

JAERI - M

84-037

複数表面欠陥付平板・配管試験体の疲労試験
結果および疲労き裂伝播評価法の検討

1984年3月

柴田 勝之・横山 憲夫・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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷㈱

複数表面欠陥付平板・配管試験体の疲労試験結果
および疲労き裂伝播評価法の検討

日本原子力研究所東海研究所安全工学部
柴田 勝之・横山 憲夫・大場 敏弘
川村 隆一・宮園昭八郎

(1984年1月31日受理)

本報では、軽水炉配管の安全性に関する試験研究の一環として実施した一連の配管疲労試験結果をまとめた。

軽水炉配管における欠陥伝播形態のひとつとして、複数の初期欠陥から疲労き裂が発生、伝播し、さらに合体を繰返すことにより大きな未貫通欠陥へと成長する場合が想定される。この場合、配管の安全性にとって重大であり配管疲労試験ではこのような、配管内面における複数欠陥からの疲労き裂伝播挙動を明らかにすることにより配管の安全性評価に資することを目的として、配管試験体の試験を中心に各種の試験を実施した。

これまでに複数表面欠陥付平板試験体および複数内面欠陥付配管試験体を供試体とした疲労試験の他いくつかの材料特性試験等をすでに行っている。本報はこれらのうち平板試験、直管試験、および曲管試験の結果についてまとめたものである。

平板試験では複数表面欠陥付平板試験体を用いた疲労試験を行い、表面欠陥伝播における自由表面効果および隣接欠陥の干渉効果について検討した。また、この結果を基に複数表面欠陥の伝播評価法を提案した。

直管試験および曲管試験では複数内面欠陥付直管および曲管試験体を供試体とした疲労試験を実施し、配管内面における複数欠陥からの疲労き裂伝播挙動を調べた。

これらの試験から表面欠陥や配管内面における複数欠陥の伝播挙動に関していくつかの知見が得られた。また、き裂伝播挙動に関して試験結果と ASME Code Sec. XI に基づくき裂伝播評価結果および本研究で提案した方法による評価結果とを比較しこれらの伝播評価法を構造部材における疲労き裂伝播評価に適用する場合の問題点について検討した。その結果、前者による評価は、き裂合体基準は過大に安全側の設定であり、また、き裂形状評価基準は場合によっては非安全側の評価結果を与えることが分った。一方、後者による評価はき裂合体点およびき裂形状変化について良好な予測を与え、伝播寿命予測についても妥当な結果を与えることが分った。

この報告書は電源開発促進対策特別会計法に基づき、科学技術庁からの受託研究として日本原子力研究所で実施した昭和53年度、54年度および56年度「配管信頼性実証試験」のうち、直管試験、曲管試験、および平板試験の結果についてまとめたものである。

Fatigue Test Results of Flat Plate and Pipe Specimens
Containing Multiple Surface Flaws, and Comparison
with Some Predicted Crack Growth Behavior

Katsuyuki SHIBATA, Norio YOKOYAMA, Toshihiro OHBA,
Takaichi KAWAMURA and Shohachiro MIYAZONO

Department of Nuclear Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 31, 1984)

In the report are described a series of the pipe fatigue test results, which have been conducted as a part of the pipe safety research of light water reactors.

As one of the serious situation for the safety of a piping component, it can be supposed that cracks originated from multiple initial defects may grow and coalesce into a very large part-through crack in the inner surface of pipes. The pipe fatigue tests have been performed to obtain informations on the pipe safety evaluation by investigating the growth behavior of multiple flaws in pipes and establishing an evaluation method for such crack growth. This report includes the results of flat plate test, straight pipe test, bend pipe test, and some material property tests, which have been performed through the pipe fatigue test.

In the flat plate test, fatigue test of flat plate specimens with surface defects were performed to study the influence of the front free surface and the interaction of surface cracks. Based on the test results, an evaluation method for the growth of multiple surface flaws were proposed including the influence of the front free surface and interaction of cracks.

In the straight pipe and bend pipe tests, fatigue test of pipes with multiple surface cracks were performed to study the behavior of fatigue crack growth in the inner surface of pipes.

* This work was performed under the contract between the Science and Technology Agency of Japan and JAERI to demonstrate the integrity for fatigue life of the primary coolant pipes in nuclear power plant.

From the above test results, the growth behavior of surface cracks in the flat plate and in the inner surface of pipes were obtained. These growth behaviors were also compared with those obtained by the method of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, and the method proposed in this study to examine an applicability of those evaluation method on the problem of surface crack growth in piping components.

It is shown by the test results that the method of the ASME Code gives an overconservative estimation as regard the crack coalescence, while crack shapes are incorrectly estimated resulting in an unconservative fatigue life evaluation under a certain load and boundary conditions. On the otherhand, it is shown that the method developed in this study gives a good estimation for the crack coalescence point, change in crack shape, and reasonable fatigue life.

Keywords: Fatigue Test, Surface Detects, Light Water Reactors Piping, Multiple Initial Detects, Interaction, Crack Growth

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験経過	4
3. 表面欠陥付平板試験片のき裂伝播試験結果およびき裂伝播評価法の検討	6
3.1 まえがき	6
3.2 試験方法	7
3.3 試験結果	7
3.3.1 自由表面の影響	7
3.3.2 隣接欠陥の干渉効果	8
3.4 複数表面欠陥の伝播予測法の提案	10
3.5 伝播予測結果と試験結果の比較	11
3.6 結 論	13
4. 複数内面欠陥付直管試験体のき裂伝播試験結果およびき裂伝播評価	36
4.1 まえがき	36
4.2 試験方法	36
4.2.1 直管試験体	36
4.2.2 疲労試験	37
4.2.3 測定方法	37
4.3 試験結果	38
4.3.1 応力分布測定結果	38
4.3.2 き裂伝播試験結果	39
4.4 試験体材料のき裂伝播特性	40
4.5 試験結果と予測結果の比較	40
4.6 結 論	41
5. 複数内面欠陥付曲管試験体のき裂伝播試験結果およびき裂伝播評価	61
5.1 まえがき	61
5.2 試験方法	61
5.2.1 曲管試験体	61
5.2.2 疲労試験	62
5.2.3 測定方法	63
5.3 試験結果	63
5.3.1 応力分布測定結果	63
5.3.2 き裂伝播試験結果	65
5.4 試験結果と予測結果の比較	65
5.5 結 論	66

6. 結 言.....	83
謝 辞.....	84
参考文献.....	84

Contents

1. Foreword	1
2. Progress of pipe fatigue test	4
3. Fatigue test results of flat plate specimen with surface flows and method of crack growth evaluation	6
3.1 Introduction	6
3.2 Test procedure	7
3.3 Test result	7
3.3.1 Influence of front free surface	7
3.3.2 Interaction of cracks	8
3.4 Proposed method of surface crack growth evaluation	10
3.5 Comparison of crack growth behavior between tested and predicted results	11
3.6 Conclusions	13
4. Fatigue test results of straight pipe with multiple flaws in inner surface, and comparison with evaluated crack growth behavior	36
4.1 Introduction	36
4.2 Test procedure	36
4.2.1 Test pipe	36
4.2.2 Fatigue test	37
4.2.3 Measurement	37
4.3 Test results	38
4.3.1 Results of stress distribution measurement	38
4.3.2 Result of fatigue test	39
4.4 Material da/dN vs. ΔK relationship	40
4.5 Comparison of crack growth behavior between tested and predicted results	40
4.6 Conclusions	41
5. Fatigue test results of bend pipe with multiple flaws in inner surface, and comparison with evaluated crack growth behavior	61
5.1 Introduction	61
5.2 Test procedure	61
5.2.1 Test pipe	61
5.2.2 Fatigue test	62

5.2.3 Measurement	63
5.3 Test results	63
5.3.1 Result of stress distribution measurement	63
5.3.2 Result of fatigue test	65
5.4 Comparison of crack growth behavior between tested and predicted results	65
5.5 Conclusions	66
6. Postword	83
Acknowledgement	84
References	84

1. 緒 言

わが国では軽水炉発電プラントの建設を中心に原子力開発が積極的に進められているが、原子力設備の安全確保が今後ますます重要な課題になると思われる。現在、稼動中又は建設中の原子力発電プラントはほとんどが軽水炉であり、その安全を確保するため多くの試験研究が進められている¹⁾。

原子力発電プラントの設置および維持、管理にあたっては一般公衆を放射線の被害から守るとともに可能な限り放射線被曝を低くすることを第一の前提として進められなければならない。すなわち軽水炉プラントの安全は配管破断のような事故時においても大量の核分裂生成物を確実にプラント内に封じ込めることによって達成されるのである。さらに、プラントの機能を維持し、性能を発揮し続けるためには構成機器の健全性が保たれねばならない。

プラントを構成する構成機器の設計、製造、施工および検査にあたっては機器の健全性がプラント寿命中十分保持されるよう各種の法令、基準、規格および指針等にのっとり作業が進められるようになっている。しかし、発電用軽水炉プラントが運転開始されて以来、国内、国外を問わず、構造機器の破損例が多数報告されている。^{2), 3), 4)} これらの破損原因も疲労、脆性破壊, Corrosion, Erosion 等多岐に渡っている。

軽水炉プラントの安全を確保し、機能を維持していくにあたっては上記破損事故の経験や、技術の進歩および構造研究の成果をふまえ、設計、製造、施工、および検査技術を漸次改善していく事も重要な課題である。

一方、軽水型原子炉の安全対策の観点から、仮想事故の一つとして配管が瞬時破断すると仮定し、その波及効果を最小限にとどめるための対応策が規定されている。

わが国では、発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針⁵⁾ にその対策について基本方針が定められている。この配管破断の考え方としては、配管が瞬時破断し、口径相当の破断口から高温高圧水が噴出するという仮定が基礎になっている。

配管が上記のような破断に至る可能性は極めて小さいと考えられるが、破断に到るプロセスとしてつぎが想定される。

- 1) 各種（溶接欠陥、疲労、SCC）の原因によって配管に複数の初期欠陥が発生する。
- 2) この複数欠陥が成長、合体し未貫通の状態で大きな単一欠陥へと成長する。
- 3) 何らかの原因（事故荷重、耐震荷重等）によって配管に大きな荷重がかかり破断が発生する。

上記のプロセスにより配管破断が発生したとしても瞬時に口径相当の破断が生ずる可能性は極めて小さいと思われる。しかし、上記各項における欠陥成長過程や破断限界を明らかにしておくことは原子炉構造機器の健全性を評価し、原子炉の安全性を確保していくという観点から非常に重要な課題である。

日本原子力研究所では原子炉配管の安全性に関する試験研究として配管信頼性実証試験を進めているが、本試験の一環として配管疲労試験を実施している。この試験では上記プロセスのうち

疲労による複数欠陥の伝播挙動を調べることを目的としている。すなわち、配管の同一断面上に複数欠陥が存在する場合、繰返し荷重によって初期欠陥からき裂が伝播し、合体して大きな欠陥へと成長していく過程を明らかにするとともに、このような欠陥が発見された場合の欠陥成長評価法についても検討することを目的として試験を進めている。

現在、原子力発電プラントの供用期間中検査法を規定した ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI⁶⁾ は破壊力学の手法に基づいた欠陥伝播評価法を疲労寿命評価に用いた欠陥の許容基準を採用している。また、わが国においても Sec. XI と同様の欠陥評価基準の採用が検討されている。

破壊力学を基にした欠陥評価基準は非破壊検査技術の進歩と相まって今後各方面で急速に広まると思われるが、一方、欠陥成長評価に対する信頼性や精度の向上および合理化等に関する問題も未だ多く残されており、今後の研究開発課題も多い。

例えば構造機器で発見された表面欠陥や内部欠陥の伝播解析にあたり導入される境界条件やき裂形状の単純化および用いられる応力拡大係数解の適用性の問題がある。評価基準の作成にあたっては手法の簡易性や汎用性が手法の保守性ととも不可欠な条件となるので、ASME Code で採用されているように、半楕円き裂又は埋没楕円き裂付平板に問題をモデル化することは合理的である。

しかし、き裂付平板へのモデル化にあたっては実構造物形状の供試体を用いた実証試験により適用性を十分検証しておくことが必要であるが、この点に関する試験研究は多くない。また、採用する応力拡大係数解に関しても上記試験により適用性および信頼性が十分確認されるべきである。

一方、欠陥が複数の場合の相互干渉効果の評価およびき裂合体の判定法についても重要な問題である。例えば、ASME Code では隣接き裂が接触する前に合体条件を設定し、干渉効果も合体判定基準中に含まれている。この方法は保守的と考えられるが合理的でなく、干渉効果および合体条件の設定に関してより合理的な基準へと改善する必要がある。

このほか、伝播にともなうき裂形状変化の推定法についても表面欠陥伝播評価上の問題点が指摘される。

以上に指摘した問題点のほか、環境中での構造材の材料特性に関してもき裂伝播評価上問題点が多く含まれるが、材料挙動に関しては本研究の範囲外でありここでは指摘するにとどめる。

以上に述べたき裂伝播評価法の問題点について、非安全側の評価基準は勿論のこと、過大に安全側の基準についても適切に修正するとともに合理的かつ精度および信頼性の高い評価法を確立していくことが現状での重要な研究課題となっている。

本研究では配管試験体を用いた試験結果により上記の諸問題に関して検討を行うとともにより精度の高いき裂伝播評価法を提案している。

配管疲労試験は53年度に試験開始以来、予備試験、直管試験、曲管試験、および平板試験を実施するとともに各種の基礎試験や計算解析も行ったが、本報では平板試験、直管試験、および曲管試験の結果を中心につぎの項目についてまとめた。

(1) 平板試験結果

平板試験では複数表面欠陥付平板試験片を用いて表面欠陥の伝播に関して基礎試験を行った。

その結果から複数表面欠陥の伝播実験結果に基づき表面欠陥の伝播における表面効果および隣接欠陥の干渉効果を検討するとともにこれらの効果を含めた複数表面欠陥の伝播評価法を提案している。さらに、実験結果と ASME Code Sec. XI の方法および本研究の方法から得られた伝播予測結果との比較を行っている。

(2) 直管試験結果

直管試験では直管試験体の同一円周断面に 3 個の半楕円欠陥を加工した母材試験体および溶接継手試験体を供試体に使用し繰返し曲げ荷重による疲労試験を行い、配管内面における表面き裂の伝播、合体の挙動を調べた。さらに、本研究で得られた表面欠陥伝播評価法および ASME Code Sec. XI の評価法によるき裂伝播評価を行い実験結果と比較し、これらの評価法の適用性を検討している。

(3) 曲管試験結果

曲管試験では 90 度エルボの両脇腹、内面に軸方向に 1 個又は 3 個の半楕円欠陥を加工した 2 体曲管試験体を供試体とし、曲管部に面内曲げ荷重がかかる荷重体系により行い、曲管部内面における複数表面欠陥の伝播、合体の挙動を調べている。さらに、第 4 章で述べた複数表面欠陥伝播評価法および Sec. XI の評価法によるき裂伝播評価を行い実験結果と比較し、これらの評価法の適用性を検討している。

2. 試験経過

配管疲労試験は配管信頼性実証試験の一部として実施された。本試験研究は50年度から計画が進められ、52年度には試験装置が完成した。

配管疲労試験では53年度から56年度に渡って配管試験体を主な供試体とした一連の疲労試験を実施した。配管疲労試験において実施した試験は予備試験、直管試験、曲管試験、および平板試験である。これらの試験と同時に基礎データを求めるための材料試験や各種測定法の検討等も行っている。以上の試験経過についてTable 2.1にまとめた。

また、Table 2.2には各試験の試験項目および内容等をまとめた。

Table 2.1 Progress of pipe fatigue test

Fiscal year Items	1977	1978	1979	1980	1981
Preliminary test	Fabrication of test pipe	Test (No. 1) Test (No. 2)			
Straight pipe test		Fabrication of test pipe	Test (ST-1) Test (ST-2)		
Bend pipe test			Fabrication of test pipe	Test (EL-1) Test (EL-2)	Test (EL-4) Test (EL-5)
Flat plate test				Fabrication of plate specimen	Test (FL-1) Test (FL-6)
Others	Test apparatus		Material test	Material test	Material test

Table 2.2 Summary of pipe fatigue tests

Items	Test No.	Material spec.	Geometry of test pipe (mm)	Initial defect			Load $\Delta\sigma$ kg/mm ² R	Loading method	Crack growth measurement	Results and remarks
				Number of defect	Defect interval (mm)	Geometry (mm) Location and direction				
Preliminary test	No.1	STPT38	straight pipe 205 ϕ ×15 ^t	1	—	3 ^d ×9 ^l 10 ^d ×24 ^l	18.0/0.05	4-point bending	Marking AE Micro-scope	Informations on test apparatus, instrumentations, and loading method were obtained.
	No.2			1	—	—				
Straight pipe test	ST-1	SUS304L	Straight pipe 320 ϕ ×35 ^t	3	50	8 ^d ×24 ^l	14.0/0.1	Cantilever bending	Marking UT	Crack growth behavior from multiple defect in the inner surface of pipes were obtained. Criteria by the Sec. XI gave conservative evaluation, except for EL-4.
	ST-2 (HAZ)			3	10	—				
Bend pipe test	EL-1	SUS304L	Elbow 320 ϕ ×35 ^t	3×2	58	—	-28.0/0.1	Axial load (In-plane bending)	Marking UT	Crack growth behaviors were compared with the present evaluation method.
	EL-2			3×2	100	8 ^d ×24 ^l	56.0/- .1			
	EL-4			1×2	—	—	21.0/0.1			
	EL-5			3×2	100	—	21.0/0.1			
				—	—	—	—			
Flat plate test	FL-1, -2	SUS304L	Flat plate 200 ^w ×24 ^t	1	—	—	14.0/0.1	Axial load	Marking UT	Front free surface and interaction effects were evaluated. Evaluation method was developed based on test results.
	FL-3, -4			2	42	5 ^d ×12 ^l	14.0/0.1			
	FL-5, -6			2	60	—	14.0/0.1			

3. 表面欠陥付平板試験片のき裂伝播試験結果 およびき裂伝播評価法の検討

3.1 まえがき

構造機器の非破壊検査において検出頻度が最も高い欠陥は表面欠陥であり、その伝播評価を正しく行うことは構造機器の安全評価上重要である。そのため従来、表面欠陥の伝播問題に関して実用上の重要性が強く認識され試験研究が行われてきた。

ASME Code Sec. XIに規定された欠陥伝播評価基準にはき裂は初期形状比を保持しながら伝播するという仮定が導入されているが、一般に表面欠陥は応力成分比や板厚に依存して形状変化することが知られており、^{7)~11),13)} 従って、より信頼性の高い表面欠陥の伝播評価を行うには形状変化も考慮する必要がある。この考えから、き裂形状変化も含めた表面欠陥伝播予測法が以下のようにいくつか提案され試験結果との比較も行われている。

川原、栗原^{7),8),9)} は膜応力と曲げ応力の比を変えた表面き裂の伝播試験を行いその結果から形状変化予測法を提案し、さらに、形状変化も含め複数欠陥の合体判別法や伝播推定法についても提案している。

また、Iida and Kawahara¹⁰⁾ は川原らによって得られた形状変化予測式およびKobayashi¹²⁾ による応力拡大係数の解を基にして複数表面欠陥の伝播予測法を提案するとともに多数の実験結果と比較している。さらに、飯田、安藤¹¹⁾ らは多数の実験結果を統計的手法を用いて解析した飯田、高による形状予測法¹³⁾ を用い、Kobayashi による応力拡大係数の解を用いた複数表面欠陥の伝播予測法を提案している。

以上述べた表面欠陥の伝播評価法では深さ方向への伝播にはParis 則¹⁴⁾ を適用し、表面方向の伝播には実験的に得られたき裂形状変化式を用いて伝播評価を行うのが特徴である。表面方向にParis 則を適用せず、実験から得られた形状予測式を用いる理由は欠陥前面の自由表面では応力状態が複雑であり信頼できる応力拡大係数解が得られておらず、このため表面方向にParis 則を適用することには問題があることなどの理由によるものである。このことはまた、前面での自由表面効果を適切に補正し、Paris 則を深さ方向と表面方向に適用すれば形状変化も含めた伝播予測が可能となることを示すものである。この立場から、Newman and Raju¹⁵⁾ は表面き裂伝播においては表面効果により10%程度応力拡大係数が低下すると推定し、き裂形状変化を検討している。

以上のことから、表面き裂伝播問題ではき裂前面での自由表面効果を明らかにする必要がある。

一方、複数表面き裂の伝播においてはき裂の干渉効果が発生し単一き裂とは異なる挙動を示す。Sec. XIでは複数欠陥は深さの2倍までの接近をもって合体した単一欠陥とみなし干渉効果もこの合体判定基準に含めている。しかし、複数き裂の伝播を検討した上記の研究結果^{9),10),11)} や著者ら¹⁶⁾¹⁷⁾ および新井、井野ら¹⁸⁾ による研究結果からき裂干渉効果は全体の伝播寿命にあまり影響せずSec. XIの合体判定基準は過大に安全側の設定となっていることが明らかにされている。

複数表面欠陥の干渉効果については新井、井野ら¹⁸⁾ による実験的検討、宮田、楠本¹⁹⁾ によ

る有限要素法解析例，および村上，西谷²⁰⁾による体積力法による解析例が発表されているが，これらの結果もふまえ，合理的な干渉効果の評価基準や合体判定基準を確立していく必要がある。

以上に述べたように，複数表面欠陥の伝播予測においては自由表面の影響，干渉効果，および合体条件を定量的に把握しておくことが重要である。

そこで平板試験は複数表面欠陥付平板試験片のき裂伝播試験により，複数表面欠陥の伝播における自由表面効果およびき裂干渉効果を定量的に把握するとともに，これらを考慮した表面欠陥の伝播予測法を検討することを目的として実施したものである。

以下では，1個または2個の初期欠陥付平板試験片により行った3ケースのき裂伝播試験結果について述べ，自由表面効果および複数き裂干渉効果を検討する。さらに，得られた評価式を基に形状変化をも含めた複数表面欠陥の伝播予測法を提案するとともに試験結果との比較および他の予測法との比較を行う。

3.2 試験方法

平板試験片の疲労試験は1個または2個の人工欠陥を加工したSUS 304L ステンレス鋼製の平板試験片を用いて行った。供試材の化学成分および機械的性質をTable 3.1およびTable 3.2に示す。試験片形状および人工欠陥位置をそれぞれFig. 3.1およびTable 3.3に示す。試験は欠陥数および欠陥間隔を変えて，3ケース行った。人工欠陥の寸法は5 mm深さ×12 mm長さでCase 1では1個，Case 2では2個（き裂間隔42 mm，1.75 t），Case 3では2個（き裂間隔60 mm，2.5 t）試験片に加工した。

疲労試験は100 Tonの油圧式疲労試験機を用いて，応力範囲， $\Delta\sigma = 14 \text{ kg/mm}^2$ ，応力比， $R = 0.05$ の軸力繰返し荷重により，室温，大気中で行った。試験条件をTable 3.4に示す。

疲労試験においては顕微鏡によるき裂長さ測定を行うとともにき裂深さおよびき裂形状を把握するため，ビーチマーク法によるき裂伝播測定を各試験片とも10回程度行った。各Caseについて同一条件の試験を2回ずつ実施した。

なお，ビーチマーク操作中の繰返し数は，ビーチマーク操作前後のき裂伝播速度とビーチマーク操作中のき裂進展量より，等価繰返し数を求めて，全体の繰返し数を補正した。

疲労試験はき裂が板厚を貫通するまで行った。その後疲労破面を切り出しビーチマーク観察を行った。Photo. 3.1～Photo. 3.3に疲労破面を示す。これらの破面写真から分るようにはば良好なビーチマーク模様を得られた。

測定結果から深さ方向および表面方向についてき裂伝播挙動を良好に把握できた。

3.3 試験結果

3.3.1 自由表面の影響

軸力荷重下における半円表面き裂の表面点における応力拡大係数解析結果は最深部に比べて10%程度高くなるのが普通であり¹⁵⁾，このことは，き裂伝播速度は応力拡大係数によって一義的に定まるといふ従来の研究結果を前提にすれば，表面欠陥は1.0以下のアスペクト比へと均衡して

成長しなければならないことを示している。しかし、後に示すように平板試験から得られたき裂のアスペクト比は1.0を越える部分があり、上記のことと矛盾する。

このことは自由表面による3次元的效果およびき裂先端における塑性変形挙動の違いによると考えられる。

すなわち、き裂が表面に突出している部分では自由表面があるため平面応力状態であり、内部へ行くに従って拘束が大きくなり平面歪状態となってくる。そのため、表面付近では応力状態が複雑となり、また、内部より塑性変形が生じやすくなる。その結果、表面付近においては内部より塑性変形による応力緩和が生じやすくなる。

自由表面付近でき裂伝播が遅れる理由は以上のような事情によると考えられるが、このことはこれまでに得られている応力拡大係数解析結果には考慮されていない。

そこで、ここでは平板試験結果に基づきつぎの方法で表面効果補正係数を導く。

Fig. 3.2 は各試験結果について表面および最深部のき裂伝播速度と応力拡大係数範囲の関係を示したものである。応力拡大係数はNewman and Raju¹⁵⁾によって得られた結果を用いた。同図から明らかなように、応力拡大係数範囲とき裂伝播速度の関係は最深部と表面で異なり、表面の方が伝播速度が低くなっている。表面における da/dN vs. ΔK_B 曲線は最深部における da/dN vs. ΔK_A 曲線に対してほぼ平行である。

最深部における da/dN vs. ΔK_A 曲線の方が材料のき裂伝播特性 ($da/dN - \Delta K$ 曲線)に近いと考えられるので、補正した後の da/dN vs. $\Delta K_{eff, B}$ 曲線は da/dN vs. ΔK_A 曲線と一致すべきである。以上のことから表面効果補正として、大略、Fig. 4.3における da/dN vs. ΔK_B 曲線を平行移動した $\Delta K_{eff, B} = C_{fs} \Delta K_B$ の補正が近似的に可能であると判断され、次式の補正係数が得られる。

$$C_{fs} = \frac{\Delta K_{eff, B}}{\Delta K_B} = 0.824 \quad (3.1)$$

3.3.2 隣接欠陥の干渉効果

試験結果から得られたき裂伝播曲線において貫通までの寿命の大半はき裂が小さい期間で占められているので、隣接欠陥の干渉効果はき裂伝播寿命の全体には余り影響をおよぼさない。しかし、Pohto. 3.2およびPohto. 3.3におけるビーチマーク破面から分るように隣接欠陥内側への伝播長さは外側への伝播長さに比べ大きくなっており、き裂の干渉が内側においてより大きく生じていることを示している。そこで以下に複数欠陥の試験結果 (FL-3~FL-6)を基に干渉効果を検討してみる。

Fig. 3.3 は表面での伝播速度について内側と外側の伝播速度比、 α とき裂の接近度の関係を各試験結果について示したものである。ただし、FL-4のデータについては左右のき裂がアンバランスに進展し、正しく評価できないので除外した。同図においてき裂が合体点 ($\lambda = 1$) に近づくとつれ α が大きくなり干渉効果が生じていることは明らかである。

図における α は主にき裂間隔 (き裂接近度) に依存し、そのほか、アスペクト比 β ($\beta = a/b$)にも依存すると考えられるが、以下に同図を基にき裂干渉効果を検討する。

2個の表面き裂の内側表面点に対する干渉効果 ($C_{si} = (K_{B, \text{inside}}) \text{ two-crack} / (K_B) \text{ single-crack}$) はつぎのように考えられる。すなわち、き裂が接近すると干渉効果が大きくなり発散し ($C_{si} \rightarrow \infty$)、遠ざかる場合には次第に消失する ($C_{si} \rightarrow 1$)。また、き裂長さおよびき裂間隔が同一であってもアスペクト比 (β)、が大きく深いき裂に対して干渉効果はより大きく、この場合 β の増加に従って2個の貫通き裂の干渉効果に漸近し、逆に、 β が0に近づく場合は干渉効果は無くなる ($C_{si} \rightarrow 1$) と考えられる。

一方、外側表面点に対する干渉効果 ($C_{so} = (K_{B, \text{outside}}) \text{ two-crack} / (K_B) \text{ single-crack}$) は内側と同様の傾向であるが内側よりかなり小さく、合体位置において有限値となる。また、 C_{so} の上限も等長貫通き裂の外側の干渉効果 (C_{to}) に漸近すると考えられる。 C_{to} の値は、 $\lambda = 0.9$ で $C_{to} = 1.12$ 、合体点 ($\lambda = 1.0$) においては、 $C_{ti} = \sqrt{2}$ であり、²³⁾ 表面き裂の場合はそれよりさらに小さくなるので、 β が大きくない場合は、外側表面点に対する干渉効果は無視しても問題はないと考えられる。

以上の考察から Fig. 3.3 の α は近似的に単一欠陥との伝播速度比としても大きな誤差はない。すなわち、

$$\alpha = \frac{(db/dN) \text{ inside}}{(db/dN) \text{ outside}} \cong \frac{(db/dN) \text{ inside}}{(db/dN) \text{ single}} \quad (3.2)$$

一方、2個の等長貫通き裂の応力拡大係数は石田²¹⁾により解が得られており、この解から得られる内側の干渉効果、 C_{ti} はつぎの通りである。

$$C_{ti} = K_{\text{inside}} / K_{\text{single}} = \frac{(1+\lambda)^2 E(\phi) / K(\phi) - (1-\lambda)^2}{2\lambda\sqrt{1-\lambda}} \quad (3.3)$$

ここで、 λ = き裂長さ / き裂中心間隔であり、 $\phi = 2\lambda / (1+\lambda)$ である。き裂伝播則に Paris 則を適用すれば2個の等長貫通き裂と単一き裂の伝播速度比、 α_t はつぎの通りである。

$$\alpha_t = \left\{ \frac{[(1+\lambda)^2 E(\phi) / K(\phi) - (1-\lambda)^2]}{2\lambda\sqrt{1-\lambda}} \right\}^m \quad (3.4)$$

ここで表面き裂の干渉効果の上限が、貫通き裂の干渉効果に一致することを考慮すると、 $\beta \rightarrow \infty$ で $\alpha \rightarrow \alpha_t$ 、 $\beta \rightarrow 0$ で $\alpha \rightarrow 1.0$ となるのでこの関数形をつぎのように仮定する。

$$\alpha = \alpha_t \frac{\beta^n}{A + \beta^n} \quad (3.5)$$

Fig. 3.3に示す実験データを基にAの最適値を求めた結果 $A = 0.43$ 、 $n = 2.1$ が得られた。(3.4)式および(3.5)式から表面き裂の内側表面点での干渉効果について次式が得られる。

$$C_{si} = \alpha^{\frac{1}{m}} = \left\{ \frac{(1+\lambda)^2 E(\phi)/K(\phi) - (1-\lambda)^2}{2\lambda\sqrt{1-\lambda}} \right\}^{\frac{\beta^{2.1}}{0.46 + \beta^{2.1}}} \quad (3.6)$$

Fig. 3.3における実線は $\beta = 0.9$ として(3.4)式を用いて描いたものであり、また各実験点は β が0.9以上のものと0.9以下のものに区別してプロットしたものである。データにはかなりバラツキがあるが、 $\beta < 0.9$ のデータの平均は実線の下に、 $\beta > 0.9$ のデータ平均は実線の上に来る傾向を示している。Fig. 3.4は村上、西谷²⁰⁾によって求められた等大半楕円き裂の干渉効果の計算結果、および新井、井野ら¹⁹⁾によって得られた実験式と(3.6)式を比較したものである。新井らの実験式にはアスペクト比の効果は考慮されていないが、この式はほぼ、貫通き裂の干渉効果に一致し、大きすぎる値を与えると思われる。また、(3.6)式は村上らの解析結果に比較し、 $\beta = 1.0$ では若干大き目の値を与え、 $\beta = 0.5$ では逆の傾向を示しているがほぼ妥当と思われる。従って、アスペクト比依存性については(3.6)式により良好に評価されると思われる。

表面き裂の干渉効果は最深点に対しても存在するが、村上らの結果からも分るように無視しても問題はないと考えられる。

なお、(3.1)式～(3.6)式において記号はつぎの通りである。

α : 2個の表面欠陥の内側表面点と外側の伝播速度比、または単一欠陥との伝播速度比

α_t : 2個の等長貫通欠陥の内側と単一欠陥の伝播速度比

β : 表面き裂または半楕円き裂のアスペクト比

λ : 2個のき裂のリガメント係数

$$= 1 - s/d$$

$$\phi : = 2\sqrt{\lambda}/(1+\lambda)$$

C_{fs} : 自由表面効果補正係数

C_{si} : 複数表面き裂の内側表面点における干渉効果係数

C_{so} : 複数表面き裂の外側表面点における干渉効果係数

C_{ti} : 複数貫通き裂の内側の干渉効果係数

C_{to} : 複数貫通き裂の外側の干渉効果係数

s : 複数き裂のき裂間のリガメント

m : Paris 則における ΔK のべき乗の指数

3.4 複数表面欠陥の伝播予測法の提案

3.3において求められた表面効果係数および干渉効果係数の実験式を用いて、ここでは複数表面欠陥の伝播予測法を提案する。

Fig. 3.5に予測手順の流れ図を示す。

伝播予測はつぎの手順により行うものとする。

(1) き裂形状はASME Code Sec. XIと同様に半楕円形状にモデル化する。

(2) 荷重条件から断面における $\Delta\sigma_m$ 、 $\Delta\sigma_b$ を求め、これらとき裂形状からNewman and

Raju¹⁵⁾の解を用いて、最深部の応力拡大係数範囲 (ΔK_A) および表面の応力拡大係数範囲 (ΔK_B) を求める。

さらに、 ΔK_B については (3.1) 式および、(3.6) 式を用いてつぎのように補正する。

$$\Delta K_{B, \text{eff}} = C_{fs} C_{si} \Delta K_B$$

ただし、左右のき裂寸法が異なる場合はき裂間のリガメント ($s = d - b_{12} - b_{21}$) を同一寸法とし、深さ、および長さは大きい方の値を持つ、二つの等大半楕円き裂に置き換えて C_{si} を評価するものとする。

- (3) 得られた ΔK_A , $\Delta K_{B, \text{eff}}$ を基に材料のき裂伝播特性 (da/dN vs. ΔK 曲線) を用いて、1 サイクル当りの Δa , Δb を求める。
- (4) $a = a + \Delta a$, $b = b + \Delta b$ として同一荷重条件の負荷回数繰返す。ただし、き裂の合体は隣接するき裂が接したときに生ずると仮定し、合体後は新たに最深部と $1/2$ 長さを両軸の半径とする単一の半楕円き裂になると仮定してき裂形状を更新する。
- (5) 異なる荷重条件すべてに対して(2)~(4)のステップの計算を行う。

以上の手順により複数表面き裂の伝播予測が可能である。

Table 3.5 に ASME Code Sec. XI の方法と本法との比較を示す。この比較から分るように本法はつぎの点の特徴となっている。

- (1) 表面き裂の伝播における表面効果および隣接き裂の干渉効果が予測中に含まれている。
- (2) き裂伝播則を深さ方向と表面方向にそれぞれ独立して適用するのでき裂形状変化が適切に予測できる。従って、Sec. XI で採用しているアスペクト比一定の仮定によって生ずるような不都合は生じない。
- (3) 干渉効果およびき裂形状変化を適切に評価しており、合体の判定方法についても Sec. XI の場合より合理的であり、明確となっている。

3.5 伝播予測結果と試験結果の比較

平板試験体の疲労試験から得られた表面欠陥の伝播挙動に関しここでは以下に述べる3種類の予測方法(予測法Ⅰ~予測法Ⅲ)によるき裂伝播予測を行い試験結果と比較する。

予測法Ⅰは ASME Code Sec. XI に規定された方法であり、予測法Ⅱは本論文の3.4で提案した方法である。さらに、予測法Ⅲは予測法Ⅱにおいて干渉効果および表面効果を考慮しない予測法、すなわち、干渉効果および表面効果の補正係数を1.0とした場合である。

上記の方法によるき裂伝播予測を行うには材料のき裂伝播特性、 $da/dN - \Delta K$ 曲線が必要であり、このデータは平板試験片と同一の板材から中央切欠き試験片 (CCT 試験片, 160 mm W × 10 mm t × 500 mm L) を製作し、その疲労試験結果から求めた。Fig. 3.6 に得られた $da/dN - \Delta K$ 曲線を示す。同図に示すように曲線の上下限は次の通りである。

$$\frac{da}{dN} = 5.17 \times 10^{-11} \Delta K^{3.22}$$

$$\frac{da}{dN} = 2.60 \times 10^{-11} \Delta K^{3.29} \quad (3.7)$$

各予測法によるき裂伝播予測は (3.7) 式を用いて上下限のバンド幅で行い、平板試験結果と比較した。

予測法 I に基づく予測結果と試験結果から得られたき裂伝播曲線の比較を Fig. 3.7 ~ Fig. 3.12 に示す。予測法 I はいずれの試験結果に対しても安全側の結果を与えている。とくに、2 欠陥の伝播を調べた Case 2 および Case 3 に対して試験結果に比べき裂が小さいうちに合体条件に達し、非常に安全側の評価となっている。

このことから Sec. XI における合体判定基準は過大に安全側の設定となっていると思われる。また、Sec. XI にはき裂は同一形状を保持しながら伝播するという仮定が導入されているが、Photo. 3.1 ~ Photo. 3.3 に示す破面観察結果から分るようにき裂伝播に従って形状は変化している。このため、形状不変の仮定はき裂伝播評価に不正確さを生じさせるだけでなく、後に述べるように非安全側の評価を与える原因となる恐れもある。

予測法 II および予測法 III により得られたき裂伝播曲線の予測結果と試験結果との比較を Fig. 3.13 ~ Fig. 3.18 および Fig. 3.19 ~ Fig. 3.24 に示す。予測法 II の場合、伝播寿命の長い FL-2 の試験結果を除けば試験結果はいずれも予測値の上限と下限のバンド幅の中に入っていることが図から明らかであり、また、合体が起るき裂深さの予測値も各試験結果と良く一致している。

一方、表面効果およびき裂干渉効果を補正しない予測法 III による結果は、Fig. 3.19 ~ Fig. 3.24 から分るようにいずれの場合も短寿命側のき裂伝播予測となっている。

従って、補正を導入した予測法 II は最も試験結果に近いき裂伝播予測値を与えることが以上のことから分る。

つぎに、き裂伝播にともなうき裂形状の変化をアスペクト比 (a/b) と無欠元化したき裂深さとの関係で求め各予測法から得られた結果と試験結果を比較したのが Fig. 3.25 ~ Fig. 3.30 である。いずれの試験結果においても、き裂伝播に伴ってアスペクト比は初期値 (0.83) から増加し、 a/t が 0.5 程度で 1.0 ~ 1.2 の最大値となり、その後減少していくことが分る。Sec. XI では相似き裂形状が保持されるという仮定を導入しているので、予測法 I によるアスペクト比は合体条件に達するまで一定であり試験結果とは一致しない。また、試験結果と比較し、き裂がかなり浅いうちに合体条件に達していることはこれからの図からも明らかである。

一方、予測法 II はいずれも試験結果の傾向と良く一致する。単一欠陥の場合、 a/t が 0.7 以上になると試験結果から得られたアスペクト比の減少の割合は予測法 II より大きくなり、試験結果は小さなアスペクト比を示す。このことからき裂が深くなると最新部では Back surface の影響により局所的な塑性変形による応力緩和が生じ、その結果き裂伝播が起こりにくくなる可能性も考えられる。

Newman and Raju の解は a/t が 0.8 以上までは、適用可能であり、予測法 II によるき裂形状変化の予測値も $a/t = 0.8$ 程度までは良好である。また、Case 2 に対しては合体時のき裂深さの予測値も良好であり a/t が 0.8 までの範囲では予測法 II により良好に合体時き裂深さも予測できると判断される。Case 3 の試験結果では予測値より浅い位置で合体が起きており、上記 Back Surface の効果や応力拡大係数解の誤差が生じていると思われる。

表面効果およびき裂干渉効果を見捨てた予想法Ⅲの結果は予想法Ⅱよりかなりアスペクト比の変化は平坦であり予想法Ⅱほど試験結果と良く一致していない。

以上から、本論文で提案した予想法Ⅱによる伝播予測結果は伝播寿命、き裂形状変化、およびき裂合体のいずれに対しても、おおむね良好な予測値を与えていることが分た。

3.6 結 論

複数表面き裂の伝播挙動に関し、自由表面の効果およびき裂の干渉効果を明らかにするため単数または複数表面欠陥付平板試験片による軸力荷重下におけるき裂伝播試験を3ケース実施した。試験結果から、表面効果 (C_{fs})、および干渉効果 (C_{si}) についてつぎの補正係数が得られる。

$$C_{fs} = 0.824$$

$$C_{si} = \left\{ \frac{(1+\lambda)^2 E(\phi) / K(\phi) - (1-\lambda)^2}{2\lambda\sqrt{1-\lambda}} \right\}^{\frac{\beta^{2.1}}{0.46 + \beta^{2.1}}}$$

また、表面における有効応力拡大係数はつぎのように表わされる。

$$K_{B,eff} = C_{fs} \cdot C_{si} K_B$$

平板試験の結果について ASME Code Sec. XI によるき裂伝播解析との比較を行うとともに、上記の補正係数を基にした表面き裂の伝播予測法を提案し、この予測法によるき裂伝播予測、および補正をしない場合のき裂伝播予測を行い、これらと試験結果とを比較した。さらに、提案した予測法を基にき裂形状変化および隣接き裂合体判別法について検討した。以上の結果からつぎの結論が得られた。

- (1) ASME Code Sec. XI における合体判定法はかなり安全側の設定であり、そのため平板試験における伝播寿命予測は過大に安全側となる。さらに、同コードに導入されている同一き裂形状保持の仮定は試験結果から判断して妥当とはいえない。
- (2) 本研究で提案している表面き裂伝播予測法はき裂形状変化およびき裂合体位置の予測に関して試験結果と良く一致し、また、伝播寿命予測も良好である。
- (3) 複数表面き裂伝播において、隣接き裂内側表面点では、明らかに干渉効果が認められるが、き裂伝播寿命には大きな影響をおよぼさない。一方、き裂伝播寿命におよぼす自由表面効果は大きく、これを無視した場合、良好な伝播挙動予測ができない。

Table 3.1 Chemical compositions of test material (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
Spec.	Max 0.020	Max 1.00	Max 2.00	Max 0.040	Max 0.030	18.00- 20.00	8.00- 12.00	Max 0.12
H9237	0.010	0.45	1.50	0.026	0.008	18.41	10.33	0.10

Table 3.2 Mechanical properties of test material

		0.2% YS kg/mm ²	UTS kg/mm ²	Elong. %	Hardness H _B	Grain size ASTM No.	Ferrite %
Spec. (Aimed)		Min 21.0 (26.0 - 28.0)	Min 53.0 (53.0 - 63.0)	Min 30 (60.0 - 70.0)	— (150 - 155)	— (4 - 6)	— (max 0.01)
H9237	L	26.3	57.9	60.4	156	3.5	0.15
	T	25.5	59.6	59.6	156		
H9237* (L)	F2	23.7	58.0	70.0	—	—	—
	F3	24.0	57.0	70.0	—	—	—

