

JAERI - M  
85-064

軽水炉配管材の延性不安定破壊に関する研究  
—引張り荷重下での炭素鋼製中央切欠き平板の  
室温における破壊挙動—

1985年5月

金子 正・柴田 勝之・大場 敏弘  
川村 隆一・宮園昭八郎

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 いばらき印刷(株)

軽水炉配管材の延性不安定破壊に関する研究

—引張り荷重下での炭素鋼製中央切欠き平板  
の室温における破壊挙動—

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

金子 正・柴田 勝之・大場 敏弘

川村 隆一・宮園 昭八郎

(1985年5月1日受理)

軽水炉圧力バウンダリ配管の Leak Before Break (漏洩先行型破壊)に関する研究の一環として、炭素鋼配管の破壊挙動を明らかにする試験が、日本原子力研究所で行なわれている。

本報告は、JIS STS 42 鋼管より切り出した中央切欠き平板の室温、引張り荷重下における破壊挙動に関する試験結果をまとめたものである。

この試験研究では、上記、平板の引張試験及び延性不安定破壊試験を実施し、次の項目について検討を行なった。

- (1) 実断面応力基準による破壊挙動の評価
- (2) J-R 曲線の作成
- (3) J 積分に基づく Tearing Instability クライテリオンによる延性不安定破壊の予測

その結果、下記に示す知見が得られた。

- 〔I〕周方向貫通欠陥を有する配管の崩壊荷重値は、下式に示す流動応力  $\sigma_f$  を用いた実断面応力崩壊基準により推定できる。

$$\sigma_f = 0.6 (\sigma_y + \sigma_u)$$

但し、 $\sigma_y$  ; 0.2%耐力、 $\sigma_u$  ; 引張強さ

- 〔II〕高コンプライアンスを有する系のき裂進展の安定性は、J 積分に基づく Tearing Instability クライテリオンにより安全側に評価できる。

Studies on ductile unstable fracture of piping materials  
in light water reactors

— Fracture behavior of center cracked panel specimen  
fabricated from 24-inch diameter carbon steel pipe  
under tensile loading condition at room temperature —

Tadashi KANEKO, Katsuyuki SHIBATA, Toshihiro OHBA,  
Takaichi KAWAMURA and Shohachiro MIYAZONO

Department of Reactor Safety Research  
Tokai Research Establishment, JAERI

( Received May 1, 1985 )

Safety evaluations of nuclear power plant piping system have been performed against postulated circumferential guillotine breaks. This results in overly conservative loading, which in turn requires the use of massive pipe whip restraints that might reduce the reliability of in-service inspection and are very expensive to design and install. Therefore, because of safety and economic consideration, it is highly desirable to determine if the failure of a piping system will occur in a "Leak Before Break" mode. JAERI's piping reliability programs on ductile fracture mechanics analysis techniques, fracture toughness data development and full scale pipe fracture test have been carried out since 1982. However, fracture behavior of carbon steel piping has not been fully understood.

This report presents the results of a research program conducted to evaluate the fracture behavior of center cracked panel specimens fabricated from 24-inch diameter JIS\* STS42 carbon steel pipe under tensile loading condition at room temperature. The program approach includes a two effort. The first phase develops J-R curve data for center cracked panel specimens to characterize crack growth resistance. In addition, the collapse load of center cracked panel specimen is

---

\* JIS ; Japan Industrial Standard

determined using net-section collapse criterion, and that of carbon steel pipe with a through-wall circumferential crack is predicted.

The second phase of this program is to modify the current 100 ton fatigue test machine to conduct unstable fracture experiments under compliant tension. Especially, this phase focusses on the applicability of J-integral tearing instability criterion to predict the unstable fracture behavior of carbon steel piping using center cracked panel specimens.

The following conclusions have been drawn from the results of this investigation.

- (1) Based on the net-section collapse criterion, the collapse load of JIS STS 42 carbon steel pipe with a through-wall circumferential crack can be predicted from flow stress given by

$$\sigma_f = 0.6 (\sigma_y + \sigma_u)$$

where  $\sigma_y$  : 0.2% proof strength,  $\sigma_u$  : ultimate tensile strength

- (2) Assuming elastic-plastic hardening material behavior, the combination of J-integral resistance curves and tearing instability analysis can be used to conservatively estimate the instability point of flawed structures with a high compliance. However, the prediction of the accurate instability point has not yet been determined.

Keywords: Light Water Reactor, Ductile Unstable Fracture, Leak Before Break, Pressure Boundary Piping, Carbon Steel Piping, Net-section Collapse Criterion, J-integral Tearing Instability Criterion, Flow Stress, Structural Integrity

## 目 次

1.	まえがき	1
2.	試験概要と目的	3
3.	試験内容	5
3.1	供試材	5
3.2	丸棒の引張試験	5
3.3	シャルピ衝撃試験	5
3.4	中央切欠き平板の引張試験	6
3.4.1	試験方法	6
3.4.2	J 積分の解析方法	7
3.5	中央切欠き平板の延性不安定破壊試験	7
3.5.1	高コンプライアンス発生装置	8
3.5.2	延性不安定破壊試験法	8
4.	試験結果及び考察	19
4.1	供試材の機械的特性	19
4.1.1	引張試験結果	19
4.1.2	シャルピ衝撃試験結果	19
4.2	中央切欠き平板の引張試験	19
4.2.1	荷重—荷重点変位—き裂長さの関係及びき裂進展状況	19
4.2.2	実断面応力による破壊挙動評価	20
4.2.3	J-R 曲線の作成	21
4.3	中央切欠き平板の延性不安定破壊試験	22
4.3.1	荷重と変位の関係及びき裂進展状況	22
4.3.2	J 積分に基づく Tearing Instability クライテリオンによる 延性不安定破壊挙動評価	23
5.	結 論	48
6.	あとがき—今後の課題—	48
	謝 辞	48
	参考文献	49
	付 録	51

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Objectives .....	3
3. Experimental procedure .....	5
3.1 Material to be tested .....	5
3.2 Tensile test for determining the mechanical properties ....	5
3.3 Charpy V notch impact test .....	5
3.4 Tensile test using center cracked panel specimens .....	6
3.4.1 Test procedure .....	6
3.4.2 Calculation of J-integral .....	7
3.5 Unstable fracture test using center cracked panel specimens .....	7
3.5.1 High compliance test apparatus .....	8
3.5.2 Test procedure .....	8
4. Experimental results and discussion .....	19
4.1 Mechanical properties .....	19
4.1.1 Tensile test results .....	19
4.1.2 Charpy V notch impact test results .....	19
4.2 Tensile test results using center cracked panel specimens .....	19
4.2.1 Load-vs-loadline displacement-vs-crack length and crack growth behavior .....	19
4.2.2 Evaluation of fracture behavior based on the net-section collapse criterion .....	20
4.2.3 Development of J-R curves .....	21
4.3 Unstable fracture test results using center cracked panel specimens .....	22
4.3.1 Load-vs-displacement and crack growth behavior with a high compliance .....	22
4.3.2 Assessment of the crack growth and stability using J-integral tearing instability criterion .....	23
5. Conclusions .....	48
6. Future works .....	48
Acknowledgement .....	48
References .....	49
Appendices .....	51

## List of abbreviations

A/W	Artificial Half Crack Length / Specimen Half Width
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCP	Center Cracked Panel
CT	Compact Tension
$C_m$	Compliance of Disk Spring
EDM	Electric Discharge Machining
JIS	Japan Industrial Standard
JSME	Japan Society of Mechanical Engineers
LBB	Leak Before Break
RT	Room Temperature
SEM	Scanning Electron Microscope
SPEC. ID	Specimen Identification
$\sigma_f$	Flow Stress
$\sigma_y$	0.2% Proof Strength
$\sigma_u$	Ultimate Tensile Strength
$T_{appl}$	Applied Tearing Modulus
$T_{mat}$	Material Tearing Modulus



List of tables

- 2 Research program
- 3.1 Chemical composition of JIS STS 42 carbon steel pipe
- 3.2 Room temperature mechanical properties of JIS STS 42 carbon steel pipe
- 4.1 Net-section stress  $\sigma_{net}$  at crack initiation
- 4.2 Net-section stress  $\sigma_{net}$  at maximum load

List of figures

- 3.1 Schematic drawing of tensile specimen orientation
- 3.2 Tensile specimen size
- 3.3 Schematic drawing of charpy V notch specimen orientation
- 3.4 Charpy V notch specimen size
- 3.5 Schematic drawing of center cracked panel specimen orientation
- 3.6 Center cracked panel specimen size
- 3.7 Calibration line for determining crack extension
- 3.8 Schematic drawing of tension-type high compliance test apparatus
- 3.9 Schematic drawing of center cracked panel specimen orientation used for unstable fracture test
- 3.10 Center cracked panel specimen size used for unstable fracture test
- 4.1 Charpy V notch energy transition curve for 24-inch (609 mm) diameter JIS STS 42 carbon steel pipe
- 4.2 Comparison between JIS STS 42 and ASTM A 106 B carbon steel for charpy V notch energy transition curves
- 4.3a Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm thickness center cracked panel specimen(TP-01) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.3b Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm thickness center cracked panel specimen(TP-02) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.3c Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm thickness center cracked panel specimen(TP-03) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.4a Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm thickness center cracked panel specimen(TP-06) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.4b Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm thickness center cracked panel specimen(TP-07) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.4c Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm thickness center cracked panel specimen(TP-08) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.5a Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm thickness center cracked panel specimen(TP-111) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.5b Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm thickness center cracked panel specimen(TP-112) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.5c Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm thickness center cracked panel specimen(TP-121) of JIS STS 42 carbon steel

## List of figures (continued)

- 4.6 Applied bending load for the failure of a 6-inch(165mm) diameter JIS STS 42 carbon steel pipe with a through-wall circumferential crack at room temperature as calculated by the net-section collapse criterion and comparison with full-scale pipe test results
- 4.7 J-R curves for 25mm thickness center cracked panel specimens( $a/w=0.5$ ) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.8 J-R curves for 25mm thickness center cracked panel specimens( $a/w=0.7$ ) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.9 J-R curves for 10mm thickness center cracked panel specimens( $a/w=0.5$ ) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.10 Effect of artificial crack length( $a/w$ ) on J-R curves using 25mm thickness center cracked panel specimens, JIS STS 42 carbon steel
- 4.11 Effect of specimen thickness on J-R curves using center cracked panel specimens( $a/w=0.5$ ), JIS STS42 carbon steel
- 4.12 Comparison of J-R curves between 10mm thickness center cracked panel specimen and pipe specimen
- 4.13 J/T plots from J-R curves data of center cracked panel specimens
- 4.14a Load-versus-loading system total displacement curve for 10mm thickness center cracked panel specimen(TP-211) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.14b Load-versus-loading system total displacement curve for 10mm thickness center cracked panel specimen(TP-212) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.15a Load-versus-loadline displacement curve for 10mm thickness center cracked panel specimen (TP-211) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.15b Load-versus-loadline displacement curve for 10mm thickness center cracked panel specimen (TP-212) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.16a Loadline displacement-versus-loading system total displacement for 10mm thickness center cracked panel specimen (TP-211) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.16b Loadline displacement-versus-loading system total displacement for 10mm thickness center cracked panel specimen (TP-212) of JIS STS 42 carbon steel
- 4.17 J/T plots for  $T_{\text{applied}}$  and  $T_{\text{material}}$  of center cracked panel specimens with a compliance of  $6 \times 10^{-4}$  mm/kg

List of photos

- 3.1 Center cracked panel specimen
- 3.2a MTS-100ton fatigue machine without high compliance apparatus-external appearance
- 3.2b MTS-100ton fatigue machine without high compliance apparatus-measuring the loadline displacement
- 3.3 MTS-100ton fatigue machine with high compliance apparatus-external appearance
- 4.1 SEM observation of fractured charpy V notch specimen, JIS STS 42 carbon steel (Test temp.; RT )
- 4.2 Development of crack growth in 10mm thickness CCP specimen (TP-121) , JIS STS 42 carbon steel
- 4.3 SEM observation of fractured CCP specimen, JIS STS 42 carbon steel
- 4.4a Development of crack growth in 10mm thickness CCP specimen (TP-211) with a compliance of  $6 \times 10^{-4}$  mm/kg
- 4.4b Development of crack growth in 10mm thickness CCP specimen (TP-212) with a compliance of  $6 \times 10^{-4}$  mm/kg
- 4.5 Unstable fractured CCP specimen of JIS STS 42 carbon steel
- 4.6 SEM observation of fractured specimen with a compliance of  $6 \times 10^{-4}$  mm/kg

## 1. ま え が き

配管の延性不安定破壊に関する研究は、高圧ガスパイプラインの事故を一つの契機として、展開されている<sup>1)</sup>。軽水炉の分野では、原子炉冷却材圧力バウンダリ配管が延性不安定破壊によって、瞬時破断するという想定事象に関して、Leak Before Break (LBB；漏洩先行型破壊)と呼ばれる考え方がある。この考え方は、

- (1) 配管に生じたき裂が、管の肉厚方向に貫通し、貫通部から漏洩する原子炉冷却水が検出され、配管が不安定破壊を生ずる以前に、プラントの運伝停止作業が実施できること。
- (2) 上記の作業が進められる間、き裂の進展速度が、極めて遅く、不安定破壊を生ずる限界き裂長さ及び深さに対して、配管が十分な裕度を有していること。

を指している。従って、このLBB概念の成立を実証するには、

- (1) 非破壊検査における信頼性評価
- (2) 応力腐食割れ、腐食疲労等により生じたき裂の進展速度評価
- (3) 延性不安定破壊に対する予測法
- (4) 漏洩検出に係る信頼性評価

等に関する実証研究が、極めて重要となってくる。

これらの研究の結果、LBB概念が成立し、現在想定されている瞬時破断における破断口よりもはるかに小さな破断口の想定で十分であることが、確証されると、以下に示す様なプラントの信頼性向上及び設計合理化に大幅に寄与する可能性がある。

- (1) 格納容器及びECCS系の設計合理化
- (2) パイプホイップを防ぐためのレストレイント、ジェットフォース対策に関する大幅な設計合理化
- (3) 上記に伴う供用期間中検査 (ISI) 時の作業性向上及び ISI 時における従業員の被ばく量低減

我が国では、ステンレス鋼配管に生じた応力腐食割れによるき裂の発見を契機として、ステンレス鋼管を用いたLBB実証試験が日本原子力研究所及び原子力工学試験センターで、実施されている。これらの実証研究では、実断面応力崩壊基準及びJ積分によるTearing Instability基準が、不安定破壊予測法として検討されている<sup>2), 3), 4)</sup>。そして、その研究成果は、より合理的な原子力発電所安全審査基準の確立のために、反映される段階にある<sup>5), 6)</sup>。一方、米国では、この分野の研究は、NRC及びEPRiを中心に展開され<sup>7), 8), 9)</sup>、その成果は、供用期間中に検出されたき裂を有するステンレス鋼製配管の安全裕度の見直しに活用されている<sup>10), 11)</sup>。さらに、配管の瞬時破断対策の見直しにも反映されつつある。ウェスティングハウス社及びコンパッションエンジニアリング社は、一次系ステンレス鋼配管へのパイプホイップレストレイント設置免除を米国NRCへ申請し、一部のプラントでNRCは、これを承認している<sup>12), 13)</sup>。この様に、ステンレス鋼配管については、国内外ともに、広範囲な研究が実施された結果、LBB概念の成立が広く認められる方向にある。

しかしながら、ステンレス鋼配管と並んで原子力発電プラントを構成する炭素鋼配管のLBB実証研究は、国内外ともに、まだ緒についたばかりである。米国では、U.S. David Taylor Naval 研究所のM. G. Vassilaros らが、管径8インチのASTM A 106 Gr. B鋼管を用い、J積分に基づくTearing Instabilityクライテリオンを導入して、周方向貫通疲労き裂を有する配管の破壊挙動について検討を行っている<sup>14)</sup>。さらに、Battele Columbus 研究所のG. Wilkowski らは、NRCからの委託研究“Degraded Piping Program phase II”において、A 106 Gr. B (最大径16インチ)及びA 333 Gr. 6 (最大径10インチ)を供試材として、欠陥を有する配管の破壊試験を計画している<sup>15)</sup>。一方、この様な実パイプを用いた実証試験と平行して、Materials Engineering Associates のF. J. Loss は、NRC資金により、小型試験片を用いて配管材料の材料データ(破壊靱性値、シャルピ衝撃値)を得る研究を進めている<sup>16)</sup>。我が国では、軽水炉圧力バウンダリを構成する代表的な炭素鋼管JIS STS 42に対して、日本原子力研究所の柴田らが、管径6インチの貫通欠陥を有する配管を用いて、四点曲げ試験を昭和59年より行っている。さらに、日本溶接協会3DF小委員会では、日本原子力研究所からの委託研究として、小型試験片(主に、CT試験片)を用いた動的弾塑性破壊靱性試験及び不安定破壊試験を計画立案し、昭和59年より試験を開始している。以上の様に、炭素鋼の延性不安定破壊に関する研究は、着手されたばかりであり、前述の破壊予測法の検討や材料特性データの集積が急務となっている。

以上の背景から、本試験では、炭素鋼管STS 42の破壊挙動に関する知見を得るために、中央切欠き平板試験片を用いて、室温大気中で引張試験及び高コンプライアンス装置による延性不安定破壊試験を実施した。本報告書は、上記の試験内容及び成果についてまとめたものである。

なお、本試験は、現在日本原子力研究所で実施している科学技術庁からの受託研究「配管信頼性実証試験—不安定破壊試験」をサポートするために行ったものである。

## 2. 試験概要と目的

本試験で用いた材料は、軽水炉冷却材圧力バウンダリで使用されている代表的鋼管 STS 42 である。この鋼管より切り出した中央切欠き平板試験片に、室温大気中で引張荷重を負荷して、試験を行った。試験の内容は、皿ばねを装着した高コンプライアンス発生装置の有無によって、二つのタスクに分かれる。Table 2.1 及び以下に、各試験内容及び目的を示す。

- タスク 1; 中央切欠き平板の引張試験
  - a) 内容…… 100 トン疲労試験機を用いた平板の引張試験
  - b) 目的(1) 実断面応力に基づく破壊挙動の評価
    - (2) J-R 曲線の作成
- タスク 2; 中央切欠き平板の延性不安定破壊試験
  - a) 内容…… 100 トン疲労試験機に、高コンプライアンス発生装置を設けて実施した引張荷重下での平板の延性不安定破壊試験
  - b) 目的…… J 積分に基づく Tearing Instability クライテリオンによる延性不安定破壊評価

上記に加えて、供試材の機械的性質を知るために、丸棒の引張試験及びシャルピ衝撃試験を実施した。なお、タスク II の試験に先立って、高コンプライアンス発生装置の設計、製作も行った。

Table 2.1 Research program

Task	Objective	Test machine
Task-1	To develop J-R curves To predict the maximum load of a through-wall circumferential cracked pipe using net-section collapse criterion	100 ton fatigue test machine
Task-2	To evaluate the applicability of J-integral tearing instability criterion to predict the unstable fracture behavior	100 ton fatigue test machine with high compliance test apparatus



### 3. 試験内容

#### 3.1 供試材

供試材は、軽水炉冷却材圧力バウンダリで使用されている代表的な炭素鋼管 STS 42 (JIS G 3455; 高圧配管用炭素鋼管) である。この鋼管は、住友金属工業(株)で、Si-(A $\phi$ )キルド鋼を用いて熱間仕上げされた継目無鋼管である。

管寸法は、外径 609.6 mm (24 インチ)、肉厚 38.9 mm (Sch.100) で、焼ならし熱処理(900 °C, 30 分空冷)が施されている。

Table 3.1 は、化学成分のレドール分析値で、JIS G 3455 の要求を、満足している。Table 3.2 は、機械的性質で、前述の JIS 規格 G 3455 を満たしている。なお、Table 3.2 の各値は、ミルシート記載値ではなく、次項 3.2 で述べる丸棒の引張試験結果である。

#### 3.2 丸棒の引張試験

供試材 STS 42 の機械的性質 (0.2 %耐力, 引張強さ, 伸び, 絞り) を明らかにするために、容量 10 ton のインストロン引張試験機を用いて、試験を行った。

試験片の採取は、Fig. 3.1 に示す様に、管径 24 インチ、肉厚 Sch. 100 鋼管の管長手方向と試験片の長軸方向が一致する様にした。採取位置は、管内面より  $t/4$  ( $t$ ; 管肉厚) のところである。Fig. 3.2 は、丸棒試験片の寸法を示したものであり、試験片の標点間距離は、50 mm である。

試験は、JIS Z 2241-1980 (金属材料引張試験方法) に準じて、室温大気中で実施した。引張試験機のクロスヘッド速度は、0.5 mm/min である。

#### 3.3 シャルピ衝撃試験

供試材 STS 42 のシャルピ吸収エネルギーを求めるために容量 300 J (東京衡機製 IJ-30B) のシャルピ試験機を用いて、試験を実施した。

試験片の採取は、Fig. 3.3 に示す様に、鋼管の管長手方向と試験片長軸方向が一致する様にした。採取位置は、管内面より  $t/4$  ( $t$ ; 管肉厚) のところである。Fig. 3.4 は、試験片寸法を示したものであり、JIS Z 2202-1980 (金属材料衝撃試験片) に基づく 4号試験片である。

試験は、JIS Z 2242-1980 (金属材料衝撃試験方法) に準じて行い、試験温度は  $-100^{\circ}\text{C}$ 、 $-80^{\circ}\text{C}$ 、 $-60^{\circ}\text{C}$ 、 $-40^{\circ}\text{C}$ 、 $-20^{\circ}\text{C}$ 、 $0^{\circ}\text{C}$ 、 $24^{\circ}\text{C}$  (室温)、 $40^{\circ}\text{C}$ 、 $60^{\circ}\text{C}$  とした。各温度で用いた試験片本数は、3本である。なお、液体窒素雰囲気 ( $-130^{\circ}\text{C}$  以下) で、試験片を冷却し、試験に供したものが1本ある。

### 3.4 中央切欠き平板の引張試験

配管の延性不安定破壊予測法の一つに、実断面応力崩壊基準がある。この予測法は、その適用が簡便であることから、供用中に検出されたき裂を有するステンレス鋼配管の安全裕度評価に採用されている<sup>10)</sup>。しかしながら、STS 42 鋼にこの基準を適用することの妥当性について、十分な検討が行われていない。従って、本試験の目的は STS 42 鋼について、実断面応力に基づく破壊挙動を評価することである。

一方、上記の破壊基準では、配管系のコンプライアンスの影響を考慮したき裂成長の安定性評価は行えない。このために、次項 3.5 で述べる破壊力学パラメータ J 積分に基づき Tearing Instability クライテリオンによる破壊挙動評価も必要となる。この試験の第二の目的は、この破壊クライテリオンの評価に先立って、延性き裂の安定成長に対する材料の抵抗を表す曲線 (J-R 曲線) を得ることである。

#### 3.4.1 試験方法

##### a) 試験片

試験片は、鋼管より切り出した中央切欠き平板である。試験片の採取は、Fig. 3.5 に示す如く管径 24 インチ、肉厚 Sch. 100 鋼管の管長手方向と試験片の長軸方向が一致する様にした。試験片は、Fig. 3.6 に示す如く、人工切欠き寸法及び板厚をパラメーターにして、各条件につき 3 回の繰返し数を取り、合計 9 枚である。同図には、試験片寸法 (長さ 470 mm、幅 100 mm、板厚 25 mm または 10 mm) も示してある。試験片中央部の切欠き (Fig. 3.6) は、放電加工によって施された貫通欠陥である。Photo. 3.1 は、試験片の外観写真である。

##### b) 試験方法

試験開始に先立って、試験片を MTS-100 トンの疲労試験機 (Photo. 3.2 a) にチャック間距離が 185 mm となる様に装着した。Photo. 3.2 b は、装着部の拡大写真で、試験機に試験片をセット後、ナイフエッジを介してクリップゲージを取り付けてある。クリップゲージの取り付け後、室温大気中で所定変位まで引張荷重を試験片に負荷し、次の項目について計測及び写真撮影を実施した。

- (1) 荷重-荷重点変位曲線
- (2) き裂長さ
- (3) き裂進展挙動の観察

なお、試験機のクロスヘッド速度は 1 mm/min である。

荷重点変位 (標点間距離; 150 mm) は、ナイフエッジを介して、東京測器製クリップゲージ RA-25 S を用いて測定した。荷重の測定には、疲労試験機に装着されているロードセルを用いた。そして荷重-荷重点変位の関係をデータレコーダ及び X-Y ペンレコーダに記録した。

き裂長さは、Fig. 3.7 に示す較正直線を用いて求めた。同図の横軸は、読み取り式光学顕微鏡で求めた表面のき裂長さである。一方、縦軸は表面のき裂長さを求めた同一試験片に試験中、白ペンを塗布して、き裂の前縁が判る様にマーキングし、試験終了後 J S M E S 001<sup>17)</sup>に基

づく三点平均法によって求めたき裂長さである。即ち、本試験では顕微鏡で測定したき裂長さから、Fig. 3.7で示す較正直線を用いて、き裂長さを求めた。

さらに、き裂進展挙動を知るために、所定変位毎に写真撮影（レンズ；メディカルニコール、絞り；5.6、シャッタースピード；1/60）を実施した。なお、その際のシャッタースIGNALを、前述の荷重-荷重点変位曲線と同一のグラフ上に出力させた。

### 3.4.2 J積分の解析法

中央切欠き平板のJ積分算出は、前項3.4.1で求めた荷重-荷重点変位-き裂長さの関係をもとに、G.S. Garwoodによるき裂進展を考慮した次の式<sup>18)</sup>を用いて行った。

$$J_n = J_{n-1} + \frac{U_n - U_{n-1}}{B(W - a_n + a_{n-1})} \quad (3.1)$$

但し、

W：試験片の幅

B：試験片の板厚

a：き裂進展長さ

U：荷重-荷重点変位曲線下の面積

### 3.5 中央切欠き平板の延性不安定破壊試験

配管に生じたき裂が管肉厚を貫通し、内部流体の漏洩が検出されると、プラントは運転停止手順に入る。この間、配管系が有するコンプライアンス<sup>(\*)</sup>と内部流体エネルギーにより、き裂開口部が急速に大きくなる可能性も考えられる。従って、き裂進展の安定性評価に際しては、J積分、き裂開口角などで代表されるき裂先端近傍の力学的状態に加えて、負荷系の剛性を加味して検討することも重要である。

Parisらは、J積分抵抗曲線（J-R曲線）に基づき、き裂進展の安定性を判定する手法を提案している<sup>19)</sup>。この手法は、破壊靱性試験によって得られる材料のJ-R曲線の傾きと簡易解析法<sup>20)</sup>や詳細解析法によって求められる負荷状態におけるJ値の変化率とを比較して、き裂を有する構造物の不安定破壊挙動を論ずる方法である。

上記、き裂進展の安定解析に用いられる力学的なパラメーターTmat（延性破壊材料係数；Material Tearing Modulus）及びTappl（延性破壊荷重係数；Applied Tearing Modulus）は、下式で示される。

$$T_{mat} = \frac{E}{\sigma_f^2} \frac{dJ_R}{da} \quad (3.2)$$

$$T_{appl} = \frac{E}{\sigma_f^2} \left( \frac{\partial J_A}{\partial a} \right)_{J_T} \quad (3.3)$$

(\*) ばね定数の逆数で、配管系のコンプライアンスが大きいということは、その剛性が低いことを意味している。

但し、

- $E$  : 縦弾性係数                       $\sigma_f$  : 流動応力  
 $J_A$  : 負荷状態における J 積分値  
 $d_T$  : 総変位量  
 $J_R$  : J-R 曲線上の  $d_a$  に対する J 積分値  
 $a$  : き裂長さ

である。

この手法は、上記の二つの係数の比較を行い、次の式を満足するならば、不安定破壊が生じるという考え方である。

$$T_{\text{appl}} \geq T_{\text{mat}} \quad (3.4)$$

本試験の目的は、高コンプライアンス発生装置を用いて、不安定破壊現象を生起させ、上記の J 積分に基づく不安定破壊理論の適用性を検討することである。

### 3.5.1 高コンプライアンス発生装置

中央切欠き平板の延性不安定破壊試験を行うには、高コンプライアンスを有する荷重負荷装置が必要である。このため、皿ばねを用いた高コンプライアンス発生装置を製作し、100トン疲労試験機に取り付けた。Fig. 3.8は、その取り付け状況を示す概要図で、Photo. 3.3は、外観写真である。本装置は、引張荷重を皿ばね及びガイドロッドを介して試験片に負荷できる構造となっている。試験片の破壊時には、皿ばねのエネルギーが急激に放出されるために、このエネルギーをオイルダンパーを用いて吸収できる様にしてある。皿ばねは、高さ494 mm、外径475 mmの円筒容器の中に、最大6枚直列に装荷できる。その皿ばね寸法は、外径425 mm、内径160 mm、厚さ17 mmで、皿ばねの装荷枚数を変化させることによって、コンプライアンスをパラメーターにした試験が可能となる。なお、皿ばね1枚当りのコンプライアンスは、 $2 \times 10^{-4}$  mm/kgである。

### 3.5.2 延性不安定破壊試験法

#### a) 試験片

試験片は、鋼管から切り出した3.4.1項と同様な中央切欠き平板である。試験片の採取は、Fig. 3.9に示す如く管径24インチ、肉厚Sch. 100鋼管の管長手方向と試験片の長軸方向が一致する様にした。採取位置は、管内面より $t/4$  ( $t$ :肉厚)のところである。Fig. 3.10は、試験片寸法(長さ470 mm、幅100 mm、厚さ10 mm、初期人工欠陥比 $A/W=0.5$ )で、試験片中央部の切欠きは、放電加工による貫通欠陥である。試験の繰り返し数は、2である。

#### b) 試験方法

試験開始に先立って、100トン疲労試験機に高コンプライアンス発生装置を取り付けた後、試験片を装着した。本試験で用いた皿ばねは3枚で、そのコンプライアンス $C_M$ は、 $6 \times 10^{-4}$  mm/kgである。試験片装着後、Photo. 3.3と同様に、クリップゲージを取り付け、室温大気中で引張荷重を負荷した。試験機のクロスヘッド速度は、1 mm/minで、次の項目について、計測を実施した。

- (1) 荷重-荷重点変位曲線
- (2) 荷重-試験系全体変位曲線
- (3) き裂進展挙動の観察

荷重-荷重点変位（標点間距離：150 mm）の関係は、3.4.1項と同様な方法で測定した。また、試験系総変位は、疲労試験機に内蔵されている差動トランスを介して、X-Yレコーダ及びデータレコーダに記録した。

さらに、不安定破壊時のき裂進展挙動を知るために、3.4.1(b)と同様に、写真撮影を実施し、その際のシャッター信号をデータレコーダに入力した。なお、き裂が不安定成長を始める付近からモータドライブによる自動写真撮影を行った。

Table 3.1 Chemical composition of JIS STS 42 carbon steel pipe

	C	Si	Mn	P	S
Spec.*	≤ 0.30	0.10-0.35	0.30-1.40	≤ 0.035	≤ 0.035
Ladle Analysis	0.20	0.30	1.37	0.024	0.006

\* JIS G 3455

Table 3.2 Mechanical properties of JIS STS 42 carbon steel pipe at room temperature

