

JAERI - M

83-021

S U S 3 0 4 鋼 溶 接 部 の 疲 勞
き 裂 伝 播 に 関 す る 研 究

(残 留 応 力 の 解 放 ・ 再 分 布 に 関
す る 実 験 と F E M 解 析 結 果)

1 9 8 3 年 2 月

柴 田 勝 之 ・ 川 村 隆 一 ・ 横 山 憲 夫

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, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 刷 株高野高速印刷

SUS 304 鋼溶接部の疲労き裂伝播に関する研究
(残留応力の解放・再分布に関する実験とFEM解析結果)

日本原子力研究所東海研究所安全工学部
柴田 勝之・川村 隆一・横山 憲夫

(1983年1月27日受理)

構造物の溶接部では溶接に基因した破損の事例がしばしば見られる。溶接部における破損原因のひとつとして溶接残留応力の存在が指摘されているが、残留応力の影響についてはあまり明らかにされていない。本研究ではき裂伝播時における溶接残留応力の挙動を明らかにするため、溶接残留応力を付加した平板試験片を用いてき裂伝播におよぼす残留応力の影響やき裂伝播にともなう残留応力の解放・再分布の挙動を調べるとともに残留応力の挙動のFEM解析や残留応力場における疲労き裂伝播評価法の検討などの一連の試験研究を実施している。

本報告書では上記試験研究のうち、き裂伝播にともなう残留応力の解放・再分布挙動について調べた3ケースの実験結果およびFEM解析結果についてまとめた。実験および解析結果から、き裂伝播にともなう残留応力が解放され、この解放応力がき裂前方へと再分布されることによりき裂前方では常に初期残留応力より大きな残留応力が生じ、その結果、き裂が通過した後は塑性変形が残されていることや初期残留応力が負の位置においても残留応力の再分布によりしだいに正の残留応力へと変化してゆくこと等が明らかとなった。

Studies on Fatigue Crack Growth around
Weldment in SUS304 Stainless Steel

(Experimental Results and FEM Analyses on Relaxation and
Redistribution of Residual Stress with Crack growth)

Katsuyuki SHIBATA , Takaichi KAWAMURA and Norio YOKOYAMA

Division of Nuclear Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 27, 1983)

Failures in a welded component are frequently found due to the factors induced by welding. One of such factor is the welding residual stress, and it may affect on the failures.

Authors have performed a series of investigations to study the behavior of the welding residual stress during the crack extension. In this study, the influence of welding residual stress on the fatigue crack growth, and the relaxation and redistribution of the residual stresses with the crack extension have been investigated using the center cracked tension specimen of AISI Type304 stainless steel, which has relatively large amount of the residual stress by welding. FEM analyses has been performed on the behavior of the residual stress during the crack extension, and a simple analytical procedure to evaluate the fatigue crack growth in a residual stress field has also been developed.

As a part of the above study, in this report are described the experimental results and FEM analyses on the relaxation and redistribution of residual stresses with the crack extension.

It is found from the results that the relaxation of residual stresses is caused in the cracked region and the relaxed loads are redistributed forward with the extension of crack, and consequently, the residual stresses become larger than the initial value and positive even at the location where the initial residual stresses are negative. The redistribution of the residual stresses also causes plastic deformations around the cracked region.

Keywords: Residual Stress, Crack Growth, Relaxation, Redistribution, Fatigue Test, FEM Analysis, SUS304 Stainless Steel

目 次

1. まえがき	1
2. 実験方法	2
3. 有限要素法による残留応力の再分布解析	3
4. 実験結果と解析結果との比較	4
4.1 き裂伝播模擬実験の結果 (Case 1)	4
4.2 疲労き裂伝播試験結果 (Case 2, Case 3)	4
5. 結 論	6
参考文献	7
Appendix	22

Contents

1. Introduction	1
2. Test procedure	2
3. FEM Analyses on Relaxation of Residual stress with crack extension	3
4. Comparison of experimental results with FEM Analyses	4
4.1 Result and discussion of artificial crack extension test	4
4.2 Result and discussion of fatigue crack extension test	4
5. Conclusions	6
References	7
Appendix	22

1. ま え が き

各種プラントを構成する構造機器の製作にあたっては溶接による接合が多く用いられ、溶接は機器製作上重要な技術のひとつである。しかし、構造機器の溶接部では溶接部に起因した破損の事例が多く見られ構造機器に生ずる破損のうちかなりの割合が溶接部に集中していることが知られている。

通常、溶接部では信頼性を高めるため溶接後熱処理によって残留応力の低減が計られる。しかし、現場における溶接後熱処理が困難な機器の場合や、ステンレス鋼配管溶接部のように材質鋭敏化を避けるため溶接後熱処理による残留応力の低減ができない場合には高い残留応力が溶接部に生じ、これが疲労き裂伝播や破損の原因になると考えられる。従って、溶接残留応力の影響を明らかにしておくことは構造機器の安全性を評価するうえで重要な課題のひとつである。

最近、破壊力学による疲労解析法や破壊予測法の研究の進展が著しく、ASME Boiler and Pressure Vessel Code に見られるように^{1), 2)}、破壊力学による解析に基づいたき裂伝播解析法や脆性破壊防止法が設計基準や非破壊検査基準に採用されるようになってきている。

このような基準に基づいて構造機器の安全性を評価するには、精度の高い非破壊検査とともにき裂伝播解析についても精度良く行うことが重要である。しかし、溶接部に高い残留応力が生じているケースでの残留応力の影響の評価法は確立されていないのが現状であり、その理由は実構造物における残留応力の状態を把握することが困難なことやその影響に関する実験データが少ないことによるものである。従って、溶接部における残留応力の挙動を明らかにすることは現状では重要な課題のひとつとなっている。

以上のような背景から、著者らはこれまで溶接残留応力付の中央切欠き型試験片を使用し、き裂伝播に及ぼす溶接残留応力の影響を明らかにする試験研究を進めてきた。^{3)~6)}この研究結果から、引張残留応力のある位置でき裂が伝播する場合の伝播速度の加速効果や、^{3) 5)}き裂伝播にともなう残留応力の再分布過程⁴⁾および残留応力の緩和現象等についていくつかのことを明らかにするとともに残留応力場での疲労き裂伝播予測法についても提案している。⁶⁾上記の試験研究において実施した残留応力付試験片のき裂伝播試験ではき裂伝播にともなう残留応力の解放量を歪ゲージにより測定している。この歪ゲージ測定から得られた残留応力の解放・再分布の挙動についてはFEM解析結果とともに一部すでに発表しているが、⁴⁾その後実施した試験においても残留応力の解放量の測定を行うとともに、さらに詳細なFEM解析をその後実施した。本報告書では以上のき裂伝播にともなう残留応力の解放・再分布に関する実験結果について述べるとともにFEM解析との比較を行う。

2. 実験方法

本研究ではき裂伝播試験用試験片として130 mmW×5 mm t の中央切欠き型試験片を使用している。試験片中央部には溶接部があり、中央部で正、両端部で負の残留応力分布が得られるような試験片となっている。Fig. 1 に試験片形状、寸法を示す。この試験片における初期残留応力分布を Fig. 2 に示す。この残留応力分布は2本の試験片において放電加工による切断法により求めたものである。試験片製作方法、化学成分、機械的性質、および残留応力分布測定法等の詳細については JAERI-M 8900⁵⁾ に示す通りである。

き裂伝播にともなう残留応力の解放量は試験片の所定の位置に歪ゲージを多数貼付しておき、き裂が所定の長さ伝播する毎に歪測定を行うことにより求めた。

この解放歪測定実験はつぎの3 Case について実施した。

(1) Case 1 : 放電加工スリットによるき裂伝播模擬実験

この実験では試験片中央において放電加工スリット長さを順次拡大してゆくことによりき裂伝播を模擬した実験を行った。この実験では外荷重を作用させることなくき裂を伝播させた場合の残留応力の解放・再分布の挙動を調べるとともに疲労き裂伝播の場合との差異について調べることを目的としている。放電加工スリットは0.5 mm t の電極を用いスリット長さは0→10→30→50→70→90→110→130の順に拡大した。この実験は1体の試験片(W-1)について実施した。

(2) Case 2 : 疲労き裂伝播実験(1)

このCase では Fig. 2 に示す残留応力が最大の位置、すなわち $y = 0$ mm の断面を疲労き裂が伝播するときの挙動を調べた。Fig. 1 から分るようにき裂は溶接金属→HAZ→母材の順に伝播する。この実験は2体の試験片(W-2, W-3)について実施した。

(3) Case 3 : 疲労き裂伝播実験(2)

このCase ではき裂が中心線 ($y = 0$) から 2.5 mm 離れた断面 ($y = 2.5$ mm) を伝播する場合について調べた。この場合き裂は最初から母材中を伝播する。また、残留応力値は Case 2 よりかなり小さくなっている。この実験は2体の試験片(W-6, W-8)について実施した。

各試験片における歪測定位置を Fig. 3～Fig. 6 に示す。各ケースともき裂から5 mm および20 mm 離れた位置を中心に歪測定を行った。

以上の3 Case の実験条件を Table 1 にまとめる。

上記の3 Case の実験における歪測定結果を基に単軸応力の次式を用いて解放応力を計算した。

$$\sigma_{\text{relax}} = \epsilon_{\text{relax}} \cdot E \quad (1)$$

さらに、解放・再分布後の残留応力は Fig. 2 に示した初期残留応力から解放応力、 σ_{relax} を差引くことにより求めた。

$$\sigma_r = \sigma_{r0} - \sigma_{\text{relax}} \quad (2)$$

ここで、

- ϵ_{relax} : 解放歪
- σ_{relax} : 解放応力
- σ_r : 解放・再分布後の残留応力
- σ_{r0} : き裂導入前の初期残留応力

3. 有限要素法による残留応力の再分布解析

実験結果との比較を行うため有限要素法 (FEM) によりき裂伝播にともなう残留応力の解放および再分布の過程を解析した。FEM解析は実験を行ったCase 1およびCase 2における $y = 0$ mm断面をき裂が伝播する場合と、Case 3における $y = 25$ mm断面をき裂が伝播する場合について行った。ここで行った残留応力の解放の解析は重ね合せの方法に基づいており、その概略を Fig. 7 に示す。

Fig. 7 に示すように、初期残留応力、 σ_{r0} が存在する初期状態 (A) は長さ $2a$ のき裂を導入したこのき裂面に $-\sigma_{r0} \cdot t$ の分布力を作用させることによりき裂面変位を初期状態と同一に拘束した状態 (B) と弾性論的に等価である。このB状態はさらに、き裂導入により残留応力が解放・再分布した状態 (C) とき裂面に $\sigma_{r0} \cdot t$ の分布力が作用したときの応力状態 (D) の差に分割することができる。逆に、求める応力状態、Cは初期状態 (A) とき裂面に $\sigma_{r0} \cdot t$ の分布力を作用させた応力状態 (D) の和として表わすことができる。以上においてD状態はき裂の導入により解放される応力分布を示しておりFEM解析ではD状態を解析した。

計算は2次元弾性解析プログラムを用いて行った。試験片の対称性を考慮し全体の $1/4$ を解析モデルとした。

Fig. 8 および Fig. 9 に要素分割図を示す。き裂の導入は節点変位を自由にするにより行った。計算は $y = 0$ mm断面および $y = 25$ mm断面の2ケースについてき裂長さを変えて行った。

Fig. 10 および Fig. 11 は $y = 0$ mm断面および $y = 25$ mm断面をき裂が伝播する場合の残留応力分布の変化を示したものである。両図ともき裂から 5 mm離れた位置 ($d = 5$ mm) における $a = 0, 10, 20, 30, 40$ mmのときの残留応力分布を表わしている。図から明らかなように、各分布図はき裂先端前後で最大の引張残留応力となりき裂の前方へ行くに従って圧縮残留応力となる。また、き裂の後方では残留応力が解放され残留応力値は小さくなっている。Fig. 10 および Fig. 11 とも同様の傾向を示している。各き裂長さにおける引張残留応力のピーク値は $a = 20$ mm付近で最大値となり各ピーク値は初期残留応力の値よりかなり大きくなっている。これはき裂伝播とともに解放される残留応力が残りの部分へと負荷されてゆくことによるものである。

ここで、

- $\varepsilon_{\text{relax}}$: 解放歪
- σ_{relax} : 解放応力
- σ_r : 解放・再分布後の残留応力
- σ_{r0} : き裂導入前の初期残留応力

