

## リブ回し溶接部の曲げ疲労寿命に及ぼすベースプレートサイズの影響

崎野 良比呂\*      中前 公宏\*\*      松田 知貴\*

### Effect of Base-Plate Size on the Bending Fatigue Life in Box-Welded Joints

Yoshihiro SAKINO, Kimihiro NAKAMAE and Tomoki MATSUDA

#### Synopsis

It is well known that the fatigue life of welded joints is affected by the size of the specimen. In this study, box-welded rib-plate specimens were prepared and the effects of base-plate size of the specimen on fatigue life were investigated through fatigue tests. Two sizes of specimens, large (width: 150 mm, thickness: 16 mm) and small (width: 40 mm, thickness: 9 mm), were tested and fatigue lives were compared.

Results indicate that fracture lives of the large specimens were shorter than those of the small specimens. The fracture life was divided into crack initiation life and crack propagation life. The difference in fracture lives was caused by the crack initiation lives. The crack propagation lives were scarcely affected by the size of the base-plate.

Key Words: Bending fatigue test, Size effect, Base-plate size, Box-welded joint,

Fatigue crack initiation life, Fatigue crack propagation life

#### 1. はじめに

建築、橋梁、発電所、プラント、エネルギー貯蔵・輸送等の産業および社会基盤を支えている鋼構造物はわが国の大切な社会資本ストックである。これらの鋼構造物は災害などの異常時に崩壊しないことはもちろんであるが、通常長い供用期間にわたっても安全に使用できることが求められている。そこで注目されるのが疲労現象である。

材料の疲労現象は古くから経験的に知られており、18世紀の産業革命による機械工業の発達以降、疲労による破壊事故が大きく社会問題として認識されるようになった。し

かし、約100年経過した現在でも事故原因の80%程度が疲労により生じているといわれている。疲労が起こる原因は応力振幅、切欠きなどの応力集中、残留応力、平均応力、表面粗さ、寸法効果と呼ばれる部材の物理的大きさ、熱や腐食などの環境と多岐にわたり、この疲労対策のために多くの溶接継手部の疲労強度に関する実験的研究がなされている。しかしながら、小型試験体のみを対象としたものが多く大型試験体を用いた研究は多くない。また、小型試験体と大型試験体の疲労強度の差異を対象とした研究は非常に少ない。しかし、溶接継手寸法の増大に伴い疲労強

---

\* 近畿大学工学部建築学科

Department of Architecture,  
Faculty of Engineering, Kinki University

\*\* 近畿大学工学部建築学科  
(現所属：戸田建設株式会社)

Department of Architecture,  
Faculty of Engineering, Kinki University  
(Current affiliation: Toda Corporation)

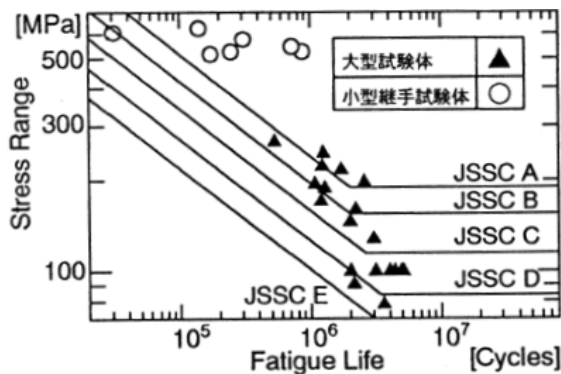


図1 大型試験体と小型試験体による疲労試験結果の比較<sup>1)</sup>

度が低下する現象—疲労強度の寸法効果—により大型試験体のほうが小型試験体よりも疲労強度が著しく低下することがわかっている。図1に大型試験体と小型試験体の疲労試験結果を示す<sup>1)</sup>。小型試験体 (○) よりも大型試験体 (▲) の疲労強度が低いことがわかる。即ち小型試験体の疲労寿命は実構造物の疲労強度を過大評価していることになる。

