

未溶着が内在する鋼製橋脚の耐震性能に及ぼす 梁－柱接合部における溶接性状の影響

羽田 新輝¹・葛 漢彬²

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

²正会員 名城大学教授 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

1. 序論

近年，溶接構造物の施工時における溶接不具合（欠陥）が問題視されてきていることを受け，筆者らは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，溶接未溶着や十字継手部の溶接性状が地震時の延性き裂発生に与える影響について実験的研究を行い，報告を行ってきた^{1)~4)}。

これらの研究で，板厚12mmに対して未溶着高さが2mm程度（板厚の16%程度）を超える箇所では，未溶着部を起点とした延性き裂が発生する危険性があり，未溶着高さが大きいほど，き裂進展が急激なものとなることが示された。

しかしながら，これらの研究で用いられたすべての供試体における十字継手溶接部には，0.5mmのルートギャップが設けられているため，ルートギャッ

プが存在しない場合における延性き裂の発生・進展挙動は明らかになっていない。

そこで，本研究では十字継手溶接部のルートギャップをあえて設けずに製作した供試体による繰り返し載荷実験を行い，ルートギャップが存在しない場合における，十字継手部の溶接性状が延性き裂発生・進展挙動へ及ぼす影響を調べた。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

実験供試体の概要図を図-1に示す。実験供試体はこれまでの研究と同様に，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－柱の接合部であり，板組はウェブ優先の板組（WW板組）となっている。鋼種は実橋脚での使用が多い

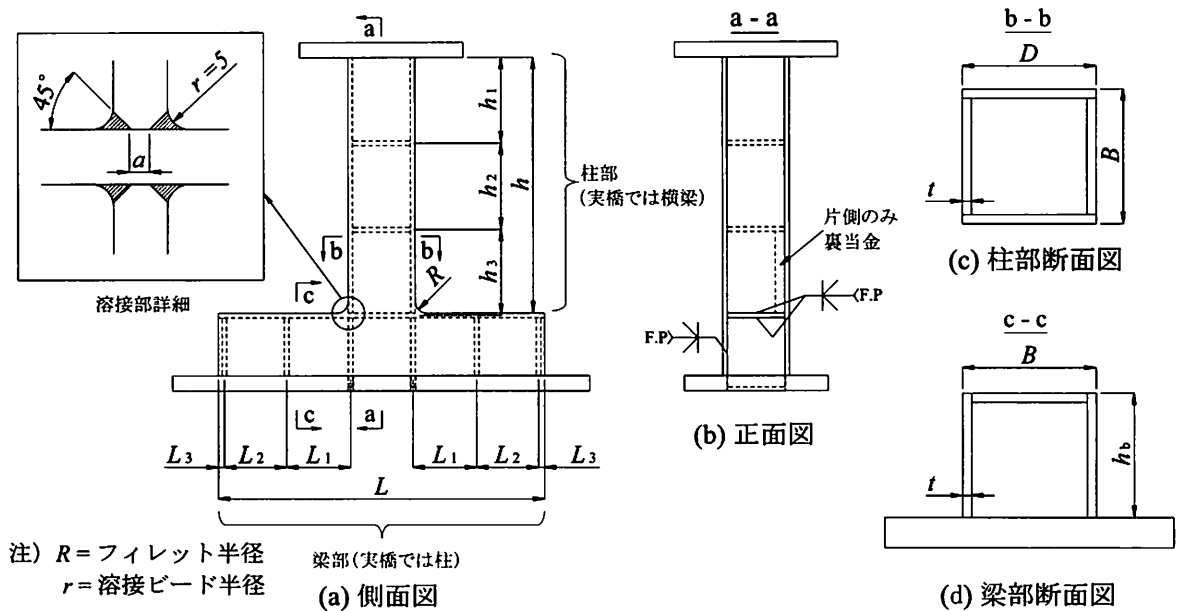


図-1 供試体概要図

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	s	d	a	r_a
S30-5-30-R-VC-NRG	669	225	225	225	166	859	168	164	16	175	176	12.11	29	7.2	3.9	4.1	2.9
S30-8-30-R-VC-NRG	670	225	225	225	166	858	168	164	16	176	177	12.11	31	6.9	1.7	8.8	2.4

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, s =溶接ビード脚長, d =溶け込み深さ, a =未溶着高さ, r_a =のど厚 (s , d , a , r_a は切断面の計測平均値). その他は図-1を参照されたい.

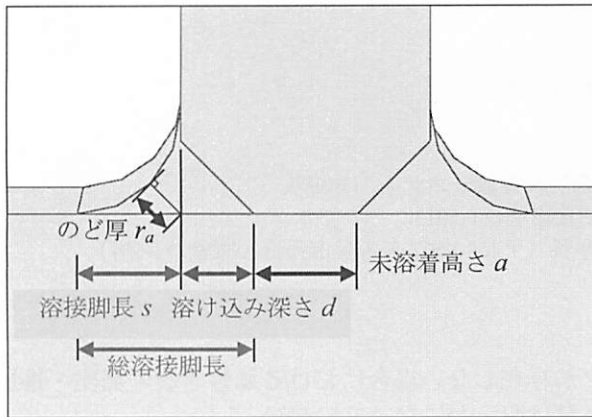


図-2 十字継手部詳細図

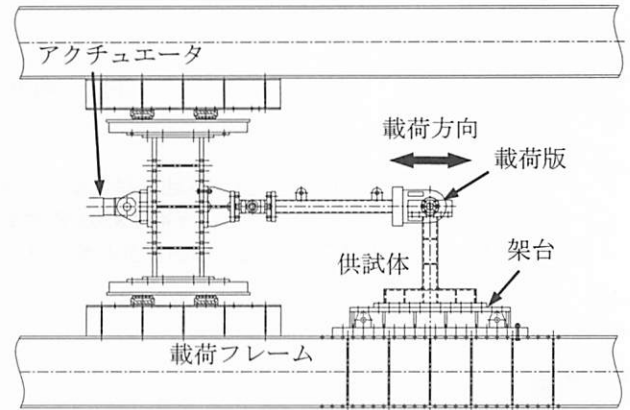
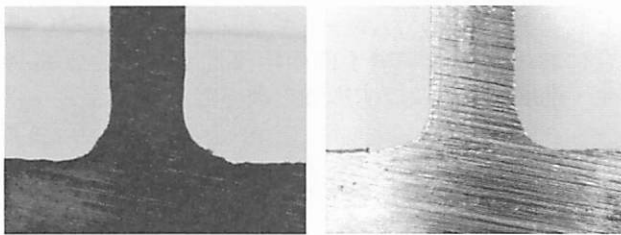


