

すみ肉溶接部に生じる表面疲労亀裂の形状

ASPECT RATIOS OF SURFACE FATIGUE CRACKS ORIGINATED IN FILLET WELDED JOINTS

森 猛*、三木 千寿**

Takeshi MORI and Chitoshi MIKI

* 工博 法政大学助教授 工学部土木工学科 (〒184 東京都小金井市梶野町3-7-2)

** 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

Fatigue damages occurred in steel bridges have often been caused by fatigue cracks originated in the surface of fillet welded joints. The surface length of these cracks can be evaluated by nondestructive inspection method (such as magnetic particle inspection) with high accuracy. However, it is difficult to measure the depths of the cracks by existing methods. This study deals with the relationship between crack depth and length (aspect ratio) by arranging the many existing data about the shapes of fatigue cracks in fillet welded joints. The results of this study will serve the decision which method is used for the repair of fatigue cracked portion and when the repair is done.

key Words : fatigue crack, aspect ratio, fillet welds

1. はじめに

これまでに収集された鋼橋部材の疲労損傷データによれば、その多くはすみ肉溶接の止端部から生じた表面疲労亀裂によるものである¹⁻³⁾。このような疲労損傷部に対する補修の方法や時期を決める上で、またその余寿命を精度良く予測する上で、正確な疲労亀裂の形状・寸法は最も基礎的なデータとなる。すみ肉溶接部の検査は、目視、浸透探傷法、磁粉探傷法、渦流探傷法、超音波探傷法などによって行なわれる。これらの内、疲労亀裂の検出能力・寸法測定精度としては磁粉探傷法が最も優れているとされているが⁴⁾、この方法では疲労亀裂の表面での寸法のみが測定され、その深さを知ることはできない。超音波探傷法を用いれば、亀裂深さの測定も可能であるが、現在のところ、その測定精度は余寿命を高い精度で推定する上で十分とは言えない。

疲労亀裂の表面での長さとの関係については、いくつかの実験的研究がなされている。川原ら⁵⁾および飯田ら⁶⁾は、平滑平板中の疲労亀裂を対象としてその表面での長さとの関係を示している。それらによれば、疲労亀裂は軸方向応力下ではほぼ半円形、板曲げ応力下では亀裂が大きくなるにしたがって扁平となる。このことは、破壊力学の手法を用いた疲労亀裂進展解析からも確かめられる。しかし、すみ肉溶接部には応力集中が生じるため、平滑平板で得られた結果をそのまますみ肉溶接部に適用することは難しい。松野らは⁷⁾、切欠き材を用いて、応力集中部から生じる表面疲労亀裂の形状について実験的に検討している。しかし、この研究においても単一の亀裂を対象としているため、そこでの結果を複数

の亀裂が発生しそれらが合体を繰返しながら複雑な進展挙動を示す溶接継手部の疲労亀裂に対してどの程度の精度で適用できるかの検討が必要である。

すみ肉溶接部から発生する疲労亀裂の表面での長さとその深さの関係については、Maddox¹⁰⁾、山田ら^{8,11,12)}によって実験的に調べられている。しかし、それらは限られた継手形状、寸法、載荷条件で得られたものである。また、Fisher¹³⁾は前面すみ肉溶接継手についての実験データより、疲労亀裂の形状比に関する実験式を示しているが、その基になったデータは少ない。

著者らは、種々のすみ肉溶接継手について、二段多重試験（ビーチマーク試験）を行ない、溶接止端部あるいは溶接表面から生じた疲労亀裂の形状に関するデータを数多く収集している。本研究では、これらのデータに基づき、疲労亀裂の表面での長さからその深さを予測する方法について検討するとともに、これまでに提案されている疲労亀裂形状の予測方法の適用性について検討する。

2. 対象とした継手および疲労亀裂の進展性状

2.1 継手

図-1は、鋼橋の疲労損傷データベース³⁾に基づき、すみ肉溶接部に対する載荷モードとそれにより生じる疲労亀裂およびその事例数を示したものである¹⁴⁾。ここでは、載荷モード②によって生じる疲労亀裂 a（板曲げ、面外ガセット継手）、載荷モード③によって生じる疲労亀裂 b（軸方向力、リブ十字・T字継手）、載荷モード④による疲労亀裂 b（板曲げ、リブ十字・T字継手）、載荷モード①による疲労亀裂 g（軸方向力、縦方向継

手)を対象とする。

疲労亀裂の表面での長さとその深さとの関係を調べた継手の一覧およびその出典を表-1に、継手の外形と载荷モード、およびそこに生じる疲労亀裂を図-2に示す。継手記号の一字目は継手型式(W:面外ガセット継手、S:リブ十字・T字継手、L:縦方向継手)、二文字目は载荷モード(A:軸方向力、B:板曲げ)を示している。Tは継手の板厚(例えば、板厚が16mmの継手をT16と表す)を、次の文字S、B、Fは溶接止端の形状を示している。Sは溶接のままで止端の開き角 θ が135度以下、Bは溶接のままで $\theta > 135$ 度、Fは止端部をTIG-dressingで仕上げたことを示している。このような分

類は、これまでの検討により、疲労亀裂の形状が継手部の応力分布に著しく影響されることが確かめられており5-9)、応力分布は継手の型式や载荷モードに加えて継手の板厚や溶接止端形状に特に影響を受けることによる。一部の継手については、継手記号の末尾に(S)という記号を付けているが、これは付加板の中央あるいは端部にスカーラップがあることを示している。縦方向継手では、溶接棒継ぎ部のビード表面リップルが疲労亀裂の起点となることが多く15)、ここで形状を調べた疲労亀裂もすべて棒継ぎ部から生じたものである。棒継ぎ部の表面形状は、前ビードのクレータが後ビードにより埋められているかどうかにより区別しており、クレータが残ったも

