

論文の要旨

題目：油圧ショベル構造物を模擬した荷重伝達型片側すみ肉溶接継手における

疲労き裂進展挙動と寿命推定に関する基礎的研究

(Fundamental study on the fatigue crack propagation behavior and lifetime estimation

with one-sided welding of the fillet joint for load carrying type of excavator structures.)

阿部 孝正

本研究は油圧ショベルの構造物の中でも作業機部分(アタッチメント)の溶接継手を調査の対象とし、中でも片側すみ肉溶接継手を研究対象としている。以下の要旨では、論文構成に従って第1章から5章をそれぞれ要約する。

第1章では本研究の背景と目的を述べた。一般的にすみ肉溶接継手は施工性や経済性に優れる継手であるが、溶接未溶着部が残り、疲労き裂進展の起点となる場合がある継手であるため、両側すみ肉溶接や開先加工を施工して用いることが多い。しかしながら、箱型構造を有するアタッチメントの場合は、全部位に両側すみ肉溶接を施工することは難しいため片側すみ肉溶接を使用せざるを得ない。さらに、開先加工を施工した場合でも高品質な完全溶け込みを確保することは難しく、未溶着部を完全に無くすことはできない。本継手を有する構造物の強度評価に関する設計指針や規格はいくつかあり、代表的なものとして社団法人日本鋼構造協会が制定した鋼構造物の疲労設計指針・同解説、日本溶接協会規格、国際溶接協会による疲労設計指針(IIW-1823-07(2008))があり、溶接継手の強度評価方法として以下の三つ、(1)公称応力を用いた方法、(2)ホットスポット応力を用いた方法、(3)疲労き裂進展解析を用いた方法がそれぞれ提案されている。工学的にはすみ肉溶接継手の形状や応力状態が複雑であることから、のど断面の公称応力を用いて評価することは難しく、破壊力学の考え方つまり応力拡大係数 ΔK を算出し、Paris の式を用いてき裂進展寿命を算出する方法が広く用いられている。しかし、既存の評価の多くは、未溶着部の疲労強度評価および寿命予測の際に、未溶着部を単一の初期き裂と見なして評価しており、疲労き

裂の進展挙動を考慮した評価には重点が置かれていない。一方で、荷重伝達型片側すみ肉溶接継手の疲労き裂進展挙動についても、既存の調査の多くは十字型すみ肉溶接継手に関するものは多いものの片側すみ肉溶接に関する調査は僅少であり、さらに荷重伝達型に関する調査は見られない。そこで、本研究では、溶接継手内部のき裂進展挙動を調査し、現象に基づいた寿命予測を行うことができれば、評価精度の向上が図れると考えた。そこで、荷重伝達型片側すみ肉溶接継手におけるき裂進展挙動の把握、および疲労強度評価に関する基礎的な検討を行った。

第2章においては、疲労き裂進展挙動を把握する目的で、実機を模擬した疲労試験片を製作し、疲労試験とき裂の三次元化による観察を行った。その結果、試験力レベルによらず試験体幅50mm 全ての範囲で長さ0.01mm～0.3mmのき裂が認められ、推定破断寿命 $N_{f,est}$ に対し非常に早い段階でき裂が発生していることが分かった。また、推定破断寿命 $N_{f,est}$ に対し50%時点でのき裂形状においても本試験体に認められるき裂前縁は、直線形状、もしくは緩やかな半楕円形状を有しておらず、一部がき裂進展方向に突出し、凸型形状が複数個重なった複雑な形状であることが分かり、未溶着部先端において異なる複数の箇所から疲労き裂が発生し、それらが進展・合体を繰返し試験体の最終破壊を導くことを確認できた。