図-4 荷重装置概要図



(a) 従来の供試体

(b) 本研究の供試体

写真-1 十字継手部断面

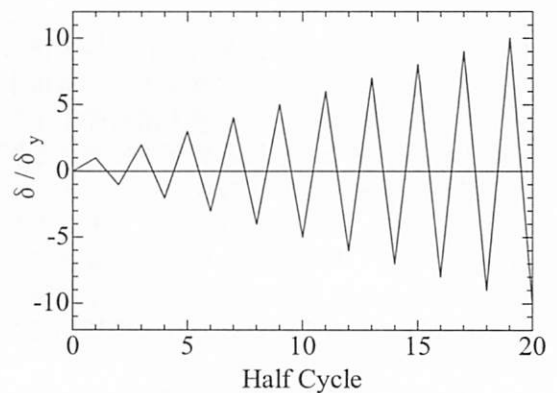


図-5 荷重パターン

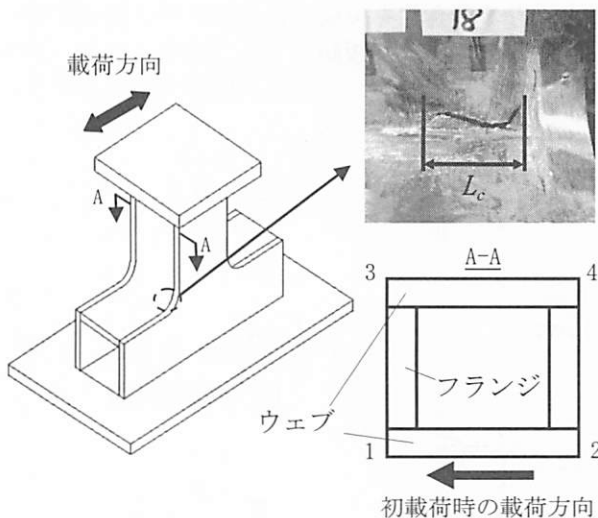


図-3 隅角部の角部番号とき裂長さの定義

SM490クラスの鋼材であり, 板厚は12mmとしている. 三線交差部には半径 $R=30\text{mm}$ のフィレットを設けている.

表-1に供試体各部の寸法を, 図-2に十字継手溶接部詳細図を示す. 表-1に示す測定値は設計値ではな

く実測値の平均である. 図-2に示すように溶接脚長 s は梁部側の脚長であり, 各供試体の溶け込み深さが様々であることから, のど厚 r_a は梁フランジと柱フランジの延長線の交点から溶接ビード表面までの最短距離とし, 溶接脚長と溶け込み深さの合計値を「総溶接脚長」と定義している.

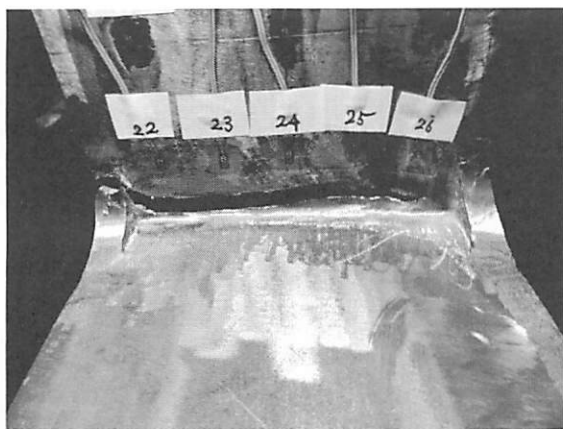
文献3), 4)で用いた供試体および本研究の供試体の十字継手部断面はそれぞれ写真-1(a), (b)のようになっている.

本研究では実験結果を示す際, 供試体の各角部に対して図-3に示す角部番号を用いる. 番号は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となるように設けている.

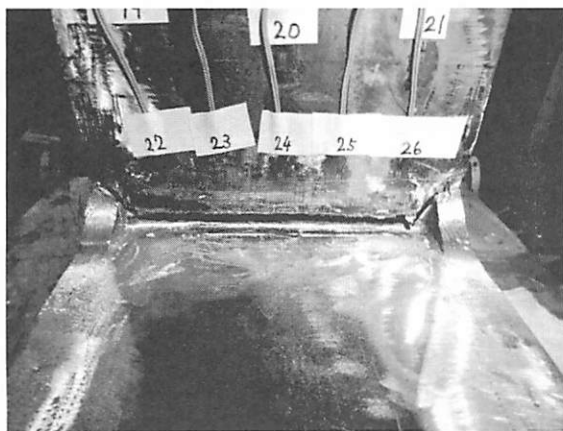
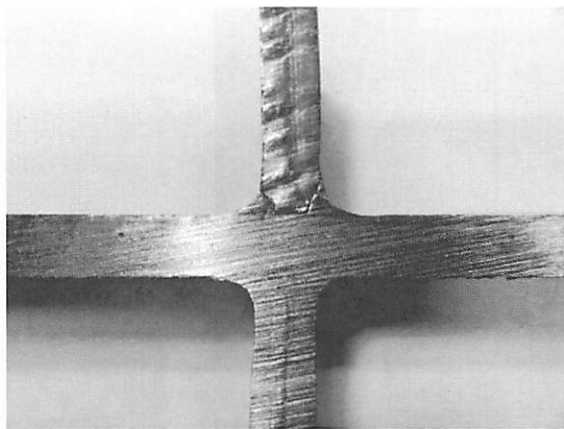
また, 以降に示すき裂長さ L_c は, 同図中右上に示すように, き裂両端の水平方向距離であり, き裂発生高さは梁フランジ表面からの距離を表す.

