余盛と未溶着を有する横突合せ溶接継手の疲労強度評価

森 猛¹・藤野 大地²・南 邦明³・谷口 哲志⁴

¹正会員 法政大学教授 都市環境デザイン工学科 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33)
E-mail: mori@hosei.ac.jp

²非会員 川田工業(株) 鋼構造事業部 (〒550-0014 大阪府大阪市西区北堀江1-22-19)
Email: daichi.fujino@kawada.co.jp

³正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 (〒060-0002 札幌市中央区二条西1-1)

⁴正会員 法政大学大学院博士課程 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33)

鋼構造物に用いられる溶接継手には数多くの種類があり、横突合せ継手は最も基本的な継手の一つである。横突合せ継手の溶接部に未溶着が生じると、疲労強度は低くなる。事実、未溶着を起点として疲労き裂が生じた例も少なくない。未溶着を有する横突合せ継手の疲労強度については、いくつかの研究がなされている。しかし、余盛と未溶着がある場合の疲労強度は明らかにされていない。

本研究では、余盛と未溶着を有する横突合せ継手の疲労試験を行い、余盛や未溶着長さ、そしてルートギャップが疲労強度に与える影響を明らかにした上で、パラメトリックな疲労き裂進展解析を行い、疲労強度評価式を提案している。

Key Words : transverse butt joint, incomplete penetration, weld reinforcement, fatigue strength

1. はじめに

疲労損傷は形状が急変して応力が集中する箇所から生じやすく、鋼構造物では溶接継手はその典型である。この溶接継手には数多くの種類があるが、横突合せ継手は最も基本的な溶接継手の一つである。

日本鋼構造協会の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」¹⁾(以後、JSSC指針と呼ぶ)や日本道路協会の「鋼道路橋の疲労設計指針」²⁾では、疲労試験などに基づいて各種溶接継手の疲労強度等級を定めており、鋼橋の疲労照査を行う際に用いられている。横突合せ溶接継手については、完全溶け込みあるいは小さな溶接きずを前提として疲労強度等級が定められている。鋼橋では、横突合せ溶接継手に大きな未溶着は許容されないものの、それが原因で桁型式橋梁の下フランジを貫通する疲労き裂が生じた例もある³⁾。また、クレーンガーダにおいても、同様のき裂が生じている⁴⁾。したがって、未溶着を有する横突合せ溶接継手の疲労強度評価法を確立することは、定期検査などでこの種のき裂が発見され、それを契機に同様の部位を検査した場合に、検出することができない程度の未溶着が残存している場合や、検出されたとしても

補修が困難な場合などに、有用と考えられる。ここでは、部分的な未溶着ではなく、連続した未溶着部を有する横突合せ溶接継手の疲労強度を対象とする。

連続した未溶着部を有する横突合せ溶接継手の疲労強度については、古くから実験的に検討されており⁵⁾⁸⁾、破壊力学を用いた疲労強度評価の適用性、ルートギャップの影響、溶接後熱処理の影響などについて検討した結果が示されている。ただし、これらは溶接表面を平滑に仕上げた状態を対象としており、余盛の存在や、その形状・寸法が継手の疲労強度に与える影響については明らかにされていない。鋼橋では、横突合せ溶接継手の余盛は削除されることが多いが、構造物によっては余盛をそのままとすることもある。そのためJSSC指針などでは、余盛付き横突合せ溶接継手についても疲労強度等級が示されている。

本研究では、余盛と未溶着を有する横突合せ継手の疲労試験と疲労き裂進展解析を行い、余盛形状・寸法や未溶着長さ、板厚、ルートギャップなどが疲労強度とき裂発生限界に与える影響について検討する。そしてそれらの結果に基づいて、余盛と未溶着を有する横突合せ溶接継手の疲労強度評価式を提案する。

表-1 供試鋼材の機械的性質と化学成分

機械的性質			化学成分(%)				
降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	C	Si	Mn	P	S
279	440	30	0.17	0.18	0.50	0.019	0.003

表-2 溶接条件

		電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)
X 開先	上面	26	37	8.0
	下面	26	37	8.0
レ開先	上面	23	38	7.3
	下面	26	31	11.1

写真-1 溶接断面マクロの例

図-1 試験体の形状と寸法

表-3 溶接部の形状・寸法と未溶着長さ

試験体	溶接ビード幅 (mm)		余盛厚 (mm)		溶け込み 深さ(mm)		余盛 偏心量 (mm)	未溶着 長さ (mm)
	上面	下面	上面	下面	上面	下面		
X-0	9.7	9.7	2.5	2.5	0.4	0.4	0.6	7.2
X-1	9.4	9.6	2.5	2.4	1.0	0.9	0.6	6.1
レ-0	11.8	11.2	2.4	3.0	-0.3	2.5	1.7	5.8
レ-0P	-	-	-	-	-0.2	2.3	-	5.9
レ-1	11.1	11.9	2.5	2.9	-0.2	3.1	1.4	5.1

