

# 鋼橋の溶接継手の研究 －裏波を有する片面突合せ溶接継手の疲労強度－

製作小委員会 製作部会

村上 貴紀 綿谷 剛 津山 忠久 萩原 篤 武田 有祐

## 1. はじめに

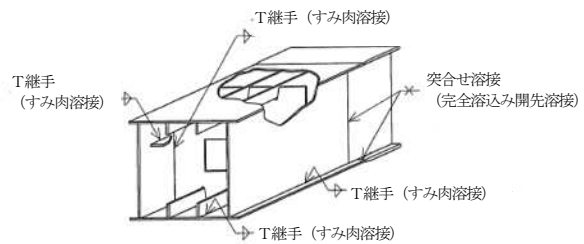
鋼橋の疲労損傷の多くは溶接継手部で生じている。この溶接継手には数多くの種類があるが、横突合せ継手は最も基本的な溶接継手である。鋼箱桁における溶接継手の例を図-1に示す<sup>1)</sup>。工場ではフランジやウェブの板継ぎ、現場では主桁の全断面溶接および鋼床版デッキプレートの現場接合に横突合せ継手が採用されている。工場では裏はつりを伴う両面からの完全溶込み溶接が行われるが、現場では部材の反転ができないため、例えば下フランジ継手は上向き姿勢での裏はつりを伴う溶接となり、かえって所定の溶接品質の確保が困難となる。また、桁内の作業スペース等の問題のために両面溶接の採用が困難な場合がある。このような場合は裏はつりを伴わない片面からの完全溶込み溶接（以下、片面溶接）が採用される。この片面溶接は開先の裏側に裏当て材を取り付け、開先側から裏波ビードを形成させて溶接する方法である。裏当て材は溶接完了後に除去する。

裏当て材にはセラミック製などの材質や、溶接方法、ルートギャップの大きさ、テーパの有無などに応じた多くの種類があり、施工条件に応じて最適なものが選択される。一般に、裏波ビードが形成されやすいように10～12mm程度の幅で深さ1mm程度の溝が設けてあるものが使用されている。裏当て材の取付けでは接着剤が塗布されたアルミテープやマグネットクランプなどで確実に継手と密着させる必要があるが、これは鋼板との密着度が悪いと良好な裏波ビードが形成されないためである。

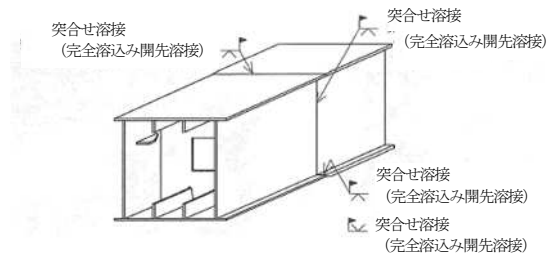
裏当て材を用いた片面溶接は、サブマージアーク溶接やマグ溶接にて施工され、開先角度やルートギャップなどの開先形状および溶接条件は溶接施工試験にて確認する。特に、ルートギャップは製作誤差や架設誤差を考慮しつつ、確実に良好な形状の裏波ビードが形成できる値とする必要がある。

日本鋼構造協会の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」<sup>2)</sup>（以下JSSC指針と呼ぶ）では、疲労試

験結果に基づいて各種溶接継手の疲労強度等級を定めている。横突合せ溶接継手については、完全溶込み溶接を前提として疲労強度等級が定められている。そのうち両面突合せ溶接継手については、数多くの疲労試験の結果に基づいて疲労強度等級はD（200万回基本疲労強度100 N/mm<sup>2</sup>）とされている。また、片面溶接については、良好な形状の裏波ビードを有する場合にD等級、裏面の形状を確かめることのできない場合、および裏当て金付きではF等級と定められている。ただし、良好な形状の裏波ビードについての明確な定義はなされていない。また、裏波ビードを有する片面横突合せ溶接継手の疲労試験データは少なく、JSSC指



(a) 工場溶接



(b) 現場溶接

図-1 鋼箱桁における溶接継手の例<sup>1)</sup>

表-1 開先溶接の余盛高さ<sup>3)</sup> (mm)

ビード幅(B)	余盛高さ(h)
$B < 15$	$h \leq 3$
$15 \leq B < 25$	$h \leq 4$
$25 \leq B$	$h \leq (4/25) \cdot B$

針にも疲労試験データは示されていない。アメリカの道路橋設計基準<sup>4)</sup>や国際溶接学会の疲労設計指針<sup>5)</sup>にも、片面横突合せ溶接継手の疲労強度等級は示されていない。

「道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編」<sup>3)</sup>では、開先溶接の溶接止端に高い応力集中が生じないように、余盛高さを表-1のように規定しており、この規定が良好な裏波ビード形状の定義の参考になるものと考えられる。しかし、この規定は両面溶接を想定して定められたものと考えられ、裏波ビードのようにビード幅がさらに小さい場合には別途検討が必要と考えられる。

横突合せ溶接継手の疲労強度は溶接形状・寸法（ビード幅、余盛高さ）、特に溶接止端形状（止端の曲率半径と開き角）に依存すると考えられる。また、溶接の形状と寸法は、開先形状やルートギャップ、そして溶接方法・条件に左右されると考えられる。したがって、裏波ビードを有する片面横突合せ溶接継手の適切な疲労強度等級、また良好な裏波ビード形状の定義を明らかにするためには、溶接方法や開先形状、ルートギャップをパラメータとして製作した溶接継手の溶接形状と疲労強度を明らかにする必要がある。

以上のことから、裏波ビードを有する片面横突合せ溶接継手の疲労強度と良好な裏波ビード形状の定義を明らかにすることを目的とし、片面溶接の開先形状、ルートギャップ、溶接方法をパラメータとした継手試験体を製作し、それらの溶接形状・寸法測定を行うとともに、軸方向荷重と板曲げ荷重下で疲労試験を行う。また、様々な溶接形状の解析モデルを作成し、それらの応力解析を行うことにより良好な裏波ビード形状について検討する。

本稿では、裏波ビードを有する片面横突合せ溶接継手の疲労強度と良好な裏波ビード形状について検討した結果を報告する。なお、本研究は法政大学との共同研究として行ったものである。

## 2. 試験体

### 2.1 試験体の製作

供試鋼材は、板厚 16mm の溶接構造用圧延鋼材 SM490YA である。この鋼板を図-2 に示す形状に組み立て、裏側に角変形を防止する目的で拘束材を設置し、裏当て材を取り付けて溶接を行う。継手の種類は表-2 に示すように 4 種類である。溶接方法は、サブマージアーク溶接（以下、SAW）と

