

斜め連続未溶着部をもつ突合せ溶接継手の 疲労挙動

金 仁泰¹・新海英昌²・山田健太郎³・近藤明雅⁴

¹正会員 工博 名古屋大学講師 理工科学総合研究センター(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail:itkim@civil.nagoya-u.ac.jp

²正会員 工修 東海旅客鉄道株式会社(〒450-6101 名古屋市中村区名駅一丁目, 前名古屋大学大学院)

³正会員 Ph.D. 名古屋大学大学院教授 環境学研究科都市環境学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁴正会員 工博 名城大学教授 理工学部環境創造学科(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口)

本研究では、連続未溶着部をもつ突合せ溶接継手の疲労試験を行い、直応力とせん断応力の組合せ応力下における疲労き裂の発生・進展挙動および疲労寿命の違いを検討した。未溶着部は、単軸の繰り返し応力に対して垂直な場合($\alpha=0^\circ$)に加え、 $\alpha=15^\circ$ 、 30° 、 45° の4種類であり、目標ギャップサイズは0mm、1.5mmの2種類とした。疲労き裂の発生・進展挙動および疲労寿命は、斜めの角度 α および応力範囲により異なった。疲労き裂は未溶着先端部から分岐し作用応力の垂直方向に、あるいはその延長面上に発生・進展する2種類であった。のど断面応力で整理した疲労寿命は、 $\alpha=0^\circ$ 、 15° 、 30° ではほぼ同程度であり、 45° は長寿命側になった。

Key Words : fatigue test, combined stresses, inclined angle, butt welded joint, lack-of-penetration

1. はじめに

鋼橋が確認されている疲労損傷は通常疲労試験で用いられる一軸応力ではなく、多軸応力および組合せ応力下でも発生している¹⁾。疲労設計指針^{2), 3)}で示されている継手の疲労強度等級は、単一方向の荷重が作用する場合を想定し規定されていることから、組合せ応力下の溶接継手には当てはまらない場合がある。例えば、直応力とせん断応力が同時に作用する場合がその例としてあげられる。このような場合、最大主応力を溶接線の垂直方向に作用させることで疲労寿命評価を行う場合が多く、せん断応力と直応力の割合がどの程度になったときに組合せ応力(例えば、最大主応力)で評価すべきかに対しては、一概に決められていない²⁾。これは、溶接線に対して応力がある角度を持って作用する場合の疲労挙動が必ずしも明確にされてこなかったことに起因すると考えられる。

筆者らは、これまで作用応力に斜めに溶接された面外ガセットおよびリブ十字すみ肉溶接止端から発生する疲労き裂に対してこの斜めの影響を評価してきた^{4), 5)}。さらに、作用応力に対して斜めの円形の未溶着部を持つ突合せ溶接継手についても疲労試験を行った⁶⁾。そこで、本研究では、連続未溶着部をもつ突合せ溶接継手の疲労試験を行った。未溶着部は、作用応力に対して垂直な場合($\alpha=0^\circ$)に加え、 $\alpha=15^\circ$ 、 30° 、 45° とした。さらに、それぞれに対して未溶着部の目標ルートギャップサイズを

0mm、1.5mmとした。このような疲労試験から、直応力とせん断応力の割合、つまり最大主応力の方向による疲労き裂の発生・進展挙動と疲労寿命の違いを実験的に検討する。

2. 疲労試験体および疲労試験

(1) 疲労試験体

供試鋼材は、板厚16mmの普通構造用鋼材 JIS SM490YA で、その化学成分と機械的性質を表-1に示す。試験体の形状、および寸法を図-1に示す。疲労試験体は、2枚の鋼板を部分溶け込み溶接することで未溶着部が板幅方向を貫通する形になるように製作した。未溶着部の角度は、通常の横突合せ溶接継手($\alpha=0^\circ$)に対して、 $\alpha=15^\circ$ 、 30° 、 45° の4種類(それぞれ B0、B15、B30、B45 と呼ぶ)とし、それぞれの試験体のルートギャップサイズ G は0mm、1.5mm(それぞれ G0、G1 と呼ぶ)を目標値とした。実際に測定した G の値は、試験体の両端部で、G0 で0.05mm以下、G1 では1.0~1.4mmであった。

溶接方法は、フラックス入りワイヤーを用いたCO₂自動溶接である。表-2に示す溶接条件は、予備試験体を用いて試験溶接を行い、図-1(c)に示す試験体の板厚方向の未溶着部の長さ2a(以下、未溶着部の長さと呼ぶ)を確認した上で、各試験体の未溶着部の長さが4mmとなるように決定した。しかし、疲労破面観察から得られた未溶着部の長さは、

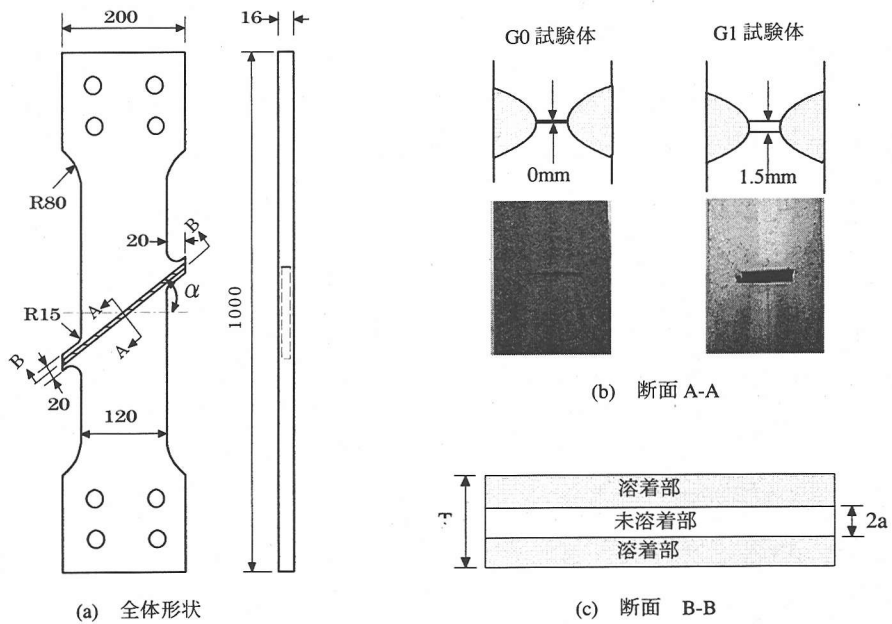


図-1 試験体の形状および寸法(単位: mm)

