

J A E R I - M

87-068

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

1987 年 5 月

安田 祐司・柴田 勝之・鬼沢 邦雄
川村 隆一・大場 敏弘・宮園昭八郎

日本原 子 力 研 究 所
Japan Atomic Energy Research Institute

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。
入手の問合せは、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, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷機

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

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部
安田祐司・柴田勝之・鬼沢邦雄
川村隆一・大場敏弘・宮園昭八郎

(1987 年 4 月 3 日受理)

日本原子力研究所では、軽水炉冷却材圧力バウンダリ配管のLeak Before Break (LBB : 破断前漏洩) に関する試験研究を実施している。この試験研究では、LBB 成立を実証する上で必要となる配管の破壊条件並びに破壊クライテリアの適用性を検討するために、ステンレス鋼配管及び炭素鋼配管を用いて配管の破壊挙動を調べている。

本報告書は、周方向貫通切欠きを加工したオーステナイト系ステンレス SUS 304 鋼 3 インチ口径配管を供試配管として、室温大気中で実施した 4 点曲げ試験により明らかになった配管の延性破壊挙動についてまとめたものである。

試験結果から、最大荷重時の偏平化挙動、実断面応力基準の適用性、J-R 曲線に及ぼす初期切欠き角度、配管肉厚等の影響が明らかになった。さらに、き裂開口面積を実験的に求めるとともに、簡易評価式を用いてき裂開口面積の推定も試みた。

INVESTIGATION ON DUCTILE FRACTURE BEHAVIOR OF
3-INCH DIAMETER TYPE 304 STAINLESS STEEL PIPE
WITH A CIRCUMFERENTIAL THROUGH-WALL CRACK

Yuji YASUDA, 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 April 3, 1987)

At Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), a pipe fracture test program has been conducted as a part of the Leak-Before-Break (LBB) verification research in LWR pressure boundary pipings. In this program, fracture behavior and fracture criteria of the circumferentially cracked pipe have been investigated, using austenitic stainless steel pipes and carbon steel pipes.

This report presents a four-point bending test results of 3-inch diameter Type 304 austenitic stainless steel pipes with circumferential through-wall crack at room temperature.

Pipe fracture data were obtained from the test in regard to load-loadline displacement, crack extension, crack opening area, and so on. Discussions are performed on the effect of pipe ovalization ratio at maximum load, the application of the net-section collapse criterion, and the effect of initial crack angle, wall-thickness etc. on J-R curve. Furthermore, the crack opening area was estimated by assuming a simple crack model.

Keywords: Light Water Reactor, Pressure Boundary Piping, Leak Before Break, Ductile Fracture, Pipe Fracture, Stainless Steel Piping, Net-Section Collapse Criterion, Flow Stress, J-R curve, Crack

目 次

1. まえがき	1
2. 試験目的	3
3. 試験体	4
3.1 供試材	4
3.2 試験体形状と試験パラメータ	4
4. 試験方法	15
4.1 試験装置	15
4.2 測定項目と測定方法	15
5. 試験結果	19
5.1 荷重一荷重点変位測定結果	19
5.2 偏平化測定結果	19
6. 考 察	36
6.1 荷重一荷重点変位曲線の検討	36
6.2 偏平化挙動の評価	36
6.3 実断面応力基準による破壊荷重評価	37
6.4 J - R 曲線によるき裂進展抵抗の評価	38
6.5 き裂開口面積の評価	39
7. 結 論	51
謝 辞	52
参考文献	53
付 錄	55

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Objectives	3
3. Test pipes	4
3.1 Material	4
3.2 Geometry of test pipe and test parameters	4
4. Test procedure	15
4.1 Test facility	15
4.2 Measurements	15
5. Test results	19
5.1 Load-loadline displacement	19
5.2 Pipe ovalization	19
6. Discussion	36
6.1 Evaluation of load-loadline displacement	36
6.2 Evaluation of ovalization effect	36
6.3 Prediction of collapse moment based on the net-section collapse criterion	37
6.4 Evaluation of J-resistance curve	38
6.5 Evaluation of crack opening area	39
7. Conclusions	51
Acknowledgement	52
References	53
Appendices	55

List of Tables

- Table 3.1 Inspection certificate of 3-inch diameter SUS304 Sch. 40 pipe
Table 3.2 Inspection certificate of 3-inch diameter SUS304 Sch. 80 pipe
Table 3.3 Inspection certificate of 3-inch diameter SUS304 Sch.160 pipe
Table 3.4 Chemical composition of JIS SUS304 pipe
Table 3.5 Mechanical properties of JIS SUS304 pipe at room temperature
Table 3.6a Diameter, wall thickness and crack size of Sch. 40 and Sch. 160 pipes
Table 3.6b Diameter, wall thickness and crack size of Sch. 80 pipes
Table 3.7 Pipe No. and test matrix

List of Figures

- Fig. 3.1 Size and No. of tensile specimen
Fig. 3.2 Geometry of test pipe

Fig. 4.1 Sketch of four-point bending device
Fig. 4.2 Location of strain gages in 3-inch diameter pipes without crack

Fig. 5.1 Load versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ without crack (S-1)
Fig. 5.2 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ and $2\theta=45^\circ$ (S-2)
Fig. 5.3 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ and $2\theta=90^\circ$ (S-3)
Fig. 5.4 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ and $2\theta=180^\circ$ (S-4)
Fig. 5.5a Load versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ without crack (S-17)
Fig. 5.5b Load versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ without crack (S-11)
Fig. 5.6 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta=45^\circ$ (S-12)
Fig. 5.7a Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta=90^\circ$ (S-18)

- Fig. 5.7b Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ (S-14)
- Fig. 5.8 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta=90^\circ$ with fatigue crack (S-13)
- Fig. 5.9 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta=135^\circ$ (S-15)
- Fig. 5.10a Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta=180^\circ$ (S-19)
- Fig. 5.10b Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta=180^\circ$ (S-16)
- Fig. 5.11 Load versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ without crack (S-21)
- Fig. 5.12 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ and $2\theta=45^\circ$ (S-22)
- Fig. 5.13 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ and $2\theta=90^\circ$ (S-23)
- Fig. 5.14 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ and $2\theta=180^\circ$ (S-24)
- Fig. 5.15 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ without crack
- Fig. 5.16 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ and $2\theta=45^\circ$
- Fig. 5.17 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ and $2\theta=90^\circ$
- Fig. 5.18 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ and $2\theta=180^\circ$
- Fig. 5.19 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ without crack
- Fig. 5.20 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta=45^\circ$
- Fig. 5.21 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta=90^\circ$
- Fig. 5.22 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta=135^\circ$
- Fig. 5.23 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta=180^\circ$
- Fig. 5.24 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ without crack

- Fig. 5.25 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ and $2\theta=45^\circ$
- Fig. 5.26 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ and $2\theta=90^\circ$
- Fig. 5.27 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ and $2\theta=180^\circ$
- Fig. 6.1 Effect of initial crack angle on load-loadline displacement curves of $R/t = 10.6$ pipes
- Fig. 6.2 Effect of initial crack angle on load-loadline displacement curves of $R/t = 7.1$ pipes
- Fig. 6.3 Effect of initial crack angle on load-loadline displacement curves of $R/t = 4.0$ pipes
- Fig. 6.4 Ovalization ratio at P_{max} versus R/t
- Fig. 6.5 Ovalization ratio at P_{max} versus initial crack angle
- Fig. 6.6 Comparison of experimental data to net-section collapse criterion using $\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u)/2$ for circumferentially through-wall cracked SUS304 stainless steel pipes
- Fig. 6.7 Comparison of experimental data to net-section collapse criterion using $\sigma_f = 1.15(\sigma_y + \sigma_u)/2$ for circumferentially through-wall cracked SUS304 stainless steel pipes
- Fig. 6.8 Comparison of experimental data to net-section collapse criterion using $\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u)/2$ for circumferentially through-wall cracked SUS304 stainless steel pipes considering ovalization correction
- Fig. 6.9 Comparison of experimental data to net-section collapse criterion using $\sigma_f = 1.15(\sigma_y + \sigma_u)/2$ for circumferentially through-wall cracked SUS304 stainless steel pipes considering ovalization correction
- Fig. 6.10 Effect of initial crack angle (2θ) on J-R curves under $R/t = 10.6$ using 3-inch diameter SUS304 pipes
- Fig. 6.11 Effect of initial crack angle (2θ) on J-R curves under $R/t = 7.1$ using 3-inch diameter SUS304 pipes
- Fig. 6.12 Effect of initial crack angle (2θ) on J-R curves under $R/t = 4.0$ using 3-inch diameter SUS304 pipes
- Fig. 6.13 Effect of R/t on J-R curves under $2\theta=45^\circ$ using 3-inch diameter SUS304 pipes
- Fig. 6.14 Effect of R/t on J-R curves under $2\theta=90^\circ$ using 3-inch diameter SUS304 pipes

- Fig. 6.15 Effect of R/t on J-R curves under $2\theta=180^\circ$ using 3-inch diameter SUS304 pipes
- Fig. 6.16 Effect of pipe diameter on J-R curves using SUS304 pipes
- Fig. 6.17 Comparison of J-R curves between EDM notch and fatigue crack using 3-inch diameter SUS304 pipes
- Fig. 6.18 Results of crack opening area measurement using 3-inch diameter SUS304 pipes of $R/t = 10.6$
- Fig. 6.19 Results of crack opening area measurement using 3-inch diameter SUS304 pipes of $R/t = 7.1$
- Fig. 6.20 Results of crack opening area measurement using 3-inch diameter SUS304 pipes of $R/t = 4.0$
- Fig. 6.21 Simple estimation model which can estimate COA approximately from formula (6.9)
- Fig. 6.22 Correlation between estimated COA from formula (6.9) and measured COA

List of Photos

- Photo. 4.1 External appearance of 100 ton fatigue test machine
- Photo. 4.2 Test apparatus for 3-inch diameter circumferentially cracked pipe in four-point bending

Appendices

Appendix A: Stress-strain curves

- Fig. A.1a Stress-strain curve of Sch. 40 SUS304 pipe up to 1.25% strain at room temperature (4-1)
- Fig. A.1b Stress-strain curve of Sch. 40 SUS304 pipe up to 12.5% strain at room temperature (4-1)
- Fig. A.1c Stress-strain curve of Sch. 40 SUS304 pipe at room temperature
- Fig. A.2a Stress-strain curve of Sch. 40 SUS304 pipe up to 1.25% strain at room temperature (4-2)
- Fig. A.2b Stress-strain curve of Sch. 40 SUS304 pipe up to 12.5% strain at room temperature (4-2)
- Fig. A.2c Stress-strain curve of Sch. 40 SUS304 pipe at room temperature (4-2)
- Fig. A.3a Stress-strain curve of Sch. 80 SUS304 pipe up to 1.25% strain at room temperature (8-1)
- Fig. A.3b Stress-strain curve of Sch. 80 SUS304 pipe up to 12.5% strain at room temperature (8-1)
- Fig. A.3c Stress-strain curve of Sch. 80 SUS304 pipe at room temperature (8-1)
- Fig. A.4a Stress-strain curve of Sch. 80 SUS304 pipe up to 1.25% strain at room temperature (8-2)
- Fig. A.4b Stress-strain curve of Sch. 80 SUS304 pipe up to 12.5% strain at room temperature (8-2)
- Fig. A.4c Stress-strain curve of Sch. 80 SUS304 pipe at room temperature (8-2)
- Fig. A.5a Stress-strain curve of Sch. 160 SUS304 pipe up to 1.25% strain at room temperature (16-1)
- Fig. A.5b Stress-strain curve of Sch. 160 SUS304 pipe up to 12.5% strain at room temperature (16-1)
- Fig. A.5c Stress-strain curve of Sch. 160 SUS304 pipe at room temperature (16-1)
- Fig. A.6a Stress-strain curve of Sch. 160 SUS304 pipe up to 1.25% strain at room temperature (16-2)
- Fig. A.6b Stress-strain curve of Sch. 160 SUS304 pipe up to 12.5% strain at room temperature (16-2)

Fig. A.6c Stress-strain curve of Sch. 160 SUS304 pipe at room temperature
(16-2)

Appendix B: Results of COD measurement

- Fig. B.1 Result of COD measurement by S-2 test pipe
- Fig. B.2 Result of COD measurement by S-3 test pipe
- Fig. B.3 Result of COD measurement by S-4 test pipe
- Fig. B.4 Result of COD measurement by S-12 test pipe
- Fig. B.5 Result of COD measurement by S-18 test pipe
- Fig. B.6 Result of COD measurement by S-14 test pipe
- Fig. B.7 Result of COD measurement by S-13 test pipe
- Fig. B.8 Result of COD measurement by S-15 test pipe
- Fig. B.9 Result of COD measurement by S-19 test pipe
- Fig. B.10 Result of COD measurement by S-16 test pipe
- Fig. B.11 Result of COD measurement by S-22 test pipe
- Fig. B.12 Result of COD measurement by S-23 test pipe
- Fig. B.13 Result of COD measurement by S-24 test pipe

Appendix C: Results of CTOD measurement

- Fig. C.1 Result of CTOD measurement by S-2 test pipe
- Fig. C.2 Result of CTOD measurement by S-3 test pipe
- Fig. C.3 Result of CTOD measurement by S-4 test pipe
- Fig. C.4 Result of CTOD measurement by S-12 test pipe
- Fig. C.5 Result of CTOD measurement by S-18 test pipe
- Fig. C.6 Result of CTOD measurement by S-14 test pipe
- Fig. C.7 Result of CTOD measurement by S-13 test pipe
- Fig. C.8 Result of CTOD measurement by S-15 test pipe
- Fig. C.9 Result of CTOD measurement by S-19 test pipe
- Fig. C.10 Result of CTOD measurement by S-16 test pipe
- Fig. C.11 Result of CTOD measurement by S-22 test pipe
- Fig. C.12 Result of CTOD measurement by S-23 test pipe
- Fig. C.13 Result of CTOD measurement by S-24 test pipe

Appendix D: Results of strain distribution measurement

- Fig. D.1a Result of strain distribution measurement (S-1)
- Fig. D.1b Result of strain distribution measurement (S-1)
- Fig. D.2a Result of strain distribution measurement (S-17)
- Fig. D.2b Result of strain distribution measurement (S-17)
- Fig. D.3a Result of strain distribution measurement (S-11)
- Fig. D.3b Result of strain distribution measurement (S-11)
- Fig. D.4a Result of strain distribution measurement (S-21)
- Fig. D.4b Result of strain distribution measurement (S-21)

Appendix E: Data of load, J-value etc.

- Table E.1 Results from S-1 test pipe
- Table E.2 Results from S-2 test pipe
- Table E.3 Results from S-3 test pipe
- Table E.4 Results from S-4 test pipe
- Table E.5 Results from S-17 test pipe
- Table E.6 Results from S-11 test pipe
- Table E.7 Results from S-12 test pipe
- Table E.8 Results from S-18 test pipe
- Table E.9 Results from S-14 test pipe
- Table E.10 Results from S-13 test pipe
- Table E.11 Results from S-15 test pipe
- Table E.12 Results from S-19 test pipe
- Table E.13 Results from S-16 test pipe
- Table E.14 Results from S-21 test pipe
- Table E.15 Results from S-22 test pipe
- Table E.16 Results from S-23 test pipe
- Table E.17 Results from S-24 test pipe

Appendix F: J-R curves for 3-inch SUS304 stainless steel pipes

- Fig. F.1 J-R curve for S-2 test pipe
- Fig. F.2 J-R curve for S-3 test pipe
- Fig. F.3 J-R curve for S-4 test pipe
- Fig. F.4 J-R curve for S-12 test pipe
- Fig. F.5 J-R curve for S-18 and S-14 test pipes
- Fig. F.6 J-R curve for S-13 test pipe
- Fig. F.7 J-R curve for S-15 test pipe
- Fig. F.8 J-R curve for S-19 and S-16 test pipes
- Fig. F.9 J-R curve for S-22 test pipe
- Fig. F.10 J-R curve for S-23 test pipe
- Fig. F.11 J-R curve for S-24 test pipe

Nomenclature and Abbreviation

D_{x_0}	Initial pipe outer diameter in the x direction	(mm)
D_{y_0}	Initial pipe outer diameter in the y direction	(mm)
D_o	Average of D_{x_0} and D_{y_0}	(mm)
D_x	Outer pipe diameter in the x direction	(mm)
D_y	Outer pipe diameter in the y direction	(mm)
d_{x_0}	Initial pipe inner diameter in the x direction	(mm)
d_{y_0}	Initial pipe inner diameter in the y direction	(mm)
d_o	Average of d_{x_0} and d_{y_0}	(mm)
R	Pipe mean radius	(mm)
t	Pipe wall-thickness	(mm)
2θ	Initial crack angle	(degree)
$2a_0$	Initial crack length	(mm)
P	Applied bending load	(ton)
δ_p	Load-line displacement	(mm)
δ_t	Loading system total displacement	(mm)
σ_y	0.2% proof stress	(kg/mm ²)
σ_u	Ultimate tensile strength	(kg/mm ²)
σ_f	Flow stress	(kg/mm ²)
σ_b	Applied bending stress	(kg/mm ²)
Δa	Crack extension at pipe surface	(mm)
Δa_m	Crack extension at center of pipe wall-thickness	(mm)
E	Young's modulus	(kg/mm ²)
J	J-integral	(kg/mm)
K	Stress intensity factor	(kg/mm ^{3/2})
M	Applied moment	(kg·mm)
M_c	Collapse moment	(kg·mm)
COA	Crack Opening Area	(mm ²)
COD	Crack Opening Displacement	(mm)
CTOD	Crack Tip Opening Displacement	(mm)
EDM	Electric Discharge Machining	
FC	Fatigue Crack	

1. まえがき

原子炉冷却材圧力バウンダリ配管に対しては、現在瞬時破断を想定して構造設計が行われている。^{1) 2)} そのため、配管の瞬時破断によるホイップ現象及びこれにより生じ得る二次的災害を防止するために、パイプホイップレストレインントを設ける等の対策が講じられている。

一方、軽水炉圧力バウンダリ配管材料は、一般に靭性が高く瞬時破断が生ずる可能性は極めて低いと考えられている。このことから最近では、LBB (Leak-Before-Break : 破断前漏洩) 概念に基づいた構造設計法導入の動きが世界的に広まっている。

このLBB概念とは、"配管に生じたき裂が貫通し、内部流体が漏洩するとプラントの運転停止手順が進められる。その間、破断口は徐々に拡大する。その場合のき裂進展速度が十分小さく、プラント運転停止時のき裂寸法が不安定破壊へ移行する限界き裂長さよりも十分小さければ破局的事故は発生しないであろう"と言う考え方である。配管のLBB成立が実証されると、瞬時破断を想定する必要がなくなるため、パイプホイップレストレインント等の防護設備の設置義務は大幅に緩和される。その結果、供用期間中検査 (ISI) 時の作業性向上、及び作業員の放射線による被曝量の低減、またECCS系統の設計合理化が期待できる。さらに、プラントの設計、製造から保守管理に至るまで、コストダウンが期待でき経済的効果も大きくなると考えられる。最近のNRCの試算^{3) 4)}によると、パイプホイップレストレインントの廃止により、プラント1基当たり最低1億ドルのコストダウンが可能になると言われている。

このような観点から、西独や米国では既に、防護設備の設置義務を緩和する方針が打ち出されている。西独では、1981年 "PWR 1次冷却系配管に対する原子力安全委員会ガイドライン"^{5) 6) 7) 8)} が改訂され、従来の大規模破断の仮定に代わって小規模破断の開口が想定されるようになった。即ち、従来のガイドラインでは2F (F : 配管断面積) の開口が仮定されていたのに対して、新基準においては瞬時破断は生じないとする考え方に基づいて0.1Fの開口想定へと変更されたため、パイプホイップレストレインント等の防護設備を廃止することが可能になった。

一方、米国においてもパイプホイップレストレインント等の防護設備を廃止する方針で、NRCが10CFR Part 50 Appendix A General Design Criterion 4 (GDC 4)¹⁾ の改訂作業を進めてきた。そして、1986年5月に、PWRプラント一次系配管に対しては、配管の瞬時破断想定を設計基準から削除する改訂を行った。⁹⁾ さらに同年7月には、配管破断想定免除規定の適用範囲を拡大した10CFR Part 50 Appendix A GDC 4 (案)を提案している¹⁰⁾ 従って現在既にPWRプラントの一次系配管は、LBBの適用が認められており、破断想定免除規定を受けたPWRプラントもある。^{3) 4)} また、近い将来には、配管破断想定免除規定の適用範囲を拡大した10CFR Part 50 Appendix A GDC 4が正式に導入される方向にある。

LBB概念の設計基準導入に先立ち、米国においては、NRC, EPRI¹¹⁾が中心となって配管材料の試験を実施してきた。さらに、Battelle Columbus研究所のG. Wilkowskiらは、NRCから委託された試験研究DP³ II (Degraded Piping Program Phase II)において広範な配管試験並びに研究開発を展開している。^{12) 13) 14) 15) 16)} さらに、上記のDP³ II計画と並行して、配

管コンポーネント試験を主目的とした国際協同研究グループ IPIRG (International Piping Integrity Research Group) が、 Battelle Columbus 研究所を中心に結成され、 1986 年から活動を開始している。このグループには日本からの代表機関として電力中央研究所が参加している。

一方、 我が国では、 ステンレス鋼配管並びに炭素鋼配管を用いた LBB 実証試験は、 原子力工学試験センター及び日本原子力研究所にて実施されている。原子力工学試験センターでは、 ステンレス鋼配管を用いた試験研究は既に終了し、 1985 年から炭素鋼配管を用いた試験研究を実施している。¹⁷⁾ また、 日本原子力研究所では、 柴田らが周方向切欠き付 6 インチ、 12 インチ口径配管を使用した四点曲げ試験^{18) 19) 20) 21) 22)} 及び各種材料試験を^{3) 24)} 実施している。これらの試験研究では主に、 実断面応力基準並びに J 積分に基づく Tearing Instability 基準が破壊予測法として検討されている。しかしながら、 LBB 概念に基づく設計基準の作成に当っては、 配管口径及び配管肉厚の影響等を含めて破壊評価法を確立してゆく必要があり、 今後明らかにすべき課題も多い。

そこで本試験では、 オーステナイト系ステンレス鋼配管の破壊挙動に関する知見を得るために、 SUS 304 3 インチ口径配管を用いて四点曲げ試験を実施した。本報告書は上記試験内容及び成果についてまとめたものである。

2. 試験目的

配管の破壊予測法の一つとして, Kanninen らは実断面応力基準を提案している²⁵⁾。この基準は, き裂断面の応力分布やリガメント応力がある限界値に達した時に崩壊が生じると仮定して, き裂発生時の荷重や破壊荷重評価を行うものである。この実断面応力基準は, 適用が容易であること, また, オーステナイト系ステンレス鋼のような高延性材料に適用することも可能であるため, 配管の破壊荷重評価や許容欠陥寸法評価に広く用いられる傾向にある。

一方, 配管の曲げ負荷状態では, 配管中央部に偏平化が生じ, 配管が円形断面を保持している場合に比べて配管の剛性が低下する。Wilkowski らは, 配管の偏平化による補正項を導入した実断面応力基準を提案しているが²⁶⁾, 必らずしも実験値と一致するとは言い難い。

上記, 実断面応力基準の他, 配管の破壊挙動評価法の一つとして, J-R 曲線による評価法がある。この方法によると, き裂を有する配管試験体の変形及び破壊に対するき裂進展抵抗を J 積分を用いて定量的に評価することができる。原研においては, 柴田らが 6 インチ, 12 インチ口径配管並びに配管から切り出した CCT 試験片を用いて J-R 曲線の作成・評価を行っている。さらに詳細な配管口径依存性等の系統的な評価を行うため, 小口径配管に関するデータの取得が待たれている。

一方, 配管の LBB 評価においては, 上記実断面応力基準や J-R 曲線等による破壊挙動評価のみならず, 冷却材の漏洩流量を評価することも極めて重要となる。さらに, 冷却材の漏洩流量評価の際には, き裂開口面積を正確に把握しておくことが必要となる。その際, 同一のき裂開口面積であっても, 配管寸法に対して相対的にき裂開口面積が大きくなる小口径配管の方が破断までの裕度が小さいことから, 小口径配管に関するき裂開口面積を求めておけば, 安全側の評価ができる。き裂開口面積については, 従来より Paris²⁷⁾ 及び German²⁸⁾ らが評価を行ってきたが, それらは必ずしも実験的に求めた訳ではない。

以上の背景より, 本試験ではオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304, 3 インチ口径配管を用いて, 下記の試験目的のもとに室温大気中において四点曲げ試験を実施した。

- 1) 偏平化挙動の評価を行うこと
- 2) 最大荷重時の崩壊モーメントを実断面応力基準により予測すること
- 3) J-R 曲線を作成し, J-R 曲線の下記項目による依存性を明らかにすること
 - 初期切欠き角度
 - 半径肉厚比
 - 切欠き尖鋭度
 - 配管口径
- 4) 実験データから, き裂開口面積を求めるこ

3. 試験体

3.1 供試材

試験に供した配管は、住友金属工業（株）製のオーステナイト系ステンレス鋼配管SUS 304 TP (JIS G 3459) であり、1060°Cにおいて固溶化熱処理が施されている。管寸法は、外径3インチ(89.1 mm)であり、配管肉厚の影響を調べるために、Sch. 40 ($t = 5.5$ mm), Sch. 80 ($t = 7.6$ mm), Sch. 160 ($t = 11.1$ mm) の3種類の肉厚の配管を用いた。これらの配管のミルシートをTable 3.1～Table 3.3に示す。

Table 3.4は、3種類の配管の化学成分レードル分析値であり、JIS G 3459の要求を満足している。Table 3.5は、各配管毎の機械的性質であり、JIS G 3459の要求をすべて満足している。なお、Table 3.5の各値は、以下に述べる各SUS 304配管から引張試験片を2本ずつ切り出して行った引張試験結果である。

引張試験片は、配管試験体と同一ロットの管材から、軸方向に各Sch. 每に2本ずつ切り出した。引張試験片形状と試験片NoをFig. 3.1に示す。各Sch. 每に試験片形状は異なっているが、いずれの試験片においても標点間距離を50 mmとした。これらの引張試験片を用いて、容量10トンのインストロン型引張試験機により、室温大気中において引張試験を実施した。試験機のクロスヘッド速度は、0.5 mm/minである。

引張試験で得られた応力-ひずみ曲線は、すべてAppendix Aに示す。

3.2 試験体形状と試験パラメータ

Fig. 3.2に、試験体形状を示す。試験体中央部、幅180 mmの部分を、Sch. 40の場合は約1.5 mm, Sch. 80の場合は約2.0 mm, Sch. 160の場合は約1.0 mm減肉させた。この理由は、Sch. 80の場合、柴田らが行った6インチ配管の半径肉厚比 $R/t = 7.1$ と同一にするためである。^{18)～22)}また、Sch. 40, Sch. 160の場合は、 R/t の影響を調べるためである。

以上の要領で減肉させた試験体に、初期切欠き角度 2θ をパラメータとして放電加工(EDM)による貫通切欠きを加工した。

Table 3.6 a, Table 3.6 bに、Fig. 3.2において記号で記した箇所の寸法を示す。

次に、試験体NoをTable 3.7に示す。試験パラメータは、

- (1) 初期切欠き角度
- (2) 平均半径／肉厚
- (3) 切欠き尖銳度
- (4) 配管口径

である。

なお、配管口径の影響は、柴田らが取得した6インチ、12インチ口径SUS 304鋼配管に関する

る試験データ²¹⁾を用いて今回実施の3インチ配管データと比較した。

また、切欠き尖鋭度の影響を調べるために、試験体No.S-13の配管には、疲労き裂を導入した。次式にて表わされる。

疲労き裂導入条件を以下に示す。あらかじめ放電加工により $2\theta = 77^\circ$ まで貫通切欠きを加工しておき

負荷荷重様式 ; 四点曲げ荷重

負荷荷重 ; $80 \leq K_{max} \leq 85$ ($\text{kg}/\text{mm}^{1.5}$)

応力比 ; 0.1

繰り返し速度 ; 5 (Hz)

なる条件下にて、 $2\theta = 90^\circ$ となるまで疲労き裂を進展させた。その際のK値は、Paris, Tadaらの方法²⁶⁾で算出した。

Table 3.1 Inspection certificate of 3-inch diameter SUS304 Sch. 40 pipe

Table 3.2 Inspection certificate of 3-inch diameter SUS304 Sch. 80 pipe

検査証明書
INSPECTION CERTIFICATE
日付 Date 56.8.23
Certificate No. TIC 9354

日付 Date 561. 8. 23

Table 3.3 Inspection certificate of 3-inch diameter SUS 304 Sch.160 pipe

檢査証明書 INSPECTION CERTIFICATE

上記注文品は指定の規格および仕様に従って製造され、その要求事項を満足していることを証明します。

Table 3.4 Chemical composition of JIS SUS304 pipe

(wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Spec.	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	8.00 ~11.00	18.00 ~20.00
Sch. 40	0.04	0.49	1.49	0.028	0.002	9.65	18.30
Sch. 80	0.04	0.49	1.49	0.028	0.002	9.65	18.30
Sch. 160	0.04	0.49	1.49	0.028	0.002	9.65	18.30

Table 3.5 Mechanical properties of JIS SUS304 pipe at room temperature

Sch.	Specification	0.2% proof stress σ_y (kg/mm ²)	Tensile strength σ_u (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
40	Specimen 4-1	27.2	62.8	62.6	78.6
	Specimen 4-2	27.8	63.2	62.8	74.1
	Average	27.5	63.0	62.7	76.4
80	Specimen 8-1	33.8	64.0	57.3	83.4
	Specimen 8-2	34.2	65.0	57.2	83.4
	Average	34.0	64.5	57.3	83.4
160	Specimen 16-1	27.3	62.5	61.7	81.8
	Specimen 16-2	27.1	62.2	61.9	81.2
	Average	27.2	62.4	61.8	81.5

* for Sch. 40

Table 3.6a Diameter, wall thickness and crack size of Sch. 40 and Sch. 160 pipes

Sch.	Pipe No.	40			160			Average	
		S-1	S-2	S-3	S-4	Average	S-21	S-22	
	2θ	0°	45°	90°	180°		0°	45°	90°
Pipe Size	D_{x_0} (mm)	86.17	86.15	86.19	86.10	—	87.28	87.27	87.26
	D_{y_0} (mm)	86.18	86.15	86.19	86.13	—	87.28	87.27	87.27
	D_o (mm)	86.18	86.15	86.19	86.12	86.16	87.28	87.27	87.27
	d_{x_0} (mm)	78.39	78.39	78.42	78.41	—	67.91	67.94	67.83
	d_{y_0} (mm)	78.49	78.45	78.44	78.43	—	67.88	67.86	67.97
	d_o (mm)	78.44	78.42	78.43	78.42	78.43	67.90	67.90	67.90
	t (mm)	3.87	3.87	3.88	3.85	3.87	9.69	9.69	9.69
	R (mm)	41.16	41.14	41.16	41.14	41.15	38.80	38.79	38.80
	R/T	10.64	10.63	10.61	10.69	10.64	4.00	4.00	4.00
Crack Size	$2a_o$ (mm)	—	33.50	68.00	135.50	—	33.80	69.00	137.00
	ℓ (mm)	—	2.55	3.20	3.75	—	3.00	3.20	3.00
	W (mm)	—	1.00	0.94	0.95	—	0.97	0.95	1.00
	w (mm)	—	0.38	0.38	0.38	—	0.39	0.40	0.38

Table 3.6b Diameter, wall thickness and crack size of Sch. 80 pipes

		Sch. 80									
Sch.	Pipe No.	S-17	S-11	S-12	S-18	S-14	S-13	S-15	S-19	S-16	Average
	2θ	0°	0°	45°	90°	90°	77°(90°)	135°	180°	180°	
Pipe Size	D _{x0} (mm)	85.08	85.04	85.06	85.06	85.03	85.05	85.09	85.05	85.05	-
	D _{y0} (mm)	85.08	85.04	85.05	85.07	85.06	85.03	85.06	85.08	85.05	-
	D _o (mm)	85.08	85.04	85.05	85.07	85.06	85.03	85.06	85.09	85.05	85.06
	d _{x0} (mm)	73.93	73.88	73.84	73.86	73.87	73.88	73.92	73.83	73.88	-
	d _{y0} (mm)	73.93	73.84	73.85	73.84	73.86	73.94	73.92	73.86	73.86	-
	d _o (mm)	73.93	73.86	73.85	73.85	73.87	73.91	73.92	73.85	73.87	73.88
	t (mm)	5.58	5.59	5.60	5.61	5.60	5.56	5.57	5.62	5.59	5.59
	R (mm)	39.75	39.73	39.73	39.73	39.73	39.74	39.74	39.73	39.73	39.74
Crack Size	R/t	7.12	7.11	7.09	7.08	7.09	7.15	7.13	7.07	7.11	7.11
	2a (mm)	-	-	33.50	66.80	67.00	56.90 (67.30)	100.50	134.00	134.00	-
	λ (mm)	-	-	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	1.80	3.00	-
Size	W (mm)	-	-	0.87	1.00	0.88	0.92	0.92	0.98	0.93	-
	w (mm)	-	-	0.36	0.32	0.36	0.36	0.36	0.32	0.36	-

() ; After fatigue cracking

Table 3.7 Pipe No. and test matrix

2θ	Initial crack condition	R/t		
		10.6	7.1	4.0
0°	EDM	S-1	S-11 S-17	S-21
45°	EDM	S-2	S-12	S-22
90°	EDM	S-3	S-14 S-18	S-23
	FC	-	S-13	-
135°	EDM	-	S-15	-
180°	EDM	S-4	S-16 S-19	S-24

EDM; Electric Discharge Machining

FC ; Fatigue Crack

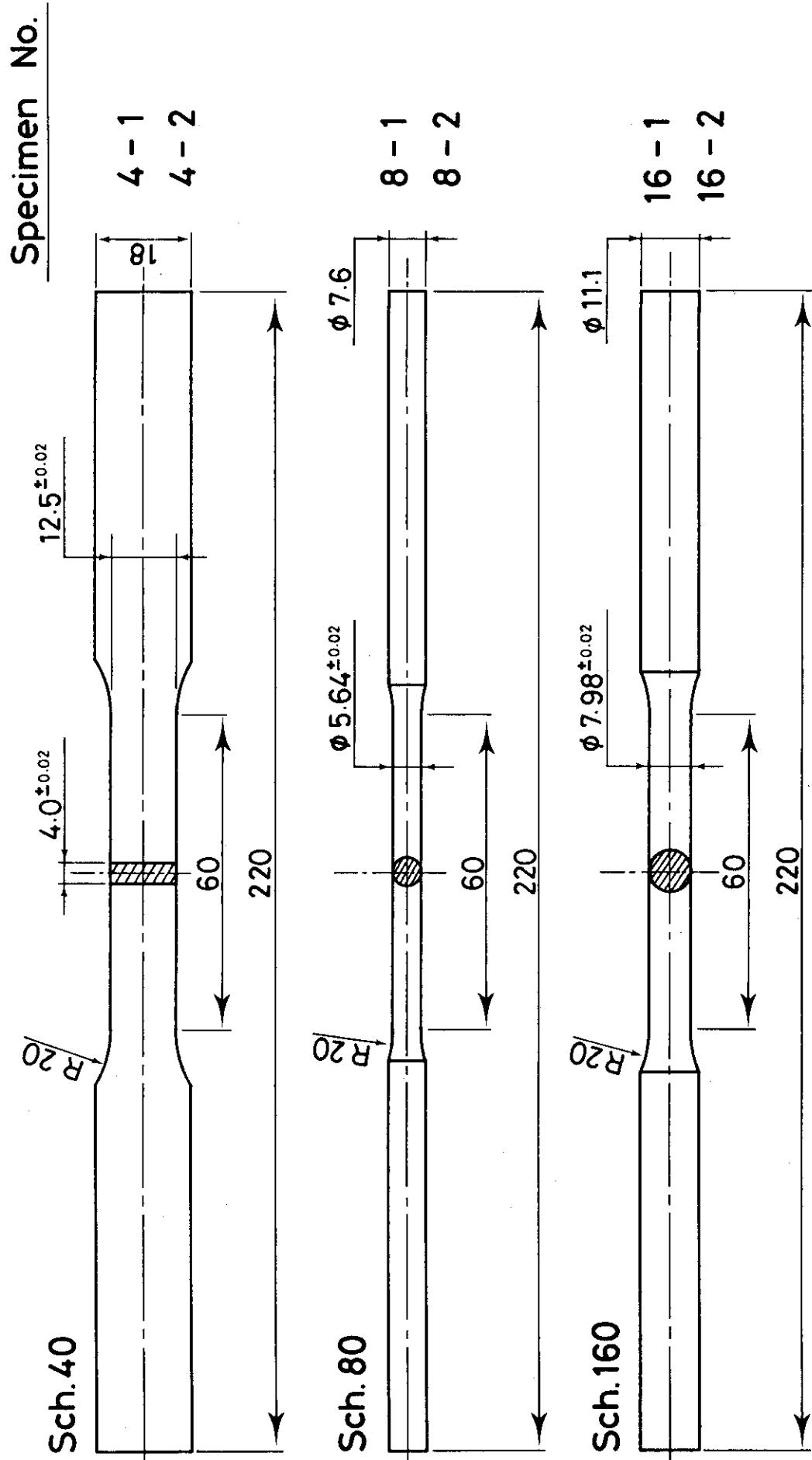


Fig. 3.1 Size and No. of tensile specimen

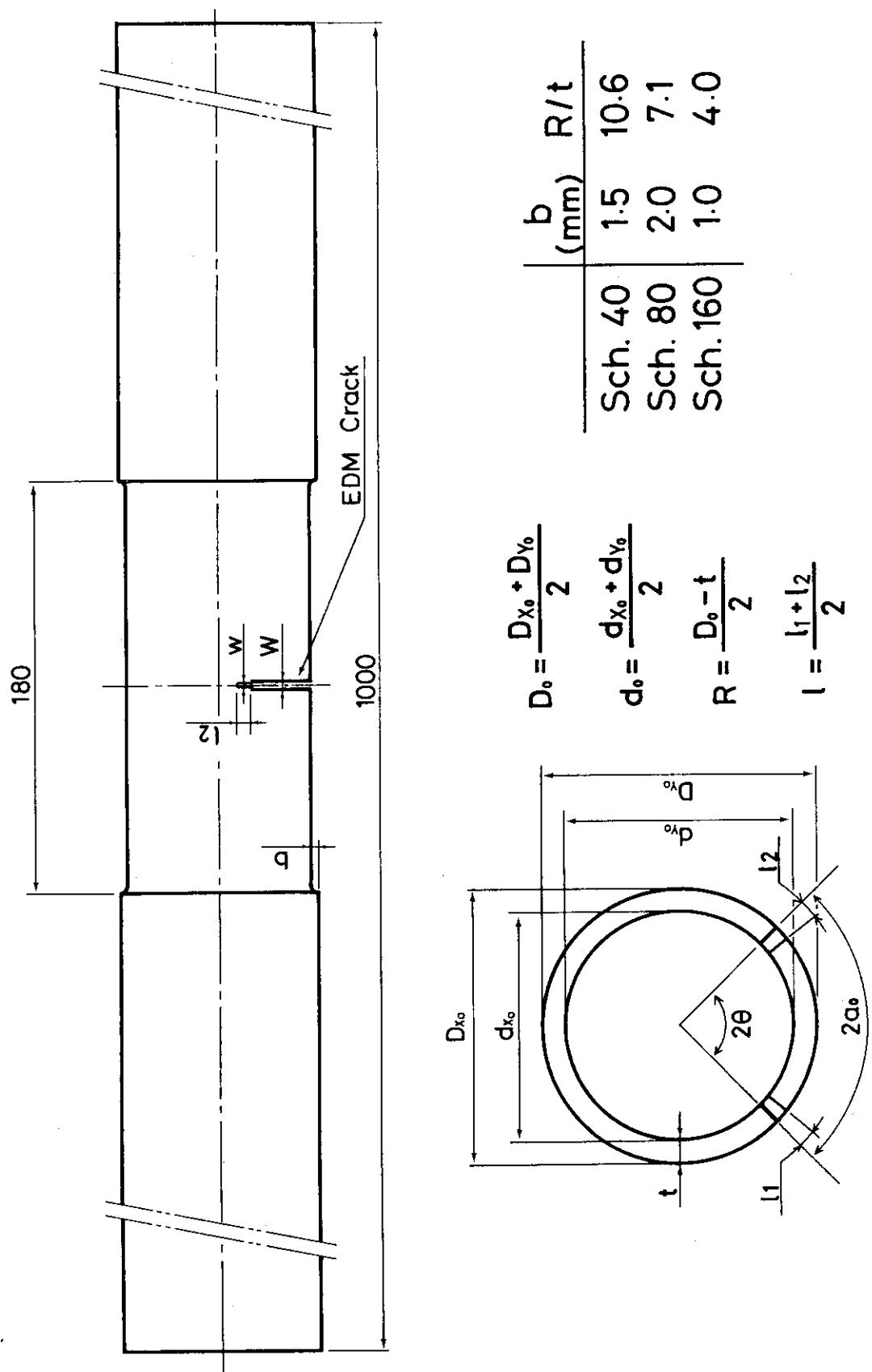


Fig. 3.2 Geometry of test pipe

4. 試験方法

4.1 試験装置

試験には、容量 100 トンの疲労試験機を使用した。この疲労試験機に 3 インチ配管用四点曲げ試験治具を装着した。Fig. 4.1 に、試験治具を示す。図中、上下にあるチャッキングプレートを疲労試験機の油圧チャックではさむことによって試験治具を固定している。また、配管試験体と直接接触する個所には、軸力が生じないようにするために硬質クロムメッキを施したローラを設けてあり自由に回転出来る構造になっている。本試験では、上下のローラ中心間の距離、即ち内側スパン（上部スパン）を $S_1 = 200 \text{ mm}$ 、外側スパン（下部スパン）を $S_2 = 600 \text{ mm}$ とした。

以上の 3 インチ配管用四点曲げ試験治具及び配管試験体の装着状態の外観写真を Photo 4.1 に示す。また、Photo 4.2 は、試験部の拡大写真である。

なお、試験機のクロスヘッド速度は 5 mm/min とした。

4.2 測定項目と測定方法

測定項目を以下に示す。

- 荷重 ; P
- 荷重点変位 ; δ_p
- ジャッキ変位 ; δ_t
- 切欠き中央部の開口変位量 ; COD
- 切欠き先端部の開口変位量 ; CTOD
- 配管表面でのき裂進展量 ; Δa
- x, y 方向の外径 ; D_x, D_y
- き裂開口形状（き裂開口面積） ; (COA)
- ひずみ分布 ; ϵ

上記各項目の測定は、以下の方法で行った。

1) 荷重

疲労試験機に装着されているロードセルにより測定した。

2) 荷重点変位

試験治具に取り付けた ± 100 mm の変位計を用いて測定した。また、ジャッキ変位は、疲労試験機に内蔵されている差動トランジスタを用いて測定した。

3) 開口変位量

切欠き中央部 (COD) と切欠き先端部 (CTOD) について測定した。両者共 25 mm のリング状クリップゲージを配管試験体の切欠き中央部と切欠き先端部に固定ピンを介して装着することにより測定を行った。

4) き裂進展量

所定変位毎の試験機停止時に、配管左右のき裂進展量を、スケールによる測定、写真撮影による測定、そして光学顕微鏡による測定を行った。そして、これらの平均値を表面でのき裂進展量 Δa とした。測定を容易にするため、配管試験体中央部には、き裂進展方向に沿ってスケールを貼付してある。

5) 外 径

所定変位毎の試験機停止時に、配管の x 方向と y 方向の外径をノギスで測定した。

6) き裂開口形状

所定変位毎の試験機停止時に、き裂近傍を #400 のエメリーペーパーで研磨し、その後粘着テープでプリントすることによりき裂面の転写を行った。

7) ひずみ分布

配管試験体中心から 20 mm 離れた位置に、円周方向に 2 軸弾性ひずみゲージ（東京測器研究所（株）製 FCA-2-5L JBT-17, ゲージ長：2 mm）貼付した。Fig. 4.2 にひずみゲージの貼付位置を示す。ひずみ分布は、所定変位毎にデジタルひずみ計で測定した。なお、ひずみ分布の測定は、切欠き加工を施していない試験体についてのみ行った。

以上の測定項目のうち、アナログ信号は、PCM 式レコーダに記録し、試験後もデータの再生が可能となる様にした。また、写真撮影を行う際、シャッター同期シグナルも X-Y レコーダ上に出力させて、荷重点変位との対応がとれる様にした。

