

溶接脚長および溶け込み深さが鋼製橋脚隅角部の延性き裂発生・進展に及ぼす影響

羽田 新輝¹・葛 漢彬²・速水 景³・鈴木 俊光⁴

¹学生会員 名城大学大学院 建設システム工学専攻 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

E-mail: 123437016@ccalumni.meijo-u.ac.jp

²正会員 博(工) 名城大学教授 理工学部建設システム工学科

(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

E-mail: gehanbin@meijo-u.ac.jp

³学生会員 名城大学大学院 建設システム工学専攻 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

E-mail: 113437009@ccalumni.meijo-u.ac.jp

⁴正会員 博(工) 三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 橋梁事業本部

(〒730-8642 広島市中区江波沖町 5-1)

E-mail: toshimitsu_suzuki@mbe.mhi.co.jp

本研究は、鋼製橋脚における溶接部の溶接脚長の差や溶け込み深さの違いによる、延性き裂の発生・進展への影響を明らかにすることを目的とする。鋼製橋脚隅角部の十字継手を模擬し、十字継手内に溶接未溶着が内在する実験供試体を用いた繰り返し載荷実験を行い、溶接脚長および溶け込み深さのデータを計測・整理・分析し、これらが与える延性き裂発生・進展への影響についての検討を行い、その結果、き裂の発生箇所や未溶着の大きさに関わらず、溶着部分の大きさが最も小さいところでき裂が進展することを明らかにした。また、溶着部分が小さい場合においても、フィレットの半径が大きくなると耐荷力の低下時期が遅くなるという結果を得た。

Key Words : *Ductile crack, Beam-column connection, Welding defect, Leg length, Cyclic loading, Extremely low cycle fatigue, Thick-walled steel member,*

1. はじめに

1995年1月に発生した兵庫県南部地震では多くの建築鋼構造物をはじめ、鋼製橋脚においても過去に経験したことのない甚大な被害を受けた。中でも神戸ハーバーハイウェイ P75 橋脚の隅角部においては、鋼橋において初めて延性き裂を起点とした脆性的な破壊モードが確認された¹⁾。それまでの土木鋼構造物設計基準では強大な地震動による脆性的な破壊は想定されておらず、以降、鋼構造物に対する地震時挙動、破壊性状に関する研究が多く行われてきた²⁾⁶⁾。

しかしながら、上記の研究において溶接部の詳細まで考慮されている研究は少ない。実際の溶接構造物では溶

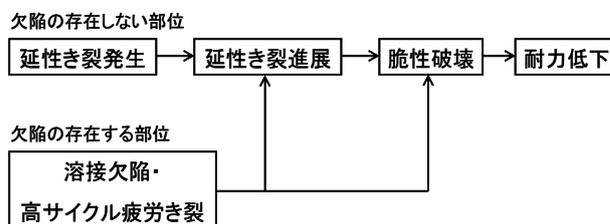


図-1 土木構造物の地震時脆性破壊の経路模式図

接構造や溶け込み深さは様々であり、また部位によっては溶接ビードの仕上げを行うケースもあり、一概に溶接部といってもその形状は多岐にわたる。

一方、近年溶接構造物の施工時における溶接不具合(欠

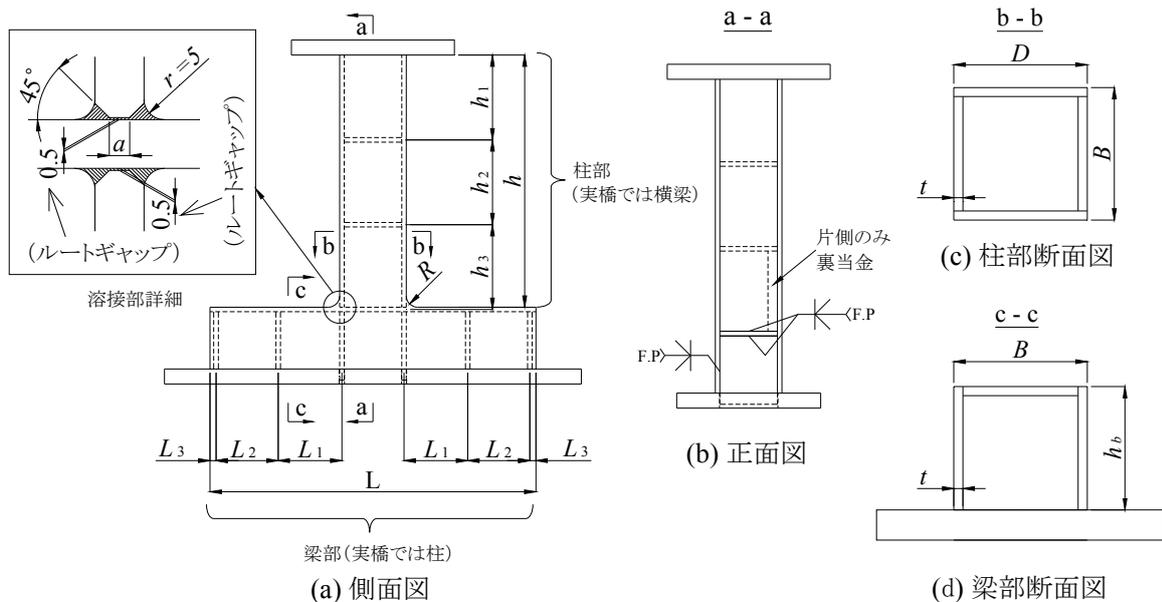


図-2 供試体概要図

陥)の内在が問題視されてきており、三木らによって鋼製橋脚隅角部の施工の不具合に関する報告⁷⁾がなされているが、過去に行われてきた鋼製橋脚等の実験においては、このような溶接欠陥を有する場合の低サイクル疲労寿命に及ぼす影響に関する詳細な検討は非常に少ない。