表-1 鋼材の化学成分(%)と機械的性質(ミルシート値)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	降伏点(MPa)	引張強度(MPa)	伸び(%)
0.17	0.36	1.46	0.013	0.05	0.01	0.02	0.02	402	539	24

表-2 溶接条件

試験体の種類	電流(A)	電圧(V)	速度(cm/min)
G0 試験体(ルートギャップ 0 mm)	320	36	35
G1 試験体(ルートギャップ 1.5 mm)	280	33	22

2.5~7.0mm と大きくばらついていた。

試験体には、両端に幅 20mm の拡幅部を設け、半径 15mm の R 加工を施すことで、試験体端の未溶着部からのき裂発生を防止した。また、内部未溶着部から疲労き裂を発生させるため、溶接余盛はグラインダーで削除した。採用した形状の試験体に対する有限要素応力解析結果を図-2 に示す。解析結果は、単位作用応力に対する突合せ溶接ルート部の作用応力方向の応力、すなわち応力集中係数 K_t で示した。解析には、未溶着部の長さを 4mm、板厚を 16mm とした試験体の 1/2 モデルに対して固体要素(最小サイズ 1.0×2.5×5.0mm)を用いた。図-2 に示すように応力分布がほぼ一定である試験体中央部の K_t は、 $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ に対してそれぞれ 1.22, 1.21, 1.18, 1.13 である。角度が大きくなるにしたがって K_t は小さくなるが、その差は比較的小さい。また、試験体の端部に近づくに従って K_t が小さくなっているため、疲労き裂は応力集中が一定になる区間(試験体の幅 120mm の中央部の幅 100mm)から発生・進展すると予想される。

(2) 疲労試験

疲労試験は、アムスラー型疲労試験機(容量 980kN)を用いて、繰返し速度 4.5Hz の一定振幅荷重で行った。また、上限荷重 372kN(最大作用応力 208MPa)を一定とした。

試験体の両面には、図-3 に示すように溶接部の中央部 80 mm に 0.04 mm 径のウレメット被覆銅線を貼付した。未溶着部から発生した疲労き裂が表面まで進展すると、これらの銅線が切断され、試験機が自動的に停止するようになっている。そこで、疲労寿命 N_f は、両面に貼付した銅線がき裂により切断されるまでの繰返し数とした。

疲労き裂の発生・進展状況は、ダイマーキングやビーチマーク試験によって追跡した。ダイマーキングは、浸透性のよい速乾性のインクを未溶着部に入れ、その時存在する疲労き裂に浸透させることによってき裂形状をマーキングする方法である。この方法によって、初期き裂の進展状況を確認した。また、ビーチマーク試験は、疲労試験の途中で上限荷重をそのままで応力範囲を 1/2 とした。ビーチマーク試験中の繰返し数は、疲労寿命 N_f には含めないこ

とにする。これらのピーチマーク試験では、き裂の大きさを想定してそのときの応力拡大係数 K から繰返し数を決めたので、試験体毎に繰返し数が異なるが、およそ1万回から5万回であった。

(3) のど断面応力

未溶着部の長さは、試験体ごとに異なり、G1 試験体の場合は G0 試験体に比べ、2 倍程度大きい。また、未溶着先端部の形状は、板厚方向の溶接溶け込み深さが一様でないため、1mm 間隔で未溶着長さを測定し、平均値を算出した。これを未溶着部の長さ $2a$ とする(図-4(c) 参照)。

未溶着部を有する溶接継手の場合、その疲労寿命は、一般に溶接部のあるのど断面応力で評価する^{7),8)}。本研究では、B0, B15, B30, B45 ののど断面応力を図-4 に示すように求めた。作用応力範囲 $\Delta\sigma_p$ から、 α だけ傾いた断面 A に垂直な応力範囲 $\Delta\sigma_{pn}$ とせん断応力範囲 $\Delta\tau_{pn}$ を式(1) で求める。次に、断面 A の面積から未溶着部の断面積を引いたのど断面積 B を求め、式(2) によりそれぞれののど断面応力 $\Delta\sigma_a$, $\Delta\sigma_{an}$, $\Delta\tau_{an}$ を求めた^{7),8)}。本研究では、作用応力範囲 $\Delta\sigma_p$ から得られたのど断面応力範囲 $\Delta\sigma_a$, $\Delta\sigma_{an}$, $\Delta\tau_{an}$ をそれぞれののど断面応力範囲(あるいは最大主応力範囲), 垂直応力範囲, せん断応力範囲と呼ぶ。

$$\Delta\sigma_{pn} = \Delta\sigma_p \cdot \cos^2 \alpha \quad (1)$$

$$\Delta\tau_{pn} = \Delta\sigma_p \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

$$\Delta\sigma_a = \Delta\sigma_p \cdot T / (T - 2a) \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_{an} = \Delta\sigma_{pn} \cdot T / (T - 2a)$$

$$\Delta\tau_{an} = \Delta\tau_{pn} \cdot T / (T - 2a)$$

3. 疲労き裂の発生と進展

(1) 概要

疲労き裂の発生・進展挙動は、斜めの角度とのど断面応力範囲により異なり、タイプIとタイプIIに分類できる。それぞれの疲労破面および模式図を図-5と6に示す。タイプIは、図-5(a)と6(a)に示すように疲労き裂が作用応力に対して α 傾いた未溶着先端部に沿ってほぼ同時に発生し、一つの扁平なき裂として未溶着部の延長面上に進展する場合である。これに対して、タイプIIは、図-5(b)~5(d)と6(b)に示すように疲労き裂が未溶着先端部の複数点から発生し、未溶着先端部と交差する面、すなわち作用応力にはほぼ垂直方向にそれぞれ独立して進展する場合である⁸⁾⁻¹¹⁾。タイプIIのき裂は、進展するに当たって近隣のき裂と重なり合い、段差を生じて一つのき裂となる場合と、重なり合いながら独立したき裂として進展する場合がある。