いずれの試験体も、溶接はフラックス入りワイヤを用いたCO₂自動溶接で両面からそれぞれ1パスで行っている。X開先（両面にV開先）の深さはそれぞれ2.5mm、開先角度は60度、レ開先（片面のみ）の深さは4mm、開先角度は45度である。溶接条件を表-2に示す。なお、ルートギャップを1mmとする場合には、エンドタブを設けてギャップを調整するとともに、溶接ブロック中央に直径1mmの溶接ワイヤを挿入した状態で溶接している。

各試験体の側面における断面マクロ写真の例を写真-1に示す。表-3は各試験体の側面で測定した未溶着長さ、溶け込み深さ、余盛形状・寸法の平均値を示したものである。未溶着長さはX-0試験体で7.2mmと最も長く、レ-1試験体が5.1mmと最も短い。X開先試験体では上下面ともに同じ条件で溶接を行っているため、上下面で溶け込み深さと余盛幅・余盛厚はほぼ同じとなっている。レ開先試験体については、開先角度が小さいため、開先の一部が残存して溶け込み深さがマイナスとなっている。また、ルートギャップがある場合の方が、X開先、レ開先とも、溶け込みが深くなっている。

(2) 残留応力

単軸のひずみゲージ（ゲージ長：2mm）を用いて、切断法により各試験体の未溶着部直上・直下の溶接表裏面の残留応力を測定した。その結果を図-2に示す。なお、ここで示す値は表裏面での平均である。いずれの試験体、位置においても50～100N/mm²程度の引張残留応力が生じている。したがって、未溶着先端近傍には、溶接表面

2. 試験体

(1) 試験体の製作

供試鋼材は、板厚12mmのSS400である。鋼材の機械的性質と化学成分を表-1に示す。試験体は2枚の鋼板を突合せ溶接し、幅1400mmのブロックを作製した後、幅110mmにガス切断し、切断面を研削して幅100mmに仕上げたものである。その際、溶接の始末端部や組み立て溶接部が試験体に含まれないようにそれらの位置を決めている。試験体の形状と寸法を図-1に示す。開先形状、余盛とルートギャップの有無により以下の5種類の試験体を作製し、疲労試験に供した。

X-0試験体：X開先溶接，ギャップ0

X-1試験体：X開先溶接，ギャップ1mm

レ-0試験体：レ開先溶接，ギャップ0

レ-0P試験体：レ-0試験体の余盛を削除

レ-1試験体：レ開先溶接，ギャップ1mm

図-2 溶接表面の残留応力分布

の引張残留応力に釣り合う圧縮残留応力が生じていると考えられる。なお、レ-0F試験体では、他の試験体と異なり、残留応力の左右のバランスがとれていないが、これは余盛り削除のための加工の影響と考えられる。

3. 疲労試験

(1) 試験方法

疲労試験は、動的能力500kNと200kNの電気油圧サーボ式材料試験機を用いて行った。X-0、X-1、レ-0、レ-1試験体については、前節で示した未溶着先端近傍の圧縮残留応力の影響(疲労強度に対する)ができるだけ生じないように上限荷重を180kNとして行った(P_{max} 一定試験)。レ-0F試験体については、余盛がないことを考慮して、上限荷重を100kNとした。また、X-0試験体では残留応力が疲労強度に及ぼす影響を調べる目的で応力比 $R=0$ 及び $R=-1$ でも疲労試験を行った。応力波形は正弦波、繰返し速度は、8~20Hzである。荷重繰返し数が4000万回~6000万回に達しても疲労破壊が生じなかった場合には、そこで疲労試験を中止した。なお、未破断の試験体については、大きな繰返し荷重(レ-0F試験体で20~120kN、その他の試験体では50~180kN)で再度疲労試験を行い、強制的に疲労破壊させた。そして破面を50倍の顕微鏡で観察したが、未破断の状態が生じたと思われる疲労き裂は観察されなかった。

(2) 疲労試験結果

疲労試験結果を表-4に示す。試験体の破断は、すべて未溶着部から発生した疲労き裂の進展により生じた。試験体の破断面の例を写真-2に示す。破断面の写真で黒くあるいは茶色に見える部分が未溶着部である。いずれの

