

荷重伝達型十字溶接継手の 疲労破壊起点の評価方法の提案

貝沼重信¹・森猛²・一宮充³

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

²正会員 工学博士 法政大学教授 工学部土木工学科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2)

³正会員 修士(工学) 横河ブリッジ 技術本部研究所 (〒261-0002 千葉県船橋市山野町27番地)

鋼道路橋において、荷重伝達型の十字すみ肉溶接継手とみなされる溶接継手の止端部やルート部に典型的な疲労損傷が報告されている。この継手の疲労破壊起点は、溶接脚長、溶接の溶込み深さ(開先深さ)や板厚などの諸因子により影響を受けることが知られている。しかし、疲労破壊起点に及ぼすこれらの因子の影響が十分に明らかにされていないため、その評価方法は確立されていない。そこで、本研究では継手の諸寸法を様々に変化させた荷重伝達型十字溶接継手を対象として、パラメトリックな疲労き裂進展解析を行った。この解析結果に基づき、溶接脚長、溶込み深さ、板厚が疲労破壊起点に及ぼす影響を定量的に明らかにし、疲労破壊起点の評価方法を提案した。

Key Words : cruciform joint, fillet weld, fatigue failure mode, toe, root

1. はじめに

すみ肉溶接継手は、鋼橋の2次部材の接合に多用されており、近年の交通車両の大型化や交通量の増大に伴って典型的な疲労損傷が報告されている。この損傷の多くは、鋼I桁橋の対傾構が取付けられた垂直補剛材やウェブギャッププレートの上端部などの荷重伝達型十字溶接継手とみなされる溶接部に生じている^{1)~3)}。この溶接継手の疲労き裂は、止端部やルート部から発生・進展している。止端部のき裂については、比較的容易に検出することができる。しかし、ルート部については、継手内部の未溶着部から疲労き裂が発生するため検出することは困難とされている。そのため、これまで疲労破壊起点に関する研究が行われてきた^{4)~8)}。

止端破壊からルート破壊へ移行する臨界の溶接脚長は臨界脚長と呼ばれ、疲労破壊起点は板厚に対する臨界脚長の比(以下、臨界脚長比と呼ぶ)で一般的に評価されている。例えば、Soeteらは溶接の溶込みがほとんど無い板厚13~15mmの荷重伝達型十字溶接継手の疲労試験を行い、臨界脚長比が0.85程度であることを示している⁴⁾。Ouchidaらは、板厚が16 mmと32 mmの十字溶接継手の疲労試験を行った⁵⁾。その結果、臨界脚長比は約1.0であり、板厚が厚くなるほど臨界脚長比が若干小さくなるこ

とを示している。また、開先深さが臨界脚長比に及ぼす影響について検討し、開先深さを溶接脚長程度設けることで、臨界脚長比が15%程度小さくなることを示している。著者らは溶接脚長と溶込み深さが臨界脚長比に及ぼす影響を解析的に検討した^{6),7)}。その結果、板厚20 mmの十字溶接継手の臨界脚長比は1.2程度であり、溶込み深さが大きい場合には1.0程度まで低下することを示した。しかし、溶接脚長、溶込み深さや板厚が疲労破壊起点に及ぼす影響は定量的に明らかにされていない。

疲労破壊起点の評価方法を確立するためには、まず、不明な点が多い溶接ルート部の疲労き裂の進展性状を明らかにする必要がある。そこで、著者らはこの進展性状について実験的に検討した⁸⁾。その結果、ルート部の先端近傍には高い圧縮残留応力が存在し、この残留応力により疲労き裂の進展速度が遅延することを明らかにした。また、実構造物で作用するような比較的小さな繰返し応力下では、ルート破壊する場合の疲労強度が圧縮残留応力により向上することを明らかにした^{6),7)}。しかし、実構造物では予期できない隣接部材の拘束が生じることなどから、ルート部の圧縮残留応力を期待することはできない。また、残留応力を精度良く測定することは困難であることなどから、荷重伝達型十字継手の疲労破壊起点は、ルート部の