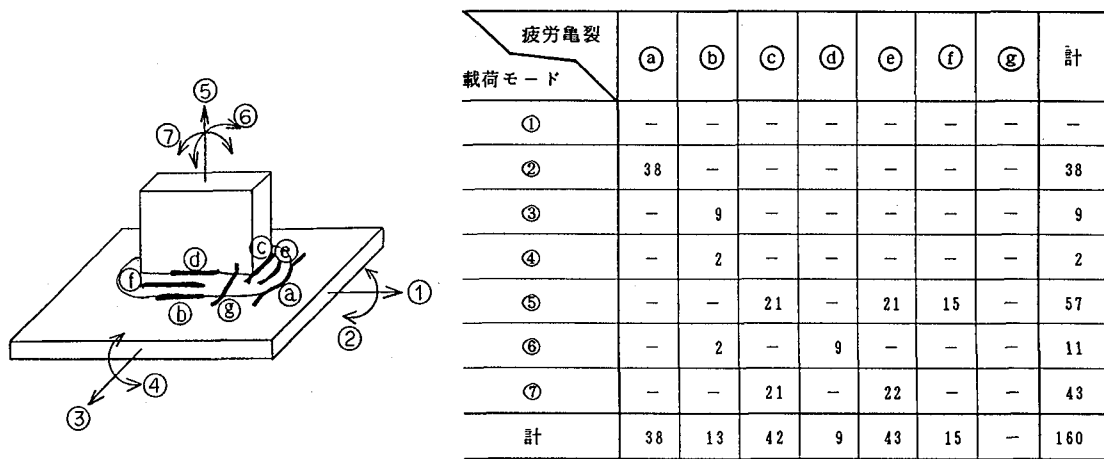


図-1 すみ肉溶接部に生じる疲労亀裂と実橋での事例数

表-1 継手一覧

試験体記号	板幅 (mm)	溶接サイズ (mm)	止端形状 開き角(deg.)	備 考	引用文献
WB-T15-S	50	6	120		16)
WB-T16-S	40	6	120		17)
WB-T15-F	50	6	120		16)
SA-T15-B	130x300	6	150	ボックス断面	18)
SA-T16-B	110	6	150		19)
SA-T45-B	180	10	160		18)
SA-T45-B(S)		10	150		20)
SA-T16-S	110	6	100		19)
SA-T20-S(S)	300	6	120		21)
SB-T9-B	40	5	150	S.C.F = 1.72	9)
SB-T16-B	40	5	150	S.C.F = 2.03	9)
SB-T25-B	40	5	150	S.C.F = 2.55	9)
SB-T9-S	50	6	120	S.C.F = 2.08	9)
SB-T15-S	50	6	120	S.C.F = 2.48	9)
SB-T16-S	20	6	130	S.C.F = 2.92	17)
SB-T24-S	65	6	120	S.C.F = 2.78	9)
SB-T34-S	90	6	120	S.C.F = 2.92	9)
SB-T50-S	130	6	120	S.C.F = 2.94	9)
SB-T50-S	130	19	120	S.C.F = 3.78	9)
LA-T16-C	60	6	140~155		22)
LA-T16-T	60	6	150~160		22)
LA-T40-C	1040x1080	7		ボックス断面	23)

S.C.F.: 応力集中係数

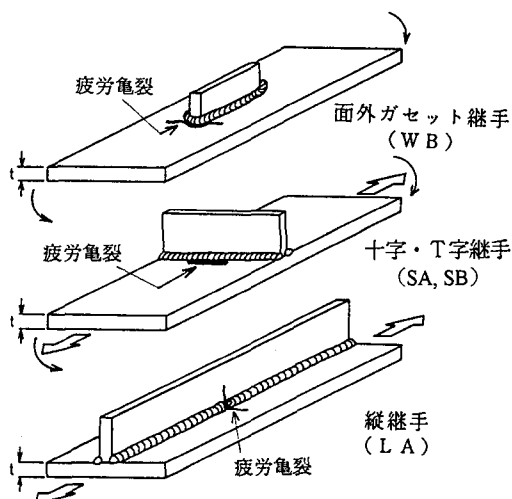


図-2 疲労亀裂の形状を測定した継手と载荷モード

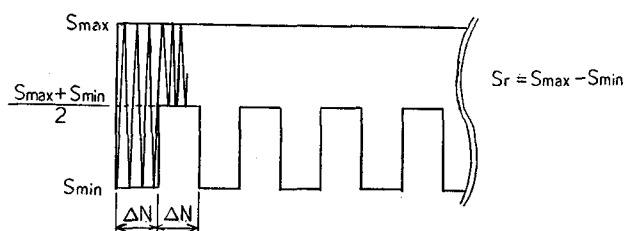


図-3 ビーチマーク試験

のを記号C、クレータが完全に埋められたものを記号Tで表し、継手記号の末尾に付した。

疲労亀裂の表面での長さや深さの関係は主として二段多重繰返し応力試験（ビーチマーク試験）を行なうことにより調べている。この試験では、図-3に示すように所定の繰返し数ごと（ ΔN ）に下限応力を上昇させ応力範囲を半減している。応力範囲を半減した時に進展した部分が破面に模様として残り、これをビーチマークと呼んでいる。一部の継手については、疲労試験後に強制的に疲労破面を暴露し、疲労亀裂の寸法と形状を測定した。

2.2 疲労亀裂の進展性状

図-4は板曲げを受ける面外ガセット継手のビーチマークを含む疲労破面の例を示したものである。図中の記号 S_r は応力範囲、 ΔN は1つの応力ブロックでの繰返し数である（図-3参照）。また、 N_f は破断に至るまでの疲労寿命である。この継手では回し溶接部止端に沿って1つあるいは数個の半楕円形の疲労亀裂が発生する。数個の疲労亀裂は合体を繰返ししながら、溶接止端に沿って進展している。疲労亀裂が合体すると、その前縁は一時的にうねった形状となるが、進展に伴い再び半楕円形に近くなる。以後、このような表面疲労亀裂の深さ（ a ）と表面での長さ（ $2b$ ）との関係を形状比（ $a/2b$ ）で表す（図-4参照）。この継手ではまわし溶接の止端が曲っており、疲労亀裂はそれに沿って進展するが、ある程度進展すると（溶接の端部に近づく）亀裂先端が溶接止

WB-T16-S $S_r=270\text{MPa}$, $N_f=35 \times 10^4$, $\Delta N=5 \times 10^4$

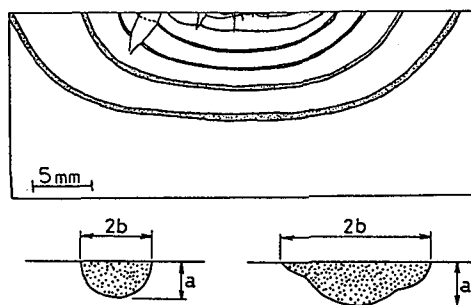
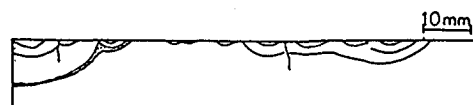
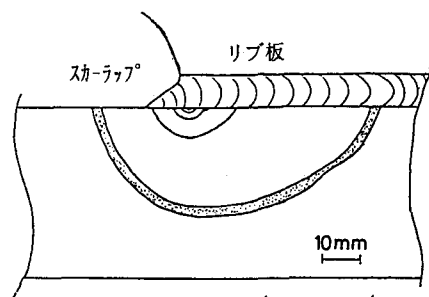


図-4 代表的なビーチマーク
（板曲げを受ける面外ガセット継手）



$S_r=126\text{MPa}$, $N_f=136 \times 10^4$, $\Delta N=30 \times 10^4$

(a) SA-T16-B



$S_r=147\text{MPa}$, $N_f=179 \times 10^4$, $\Delta N=30 \times 10^4$

(b) SA-T45-B(S)