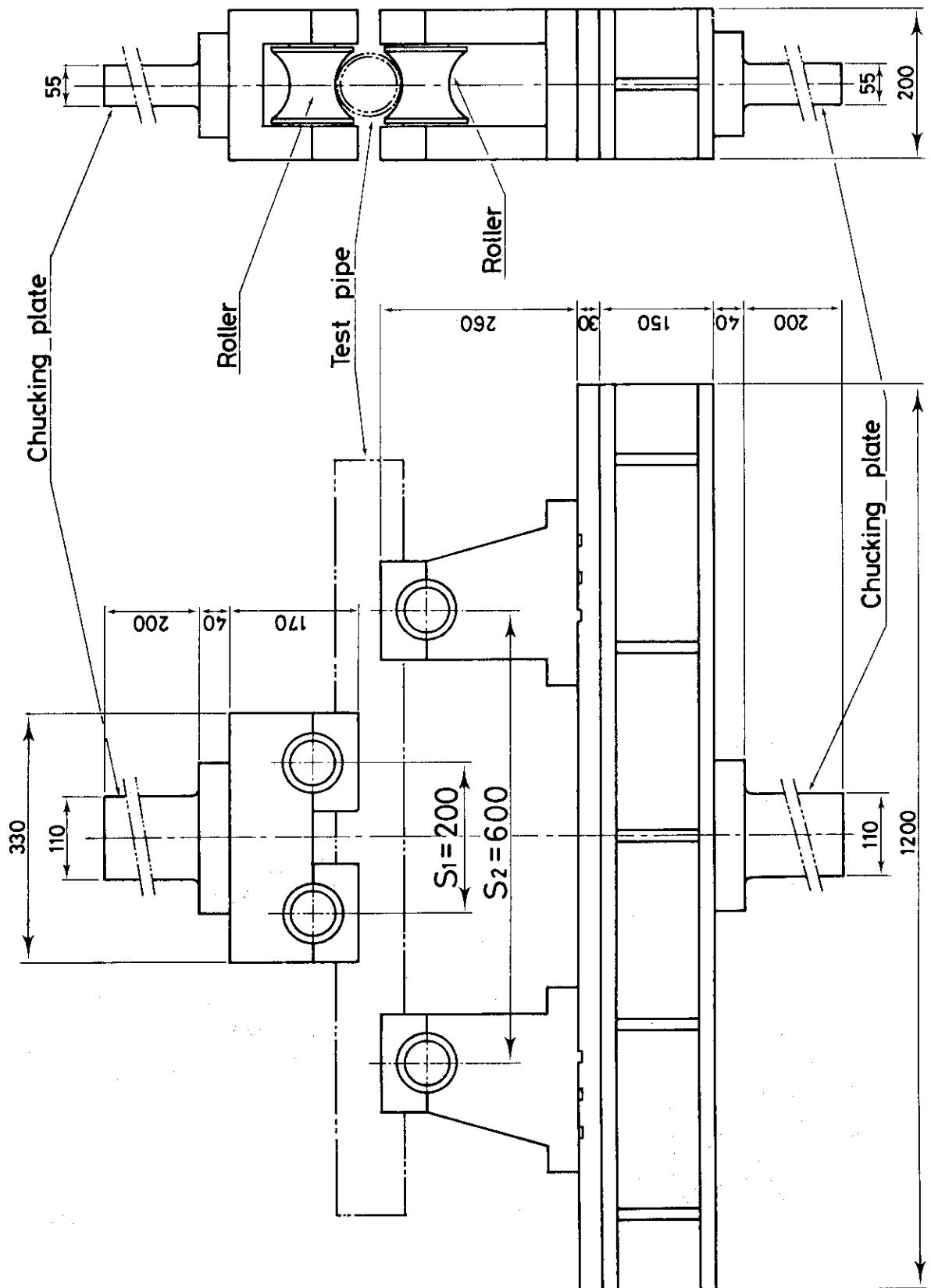


Fig. 4.1 Sketch of four-point bending device

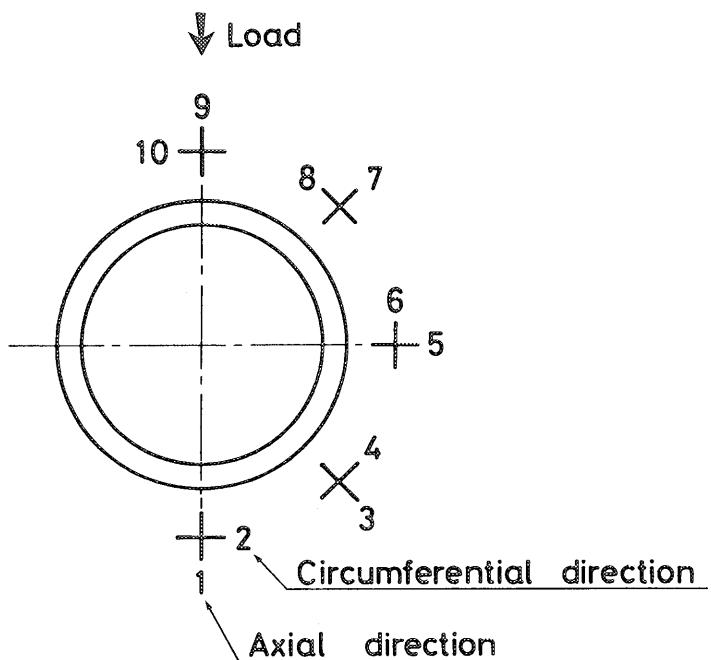


Fig. 4.2 Location of strain gages in 3-inch diameter pipes without crack

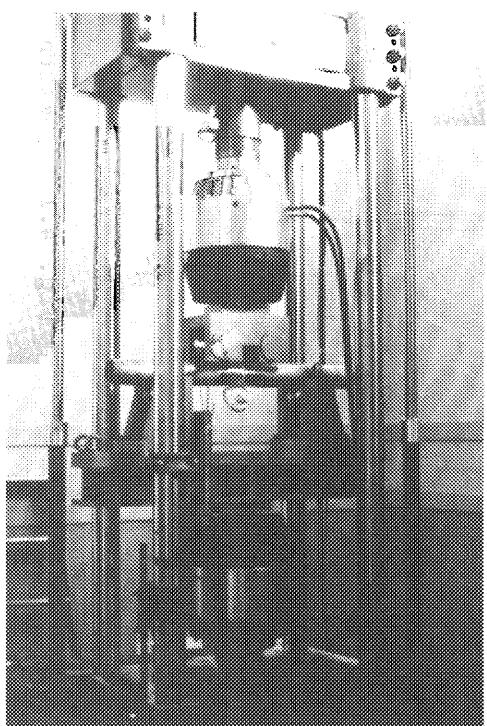


Photo 4.1 External appearance of 100 ton fatigue test machine

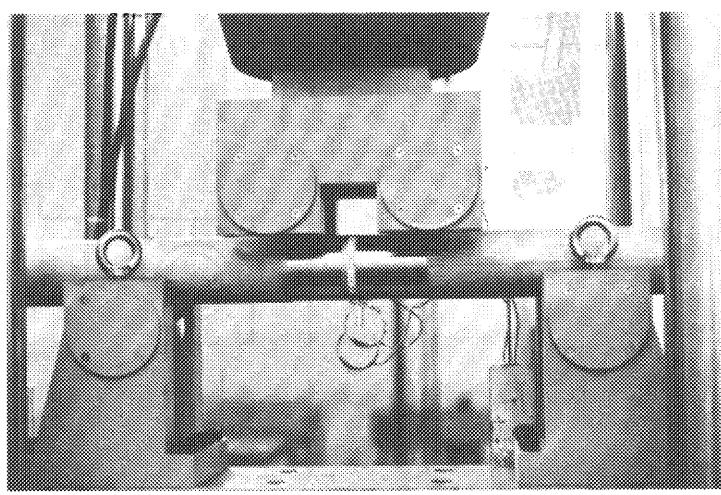


Photo 4.2 Test apparatus for 3-inch diameter circumferentially cracked pipe in four-point bending

5. 試験結果

5.1 荷重一荷重点変位測定結果

Fig. 5.1～Fig. 5.14 に、配管試験体の荷重－荷重点変位－表面き裂長さの関係を示す。切欠き加工を施した試験体において、き裂は最大荷重点に至る前に発生している。そして、荷重の増加に伴って、き裂は安定的に進展し、最大荷重点を経て除荷過程に至っている。

また、初期切欠きを加工した試験体について測定した COD－荷重点変位の関係を Appendix B に、CTOD－荷重点変位の関係を Appendix C に、そして切欠きなしの試験体について行ったひずみ分布測定結果を Appendix D にそれぞれまとめて示す。

5.2 偏平化測定結果

配管の曲げ試験では、試験体中央部に偏平化が生じ、配管強度に影響を及ぼす。Fig. 5.15～Fig. 5.27 に x, y 両方向の偏平化測定結果を示す。図中、縦軸は各試験体の外径測定値 (D_x , D_y) を初期の外径 (D_{x_0} , D_{y_0}) で割った値である。なお、外径測定値は、Appendix E にまとめて示した。

以上の図より、偏平化は初期切欠き角度 2θ に依存し、 2θ が小さい場合、偏平化は x 方向に生じるが、 2θ の増加に伴って偏平化は y 方向に生じる傾向が認められる。この傾向は、 R/t が変わっても同様である。

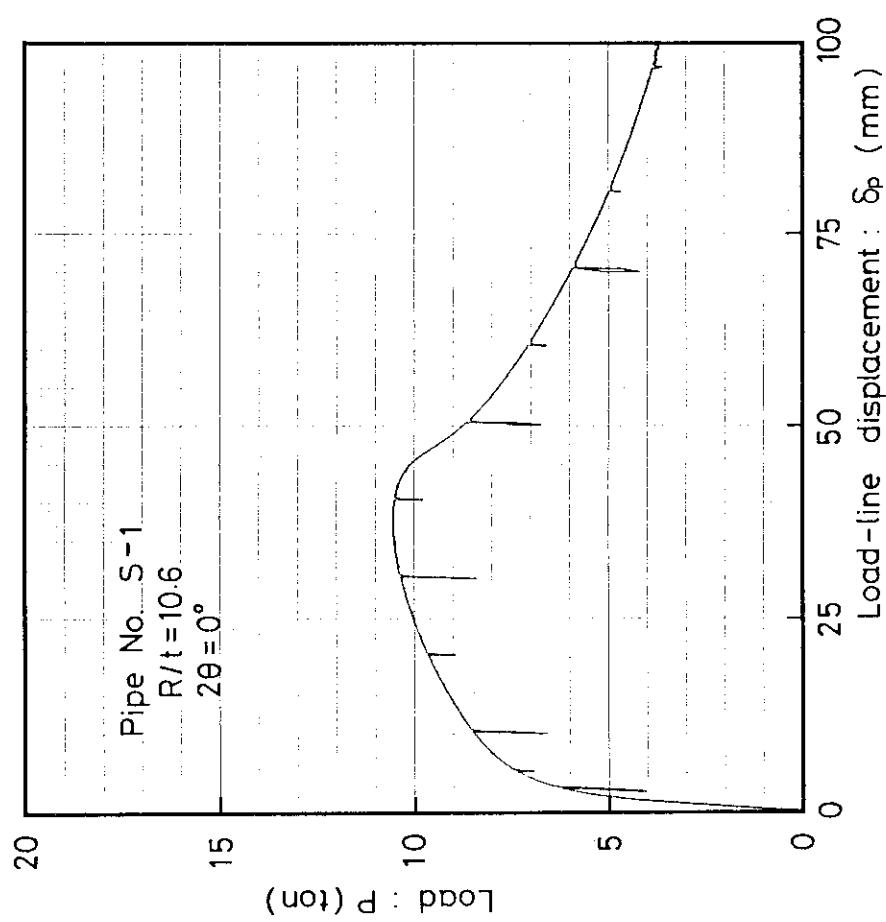


Fig. 5.1 Load versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ without crack (S-1)

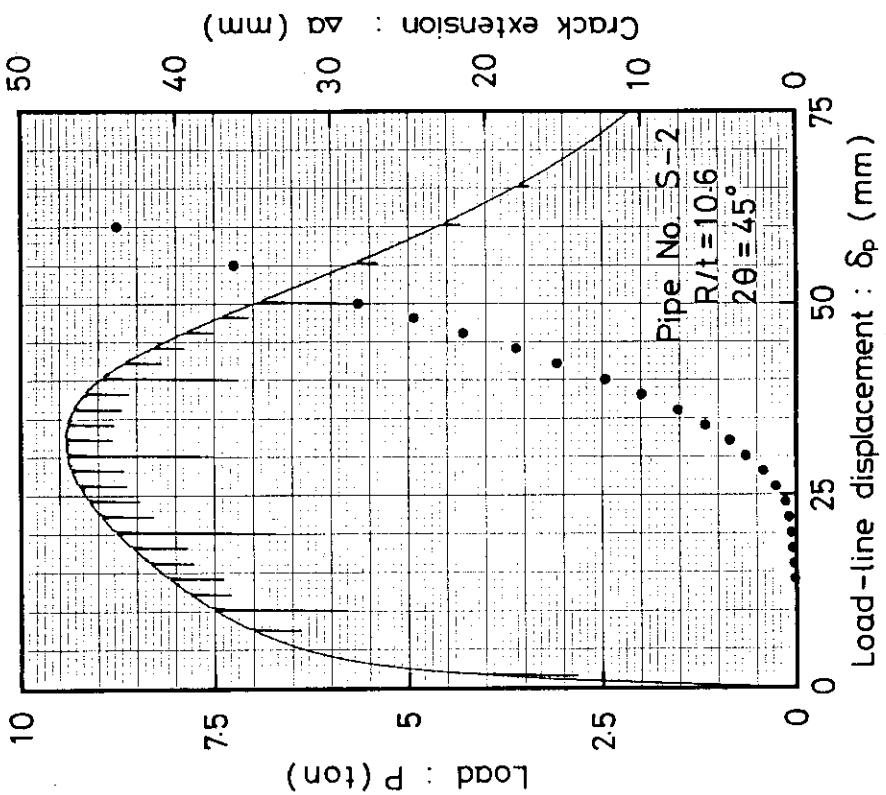


Fig. 5.2 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ and $2θ = 45°$ (S-2)

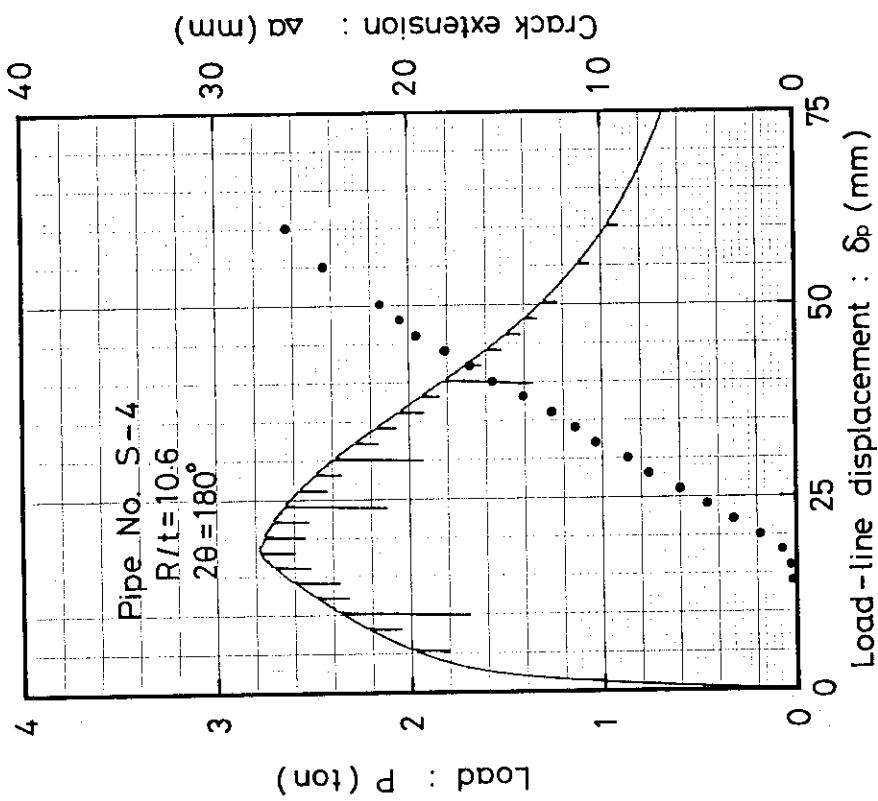


Fig. 5.3 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ and $2\theta = 90^\circ$ (S-3)

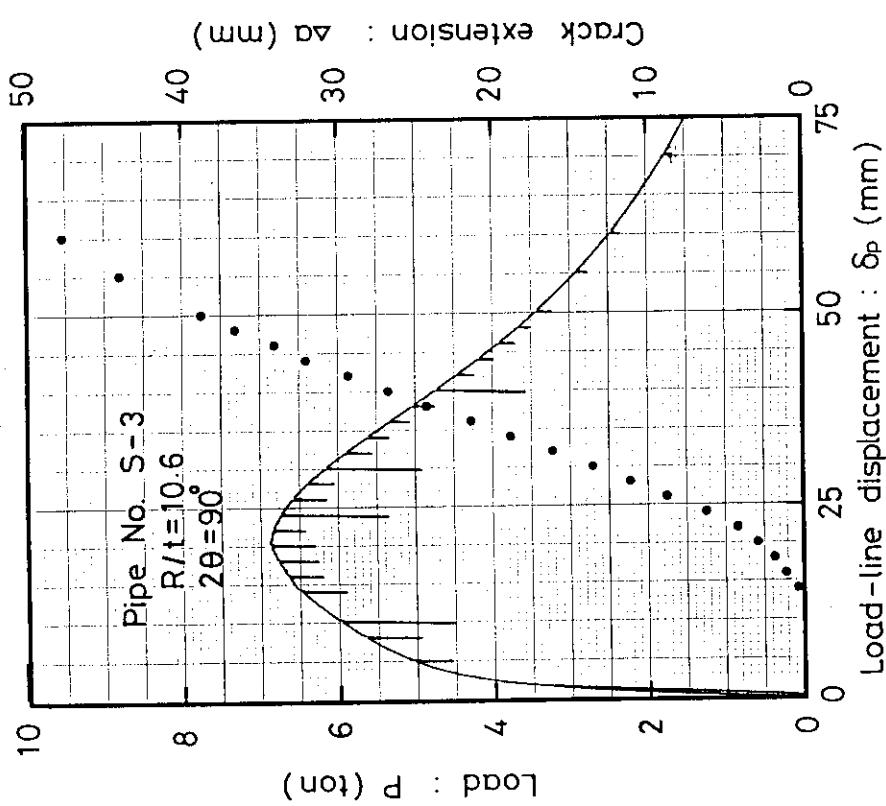


Fig. 5.4 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ and $2\theta = 180^\circ$ (S-4)

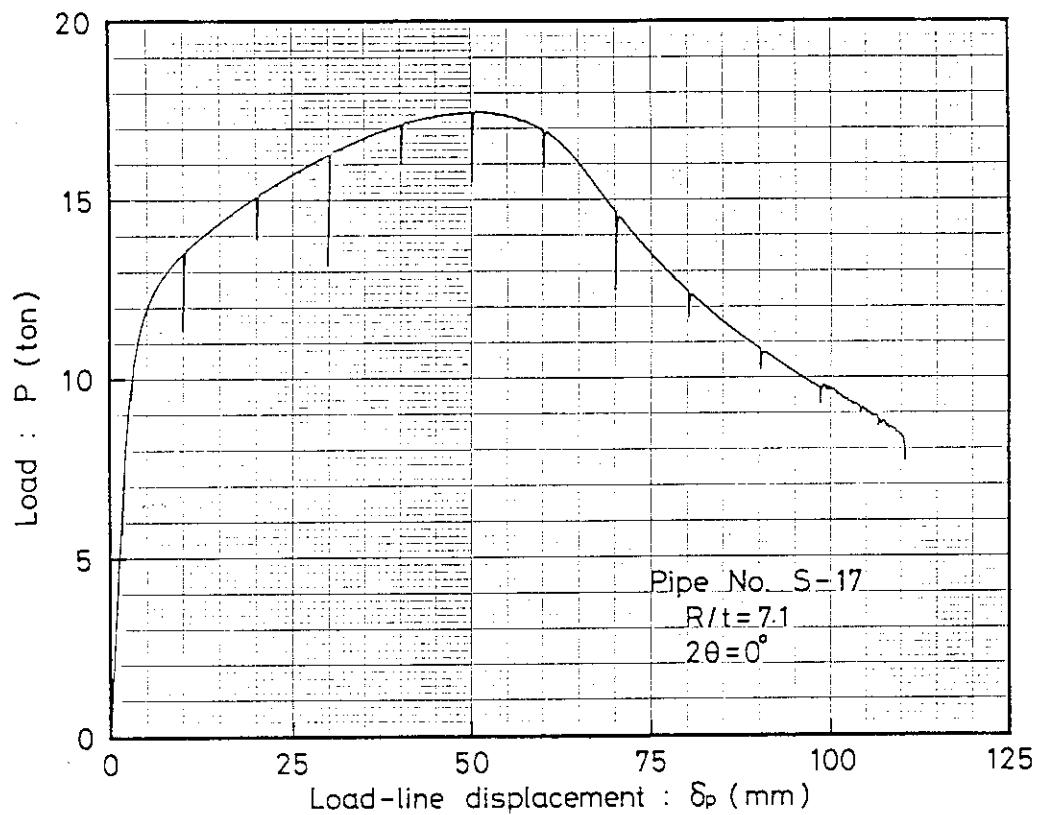


Fig. 5.5a Load versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ without crack (S-17)

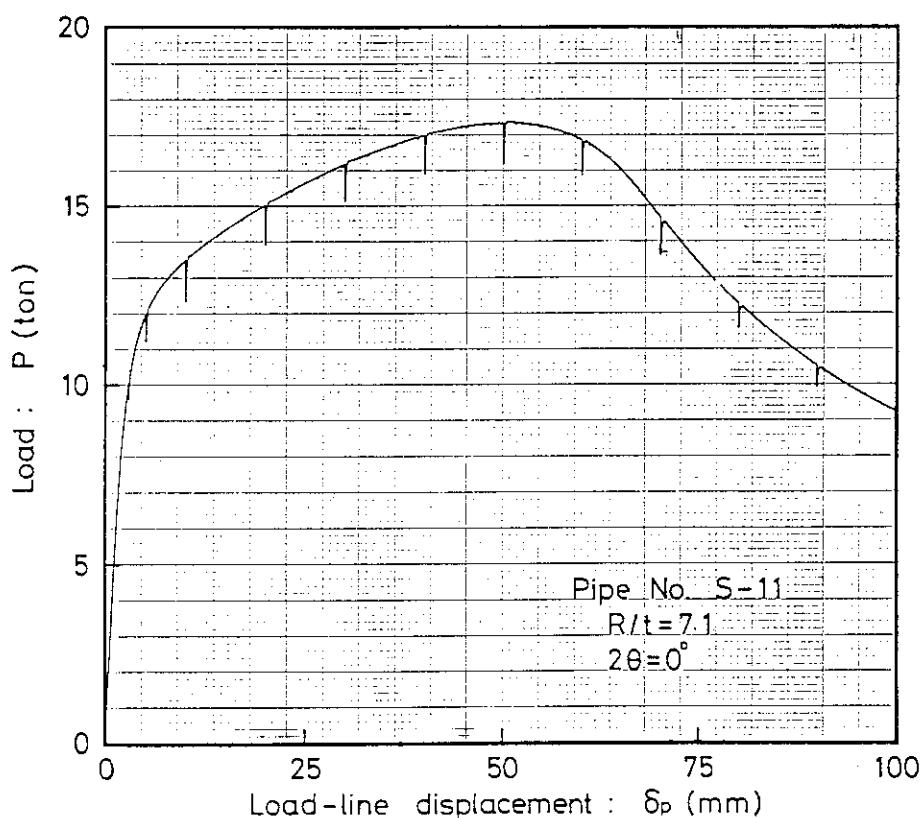


Fig. 5.5b Load versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ without crack (S-11)

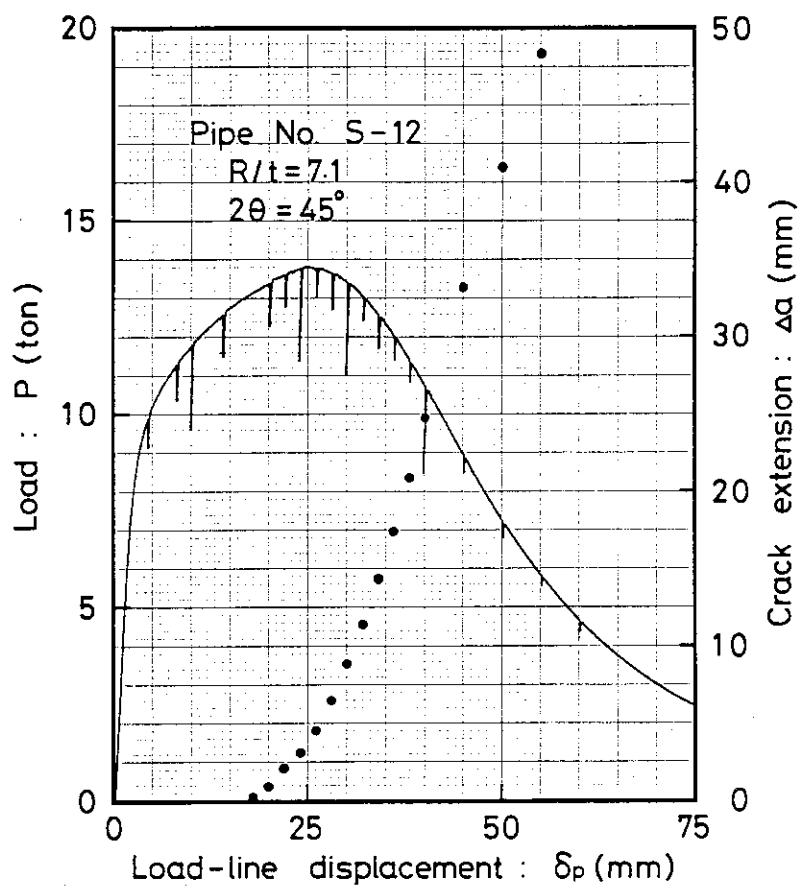


Fig. 5.6 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta = 45^\circ$ (S-12)

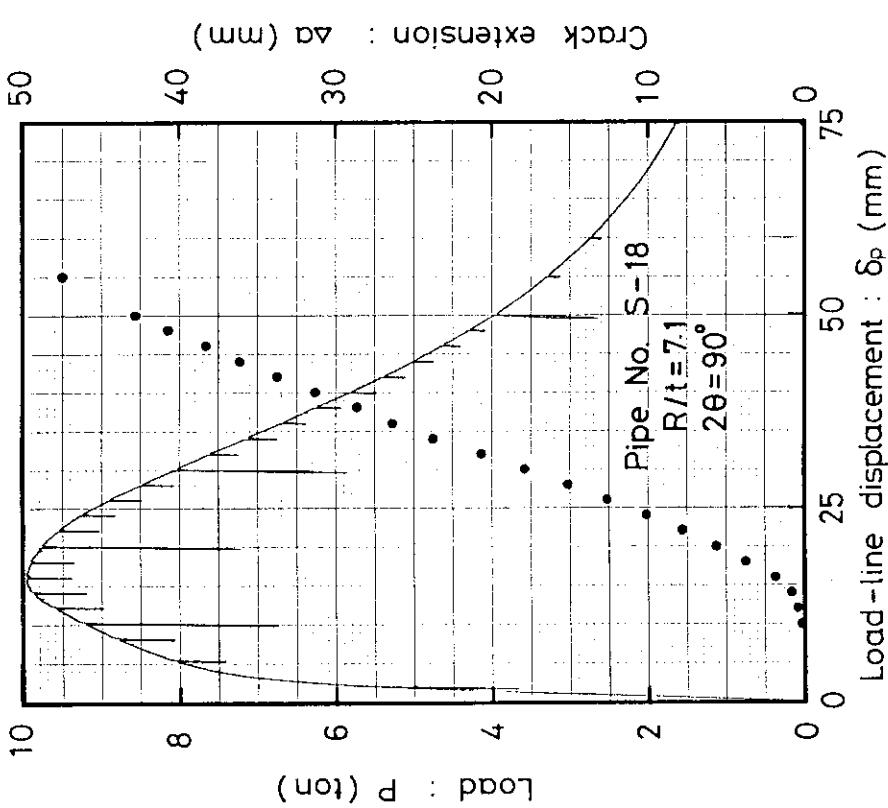


Fig. 5.7a Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta = 90^\circ$ (S-18)

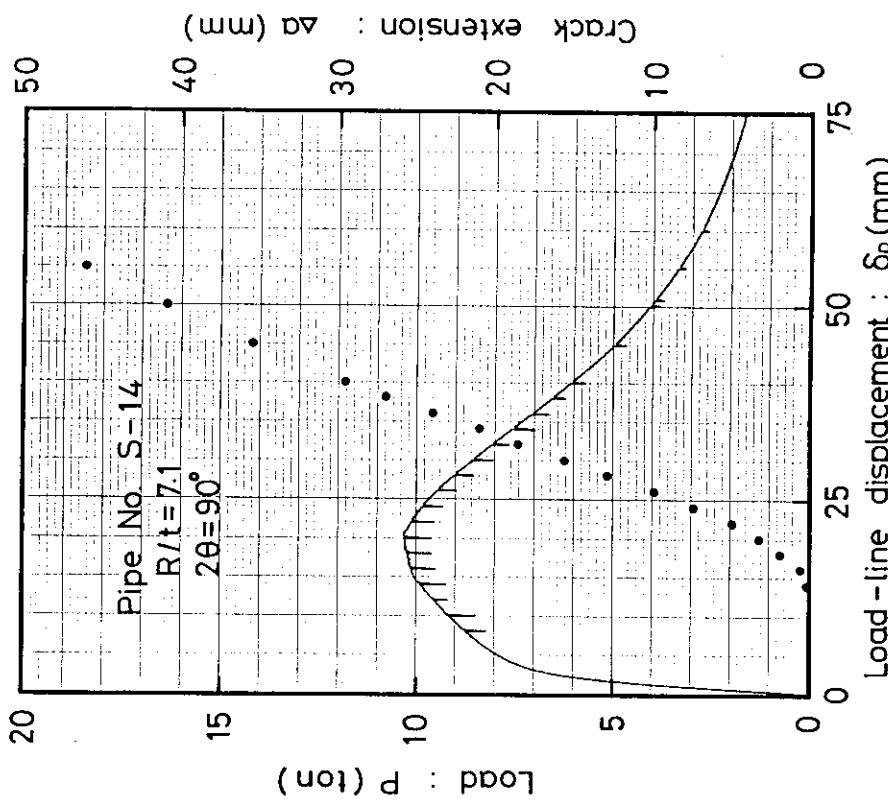


Fig. 5.7b Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ (S-14)

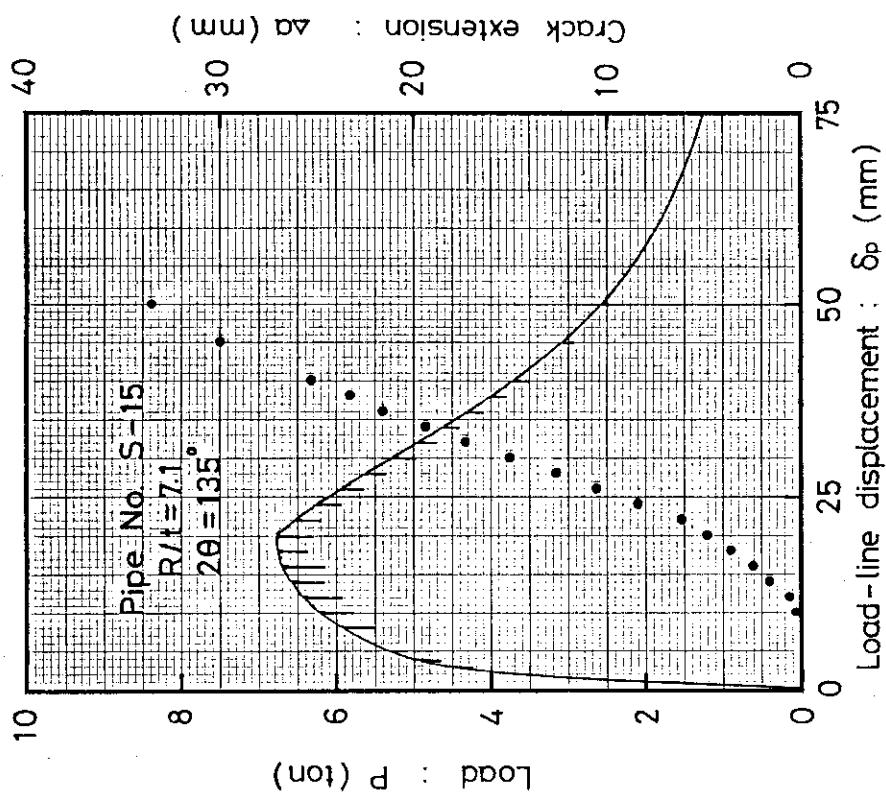
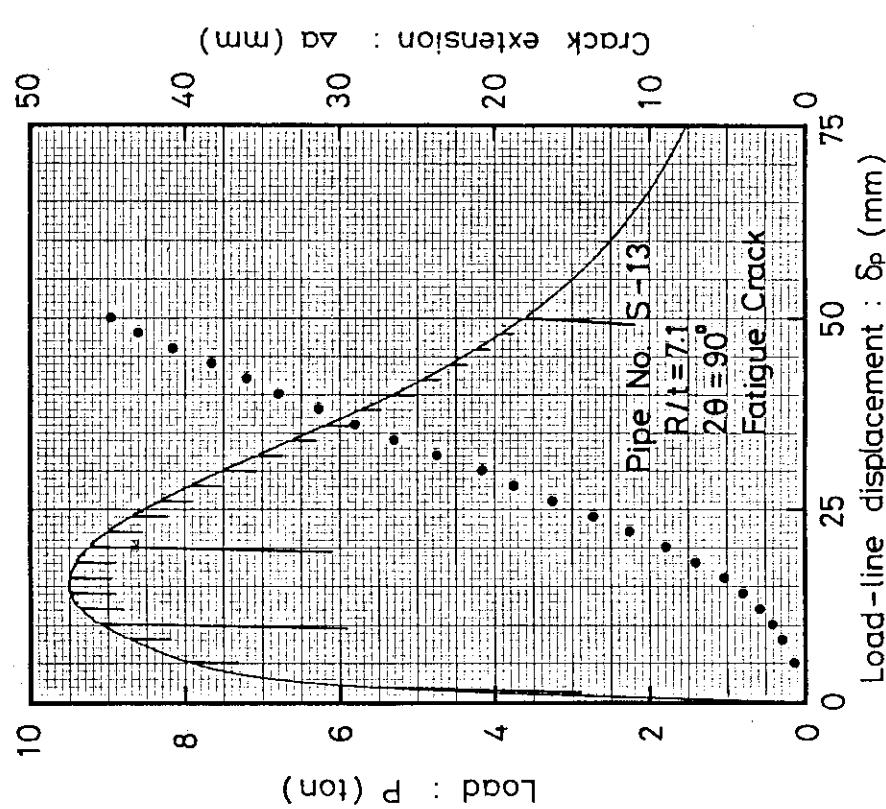


Fig. 5.8 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $\theta = 90^\circ$ with fatigue crack (S-13)

Fig. 5.9 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $\theta = 135^\circ$ (S-15)

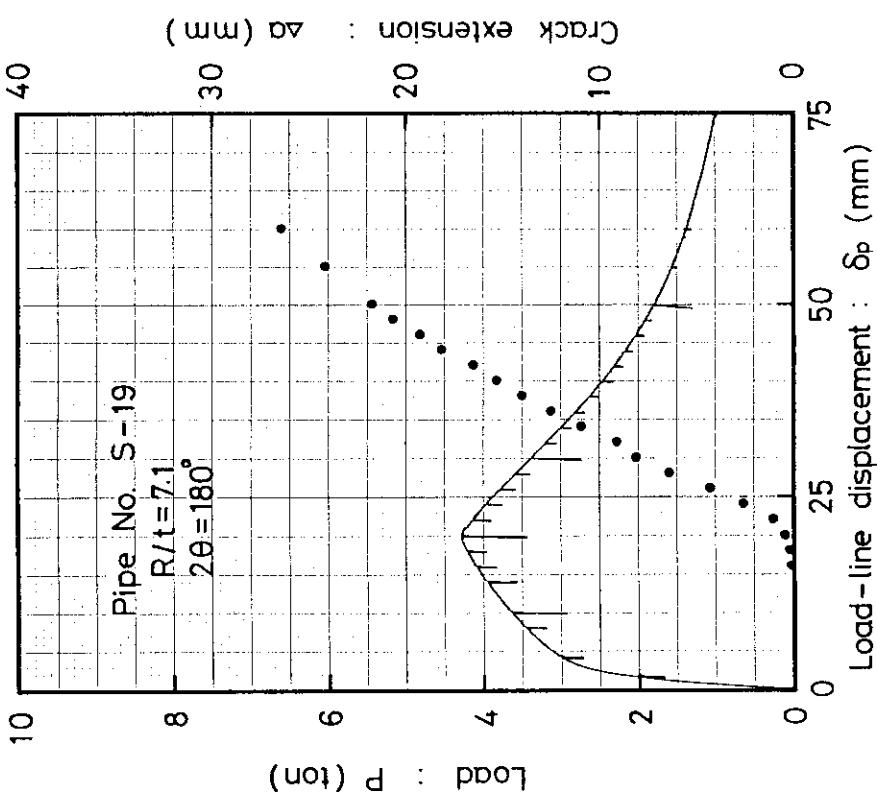
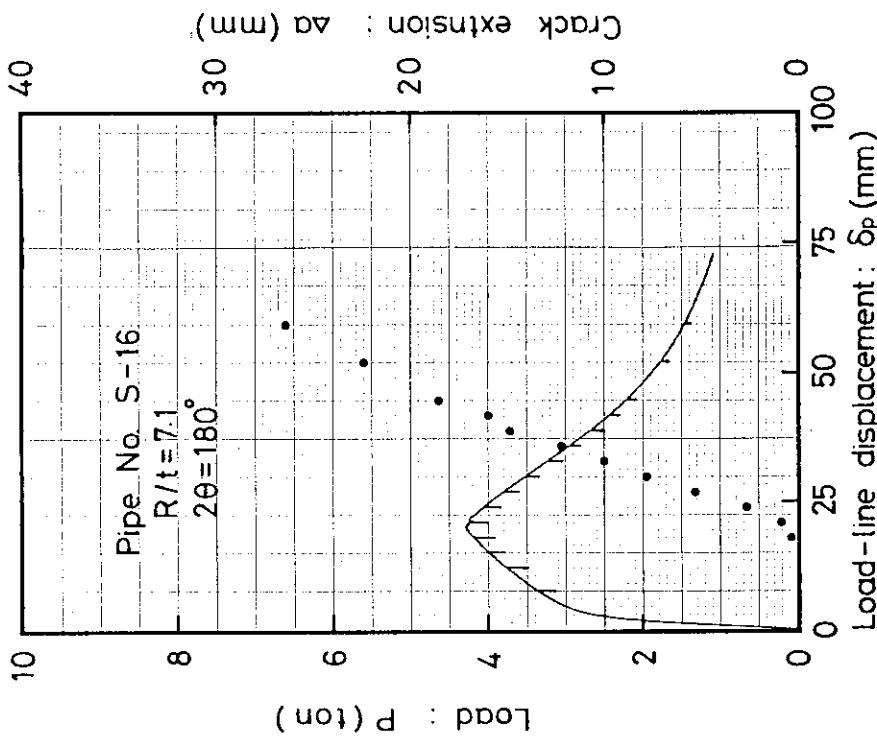


Fig. 5.10a Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta = 180^\circ$ (S-19)

Fig. 5.10b Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ (S-16)

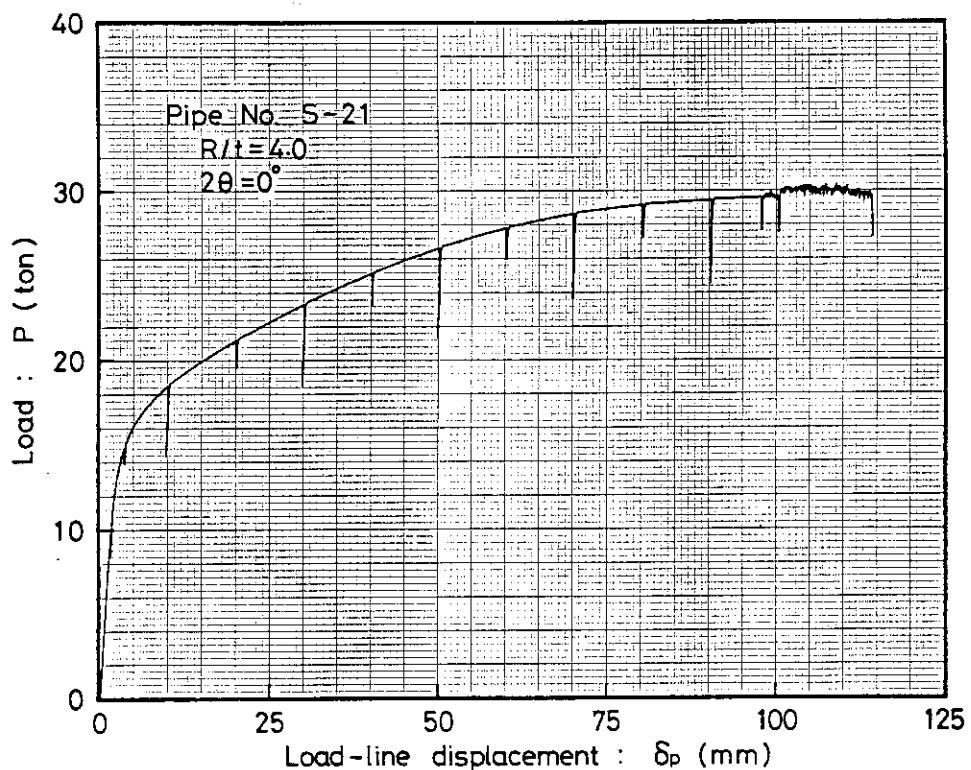


Fig. 5.11 Load versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ without crack (S-21)

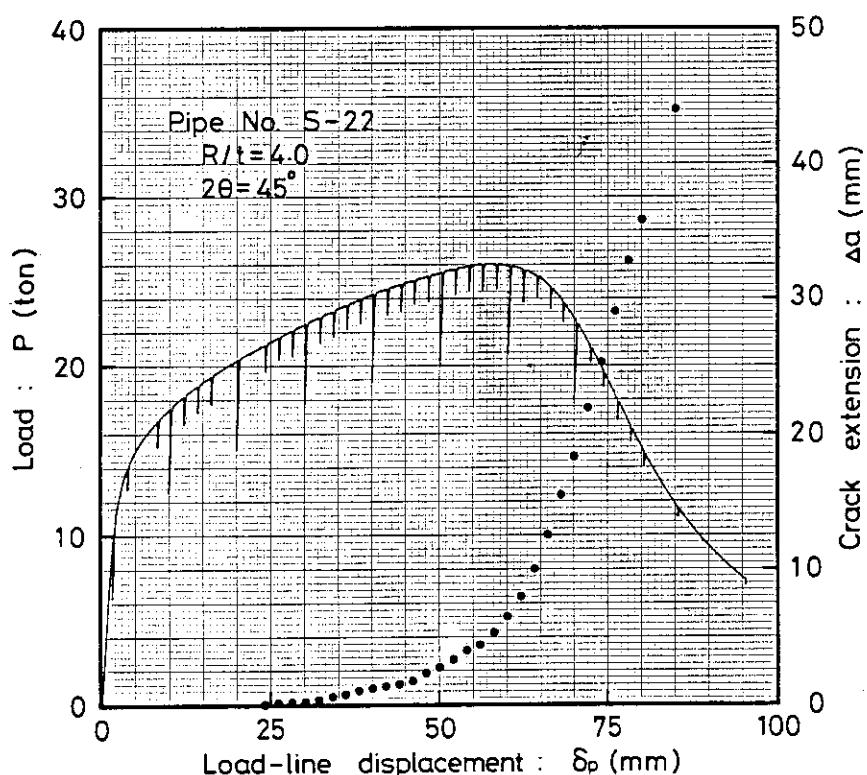


Fig. 5.12 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ and $2\theta = 45^\circ$ (S-22)

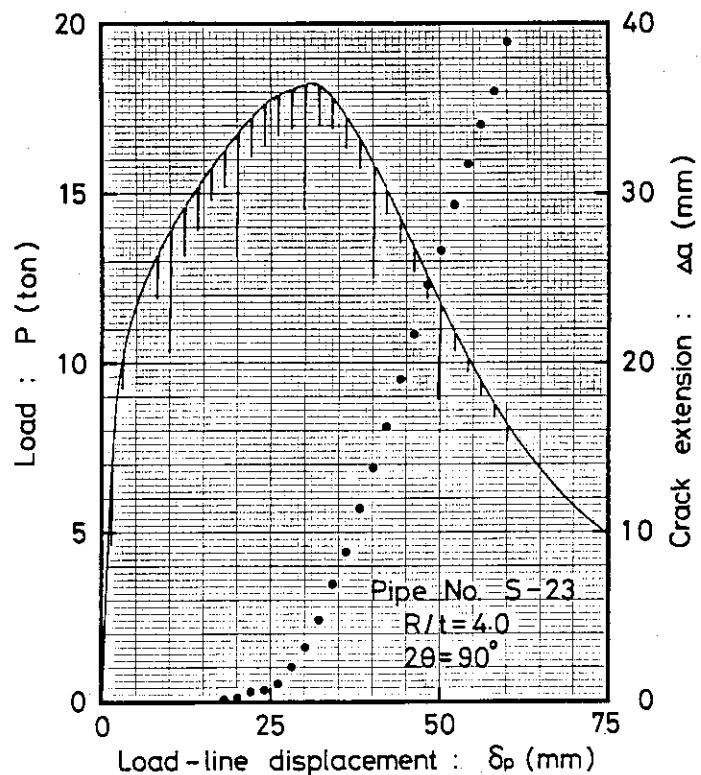


Fig. 5.13 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ and $2\theta = 90^\circ$ (S-23)

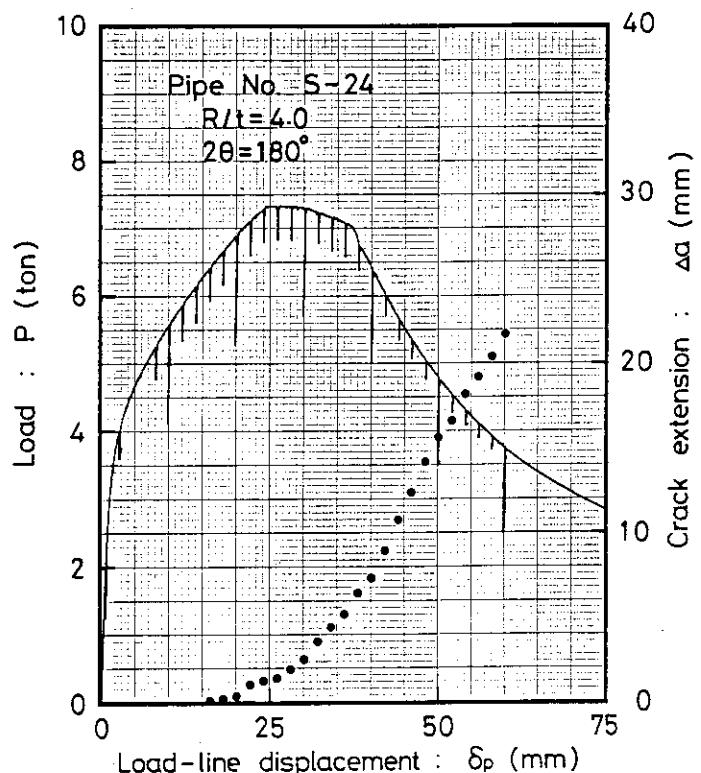


Fig. 5.14 Load and crack growth versus load-line displacement of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ and $2\theta = 180^\circ$ (S-24)