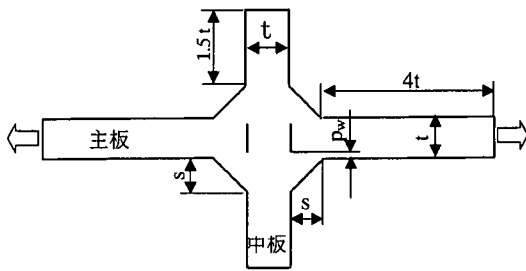


図-1 解析モデル

圧縮残留応力を考慮しない条件下で検討すべきと考えられる⁶⁾⁻¹⁰⁾。

本研究では、著者らが既に検討した臨界脚長比に及ぼす溶接脚長と溶込み深さ(開先深さ)の影響を解析モデルを追加することで再検討する。さらに、この検討結果に基づき、板厚の影響も考慮した疲労破壊起点の評価方法を提案する。そのために、溶接脚長、溶込み深さおよび板厚を様々に変化させた荷重伝達型十字溶接継手を対象とし、ルート部の圧縮残留応力を考慮しない条件下でパラメトリックな疲労き裂進展解析を行った。

2. 解析方法

解析モデルは、板厚 t を 9, 20, 40 および 75 mm とし、溶接脚長と溶込み深さを变化させた計 70 種類の荷重伝達型十字継手である。解析モデルの形状および寸法を図-1 および表-1 に示す。なお、本解析では一般的な十字溶接継手を対象とするため、解析モデルのすみ肉溶接は全て等脚長とした。その溶接止端角は 45° (二等辺三角形) とし、溶接止端の曲率半径は 0.5 mm とした。曲率半径については、溶接継手の測定結果に基づき決定した^{6),7)}。

疲労き裂進展解析では、止端部からき裂が進展する場合、およびルート部から疲労き裂が進展する場合を対象とした。これらの進展解析は、各き裂長さに対する応力拡大係数範囲を疲労き裂進展速度との関係に代入し、それを初期き裂から限界き裂まで繰返すことにより行った。なお、本解析では前述したように、実構造物では圧縮残留応力を期待できないなどの理由から、ルート部の圧縮残留応力を考慮していない。

止端破壊する場合の解析は、溶接止端に深さ 0.1 mm、幅 0.2mm の半円形の初期き裂が存在するものとした⁷⁾。また、限界き裂深さは板厚の 0.8 倍とし

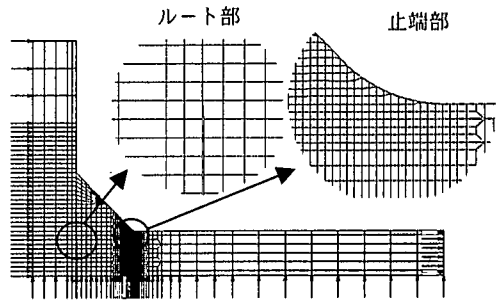


図-2 解析モデルの要素分割例

た。ルート破壊については、未溶着部を初期き裂とみなし^{9),10)}、限界き裂長さを(板厚/2+脚長 \times 0.8)とした。疲労き裂進展速度式には、日本鋼構造協会の疲労設計指針(以下、JSSC 疲労設計指針と呼ぶ)¹¹⁾に示されている平均設計曲線を用いた。また、応力拡大係数範囲の算出には、止端破壊に対して Albrecht らの式¹²⁾、ルート破壊に対しては、Frank らの式¹³⁾を用いた。なお、ここで示した解析条件の妥当性は、解析結果と疲労試験結果を比較することで検証している^{6),7)}。

止端破壊を対象とした解析では、溶接止端部のき裂進展断面における応力分布が必要となる。そのため、表-1 で示した十字溶接継手を対象として有限要素応力解析を行った。解析モデルは継手の対称性を考慮し、図-2 に示す 1/4 モデルとした。要素には 2次元平面ひずみ要素を用い、着目部である溶接止端近傍の最小要素寸法は 0.025 mm とした。なお、この要素寸法を用いたモデルの進展解析の結果は、実験結果と良く一致することを文献⁷⁾で確認している。

3. 諸因子が臨界脚長比に及ぼす影響

前述したように、著者らは既に溶接脚長と溶込み深さの影響について定性的に検討した。本章では解析モデルを増やし、それらの影響を再度検討するとともに、板厚による影響も考慮した臨界脚長比について定量的に明らかにする。そこで、表-1 で示した計70種類の解析モデルの解析結果に基づき、溶接脚長、溶接の溶け込み、板厚が臨界脚長比に及ぼす影響について検討した結果を示す。

