

JAERI - M
88-130

周方向貫通欠陥付 3 インチ口径炭素鋼
配管の延性破壊挙動

1988年7月

中城 憲行・柴田 勝之・鬼沢 邦雄
川村 隆一・大場 敏弘・宮園昭八郎

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

周方向貫通欠陥付 3 インチ口径炭素鋼配管の延性破壊挙動

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

中城憲行・柴田勝之・鬼沢邦雄

川村隆一・大場敏弘・宮園昭八郎

(1988年6月17日受理)

軽水炉圧力バウンダリ配管の構造安全設計に漏洩先行破損(LBB)概念を適用するに当っては配管の破壊条件やき裂開口面積等の破壊挙動を明らかにしておく必要がある。

原研ではLBB研究の一環としてステンレス鋼配管およびSTS42炭素鋼配管の曲げ荷重下での破壊試験を進めている。

本報告書は、小口径炭素鋼配管の破壊挙動を明らかにするため室温大気中に於いて貫通欠陥付3インチ口径STS42炭素鋼配管の4点曲げ試験を実施した結果および実断面応力基準の適用性、J-R曲線、き裂開口面積等の評価をまとめたものである。実断面応力基準の適用性について検討した結果、安全側評価となっていることが明らかとなった。

Ductile Fracture Behavior of 3-inch Diameter
Carbon Steel Piping with a Circumferential
Through-wall Crack under Bending Load

Noriyuki TYUJYO, Katsuyuki SHIBATA
Kunio ONIZAWA, Takaichi KAWAMURA
Toshihiro OHBA and Shohachiro MIYAZONO

Department of Reactor Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 17, 1988)

In order to introduce Leak-Before-Break (LBB) concept into the piping design criteria of the LWR pressure boundary pipings, it is necessary to investigate the pipe fracture behaviors, such as fracture condition and crack opening area, etc.

At JAERI, pipe fracture tests of stainless steel and STS42 carbon steel pipes under bending load have been conducted as a part of the LBB research program.

This report summarizes the four-point bending test results of 3-inch diameter STS42 carbon steel pipe with a circumferential through-wall crack. Tests were carried out at room temperature. In the tests, the fracture behavior of pipes was investigated to evaluate the validity of Net-section collapse criterion, J-R curve and crack opening area. It is shown that the Net-section collapse criterion gives a conservative evaluation for the fracture load of 3-inch diameter carbon steel pipes.

Keywords: Ductile Fracture, STS42, Leak Before Break, J-resistance Curve, Net-Section Collapse Criterion Crack Opening Area, Light Water Reactor Pressure Boundary Piping

目 次

1. まえがき	1
2. 試験目的	3
3. 供試配管の材料試験	4
3.1 供試材	4
3.2 引張試験方法および結果	4
3.3 シャルピー衝撃試験方法および結果	4
4. 配管試験体の曲げ試験	10
4.1 配管曲げ試験	10
4.1.1 試験体	10
4.1.2 試験方法	10
4.1.3 測定方法	10
4.2 配管曲げ試験結果	11
4.2.1 荷重-荷重点変位-き裂進展量の関係	11
4.2.2 偏平化	12
4.2.3 き裂開口面積	12
5. 考 察	37
5.1 実断面応力基準による評価	37
5.2 流動応力の評価	37
5.3 J-R 曲線によるき裂進展抵抗の比較	37
5.4 偏平化挙動の評価	38
5.5 き裂開口面積の評価	39
6. 結 論	50
謝 辞	50
参考文献	51
付 録	
付録A 試験体ミルシート	53
付録B 応力-歪線図	59
付録C COD- δ_p 曲線	75
付録D CTOD- δ_p 曲線	83
付録E き裂なし試験体の歪分布	91
付録F J 積分計算値, 偏平化測定データ	97
付録G 試験付ごとの J-R 曲線	113

Contents

1. Introduction	1
2. Objectives	3
3. Material test	4
3.1 Material to be tested	4
3.2 Method and results of tensile test	4
3.3 Method and results of Charpy V-notch impact test	4
4. Bending test by test pipe	10
4.1 Pipe bending test	10
4.1.1 Test pipe	10
4.1.2 Test procedure	10
4.1.3 Measurement method	10
4.2 Results of bending test	11
4.2.1 Load-load line displacement-crack extension	11
4.2.2 Ovalization	12
4.2.3 Crack opening area	12
5. Discussion	37
5.1 Evaluation of fracture behavior by the net-section collapse criterion	37
5.2 Evaluation of flow stress determined by bending test	37
5.3 Comparison of J-R curves	37
5.4 Evaluation of ovalization behavior	38
5.5 Evaluation of crack opening area	39
6. Conclusions	50
Acknowledgement	50
References	51
Appendices	
Appendix A Mill certificate	53
Appendix B Stress-Strain diagram	59
Appendix C COD - δ_p curve	75
Appendix D CTOD - δ_p curve	83
Appendix E Stress distribution of uncracked pipe	91
Appendix F Calculated J-value and result of ovalization measurement	97
Appendix G J-resistance curve of test pipes	113

Nomenclature and Abbreviation

a_0	: Initial half crack length	(mm)
Δa	: Crack extension at pipe outer surface	(mm)
Δa_m	: Crack extension at center of pipe wall-thickness	(mm)
CCT	: Center Cracked Tension	
COA	: Crack Opening Area	(mm ²)
COD	: Crack Opening Displacement	(mm)
CTOD	: Crack Tip Opening Displacement	(mm)
CV	: Charpy V-notch Energy	(J)
dx_0	: Initial pipe inner diameter in the x direction	(mm)
dy_0	: Initial pipe inner diameter in the y direction	(mm)
d_0	: Average of dx_0 and dy_0	(mm)
Dx_0	: Initial pipe outer diameter in the x direction	(mm)
Dy_0	: Initial pipe outer diameter in the y direction	(mm)
D_0	: Average of Dx_0 and Dy_0	(mm)
Dx	: Outer pipe diameter in the x direction	(mm)
Dy	: Outer pipe diameter in the y direction	(mm)
E	: Young's modulus	(kg/mm ²)
EDM	: Electric Discharge Machining	
FC	: Fatigue Crack	
J	: J-integral	(kg/mm)
M	: Applied moment	(kg·mm)
M_c	: Collapse moment	(kg·mm)
P	: Applied bending load	(ton)
R	: Pipe mean radius	(mm)
RT	: Room Temperature	(°C)
S_f	: Flow stress determined by pipe test	(kg/mm ²)
S_m	: Design stress intensity	(kg/mm ²)
t	: Pipe wall-thickness	(mm)
σ_b	: Applied bending stress	(kg/mm ²)
σ_f	: Flow stress	(kg/mm ²)
σ_u	: Ultimate tensile stress	(kg/mm ²)
σ_y	: Yield strength	(kg/mm ²)
δ_p	: Load-line displacement	(mm)
δ_t	: Loading system total displacement	(mm)
θ	: Initial half crack angle	(deg)

1. ま え が き

我国では、軽水型原子力発電所の設置に際し、原子炉冷却材圧力バウンダリ配管の瞬時ギロチン破断 (Double Ended Guillotine Break) を想定し安全防護設計を行うよう規定されている¹⁾。そのため配管破断の結果生じるジェット流の衝突・配管のむち打ち・原子炉容器等に加わる水力的不平衡力・機器、配管の支持構造物に加わる荷重等を構造設計上考慮しなければならない。その結果、パイプホイッププレストレイントの設置が必要となるため原子炉建屋内機器構造物の配置の複雑化を招いている。

一方、圧力バウンダリ配管に使用されている高靱性材料の破壊力学的評価、配管破壊挙動の解明が進められ、漏洩先行破損 (LBB) 概念の構造安全設計への導入が世界各国で検討されている。この概念は、配管材料の靱性が高いか或いは作用応力が低い場合、脆性破壊および延性不安定破壊が生じることはなく、万一き裂が生じた場合でも破断に至る前に冷却材漏洩が起これり、これを検知することでプラントを安全に停止できるという構造安全設計の考え方である。

LBB の成立が実証されれば安全防護設計に LBB 概念を導入する事が可能となり想定配管破損の結果派生する動的影響は瞬時ギロチン破断に比べ極めて小さくなる。さらに過剰な防護機器を除去することによりプラントの信頼性も向上することとなる。原子炉格納容器・非常用炉心冷却系設備のコンパクト化、パイプホイッププレストレイントの削除による保守点検性の向上、供用期間中検査時に於ける従業員の被ばく低減に対しても大きく寄与する。米国では、新規プラントでパイプホイッププレストレイントを設置しなければプラント 1 基当たり最低 1 億ドルのコストダウンになると試算されている^{2),3)}。

各国に於ける LBB 概念の基準化の現状はつぎの通りである。

- (1) 西独では 1981 年 RSK (Reaktorsicherheitskommission) ガイドラインが改訂された^{4),5)}。この基準では、低合金鋼製 PWR 一次系配管の想定開口面積を従来の 2 F から 0.1 F に変更したことでパイプホイッププレストレイントの設置が不要となった。
- (2) 米国では NRC の作業により 1987 年 11 月 10 日 CFR 50, Appendix A, General Design Criteria for Nuclear Power Plants Criterion 4 の再改訂が行われた⁶⁾。この基準では全ての原子力プラントの高エネルギー配管 (流体が 93°C 以上, 19.4 kg/cm² 以上) についてパイプホイッププレストレイントおよびジェットインピンジメントの削除を認めている。
- (3) イタリアでは 1986 年 General Design Criteria が改訂され、西独同様 PWR 一次系配管の想定開口面積を 2 F から 0.1 F に変更している⁷⁾。
- (4) その他、フランス・カナダ等でも基準化を計画している⁸⁾。
- (5) 我国ではステンレス鋼製配管を対象にし LBB の適用が検討され基準案はほぼ固まっている。炭素鋼管についても R & D によりデータの蓄積を行った後基準化の検討を行う予定である⁸⁾。

配管破壊挙動に関する研究は、世界各国で実施されており、その評価法として、実断面応力基準^{9),10)}、Tearing Instability Criterion^{11),12),13)}、Two Criteria 法^{14),15)}等が検討され改良が進められている。

また、米国の Battelle Columbus Laboratories, David Tayler Naval Ship Research Development, General Electric社, Westinghouse 社等, 西独の Kraftwerk Union 社, Stuttgart 工科大学 Material Prüfungsanstalt 研究所等, フランスの French Atomic Energy Commission (CEA), Electricite de France 等, イタリアの ENEA 等の研究機関で現在も R&D が進展中である。我国では日本原子力研究所, 原子力工学試験センターに於いて活発に配管破壊試験が行われている。さらに, 1987年9ヶ国が参加して発足した国際研究プロジェクト International Piping Integrity Research Group (IPIRG) には電力中央研究所が日本の窓口となって参加している。

日本原子力研究所では1982年より柴田らにより周方向欠陥付6インチおよび12インチ口径のステンレス鋼管および炭素鋼管の4点曲げ試験^{18),19),20),21)} および各種材料試験^{22),23)}を進めている。

これらの試験の一環として, 小口径炭素鋼配管の破壊挙動を明らかにするため, 室温大気中に於いて貫通欠陥付3インチ口径 STS 42 炭素鋼配管の4点曲げ試験を実施し, 実断面応力基準の適用性, J-R 曲線, き裂開口面積等の評価を行った。

本報告書は, 上記の試験内容および検討結果についてまとめたものである。

2. 試 験 目 的

炭素鋼配管の LBB 実証研究の一環として、軽水炉圧力バウンダリに使用されている小口径の STS 42 炭素鋼管の室温大気中に於ける破壊挙動を明らかにする目的で 4 点曲げ試験を行い次の項目について検討した。

(1) 実断面応力基準による評価

(2) J-R 曲線の評価

(3) き裂開口面積の評価

(1)項の実断面応力基準⁹⁾とは、Kanninenらが提案した破壊挙動評価法で、き裂部に於ける応力が限界値に達した時破壊が生じるという考え方である。取扱いが単純なことから多用される傾向にあるが、その適用性を検討しておく必要がある。

(2)項のき裂進展抵抗を示す J-R 曲線の取得は、CT 試験片、CCT 試験片などによる材料試験データからの配管破壊予測の妥当性を明らかにするため必要である。

(3)項のき裂開口面積データの取得は、冷却材漏洩流量評価の観点から破壊裕度と漏洩検知の関係から厳しい側の評価となりうる小口径配管について行う。

さらに、柴田ら^{18) 19) 20) 21)}の 6 インチ、12 インチ口径配管 4 点曲げ試験データと比較し、口径依存性について検討する。

3. 供試配管の材料試験

3.1 供試材

供試材は、軽水炉圧力バウンダリで使用されている代表的な炭素鋼管 STS 42 (JIS G3455 : 高圧配管用炭素鋼管) 継目無鋼管である。

管寸法は、外径 3 インチ (89.1 mm) であり、肉厚効果を調べるため Sch 40 ($t = 5.5$ mm), Sch 80 ($t = 7.6$ mm), Sch 160 ($t = 11.1$ mm) の 3 種類について試験した。なお、これらの配管は、焼ならし熱処理 (900°C, 10分空冷) が施こされている。

Table 3.1 に、化学成分のレードル分析値を示す。

Table 3.2 に、各配管の機械的性質を示す。Table 3.2 の値は次節に示す引張試験から求めたものである。なお、各配管のミルシートを Appendix A に示す。

3.2 引張試験方法および結果

供試材 STS 42 の機械的性質 (降伏強さ, 引張強さ, 伸び, 絞り) を求めるため JIS Z2241 (1980) 金属材料引張試験方法に準じ、室温大気中で引張試験を実施した。

引張試験片は 3 種の試験体と同一ロットの管材から軸方向に 2 本ずつ採取した。Fig. 3.1 に、引張試験片形状を示す。肉厚の薄い Sch 40 配管のみ板状で他は丸棒試験片とし、標点間距離は全て 50 mm とした。引張試験は容量 10 ton のインストロン型引張試験機により 1.25% 歪までクロスヘッド速度 0.5 mm/min, 1.25% 歪以上では 5 mm/min で実施した。

Table 3.2 に、引張試験結果を示す。なお本試験より求めた応力-ひずみ線図を Appendix B に示す。

3.3 シャルピー衝撃試験方法および結果

各供試配管材のシャルピー吸収エネルギーを求めるため、JIS Z2242 (1980) 金属材料衝撃試験方法に準じ、シャルピー衝撃試験を実施した。

Fig. 3.2 および Fig. 3.3 に、試験片採取方向および試験片形状を示す。試験片は、JIS Z2202 (1980) 金属材料衝撃試験片に準ずる 4 号試験片サブサイズ試験片 (但し、Sch 40 では幅 4.0 mm Sch 80 および Sch 160 では幅 5.0 mm) を用いた。試験片は、管軸方向と試験片長軸方向を一致させて採取した。

容量 300 J の試験機を用い、試験温度は、 $-120^{\circ}\text{C} \sim 17.5^{\circ}\text{C}$ (室温) とし各温度で 1 本ないし 2 本試験を実施した。

Fig. 3.4(a)~Fig. 3.4(c) に、ロットごとのシャルピー吸収エネルギー測定結果を示す。全ての供試材は JIS G3455 (1984) の特別品質規定の要求値を満足していた。

同図は、配管4点曲げ試験を実施する室温ではシャルピー吸収エネルギーが上部棚エネルギー領域にあることを示す。

Table 3.1 Chemical composition of 3-inch dia. STS42 pipes

	(wt%)				
	C	Si	Mn	P	S
Specification	≤0.30	0.10 ~ 0.35	0.30 ~ 1.40	≤0.035	≤0.035
Sch. 40	0.14	0.12	1.14	0.016	0.008
Sch. 80	0.14	0.12	1.14	0.016	0.008
Sch. 160	0.14	0.12	1.14	0.016	0.008

Table 3.2 Mechanical properties of 3-inch dia. STS42 pipes at room temperature

Sch.	Specimen No.	(*) Shape	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
			≥25	≥42	≥25	
40	C4-1	Type A	32.6	46.8	39.0	64.3
	C4-2		32.8	46.8	38.8	58.9
	Average		32.7	46.8	38.9	61.6
80	C8-1	Type B	29.5	45.8	37.0	77.1
	C8-2		31.3	47.8	36.1	74.4
	Average		30.4	46.8	36.6	75.8
160	C16-5	Type B	29.7	45.8	34.0	77.0
	C16-6		32.4	48.0	35.1	74.5
	C16-7		29.3	45.8	37.0	77.9
	Average			30.5	46.5	35.4
	C16-1	Type C	30.0	45.5	41.2	76.1
	C16-2		28.9	45.5	41.2	76.8
	Average			29.5	45.5	41.2

(*) Refer Fig. 3.1

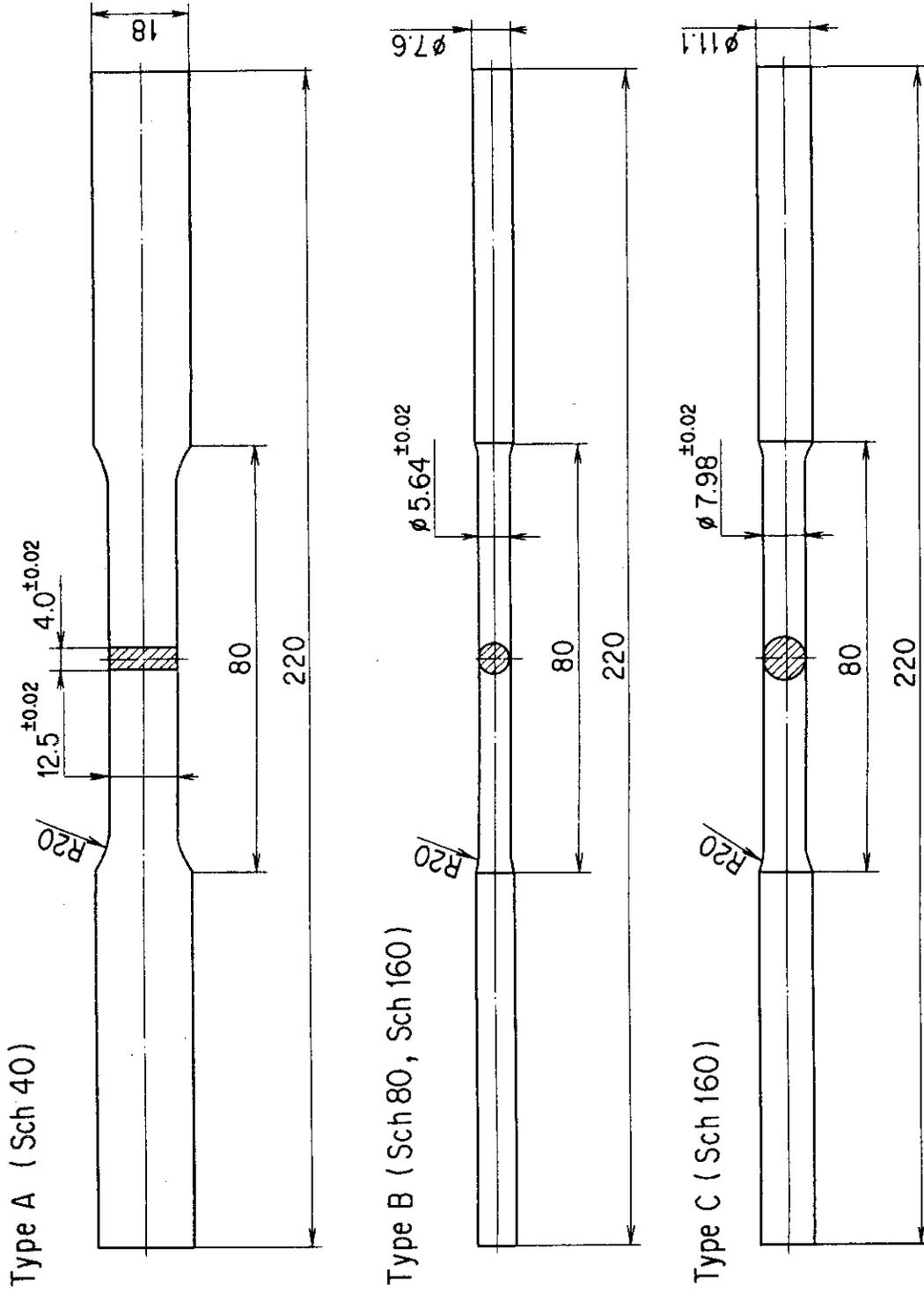


Fig. 3.1 Geometries of tensile specimens

3-inch dia. pipe section

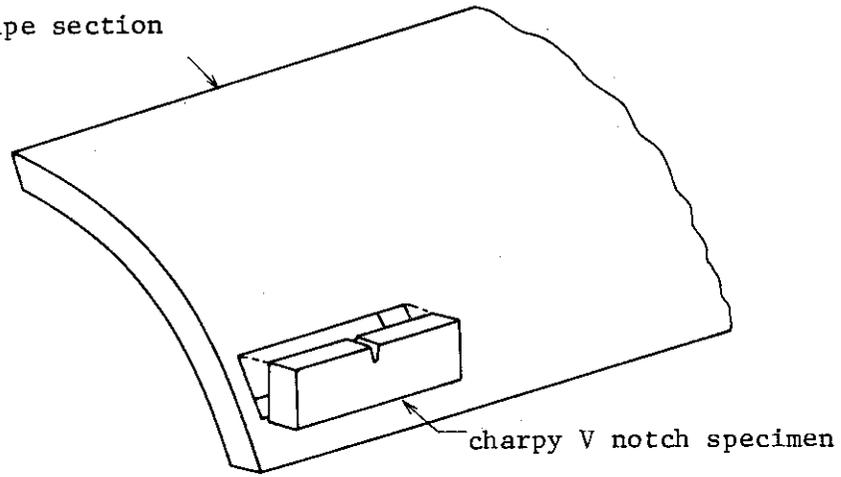


Fig. 3.2 Schematic drawing of Charpy V notch specimen orientation

	Sch40	Sch80	Sch160
b	4	5	5

unit: mm

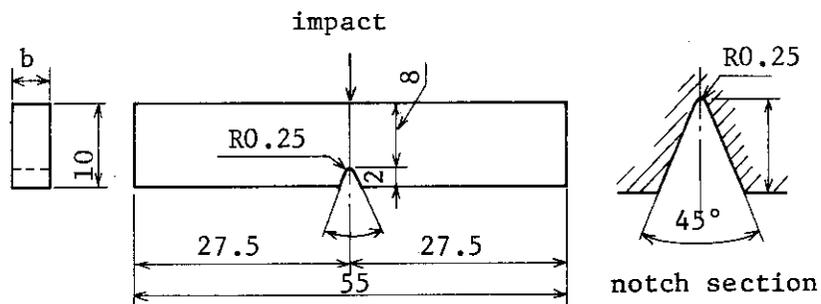


Fig. 3.3 Charpy V notch specimen size

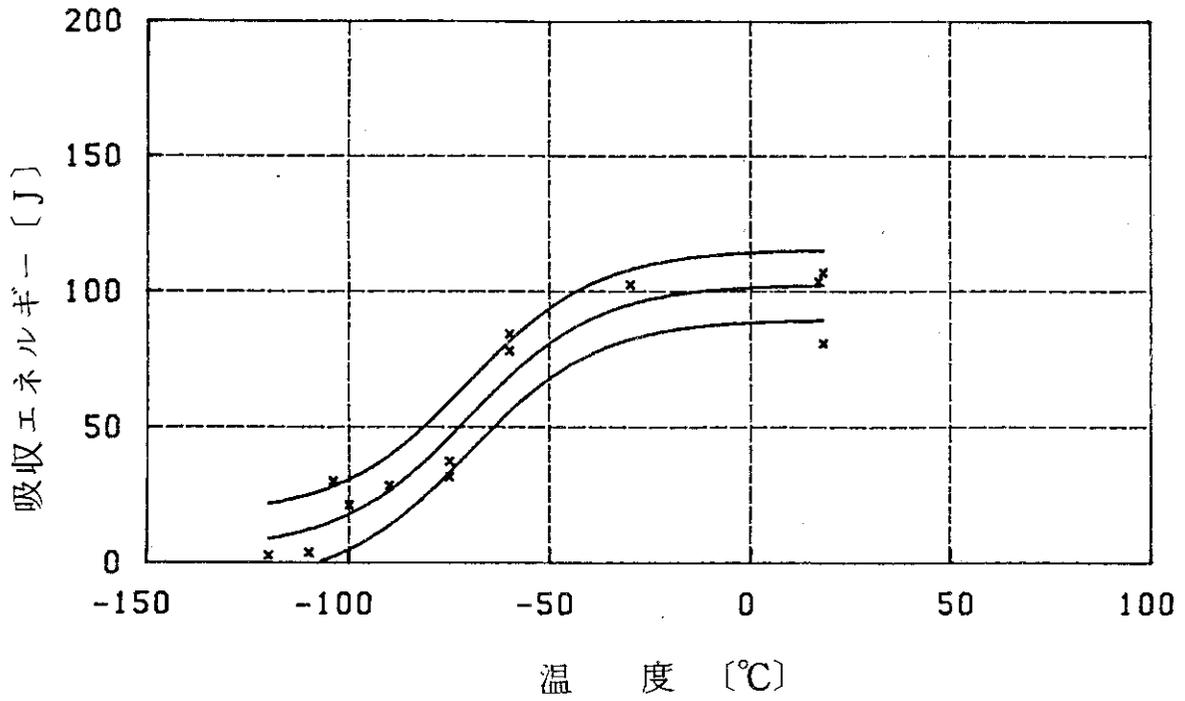


Fig. 3.4(a) Charpy V notch energy transition curve for 3-inch dia. Sch40 STS42 carbon steel pipe

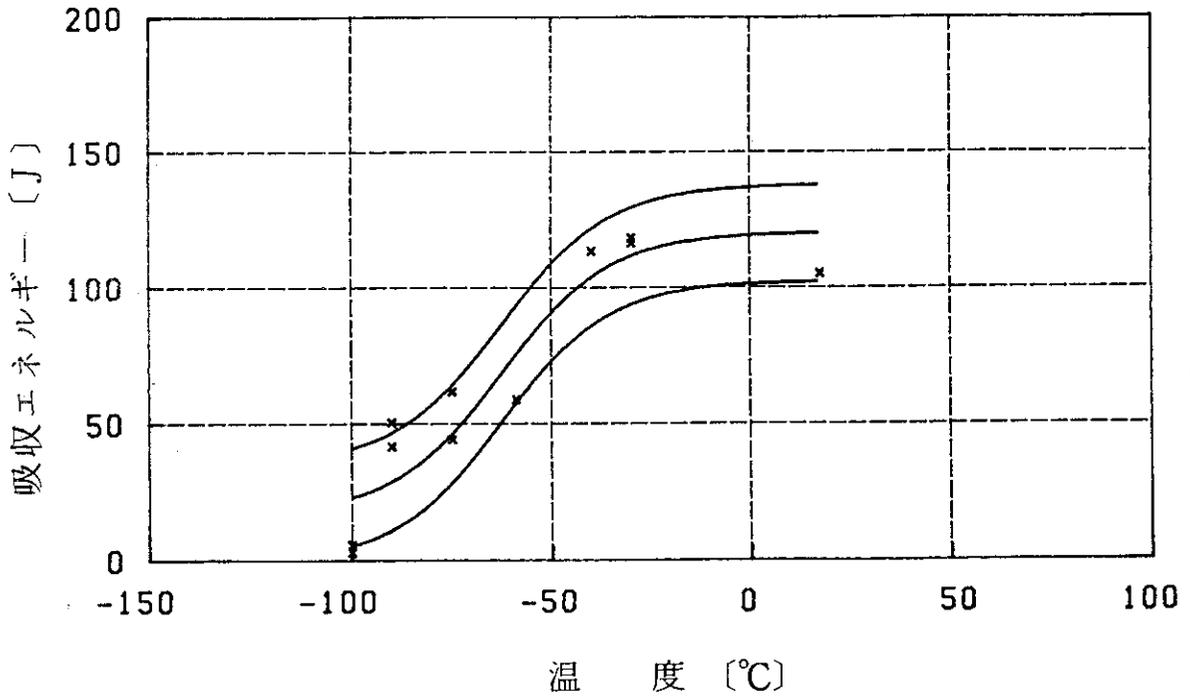


Fig. 3.4(b) Charpy V notch energy transition curve for 3-inch dia. Sch80 STS42 carbon steel pipe

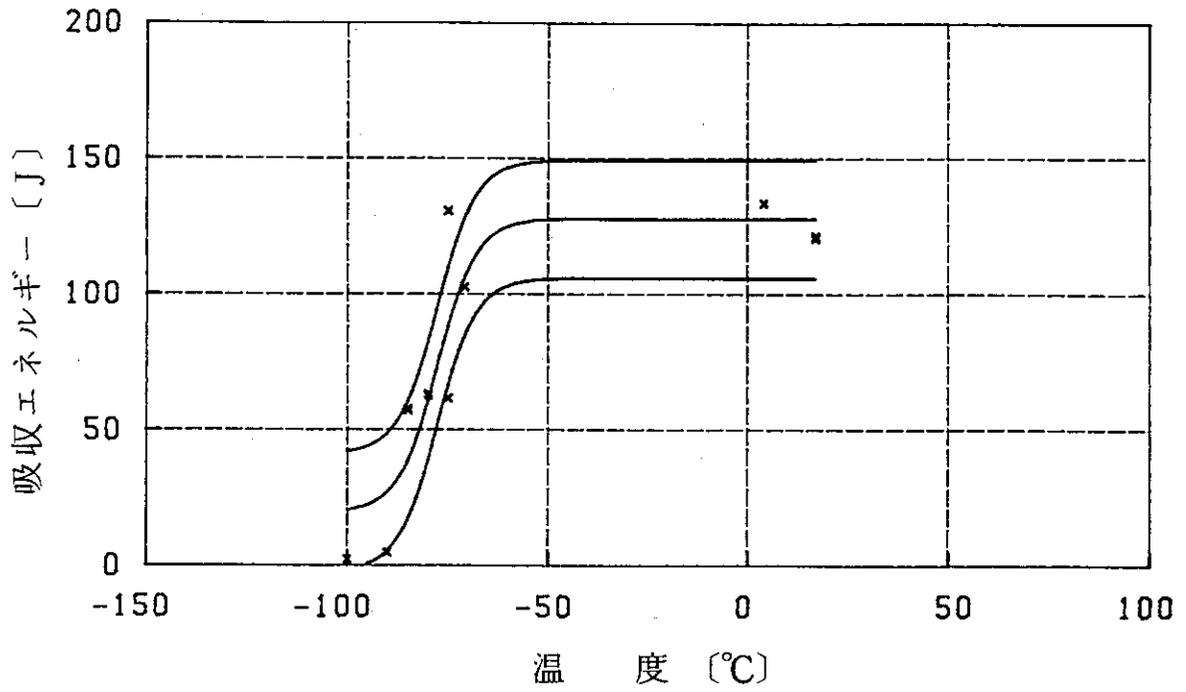


Fig. 3.4(c) Charpy V notch energy transition curve for 3-inch dia. Sch160 STS42 carbon steel pipe

4. 配管試験体の曲げ試験

4.1 配管曲げ試験

配管の4点曲げ試験はすべて室温で行い、以下の試験パラメータについて調べた。

- (1) 初期切欠き角度
- (2) 平均半径/肉厚 (R/t)
- (3) 切欠き尖鋭度

(1)~(3)項を考慮した試験マトリックスを、Table 4.1 に示す。さらに口径の影響を調べるため柴田ら²⁰⁾²¹⁾の6インチ、12インチ口径 STS 42 炭素鋼管データとも比較検討した。

4.1.1 試験体

Fig. 4.1 に、試験体形状を示す。Table 4.1 に示す様に試験体には放電加工 (EDM) により先端幅 0.3 mm、き裂角度 45° ~ 180° の人工貫通欠陥が加工されている。さらに欠陥なし試験体3体およびき裂角度 77° の放電加工による貫通欠陥から、疲労により 90° まで伝播された疲労き裂試験体1体が含まれる。上記(3)項の切欠き尖鋭度の影響は、放電加工による欠陥と疲労き裂を有する試験体を比較することで明らかにした。

口径の影響について、柴田らの6インチおよび12インチ口径 Sch80 配管のデータと比較するため試験体中央部外面を機械加工することにより、 $R/t = 7.1$ に揃えた。

Table 4.29~4.2c に、各試験体の詳細寸法および欠陥寸法を示す。

4.1.2 試験方法

試験は、油圧サーボ制御式疲労試験機 (容量: 100 ton) に、Fig. 4.2 に示す4点曲げ治具を装着し、4点曲げ荷重を負荷して行った。Photo. 4.1 に試験装置外観を、Photo. 4.2 に、試験体設置状況を示す。

なお、4点曲げの内側スパン S_1 および外側スパン S_2 をそれぞれ 200 mm、600 mm とし、試験機のクロスヘッド速度は、2.5 mm/min で試験を実施した。

4.1.3 測定方法

本試験では、荷重、変位、き裂進展量 (配管外表面)、き裂開口変位 (COD)、き裂先端部の開口変位 (CTOD)、き裂開口形状、ひずみ分布、扁平化等を測定した。

これらの測定方法を以下に示す。

(1) 荷重および変位測定

試験体に負荷される荷重は、疲労試験機に装着されたロードセルにより測定した。

また荷重点変位についてはローラ部に於いて、 ± 100 mm の変位計により測定した。

(2) き裂進展量 (配管外表面) の測定

配管外表面に於けるき裂進展量の測定は、所定変位毎に試験機を停止し、拡大鏡を用いた目視測定と写真撮影により行った。

なお、き裂進展量は目視測定法と写真法による測定値の平均とした。

(3) COD および CTOD の測定

COD および CTOD の測定は、25mm のクリップゲージを切欠き中央部と初期欠陥先端部に固定し行った。

(4) き裂開口面積 (COA) の測定

所定の荷重または変位において配管外表面でのき裂形状をテープ上に転写し、さらにき裂半分を9分割してき裂開口変位を測定してシンプソンの公式によりき裂開口面積を算出した。

(5) 歪分布測定

歪分布測定は切欠きのない試験体について中央、円周方向に2軸歪ゲージを貼付し所定の荷重または変位のときに行った。Fig. 4.3 に歪ゲージ貼付位置を示す。

(6) 偏平化測定

偏平化は、所定変位に於いて試験体の x, y 方向の外径をノギスにより測定し求めた。

以上の測定のうち、アナログ信号および写真撮影周期信号は PCM 式レコーダに記録し、試験後のデータ処理も可能とした。さらに、一部のアナログ信号については x-y レコーダにオンラインで記録した。

4.2 配管曲げ試験結果

4.2.1 荷重-荷重点変位-き裂進展量の関係

試験体の予き裂先端は、負荷が増加するに従い、塑性鈍化により丸みを帯びると同時に開口量が増加し、その後き裂の発生、進展が認められた。き裂は最初負荷方向に対して約 45° 傾き、方向を変えながら管周方向に安定成長した。Photo. 4.3 に、代表的な試験後の試験体を示す。破断面は、シェアリップを呈していた。

Fig. 4.4 ~ Fig. 4.17 に、各試験体の荷重-荷重点変位-外表面き裂進展量の関係を示す。同図より、予き裂先端からのき裂発生は、概ね最大荷重点直前附近である。き裂は最大荷重点到達後、荷重低下とともに安定成長した。

初期欠陥角度 90° の放電加工による予き裂と疲労予き裂を有する試験体 (C-14, C-13) の最大荷重を比較すると疲労試験体の方が約 3% 低かった。

欠陥なしの試験体の場合、最大荷重点に至るまでに大きな塑性変形を生じていることが、Fig. 4.4, Fig. 4.8 および Fig. 4.14 から分かる。

Fig. 4.18 ~ 4.20 に、各半径肉厚比の荷重-荷重点変位曲線を示す。R/t が同一である場合初期欠陥角度が大きくなるに従い、最大荷重および最大荷重点に於ける変位が小さくなる。

また、初期欠陥角度が同一の場合、R/t が小さくなるに従い最大荷重および最大荷重点に於ける変位が大きくなる。

なお、き裂開口変位-荷重点変位曲線、き裂先端に於ける開口変位-荷重点変位曲線およびき裂なし試験体の歪分布測定結果をそれぞれ Appendix C, Appendix D および Appendix E に示す。

4.2.2 偏平化

Fig. 4.21～Fig. 4.34 に、各試験体の荷重点変位に対する x, y 方向の外径測定結果より求めた偏平化率を示す。同図に於いて偏平化率は、x, y 方向の外径測定値 (D_x, D_y) を初期の外径 (D_{x0}, D_{y0}) で除した値により示した。外径測定結果については、Appendix F に示す。

き裂を有する試験体は全て負荷の増加に伴ない y 方向に偏平化し、き裂なし試験体では逆の x 方向に偏平化した。

4.2.3 き裂開口面積

き裂開口面積は、き裂形状をテープに転写し、Simpson の公式を用いて算出した。

Fig. 4.35～Fig. 4.37 に、曲げ応力 $\sigma_b (= M/Z)$ に対するき裂開口面積の変化を示す。

Table 4.1 Test matrix

2θ	(*) Initial Crack Condition	R/t		
		9.9 (Sch.40)	7.1 (Sch.80)	4.1 (Sch.160)
0°	EDM	C-1	C-11	C-21
45°	EDM	C-2	C-12	C-22
90°	EDM	C-3	C-14	C-23
	FC	-	C-13	-
135°	EDM	-	C-15	-
180°	EDM	C-4	C-16	C-24

(*) EDM : Electric Discharge Machining
 FC : Fatigue Crack

Table 4.2(a) Pipe size and crack size of Sch.40 pipes

		Sch.	Sch.40				Average
		Pipe No.	C-1	C-2	C-3	C-4	
		2θ(deg)	0°	45°	90°	180°	
Pipe Size	Dx ₀ (mm)		86.38	86.42	86.38	86.44	-
	Dy ₀ (mm)		86.38	86.43	86.39	86.43	-
	D ₀ (mm)		86.38	86.43	86.39	86.44	86.41
	dx ₀ (mm)		78.48	78.34	77.76	77.87	-
	dy ₀ (mm)		77.93	77.98	78.37	78.29	-
	d ₀ (mm)		78.21	78.16	78.07	78.08	78.13
	t (mm)		4.09	4.13	4.16	4.18	4.14
	R (mm)		41.15	41.15	41.12	41.13	41.14
R/t		10.06	9.96	9.88	9.84	9.94	
Crack Size	2a ₀ (mm)		-	33.94	67.85	135.78	-
	ℓ (mm)		-	3.00	3.10	3.25	-
	W (mm)		-	1.01	0.85	0.98	-
	w (mm)		-	0.31	0.28	0.29	-

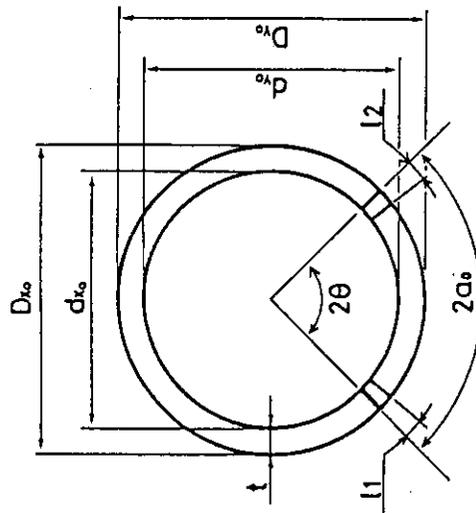
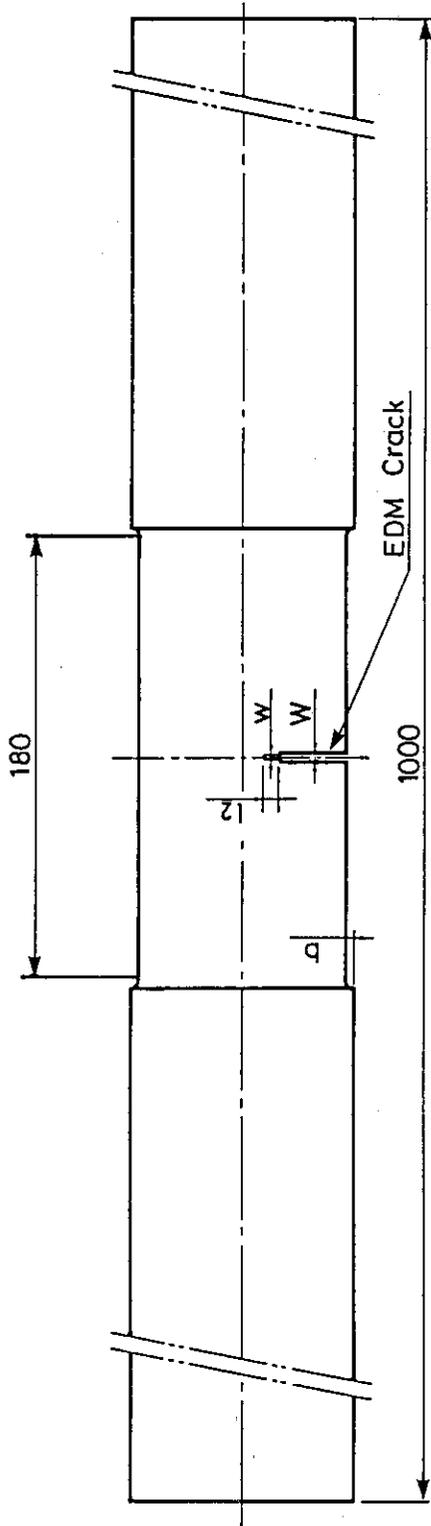
Table 4.2(b) Pipe size and crack size of Sch.80 pipes

		Sch.	Sch.80						Average
		Pipe No.	C-11	C-12	C-13	C-14	C-15	C-16	
		2θ	0°	45°	90°FC(*)	90°	135°	180°	
Pipe Size	Dx ₀	(mm)	84.91	84.96	84.97	84.82	84.88	84.85	-
	Dy ₀	(mm)	84.91	84.96	84.97	84.82	84.88	84.85	-
	D ₀	(mm)	84.91	84.96	84.97	84.82	84.88	84.85	84.90
	dx ₀	(mm)	73.82	73.76	74.05	73.84	73.82	73.58	-
	dy ₀	(mm)	73.70	73.84	73.91	73.90	73.78	73.48	-
	d ₀	(mm)	73.76	73.80	73.98	73.87	73.80	73.53	73.79
	t	(mm)	5.58	5.58	5.50	5.48	5.54	5.66	5.56
	R	(mm)	39.67	39.69	39.74	39.67	39.67	39.70	39.67
R/t		7.11	7.11	7.22	7.24	7.16	7.00	7.14	
Crack Size	2a ₀	(mm)	-	33.36	66.67	66.62	100.29	133.28	-
	ℓ	(mm)	-	2.80	2.95	3.00	2.60	3.35	-
	W	(mm)	-	1.02	0.88	0.98	0.83	0.99	-
	w	(mm)	-	0.31	0.32	0.28	0.27	0.30	-

(*) FC : Fatigue crack

Table 4.2(c) Pipe size and crack size of Sch.160 pipes

		Sch.	Sch.160				Average
		Pipe No.	C-21	C-22	C-23	C-24	
		2θ	0°	45°	90°	180°	
Pipe Size	Dx ₀	(mm)	85.94	85.82	85.78	85.81	-
	Dy ₀	(mm)	85.94	85.82	85.78	85.81	-
	D ₀	(mm)	85.94	85.82	85.78	85.81	85.84
	dx ₀	(mm)	67.34	66.86	66.91	66.98	-
	dy ₀	(mm)	67.58	67.17	67.13	66.52	-
	d ₀	(mm)	67.46	67.02	67.02	66.75	67.06
	t	(mm)	9.24	9.40	9.38	9.53	9.39
	R	(mm)	38.35	38.21	38.20	38.14	38.23
R/t		4.15	4.06	4.07	4.00	4.07	
Crack Size	2a ₀	(mm)	-	33.70	67.37	134.72	-
	ℓ	(mm)	-	3.00	2.75	3.00	-
	W	(mm)	-	1.05	0.83	1.03	-
	w	(mm)	-	0.31	0.32	0.28	-



$$D_o = \frac{D_{X_o} + D_{Y_o}}{2}$$

$$d_o = \frac{d_{X_o} + d_{Y_o}}{2}$$

$$R = \frac{D_o - t}{2}$$

$$l = \frac{l_1 + l_2}{2}$$

	R/t
Sch. 40	9.9
Sch. 80	7.1
Sch. 160	4.1

Cross section of pipe center

Fig. 4.1 Geometry of 3-inch diameter test pipe

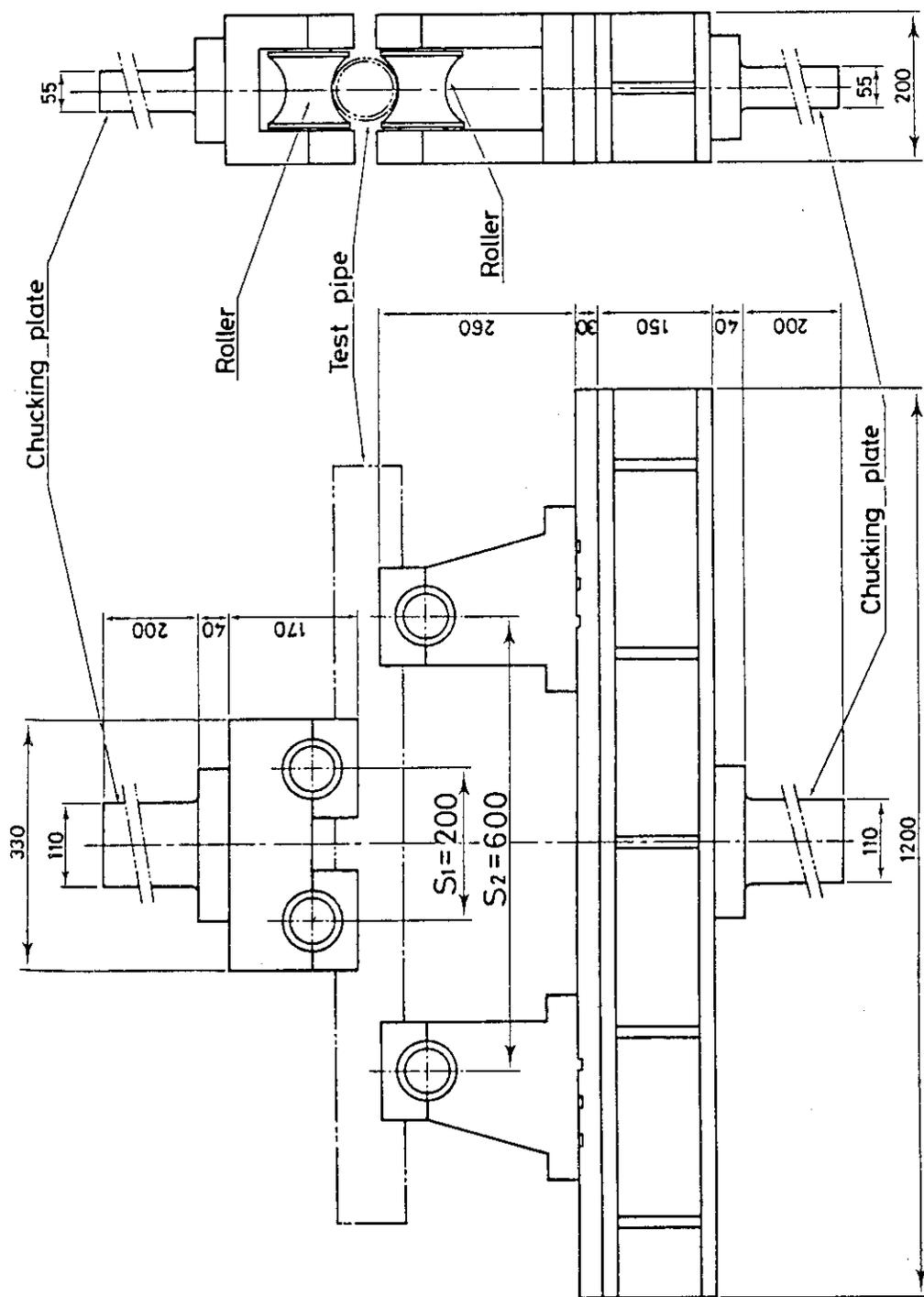


Fig. 4.2 Sketch of four-point bending device

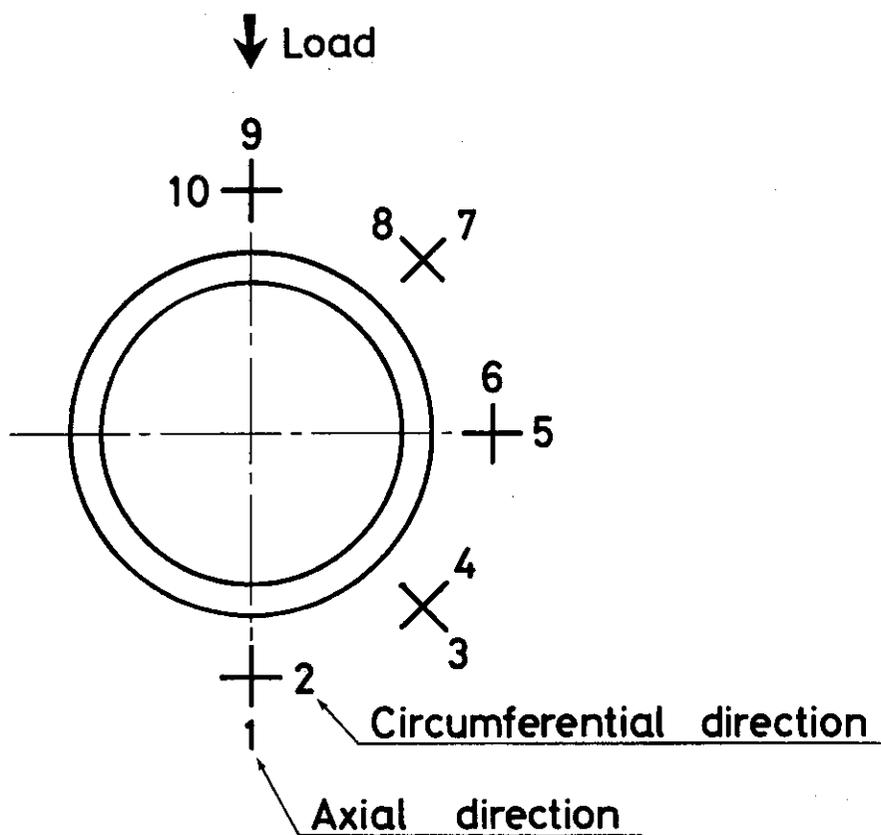


Fig. 4.3 Location of strain gages in 3-inch diameter pipes without crack

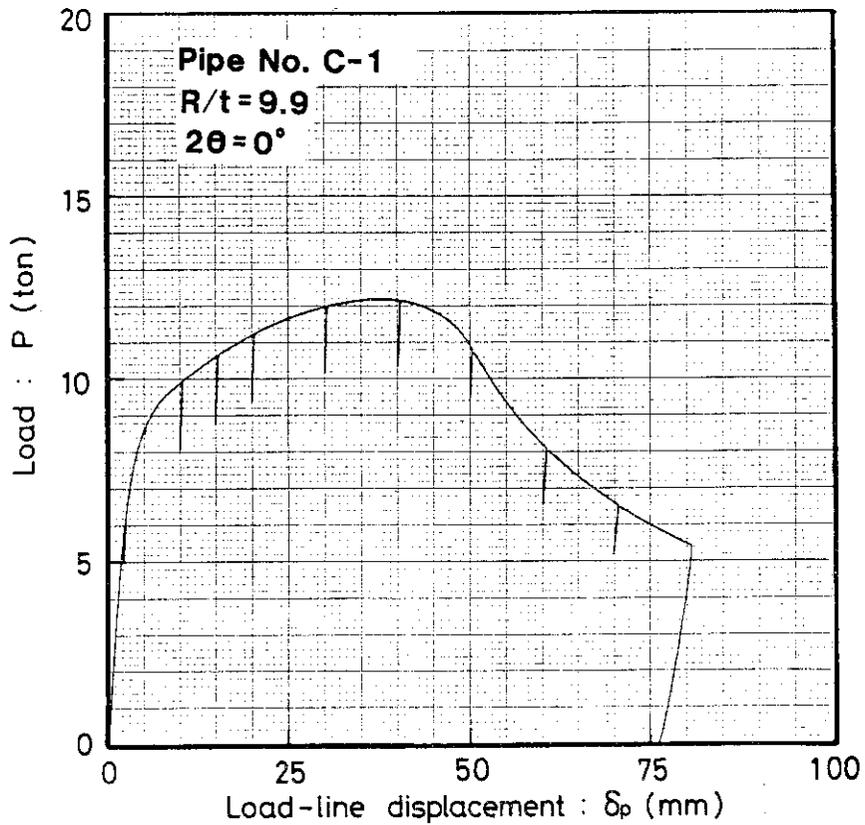


Fig. 4.4 Load versus load-line displacement (C-1)

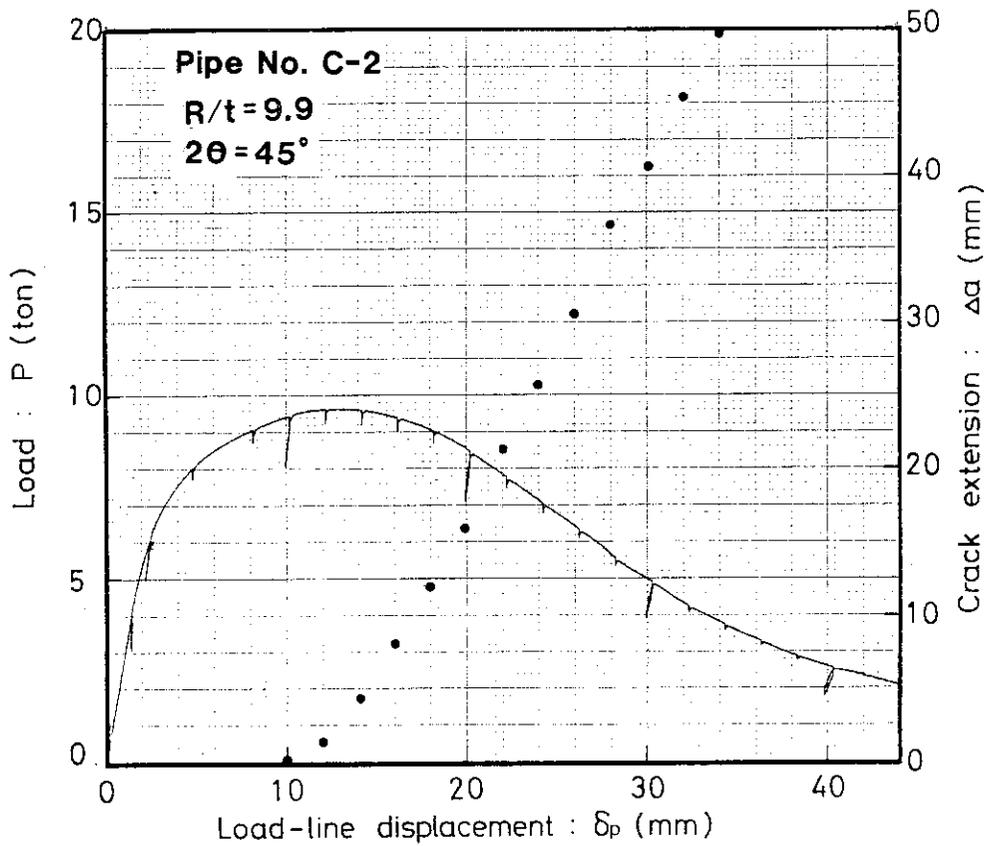


Fig. 4.5 Load and crack extension versus load-line displacement (C-2)

