

JAERI - M
87-077

軽水炉配管材の延性不安定破壊に関する研究(第3報)

—炭素鋼管製中央貫通または未貫通切欠き付引張
試験片の室温における破壊挙動—

1987年6月

鬼沢 邦雄・柴田 勝之・安田 祐司
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。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷㈱

軽水炉配管材の延性不安定破壊に関する研究（第3報）
—炭素鋼管製中央貫通または未貫通切欠き付引張
試験片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
鬼沢邦雄・柴田勝之・安田祐司
大場敏弘・川村隆一・宮園昭八郎

（1987年5月7日受理）

軽水炉圧力バウンダリ配管の構造設計に対して、従来は瞬時破断を想定することとなっているが、最近LBB（破断前漏洩）概念を採り入れる動きが世界各国に広まっている。

日本原子力研究所では、LBB概念に関連して配管の破壊挙動を明らかにするため、ステンレス鋼管及び炭素鋼管の延性不安定破壊試験を昭和58年度より実施している。また、これらの配管試験と並行して、昭和59年度より配管から採取した平板試験片を用いた基礎試験を行っている。

本報告書は、以前に行ったSTS 42鋼管より採取した中央貫通切欠き付平板試験の延長として同一試験片に貫通及び未貫通切欠きを施して静的引張試験及び延性不安定破壊試験を行った結果をまとめたものである。

試験結果をもとに、貫通切欠き試験に対してTearing Instabilityクライテリオンを適用し不安定破壊を精度良く予測できることがわかった。また貫通及び未貫通切欠きの両方に対して実断面応力基準を適用し、破壊荷重評価に対するその基準の有効性が明らかとなった。

Studies on ductile unstable fracture of piping materials
in light water reactors (Part 3)

— Fracture behavior of through-wall or part-through
cracked tension specimens machined from 24-inch
diameter carbon steel pipe at room temperature —

Kunio ONIZAWA, Katsuyuki SHIBATA, Yuji YASUDA,
Toshihiro OHBA, Takaichi KAWAMURA and Shohachiro MIYAZONO

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

(Received May 7, 1987)

LWR pressure boundary piping shall be designed considering the dynamic effect of postulated double-ended guillotine break (DEGB). However, the DEGB accident is extremely unlikely, so that leak before break (LBB) concept instead has been introduced in some countries in which nuclear power electricity is being generated.

At JAERI, ductile fracture tests of stainless and carbon steel pipes have been conducted in order to verify LBB concept in the pressure boundary piping since 1983. In addition, the tests for piping material characterization have been carried out since 1984 using center cracked tension (CCT) specimen.

This report summarizes stable and unstable ductile fracture test results of CCT specimens, which contain a through-wall or part-through crack, machined from 24-inch diameter STS42 carbon steel pipe.

In order to characterize the material, the tearing instability criterion based on J-integral was applied to through-wall CCT specimen and the net-section collapse criterion was applied to both through-wall and part-through CCT specimens. The validity of two criteria was discussed considering LBB concept.

Keywords; Light Water Reactor, Double-Ended Guillotine Break, Leak Before Break, Piping Materials

目 次

1. はじめに	1
2. 試験概要及び目的	3
3. 延性破壊試験	3
3.1 供試材	3
3.2 試験片	3
3.3 試験方法	4
3.3.1 静的引張試験	4
3.3.2 延性不安定破壊試験	4
4. 試験結果	12
4.1 静的引張試験	12
4.2 延性不安定破壊試験	13
5. 考 察	46
5.1 J-R 曲線によるき裂進展抵抗の評価	46
5.2 T-クライテリオンによる延性不安定破壊の評価	47
5.3 実断面応力基準	49
5.3.1 流動応力の評価	49
5.3.2 未貫通切欠き付平板への適用	49
5.4 LBB評価に関する検討	50
6. 結 び	59
謝 辞	59
参考文献	60
付 録	62

Contents

1. Introduction	1
2. Objectives	3
3. Ductile fracture test	3
3.1 Material	3
3.2 Specimen	3
3.3 Testing procedure	4
3.3.1 Static tensile test	4
3.3.2 Unstable fracture test	4
4. Test results	12
4.1 Static tensile test	12
4.2 Unstable fracture test	13
5. Discussion	46
5.1 Evaluation of crack growth resistance by J-R curve	46
5.2 Stability analysis based on tearing instability criterion	47
5.3 Net-section collapse criterion	49
5.3.1 Flow stress Estimation from through-wall cracked specimen	49
5.3.2 Application to part-through cracked specimen	49
5.4 Discussion on LBB evaluation	50
6. Conclusion	59
Acknowledgement	59
References	60
Appendix	62

List of tables

- Table 3.1 Chemical composition of JIS STS42 carbon steel pipe
- Table 3.2 Mechanical properties of JIS STS42 carbon steel pipe
at room temperature
- Table 3.3 EDM notch dimensions and test conditions
- Table 5.1 Net-section stress σ_{net} at maximum load for through-wall CCT specimens
- Table 5.2 Crack penetration load P_L and collapse load P_{max} for part-through
CCT specimens

List of figures

- Fig.3.1 Charpy V-notch absorbed energy transition curve of JIS STS42 carbon steel pipe
- Fig.3.2 Schematic drawing of CCT specimen orientation
- Fig.3.3 CCT specimen geometry
- Fig.3.4 Calibration line for determining crack extension
- Fig.4.1 Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (A-1)
- Fig.4.2 Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (A-2)
- Fig.4.3 Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (A-4)
- Fig.4.4 Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (A-7)
- Fig.4.5 Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (A-8)
- Fig.4.6 Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (A-9)
- Fig.4.7 Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (B-1)
- Fig.4.8 Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (B-6)
- Fig.4.9 Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (B-3)
- Fig.4.10 Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (B-8)
- Fig.4.11 Load-loadline displacement-crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (B-10)
- Fig.4.12 Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm-thickness CCT specimen (C-1)
- Fig.4.13 Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm-thickness CCT specimen (C-2)
- Fig.4.14 Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm-thickness CCT specimen (C-3)
- Fig.4.15 Load-loadline displacement-crack extension curves for 25mm-thickness CCT specimen (C-4)
- Fig.4.16 Load-crack opening displacement(COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen (A-1)
- Fig.4.17 Load-crack opening displacement(COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen (A-2)

- Fig.4.18 Load-crack opening displacement(COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen (A-4)
- Fig.4.19 Load-crack opening displacement(COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen (A-7)
- Fig.4.20 Load-crack opening displacement(COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen (A-8)
- Fig.4.21 Load-crack opening displacement(COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen (A-9)
- Fig.4.22 Summary of load-crack opening displacement(COD) curves for 10mm-thickness CCT specimen with $a/W=0.50$
- Fig.4.23 Summary of load-crack opening displacement(COD) curves for 10mm-thickness CCT specimen with $a/W=0.25$
- Fig.4.24 Summary of load-loadline displacement curves for 25mm-thickness CCT specimen with $a/W=0.70$
- Fig.4.25 Load-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.84×10^{-4} mm/kg (A-6)
- Fig.4.26 Load-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 9.60×10^{-4} mm/kg (A-11)
- Fig.4.27 Load-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-2)
- Fig.4.28 Load-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-5)
- Fig.4.29 Load-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-9)
- Fig.4.30 Load-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-4)
- Fig.4.31 Load-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-7)
- Fig.4.32 Load-loadline displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.84×10^{-4} mm/kg (A-6)
- Fig.4.33 Load-loadline displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen with under high compliance of 9.60×10^{-4} mm/kg (A-11)
- Fig.4.34 Load-loadline displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen with under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-2)
- Fig.4.35 Load-loadline displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen with under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-5)
- Fig.4.36 Load-loadline displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen with under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-9)
- Fig.4.37 Load-loadline displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen with under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-4)

- Fig.4.38 Load-loadline displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen with under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-7)
- Fig.4.39 Load-crack opening displacement(COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.84×10^{-4} mm/kg (A-6)
- Fig.4.40 Load-crack opening displacement(COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 9.60×10^{-4} mm/kg (A-11)
- Fig.4.41 Loadline displacement-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.84×10^{-4} mm/kg (A-6)
- Fig.4.42 Loadline displacement-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 9.60×10^{-4} mm/kg (A-11)
- Fig.4.43 Loadline displacement-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-2)
- Fig.4.44 Loadline displacement-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-5)
- Fig.4.45 Loadline displacement-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-9)
- Fig.4.46 Loadline displacement-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-4)
- Fig.4.47 Loadline displacement-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-7)
- Fig.4.48 Comparison of system compliance and specimen compliance at the onset of instability
- Fig.5.1 J-R curves for STS42 CCT specimens and 6in.dia. pipe specimens
- Fig.5.2 $J-T_{mat}$ curves for STS42 CCT specimens
- Fig.5.3 J-T analysis curves for CCT specimens with two compliance conditions of $C_M = 3.84$ and 9.60×10^{-4} mm/kg
- Fig.5.4 Relationship between the stress ratio of $\sigma_{net} / (\sigma_{ys} + \sigma_{uts})$ and ligament aspect ratio
- Fig.5.5 Application of the net-section collapse criterion to STS42 6in.dia. pipe specimen
- Fig.5.6 Stress distribution model at crack penetration for part-through CCT specimen
- Fig.5.7 Relationship between calculated load and experimentally measured load
- Fig.5.8 Relationship between penetration load ratio P_L / P_{max} and crack depth d/t
- Fig.5.9 Evaluation of crack geometry for LBB condition

List of photos

- Photo. 3.1 External appearance of 100ton fatigue test machine
- Photo. 3.2 Set-up of CCT specimen
(a) through-wall crack specimen
(b) part-through crack specimen
- Photo. 3.3 External appearance of 100ton fatigue test machine with compliant disc springs
- Photo. 4.1 Development of stable crack growth in 10mm-thickness through-wall CCT specimen (A-4)
- Photo. 4.2 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (A-2)
- Photo. 4.3 Post-test fracture surface of 10mm-thickness through-wall CCT specimen (A-4)
- Photo. 4.4 Post-test fracture surface of 10mm-thickness part-through CCT specimen (A-2)
- Photo. 4.5 Development of crack growth in 10mm-thickness through-wall CCT specimen under high compliance of 9.60×10^{-4} mm/kg (A-11)
- Photo. 4.6 Development of crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-7)
- Photo. 4.7 Post-test fracture surface of 10mm-thickness through-wall CCT specimen under high compliance of 9.60×10^{-4} mm/kg (A-11)
- Photo. 4.8 Post-test fracture surface of 10mm-thickness part-through CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-7)

Appendix

- Photo, A.1 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (A-1)
- Photo, A.2 Development of stable crack growth in 10mm-thickness through-wall CCT specimen (A-7)
- Photo, A.3 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (A-8)
- Photo, A.4 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (A-9)
- Photo, A.5 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (B-1)
- Photo, A.6 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (B-3)
- Photo, A.7 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (B-6)
- Photo, A.8 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (B-8)
- Photo, A.9 Development of stable crack growth in 10mm-thickness through-wall CCT specimen (B-10)
- Photo, A.10 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (C-1)
- Photo, A.11 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (C-2)
- Photo, A.12 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (C-3)
- Photo, A.13 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (C-4)
- Photo, A.14 Development of crack growth in 10mm-thickness through-wall CCT specimen under high compliance of 3.84×10^{-4} mm/kg (A-6)
- Photo, A.15 Development of crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-4)
- Photo, A.16 Development of crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-5)
- Photo, A.17 Development of crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-9)
- Photo, A.18 Post-test fracture surface of 10mm-thickness CCT specimen (A-Series)
- Photo, A.19 Post-test fracture surface of 10mm-thickness CCT specimen (B-Series)
- Photo, A.20 Post-test fracture surface of 10mm-thickness CCT specimen (C-Series)
- Photo, A.21 Post-test fracture surface of 10mm-thickness CCT specimen under high compliance

記 号 表

T	: 引き裂き係数
T_{mat}	: 材料引き裂き係数
T_{app}	: 負荷引き裂き係数
ΔK	: 応力拡大係数振幅 ($\text{kg}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$)
R	: 応力比
P	: 荷 重 (ton)
δ_p	: 荷重点変位 (mm)
COD	: き裂開口変位 (mm)
Δa	: き裂進展量 (mm)
a	: き裂半長 (mm)
W	: 試験片半幅 (mm)
d	: き裂深さ (mm)
t	: 試験片板厚 (mm)
P_L	: き裂板厚貫通時のピーク荷重 (ton)
P_{max}	: 崩壊時のピーク荷重 (ton)
C_M	: 試験機コンプライアンス (mm/kg)
J	: J 積分 (kg/mm)
U	: 荷重変位曲線下の面積 ($\text{kg} \cdot \text{mm}$)
E	: ヤング率 (kg/mm^2)
σ_f	: 流動応力 (kg/mm^2)
σ_0	: 参照応力または流動応力 (kg/mm^2)
J_{inst}	: 不安定破壊時の J 積分 (kg/mm)
σ_{net}	: 実断面応力 (kg/mm^2)
σ_y	: 降伏応力 (kg/mm^2)
σ_{uts}	: 引張強さ (kg/mm^2)
P_A	: き裂貫通時のピーク荷重計算値 (ton)
P_B	: 崩壊時のピーク荷重計算値 (ton)
S_m	: 設計応力強さ (= 14.0) (kg/mm^2)

Nomenclature

T	:	tearing modulus
T_{mat}	:	material tearing modulus
T_{app}	:	applied tearing modulus
ΔK	:	stress-intensity factor range ($\text{kg}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$)
R	:	stress ratio
P	:	load (ton)
δ_p	:	load-line displacement (mm)
COD	:	crack opening displacement (mm)
Δa	:	crack extension (mm)
a	:	half crack length (mm)
W	:	specimen width (mm)
d	:	crack depth (mm)
t	:	specimen thickness (mm)
P_L	:	peak load at crack penetration (ton)
P_{max}	:	peak load at collapse (ton)
C_M	:	machine compliance (mm/kg)
J	:	J-integral (kg/mm)
U	:	area under load-displacement curve ($\text{kg}\cdot\text{mm}$)
E	:	Young's modulus (kg/mm^2)
σ_f	:	flow stress (kg/mm^2)
σ_0	:	reference stress or flow stress (kg/mm^2)
J_{inst}	:	J-integral at instability (kg/mm)
σ_{net}	:	net-section stress (kg/mm^2)
σ_y	:	yield stress (kg/mm^2)
σ_{uts}	:	ultimate tensile strength (kg/mm^2)
P_A	:	calculated load at crack penetration (ton)
P_B	:	calculated load at collapse (ton)
S_m	:	allowable design stress intensity (=14.0) (kg/mm^2)

1. はじめに

軽水炉圧力バウンダリ配管の構造設計においては、配管の瞬時破断を想定し、これに対する防護措置を講ずることが設計基準により要求される。その措置として、現在パイプホイップレストレント、ジェットシールド等の安全設備が設置されている。しかし、一般に軽水炉圧力バウンダリ配管材料は靱性が高く、瞬時破断の可能性は非常に低いため、瞬時破断想定基準に代わって LBB (破断前漏洩) 概念を設計基準に導入する動きが各国で活発化している。

この LBB 概念とは、『配管に生じたき裂が貫通し、内部冷却材の漏洩が起きたとしても、漏洩を検出してプラントの運転停止措置が行われる間、き裂の進展速度が遅く、配管が不安定破壊を起こす限界き裂寸法に対して十分な安全裕度が存在する』という考え方を意味するものである。このため、延性不安定破壊を起こす限界寸法を把握しておくことは非常に重要である。この概念が設計基準に導入されると、瞬時破断を想定して設置されていたレストレント等の防護設備が不要となる。このことにより、プラントの設計、検査、維持、管理等の過程における経済的利益や供用期間中検査及び修理作業時の作業員の被ばく低減に大きな効果が期待される。さらに LBB が成立する場合は小破断 LOCA を想定すればよいので、将来 ECCS や格納容器の設計が大幅に合理化される可能性もある。

米国のあるプラント建設会社の試算によると、プラント 1 基当り LBB を設計に採用するための経費は、材料の基礎データ取得及び人件費等で約 6 万ドルである。一方、LBB 設計による経済的利益は、安全装置等の建設費用、建設期間の短縮等により約 9 千万ドルと見積られている¹⁾。また、米国 NRC の見積りにおいても、2～4 千万ドルの経済的利益があるとされている²⁾。

このような LBB 概念の基準への導入は西独及び米国において進められている³⁾。

西独においては、RSK (Reaktor Sicherheit Kommission) ガイドラインが 1981 年にすでに改訂されており、将来のプラントではパイプホイップレストレントの設置を免除することができる⁴⁾⁵⁾。この基準は、従来配管破断に対して想定していた開口面積 $2F$ (F : 配管断面積) を $0.1F$ に変更し、 $0.1F$ からのジェット流等を評価することとしている。これは、新しい設計において使用される材料が高品質であることに基づいている。イタリアにおいても LBB に関する研究⁶⁾が進められており、西独と同様の考え方から、レストレントの設置免除を認める準備が進められている。

米国においては、1984 年に NRC が LBB 解析手法⁷⁾を確立しており、さらに、10 CFR 50, Appendix A⁸⁾ の General Design Criterion 4 (GDC 4) の改訂作業を進めている。既に PWR プラントの一次系配管に対しては、1986 年 5 月に LBB 概念を導入し、配管破断時の動的効果を設計基準から削除する改訂を行った。この改訂作業と並行して、いくつかのプラントで実際に LBB 概念を採り入れた設計が認められており、またその解析例も報告されている⁹⁾。さらに、1986 年 8 月には、原子力プラントの高エネルギー配管に対して、パイプホイップレストレント等の安全設備を設置することが免除できるように基準の改訂を提案している¹⁰⁾。

このような動きの中で、1986 年 12 月 9 日に米国ヴァージニア州の Surry-2 プラントで配管

瞬時破断事故が起こった。この事故は同PWRプラントの給水系配管において起こったものであり、近くに居合わせた8人の作業員が死傷している¹¹⁾。しかし、NRCの見解¹²⁾によると、破断事故が起きた2次系配管の設計は主契約者であるWestinghouse社によるものでなく、建設会社のStone & Webster社によるものであり、その配管系に対してNRCは責任は無いものとしている。また、事故の主原因は、水質低下によるエロージョン/コロージョンであり、これにより配管の減肉が相当進んでいたことに加えて、主蒸気隔離弁や逆止弁の異常が起こったことによるものである。LBB概念とは相反する事故にもかかわらず、以上のような観点から、米国におけるLBB導入の動きは妨げられていないようである。

LBB概念の設計基準導入に先行して、米国においてはBattelle Columbus研究所(BCL)が中心となって、Degraded Piping Program Phase II (DP³ II)が進められている¹³⁾¹⁴⁾。この計画では、原子炉配管のLBB挙動を評価するための極限荷重解析及び破壊力学的解析手法を開発することを目的としており、弾塑性破壊力学の改善、材料基礎試験及び配管試験を行っている。またこの計画をさらに進めて、配管コンポーネント試験を中心課題とした国際協力研究グループ(International Piping Integrity Research Group; IPIRG)が結成され、1986年度より活動を開始している。

その他、フランス¹⁵⁾や英国¹⁶⁾においても、CEAやCEGBが中心となってLBBに関する試験研究を進めている。

日本においては、原研、原子力工学試験センター、電力中央研究所及び民間の研究所においてLBB研究が行われている。

原子力工学試験センターでは、ステンレス鋼管における応力腐食割れの発見を契機として、ステンレス鋼配管を用いたLBB実証試験を行ってきた¹⁷⁾。昭和60年度からは、炭素鋼配管に対する試験も開始している。また電力中央研究所は前述したIPIRGの日本側代表機関として試験研究を進めている。民間でも配管の漏洩及び崩壊荷重の予測式の開発が行われている。

一方、原研においては配管信頼性実証試験の一連の試験研究として、昭和57年度から延性不安定破壊試験が開始された¹⁸⁾¹⁹⁾。この試験計画では、昭和62年度まで、6インチ及び12インチ口径のステンレス鋼配管及び炭素鋼配管の四点曲げ試験を行うことになっている。またこの計画をサポートする基礎試験として、昭和59年度から配管材の中央切欠き付平板試験片を用いた静的引張試験及び延性不安定破壊試験を行っている²⁰⁾²¹⁾。さらに、日本溶接協会に対して、昭和58年度より軽水炉一次系健全性の破壊力学的評価に関する研究を委託している²²⁾²³⁾。

本報は、炭素鋼配管材の破壊挙動を評価する際に必要な基礎データを得るために行われた金子らの試験²⁰⁾の延長として、貫通及び未貫通切欠き付平板試験片を用いて行った静的引張試験及び延性不安定破壊試験結果をまとめたものである。

2. 試験概要及び目的

配管の延性破壊を評価する手法としては、J積分に基づく Tearing Instability クライテリオン (T-クライテリオン)²⁴⁾、実断面応力基準²⁵⁾²⁶⁾、R6法²⁷⁾及びDPFAD法²⁸⁾等があげられる。本試験においては、このうち現在広く用いられている T-クライテリオン及び実断面応力基準による解析を行った。

T-クライテリオンは、Paris²⁹⁾が提案した J積分に基づく無次元延性破壊抵抗パラメータ、 T 、によって延性不安定破壊を論ずるものである。材料定数である T_{mat} と、負荷段階において評価される T_{app} との大小関係で不安定破壊を判定するものである。

一方、実断面応力基準は、き裂断面の応力分布やリガメント部の応力を単純に近似し、その応力がある限界値に達した時に崩壊が生じるとするものである。Kanninenら²⁵⁾や長谷川ら²⁶⁾は、この考え方により配管や引張試験片のき裂貫通時の荷重及び崩壊荷重値を予測する式を提案している。

本研究においては、軽水炉圧力バウンダリ配管に広く用いられている 24 インチ口径 STS42 炭素鋼管から採取した平板試験片に、貫通及び未貫通切欠きを施し、静的引張試験及び高コンプライアンス発生装置を用いた延性不安定破壊試験を行った。本報では、この試験結果から、切欠き幅の影響を調べるとともに、上記 2 クライテリオンの適用性を検討する。さらに、未貫通切欠き試験によりき裂、板厚貫通挙動及び破壊挙動を評価し、LBB 成立性の評価も行う。

3. 延性破壊試験

3.1 供試材

供試材は、軽水炉圧力バウンダリで使用されている代表的な炭素鋼管 STS42 である。管寸法は、外径 609.6mm、肉厚 38.9mm であり、焼ならし熱処理 (900°C 30 分、空冷) が施されている。第 1 報において使用したものと同一であり、化学成分、機械的性質及びシャルピー衝撃試験結果を Table 3.1、3.2 及び Fig. 3.1 に示す。

3.2 試験片

試験片は、Fig. 3.2 に示す通り、STS 42 鋼管の長手方向と平板試験片の引張軸とが一致するように採取した。Fig. 3.3 に試験片形状を示す。幅及び長さはずべて同一であるが、板厚 t のみ 10mm と 25mm の 2 種類とした。また、すべての試験片に対して放電加工 (EDM) により貫通又は未貫通切欠きを加工した。各試験片の切欠き寸法を Table 3.3 に示す。

高コンプライアンス発生装置を用いる試験片については、つかみ具に合せて、Fig. 3.3 中に示

2. 試験概要及び目的

配管の延性破壊を評価する手法としては、J積分に基づく Tearing Instability クライテリオン (T-クライテリオン)²⁴⁾、実断面応力基準²⁵⁾²⁶⁾、R6法²⁷⁾及びDPFAD法²⁸⁾等があげられる。本試験においては、このうち現在広く用いられている T-クライテリオン及び実断面応力基準による解析を行った。

T-クライテリオンは、Paris²⁹⁾が提案したJ積分に基づく無次元延性破壊抵抗パラメータ、 T 、によって延性不安定破壊を論ずるものである。材料定数である T_{mat} と、負荷段階において評価される T_{app} との大小関係で不安定破壊を判定するものである。

一方、実断面応力基準は、き裂断面の応力分布やリガメント部の応力を単純に近似し、その応力がある限界値に達した時に崩壊が生じるとするものである。Kanninenら²⁵⁾や長谷川ら²⁶⁾は、この考え方により配管や引張試験片のき裂貫通時の荷重及び崩壊荷重値を予測する式を提案している。

本研究においては、軽水炉圧力バウンダリ配管に広く用いられている 24インチ口径 STS42 炭素鋼管から採取した平板試験片に、貫通及び未貫通切欠きを施し、静的引張試験及び高コンプライアンス発生装置を用いた延性不安定破壊試験を行った。本報では、この試験結果から、切欠き幅の影響を調べるとともに、上記2クライテリオンの適用性を検討する。さらに、未貫通切欠き試験によりき裂、板厚貫通挙動及び破壊挙動を評価し、LBB 成立性の評価も行う。

3. 延性破壊試験

3.1 供試材

供試材は、軽水炉圧力バウンダリで使用されている代表的な炭素鋼管 STS42 である。管寸法は、外径 609.6mm、肉厚 38.9mm であり、焼ならし熱処理 (900°C 30分、空冷) が施されている。第1報において使用したものと同一であり、化学成分、機械的性質及びシャルピー衝撃試験結果を Table 3.1、3.2 及び Fig. 3.1 に示す。

3.2 試験片

試験片は、Fig. 3.2 に示す通り、STS 42 鋼管の長手方向と平板試験片の引張軸とが一致するように採取した。Fig. 3.3 に試験片形状を示す。幅及び長さはすべて同一であるが、板厚 t のみ 10mm と 25mm の2種類とした。また、すべての試験片に対して放電加工 (EDM) により貫通又は未貫通切欠きを加工した。各試験片の切欠き寸法を Table 3.3 に示す。

高コンプライアンス発生装置を用いる試験片については、つかみ具に合わせて、Fig. 3.3 中に示

した4つの穴あけ加工も行った。

Spec. No. B-10については、初期き裂先端形状の影響を調べるため、疲労予き裂を導入した。予き裂導入条件は、 $\Delta K \cong 85 \text{ kg}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$ 、応力比 $R = 0.05$ 及び周波数 20 Hz である。

3.3 試験方法

3.3.1 静的引張試験

静的引張試験は、Photo 3.1 に示す荷重容量 100 ton の油圧サーボ疲労試験機を用いて行った。試験片は油圧チャックにて上下で拘束する。試験中の変位速度は $1.0 \text{ mm}/\text{min}$ とした。

測定項目は、荷重 P 、荷重点変位 δ_p 、開口変位 COD 及びき裂進展量 Δa である。また、負荷途中段階で、所定の変位におけるき裂部の写真撮影を行った。

荷重の測定は試験機装置の 100 ton ロードセル、 δ_p 及び COD は、ナイフエッジを介して 25 mm クリップゲージにより測定した。それぞれの標点間距離は 150 mm 及び 6 mm である。クリップゲージは、Photo 3.2 に示すように、貫通切欠きの場合は両面に、未貫通切欠きの場合は切欠き側片面に装着し、測定を行った。

き裂進展量 Δa は、光学顕微鏡により測定し、第1報において用いた Fig. 3.4 に示す校正曲線を適用して求めた。

測定したデータ (P 、 δ_p 、COD 及び写真撮影信号) は、X-Y レコーダ及び PCM 式データレコーダに記録した。

3.3.2 延性不安定破壊試験

本試験は、前項と同一試験機を用い、Photo 3.3 に示すように、皿ばねを用いた高コンプライアンス発生装置を取り付けて行った。皿ばねは直列に5枚連結したものであり、コンプライアンス C_M を変化させることができるが、今回は $8.07 \sim 9.60 \times 10^{-4} \text{ mm}/\text{kg}$ (皿ばね5枚) 及び $3.23 \sim 3.84 \times 10^{-4} \text{ mm}/\text{kg}$ (皿ばね2枚) の2種類を使用した。

各試験片には前項同様ナイフエッジを介して2つのクリップゲージを取り付けた。変位速度も前項同様 $1.0 \text{ mm}/\text{min}$ である。

測定項目は前項とほぼ同様であるが、試験機総変位 δ_T の測定を加え、また Δa の測定は行わなかった。き裂が不安定成長を始める直前からは写真撮影は自動に切換え、毎秒3コマのモータドライブにより撮影した。

データ収録は前項と同じであるが、延性不安定破壊時のデータ再生時はウェーブメモリを用いて行った。

Table 3.1 Chemical composition of JIS STS42 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 STS42 carbon steel pipe at room temperature

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

* JIS G 3455

Table 3.3 EDM notch dimensions and test conditions

Specimen No.	Notch width a/w	Notch depth d/t	Thickness t (mm)	Test condition
A-1	0.25	0.75	10	$C_M = 3.84 \times 10^{-4}$ mm/kg
A-2	0.25	0.75	10	
A-4	0.25	1.00	10	
A-6	0.25	1.00	10	
A-7	0.25	1.00	10	
A-8	0.50	0.51	10	
A-9	0.50	0.50	10	$C_M = 9.60 \times 10^{-4}$ mm/kg
A-11	0.25	1.0	10	
B-1	0.50	0.75	10	$C_M = 8.07 \times 10^{-4}$ mm/kg
B-2	0.50	0.73	10	
B-3	0.50	0.89	10	$C_M = 8.07 \times 10^{-4}$ mm/kg
B-4	0.50	0.90	10	
B-5	0.50	0.75	10	$C_M = 3.23 \times 10^{-4}$ mm/kg
B-6	0.50	0.75	10	$C_M = 3.23 \times 10^{-4}$ mm/kg
B-7	0.50	0.88	10	
B-8	0.50	0.89	10	$C_M = 8.07 \times 10^{-4}$ mm/kg
B-9	0.50	0.77	10	
B-10	0.50	1.00	10	Fatigue precrack
C-1	0.70	0.74	25	
C-2	0.70	0.74	25	
C-3	0.70	0.89	25	
C-4	0.70	0.90	25	

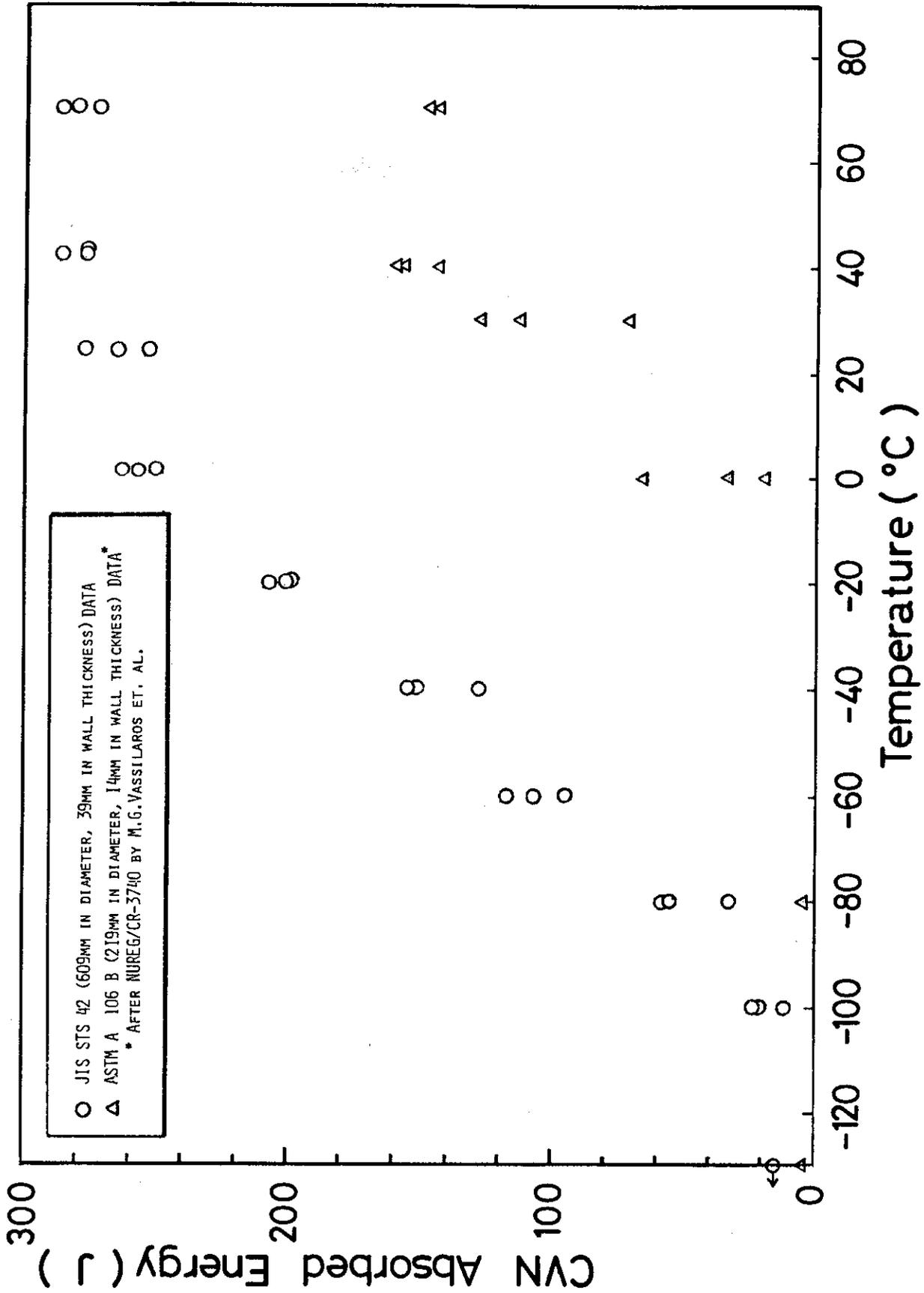


Fig.3.1 Charpy V-notch absorbed energy transition curve of JIS STS42 carbon steel pipe

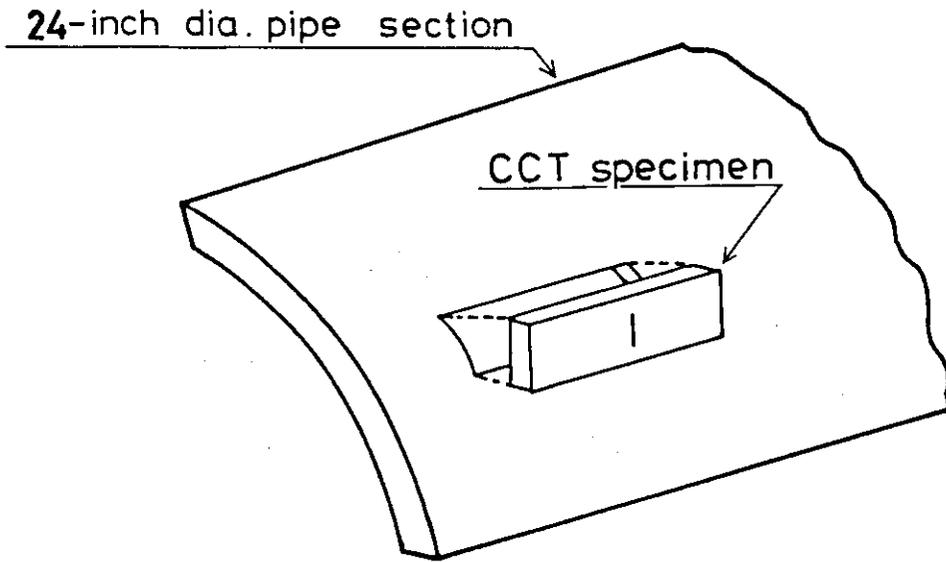


Fig.3.2 Schematic drawing of CCT specimen orientation

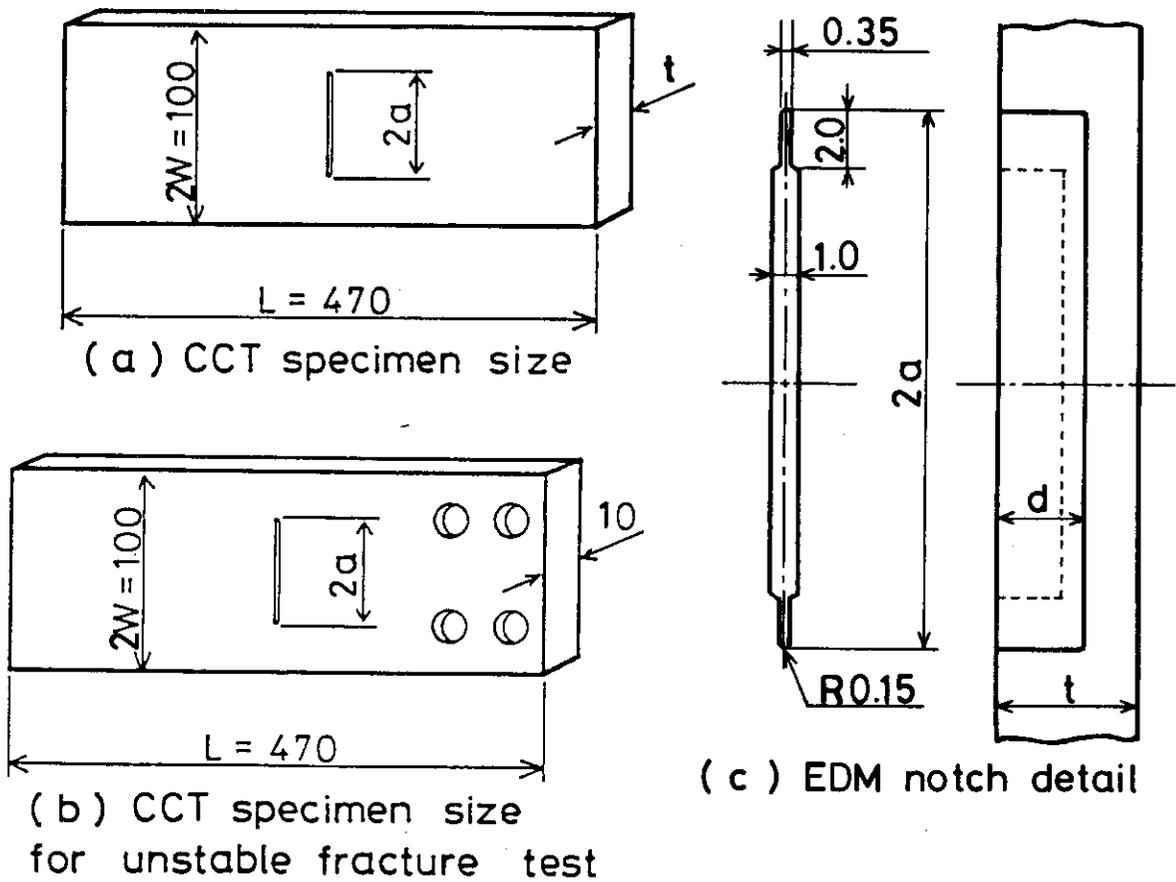


Fig.3.3 CCT specimen geometry

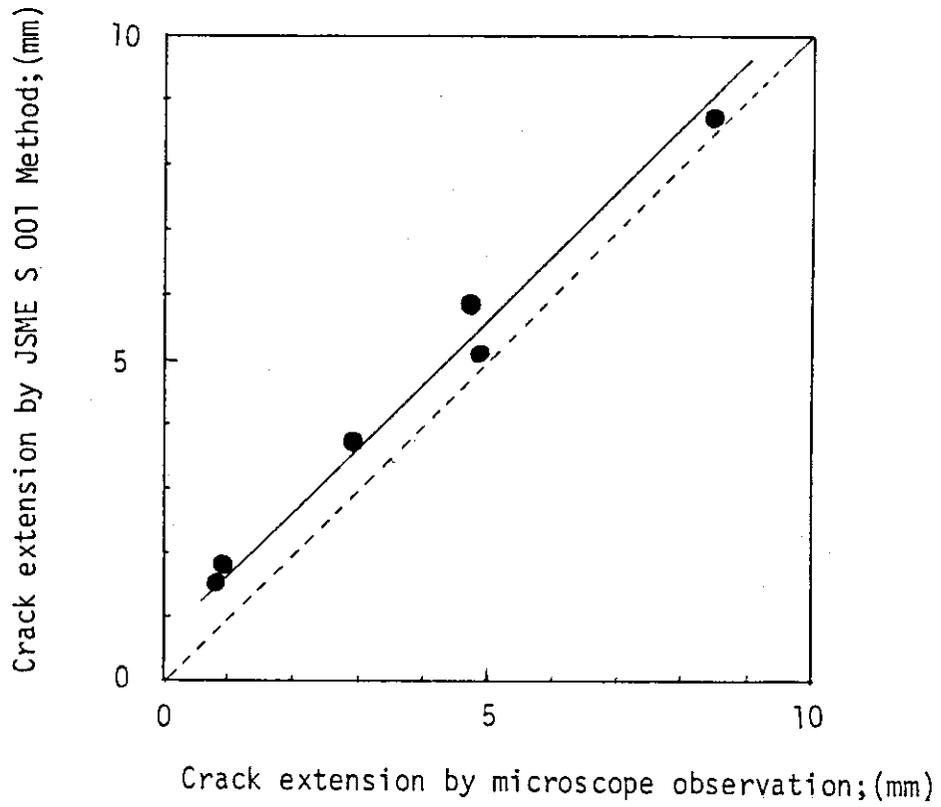
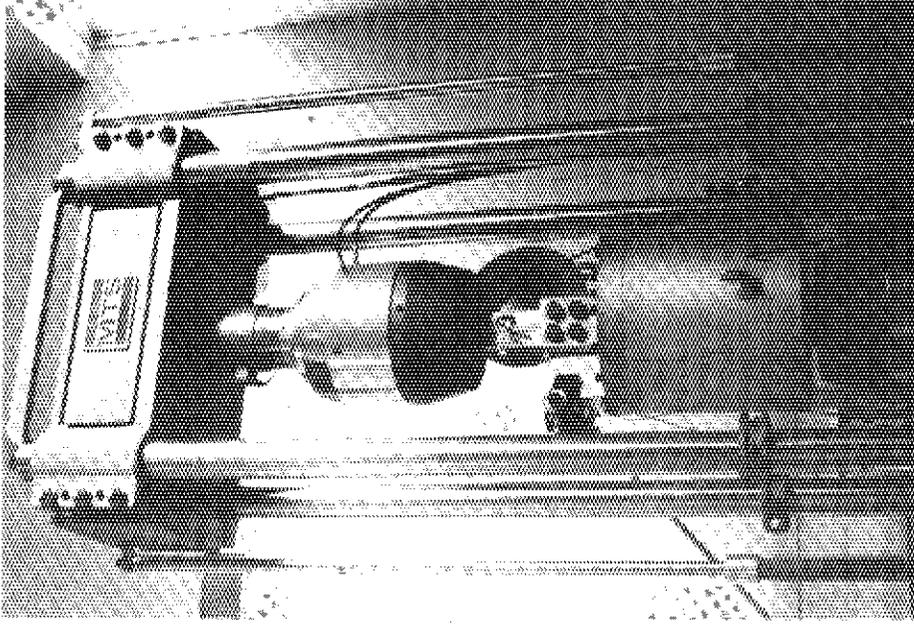


