

微小格子法による鉄-ステンレス系層状金属複合板中の き裂開口挙動の観察

立命館大学理工学部

田中 道七

立命館大学大学院

○福地 雄介

1. 緒言 著者らはこれまでに、弾性定数がほぼ等しく熱膨張係数と機械的強度のみが異なる低炭素鋼とステンレス鋼からなる層状金属複合板の異種金属界面に垂直に進展する疲労き裂の進展挙動とき裂開口挙動を調べ、それらにおよぼす初期残留応力と降伏強度差の影響について検討を行ってきた。本報ではこの複合板中のき裂開口挙動をより詳細に調べるとともにそれらにおよぼす初期残留応力の影響を明らかにすることを目的として、微小格子法によりき裂開口挙動の直接観察を行った。

2. 供試材料と実験方法 本実験に使用した試験片は、アルミキルド鋼CH10A(以下SAと略記)とフェライト系ステンレス鋼SUS405(SUSF)からなる2層複合板と、0.07% Cリムド鋼(SR)とオーステナイト系ステンレス鋼SUS316(SUSA)からなる2層複合板およびそれぞれの単独材である。素材の降伏応力 σ_y は228(SA), 310(SUSF), 235(SR), 279(SUSA)MPaであり、またSUSF材の線膨張係数 α の値はSA材に比べて小さいが、SUSA材の α はSR材よりも大きい。複合板試験片は前報と同様拡散接合法により作製したものであり、その形状寸法を図1に示す。なお、単独材についても図1と同じ形状寸法の試験片を用いた。疲労試験は電気油圧サーボ疲労試験機を使用し、繰返し速度30Hzで片振り引張り($R \approx 0$)の荷重一定条件で行った。

き裂開口挙動の観察には試験片表面に張付けた格子の変形を直接測定する微小格子法を用いた。図2は疲労き裂先端近傍の格子写真の例である。本実験

に用いた格子はHe-Cdレーザ光の干渉縞を用いた回折格子にアルミニウム薄膜を蒸着することにより試験片表面に転写したもので、約4 μm 程度の凹凸状になっており、格子間隔は10 μm である。繰返し荷重により所定のき裂長さまでき裂を進展させた後、手動により荷重を負荷して連続的に格子を撮影し、そのネガフィルムを拡大投影器を

用いて図3に示すき裂先端後方の負荷方向の3格子間(30 μm)をゲージ長として変位置 δ を順次測定した。図4は本実験で得られた応力 σ と変位 δ の関係および応力 σ とコンプライアンス $d\delta/d\sigma$ の関係を模式的に示したものである。Elberの開口点の定義に従えば、

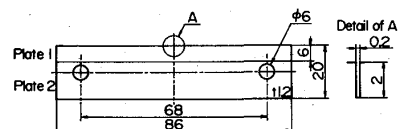


図1 試験片の形状寸法

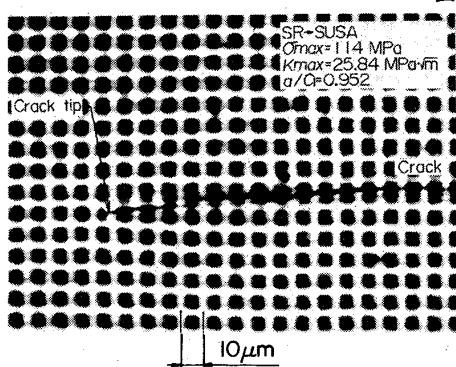


図2 き裂先端近傍の格子写真

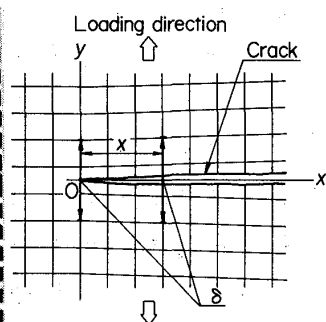


図3 測定箇所

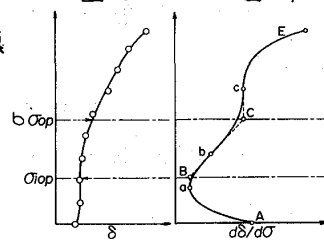


図4 き裂開口点

開口点はコンプライアンスが変化する遷移点と考えられるので、本実験では近似的に図4のB点とC点をそれぞれき裂開口開始点 σ_{op} および σ_{op} と定義する。なお、き裂開口点 σ_{op} は試験片表面に張付けたひずみゲージによる除荷弾性コンプライアンス法によっても同時に測定している。

3. 実験結果および考察 図5は最大負荷時におけるき裂先端後方の各点におけるき裂の開口量 δ_{max} を示したもので、この δ_{max} はCODとき裂面近傍の塑性変形を含んでいる。図中の $\rightarrow$ 印は界面の位置を示しており、またこの時のき裂長さ a は図1におけるPlate1の板幅 C_1 で無次元して示している。図(a)は図(b)に比べて K 値がかなり高いが、 δ_{max} は逆に小さい。

