

面外ガセツ溶接継手に対するき裂進展解析手法の推定精度に関する一考察

東京都立大学 学生会員 〇倉林 拓矢 東京都立大学 正会員 村越 潤

首都高技術株式会社(前(国研)土木研究所) 正会員 木ノ本 剛

(国研)土木研究所 正会員 澤田 守 (国研)土木研究所 正会員 大西 達也

1. はじめに

「鋼構造物の疲労設計指針」^{1),2)}には、比較的簡便なき裂進展解析(以下、JSSC 解析手法)を用いた疲労照査法が提示されているが、3 次元的なき裂の進展挙動となる面外ガセツ溶接継手に対して、同手法の適用性に関する定量的な評価事例は少ない。本検討では、実橋に近い寸法諸元の面外ガセツ溶接継手の疲労試験結果に対して、JSSC 解析手法によるき裂進展解析を実施し、疲労試験結果との比較分析を通じて、その推定精度を評価した³⁾。また、半楕円き裂を導入した溶接継手の FEM 解析による K 値の算出や、破面の型取りによるき裂進展方向の測定により、同手法の推定精度について考察した。

2. 疲労試験と試験データの概要

表-1 に検討対象の継手試験体(き裂進展挙動を確認可能なビーチマーク試験実施の 19 体、き裂データ 29 個を分析対象)の概要を、図-1 に寸法形状と寸法パラメータを示す。疲労試験は軸引張荷重作用下で実施され、き裂は主板を挟んで片側または両側の回し溶接止端部から発生・進展する場合が確認されている。表-2 に、各段階時点での、表面き裂長さ $2b$ と、試験終了時の載荷回数 N_f に対する寿命比を示す。初期単一き裂とは、止端部の複数き裂が合体した後の視認可能な単一かつ最小寸法の半楕円表面き裂を意味する。また、両側き裂の場合、き裂深さが板厚半分 $0.5t$ まで進展した時が概ね板厚貫通に相当する。本検討では、半楕円き裂の進展過程への JSSC 解析手法の適用性を検討することとし、初期単一き裂から深さ方向 $0.5t$ に達するまでの挙動に着目した。

3. 解析方法

き裂進展速度式¹⁾には、平均設計曲線¹⁾ ($C=1.5\times10^{-11}$, $n=2.75$, $\Delta K_{th}=2.4\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)を用いた。応力集中に対する補正係数 F_g は、図-2 に示す FEM モデル(汎用有限要素解析ソフト MSC.Marc.2018.1.0 を使用)より得られる主板側止端部の応力分布から求めた。また、JSSC 解析手法の推定精度を考察する上で、同モデルに実き裂に近い形状の半楕円き裂を導入したモデルを用いて FEM 解析を実施し、き裂先端付近の開口変位を求め、変位外挿法⁴⁾により K 値(K_{FEM})を算出した。なお、き裂は主板応力方向に対して垂直な面内に進展するものと仮定した。

4. 試験値と解析値の比較・考察

図-3(a)に例として試験体 T25L4-65-3 のき裂深さと載荷回数の関係

表-1 検討対象とした試験データの概要

試験体	寸法パラメータ(mm)				応力範囲(MPa)	き裂発生位置	
	t_g	t	l	l_m			
T9L2	T9L2-80-1	9	9	200	1200	80	3*4側 両側
	T9L2-80-3					65	3*4側 両側
	T9L2-65-2					50	3側 片側
	T9L2-50-1					50	1*2側 両側
T9L4	T9L4-80-1	9	9	400	1600	80	2,4側 片側
	T9L4-80-3					65	1,2側 両側
	T9L4-65-1					50	2,3*4側 片側,両側
	T9L4-50-1					50	4側 片側
T9L8	T9L8-80-1	9	9	800	2000	80	3,4*側 両側
	T9L8-80-3					65	1,2*側 両側
	T9L8-65-1					50	1,3側 片側
	T9L8-50-1					50	1,2*4*側 片側,両側
T25L4	T25L4-80-1	25	25	400	1600	80	3,4側 両側
	T25L4-80-2					65	3,4側 両側
	T25L4-65-3					50	1,2側 両側
	T25L4-50-1					50	3,4*側 両側
T40L4	T40L4-80-1	25	40	400	1600	80	1,2側 両側
	T40L4-65-1					65	3,4側 両側
	T40L4-50-2					50	1,2側 両側

