

## 隅肉溶接部の疲労強度とルート部の欠陥について

## FATIGUE STRENGTH OF FILLET WELDED JOINTS CONTAINING DEFECTS IN ROOT

三木千寿\*、范 恒達\*\*、田中雅人\*\*\*

By Chitoshi Miki, Hengda Fan and Masato Tanaka

In order to examine the fatigue performance of fillet welded joints containing heel crack or root-gap defects, fatigue tests are carried out. The specimens are divided into 2 series which are heel crack series and root-gap series. The first series which consists of nonload-carrying cruciform, load-carrying cruciform and longitudinal welded joints; considered various orientations between heel cracks and applied stresses. The second series are all load-carrying cruciform joints and have 4 kinds of details with various root-gaps and leg lengths. The material used is JIS SM50YA with carbon equivalent of 0.42(%) for its ease in occurrence of heel cracks while tack welding is performed.

## 1. はじめに

鋼橋の疲労損傷の多くは溶接継手部に生じており、その大部分は隅肉溶接部である<sup>1)</sup>。通常高い応力を伝達する継手部には隅肉溶接は使用しないが、二次的な変形、挙動により設計時には想定していないような応力が発生し、それが疲労損傷の原因となることが多い。隅肉溶接はそのルート部に未溶着部を残しており、荷重伝達型の継手として使用した場合未溶着部が応力集中源となるため、隅肉溶接ののど厚によってはルート部から疲労亀裂が発生し、疲労強度がかなり低くなることがある。また、隅肉溶接のルート部には割れなどの欠陥が入りやすい、ギャップ量の精度確保が難しい、しかも溶接終了後はこれらに対する検査が非常に難しい、などの疲労強度からみた場合いくつかの本質的な問題を有している。

本研究では隅肉溶接ルート部に発生する欠陥のうち、疲労強度に大きな影響を及ぼすと考えられるヒールクラックとルートギャップを対象としている。ヒールクラックは溶接長の短い初層隅肉溶接に生じる一種の冷間割れであり、仮付溶接部などに残される恐れがある<sup>2)</sup>。ここでは、構造物中に存在する各種のディテールを勘案し、クラックに対して平行、垂直、及び溶接線方向の荷重下での疲労強度を調べた。

隅肉溶接のルートギャップ(密着度)については、現行の道路橋示方書<sup>3)</sup>では1 mm以下とし、それを越える場合は開先溶接にするのが良いとしている。しかし、密着度が悪いことを確認した後に開先をとって溶接する

- 
- \* 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)
  - \*\* 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)
  - \*\*\* 東京鉄骨橋梁(株) 生産技術部 (〒302 取手市下高井1020)

ことの施工性や、開先溶接に変更したときの入熱量上昇により生じてくる悪影響を考え、示方書の改定案では1mmを越え、3mmまでのルートギャップについては所定の脚長にギャップ量を加えた脚長の隅肉溶接とすることになっている。ここでは、このような対処をされた隅肉溶接部が荷重伝達型継手として使われる場合の疲労強度への影響についても検討を加えている。

## 2. 疲労試験方法

### (1) 試験体

疲労試験には、図-1に示すような2シリーズ合計7種類の試験体を用いた。最初のシリーズはヒールクラックの影響を調べるための試験体であり、それぞれの型式でヒールクラックと荷重の方向が異なっている。試験体Aは非荷重伝達型の十字継手、試験体Bは荷重伝達型の十字継手、試験体Cは縦方向継手である。2番目のシリーズは荷重伝達型十字継手試験体でルートギャップと溶接脚長の影響を調べるための試験体であり、試験体GOS6、G2S6、G2S8、G3S9のルートギャップ( $g$ )と溶接脚長( $s$ )はそれぞれ  $g=0, s=6$ 、 $g=2, s=6$ 、 $g=2, s=8$ 、 $g=3, s=9$  (いずれも mm) である。すなわち、G2S8およびG3S9がギャップ量の増加に伴って脚長を増した試験体である。

供試鋼材は JIS SM50YA である。表-1にその化学成分及び機械的性質を示す。炭素当量  $C_{eq}$ は 0.42 であり、この鋼材はヒールクラックが生じやすいことが確かめられている<sup>2)</sup>。

試験体A、B、Cは、まず長さ 80mmの仮付け溶接を行い、次に 48時間放置し、その後1パスの本溶接を行うことにより製作した。溶接棒はいずれも JIS Z3212 D5016相当の低水素系溶接棒であり、その棒径は仮付け