シールドガスに 100%炭酸ガスを用いたマグ溶接（以下、CO<sub>2</sub>）の 2 種類とし、開先形状とルートギャップは、各溶接方法で裏波ビードが形成できる範囲としている。各継手を S01（SAW、ルートギャップ 1mm）、S10（SAW、10mm）、C04（CO<sub>2</sub>溶接、4mm）、C12（CO<sub>2</sub>溶接、12mm）と呼ぶ。

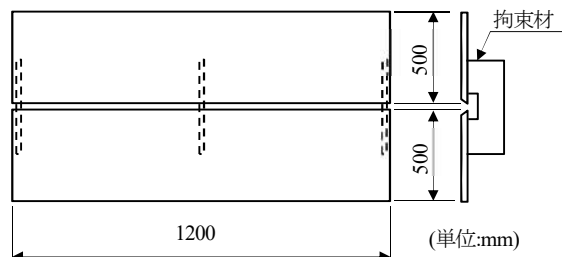


図-2 継手の組立

表-2 継手の種類

継手名称	溶接方法	開先形状		
		開先角度 $\theta$	ルートギャップ G	断面
S01	SAW	45度	1mm	
S10	SAW	45度	10mm	
C04	CO <sub>2</sub>	30度	4mm	
C12	CO <sub>2</sub>	30度	12mm	

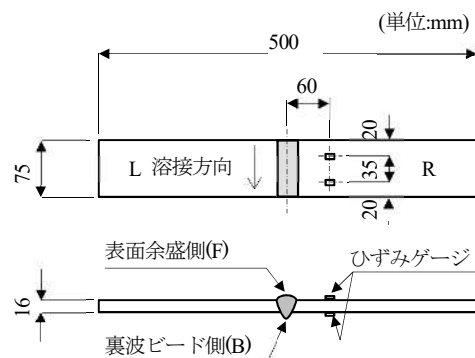


図-3 試験体の形状・寸法

表-3 溶接条件

継手名称	溶接方法	パス数	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/mm)
S01	SAW	1	760	30	24	5,700
S10	SAW	3	700	32	22	5,169
			730		30	6,371
C04	CO <sub>2</sub>	3	200	28	23	1,461
			300		30	2,160
C10	CO <sub>2</sub>	3	200	28	10	2,918
			320		25	3,360

表-4 溶接材料

溶接方法	ワイヤ		フラックス		充填材
	JIS	径	JIS	粒度	径×長さ
SAW	JIS Z 3351 YS-S6 該当	4.8φ	JIS Z 3352 SFMS1 該当	20×200	1φ×1
CO <sub>2</sub>	JIS Z 3312 YGW11	1.2φ	—	—	—

各継手の溶接条件を表-3、溶接材料を表-4に示す。裏当て材には各溶接法に適した材質のものを使用した。S01はルートギャップが1mmと小さく、1パスで溶接している。それに対しS10はルートギャップが広いので、3パスでの多層盛溶接としている。C04は裏波ビードの高さが道路橋示方書の規定を超えるように、初層のウィピングの際にルートギャップ中心での停止時間を長くして溶接している。C12はルートギャップに応じた標準的な条件で溶接している。溶接の積層はC04、C12ともに3パスである。

以上のように溶接した鋼板から試験体を切り出した。試験体の形状と寸法を図-3に示す。

## 2.2 溶接部の形状

各試験体のマクロ写真を写真-1に示す。各試験体の裏波ビード形状には、以下のような特徴が認められる。

- S01：ビード幅は狭く、止端形状が鋭い
- S10：ビード幅は広く、溶接形状が滑らか
- C04：ビード幅は狭く、余盛が高い
- C12：ビード幅は広く、余盛が高い。

以上の特徴をさらに明確とする目的で、各試験体の溶接形状・寸法を測定した。測定した各寸法の定義を図-4に、測定結果を表-5に示す。なお、溶接止端を図-3に示すように溶接方向から見て左側をL、右側をRで区別する。

ルートギャップを1mmとしてSAWで溶接したS01継手の表面での平均ビード幅は20.7mm、高さは1.6mmである。また、裏波ビードの幅は9.1mm、高さは2.4mmである。これらは、いずれも道路橋示方書の規定を満たしているものの、裏波ビードはビード幅に比べて高さが大きく、止端の開き角が小さい。裏波ビードの止端開き角の標準偏差が他の継手に比べて大きいのが、これは止端が写真-1の左側(L側)のようにオーバーラップ気味に母板に被さるような状態のものとならない場合もあったためである。この裏波ビード形状に比べて、表面余盛の形状は滑らかである。