ここで、土木構造物の地震時脆性破壊の機構について述べる。図-1に地震時に土木構造物がたどると考えられる脆性破壊の経路模式図を示す。溶接欠陥の存在する部位では、溶接欠陥から延性き裂が進展する場合や、延性き裂の進展を待たずに脆性破壊を引き起こす可能性もあることから、非常に危険な破壊モードを呈する可能性があると考えられる。

延性き裂発生を起点とした一連の破壊機構を考慮した場合、設計においてどの時点が破壊基準と捉えるのかが問題となるが、最も厳しいのは延性き裂発生を破壊基準と捉える場合である。次に延性き裂進展、脆性破壊が破壊基準として考えられる。しかしながら、延性き裂進展から脆性破壊に至る機構が十分に解明されていない現状では、これらを設計段階で評価することは非常に困難であると考えられる。また、鋼製橋脚などの土木鋼構造物では一旦脆性破壊が発生すると崩壊につながることも考えられるので、脆性破壊の発生を防ぐ事は非常に重要である。

筆者らはこれまでに本来完全溶け込み溶接が要求される鋼製橋脚隅角部の三線交差部ならびに十字継手内部に溶接未溶着が存在する場合を想定し、その溶接未溶着が地震時の延性き裂発生に与える影響について実験ならびに解析的研究を実施し、その地震時挙動や延性破壊性状について報告を行ってきた⁸⁾⁻¹⁰⁾。

しかしながら、これらの研究では、未溶着高さによる

影響や、フィレットの半径による影響が検討されてきたものの、各々の実験供試体における溶接脚長の差や溶け込み深さの違いによる影響については十分な検討が行われていない。

そこで、本研究では鋼製橋脚隅角部の十字継手を模擬し、十字継手内に溶接未溶着が内在する実験供試体を用いた繰り返し载荷実験を行い、各供試体の溶接脚長や溶け込み深さの実測値と実験結果を照らし合わせることで、溶接脚長および溶け込み深さが与える延性き裂発生・進展への影響について定量的な検討を行った。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

実験供試体は鋼製橋脚隅角部を想定したものである。実験供試体は鋼製橋脚と横梁の剛結構造からなる隅角部を模擬した無補剛厚肉断面の梁-柱の接合部としている。使用材質は実橋脚で使用が多いSM490Yクラスの鋼材であり、板厚は12mmとした。実験供試体の概要図を図-2に示す。

供試体の梁-柱交差部には未溶着高さ a の溶接未溶着および間隔 0.5mm のルートギャップが導入されている。また、供試体の柱部には h_1 , h_2 , h_3 の間隔で、梁部には L_1 , L_2 の間隔でダイヤフラムが設置されている。なお、実験における载荷機構と供試体設置の制約から本来の構造を90度回転させた形で供試体を設置しているため、供試体における柱部は実橋での横梁、梁部は実橋での柱となる。

供試体の梁-柱交差部には、 $a = 5\text{mm}$ の供試体では半

表-1 供試体構造パラメータ一覧

(単位: mm)

供試体名	h	h_1	h_2	h_3	h_b	L	L_1	L_2	L_3	B	D	t	R	鋼板 No.
S30-0-5-R-VC-MD	670	225	225	225	163	857	168	164	16	175	176	12.07	7	1
S30-2-5-R-VC-MD	671	225	225	225	164	857	168	164	16	176	177	12.07	8	1
S30-5-5-R-VC-MD	669	225	225	225	165	860	168	164	16	174	176	12.20	7	2
S30-5-15-R-VC-MD	670	225	225	225	165	858	168	164	16	175	176	12.22	18	3
S30-5-30-R-VC-MD	670	225	225	225	166	860	168	164	16	175	176	12.22	30	3
S30-8-5-R-VC-MD	670	225	225	225	165	858	168	164	16	175	175	12.07	5	2
S30-8-15-R-VC-MD	670	225	225	225	164	860	168	164	16	175	176	12.22	17	3
S30-8-30-R-VC-MD	670	225	225	225	163	860	168	164	16	175	176	12.22	29	3
S30-8-50-R-VC-MD	668	225	225	225	166	858	168	164	16	175	176	12.20	52	2
S30-8-100-R-VC-MD	668	225	225	225	166	858	168	164	16	175	176	12.20	101	2

Note: h =柱部高さ, L =梁部長さ, B =フランジ幅, D =ウェブ幅, t =板厚, R =フィレット半径. その他は図-2を参照されたい

表-2 鋼材の引張試験結果

鋼板 No.	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)	ν	E (GPa)	E_{st} (GPa)	ϵ_{st} (%)
1	368	0.17	517	19.4	0.31	214	5.27	1.02
2	421	0.20	517	26.0	0.28	213	2.77	2.77
3	407	0.20	518	26.0	0.27	208	5.00	1.70

Note: σ_y =降伏応力, ϵ_y =降伏ひずみ, σ_u =引張強さ, ϵ_u =破断ひずみ, ν =ポアソン比, E =ヤング率, E_{st} =ひずみ硬化開始時の硬化係数, ϵ_{st} =ひずみ硬化開始時のひずみ.

径 $R=15, 30\text{mm}$, $a=8\text{mm}$ の供試体では $R=5, 15, 30, 50, 100\text{mm}$ のフィレットを設けている. 十字溶接継手部には仕上げ半径 5mm の R 仕上げを施した. 仕上げ部はグラインダー等による仕上げ傷が残らないように留意するとともに, 三線交差部の3方向からの溶接ビードラップ部分の余盛を形成し, 溶接ラップに伴うビード仕上がり形状の影響を排除した.