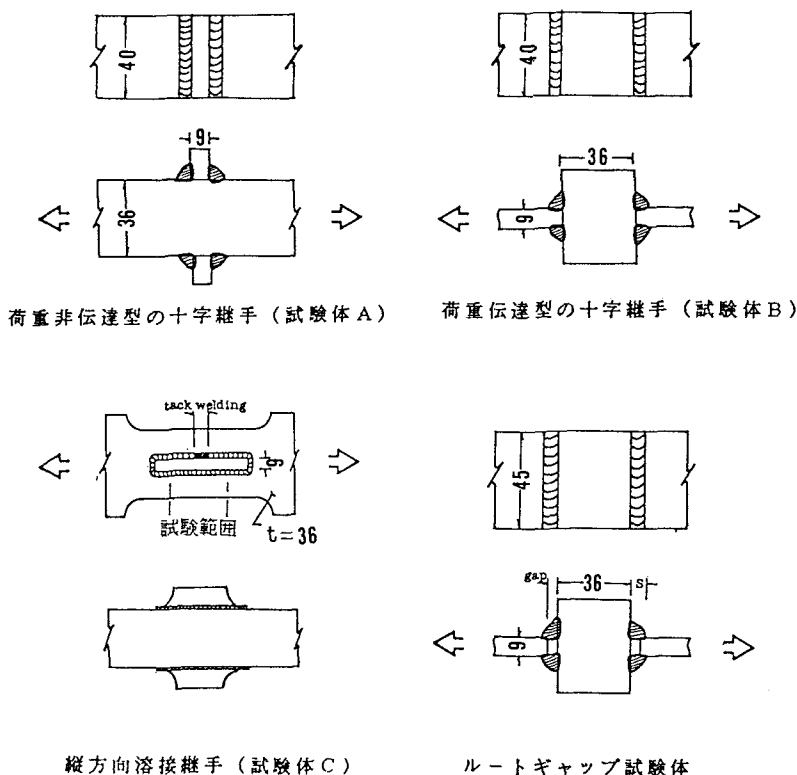


図-1 試験体

表-1 供試鋼材の化学成分および機械的性質

|        | C   | Si  | Mn   | P    | S    | TAI  | Cu  | Ni  | Cr  | Mo  | Nb   | V    | Ti   | 降伏点<br>(MPa) | 引張り強さ<br>(MPa) | 伸び<br>% |
|--------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|--------------|----------------|---------|
| t=9mm  | .16 | .43 | 1.42 | .011 | .008 | .031 | .01 | .01 | .02 | .00 | .000 | .000 | .002 | 421          | 568            | 25      |
| t=36mm | .18 | .44 | 1.39 | .019 | .003 | .025 | .01 | .01 | .02 | .00 | .016 | .000 | .002 | 421          | 568            | 27      |

溶接で 3.2mm、本溶接で 4mmである。溶接電流は仮付けで120A、本溶接で 175Aとした。溶接脚長は仮付け溶接で 4mmであり、本溶接で 6mmである。この仮付溶接では、ルート部にヒールクラックが生じることが確認されている<sup>2)</sup>。また、試験体Cの破面の観察により仮付全長にわたり深さ3~5mm程度のヒールクラックの存在が確認された。溶接のパス数はG0S6、G2S6で1パスである。しかし、脚長が 8mmとなると1パスでは施工できなくなる。そのため、G2S8、G3S9では溶接の積層方法の影響を調べるため、2パス溶接と3パス溶接に分けて製作した。図-2にそのルートギャップ試験体の溶接条件と積層法を示す。このシリーズの試験体に対しては仮付溶接を行っておらず、従ってヒールクラックは発生していない。

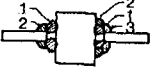
| 試験体  | 記号 | 電流<br>(A)                              | 積層法                                                                                 |
|------|----|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| G0S6 |    | 175A                                   |  |
| G2S6 |    | 175A                                   |  |
| G2S8 |    | 1ハ*ス: 180A<br>2ハ*ス: 170A               |  |
| G3S9 |    | 1ハ*ス: 180A<br>2ハ*ス: 180A<br>3ハ*ス: 170A |  |

図-2 ルートギャップ試験体の溶接条件と積層法

## (2) 疲労試験方法

疲労試験は、電気油圧式疲労試験機を用いて下限荷重をほぼ 0とした片振り引張り荷重下で行った。荷重繰返し速度は10~18Hzである。本試験では、特に長寿命域を中心としての疲労特性を調べている。一部の試験体については、疲労亀裂の発生、進展挙動を観察する目的でビーチマーク試験も行った。