表-4 疲労試験結果

X-0 試験体 Pmax一定試験									
No.	Pmin	Pmax	ΔP	Δσ	Δσt	Δσt'	ΔK	N	
kN			N/mm ²				N/mm ^{3/2}	(x10 ⁴)	
1	100	180	80	66.7	189.5	78.7	258.0	42.8	
2	115		65	54.2	129.4	62.4	204.6	75.5	
3	130		50	41.7	118.5	48.0	161.0	141.6	
4	140		40	33.3	79.4	38.1	122.7	239.3	
5	148		32	26.7	70.6	31.5	102.7	817.4	
6	155		25	20.8	49.5	24.8	76.2	>4494	
X-0 試験体 応力比R=0									
1	5	105	100	83.3	219.8	103.4	323.4	36.2	
2		85	80	66.7	168.8	77.6	252.3	109.0	
3		70	65	54.2	137.6	64.1	214.4	132.4	
4		55	50	41.7	118.0	49.9	167.1	336.3	
5		45	40	33.3	88.1	41.0	122.0	826.1	
6		37	32	26.7	63.4	31.7	100.2	1970	
7		30	25	20.8	54.8	25.7	78.2	>4000	
X-0 試験体 応力比R=-1									
1	-50	50	100	83.3	198.0	102	309.2	60.0	
2	-40	40	80	66.7	158.6	80	240.1	135.4	
3	-32.5	32.5	65	54.2	142.7	68	216.9	263.6	
4	-25	25	50	41.7	110.1	52	163.9	>4000	
X-1 試験体 Pmax一定試験									
1	80	180	100	83.3	180.5	96	218.6	39.7	
2	100		80	66.7	143.6	76	169.5	84.9	
3	115		65	54.2	113.4	60	138.5	171.5	
4	130		50	41.7	95.6	47	109.3	594.1	
5	140		40	33.3	76.3	37	84.8	1024	
6	148		32	26.7	57.5	30	68.2	>5455	
レ-0 試験体 Pmax一定試験									
1	80	180	100	83.3	165.7	87	248.1	32.1	
2	100		80	66.7	128.6	69	210.6	90.8	
3	115		65	54.2	108.0	56	171.1	148.4	
4	130		50	41.7	90.6	45	135.2	204.4	
5	140		40	33.3	72.7	37	104.2	427.9	
6	148		32	26.7	57.5	28	81.2	1111	
7	155		25	20.8	50.0	24	70.9	3372	
8	160		20	16.7	36.2	18	54.1	>6315	
レ-0F 試験体 Pmax一定試験									
1	20	100	80	66.7	113.4	113	224.5	33.3	
2	35		65	54.2	95.6	96	191.3	76.5	
3	50		50	41.7	81.6	82	165.3	62.7	
4	60		40	33.3	60.7	61	117.7	186.0	
5	68		32	26.7	48.8	49	96.7	427.3	
6	75		25	20.8	36.8	37	73.6	>4000	
レ-1 試験体 Pmax一定試験									
1	80	180	100	83.3	147.6	84	186.3	76.3	
2	100		80	66.7	118.9	64	147.9	139.6	
3	115		65	54.2	104.3	53	121.1	224.6	
4	130		50	41.7	74.2	41	84.3	1082	
5	140		40	33.3	59.4	33	67.5	1837	
6	148		32	26.7	47.2	27	59.1	>5835	

P_{min} : 最小荷重 P_{max} : 最大荷重
 ΔP : 荷重範囲 $\Delta\sigma$: 公称応力範囲
 $\Delta\sigma_t$: 理論のど断面応力範囲
 $\Delta\sigma_t'$: 実のど断面応力範囲
 ΔK : 未溶着部をき裂とみなした場合の応力拡大係数
N: 疲労寿命

試験体においても、未溶着部先端は試験体幅方向でほぼ平行となっており、位置による未溶着部長さの変化はほとんどない。未溶着部先端とほぼ平行あるいは偏平な半楕円状となっているグレーの部分が疲労破面であり、その外側の多少色調が変わったグレーの部分は、疲労き裂により断面積が小さくなって最終的に破断した面である。このように、疲労き裂はほぼ貫通き裂とみなすことがで

写真-2 疲労破面の例

きる。

(3) 公称応力範囲で整理した疲労試験結果

疲労試験より求めた主板での公称応力範囲と疲労寿命の関係を図-3(a)~(c)に示す。図中の直線群は、最小二乗法を用いて求めた各試験体の疲労寿命に対する応力範囲の回帰直線である。ただし、回帰直線の計算に未破断のデータは含めていない。

