

大阪大学基礎工学部 小倉 敬二 三好 良夫
大阪大学大学院 鹿山 昌宏 (株) 資生堂 辻 宗和

1. 緒言

近年、破面解析の手段としてX線回折法を用いた、いわゆるX線フラクトグラフィなる手段が提案され、疲労破面への適用例についても、いくつか報告されている。⁽¹⁾ しかし、これまでの結果は、必ずしも同傾向にあるとはいえず、実用部材の破面解析に適用できるまでには、なお種々の条件下、あるいは各種材料についてのデータの蓄積が必要である。

本研究では、S M 50 A 鋼の疲労破面にX線回折法を適用し、それより求めた破面上ならびに破面下の残留応力や半価幅などのX線のパラメータと、破面形成時の応力拡大係数範囲 ΔK などの破壊力学パラメータとの関係を実験的に調べる一方、有限要素法により破面下の残留応力分布を解析的に調べることを試みた。

2. 実験方法

用いた材料は S M 50 A で、その化学組成と機械的性質はそれぞれ表 1, 2 に示した。試験片は A S T M 規格に準じた C T 試験片で、その寸法、形状は図 1 に示した。疲労き裂伝は試験は電気油圧サーボ疲労試験機により、応力比 $R = 0.05$ で、荷重振幅一定および応力拡大係数範囲 ΔK 一定の 2 種類について行った。残留応力の測定はX線応力測定法により、 $\sin\psi$ 法による並傾法を用いた。照射面積は $1 \times 10 \text{ mm}^2$ で周辺をビニールテープで覆い、き裂進展方向の応力を測定した。破面下の残留応力分布は電解研磨により破面を逐次除去することにより測定した。半価幅は残留応力の測定時に得た回折強度曲線 ($\psi_0 = 0^\circ$ のもの) より求めた。

3. 結果および考察

3.1 破面上ならびに破面下の残留応力分布

図 2 は荷重一定試験後の破面上で測定した残留応力 (σ_r) を応力拡大係数範囲 (ΔK) で整理したものである。破面上の σ_r は引張を示しており、その応力は ΔK が増加するにつれて一担減少した後、再び増大する傾向である。しかし、 ΔK に対するその変化量がわずかであることから、破面上の残留応力は、本実験に関する限りは ΔK に依存しないと考えるのが妥当なようである。なおこれまでの結果は、破面上の σ_r が K_{max} や ΔK とともに増大する場合⁽²⁾⁽³⁾ や、減少する場合⁽⁴⁾ のあることが報告されており、統一した結果は得られてい

表 1 化学組成

C	Si	Mn	P	S	Al	Fe
0.04	0.37	1.24	0.016	0.008	0.037	R

表 2 機械的性質

Yield strength σ_s (kgf/mm ²)	Tensile strength σ_b (kgf/mm ²)	Elongation (%)
40.1	53.2	26.5

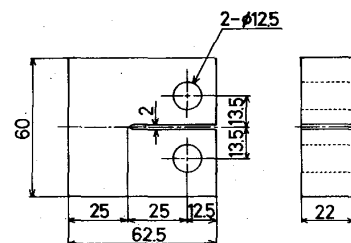


図 1. C T 試験片形状・寸法

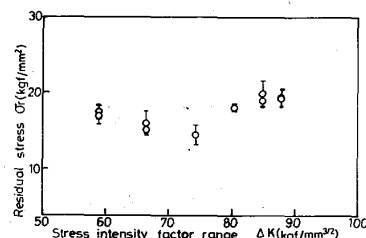


図 2. 応力拡大係数範囲と破面残留応力との関係

い。図3は荷重一定、および ΔK -一定試験後の破面下の残留応力(σ_r)を破面からの深さ(Y)に対してプロットしたものである。 σ_r は破面直下(20~30 μm)で極大を示した後減少し、母材部の残留応力値である0に収束する。この変化の傾向は ΔK 値によらずほぼ同じであるが、 σ_r が0となる Y の値 Y_1 は ΔK に依存しており、 ΔK の大きいものほど Y_1 も大きくなっている。この結果は従来の結果⁽²⁾⁽⁵⁾ともよく一致している。なお σ_r が破面直下で極大値を示す原因は十分明らかではないが、破面の荒さの影響と推測され、再降伏域に対応するようなものではないと思われる。