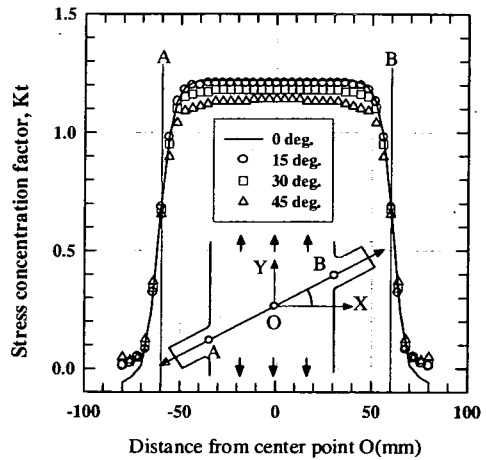


図-2 未溶着先端近傍の応力分布

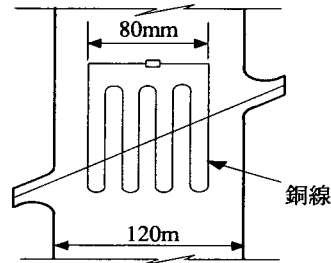
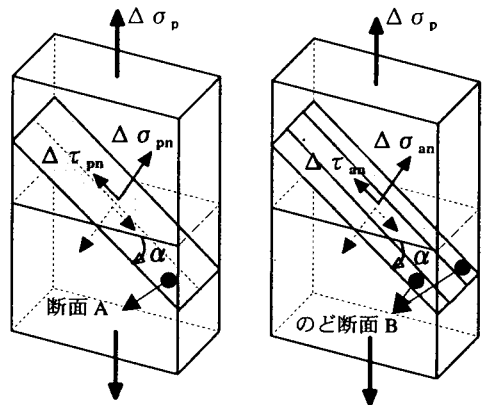
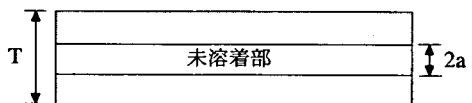