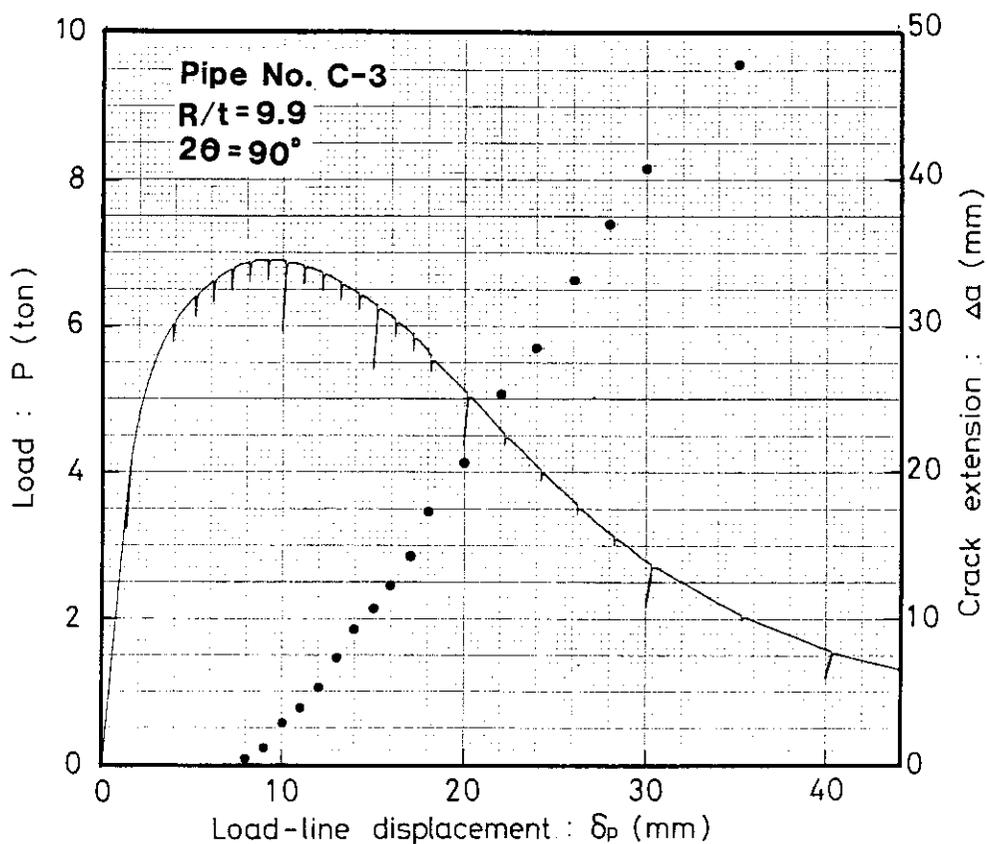


Fig. 4.6 Load and crack extension versus load-line displacement (C-3)

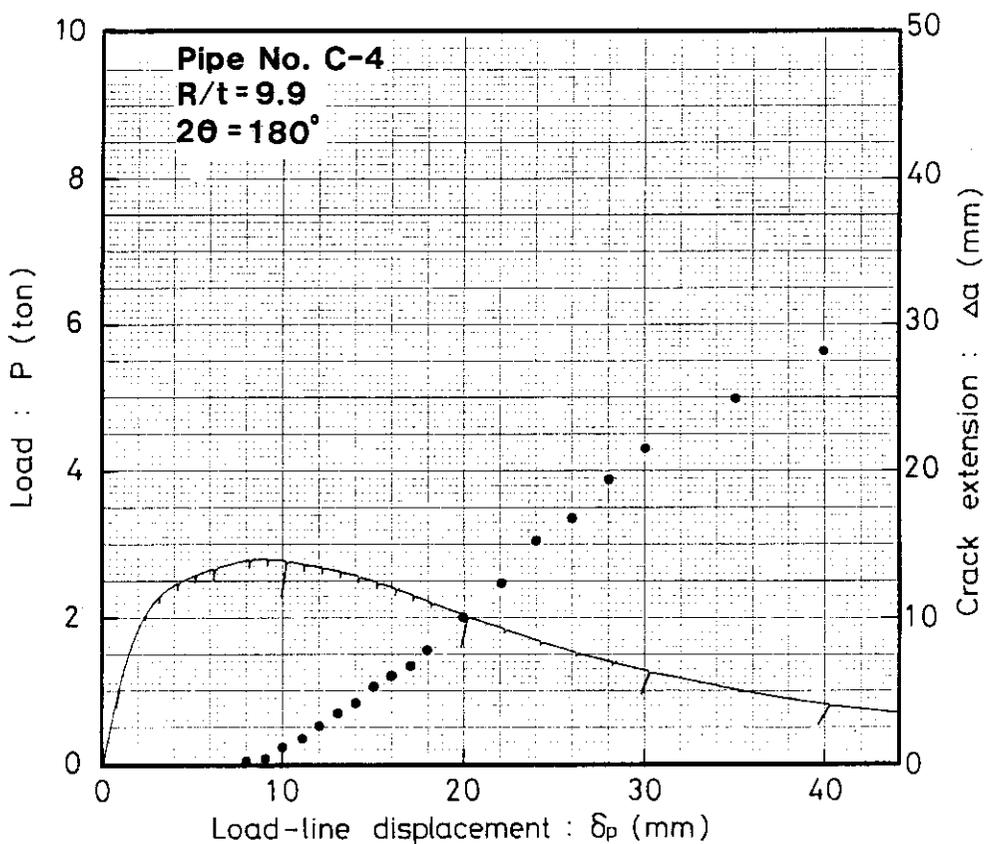


Fig. 4.7 Load and crack extension versus load-line displacement (C-4)

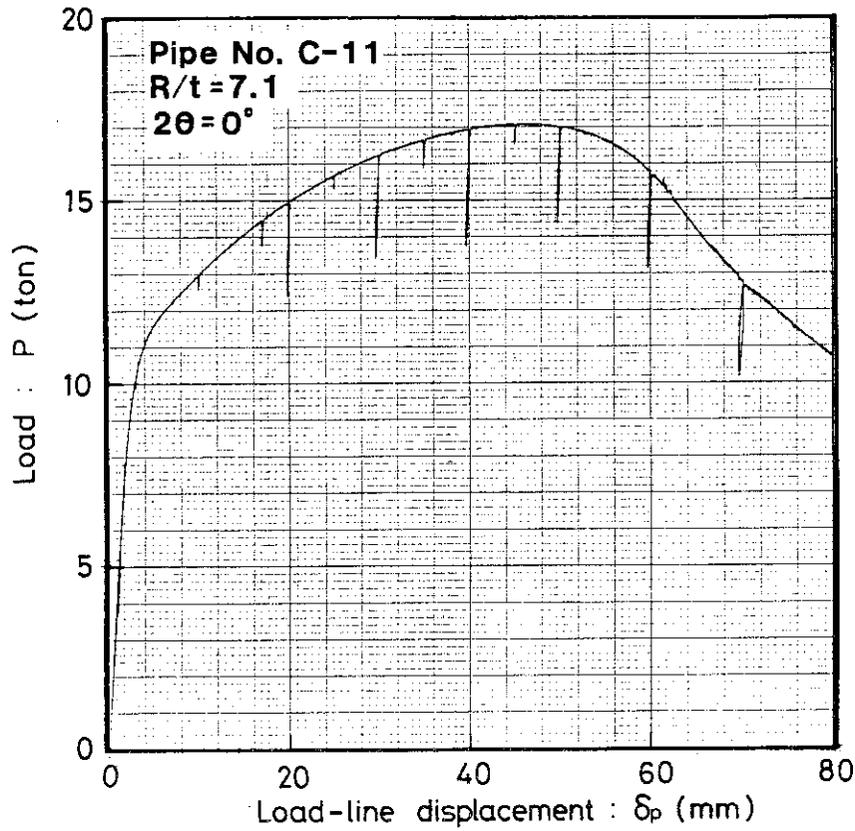


Fig. 4.8 Load versus load-line displacement (C-11)

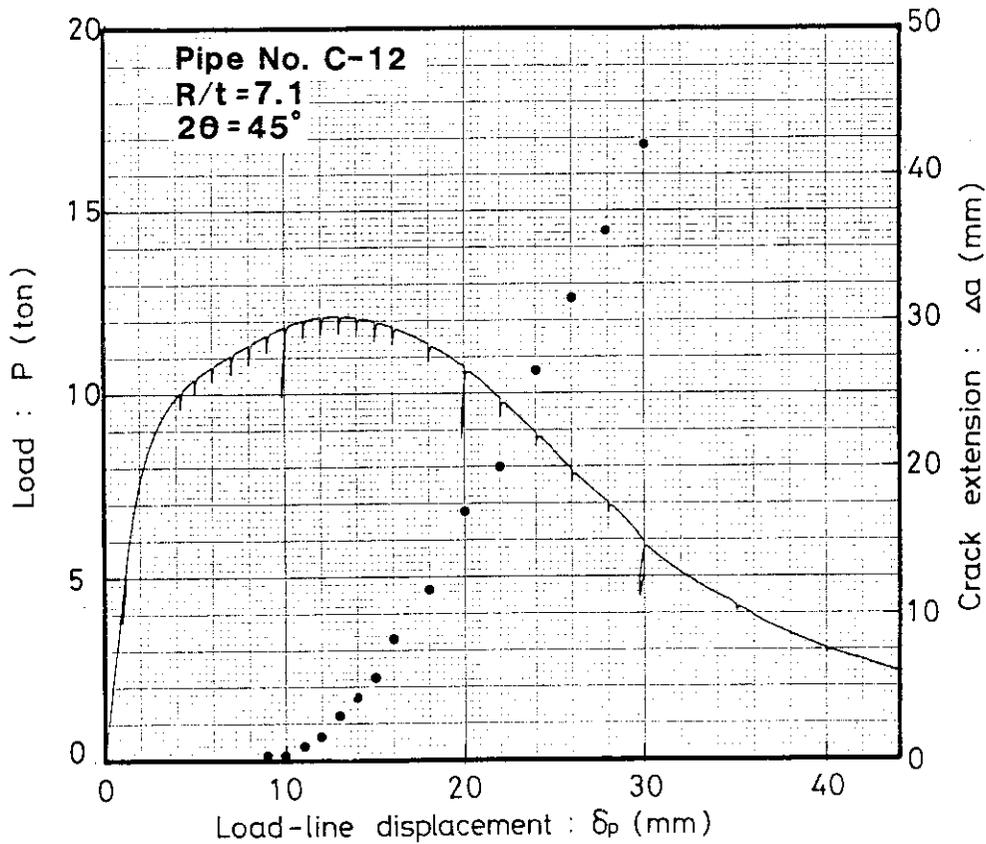


Fig. 4.9 Load and crack extension versus load-line displacement (C-12)

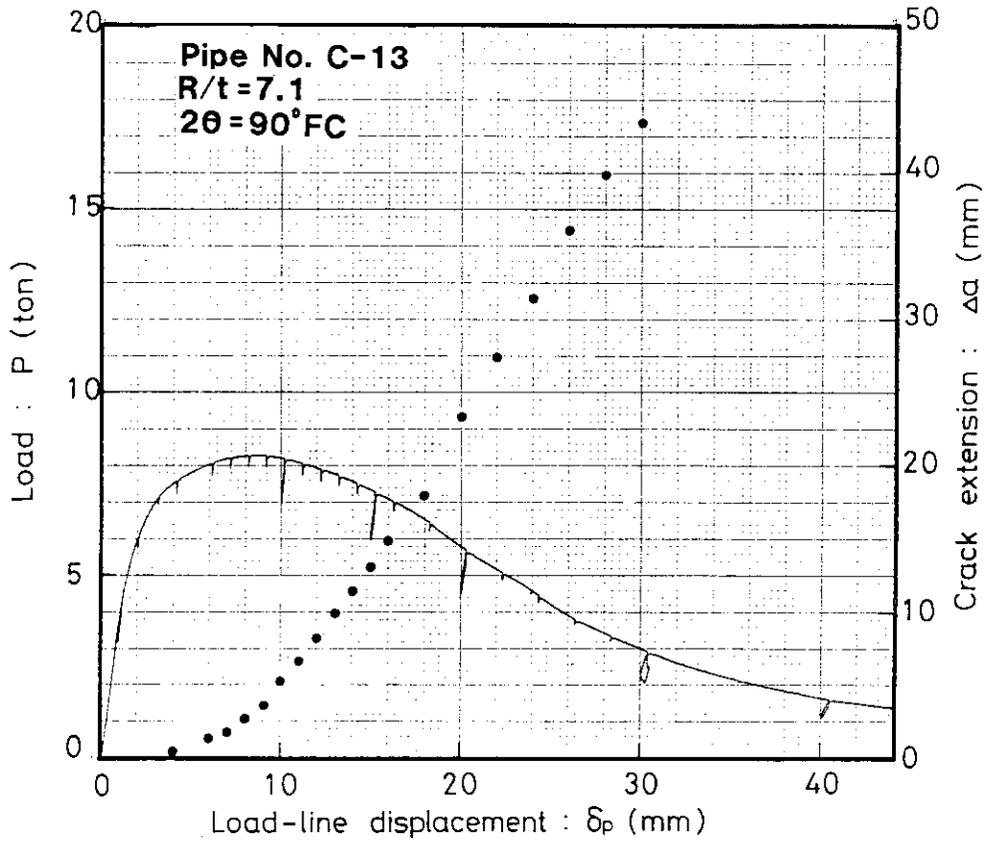


Fig. 4.10 Load and crack extension versus load-line displacement (C-13)

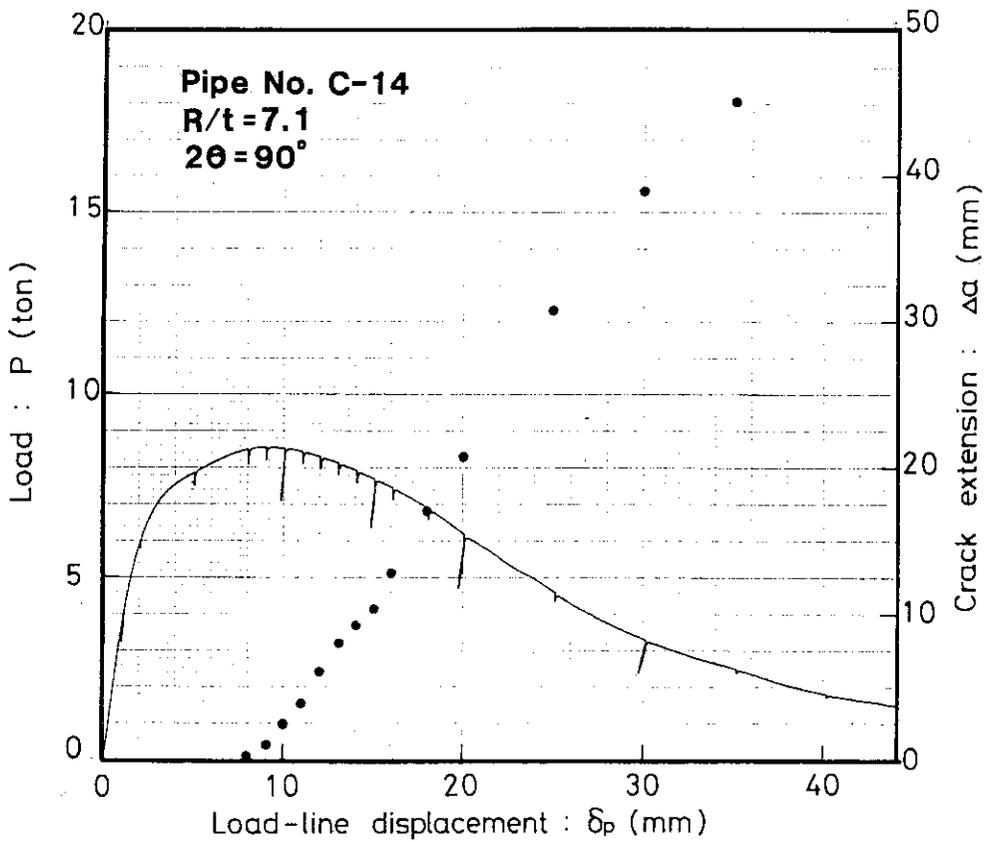


Fig. 4.11 Load and crack extension versus load-line displacement (C-14)

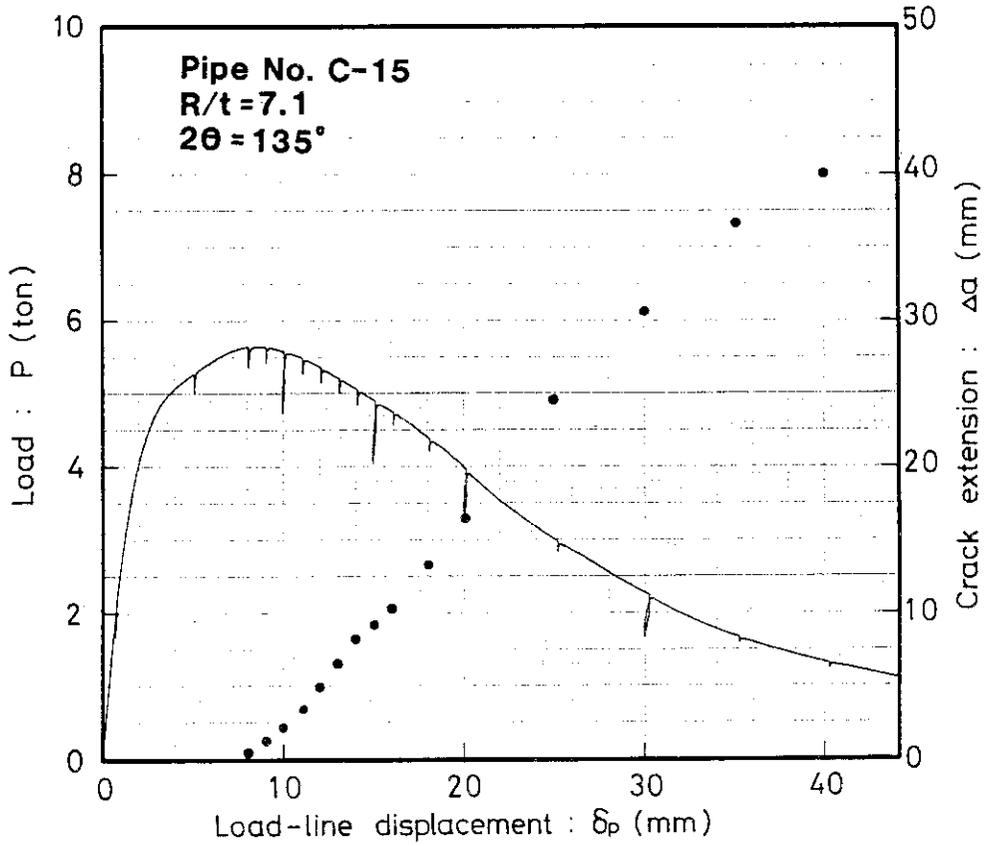


Fig. 4.12 Load and crack extension versus load-line displacement (C-15)

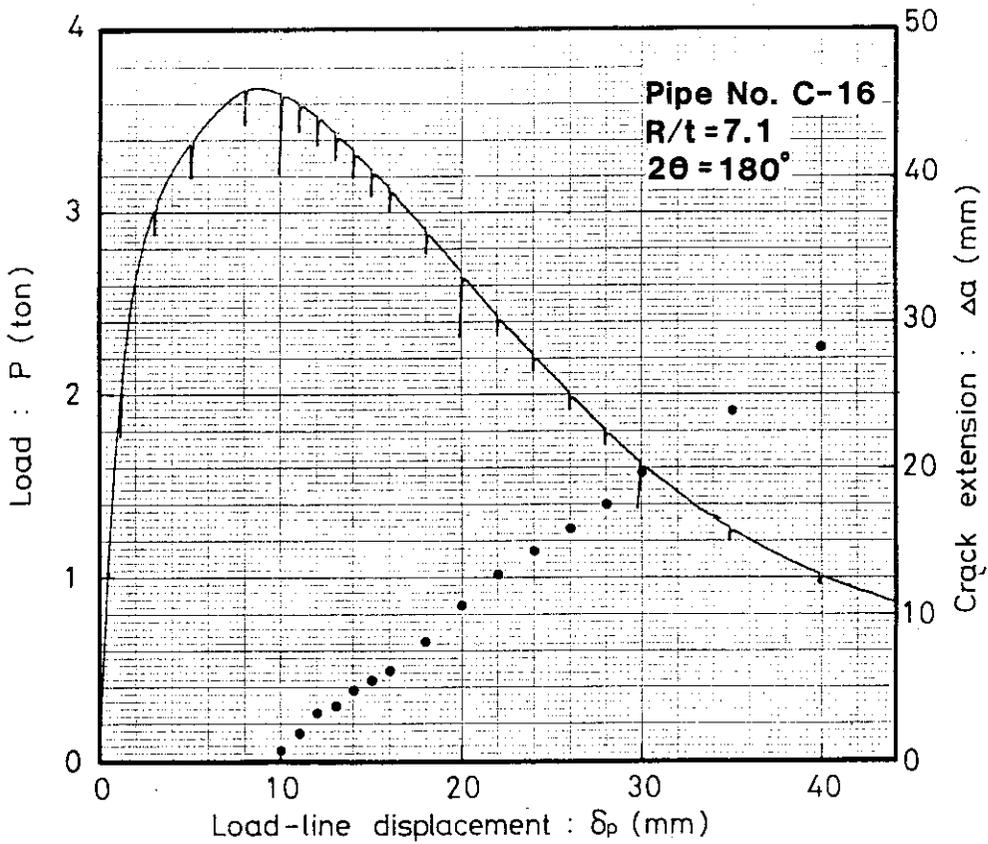


Fig. 4.13 Load and crack extension versus load-line displacement (C-16)

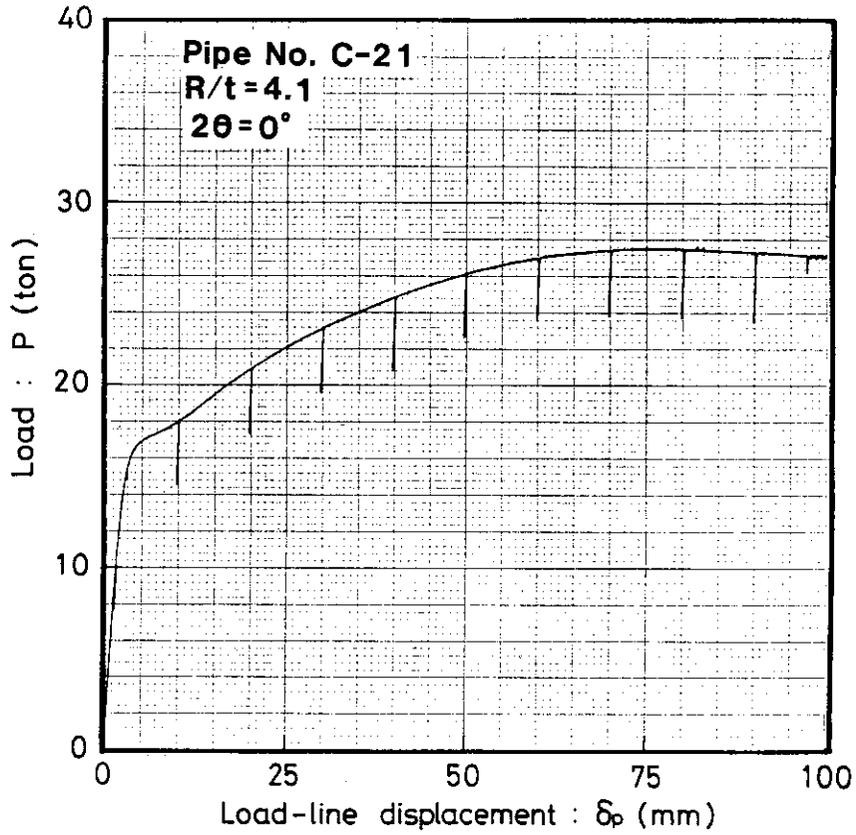


Fig. 4.14 Load versus load-line displacement (C-21)

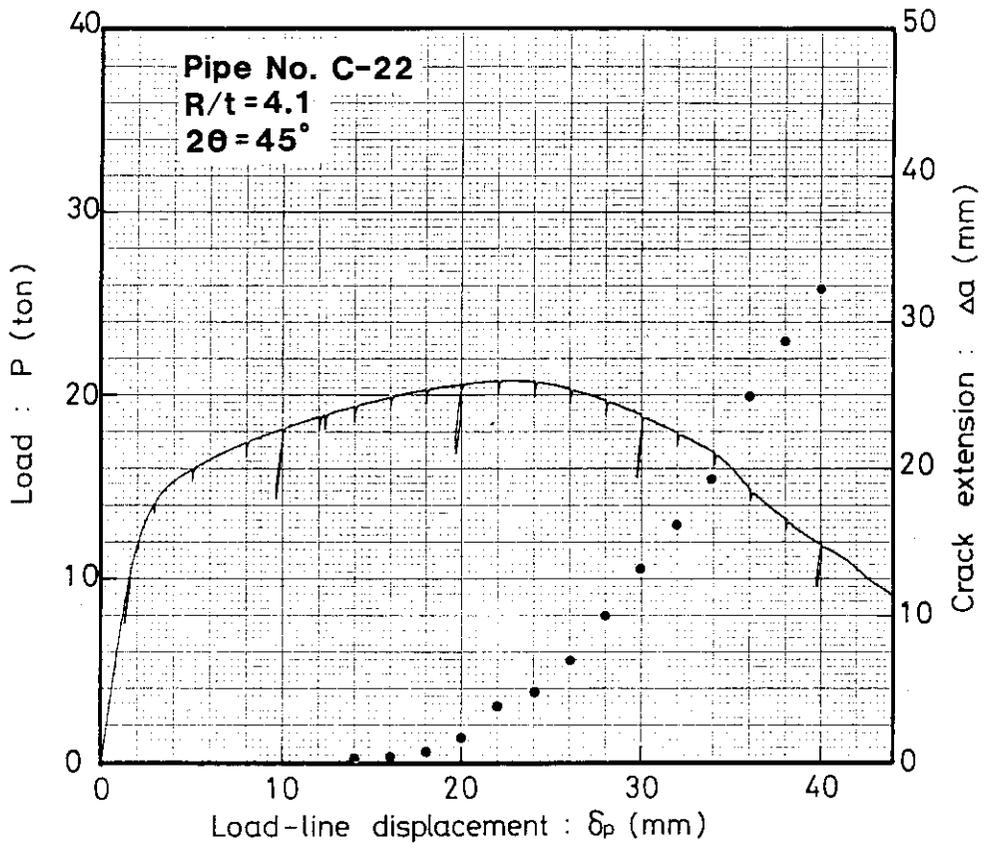


Fig. 4.15 Load and crack extension versus load-line displacement (C-22)

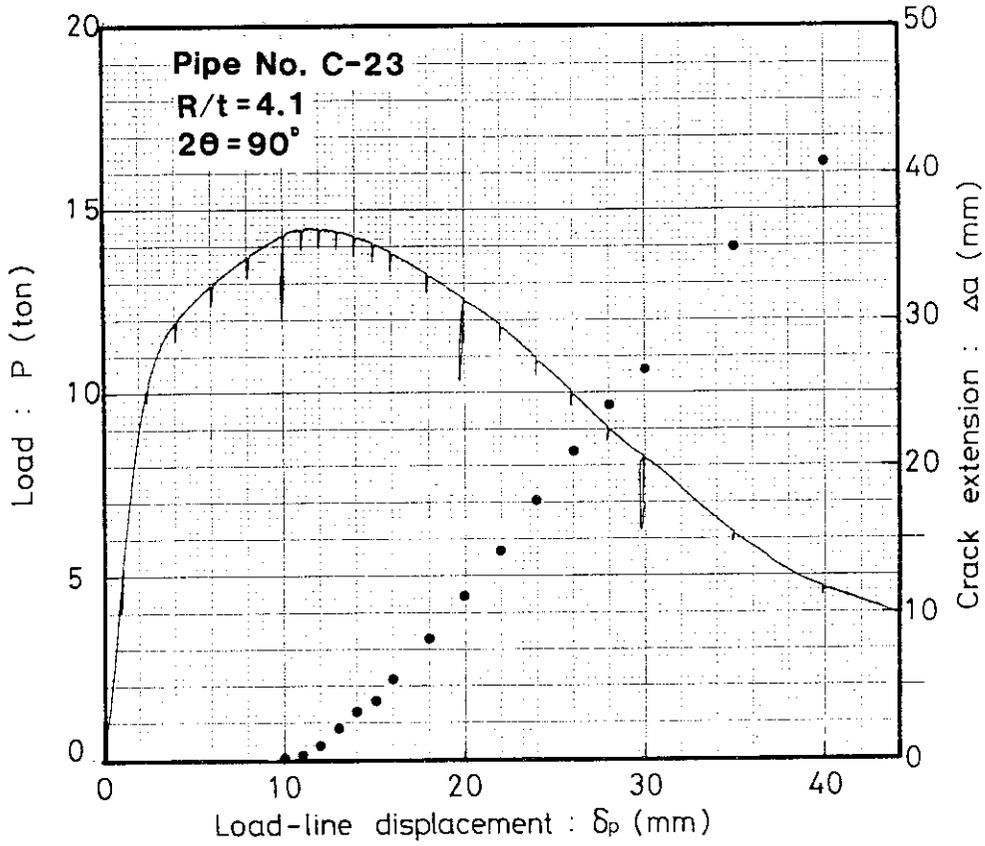


Fig. 4.16 Load and crack extension versus load-line displacement (C-23)

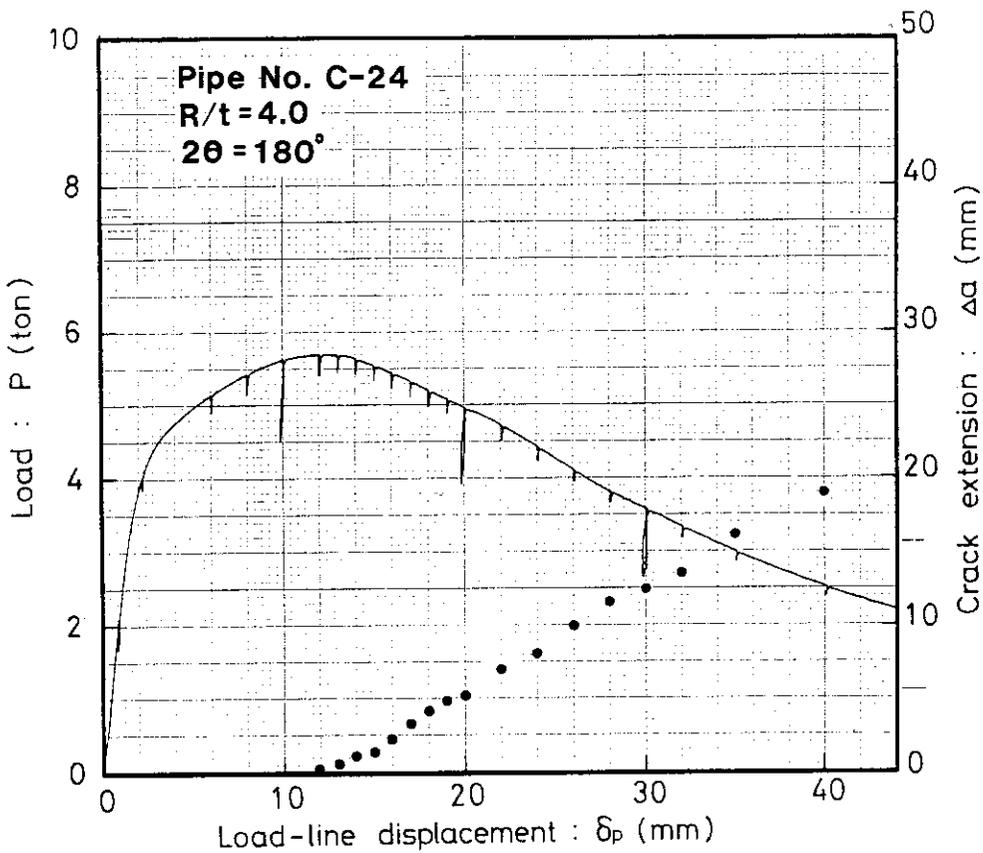


Fig. 4.17 Load and crack extension versus load-line displacement (C-24)

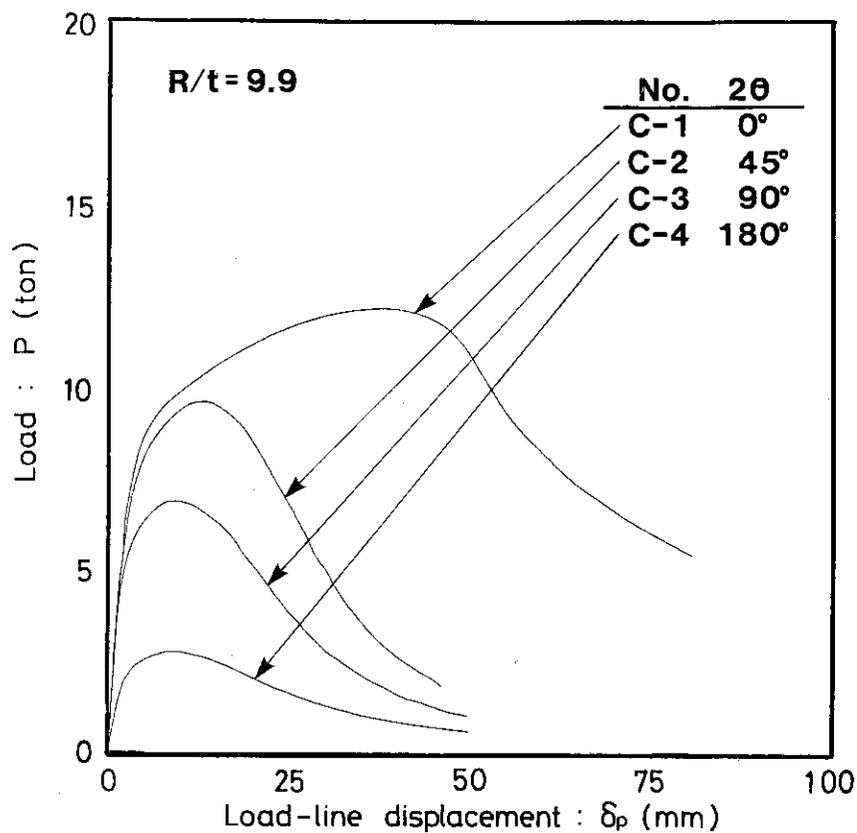


Fig. 4.18 Effect of initial crack angle on load load-line displacement curve of R/t=9.9 pipes

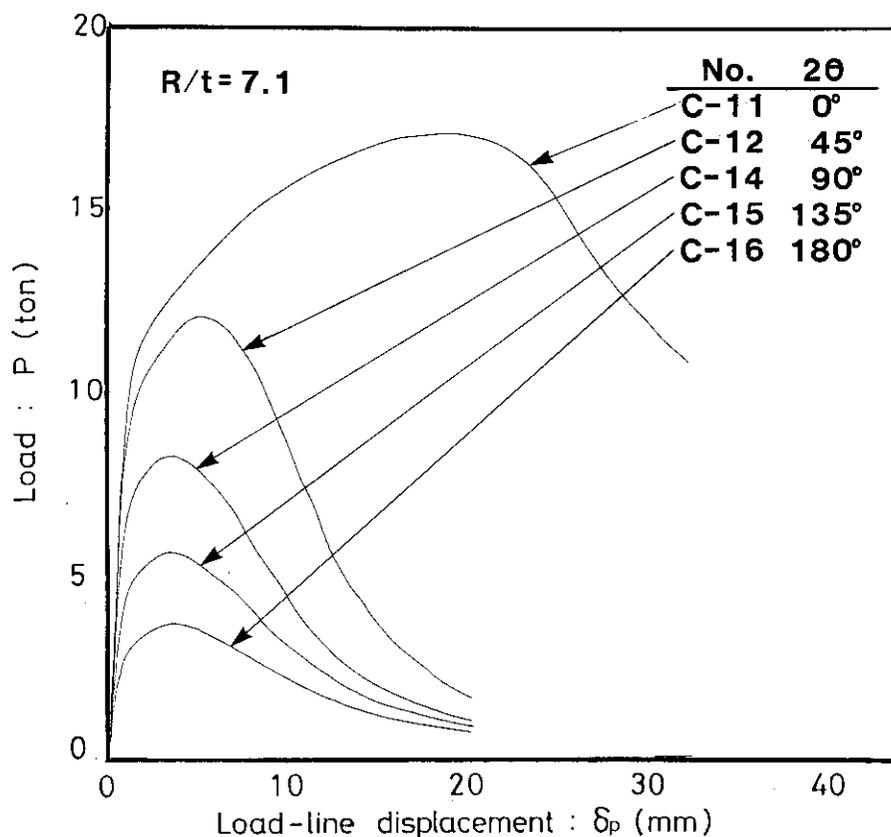


Fig. 4.19 Effect of initial crack angle on load load-line displacement curve of R/t=7.1 pipes

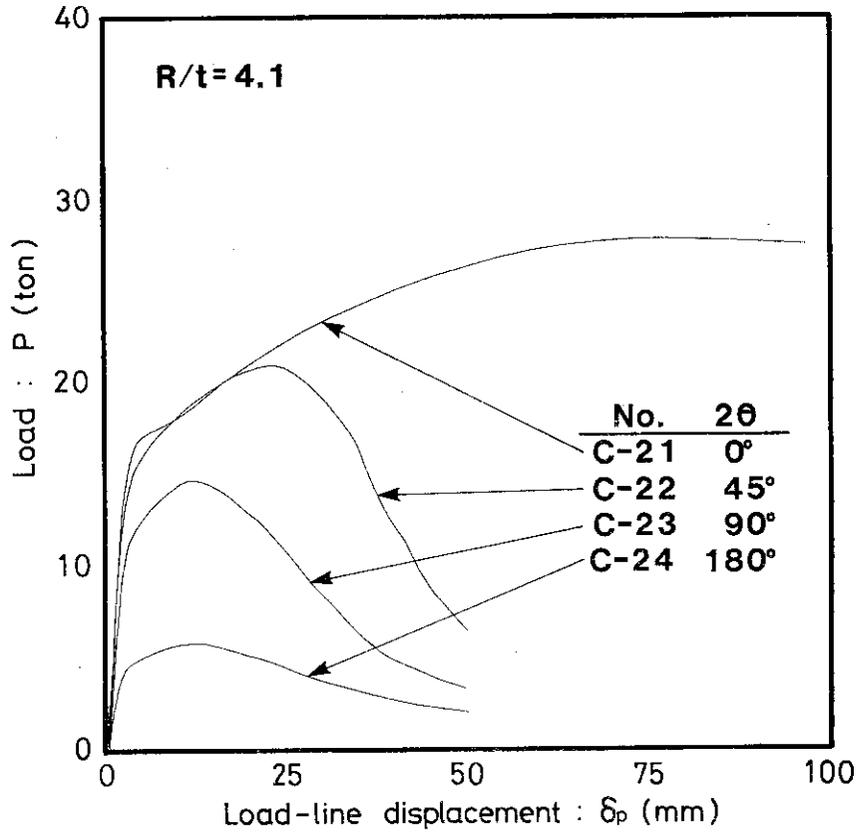


Fig. 4.20 Effect of initial crack angle on load load-line displacement curve of R/t=4.1 pipes

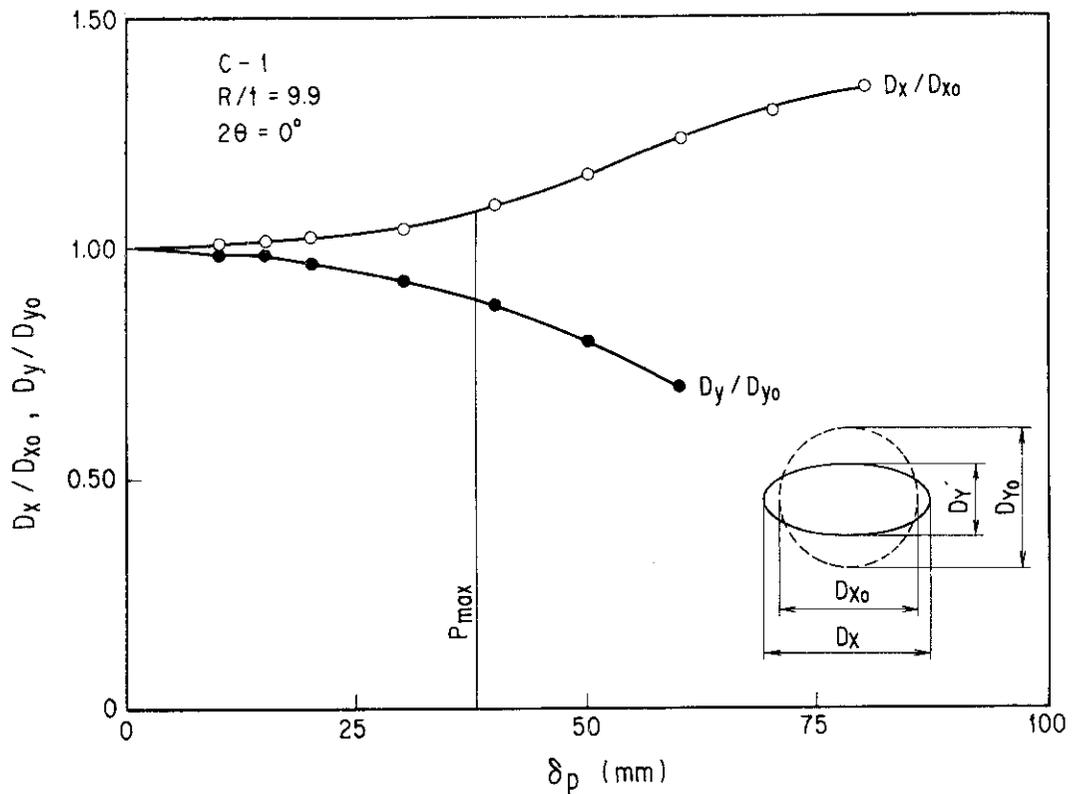


Fig. 4.21 Pipe ovalization measurement result of 3-inch STS42 pipe having R/t=9.9 without crack

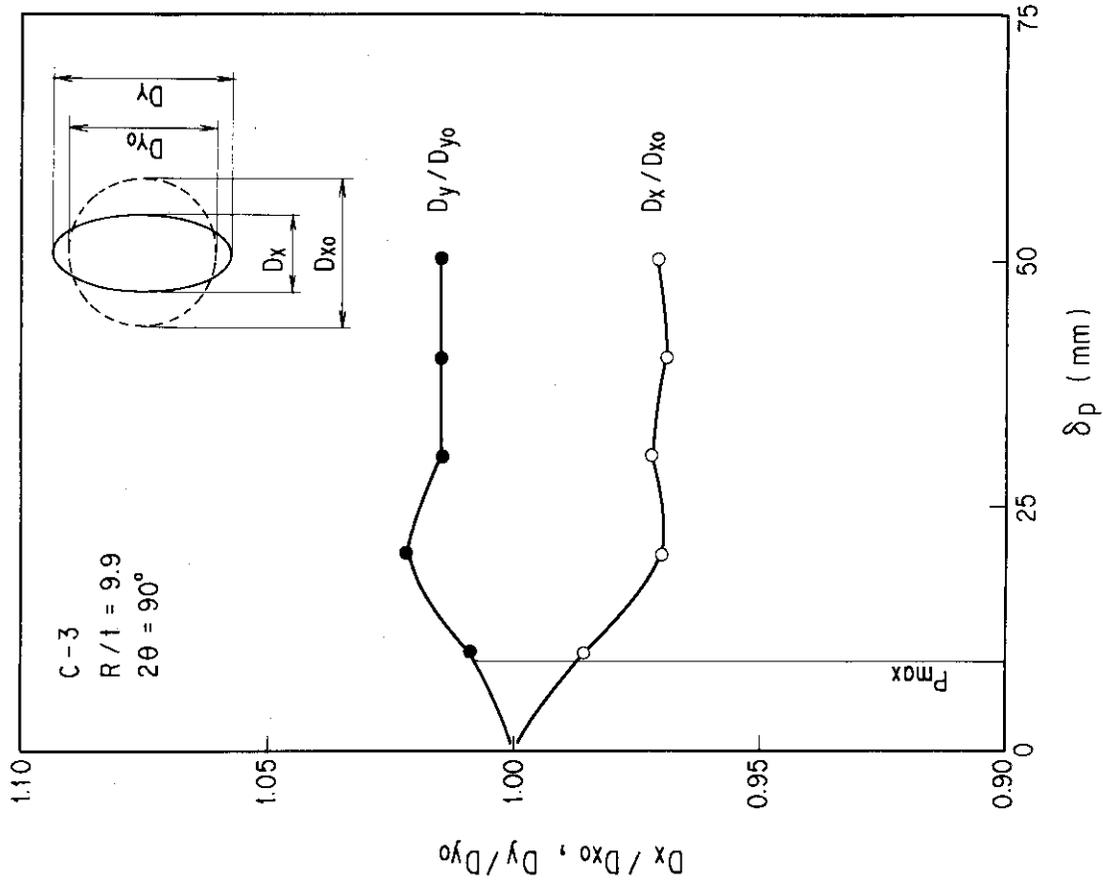


Fig. 4.23 Pipe ovalization measurement result of 3-inch STS42 pipe having R/t=9.9 and 2θ=90°

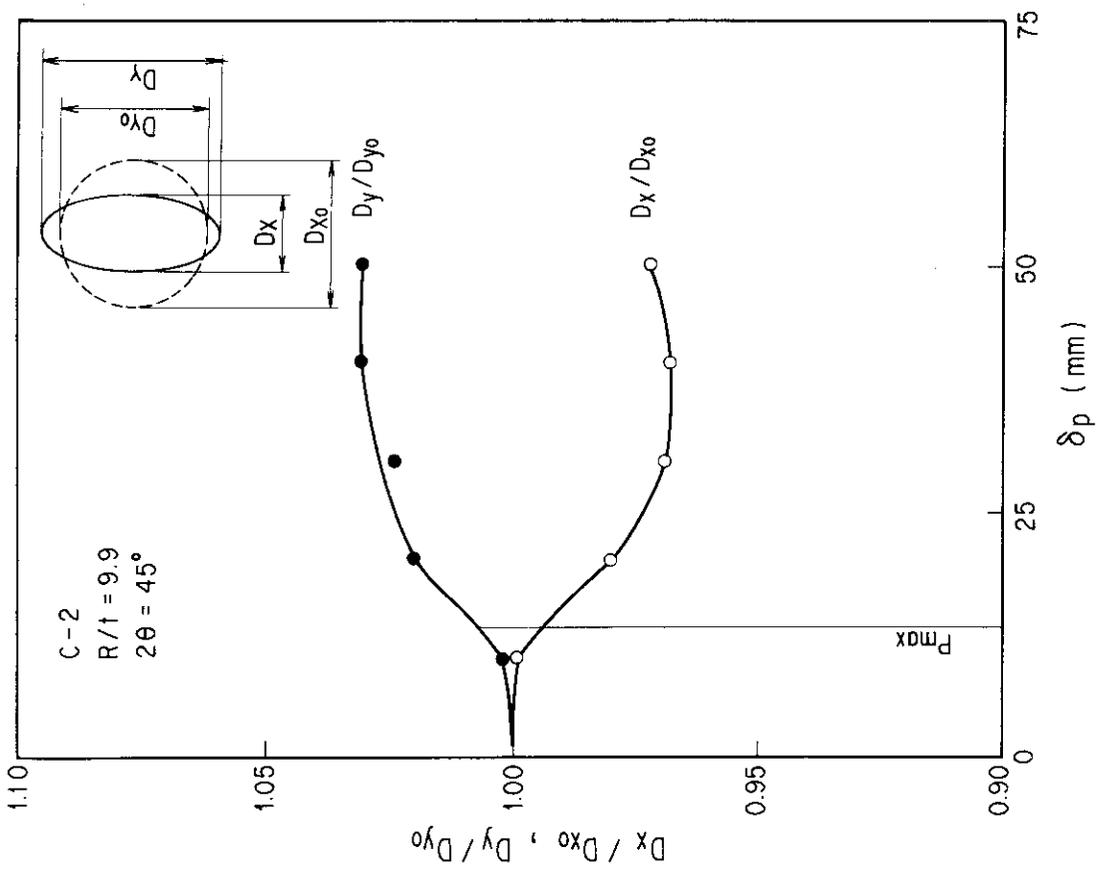


Fig. 4.22 Pipe ovalization measurement result of 3-inch STS42 pipe having R/t=9.9 and 2θ=45°

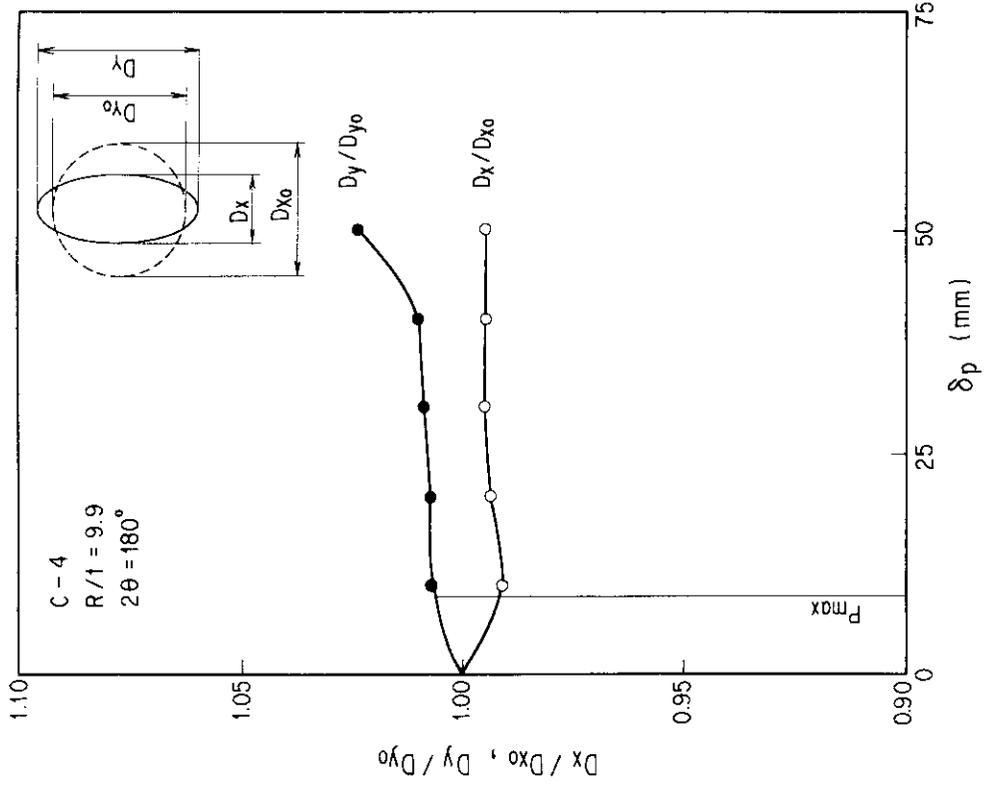


Fig. 4.24 Pipe ovalization measurement result of 3-inch STS42 pipe having R/t=9.9 and 2θ=180°

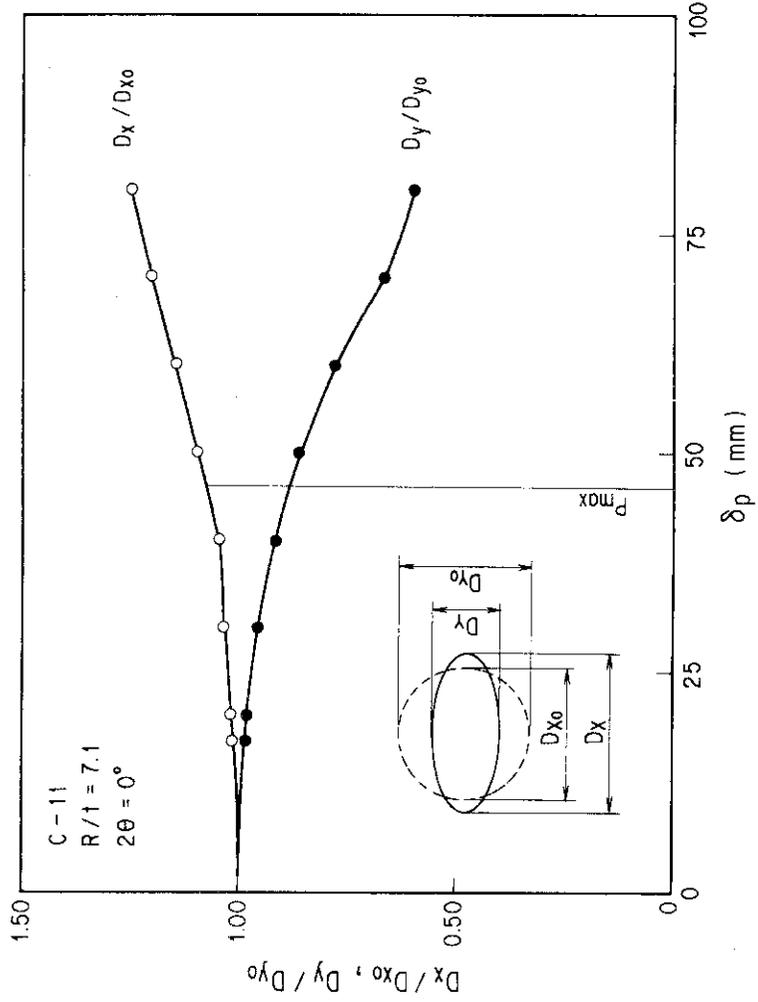


Fig. 4.25 Pipe ovalization measurement result of 3-inch STS42 pipe having R/t=7.1 without crack