そこで本研究では、大型試験体でも小さな荷重で試験が可能な曲げ疲労試験に注目した。小型試験体は引張疲労試験で行うことができるが、大型試験体は大きな荷重がかかるので引張で行うのは難しい。しかし、曲げ疲労試験ならばピンの間隔が調節できて大きな応力振幅が出せるため、大型試験体でも小さな荷重で実験が可能になる。そこで、引張疲労試験機により、これまでより大型の試験体を用いて疲労寿命を比較するための曲げジグを作成した。

本研究ではこの曲げジグを用い、リブ回し溶接部を対象として、ベースプレートサイズ (板厚と板幅) が曲げ疲労試験における疲労き裂発生寿命と疲労き裂進展寿命に及ぼす影響について検討した<sup>2)</sup>。

## 2. 疲労強度に影響を及ぼす因子<sup>3), 4)</sup>

疲労強度には様々な因子が影響を及ぼす。ここでは、本研究に関連のある因子について説明する。

### 2.1 応力振幅

応力振幅は最も疲労強度に影響する因子である。応力振幅をしっかりコントロールして低く抑えることができれば疲労破壊を防ぐことができるので如何にして応力振幅を低く抑えるかが設計のノウハウである。これには材料力学のような力学的考え方がベースになり、同じ断面の構造部材を使用したとしても、その使い方で発生する応力振幅をコントロールすることができる。

### 2.2 応力集中

部材表面に形状の変化があると、その部位に過大な応力が集中して疲労強度が大幅に低下することがある。この過大な応力の発生が応力集中であり、応力集中を生じさせる部位を応力集中部と呼ぶ。例えば、溝や切り欠きの存在、あるいは溶接ビードの止端部などが応力集中部の例である。また、応力集中部に関してもその緩和方法には多数のノウハウがある。応力集中の疲労強度への影響度合いは材料の硬さに依存する。同じ応力集中度合いでも、硬い材料ならば大きく疲労強度が低下するが、軟鋼ならばそれほど低下しない。これは切欠き係数と応力集中係数の関係で説明できる。

### 2.3 残留応力

き裂進行のメカニズムは、引張応力によるき裂開口、圧縮応力によるき裂閉口するというサイクルの繰り返しのため、外力以外に引張りの残留応力が存在すると、少ない引張応力でき裂が開口してしまう。したがって、部材表面に引張りの残留応力が存在すると疲労強度は低下してしまう。溶接などによって引張残留応力が溶接部に存在する場合には注意が必要である。溶接止端部は形状急変による応力集中も伴うのでさらに疲労強度は低下する。ただし、残留応力は応力の繰返しにより緩和してしまうことがある。繰返しの応力レベルにもよるが、降伏応力を超える過大な応力による疲労 (低サイクル疲労) では繰返しと共に残留応力が緩和してしまうため、残留応力の影響をあまり受けない。逆に疲労限度付近の高サイクル疲労の場合は、応力緩和の程度も少ないため残留応力の影響を受けやすくなる。

### 2.4 平均応力

平均応力は残留応力と基本的に同じで、引張りの平均応力は疲労強度を低下させ、圧縮の平均応力は疲労強度を向上させる効果がある。平均応力は外力によりコントロールすることができるので、疲労試験により詳細に調べることができる。この平均応力の効果も含めて疲労試験を実施した結果をもとに、疲労強度を評価する方法に疲労限度線図がある。疲労限度線図とは横軸に平均応力、縦軸に応力振幅をとる。評価対象の応力波形から平均応力、応力振幅を計算し、このグラフにプロットすることで平均応力の影響を加味した疲労強度を評価することができる。