(2) 実験方法

実験には文献3), 4)と同様な荷重装置を用いており, 図-4に示す. 荷重フレームの柱に固定したアク



(a) S30-5-30-R-VC-NRG



(b) S30-8-30-R-VC-NRG

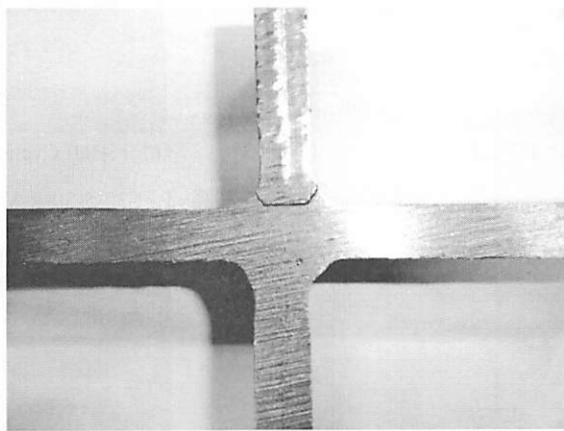


写真-2 荷重 10%低下時 (実験終了時) の破壊様式

チュウエータ (±1000 kN) により、供試体頂部に水平方向へ荷重し、変位が与えられる仕組みになっている。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。

荷重パターンに関しても文献3), 4)と同様であり、図-5に示すような供試体の降伏変位 δ_y を基準とした、1サイクル毎の漸増変位振幅荷重とし、各Half Cycleの折り返し点での荷重が、最大荷重の90%以下になるまで荷重を継続した。

3. 実験結果

(1) 破壊様式

写真-2(a), (b)にそれぞれS30-5-30-R-VC-NRGおよびS30-8-30-R-VC-NRGのき裂発生状況、写真-3(a), (b)に、荷重が10%以上低下した時点での破壊様式を示す。なお、このときの荷重段階はS30-5-30-R-VC-NRGでは17 Half Cycle, S30-8-30-R-VC-NRGでは11 Half Cycleであった。

どちらの供試体も溶接ビードに沿ったき裂進展が確認でき、フランジ板端部からはフィレット上に向け進展している。十字継手部の断面写真を見ると、き裂は未溶着部から溶接ビード表面に進展していることが確認できる。

(2) き裂進展過程

a) S30-5-30-R-VC-NRGのき裂進展

写真-3にS30-5-30-R-VC-NRGのき裂進展過程を示す。

き裂は4Half Cycle荷重中に角部1近傍に発生し、4 Half Cycle荷重後のき裂長さは $L_c=3.4\text{mm}$ であった (写真-3(b))。その後5Half Cycleで角部2付近にもき裂が発生し、このときの長さは $L_c=2.3\text{mm}$ であった (写真-3(c))。角部2のき裂は11Half Cycleの時点で $L_c=51.2\text{mm}$ 、15Half Cycleでは $L_c=105.0\text{mm}$ まで進展した (写真-3(d), (e))。一方、角部1のき裂は16Half Cycleにおいても $L_c=28.2\text{mm}$ までしか進展せず、その後の17Half Cycleにて角部2から発生したき裂が写真-2(a)に示すように $L_c=148.0\text{mm}$ にまで進展し、これに伴い荷重荷重が90%以下に低下したため実験を終了した。

b) S30-8-30-R-VC-NRGのき裂進展

写真-4にS30-8-30-R-VC-NRGのき裂進展過程を示す。

き裂は3Half Cycle荷重中に角部4付近に発生し、この時のき裂長さは $L_c=44.5\text{mm}$ であった (写真-4(b))。このき裂は3Half Cycleの荷重中に進展を続け、写真ではき裂の開口量が小さいため確認し辛い、3Half Cycle荷重終了時点でき裂長さ $L_c=118.0\text{mm}$ まで急激に進展した (写真-4(c))。その後、4Half