図-3 試験体両面の銅線配置

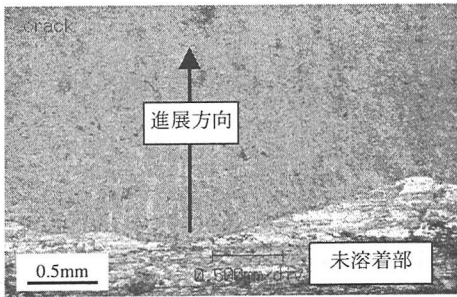


(a) 未溶着部がない場合 (b) 未溶着部がある場合

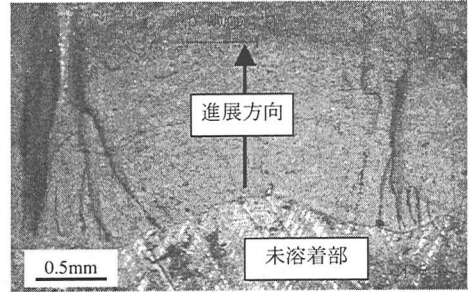


(c) のど断面 B

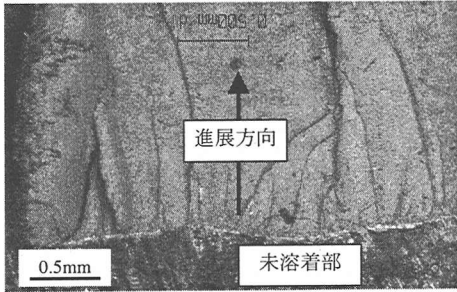
図-4 のど断面応力の定義



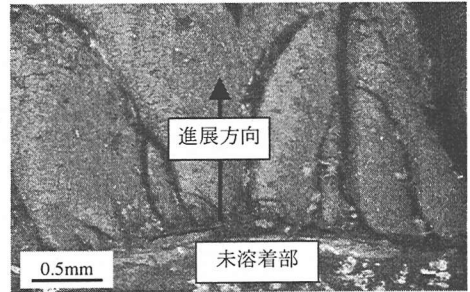
(a) B0G0-06



(b) B15G0-04

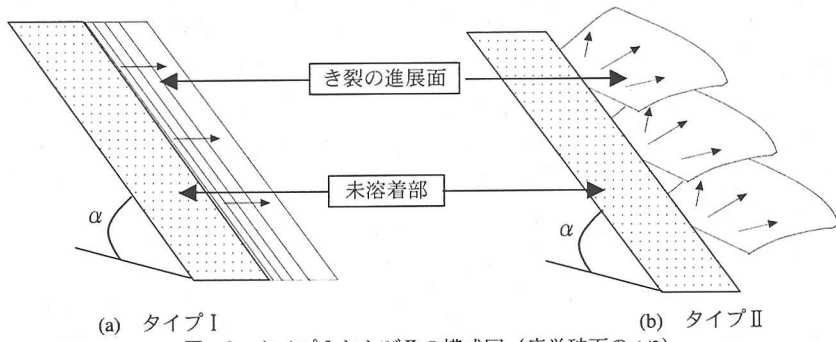


(c) B30G0-04



(d) B45G0-02

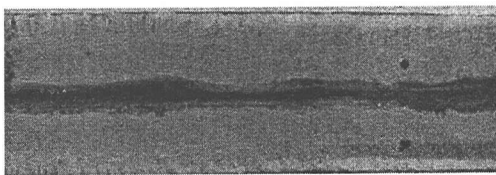
図-5 未溶着部近傍の疲労破面



(a) タイプ I

(b) タイプ II

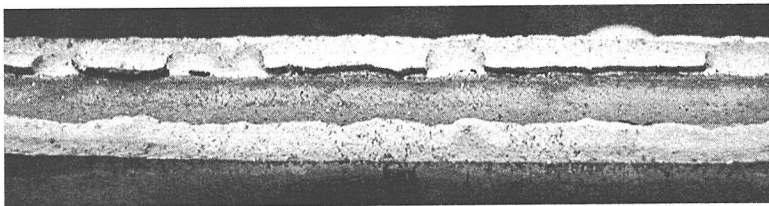
図-6 タイプ I および II の模式図 (疲労破面の 1/2)



(a) B0G0-06



(b) B0G0-04



(c) B0G1-04

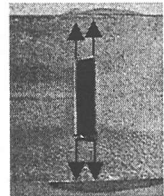


図-7 B0 試験体の疲労破面 (タイプ I)

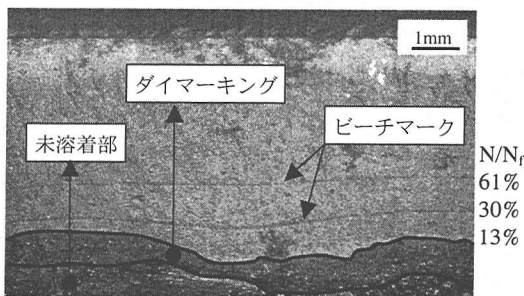
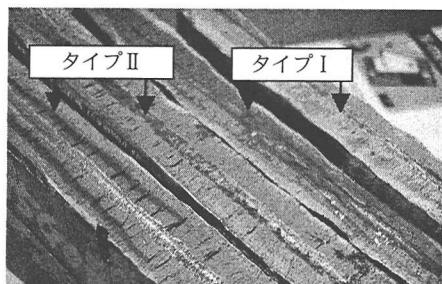
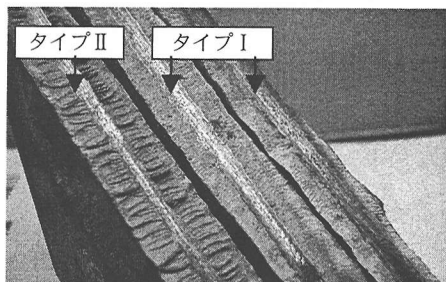


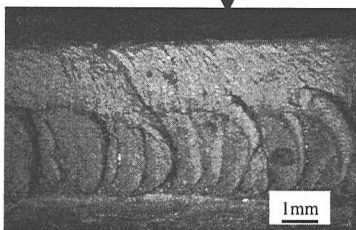
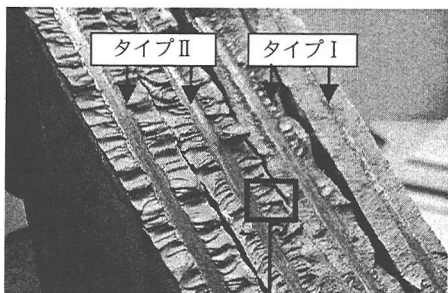
図-8 疲労き裂の発生と進展形状(B0G1-02)



(a) B15G0



(b) B30G0



(c) B45G0

図-9 疲労き裂の発生と進展状況

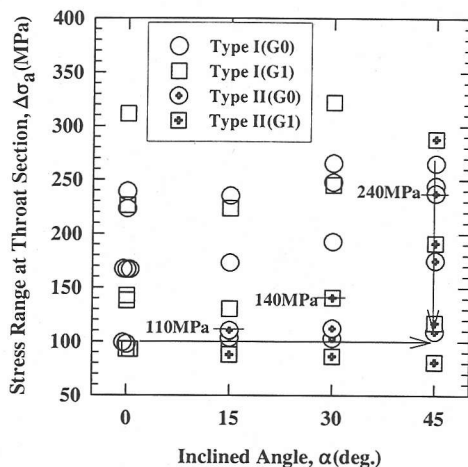


図-10 応力範囲と斜めの角度による影響

(2) B0 試験体 ($\alpha=0^\circ$)

未溶着部が作用応力に垂直であるため、疲労き裂は図-7(a)に示すように未溶着先端部よりほぼ同時に発生、作用応力と垂直な面に扁平なき裂として進展し、タイプIの進展挙動を示す。このうち、図-7(b)に示す B0G0-04 の場合には、き裂が未溶着先端部の一部分より発生し半楕円形き裂として進展した。また、B0G1 の場合にも、図-7(c)に示すような未溶着先端部のコーナーにエッジがある場合に、疲労き裂は未溶着先端部の4箇所から発生した。このき裂は、独立して板幅と板厚方向に進展する半楕円形のき裂を形成し、進展するに従って合体し、一つのき裂として板厚を貫通した。