図-3(a)は、開先形状とギャップが疲労強度に与える影響を示したものである。X-0試験体に比べて、レ-0試験体で疲労強度が高くなっている。これはレ-0試験体の方がX-0試験体に比べて未溶着が平均で5.8mmと7.2mmと、短いと考えられる。ギャップ有と無を比較すると、ギャップ有の疲労強度の方が高い。これも、未溶着長さの違いによって生じたものと考えられる。さらに、ギャップ無の場合、その未溶着部先端がき裂と同等に鋭利であるのに対し、ギャップ有の場合では未溶着先端の形状が多少鈍くなっていることも原因と考えられる。

図-3(b)は、余盛の影響を示したものである。余盛が無い場合の疲労強度の方が低くなっている。このことは余盛によって疲労強度が高くなることを意味している。

図-3(c)は、応力比の影響を示している。疲労強度の順番は「 $R=1$ 」>「 $R=0$ 」>「 P_{max} =一定」となっている。これは応力比が低くなると、未溶着内部に働く圧縮の残留応力によって未溶着部が開きにくくなり、き裂が進展しにくくなるためと考えられる。

(4) 理論のど断面応力範囲で整理した疲労試験結果

のど断面での応力範囲と疲労寿命の関係を図-4(a), (b)に示す。のど断面積は主板厚から未溶着長さを差し引いたものをのど厚として計算した。すなわち、余盛がないものとしてのど厚を計算している。以後、この断面積を用いて計算した応力を理論のど断面応力と呼ぶ。

図-4(a)に示すように、ギャップ無と有でのX形とレ形試験体の疲労強度はほぼ同じとなっている。これは、理論のど断面応力で整理することで、公称応力範囲で整理した場合にみられた未溶着長さの影響が考慮されたため

図-3 公称応力範囲で整理した疲労試験結果

図-4 理論のど断面応力で整理した疲労試験結果

図-5 実のど断面応力で整理した疲労試験結果

と考えられる。ただし、X開先、レ開先ともギャップ有で若干ではあるが疲労強度が高くなっている。

図-4(b)は、余盛が疲労強度に与える影響を示したものである。公称応力範囲で整理したときと同様に、余盛有の場合で疲労強度が高くなっている。

(5) 実のど断面応力範囲で整理した疲労試験結果

余盛厚を含めたのど断面での応力範囲（以後、実のど断面応力範囲と呼ぶ）と疲労寿命の関係を図-5(a), (b)に示す。実のど断面積は、余盛を含めた未溶着直線上の試験体厚から未溶着長さを差し引いたものを実のど厚として計算した。

図-5(a)に示すように、ギャップの有無によらず、X開先試験体とレ開先試験体の疲労強度はほぼ一致している。ただしギャップ0の場合には、X開先試験体の疲労強度が若干ではあるが、低くなっている。これは、これらの試験体の余盛厚、未溶着長さ、そして上下面の溶接中心のずれの違いによって生じたものと考えられる。

図-5(b)は疲労強度に対する余盛の影響を示している

が、その結果は理論のど断面応力範囲で整理した場合とは逆に余盛を有する場合に疲労強度が低くなっている。このことは、余盛厚のすべてが疲労強度向上に寄与するのではなく、その一部が疲労強度に寄与することを意味している。なお、余盛厚の40%をのど厚に含めれば、両者の疲労強度はほぼ同じとなる。

(6) 初期応力拡大係数範囲で整理した疲労試験結果

未溶着をき裂とみなして計算した初期の応力拡大係数範囲 ΔK と疲労寿命の関係を図-6(a)~(c)に示す。 ΔK は、き裂進展解析ソフトFRANK 2D-L⁹⁾を用いて算出した。詳細は、次章で示す。なお、キャップがある場合には、各試験体で測定したギャップ幅の矩形の切欠きの両端のコーナーに長さ0.1mmのき裂を導入することにより模擬した。また、切欠きの長さに両端のき裂長さ（合計0.2mm）を加えた長さが測定した未溶着長さと同じとなるように設定している。JSSC指針では下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} を平均設計曲線の場合には76N/mm^{3/2}、最安全設計曲線では63N/mm^{3/2}としている。これらの値は高い引張応力場で

図-6 応力拡大係数範囲で整理した疲労試験結果

疲労き裂の開口が生じないような条件で行われた疲労き裂進展試験結果に基づくものである。これらの値も図中に示している。上限荷重を一定とした試験は、このような条件を狙ったものである。

図-6(a)に示すギャップ有と無のXとレ試験体の疲労強度は、他のパラメータで整理した場合よりも、その差が小さくなっている。未破断の試験データから求めた各試験体の ΔK は、 $54.0 \sim 76.2 \text{ N/mm}^{3/2}$ の範囲にあり、JSSC