3. 有限要素法による残留応力の再分布解析

実験結果との比較を行うため有限要素法 (FEM) によりき裂伝播にともなう残留応力の解放および再分布の過程を解析した。FEM解析は実験を行ったCase 1およびCase 2における $y = 0$ mm断面をき裂が伝播する場合と、Case 3における $y = 2.5$ mm断面をき裂が伝播する場合について行った。ここで行った残留応力の解放の解析は重ね合せの方法に基づいており、その概略を Fig. 7 に示す。

Fig. 7 に示すように、初期残留応力、 σ_{r0} が存在する初期状態 (A) は長さ $2a$ のき裂を導入しこのき裂面に $-\sigma_{r0} \cdot t$ の分布力を作用させることによりき裂面変位を初期状態と同一に拘束した状態 (B) と弾性論的に等価である。このB状態はさらに、き裂導入により残留応力が解放・再分布した状態 (C) とき裂面に $\sigma_{r0} \cdot t$ の分布力が作用したときの応力状態 (D) の差に分割することができる。逆に、求める応力状態、Cは初期状態 (A) とき裂面に $\sigma_{r0} \cdot t$ の分布力を作用させた応力状態 (D) の和として表わすことができる。以上においてD状態はき裂の導入により解放される応力分布を示しておりFEM解析ではD状態を解析した。

計算は2次元弾性解析プログラムを用いて行った。試験片の対称性を考慮し全体の $1/4$ を解析モデルとした。

Fig. 8 および Fig. 9 に要素分割図を示す。き裂の導入は節点変位を自由にするにより行った。計算は $y = 0$ mm断面および $y = 2.5$ mm断面の2ケースについてき裂長さを変えて行った。

Fig. 10 および Fig. 11 は $y = 0$ mm断面および $y = 2.5$ mm断面をき裂が伝播する場合の残留応力分布の変化を示したものである。両図ともき裂から 5 mm 離れた位置 ($d = 5$ mm) における $a = 0, 10, 20, 30, 40$ mm のときの残留応力分布を表わしている。図から明らかなように、各分布図はき裂先端前後で最大の引張残留応力となりき裂の前方へ行くに従って圧縮残留応力となる。また、き裂の後方では残留応力が解放され残留応力値は小さくなっている。Fig. 10 および Fig. 11 とも同様の傾向を示している。各き裂長さにおける引張残留応力のピーク値は $a = 20$ mm 付近で最大値となり各ピーク値は初期残留応力の値よりかなり大きくなっている。これはき裂伝播とともに解放される残留応力が残りの部分へと負荷されてゆくことによるものである。

4. 実験結果と解析結果の比較

4.1 き裂伝播模擬実験の結果 (Case 1)

Case 1の実験は、すでに述べたように、放電加工スリットの長さを順次拡大してゆくことによりき裂伝播を模擬した実験を行ったものである。この場合、疲労き裂伝播のように外からの荷重の影響は生じない。

Fig. 12は $d = 5 \text{ mm}$ (d :き裂伝播面からの距離)上の、 $X = 0, 20, 40, 60 \text{ mm}$ の各位置におけるき裂伝播にともなう残留応力の変化を解析結果とCase 1の実験結果とを比較したものである。同図において、各位置における残留応力はき裂が接近するに従って残留応力が大きくなり、き裂が通過する付近でピークに達し、き裂が通過した後は残留応力が低下するという挙動を示している。このように、き裂が接近するに従って残留応力が大きくなる現象はき裂の通過により解放された残留応力がき裂先端部へと再分布されたことによって生ずるものである。このような残留応力の解放機構により、初期残留応力が正の位置からき裂が入る場合には、初期残留応力が負の位置においてもき裂が接近するに従って残留応力が増加し、き裂先端付近では常に正の残留応力が生じているのである。

Fig. 12において、解析結果を見るとき裂が通過した後残留応力値はゼロ付近に収束し、残留応力がすべて解放されることを示している。しかし実験結果では $X = 0 \text{ mm}$ および $X = 20 \text{ mm}$ の位置ではき裂が全断面を通過した後も残留応力が残っている。これはさきに述べたように残留応力の再分布により初期に大きな引張残留応力が生じている部分ではさらに引張応力が加えられることにより塑性変形が生じ、見掛上残留応力が残っているのである。一方、初期残留応力が負となっている $X = 40 \text{ mm}$ および $X = 60 \text{ mm}$ の位置では残留応力はゼロ付近に収束し、初期残留応力はすべて解放されていることが分る。

Fig. 13はFig. 12と同様の挙動を $d = 20 \text{ mm}$ 上の $X = 0, 20, 40, 60 \text{ mm}$ の位置において調べたものである。この位置では、Fig. 2から分るように、残留応力分布はかなり減衰している。Fig. 13の場合はFig. 12の場合よりき裂から遠ざかっており、また、残留応力値も小さいのでさきに述べた塑性変形もあまり生じていないようである。 $X = 0 \text{ mm}$ の位置では若干解析結果と実験結果に差が生じており、若干塑性変形しているが、他の位置では解析結果と良く一致し弾性的な挙動となっている。また、Fig. 13の場合も、Fig. 12の場合と同様にき裂が接近するに従って残留応力が大きくなり、通過後には低下するという挙動を示している。しかし、残留応力のピークはFig. 12の場合ほど鋭どくなっていない。

4.2 疲労によるき裂伝播実験の結果 (Case 2, Case 3)

疲労によるき裂伝播実験は $y = 0 \text{ mm}$ 断面をき裂が伝播する場合 (Case 2) および $y = 2.5 \text{ mm}$ 断面をき裂が伝播する場合 (Case 3)の2 Caseの実験を行った。Case 3ではき裂は残留応力分布が減衰した位置を通過する。

Fig. 14 および Fig. 15 はき裂からの距離, $d = 5 \text{ mm}$ および $d = 20 \text{ mm}$ 上における $X = 0, 20, 40, 60 \text{ mm}$ 位置の Case 2 のき裂伝播にともなう残留応力の変化を示したものである。Case 2, Case 3 では試験片に繰返し荷重 ($\Delta\sigma = 8 \text{ kg/mm}^2$, $R = 0.05$) が負荷される。そのため一層, 塑性変形が生ずると考えられる。Fig. 14 および Fig. 15 に示されるようにき裂が接近してくると残留応力が大きくなる傾向は Case 1 と同様である。しかし, Fig. 14 の場合には $X = 20, 40, 60 \text{ mm}$ の位置ではき裂通過後においても残留応力は増加傾向を示しており, ピークは認められない。このことは残留応力の再分布による塑性変形のほか, 疲労荷重によっても塑性変形が生じていることを示している。また解析結果との差がき裂伝播するに従って大きくなる傾向を示していることから塑性変形が大きいことが分る。

一方 Fig. 15 に示した $d = 20 \text{ mm}$ の場合には初期残留応力が $d = 5 \text{ mm}$ の場合よりかなり減衰している位置であるため $X = 60 \text{ mm}$ 以外は Fig. 14 の場合より解析結果と一致し, 弾性的挙動をしているといえる。き裂の大きさが $a = 45 \text{ mm}$ 以上になると試験片は全断面降伏する。そのため Fig. 15 において $X = 60 \text{ mm}$ の位置の残留応力が大きくなり, 塑性変形が生じている。

Fig. 16 は Case 3 における $d = 5 \text{ mm}$ 上の残留応力の変化を示したものである。この場合, き裂は残留応力がかなり減衰している $y = 25 \text{ mm}$ 断面を伝播するので残留応力の変化は Case 1 および Case 2 ほど大きくない。しかし, $X = 20, 40, 60 \text{ mm}$ の位置ではき裂が通過した後も残留応力はあまり低下せず繰返し荷重の影響が生じている。

これまで述べたように各ケースの実験結果ではき裂伝播にともなって残留応力が弾性的に解放・再分布されるのではなく, 引張残留応力がき裂前方へと再分布してゆく過程でき裂伝播断面付近に塑性変形が生じている。この塑性変形は初期残留応力分布の大きな位置では大きく, またき裂に近い断面ほど大きくなっている。また, 繰返し荷重が負荷される場合には残留応力との重畳によって大きな塑性変形が生じている。この塑性歪はき裂が全断面を伝播した後の残留応力値を弾性係数で割ることにより概算できる。

Fig. 17 は $d = 5 \text{ mm}$ の断面における塑性歪分布を Case 1 および Case 2 について示したものである。同図から明らかなように Case 1 の場合, $X = 40 \text{ mm}$ 以上では塑性歪, ϵ_p はほぼゼロとなっており Case 1 の場合初期残留応力が小さな位置では弾性的な挙動を示している。一方, $X = 40 \text{ mm}$ 以下においても ϵ_p は Case 2 に比べ非常に小さく, 逆に Case 2 の場合には繰返し荷重と残留応力が再分布して重畳するので塑性変形が非常に大きい。また, $X = 40 \text{ mm}$ 以上においても著るしく塑性歪が生じており, これはき裂寸法が $a = 45 \text{ mm}$ 以上になるとき裂伝播断面において全断面降伏が生ずるためである。

以上のように Case 2 の場合には繰返し荷重の効果が顕著に現われている。

Fig. 18 は Case 3 の塑性歪分布を調べたものである。Case 3 ではき裂伝播断面における残留応力分布は Case 2 よりかなり減衰しているため塑性歪は Case 2 よりかなり小さくなっている。しかし, Case 2 と同様に, 初期残留応力が負の位置においても塑性歪が生じており繰返し荷重の効果が見られる。

5. 結 論

本報では残留応力場をき裂が伝播するときに生ずる残留応力の解放・再分布挙動を調べた3ケースの実験結果およびFEMによる解析結果についてまとめた。

実験は溶接残留応力を付加したSUS304鋼製中央切欠き型平板試験片を使用し、放電加工スリットによる模擬き裂を最大残留応力位置において拡大してゆく場合（Case 1）、疲労き裂が最大残留応力位置を伝播する場合（Case 2）、および疲労き裂が最大残留応力位置から若干はずれた位置を伝播する場合（Case 3）の3 Caseについて実施した。これらの実験において歪ゲージにより、き裂伝播にともなう解放応力および残留応力の変化を測定するとともに、2次元弾性解析プログラムにより残留応力の再分布を計算し実験結果と比較した。

以上の結果からつぎの結論が得られた。

(1) 残留応力が生じている部材の引張残留応力側にき裂が生じ伝播する場合、き裂が通過した部分では残留応力が解放され低下する。解放された残留応力はき裂前方へと再分布し、き裂先端付近で残留応力はピークを示す。このようなき裂伝播にともなう残留応力の再分布機構によりき裂通過前では初期残留応力より大きな残留応力が生じ、また、初期残留応力が負の位置でもき裂の接近とともに引張残留応力へと変化してゆく。

(2) FEM弾性解析ではき裂が全断面を通過した後は残留応力はゼロ付近に収束する。しかし、Case 1の実験結果ではき裂前方への残留応力の再分布による塑性変形が生じるため、見掛上残留応力が残っている。この塑性変形は初期残留応力が正の部分で生じており、初期残留応力が負の部分では弾性的挙動を示しゼロ付近に収束する。

(3) 一方、繰返し荷重が重畳して負荷されるCase 2の場合にはCase 1よりかなり大きな塑性変形が生じており繰返し荷重による効果も顕著に認められる。

(4) き裂が最大残留応力位置からはずれた位置を伝播するCase 3ではCase 2ほど塑性変形は大きくないが、この場合には繰返し荷重の影響が大きいと思われる。

本報では実験結果とFEM弾性解析の結果を比較した。Case 1の場合には塑性変形による差が若干生じるが、ほぼ良好に一致する。しかし、Case 2およびCase 3では繰返し荷重による塑性変形が生じるため解析結果とあまり一致しない。この場合には繰返し荷重も含めた弾塑性解析が必要である。今後このような解析を進める計画である。

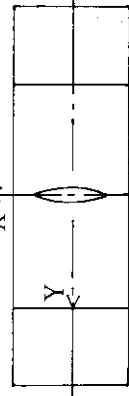
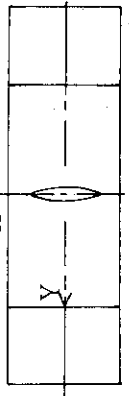
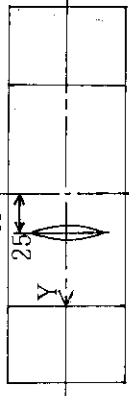
なお Appendix には参考データとしてき裂伝播にともなう解放応力の挙動について実験結果と解析結果とを比較した。