* Tested by user: GL = 50 mm, D = 10.0 mm ϕ

Table 3.3 Location of artificial defects

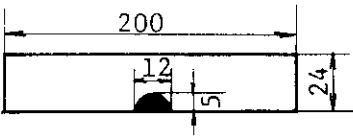
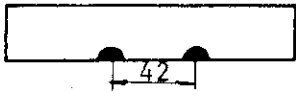
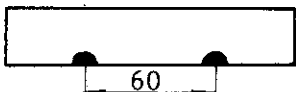
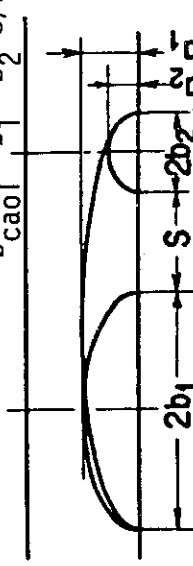
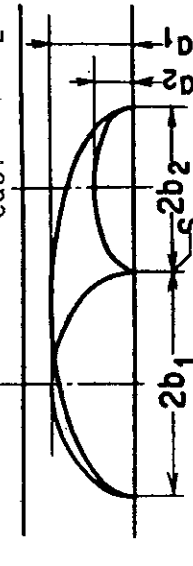
case 1		Specimen No. FL-1, FL-2
case 2		Specimen No. FL-3, FL-4
case 3		Specimen No. FL-5, FL-6

Table 3.4 Test conditions

Case No.	Case 1	Case 2	Case 3
Items	(FL-1) -2	(FL-3) -4	(FL-5) -6
number of cracks	1	2	2
crack interval	—	42 mm (1.75 t)	60 mm (2.5 t)
stress range	14 kg/mm ²		
stress ratio	0.05		
geometry of test section	24 mm t × 200 mm W		
geometry of EDM defect	5 mm depth × 12 mm width		
cyclic rate	7 H ₂		

Table 3.5 Comparison of two analytical procedures

Method Items	Method I (ASME Code Sec. XI)	Method II (Present study)
Model for analysis	Flat plate with single or multiple semi-elliptical cracks subjected to membrane and bending stresses	Flat plate with single or multiple semi-elliptical cracks subjected to membrane and bending stresses
Criteria for crack coalescence	<p>Coalescence: $S = 2a_1, a_{caol} = a_1$ $b_{caol} = b_1 + b_2 + S/2$</p> 	<p>Coalescence: $S = 0, a_{caol} = a_1$ $b_{caol} = b_1 + b_2$</p> 
Interaction of adjacent cracks	Included in the crack coalescence criteria	$C_{si} = \left(\frac{(1+\lambda)^2 E(\phi) / k(\phi) - (1-\lambda)^2}{2\lambda\sqrt{1-\lambda}} \right)^{\beta^2.1}$ $k_{Beff} = C_{si} K_B$
Influence of front free surface	Neglected	$C_{fs} = 0.824, k_{Beff} = C_{fs} k_B$
Application of crack growth formula	Thickness direction, only; Surface length is determined by the assumption that cracks grow geometrically similarly	Thickness and surface directions; Change in the crack shape can be evaluated reasonably

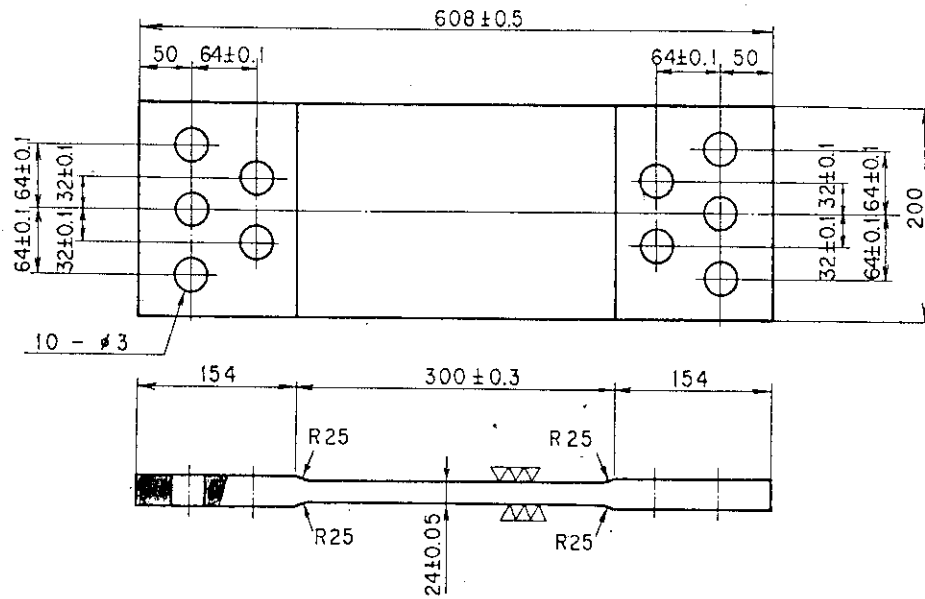


Fig. 3.1 Geometry of flat plate specimen

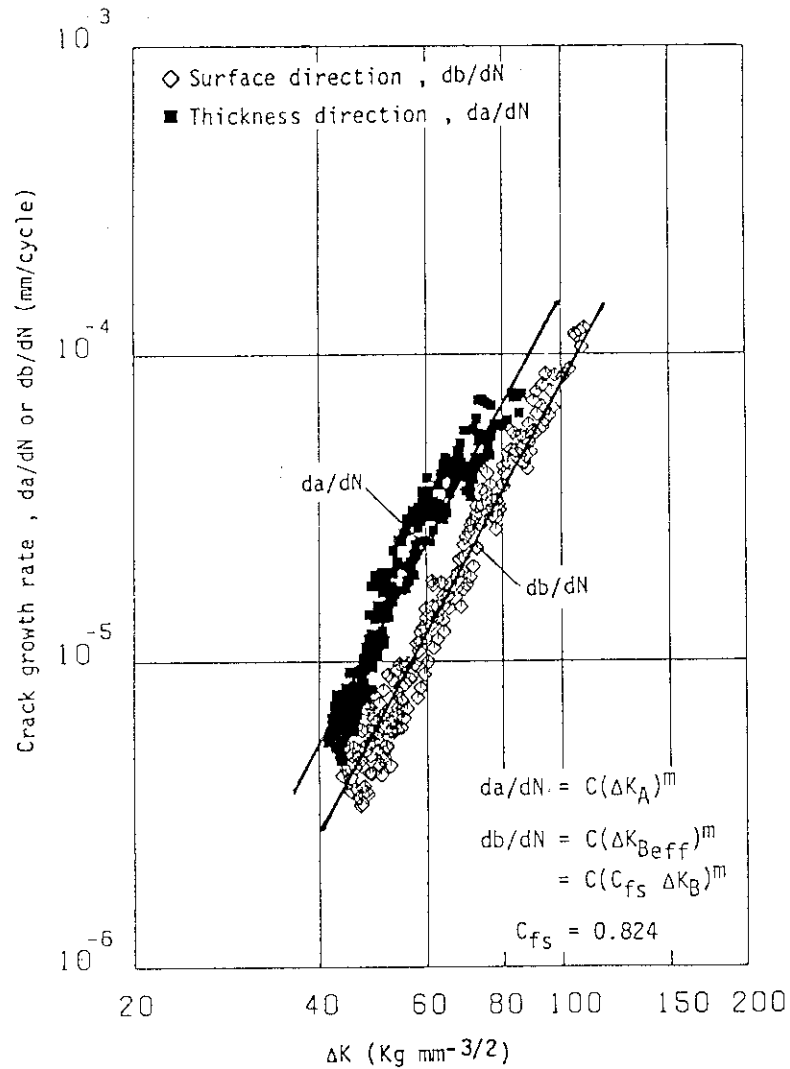


Fig. 3.2 Relationship between crack growth rate and range of stress intensity factor

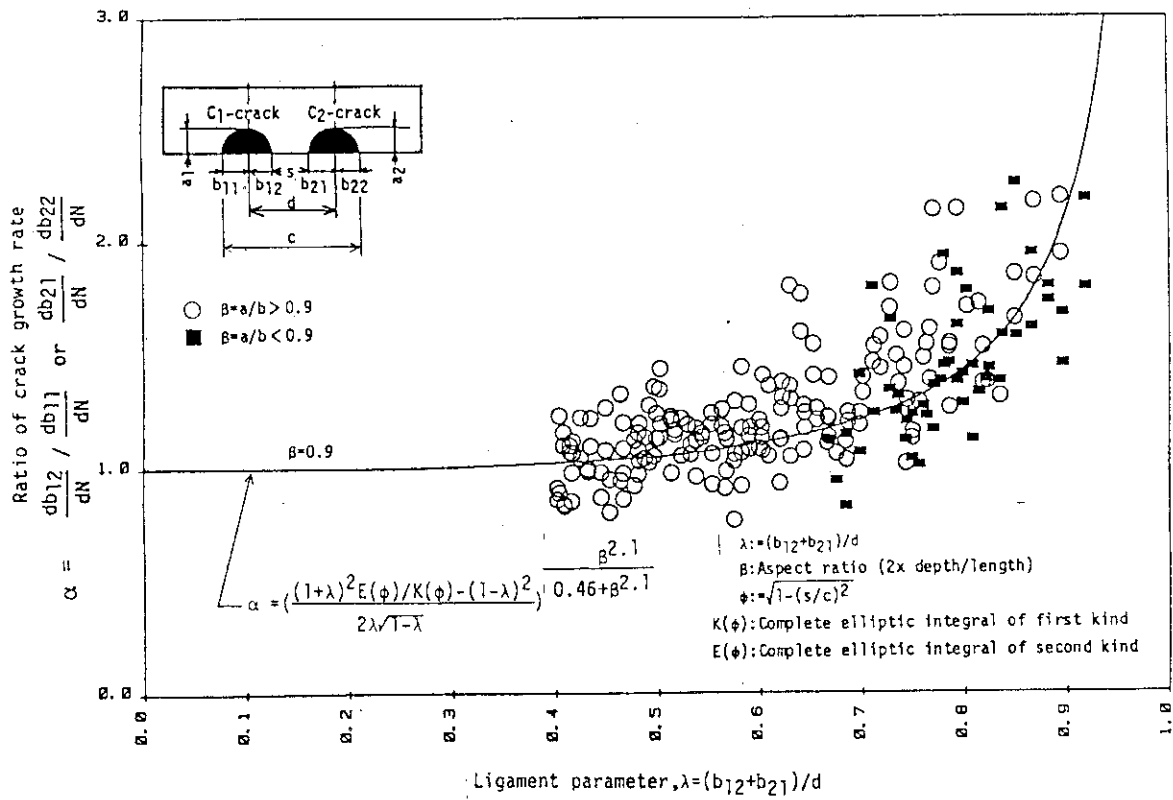


Fig. 3.3 Influence of adjacent crack on the crack growth rate of surface direction

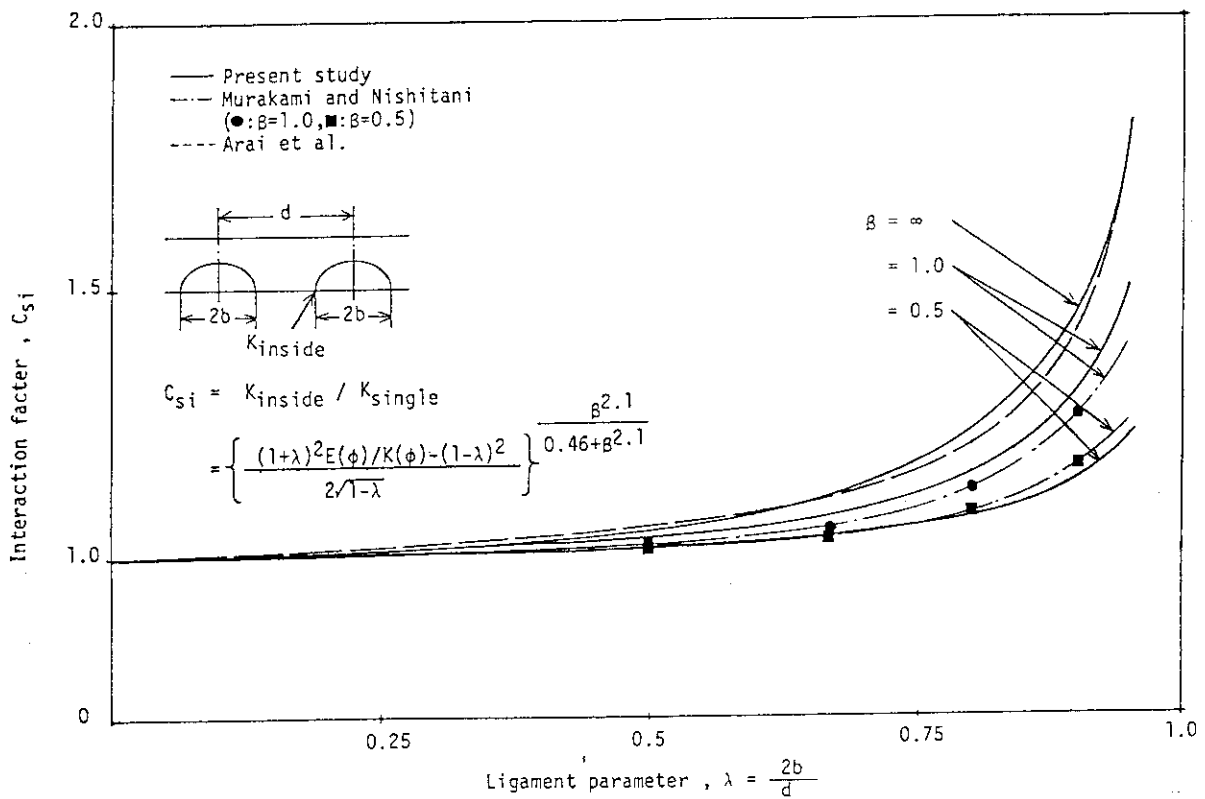


Fig. 3.4 Comparison of interaction effect of surface cracks

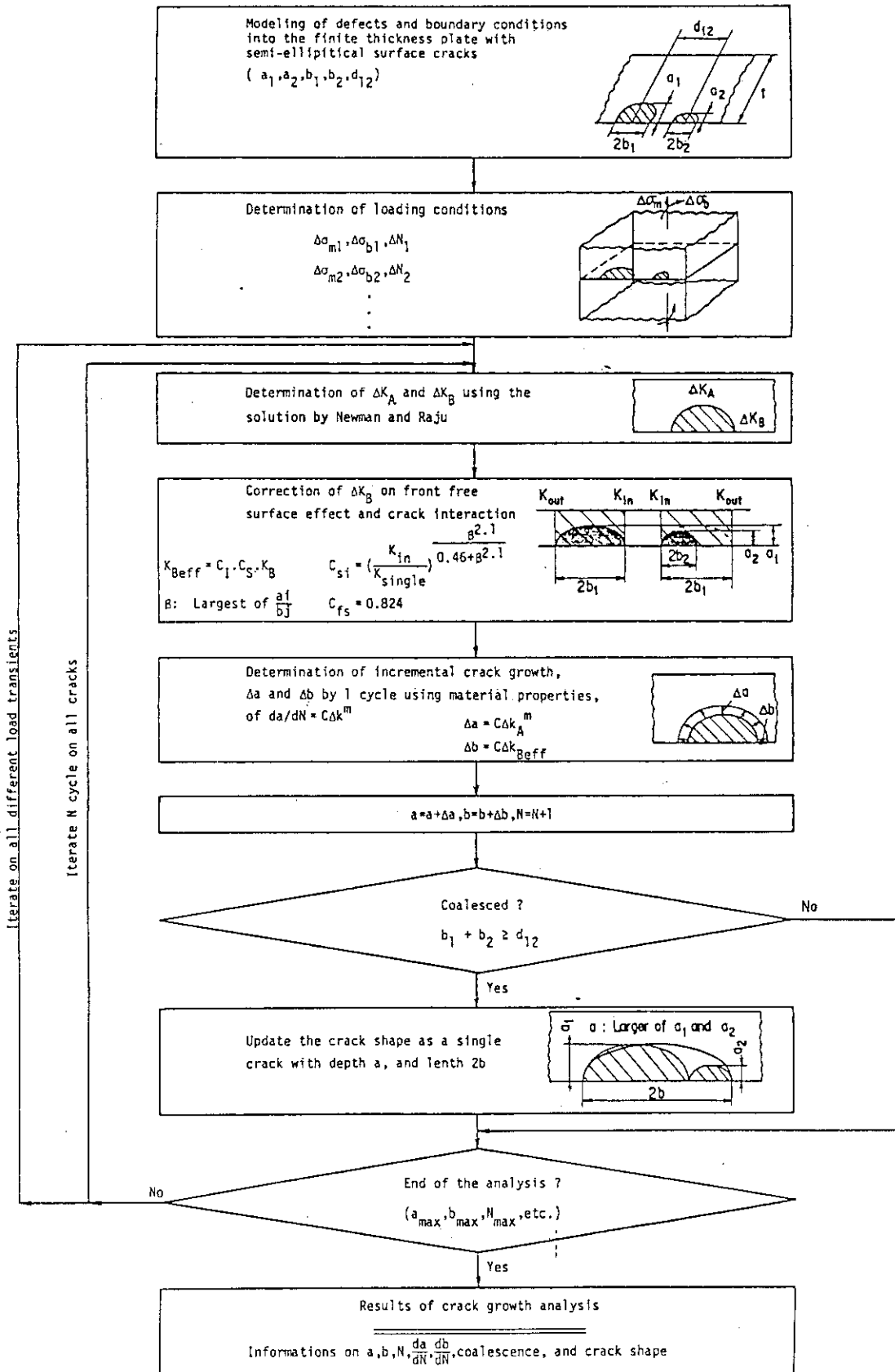


Fig. 3.5 Flow of the proposed evaluation procedure of collinear surface cracks

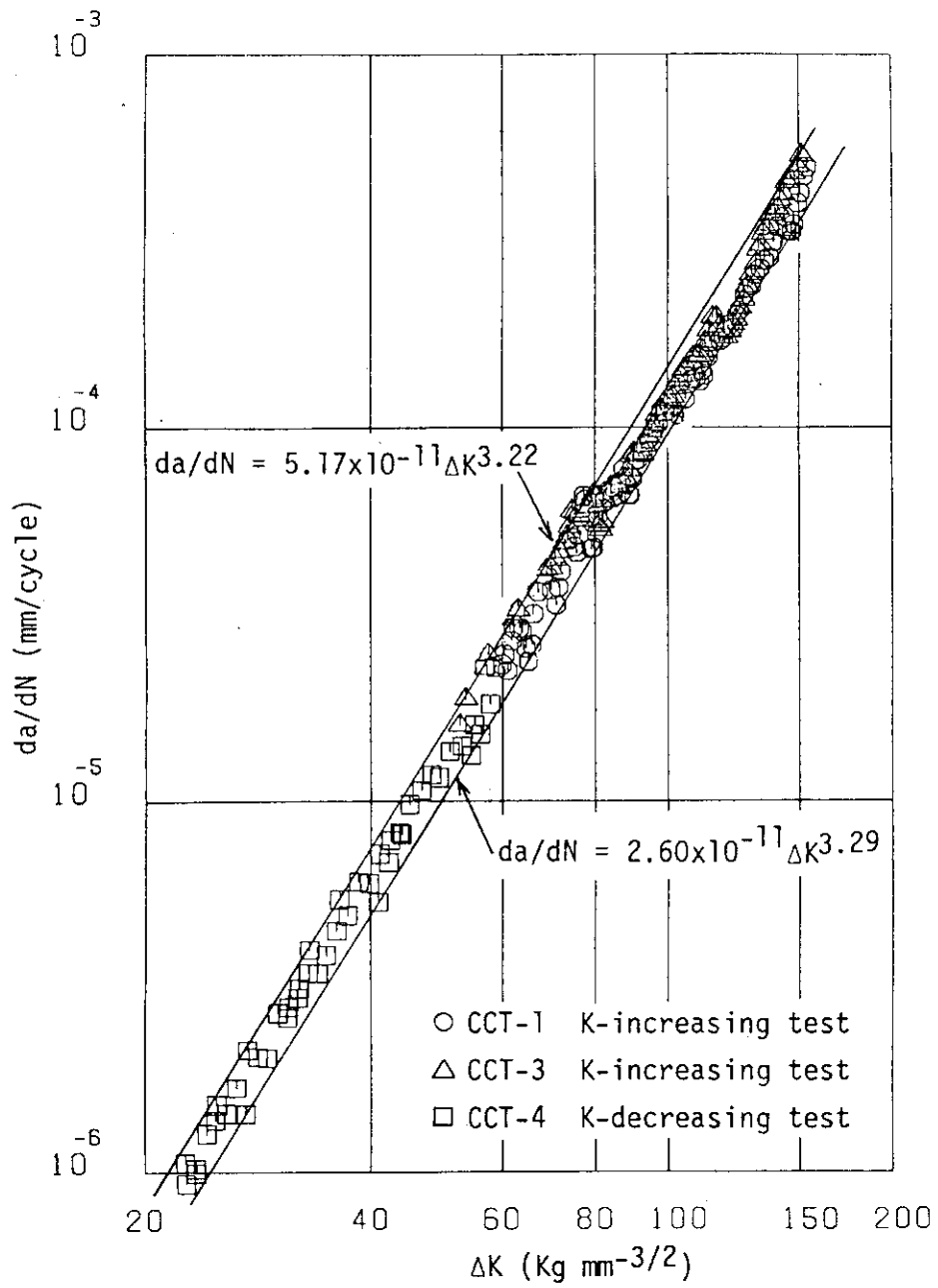


Fig. 3.6 Material da/dN vs. ΔK curve of SUS304L stainless steel plate

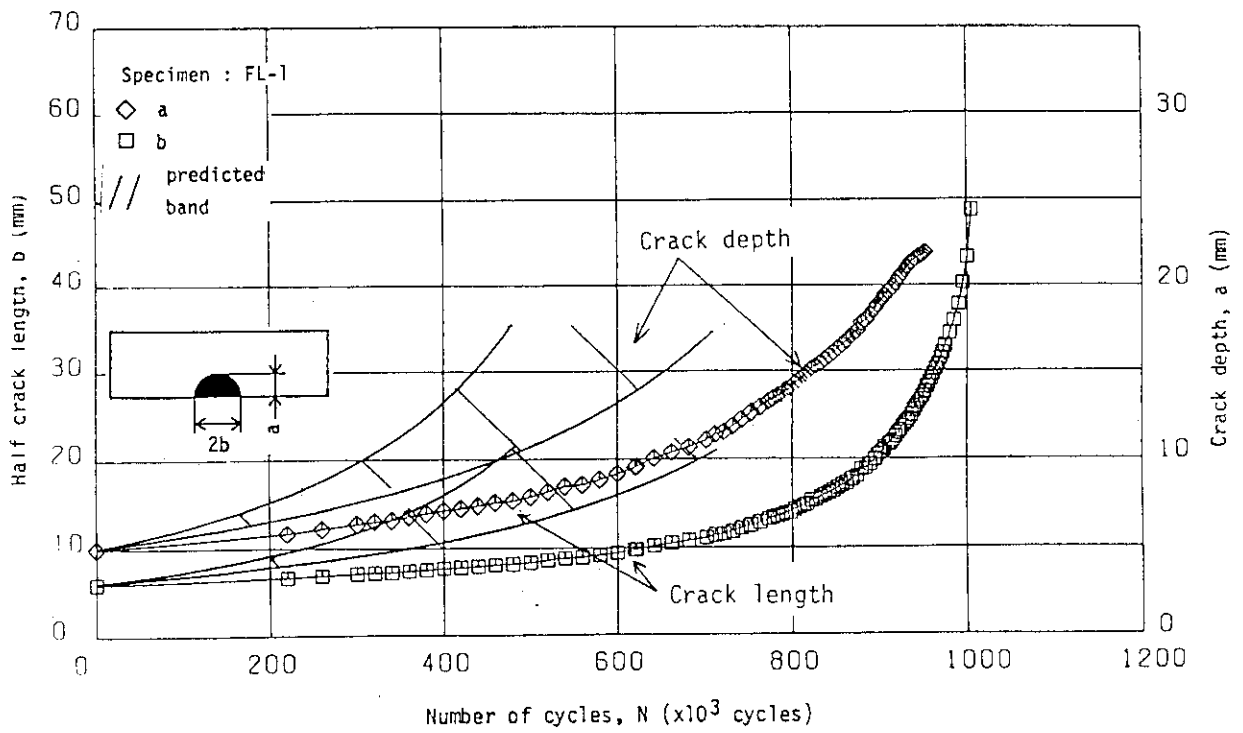


Fig. 3.7 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by ASME code (Method I)

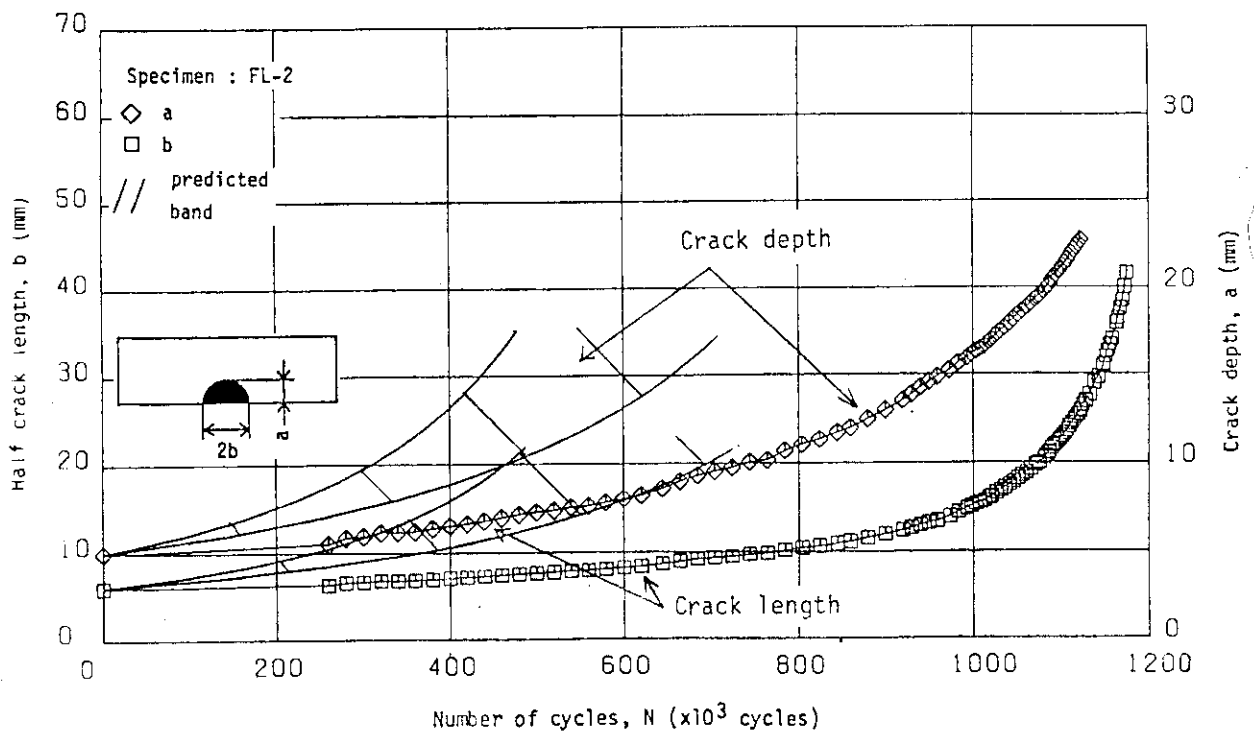


Fig. 3.8 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by ASME code (Method I)

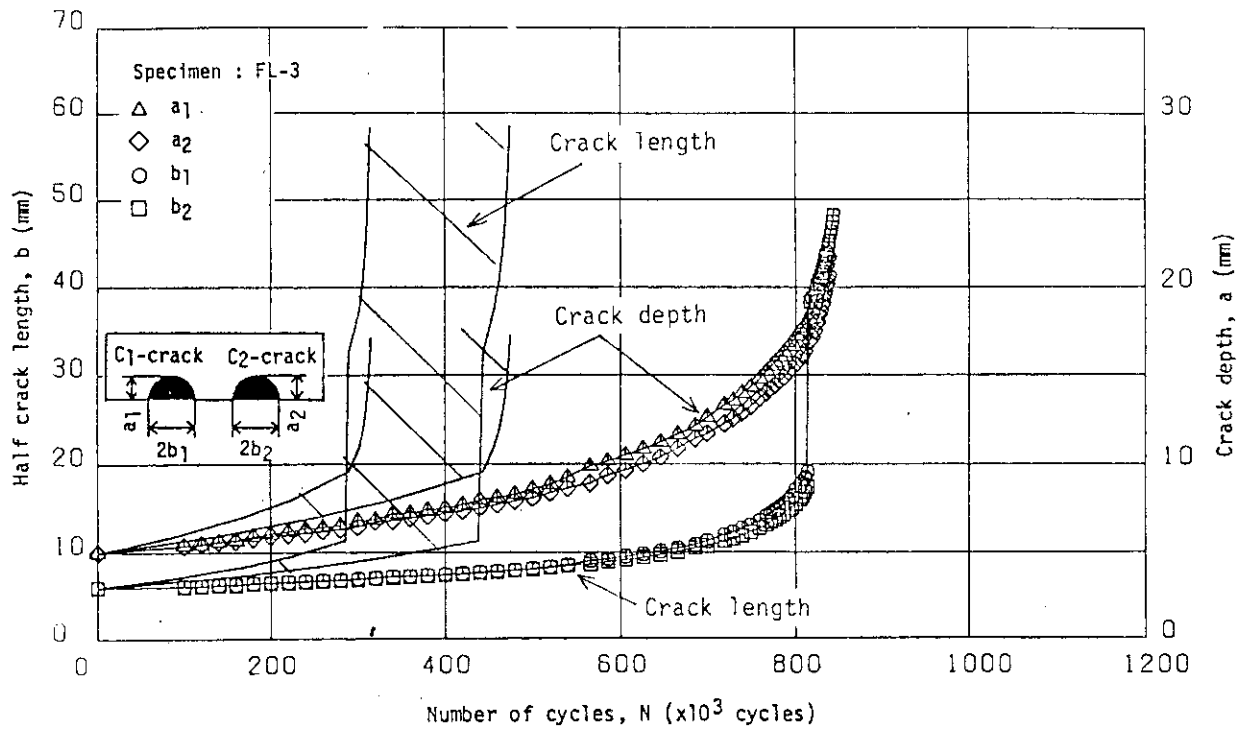


Fig. 3.9 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by ASME code (Method I)

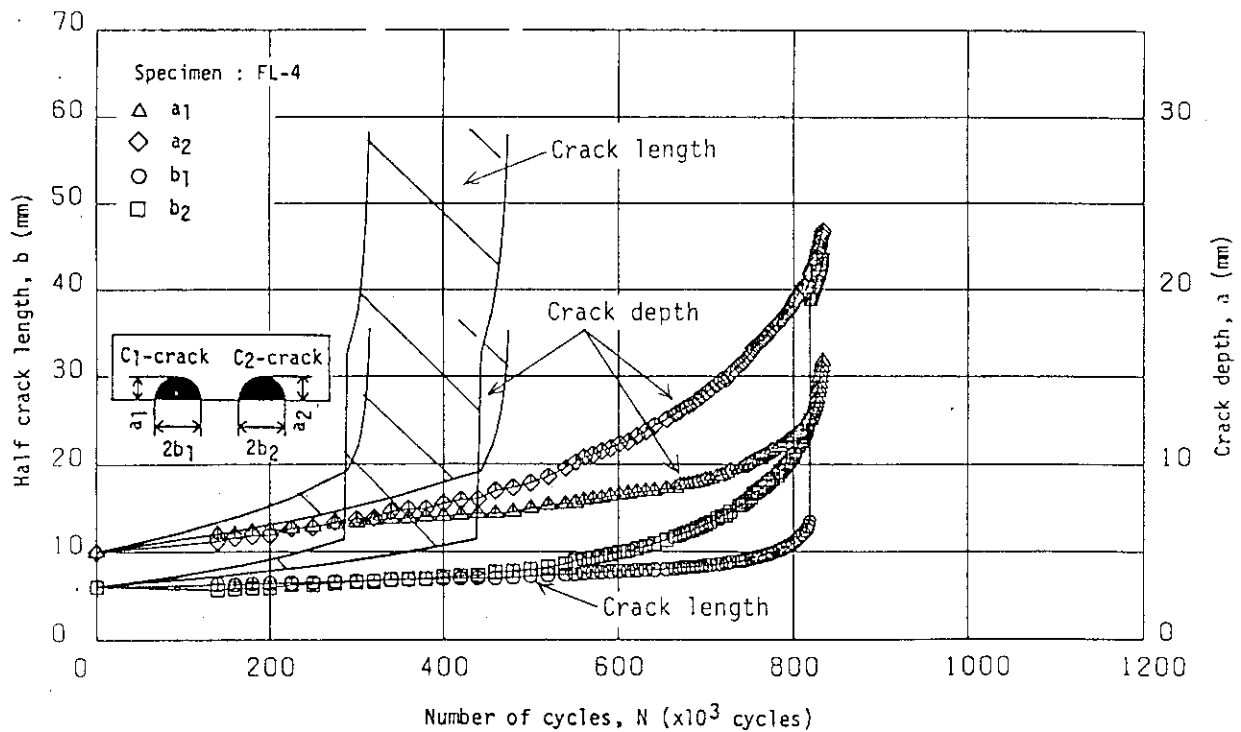


Fig. 3.10 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by ASME code (Method I)

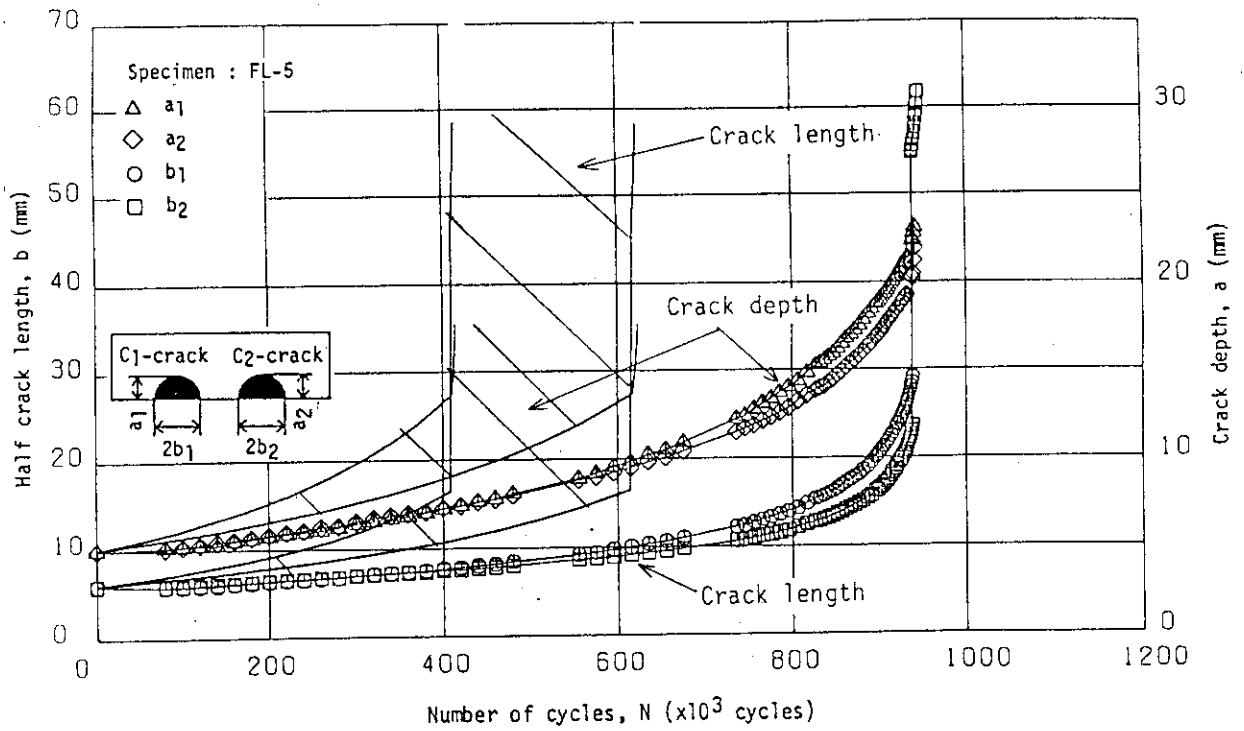


Fig. 3.11 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by ASME code (Method I)

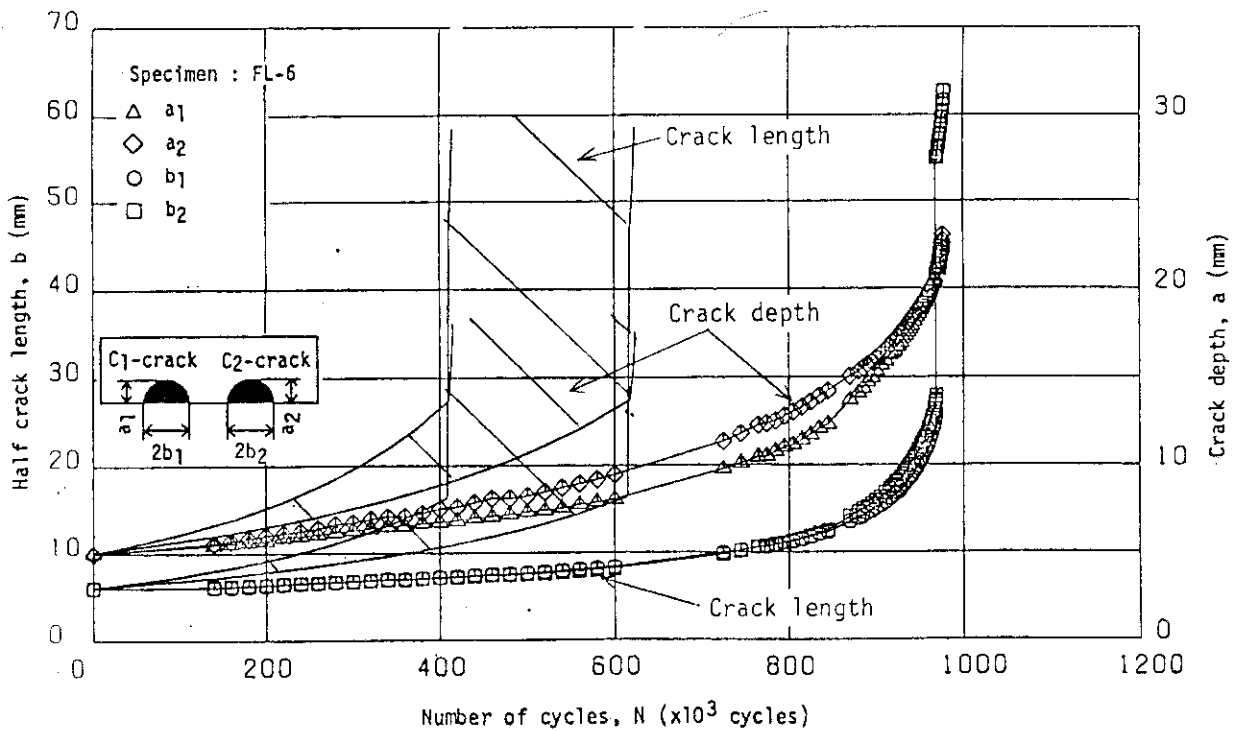


Fig. 3.12 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by ASME code (Method I)

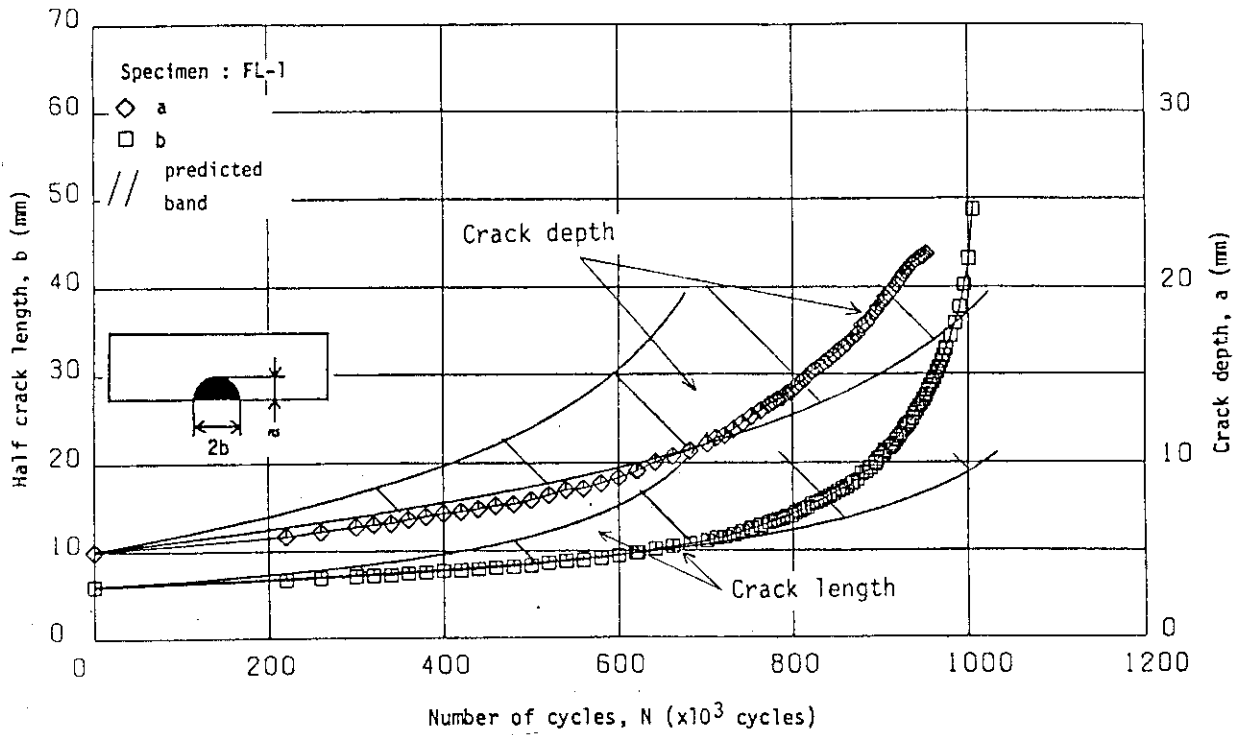


Fig. 3.13 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by present study (Method II)