図-5 代表的なビーチマーク
（軸方向力を受ける十字・T字継手）

端をはずれ、その後は応力と垂直な方向に真っ直ぐ進展する（図-2参照）。

図-5(a), (b) は軸方向力を受けるリブ十字・T字継手のビーチマークを含む疲労破面の例を示している。図(a)に示す SA-T16-B 継手における疲労亀裂は、すみ肉溶接の止端に沿って複数発生しており、またその位置は様々である。これらの疲労亀裂は合体を繰返ししながら、溶接止端に沿って進展している。図(b)に示す SA-T45-B(S) 継手では、スカラップ近傍の回し溶接部近傍の止端から疲労亀裂が発生している。疲労亀裂が大きくなると、疲労亀裂の表面での進展が左右で異なり、平滑なスカラップ内部に比べて溶接止端に沿った側の進展が大きく、亀裂形状はいびつとなっている。

図-6(a)に SA-T16-B 継手、図-6(b)に SA-T45-B(S) 継手で観察された亀裂進展に伴う疲労亀裂形状比の変化を示す。これらの継手では複数の疲労亀裂が発生するが、この図で示している形状比は疲労破壊の主たる原因になったと考えられる疲労亀裂（ここでは主亀裂と呼ぶ）から得られたものである。なお、SA-T16-B 継手では8

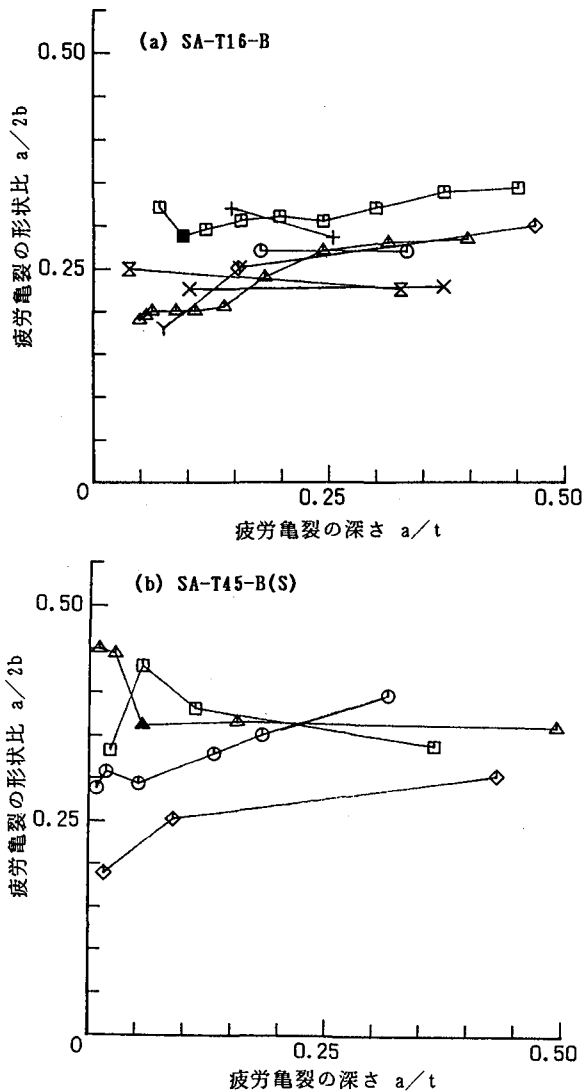


図-6 疲労亀裂進展に伴う疲労亀裂形状比の変化
(軸方向力を受ける十字・T字継手)

体、SA-T45-B(S)継手は4体のビーチマーク試験が行なわれており、それらの試験体により図中のマークの種類を変えている。発生初期の亀裂が半円形に近い場合 ($a/2b \approx 0.5$)、亀裂が大きくなるにしたがってその形状は扁平 ($a/2b$: 小) となっている。発生初期の亀裂が扁平な場合には、一旦亀裂進展に伴って半円形に近づき、その後初期の亀裂が半円形に近い場合の亀裂形状変化と一致している。図中の黒く塗り潰した印は、亀裂が合体した直後の亀裂形状を示している。このとき、亀裂の形状は一時的に扁平となるが、その後は単一の亀裂の場合の亀裂形状に近づいている。さらに疲労亀裂が大きくなると、疲労亀裂の形状比はほぼ一定となっている。

図-7(a), (b)に板曲げを受けるリブ十字・T字継手の疲労破面の例を示す。また、図-8(a), (b)に SB-T25-B継手、SB-T9-S継手での主亀裂の形状比の変化を示す。図中に数種類のマークがプロットされているのは、図-5と同じ理由による。これらの継手においても発生初期の亀裂の形状比の変化の様子は軸方向力を受けるリブ十字・

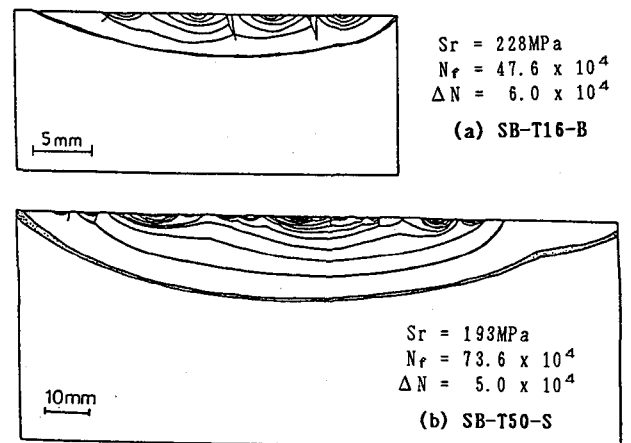


図-7 代表的なビーチマーク
(板曲げを受ける十字・T字継手)

