

## 特集：溶接部の疲労

## 疲労性能に影響を及ぼす溶接部形状と 応力集中係数の自動評価手法

 大阪大学大学院 工学研究科  
 堤 成一郎

### 1. はじめに

機械・構造物の損傷の多くは疲労に起因しているといわれており、特に鋼構造物の破損は、溶接部を起点とする場合が多く、疲労亀裂発生からその後の進展挙動のメカニズム解明や高精度な疲労設計手法の開発が進められている<sup>1, 2)</sup>。一方、溶接継手部の個体差・バラツキは、各種製品の疲労性能にも影響を及ぼすため、各製品の品質確保には、疲労性能に影響を及ぼす因子を把握するとともに、各バラツキ要因を適切に管理することが重要な課題となる。

疲労性能に影響を及ぼす因子は多数あり、中でも公称応力 $\sigma$ と最大応力 $\sigma_{max}$ の比として定義される応力集中係数 $K_t(K_t = \sigma_{max} / \sigma)$ と疲労性能の間には強い相関があることが知られている<sup>3-6)</sup>。この $K_t$ は形状によって様々に変化するため、任意形状の $K_t$ の算出には、一般にFEM解析が行われている。しかしながら、溶接継手部の局所形状は、大きなバラツキを持って3次元的に複雑に分布しているため、精度の高い $K_t$ の評価には、精緻な形状データの反映が必要となる。特に近年の計測技術や計算機器の発達が進捗するデジタルツインに対する期待も相まって、3Dスキャナで取得された計測結果を採用する場合は、膨大な点群データの圧縮や計算効率の向上も重要な課題である。このような状況下で、溶接部に対して定義される止端半径・フランク角・角変形・目違い・余盛幅・余盛高さなどの形状パラメータを数式に代入することで、 $K_t$ を簡易に推定可能な評価式<sup>3-5)</sup>に対する期待も依然として高く、実形状との乖離を小さくした高精度な $K_t$ 推定式や角変形量、目違い等の影響を考慮する手法も多く提案されている。

一方、 $K_t$ 評価式の入力データとなる溶接部の形状パラメータの取得方法としては、樹脂等で余盛形状を型取りするレプリカ法が一般的である。この手法は、型取りによって得た複雑に変化する溶接部形状から、計測者が個人の判断に基づいて、特定の2次元断面形状を選定した後に、個々の形状パラメータを目視により評価して行われている。そのため、結果の算出までに多大な労力が必要となり、また評価される形状の信頼性の低さが懸念される。なお、橋梁接合部の止端部を対象とした評価では、レプリカ法を用いて計測された形状パラメータは、計測者によって大きく異なることが報告<sup>7)</sup>されている。そこで近年、溶接継手部の形状データから形状パラメータを自動的に評価する手法の開発が進められている。

本報では、止端半径・フランク角・余盛幅・余盛高さ・角変形・目違いなど、溶接継手に関連する形状パラメータを一いつ高精度・高効率に取得するとともに、溶接継手の疲労性能と直結する応力集中係数 $K_t$ までを自動評価可能な手法について概説する<sup>8-10)</sup>。特に、具体的な活用事例として、突合せ溶接継手を対象として多断面分析を行った研究を取り上げ、各種形状パラメータの分布状況を分析した結果や、形状を反映した局所応力によって疲労試験を整理した結果について例示すること

で、疲労性能バラツキ因子を定量化する試みに関して説明する。

## 2. 表面形状パラメータ自動決定の評価手法<sup>8,10)</sup>

3D スキャナで取得した溶接部断面の2次元 (x, y) 形状データから、止端半径 ( $\rho$ )・フランク角 ( $\theta$ )・余盛幅 (W)・余盛高さ ( $\delta$ )・角変形 ( $\alpha$ )・目違い (e) などの形状パラメータに加えて、応力集中係数  $K_t$  を自動的に評価可能な手法<sup>8, 10)</sup> について概説する。

