板曲げを受けるすみ肉溶接継手の疲労挙動

Fatigue behavior of fillet welded joints under plate bending

白　彬*，山田健太郎**
Biehn Baik, Kentaro Yamada

*工修　名古屋大学　大学院工学研究科社会基盤工学専攻博士課程　(〒464－8603　名古屋市千種区不老町)
**Ph.D. 名古屋大学教授　大学院環境学研究科都市環境学専攻　(〒464－8603　名古屋市千種区不老町)

Fatigue test was carried out to investigate the fatigue behavior of fillet welded joints, such as single-sided, double-sided and cruciform joint, under plate bending. It is found that all fatigue cracks are initiated at the weld toe of each fillet welded joint and propagated in plate thickness and width direction. Fatigue crack propagation behavior under plate bending was explored, comparing the past results from fatigue test performed under tensile loading. As a result, it is figured out that the fatigue crack growth rate was decreasing considerably under bending for tensile loading from the relationship between crack depth and fatigue life. Therefore, the fillet welded joints under bending had long fatigue life for under tension. Additionally, 1mm method was used to predict the fatigue life of each fillet welded joint under bending.

Key Words: Fatigue test, fatigue crack, plate bending, fillet welded joint
キーワード：疲労試験，疲労き裂，板曲げ，すみ肉溶接継手

1. まえがき

現在，鋼床版のデッキプレートの垂直補鋼材や U リブを溶接した部位のように，デッキプレートの板曲げ変形により疲労き裂が発生した例が数多く報告されている．一般に，引張応力あるいはせん断応力が作用する鋼構造物の溶接継手の疲労強度の評価は，鋼構造物の疲労設計指針[1)]に示される疲労強度等級を用いて行なわれる．複雑な溶接継手部に対しても，HSS 法[2)]や 1mm 法[3)]を用いて，溶接継手の疲労強度が解析的に評価されている．

鋼構造物の疲労設計指針では，さらに，膜応力と板曲げ応力を受ける場合に対して，疲労試験結果に基づいて，次式が提案されおり板曲げ応力 $\Delta\sigma_b$ が 4/5 に低減され膜応力における疲労強度に換算して適用される．

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_m + (4/5)\Delta\sigma_b \quad (1)$$

ここに，$\Delta\sigma_m$：膜応力範囲

ただし，式(1)では，板厚が 25mm 以上の場合，$\Delta\sigma_b$ の値は低減されない．

しかし，板曲げを受ける多様な溶接継手の形状に対して，式(1)を用いて板曲げ応力による溶接継手の疲労強度が評価できるかは不明である．したがって，鋼床版などの板曲げを受ける溶接継手の疲労寿命および疲労き裂の発生・進展挙動を明らかにすることが求められている．

本研究では，板曲げを受けるすみ肉溶接継手の止端破壊に着目し，その疲労挙動を把握するための基礎的な研究として，片面すみ肉溶接継手，両面すみ肉溶接継手およびリブ十字すみ肉溶接継手の板曲げ疲労試験を行い，それらのき裂発生・進展挙動および疲労強度を示す．また，過去に行われた引張疲労試験結果との比較により，疲労き裂発生・進展挙動を検討する．さらに FEM 解析を行って溶接継手の止端近傍の応力分布を求め，1mm 法を適用して疲労寿命の評価を行う．

2. 板曲げ疲労試験

2.1 疲労試験体

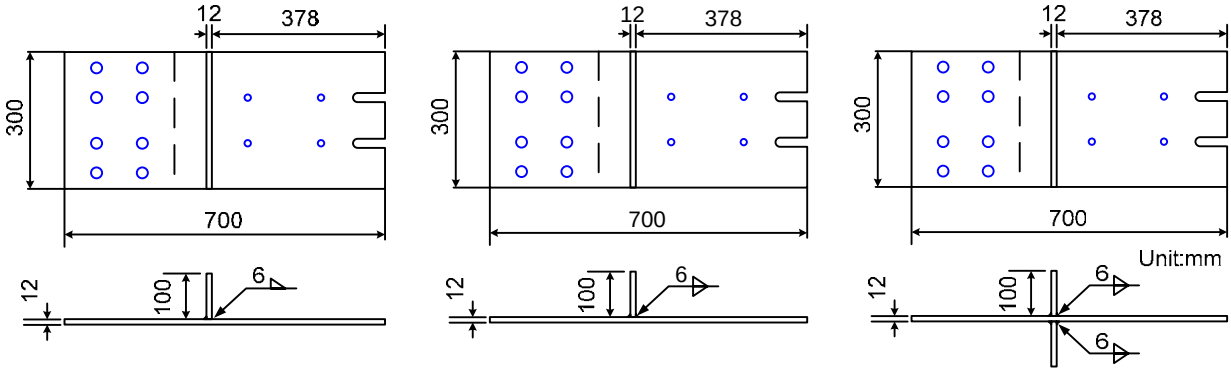
試験体には，溶接構造用鋼材 JIS-SM400A を用いた．その機械的性質および化学的性質を**表－1** に示す．疲労試験体は，700×300×12mm の鋼板にリブタイプの付加板がすみ肉溶接された継手である．試験体を**図－1** に示す．試験体 SS は片面すみ肉溶接継手，試験体 SD は両面すみ肉溶接継手，試験体 CR はリブ十字形すみ肉溶接継手である．リブサイズ，溶接サイズなどの条件は同じである．リブは，炭酸ガスアーク溶接で溶接されている．

2.2 疲労試験方法

疲労試験は，**図－2** に示す名古屋大学で開発された板曲げ疲労試験機[4)]を用いた．試験体の片側がフレームに固定された片持ち状態の試験体に加振機がセットされている．

表－1　鋼材の化学成分(%)と機械的性質(ミルシート値)

Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Chemical compositions (%)				
			C	Si	Mn	P	S
281	424	31	0.16	0.14	0.5	0.011	0.004

