

溶接管理技術者の体験紹介

鋼橋での疲労破壊防止技術に関する研究に参加して

株式会社 横河ブリッジ  
射越潤一

1. はじめに

鋼橋の設計では、平成 14 年に発刊された道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編において疲労の影響を考慮することが規定され、全ての鋼橋において疲労に対する検討が行われるようになった。桁形式橋梁では、図 1 のように構造上、横桁の仕口や水平補剛材など、主桁ウェブに直交して接合される板材（面外ガセット）が多用され、これらの溶接部の疲労強度は低く、疲労き裂の発生起点は、高い応力集中が生じる溶接止端であることが多い。このため、疲労設計上必要な場合には、その疲労強度向上策のひとつとして、溶接止端部の形状を滑らかに仕上げる方策が採用されている。

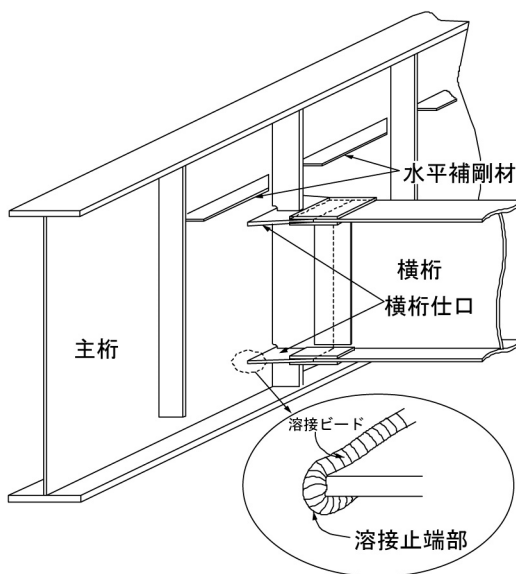


図 1 桁形式橋梁の構造例

日本鋼構造協会の鋼構造物の疲労設計指針・同解説（以下、JSSC 疲労設計指針）では、表 1 に示すように、溶接継手構造について幾つかの仕上げ形状に対する設計上の疲労強度等級基準（A～I）があり、例えば面外ガセット溶接継手に対して、“止端仕上げ”をすることで、溶接のまま（非仕上げ）の継手に比べ 1 ランク強度等級が上がる（例えば F⇒E）ことが示されている。しかし、平成 14 年当時は、具体的な仕上げ形状や、開先溶接を施す範囲などは明示していなかった。したがって、止端仕上げにおける最終的な仕上げ状態は、各施工業者の社内基準あるいは工事ごとの発注者の要求に応じて決められているのが実情であった。実施工においては、溶接ビード全体を滑らかに（R 形状に）仕上げれば、疲労強度が大きく向上することは明らかであるが、施工者側からは、仕上げるための労力とコストが多くなることから、具体的な仕上げ状態、開先溶接範囲と疲労強度の関係、及び過剰とならない仕上げ方法等を明確にすることが求められていた。

表 1 継手の強度等級分類（ガセット溶接継手）の例

継手の種類		強度等級 ( $\Delta\sigma_f$ )	備考
面外ガセット	1. ガセットをすみ肉ある いし開先溶接した継手 ( $l \leq 100\text{mm}$ )	(1) 止端仕上げ (2) 非仕上げ	
	2. フィレットを有するガセットを開先溶接した継手 (フィレット部仕上げ)	E (80)	
	3. ガセットをすみ肉溶接した継手 ( $l > 100\text{mm}$ )	G (50)	
	4. ガセットを開先溶接した 継手 ( $l > 100\text{mm}$ )	(1) 止端仕上げ (2) 非仕上げ	
	5. 主板にガセットを貫通させた継手 (スカラップを伴う)	I (32)	

※（日本鋼構造協会（以下 JSSC）-疲労設計指針より転記）

※  $\Delta\sigma_f$ :  $2 \times 10^6$  回基本疲労強度

一方、（一社）日本橋梁建設協会（以下、橋建協）の溶接技術部会では、構造上、応力集中の発生しやすい十字継手や面外ガセットの溶接部に着目し、これらの疲労強度向上に係る溶接止端部の仕上げの効果や仕上げ方法の明確化を目的として、法政大学（現：都市環境デザイン工学科 森教授）との共同研究を実施し、下記に示すような一連の研究結果を報告してきた。