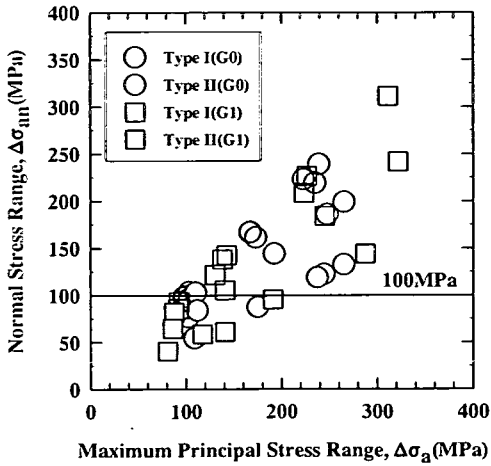
図-8には、疲労破面のダイマーカーとビーチマーカーの例を示すが、未溶着先端部よりほぼ同時にき裂が発生していることがわかる。また、ダイマーカーより、疲労き裂の発生寿命は疲労寿命 N_f の13%以下で、き裂の進展寿命が疲労寿命 N_f の約9割以上を占めているといえる。

(3) B15, B30, B45 試験体 ($\alpha=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)

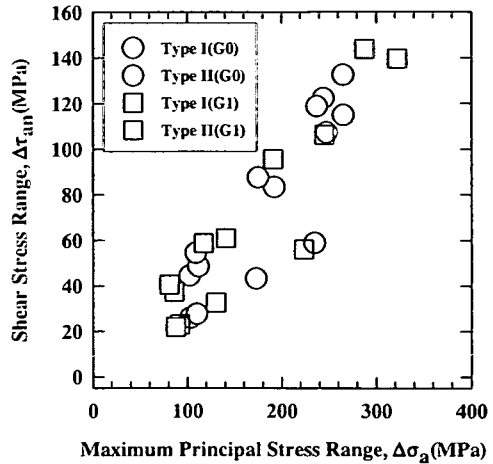
B15, B30, B45 の場合には、タイプIとタイプIIが混在している。つまり、未溶着部の傾き α が同じであっても、疲労き裂は未溶着部の延長面上を発生・進展する場合(タイプI)と未溶着部から分岐して発生・進展する場合(タイプII)がある。B15G0, B30G0 や B45G0 の疲労破面をタイプIとタイプIIに分類し、図-9に示す。

斜めの角度 α とのど断面応力範囲を用いてタイプIとタイプIIのデータを分類して図-10に示す。き裂の発生・進展は、斜めの角度が大きくなるとど断面応力範囲が小さくなるとタイプIIになる可能性が高い。また、タイプIとタイプIIの境界となるのど断面応力範囲は、B15, B30, B45 に対して、それぞれ110MPa, 140MPa, 240MPaであり、徐々に大きくなるのがわかる。

図-11(a)には、最大主応力範囲 $\Delta\sigma_a$ と垂直応力

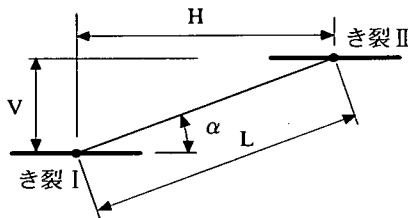


(a) 垂直応力とのど応力で整理した場合

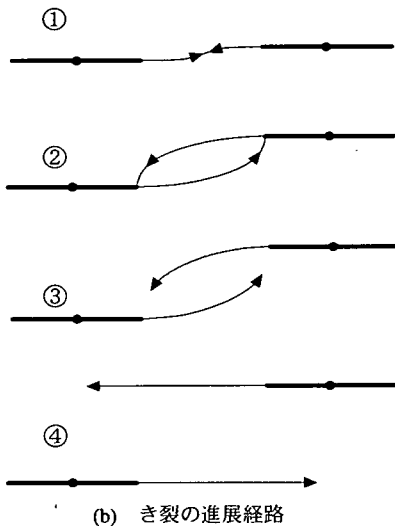


(b) せん断応力とのど断面応力で整理した場合

図-11 応力範囲による疲労き裂発生・進展挙動の違い



(a) き裂の間隔



(b) き裂の進展経路

図-12 疲労き裂の進展状況

範囲 $\Delta\sigma_{an}$ で、図-11 (b) に最大主応力範囲 $\Delta\sigma_a$ とせん断応力 $\Delta\tau_{an}$ で、疲労試験結果をタイプ I とタイプ II と分類して示す。タイプ I とタイプ II は、図-11 (b) に示すように最大主応力範囲とせん断応力範囲の大きさに依存せず分布しているが、図-

11 (a) に示すように垂直応力範囲が約 100MPa 以下であればタイプ II となることから、直応力とせん断応力が同時に作用する場合、疲労き裂の発生・進展タイプは垂直応力範囲の大きさに依存すると思われる。

(4) 斜めの角度による疲労破面の違い

図-9 に示すようにタイプ II の疲労破面は、斜めの角度により異なる。これに対して、き裂の相互干渉を用いて検討する。図-12 (a) に示すように、異なる線上にある 2 つの貫通き裂は、き裂の進展にともない近隣のき裂と重なりはじめると相互干渉が現れる。この場合、き裂の間隔(応力方向 V とその垂直方向 H)、き裂の寸法などにより図-12 (b) の①、②、③、④のいずれかのように進展する^{12),13)}。

B15, B30, B45 の疲労破面から、角度が大きくなると H は小さく、 V は大きくなる傾向が見られる。ところが、同一角度における疲労き裂発生の間隔 H と V は、同一ではなく異なるため、定量化することが困難である。そこで、疲労き裂が、未溶着先端部に沿って同一間隔の H で発生すると仮定すると、角度が 15° 、 30° 、 45° と大きくなるに従って、 V が大きくなる。 $\alpha=15^\circ$ の場合は、 V が小さくほぼ同一線上にあるため、図-12 (b) に示す①、あるいは②のように初期き裂とほぼ同一面上で合体する。 $\alpha=45^\circ$ の場合には、 V が大きいため、③あるいは④のように進展する。その後、き裂進展はほぼ停留するため、合体しない。これに対して、 $\alpha=30^\circ$ の V は、 $\alpha=15^\circ$ と 45° の間であり、②のように合体する場合と③のようにき裂進展が停留し、合体しない場合がある。