一般的な隅角部の設計においては, 梁-柱幅の $1/2$ 程度を剛域として構造解析を行い, 塑性化を許容しない設計が行われるが, 本研究での供試体の設計において, 柱についてはクラック発生前に繰り返し荷重に伴う母材の局部座屈による耐荷力低下を防止するために幅厚比パラメータ R_f を 0.3 として設計を行い, その断面を梁にも適用して隅角部を構成した. 幅厚比パラメータは次式により定義される.

$$R_f = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 \cdot 4n^2}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (1)$$

ここに, b =フランジの板幅, t =フランジの板厚, σ_y =降伏応力, E =弾性係数, ν =ポアソン比, n =サブパネル数(本研究の対象は無補剛断面であるため $n=1$) である.

供試体の名称は S30-8-100-R-VC-MD を例にとると, S (鋼製部材) 30 (幅厚比パラメータの 100 倍の値) - 8

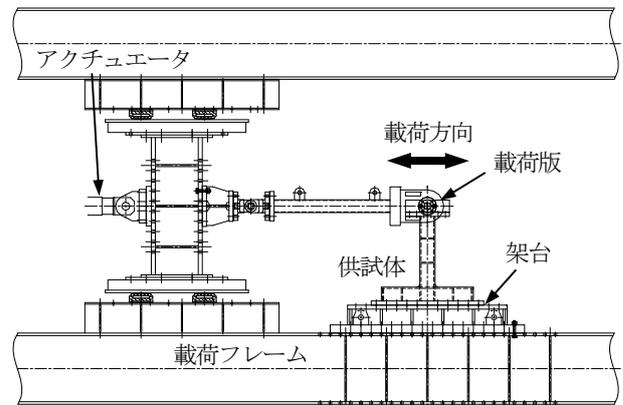


図-3 荷重装置概要図

(十字溶接部内の溶接未溶着高さ $a=8\text{mm}$) - 100 (フィレット半径) - R (R 仕上げ) - VC (荷重パターン) を表す. 「MD」については, 過去の研究での供試体が $s=10\text{mm}$ (設計値) の溶接ビード脚長であったのに対し, 本研究では $s=5\text{mm}$ (設計値) に変更していることを表す. また, 過去の研究において, $s=10\text{mm}$ とした場合, その多くがフィレット上端部から延性き裂が発生することが確認されている¹⁰⁾.

表-1 に供試体各部の寸法を示す. ここに示す測定値は設計値ではなく実測値である. また, 供試体の製作に用いた鋼板が3種類と異なっていることから, 表-1内の「鋼

板 No.」欄に用いた鋼板を示し、それぞれの引張試験結果を表-2 に示す。

材料定数は、試験片 3 本の平均値より求めた応力-ひずみ曲線から、弾性域での直線部分を最小二乗法により近似した傾きからヤング係数 E 、降伏棚での応力の平均より降伏応力 σ_y 、ひずみ硬化開始時の傾きを最小二乗近似して得た傾きよりひずみ硬化係数 E_{st} 、 $\sigma_y = E_{st} \epsilon_y$ の関係から得た降伏ひずみ ϵ_y を求めた。さらに、横ひずみのグラフにおける初期の直線部分を最小二乗近似して得た傾き E_t と E の比からポアソン比 ν を求めた。

(2) 実験装置

本実験の実験装置の概略図を図-3 に示す。水平方向の荷重は荷重フレームの柱に固定したアクチュエータ（±1000 kN）により荷重を行い、アクチュエータの水平ストロークにより供試体頂部に水平変位が与えられる仕組みになっている。またアクチュエータの先端にはヒンジを取り付け、常に水平方向に荷重できる構造となっている。供試体と架台および荷重版、架台と荷重フレーム間はそれぞれ高力ボルトで連結した。なお、本実験は十字継手部の溶接性状に着目した実験であり、供試体の梁部をベースプレートに固定しており、実際の梁-柱からなる隅角部の曲げ性状を完全には再現するものではないが、この影響は今後、実験、解析を含め検討を行う必要がある。

(3) 荷重パターン

荷重パターンについては、各供試体における降伏水平変位である δ_y を基準とした、1 サイクル毎の漸増変位振幅繰り返し荷重とし、図-4 に示すような荷重パターンとした。

(4) 角部番号

以下に示す実験結果において、き裂発生箇所を表す際に図-5 に示すような角部番号を用いた。初荷重圧縮側に角部 1 および角部 3、初荷重引張側に角部 2 および角部 4 となるように角部番号を設けた。

また、以降に示すき裂長さ L_c は、同図中右上に示すように、き裂両端の水平方向距離であり、き裂発生高さは梁フランジ表面からの距離を表す。

3. 実験結果

(1) 各供試体の破壊様式比較

写真-1 に、フィレット半径 $R=5\text{mm}$ の供試体のき裂進展状況を示す。

$R=5\text{mm}$ の供試体の場合、未溶着高さ $a=0, 2\text{mm}$ の供試体（写真(a), (b)）では十字溶接継手部に大きくき裂は進展せず、柱フランジにおいてき裂が進展した。このき