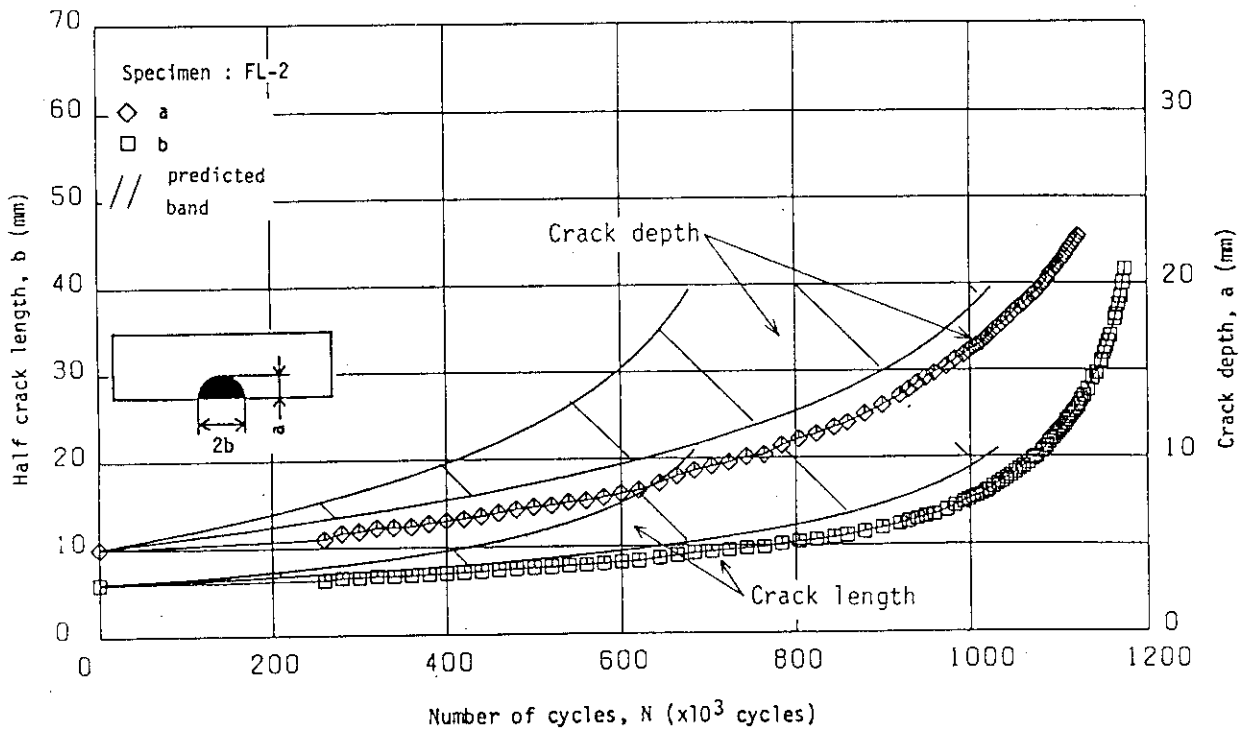


Fig. 3.14 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by present study (Method II)

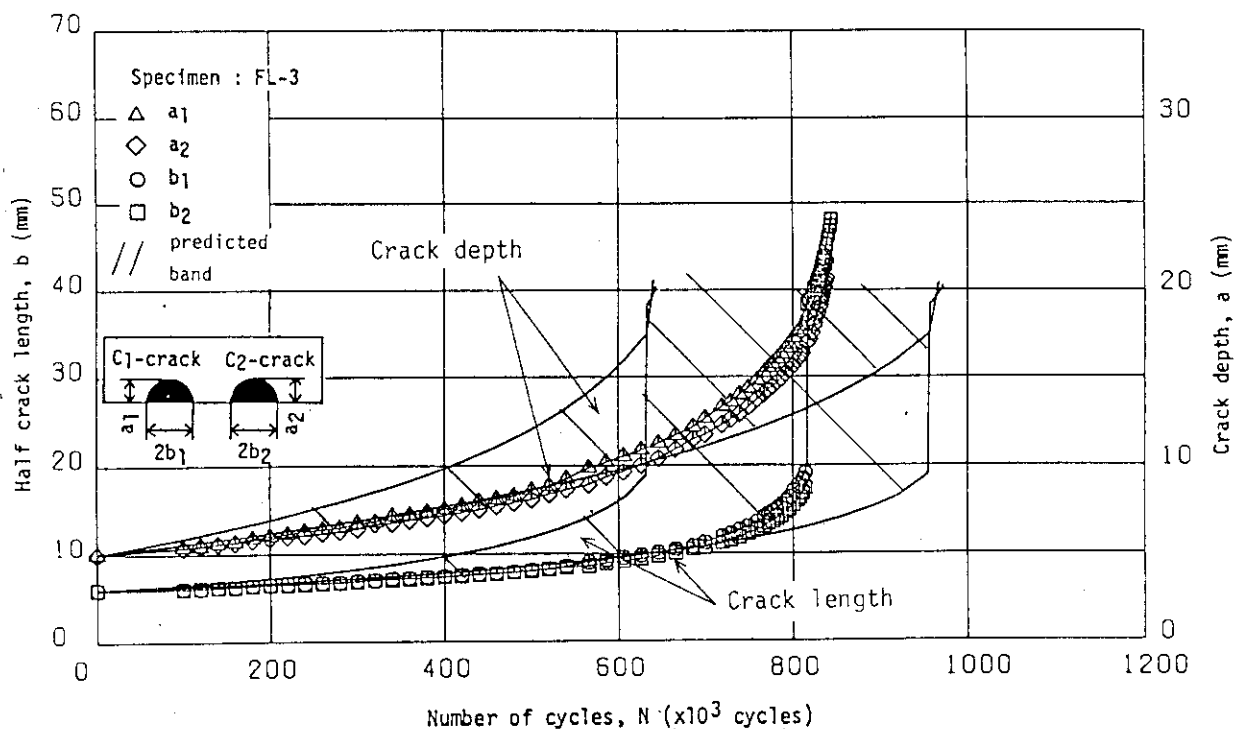


Fig. 3.15 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by present study (Method II)

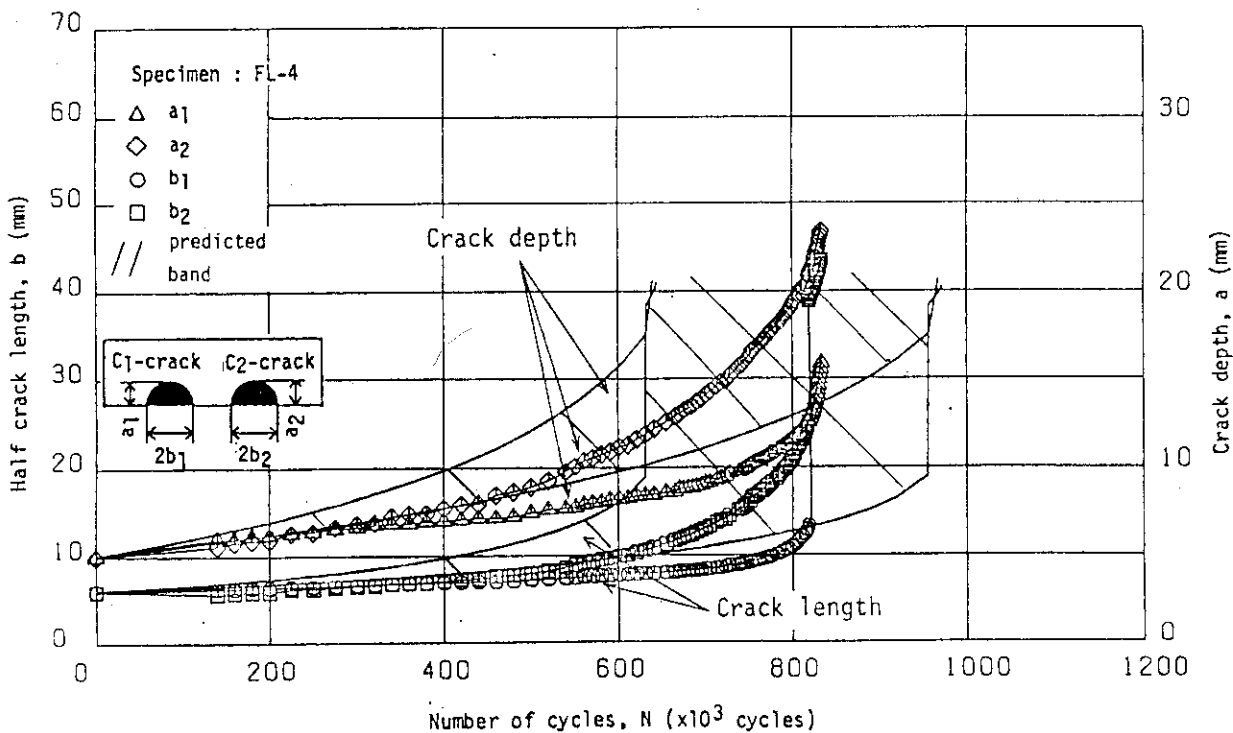


Fig. 3.16 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by present study (Method II)

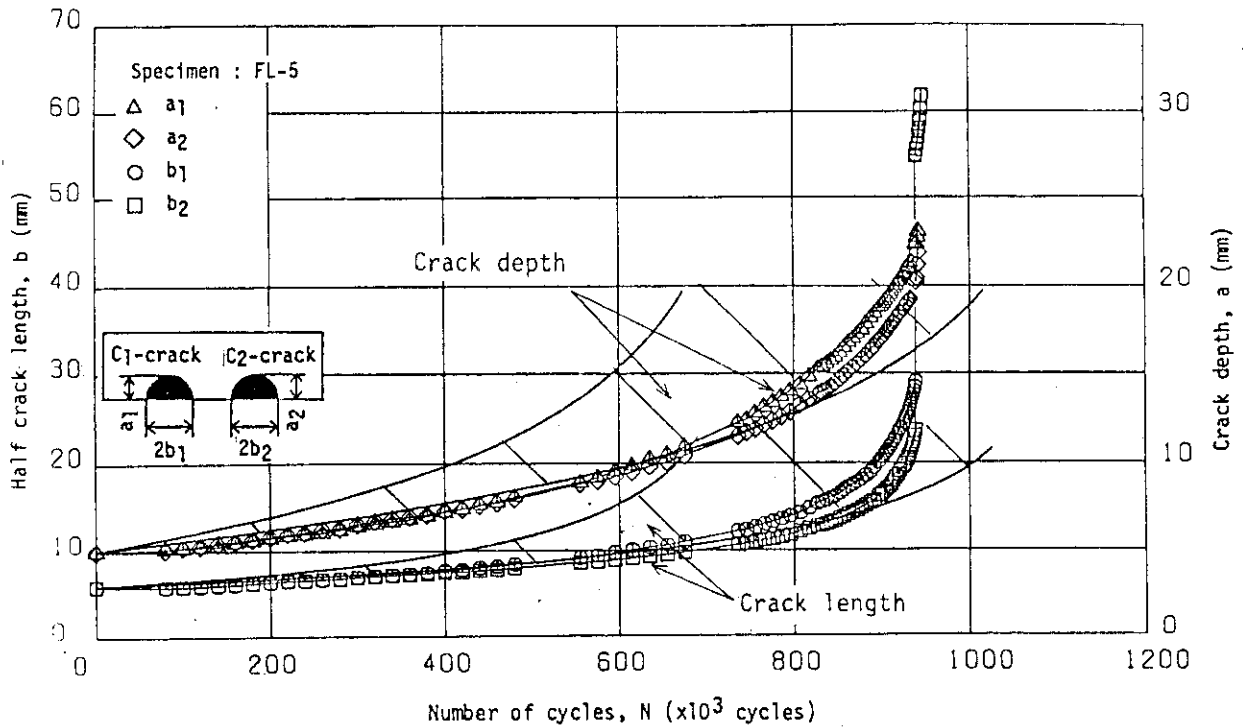


Fig. 3.17 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by present study (Method II)

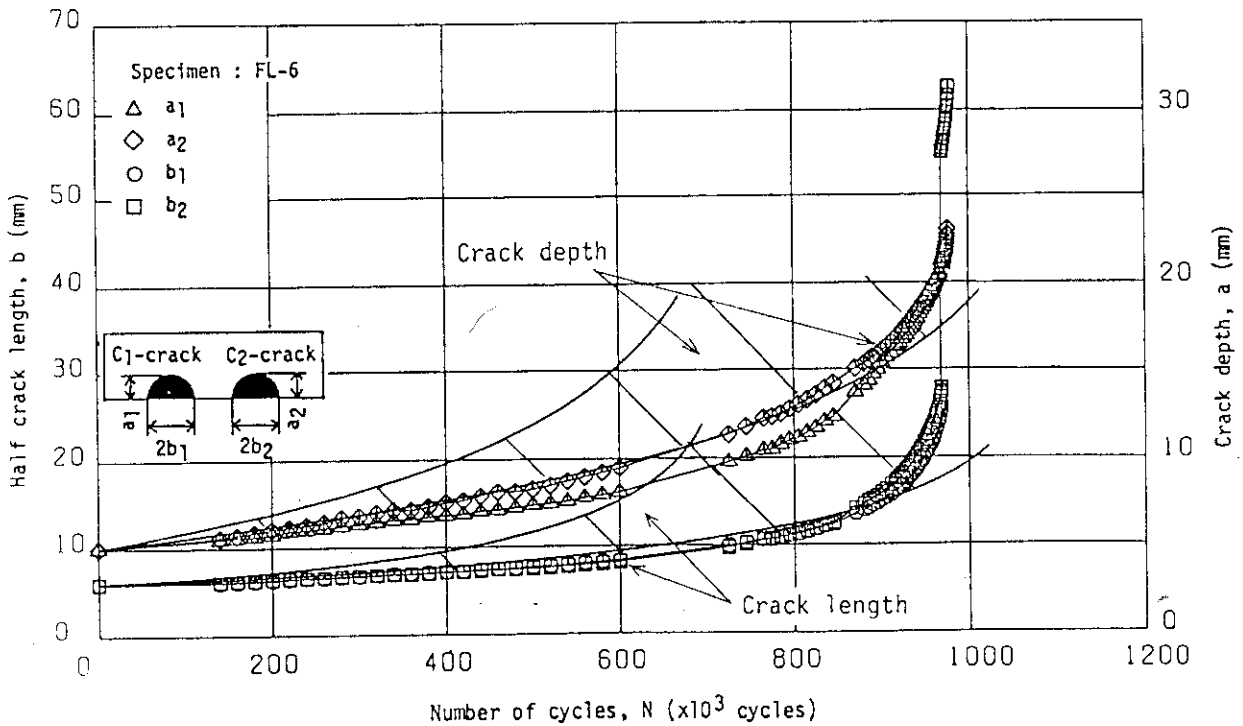


Fig. 3.18 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by present study (Method II)

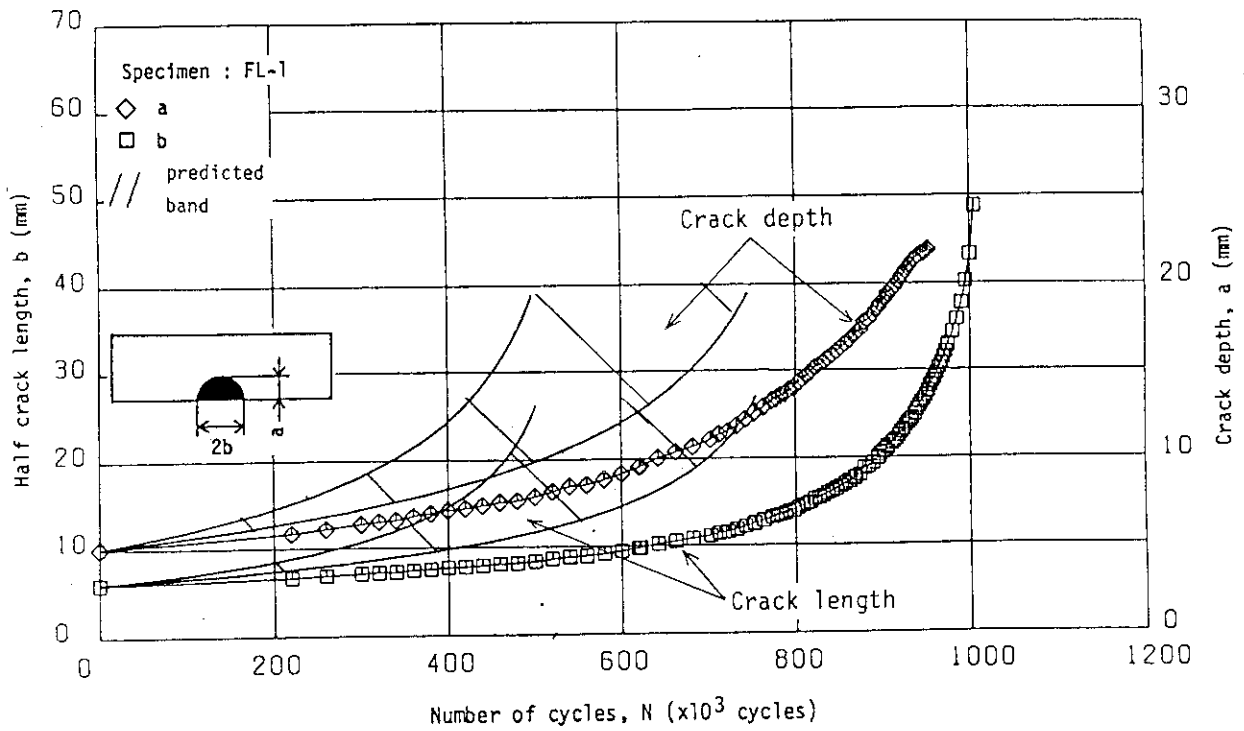


Fig. 3.19 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by present study, without surface and interaction effect (Method III)

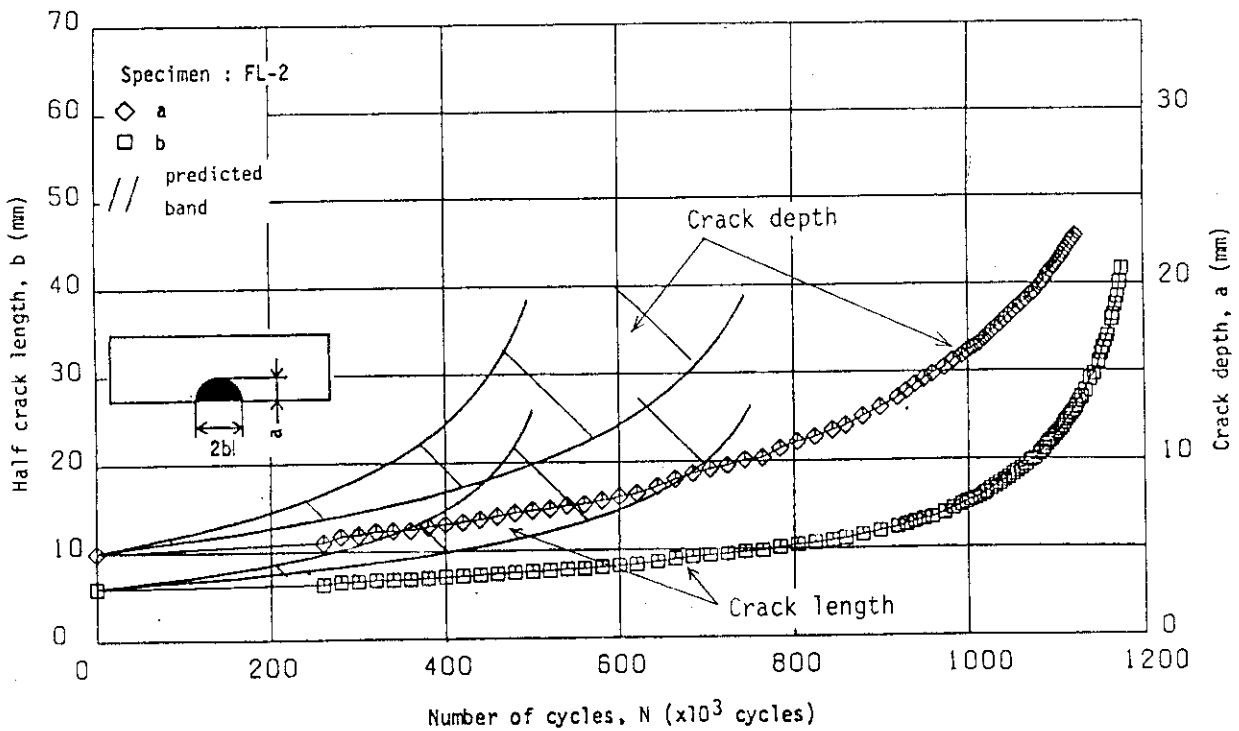


Fig. 3.20 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by present study, without surface and interaction effect (Method III)

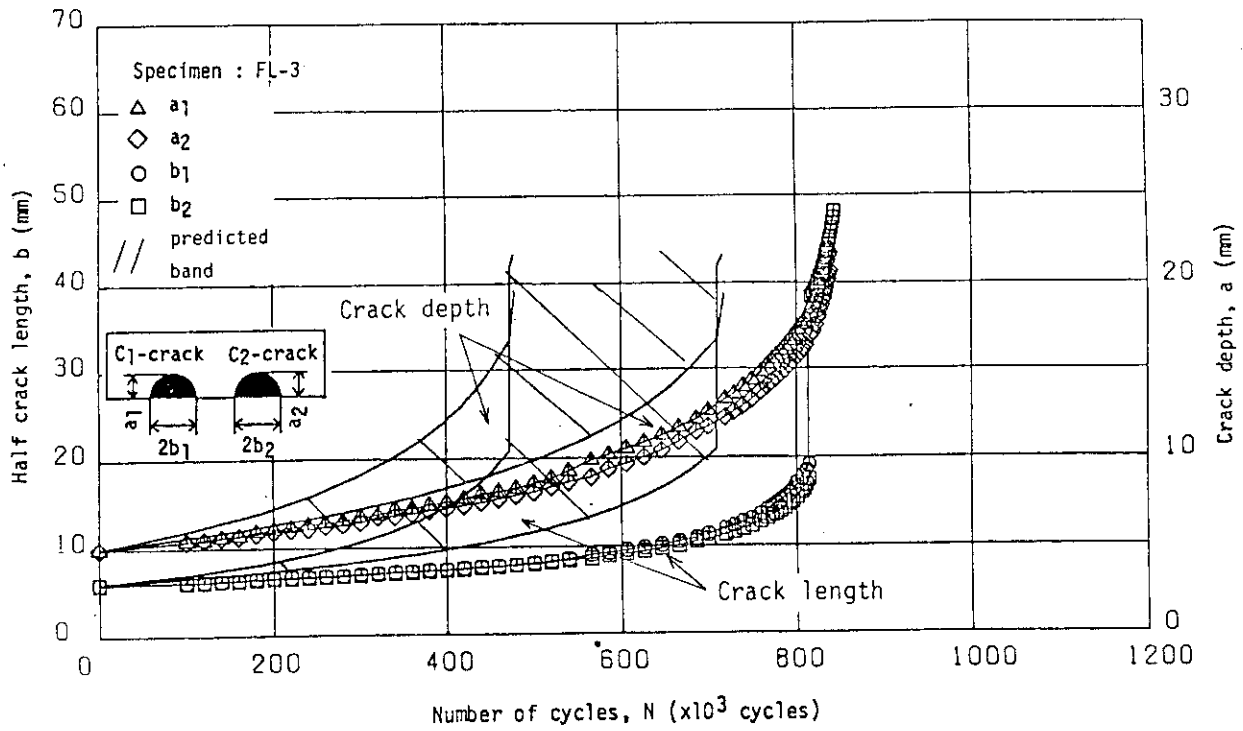


Fig. 3.21 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by present study, without surface and interaction effect (Method III)

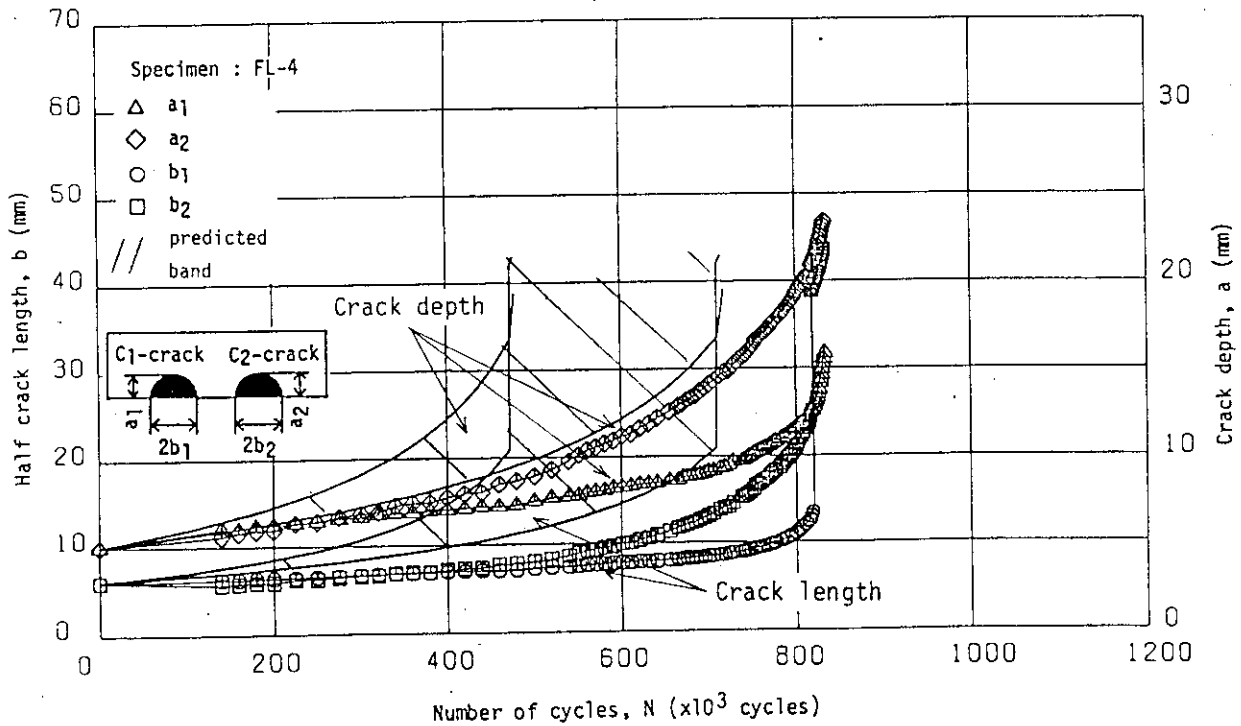


Fig. 3.22 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by present study, without surface and interaction effect (Method III)

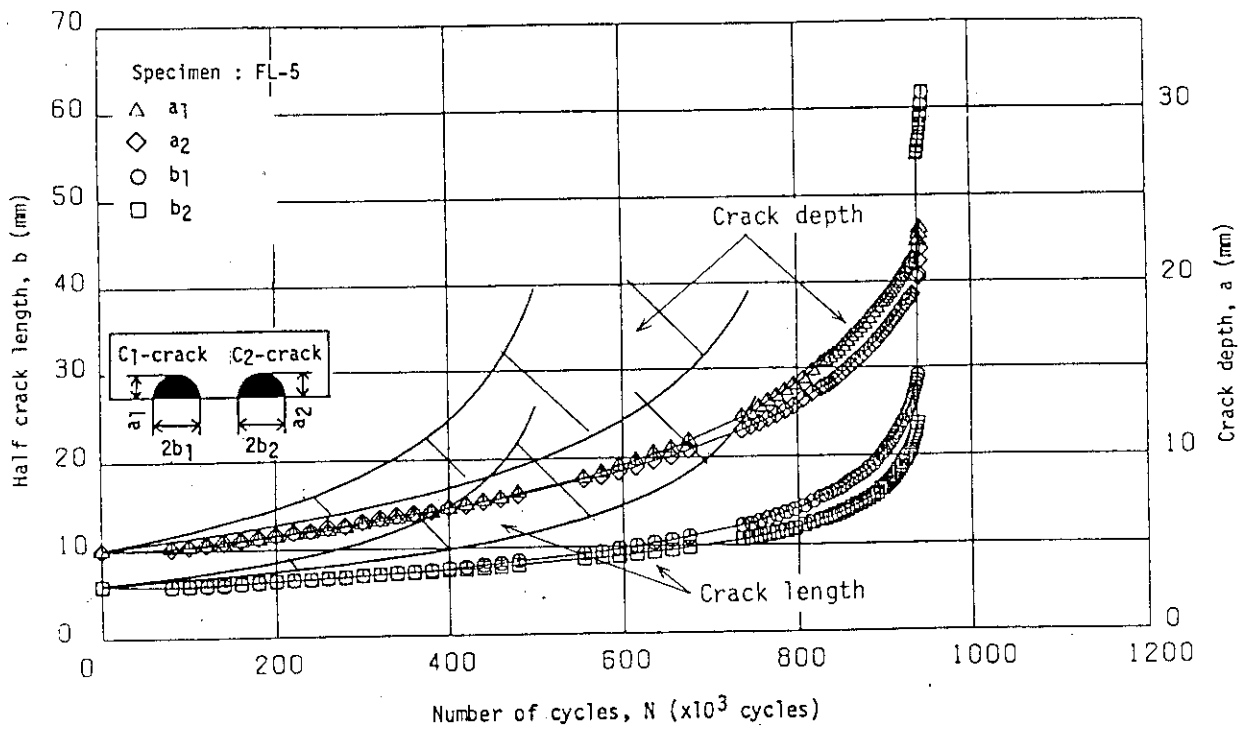


Fig. 3.23 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by present study, without

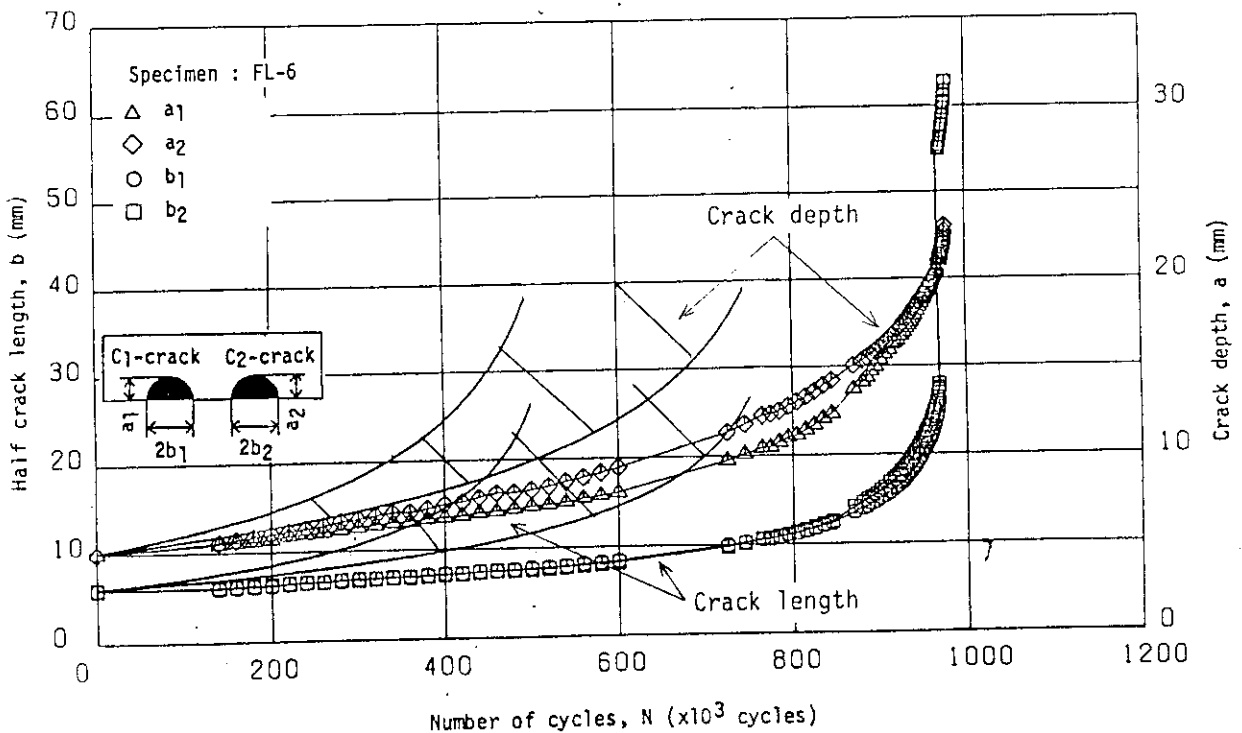


Fig. 3.24 Comparison of crack growth curves between test results and analytical results by present study, without surface and interaction effect (Method III)