注 1) 試験体 T〇L〇-〇-〇: 〇部は順に、 t (mm), l ($\times 100$ mm), 応力範囲 (MPa), 試験体 No. を指す。
注 2) *: ビーチマークが読み取れなかったため、データには含めていない。

表-2 表面き裂長さ $2b$ と N_f に対する寿命比

試験体	初期単一き裂 確認時 N_{s0}		板厚半分時 $N_{0.5t}$		試験終了時 N_f
	き裂長さ $2b$ (mm)	寿命比 N_{s0}/N_f	き裂長さ $2b$ (mm)	寿命比 $N_{0.5t}/N_f$	
T9L2 T9L4 T9L8	7~16	0.14~0.58	15~20	0.50~0.76	133~181
T25L4	24~36	0.10~0.30	46~48	0.69~0.78	172~186
T40L4	21~35	0.11~0.19	50~67	0.77~0.95	217~239

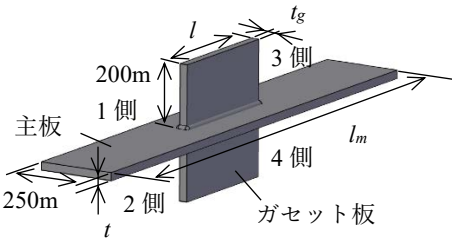


図-1 試験体寸法形状と寸法パラメータ

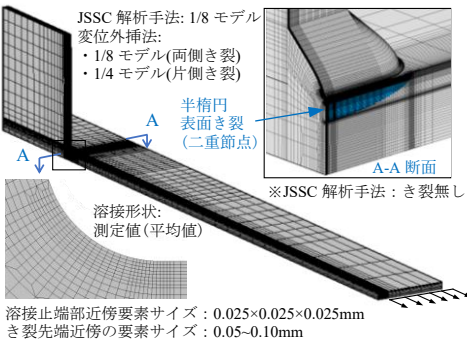


図-2 FEM モデル例(試験体 T25L4)

キーワード 面外ガセツ溶接継手, 疲労試験, 疲労き裂進展解析

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学 t.kurabayashi27@gmail.com

を黒線(赤線については後述)で、図-3(b)に全データに対して初期単一き裂の深さ a_{s0} から板厚半分 $0.5t$ に達するまでの進展回数 N_{pi} について試験値と解析値を比較して示す。全体として比率(解析値/試験値)の平均値、標準偏差はそれぞれ 0.54, 0.11 であり、解析値の方が進展速度は速く(進展回数は短く)、すなわち安全側に評価することを確認した。

図-4(a)に JSSC 解析手法による K 値(K_{JSSC})と K_{FEM} 、図-4(b)に K_{JSSC} と進展速度(試験値)より逆算して求めた K 値(K_{EXP})の比較結果(紙面の都合上、試験体 T25L4, T40L4 のみ)を示す。図-4 より、比率 K_{JSSC}/K_{FEM} は 1.0 ~ 1.3 程度、比率 K_{JSSC}/K_{EXP} は 1.0 ~ 1.8 程度であり、JSSC 解析手法は K_{FEM} と K_{EXP} より K 値を大きく評価する。ここで、半楕円き裂を有する有限帯板モデルによる K_{FEM} と、補正係数 F_g を 1 として計算した K_{JSSC} は、深さ方向の K 値に関して良く一致することを確認しており、 K_{JSSC} と K_{FEM} の差は、主に K_{JSSC} の算出における重ね合わせの原理に基づく補正係数 F_g の影響によるものと考えられる。この差を考慮しても、JSSC 解析手法は試験値 K_{EXP} よりもやや大きく評価し、ばらつきがみられるため、この差の他の要因としてき裂進展方向の違いが考えられる。

図-5 に、破面の型取りによるき裂深さの進展方向の測定結果を示す。進展初期では溶接止端形状の影響によりき裂はガセット側に傾いて進展し、板厚半分に近づくにつれて傾きが緩やかになる傾向があり、解析上の仮定面($y=0$)とは乖離がみられる。また、深さ 1.0mm 程度までは全データの進展方向の違いは比較的小さく、初期き裂進展角度($y=0.5\text{mm}$ 時点)は $20.9 \sim 38.5^\circ$ であった。