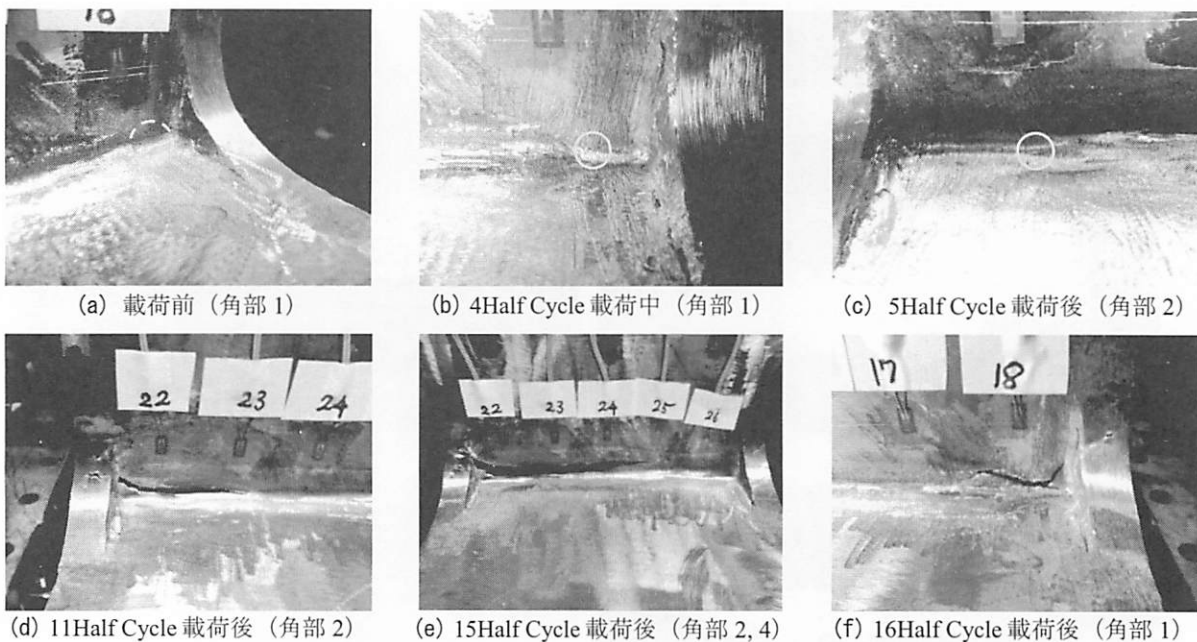


写真-3 S30-5-30-R-VC-NRG のき裂進展過程

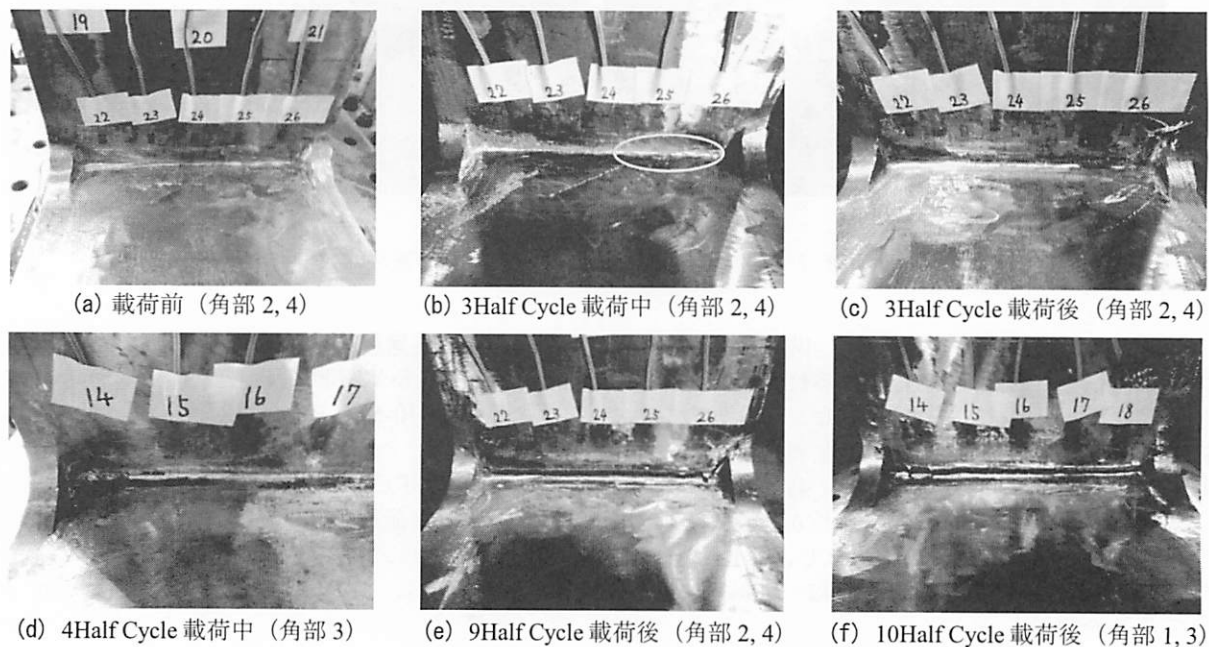


写真-4 S30-8-30-R-VC-NRG のき裂進展過程

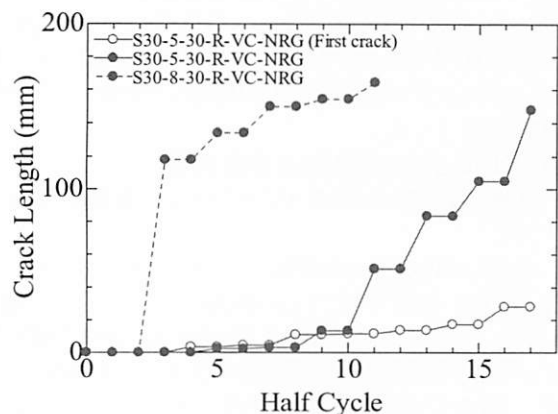


図-6 き裂進展比較

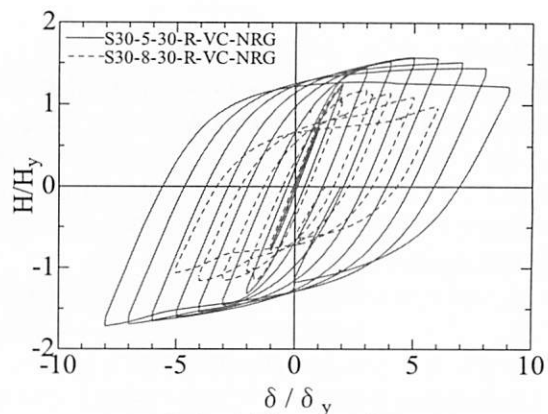


図-7 水平変位—水平荷重関係

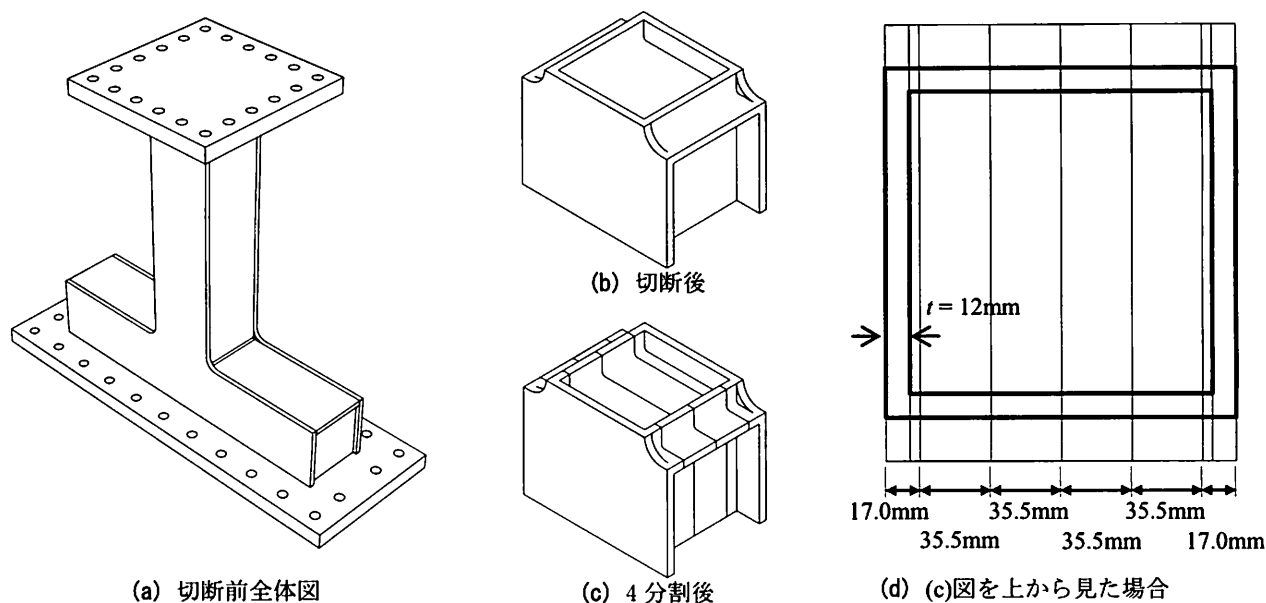


図-8 供試体の切断方法

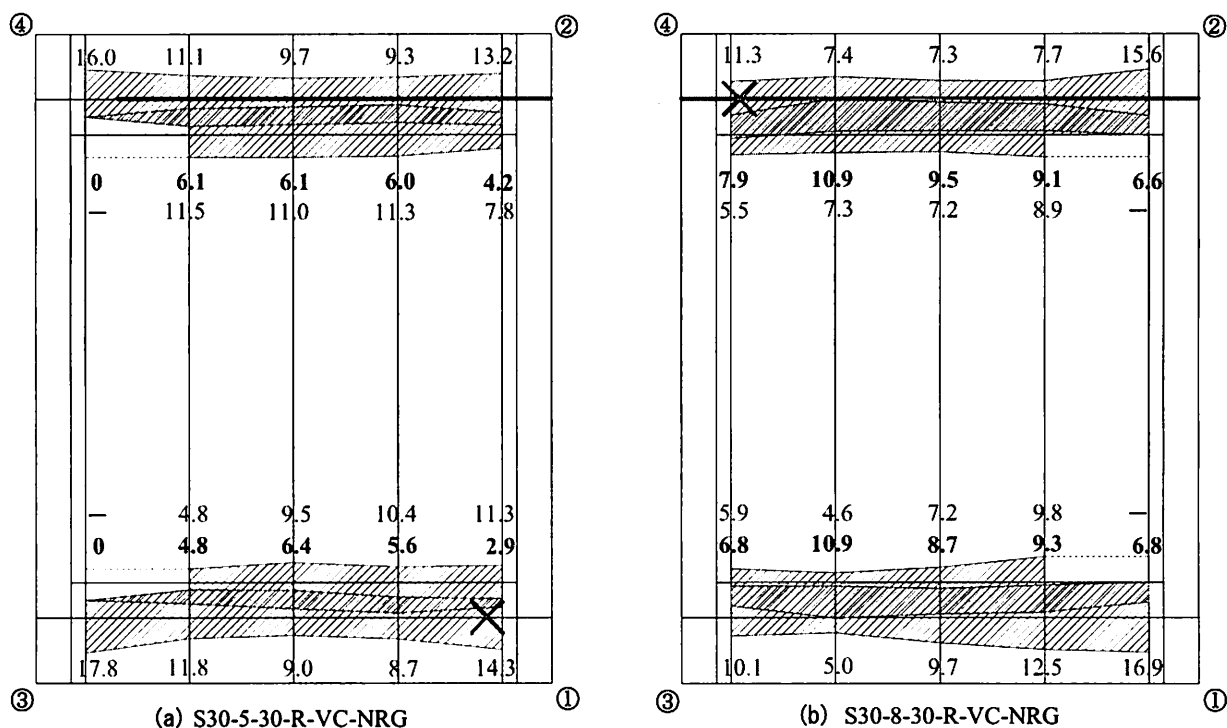


図-9 十字継手部の溶接性状の調査結果

Cycleで角部3に新たなき裂が発生し、長さは $L_c=75.8$ mmであった。角部4に発生したき裂は9Half Cycle時点で $L_c=154.3$ mmとなり角部2近傍まで進展、角部3に発生したき裂は10Half Cycle時点で $L_c=163.0$ mmとなり角部1近傍まで進展した(写真-4(d), (e))。その後の11Half Cycleで角部2, 4に進展していたき裂が $L_c=164.4$ mmまで進展し(写真-4(f))、この時点で載荷荷重が90%以下となり実験を終了した。

c) き裂進展の比較

図-6に両供試体のき裂進展比較図を示す。実線がS30-5-30-R-VC-NRGのき裂進展、破線がS30-8-30-R-

VC-NRGのき裂進展である。S30-5-30-R-VC-NRGは最初に発生したき裂と最も大きく進展したき裂の場所が異なるため、最初に発生したき裂を白抜き、最も大きく進展したき裂を塗り潰しの記号で示した。