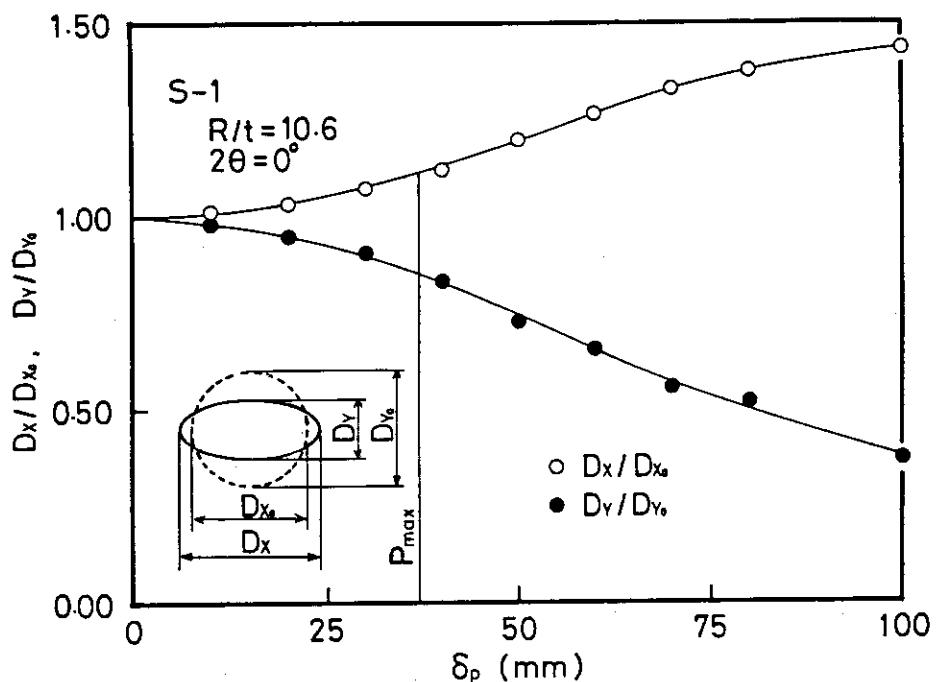


Fig. 5.15 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ without crack

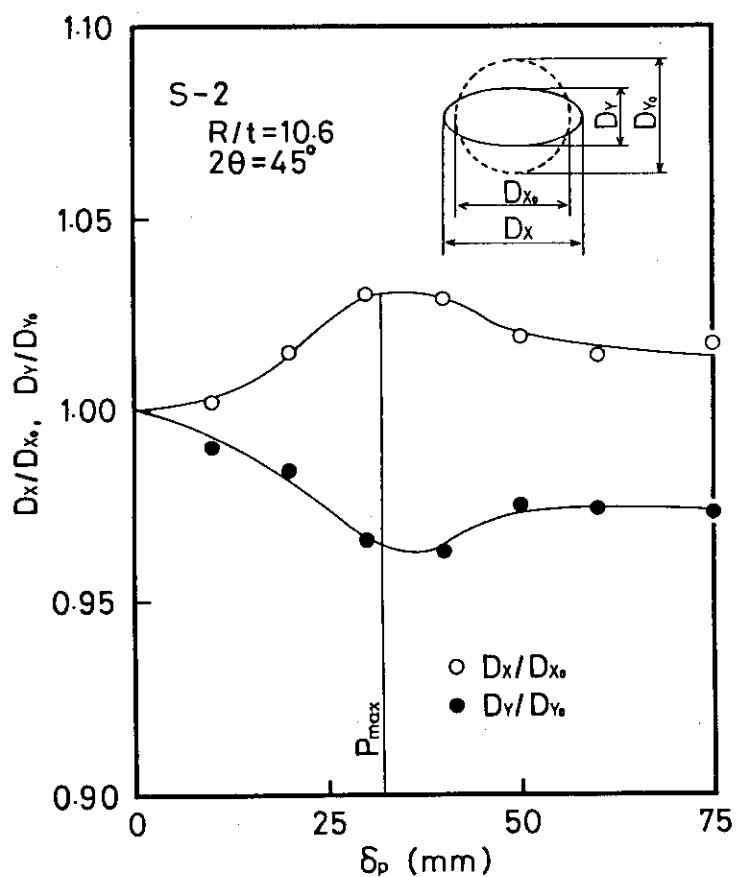


Fig. 5.16 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ and $2\theta = 45^\circ$

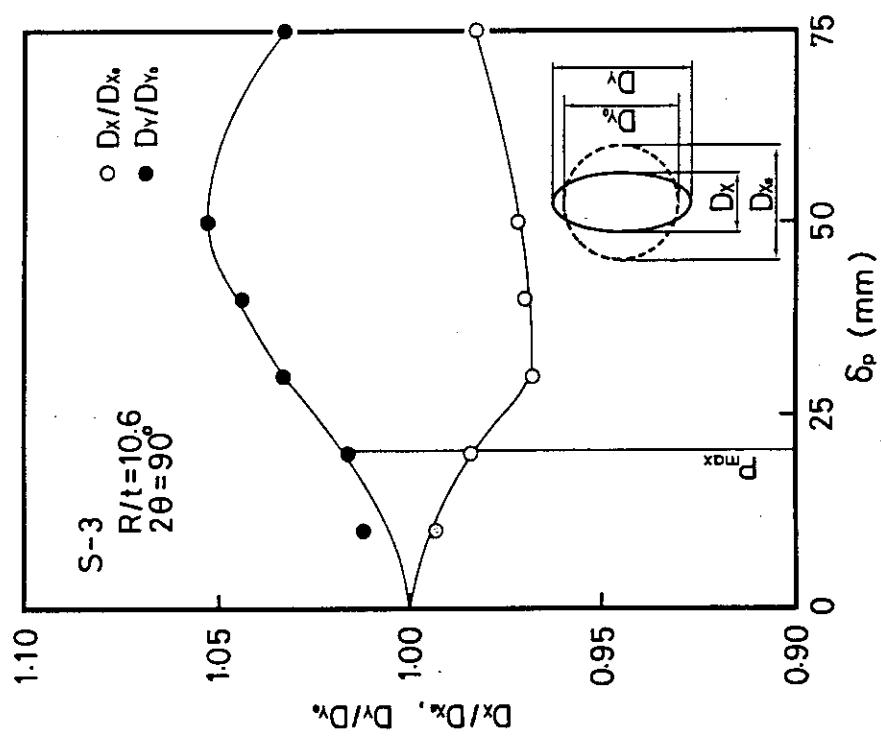


Fig. 5.17 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ and $2\theta = 90^\circ$

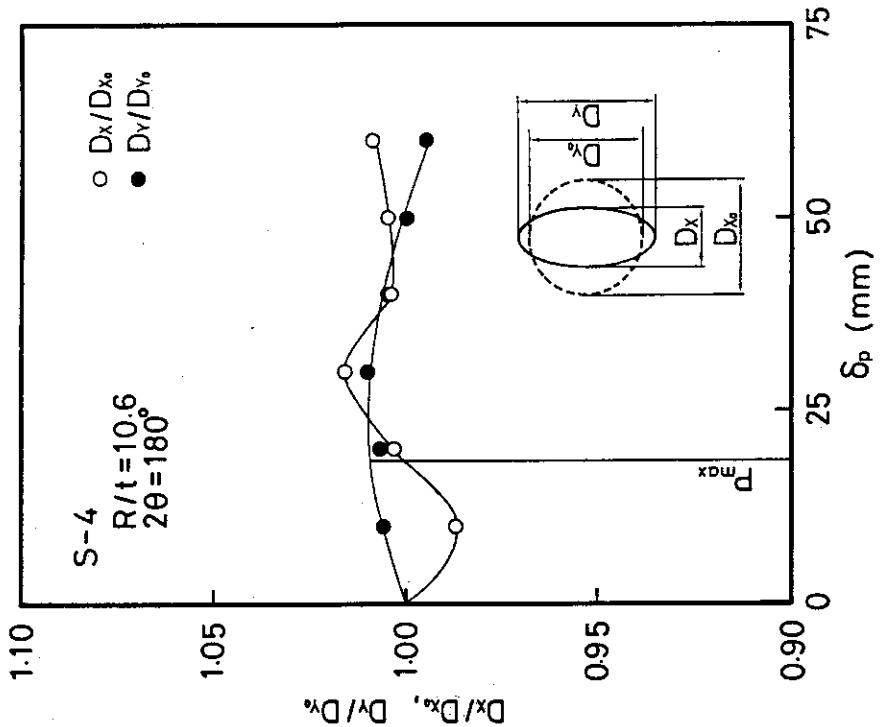


Fig. 5.18 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 10.6$ and $2\theta = 180^\circ$

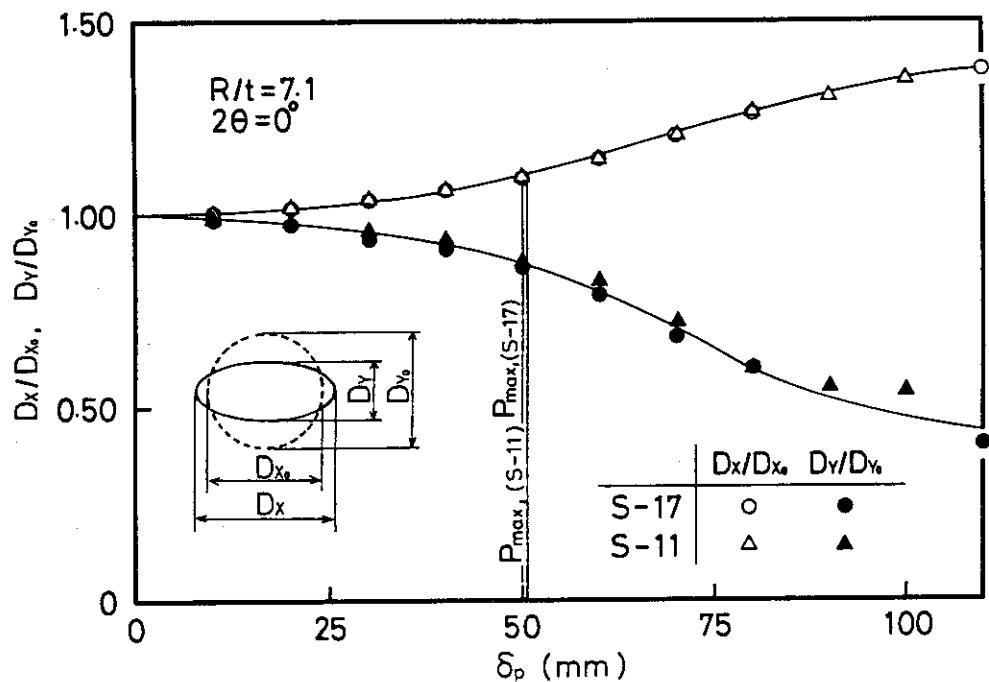


Fig. 5.19 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ without crack

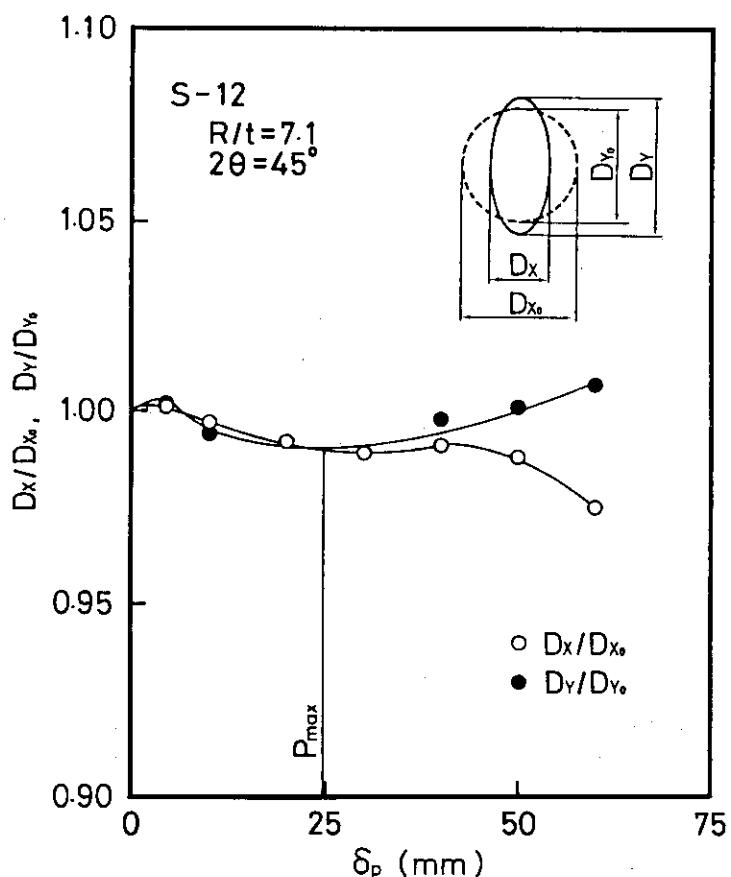


Fig. 5.20 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta = 45^\circ$

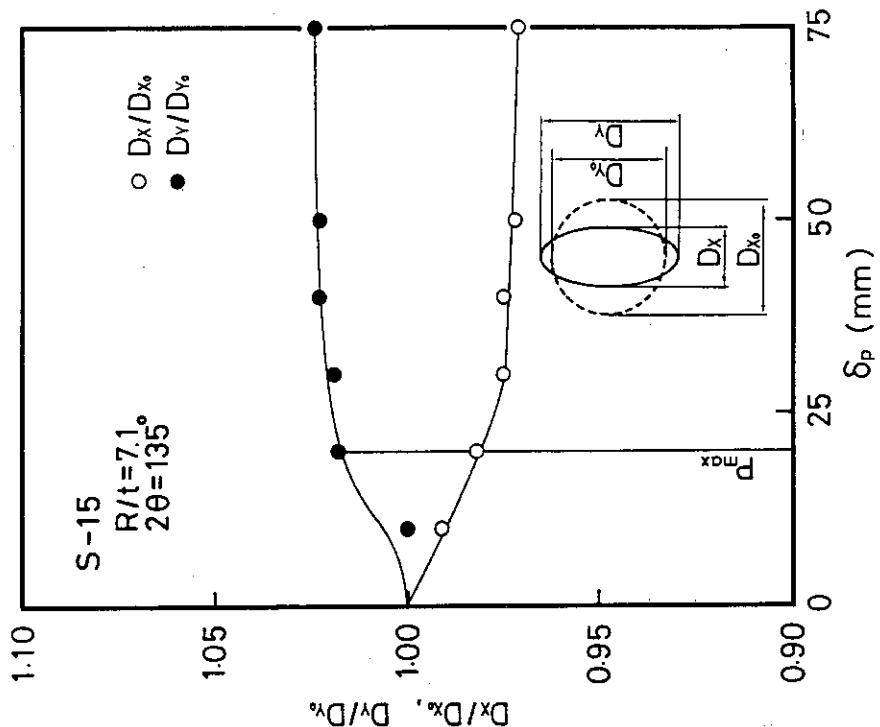


Fig. 5.22 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta = 135^\circ$

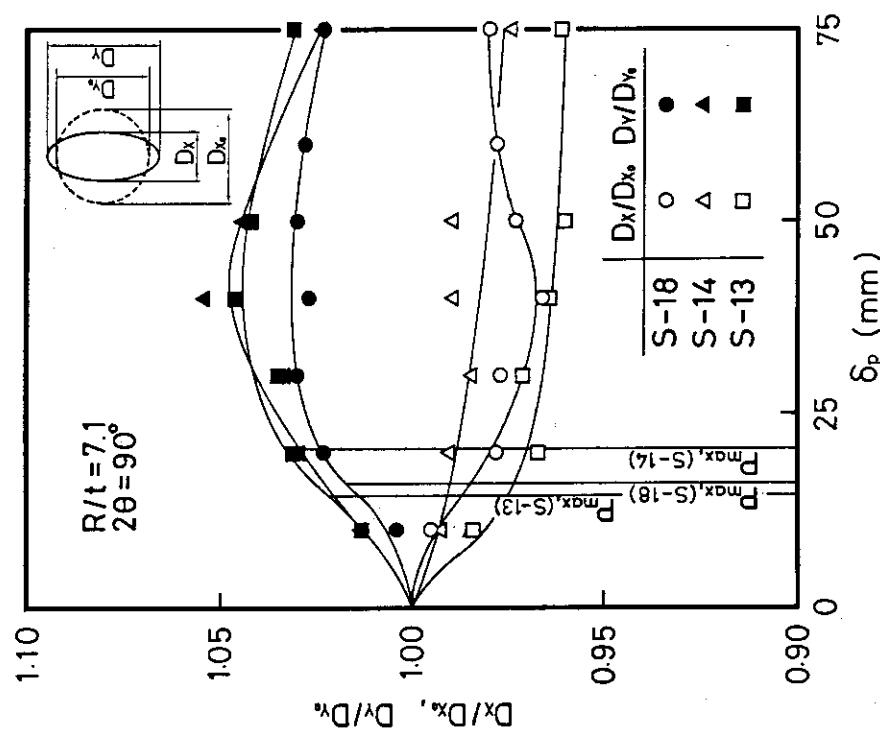


Fig. 5.21 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta = 90^\circ$

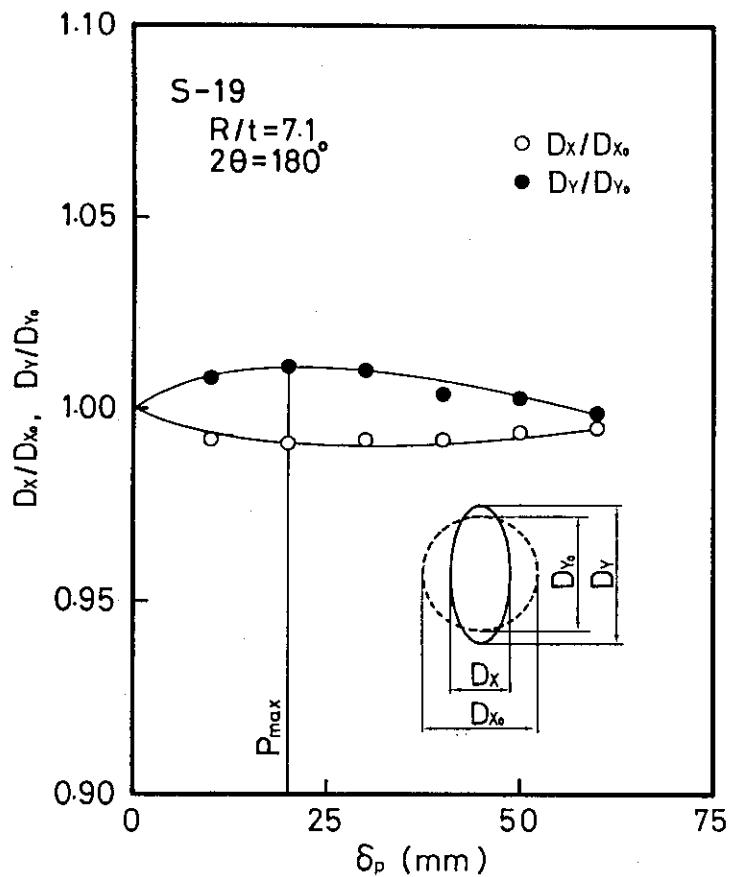


Fig. 5.23 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 7.1$ and $2\theta = 180^\circ$

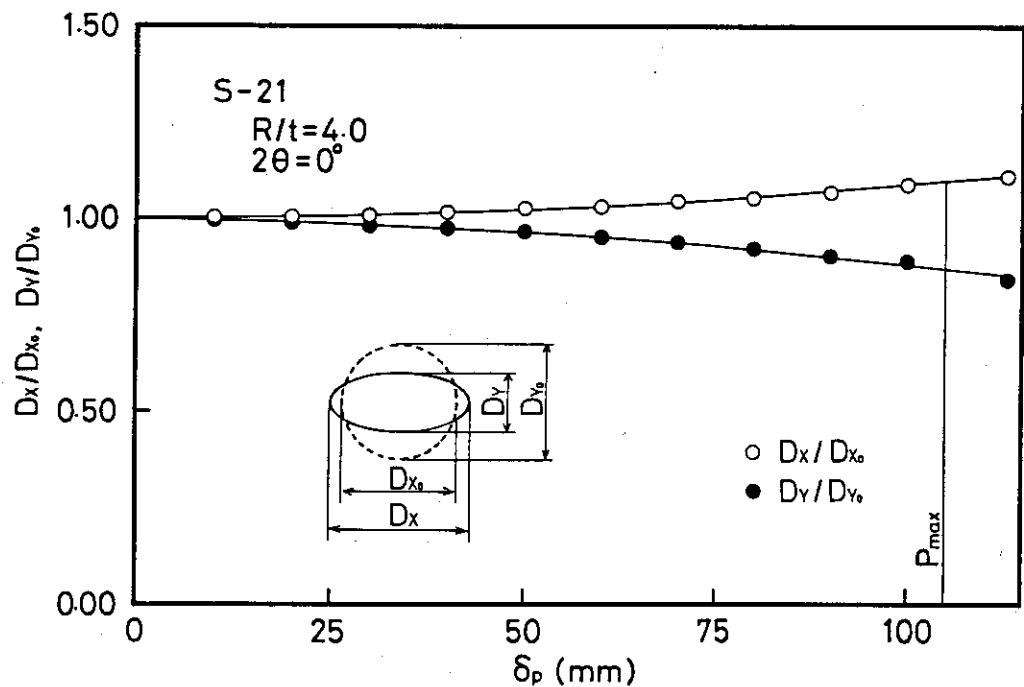


Fig. 5.24 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ without crack

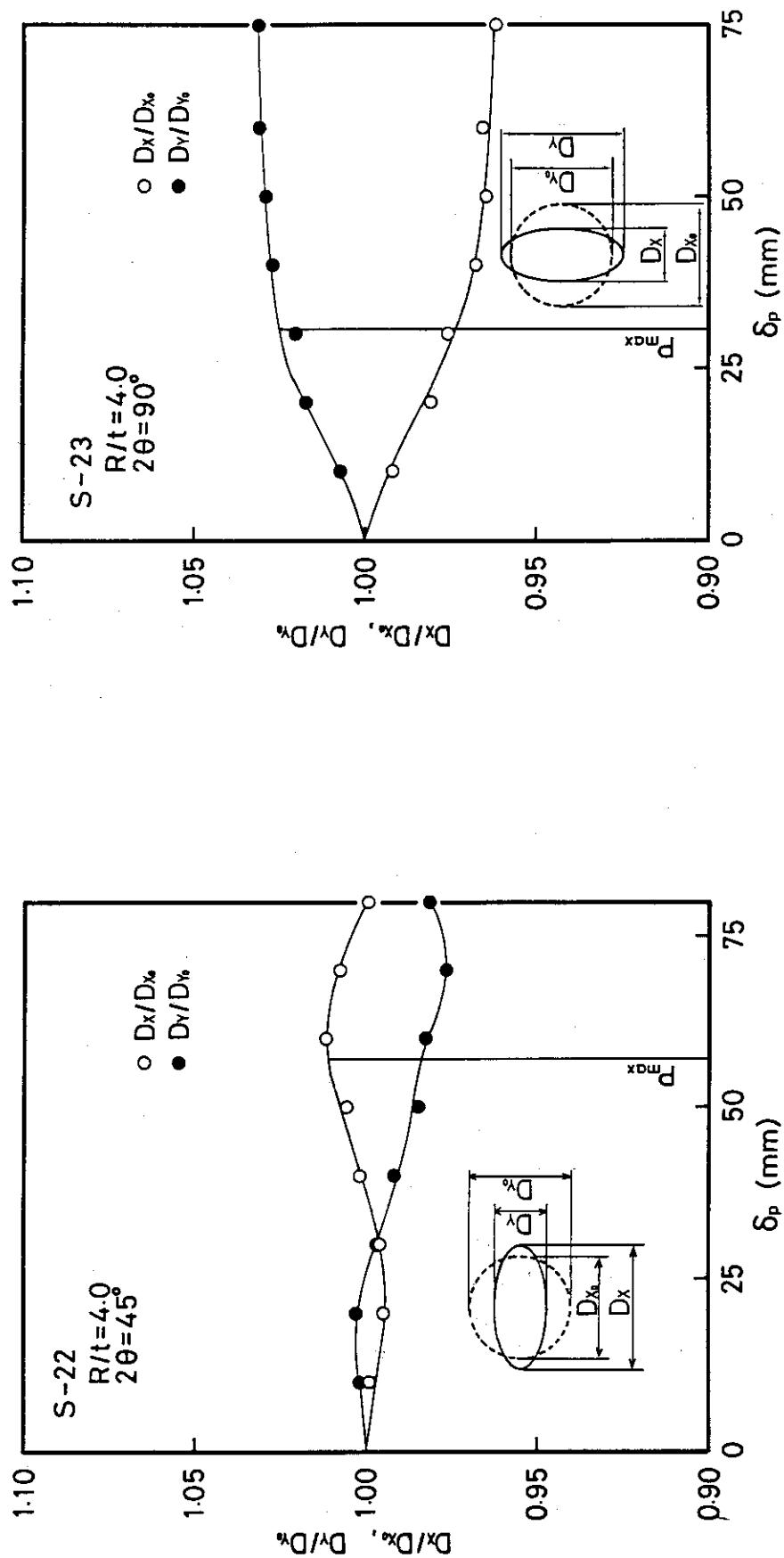


Fig. 5.25 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ and $2\theta = 45^\circ$

Fig. 5.26 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ and $2\theta = 90^\circ$

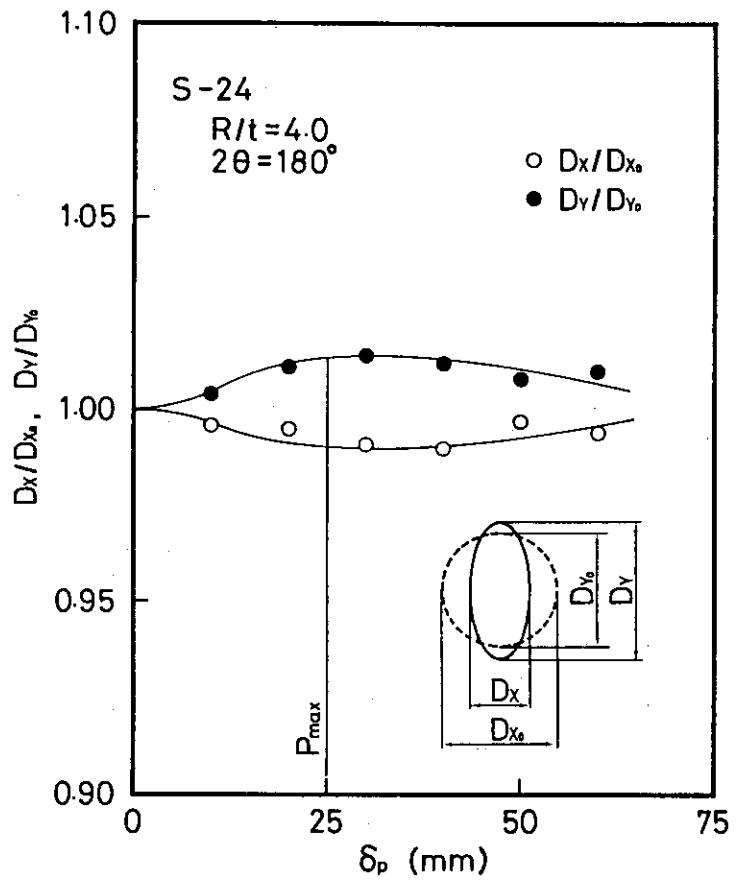


Fig. 5.27 Pipe ovalization measurement result of 3-inch SUS304 pipe having $R/t = 4.0$ and $2\theta = 180^\circ$

6. 考 察

6.1 荷重一荷重点変位曲線の検討

Fig. 6.1～Fig. 6.3は、荷重－荷重点変位について比較検討するため、試験で得られた荷重－荷重点変位曲線を半径肉厚比 R/t 每に分類してまとめたものである。 R/t が同一の場合、初期切欠き角度 2θ が大きいほど、最大荷重点変位も最大荷重も小さくなる傾向が認められた。このことは、配管に欠陥が生じた場合、その欠陥が大きいほど、配管の変形能が小さくなることを示している。

また、初期切欠きなしの場合、 R/t が小さいほど（肉厚が大きいほど）最大荷重点変位が大きくなる傾向が認められた。しかし、初期切欠きがある場合、同一の 2θ で比較すると、 $R/t = 7.1$ の時の最大荷重点変位が最も小さかった。

6.2 偏平化挙動の評価

5.2において偏平化は初期切欠き角度 2θ に依存し、 2θ が小さい時は x 方向に偏平化し、 2θ が大きくなるにつれて y 方向に偏平化してゆく傾向であることが確認できた。この傾向は Wilkowskia らによる結果と²⁶⁾ 同様の傾向である。

ここでは、5.2に示した偏平化測定結果に基づいて、最大荷重 P_{max} の時の偏平化挙動評価を行った。

Fig. 5.15～Fig. 5.27から、最大荷重時の偏平化度を求めて $(D_x - D_y)/D_0$ を算出し、この $(D_x - D_y)/D_0$ の値を偏平化率と定義する。

Fig. 6.4に、偏平化率と配管の半径肉厚比 R/t との関係を示す。同図は右上がりの傾向を示しているが、必ずしも偏平化率は R/t に依存しないことが分かる。

次に、偏平化率 $(D_x - D_y)/D_0$ と 2θ との関係を調べた。Fig. 6.5から、偏平化率は 2θ に大きく依存するが R/t による依存性は小さいことがわかる。また、偏平化率は切欠きなしの場合に約 25% と最も大きいが、 2θ が 90° に至る迄に急激な低下を示している。その途中約 60° の時に x 方向の偏平化から y 方向の偏平化へ移行する。そして、 2θ が、90° から 135° の間に偏平化率の極小値が存在していることが分かる。

一方、最大荷重時の偏平化率は、切欠きがない場合に約 25% と最も高い値であったが、貫通き裂が配管に生じた場合の偏平化率は Fig. 6.5 より 5～7% 以下であることから、貫通き裂が配管に生じたとしても、配管の剛性低下は、最大荷重値には、さほど大きな影響を及ぼさないものと考えられる。

6.3 実断面応力基準による破壊荷重評価

得られた試験結果に基づいて、実断面応力基準による破壊モーメントの予測を行った。実断面応力基準による破壊モーメントは、Kanninen らにより次式で与えられている²⁵⁾

$$M = 4 \sigma_f R^2 t F(\theta) \quad (6.1)$$

ここで

$$F(\theta) = \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta$$

Fig. 6.6 は、3.1 で行った引張試験結果から得られた σ_y と σ_u を用いて、流動応力 σ_f を

$$\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u) / 2 \quad (6.2)$$

とした時の実断面応力基準と実験結果とを無次元化して比較したものである。図中曲線は予測値、各プロットが実験値である。半径肉厚比 $R/t = 10.6$ で切欠きなしの場合を除けば、実験点は全て安全側の評価である。特に厚肉 $R/t = 4.0$ で 2θ が小さい場合、実験点は予測曲線を大きく上回る結果となっている。

次に、Wilkowski らが提案²⁶⁾した、流動応力 σ_f を

$$\sigma_f = 1.15 (\sigma_y + \sigma_u) / 2 \quad (6.3)$$

とした時の実断面応力基準と実験結果との比較を Fig. 6.7 に示す。この図は、 $R/t = 4.0$ の時、実験点は予測曲線と良好な関係を示すが、他の R/t の場合、特に 2θ が小さい時、実験値は非安全側の評価となっている。

以上の様に実験値が予測値と必ずしも一致しない理由として、式 (6.1) の適用が薄肉配管に対するものであることと、式 (6.1) は、配管の偏平化の影響を考慮していないことに帰因するものと考えられる。そこで、以下に示す方法で偏平化の補正を行った。

即ち、式 (6.1) では、平均半径 R を一定としたが、ここでは偏平化の影響で平均半径 R を変数と仮定した。つまり、5.2 で示した Fig. 5.15～Fig. 5.27 から最大荷重 P_{max} の時の偏平化を求めてその値から計算した平均半径 R を式 (6.1) に適用した。

以上の方で偏平化の補正を行った実験値と実断面応力基準との比較を Fig. 6.8, Fig. 6.9 に示す。Fig. 6.8 は、流動応力 σ_f として、式 (6.2) を適用した場合、Fig. 6.9 は、式 (6.3) を適用した場合である。偏平化の補正を行った場合、Fig. 6.8 も Fig. 6.9 も、切欠きなしの場合の実験点はすべて予測曲線を上回る結果となった。しかしながら、 σ_f として式 (6.2) を用いた Fig. 6.6 と、Fig. 6.8 とを比べると $2\theta \geq 90^\circ$ の時、偏平化の補正をした方が、実験点はすべて予測曲線に近付く傾向が認められた。

6.4 J-R 曲線によるき裂進展抵抗の評価

き裂を有する試験体の変形及び破壊に対する抵抗は、J-R 曲線で表示することができる。

Fig. 4.1 に示した試験体系において配管に負荷される J 値は次式によって表わされる。

$$J = J_e + J_p \quad (6.4)$$

式(6.4)において J_e , J_p はそれぞれ J の弾性成分、塑性成分である。式(6.4)における J_e は次式により表わされる。

$$J_e = \frac{K^2}{E} \quad (6.5)$$

$$E = 19900 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

式(6.5)における K 値は、Klecker らの方法²⁹⁾で算出した。また、式(6.4)における J_p は、Zahoor³⁰⁾, Pan³¹⁾ らの方法により柴田が作成した計算プログラムを用いて収束計算を行うことにより算出した。²³⁾

以上的方法で算出した J 値と、荷重、荷重点変位等の全データを各試験体毎に Appendix E にまとめた。

Fig. 6.10～Fig. 6.12 は、半径肉厚比 R/t を一定とした時の J-R 曲線に対する初期切欠き角度 2θ の依存性を示したものである。横軸 Δa_m は、配管表面でのき裂進展量 Δa を式(6.6)を用いて肉厚中央部でのき裂進展量 Δa_m に換算した値である。

$$\Delta a_m = \Delta a \cdot \frac{2R}{D_0} \quad (6.6)$$

Fig. 6.10～Fig. 6.12 から、SUS 304, 3 インチ配管の J-R 曲線は、平板試験結果²⁴⁾ と同様 2θ に依存することが分かる。 2θ が小さいほど、き裂発生時の J 値は低いが、き裂が進展してある値以上になると逆転する傾向がある。この傾向は $R/t = 10.6, 7.1$ の時に特に顕著に認められる。

Fig. 6.13～Fig. 6.15 は、 2θ を一定とした時の J-R 曲線に対する半径肉厚比 R/t の依存性を示したものである。どの 2θ においても、 $R/t = 4.0$ の時の J 値が最大であった。 $2\theta = 45^\circ, 90^\circ$ の場合、 $R/t = 7.1$ と 10.6 の J-R 曲線は差異が認められない。一方、 $2\theta = 180^\circ$ の場合、 $R/t = 7.1$ の J 値は、 $\Delta a_m \leq 1 \text{ mm}$ では $R/t = 4.0$ の J-R 曲線と同一挙動を示すが、 $\Delta a_m \geq 1 \text{ mm}$ では、 $R/t = 10.6$ の J-R 曲線に漸近してゆく傾向であることが認められた。

Fig. 6.16 は、 $R/t = 7.1, 2\theta = 90^\circ, 180^\circ$ の J-R 曲線を、柴田らが行った 6 インチ及び 12 インチ口径 SUS 304 配管による J-R 曲線²¹⁾とを比較したものである。6 インチ配管では、 $2\theta = 120^\circ, 180^\circ$ 、12 インチ配管では、 $2\theta = 90^\circ, 180^\circ$ の時の J-R 曲線を示した。また、縦軸は、J 値の塑性成分である。この図より J-R 曲線は、明らかに配管径に依存することが分かる。また、3 インチ配管では、J-R 曲線は、 2θ に依存しているが、配管口径が大きくなる

につれ、その依存性は小さくなる傾向にある。

次に、Fig. 6.17 に $R/t = 7.1$, $2\theta = 90^\circ$ の時の切欠き尖鋭度の影響を示す。疲労き裂を施した試験体 S-13 の J-R 曲線を x 軸方向に -2.5 mm 程度平行移動すれば、放電加工切欠き(EDM 切欠き)を施した試験体 S-18 の J-R 曲線と一致する。一方、5.1 における EDM 切欠き試験体と疲労き裂試験体による Fig. 5.7a と Fig. 5.8 とを比較すると両者の荷重-荷重点変位曲線は、ほぼ一致する。さらに、き裂進展量に関しては、疲労き裂を施した試験体 S-13 の荷重点変位-き裂進展量の曲線を Δa 方向に -2.5 mm 平行移動すれば EDM 切欠き試験体 S-18 の荷重点変位-き裂進展量の曲線に一致する。このことは、疲労き裂の場合、初期き裂長さは実際の初期き裂長さより 2.5 mm 長いものと同等の効果となることを示している。

以上より、放電加工を施した配管の J-R 曲線を x 軸方向に、+2.5 mm 平行移動することにより疲労き裂の場合と同等の評価ができることが分かる。

なお、Appendix F に、個々の J-R 曲線を示す。

6.5 き裂開口面積の評価

ここでは、4.2 で述べた方法で配管の曲げ試験中に得られたき裂開口形状データを基に、貫通切欠き付 SUS 304 鋼製 3 インチ配管のき裂開口面積 COA を以下の方法で算出した。

即ち、配管の曲げ試験中に転写したき裂面のプリントから、数 mm 間隔でき裂幅を測定し、シンプソンの公式を用いて COA を算出した。

Fig. 6.18～Fig. 6.20 は、以上的方法で求めた COA と曲げ応力 σ_b との関係である。3つの図から初期切欠き角度 2θ が大きくなるほど COA は大きくなることが分かる。

次に、初期切欠き長さ $2a_0$, COD, CTOD により、COA を求める方法として Fig. 6.21 に示す簡易評価モデルを考える。図に示したように、貫通き裂を $2a_0 \times \text{CTOD}$ の矩形及び長軸半径 a_0 短軸半径 (COD - CTOD) / 2 の橿円と仮定し、斜線部の面積を S_1 、それ以外の部分の面積を S_2 とする。 S_1 , S_2 は次式により表わされる。

$$S_1 = \pi a_0 \frac{\text{COD} - \text{CTOD}}{2} \quad (6.7)$$

$$S_2 = 2a_0 \cdot \text{CTOD} \quad (6.8)$$

荷重が負荷されてき裂が開口した時の COA は次式で表わされる。

$$\text{COA} = S_1 + S_2 \quad (6.9)$$

式 (6.9) で計算した COA と、実験的に求めた COA との相関を Fig. 6.22 に示す。図より、簡易評価式 (6.9) で求めた COA の方が、実験的に求めた COA よりも若干上回ってはいるが、良好な相関関係にあることがわかる。従って、式 (6.9) を用いて COA は十分評価できるものと考えられる。即ち、き裂長さ $2a_0$ 、き裂先端部の CTOD、き裂中央部の COD が既知であれば、式 (6.7)～(6.9) により、き裂開口面積 COA を良好に推定することができる。

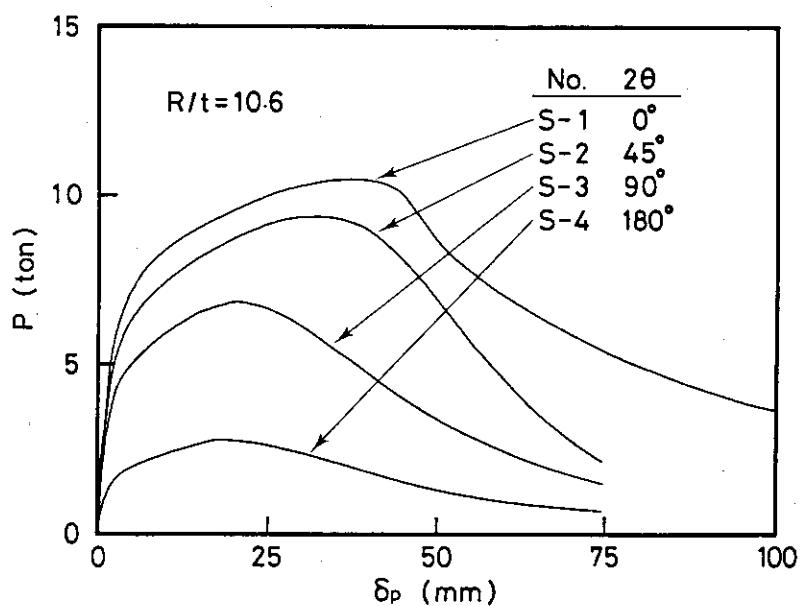


Fig. 6.1 Effect of initial crack angle on load-loadline displacement curves of $R/t = 10.6$ pipes

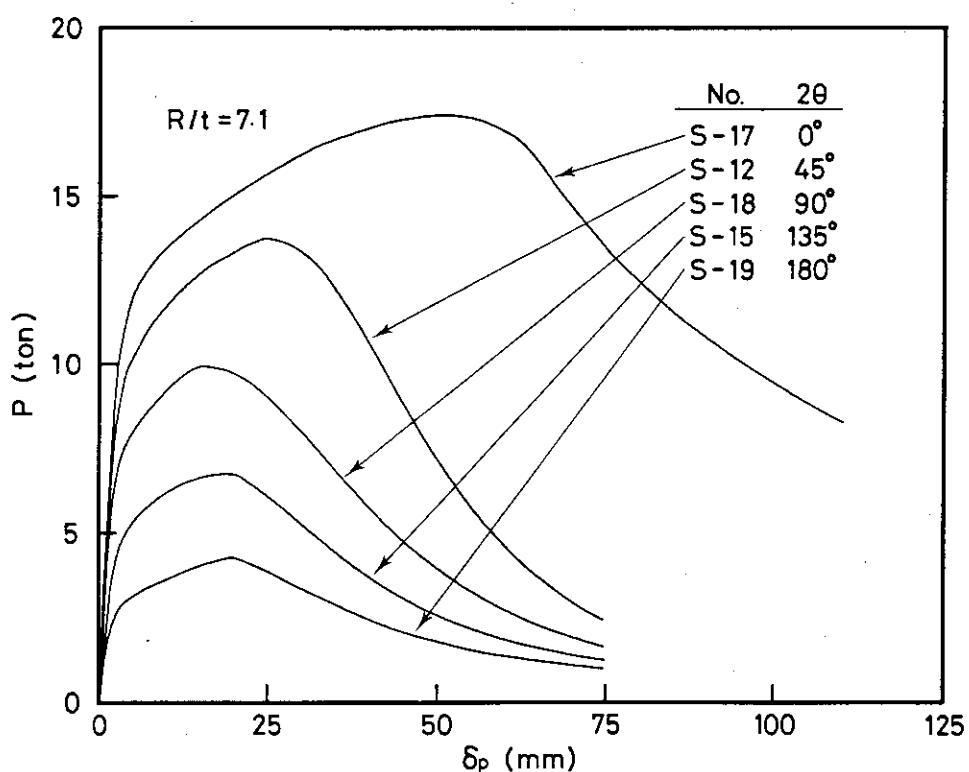


Fig. 6.2 Effect of initial crack angle on load-loadline displacement curves of $R/t = 7.1$ pipes

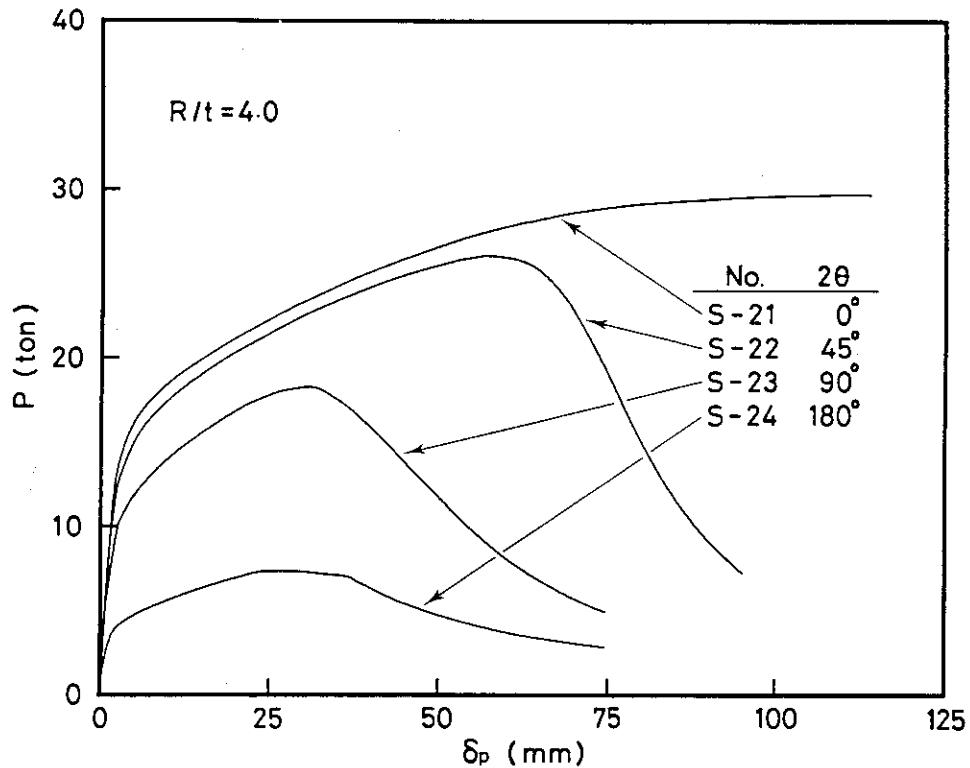


Fig. 6.3 Effect of initial crack angle on load-loadline displacement curves of $R/t = 4.0$ pipes