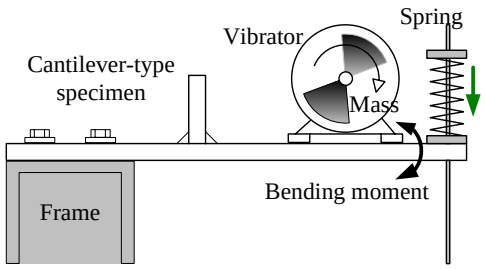


(a) SS　(b) SD　(c) CR

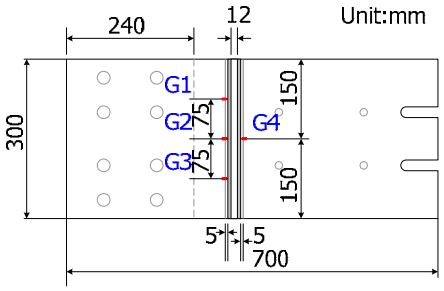
図－1　すみ肉溶接継手の疲労試験体

全ての試験体に対して，まずコイルバネを下方向に押すことで試験体の上面に引張応力を与える．その状態のまま，加振機を振動させることによって試験体に繰り返し板曲げ応力を与えている．ひずみゲージの貼付位置を**図－3(a)**に示す．**図－3(b)**には疲労試験中に計測した G2 の位置のひずみ波形の例を示す．この図のように，本研究では，ひずみの範囲を制御して，応力比 R=0 の片振りの疲労試験を行った．この試験機は荷重制御ではないため，疲労試験の間，試験体に発生する応力範囲を 15 分間隔で計測した．

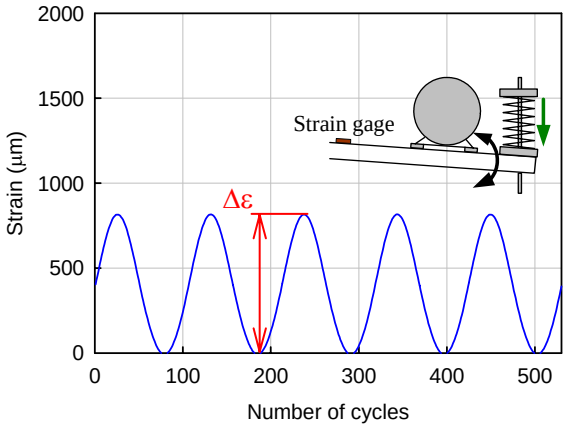
試験体の溶接止端には，φ0.04 ㎜の被覆銅線が貼付されており，疲労き裂が発生あるいは進展することによって銅線が切断されると，疲労試験機が停止するようにした．銅線が最初に切れたときに，ダイマーキングを実施した．さらに，試験終了後に試験体の破面から疲労き裂の進展状況を確認するためにビーチマーク試験を数回行った．



図－2　曲げ疲労試験機の概要



(a)　ひずみゲージの貼付位置



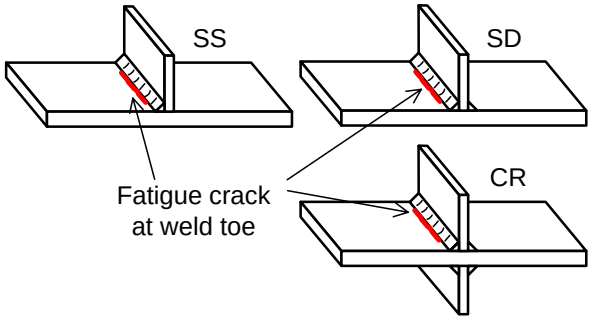
(b)　片振り振動のひずみ波形の例

図－3　ひずみゲージの位置とひずみ波形

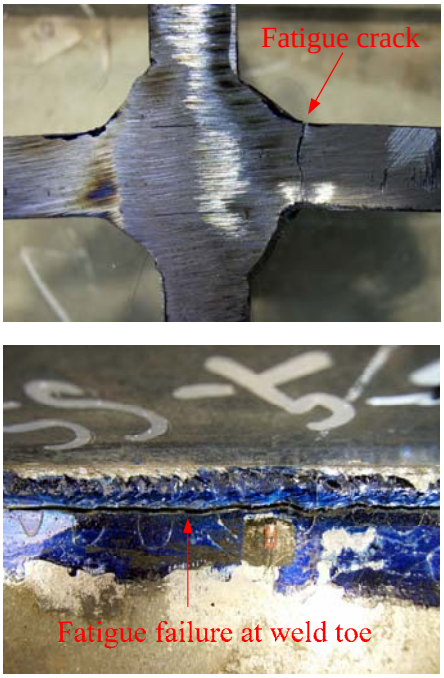
3.　疲労き裂の発生･進展挙動

3. 1　疲労き裂の発生･進展

すべての試験体について，ダイマークとビーチマークをスケッチして疲労き裂の発生・進展挙動を観察した．**図－4** に疲労き裂発生位置と疲労試験後の破断状況を示す．疲労き裂は**図－3** の G2 側および G4 側の溶接止端部から発生し，どちらかの溶接止端部の疲労き裂の進展により試験を終了した．代表的な試験体の疲労破面と破面のスケッチを**図－5** に示す．図中の，N_{dye} はダイマークしたときの繰り返し回数であり，N はビーチマークしたときの繰り返し回数である．N_f は，G2 側あるいは G4 側の溶接止端部の疲労き裂が進展し，き裂が開いたため，荷重を載荷できなくなったときの繰り返し回数である．**図－5** から，N_f に達したとき，き裂の進展により断面がほぼ破断していることが分かる．**図－5** から分かるように，複数個発生した疲労き裂は合体して，細長い半楕円形状のき裂となって進展した．