Fig.3.4 Calibration line for determining crack extension



Compliant disc spring

Photo. 3.3 External appearance of 100ton fatigue test machine with compliant disc springs

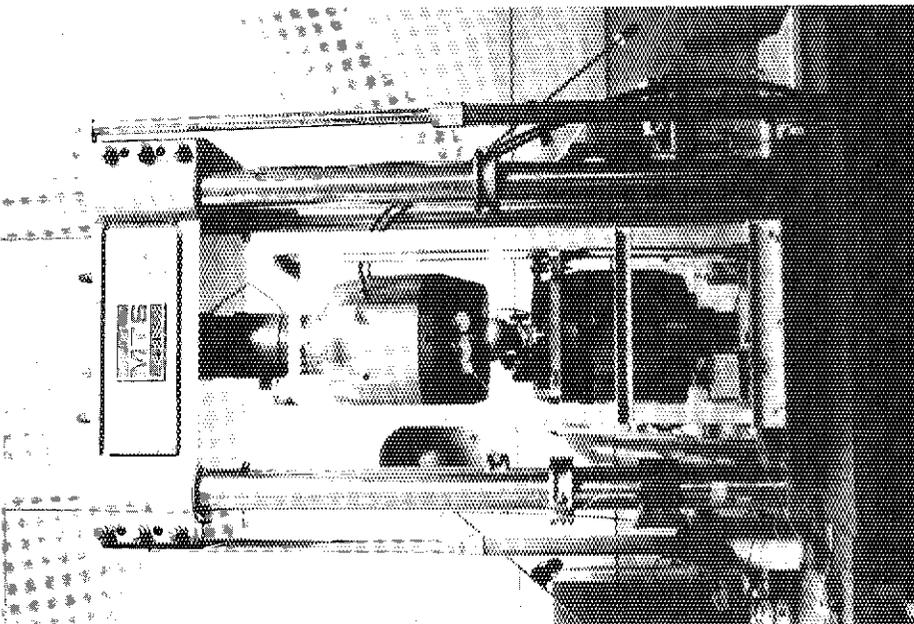
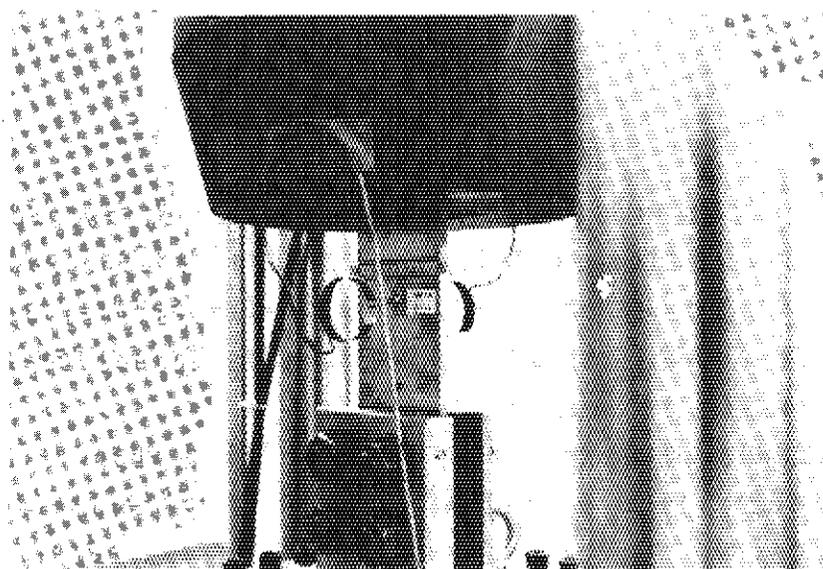
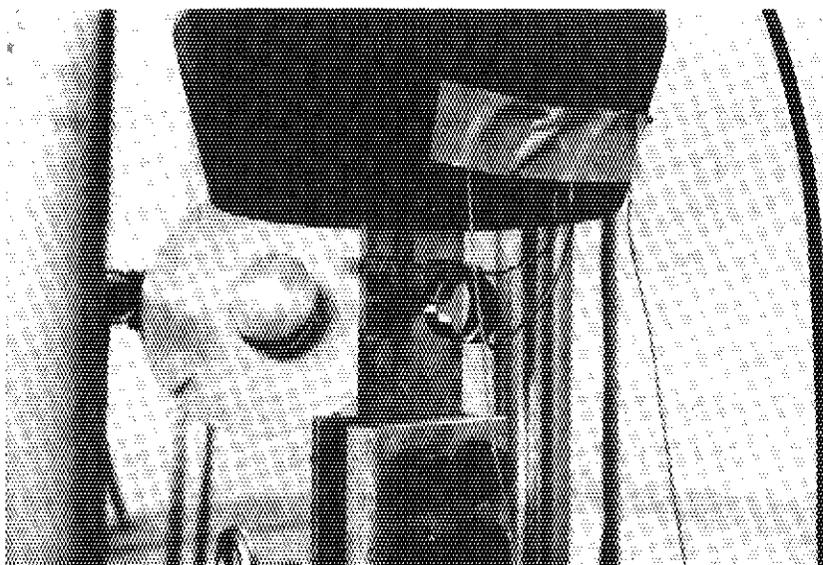


Photo. 3.1 External appearance of 100ton fatigue test machine



(a) through-wall crack specimen



(b) part-through crack specimen

Photo. 3.2 Set-up of CCT specimen

4. 試験結果

4.1 静的引張試験

Fig.4.1～4.15に全試験片の $P-\delta_p-\Delta a$ の関係を示す。 Δa は、切欠き両側へのき裂進展量の平均値である。全ての試験片は、弾性的挙動で荷重が増加した後降伏現象が起こり、その後加工硬化に伴って荷重がさらに増加してゆく。荷重が最大値を示す近辺から、き裂が安定に進展してゆく過程を経て、荷重は次第に減少し、最終破断に至った。荷重が定期的に減少するのは、 Δa 測定のために負荷を停止したためである。

負荷中の試験片のき裂進展の状況をPhoto 4.1及び4.2に示す。Photo 4.1は貫通切欠き(A-4, $a/w=0.25$)、Photo 4.2は未貫通切欠き(A-2, $a/w=0.25$, $d/t=0.75$)の場合である。貫通切欠きの場合、 δ_p が4mm程度になるまで切欠き端の鈍化が続き、その後き裂は安定に45°のシェアリップを形成しながら進展し、最終破断に至る。未貫通切欠きの場合は、 δ_p が0.5mm程度から切欠きの板厚方向リガメント部が塑性変形し、収縮しはじめる。さらに負荷を続けると収縮部にき裂が貫通し、急速に切欠き幅まで広がってゆく。その後は貫通切欠きの場合と同じで、45°の破面を形成しながら最終破断に至る。それぞれの試験片の破面をPhoto4.3及び4.4に示す。破面は第1報の場合と同様、ディンプル破面であった。

なお、他の試験片のき裂進展状況写真及び破面写真は付録にまとめて示した。

また、A-1からA-9までの試験片については、Fig.4.1から4.6に示す通り36～37ton付近で一旦荷重増加が停まり、1.5mm～2.0mm変位が増加した後再度荷重が増加する。この平坦部分は試験片の平滑部が全断面降伏を起こし、 δ_p を測定する標点間(150mm)全域にわたって変形が起こったためである。そこで、き裂に対する変位を正確に表わすと考えられるCODを用いた $P-COD-\Delta a$ 曲線を、A-1からA-9の試験片についてFig.4.16～4.21に示す。B及びCの試験片については、 δ_p とCODとの差はほとんど表われなかった。

未貫通切欠き試験片について、き裂が板厚を貫通した点を $P-\delta_p$ (COD)曲線中に矢印で示しておいた。き裂の板厚貫通は第1のピークの後に起こっている。これから、第1のピークは板厚方向のリガメント部の加工硬化によるものと考えられる。この第1のピークについて、切欠き深さの影響を比較するために、Fig.4.22～4.24に切欠き幅を同一にした場合の荷重変位曲線を示す。Fig.4.22は、 $t=10$ mm, $a/w=0.5$ の場合で、 d/t を0.5, 0.75, 0.9及び1.0の4種類変化させた曲線である。 $d/t=1.0$ については第1報のデータを用いた。切欠きが浅くなるにつれて第1のピーク値 P_L は大きくなり、0.75より浅くなると P_L は第2のピーク値 P_{max} を越える。さらに浅くなり $d/t=0.5$ で第2のピークは表われず、変曲点のみとなる。Fig.4.23は、 $a/w=0.25$ の場合であり、 $d/t=0.75$ 及び1.0の比較である。第1のピークは全断面降伏点付近にわずかに起こり、貫通切欠きに対して約2tonの荷重増加となった。Fig.4.24は $t=25$ mm, $a/w=0.7$ の場合で、 $d/t=0.75$, 0.9及び1.0の曲線である。 P_L と P_{max} の関係は本図中の $d/t=0.75$ 及び0.9がFig.4.22中の $d/t=0.5$ 及び0.75に対応する。しかし、リガ

メント長さの絶対値としては、それぞれ 2.5 mm 及び 5~6 mm と一致しており、ピーク値の関係はリガメント長さに依存すると考えられる。

STS 42 の 6 インチ口径配管を用いた試験結果³⁰⁾によると、 P_L と P_{max} の大きさはやはり $d/t = 0.75 \sim 0.9$ において逆転し、0.8 位で一致することが報告されている。今回の平板試験では、 $t = 10\text{mm}$ 、 $a/w = 0.5$ の結果が 6 インチ配管と類似していると考えられ、 $d/t = 0.8$ 位の値で 2 つのピーク値が一致する結果となった。

4.2 延性不安定破壊試験

高コンプライアンス発生装置を用いて、3 種類の切欠きを有する試験片（計 7 本）の延性不安定破壊試験を行った。試験より得られた $P - \delta_T$ 曲線を Fig. 4.25 ~ 4.31 に、 $P - \delta_p$ 曲線を Fig. 4.32 ~ 4.38 に示す。試験片中、A-6、B-5 及び B-7 は低 C_M 条件 ($3.23 \sim 3.84 \times 10^{-4} \text{mm/kg}$) で行ったものであり、A-11、B-2、B-4 及び B-9 は高 C_M 条件 ($8.07 \sim 9.60 \times 10^{-4} \text{mm/kg}$) で行ったものである。なお、A シリーズの試験片については、前項同様 $P - \text{COD}$ 曲線も Fig. 4.39 及び 4.40 に示した。

すべての試験片は不安定破壊を起こして破断したが、不安定破壊開始点を実験的に求めることは、安定状態から不安定状態への遷移がなめらかに起こるため、非常に困難である。そこで、第 1 報と同様にして、Fig. 4.41 ~ 4.47 に示す $\delta_p - \delta_T$ 曲線において、 δ_T が増加しないにもかかわらず δ_p が急速に増加してゆく点を不安定破壊開始点と定義した。各試験に対して、その点を Fig. 4.25 ~ 4.38 中にも示した。

A シリーズの試験片は、 P_{max} を越えてから若干の荷重低下過程を経て、不安定破壊に至った。低 C_M の A-6 は 5.1 ton、高 C_M の A-11 は 1.7 ton の荷重低下後不安定破壊した。

B シリーズの試験片は、き裂が貫通する際に加工硬化によりピークが生じ、その直後に一旦き裂は不安定化する。しかし、板幅方向のリガメント部の加工硬化により第 2 のピークを生じるため、き裂の不安定伝播は停止する。その後は A シリーズと同様に P_{max} を過ぎるまで安定成長を続け、若干の荷重低下後不安定化した。それぞれの荷重低下量は、低 C_M の B-5 及び B-7 が 3.9 及び 3.7 ton、高 C_M の B-2、B-4 及び B-9 がそれぞれ 1.0、1.2 及び 1.2 ton であった。図中には最初の不安定点、不安定伝播停止点及び最終不安定点を示した。

各試験片の不安定点における $P - \delta_p$ 曲線の傾き $dP/d\delta|_{inst}$ は、Fig. 4.48 に示すように、ほぼ C_M に等しかった。理論的不安定破壊条件は、 $C_M \leq d\delta/dP$ であり、本試験結果は妥当なものであった。

今回の B シリーズの試験はすべて不安定破壊が一旦停止したが、4.1 節に示したように P_L は d/t に依存し、切欠きが浅いほど P_L は高くなる。切欠きが浅く、 P_L と P_{max} を結ぶ直線の傾きが C_M より大きくなる場合には（たとえば Fig. 4.5 及び 4.6）き裂は板厚貫通時から最終破断まで一気に不安定成長すると考えられる。

Photo 4.5 及び 4.6 は不安定破壊試験中のき裂進展状況を写した写真である。他の試験片については付録に示した。A シリーズは P_{max} を過ぎるまで安定にき裂成長し、最後 2 枚の写真間で急速に破断に至った。B シリーズは P_L 直後に不安定化するが、自動撮影によりき裂が貫通し

板幅方向に急速に広がる様子が確認できた。その後はAシリーズと同様であった。Photo 4.7 及び 4.8 に不安定破壊後の試験片破面を示す。他は付録に示してある。すべての試験片について、破面はディンプル破面であり、静的引張試験の場合と同じであった。

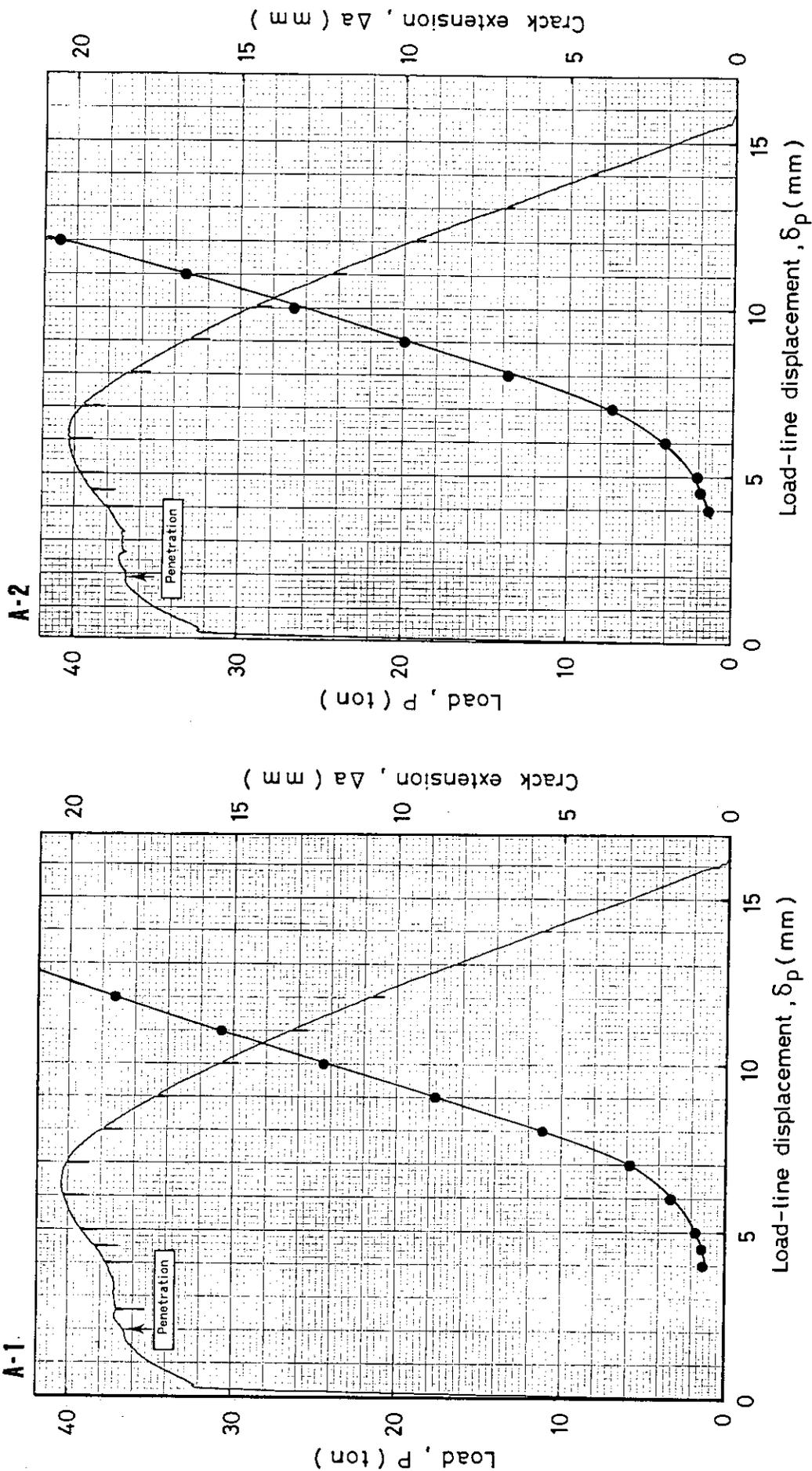


Fig.4.1 Load - loadline displacement - crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (A-1)

Fig.4.2 Load - loadline displacement - crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (A-2)

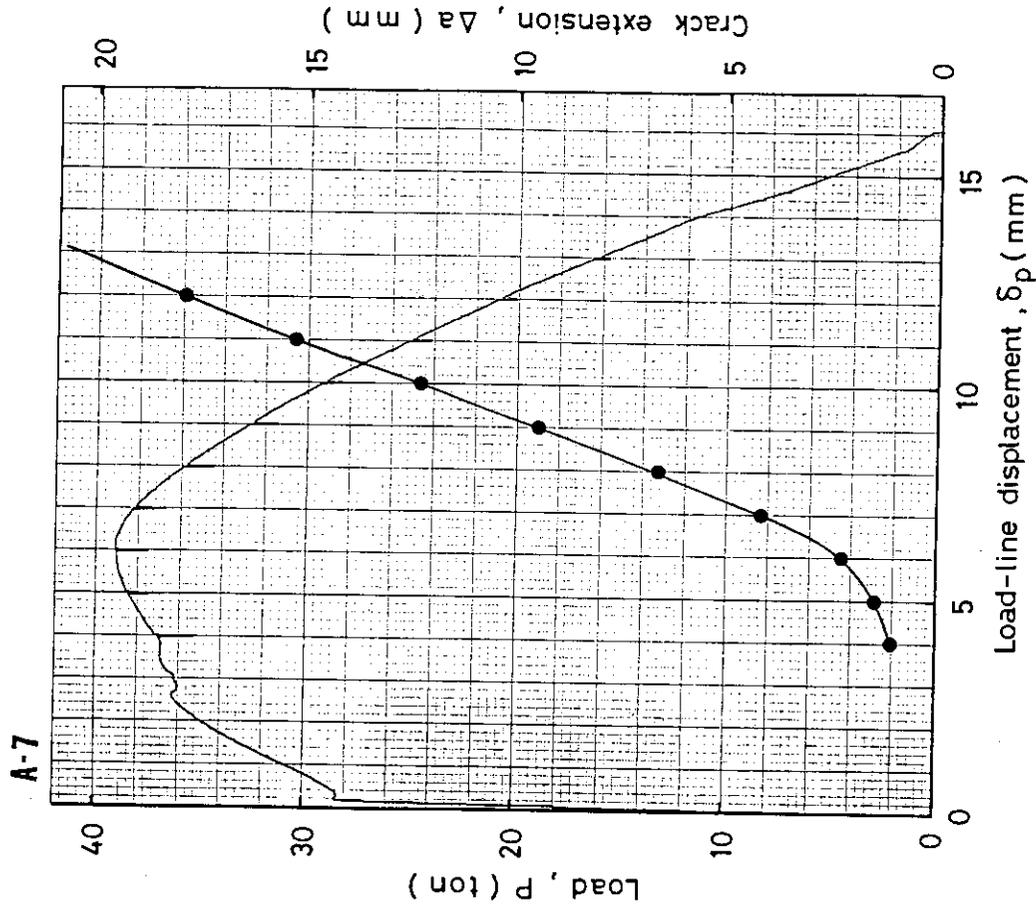
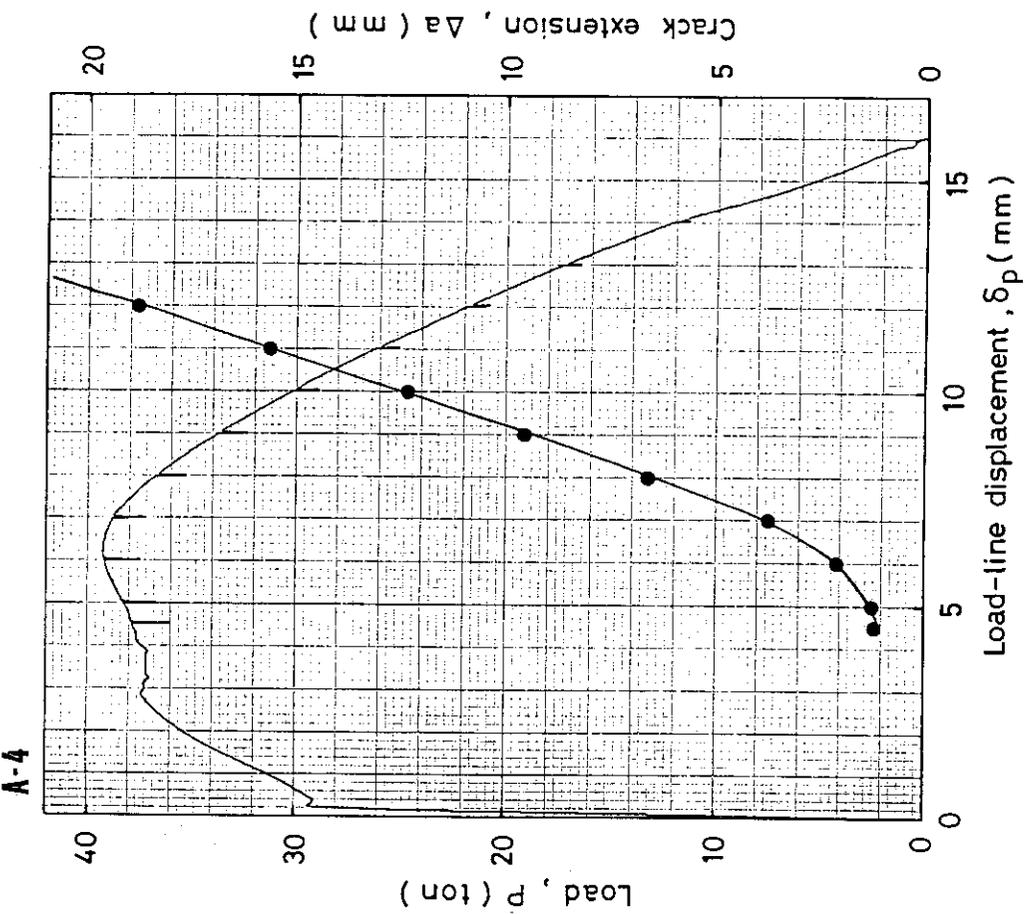


Fig.4.3 Load - loadline displacement - crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (A-4)
 Fig.4.4 Load - loadline displacement - crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (A-7)

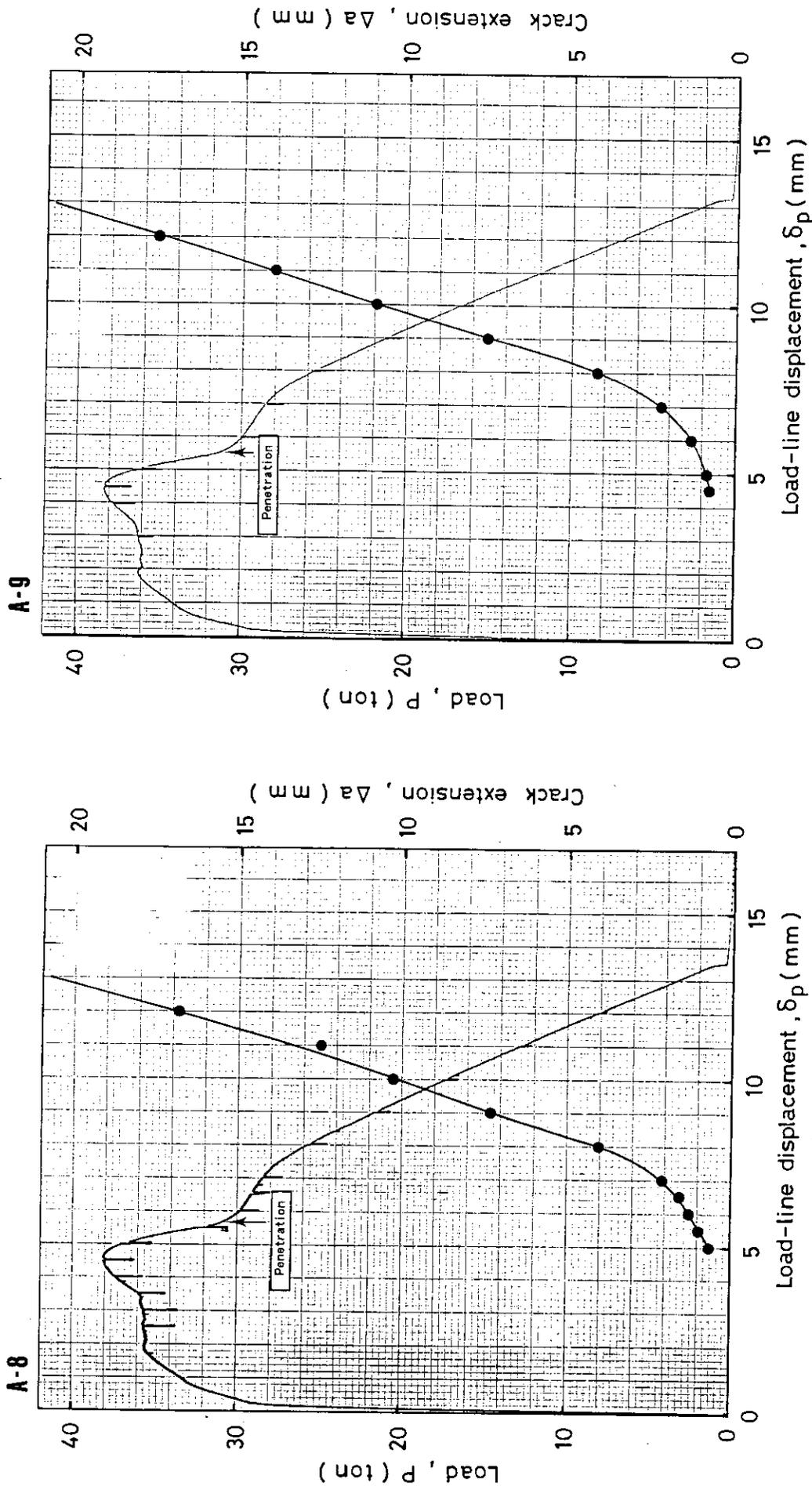


Fig.4.5 Load - loadline displacement - crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (A-8)

Fig.4.6 Load - loadline displacement - crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (A-9)

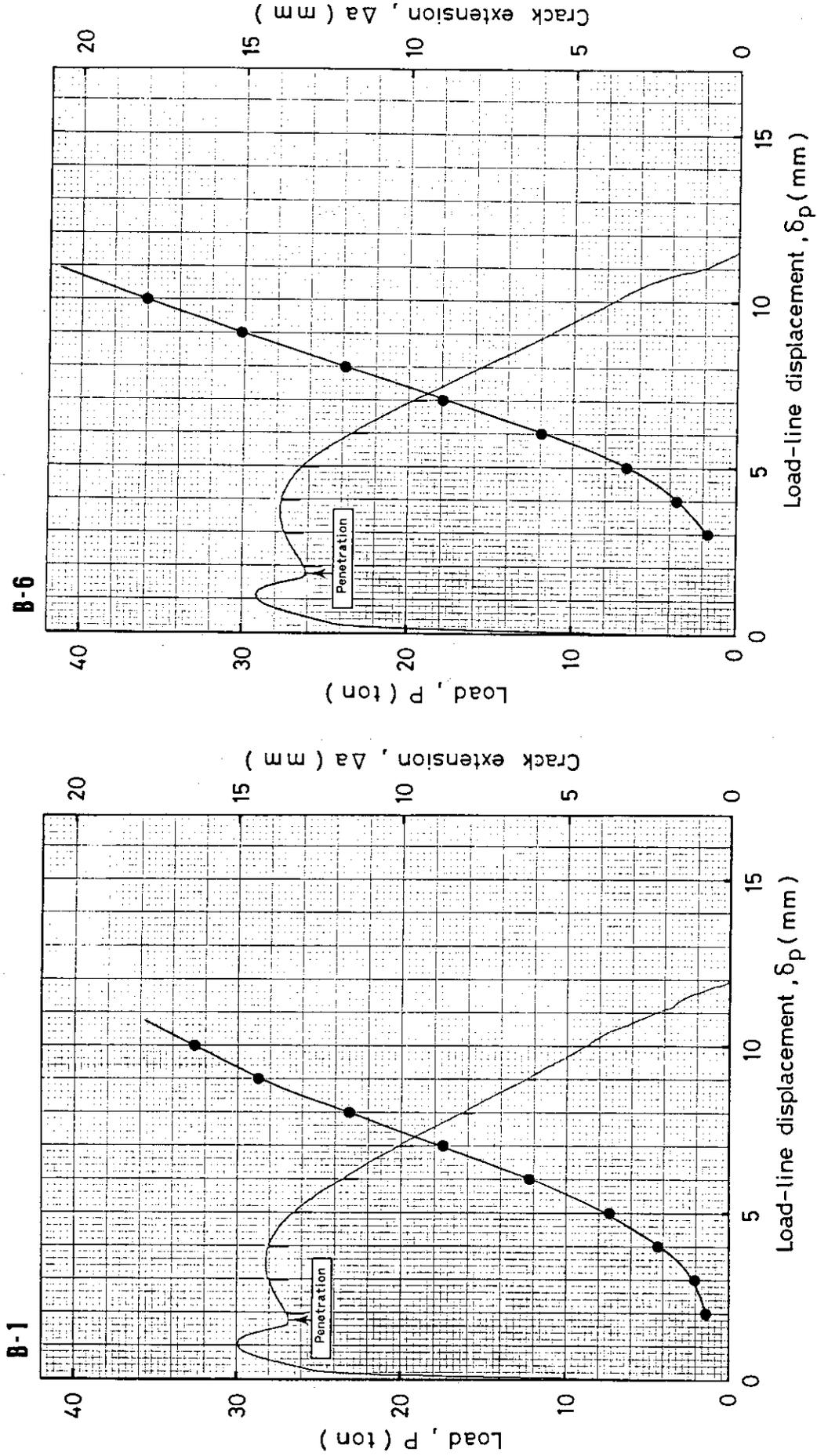


Fig.4.7 Load - loadline displacement - crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (B-1)

Fig.4.8 Load - loadline displacement - crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (B-6)

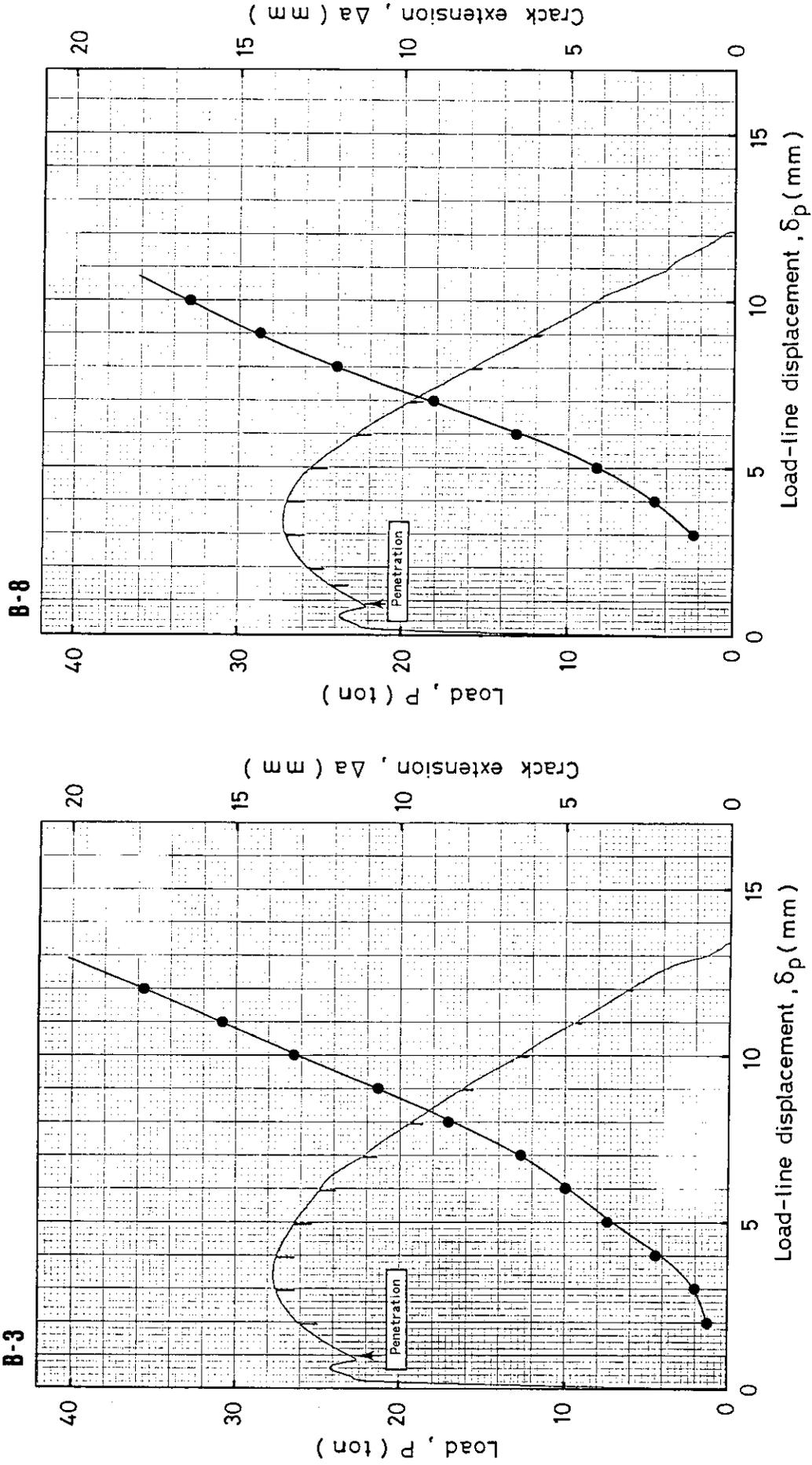


Fig.4.9 Load—loadline displacement—crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (B-3)
 Fig.4.10 Load—loadline displacement—crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (B-8)

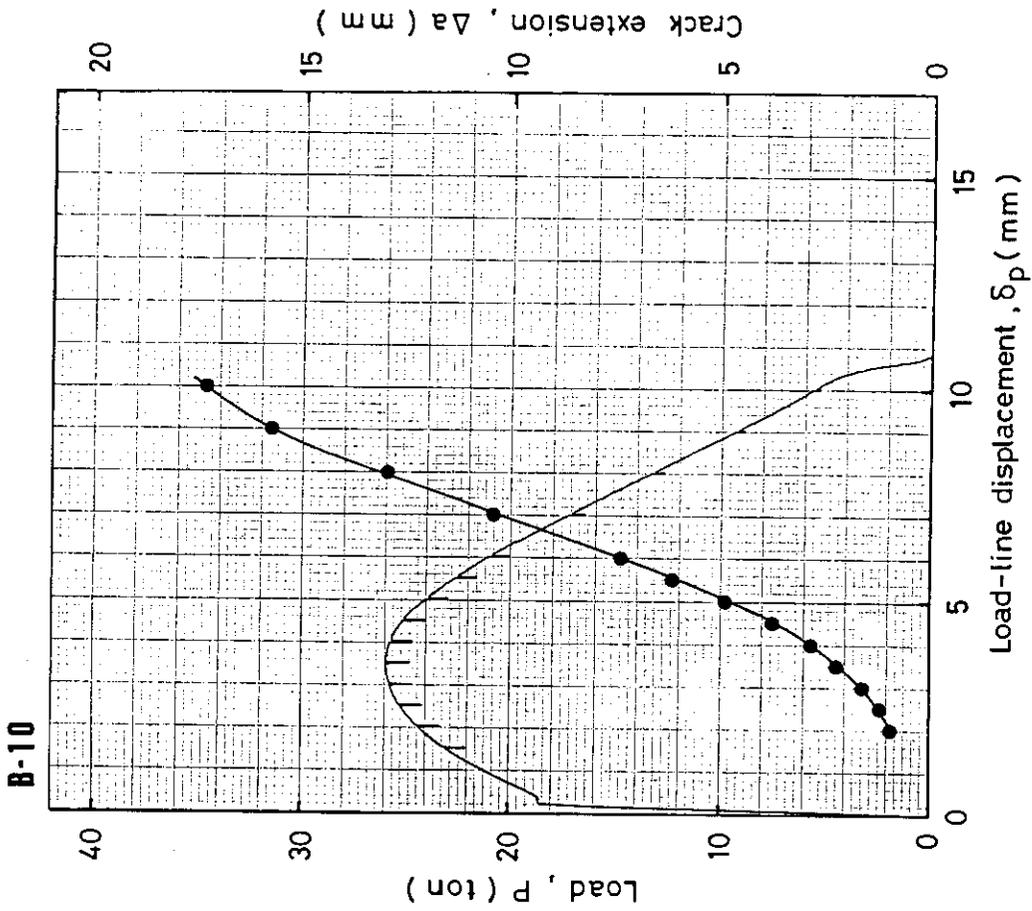


Fig.4.11 Load - loadline displacement - crack extension curves for 10mm-thickness CCT specimen (B-10)