### 2.5 寸法効果

曲げやねじり、あるいは切欠きがある場合、つまり応力分布に勾配がある場合は、物理的な部材寸法が大きくなるほど疲労強度が低下する。図2は厚さの異なる板A, Bに曲

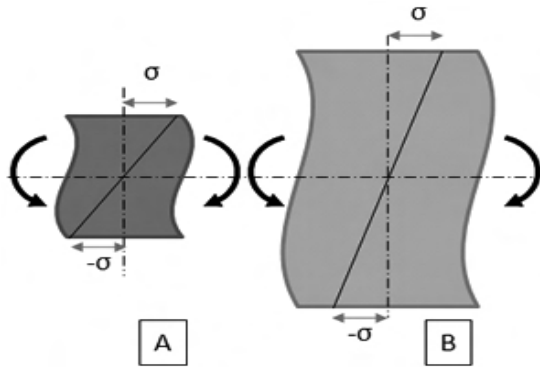


図2 板厚による応力分布の違いの模式図

げモーメントを加えた時の応力分布を模式的に表す。この時、部材表面の応力 $\sigma$ は両者で同じとする。疲労強度が応力の絶対値に支配されるとすると、材質が同じで表面応力が同じなら疲労強度は同じとなる。しかし、AとBでは部材内部の応力勾配が異なる。Bの方が高い応力を受ける面積(体積)が大きいため、金属組織内の欠陥が存在する確率が高くなる。疲労は局所的な強度に影響されやすく最も弱いところにき裂が発生するため、欠陥などにより強度的に弱いところが存在する確率が高くなれば全体の疲労強度が落ちてしまう。直径100mmの試験片の疲労強度は直径10mmの試験片に比べて10~20%低下すると言われている。

### 3. 溶接部の寸法効果<sup>4)~6)</sup>

前章で述べたように、部材の寸法は疲労強度に影響を及ぼす。ここでは、本研究で対象としている板厚と板幅が疲労強度に及ぼす影響についての知見をまとめる。

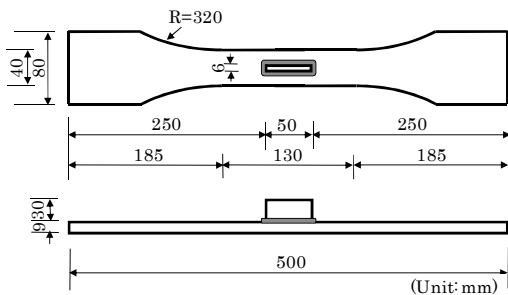


図3 疲労試験用試験体 (Small)

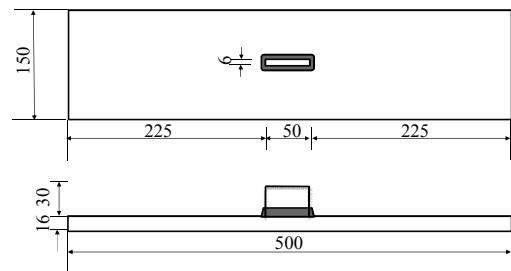


図4 疲労試験用試験体 (Large)

表1 使用鋼材の機械的性質および成分分析結果

	Mechanical property				Chemical composition (%)												
	$\sigma_Y$	$\sigma_U$	$\delta$	YR	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	Ti	Ceq
	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	$\times 10^{-2}$			$\times 10^{-3}$			$\times 10^{-2}$						$\times 10^{-2}$
Rib	768	844	14	91	9	32	160	16	5	11	5	8	2	10	-	14	39
BP(Small)	803	841	21	95	14	25	129	11	4	1	2	25	0	0	0.1	-	42
BP(Large)	741	802	29	92	14	23	130	17	3	2	1	27	0	0	0.1	-	42

$$Ceq=C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$$

### 3.1 板厚効果

溶接継手の疲労強度は板厚が増すにつれて低下する傾向があり、板厚は溶接継手疲労強度の主要な影響因子である。これは板厚効果または寸法効果と呼ばれる。溶接継手で著しい板厚効果が現れる原因は2つある。まず溶接部の応力集中係数は溶接止端半径 $\rho$ と板厚 $t$ の比 $\rho/t$ に大きく依存する。しかし、板厚が大きくなっても溶接止端半径は変わらないので、板厚が大きくなると応力集中係数も大きくなる。次に応力集中係数が同一で、形状が板厚に比例する継手(止端半径 $\rho$ も比例する)においては、板厚が大きくなると止端部の応力勾配は緩やかになる。すなわち、止端部の大きな応力の領域が広くなり、この領域が疲労損傷を受ける。このように板厚効果は止端部の応力集中係数ないしは応力分布によるので、溶接付加物寸法も板厚効果に影響を与える。このため、主板厚と溶接付加物寸法を系統的に変えた実験によらないと、定量的な板厚効果を調べることができない。