Spec.*	0.2% Proof Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Ultimate Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation % in 50mm	Reducton of Area %
	≥ 25	≥ 42	≥ 24	—
Specimen B-3	36.1	54.5	33	76
Specimen B-4	37.2	57.2	33	76
Average	36.7	55.9	33	76

\* JIS G 3455

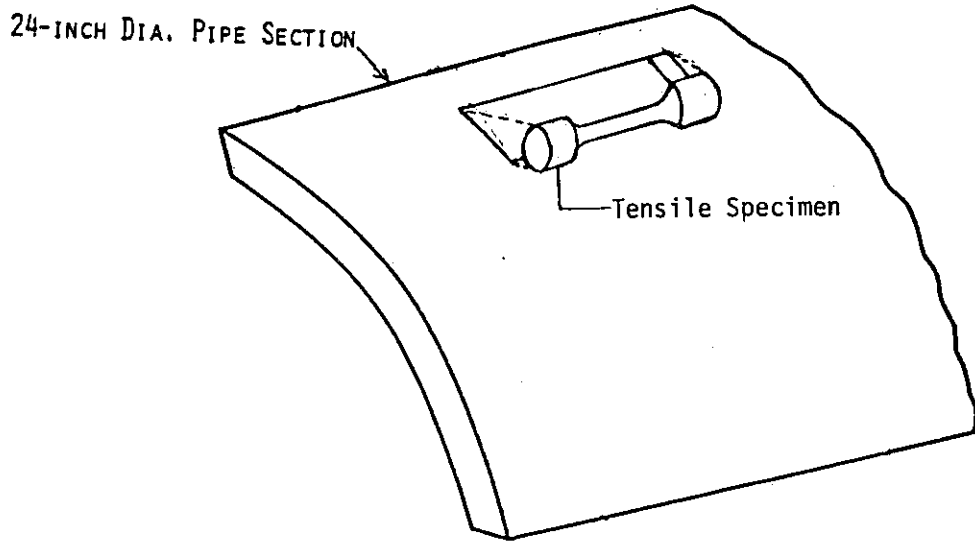


Fig. 3.1 Schematic drawing of tensile specimen orientation

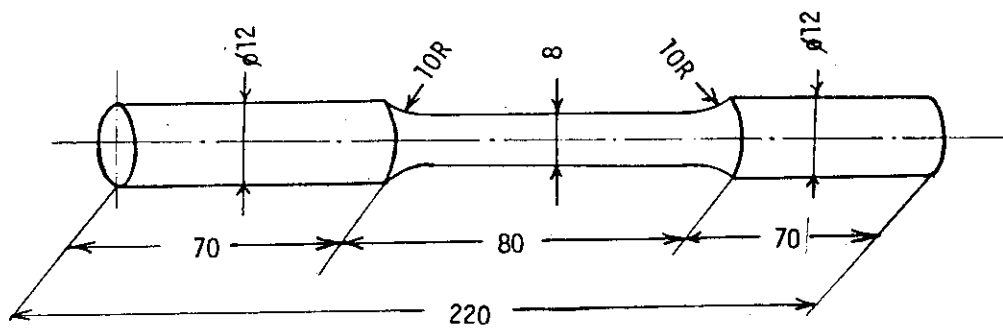


Fig. 3.2 Tensile specimen size

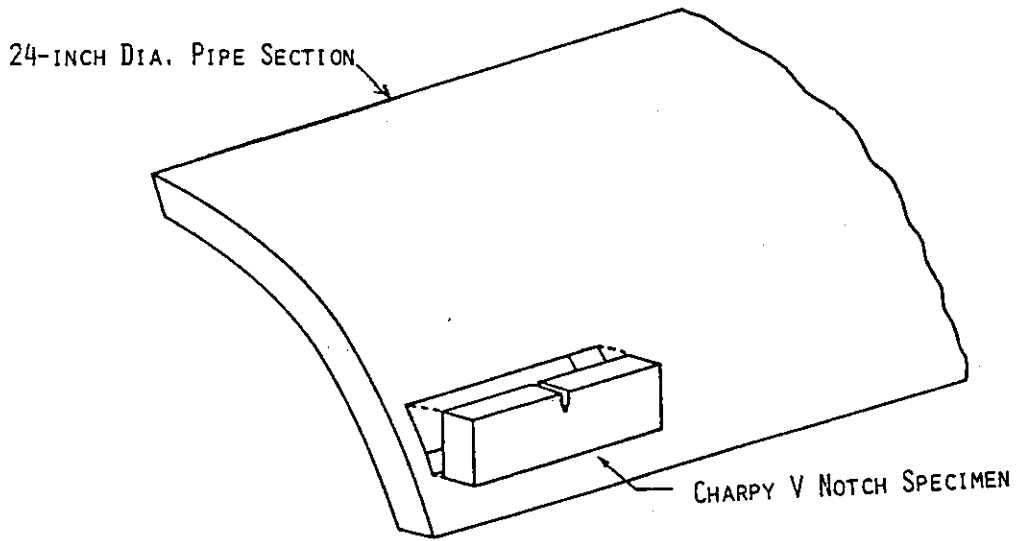


Fig. 3.3 Schematic drawing of charpy V notch specimen orientation

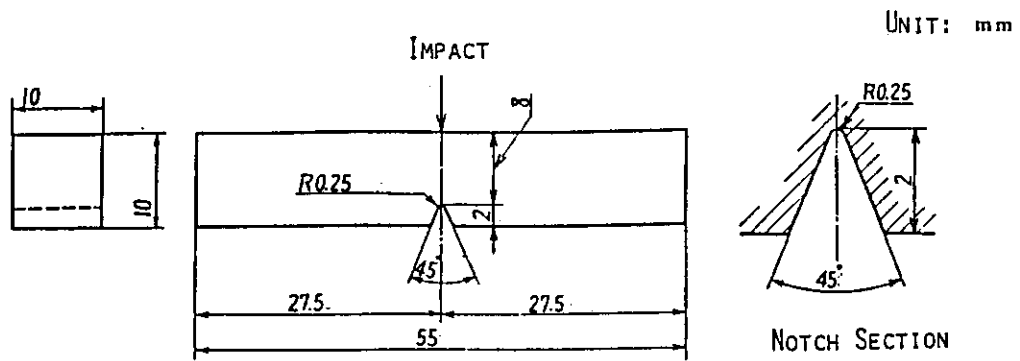


Fig. 3.4 Charpy V notch specimen size



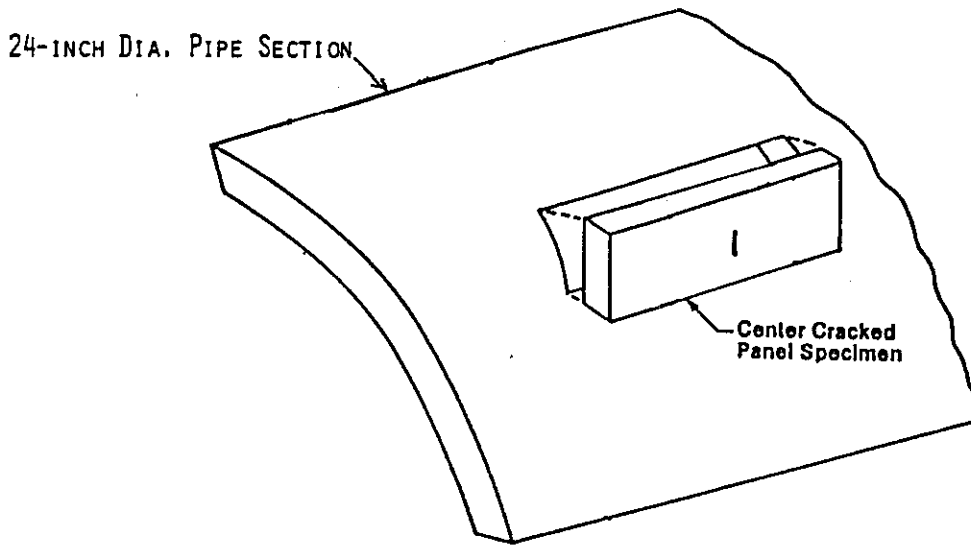


Fig. 3.5 Schematic drawing of center cracked panel specimen orientation

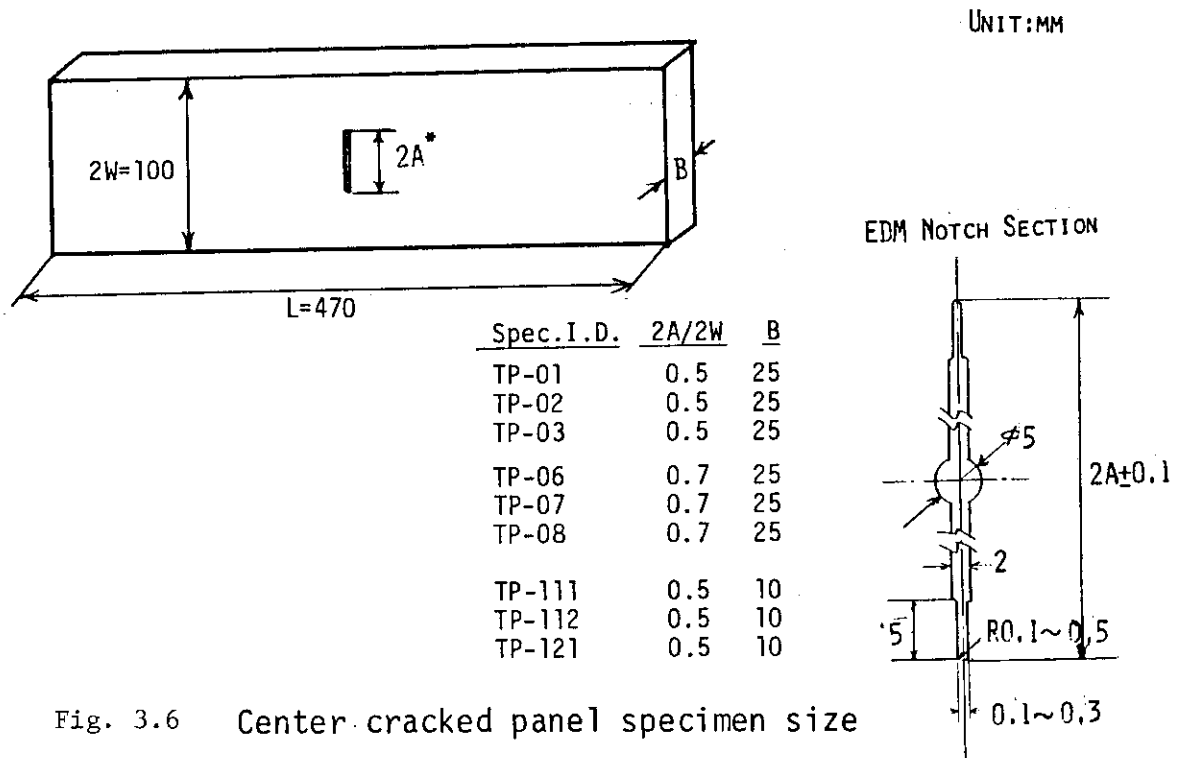


Fig. 3.6 Center cracked panel specimen size

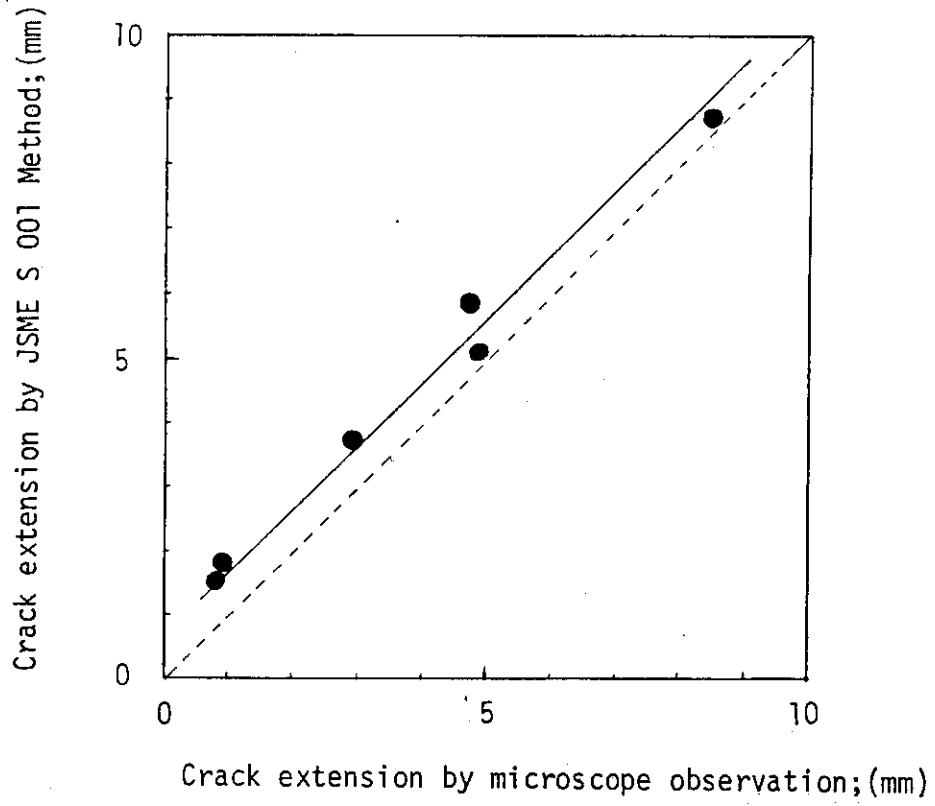


Fig. 3.7 Calibration line for determining crack extension

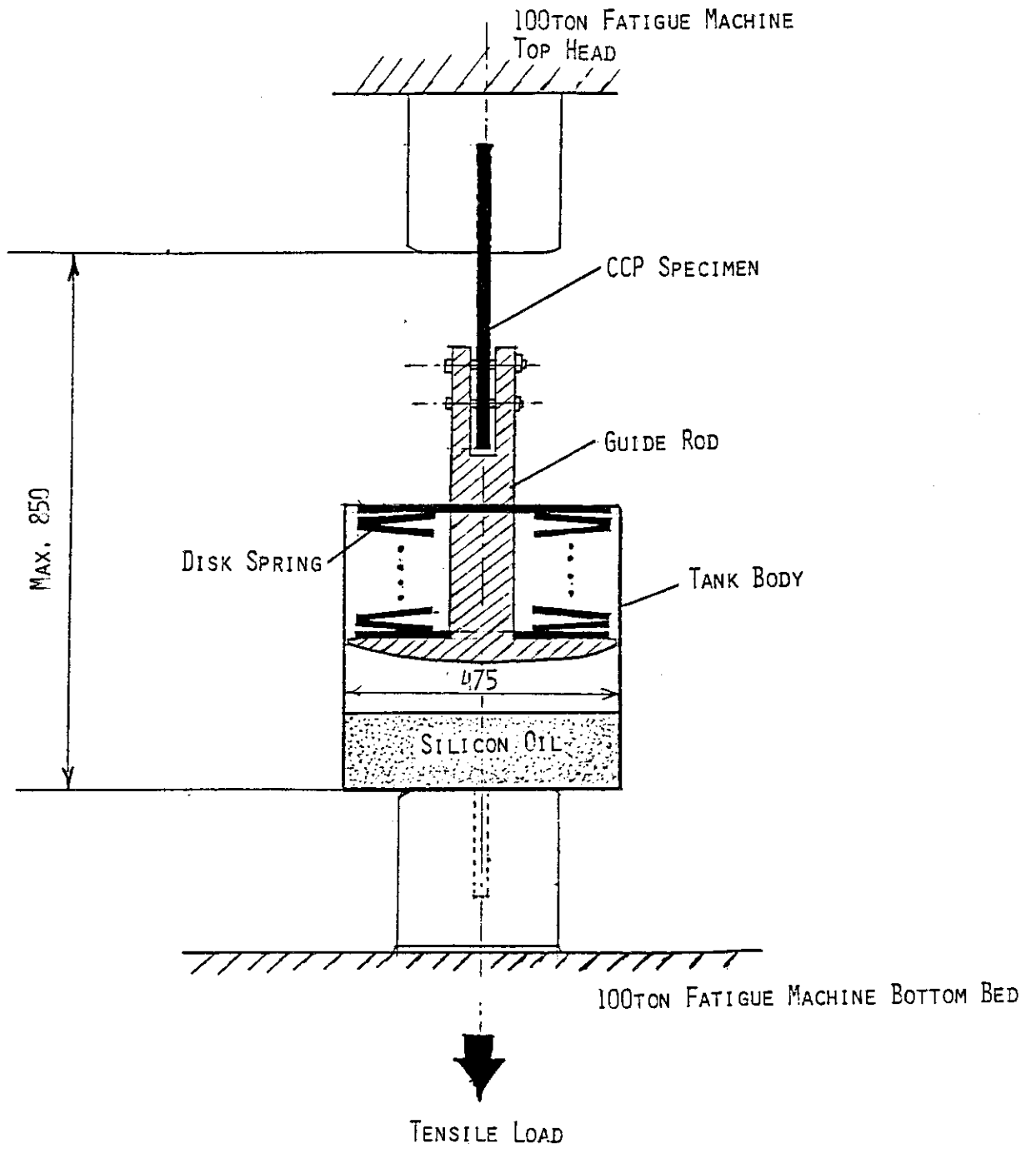


Fig. 3.8 Schematic drawing of tension-type high compliance test apparatus

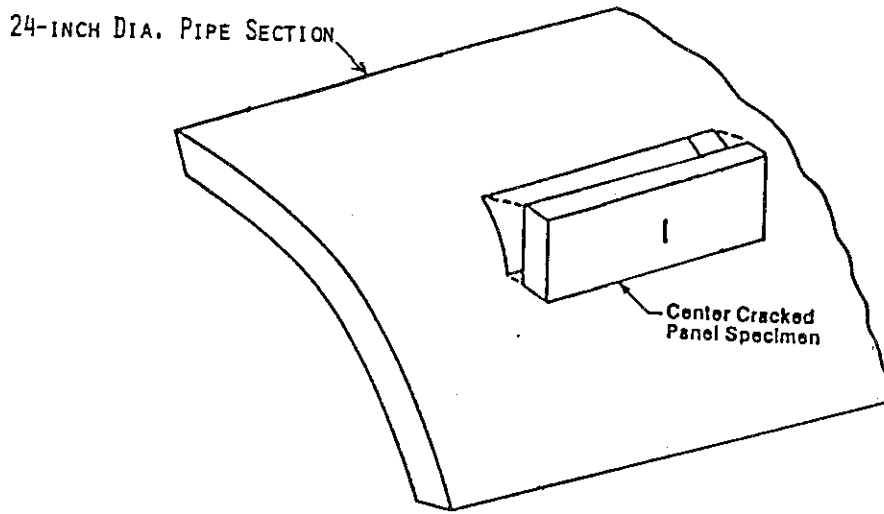


Fig. 3.9 Schematic drawing of center cracked panel specimen orientation used for unstable fracture test

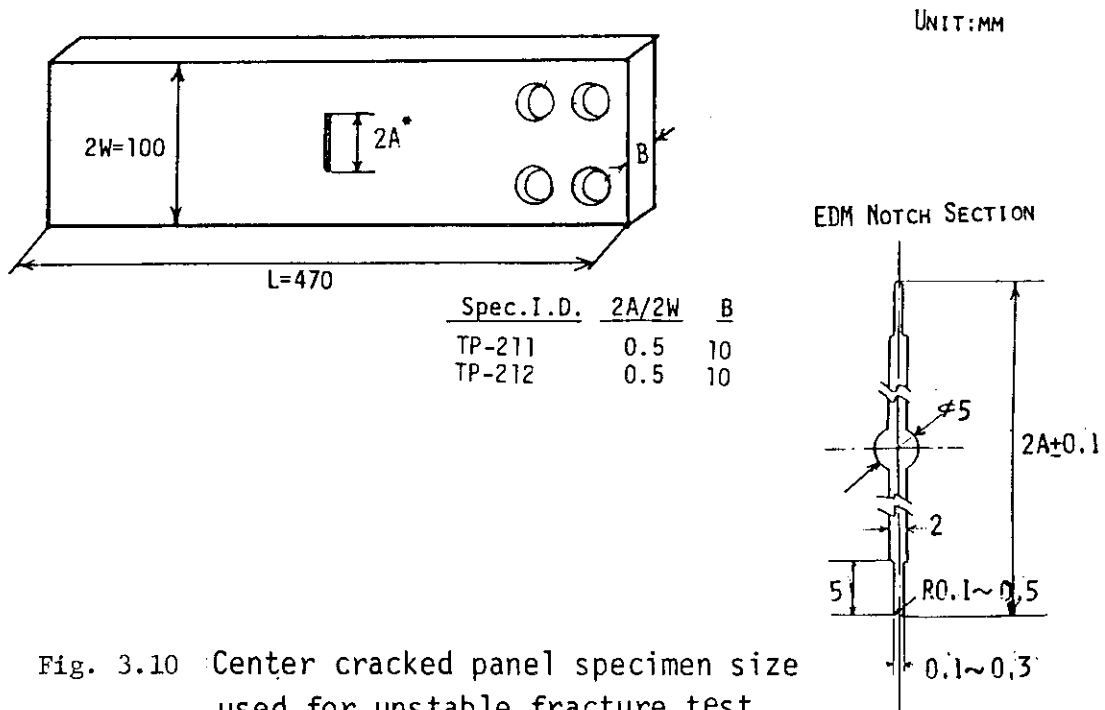


Fig. 3.10 Center cracked panel specimen size used for unstable fracture test

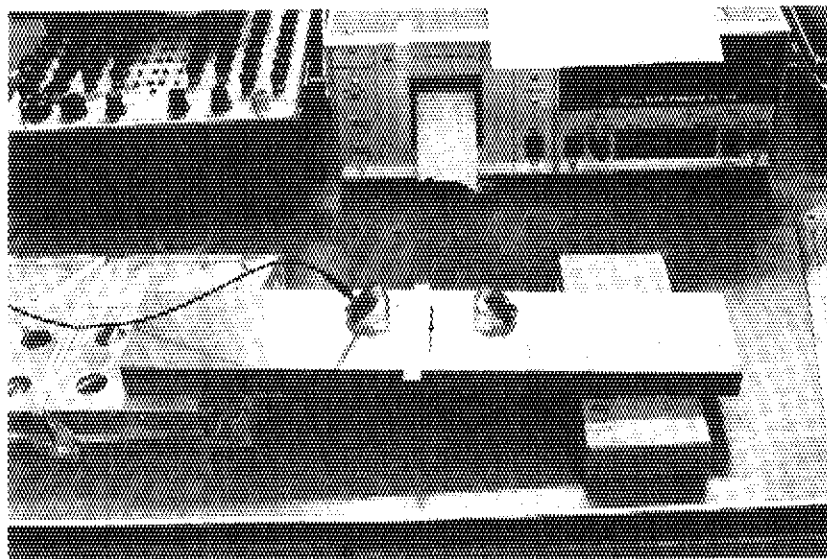


Photo 3.1 Center cracked panel specimen

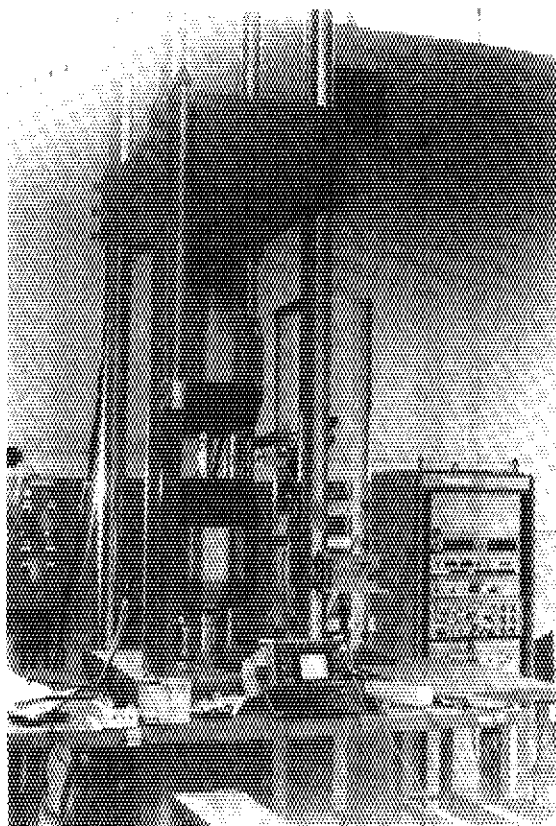


Photo 3.2a 100 ton fatigue test machine without high compliance apparatus -external appearance-

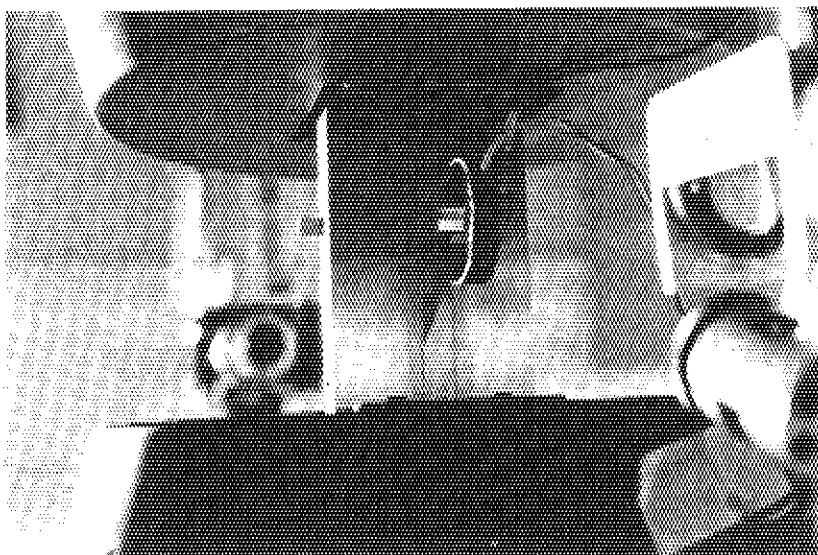


Photo 3.2b 100 ton fatigue test machine without high compliance apparatus -measuring the loadline displacement

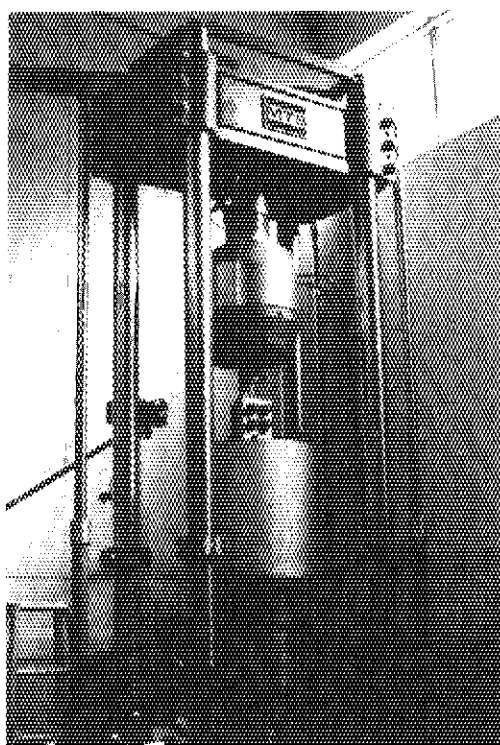


Photo 3.3 100 ton fatigue test machine with high compliance apparatus -external appearance-

## 4. 試験結果及び考察

### 4.1 供試材の機械的特性

#### 4.1.1 引張試験結果

前掲の Table 3.2 は、室温大気中における供試材の引張試験結果である。同表より供試材は、JIS G 3455 の機械的性質（0.2%耐力、引張強さ及び伸び）の要求を全て満足している。2本の試験片の各値の平均値は、以下のとおりである。

- 1) 0.2%耐力  $\sigma_y$  : 36.7 (kg/mm<sup>2</sup>)
- 2) 引張強さ  $\sigma_u$  : 55.9 (kg/mm<sup>2</sup>)
- 3) 伸び  $\phi$  : 33 (%)
- 4) 絞り  $\psi$  : 76 (%)

応力-ひずみ線図を Appendix A に示す。

#### 4.1.2 シャルピ衝撃試験結果

Fig. 4.1 は、供試材のシャルピ吸収エネルギーの測定結果である。同図より供試材は、JIS G 3455-1978 の特別品質規定のシャルピ衝撃特性要求を、満足している。エネルギー遷移温度は、-40°C であり、この材料は室温で上部棚エネルギー領域にある。Photo. 4.1 は、走査型電子顕微鏡観察による破面写真で、ディンプル破面を呈していることがわかる。

Fig. 4.2 は、G. Vassilaros らが実施した米国 LWR で使用されている炭素鋼管 ASTM A 106 Gr. B 鋼のシャルピ衝撃試験結果（△印）<sup>14)</sup> と本試験結果（○印）とを併せて示したものである。同図によると、国産材料 STS 42 の吸収エネルギーが ASTM A 106 Gr. B 鋼のそれに比較して、高いこと、さらに STS 42 鋼の延性-脆性遷移温度が低いことが分かる。この要因の一つとして、STS 42 鋼の Mn 含有量（Mn : 1.37 重量%）が、ASTM A 106 Gr. B 鋼（Mn : 0.81 重量%）に比べて、高いことがあげられ、延性-脆性遷移温度が、鋼中の Mn 含有量の増加に伴って、低くなるという森島らの報告<sup>21)</sup>と同様の傾向を示している。さらに、本供試材が Si-A $\beta$  キルド鋼より製鋼されており、十分に脱酸されたことも、脆化の感受性を低くしている要因と考えられる。

### 4.2 中央切欠き平板の引張試験

#### 4.2.1 荷重-荷重点変位-き裂長さの関係及びき裂進展状況

Fig. 4.3 から Fig. 4.5 に、各試験片の荷重-荷重点変位-き裂長さの関係を示す。同図よりき裂進展は最大荷重点に至る以前に生じていることが分かる。そして、荷重の増加に伴って、き裂は安定に成長し、やがて最大荷重点に達し、除荷過程を経て、最終破断点に至っている。この間、き裂の進展は終始安定しており、急速進展への移行は認められなかった。なお、荷重、荷重

点変位及びき裂長さに関する全データを、Appendix B にまとめた。

Photo. 4.2 は、写真撮影により試験片表面のき裂進展状況を観察した結果 (Spec. ID : TP-121) である。き裂は欠陥先端が鈍化した後に発生し、進展している。き裂の進展方向は、負荷方向に対して約 45°であった。き裂の破断面は、シェアリップを呈しており、破断部は試験片板厚の減少 (元厚に対して、2.7 mm) 及び試験片板幅の収縮 (元幅に対して、7.4 mm) を生じていた。Photo. 4.3 は、走査型電子顕微鏡観察による破面観察結果の代表的な写真である。破面はディンプルと呼ばれる延性破面であった。なお、Appendix C に、各試験片のき裂進展状況を写真集としてまとめた。