以上の角度によるき裂進展の違いは、図-9 に示す B15, B30, B45 の進展状況と似ている部分が多いため、 $\alpha=15^\circ$ 、 30° 、 45° の疲労破面の違いは、疲労き裂の発生間隔の違い、およびき裂の相互干渉によるものと考えられる。また、②、③、④のように進展し合体、あるいは停留したき裂が破断時つ

ながることで疲労破面に階段状の段差が形成されたと思われる。

4. 疲労寿命

(1) B0 試験体

B0 ($\alpha=0^\circ$) の試験結果をのど断面応力で整理し、図-13 に示す。ルートギャップのサイズにより疲労試験結果を比較すると、B0G1 の疲労寿命は B0G0 に比べ若干短寿命側であることがわかる。これは、図-14 に示すように未溶着先端部はほぼ同じ形状であったが、未溶着長さが G0 より G1 が大きいことに起因すると思われる。

試験結果を JSSC⁽²⁾ の疲労強度等級により評価すると 1 つのデータを除いて JSSC-F 等級となる。しかし、これらは余盛を削除した完全溶け込み横突合せ溶接継手の JSSC-B 等級に比べ、4 等級低いものである。図-13 に示す実線は、異なるき裂形状で進展した B0G0-04 を除いた B0G0 と B0G1 から得られた平均と平均 $\pm 2s$ (s : 標準偏差) の S-N 線である。以下には、これらの S-N 線を基準とし、角度による疲労寿命の違いを検討する。

(2) B15, B30, B45 試験体

B15, B30, B45 ($\alpha=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$) の疲労試験結果を図-15 と 16 に示す。タイプ II の疲労破面を示したデータには '#' を付けてタイプ I と区別する。また、図中の 3 つの実線は B0 の平均と平均 $\pm 2s$ (s : 標準偏差) の S-N 線である。

図-15 に示すように B15 の疲労寿命は、B15G0, B15G1 とともに B0 の平均疲労寿命と同程度である。前述したように、B15 ではタイプ I とタイプ II の 2 種類のき裂進展挙動がみられたが、き裂の進展挙動の違いによる疲労寿命への影響は見られない。

B30 ($\alpha=30^\circ$) は、図-15 に示すように B0 の平均疲労寿命に比べ、同程度以上である。タイプ I のデータは、B0 とほぼ同程度の疲労寿命となり、タイプ II は B0 の平均疲労寿命に比べ、1.5 倍以上の長寿命側になる。

B45 ($\alpha=45^\circ$) では、図-16 に示すようにすべてのデータが B0 に比べ長寿命側になる。B45G0 の場合、B0 の平均疲労寿命と比べ、タイプ I は約 1.6 倍、タイプ II は 2.9~4.4 倍である。これに対して、B45G1 はすべてタイプ II の疲労き裂になり、その疲労寿命は 3.6~4.1 倍となる。

B15, B30, B45 の試験結果をタイプ I とタイプ II に分類し、き裂の発生・進展挙動による疲労寿命の違いを検討する。図-17 に示すように、タイプ I のデータは B0 の平均 $\pm 2s$ の S-N 線内に分布し、斜めの角度 α が $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ と大きくなっても、疲労寿命の違いは見られない。つまり、未溶着部の延長面上を 1 つの扁平なき裂として進展する場合は、斜めの角度によらず疲労寿命は一定であることがわかる。これに対して、タイプ II の場合には、すべてのデータが B0 の平均疲労寿命に比べ長

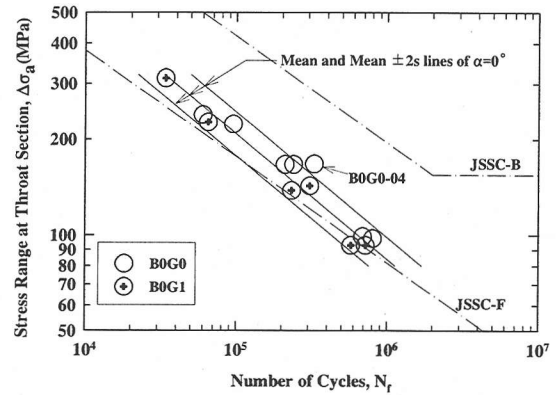
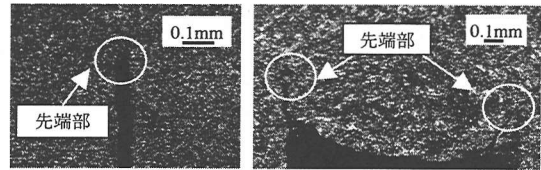


図-13 B0 の疲労試験結果 ($\alpha=0^\circ$)