図-7 実験結果とき裂進展解析結果の比較

指針で示されている ΔK_{th} よりも低いものもあるが、ほぼ一致している。

図-6(b)に示すように、余盛なしで疲労強度が若干低くなっている。これは、余盛を削除することでき裂が進展する長さが短くなるためと考えられる。ただし、未破断データから求めた ΔK は、余盛なしの方が若干高くなっている。

図-6(c)では、 $R=-1$ での疲労強度や未破断データに対応する ΔK が $R=0$ や P_{max} 一定試験に比べて高くなっており、応力比の影響が生じている。

4. 疲労き裂進展解析を用いた疲労強度評価

橋梁などの溶接構造物については、高い引張残留応力場で得られた疲労強度を設計に用いるべきと考えられる。ここでは、そのような場での余盛と未溶着部を有する横突合せ溶接継手の疲労強度評価法について検討する。

(1) 解析方法

疲労き裂進展解析には、き裂進展に伴う要素の再分割を自動的に行うことが可能な汎用き裂進展解析コードFRANC2D/L⁹⁾を用いた。解析は平面ひずみ条件下で行っている。その際、弾性係数は $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比は0.3とした。き裂の発生・進展方向の判定には、き裂は最大主応力方向に対して垂直に進展するという、最大主応力説を用いた。応力拡大係数はJ積分に基づき算出している。算出した応力拡大係数範囲 ΔK を、疲労き裂進展速度 $da/dN(\text{mm/cycle})$ と ΔK の関係に代入し、それを初期き裂長さから限界き裂長さまで繰り返し数値積分することにより疲労寿命を求めた。なお初期き裂は未溶着部とし、いずれか一方のき裂先端が溶接表面に達した時点を超

図-8 解析パラメータ

とした。1ステップでのき裂進展量は、0.1mm～0.5mmとしている。

da/dN と ΔK の関係としては、JSSC指針に示される平均設計曲線を用いた。ただし、下限応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は考慮していない($\Delta K_{th}=0$)。

$$da/dN = 1.1 \times 10^{-12} \cdot \Delta K^{2.75} \quad (1)$$

da/dN : mm/cycle, ΔK : $N/mm^{3/2}$

(2) 疲労試験結果との比較

実測寸法に基づいて、各試験体をモデル化した。余盛は余盛幅と余盛厚の測定結果に基づき余盛が母板表面と接する2点と余盛幅中央に余盛厚だけ離れた点の3点を結んだ円の一部としてモデル化した。その際、余盛幅や未溶着長さだけではなく、継手上下での余盛寸法とその位置の違いや、板厚方向の未溶着の偏心もモデル化している。そして、前節で示した方法により各試験体の疲労き裂進展解析を行い、疲労寿命を求めた。

以上のようなモデルの進展解析から求めた疲労寿命と疲労試験で得た疲労寿命を比較した結果を図-7に示す。応力比 R をほぼ0あるいは1とした疲労試験で求めた疲労寿命は、残留応力の影響(応力比の影響)で、進展解析から求めた寿命よりも長くなっている。 P_{max} 一定で疲労試験を行った試験体についても、き裂進展解析より求めた疲労寿命が、疲労試験より求めた疲労寿命よりも短くなっている。しかし、疲労寿命300万回程度以下の領域では、その差は小さい。それを超える超寿命域では、両者の差が大きくなっているが、これは疲労き裂進展解析において下限応力拡大係数範囲を考慮していないためと考えられる。したがって、疲労き裂進展解析により、余盛と未溶着を有する横突合せ溶接継手の疲労強度・寿命をある程度精度よく予測できると言える。

(3) 疲労強度に対する諸因子の影響

横突合せ溶接継手がルート破壊する場合の疲労強度に対する各因子の影響について、き裂進展解析を行うことにより検討する。各パラメータの定義は、図-8に示すとおりである。すなわち、板厚 T 、未溶着長さ $2a$ 、余盛厚 Sd 、余盛幅 Sw 、未溶着長さの偏心量 Ea 、余盛位置の偏心量 Es 、ギャップ幅 g をパラメータとした。板厚 T は6, 12, 24, 48mmとし、未溶着長さ $2a$ と板厚の比 $2a/T$ を0.1, 0.2,

図-9 疲労強度と板厚の関係

0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 余盛厚と板厚の比 Sd/T を0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 余盛幅と板厚の比 Sw/T を0.6, 0.75, 0.85, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 未溶着長さの偏心量と板厚の比 Ea/T を0, 0.05, 0.1, 0.15, 余盛位置の偏心量と板厚の比 Es/T を0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, そしてギャップ幅と板厚の比 g/T を0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08とした。 $T=24$ mm, $2a/T=0.5$, $Sd/T=0.2$, $Sw/T=0.85$, $Ea/T=0$, $Es/T=0$, $g/T=0$ を基準モデルとする。