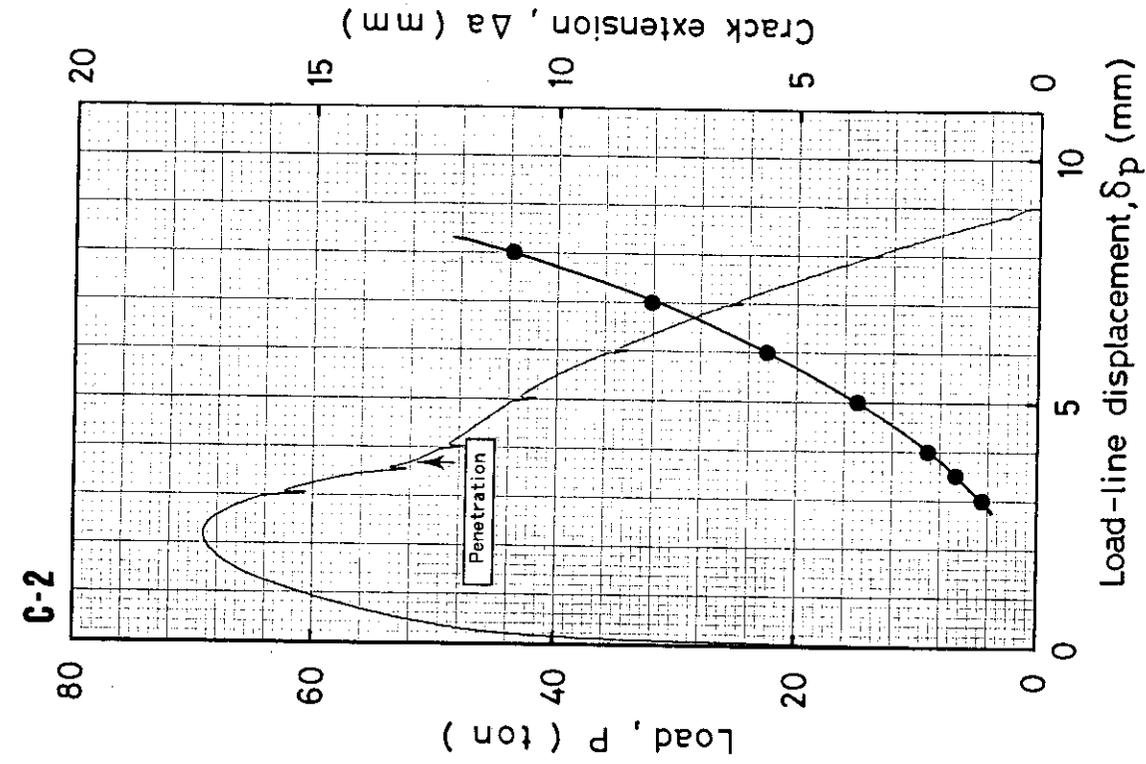


Fig.4.13 Load - loadline displacement - crack extension curves for 25mm-thickness CCT specimen (C-2)

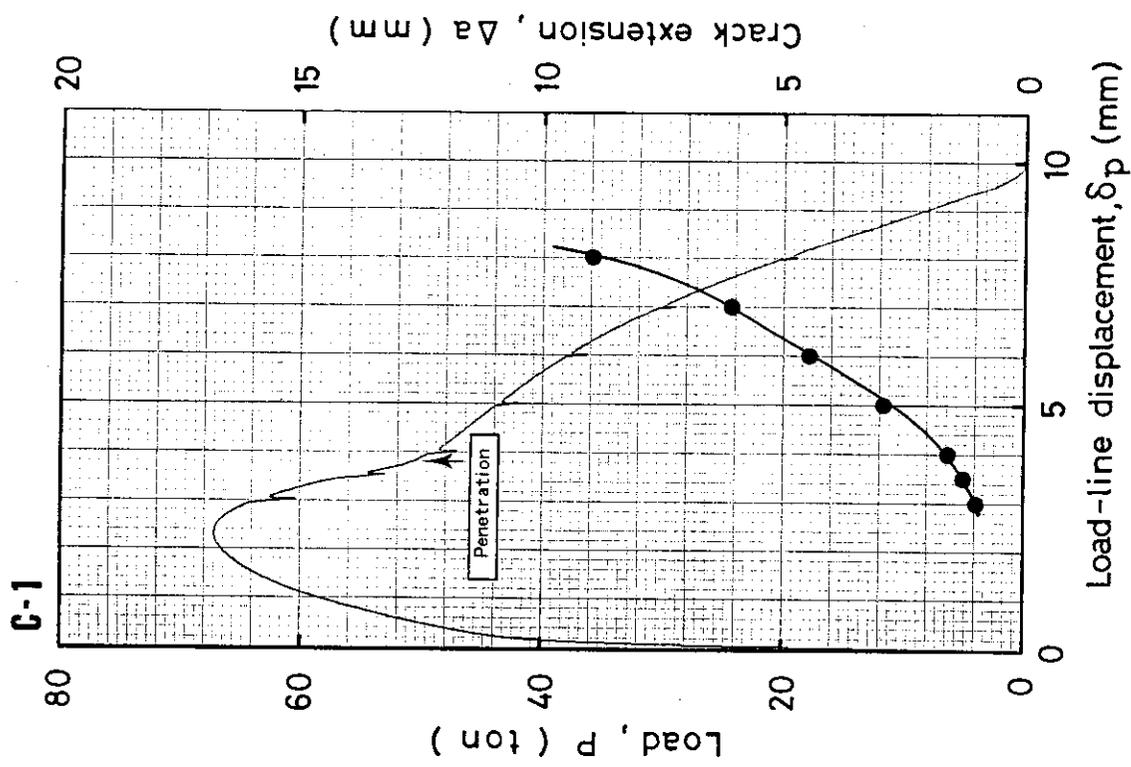


Fig.4.12 Load - loadline displacement - crack extension curves for 25mm-thickness CCT specimen (C-1)

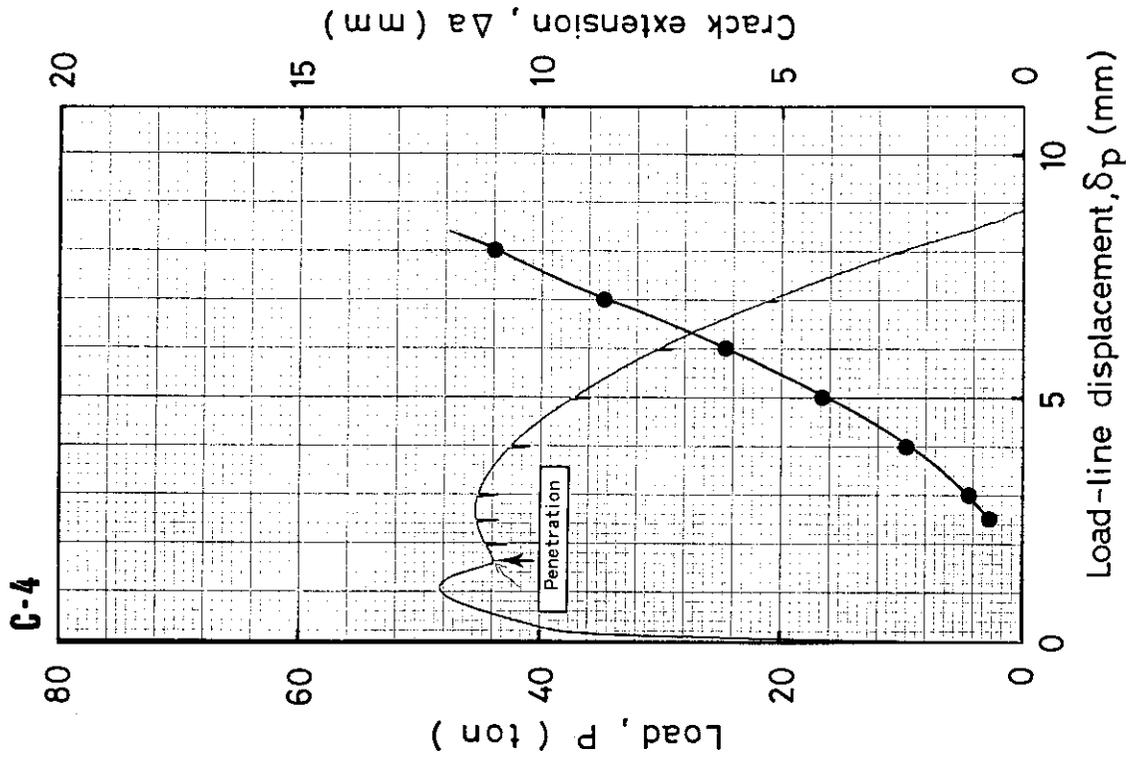


Fig.4.15 Load - loadline displacement - crack extension curves for 25mm-thickness CCT specimen (C-4)

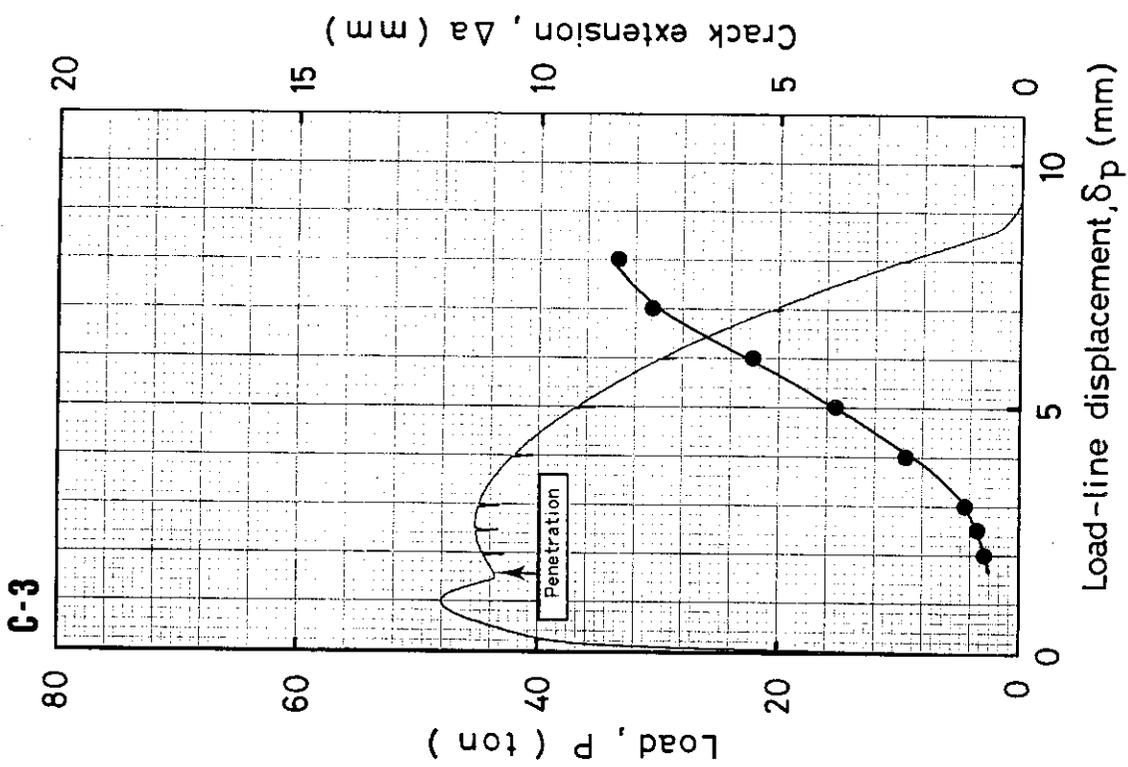


Fig.4.14 Load - loadline displacement - crack extension curves for 25mm-thickness CCT specimen (C-3)

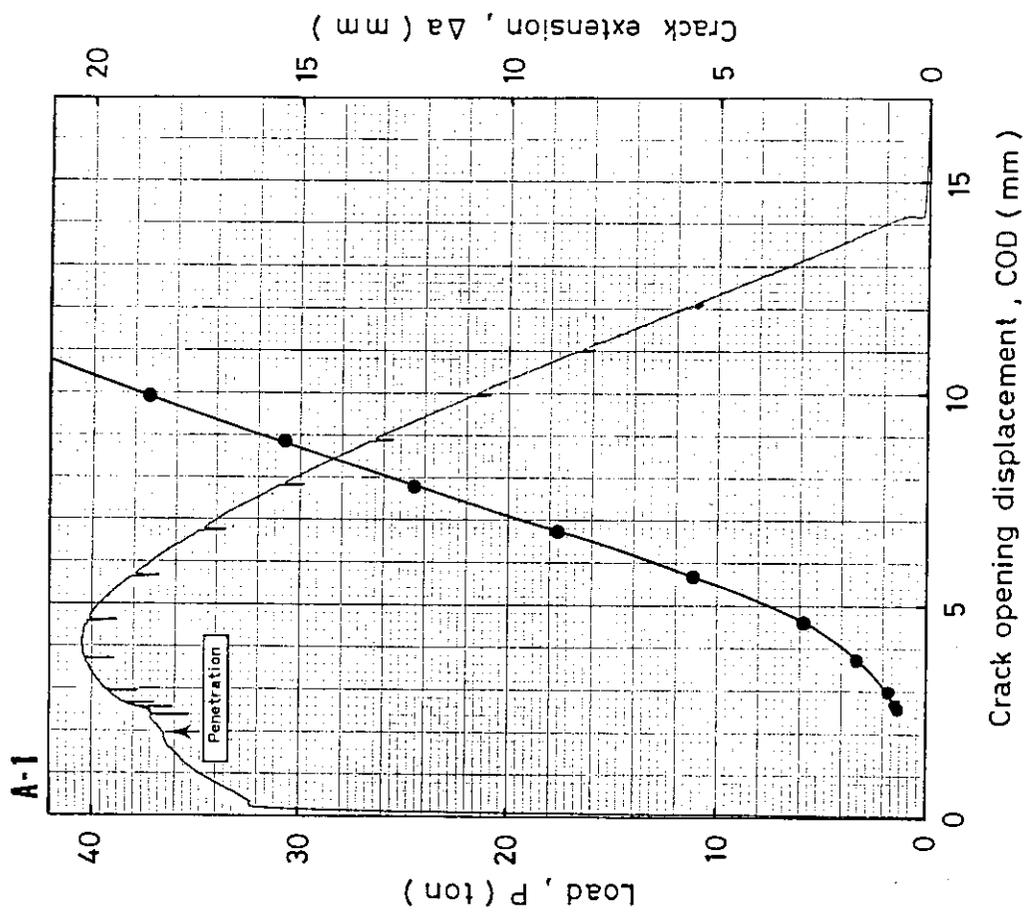


Fig.4.16 Load-crack opening displacement(COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen (A-1)

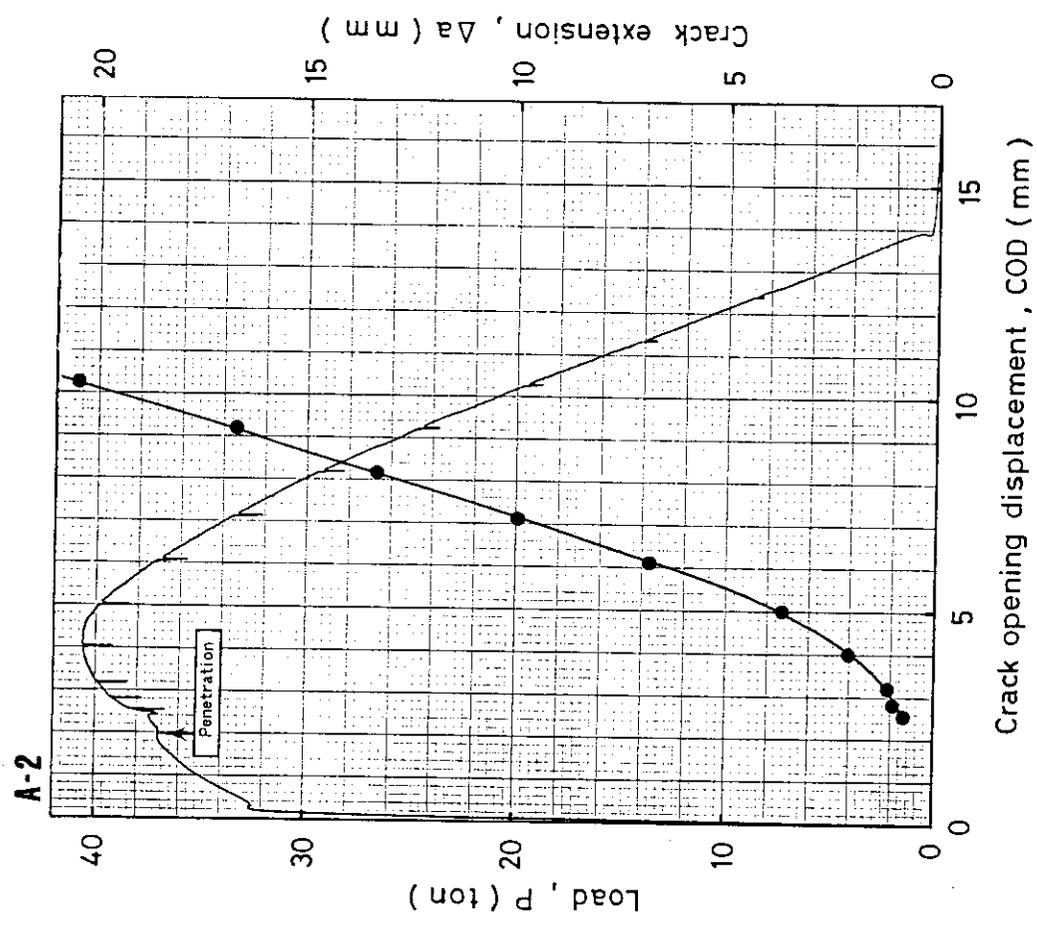


Fig.4.17 Load-crack opening displacement(COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen (A-2)

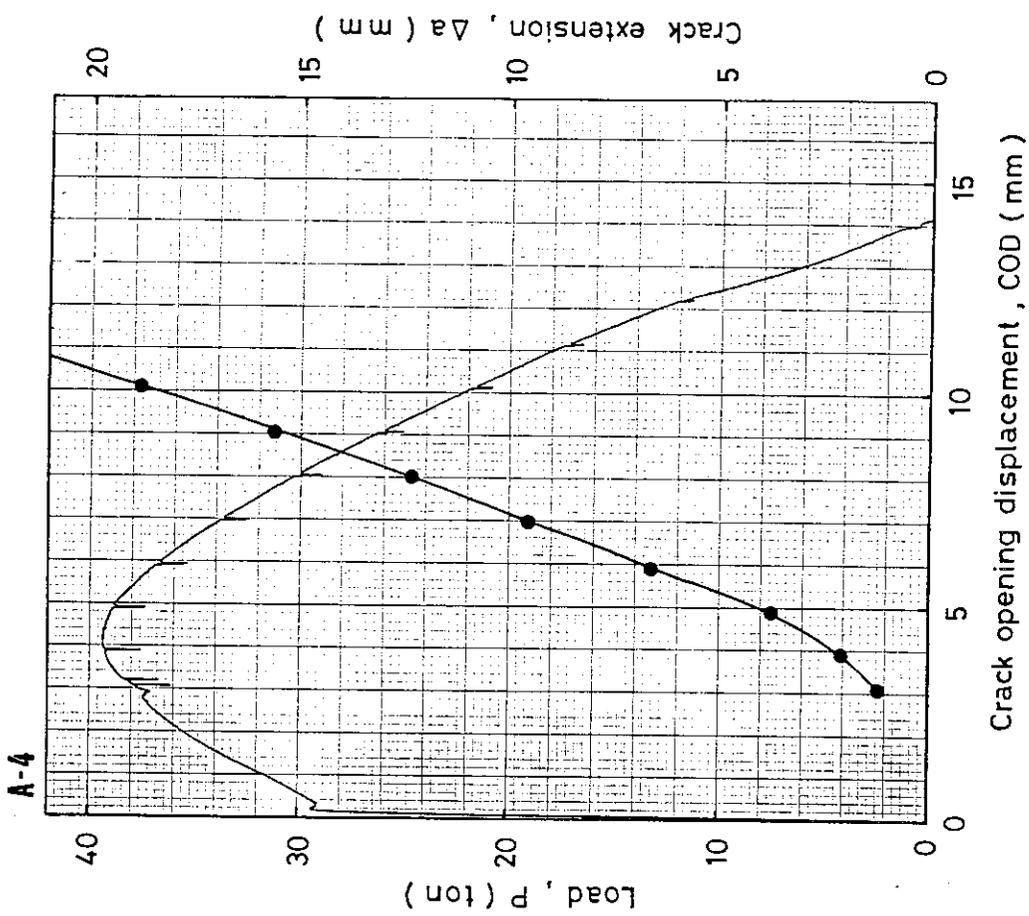


Fig.4.18 Load - crack opening displacement(COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen (A-4)

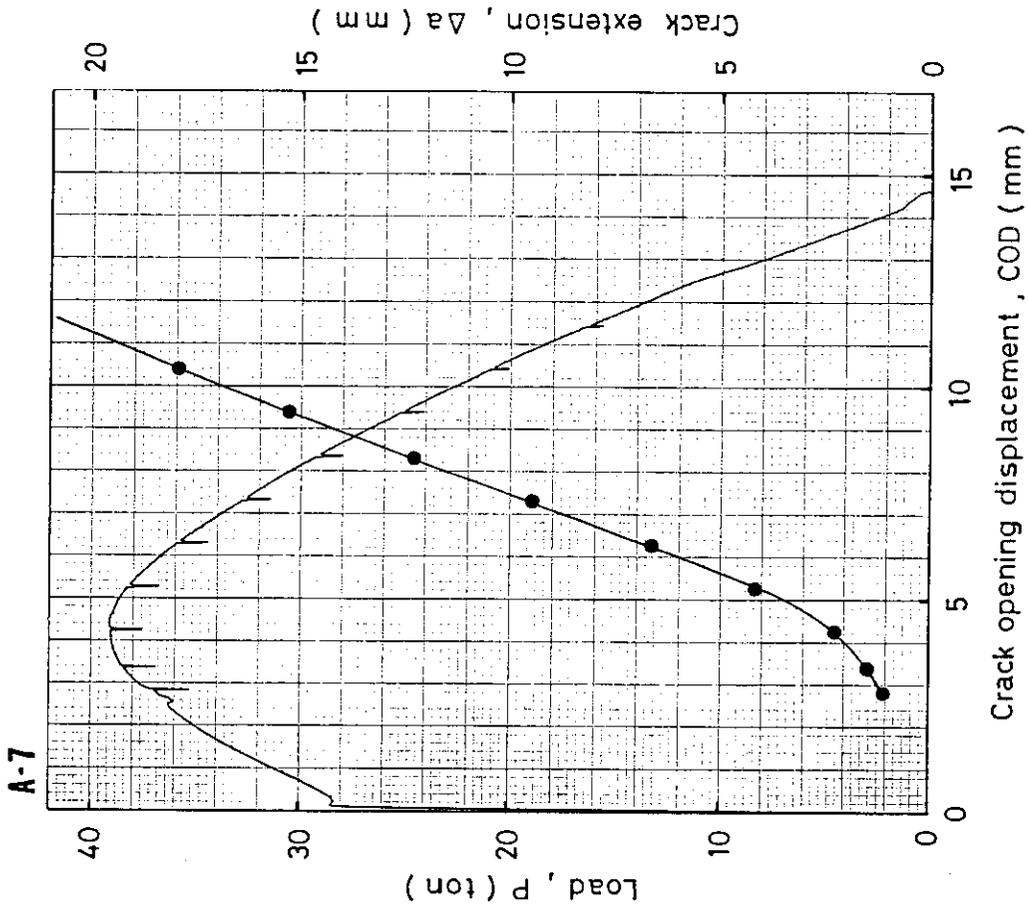


Fig.4.19 Load - crack opening displacement(COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen (A-7)

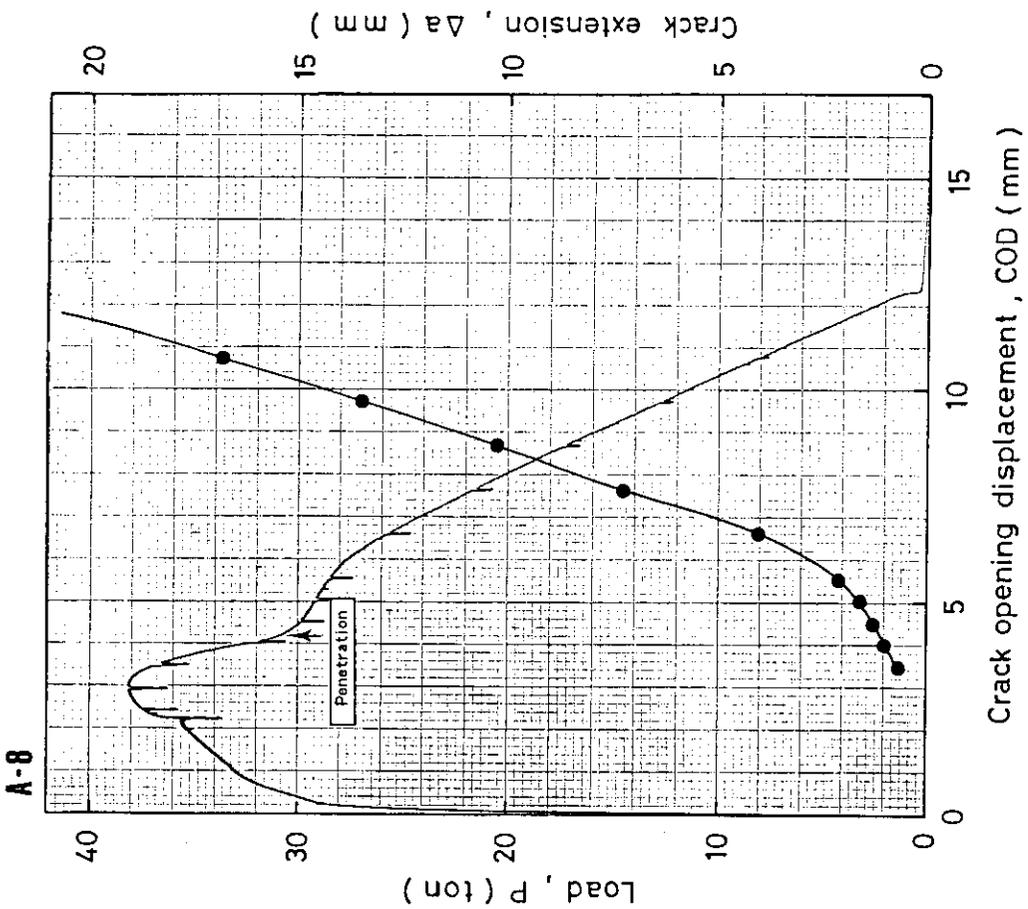


Fig.4.20 Load—crack opening displacement(COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen (A-8)

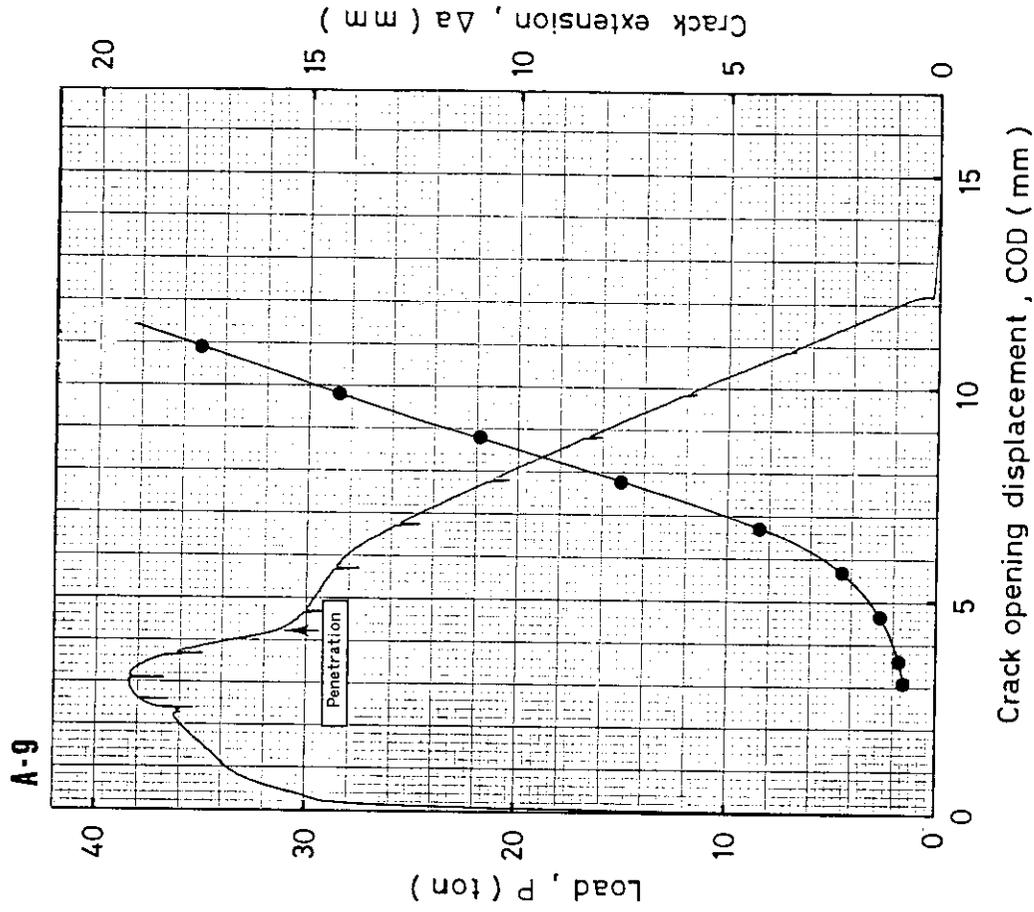


Fig.4.21 Load—crack opening displacement(COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen (A-9)

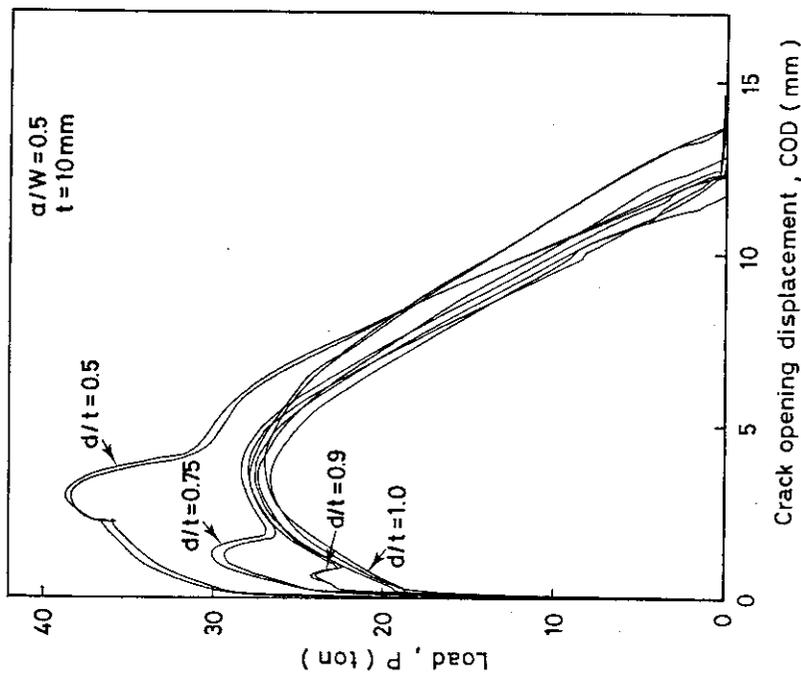


Fig. 4.22 Summary of load-crack opening displacement (COD) curves for 10mm-thickness CCT specimen with $a/W=0.50$

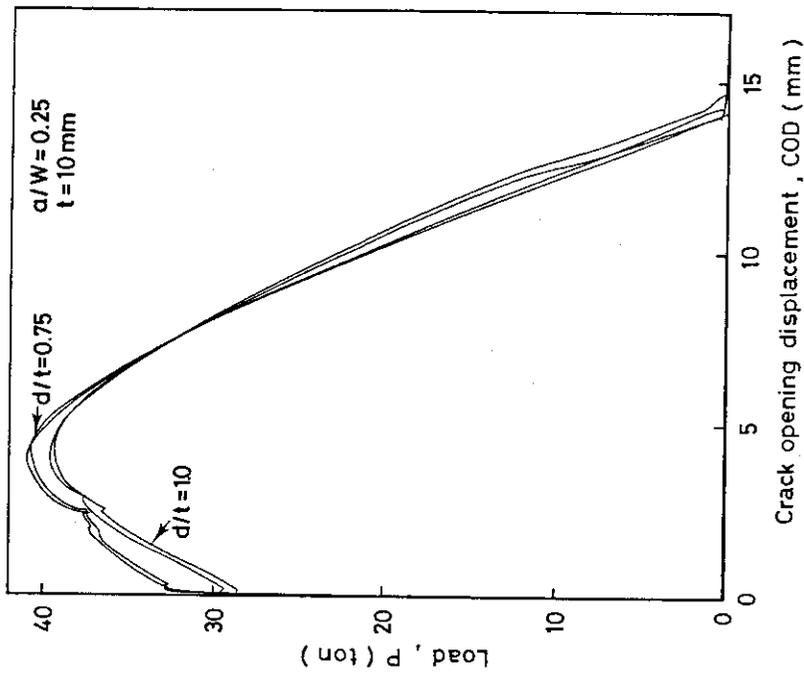


Fig. 4.23 Summary of load-crack opening displacement (COD) curves for 10mm-thickness CCT specimen with $a/W=0.25$

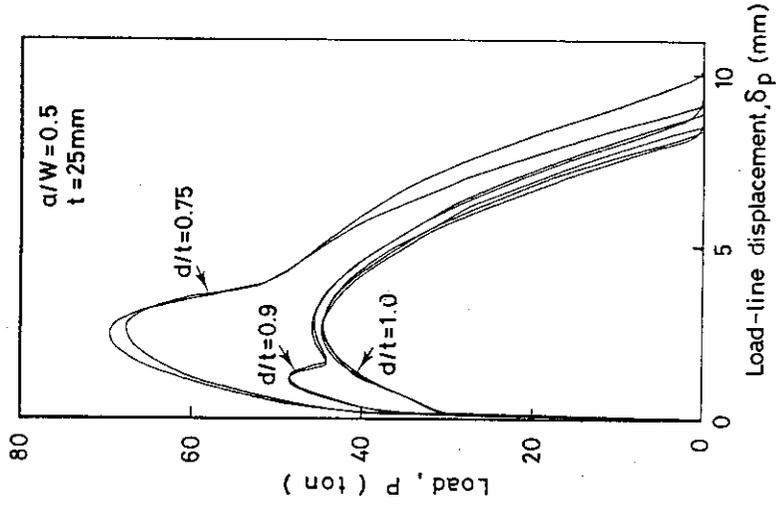


Fig. 4.24 Summary of load-line displacement curves for 25mm-thickness CCT specimen with $a/W=0.70$

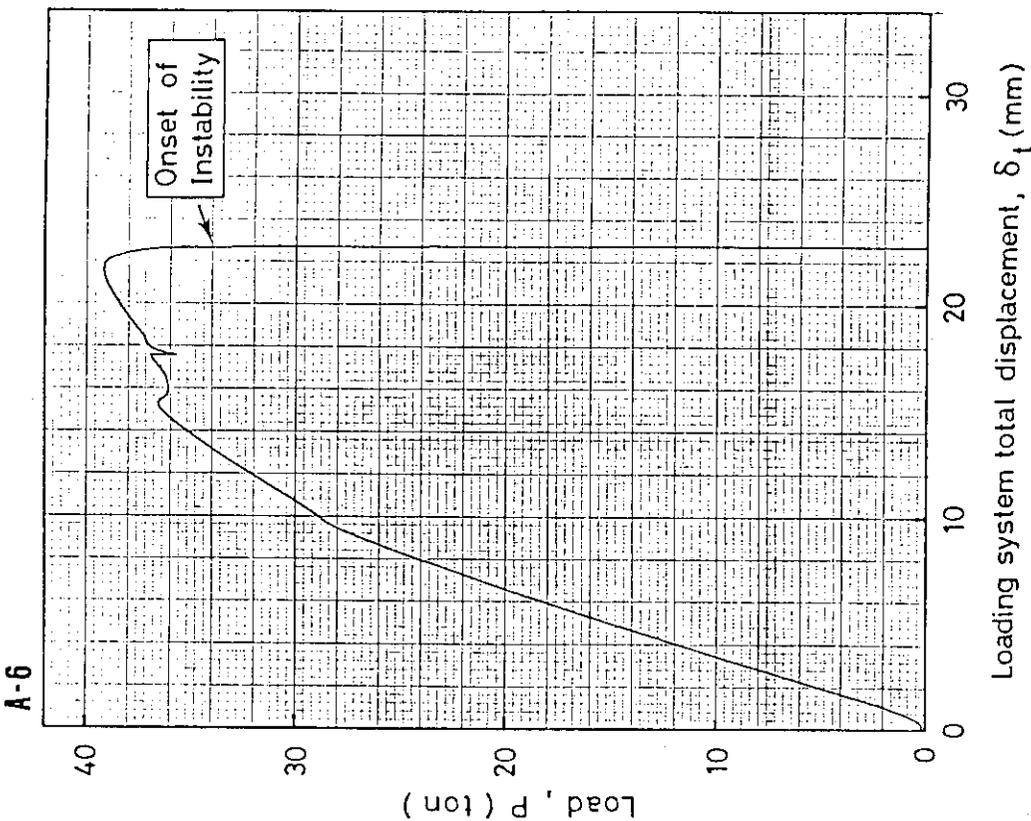


Fig. 4.25 Load-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.84×10^{-4} mm/kg (A-6)

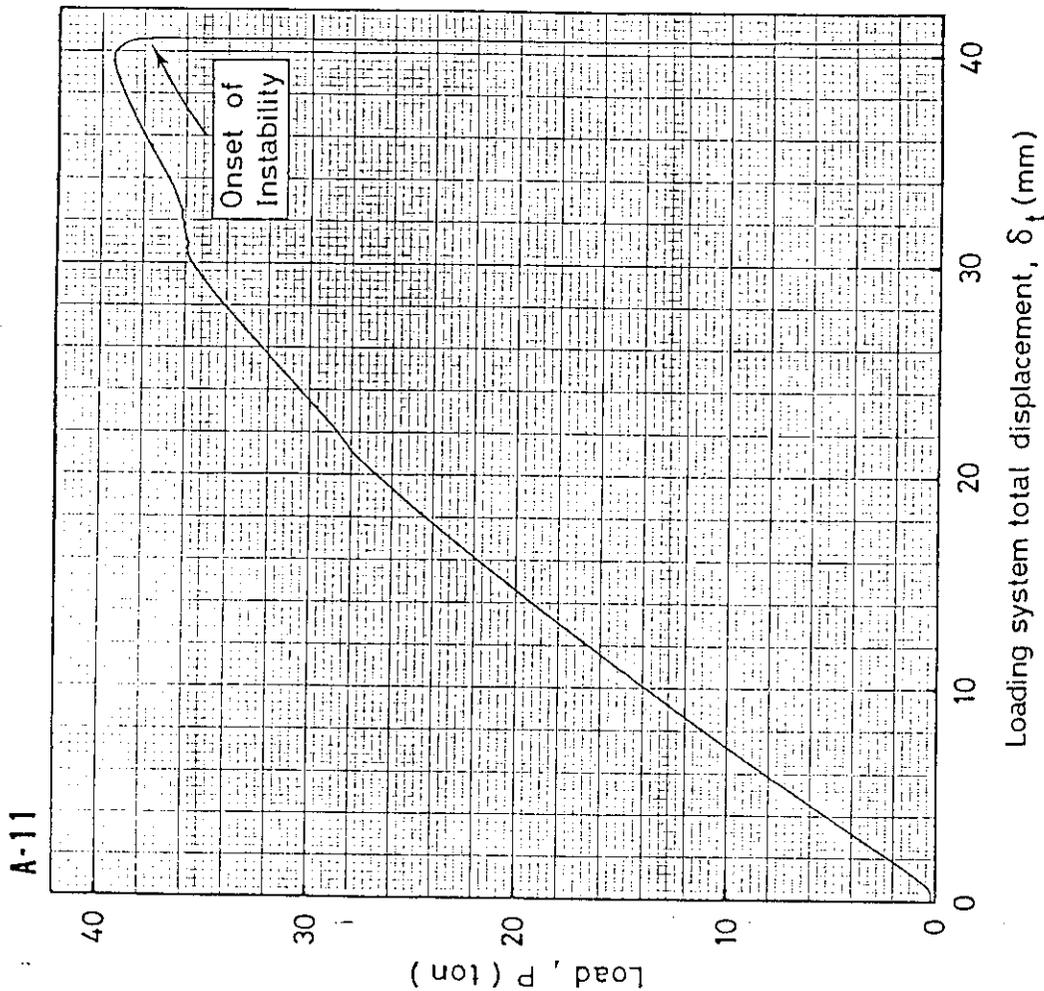


Fig. 4.26 Load-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 9.60×10^{-4} mm/kg (A-11)