3.2 破面下の半価幅変化

図4は ΔK -一定試験後の破面下の半価幅変化を示したものである。本実験では回折強度曲線の $k_{\alpha 1}$ と $k_{\alpha 2}$ 線の分離度が破面上、破面下、母材部とで異なるため、それらの分離の影響が小さいと考えられる。ピーク強度の $7/8$ での幅($7/8H$ 幅)を半価幅として採用した。図4より $7/8H$ 幅は破面上で最も大きく、破面直下で急減し、その後漸減して、母材部の値(2.52deg)に収束する。この変化傾向は ΔK によらず同じであるが、その収束する深さ Y_2 は ΔK により異なり、 ΔK の大きいものほど Y_2 も大きくなり、図3の残留応力分布の結果ともよく一致している。 Y_2 の値は先の Y_1 の値にほぼ等しく、塑性域寸法に対応するものと考えられる。図5は、残留応力および $7/8H$ 幅が母材部のそれに収束する深さ、 Y_1 、 Y_2 を塑性域深さ w_p として求め、それらを ΔK で整理したものである。 w_p は ΔK ($\cong k_{\max}$)の二乗に比例して増大し、その値は計算で得られる平面ひずみ条件下のき裂面に垂直方向の $k_{\max}$ に対する塑性域寸法(図中点線) $w_p = \frac{0.83}{2\pi} \left(\frac{k_{\max}}{\sigma_f} \right)^2$ とほぼ一致している。

3.3 有限要素法による破面残留応力の解析

解析方法については省略するが、著者の一人がこれまでに行ってきた、き裂進展を伴う繰返し荷重下の弾塑性解析である⁽⁶⁾。図6に示す中央き裂試験片について平面ひずみの仮定のもと、負荷応力、降伏点、加えて硬化率を種々変えて解析を行い、これらの残留応力値への影響を調べた。

解析結果を図8(a~c)に示す。これらはいずれも、応力比 $R=0$ 、 $k_{\max}$ -一定下のき裂進展の結果で、図7に示すようなき裂進展に伴う破面残留応力が定常値に至るまでの変化の様子を重ね合わせた

