.4)



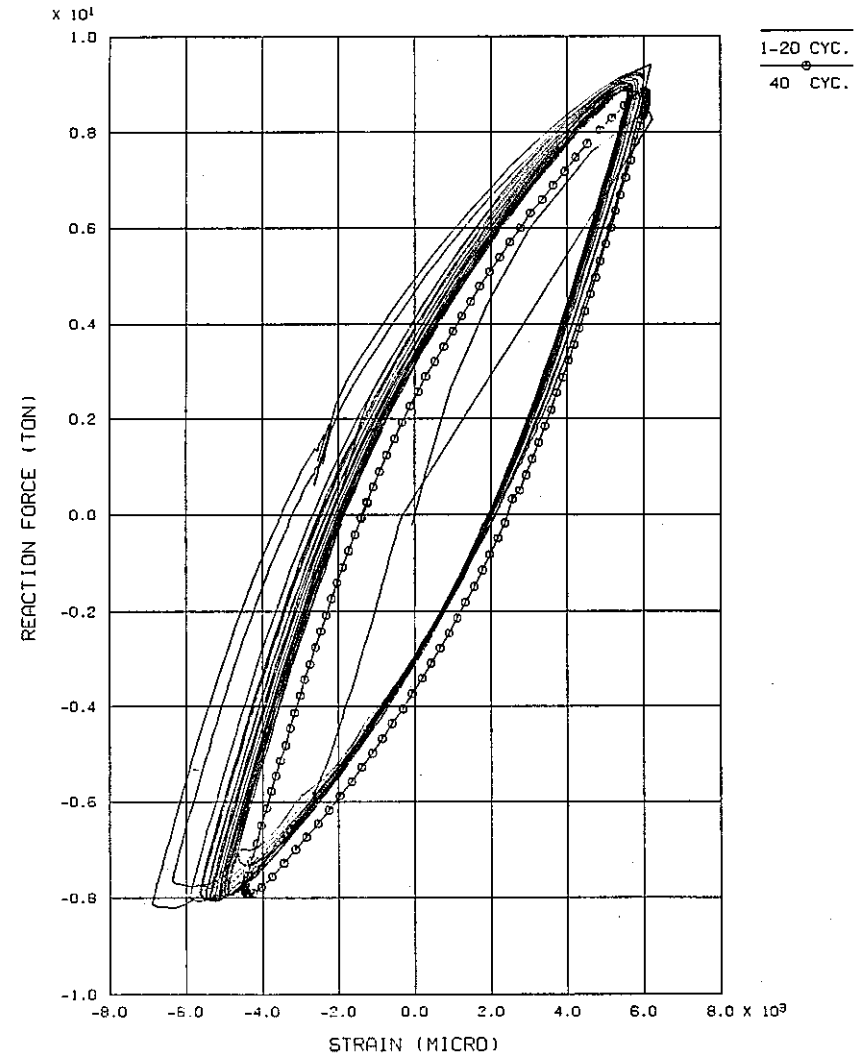
STRAIN DISTRIBUTION AT CENTER LINE (BOTTOM)
CPVT NO.4 (DU=0.44MM)

Fig.2.4-8 Strain Range Distribution at Ligament bottom
(CPVT No.4)



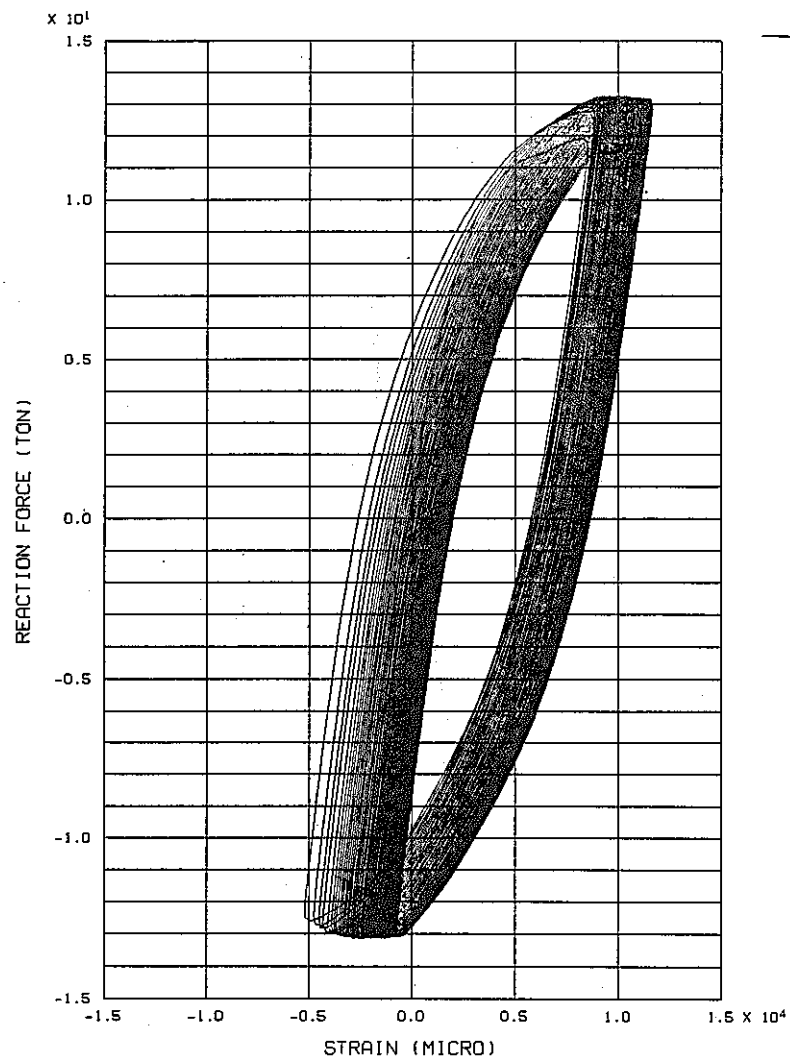
P - EPS-Y RELATIONSHIP AT NO.19 (3.20MM FROM EDGE, BOTTOM)
CPVT NO.4 (DU=0.44MM)

Fig. 2.4-9 Reaction Force-Strain Relationship
(CPVT No. 4, Gauge No. 19)



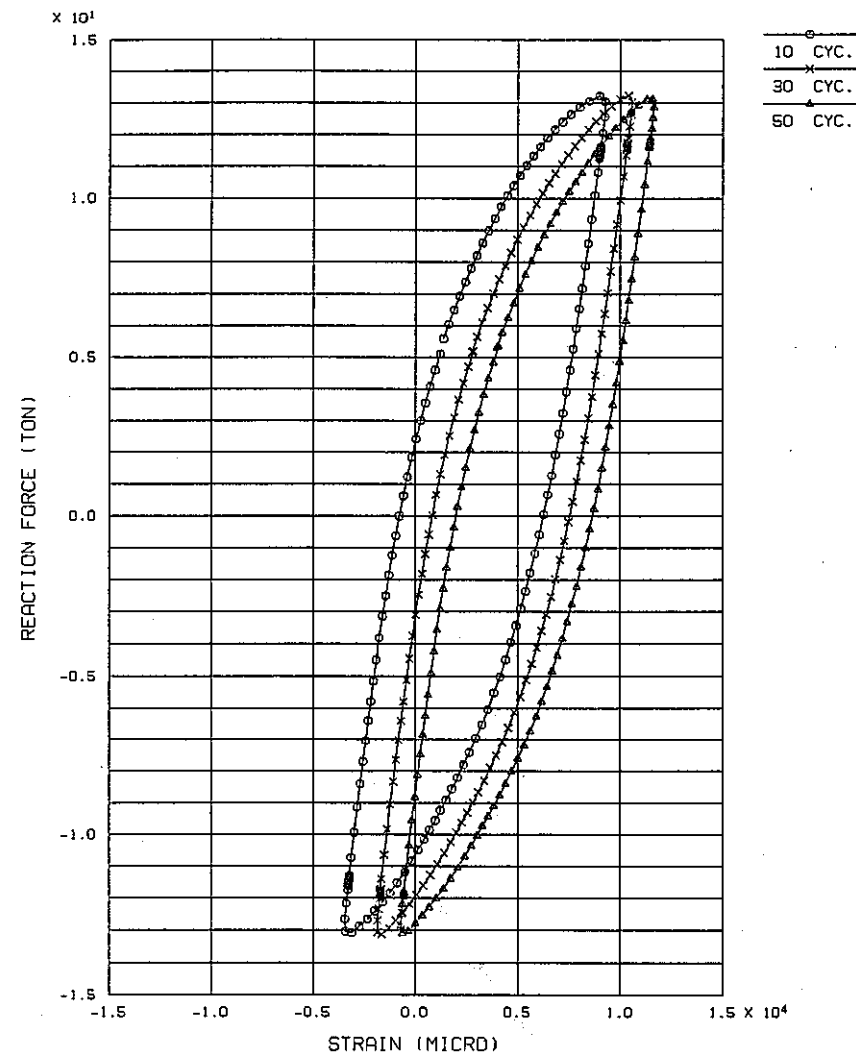
P - EPS-Y RELATIONSHIP AT SLIT TIP (NO.16-3)
CPVT NO.3 (DU=0.22MM) // 1 TO 20 CYCLE //

Fig. 2.5-1 Origin Shift of Measured Slit Tip Strain
(CPVT No. 3)



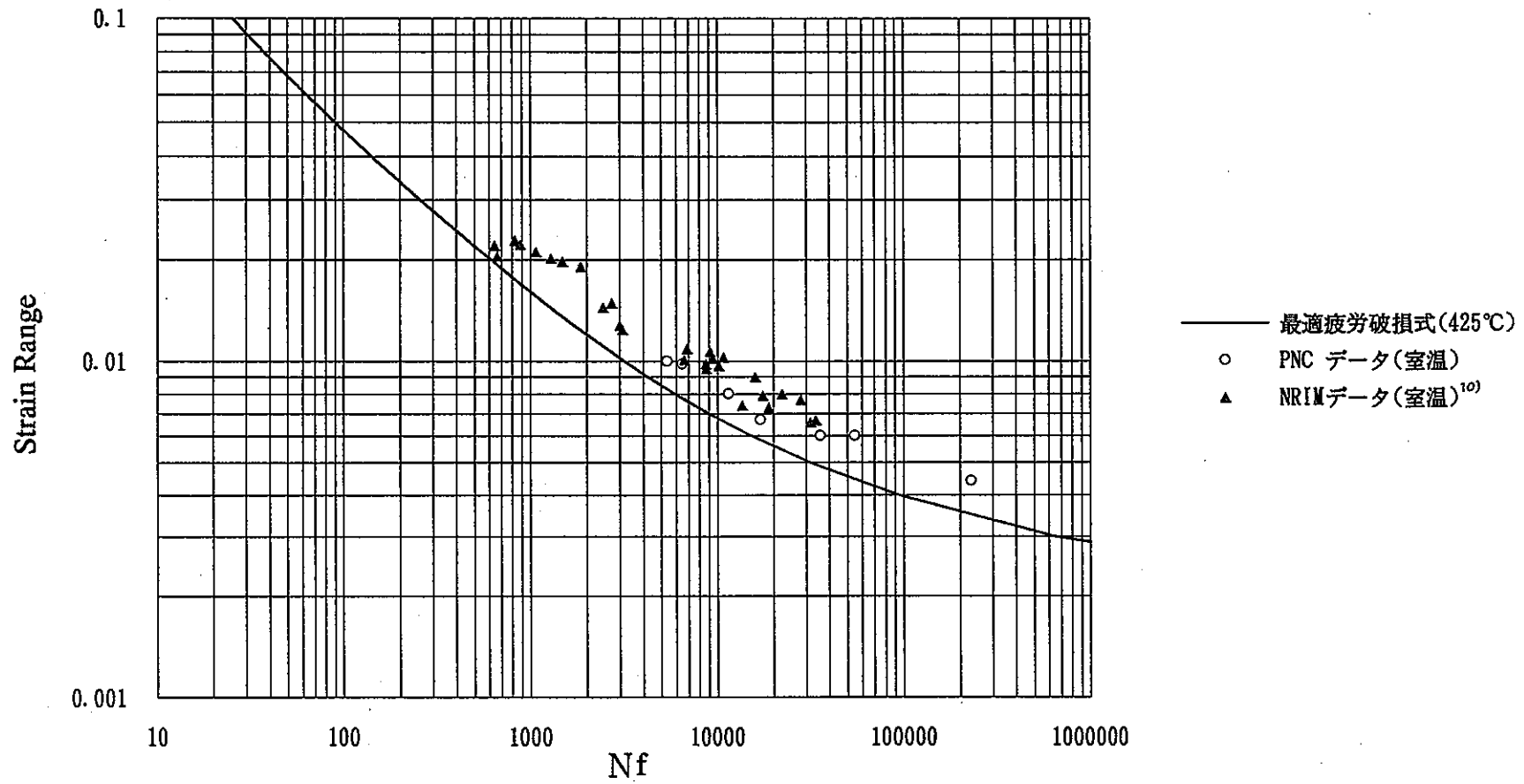
P - EPS-Y RELATIONSHIP AT NO.12-1 (0.95MM FROM EDGE, TOP)
CPVT NO.4 (DU=0.44MM)

Fig.2.5-2 Origin Shift of Measured Strain History
(CPVT No.4)



P - EPS-Y RELATIONSHIP AT NO.12-1 (0.95MM FROM EDGE, TOP)
CPVT NO.4 (DU=0.44MM)

Fig.2.5-3 Origin Shift of Measured Strain (CPVT No.4)



SUS304鋼の低サイクル疲労線図

最適疲労破損式とPNCデータのひずみ速度は
 0.1%/sec, NRIデータのみは0.67%/sec

Fig. 2.6-1 Low-Cycle Fatigue Diagram for SUS304 Steel

FINAS STATIC ANALYSIS

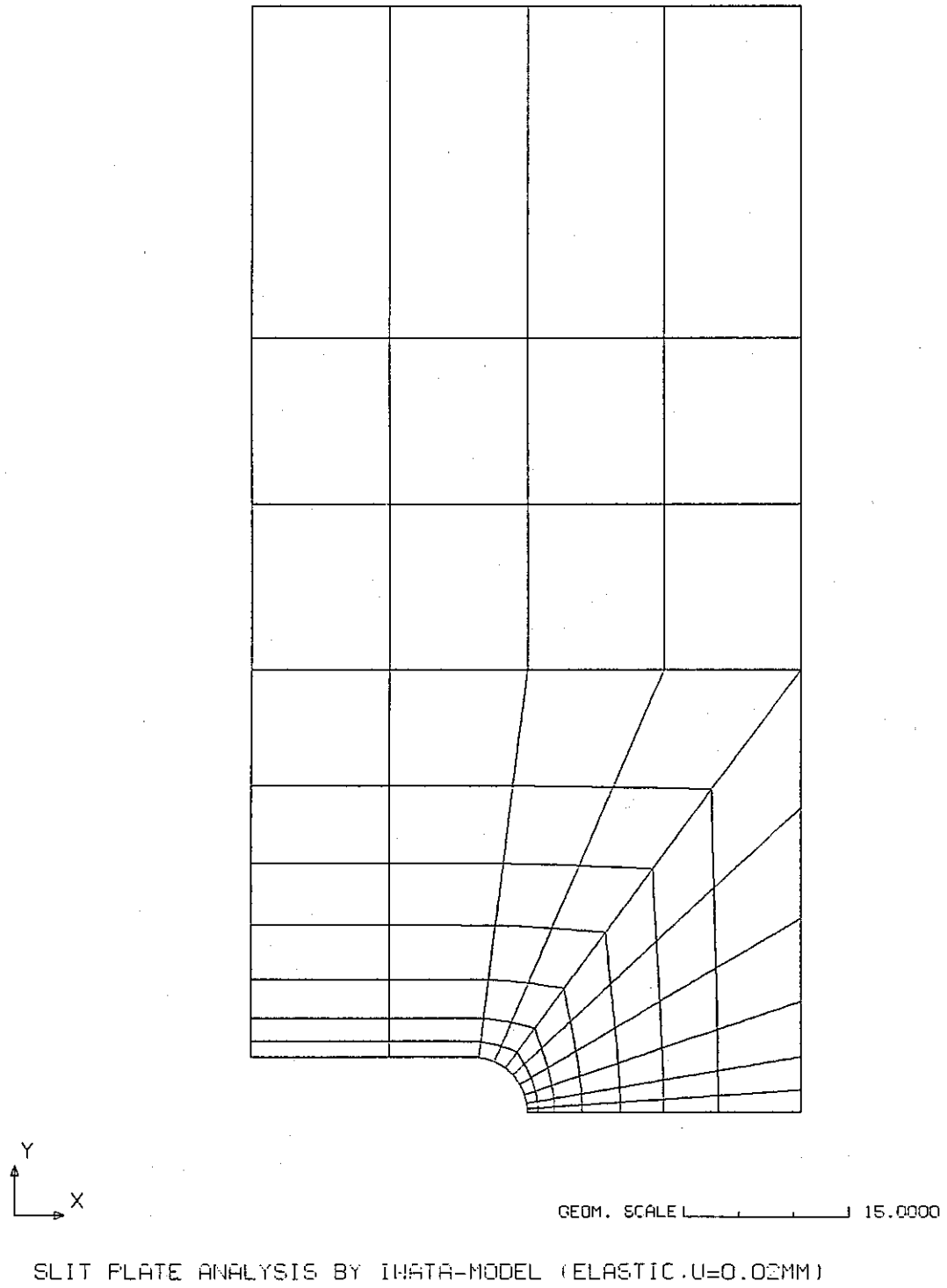


Fig. 3.2-1 Mesh Division for 2-D Analysis

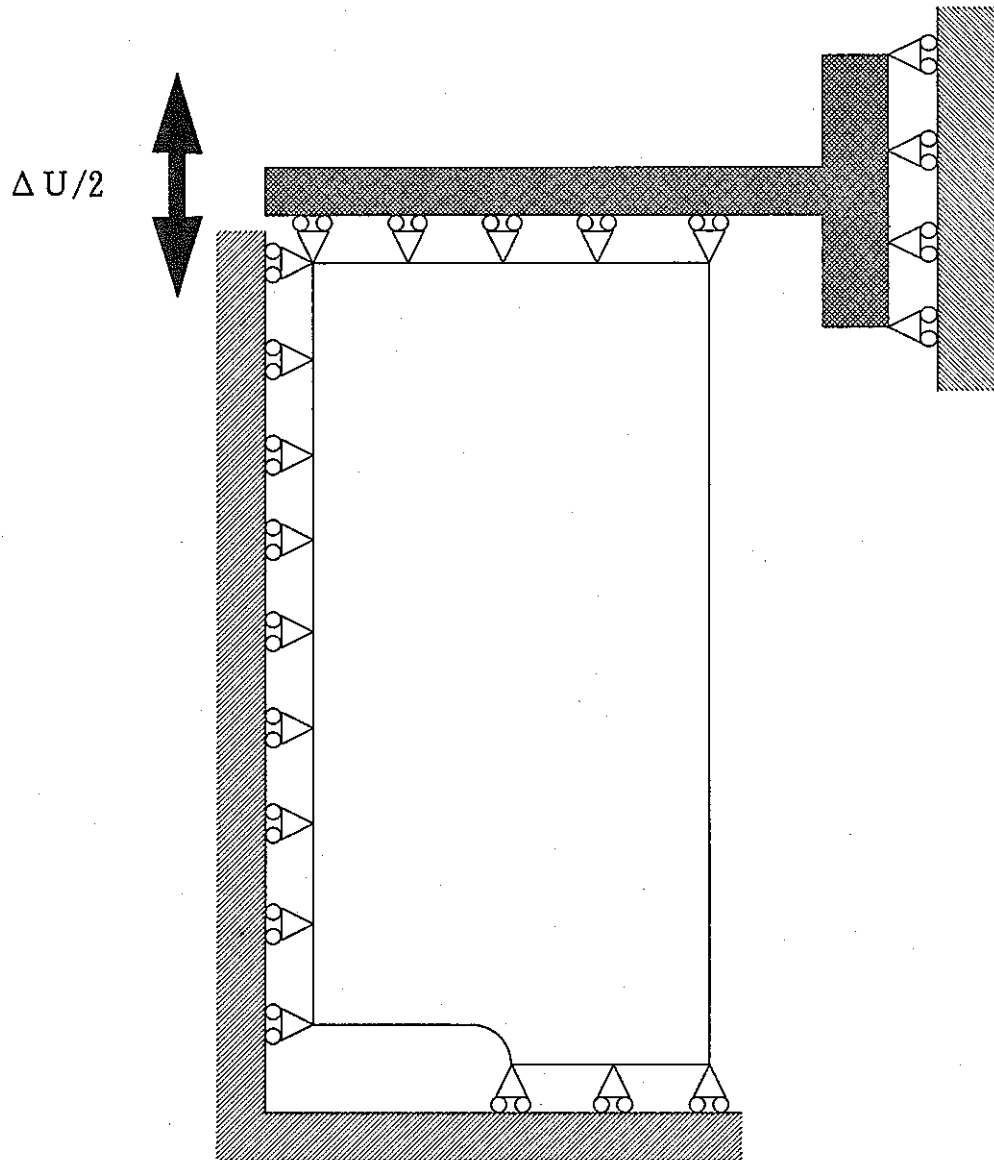


Fig. 3.2-2 Boundary Condition for FEM Analysis

FINAS STATIC ANALYSIS

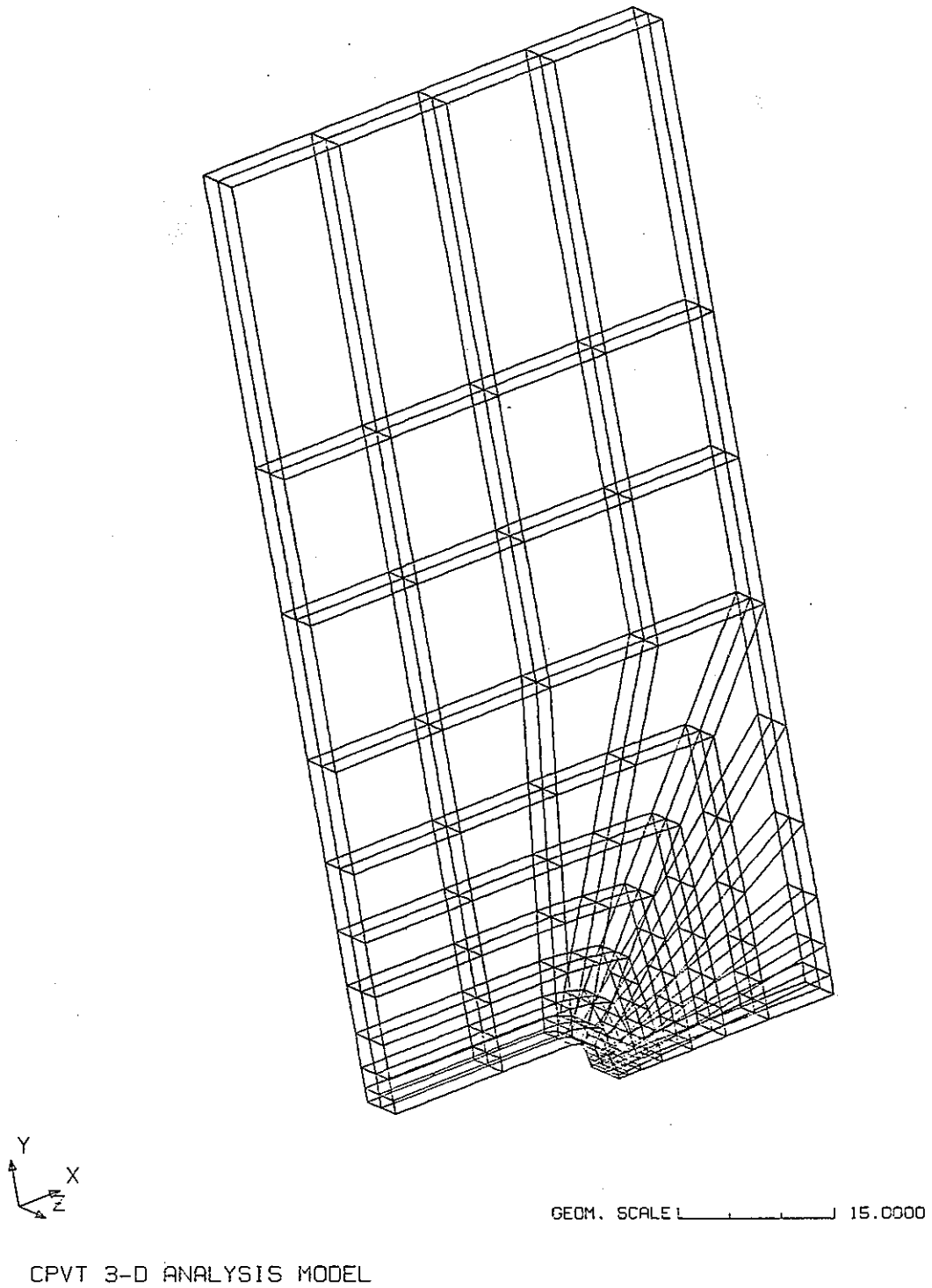


Fig. 3.2-3 Mesh Division for 3-D Analysis

FINAS STATIC ANALYSIS
DEFORMED SHAPE

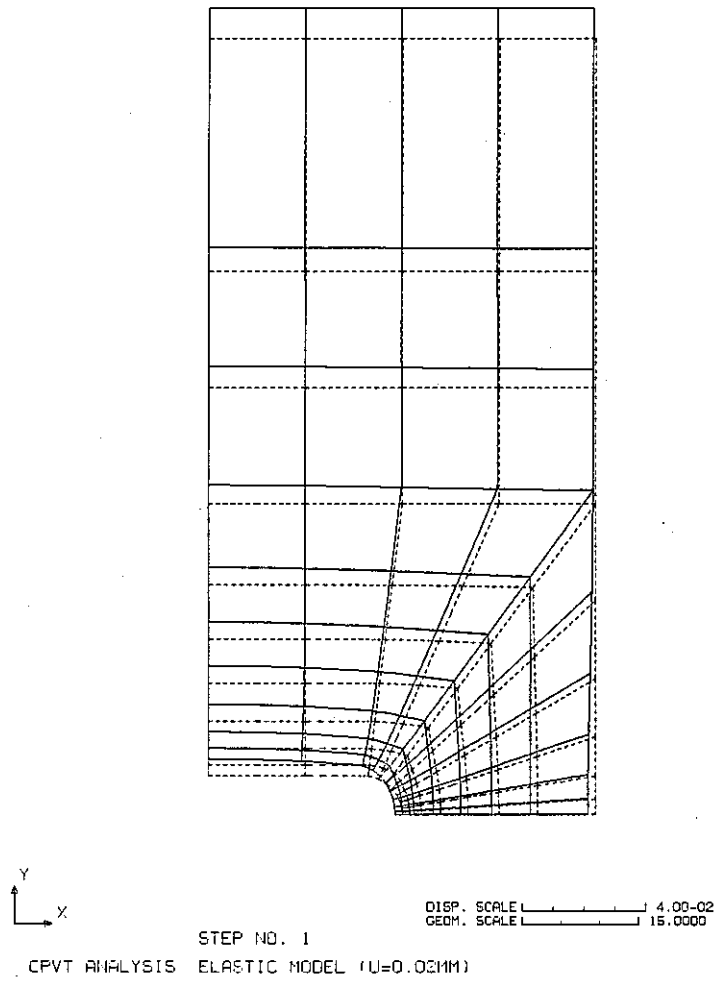


Fig. 4.1-1 Deformed Shape (Elastic Analysis U=0.02mm)