B-5

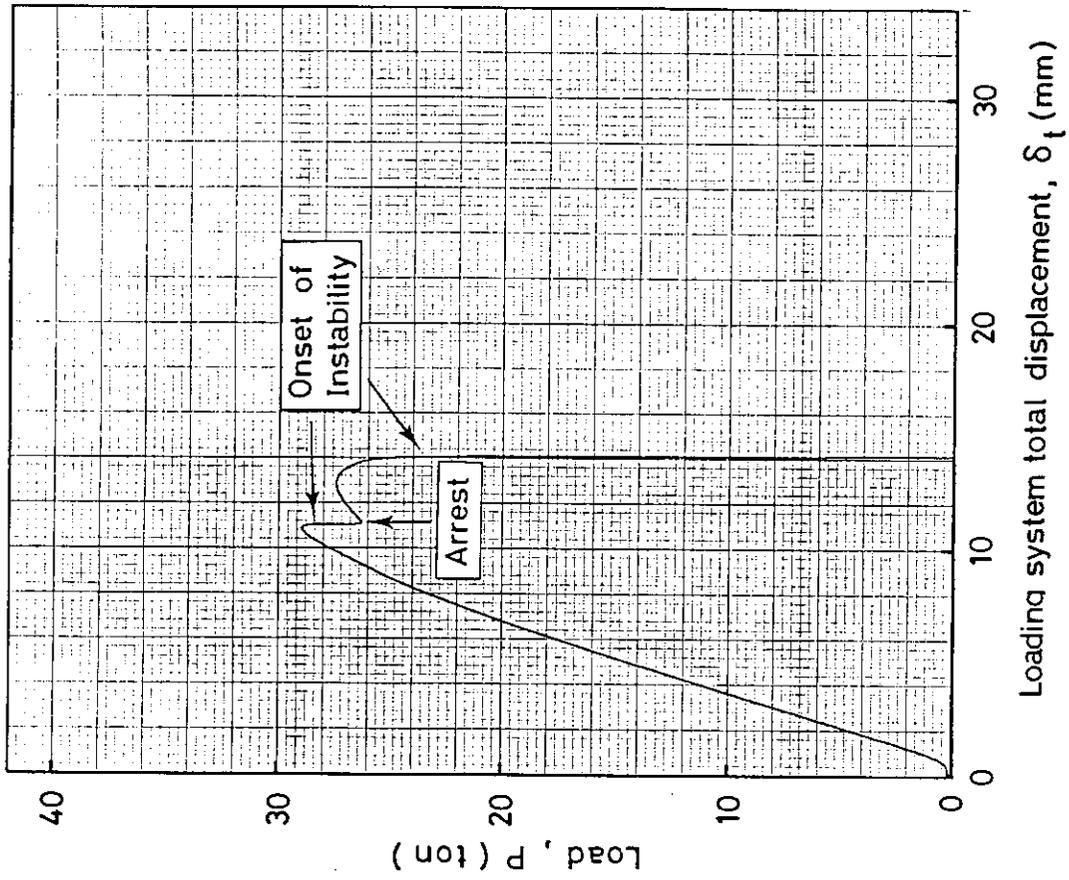


Fig. 4.28 Load-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-5)

B-2

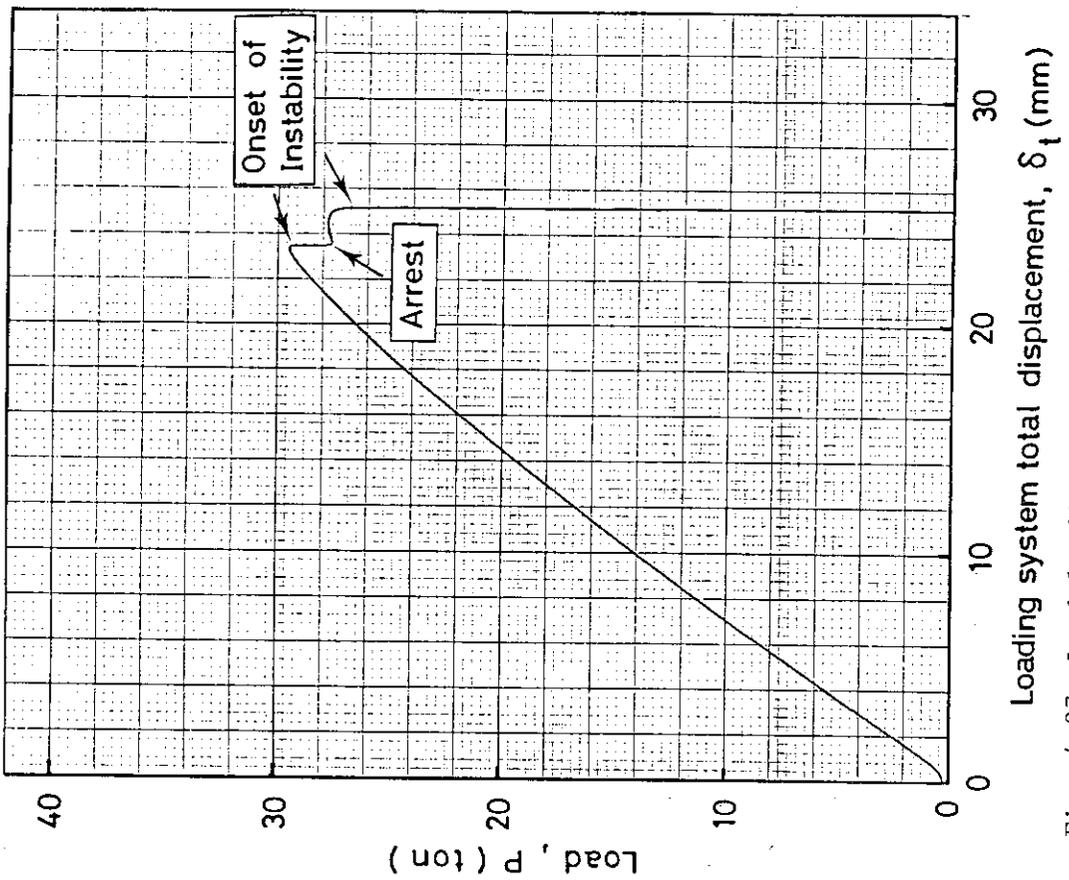


Fig. 4.27 Load-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-2)

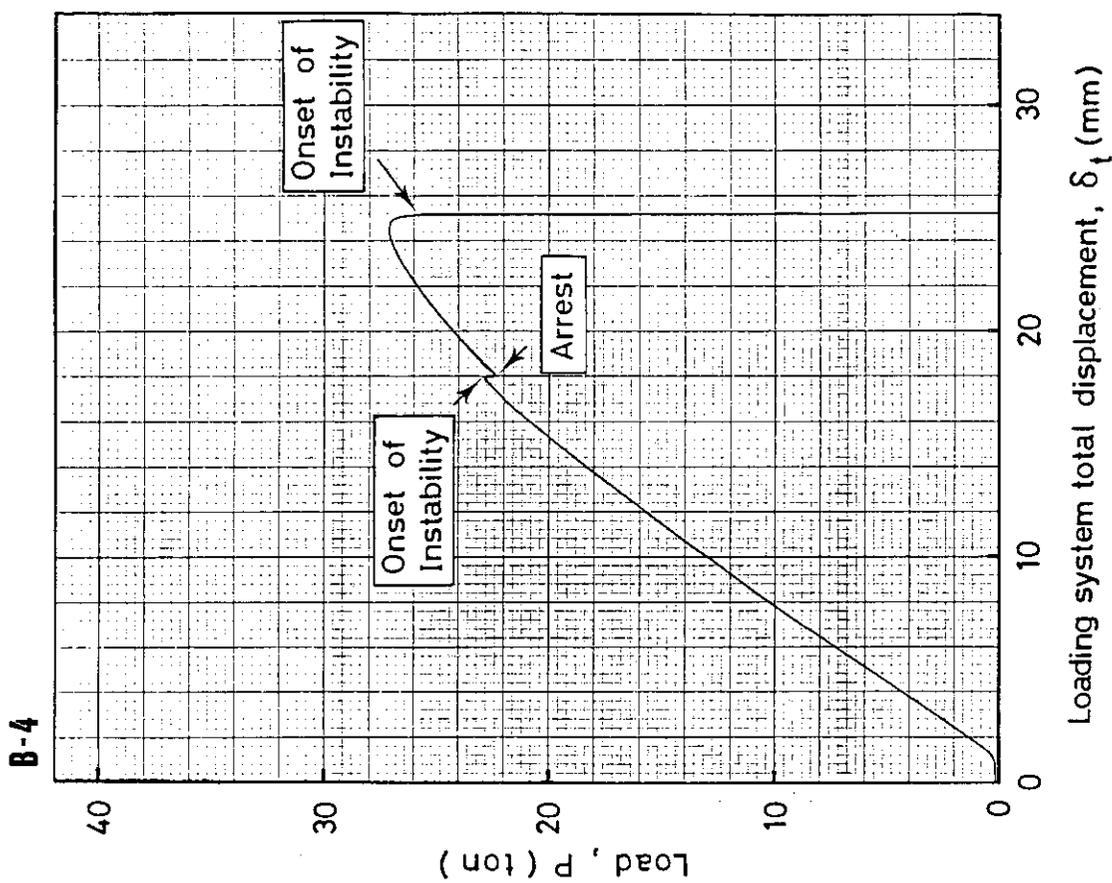


Fig. 4.30 Load-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-4)

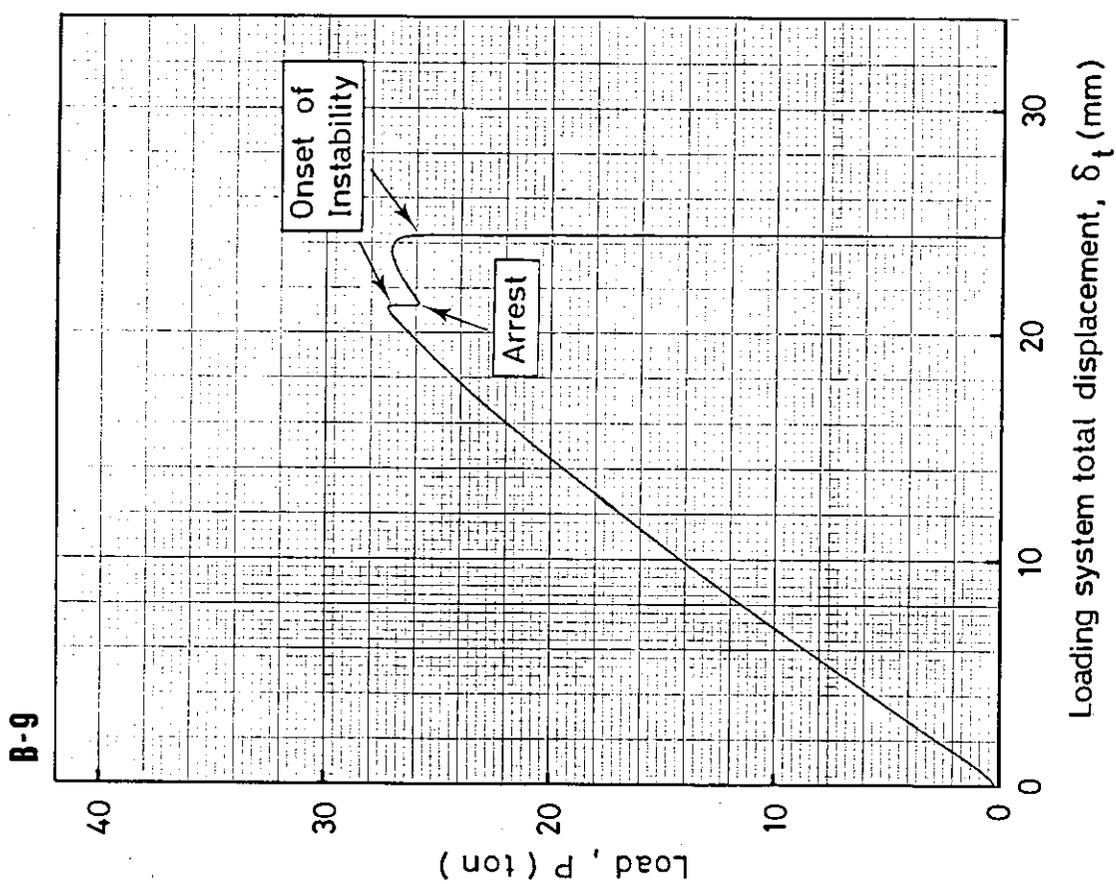


Fig. 4.29 Load-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-9)

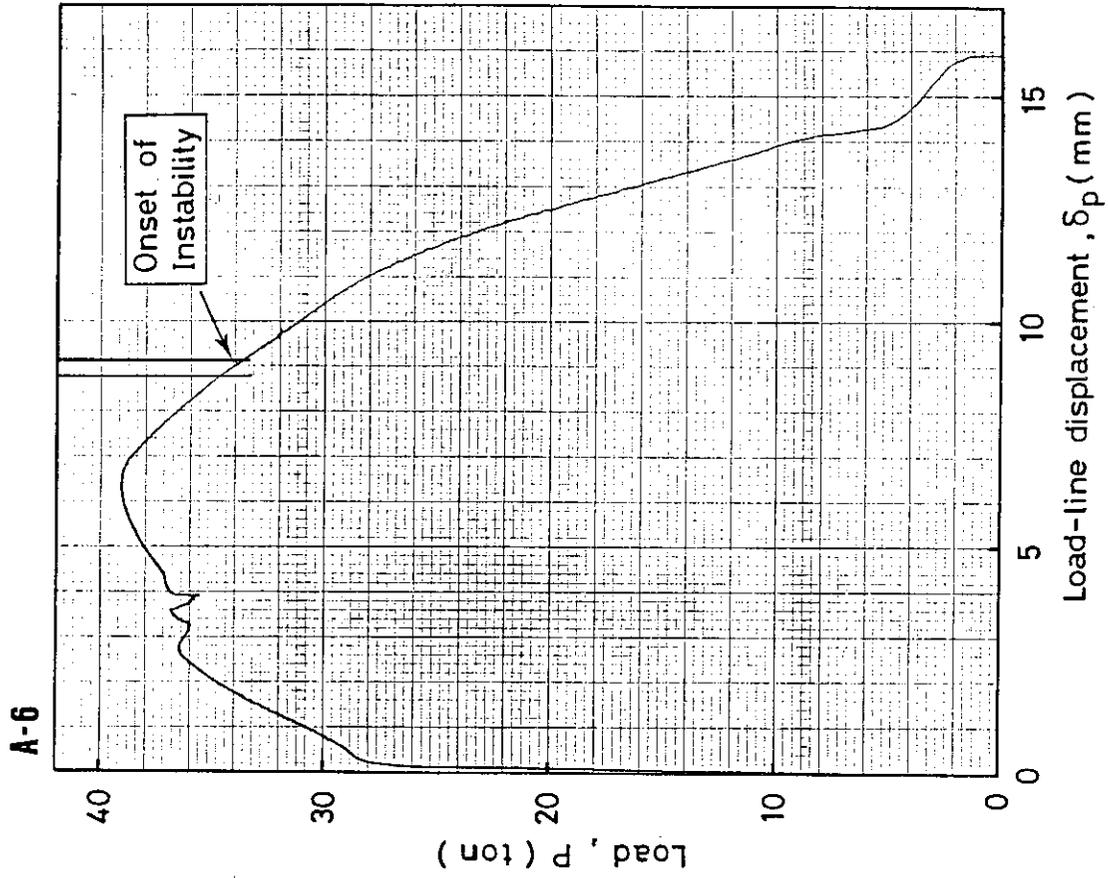


Fig. 4.32 Load-loadline displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.84×10^{-4} mm/kg (A-6)

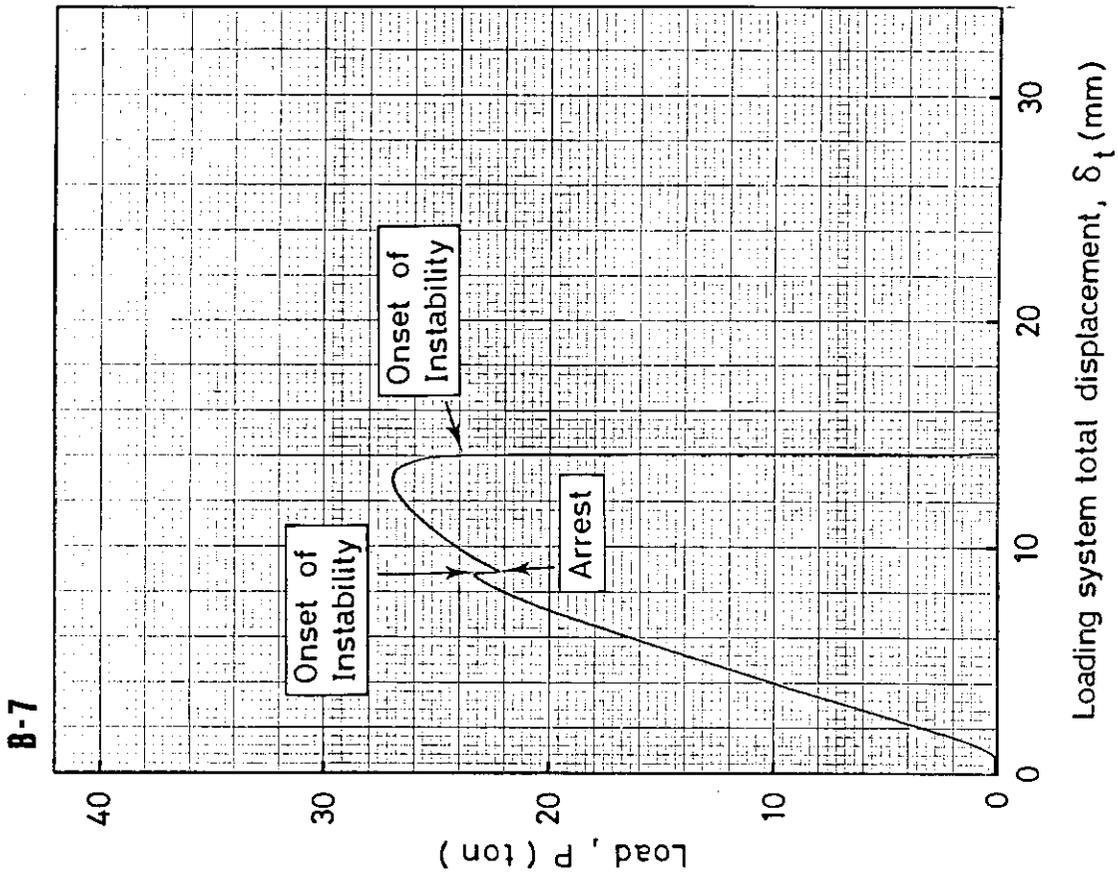


Fig. 4.31 Load-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-7)

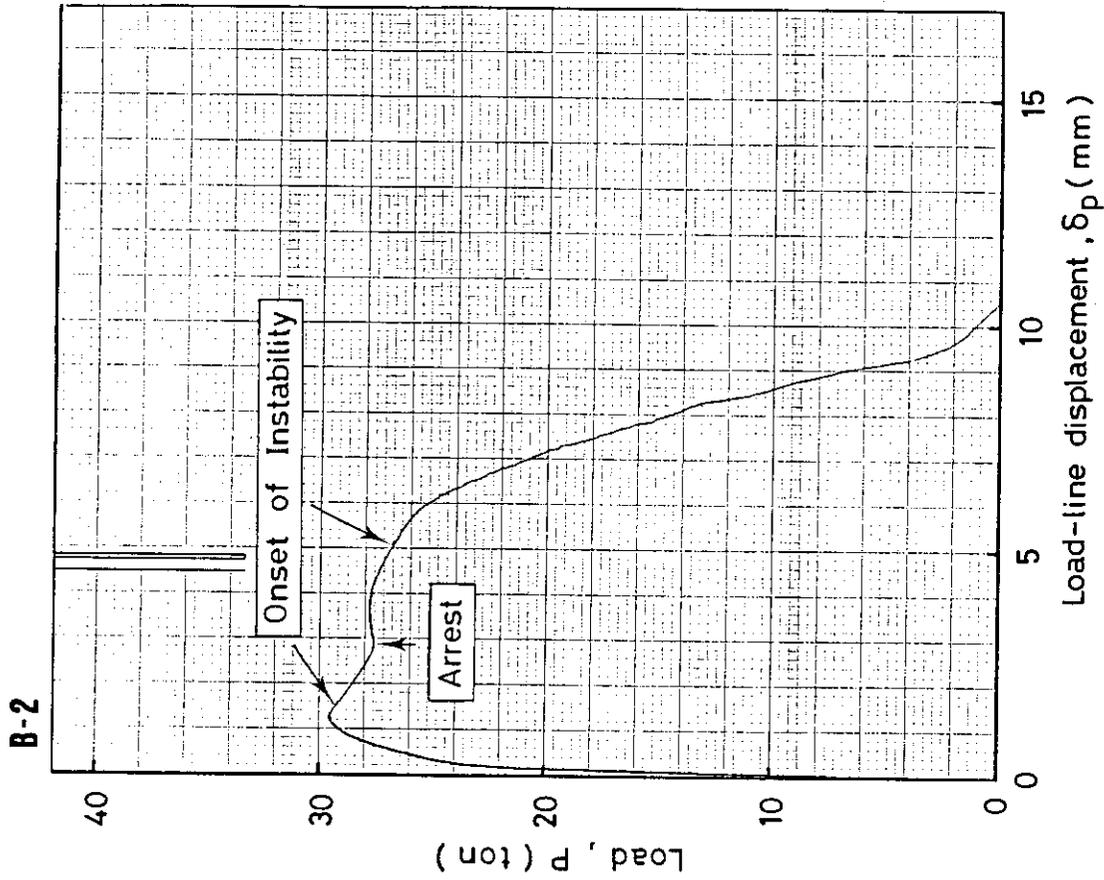


Fig. 4.34 Load-line displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen with under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-2)

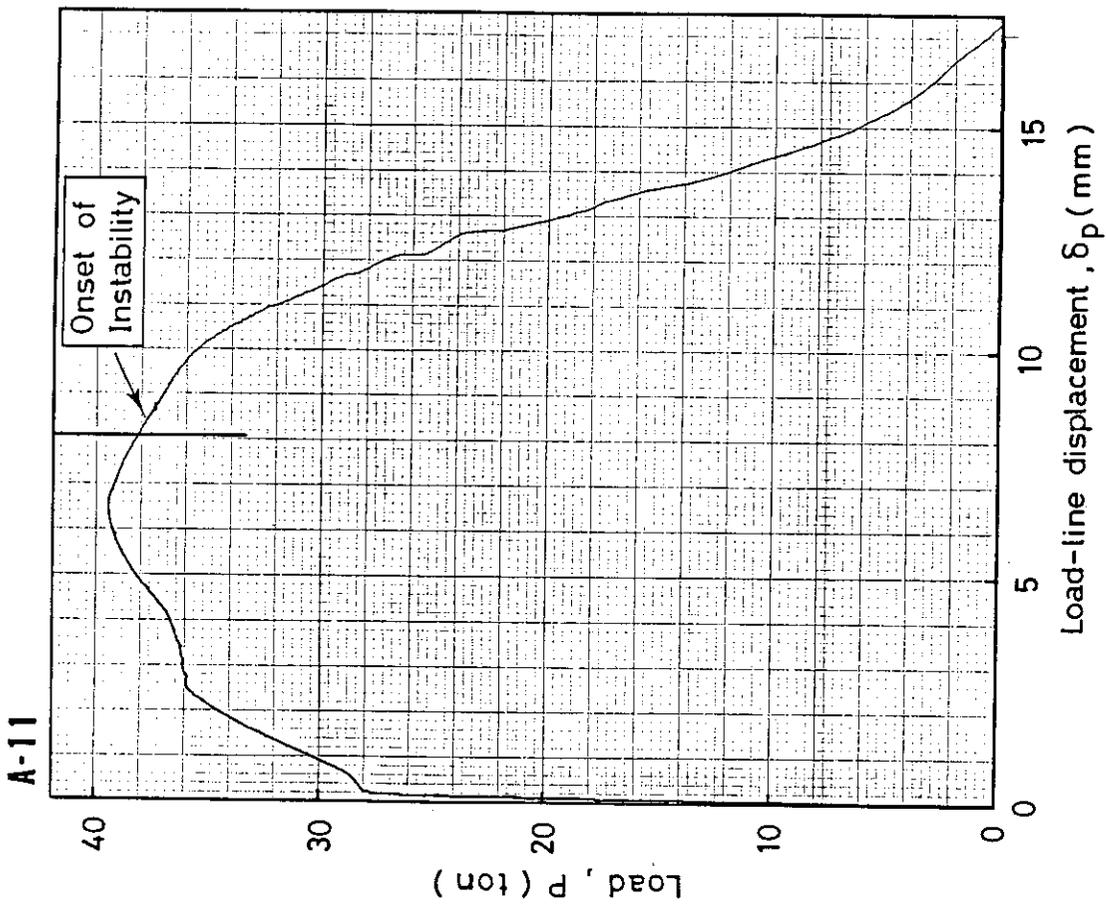


Fig. 4.33 Load-line displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen with under high compliance of 9.60×10^{-4} mm/kg (A-11)

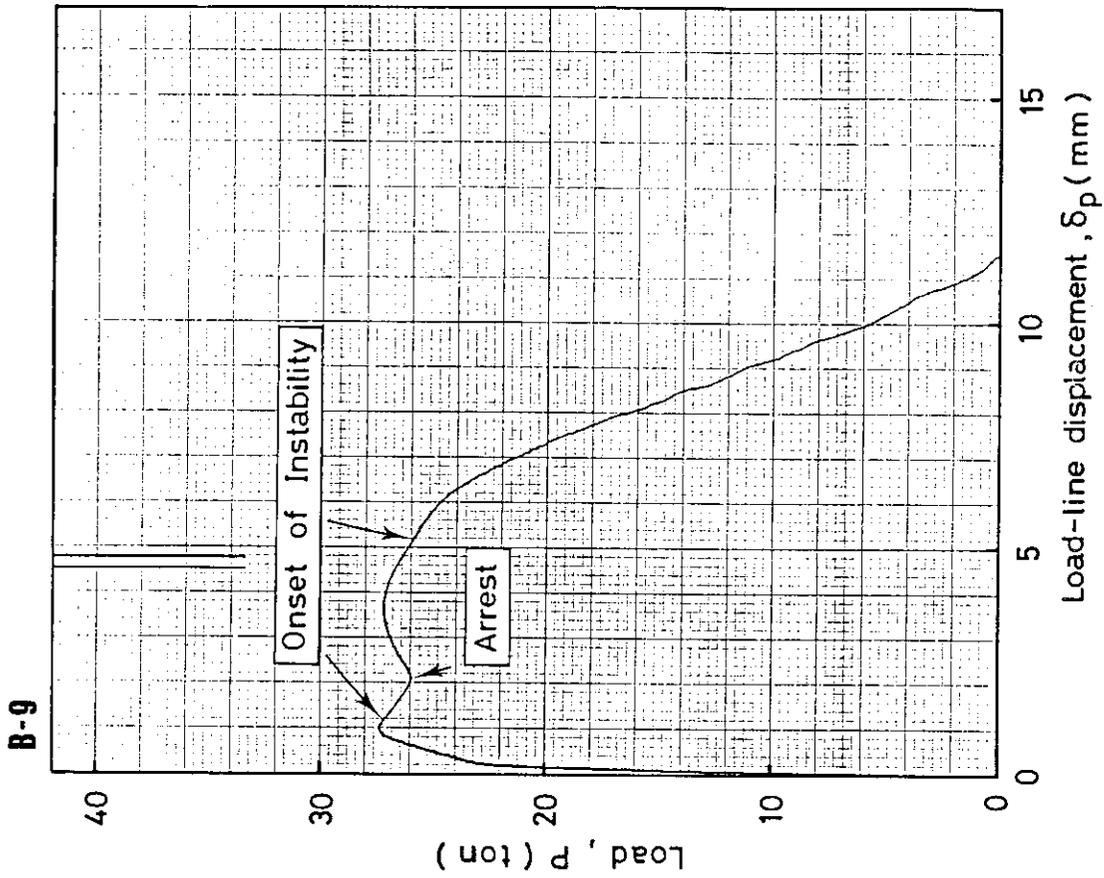


Fig. 4.36 Load-loadline displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen with under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-9)

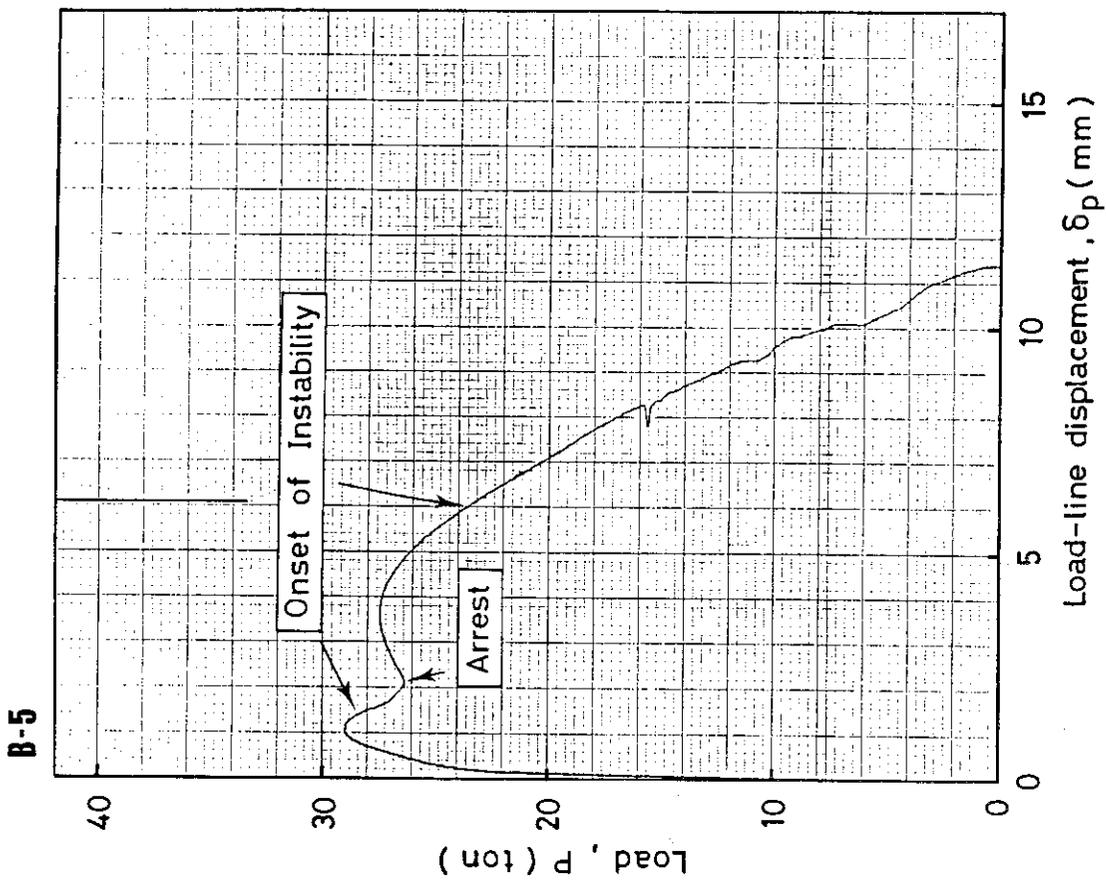


Fig. 4.35 Load-loadline displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen with under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-5)

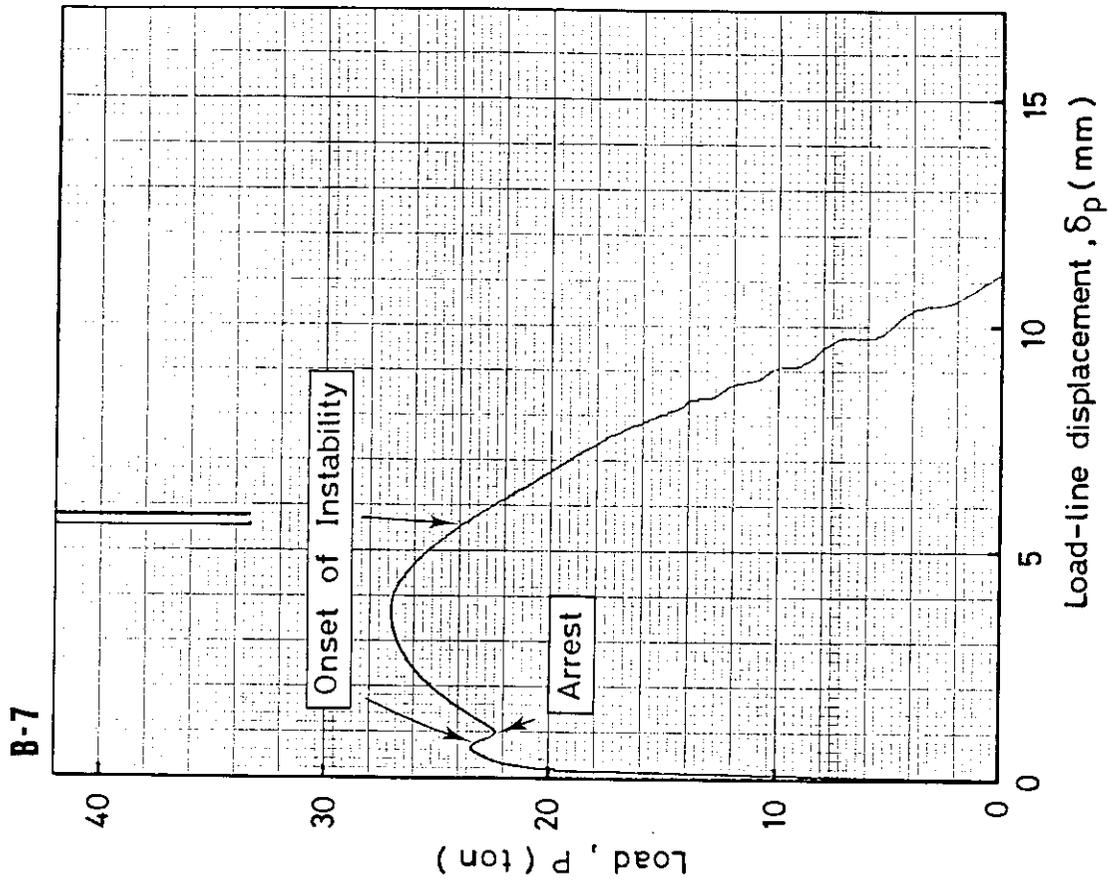


Fig. 4.38 Load-loadline displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen with under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-7)

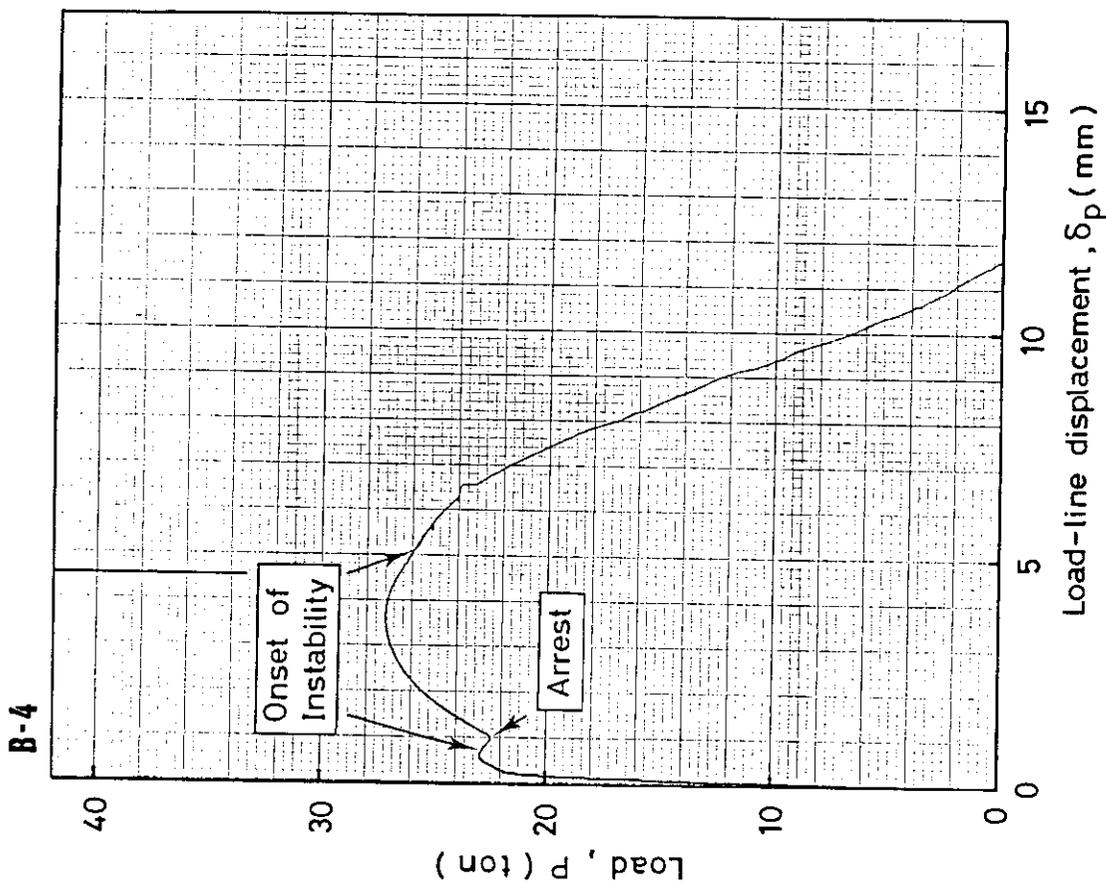


Fig. 4.37 Load-loadline displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen with under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-4)