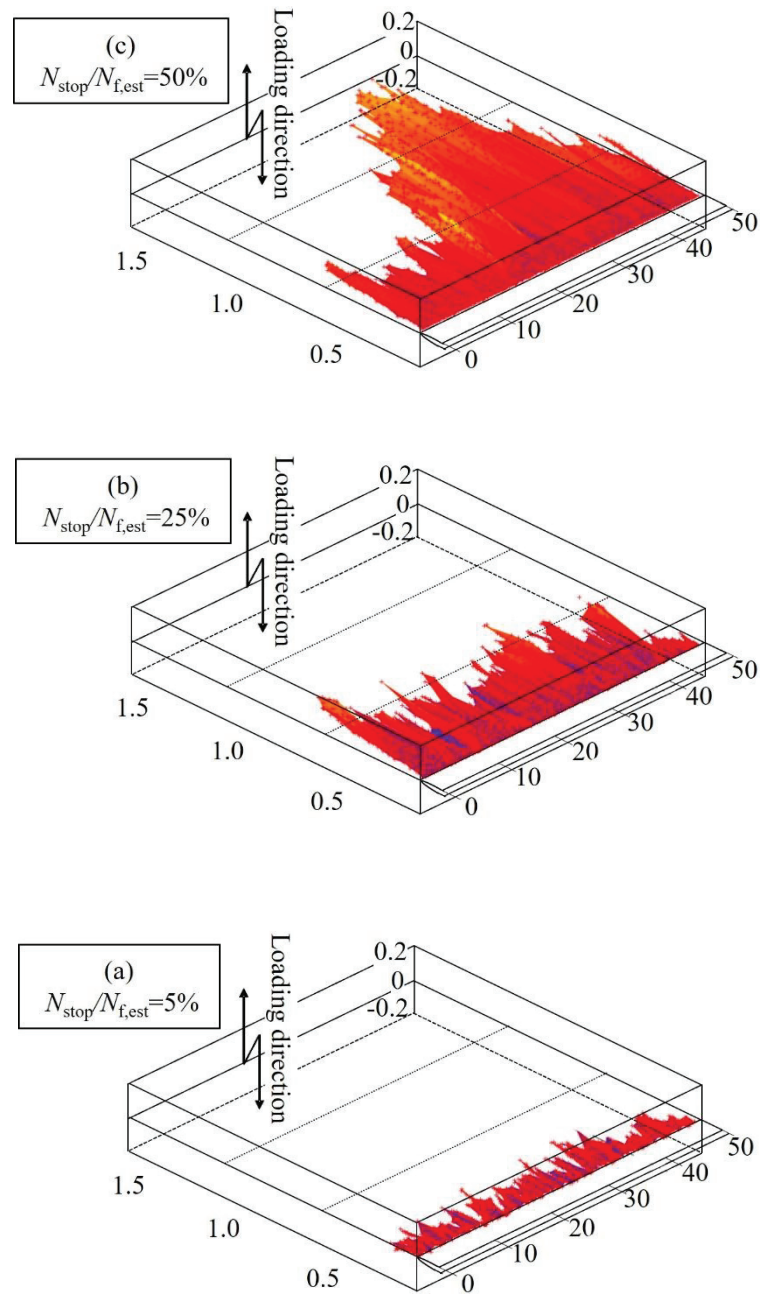
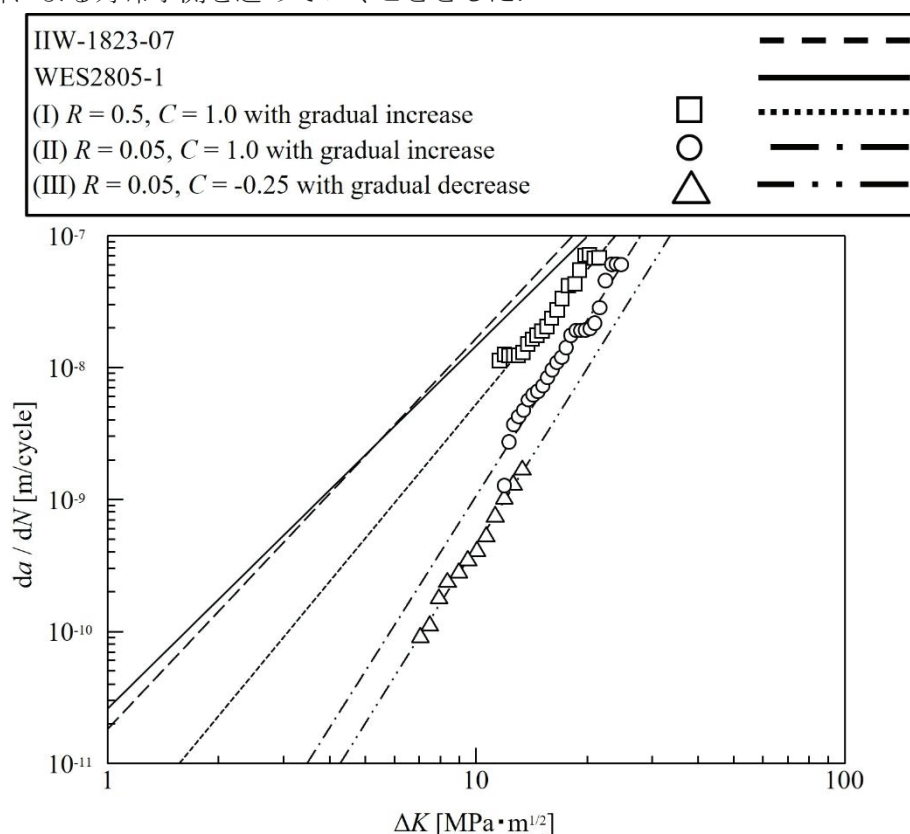