(1) 溶接脚長の影響

ここでは、解析モデルの板厚 t を 20 mm、溶込み深さ p_w を 0 mm とし、溶接サイズ s を 9~30 mm に

表-1 解析モデルの諸寸法

板厚 t (mm)	溶接脚長 s (mm)	溶込み深さ p _w (mm)	s/t	板厚 t (mm)	溶接脚長 s (mm)	溶込み深さ p _w (mm)	s/t
9	4	0	0.444	20	24	1	1.2
		3					
		3.5					
		4					
	4.5	0	0.5	25	0	1.25	
	6	0	0.667	30	0	1.5	
	7	2	0.778	40	18	0	0.45
		3					
	9	0	1	20	18	14	0.5
		1					
		2					
	2.5	0	1.222	31	11	0.775	
					13		
	11	1	1.222	40	31	15	1
2							
13	0	1.444	48	40	0	1.2	
	2						
13.5	0	1.5	52	0	1.3		
20	9	0	0.45	60	0	1.5	
		8					
		9					
	10	0	0.5	75	34	0	0.453
		0					
	13	0	0.65	35	45	20	0.6
		1					
		2.5					
		5					
		7.5					
		9					
	10	0	0.85	53	53	12	0.707
		4					
		5					
		6					
	17	0	0.85	75	75	24	1
		4					
		5					
6							
20	0	1	98	0	1.307		
	3						
	5						
112.5	0	1.5	120	0	1.6		
	5						

変化させた場合について示す。主板断面における 2×10^6 回疲労強度と s/t の関係を図-3 に示す。ルート破壊する場合の疲労強度は、 s/t が増加するにしたがって高くなっている。この傾向は止端破壊する場合についても同様となっている。これは、荷重伝達型十字継手では、作用応力はすべてすみ肉溶接を介して伝達されるため、 s/t が小さいほど止端部の応力集中が大きくなるためと考えられる。

s/t が 1.21 よりも小さい領域では、止端破壊する場合の疲労強度がルート破壊する場合に比べ高くなっている。一方、 s/t が 1.21 より大きい領域では、止端破壊の疲労強度が低くなっている。これらの結果から、板厚 t が 20 mm で、溶込み深さ p_w が 0 mm の場合の十字溶接継手の臨界脚長比は 1.21 であると考えられる。

(2) 溶込み深さ(開先深さ)の影響

2×10^6 回疲労強度と板厚 t に対する溶込み深さ p_w の関係を図-4 に示す。ここでは、板厚 t を 20 mm、溶接サイズ s を 13 mm と一定とし、溶込み深さ p_w を変化させた解析結果を示している。 p_w が増加するに伴い、ルート破壊する場合の疲労強度は向上している。止端破壊する場合についても、 p_w が大きくなるにしたがって、疲労強度は高くなっている。これは、溶込み深さが増加することで、作用応力がすみ肉溶接部を介して伝達される割合に比べ、直接主板を介して中板に応力が伝達される割合が大きくなるためである。この分だけ、溶接止端部の応力集中が緩和される。なお、 p_w が 0~10 mm(完全溶込み)に増加することで、止端部の応力集中係数は 5.46 から 3.59 に約 35% 低減した。