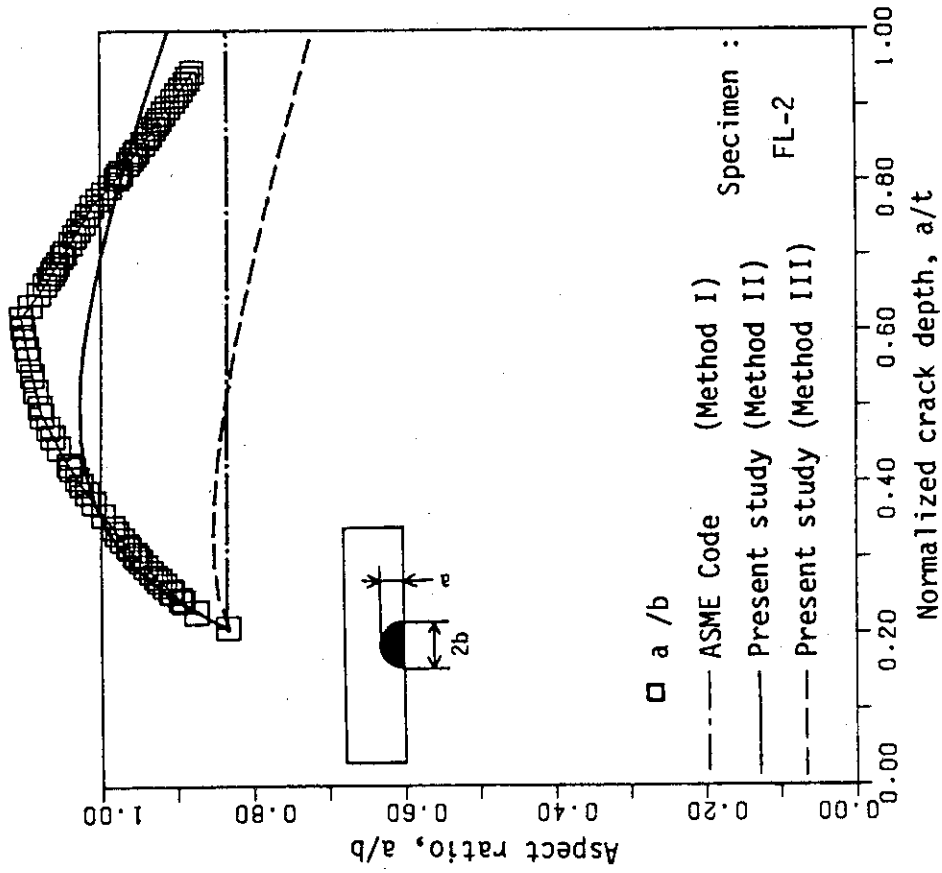


Fig. 3.26 Change in aspect ratio with the crack growth in FL-2 specimen

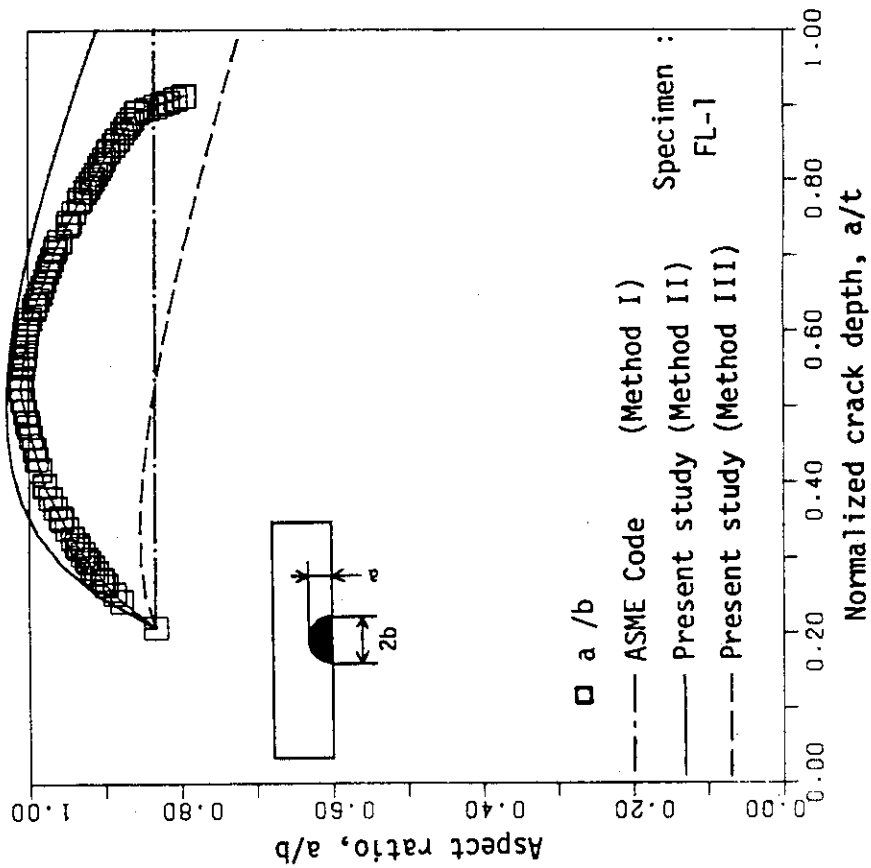


Fig. 3.25 Change in aspect ratio with the crack growth in FL-1 specimen

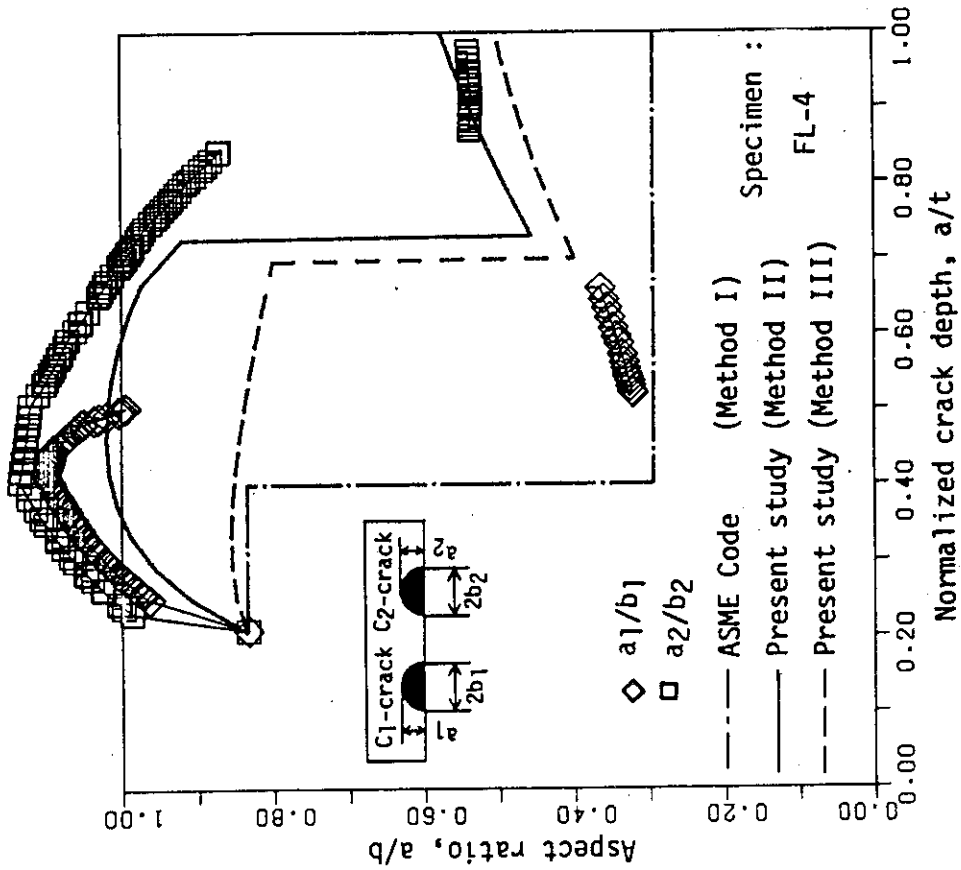


Fig. 3.28 Change in aspect ratio with the crack growth in FL-4 specimen

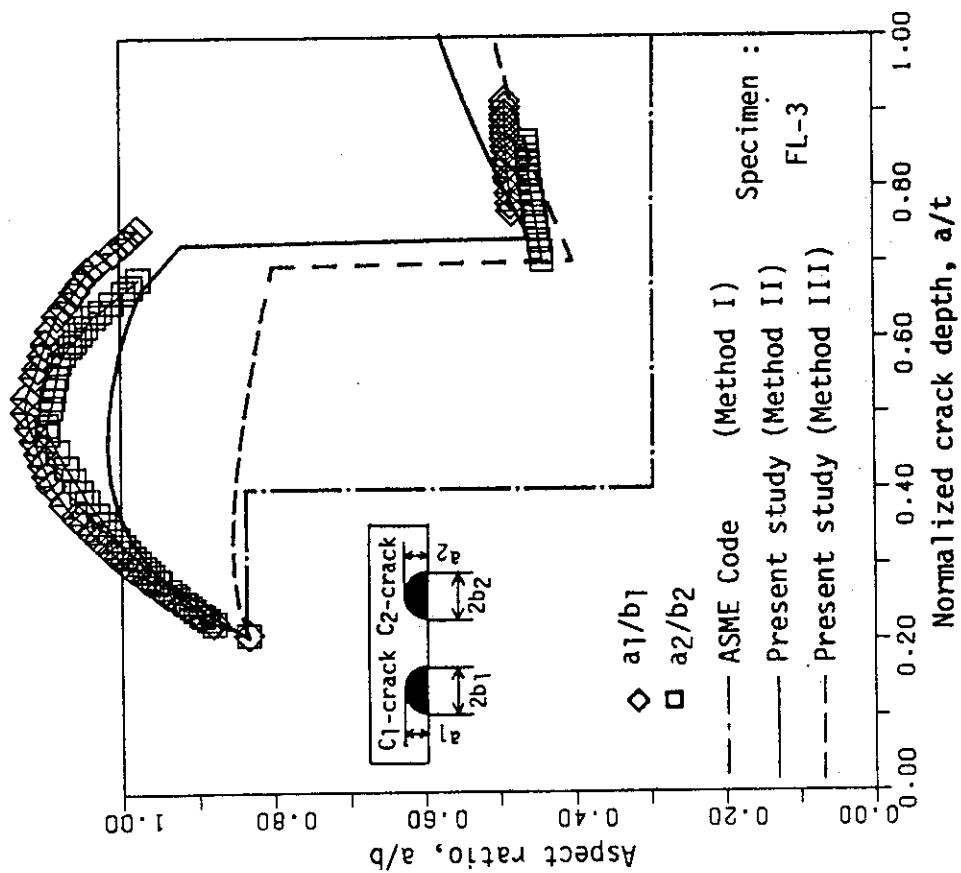


Fig. 3.27 Change in aspect ratio with the crack growth in FL-3 specimen

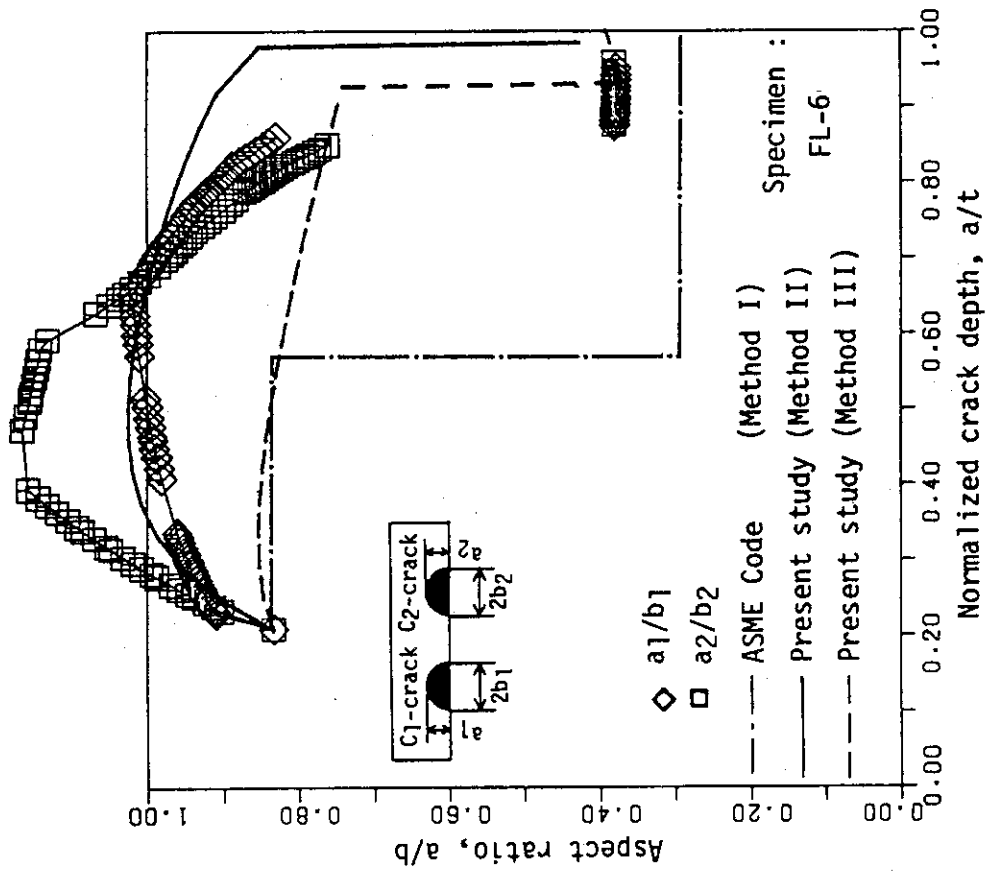


Fig. 3.30 Change in aspect ratio with the crack growth in FL-6 specimen

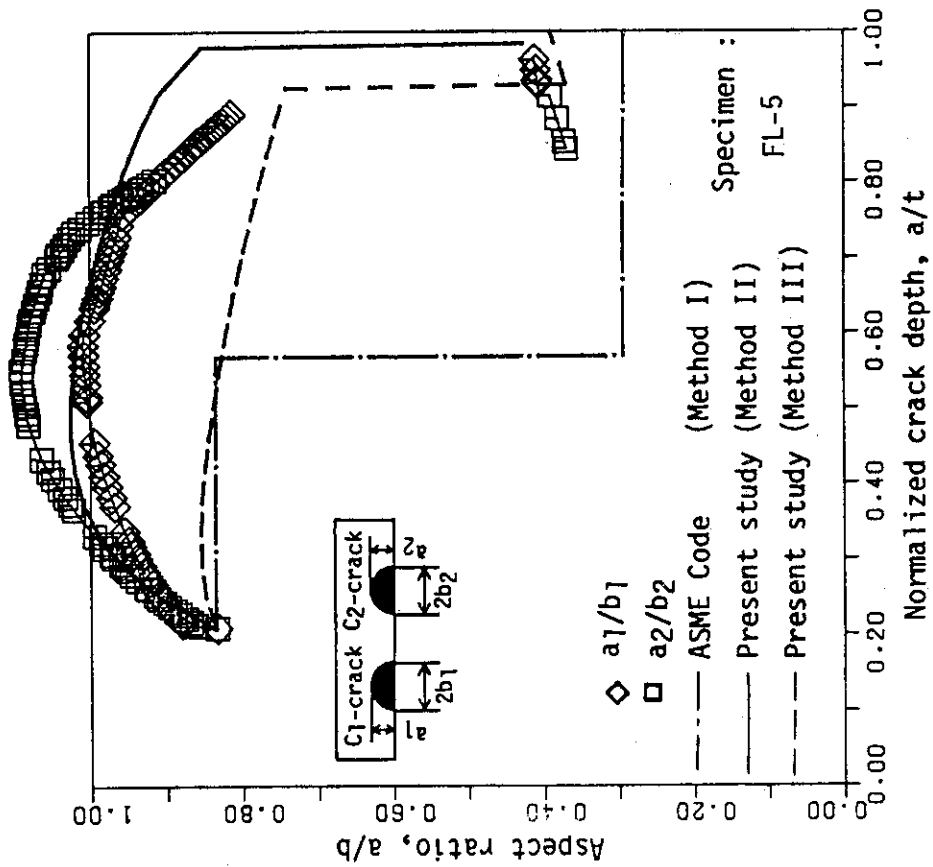
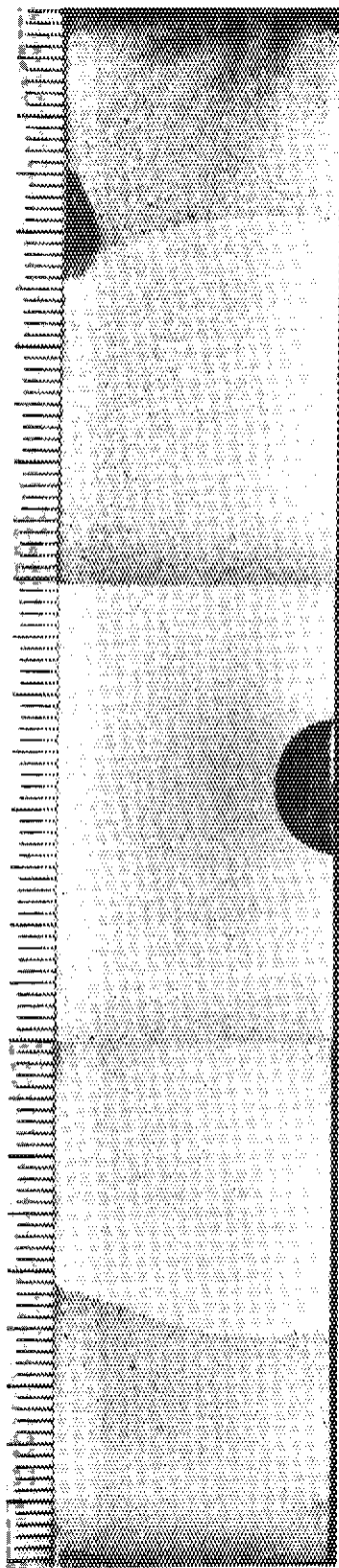
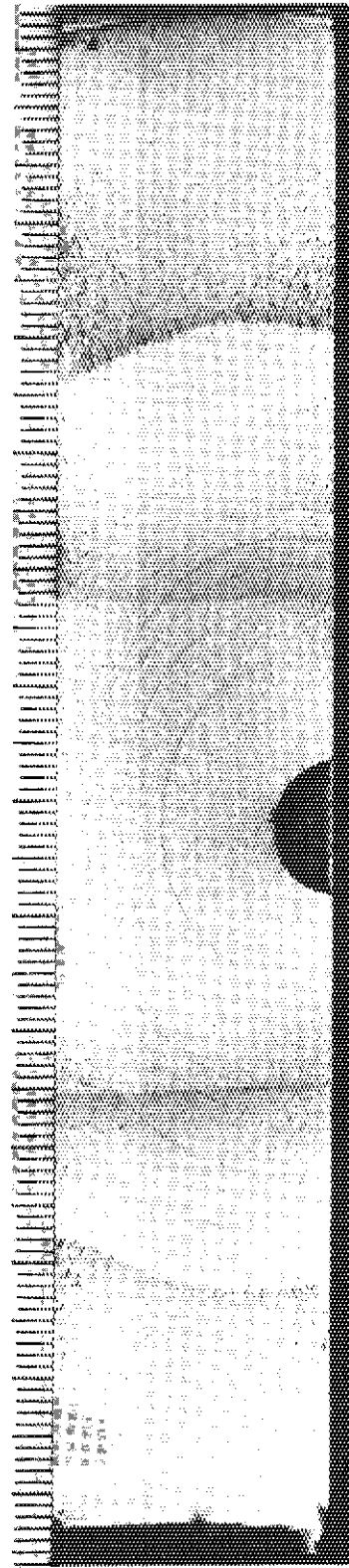


Fig. 3.29 Change in aspect ratio with the crack growth in FL-5 specimen

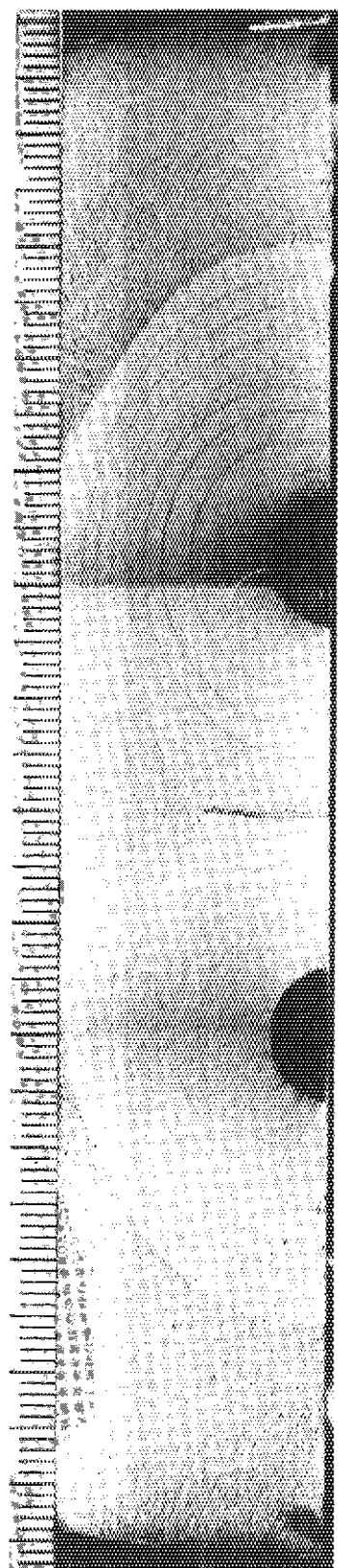


FL-1

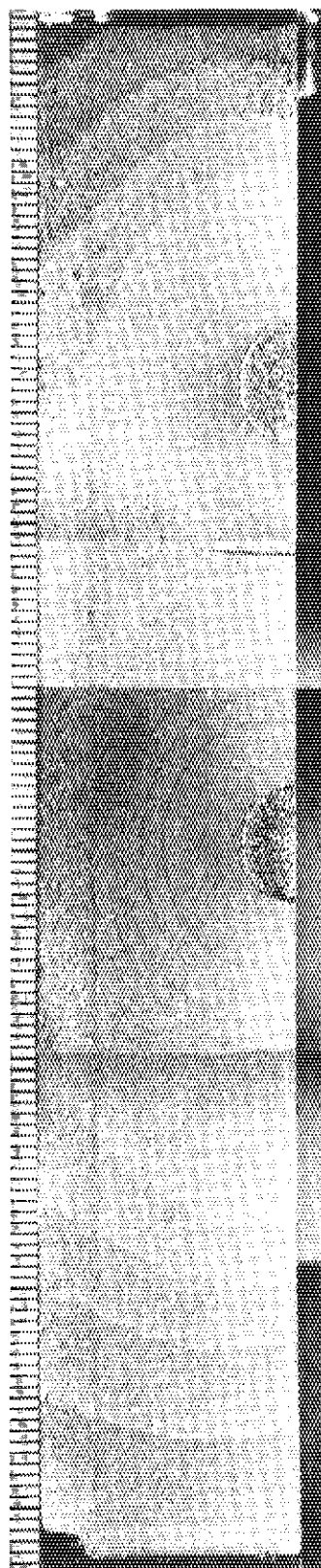


FL-2

Photo 3.1 Fracture surface of flat plate specimen, FL-1 and FL-2 (Case 1)

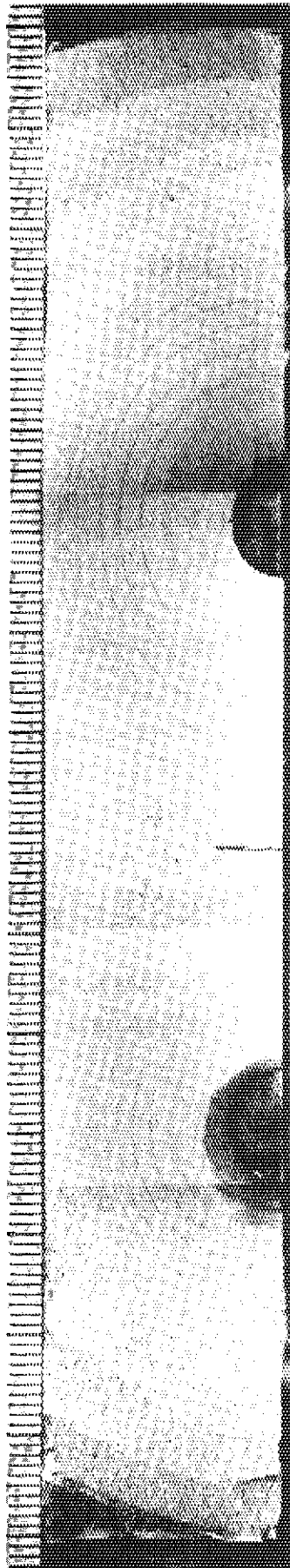


FL-3

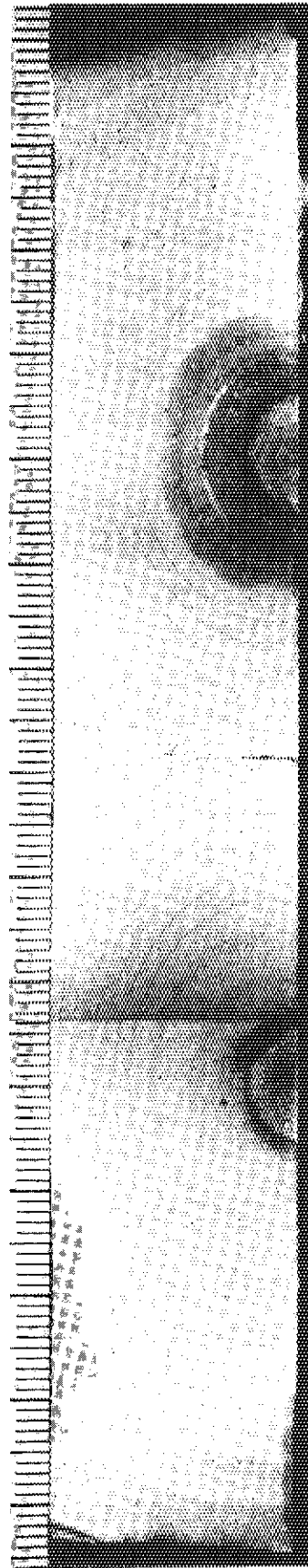


FL-4

Photo 3.2 Fracture surface of flat plate specimen, FL-3 and FL-4 (Case 2)



FL-5



FL-6

Photo 3.3 Fracture surface of flat plate specimen, FL-5 and FL-6 (Case 3)

4. 複数内面欠陥付直管試験体のき裂伝播試験結果 およびき裂伝播評価

4.1 まえがき

前章では表面欠陥付平板試験片のき裂伝播試験結果に基づき表面効果および隣接欠陥の干渉効果を考慮したき裂伝播評価法を提案したが、本法だけでなく ASME Code Sec. XI の方法や、Iida and Kawahara の方法¹⁰⁾、飯田および安藤らの方法¹¹⁾、などこれまでに提案されているき裂伝播評価法はすべて、き裂付無限平板にモデル化する手法を用いている。

評価基準の作成にあたっては手法の簡易さや汎用性が重要な要件であるので、構造部材を欠陥付無限平板にモデル化することは妥当であり、必然と思われる。しかし、部材の平板モデルへの単純化や、さらに、き裂形状、応力分布等の単純化によって評価結果には誤差が生ずるので、これらの単純化の採用にあたっては実構造物形状の供試体を用いた実証試験等により評価法の適用性を十分検討しておくことが重要である。

そこで、前章で提案した評価法を実構造物形状の供試体の疲労試験との比較により評価法の適用性をここでは検討する。供試体には形状が単純でしかも最も多く用いられる構造部材として直管試験体を用いた。一方、原子炉配管の安全性を評価する上で、複数の表面欠陥から疲労き裂が伝播し、合体して大きな内面欠陥へと成長していく過程を明らかにすることが重要な研究課題となっている。この観点から上記直管試験では配管における重大な欠陥成長の形態として直管内面における同一円周断面での複数欠陥の伝播挙動を明らかにするとともに、ASME Code Sec. XI によるき裂伝播評価および本研究の方法による評価を行い、試験結果と比較してこれらの評価法の適用性を検討することを目的とした。

本試験では外径 320 mm ϕ 、肉厚 35 mm t の SUS 304 L ステンレス鋼管製の母材および溶接継手付試験体を供試体を使用し、片持型の繰返し曲げ荷重により直管内面におけるき裂伝播試験を行い、伝播挙動を調べた。

4.2 試験方法

4.2.1 直管試験体

供試体として用いた管材は 12 B, Sch. 160 の SUS 304 L ステンレス鋼管である。供試管の化学成分および機械的性質を Table 4.1 および Table 4.2 に示す。

試験体は一端をテストベッドに固定し他端に繰返し荷重を負荷することにより、曲げモーメントが負荷される構造となっている。試験体形状、寸法を Fig. 4.1 に示す。

疲労試験体は 2 体の試験体について実施した。1 体は母材試験体であり、もう一体はフランジ底面から 515 mm の位置に突合せ継手を有する溶接付試験体である。それぞれ ST-1 試験体および ST-2 試験体と以下称することにする。ST-2 試験体の溶接条件を Table 4.3 に示す。試験部は両試験体ともフランジ底面から 500 mm の周方向断面であり、この位置の内面に各 3 個

の人工欠陥を放電加工した。

4.2.2 疲労試験

疲労試験は配管疲労試験装置を使用して行った。試験体をテストベッド上に垂直に固定し、反力壁に固定した油圧アクチュエータを連結棒を介して試験体上端と連結しアクチュエータから繰返し荷重を負荷した。試験体および試験装置概略図をFig. 4.2に示す。Photo. 4.1には試験状態を示す。

試験は応力比, $R = 0.1$, 試験部の公称曲げ応力範囲, $\Delta\sigma = 14.0 \text{ kg/mm}^2 (= S_m)$, 繰返し速度, 5 Hz の条件で行った。また, 人工欠陥の寸法は 8 mm 深さ \times 24 mm 長さであり, 中心間隔 50 mm で 3 個同一円周断面上に配置した。Table 4.4 には試験条件および人工欠陥の形状, 寸法を示す。なお, 溶接継手試験体, ST-2 の場合はき裂は熱影響部を通過するようになっている。

疲労試験は 3 個の人工欠陥からき裂が伝播し, 合体して板厚を貫通するまで行い, 貫通した時点で終了とした。

4.2.3 測定方法

(1) 歪分布および変形測定

ST-1 および ST-2 試験体には各々約 100 点の歪ゲージを貼付し試験体の応力分布測定を行った。また試験体荷重点およびフランジ部 (2 カ所) に変位計を取付け変形測定を行った。

Fig. 4.3 および Fig. 4.4 に両試験体の歪ゲージおよび変位計取付位置を示す。歪および変形測定は所定の繰返し数において荷重をステップ状に変化させながらデジタル歪測定器により行った。

(2) 超音波探傷法によるき裂深さ測定

直管試験体内面における疲労き裂伝播測定法のひとつとして超音波探傷法を採用した。この測定ではき裂先端から反射されるエコーを検出する端部ピークエコー法によった。Fig. 4.5 に測定原理図を示す。超音波探傷プローブには 5 MHz の縦波斜角プローブを用いた。Photo. 4.2 に探傷器およびプローブを示す。

(3) 電位差法によるき裂伝播測定

疲労試験におけるき裂伝播測定法のひとつとして電位差法を採用した。

Fig. 4.6 に, 電位差法によるき裂伝播測定図を示す。この方法はき裂伝播によって探針間の抵抗が増加するのを検出する方法である。探針は 3 個のき裂の中央に取付け, さらにき裂が合体する付近を検出するためき裂の中間に 2 カ所取付けた。また, 探針間の間隔は従来の経験に基づいて 5 mm とした。

Photo. 4.3 に探針取付状態を示す。

(4) ビーチマーク法によるき裂伝播測定

疲労き裂伝播実験において疲労荷重の途中で荷重を変動させるとき裂先端形状の条こんが疲労破面に残ることが知られている。本試験では超音波探傷法, スメックゲージ法によりき裂伝播測定を行ったが, き裂伝播過程でのき裂先端形状を把握するため上記の条こんを残す方法

(ビーチマーク法)を用いた。Fig. 4.7 にビーチマーク操作時の荷重条件を示す。Fig. 4.7 に示すようにビーチマーク荷重を $P = P_{\max} / 2 \rightleftharpoons P_{\max}$ とすれば、ビーチマーク荷重の影響が無視できることが知られている。

疲労試験ではこの操作をき裂が約 2.5 mm 進むごとに 10 回行った。

(5) 管内カメラによるき裂伝播観察

疲労試験時に試験体内面におけるき裂の伝播およびき裂の合体付近を観察するため、管内検査用小型 TV カメラを使用した。TV カメラの管内への固定はカメラホルダを製作し、固定用治具をベースプレートに取付けて行った。Photo. 4.4 に TV カメラおよび治具の取付状況を示す。TV カメラから来る映像はモニタ TV によって観察するとともに VTR に記録した。

4.3 試験結果

4.3.1 応力分布測定結果

ST-1 および ST-2 試験体における応力分布および変位測定は Fig. 4.3 および Fig. 4.4 に示した位置でデジタル歪測定器を用いて実施した。応力値は歪測定結果を基に次式を用いて計算した。

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta} &= \frac{\varepsilon_{\theta} + \nu \varepsilon_L}{1 - \nu^2} \\ \sigma_L &= \frac{\varepsilon_L + \nu \varepsilon_{\theta}}{1 - \nu^2}\end{aligned}\quad (4.1)$$

また、(4.1) 式から得られた応力分布と次式の梁理論に基づく軸方向応力分布を求め比較した。

$$\sigma_L = \frac{M}{I} r \cos \theta \quad (4.2)$$

ここで、

- σ_L : 軸方向応力
- σ_{θ} : 周方向応力
- E : 弾性係数 (= 19700 kg/mm²)
- ε_L : 軸方向歪
- ε_{θ} : 周方向歪
- ν : ポアソン比 (= 0.3)
- r : 管の半径
- θ : 最大外皮応力位置から周方向への角度

Fig. 4.8 ~ Fig. 4.10 に ST-1 試験体の第 1 サイクルにおける A, A', および E 断面の応力分布測定結果および計算結果の比較を示す。同様に、Fig. 4.11 ~ Fig. 4.13 に ST-2 試験体における A, A', および C 断面の応力分布の比較を示す。

これらの図から分るように両試験体の各断面における軸方向応力の応力分布は計算値と良く一

致している。また、周方向応力は軸方向応力に比べて非常に小さく、 $\theta = 90^\circ$ および 270° 付近以外はほぼ一軸応力状態となっている。

4.3.2 き裂伝播試験結果

疲労試験はき裂が板厚を貫通し、試験体表面で約 10 mm の長さに伝播するまで行った。試験後、試験部を切出し、油圧試験機により破面分割を行い、破面観察を行った。Photo. 4.5 に ST-1 および ST-2 試験体の疲労破面を示す。試験中に行ったビーチマーク操作によりき裂伝播模様が良好に観察できる。

この観察結果から ST-1 試験体についてはつぎのことが分る。

き裂伝播は中央の C_2 き裂が最も顕著であり、ここからき裂が貫通している。また、き裂は最初、最深部に発生しほぼ半円状となって伝播していく。表面近傍ではき裂形状が凸となっており表面で伝播遅れが生じていることが分る。これは、前章で指摘したように、表面付近と内部の応力状態の違いによって生ずる表面効果によると考えられる。さらに、き裂が大きく成長し合体した後中央から貫通している。

一方、ST-2 試験体については幾分異なった伝播挙動を示している。ST-2 試験体の場合、き裂は C_1 、 C_3 、 C_2 の順に発生しこの順に大きく成長している。さらに、き裂合体が生じた後 C_1 から貫通しており ST-1 試験体とは異なる位置で貫通が生じた。また、 C_2 き裂の伝播が遅かったため貫通時のき裂は ST-1 試験体に比べ周方向へ大きく拡大している。以上のように ST-2 試験体の伝播挙動に差異が生ずる原因としてつぎの理由が考えられる。

- (1) ST-2 試験体における溶接部の中心は試験断面から 15 mm の位置であり、溶接残留応力の影響が考えられる。
- (2) また、き裂は熱影響部を伝播するのでき裂伝播に際して材質変化が影響しているかも知れない。
- (3) 溶接ビード、および開先加工により ST-2 試験体の幾何学形状は ST-1 試験体に比べわずかに異なっているため、試験部の応力が影響されることが考えられる。

疲労試験では 3 種類の方法によりき裂伝播測定を行ったが以下にそれらの測定結果を述べる。

Fig. 4.14 および Fig. 4.15 は超音波およびビーチマーク法から得られた深さ方向へのき裂伝播曲線である。超音波法による測定結果はビーチマーク法による結果よりわずかに低目であるがその差は非常に小さく良好な測定結果を与えている。

Fig. 4.15 に示す ST-2 試験体の結果ではすでに指摘したように C_1 クラックおよび C_3 クラックが C_2 より先行して伝播しており ST-1 試験体の場合とは異なっており、これは前記(1)(2)(3)の理由によると思われる。

電位差法によるき裂深さ測定では良好な測定結果は得られなかったがき裂合体位置に取付けた電位差測定プローブによりき裂合体が明確に測定できた。Fig. 4.16 および Fig. 4.17 に両試験体における電位差測定結果を示す。両図において No. 2 プローブは C_1 クラックと C_2 クラックの間、No. 4 プローブは C_2 クラックと C_3 クラックの間に取付けられている。

Fig. 4.16 の ST-1 試験体の場合 No. 2 プローブは約 630000 サイクル、No. 4 プローブでは約 $N = 610000$ サイクルにおいて電位差出力が急激な立上りを示しており、一方、ビーチマーク模様

からも C_1 と C_2 の合体は $N = 630000 \sim 640000$ サイクル、 C_2 と C_3 の合体は $N = 610000 \sim 630000$ サイクルと判断されるので電位差測定によりき裂合体が検出されていることが分る。一方、Fig. 4.17 の ST-2 試験体の場合、No. 2 および No. 4 プローブの電位差の立上りはそれぞれ $N = 420000$ サイクルおよび $N = 530000$ サイクル付近でありこの場合もピーチマーク模様から、 $N = 360000 \sim 480000$ サイクルおよび $N = 480000 \sim 560000$ サイクルの間でそれぞれ合体が生じていると判断されるので、電位差測定により良好にき裂合体が検出されている。

Table 4.5 に上記により得られた合体点における繰返し数、およびき裂深さをまとめた。

4.4 試験体材料のき裂伝播特性

配管疲労試験におけるき裂伝播解析にあたっては材料のき裂伝播特性 ($da/dN - \Delta K$ 曲線) が必要である。そこで直管試験体と同一の供試用ステンレス鋼管から中央切欠き試験片を切出し材料試験を行った。この試験片寸法は板幅約 140 mm、板厚 10 又は 12 mm である。

試験は ΔK の低い範囲は ΔK - 減少試験、 ΔK の高い範囲は ΔK - 増加試験を行った。その結果得られたき裂伝播曲線を Fig. 4.18 に示す。

4.5 試験結果と予測結果の比較

直管試験体 ST-1 および ST-2 におけるき裂伝播挙動の予測は ASME Code Sec. XI の方法 (予測法 I) および本研究の方法 (予測法 II) の 2 方法によって行い、これらの結果と試験結果との比較を行った。解析には各試験体の実測寸法を用いた。Table 4.6 に解析モデルの条件を示す。伝播解析は Fig. 4.18 に示した材料の $da/dN - \Delta K$ 曲線の上下限を用い上下限のバンド幅で行った。

以上の結果得られたき裂伝播曲線の比較を Fig. 4.19 および Fig. 4.20 に示す。

Fig. 4.19 は ASME Code の方法による予測結果であるが、この場合、両試験体の試験結果に対してかなり短寿命側の伝播予測を与えており、前章で述べた平板試験の場合と同様の傾向を示している。Fig. 19 において予測曲線はき裂合体点において屈折が生じ急激に立上っている。この点では、ASME Code に規定された合体判定基準により一挙にき裂が合体し大きな単一欠陥とみなすことになるので ΔK 値がジャンプし屈折点が生ずるのである。しかし、解析におけるこの合体判定は試験結果に比べかなりき裂が浅いうちであり、前章での指摘と同様に、ASME Code における合体基準はかなり安全側に設定されていることが直管試験結果においても示されている。また、同様の事実は Iida and Kawahara¹⁰⁾、あるいは飯田および安藤ら¹¹⁾ によっても指摘されている通りである。

一方、本研究の方法 (予測法 II) による予測結果と試験結果とを比較したのが Fig. 4.20 である。図から分るように深さ方向への予測伝播曲線は ST-1 試験体に対しては試験結果より若干大き目の伝播寿命を与え、ST-2 試験体に対しては良好な伝播寿命予測を与えていることが分る。つぎに、予測法 II により得られたき裂形状変化と試験結果および ASME Code で採用している相似形状伝播の仮定を比較したのが Fig. 4.21 および Fig. 4.22 である。

試験結果ではき裂のアスペクト比は伝播に従って一旦大きくなり、ピークを示した後減少し、その後合体するという挙動を示している。予測法Ⅱによるアスペクト比変化はST-1試験体の結果に対しては良く一致し、ST-2試験体の結果より若干大き目となるが、おおむね良好な予測値を与えている。一方、Fig. 4.21およびFig. 4.22から明らかなようにASME Codeに導入された形状不変の仮定は試験結果と合致しない。このことはASME Codeの方法による伝播予測に誤差を生ずる原因となるものである。

Fig. 4.21およびFig. 4.22におけるST-1とST-2試験体の試験結果を比べると両者に差が生じている。すなわち、ST-1試験体のアスペクト比がST-2試験体の場合より合体に大きくなっており、そのため、き裂合体もST-2試験体の場合より深い位置で生じている。

アスペクト比変化およびき裂合体挙動についてのST-1試験体とST-2試験体の違いはさきに述べたようにST-2試験体には溶接継手がありそのため生じたと思われる。

4.6 結 論

本研究では直管の周方向断面上に複数内面欠陥が存在する場合、その欠陥からの疲労き裂伝播挙動を明らかにするため直管試験体を供試体としたき裂伝播試験を実施するとともに、ASME Code Sec. XIにおける伝播評価法および前章で提案した表面欠陥伝播評価法による伝播予測を行い評価法の配管構造物への適用性も検討した。

試験は同一円周断面上に3個の人工欠陥を加工した母材および突合せ継手付の直管試験体を供試体で使用し、片持型の曲げ荷重の繰返しにより行った。疲労試験は3個のき裂が合体し、板厚を貫通するまで行った。

試験開始時には歪ゲージにより応力分布測定を行い良好な応力分布が得られた。また、試験中におけるき裂伝播測定にはビーチマーク法、超音波探傷法、および電位差法を用いた。

これらの結果からつぎの結論が得られた。

- (1) 縦波斜角触子を用いた端部ピークエコー法により得られたき裂深さとビーチマークで測定したき裂深さは良く一致した。このことは非破壊検査におけるき裂深さ測定法として上記の超音波探傷法が有力な手段であることを示唆するものである。
- (2) 母材試験体と溶接試験体との間にき裂伝播形状について差異が見られた。溶接試験体では母材試験体に比べてき裂は周方向への拡がりが大きく、従って、貫通時のき裂寸法も大きい。このことは溶接に起因して生じたと思われる。
- (3) 両試験体の試験結果に対して、ASME Code Sec. XIによるき裂伝播予測は保守的な評価を与える。とくに、ASME Codeにおける合体判定基準は過大に安全側となっている。一方、ASME Codeにおける同一き裂形状保持の仮定は実験事実と反するものである。直管試験結果から得られたき裂のアスペクト比はASME Codeの規定より一般に大き目であった。従って、ASME Codeではき裂の表面長さを実際より長く評価することになるので直管試験体の場合は保守的なき裂形状評価といえる。
- (4) 本研究で提案した方法（予測法Ⅱ）により両試験体き裂伝播寿命を妥当に評価できる。また、き裂合体の判定やき裂形状変化予測についても試験結果と良く一致し、直管試験体への

適用性は良好である。本法ではき裂伝播則を2方向に適用し、さらに、自由表面効果やき裂干渉効果も考慮しており、このことによって良好なき裂伝播予測が可能となる。

Table 4.1 Chemical compositions of the test pipe
(wt %)

Composition	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
Spec.	- <0.02	- <1.00	- <2.00	- <0.04	- <0.03	>8.00 <11.0	>18.0 <20.0	- <0.12
ST-1, ST-2	0.012	0.52	1.68	0.024	0.001	10.45	18.35	0.0957

Table 4.2 Mechanical properties of the test pipe

	0.2% YS. MPa	UTS. MPa	Elong. %	Hardness H _B	Orientation
Spec.	>206	>519	>35	-	-
ST-1, ST-2	274	578	64.0	152	Longitudinal
	264	568	64.0	151	Longitudinal

Table 4.3 Welding conditions of straight pipe

Welding process	GTAW (first layer) + SMAW
Shape of edge prep.	U type
Welding rod	GTAW: TGS-308LK, 1.6 ~ 2φ SMAW: NC-38LK, 3.2 ~ 4φ
Pre-heat	no
Stress relief	no
Shield gas	Argon gas
Back shield gas	Argon gas
Welding current and voltage	GTAW: 60 ~ 145A, 15V SMAW: 60 ~ 145A, 30V
Welding position	Flat
No. of layers	GTAW: 1, SMAW: 7
Finish	As welded

Table 4.4 Fatigue test conditions

<p>loading conditions</p>	<p>load : $P = 1.73 \Rightarrow 17.3 \text{ ton}$ stress* : $\sigma_L = 1.6 \Rightarrow 15.6 \text{ Kg/mm}^2$ $\Delta\sigma = 14.0 \text{ Kg/mm}^2$ (= S m) stress ratio : $R = 0.1$ cyclic rate : $f = 5 \text{ Hz}$</p>
<p>shape of artificial defects</p> <p>(unit = mm)</p>	

* $D_o = 318 \text{ mm}$ and $t = 33.3 \text{ mm}$ (J I S)
 were used

Table 4.5 Crack depth and number of cycles at the crack coalescences

	location of coalescence	a ₁ mm	a ₂ mm	a ₃ mm	N cycle
No.1 Test pipe	C2 - C3	19.6	27.4	22.7	620,000
	C1 - C2	21.0	30.4	25.0	640,000
No.2 Test pipe	C1 - C2	17.0	12.2	15.7	420,000
	C2 - C3	20.7 (19.9)*	14.5	18.5 (18.2)*	530,000

* (): crack depth of 90° direction

Table 4.6 Geometry and loading conditions of test pipes for analytical procedures

Items	Straight pipe	
	ST-1	ST-2
Thickness, t(mm)	35.00	32.30
Membrane stress range, $\Delta\sigma_m$ (kg·mm ²)	11.8*	12.6*
Bending stress range, $\Delta\sigma_b$ (kg·mm ²)	-1.4*	-1.4*
Initial defect size, a×b(mm)	8×12	8×12
Number of initial defects	3	3
Crack interval, d(mm)	57.3	56.7

* Calculated as a cantilever

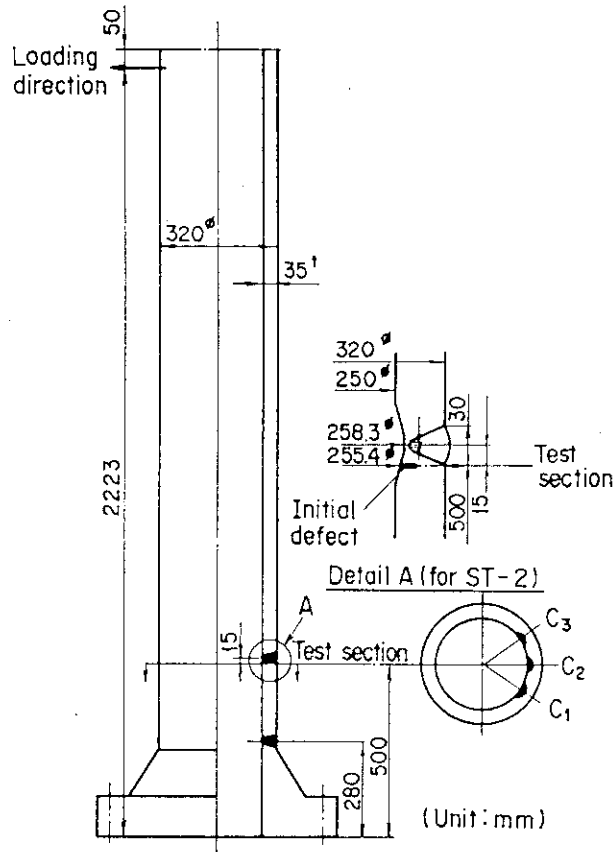


Fig. 4.1 Geometry of straight pipe (ST-1, ST-2) and loading direction

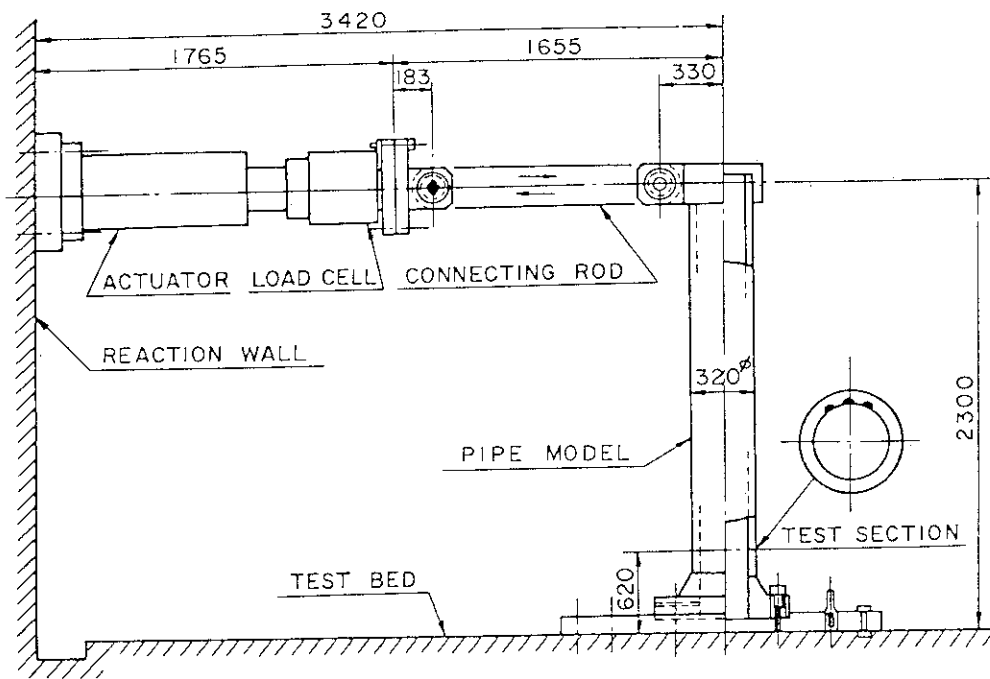


Fig. 4.2 Schematic view of the straight pipe test

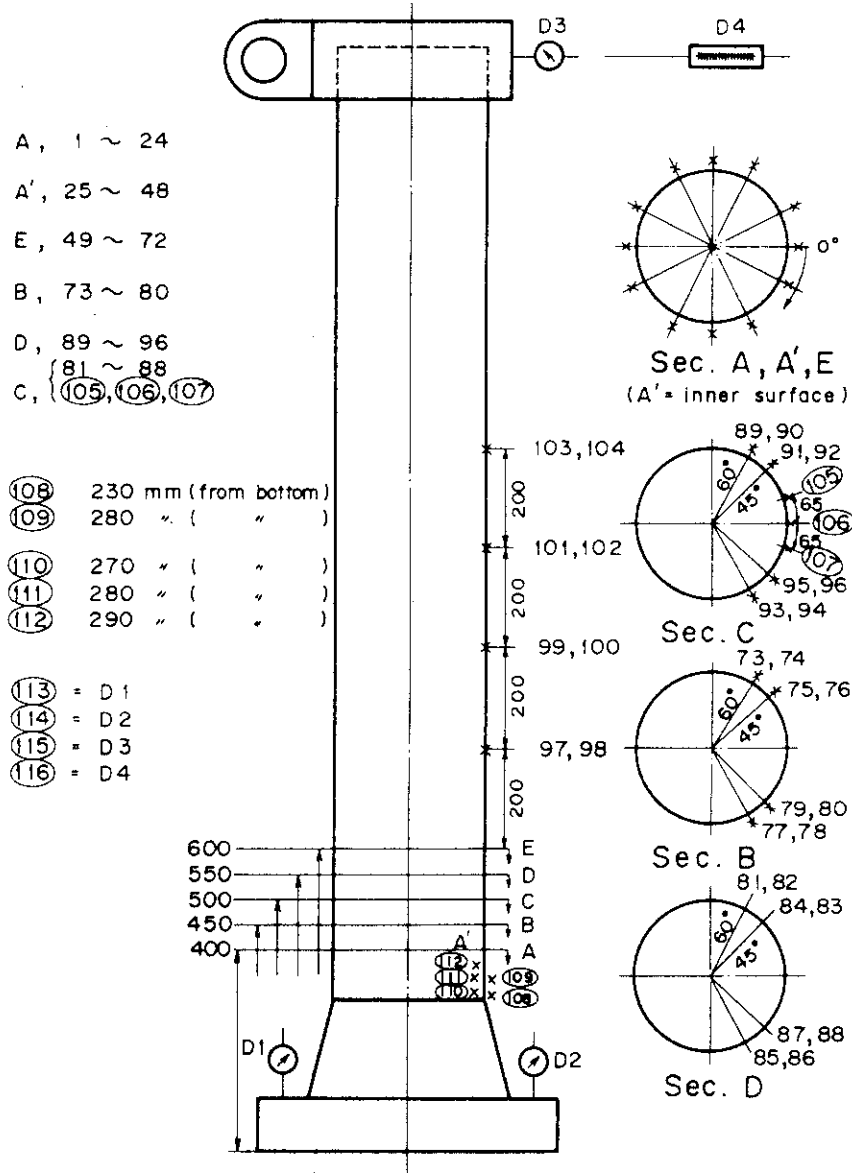


Fig. 4.3 Location of strain gages and displacement gages (ST-1)