S10継手では、ルートギャップを10mmと広くしているため、最終層の積層が2パスとなり表面

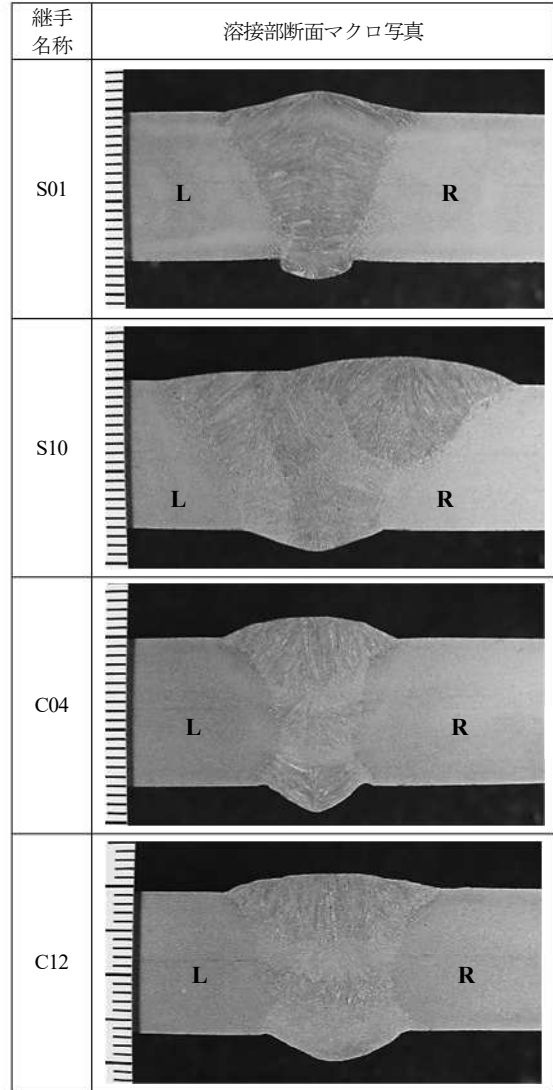


写真-1 各継手の溶接部断面マクロ写真

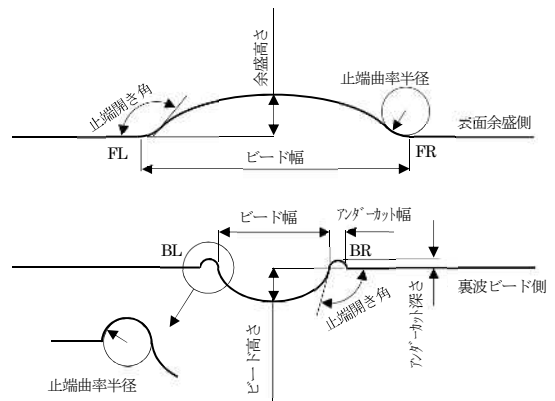


図-4 溶接形状と寸法の定義

表-5 溶接形状と寸法の測定結果（平均値と標準偏差）

継手名称	部位	測定数	表面余盛幅 裏波ビード幅 (mm)	表面余盛高さ 裏波ビード高さ (mm)	道示の余盛高さ の規定値 (mm)	止端曲率半径 (mm)	止端開き角 (度)
S01	FL	90	20.7 (2.9)	1.6 (0.4)	4.0	8.7 (3.5)	169 (4)
	FR					8.1 (3.5)	168 (4)
	BL	120	9.1 (0.9)	2.4 (0.3)	3.0	0.6 (0.5)	103 (28)
	BR					0.6 (0.5)	100 (25)
S10	FL	90	37.8 (0.9)	3.4 (0.4)	6.0	5.6 (3.4)	165 (7)
	FR					0.8 (0.4)	150 (6)
	BL	19.5 (0.7)	2.2 (0.3)	4.0	2.9 (2.3)	143 (7)	
	BR				5.6 (3.2)	160 (6)	
C04	FL	90	16.9 (1.4)	2.2 (0.3)	4.0	3.6 (3.3)	151 (5)
	FR					3.6 (3.1)	149 (5)
	BL	11.5 (0.6)	3.5 (0.5)	3.0	1.7 (0.8)	139 (7)	
	BR				1.5 (0.7)	138 (7)	
C12	FL	30	23.4 (0.8)	2.7 (0.2)	4.0	1.9 (1.1)	154 (7)
	FR					1.8 (1.1)	154 (7)
	BL	15.2 (1.1)	2.9 (0.4)	4.0	1.9 (0.9)	149 (6)	
	BR				2.1 (1.3)	149 (6)	

( ) 内の数値は標準偏差

のビード幅は 37.8mm と広い。裏波ビードの幅も 19.5mm と広く、それに対して高さは 2.2mm と比較的小さい。この継手の溶接形状は、道路橋示方書の余盛高さの規定を十分に満たしている。

C04 継手では、表面のビード幅 16.9mm、高さ 2.2mm と道路橋示方書の規定を満たしている。しかし、裏波ビードは幅 11.5mm で高さ 3.5mm と鋭い凸形状となっており、道路橋示方書の規定を満足していない。また、裏波ビードの止端にはアンダーカットが生じている。その深さは平均で 0.3mm (標準偏差 0.1mm)、幅は平均で 1.4mm (標準偏差 0.2mm) であり、形状は滑らかである。このアンダーカットの深さは、道路橋示方書の規定 (0.3mm 以下) を概ね満たしている。

C12 継手では、表面のビード幅は 23.4mm、高さは 2.7mm と滑らかな形状となっている。裏波ビードの幅は 15.2mm で高さは 2.9mm であり、道路橋示方書の規定を辛うじて満足している。

なお、S01、C04 と C12 継手では表面の余盛と裏波ビードの中心は一致しているものの、S10 継手ではルートギャップが広く、最終層を 2 パスで溶接しているため 15mm 程度ずれている。

### 2.3 試験体

軸方向疲労試験では、S01、S10、C04、C12 継手のすべてを試験対象とした。軸方向疲労試験に用いる試験体に A-を付し、板曲げ疲労試験体と区別する。S01 試験体については、表面の余盛を平滑に削除し、裏波ビードのみとした状態での試験体も準備した。これを(F)を付して区別する。

A-S01(F)試験体を用意した理由は、表面の余盛によって裏波ビードの止端の応力集中が影響を受け、それによって疲労強度が異なる可能性があると考えたためである。

板曲げ疲労試験に用いた試験体については、B-を付した。この試験に用いた継手は、S01、S10 と C04 である。板曲げ疲労試験では、裏波ビード側に引張繰返し応力が生じるようにした正曲げ試験と、上下を逆とした負曲げ試験を行った。それらを(P)、(N)と記号を付すことにより区別する。

## 3. 疲労試験

### 3.1 疲労試験方法

疲労試験は、2.3 節で示した試験体を用いて、軸方向荷重下と板曲げ荷重下で行った。

軸方向疲労試験は、荷重能力 500kN の油圧サーボ式材料試験機を用いて、繰返し速度 2.5~16Hzで行った。下限荷重を 10kN (公称応力 8.3N/mm<sup>2</sup>) とし、応力範囲が 125, 160, 200, 250 N/mm<sup>2</sup> となるような条件で疲労試験を行った。荷重繰返し回数が 1000 万回を超えても疲労破壊が生じない場合には、そこで疲労試験を中止した。

板曲げ疲労試験は、荷重能力 100kN の油圧サーボ式材料試験機を用いて、繰返し速度 3~9Hz で行った。曲げ荷重は、荷重点間距離を 120mm、支間を 360mm とした 4 点曲げで与えた。下限荷重を 1kN (公称応力 18.8 N/mm<sup>2</sup>) で一定とし、応力範囲が 170~360N/mm<sup>2</sup> となるような条件で疲労試験を行った。荷重繰返し回数が 1000 万回を超えても

疲労破壊が生じない場合には、そこで疲労試験を中止した。

### 3.2 軸方向疲労試験の結果

軸方向疲労試験結果を表-6に示す。疲労破壊は、すべて溶接止端から生じた疲労き裂が進展することによって生じた。A-S01(F)試験体では溶接止端が2箇所、他の試験体では4箇所あるが、どの止端が疲労破壊の起点となったかも表-6中に示している。A-S01試験体とA-S10試験体では、すべて裏波ビードの止端が疲労破壊の起点となっている。また、A-S01(F)試験体を含めて、SAWで溶接した試験体では、裏波ビードのR側の止端が疲労破壊の起点となったものが多い。一方、CO<sub>2</sub>法で溶接したA-C04試験体とA-C12試験体では止端形状が比較的鋭い裏波ビード側ではなく、表面の余盛の止端が疲労破壊の起点となっている。