また、いずれの場合もあまり明瞭ではないが、界面で開口曲線の折れ曲りが観察される。図6はき裂開口点を調べるために求めたき裂先端後方の各点における負荷過程の応力と変位の関係を示したもので、縦軸には最大応力 σ_{max} で無次元化した負荷応力 σ/σ_{max} をとっている。いずれの場合もき裂先端後方にいくほど応力-変位曲線のコンプライアンスの遷移点が明瞭となるが、変位量が図(a)に比べて大きい図(b)の場合には、き裂の開口にともなうき裂先端での塑性変形の影響を受けて遷移点は不明瞭なものとなる。次にこれらの曲線から前述の方法により定義したき裂開口点 σ_{op} およびき裂開口開始点 σ_{iop} を求めたものが各図中の $\rightarrow$ 印および $\leftarrow$ 印であり、また一点鎖線は除荷弾性コンプライアンス法により求めたき裂開口点である。図7は以上のようにして得られたき裂進展にともなうき裂先端後方の各点のき裂開口挙動を示したもので、縦軸には最大応力 σ_{max} で無次元化したき裂開口点 σ_{op}/σ_{max} およびき裂開口開始点 $\sigma_{iop}/\sigma_{max}$ をとっている。まず、図(a)のSR材からSUSA材にき裂が進展する場合、き裂がSR材中にある間の開口点は σ_{op} および σ_{iop} ともほとんど変化せずき裂先端から後方までほぼ一定で、き裂開口点 σ_{op} の値はコンプライアンス法の開口点と良く一致している。このことはコンプライアンス法がかなり良くき裂先端の開口挙動を反映することを示唆している。しかし、界