(a) 疲労き裂発生位置



(b) 破断状況

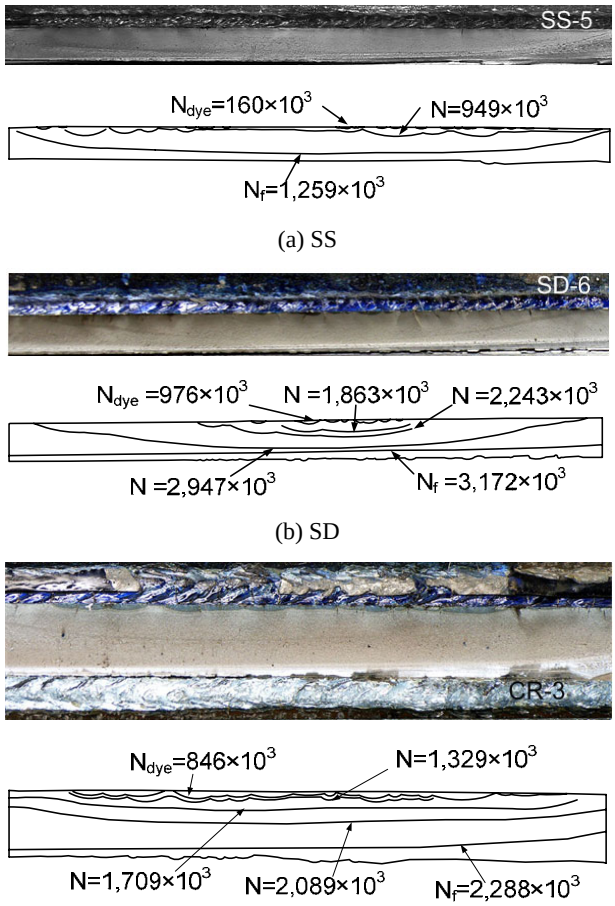
図－4　疲労き裂発生位置と破断状況

き裂が板厚方向に進展し板厚貫通まで 1～2mm を残して，鋼板の裏面からき裂が発生して，それがリブからのき裂と合体して破断した．

3.2　疲労き裂の深さと幅の関係

破面に残ったダイマークおよびビーチマークの寸法を計測して，疲労き裂が進展する過程で示すき裂形状の変化を追跡した．ここで，楕円形のき裂深さを a，板の表面のき裂の幅を $2b$ として示した a と b の関係を**図－6** に示す．図には，過去に行われた板厚 9mm，板幅 200mm のリブ十字形すみ肉溶接継手の引張試験の結果[5]も示されている．

図－6 に示すように，引張を受ける場合，a の値に関わらず，き裂形状比 a/b はおよそ 1/20~1/3 に分布しているが，板曲げを受ける場合，き裂形状比 a/b は，a が小さい範囲では a/b=1/5~1/2 に分布し，き裂深さ a が大きくなると a/b=1/20~1/10 の範囲に変化する傾向が見られる．これは，引張の場合，き裂が発生すると，き裂を有する断面に生じる応力が増加する．しかし，板曲げを受ける場合，き裂長さが板幅に対して十分小さく，き裂が曲げ剛性に影響を与えない範囲では，板厚方向にき裂が進展すると，き裂先端

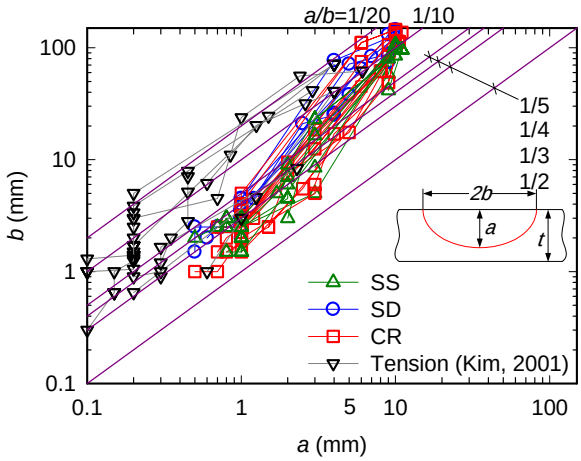


(a) SS

(b) SD

(c) CR

図－5　疲労破面とスケッチ

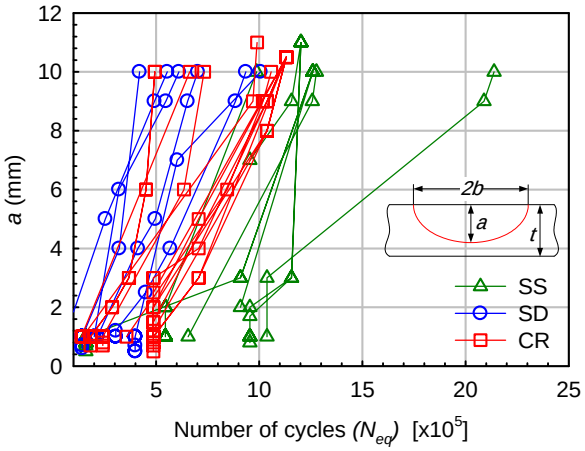


図－6　き裂形状の変化

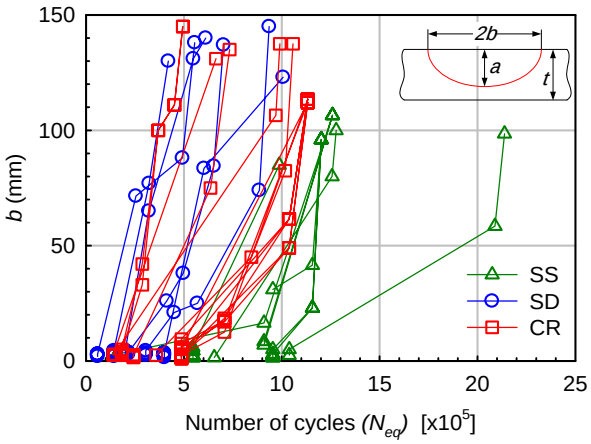
の応力が低下するため，板厚方向のき裂の進展が遅くなる．一方，板幅方向のき裂は常に進展するため，板曲げを受ける場合のき裂形状比 a/b は，き裂深さ a に対して変化したと考える．