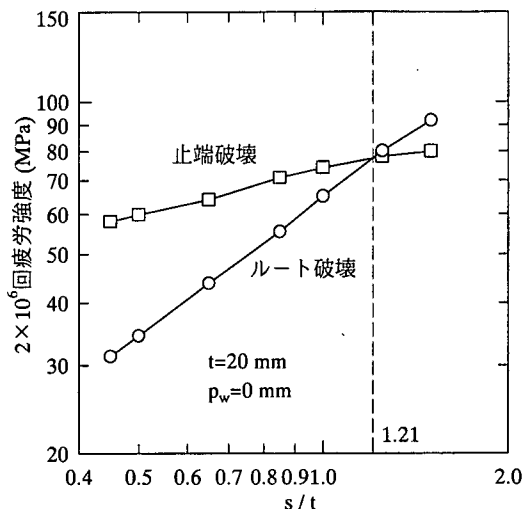


図-3 溶接脚長が臨界脚長比に及ぼす影響

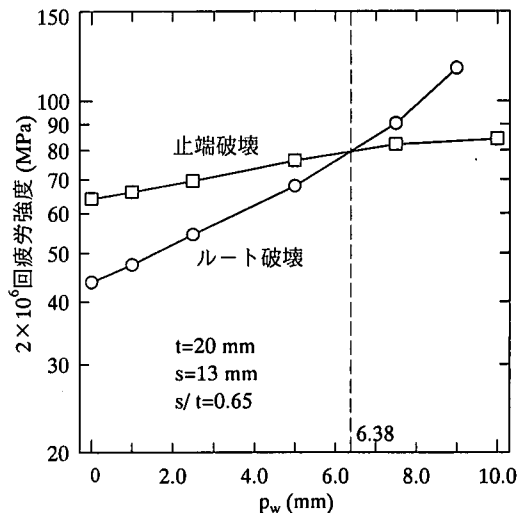
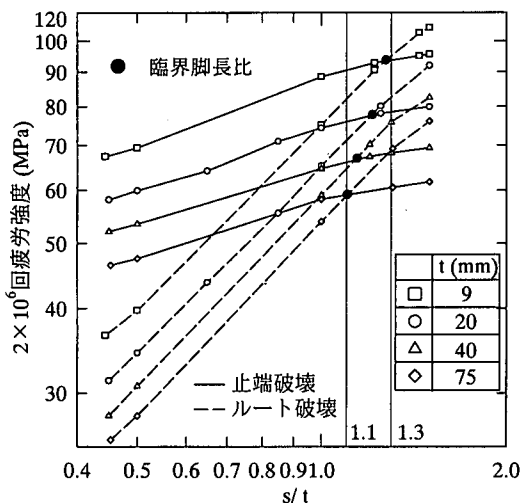
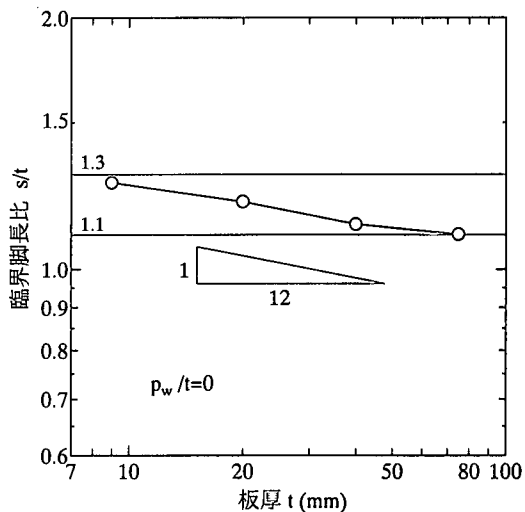


図-4 溶込み深さが臨界脚長比に及ぼす影響



(a) 板厚の影響



(b) 臨界脚長比と板厚の関係

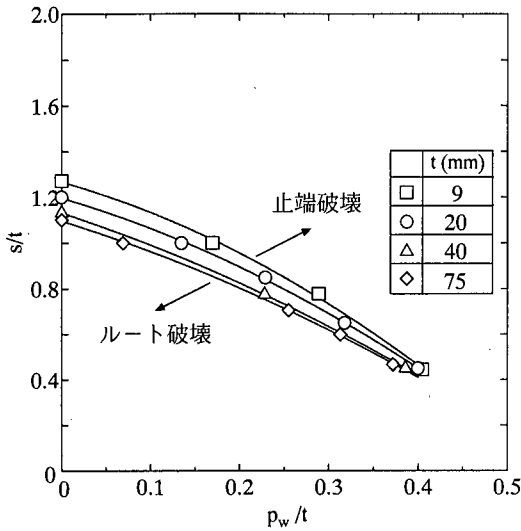
図-5 板厚が臨界脚長比に及ぼす影響

止端破壊とルート破壊する場合の疲労強度は p_w が 6.38 mm の時に交差しており、この値より小さい領域ではルート破壊の疲労強度が低くなっており、大きい領域では止端破壊の疲労強度が低くなっている。JSSC 疲労設計指針では溶込みがある場合の荷重伝達型十字溶接継手(ルート破壊)の疲労強度をのど厚を $(s + p_w) / \sqrt{2}$ として評価するものとしている。すなわち、溶込み分だけ溶接脚長が大きくなるものとしている。 p_w が 6.38 mm のときの臨界脚長比 s/t は 0.97 となり、溶込みが無い場合(臨界脚長比 1.21)に比べ 20% 小さくなる。