突合せ溶接継手を例として、形状パラメータの定義と形状の表現に用いる関数・特徴点を図1に示している。母材部を直線、左右の止端部を円弧、余盛部をスプライン曲線として、滑らかに接続された3種の関数を用いて突合せ継手の形状を表現している。また、計測された実形状と関数表示される予測形状の平均的な距離を形状誤差指標として定義し、その値が最小となった形状を最適形状として決定するとともに、関数に採用された形状パラメータを抽出する。これにより得られた形状パラメータを応力集中係数  $K_t$  の評価式に代入することにより、当該止端部の  $K_t$  まで瞬時に算出される。なお、詳細については、文献<sup>8,10)</sup> を参照願う。

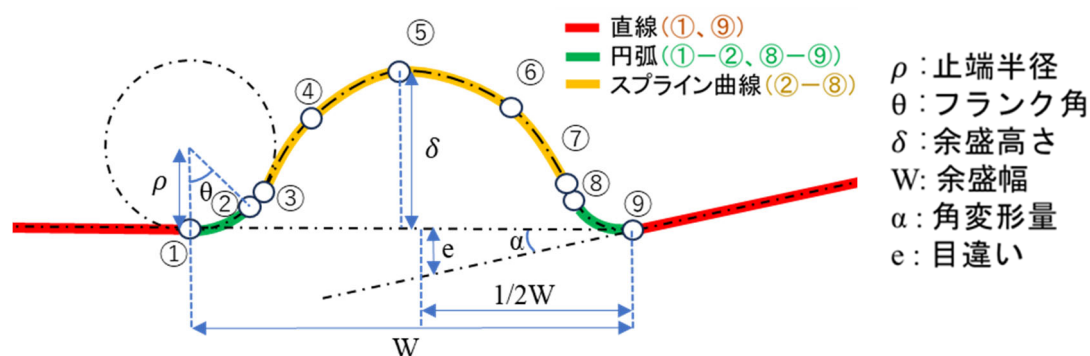


図1 突合せ継手を例とした形状パラメータの定義と関数・特徴点の概略図

## 3. 突合せ溶接継手の製作条件および形状評価結果

ここに示す評価対象の突合せ溶接継手は、開先角度  $35^\circ$  に加工した SS400 鋼板を炭酸ガスアーク溶接により製作されている。継手形状を変化させることを目的として、表1に示すように目違いおよびルートギャップの施工目標値を4通り (A, B, C, D) に設定した試験片合計8体を作成し、疲労試験に供している。なお、疲労試験片は、評価対象部の板幅が 31mm となるように切出しにより製作し、疲労試験に先行して3D スキャナを用いた形状取得を行っている。これにより得られた3D 点群データから、疲労試験片一体あたり、約 0.1mm 間隔の合計 311 断面、総計 2488 断面の形状を2次元 (x, y) データとして取得している。例として、表1に示した疲労試験片 TP-A-1, B-1, C-1, D-1 の表面・中央断面から取得した形状を図2に示している。なお表1には、継手製作時の目違いおよびルートギャップの施工目標値に加えて、実測した角変形量 ( $\alpha$ )、目違い (e) の値および疲労試験条件と得られた結果を示している。

表 1 各突合せ溶接継手の施工目標値・実測値・疲労試験の条件および試験結果

TP	製作条件 (目標値)			形状計測結果		疲労試験条件		疲労試験結果
	板厚 (mm)	RG (mm)	目違い (mm)	角変形 $\alpha(^{\circ})$	目違い e(mm)	$\Delta\sigma$ (MPa) 応力比 R=0.1	$N_f$ (cycles)	疲労破断 開始位置
A-1	16	1	1	2.19	1.05	225	324,679	Front-left
A-2				2.02	0.74	225	194,394	Front-left
B-1			3	2.98	2.09	186	162,525	Front-left
B-2				2.9	1.84	225	80,678	Front-left
C-1		2	1	2.85	1.01	186	437,008	Front-left
C-2				2.76	0.69	225	270,665	Front-left
D-1			3	1.96	1.95	186	352,454	Front-left
D-2				1.83	1.83	225	170,660	Front-left