(a)G0 試験体 (b)G1 試験体

図-14 未溶着先端部の形状

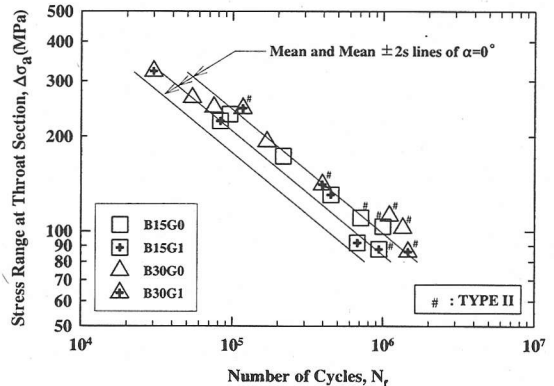


図-15 B15, B30 の疲労試験結果

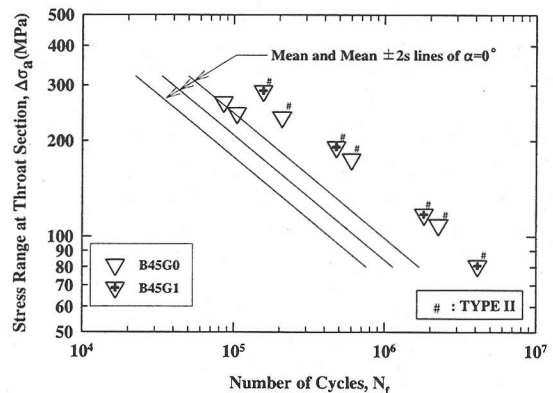


図-16 B45 の疲労試験結果

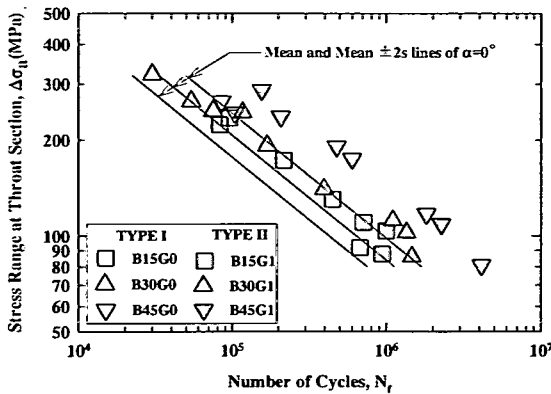


図-17 タイプIおよびタイプIIの疲労試験結果

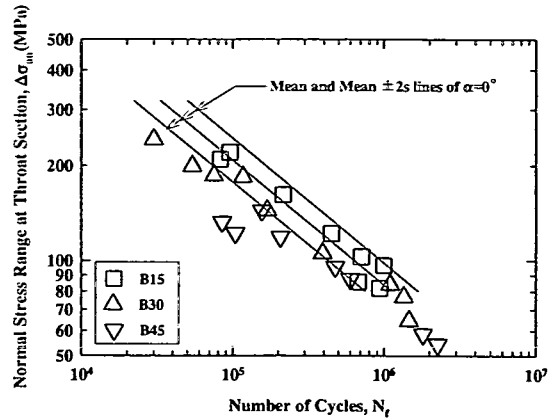


図-18 垂直応力範囲で整理した疲労試験結果

寿命側になり、角度が 15° 、 30° 、 45° と大きくなるとそれぞれの疲労寿命も長くなる。これは、前述したように疲労き裂が異なる面上を進展することで、き裂が重なり合う、あるいは相互干渉によって半楕円形のき裂として進展することで長寿命側になったものと思われる。また、き裂の進展に従ってほぼ延長面上で合体し、異なる面上を進展する割合が小さい $\alpha=15^\circ$ に比べ、 30° と 45° になるとその割合も大きくなるのがその理由であると思われる。したがって、タイプIは角度によらず $\alpha=0^\circ \sim 45^\circ$ の疲労寿命は同程度であるが、タイプIIの場合には、斜めの角度が大きくなるにしたがって長寿命になるため、角度が大きくなると疲労き裂の発生・進展挙動による疲労寿命の差も大きくなることがわかる。

(3) 疲労寿命評価方法の検討

せん断応力と垂直応力が同時に作用する場合、溶接継手の疲労寿命は最大主応力、あるいは垂直応力で評価する^{2),3)}。これらに対して、本疲労試験結果を用いて検討する。

未溶着部に対して垂直応力範囲 $\Delta\sigma_{an}$ は式(2)で計算され、未溶着部の長さ $2a$ が同一である場合の $\Delta\sigma_{an}$ は B0 に比べて B15 で 0.93、B30 で 0.75、B45 で 0.5 となる。垂直応力範囲で疲労試験結果を整理した S-N 線図を図-18 に示す。この場合、未溶着部に垂直な方向の応力範囲で疲労寿命が決まるとすれば、B15、B30、B45 のデータと B0 のデータがほぼ同一の S-N 曲線上に図示される。

B15 は、ほぼ B0 の平均 $\pm 2s$ の S-N 線内に分布しており、B0 と同程度の疲労寿命と評価できる。しかし、B30、B45 のデータは、B0 より短寿命側となる場合がある。したがって、せん断応力範囲 $\Delta\tau_{an}$ が垂直応力範囲 $\Delta\sigma_{an}$ の 0.27 以下 ($\alpha=15^\circ$ 以下) であれば、 $\Delta\tau_{an}$ を省略し垂直応力範囲 $\Delta\sigma_{an}$ のみで疲労寿命を評価することが可能である。これまで疲労設計指針では $\Delta\tau_{an} / \Delta\sigma_{an} \leq 0.15$ であれば $\Delta\sigma_{an}$ で評価できるとしている。 $\alpha=15^\circ \sim 45^\circ$ ($\Delta\tau_{an} / \Delta\sigma_{an} = 0.27 \sim 1.0$) の場合は、せん断応力を考慮した組合せ応力(たとえば、最大主応力)で疲労寿命を評価

することが必要である。

図-17 に示すように、最大主応力範囲 $\Delta\sigma_3$ で疲労試験結果を整理した場合には、前述したように $\alpha=15^\circ$ 、 30° 、 45° (それぞれ $\Delta\tau_{an} / \Delta\sigma_{an} = 0.27$ 、 0.58 、 1.0) の疲労寿命は、 $\alpha=0^\circ$ に比べ同程度以上である。したがって、 $\alpha=0^\circ \sim 45^\circ$ の疲労寿命は、 $\alpha=0^\circ$ の S-N 線図と最大主応力範囲を用いて評価することができる。ただし、 $\alpha=45^\circ$ に対しては、約 3 倍以上の安全側に評価される場合がある。