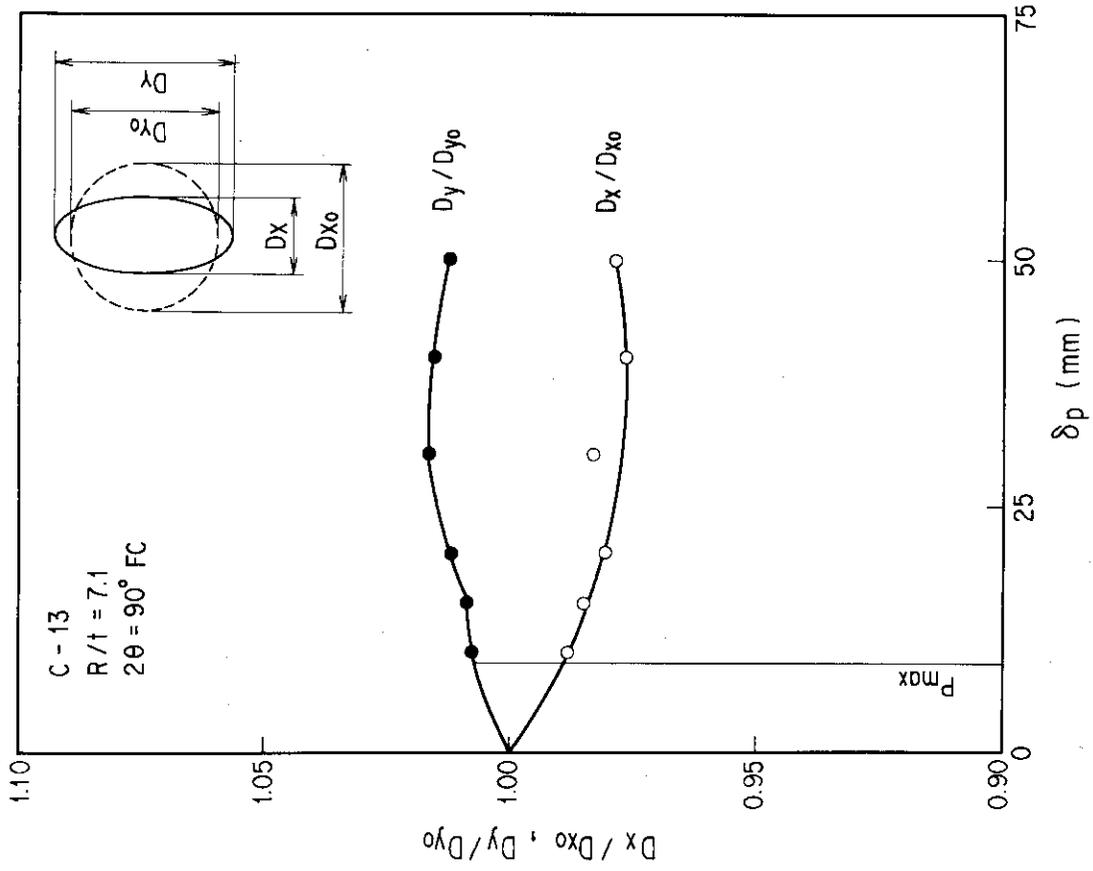


Fig. 4.27 Pipe ovalization measurement result of 3-inch STS42 pipe having R/t=7.1 and 2θ=90° fatigue crack

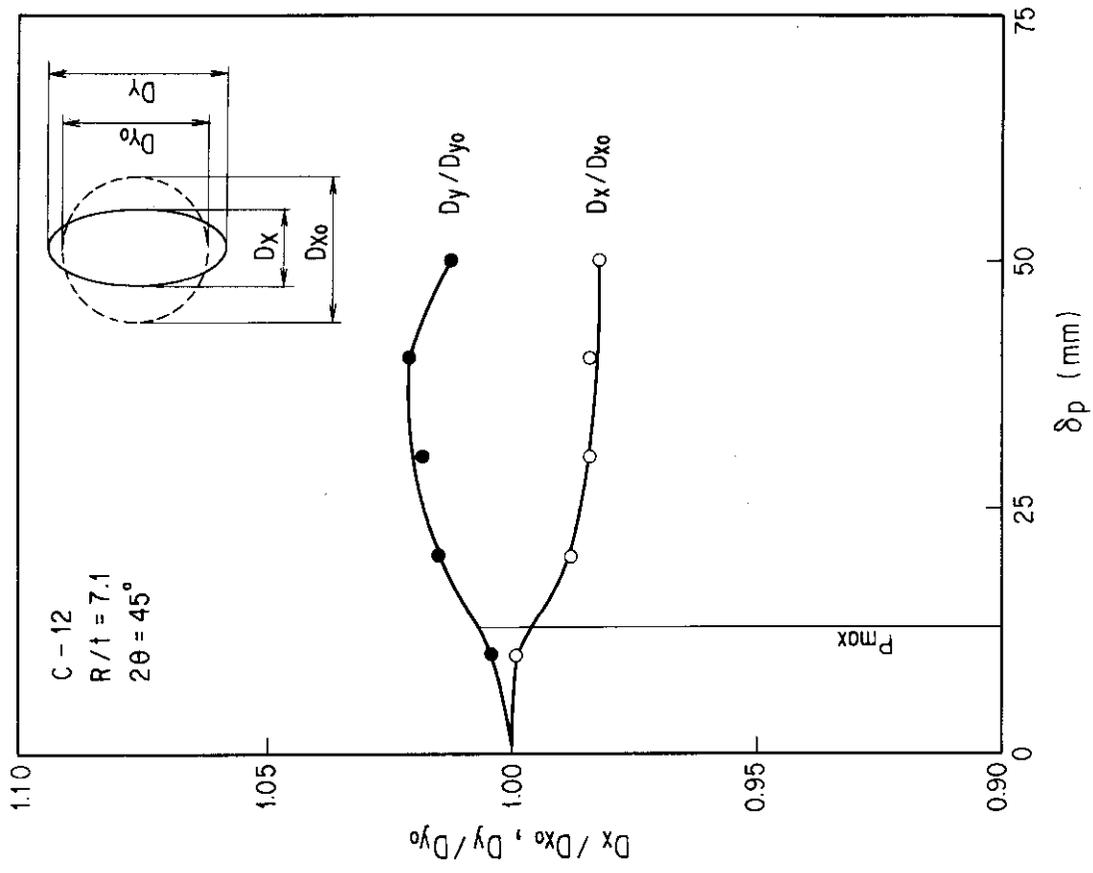


Fig. 4.26 Pipe ovalization measurement result of 3-inch STS42 pipe having R/t=7.1 and 2θ=45°

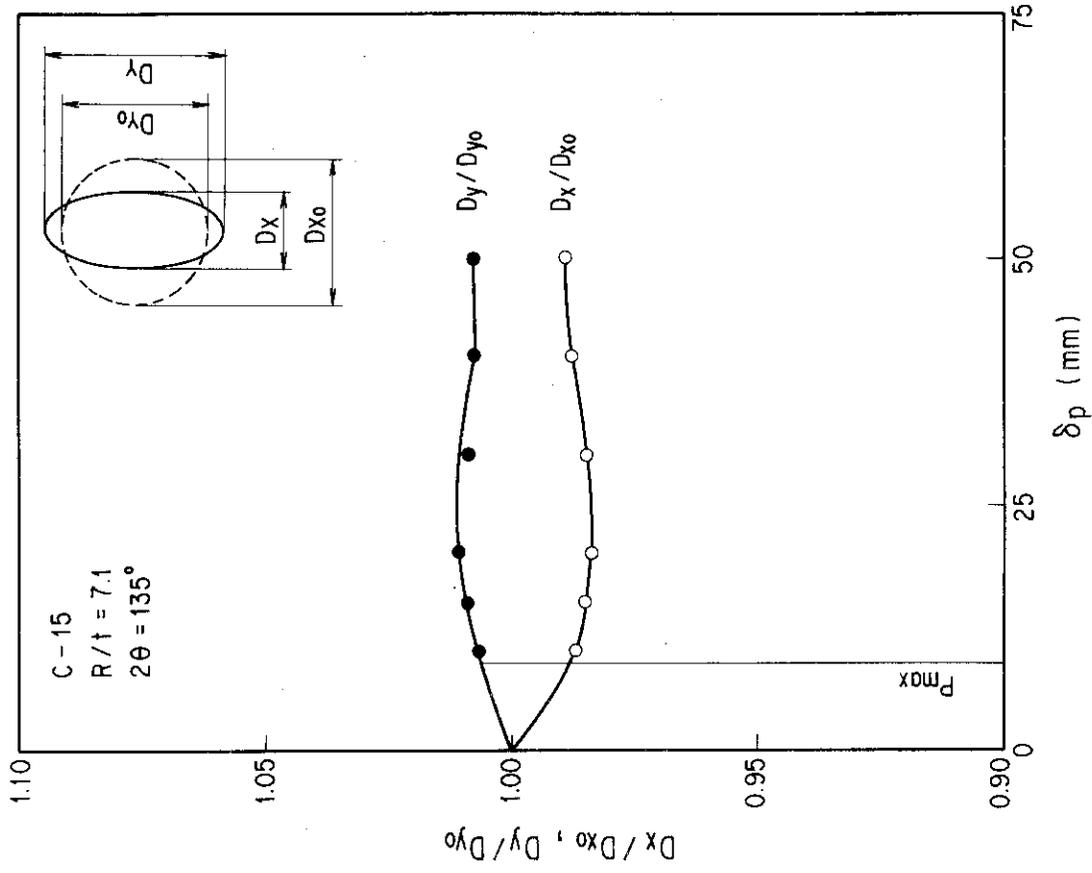


Fig. 4.29 Pipe ovalization measurement result of 3-inch STS42 pipe having R/t=7.1 and 2θ=135°

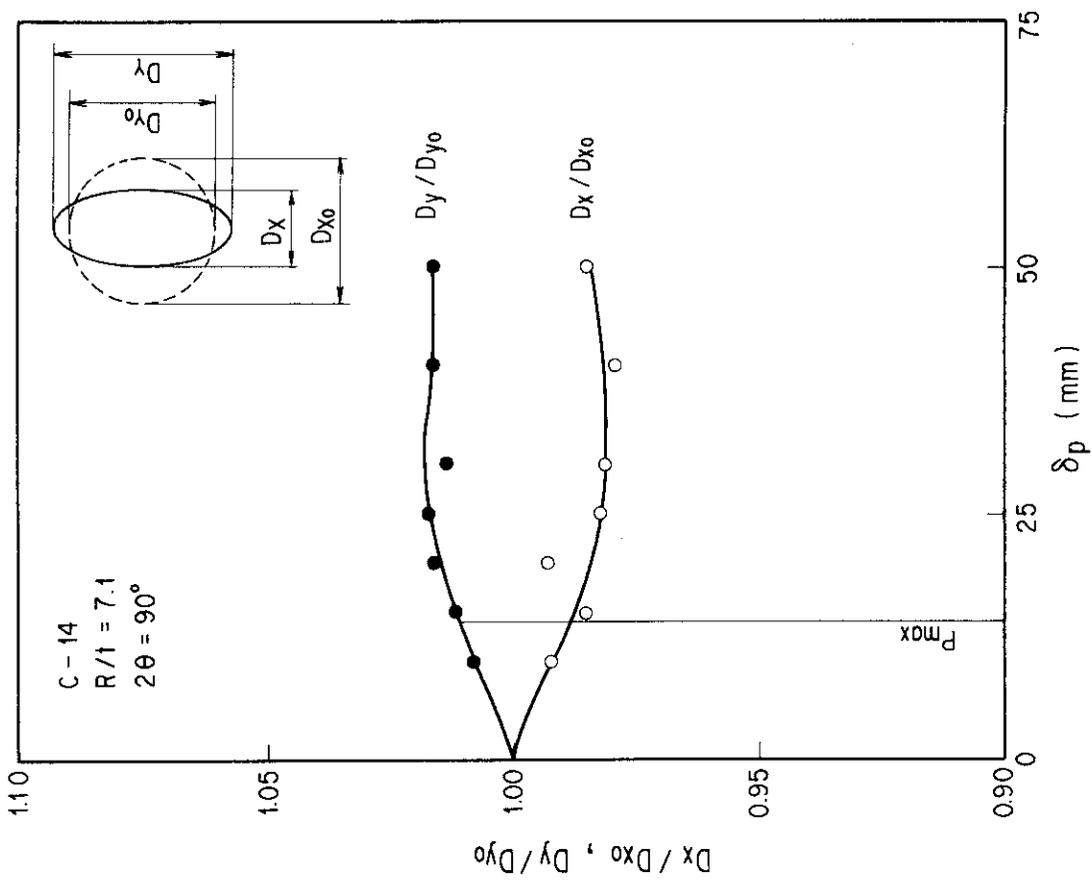


Fig. 4.28 Pipe ovalization measurement result of 3-inch STS42 pipe having R/t=7.1 and 2θ=90°

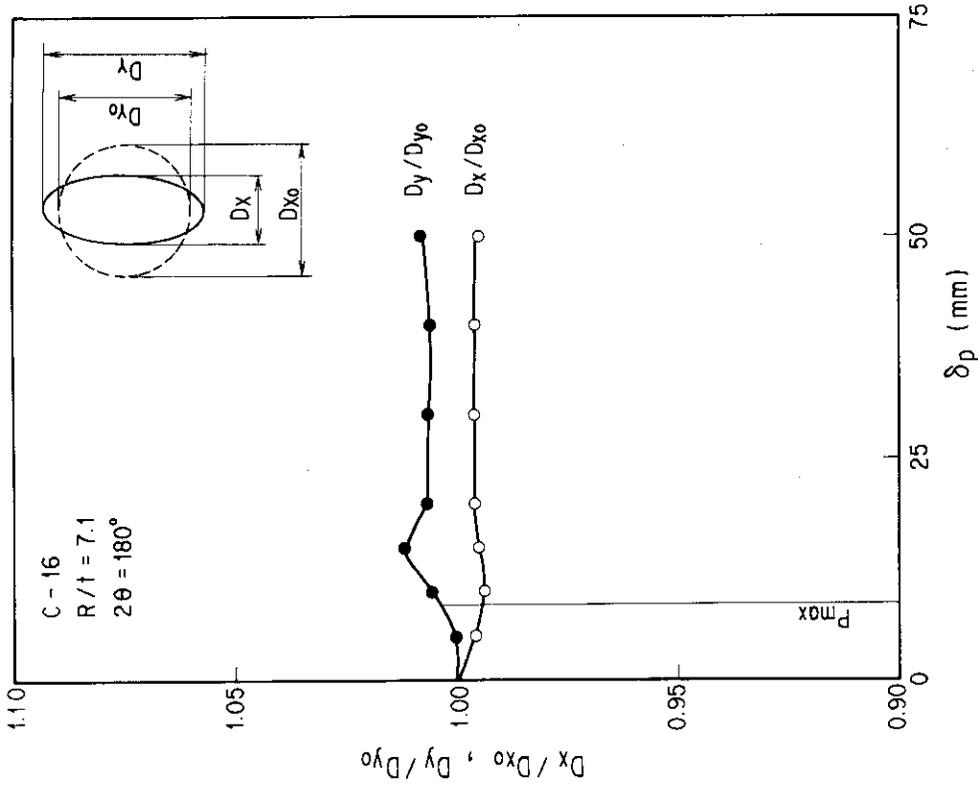


Fig. 4.30 Pipe ovalization measurement result of 3-inch STS42 pipe having R/t=7.1 and 2θ=180°

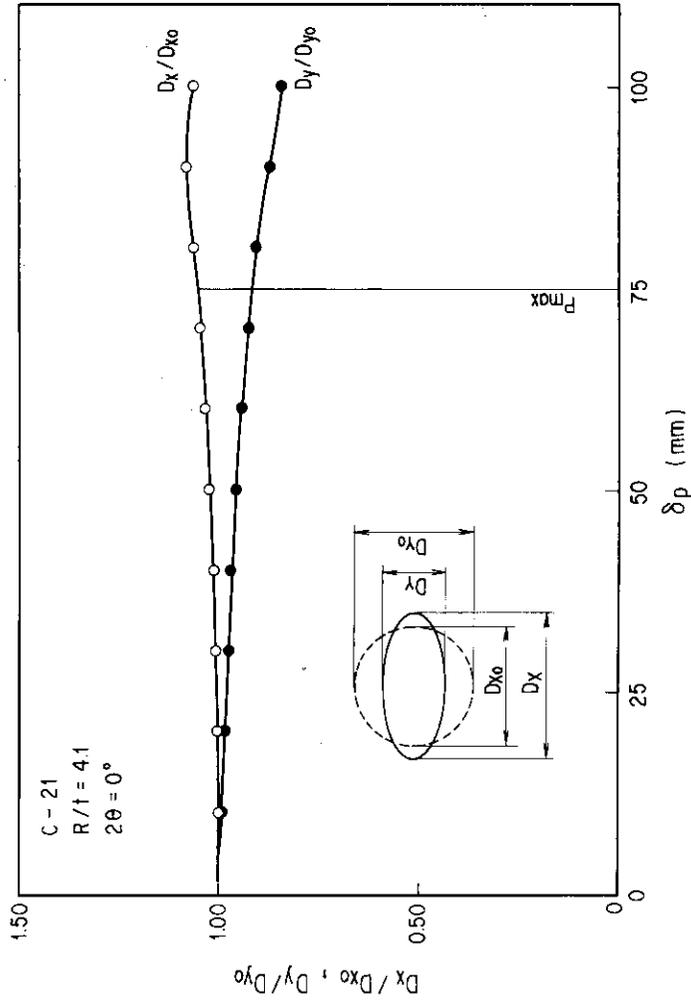


Fig. 4.31 Pipe ovalization measurement result of 3-inch STS42 pipe having R/t=4.1 without crack

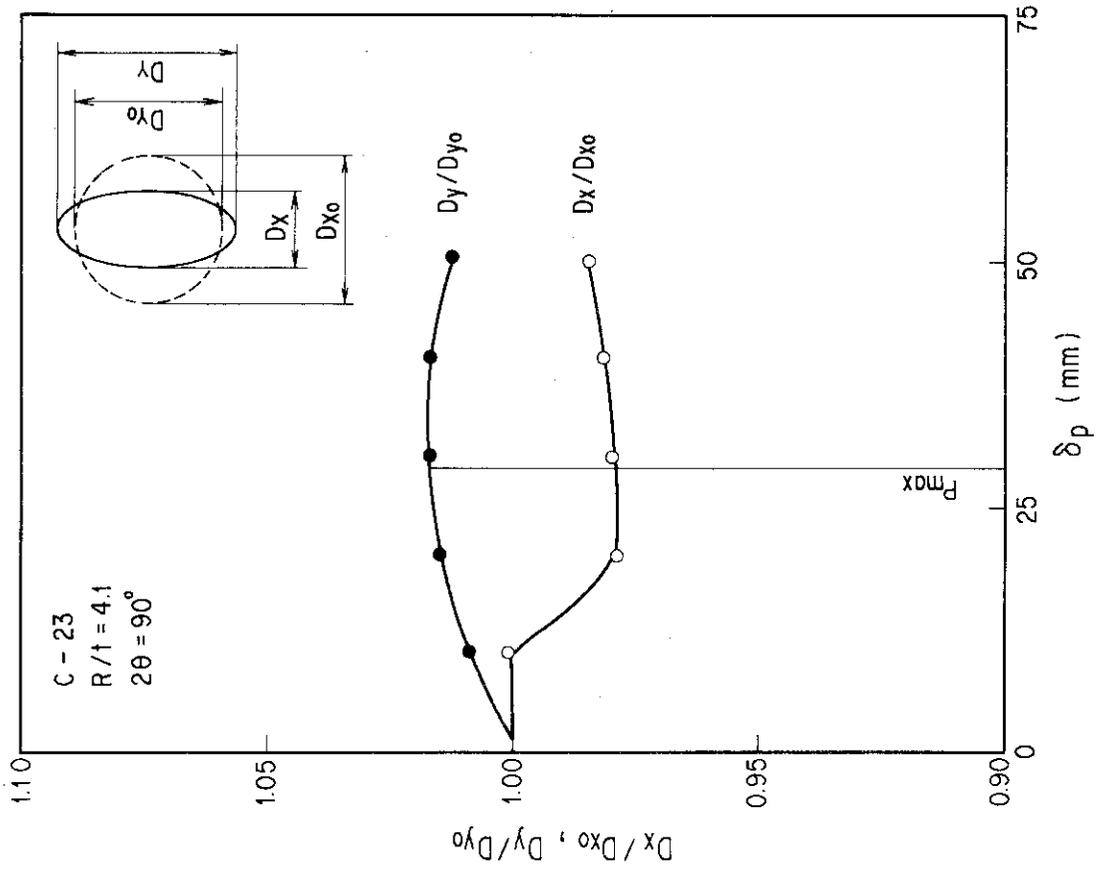


Fig. 4.33 Pipe ovalization measurement result of 3-inch STS42 pipe having $R/t=4.1$ and $2\theta=90^\circ$

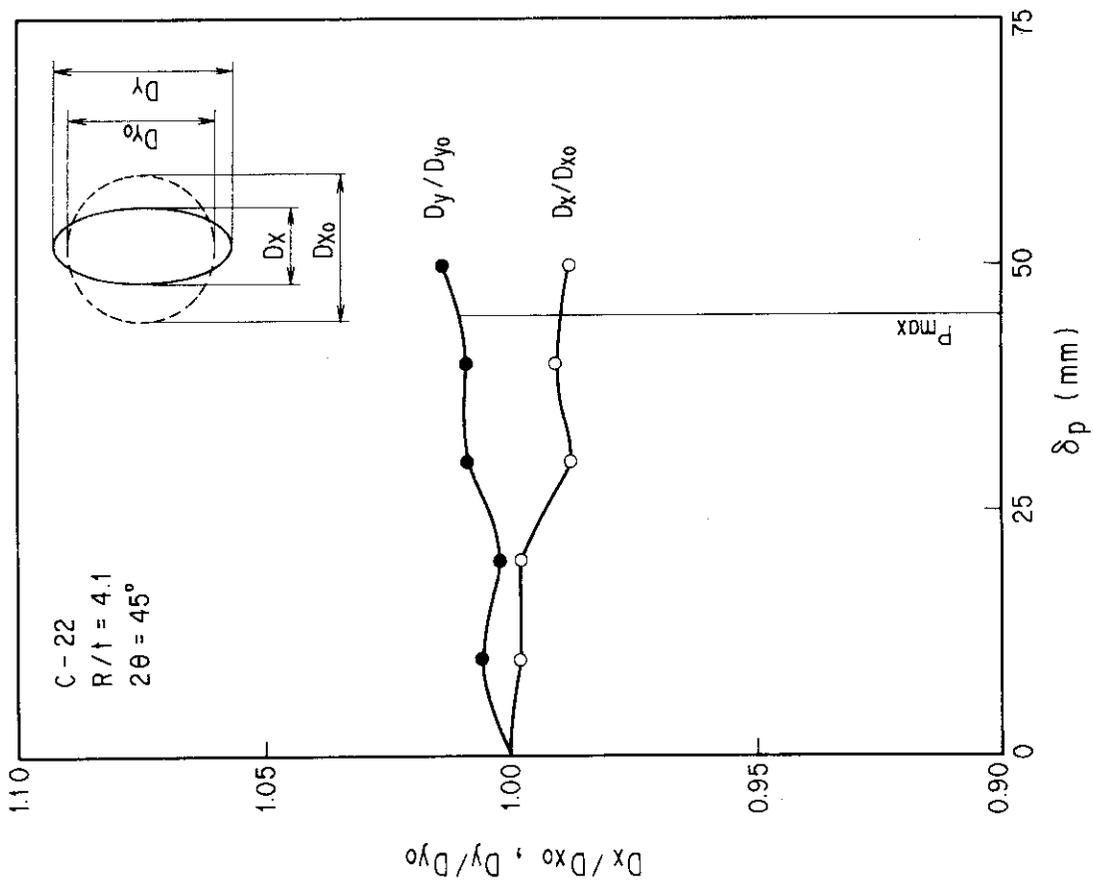


Fig. 4.32 Pipe ovalization measurement result of 3-inch STS42 pipe having $R/t=4.1$ and $2\theta=45^\circ$

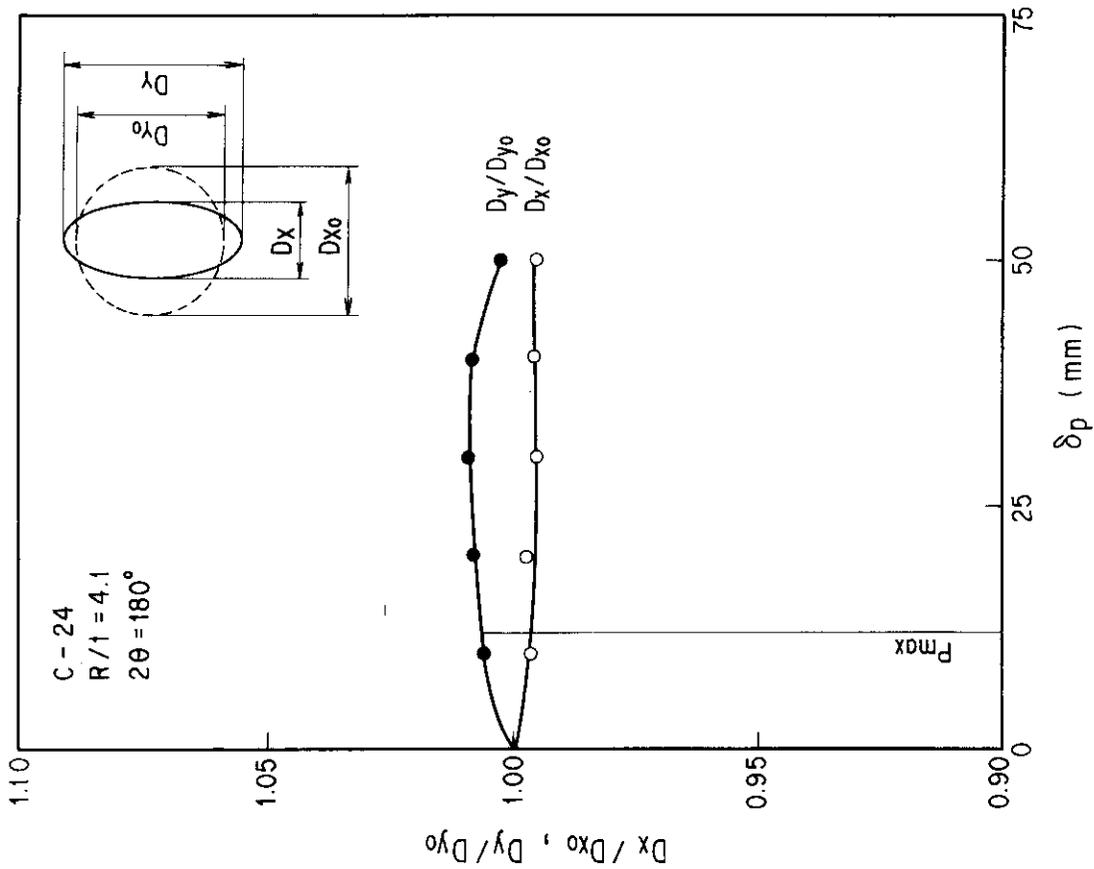


Fig. 4.34 Pipe ovalization measurement result of 3-inch STS42 pipe having R/t=4.1 and 2θ=180°

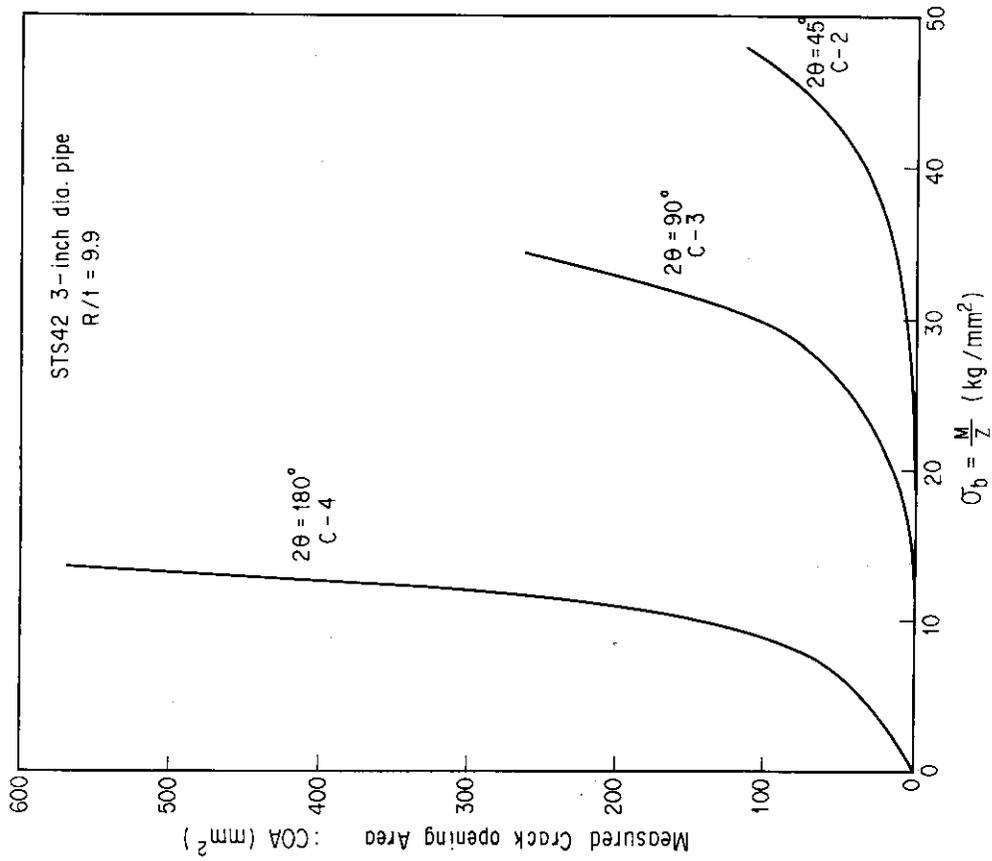


Fig. 4.35 Results of crack opening area measurement (R/t=9.9)

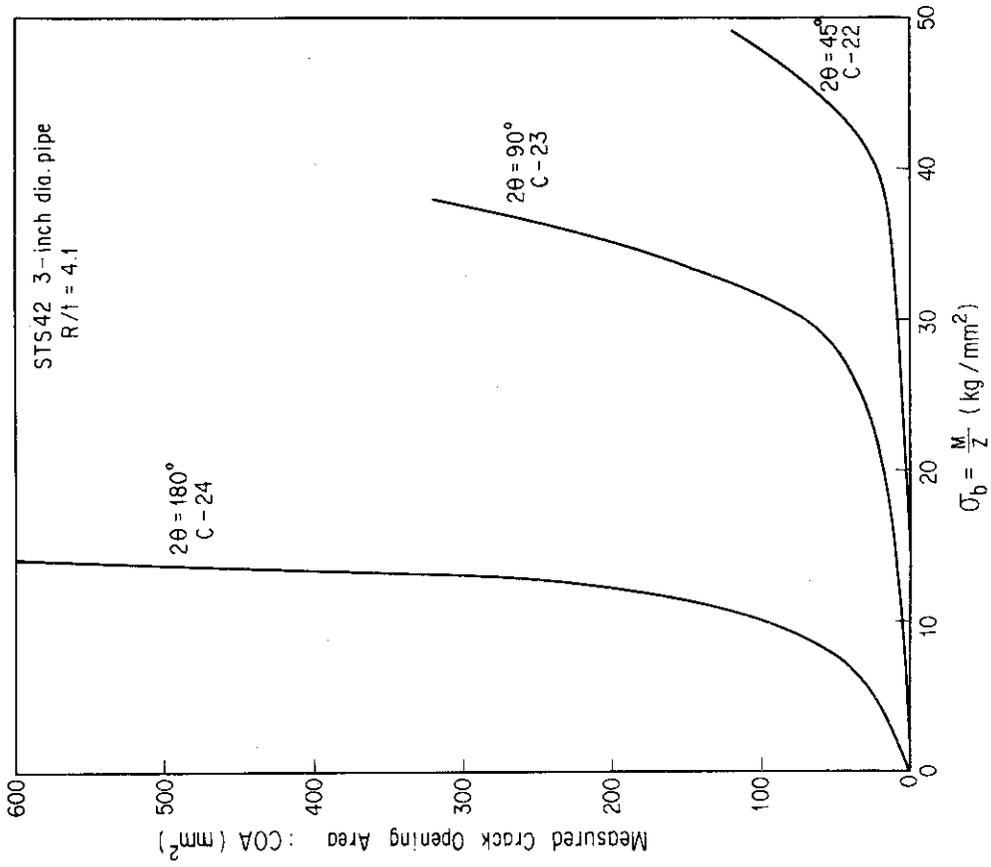


Fig. 4.37 Results of crack opening area measurement
(R/t=4.1)

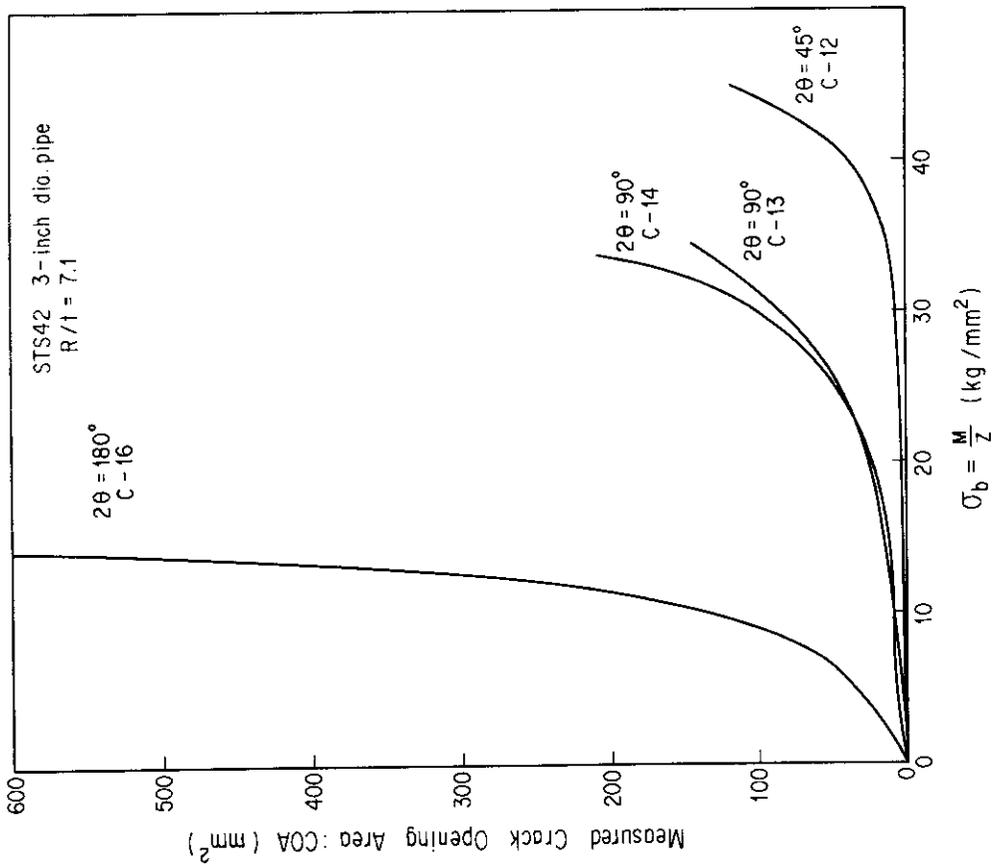


Fig. 4.36 Results of crack opening area measurement
(R/t=7.1)

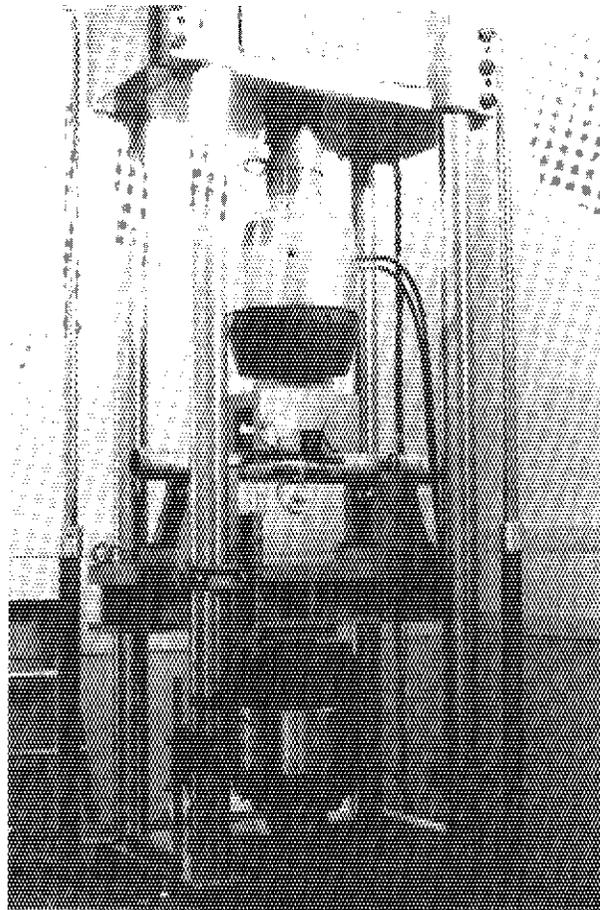


Photo. 4.1 External appearance of 100ton fatigue test machine

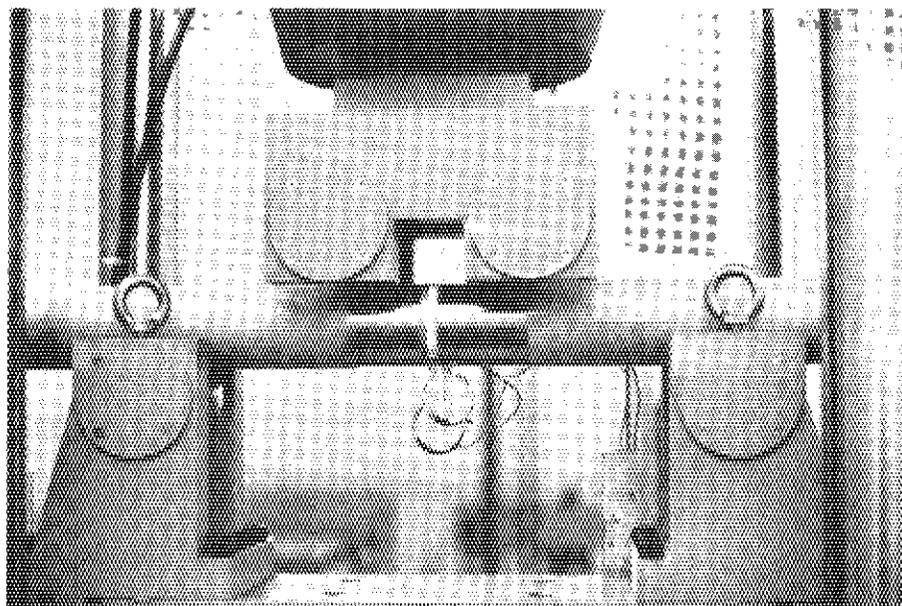


Photo. 4.2 Test apparatus for 3-inch diameter circumferential cracked pipe in four-point bending

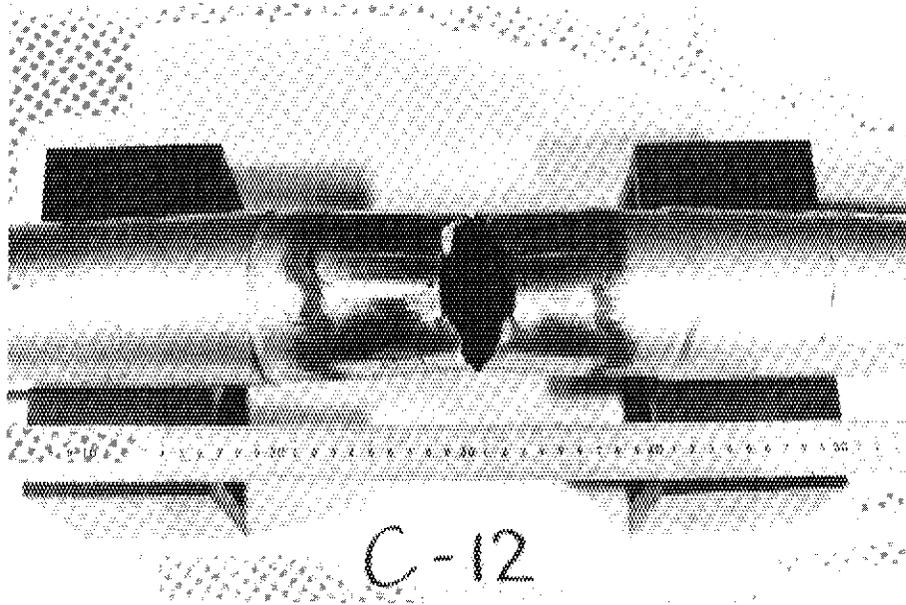


Photo. 4.3 Typical test pipe after four-point bending

5. 考 察

5.1 実断面応力基準による評価

貫通欠陥付配管の破壊挙動の予測法のひとつとして、M.F. Kanninen ら⁹⁾によって実断面応力基準 (Net-section collapse criterion) が提案されている。

実断面応力基準とは、Fig. 5.1 のモデルに示す通りき裂を有する構造部材が大きな塑性変形を受けた場合、き裂部およびリガメント部の応力分布が一様であると仮定し、その応力が流動応力に達した時、き裂の進展および部材の破壊が生じるという考え方である。

周方向貫通欠陥付配管に実断面応力基準を適用した場合、最大曲げモーメントは次式によって与えられる⁹⁾

$$\begin{aligned} M_{\text{pred}} &= 2 \sigma_f R^2 t (2 \sin \beta - \sin \theta) \\ &= 4 \sigma_f R^2 t \left(\cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \right) \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\beta = (\pi - \theta) / 2 \quad (5.2)$$

$$\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u) / 2 \quad (5.3)$$

Fig. 5.2 に、実断面応力基準により予測される最大モーメント曲線と実験結果との比較を示す。なお、流動応力には降伏強さと引張強さの平均値を用いた。同図より、疲労予き裂体も含め全ての実験データは予測破壊モーメント曲線を上回っていることが分かる。

Fig. 5.3 は、初期き裂角度をパラメータとして $M_{\text{exp}} / M_{\text{pred}}$ 値を示す。全て 1.0 を上回っており、実断面応力基準が安全側評価になっていることを示している。

5.2 流動応力の評価

実断面応力基準に基づく (5.1) 式を用いて貫通欠陥付配管試験から求められる流動応力を以下のように評価する。流動応力 S_f は次式に示す様に試験から得られる最大モーメント M_c から求められる²⁰⁾

$$S_f \equiv \frac{M_c}{4R^2t \left(\cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \right)} \quad (5.4)$$

Fig. 5.4 に、(5.4) 式から求まる配管の流動応力を、設計応力強さで除した値 S_f / S_m を示す。放電加工による予き裂付配管の流動応力は全て $3 S_m$ を越えている。一方、疲労き裂付配管では $3 S_m$ を若干下回っているがほぼ $3 S_m$ となっている。

5.3 J-R 曲線によるき裂進展抵抗の比較

3 インチ口径 STS 42 配管貫通欠陥試験体の 4 点曲げ試験より得られた荷重-荷重点変位-き

裂進展量の測定結果より配管のき裂進展抵抗を示す J-R 曲線を求めた。J 値は、

$$J = J_e + J_p \quad (5.5)$$

より、弾性成分と塑性成分の和として表わされる。ここで、 J_e 値の計算は、J. L. Sanders が提案した式²⁵⁾、 J_p 値の計算は、A. Zahoor and M. F. Kanninen および J. Pan の提案した式に基づき作成した計算プログラム²⁶⁾²⁷⁾を用い行った。

Fig. 5.5 ~ Fig. 5.7 は、半径肉厚比 R/t を一定とした場合の初期欠陥角度の影響を示す。横軸 Δa_m は、配管外表面でのき裂進展量 Δa を次式により肉厚中央部に於けるき裂進展量 Δa_m に換算した値である。

$$\Delta a_m = \Delta a \cdot \frac{2R}{D_0} \quad (5.6)$$

Fig. 5.8 ~ Fig. 5.10 に、初期欠陥角度を一定とした場合の半径肉厚比 R/t の J-R 曲線への影響を示す。 $R/t = 9.9$ と $R/t = 7.1$ の J-R 曲線は概ね一致しているが、 $R/t = 4.1$ の場合 J-R 曲線は若干大きくなっている。

Fig. 5.11 は、配管口径の影響について示したものである。3 インチと 6 インチ口径配管の J-R 曲線は、ほぼ一致しているが、12 インチ口径については、 Δa_m が約 3 mm を越えると J 値が他を大きく上回っている。

Fig. 5.12 は、 $R/t = 7.1$ 、 $2\theta = 90^\circ$ の場合の切欠き尖鋭度の影響を調べたものである。 Δa_m が約 10 mm までは、初期欠陥が放電加工である方が疲労予き裂の場合に比べ J 値が上回っている。 Δa_m が 10 mm を越えると、両者は概ね一致する。また、Fig. 4.10 と Fig. 4.11 の荷重点変位-き裂進展量曲線を比較すると、初期欠陥が放電加工の場合の曲線を比較すると、初期欠陥が放電加工の場合の曲線を Δa 方向に -2.0 mm 平行移動すれば、疲労予き裂の場合の曲線とほぼ重なる。このことから、放電加工のき裂進展量曲線に -2.0 mm 加えることにより、疲労予き裂の尖鋭度の影響を考慮することができる。すなわち、3 インチ口径 STS 42 配管では、放電加工を含む試験体の J-R 曲線を、 Δa_m 方向に +2.0 mm 平行移動することにより疲労予き裂を含む試験体の J-R 曲線を推定できることが分かる。

5.4 偏平化挙動の評価

配管断面の偏平化については、これまでに 6 インチ配管等の測定結果より、き裂なしの場合および初期き裂角度が小さいためき裂進展がない場合には、x 方向に大きく偏平化し、逆に、き裂進展がみられる場合は y 方向に偏平化するという知見が得られている。^{21),24)}

本試験に於いても同様な結果が得られた。

Fig. 5.13 に、最大荷重点に於ける偏平化率と初期き裂角度の関係を示す。 $2\theta = 0^\circ$ (き裂なし) と $2\theta = 45^\circ$ の間で偏平化の方向が逆転しており、この間にき裂進展が生じない最大の初期き裂角度が存在すると考えられる。

Fig. 5.14 に、偏平化率と半径肉厚比 R/t の関係を示す。 $R/t = 7.1$ と $R/t = 9.1$ の偏平化率は、ほぼ一致しているが $R/t = 4.1$ では他の二者とは異っており、肉厚効果の影響を示している。

5.5 き裂開口面積の評価

き裂開口面積の簡易評価法は種々提案されている。^{28),29),30)}本報のき裂開口面積の簡易評価は Appendix C および Appendix D に示す COD および CTOD データから算出した。

簡易評価式 1) は、き裂開口形状を Fig. 5.15 (1) に示す楕円にモデル化し、次式とした。

$$COA(1) = \frac{\pi \cdot a_0 \cdot COD}{2} \quad (5.7)$$

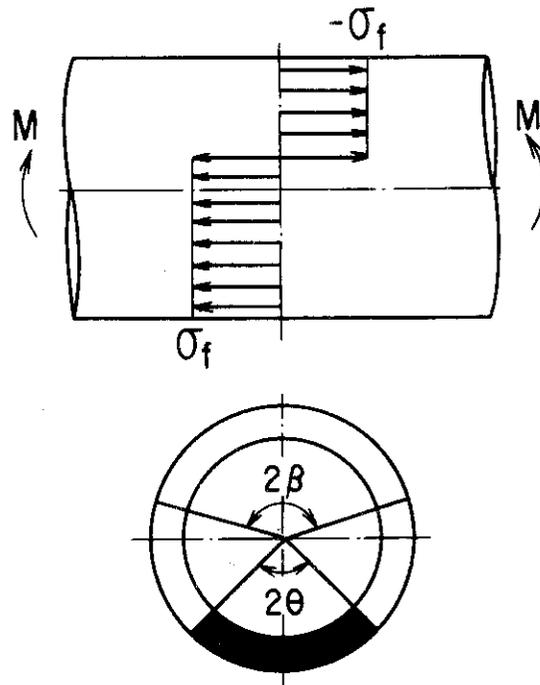
Fig. 5.16 に、テープに転写したき裂形状から求めたき裂開口面積の測定値と (5.7) 式による計算値(1)との相関を示す。同図から明らかなように、計算値(1)は、測定値より約10%高くなっていることが分かる。

次に、Fig. 5.15 (2) に示す様に、き裂開口形状を $2a_0 \cdot CTOD$ の矩形と長軸半径 a_0 、短軸半径 $(COD - CTOD)/2$ の楕円が合体したものにモデル化して開口面積を評価した。簡易評価式 2) は、このモデルを用い次式により行った。

$$COA(2) = \pi a_0 \frac{COD - CTOD}{2} + 2 a_0 \cdot CTOD \quad (5.8)$$

Fig. 5.17 および Fig. 5.18 に、測定値と (5.8) 式による計算値(2)の相関を示す。同図より、測定値の約 1.2 倍が計算値(2)とフィットしていることが分かる。

本試験では、き裂開口面積の簡易評価式として、き裂形状を楕円にモデル化した (5.7) 式の方が良好であった。



$$M_{pred} = 2\sigma_f R^2 t (2 \sin \beta - \sin \theta)$$

$$\beta = \frac{\pi - \theta}{2}$$

$$\sigma_f = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2}$$

Fig. 5.1 Fracture evaluation by net-section collapse criterion

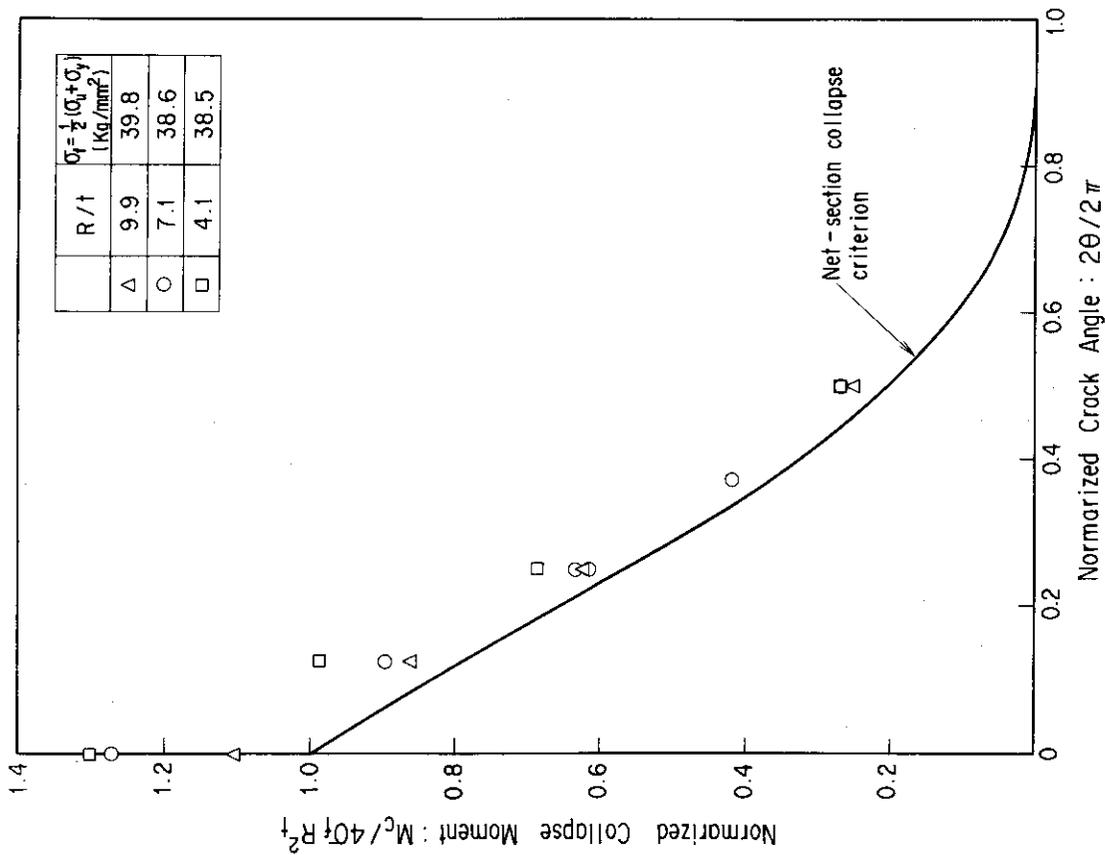


Fig. 5.2 Comparison between net-section collapse criterion and test result for 3-inch diameter STS42 carbon steel pipes

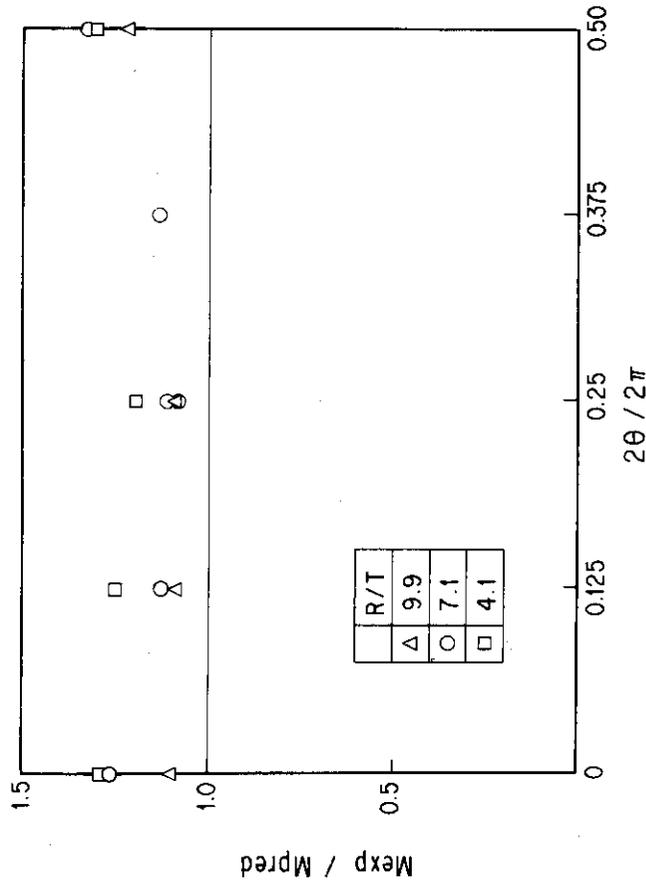


Fig. 5.3 Comparison between predicted net-section collapse moment and test result for 3-inch diameter STS42 carbon steel pipes