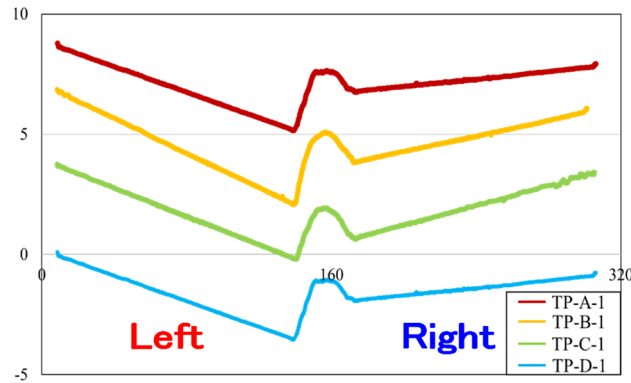


図 2 継手の表面形状の例 (継手表面・中央断面)

次に、形状評価結果の一例として、試験片 TP-D-1 の表面・中央断面の形状フィッティング結果を図 3 に示している。この図から、形状を表現する関数と実形状を示すデータポイントが高い精度で一致していることが確認できる。

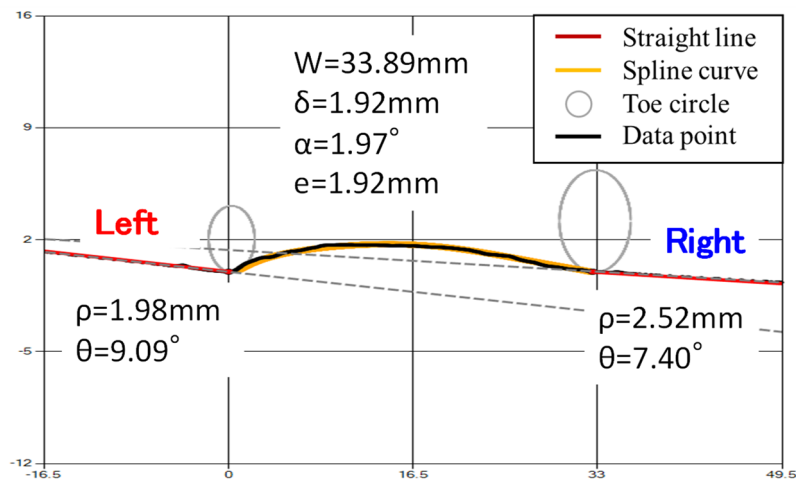
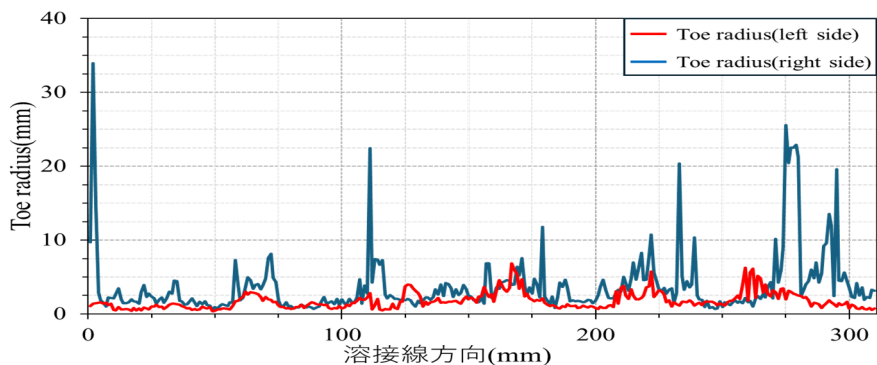
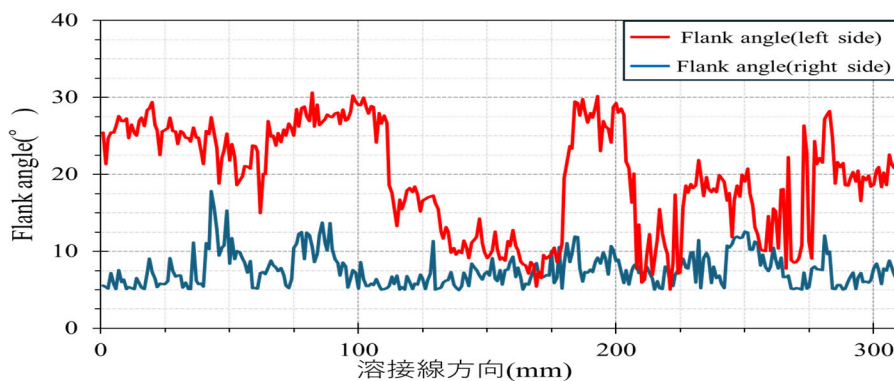