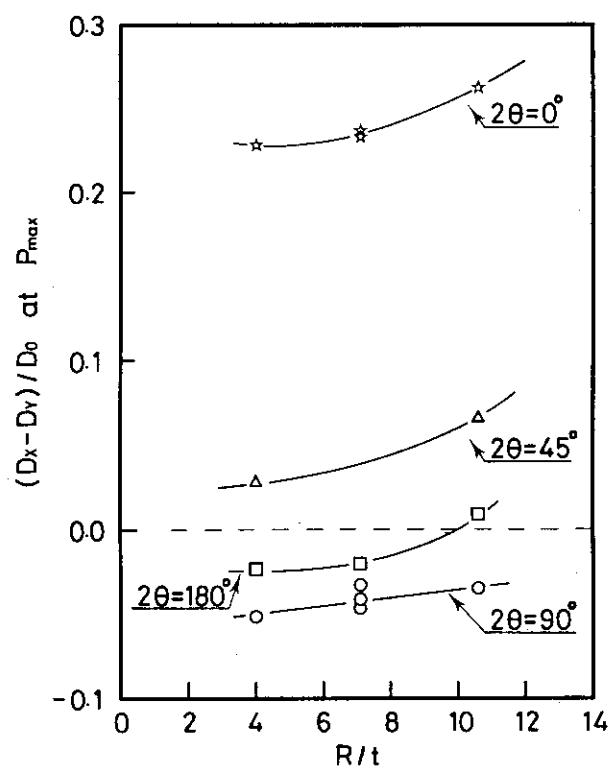


Fig. 6.4 Ovalization ratio at P_{max} versus R/t

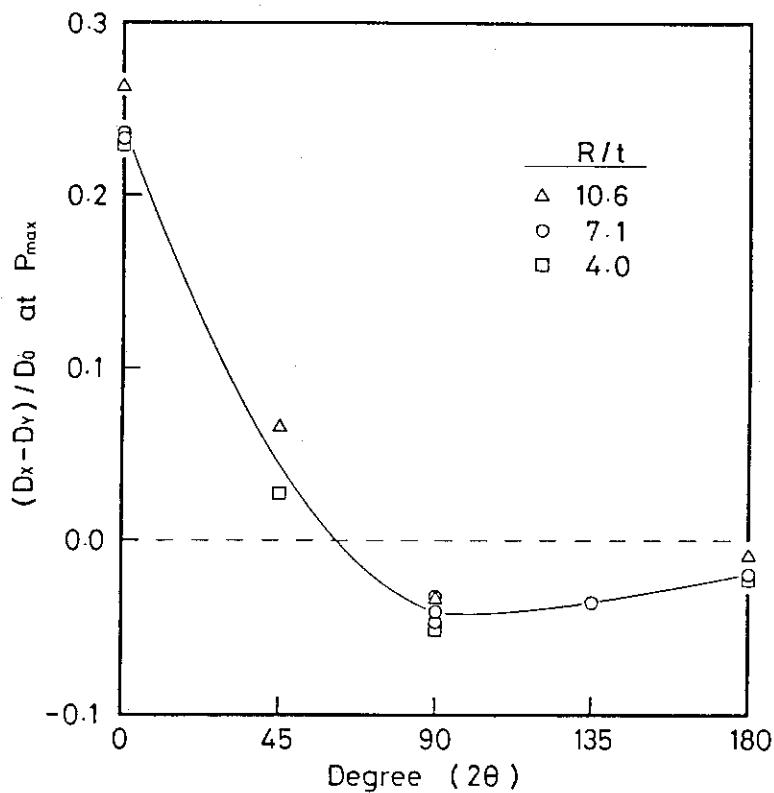


Fig. 6.5 Ovalization ratio at P_{max} versus initial crack angle

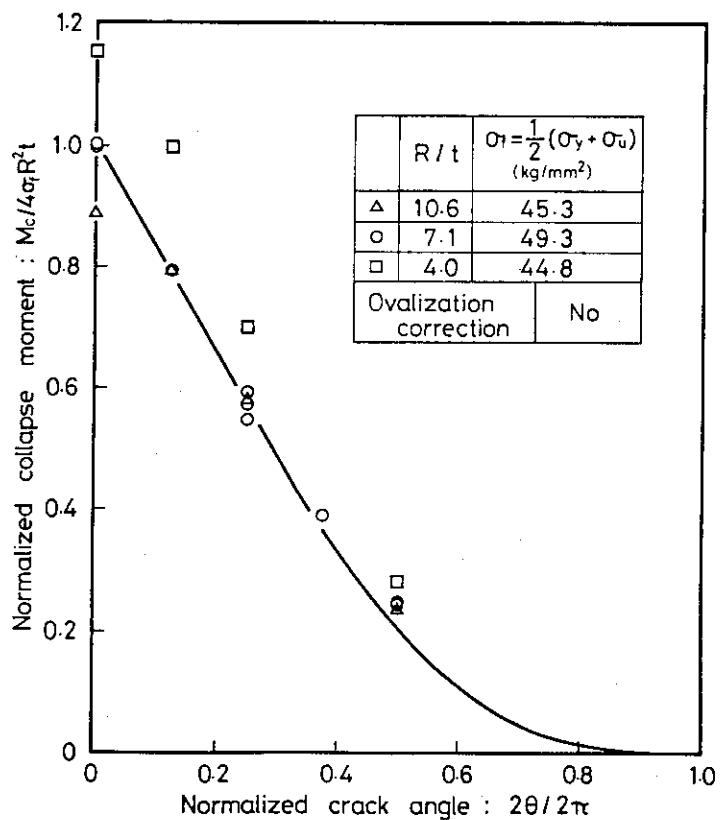


Fig. 6.6 Comparison of experimental data to net-section collapse criterion using $\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u)/2$ for circumferentially through-wall cracked SUS304 stainless steel pipes

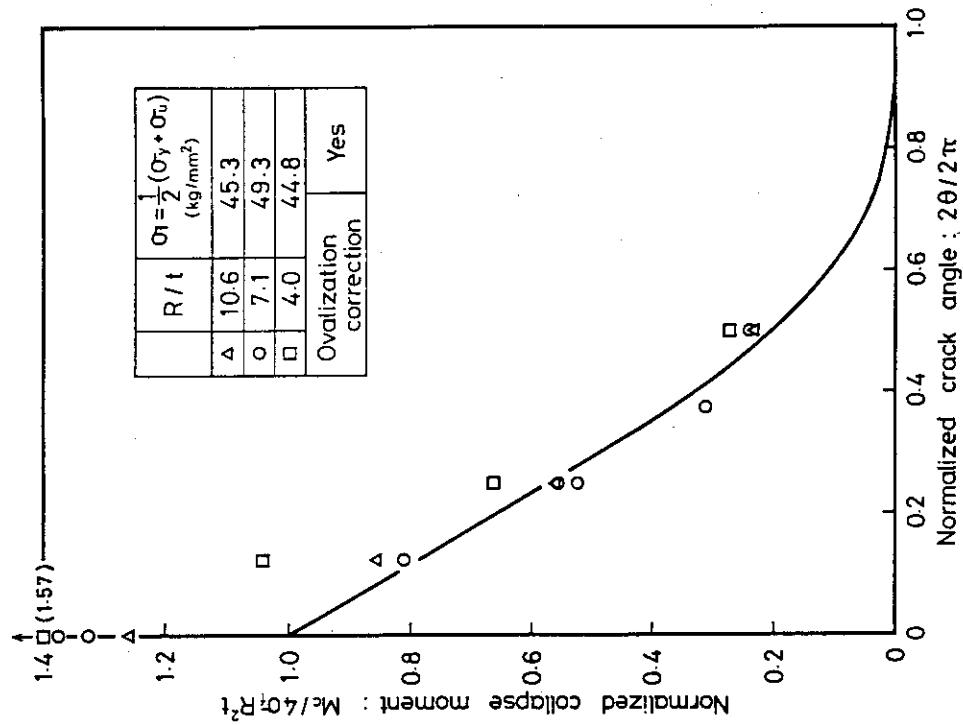


Fig. 6.8 Comparison of experimental data to net-section collapse criterion using $\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u)/2$ for circumferentially through-wall cracked SUS304 stainless steel pipes considering ovalization correction

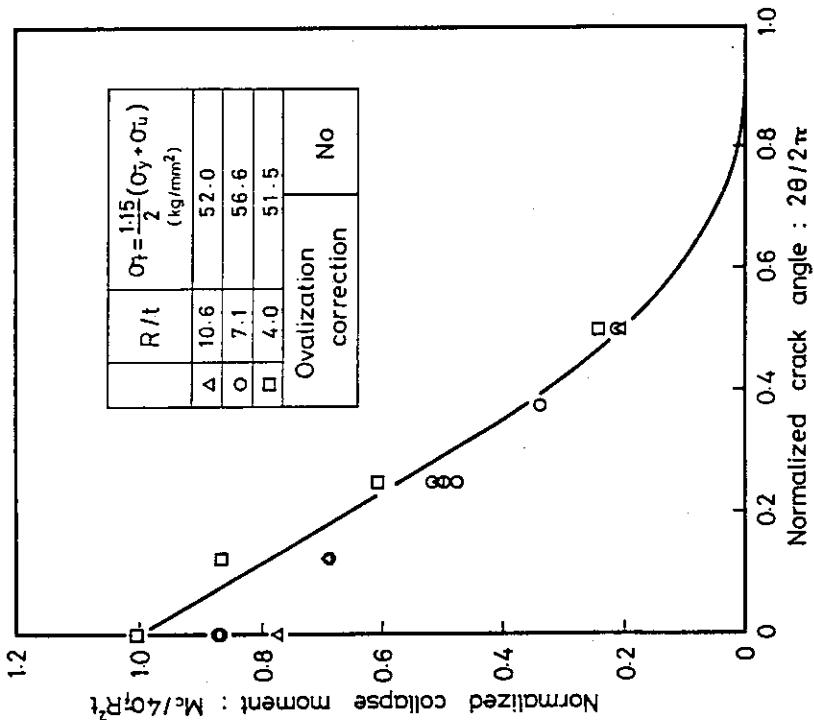


Fig. 6.7 Comparison of experimental data to net-section collapse criterion using $\sigma_f = 1.15(\sigma_y + \sigma_u)/2$ for circumferentially through-wall cracked SUS304 stainless steel pipe

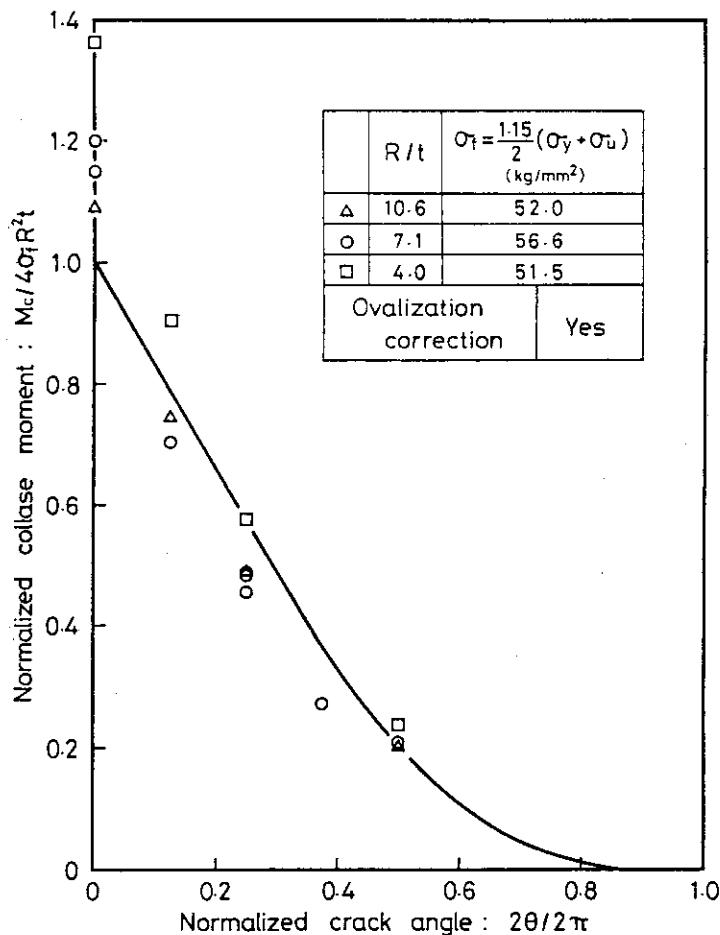


Fig. 6.9 Comparison of experimental data to net-section collapse criterion using $\sigma_f = 1.15(\sigma_y + \sigma_u)/2$ for circumferentially through-wall cracked SUS304 stainless steel pipes considering ovalization correction

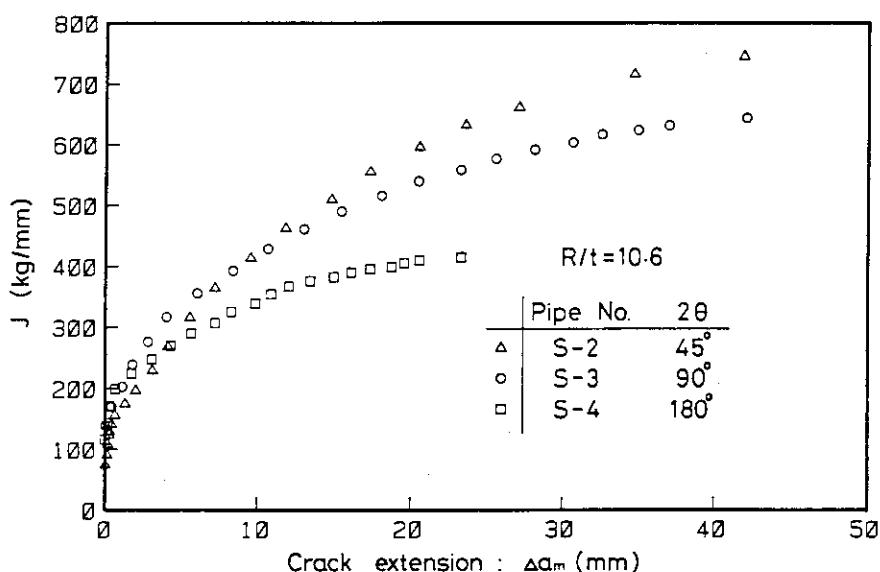


Fig. 6.10 Effect of initial crack angle (2θ) on J-R curves under $R/t = 10.6$ using 3-inch diameter SUS304 pipes

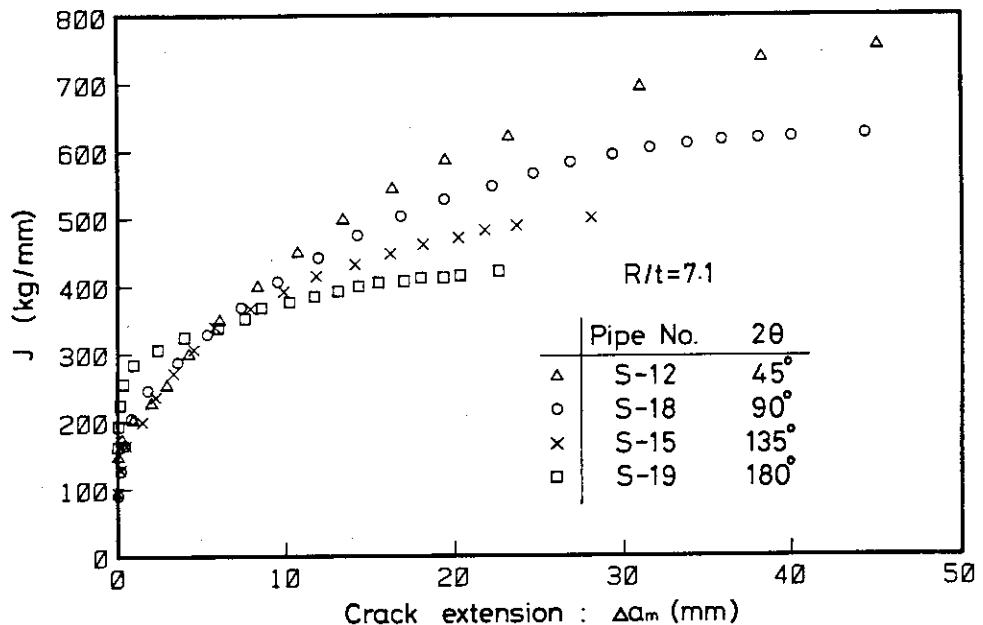


Fig. 6.11 Effect of initial crack angle (2θ) on J-R curves under $R/t = 7.1$ using 3-inch diameter SUS304 pipes

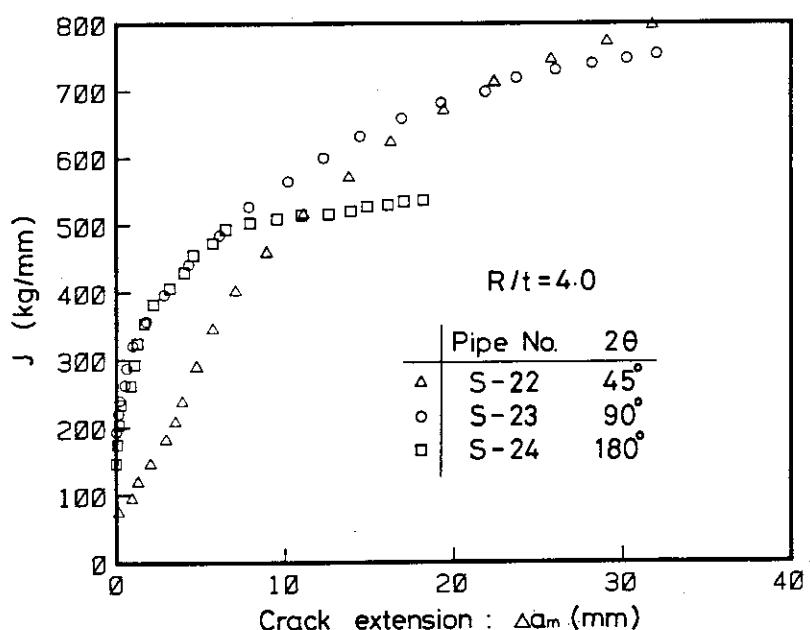


Fig. 6.12 Effect of initial crack angle (2θ) on J-R curves under $R/t = 4.0$ using 3-inch diameter SUS304 pipes

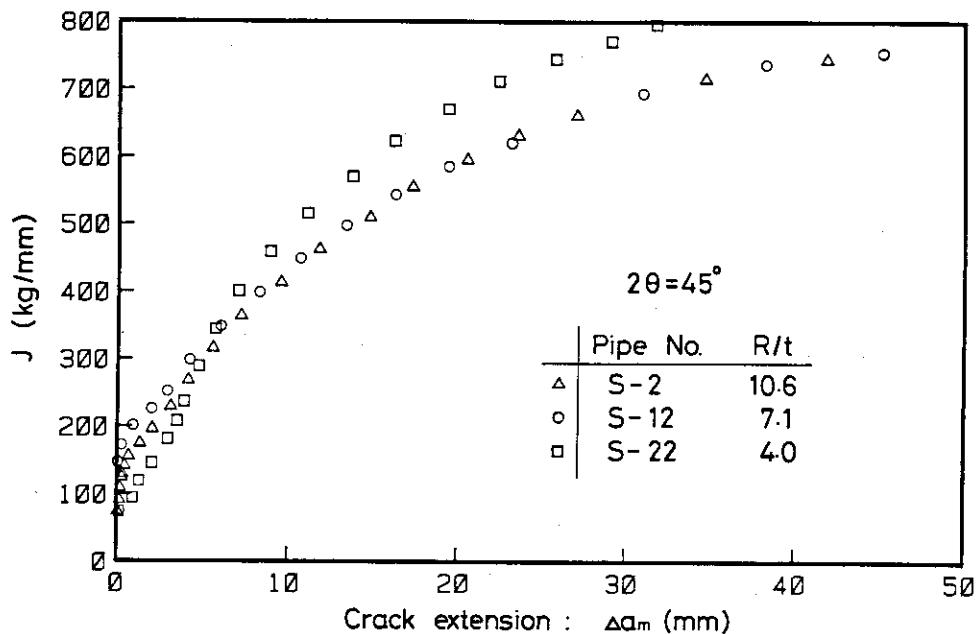


Fig. 6.13 Effect of R/t on J-R curves under $2\theta = 45^\circ$ using 3-inch diameter SUS304 pipes

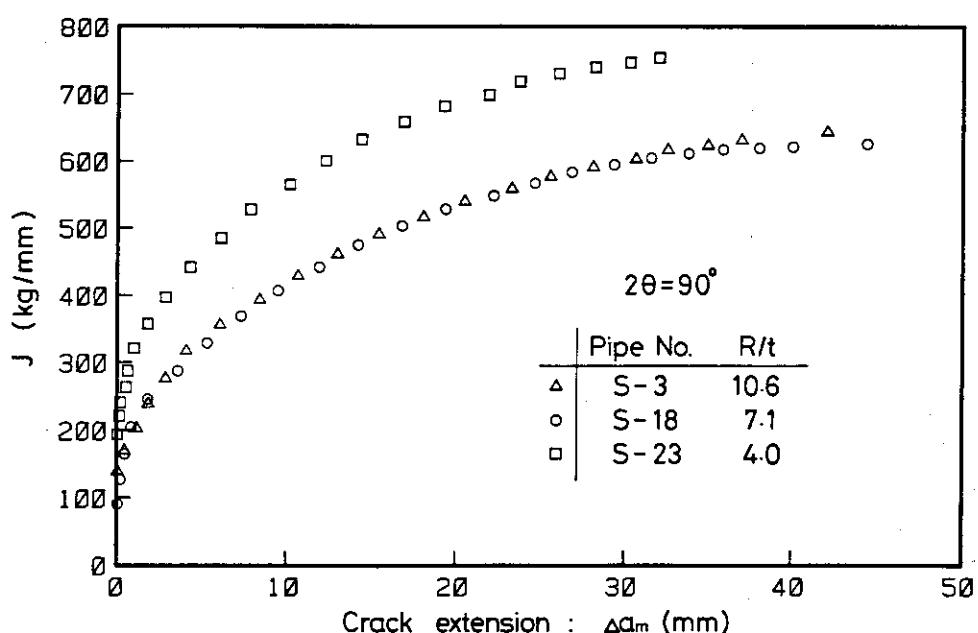


Fig. 6.14 Effect of R/t on J-R curves under $2\theta = 90^\circ$ using 3-inch diameter SUS304 pipes

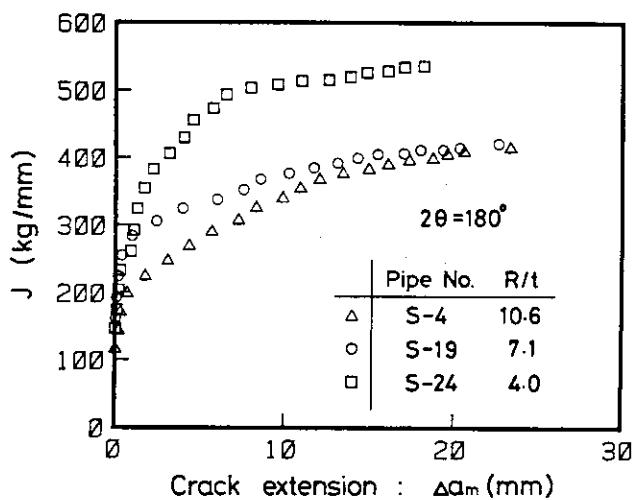


Fig. 6.15 Effect of R/t on J-R curves under $2\theta = 180^\circ$ using 3-inch diameter SUS304 pipes

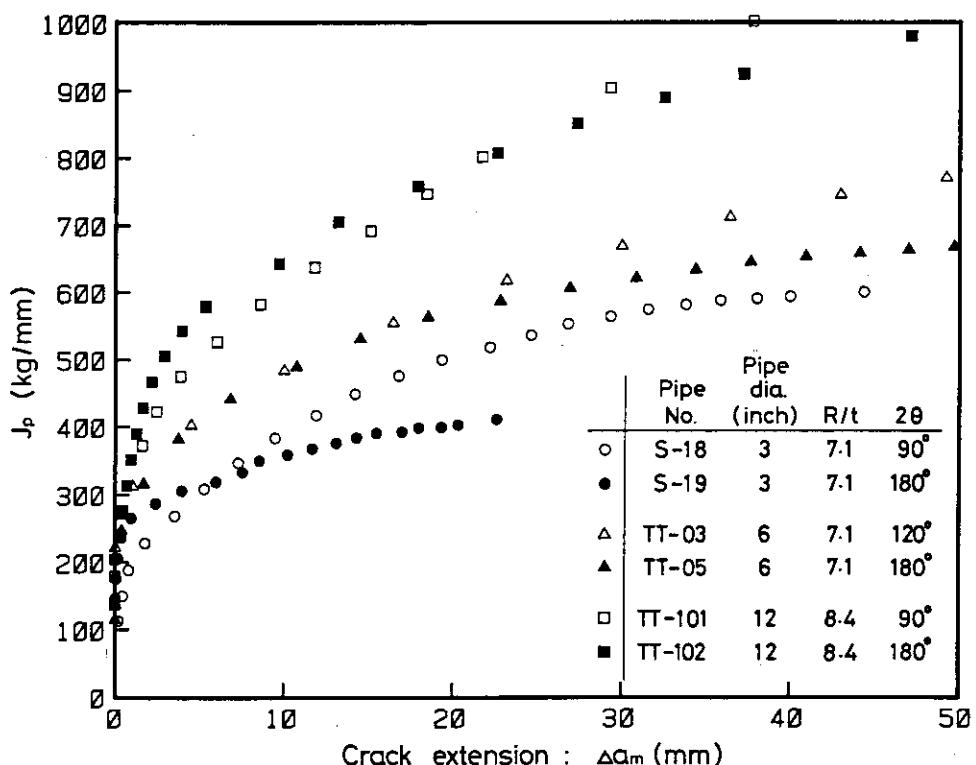


Fig. 6.16 Effect of pipe diameter on J-R curves using SUS304 pipes

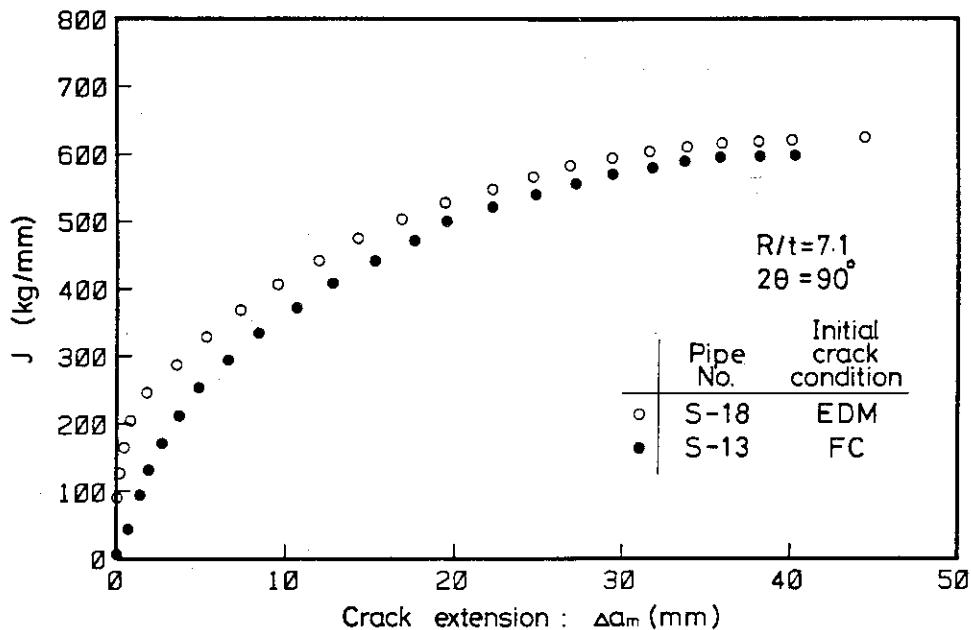


Fig. 6.17 Comparison of J-R curves between EDM notch and fatigue crack using 3-inch diameter SUS304 pipes

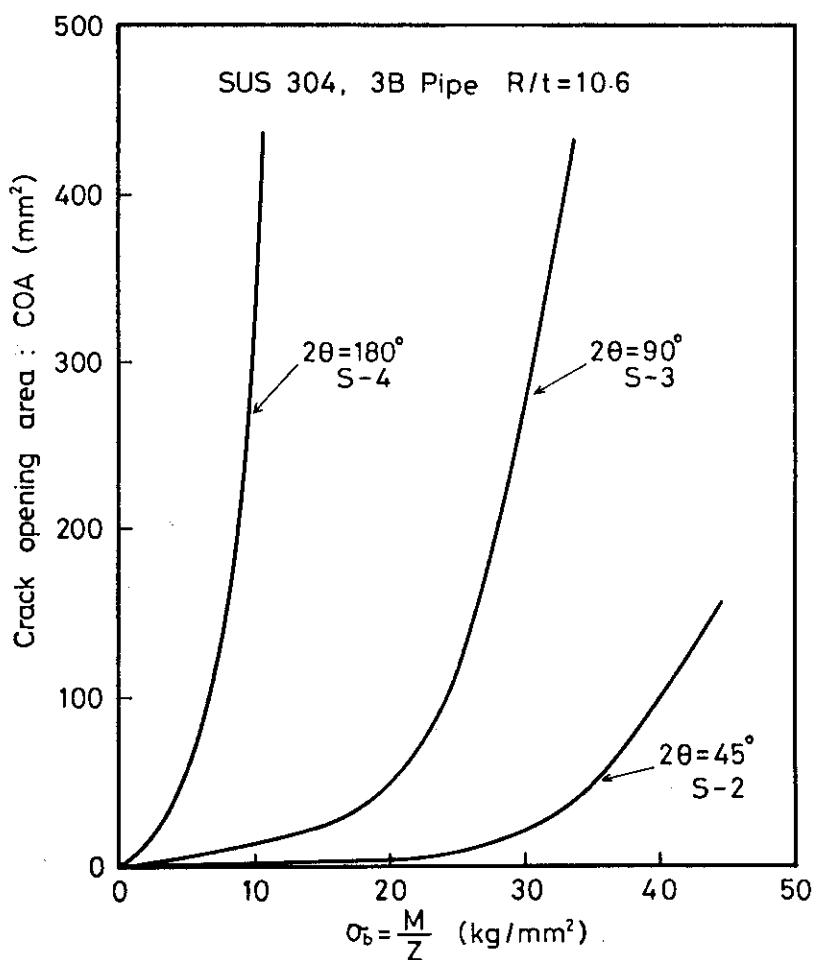


Fig. 6.18 Results of crack opening area measurement using 3-inch diameter SUS304 pipes of $R/t = 10.6$

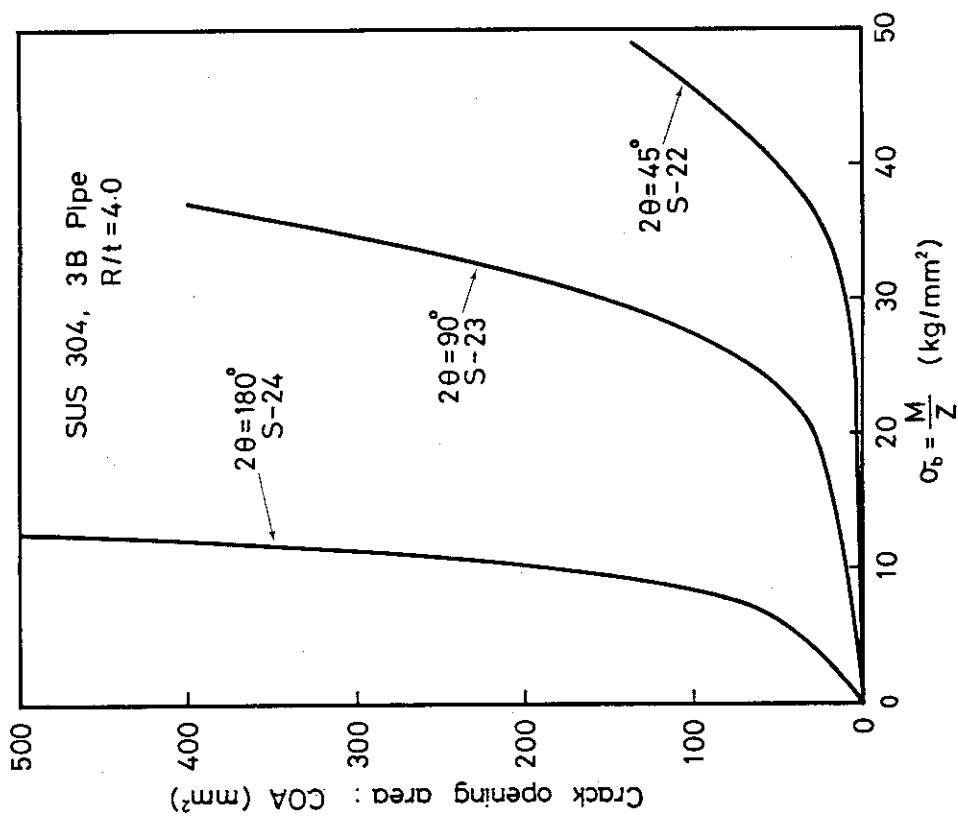


Fig. 6.20 Results of crack opening area measurement using 3-inch diameter SUS304 pipes of $R/t = 4.0$.

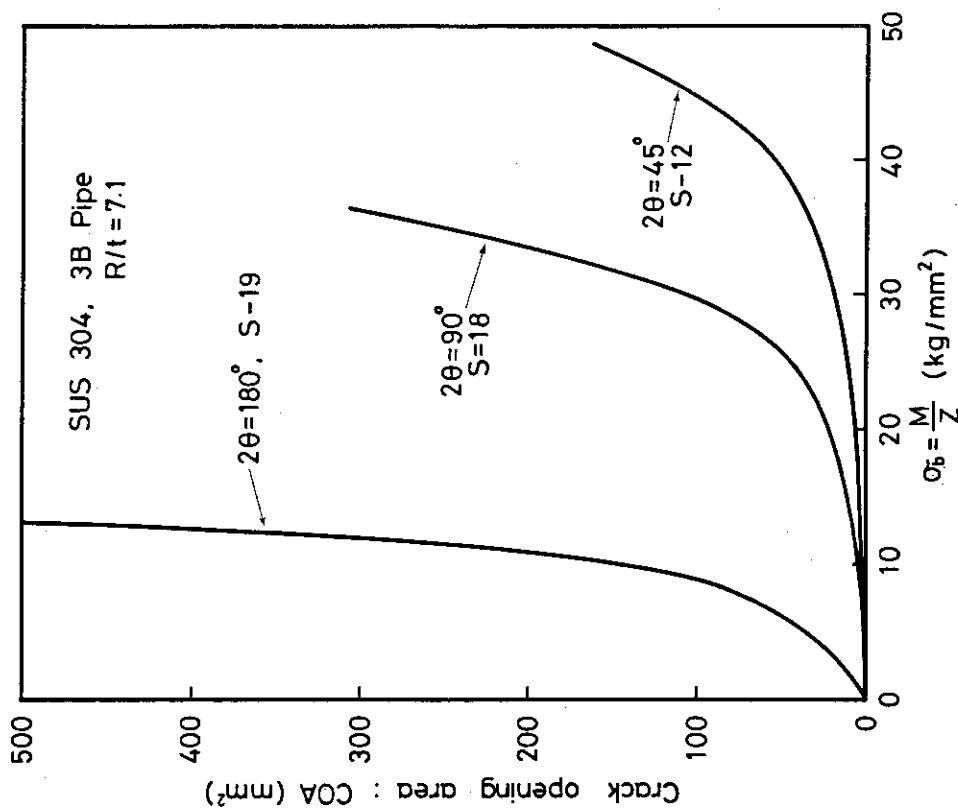
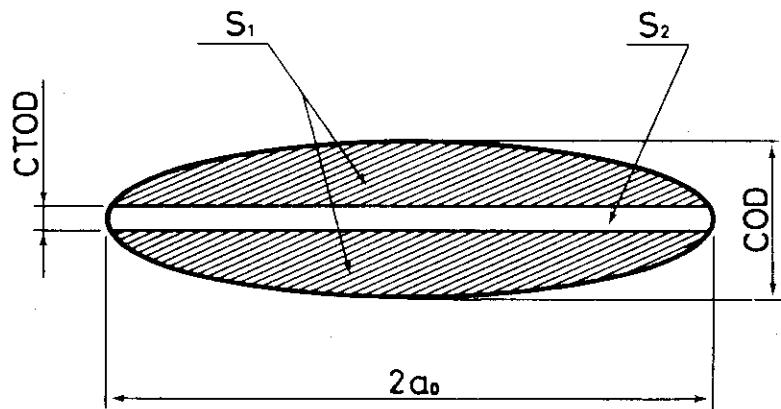


Fig. 6.19 Results of crack opening area measurement using 3-inch diameter SUS304 pipes of $R/t = 7.1$.



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

$$S_2 = 2a_0 \cdot CTOD$$

Fig. 6.21 Simple estimation model which can estimate COA approximately from formula (6.9)

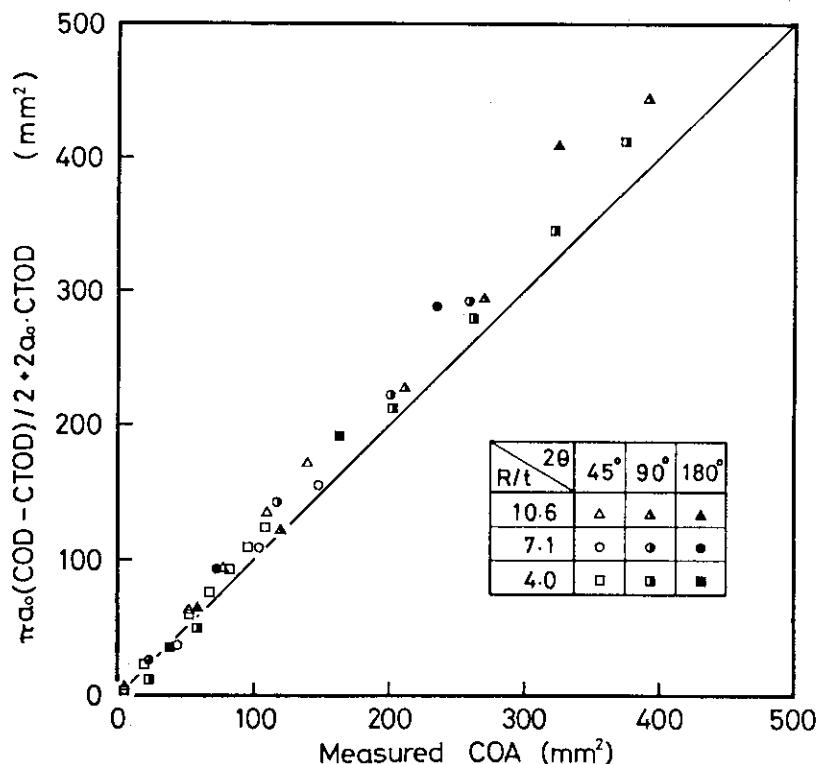


Fig. 6.22 Correlation between estimated COA from formula (6.9) and measured COA

7. 結 論

半径肉厚比 R/t が、 10.6, 7.1, 4.0, 外径が 3 インチの周方向貫通切欠き付オーステナイト系ステンレス鋼配管 SUS 304 TP を用いて室温大気中において四点曲げ試験を実施し、以下の項目を測定した。

- (1) 荷重 - 荷重点変位曲線
- (2) COD, CTOD - 荷重点変位曲線
- (3) き裂進展量, 外径, き裂開口形状

以上の測定結果を基にして、次に示す項目について検討を行った。

- (1) 偏平化挙動の評価
- (2) 周方向貫通切欠きを有する配管の実断面応力基準による崩壊モーメントの予測
- (3) J - R 曲線によるき裂進展抵抗の評価
- (4) き裂開口面積の評価

以上の結果、下記に示す結論が得られた。

- (1) ステンレス製 3 インチ口径配管の偏平化率は、半径肉厚比 R/t による依存性は小さい。しかし、初期切欠き角度 2θ に大きく依存し、 2θ が小さい時は x 方向に偏平化する。しかし、 2θ の増加に伴って y 方向への偏平化に移行する。そして、初期切欠き角度 2θ が 60° 付近の時に x 方向から y 方向への偏平化へ移行する。
- (2) 周方向貫通切欠き付配管の崩壊モーメントは、式 (6.2) に示す流動応力を基にした実断面応力基準により安全側に予測できる。
- (3) 配管の偏平化補正を行った場合、切欠きなしの時の崩壊モーメントは、実断面応力基準による予測値を大幅に上回った。
- (4) 3 インチ口径配管の J - R 曲線は、初期切欠き角度 2θ に依存し、 2θ が小さいほどき裂発生時の J 値は低い。しかし、き裂がある程度以上進展すると、この傾向は逆転し、 2θ が小さいほど J 値は高い値を示した。
- (5) 半径肉厚比 R/t が 10.6 と 7.1 の時の J - R 曲線は、初期切欠き角度 2θ が一定であればほぼ一致し、 R/t の影響は小さい。しかし、管肉厚が厚い $R/t = 4.0$ の場合、J 値は、 $R/t = 10.6, 7.1$ の場合よりも大きな値を示した。
- (6) 3 インチ口径配管の J - R 曲線は、切欠き尖鋭度の影響を受ける。放電加工切欠きによる J - R 曲線は、疲労き裂による J - R 曲線を約 - 2.5 mm x 軸方向に平行移動したものと一致した。
- (7) 配管の J - R 曲線は、配管口径の影響を受け、配管径が大きくなるほど J 値は高くなる。
- (8) 冷却材漏洩流量評価の際に必要となるき裂開口面積 COA に関する実験データを $0 \leq COA \leq 500 (\text{mm}^2)$ 、曲げ応力 σ_b を $0 \leq \sigma_b \leq 50 (\text{kg/mm}^2)$ の範囲で取得した。
- (9) き裂開口面積は、き裂先端部の CTOD、き裂中央部の COD、初期き裂長さ $2a_0$ から式 (6.7) ~ 式 (6.9) により良好に推定出来る。

謝 辞

本試験の遂行に関して、原子力エンジニアリング（株）八木岡隆一氏及び大浦博文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) 10 CFR 50, Appendix A; General Design Criteria For Nuclear Power Plants, Criterion 4, 1976
- 2) Regulatory Guide 1.4b; "Protection Against Pipe Whip Inside Containment", 1973
- 3) Inside NRC, Vol. 7, No. 1, January, 1985
- 4) Nuclenorics Week, Vol. 2b, No. 3, January, 1985
- 5) K. Kussmaul 他 ; "Experience in the replacement of safety related piping in German Boiling Water Reactor", SMIRT Post Conference Seminar, 1985
- 6) G. Bartholome 他 ; "Preclusion of Double-Ended Circumferential Rupture of the Main Coolant Line", Nuclear Engineering and Design 72 (1982)
- 7) K. Kussmaul 他 ; "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, Mar. 1983, Stuttgart
- 8) G. Bartholome 他 ; "Exclusion of Failure of the Pressure Retaining Coolant System, Part 2: Application to the Primary Coolant Piping", ibid.
- 9) 10 CFR 50, Appendix A; General Design Criteria for Nuclear Power Plants, Criterion 4, 1986. 4
- 10) Federal Register, Vol. 51, No. 141, Proposed Rules, July, 1986
- 11) 例えば , M. Norris 他 ; "Evaluation of Flaws in Austenitic Steel Piping", EPR1 NP-4690-Sr, July, 1986 等
- 12) G.M. Wilkowsky 他 ; "Degraded Piping Program - Phase II", NUREG/CR-4082, BMI-2120, Vol. 1, Jan. 1985
- 13) G.M. Wilkowsky 他 ; "Degraded Piping Program - Phase II", NUREG/CR-4082, BMI-2120, Vol. 2, Jul. 1985
- 14) G.M. Wilkowsky 他 ; "Degraded Piping Program - Phase II", NUREG-4082, BMI-2120, Vol. 3, Mar. 1986
- 15) G.M. Wilkowsky 他 ; "Degraded Piping Program - Phase II", NUREG-4082, BMI-2120, Vol. 4, Sept. 1986
- 16) G.M. Wilkowsky 他 ; "Analysis and Low-Energy Test Results of Degraded Piping", Nuclear Engineering and Design, 89 (1985)
- 17) 原子力産業新聞, 昭和60年3月7日.
- 18) 柴田他 ; "曲げ荷重を受ける欠陥付SUS304鋼製6インチ管の延性不安定破壊挙動" 日本機械学会講演論文集 No.840-10, 1984 .