ここでは、主板の公称応力範囲を $100 N/mm^2$ として、3.(1)節で示した方法で疲労寿命を求め、さらに疲労寿命が応力範囲の2.75乗に反比例することを利用して、200万回疲労強度を求める。そして、基準モデルの200万回疲労強度を基準として、各パラメータの影響を補正係数として定式化し、各パラメータに対する補正係数を基準モデルの疲労強度に乗じることにより疲労強度評価式を構築する。

a) 板厚の影響

疲労き裂進展解析より求めた200万回疲労強度と板厚 T の関係を図-9(a)に示す。この図では T を6, 12, 24, 48mmと変化させ、その他のパラメータを一定(基準モデル)とした結果を示している。なお、図の縦軸と横軸

図-10 疲労強度と未溶着長さの関係

図-11 疲労強度と未溶着偏心量の関係

図-12 疲労強度と余盛厚の関係

図-13 疲労強度と余盛幅の関係

は対数表示としている。疲労強度は板厚 T に反比例して低下している。基準板厚 24mm の 200 万回疲労強度で除した各板厚モデルの無次元疲労強度と板厚 T の関係を図-9(b)に示す。図中の破線は、最小 2 乗法により求めた回帰直線である。無次元疲労強度と板厚の関係は、次式で与えられる。

$$\varepsilon_T = -0.301 \log T + 1.420 \quad (6 \leq T \leq 48 \text{ mm}) \quad (2)$$

この式は、疲労強度が板厚の 0.301 乗に反比例することを意味しており、この低下度は横突合せ継手が止端破壊する場合の板厚効果¹⁰⁾と同程度である。

b) 未溶着長さの影響

無次元疲労強度と $2a/T$ の関係を図-10 に示す。図中の破線は最小 2 乗法により求めた 2 次の回帰曲線である。 $2a/T$ が大きくなるにしたがって、無次元疲労強度は減少している。この関係を 2 次式で表すと、以下のようになる。

$$\varepsilon_{2a} = 2.500(2a/T)^2 - 4.052(2a/T) + 2.370 \quad (3)$$

$$(0.1 \leq 2a/T \leq 0.7)$$

c) 未溶着部の偏心の影響

未溶着の偏心量 Ea と板厚 T の比 $Ea/T=0$ を基準として求めた無次元疲労強度と Ea/T の関係を図-11 に示す。 Ea/T の値が大きくなるにしたがって、無次元疲労強度は低くなっている。この関係を 1 次式で表すと、以下のようになる。

$$\varepsilon_{Ea} = -0.564(Ea/T) + 1.001 \quad (0 \leq Ea/T \leq 0.15) \quad (4)$$

d) 余盛厚の影響

余盛厚 Sd と板厚 T の比 $Sd/T=0.2$ を基準として、無次元疲労強度と Sd/T の関係を求めた結果を図-12 に示す。 Sd/T が大きくなるにしたがって、無次元疲労強度が高くなっている。ただし、 Sd/T の値がある程度大きくなると、疲労強度の上昇は飽和する傾向にある。これは、余盛がある程度以上大きくなると、余盛で分担する応力が飽和するためである。これは、面内ガセットや面外ガセットの高さがその幅に比べてある程度以上大きくなると、溶

図-14 疲労強度と余盛位置の関係

接止端の応力集中が飽和するのと同じメカニズムである。無次元化疲労強度と Sd/T の関係を2次式で表すと、以下のようになる。

$$\varepsilon_{Sd} = -2.012(Sd/T)^2 + 1.431(Sd/T) + 0.803 \quad (5)$$

$$(0 \leq Sd/T \leq 0.4)$$

e) 余盛幅の影響

無次元疲労強度と Sw/T の関係を図-13に示す。 Sw/T の値が大きくなるにしたがって、無次元疲労強度も高くなっている。ただし、 Sw/T の値がある程度大きくなると、疲労強度の上昇は飽和する傾向にある。この関係を2次式で表すと、以下のようになる。なお、疲労強度の上昇が飽和するメカニズムは、余盛厚の影響と同じである。

$$\varepsilon_{Sw} = -0.093(Sw/T)^2 + 0.524(Sw/T) + 0.629 \quad (6)$$

$$(0.6 \leq Sw/T \leq 3.0)$$

f) 余盛位置の偏心の影響

余盛位置の偏心量 Es と板厚 T の比 $Es/T=0$ を基準とした無次元疲労強度と Es/T の関係を図-14に示す。 Es/T の値が大きくなるにしたがって、無次元疲労強度はほぼ直線的に低下している。この関係は、以下の式で与えられる。