本研究を遂行するにあたり、安全工学部構造強度研究室長、宮園昭八郎主任研究員の協力を得た。また、実験の一部は三菱重工業（株）、神野藤保夫氏の協力によった。両氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III, 1980.
- 2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI, 1980.
- 3) 柴田, 川村, 神野藤; オーステナイトステンレス鋼溶接部の疲れき裂伝播に関する研究 (第1報 残留応力がき裂伝播におよぼす影響について), 日本機械学会講演論文集, No.783-1
- 4) 柴田, 神野藤, 川村; オーステナイトステンレス鋼溶接部の疲れき裂伝播に関する研究 (第2報 き裂伝播にともなう残留応力の再分布に関する実験と解析), 日本機械学会講演論文集, No.783-1
- 5) 柴田, 川村, 神野藤; SUS 304 鋼溶接部の疲労き裂伝播に関する研究 (溶接部の機械的性質と母材, 溶接金属, 熱影響部のき裂伝播), JAERI-M 8900, 1980年6月
- 6) 柴田, 川村; SUS 304 鋼溶接部の疲労き裂伝播に関する研究 (溶接残留応力下でのき裂伝播挙動の予測), JAERI-M 82-049, 1982年5月

Table 1 Test conditions of crack extension tests

Items Case No	Specimen No.	Test method	Crack location and direction	Stress range, Stress ratio
Case 1	W-1	EDM Crack extension test		-
Case 2	W-2, W-3	Fatigue crack extension test		8.0 kg/mm ² , 0.05
Case 3	W-6, W-8	Fatigue crack extension test		8.0 kg/mm ² , 0.05

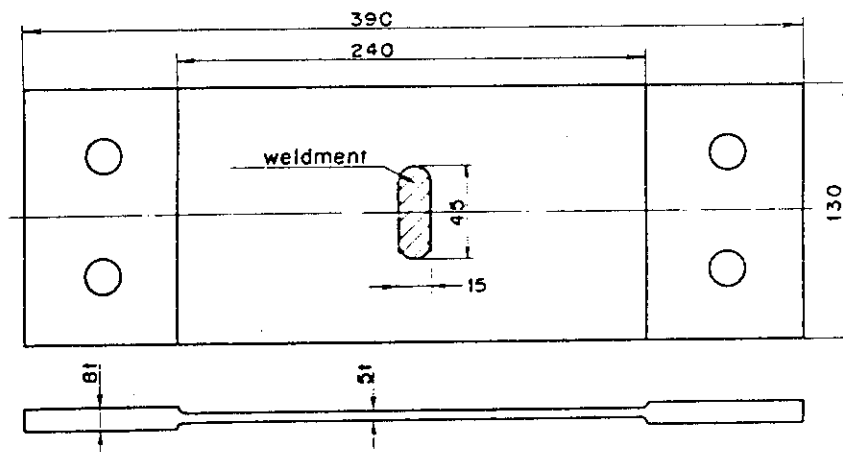


Fig. 1 Geometry of welded specimen

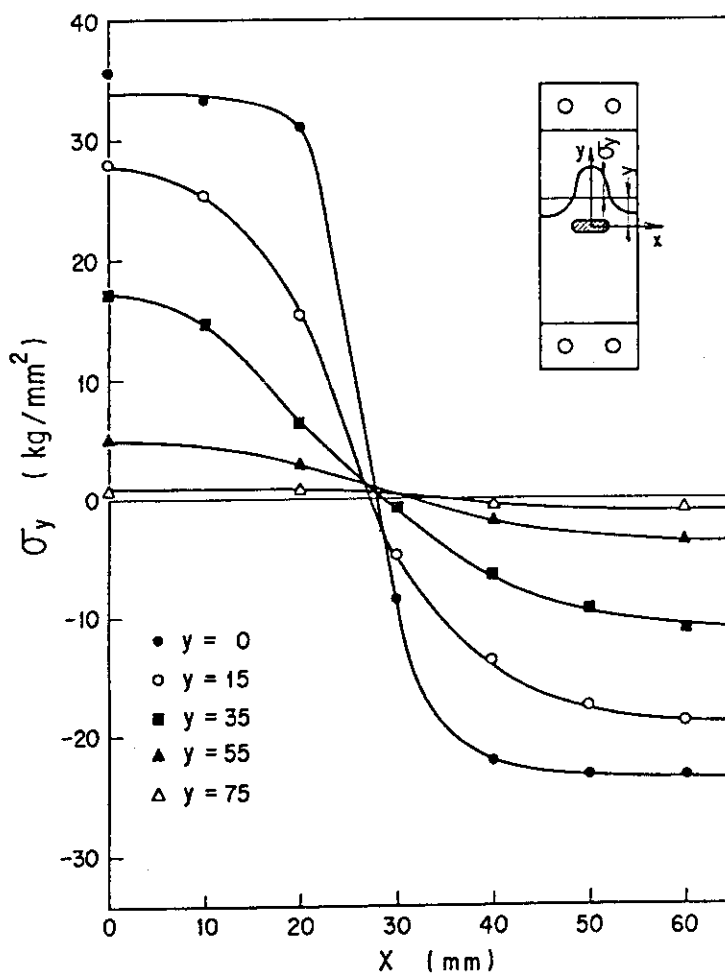


Fig. 2 Residual stress distribution of welded specimen

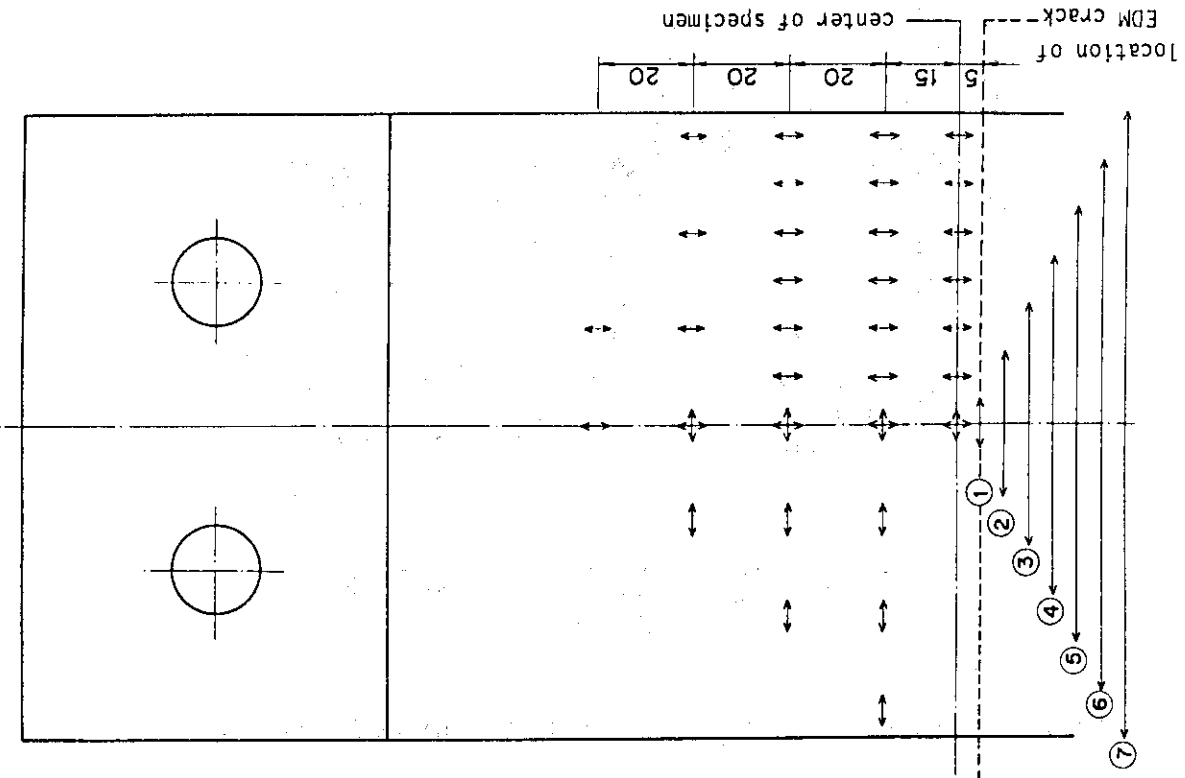


Fig. 3 Location of strain gages in W-1 specimen, used in EDM crack extension test

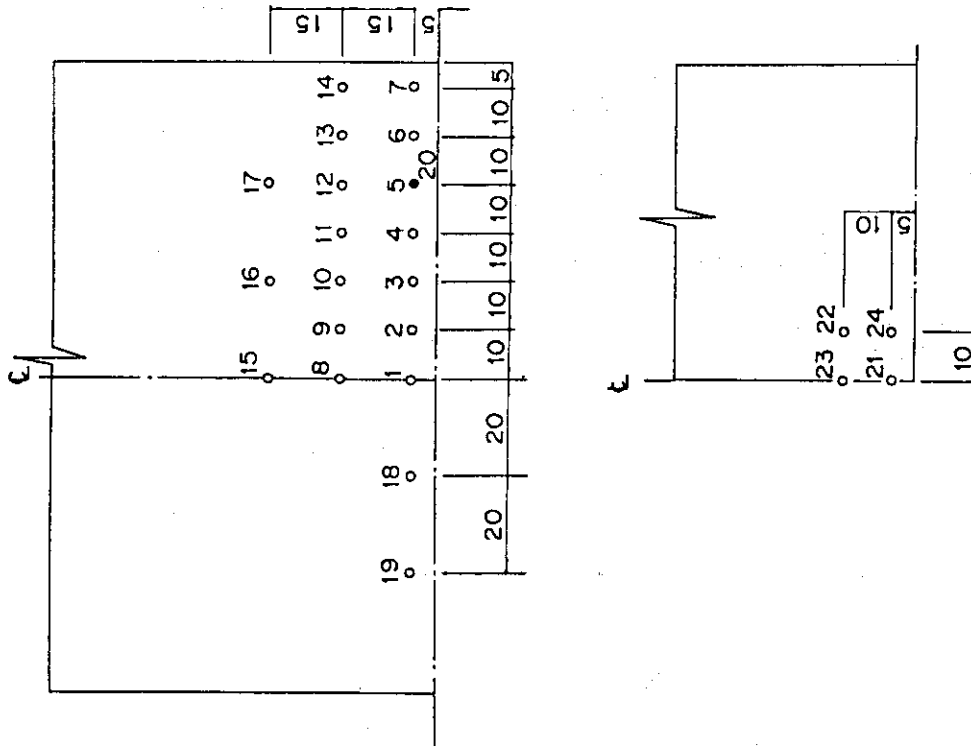


Fig. 4 Location of strain gages in W-2 specimen, used in fatigue crack extension test

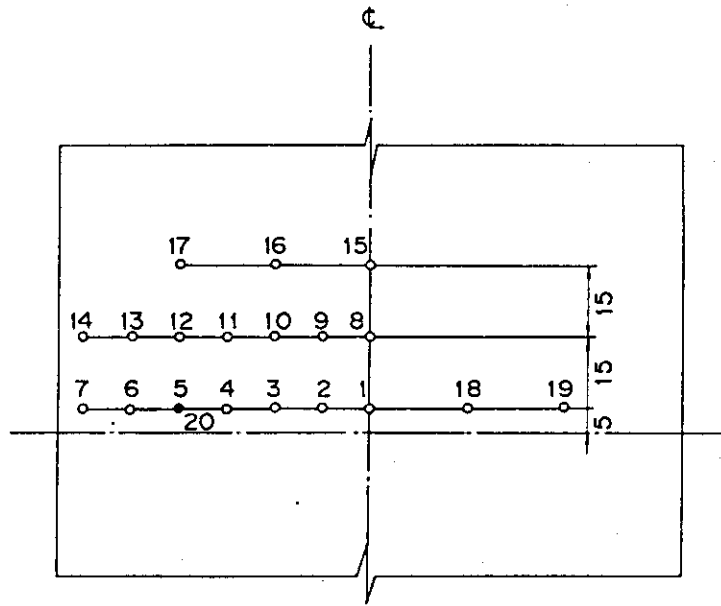


Fig.5 Location of strain gages in W-3 specimen, used in fatigue crack extension test