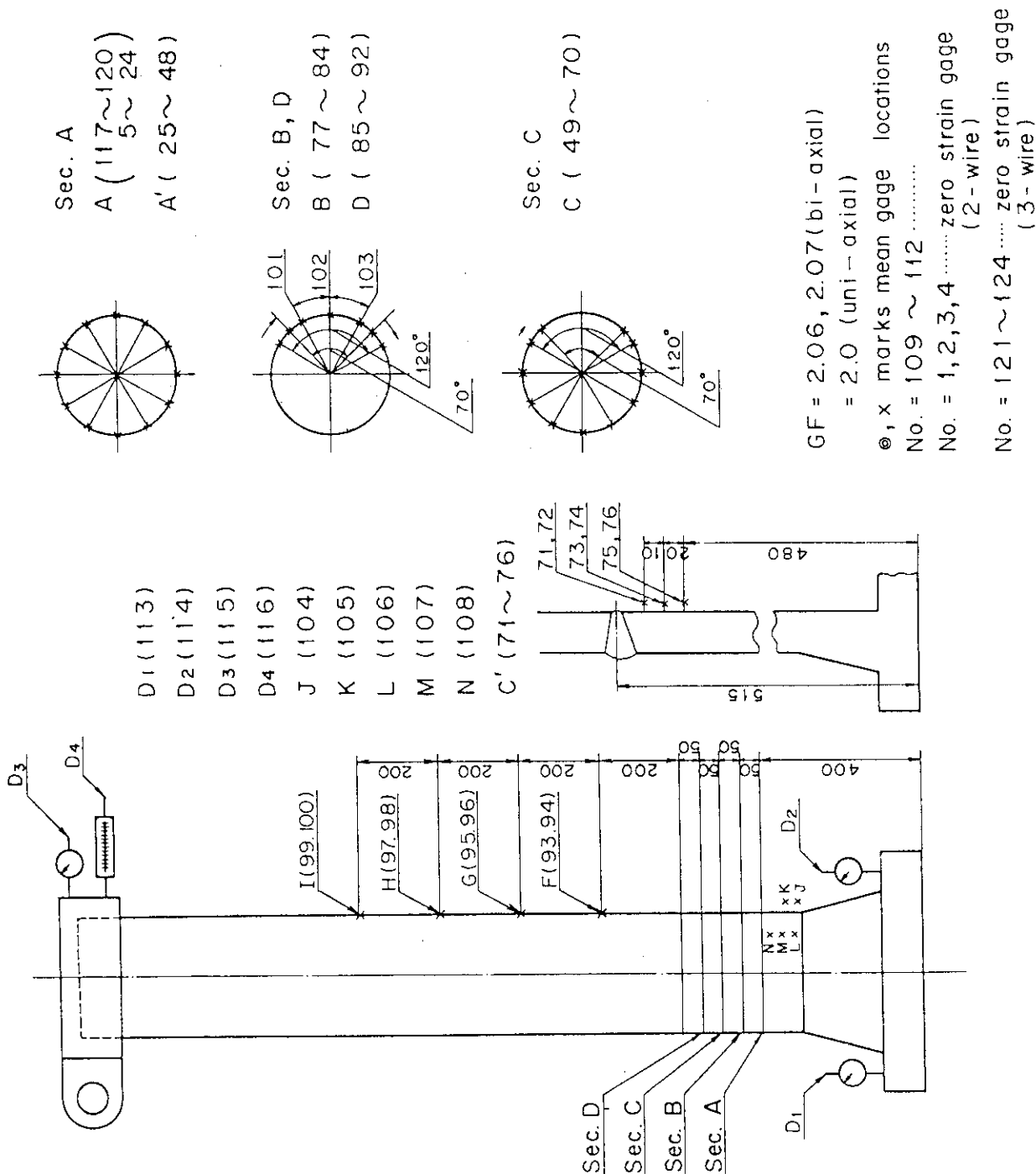
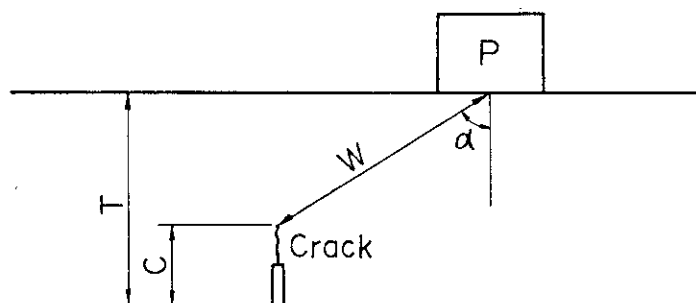


Fig. 4.4 Location of strain gages and displacement gages (ST-2)



$$C = T - W \cos \alpha$$

- P : Probe
- T : Thickness
- W : Beam Path
- α : Refraction angle
- C : Crack Depth

Fig. 4.5 Principle of crack depth measurement by UT examination

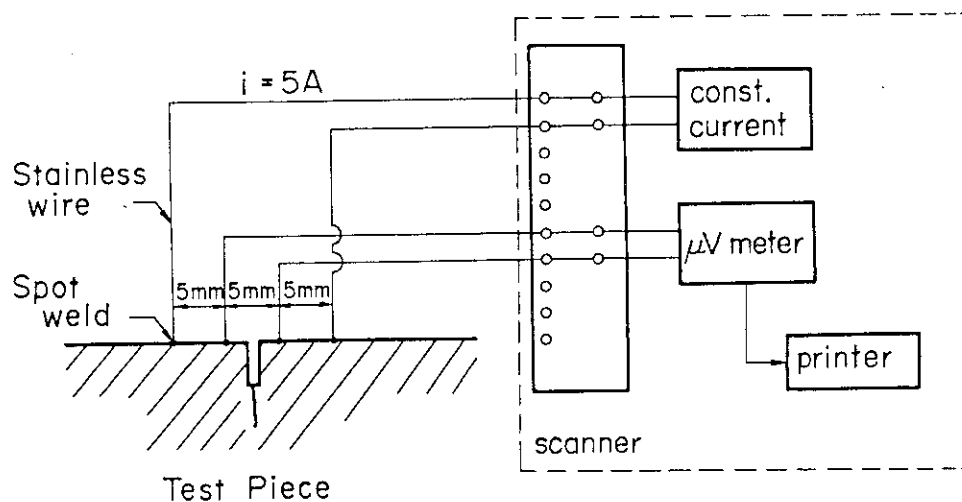
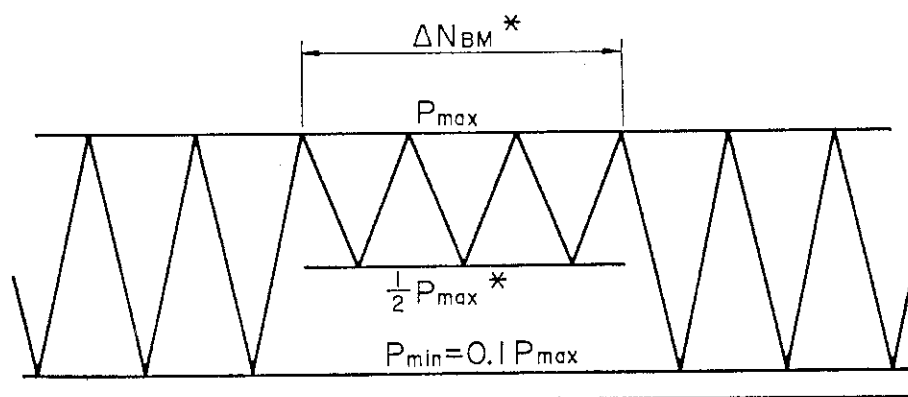


Fig. 4.6 Electric potential measurement



$$* \frac{1}{2} P_{max} \rightleftharpoons P_{max} , \Delta N_{BM} = 1/da/dN$$

Fig. 4.7 Loading sequence of crack front marking

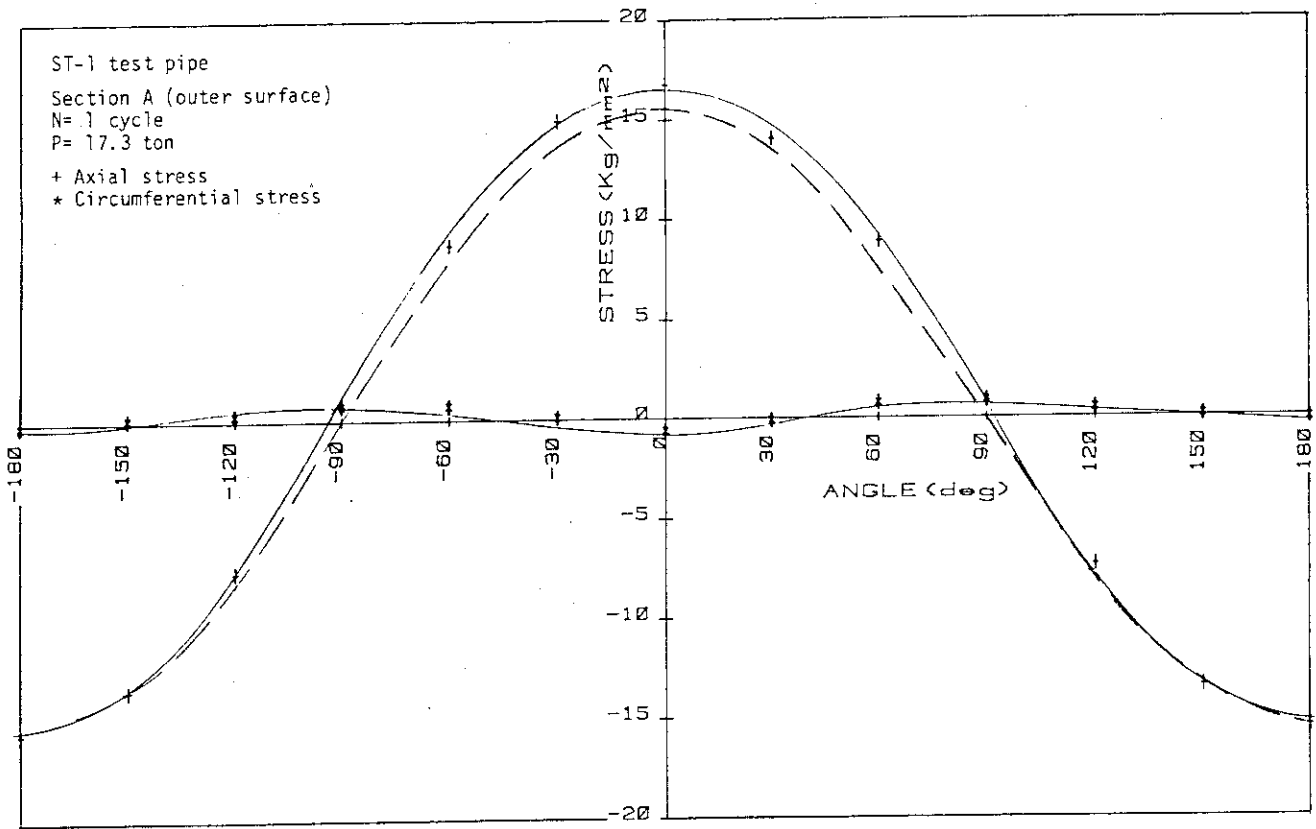


Fig. 4.8 Stress distribution of ST-1 test pipe

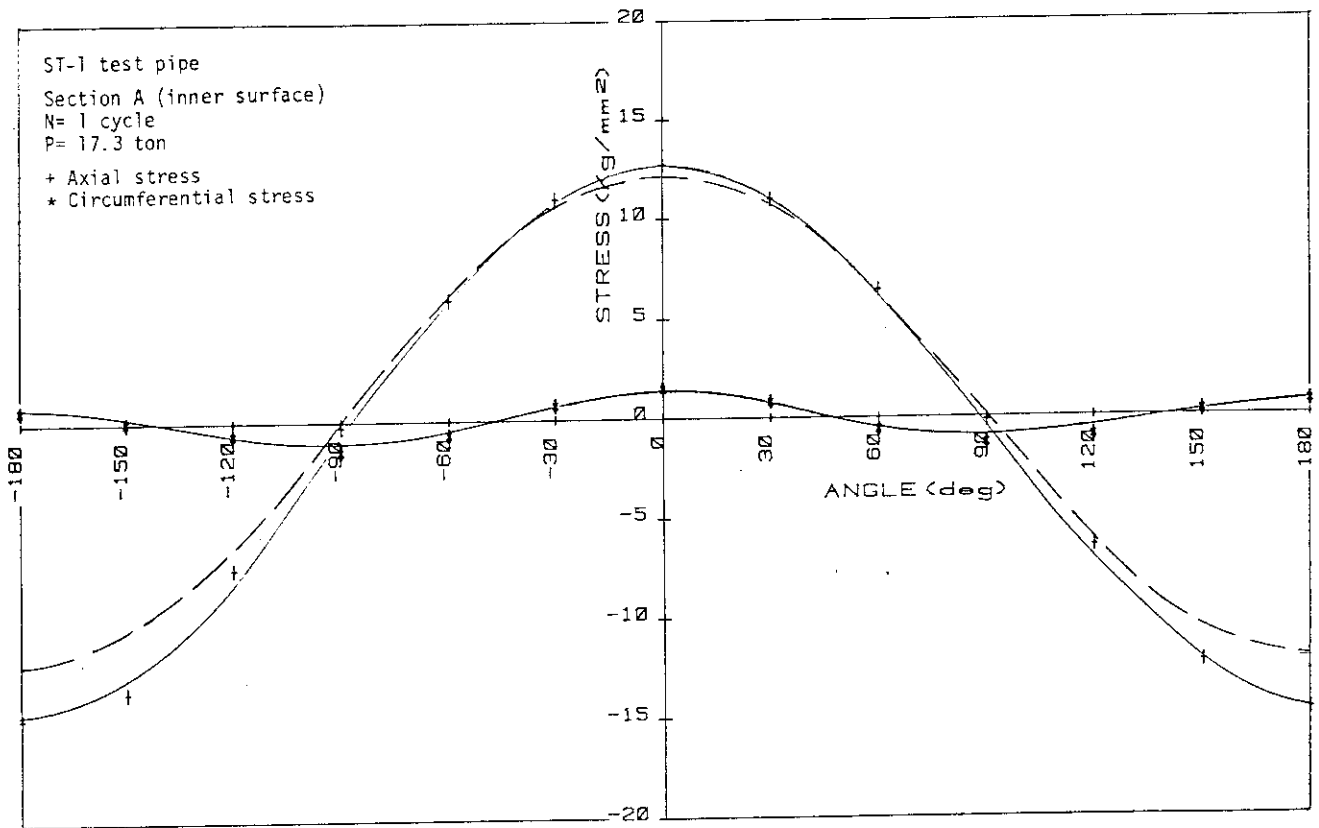


Fig. 4.9 Stress distribution of ST-2 test pipe

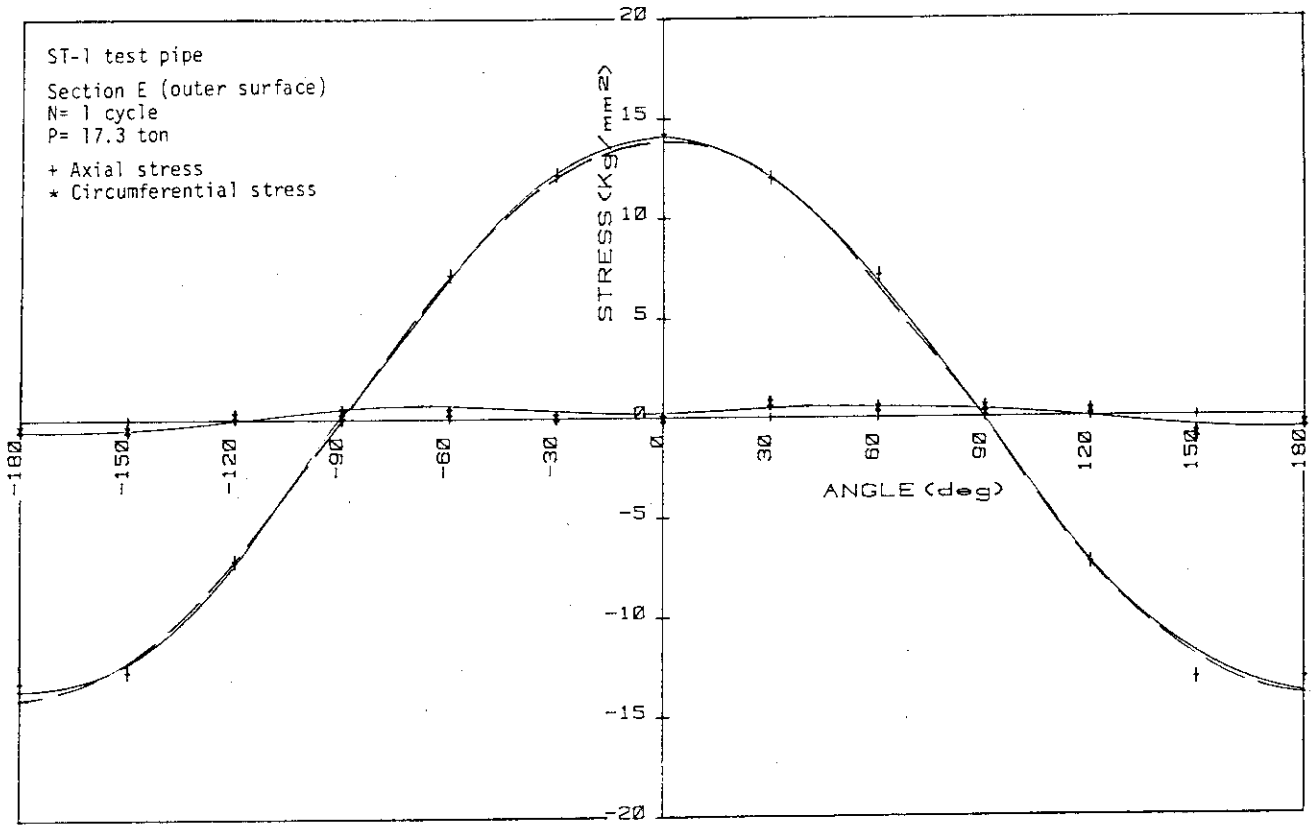


Fig. 4.10 Stress distribution of ST-1 test pipe

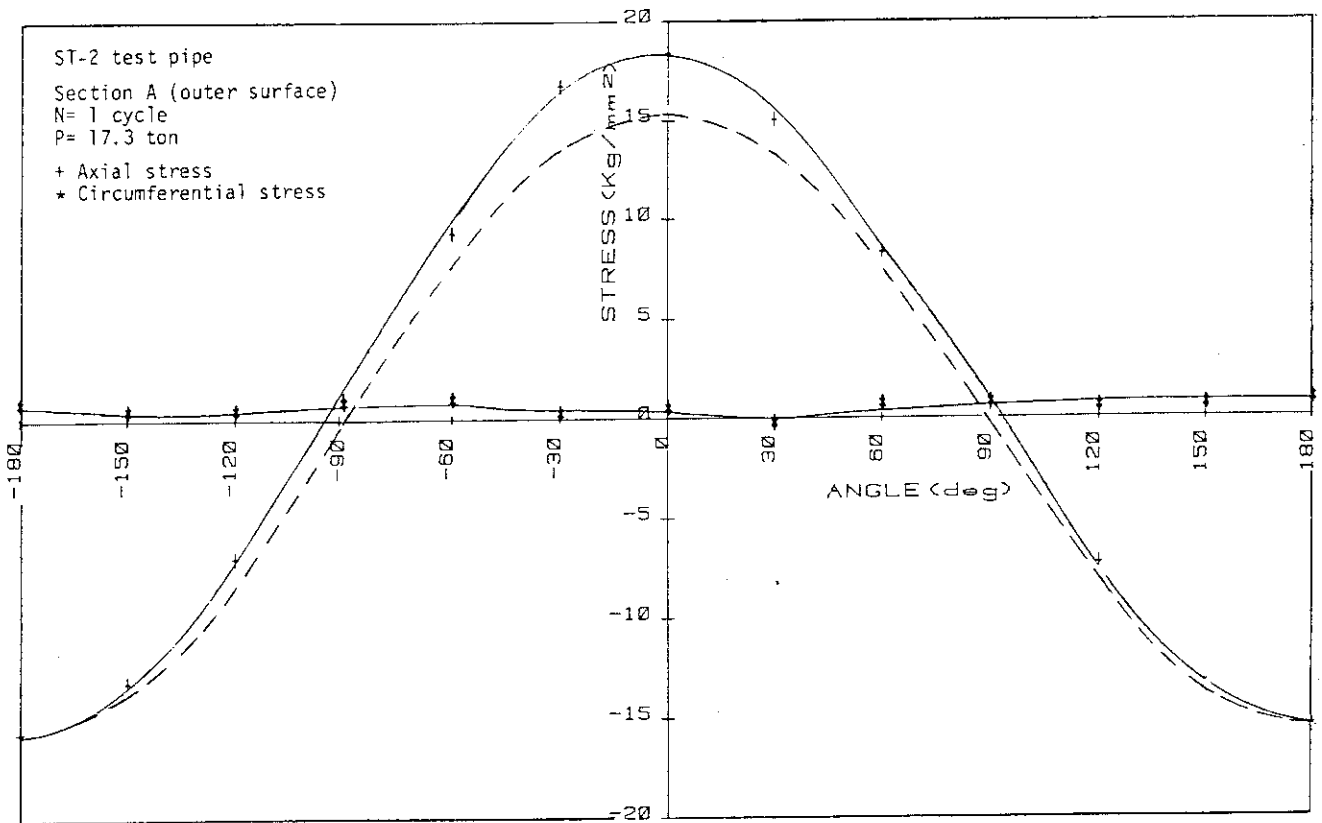


Fig. 4.11 Stress distribution of ST-2 test pipe

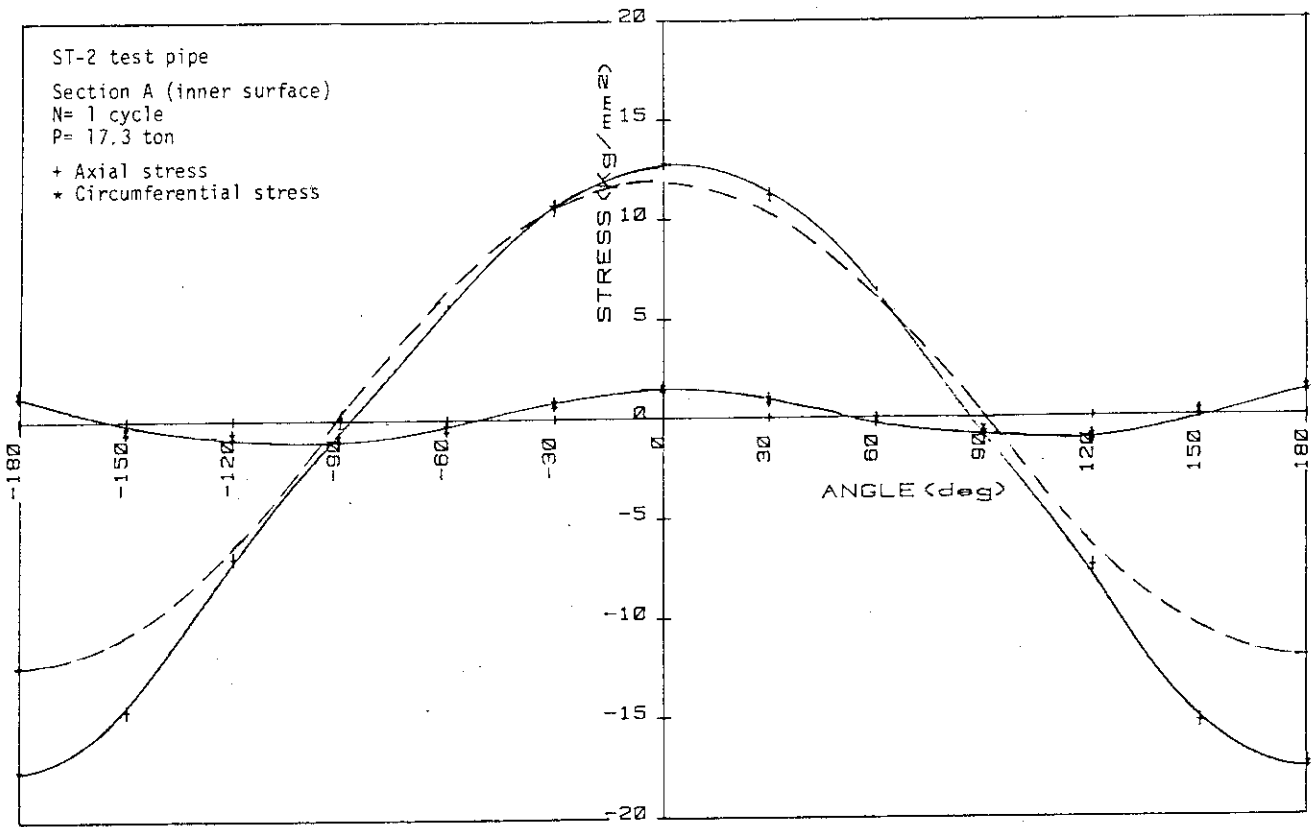


Fig. 4.12 Stress distribution of ST-2 test pipe

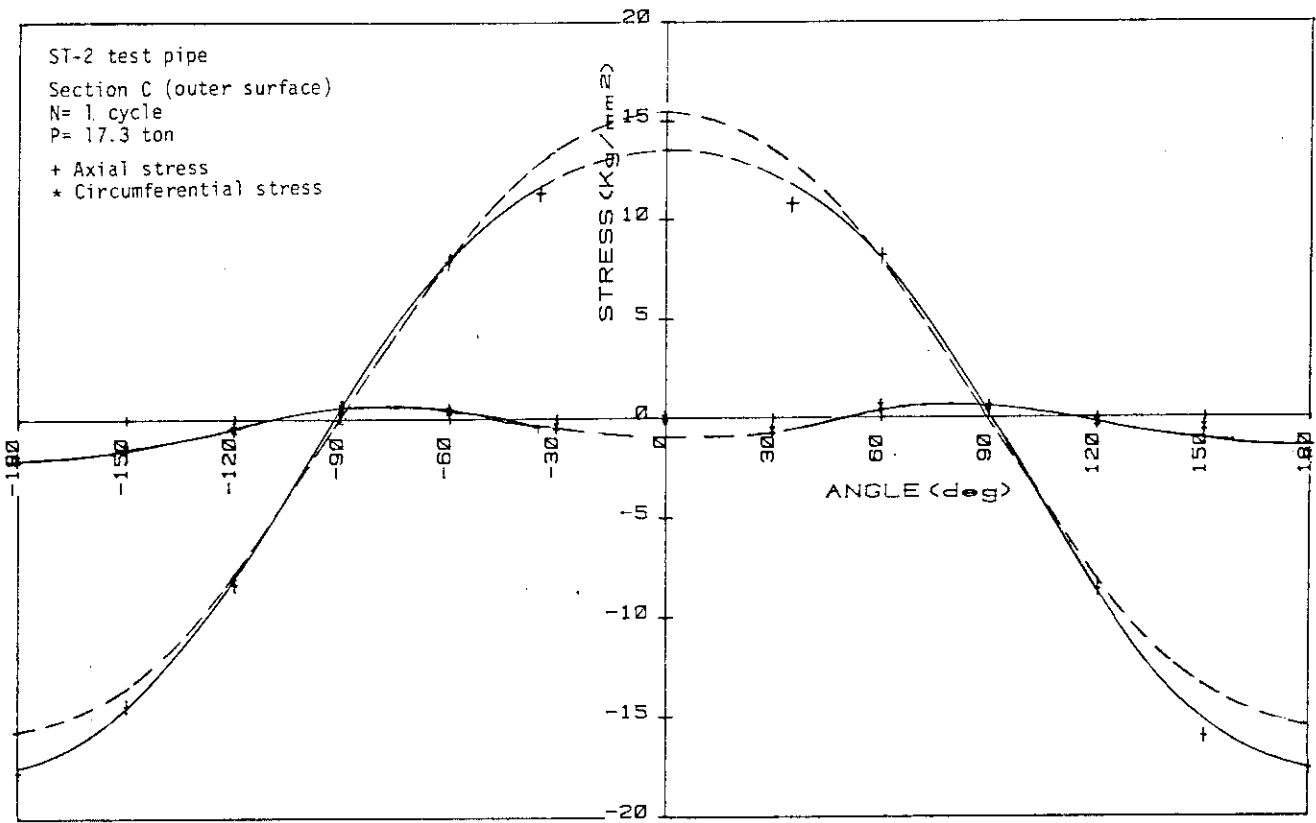


Fig. 4.13 Stress distribution of ST-2 test pipe

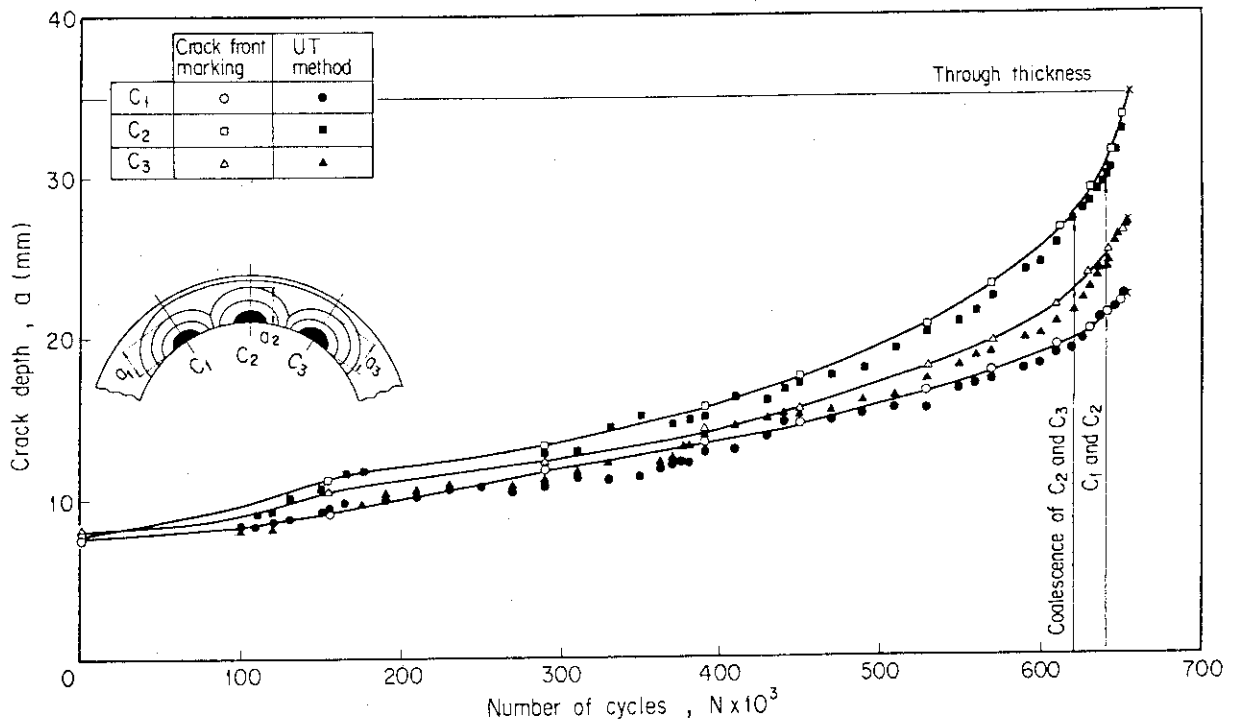


Fig. 4.14 Result of crack growth measurement in ST-1 test pipe by ultrasonic method and crack front marking

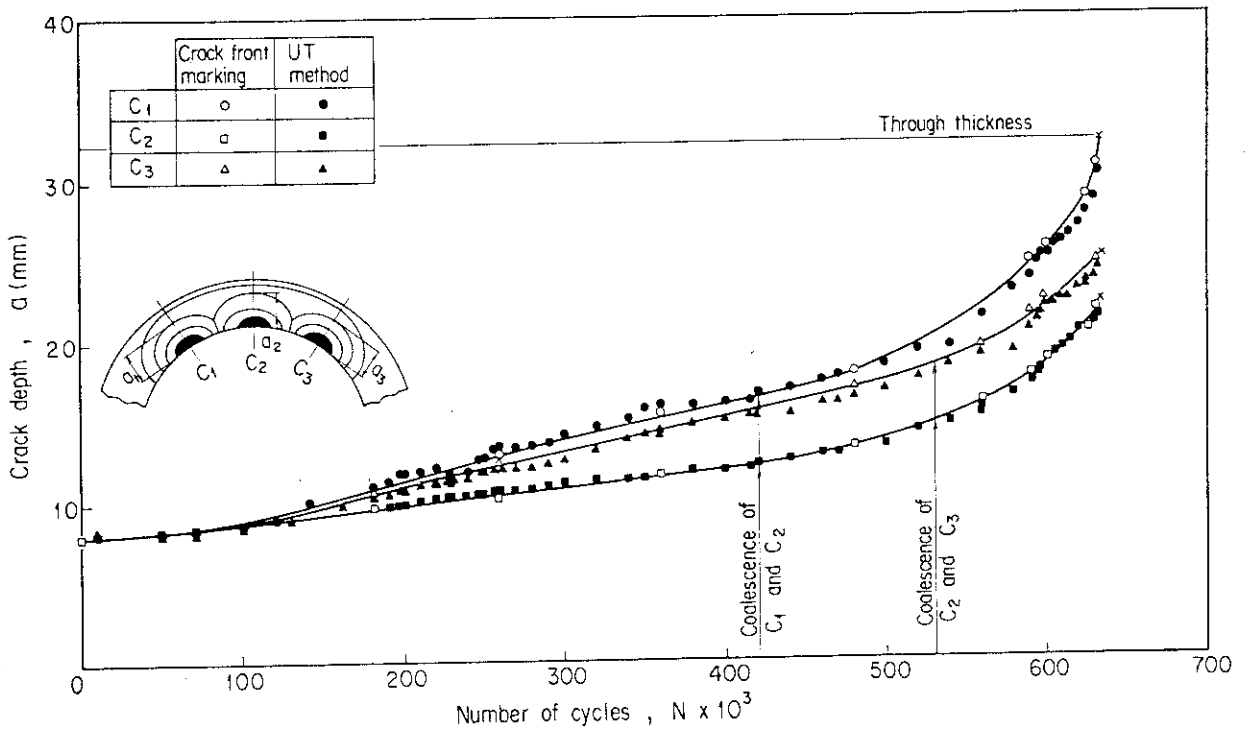


Fig. 4.15 Result of crack growth measurement in ST-2 test pipe by ultrasonic method and crack front marking

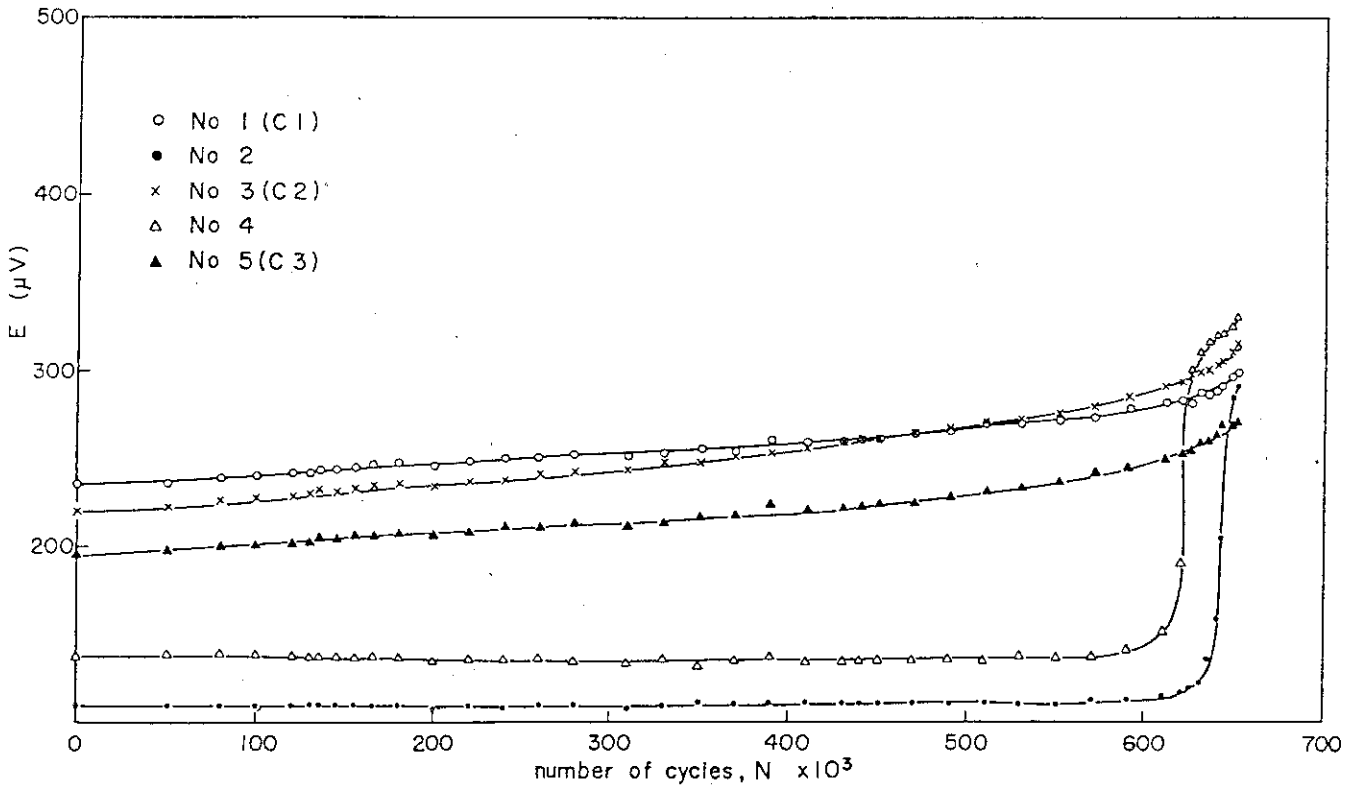


Fig. 4.16 Results of electric potential measurement (ST-1)

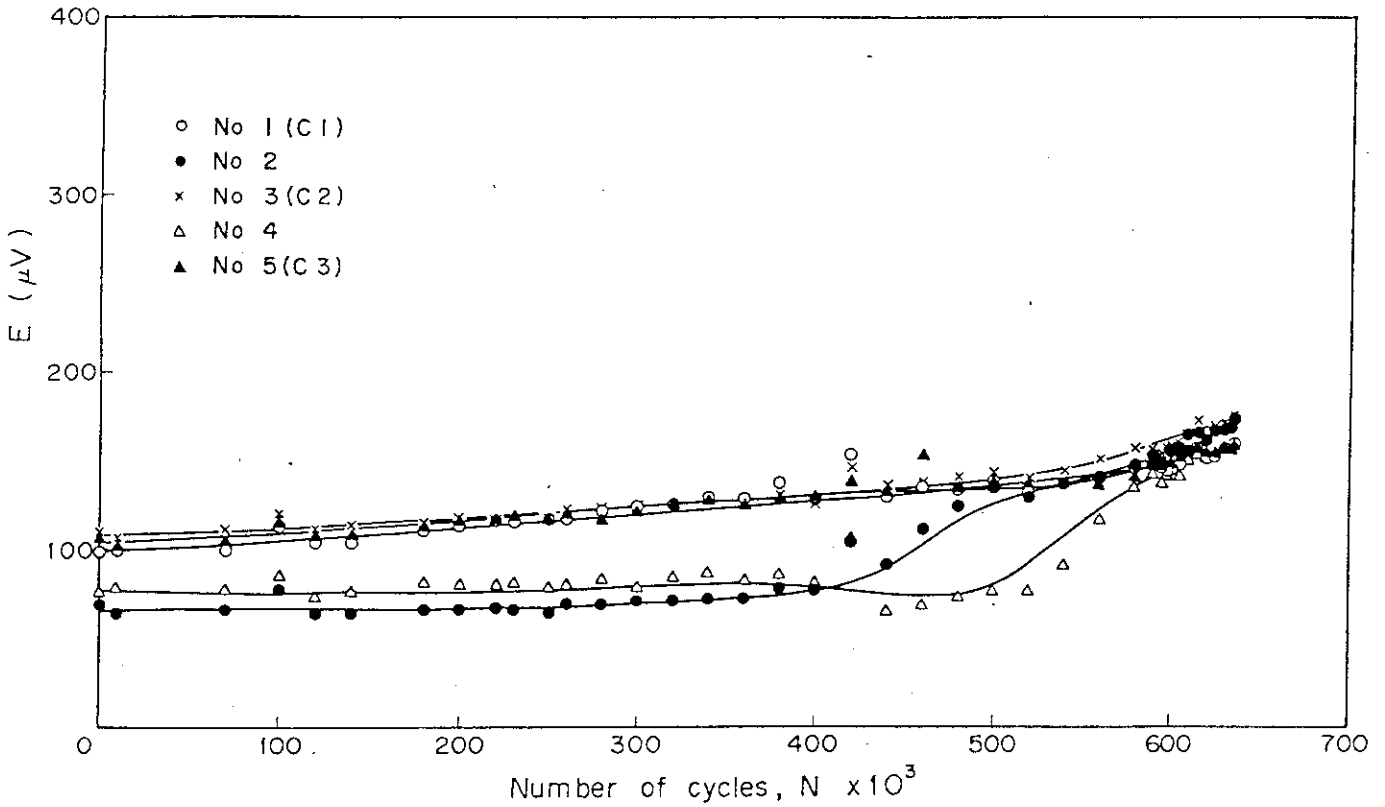


Fig. 4.17 Results of electric potential measurement (ST-2)