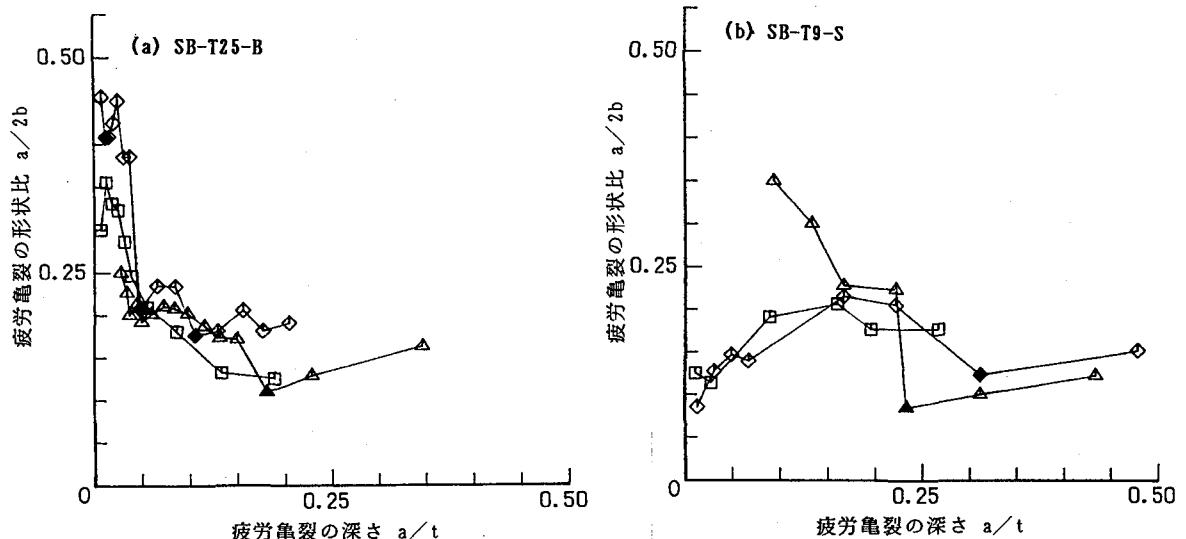


図-8 亀裂進展に伴う疲労亀裂形状比の変化 (板曲げを受ける十字・T字継手)

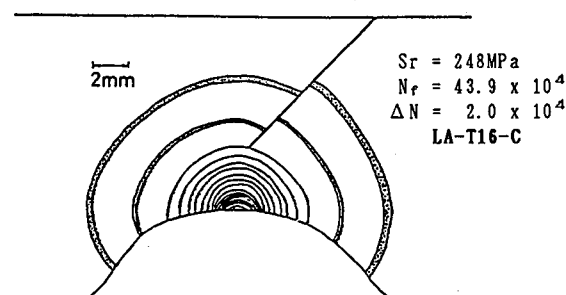


図-9 代表的なビーチマーク
(軸方向力を受ける縦継手)

T字継手と同じである。ただし、疲労亀裂が大きくなったときの形状比は、軸方向力を受ける場合に比べ、かなり小さくなっている。

図-9は軸方向力を受ける縦方向継手のビーチマークを含む疲労破面の例を示したものである。疲労亀裂は単独で後ビードの前縁中央部から発生し、半楕円形の表面亀裂として進展している。また、この継手においても後ビードの前縁は曲っており、疲労亀裂は面外ガセット継手と同様に曲ったビード前縁に沿って進展した後、亀裂先端がそこを離れ、その後は応力の方向と直角に真っ直ぐ進展していた。

3. 表面疲労亀裂の形状比

3.1 板曲げを受ける面外ガセット継手の疲労亀裂

図-10に板曲げを受ける面外ガセット継手で測定された疲労亀裂の形状比 ($a/2b$) と表面での長さ ($2b$) の関係を示す。疲労亀裂が小さい間はその形状比が0.05~0.50と広い範囲にばらついている。さらに亀裂が成長し、表面での長さが25mmを超えると形状比のばらつきは小さくなり、一定値に収束するような傾向が認められる。また、溶接止端を仕上げた継手(WB-T15-F)と溶接のままの継手(WB-T15-S、WB-T16-S)では、亀裂が小さい間で疲労亀裂の形状比の相違が明らかである。これらの継手では、形状・寸法ともほぼ同じであり、顕著な相違は止端形状だけである。

図-11は、溶接止端を滑らかに仕上げることによりそこでの応力集中がどの程度改善されるかを調べるために、板厚15mmのリブ十字・T字継手の板厚方向の応力分布を有限要素解析により求めた結果を示している。溶接のままでは約2.3であった溶接止端での応力集中がそこを仕上げるにより1.4程度まで改善されている。このような応力集中の違いにより疲労亀裂の形状比の相違が生じたと考えられる。

面外ガセット継手の主板表面での応力集中は回し溶接部止端の中央で最も高く、溶接から離れた位置では応力集中はほとんど生じない。したがって、先端が溶接止端を離れる程度に疲労亀裂が長くなる(およそ25mm)と、表面での亀裂進展に対する応力集中の影響はほとんどな

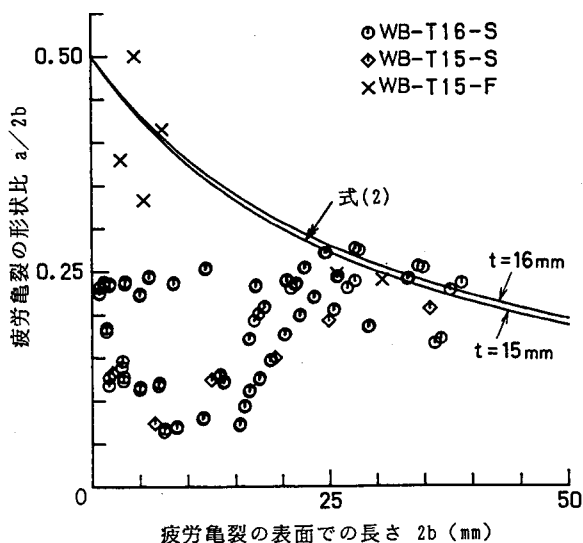


図-10 疲労亀裂の形状比
(板曲げを受ける面外ガセット)

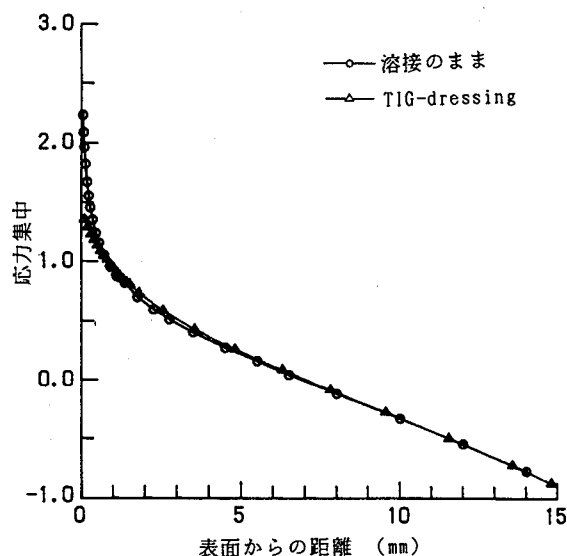


図-11 止端部仕上げが応力分布に及ぼす影響

いと考えられる。また、このように大きくなった亀裂の深さは、その時の形状比から考えて少なくとも1mm以上であり、図-11に示す板厚方向の応力分布からわかるように、亀裂深さが1mm以上では深さ方向の亀裂進展に対しても応力集中の影響は非常に小さいと予想される。また、疲労亀裂は溶接止端部から発生するため、先端が溶接止端部を離れる程度に大きくなった状態では亀裂の合体も生じることはない。したがって、先端が溶接止端部を離れる程度に長くなった疲労亀裂の形状比については、単独の疲労亀裂を対象とした平滑平板での実験式が適用可能と考えられる。