### 3.2 板幅効果

板幅が増すと、疲労強度がやや低下する傾向があるが、突合せ溶接の場合には板幅の影響はほとんど見られないとされている。疲労き裂は一般的に溶接止端部に沿って複数箇所から発生し、最終的には、それらが合体するか、あるいは最も支配的なき裂だけが成長し、最終破断に至る。このため、突合せ溶接部のように、溶接止端部に沿って複数箇所からき裂が発生し得る程度以上の板幅であれば、板幅の影響はないと考えられている。

被覆アーク溶接継手の各溶接シリーズを試験片板幅の違いによってさらに細分化し、疲労試験条件が同一の結果ごとにまとめ、 $5 \times 10^6$  疲労寿命の平均値及び平均値の95%信頼区間を求めた結果、板厚が厚い高強度材で板幅が広いほど継手の疲労寿命が幾分低下する傾向が見られるが、試験条件の範囲ではこの低下量は大きくないことがわっている。

しかしながら、本研究で対象としているリブの回し溶接部を有するベースプレートの場合には、板幅によって回し溶接部の応力集中が変化するので、板幅が疲労強度に大きな影響を及ぼすことが考えられる。

#### 4. 実験概要

前章で述べたように、溶接部の寸法が疲労強度の影響を及ぼすことは分かっているものの、溶接部の形状毎に定量的な把握が出来ているとは言い難い。

そこで本研究では、リブを回し溶接したベースプレートを対象とし、板厚と板幅を変えて実験を行った。

##### 4.1 試験体

試験体の形状・寸法を図3, 4に示す。試験体は、小型試験体 (Small) が板厚9mm 板幅40mm ベースプレートに6mmのリブを780キロ鋼ソリッドワイヤで回し溶接したものである。一方の大型試験体 (Large) が、溶接部の詳細は小型試験体と同様でベースプレートのサイズを板厚16mm

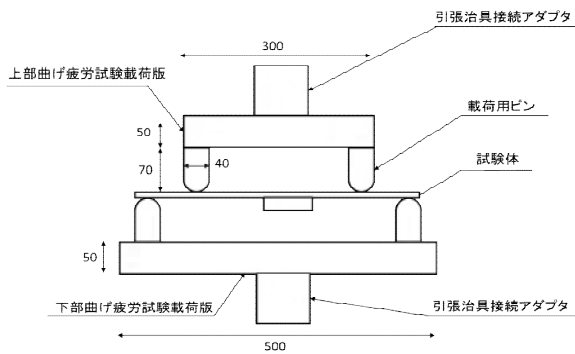


図5 曲げ疲労試験用ジグ

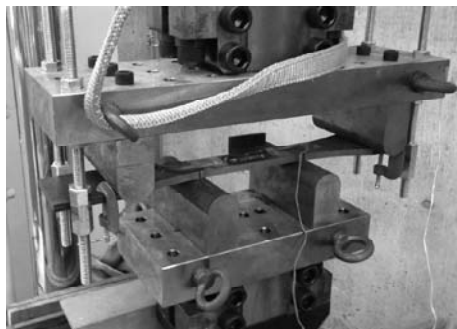


図6 曲げ疲労試験 (Small)