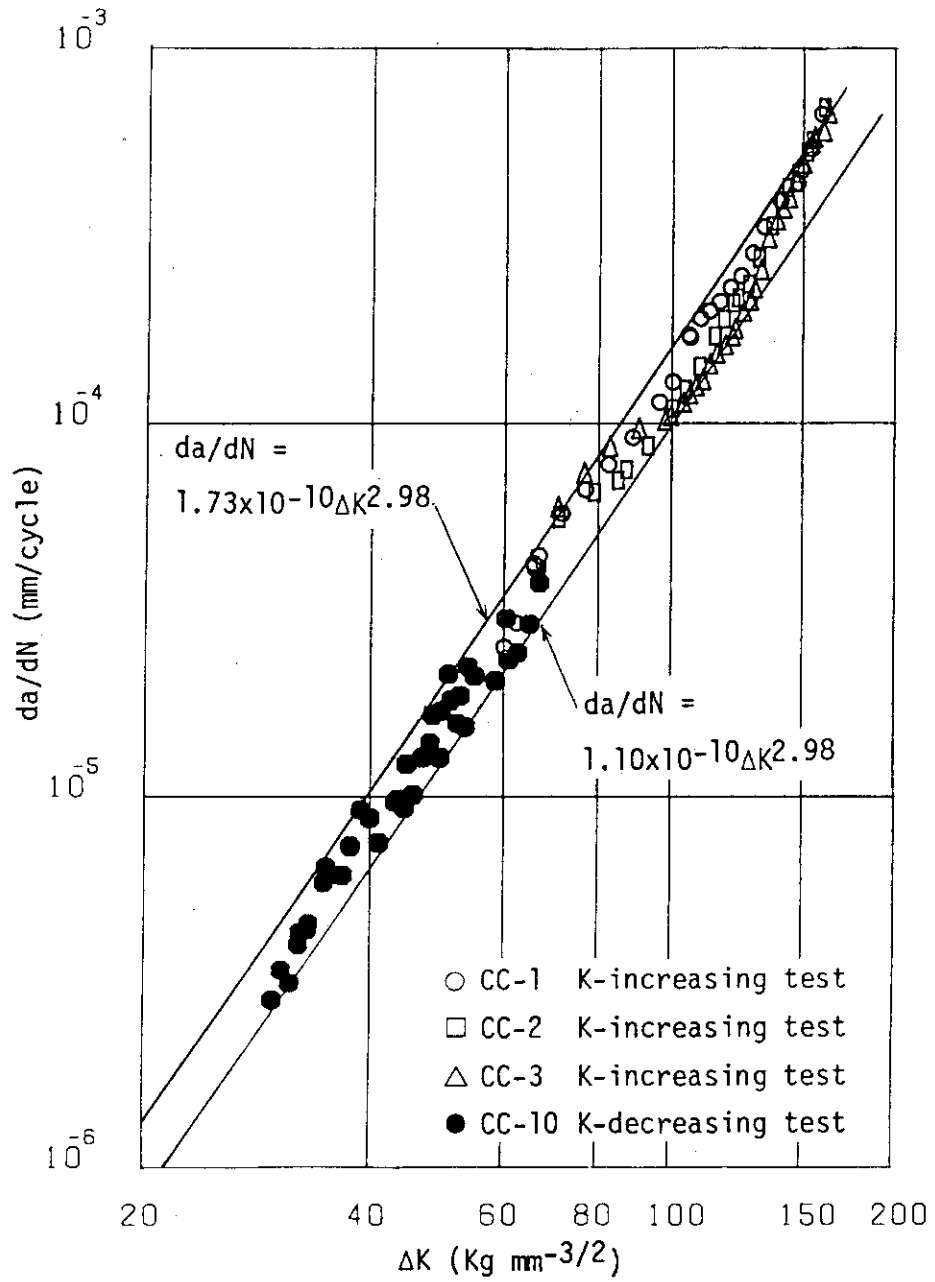


Fig. 4.18 Material da/dN vs. ΔK curve of SUS304L stainless steel pipe

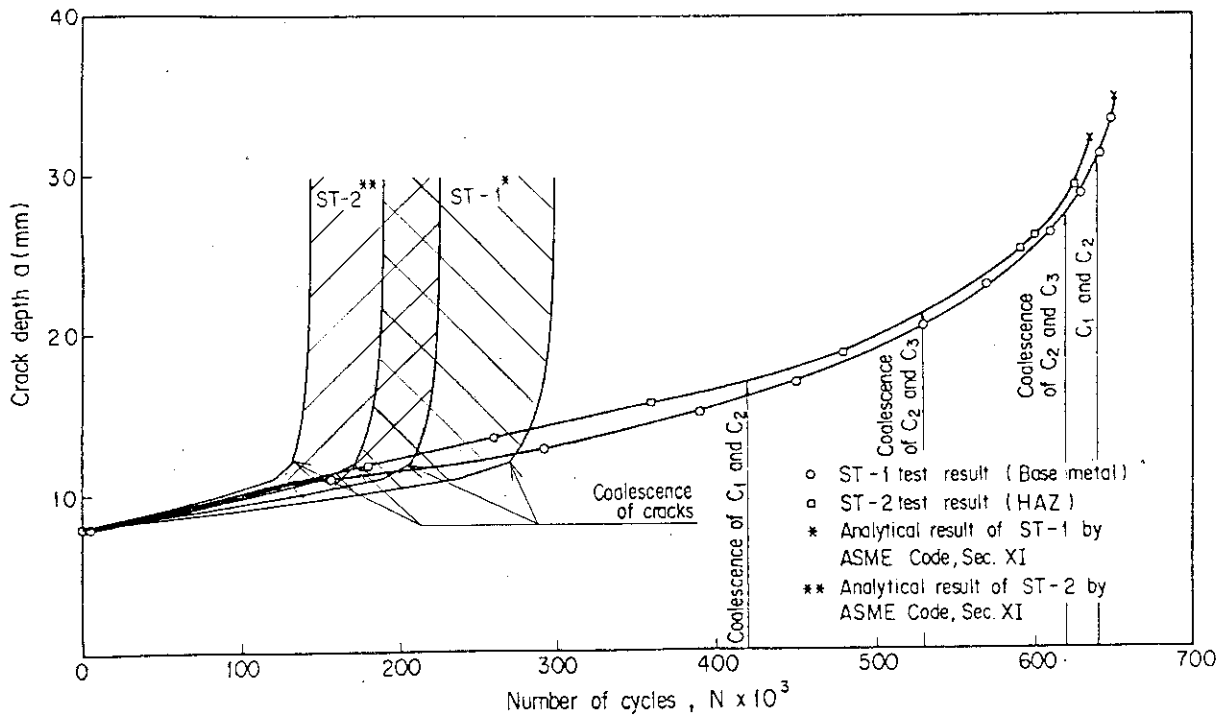


Fig. 4.19 Comparison of crack growth curves of straight pipes in the thickness direction between test results and analytical results by ASME Code

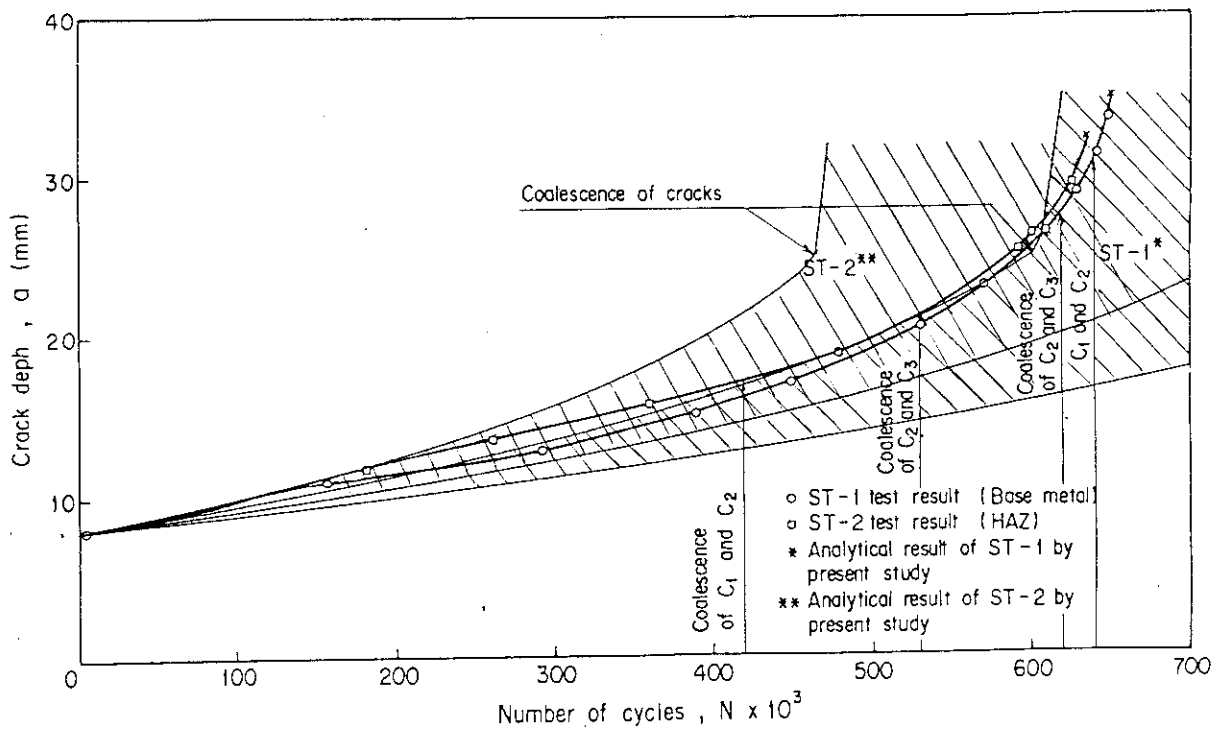


Fig. 4.20 Comparison of crack growth curves of straight pipes in the thickness direction between test results and analytical results by present study

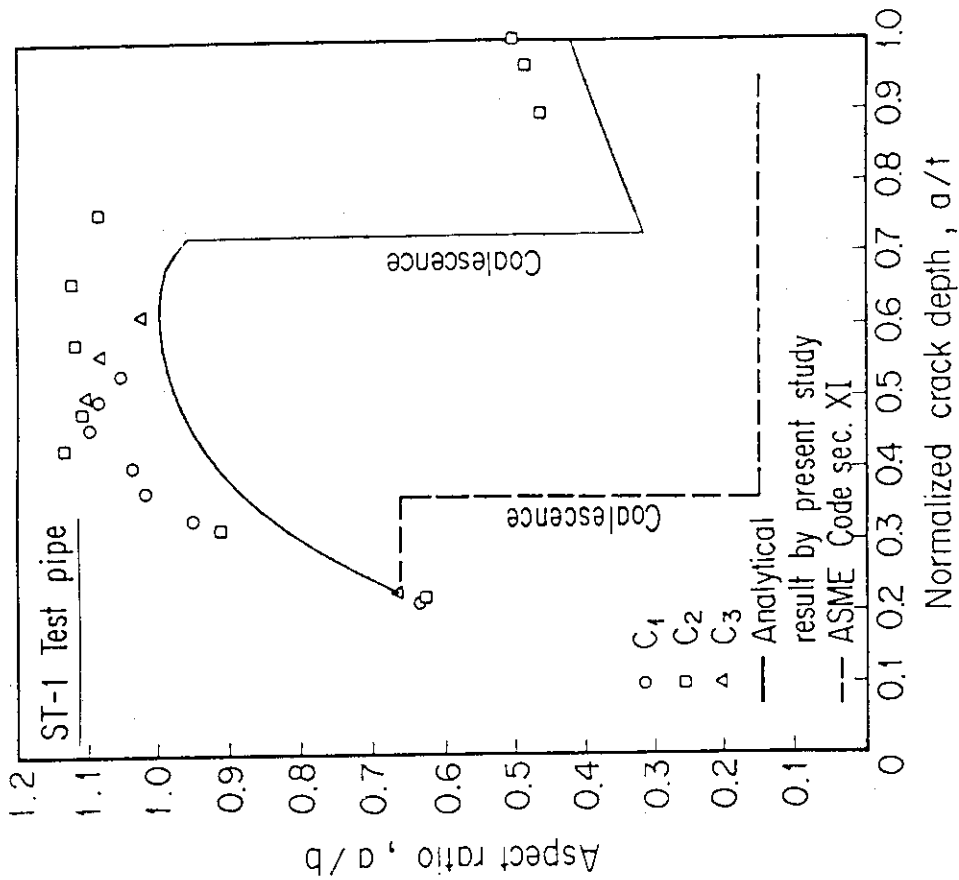


Fig. 4.21 Change in aspect ratio with the crack growth in ST-1 test pipe

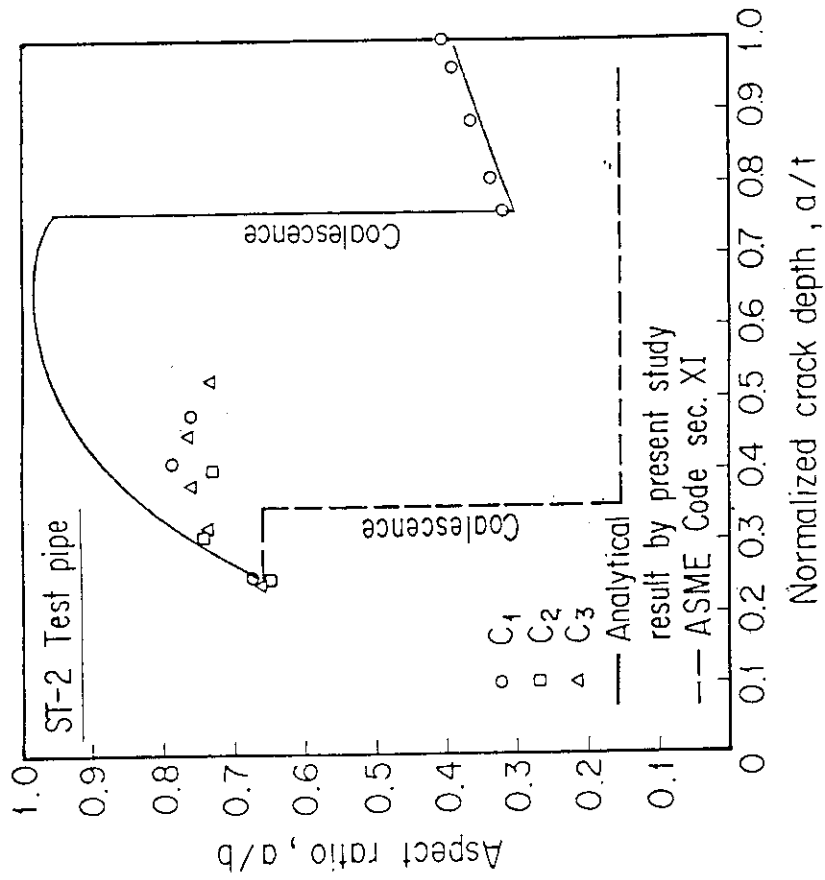


Fig. 4.22 Change in aspect ratio with the crack growth in ST-2 test pipe

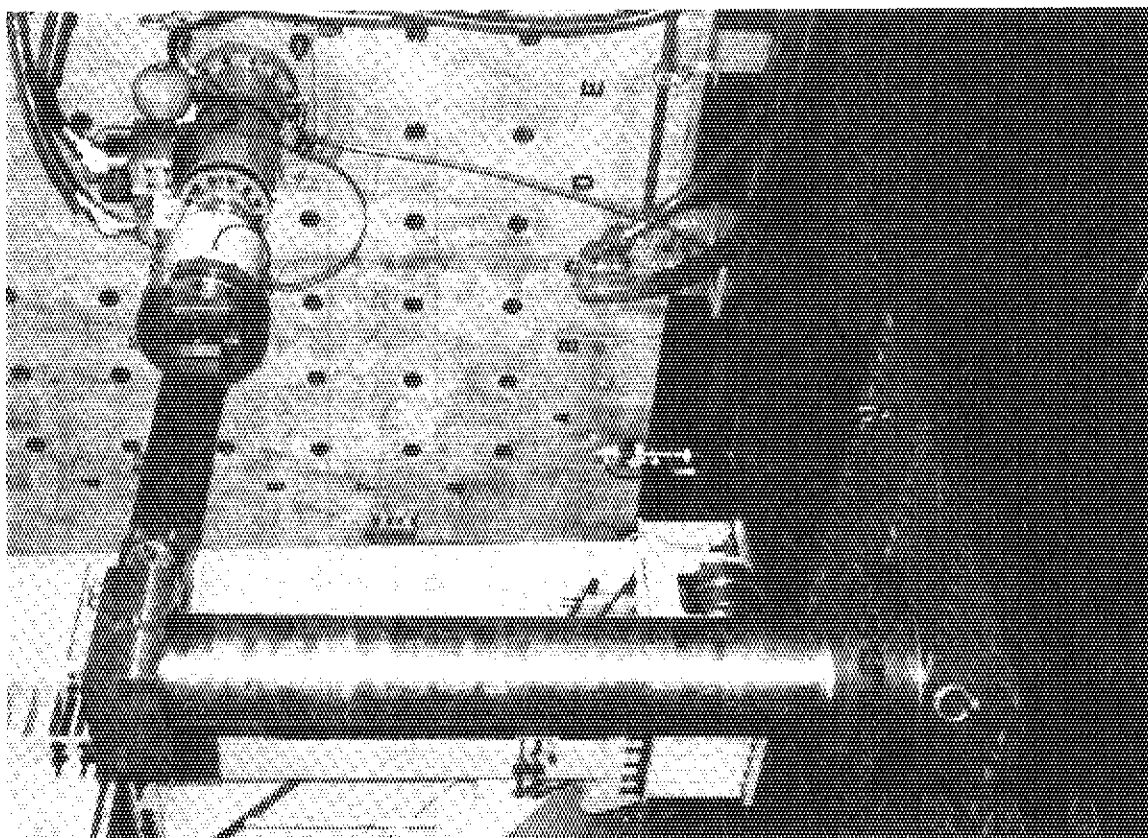
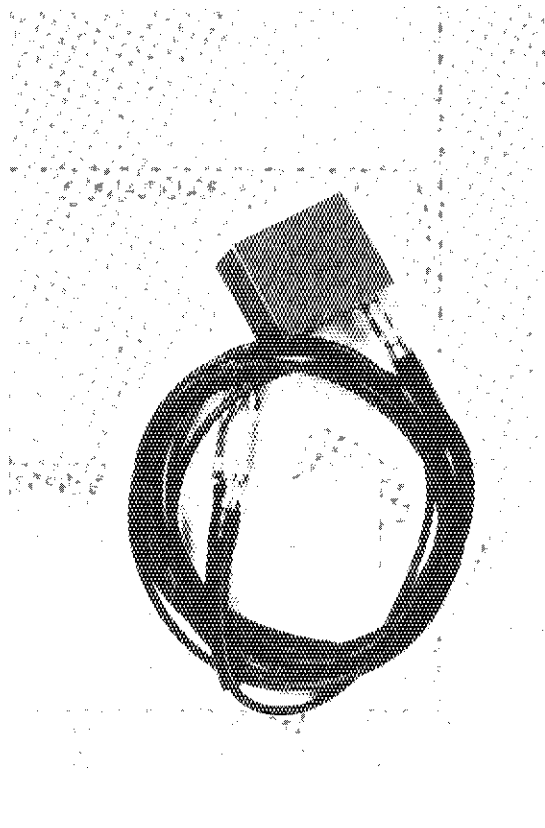
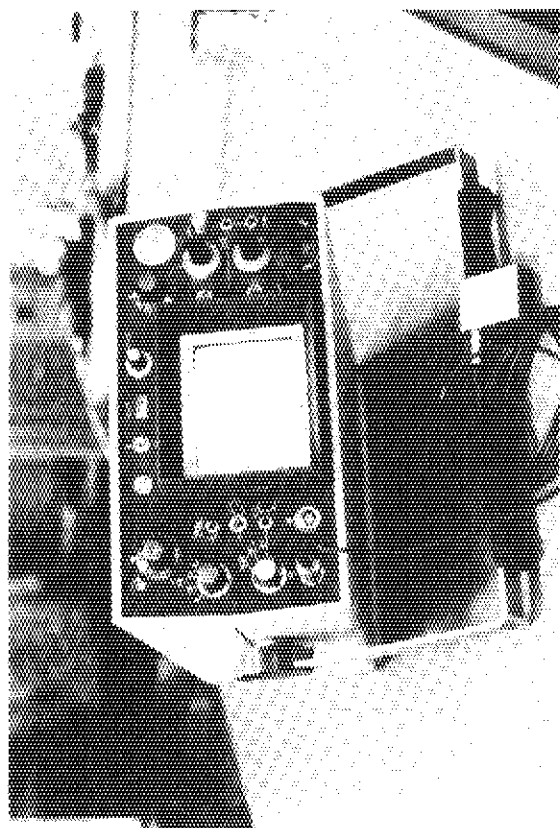


Photo 4.2 Ultrasonic flow detector and longitudinal wave probe

Photo 4.1 View of the straight pipe test

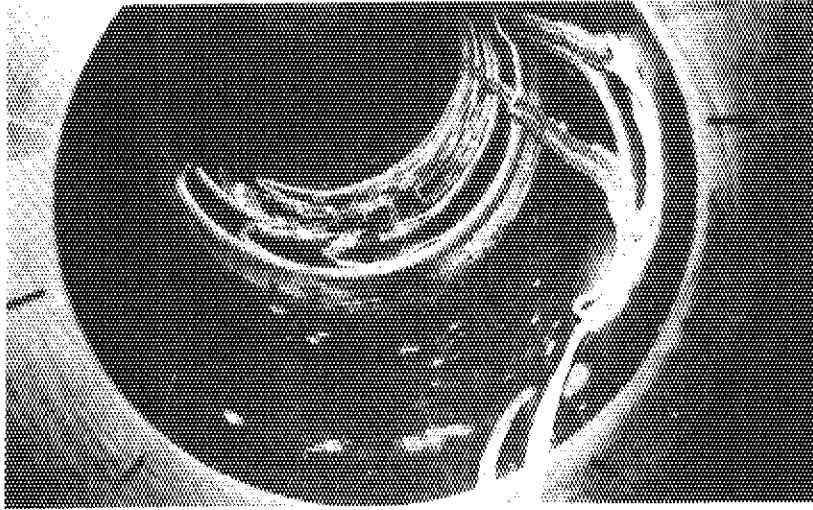


Photo 4.3 Probes of electric potential method welded in the inner surface of test pipe

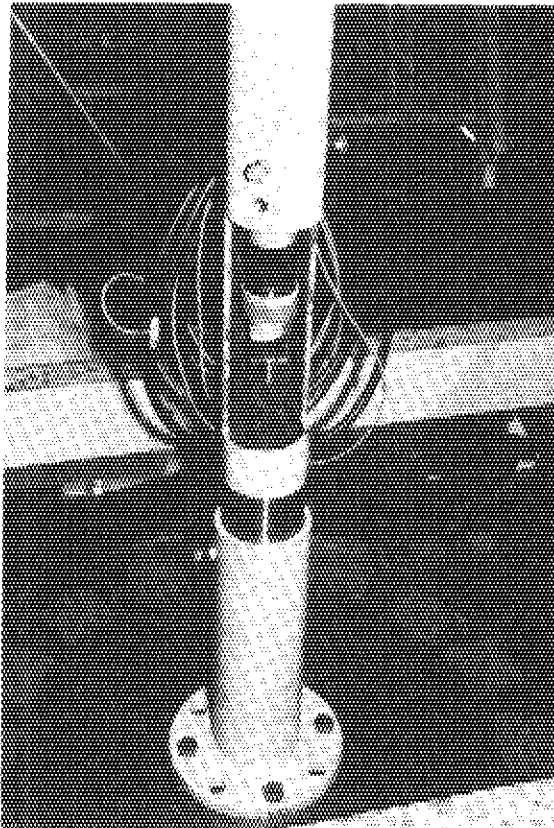


Photo 4.4 Small TV-camera and setting device for observation of the inside of straight pipe

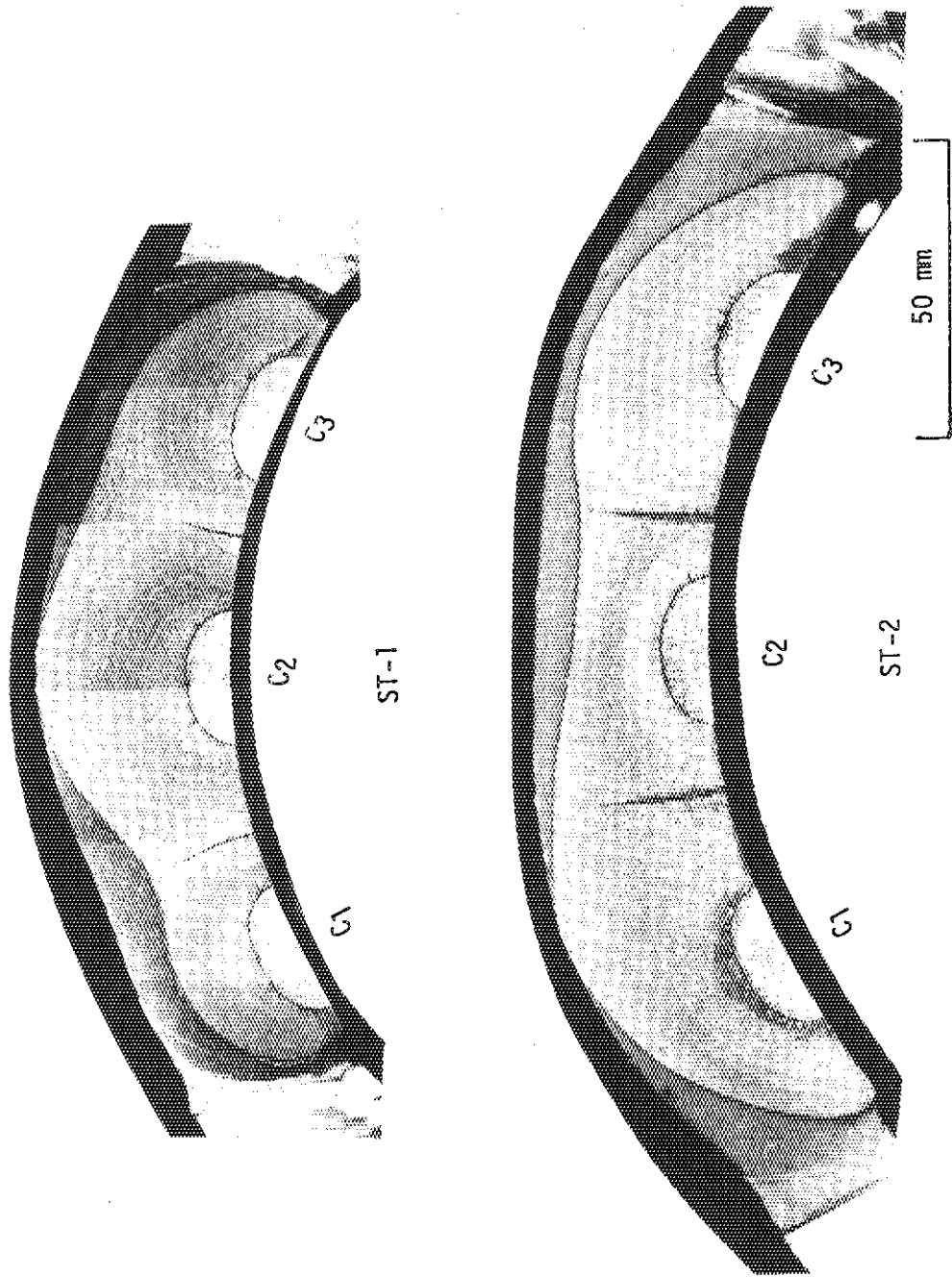


Photo 4.5 Fracture surface of straight pipes, ST-1 and ST-2

5. 複数内面欠陥付曲管試験体のき裂伝播試験結果 およびき裂伝播評価

5.1 まえがき

直管試験体の試験に引続き、配管における複数表面欠陥の伝播挙動を明らかにし、欠陥伝播評価法の適用性を明らかにするため複数内面欠陥付曲管試験体を供試体とした疲労試験を実施した。

一般に各種プラントの製作においてエルボは配管の引回しの際一番多く用いられるコンポーネントである。また、熱膨張や溶接、その他外荷重による変形は配管の曲りの部分で吸収する構造となるケースが多く、この場合エルボ部には曲げ荷重により大きな応力が発生する。

曲管のエルボ部に面内曲げ荷重が作用すると、エルボ部は偏平化し、その脇腹部に最大の周方向応力が発生する。したがって、この位置に欠陥が存在していた場合、その欠陥からのき裂の伝播挙動を明らかにすることは重要である。

そこで、試験では320 mm ϕ のSUS 304 L ステンレス鋼製の2体の曲管試験体のエルボ部内面の両側に、1体は人工欠陥を1個ずつ設け、他方は3個ずつ設けこれらの曲管試験体に面内曲げ荷重を負荷したとき、これらの人工欠陥からき裂が伝播し、合体して貫通に至る過程を調べた。

さらに、直管試験の場合と同様に、ASME Code Sec. XIの方法および第3章で提案した表面欠陥伝播評価法によりき裂伝播予測を行い試験結果と比較し、直管試験に引続きこれらの評価法の適用性を検討した。

5.2 試験方法

5.2.1 曲管試験体

試験に供した曲管試験体は曲管試験用に製作した90°ロングエルボ(90 EL, 12B, Sch. 160)にフランジ付直管を溶接して製作した。

曲管試験体の製作にあたり、試験体の荷重方向が対称となるような試験体設置方法とすること、あるいは試験装置の能力(門型フレーム寸法、荷重、変位容量)等を考慮して各部の寸法を決定した。

試験部に使用した90°ロングエルボは14 B Sch. 160のSUS 304 L 鋼管から熱間曲げ法によりエルボに成形したものである。化学成分、機械的性質をTable 5.1およびTable 5.2に示す。

このように製作したエルボに所定の人工欠陥を加工し、また計測用のスメックゲージ、クラックゲージ、および歪ゲージを内面に取付けた。その後両端に約800 Lのフランジ付SUS 304 L 鋼管(12 B, Sch. 160)を溶接しさらにフランジ面の機械加工を行い曲管試験体を完成した。

曲管試験体の形状、寸法をFig. 5.1に示す。

なお、エルボ製作用のステンレス鋼管および直管部に使用したステンレス鋼管は同等の化学成分および機械的性質を有するように製造したものである。

人工欠陥の加工は試験体製作後では非常に困難となるので、エルボ直管を溶接する前、すなわ

ちエルボの状態を実施した。

人工欠陥の形状は直管試験に採用した 8 mm (深さ) × 24 mm (長さ) の半楕円状欠陥と同一形状とし、曲管試験体の内面、両脇腹部に軸方向にそって EL-4 試験体は 1 個ずつ、合計 2 個、EL-5 試験体は 3 個ずつ、合計 6 個の人工欠陥を加工した。EL-5 の人工欠陥の間隔は 100 mm (約 3 t) とした。Fig. 5.2 に人工欠陥形状、位置を示す。

5.2.2 疲労試験

曲管試験では門型フレームに取付けられた油圧アクチュエータとテストベッド間に試験体を「くの字型」に両端をピン接続し、軸力引張荷重によって面内曲げ荷重を試験体を与えた。

Photo. 5.1 に曲管試験体の据付状態を示す。

2 体の曲管試験体 (EL-4, EL-5) の試験条件を Table 5.3 に示す。

Table 5.3 に示す荷重条件 (ΔP) は EL-4 および EL-5 試験体の試験部の肉厚の平均, $t = 40.3$ mm および直径の平均 $D_o = 320.2$ mm の値を用い ASME Code Sec. III²²⁾ における一次曲げ応力, P_b が $1.5 S_m = 21.0 \text{ kg/mm}^2$ となるように決定したものである。

すなわち、つぎのようにして荷重条件を決定した。

$$B_2 = 0.75 C_2 = 0.75 \frac{1.95}{\lambda^{3/2}}$$

$$\lambda = R t / r^2$$

ここで、

C_2 : 二次応力指数 (曲げに対する)

B_2 : 一次応力指数 (")

λ : パイプ係数

R : = 440.0 mm

t : = $((40.0 + 40.8) / 2 + (40.9 + 39.6) / 2) / 2$
= 40.3 mm

r : $(D_o - t) / 2 = 139.9$ mm

D_o : = $(322.0 + 318.4) / 2 = 320.2$ mm

上式より曲げに対する一次応力指数を求めると、 $B_2 = 1.562$ である。一次曲げ応力を $\Delta P_b = 1.5 S_m = 21.0 \text{ kg/mm}^2$ とするには外部からの曲げ応力、 ΔM は、

$$\Delta M = Z P_b / B_2 = 29.75 \times 10^6 \text{ kg-mm}$$

Z : 断面係数 = $2I / D_o = 2.213 \times 10^6 \text{ mm}^3$

I : 断面二次モーメント

$$= \pi (D_o^4 - D_i^4) / 64 = 3.544 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

試験体の幾何学形状から ΔM と外力、 ΔP との関係はつぎのようになる。

$$\Delta M = 1040 \text{ mm} \times \cos 45^\circ + 440 \text{ mm} \times (1 - \cos 45^\circ) \\ \times \Delta P \text{ kg} = 864.3 \times \Delta P \text{ kg-mm}$$

この関係から、

$$\Delta P = \Delta M / 864.3 = 34420 \text{ kg}$$

これより

$$P_{\max} = \Delta P / (1-R) = 38.24 \text{ ton}$$

$$P_{\min} = R \cdot P_{\max} = 3.82 \text{ ton}$$

が決定される。

5.2.3 測定方法

(1) 歪分布および変形測定

試験中所定の繰返し数において試験体の歪分布測定および変形測定を各試験体について実施した。歪分布測定は曲管試験体の試験部を中心に108点の歪ゲージを用いて行った。歪測定はデジタル式多点歪測定器を用い、0荷重から最大荷重の間、試験体の荷重をステップ状に変化させながら各ステップにおいて荷重を一定に保持しながら実施した。

また、試験体の変形は試験体の上部フランジ位置においてダイヤルゲージ式変位計により測定した。Fig. 5.3にEL-4およびEL-5試験体の歪ゲージ貼付位置および変形測定位置を示す。

(2) 超音波探傷法によるき裂深さ測定

直管試験と同様に超音波探傷法によるき裂深さ測定を行った。曲管試験体におけるき裂深さ測定では周方向に探触子を前後操作しなければならない。周方向から測定では探触子から試験体に入射した超音波の拡散が大きく、ビーム路程が長くなるほどエコー強度が弱くなり、ピークエコーの測定が困難となる。このため、ビーム路程の長い浅いき裂の測定には拡散を防ぐ目的で点集束型の探触子を使用した。

(3) き裂ゲージによるき裂伝播測定

き裂ゲージによる内表面におけるき裂伝播測定は両試験体の所定位置にき裂ゲージを貼付して行った。き裂進展の測定は疲労試験中歪出力の値からき裂先端位置を求めることにより行った。

(4) 電位差法によるき裂伝播測定

直管試験と同様に電位差法によるき裂伝播測定を疲労試験中に行った。探針取付位置をFig. 5.4に示す。

(5) ビーチマーク法によるき裂伝播測定

上記の各方法と併用してき裂伝播中のき裂形状を正確に把握するためビーチマーク法による測定を各試験とも10回程度行った。ビーチマーク付加方法は直管試験の場合と同様である。

5.3 試験結果

5.3.1 応力分布測定結果

EL-4およびEL-5試験体における応力分布測定はFig. 5.3に示した測定位置においてデジタル歪測定器を用いて行った。測定から得られた応力分布と以下に示すKarmanの第1近似式お

よび ASME Code Sec. III の NB 3685. 1-2 における応力分布式から得られるエルボの中央円周方向断面の応力分布とを比較する。

Karman の第 1 近似式はつぎの通りである。

$$\sigma_L = \frac{K M r}{I} \left\{ \sin \phi - \frac{6}{5+6\lambda^2} \sin^3 \phi + \frac{9\nu\lambda}{5+6\lambda^2} \cos 2\phi \right\}$$

$$\sigma_\theta = \frac{K M r}{I} \left\{ \nu \left(\sin \phi - \frac{6}{5+6\lambda^2} \sin^3 \phi \right) + \frac{9\lambda}{5+6\lambda^2} \cos 2\phi \right\}$$

K : 撓み係数 $= \frac{10 + 12\lambda^2}{1 + 12\lambda^2}$

λ : パイプ係数 $= \frac{tR}{r^2}$

t : エルボの肉厚 (= 40.325 mm)

R : エルボの曲率半径 (= 440 mm)

r : エルボの断面平均半径 (= 139.9 mm)

M : 曲げモーメント

I : エルボの断面二次モーメント

ϕ : 円周方向の位置 (断面の中立軸を 0° とし て反時計向きの偏角)

また, ASME Code Sec. III におけるエルボ中央周方向断面の応力分布式はつぎの通りである。

$$\sigma_{tm} = \sin \phi + \{ (1.5 X_2 - 18.75) \sin 3\phi + 11.25 \sin 5\phi \} / X_4$$

$$\sigma_{nb} = \lambda (9 X_2 \cos 2\phi + 225 \cos 4\phi) / X_4$$

$$\sigma_\theta = \frac{M}{Z} (\nu \sigma_{tm} \pm \sigma_{nb}) \quad (+ = \text{外面}, - = \text{内面})$$

$$\sigma_L = \frac{M}{Z} (\sigma_{tm} \pm \nu \sigma_{nb}) \quad (+ = \text{外面}, - = \text{内面})$$

$$\lambda : \lambda = tR / r^2 \sqrt{1 - \nu^2} \quad (\text{valid for } \lambda \geq 0.2)$$

$X_1 : X_1 = 5 + 6\lambda^2$

$X_2 : X_2 = 17 + 600\lambda^2$

$X_3 : X_3 = X_1 X_2 - 6.25$

$X_4 : X_4 = (1 - \nu^2) (X_3 - 4.5 X_2)$

Z : エルボの断面係数

EL-4 および EL-5 試験体の中央周方向外表面の上記応力分布の比較を Fig. 5.5 および Fig. 5.6 に示す。応力分布測定結果と Karman の式および ASME Code の式による応力分布とを比較すると周方向応力の測定値は両式から得られた応力よりやや小さく、軸方向応力は逆の傾向を示している。また, ASME Code の式は Karman の式よりわずかに大き目の応力を与えている。

なお、EL-4 および EL-5 試験体の測定結果はほぼ一致しており、両者とも良好な測定値が得られたと判断される。

一方、内面における応力分布測定結果と ASME Code の式とを比較したのが Fig. 5.7 および Fig. 5.8 であるが、この場合は測定結果と計算結果はあまり一致していない。

測定結果から曲管試験体内面の両脇腹において大きな応力が生じていることが分る。

5.3.2 き裂伝播試験結果

EL-4 および EL-5 試験体の疲労試験は試験断面においてき裂が板厚を貫通するまで行った。試験中ビーチマーク荷重は EL-4 試験体では 9 回、EL-5 試験体では 8 回それぞれ負荷した。試験終了後試験部を切出し、さらに油圧試験機により破面を分割し破面観察を行った。

破面におけるビーチマークは一部不鮮明なところもあったがほぼ良好であり、伝播模様が良好に観察できた。

Photo. 5.2 および Photo. 5.3 に EL-4 および EL-5 試験体の破面写真を示す。

ビーチマーク法および超音波探傷法によって得られた深さ方向へのき裂伝播曲線を Fig. 5.9~Fig. 5.12 に示す。これらの図から明らかなように超音波探傷法によるき裂深さ測定結果はビーチマークから得られたき裂深さに良く一致しており、端部ピークエコー法により良好なき裂深さ測定が可能である。

Fig. 5.9 に示した EL-4 試験体の場合、 C_{2A} クラックと C_{2B} クラックの伝播曲線に勾配の差が生じたが、図から分るように両者とも直線的に深さ方向へと伝播する。

一方、Fig. 5.10~Fig. 12 に示す EL-5 試験体の複数欠陥のケースではき裂合体付近を境にして伝播曲線は急激に立上っている。合体前は単一欠陥のケースの EL-4 試験体とほぼ同様の伝播挙動となっており、合体直前まではき裂の相互干渉は小さいと判断できる。合体直前になると相互干渉により伝播速度が増大し、さらに合体により大きなき裂となり伝播速度はさらに大きくなるのである。

一方、試験体内面における表面方向のビーチマークによるき裂伝播曲線を図示したのが Fig. 5.13~Fig. 5.16 である。

これらの図から分るように表面方向へは深さ方向に比べ非常に大きくき裂が伝播し貫通寸前には EL-4 の場合約 300 mm、EL-5 の場合約 350 mm にも達している。

Fig. 5.15 および Fig. 5.16 の両図から EL-5 試験体の場合 C_{1A} と C_{2A} および C_{2A} と C_{3A} の合体点、 C_{1B} と C_{2B} および C_{2B} と C_{3B} の合体点における繰返し数は図中に示したように判断される。

また、疲労破面写真からも分るように EL-4 および EL-5 試験体におけるき裂伝播は深さ方向よりも表面方向の方が顕著でありき裂形状はしだいに偏平な楕円形状となってゆく。

5.4 試験結果と予測結果の比較

EL-4 および EL-5 試験体におけるき裂伝播挙動の予測は ASME Code Sec. XI の方法 (予測法 I) および本研究の方法 (予測法 II) の 2 方法によって行い、試験結果と比較した。伝

播解析にあたっては曲管試験体の実測寸法により解析モデル形状を決定し、また、解析における負荷条件は各試験体の実測応力によった。Table 5.4 に解析条件を示す。

Fig. 5.17 は ASME Code の方法による伝播予測結果と EL-4 および EL-5 試験体の試験結果におけるき裂伝播曲線とを比較したものであり、Fig. 5.18 は同様に本研究の方法による予測結果と試験結果とを比較したものである。

Fig. 5.17 において EL-5 試験体の予測結果は試験結果に比べかなり短寿命側であり安全側の評価となっており直管試験体の場合と同様の結果である。一方、EL-4 試験体の場合も安全側の評価となつてはいるが、き裂が深くなると伝播曲線の勾配は次第に緩やかとなり非安全側へと移行する傾向が生じている。Photo. 5.2 における EL-4 試験体の破面写真から分るように、き裂が伝播するに従って非常にへん平な長いき裂形状となる。このことは曲管脇腹部では板曲げに近い応力状態となり応力のほとんどが曲げ応力成分から成っているために生じたと推定される。一方、ASME Code の方法ではき裂形状は不変という仮定を採用しているため、同一のき裂深さに対して試験結果よりはるかに短い表面長さにき裂形状を評価していることになる。上記の EL-4 試験体の伝播予測における非安全側への移行はこのような不適正なき裂長さ評価によって生ずるものである。

一方、本研究の方法と両試験体の試験結果を比較した Fig. 5.18 では、予測結果は試験結果に対して若干安全側の評価となっている。また、き裂合体点の予測も試験結果と良く一致しており、ASME Code による予測より妥当な評価結果が得られることが分る。

つぎに、き裂形状変化について予測結果と EL-4 試験体の試験結果と比較したのが Fig. 5.19 であり、EL-5 試験体の試験結果と比較したのが Fig. 5.20 である。

Fig. 5.19 において EL-4 試験体の場合は試験結果と予測法Ⅱによるアスペクト比は非常に良く一致しているが、ASME Code の方法（予測法Ⅰ）き裂が深くなると試験結果に対して大き目のアスペクト比評価となり、その差も次第に拡大してゆく。すでに指摘したように、アスペクト比を小さく評価するということはき裂の表面長さを短く評価していることになるので実際より非安全側のき裂寸法評価となる。また、このことは面内曲げ荷重負荷を受ける曲管脇腹部のような曲げ応力成分が大きな負荷状態の構造断面ではき裂は非常にへん平な形状へと成長するが、ASME Code ではこの事情を考慮できないため、非安全側のき裂伝播寿命評価となる恐れがあることを示唆するものである。

一方、本研究の方法では曲管試験体におけるき裂伝播挙動に関してき裂形状変化およびき裂合体位置評価が正確に可能であり、き裂伝播寿命に関しては若干安全側の評価が可能である。

5.5 結 論

本研究では曲管の脇腹部軸方向断面に複数内面欠陥が存在する場合、その欠陥からの疲労き裂伝播挙動を明らかにするため曲管試験体を供試体とした疲労試験を実施した。さらに、ASME Code Sec. XI の評価法および第3章で提案した表面欠陥伝播評価法によるき裂伝播評価を行い、これらの評価法の配管構造物への適用性を検討した。

疲労試験は SUS 304L ステンレス鋼製の曲管試験体の両脇腹部の軸方向断面に 1 欠陥づつあ

るケース (EL-4 試験体) および 3 欠陥づつあるケース (EL-5 試験体) について繰返し面内荷重負荷により行った。超音波探傷法, ビーチマーク法, および電位差法によるき裂伝播測定を試験中に行い, 疲労き裂が外表面までに伝播するまで疲労試験を行った。