FINAS STATIC ANALYSIS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES

1	0.800000
2	1.799999
3	2.799998
4	3.799997
5	4.799996
6	5.799995
7	6.799994
8	7.799993
9	8.799992
10	9.799991
11	10.799990

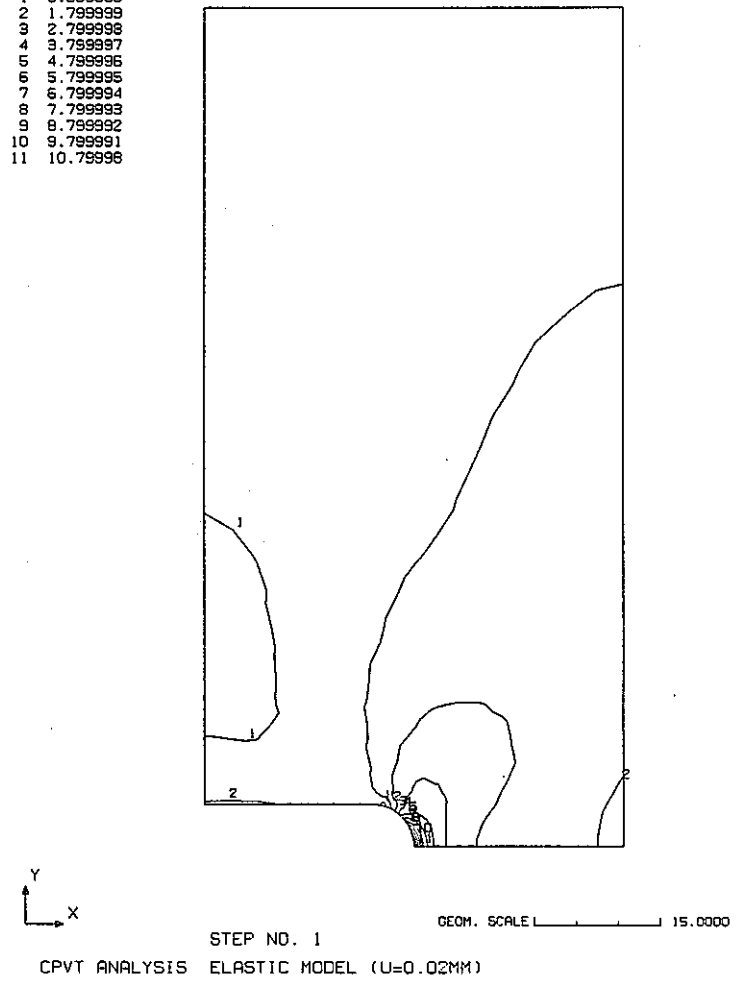
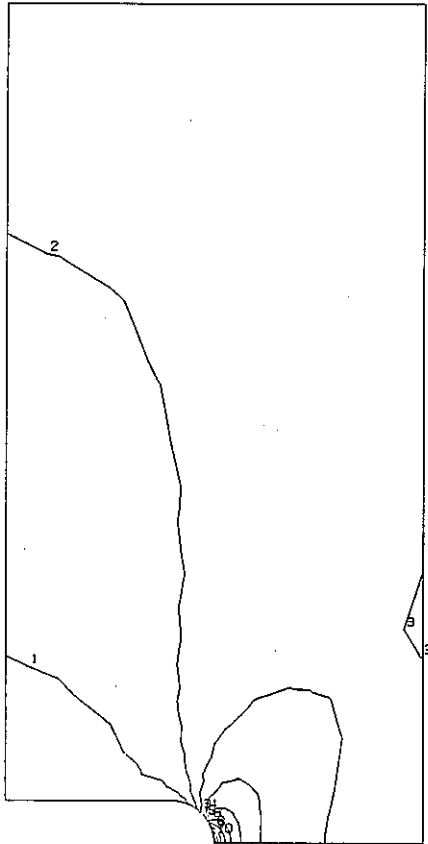


Fig. 4.1-2 Mises Stress Contours (Elastic Analysis U=0.02mm)

FINAS STATIC ANALYSIS
STRESS COMPONENT 2

CONTOUR VALUES
1 0.000000
2 1.399998
3 2.499998
4 3.599997
5 4.699996
6 5.799996
7 6.899995
8 7.999995
9 9.099994
10 10.19999

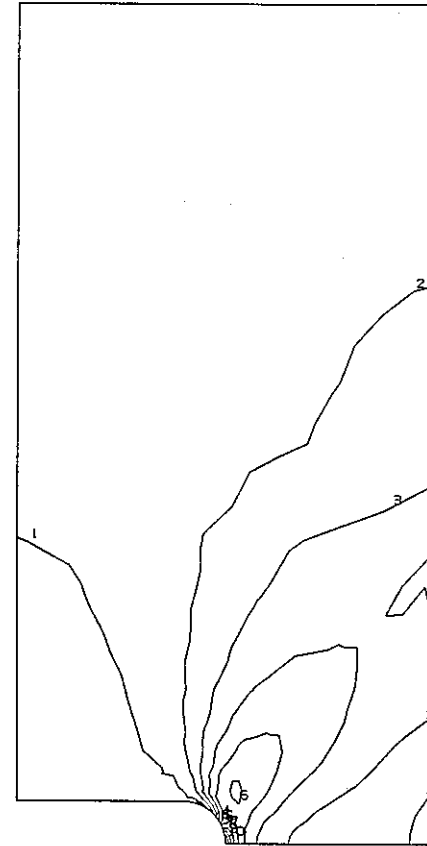


Y
X
STEP NO. 1
CPVT ANALYSIS ELASTIC MODEL (U=0.02MM)
GEOM. SCALE 15.0000

Fig.4.1-3 σ , Contours (Elastic Analysis U=0.02mm)

FINAS STATIC ANALYSIS
TOTAL STRAIN COMPONENT 2

CONTOUR VALUES
1 3.700-05
2 9.100-05
3 1.450-04
4 1.990-04
5 2.530-04
6 3.070-04
7 3.610-04
8 4.150-04
9 4.690-04
10 5.230-04



Y
X
STEP NO. 1
CPVT ANALYSIS ELASTIC MODEL (U=0.02MM)
GEOM. SCALE 15.0000

Fig.4.1-4 ϵ , Contours (Elastic Analysis U=0.02mm)

FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 1

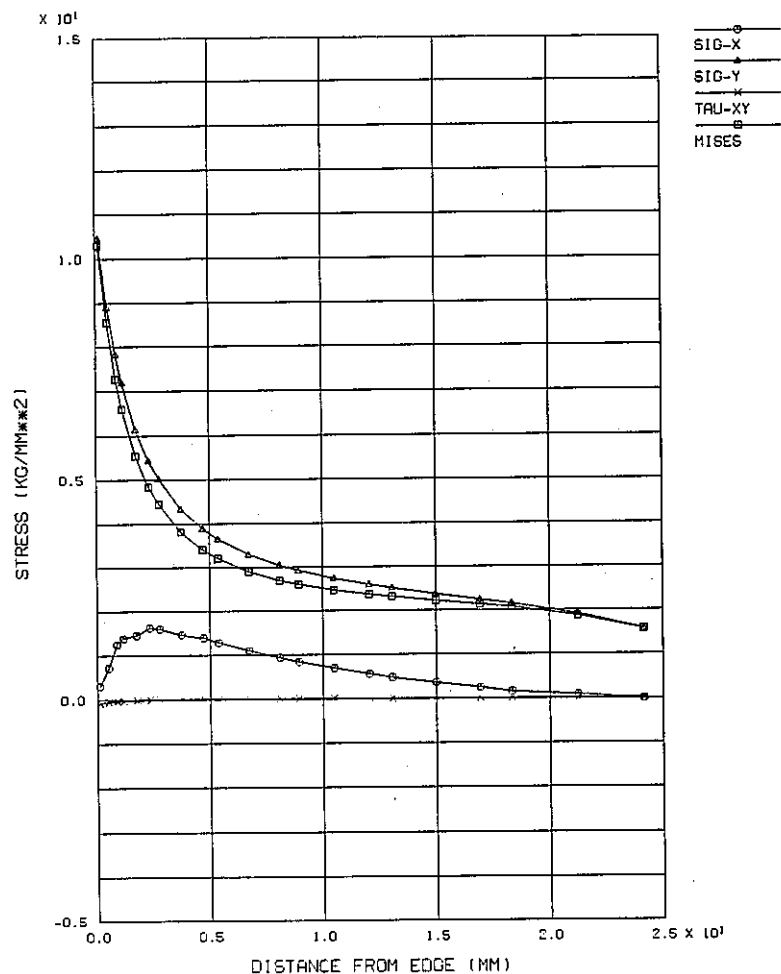


Fig. 4.1-5 Stress Distribution at Ligament
(Elastic Analysis U=0.02mm)

FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 1

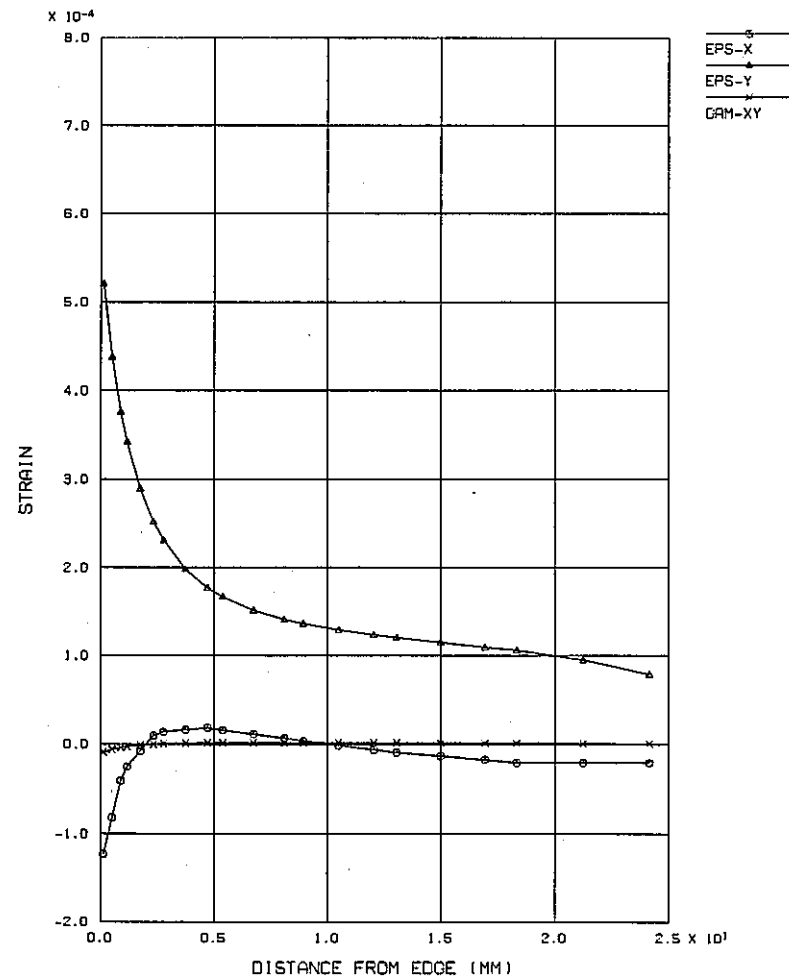
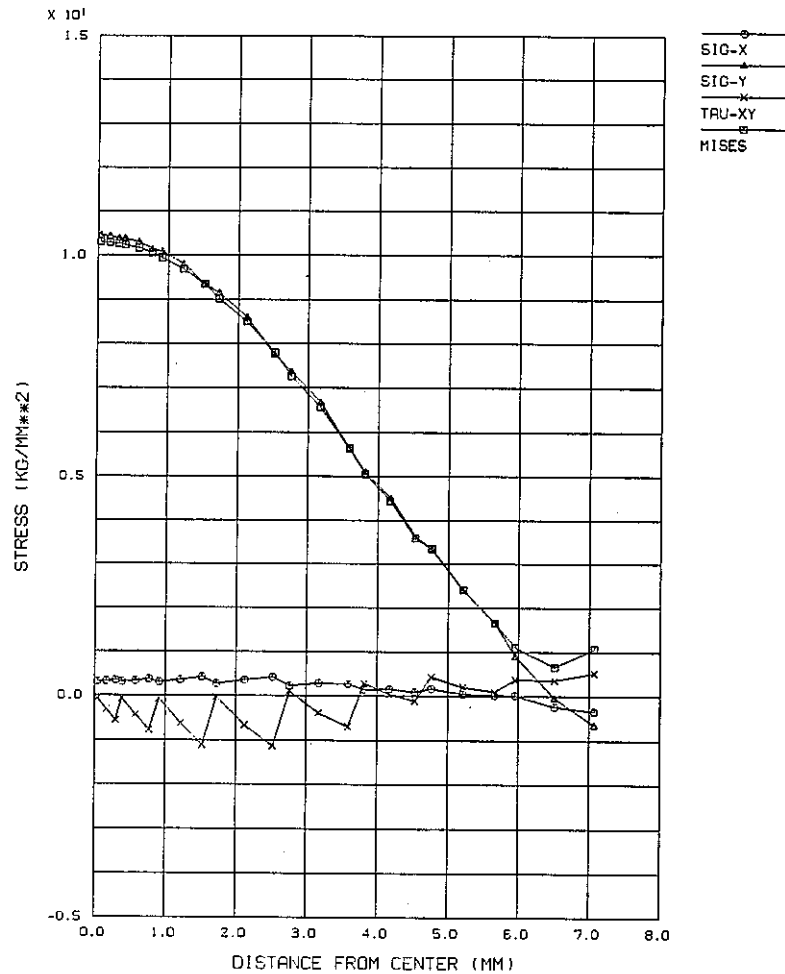


Fig. 4.1-6 Strain Distribution at Ligament
(Elastic Analysis U=0.02mm)

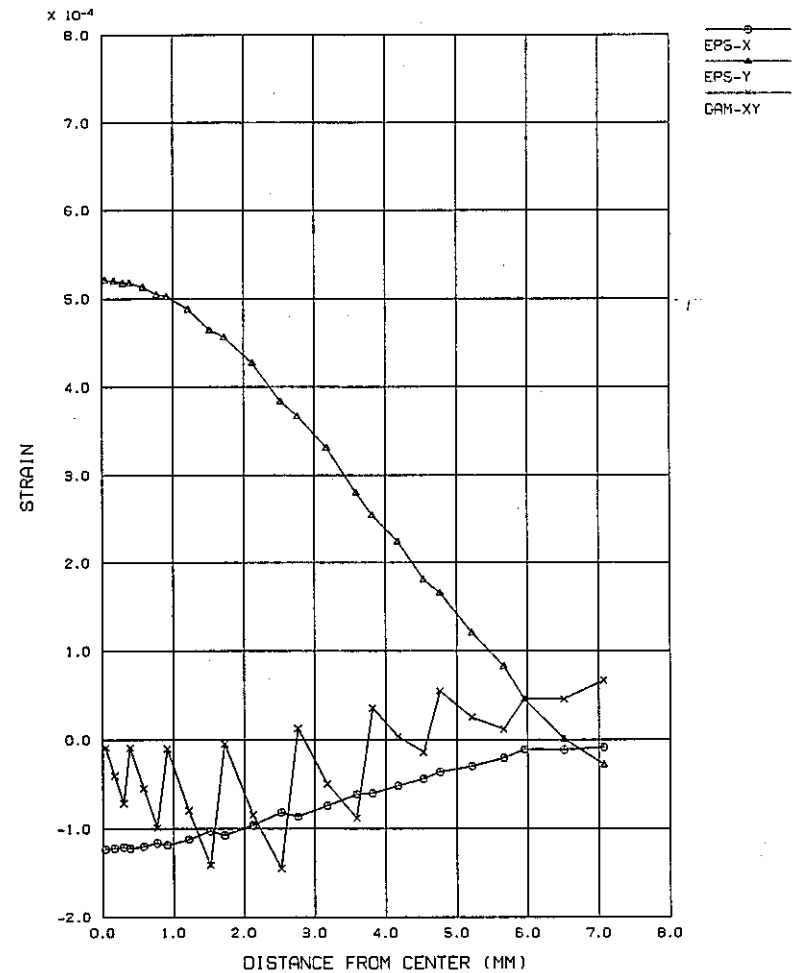
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 1



STRESS DISTRIBUTION AT ROUNDING EDGE
CPVT ANALYSIS ELASTIC MODEL (U=0.02MM)

Fig.4.1-7 Stress Distribution at Edge
(Elastic Analysis U=0.02mm)

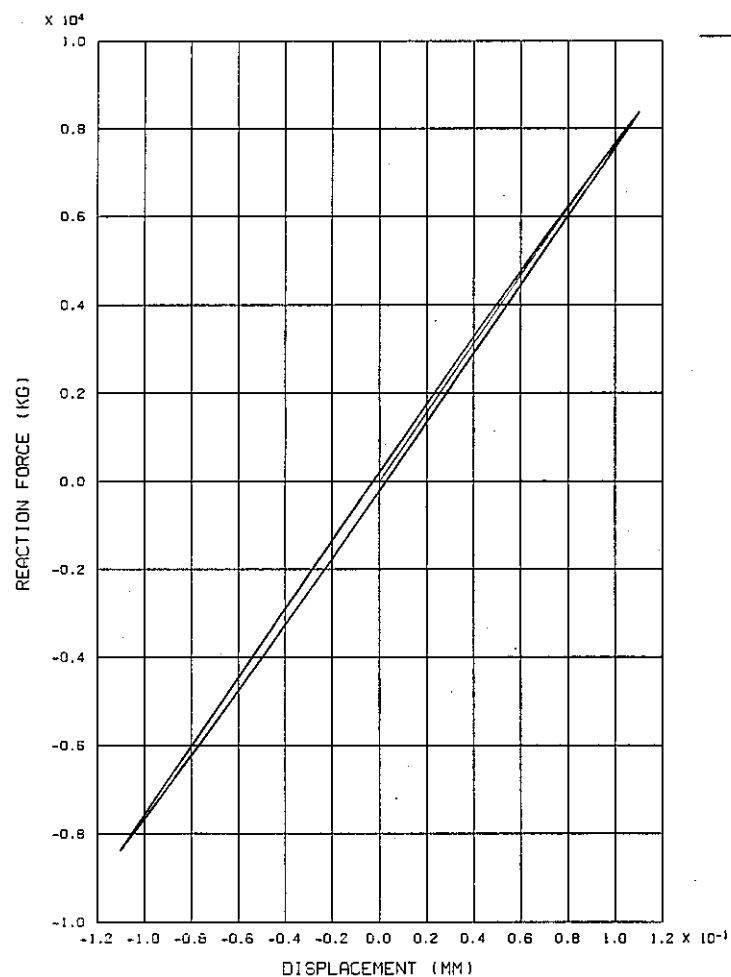
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 1



STRAIN DISTRIBUTION AT ROUNDING EDGE
CPVT ANALYSIS ELASTIC MODEL (U=0.02MM)

Fig.4.1-8 Strain Distribution at Edge
(Elastic Analysis U=0.02mm)

FINAS STATIC ANALYSIS

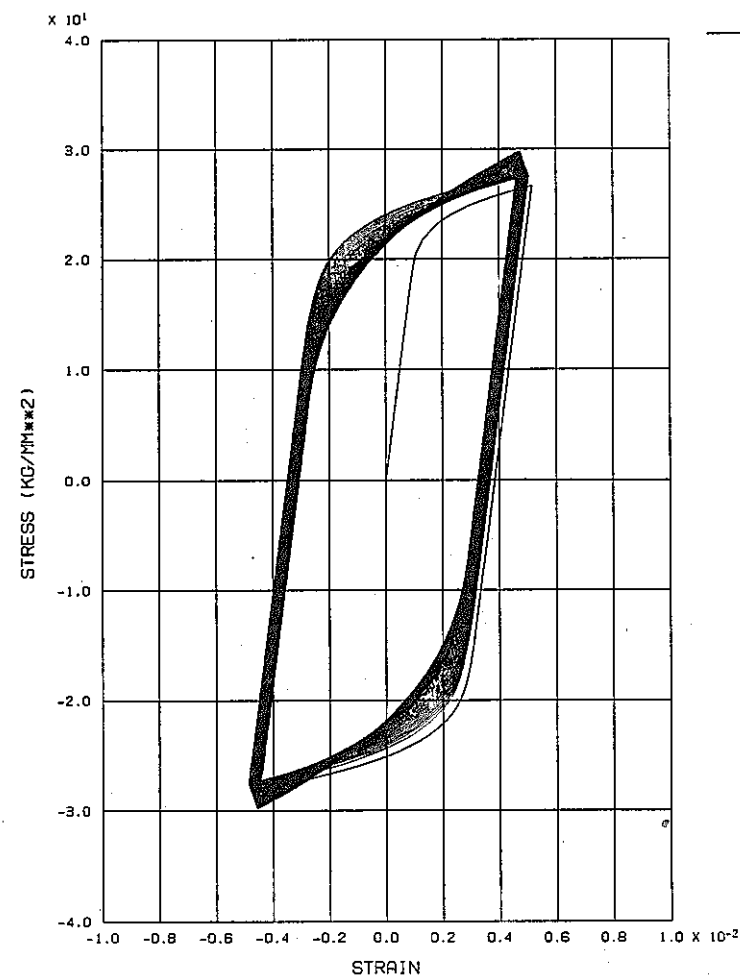


P - U

SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-21:OU=0.22MM)