- 19) 柴田他 ; "Ductile Fracture Behavior of Circumferentially Cracked Type 304 Stainless Steel Piping Under Bending Load", Nuclear Engineering and Design 94 (1986)
- 20) 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.
- 21) K. Shibata 他 ; "Investigation and Evaluation of Ductile Fracture Behaviors in LWR Piping Under Bending Load", 9th SMIRT に投稿中.
- 22) 柴田他 ; "貫通または未貫通欠陥を有する 6 インチ口径SUS304 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 .
- 23) 金子他 ; "軽水炉配管材の延性不安定破壊に関する研究ー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ー" JAERI-M 85-064, 1985 .
- 24) 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)ー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ー" JAERI-M 86-098 , 1986 .
- 25) M.K. Kanninen 他 ; "Mechanical Fracture Predictions for Sensitized Stainless Steel Piping with Circumferential Cracks", EPR1 NP-192, 1976
- 26) G.M. Wilkowsk; "Margins of Safety Based on Circumferential Cracked Depth Using the Net-Section Collapse Analysis", CSNI Specialist Meeting on Leak-Before-Break in Nuclear Reactor Piping, NUREG/CP-0051, CSNI Report No. 82 1983
- 27) P.C. Paris 他 ; "The Application of Fracture Proof Design Methods Using Tearing Instability Theory to Nuclear Piping Postulating Circumferential Through Wall Cracks", NUREG/CR-3464, Sept. 1983
- 28) M.D. German 他 ; "Elastic-Plastic 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
- 29) R. Klecker 他 ; "NRC Leak-Before-Break (LBB. NRC) Analysis Method for Circumferentially Through-Wall Cracked Pipes Under Axial Plus Bending Loads", NUREG/CR-4572, MBI-2134
- 30) A. Zahoor 他 ; "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
- 31) J. Pan 他 ; "The Theory of Instability of the Tearing Mode of Elastic-Plastic Crack Growth", ASTM, STP668, 1979

付 錄

本付録には、試験で得られたつぎのデータを収録した。

- Appendix A 応力-ひずみ曲線（配管から切り出した引張試験片による）
- Appendix B 各試験体の COD 測定結果
- Appendix C 各試験体の CTOD 測定結果
- Appendix D き裂なし試験体のひずみ分布測定結果
- Appendix E 各試験体の J 値、き裂長さ等のデータ
- Appendix F 各試験体毎の J-R 曲線

Appendix A

Stress - strain curves

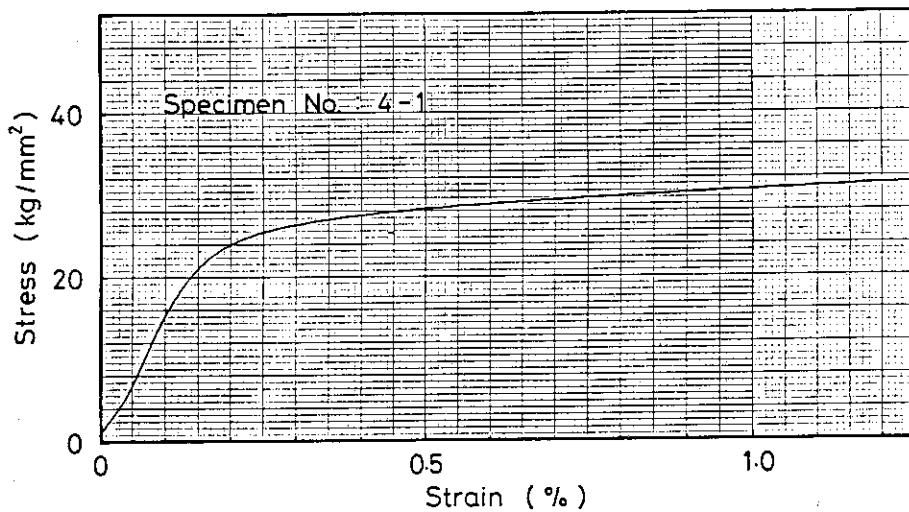


Fig. A.1a Stress-strain curve of Sch.40 SUS304 pipe
up to 1.25% strain at room temperature (4-1)

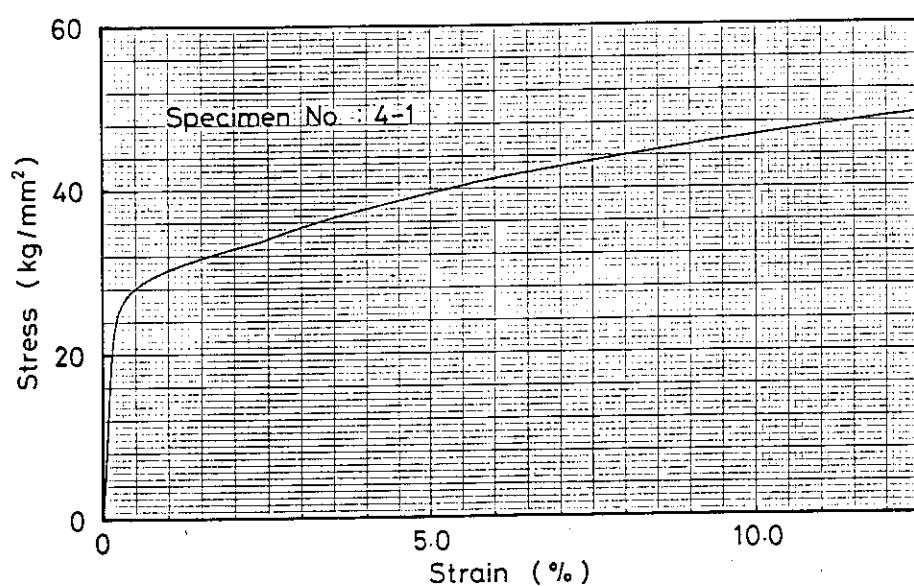


Fig. A.1b Stress-strain curve of Sch.40 SUS304 pipe
up to 12.5% strain at room temperature (4-1)

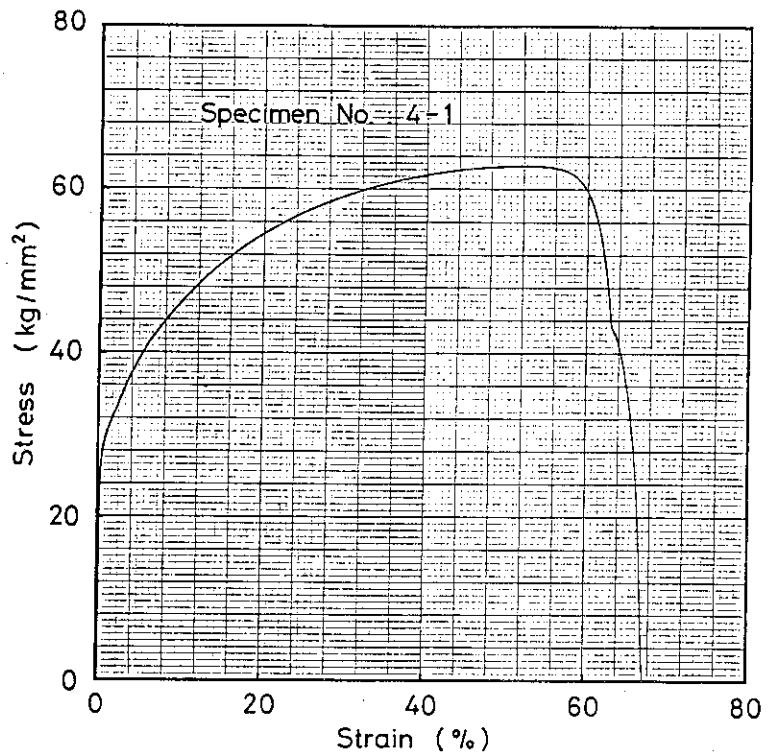


Fig. A.1c Stress-strain curve of Sch.40 SUS304 pipe
at room temperature

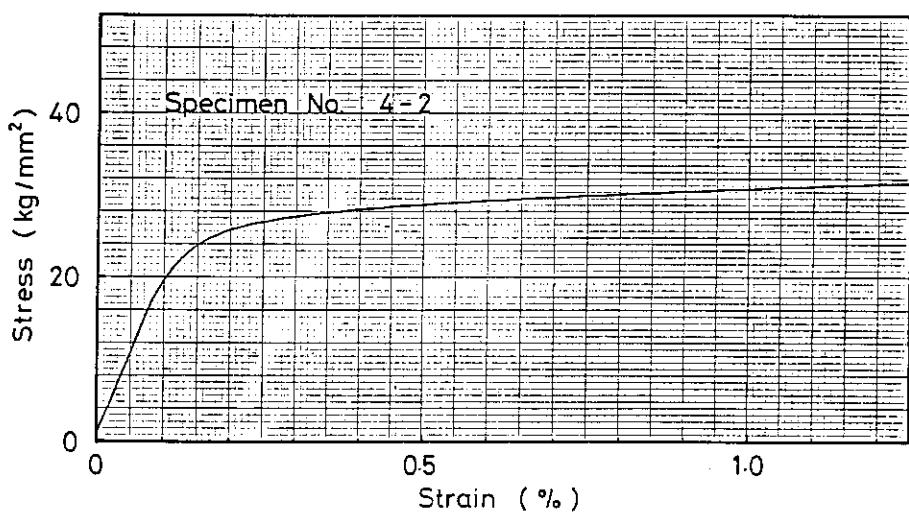


Fig. A.2a Stress-strain curve of Sch.40 SUS304 pipe
up to 1.25% strain at room temperature (4-2)

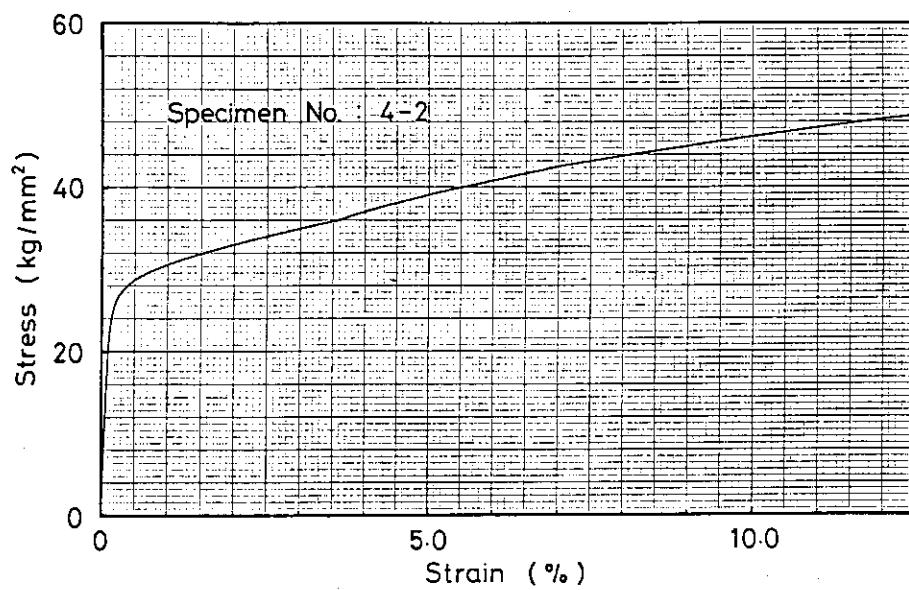


Fig. A.2b Stress-strain curve of Sch.40 SUS304 pipe up to 12.5% strain at room temperature (4-2)

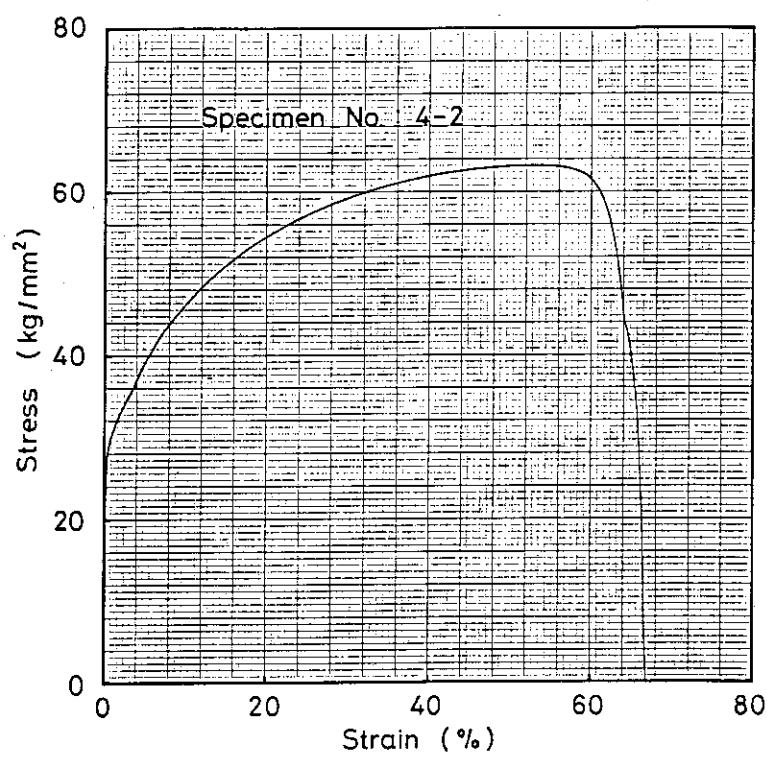


Fig. A.2c Stress-strain curve of Sch.40 SUS304 pipe at room temperature (4-2)

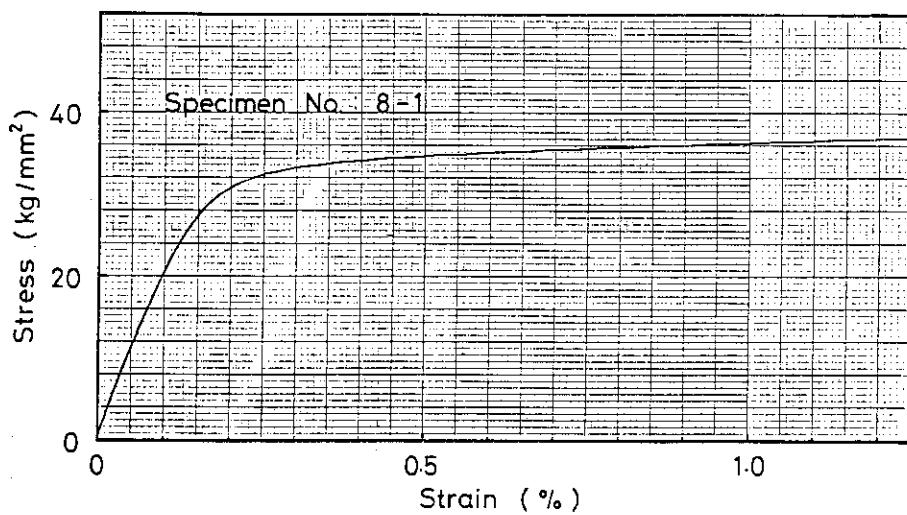


Fig. A.3a Stress-strain curve of Sch.80 SUS304 pipe
up to 1.25% strain at room temperature (8-1)

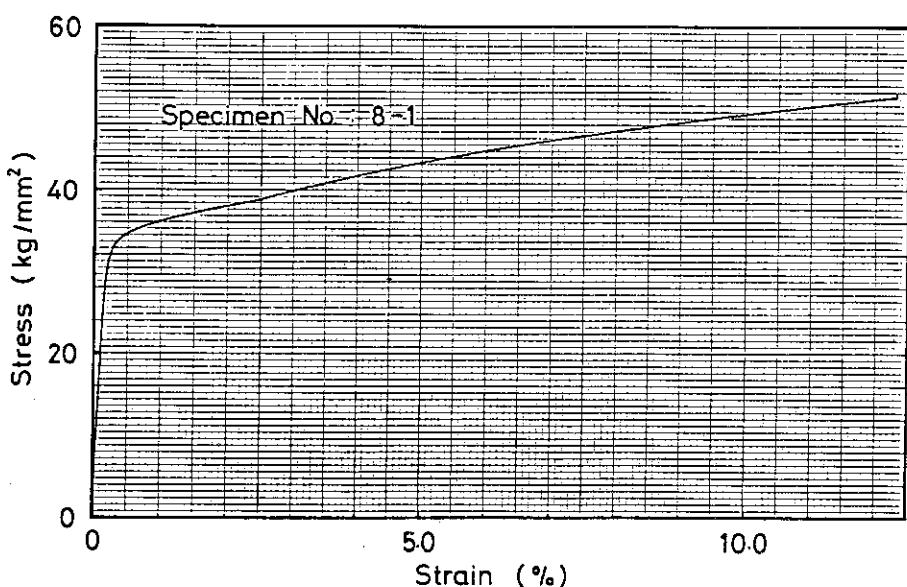


Fig. A.3b Stress-strain curve of Sch.80 SUS304 pipe
up to 12.5% strain at room temperature (8-1)

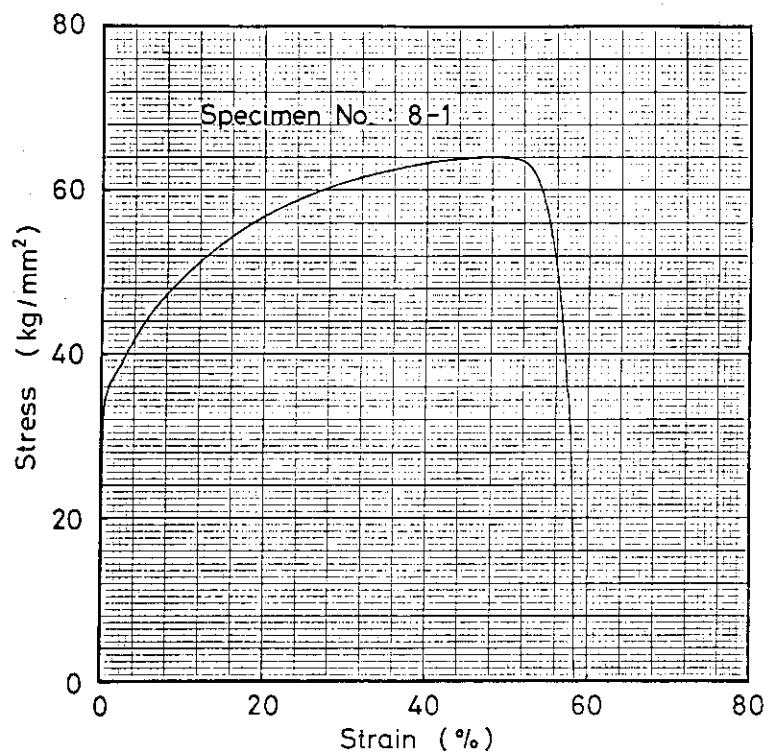


Fig. A.3c Stress-strain curve of Sch.80 SUS304 pipe
at room temperature (8-1)

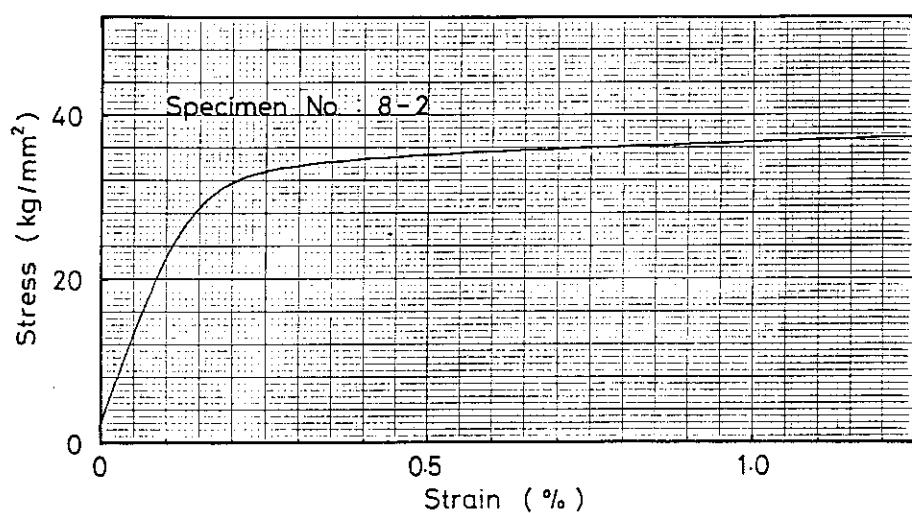


Fig. A.4a Stress-strain curve of Sch.80 SUS304 pipe
up to 1.25% strain at room temperature (8-2)

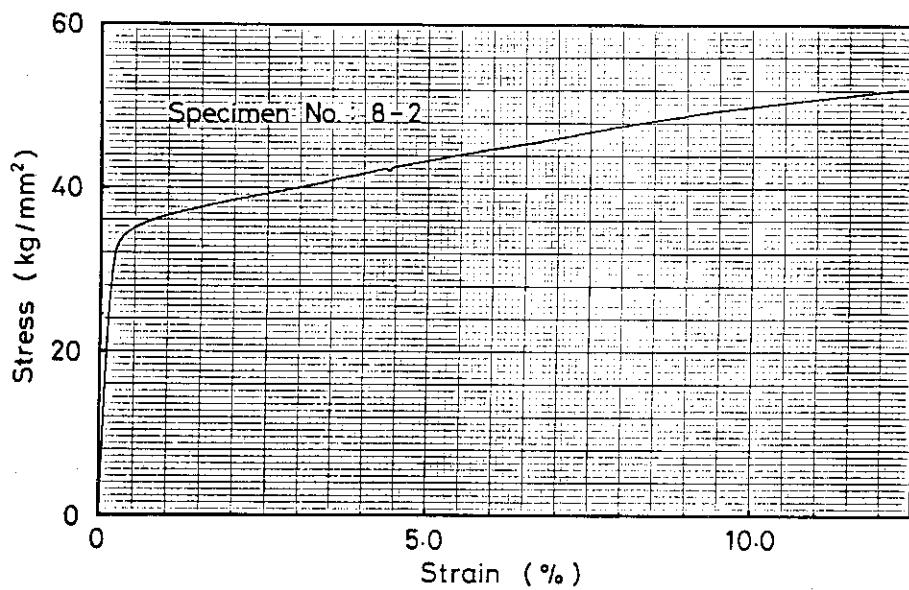


Fig. A.4b Stress-strain curve of Sch.80 SUS304 pipe
up to 12.5% strain at room temperature (8-2)

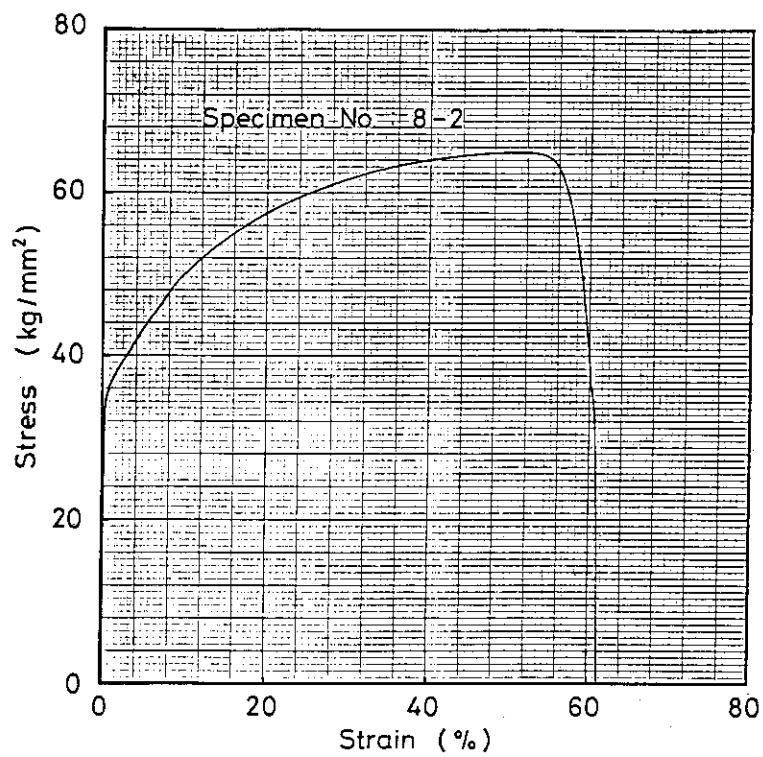


Fig. A.4c Stress-strain curve of Sch.80 SUS304 pipe
at room temperature (8-2)

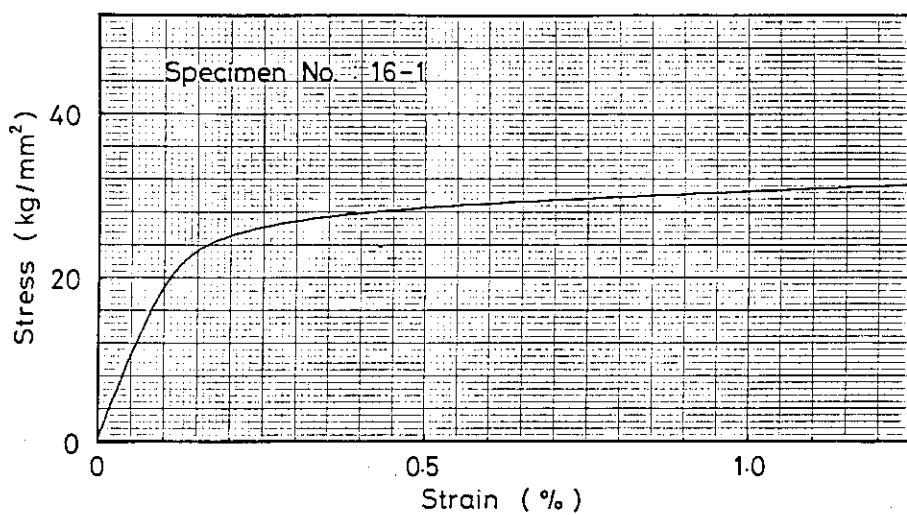


Fig. A.5a Stress-strain curve of Sch.160 SUS304 pipe
up to 1.25% strain at room temperature (16-1)

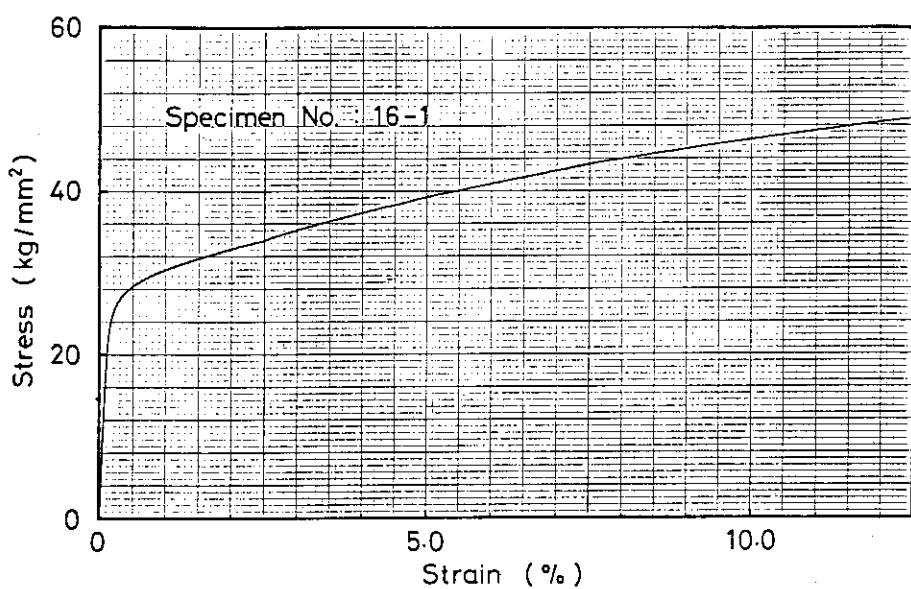


Fig. A.5b Stress-strain curve of Sch.160 SUS304 pipe
up to 12.5% strain at room temperature (16-1)

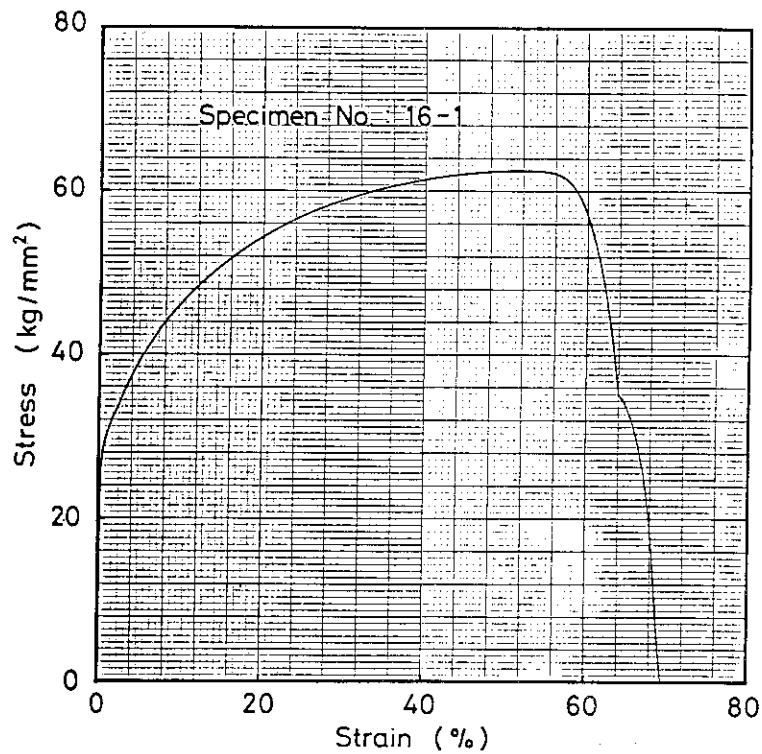


Fig. A.5c Stress-strain curve of Sch.160 SUS304 pipe
at room temperature (16-1)

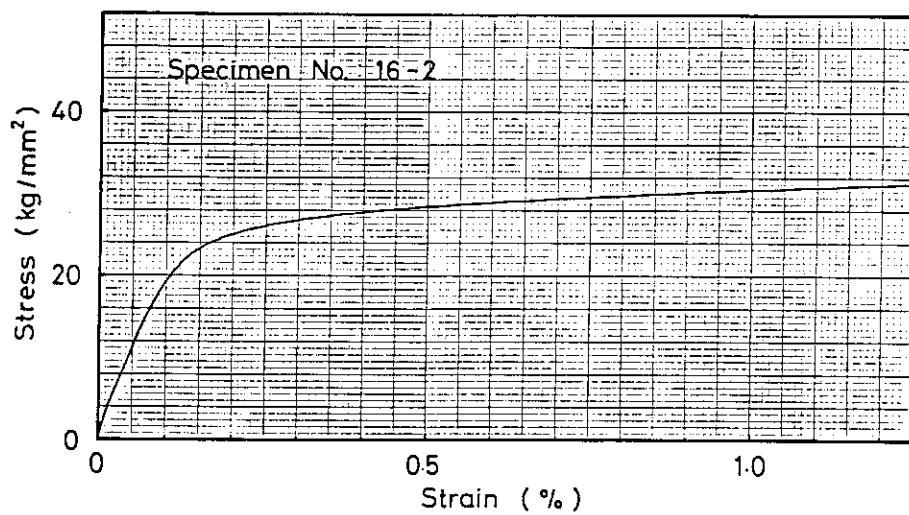


Fig. A.6a Stress-strain curve of Sch.160 SUS304 pipe
up to 1.25% strain at room temperature (16-2)

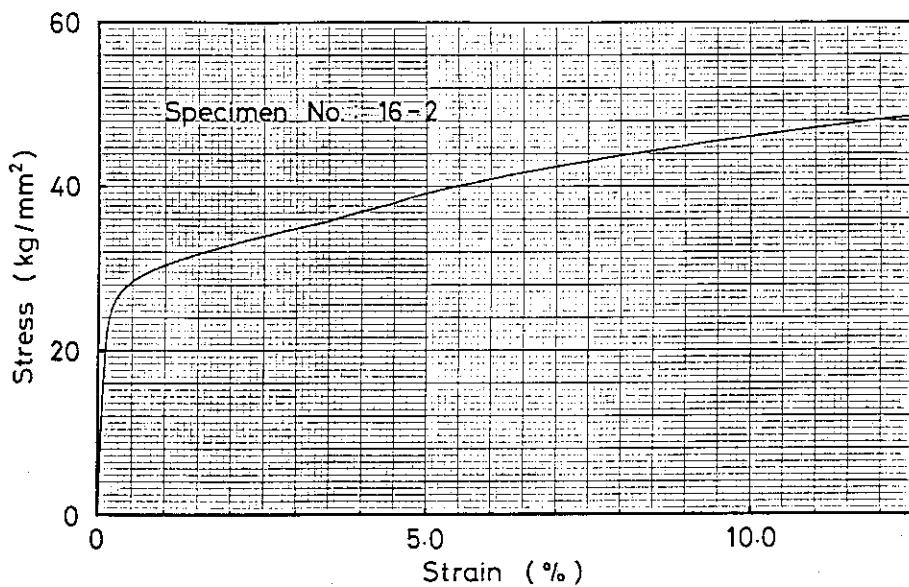


Fig. A.6b Stress-strain curve of Sch.160 SUS304 pipe
up to 12.5% strain at room temperature (16-2)

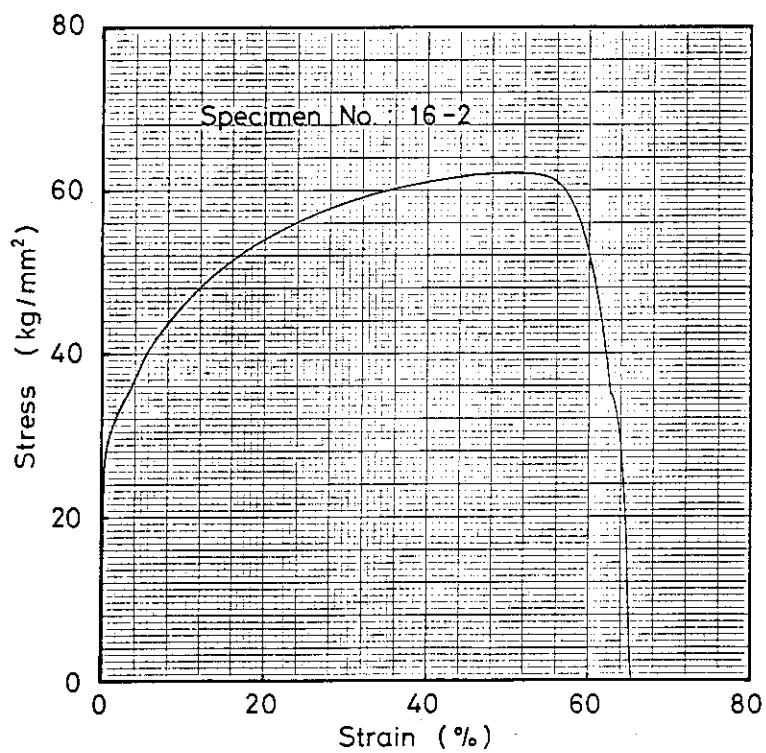


Fig. A.6c Stress-strain curve of Sch.160 SUS304 pipe
at room temperature (16-2)

Appendix B

Results of COD measurement

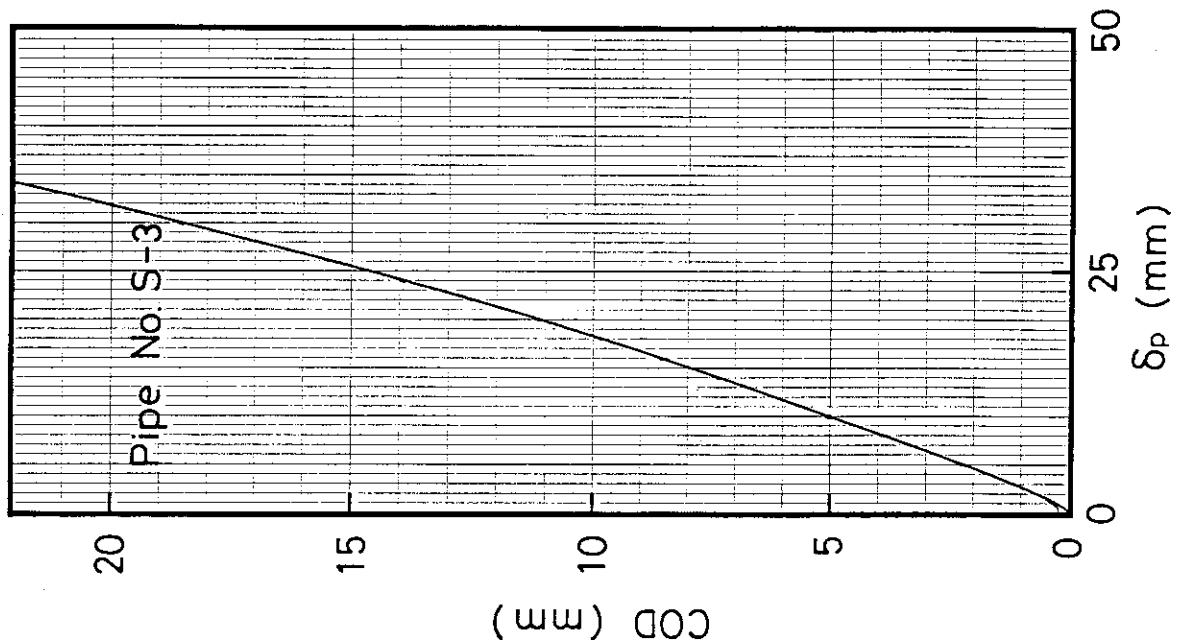


Fig. B.2 Result of COD measurement by S-3 test pipe

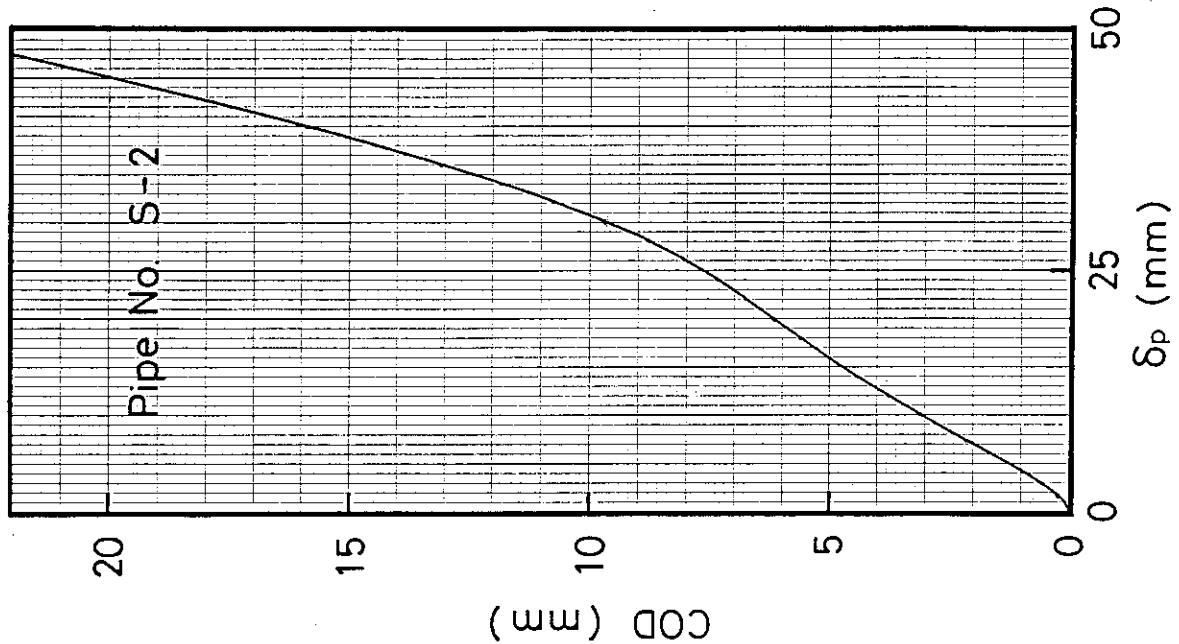


Fig. B.1 Result of COD measurement by S-2 test pipe

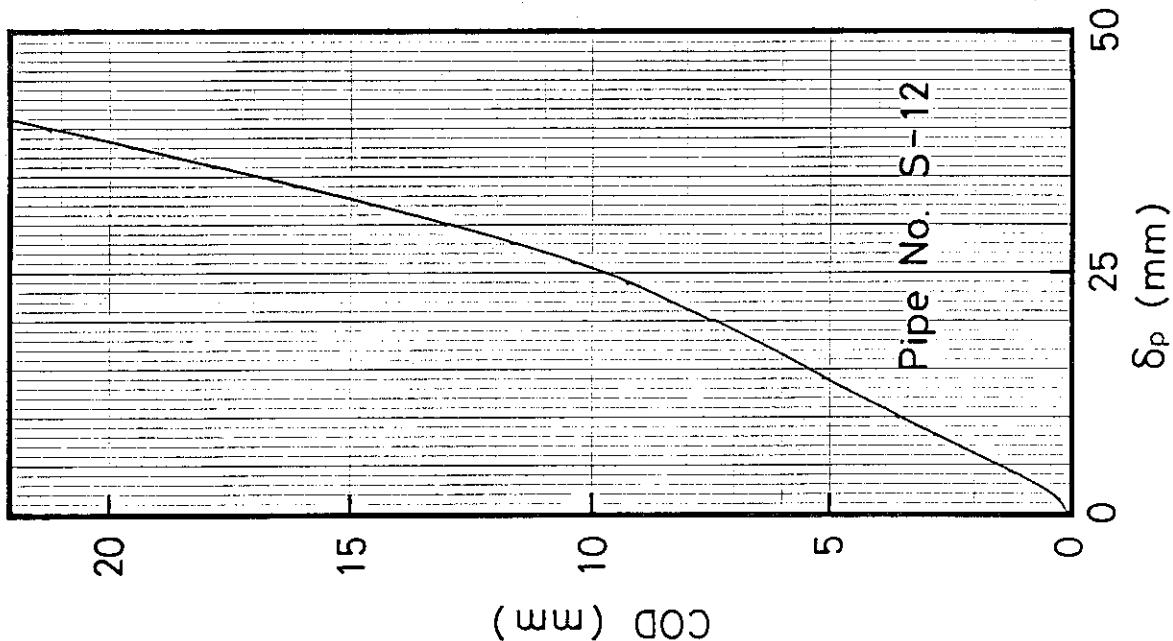


Fig. B.4 Result of COD measurement by S-12 test pipe

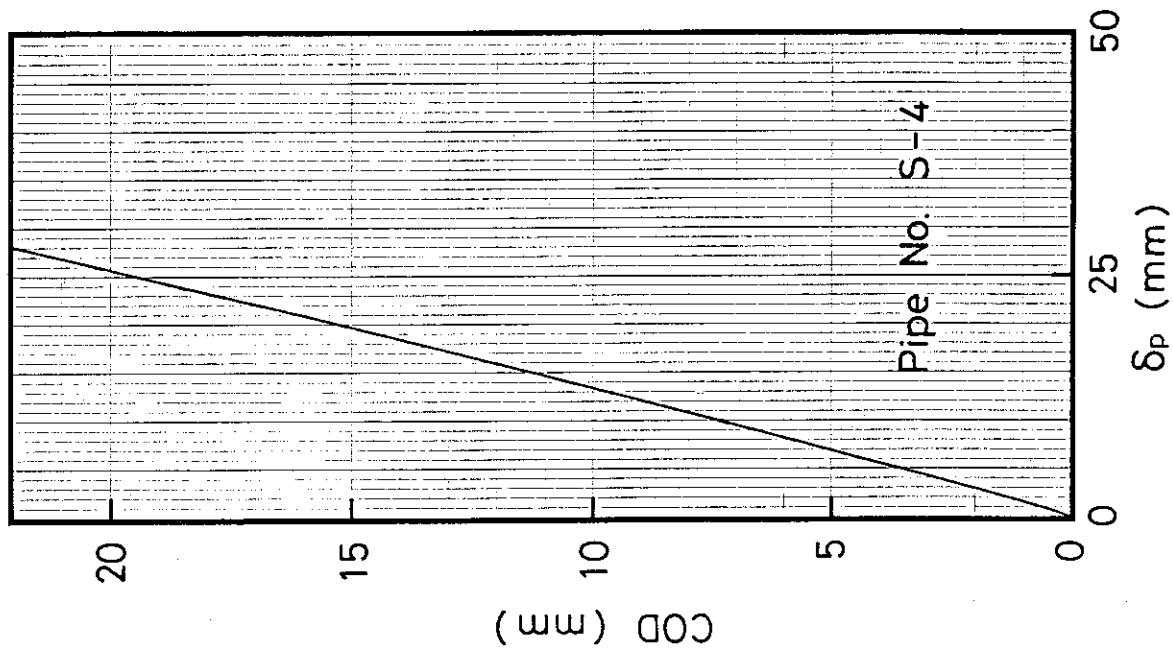
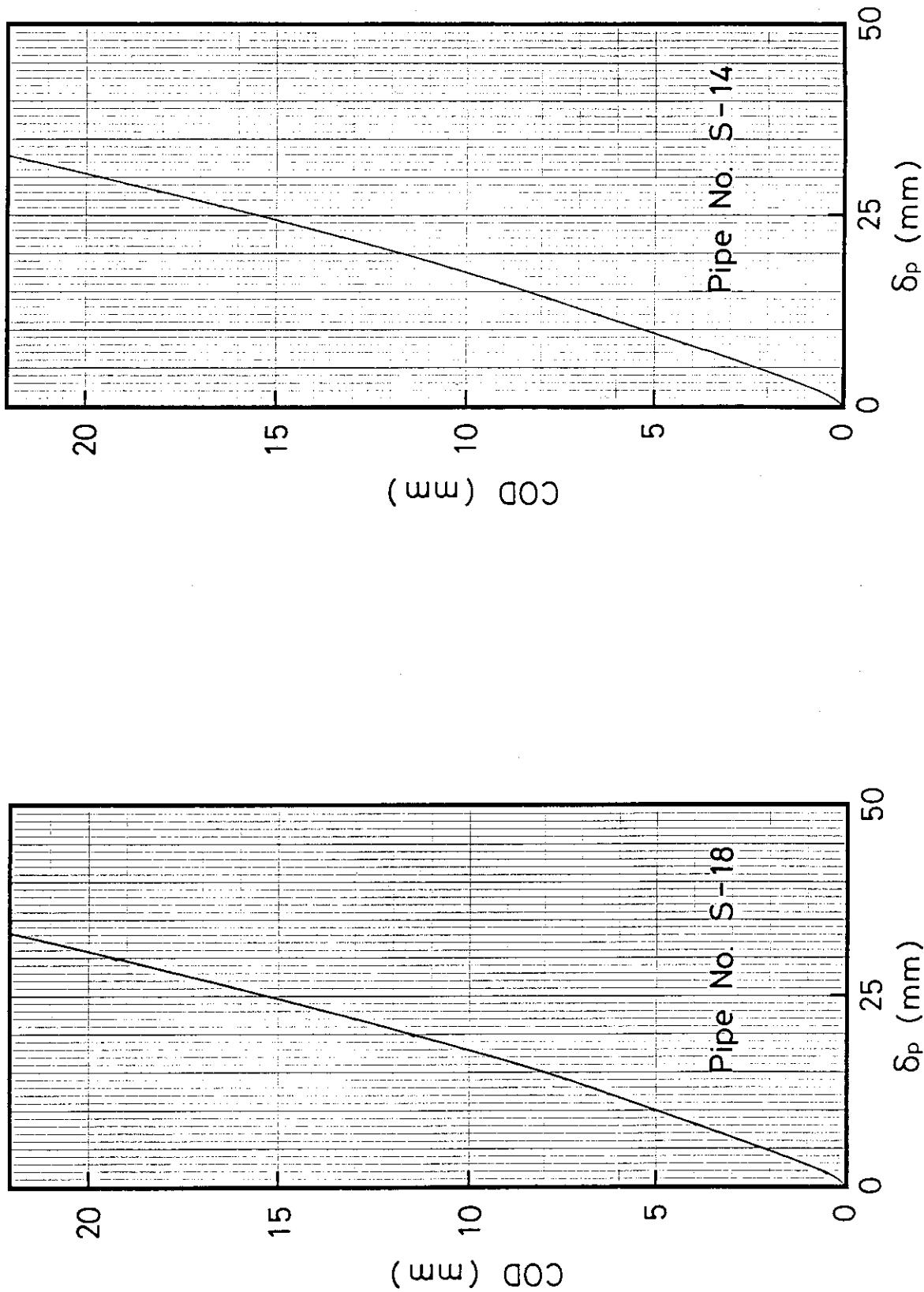