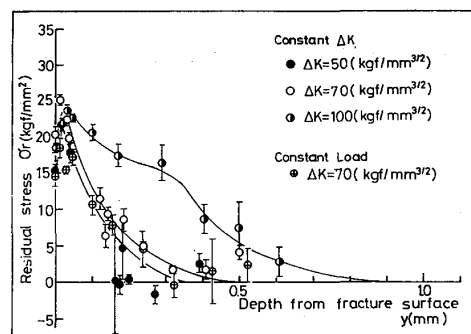


図3. 破面下の残留応力分布

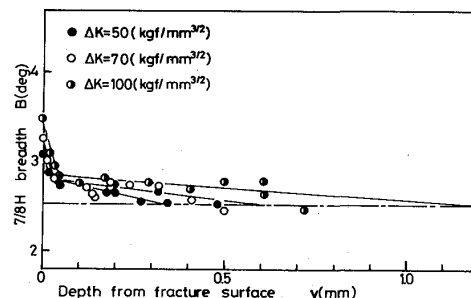


図4. 破面下の半価幅変化

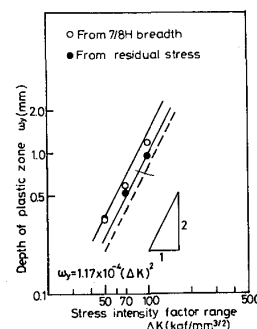


図5. 応力拡大係数範囲と塑性域深さの関係

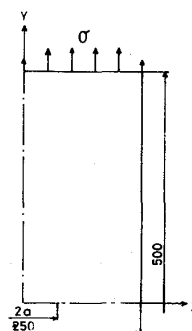


図6. 試験片形状

ものである。なお、図8で残留応力は降伏点 σ_y で、破面からの深さはその方向の降伏域寸法 w_p で無次元化してある。図8(b)は図8(a)と比べて k_{max} および σ_y が大きく、図8(c)は加工硬化係数 H' が大きい。図より定常残留応力の分布の様子(図中黒丸印)を見ると、いずれの場合も残留応力の値は破面上で引張、内部に入るにつれて急速に減少し、降伏域寸法 w_p の所で0となっている。この傾向は先の図3に示した実験結果とも良く一致している。破面における残留応力の値は k_{max} , σ_y , H' の変化に応じて若干変化するが、 σ_y で無次元化するといずれの場合も0.5に近い値となる。なお今回行った解析の範囲では再降伏域が小さいので、再降伏域寸法(cyclic plastic zone)と残留応力の値および分布との関係は十分明確ではないが、図8(a)(b)(c)でも明らかな様に、その対応関係はあまりはっきりしていない。

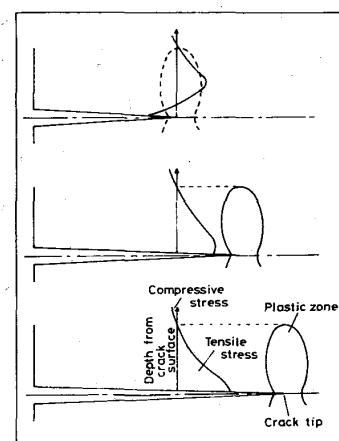


図7 き裂の進展に伴う応力分布変化模式図

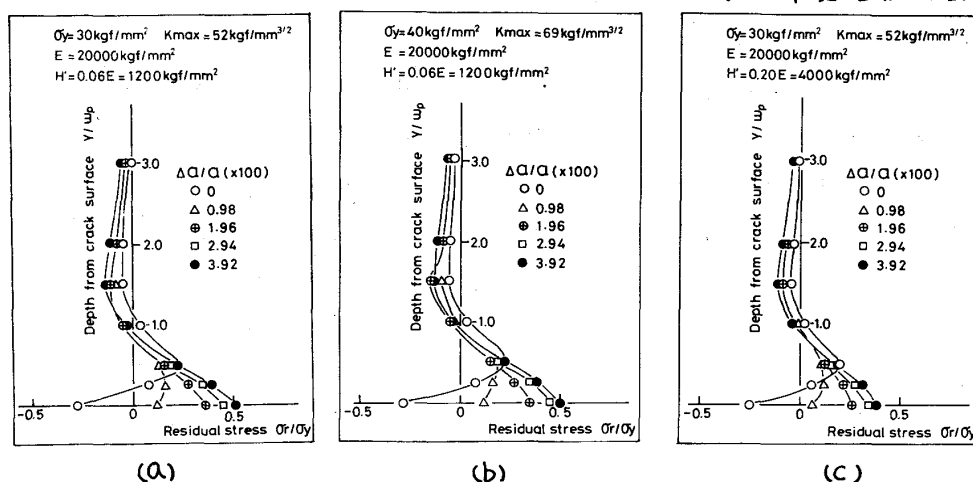


図8 解析によつて得られた破面下の残留応力分布

4. まとめ

以上のことから、破面残留応力あるいは半価幅の深さ方向の分布より、最大荷重に対する降伏域の寸法、したがってまた k_{max} の推定は可能であると思われるが、繰返し負荷に対する降伏域寸法、したがってまた ΔK の推定は悲観的であるように思われる。 ΔK の推定にはすでに指摘されていることであるが⁽⁷⁾、破面近傍の繰返し塑性変形に起因する組織変化を検出することなどが必要であろうと思われる。

参考文献

- (1) たとえば、委員会報告，材料，31，244，(1982)。
- (2) 小峰，中西，小峰，材料，27，245，(1978)
- (3) Komine, A., H. Ueda, E. Nakanishi, S. Araki, and K. Taguchi, Adv. X-Ray Analysis, 22, 227 (1979)
- (4) 紅，児玉，三沢，材料，31，221 (1982)
- (5) 田中，畑中，材料，31，215 (1982)
- (6) K. Ogura, ほか，Engng. Fract. Mech. 9，471 (1977)
- (7) 吉岡，寺沢，泉山，第14回材料強度に関するシンポジウム前刷集，53 (1977)