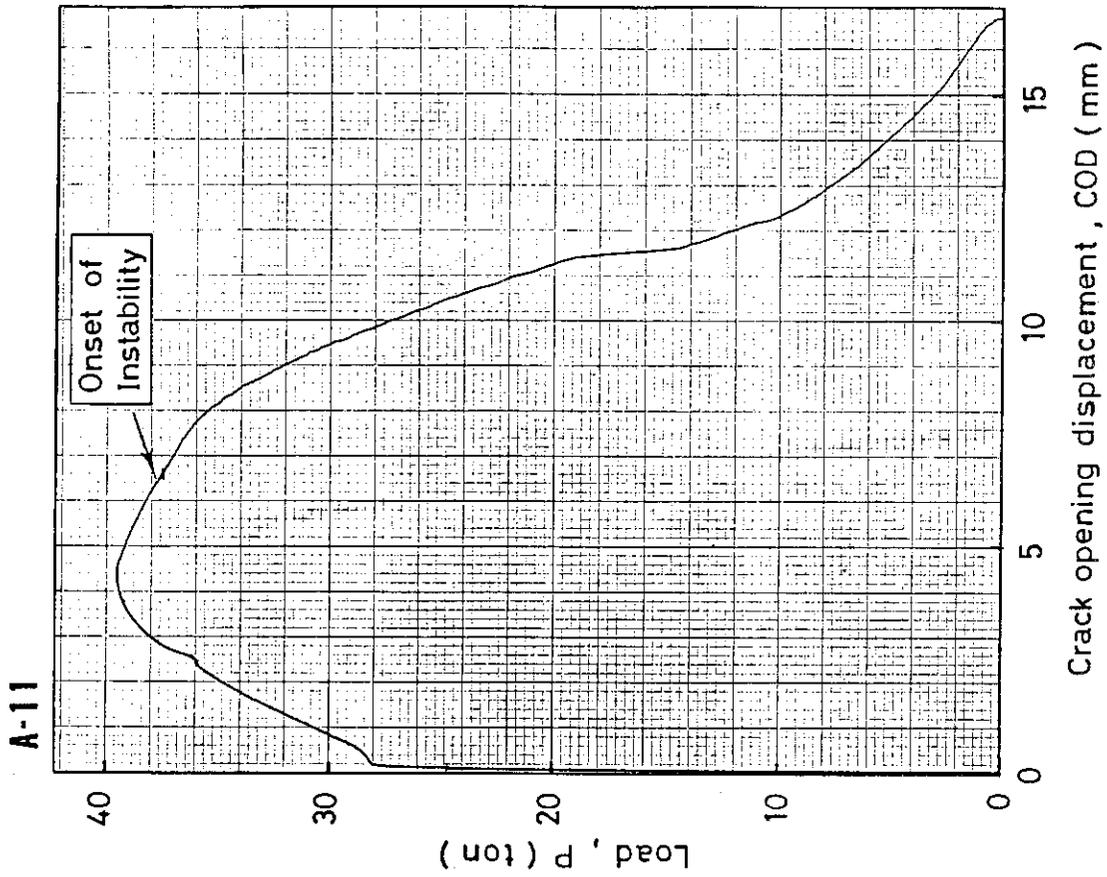


Fig. 4.40 Load-crack opening displacement (COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 9.60×10^{-4} mm/kg (A-11)

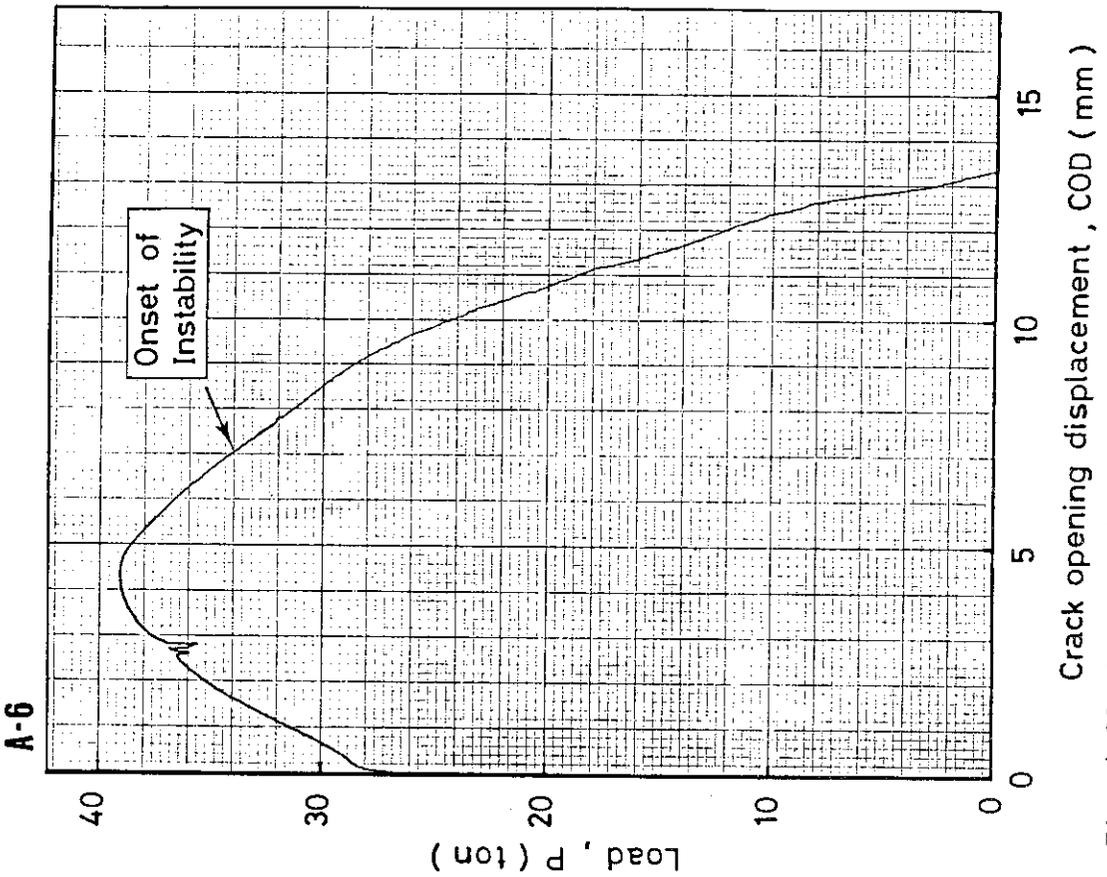


Fig. 4.39 Load-crack opening displacement (COD) curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.84×10^{-4} mm/kg (A-6)

A-11

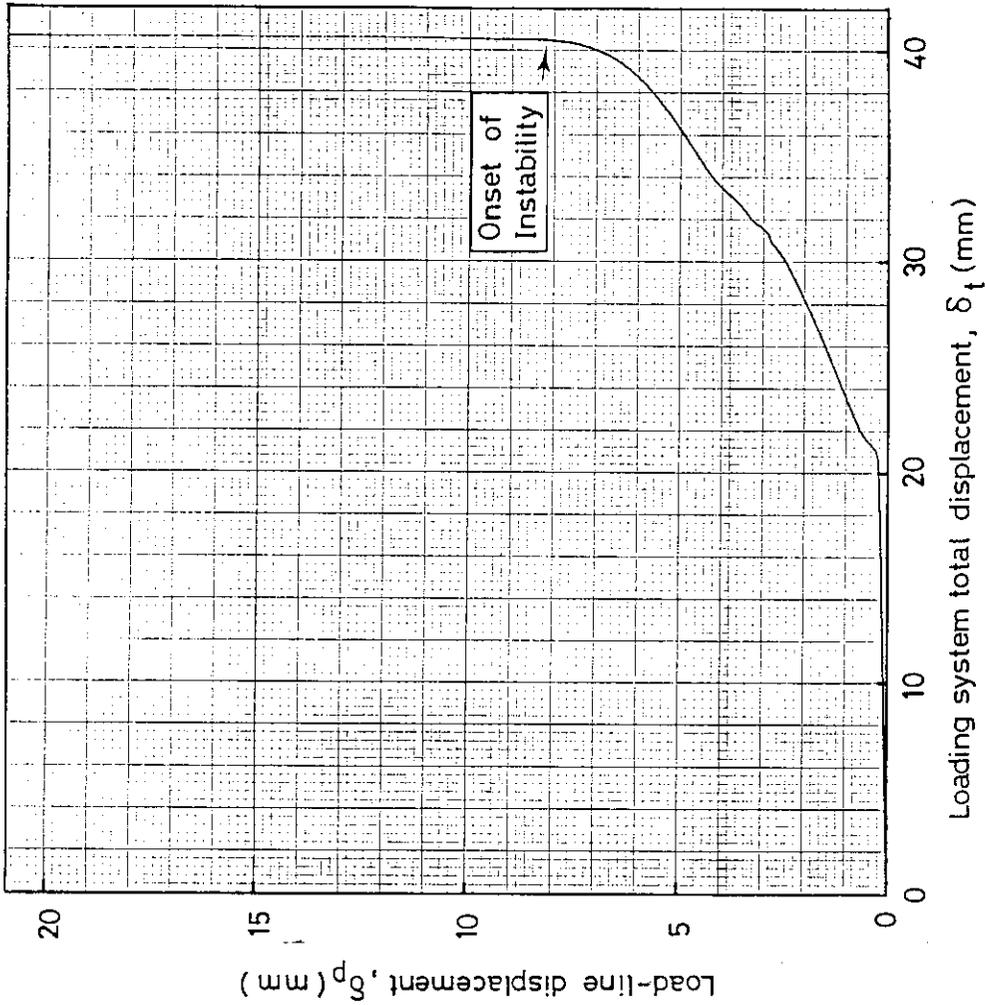


Fig. 4.42 Loadline displacement-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 9.60×10^{-4} mm/kg (A-11)

A-6

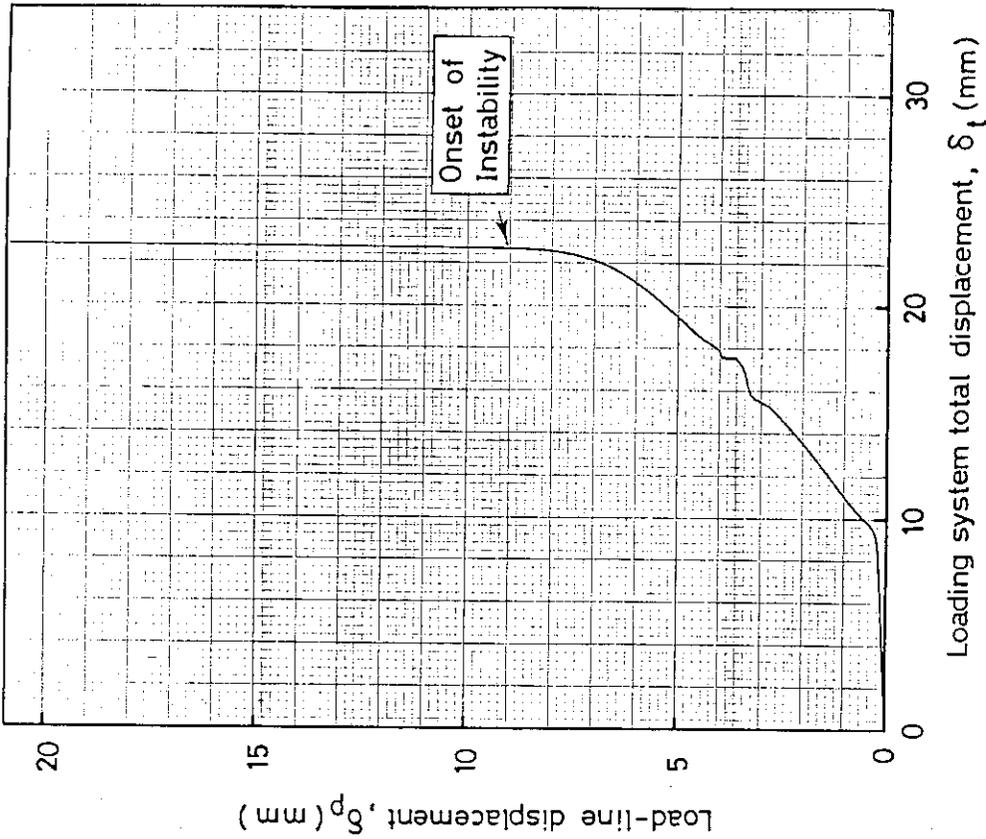


Fig. 4.41 Loadline displacement-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.84×10^{-4} mm/kg (A-6)

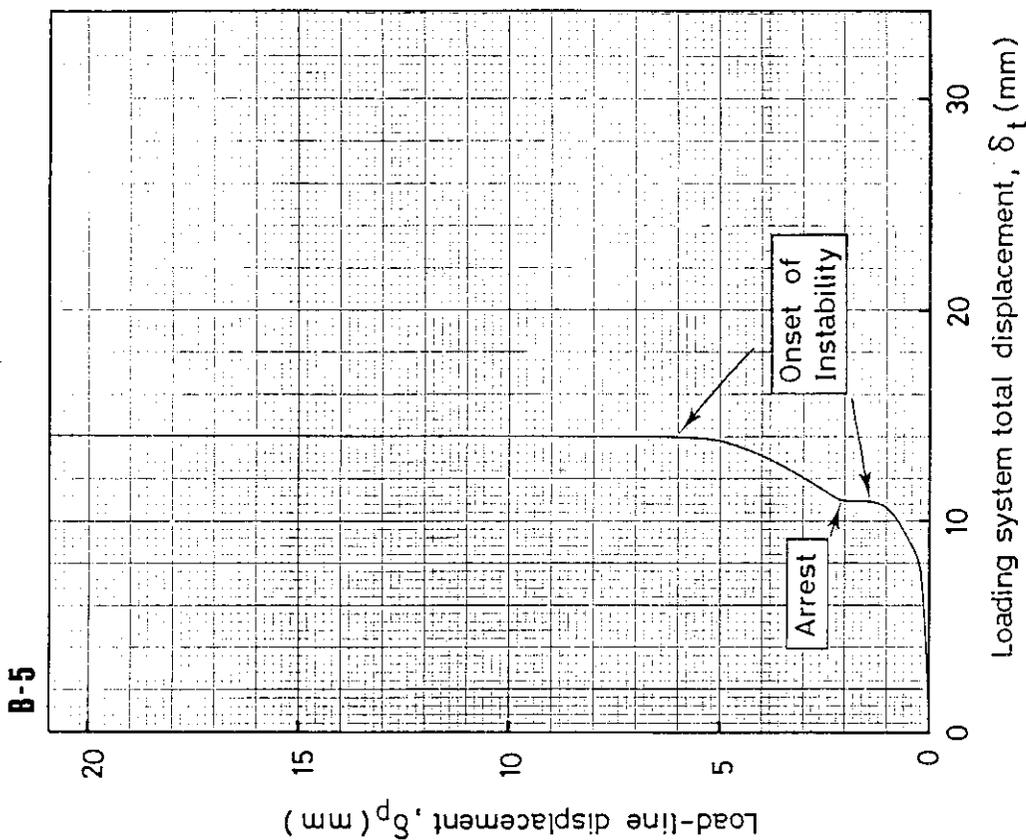


Fig. 4.44 Loadline displacement-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-5)

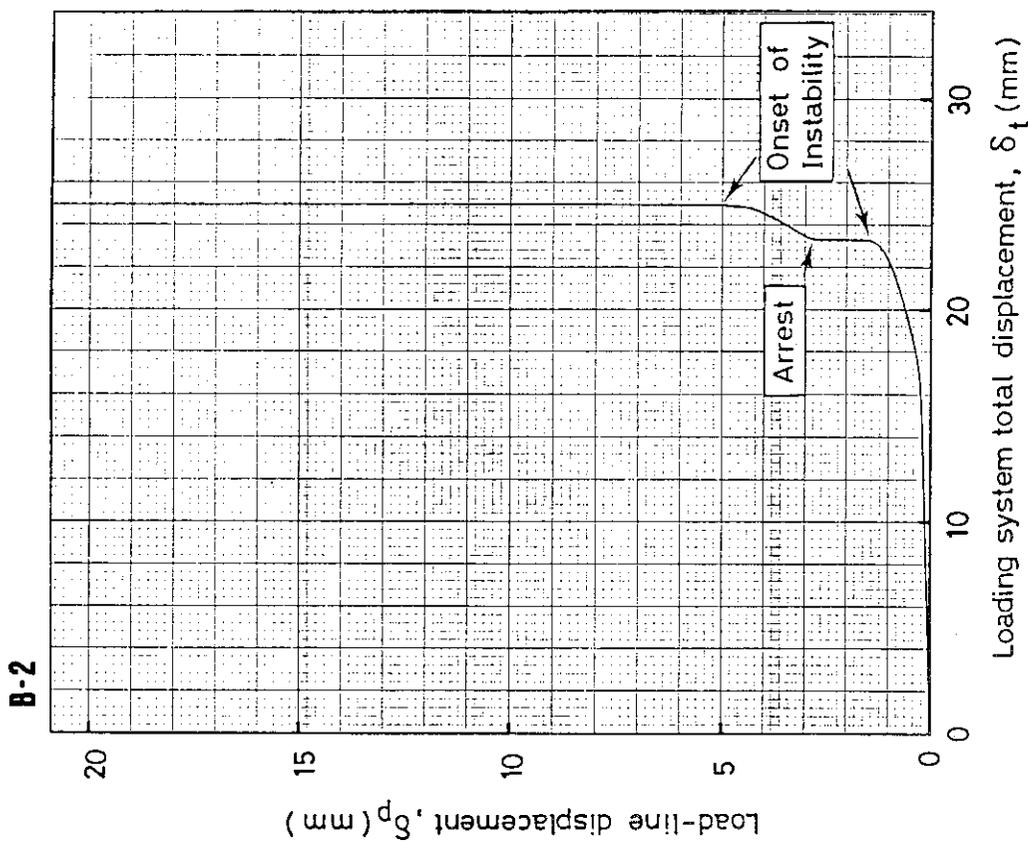


Fig. 4.43 Loadline displacement-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-2)

B-4

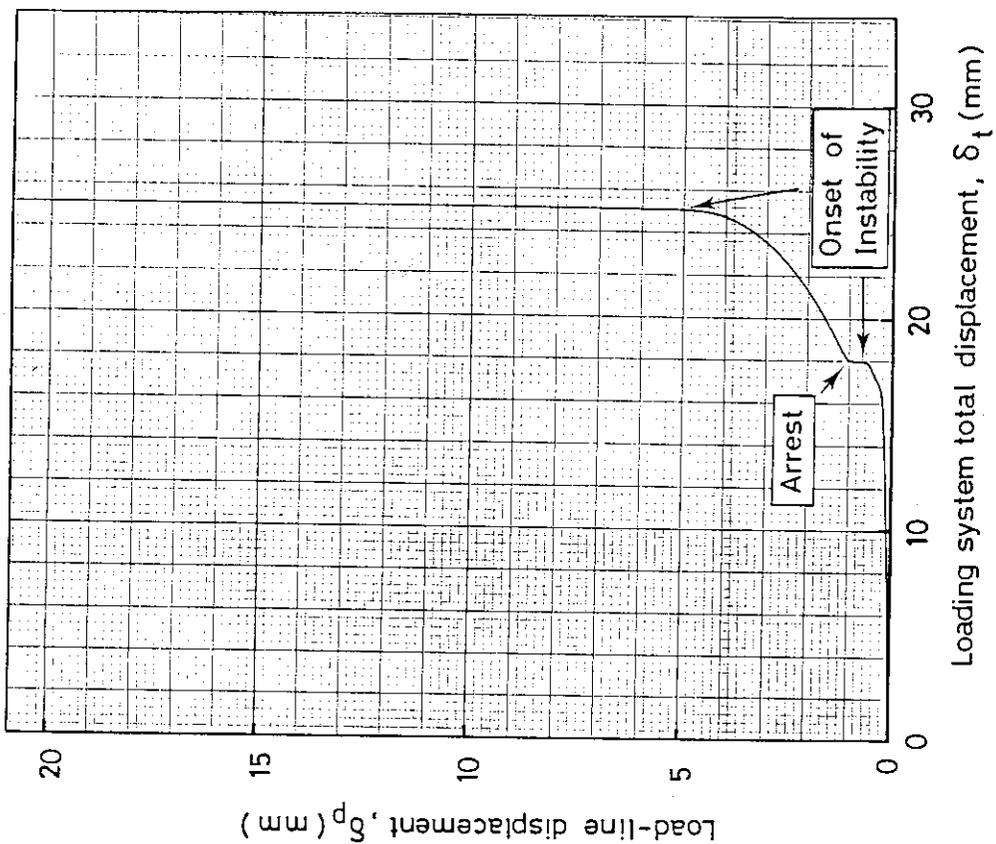


Fig. 4.46 Loadline displacement-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-4)

B-9

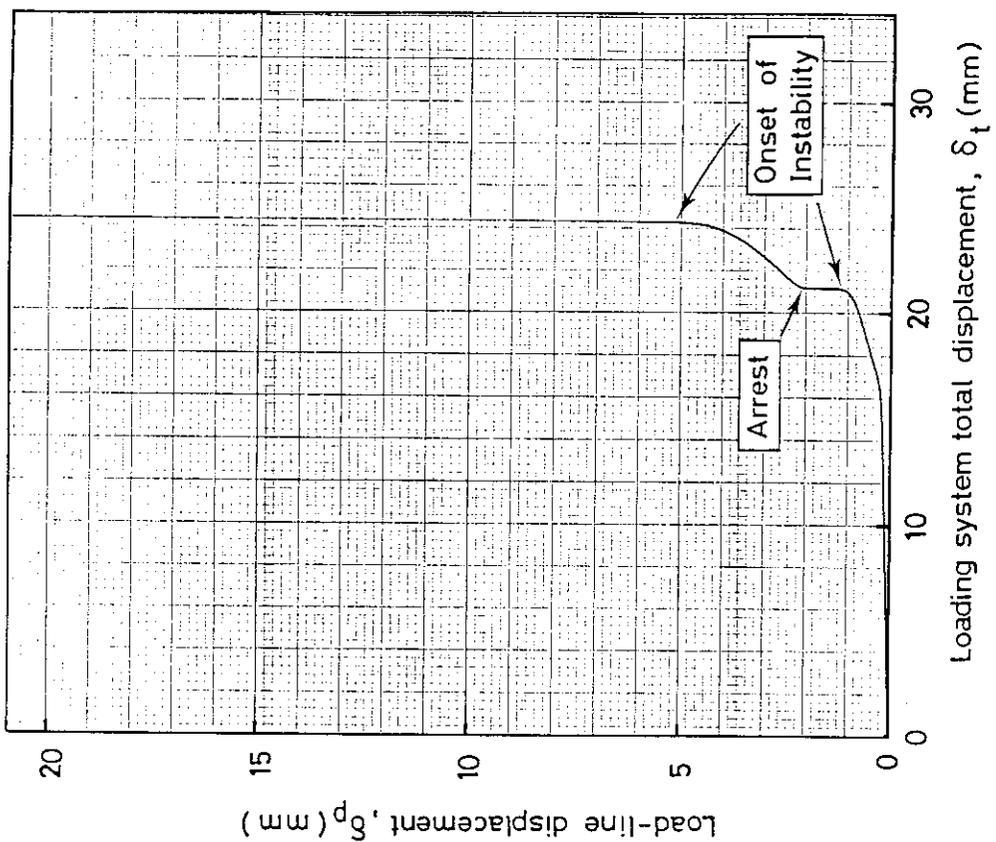


Fig. 4.45 Loadline displacement-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-9)

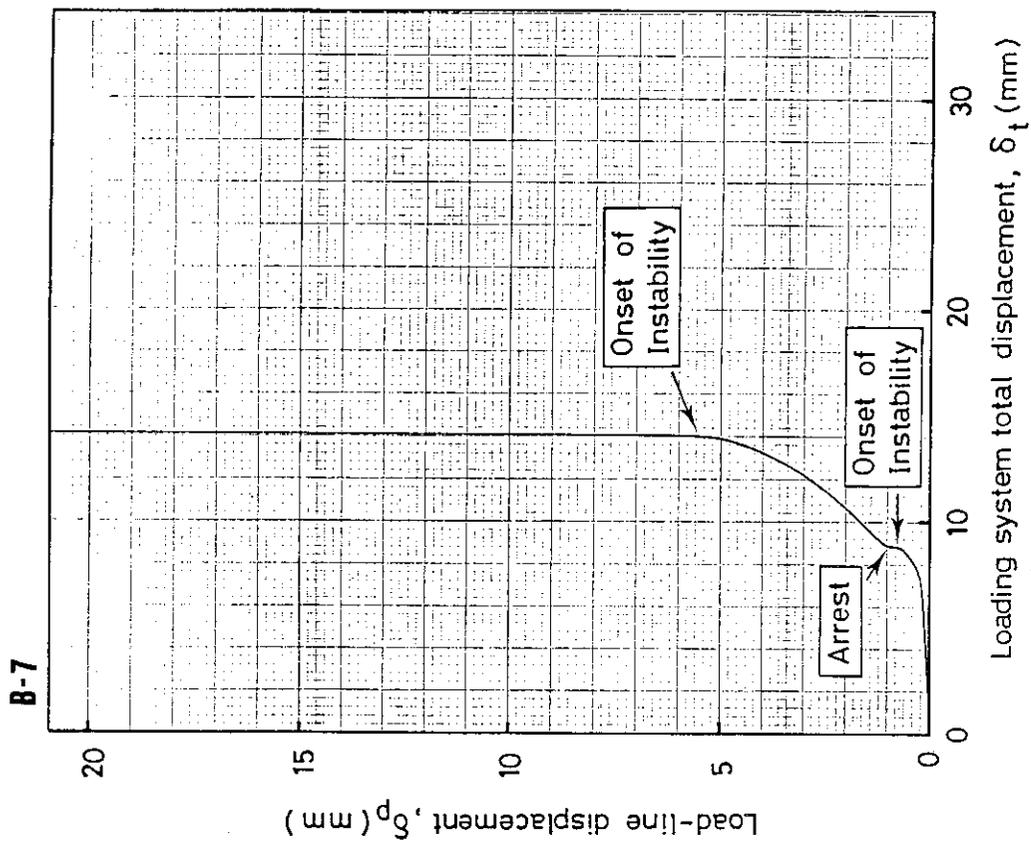


Fig. 4.47 Loadline displacement-loading system total displacement curve for 10mm-thickness CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-7)

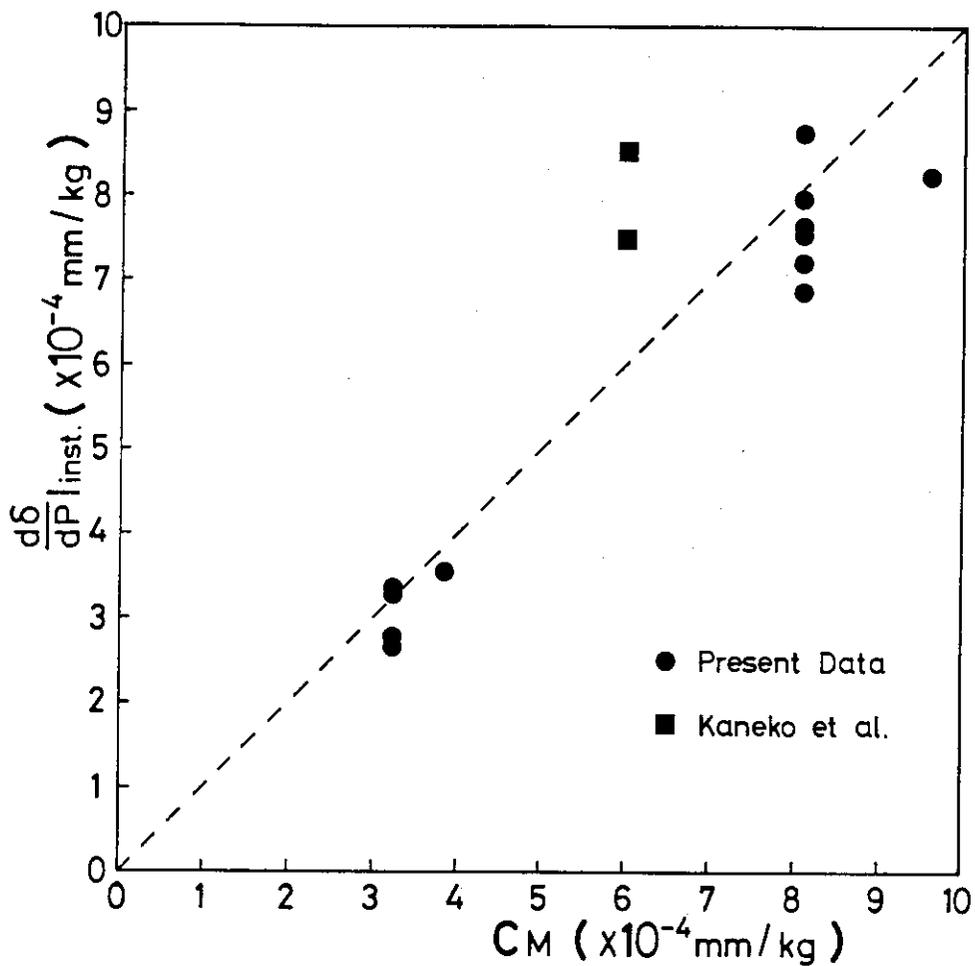
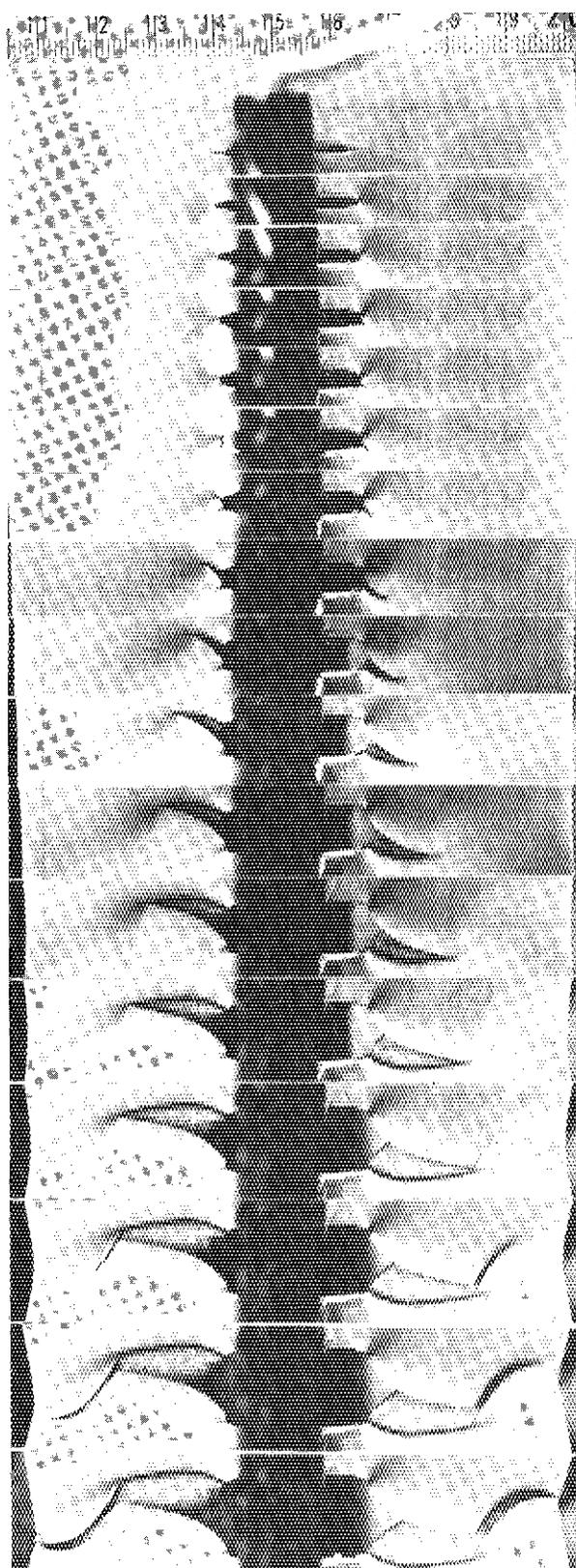


Fig.4.48 Comparison of system compliance and specimen compliance at the onset of instability

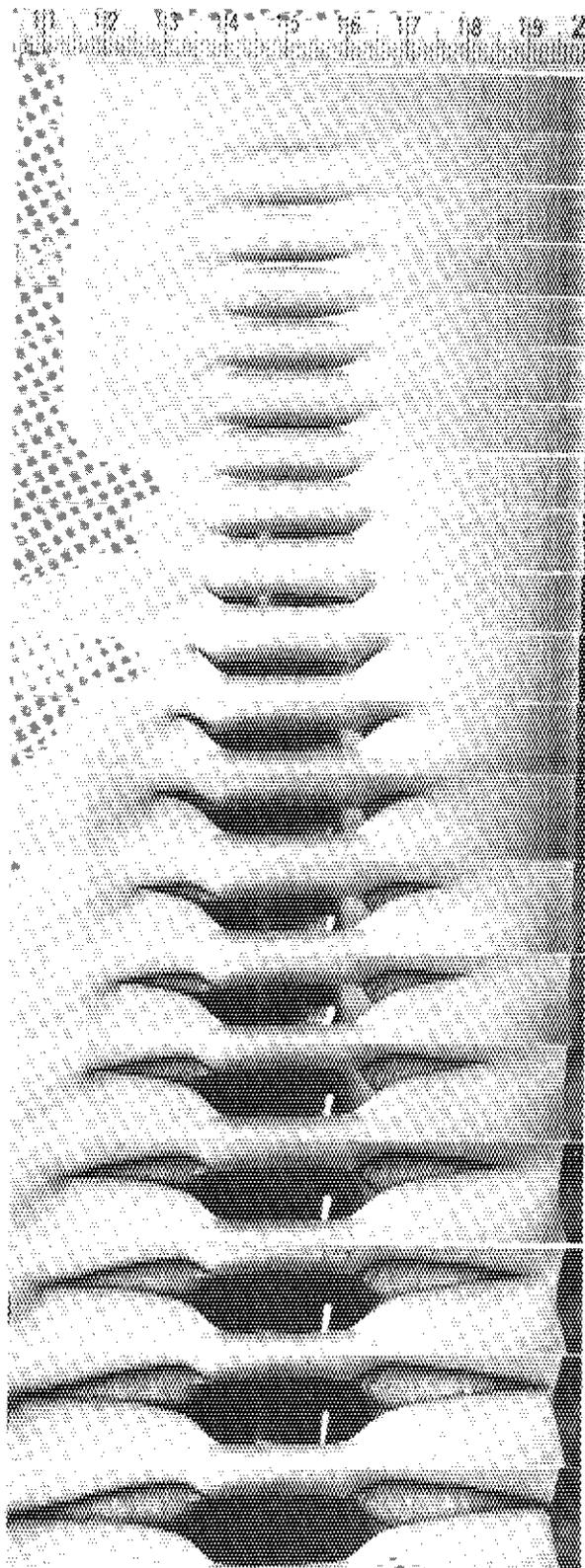
A-4



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
31.3	1.0
35.4	2.0
37.25	3.0
37.45	4.0
38.25	5.0
39.2	6.0
38.75	7.0
36.7	8.0
33.7	9.0
30.2	10.0
26.2	11.0
22.0	12.0
17.4	13.0
12.1	14.0
5.3	15.0
0.4	16.0

Photo. 4.1 Development of stable crack growth in 10mm-thickness through-wall CCT specimen (A-4)

A-2



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
35.0	1.0
36.4	1.5
36.75	1.75
36.8	2.0
37.2	2.5
37.0	3.0
38.0	4.0
39.6	5.0
40.3	6.0
39.6	7.0
36.9	8.0
33.35	9.0
29.4	10.0
24.6	11.0
19.65	12.0
14.2	13.0
8.95	14.0
3.6	15.0
0	16.0

Photo. 4.2 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (A-2)

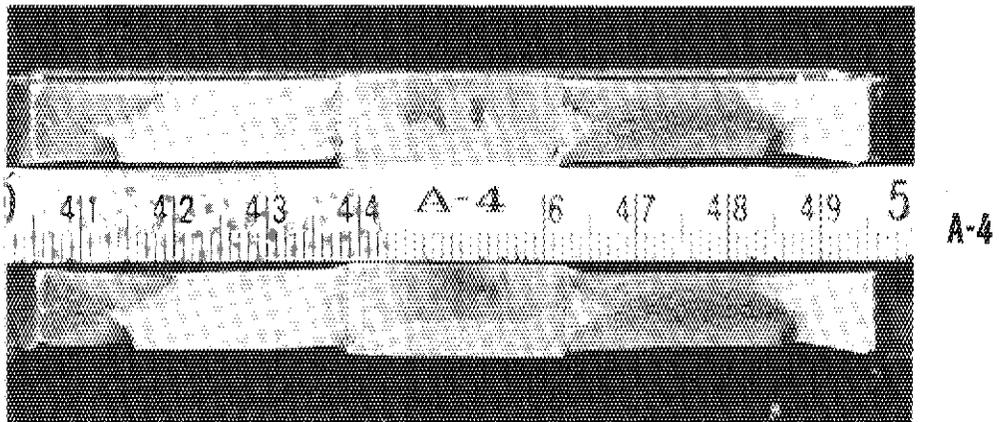


Photo. 4.3 Post-test fracture surface of 10mm-thickness through-wall CCT specimen (A-4)

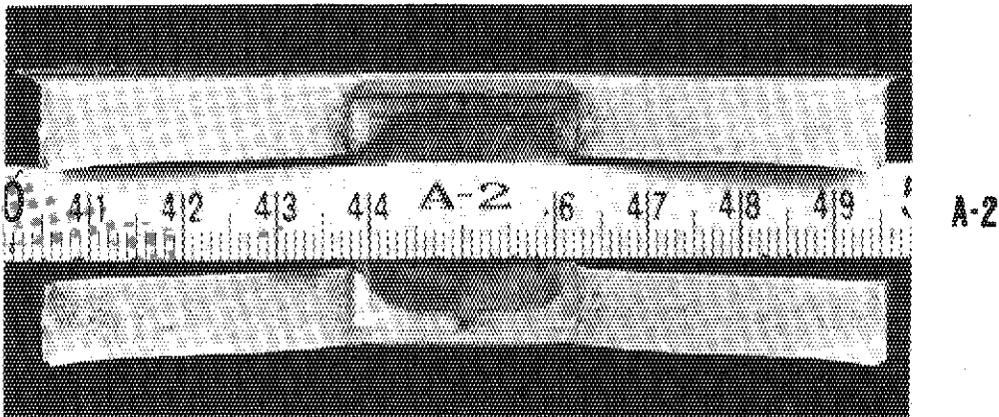
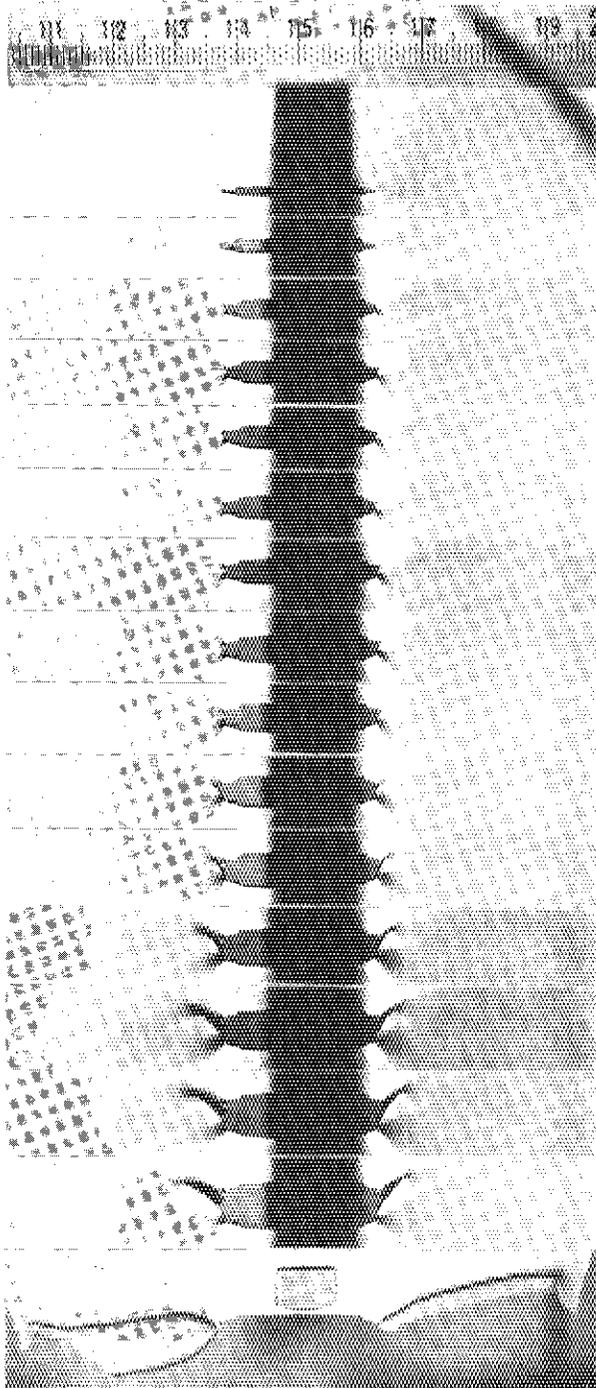