#### 4.2.2 実断面応力による破壊挙動評価

Table 4.1 は、安定き裂発生時の荷重及び初期実断面積を基に求めたき裂発生時の応力値である。き裂発生時の実断面応力は、0.2%耐力を越えている。Table 4.2 は、最大荷重点の実断面応力値を示したものである。最大荷重点における実断面応力値は、0.2%耐力と引張強さの和の 60~67%であった。この結果より、き裂を含む実断面応力が 0.2%耐力と引張強さの和の 6割に達した時を、部材の崩壊点とし、これまでに種々の形で<sup>23), 24)</sup>提案されている流動応力  $\sigma_f$  を、STS 42 鋼に対して次式で示すことにする。

$$\sigma_f = 0.6 (\sigma_y + \sigma_u) \quad (4.1)$$

$\sigma_y$  : 0.2%耐力,  $\sigma_u$  : 引張強さ

次に、上式 (4.1) を用いて実断面応力崩壊基準により、周方向貫通欠陥を有する配管の最大荷重値 (崩壊荷重値) を予測する。曲げ荷重が負荷される貫通欠陥付配管の最大荷重値は、欠陥角度  $2\theta$  のとき、次の式で与えられる<sup>22)</sup>。

$$P = \frac{16 \sigma_f R_o^2 t}{L-D} F(\theta) \quad (4.2)$$

但し、

$\sigma_f$  : 流動応力

$R_o$  : 平均管半径

$t$  : 肉厚

$L$  : 四点曲げ試験装置のスパン長さ

$D$  : 同上の支点間距離

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

Fig. 4.6 の実線が、式 (4.1) 及び式 (4.2) を用いて求めた管径 6 インチ管の最大荷重値と欠陥角度の関係である。欠陥角度  $2\theta$  が 0°, 180°のときの最大荷重値は、各々 34.3 ton, 7.1 ton である。なお、計算に際しては、次に示す値を用いた。



$$\begin{aligned}\sigma_f &= 0.6 \times (28.6 + 48.3) \\ &= 46.1 \text{ (kg/mm}^2\text{)}\end{aligned}$$

$$R_0 = 77 \text{ (mm)}, \quad t = 11 \text{ (mm)}, \quad L = 2000 \text{ (mm)}, \quad D = 600 \text{ (mm)}$$

Fig. 4.6 には、柴田らが STS 42 鋼製の周方向貫通欠陥付配管（管径 6 インチ，肉厚 Sch 80）を用いて，室温で四点曲げ試験を行った際の実験結果（黒丸）も，併せて示してある。周方向欠陥角度  $2\theta$  が， $0^\circ$  及び  $180^\circ$  のときの，最大荷重値は，34.9 ton 及び 7.3 ton（第 1 回試験結果），6.9 ton（第 2 回試験結果）であった。

下表は，上記の計算による予測値と実験結果を比較したものである。

	最大荷重値 (ton)		
	欠陥角度 $2\theta$	欠陥角度 $2\theta$	
	$0^\circ$	$180^\circ$	
実験値	34.9	7.3 *	6.9 **
計算値	34.3	7.1	

\* 第 1 回試験結果， \*\* 第 2 回試験結果

比較するデータ数が限られているものの，式 (4.1) 及び式 (4.2) を用いて求めた最大荷重値と実験結果は，極めてよく一致していることが明らかである。このことから，貫通欠陥を有する配管の崩壊荷重値（载荷能力）の予測は，式 (4.1) で新たに提案した流動応力値を用い，実断面応力崩壊基準によって可能である。

#### 4.2.3 J-R 曲線の作成

J 積分に基づく Tearing Instability 基準が，炭素鋼管の延性不安定破壊解析法として，検討されている<sup>13)</sup>。この手法の導入に際しては，3.5 項で述べた様に，材料の J-R 曲線を求めることが必要となる。このため，式 (3.1) 及び 4.2.1 項で明らかとなった荷重-荷重点変位-き裂長さの関係を用いて，J-R 曲線を求めた。

Fig. 4.7, 4.8 及び Fig. 4.9 が，各試験片に対する J-R 曲線である。Appendix B には，J 値及びき裂長さについての全データをまとめた。

Fig. 4.10 は，J-R 曲線に及ぼす初期欠陥長さ比 ( $A/W$ ) の影響を示したものである。初期欠陥長さ比が小さい程，J 値は高くなり，柴田らの Type 304 ステンレス鋼管の結果<sup>2)</sup>と同様な傾向を示している。J-R 曲線は，初期欠陥長さ比の影響をうけることから，この比を一定 (= 0.5) にして，J-R 曲線に及ぼす試験片の板厚及び形状の影響について，以下に検討する。

Fig. 4.11 は，J-R 曲線に及ぼす試験片板厚の影響を示したものである。同図より J-R 曲線に対する板厚依存性は，比較的小さいことが分かる。また，き裂進展開始の J 値は，同図より  $J_{in} = 78 \text{ (kg/mm)}$  であった。

Fig. 4.12 は，柴田らが行った  $180^\circ$  周方向貫通欠陥 ( $A/W = 0.5$ ) を有する STS 42 製配管試験体（管径 165 mm，肉厚 11 mm）の J-R 曲線とこの試験体とはほぼ同等の板厚（10mm）

を有する中央切欠き平板試験片から得た J-R 曲線を比較した結果である。両者は、ほぼ同様な傾向にあり、J. Pan らの Type 304 ステンレス鋼に関する報告<sup>25)</sup>と一致している。Fig. 4.11 及び Fig. 4.12 より配管試験体及び中央切欠き平板試験片から得た J-R 曲線が、ほぼ同様な傾向を示すとともに、J-R 曲線が試験片板厚の影響をうけにくいことが、明らかとなった。このことは、貫通欠陥を有する炭素鋼配管のき裂成長の安定性を評価する為に不可欠な J-R 曲線が、必ずしも配管試験体から得たものである必要はなく、配管試験体と同じ初期欠陥長さ比 (A/W) を有する中央切欠き平板試験片から求めた曲線で、十分であることを示唆している。今後、上記の点をより明らかにするための試験研究が期待される。

Fig. 4.13 は、Fig. 4.9 の曲線の傾き及び式 (3.2) を用いて求めた J-Tmat 曲線である。なお、式 (3.2) の計算で使用した数値は、以下のとおりである。

$$E = 1.96 \times 10^4 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

$$\sigma_f = 0.6 \times (36.7 + 55.9) = 55.6 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

同図によると、Tmat は、J 値の増大に伴って、急激に低下する傾向にある。

### 4.3 中央切欠き平板の延性不安定破壊試験

#### 4.3.1 荷重と変位の関係及びき裂進展状況

Fig. 4.14 は、高コンプライアンス発生装置 ( $C_m = 6 \times 10^{-4} \text{ mm/kg}$ ) を用いて得られた荷重-試験系総変位曲線である。荷重は、最大荷重点を越えてから、なだらかに約 0.8 ton 低下し、その直後に急激に下降している。Fig. 4.15 は、前述の曲線と同時に得られた荷重-荷重点変位曲線であり、Fig. 4.16 は、これらの試験系総変位と荷重点変位の関係を示したものである。不安定破壊開始点とは、負荷(試験)系の変位が増大しないにもかかわらず、安定き裂が急速伝播をはじめめる点である。これにより不安定破壊開始点を Fig. 4.16 から求め、前述の荷重-変位曲線 (Fig. 4.14, 15) に対して、矢印で図示した。この不安定破壊開始点は、試験片に取り付けた超音波探触子からの信号の変化とおおむね対応している<sup>26)</sup>。不安定破壊を生じた荷重値は、26.4 ton (Spec. ID : TP-211) 及び 26.0 ton (Spec. ID : TP-212) で、この時の安定き裂長さを Fig. 4.5 b より求めると、各々 1.8 mm, 2.1 mm である。さらにこの値を用いて J-R 曲線 (Fig. 4.9 の Spec. ID : TP-112 の J-R 曲線) から、不安定破壊発生時の J 値  $J_{inst}$  を得た。 $J_{inst}$  値は次のとおりである。

$$J_{inst} \text{ (TP-211)} = 98 \text{ kg/mm}$$

$$J_{inst} \text{ (TP-212)} = 102 \text{ kg/mm}$$

Photo. 4.4 は、写真撮影により試験片表面のき裂進展状況を観察した結果である。き裂は、4.2.1 項の高コンプライアンス発生装置が装着されていない場合と同様に、人工欠陥の先端が鈍化した後に発生し、荷重の増加に伴って、安定的に成長しやがて最大荷重点に達し、除荷過程を経て、不安定破壊開始点に至っている。この間のき裂の進展方向は、負荷方向に対して約  $45^\circ$  であった。き裂の破断面は、目視観察によるとき裂の安定成長、急速進展にかかわらず終始約  $45^\circ$  の剪断破面を呈していた。(Photo. 4.5) 破断部の試験片板厚の減少 (元厚に対して、1.6 mm) 及び板幅の収縮 (元幅に対して 5.6 mm) は、4.2.1 項で認められた安定き裂後のそれより若干小さ

かった。

Photo. 4.6 は、走査型電子顕微鏡による破面観察の結果である。Photo. 4.6(a)の撮影部は、人工欠陥前縁近傍、Photo. 4.6(b)は、前縁より5 mm離れた所である。両者の破面は、ディンプルと称される延性破面であった。上記の結果及び4.2.1項の結果より、き裂の安定成長及び不安定成長を目視と走査型電子顕微鏡にて比較したが、巨視的ならびに微視的様相に、顕著な差異が認められなかった。このことから、安定破壊と延性不安定破壊の破壊機構に大きな差はないと考えられる。

#### 4.3.2 J積分に基づく Tearing Instability クライテリオンによる延性不安定破壊挙動評価

ParisらはJ-R曲線に基づき、き裂進展の安定性を判定する手法を提案している<sup>19)</sup>。本項では、この考え方に基づき、STS 42鋼製の中央切欠き平板のき裂の安定性について考察し、本手法の適用性について検討する。

一般的な構造物に対して、 $T_{appl}$ を求めることは、現在困難である。しかしながら、本研究の如く単純な系の場合、中央切欠き平板に対して、 $T_{appl}$ の解はTadaらのハンドブック<sup>20)</sup>により与えられている。この $T_{appl}$ の算出には次の値を用いた。

皿ばねのコンプライアンス  $C_m$  :  $6 \times 10^{-4}$  (mm/kg)

試験片の厚さ  $B$  : 10 (mm)

縦弾性係数  $E$  :  $1.96 \times 10^4$  (kg/mm<sup>2</sup>)

係数  $\lambda$  : 1 (平面応力)

さらに、材料のひずみ硬化は、下式のRamberg-Osgood硬化則に従うこととした。

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (4.3)$$

ここで、 $\sigma_0$ 、 $\varepsilon_0$ は、基準応力、基準ひずみ、 $\alpha$ は比例定数、 $n$ は加工硬化指数である。3.2項で実施した丸棒の引張試験結果から、STS 42鋼の応力-ひずみ曲線を、 $\varepsilon < 12\%$ の範囲で、最小二乗近似し、式(4.3)の定数を次の様に決定した。

$$\sigma_0 = 26.4 \text{ (kg/mm}^2\text{)}, \quad \varepsilon_0 = 0.003, \quad \alpha = 0.57, \quad n = 5.4$$

Fig. 4.17は、 $T_{appl}$ をプロットした結果である。同図には、Fig. 4.13で示したJ-Tmat曲線のうち、安全側の評価を行うために、下限側にある曲線(TP-112)を併せて記述してある。式(3.4)を満足する中央切欠き平板の不安定破壊開始点(●印)のJ値  $J_{inst}$ は次のとおりである。

$$J_{inst} = 84 \text{ kg/mm}$$

同図には、4.3.1項で明らかになった実験点(▲印)も図示した。これより不安定破壊が、J積分に基づくTearing Instabilityクライテリオンにより、安全側に予測できることが示唆される。

今後は、不安定破壊開始点を精度よく推定することが必要であり、検討すべき点が残されている。例えば、J-R曲線が試験片形状・寸法に依存しない材料固有の曲線となる為にJ支配下き裂進展に関する点である。J支配下のき裂進展条件は、引張荷重に対して、次の様に提示されている<sup>27)</sup>。

$$\omega = \frac{b}{J} \frac{dJ}{da} \geq 20 \quad (4.4)$$

但し、 $b$ ：リガメント長さ、 $a$ ：き裂長さ

本試験の不安定破壊点では、 $\omega$ は次のとおりである。

$$\omega = 7.2$$

上記の値は、式(4.4)のC. Shihらの提案を満足していない。しかしながら、上式は本供試材と異なるA 533鋼を対象として導かれたもので、本供試材に対して、どの程度まで適用可能であるか不明である。この為に今後、この条件について定量的な検討が必要である。

Table 4.1 Net-section stress  $\sigma_{net}$  at crack initiation

Spec. ID.	Load P at Crack Initiation (ton)	$\sigma_{net}$ at Crack Initiation ( $\text{kg/mm}^2$ )
TP-01	67.6	54.1
TP-02	67.2	53.7
TP-03	66.0	52.8
TP-06	41.0	54.7
TP-07	42.4	56.5
TP-08	42.8	57.1
TP-111	24.6	49.2
TP-121	26.4	52.8
TP-112	24.2	48.4

Table 4.2 Net-section stress  $\sigma_{net}$  at maximum load

Spec. I.D.	Max. Load P (ton)	Crack Extension $\Delta a$ (mm) at Max. Load	$\sigma_{net}$ at Max. Load ( $\text{kg/mm}^2$ )	$\sigma_{net} / (\sigma_y + \sigma_u)^*$
TP-01	70.2	1.40	59.5	0.64
TP-02	70.4	1.89	60.9	0.66
TP-03	69.6	1.34	58.8	0.63
TP-06	44.5	0.60	61.8	0.67
TP-07	44.4	0.40	60.8	0.66
TP-08	44.7	0.50	61.7	0.67
TP-111	27.0	1.39	57.3	0.62
TP-121	27.4	1.24	57.7	0.62
TP-112	26.6	1.11	55.7	0.60

\*  $\sigma_y = 36.2 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_u = 55.9 \text{ kg/mm}^2$

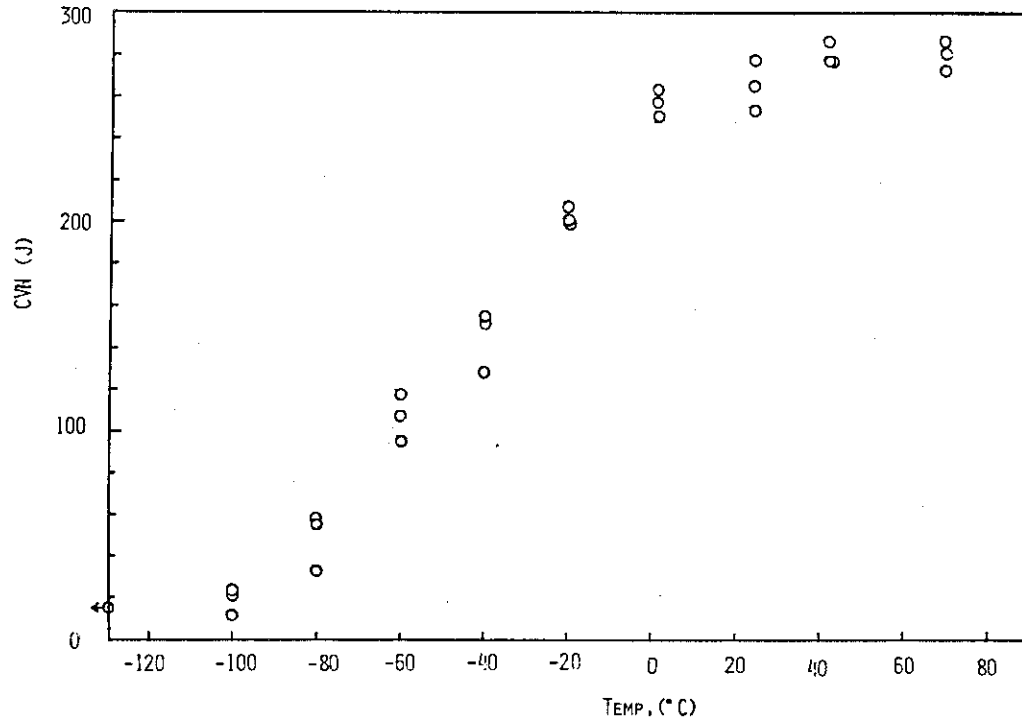


Fig. 4.1 Charpy V notch energy transition curve for 24-inch (609 mm) diameter JIS STS 42 carbon steel pipe

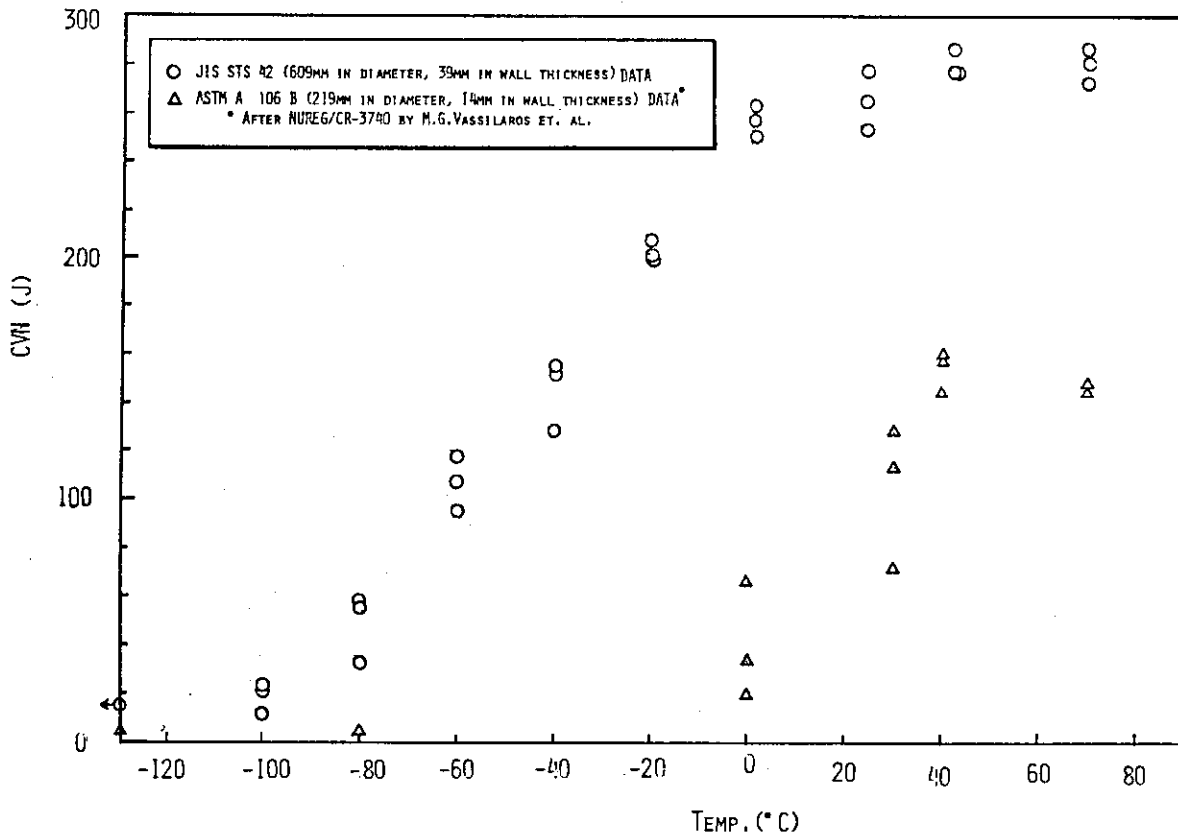


Fig. 4.2 Comparison between JIS STS 42 and ASTM A 106 B carbon steel for Charpy V notch energy transition curves

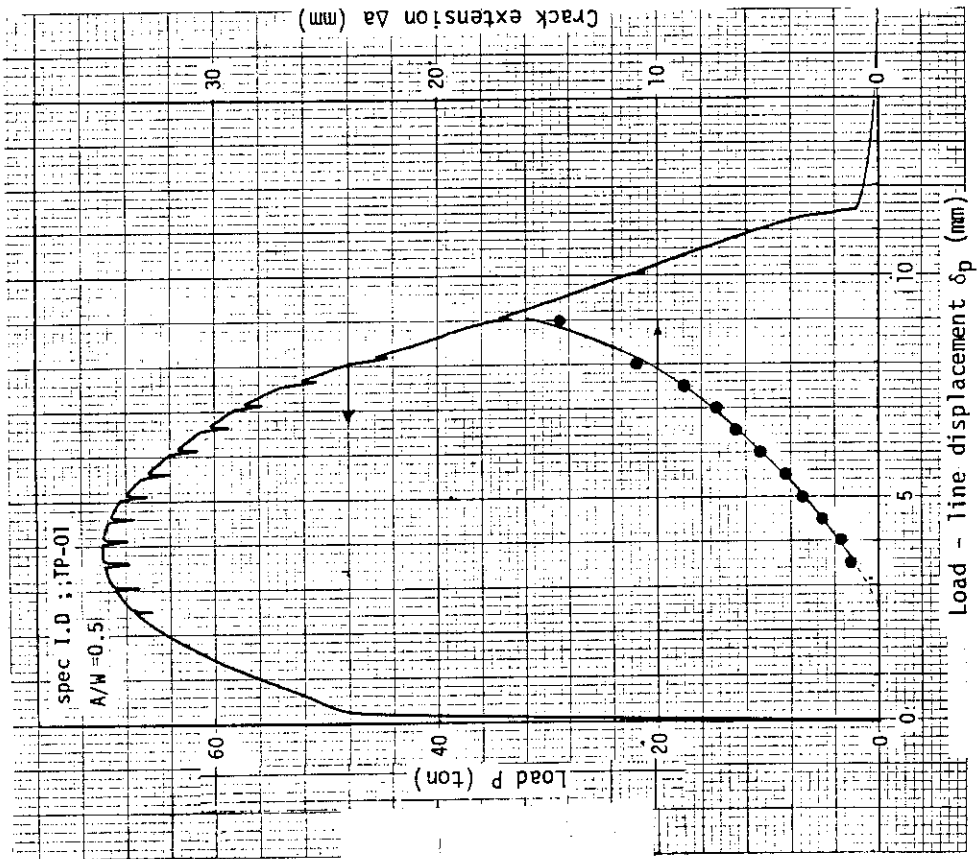


Fig. 4.3a

Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm thickness center cracked panel specimen (TP-01) of JIS STS 42 carbon steel

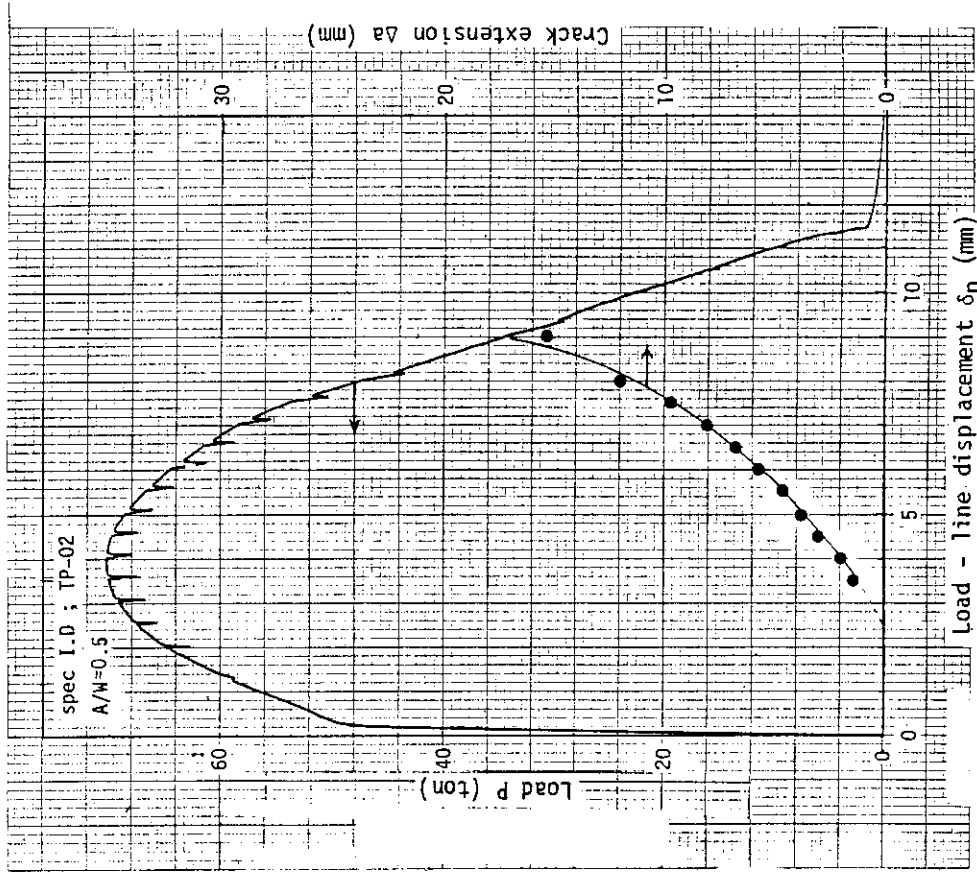


Fig. 4.3b

Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm thickness center cracked panel specimen (TP-02) of JIS STS 42 carbon steel

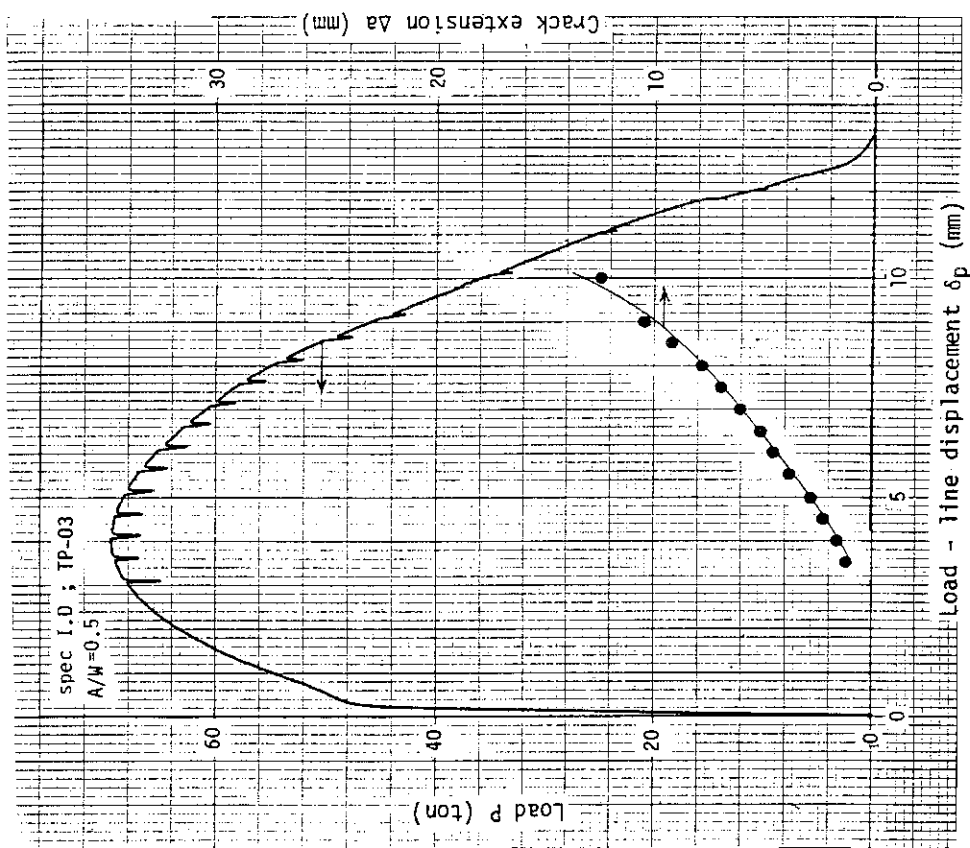


Fig. 4.3c Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm thickness center cracked panel specimen (TP-03) of JIS STS 42 carbon steel



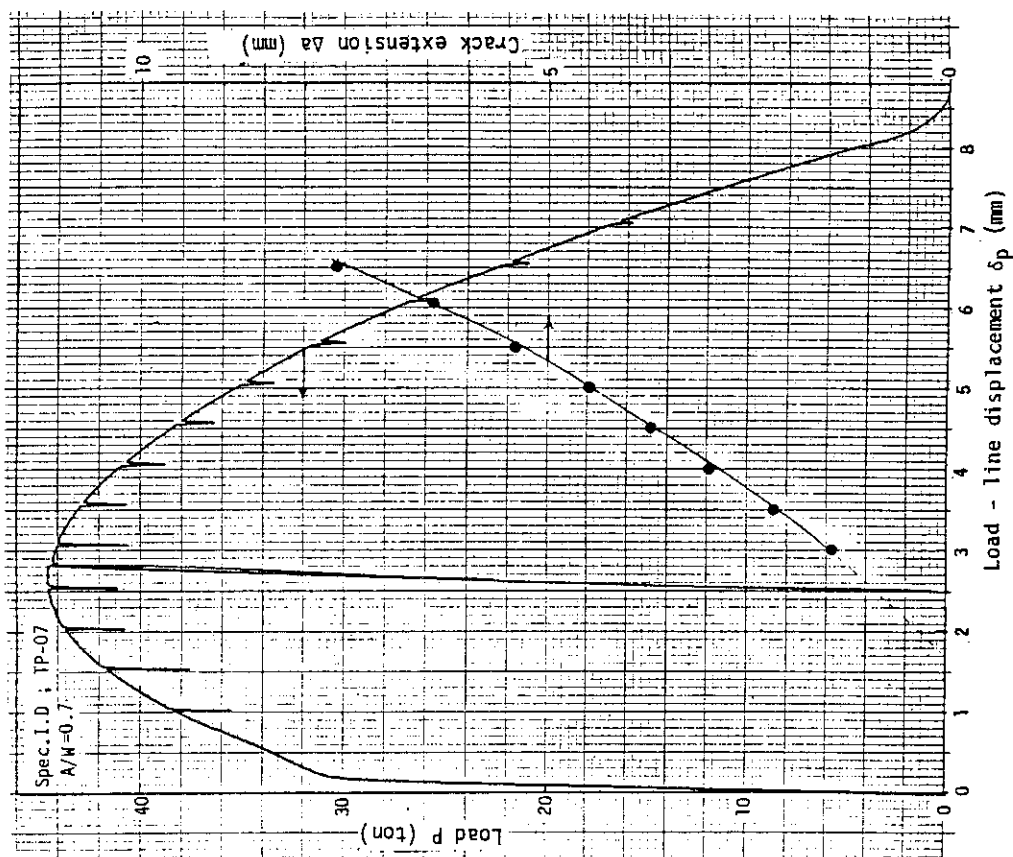


Fig. 4.4b

Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm thickness center cracked panel specimen (TP-07) of JIS STS 42 carbon steel