（１）面外ガセット溶接継手の疲労強度に対する溶接部仕上げの効果（鋼構造論文集、2009）

<『溶接止端仕上げの手引き』発刊（橋建協、2012）>

（２）面外ガセット溶接継手の疲労強度に対する溶接止端仕上げ部の表面粗さと曲率半径の影響（鋼構造論文集、2013）

（３）面外ガセット溶接継手の止端仕上げならびにルート破壊防止に関する検討（土木学会年次学術講演、2014）

<有効切欠き応力概念を用いた面外ガセット溶接継手ルート疲労破壊防止法の検討（鋼構造論文集、2014）>

私は、橋建協の溶接技術部会員として、当初よりこれらの研究に参画してきた。ここでは、これらの研究で得られた知見や成果の概要について紹介する。

## 2. 橋建協での研究成果

### 2.1 溶接止端仕上げの効果

前記（１）及び（２）に関する研究では、面外ガセット溶接継手を各種の止端部仕上げ（仕上げ半径 3 R、5 R、完全 R、フィレット付きなど）を施した試験体及び表面の仕上げの程度の違う試験体による疲労試験と FEM 解析を行い、JSSC 疲労設計指針との比較を行った。また、止端仕上げの範囲や主板への削り込み深さの影響も確認している。

本試験の結果により、溶接止端部の応力集中は、止端部の曲率半径に大きく影響されることを明らかにした上で、疲労強度が溶接のままの非仕上げの試験体に比べ、少なくとも止端部を半径 3 R 以上に仕上げれば 1 等級（F → E 等級）、5 R 以上では 2 等級（F → D 等級）向上した試験結果（**図 2** 参照）をもとに、**表 2** に示すような強度等級を提案した。なお、試験体の中で、グラインダー仕上げによる主板応力方向へ直行する鋭い残存傷や溶接止端ラインの残存部、また、溶接内部の未溶着部分

から疲労破壊する可能性があることから、安易なグラインダー掛けや内部未溶着部は、そこが疲労き裂の発生起点となり、疲労強度を低下させることもあることなどを示した。

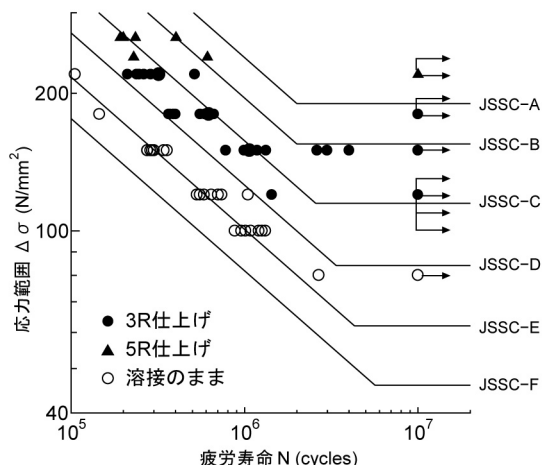


図2 止端仕上げの違いによる疲労試験データの例

表2 疲労強度等級の基準と提案等級（面外ガセット）

	疲労設計指針 の等級	提案等級
非仕上げ	G (50N/mm <sup>2</sup> )	G
止端仕上げ	F (65N/mm <sup>2</sup> )	F (R ≥ 3mm)
		E (R ≥ 5mm)
滑らか仕上げ	F (65N/mm <sup>2</sup> )	D (R ≥ 10mm)

これらの疲労試験や解析結果に基づき、橋建協として、実施工に即した止端仕上げの適切な施工法を明示することを目的に、2012年度に「溶接止端仕上げの手引き」をまとめ発刊した。

本書では、止端半径3Rでグラインダー仕上げする場合について、実際に使用するグラインダーの種類と使い方、適切な仕上げ範囲、主板への削り込み深さなどについて、下記のようなことを示している。

- i) 疲労強度等級を1等級上げるための止端半径は3R以上が必要。
- ii) 使用するグラインダーはディスクタイプでなく超硬バー（円筒、球、つくし型）を推奨。  
（グラインダー処理の良い例、悪い例の例示）
- iii) 適切な止端仕上げの範囲を明示。（図3参照）  
（止端仕上げは、まわし溶接部近傍とし、ガセット長手方向の仕上げ範囲はガセット板厚  $t_g$  の2倍以上、さらに、2倍以上の範囲で仕上げ無しの部分に仕上げ遷移区間として、滑らかに擦り付ける。）
- iv) 主板への削り込み深さは0.3mm以下とする。（図4参照）  
（溶接止端ラインを消すことを優先する場合は、0.5mmまで許容できる）