5. まとめ

本研究は、単軸の繰り返し応力が未溶着部に垂直に作用する場合 ($\alpha=0^\circ$) に対して、 $\alpha=15^\circ$ 、 30° 、 45° と傾いている場合、連続未溶着部をもつ突合せ溶接継手の疲労試験を行った。これらにより、斜めの角度および応力範囲による疲労き裂の発生・進展挙動、および疲労寿命の違いを定量的に検討した。

試験結果から得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) 疲労き裂は、未溶着先端部に沿って同時に発生し、未溶着部の延長面上に一つの扁平なき裂として進展する場合と、未溶着先端部の複数点から発生し、未溶着先端部と交差する面にそれぞれ独立して進展する場合がある。斜めの角度が大きくなると、のど断面応力範囲が小さくなるにしたがって、疲労き裂の発生・進展は後者のようになる可能性が高い。
- (2) のど断面応力範囲で整理した $\alpha=0^\circ$ 、 15° 、 30° の疲労寿命は、斜めの角度によらず同程度であり、 $\alpha=45^\circ$ の場合には長寿命側となる。疲労き裂の発生・進展挙動の違いによる疲労寿命の差は、 $\alpha=0^\circ$ 、 15° 、 30° 、 45° と大きくなるにしたがって顕著に現われる。
- (3) 直応力とせん断応力が同時に作用する場合、せん断応力範囲 $\Delta\tau_{an}$ が垂直応力範囲 $\Delta\sigma_{an}$ の 0.27 以下 ($\alpha=15^\circ$ 以下) であれば、 $\Delta\tau_{an}$ を省略し垂直応力範囲 $\Delta\sigma_{an}$ のみで疲労寿命を評価することができる。また、 $\Delta\tau_{an} / \Delta\sigma_{an} = 0.0 \sim$

1.0 ($\alpha=0^\circ \sim 45^\circ$) の疲労寿命は、 $\alpha=0^\circ$ の疲労寿命と最大主応力方向ののど断面応力を用いて評価することができる。ただし、 $\alpha=45^\circ$ に対しては、約 3 倍以上の安全側に評価される場合がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、岐阜大学助教授員沼重信、名古屋大学の小塩達也助手には疲労試験に関する貴重な助言を頂いた。また、名城大学の竹下寿君には疲労試験で協力していただいた。瀧上工業株中川賢治氏には試験体の製作でお世話になった。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会：鋼橋における劣化現象と損傷の評価、鋼構造シリーズ 7、社団法人土木学会、pp. 1-22, 1996.
- 2) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版、1993.
- 3) International Institute of Welding: Recommendation on Fatigue of Welded Components, *IIW Document XIII-1539-96/XV-845-96*, 1996.
- 4) 山田健太郎、加藤秀一郎、岡部篤紀、金 仁泰、小塩達也：作用応力に斜めに溶接された面外ガセット継手の疲労試験、構造工学論文集、Vol. 47A, pp. 1039-1045, 2001.
- 5) 山田健太郎、金 仁泰、伊藤健一：作用応力に斜めの荷重非伝達型リブ十字すみ肉溶接継手の疲労挙動、土木学会論文集、No. 682/I-56, pp. 383-390, 2001.
- 6) In-Tae Kim, Kentaro Yamada and Shigenobu Kainuma :

- Fatigue Behavior of Butt Welded Specimens Containing Inclined Lack-of-penetration, *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE*, pp. 53-62, 2001.
- 7) Pook, L. P. : The Effect of Crack Angle on Fracture Toughness, *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 3, pp. 205-218, 1971.
 - 8) Yoshioka, S., Watanabe, K., Kitagawa, H., Inoue, A. and Kumasawa, M.: Fatigue Crack Growth Threshold (ΔK_{th}) under Mode III (The Effect of Stress Ratio and Mixed Mode), *JSME (series-A)*, Vol. 50, No. 454, pp. 1267-1274, 1984.
 - 9) Pook, L. P. : The Fatigue Crack Direction and Threshold Behavior of Mild Steel under Mixed Mode I and III Loading, *Int. J. Fatigue*, Vol. 7, pp. 21-30, 1985.
 - 10) Yates, J. R. and Miller, K. J. : Mixed Mode (I+III) Fatigue Threshold in a Forging Steel, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 12, pp. 259-270, 1989.
 - 11) Makabe, C., Kaneshiro, H., Tamayose, H., Yafuso, T. and Yara, H.: Fatigue Crack Propagation under Mixed Mode of Modes I, II and III Started from Notch Inclined in Thickness Direction, *JSME (series-A)*, Vol. 59, No. 562, pp. 1421-1428, 1993.
 - 12) 安藤清、平田隆明、飯田国廣：複数表面欠陥からの疲労き裂伝播寿命評価(第2報)、日本造船学会論文集、第153号、pp. 255-266, 1983.
 - 13) 石田誠：半無限板におけるき裂群、分岐き裂及び鋭い切欠きからのき裂の解析、日本機械学会論文集(A編)、45巻392号、pp. 306-317, 1979.

(2001. 6. 17 受付)

FATIGUE BEHAVIOR OF BUTT WELDED JOINTS CONTAINING LACK-OF-PENETRATION INCLINED TO APPLIED STRESSES

In-Tae KIM, Hidemasa SHINKAI, Kentaro YAMADA and Akimasa KONDO

In order to investigate fatigue behavior of welded joints under the combined stresses, which consist of normal and out-of-plane shear stress, fatigue tests of butt-welded joints containing lack-of-penetration inclined to applied stresses are carried out. The inclined angles are 0, 15, 30 or 45 degrees for transverse direction which is perpendicular to applied stresses and a gap of 0 or 1.5mm wide is introduced in each specimen. The test results show that the inclined angles and applied stress ranges influence the pattern of fatigue crack propagation, which can be divided into two types. The test results arranged for 0, 15 and 30 degrees show almost the same fatigue life when the data are plotted for nominal stress ranges at throat section. The test results for 45 degrees show the longer fatigue life than the other specimens.