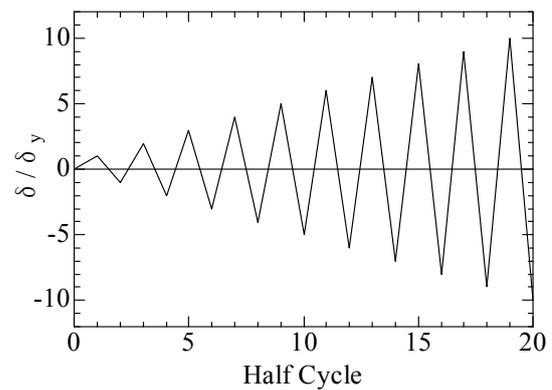


図-4 荷重パターン

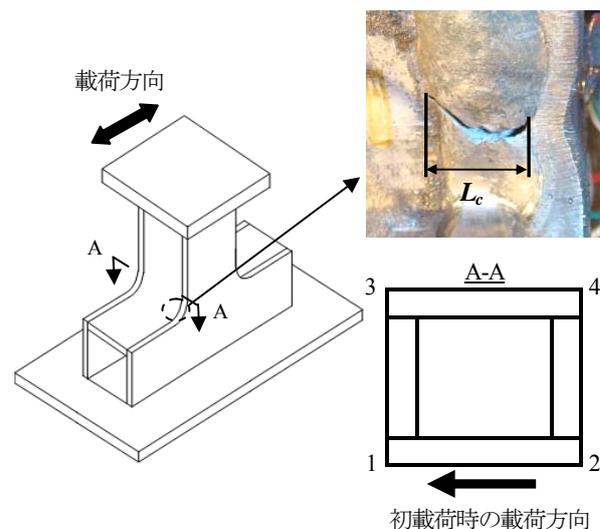


図-5 隅角部の角部番号とき裂長さの定義

裂はウェブ板端部付近に発生し、フランジ中央方向に向かって進展した。

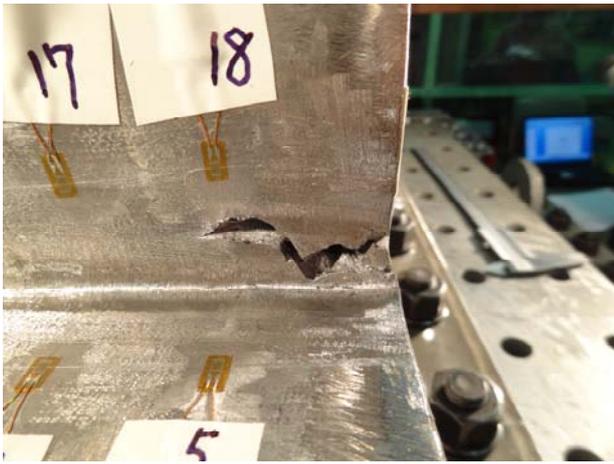
それに対して $a=5, 8\text{mm}$ の供試体（写真(c), (d)）では十字溶接継手部にき裂が発生し、溶接ビードに沿って進展した。この場合、ウェブ板にき裂が発生せず、十字溶接継手にて発生したき裂がウェブ板方向に向かって進展した。

写真-2 に、 $R=15, 30, 50, 100\text{mm}$ の供試体のき裂進展状況を示す。

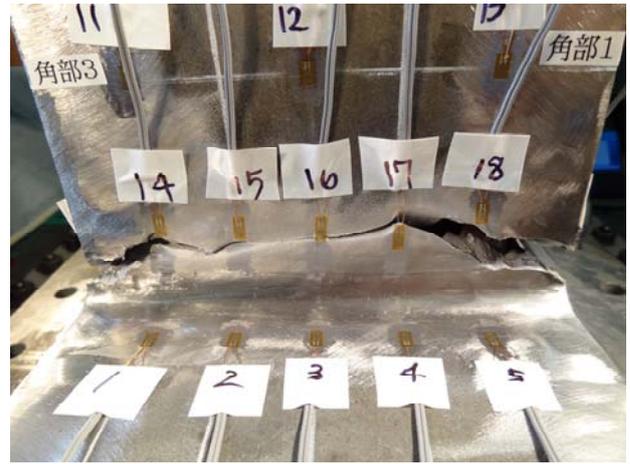
$R=15, 30, 50\text{mm}$ （写真(a)~(e)）の供試体では十字溶接部にてき裂が進展し、それに伴い荷重が大きく低下したが、 $R=100\text{mm}$ の供試体（写真(f)）では、き裂がフランジ幅全域にき裂が進展しても荷重が大きく低下せず、ウェブ板と柱フランジの溶接部にき裂が進展した後に荷重が大きく低下した。

(2) き裂発生点・き裂進展の比較

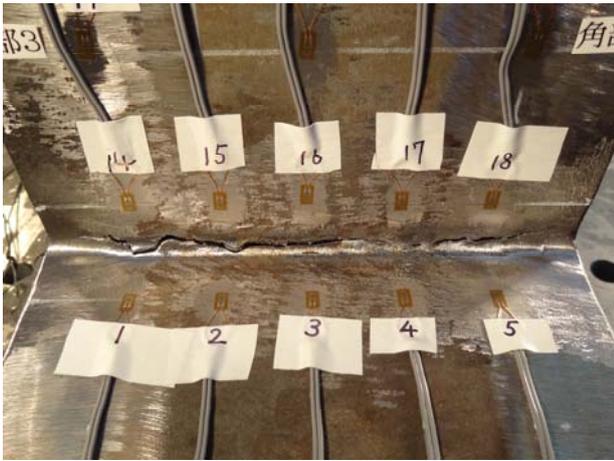
表-3 に各供試体における最初のき裂発生点と発生箇所、荷重 10%低下時の荷重段階とその時の最大き裂進展



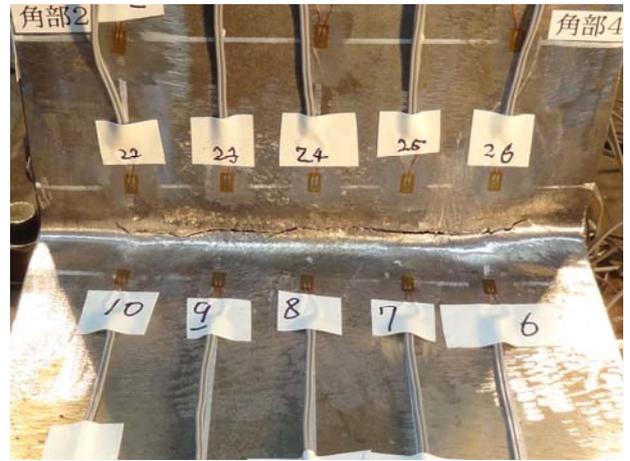
(a) S30-0-5-R-VC-MD



(b) S30-2-5-R-VC-MD



(c) S30-5-5-R-VC-MD



(d) S30-8-5-R-VC-MD

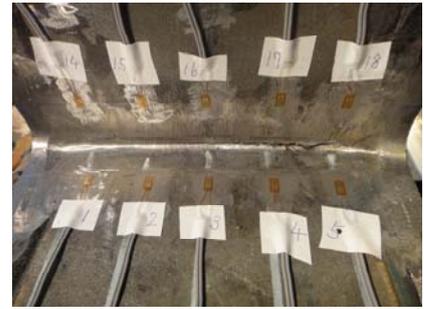
写真-1 各供試体のき裂進展状況 (R=5mm)