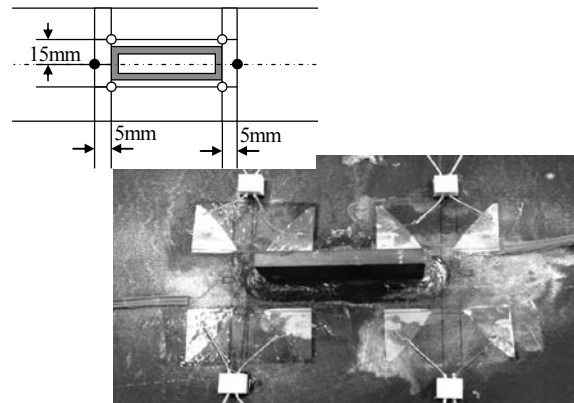


図7 ひずみゲージとクラックゲージの貼付位置

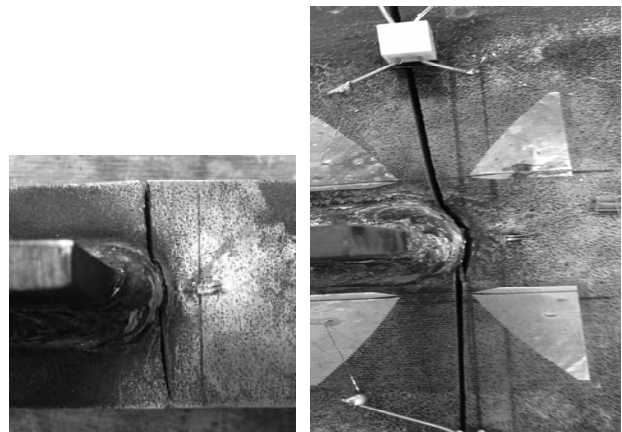
板幅150mmとしたものである。リブは両試験体とも共通の鋼材を用い、脚長6mm(実測8mm)も共通である。鋼材はいずれもHT780である。ミルシートによる使用鋼材の機械的性質と成分分析結果を表1に示す。

##### 4.2 曲げ疲労試験用ジグ

実験は100kN一軸疲労試験機に、新たに設計・製作した曲げ疲労試験ジグを組合せて行った。図5に曲げ疲労試験ジグの組立図を、図6に実際に試験機にセットして実験を行っている模様を示す。このジグを設計するにあたり、1つのジグで3点曲げ、4点曲げを両方できるように載荷ピンを移動可能とした。これにより、ピンの間隔が調節できて様々な寸法の試験体で曲げ疲労試験ができる。また、試験時に試験体が動く事を防止するため、長ネジと長ナット等による回転止めジグやC型クランプ等による移動止めジグを作成し、疲労試験中の応力が変化しないように工夫した。

##### 4.3 疲労試験の概要

図6中に示す様に、試験体をリブのある側が引張となる



(a) 小型試験体

(b) 大型試験体

図8 疲労き裂の発生状況

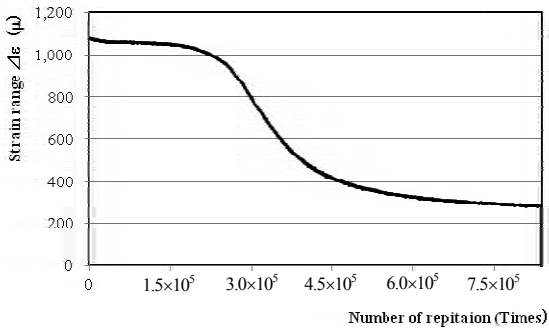


図9 ひずみ振幅—繰返し回数関係

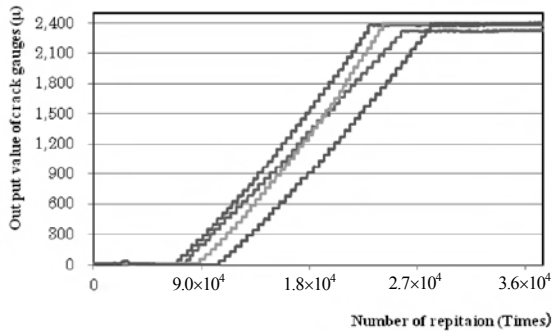


図10 クラックゲージ出力—繰返し回数関係

ように4点曲げ疲労試験に供した。加力ピンの間隔は450mmと250mmである。

小型試験体は応力振幅200~500MPa全てを周波数5Hzで、大型試験体の200~500MPaは周波数5Hz、100MPaと150MPaは周波数7.5Hzで行った。応力比はいずれの試験体でも0.1とした。