Photo. 4.4 Post-test fracture surface of 10mm-thickness part-through CCT specimen (A-2)

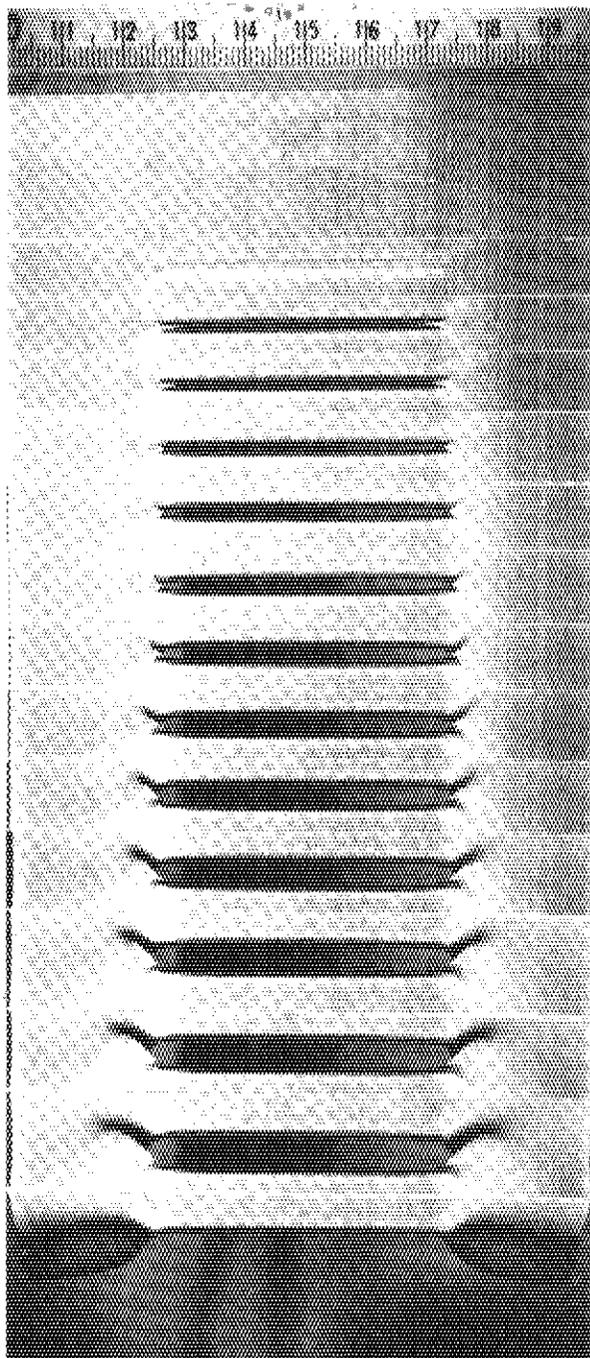
A-11



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
30.3	1.0
34.5	2.0
36.1	3.0
36.3	3.5
36.7	4.0
37.4	4.5
38.2	5.0
38.9	5.5
39.3	6.0
39.5	6.5
39.2	7.0
38.8	7.5
38.2	8.0
37.6	8.5
0	—

Photo. 4.5 Development of crack growth in 10mm-thickness through-wall CCT specimen under high compliance of 9.60×10^{-4} mm/kg (A-11)

B-7



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
23.1	0.5
22.45	0.92
22.35	1.0
23.9	1.5
25.3	2.0
26.2	2.5
26.8	3.0
27.0	3.5
26.95	4.0
26.4	4.5
25.4	5.0
24.05	5.5
22.5	6.0
0	—

Photo. 4.6 Development of crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen under high compliance of $3.23 \times 10^{-4} \text{mm/kg}$ (B-7)

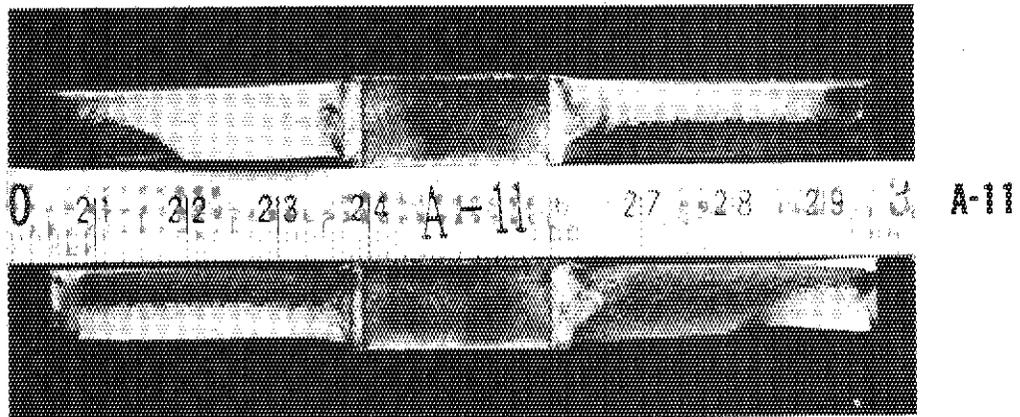


Photo. 4.7 Post-test fracture surface of 10mm-thickness through-wall CCT specimen under high compliance of 9.60×10^{-4} mm/kg (A-11)

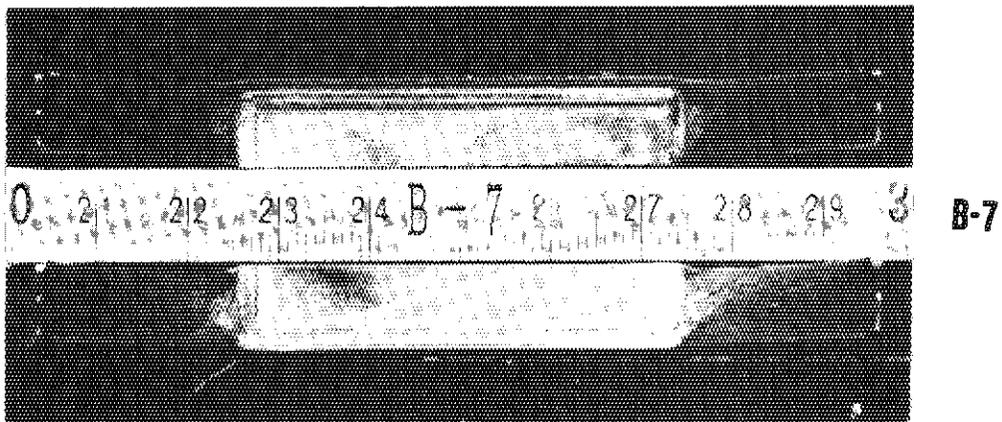


Photo. 4.8 Post-test fracture surface of 10mm-thickness part-through CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-7)

5. 考 察

5.1 J-R 曲線によるき裂進展抵抗の評価

第1報において、中央貫通欠陥を有する平板に対して J-R 曲線を求め、T-クライテリオンを適用し、延性不安定破壊の予測を行った。今回、初期欠陥長さを変えた試験片及び疲労予き裂を導入した試験片を用いた実験を行ったので、前報同様 J-R 曲線の評価を行う。

J 積分値は、Garwood³¹⁾ によるき裂進展を考慮した次式により算出した。

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

ここで、 n は負荷ステップ、 U は $P-\delta_p$ 曲線下の面積から求められるエネルギーであり、A4 及び A7 については全断面降伏を起こしたので、 P -COD 曲線を使用した。

Fig.5.1 に求められた J-R 曲線を示す。前報における J-R 曲線も合わせて示した。今回の結果を前報のそれと比較すると、 $\Delta a = 2$ mm 付近から大きな値を示し始め、その後さらに差が広がってゆく傾向にある。この傾向は、第1報における $t = 25$ mm、 $a/w = 0.5$ 及び 0.7 の場合や第2報におけるステンレス鋼の平板試験結果の場合と一致しており、上式はき裂長さの影響を受けることがわかる。これは、J 支配き裂進展条件として20以上であることが要求される $\omega (= b/J \cdot dJ/da)$ が小さく、つまり塑性域がリガメントに対してかなり大きな範囲に広がっていることによるものと考えられる。

疲労予き裂を導入した試験片 B-10 の結果は、第1報のものと初期き裂長さは同じものの、全体として小さな値を示し、その差は $20 \sim 50$ kg/mm 程度である。き裂が初生したあとの J-R 曲線の傾き (dJ/da) はほぼ一致しており、この差はき裂が初生するまでの J 値の大きさによるものである。き裂初生時の J 値つまり J_{ic} を求める場合は、今回主に用いている放電加工切欠きはやや大きめの J_{ic} を与えると考えられるが、T-クライテリオンを適用して延性不安定破壊を予測する上では、 dJ/da が比較されるため、初期き裂形状の違いはあまり大きな影響を及ぼさないといえよう。

また、Fig.5.1 には柴田ら³²⁾ による STS42 製 6 B Sch 80 配管試験体の J-R 曲線も合わせて示した。配管試験体は切欠き角度 $2\theta = 90^\circ \sim 180^\circ$ のものであり、第1報の結果 ($a/w = 0.5$) とほぼ一致している。柴田らのその後の研究¹⁹⁾ によれば、Pan ら³³⁾ による J 値算出式を用いた他の実験結果は、材料により試験片形状や配管口径及び肉厚に依存する場合があることが指摘されている。ステンレス鋼配管材や炭素鋼配管材などの高靱性の材料に対して、今後初期形状に依存しない J 積分算出法の開発が必要であろう。

5.2 T-クライテリオンによる延性不安定破壊の評価

Paris ら²⁹⁾ によって提案された T-クライテリオンは、材料のもつ延性引裂き抵抗係数 T_{mat} と、負荷される延性引裂き係数 T_{app} の大小関係を基準として延性不安定破壊を論じるものであり、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} T_{mat} > T_{app} & \text{ ならば安定き裂成長} \\ T_{mat} \leq T_{app} & \text{ ならば不安定破壊} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで T_{mat} 及び T_{app} は次式で表わされる無次元引裂き係数である。

$$T_{mat} = \frac{E}{\sigma_f^2} \left(\frac{dJ}{da} \right)_{mat} \quad (3)$$

$$T_{app} = \frac{E}{\sigma_f^2} \left(\frac{\partial J}{\partial a} \right)_{\Delta t} \quad (4)$$

$$\left(\frac{dJ}{da} \right)_{mat} : J-R \text{ 曲線の勾配}$$

$$\left(\frac{\partial J}{\partial a} \right)_{\Delta t} : \text{総変位 } \Delta t \text{ を固定したときの微小き裂進展に対する } J \text{ 積分の変化量}$$

今回の実験では $t = 10\text{mm}$, $a/w = 0.25$ の貫通切欠き条件で、引張試験と延性不安定破壊試験を行ったので、その場合に T-クライテリオンを適用する。

T_{mat} は、前項で得られた A-4 及び A-7 の J-R 曲線より算出し、Fig. 5.2 に示すような J- T_{mat} 線図を得た。

T_{app} は、一般的な構造物に対して算出することは非常に困難であるが、本研究における中央切欠き付平板の引張負荷に対しては、Tada ら³⁴⁾ によりその算出式が与えられている。そこで、前報同様、以下に示す Tada らの算出式を用いて J, T_{app} を算出する。

$$J = b \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \{ \phi_1 (a_{eff}/b, n=1)(P/P_0) + \alpha G_{3n}(a/b, n)(P/P_0)^n \} \quad (5)$$

$$T_{app} = N/D$$

$$N = H_1 (P/P_0)^2 + H_2 (P/P_0)^{n+1} + H_3 (P/P_0)^{2n} \quad (6)$$

$$D = \lambda (1-a/b) \left(\frac{L}{b} + 2BEC_M \right) + (1+\phi_2) \phi_3 + n G_{3n} (P/P_0)^{n-1}$$

$$H_1 = \lambda (1-a/b) \left(\frac{L}{b} + 2BEC_M \right) \left\{ \phi_3 + \frac{2}{1-a/b} \right\} \phi_1$$

$$+ \left\{ (1+\phi_1) (\phi_3 - \phi_4) - \phi_4 + \frac{\phi_1}{1-a/b} \right\} \phi_1 \phi_3$$

$$H_2 = \alpha \left[\begin{aligned} & \lambda (1-a/b) \left(\frac{L}{b} + 2BEC_M \right) \left\{ \phi_5 + \frac{n+1}{1-a/b} \right\} G_{1n} \\ & + \left\{ \phi_5 (1+\phi_1) + (n+1) \left[\frac{\phi_1}{1-a/b} - \phi_4 \right] \right\} (\phi_3 \cdot G_{1n}) \\ & + \left\{ n \left[\phi_3 - \frac{\phi_1}{1-a/b} \right] - \phi_6 (2+\phi_1) \right\} (\phi_1 \cdot G_{3n}) \end{aligned} \right]$$

$$H_3 = \alpha^2 \{ n \phi_5 - (n+1) \phi_6 \} (G_{1n} \cdot G_{3n}) \quad (7)$$

$\phi_1 \sim \phi_6$, $\psi_1 \sim \psi_3$ 及び $G_{1n} \sim G_{3n}$ は文献 34) より図式的に求めた。

上式を用いるにあたって、材料の応力-ひずみ曲線は次式の Ramberg-Osgood 型に近似した。

$$\begin{aligned} \varepsilon / \varepsilon_0 &= \sigma / \sigma_0 + \alpha (\sigma / \sigma_0)^n \\ \sigma_0 &= E \varepsilon_0 \end{aligned} \quad (8)$$

α 及び n の値は、丸棒引張試験結果より、2~12%の範囲のひずみに対して最小二乗近似して求めた。

T_{mat} 及び T_{app} 算出に用いた定数をまとめて以下に示す。

$$\begin{aligned} E &= 1.96 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_t = \sigma_0 = \sigma_y &= 36.7 \text{ kg/mm}^2 \\ \alpha &= 7.0 \\ n &= 5.0 \\ \lambda &= 1 \\ C_M &= 3.84 \times 10^{-4}, \quad 9.60 \times 10^{-4} \text{ mm/kg} \\ &\quad (A-6) \quad (A-11) \end{aligned}$$

A-6 及び A-11 に用いた 2 種類のコンプライアンス C_M に対して算出した $(J-T)_{app}$ 曲線を Fig. 5.3 に示す。 $(J-T)_{mat}$ 曲線としては、前項で求めた J-R 曲線のうち、安全側の評価をするため下限側の A-4 の曲線を選んだ。T-クライテリオンにおいては $(J-T)_{mat}$ と $(J-T)_{app}$ の 2 曲線の交点が延性不安定破壊点であり、それらの値は以下のように求められた。

$$A-6 : J_{inst, cal} = 193.5 \text{ (kg/mm)} \quad [C_M = 3.84 \times 10^{-4} \text{ mm/kg}]$$

$$A-11 : J_{inst, cal} = 155.5 \text{ (kg/mm)} \quad [C_M = 9.60 \times 10^{-4} \text{ mm/kg}]$$

次に、実験結果から延性不安定破壊開始時の J 積分値を求める。Fig. 4.39 及び Fig. 4.40 に示した P-COD 曲線における不安定破壊開始時の荷重から、Fig. 4.18 により Δa を求め、その Δa を用いて Fig. 5.1 の J-R 曲線から延性不安定破壊開始時の J 値、 $J_{inst, exp}$ を求めた。

$$A-6 : J_{inst, exp} = 240 \text{ (kg/mm)} \quad [\Delta a = 9.1 \text{ mm}]$$

$$A-11 : J_{inst, exp} = 187 \text{ (kg/mm)} \quad [\Delta a = 5.3 \text{ mm}]$$

Fig. 5.3 中にこれらの値も示した。

計算値は実験値に比べて 17~20% 小さい値であり、安全側の評価となっている。これは第 1 報における同一材料の結果とほぼ同じ程度の精度である。しかし、第 2 報における、より高靱性のステンレス鋼管材の場合はさらに精度が悪くなることが示されており、T-クライテリオンの適用は材料の破壊挙動、または降伏規模を知ることが必要である。すなわち、T-クライテリオンの基礎となる J 積分に対する塑性領域の大きさの条件が満足できるか、できないかによってこのクライテリオンの適用性が判断できると考えられる。T-クライテリオンを適用する際には T_{app} の算出法が難点となるが、Fig. 5.3 中に P_{max} 時の J 値を示したように実断面応力基準が P_{max} により不安定破壊を論ずるのに対し、T-クライテリオンはより負荷レベル (J 値) の大きい時点での不安定破壊を予測することが可能である。今回用いた炭素鋼配管材の場合は、高靱性材料に対して適用される、後述の実断面応力基準と T-クライテリオンが適用できる材料の中間に位置する靱性レベルを有していると考えられるが、今後さらに精度の良い T-クライテリオン

を開発してゆくことが重要であろう。

5.3 実断面応力基準

5.3.1 流動応力の評価

実断面応力基準を適用する際には、材料の崩壊応力として用いる流動応力 σ_f を精度良く見積る必要がある。そこで本節においては、貫通切欠き付平板試験結果をもとに、 σ_f を決定する。

Table 5.1 に今回試験を行った貫通切欠き付平板試験片の最大荷重 P_{max} 及び最大荷重を初期断面で割った実断面応力値 σ_{net} を示す。Table 5.1 中には、第1報において得られた試験結果も合わせて示してある。第1報においては最大荷重時のき裂進展量を考慮して実断面応力を算出したが、最大荷重時のき裂進展量は予測できないこと及び配管試験においても初期切欠き角度を用いて実断面応力基準を適用していることから、今回は初期断面積を用いて整理した。さらに、初期断面積を用いることにより、安全側の評価をすることができる。

得られた実断面応力 σ_{net} は、 σ_y と σ_{uts} の和の 56~65% の値となった。これらの値は、Fig. 5.4 に示すように板厚に対するリガメント長さの比、 $t/(w-a)$ 、が小さくなるにつれて、すなわち初期断面形状が薄板となるにつれて小さくなる傾向がある。これは、初期断面形状が薄くなるにつれて平面ひずみ状態から平面応力状態へと移行し、拘束が弱くなることが原因と考えられる。さらに、配管試験の場合、 $t/(w-a)$ の値が 0.1 程度のより薄肉となることから、流動応力 σ_f として実験結果の下限より得られる Fig. 5.4 中の直線を $t/(w-a) = 0$ へ外挿することにより、次式を用いることとする。

$$\sigma_f = 0.55 (\sigma_{ys} + \sigma_{uts}) \quad (9)$$

上式で与えられる流動応力を、6 インチ口径 STS42 配管試験結果³²⁾ に適用してみる。Fig. 5.5 にその結果を示す。柴田らは流動応力算出式に係数 0.5 を用いたが、今回の 0.55 を用いることにより貫通き裂及び浅いき裂に対してより良い予測ができるといえよう。

5.3.2 未貫通切欠き付平板への適用

Table 5.2 に未貫通切欠き付平板試験より得られた P_L 及び P_{max} を示す。A-8, A-9, C-1 及び C-2 については P_L 値が大きく、 P_{max} 値は明確には得られなかった。

これらの P_L 及び P_{max} 値を予測する手法が、Hasegawa ら²⁶⁾ によって提案されている。Hasegawa らは SUS304 製未貫通切欠き付平板試験を行い、その結果をもとにき裂貫通荷重 P_A 及び破断荷重 P_B の予測式を得ている。Fig. 5.6 にき裂貫通時の応力分布モデル図を示す。き裂貫通時には切欠き前縁の板厚方向リガメント部分 (面積 A_L) には応力 σ_{ef} が作用し、切欠きの板幅方向リガメント部 (面積 A) には応力 σ_p が作用しているものと仮定する。またき裂貫通後の破断時には、A 部に応力 σ_B が作用するものとする。従って P_A 及び P_B は次式で表わされる。

$$P_A = \sigma_p \cdot A + \sigma_{ef} \cdot A_L \quad (10)$$

$$\text{ここで、} \sigma_p = \sigma_{uts} - (\sigma_{uts} - \sigma_{ys}) \cdot \frac{d}{t}$$

$$\sigma_{ef} = \text{破壊応力}$$

$$\begin{aligned}
 A &= (w-a) \cdot t \\
 A_L &= (t-d) \cdot a \\
 P_B &= \sigma_B \cdot (w-a) \cdot t
 \end{aligned} \tag{11}$$

ここで

$$\sigma_B = \begin{cases} \frac{1}{(0.9)^2} (\sigma_{uts} - \sigma_0) \left(1 - \frac{d}{t}\right)^2 + \sigma_0 & (0.1 \leq d/t \leq 1.0) \\ \sigma_{uts} & (d/t < 0.1) \end{cases}$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{2} (\sigma_{uts} + \sigma_{ys})$$

σ_p 及び σ_B の算出式 SUS 304 平板試験結果より導いたものである。上式を用いて今回の試験片に対する P_A 及び P_B を算出し、Table 5.2 中に示した。なお、上式の σ_0 としては 5.3.1 において求められた式(9)を用い、破壊応力 σ_{ef} としては σ_{uts} を採用した。Fig. 5.7 に、実測値と計算値の比較を示す。破断荷重 P_{max} と P_B は良く一致しているが、き裂貫通時の荷重 P_L と P_A は荷重が大きくなるにつれて次第に差が大きくなり、計算値はかなり小さい値となる。これは初期き裂が小さいため、Fig. 5.6 に示した応力分布のモデル化が適当でなくなることによると考えられる。つまり、 σ_p で表わした領域が実際にはより大きな応力になると考えられる。しかし、計算値はすべての場合について実測値を下回っており、安全側の評価ができる。

以上から、Hasegawa らの式を用い、定数を多少修正することにより未貫通切欠き付平板試験片のき裂貫通荷重及び破断荷重が予測できることが示された。

5.4 LBB 評価に関する検討

5.2 項において、T-クライテリオンに基づく解析は、貫通き裂材に対する不安定破壊を80%程度の精度で予測できることが示された。しかし未貫通き裂の場合には、き裂貫通挙動及び不安定破壊をJ積分を用いて解析することは非常に困難である。

5.3 項においては、実断面応力基準を適用することにより、貫通及び未貫通き裂に対して、き裂貫通時の荷重及び破断荷重が精度良く安全側の評価ができることが示された。

そこで、実際の構造物において重要な未貫通き裂の解析が容易な実断面応力基準を適用することにより、LBB 概念に対する許容欠陥寸法について検討する。

LBB は、き裂が板厚を貫通する時の荷重のピーク値よりも、その後貫通き裂の最大崩壊荷重値が大きく、すなわちき裂貫通後も、材料が崩壊するまでに十分な抵抗を有している場合に成立する考え方であり、今回の実験においては P_L と P_{max} とを比較することによってその成立性を評価できる。

Fig. 5.8 は本試験で得られた P_L / P_{max} の比を、き裂深さ d/t に対してプロットしたものである。 $d/t = 0$ のデータは、無欠陥試験片の最大荷重 P_0 を P_L に代入して求めており、また P_{max} の値は、同一 a/w の貫通切欠き試験片の値を採用している。図に示す通り、 P_L / P_{max} の値は $a/w = 0.50$ の場合には板厚 $t = 10\text{mm}$ と 25mm の両者は同一の曲線で表わされ、 $a/w = 0.25$, 0.50 及び 0.7 に対してそれぞれ1本の曲線で表現できる。前述のように、この P_L / P_{max} の値が 1.0 以下であれば、LBB は成立する。図中の3本の曲線と $P_L / P_{max} = 1.0$ の直線との交

点を求め、その値を $a/w-d/t$ グラフにプロットしたものが Fig. 5.9 である。実験的に得られた LBB が成立する欠陥寸法は、図中の 3 点を結ぶ曲線の上側の範囲となる。

次に、5.2 項において用いた Hasegawa らの荷重算出式により、LBB の評価を行う。式(10)及び式(11)を用い、 $P_A \leq P_B$ を満足する a/w と d/t の関係を求めると、Fig. 5.9 中に示す破線となる。実験より得られた曲線と比較すると、 $a/w = 0.4$ から 0.7 の範囲では精度良く予測できているといえるが、 a/w が 0.4 以下の小さいき裂及び 0.7 以上の大きいき裂に対する予測は、LBB 成立範囲を大きく見積ることがわかる。これは、5.3.2 で述べた小さいき裂の場合に P_L 値を過小評価すること、及び 5.3.1 で述べた、リガメント部の形状が厚肉となることによる実際の流動応力値の増大が原因となっているものと考えられる。

図中の一点鎖線は設計基準となる $P_A = 3 S_m$ を満足するように式(10)を用いて求めた曲線でありその曲線の左下側は設計上、安全である。

したがって、今後 LBB 評価を進めてゆく上で、 $3 S_m$ 線から $a/w \leq 0.4$ 及び $a/w > 0.7$ の範囲において精度良く P_L 及び P_{max} を予測できる式の開発が重要である。

さらに、実構造物において存在すると仮定されるき裂形状は通常楕円形であり、今回用いた矩形は特異なケースである。楕円形き裂の場合には、き裂の板厚貫通挙動が異なると考えられ、実断面応力基準における応力分布のモデル化には注意する必要がある。

Table 5.1 Net-section stress σ_{net} at maximum load for through-wall CCT specimens

Specimen No.	Notch Width a/w	Thickness t (mm)	Max. Load P_{max} (ton)	σ_{net} , kg/mm ²	$\sigma_{net}/(\sigma_y + \sigma_{uts})^*$
A-4	0.25	10	39.25	52.3	0.565
A-6	0.25	10	39.1	52.2	0.564
A-7	0.25	10	39.1	52.2	0.564
A-11	0.25	10	39.5	52.7	0.569
B-10	0.50	10	25.95	52.5	0.567
☆ TP-01	0.50	25	70.2	56.2	0.607
☆ TP-02	0.50	25	70.4	56.3	0.608
☆ TP-03	0.50	25	69.6	55.7	0.602
☆ TP-06	0.70	25	44.5	59.3	0.640
☆ TP-07	0.70	25	44.4	59.2	0.639
☆ TP-08	0.70	25	44.7	59.6	0.644
☆ TP-111	0.50	10	27.0	54.0	0.583
☆ TP-121	0.50	10	27.4	54.8	0.592
☆ TP-112	0.50	10	26.6	53.2	0.575
☆ TP-211	0.50	10	27.3	54.6	0.590
☆ TP-212	0.50	10	26.9	53.8	0.581

$$* \begin{cases} \sigma_y = 36.7 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_u = 55.9 \text{ kg/mm}^2 \end{cases}$$

☆ Reference 20

Table 5.2 Crack penetration load P_L and collapse load P_{max} for part-through CCT specimens

Specimen No.	Penetration Load P_L (ton)	Max. Load P_{max} (ton)	Calculated Load	
			P_A (ton)	P_B (ton)
A-1	36.4	40.4	33.3	38.55
A-2	36.8	40.4	33.3	38.65
A-8	38.1	—	31.4	26.3
A-9	38.3	—	31.6	26.4
B-1	29.9	28.2	25.15	25.8
☆B-2	29.55	27.8	25.5	25.8
B-3	24.15	27.7	21.4	25.6
☆B-4	22.95	27.2	21.1	25.6
☆B-5	29.0	27.45	25.1	25.8
B-6	29.1	27.75	25.05	25.8
☆B-7	23.4	27.05	21.6	25.6
B-8	23.75	27.25	21.4	25.7
☆B-9	27.35	27.20	24.5	25.8
C-1	67.2	—	47.0	38.9
C-2	69.1	—	46.5	38.9
C-3	48.0	45.3	35.7	38.6
C-4	48.3	45.4	35.1	38.6

☆ High Compliance Test

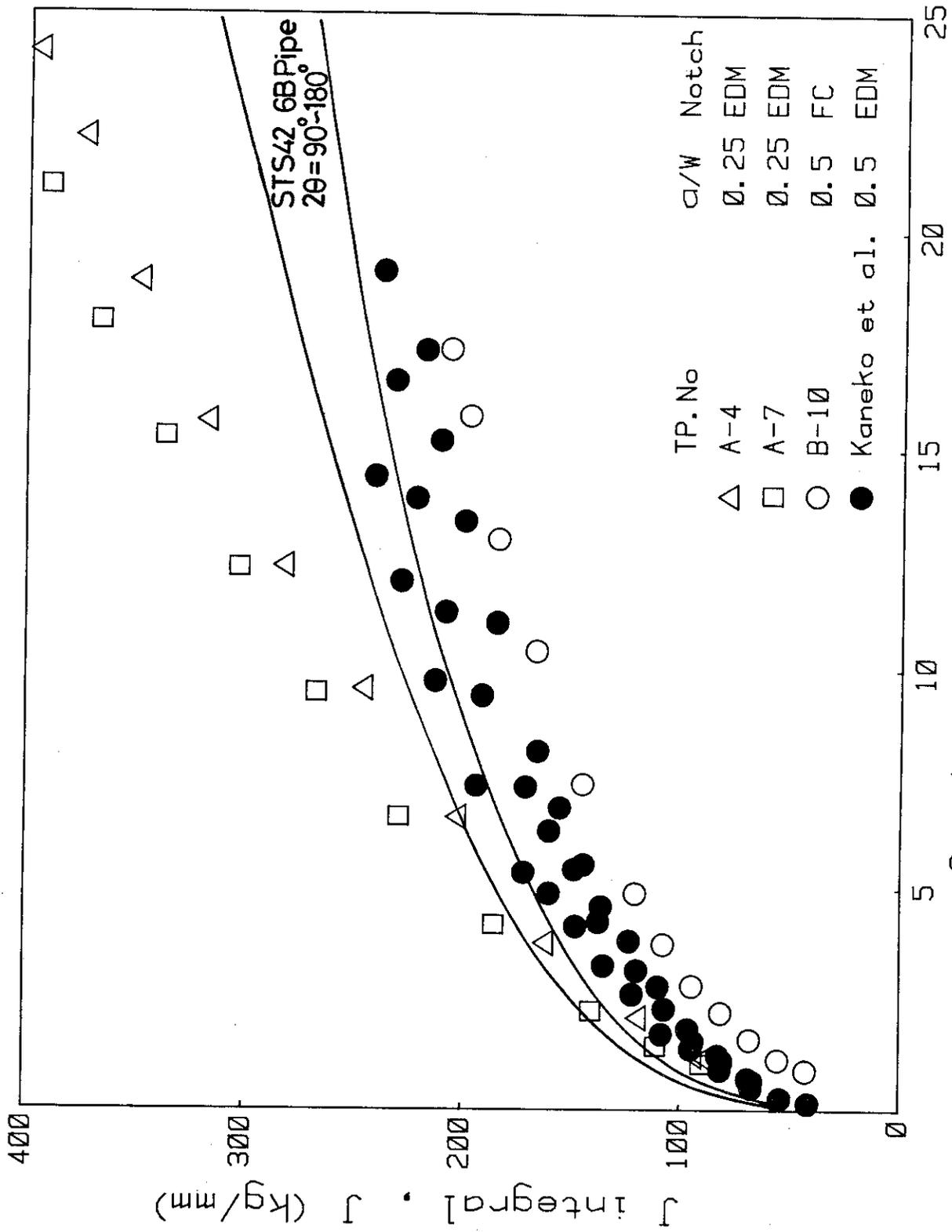


Fig.5.1 J-R curves for STS42 CCT specimens and 6in.dia. pipe specimens

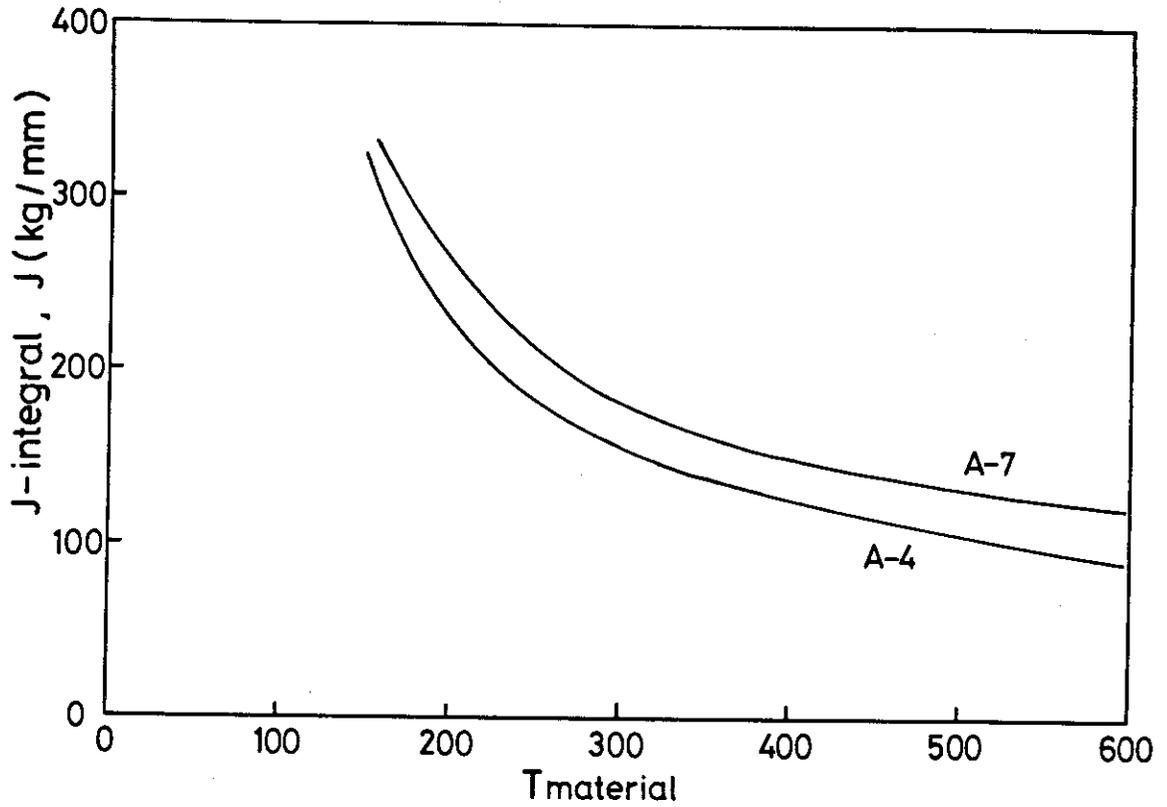


Fig.5.2 J-T_{mat} curves for STS42 CCT specimens

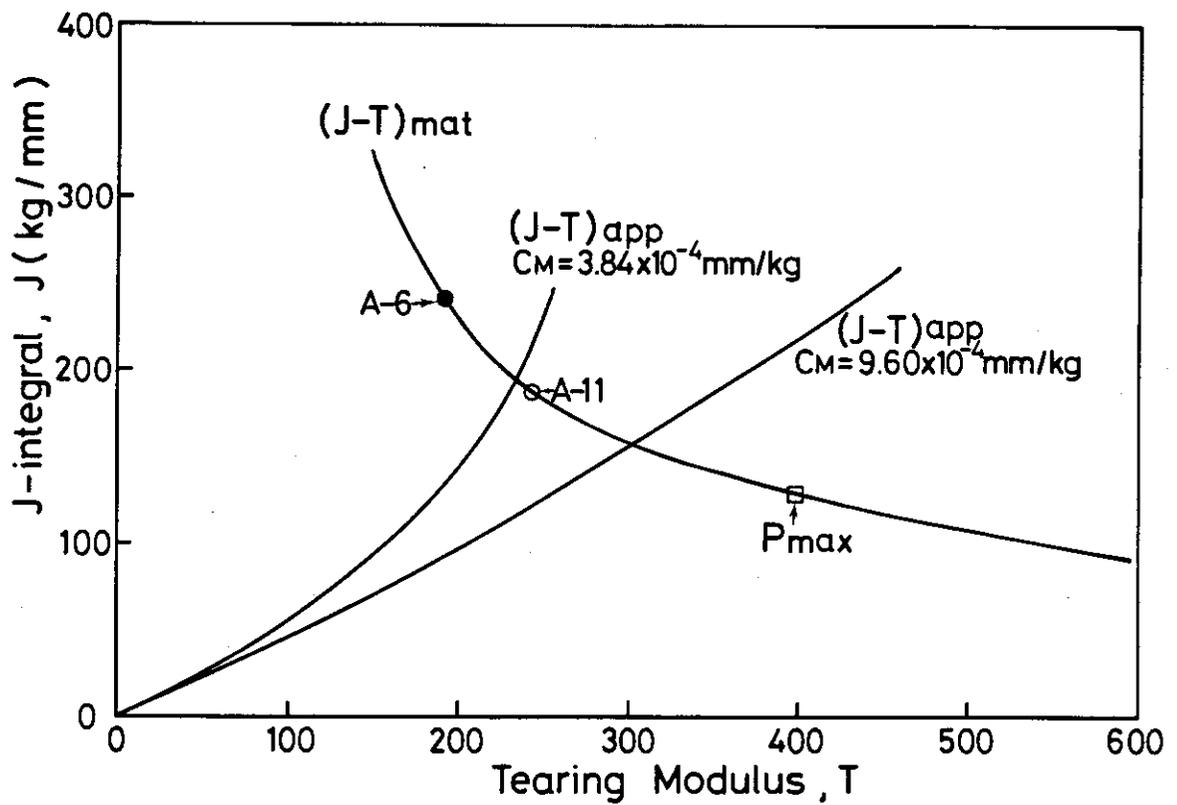


Fig.5.3 J-T analysis curves for CCT specimens with two compliance conditions of $C_M = 3.84$ and 9.60×10^{-4} mm/kg

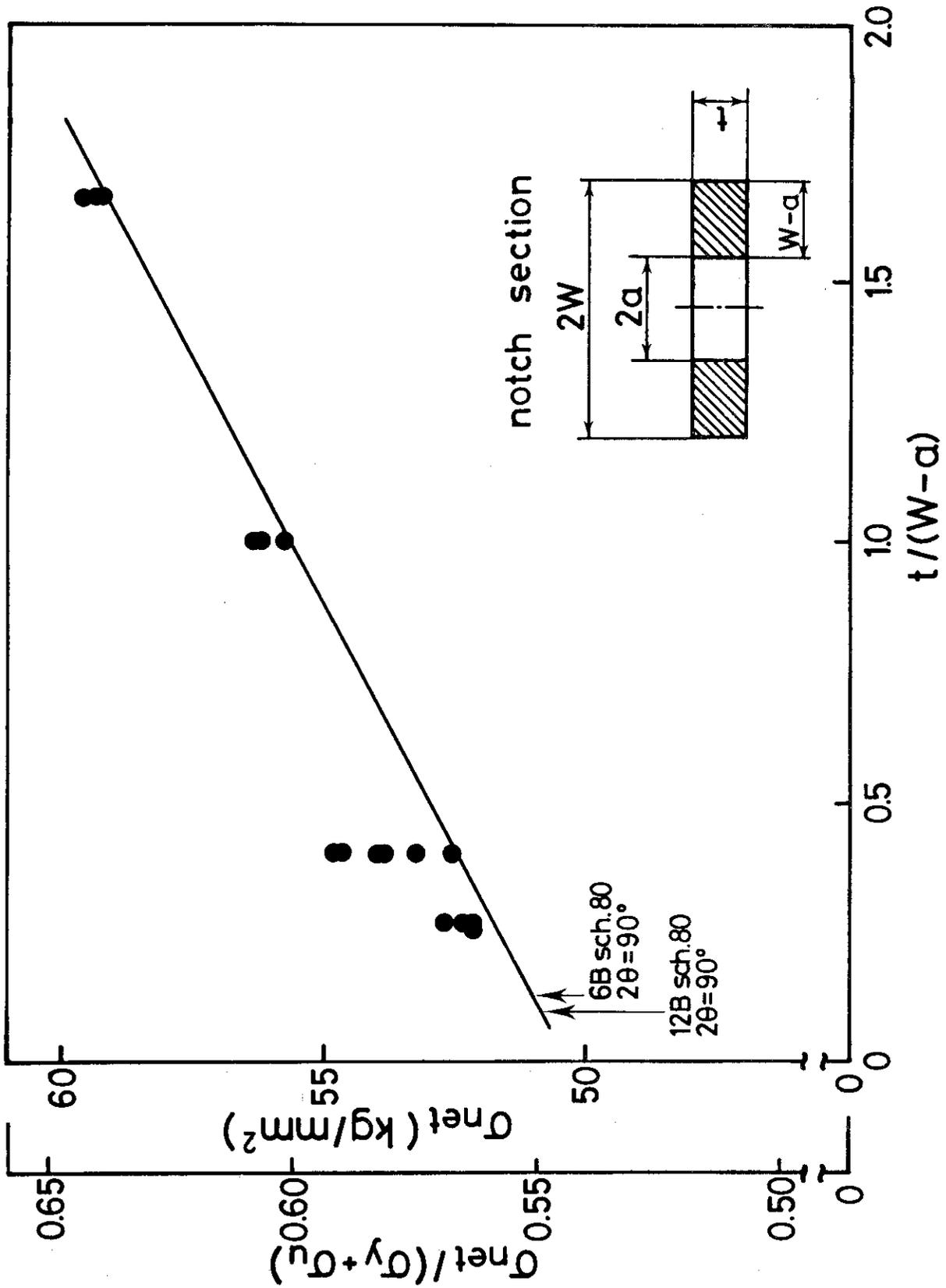


Fig.5.4 Relationship between the stress ratio of $\sigma_{net} / (\sigma_{ys} + \sigma_{tts})$ and ligament aspect ratio