S30-5-30-R-VC-NRGでは最初に発生したき裂の進展は非常に遅く、実験終了時までほとんど進展していない。最も大きく進展したき裂はき裂発生から一定のペースで進展し、比較的緩やかな進展挙動を示した。

一方、S30-8-30-R-VC-NRGでは、き裂が発生してすぐに大きな進展を伴っており、き裂がある程度進

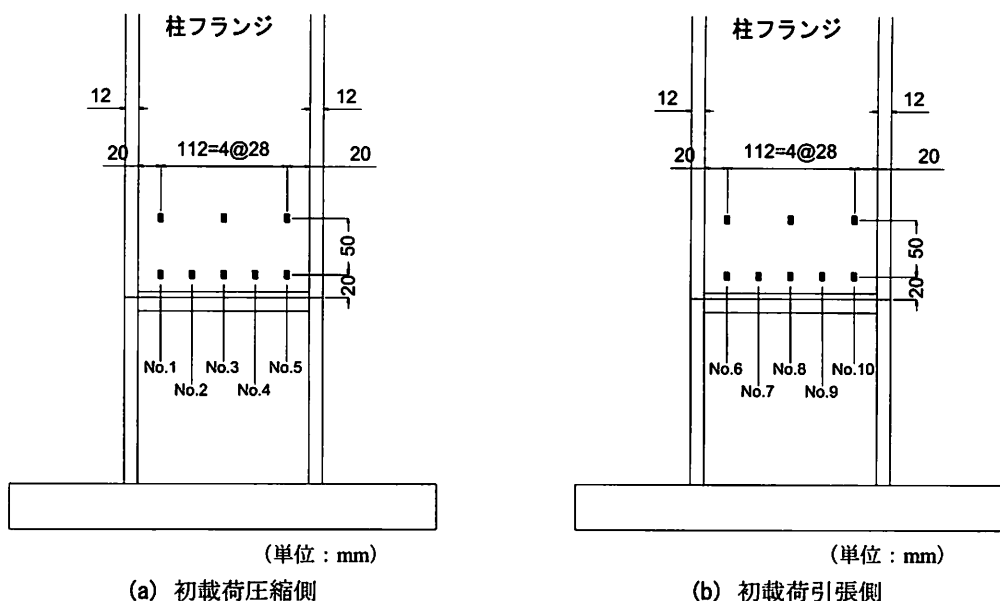


図-10 ひずみゲージ貼付位置およびゲージ番号

展するまでの進展挙動は非常に急激であるといえる。

図-7に両供試体の水平変位－水平荷重関係を示す。図中の横軸は供試体頂部の水平変位を降伏変位で除したもので、縦軸は水平荷重を降伏荷重で除したものである。

S30-5-30-R-VC-NRGではき裂進展に伴い徐々に荷重が低下していることに対し、S30-8-30-R-VC-NRGでは、初期の傾き等はS30-5-30-R-VC-NRGとほぼ等しいものの、き裂発生から早い段階で耐荷力が低下しており、履歴曲線の形状に大きな差がみられる。

(3) 溶接脚長および溶け込み深さの影響

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

供試体の切断図を図-8に、計測結果を図-9に示す。図-8に示すように、図-9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-9に示す斜線部分が溶接脚長と溶け込み深さを合わせた総溶接脚長であり、数字はその大きさである。裏当金の影響等により溶接脚長が計測不可能であった箇所は「－」と記した。なお、溶接脚長 s の設計値は両供試体とも5mm、溶け込み深さの設計値は未溶着高さ $a=5, 8\text{mm}$ の供試体でそれぞれ3.5, 2.0mmとなっている。二重斜線部分は溶接未溶着部であり、太数字で大きさを示す。また、×は最初のき裂発生箇所を表し、太線を引いた部分は荷重低下時に最も大きくき裂が進展していた箇所である。四隅の丸数字は図-3で示した角部番号である。

a) き裂発生箇所

どちらの供試体も共にフランジの角部に近い位置でき裂が発生している。

S30-5-30-R-VC-NRGでは角部①付近にき裂が発生したが、この箇所での総溶接脚長は供試体内側方

向・外側方向共に反対側の角部②に比べ大きく、未溶着高さは小さかった。

一方、S30-8-30-R-VC-NRGでは角部④付近にき裂が発生したが、この箇所は反対側の角部③と比較して供試体外側方向の総溶接脚長と未溶着高さが大きく、内側方向の総溶接脚長は小さい。また、総溶接脚長の合計値ではき裂が発生した角部④が角部③に比べ大きい。

以上より、き裂発生箇所については、未溶着の大きさや溶け込み深さ、溶接脚長の大きさに起因する明確な傾向は確認されなかった。

b) き裂進展箇所

S30-5-30-R-VC-NRGでは最大き裂は角部②にて進展し、最初のき裂が発生した箇所に比べ総溶接脚長が小さい箇所でき裂が進展した。

一方、S30-8-30-R-VC-NRGでは、最初にき裂が発生した箇所（角部④）でき裂が進展した。

また、どちらの供試体においても最大のき裂が進展した初載荷引張側の面で比較した際、供試体外側方向の溶接脚長が小さい角部、つまりS30-5-30-R-VC-NRGでは角部②と④を比較して角部②から、S30-8-30-R-VC-NRGでは角部②と④を比較して角部④からき裂が進展した。

(4) ひずみ履歴

図-10にひずみゲージの貼付位置とゲージ番号を示す。ひずみゲージは2mmの塑性域ゲージ（YFLA-2：東京測器研究所）を使用した。柱フランジに貼り付けたひずみゲージについて、図-10に示すように、初載荷圧縮側ではNo.1～5、初載荷引張側ではNo.6～10のゲージ番号を設けた。