A-S01試験体とA-S01(F)試験体の応力範囲と疲労寿命の関係を図-5に示す。図中には、JSSC指針で示されている疲労強度等級A~Eに対応する疲労設計曲線も示している。これらの試験体の疲労破壊起点は、先に示したように、いずれも裏波ビードの止端である。A-S01試験体と表面の余盛を平滑に削除したA-S01(F)試験体の疲労強度はほぼ同じである。

図-6はA-S01、A-S10、A-C04とA-C12試験体の応力範囲と疲労寿命の関係を示している。写真-1に示したように溶接形状、また表-6に示したように疲労破壊起点は試験体の種類によって異なるものの、試験体の種類による疲労強度の顕著な差は認められない。ここに示す疲労試験データは、JSSC指針で示されている良好な形状の裏波ビー

ドを有する横突合せ溶接継手の疲労強度等級Dの疲労設計曲線を満たしている。

2.1節で示したように、試験体の製作にあたり継手の溶接の際は、角変形を防止するために裏側に拘束材を設置している。しかし、V形開先による片面溶接のため、試験体には多少の角変形が生じており、疲労強度に板曲げの影響が生じていたと

表-6 軸方向疲労試験結果

試験体名称	応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )	疲労寿命 (万回)	疲労破壊の起点	
A-S01	1	200	84.6	BR
	2	160	85.2	BR
	3	250	37.0	BL
	4	125	>1,000.0	未破断
	5	250	34.8	BR
	6	200	124.0	BL
	7	160	89.7	BR
A-S01 (F)	1	200	80.5	BR
	2	160	>1,000.0	未破断
	3	250	61.1	BR
	4	200	69.8	BR
	5	250	12.8	BR
	6	160	131.9	BR
A-S10	1	200	121.3	BR
	2	160	90.2	BL
	3	125	>1,000.0	未破断
	4	250	15.6	BR
	5	200	88.1	BR
	6	160	120.2	BL
	7	250	13.2	BR
A-C04	1	125	>1,000.0	未破断
	2	160	103.8	FR
	3	200	54.7	FL
	4	160	>1,000.0	未破断
	5	200	96.0	FL
	6	250	24.3	FR
	7	250	21.8	FR
A-C12	1	200	80.4	FR
	2	160	>1,000.0	未破断
	3	250	22.9	FL
	4	250	25.4	FL
	5	200	183.8	FR

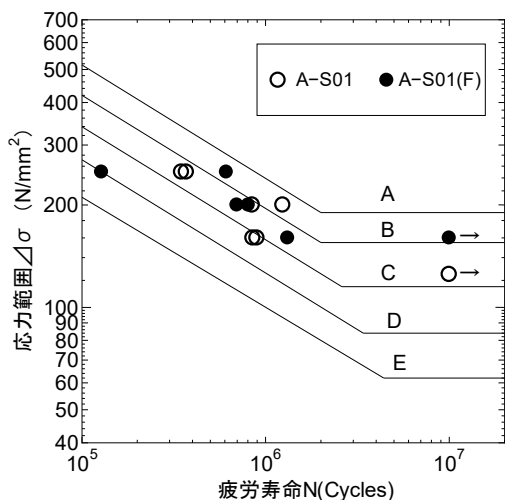


図-5 A-S01, A-S01 (F) 試験体の疲労試験結果

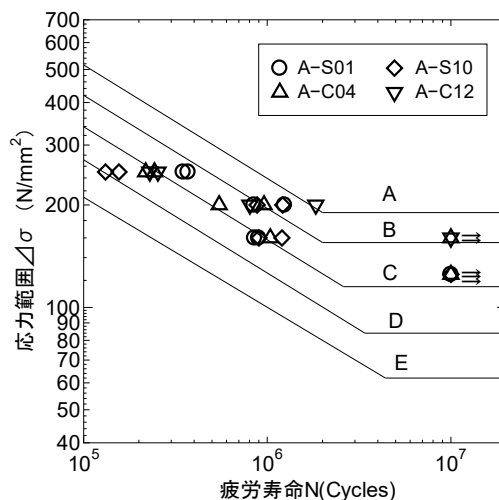


図-6 A-S01, A-S10, A-C04, A-C12 試験体の疲労試験結果

も考えられる。そこで、**図-3**に示したように試験体の表裏面にひずみゲージを貼り、下限荷重と上限荷重でのひずみを計測し、疲労破壊の起点となった面でのひずみ範囲にヤング率を乗じ、板曲げの影響を考慮した補正応力範囲  $\Delta\sigma_{mod}$  を求めた。この補正応力範囲と疲労寿命の関係を**図-7**に示す。いずれの試験体においても、多少の板曲げが生じており、測定された曲げ応力と軸方向応力の比は0.2~12%であった。このような整理を行うと、A-S10試験体で疲労強度が低く、A-C12試験体で高い傾向が認められるが、明確なものではない。この原因として、溶接止端とひずみゲージ貼付位置で試験体の角変形による板曲げ応力が異なることも考えられる。角変形を有する継手の疲労試験においては今後、角変形が疲労強度に及ぼす影響を明らかにする必要があると考える。

以上の軸方向疲労試験結果をまとめると、本研究で製作した片面横突合せ溶接継手の疲労強度はD等級であり、溶接方法や溶接パス数、溶接形状・寸法（ビード幅、余盛高さ）や溶接止端形状、および角変形の明確な影響は表れなかったと言える。

### 3.3 板曲げ疲労試験の結果

板曲げ疲労試験結果を**表-7**に示す。疲労破壊は、溶接形状にかかわらず、すべて引張応力が生じる面の溶接止端からの疲労き裂が発生、進展することによって生じた。試験体数は少ないが、B-S01(P)試験体はすべて裏波ビードのL側の止端、B-S10(N)試験体はすべて表面余盛のR側が疲労破壊の起点となっている。なお、2.2節で示したようにS10継手の表面の余盛と裏波ビードの中心は15mm程度ずれており、裏波ビードを中心にするるとR側の表面のビード幅が大きい。

**図-8**に裏波ビード側が引張応力となる正曲げ、**図-9**に表面余盛側が引張応力となる負曲げの応力範囲と疲労寿命の関係を示す。図中には、JSSC指針に示されている疲労設計曲線も示している。正曲げ試験で得られた疲労強度は、B-S10(P)試験体で最も高く、B-C04(P)、B-S01(P)試験体の順となっている。これは、**写真-1**と**表-5**に示したようにB-S01(P)試験体の裏波ビードの止端開き角が小さく、高い応力集中が生じたためと考えられる。負曲げ試験での疲労強度は、B-S01(N)、B-C04(N)、B-S10(N)試験体の順に高い。