3.3　疲労き裂の深さと荷重の繰り返し回数の関係

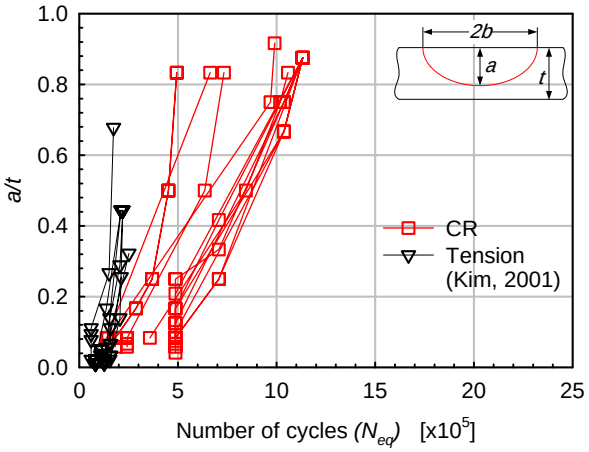
図－7 にき裂深さ a と荷重の繰り返し回数 N の関係を示す．試験体や溶接タイプによって応力範囲が異なるため，**図－7** の横軸には，次式から計算される応力範囲



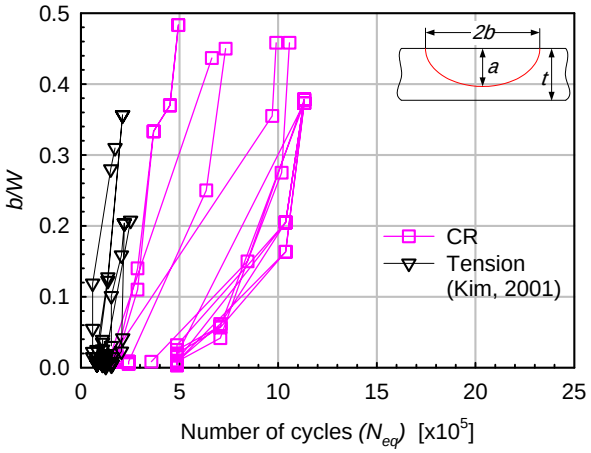
図－7　疲労き裂深さ a と繰り返し回数 N_{eq} の関係



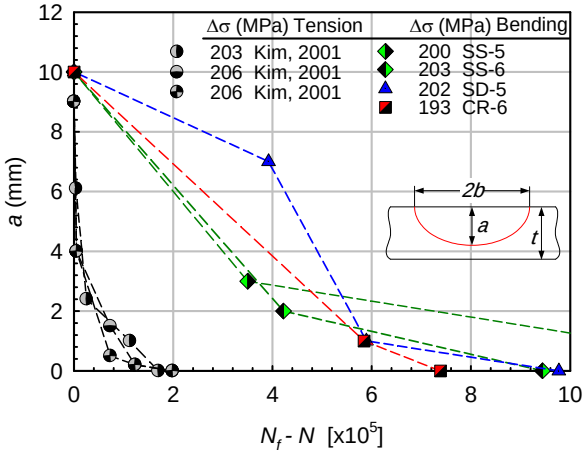
図－10　き裂幅 b と繰り返し回数 N_{eq} の関係



図－8　引張と板曲げの a/t－N_{eq} 関係の比較



図－11　引張と板曲げの b/W－N_{eq} 関係の比較



図－9　疲労き裂の深さと残存寿命の関係

$\Delta\sigma_e$=200MPa に換算された等価繰り返し回数 N_{eq} が示されている．ここでは，m=3 を仮定している．

$$N_{eq} = \left(\Delta\sigma/\Delta\sigma_e\right)^m \cdot n \qquad (2)$$

ここに，

N_{eq}：応力範囲 $\Delta\sigma_e$ に対する等価繰り返し回数

$\Delta\sigma$：試験体の応力範囲

n：$\Delta\sigma$ に対する繰り返し回数

図－7 に示されるように，両面すみ肉溶接継手 SD とリブ十字形すみ肉溶接継手 CR の a と N_{eq} の関係は，ほぼ同じである．同じき裂深さに達する繰り返し回数は，試験体 SD および CR と比べて片面すみ肉溶接継手 SS では増加している．

リブ十字形すみ肉溶接継手に対して，引張を受ける場合の a と N_{eq} の関係と板曲げを受ける場合の a と N_{eq} の関係を**図－8** に示す．引張疲労試験と板曲げ疲労試験の試験体の寸法が異なるため，縦軸はき裂深さを板厚 t で除した値を示している．この図から分かるように，a/t の値が大きくなるに従って，同じき裂深さに達する繰り返し回数は，引張を受ける場合と比べて板曲げを受ける場合の方が増加している．

3.4 疲労き裂の深さと残存寿命の関係

基準応力範囲が 200MPa に対して，疲労き裂の深さ a と残存寿命 N_f－N の関係を**図－9** に示す．この図には，過去に行われた引張疲労試験[5]の結果も示されている．この図から，引張を受ける場合，き裂の深さが大きくなると，急激に残存寿命が短くなるが，板曲げを受ける場合，き裂の深さが大きくなっても，残存寿命は引張を受ける場合より

表－2　疲労試験結果

Type	Specimen	$\Delta\sigma$ (MPa)	N_f ×10^3
片面すみ肉溶接継手 SS	SS-1	144 179	>10,000 6,473*
	SS-2	157	4,343
	SS-3	173	1,943
	SS-4	157	2,405
	SS-5	200	1,180
	SS-6	203	944
両面すみ肉溶接継手 SD	SD-1	151	1,261
	SD-2	151	1,129
	SD-3	142	2,374
	SD-4	102 150	>10,000 916*
	SD-5	202	839
	SD-6	121	2,936
リブ十字形すみ肉溶接継手 CR	CR-1	142	3,002
	CR-2	145	1,846
	CR-3	120	2,048
	CR-4	120	4,583
	CR-5	105 147	>10,000 2,518*
	CR-6	193	738

Note : * specimen retested after 10,000×10^3 cycles without any crack being found.