Fig. 3-dimensional observation of fatigue crack propagation at the root region ($F_a=9$ kN)

以上のことから、複数起点の疲労き裂進展挙動を考慮した寿命予測をすることで評価精度の向上が可能と考えられるが、その場合においても、初期き裂の大きさ、個数や配置などの初期条件と寿命の関係はわかっていない。そこで、菊池らが提案している S-version FEM(重合メッシュ法)を用いて解析評価を行ったが、疲労き裂進展解析の妥当性を検証するためには、一般規格で提案している材料のき裂進展特性ではなく、疲労試験体と同一材によるき裂進展特性による疲労き裂進展解析を行う必要がある。そのため、FEM 解析に用いるき裂進展特性を夏目や城野および菅田らが実施した除荷弾性コンプライアンス法を用いて本研究で用いた溶接材のき裂進展速度の計測方法と計測結果を第3章にまとめた。一定荷重下における応力比を変化させた荷重漸増および漸減試験を実施し、得られたき裂進展特性を国内外の規格で提唱している数値と比較した結果、工学的に用いられている各種のき裂進展特性を用いて寿命予測をすると本研究においては過度に安全側の予測となる可能性が高く、さらに本試験片のき裂進展速度とは差異が大きいことがわかった。そこで、本研究では得られた3つのき裂進展速度のうち最も安全側の予測となる試験値を用いて解析による寿命予測を進めていくこととした。

Fig. Relationship between ΔK and da/dN

第4章では S-version FEM (重合メッシュ法) 解析の結果を述べた。図は重合メッシュ法を用いて計算した $F_a = 9\text{kN}$ における疲労き裂進展挙動の結果を示す。(a)Type1 に示すように、疲労き裂は溶接深さ方向ではなく幅方向に優先的に進展している。これは、 $\theta = 0^\circ$ および $\theta = 180^\circ$ での応力拡大係数範囲は $\theta = 90^\circ$ での応力拡大係数範囲よりも大きいためである。その結果、き裂は溶接幅方向に優先的に進展したと考える。一方、(e) Type1 all crack ($a = 0.3, 2c = 50\text{mm}$) の進展については $\theta = 0^\circ$ および $\theta = 180^\circ$ での応力拡大係数範囲と $\theta = 90^\circ$ の応力拡大係数範囲はほとんど同じ値であり、き裂は溶接幅および深さ方向にともに進展したと考える。(b), (c), (d) を見ると初期き裂が複数ある場合は、き裂がそれぞれ進展し、互いに合体し、これらのき裂が幅方向に進展していることがわかる。これらの結果から、重合メッシュ法を用いて疲労試験で確認された複数き裂の疲労き裂進展解析が再現できることが確認できた。最後に疲労試験と解析結果の寿命比較結果を示す。各荷重振幅レベルにおける解析の疲労寿命と試験結果を比較すると、単一の初期き裂 (e) Type1 all crack ($a = 0.3, 2c = 50\text{mm}$) では疲労試験結果に比べ疲労寿命がほぼ 2~3 倍短い結果であった。これは規格に基づき工学的に一般的に行われている解析、つまり未溶着部をすべてき裂とみなす考え方に基づいた解析であるが、この考え方では疲労寿命評価が極端に短く評価されることを意味する。一方、(a) Type1 の単一初期き裂の解析結果と疲労試験結果を比較すると、試験結果に比べ疲労寿命が約 1.5~2 倍大きい結果である。これは本研究で想定した条件下で単一き裂解析に基づいて寿命を評価した場合、危険側の評価になることを意味する。複数起点の解析結果に基づくと、Type2-16.6 および Type3 の解析結果は単一のき裂進展解析よりも疲労試験結果に近い結果となっている。したがって、実機のように非常に溶接線が長い場合の疲労寿命評価では複数のき裂発生と進展および合体を考慮する必要があることが確認できた。