Fig. 4.2-1 Load-Displacement Relationship
(CPVT No.3 Analysis)

FINAS STATIC ANALYSIS

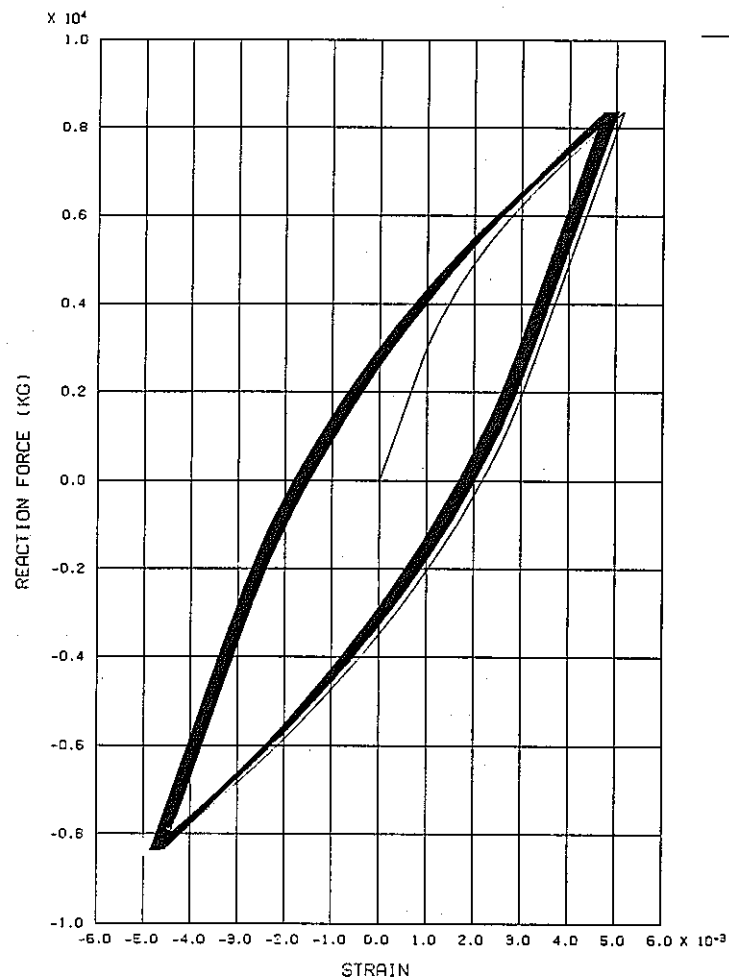


SIG-Y - EPS-Y RELATIONSHIP (A: 0.11MM FROM EDGE)

SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-21:OU=0.22MM)

Fig. 4.2-2 Stress-Strain Relationship at Slit Tip
(CPVT No.3 Analysis)

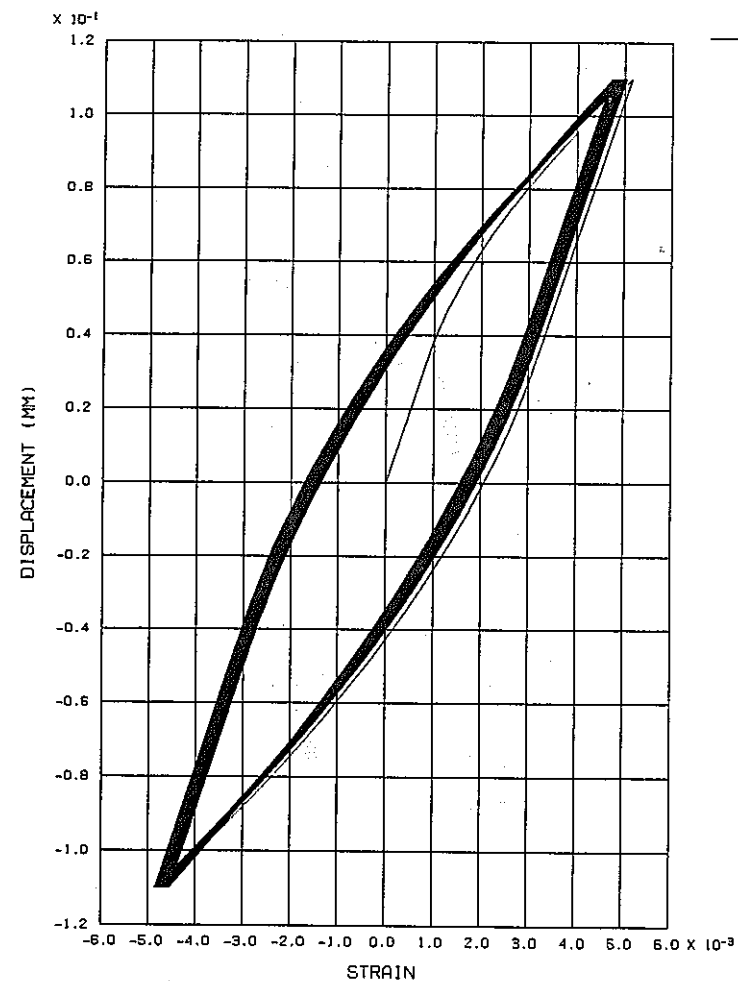
FINAS STATIC ANALYSIS



P - EPS-Y RELATIONSHIP (A: 0.11MM FROM EDGE)
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-21:DU=0.22MM)

Fig. 4.2-3 Load-Strain Relationship at Slit Tip
(CPVT No. 3 Analysis)

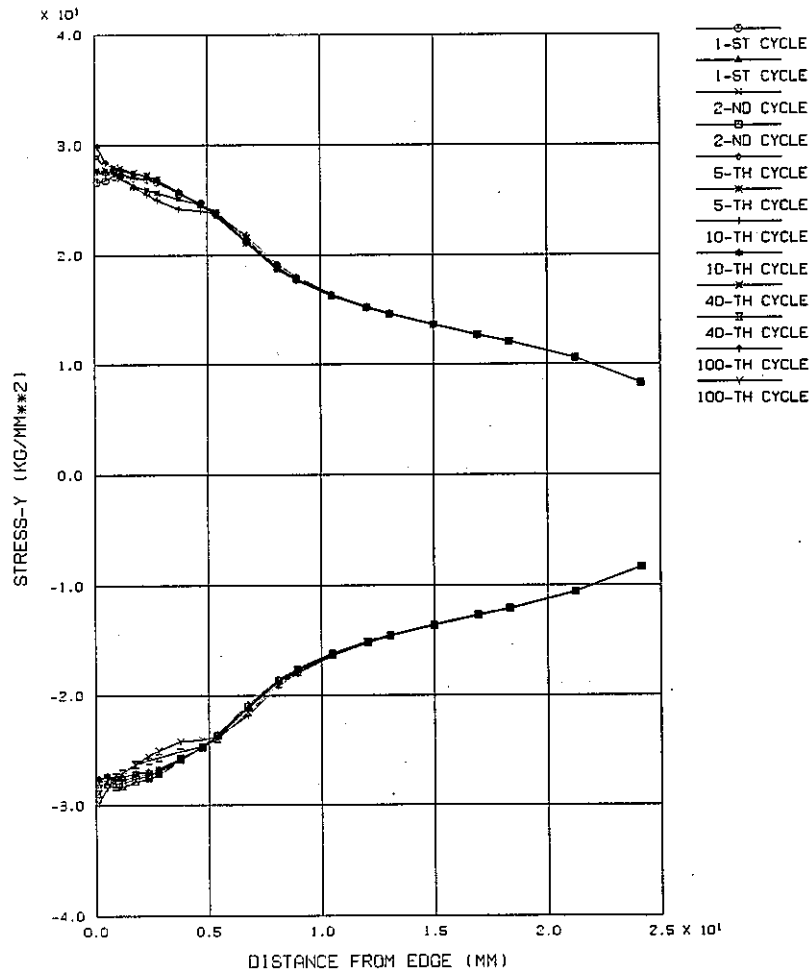
FINAS STATIC ANALYSIS



U - EPS-Y RELATIONSHIP (A: 0.11MM FROM EDGE)
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-21:DU=0.22MM)

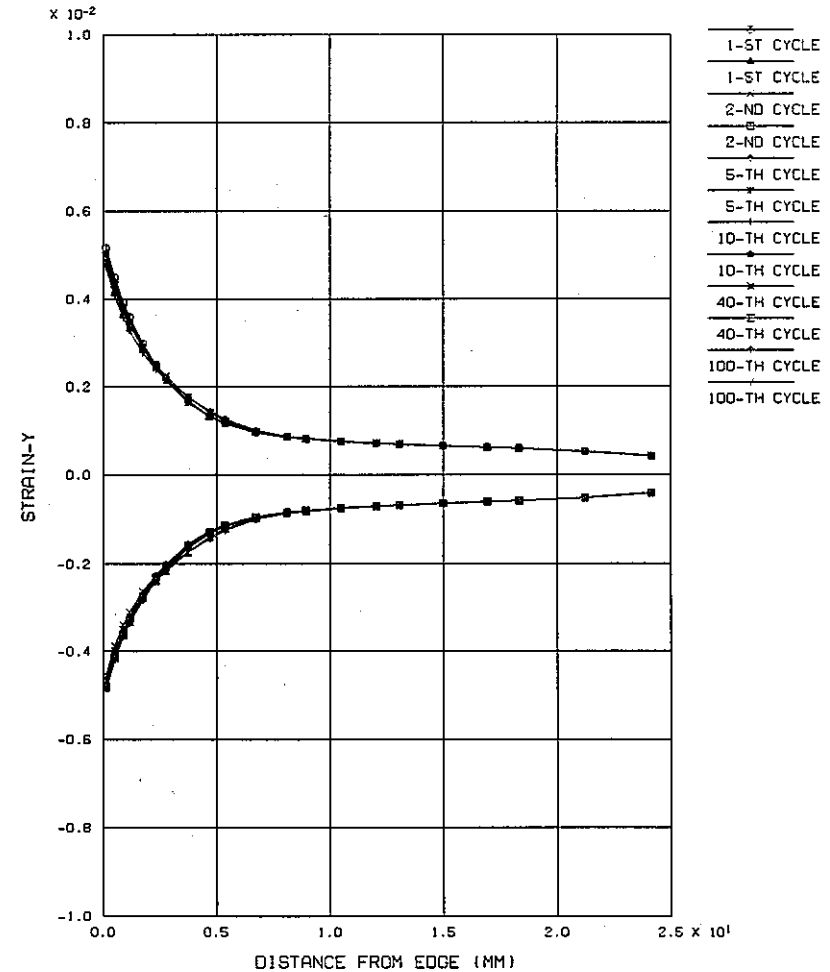
Fig. 4.2-4 Displacement-Strain Relationship at Slit Tip
(CPVT No. 3 Analysis)

PNC TN9410 92-191



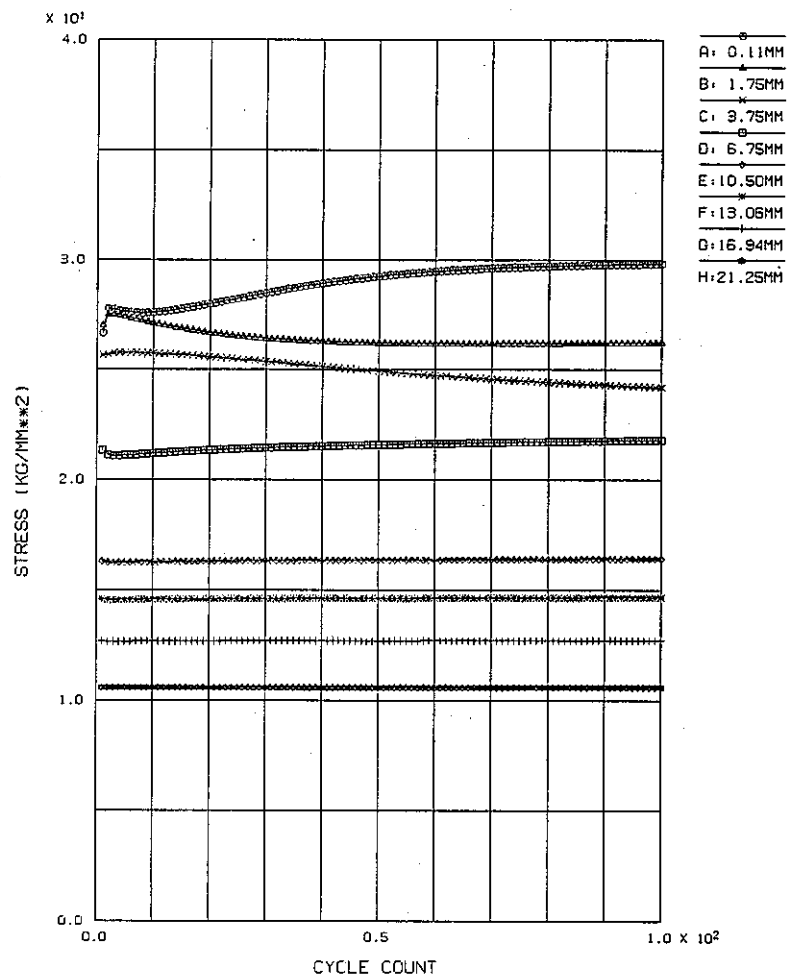
STRESS DISTRIBUTION AT CENTER LINE
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-21:DU=0.22MM)

Fig. 4.2-5 Stress Range at Ligament (CPVT No.3 Analysis)



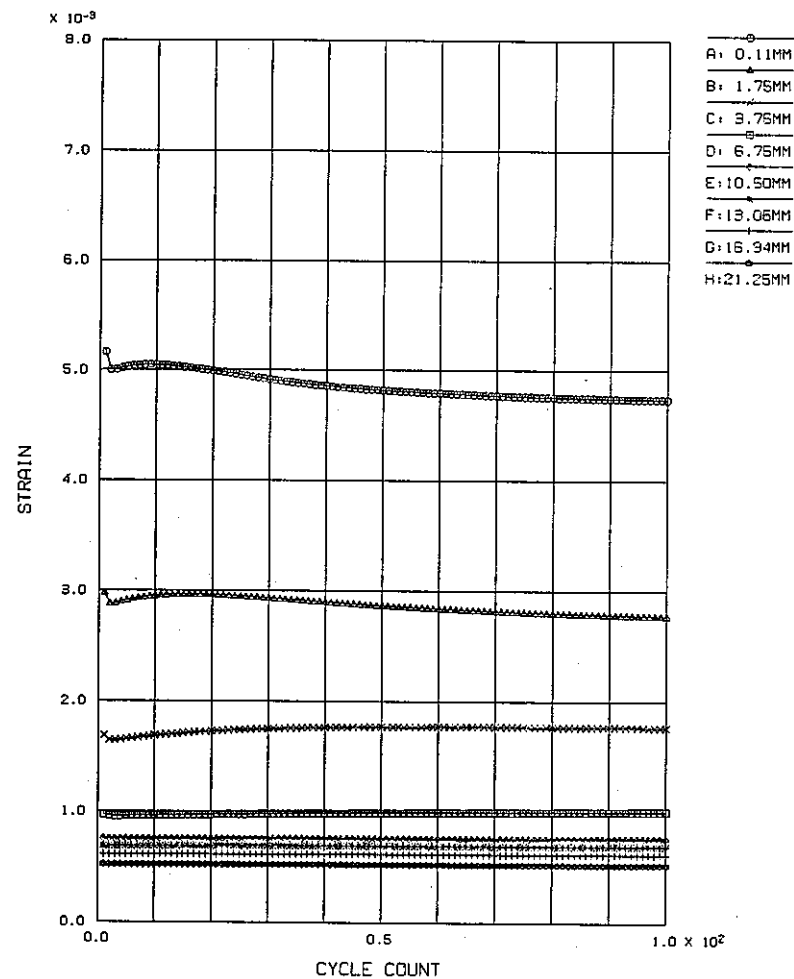
STRAIN DISTRIBUTION AT CENTER LINE
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-21:DU=0.22MM)

Fig. 4.2-6 Strain Range at Ligament (CPVT No.3 Analysis)



PEAK STRESS HISTORIY (TENSION +)
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-21:DU=0.22MM)

Fig. 4.2-7 Peak Stress History at Ligament
(CPVT No.3 Analysis)



PEAK STRAIN HISTORIY (TENSION +)
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-21:DU=0.22MM)

Fig. 4.2-8 Peak Strain History at Ligament
(CPVT No.3 Analysis)

FINAS STATIC ANALYSIS
DEFORMED SHAPE

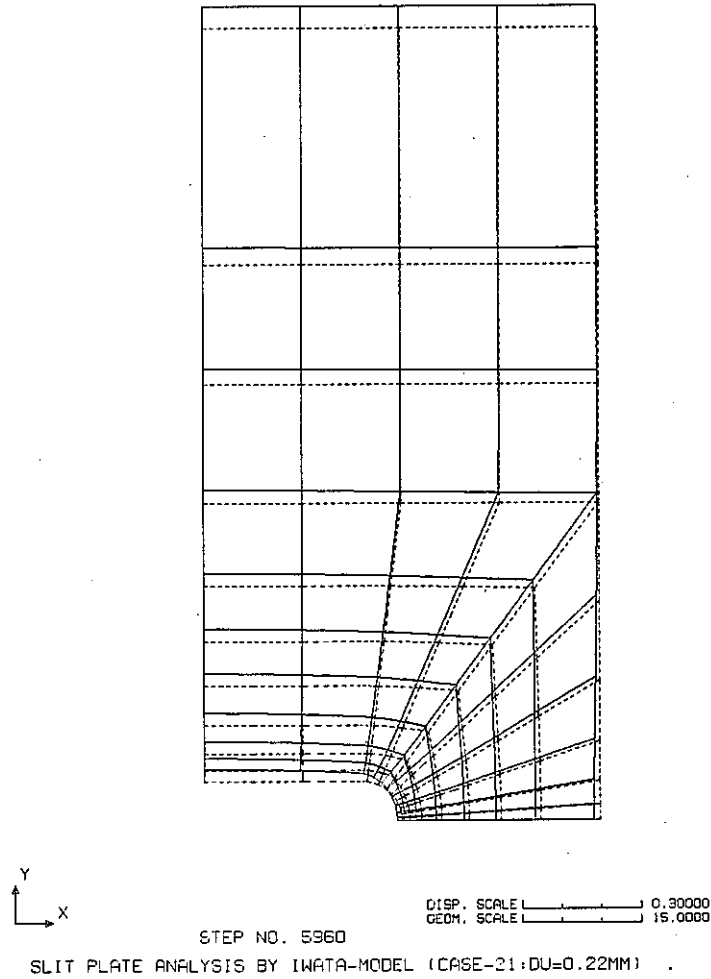


Fig.4.2-9 Deformed Shape (CPVT No.3 Analysis, 100Cycle)

FINAS STATIC ANALYSIS
VON MISES STRESS

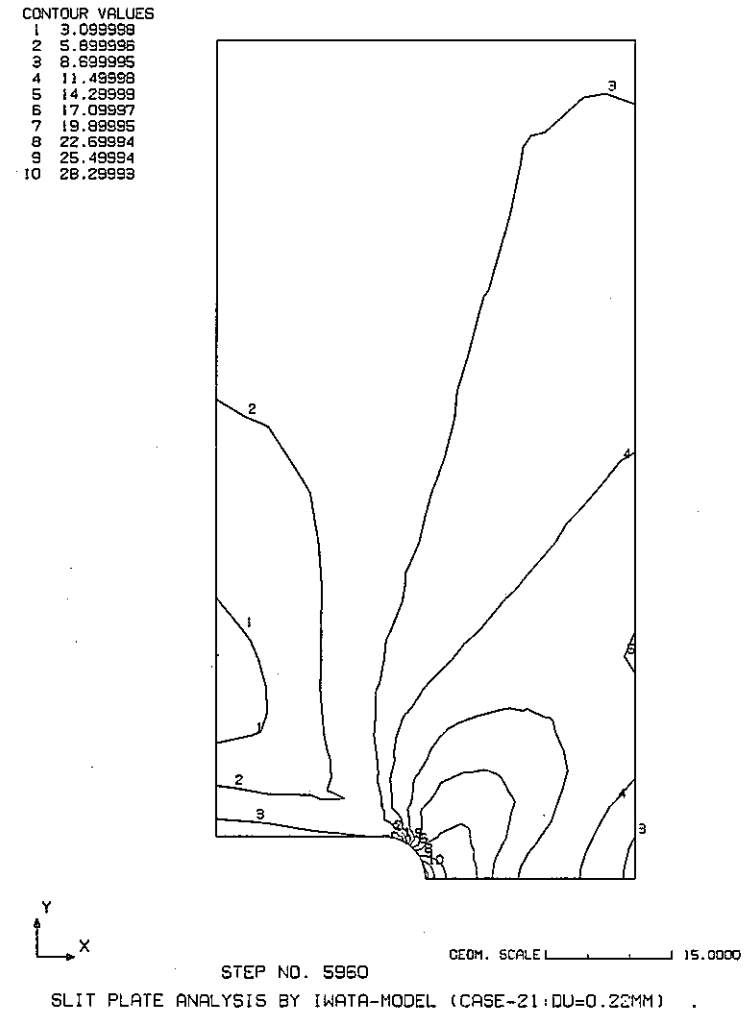
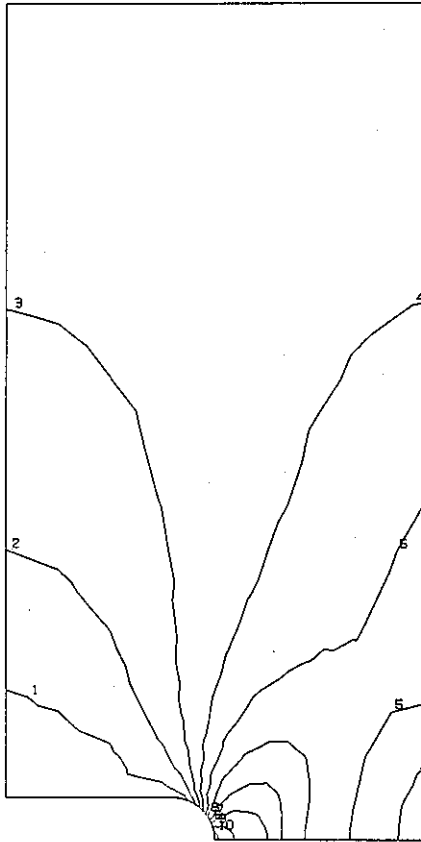


Fig.4.2-10 Mises Stress Contours (CPVT No.3 Analysis, 100Cycle)

FINAS STATIC ANALYSIS
STRESS COMPONENT 2

CONTOUR VALUES
1 0.700000
2 3.799998
3 6.899996
4 9.999995
5 13.099993
6 16.199991
7 19.299989
8 22.399987
9 25.499985
10 28.599984



STEP NO. 5960

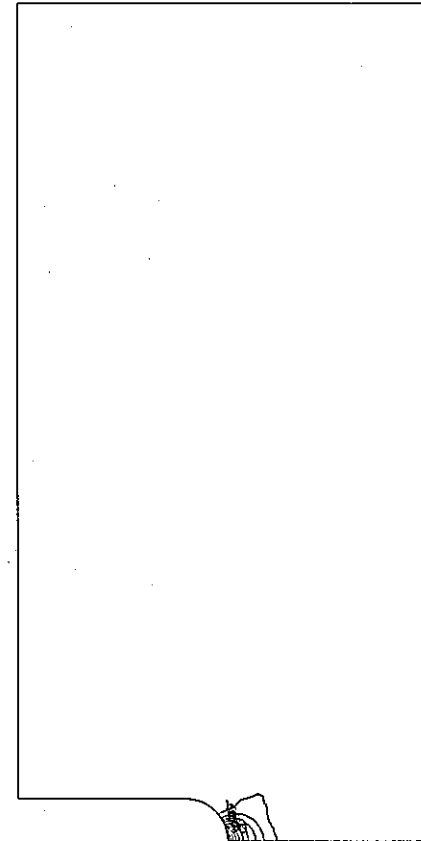
GEOM. SCALE 15.0000

SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-21:DU=0.22MM)