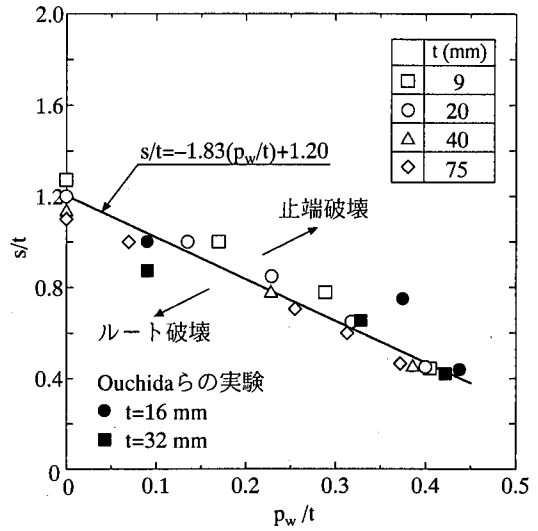
(3) 板厚の影響

板厚 t が臨界脚長比に及ぼす影響を図-5 に示す。ここでは、溶込みが無い継手モデルの解析結果を示している。図(a)では横軸を s/t としている。止端破壊とルート破壊する場合の臨界脚長比は、 t が 9 ~ 75 mm に増加するにしたがって小さくなっている。なお、この傾向は溶込みがある場合についても同様であった。

臨界脚長比 s/t と板厚 t の関係を図(b)に示す。 t が 9 ~ 75 mm に増加することで、臨界脚長比は 1.3 から 1.1 に板厚の $1/12$ 乗に反比例して低下している。しかし、板厚が疲労破壊起点に及ぼす影響は比較的



(a) s/t と p_w/t の回帰曲線



(b) s/t と p_w/t の回帰直線

図-6 溶接脚長, 溶込み深さと板厚が疲労破壊起点に及ぼす影響

小さいものと考えられる。

4. 疲労破壊起点の評価方法の提案

溶接脚長 s , 溶込み深さ p_w および板厚 t を変化した十字溶接継手の臨界脚長比 s/t と p_w/t の関係を図-6 に示す。図(a)では t を 9~75 mm とした場合の疲労破壊の臨界点から算出した 2 次の回帰曲線を示す。溶込みがある場合についても図-5 と同様に t が大きくなるにしたがって、臨界脚長比 s/t は小さくなっている。 p_w/t と臨界脚長比 s/t の関係から、各回帰曲線の下側の領域ではルート破壊、上側の領域では止端破壊するものと考えられる。

板厚が疲労破壊起点に及ぼす影響は比較的小さいことから、破壊起点をより簡便に評価するため、図(a)中の全てのプロットに基づき回帰直線を算出した。その結果を図(b)に示す。回帰解析から疲労破壊起点は以下の条件式で与えられる。

$$\text{ルート破壊} : s/t \leq \alpha \quad (1)$$

$$\text{止端破壊} : s/t \geq \alpha \quad (2)$$

$$\alpha = -1.83(p_w/t) + 1.20 \quad (3)$$

JSSC 疲労設計指針では、as-welded の荷重伝達型十字溶接継手が止端破壊する場合とルート破壊する場合の 2.0×10^6 回疲労強度をそれぞれ 65 MPa

(主板断面の応力範囲)と 40 MPa (のど断面の応力範囲)としている。これらの 2.0×10^6 回疲労強度から、臨界脚長比を試算すると 1.15 となる。この試算結果は、溶け込みが無い十字溶接継手の臨界脚長比が 1.1~1.3 であることから、解析結果と良く一致していると言える。

図-6 の黒塗りのプロットは、Ouchida らの板厚 16 mm および 32 mm の荷重伝達型十字溶接継手(焼きなまし処理)の試験結果⁵⁾から得られた s/t と p_w/t の関係を示している。本解析から得られた回帰直線は、Ouchida らの試験結果から推定した臨界脚長比 s/t と p_w/t の関係と比較的良く一致している。したがって、式(1)~(3)の条件式を用いることで、疲労破壊起点を評価できるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、溶接脚長, 溶込み深さおよび板厚が荷重伝達型十字溶接継手の臨界脚長比に及ぼす影響を定量的に明らかにし、臨界脚長比の評価方法を確立することを目的とした。そのために、継手の諸寸法を様々に変化した十字溶接継手モデルを用いてパラメトリックな疲労き裂進展解析を行った。