(a) S30-5-15-R-VC-MD



(b) S30-5-30-R-VC-MD



(c) S30-8-15-R-VC-MD



(d) S30-8-30-R-VC-MD



(e) S30-8-50-R-VC-MD



(f) S30-8-100-R-VC-MD

写真-2 各供試体のき裂進展状況 (R=15, 30, 50, 100mm)

表-3 き裂発生・進展状況

供試体名	き裂発生日	最初のき裂発生部位 (梁フランジ表面から の高さ)	荷重 10% 低下時の 荷重段階	荷重 10%低下時 または実験終了時の 最大き裂進展箇所
S30-0-5-R-VC-MD	8 Half Cycle 荷重後の $-4\delta_y$	柱フランジ(9.8mm)	—	柱フランジ, ウェブ板
S30-2-5-R-VC-MD	5 Half Cycle 荷重中($-2\delta_y \rightarrow 3\delta_y$)	十字溶接継手部	20 Half Cycle	柱フランジ, ウェブ板
S30-5-5-R-VC-MD	4 Half Cycle 荷重中($2\delta_y \rightarrow -2\delta_y$)	十字溶接継手部	6 Half Cycle	十字溶接継手部
S30-5-15-R-VC-MD	16 Half Cycle 荷重後の $-8\delta_y$	十字溶接継手部	24 Half Cycle	十字溶接継手部
S30-5-30-R-VC-MD	16 Half Cycle 荷重後の $-8\delta_y$	柱フランジ(14.0mm)	26 Half Cycle	十字溶接継手部
S30-8-5-R-VC-MD	5 Half Cycle 荷重中($-2\delta_y \rightarrow 3\delta_y$)	十字溶接継手部	5 Half Cycle	十字溶接継手部
S30-8-15-R-VC-MD	3 Half Cycle 荷重後の $2\delta_y$	十字溶接継手部	6 Half Cycle	十字溶接継手部
S30-8-30-R-VC-MD	6 Half Cycle 荷重後の $-3\delta_y$	十字溶接継手部	11 Half Cycle	十字溶接継手部
S30-8-50-R-VC-MD	5 Half Cycle 荷重中($-2\delta_y \rightarrow 3\delta_y$)	十字溶接継手部	—	十字溶接継手部
S30-8-100-R-VC-MD	8 Half Cycle 荷重後の $-4\delta_y$	十字溶接継手部	14 Half Cycle	十字溶接継手部

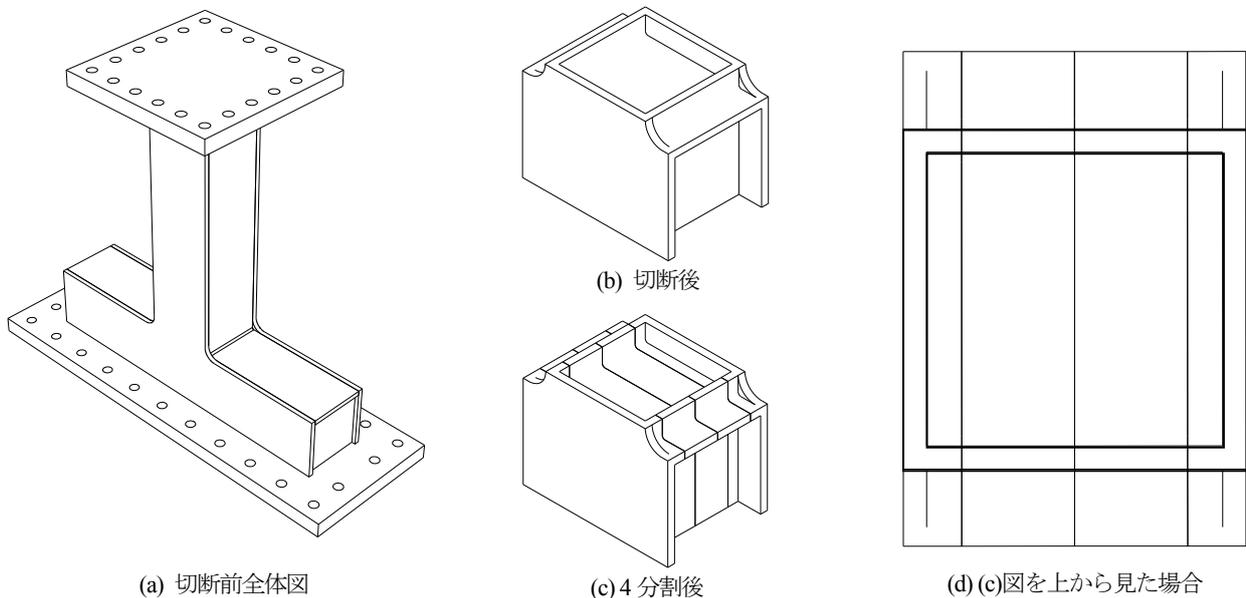


図-6 供試体の切断

箇所を示す。なお、S30-0-5-R-VC-MD および S30-8-50-R-VC-MD については、荷重 10%低下まで実験を行っていないため、「荷重低下時期」欄に「—」と示した。