Fig.4.2-11 σ_y Contours (CPVT No.3 Analysis, 100Cycle)

FINAS STATIC ANALYSIS
PLASTIC STRAIN COMPONENT 2

CONTOUR VALUES
1 1.300-04
2 4.700-04
3 8.100-04
4 1.150-03
5 1.490-03
6 1.830-03
7 2.170-03
8 2.510-03
9 2.850-03
10 3.190-03



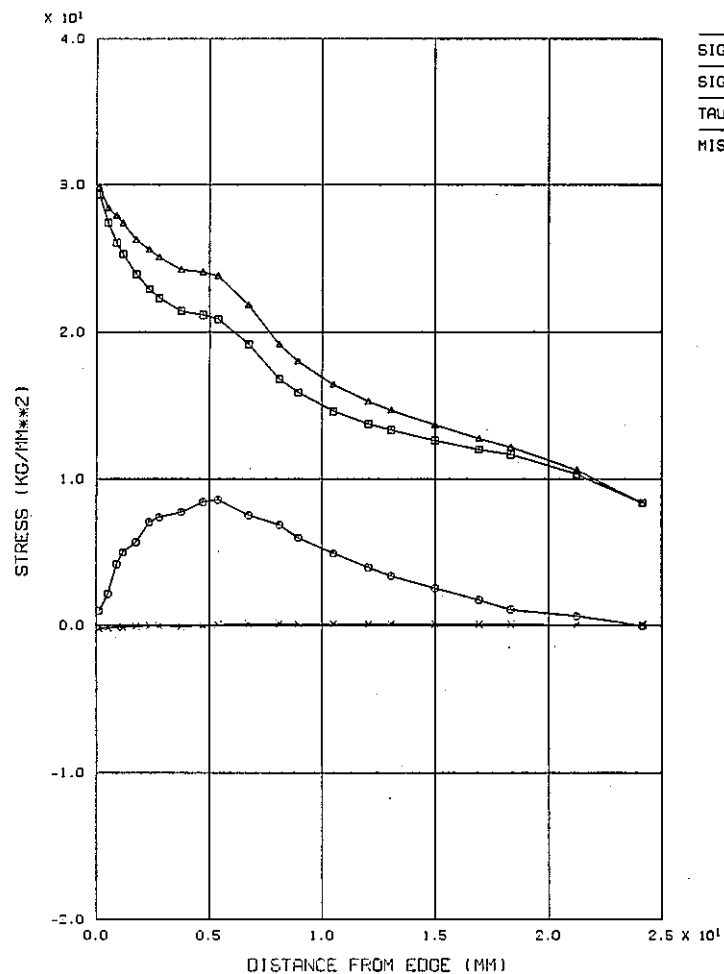
STEP NO. 5960

GEOM. SCALE 15.0000

SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-21:DU=0.22MM)

Fig.4.2-12 ϵ_y Contours (CPVT No.3 Analysis, 100Cycle)

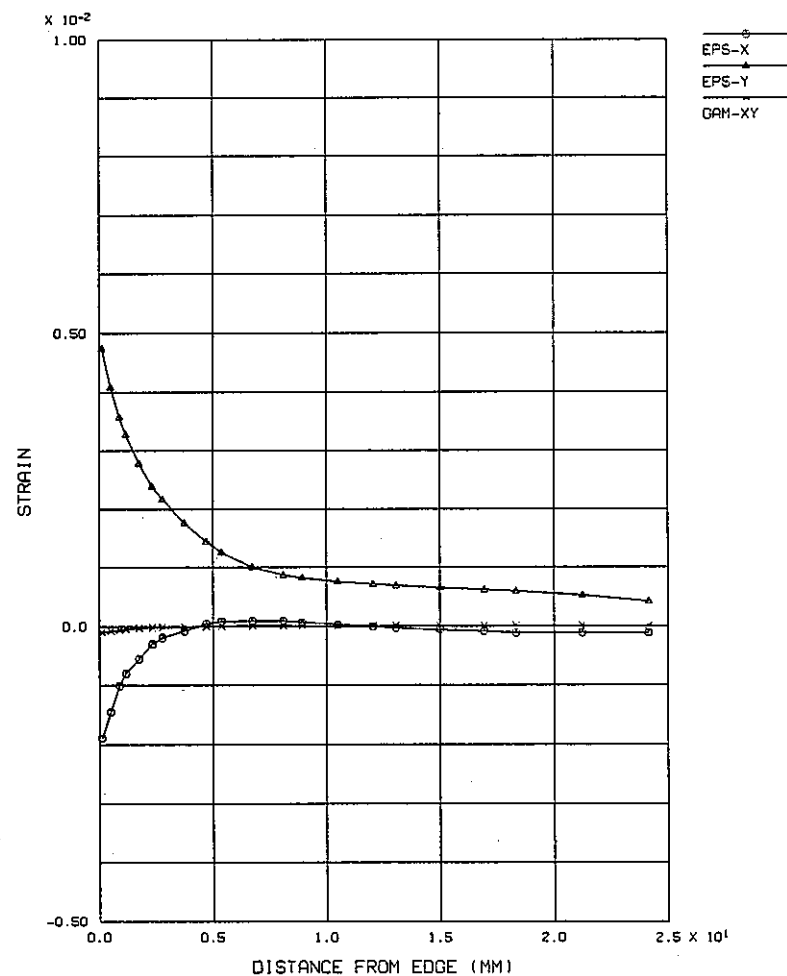
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 5960



STRESS DISTRIBUTION AT CENTER LINE
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-21:DU=0.22MM)

Fig. 4.2-13 Stress Distribution at Ligament
(CPVT No.3 Analysis, 100Cycle)

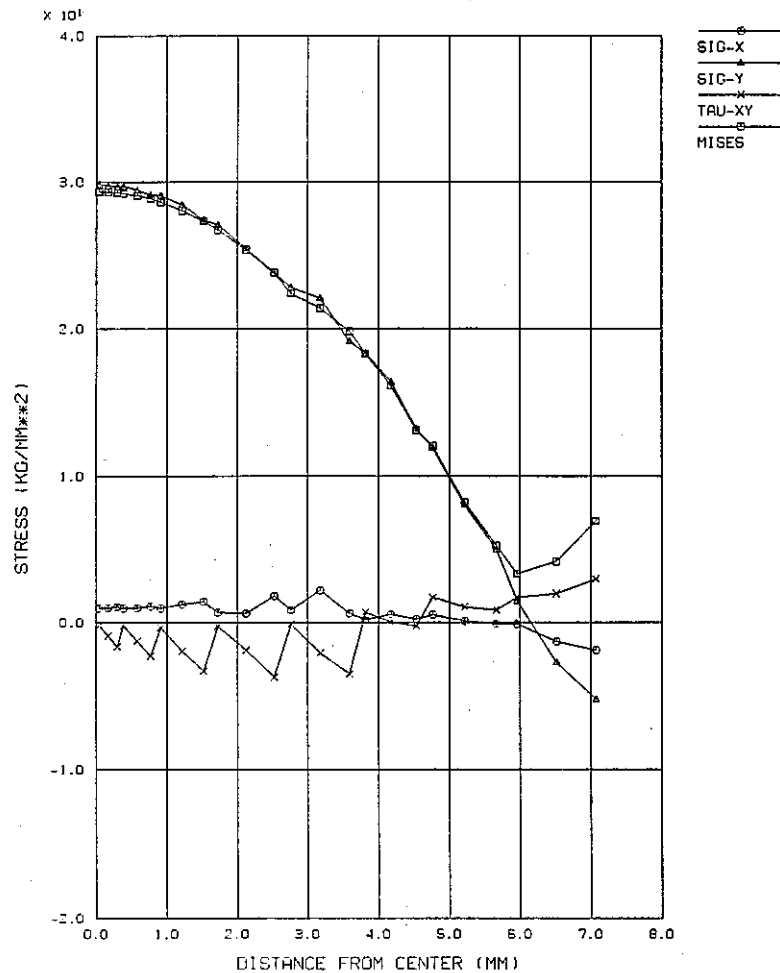
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 5960



STRAIN DISTRIBUTION AT CENTER LINE
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-21:DU=0.22MM)

Fig. 4.2-14 Strain Distribution at Ligament
(CPVT No.3 Analysis, 100Cycle)

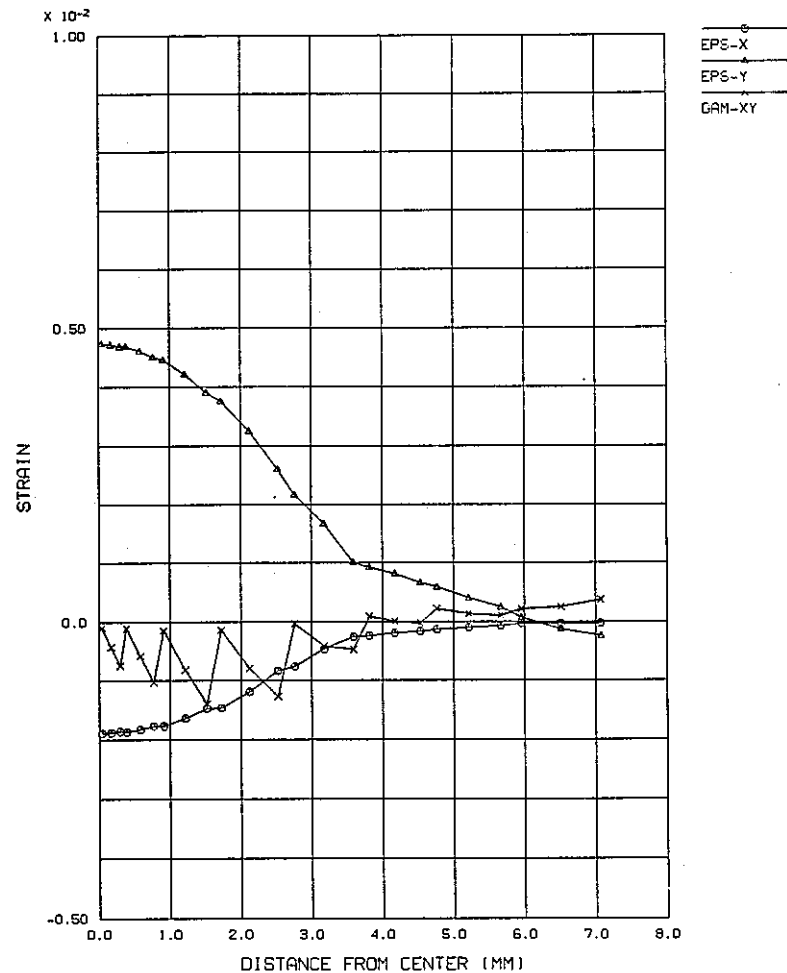
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 5960



STRESS DISTRIBUTION AT ROUNDING EDGE
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-21:DU=0.22MM)

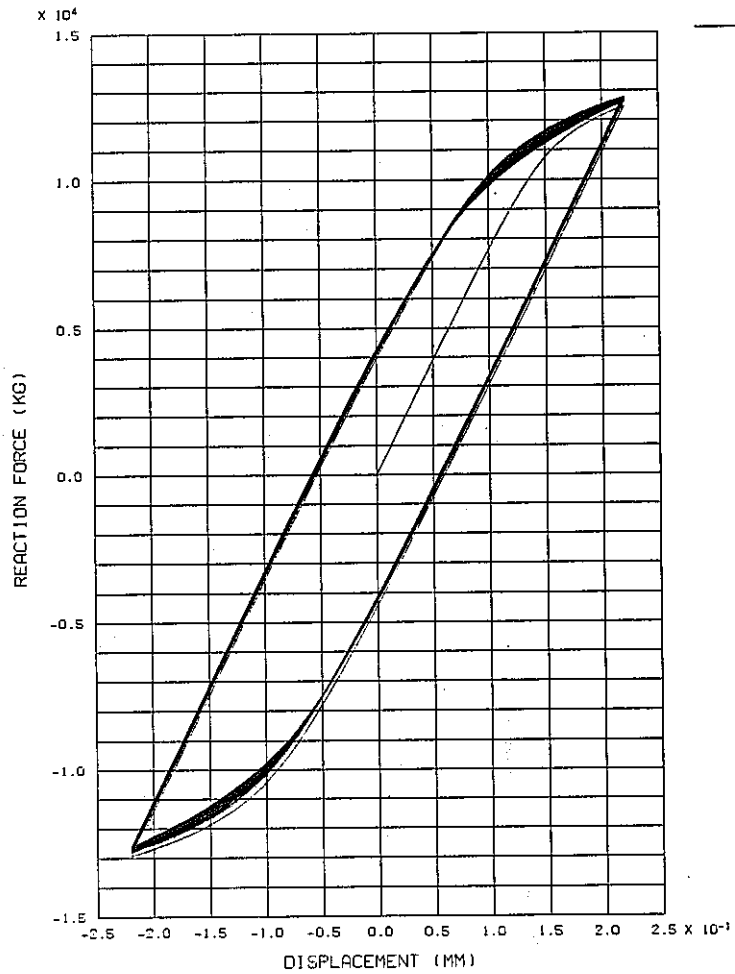
Fig. 4.2-15 Stress Distribution at Slit Edge
(CPVT No.3 Analysis, 100Cycle)

FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 5960



STRAIN DISTRIBUTION AT ROUNDING EDGE
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-21:DU=0.22MM)

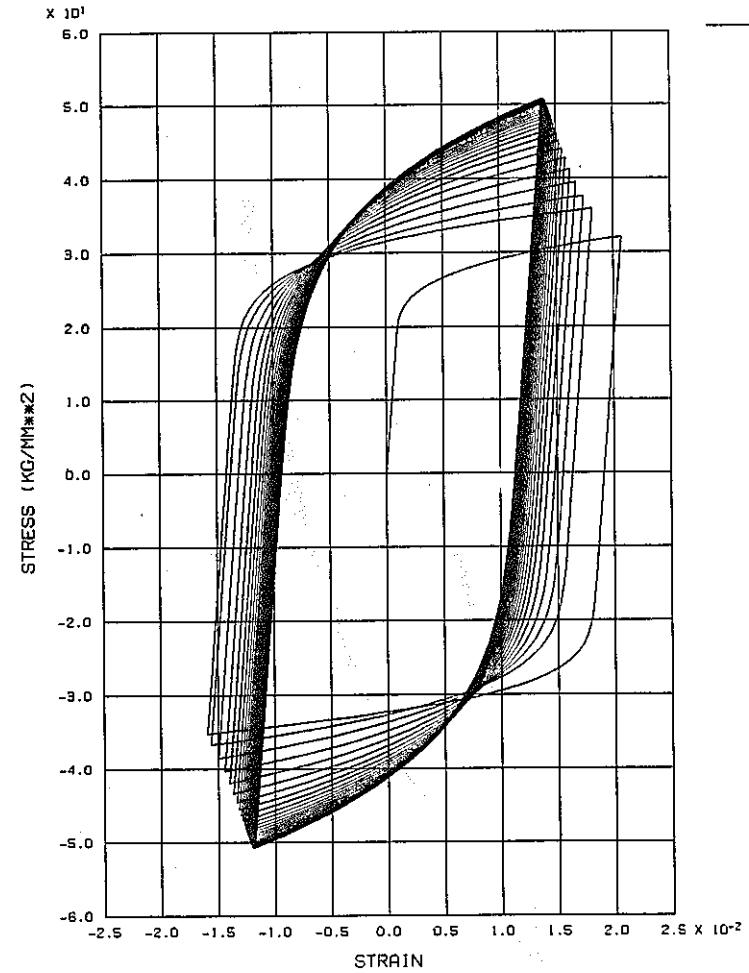
Fig. 4.2-16 Strain Distribution at Slit Edge
(CPVT No.3 Analysis, 100Cycle)



P - U

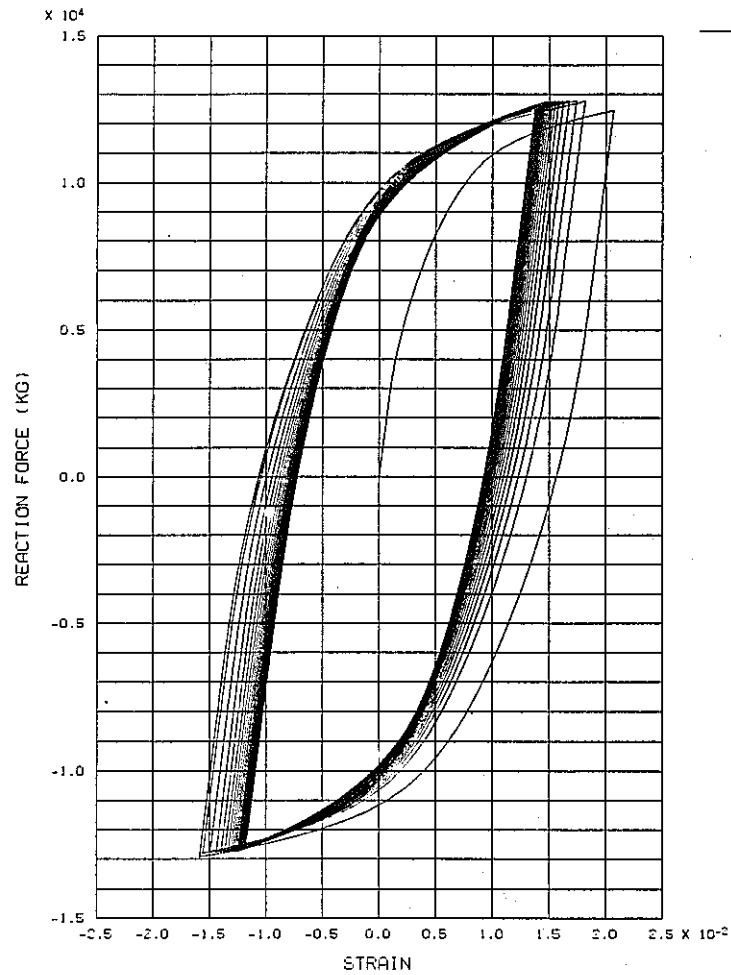
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-22:DU=0.44MM)

Fig. 4.2-17 Load-Displacement. Relationship
(CPVT No. 4 Analysis)



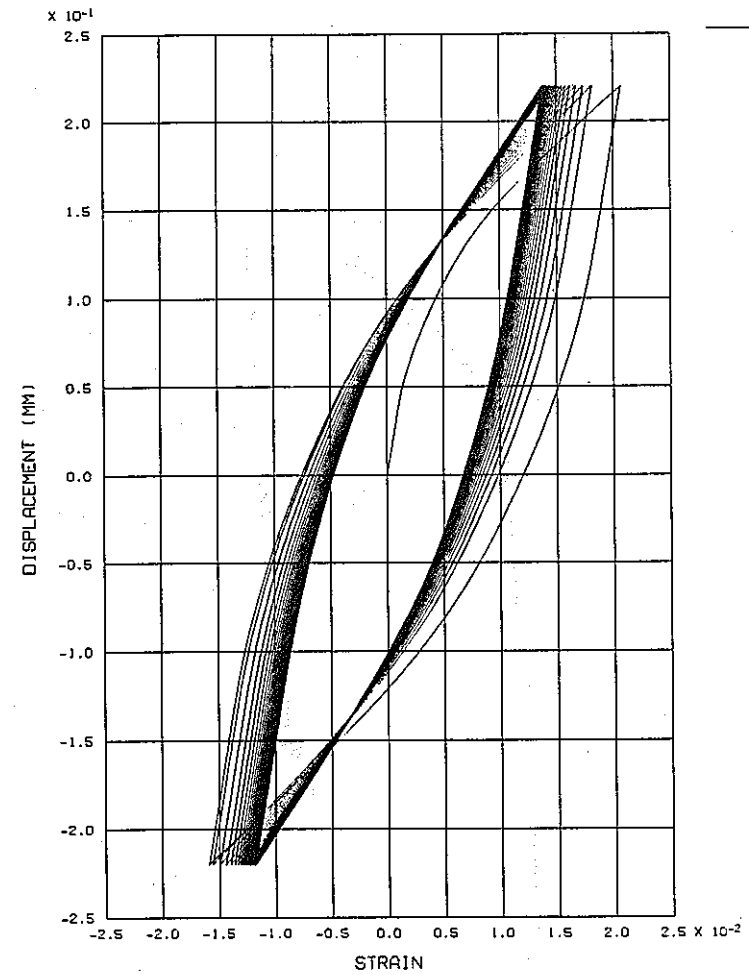
SIG-Y - EPS-Y RELATIONSHIP (A: 0.11MM FROM EDGE)
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-22:DU=0.44MM)

Fig. 4.2-18 Stress-Strain Relationship at Slet Tip
(CPVT No. 4 Analysis)



P - EPS-Y RELATIONSHIP (A: 0.11MM FROM EDGE)
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-22:DU=0.44MM)

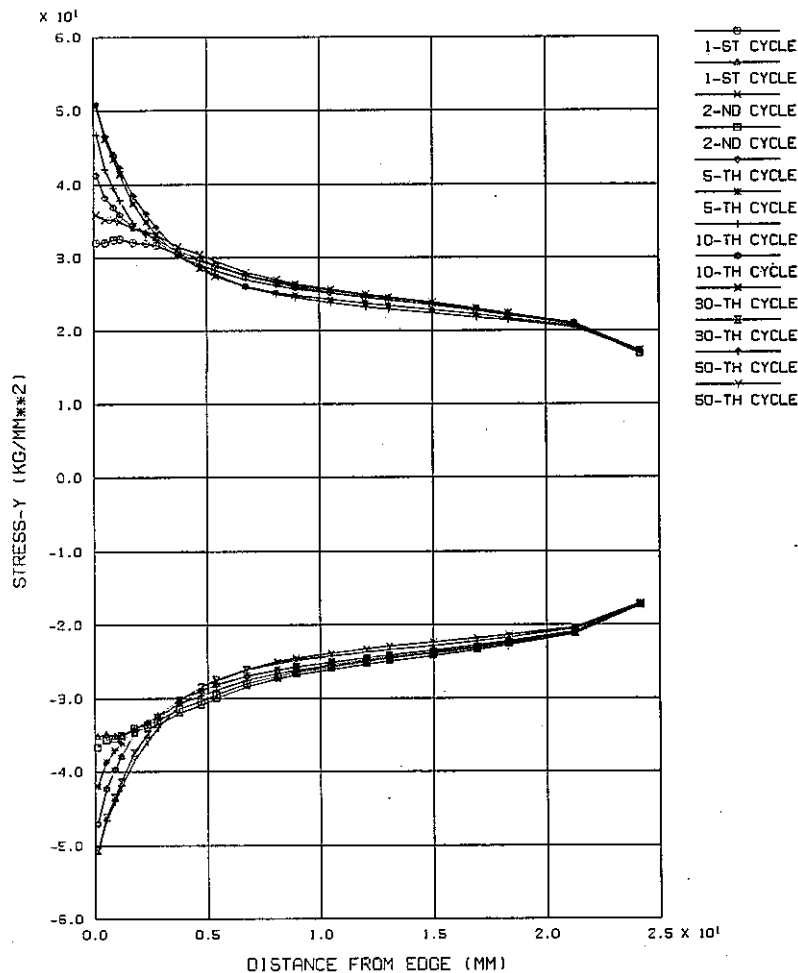
Fig. 4.2-19 Load-Strain Relationship at Slit Tip
(CPVT No. 4 Analysis)



U - EPS-Y RELATIONSHIP (A: 0.11MM FROM EDGE)
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-22:DU=0.44MM)

Fig. 4.2-20 Displacement-Strain Relationship at Slit Tip
(CPVT No. 4 Analysis)