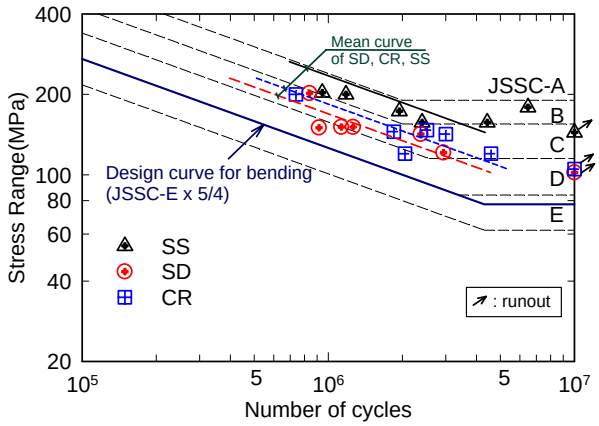
表－3　200 万回疲労強度

Specimen type	c	s	$\Delta\sigma$ (MPa) at 2×10^6
SS	13.112	0.281	186
SD	12.684	0.155	134
CR	12.793	0.165	146

も長いことが分かる．したがって，同じ応力範囲の繰り返しに対して，板曲げを受ける場合，引張を受ける場合と比べて，き裂発生およびき裂進展が遅い．これは 3.2 節で述べた疲労き裂の発生・進展の状況からも分かる．

3.5　疲労き裂の幅と繰り返し回数の関係

図－10 にき裂幅 b と繰り返し回数 N_{eq} の関係を示す．この図から分かるように，b と N_{eq} の関係は，**図－7** の a と N_{eq} の関係と同様に，同じき裂幅に達する繰り返し回数は，両面すみ肉溶接継手 SD とリブ十字形すみ肉溶接継手 CR はほぼ同じであるが，片面すみ肉溶接継手 SS では増加している．リブ十字形すみ肉溶接継手に対して，引張を受ける場合の a と N_{eq} の関係と板曲げを受ける場合の b と N_{eq} の関係を**図－11** に示す．縦軸はき裂幅を板幅 W で除した値を示している．同じき裂幅に達する繰り返し回数は，板曲げを受ける場合，引張を受ける場合よりも増加していることが分かる．この傾向は，b/W の値が小さい範囲から見られる．



図－13　各試験体の疲労強度の比較

4.　板曲げを受けるすみ肉溶接継手の疲労強度

4.1　疲労試験結果

本研究で行った 3 種類の試験体の疲労試験の結果を**表－2** に示す．繰り返し載荷の開始時に計測した，**図－3(a)** の G2 と G4 のひずみの値から計算される G2 側あるいは G4 側の溶接止端のひずみ範囲に鋼のヤング率 2.05×10^{5}MPa を乗じて算出した応力範囲 $\Delta\sigma$ が**表－2** に示されている．本試験では，き裂が進展し破断に近づくと，応力範囲が若干増加する．しかし，試験体 SS の G4 の位置の応力範囲に対して，次式から計算される等価応力範囲 $\Delta\sigma_{eq}$ を繰り返し載荷の開始時に計測した応力範囲で除した値が約 1.03 であったので，全ての試験体に対して，先に述べた $\Delta\sigma$ を応力範囲に用いている．

$$\Delta\sigma_{eq}=\left[\left\{\sum\left(n_i\cdot\Delta\sigma_i^3\right)/\sum n_i\right\}\right]^{1/3} \tag{3}$$

ここに，

$\Delta\sigma_{eq}$：等価応力範囲

$\Delta\sigma_i$：応力範囲

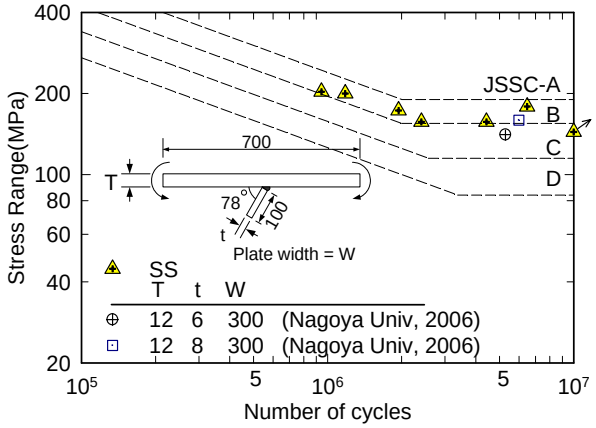
n_i：$\Delta\sigma_i$ に対する繰り返し回数

N_f には，ビーチマークを導入した際の繰り返し回数は含まれていない．**表－2** において，”>”は，その繰り返し回数で破断しなかったことを示す．”*”は破断しなかった試験体を用いて応力範囲を上げて疲労試験を行った結果を示す．

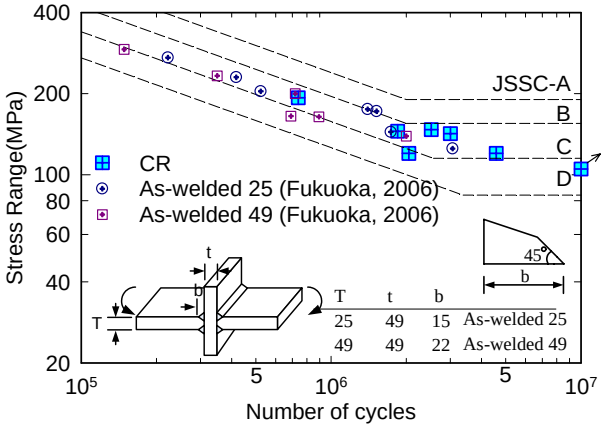
試験体 SS では $\Delta\sigma$=144MPa に対して未破断であった．しかし，試験体 SD と CR ではほぼ同じ程度の応力範囲でき裂が発生し，破断している．試験体 SD と CR では，$\Delta\sigma$=100 MPa 程度に対して未破断となった．したがって，試験体 SD と CR の疲労限は試験体 SS の疲労限より低いと思われる．試験体の種類毎に，破断した試験体の繰り返し回数と作用応力範囲を用いて最小 2 乗法により，次式に示す S-N 線図の係数 m を 3 と仮定し，c を計算し，標準偏差 s と 200 万回疲労強度を求め，その結果が**表－3** に示されている．