## 3. 疲労試験結果とその考察

### (1) ヒールクラックを含む荷重非伝達型十字継手の疲労強度

荷重非伝達型の十字継手(A試験体)の疲労試験結果を図-3に示す。図中にはこの継手に対するわが国の鉄道橋(JR)<sup>4)</sup>、日本鋼構造協会(JSSC)<sup>5)</sup>、及び米国道路橋(AASHTO)<sup>6)</sup>の疲労設計曲線を示した。ここでの試験体の疲労強度は非常に高く、いずれの設計曲線をも十分満たしている。また、全ての試験体で溶接止端から疲労亀裂が発生しており、仮付溶接中にヒールクラックが存在しても荷重非伝達型の十字継手の疲労強度には影響しないことが分かる。

### (2) ヒールクラックを含む縦方向溶接継手の疲労強度

縦方向溶接継手(C試験体)の疲労試験結果を図-4に示す。疲労き裂は付加板の端部の隅肉溶接部ルートから発生し、これにより試験体は破断した。試験体平行部に発生させたヒールクラックがある範囲内では、いずれの試験体でも疲労亀裂は発生しなかった。図中のプロットは平行部での応力範囲と試験終了回数(付加板

端部での破断回数)の関係をプロットしてあり、縦方向の継手試験体疲労強度は十分に現行の基準を満たしている。即ち、応力に平行する縦方向の溶接内にヒールクラックが存在しても、隅肉溶接部の疲労強度は影響されないといえる。

### (3) ヒールクラックを含む荷重伝達型十字継手の疲労強度

図-5及び図-6に荷重伝達型の十字継手(B試験体)の疲労試験結果を示す。図-5では主板(载荷をしている板)の応力で、図-6は隅肉溶接の設計のど厚を用いて計算した平均せん断応力で整理している。また、比較のために、図-5及び図-6中には、同じ形状、寸法と溶接条件のGOS6試験体の試験結果もプロットしてある。GOS6試験体には仮付溶接がなく、したがってヒールクラックは含まれていない。ヒールクラックの有無による疲労強度の違いは見られず、むしろヒールクラックを含む継手試験体のほうが疲労強度は高くなっている。これは、ヒールクラック試験体では仮付溶接内にヒールクラックを発生させ、その上から脚長6mmの本溶接を行っているため実質のど厚が大きくなっているためと考えられる。図-7は、のど厚からヒールクラックを除いた実測のど厚を基準にしたせん断応力で整理したものである。同図では、ヒールクラックの深さが継手の疲労強度に及ぼす影響を調べる目的で、試験結果をヒールクラックの深さで分類して示している。ヒールクラック試験体とルートギャップ0mmの試験体の間で疲労強度に差が認められず、仮付溶接内のヒールクラックの発生、またはヒールクラックの深さが荷重伝達型の十字継手疲労強度へ及ぼす影響は認められない。

図-8にビーチマーク試験の結果を示す。疲労き裂は、ヒールクラックの先端から全面的に進展するのではなく、ヒールクラックの先端に沿った少数の起点で発生し、半楕円形状に進展している。写真-1は走査型電