川原らは、平滑平板における疲労亀裂形状比の表示式として次式を示している⁵⁾。

$$a/b = 1 - \Delta \sigma_B / (\Delta \sigma_T + \Delta \sigma_B) \cdot a/t \quad (1)$$

a : 亀裂の長さ, b : 亀裂の半幅, t : 板厚

$\Delta \sigma_B$, $\Delta \sigma_T$: 繰返し応力の板曲げ応力成分、
軸方向応力成分

載荷モード (板曲げ) を考慮して、(1)式を $a/2b$ と $2b$ との関係に書き直せば次式が得られる。

$$a/2b = 1 / (2 + 2b/t) \quad (2)$$

図-10中の実線は(2)式から求められる亀裂形状比を示している。実線は表面での長さが 25mmを超える領域で実験結果と良く一致している。また、止端を仕上げた継手に対しては、応力集中が非常に小さいため、実線は亀裂の大きさによらず実験結果の傾向をよく表している。

以上より、面外ガセット継手に生じた疲労亀裂の形状比は、疲労亀裂が小さくそれが溶接止端に沿って存在する場合、さらに亀裂が長くなってその先端が止端を離れた場合に分けて整理するのがよいと考えられる。溶接止端に沿った段階では、止端形状の影響を強く受け、溶接のままの継手に対しては、

疲労亀裂の形状比 $a/2b$ の上限: 0.25 下限: 0.05

と考えればよい。止端が非常に滑らかな場合および先端が溶接止端をより離れる程度に疲労亀裂が大きくなった場合には、川原らの平滑平板を対象とした実験式に基づく(2)式より継手表面での疲労亀裂の長さからその形状比および深さを推定することができる。

3.2 軸方向力を受けるリブ十字・T字継手の疲労亀裂

図-12に軸方向力を受けるリブ十字・T字継手で測定

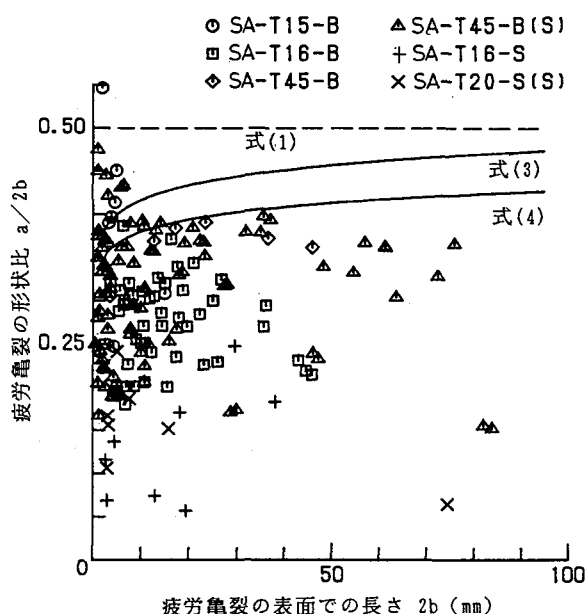


図-12 疲労亀裂の形状比
(軸方向力を受ける十字・T字継手)

された疲労亀裂の形状比 ($a/2b$) と表面における長さ ($2b$) の関係を示す。この継手においても、面外ガセット継手と同様に疲労亀裂が小さい領域で形状比のばらつきが大きく、亀裂が長くなるにしたがってばらつきは小さくなる傾向が認められる。しかし、亀裂が長くなった場合の形状比のばらつきは面外ガセット継手に比べて大きい。これは、面外ガセット継手では亀裂が大きくなった場合に亀裂の合体が生じることはないのに対し、リブ十字・T字継手では複数の疲労亀裂が溶接止端に沿って様々な位置から発生し、亀裂の合体は疲労亀裂が大きくなった状態でも生じるためである (図-4, 5参照)。

図-12では板厚 15~45mm の継手での疲労亀裂の形状比を示しているが、形状比に対する板厚の影響は認められない。止端形状による影響は顕著に現れており、溶接止端の開き角が135度以下の継手の形状比は135度を超える継手よりもかなり小さくなっている。

図-12中の破線は平滑平板を対象とした(1)式から得られる形状比を示している。実験より得られた疲労亀裂の形状比は、平滑平板とは異なり、かなり小さくなっている。

Fisher¹³⁾は実験結果に基づき疲労亀裂の表面での長さとその深さの関係について、(3)、(4)式を提案している。

$$\text{平均: } b = 1.296 a^{0.946} \quad (3)$$

$$\text{下限: } b = 1.403 a^{0.951} \quad (4)$$

図-12中に(3)式、(4)式から計算される疲労亀裂の形状比と表面での長さの関係を実線で示すが、いずれによっても形状比をかなり高く評価している。

表面疲労亀裂の検出には磁粉探傷法が最も優れているとされているが、その限界は表面の長さで 5mm程度である⁴⁾。表面での長さが 5mm 以上の疲労亀裂のデータから判断すると形状比の上限および下限として、

止端形状が滑らかな場合 (溶接のまま、 $\theta > 135^\circ$)

$$\text{上限: } a/2b = 0.40 \quad \text{下限: } a/2b = 0.15$$

止端形状が比較的鋭い場合 (溶接のまま、 $\theta \leq 135^\circ$)

$$\text{上限: } a/2b = 0.25 \quad \text{下限: } a/2b = 0.05$$

とおける。

3.3 板曲げを受けるリブ十字・T字継手の疲労亀裂

図-13(a), (b)に板曲げを受けるリブ十字・T字継手で観察された疲労亀裂の形状比と表面での長さの関係を示す。図(a)では止端の開き角 θ が135度を超える継手について、図(b)では $\theta \leq 135^\circ$ の継手について示している。また、図(a)では板厚 9, 16, 25mm、図(b)では板厚 9, 15, 16, 24, 34, 50mmの継手で得られた結果が示されているが、いずれの場合も亀裂が長くなった場合に主板が厚い継手ほど形状比が大きくなる傾向が認められる。こ

