

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

東京都立大学 学生会員 ○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(元(国研)土木研究所) 正会員 木ノ本 剛

1. はじめに

「鋼構造物の疲労設計指針」¹⁾²⁾(以下、JSSC 指針)では、面外ガセット溶接継手の疲労強度等級を、ガセット長さ 100mm を境に F, G 等級に分類しているが、疲労試験上の制約などからこれまでの疲労試験の多くが小型試験体もしくは桁試験体を対象としており、実橋での寸法諸元の実大継手に対する試験データは十分ではない。一方、JSSC 指針には、疲労強度・寿命の評価に関して、き裂進展解析手法が提示されているが、3 次元的なき裂進展挙動となる面外ガセット継手や実大継手試験体に対するき裂進展解析の適用性を検討している事例は少ない。本文では、過年度に実施された実大面外ガセット溶接継手の疲労試験結果と、き裂進展解析手法¹⁾²⁾による解析結果の比較を行い、同手法の適用性の検討結果について述べる。

2. 疲労試験の概要

表-1 に検討に使用した面外ガセット継手の試験体(き裂進展挙動を確認可能なビーチマーク試験実施の 19 体を対象)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し、貫通き裂として進展後、残存断面での塑性変形が顕著になった段階で試験を終了している。応力比は初期不整の影響を極力排除するため 0.2~0.77 の範囲としている。き裂は、主板を挟んで片面または両面の回し溶接止端部から発生・進展しており、本検討では半楕円状き裂の深さが板厚半分に達するまでの挙動について解析値と比較(検討したき裂数 29 個)した。なお、全ての試験体で破面の溶接止端付近にラチェットマークがあり、表面付近で溶接止端に沿った複数き裂の発生が確認されている。

3. き裂進展解析方法

き裂進展解析手法は JSSC 指針による方法によった。き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係は、次式の修正 Paris 則¹⁾で与えられる。

$$da/dN = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)$$

ここで、 C , m は材料定数、 ΔK_{th} は下限界応力拡大係数範囲である。本検討では平均設計曲線¹⁾($C = 1.5 \times 10^{-11}$, $m = 2.75$, $\Delta K_{th} = 2.4(\text{MPa}\sqrt{\text{mm}})$)を用いた。き裂の深さ方向の応力拡大係数範囲は次式で与えられる。

$$\Delta K = F_g \cdot F_e \cdot F_s \cdot F_t \cdot \Delta\sigma\sqrt{\pi a}$$

ここで、 $\Delta\sigma$ は公称応力範囲、 a はき裂深さ、 F_e , F_s , F_t は形状補正係数である。 F_g は応力集中に対する補正係数で、重ね合わせの原理に基づき応力解析(汎用有限要素解析ソフト MSC.MARC.2018.1.0 を使用)により得られる止端部周辺の応力分布から求めた。図-2 に試験体 T25L4 を例に解析モデル(対称性を考慮した 1/8 モデル)を、表-2 に解析に用いた溶接形状(同一寸法形状の試験体計測値の平均値)を示す。要素は 8 節点ソリッド要素で、溶接止端部の要素サイズは $0.025 \times 0.025 \times 0.025\text{mm}$ である。

4. 試験結果と解析結果の比較・考察

(1) 半楕円き裂の進展挙動

止端部から発生した複数き裂が合体し、ビーチマークにより確認できる単一かつ

表-1 検討対象とした試験体の概要

試験体	寸法パラメータ(mm)				応力範囲(MPa)	応力比 R	き裂発生位置	板厚半分までの進展回数	試験終了時の回数
	l_g	t	l	l_m					
T9L2-80-1	9	9	200	1200	80	0.64	3,4 両面	764430	1169289
T9L2-80-3					65	0.71	3 片面	628906	1003092
T9L2-65-2					50	0.77	1,2 両面	1122650	2043627
T9L2-50-1	9	9	400	1600	80	0.64	2,4 片面	2885906	4641100
T9L4-80-1					65	0.71	2,3,4 片面,両面	373075	698200
T9L4-80-3					50	0.77	4 片面	709430	969000
T9L4-65-1	9	9	800	2000	80	0.64	3,4 両面	1594056	2884272
T9L8-80-1					65	0.71	1 片面	479944	697900
T9L8-80-3					50	0.77	1,2,4 片面,両面	606225	797600
T9L8-65-1	25	25	400	1600	80	0.50	3,4 両面	808007	1347450
T9L8-50-1					65	0.77	3,4 両面	1897505	2992900
T25L4-80-1					80	0.50	3,4 両面	584270	748675
T25L4-80-2	25	25	400	1600	65	0.59	1,2 両面	680230	883497
T25L4-65-3					50	0.69	3,4 両面	1167065	1498575
T25L4-50-1					80	0.20	1,2 両面	2149470	3107488
T40L4-80-1	25	40	400	1600	80	0.20	1,2 両面	982804	1045761
T40L4-65-1					65	0.35	3,4 両面	1512952	1829758
T40L4-50-2					50	0.50	1,2 両面	2932827	3823975