$$\log N = c - m\times\log\Delta\sigma \tag{4}$$

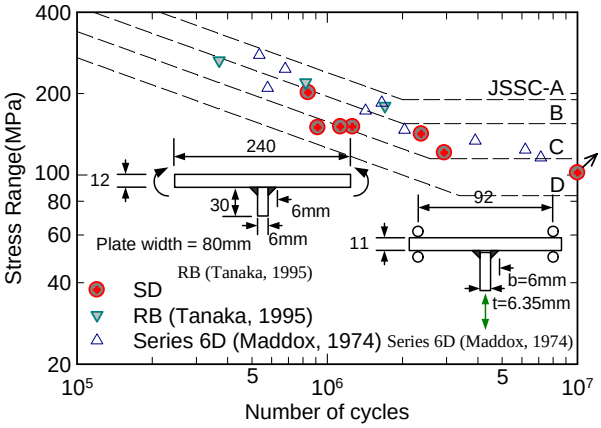
試験体 SD の 200 万回疲労強度は，試験体 SS より約 28%低く，試験体 CR は試験体 SS より約 22%低いことが**表－3**



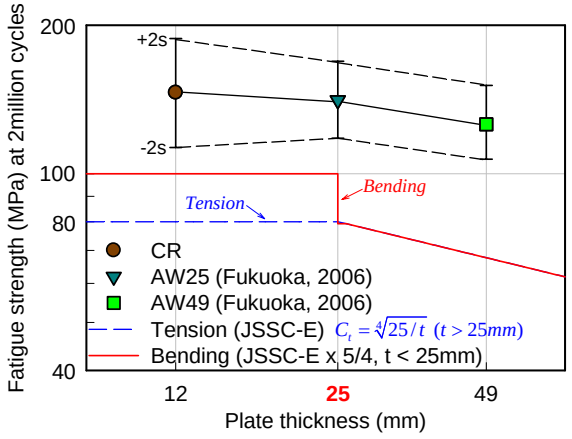
図－14　試験体 SS と過去の疲労試験結果との比較



図－16　試験体 CR と過去の疲労試験結果との比較



図－15　試験体 SD と過去の疲労試験結果との比較



図－17　板厚の違いによる 200 万回疲労強度

から分かる．

疲労試験の結果の $\Delta\sigma$ と N_f の関係および JSSC 疲労設計指針で規定される各疲労強度等級に対する S-N 線図を**図－13** に示す．一般に，引張を受ける荷重非伝達のすみ肉溶接継手は JSSC 疲労設計指針では疲労強度等級 E にランクされる．したがって，**図－13** には，さらに式(1)を用いて計算される板曲げに対する E 等級の設計線図も示されている．この図から板曲げ疲労試験が行われた試験体はすべて，板曲げに対する E 等級の設計線図よりも上回ることがわかる．

それぞれの試験体の結果データの平均線の比較から，試験体 SS の疲労強度は SD と CR よりも 1 等級程度上回ることが分かる．試験体 SD の疲労強度は CR の疲労強度とほぼ同じであることが分かる．試験体 SD と CR では，疲労強度に大きな差がなかったので，片振り荷重下において CR の下面のリブの溶接部が上面のリブの溶接止端の疲労き裂発生に影響しないと思われる．

4.2　過去の疲労試験結果との比較

(1)　片面すみ肉溶接継手 SS

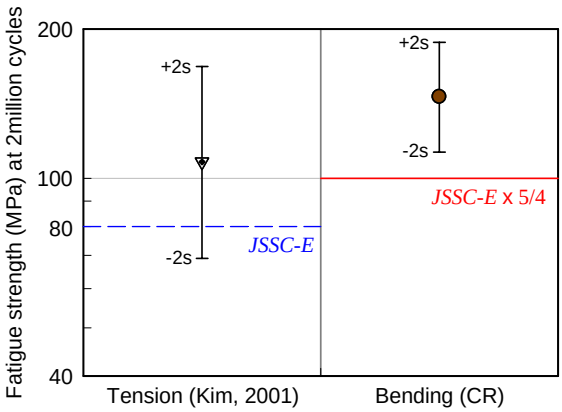
試験体 SS の試験結果と鋼床版の U リブをモデル化した片面溶接継手の試験体の板曲げ疲労試験結果 [6]を**図－14** に示す．U リブ試験体は板 12mm，幅 300mm の主板に 6mm および 8mm の U リブに相当するリブを角度 78° ですみ肉溶接したものであり，溶接脚長は 6mm，溶け込み量は板厚の 75%である．試験結果の大部分は溶接ルート部にき裂が発生したが，その中で，溶接止端からき裂が発生した試験結果がある．**図－14** から，試験体のリブが 78° 傾けて接合されていたが，同じ板厚や片面すみ肉溶接継手であるので，疲労強度はほぼ同じ範囲にばらついていると考える．

(2)　両面すみ肉溶接継手 SD

図－15 に試験体 SD の試験結果と過去に行われた T 形すみ肉溶接継手の試験結果を示す．Maddox[7] や田中ら [8]のデータは，等曲げを受ける T 形すみ肉溶接継手の結果であり，溶接止端から疲労き裂が発生し，進展して破断に至っている．**図－15** から分かるように，試験体の板厚および溶接脚長がほとんど同じなので，試験体 SD のデータと過去のデータがほぼ同一の S-N 線図上でばらついている．したがって，試験体 SD の試験結果は，等曲げを受ける過去の T 形すみ肉溶接継手の試験結果とほぼ同じであることが分かる．