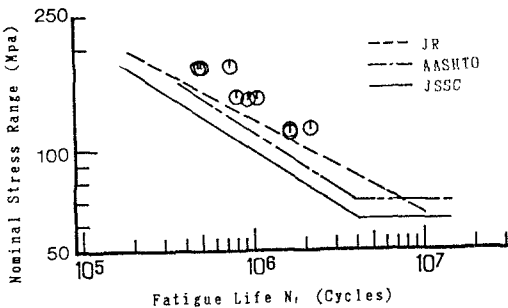


図-3 荷重非伝達型試験体の $S_r \sim N_f$ 線図

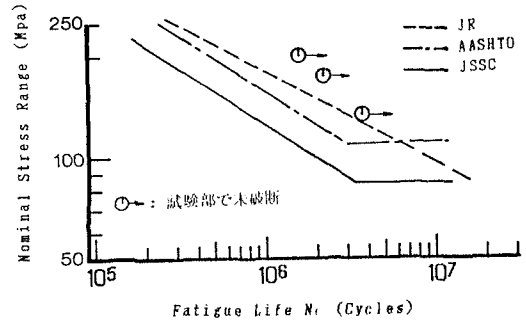


図-4 縦方向溶接試験体の $S_r \sim N_f$ 線図

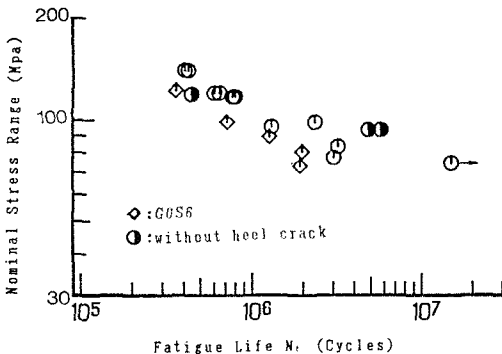


図-5 荷重伝達型試験体の主板応力の $S_r \sim N_f$ 線図

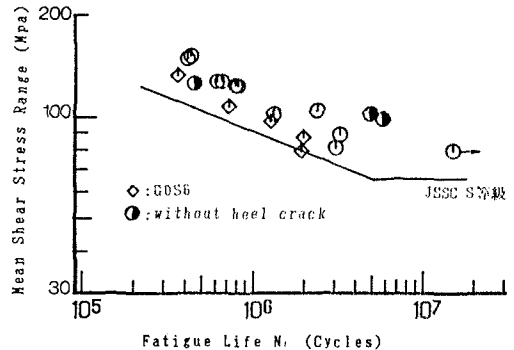


図-6 荷重伝達型試験体の平均せん断応力の $S_r \sim N_f$ 線図

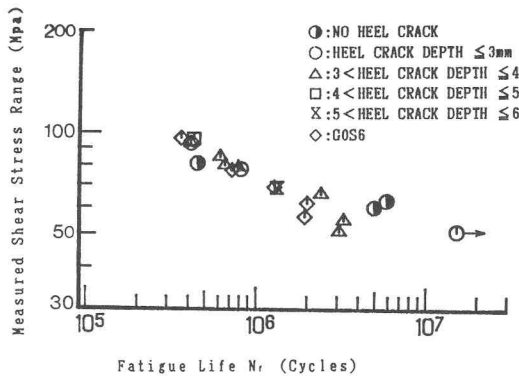


図-7 荷重伝達型試験体の実断面せん断応力の  $S_r \sim N_f$  線図

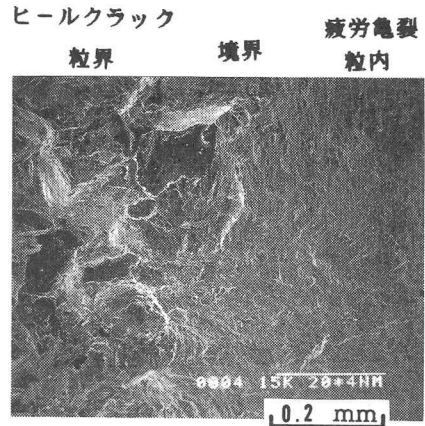


写真-1 疲労亀裂発生部の疲労破面

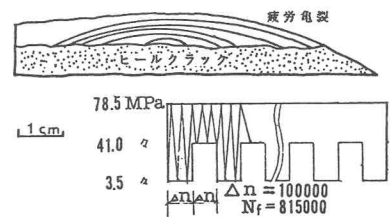
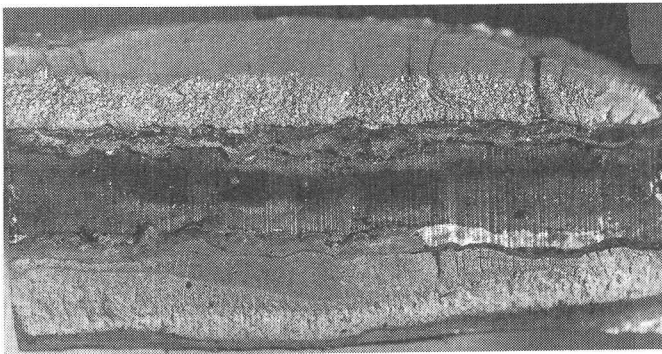


図-8 疲労破面

子顕微鏡で破面を観察した結果である。ヒールクラックと疲労き裂の進展した面との性状の違い、および、境界がよく観察できる。ヒールクラックは粒界で生じているが、疲労き裂は粒内で進展している。したがって、このようなビーチマークと走査顕微鏡による破面の観察により、ヒールクラックがそのまま疲労き裂として進展するのではないことが明らかである。