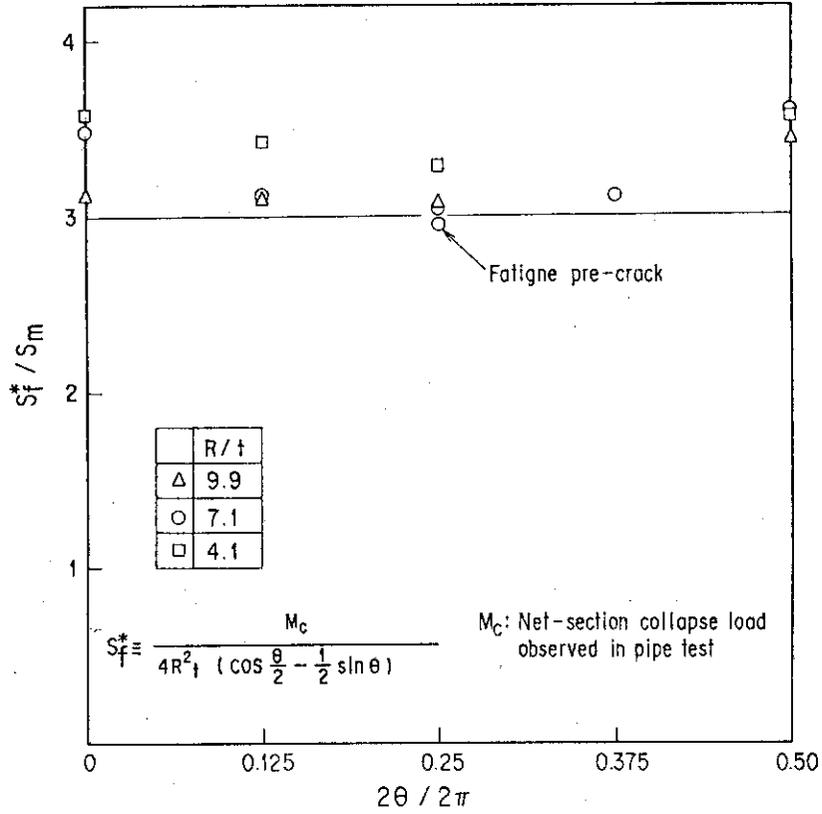


Fig. 5.4 Flow stresses of through-wall cracked pipes determined by 3-inch diameter STS42 carbon steel pipe tests

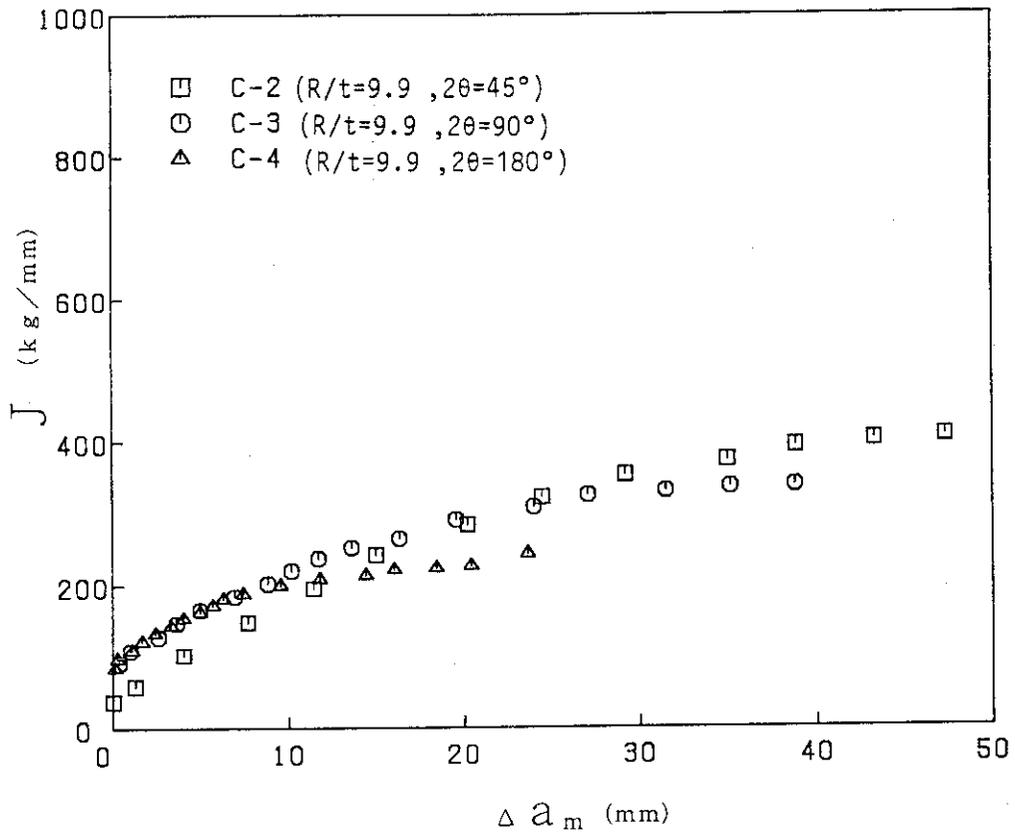


Fig. 5.5 Effect of initial crack angle (2θ) on J-Resistance curves of Sch40 pipes

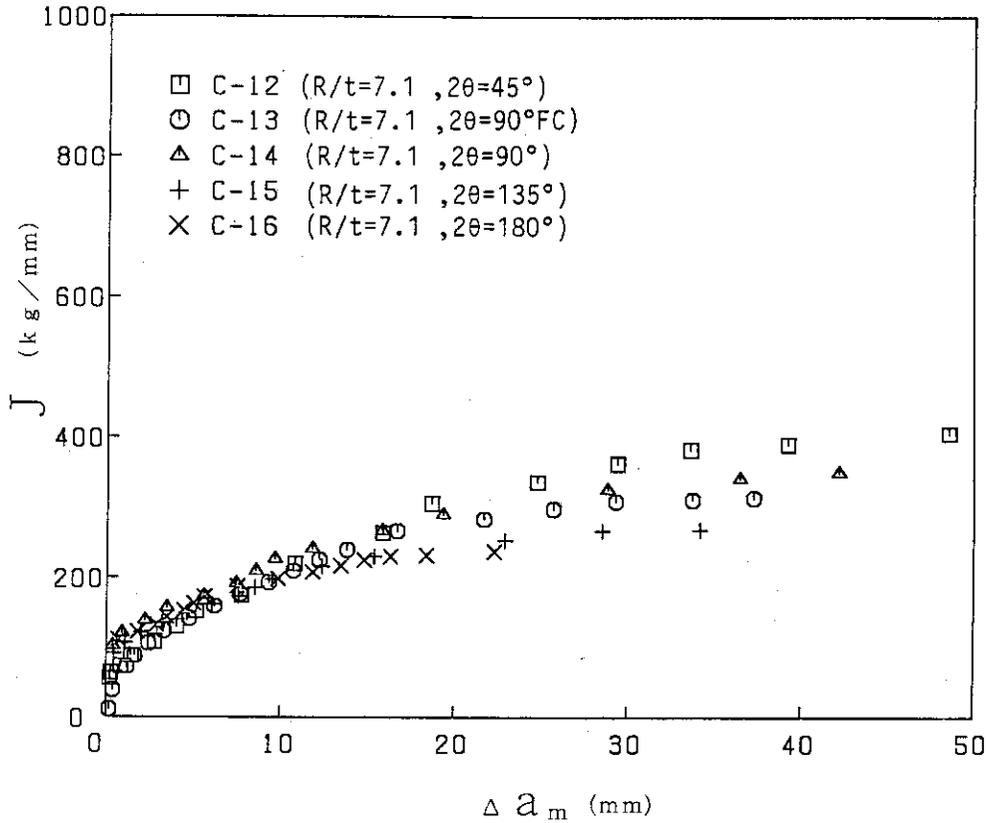


Fig. 5.6 Effect of initial crack angle (2θ) on J-Resistance curves of Sch80 pipes

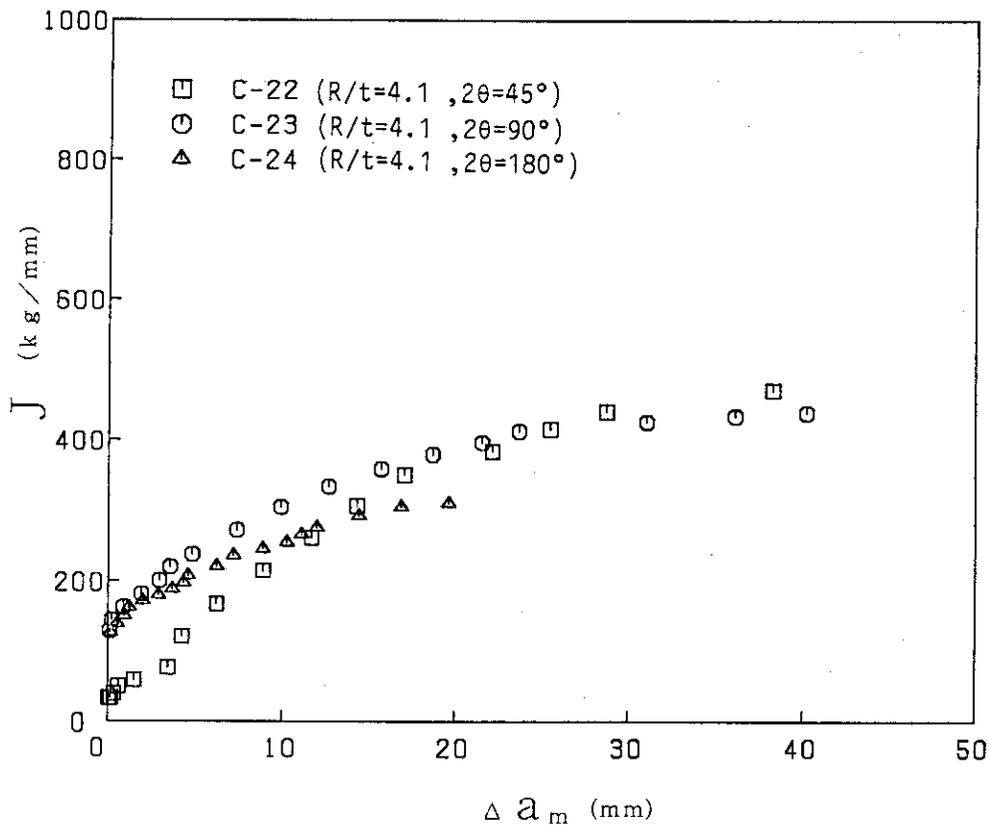


Fig. 5.7 Effect of initial crack angle (2θ) on J-Resistance curves of Schl60 pipes

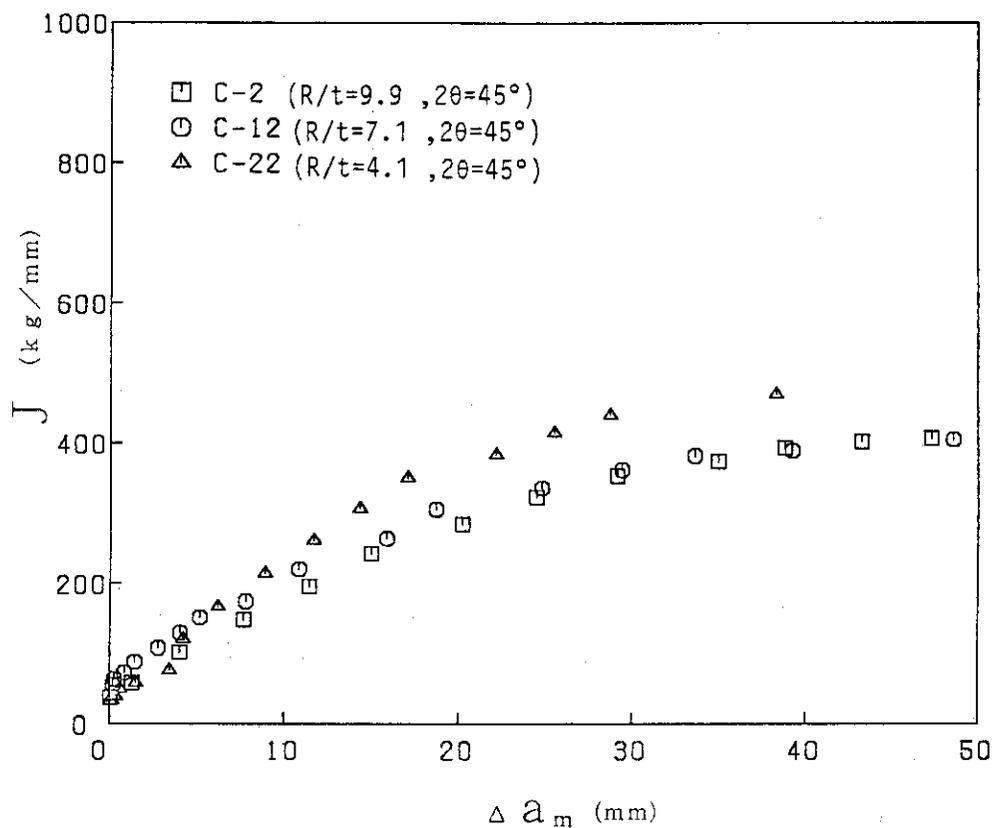


Fig. 5.8 Effect of R/t on J-Resistance curves of $2\theta=45^\circ$ pipes

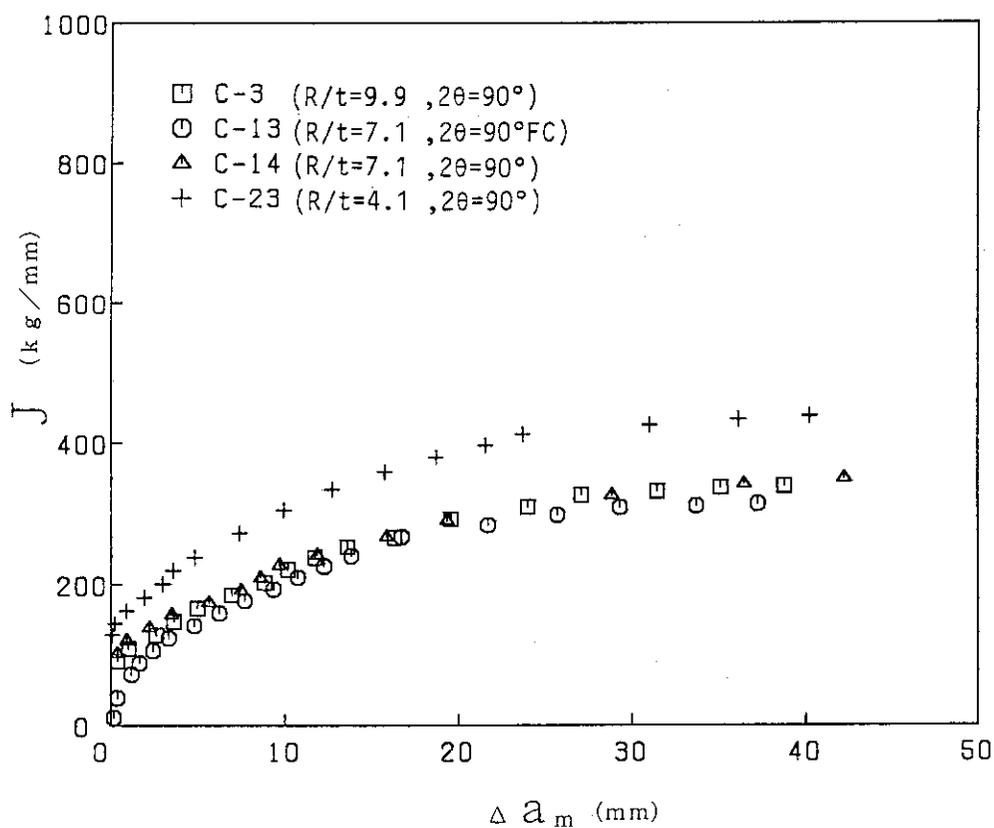


Fig. 5.9 Effect of R/t on J-Resistance curves of $2\theta=90^\circ$ pipes

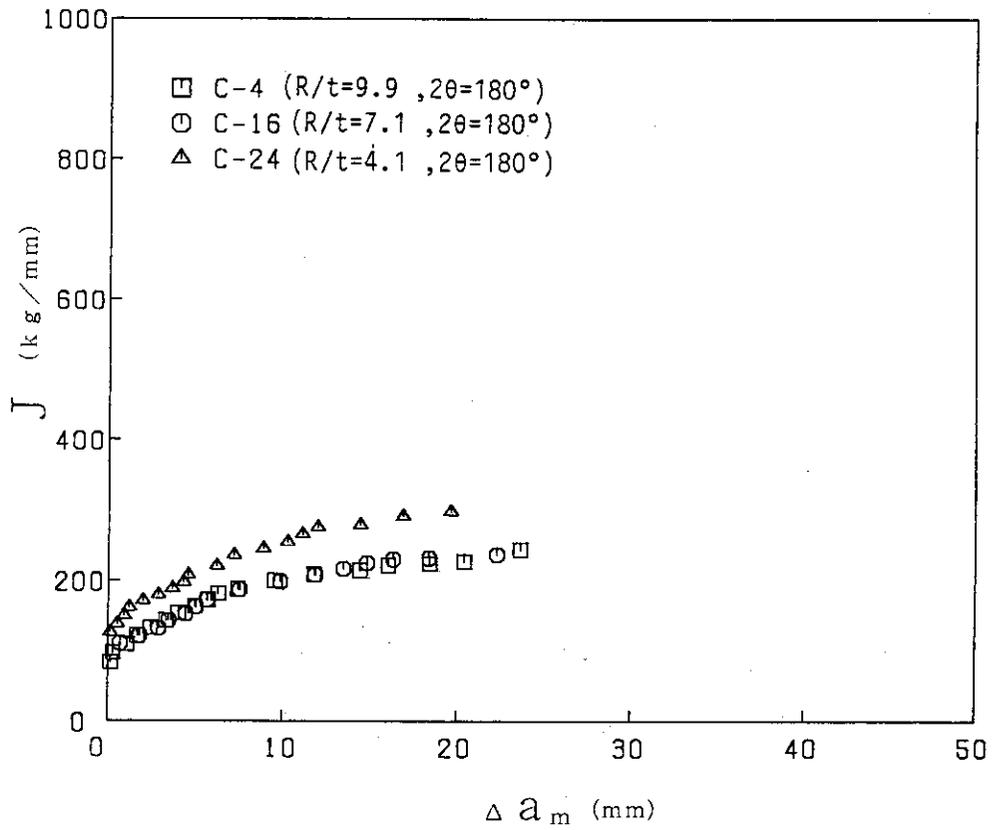


Fig. 5.10 Effect of R/t on J-Resistance curves of $2\theta=180^\circ$ pipes

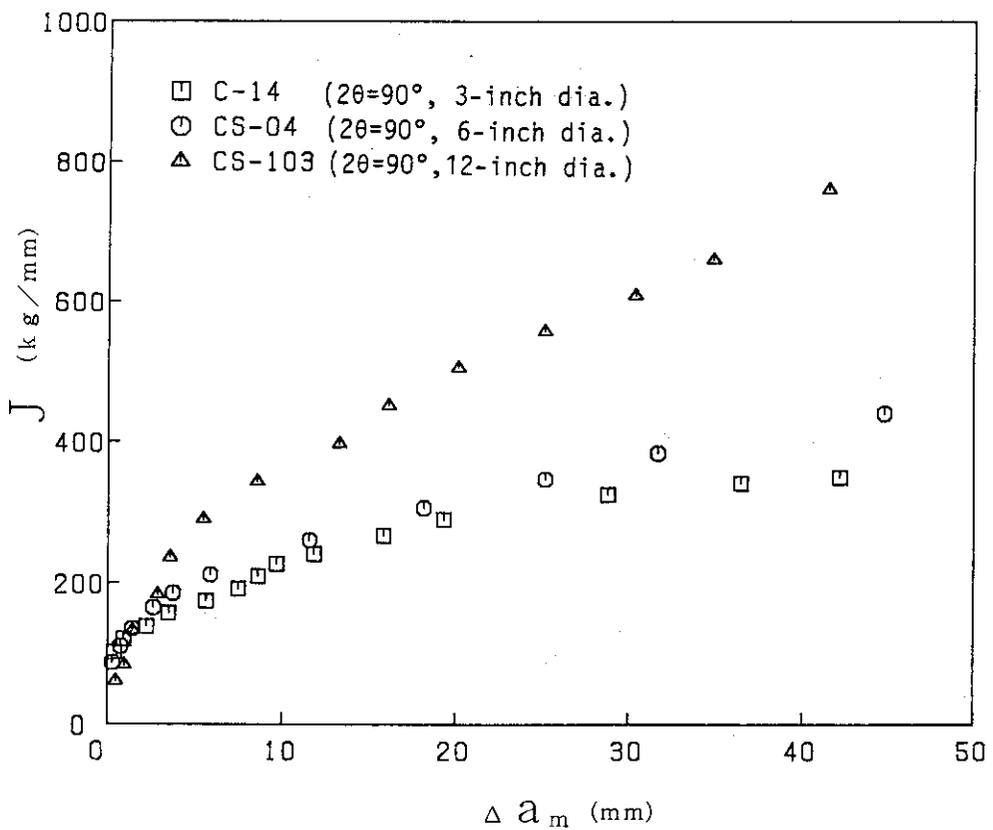


Fig. 5.11 Effect of pipe diameter on J-Resistance curves

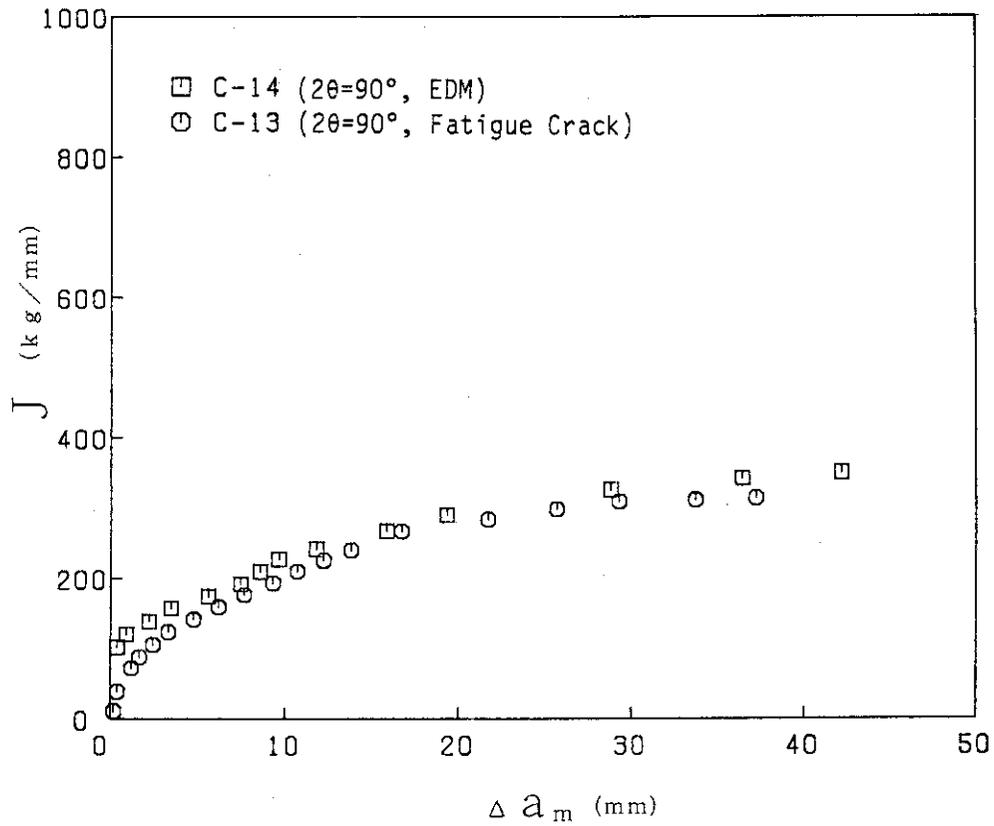


Fig. 5.12 Comparison of J-Resistance curves between EDM and fatigue pre-cracked pipes

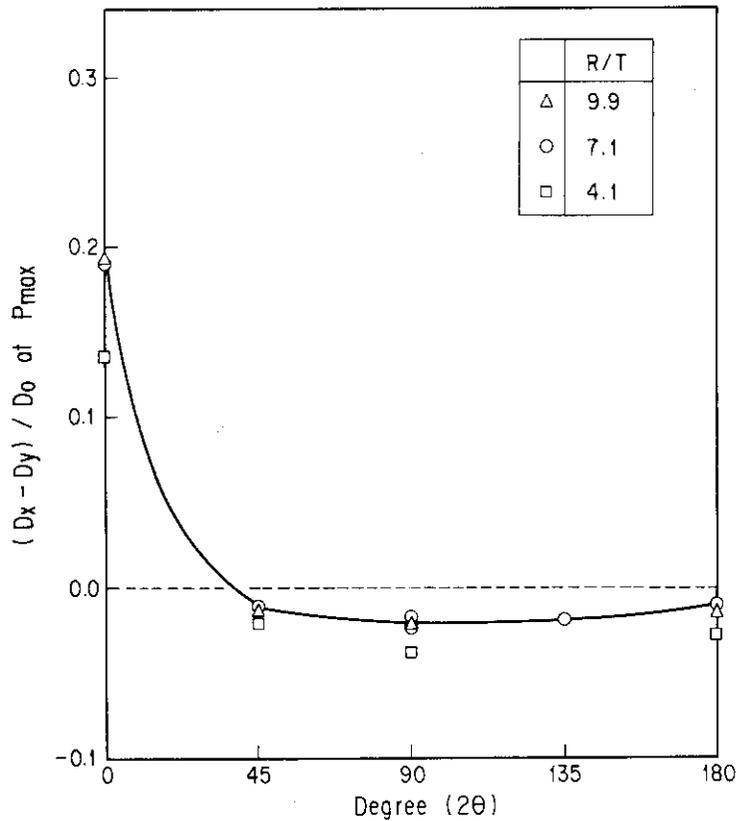
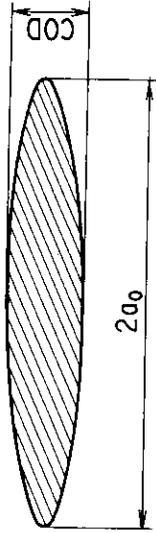


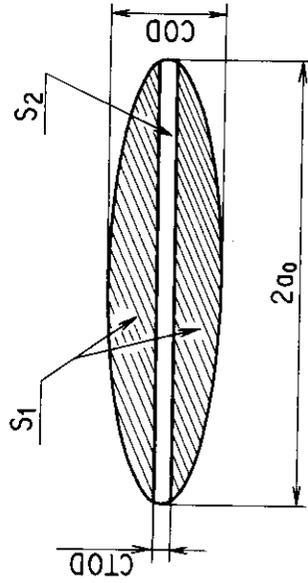
Fig. 5.13 Ovalization ratio at P_{max} versus initial crack angle for 3-inch diameter STS42 carbon steel pipes

Model (1)



$$COA(1) = \pi a_0 COD / 2$$

Model (2)



$$S_1 = \pi a_0 (COD - CTOD) / 2$$

$$S_2 = 2a_0 \cdot CTOD$$

$$COA(2) = S_1 + S_2$$

Fig. 5.15 Simplified model of crack shape

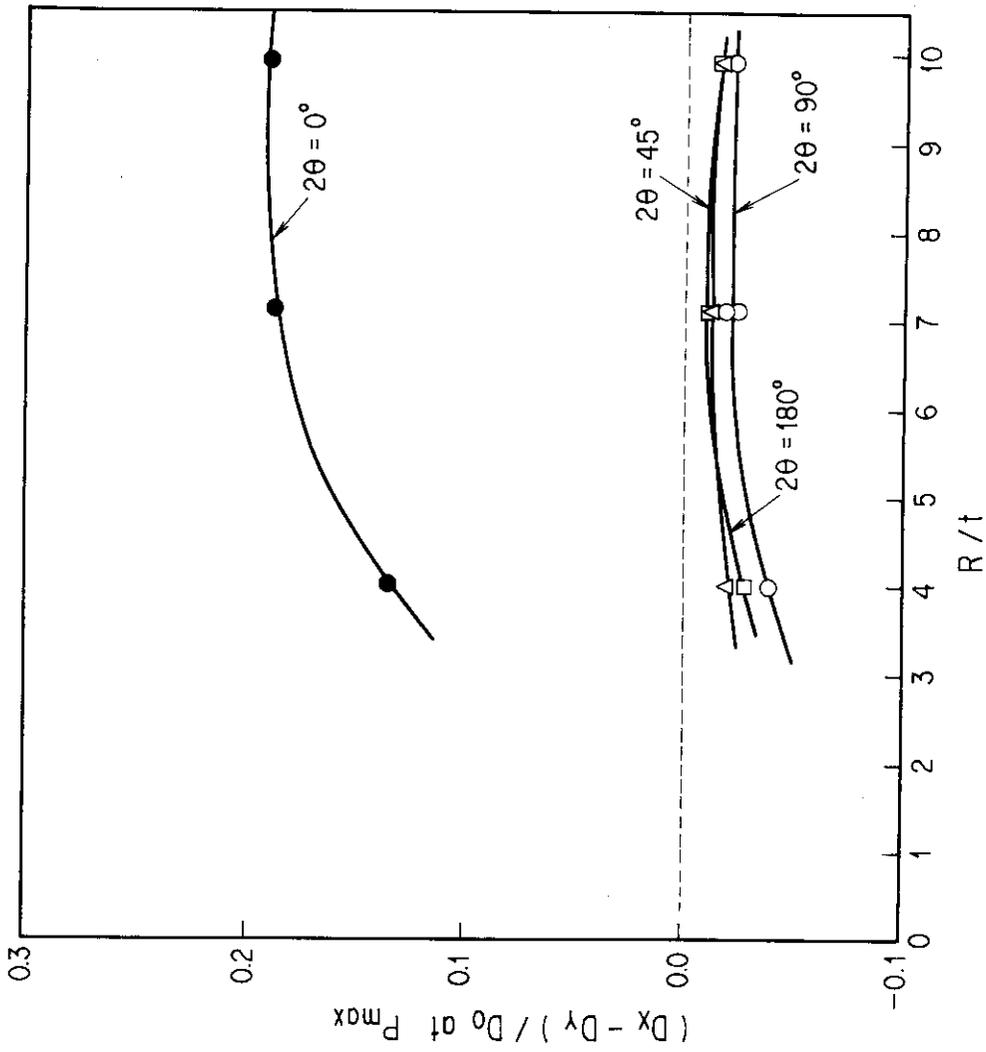


Fig. 5.14 Ovalization ratio at P_{max} versus R/t

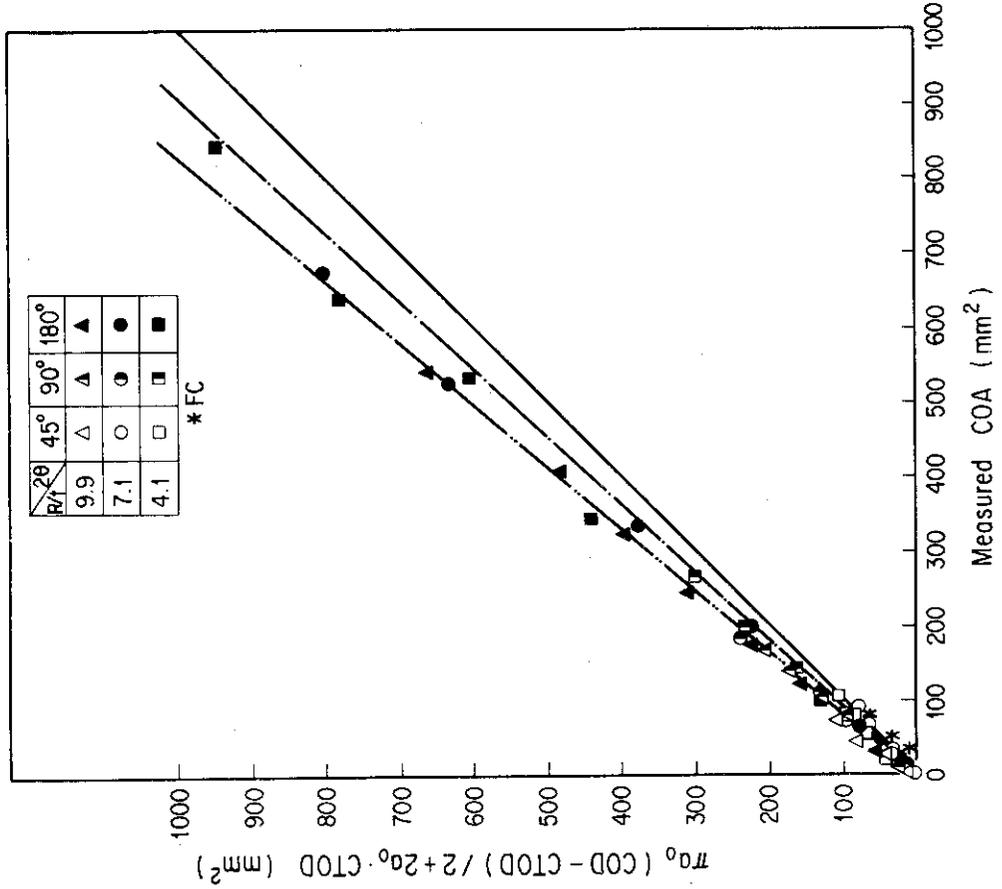


Fig. 5.17 Correlation between calculated COA by formula (5.8) and measured COA

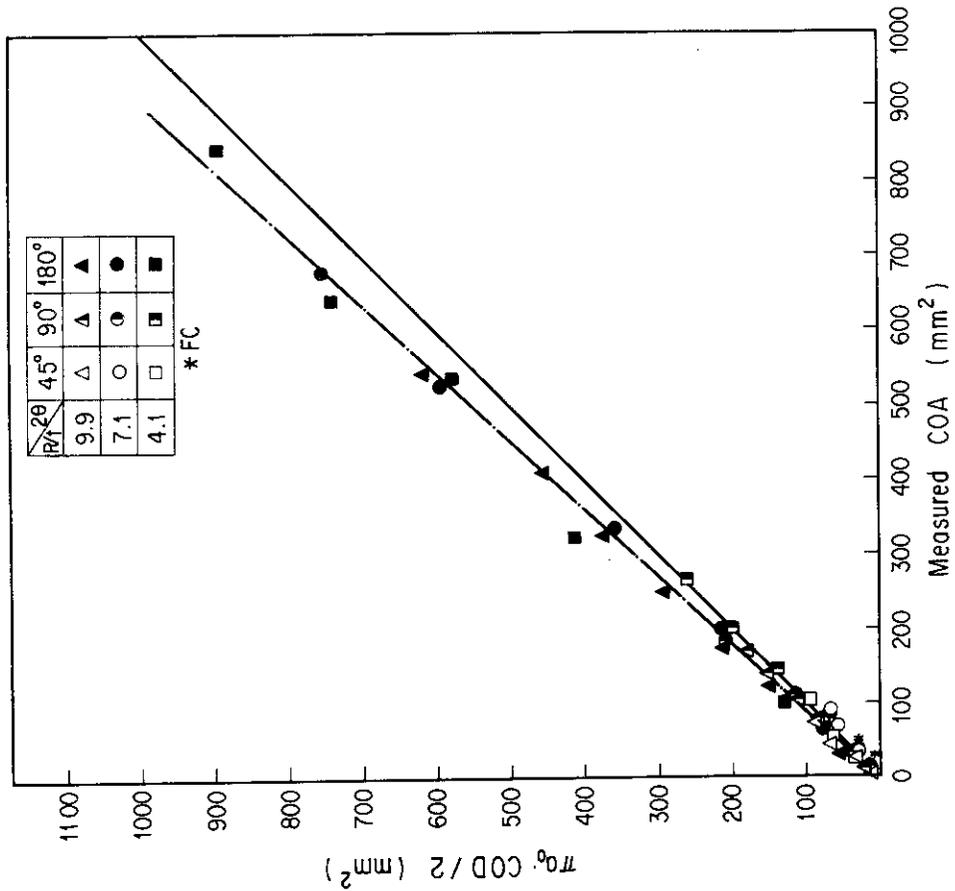


Fig. 5.16 Correlation between calculated COA by formula (5.7) and measured COA

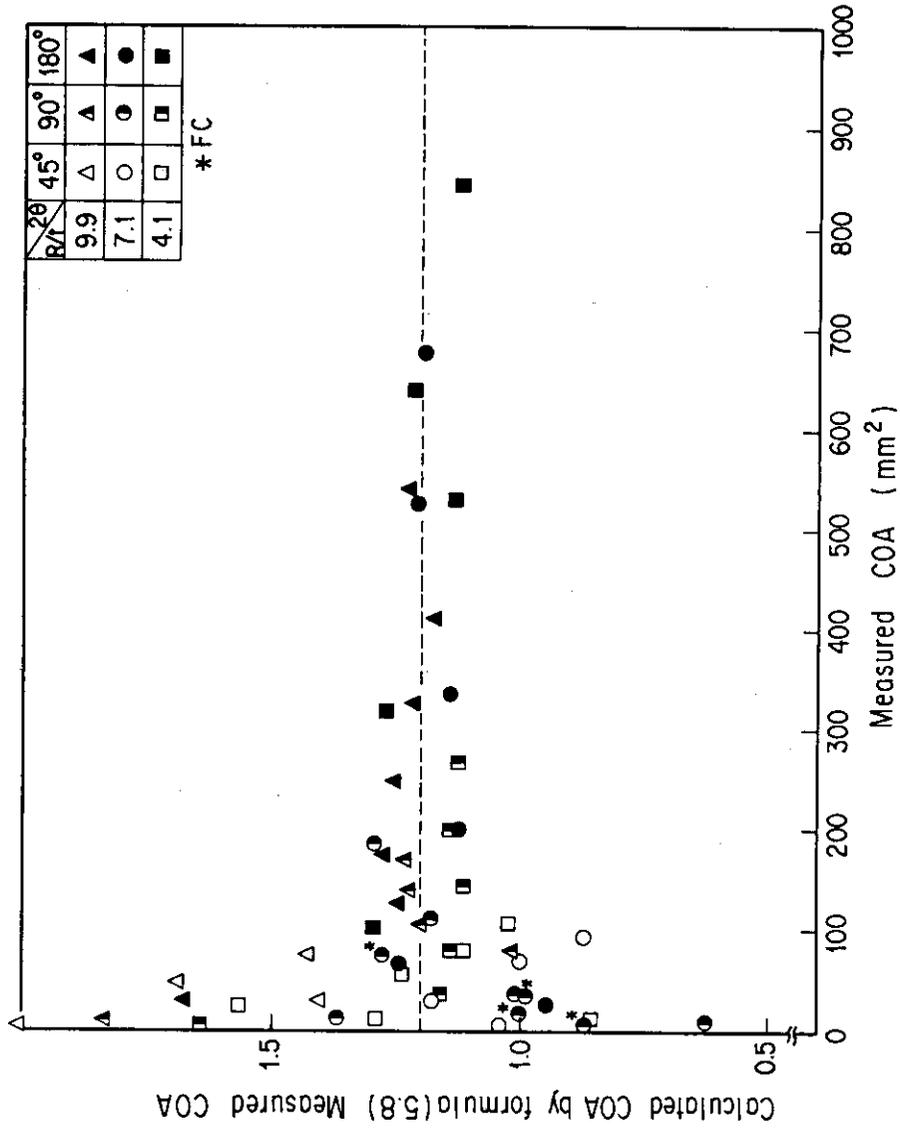


Fig. 5.18 Comparison between calculated COA by formula (5.8) and measured COA

6. 結 論

本報は、室温に於いて肉厚の異なる貫通欠陥付 3 インチ口径 STS42 配管の 4 点曲げ試験を実施し、その結果をまとめたものである。

試験では、以下の項目について調べた。

- 荷重-荷重点変位曲線
- き裂進展量-荷重点変位曲線
- き裂開口変位，き裂先端に於ける開口変位
- き裂開口面積
- 配管の偏平化率，歪分布

さらに、これらの試験結果を用い、実断面応力基準の適用性、配管の流動応力、J-R 曲線、偏平化率、き裂開口面積の評価等について検討を行い以下の知見を得た。

- (1) 実断面応力基準による最大荷重の予測は、安全側評価となっている。
- (2) 配管試験における最大荷重測定値から計算した配管試験体の流動応力値は、設計応力強さの約 3 倍以上であった。
- (3) 半径肉厚比 R/t が小さいほど最大荷重点に於ける変位は大きくなった。
- (4) 疲労予き裂付試験体の最大荷重は、放電加工き裂付試験体に比べ約 3% 下回った。
- (5) J-R 曲線は、口径、 R/t 、初期き裂角度への依存性を示す。
- (6) 偏平化は、き裂なしの場合 x 方向に生じ、初期き裂角度が 45° 以上では y 方向に生じた。
- (7) き裂形状を楕円にモデル化し、き裂中央部の COD を用いてき裂開口面積を計算すると良好に評価できる。

謝 辞

本試験の遂行に際し、原子力エンジニアリング 八木岡隆一氏より多大な協力を得たことをここに記し、深く謝意を表します。

6. 結 論

本報は、室温に於いて肉厚の異なる貫通欠陥付 3 インチ口径 STS42 配管の 4 点曲げ試験を実施し、その結果をまとめたものである。

試験では、以下の項目について調べた。

- 荷重 - 荷重点変位曲線
- き裂進展量 - 荷重点変位曲線
- き裂開口変位, き裂先端に於ける開口変位
- き裂開口面積
- 配管の偏平化率, 歪分布

さらに、これらの試験結果を用い、実断面応力基準の適用性、配管の流動応力、J-R 曲線、偏平化率、き裂開口面積の評価等について検討を行い以下の知見を得た。

- (1) 実断面応力基準による最大荷重の予測は、安全側評価となっている。
- (2) 配管試験における最大荷重測定値から計算した配管試験体の流動応力値は、設計応力強さの約 3 倍以上であった。
- (3) 半径肉厚比 R/t が小さいほど最大荷重点に於ける変位は大きくなった。
- (4) 疲労予き裂付試験体の最大荷重は、放電加工き裂付試験体に比べ約 3% 下回った。
- (5) J-R 曲線は、口径、 R/t 、初期き裂角度への依存性を示す。
- (6) 偏平化は、き裂なしの場合 x 方向に生じ、初期き裂角度が 45° 以上では y 方向に生じた。
- (7) き裂形状を楕円にモデル化し、き裂中央部の COD を用いてき裂開口面積を計算すると良好に評価できる。

謝 辞

本試験の遂行に際し、原子力エンジニアリング 榎八木岡隆一氏より多大な協力を得たことをここに記し、深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針について, 原子力委員会, 昭和53年
- 2) Nucleonics week, Jan. 17, 1985
- 3) Inside NRC, Jan. 7, 1985
- 4) K. Kussmaul et al.: "Exclusion of Fracture in Pipings of the Pressure Boundary, Part 1: Experimental Investigations and Their Interpretation", IAEA-SM-269/7, Int. Symp on Reliability of Reactor Pressure Components, March, 1983, Stuttgart
- 5) G. Bartholome et al.: "Exclusion of Failure of the Pressure Retaining Coolant Piping", Ibid.
- 6) Nuclear News, Dec. 1987
- 7) P.P. Milella: "ENEA-DISP approach to leak before break latest developments and future subjects", ENEA-DISP ACO/ATEM-4/DT(87), 1987
- 8) "原子力発電施設信頼性実証試験の現状昭和62年", 原子力工学試験センター
原子力発電工学試験センター
- 9) M.F. Kanninen, et al.: "Mechanical Fracture Predictions for Sensitized Stainless Steel Piping with Circumferential Cracks", EPRI-NP-192, 1976
- 10) K. Hasegawa, et al.: "Assessment of Leak and Break Margins in Stainless Steel Power Plant Piping, Presented at CSNI Specialist Meeting on LBB", Monterey, 1983
- 11) H. Tada and P.C. Paris: "A Stability Analysis of Circumferential Cracks for Reactor Piping Systems", ASTM STP 700, 1980
- 12) A. Zahoor and M.F. Kanninen: "A Plastic Fracture Mechanics Prediction of Fracture Instability in a Circumferentially Cracked Pipe in Bending--Part I: J--Integral Analysis, Jr. PVT.", Nov. 1981, Vol.103
- 13) J. Pan, et al.: "Application of a Tearing Instability Analysis for Strain Hardening Materials to a Circumferentially Cracked Pipe in Bending", ASTM STP 833, 1984
- 14) Milne, I. et al.: "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects", R/H/R6-Revision 3, CEGB, May 1986.
- 15) Bloom, J.M.: "Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram", ASTM STP896, 1985, pp.114-127
- 16) Wilkowski, G.M. et al.: "Degraded Piping Program--Phase II: NUREG/CR-4082, BMI-2120, Vol.1 ~ Vol.5, Jan. 1985 ~ April. 1987

- 17) Wilkowski, G.M. et al.: Nuclear Engineering and Design, 89 (1985) 257-269
- 18) 柴田他 : "Ductile Fracture Behavior of Circumferentially Cracked Type 304 Stainless Steel Piping Under Bending Load", Nuclear Engineering and Design 94 (1986)
- 19) 柴田他 ; "周方向欠陥を有する SUS 304 鋼配管の延性破壊挙動と LBB 評価", 圧力技術, vol.24, No 5, 1986.
- 20) K. Shibata, et al.: "Investigation and Evaluation of Ductile Fracture Behaviors in LWR Piping Under Bending Load", 9th SMIRT
- 21) 柴田他 ; "貫通または未貫通欠陥を有する 6 インチ口径 SUS 304 鋼配管および STS 42 炭素鋼配管の延性破壊挙動" JAERI - M 86 - 078, 1986.
- 22) 金子他 ; "軽水炉配管材の延性不安定破壊に関する研究 - 引張り荷重下での炭素鋼製中央切欠き平板の室温における破壊 -" JAERI - M 85 - 064, 1985.
- 23) 安田他 ; "軽水炉配管材の延性不安定破壊に関する研究 (第 2 報) - ステンレス鋼製中央切欠き付引張試験片の室温・引張り荷重下における破壊挙動 -" JAERI - M 86 - 098, 1986.
- 24) 安田他 ; "周方向貫通切欠きを有する 3 インチ口径 SUS 304 鋼配管の延性破壊挙動に関する研究" JAERI - M 87 - 068, 1987.
- 25) R. Klecker, et al.: "NRC Leak-Before-Break (LBB,NRC) Analysis Method for Circumferentially Through-Wall Cracked Pipes Under Axial Plus Bending Loads", NUREG/CR-4572, MBI-2134
- 26) A. Zahoor, et al.: "A Plastic Fracture Mechanics Prediction of Fracture Instability in a Circumferentially Cracked Pipe in Bending --Part I: J-integral Analysis", Journ. of Pressure Vessel Technology, Vol.103, Nov. 1981
- 27) J. Pan, et al.: "The Theory of Instability of the Tearing Mode of Elastic-Plastic Crack Growth", ASTM, STP668, 1979
- 28) P.C. Paris, et al.: "The Application of Fracture Proof Design Methods Using Tearing Instability Theory to Nuclear Piping Postulating Circumferential Through Wall Cracks", NUREG/CR-3464, Sept. 1983
- 29) M.D. German, et al.: "Elastic Analysis of Crack Opening, Stable Growth and Instability Behavior in Flawed 304SS Piping:", Trans of the ASME, Journ. of Pressure Vessel Technology, Vol. 105, Nov. 1983
- 30) C. Maricchiolo and P.P. Milella: "Prediction of Leak Areas and Experimental Verification on Carbon and Stainless Steel Pipes", ENEA-DISP ACO/ATEM-7/DT(87)

付録A 試験体ミルシート

Table A.1 Mill certificate of 3-inch diameter Sch40 STS42 pipe

作業番号 Mill Work No.	寸法 Size			員数 No. of pcs.	数量 延べ長さ Total Length	重量 Weight (kg.)	需要家管理番号 Order No. or Job No.					
	外径 O.D.	内径 I.D.	厚さ W.T.									
TIA9947	3B		SCH40	2	6000	136	T-1066					
製鋼番号 Heat No.	化学成分 Chemical Composition											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	引張試験 Tensile Test		
	0.14	0.35	0.35	0.035	0.008					引張強さ T.S.	伸び Elongation	断面収縮 Reduction of Area
										42	22	2
										2.5	0.05	0.07
										12K	33	46
												21
												31
												31
試験 Tests								試験結果 Test Results				
外観検査 Visual Dimension	水圧試験 Hydrostatic Test		へん平 Flattening		押しひるげ Flaring (Expansion)		曲げ Bending		リング引張 Ring Tensile		つぼ出し Flange	
	圧力 Pressure	結果 Result	130		130		130					
リングゲージ Ring Gauge	ドリフト Drift											
注: 900°C X 10 A.C.C.												

Table A.2 Mill certificate of 3-inch diameter Sch80 STS42 pipe

作業番号 Mill Work No.	寸法			重量 Weight (kg)	数量 Total Length	必要家管理番号 Order No. or Job No.				
	外径 O.D.	内径 I.D.	厚 W.T.							
TTA9948	38		SCH80	275	T-1066					
製鋼番号 Heat No.	化学成分						引張試験 Tensile Test G.L.	引張強さ T.S.	断面収縮率 Reduction of Area	試験温度 Test Temp.
	C	Si	Mn	P	S	Cu				
x671096	0.30	0.35	0.30	0.035	0.035	0.08	0.42	25	10	10
	0.14	0.16	0.16	0.08			49	37	97	93
										119
試験										
水圧試験 Hydrostatic Test			へん平 Flattening			曲げ Bending		リング拡大 Ring Expansion		つば出し Flange
圧力 Pressure	結果 Result		試験結果 Test Result							
256	リョク		リョク							
試験結果										
目視検査 Visual & Dimension	リングゲージ Ring Gauge	ドリフト Drift								
リョク										

試験結果: リョク (900°C x 10° A.C.)