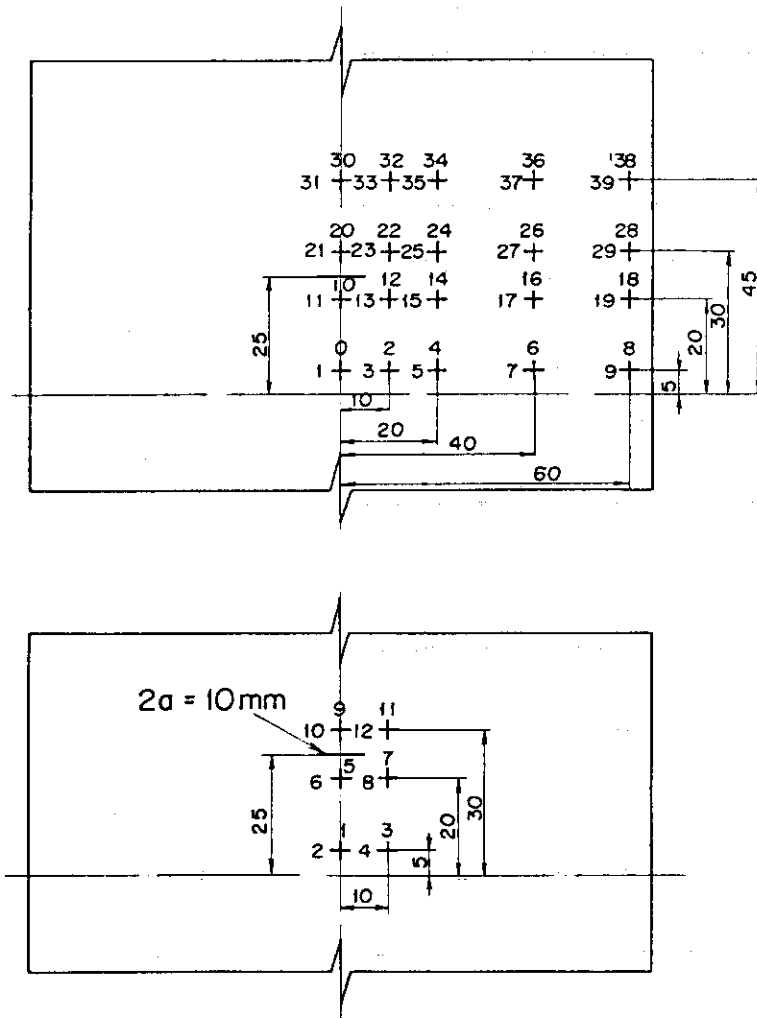


Fig.6 Location of strain gages in W-6 and W-8 specimen, used in fatigue crack extension test

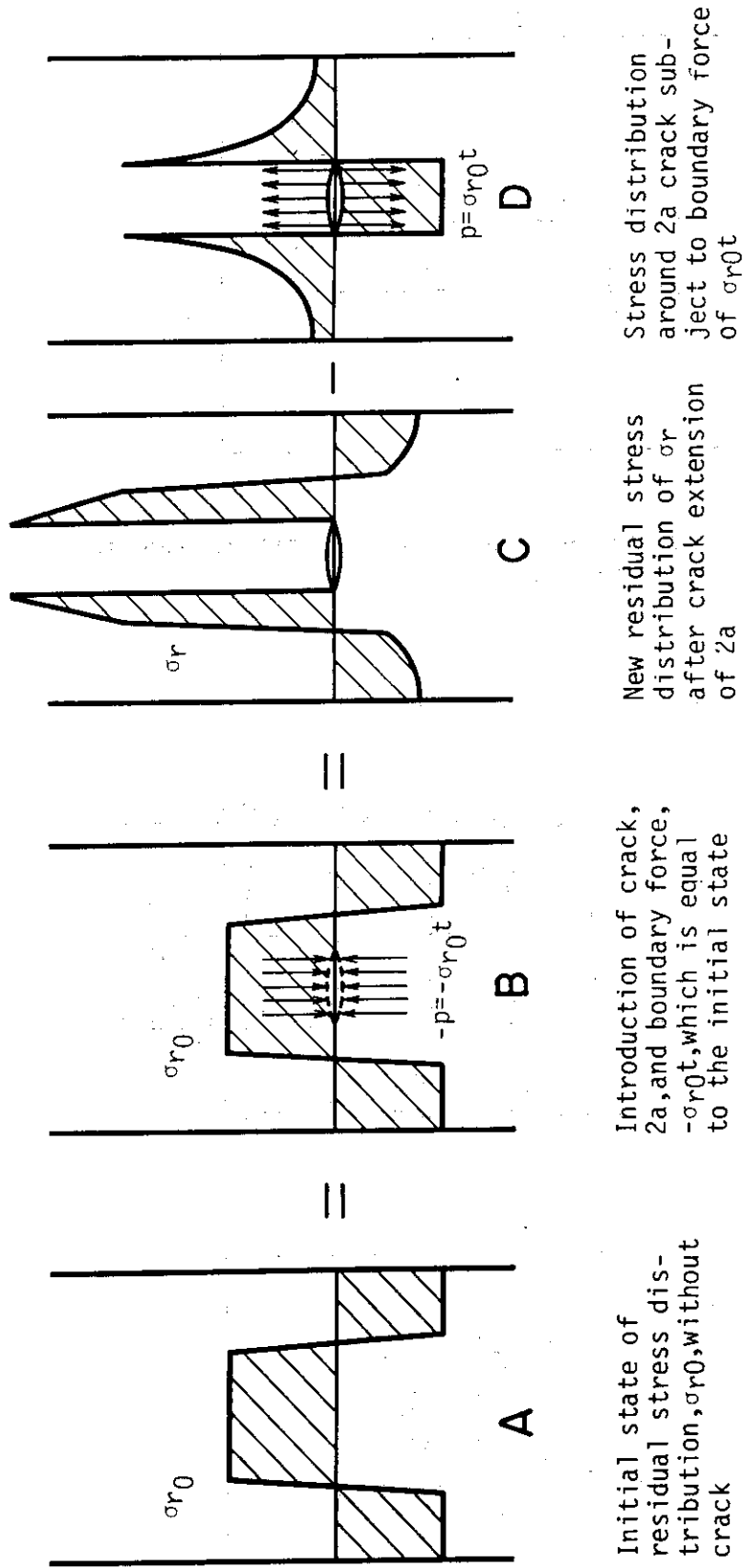


Fig.7 Elastic analysis of relaxed stress and new residual stress distribution after the crack extension of $2a$

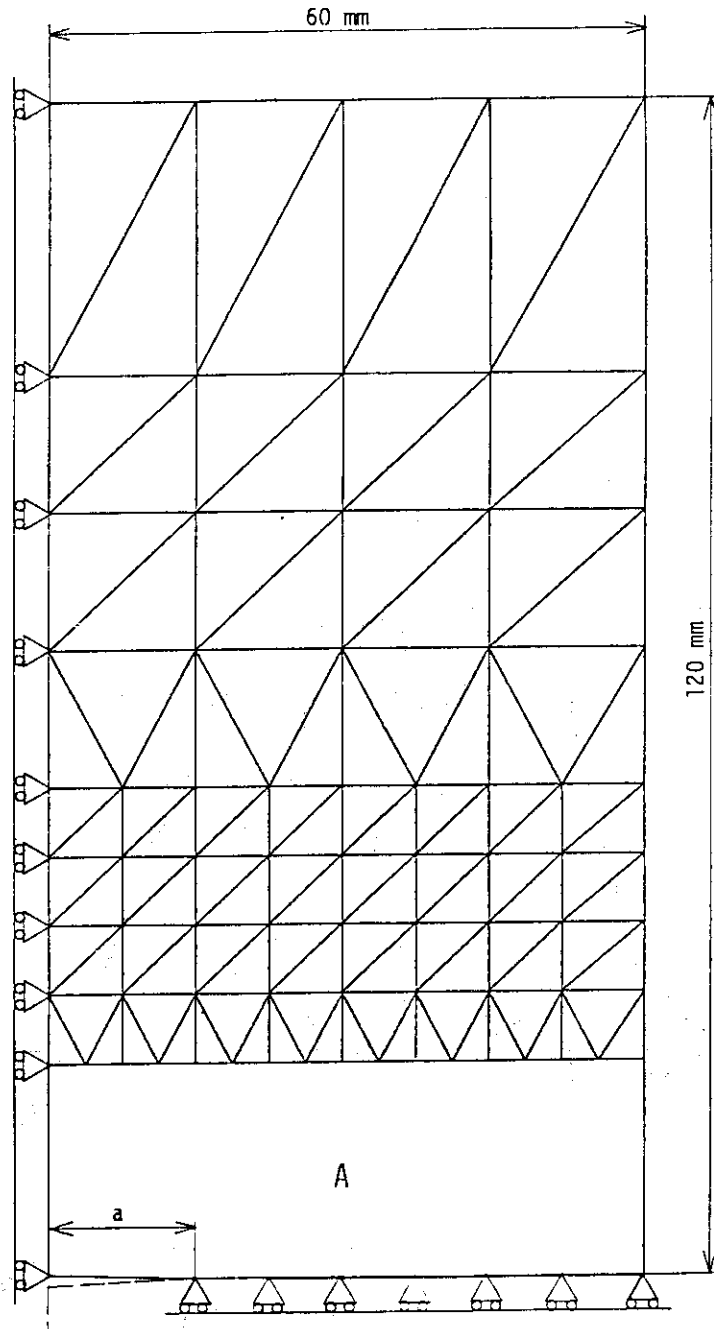


Fig. 8 Model for FEM analysis

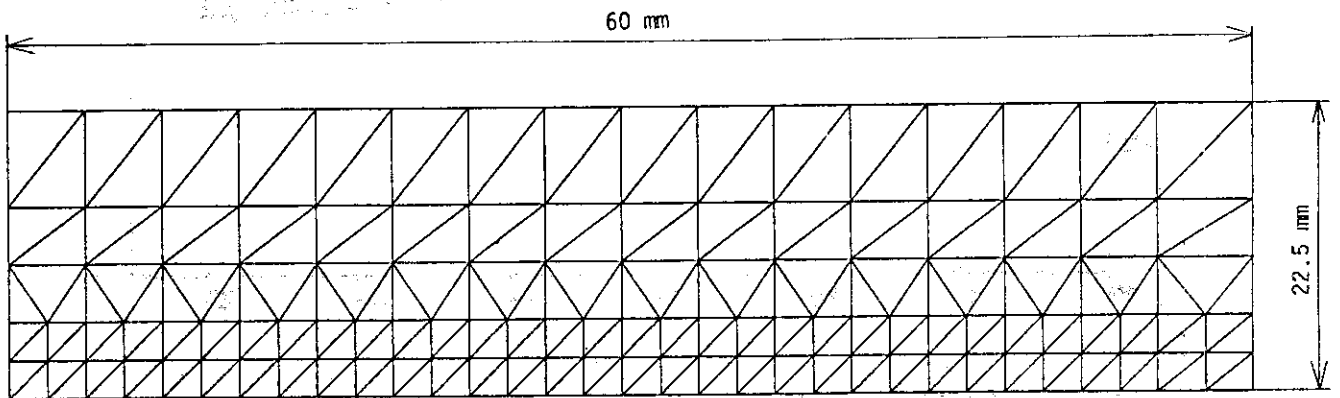


Fig. 9 Model for FEM analysis (detail A)