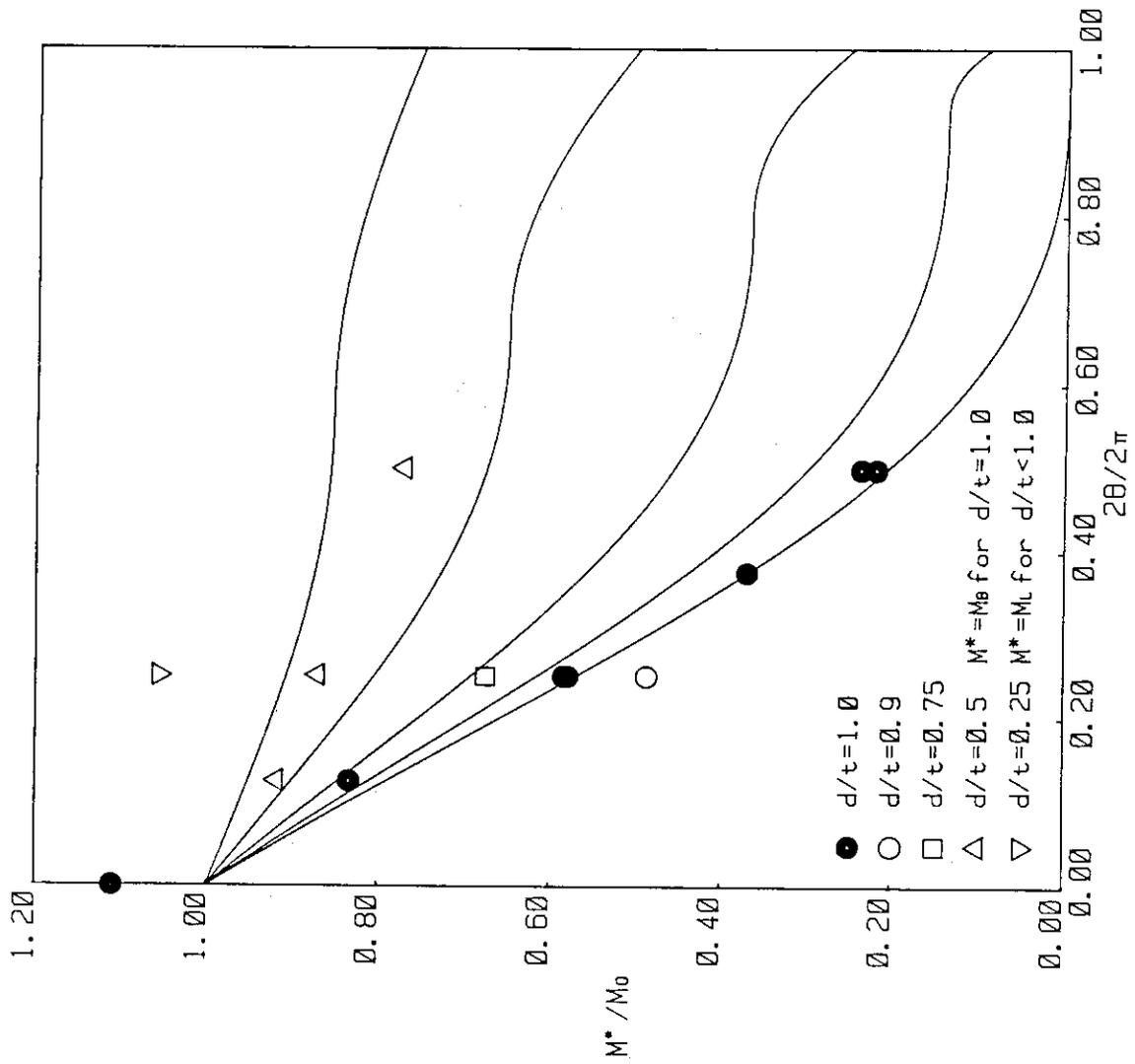


Fig.5.5 Application of the net-section collapse criterion to STS42 6in.dia. pipe specimen

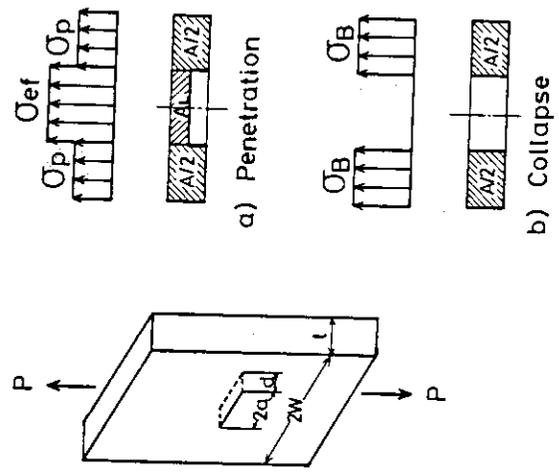


Fig.5.6 Stress distribution model at crack penetration for part-through CCT specimen

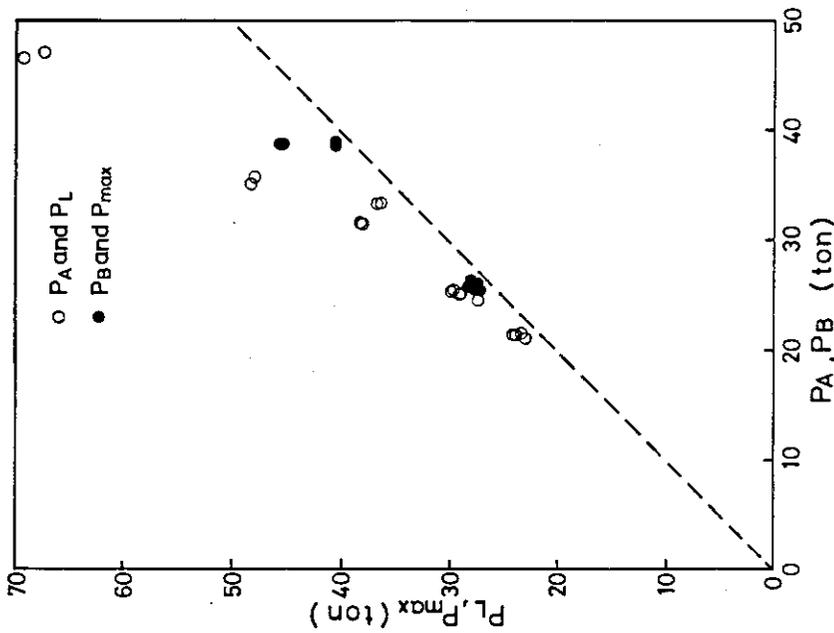


Fig. 5.7 Relationship between calculated load and experimentally measured load

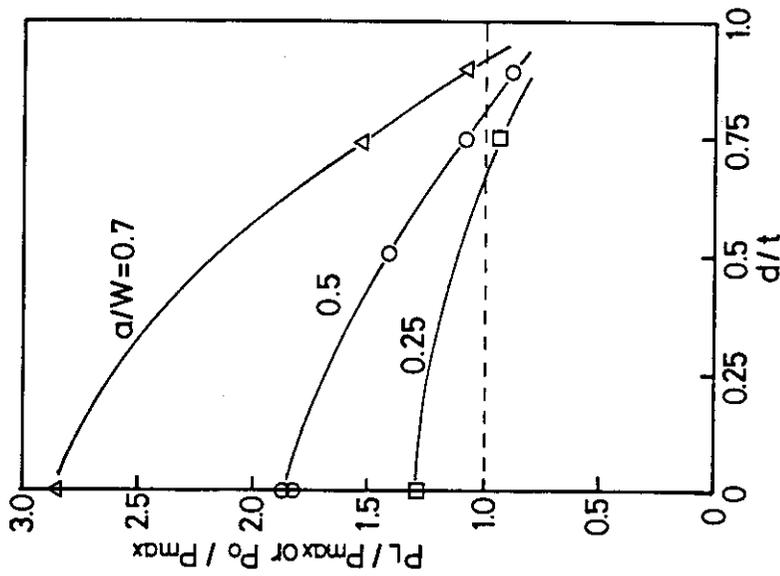


Fig. 5.8 Relationship between penetration load ratio P_L/P_{max} and crack depth d/t

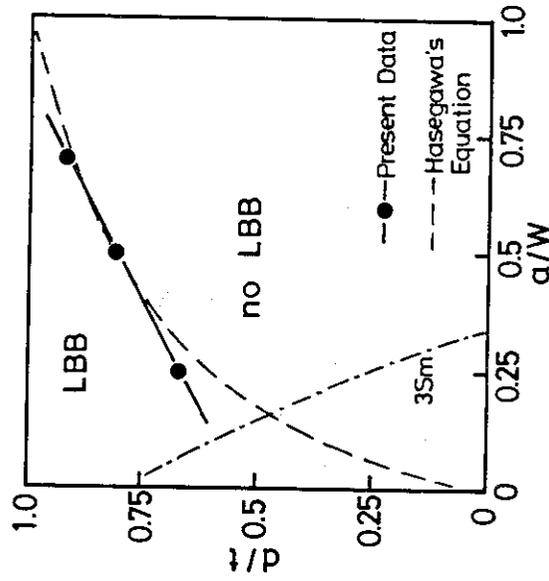


Fig. 5.9 Evaluation of crack geometry for LBB condition

6. 結 び

本論文は、外径 609.6mm、肉厚 38.9mm の STS 42 配管より採取した中央貫通及び未貫通切欠き付平板試験片を用いて静的引張試験及び延性不安定破壊試験を行い、T-クライテリオン及び実断面応力基準の適用性及び LBB 成立性について検討を行ったものである。以下に得られた知見を列記する。

- (1) Garwood の式を用いて求めた貫通切欠き付平板試験片の J-R 曲線は、これまでに得られた STS 42 配管材の J-R 曲線より高い値を示し、試験片寸法に依存することが明らかとなった。
- (2) T-クライテリオンに基づいて延性不安定破壊の予測を行ったところ、実験的に得られた不安定破壊開始時の J 積分値に対して予測値は 20% 程度小さい値であり、安全側の評価をすることができた。しかし、前述の J-R 曲線と合わせて、より精度の高い計算手法を開発することが必要である。
- (3) 貫通切欠き付平板試験結果より、実断面応力基準を適用する際の流動応力 σ_f として、次式が求められた。

$$\sigma_f = 0.55 (\sigma_y + \sigma_{uts})$$
- (4) 未貫通切欠き付平板試験片に対して、Hasegawa らの式を若干修正することにより、き裂貫通荷重 P_L 及び崩壊荷重 P_{max} が予測できることが示された。
- (5) 実験的に得られた LBB が成立するき裂寸法は、前述の P_L 及び P_{max} の予測式より求められる範囲と比較して、き裂幅 a/w が 0.4 から 0.7 程度までは良く一致しているが、それ以外の場合には予測より深いき裂に制限されることがわかった。

謝 辞

本試験を遂行するにあたり、多大な御助力をいただきました原子力エンジニアリング課の八木岡隆一氏及び大浦博文氏に心より感謝の意を表します。

6. 結 び

本論文は、外径 609.6mm、肉厚 38.9mm の STS 42 配管より採取した中央貫通及び未貫通切欠き付平板試験片を用いて静的引張試験及び延性不安定破壊試験を行い、T-クライテリオン及び実断面応力基準の適用性及び LBB 成立性について検討を行ったものである。以下に得られた知見を列記する。

- (1) Garwood の式を用いて求めた貫通切欠き付平板試験片の J-R 曲線は、これまでに得られた STS 42 配管材の J-R 曲線より高い値を示し、試験片寸法に依存することが明らかとなった。
- (2) T-クライテリオンに基づいて延性不安定破壊の予測を行ったところ、実験的に得られた不安定破壊開始時の J 積分値に対して予測値は 20% 程度小さい値であり、安全側の評価をすることができた。しかし、前述の J-R 曲線と合わせて、より精度の高い計算手法を開発することが必要である。
- (3) 貫通切欠き付平板試験結果より、実断面応力基準を適用する際の流動応力 σ_f として、次式が求められた。

$$\sigma_f = 0.55 (\sigma_y + \sigma_{uts})$$
- (4) 未貫通切欠き付平板試験片に対して、Hasegawa らの式を若干修正することにより、き裂貫通荷重 P_L 及び崩壊荷重 P_{max} が予測できることが示された。
- (5) 実験的に得られた LBB が成立するき裂寸法は、前述の P_L 及び P_{max} の予測式より求められる範囲と比較して、き裂幅 a/w が 0.4 から 0.7 程度までは良く一致しているが、それ以外の場合には予測より深いき裂に制限されることがわかった。

謝 辞

本試験を遂行するにあたり、多大な御助力をいただきました原子力エンジニアリング科の八木岡隆一氏及び大浦博文氏に心より感謝の意を表します。

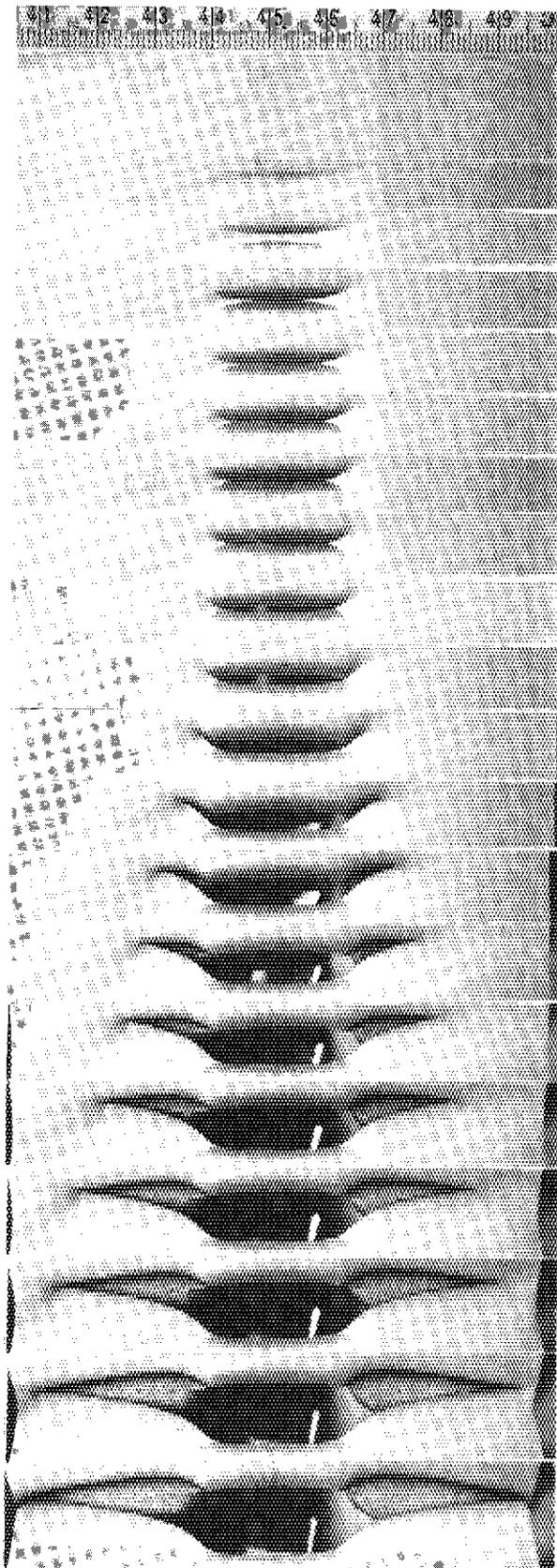
参考文献

- 1) Roege, P.E. ; "Potential Effects of Leak-Before-Break on Light Water Reactor Design", Thesis to MIT for the Degree of Nuclear Engineer and Master of Science, August 1985.
- 2) Inside NRC ; Vol.8, No.4, Feb. 17, 1986.
- 3) Nucleonics Week ; Vol.26, No.3, Jan. 17, 1985.
- 4) Kussmaul, K. et al. ; "Exclusion of Fracture in Pipings of the Pressure Boundary, Part 1 : Experimental Investigations and Their Interpretation", IAEA-SM-269/7, Int. Symp. on Reliability of Reactor Pressure Components, Mar. 1983.
- 5) Bartholome, G. et al. ; "Exclusion of Failure of the Pressure Retaining Coolant System, Part 2 : Application to the Primary Coolant Piping", *ibid.*
- 6) Lazzeri, L. ; Int. J. Pres. Vess. & Piping, 21 (1985), 243-259.
- 7) Pipe Break Task Group ; "Report of U.S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee", NUREG-1061, Vol.3 : Evaluation of Potential for Pipe Breaks, Nov. 1984.
- 8) 10CFR50 App.A, General Design Criteria for Nuclear Power Plants Criterion 4, 1986.
- 9) Swamy, S.A. et al. ; "Application of the Leak-Before-Break Approach to Westinghouse PWR Piping", EPRI NP-4971 (Dec. 1986).
- 10) The Energy Daily ; August 1, 1986.
- 11) NRC Augmented Inspection Team Report Nos. 50-280/86-42 and 50-281/86-42, February 10, 1987.
- 12) Inside NRC ; Vol.8, No.26, December 22, 1986.
- 13) Wilkowski, G.M. et al. ; "Degraded Piping Program-Phase II", NUREG/CR-4082, BMI-2120, Vol.1 ~ Vol.4, Jan. 1985 ~ Sep. 1986.
- 14) Wilkowski, G.M. et al. ; Nuclear Engineering and Design, 89 (1985), 257-269.
- 15) Garcia, J.L. et al. ; "Evaluation of Critical Sizes of Part-Through Cracks on 3-inch Austenitic Stainless Steel Pipings", Vol.G, Fracture Mechanics and NDE, 8th Int. Conf. on SMiRT, Aug. 1985.
- 16) Darlaston, B.J.L. ; Nuclear Engineering and Design, 84 (1985), 225-232.
- 17) Yagawa, G. et al. ; J. of Pres. Vess. Tech., 106 (1984), 405-411.
- 18) Shibata, K. et al. ; Nuclear Engineering and Design, 94 (1986), 221-231.
- 19) Shibata, K. et al. ; 9th Int. Conf. on SMiRT (1987),

付 録

本付録には、試験中に撮影した各試験片のき裂進展状況写真及び試験後の破面を収録した。

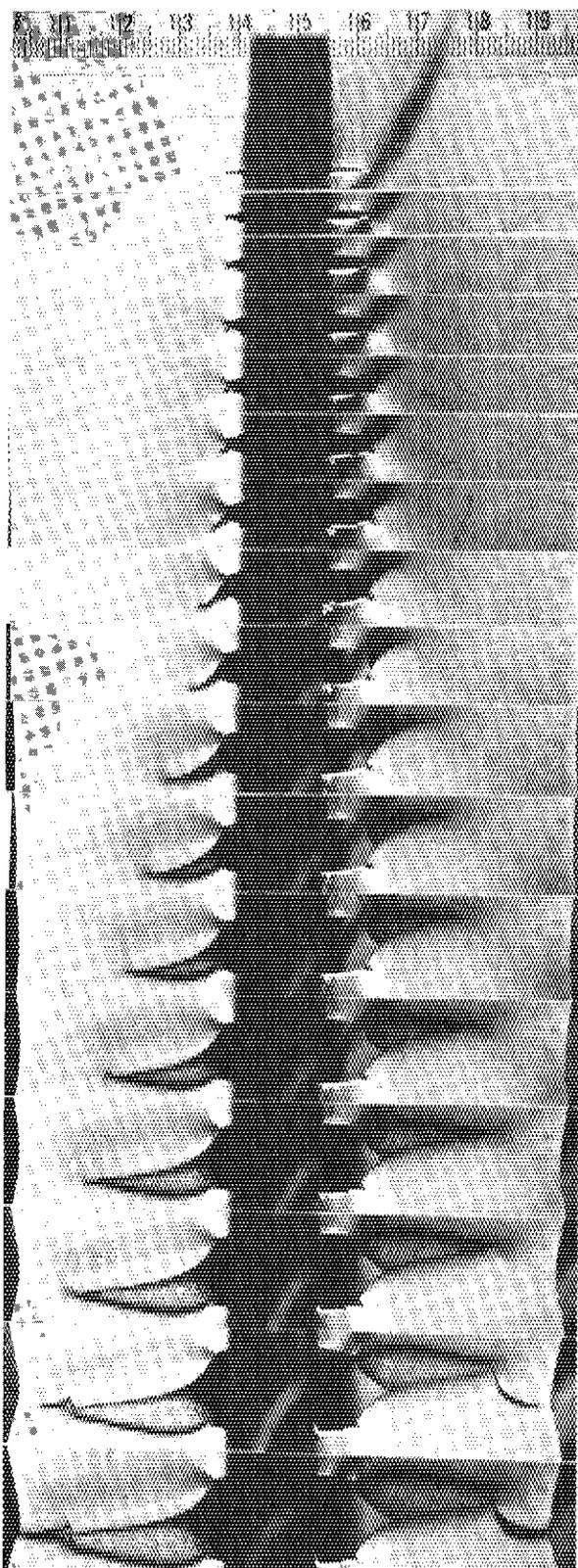
A-1



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
34.85	1.0
36.05	1.5
36.6	2.0
37.0	2.2
37.1	2.5
37.15	3.0
37.65	4.0
39.2	5.0
40.3	6.0
40.05	7.0
37.9	8.0
34.7	9.0
30.8	10.0
24.6	11.0
21.7	12.0
16.6	13.0
11.35	14.0
6.05	15.0
0.4	16.0

Photo, A.1 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (A-1)

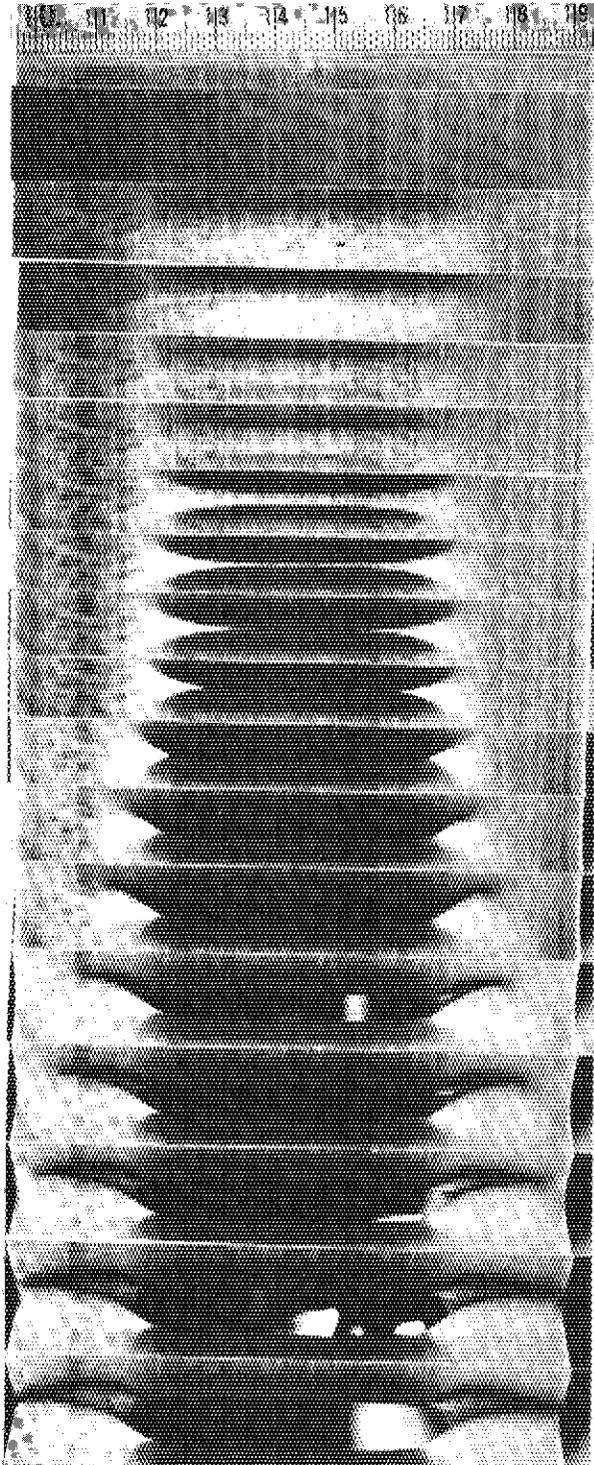
A-7



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
30.9	1.0
34.9	2.0
36.2	3.0
37.1	4.0
38.45	5.0
39.05	6.0
38.2	7.0
35.9	8.0
32.8	9.0
29.3	10.0
25.3	11.0
21.0	12.0
16.4	13.0
11.6	14.0
5.3	15.0
0.6	16.0

Photo. A.2 Development of stable crack growth in 10mm-thickness through-wall CCT specimen (A-7)

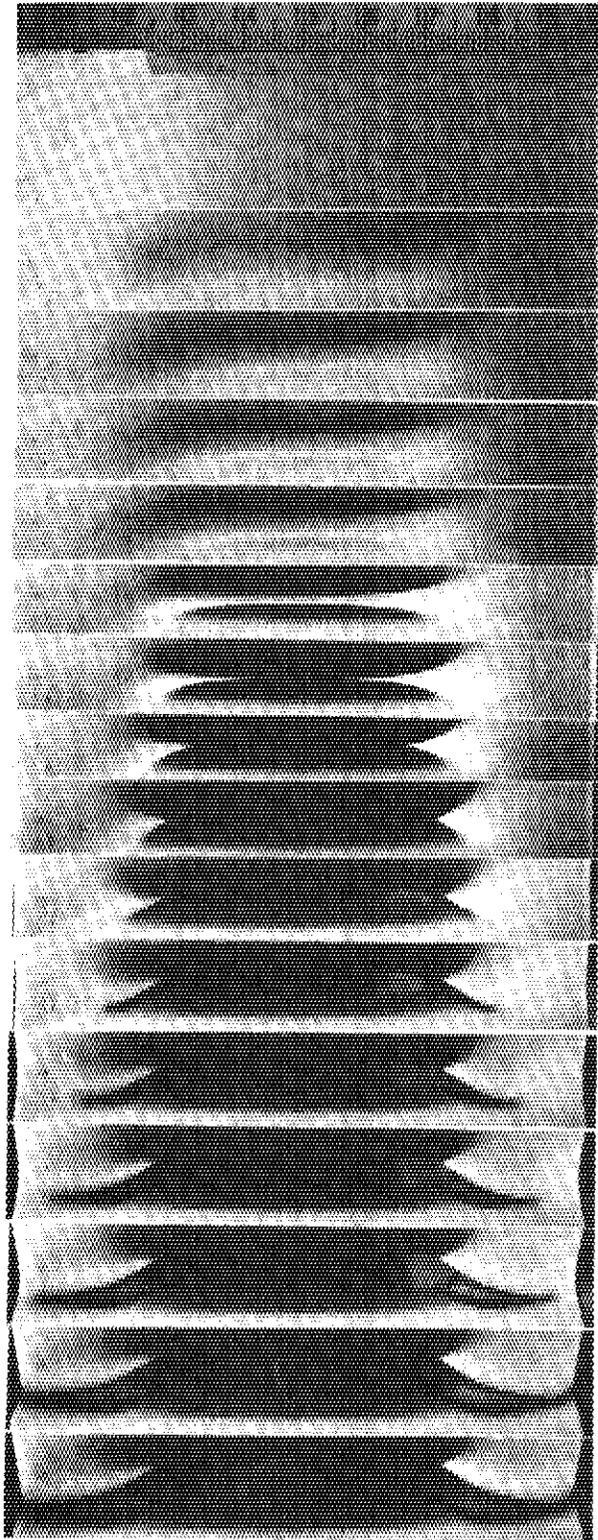
A-8



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
33.6	1.0
35.5	2.0
35.6	3.0
37.4	4.0
37.0	5.0
32.0	5.5
31.0	5.66
29.9	6.0
28.5	7.0
25.8	8.0
21.7	9.0
17.4	10.0
12.9	11.0
8.2	12.0
3.5	13.0
0.4	13.5

Photo, A.3 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (A-8)

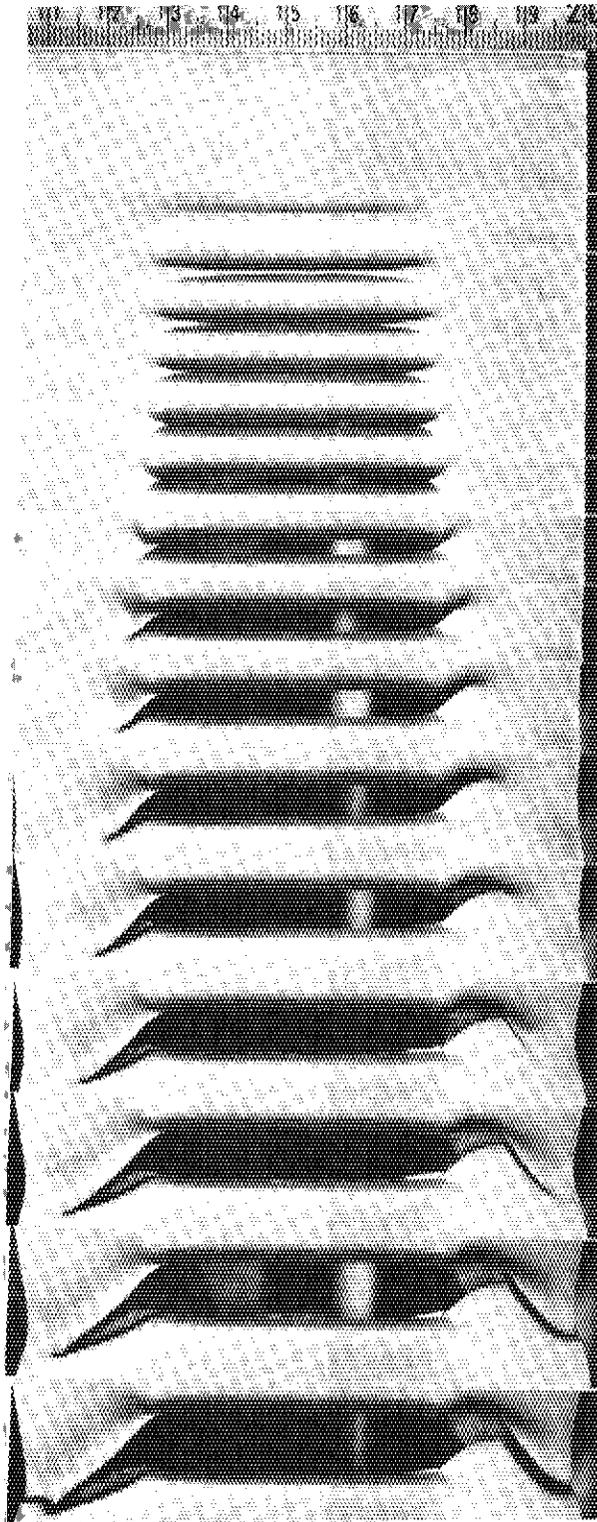
A-9



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
34.1	1.0
36.0	2.0
36.2	3.0
37.8	4.0
36.4	5.0
31.4	5.5
30.0	6.0
28.5	7.0
25.5	8.0
21.2	9.0
16.8	10.0
12.1	11.0
7.2	12.0
2.2	13.0
0	14.0

Photo. A.4 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (A-9)

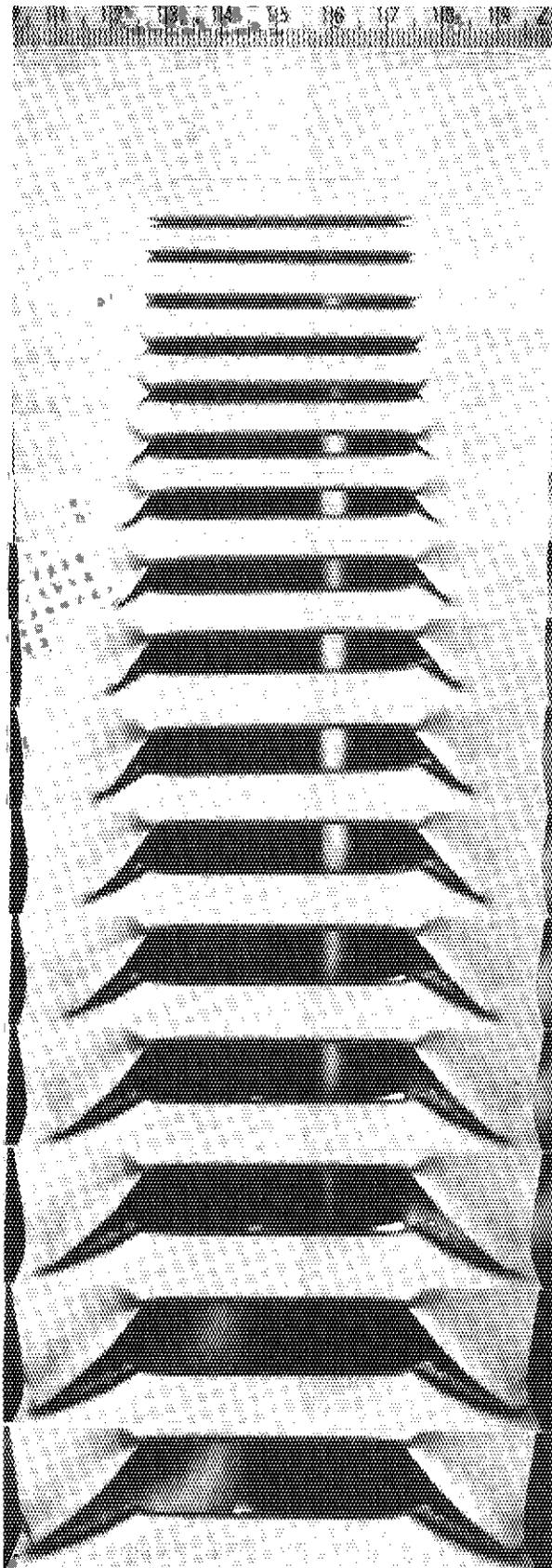
B-1



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
28.85	1.0
27.7	1.5
26.8	1.73
27.0	2.0
27.6	2.5
28.05	3.0
28.05	4.0
26.55	5.0
23.4	6.0
20.2	7.0
16.35	8.0
12.5	9.0
8.9	10.0
4.6	11.0
0	12.1

Photo. A.5 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (B-1)

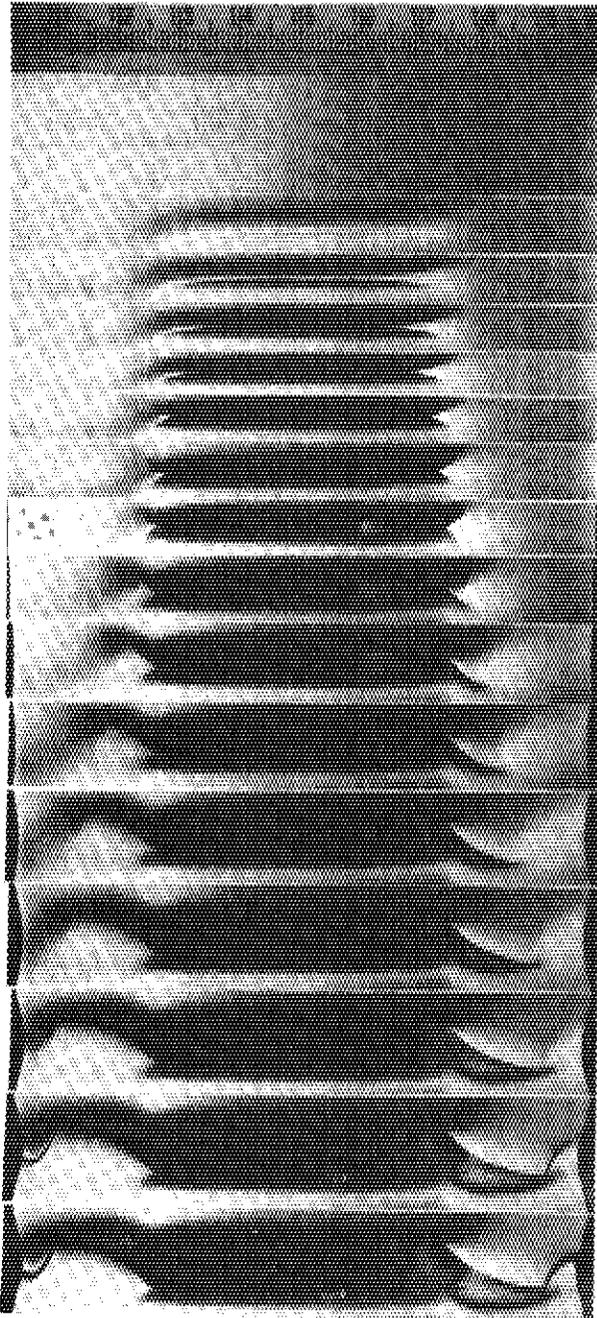
B-3



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
23.9	0.5
23.0	1.0
24.8	1.5
26.2	2.0
27.1	2.5
27.6	3.0
27.5	4.0
26.4	5.0
24.8	6.0
22.2	7.0
19.3	8.0
16.2	9.0
12.7	10.0
9.4	11.0
6.1	12.0
1.4	13.0
0	13.5

Photo. A.6 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (B-3)

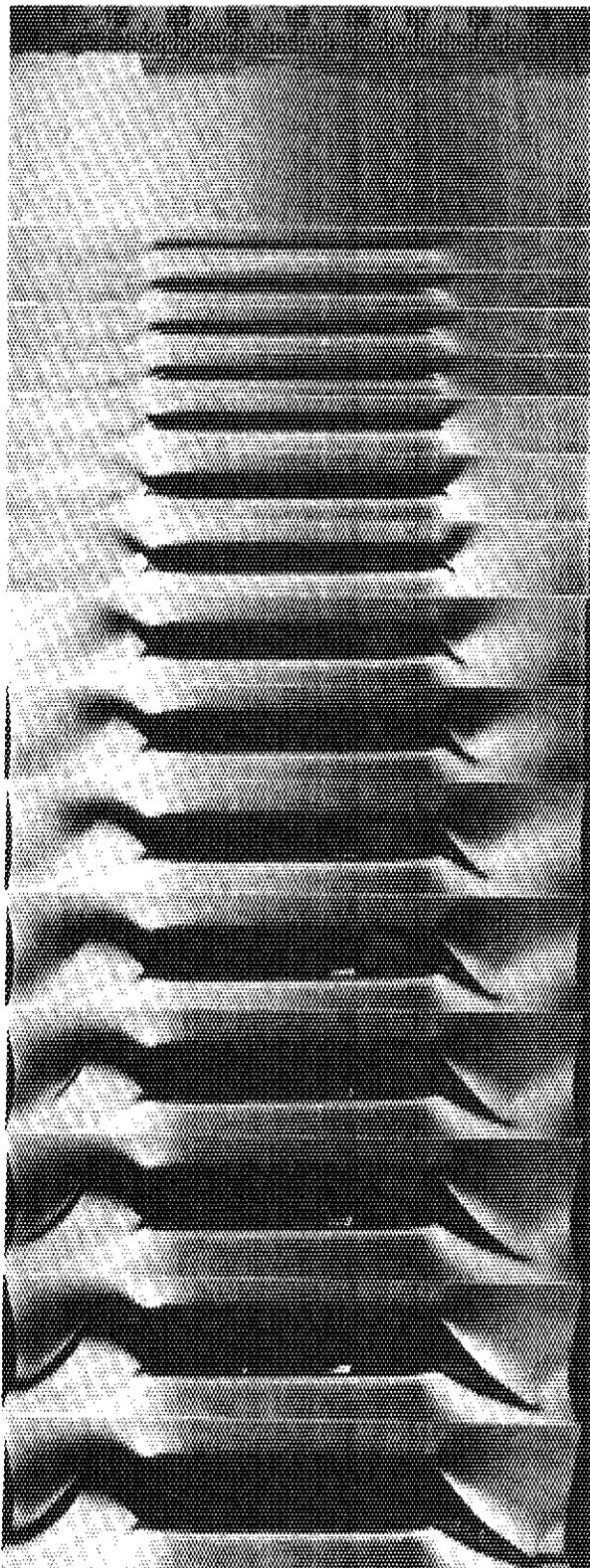
B-6



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
29.05	1.0
27.6	1.5
26.1	1.75
26.3	2.0
26.95	2.5
27.5	3.0
27.65	4.0
26.4	5.0
23.4	6.0
19.7	7.0
15.7	8.0
11.5	9.0
7.6	10.0
2.2	11.0
0	11.5