付録B 応力-歪線図

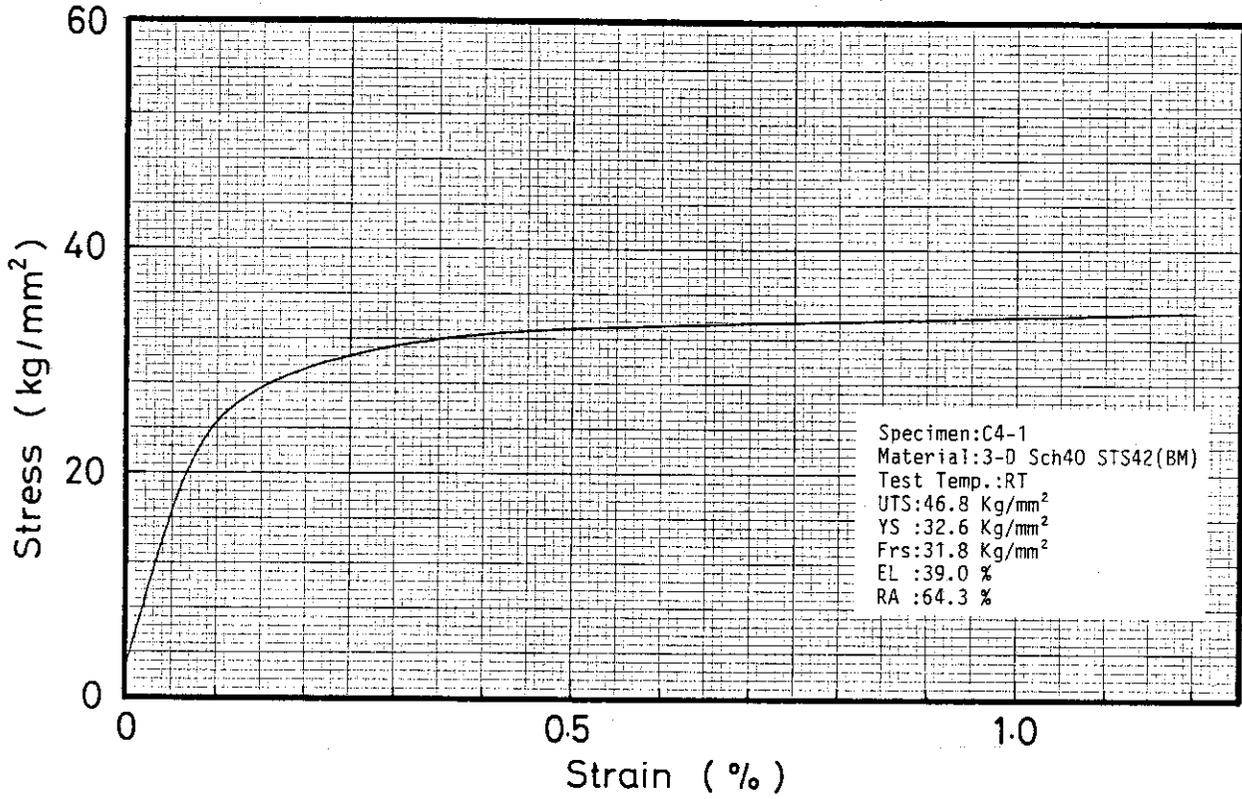


Fig. B.1a Stress-strain diagram (STS42, specimen C4-1)

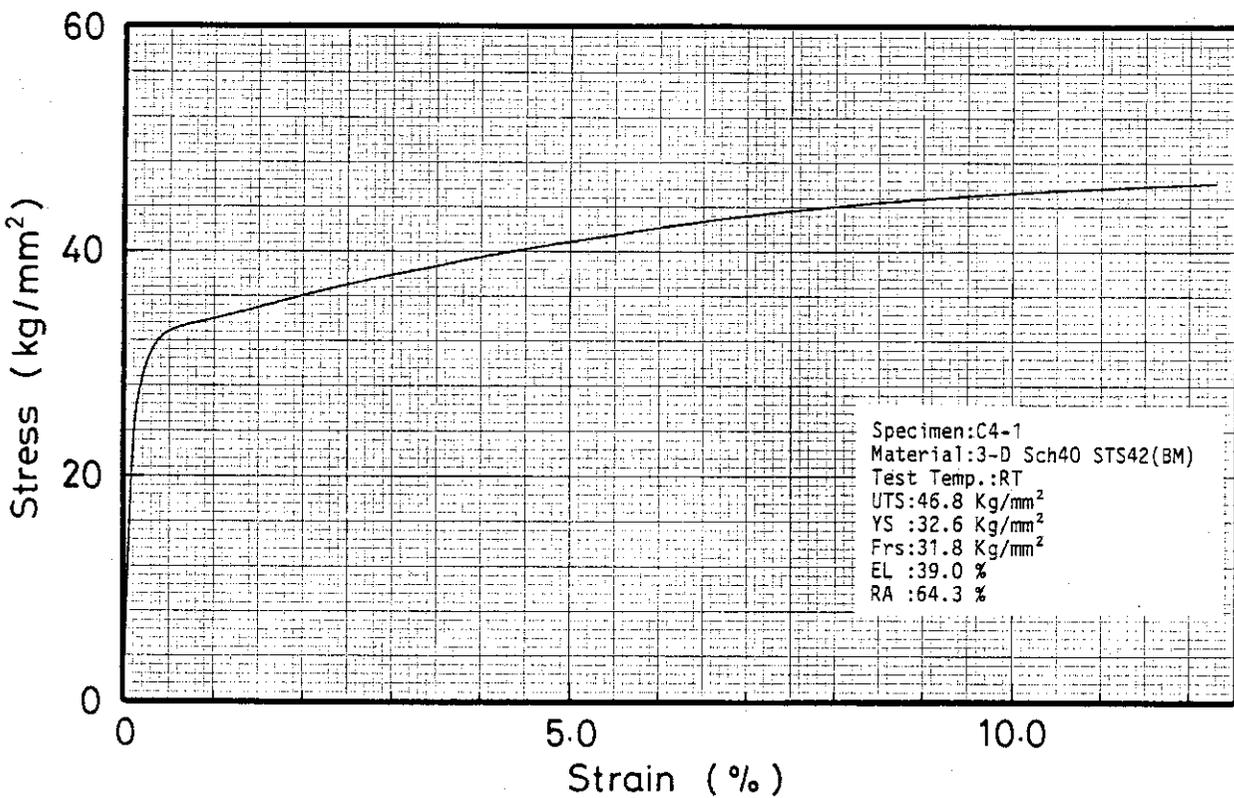


Fig. B.1b Stress-strain diagram (STS42, specimen C4-1)

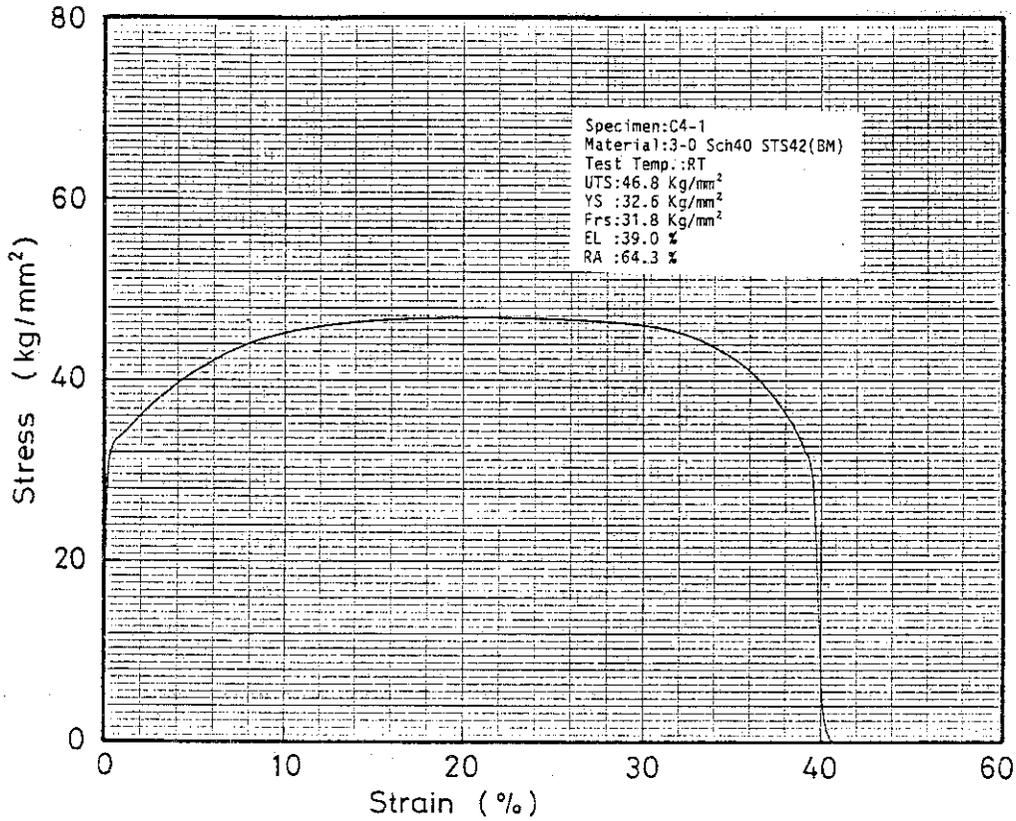


Fig. B.1c Stress-strain diagram (STS42, specimen C4-1)

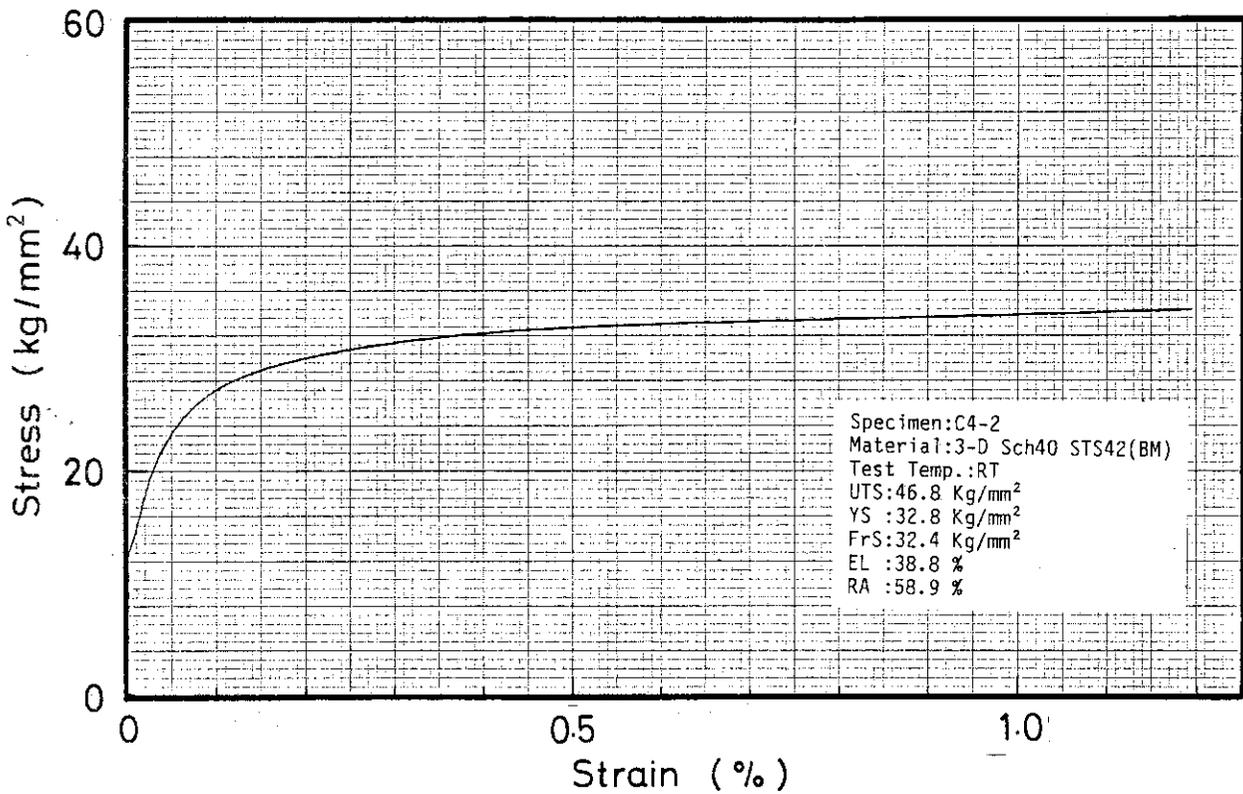


Fig. B.2a Stress-strain diagram (STS42, specimen C4-2)

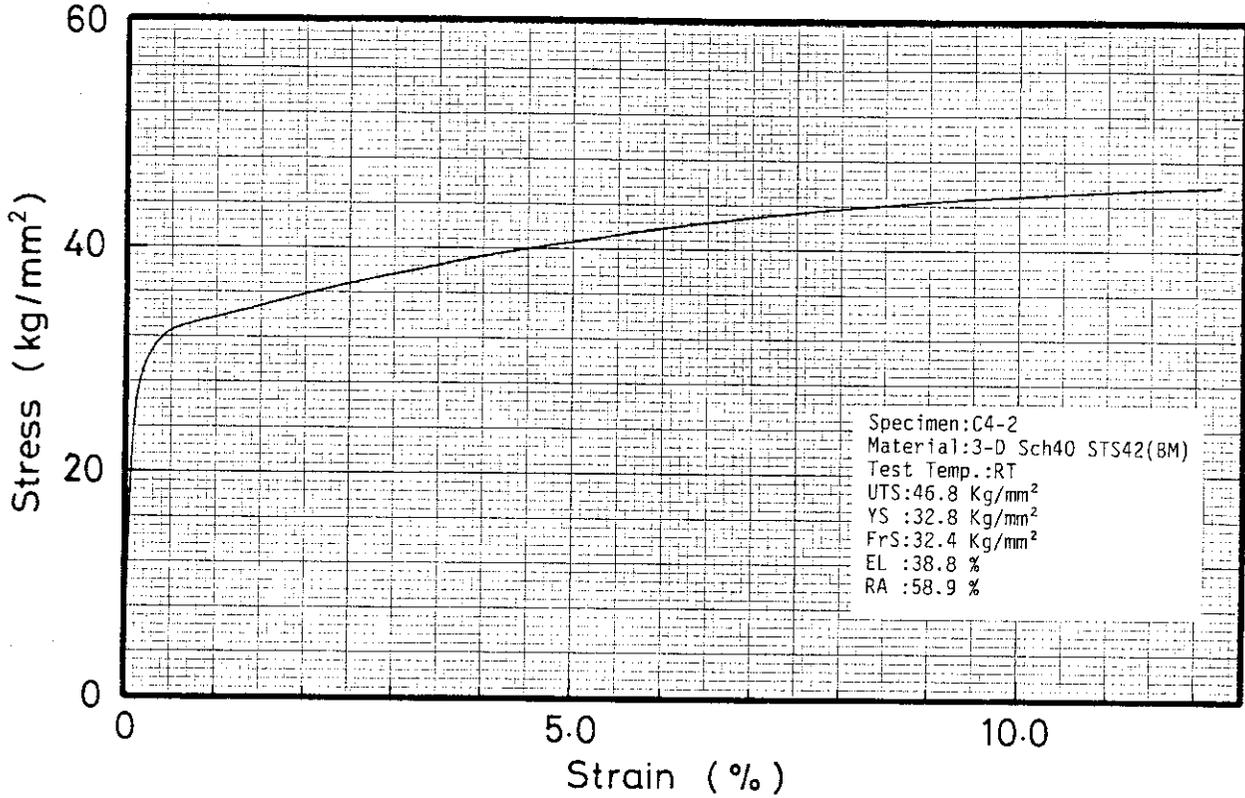


Fig. B.2b Stress-strain diagram (STS42, specimen C4-2)

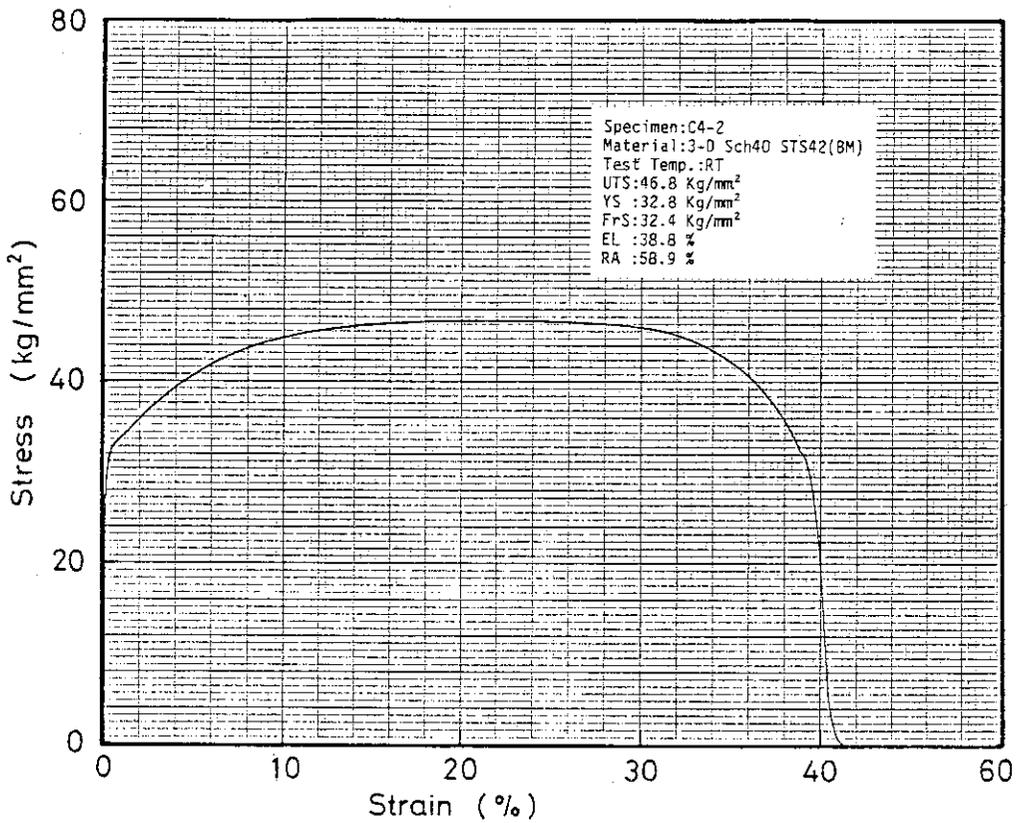


Fig. B.2c Stress-strain diagram (STS42, specimen C4-2)

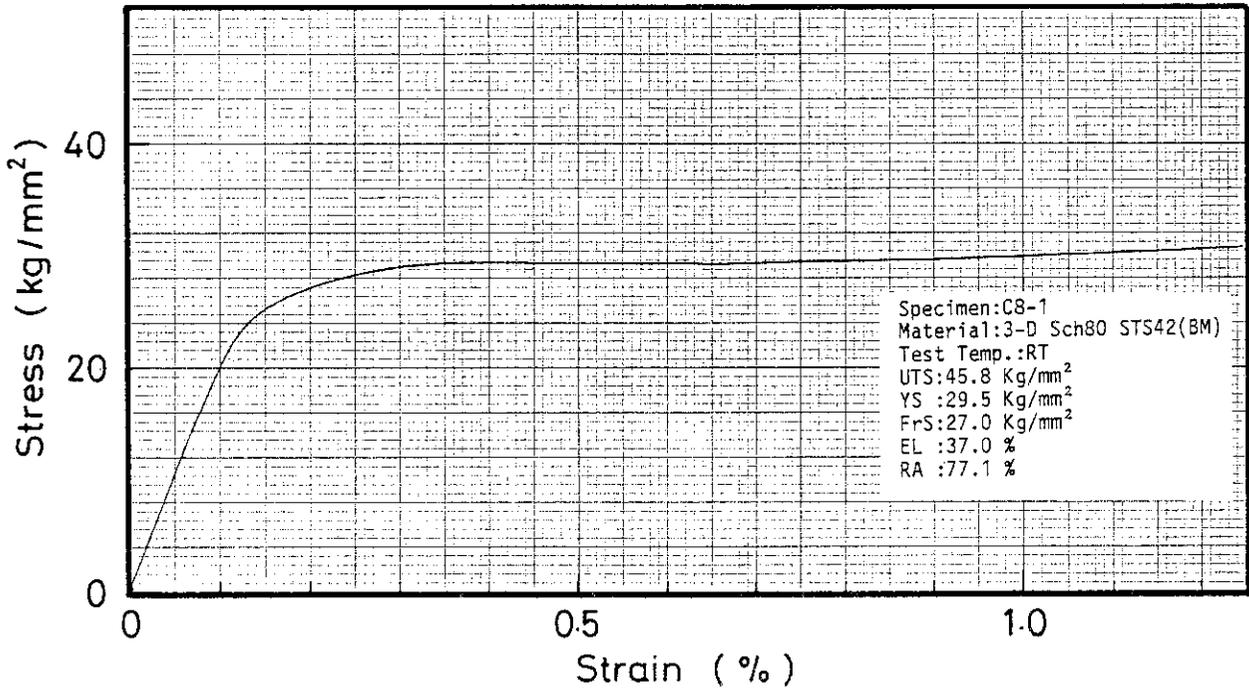


Fig. B.3a Stress-strain diagram (STS42, specimen C8-1)

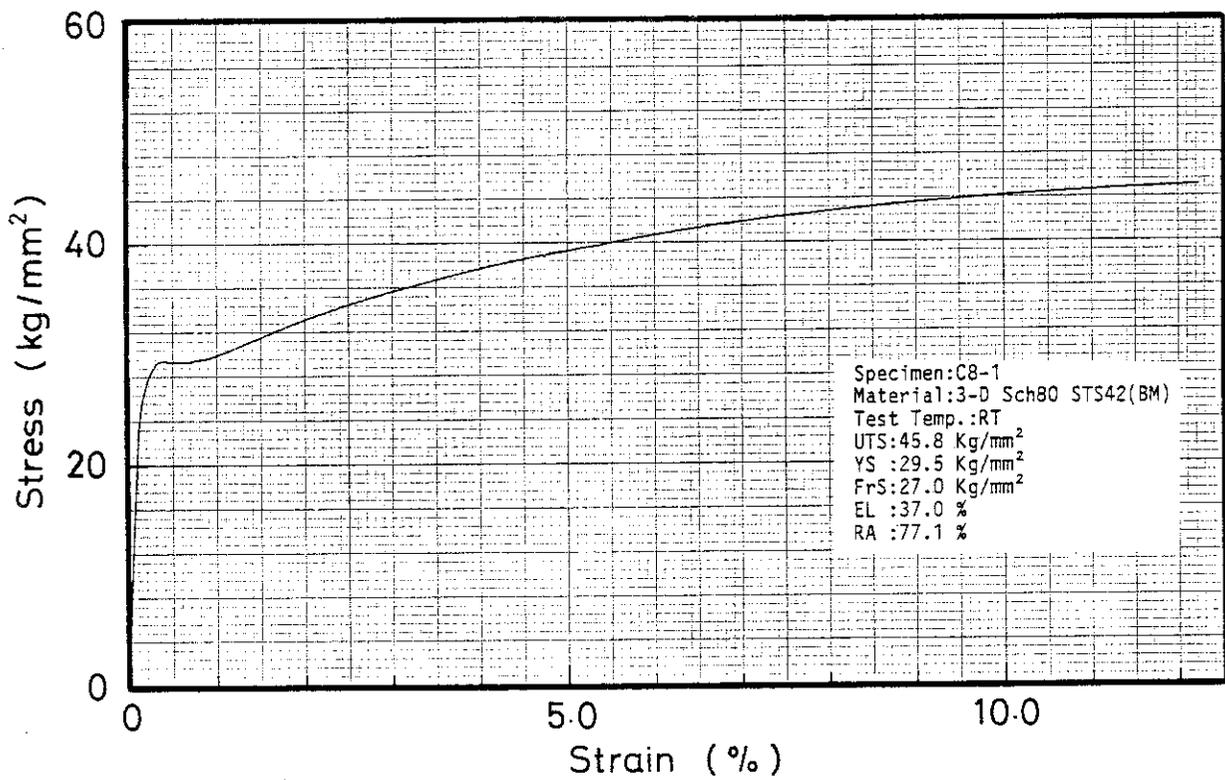


Fig. B.3b Stress-strain diagram (STS42, specimen C8-1)

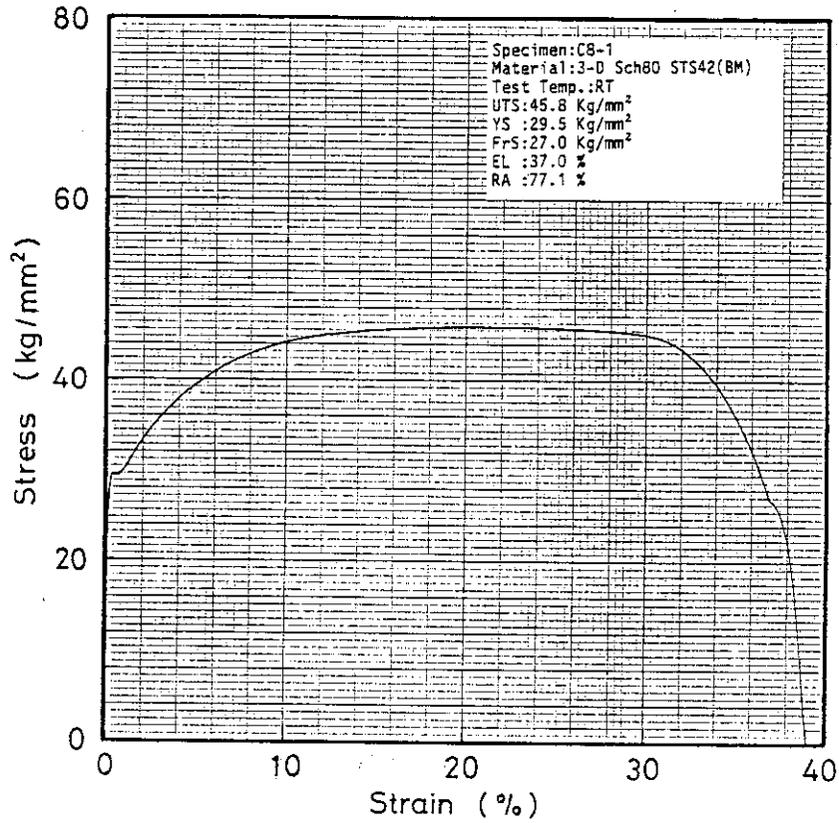


Fig. B.3c Stress-strain diagram (STS42, specimen C8-1)

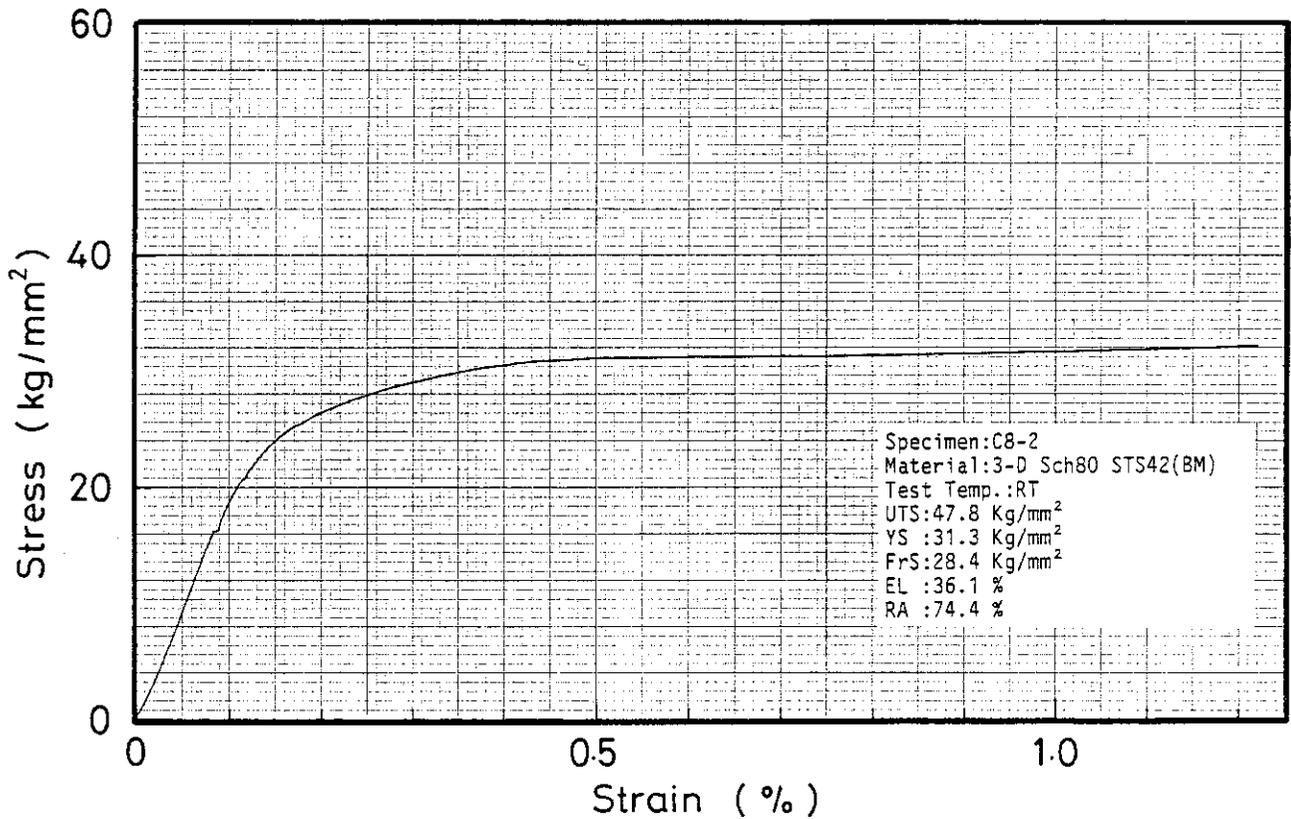


Fig. B.4a Stress-strain diagram (STS42, specimen C8-2)

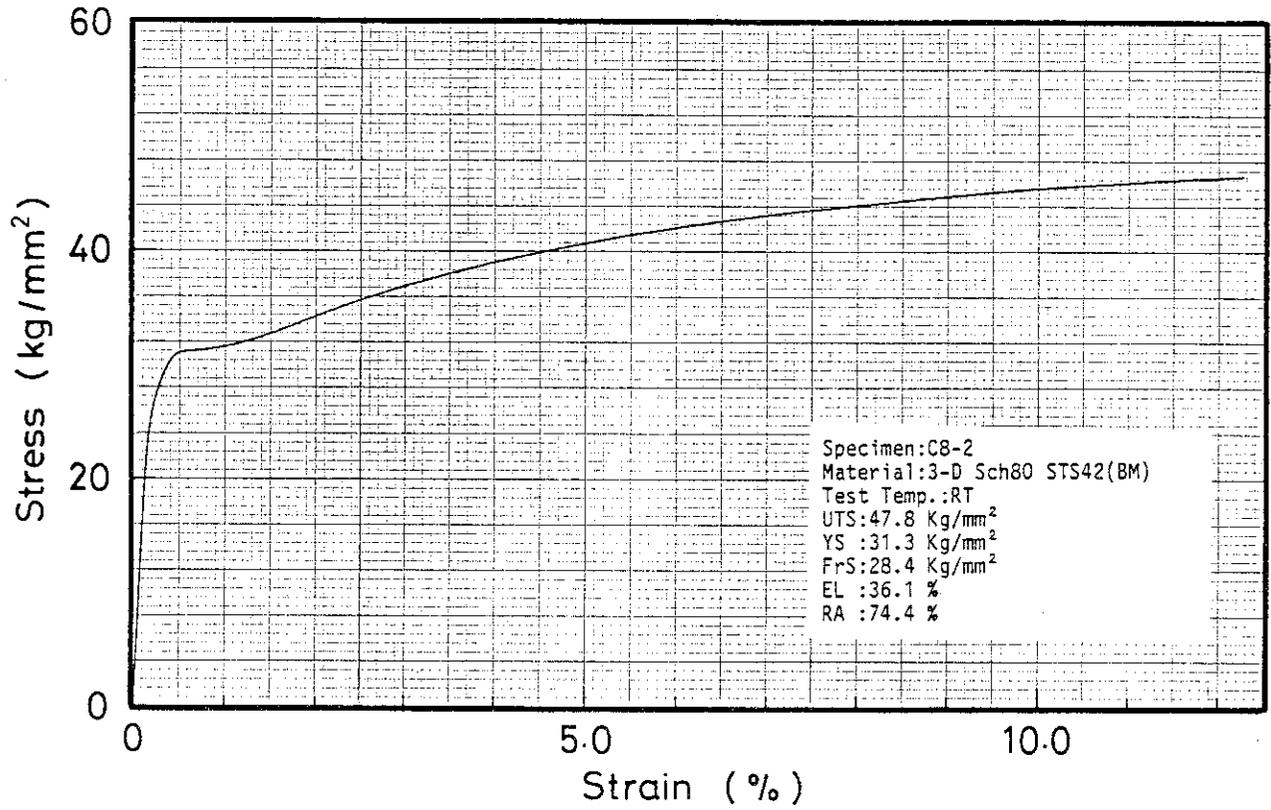


Fig. B.4b Stress-strain diagram (STS42, specimen C8-2)

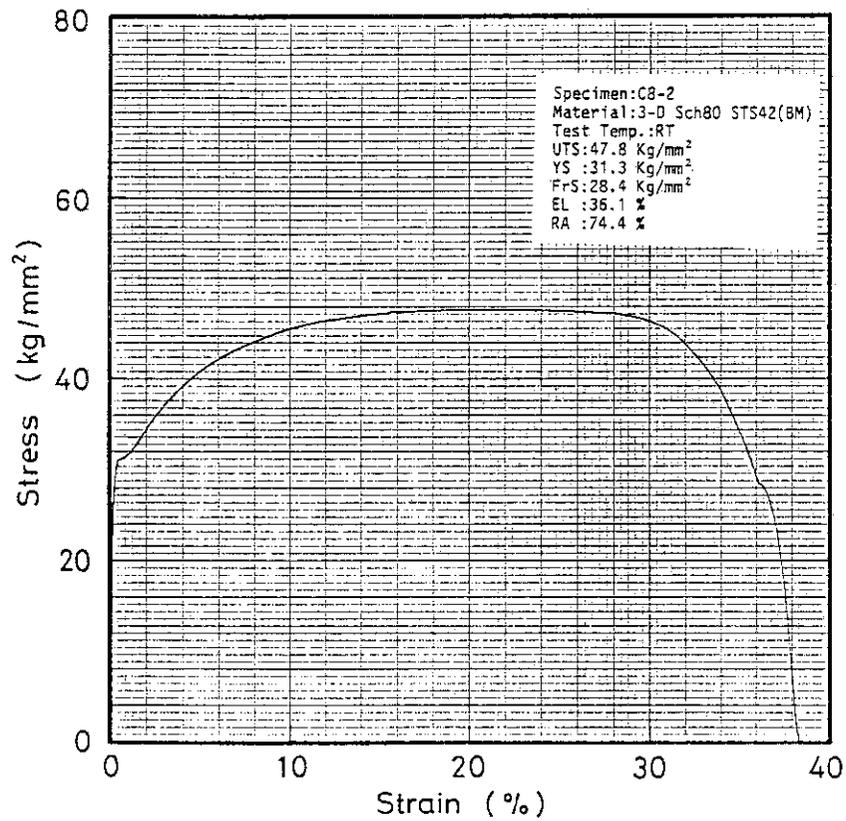


Fig. B.4c Stress-strain diagram (STS42, specimen C8-2)

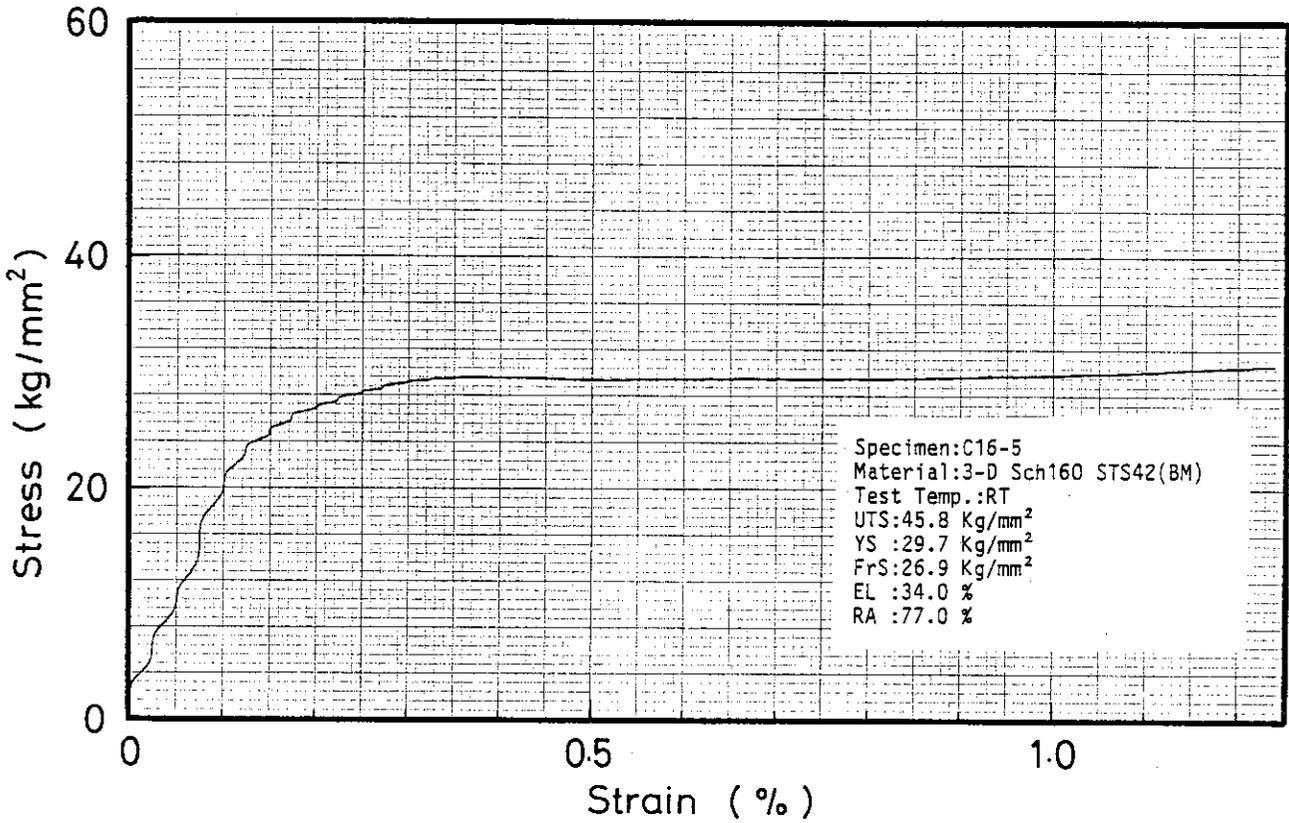


Fig. B.5a Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-5)

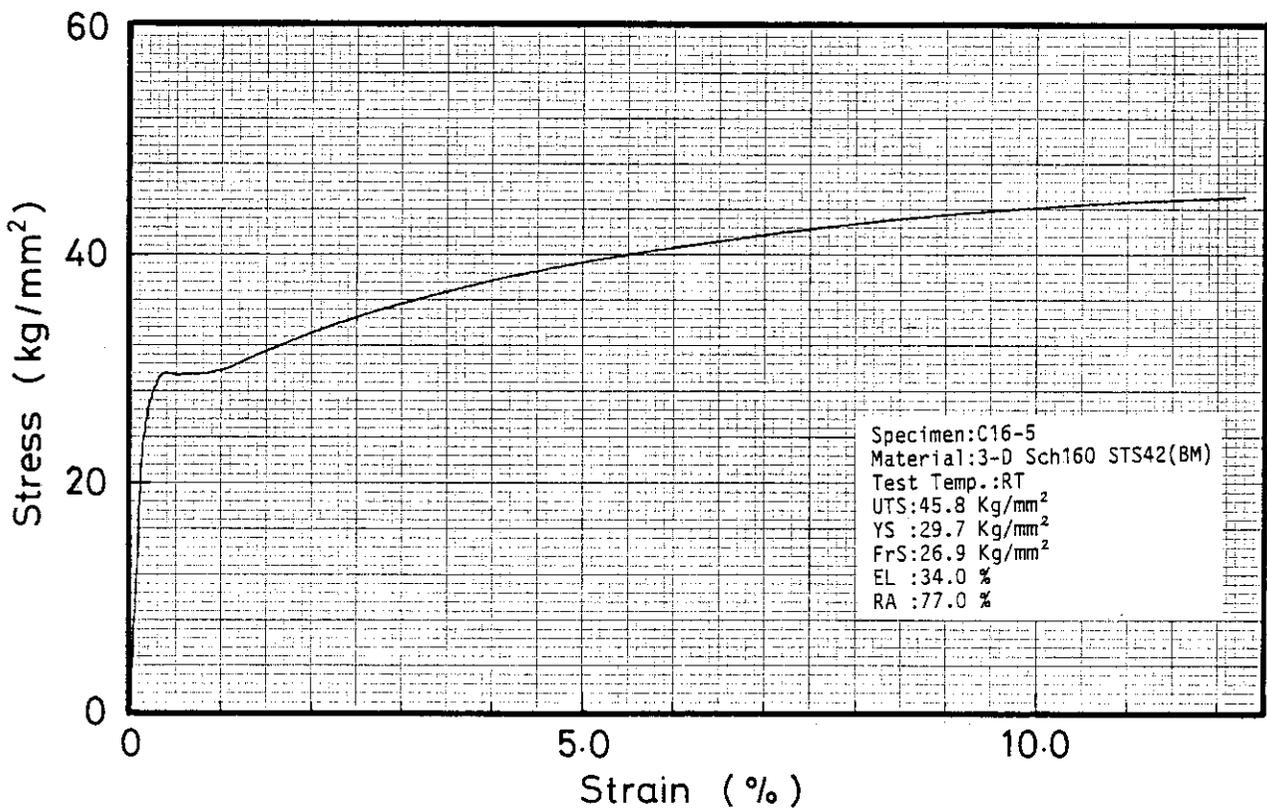


Fig. B.5b Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-5)

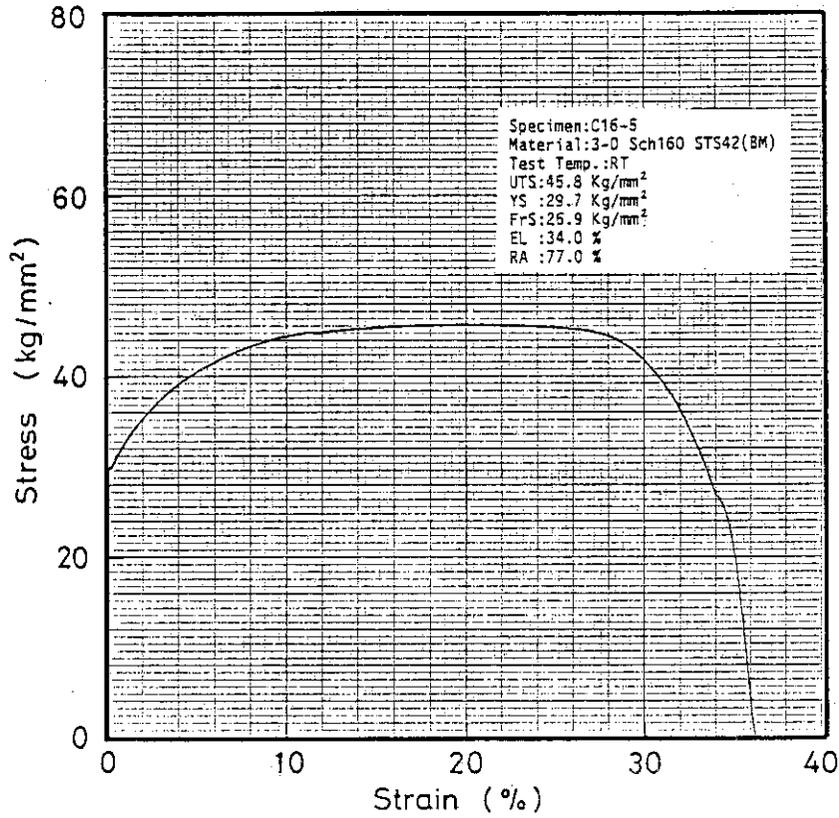


Fig. B.5c Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-5)

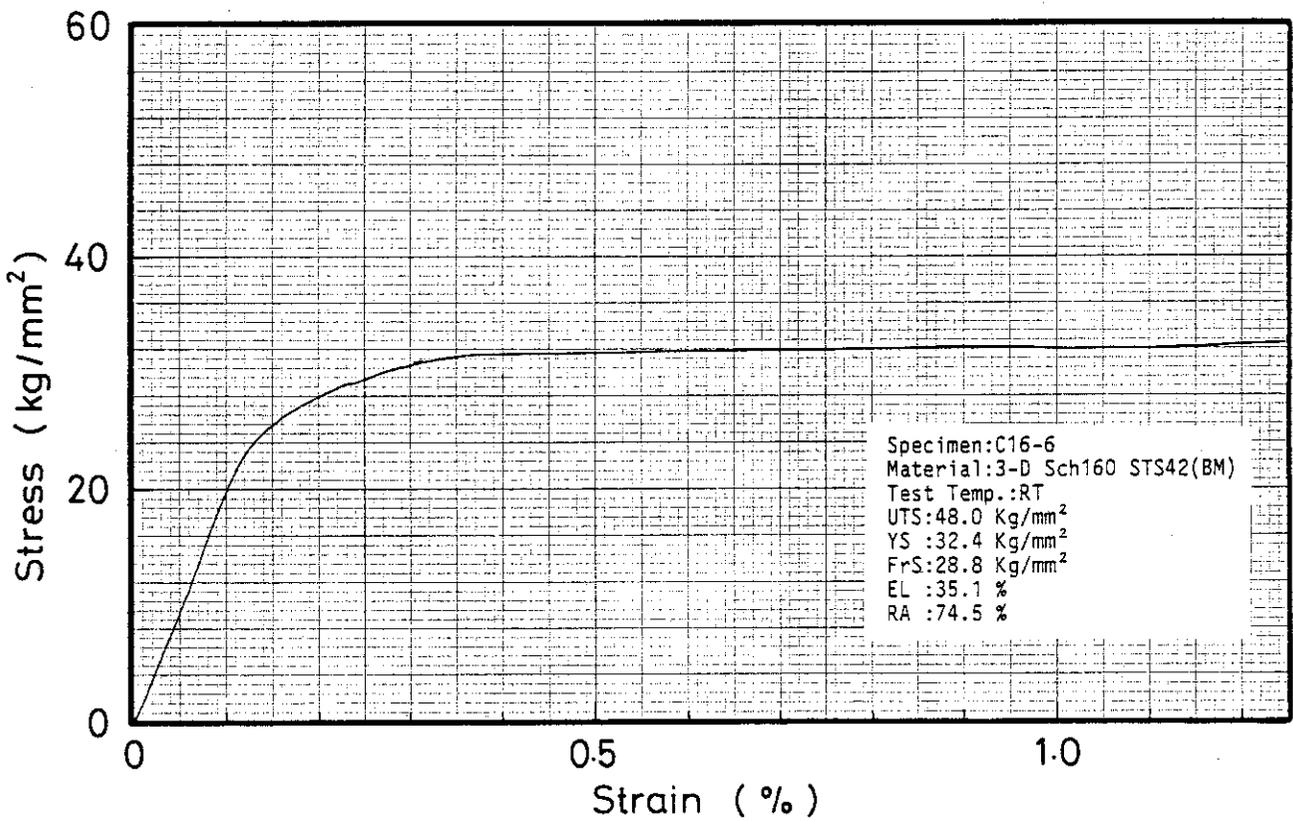


Fig. B.6a Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-6)

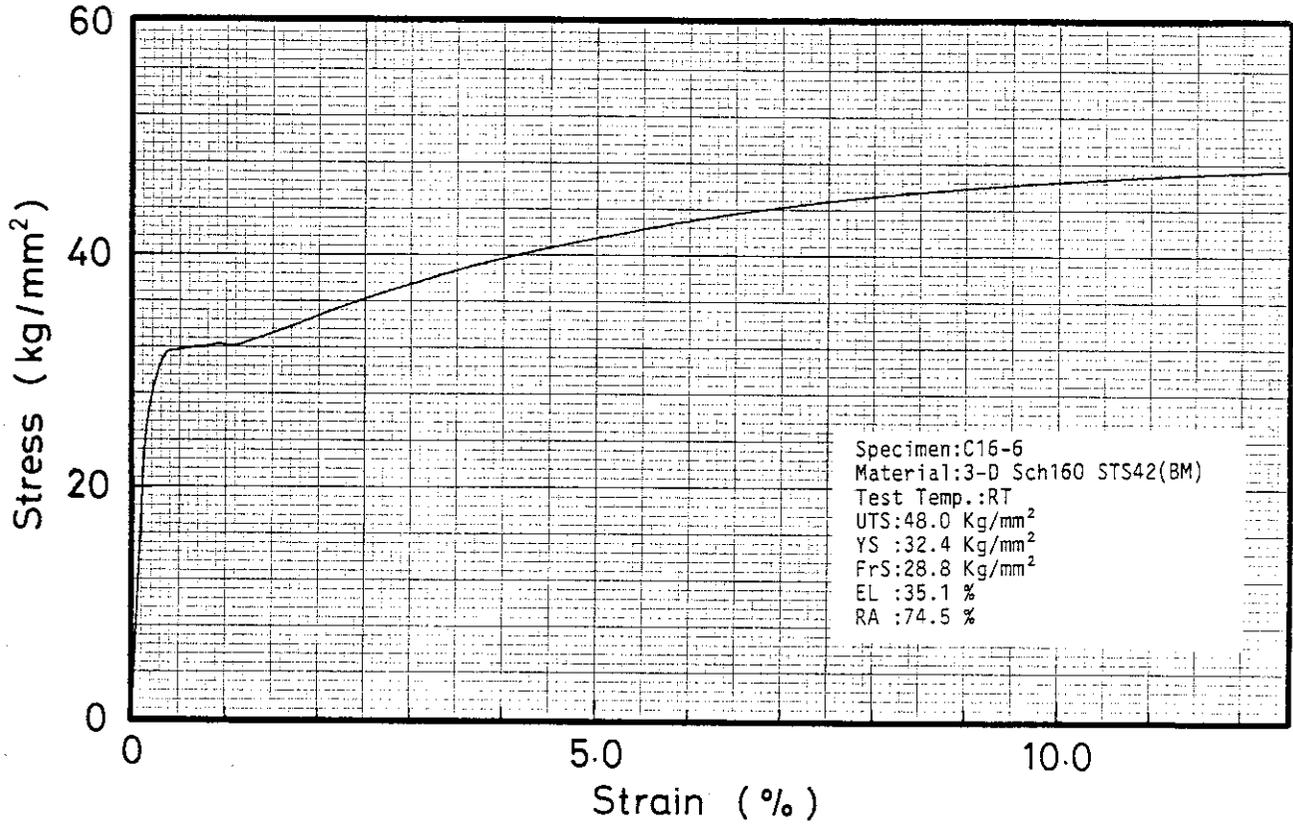


Fig. B.6b Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-6)

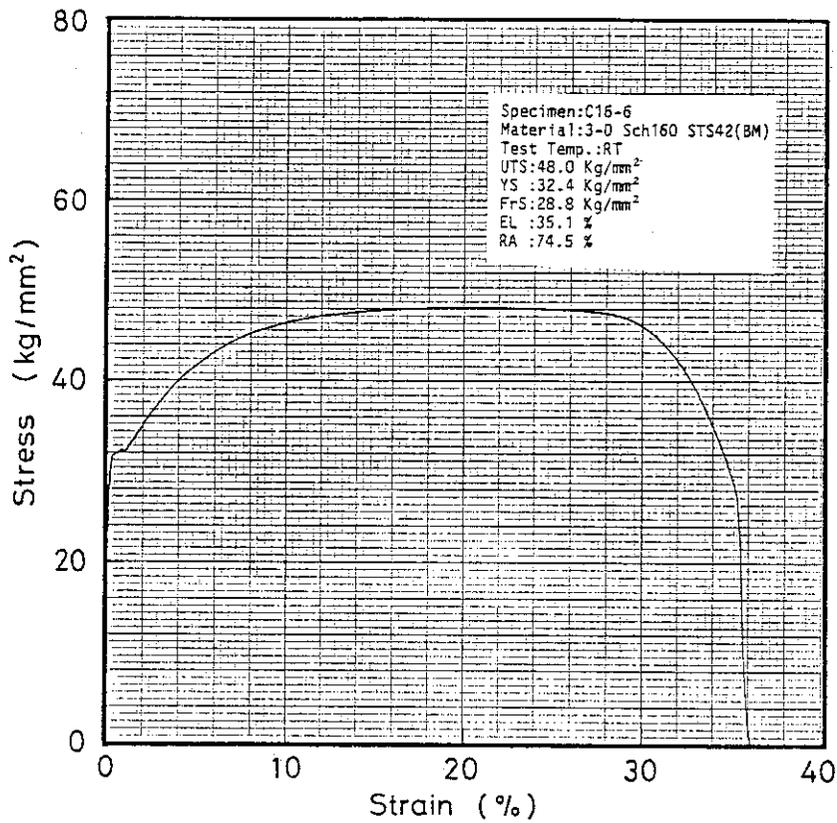


Fig. B.6c Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-6)

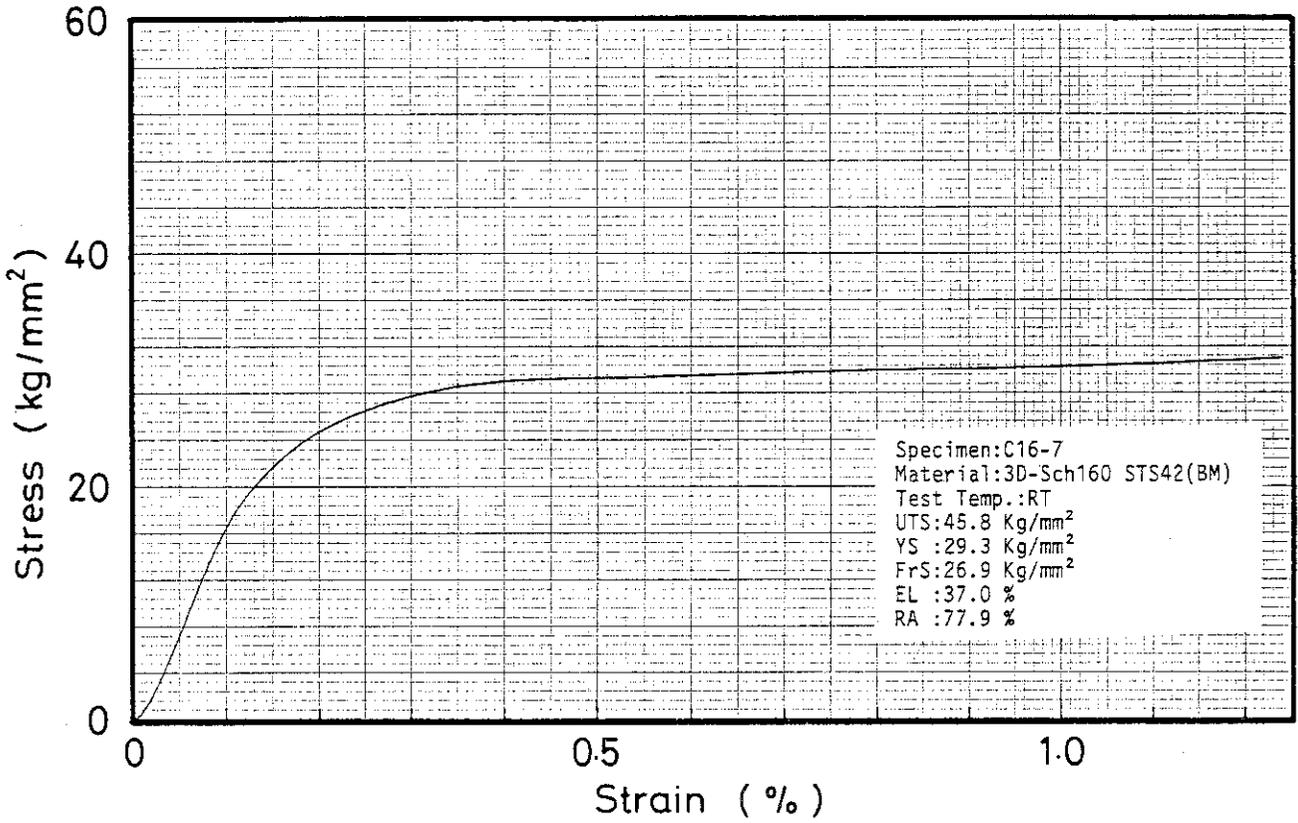


Fig. B.7a Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-7)

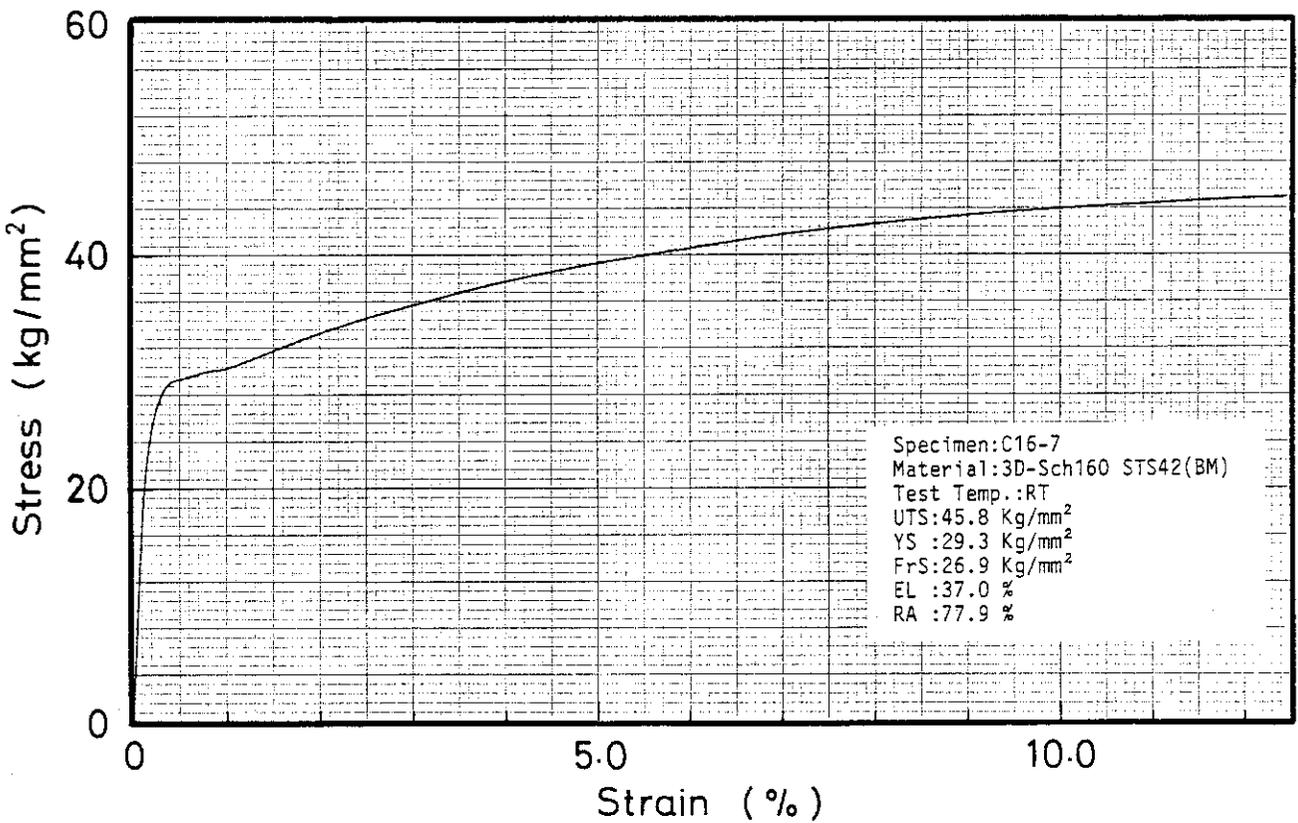


Fig. B.7b Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-7)