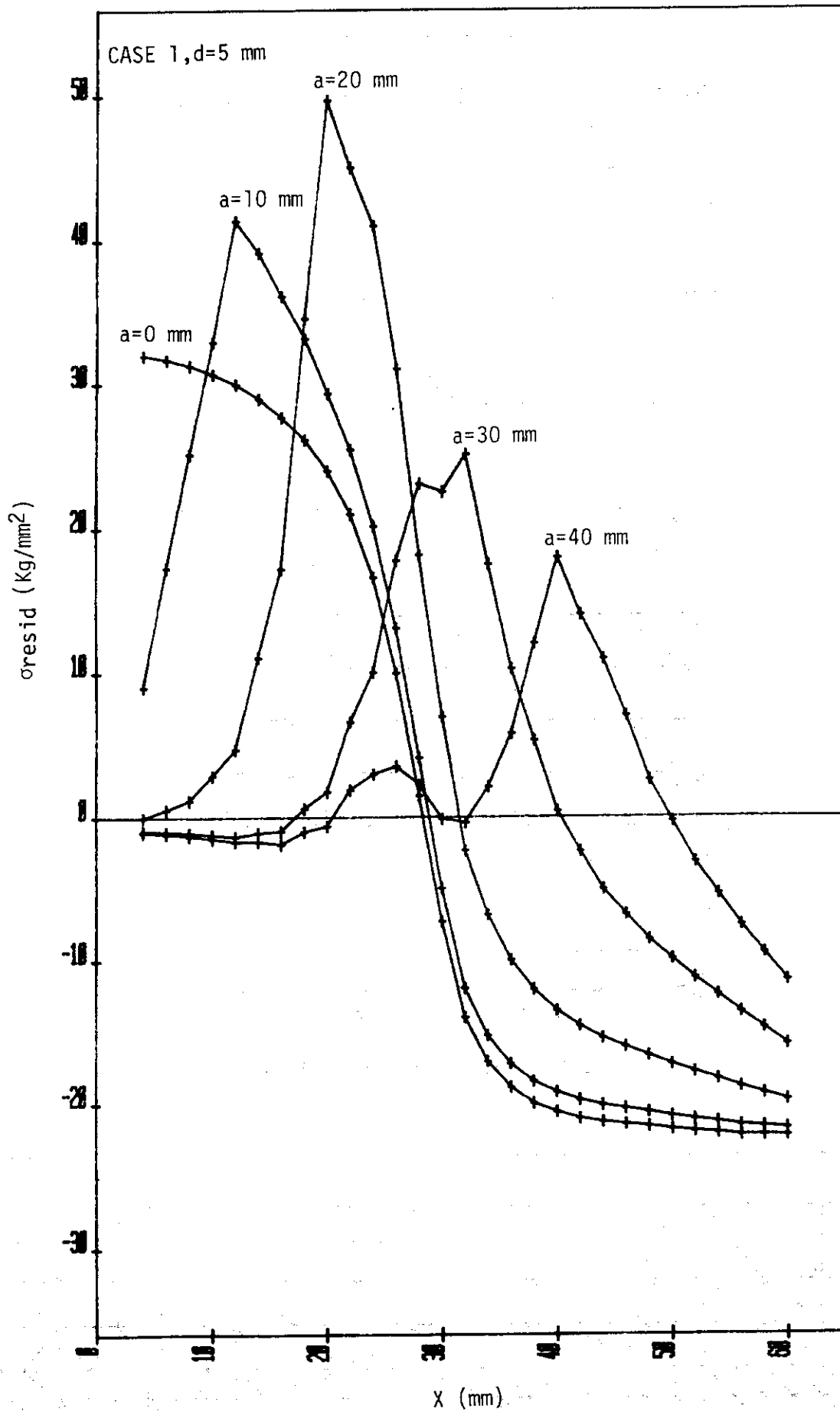


Fig.10 Residual stress distribution at various crack size by FEM analyses(Case 1)

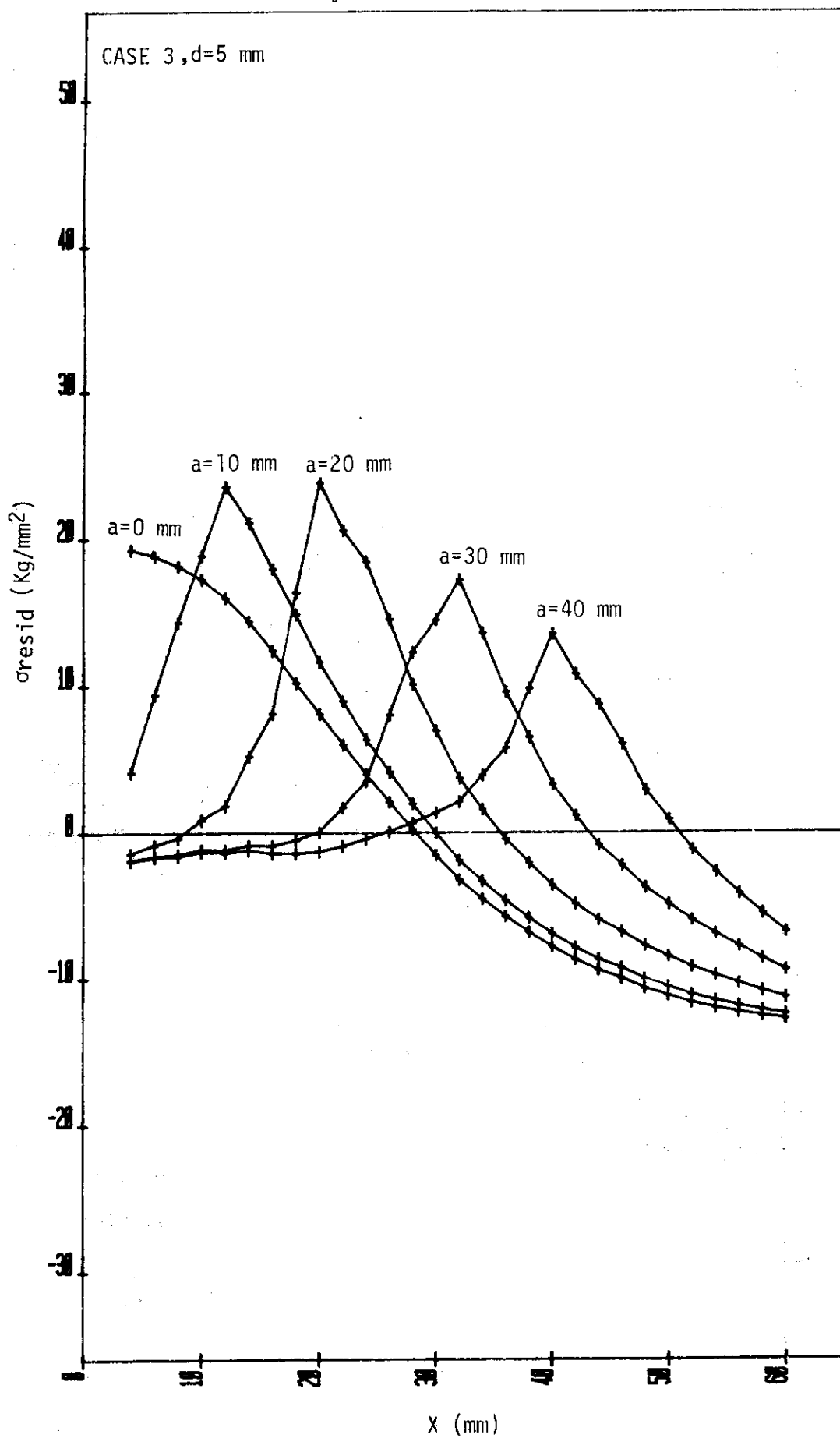


Fig.11 Residual stress distribution at various crack size by FEM analyses(Case 3)

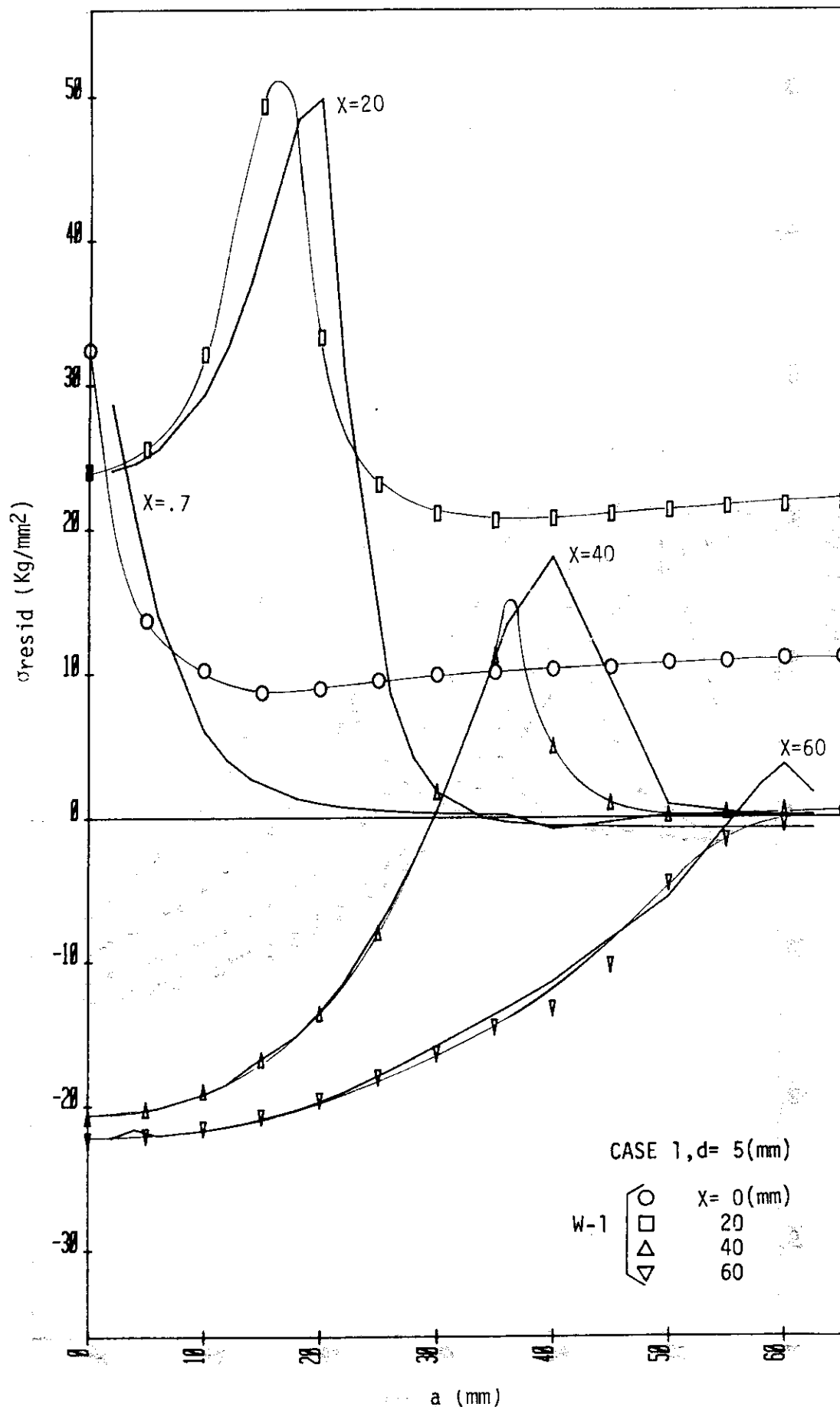


Fig.12 Change in residual stress with the crack extension at various locations. (Case 1, d=5 mm)

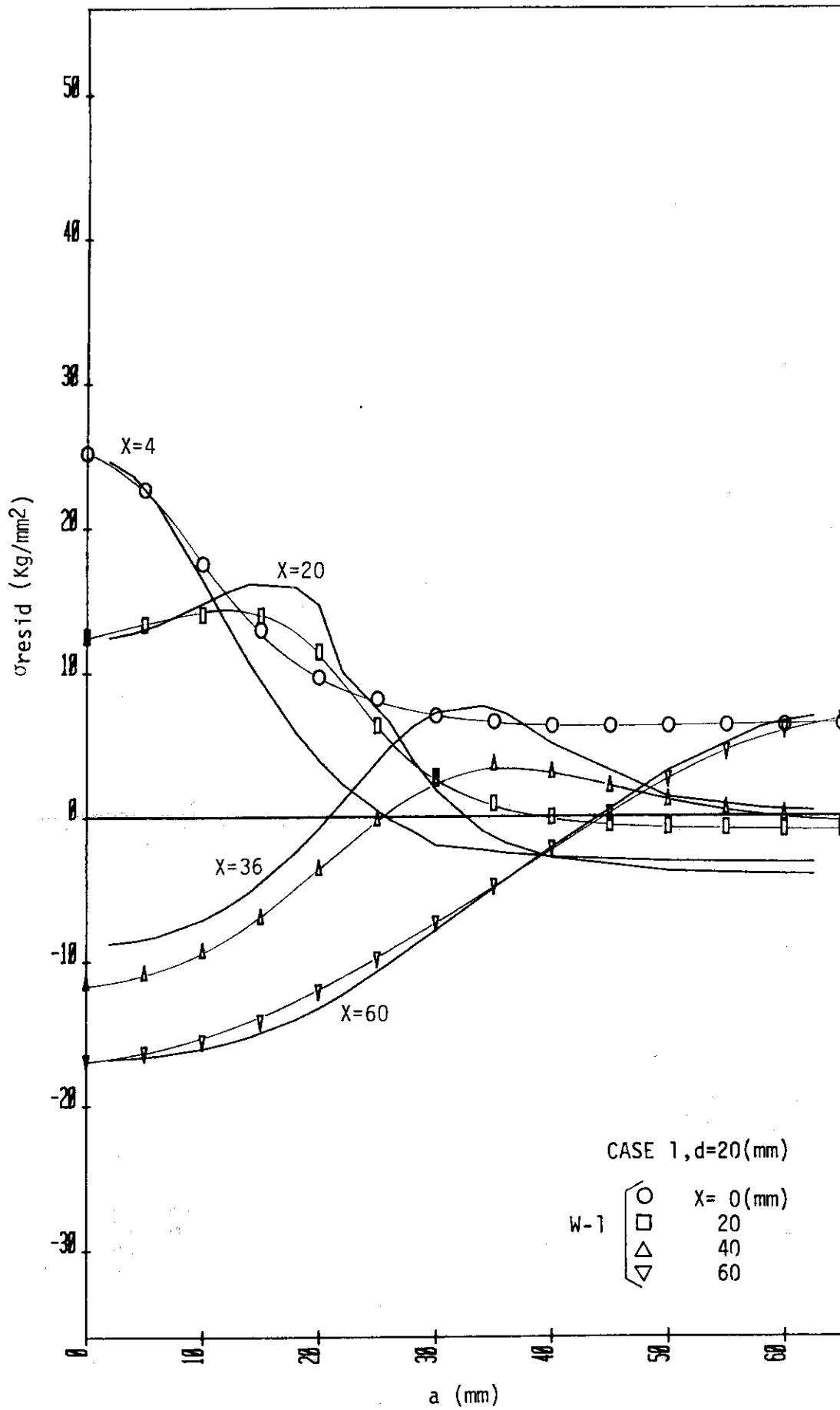


Fig.13 Change in residual stress with the crack extension at various locations (Case 1, d=20 mm)