同じ継手で正曲げと負曲げの疲労強度を比較すると、S01継手は裏波ビード側、S10継手では表面余盛側で低く、C04継手は同程度である。C04

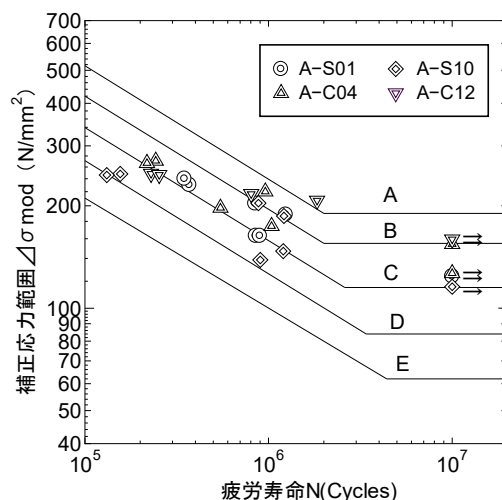


図-7 補正応力範囲と疲労寿命の関係

表-7 板曲げ方向疲労試験結果

試験体名称	応力範囲 (N/mm <sup>2</sup> )	疲労寿命 (万回)	疲労破壊の起点	
B-S01 (P)	1	300	163.5	BL
	2	250	69.5	BL
	3	210	103.9	BL
	4	175	>1,000.0	未破断
B-S01 (N)	1	300	140.5	FR
	2	250	400.4	FR
	3	360	80.5	FL
	4	210	>1,000.0	未破断
B-S10 (P)	1	300	134.1	BL
	2	250	>1,000.0	未破断
	3	350	>1,000.0	未破断
B-S10 (N)	1	300	13.8	FR
	2	250	59.4	FR
	3	210	128.6	FR
	4	175	>1,000.0	未破断
B-C04 (P)	1	300	65.3	BL
	2	250	273.4	BR
	3	350	36.6	BL
	4	210	>1,000.0	未破断
B-C04 (N)	1	300	74.7	FR
	2	250	203.8	FR
	3	350	23.9	FL
	4	210	>1,000.0	未破断

継手の溶接形状は、**写真-1**と**表-5**に示したように表面のビード幅と裏波ビードの幅の差は他の継手と比較して小さく、裏波ビード形状が比較的鋭い凸形状でアンダーカット（平均0.3mm）も生じている。このことから、裏波ビード側のアンダーカットによる疲労強度の低下はなかった、あるいは非常に小さかったと言える。

同じ継手において、板曲げ荷重下の疲労強度は、**図-7**に示した軸方向荷重下の疲労強度よりも、約1等級、すなわち約20~25%高い。JSSC指針では、板曲げ応力が生じる継手の疲労強度を評価する場合は板曲げ応力範囲に補正係数(4/5)を乗ずるとし



ており、板曲げ荷重下においても各試験体の疲労強度はD等級の疲労設計曲線を満足している。

以上の板曲げ疲労試験結果をまとめると、本研究で製作した片面横突合せ溶接継手の疲労強度は、JSSC 指針の補正係数を考慮しても軸方向疲労試験結果と同様のD等級を満足していた。疲労き裂発生位置はすべて引張応力が生じる面の溶接止端からであり、ビードの止端開き角が疲労強度に影響を与えたと言える。

#### 4. 応力解析

##### 4.1 試験体を対象とした解析

解析対象は、疲労試験に用いた試験体である。

ここでは、試験体幅方向中心での対称性から試験体の1/2モデルを作成した。S10継手では、表面の余盛と裏波ビードの中心位置のずれ(15mm)も考慮している。各試験体の溶接形状・寸法は、表-5に示した測定結果の平均値としている。C04継手の裏波ビードの止端に生じていたアンダーカットは、その測定結果に基づき開口幅1.4mm、深さ0.3mmの半楕円形でモデル化した。なお、疲労試験体で生じた角変形は考慮していない。

以上のモデルを対象に、疲労試験結果と応力集中の影響因子である溶接形状・寸法による応力集中係数との比較を行うために、プリポストにFEMAP、ソルバにCALEEMを用いて3次元弾性FEM解析を行った。用いた要素はソリッド要素、ヤング率は $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比は0.3とした。各モデルの溶接止端近傍の要素寸法は0.1mmとしている。例として、S10モデルの側面から見た要素分割図を図-10に示す。

応力解析で得られた表面余盛側と裏波ビード側の応力集中係数(止端部近傍の最大の主応力を公称応力で除した値)を表-8に示す。板曲げによる応力集中係数は、裏波ビード側で正曲げ、表面余盛側では負曲げでの解析結果である。

軸方向力を受けるS01モデルでは、溶接止端形状が比較的鋭い(曲率半径が小さい、開き角が小さい)裏波ビードの止端で応力集中係数が高くなっている。そのため、表-6に示したようにA-S01試験体の疲労破壊の起点も裏波ビードの止端となったと考えられる。S01(F)モデルでは、同じ裏波ビード形状であるにも関わらず、S01モデルに比べて応力集中が10%程度小さくなっている。これは、表面の余盛を削除しているために板厚方向の中立軸が偏心し、軸力によって生じる板曲げによ