Fig. B.3 Result of COD measurement by S-4 test pipe



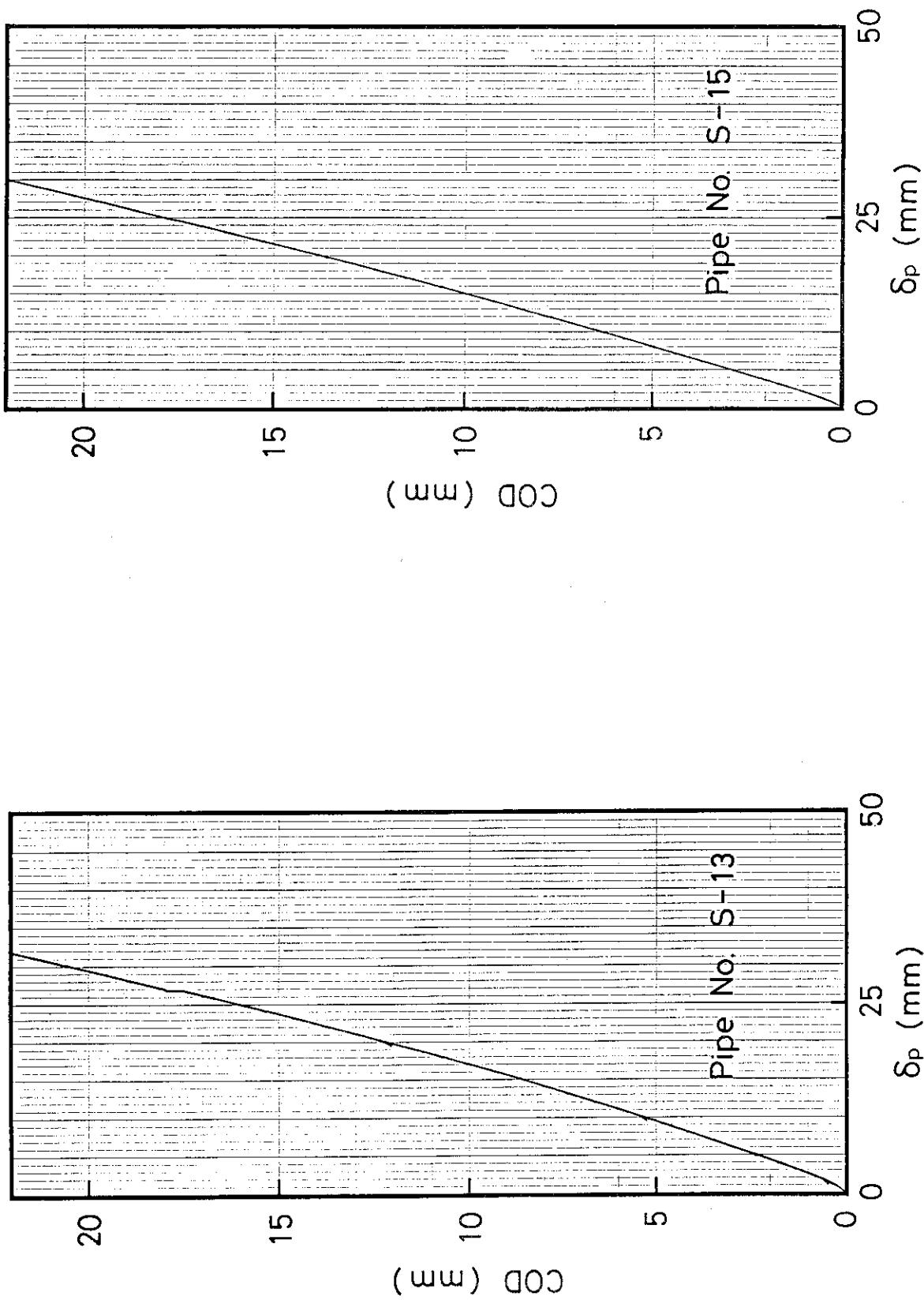


Fig. B.7 Result of COD measurement by S-13 test pipe

Fig. B.8 Result of COD measurement by S-15 test pipe

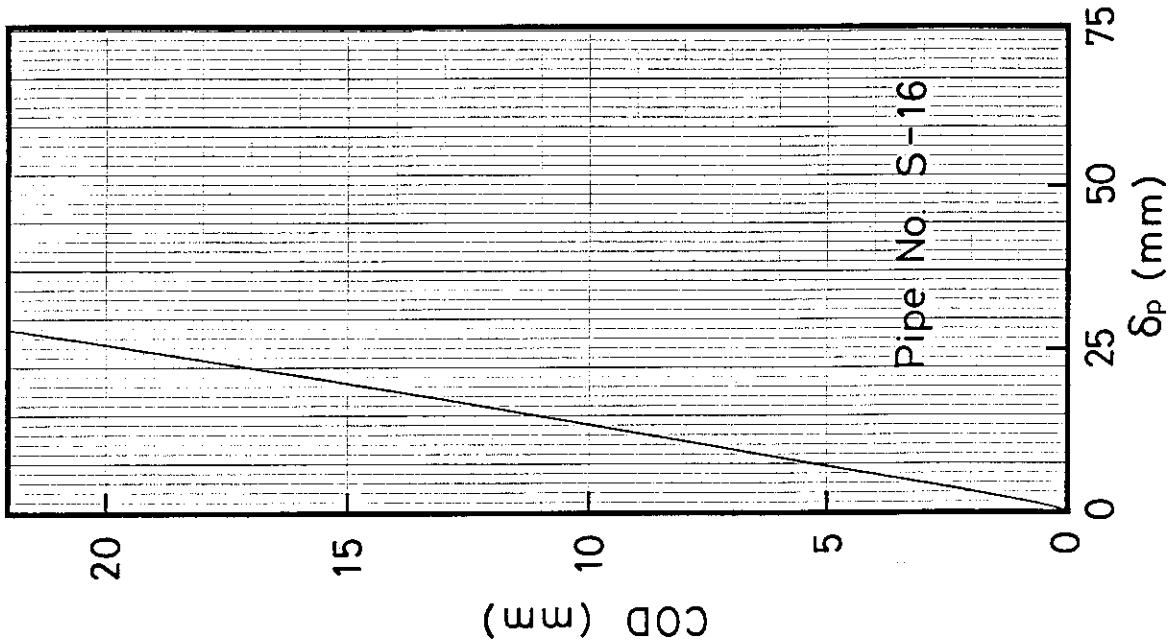


Fig. B.10 Result of COD measurement by S-16 test pipe

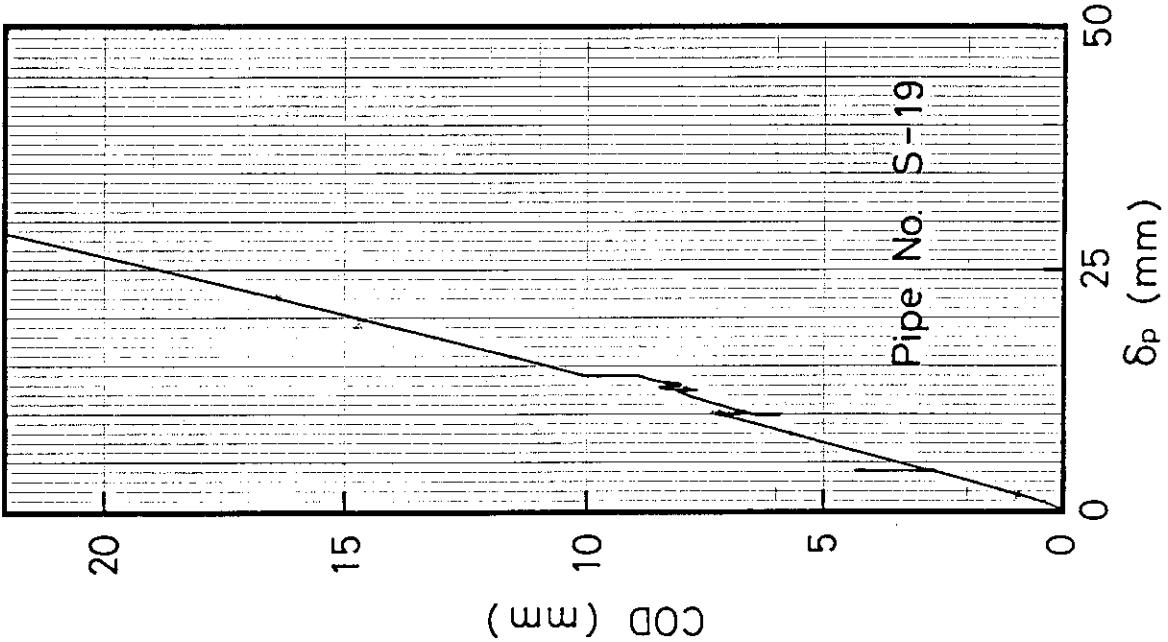


Fig. B.9 Result of COD measurement by S-19 test pipe

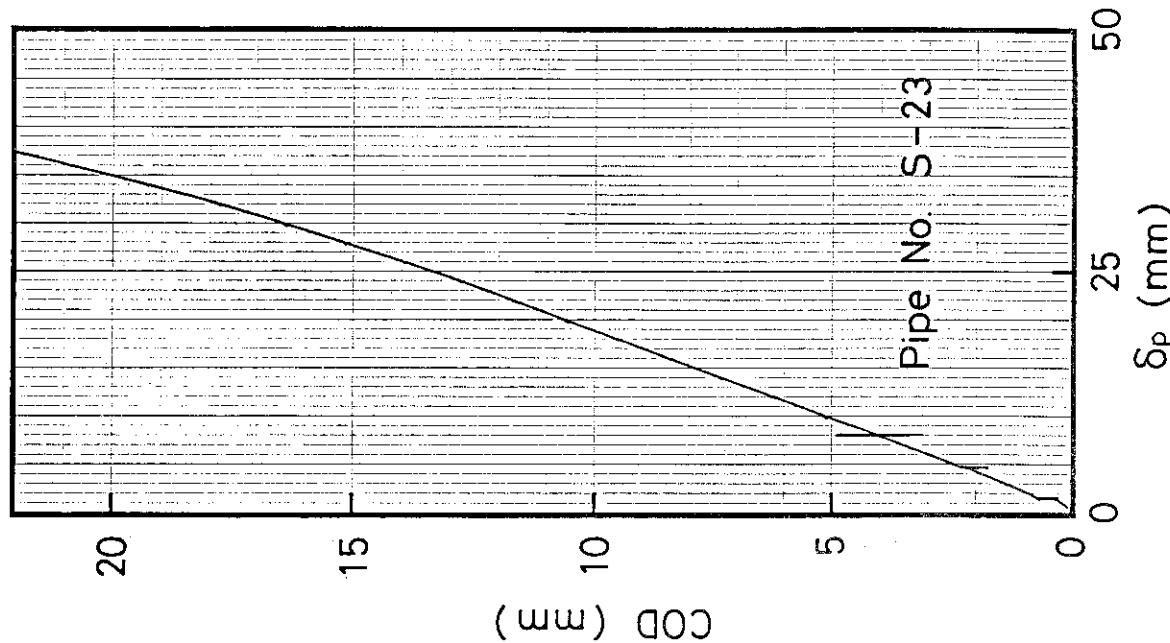


Fig. B.12 Result of COD measurement by S-23 test pipe

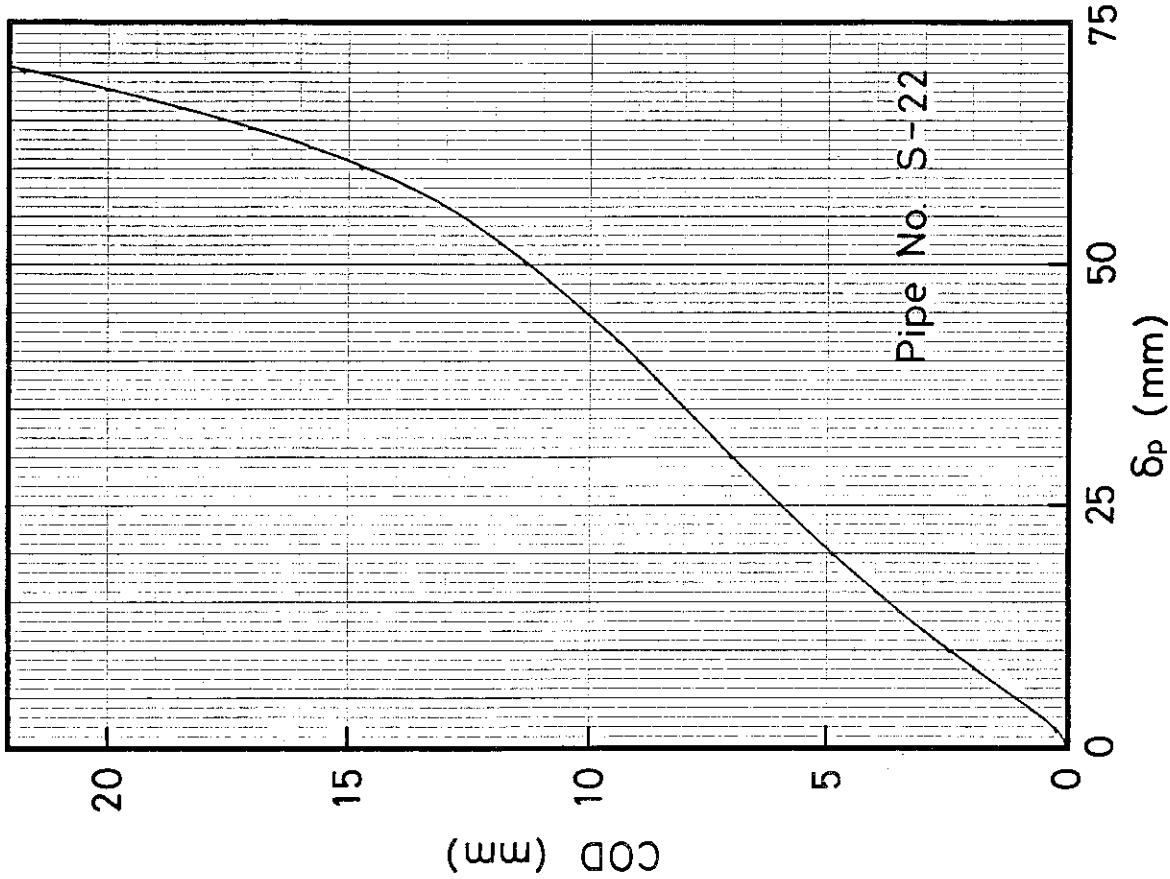


Fig. B.11 Result of COD measurement by S-22 test pipe

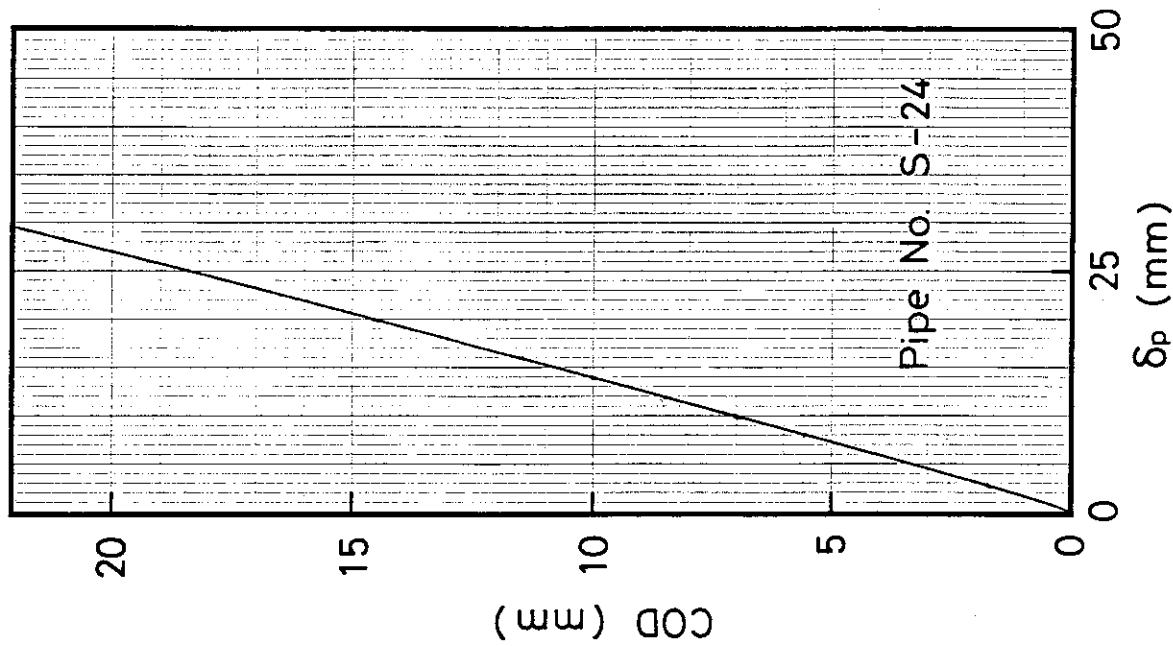


Fig. B.13 Result of COD measurement
by S-24 test pipe

Appendix C

Results of CTOD measurement

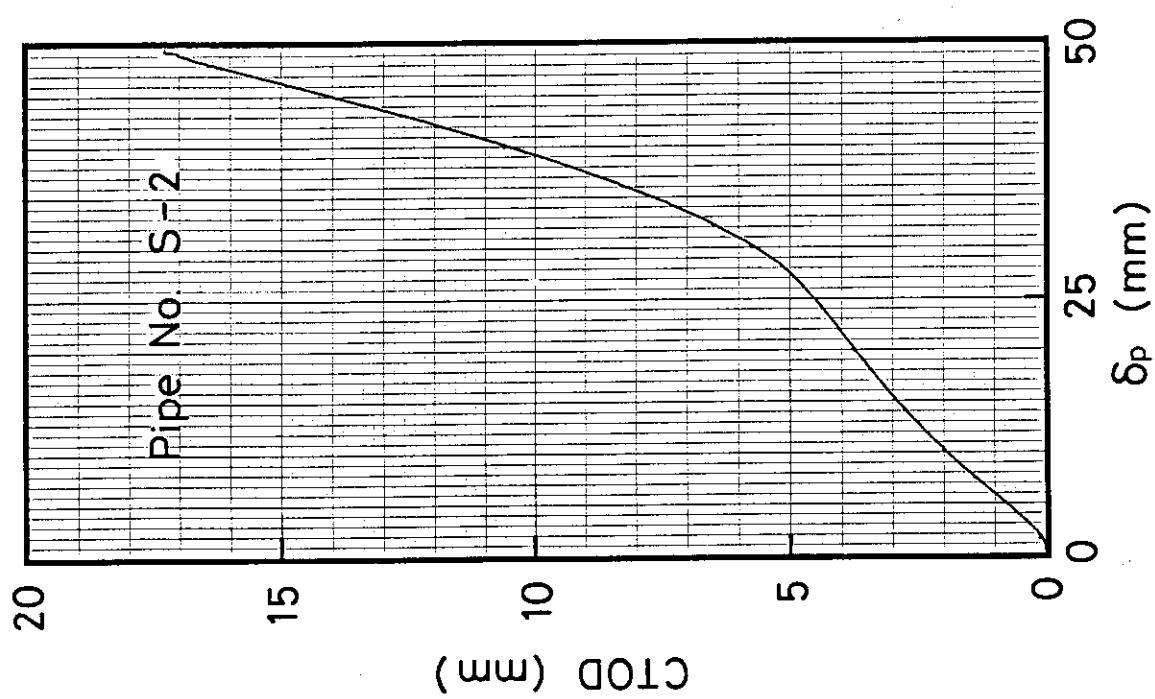


Fig. C.1 Result of CTOD measurement by S-2 test pipe

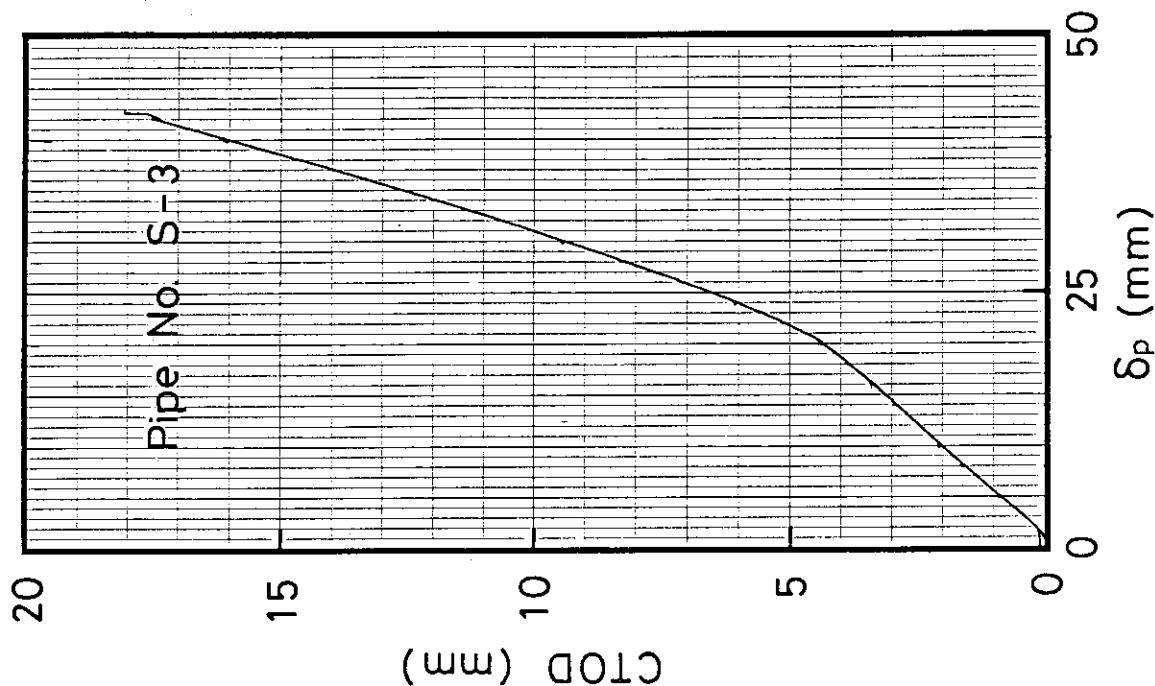


Fig. C.2 Result of CTOD measurement by S-3 test pipe

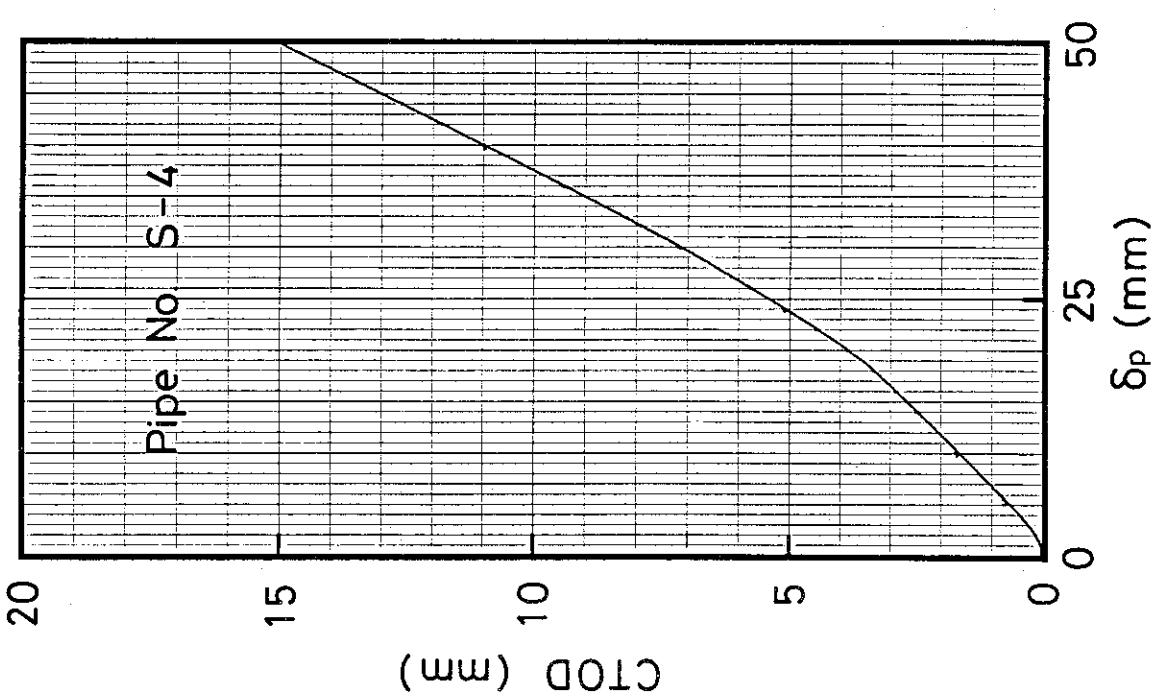


Fig. C.3 Result of CTOD measurement by S-4 test pipe

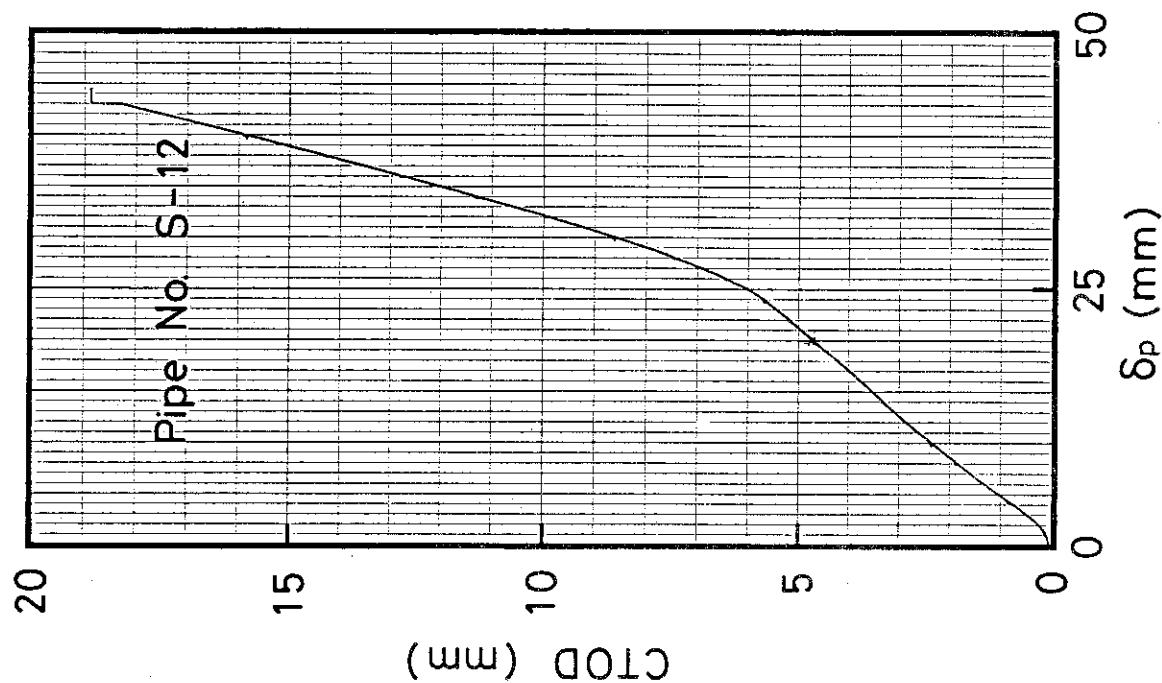


Fig. C.4 Result of CTOD measurement by S-12 test pipe

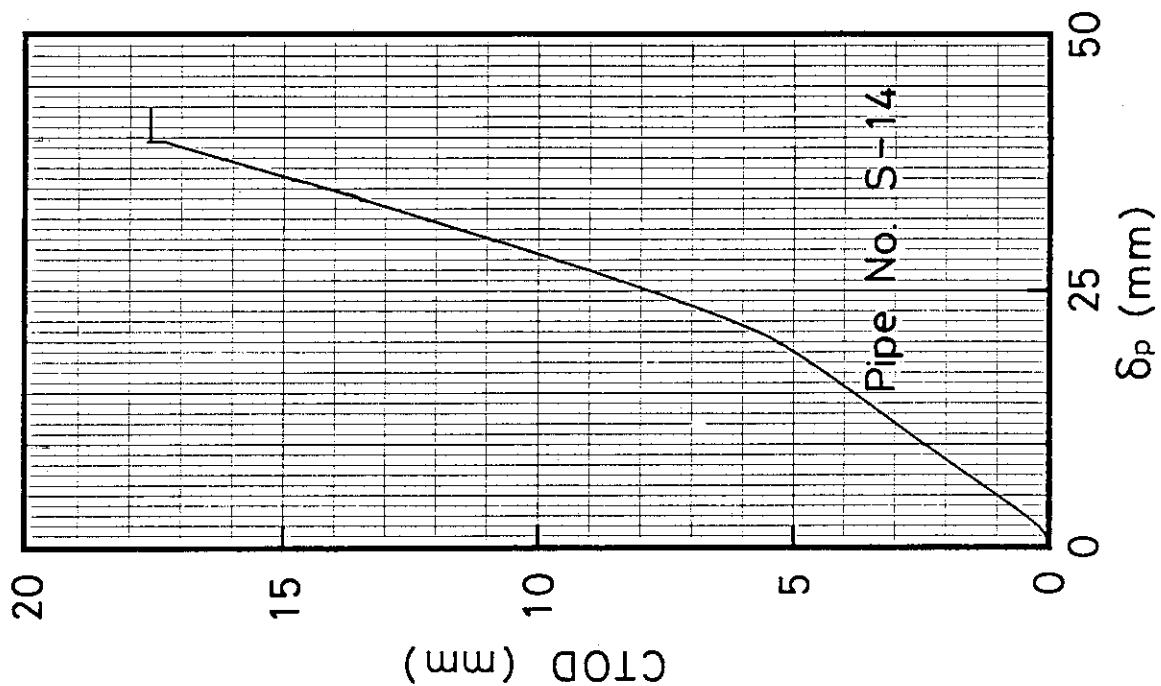


Fig. C.6 Result of CTOD measurement by S-14 test pipe

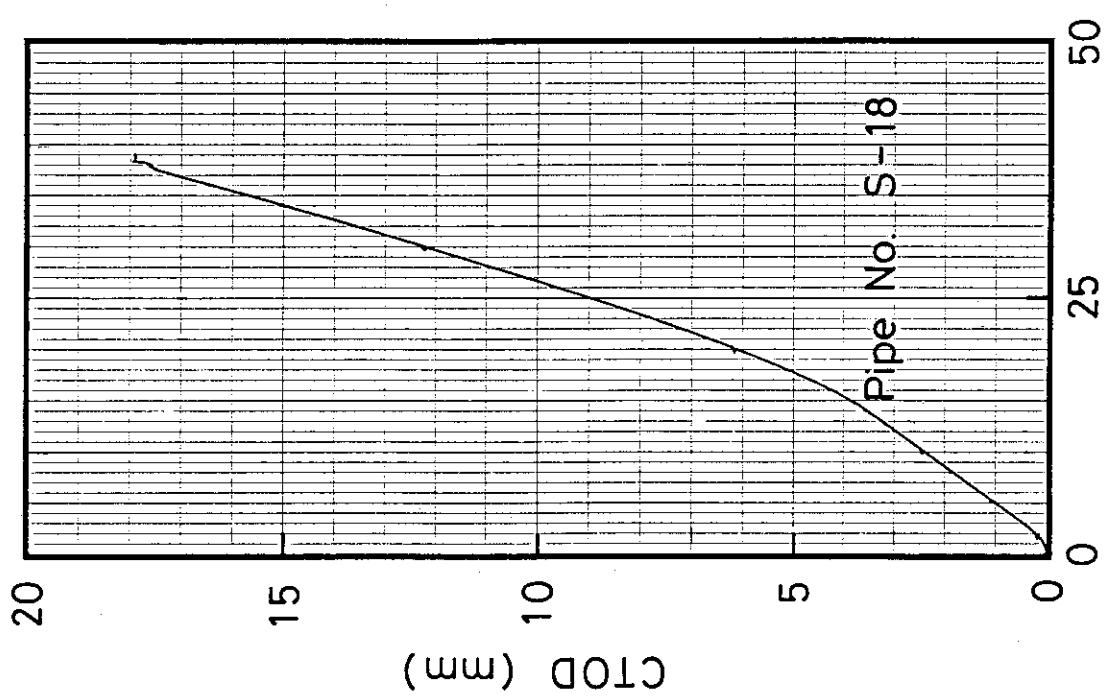


Fig. C.5 Result of CTOD measurement by S-18 test pipe

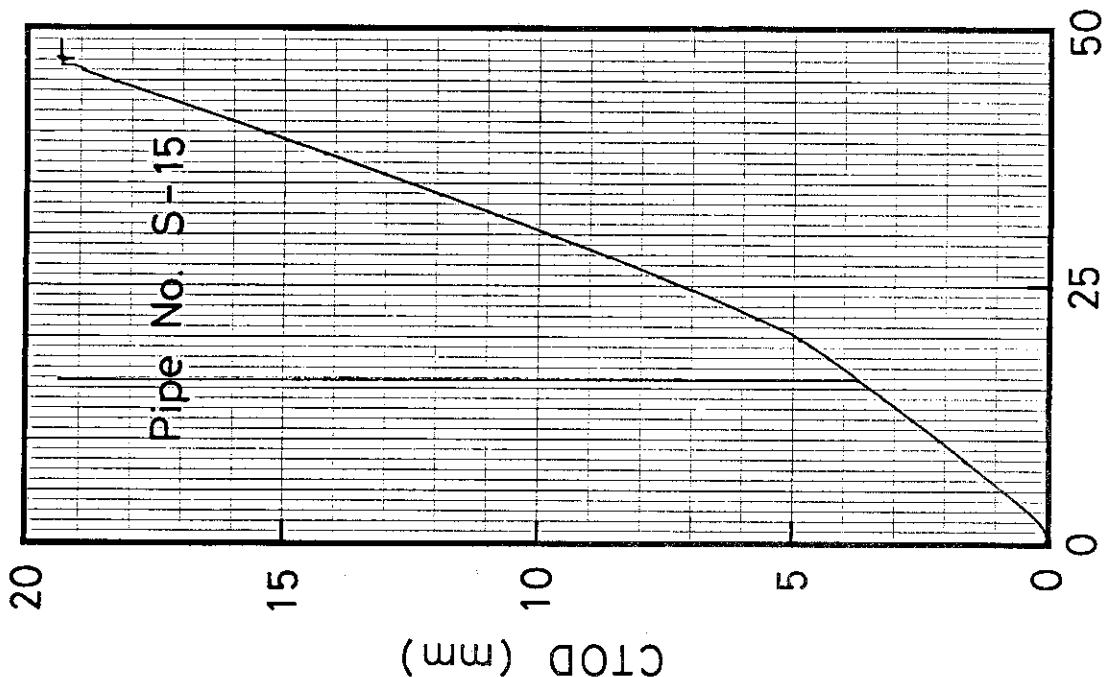


Fig. C.8 Result of CTOD measurement by S-15 test pipe

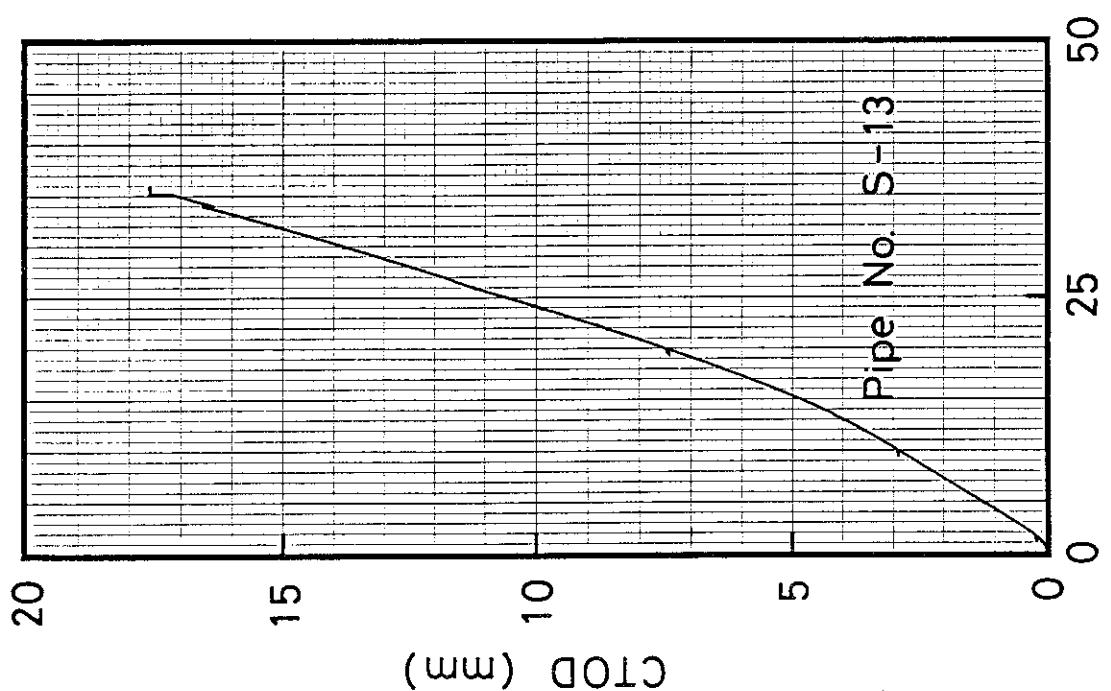


Fig. C.7 Result of CTOD measurement by S-13 test pipe

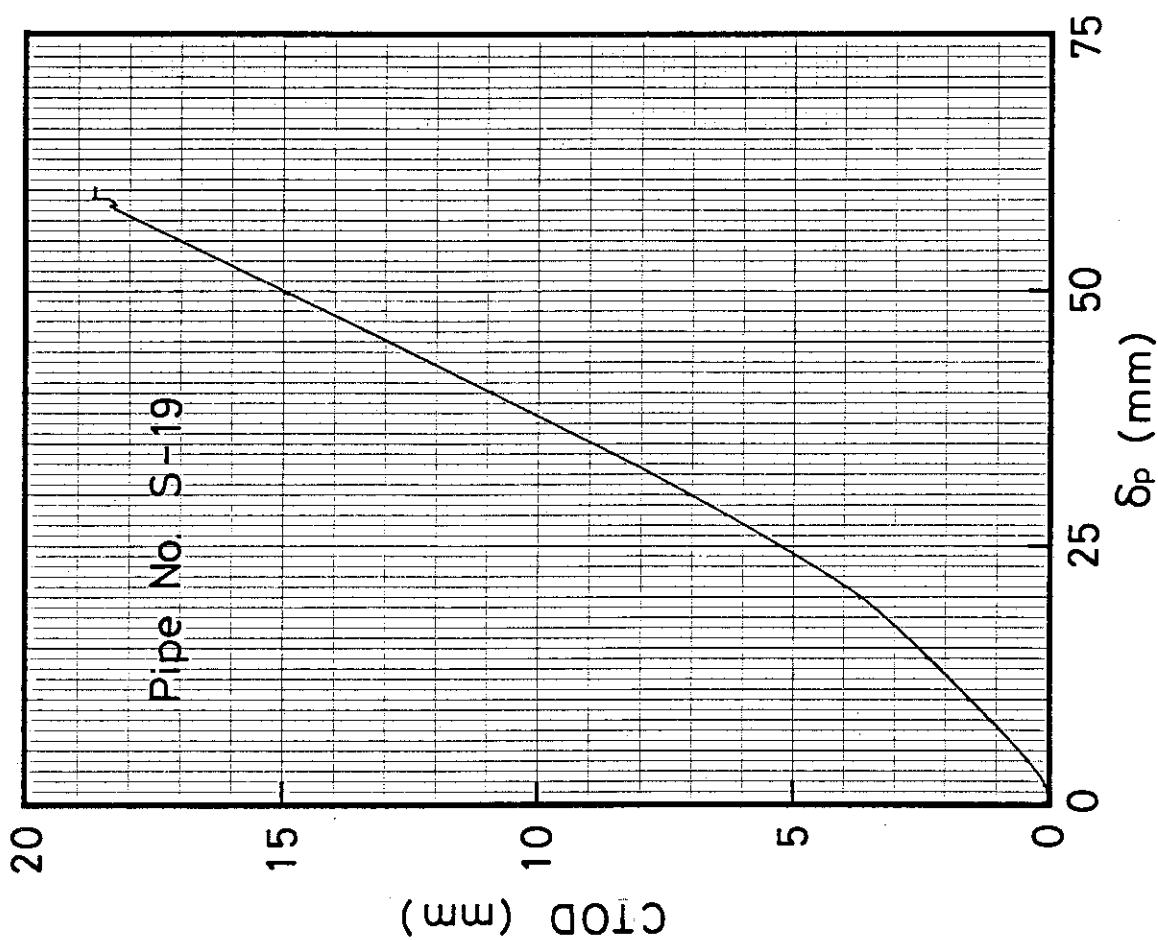


Fig. C.9 Result of CTOD measurement by S-19
test pipe

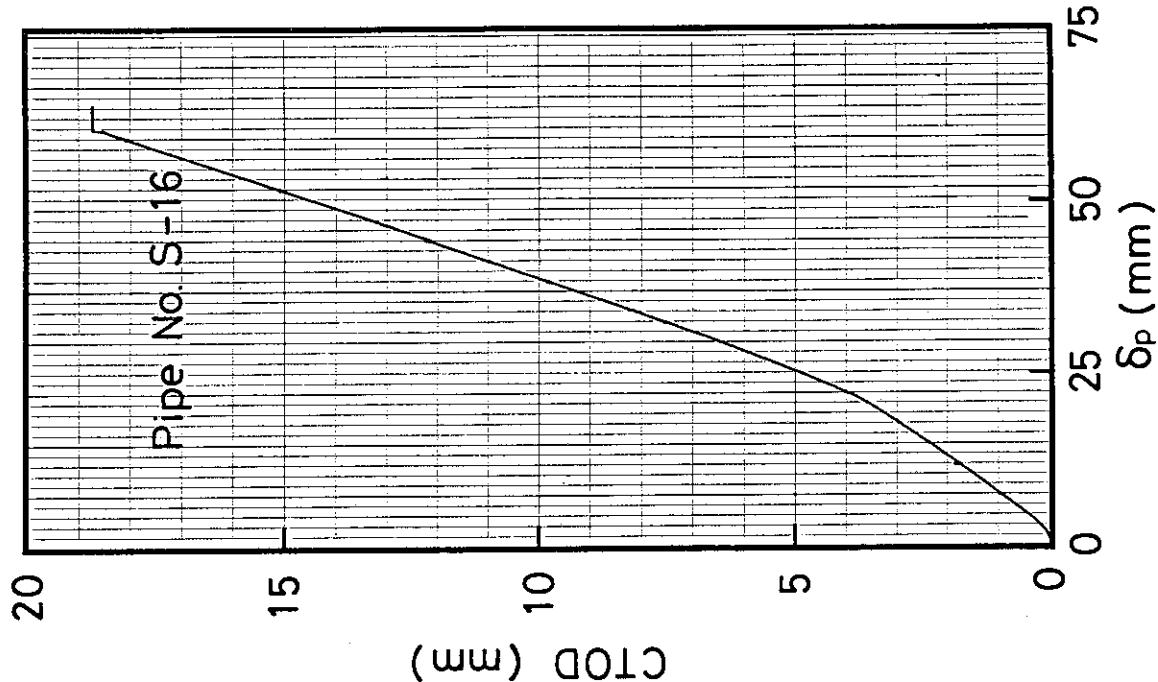


Fig. C.10 Result of CTOD measurement
by S-16 test pipe

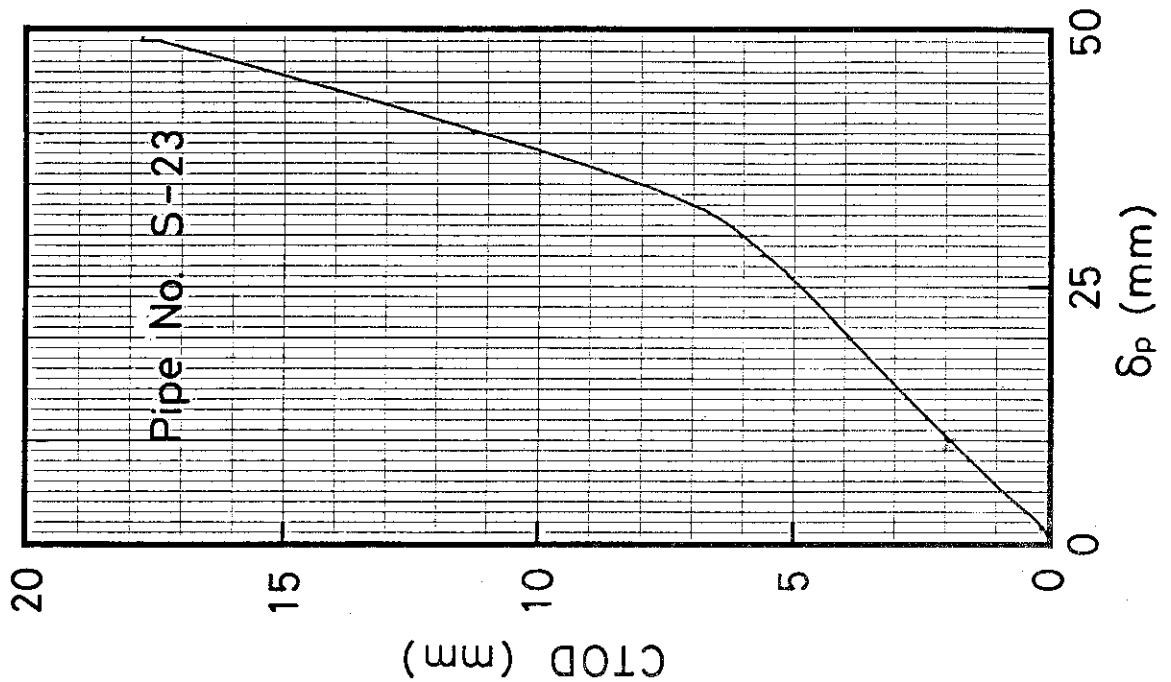


Fig. C.12 Result of CTOD measurement by S-23 test pipe

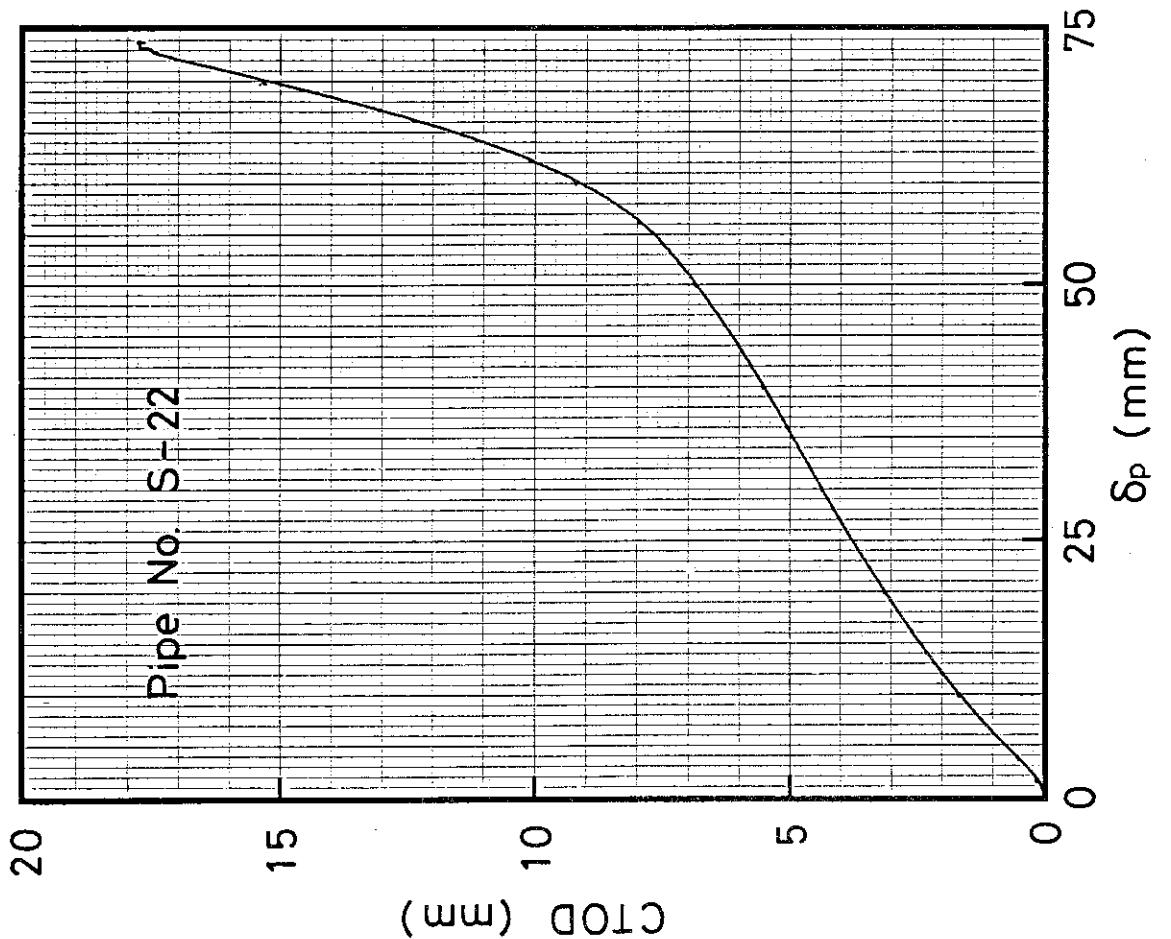


Fig. C.11 Result of CTOD measurement by S-22 test pipe

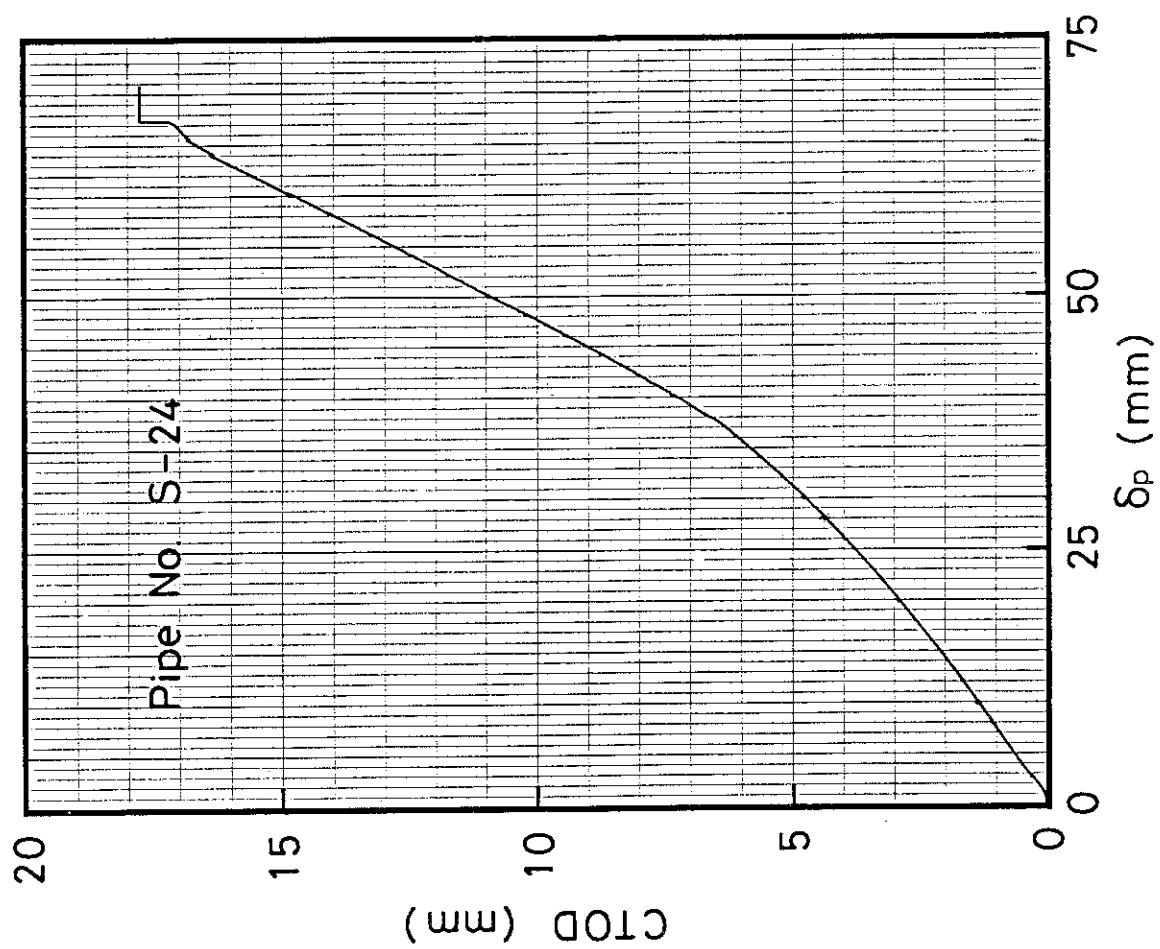


Fig. C.13 Result of CTOD measurement by S-24 test pipe

Appendix D

Results of strain distribution

measurement

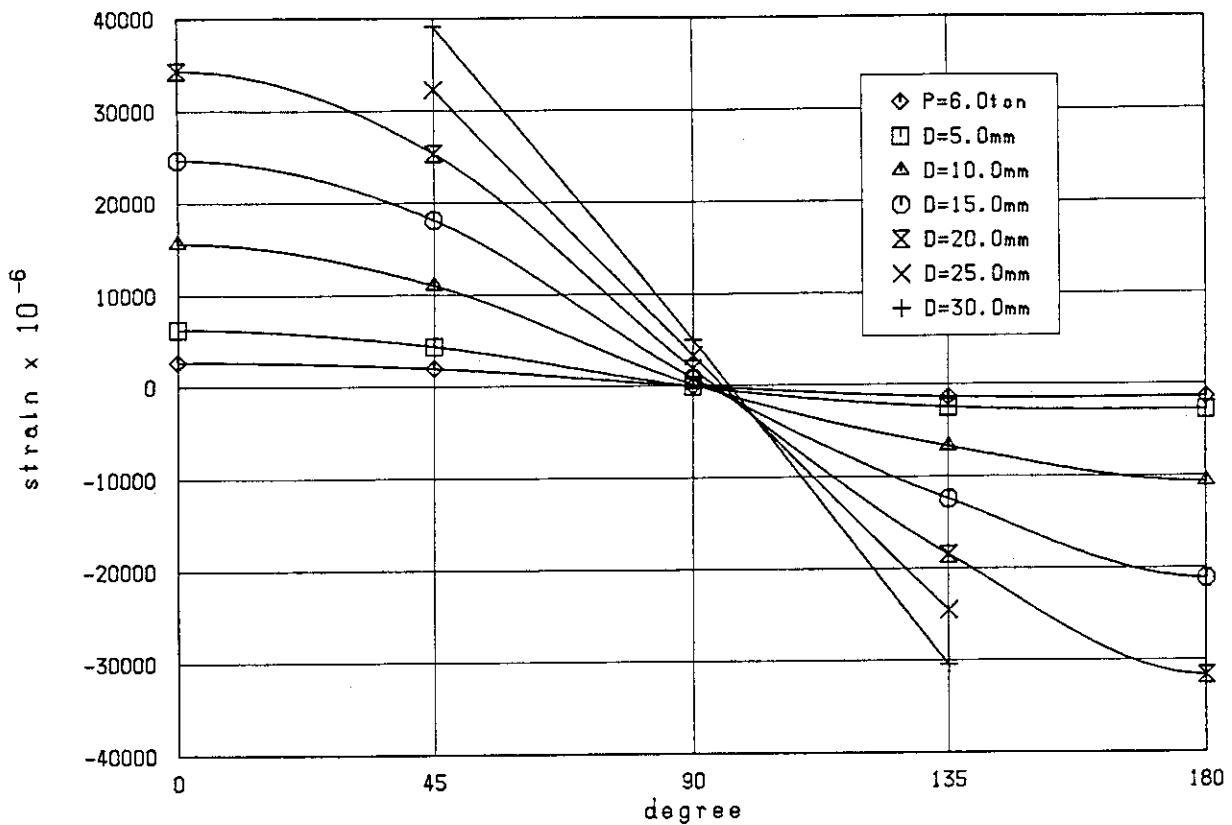


Fig. D.1a Result of strain distribution measurement (S-1)

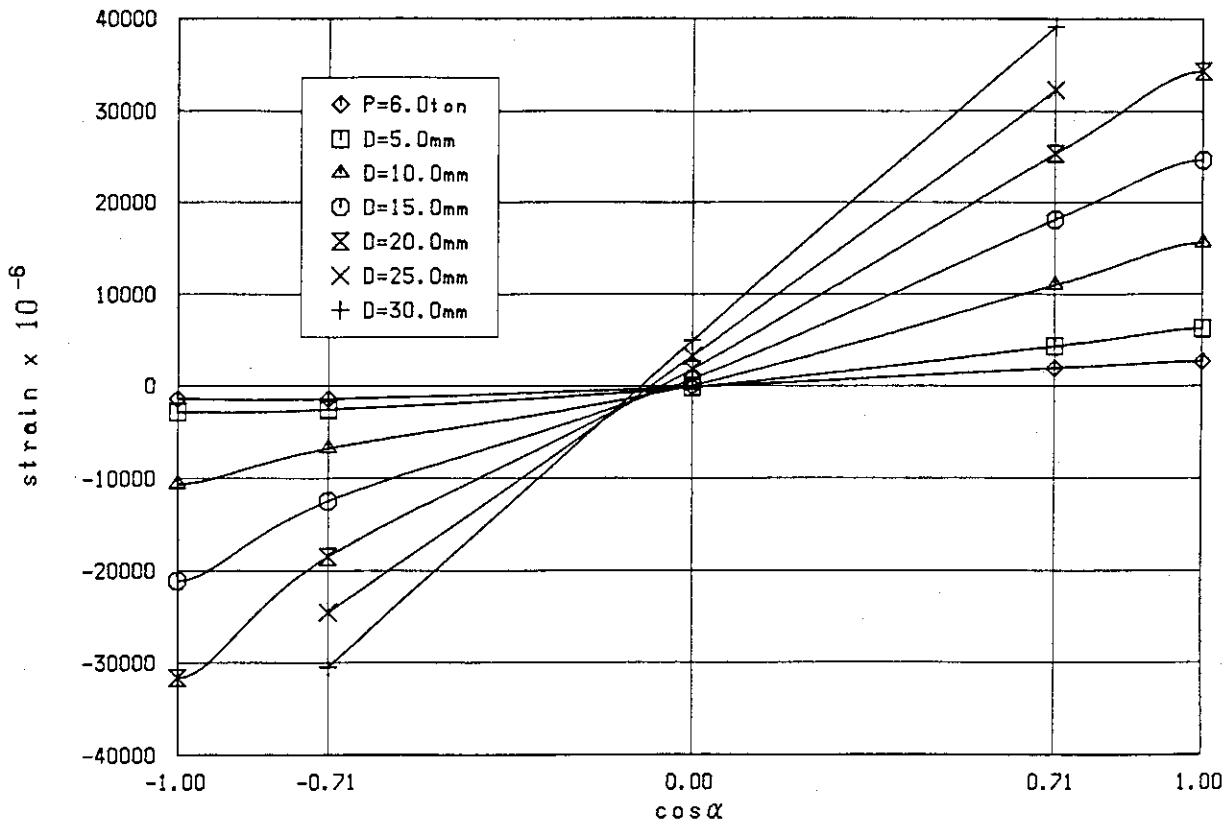


Fig. D.1b Result of strain distribution measurement (S-1)

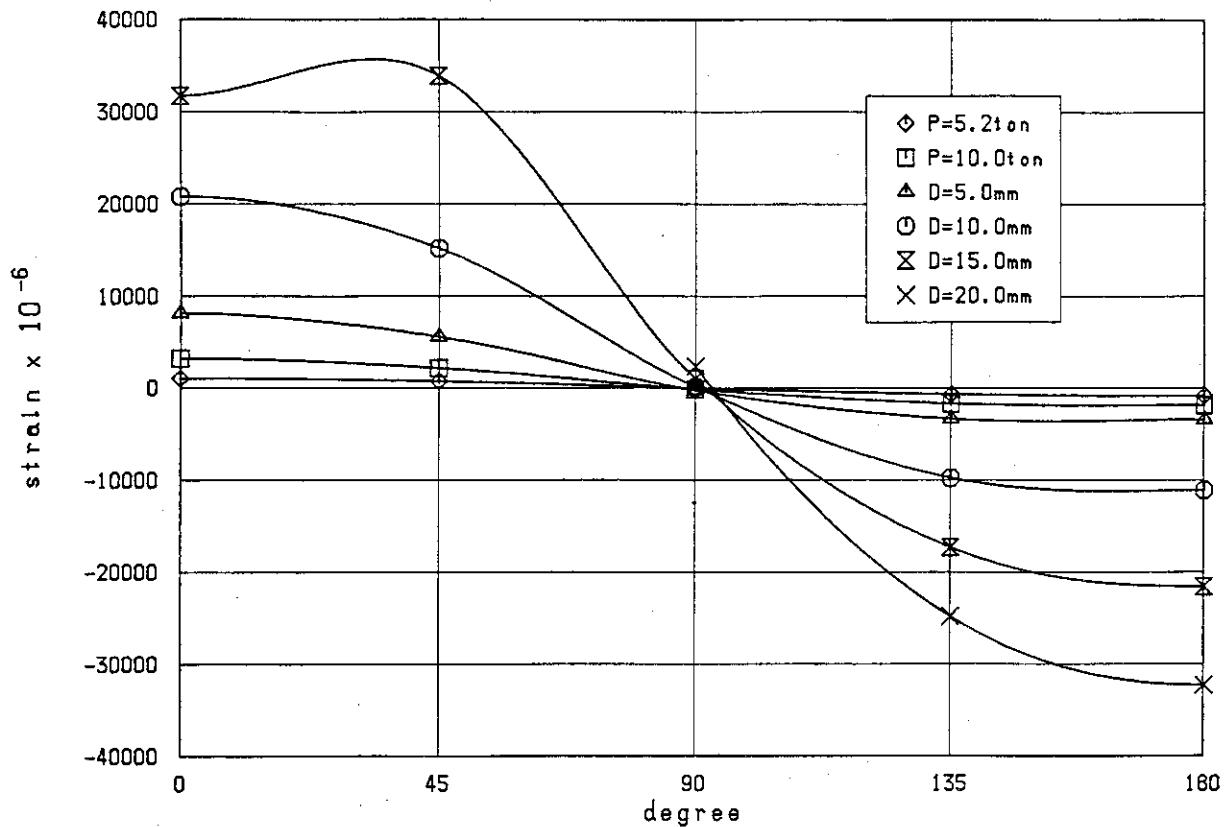


Fig. D.2a Result of strain distribution measurement (S-17)

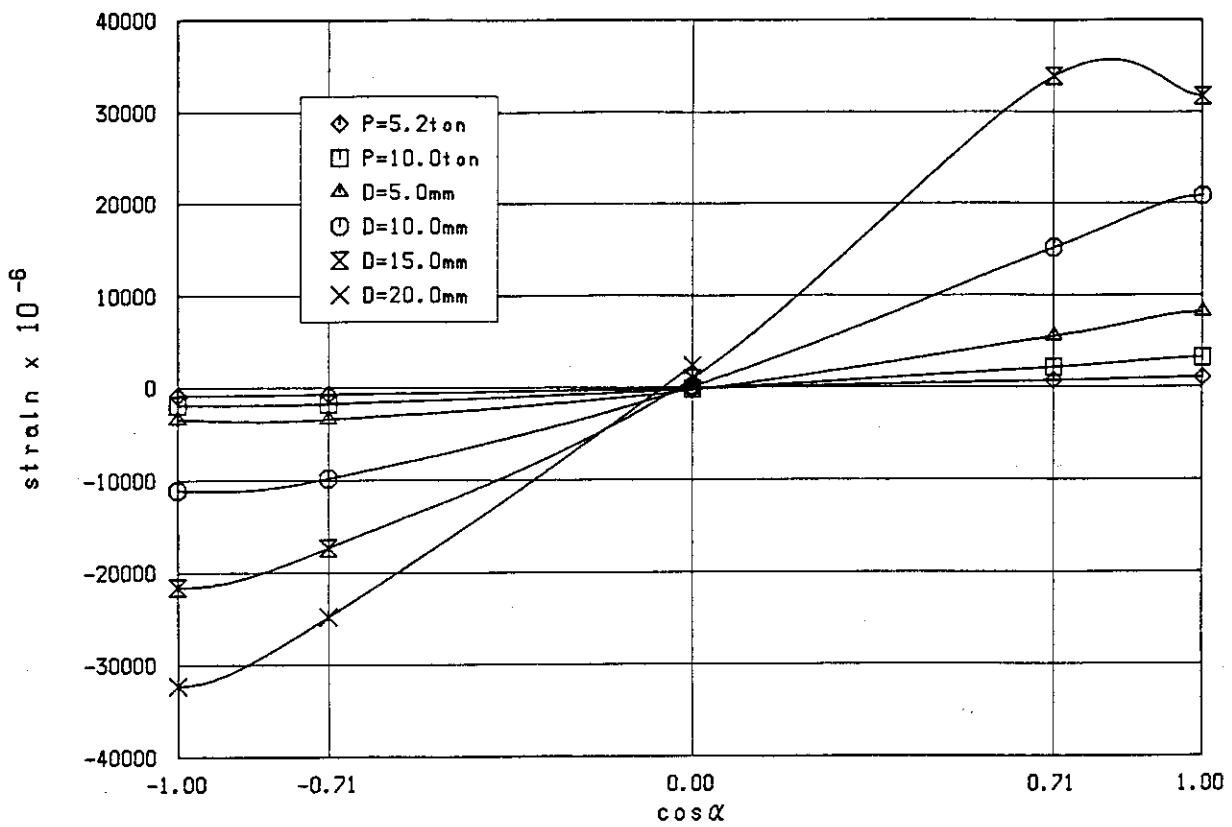


Fig. D.2b Result of strain distribution measurement (S-17)

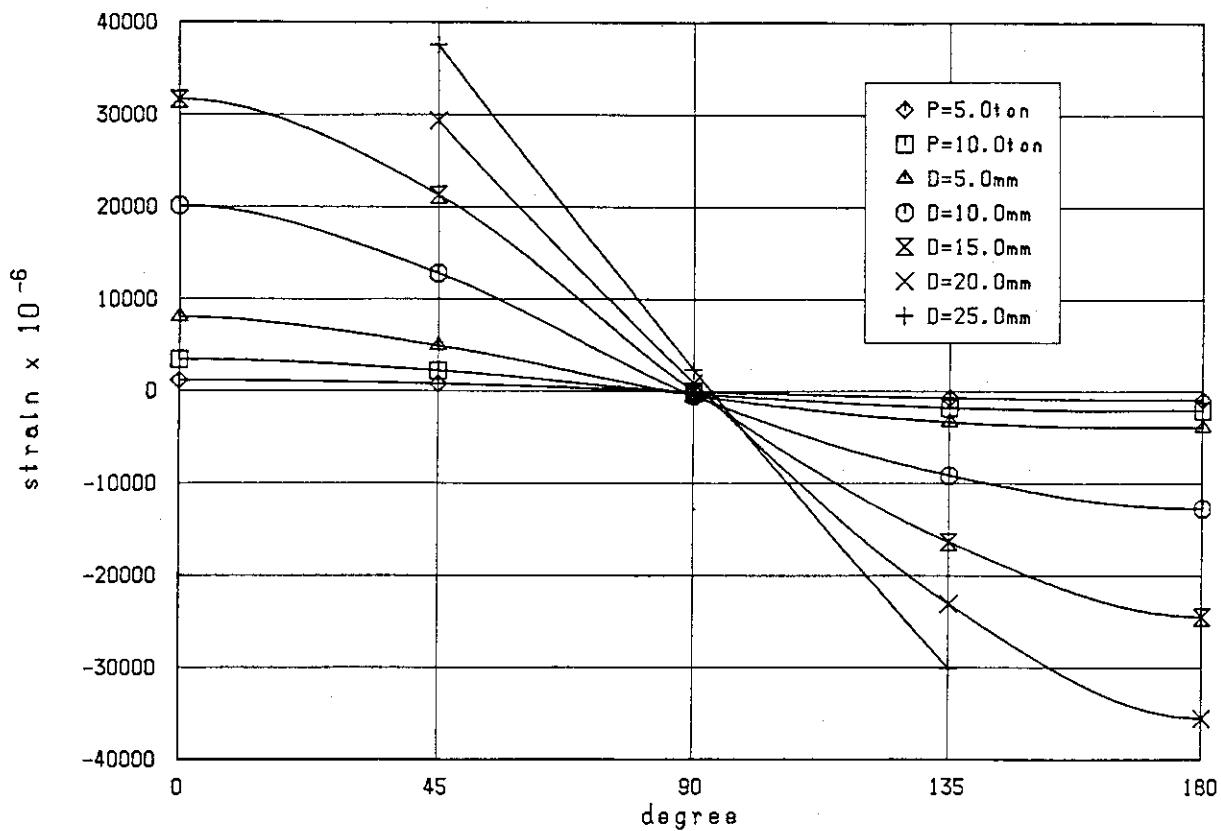


Fig. D.3a Result of strain distribution measurement (S-11)

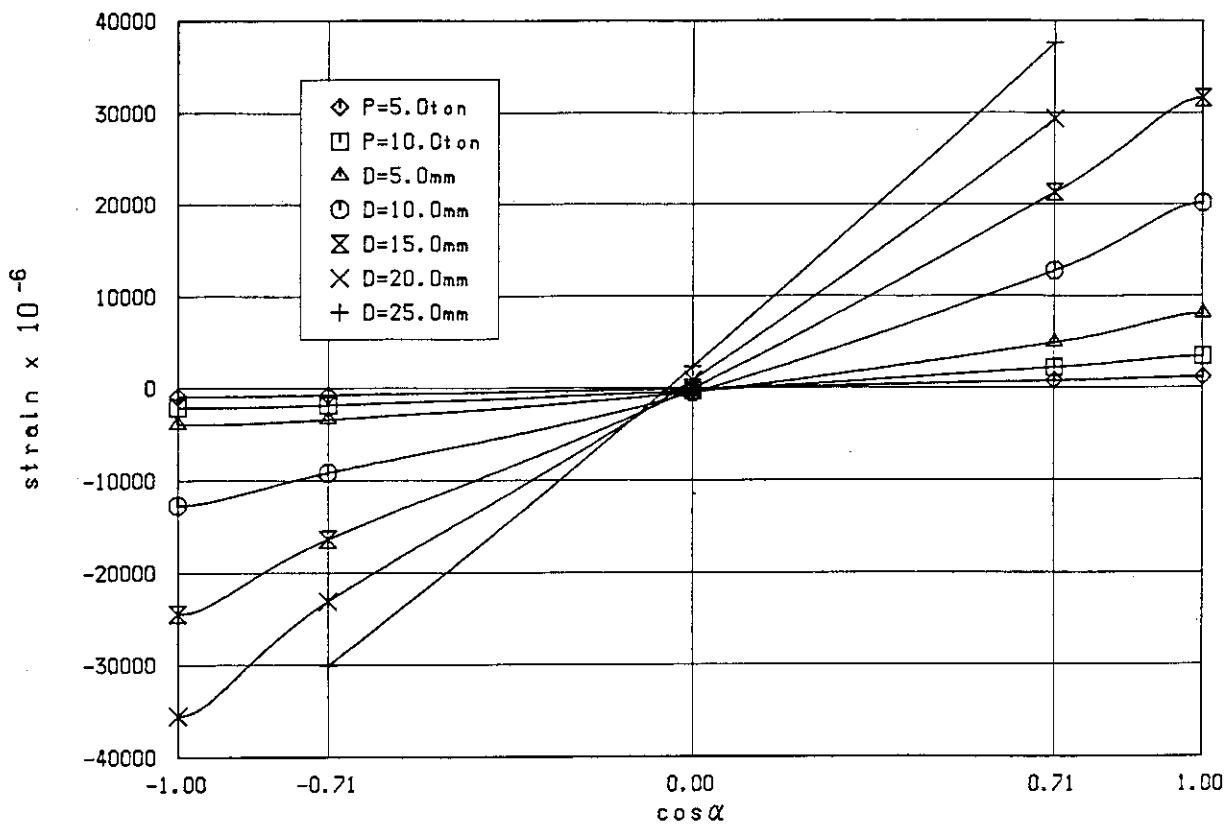


Fig. D.3b Result of strain distribution measurement (S-11)

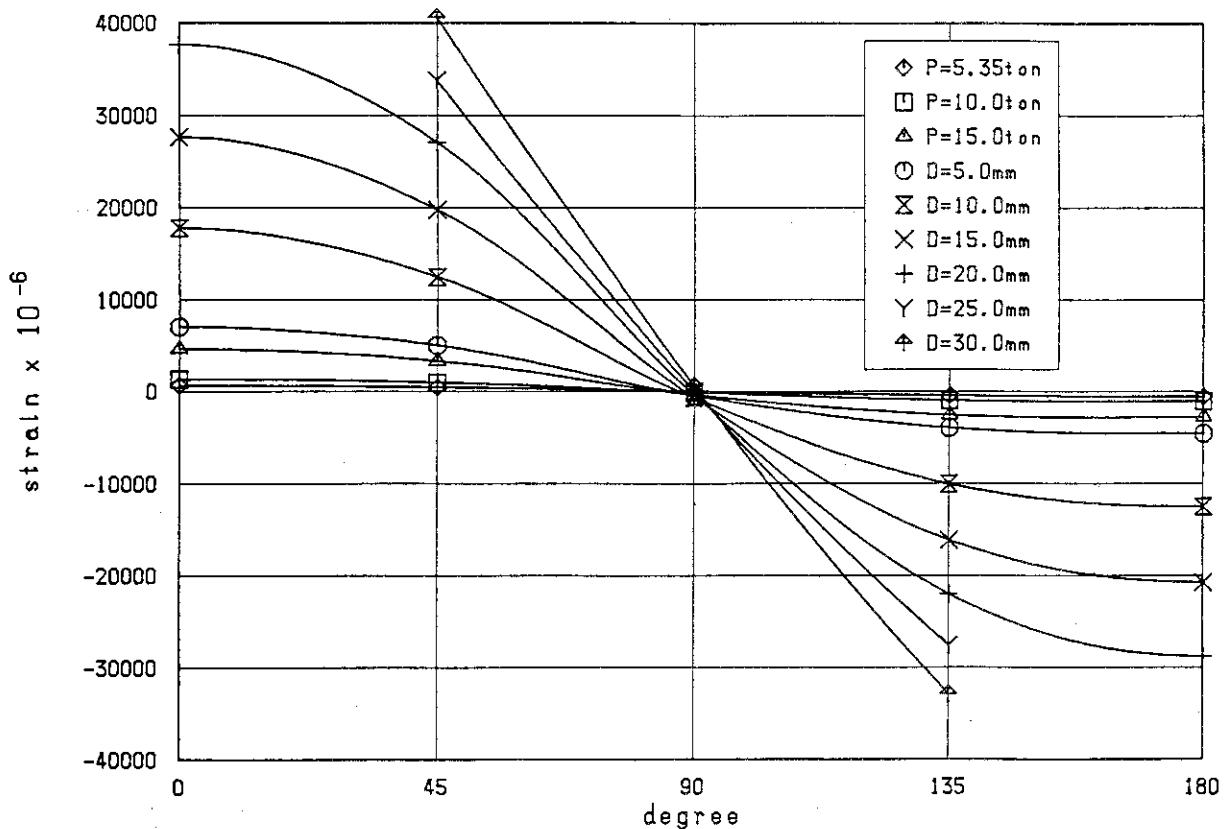


Fig. D.4a Result of strain distribution measurement (S-21)

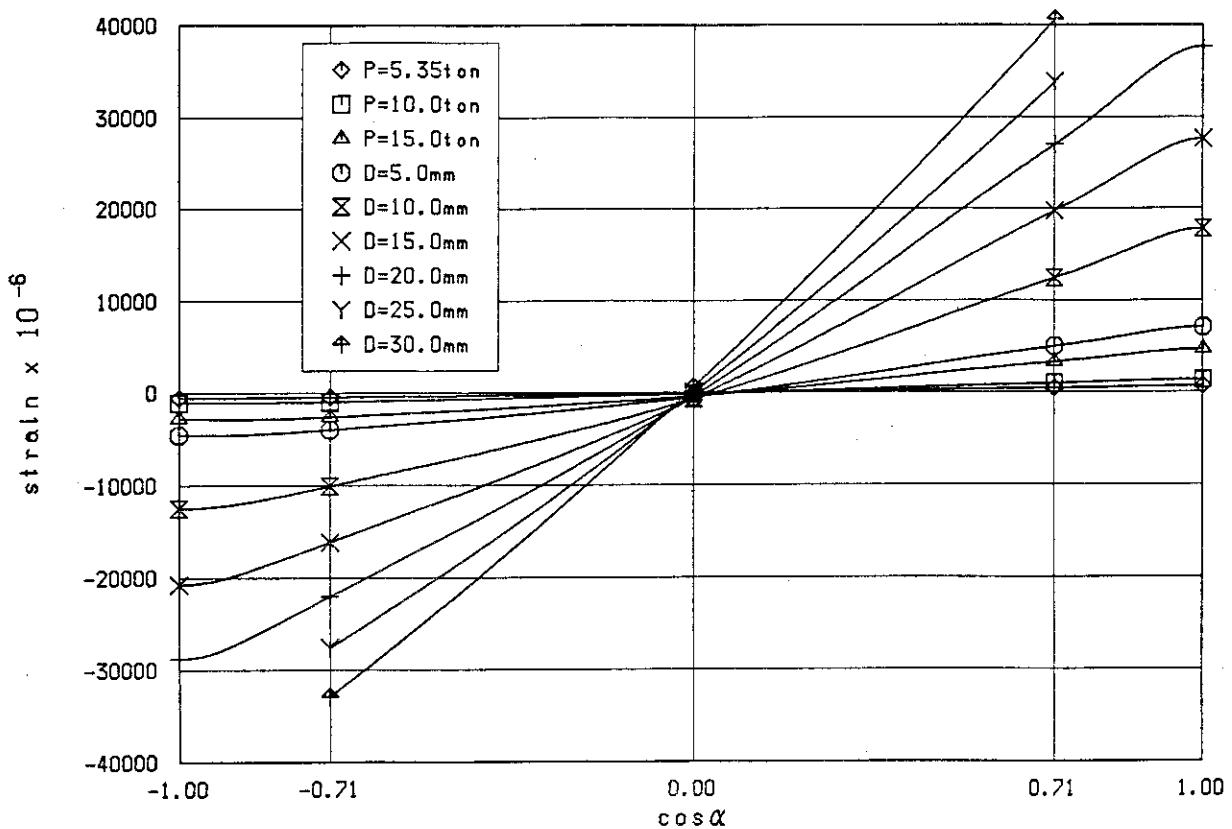


Fig. D.4b Result of strain distribution measurement (S-21)

Appendix E

Data of load, J-integral etc.

Table E.1 Results from S-1 test pipe

Table E.2 Results from S-2 test pipe

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)
S-2	10.6	45°	0.0	0	0.0	0.0	86.15	86.15			
			1.71	4110	0.0	0.0					
			7.43	6980	0.0	0.0					
			10.0	7470	0.0	0.0	86.35	85.25			
			12.0	7800	0.0	0.0					
			14.0	8060	0.13	0.12					
			16.0	8310	0.18	0.17					
			18.0	8530	0.28	0.27					
			20.0	8750	0.30	0.29	87.45	84.80			
			22.0	8930	0.45	0.43					
			24.0	9090	0.68	0.65					
			26.0	9210	1.38	1.32					
			28.0	9320	2.13	2.03					
			30.0	9380	3.28	3.13	88.75	83.20			
			32.0	9410	4.33	4.14					
			34.0	9380	5.85	5.59					
			36.0	9310	7.55	7.21					
			38.0	9180	10.00	9.55					
			40.0	8990	12.35	11.80	88.65	82.95			
			42.0	8700	15.48	14.78					
			44.0	8340	18.10	17.29					
			46.0	7930	21.50	20.53					
			48.0	7480	24.68	23.57					
			50.0	7000	28.33	27.06	87.80	84.00			
			55.0	5760	36.35	34.72					
			60.0	4620	43.85	41.88	87.35	83.90			
			65.0	3620	50.70	48.42					
			70.0	2790							
			75.0	2120							

Table E.3 Results from S-3 test pipe

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	A _a (mm)	Δa_m (mm)	D _x (mm)	D _y (mm)	J _e (kg/mm)	J _p (kg/mm)	J (kg/mm)
S-3	10.6	90°	0.0	0	0.0	0.0	86.19	86.19			
			4.92	5000	0.0	0.0					
			8.0	5620	0.0	0.0					
			10.0	5940	0.0	0.0	85.55	87.25	13.17	125.37	138.54
			12.0	6220	0.0	0.0			14.52	154.50	169.02
			14.0	6450	0.43	0.41			16.02	186.10	202.12
			16.0	6630	1.18	1.13					
			18.0	6750	1.88	1.80		17.27	220.94	238.21	
			20.0	6850	2.95	2.82	84.85	87.60	18.89	256.55	275.44
			22.0	6830	4.23	4.04		20.17	296.09	316.26	
			24.0	6740	6.33	6.05		22.04	333.29	355.33	
			26.0	6590	8.78	8.38		24.06	368.40	392.46	
			28.0	6390	11.15	10.65		25.69	402.32	428.01	
			30.0	6160	13.58	12.97	83.45	89.00	27.18	433.34	460.52
			32.0	5900	16.15	15.42			28.61	461.26	489.87
			34.0	5620	18.88	18.03			30.05	485.45	515.50
			36.0	5330	21.43	20.47			31.03	507.96	538.99
			38.0	5020	24.35	23.25			32.29	525.10	557.39
			40.0	4740	26.78	25.57	83.60	90.0	32.93	543.12	576.05
			42.0	4460	29.40	28.08			33.77	556.97	590.74
			44.0	4180	32.08	30.64			34.55	567.70	602.25
			46.0	3910	34.10	32.57			33.97	581.78	615.75
			48.0	3670	36.63	34.98			34.68	588.22	622.90
			50.0	3440	38.75	37.01			34.54	596.16	630.70
			55.0	2910	44.03	42.05			33.93	608.68	642.61
			60.0	2450	47.65	45.51					
			65.0	2080							
			70.0	1740							
			75.0	1490							
								84.70	89.00		

Table E.4 Results from S-4 test pipe

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δ_a (mm)	Δ_{am} (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)
S-4	10.6	180°	0.0	0	0.0	0.0	86.10	86.13			
			1.2	1000	0.0	0.0					
			5.31	1970	0.0	0.0					
			8.0	2210	0.0	0.0					
			10.0	2350	0.0	0.0					
			12.0	2480	0.0	0.0					
			14.0	2590	0.2	0.19					