以下に、本研究で得られた主な結果を示す。

- (1) 溶接の溶込みが無い荷重伝達型十字溶接継手の臨界脚長比は、1.1(板厚 75 mm)~1.3(板厚 9 mm)程度である。

- (2) 溶込みが大きくなるにしたがって、臨界脚長比は小さくなる。
- (3) 臨界脚長比は板厚の 1/12 乗に反比例して低下するが、板厚が臨界脚長比に及ぼす影響は比較的小さい。
- (4) 疲労破壊起点の定量的な評価を行うための簡便な評価方法を提案した。

ルート破壊 : $s/t \leq \alpha$
 止端破壊 : $s/t \geq \alpha$

$$\alpha = -1.83(p_w/t) + 1.20$$

謝辞：本研究の一部は、平成 11 年度文部省科学研究費 奨励研究(A)の補助金を用いて実施した。

参考文献

- 1) 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，第 368 号/I-5，pp.1-12，1986。
- 2) 岩崎雅紀，名取暢，深沢誠，寺田博昌：鋼橋の疲労損傷事例と補修・補強対策，横河橋梁技報，No.18，pp.1-17，1989。
- 3) 西川和廣：道路橋における疲労問題と補修・補強，橋梁と基礎，pp.19-23，1983。
- 4) Soete, W. and Van Crombrugge, R. : Fatigue Strength of Welded Joints, *Welding Journal*, Vol.31, No.2, pp.100-103, 1952。
- 5) Ouchida, H. and Nishioka, A. : A Study of Fatigue of Fillet Welded Joints, *Hitachi Review*, Vol.13 No.2, pp.3-14, 1964.
- 6) Mori, T. and Kainuma, S. : A Study on Fatigue Crack Initiation Points in Load-Carrying Type of Cruciform Fillet Welded Joints, *The Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction*, pp.219-224, 1999。
- 7) 森猛，一宮充：荷重伝達型十字すみ肉溶接継手の疲労破壊起点の検討，溶接学会論文集，第17巻，第1号，pp.94-101，1999。
- 8) 貝沼重信，森猛，一宮充：十字すみ肉溶接継手のルート部から発生する疲労き裂の進展性状，鋼構造論文集，Vol4, No.14, pp.1-8, 1997。
- 9) 森猛，貝沼重信，三木千尋：荷重伝達型十字すみ肉溶接継手ルート破壊の疲労強度解析，構造工学論文集，Vol.39A, pp.397-946, 1993。
- 10) 森猛，貝沼重信：荷重伝達型十字すみ肉溶接継手・ルート破壊の疲労強度評価方法の提案，土木学会論文集，No.501/I-29, pp.95-102, 1994。
- 11) 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。
- 12) Albrecht, P. and Yamada, K. : Rapid Calculation of Stress Intensity Factors, *Proceedings of ASCE*, Vol.103, ST2, pp.377-389, 1977。
- 13) Frank, K.H. and Fisher, J.W. : Fatigue Strength of Fillet Welded Cruciform Joints, *Proceedings of ASCE, Journal of the Structural Division*, ST9, pp.1727-1740, 1979。

(2000. 4. 26 受付)

EVALUATION METHOD FOR FATIGUE FAILURE MODES IN LOAD-CARRYING FILLET WELDED CRUCIFORM JOINTS

Shigenobu KAINUMA, Takeshi MORI and Mitsuru ICHIMIYA

During the service of steel bridges, typical fatigue cracks have been found at the toes and the roots of welded joints considered as load-carrying fillet welded joints. It is well known that the fatigue failure modes are influenced by three fundamental factors: the weld size, the weld penetration and the plate thickness. However, since their effects on fatigue failure mode have not been clarified, no evaluation method has been established. In this study, parametric fatigue life analyses were carried out on the fillet welded cruciform joints in order to quantitatively clarify the influences on the fatigue failure modes. According to the analytical results, a quantitative method for evaluating the fatigue failure modes was proposed in consideration of the weld size, the weld penetration and the plate thickness.