図 3 形状フィッティング結果の例 (TP-D-1, 継手表面・中央断面)

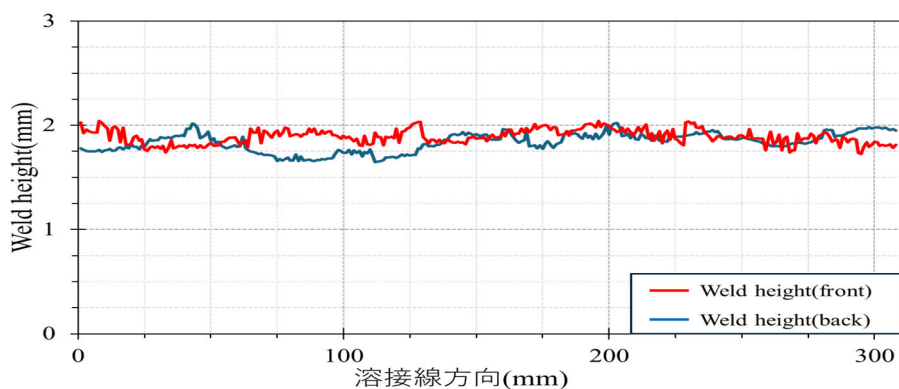
次に、試験片 TP-D-1 の全 311 断面を対象として、先述の評価手法を適用して得られた止端半径 ( $\rho$ )、フランク角 ( $\theta$ )、余盛高さ ( $\delta$ ) の値を図 4 に示している。これらの図より、約 0.1mm 間隔で評価した各形状パラメータの分布状況が確認できる。



a) 止端半径



b) フランク角



c) 余盛り高さ

図 4 各種形状パラメータの分布状況 (TP-D-1, 板幅 31mm)

#### 4. 応力集中係数 $K_t$ および疲労性能評価結果

溶接部形状の影響を反映した応力集中係数  $K_t$  の評価式は複数提案されているが、ここでは文献<sup>10)</sup>と同一の評価式を採用している。例として、試験片 TP-D-1 の全 311 断面の 4 箇所<sup>1)</sup>の止端部に対して、

横軸に試験片板幅（31mm）方向の座標値、縦軸にその位置で評価された  $K_t$  の値をプロットした結果を図 5 に示している。この図より、疲労性能との相関が高い  $K_t$  が継手幅方向に分布している状況が確認でき、特に裏側ビード（Back）に比して、表側ビード（Front）の  $K_t$  値は大きく、中でも表側ビード・左側止端部（赤色）の値が総じて大きいことや裏側ビード・左側止端部（黄色）は小さい傾向にあることなどが確認できる。