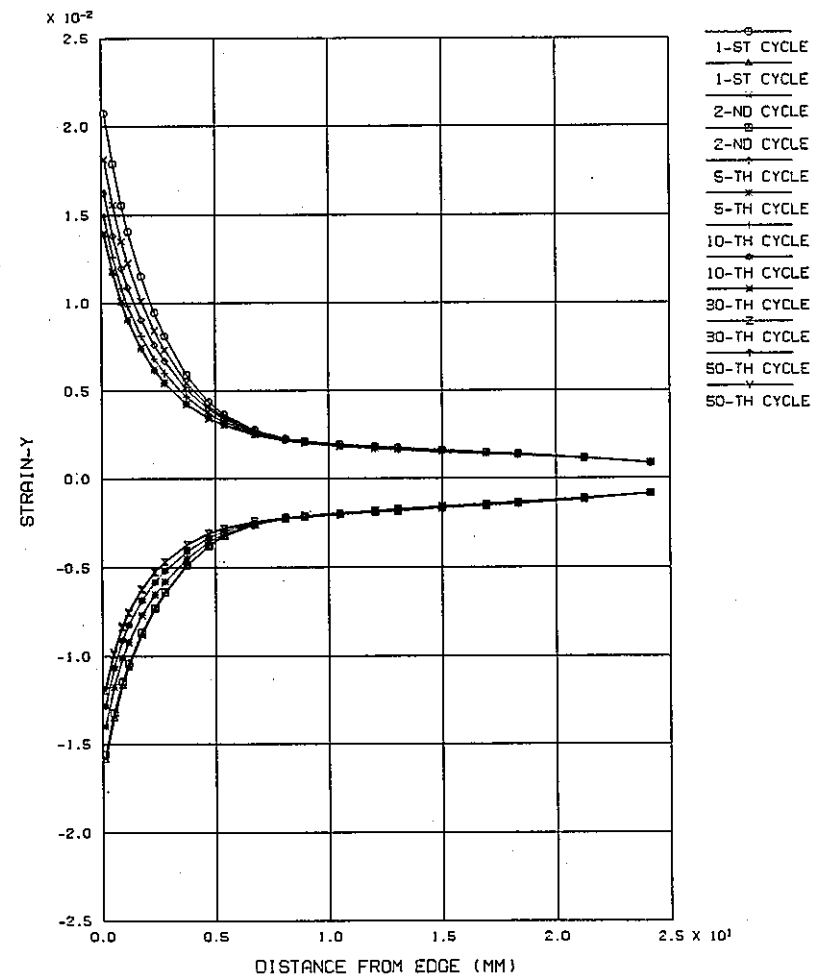
FINAS STATIC ANALYSIS



STRESS DISTRIBUTION AT CENTER LINE
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-22:DU=0.44MM)

Fig. 4.2-21 Stress Range at Ligament (CPVT No.4 Analysis)

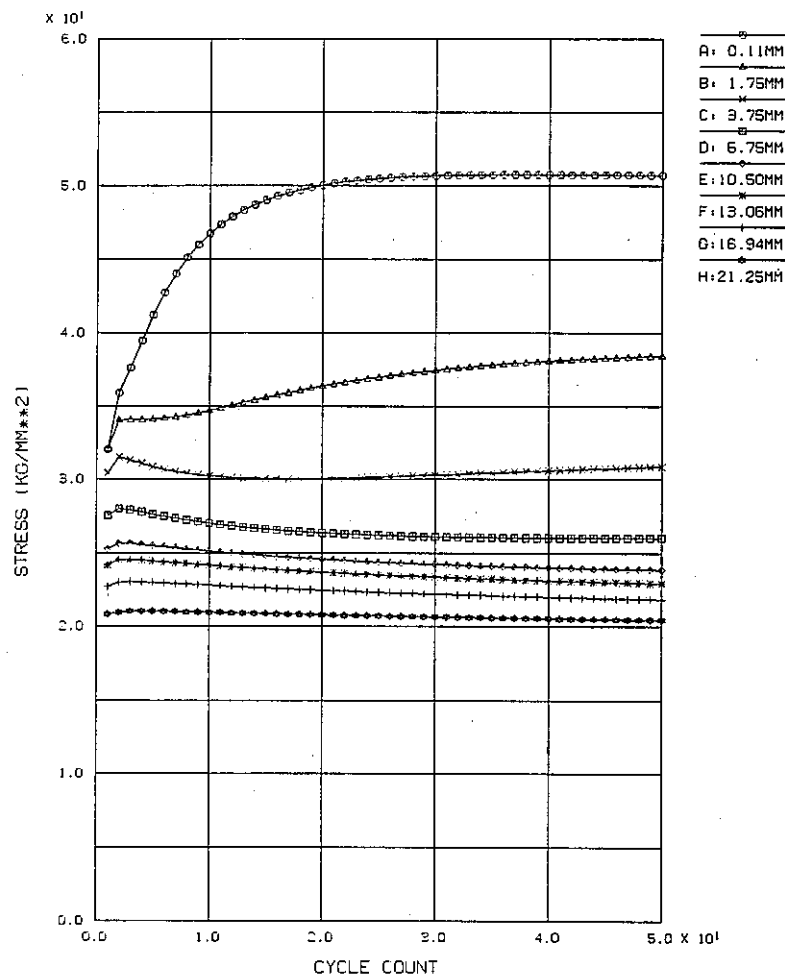
FINAS STATIC ANALYSIS



STRAIN DISTRIBUTION AT CENTER LINE
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-22:DU=0.44MM)

Fig. 4.2-22 Strain Range at Ligament (CPVT No.4 Analysis)

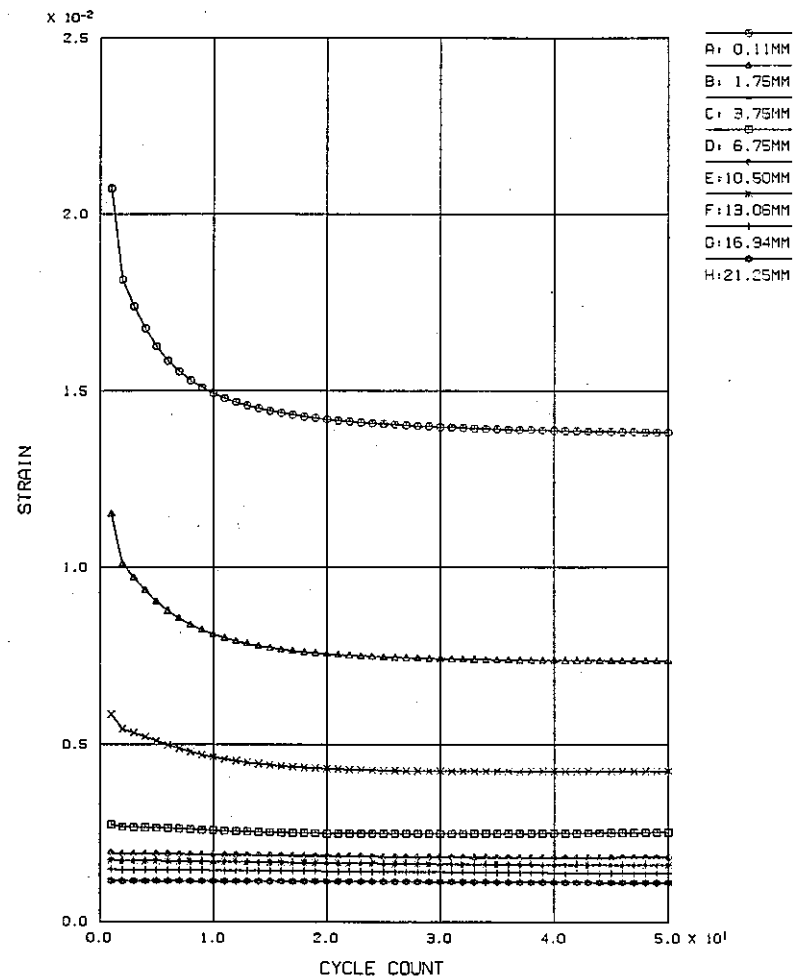
FINAS STATIC ANALYSIS



PEAK STRESS HISTORIY (TENSION +)
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-22:DU=0.44MM)

Fig. 4.2-23 Peak Stress History at Ligament
(CPVT No. 4 Analysis)

FINAS STATIC ANALYSIS



PEAK STRAIN HISTORIY (TENSION +)
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-22:DU=0.44MM)

Fig. 4.2-24 Peak Strain History at Ligament
(CPVT No. 4 Analysis)

FINAS STATIC ANALYSIS
DEFORMED SHAPE

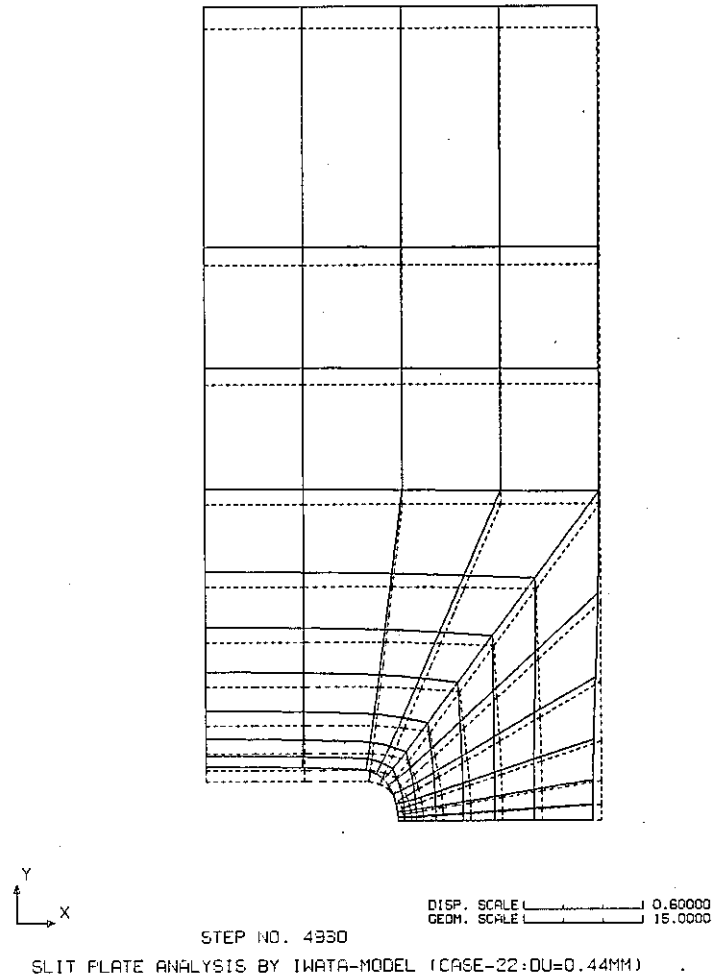


Fig. 4.2-25 Deformed Shape (CPVT No.4 Analysis, 50Cycle)

FINAS STATIC ANALYSIS
VON MISES STRESS

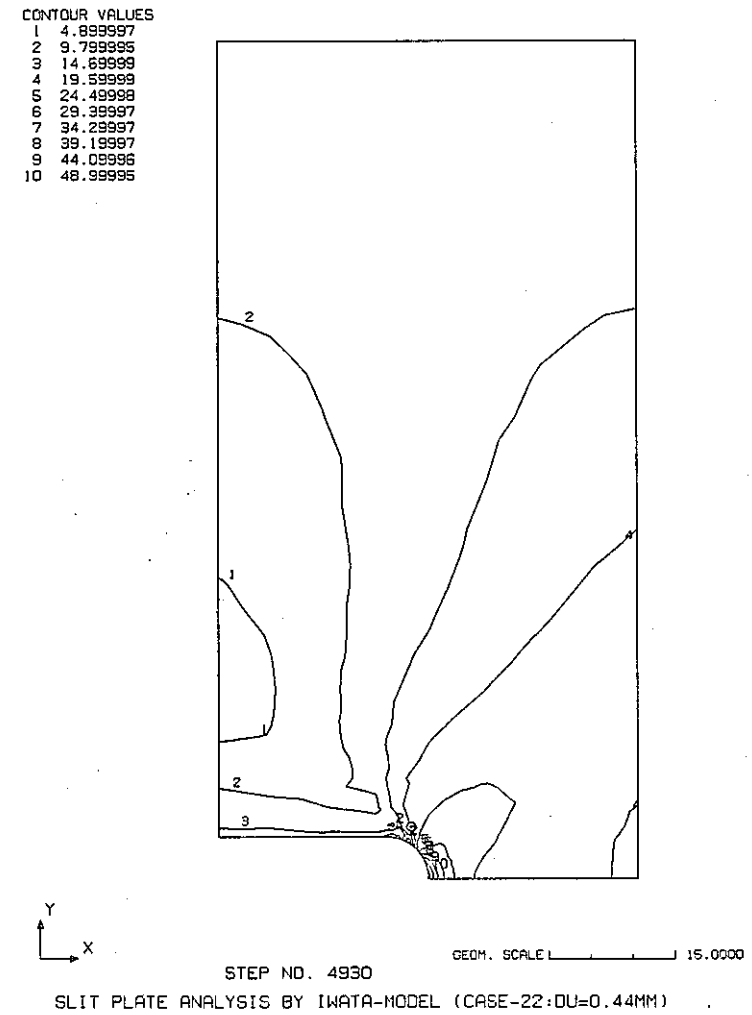
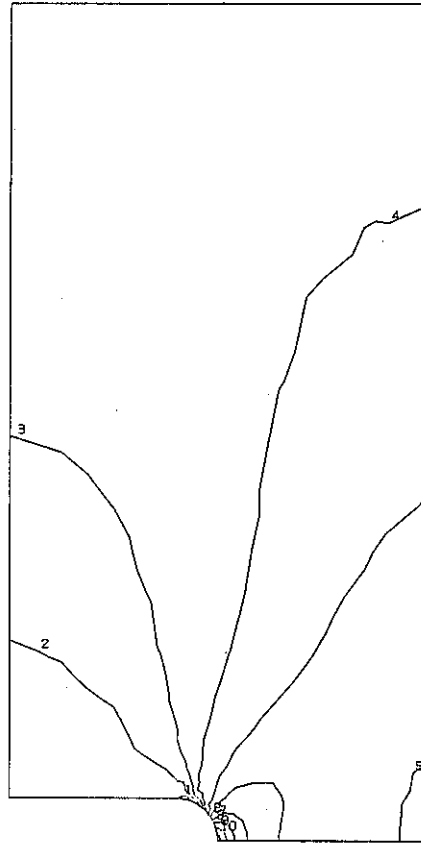


Fig. 4.2-26 Mises Stress Contours (CPVT No.4 Analysis, 50Cycle)

FINAS STATIC ANALYSIS
STRESS COMPONENT 2

CONTOUR VALUES
1 -3.40000
2 2.99999
3 8.19999
4 13.9999
5 19.7999
6 25.5999
7 31.3999
8 37.1999
9 42.9999
10 48.7999



Y
X

STEP NO. 4930

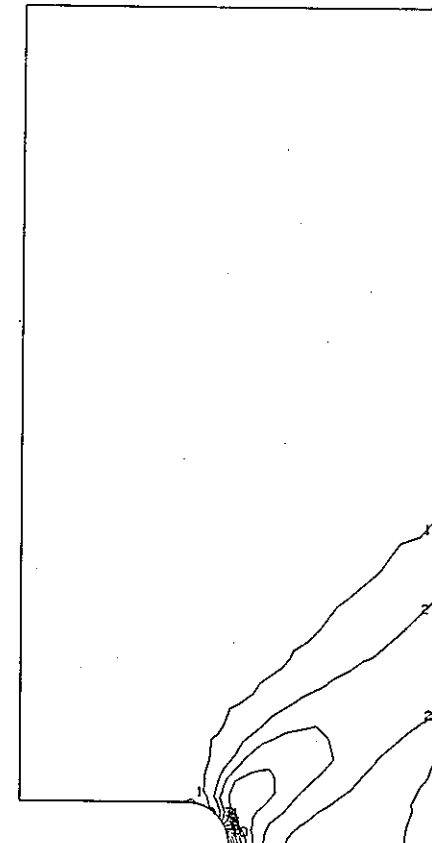
GEOM. SCALE 15.0000

SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-22:DU=0.44MM)

Fig. 4.2-27 σ_y Contours (CPVT No.4 Analysis, 50Cycle)

FINAS STATIC ANALYSIS
PLASTIC STRAIN COMPONENT 2

CONTOUR VALUES
1 1.000-04
2 1.300-03
3 2.500-03
4 3.700-03
5 4.900-03
6 5.100-03
7 7.300-03
8 8.500-03
9 9.700-03
10 1.090-02



Y
X

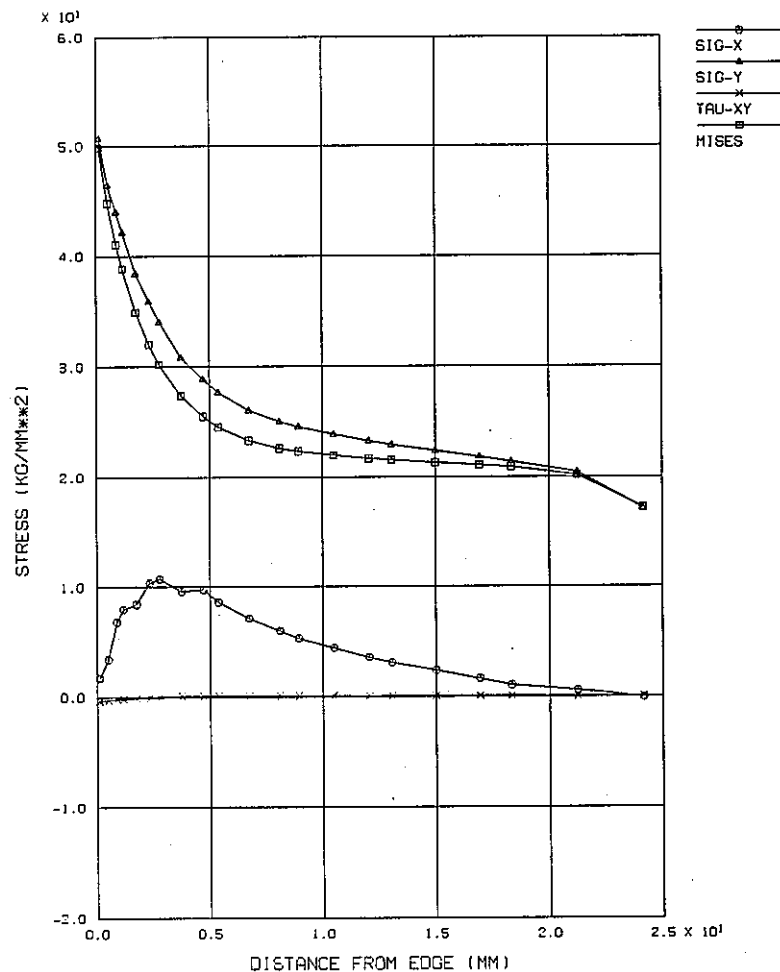
STEP NO. 4930

GEOM. SCALE 15.0000

SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-22:DU=0.44MM)

Fig. 4.2-28 ϵ_y Contours (CPVT No.4 Analysis, 50Cycle)

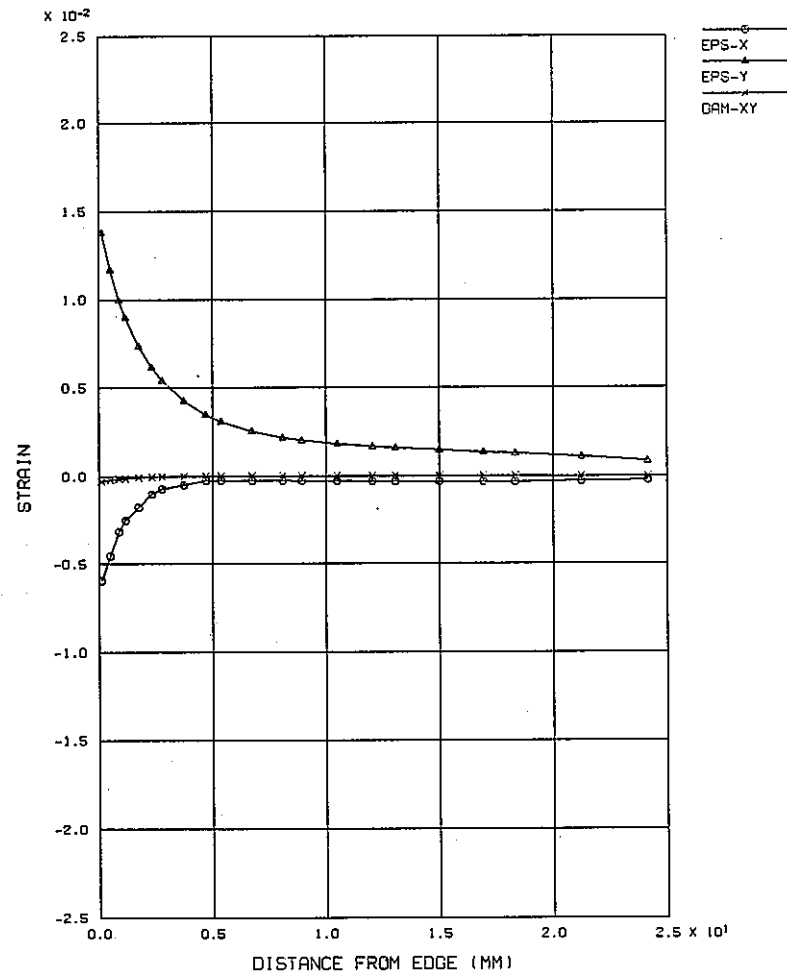
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 4930



STRESS DISTRIBUTION AT CENTER LINE
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-22:DU=0.44MM)

Fig. 4.2-29 Stress Distribution at Ligament
(CPVT No.4 Analysis, 50Cycle)

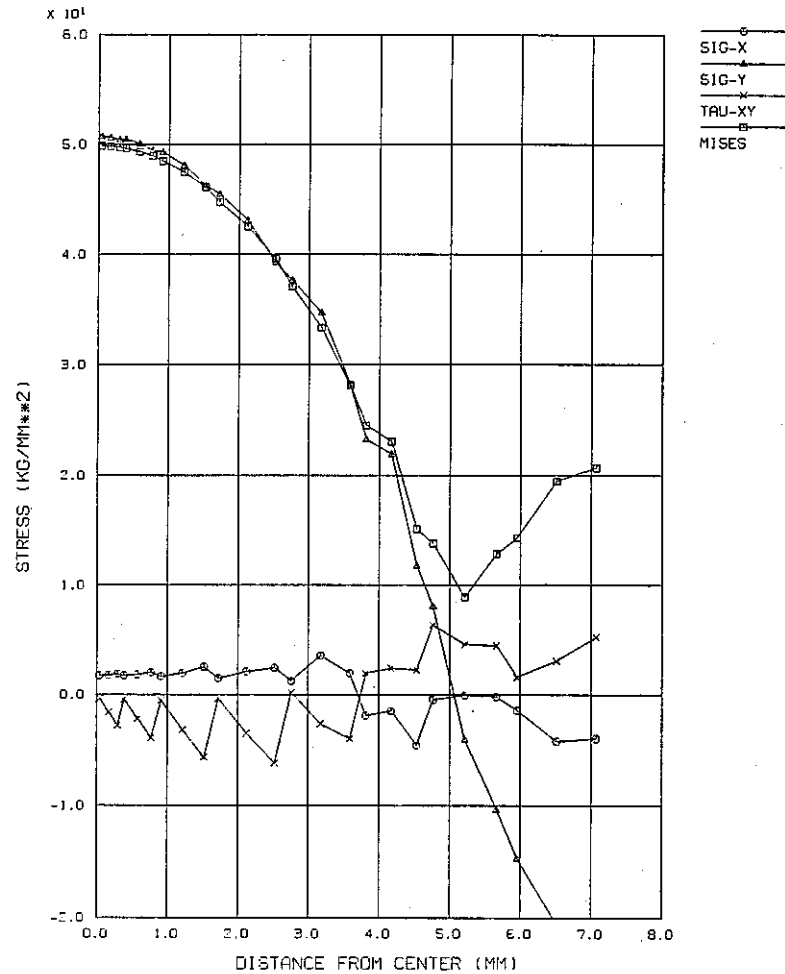
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 4930



STRAIN DISTRIBUTION AT CENTER LINE
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-22:DU=0.44MM)

Fig. 4.2-30 Strain Distribution at Ligament
(CPVT No.4 Analysis, 50Cycle)