以上より、 K 値の算出方法(K_{JSSC} と K_{FEM} の差)やき裂進展方向の仮定の影響を考慮した補正係数(それぞれ $f_{cl}=1/1.13$, $f_\theta=\cos^2 18.3^\circ$, (平均値-2×標準偏差)を基に設定)を考え、 K_{JSSC} 値の簡易的な補正を試みた。なお、これらの補正係数は、き裂進展に伴う進展角度の変化やき裂形状のばらつきなどは考慮していない。図-3(a)の赤線及び図-6 に、 K_{JSSC} 値補正後の進展回数の試験値と解析値の比較結果を示す。図-6 より、全体として比率(解析値/試験値)の平均値、標準偏差はそれぞれ 0.99, 0.21 であった。解析値は試験値に近づく傾向にあり、JSSC 解析手法の推定精度に関して、少なくとも K 値の算出法やき裂進展方向の仮定が影響を及ぼしている可能性があることを確認した。

謝辞：本研究は、(国研)土木研究所、名古屋大学、東京都立大学、施工技術総合研究所による共同研究「鋼橋の疲労耐久性向上技術に関する共同研究」の一環として実施されたものである。関係者各位に謝意を表する。

参考文献 1) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版、2012。2) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版、1993。3) 倉林他：実大面外ガセット溶接継手に対する疲労き裂進展解析の適用性の検討、鋼構造年次論文報告集、第30巻、pp.324-333、2022.11。4) 例えば、T. L. Anderson(栗飯原周二、金田重裕、吉成仁志訳)：破壊力学(第3版)―基礎と応用―、森北出版、2011。

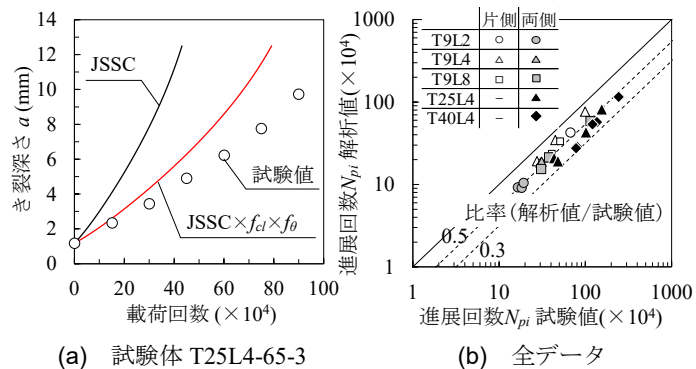


図-3 進展回数の試験値と解析値の比較

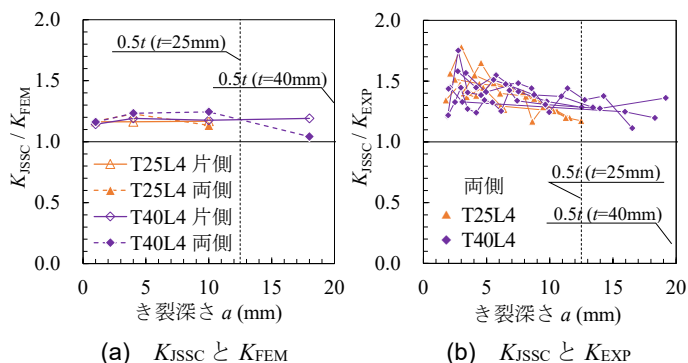


図-4 K 値の比較(試験体 T25L4, T40L4)

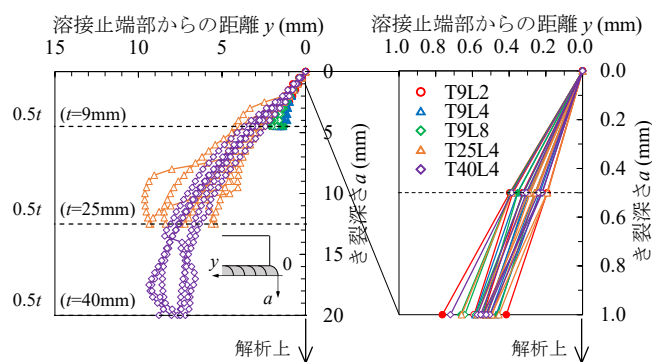


図-5 き裂の進展方向(試験体 16 体、き裂データ 24 個)

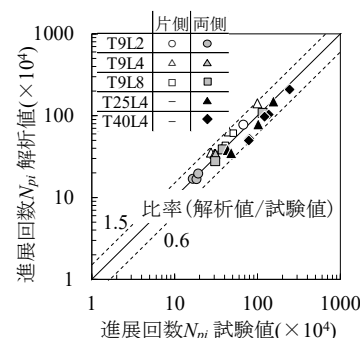


図-6 進展回数の試験値と解析値の比較(補正後、全データ)