$$\varepsilon_{Es} = -0.344(Es/T) + 1.007 \quad (7)$$

$$(0 \leq Es/T \leq 0.3)$$

g) ギャップ幅の影響

疲労き裂進展解析より求めた200万回疲労強度とギャップ幅 g と板厚 T の比 g/T との関係を図-15に示す。ここでは g/T の値を0, 0.02, 0.04, 0.06および0.08と変化させ、板厚を6, 12, 24および48mmとし、未溶着長さ a と板厚の比 $2a/T=0.5$, 余盛厚 $Sd/T=0.2$, 余盛幅 $Sw/T=0.85$,

図-15 200万回疲労強度とギャップ幅の関係

図-16 ギャップ幅が応力拡大係数範囲に及ぼす影響

図-17 疲労強度とギャップ幅の関係

未溶着長さの偏心量 $Ea=0$, 余盛位置の偏心量は $Es=0$ を一定とした場合の結果を示している。板が厚い場合には、 g/T が大きくなるにしたがって、若干ではあるが、疲労強度が高くなっている。

図-16に、き裂長さに伴う応力拡大係数の変化を示す。ギャップ幅が広いほどき裂が短い間の応力拡大係数範囲

表-5 任意モデルの寸法諸元

T(mm)	Sw/T	Sd/T	2a/T	Es/T	Ea/T	g/T
10	0.65	0.15	0.15	0	0	0
10	1.65	0.25	0.35	0	0.1	0
10	2.85	0.35	0.45	0.15	0.1	0
20	0.65	0.15	0.55	0	0	0
20	0.75	0.25	0.35	0	0.1	0
20	2.65	0.35	0.15	0.15	0.1	0
40	0.65	0.15	0.25	0	0	0
40	1.65	0.25	0.35	0	0.1	0
40	2.65	0.2	0.65	0.15	0.1	0
40	0	0	0.35	0	0.1	0

が小さくなっている。これが、疲労強度に対するギャップの影響の原因である。円孔から発生するき裂の応力拡大係数についても同様の結果が示されている。

$g/T=0$ を基準とした無次元疲労強度と g/T の関係を図-17 に示す。図中の破線は最小 2 乗法により求めた回帰直線である。この式は以下のように与えられる。

$$\varepsilon_g = 0.412(g/T) + 0.998 \quad (0 \leq g/T \leq 0.08) \quad (8)$$

以上のように、ギャップがあるとき裂が小さい間の応力拡大係数範囲が小さくなるものの、ギャップ幅が疲労強度に及ぼす影響は小さい。

(4) 疲労強度評価式の提案

以上の結果をもとに、板厚、未溶着長さ、余盛厚、余盛幅、未溶着長さの偏心量、余盛位置の偏心量、ギャップ幅の各パラメータが疲労強度に及ぼす影響を補正係数として定式化し、基準モデルの疲労強度に乘じることにより各モデルの疲労強度を求めることができる。

ここでは、未溶着を有する横突合せ溶接継手の疲労強度評価式を以下のように提案する。

$$\Delta\sigma_{200} = \varepsilon_T \times \varepsilon_{2a} \times \varepsilon_{Sd} \times \varepsilon_{Sw} \times \varepsilon_{Ea} \times \varepsilon_{Es} \times \varepsilon_g \times \Delta\sigma_{t200} \quad (9)$$

$\Delta\sigma_{t200}$: 基準モデルの 200 万回疲労強度 (35.5N/mm²)

ε_T : 板厚の影響 式(2), ε_{2a} : 未溶着長さの影響 式(3)

ε_{Ea} : 未溶着長さの偏心量の影響 式(4)

ε_{Sd} : 余盛厚の影響 式(5) ε_{Sw} : 余盛幅の影響 式(6)

ε_{Es} : 余盛位置の偏心量の影響 式(7)

ε_g : ギャップの影響 式(8)

上記の評価式から求めた 200 万回疲労強度とき裂進展解析から求めた 200 万回疲労強度を比較した結果を図-18 に示す。図中には、疲労強度評価式構築のために用いたモデルに加え、任意にパラメータを組み合わせて作成したモデルの結果も示している。任意モデルで用いた諸寸法を表-5 に示す。一部のモデルで推定式が若干安全