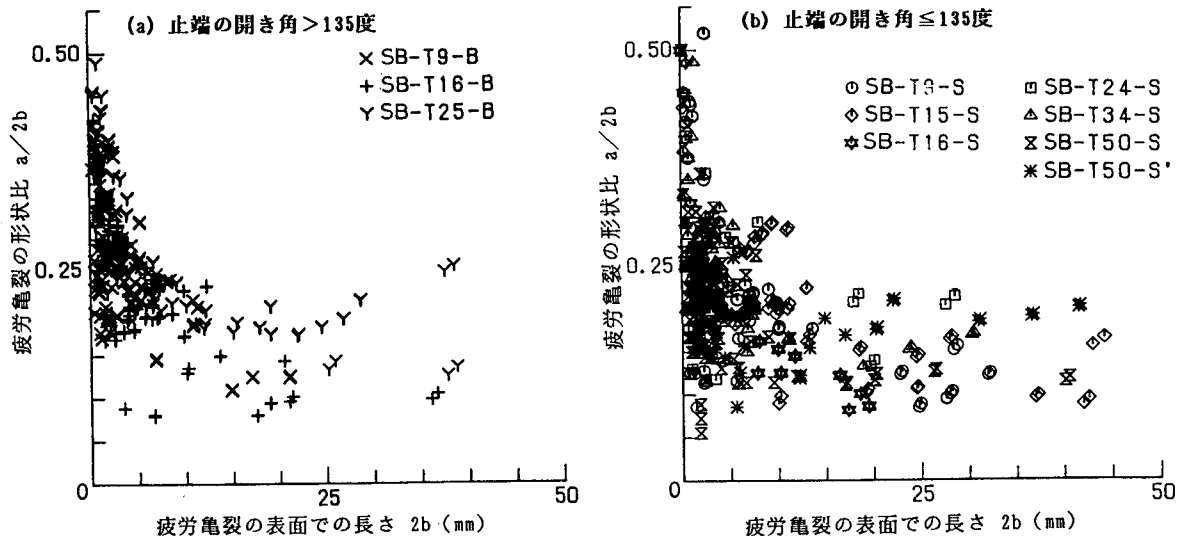


図-13 疲労亀裂の形状比（板曲げを受ける十字・T字継手）

これは板厚方向の応力分布が板厚により著しく影響されるためである。そのため、板曲げ下の疲労亀裂形状比は疲労亀裂の深さと継手の板厚の比 (a/t) をパラメータとして整理されるのが一般的である⁵⁻⁷⁾。

図-14(a), (b), (c) では、溶接止端の開き角が亀裂形状比に及ぼす影響を調べる目的で、板厚ごとに $\theta \leq 135$ 度の継手と $\theta > 135$ 度の継手の疲労亀裂形状比を比較している。亀裂が比較的小さい領域（亀裂長さ $2b$ がおよそ 10mm 以下）では、軸方向力を受ける場合と同様に止端の開き角が小さい継手の方が形状比が小さくなっている。しかし、亀裂が長くなった場合には止端開き角による形状比の相違は明らかではない。これは、ここでの継手の止端形状の相違が軸方向力を受ける継手ほど著しくなかったこと、軸方向力下と板曲げ下では応力分布が異なることに原因があると考えられる。

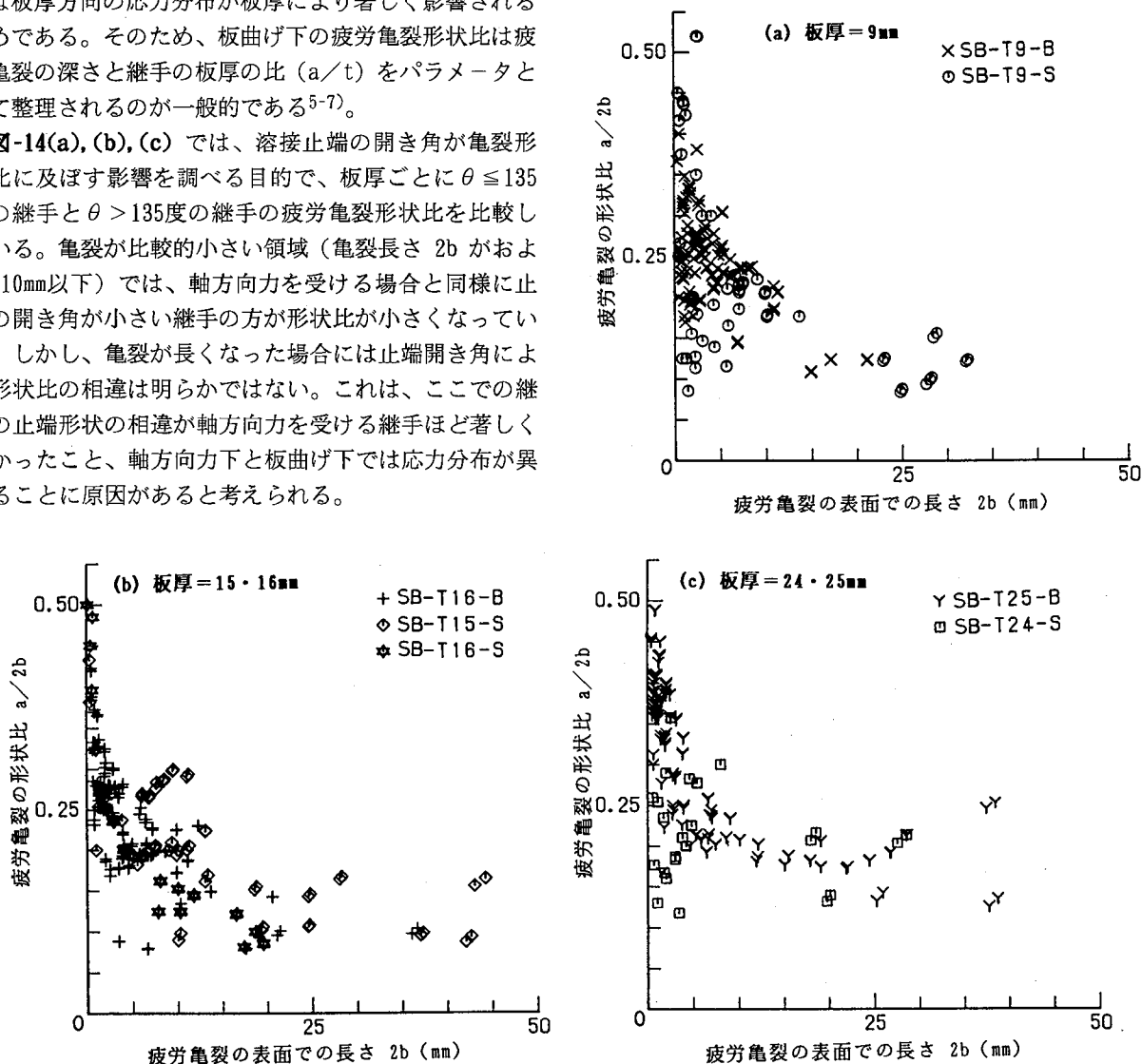


図-14 溶接止端形状の鋭さが疲労亀裂の形状比に及ぼす影響

図-15(a), (b)に疲労亀裂の深さと継手の板厚の比 (a/t) をパラメータとして整理した疲労亀裂の形状比を示す。図中の破線は平滑平板を対象とした川原らの提案式⁵⁾、実線は切欠き材を対象とした松野らの提案式⁷⁾から計算される亀裂形状比と a/t の関係である。松野らによる提案式は(5)式で与えられている。

$$a/b = 1 - (a/t)^{1/Kt} \quad (5)$$

Kt : 応力集中係数、 t : 板厚

軸方向力を受ける場合と同様、平滑平板を対象とした(1)式に基づいて疲労亀裂の表面での長さからその形状比および深さを予測することは、過度に安全側となっている。また、(5)式から推定される形状比は実験結果のほぼ上限を与えている。以上のことは、いずれの継手においても同様であった。なお、これらの継手の溶接止端