Photo. A.7 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (B-6)

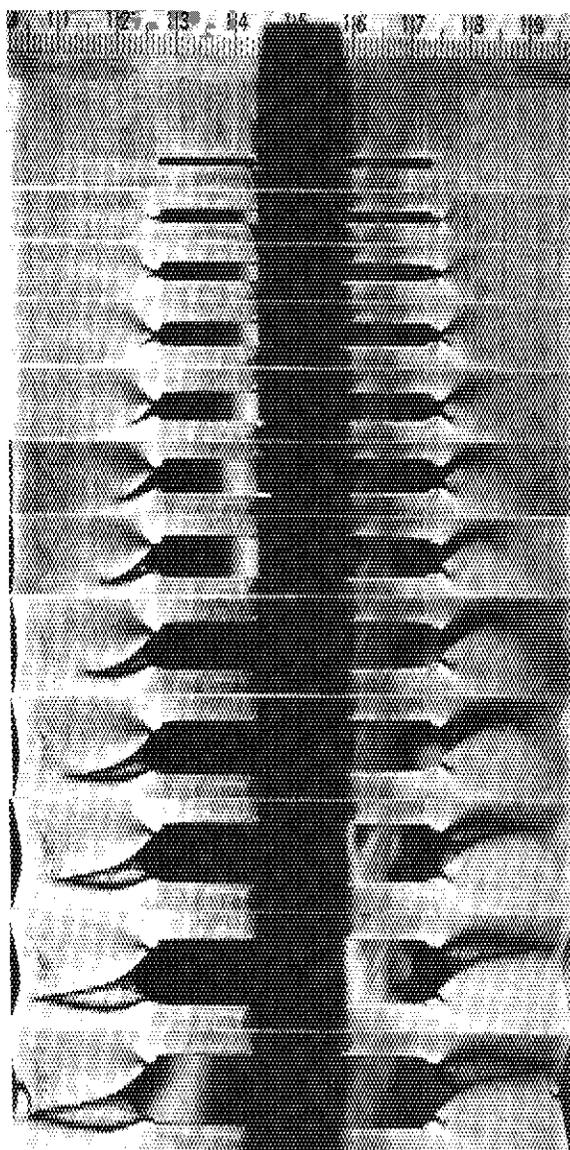
B-8



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
23.5	0.65
22.2	0.82
22.35	0.89
22.7	1.0
25.8	2.0
27.15	3.0
27.0	4.0
25.55	5.0
22.75	6.0
19.5	7.0
15.8	8.0
12.1	9.0
8.5	10.0
4.0	11.0
0.8	12.0

Photo. A.8 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (B-8)

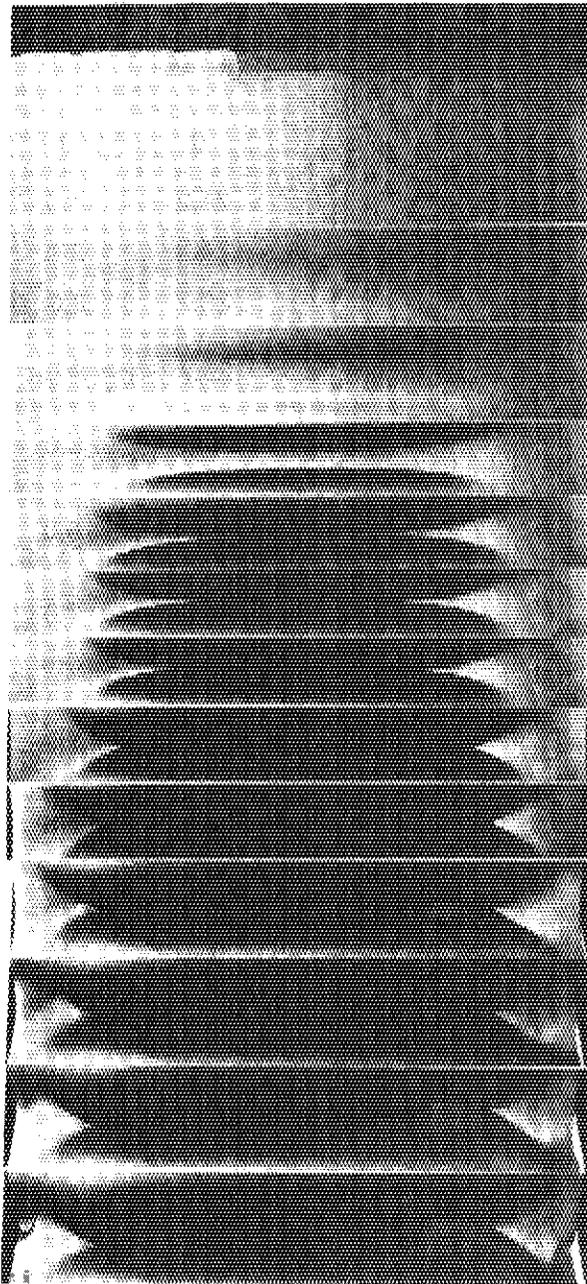
B-10



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
21.2	1.0
24.3	2.0
25.7	3.0
25.7	4.0
24.0	5.0
21.1	6.0
17.3	7.0
13.3	8.0
9.3	9.0
5.6	10.0
0	11.0

Photo. A.9 Development of stable crack growth in 10mm-thickness through-wall CCT specimen (B-10)

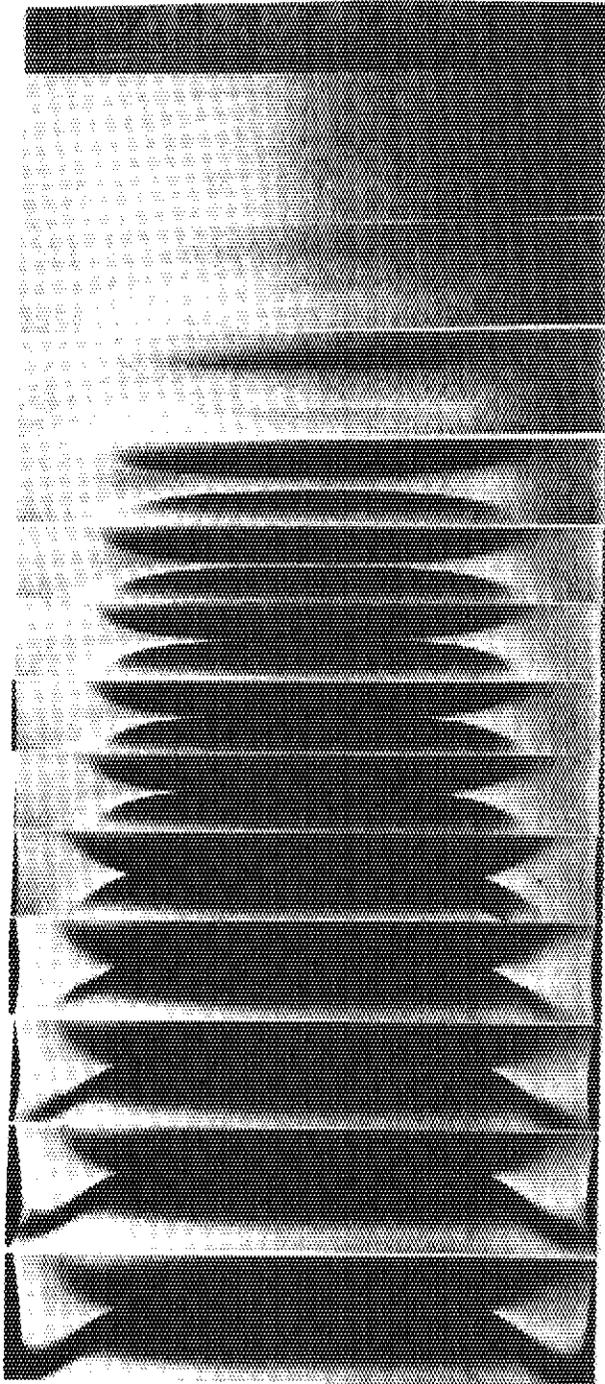
C-1



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
63.8	1.5
66.6	2.0
63.8	3.0
51.6	3.73
50.0	3.88
49.2	4.0
43.6	5.0
37.8	6.0
30.0	7.0
20.0	8.0
8.4	9.0
0	10.0

Photo. A.10 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (C-1)

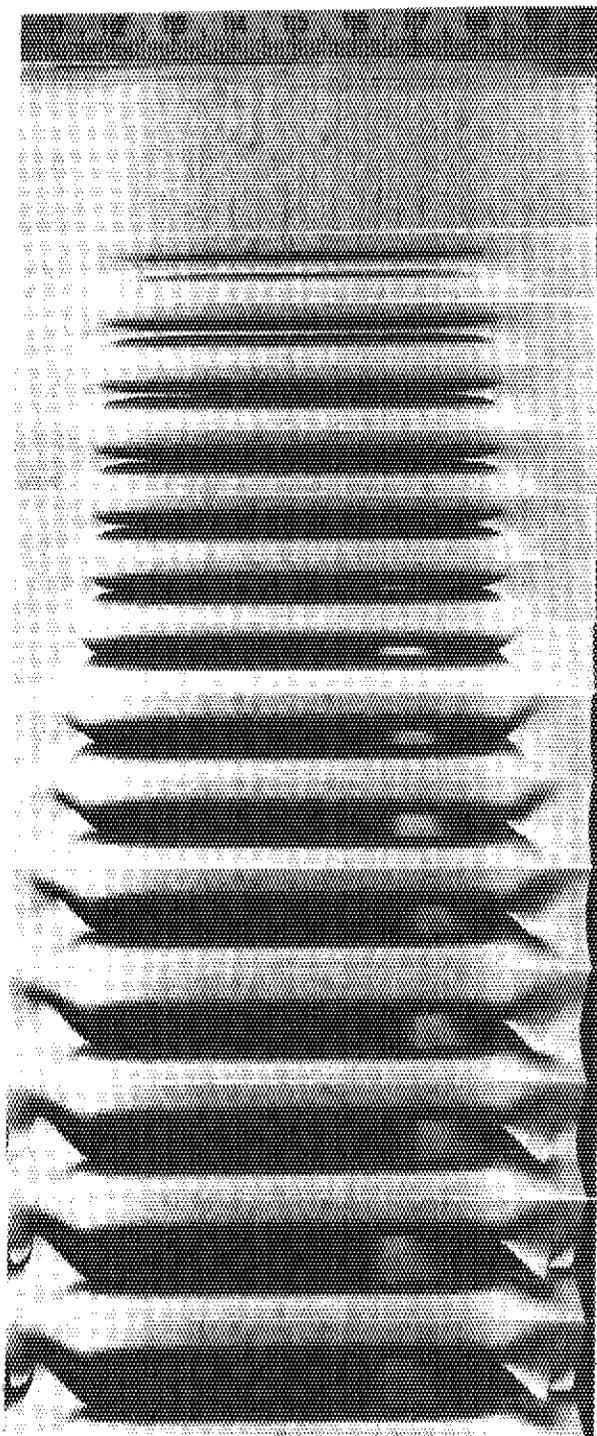
C-2



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
60.8	1.0
69.0	2.0
64.0	3.0
55.2	3.5
52.4	3.67
50.9	3.80
49.2	4.0
43.4	5.0
35.4	6.0
25.6	7.0
14.0	8.0
0	9.0

Photo. A.11 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (C-2)

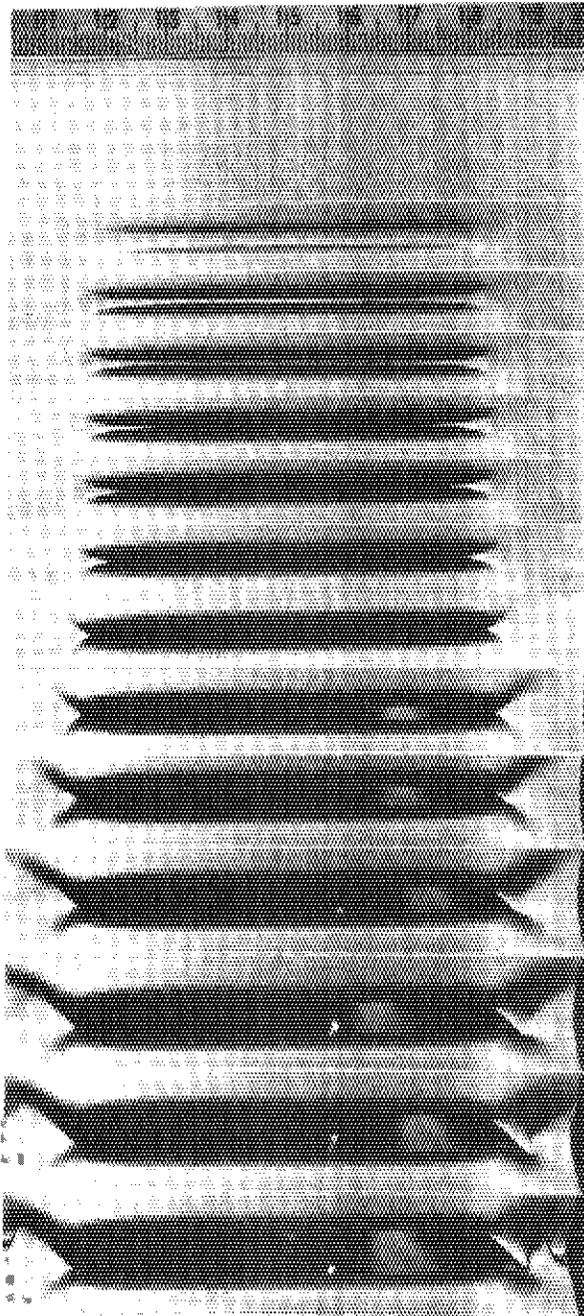
C-3



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
48.0	1.0
45.6	1.32
43.6	1.5
43.7	1.59
44.0	1.73
44.8	2.0
44.9	3.0
42.0	4.0
36.8	5.0
29.6	6.0
20.6	7.0
9.6	8.0
0.4	9.0
0	9.5

Photo. A.12 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (C-3)

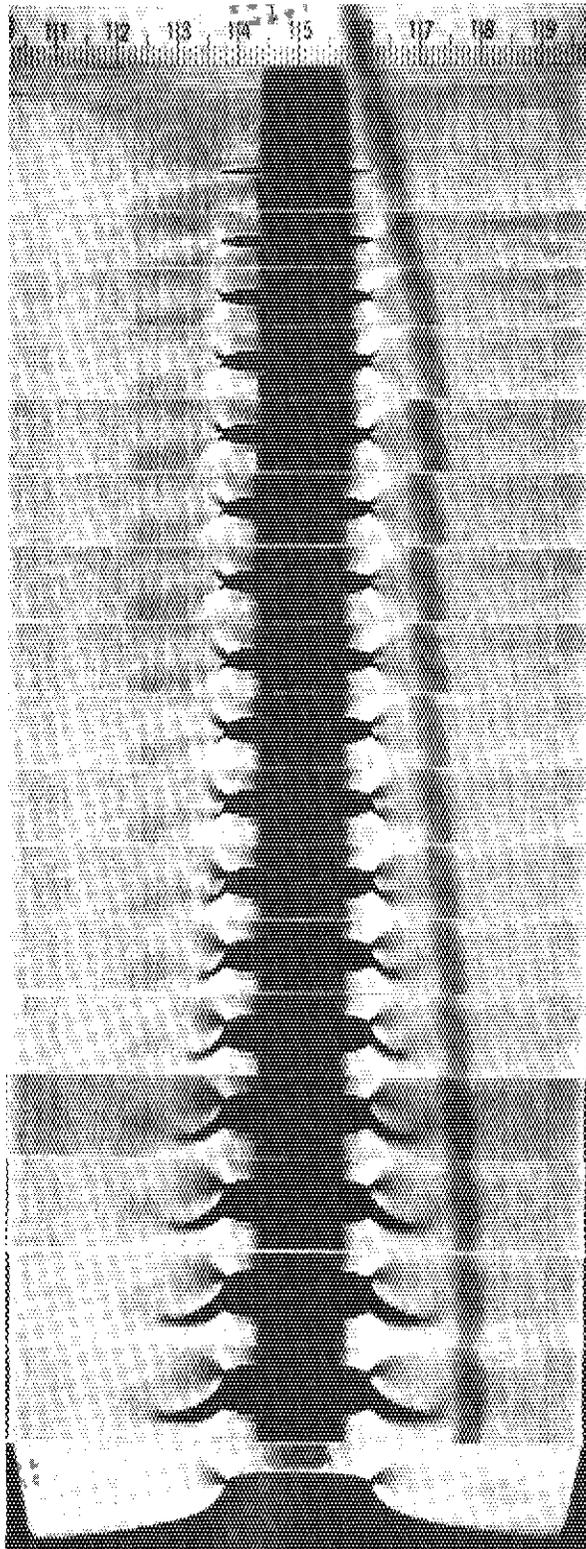
C-4



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
48.2	1.0
45.6	1.43
44.0	1.57
43.95	1.65
44.1	1.77
44.7	2.0
45.2	3.0
42.4	4.0
37.2	5.0
30.2	6.0
21.0	7.0
10.4	8.0
0	9.0

Photo, A.13 Development of stable crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen (C-4)

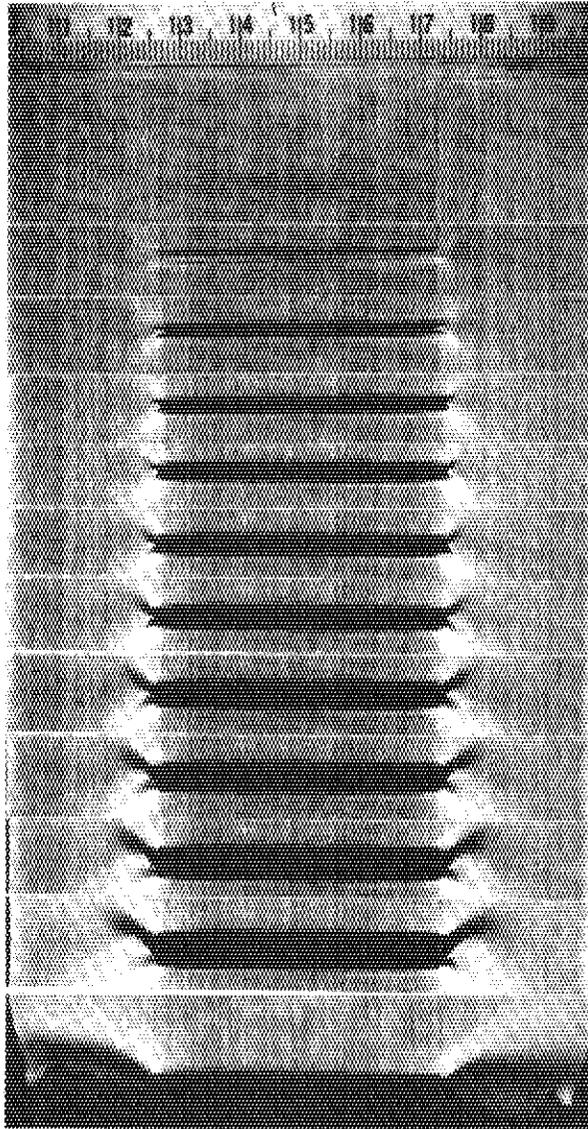
A-6



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
30.8	1.0
34.8	2.0
36.25	3.0
36.8	3.5
36.9	4.0
37.35	4.5
38.1	5.0
38.7	5.5
39.0	6.0
39.1	6.5
38.7	7.0
37.7	7.5
36.6	8.0
35.3	8.5
34.0	9.0
32.9	9.4
0	—

Photo. A.14 Development of crack growth in 10mm-thickness through-wall CCT specimen under high compliance of 3.84×10^{-4} mm/kg (A-6)

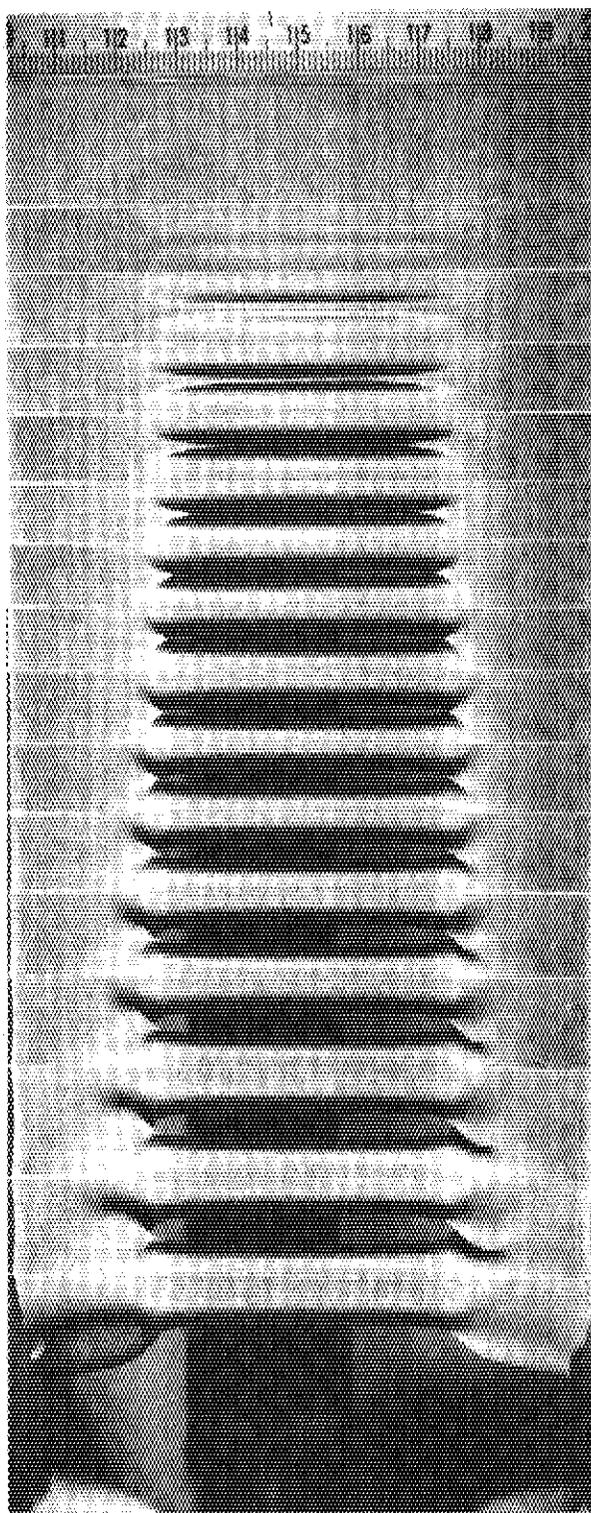
B-4



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
22.9	0.5
22.45	1.0
24.2	1.5
25.5	2.0
26.4	2.5
26.95	3.0
27.2	3.5
27.1	4.0
26.65	4.5
26.0	5.0
0	-

Photo. A.15 Development of crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen under high compliance of $8.07 \times 10^{-4} \text{mm/kg}$ (B-4)

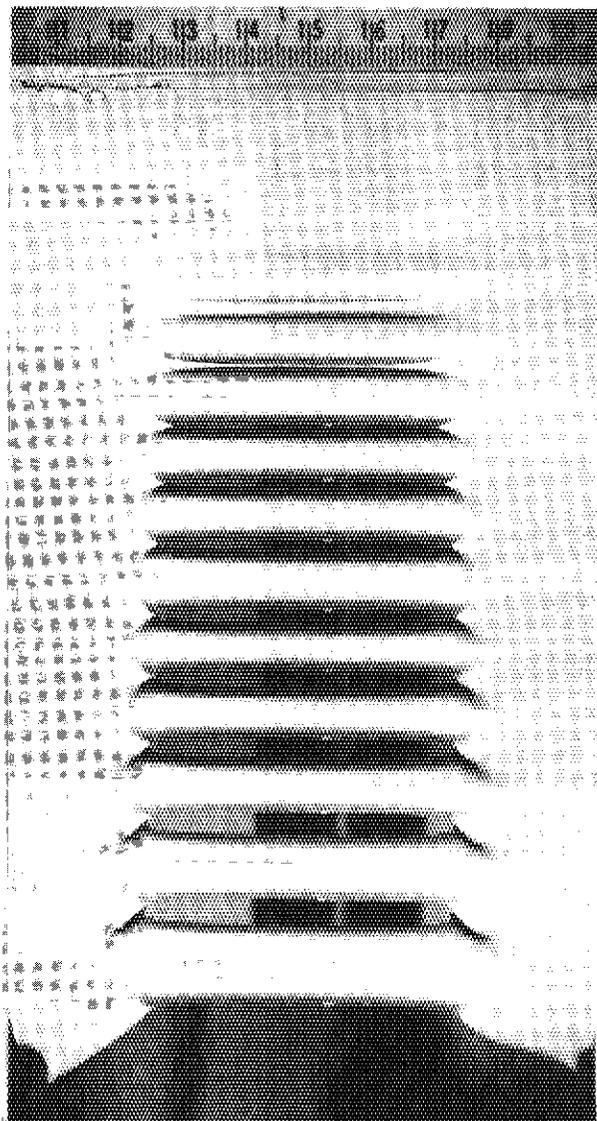
B-5



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
26.6	0.5
29.0	1.0
28.0	1.5
27.1	1.65
26.5	2.0
26.75	2.5
27.2	3.0
27.5	3.5
27.4	4.0
26.9	4.5
26.1	5.0
24.9	5.5
23.6	6.0
21.9	6.5
0	-

Photo, A.16 Development of crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen under high compliance of 3.23×10^{-4} mm/kg (B-5)

B-9



Load (ton)	Load-line displacement (mm)
0	0
25.1	0.5
27.35	1.0
26.65	1.5
26.0	2.0
26.4	2.5
26.9	3.0
27.2	3.5
27.1	4.0
26.7	4.5
26.1	5.0
25.65	5.4
0	-

Photo. A.17 Development of crack growth in 10mm-thickness part-through CCT specimen under high compliance of 8.07×10^{-4} mm/kg (B-9)

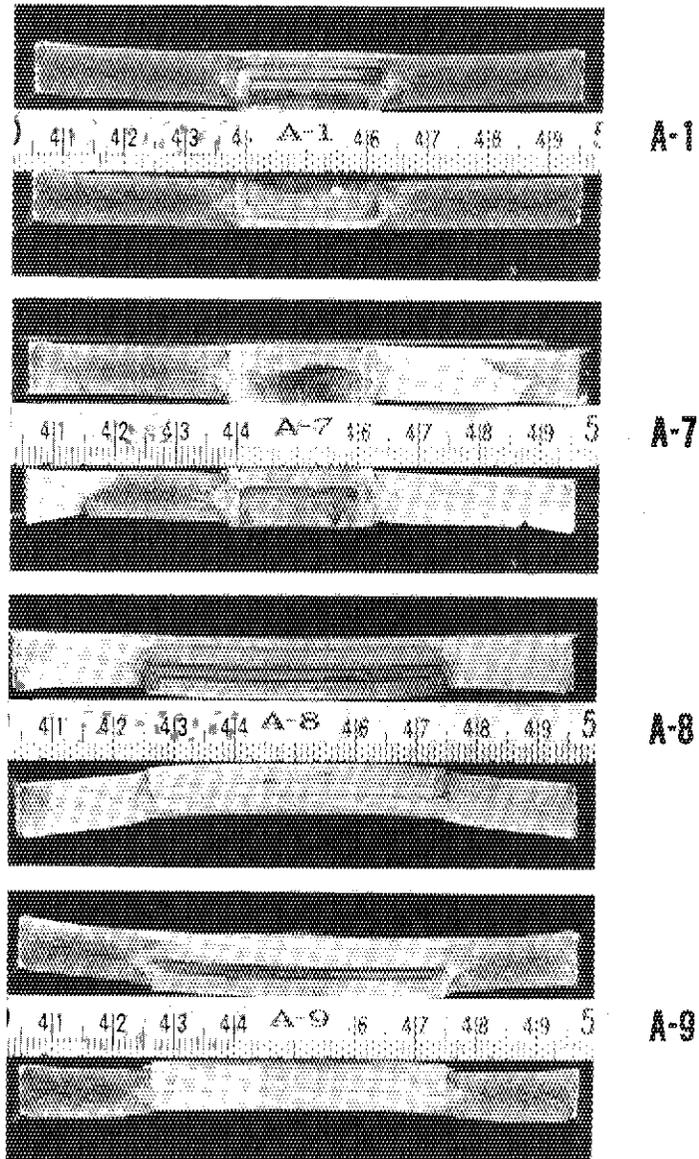


Photo. A.18 Post-test fracture surface of 10mm-thickness CCT specimen (A-Series)

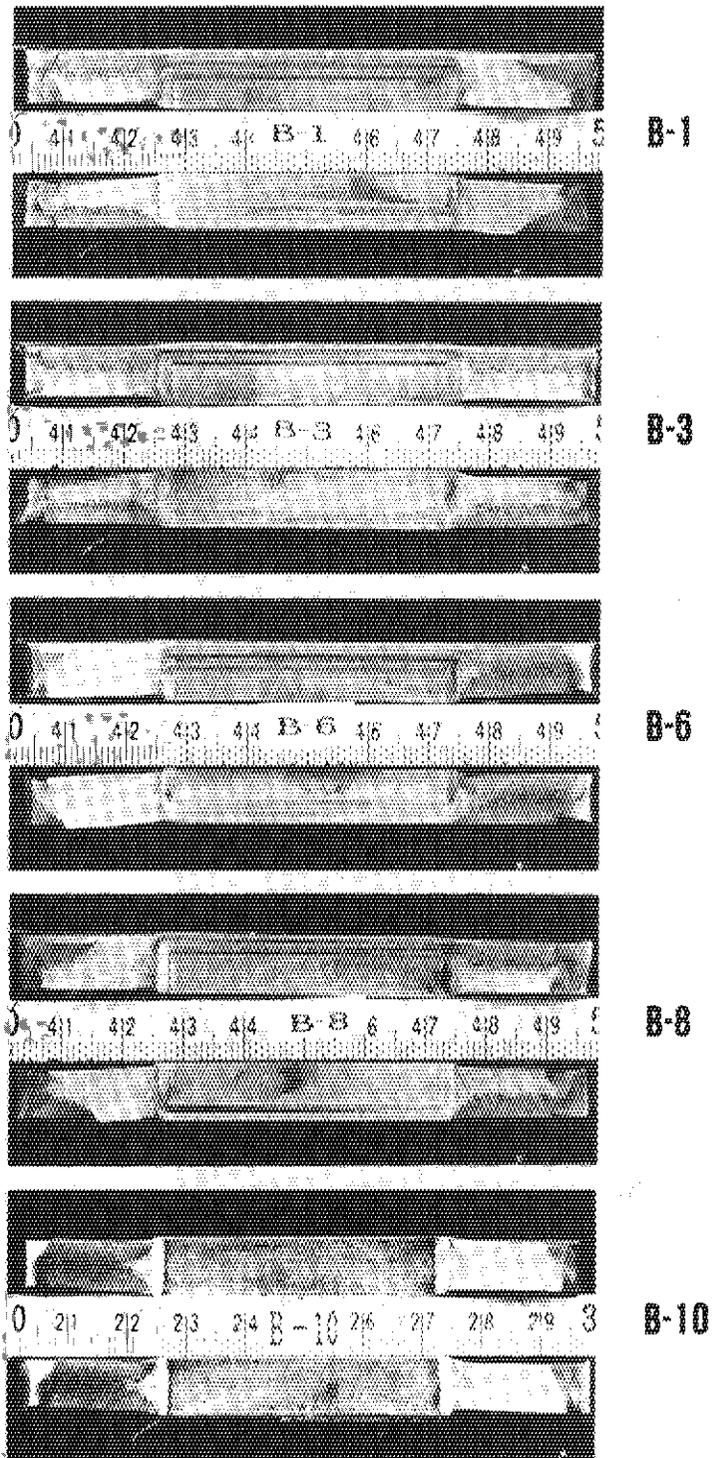


Photo. A.19 Post-test fracture surface of 10mm-thickness
CCT specimen (B-Series)

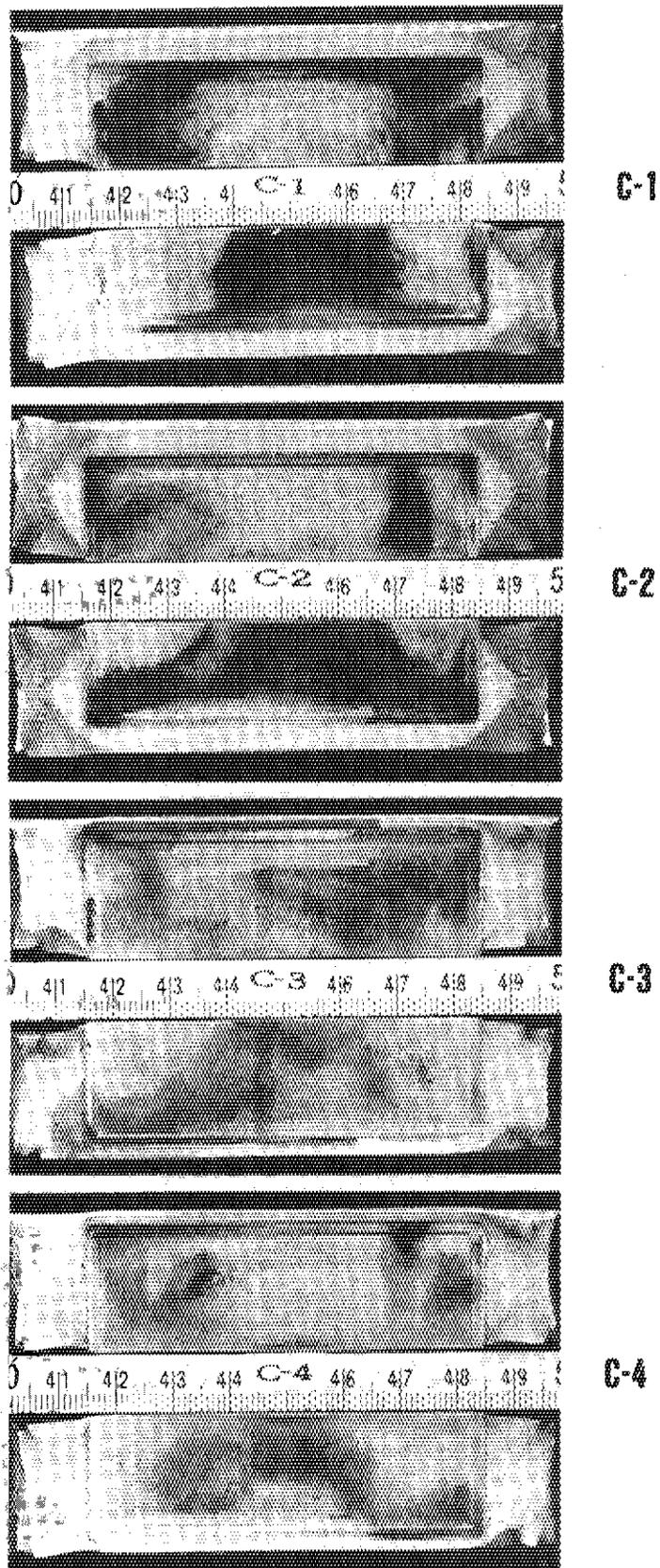


Photo. A.20 Post-test fracture surface of 10mm-thickness CCT specimen (C-Series)

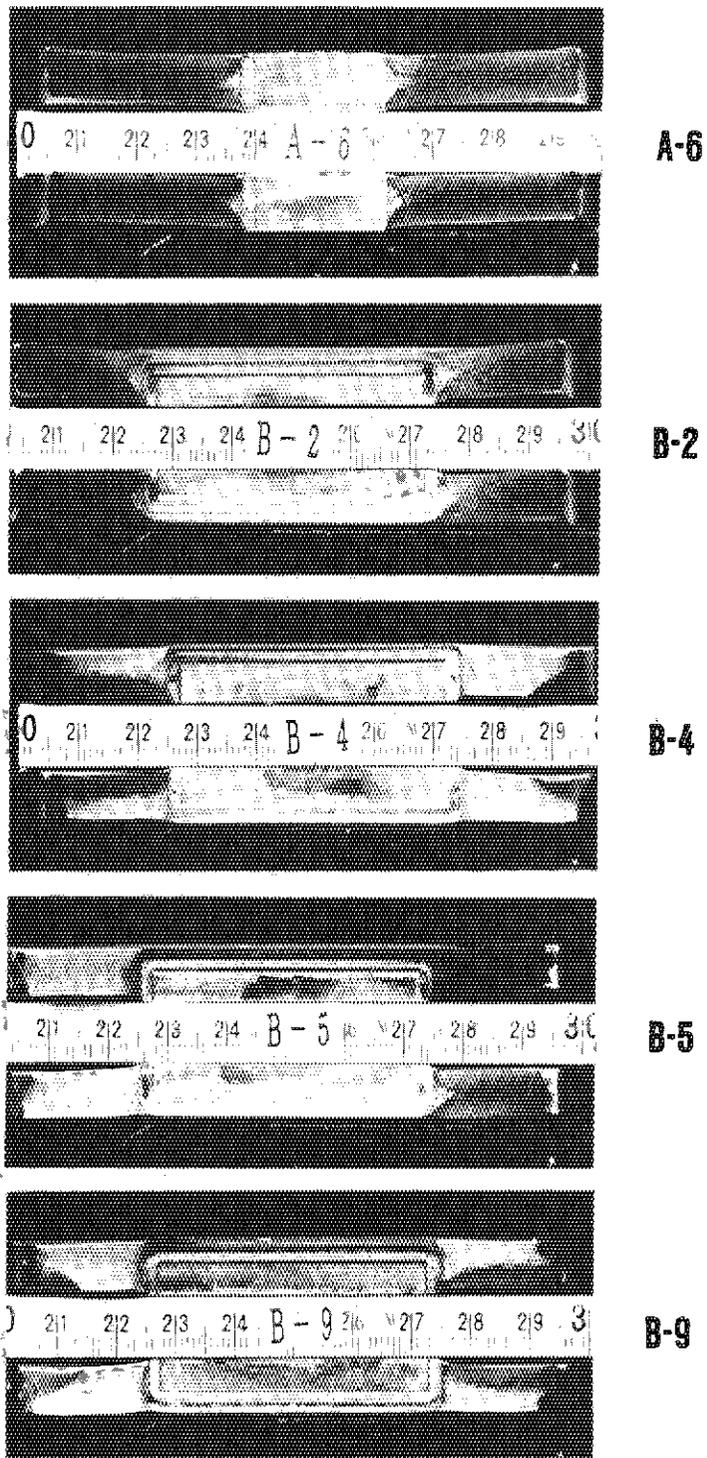


Photo. A.21 Post-test fracture surface of 10mm-thickness under high compliance CCT specimen