図-18 評価結果と進展解析結果の比較

図-19 評価結果と実験結果の比較

側の評価となっているものの、評価式は解析結果とよく一致している。

図-19 は、各試験体の疲労試験で得られた破断データを各種試験体の応力範囲と疲労寿命の関係の傾きを用いて 200 万回疲労強度に換算した結果を、式(9)から求めた 200 万回疲労強度と比較したものである。式(9)から推定した各試験体の 200 万回疲労強度は、実験結果のほぼ下限となっている。

5. まとめ

本研究では、疲労試験および破壊力学の手法を用いた疲労き裂進展解析を行い、余盛と未溶着を有する横突合せ溶接継手の疲労強度を明らかにする、またその疲労強度評価式を提示することを目的として、モデル試験体の疲労試験と疲労き裂進展解析を行った。さらに、長寿命域での疲労試験を行い、未溶着からの疲労き裂発生限界についても検討した。ここで得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 溶接余盛が存在することで疲労強度は向上する。ただし、余盛によって増加するのど厚のすべてが疲労強度向上に寄与することはない。
- (2) 未溶着部にギャップがある場合の疲労強度は、ない場合に比べて若干高くなることもあるが、その影響度は小さい。
- (3) 未溶着部先端には圧縮残留応力が存在するため、疲労強度は応力比の影響を受けやすい。
- (4) 未溶着をき裂と見なして、応力拡大係数範囲を計算することにより、疲労き裂の発生限界を評価できる。
- (5) 未溶着をき裂とみなし、破壊力学の手法で疲労き裂進展解析を行うことにより、精度よく疲労強度・疲労寿命を推定することができる。
- (6) 継手の板厚、溶接余盛の寸法・形状と偏心、未溶着長さと偏心、ギャップ幅をパラメータとした疲労き裂進展解析を行い、その結果に基づいて疲労強度評価式を提示した。この評価式から推定した疲労強度と解析および疲労試験から得られた疲労強度を比較することにより、評価式の有用性を確かめた。

謝辞：本研究の一部は外所大典氏の卒業論文として行われたものである。ここに記して、深謝します。

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（2012年改定版），技報堂出版，2012.
- 2) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労，丸善，1997.
- 3) 日本道路協会：鋼橋の疲労，丸善，2002.
- 4) 橋内良雄，小林英男：溶接欠陥に起因する天井クレーンガーダの疲労損傷，失敗知識データベース，<http://www.sozogaku.com/fkd/cf/CB0061002.html>
- 5) Lawrence, F. V. and Munse, W. H. : Fatigue Crack Propagation in Butt Welds Containing Joint Penetration Defects, *Welding Journal*, Welding Research Supplement, Vol.52, pp.221s-232s, 1973.
- 6) 大野啓充：不溶着欠陥を有する突合せ継手の疲労強度に対するルートギャップおよび応力除去焼鈍の影響，溶接学会全国大会講演概要，第32集，1983.
- 7) 長瀬隆夫，松崎弘二：台車枠溶接部の新しい強度評価法，鉄道総研報告，Vol.10, No.5, pp.19-24, 1996.
- 8) 金仁泰，新海英昌，山田健太郎，近藤明雅：斜め連続未溶着部をもつ突合せ溶接継手の疲労挙動，土木学会論文集，No.703/I-59, pp.211-219, 2002.
- 9) Swenson, D. and James, M.: FRANC2D/L User's Guide Ver 1.4, 1997.
- 10) 森 猛，南 邦明，甲 弓子：JSSC疲労設計指針の溶接継手疲労強度と強度評価法の検討，鋼構造論文集，Vol.18, No.69, pp.71-81, 2011.

(2013. 6. 28 受付)

FATIGUE STRENGTH OF TRANSVERSE BUTT WELDED JOINTS WITH WELD REINFORCEMENT AND INCOMPLETE WELD PENETRATION

Takeshi MORI, Daichi FUJINO, Kuniaki MINAMI and Tetsunori TANIGUCHI

A lot of kinds of the welded joints are employed in steel structures, and transverse butt welded joints are the most fundamental ones. In case that the joints have lack-of-penetration, the fatigue strength drastically decreases. In fact, there are some cases that the fatigue damage has been detected due to the lack-of-penetration. Therefore, some researches have been done about the fatigue strength of the transverse butt joint with the lack-of-penetration. However, fatigue strength of the joints with weld reinforcement in addition to the lack of penetration has not been made clear yet.

In this study, in order to make clear the fatigue strength of the transverse butt welded joints and propose the fatigue strength evaluation expression for obtaining the fatigue strength, fatigue tests and fatigue crack propagation analyses have been carried out on model specimens and analytical models with various shape and size of reinforcements, length of lack of penetration and plate thickness.