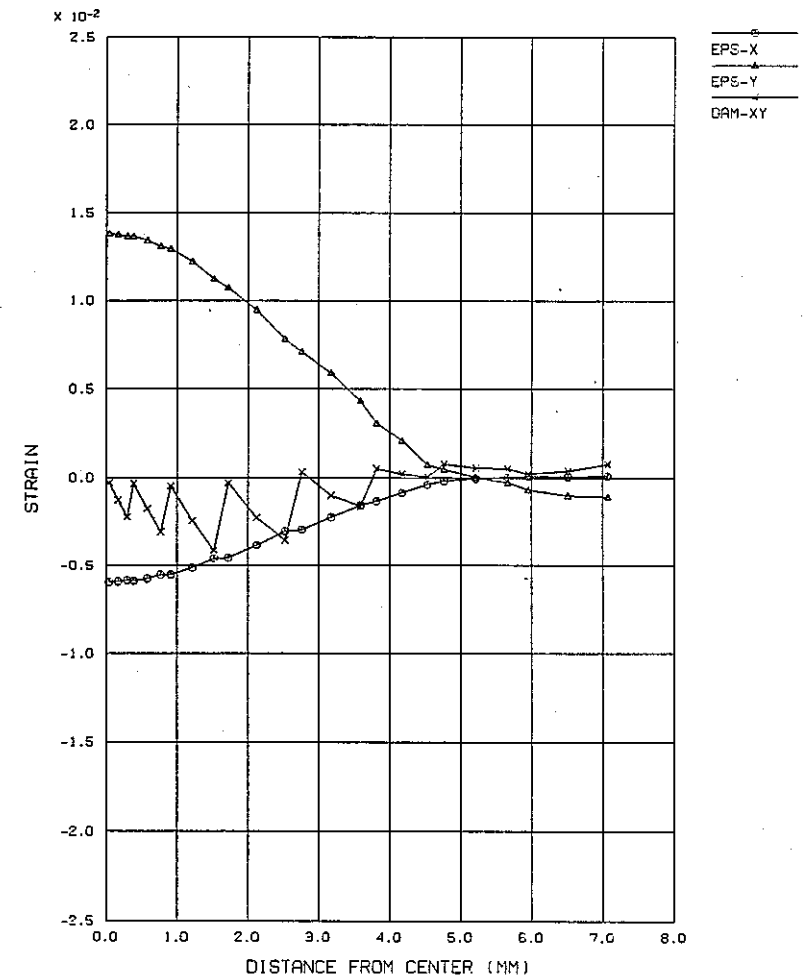
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 4930



STRESS DISTRIBUTION AT ROUNDING EDGE
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-22·DU=0.44MM)

Fig. 4.2-31 Stress Distribution at Slit Edge
(CPVT No.4 Analysis, 50Cycle)

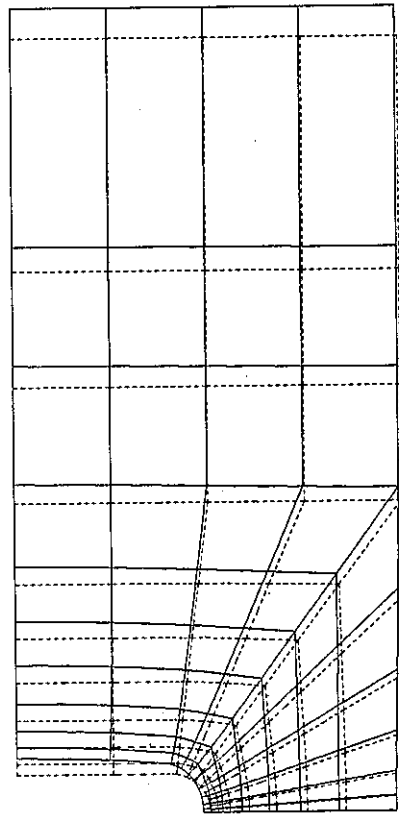
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 4930



STRAIN DISTRIBUTION AT ROUNDING EDGE
SLIT PLATE ANALYSIS BY IWATA-MODEL (CASE-22·DU=0.44MM)

Fig. 4.2-32 Strain Distribution at Slit Edge
(CPVT No.4 Analysis, 50Cycle)

FINAS STATIC ANALYSIS
DEFORMED SHAPE



DISP. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 4.00-02
GEOM. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 15.0000

STEP NO. 1

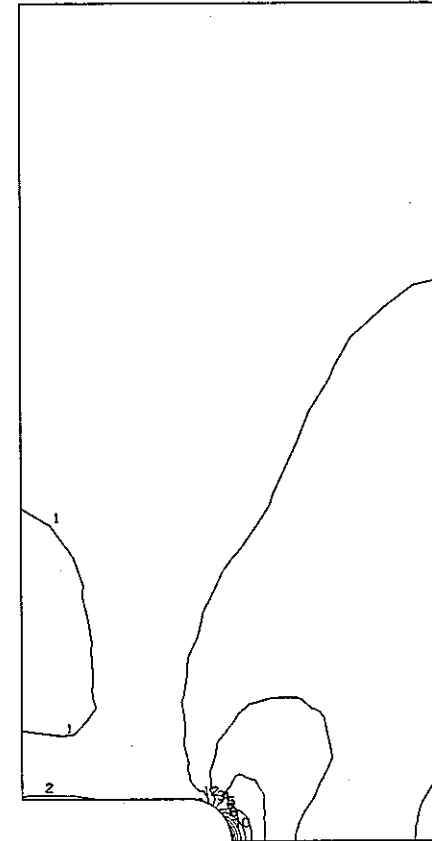
CPVT ANALYSIS (ELASTIC)

(3-D MODEL) .. SURFACE .. // U=0.02MM //

Fig. 4.3-1 Deformed Shape (Elastic 3-D Analysis U=0.02mm)

FINAS STATIC ANALYSIS
VON MISES STRESS

CONTOUR VALUES
1 0.800000
2 1.799999
3 2.799998
4 3.799997
5 4.799996
6 5.799995
7 6.799994
8 7.799993
9 8.799992
10 9.799991



GEOM. SCALE $\overline{\hspace{1cm}}$ 15.0000

STEP NO. 1

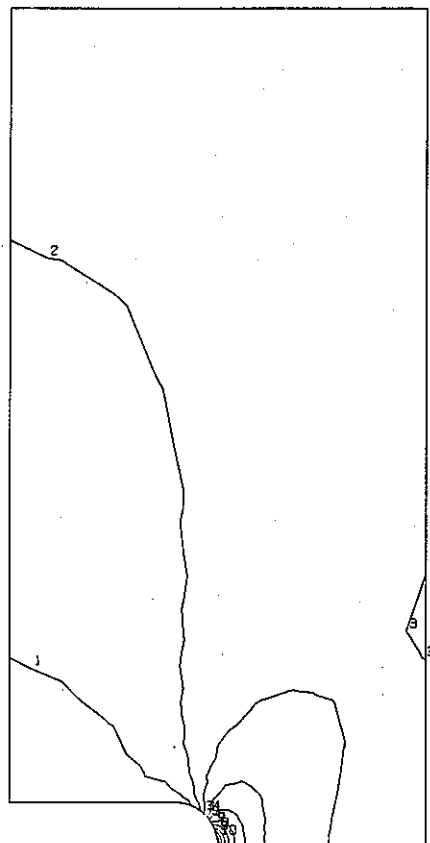
CPVT ANALYSIS (ELASTIC)

(3-D MODEL) .. SURFACE .. // U=0.02MM //

Fig. 4.3-2 Mises Stress Contours
(Elastic 3-D Analysis U=0.02mm)

FINAS STATIC ANALYSIS
STRESS COMPONENT 2

CONTOUR VALUES
1 0.300000
2 1.399998
3 2.499998
4 3.599997
5 4.699996
6 5.799996
7 6.899995
8 7.999995
9 9.099994
10 10.19999



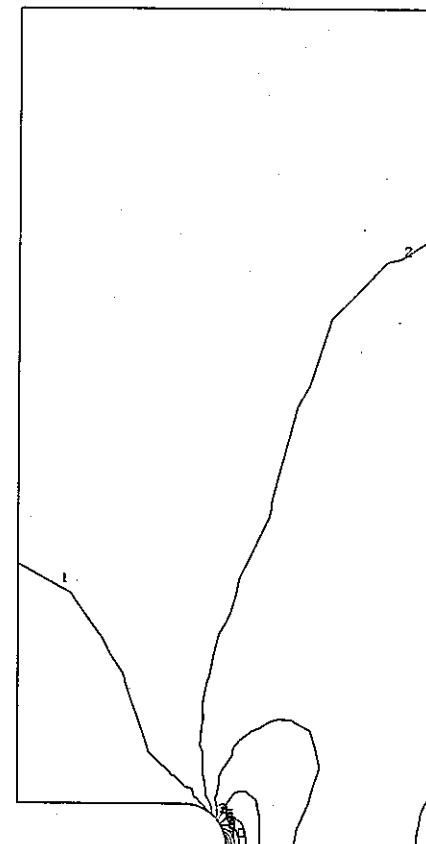
STEP NO. 1
CPVT ANALYSIS (ELASTIC)
(3-D MODEL) .. SURFACE .. // U=0.02MM //

GEOM. SCALE 15.0000

Fig. 4.3-3 σ_y Contours (Elastic 3-D Analysis U=0.02mm)

FINAS STATIC ANALYSIS
TOTAL STRAIN COMPONENT 2

CONTOUR VALUES
1 3.300-05
2 8.700-05
3 1.410-04
4 1.950-04
5 2.490-04
6 3.030-04
7 3.570-04
8 4.110-04
9 4.650-04
10 5.190-04

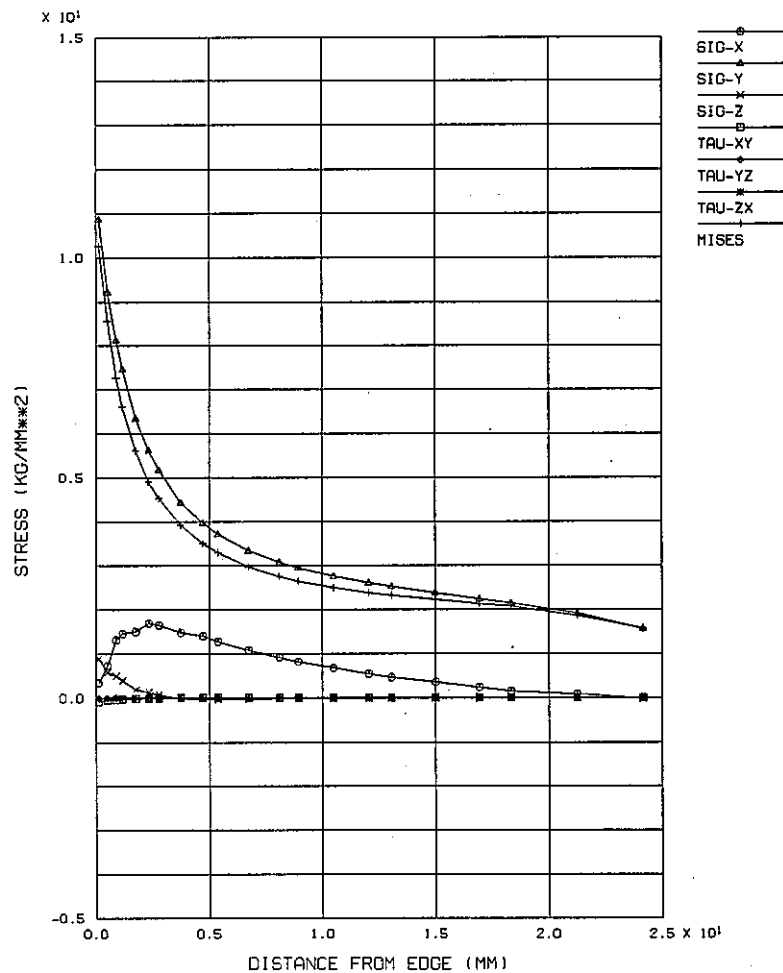


STEP NO. 1
CPVT ANALYSIS (ELASTIC)
(3-D MODEL) .. SURFACE .. // U=0.02MM //

GEOM. SCALE 15.0000

Fig. 4.3-4 ϵ_y Contours (Elastic 3-D Analysis U=0.02mm)

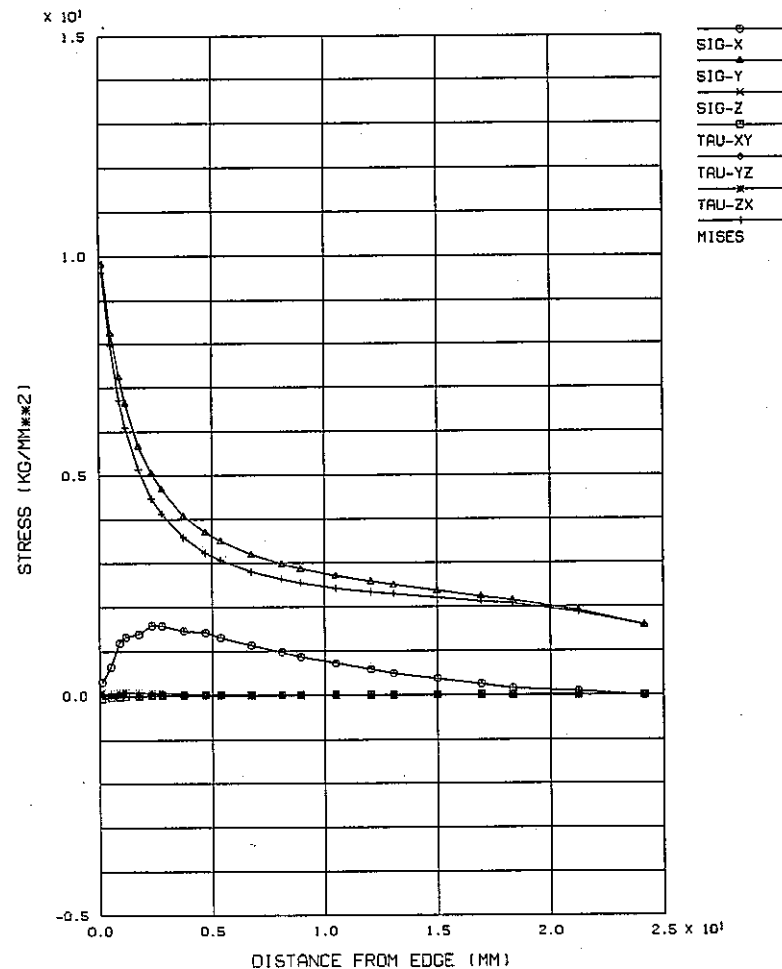
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 1



STRESS DISTRIBUTION OF LIGAMENT (3-D MODEL,CENTER)
CPVT ANALYSIS (ELASTIC) // U=0.02MM //

Fig. 4.3-5 Stress Distribution at Center
(Elastic 3-D Analysis U=0.02mm)

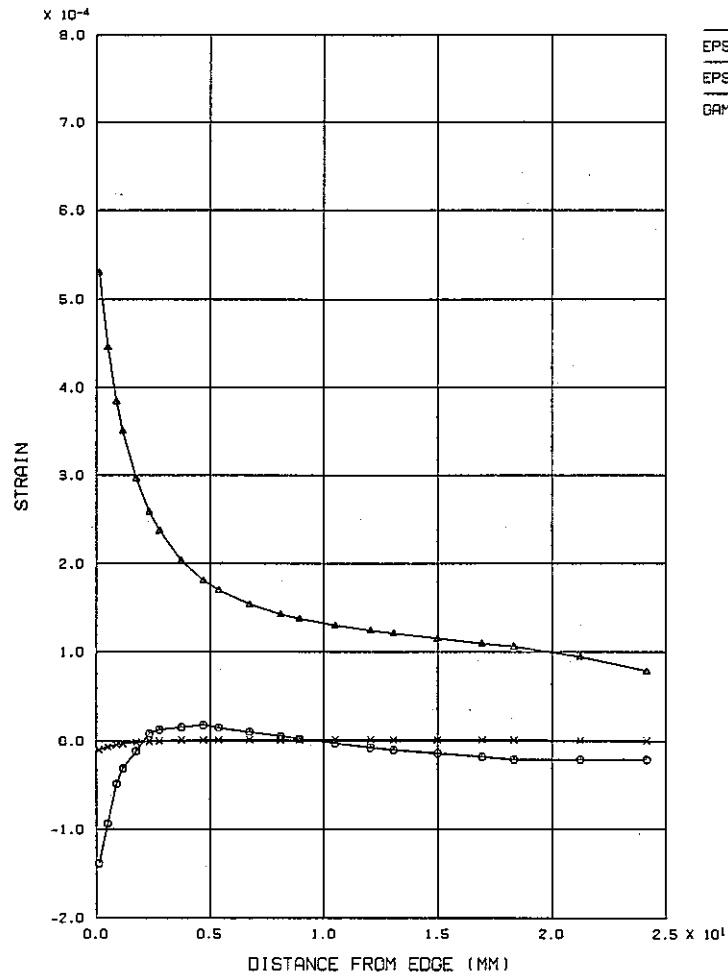
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 1



STRESS DISTRIBUTION OF LIGAMENT (3-D MODEL,SURFACE)
CPVT ANALYSIS (ELASTIC) // U=0.02MM //

Fig. 4.3-6 Stress Distribution at Surface
(Elastic 3-D Analysis U=0.02mm)

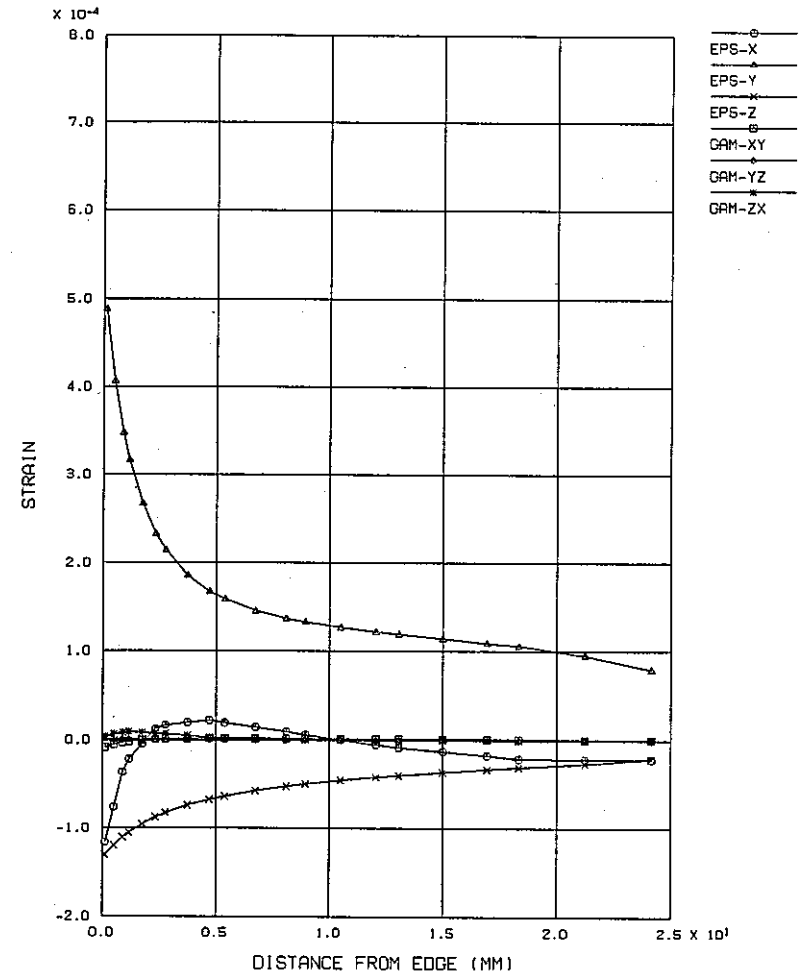
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 1



STRAIN DISTRIBUTION OF LIGAMENT (3-D MODEL,CENTER)
CPVT ANALYSIS (ELASTIC) // U=0.02MM //

Fig.4.3-7 Strain Distribution at Center
(Elastic 3-D Analysis U=0.02mm)

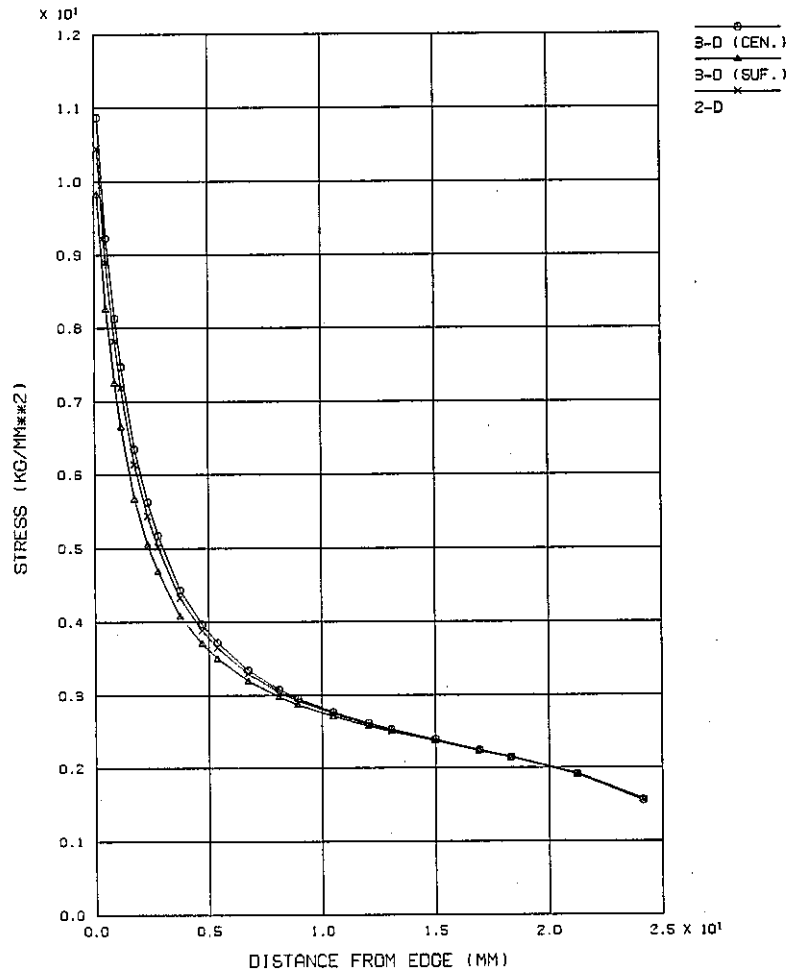
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 1



STRAIN DISTRIBUTION OF LIGAMENT (3-D MODEL,SURFACE)
CPVT ANALYSIS (ELASTIC) // U=0.02MM //

Fig.4.3-8 Strain Distribution at Surface
(Elastic 3-D Analysis U=0.02mm)

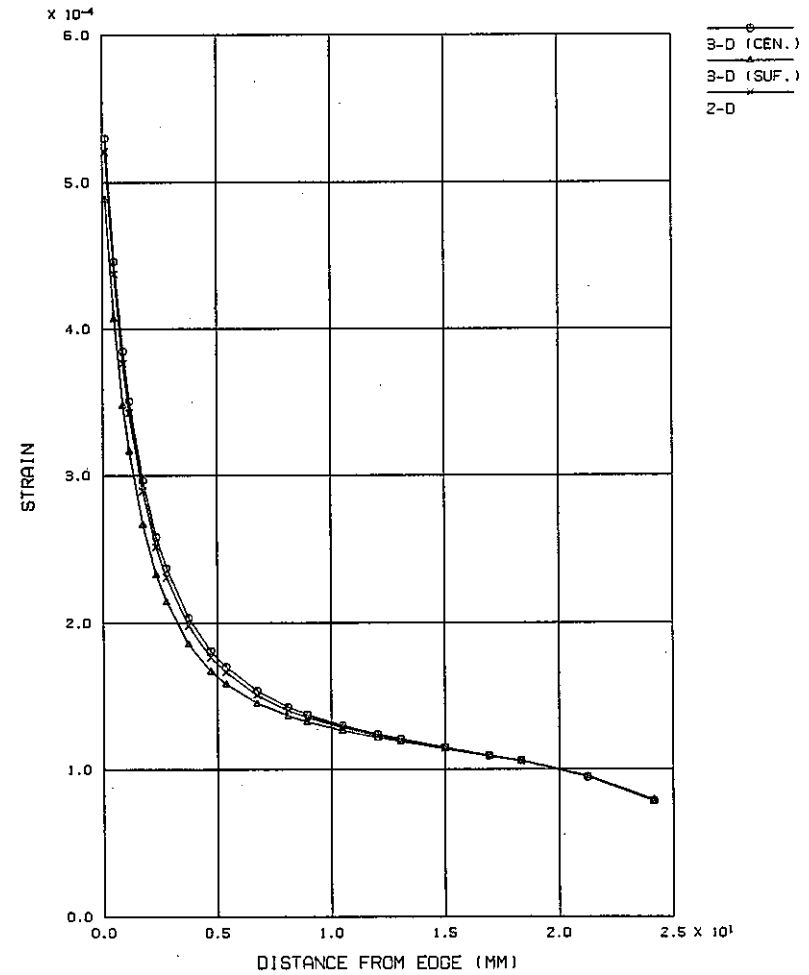
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 1