図-11、図-12にそれぞれS30-5-30-R-VC-NRGおよびS30-8-30-R-VC-NRGの載荷段階でのひずみ履歴を示す。同図中の縦破線はそれぞれの柱フランジ面でのき裂発生点である。

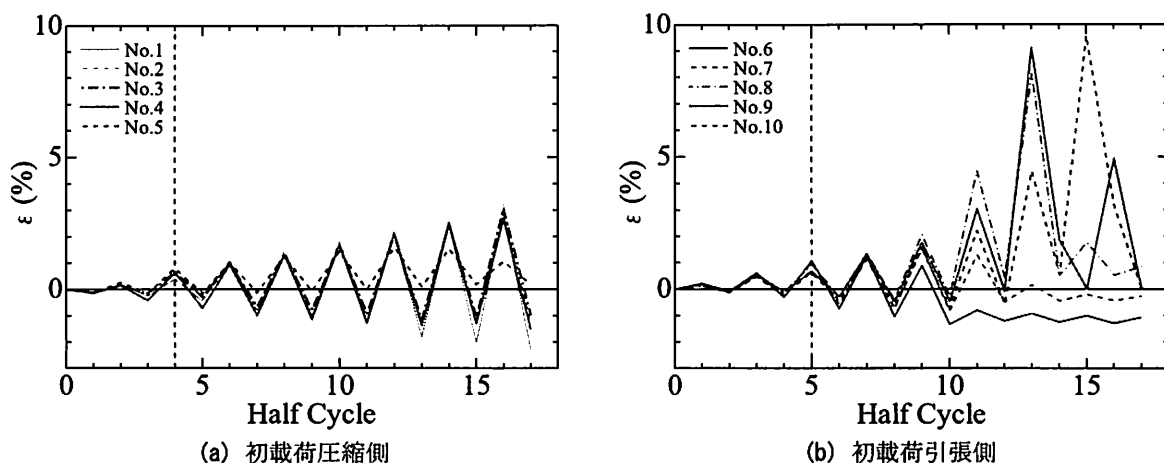


図-11 S30-5-30-R-VC-NRG のひずみ履歴

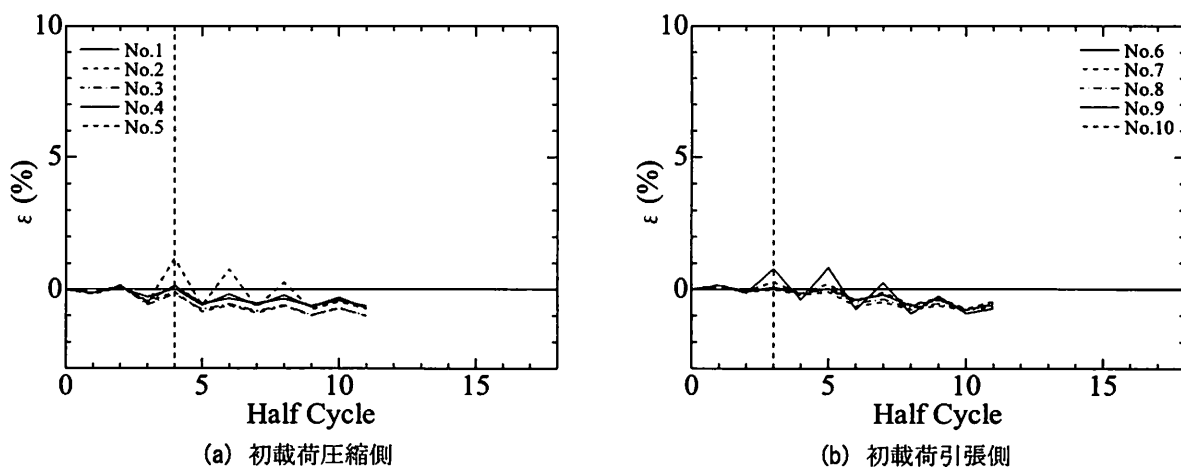


図-12 S30-8-30-R-VC-NRG のひずみ履歴

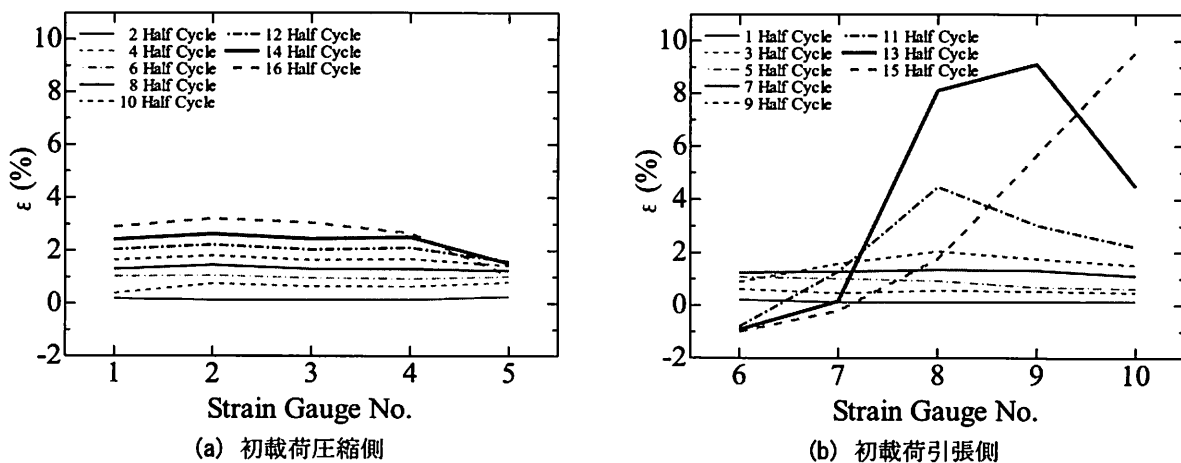


図-13 S30-5-30-R-VC-NRG のひずみ分布

S30-5-30-R-VC-NRGの初載荷圧縮側では、角部1でき裂が発生した4Half Cycle以後、No.5のひずみが小さくなっている。これはき裂がNo.5の位置よりもフランジ中央寄りに進展し、応力が解放されたためであると考えられる。その後、このき裂はほとんど進展しなかったため、No.5を除く4本のゲージの値に目立った差はない。