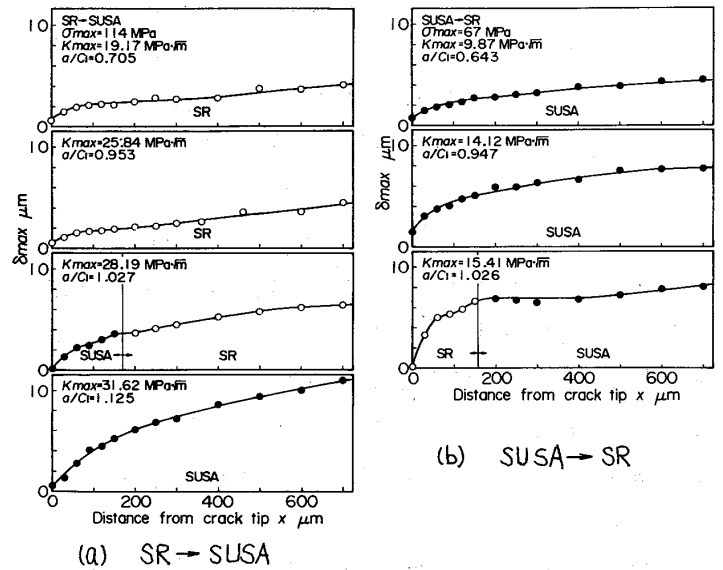


図5 き裂開口量の変化

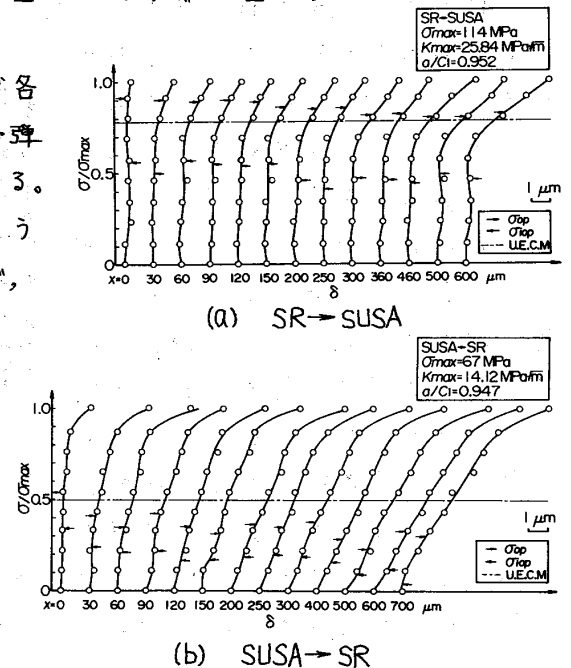


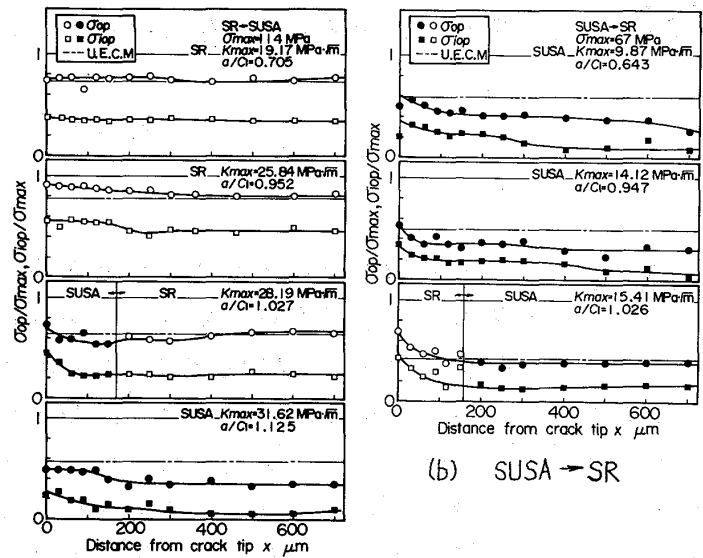
図6 応力と変位の関係

面通過後、SUSA材中の開口点はき裂先端ほど高くなっている。これに対して図(b)のSUSA材からSR材にき裂が進展する場合、SUSA材中の開口点はき裂先端ほど高くなっており、この場合のコンプライアンス法による開口点はき裂先端近傍の σ_p と対応している。

さて、以上のようにして得られたき裂開口点およびき裂開口量は、材料および測定時の K 値が異なるためその変化の傾向を直接比較することは困難である。そこで、ここでは図は省略するがき裂開口点 σ_p およびき裂開口量 δ_{max} と最大応力拡大係数 K_{max} との関係を求めて、任意の K 値におけるき裂開口点およびき裂開口量を読みとり、同じ K 値において複合板と単独材の σ_p と δ_{max} を比較することとした。図8はき裂進展にともなうき裂開口点とき裂開口量の変化を示したもので、縦軸には複合板と同じ K 値における単独材の $(\sigma_p)_0$ および $(\delta_{max})_0$ で無次元化した複合板の $\sigma_p/(\sigma_p)_0$ と $\delta_{max}/(\delta_{max})_0$ をとっている。まず、初期残留応力 σ_{ro} について圧縮から引張りの残留応力場へき裂が進展する図(a)の場合、界面より手前の $\sigma_{ro} < 0$ の領域中の σ_p は単独材の値よりもかなり大きく、特にき裂先端後方ほどその傾向が顕著である。また、 δ_{max} は逆に単独材より

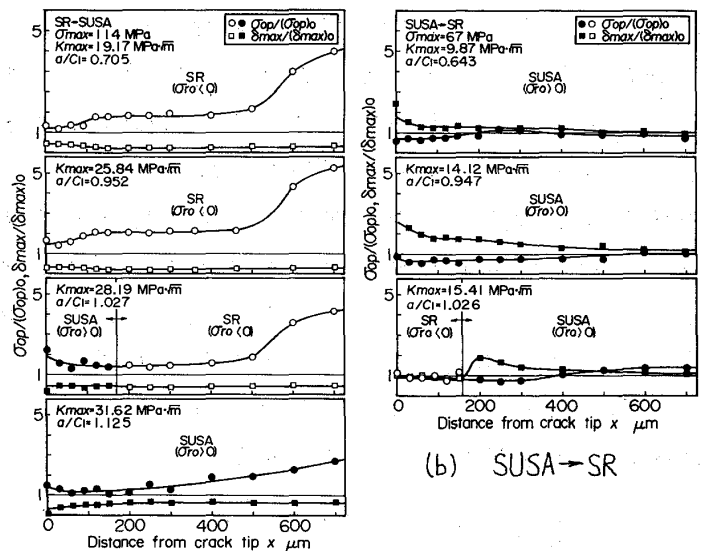
小さくなっている。しかし、界面通過後、き裂先端近傍の σ_p は単独材の場合に近づいている。これに対して、 σ_{ro} について引張りから圧縮の残留応力場へき裂が進展する図(b)の場合、界面より手前の $\sigma_{ro} > 0$ の領域での σ_p および δ_{max} は初期に単独材の場合に近いが、き裂が界面に近づくにつれて σ_p は単独材よりも小さく、き裂先端に近いほどより小さくなっている。なお、 δ_{max} はこれと逆の傾向を示している。界面通過後、SR材部分の σ_p と δ_{max} は単独材の場合と等しいが、SUSA材部分の界面近傍で δ_{max} が単独材の場合よりも大きくなっている。

4. 結言 複合板中のき裂開口挙動は、微小格子法により十分な精度で測定することができた。またその挙動は初期残留応力により定性的に説明できる。(参考文献) 省略



(a) SR → SUSA

図7 き裂開口挙動



(a) SR → SUSA

図8 き裂開口点とき裂開口量の変化