き裂発生日に関して、未溶着高さが大きくなるほどき裂発生が早くなる傾向が確認できた。

S30-0-5-R-VC-MD と S30-5-30-R-VC-MD では、梁フランジからそれぞれ 9.8mm, 14.0mm の位置にき裂が発生し、これは十字継手部ではなく柱フランジからのき裂発生であるといえる。その後、S30-0-5-R-VC-MD では柱フランジおよびウェブ板においてき裂が進展したが、S30-5-30-R-VC-MD では最初に発生したき裂はほとんど進展せず、新たに十字継手溶接部に生じたき裂が大きく進展した。また、S30-2-5-R-VC-MD では十字継手溶接部に最初のき裂が発生したが、このき裂はあまり進展せず、後

に柱フランジに発生したき裂が大きく進展した。

き裂進展に関して、未溶着高さが $a=0, 2\text{mm}$ の供試体では、最初のき裂発生部位に関わらず柱フランジおよびウェブ板において進展したが、 $a=5, 8\text{mm}$ の供試体では、最初のき裂が柱フランジで発生した S30-5-30-R-VC-MD を含むすべての供試体で十字継手溶接部においてき裂が進展した。

また、き裂進展による荷重低下時期は、フィレットの半径が大きくなるほど遅くなった。

(3) 各供試体の溶接脚長および溶け込み深さ

各供試体において溶接部の性状を確認するために、実験後の供試体を切断し、ノギスを用いて溶接脚長および溶け込み深さの計測を行った。

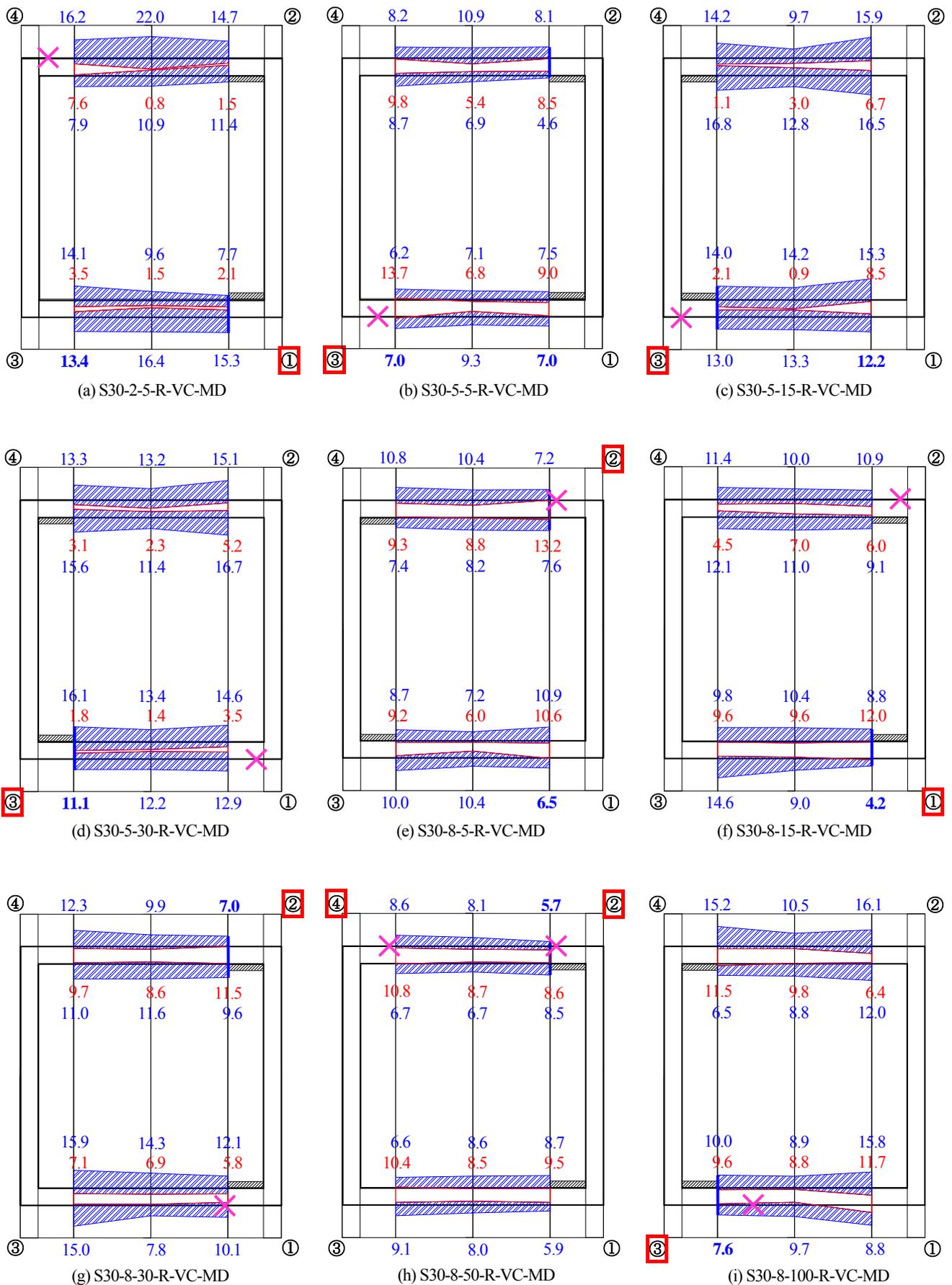


図-7 各供試体の十字継手内部の溶接性状

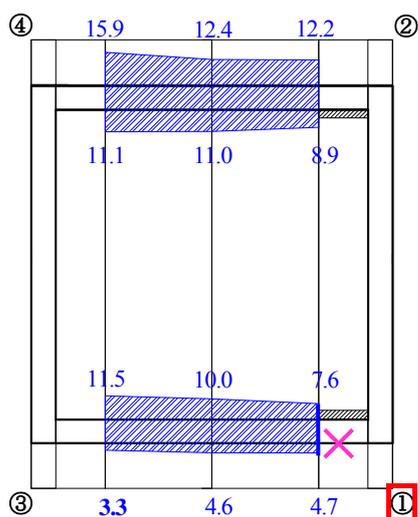


図-8 S30-0-5-R-VC-MD 十字継手内部の溶接性状

表-4 超音波探傷による計測と切断後の実測値の比較

供試体名		各部の測定値		
2-5	実測値	3.5mm	1.5mm	2.1mm
	超音波	3.5mm	5.3mm	3.9mm
	誤差	0%	31.7%	15.0%
5-5	実測値	9.8mm	5.4mm	8.5mm
	超音波	3.6mm	7.6mm	2.7mm
	誤差	51.7%	18.3%	48.3%
8-5	実測値	9.2mm	6.0mm	10.6mm
	超音波	9.0mm	9.6mm	7.3mm
	誤差	1.7%	30.0%	27.5%
8-50	実測値	10.8mm	8.7mm	8.6mm
	超音波	8.9mm	10.4mm	6.8mm
	誤差	15.8%	14.2%	15.0%
8-100	実測値	11.5mm	9.8mm	6.4mm
	超音波	8.5mm	9.4mm	8.8mm
	誤差	25.0%	3.3%	20.0%

未溶着のないS30-0-5-R-VC-MDを除く9本の供試体の計測結果を図-7に示す。図-6に示すように、図-7は供試体の梁部分および柱部分を切断し、4分割したものを上から見た図である。

図-7に示す、青斜線部分が溶接脚長と溶け込み深さを合わせた溶着部分であり、青数字はその大きさである。赤枠で囲まれた部分は溶接未溶着部であり、赤数字で大きさを示す。×は最初の子裂発生箇所を表す。四隅の丸数字は図-5で示した角部番号であり、赤枠で囲まれた角部は、荷重低下時に最も大きく子裂が進展していた箇所である。黒斜線部分は、溶接作業時に裏当金を用いた場所である。

図-7中に「×」で示す最初の子裂発生箇所に関して、

(a) S30-2-5-R-VC-MD および(g) S30-8-30-R-VC-MD では、どちらも溶着部分の大きさが表側、表裏合計値共に最小ではない箇所でき裂が発生したが、前者は子裂発生箇所近傍の未溶着高さが最大であることに対し、後者は未溶着高さが最小である。また、前者の子裂発生箇所は表側の溶着部分が最大の箇所である。