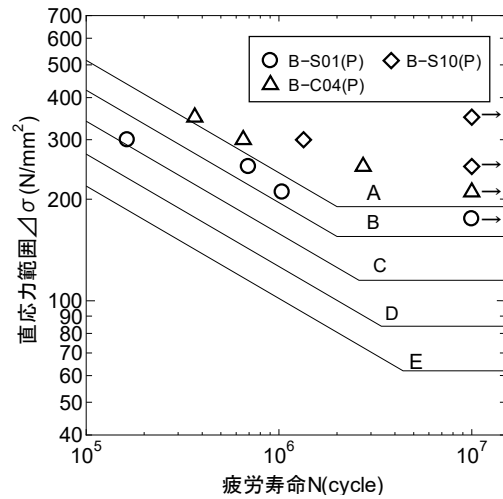


図-8 正曲げ試験の応力範囲と疲労寿命の関係

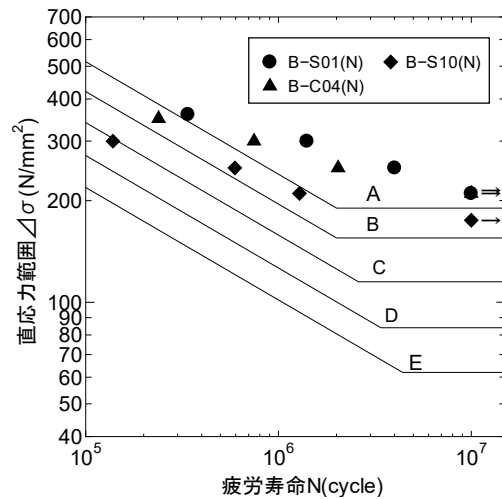


図-9 負曲げ試験の応力範囲と疲労寿命の関係

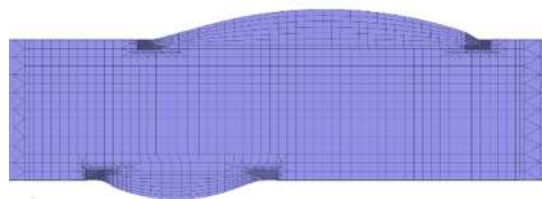






図-10 S10モデルの側面から見た要素分割図

表-8 表面余盛側と裏波側の応力集中係数

解析モデル		応力集中係数			
		FL	FR	BL	BR
軸方向力	S01	1.29	1.30	2.57	2.56
	S01(F)	—	—	2.31	2.32
	S10	1.53	2.12	1.61	1.66
	C04	1.59	1.57	2.76	2.74
	C12	1.80	1.82	2.03	1.98
板曲げ	S01	1.28	1.29	2.20	2.20
	S01(F)	—	—	2.44	2.45
	S10	1.22	2.21	1.62	1.12
	C04	1.54	1.52	2.40	2.39
	C12	1.76	1.78	1.60	1.56

り裏波ビード側に付加的な圧縮応力が生じるためと考えられる。S10 モデルでは、表面余盛の R 側 (FR) で止端形状が鋭いため、そこで応力集中係数も高くなっている。しかし、疲労試験における破壊起点は裏波ビード側であり、一致していない。C04 モデルでは、裏波ビード側で応力集中係数が高くなっているものの、疲労試験における破壊起点は表面余盛側の溶接止端であった。C12 モデルでは、各溶接止端での応力集中係数に顕著な差はないものの、裏波ビード側でやや高くなっている。しかし、疲労試験における破壊起点は表面余盛側であった。以上のように、疲労試験における破壊起点と応力集中係数に関する関係性は認められない。応力集中係数が高い順にモデルを並べると、C04 (2.76), S01 (2.57), S01(F) (2.32), S10 (2.12), C12 モデル (2.03) となるが、とに示したように試験体の種類による疲労強度の明確な差は認められなかった。これは、3.2 節で示したように試験体に多少の角変形が生じており、この角変形による板曲げ応力が影響し、応力集中係数と疲労破壊起点あるいは疲労強度との規則的な関係が見られなかったと考えられる。


板曲げを受ける S01 モデルの応力集中係数は、軸方向力を受ける S01 モデルと比べて、表面余盛側ではほぼ同じとなっているが、裏波ビード側では 15%程度低くなっている。また、S01(F)モデルの裏波ビードと比べても 10%程度低くなっている。これは、裏波ビード止端上には表面の余盛があるため、板が厚くなったような効果が生じたためと考えられる。同様に、C04 と C12 モデルも軸方向力を受ける場合に比べて裏波ビード止端の応力集中係数が低くなっている。S10 モデルでは、表面の余盛中心と裏波ビード中心がずれており (参照)、表面余盛 L 側の溶接止端 FL と裏波ビード R 側の溶接止端 BR で試験体厚が大きくなっている。そのため、これらの位置で板曲げを受ける場合の応力集中係数が軸方向力を受ける場合よりも小さくなっている。正曲げでの疲労強度はに示したように、S10, C04, S01 試験体の順で高い一方、応力集中係数が高い順にモデルを並べると、C04 (2.40), S01 (2.20), S10 モデル (1.62) となる。C04 モデルと S01 モデルは逆転しているが、疲労強度と応力集中係数にはある程度相関があると言える。負曲げでの疲労強度の順番も応力集中係数と対応している。以上のように、板曲げにおいては、応力集中係数が低い溶接止端形状ほ

ど疲労強度が高くなる傾向が認められる。

## 4.2 片面裏波溶接継手の応力集中に対する諸因子の影響

### (1) 解析対象

以上のように、本実験における軸方向疲労試験および板曲げ疲労試験の結果と応力集中係数には明確な関連性は見られなかった。しかしながら一般には溶接継手の疲労強度は溶接止端の応力集中係数にほぼ反比例するとされている。この溶接止端の応力集中係数は、溶接形状・寸法に依存する。ここでは、軸方向力あるいは板曲げを受ける裏波ビードを有する片面横突合せ溶接継手の応力集中に対する諸因子の影響について 4.1 節と同じ FEM 解析手法で検討する。溶接止端の曲率半径は有効切欠き応力を求める際に用いられる 1.0mm とし、溶接形状は半楕円形でモデル化した。板厚は 16mm である。

各モデルの溶接部寸法を表-9 に、それらの定義をに示す。シリーズ I は、表面と裏面の溶接形状・寸法が同じ両面溶接のモデルであり、片面溶接との比較のために設定した。ビード幅と余盛高さの組み合わせは、ビード幅 8mm, 12mm, 16mm, 20mm とし、高さはそれぞれのビード幅に対し 1mm, 3mm, 5mm としている。シリーズ II は、表面の余盛のビード幅が 20mm で高さを 3mm に固定し、裏波ビードの幅と高さを変化させたモデルである。裏波ビードの幅と高さの組み合わせは、ビード幅 8mm と 12mm については高さ 1mm, 2mm, 3mm。ビード幅 16mm については高さ 2mm, 3mm, 4mm としている。シリーズ III は、表面の余盛と裏波ビードの中心のずれが応力集中に及ぼす影響を検討するためのモデルである。その際、表面の余盛についてはビード幅 20mm ・高さ 3mm、裏波ビードについてはビード幅 8mm ・高さ 3mm で固定している。

### (2) 溶接形状・寸法の影響




シリーズ I のモデルの解析で求めた応力集中係数と溶接形状・寸法の間関係をに示す。は軸方向力を作用させた場合の結果であり、表面と裏面の溶接形状・寸法が同じであるため、4箇所溶接止端の応力集中係数は同じである。は板曲げの結果である。軸方向力の場合には余盛幅が大きいほど、余盛高さが大きいほど応力集中係数も高くなっている。板曲げの場合も軸方向力の場合と同じであるが、応力集中係数が高