(3)　リブ十字形すみ肉溶接継手 CR

図－16 に試験体 CR の試験結果と過去に行われた十字横方向突合せ継手の試験結果 [9]を示す．等曲げを受ける十字横方向突合せ継手の疲労試験では，試験体 CR の試験結果と同様に，疲労き裂が溶接止端から発生し，進展して破断に至った．**図－16** から，等曲げを受ける十字横方向突



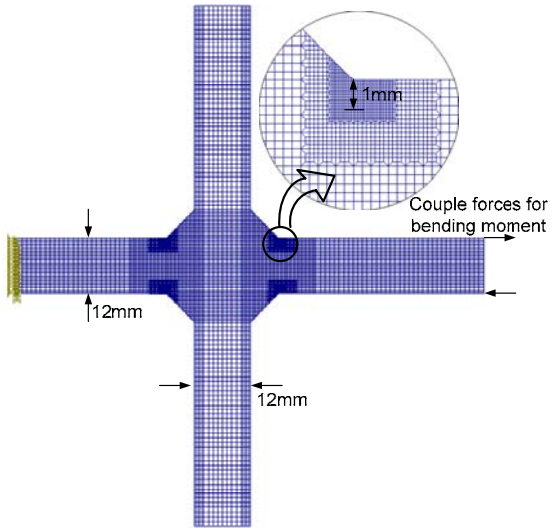
図－18　CR と引張の疲労試験結果との比較

合せ継手の疲労試験の結果は，継手形式および試験体の寸法の違いはあるが，試験体 CR の疲労強度と大きな差は見られなかった．

リブ十字形すみ肉溶接継手に対して，本試験体の板厚と文献 9)の板厚が大きく異なる．そこで，各板厚に対して，式(4)から計算される 200 万回疲労強度と板厚の関係を**図－17** に示す．図には，引張を受ける場合の疲労設計強度である E 等級(80MPa)を基準として，疲労設計指針で規定される板厚の影響を考慮する補正式 [1] の計算値および，板曲げに対する E 等級に板厚の影響を考慮した値も示されている．この図から，板曲げを受ける場合，疲労試験結果から得た疲労強度の下限値(-2*s*)が，疲労設計指針で規定される値よりも上回っていることが分かる．板厚が増加すると，試験結果と疲労設計指針で規定される値の差は大きくなる．今後，さらに疲労試験結果を増やして，板厚と板曲げを受ける場合の疲労強度との関係に対する検討を行う予定である．

(4)　板曲げを受ける場合と引張を受ける場合の比較

図－18 に板曲げを受ける場合と引張を受ける場合に対するリブ十字形すみ肉溶接継手の 200 万回疲労強度を示す．さらに引張に対する疲労設計強度である E 等級の値と板曲げに対する E 等級の値も示されている．引張を受ける場合のリブ十字形すみ肉溶接継手の疲労強度は E 等級程度にばらついているが，板曲げを受ける場合のリブ十字形すみ肉溶接継手 CR の疲労強度の下限値(-2s)が板曲げに対する E 等級の値よりも上回っていることが分かる．



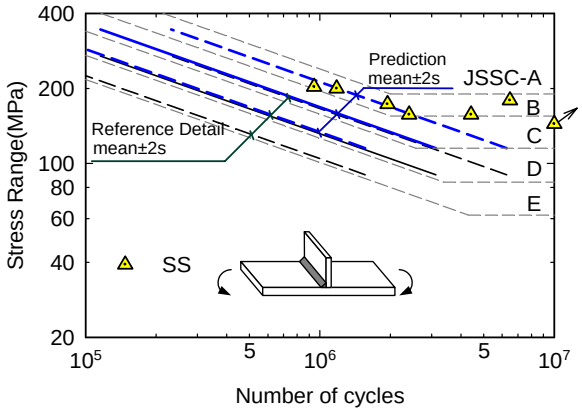
図－19　解析モデルの例(全体図)

5.　板曲げを受けるすみ肉溶接継手の疲労寿命の予測

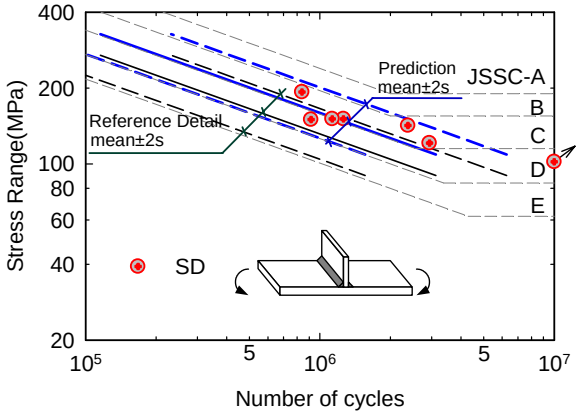
5.1　解析モデル

板曲げを受けるすみ肉溶接継手の FEM 解析を行い，1mm 法を板曲げへ適用して疲労寿命を予測する [3,10]．

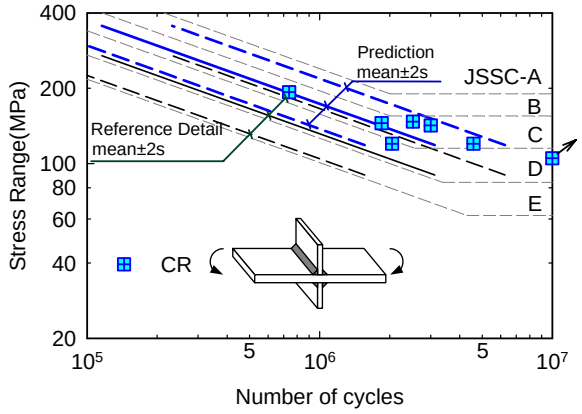
汎用の有限要素解析プログラム COSMOS/M ver.2.9[11]を用いて，線形の 2 次元平面解析を行なう．解析モデルの一