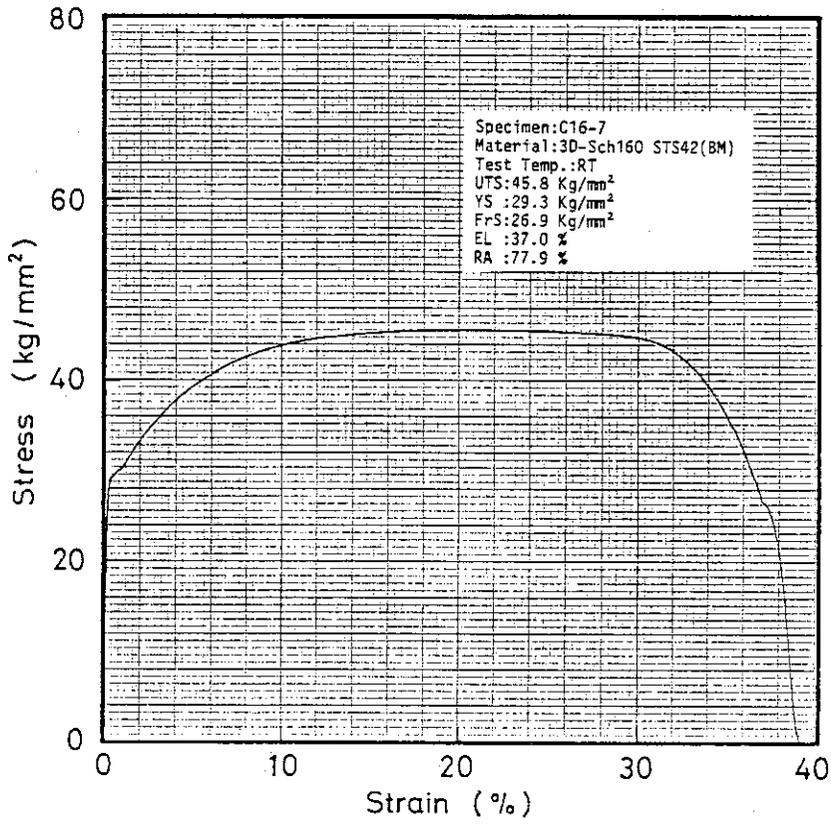


Fig. B.7c Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-7)

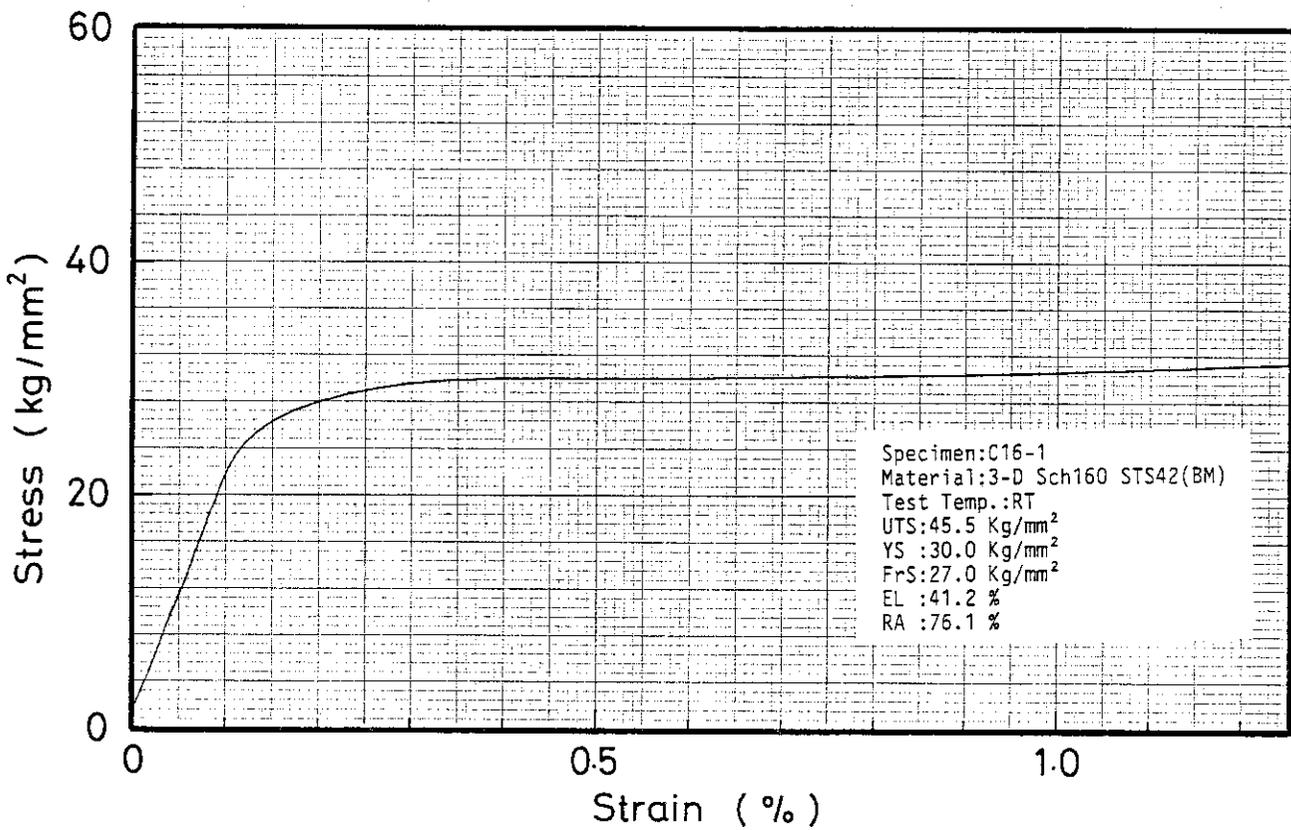


Fig. B.8a Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-1)

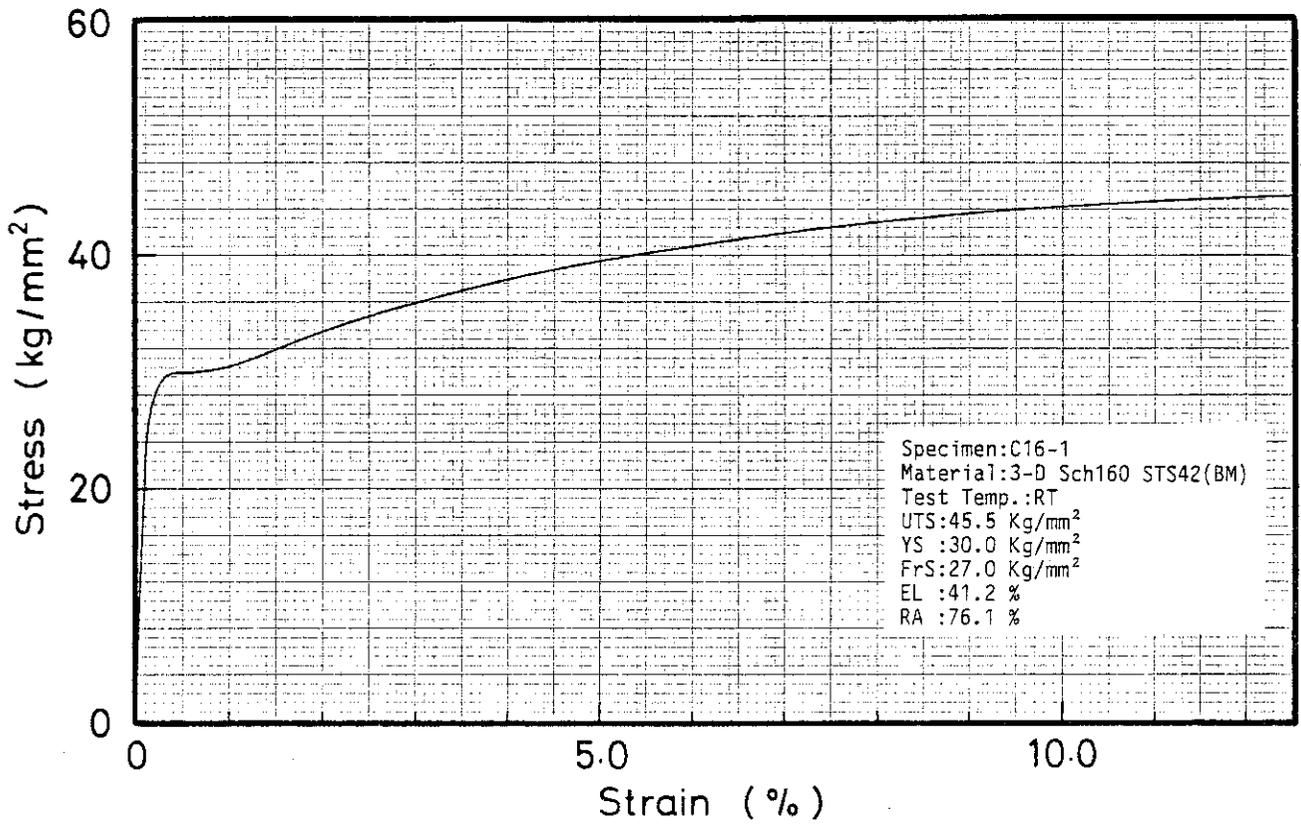


Fig. B.8b Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-1)

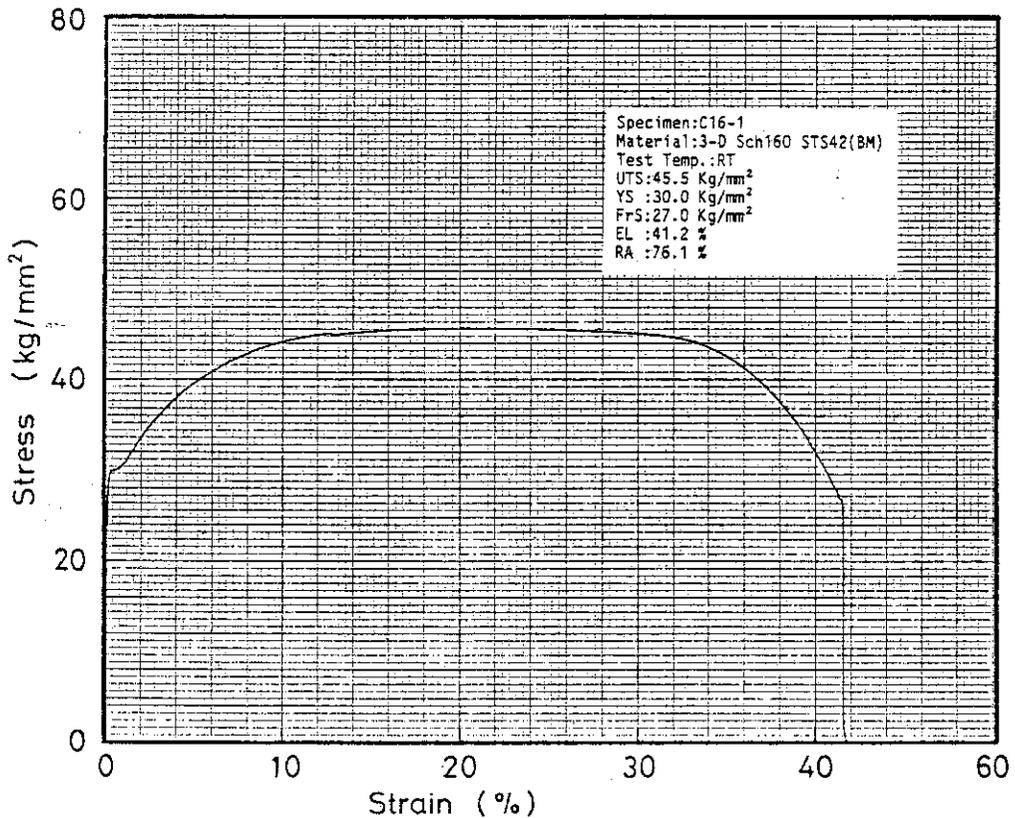


Fig. B.8c Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-1)

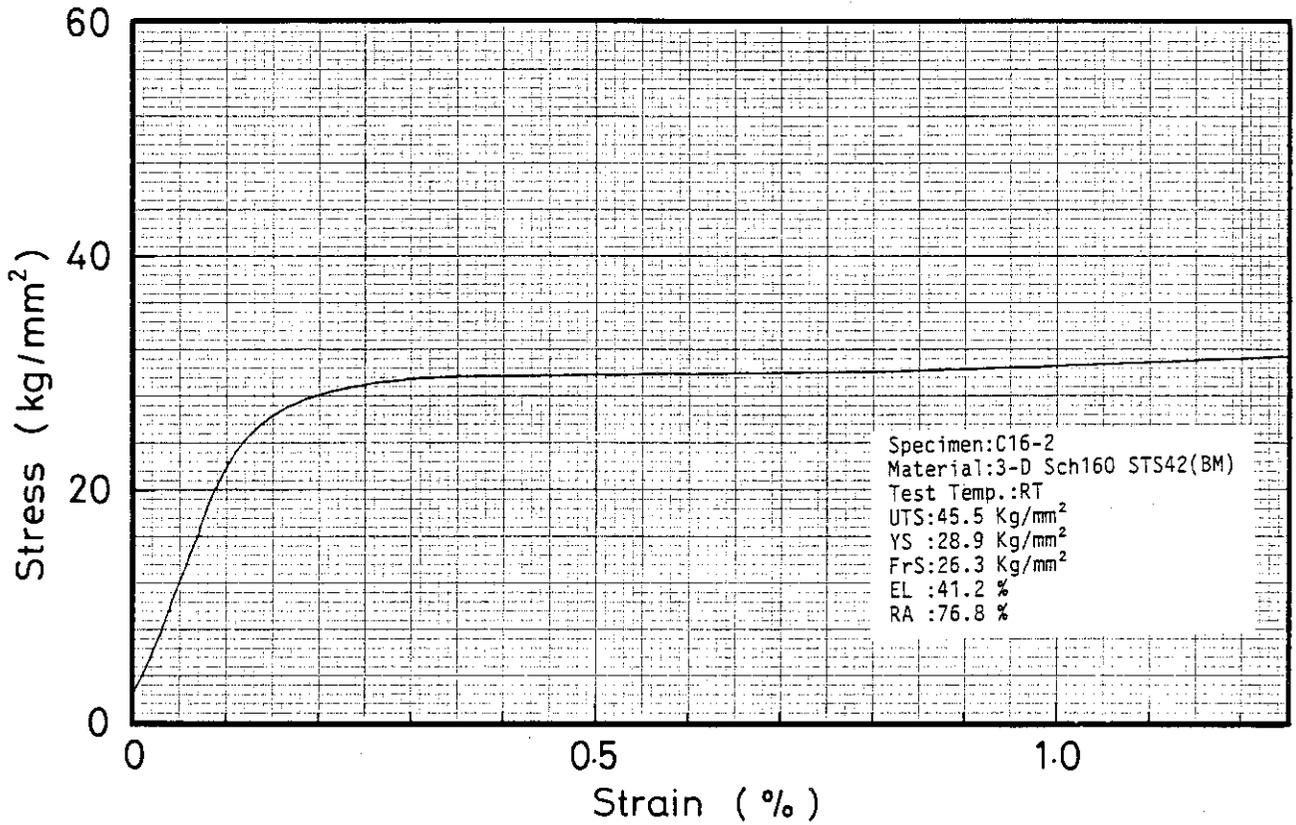


Fig. B.9a Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-2)

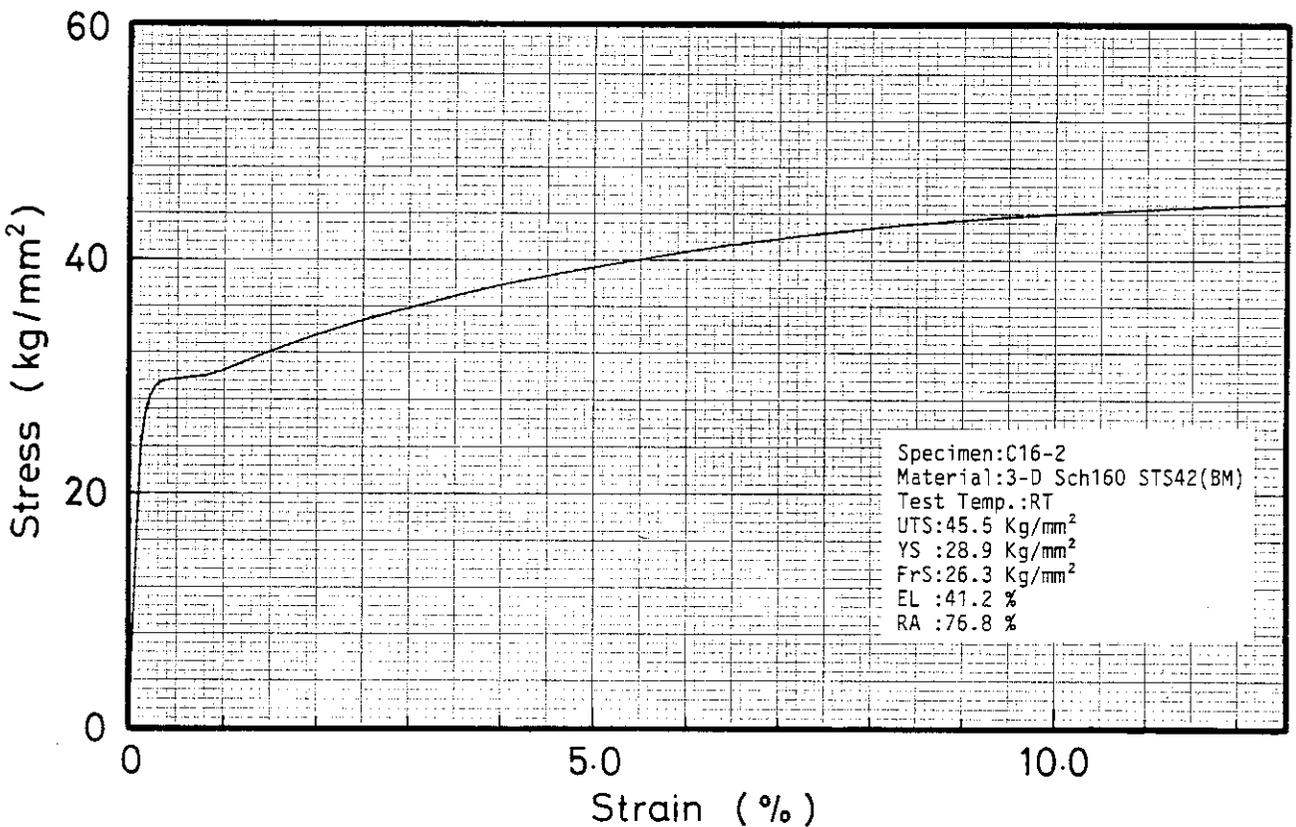


Fig. B.9b Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-2)

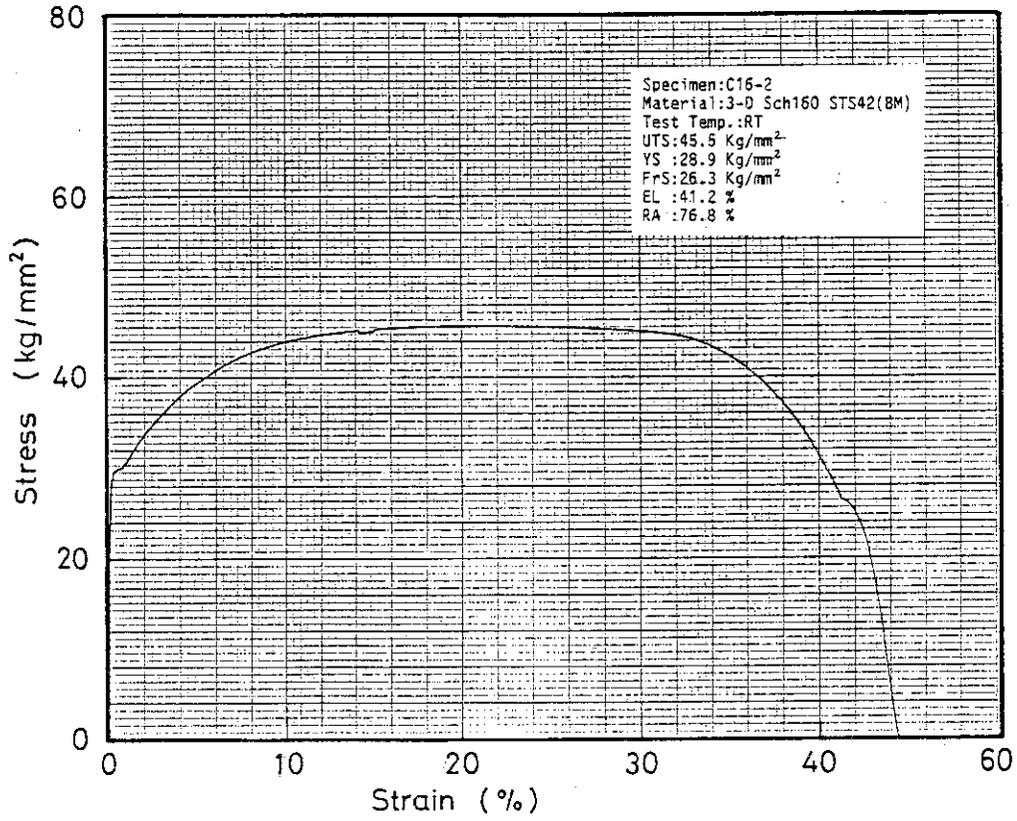


Fig. B.9c Stress-strain diagram (STS42, specimen C16-2)

付録C COD- δ_P 曲線

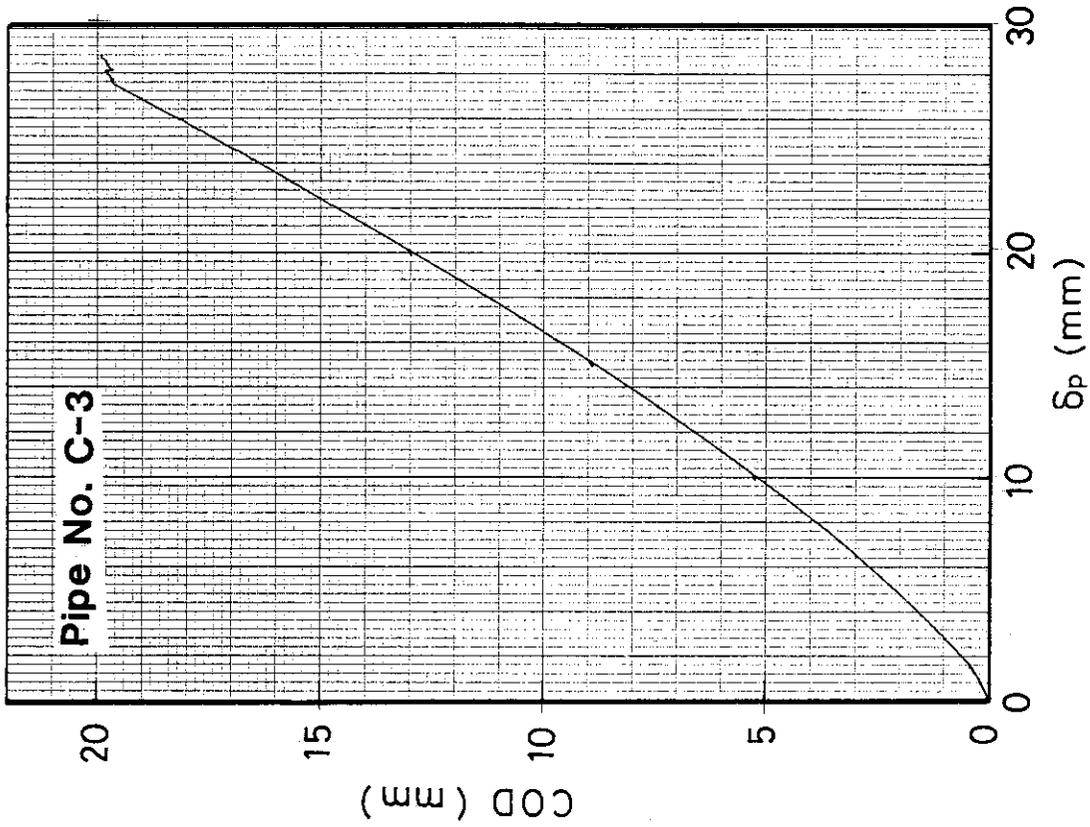


Fig. C.2 Result of COD measurement (C-3)

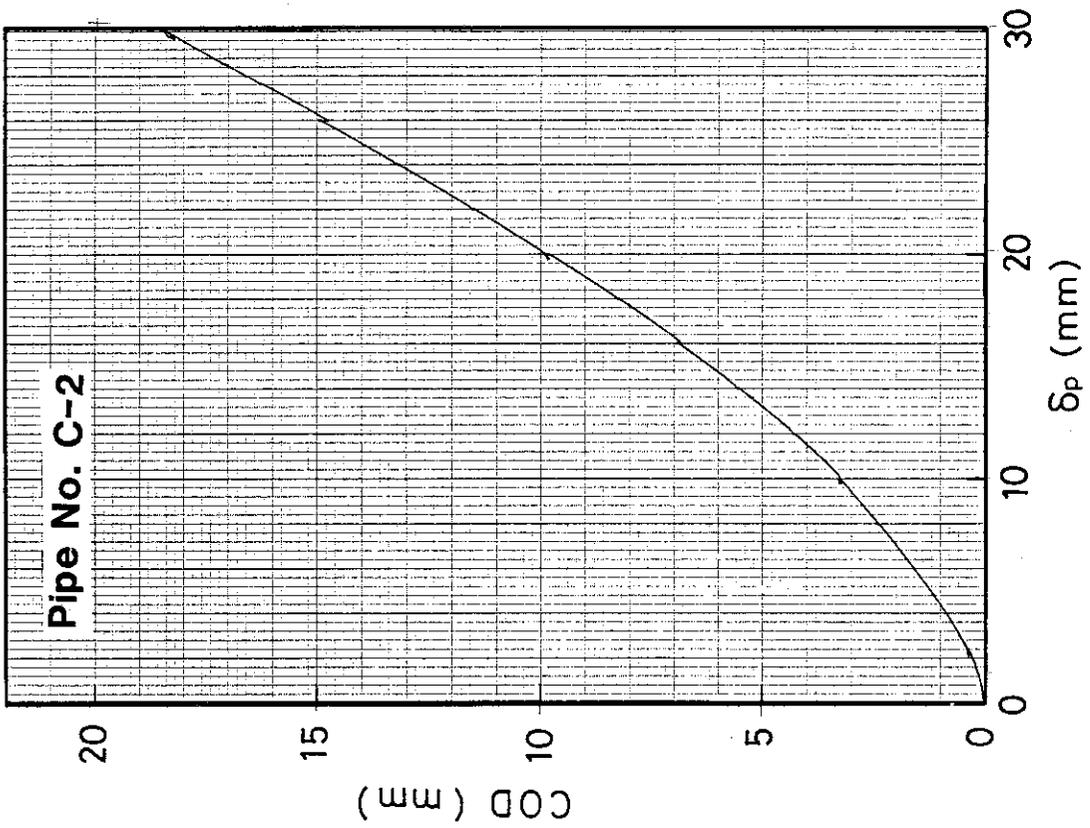


Fig. C.1 Result of COD measurement (C-2)

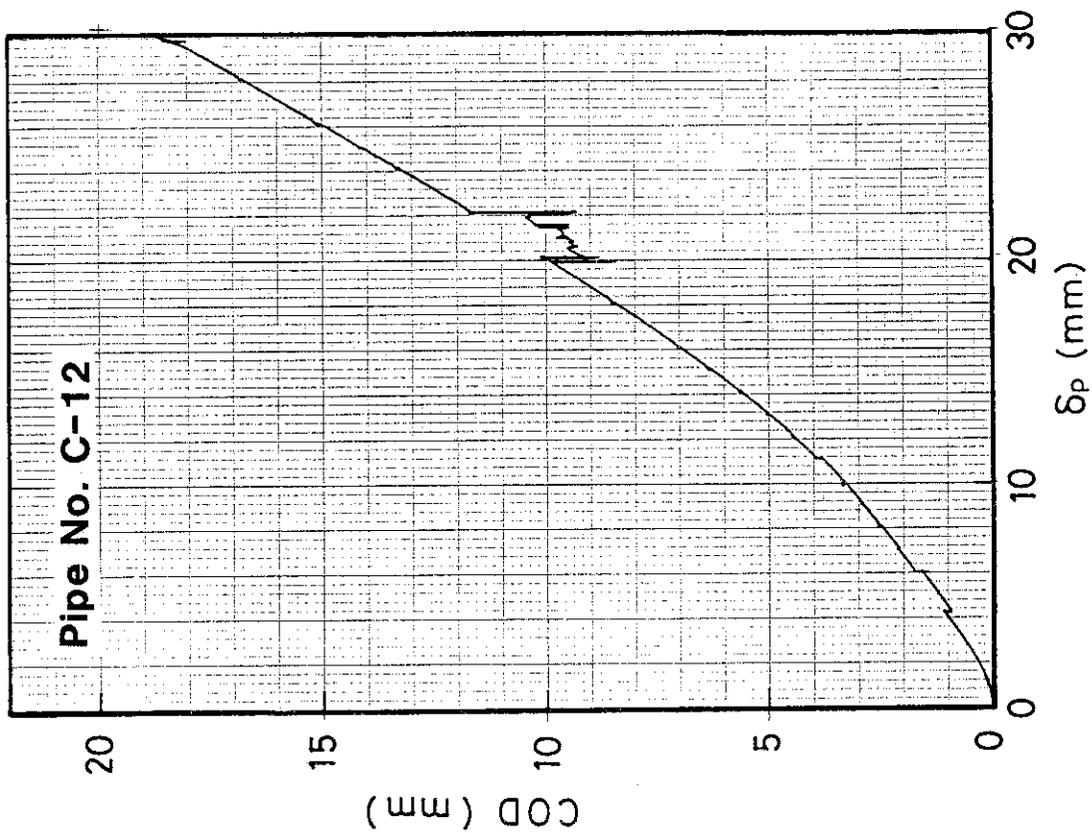


Fig. C.4 Result of COD measurement (C-12)

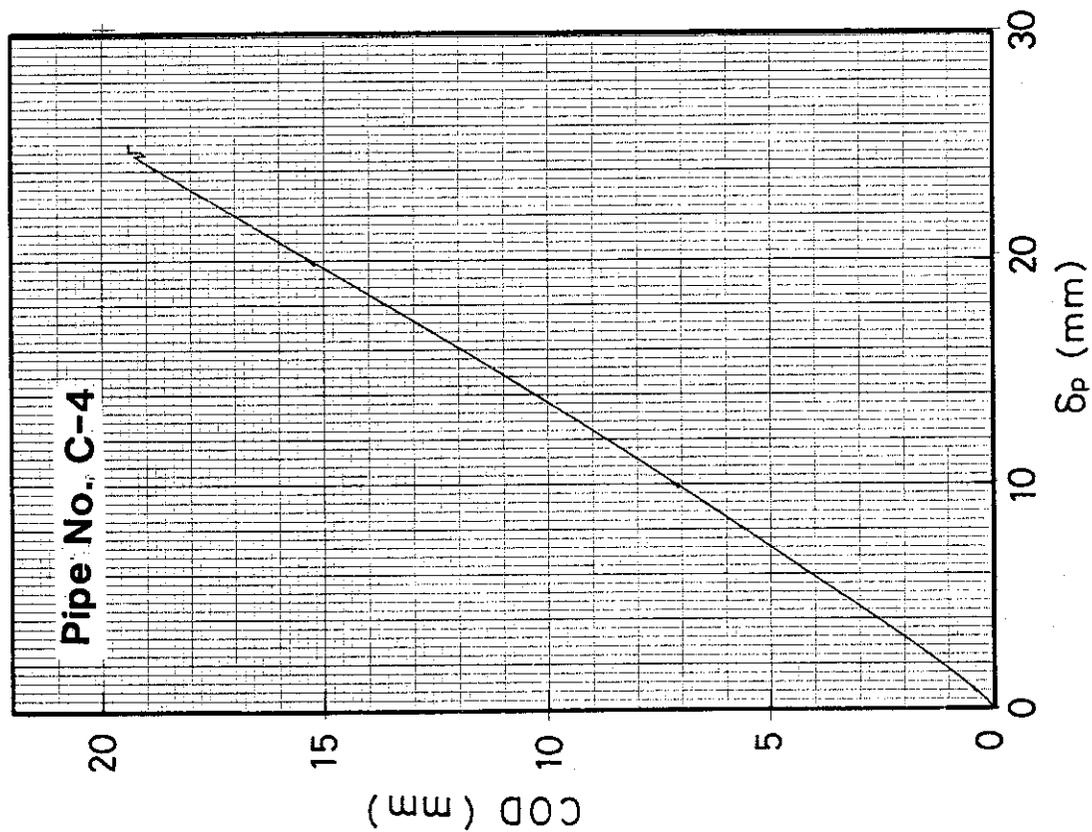


Fig. C.3 Result of COD measurement (C-4)

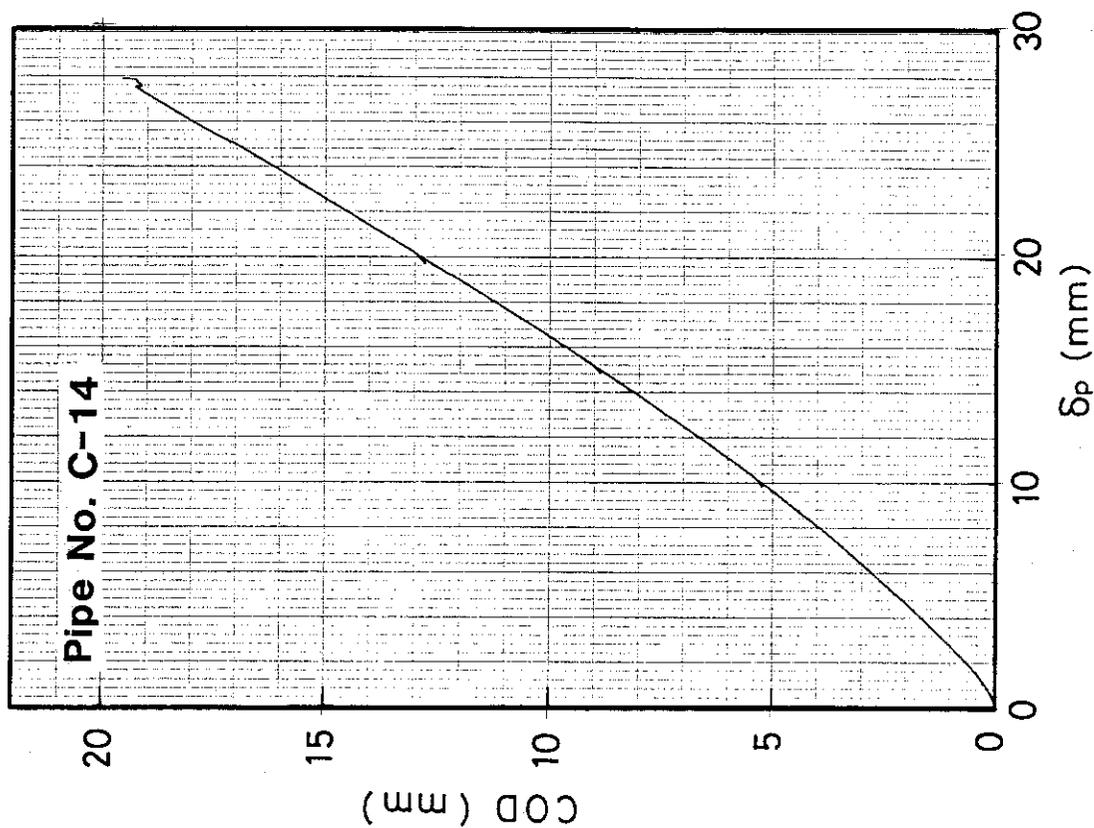


Fig. C.6 Result of COD measurement (C-14)

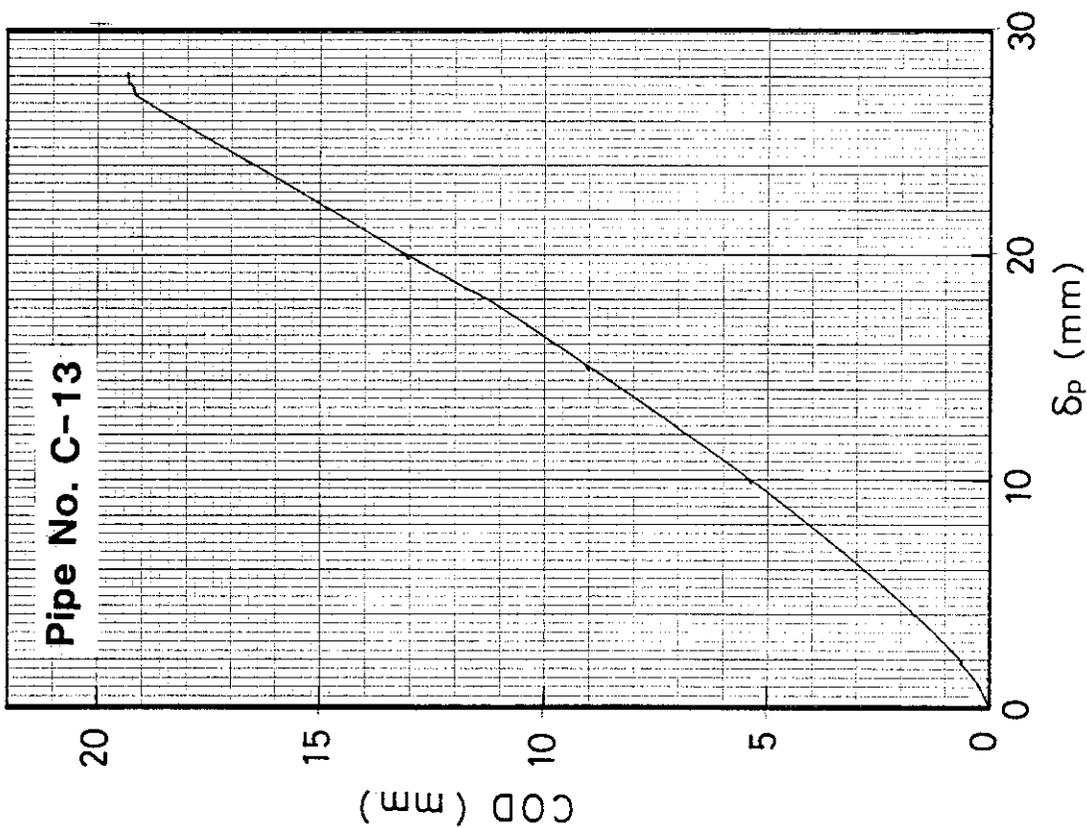


Fig. C.5 Result of COD measurement (C-13)

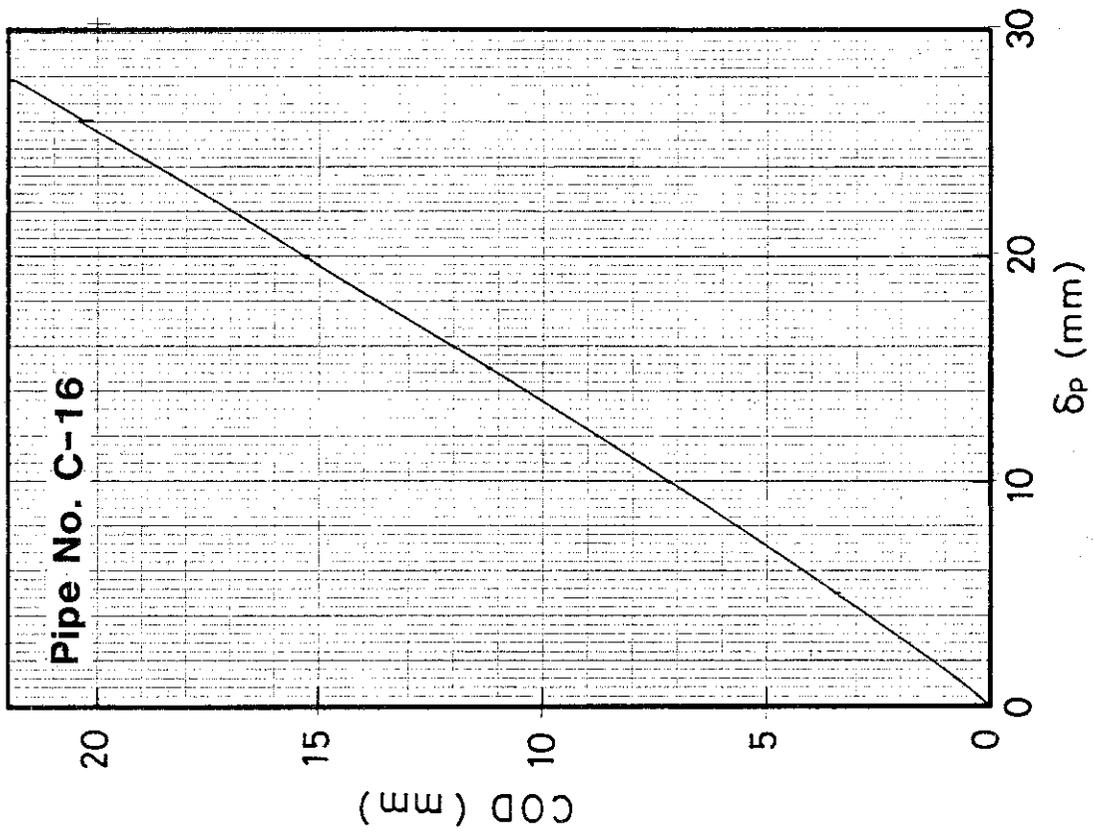


Fig. C.8 Result of COD measurement (C-16)

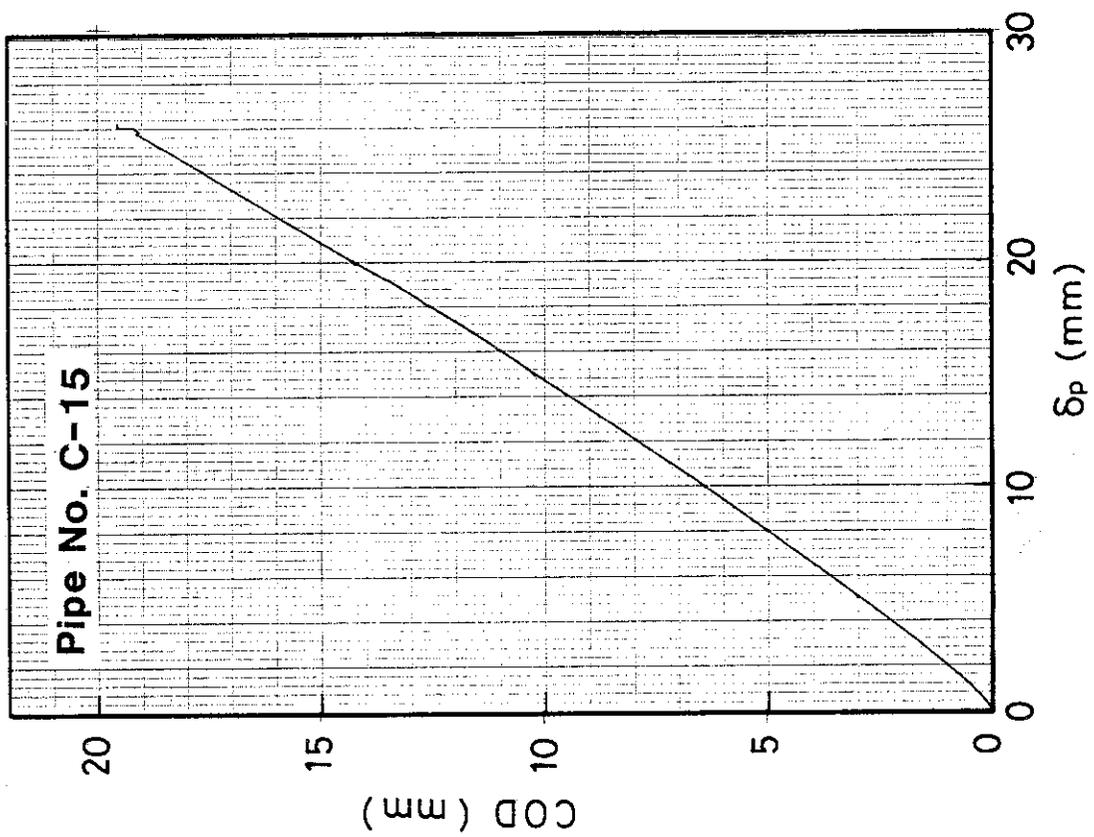


Fig. C.7 Result of COD measurement (C-15)

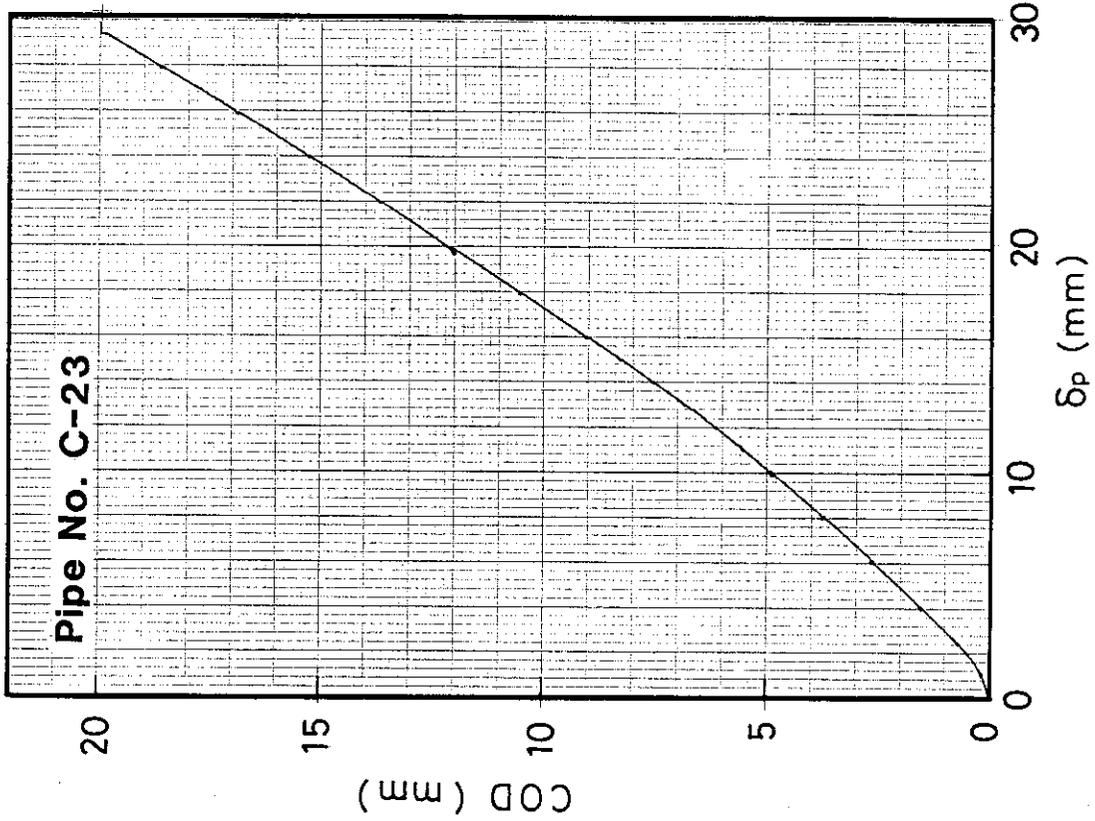


Fig. C.10 Result of COD measurement (C-23)

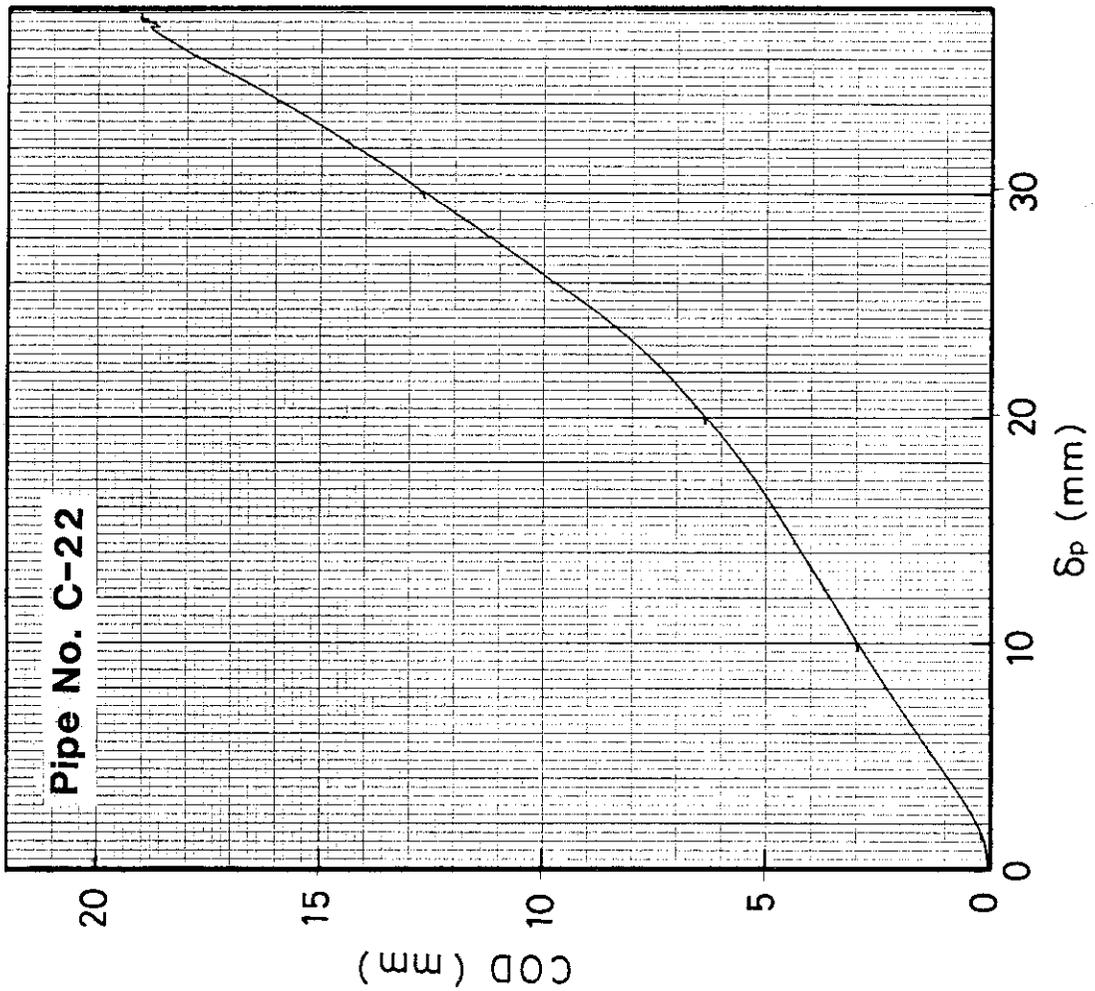


Fig. C.9 Result of COD measurement (C-22)

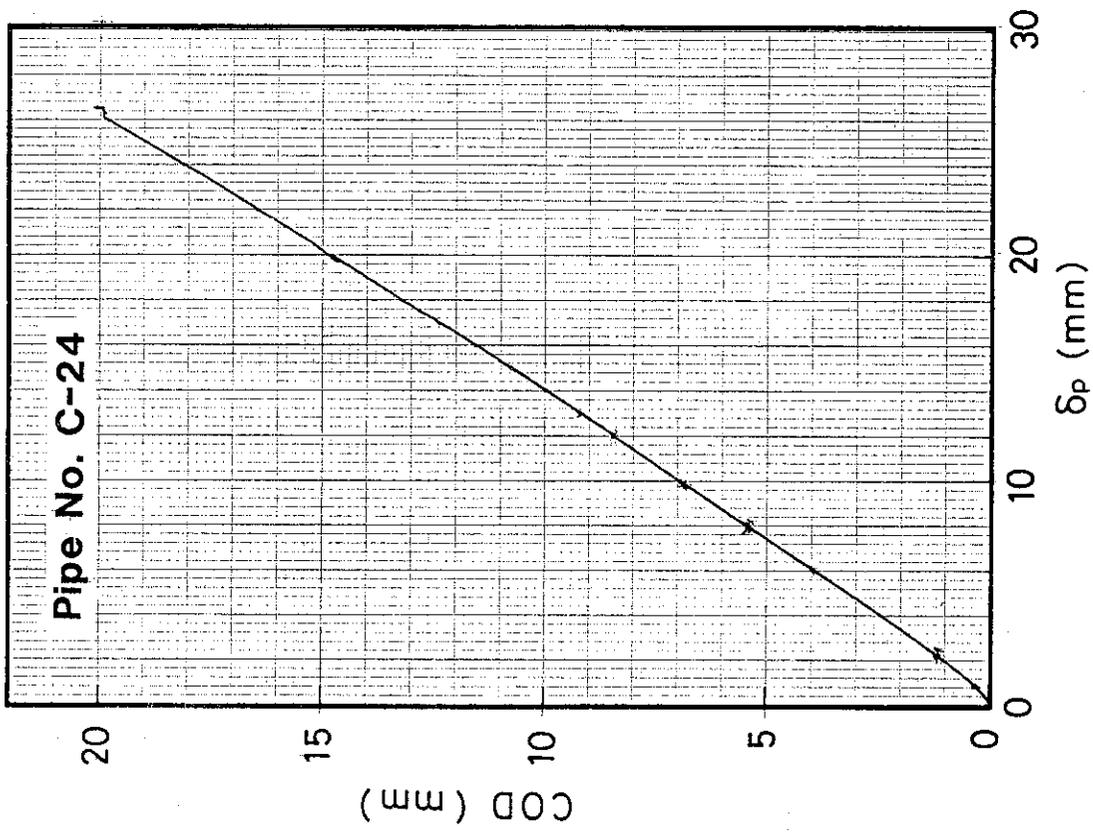


Fig. C.11 Result of COD measurement (C-24)