#### (4) ルートギャップが荷重伝達型十字継手の疲労強度に及ぼす影響

図-9及び図-10にルートギャップ試験体の疲労強度の関係を示す。図-9では主板の応力範囲を、図-10では設計のど厚を用いて求めた平均せん断応力範囲を基準にしている。これらの中ではルートギャップが0の試験体(GOS6)の疲労強度が最も低く、ルートギャップが2mmで脚長を6mmとした試験体(G2S6)の疲労強度が最も高い。ルートギャップの大きさに従ってそれぞれ2mm, 3mmづつ増脚長した試験体(G2S8及びG3S9)の疲労強度は両者の中間となっている。

各タイプ試験体のマクロ試験の結果、および未溶着部の先端部の金属顕微鏡写真を写真-2～3に示す。ギャップが0の場合(GOS6)未溶着部の先端は非常に鋭い亀裂のような形状を示している。それに対して疲労強度のもっとも高かったG2S6試験体の未溶着部の先端は、ほぼ直角に近い鈍角となっている。また、溶

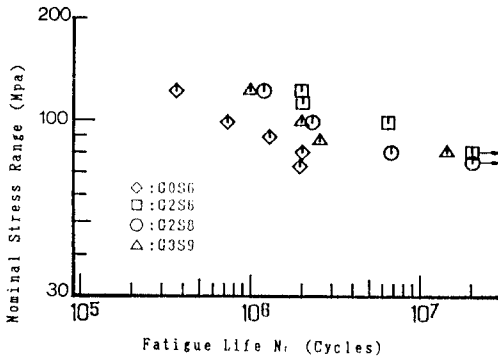


図-9 ルートギャップ試験体の $S_r \sim N_f$ 線図  
(主板での直応力で整理)

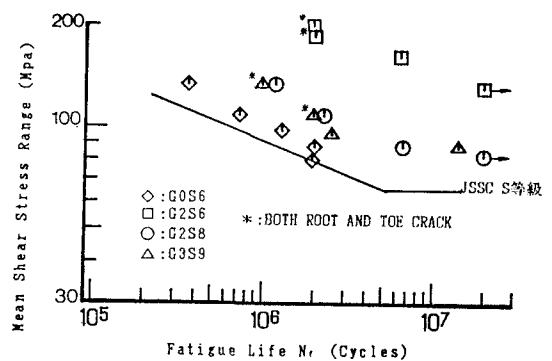


図-10 ルートギャップ試験体の $S_r \sim N_f$ 線図  
(すみ肉溶接部での平均せん断応力で整理)

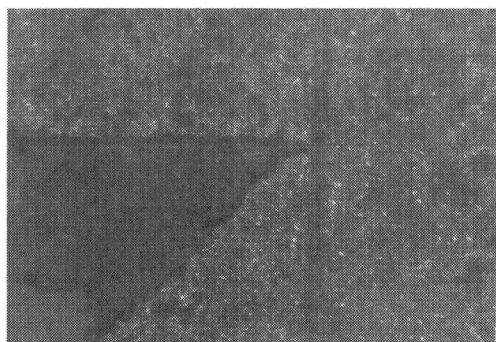
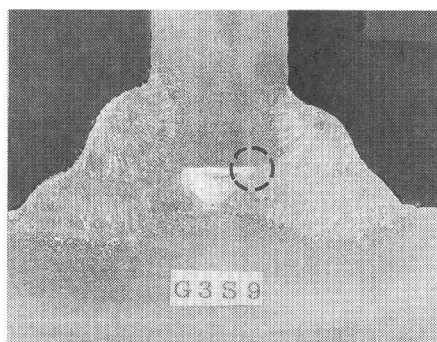
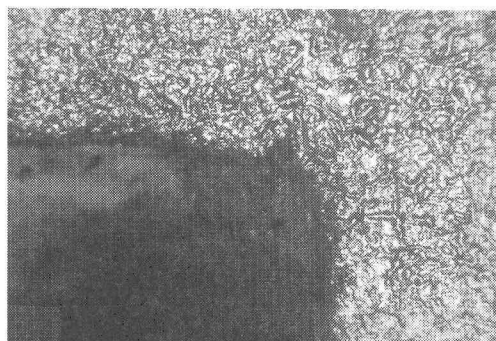
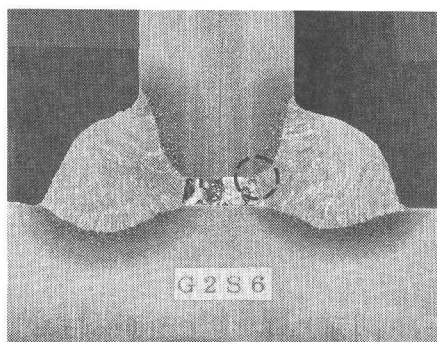
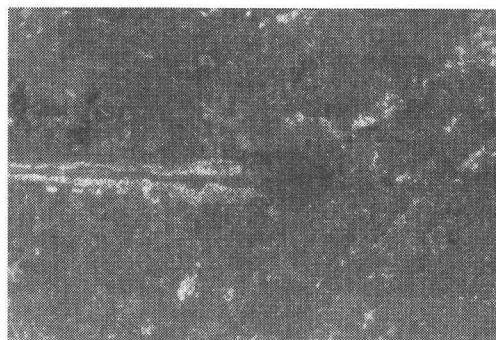
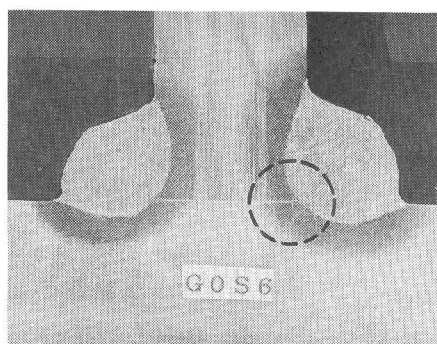
接の溶込みもギャップ 0 の試験体に比べて深い。試験体 G2S8、G3S9 は 2 パスと 3 パスで溶接を行っており、それぞれの積層法によって溶込み形状が異なることは明かである。試験体 G2S8、G3S9 いずれの試験体においても疲労亀裂は 2 パス溶接から発生している。これは 2 パス溶接の初層の狙い位置の関係により、溶込み形状が鋭くなったためである。これらの結果により、ルートギャップ試験体の疲労強度は未溶着部先端の鋭さ、および、未溶着部の長さの影響に強く依存すると考えられる。