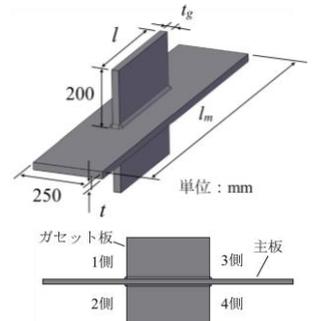


図-1 試験体寸法形状と寸法パラメータ

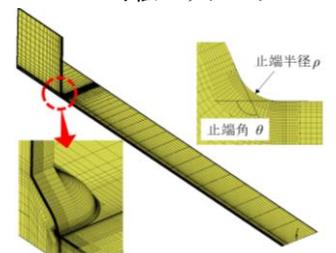


図-2 試験体の FEM モデル例

表-2 解析モデルの溶接形状

試験体	溶接脚長(mm)		止端半径 ρ(mm)	フランク角 θ(度)
	ガセット板側	主板側		
T9L2	7.35	7.15	0.71	110.31
T9L4				
T9L8				
T25L4	9.11	8.78	0.88	114.81
T40L4	9.74	9.88	0.99	115.34

最小寸法の半楕円き裂(初期き裂: 深さ a_i , 表面長さ b_i) が形成された状態から, 板厚半分までの進展挙動を対象に試験値(ビーチマークによるき裂計測値)と解析値を比較した. 図-3 に試験体 T25L4-65-3 を例に, き裂深さ a とき裂形状比 a/b の関係を, 図-4 にき裂深さ a と载荷回数との関係を示す. 図-3 より, 解析値は試験値のき裂形状比の変化傾向を適切に評価

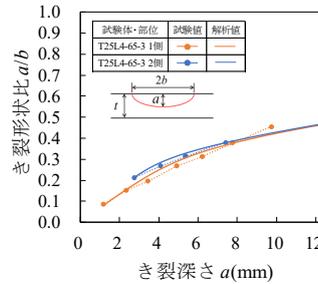


図-3 き裂深さと形状比の関係

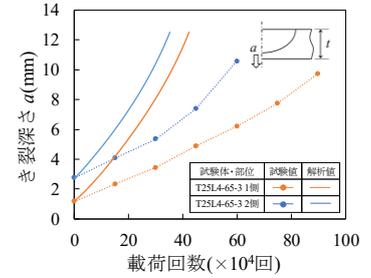


図-4 载荷回数とき裂深さの関係

している. 一方, き裂進展速度に関しては, 図-4 より, 解析値の方がき裂深さとともに速度が増加する傾向がみられる. 図-5 に, 全 19 試験体における, 長さ a_i, b_i の初期き裂から, ビーチマーク毎までの载荷回数 N_p (進展回数) の試験値と解析値の関係(同一のき裂を折れ線で表示)を示す. 全体的に解析値の方が進展回数は短く, その比率(解析値/試験値)は 0.2~1.1 の範囲にばらついている. このばらつきについては, 試験体の寸法諸元よりも, き裂の発生部位(片面・両面)による差異の影響が大きい. 片面, 両面き裂の進展回数の比率(平均値)はそれぞれ 0.74, 0.46 であり, 両面き裂の場合の方が差が大きく, 解析で考慮していない反対側のき裂進展が, 着目き裂の進展挙動に影響を与えている可能性がある.