SIG-Y DISTRIBUTION AT LIGAMENT
CPVT ANALYSIS (ELASTIC) // U=0.02MM //

Fig. 4.3-9 σ_y Distribution at Ligament
(Elastic Analysis U=0.02mm)

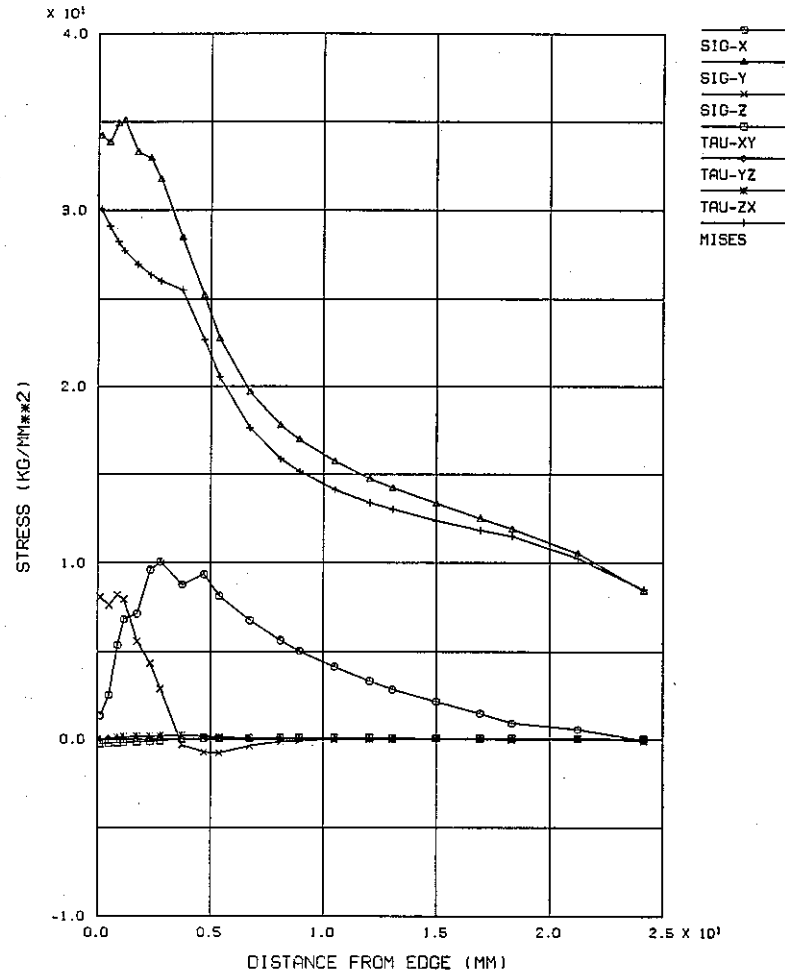
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 1



EPS-Y DISTRIBUTION AT LIGAMENT
CPVT ANALYSIS (ELASTIC) // U=0.02MM //

Fig. 4.3-10 ϵ_y Distribution at Ligament
(Elastic Analysis U=0.02mm)

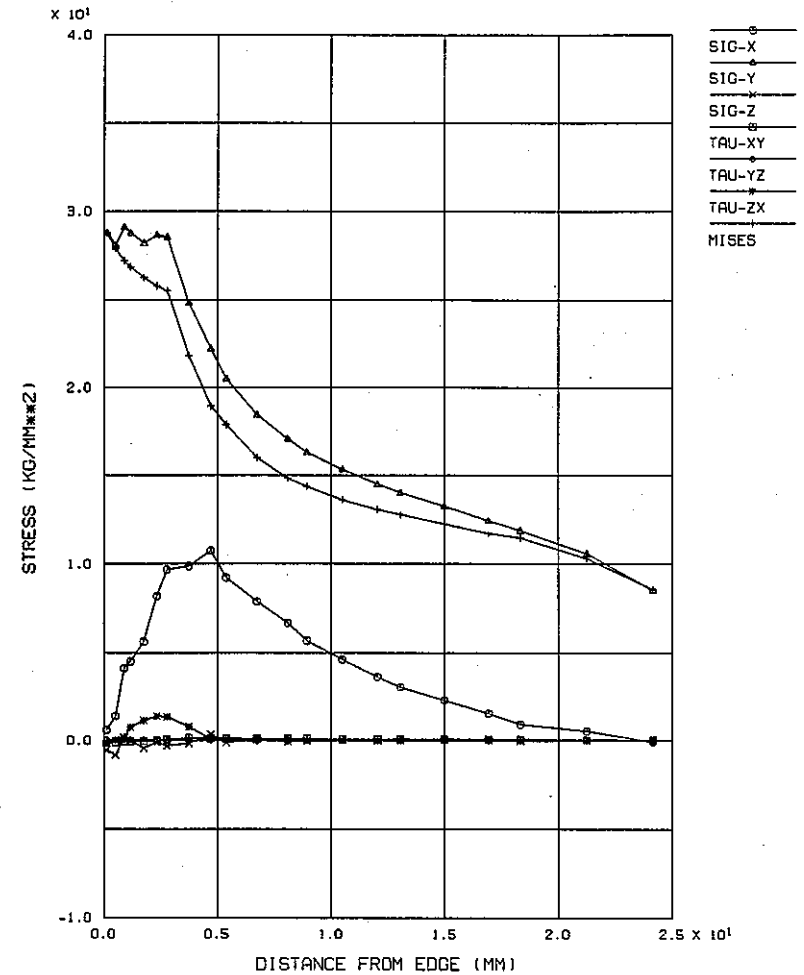
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 45



STRESS DISTRIBUTION OF LIGAMENT (3-D MODEL,CENTER)
CPVT ANALYSIS (BILINEAR HARDENING MODEL)
// U=0.055MM //

Fig. 4.3-11 Stress Distribution at Center
(Elastoplastic 3-D Analysis U=0.055mm)

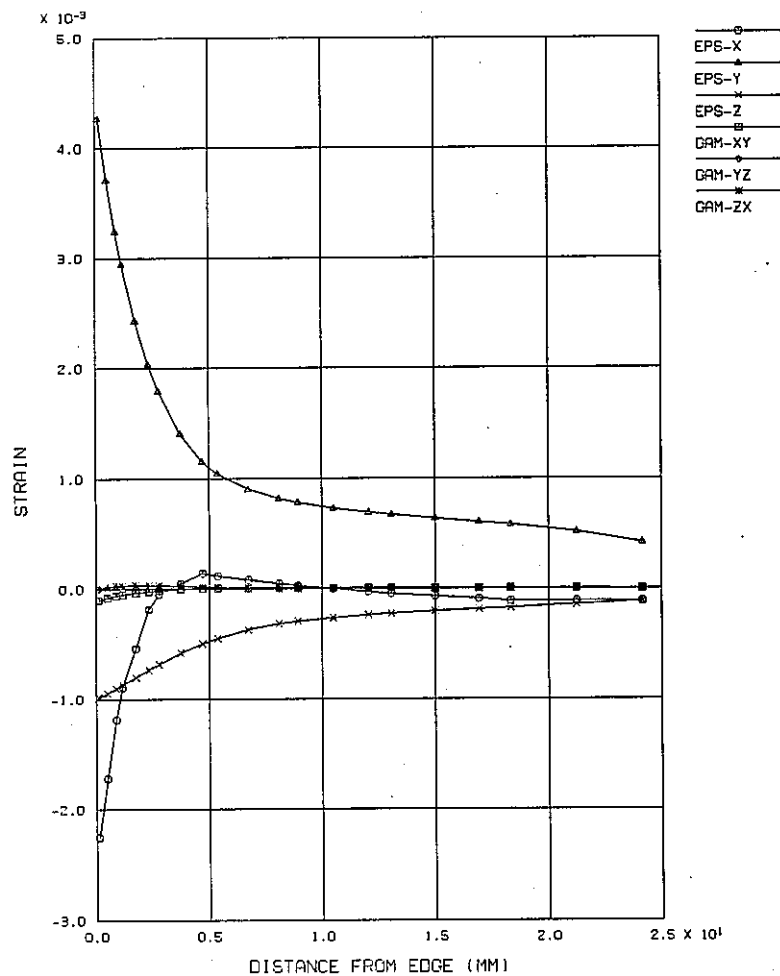
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 45



STRESS DISTRIBUTION OF LIGAMENT (3-D MODEL,SURFACE)
CPVT ANALYSIS (BILINEAR HARDENING MODEL)
// U=0.055MM //

Fig. 4.3-12 Stress Distribution at Surface
(Elastoplastic 3-D Analysis U=0.055mm)

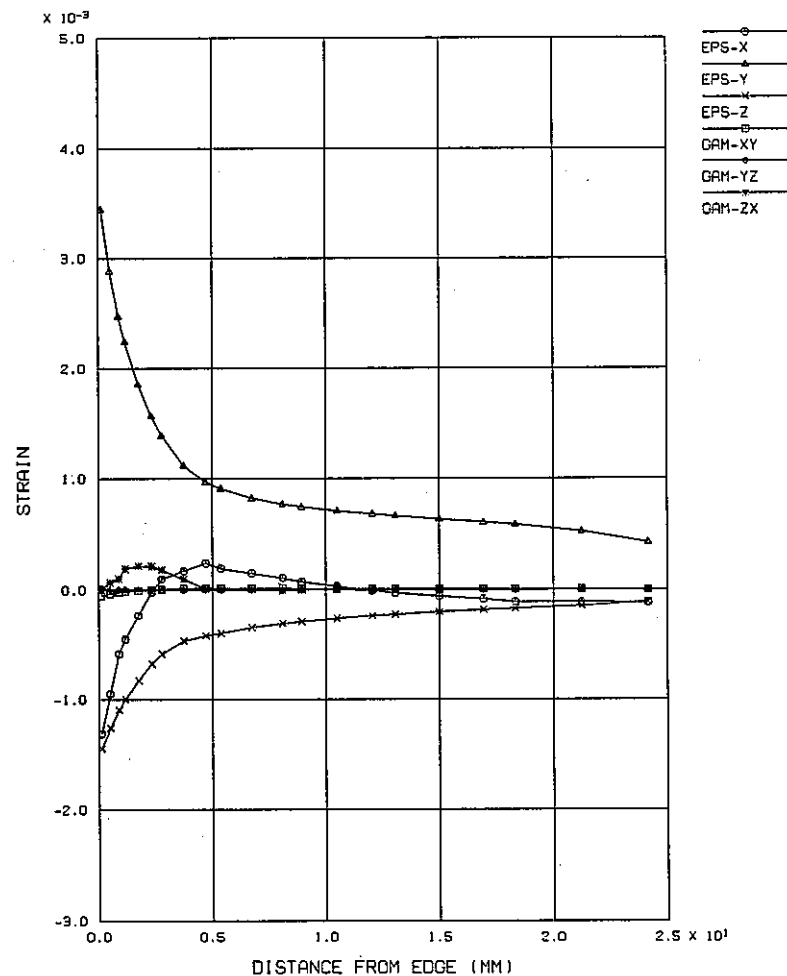
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 45



STRAIN DISTRIBUTION OF LIGAMENT (3-D MODEL,CENTER)
CPVT ANALYSIS (BILINEAR HARDENING MODEL)
// U=0.055MM //

Fig. 4.3-13 Strain Distribution at Center
(Elastoplastic 3-D Analysis U=0.055mm)

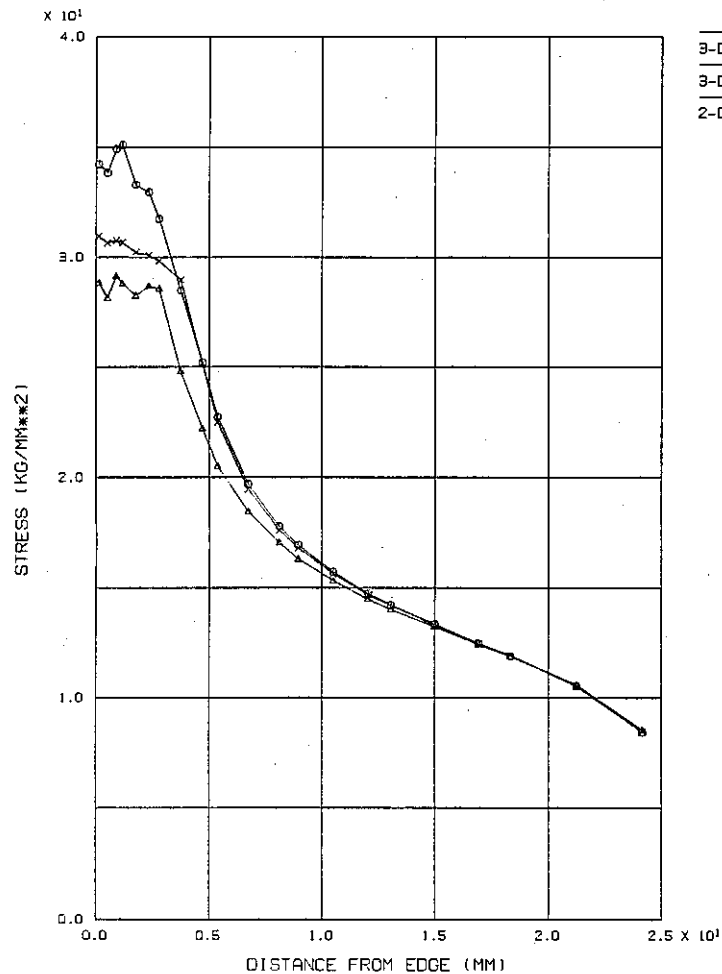
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 45



STRAIN DISTRIBUTION OF LIGAMENT (3-D MODEL,SURFACE)
CPVT ANALYSIS (BILINEAR HARDENING MODEL)
// U=0.055MM //

Fig. 4.3-14 Strain Distribution at Surface
(Elastoplastic 3-D Analysis U=0.055mm)

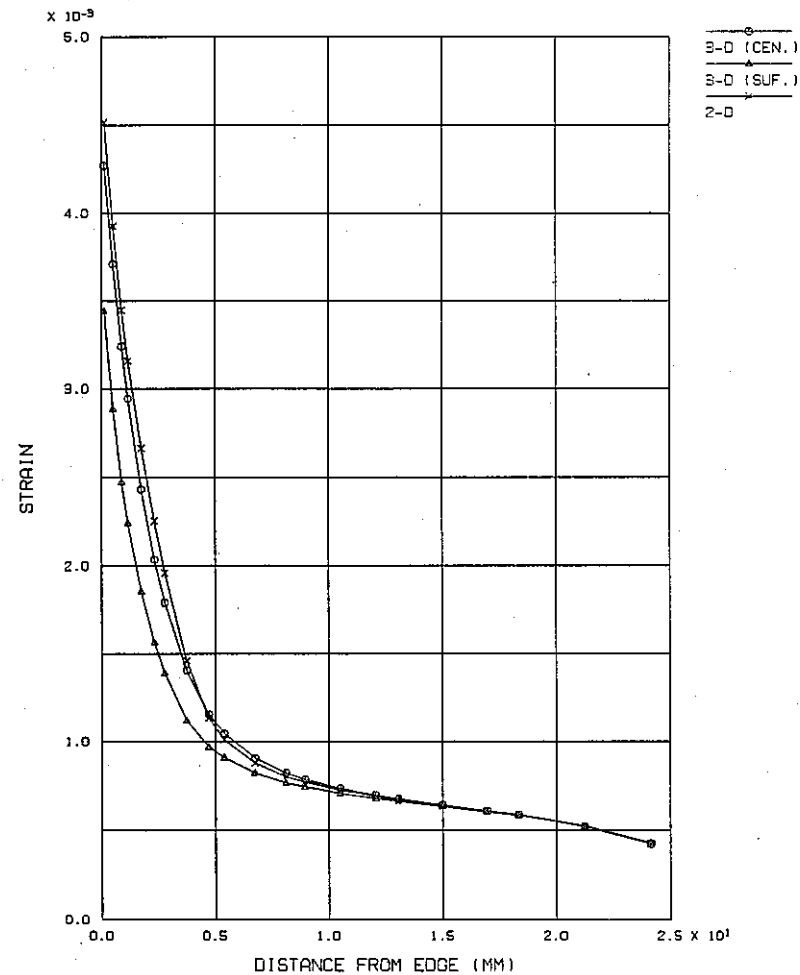
FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 45



SIG-Y DISTRIBUTION AT LIGAMENT
CPVT ANALYSIS (BILINEAR HARDENING MODEL)
// U=0.055MM //

Fig.4.3-15 σ_y Distribution at Ligament
(Elastoplastic Analysis $U=0.055\text{mm}$)

FINAS STATIC ANALYSIS
STEP NO. 45



EPS-Y DISTRIBUTION AT LIGAMENT
CPVT ANALYSIS (BILINEAR HARDENING MODEL)
// U=0.055MM //

Fig.4.3-16 ϵ_y Distribution at Ligament
(Elastoplastic Analysis $U=0.055\text{mm}$)

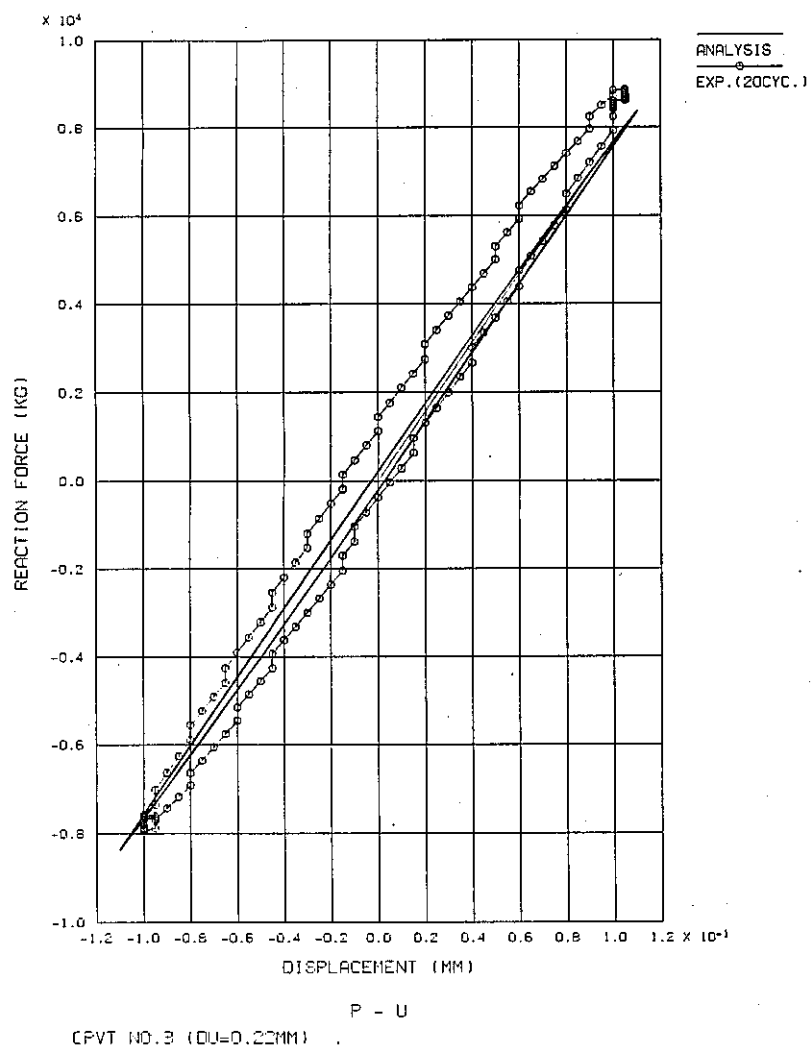


Fig. 5.2-1 Load Displacement Relationship
(Ana. & Exp. CPVT No.3)