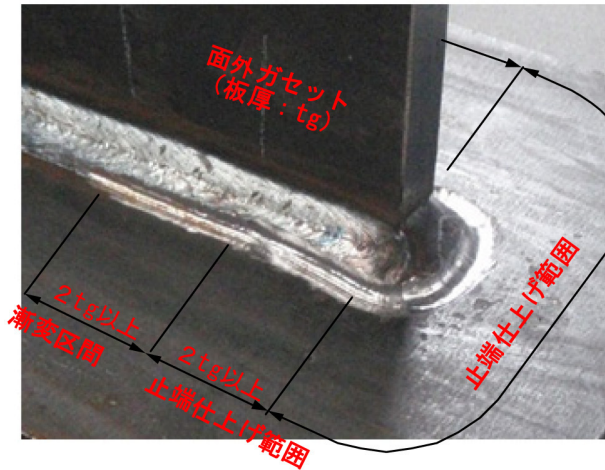


図3 まわし溶接部の止端仕上げの範囲

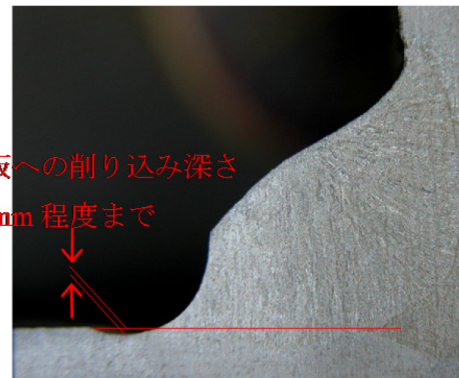


図4 止端仕上げ部の削り込み深さ

## 2.2 溶接ルート部を起点とした疲労破壊防止

面外ガセット溶接部においては、その完全溶け込み溶接範囲の違いや止端仕上げの程度によっては、溶接止端ではなく溶接ルート部（内部の未溶着端部）を起点として疲労破壊が生じることがある（図5参照）ことは、これまでの研究における試験結果からも明らかであった。ルート部を起点とする疲労き裂は外部からの検出が困難であること、また溶接止端仕上げの効果を最大限に活かすということからは、ルート部からの疲労破壊は防止すべきである。ルート破壊を防止する施策としては、「鋼道路橋の疲労設計指針」（（公社）日本道路協会、2002）に示されているように、“ガセット板端部にコーナーカットを施す”、“端部 50mm 程度の範囲を完全溶け込み溶接とする”などの方法が採用されていたが、どの程度確保すればルート破壊を防止できるかは明らかとなっていなかった。そこで、前記（3）に関わる研究において、止端仕上げを施したガセット溶接継手に対し、ルート破壊を防止するために必要なガセット端部の完全溶け込み溶接範囲を明確化し、疲労強度と疲労破壊起点の関係性を明らかにするための疲労試験と解析を行った。比較する試験体には、施工の合理化の観点から、適正範囲を完全溶け込み溶接した試験体に加え、完全溶け込み範囲を部分溶け込み溶接としたもの、開先加工などを設けずにすみ肉溶接のみとして、まわし溶接部の脚長を増したものを加え、それらの効果を確認した。また同時に、主板厚、ガセット板厚、溶接サイズ、溶接形状、及びガセットの長手方向と板厚方向の溶接溶け込みをパラメータとした3次元弾性 FEM 解析を行い、溶接ルートと止端部における応力評価を行った。

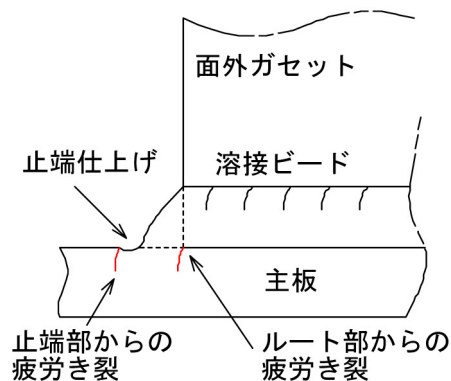


図5 疲労き裂発生部位

なお、前記（3）に関わる論文の表題に“有効切欠き応力概念”とあるが、これは解析上、溶接ルート部のき裂発生点に半径1mmの円形切欠きの存在を仮定して求められる最大の応力を疲労強度評価に有効な応力として用いる概念であり、本研究において、法政大、森教授が用いた手法である。本研究では、この有効切欠き応力を公称応力で除した値を応力集中係数として評価をしている。詳しくは論文を参照されたい。