(c) S30-5-15-R-VC-MD および(e) S30-8-5-R-VC-MD では、溶着部分の表裏合計値が最小であり、表側は最小ではない箇所でき裂が発生したが、前者の子裂発生箇所は未溶着高さが比較的小さい箇所であり、後者は未溶着高さが最大の箇所である。

(i) S30-8-100-R-VC-MD では、溶着部分が表側、表裏合計値ともに最小であり、未溶着高さは比較的小さい箇所でき裂が発生した。

子裂発生箇所については、未溶着の大きさや溶け込み深さ、脚長の大きさに起因する全体的な傾向がみられず、各供試体でバラつきがみられる。

図-7中の角部番号を赤枠で囲んで示した子裂進展箇所に関しては、(a) S30-2-5-R-VC-MD、(c) S30-5-15-R-VC-MD、(e) S30-8-5-R-VC-MDを除く6本の供試体では、各角部に近い4つの測定箇所の内、未溶着部から外側の溶着部が最も小さい、太字で大きさを示した箇所（例えばS30-8-100-R-VC-MDでは7.6mmの箇所）で耐荷力低下につながる最も大きな子裂が進展した。

(b) S30-5-5-R-VC-MDを除く8本の供試体では、角部に近い4ヶ所の測定箇所のうち、図-7中に青太線で示す、供試体表面と内部の溶着部分の大きさの合計値が最も小さいところ((a) S30-2-5-R-VC-MDでは7.7 + 15.3 = 23)でき裂が進展した。また、溶接未溶着が大きい場合でも、溶接脚長により溶着部分が大きくなるとその周囲でき裂は進展せず、溶着部分の小さい箇所から進展することが(c) S30-5-15-R-VC-MD や(i) S30-8-100-R-VC-MD から確認できる。また、(c) S30-5-15-R-VC-MD と(d) S30-5-30-R-VC-MD では、子裂進展箇所の溶着部分がほぼ同じ大きさであるが、荷重10%低下時期が後者の方が2Half Cycle 遅いことや、(e) S30-8-5-R-VC-MD に比べ溶着部分の小さい(f) S30-8-15-R-VC-MD の子裂進展が1Half Cycle 遅いことから、同じ溶着部分の大きさであっても、フィレット半径が大きくなると、耐荷力の低下時期が遅くなるといえる。

S30-0-5-R-VC-MDの十字継手内部の溶接性状を図-8に示す。この図において、青数字は先の図-7とは異なり、溶接脚長を表し、また、完全溶け込み溶接であるため未溶着部は存在しない。したがって赤数字を記していない。即ち、各部の青数字に板厚である12mmを加えたものが溶着部分の大きさとなる。

図-8に示すように、S30-0-5-R-VC-MDにおいても、他の供試体と同じように、溶着部分が最も小さい箇所でき

裂が進展し、耐荷力が低下している。

さらに、いずれの供試体においても、き裂発生箇所およびき裂進展箇所に関して、裏当金の位置との直接の関係性はみられなかった。

(4) 超音波探傷による未溶着高さの計測

実験に先立ち、S30-2-5-R-VC-MD, S30-5-5-R-VC-MD, S30-8-5-R-VC-MD, S30-8-50-R-VC-MD, S30-8-100-R-VC-MD について、超音波探傷による未溶着高さの計測を行った。計測は、S30-2-5-R-VC-MD および S30-8-5-R-VC-MD では初載荷圧縮側、残りの3体は初載荷引張側で行い、それぞれ3か所について測定した。計測箇所については、図-7 に示す未溶着高さの計測箇所と同じである。計測は菱電湘南エレクトロニクス(株)製のデジタル超音波探傷器 UI-25 を用いた屈折角 70° の斜角探傷で行った。