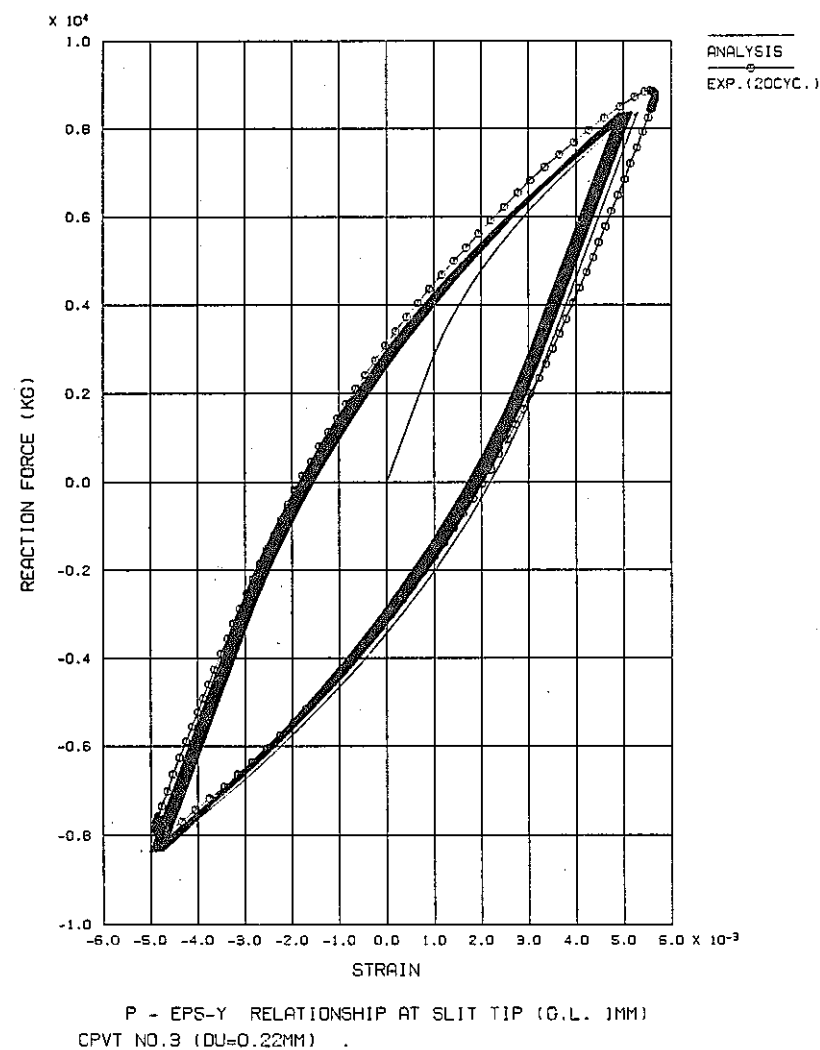
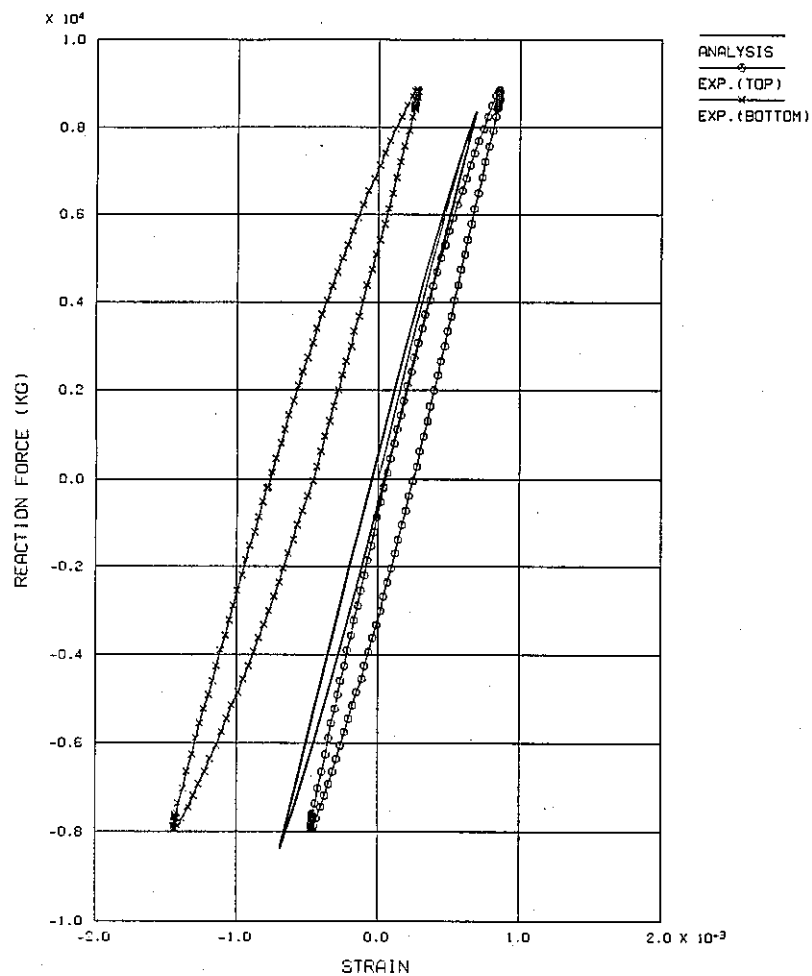
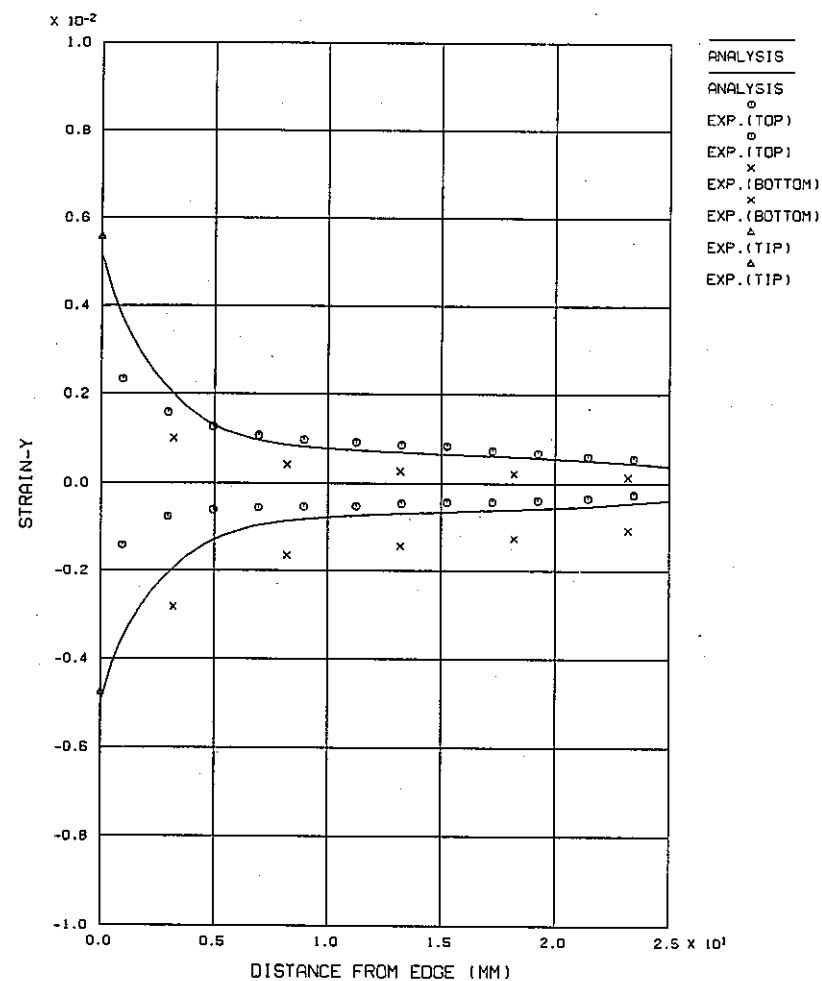


Fig. 5.2-2 Load Slit Tip Strain Relationship
(Ana. & Exp. CPVT No.3)



P - EPS-Y RELATIONSHIP AT LIGAMENT CENTER (13MM FROM EDGE)
CPVT NO.3 (DU=0.22MM)

Fig. 5.2-3 Load ligament Center Strain Relationship
(Ana. & Exp. CPVT No. 3)



STRAIN DISTRIBUTION OF LIGAMENT (20TH CYCLE, G.L. 1MM)
CPVT NO.3 (DU=0.22MM)

Fig. 5.2-4 Strain Range Distribution
(Ana. & Exp. CPVT No. 3)

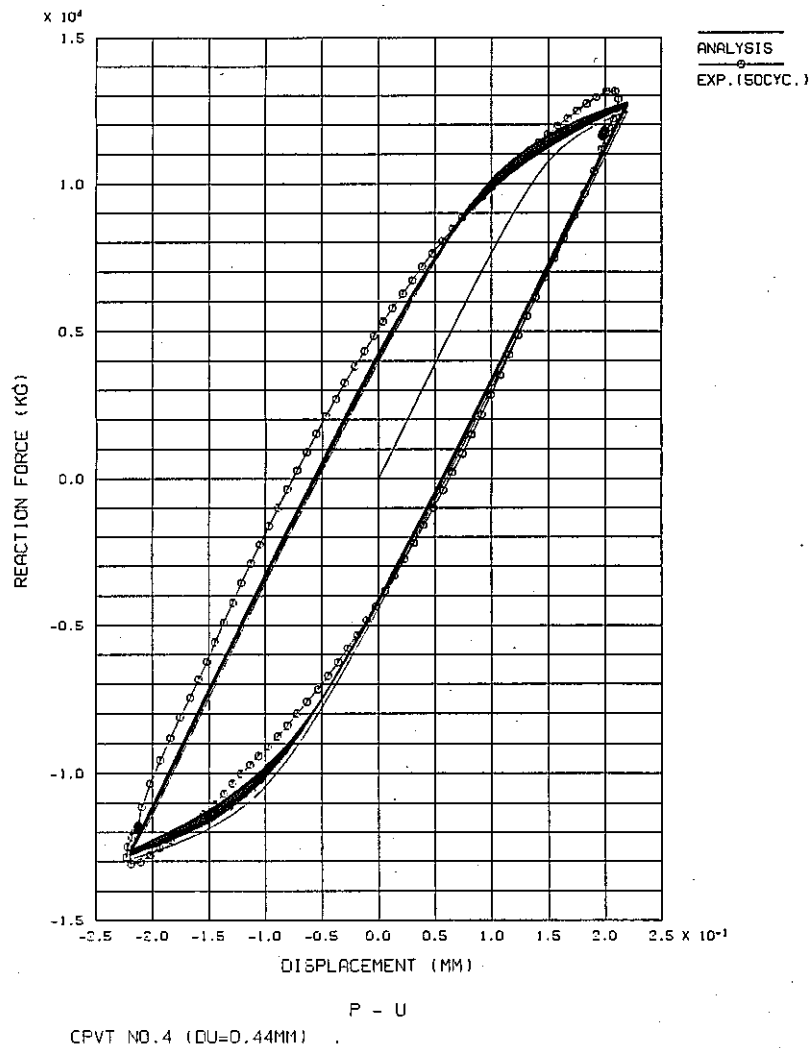


Fig. 5.3-1 Load Displacement Relationship
(Ana. & Exp. CPVT No. 4)

FINAS STATIC ANALYSIS

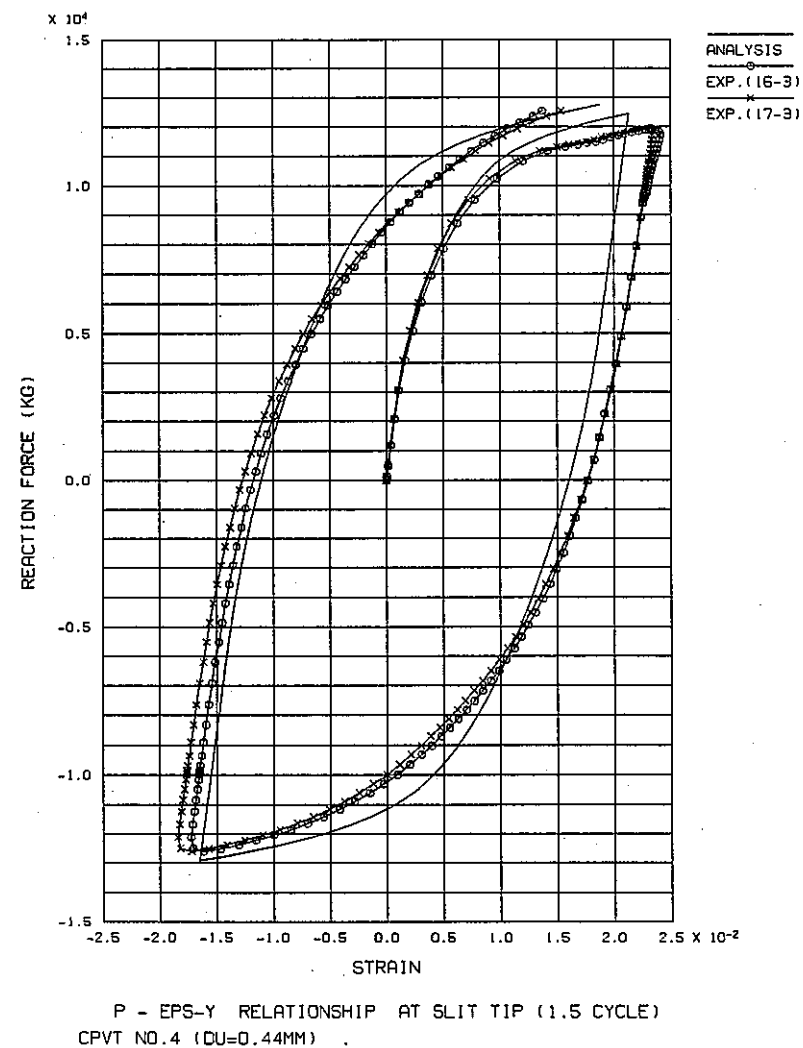
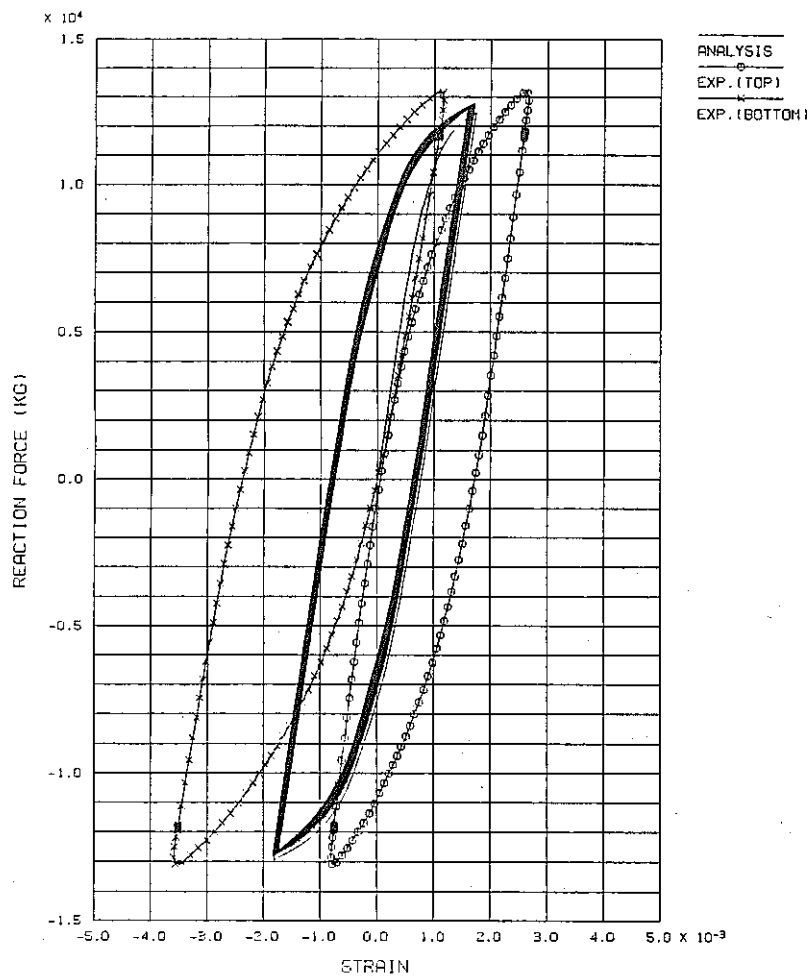
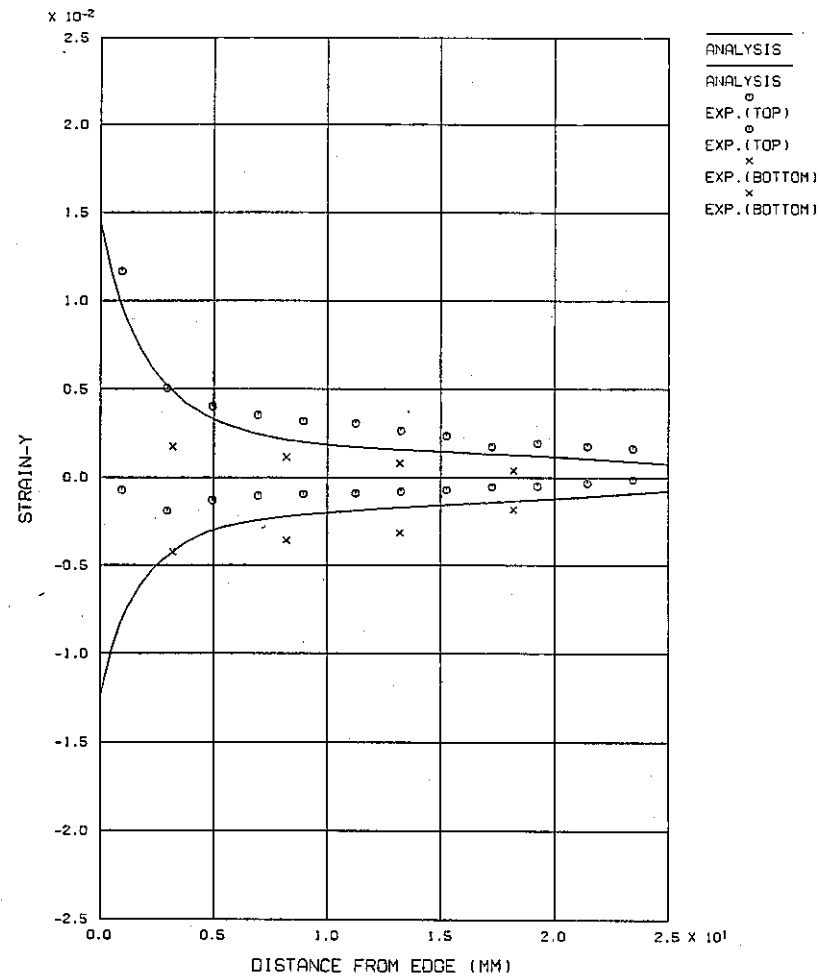


Fig. 5.3-2 Load Slit Tip Strain Relationship
(Ana. & Exp. CPVT No. 4)



P - EPS-Y RELATIONSHIP AT LIGAMENT CENTER (13MM FROM EDGE)
CPVT NO. 4 (DU=0.44MM)

Fig. 5.3-3 Load ligament Center Strain Relationship
(Ana. & Exp. CPVT No. 4)



STRAIN DISTRIBUTION OF LIGAMENT (50TH CYCLE, G.L. 1MM)
CPVT NO. 4 (DU=0.22MM)

Fig. 5.3-4 Strain Range Distribution
(Ana. & Exp. CPVT No. 4)

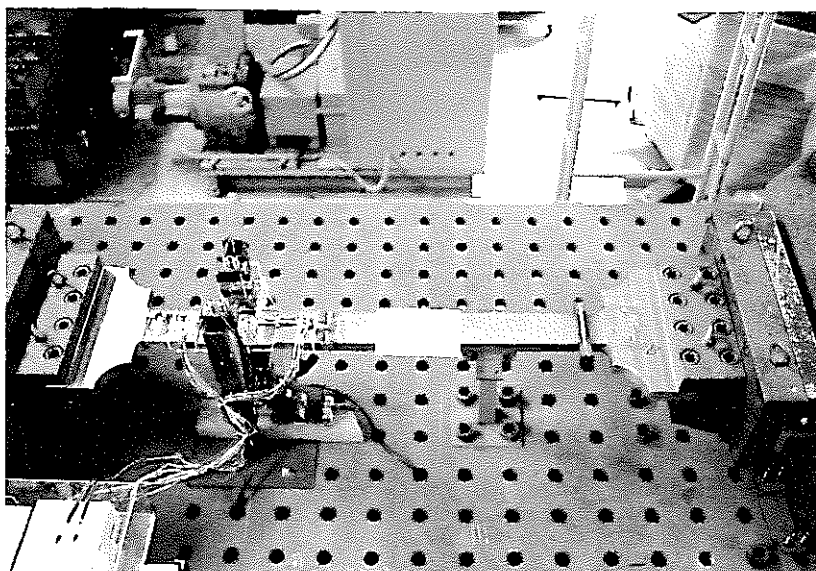
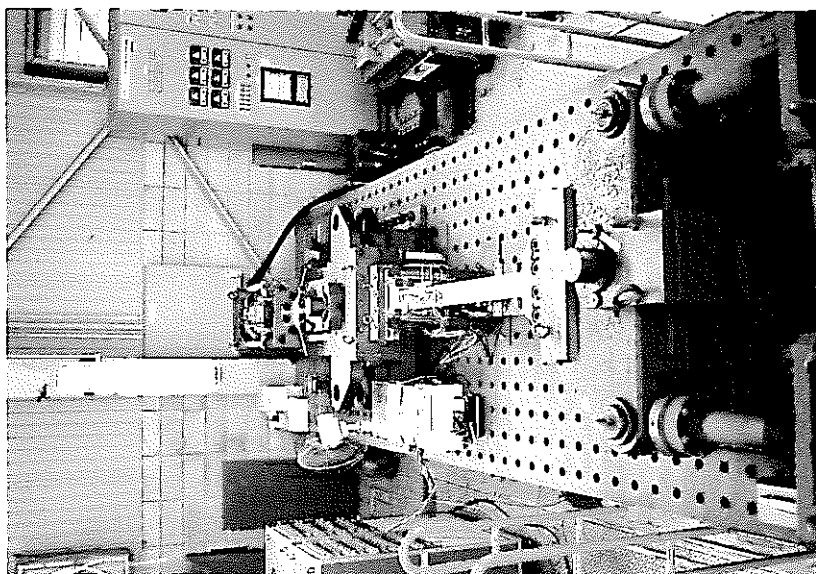
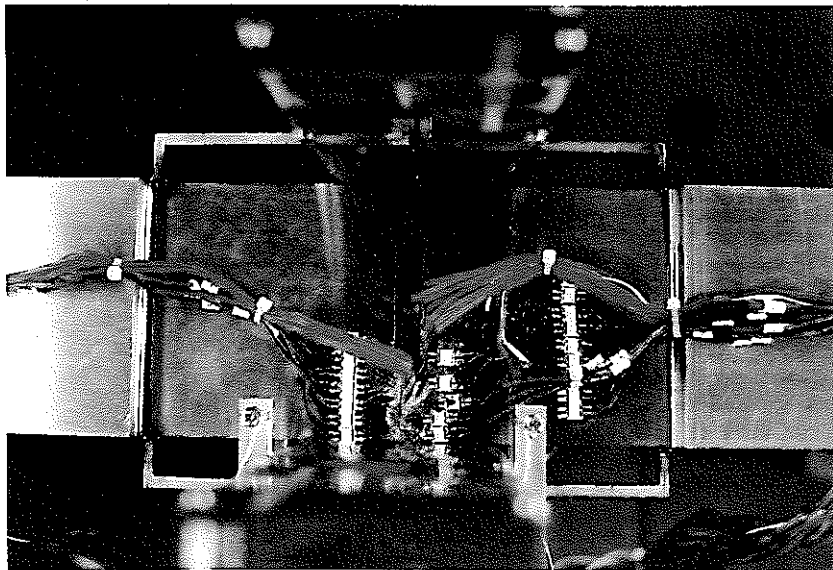
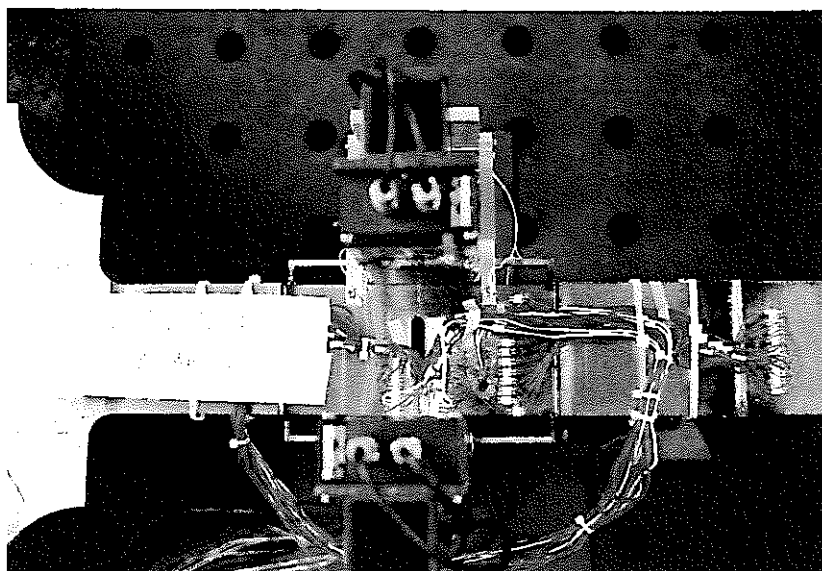


Photo. 1 BHAT System

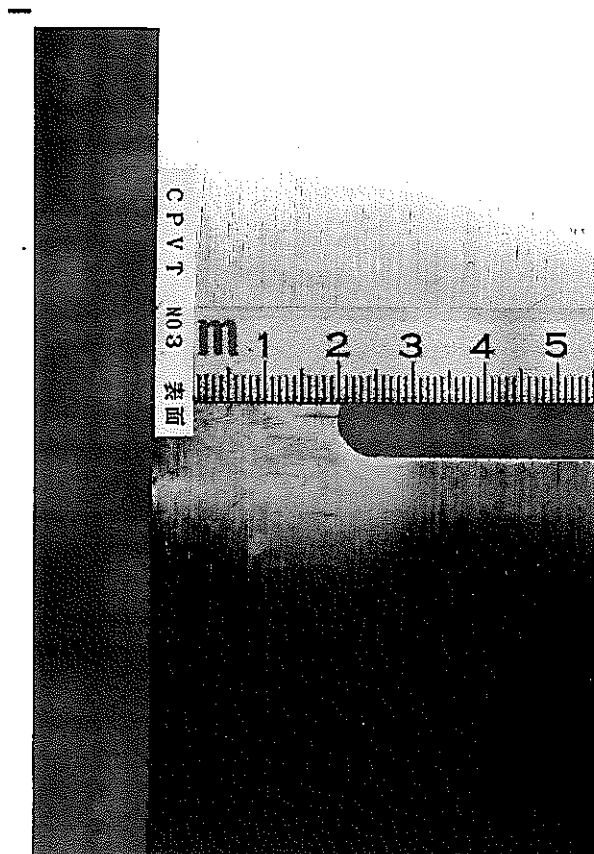


計測機器取付け状況 (CPVT No. 3)



計測機器取付け状況 (CPVT No. 4)

Photo. 2 Attached Test Specimen



試験終了後のクラック（12000サイクル負荷後）

Photo. 3 Slit Tip Crack after Experiment