一方、初載荷引張側では、11Half Cycleの時点ではNo.8が最大の値をとっているが、13Half CycleではNo.9、15Half CycleではNo.10の値が最大となり、進展するき裂の先端付近にひずみが集中している。この際、初期にき裂先端が通過したNo.6およびNo.7のひずみが、後半では解放されていることが確認できる。

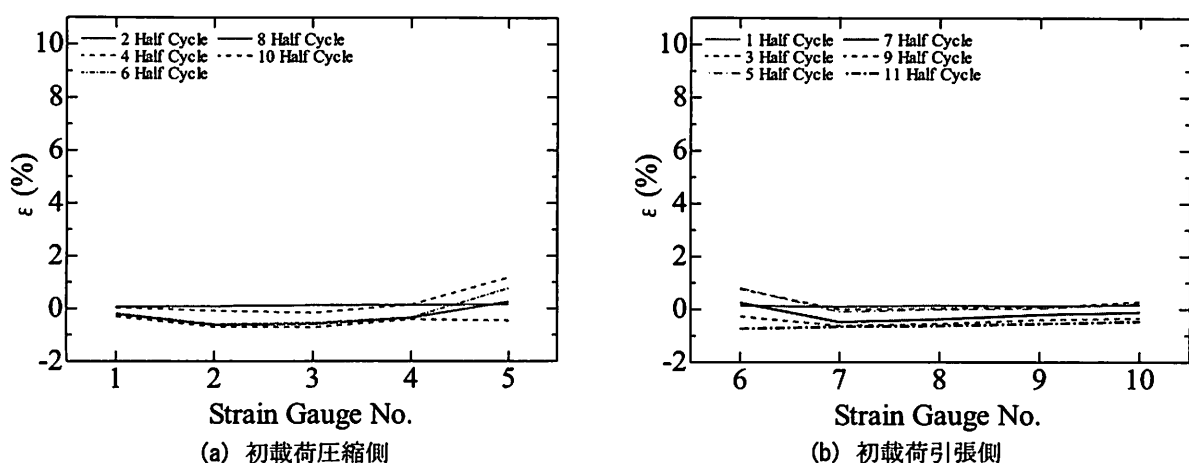


図-14 S30-8-30-R-VC-NRGのひずみ分布

S30-8-30-R-VC-NRGでは、初載荷引張側・圧縮側両面において、き裂発生点での発生箇所付近のゲージの値が大きいものの、その後急激にき裂が進展したため、各ひずみゲージの値はS30-5-30-R-VC-NRGに比べ小さい。

(5) ひずみ分布

図-13、図-14にそれぞれの供試体の柱フランジ幅方向におけるひずみ分布を示す。

S30-5-30-R-VC-NRGの初載荷圧縮側では、き裂進展に伴いNo.5のひずみが解放されたことを除き、ほぼ一定の分布となっている。

初載荷引張側では、11Half Cycleから急激に分布が変化し、角部④付近のゲージの値が増大するにつれ、角部②付近のゲージの値が低下している。

S30-8-30-R-VC-NRGでは各Half Cycle毎の差はあまりみられないが、フランジ中央付近に比べ、角部付近のひずみが若干大きな値を示している。

4. 結論

本研究では、鋼製橋脚隅角部の十字継手を模擬し、十字継手部にルートギャップが存在せず、設計値における溶接未溶着高さ a およびフィレット半径 R をそれぞれ $a=5, 8\text{mm}$ 、 $R=30\text{mm}$ とし、板厚 $t=12\text{mm}$ 、溶接脚長 $s=5\text{mm}$ 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、ルートギャップが存在しない場合における、溶接性状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) 未溶着高さ a が5, 8mmどちらの場合でもき裂は未溶着部に発生し、溶接ビードに沿って進展した。
- 2) き裂発生点は未溶着高さが大きい場合、早くなった。

- 3) 最初のき裂発生箇所については、未溶着の大きさや溶け込み深さ、溶接脚長の大きさに起因する明確な傾向は確認されなかった。
- 4) 未溶着高さが8mmの場合、5mmの供試体に比べ、き裂の進展が速く、その際の耐荷力低下が著しいものとなった。
- 5) 最大のき裂が進展した面で比較した際、供試体外側方向の溶接脚長が小さい角部付近にてき裂が進展した。
- 6) き裂進展に伴いひずみ分布がき裂先端付近に集中するが、き裂発生前のひずみ集中は確認されず、ひずみ分布とき裂発生点の明確な関係性はみられなかった。
- 7) 全体的な傾向として、ルートギャップが存在する供試体を用いた実験結果と似通っており、ルートギャップが存在しない場合においても、存在する場合と同じ傾向があることが確認された。

参考文献

- 1) 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・進展に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.57A，pp.479-489，2011。
- 2) 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，pp.43-53，2011。
- 3) 速水景，葛漢彬，羽田新輝，森翔吾，鈴木俊光：小さなフィレットを有する鋼製橋脚隅角部の未溶着高さが延性破壊に及ぼす影響，土木学会論文集A1（構造・地震工学）Vol.69，No.4（地震工学論文集第32巻），pp.I_429-I_439，2013。
- 4) 羽田新輝，葛漢彬，速水景，鈴木俊光：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，土木学会論文集A1（構造・地震工学）Vol.69，No.4（地震工学論文集第32巻），pp.I_989-I_1001，2013。