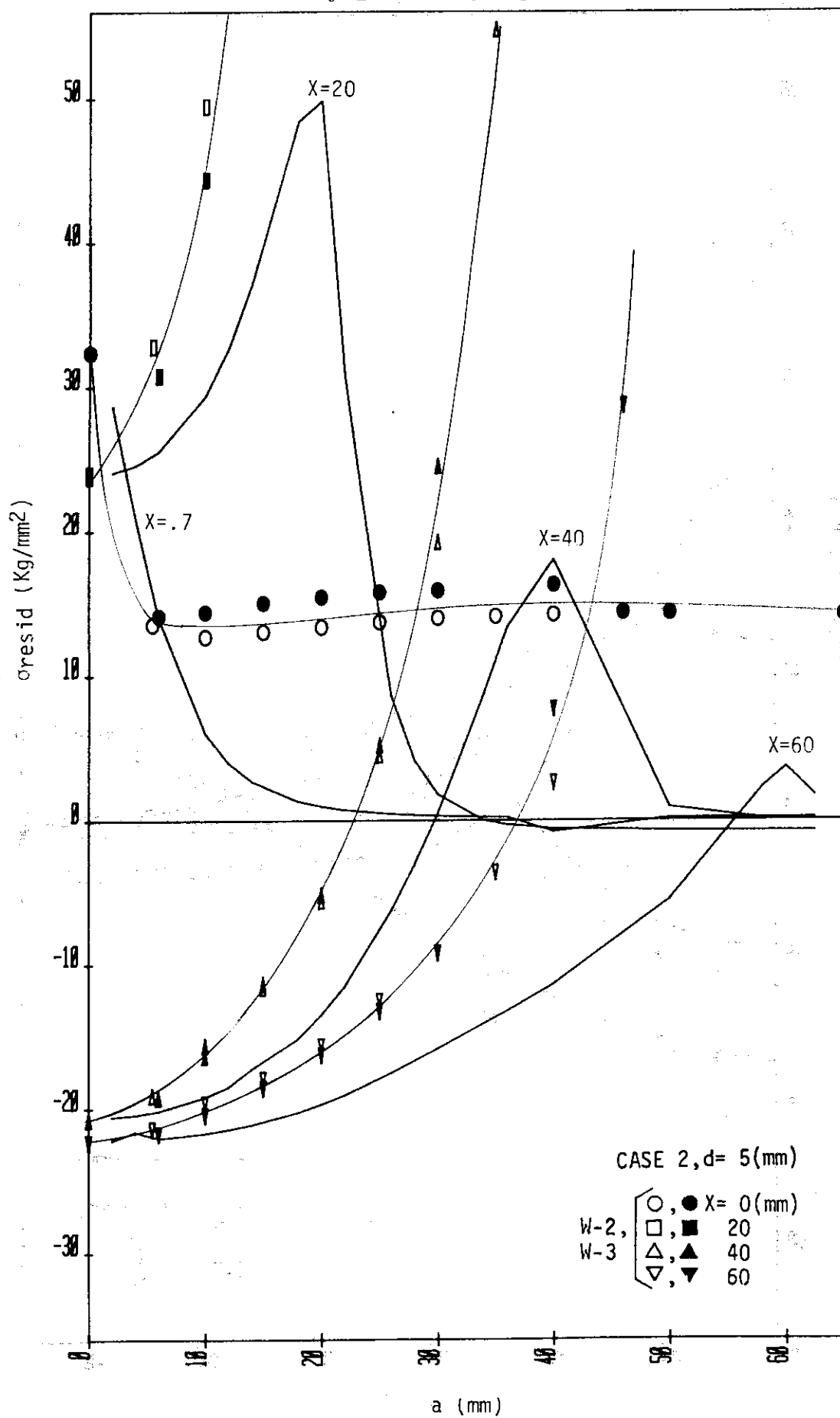


Fig.14 Change in residual stress with the crack extension at various locations (Case 2, d=5 mm)

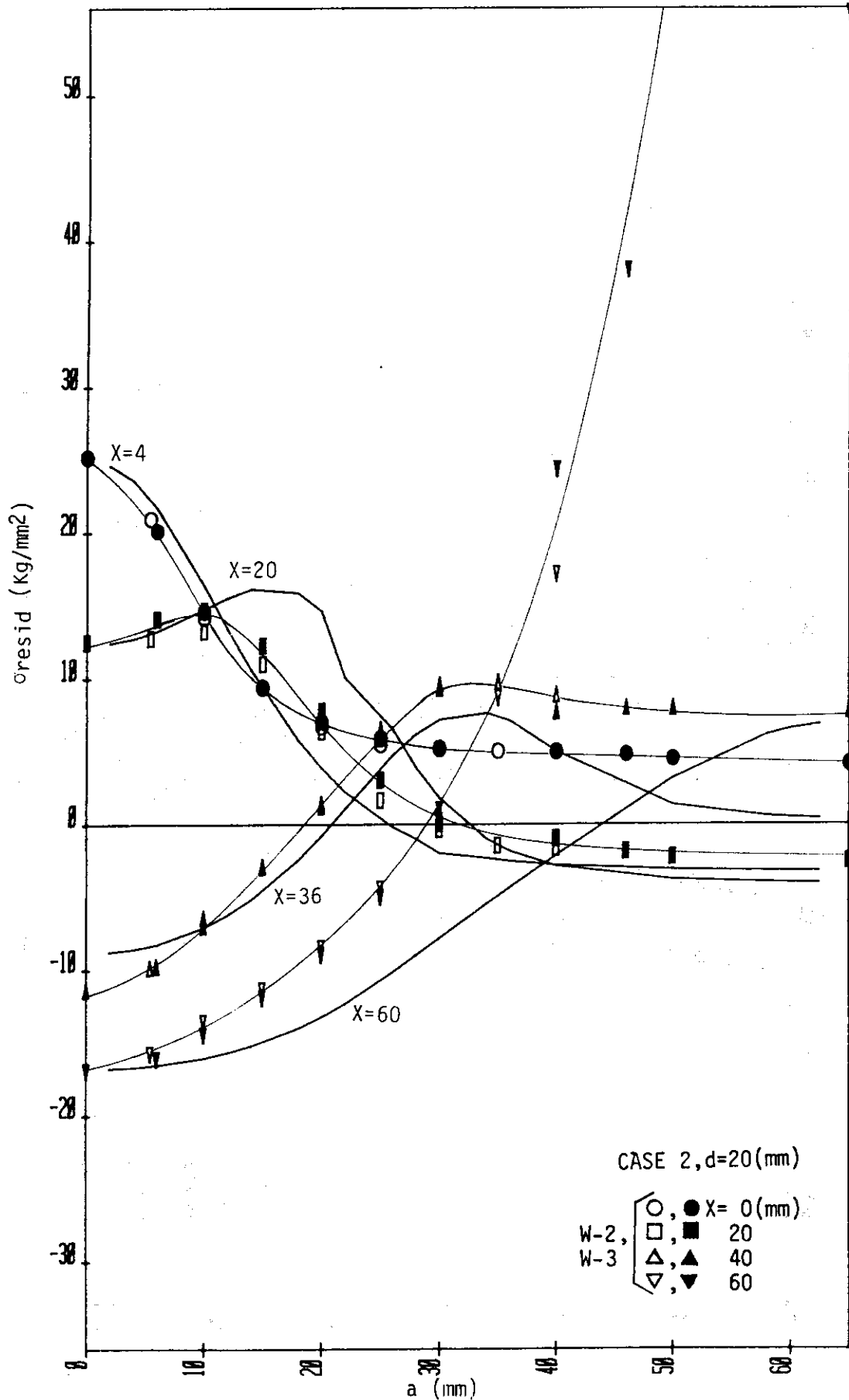


Fig.15 Change in residual stress with the crack extension at various locations (Case 2, d=20 mm)

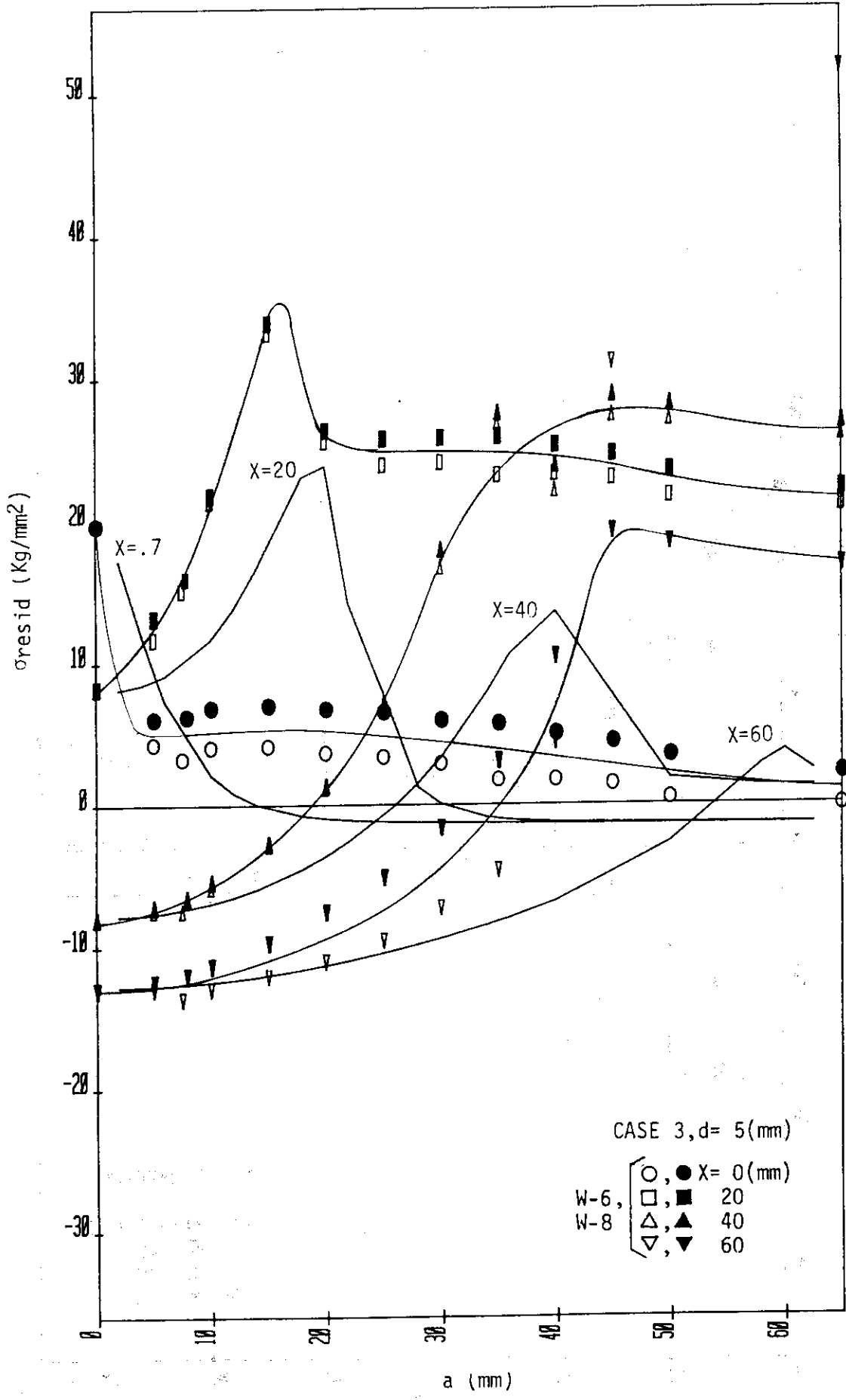


Fig.16 Change in residual stress with the crack extension at various locations (Case 3, d=5 mm)