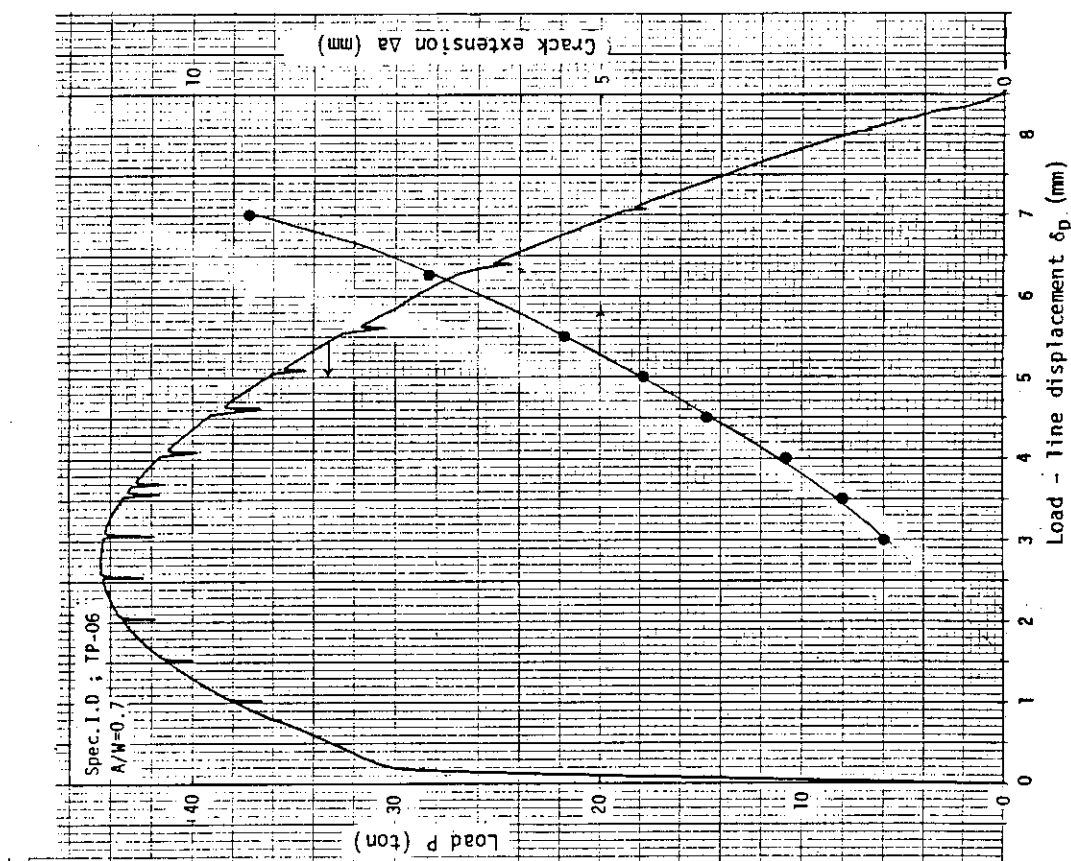


Fig. 4.4a

Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm thickness center cracked panel specimen (TP-06) of JIS STS 42 carbon steel

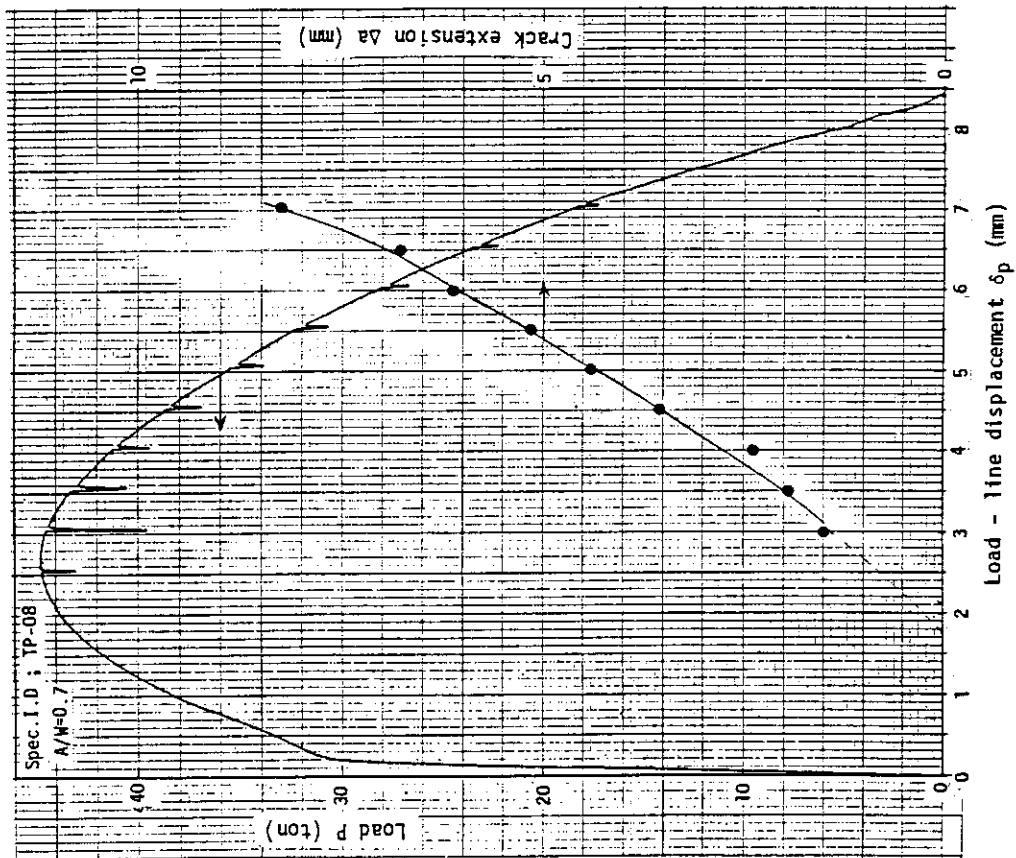


Fig. 4.4c  
Load-line displacement-crack extension curves for 25mm thickness center cracked panel specimen (TP-08) of JIS STS 42 carbon steel

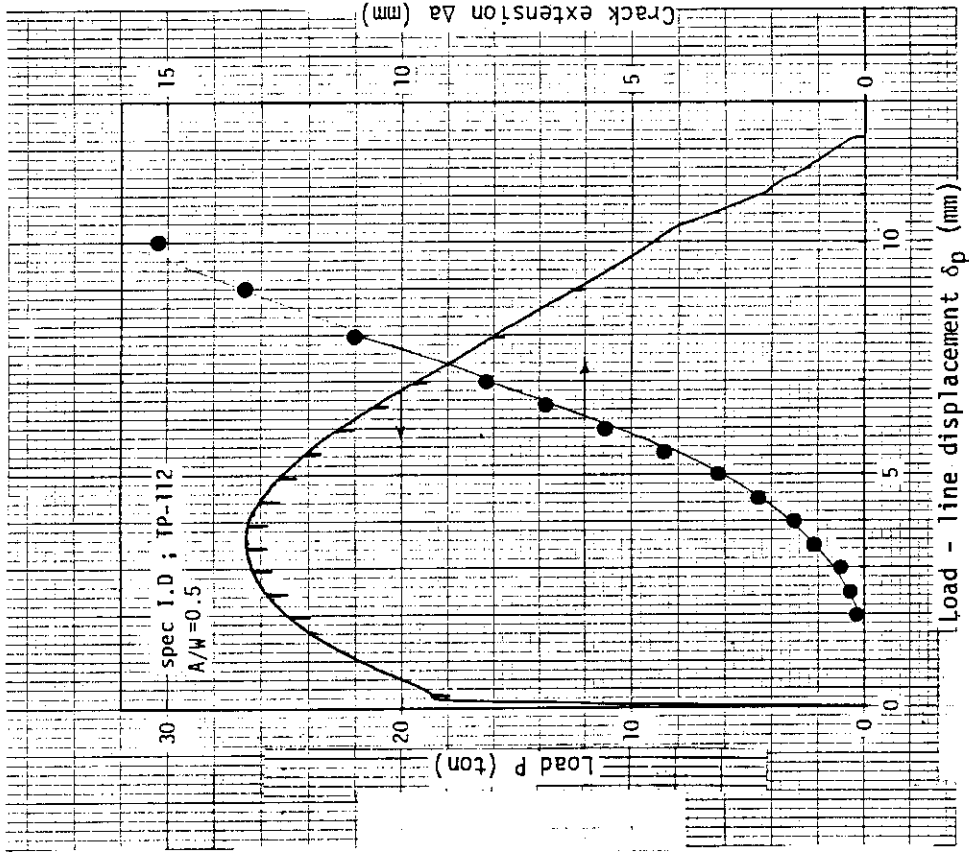


Fig. 4.5b

Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm thickness center cracked panel specimen (TP-112) of JIS STS 42 carbon steel

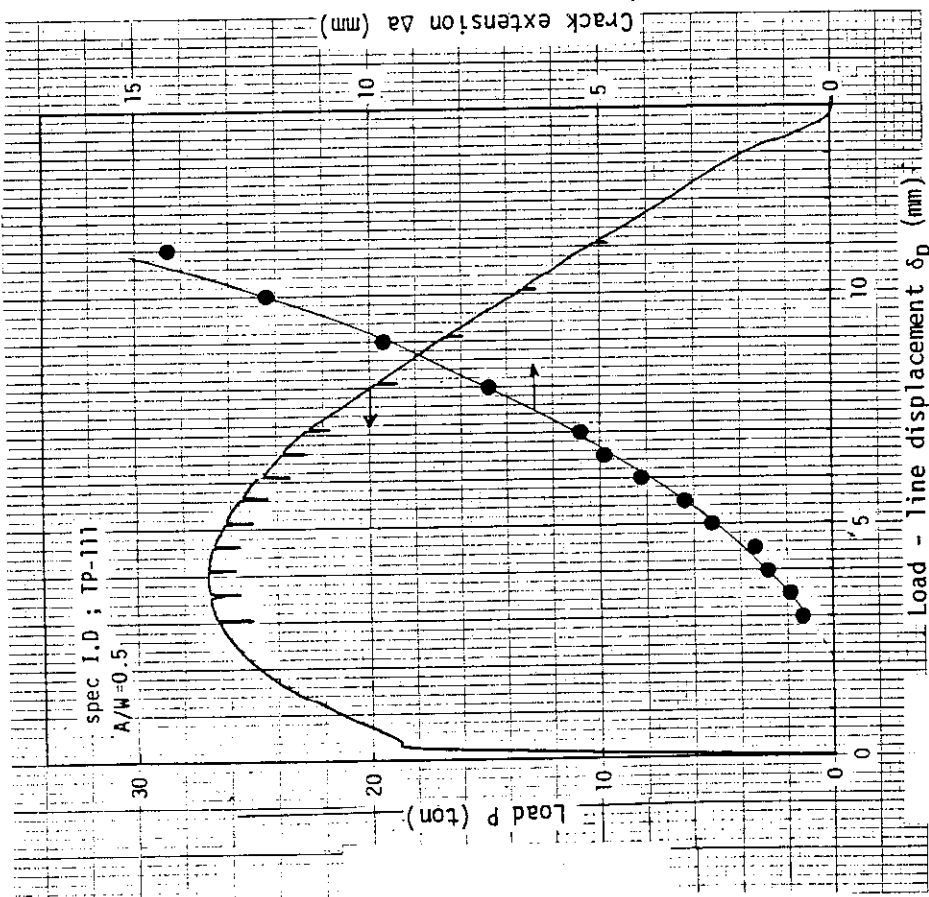


Fig. 4.5a

Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm thickness center cracked panel specimen (TP-111) of JIS STS 42 carbon steel

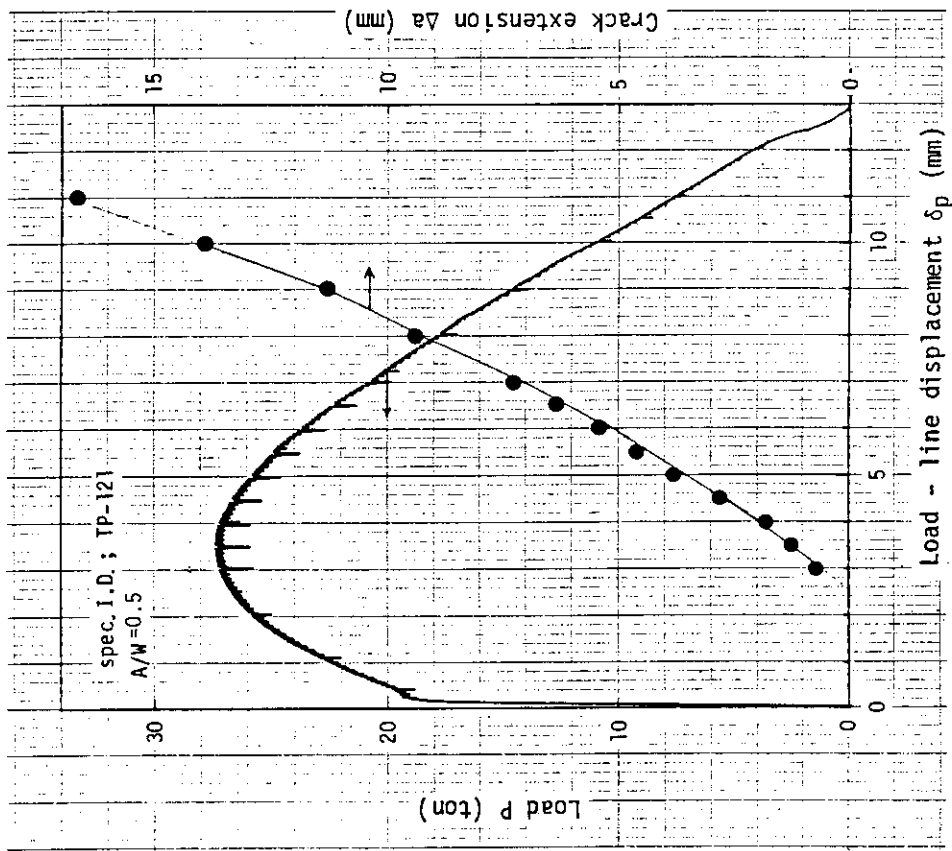


Fig. 4.5c  
Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm thickness center cracked panel specimen (TP-121) of JIS STS 42 carbon steel

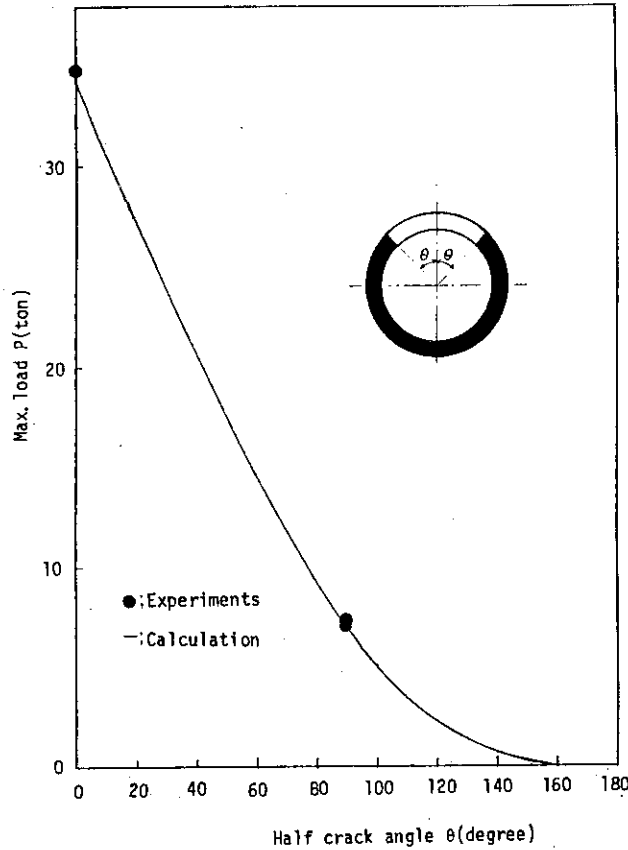


Fig. 4.6 Applied bending load for the failure of a 6-inch (165 mm) diameter JIS STS 42 carbon steel pipe with a through-wall circumferential crack at room temperature as calculated by the net-section collapse criterion and comparison with full-scale pipe test results

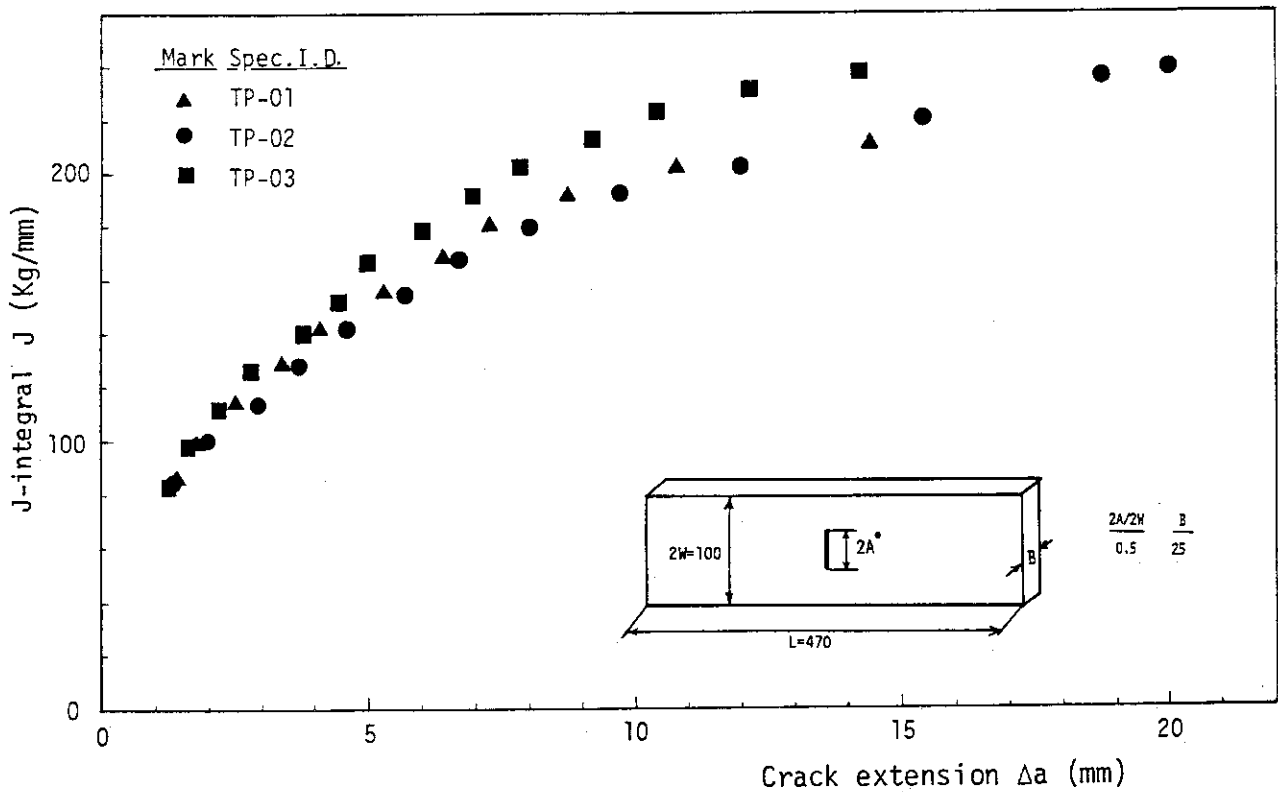


Fig. 4.7 J-R curves for 25mm thickness center cracked panel specimens ( $A/W=0.5$ ) of JIS STS 42 carbon steel

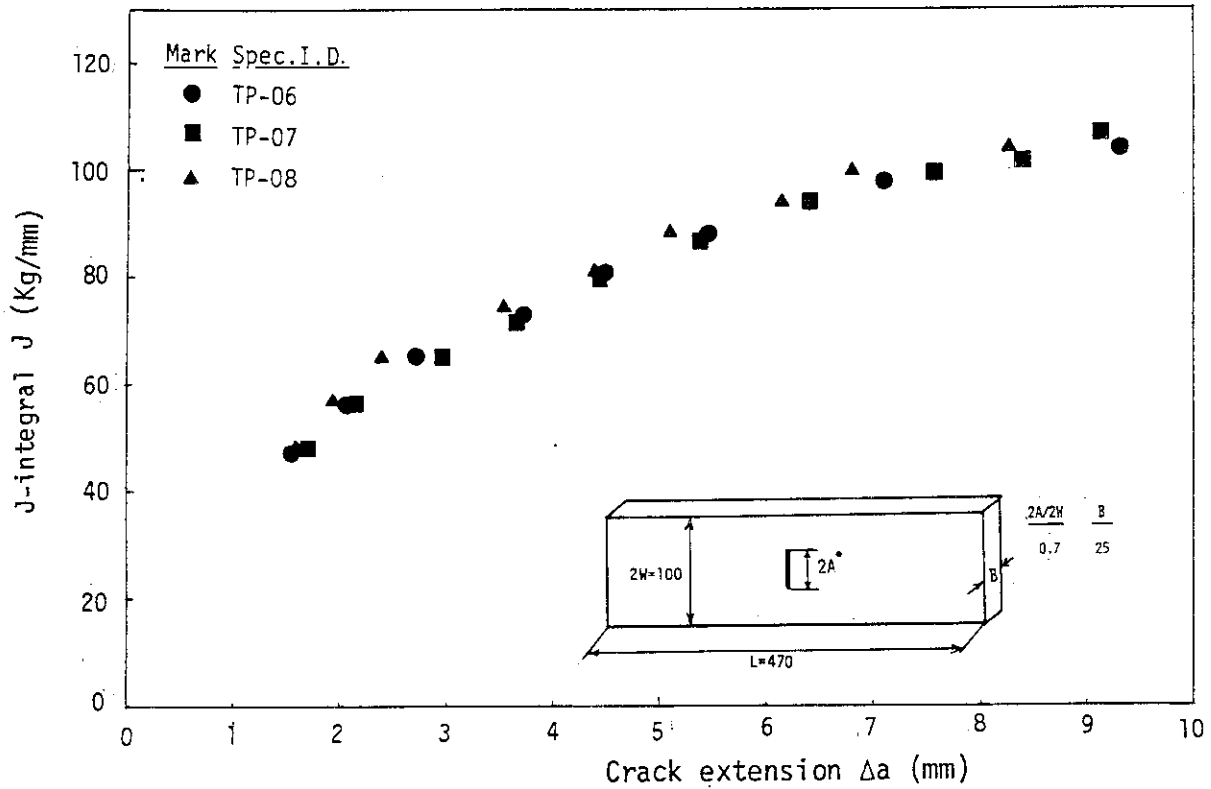


Fig. 4.8 J-R curves for 25mm thickness center cracked panel specimens (A/W=0.7) of JIS STS 42 carbon steel

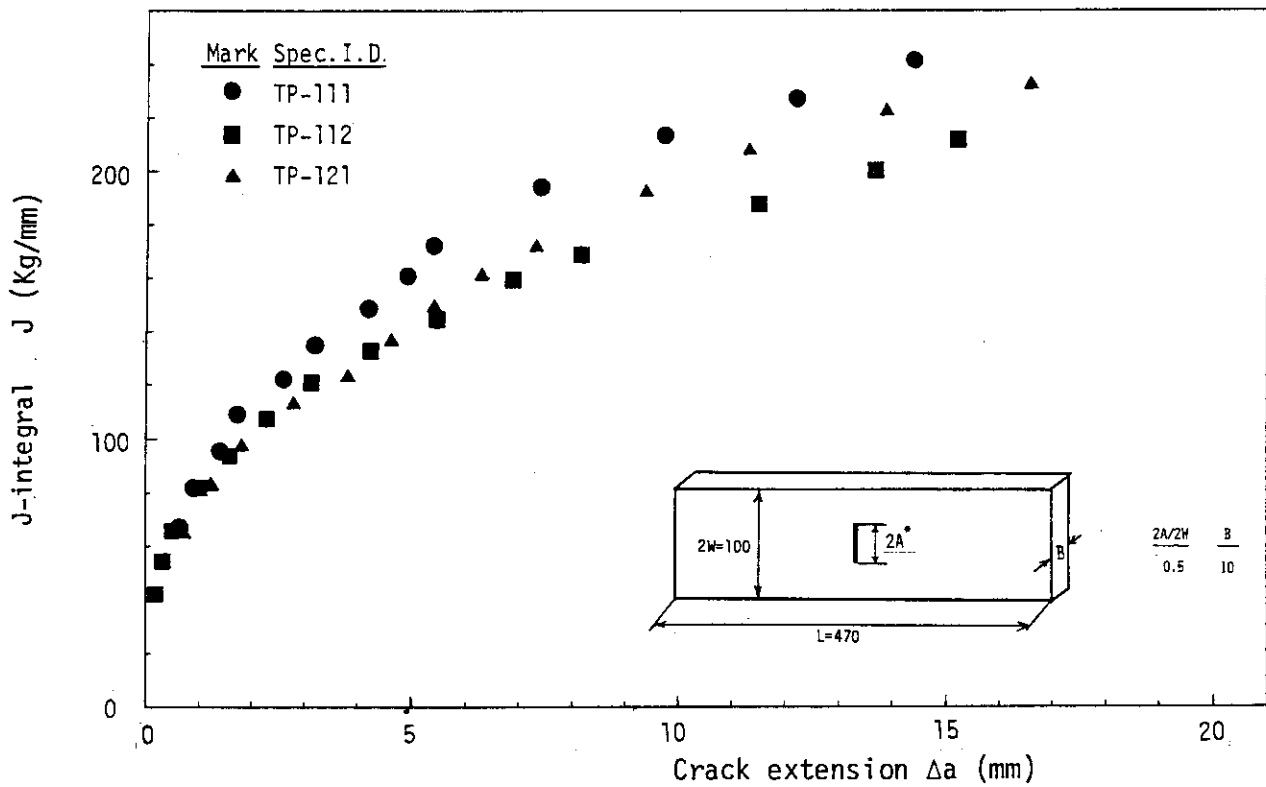


Fig. 4.9 J-R curves for 10mm thickness center cracked panel specimens (A/W=0.5) of JIS STS 42 carbon steel

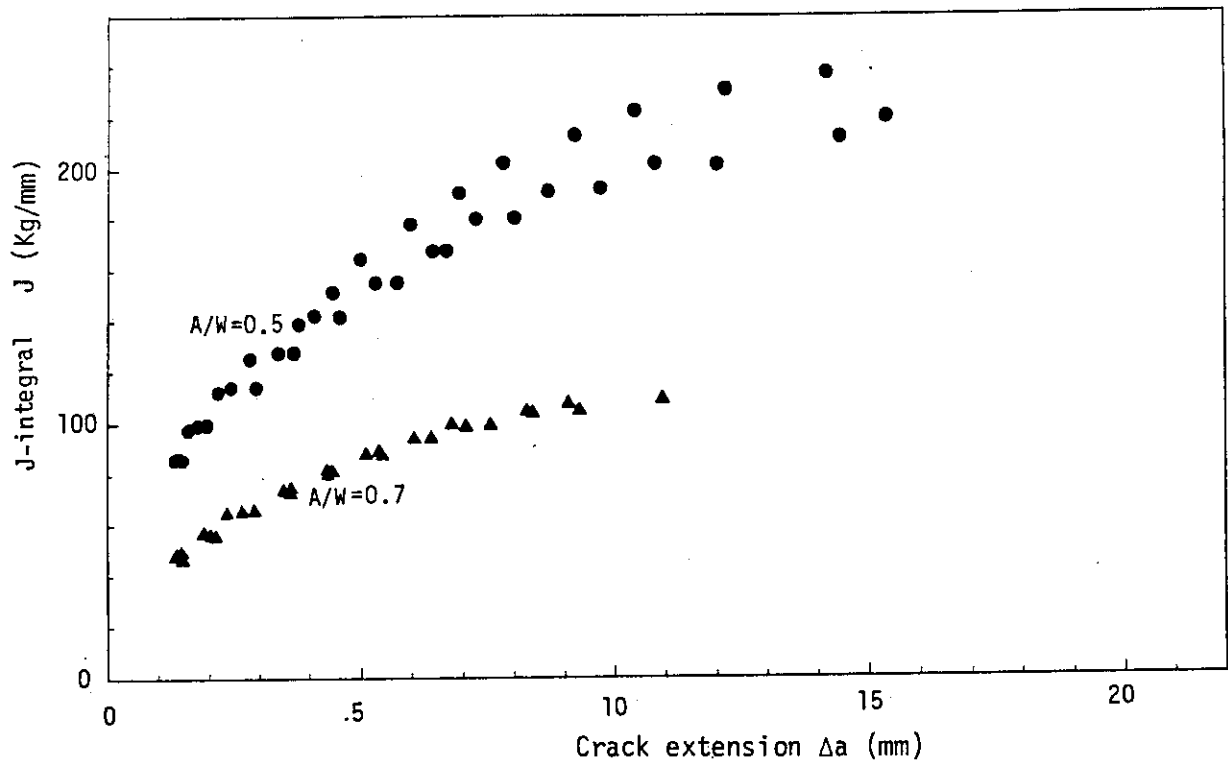


Fig. 4.10 Effect of artificial crack length ( $A/W$ ) on J-R curves using center cracked panel specimens, JIS STS 42 carbon steel

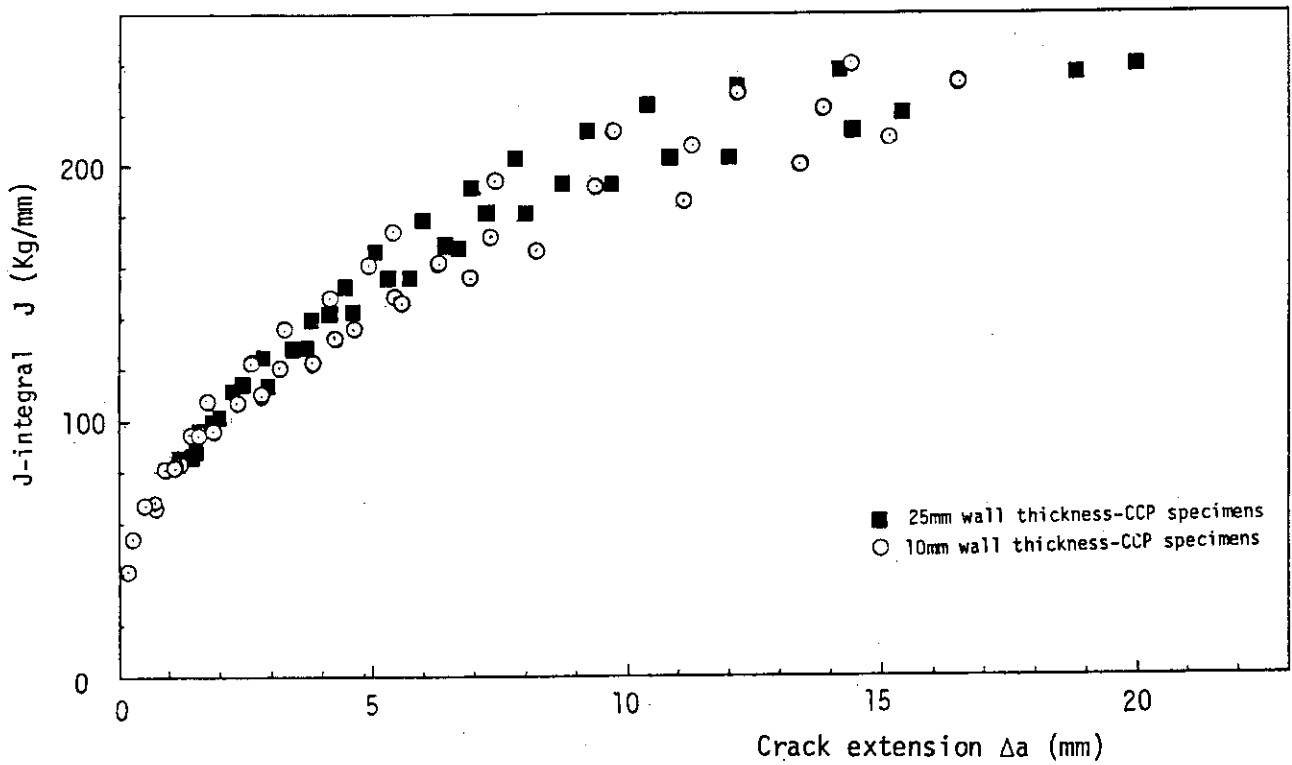


Fig. 4.11 Effect of specimen thickness on J-R curves using center cracked panel specimens ( $A/W=0.5$ ), JIS STS42 carbon steel