(a) SS



(b) SD



(c) CR

図－20　1mm 法による疲労寿命予測

例を**図－19** に示す．4 節点の平面ひずみ要素を用い，溶接止端の最小メッシュサイズを 0.05×0.05mm とした．参考文献 10)を参考として，溶接部は止端角 45°とし，止端半径 ρ は考慮していない．試験体の，ヤング率を 2.05×10^5MPa, せん断弾性係数を 7.9×10^4MPa およびポアソン比を 0.3 としている．

5.2 1mm 法による疲労寿命予測

1mm 法では，評価対象とする継手において疲労き裂が溶接止端部から発生する場合，き裂発生点から深さ 1mm での応力集中係数 K_t を用いて疲労寿命が評価される．引張を受ける板厚 10mm，脚長 6mm の荷重非伝達型リブ十字すみ肉溶接継手では，疲労き裂の進展方向へ深さ 1mm の位置での応力集中係数が K_t=1 となる．この継手を基準継手形状(Reference detail)とし, 対象とする継手の同じ位置での K_t を求め，基本継手形状の S-N 線図を上下させることにより, 対象とする継手の S-N 線図を求めることができる [3)].

板曲げの場合も同様にして，溶接止端のき裂に対して 1mm 法の Reference detail を基準 S-N 線図に用いる．板曲げを受ける場合，1mm 法によって算出される応力集中係数 K_t は, 試験体 SS, SD および CR に対してそれぞれ, 0.782, 0.828 および 0.763 であった．各継手において，1mm 法による疲労寿命予測の結果が**図－20** に示されている．この図から分かるように，試験体 SD と CR に対して，1mm 法によってそれらの疲労寿命が精度良く予測できているが，試験体 SS に対して，1mm 法による疲労寿命の予測は，試験結果よりも低く多少安全側となっている．

6. まとめ

本研究では, 板曲げを受けるすみ肉溶接継手の疲労き裂の発生・進展挙動および疲労寿命を明らかにするために, 板曲げ疲労試験を行った. 疲労試験から得られた結果をまとめると以下のようになる．

(1) 板曲げを受けるすみ肉溶接継手に対して，疲労き裂は，溶接止端の複数個所より発生し，複数のき裂が結合を繰り返しながら板厚方向へ進展する．

(2) 板曲げを受けるすみ肉溶接継手のき裂の深さ a とき裂幅 b の関係では，き裂深さの小さい範囲では a/b=1/5~1/2 に分布しているが，き裂深さが大きくなると a/b=1/20~1/5 の範囲に変化する傾向が見られた．

(3) 同じき裂深さおよび同じき裂幅に達する荷重の繰り返し回数は，両面すみ肉溶接継手およびリブ十字形すみ肉溶接継手と比べて片面すみ肉溶接継手は増加した．

(4) 同じき裂深さおよびき裂幅に達する繰り返し回数は, 引張を受ける場合よりも板曲げを受ける場合の方が増加した．

(5) 両面すみ肉溶接継手およびリブ十字形すみ肉溶接継手の疲労強度はほぼ等しいが，片面すみ肉溶接継手の疲労強度はそれらと比べて高かった．

(6) 1mm 法によって，両面すみ肉溶接継手およびリブ十字形すみ肉溶接継手の疲労寿命は予測できたが，片面すみ肉溶接継手の疲労寿命は安全側に予測される．今後，板曲げを受ける場合に対して，1mm 法による疲労寿命の予測の適用範囲を明らかにする必要がある．

謝辞 : 本研究を遂行するにあたって，試験体の製作に際してはトピー工業(株)豊橋製造所の山田聡氏に，疲労試験や破面観察では，名古屋大学の小塩達也氏（現名城大学），佐々木裕氏，小薗江朋尭氏，柿市拓巳氏らにお世話になりました．また，論文の作成では名古屋大学の石川敏之氏から多くの助言を頂きました．ここに記して感謝の意を表します．

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，1993.
2) Hobbacher, A.: Fatigue design of welded joints and components, IIW Document XIII-1539-96/XV-845-96, 1996.
3) 山田健太郎，肖志剛，金仁泰，舘石和雄：すみ肉溶接止端近傍の応力に着目した付加物溶接継手の疲労強度解析，構造工学論文集，Vol.48A, pp.1047-1054, 2002.
4) Yamada, K., Ya, S., Baik, B., Torii, A., Ojio, T., and Yamada, S.: Development of a new fatigue testing machine and some fatigue tests for plate bending, IIW Document XIII-2161-07, International Institute of Welding, 2007.
5) 金仁泰：斜めに繰り返し応力が作用する場合の溶接継手の疲労挙動に関する研究，博士学位論文，名古屋大学，2001.
6) Ya, S., and Yamada, K.: Fatigue tests of welded joints of trough to orthotropic steel deck plate in bending, *Proc. of 62nd Annual meeting of JSCE*, pp.23-24, CD-ROM, 2007
7) Maddox, S.J.: Fatigue of welded joints loaded in bending, TRRL Supplementary Report 84 UC, Crowthorne, Berkshire, 1974.
8) 田中雅人，森猛，入部孝夫，宮下竜一：片面すみ肉リブ十字継手の疲労強度，鋼構造年次論文報告集第 3 巻 pp.403-410, 1995.
9) Fukuoka, T., Maeda, T., and Mochizuki, K.: Effect of plate thickness and improvement by grinding on fatigue strength of cruciform joint under bending, IIW Document XIII-2134-06, International Institute of Welding, 2006.
10) Xiao, Z., and Yamada, K.: A method of determining geometric stress for fatigue strength evaluation of steel welded joints, International Journal of Fatigue 26, pp.1277-1293, 2004.
11) Structural Research and Analysis Corp. (SRAC): Cosmos/M User's Guide, Cosmos/M2.9 online help documents, 2004.

（2007 年 9 月 18 日受付）