試験ではひずみゲージによる疲労き裂発生寿命の計測を行った。ひずみゲージはゲージレングス2mmの弾性ゲージを用い、図7に示す試験体中央の止端部から5mmの位置2ヶ所(図7中●の位置)に貼り付けた。また、大型試験体では、大型試験体の板幅方向の中心から15mmの位置(図7中○の位置)が最初のグリッド線の中央となるように、疲労き裂が進展すると推測される位置4ヶ所に0.5mmピッチのクラックゲージを貼り付け、き裂の進展もモニタリングした。貼り付け位置と大型試験体にひずみゲージとクラックゲージを貼付した様子を図7に示す。

### 5. 実験結果

試験後の試験体の止端部付近の写真を図8に示す。全ての試験体が回し溶接部の止端部からき裂が発生して、進展後破断した。小型試験体は2箇所ある回し溶接部の1箇所のみからき裂が発生して破断に至ったが、大型試験体では先に回し溶接部に入ったき裂が進展している間にもう一方の回し溶接部からもき裂が発生し、進展していった。

ひずみゲージの計測結果による、ひずみ振幅—繰返し回

数関係の一例を図9に、クラックゲージによるクラックゲージ出力—繰返し回数関係の一例を図10に示す。2箇所の回し溶接部から発生し左右に進展した4本のき裂の進展を全てプロットしている。クラックゲージ出力が階段状に急に大きくなっている箇所がグリッド線が切れた事を表しており、これによりき裂がそのグリッド線の位置まで到達した繰返し回数を算出している。

大型試験体と小型試験体の比較をするために破断寿命、き裂発生寿命、き裂進展寿命に分類し比較した。

### 5.1 破断寿命

大型試験体と小型試験体とで破断寿命を比較したものを図11に示す。大型試験体の破断寿命は片側20mmの部分までき裂が達した時点(11本目のグリッドが破断した時

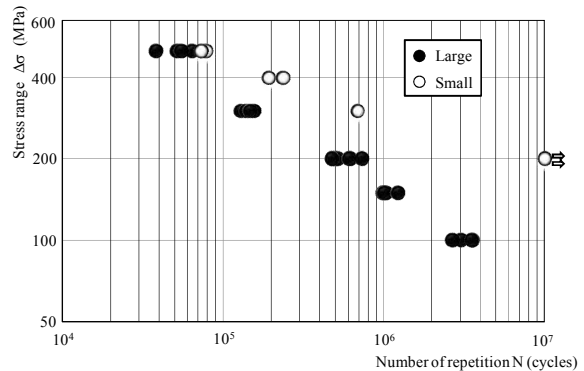


図11 S-N 曲線 (破断寿命)

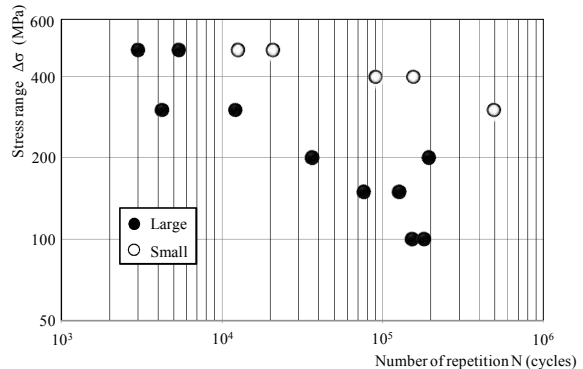


図12 S-N 曲線 (き裂発生寿命)