における応力集中係数は有限要素解析により求めており、その値は表-1に示している。この種の継手の応力集中係数の下限が2程度であることを考慮すれば、安全側の亀裂深さの予測式として次式を用いることが考えられる。

$$a/b = 1 - \sqrt{a/t} \quad (t: \text{継手の板厚}) \quad (6)$$

これを $a/2b$ と $2b$ との関係に書き直せば、

$$a/2b = 0.5 + 2b/t \{ 1/8 - \sqrt{t/(16b) + 1/64} \} \quad (7)$$

が得られる。図-16は板曲げを受けるリブ十字・T字継手で得られたすべてのデータと(6)式から予想される形状比を比較したものである。

3.4 軸方向力を受ける縦方向溶接継手

図-17は疲労亀裂の形状比 ($a/2b$) と表面での長さ

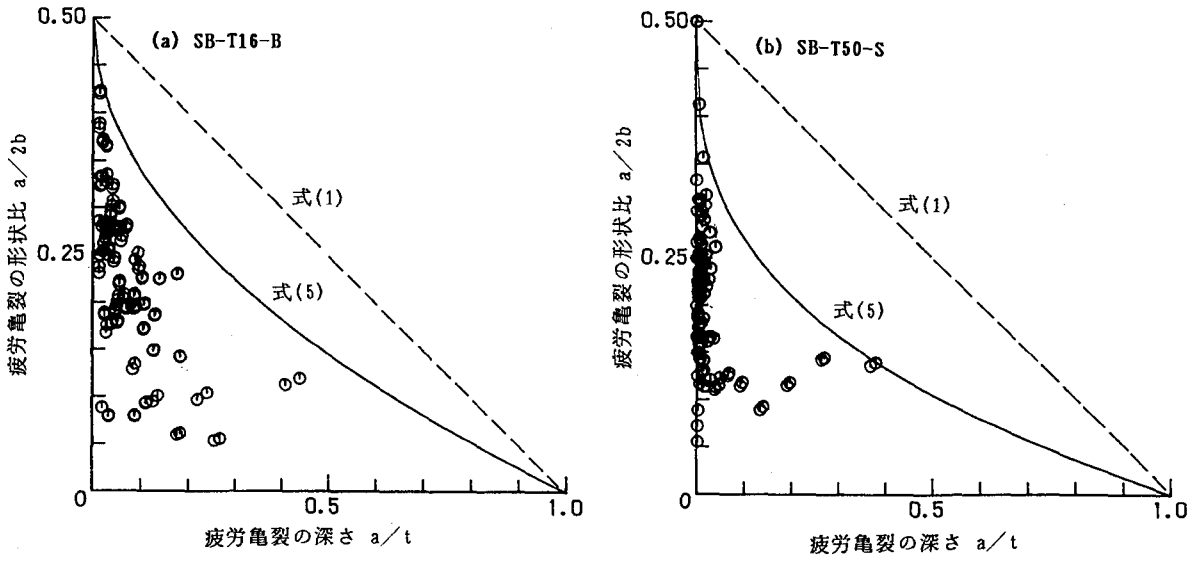


図-15 各種予測方法による疲労亀裂形状比と試験データの比較

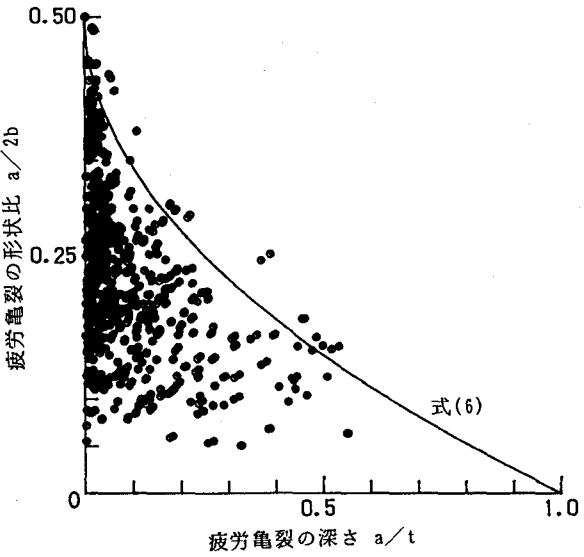


図-16 疲労亀裂形状比の安全側の推定値

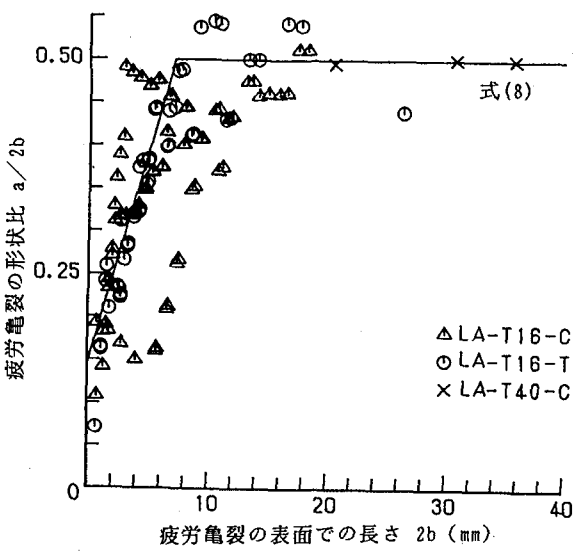


図-17 疲労亀裂の形状比 (軸方向力を受ける縦継手)

(2b) の関係を示したものである。クレータの有無によらず、いずれの継手においても発生初期の亀裂が小さい間はその形状が扁平であり、亀裂が成長するにしたがって半円形に近づき、亀裂の表面での長さが 5~10mm となった時点で、亀裂はほぼ半円形 ($a/2b=0.5$) となっている。すなわち、亀裂がある程度大きくなった領域では平滑平板での疲労亀裂形状と一致している。また、疲労亀裂が棒継ぎ部の後ビード前縁に沿って進展する長さも 5~10mm 程度であった。以上のように疲労亀裂がある程度大きくなると疲労亀裂の形状がほぼ半円形となるのは、棒継ぎによる形状の乱れが局部的で、それにより応力が乱される領域が狭いためと考えられる。