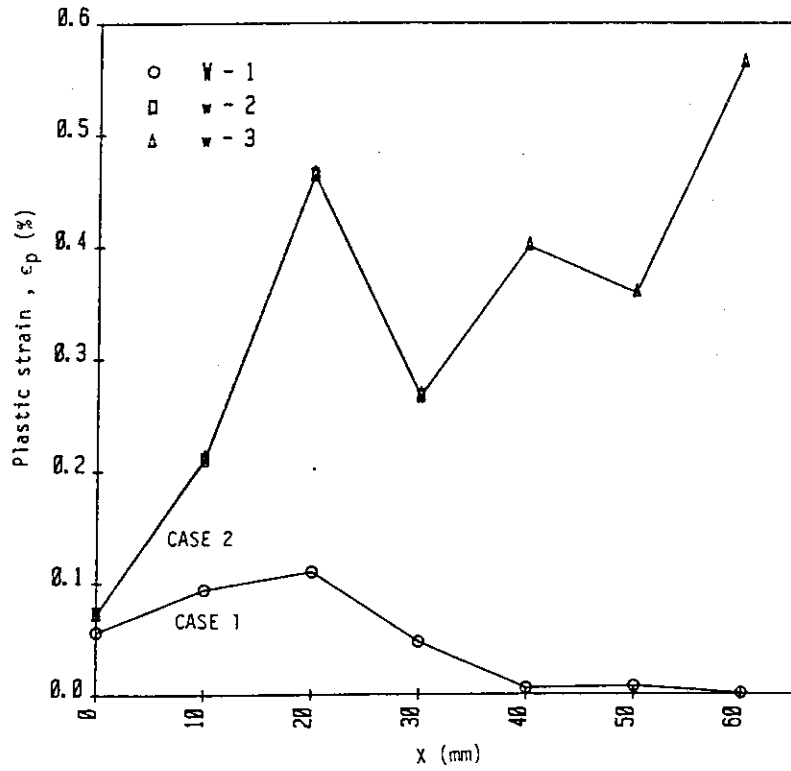


Fig.17 Residual plastic strain distribution(Case 1,Case 2)

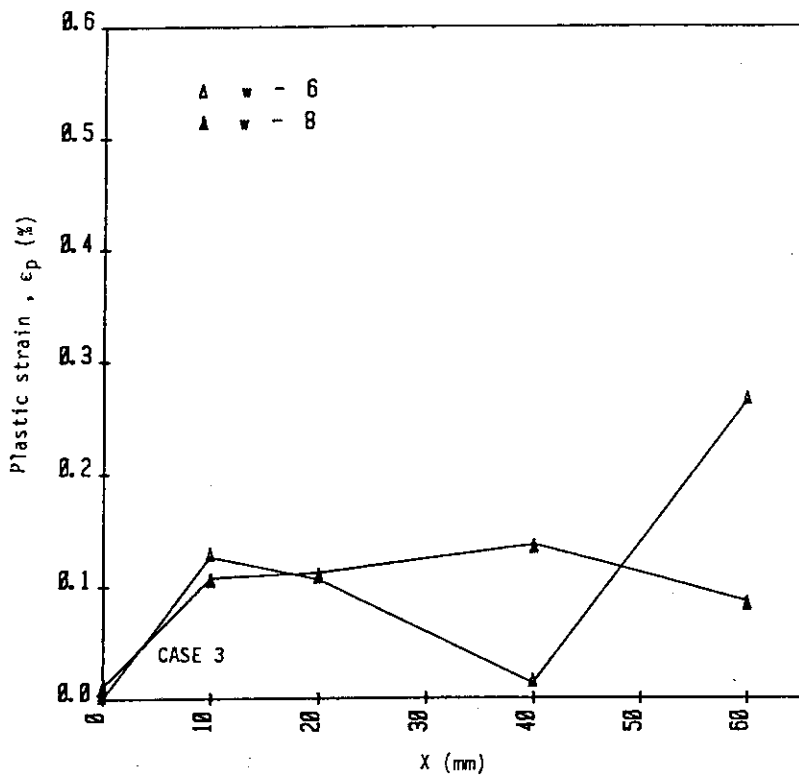


Fig.18 Residual plastic strain distribution(Case 3)

Appendix

Appendixには補足資料としてつぎの残留応力解放挙動に関するデータを集録した。

Fig. A 1 き裂伝播にともなう解放応力の変化 (Case 1, $d = 5 \text{ mm}$)

Fig. A 2 き裂伝播にともなう解放応力の変化 (Case 1, $d = 20 \text{ mm}$)

Fig. A 3 き裂伝播にともなう解放応力の変化 (Case 2, $d = 5 \text{ mm}$)

Fig. A 4 き裂伝播にともなう解放応力の変化 (Case 2, $d = 20 \text{ mm}$)

Fig. A 5 き裂伝播にともなう解放応力の変化 (Case 3, $d = 5 \text{ mm}$)

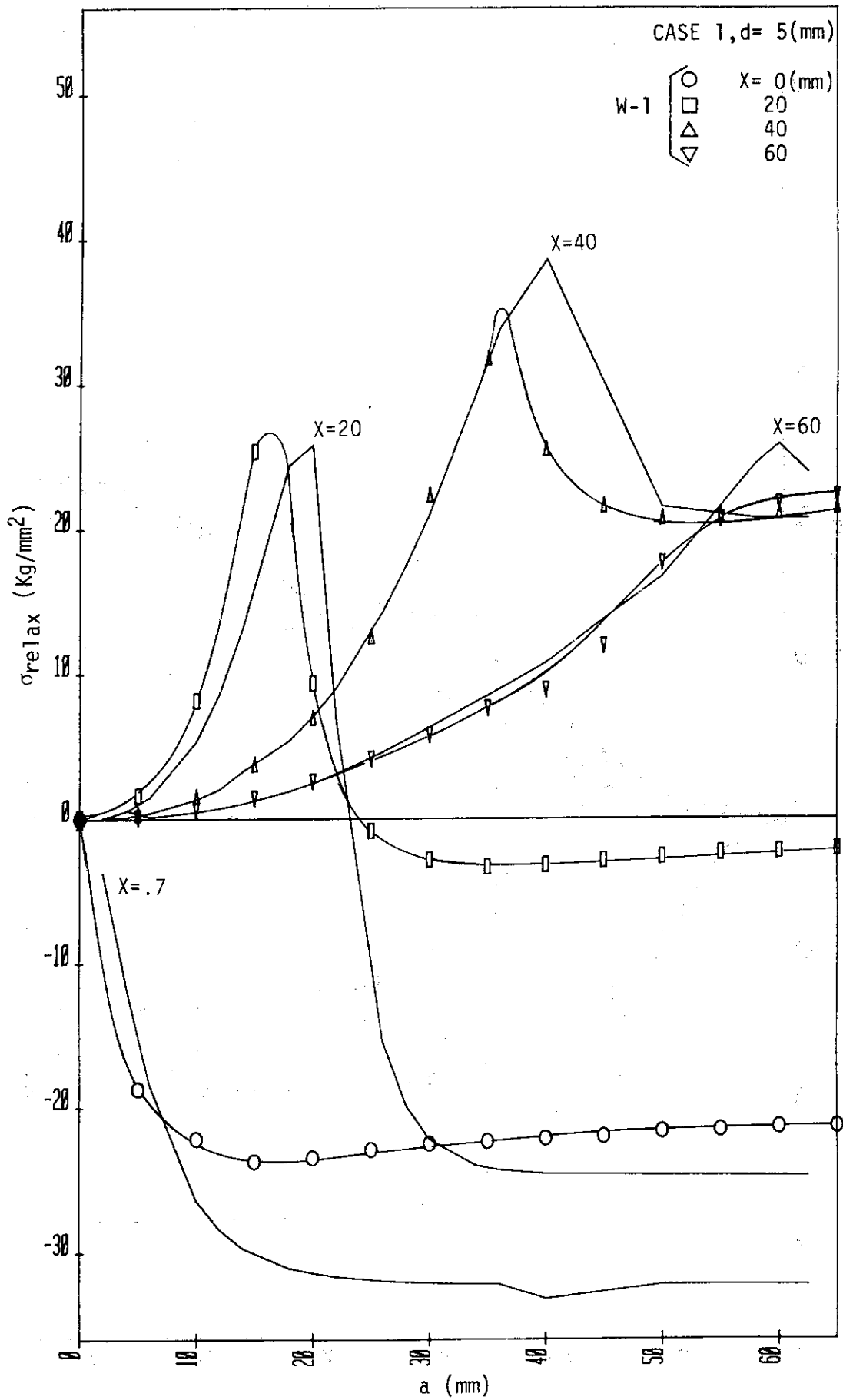


Fig.A1 Change in relaxed stress with the crack extension at various locations (Case 1, d=5 mm)

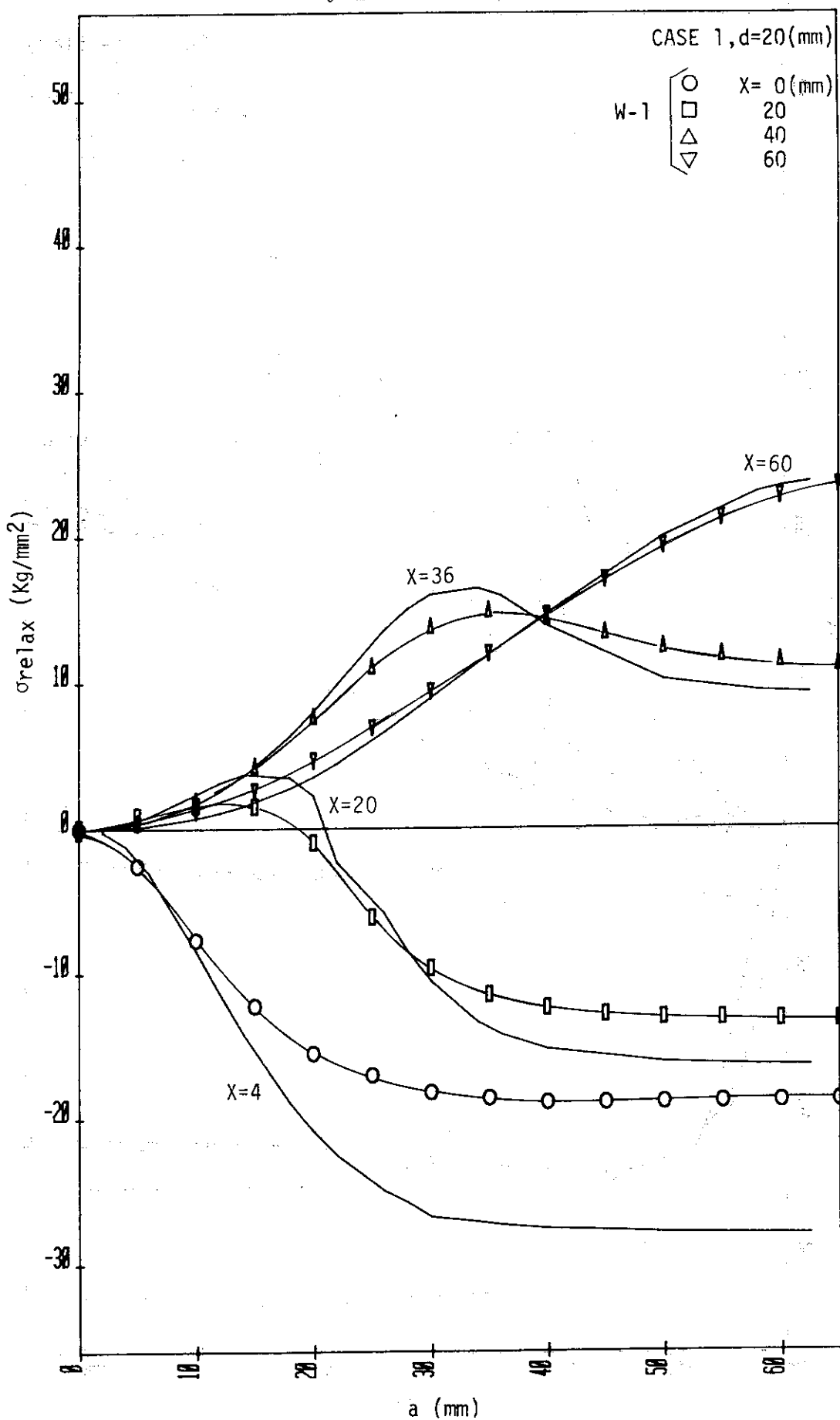


Fig.A2 Change in relaxed stress with the crack extension at various locations (Case 1, d=20 mm)