付録D CTOD- δ_P 曲線

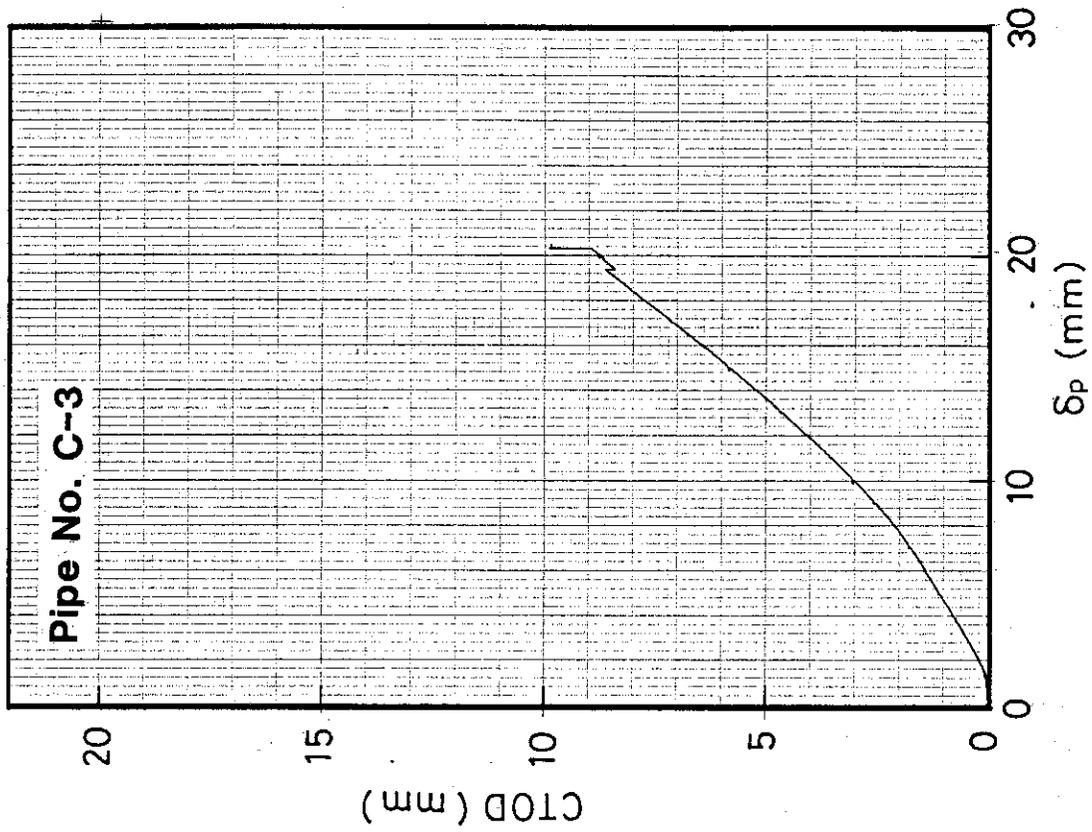


Fig. D.2 Result of CTOD measurement (C-3)

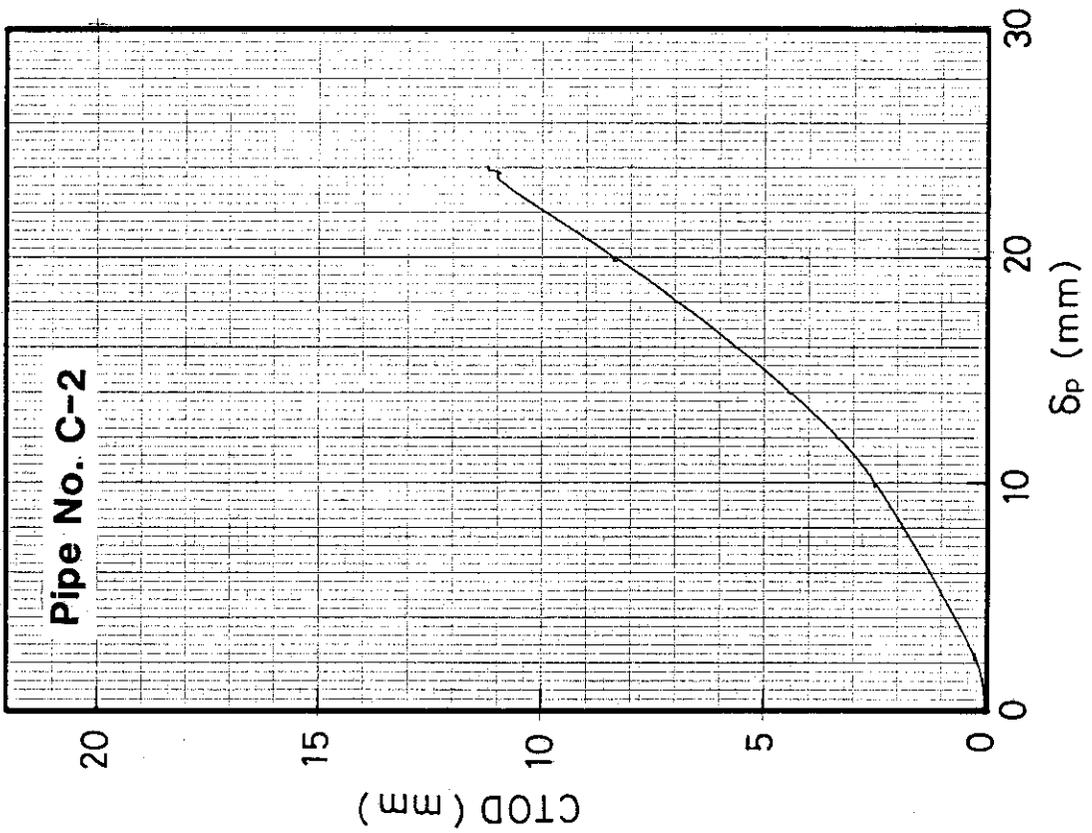


Fig. D.1 Result of CTOD measurement (C-2)

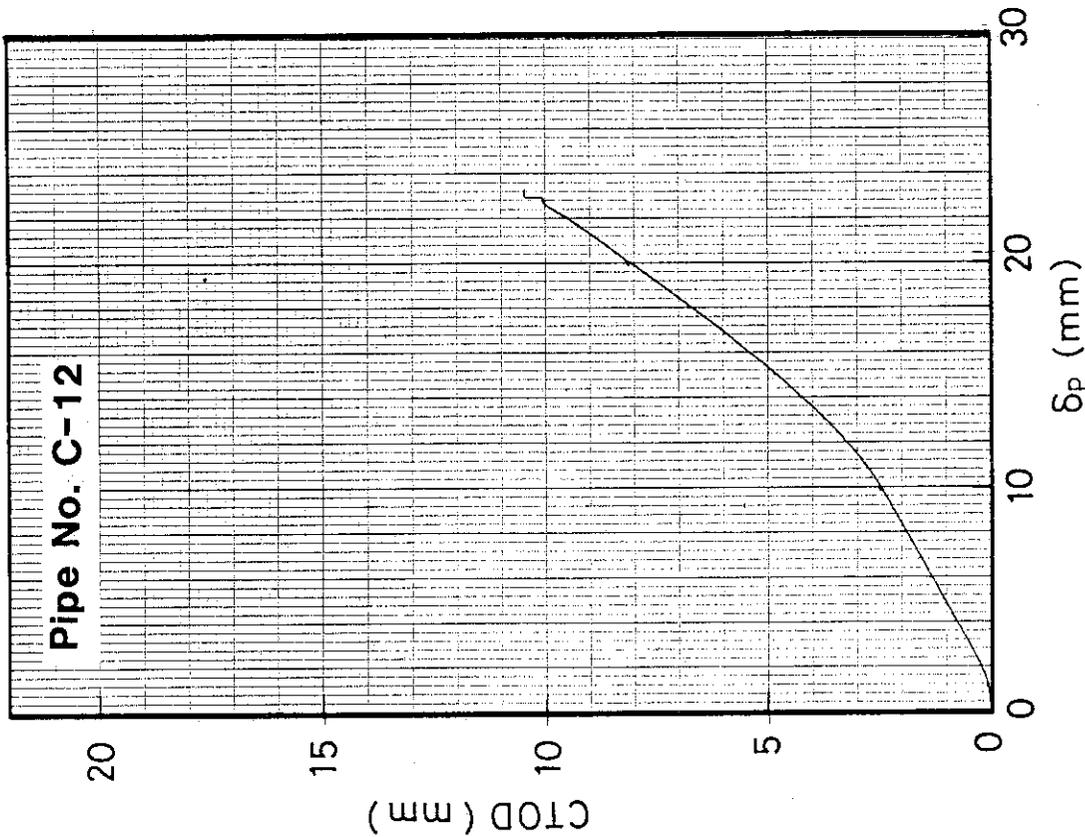


Fig. D.4 Result of CTOD measurement (C-12)

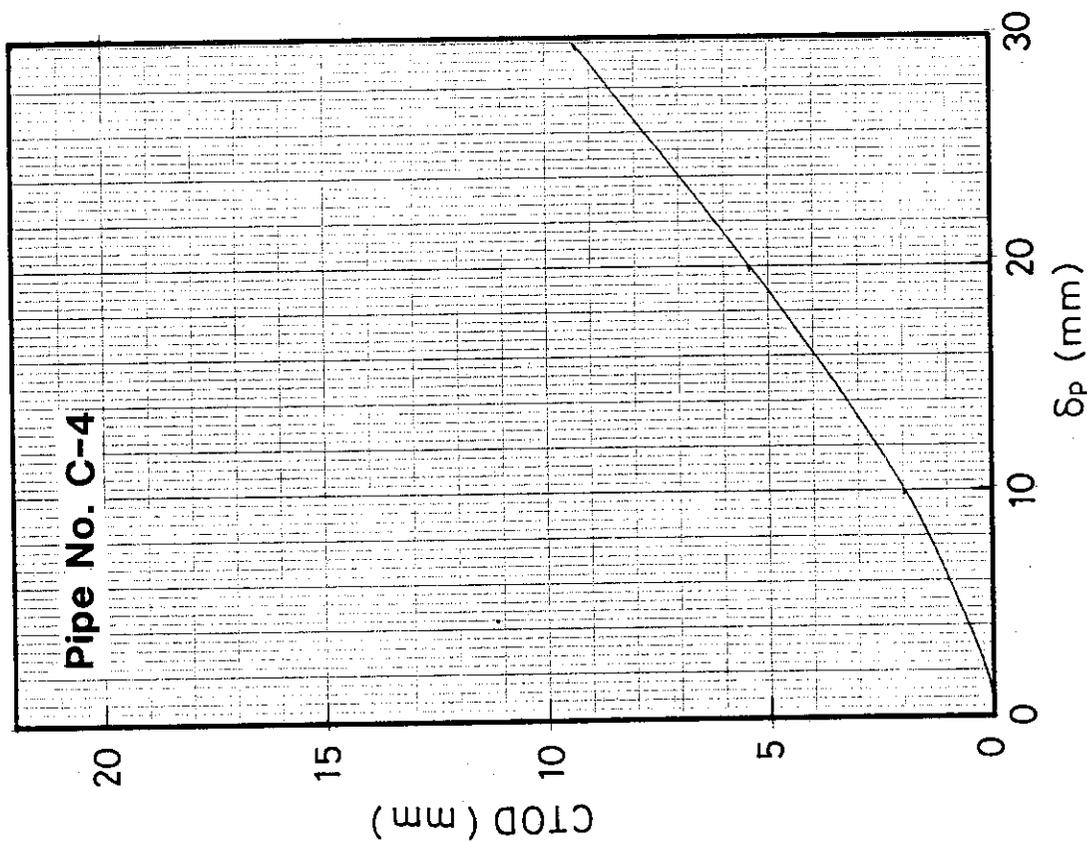


Fig. D.3 Result of CTOD measurement (C-4)

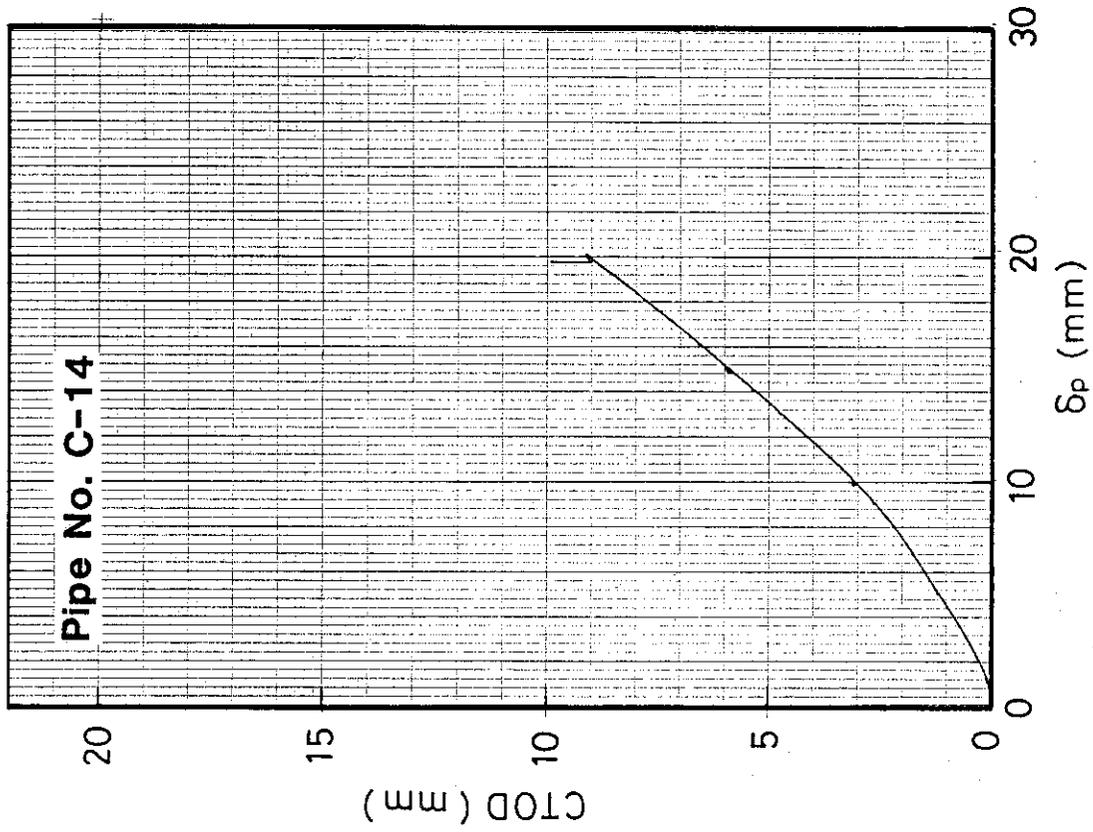


Fig. D.6 Result of CTOD measurement (C-14)

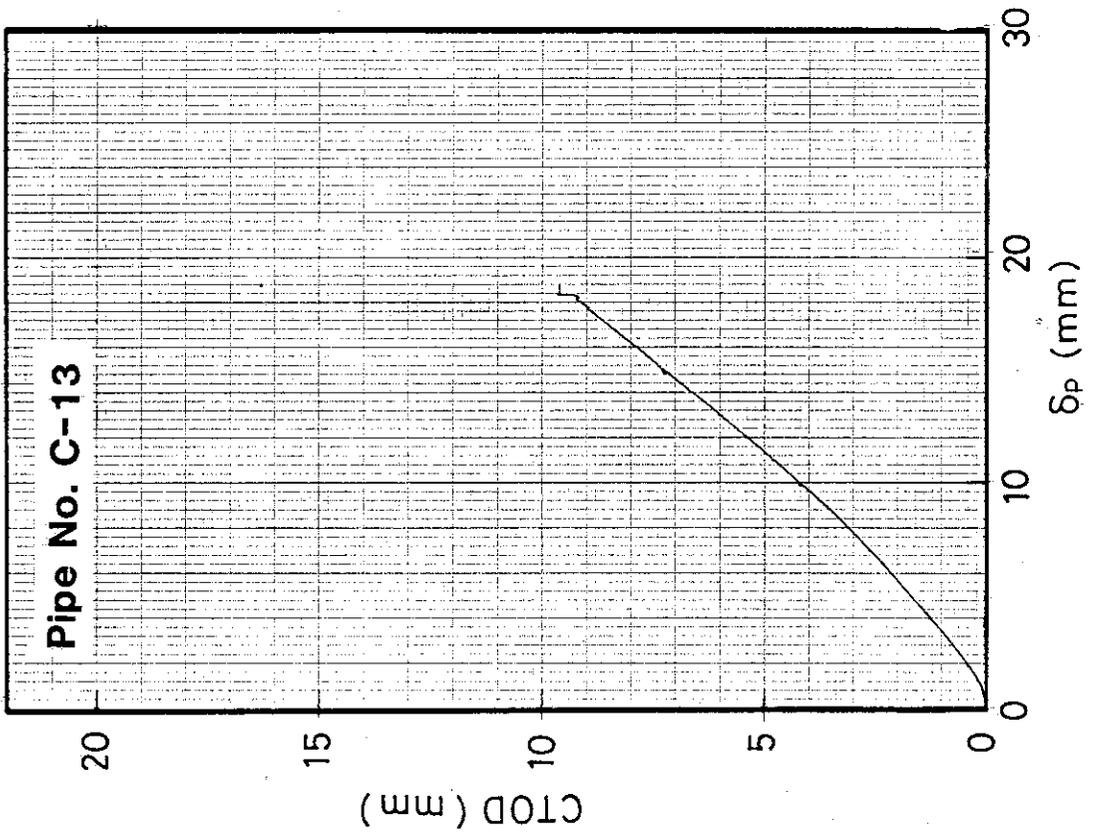


Fig. D.5 Result of CTOD measurement (C-13)

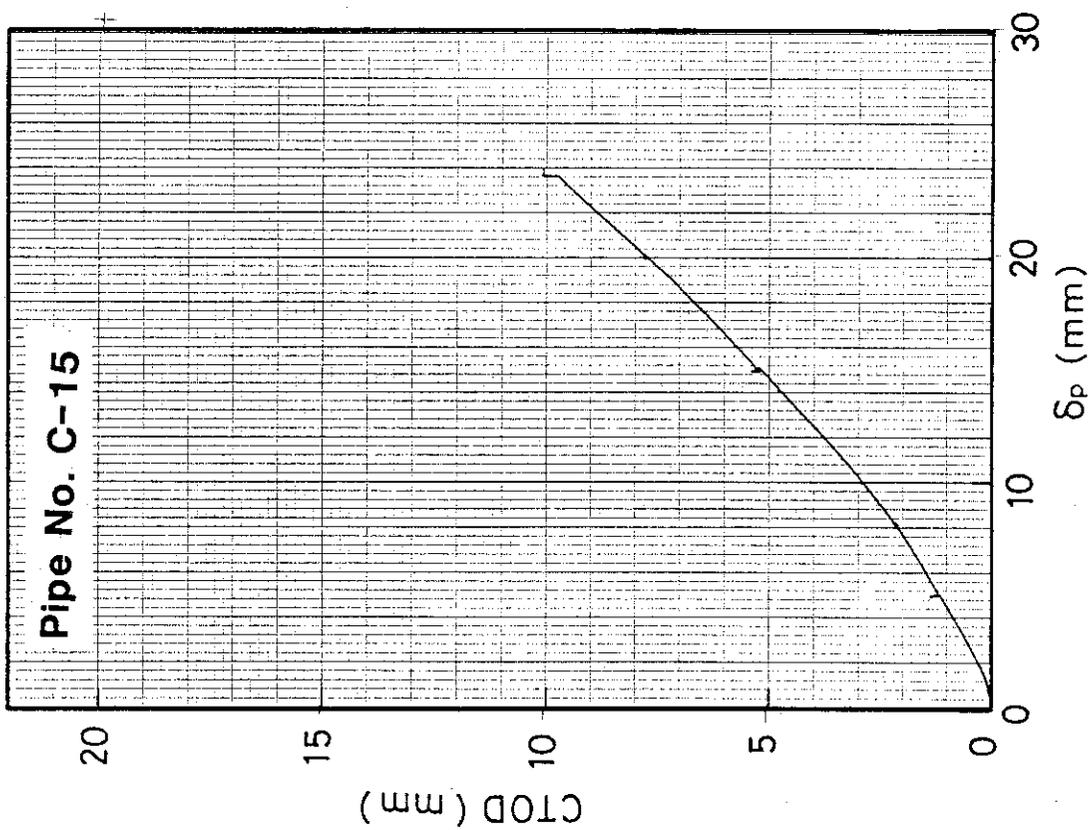


Fig. D.7 Result of CTOD measurement (C-15)

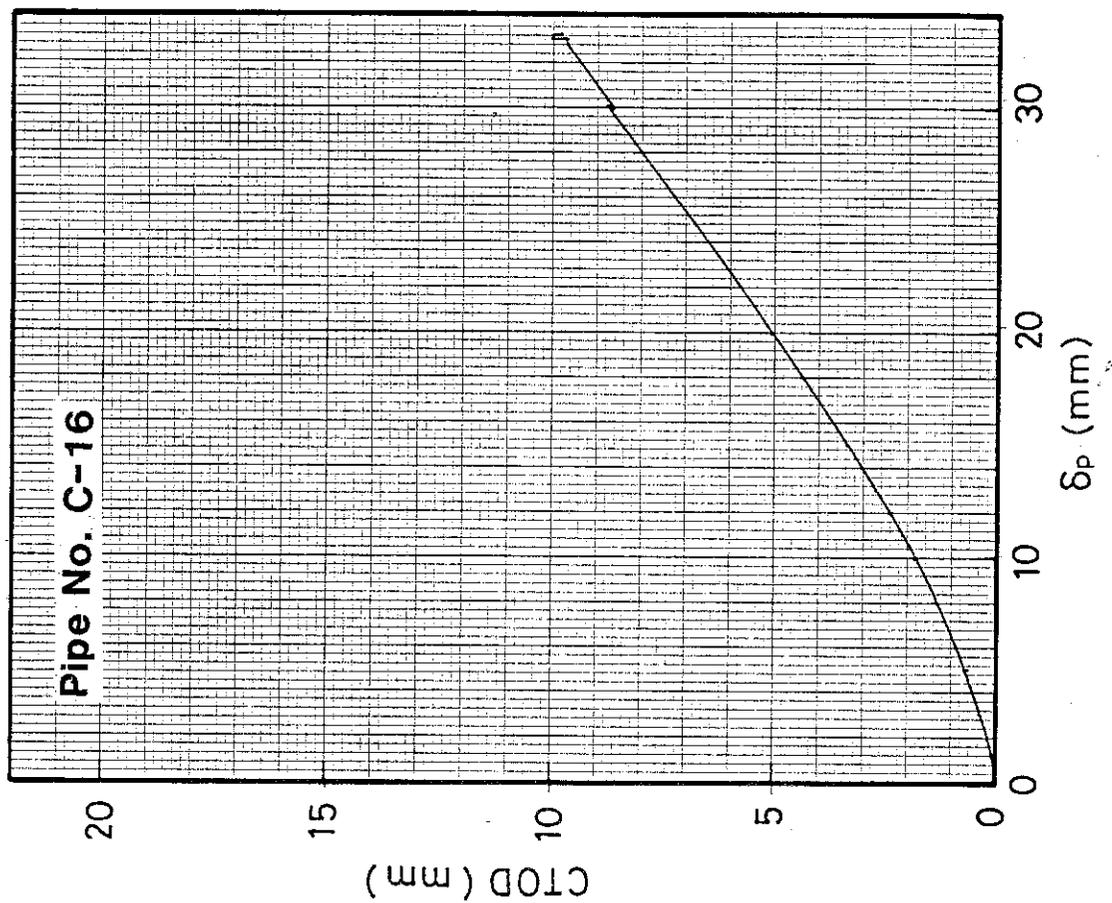


Fig. D.8 Result of CTOD measurement (C-16)

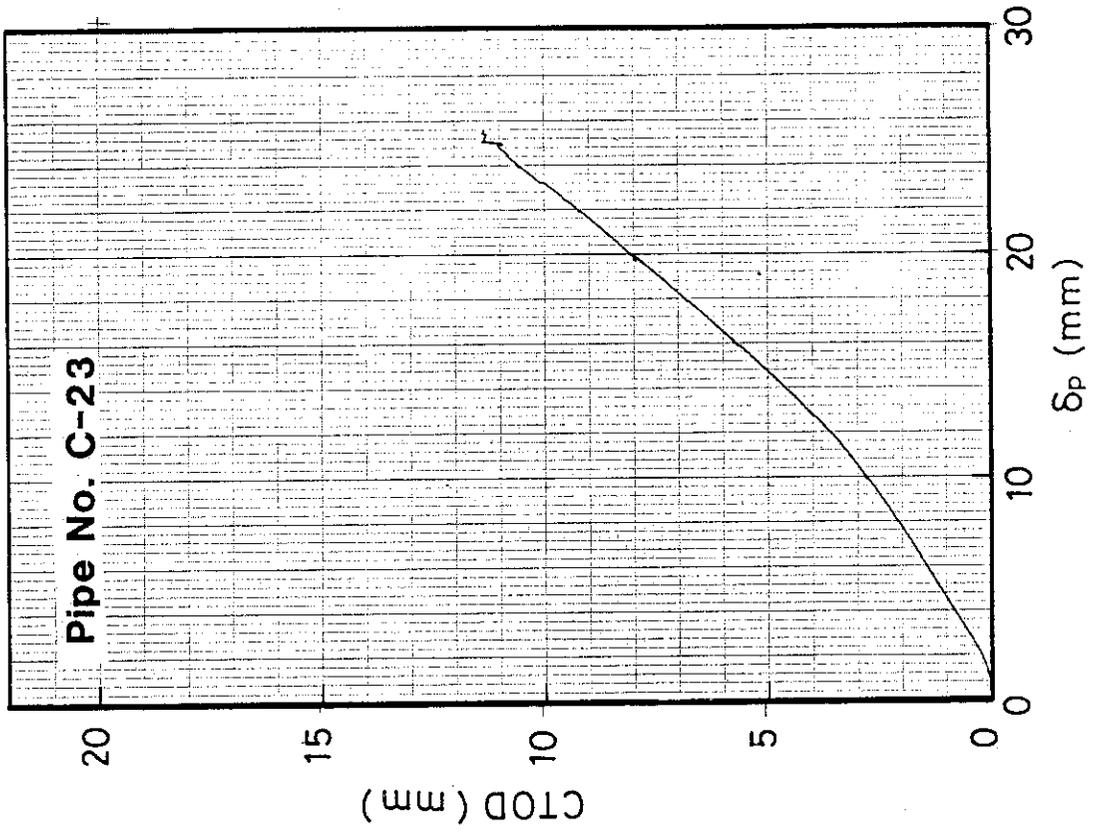


Fig. D.10 Result of CTOD measurement (C-23)

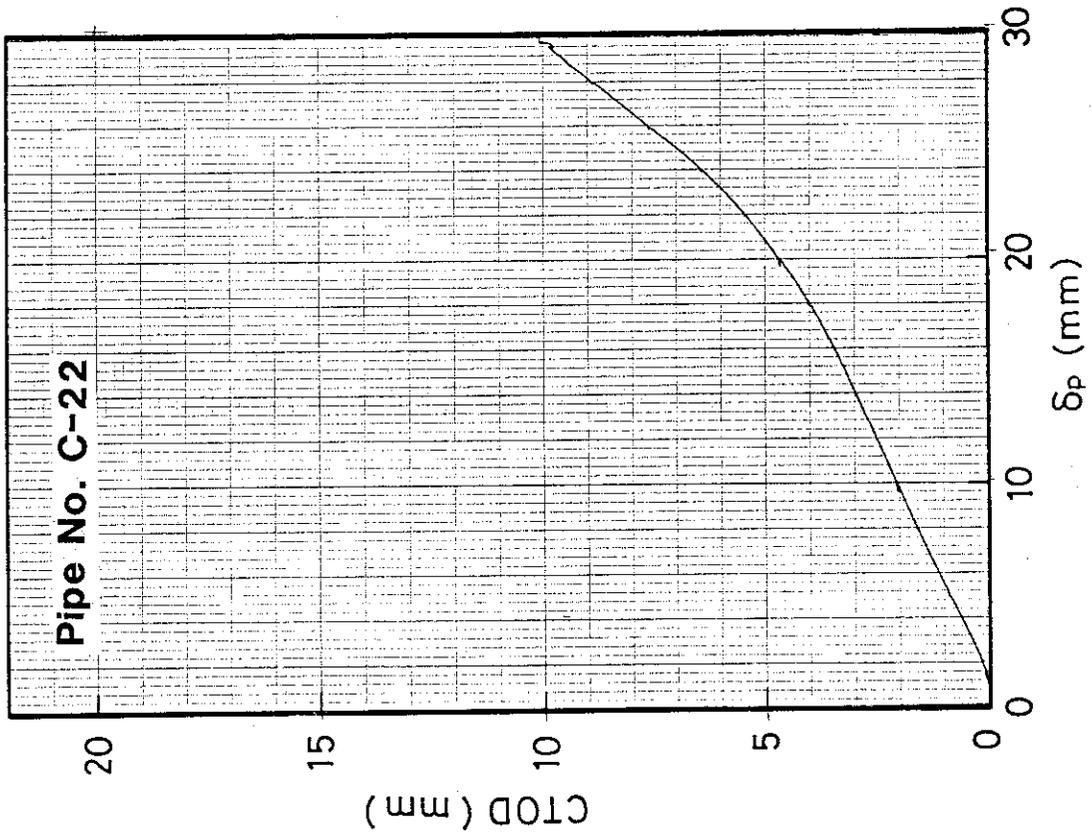


Fig. D.9 Result of CTOD measurement (C-22)

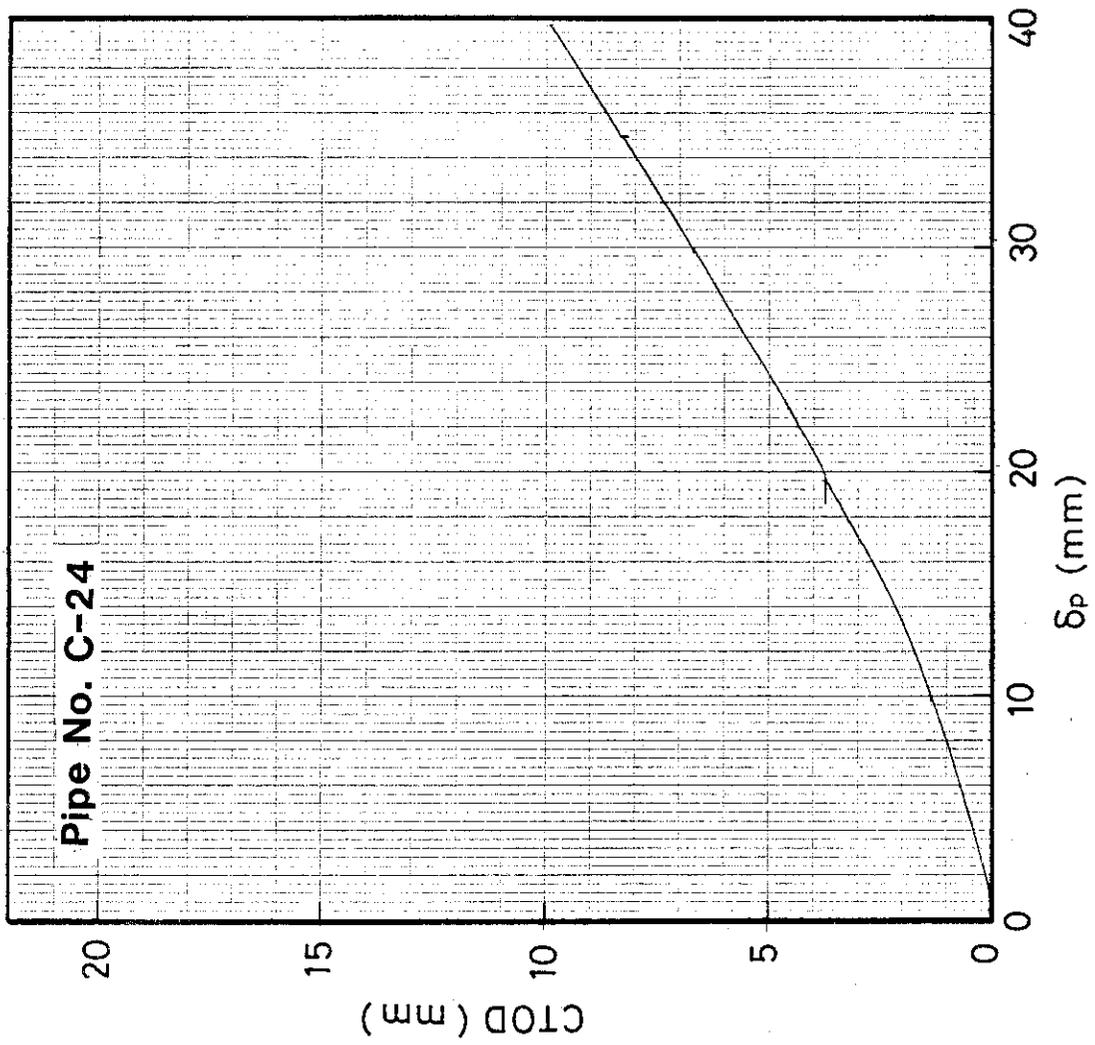


Fig. D.11 Result of CTOD measurement (C-24)

付録E き裂なし試験体の歪分布

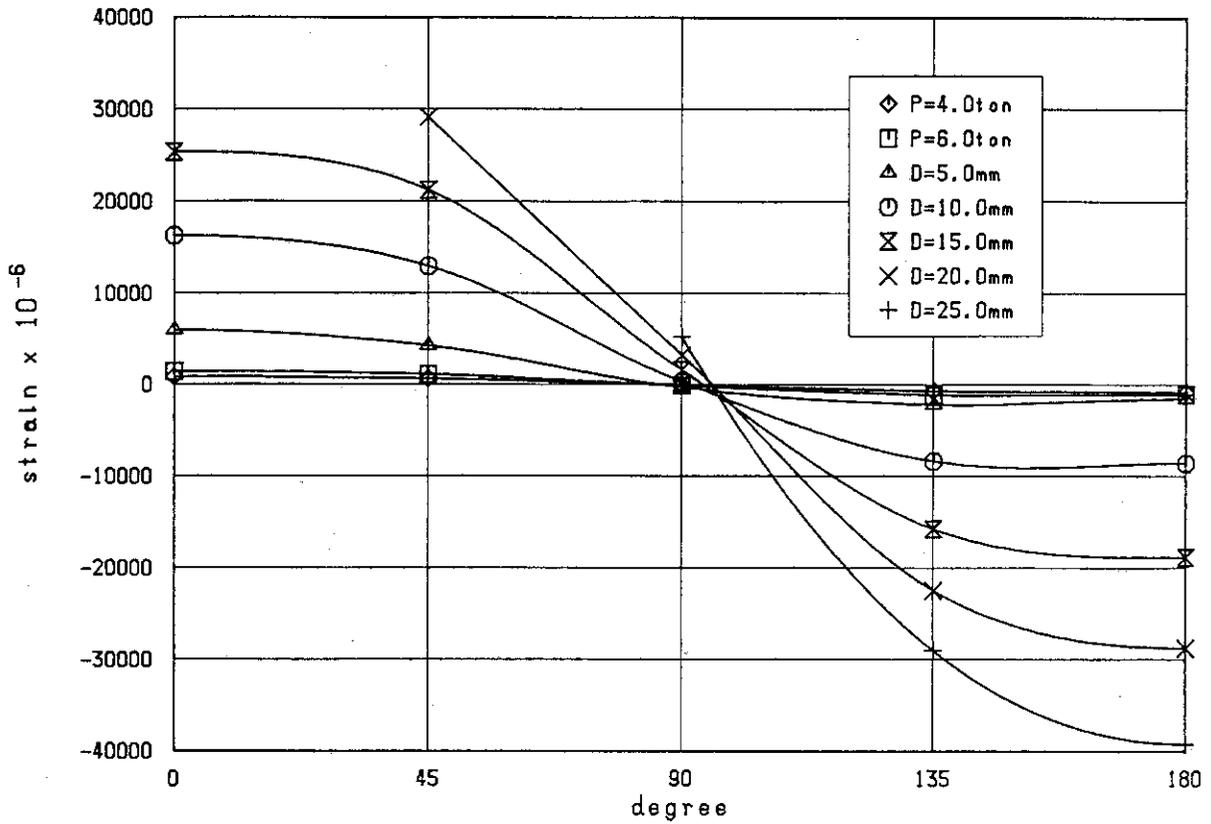


Fig. E.1a Result of strain distribution measurement (C-1)

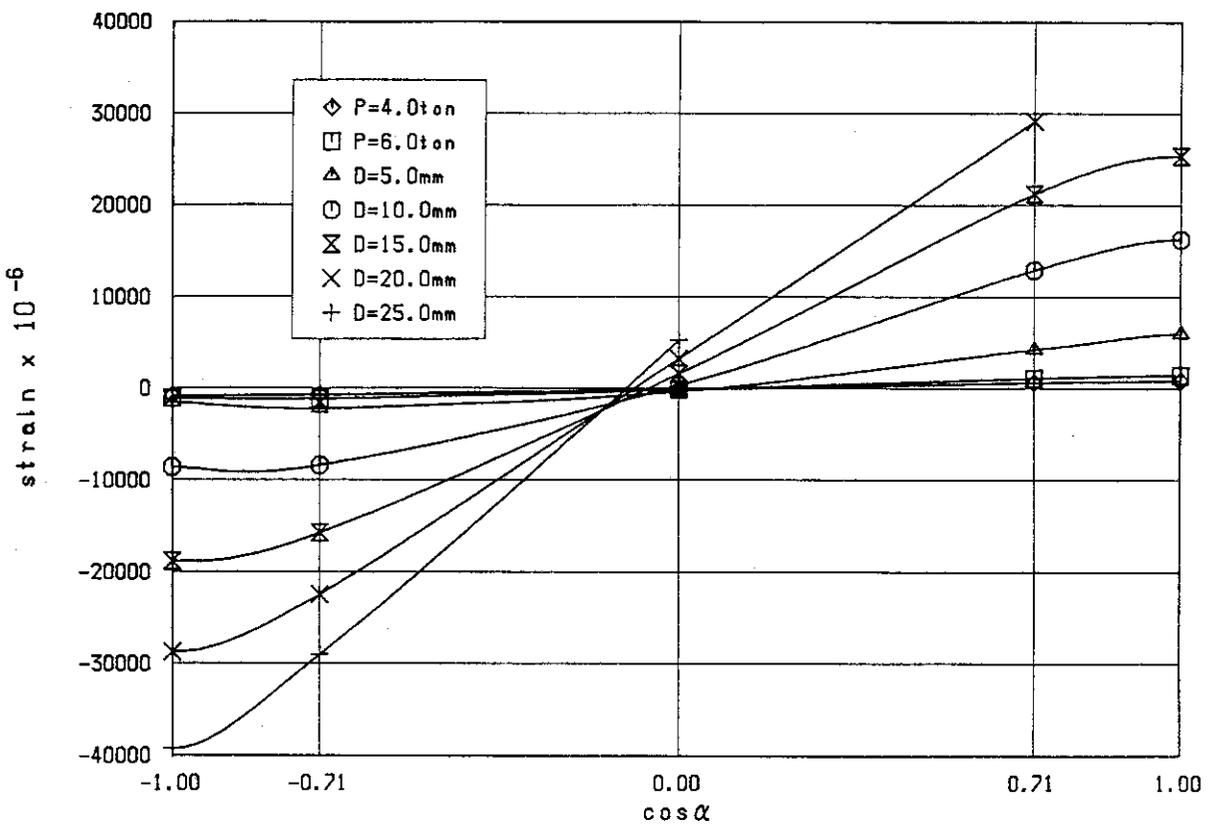


Fig. E.1b Result of strain distribution measurement (C-1)

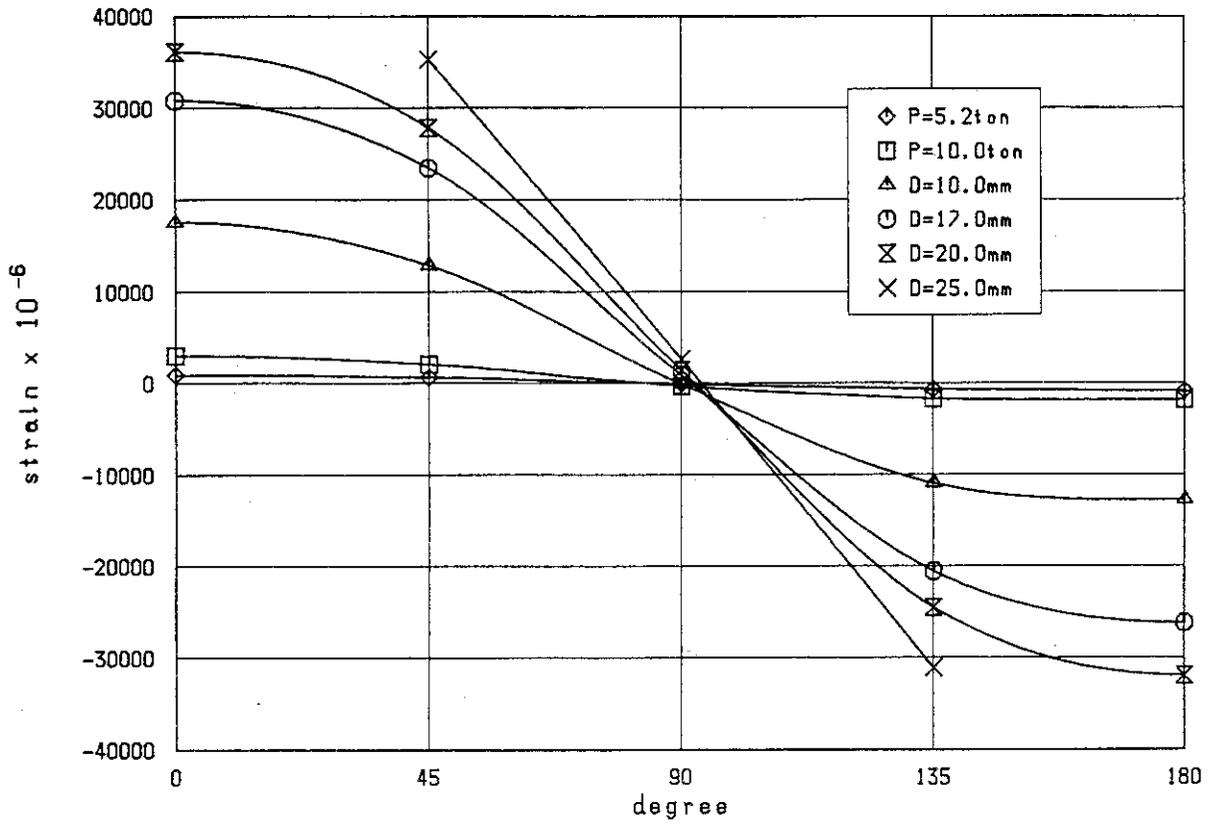


Fig. E.2a Result of strain distribution measurement (C-11)

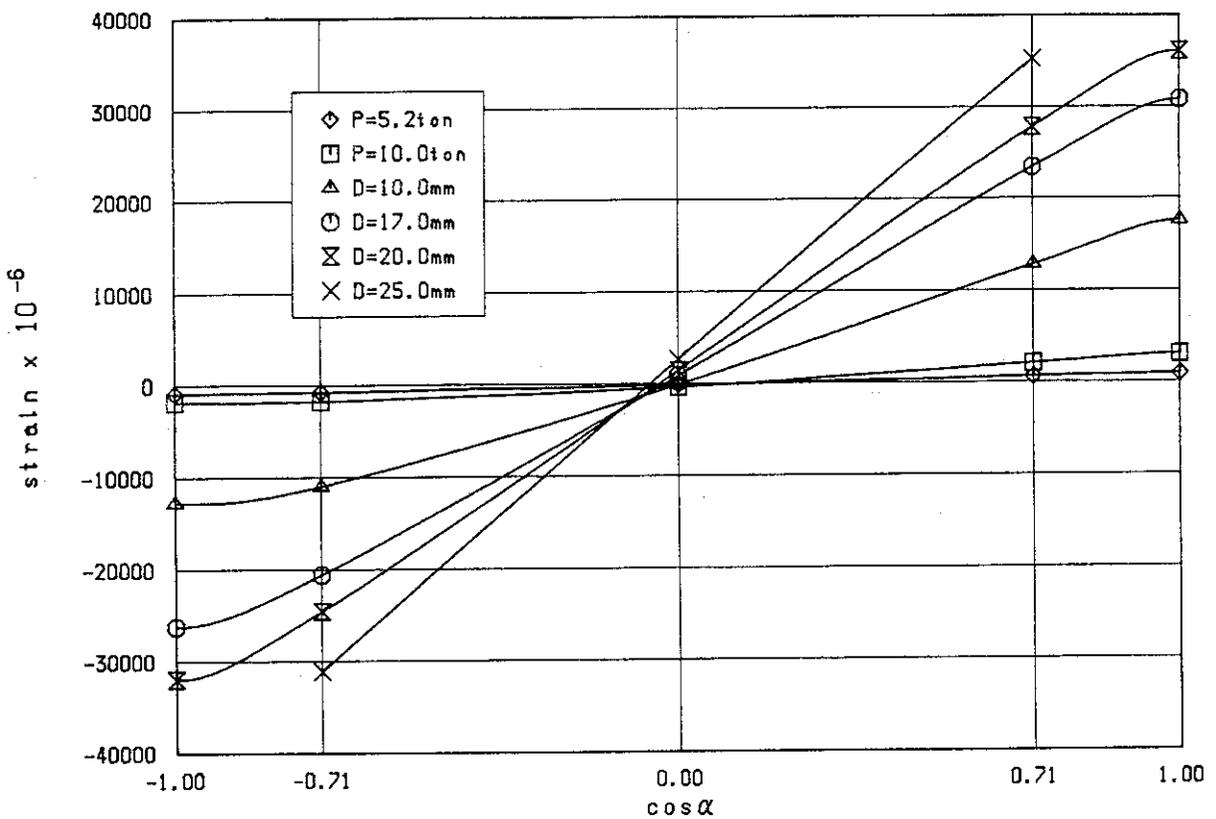


Fig. E.2b Result of strain distribution measurement (C-11)

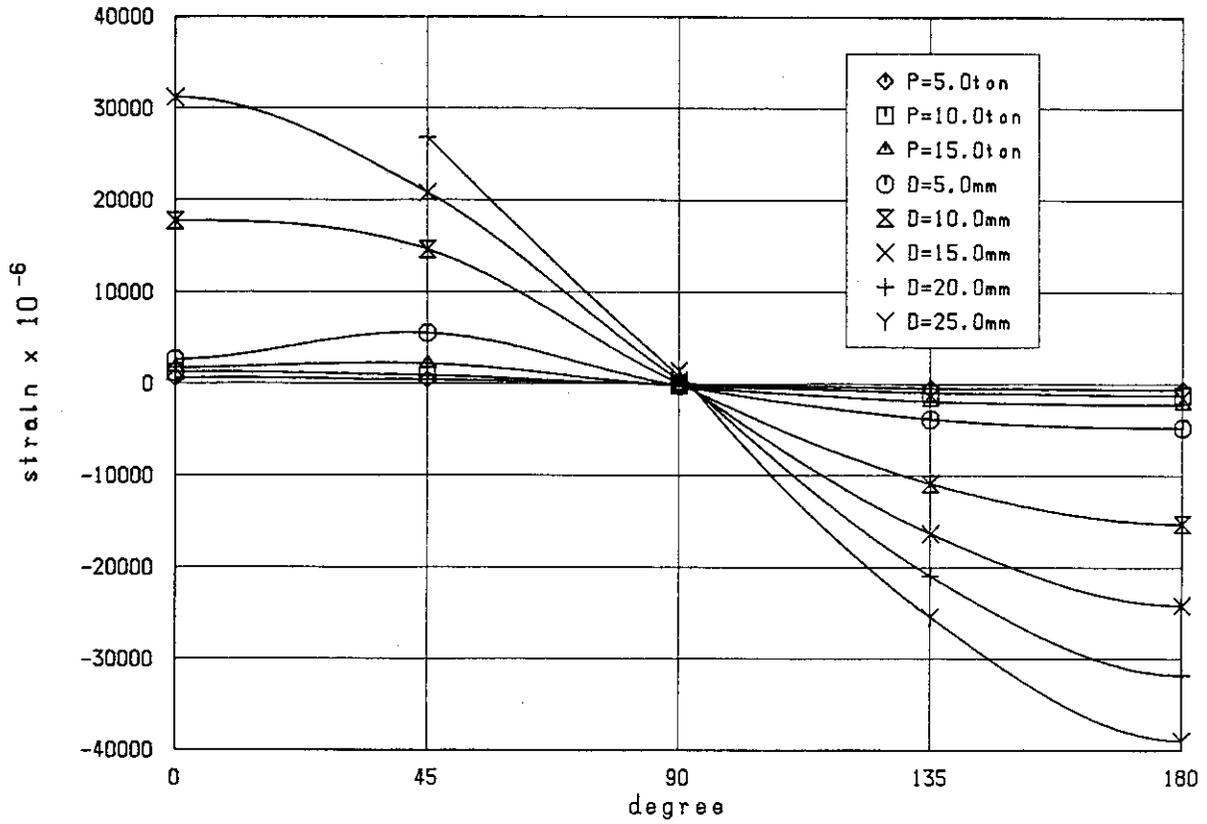


Fig. E.3a Result of strain distribution measurement (C-21)

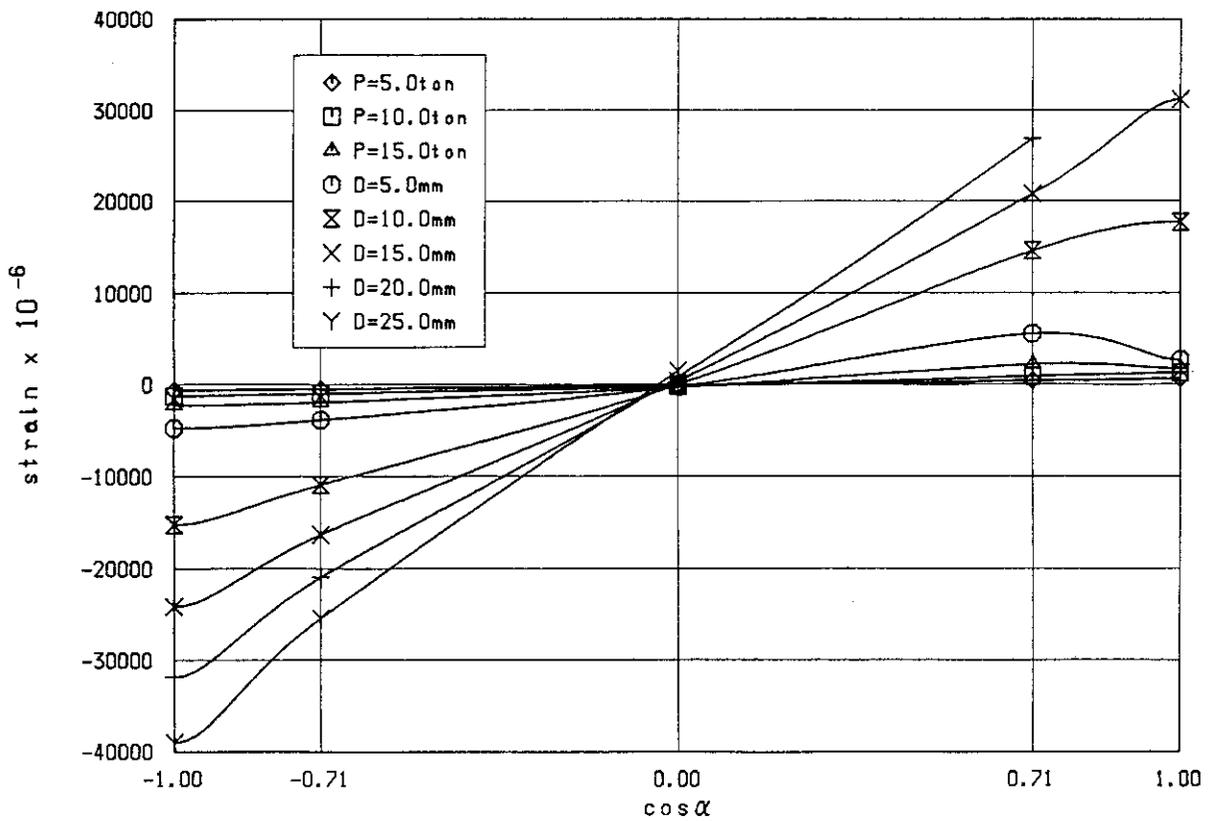


Fig. E.3b Result of strain distribution measurement (C-21)

付録F J積分計算値, 偏平化測定データ

Table F.1 Result of C-1 pipe test

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa_m (mm)	Dx (mm)	Dy (mm)	Je (kg/mm)	Jp (kg/mm)	J (kg/mm)	
C-1	9.9	0°	0	0			86.60	86.70				
			2.3	6100								
			5.2	8650								
			10.0	9900				87.40	85.65			
			15.0	10600				87.95	85.40			
			20.0	11200				88.80	83.85			
			30.0	12000				90.15	80.50			
			40.0	12150				94.90	75.80			
			50.0	10900				100.60	68.80			
			60.0	8200				107.30	60.20			
			70.0	6600								
80.0	5500											