疲労亀裂形状比のばらつきは他の型式の継手に比べて非常に小さく、 $a/2b$ と $2b$ の関係は概ね次式で与えられる。

$$\begin{aligned} a/2b &= 0.049 \cdot 2b + 0.144 & (2b < 7.2\text{mm}) \\ a/2b &= 0.50 & (2b \geq 7.2\text{mm}) \end{aligned} \quad (8)$$

表面亀裂の検出に最も適切とされている磁粉探傷法においてもその限界が 5mm 程度である⁴⁾ことを考慮すれば、ビード表面のリップルから発生した疲労亀裂の深さは表面での長さの半分と考えるのが妥当であろう。

4. まとめ

(1) すみ肉溶接止端部から発生した半楕円形の疲労亀裂の形状は、溶接止端の形状が鋭いほど扁平となる。また、板曲げを受ける継手では、軸方向力を受ける継手に比べ、疲労亀裂の形状が扁平となる。

(2) 板曲げを受ける面外ガセット継手のすみ肉溶接止端に生じる疲労亀裂の形状比は、疲労亀裂が溶接止端に沿って存在する場合と亀裂が長くなってその先端が止端を離れた場合に分けて考えるのがよい。溶接止端に沿った段階での疲労亀裂の形状比 $a/2b$ の上限は 0.25、下限は 0.05 程度である。先端が溶接止端を離れる程度に長くなった疲労亀裂の形状比は平滑平板を対象とした実験式から予測できる。

$$\begin{aligned} a/2b &= 1 / (2 + 2b/t) \\ a, 2b &: \text{疲労亀裂の深さ、表面での幅} \\ t &: \text{継手の板厚} \end{aligned}$$

(3) 軸方向力を受けるリブ十字・T字継手のすみ肉溶接止端部から発生した疲労亀裂の形状比は、その表面での長さ (2b) に基づき、次式により安全側の推定ができる。

$$a/2b = 0.4$$

板曲げを受ける場合には、松野らによる切欠き材での実験式に基づき次式で安全側の疲労亀裂形状比を推定できる。

$$a/2b = 0.5 + 2b/t \{1/8 - \sqrt{t/(16b) + 1/64}\}$$

(t: 継手の板厚)

(4) 軸方向力を受ける縦方向すみ肉溶接継手のビード表面リップルから発生した表面疲労亀裂の深さは、表面での長さの半分と考えればよい。

参考文献

- 1) 西川和広：道路橋における疲労問題と補修・補強、橋梁と基礎、Vol.17, No.8, pp.19~23, 1983.
- 2) 土木学会鋼構造委員会疲労変状調査小委員会：鋼橋の疲労変状調査、土木学会論文集、No.368, pp.1~12, 1984.
- 3) 三木千寿、坂野昌弘、館石和雄、福岡良典：鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析、土木学会論文集、No.392, pp.403~410, 1988.
- 4) 三木千寿、深沢誠、加藤昌彦、大畦久雄：表面疲労亀裂検出に対する各種非破壊試験の適用性、土木学会論文集、No.386, pp.329~337, 1987.
- 5) 川原正言、栗原正好：表面亀裂の疲労による伝播成長過程に関する予備的考察、日本造船学会論文集、No.137, pp.297~306, 1975.
- 6) 飯田国広、高允宝：疲労表面き裂の形状表現式について、日本造船学会論文集、No.147, pp.203~210, 1980.
- 7) 向井喜彦、松野博、山崎信二、角尾龍彦、尾野守章、桶島卓：形状不連続部付平板の非貫通型欠陥に対する曲げ疲労寿命予測 (第1報)、日本造船学会論文集、No.151, pp.273~287, 1983.
- 8) 山田健太郎、牧野時則、菊池洋一：横リブ十字すみ肉溶接止端部に発生する疲労亀裂の解析、土木学会論文集、No.292, pp.1~12, 1979.
- 9) 三木千寿、森猛、阪本謙二、柏木洋之：前面すみ肉溶接継手の疲労強度に対する継手寸法の影響、構造工学論文集、Vol.33A, pp.393~402, 1987.
- 10) Maddox, S.J. : An Analysis of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints, International Journal of Fracture, Vol.11, No.2, pp.221~243, 1975.
- 11) 山田健太郎、牧野時則、馬場千尋、菊池洋一：疲労裂の進展挙動に注目したガセット継手の疲労強度解析、土木学会論文集、No.303, pp.31~41, 1980.
- 12) 田垣徳幸、近藤明雅、山田健太郎、菊池洋一：溶接継手の疲労寿命に与えるすみ肉溶接止端形状の影響、土木学会論文集、No.324, pp.151~159, 1982.
- 13) John W. Fisher : Fatigue and Fracture in Steel Bridges, p.7, JOHN WILEY & SONS, 1984.
- 14) Miki, C. and Sakano, M. : A Survey of Fatigue Cracking Experiences in Steel Bridges, 東工大土木工学科研究報告、No.39, pp.33~45, 1988.
- 15) T.R. ガーニィー (鶴田明、善利博臣 訳) : 溶接構造

- の疲れ、産報、pp.95～99, 1973.
- 16) Miki, C., Mori, T., Tuda, T. and Sakamoto, K. : Retrofitting Fatigue-Cracked Joints by TIG-Arc Remelting, 土木学会論文集、No.386, pp.111～119, 1987.
- 17) 柏木洋之、三木千寿、森猛：曲げを受けるすみ肉溶接部の疲労強度および疲労亀裂の進展、土木学会年次学術講演会講演概要集、I-110, 1984.
- 18) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会：本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書、別冊2 疲れに関する検討、1979.
- 19) 社本芳明、西野文雄、三木千寿：前面すみ肉溶接部の止端形状と疲れきれつの発生・進展性状、土木学会年次学術講演会講演概要集、I-106, 1981.
- 20) Shimokawa,H., Takena,K., Ito,F. and Miki,C. : Effect of Stress Ratios on the Fatigue Strengths of Cruciform Fillet Welded Joints, 土木学会論文集、No.344, pp.121～128, 1984.
- 21) Takena,K., Shimokawa,F., Itoh,F. and Miki,C. : Fatigue Strengths of Diaphragm Joint in Box-Section Truss Chords of High Strength Steel, 土木学会論文集、No.374, pp.109～118, 1986.
- 22) 三木千寿、森猛、佐々木利視、竹名興英、阪本謙二：縦方向すみ肉溶接継手の疲労強度（溶接棒継ぎの影響）、溶接学会論文集、Vol.4, No.2, pp.157～164, 1986.
- 23) Shimokawa,H., Takena,K., Fukazawa,M. and Miki,C. : A fatigue Test on the Full-Size Truss Chord, 土木学会論文集、No.344, pp.95～102, 1984.
- 24) 竹名興英、川上博道、伊藤文夫、三木千寿：ウェブガセット溶接継手の応力解析と疲労寿命予測、土木学会論文集、No.392, pp.345～350, 1988.

(1994年9月14日受付)