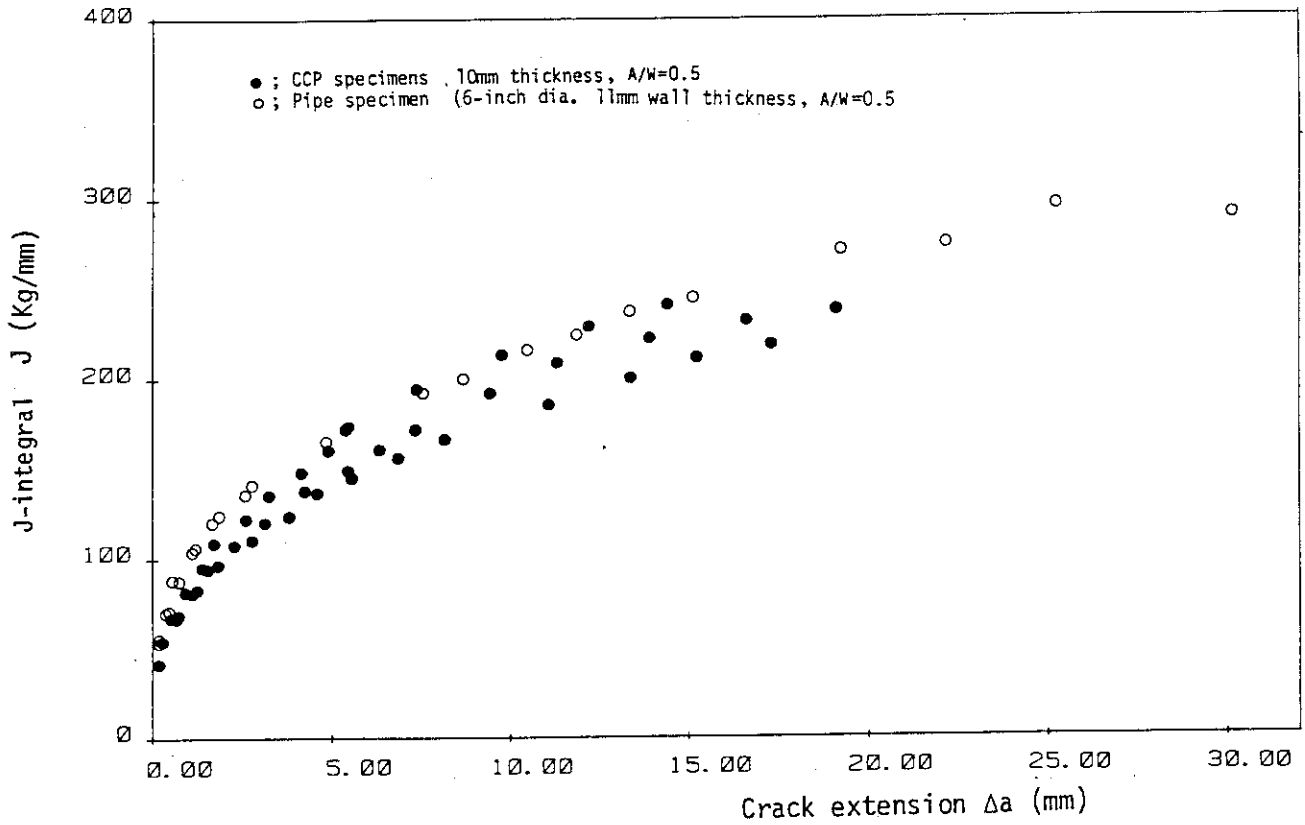


Fig. 4.12 Comparison of J-R curves between 10mm thickness center cracked panel specimen and pipe specimen

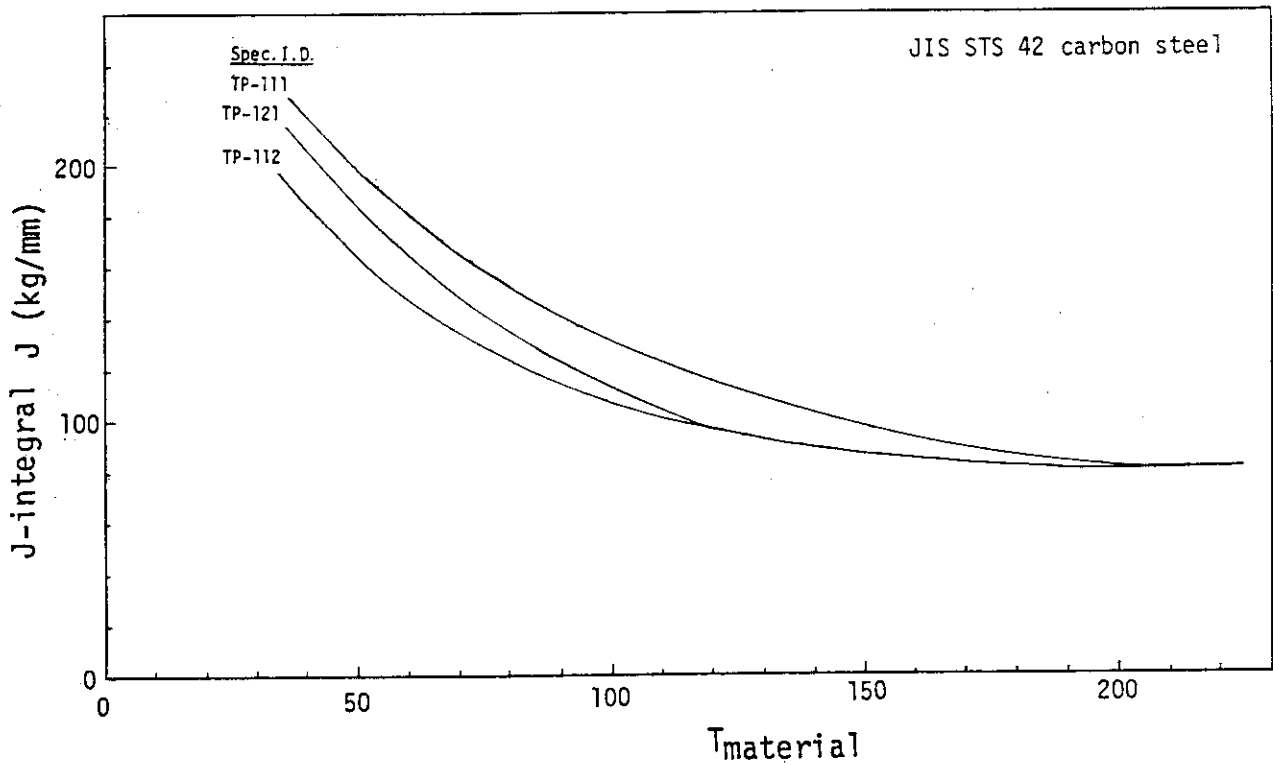


Fig. 4.13 J/T plots from J-R curves data of center cracked panel specimens



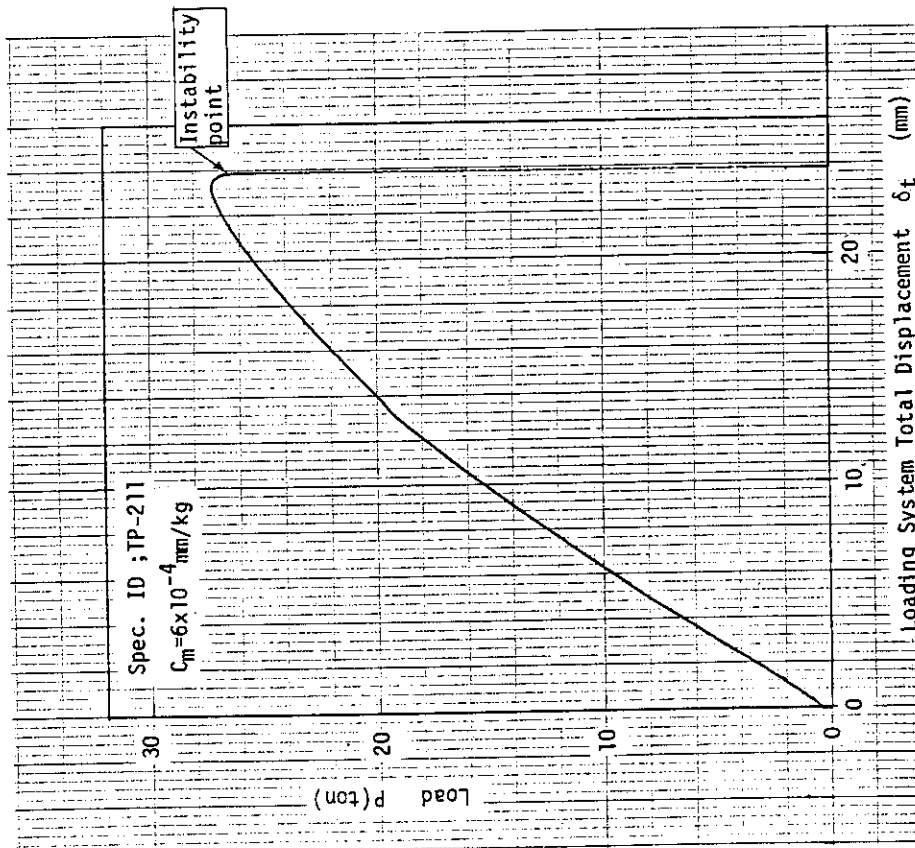


Fig. 4.14a

Load-versus-loading system total displacement curve for 10mm thickness center cracked panel specimen (TP-211) of JIS STS 42 carbon steel

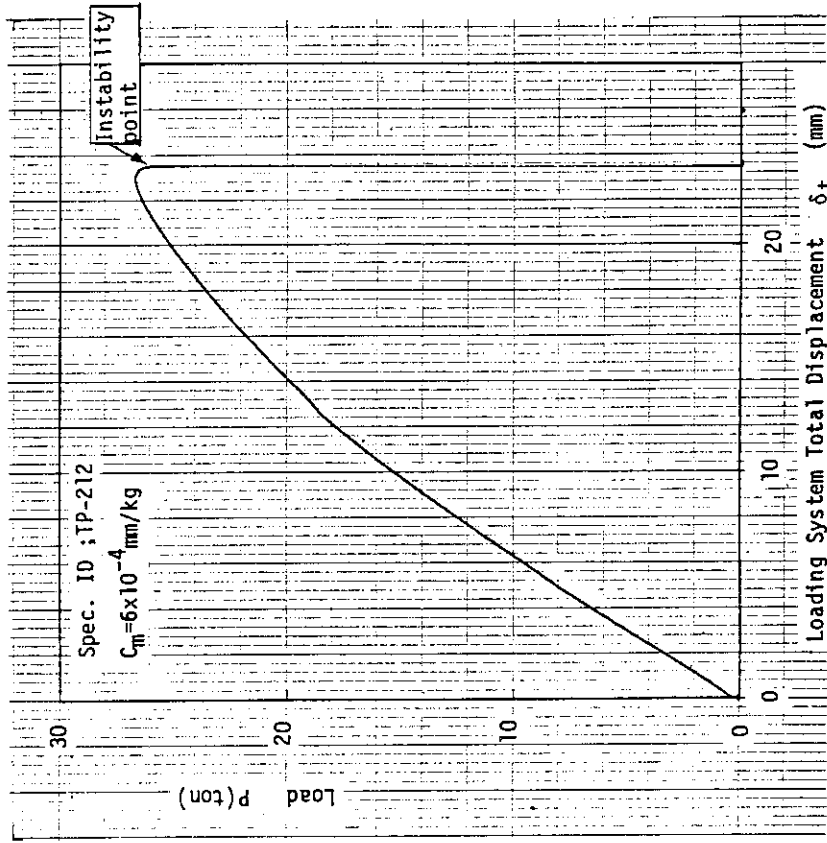


Fig. 4.14b

Load-versus-loading system total displacement curve for 10mm thickness center cracked panel specimen (TP-212) of JIS STS 42 carbon steel

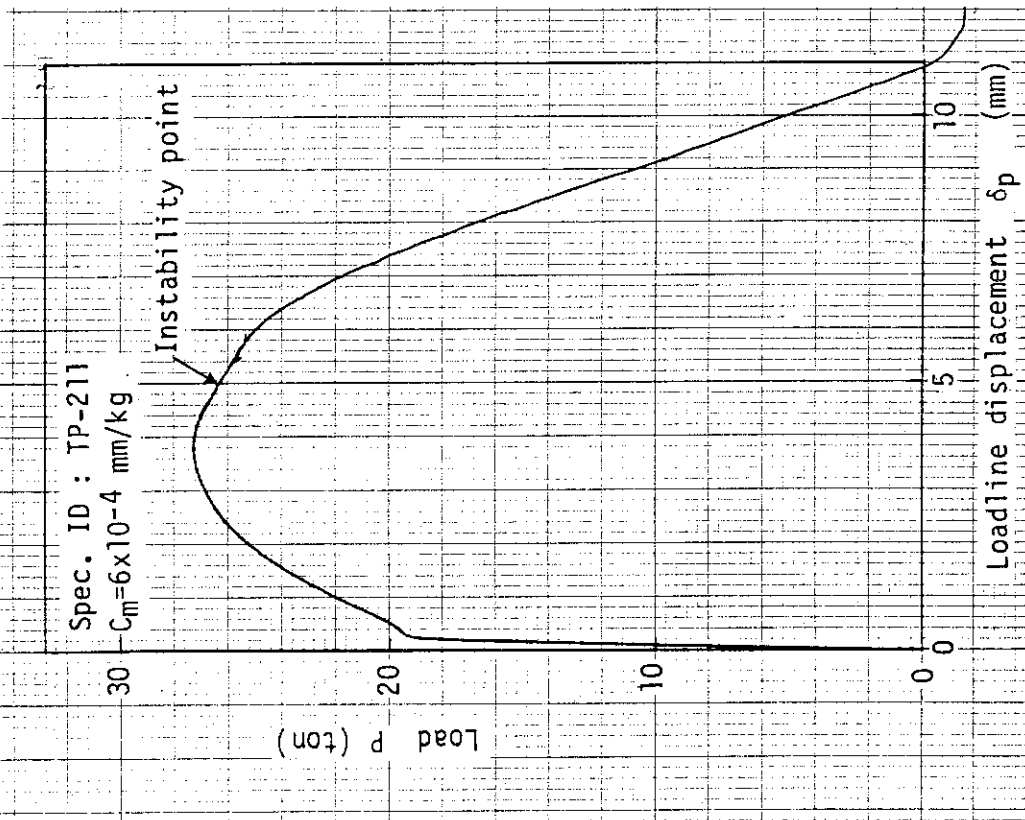


Fig. 4.15a Load-versus-loadline displacement curve for 10mm thickness center cracked panel specimen (TP-211) of JIS STS 42 carbon steel

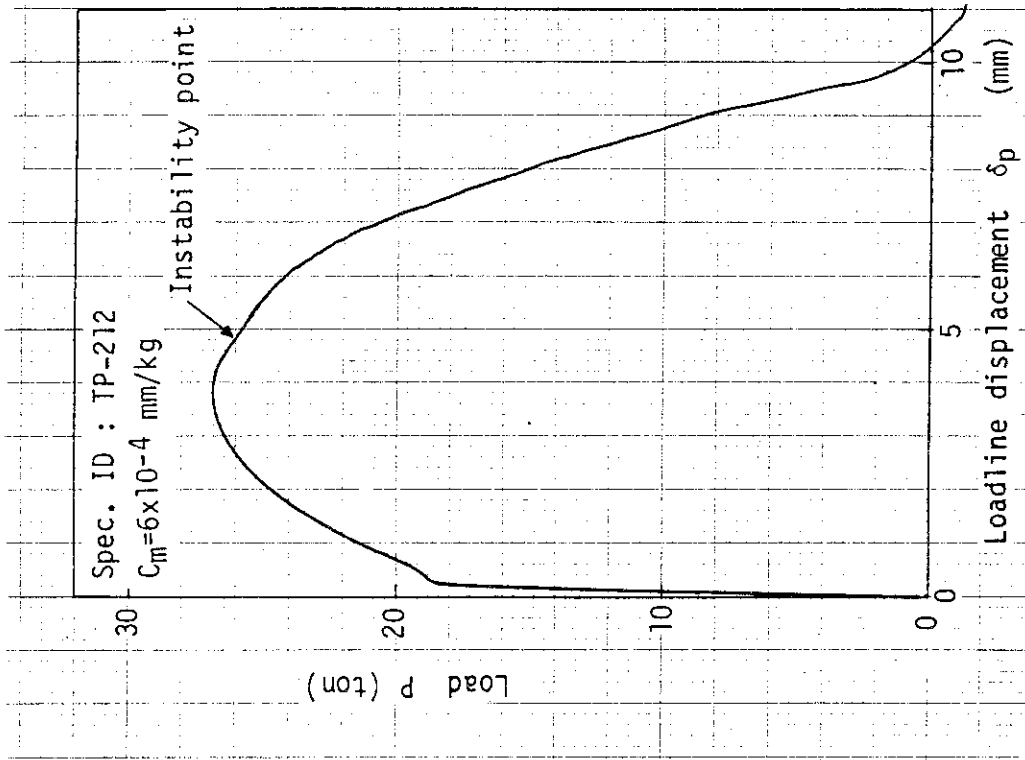


Fig. 4.15b Load-versus-loadline displacement curve for 10mm thickness center cracked panel specimen (TP-212) of JIS STS 42 carbon steel

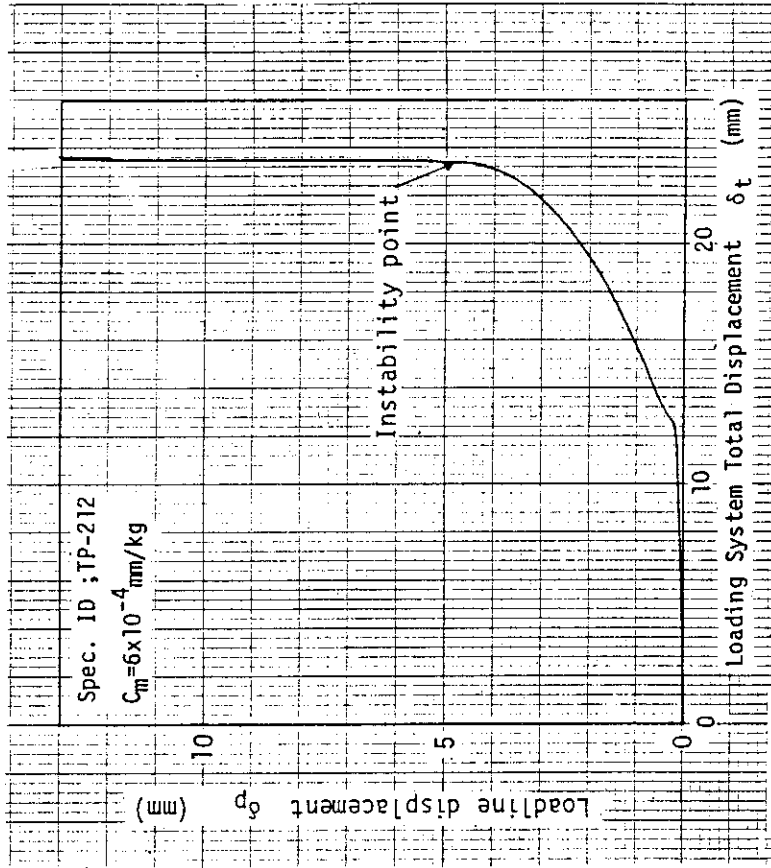


Fig. 4.16b

Loadline displacement-versus-loading system total displacement for 10mm thickness center cracked panel specimen (TP-212) of JIS STS 42 carbon steel

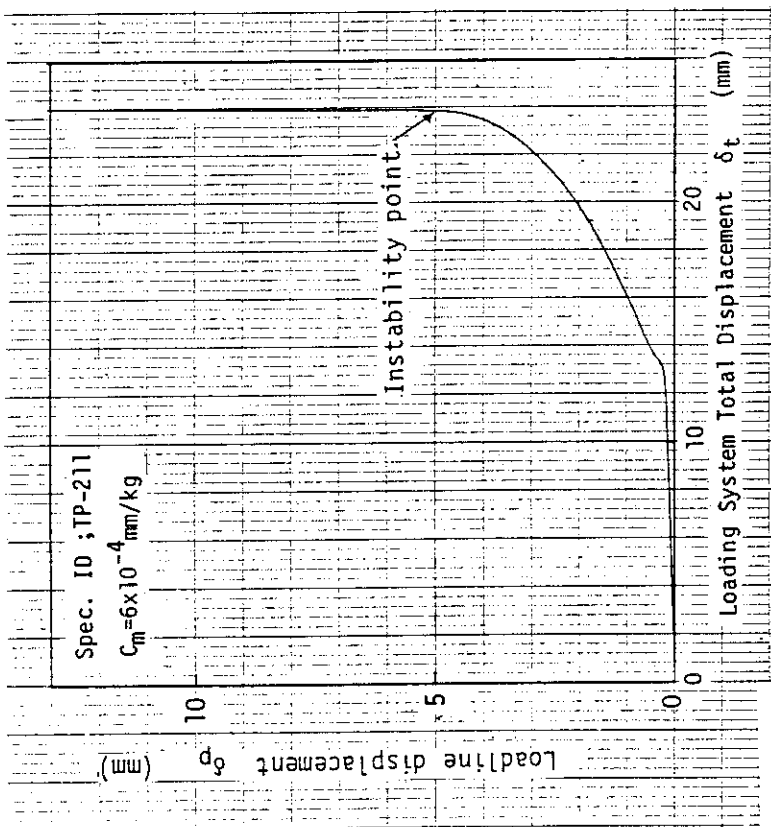


Fig. 4.16a

Loadline displacement-versus-loading system total displacement for 10mm thickness center cracked panel specimen (TP-211) of JIS STS 42 carbon steel

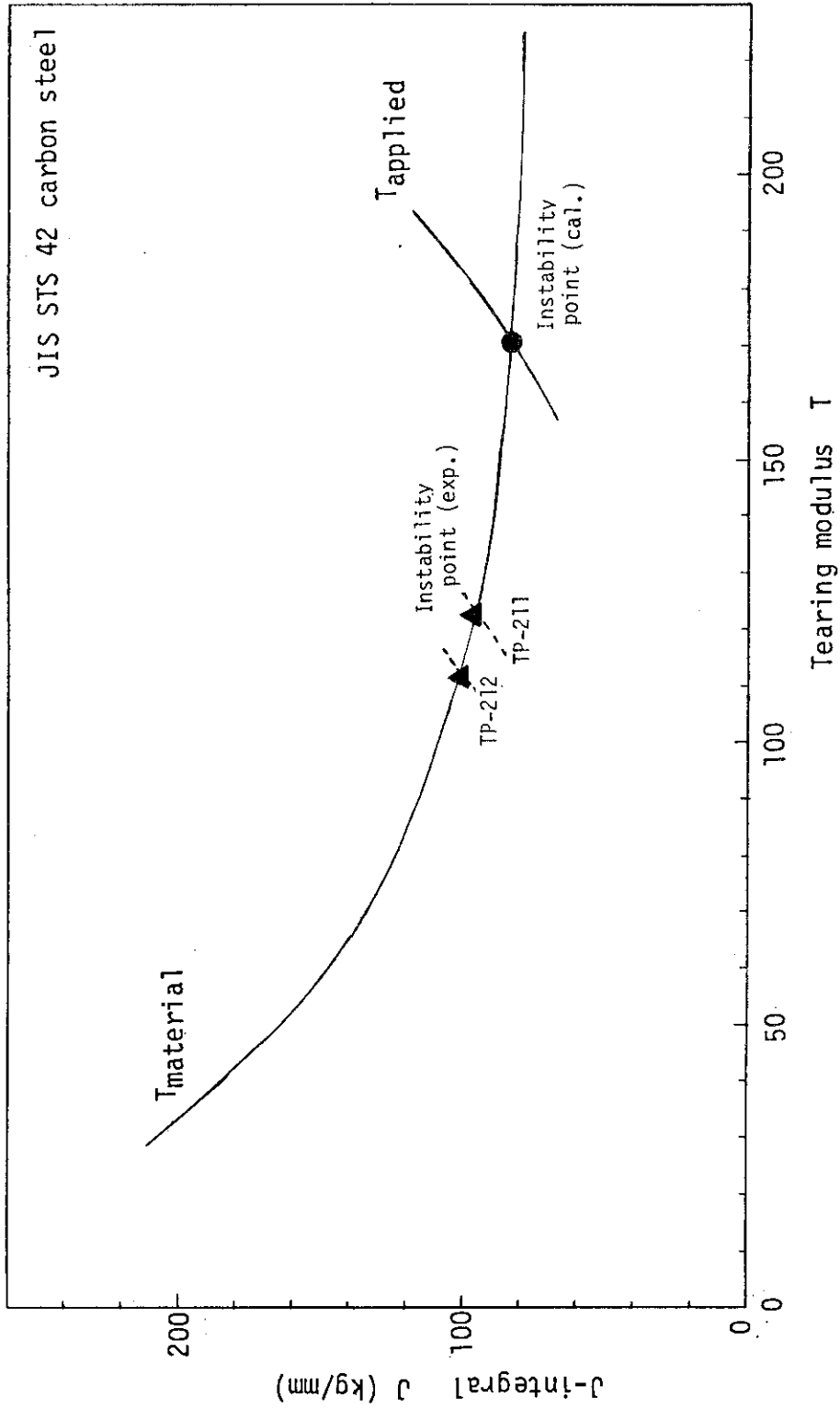


Fig. 4.17 J/T plots for T<sub>applied</sub> and T<sub>material</sub> for center cracked panel specimen with a compliance of 6x10<sup>-4</sup> mm/kg

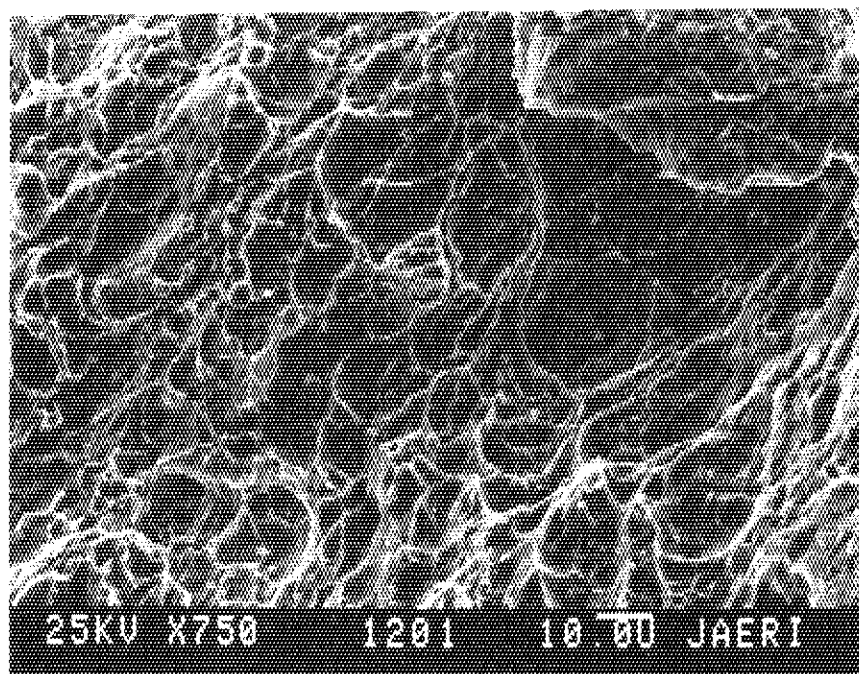


Photo 4.1 SEM observation of fractured charpy V notch specimen, JIS STS 42 carbon steel (Test temp.; RT )