超音波探傷による計測結果と切断後の実測値を表-4 に示す。供試体名については、それぞれの供試体の未溶着高さおよびフィレット半径の設計値のみ(「S30-2-5-R-VC-MD」を「2-5」)に省略して示した。表に示す実測値は切断してからのノギスでの測定値である。また、表内の「誤差」欄には、板厚 12mm に対する、超音波探傷による測定値と、切断後のノギスによる実測値の差の割合を百分率で示した。

板厚に対する測定値の誤差は、S30-5-5-R-VC-MD では最大 51.7%の誤差が生じたが、その他の供試体では 30%程度に留まった。

4. あとがき

本研究では、鋼製橋脚隅角部の十字継手を模擬し、十字継手内に溶接未溶着が内在し、溶接未溶着高さおよびフィレット半径をそれぞれ $a=0, 2, 5, 8\text{mm}$, $R=5, 15, 30, 50, 100\text{mm}$ とした実験供試体を用いた繰り返し載荷実験を行い、供試体各部の溶接脚長および溶け込み深さの測定をし、これらが与える延性き裂発生・進展への影響についての検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) $a=0\text{mm}$ (完全溶け込み溶接) および $a=2\text{mm}$ (板厚に対して 17%) の供試体では、最初のき裂発生部位に関係なく、柱フランジおよびウェブ板にてき裂が進展したが、 $a=5\text{mm}$ (板厚に対して 42%) 以上の供試体では十字溶接継手部でき裂が進展した。
- (2) き裂発生点は、溶接未溶着高さが大きいほど早くなる傾向がみられた。
- (3) 最初のき裂発生位置は、未溶着の大きさや溶け込み深さ、脚長の大きさに起因する全体的な傾向がみられず、バラつきがみられた。

- (4) き裂進展による荷重低下時期は、フィレットの半径が大きくなるにつれて遅くなった。
- (5) 荷重低下の要因となるき裂は、最初に発生したき裂の箇所に因らず、溶着部分の大きさが小さい箇所でも進展した。
- (6) き裂発生箇所および進展箇所と、裏当金の位置との直接の関係性はみられなかった。
- (7) 超音波探傷を用いて板厚 $t=12\text{mm}$ の供試体を計測した場合、誤差 30%程度の精度で溶接未溶着高さを測定することができた。

謝辞: 本研究の一部は、平成 24 年度に採択された科学研究費補助金・基盤研究(C) (研究代表者: 葛 漢彬; 課題番号: 24560588) の助成を受けて実施されたものである。

参考文献

- 1) 岡下勝彦, 大南亮一, 道場康二, 山本晃久, 富松実, 丹治康行, 三木千壽: 兵庫県南部地震による神戸港港湾幹線道路 P75 橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.243-261, 1998.4.
- 2) 坂野昌弘, 三上市蔵, 鷹羽新二: 鋼製橋脚隅角部の低サイクル疲労挙動, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp.49-60, 1997.
- 3) 坂野昌弘, 岸上信彦, 小野剛史, 三上市蔵: 鋼製ラーメン橋脚柱梁接合部の超低サイクル疲労破壊挙動, 鋼構造論文集, 第 4 巻, 第 16 号, pp.17-26, 1997.
- 4) 三木千壽, 四十沢利康, 穴見健吾: 鋼製橋脚ラーメン隅角部の地震時脆性破壊, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.273-281, 1998.
- 5) 佐々木栄一, 高橋和也, 市川篤司, 三木千壽, 名取暢: 鋼製ラーメン橋脚隅角部の補剛構造がその弾塑性挙動に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.201-214, 2001.10.
- 6) 佐々木栄一, 荒川泰二, 三木千壽, 市川篤司: 鋼製橋脚における地震時脆性破壊防止に必要な鋼材の破壊靱性レベル, 土木学会論文集 No.731/I-63, pp.93-102, 2003.4.
- 7) 三木千壽, 平林泰明: 施工の不具合を原因とする疲労損傷, 土木学会論文集 A, Vol.63 No.3, 518-532, 2007.7.
- 8) 鈴木俊光, 葛漢彬, 藤江渉: 繰り返し荷重を受ける鋼製橋脚隅角部の延性き裂発生評価に関する実験データによる検証, 第 13 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.229-234, 2010.2.
- 9) 鈴木俊光, 葛漢彬, 小野恵亮: 完全溶け込み溶接部に未溶着を有する鋼厚肉部材の延性き裂発生に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.479-489, 2011.3.
- 10) 鈴木俊光, 葛 漢彬, 岩田勝成, 速水 景: 溶接ビード

仕上げ性状が鋼厚肉部材の延性き裂発生に及ぼす影響に
関する実験的研究, 鋼構造論文集, Vol.18, No.71, 2011 年 9
月.

EFFECT OF WELD LEG LENGTH AND DEPTH OF FUSION ON THE DUCTILE CRACK INITIATION AND GROWTH

Shinki HADA, Hanbin GE, Kei HAYAMI and Toshimitsu SUZUKI

This study is aimed at clarifying the effect of the difference in the welding depth and leg length on the initiation and growth of ductile crack in the steel beam-column connection. We have conducted cyclic loading experiment using specimens with weld defect inherent in beam-column connection. As a result, regardless of place of crack initiation and weld defect width, crack growth where welding is the smallest part was revealed. In addition, even if the welded portion is small, decrease of loading capacity is slow when fillet radius is large.