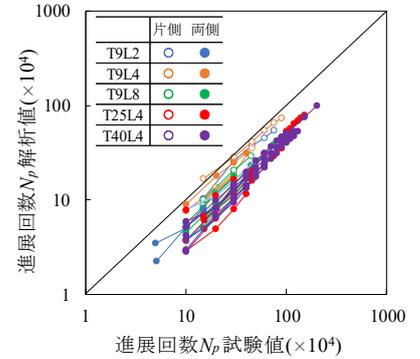


図-5 試験値と解析値の比較(き裂深さ)

(2) 貫通後のき裂の進展挙動

き裂が板厚を貫通し, 貫通き裂として幅方向に進展していく段階について, 試験値と解析値を比較した. F_g の算出には, FEM 解析で求めた溶接止端位置の板幅方向の応力分布(板厚方向に一定でないため, 板厚方向の平均値による分布)を用いた. 図-5 と同様の整理を行い, 図-6 に表面き裂長さ b の試験値と解析値の関係を比較して示す. 進展回数の比率(平均値)は 0.81 であり, 解析値は試験値と概ね一致し, かつ安全側の評価を与えている. また, 半楕円表面き裂と比較して, 試験値をより適切に評価可能であることがわかる.

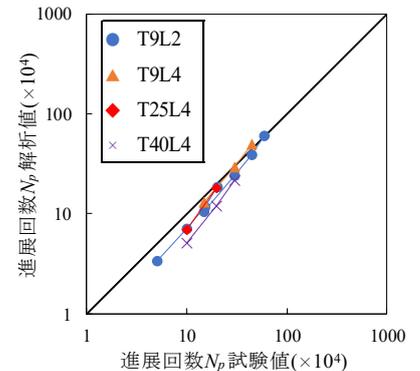


図-6 試験値と解析値の比較(貫通き裂)

(3) 疲労寿命推定における初期き裂形状の仮定の影響

き裂進展解析により疲労寿命を推定する場合の初期き裂長に関して, JSSC 指針¹⁾では推奨値($a_0=0.1\sim 0.2\text{mm}$, $a_0/b_0=1.0$)を示している. 既往研究^{3),4)}では, 軸引張を受ける面外ガセット継手に対して, $a_0=0.05\sim 0.2\text{mm}$, $a_0/b_0=0.1\sim 1.0$ 程度の値が適用されている. ここでは実用性の観点から, 初期き裂形状を表す a_0 と a_0/b_0 に着目したパラメトリック解析を行い, 板厚半分の深さまでの進展寿命の解析値と試験値の比較を行った. a_0 を $0.05\sim 0.2\text{mm}$, a_0/b_0 を $0.1\sim 1.0$ の範囲で変化させた場合の寿命比を図-7 に示す. なお, 初期き裂形状を小さく設定すると ΔK が ΔK_{th} 以下となるため, a_0, b_0 ともに ΔK_{th} 以下となるケースは除外している. a_0 が同じ場合には a_0/b_0 の増加に伴い, 解析値の寿命が長くなる傾向がみられる. 既往研究^{1),3),4)}とは異なるが, 本試験結果では, $a_0=0.2\text{mm}$, $a_0/b_0=0.1$ または 0.25 の場合, 寿命比のばらつきが比較的小さく(寿命比の標準偏差 σ : それぞれ 0.14, 0.16), かつ安全側の評価となることが確認された.

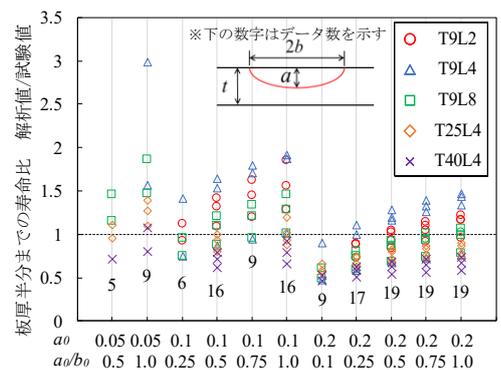


図-7 初期き裂形状と進展寿命比の関係

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)館石和雄, 吉田守孝: 溶接継手を対象とした疲労寿命のばらつき範囲の推定方法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.3, pp.481-490, 2013. 4)山田健太郎, 牧野時則, 馬場千尋, 菊池洋一: 疲労亀裂の進展挙動に注目したガセット継手の疲労強度解析, 土木学会論文集, 第 303 号, pp.31-40, 1980.