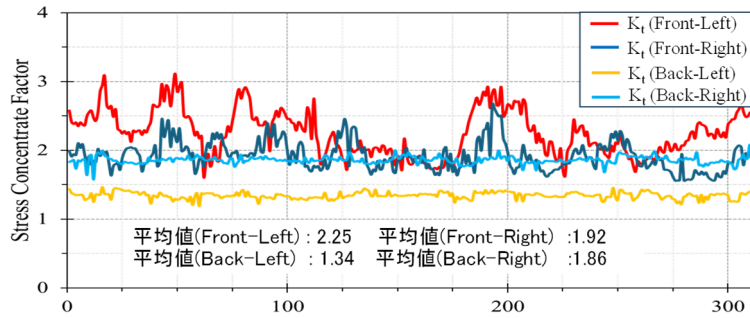


図 5 応力集中係数の分布状況（TP-D-1, 板幅 31mm）

次に、溶接継手形状と疲労性能の関係に注目した検討結果について示す。まず、疲労試験結果の整理として一般的な公称応力に基づく S-N 関係を図 6 a に示している。縦軸（S）は試験片に載荷した公称応力範囲、横軸（ $N_f$ ）は破断までに要した繰返し載荷回数である。これより、いずれの試験結果も、JSSC（日本鋼構造協会）F 等級よりも破断までの繰返し数が大きいものの、同一の応力に対して試験結果が大きくバラついていることが確認できる。次に、同一の試験結果ではあるが、公称応力に応力集中係数  $K_t$  を掛けることで算出した局所応力による S-N 関係を図 6 b に示している。なお、局所応力の評価に採用する  $K_t$  は、各継手・全 311 断面の 4 箇所止端部それぞれで評価した形状パラメータの中央値を評価式<sup>4,8)</sup>に代入することで算出している。この図より、局所応力によって整理した S-N 関係（図 6 b）は、唯一の線に近似され、実験結果のバラツキが大きく低減されることが確認できる。このように、形状計測結果を反映した局所応力によって、大きくバラつく疲労試験結果が整理される、すなわち、溶接継手形状が疲労性能に大きな影響を及ぼしていることが確認できる。

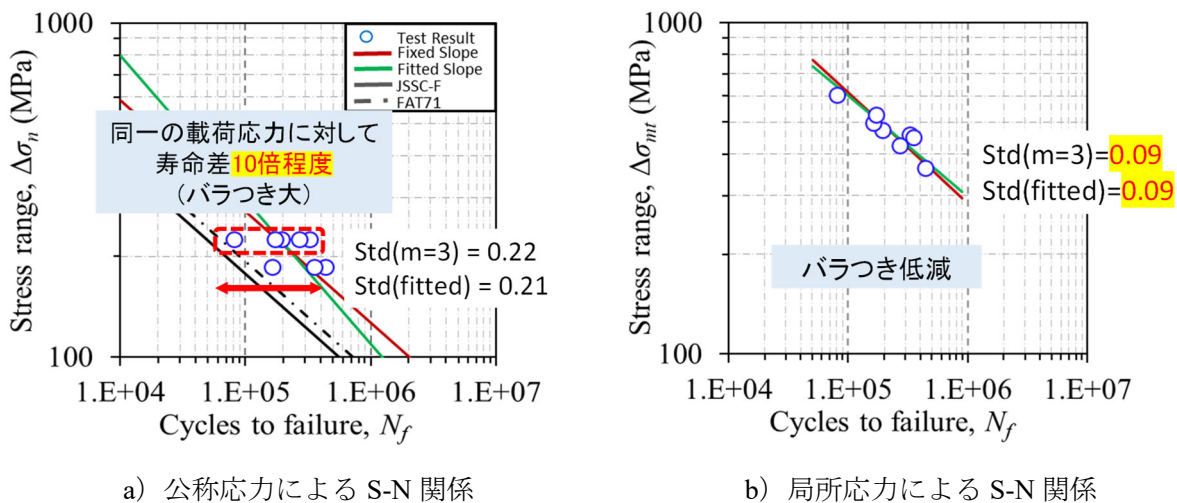


図 6 公称応力および局所応力によって評価した S-N 関係の比較

上記以外でも、形状計測結果を反映した局所応力によって、疲労亀裂発生箇所を高い精度で予測可能であることや、形状計測結果と疲労性能の相関を分析することにより、疲労性能に最も影響のある形状因子の特定など、様々な分析が可能になることが報告<sup>8, 10)</sup>されている。