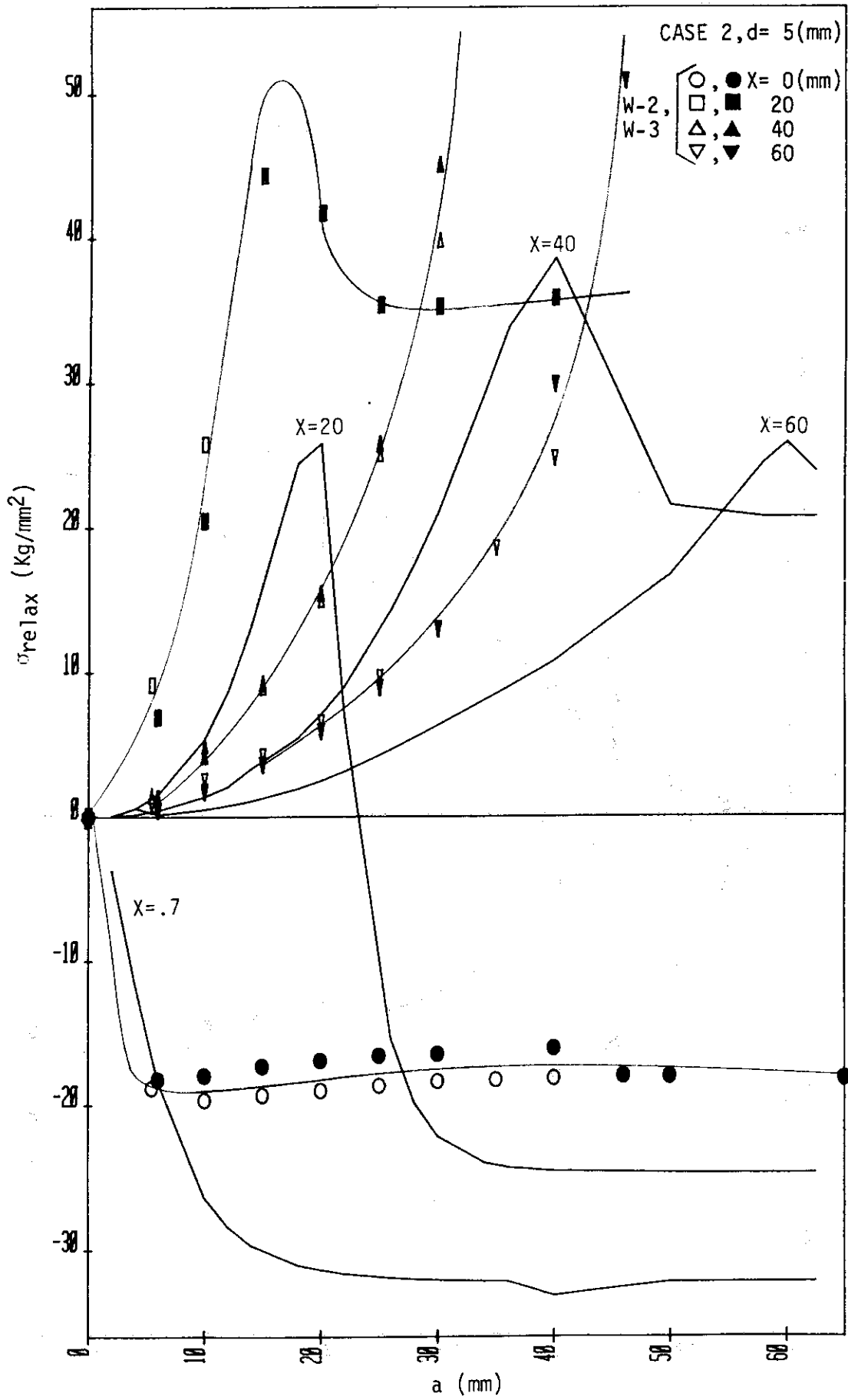


Fig.A3 Change in relaxed stress with the crack extension at various locations (Case 2, d=5 mm)

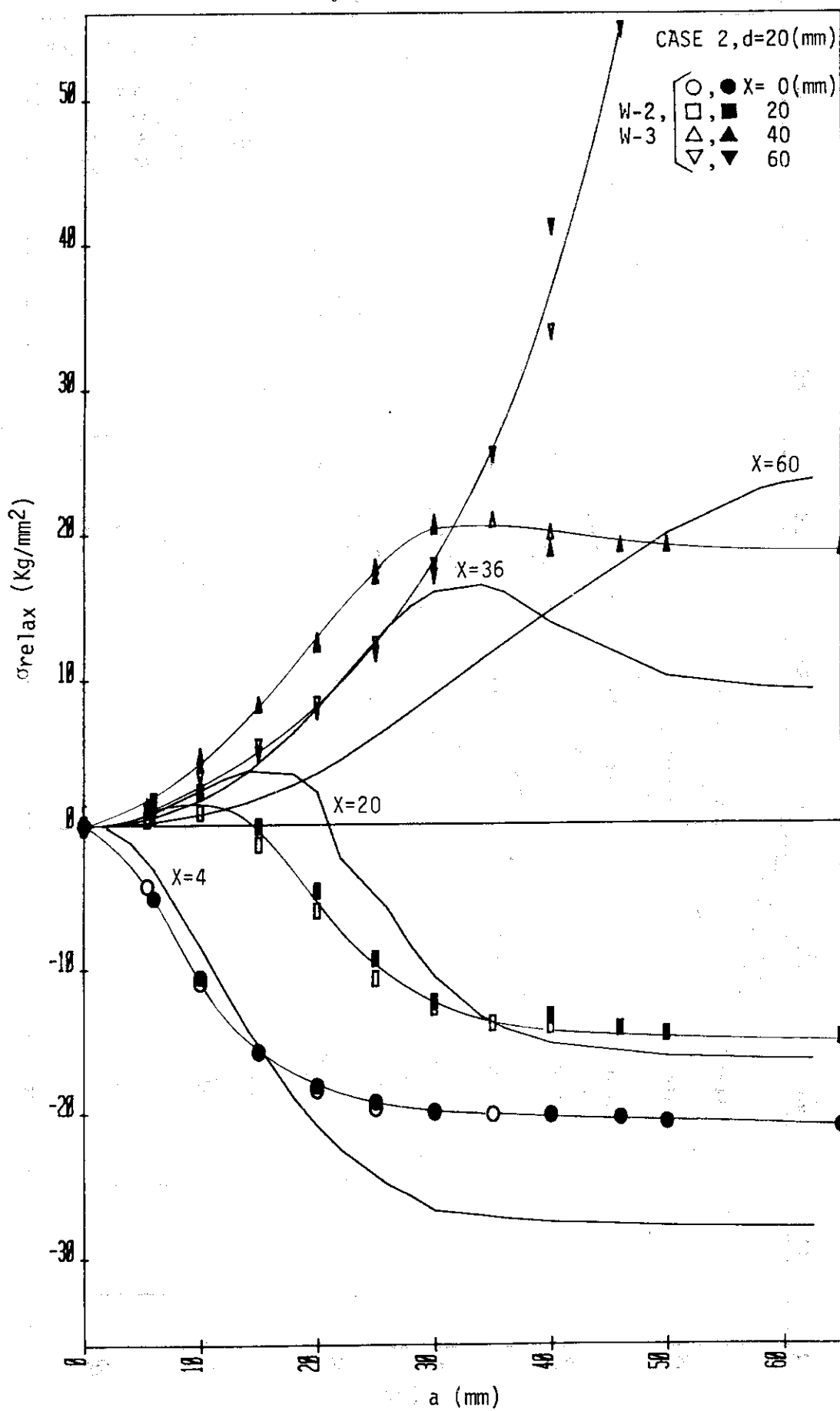


Fig.A4 Change in relaxed stress with the crack extension at various locations (Case 2, d=20 mm)

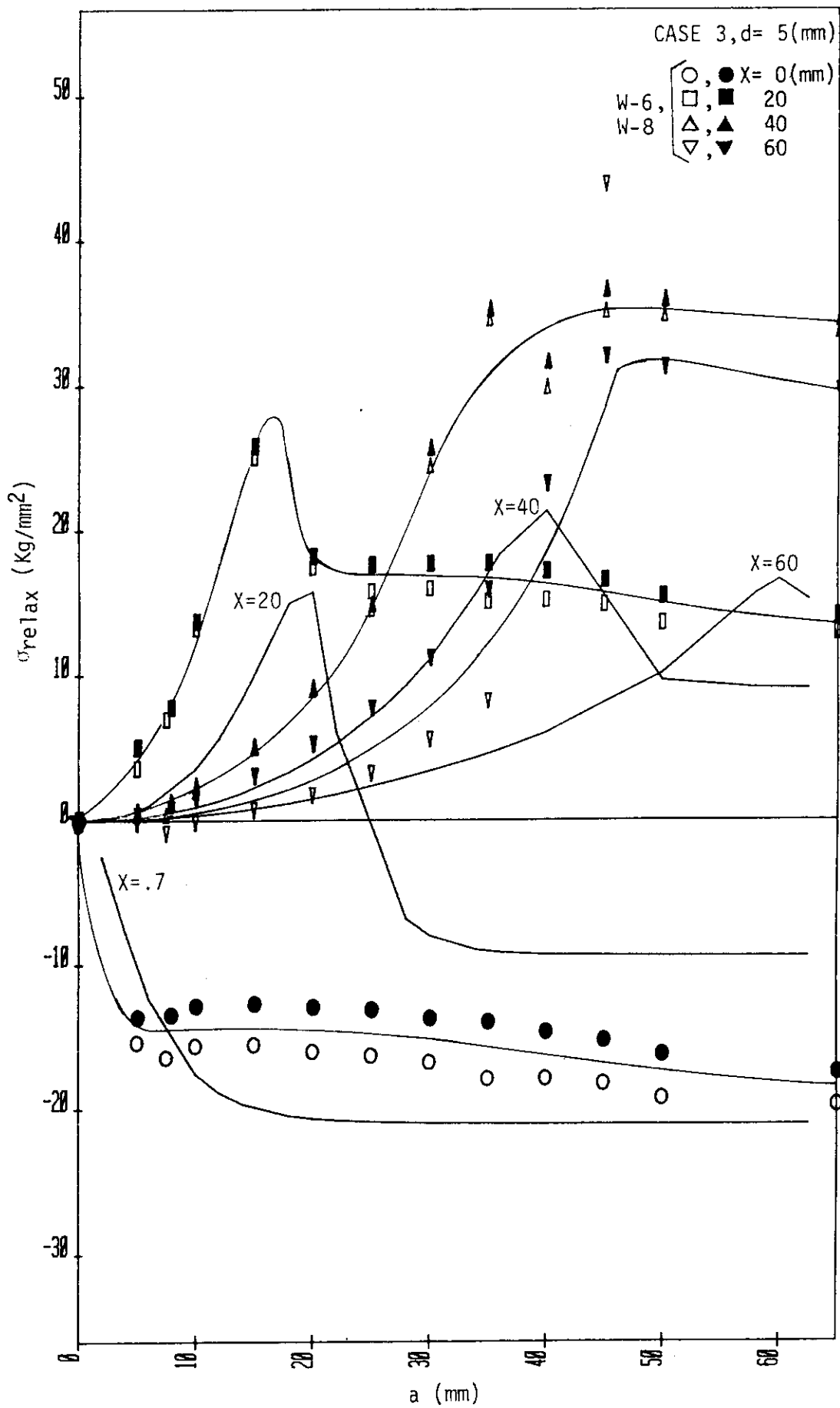


Fig.A5 Change in relaxed stress with the crack extension at various locations (Case 3, d=5 mm).