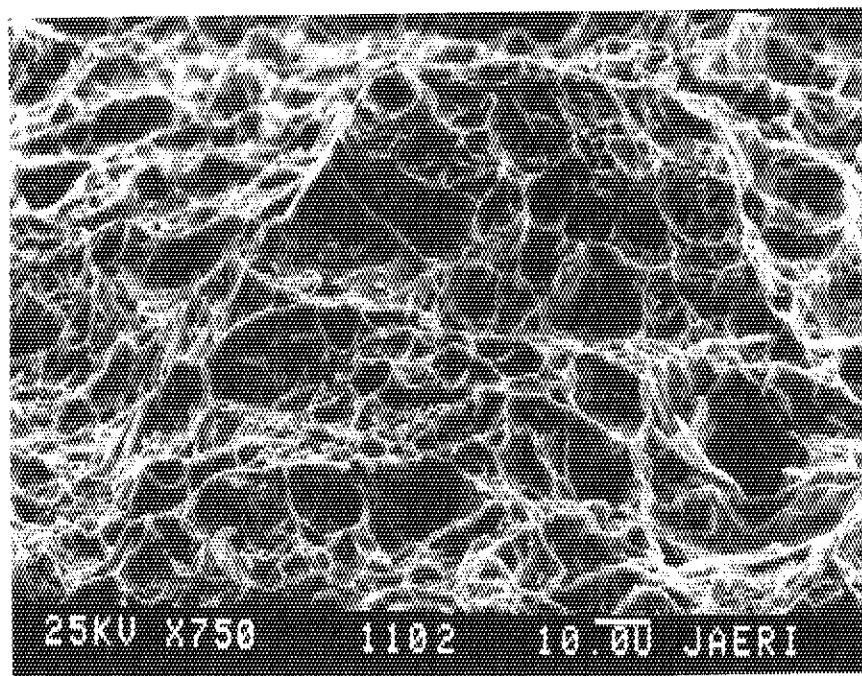


Photo 4.3 SEM observation of fractured CCP specimen, JIS STS 42 carbon steel

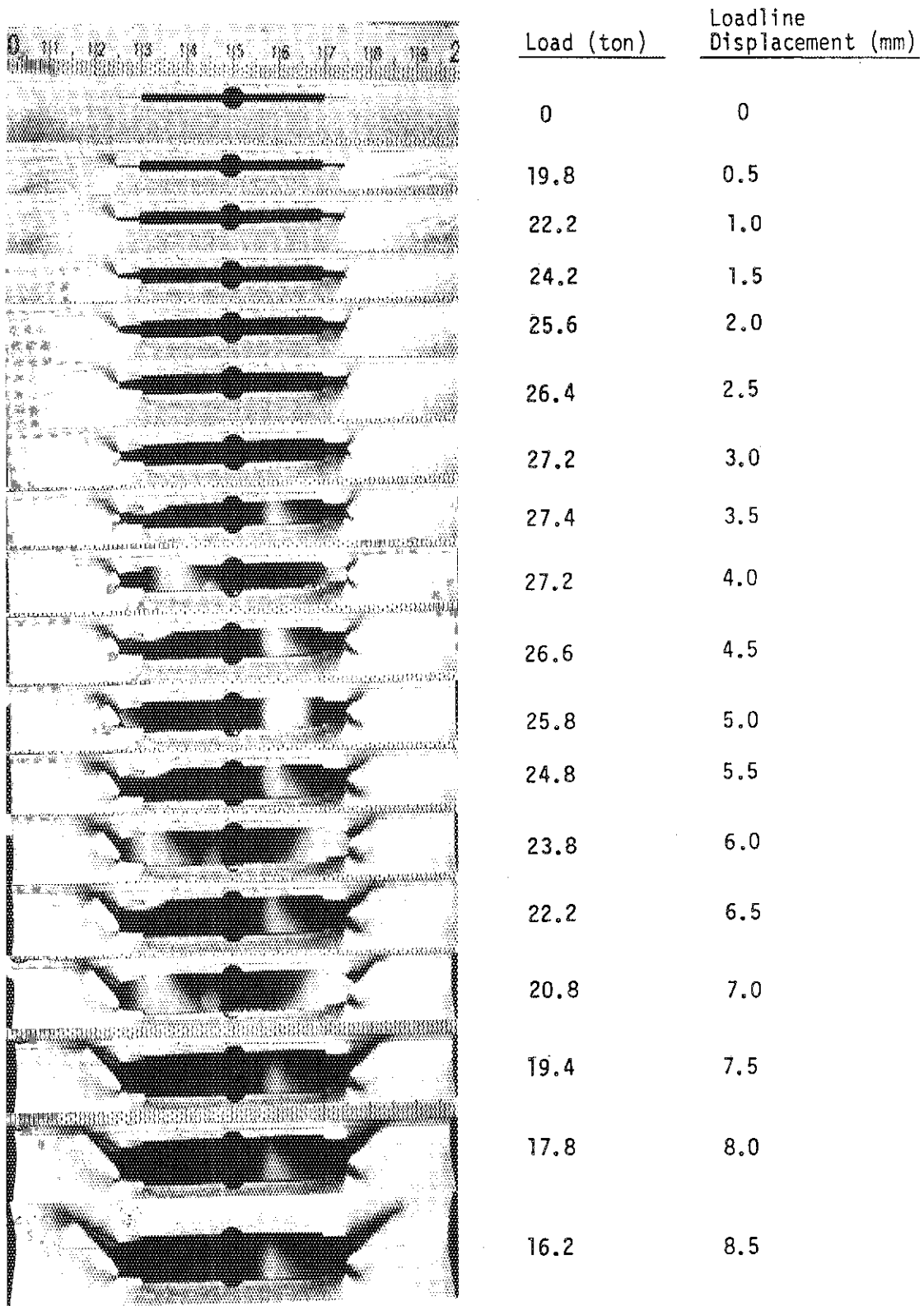
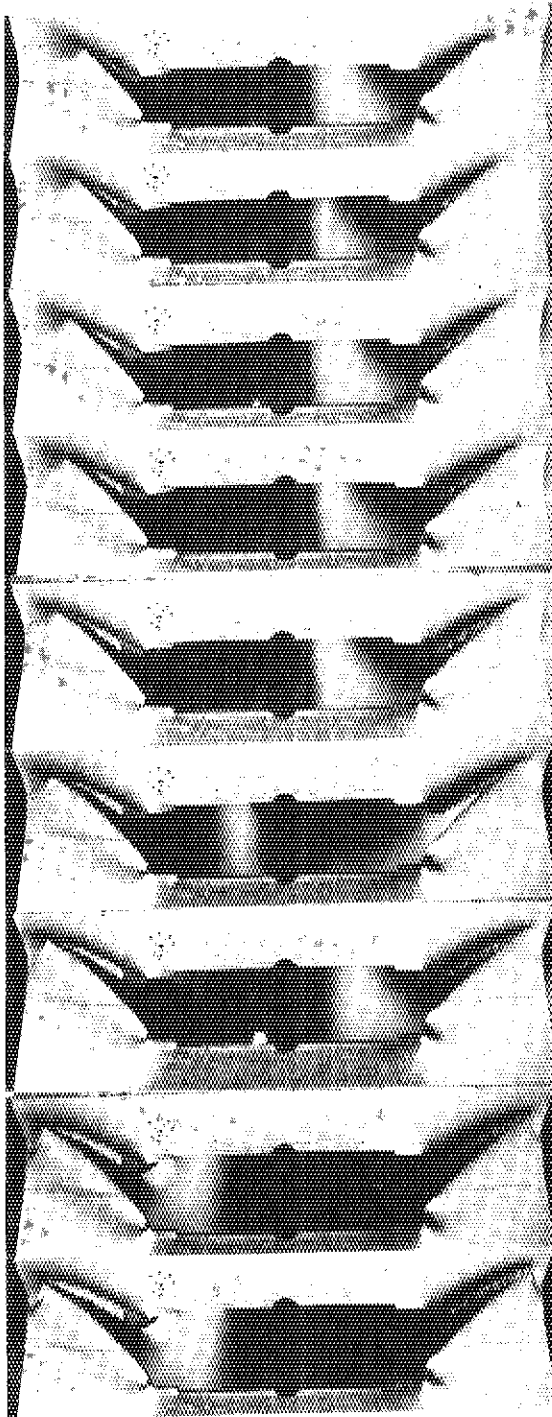


Photo 4.2 Development of crack growth in 10mm thickness center cracked panel specimen, TP-121



<u>Load (ton)</u>	<u>Loadline Displacement (mm)</u>
14.6	9.0
13.0	9.5
11.0	10.0
9.2	10.5
7.6	11.0
5.8	11.5
4.0	12.0
1.0	12.5
0	13.0

Photo 4.2 Development of crack growth in 10mm thickness center cracked panel specimen, TP-121 (continued)

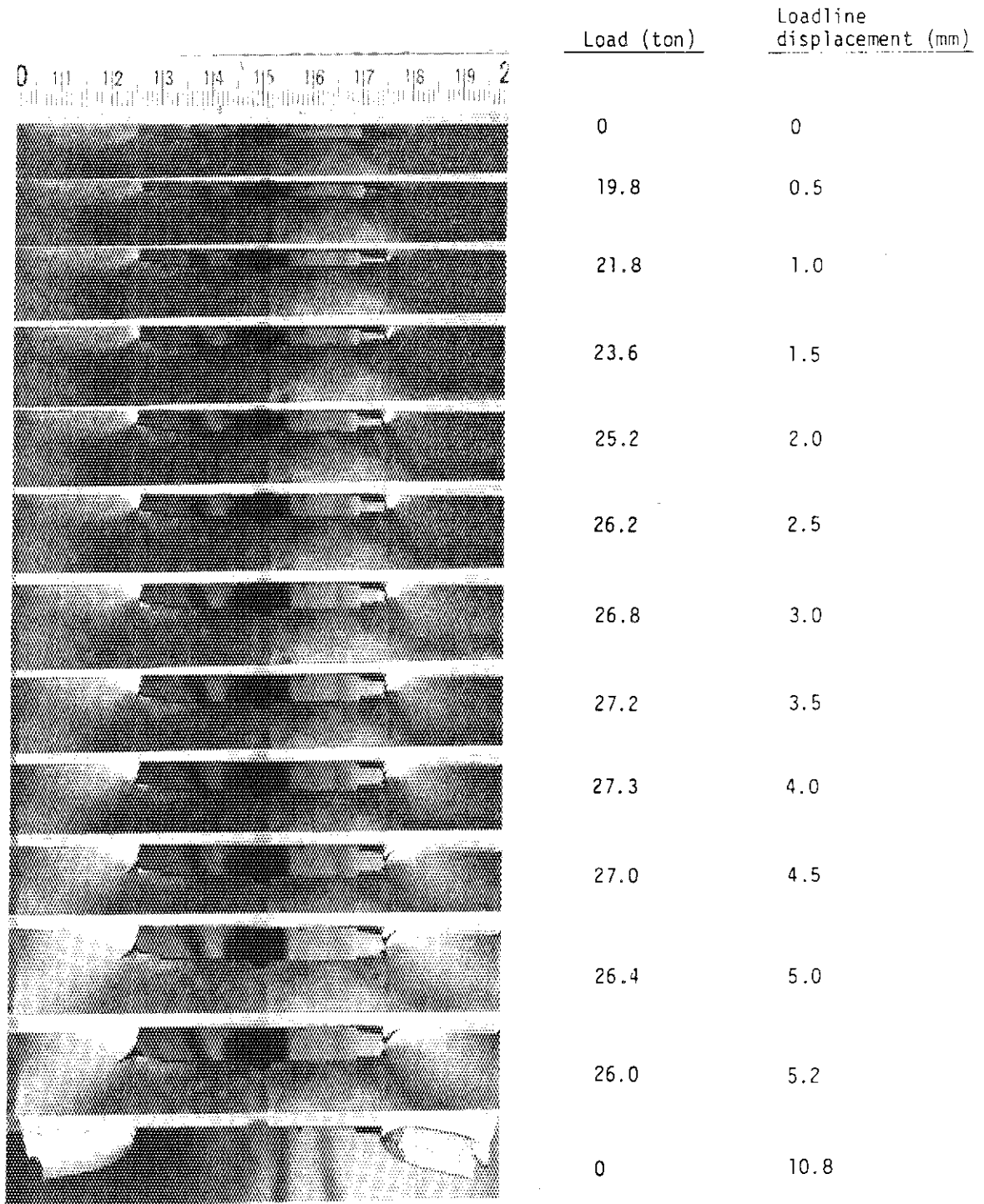


Photo 4.4a Development of crack growth in 10mm thickness CCP specimen (TP-211) with a compliance of  $6 \times 10^{-4}$  mm/kg



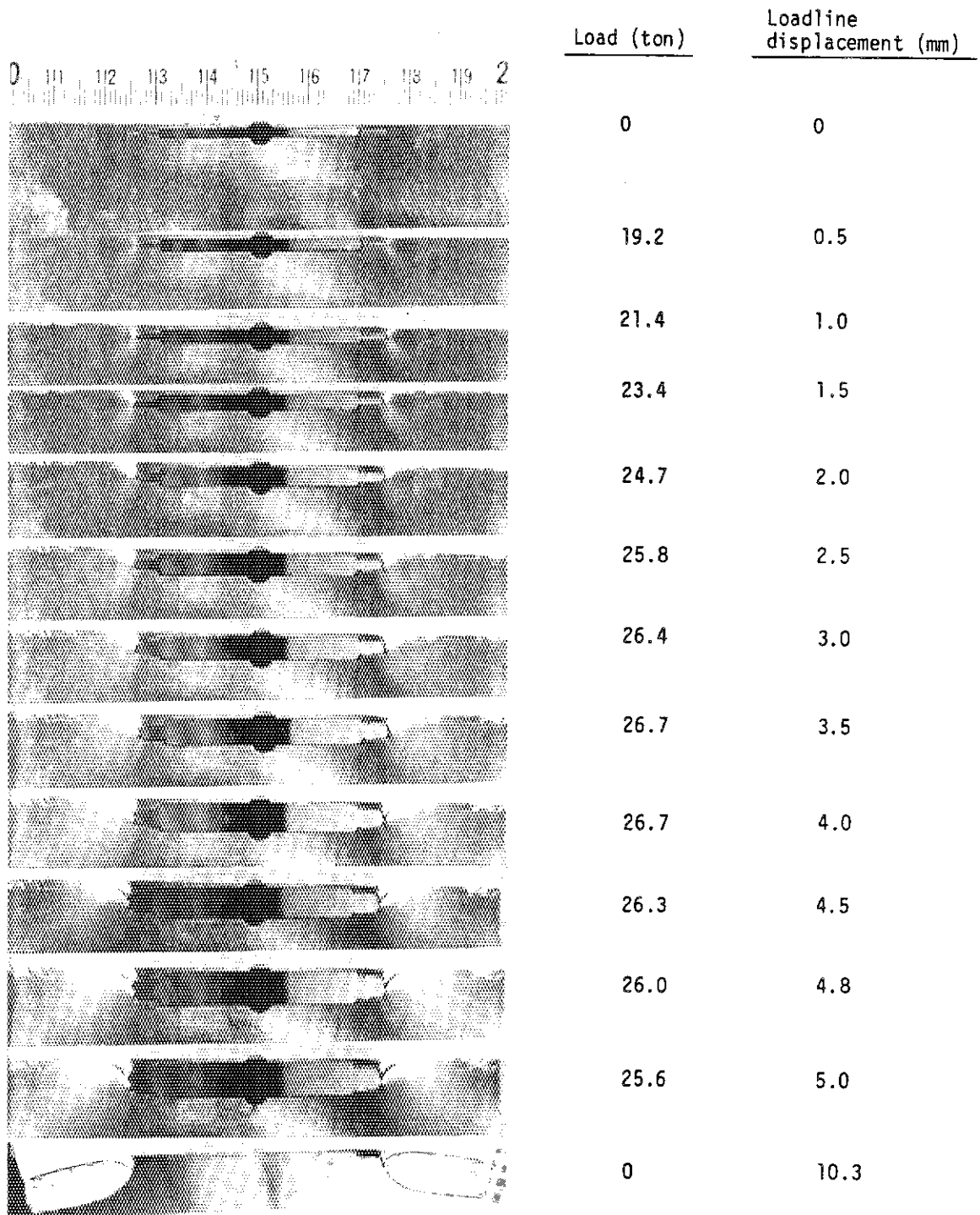


Photo 4.4b Development of crack growth in 10mm thickness CCP specimen (TP-212) with a compliance of  $6 \times 10^{-4}$  mm/kg

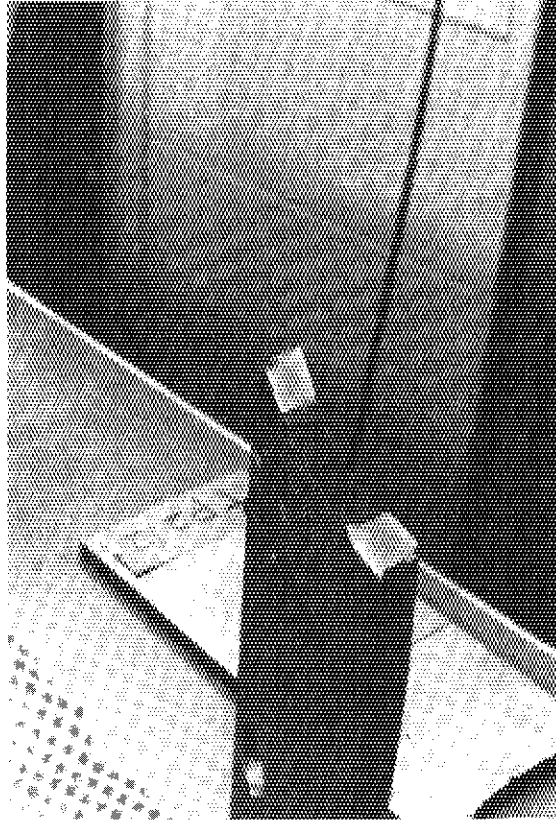
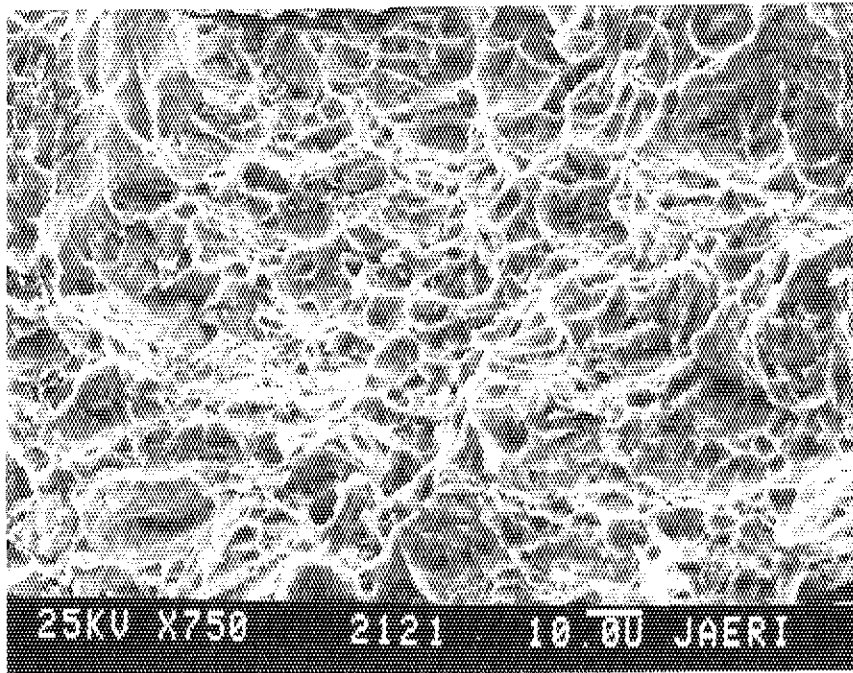
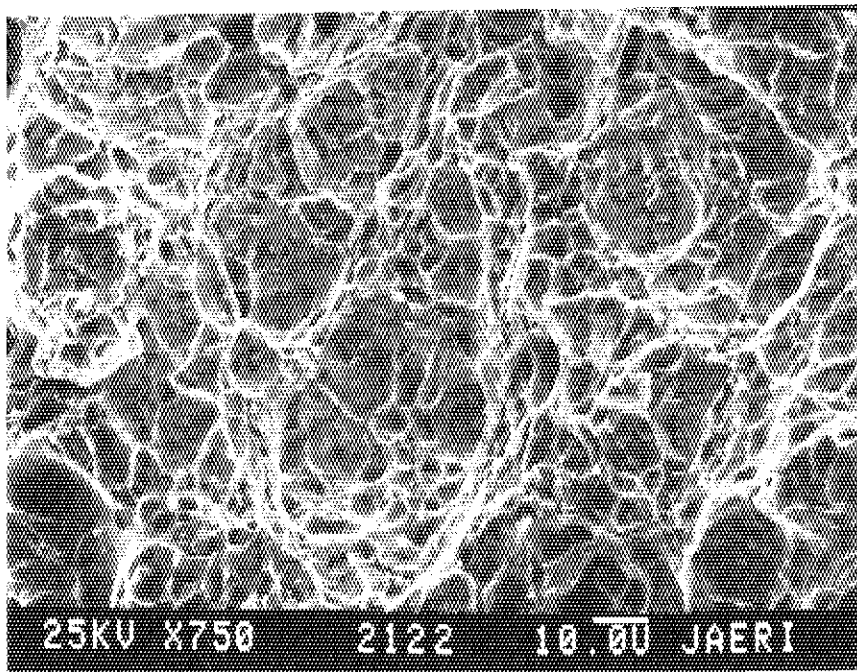


Photo 4.5 Unstable fractured CCP specimen of JIS STS 42 carbon steel



a) 0.5mm from artificial notch front



b) 5mm from artificial notch front

Photo 4.6 ·SEM observation of fractured specimen with a compliance of  $6 \times 10^{-4}$  mm/kg

## 5. 結 論

管径 609 mm, 肉厚 38 mm の炭素鋼管 STS 42 から切り出した中央切欠き平板を用いて, 室温で引張試験及び皿ばね ( $C_m: 6 \times 10^{-4} \text{ mm/kg}$ ) を装着した不安定破壊試験を実施し, 次の項目について調べた。

- (1) 荷重-変位曲線の測定
- (2) 写真撮影によるき裂進展挙動の観察
- (3) J-R 曲線の作成
- (4) 不安定破壊挙動の測定

さらに, これらの試験結果をもとにして, 次に示す破壊基準について検討を実施した。

- (1) 実断面応力破壊基準により周方向貫通欠陥を有する配管の崩壊荷重値の予測
- (2) J 積分に基づく Tearing Instability クライテリオンによる不安定破壊の予測

以上の結果, 下記に示す知見が得られた。

- (1) 周方向貫通欠陥を有する配管の崩壊荷重値は, 下式に示す流動応力  $\sigma_f$  を用いた実断面応力破壊基準により推定することができる。

$$\sigma_f = 0.6 (\sigma_y + \sigma_u)$$

なお,  $\sigma_y$ : 0.2% 耐力,  $\sigma_u$ : 引張強さ

- (2) 高コンプライアンスを有する系のき裂進展の安定性は, J 積分に基づく Tearing Instability クライテリオンにより, 安全側に予測することができる。しかし, 不安定破壊開始点を精度よく推定することは困難であった。

## 6. あとがき — 今後の課題 —

軽水炉における炭素鋼配管の不安定破壊に関する研究は, まだ緒についたばかりである。当面, 実パイプ試験をサポートする研究として, 小型試験片 (中央切欠き平板) を用いて, 以下の項目について検討しデータを集積する必要がある。

- (1) 軽水炉運転温度での J-R 曲線の作成。
- (2) J-R 曲線の荷重負荷速度依存性 (動的歪時効)。
- (3) 溶接部, 熱影響部及び母材の靱性評価。
- (4) 不安定破壊に対する限界コンプライアンス量の検討

### 謝 辞

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

## 5. 結 論

管径 609 mm, 肉厚 38 mm の炭素鋼管 STS 42 から切り出した中央切欠き平板を用いて, 室温で引張試験及び皿ばね ( $C_m: 6 \times 10^{-4} \text{ mm/kg}$ ) を装着した不安定破壊試験を実施し, 次の項目について調べた。

- (1) 荷重-変位曲線の測定
- (2) 写真撮影によるき裂進展挙動の観察
- (3) J-R 曲線の作成
- (4) 不安定破壊挙動の測定

さらに, これらの試験結果をもとにして, 次に示す破壊基準について検討を実施した。

- (1) 実断面応力破壊基準により周方向貫通欠陥を有する配管の崩壊荷重値の予測
- (2) J 積分に基づく Tearing Instability クライテリオンによる不安定破壊の予測

以上の結果, 下記に示す知見が得られた。

- (1) 周方向貫通欠陥を有する配管の崩壊荷重値は, 下式に示す流動応力  $\sigma_f$  を用いた実断面応力破壊基準により推定することができる。

$$\sigma_f = 0.6 (\sigma_y + \sigma_u)$$

なお,  $\sigma_y$ : 0.2% 耐力,  $\sigma_u$ : 引張強さ

- (2) 高コンプライアンスを有する系のき裂進展の安定性は, J 積分に基づく Tearing Instability クライテリオンにより, 安全側に予測することができる。しかし, 不安定破壊開始点を精度よく推定することは困難であった。

## 6. あとがき — 今後の課題 —

軽水炉における炭素鋼配管の不安定破壊に関する研究は, まだ緒についたばかりである。当面, 実パイプ試験をサポートする研究として, 小型試験片 (中央切欠き平板) を用いて, 以下の項目について検討しデータを集積する必要がある。

- (1) 軽水炉運転温度での J-R 曲線の作成。
- (2) J-R 曲線の荷重負荷速度依存性 (動的歪時効)。
- (3) 溶接部, 熱影響部及び母材の靱性評価。
- (4) 不安定破壊に対する限界コンプライアンス量の検討

### 謝 辞

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

## 5. 結 論

管径 609 mm, 肉厚 38 mm の炭素鋼管 STS 42 から切り出した中央切欠き平板を用いて, 室温で引張試験及び皿ばね ( $C_m: 6 \times 10^{-4} \text{ mm/kg}$ ) を装着した不安定破壊試験を実施し, 次の項目について調べた。

- (1) 荷重-変位曲線の測定
- (2) 写真撮影によるき裂進展挙動の観察
- (3) J-R 曲線の作成
- (4) 不安定破壊挙動の測定

さらに, これらの試験結果をもとにして, 次に示す破壊基準について検討を実施した。

- (1) 実断面応力破壊基準により周方向貫通欠陥を有する配管の崩壊荷重値の予測
- (2) J 積分に基づく Tearing Instability クライテリオンによる不安定破壊の予測

以上の結果, 下記に示す知見が得られた。

- (1) 周方向貫通欠陥を有する配管の崩壊荷重値は, 下式に示す流動応力  $\sigma_f$  を用いた実断面応力崩壊基準により推定することができる。

$$\sigma_f = 0.6 (\sigma_y + \sigma_u)$$

なお,  $\sigma_y$ : 0.2% 耐力,  $\sigma_u$ : 引張強さ

- (2) 高コンプライアンスを有する系のき裂進展の安定性は, J 積分に基づく Tearing Instability クライテリオンにより, 安全側に予測することができる。しかし, 不安定破壊開始点を精度よく推定することは困難であった。

## 6. あとがき — 今後の課題 —

軽水炉における炭素鋼配管の不安定破壊に関する研究は, まだ緒についたばかりである。当面, 実パイプ試験をサポートする研究として, 小型試験片 (中央切欠き平板) を用いて, 以下の項目について検討しデータを集積する必要がある。

- (1) 軽水炉運転温度での J-R 曲線の作成。
- (2) J-R 曲線の荷重負荷速度依存性 (動的歪時効)。
- (3) 溶接部, 熱影響部及び母材の靱性評価。
- (4) 不安定破壊に対する限界コンプライアンス量の検討

### 謝 辞

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

## 参考文献

- 1) 小笠原昌雄 " 高圧ガスパイプラインの不安定延性破壊停止条件の破壊力学による研究" 圧力技術 Vol. 121, No.3, 1983
- 2) 柴田他 4 名: " 曲げ荷重を受ける欠陥付 SUS 304 ステンレス鋼製 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 840, 10, (1984), 320
- 3) 植田他 5 名: " 周方向内面切欠を有する配管の不安定破壊試験" 日本原子力学会 昭和 59 年秋の分科会 A 78
- 4) G. Yagawa 他 5 名; "Stable and Unstable Growths of Circumferential Cracks in Type 304 Stainless Steel Pipes under Tensile and Thermal Loading" NUREG/CP-0051, CSNI Report No.82 (1984) pp.56-125
- 5) 青木禮次郎 " プラント設計の高度化, 改良標準化の最近のトピックス" 原子力工業 Vol. 31, No.1, pp 28~37
- 6) 原産新聞 第 1235 号, 昭和 59 年 5 月 31 日
- 7) R. Horn 他; "The Growth and Stability of Stress Corrosion Cracks in Large Diameter BWR piping Final Report, EPRI NP-2472, July, 1982
- 8) M.F. Kanninen 他 5 名; "Towards an Elastic-plastic Fracture Mechanics Predictive Capability for Reactor Piping" Nuclear Engineering and Design 48 (1978) pp.117-134
- 9) M.F. Kanninen 他 8 名; "The Development of a Plan for the Assessment of Degraded Nuclear Piping by Experimentation and Tearing Instability Fracture Mechanics Analysis" NUREG/CR-3142 (1983)
- 10) ASME Code Sec.XI IWB-3640 "Evaluation Procedure and Acceptance Criteria for Austenitic Piping" 1983 Winter Addenda
- 11) The Pipe Crack Task Group; "Report of the U.S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee" NUREG-1061, Vol.1 (August, 1984)
- 12) Nucleonics week; Vol.26, No.3, Jan. 17, 1985
- 13) Inside NRC; Vol.7, No.4, Feb. 18, 1985
- 14) M.G. Vassilaros 他 4 名; "J-Integral Tearing Instability Analyses for 8-inch Diameter ASTM A 106 Steel Pipe" NUREG/CR-3740 (April, 1984)
- 15) 金子他 1 名 " 原子炉冷却材圧力バウンダリ配管の延性不安定破壊予測法とその実証試験研究の紹介" JAERI -M 84-178, (1984)
- 16) F.J. Loss; "Structural Integrity of Water Reactor Pressure Boundary Components" NUREG/CR-3228 (Sept., 1984)
- 17) 日本機械学会: 弾塑性破壊靱性  $J_{IC}$  試験方法 JSME S 011-1981 (1981年)
- 18) G.S. Garwood, "Effect of Specimen Geometry on Crack Growth Resist-

- tance" ASTM STP 677 (1979), pp.511-532
- 19) P.C. Paris 他3名; "Instability of Tearing Model of Elastic-plastic Crack Growth" ASTM STP 668 (1979), pp.5-36
  - 20) H. Tada 他1名; "Tearing Instability Analysis Handbook" NUREG/CR-1221 (1980)
  - 21) 森島他2名, "配管用鋼管材料の諸問題" 圧力技術 Vol. 10,, No 4, (1972), pp 25~32,
  - 22) H. Tada and Paris ; "A stability analysis of Circumferential Cracks Reactor Piping System", ASTM 700, 1980
  - 23) G.T. Hahn ; "Criteria for Crack Extension in Cylindrical Pressure Vessels" Int. J. Fracture Mechanics 5 (1969), pp.187
  - 24) R.J. Eiber 他3名; "Investigation of the Initiation and Extent of Ductile Pipe Rupture" BMI-1908 (1971)
  - 25) J. Pan 他3名; "Application of a Tearing Instability Analysis for Stain Hardening Materials to a Circumferentially Cracked Pipe in Bending" presented at the 15th ASTM Symposium on Fracture Mechanics, July 1982 (to be published)
  - 26) 大場敏弘, 私信
  - 27) C. Shih 他1名; "Estimation Technique for the Prediction of Elastic-plastic Fracture of Structural Components of Nuclear Systems" RP1237-1, 1979



Appendix A : Stress-strain curve of JIS STS 42 carbon steel

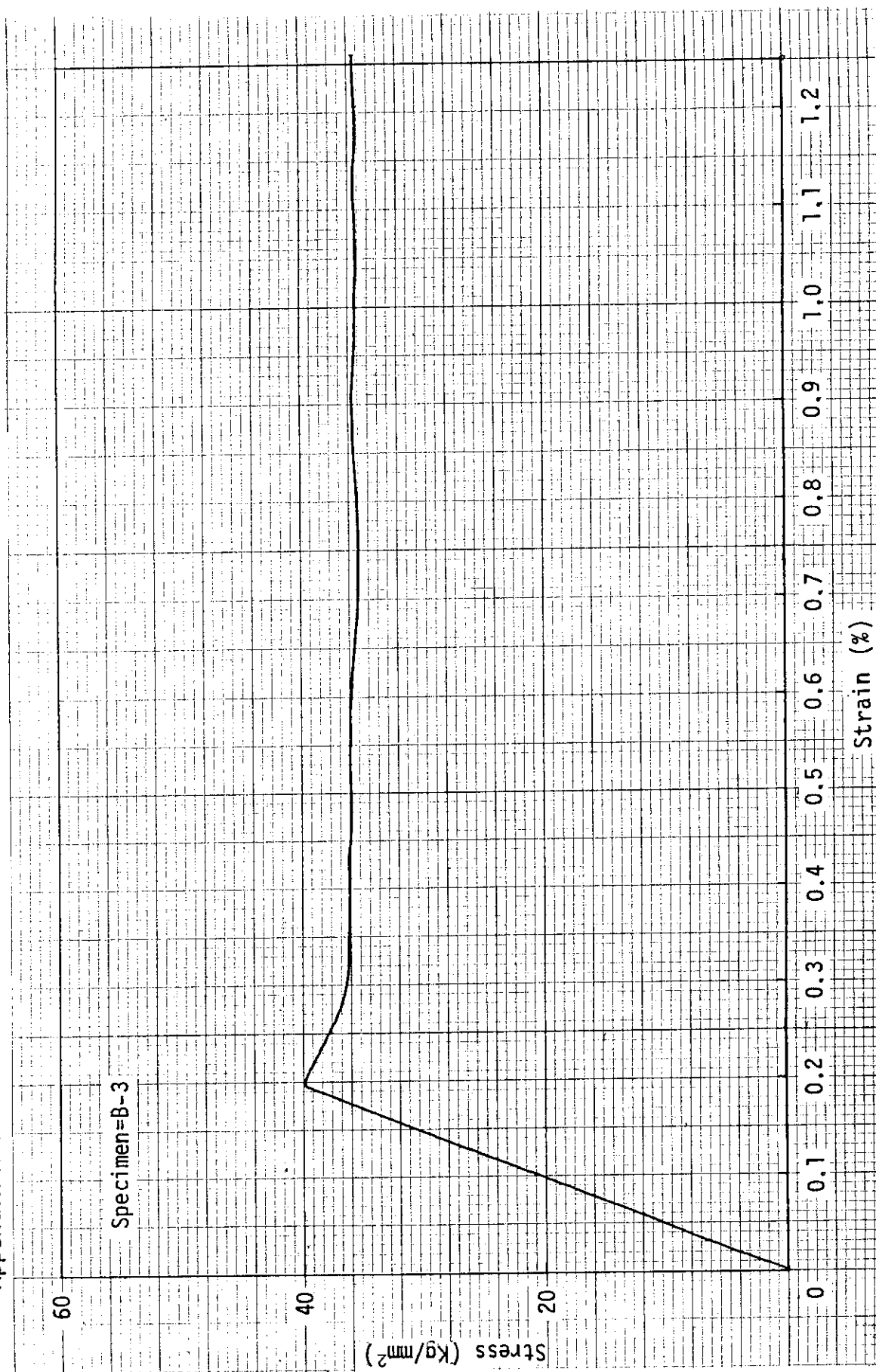


Fig. A.1 Stress-strain curve of JIS STS 42 carbon steel ; specimen B-3  
(up to 1.2% strain)