表-9 解析モデルの溶接形状と寸法

モデルの種類	モデル No.	溶接形状・寸法(mm)				表面余盛中心と裏波ビード中心の距離 e
		表面余盛側		裏波ビード側		
		ビード幅 b1	余盛高さ h1	ビード幅 b2	ビード高さ h2	
シリーズ I	A88-1	8	1	8	1	0
	A88-3	8	3	8	3	0
	A88-5	8	5	8	5	0
	A1212-1	12	1	12	1	0
	A1212-3	12	3	12	3	0
	A1212-5	12	5	12	5	0
	A1616-1	16	1	16	1	0
	A1616-3	16	3	16	3	0
	A1616-5	16	5	16	5	0
	A2020-1	20	1	20	1	0
シリーズ II	A2020-3	20	3	20	3	0
	A2020-5	20	5	20	5	0
	B208-1	20	3	8	1	0
	B208-2	20	3	8	2	0
	B208-3	20	3	8	3	0
	B2012-1	20	3	12	1	0
	B2012-2	20	3	12	2	0
	B2012-3	20	3	12	3	0
	B2016-2	20	3	16	2	0
	B2016-3	20	3	16	3	0
シリーズ III	B2016-4	20	3	16	4	0
	C208-0	20	3	8	3	0
	C208-2	20	3	8	3	2
	C208-4	20	3	8	3	4
	C208-6	20	3	8	3	6
	C208-8	20	3	8	3	8
	C208-10	20	3	8	3	10

モデル No.の説明

A (B, C) ○△□

A : シリーズ I, B : シリーズ II, C : シリーズ III

○ : b1, △ : b2, □ : h2 または e

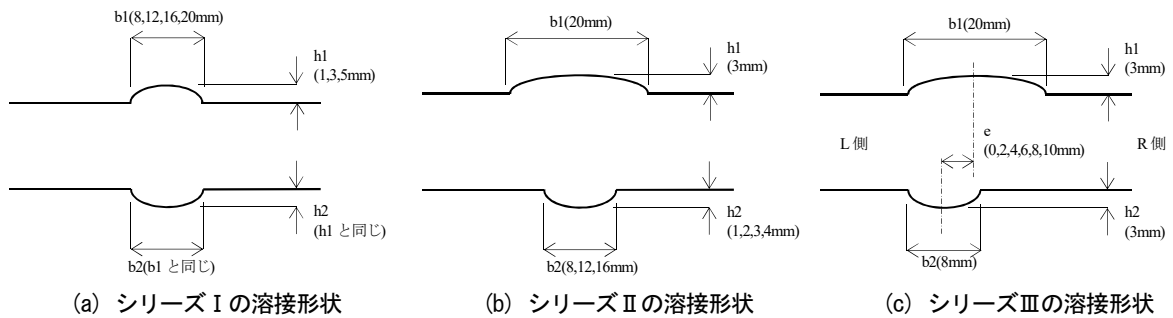


図-11 解析モデルの溶接形状の定義

くなる割合は軸方向力の場合よりも小さい。道路橋示方書の余盛高さの規定を満たす裏波ビード形状での応力集中係数は、軸方向力で 2.5 程度、板曲げで 2.2 程度以下である。

### (3) 裏波ビードの溶接形状・寸法の影響

シリーズ II のモデルの解析で求めた裏波ビードの止端の応力集中係数と溶接形状・寸法の間関係を図-13 に示す。軸方向力の場合には、裏波ビードの幅と高さが大きくなっても表面余盛側の応力集中係数はほとんど変化しておらず (図-13(a)), シ

リーズ I の A2020-3 (余盛幅 20mm, 余盛高さ 3mm) の応力集中係数と同程度である。このことから、軸方向力での表面余盛側の応力集中係数は裏波ビード形状の影響をほとんど受けないと言える。一方、裏波ビードの止端の応力集中係数は、そのビード高さが小さいと表面余盛側よりも小さいが、ビード高さが大きくなるにしたがってシリーズ I と同様に応力集中係数も高くなっている (図-13(b))。B2016 (裏波ビードの幅 16mm) では、裏波ビードの高さ 4mm の応力集中係数は、表面余

盛側が 2.52, 裏波ビード側が 2.58 であり, 表面余盛側と裏波ビード側がほぼ同じとなっている. 道路橋示方書の余盛高さの規定は, ビード幅 16mm の場合は余盛高さ 4mm であり, この余盛高さの範囲内であればシリーズ I の道路橋示方書の規定を満たす場合の応力集中係数とほとんど変わらない. 板曲げの場合は (図-13(c)), 軸方向力の裏波ビード

の止端の応力集中係数と同様に, 裏波ビードの幅と高さが大きいほど高くなっているが, シリーズ I と比較して応力集中係数は若干低い.