## 5. まとめ

本稿では、溶接継手の形状パラメータおよび  $K_t$  を一意かつ高精度・高効率に自動評価可能な手法について概説した。本手法は、継手表面の形状データを直線、円弧、スプライン曲線の3種類の関数を用いて表現し、計測結果との乖離が最も小さくなる形状を最適形状として決定することで、各形状パラメータを求め、さらに得られた形状パラメータを評価式に代入することにより、応力集中係数  $K_t$  (局所応力) まで自動的に算出可能な手法である。また、溶接継手の多断面形状分析結果から得られる局所応力と疲労試験結果との照査により、評価対象とした突合せ溶接継手の疲労性能支配因子を明らかにすることができることを示した。

本稿で概説した手法を活用することにより、現場計測された形状データから、個々の形状パラメータのみならず、疲労性能と相関が高い  $K_t$  までを瞬時に算出することが可能となり、溶接施工現場・オンサイトにおける疲労性能評価や品質管理などへの活用を期待している。

## 参考文献

- 1) 溶接構造の疲労, 産報出版, 2015.
- 2) 日本材料学会: 疲労設計便覧, 株式会社養賢堂, 1995.
- 3) 辻 勇: 非荷重伝達型すみ肉溶接継手の止端部の応力集中係数の推定式, 西部造船会々報, 80, 241-251, 1990.
- 4) Pachoud, A.J., Manso, P.A., Schleiss, A.J.: New parametric equations to estimate notch stress concentration factors at butt welded joints modeling the weld profile with splines. Engng. Fail. Anal., 72, 11-24, 2017.
- 5) Luo, Y., Tsutsumi, S., Han, R., Ma, R., Dai, K.: Parametric formulae for stress concentration factor and clamping-induced stress of butt-welded joints under fatigue test condition, Welding in the World, 66(9), (2022), 1897-1913.
- 6) 岡田 公一, 木村 俊介, 山本 勇一, 緒方 洋典, 金子 正幸, 安東 裕美, 牟田 良太郎, 谷野 忠和, 矢島 浩: ケミカルタンカーカーゴタンク溶接継手からの疲労亀裂発生防止策に関する一考察, 日本船舶海洋工学会論文集, 33, 149-157, 2021.
- 7) 鋼橋技術研究所施工部会: 施工部会報告書-I, 鋼橋技術研究会, 11-14, 2009.
- 8) 堤 成一郎, 小川 太希: 溶接継手の形状パラメータおよび応力集中係数の自動評価システムの開発, 土木学会論文集, 80, 15, 23-15033, 2024.
- 9) Luo, P., Mashino, Y., Matsuo, Y., Kasaoka, Y., Tsutsumi S.: Fatigue experiment and assessment of butt-welded joints in steel structures considering misalignment and weld geometry effects, International Journal of Fatigue, 182(2024), 108200.
- 10) 小川 太希, Luo Pengjun, 堤 成一郎: 溶接継手の多断面形状分析に基づく疲労性能支配因子評価技術の確立, 土木学会論文集, 81, 15, 24-15025, 2025.

<略歴>

**堤 成一郎 (つつみ せいいちろう)**

---

2002年 3月 九州大学大学院 博士後期課程 修了  
2002年 4月 東北大学大学院 工学研究科 助手  
2004年 4月 九州大学大学院 工学研究院 助教  
2011年 10月 大阪大学 接合科学研究所 准教授  
2022年 4月 大阪大学大学院 工学研究科 准教授  
現在に至る