Table F.2 Result of C-2 pipe test

Pipe No.	R/t	2θ	δ _p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δam (mm)	D _x (mm)	D _y (mm)	J _e (kg/mm)	J _p (kg/mm)	J (kg/mm)	
C-2	9.96	45°	0.0	0	0.0	0.0	86.80	86.80	0.0	0.0	0.0	
			1.4	4050	0.0	0.0			1.44	0.58	2.02	
			2.48	6000	0.0	0.0			3.16	5.50	8.66	
			4.8	8000	0.0	0.0			5.62	1.11	6.73	
			6.0	8490	0.0	0.0			6.33	10.95	17.28	
			8.2	9080	0.0	0.0			7.24	14.58	21.82	
			10.2	9400	0.05	0.05	0.05	86.70	87.00	7.79	29.20	36.99
			12.0	9600	1.35	1.35	1.29			9.07	49.30	58.36
			14.0	9600	4.25	4.25	4.05			11.38	90.41	101.78
			16.0	9400	8.08	8.08	7.69			14.30	134.05	148.35
			18.0	9040	12.00	12.00	11.43			17.03	178.94	195.97
			20.0	8520	15.75	15.75	15.00	85.10	88.50	18.93	223.52	242.45
			22.0	7800	21.23	21.23	20.21			21.61	263.29	284.90
			24.0	7120	25.68	25.68	24.45			22.91	300.55	323.46
			26.0	6400	30.63	30.63	29.16			24.08	329.78	353.86
			28.0	5620	36.75	36.75	34.99			25.73	348.60	374.32
30.0	5000	40.75	40.75	38.80	84.15	88.90	25.28	368.35	393.63			
32.0	4320	45.45	45.45	43.28			24.47	377.85	402.32			
34.0	3800	49.68	49.68	47.30			24.04	382.83	406.87			
36.0	3380	53.38	53.38	50.83			23.55	387.15	410.70			
38.0	2900	57.48	57.48	54.73			22.07	386.34	408.41			
40.0	2600	60.33	60.33	57.44								
45.0	1970											
50.0	1460											

Table F.3 Result of C-3 pipe test

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa_m (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)
C-3	9.88	90°	0.0	0	0.0	0.0	87.15	87.25	0.0	0.0	0.0
			1.52	4050	0.0	0.0			4.47	0.27	4.74
			3.90	6150	0.0	0.0			10.30	20.97	31.27
			5.0	6370	0.0	0.0			11.05	34.78	45.83
			6.0	6600	0.0	0.0			11.86	47.03	58.89
			7.0	6750	0.0	0.0			12.41	61.70	74.11
			8.0	6850	0.40	0.38			13.07	77.64	90.71
			9.0	6900	1.08	1.03			13.79	94.86	108.64
			10.0	6895	2.73	2.60		85.95	15.10	112.52	127.61
			11.0	6840	3.80	3.62			15.76	131.25	147.02
			12.0	6750	5.23	4.98			16.60	149.66	166.25
			13.0	6600	7.30	6.95			17.75	167.14	184.88
			14.0	6480	9.28	8.83			19.02	183.56	202.59
			15.0	6300	10.68	10.17			19.37	201.19	220.56
			16.0	6130	12.30	11.71			19.99	217.36	237.35
			17.0	5900	14.28	13.59			20.57	232.10	252.67
			18.0	5635	17.15	16.32			21.85	243.56	265.41
20.0	5100	20.55	19.56		84.57	21.47	270.63	292.11			
22.0	4600	25.20	23.99			22.49	287.20	309.70			
24.0	4100	28.43	27.06			21.37	304.62	325.99			
26.0	3600	33.08	31.49			21.43	310.08	331.51			
28.0	3180	36.93	35.15			20.90	316.09	336.99			
30.0	2800	40.73	38.77		84.75	20.27					
35.0	2350	47.88	45.57								
40.0	1600	54.13	51.52								
45.0	1250				84.45	88.60					
50.0	1000				84.65	88.55					

Table F.4 Result of C-4 pipe test

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa_m (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)	
C-4	9.84	180°	0.0	0	0.0	0.0	86.90	87.10	0.0	0.0	0.0	
			0.96	1150	0.0	0.0			2.30	0.33	2.63	
			2.4	2030	0.0	0.0			7.16	6.61	13.77	
			3.0	2250	0.0	0.0			8.80	11.27	20.07	
			4.0	2440	0.0	0.0			10.35	21.29	31.64	
			5.0	2565	0.0	0.0			11.44	32.58	44.01	
			6.0	2645	0.0	0.0			12.16	44.75	56.91	
			7.0	2725	0.0	0.0			12.91	57.30	70.21	
			8.0	2775	0.15	0.14			13.50	70.10	83.60	
			9.0	2800	0.30	0.29			13.86	83.28	97.14	
			10.0	2775	1.15	1.09		86.10	87.75	14.30	94.91	109.21
			11.0	2730	1.75	1.67				14.33	107.12	121.45
			12.0	2700	2.55	2.43				14.69	118.17	132.85
			13.0	2630	3.50	3.33				14.73	128.67	143.41
			14.0	2575	4.23	4.03				14.74	139.25	153.99
			15.0	2500	5.23	4.98				14.74	148.44	163.18
			16.0	2420	6.00	5.71				14.45	158.08	172.53
			17.0	2325	6.63	6.31				13.85	167.91	181.76
			18.0	2225	7.80	7.42				13.60	174.76	188.36
			20.0	2030	10.03	9.54		86.35	87.70	12.94	187.06	200.00
22.0	1865	12.38	11.78				12.59	196.31	208.90			
24.0	1700	15.15	14.42				12.39	201.67	214.07			
26.0	1540	16.85	16.04				11.29	210.37	221.66			
28.0	1400	19.38	18.44				10.91	213.14	224.05			
30.0	1280	21.45	20.41		86.45	87.90	10.37	216.58	226.95			
35.0	1020	24.83	23.63				8.12	235.73	243.85			
40.0	820	28.10	26.74									
45.0	675											
50.0	560											

Table F.5 Result of C-11 pipe test

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa_m (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)	
C-11	7.1	0°	0.0	0			85.10	85.35				
			1.1	5100								
			2.8	10100								
			10.0	13000								
			17.2	14400				86.20	83.80			
			20.0	15000				86.57	83.85			
			30.0	16200				88.00	81.35			
			35.0	16600				89.00	79.80			
			40.0	16900				90.25	78.30			
			50.0	17000				93.65	73.95			
			60.0	15700				97.85	66.90			
			70.0	12700				102.75	57.20			
80.0	10700				106.80	51.40						

Table F.6 Result of C-12 pipe test

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa_m (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)
C-12	7.11	45°	0.0	0	0.0	0.0	85.15	85.20	0.0	0.0	0.0
			1.2	5100	0.0	0.0			1.31	0.47	1.78
			4.2	10000	0.0	0.0			5.03	12.78	17.81
			5.0	10400	0.0	0.0			5.44	19.27	24.70
			6.0	10730	0.0	0.0			5.79	30.56	36.34
			7.0	11000	0.0	0.0			6.08	43.21	49.30
			8.0	11330	0.0	0.0			6.45	44.20	50.65
			9.0	11600	0.20	0.19			6.87	48.35	55.23
			10.0	11800	0.30	0.28		85.05	7.17	56.39	63.56
			11.0	12000	0.90	0.84			7.79	64.58	72.37
			12.0	12080	1.55	1.45			8.30	79.77	88.07
			13.0	12100	3.00	2.80			9.30	98.66	107.96
			14.0	12080	4.35	4.06			10.22	119.28	129.50
			15.0	11980	5.55	5.19			10.93	140.61	151.54
			16.0	11840	8.35	7.80			12.85	161.63	174.48
			18.0	11400	11.60	10.84			14.58	205.68	220.25
20.0	10720	17.00	15.88		84.10	17.62	246.18	263.81			
22.0	9860	20.00	18.69			17.60	288.08	305.69			
24.0	8930	26.50	24.76			20.52	315.75	336.27			
26.0	7900	31.50	29.43			21.00	341.22	362.22			
28.0	7000	36.00	33.64			21.05	361.01	382.06			
30.0	5920	42.00	39.24		83.75	21.00	368.22	389.22			
35.0	4200	52.00	48.58			18.82					
40.0	3000	59.25	55.36								
50.0	1640										

Table F.7 Result of C-13 pipe test

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa_m (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)		
C-13	7.22	90°	0.0	0	0.0	0.0	85.45	85.80	0.0	0.0	0.0		
			1.12	4120	0.0	0.0			2.63	0.63	3.26		
			2.0	6000	0.175	0.16			5.64	5.37	11.01		
			4.0	7500	0.40	0.37			8.92	29.56	38.48		
			6.0	8020	1.275	1.19			10.71	60.90	71.61		
			7.0	8200	1.775	1.66			11.52	76.18	87.69		
			8.0	8260	2.60	2.43			12.23	92.99	105.22		
			9.0	8280	3.55	3.32			12.95	110.32	123.27		
			10.0	8200	5.125	4.79		84.45	86.50	13.84	127.37	141.20	
			11.0	8080	6.65	6.22				14.59	144.44	159.03	
			12.0	7940	8.225	9.69				15.34	161.10	176.43	
			13.0	7800	9.975	9.33				16.26	176.90	193.17	
			14.0	7600	11.475	10.73				16.73	193.00	209.73	
			15.0	7340	13.075	12.23			84.20	86.55	17.00	208.17	225.18
			16.0	7100	14.775	13.82					17.43	222.24	239.67
			18.0	6740	17.875	16.92					18.58	248.16	266.74
			20.0	5800	23.2	21.90			83.85	86.80	18.44	265.10	283.54
22.0	5200	27.45	25.67					18.82	279.04	297.86			
24.0	4600	31.325	29.30					18.40	290.34	308.74			
26.0	3900	36.075	33.74					17.47	293.59	311.07			
28.0	3420	39.825	37.25					16.81	296.94	313.75			
30.0	3000	43.325	40.52			84.00	87.30						
35.0	2200												
40.0	1640					83.50	87.20						
50.0	1000					83.65	86.90						

Table F.8 Result of C-14 pipe test

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa_m (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)	
C-14	7.24	90°	0.0	0	0.0	0.0	85.00	85.60	0.0	0.0	0.0	
			1.2	4000	0.0	0.0				2.52	1.09	3.61
			2.0	5980	0.0	0.0				5.63	4.69	10.32
			5.0	7860	0.0	0.0				9.73	43.48	53.21
			8.0	8500	0.4	0.37				11.64	90.23	101.87
			9.0	8560	0.975	0.91				12.19	107.71	119.89
			10.0	8530	2.375	2.22		84.30	86.30	13.08	125.28	138.36
			11.0	8400	3.725	3.48				13.67	143.25	156.92
			12.0	8300	6.025	5.64				15.12	159.20	174.32
			13.0	8100	8.00	7.48				16.02	175.71	191.74
			14.0	7940	9.2	8.61				16.43	193.04	209.46
			15.0	7700	10.35	9.68		83.75	86.60	16.43	210.37	226.80
			16.0	7460	12.65	11.83				17.45	223.63	241.08
			18.0	6900	16.95	15.86				18.84	248.19	267.03
			20.0	6200	20.675	19.34		84.40	87.00	18.64	271.33	289.98
25.0	4630	30.825	28.84		83.45	87.05	18.45	307.04	325.49			
30.0	3300	39.0	36.48		83.35	86.70	15.19	326.35	341.54			
35.0	2500	45.125	42.21				12.66					
40.0	1800	53.075	49.65		83.20	87.00						
50.0	1050				83.70	86.95						

Table F.9 Result of C-15 pipe test

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa_m (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)
C-15	7.16	135°	0.0	0	0.0	0.0	85.45	85.30	0.0	0.0	0.0
			0.8	2050	0.0	0.0			1.61	0.42	2.02
			5.08	5270	0.0	0.0			10.62	34.79	45.41
			8.0	5635	0.495	0.44			12.45	78.39	90.84
			9.0	5640	1.195	1.10			12.96	93.42	106.38
			10.0	5580	2.15	2.01	84.30	85.90	13.38	108.04	121.42
			11.0	5500	3.45	3.22			13.96	121.69	135.64
			12.0	5375	4.95	4.63			14.48	134.61	149.09
			13.0	5220	6.5	6.08			14.89	146.78	161.67
			14.0	5070	8.125	7.59			15.38	157.99	173.37
			15.0	4900	9.15	8.55			15.22	170.54	185.76
			16.0	4750	10.2	9.53			15.18	182.14	197.32
			18.0	4400	13.25	12.39			15.51	200.27	215.78
			20.0	4000	16.475	15.40			15.46	214.65	230.11
			25.0	3000	24.5	22.90			14.04	238.80	252.84
			30.0	2265	30.5	28.51			11.56	255.16	266.71
35.0	1650	36.55	34.16			8.92	259.42	268.34			
40.0	1320	39.875	37.27								
50.0	850										

Table F.10 Result of C-16 pipe test

Pipe No.	R/t	2θ	δ _p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa _m (mm)	D _x (mm)	D _y (mm)	J _e (kg/mm)	J _p (kg/mm)	J (kg/mm)		
C-16	7.00	180°	0.0	0	0.0	0.0	85.00	85.0	0.0	0.0	0.0		
			1.0	1020	0.0	0.0				0.96	0.92	1.89	
			1.2	2040	0.0	0.0				3.85	0.96	2.88	
			3.0	3000	0.0	0.0				8.32	11.58	19.90	
			5.0	3380	0.0	0.0		84.70	85.00	10.56	33.50	44.06	
			8.0	3680	0.0	0.0		84.45	85.50	12.52	71.76	84.28	
			10.0	3660	0.75	0.70				12.94	97.69	110.64	
			11.0	3600	1.925	1.80				13.42	108.14	121.57	
			12.0	3528	3.1	2.89				13.82	118.17	131.99	
			13.0	3440	3.725	3.48				13.64	129.73	143.37	
			14.0	3340	4.775	4.46				13.69	139.12	152.81	
			15.0	3240	5.4	5.04			84.55	86.00	13.38	149.66	163.04
			16.0	3140	6.05	5.65					13.06	159.59	172.66
			18.0	2900	8.095	7.54					12.59	174.92	187.52
			20.0	2680	10.55	9.85			84.65	85.60	12.51	185.75	198.25
			22.0	2440	12.7	11.85					11.83	195.82	207.65
24.0	2220	14.425	13.46					10.89	205.76	216.65			
26.0	2000	15.875	14.82					9.66	215.16	224.82			
28.0	1800	17.5	16.33					8.66	221.68	230.34			
30.0	1640	19.7	18.39			84.65	85.60	8.24	223.43	231.67			
35.0	1280	23.875	22.28					6.51	230.48	236.99			
40.0	1000	28.125	26.25										
50.0	696												

Table F.11 Result of C-21 pipe test

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa_m (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)	
C-21	4.0	0	0.0	0			86.20	87.50				
			1.5	10200								
			3.0	15200								
			10.0					86.00	86.50			
			20.0					86.40	85.95			
			30.0					86.80	85.30			
			40.0					87.45	84.80			
			50.0					88.15	84.10			
			60.0					89.10	82.50			
			70.0					90.40	80.95			
			80.0					92.00	79.50			
90.0					93.35	76.70						
100.0					92.30	74.10						

Table F.12 Result of C-22 pipe test

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa_m (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)		
C-22	4.06	45°	0.0	0	0.0	0.0	86.05	86.20	0.0	0.0	0.0		
			1.6	10200	0.0	0.0				1.92	0.46	2.37	
			2.0	12000	0.0	0.0				2.65	1.93	4.58	
			2.9	14000	0.0	0.0				3.61	9.68	13.30	
			5.0	16000	0.0	0.0				4.72	7.72	12.44	
			8.0	17400	0.0	0.0				5.58	17.51	23.09	
			10.0	18160	0.0	0.0			85.90	86.70	6.08	19.10	25.18
			12.0	18800	0.05	0.04					6.54	26.24	32.78
			14.0	19360	0.2	0.18					7.01	26.07	33.08
			16.0	19840	0.4	0.36					7.47	31.44	38.91
			18.0	20240	0.7	0.62					7.94	41.52	49.46
			20.0	20560	1.7	1.51			85.85	86.40	8.78	49.31	58.09
			22.0	20800	3.875	3.45					10.37	65.58	75.95
			24.0	20720	4.75	4.23					10.87	110.02	120.89
			26.0	20400	7.0	6.23					12.07	155.10	167.17
			28.0	19720	10.0	8.90					13.38	201.11	214.49
30.0	18920	13.125	11.69					14.61	246.86	261.47			
32.0	18000	16.1	14.34			85.00	86.95	15.48	291.51	306.99			
34.0	16400	19.175	17.07					15.08	335.75	350.83			
36.0	14880	24.875	22.15					16.67	367.16	383.86			
38.0	13200	28.625	25.49					15.95	399.11	415.06			
40.0	11900	32.25	28.72			85.30	86.95	15.70	424.32	440.01			
45.0	8520	43.0	38.29					14.49	455.32	469.81			
50.0	6400	51.95	46.08			85.00	87.40						

Table F.13 Result of C-23 pipe test

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa_m (mm)	Dx (mm)	Dy (mm)	J _e (kg/mm)	J _p (kg/mm)	J (kg/mm)
C-23	4.07	90°	0.0	0	0.0	0.0	86.55	86.20	0.0	0.0	0.0
			1.1	5200	0.0	0.0			1.35	0.75	2.10
			2.4	10100	0.0	0.0			5.10	5.51	10.61
			4.0	11900	0.0	0.0			7.08	24.50	31.58
			6.0	12900	0.0	0.0			8.31	54.76	63.07
			8.0	13700	0.0	0.0			9.38	87.82	97.19
			10.0	14300	0.1	0.09	86.65	86.95	10.27	117.82	128.09
			11.0	14450	0.25	0.22			10.57	133.60	144.17
			12.0	14480	1.00	0.89			11.04	151.49	162.53
			13.0	14400	2.15	1.91			11.59	169.85	181.44
			14.0	14280	3.3	2.94			12.09	188.24	200.33
			15.0	14100	4.0	3.56			12.23	207.33	219.56
			16.0	13860	5.4	4.81			12.70	224.93	237.63
			18.0	13260	8.3	7.39			13.51	258.92	272.42
			20.0	12600	11.15	9.93	84.95	87.45	14.15	290.87	305.02
			22.0	11900	14.25	12.69			14.86	319.35	334.21
			24.0	11000	17.65	15.72			15.22	343.86	359.08
26.0	10030	21.0	18.70			15.18	364.39	379.57			
28.0	9040	24.2	21.55			14.72	381.33	396.05			
30.0	8300	26.6	23.69	84.80	87.65	14.19	398.00	412.19			
35.0	6200	34.85	31.04			12.72	412.68	425.39			
40.0	3630	40.6	36.16			9.95	423.39	433.33			
45.0	3840	45.15	40.21			8.97	428.95	437.93			
50.0	3100	49.9	44.44								

Table F.14 Result of C-24 pipe test

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa_m (mm)	Dx (mm)	Dy (mm)	J _e (kg/mm)	J _p (kg/mm)	J (kg/mm)		
C-24	4.00	180°	0.0	0	0.0	0.0	86.10	86.20	0.0	0.0	0.0		
			0.88	2100	0.0	0.0			1.32	0.49	1.81		
			2.2	4000	0.0	0.0			4.78	5.54	10.32		
			6.0	5130	0.0	0.0			7.86	42.34	50.20		
			8.0	5400	0.0	0.0			8.71	65.97	74.68		
			10.0	5600	0.0	0.0		85.75	86.75	9.37	90.95	100.32	
			12.0	5700	0.15	0.13				9.79	116.54	126.33	
			13.0	5690	0.6	0.53				10.02	128.22	138.24	
			14.0	5650	1.05	0.93				10.14	139.86	150.00	
			15.0	5550	1.35	1.20				9.96	152.12	162.08	
			16.0	5450	2.25	2.00				10.12	161.41	171.52	
			17.0	5335	3.25	2.89				10.28	169.88	180.16	
			18.0	5200	4.15	3.69				10.30	178.31	188.61	
			19.0	5075	4.85	4.31				10.22	187.10	197.32	
			20.0	4950	5.15	4.58			85.80	86.90	9.90	197.66	207.56
			22.0	4730	7.0	6.22					10.08	210.75	220.83
24.0	4430	8.1	7.20					9.44	226.75	236.19			
26.0	4130	10.0	8.89					9.19	236.17	245.35			
28.0	3820	11.55	10.27					8.62	246.21	254.83			
30.0	3600	12.5	11.11					8.10	258.21	266.32			
32.0	3350	13.5	12.00					7.45	268.73	276.18			
35.0	3000	16.25	14.45					7.04	285.72	292.77			
40.0	2520	19.0	16.87					5.86	299.65	305.51			
45.0	2150	22.1	19.65					5.14	305.59	310.73			
50.0	1870	24.8	22.05										

付録G 試験付ごとのJ-R曲線

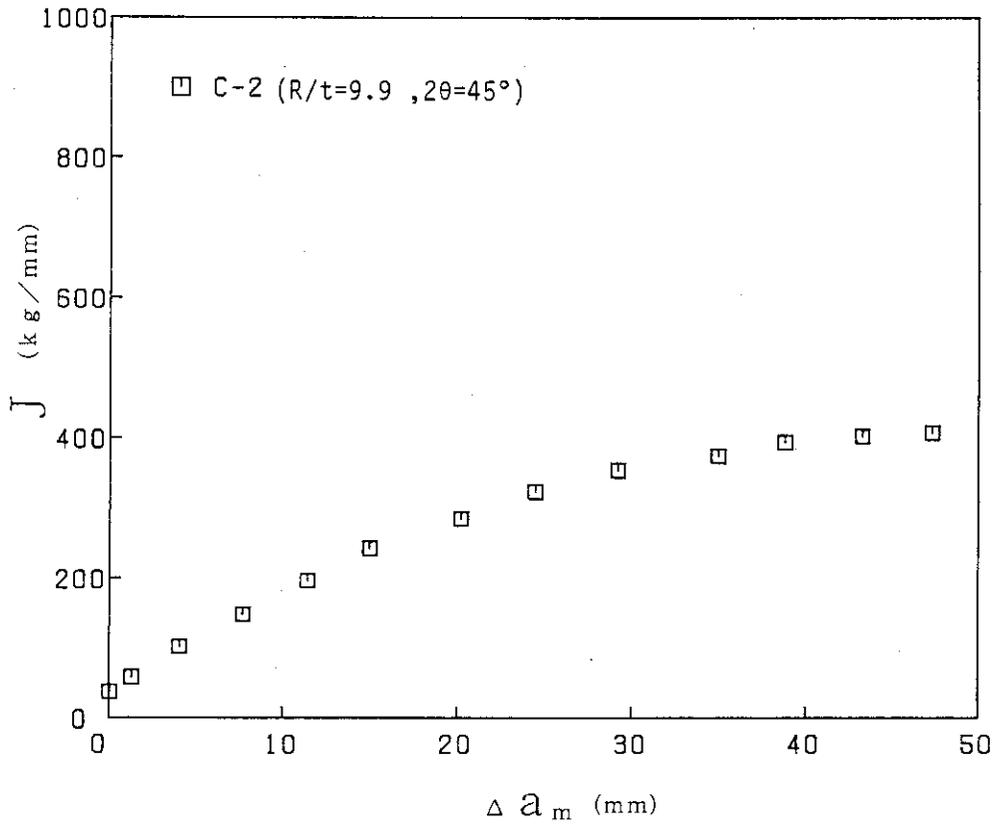


Fig. G.1 J-Resistance curve of C-2 test pipe

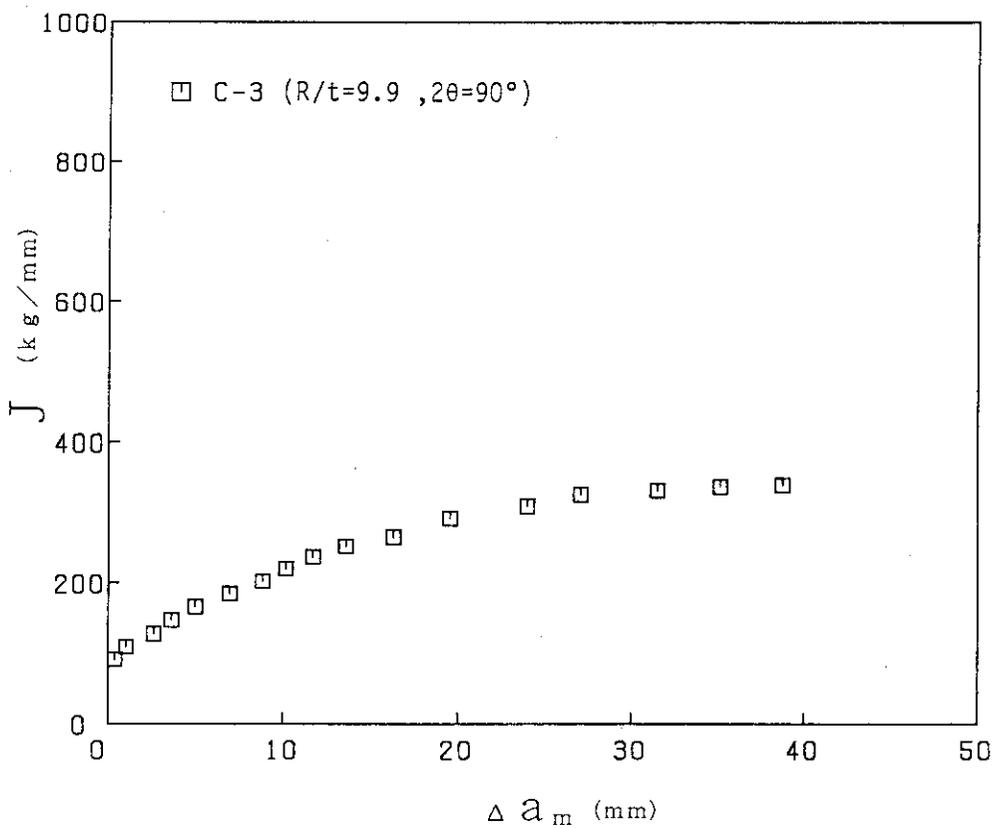


Fig. G.2 J-Resistance curve of C-3 test pipe

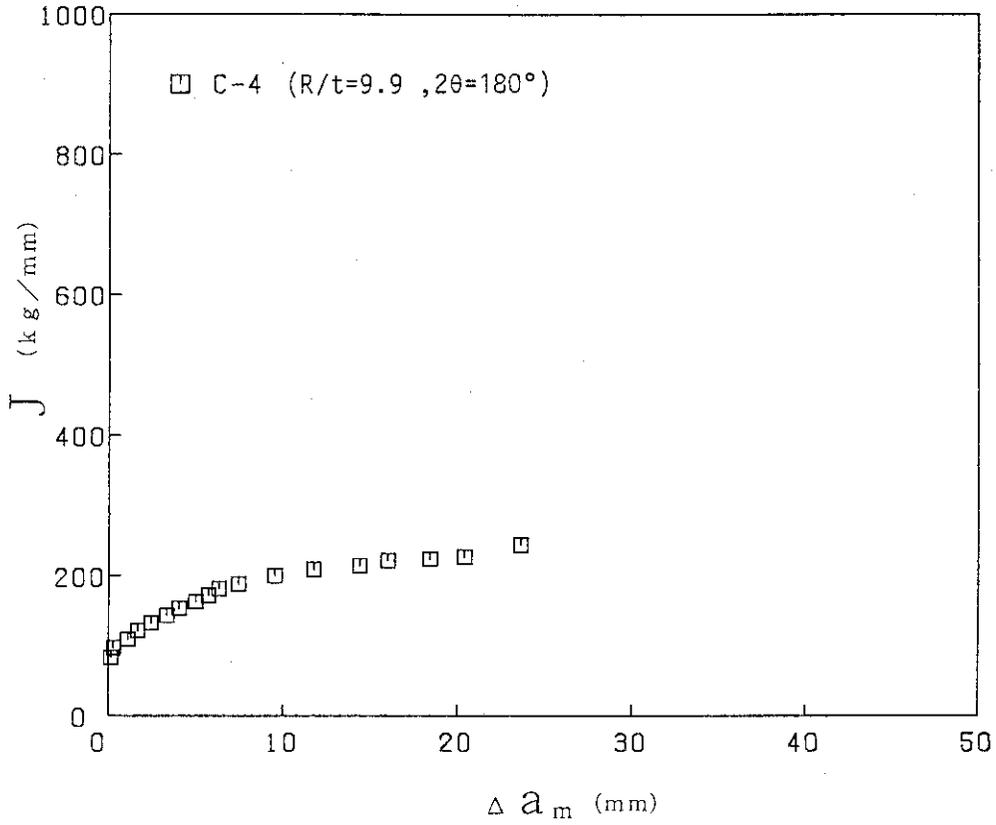


Fig. G.3 J-Resistance curve of C-4 test pipe

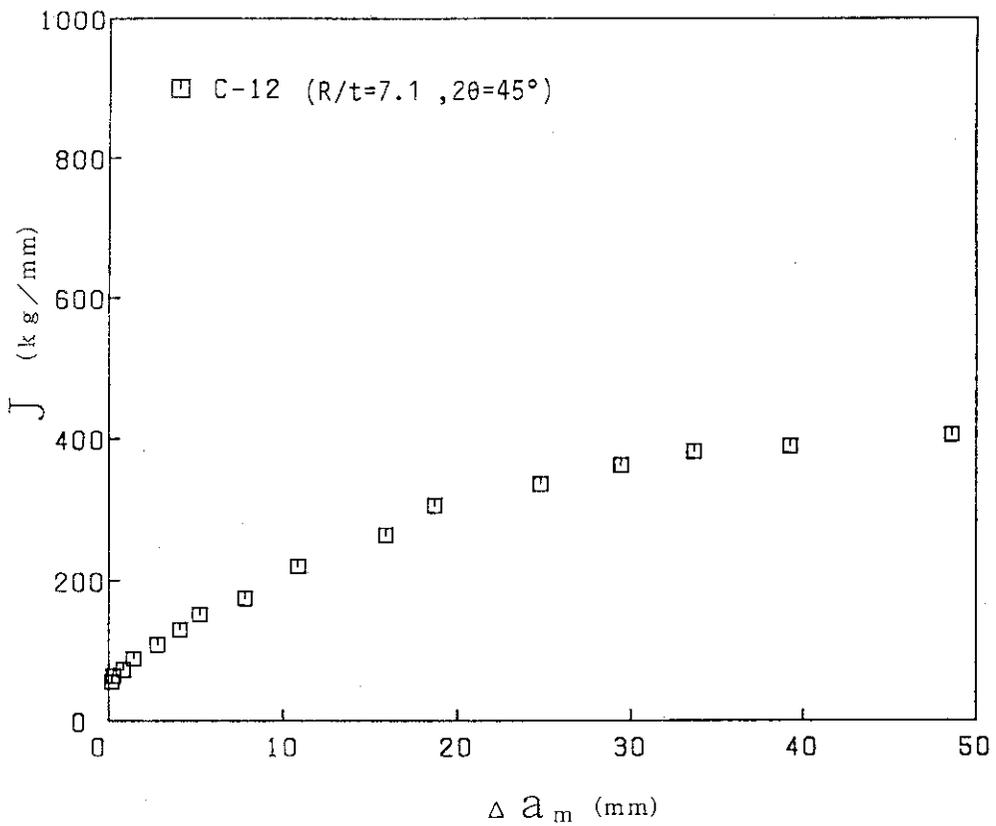


Fig. G.4 J-Resistance curve of C-12 test pipe

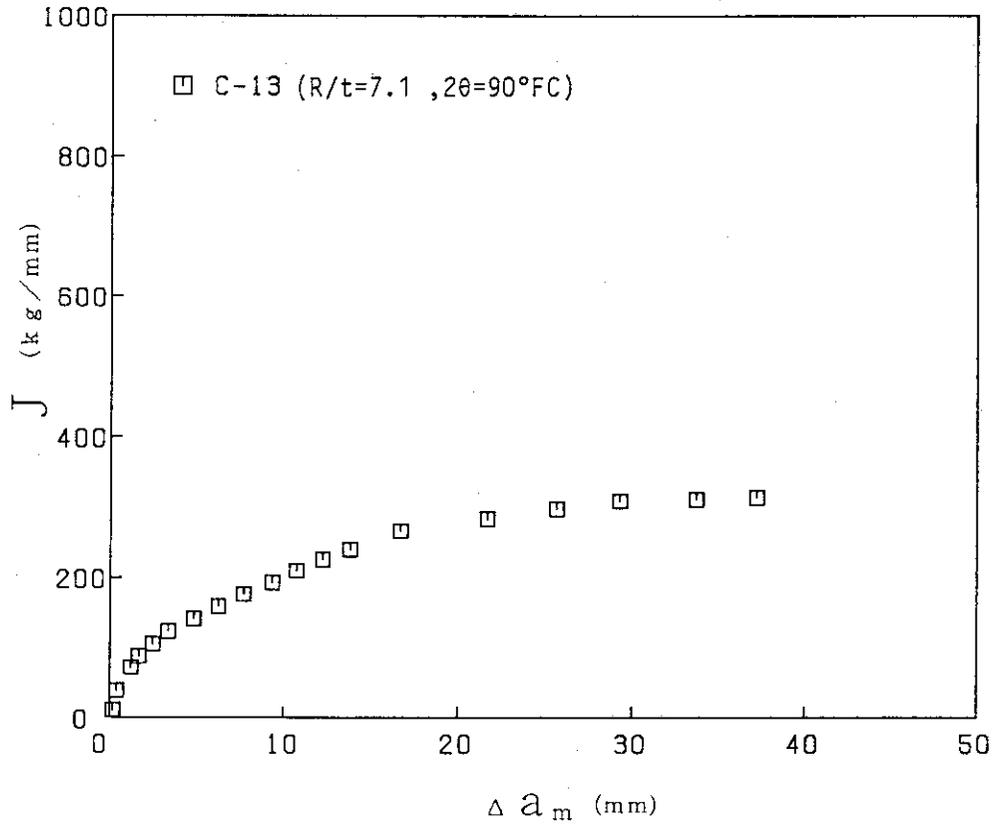


Fig. G.5 J-Resistance curve of C-13 test pipe

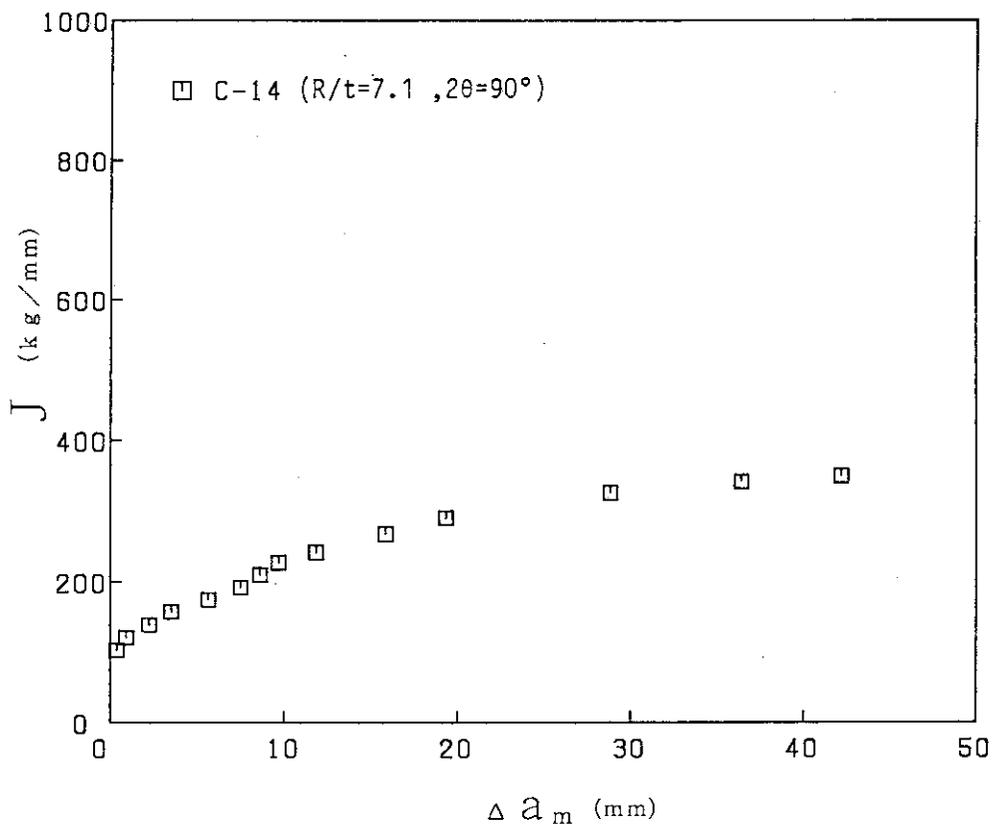


Fig. G.6 J-Resistance curve of C-14 test pipe

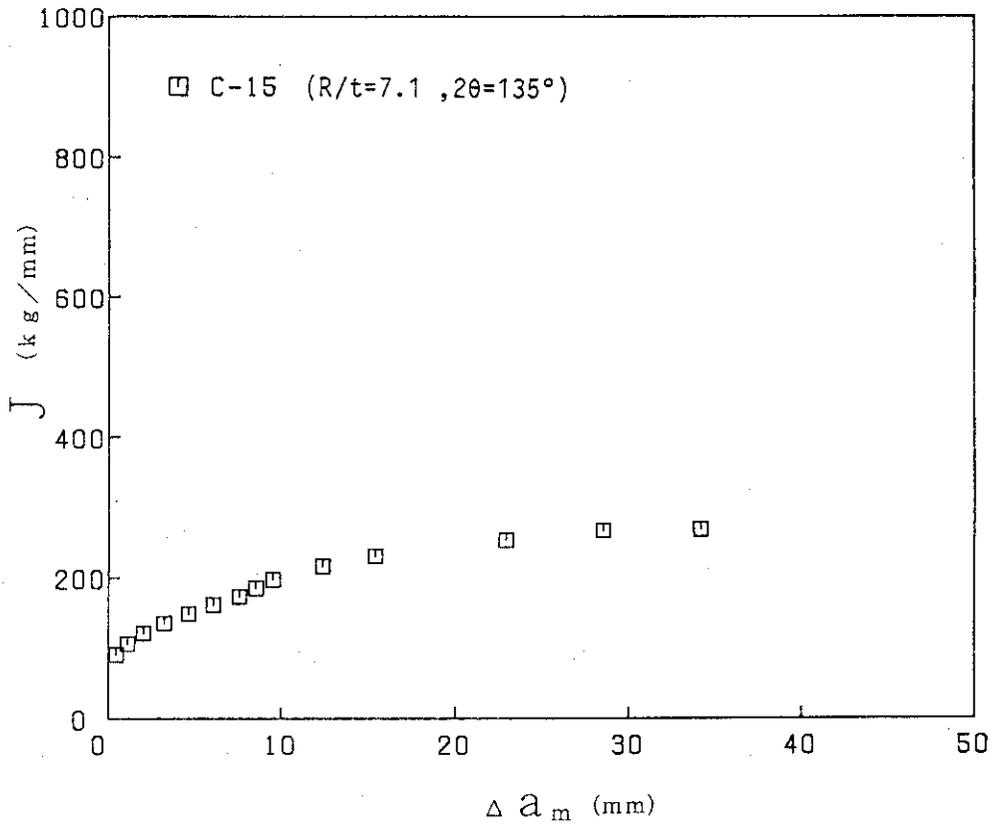


Fig. G.7 J-Resistance curve of C-15 test pipe

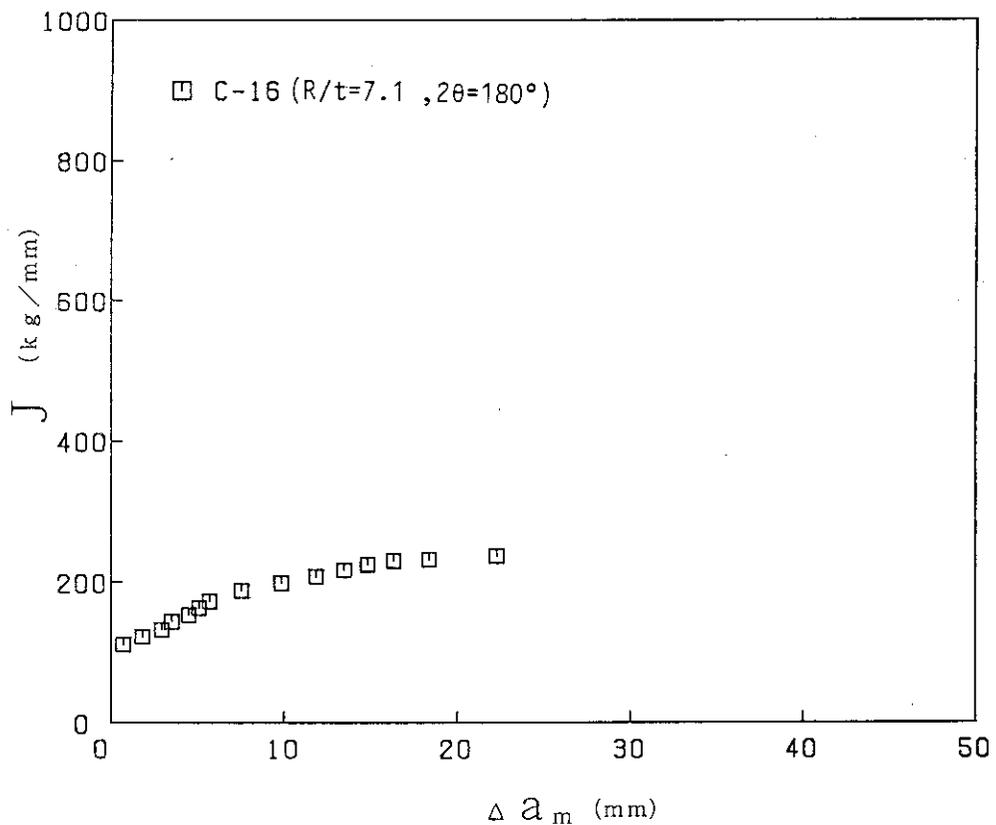


Fig. G.8 J-Resistance curve of C-16 test pipe

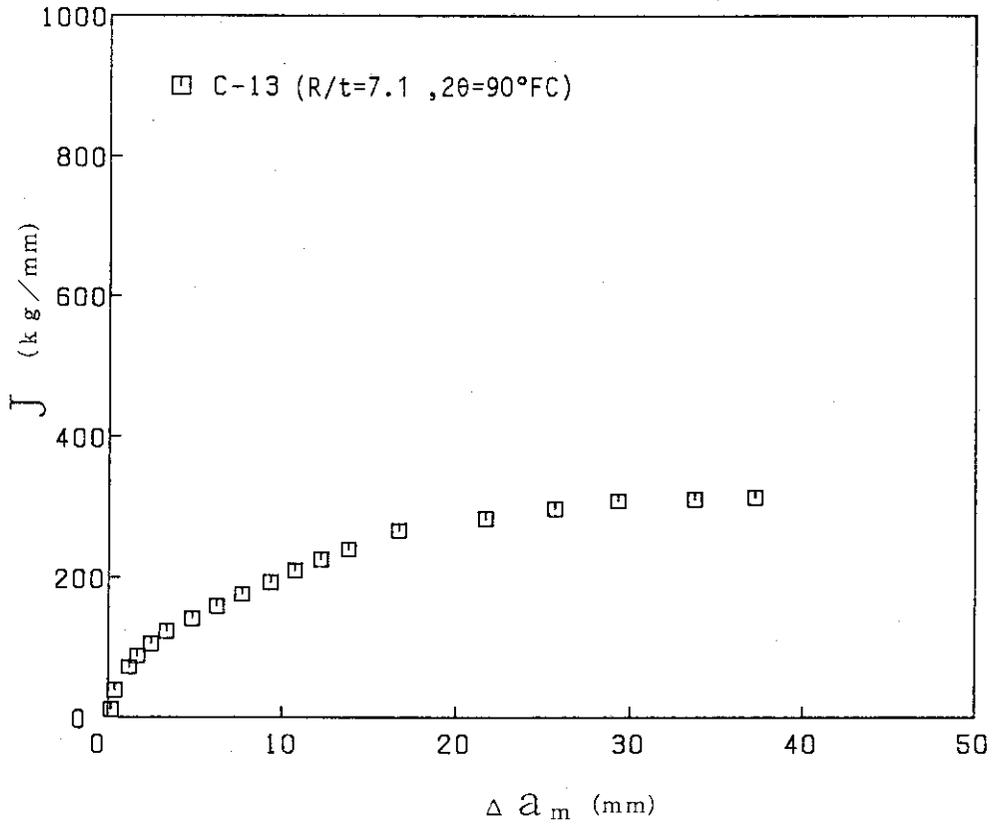


Fig. G.5 J-Resistance curve of C-13 test pipe

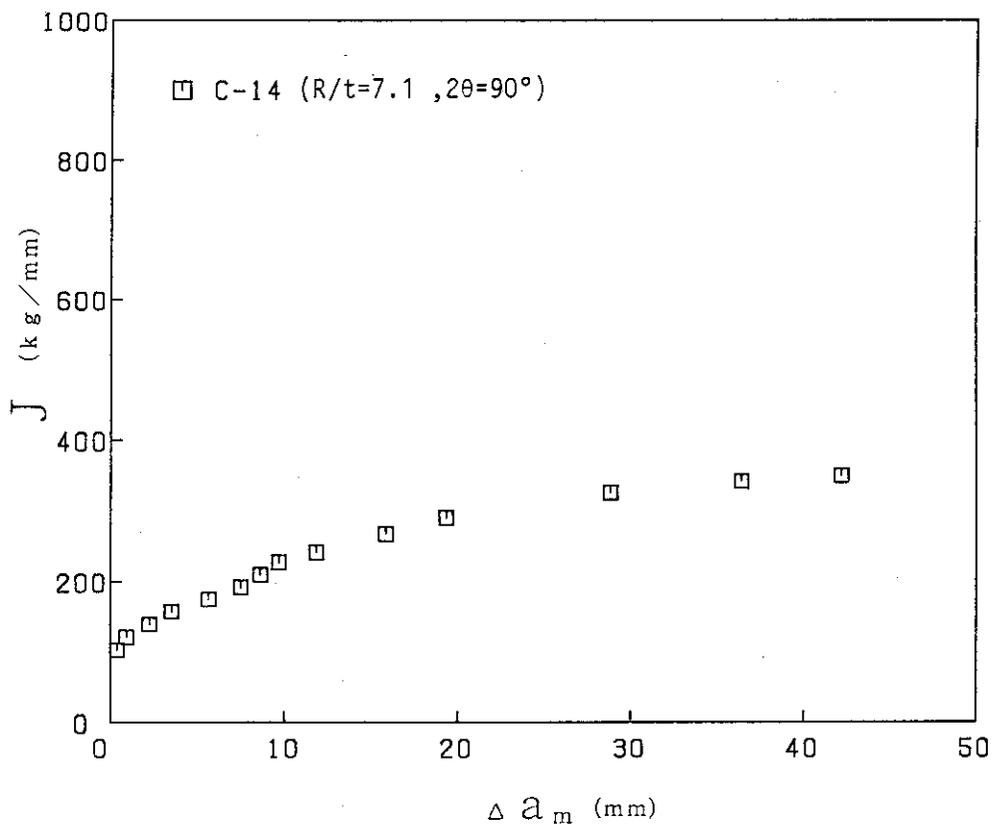


Fig. G.6 J-Resistance curve of C-14 test pipe

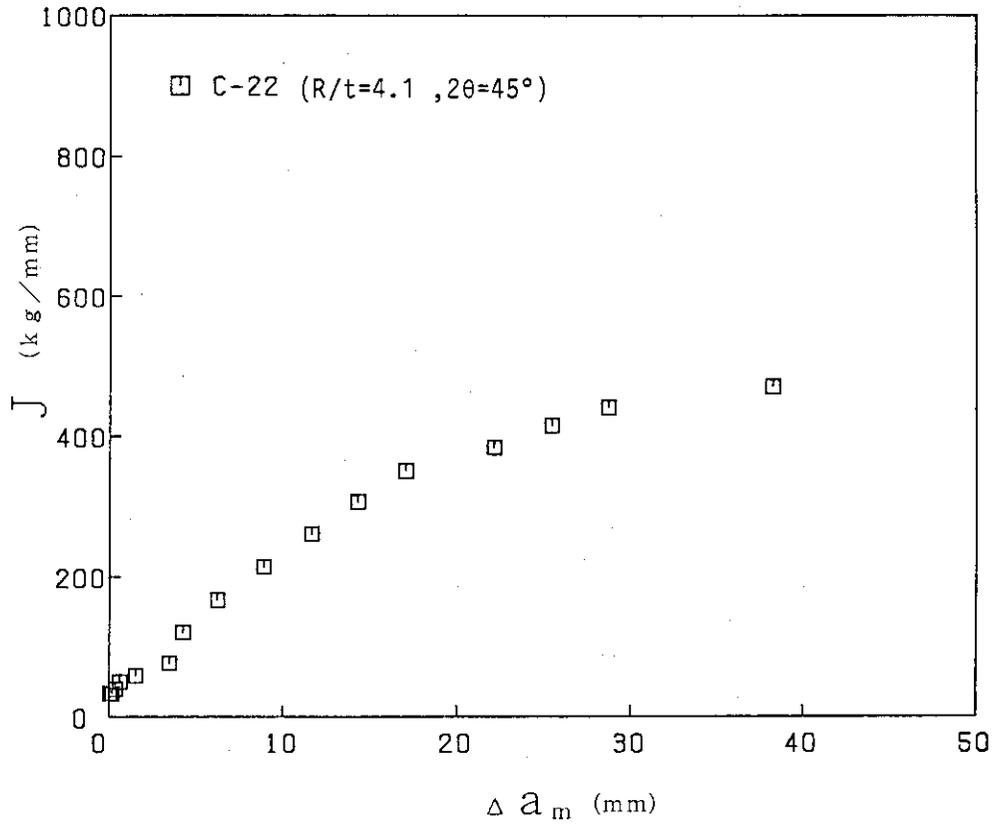


Fig. G.9 J-Resistance curve of C-22 test pipe

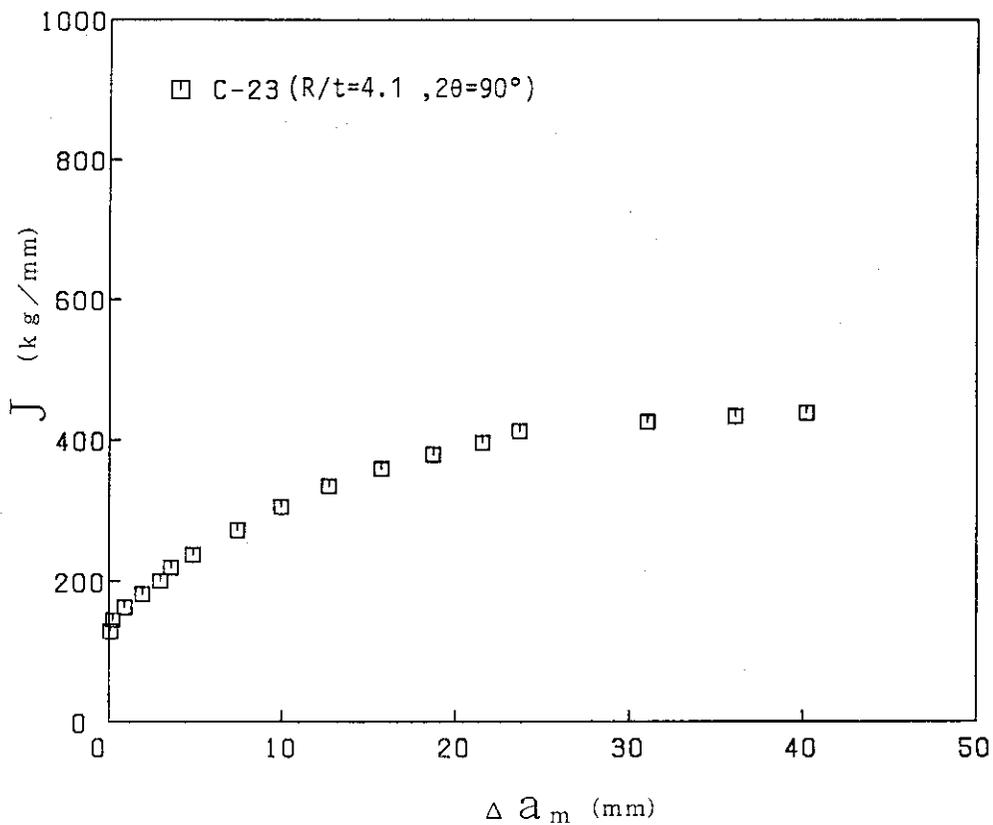


Fig. G.10 J-Resistance curve of C-23 test pipe

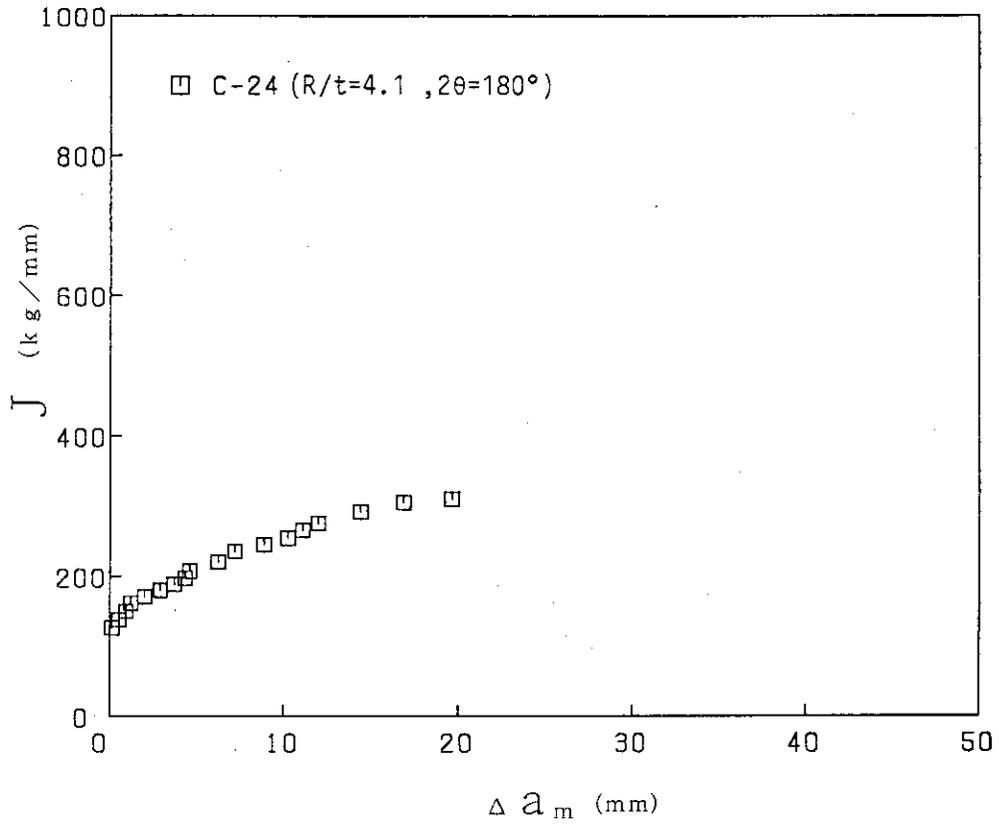


Fig. G.11 J-Resistance curve of C-24 test pipe