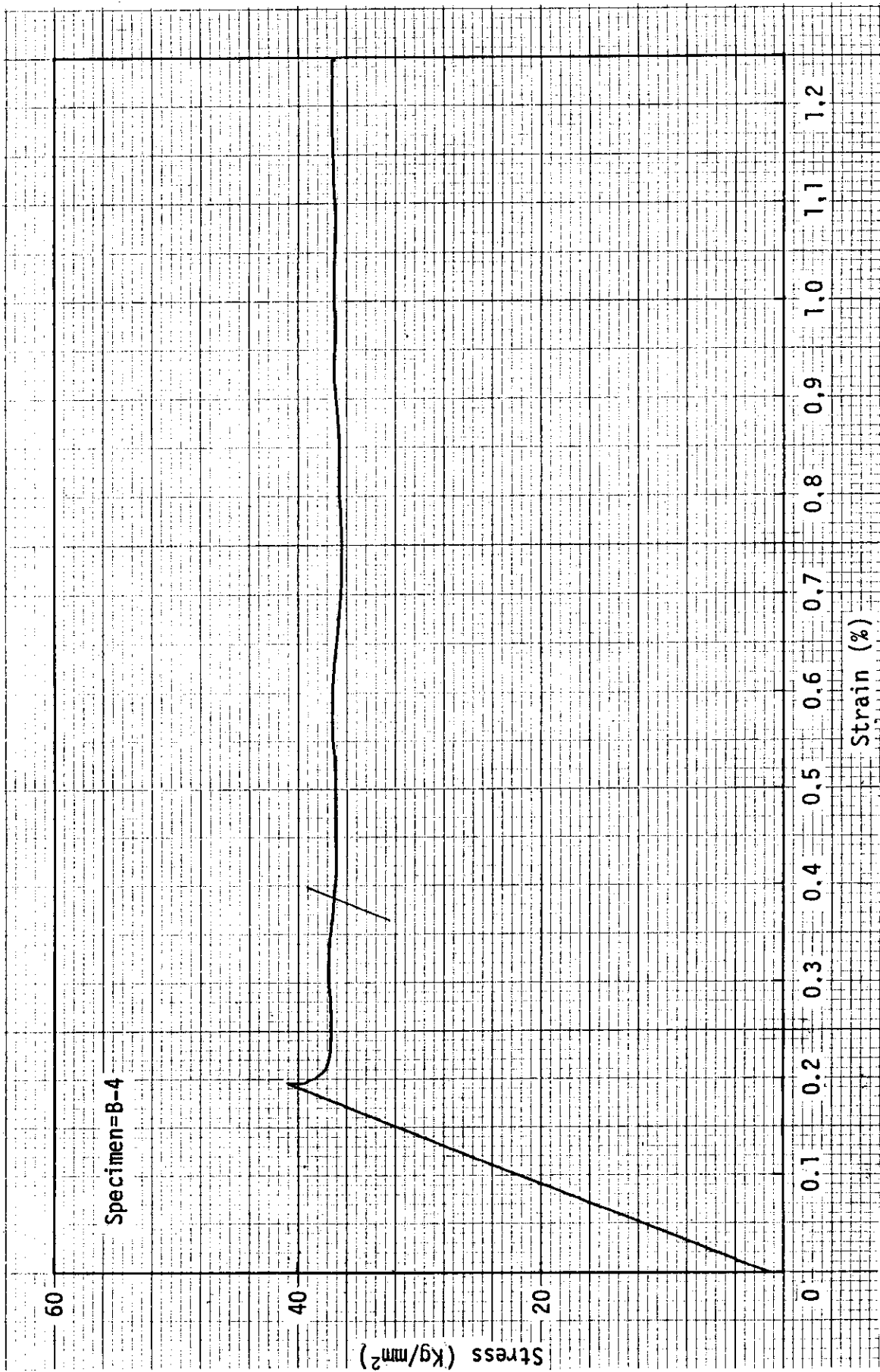


Fig. A.2 Stress-strain curve of JIS STS 42 carbon steel ;specimen B-4  
(up to 1.2% strain)

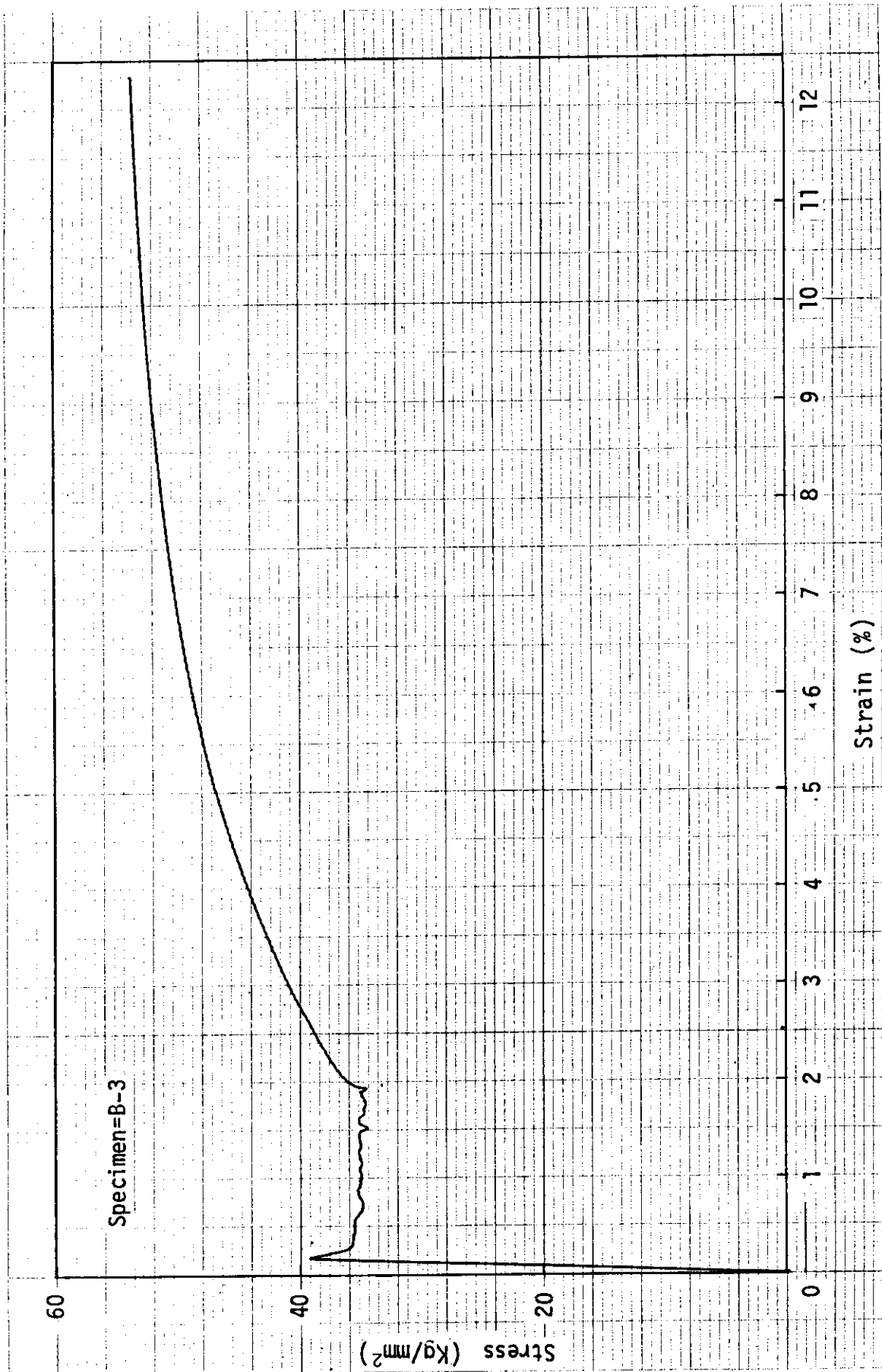


Fig. A.3 Stress-strain curve of JIS STS 42 carbon steel ;specimen B-3  
(up to 12% strain)

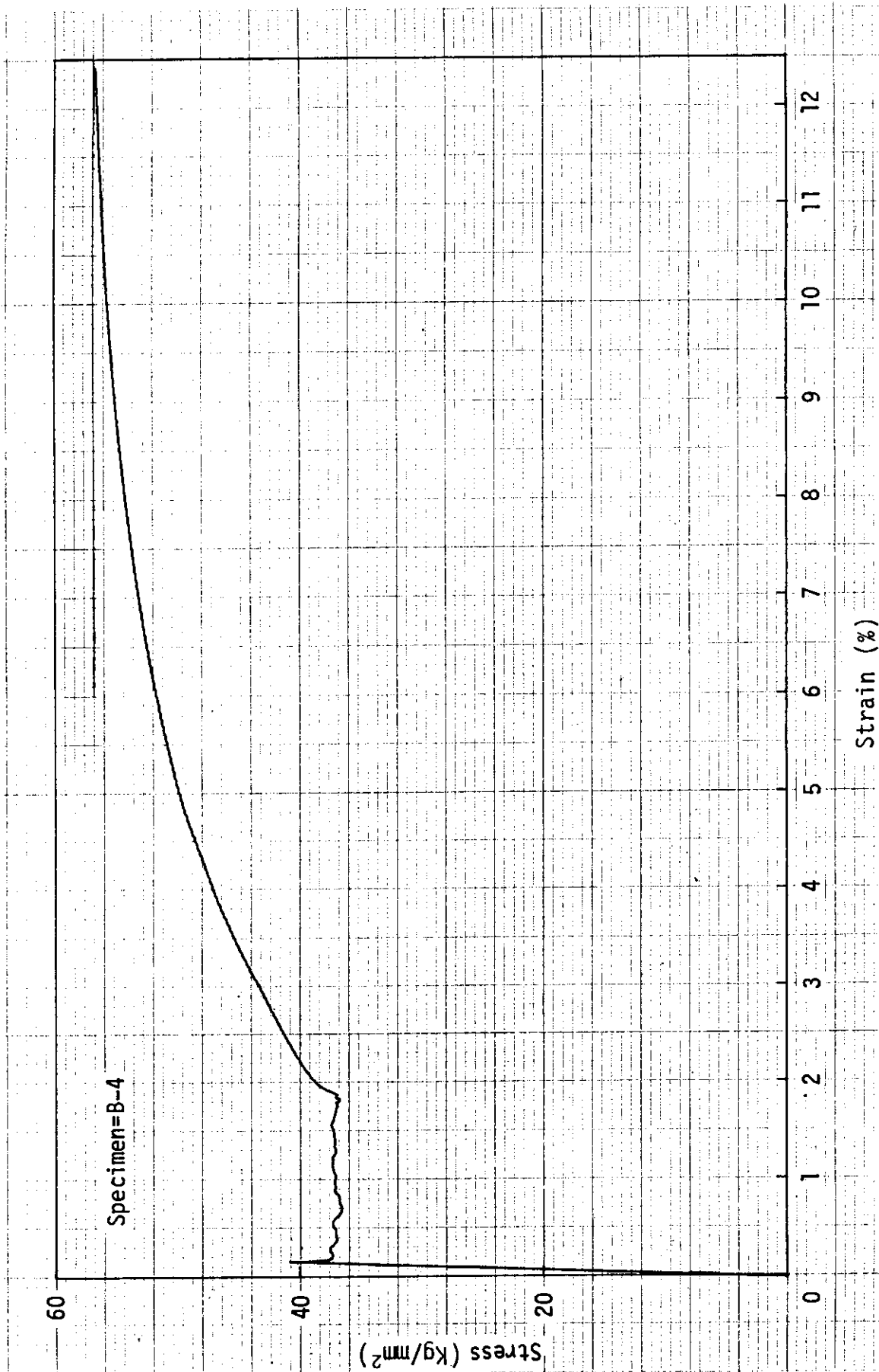


Fig. A.4 Stress-strain curve of JIS STS42 carbon steel; specimen B-4 (up to 12% strain)

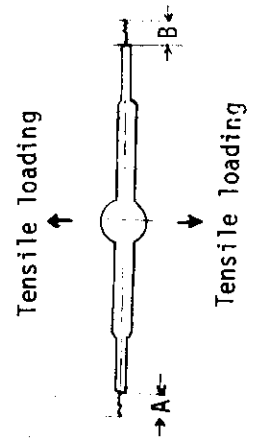
Appendix B ; Tabulation of curves fit crack extension data and J calculation

SPEC. ID; TP-111

Load(ton)	Load-line displacement(mm)	Crack length A* (mm)	Cracklength B* (mm)	Crack extension** (mm)	J(kg/mm)
26.4	3.0	0.83	0.49	0.66	66.8
26.8	3.5	0.96	0.87	0.92	81.4
27.0	4.0	1.32	1.47	1.39	95.0
26.8	4.5	1.40	2.04	1.72	108.6
26.2	5.0	2.39	2.84	2.62	122.1
25.6	5.5	2.94	3.57	3.26	135.3
24.8	6.0	3.80	4.50	4.15	148.1
23.6	6.5	4.34	5.46	4.90	160.4
22.8	7.0	4.82	5.95	5.38	172.1
19.6	8.0	6.99	7.76	7.37	194.2
16.6	9.0	9.54	9.96	9.75	213.2
13.2	10.0	12.0	12.37	12.00	228.9
10.0	11.0	14.47	14.40	14.4	240.9

\* Crack length

\*\* Crack extension =  $\frac{A+B}{2}$

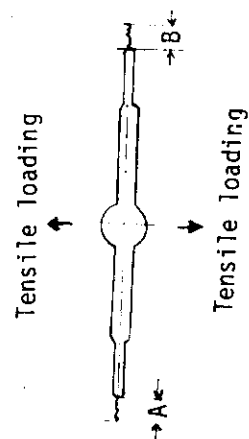


SPEC. ID: TP-121

Load(ton)	Load-line displacement(mm)	Crack length A (mm)	Crack length B (mm)	Crack extension** (mm)	J(kg/mm)
27.2	3.0	0.67	0.77	0.72	68.8
27.4	3.5	1.20	1.29	1.24	82.6
27.2	4.0	1.95	1.71	1.83	96.5
26.6	4.5	2.87	2.72	2.79	110.3
25.8	5.0	4.08	3.55	3.82	123.6
24.8	5.5	4.93	4.27	4.60	136.5
23.8	6.0	5.72	5.17	5.45	148.9
22.2	6.5	6.69	5.97	6.33	160.6
20.8	7.0	7.67	7.02	7.34	171.6
17.8	8.0	9.49	9.36	9.42	191.7
14.6	9.0	11.56	11.12	11.3	208.6
11.0	10.0	13.79	14.07	13.9	222.1
7.6	11.0	16.47	16.83	16.6	232.0
4.0	12.0	19.00	19.26	19.1	238.0

\* Crack length

$$** \text{ Crack extension} = \frac{A+B}{2}$$

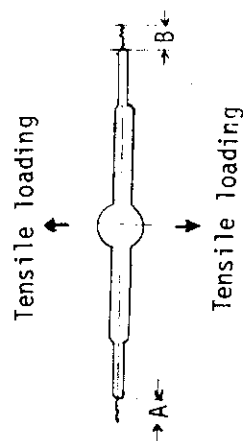


SPEC. ID; TP-112

Load (ton)	Load-line displacement (mm)	Crack length A* (mm)	Crack length B* (mm)	Crack extension** (mm)	J (kg/mm)
24.8	2.0	0.21	0.13	0.17	41.4
25.8	2.5	0.33	0.22	0.28	54.1
26.4	3.0	0.60	0.45	0.52	67.2
26.6	3.5	1.14	1.07	1.11	80.6
26.5	4.0	1.58	1.52	1.55	94.0
26.0	4.5	2.42	2.16	2.29	107.3
25.2	5.0	3.41	2.90	3.15	120.1
24.0	5.5	4.84	3.67	4.25	137.7
22.8	6.0	6.78	4.35	5.56	144.7
21.0	6.5	8.14	5.58	6.86	155.9
19.4	7.0	9.88	6.44	8.16	166.3
16.0	8.0	13.15	8.97	11.06	185.1
12.4	9.0	15.87	10.87	13.37	200.0
9.2	10.0	17.33	13.11	15.22	211.2
4.8	11.0	20.53	14.08	17.30	218.5

\* Crack length

\*\* Crack extension =  $\frac{A+B}{2}$

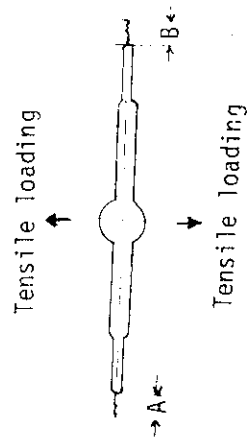


SPEC. ID-TP-06

Load (ton)	Load-line displacement (mm)	Crack length A. (mm)	Crack length B. (mm)	Crack extension (mm)	J (kg/mm)
44.4	3.0	1.58	1.50	1.54	47.5
43.6	3.5	1.73	2.34	2.04	56.3
41.8	4.0	2.58	2.83	2.70	65.0
39.2	4.5	3.52	3.83	3.68	73.2
36.2	5.0	4.47	4.43	4.45	80.9
32.8	5.5	5.38	5.53	5.45	87.9
25.2	6.35	7.03	7.13	7.08	98.1
19.2	7.0	9.41	9.19	9.30	104.1
8.0	8.0	11.63	10.29	10.96	109.7

\* Crack length

\*\* Crack extension =  $\frac{A+B}{2}$



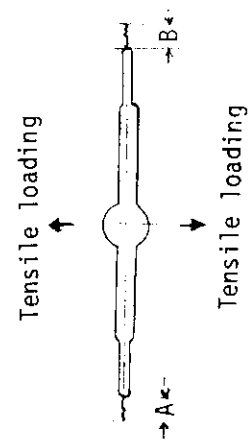


SPEC. ID: TP-07

Load (ton)	Load-line displacement (mm)	Crack Length A* (mm)	Crack Length B* (mm)	Crack extension** (mm)	J (kg/mm)
44.0	3.0	1.20	1.75	1.47	47.8
43.0	3.5	2.14	2.16	2.15	56.6
41.2	4.0	2.89	3.05	2.97	65.2
38.4	4.5	3.49	3.91	3.70	73.2
35.4	5.0	4.34	4.65	4.49	80.7
32.0	5.5	5.34	5.49	5.41	87.6
27.2	6.05	6.39	6.44	6.41	94.2
22.8	6.5	7.45	7.77	7.61	98.8
17.6	7.0	8.32	8.48	8.40	102.9
4.8	8.0	9.04	9.17	9.11	107.4

\* Crack length

\*\* Crack extension =  $\frac{A+B}{2}$

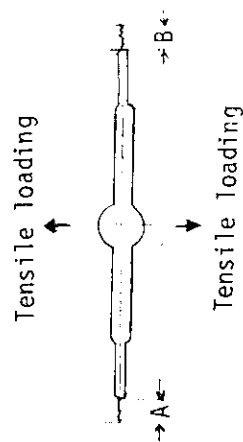


SPEC. ID; TP-08

Load(ton)	Load-line displacement(mm)	Crack length A* (mm)	Crack length B* (mm)	Crack extension** (mm)	J(kg/mm)
44.5	3.0	1.40	1.62	1.51	48.0
43.4	3.5	2.07	1.83	1.95	56.8
41.4	4.0	2.70	2.06	2.38	65.4
38.8	4.5	3.74	3.33	3.53	73.6
35.8	5.0	4.73	4.07	4.40	81.2
32.4	5.5	5.64	4.62	5.13	88.1
28.4	6.0	6.97	5.28	6.13	94.3
23.8	6.5	7.52	6.03	6.77	99.6
18.8	7.0	9.75	6.78	8.26	104.0

\*\* Crack extension =  $\frac{A+B}{2}$

\* Crack length

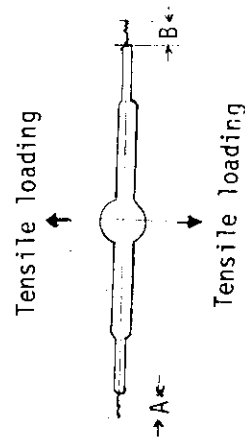


SPEC. ID; TP-01

Load(ton)	Load-line displacement(mm)	Crack length A* (mm)	Crack length B* (mm)	Crack extension** (mm)	J(kg/mm)
70.0	3.5	1.27	1.49	1.38	85.7
70.2	4.0	1.68	1.85	1.76	99.9
69.6	4.5	2.38	2.56	2.47	114.0
68.6	5.0	3.06	3.73	3.39	128.1
66.4	5.5	3.91	4.36	4.13	141.8
64.0	6.0	4.98	5.56	5.27	155.1
61.6	6.5	6.12	6.65	6.39	167.9
58.4	7.0	7.01	7.48	7.24	180.1
54.4	7.5	8.37	9.01	8.69	191.7
48.8	8.0	10.33	11.33	10.83	202.5
35.2	9.0	13.95	14.81	14.38	211.5

\* Crack length

$$** \text{ Crack extension} = \frac{A+B}{2}$$

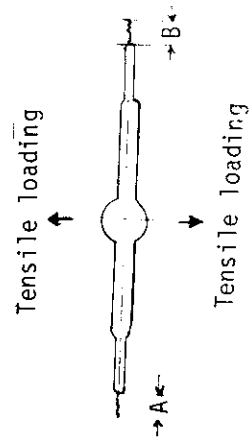


SPEC. ID; TP-02

Load(ton)	Load-line displacement(mm)	Crack length A (mm)	Crack length B (mm)	Crack extension** (mm)	J(kg/mm)
70.0	3.5	1.28	1.58	1.43	85.9
70.4	4.0	1.84	2.09	1.96	100.0
70.0	4.5	2.76	3.16	2.96	114.3
68.8	5.0	3.58	3.82	3.70	128.1
66.8	5.5	4.50	4.77	4.63	141.9
64.8	6.0	5.36	5.99	5.68	155.3
61.6	6.5	6.13	7.25	6.69	168.2
58.4	7.0	7.33	8.71	8.02	180.5
53.6	7.5	8.89	10.49	9.69	192.1
47.2	8.0	11.27	12.74	12.01	202.6
34.4	9.0	14.83	16.03	15.40	220.1
16.0	10.5	18.55	19.06	18.80	236.3
10.0	11.0	19.66	20.26	20.00	239.0

\* Crack length

\*\* Crack extension =  $\frac{A+B}{2}$

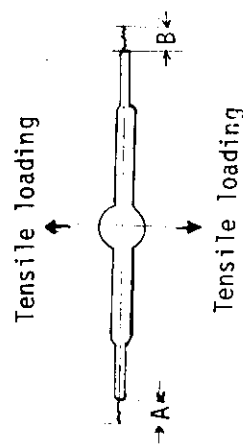


SPEC. ID; TP-03

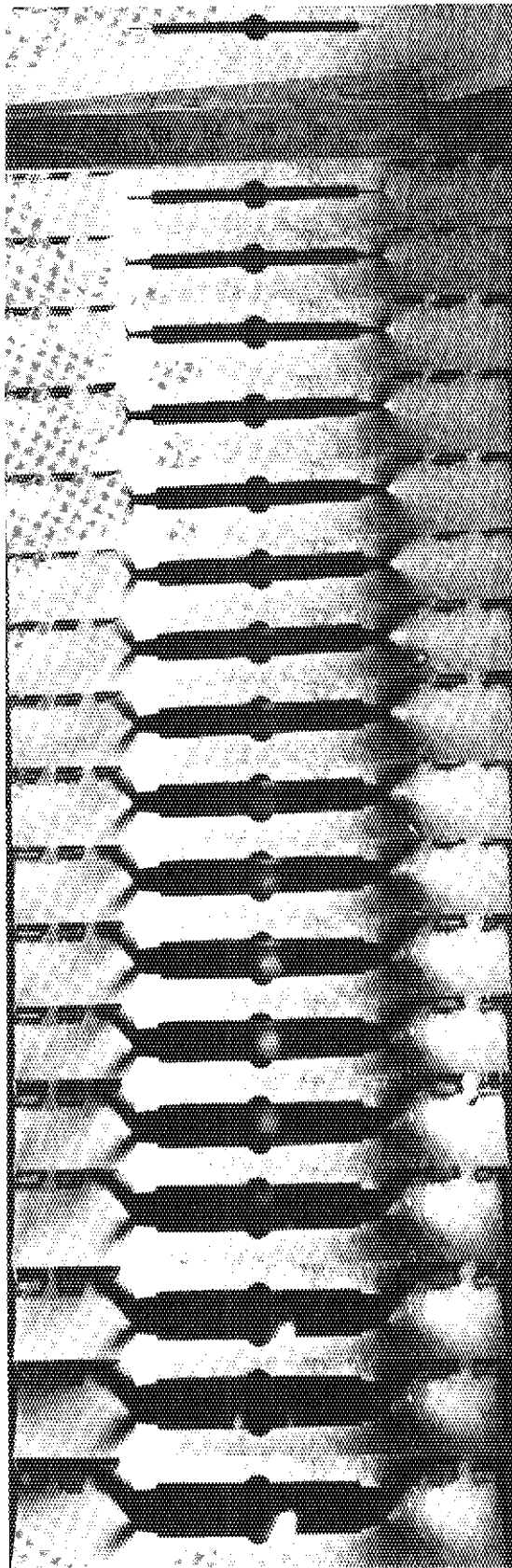
Load(ton)	Load-line displacement(mm)	Crack length A* (mm)	Crack length B* (mm)	Crack extension** (mm)	J(kg/mm)
69.2	3.5	1.35	1.14	1.25	83.6
69.6	4.0	1.52	1.67	1.60	97.6
69.2	4.5	2.09	2.36	2.22	111.6
68.4	5.0	2.77	2.87	2.82	125.5
67.6	5.5	3.64	3.97	3.80	139.3
65.6	6.0	4.51	4.40	4.45	152.8
63.2	6.5	5.10	4.94	5.02	165.8
60.8	7.0	6.25	5.73	5.99	178.4
58.4	7.5	7.21	6.65	6.93	190.5
55.2	8.0	8.52	7.11	7.81	202.1
51.2	8.5	10.24	8.09	9.16	213.0
46.0	9.0	12.01	8.76	10.38	223.0
36.0	10.0	13.63	10.86	12.24	231.5
25.6	11.0	15.98	12.43	14.21	237.9

\* Crack length

\*\* Crack extension =  $\frac{A+B}{2}$

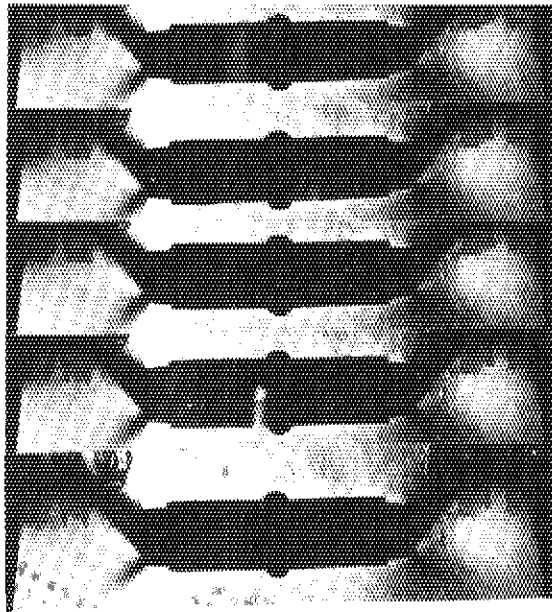


Appendix C Development of crack growth in center cracked panel specimens



<u>Load (ton)</u>	<u>Loadline Displacement (mm)</u>
0	0
51.2	0.5
56.0	1.0
60.8	1.5
64.4	2.0
67.2	2.5
68.8	3.0
70.0	3.5
70.2	4.0
69.6	4.5
68.6	5.0
66.4	5.5
64.0	6.0
61.6	6.5
58.4	7.0
54.4	7.5
48.8	8.0
41.6	8.5

Photo C.1 Development of Crack Growth in 25mm Thickness CCP Specimen TP-01



<u>Load (ton)</u>	<u>Loadline Displacement (mm)</u>
35.2	9.0
28.8	9.5
22.4	10.0
17.2	10.5
11.2	11.0

Photo C.1 Development of Crack Growth in 25mm Thickness CCP Specimen TP-01  
(Continued)