			16.0	2690	0.3	0.29					
			18.0	2770	0.7	0.67					
			20.0	2750	1.83	1.75					
			22.0	2710	3.25	3.10					
			24.0	2650	4.55	4.35					
			26.0	2580	5.95	5.68					
			28.0	2500	7.58	7.24					
			30.0	2400	8.68	8.29					
			32.0	2290	10.33	9.87					
			34.0	2180	11.40	10.89					
			36.0	2060	12.60	12.04					
			38.0	1940	14.05	13.42					
			40.0	1830	15.65	14.95					
			42.0	1710	16.85	16.10					
			44.0	1600	18.13	17.32					
			46.0	1500	19.60	18.72					
			48.0	1410	20.50	19.58					
			50.0	1320	21.53	20.57					
			55.0	1130	24.40	23.31					
			60.0	970	26.30	25.12					

Table E.5 Results from S-17 test pipe

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δ_a (mm)	Δ_{2m} (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)
S-17	7.1	0°	0	0			85.08	85.08			
			1.35	5180							
			1.91	7120							
			3.05	9930							
			5.00	12000							
			10.0	13530							
			15.0	14360							
			20.0	15090							
			25.0	15720							
			30.0	16300							
			35.0	16730							
			40.0	17120							
			45.0	17360							
			50.0	17480							
			55.0	17360							
			60.0	16980							
			65.0	16060							
			70.0	14710							
			75.0	13480							
			80.0	12440							
			85.0	11590							
			90.0	10840							
			95.0	10140							
			100.0	9660							
			105.0	9080							
			110.0	8400							
									111.15	34.30	

Table E.6 Results from S-11 test pipe

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa_m (mm)	DD_x (mm)	DD_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)
S-11	7.1	0°	0	0			85.04	85.04			
			1.16	5200							
			3.00	10190							
			5.20	12040							
			10.0	13480							
			15.0	14340							
			20.0	15040							
			25.0	15670							
			30.0	16210							
			35.1	16660							
			40.0	17000							
			45.0	17260							
			50.0	17340							
			50.7	17380							
			55.0	17250							
			60.0	16880							
			65.0	16050							
			70.2	14680							
			75.0	13410							
			80.0	12290							
			85.0	11370							
			90.0	10530							
			95.0	9860							
			100.0	9250							

Table E.7 Results from S-12 test pipe

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)
S-12	7.1	45°	0.0	0	0.0	0.0	85.04	85.05			
			1.37	5000	0.0	0.0	85.15	85.25			
			4.43	9880	0.0	0.0					
			8.0	11220	0.0	0.0					
			10.0	11740	0.0	0.0					
			12.0	12190	0.0	0.0					
			14.0	12530	0.0	0.0					
			16.0	12890	0.0	0.0					
			18.0	13140	0.25	0.23					
			20.0	13350	0.95	0.89	84.35	84.40	10.17	190.53	200.70
			22.0	13590	2.13	1.99			11.55	213.78	225.33
			24.0	13740	3.10	2.90			12.70	238.77	251.47
			26.0	13750	4.50	4.20			14.07	284.21	298.28
			28.0	13620	6.45	6.03			15.78	332.25	348.03
			30.0	13420	8.85	8.27	84.10	84.10	17.90	380.55	398.45
			32.0	13060	11.43	10.68			19.88	428.59	448.47
			34.0	12590	14.30	13.36			21.89	475.18	497.07
			36.0	12030	17.43	16.28			23.87	519.19	543.06
			38.0	11410	20.78	19.41			25.82	559.39	585.21
			40.0	10730	24.80	23.17	84.30	84.90	28.38	592.07	620.45
			45.0	8970	33.15	30.97			31.07	662.61	693.68
			50.0	7250	40.98	38.28	84.05	85.10	31.22	705.56	736.78
			55.0	5820	48.30	45.12			30.54	723.69	754.23
			60.0	4650	54.88	51.27	82.90	85.65			

Table E.8 Results from S-18 test pipe

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_{e_p} (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)
S-18	7.1	90°	0.0	0	0.0	0.0	85.06	85.07		
			1.88	5190	0.0	0.0				
			5.29	8020	0.0	0.0				
			8.0	8760	0.0	0.0				
			10.0	9170	0.18	0.17	84.60	85.40	12.01	78.37
			12.0	9560	0.45	0.42				113.16
			14.0	9860	0.85	0.79				126.45
			16.0	9960	1.88	1.76				149.62
			18.0	9900	3.78	3.53				164.29
			20.0	9780	5.65	5.28	83.15	87.00		188.15
			22.0	9560	7.78	7.27				204.11
			24.0	9270	10.13	9.46				228.10
			26.0	8900	12.73	11.89				245.34
			28.0	8520	15.18	14.18				268.12
			30.0	8070	17.95	16.77	83.15	87.65		287.03
			32.0	7630	20.70	19.33				307.92
			34.0	7180	23.75	22.18				328.35
			36.0	6710	26.35	24.61				346.53
			38.0	6270	28.70	26.81				368.42
			40.0	5830	31.38	29.31	82.20	87.40		383.07
			42.0	5410	33.78	31.55				406.42
			44.0	5010	36.18	33.79				416.75
			46.0	4660	38.40	35.87				441.49
			48.0	4310	40.73	38.04				474.59
			50.0	3990	42.83	40.01	82.80	87.60		475.88
			55.0	3300	47.48	44.35				502.84
			60.0	2730	51.60	48.20	83.15	87.45		527.83
			65.0	2280						536.66
			70.0	1930						553.49
			75.0	1630						583.12
										587.72
										594.17
										594.28
										594.49
										604.09
										610.85
										616.60
										619.01
										620.93
										624.95
										629.80
										634.00
										637.00

Table E.9 Results from S-14 test pipe

Pipe No.	R/t	20	δ_p (mm)	P (kg)	Δ_a (mm)	Δ_{au} (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg·mm)
S-14	7.1	90°	0.0	0	0.0	0.0	85.06	85.06			
			1.7	5200	0.0	0.0					
			5.0	7930	0.0	0.0					
			8.0	8740	0.0	0.0					
			10.0	9170	0.0	0.0	84.40	86.20			
			12.0	9560	0.0	0.0					
			14.0	9900	0.15	0.14					
			16.0	10120	0.50	0.47					
			18.0	10220	1.80	1.68					
			20.0	10290	3.10	2.90	84.20	87.55	19.88	308.75	328.63
			22.0	10110	4.85	4.53			21.11	350.22	371.33
			24.0	9820	7.30	6.82			22.73	388.69	411.42
			26.0	9460	9.85	9.20			24.19	424.99	449.18
			28.0	9000	12.85	12.00			25.72	456.99	482.71
			30.0	8550	15.55	14.53	83.70	87.90	26.84	487.18	514.02
			32.0	8070	18.55	17.33			28.14	512.18	540.32
			34.0	7540	21.05	19.66			28.17	536.96	565.13
			36.0	7040	24.00	22.42			28.93	554.50	583.43
			38.0	6530	27.00	25.22			29.47	567.87	597.34
			40.0	6040	29.60	27.65	84.10	89.65	29.25	580.90	610.15
			45.0	4940	35.50	33.16			27.60	605.58	633.18
			50.0	4070	40.95	38.25	84.10	88.80	25.96	617.32	643.28
			55.0	3340	46.20	43.16					
			60.0	2750	50.75	47.41					
			65.0	2310							
			70.0	1950							
			75.0	1660							