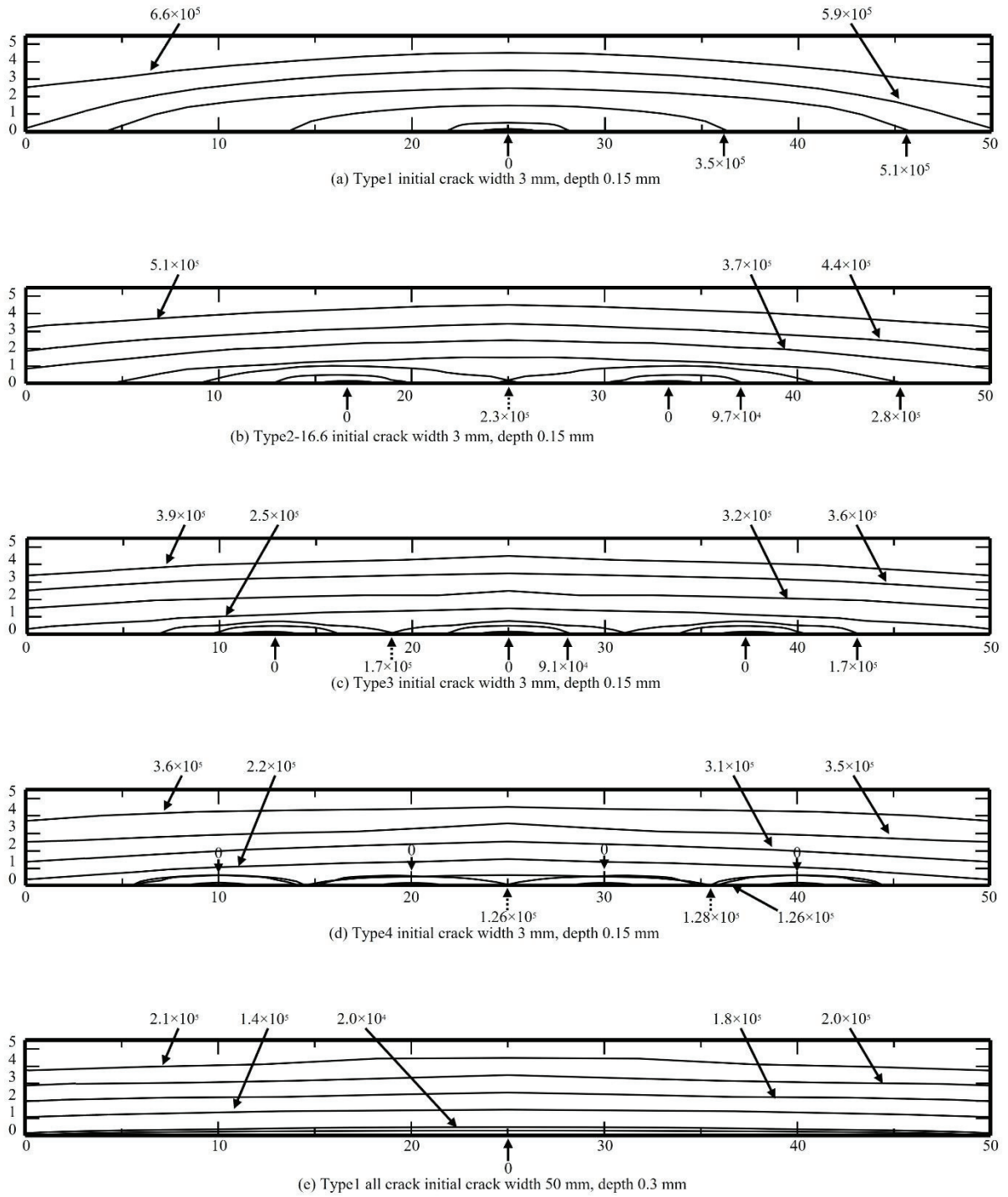


Fig. 3-dimensional observation of fatigue crack propagation at the root region ($F_a=9$ kN)