以上の試験および解析結果からつぎの結論が得られた。

- (1) 曲管外表面から行った超音波探傷法によるき裂深さ測定結果とビーチマークから得られたき裂深さは良い一致を示し, 直管試験体の場合と同様に, 曲管試験体の場合でも端部ピークエコー法により良好なき裂深さ測定が可能である。
- (2) 曲管脇腹部に単一欠陥を有するケースでは深さ方向へのき裂伝播は貫通するまで直線的な伝播曲線を示し, 3 欠陥のケースではき裂が合体する直前から伝播速度が高くなり伝播曲線はほぼバイリニアとなる。き裂合体直前までは単一欠陥の場合と同様の伝播曲線を示し, き裂干渉効果は小さい。
- (3) 曲管脇腹部における周方向応力は曲げ応力成分が大きく板曲げに近い応力状態となる。そのため, この部分における軸方向表面き裂は深さ方向に比べ表面方向への伝播が顕著であり, 長く, へん平なき裂へと成長する。
- (4) ASME Code Sec. XI によるき裂伝播評価法は両試験体の試験結果に対して安全側の評価を与える。しかし EL-4 試験体の場合にはき裂が深くなると予測された伝播曲線は次第に緩やかな勾配となり, 試験結果に対して非安全側の寿命評価へと移行する傾向が生ずる。これは ASME Code では同一き裂形状保持という仮定を導入しているため, き裂寸法を過小評価するために生ずるものである。従って, き裂形状が大きく変化すると予想されるケース, 例えば, アスペクト比が 1.0 から大きくずれている初期欠陥からのき裂伝播や曲げ応力成分の非常に大きな部材におけるき裂伝播, に対して ASME Code の方法は適用できない。
- (5) 上記のことはアスペクト比変化を調べた結果からも明らかであり, とくに, 初期欠陥のアスペクト比が大きく, 曲げ応力成分も大きい場合には非安全側のき裂伝播寿命を与える可能性がある。
- (6) 直管試験の場合と同様に ASME Code における合体基準は過大に安全側となっている。
- (7) 本研究で提案した評価法により曲管試験体の試験結果に対して若干安全側の伝播寿命評価が得られる。また, この方法によりき裂形状変化および合体位置の予測を正確に可能である。

Table 5.1 Chemical compositions of the test pipe
(wt %)

Composition	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
Spec.	- <0.02	- <1.00	- <2.00	- <0.04	- <0.03	>8.00 <11.0	>18.0 <20.0	- <0.12
EL-4, EL-5	0.012	0.52	1.68	0.025	0.004	10.26	18.32	0.090

Table 5.2 Mechanical properties of the test pipe

	0.2% YS. MPa	UTS. MPa	Elong. %	Hardness H _B	Orientation
Spec.	>206	>519	>35	-	-
EL-4, EL-5	252	549	63.3	—	Longitudinal
	259	559	66.9	—	Transverse

Table 5.3 Fatigue test conditions of test pipes

Items \ Pipe No.	EL-4, EL-5
Load	37 ± 372 KN
Frequency	5 Hz
Environment	Ambient air
Geometry of initial defects	8mm depth × 24mm length
Direction of initial defects	Longitudinal

Table 5.4 Geometry and loading conditions of test pipes for analytical procedures

Items	Bend pipe	
	EL-4	EL-5
Thickness, t (mm)	37.34	37.75
Membrane stress range, $\Delta\sigma_m$ (MPa)	49.3 *	51.6 *
Bending stress range, $\Delta\sigma_b$ (MPa)	176.9 *	182.5 *
Initial defect size, $a \times b$ (mm)	8 × 12	8 × 12
Number of initial defects	1	3
Crack interval, d (mm)	—	98.5

* Measured by strain gages

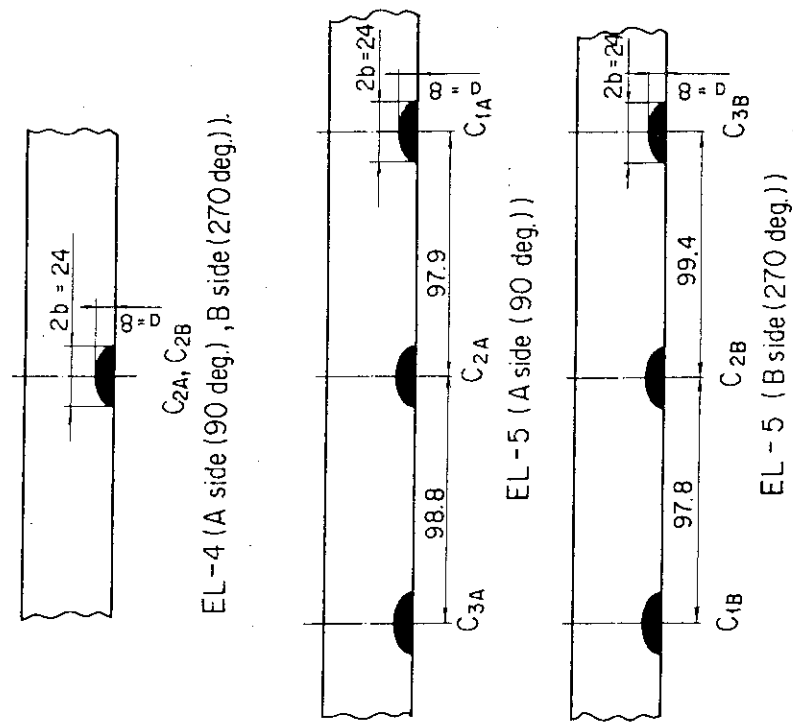
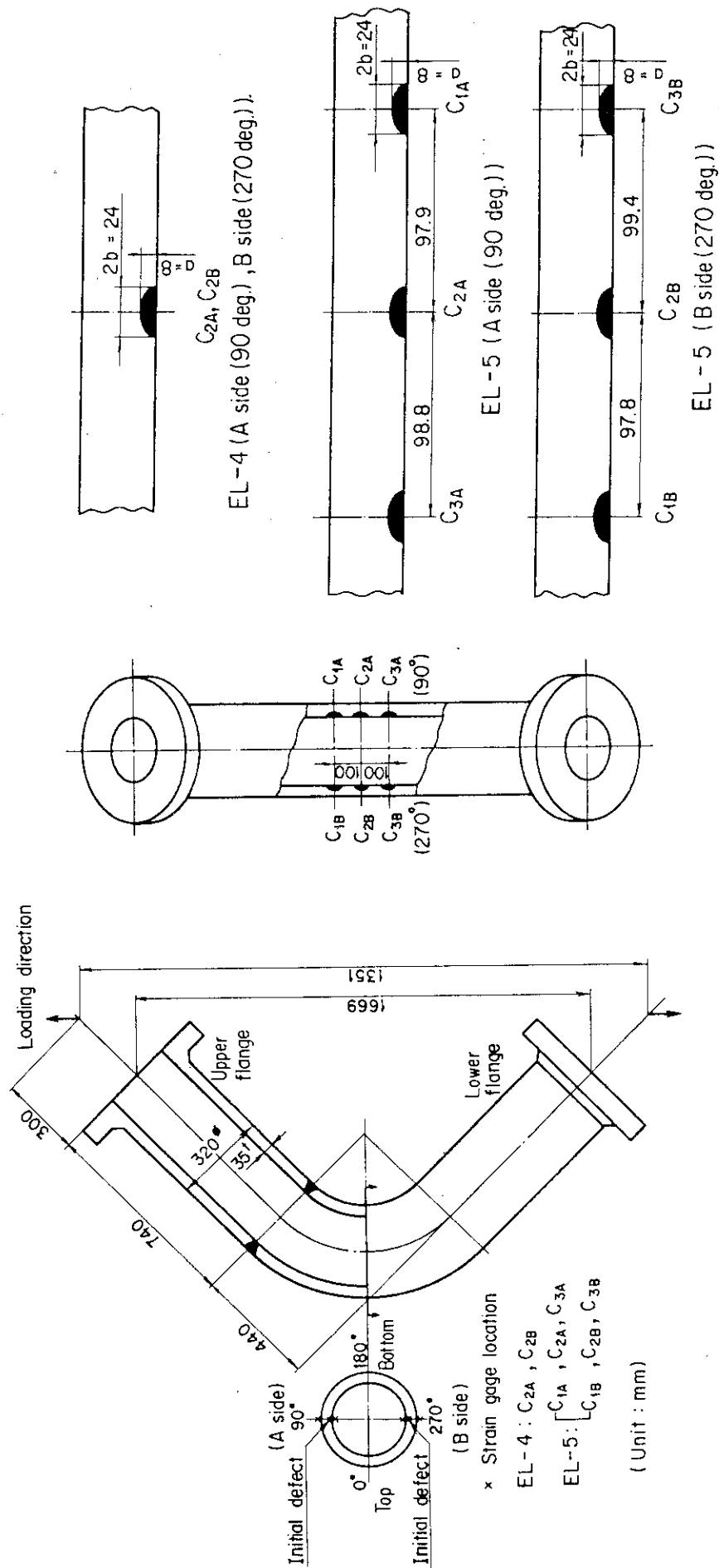


Fig. 5.2 Geometry and location of initial EDM defect of EL-4 and EL-5 test pipe

Fig. 5.1 Geometry of bend pipe (EL-4, EL-5) and loading direction

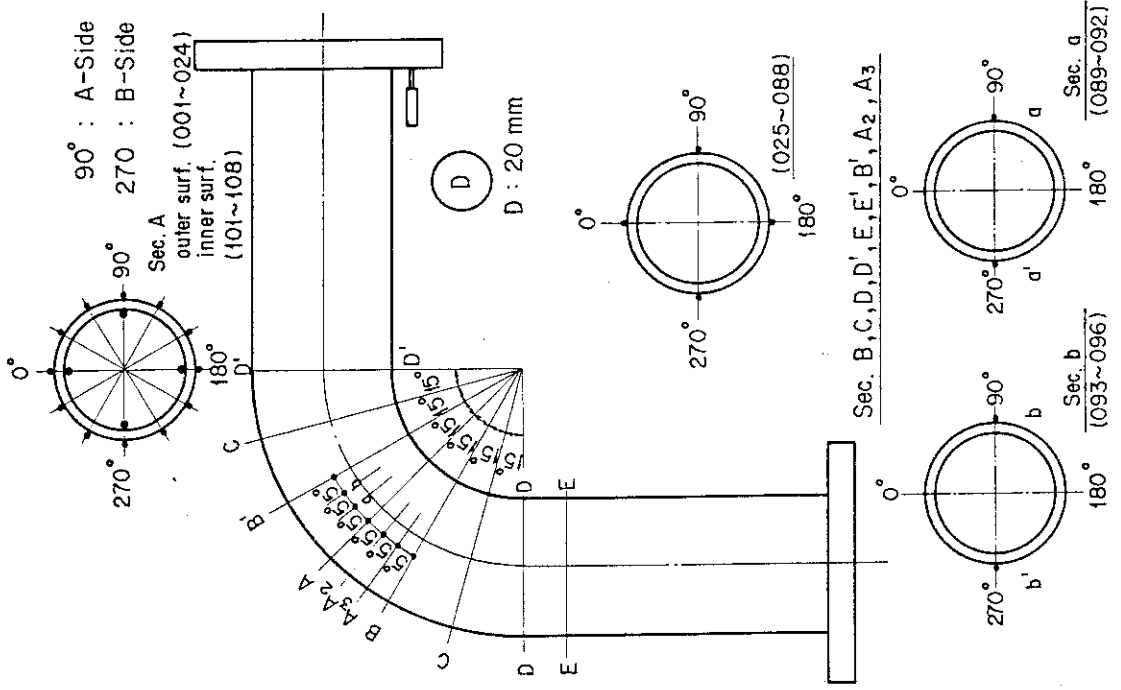


Fig. 5.3 Location of strain gages and displacement gages

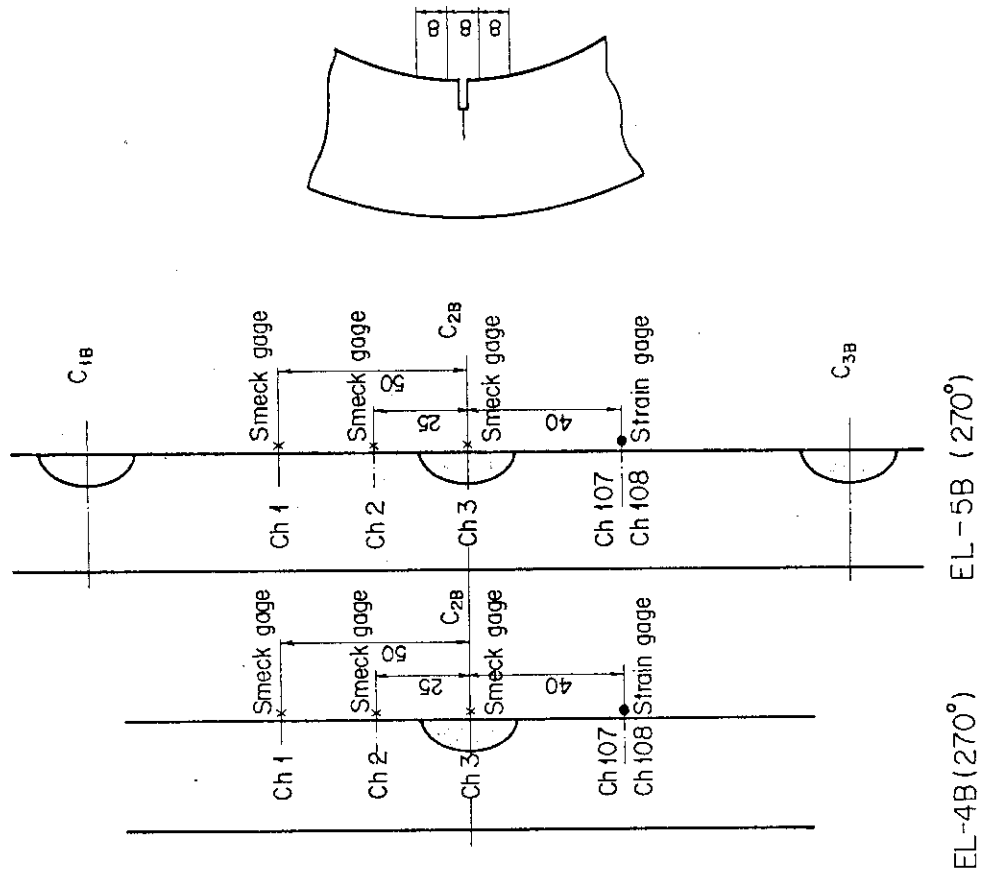


Fig. 5.4 Location of electric potential measurement

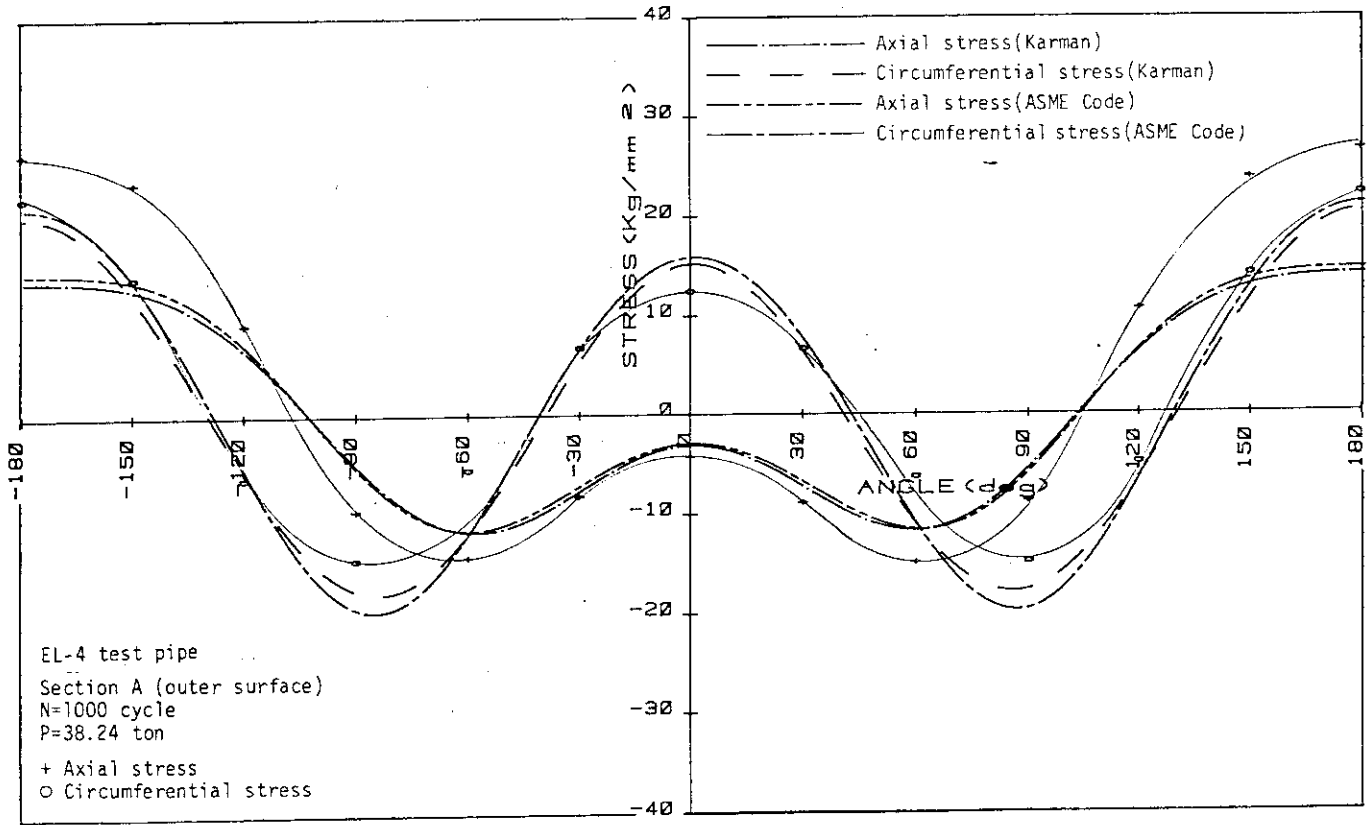


Fig. 5.5 Stress distribution of EL-4 test pipe

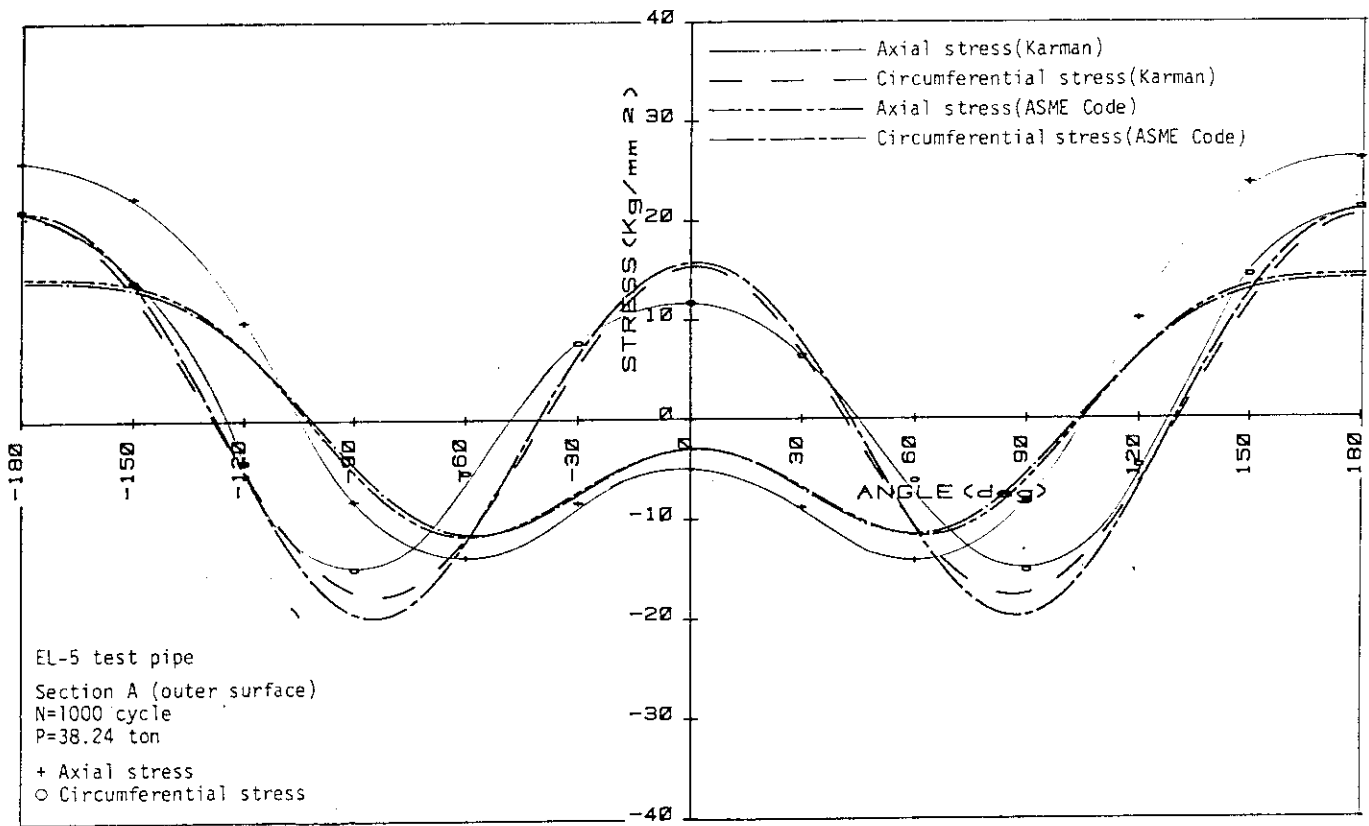


Fig. 5.6 Stress distribution of EL-5 test pipe

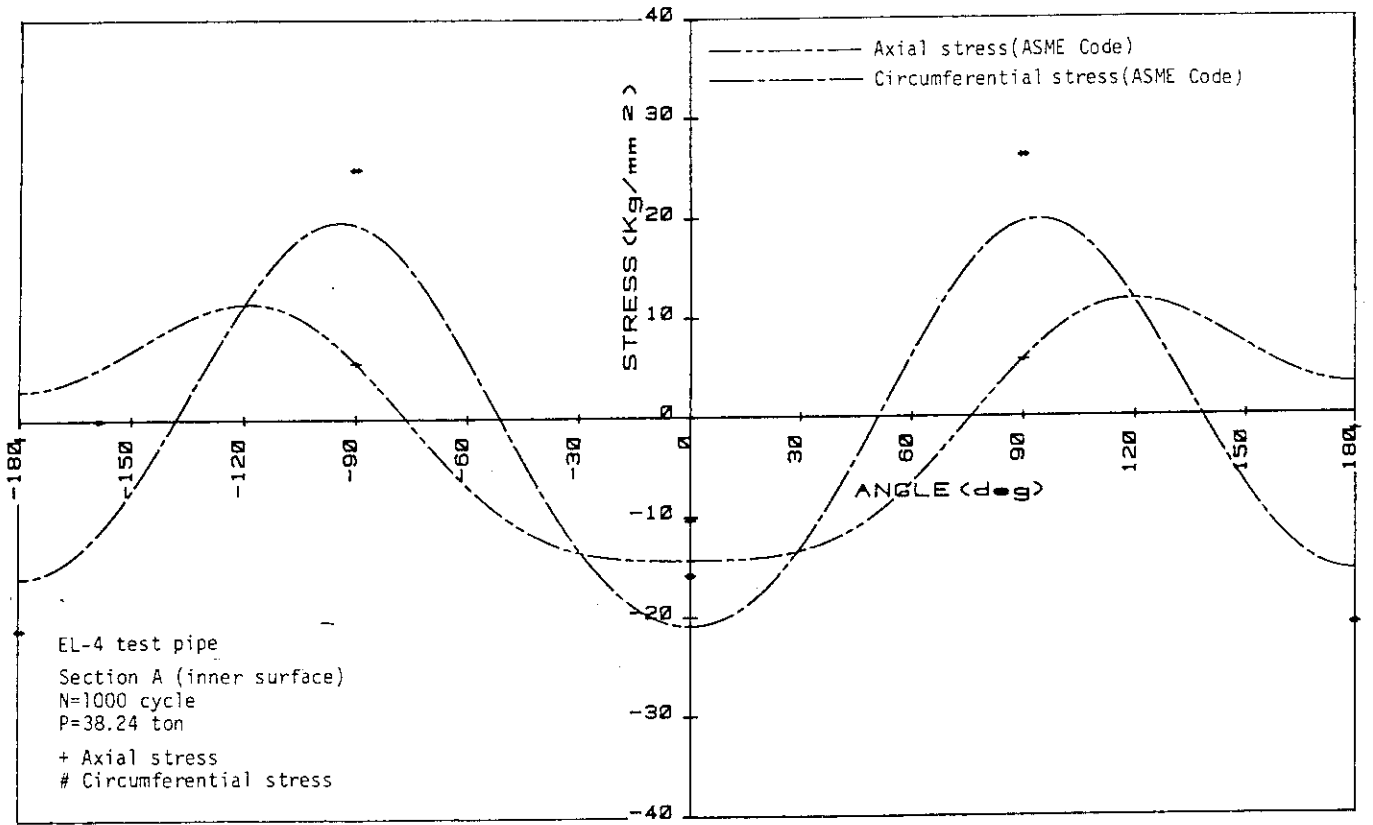


Fig. 5.7 Stress distribution of EL-4 test pipe

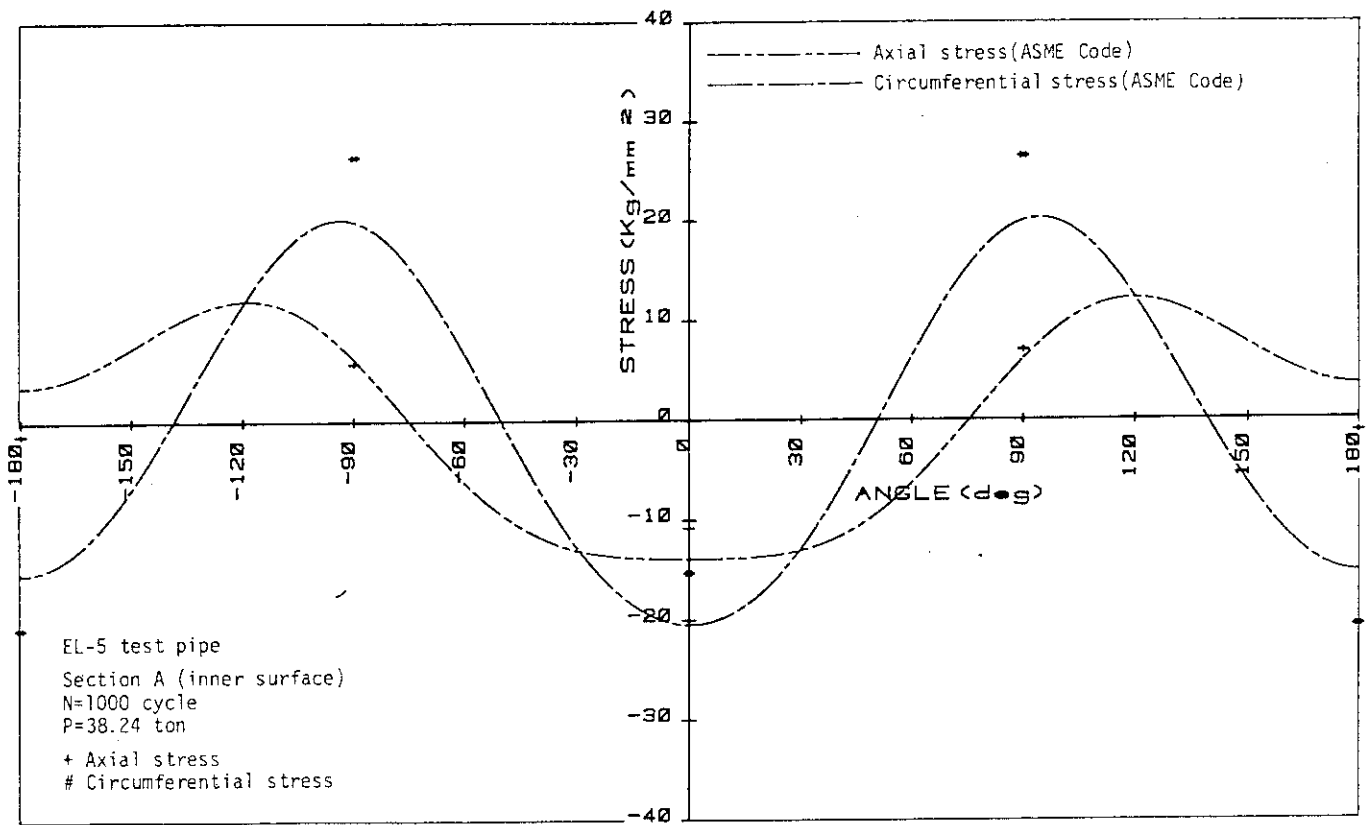


Fig. 5.8 Stress distribution of EL-5 test pipe

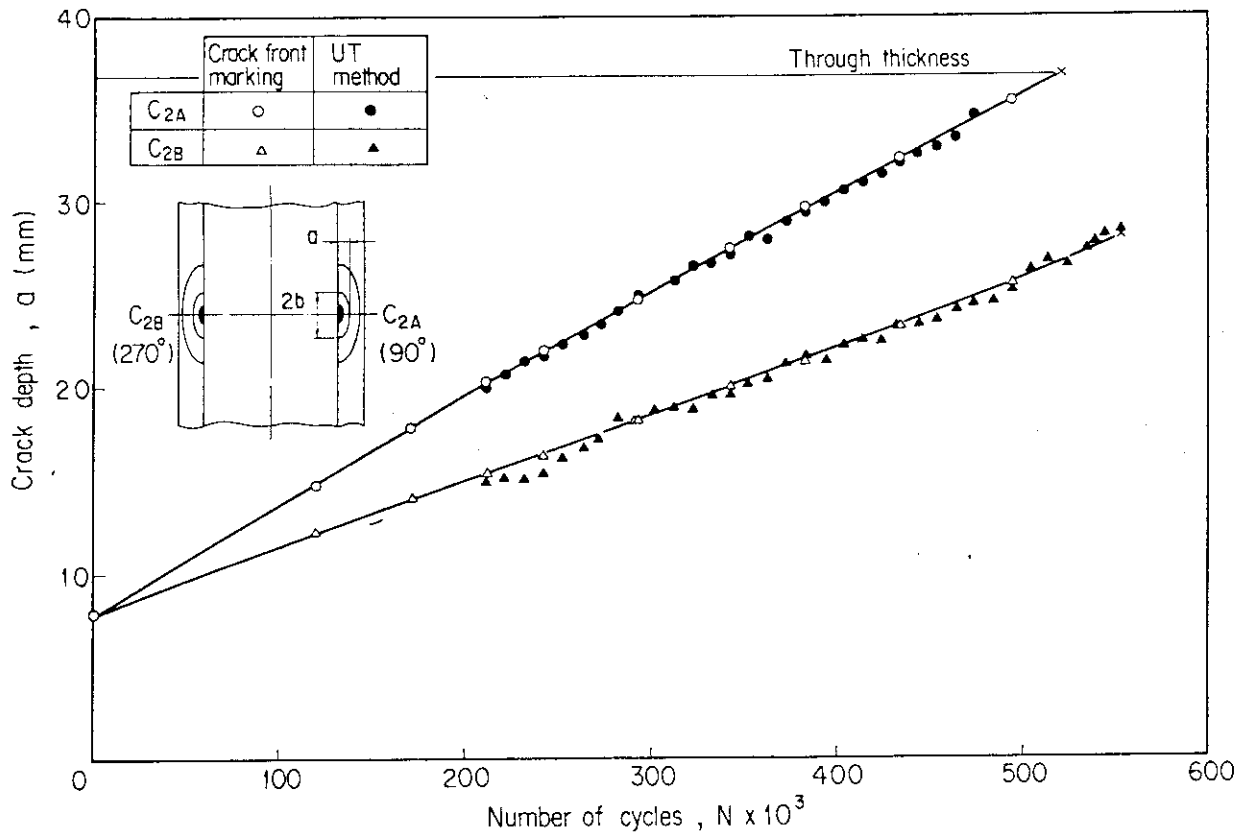


Fig. 5.9 Result of crack depth measurement in EL-4 test pipe by ultrasonic method and crack front marking (EL-4, C_{2A} and C_{2B} crack)

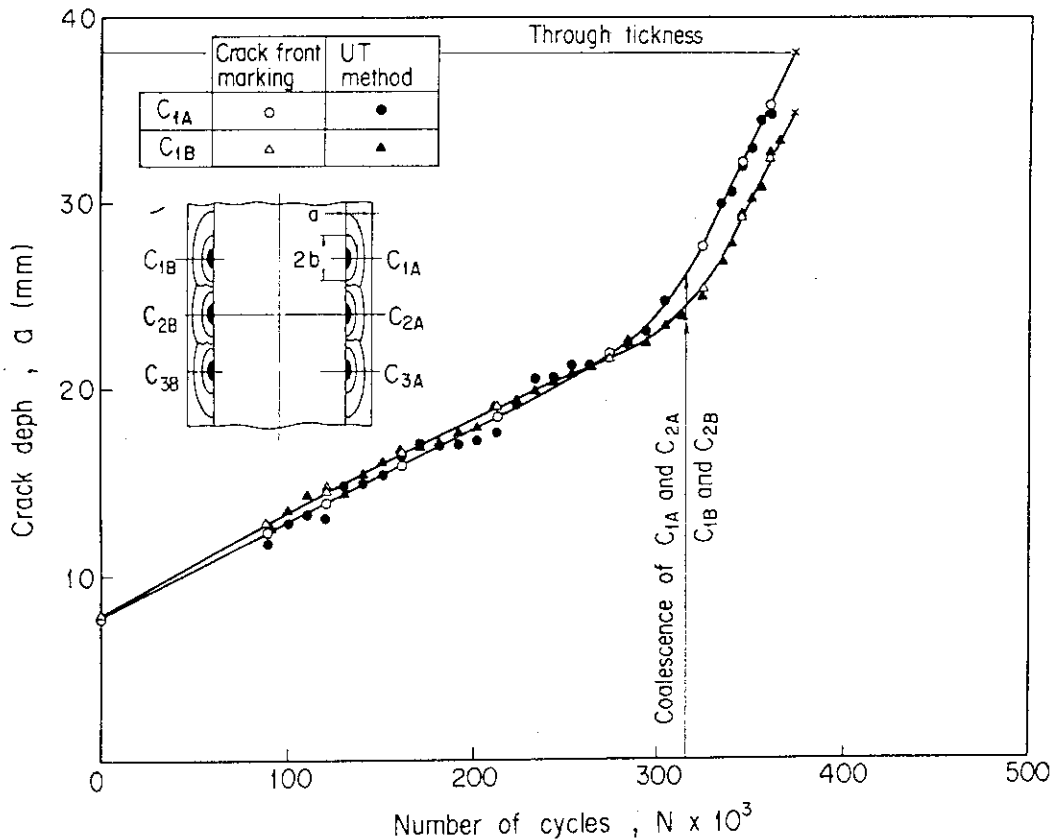


Fig. 5.10 Result of crack depth measurement in EL-5 test pipe by ultrasonic method and crack front marking (EL-5, C_{1A} and C_{1B} crack)

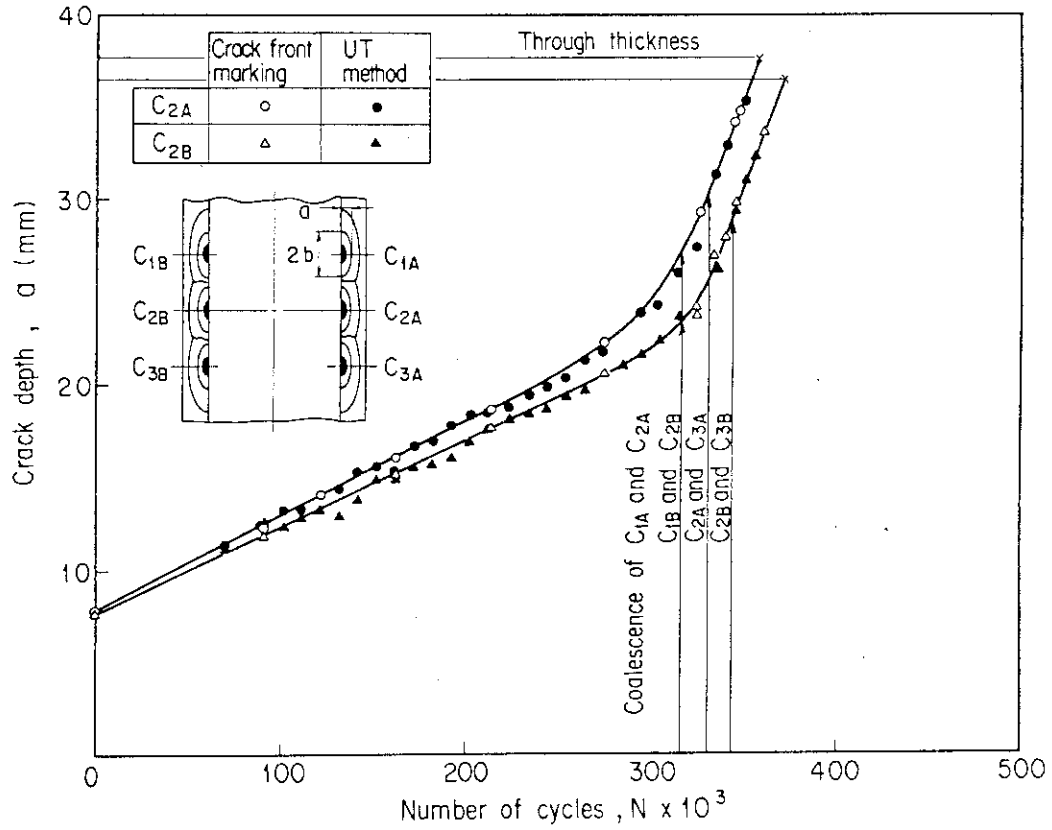


Fig. 5.11 Result of crack depth measurement in EL-5 test pipe by ultrasonic method and crack front marking (EL-5, C_{2A} and C_{2B} crack)

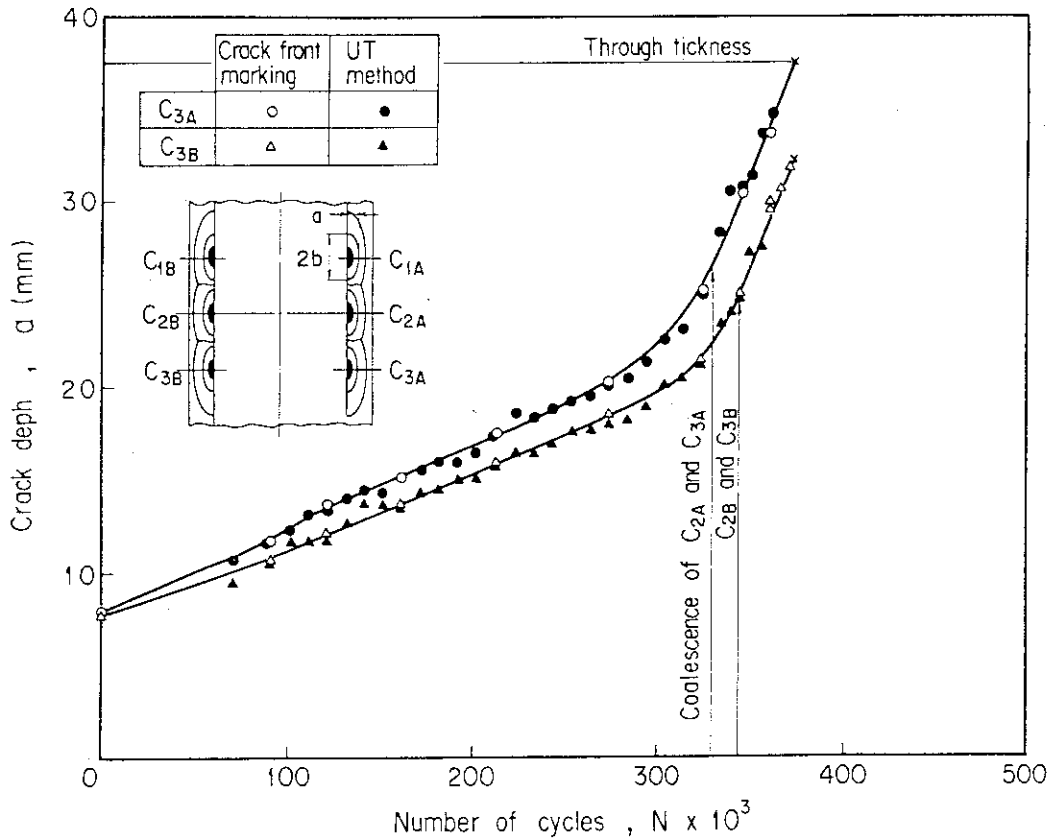


Fig. 5.12 Result of crack depth measurement in EL-5 test pipe by ultrasonic method and crack front marking (EL-5, C_{3A} and C_{3B} crack)