Table E.10 Results from S-13 test pipe

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)	(kg/mm)
S-13 (Fc) 90°	7.1	90°	0.0	0	0.0	0.0	83.03	85.03	4.49	1.35	5.84
			1.81	5250	0.0	0.0			10.63	33.00	43.63
			5.0	7920	0.73	0.68			13.38	80.88	94.26
			8.0	8700	1.48	1.38					
			10.0	9080	2.03	1.90	83.70	86.10	15.02	116.30	131.32
			12.0	9350	2.88	2.69			16.69	153.74	170.43
			14.0	9490	3.95	3.69			18.23	192.94	211.17
			16.0	9490	5.18	4.84			19.49	233.47	252.96
			18.0	9410	7.03	6.57			21.18	272.72	293.90
			20.0	9260	8.93	8.35	82.20	87.70	22.72	311.35	334.07
			22.0	9020	11.33	10.59			24.52	347.44	371.96
			24.0	8710	13.60	12.71			25.82	382.45	408.27
			26.0	8340	16.25	15.19			27.32	413.44	440.76
			28.0	7950	18.75	17.52			28.44	442.49	470.93
			30.0	7540	20.80	19.44	82.60	88.00	28.62	471.38	500.00
			32.0	7090	23.73	22.18			29.78	491.48	521.26
			34.0	6660	26.50	24.77			30.71	509.17	539.88
			36.0	6210	29.05	27.15			30.88	525.36	556.24
			38.0	5750	31.38	29.33			30.28	540.02	570.30
			40.0	5340	33.95	31.73	82.00	88.90	30.35	549.28	579.63
			42.0	4940	36.00	33.65			29.32	560.39	589.71
			44.0	4580	38.25	35.75			28.82	566.84	595.66
			46.0	4250	40.78	38.11			28.90	568.22	597.12
			48.0	3920	43.00	40.19			28.14	570.35	598.49
			50.0	3620	44.78	41.85					
			55.0	3000							
			60.0	2500							
			65.0	2100							
			70.0	1780							
			75.0	1520					81.70	87.65	

Table E.11 Results from S-15 test pipe

pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δ_a (mm)	Δ_{am} (mm)	Dx (mm)	Dy (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)
S-15	7.1	135°	0.0	0	0.0	0.0	85.05	85.06			
			0.95	1920	0.0	0.0					
			1.22	2420	0.0	0.0					
			2.26	4000	0.0	0.0					
			2.82	4420	0.0	0.0					
			3.63	4900	0.0	0.0					
			8.0	5910	0.0	0.0					
			10.0	6200	0.20	0.19	84.30	85.05	13.90	80.63	94.53
			12.0	6410	0.55	0.51			15.46	113.02	128.48
			14.0	6560	1.58	1.48			16.84	146.93	163.77
			16.0	6690	2.43	2.27			18.66	180.30	198.96
			18.0	6750	3.55	3.32			20.33	214.71	235.04
			20.0	6760	4.85	4.53	83.55	86.55	22.00	248.75	270.75
			22.0	6520	6.15	5.75			23.71	282.13	305.84
			24.0	6250	8.40	7.85			23.70	315.80	339.50
			26.0	5940	10.55	9.86			24.70	342.18	366.88
			28.0	5620	12.63	11.80			25.19	366.65	391.84
			30.0	5280	15.05	14.06	82.95	86.70	25.39	388.93	414.32
			32.0	4950	17.30	16.17			25.78	405.87	431.65
			34.0	4630	19.38	18.11			25.84	421.25	447.09
			36.0	4300	21.60	20.19			25.56	435.12	460.68
			38.0	4000	23.30	21.77			25.17	445.42	470.59
			40.0	3720	25.30	23.64	82.90	87.00	24.12	457.66	481.78
			45.0	3090	30.00	28.04			23.54	464.86	488.40
			50.0	2580	33.55	31.35	82.70	87.00	21.65	478.48	500.13
			55.0	2170							
			60.0	1860							
			65.0	1600							
			70.0	1400							
			75.0	1240							
							82.55	87.10			

Table E.12 Results from S-19 test pipe

Pipe No.	R/t	2θ	δ_D (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)
S-19	7.1	180°	0.0	0	0.0	0.0	85.09	85.08			
			1.8	2010	0.0	0.0					
			4.1	2970	0.0	0.0					
			8.0	3440	0.0	0.0					
			10.0	3620	0.0	0.0	84.40	85.75			
			12.0	3790	0.0	0.0					
			14.0	3950	0.0	0.0			15.59	146.07	161.66
			16.0	4090	0.05	0.05			16.76	175.47	192.23
			18.0	4210	0.15	0.14			17.87	205.67	223.54
			20.0	4280	0.38	0.35	84.35	86.00	18.72	236.15	254.87
			22.0	4170	1.00	0.93			18.43	265.16	283.59
			24.0	4000	2.56	2.39			18.59	286.65	305.24
			26.0	3810	4.23	3.95			18.63	305.32	323.95
			28.0	3600	6.40	5.98			18.94	318.04	336.98
			30.0	3410	8.05	7.52	84.45	85.90	18.78	332.41	351.19
			32.0	3210	9.13	8.53			17.77	349.45	367.22
			34.0	3020	10.93	10.21			17.55	358.44	375.99
			36.0	2830	12.50	11.67			16.96	367.48	384.44
			38.0	2640	14.00	13.08			16.19	375.45	391.64
			40.0	2480	15.28	14.27	84.45	85.45	15.46	383.54	399.00
			42.0	2320	16.55	15.46			14.63	390.10	404.73
			44.0	2170	18.18	16.98			14.16	391.96	406.12
			46.0	2030	19.23	17.96			13.23	397.89	411.12
			48.0	1910	20.68	19.31			12.81	398.53	411.34
			50.0	1800	21.73	20.29	84.60	85.35	12.15	402.32	414.47
			55.0	1560	24.18	22.58			10.62	410.40	421.02
			60.0	1380	26.40	24.66	84.65	85.00			
			65.0	1230	1100						
			70.0	1000	75.0						

Table E.13 Results from S-16 test pipe

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)
S-16	7.1	180°	0.0	0	0.0	0.0					
			1.07	1000	0.0	0.0					
			1.92	2000	0.0	0.0					
			2.75	2500	0.0	0.0					
			7.5	3370	0.0	0.0					
			8.0	3400	0.0	0.0					
			12.1	3760	0.0	0.0					
			15.1	4000	0.0	0.0					
			18.0	4180	0.38	0.36					
			21.0	4240	0.83	0.78					
			24.0	4060	2.65	2.48					
			27.0	3800	5.30	4.95					
			30.0	3520	7.80	7.29					
			33.0	3230	10.00	9.34					
			35.9	2930	12.15	11.35					
			38.9	2670	14.88	13.90					
			41.9	2410	16.00	14.95					
			44.9	2200	18.53	17.31					
			52.3	1760	22.40	20.93					
			59.8	1450	26.45	24.71					
			67.1	1230							
			74.2	1060							

Table E.14 Results from S-21 test pipe

Pipe No.	R/t	2_0	δ_p (mm)	P_p (kg)	Δ_a (mm)	Δ_{eff} (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)
S-21	4.0	0°	0	0			87.28	87.28			
			0.82	5310							
			1.64	10000							
			3.71	14820							
			5.0	16100							
			10.0	18440							
			15.0	19960							
			20.0	21160							
			25.0	22290							
			30.0	23310							
			35.0	24270							
			40.0	25150							
			45.0	25930							
			50.0	26610							
			55.0	27260							
			60.0	27820							
			65.0	28260							
			70.0	28660							
			75.0	28950							
			80.0	29190							
			85.0	29370							
			90.0	29470							
			95.0	29600							
			100.0	29680							
			105.0	30160							
			110.0	29910							
			113.0	29790							
									97.00	73.40	

Table E.15 Results from S-22 test pipe

Pipe No.	R/t	29	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)
S-22	4.0	45°	0.0	0	0.0	0.0	87.27	87.27			
			1.79	10230	0.0	0.0					
			3.92	13980	0.0	0.0					
			8.0	16620	0.0	0.0					
			10.0	17440	0.0	0.0	87.20	87.45			
			12.0	18100	0.0	0.0					
			14.0	18700	0.0	0.0					
			16.0	19280	0.0	0.0					
			18.0	19800	0.0	0.0					
			20.0	20290	0.0	0.0	86.85	87.50			
			22.0	20800	0.0	0.0					
			24.0	21300	0.05	0.04			8.21	48.88	57.09
			26.0	21650	0.10	0.09			8.52	57.98	66.50
			28.0	22030	0.15	0.13			8.85	64.49	73.34
			30.0	22410	0.28	0.25	86.90	87.00	9.24	69.92	79.16
			32.0	22810	0.35	0.31			9.62	70.69	80.31
			34.0	23200	0.58	0.52			10.12	72.52	82.64
			36.0	23590	0.73	0.65			10.57	72.49	83.06
			38.0	23890	1.03	0.92			11.07	82.35	93.42
			40.0	24230	1.18	1.05	87.45	86.55	11.51	87.58	99.09
			42.0	24530	1.40	1.24			11.97	94.90	106.87
			44.0	24800	1.45	1.29			12.28	105.99	118.27
			46.0	25050	1.70	1.51			12.74	119.95	132.69
			48.0	25300	2.30	2.04			13.53	131.37	144.90
			50.0	25470	2.70	2.40	87.75	86.00	14.07	154.12	168.19
			52.0	25710	3.33	2.96			14.93	165.68	180.61
			54.0	25870	3.95	3.51			15.73	190.86	206.59
			56.0	26000	4.40	3.91			16.34	219.83	236.17
			58.0	26010	5.35	4.76			17.32	271.24	288.56
			60.0	25940	6.45	5.73	88.30	85.75	18.40	325.50	343.90
			62.0	25740	7.95	7.07			19.76	380.51	400.27
			64.0	25400	10.05	8.93			21.63	435.68	457.31
			66.0	24810	12.50	11.11			23.56	490.73	514.29
			68.0	23960	15.48	13.76			25.69	543.62	569.31
			70.0	22820	18.28	16.25	88.00	85.30	26.91	595.49	622.40
			72.0	21400	21.85	19.42			28.38	641.19	669.57
			74.0	19880	25.23	22.43			29.08	682.46	711.54
			76.0	18300	29.03	25.81			29.93	714.71	744.64
			78.0	16740	32.75	29.11			30.37	740.52	770.89
			80.0	15200	35.78	31.81	87.30	85.70	29.38	765.65	795.03
			85.0	11820	44.05	39.16					
			90.0	9300							
			95.0	7550			88.70	86.00			

Table E.16 Results from S-23 test pipe

Pipe No.	R/t	20	δ_p (mm)	P (kg)	Δa (mm)	Δa_m (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	T (kg/mm)	
S-23	4.0		0.0	0	0.0	0.0	87.28	87.28				
			1.47	7200	0.0	0.0						
			2.95	10120	0.0	0.0						
			8.0	13140	0.0	0.0						
			10.0	13880	0.0	0.0						
			12.0	14560	0.0	0.0						
			14.0	15160	0.0	0.0						
			16.0	15750	0.0	0.0						
			18.0	16260	0.13	0.12						
			20.0	16770	0.20	0.18						
			22.0	17220	0.56	0.50						
			24.0	17630	0.68	0.60						
			26.0	17900	1.08	0.96						
			28.0	18080	2.00	1.78						
			30.0	18200	3.18	2.83						
			32.0	18200	4.83	4.29						
			34.0	17860	6.90	6.13						
			36.0	17300	8.83	7.85						
			38.0	16660	11.45	10.18						
			40.0	15930	13.80	12.27						
			42.0	15200	16.20	14.40						
			44.0	14300	19.00	16.89						
			46.0	13450	21.65	19.25						
			48.0	12600	24.63	21.90						
			50.0	11740	26.68	23.72						
			52.0	10980	29.30	26.05						
			54.0	10190	31.73	28.21						
			56.0	9500	34.05	30.27						
			58.0	8810	36.05	32.05						
			60.0	8190	38.93	34.61						
			65.0	6850	70.0	5770						
			75.0	75.0	4920							
							84.00	90.00				

Table E.17 Results from S-24 test pipe

Pipe No.	R/t	2θ	δ_p (mm)	P (kg)	Δ_a (mm)	Δ_{am} (mm)	D_x (mm)	D_y (mm)	J_e (kg/mm)	J_p (kg/mm)	J (kg/mm)
S-24	4.0	180°	0.0	0	0.0	0.0	87.26	87.27			
			0.87	2080	0.0	0.0					
			2.92	4020	0.0	0.0					
			8.0	5250	0.0	0.0					
			10.0	5580	0.0	0.0					
			12.0	5840	0.0	0.0					
			14.0	6150	0.0	0.0					
			16.0	6410	0.10	0.09					
			18.0	6660	0.20	0.18					
			20.0	6880	0.33	0.29					
			22.0	7110	1.00	0.89					
			24.0	7280	1.23	1.09					
			26.0	7320	1.43	1.27					
			28.0	7320	1.90	1.69					
			30.0	7320	2.50	2.22					
			32.0	7200	3.58	3.18					
			34.0	7150	4.55	4.04					
			36.0	7070	5.18	4.60					
			38.0	6800	6.48	5.76					
			40.0	6400	7.35	6.53					
			42.0	6030	8.95	7.96					
			44.0	5650	10.75	9.56					
			46.0	5360	12.35	10.98					
			48.0	5050	14.15	12.58					
			50.0	4770	15.60	13.87					
			52.0	4520	16.70	14.85					
			54.0	4300	18.10	16.09					
			56.0	4100	19.18	17.05					
			58.0	3910	20.45	18.18					
			60.0	3740	21.68	19.27					
			65.0	3380							
			70.0	3090							
			75.0	2830							

Appendix F

J-R curves for 3-inch

diameter SUS 304

stainless steel pipes

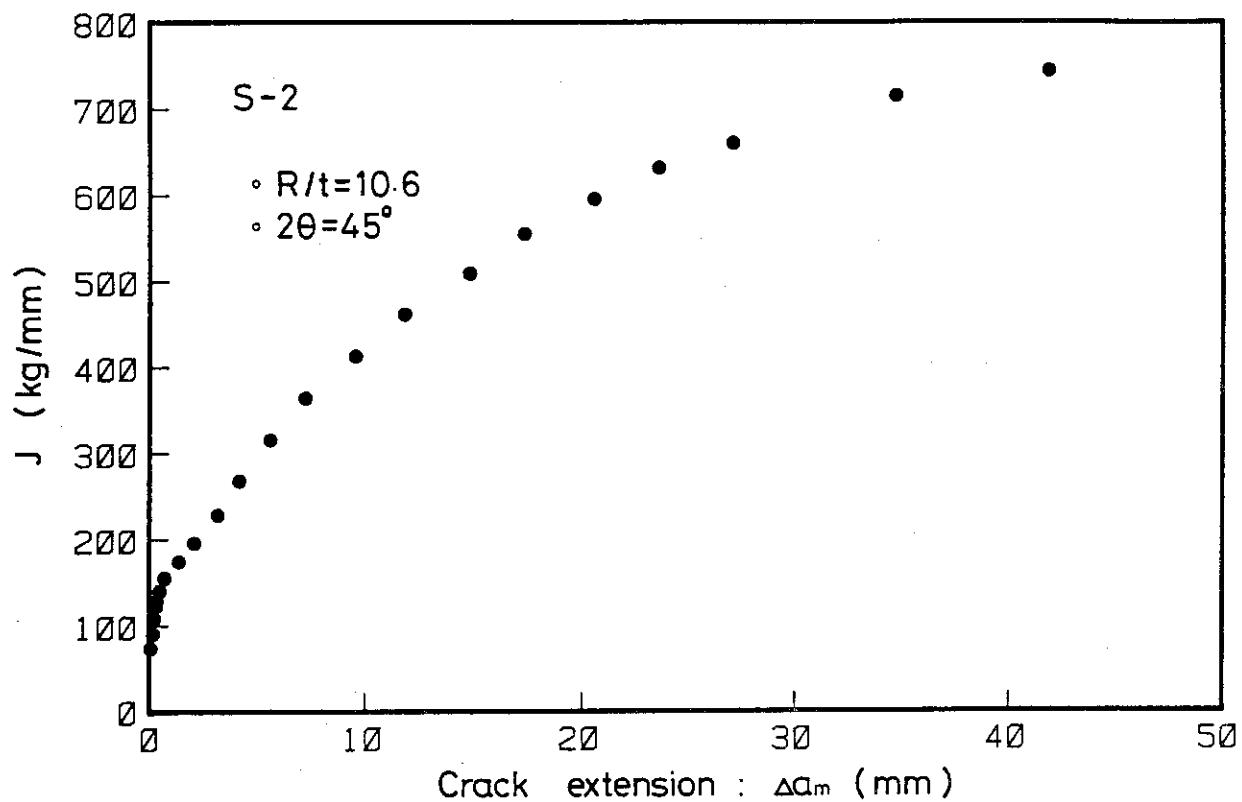


Fig. F.1 J-R curve for S-2 test pipe

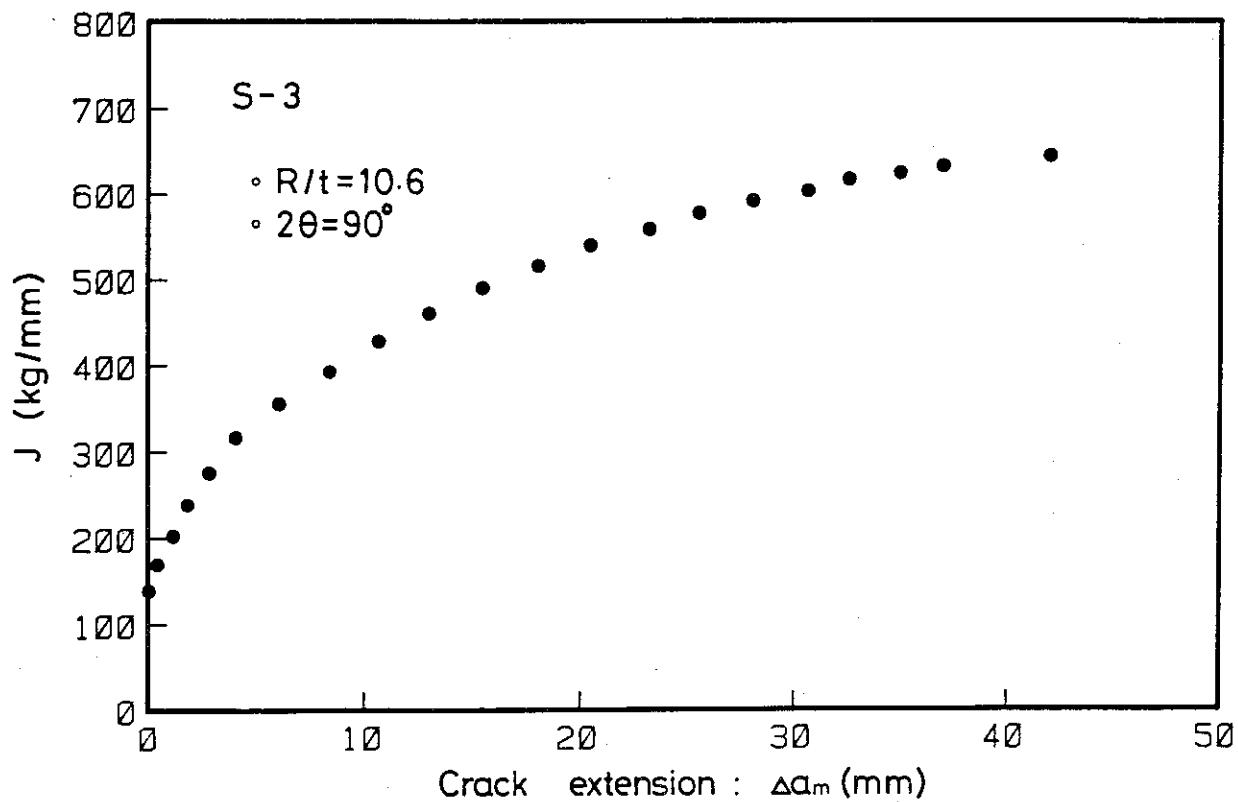


Fig. F.2 J-R curve for S-3 test pipe

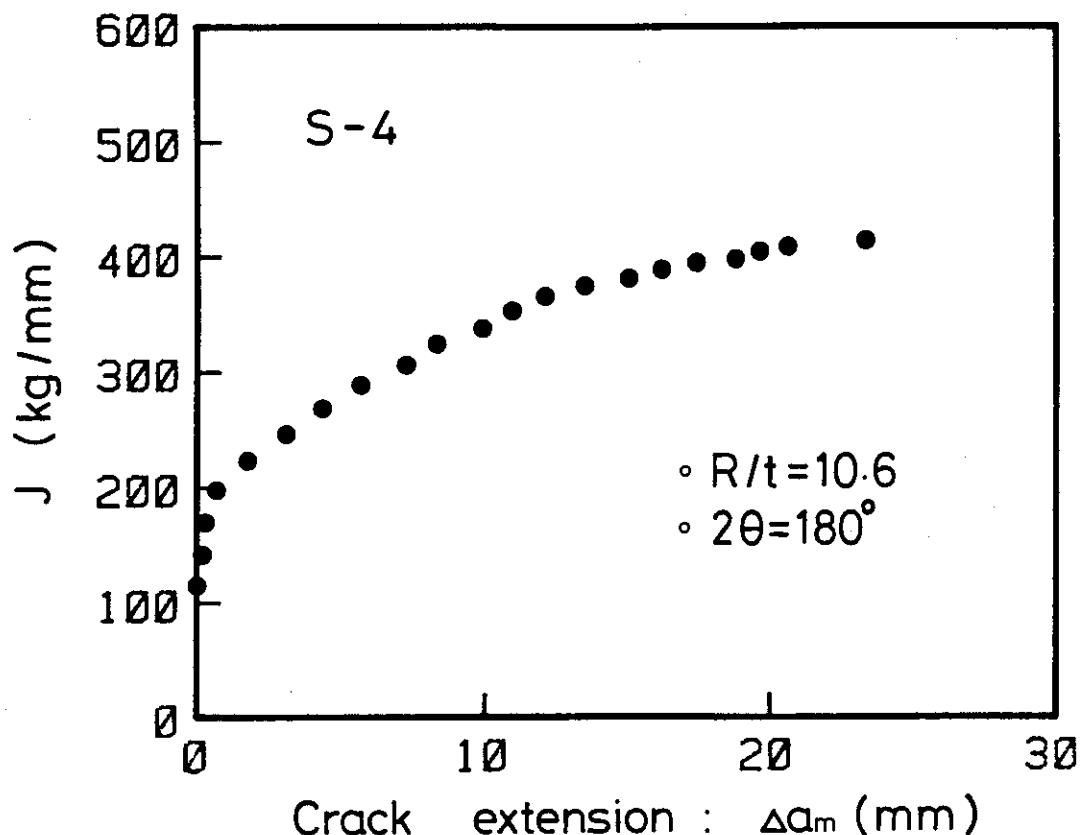


Fig. F.3 J-R curve for S-4 test pipe

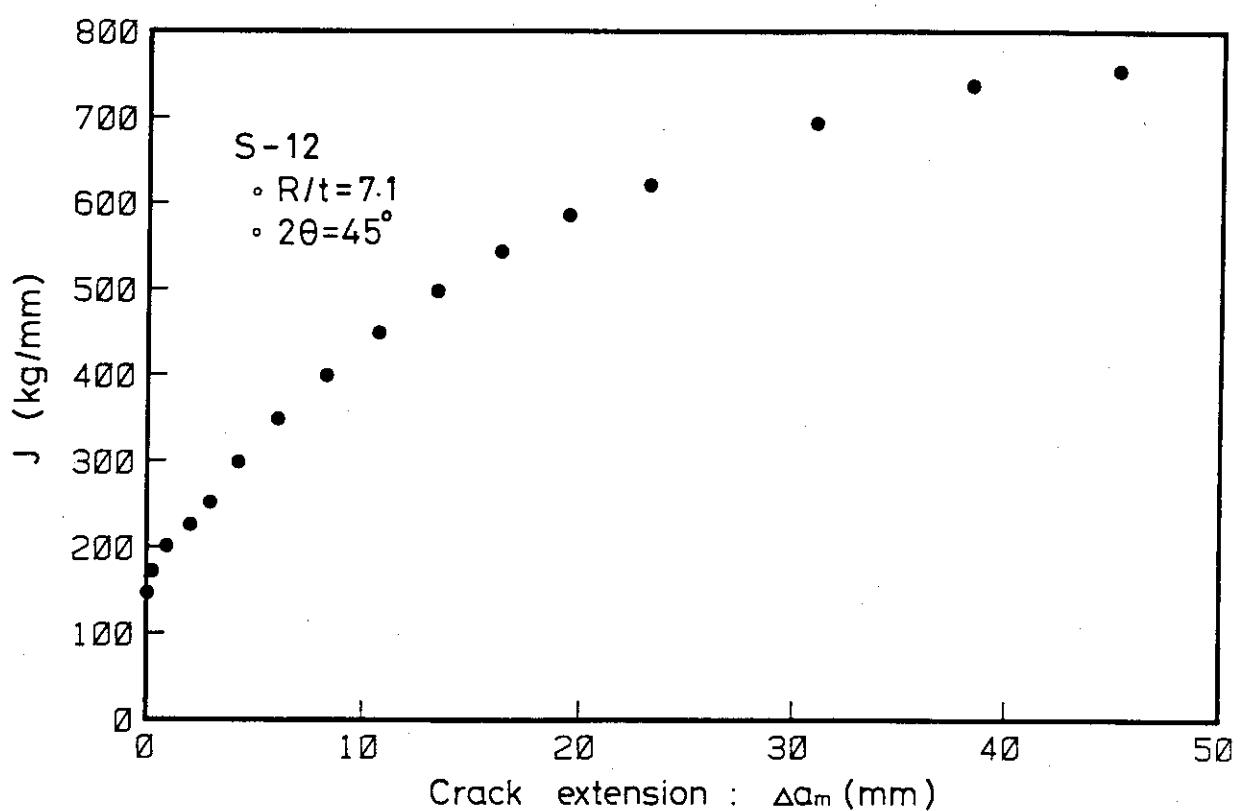


Fig. F.4 J-R curve for S-12 test pipe

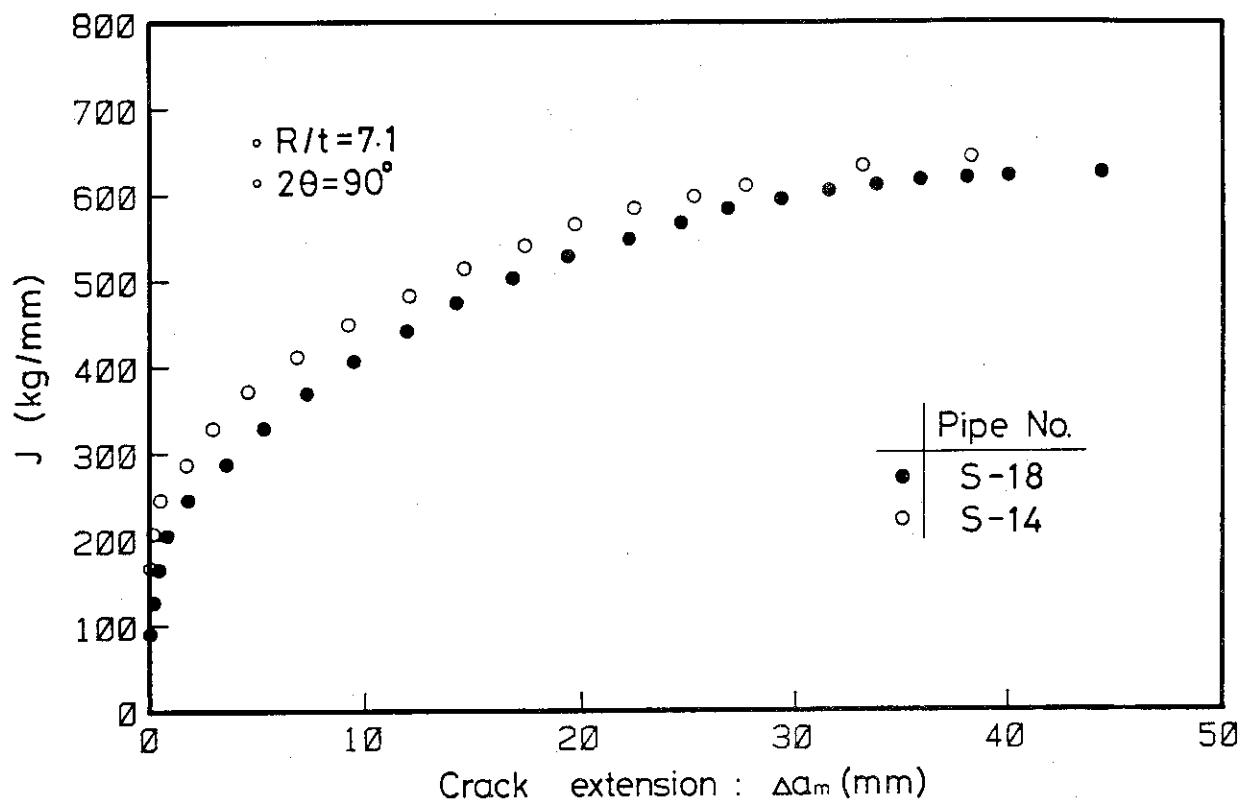


Fig. F.5 J-R curve for S-18 and S-14 test pipes

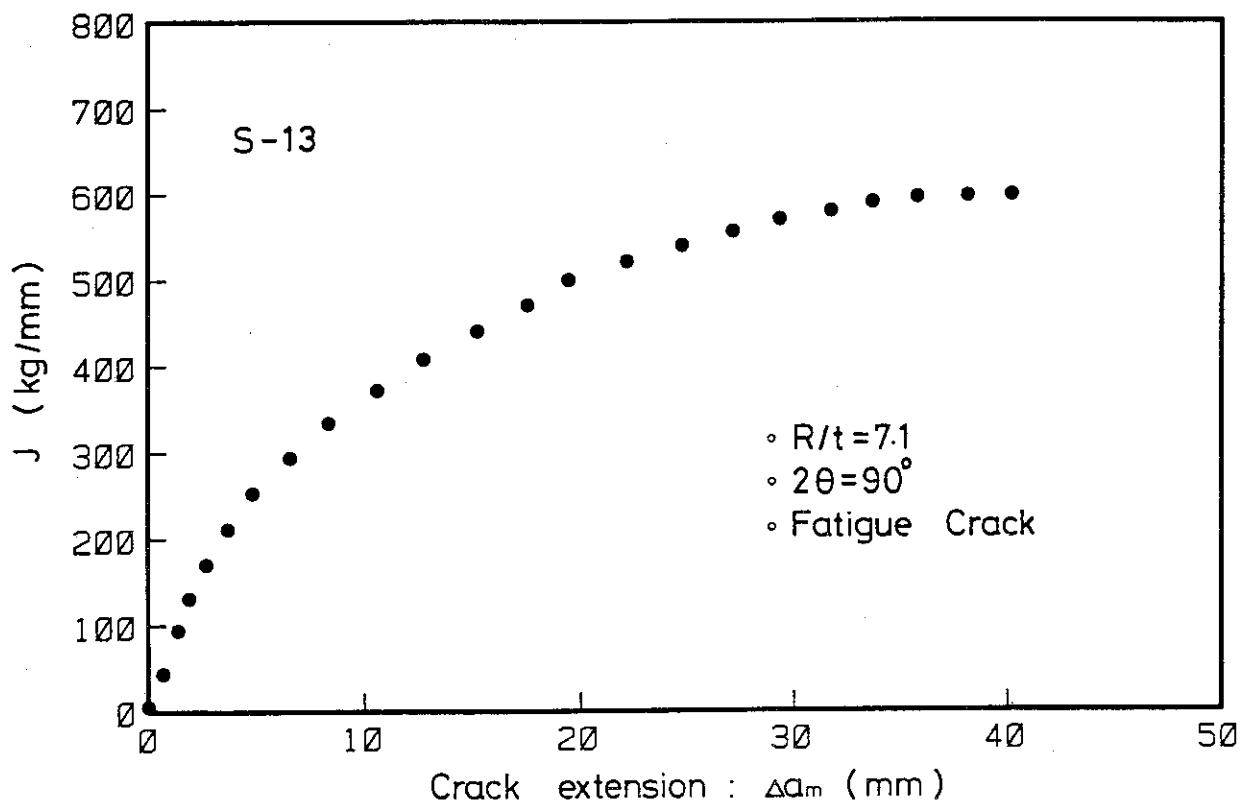


Fig. F.6 J-R curve for S-13 test pipe

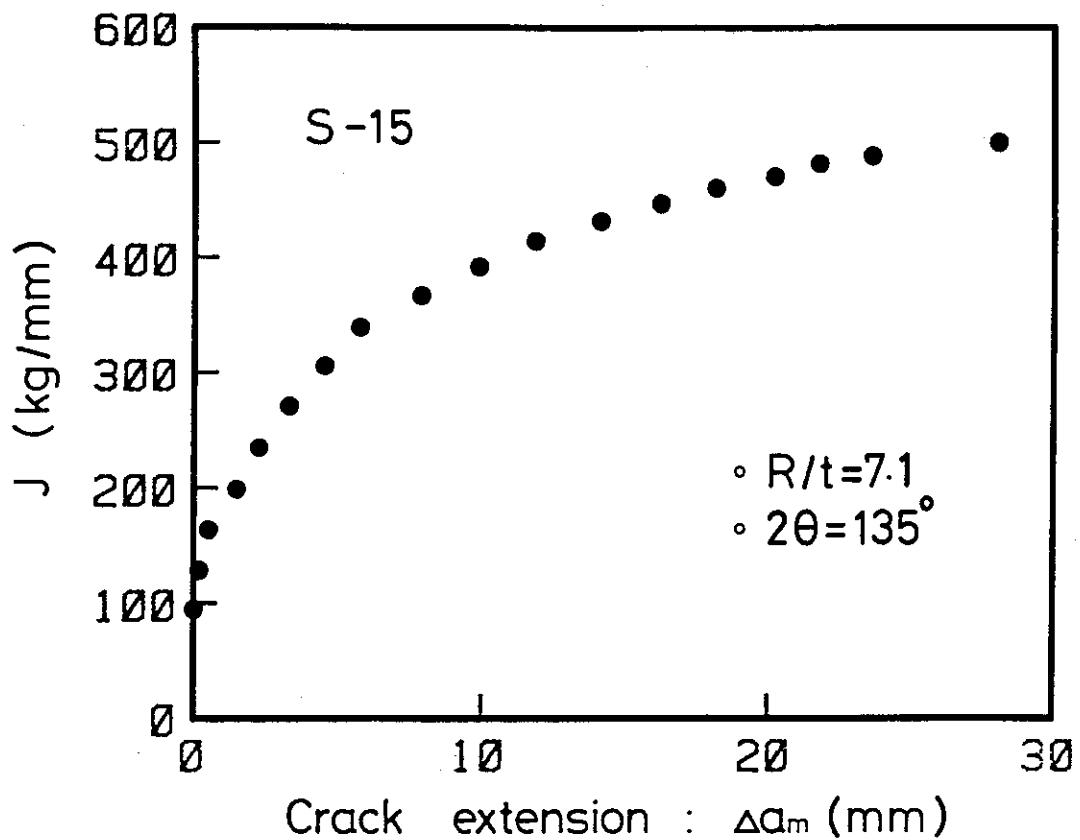


Fig. F.7 J-R curve for S-15 test pipe

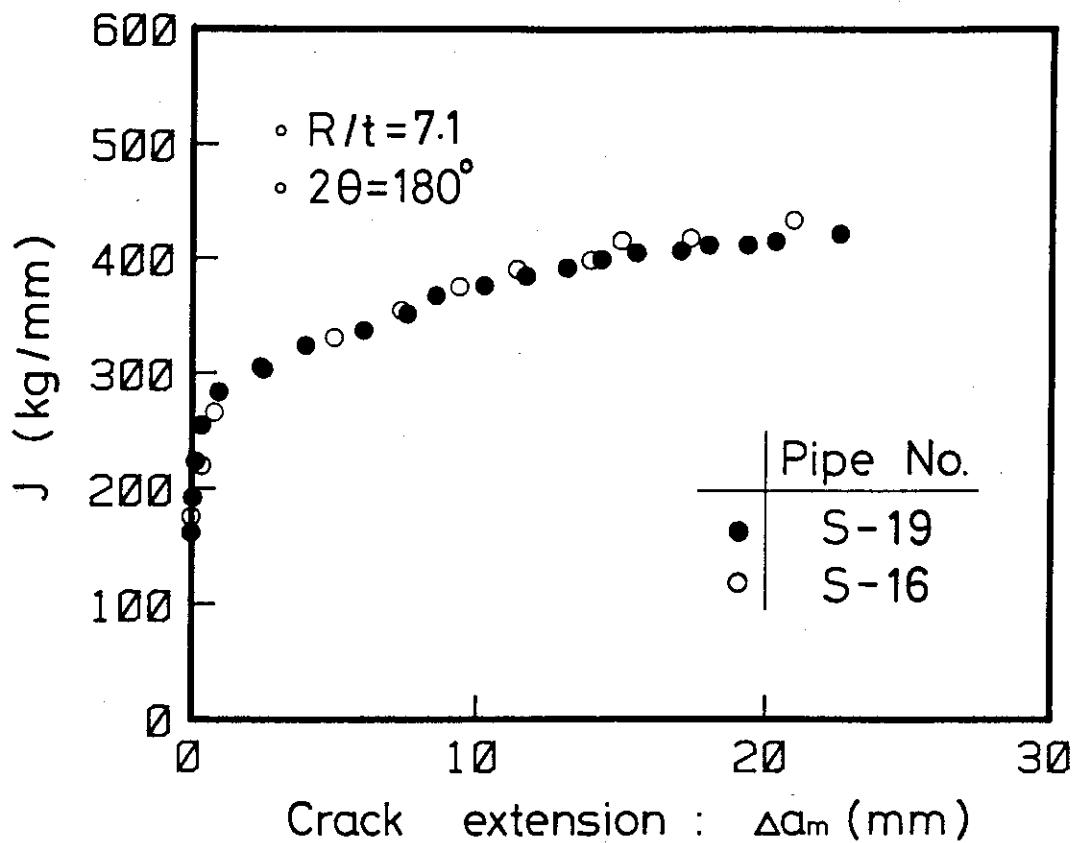


Fig. F.8 J-R curve for S-19 and S-16 test pipes

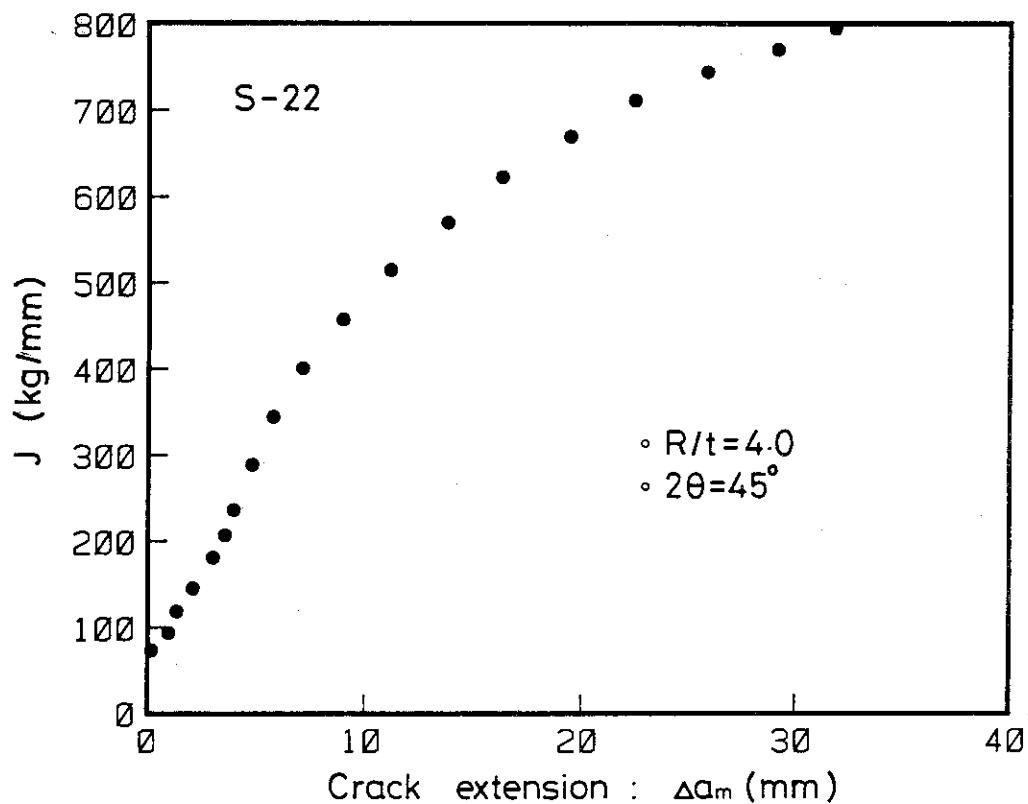


Fig. F.9 J-R curve for S-22 test pipe

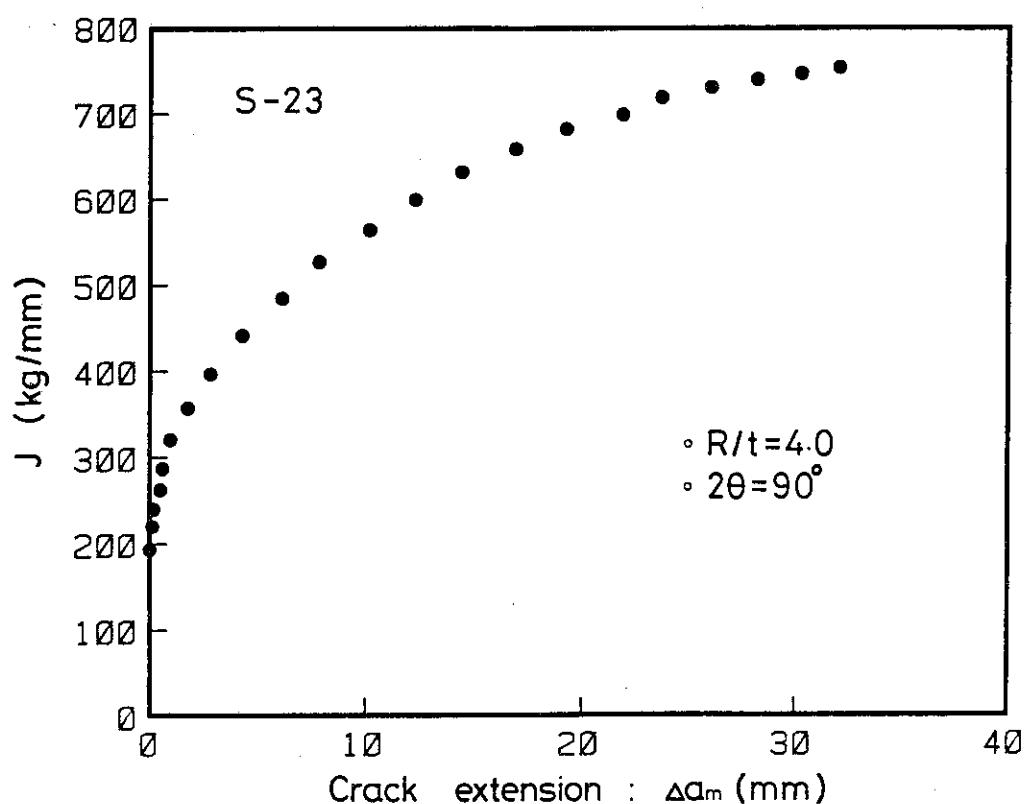


Fig. F.10 J-R curve for S-23 test pipe

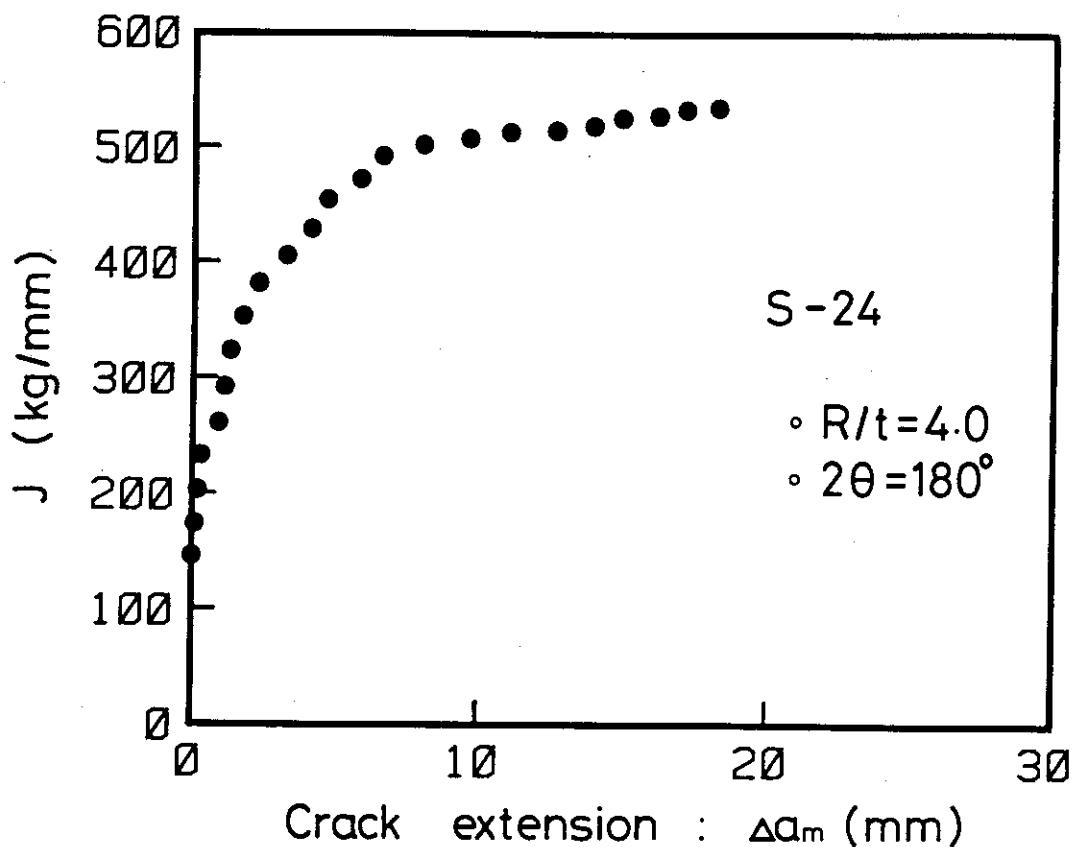


Fig. F.11 J-R curve for S-24 test pipe