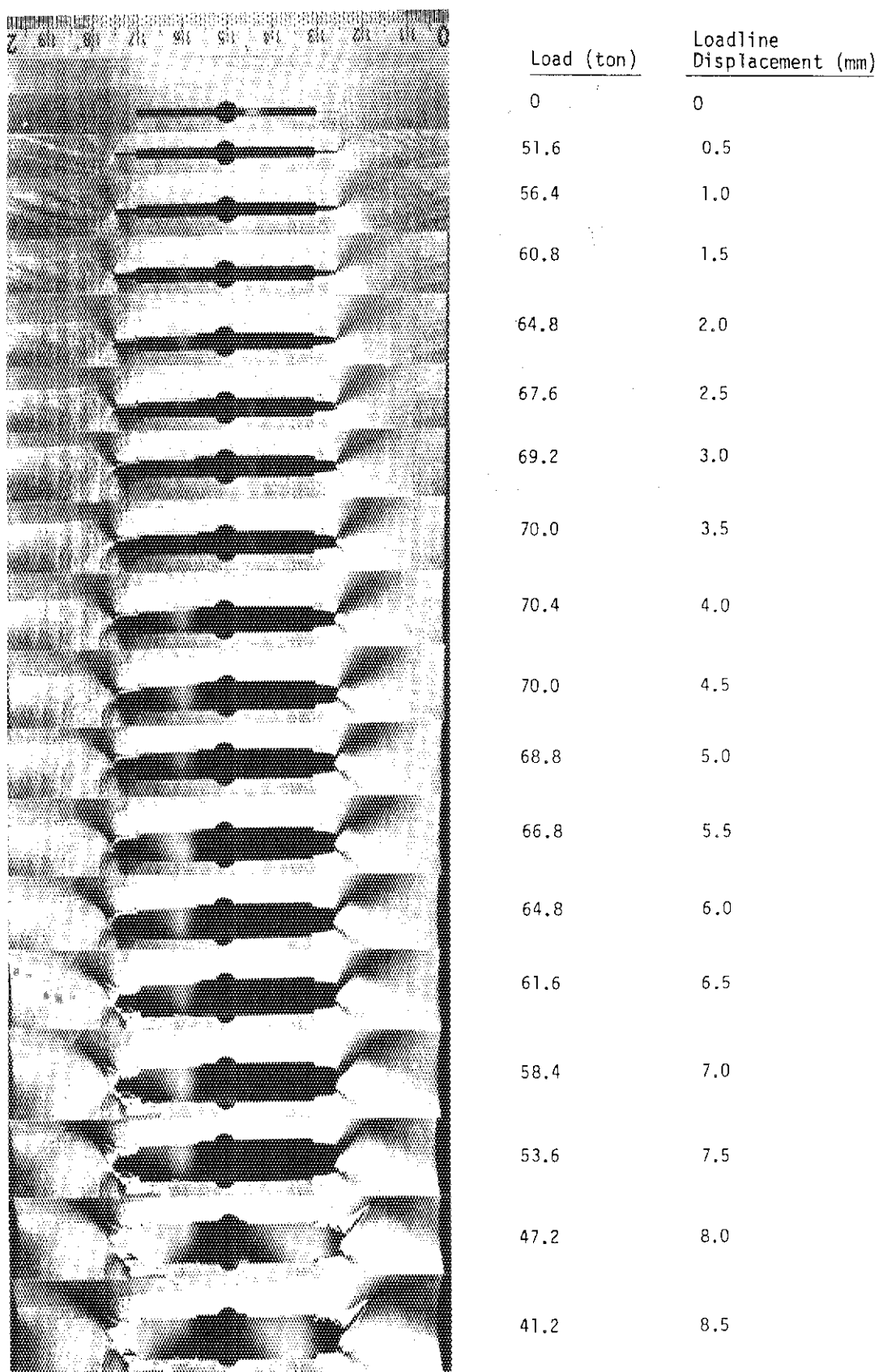
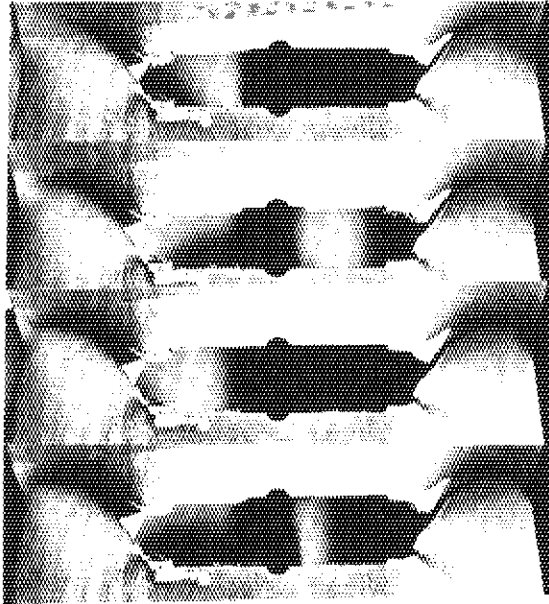
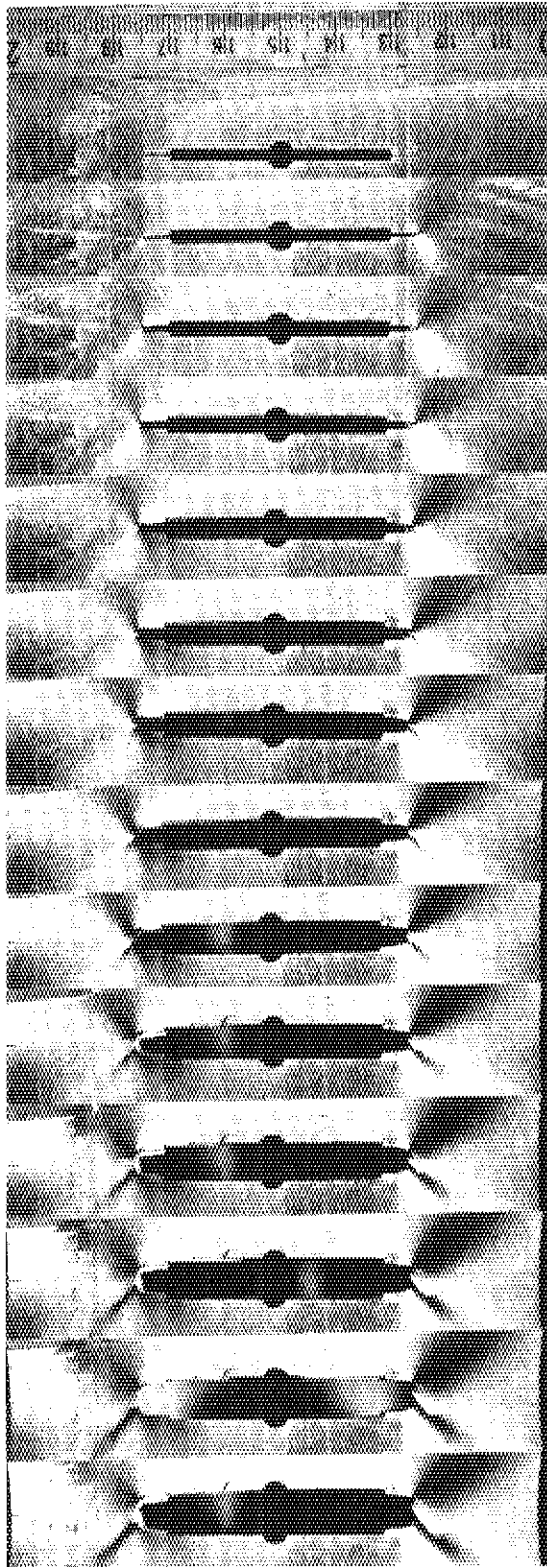


Photo C.2 Development of Crack Growth in 25mm Thickness CCP Specimen TP-02



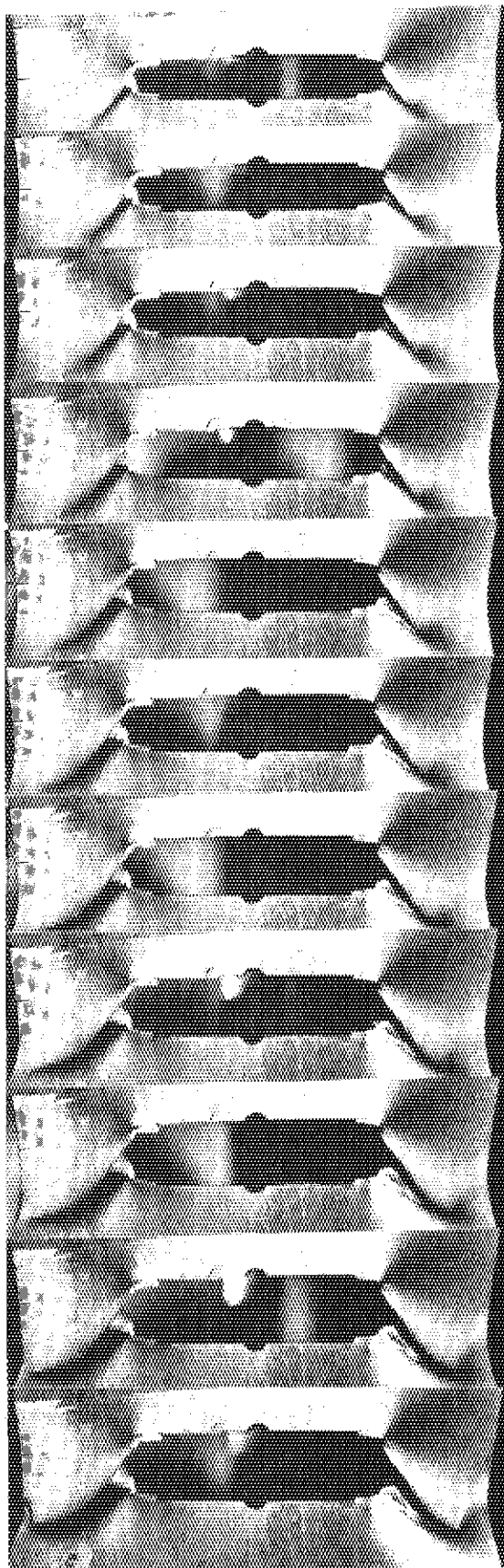
<u>Load (ton)</u>	<u>Loadline Displacement (mm)</u>
34.4	9.0
28.4	9.5
16.4	10.5
10.0	11.0

Photo C.2 Development of Crack Growth in 25mm Thickness CCP Specimen TP-02  
(Continued)



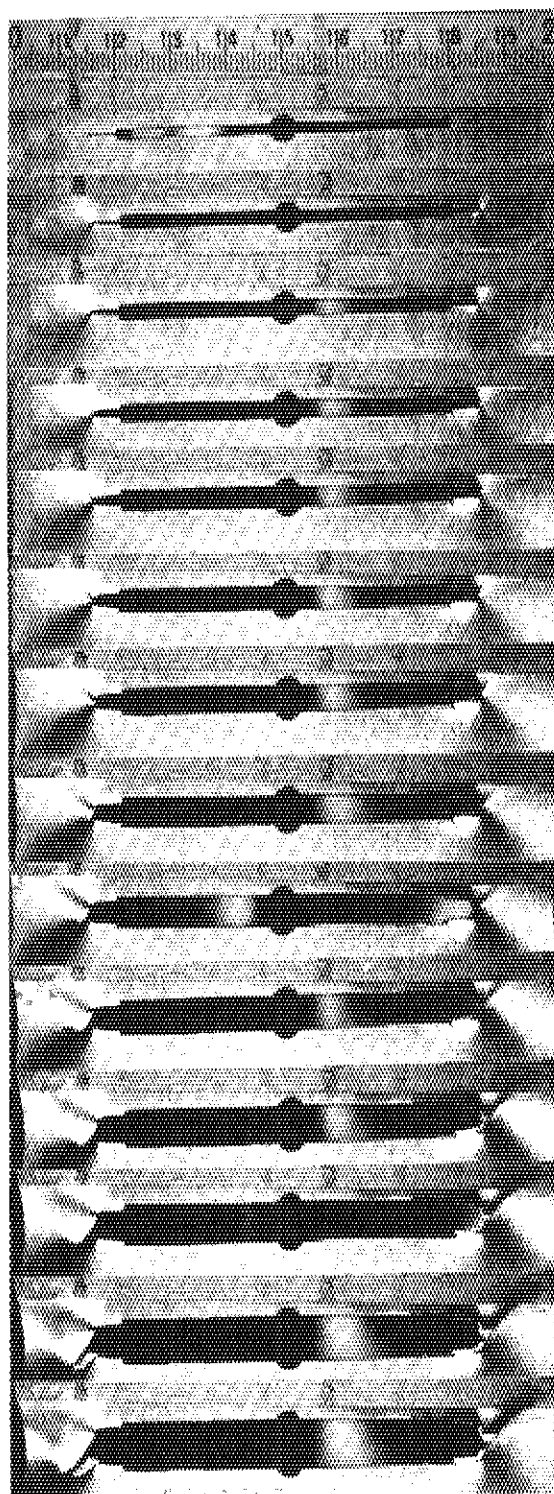
<u>Load (ton)</u>	<u>Loadline Displacement (mm)</u>
0	0
49.2	0.5
54.8	1.0
59.6	1.5
63.2	2.0
66.0	2.5
68.0	3.0
69.2	3.5
69.6	4.0
69.2	4.5
68.2	5.0
67.6	5.5
65.6	6.0
63.2	6.5

Photo C.3 Development of Crack Growth in 25mm Thickness CCP Specimen TP-03



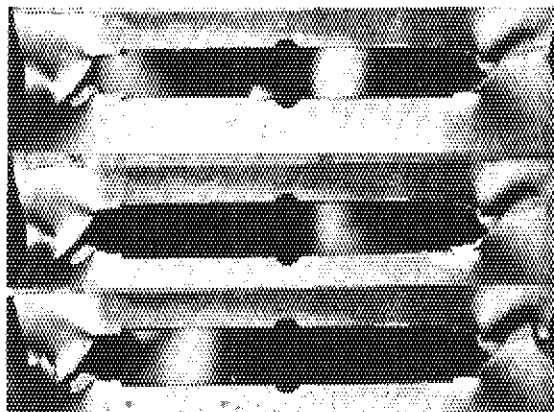
<u>Load (ton)</u>	<u>Loadline Displacement (mm)</u>
60.8	7.0
58.4	7.5
55.2	8.0
51.2	8.5
46.0	9.0
41.2	9.5
36.0	10.0
30.8	10.5
25.6	11.0
20.0	11.5
11.6	12.0

Photo C.3 Development of Crack Growth in 25mm Thickness CCP Specimen TP-03 (Continued)



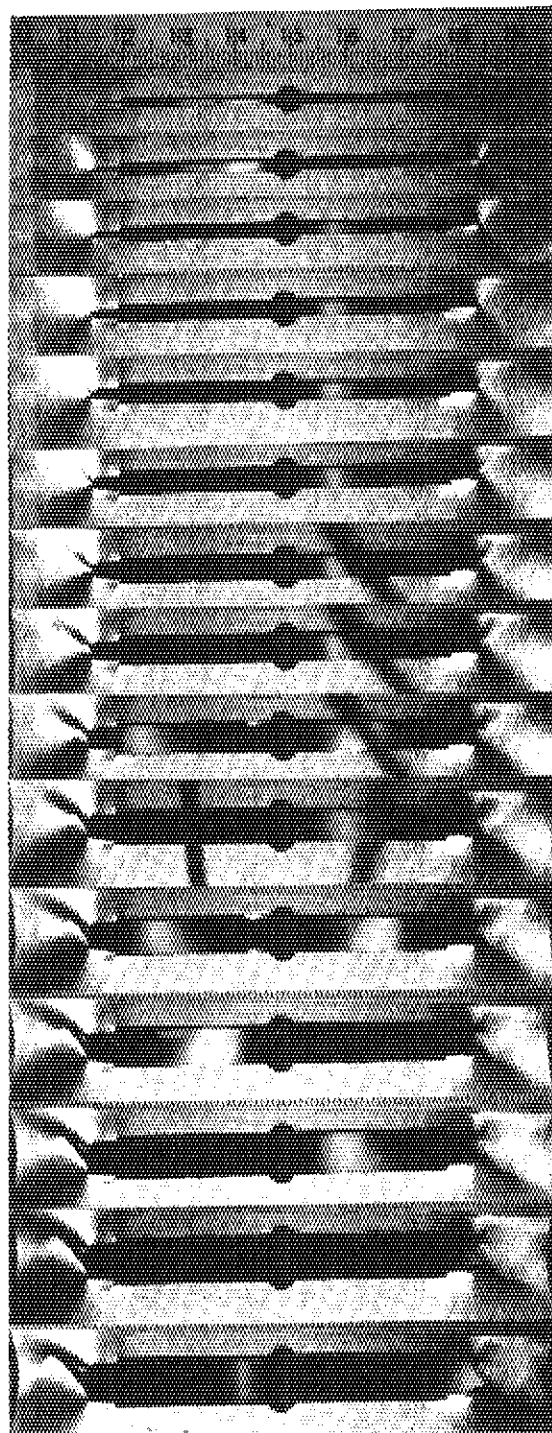
<u>Load (ton)</u>	<u>Loadline Displacement (mm)</u>
0	0
33.0	0.5
37.8	1.0
41.2	1.5
43.4	2.0
44.4	2.5
44.4	3.0
43.6	3.5
41.8	4.0
39.2	4.5
36.2	5.0
32.8	5.5
25.2	6.35
19.2	7.0

Photo C.4 Development of Crack Growth in 25mm Thickness CCP Specimen TP-06



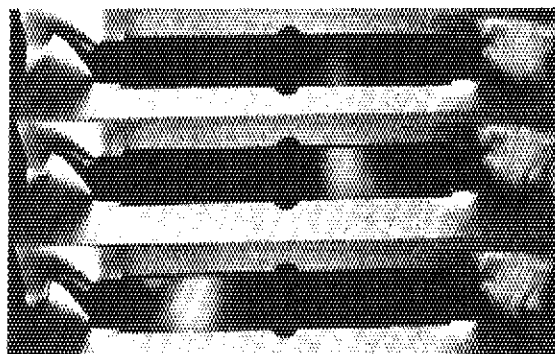
<u>Load (ton)</u>	<u>Loadline Displacement (mm)</u>
13.8	7.5
8.0	8.0
0	8.5

Photo C.4 Development of Crack Growth in 25mm Thickness CCP Specimen TP-06  
(Continued)



<u>Load (ton)</u>	<u>Loadline Displacement (mm)</u>
0	0
33.6	0.5
38.4	1.0
41.6	1.5
43.6	2.0
44.4	2.5
44.0	3.0
43.0	3.5
41.2	4.0
38.4	4.5
35.4	5.0
32.0	5.5
27.2	6.05
22.8	6.5
17.6	7.0

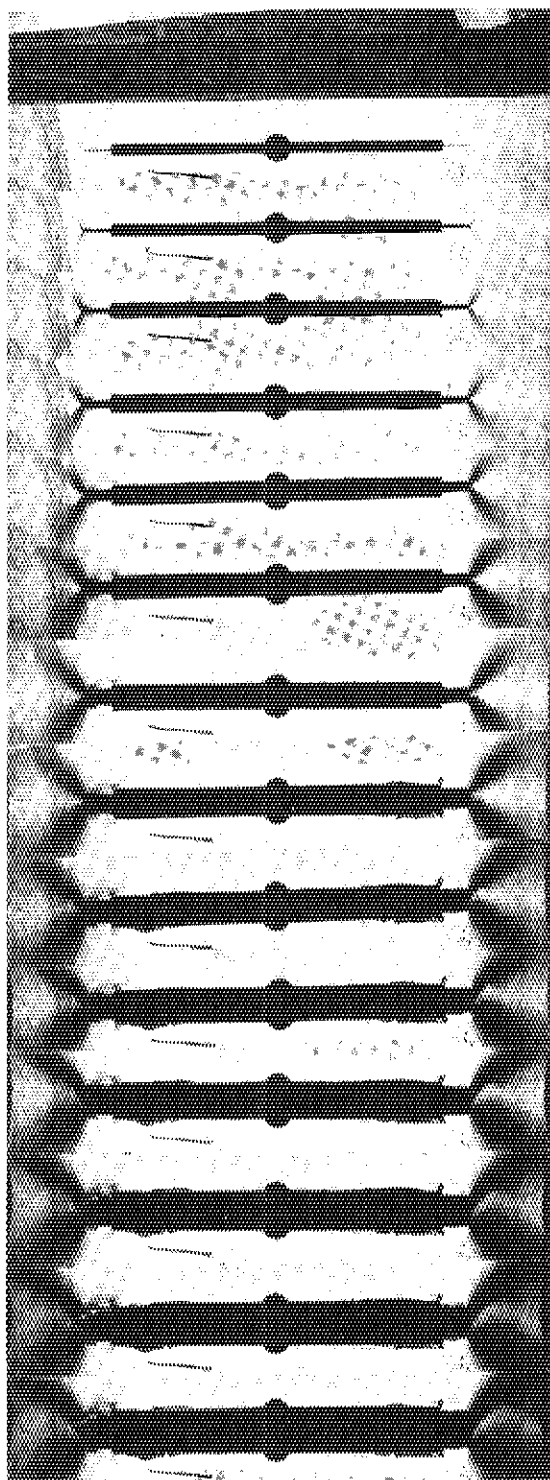
Photo C.5 Development of Crack Growth in 25mm Thickness CCP Specimen TP-07



<u>Load (ton)</u>	<u>Loadline Displacement (mm)</u>
11.4	7.5
4.8	8.0
0.4	8.5

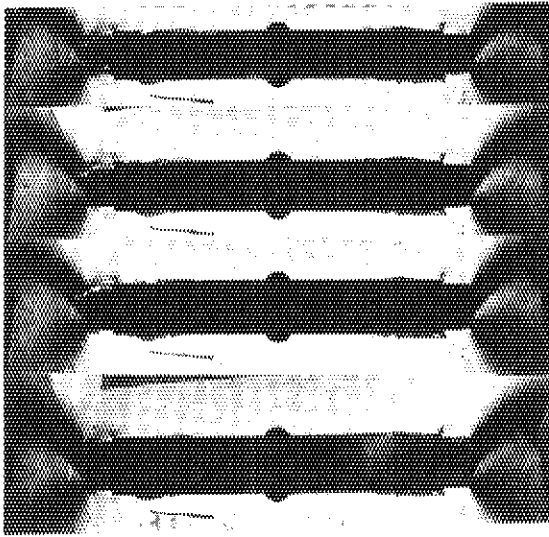
Photo C.5 Development of Crack Growth in 25mm Thickness CCP Specimen TP-07  
(Continued)





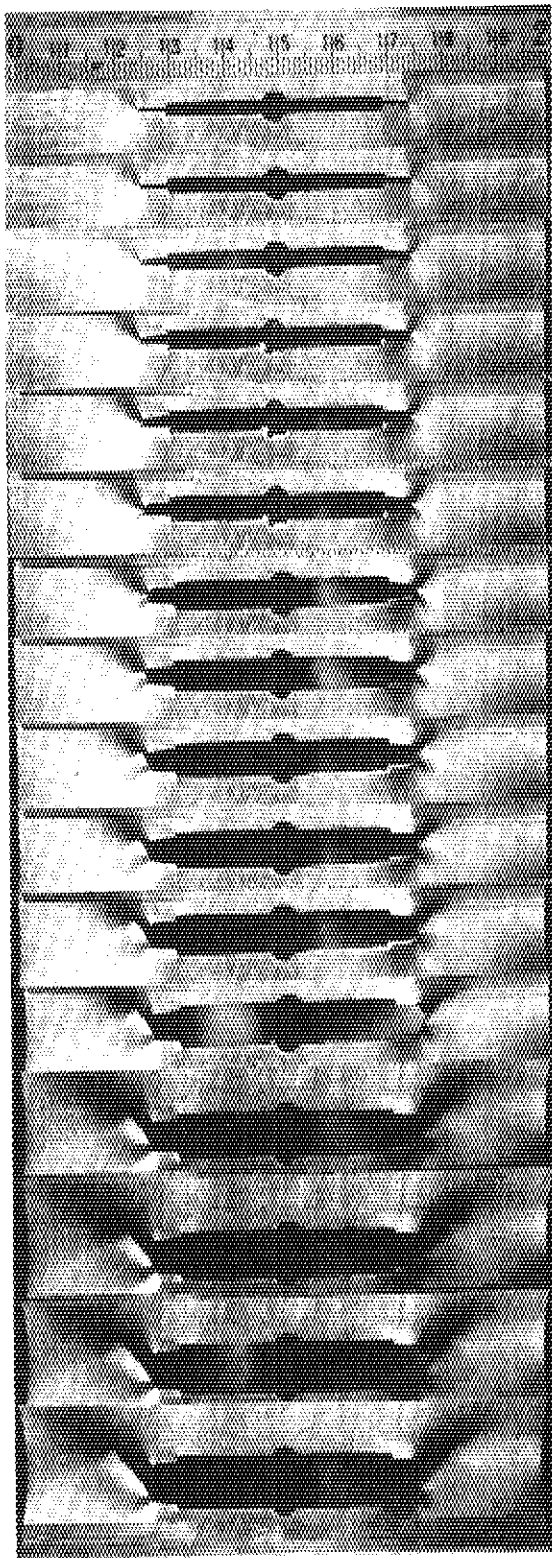
<u>Load (ton)</u>	<u>Loadline Displacement (mm)</u>
0	0
33.4	0.5
38.4	1.0
41.6	1.5
43.6	2.0
44.6	2.5
44.5	3.0
43.4	3.5
41.4	4.0
38.8	4.5
35.8	5.0
32.4	5.5
28.4	6.0
23.8	6.5

Photo C.6 Development of Crack Growth in 25mm Thickness CCP Specimen TP-08



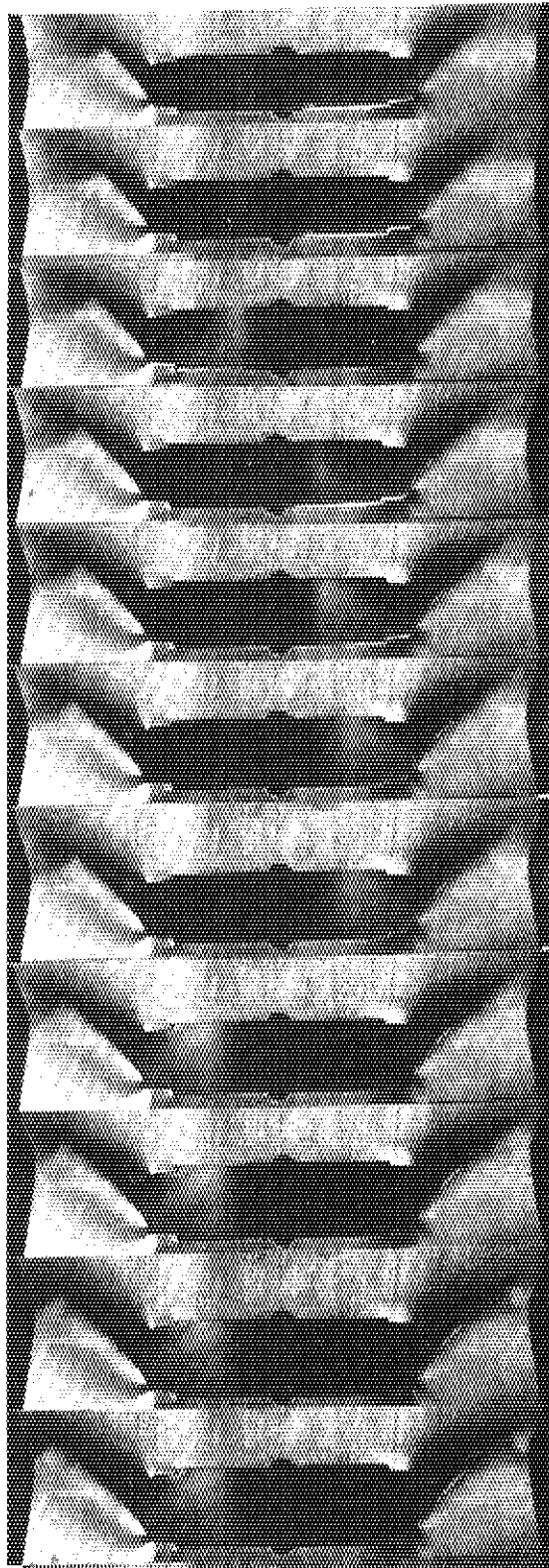
<u>Load (ton)</u>	<u>Loadline Displacement (mm)</u>
18.8	7.0
12.4	7.5
5.2	8.0
0	8.5

Photo C.6 Development of Crack Growth in 25mm Thickness CCP Specimen TP-08  
(Continued)



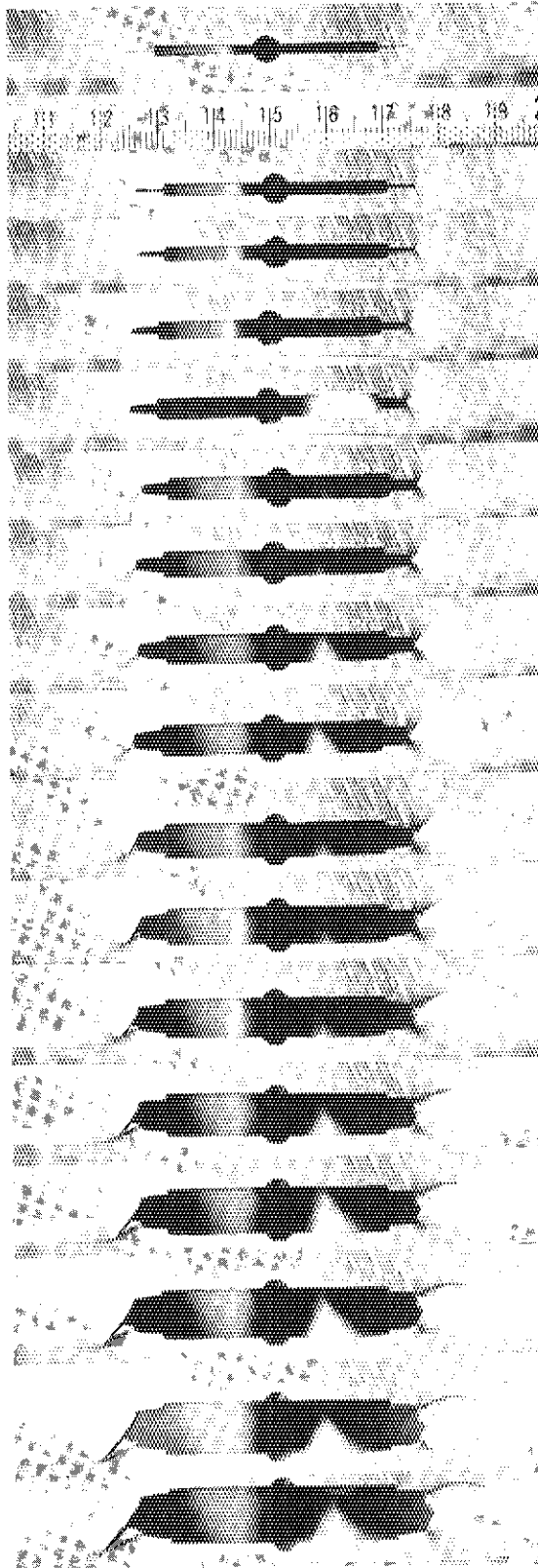
<u>Load (ton)</u>	<u>Loadline Displacement (mm)</u>
19.0	0.5
21.4	1.0
23.4	1.5
24.8	2.0
25.8	2.5
26.4	3.0
26.8	3.5
27.0	4.0
26.8	4.5
26.2	5.0
25.6	5.5
24.8	6.0
23.6	6.5
22.8	7.0
21.2	7.5
19.6	8.0

Photo C.7 Development of Crack Growth in 10mm Thickness CCP Specimen TP-111



Load (ton)	Loadline Displacement (mm)
18.4	8.5
16.6	9.0
15.2	9.5
13.2	10.0
12.0	10.5
10.2	11.0
8.6	11.5
7.0	12.0
5.4	12.5
3.8	13.0
0	13.5

Photo C.7 Development of Crack Growth in 10mm Thickness CCP Specimen TP- 111  
(Continued)



Load (ton)	Loadline Displacement (mm)
0	0
19.6	0.5
21.8	1.0
23.6	1.5
24.8	2.0
25.8	2.5
26.4	3.0
26.6	3.5
26.5	4.0
26.0	4.5
25.2	5.0
24.0	5.5
22.8	6.0
21.0	6.5
19.4	7.0
17.6	7.5
16.0	8.0

Photo.C.8 Development of Crack Growth in 10mm Thickness CCP Specimen TP-112





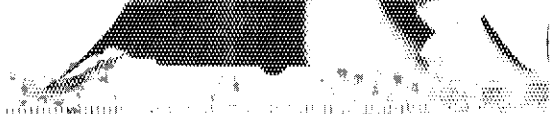

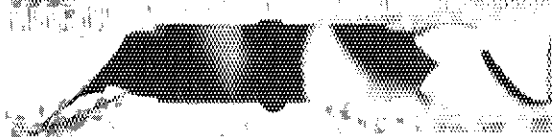
	<u>Load (ton)</u>	<u>Loadline Displacement (mm)</u>
	14.2	8.5
	12.4	9.0
	10.6	9.5
	9.2	10.0
	7.0	10.5
	4.8	11.0
	2.8	11.5

Photo C.8 Development of Crack Growth in 10mm Thickness CCP Specimen TP-112  
(Continued)