本研究では下記のような結論を得た。

- i) すみ肉溶接のままの状態ですみ肉溶接の脚長を増した場合でも、ルート破壊を生じる可能性が大きい。
- ii) 完全溶け込み（FP）範囲を部分溶け込み（PP、未溶着部残存）とすると、FPの場合と同等の疲労強度が得られるが、完全にルート破壊は防止できない。
- iii) 完全溶け込み（FP）の範囲を主板厚  $t_m$  の2倍、漸変区間を主板厚  $t_m$  の2倍とすることで、ルート破壊を防止し、所定の疲労強度を満足できる（図6参照）。
- iv) 溶接サイズを大きくすると、止端破壊およびルート破壊する場合のいずれも疲労強度は高くなるが、ルート破壊を防止することはできない。
- v) 溶接のガセット板長手方向および幅方向の溶け込みを深くすることで、ルートの有効切欠き応力は低下する。
- vi) 主板が厚くなるほど、溶接止端、溶接ルートとも有効切欠き応力は高くなる。
- vii) ガセット板側に比べて主板側の溶接脚長を長くすることにより、ルートと止端の有効切欠き応力は小さくなる。

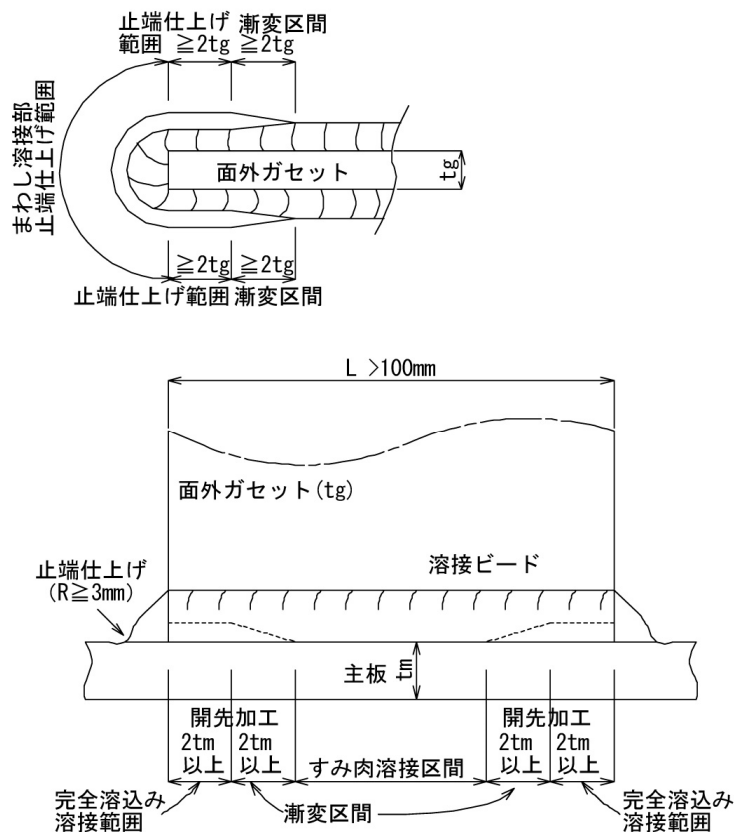


図6 ルート破壊防止のための止端仕上げと完全溶け込み溶接の範囲

以上、本研究では、面外ガセット施工において、ルート破壊を防止し溶接止端の仕上げ効果を最大限に活かすためには、適正な完全溶け込み区間を設ける必要があること、また、部分溶け込みや溶接サイズの設定によっては、ルート破壊を防止できる可能性があることなどを示すことができた。

### 3. おわりに

溶接部の疲労強度向上施策に関する共同研究に参加して、設計上の基準と要求される性能を実現するための施策や溶接施工法との関係について、貴重な知識と経験を得させていただいた。鋼橋の寿命に大きく影響を与える疲労耐久性向上に係る溶接技術や施策は、今後ますます重要になってくることは間違いない。製造物の品質保証は、設計や工場の技術者だけでなく、実際に材料加工や溶接作業を行う作業員のすべての関係者が、溶接部の特性に係る基礎的知識は元より、施工状態の違いによる影響、止端仕上げ等疲労強度向上のための施策の目的、その目的を達成するための的確な施工方法及び手順を理解、実行し、そして施工の各段階、特に溶接完了後には確認の難しい開先加工や溶接手順などのプロセスを適切に管理しなければ成し得ないと、製造業に身を置く技術者として改めて感じている次第である。

**射越潤一（いこし じゅんいち） 溶接管理技術者特別級**

株式会社横河ブリッジ 機材事業部 機材部