G2S6 および G3S9 試験体では、比較的短い寿命領域で ( $N_f < 200$  万回程度)、ルートだけではなく、溶接止端が疲労破壊の起点となるものもあった。

#### 4. 結論

隅肉溶接継手を対象とし、ルート部における仮付け溶接内のヒールクラックおよびルートギャップが疲労強度に及ぼす影響について検討し、以下の結果を得た。

- (1) 荷重非伝達型の十字継手と縦方向溶接継手の疲労強度に対してヒールクラックの存在は影響しない。
- (2) 荷重伝達型十字継手の仮付溶接にヒールクラックが存在しても疲労強度は低下していない。これは本溶接によって所定ののど厚が確保されているためである。
- (3) ヒールクラックを含む荷重伝達型十字継手試験体では、疲労亀裂はヒールクラック先端の数個所から発生し、半楕円形状の亀裂として進展する。すなわち、ヒールクラックがそのまま疲労亀裂として進展するのではないことが明かである。
- (4) ルートギャップを 0mm、2mm、3mm とした荷重伝達型十字継手の疲労強度は、ルートギャップ 0mm の場合が最も低い。これはルートギャップが 0 の場合は未溶着部先端が非常に鋭く、また溶込みが浅いためである。ルートギャップ 2mm、3mm の場合は増脚長をしても疲労強度に差はない。これは、疲労強度は溶接脚長だけではなく、ルート部の未溶着部先端の鋭さおよび未溶着部の長さに強く依存する。



0.5 mm

写真-2 ルートギャップ試験体の  
マクロ試験写真

写真-3 ルートギャップ試験体未溶着部  
の先端部の金属顕微鏡写真

# 謝辞

本研究は鋼橋技術研究会示方書研究部会施工技術分科会の共同研究として実施したものである。実施するにあたり、日本橋梁建設協会からの研究費の補助を受けた。また、東京工業大学 土木工学科 森 猛助手および河野 雅技官には有益な助言と実験の協力を得た。さらに修士課程1年の沖中 知雄君には、図面の整理などの協力を得た。ここに記して深謝します。

参考文献：

- 1) 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、No392, pp.403-410, 1988.
- 2) 三木千寿・中村勝樹・遠藤秀臣・等農克巳：仮付け溶接の長さとヒール・クラックの発生について、土木学会論文集、No404, pp.259-265, 1989.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、pp341-342, pp351-352, 昭和55年2月.
- 4) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説、1983-4.
- 5) 日本鋼構造協会：疲労設計指針（案）改定小委員会資料、1989.
- 6) The American Association of State Highway and Transportation Officials: Standard Specification for Highway Bridges.1983.

(1989年10月 2日受付)