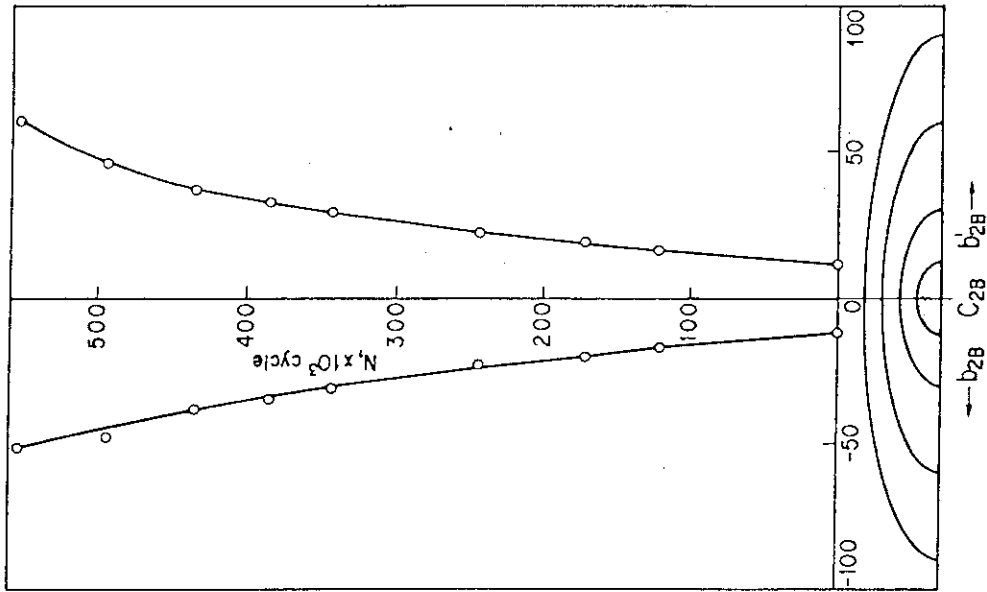


Fig. 5.14 Result of crack length measurement by beach mark method

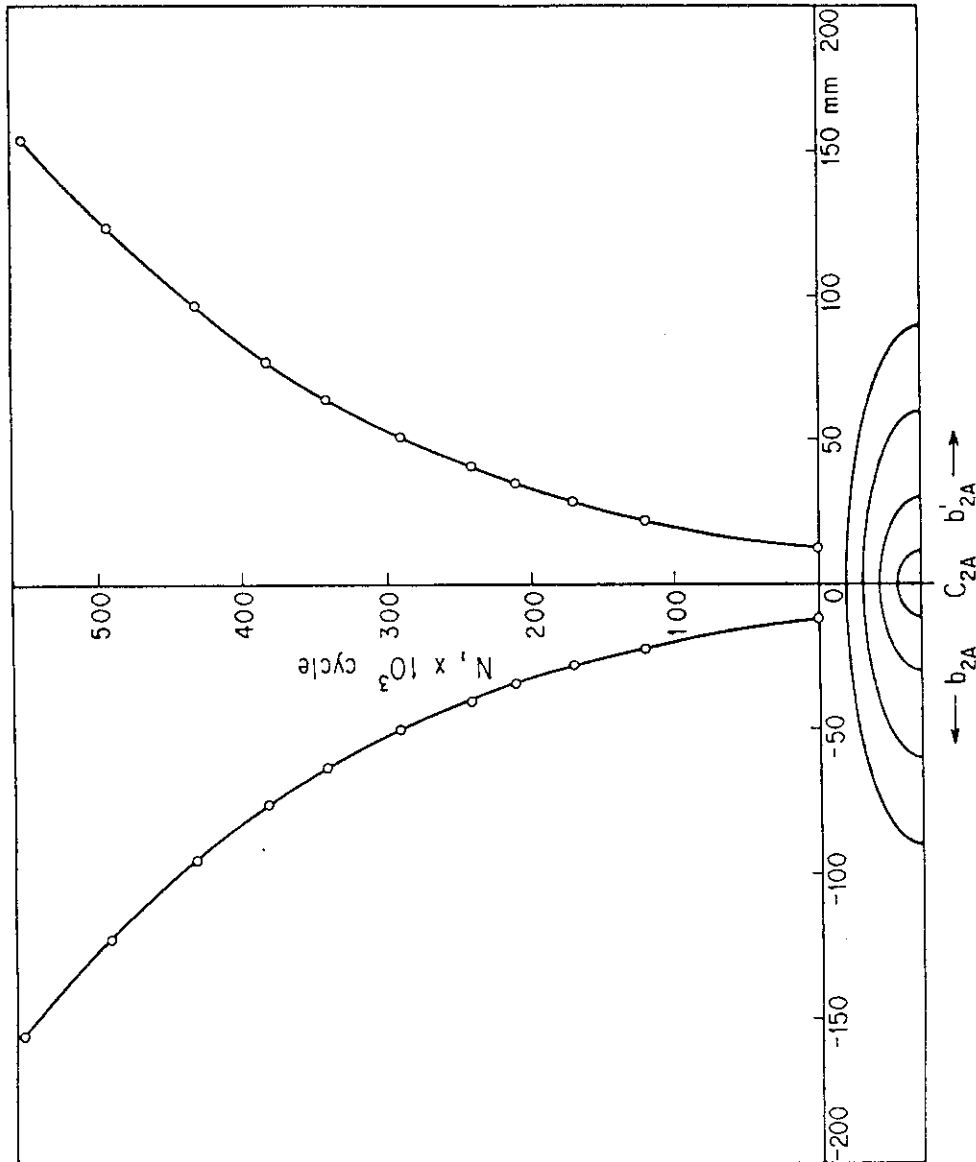


Fig. 5.13 Result of crack length measurement by beach mark method

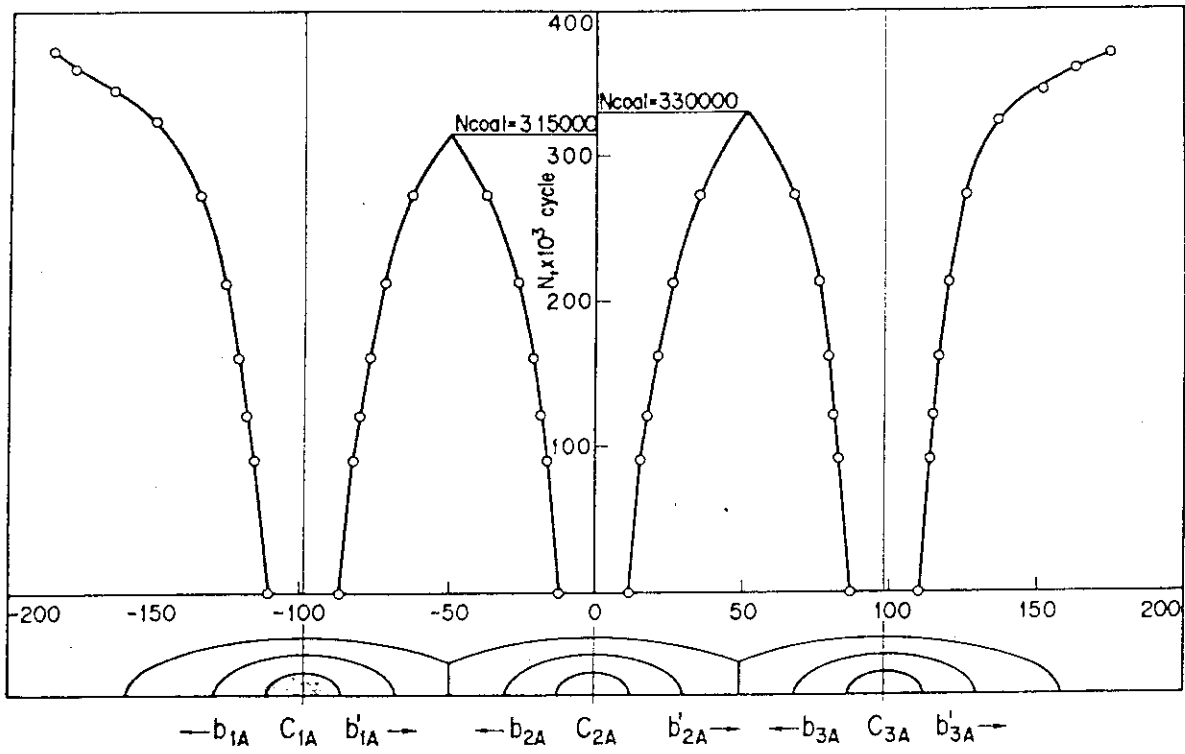


Fig. 5.15 Result of crack length measurement by beach mark method

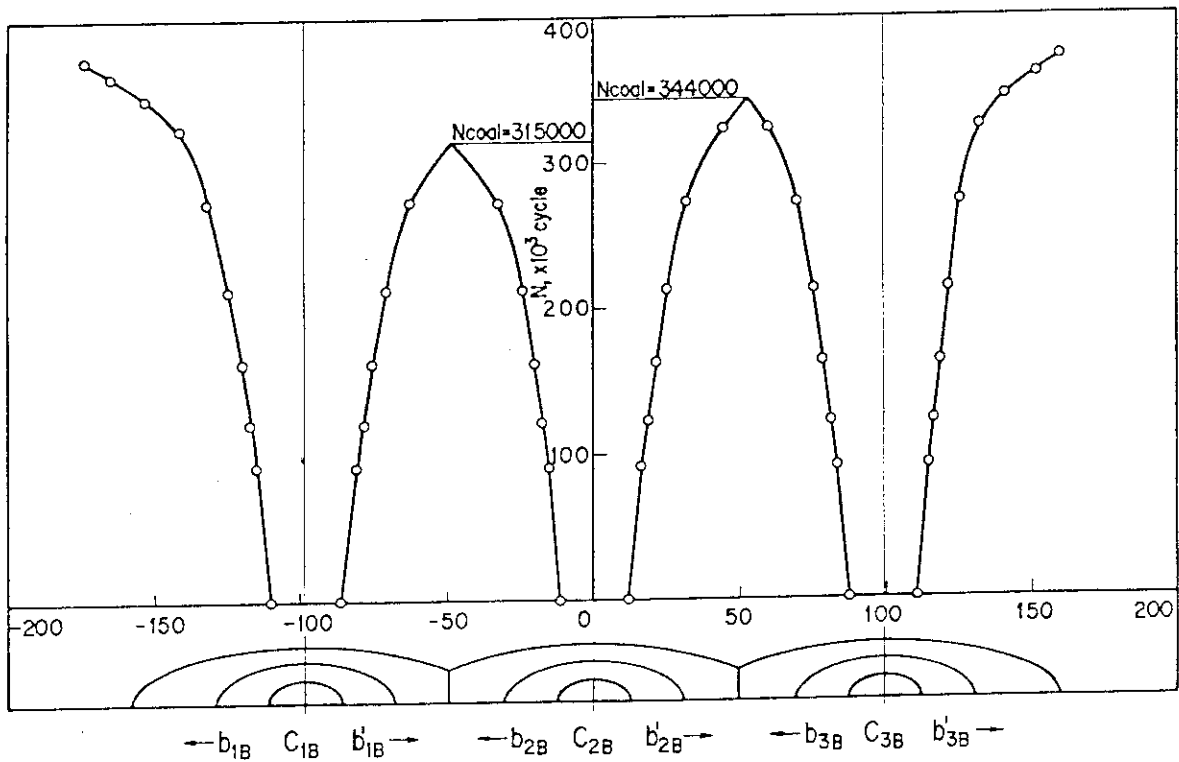


Fig. 5.16 Result of crack length measurement by beach mark method

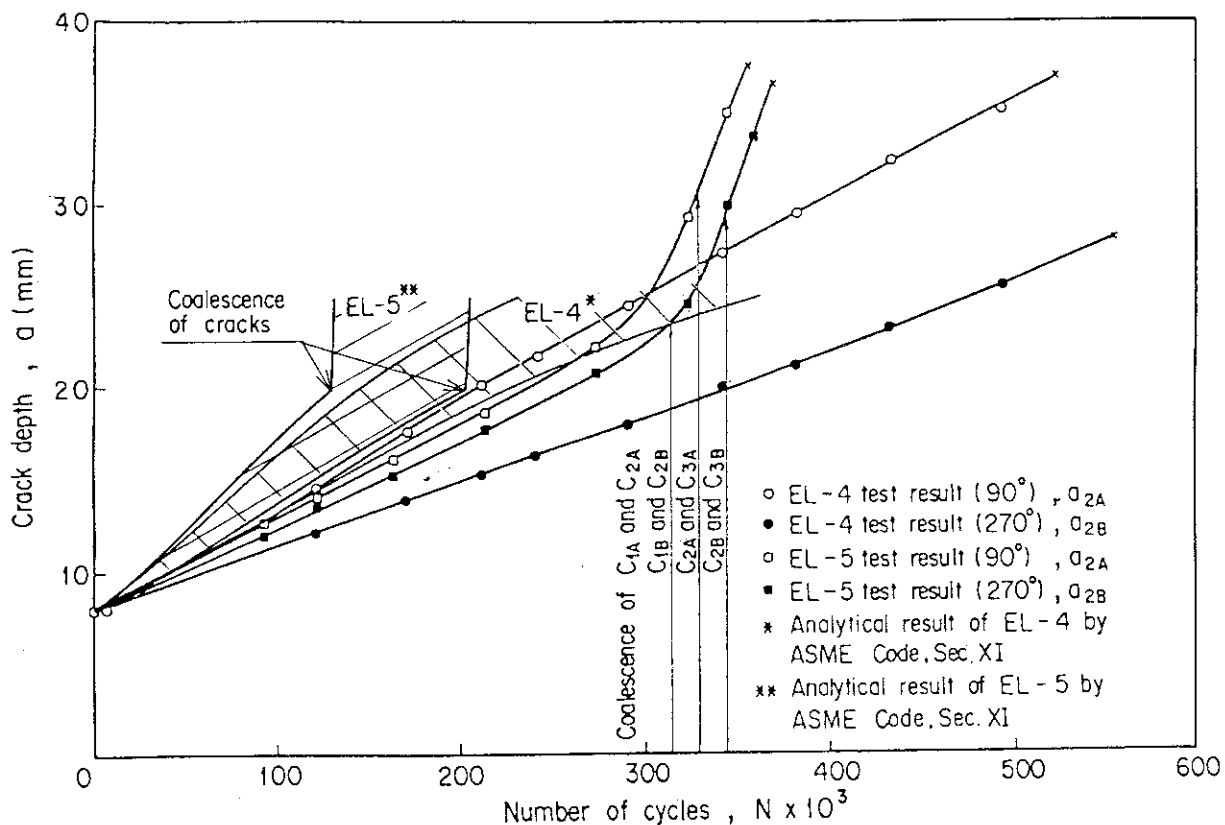


Fig. 5.17 Comparison of crack growth curves of bend pipes in the thickness direction between test results and analytical results by present study

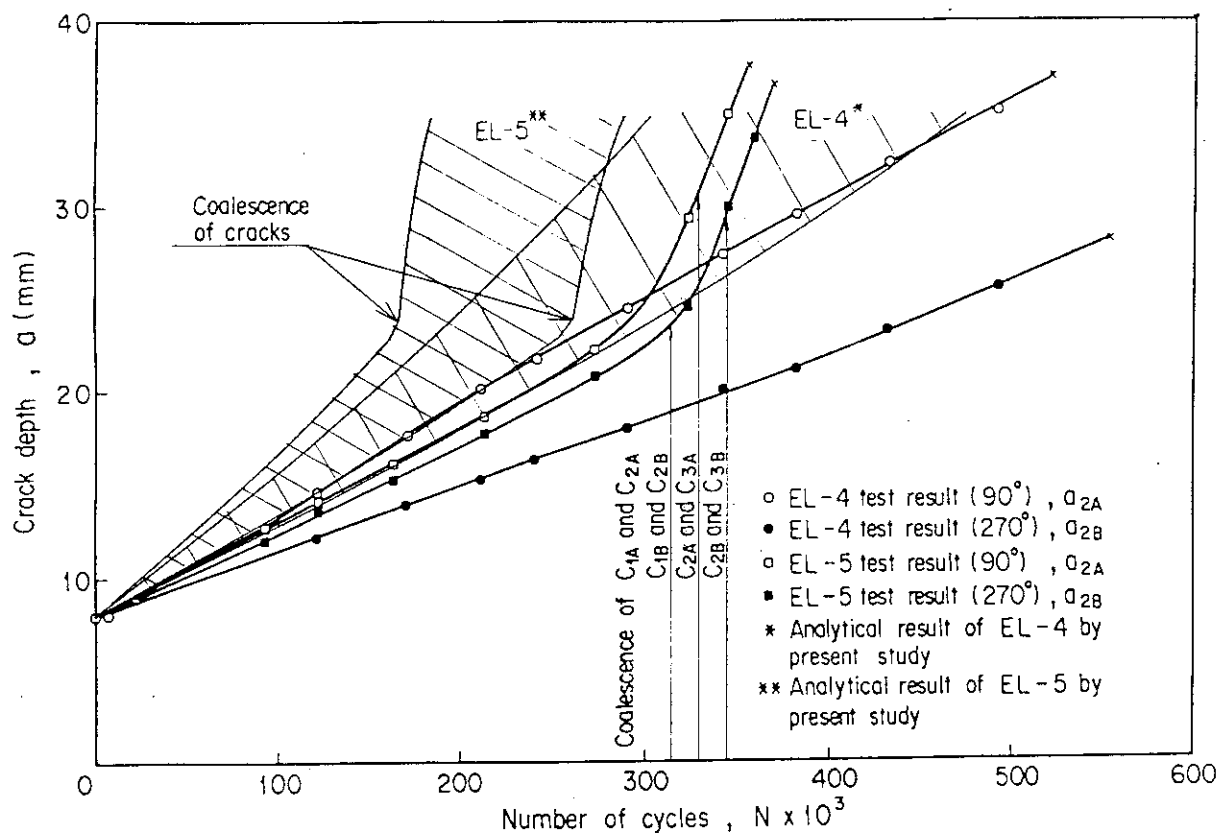


Fig. 5.18 Comparison of crack growth curves of bend pipes in the thickness direction between test results and analytical results by present study

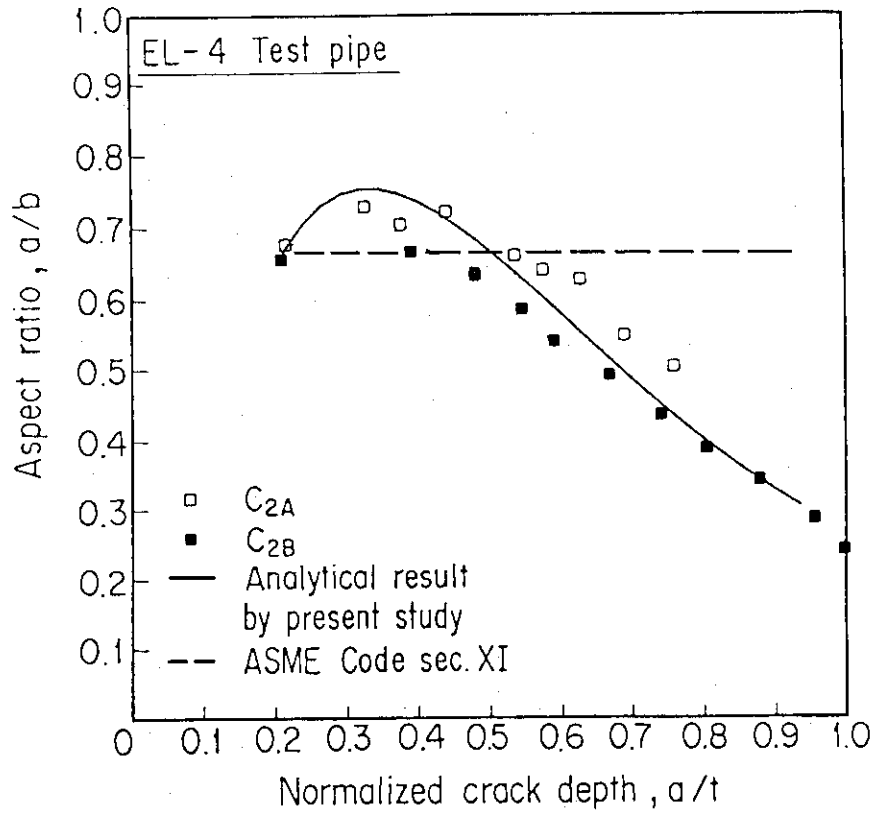


Fig. 5.19 Change in aspect ratio with the crack growth in EL-4 test pipe

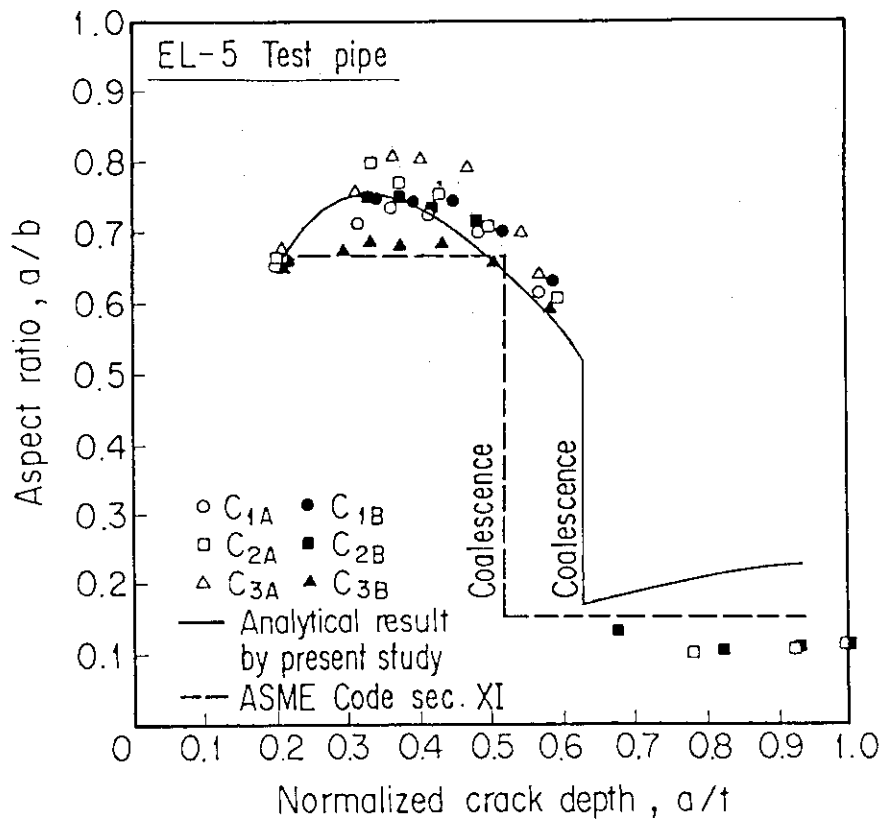


Fig. 5.20 Change in aspect ratio with the crack growth in EL-5 test pipe

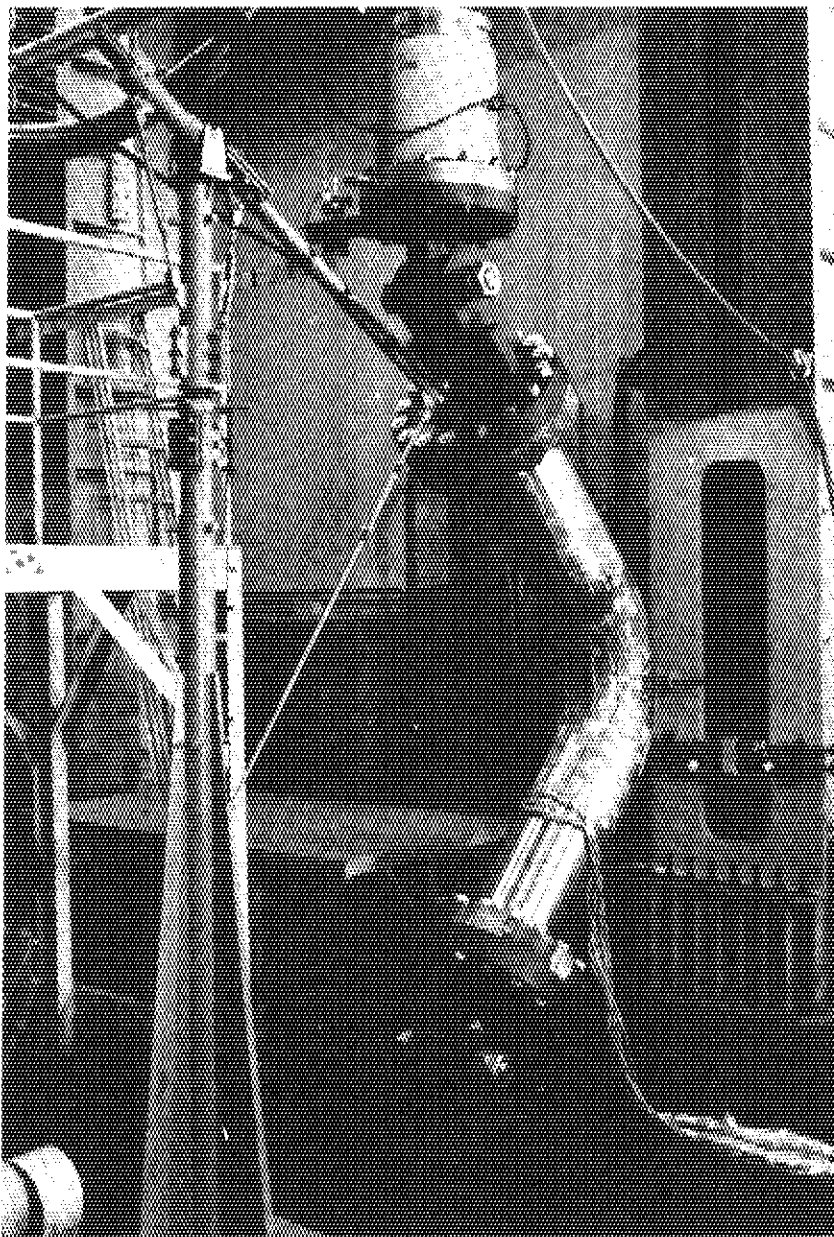


Photo 5.1 View of the bend pipe test

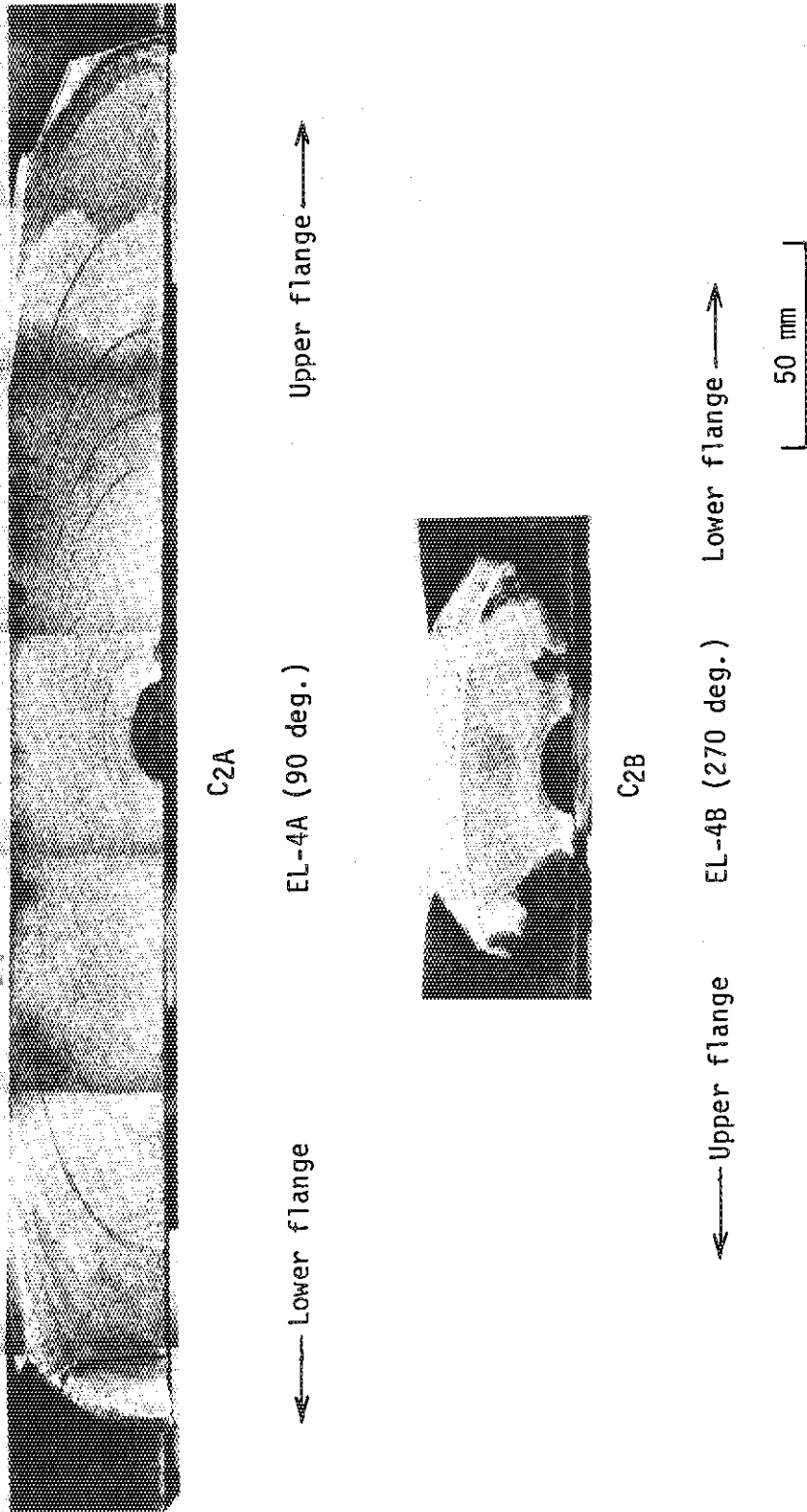


Photo 5.2 Fracture surface of bend pipe, EL-4

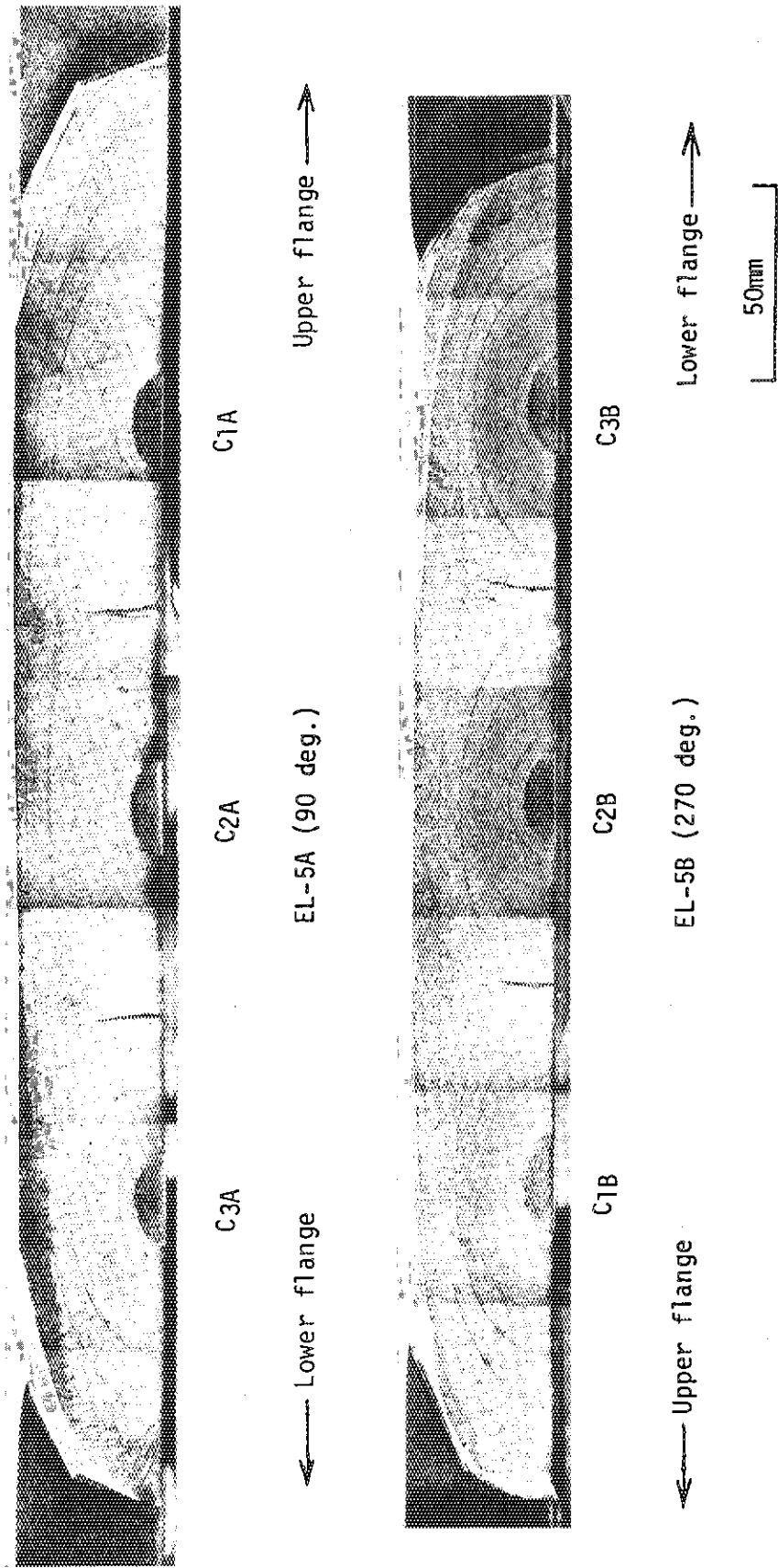


Photo 5.3 Fracture surface of bend pipe, EL-5

6. 結 言

配管疲労試験ではこれまでに種々の表面欠陥付試験体を供試体にした試験を進めてきたが、本報ではそのうち平板試験、直管試験、および曲管試験の結果をもとに複数表面欠陥の伝播挙動およびその伝播評価法に関してまとめたものである。

一般に、配管に大きな未貫通欠陥が生じた場合配管の安全性にとって重大な状態となることは言うまでもないことである。そこで、配管疲労試験は大きな未貫通欠陥へと成長する可能性が高い複数表面欠陥の疲労による伝播挙動を明らかにし、配管の健全性評価法を確立することにより配管の安全性評価に資するとともに信頼性の向上を目的として実施したものである。

本研究の結果により配管内面における疲労による複数欠陥の伝播、合体、そして大きな欠陥へと成長していく挙動に関して多くの知見が得られた。また、複数表面欠陥の伝播評価手法について提案するとともに ASME Code Sec. XIにおける欠陥伝播評価法についてもその問題点や構造機器への適用性について検討した。それらの結果については各章で述べた通りである。

周知のごとく軽水炉プラントでは炉心に大量の核分裂生成物を保有していることから、その安全確保は極めて重要である。プラントの寿命中における安全を確保し、機能を維持していくには年1回実施される定検や、その他の点検、検査により損傷や欠陥を確実に発見し、欠陥評価や補修を適確に遂行することも重要なことのひとつである。一方、プラントを効率的に運転、管理していく立場から、検査および補修の簡素化や合理化および検査期間の短縮が要求される。ASME Code Sec. XIにおいて採用されている欠陥伝播評価基準や本研究で提案した評価手法は近年急速に発達した破壊力学を基礎にしており、これらは寿命中の欠陥伝播を含めて構造機器の健全性を評価する立場に立っており、従来の欠陥評価法に比べはるかに合理的な評価法である。また、この手法は検査や補修の簡素化および期間の短縮に大きく貢献するものである。

以上のように、配管疲労試験では配管に大きな未貫通欠陥が生ずるまでの過程を調べ、さらに欠陥伝播評価に関して提言することにより構造機器の健全性評価手法の確立や信頼性の向上といった事を主な目的として実施した。一方、配管に大きな未貫通欠陥が存在する場合に、不安定破壊条件や破断前漏洩 (Leak Before Break) 成立条件を明らかにする課題は現実的な破断形態に基づいて、将来、より合理的かつ信頼性の高い設計手法や安全評価手法を確立していくうえで今日重要な研究課題となっている。また、この課題はき裂の発生、伝播、および破壊にいたる一連のき裂成長過程のうち最終破断過程を研究対象としており、配管疲労試験の延長上にある課題として位置づけされる。

このような配管破断に対する安全評価手法の確立にあたっては、当面、つぎの各項について明らかにし、データの集積が必要である。

- (1) 想定すべき最大欠陥寸法、形状、および位置
- (2) 不安定破壊条件およびLBB成立条件の解明
- (3) 想定すべき最大荷重条件
- (4) 破断発生に対する確率論的検討

上記各項を明らかにし新しい安全評価手法を確立することにより現行の配管破断に対する評価基準を合理化し、検査法についても簡素化が可能と考える。

配管における欠陥成長を明らかにし、その評価法を確立していく課題として今後以上のような課題を明らかにするため試験研究を進めていく必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、日本原子研究所、東海研究所、能沢正雄副所長、大洗研究所、森島淳好所長、ならびに安全性試験研究センタ、桂木学センタ長より多大な支持と協力を賜った。

本報告書をまとめるにあたり、東京大学工学部、船舶工学科、飯田國廣教授より有益な教示ならびに討論を頂いた。

さらに、各試験の計画、立案、およびデータ解析に当っては構造安全性研究委員会（委員長、安藤良夫東大名誉教授）の委員各位より多くの討論を賜った。

各位には心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 原子力白書, 昭和 57 年版, 原子力委員会
- 2) S. H. Bush: Reliability of Piping in Light-Water Reactors, Nuclear Safety, Vol. 17, No. 5, 1976
- 3) L. Frank and W. S. Hazelton, et al.: Pipe Cracking Experience in Light-Water Reactors, NUREG-0679, 1980
- 4) Investigation and Evaluation of Stress-Corrosion Cracking in Piping of Light-Water Reactor Plants NUREG-0531, 1979
- 5) 発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針, 昭和 52 年 6 月, 原子力委員会
- 6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI, (1980 ed)
- 7) 川原, 栗原: 表面き裂の疲労による伝播成長過程に関する予備的考察, 日本造船学会論文集, Vol. 137, No. 137
- 8) 川原, 栗原: 表面欠陥からの疲労き裂伝播 (第 1 報), 日本造船学会論文集, Vol. 139, No. 139
- 9) 川原, 栗原: 表面欠陥からの疲労き裂伝播 (第 2 報), 日本造船学会論文集, Vol. 141, No. 141
- 10) K. Iida and M. Kawahara: Propagation and Coalescence of Fatigue Cracks Initiated from Collinear or Parallel Adjacent Surface Flaws, Proc. 4th Int. Conf. PVT., Vol. 1, 1980, London.
- 11) 飯田, 安藤, 平田: 複数表面欠陥からの疲労亀裂伝播寿命評価, 日本造船学会論文集, Vol. 148, No. 148
- 12) A. S. Kobayashi: Crack Opening Displacement in a Surface Flawed

上記各項を明らかにし新しい安全評価手法を確立することにより現行の配管破断に対する評価基準を合理化し、検査法についても簡素化が可能と考える。

配管における欠陥成長を明らかにし、その評価法を確立していく課題として今後以上のような課題を明らかにするため試験研究を進めていく必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、日本原子研究所、東海研究所、能沢正雄副所長、大洗研究所、森島淳好所長、ならびに安全性試験研究センタ、桂木学センタ長より多大な支持と協力を賜った。

本報告書をまとめるにあたり、東京大学工学部、船舶工学科、飯田國廣教授より有益な教示ならびに討論を頂いた。

さらに、各試験の計画、立案、およびデータ解析に当っては構造安全性研究委員会（委員長、安藤良夫東大名誉教授）の委員各位より多くの討論を賜った。

各位には心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 原子力白書，昭和57年版，原子力委員会
- 2) S. H. Bush: Reliability of Piping in Light-Water Reactors, Nuclear Safety, Vol. 17, No. 5, 1976
- 3) L. Frank and W. S. Hazelton, et al.: Pipe Cracking Experience in Light-Water Reactors, NUREG-0679, 1980
- 4) Investigation and Evaluation of Stress-Corrosion Cracking in Piping of Light-Water Reactor Plants NUREG-0531, 1979
- 5) 発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針，昭和52年6月，原子力委員会
- 6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI, (1980 ed)
- 7) 川原，栗原：表面き裂の疲労による伝播成長過程に関する予備的考察，日本造船学会論文集，Vol. 137, No. 137
- 8) 川原，栗原：表面欠陥からの疲労き裂伝播（第1報），日本造船学会論文集，Vol. 139, No. 139
- 9) 川原，栗原：表面欠陥からの疲労き裂伝播（第2報），日本造船学会論文集，Vol. 141, No. 141
- 10) K. Iida and M. Kawahara: Propagation and Coalescence of Fatigue Cracks Initiated from Collinear or Parallel Adjacent Surface Flaws, Proc. 4th Int. Conf. PVT., Vol. 1, 1980, London.
- 11) 飯田，安藤，平田：複数表面欠陥からの疲労亀裂伝播寿命評価，日本造船学会論文集，Vol. 148, No. 148
- 12) A. S. Kobayashi: Crack Opening Displacement in a Surface Flawed

上記各項を明らかにし新しい安全評価手法を確立することにより現行の配管破断に対する評価基準を合理化し、検査法についても簡素化が可能と考える。

配管における欠陥成長を明らかにし、その評価法を確立していく課題として今後以上のような課題を明らかにするため試験研究を進めていく必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、日本原子研究所、東海研究所、能沢正雄副所長、大洗研究所、森島淳好所長、ならびに安全性試験研究センタ、桂木学センタ長より多大な支持と協力を賜った。

本報告書をまとめるにあたり、東京大学工学部、船舶工学科、飯田國廣教授より有益な教示ならびに討論を頂いた。

さらに、各試験の計画、立案、およびデータ解析に当っては構造安全性研究委員会（委員長、安藤良夫東大名誉教授）の委員各位より多くの討論を賜った。

各位には心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 原子力白書，昭和57年版，原子力委員会
- 2) S. H. Bush: Reliability of Piping in Light-Water Reactors, Nuclear Safety, Vol. 17, No. 5, 1976
- 3) L. Frank and W. S. Hazelton, et al.: Pipe Cracking Experience in Light-Water Reactors, NUREG-0679, 1980
- 4) Investigation and Evaluation of Stress-Corrosion Cracking in Piping of Light-Water Reactor Plants NUREG-0531, 1979
- 5) 発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針，昭和52年6月，原子力委員会
- 6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI, (1980 ed)
- 7) 川原，栗原：表面き裂の疲労による伝播成長過程に関する予備的考察，日本造船学会論文集，Vol. 137, No. 137
- 8) 川原，栗原：表面欠陥からの疲労き裂伝播（第1報），日本造船学会論文集，Vol. 139, No. 139
- 9) 川原，栗原：表面欠陥からの疲労き裂伝播（第2報），日本造船学会論文集，Vol. 141, No. 141
- 10) K. Iida and M. Kawahara: Propagation and Coalescence of Fatigue Cracks Initiated from Collinear or Parallel Adjacent Surface Flaws, Proc. 4th Int. Conf. PVT., Vol. 1, 1980, London.
- 11) 飯田，安藤，平田：複数表面欠陥からの疲労亀裂伝播寿命評価，日本造船学会論文集，Vol. 148, No. 148
- 12) A. S. Kobayashi: Crack Opening Displacement in a Surface Flawed

Plate Subjected to Tension or Plate Bending, Proc. 2nd. ICM.,
Boston, 1976.

- 13) 飯田, 高: 表面き裂の形状表現式について: 日本造船学会論文集, Vol. 147, No. 147
- 14) P. A. Paris and F. Erdogan: A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Trans. ASME., Ser. D, Vol. 85, No. 4, 1963.
- 15) J. C. Newman, Jr. and I. S. Raju: Analyses of Surface Cracks in Finite Plate Under Tension or Bending Loads, NASA TP. 1570, 1979.
- 16) K. Shibata, N. Yokoyama, T. Ohba, T. Kawamura, and S. Miyazono: Fatigue and Fracture Behavior of Straight Pipe with Flaws in Inner Surface, Nucl. Eng. Des., Vol. 66, No. 1, 1981.
- 17) K. Shibata, N. Yokoyama, T. Ohba, T. Kawamura and S. Miyazono: Fatigue Behavior of Pipes Containing Multiple Flaws in Inner Surface, Nucl. Eng. Des., Vol. 74, No. 2, 1982.
- 18) 新井, 井野, 岩城: 隣接表面き裂の相互干渉効果, 機械学会論文集(A) 49巻, 437号, 昭58
- 19) 宮田, 楠本: 三次元表面き裂の応力拡大係数について, 機械学会論文集(A), 45巻, 391号, 昭54
- 20) 村上, 西谷: 二つの等大半楕円形き裂の干渉における応力拡大係数, 機械学会論文集(A), 47巻, 415号, 昭56
- 21) 石田: き裂の弾性解析と応力拡大係数, 培風館,
- 22) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III, 1983