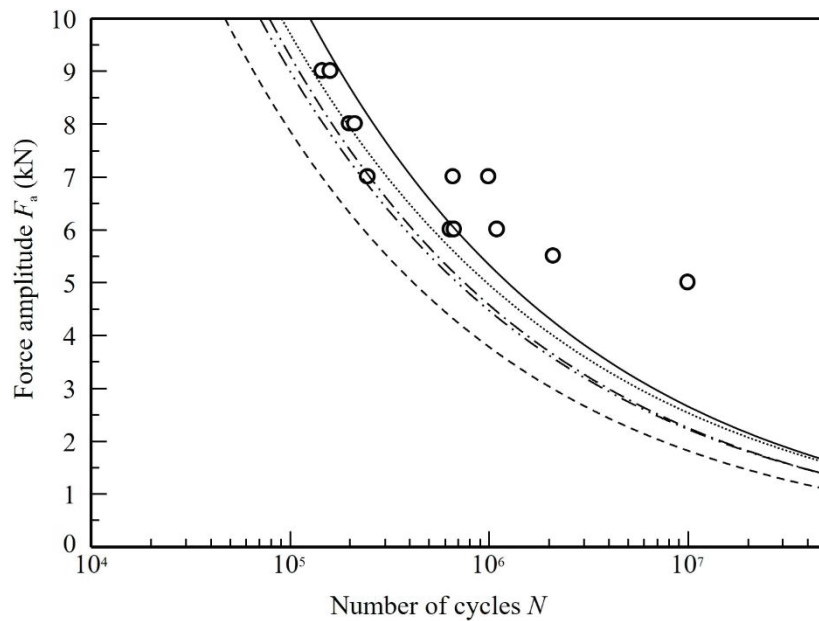
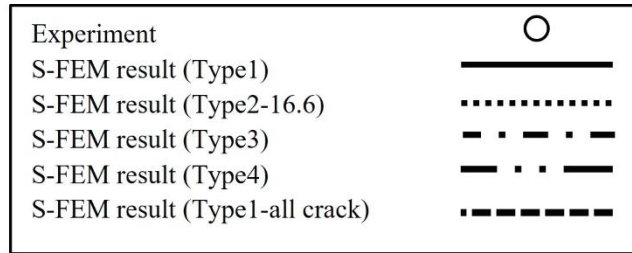


Fig. Fatigue lifetime estimation using the S-version FEM compared with MX200 test results
(The number of cracks comparison)

本研究では荷重伝達型片側すみ肉溶接継手の寿命予測精度を向上する目的で、実機と同じ疲労試験片を製作し疲労試験を行った。き裂の三次元化およびビーチマーク法を用いて未溶着部内部のき裂進展挙動を調査した。また、S-version FEMの疲労き裂進展解析に必要なき裂進展特性はCT試験片を用いた除荷弾性コンプライアンス法により取得して、疲労き裂進展解析を実施した。本研究により得られた結論を以下に示す。

- (1) 疲労き裂の三次元的観察より，疲労き裂は全寿命の初期に発生しており，全寿命に対してき裂進展寿命が支配的であることが明らかとなった．
- (2) 本試験体には複数のき裂発生起点が認められ，さらに繰返し数の増加に伴い発生した疲労き裂が合体しながら進展する疲労き裂進展挙動であることが明らかとなった．
- (3) 本試験体における溶接材について，除荷弾性コンプライアンス法によってき裂進展特性を取得した結果，IIW-1823-07，日本溶接協会規格や鋼構造物の疲労設計指針の値よりも進展速度は遅い結果であった．規格値は最安全側であるものの，最適設計の際にはそれぞれのき裂進展特性を用いて解析評価を実施すべきである．
- (4) S-version FEM を用いた解析モデルと境界条件の設定により，本試験体の複数き裂の進展挙動を再現した解析を再現することができた．
- (5) S-version FEM 解析結果の比較より，複数の初期き裂におけるき裂進展および合体の挙動が疲労寿命に大きく影響することが明らかとなった．特に，Type2-16.6 と Type3 の解析結果は単一き裂の解析結果よりも疲労試験結果に近い結果であった．また，溶接未溶着部を初期き裂かつ全幅き裂と見なした場合の疲労寿命は過度に安全側評価となっていることが確認できた．