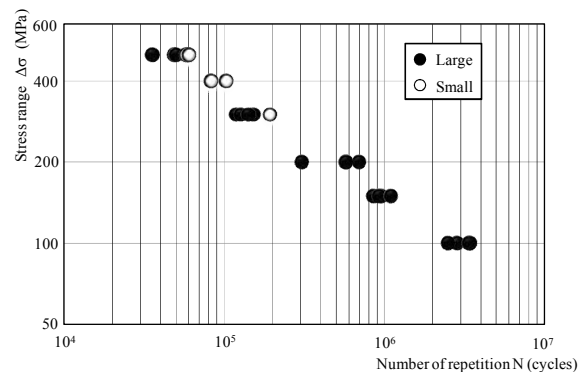


図13 S-N 曲線 (き裂進展寿命)

点)と定義した。これは小型試験体の表面疲労き裂が板幅である 40mm (き裂長さ 20mm) まで進展してから破断しているためである。

破断寿命で比較した場合、全ての応力振幅で小型試験体の破断寿命の方が大型疲労試験体の疲労寿命より長くなっている。300MPa、500MPa で比較すると、それぞれ約 1.5 倍、3.3 倍小型試験体の破断寿命が大型試験体に比べ長い。つまり小型試験体で実験すると同じ溶接ディテールでも大型試験体よりも破断寿命が長く評価してしまうことになる。

### 5.2 き裂発生寿命

大型試験体と小型試験体とで破断寿命を比較したものを図 12 に示す。き裂発生寿命はひずみゲージの値が初期値より 5%低下した時点と定義した。

き裂発生寿命で比較した場合も破断寿命と同様に、全ての応力振幅で小型試験体の破断寿命の方が大型疲労試験体の疲労寿命より長くなっている。300MPa、500MPa で比較すると、それぞれ約 78.6 倍、約 2.4 倍小型試験体のき裂発生寿命が大型試験体に比べ長い。き裂発生寿命は大型試験体に比べ小型試験体の方が格段に長いことがわかる。

### 5.3 き裂進展寿命

大型試験体と小型試験体とで破断寿命を比較したものを図 13 に示す。き裂進展寿命は破断寿命をき裂発生寿命で引いた値である。

き裂進展寿命を比較した場合、破断寿命やき裂発生寿命に比べその差は小さく、両者のプロットがほぼ同じラインに乗っていることがわかる。よって、ベースプレートサイズはき裂進展寿命にほとんど影響を及ぼしていないと考えられる。

これにより、小型試験体と大型試験体の破断寿命の違いは、主にき裂発生寿命の違いによるものであり、き裂進展寿命の影響は非常に小さいといえる。

## 6. まとめ

リブの回し溶接部の疲労寿命に及ぼすベースプレートサイズの影響について、以下のことが明らかになった。

- (1) 回し溶接部の詳細が同じでベースプレートのサイズのみを変えた場合、破断寿命はベースプレート寸法を大きくした方が短くなる。つまり、ベースプレートサイズを小さくモデル化した試験体では、実大構造物の疲労寿命を過大評価してしまう恐れがある。
- (2) ベースプレートサイズによる破断寿命の違いは、ベースプレートサイズが小さくなった事により、疲労き裂発生寿命が短くなる事が主な要因である。
- (3) き裂進展寿命に及ぼすベースプレートサイズの影響は非常に小さい。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 基盤研究 (C) (課題番号: 29420468) の助成を受けました。

ここに記して感謝致します。

## 参考文献

- 1) 穴見健吾, 三木千寿: 溶接継手部の疲労強度の寸法効果に関する研究, 鋼構造論文集, Vol. 4, No. 14, pp. 9-17, 1997.
- 2) 崎野良比呂, 中前公宏: リブ回し溶接部の曲げ疲労寿命に及ぼすベースプレートサイズの影響, 溶接学会全国大会講演概要, 第 97 集, pp. 186-188, 2015.
- 3) 日本材料学会: 改訂材料強度学, 2005.
- 4) 日本溶接学会: 溶接・接合便覧, pp. 90-110, 2003.
- 5) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説 2012 改訂版.
- 6) 瀬戸厚司, 征矢勇矢, 田中洋一: 各種溶接部改善処理継手の疲労強度向上と板厚効果の検討, 日本造船学会論文集, 第 172 号, pp. 617-626, 1992.