#### (4) 溶接位置のずれの影響モデルで得られた応力集中係数

シリーズIIIの溶接位置のずれの影響モデルで得られた応力集中係数を図-14 に示す. 軸方向力の

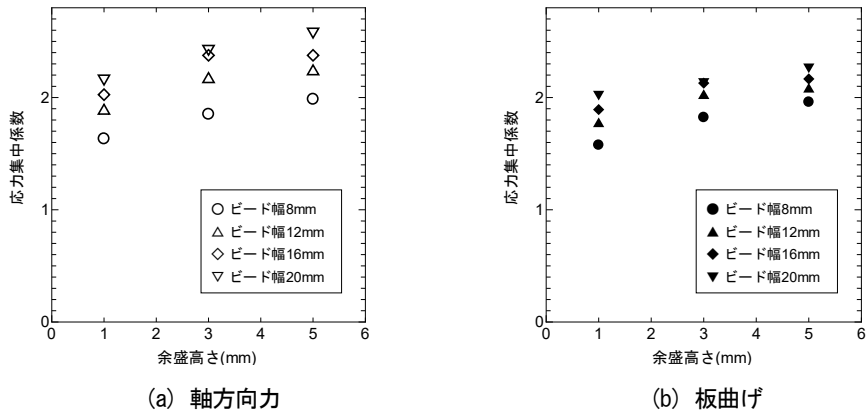


図-12 シリーズ I の応力集中係数と溶接形状・寸法との関係

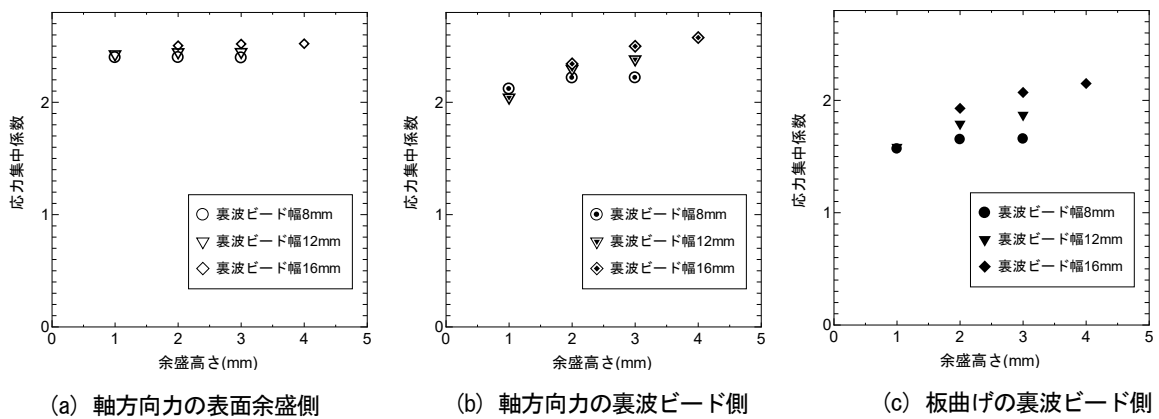


図-13 シリーズ II の応力集中係数と溶接形状・寸法との関係

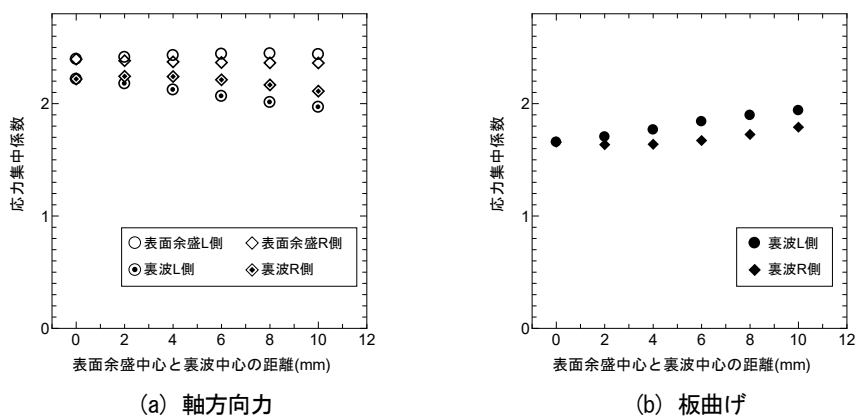


図-14 シリーズ III の応力集中係数と溶接位置のずれとの関係

場合 (図-14(a)), 表面余盛側の応力集中係数は裏波ビードの位置によってほとんど変化しておらず, 表面余盛側の応力集中係数は裏波ビードの位置の影響をほとんど受けないと言える. 裏波ビードの止端の応力集中係数は, 裏波ビードの位置が中心から離れるにしたがって若干小さくなっている. 板曲げでは (図-14(b)), 裏波ビードの位置が中心から離れるにしたがって応力集中係数が若干高くなっている. 以上より, 裏波ビードの止端の応力集中係数に対する溶接位置のずれの影響は小さいと言える.

#### (5) 良好な裏波ビード形状

解析結果から, 裏波ビードを有する片面溶接の裏波ビード止端の応力集中係数は, 裏波ビードの高さが大きくなるにしたがって高くなり, 裏波ビードの幅が 16mm, 高さが 4mm で, 両面溶接での道路橋示方書の余盛高さの規定を満たす場合の応力集中係数とほぼ同じとなる. これ以上のビード高さになると応力集中係数が高くなり, 疲労強度の低下につながると考えられる. 良好な裏波ビードの溶接形状・寸法を両面溶接での応力集中係数との比較で考えると, 道路橋示方書の余盛高さの規定である, ビード幅が 15mm 以下の場合の余盛高さは 3mm 以下, 15mm を超え 25mm 以下の場合には 4mm 以下の規定を適用するのがよいと考える. また, 裏波ビード側だけでなく表面余盛側にも適用できると考えられる. ただし, ここでは裏波ビードの幅が 8mm 以上を対象としており, さらにビード幅が小さい場合は別途検討が必要である. なお, 本研究で使用した溝付きの裏当て材を用いて片面溶接を行うと, 裏波ビードの幅は 8mm 以上となることがほとんどである.

#### 5. まとめ

裏波ビードを有する片面横突合せ溶接継手の疲労強度と良好な裏波ビード形状の定義を明らかにすることを目的として, 開先形状, ルートギャップ, 溶接方法をパラメータとして製作した片面溶接継手試験体の軸方向疲労試験と板曲げ疲労試験を行った. また, 様々な溶接形状の解析モデルを作成し, それらの応力解析を行った. ここで得られた主な結果は以下の通りである.

(1) 疲労試験により, 表面余盛側と裏波ビード側の溶接形状が道路橋示方書の規定を満足する場合だけでなく, 裏波ビードの高さが規定を超える場合でも, JSSC 指針で示されている良好

な形状の裏波ビードを有する横突合せ溶接継手の疲労強度等級 D を満足した.

- (2) 疲労試験体を模擬したモデルの応力解析の結果, 軸方向力下では応力集中係数と疲労破壊起点が異なる場合があるが, 板曲げでは応力集中係数が小さいほど疲労強度が高いという結果が得られた. 軸方向力で応力集中係数と疲労強度が対応しないのは, 試験体に角変形が生じていた影響の可能性が考えられる.
- (3) 裏波ビードの溶接形状・寸法を変化させたモデルによる応力解析の結果, 表面余盛側の応力集中は裏波ビードの溶接形状・寸法にほとんど影響されない. 裏波ビードの止端の応力集中係数はビード高さが大きくなると高くなり, 疲労強度の低下につながるものと考えられる.
- (4) 裏波ビードを有する片面溶接は, 疲労強度の確保のために, 裏波ビード側も道路橋示方書の開先溶接の余盛形状の規定を適用するのがよい.

なお, 本研究では故意に裏波ビード形状を凸とした継手や止端の開き角が小さい継手も製作した. ただし, 適切な条件で溶接を行えば, 道路橋示方書の外部さず検査の規定を満足する良好な裏波ビード形状が得られる. 特に, 止端の開き角が小さい場合にはオーバーラップの有無の判断が難しいため, 溶接方法やルートギャップに応じた適切な溶接条件で施工し, 止端の開き角が大きい裏波ビード形状とする必要がある.

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会: 鋼道路橋施工便覧, p.136, p.138, 平成 27 年 3 月.
- 2) 鋼構造協会疲労設計指針改定小委員会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説 一付・設計例ー 2012 年改定版, 技報堂出版, p.550, 2012.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2017.
- 4) American Association of State Highway and Transportation Officials: Standard Specifications for Highway Bridges, 1992.
- 5) Hobbacher, A.: IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, WRC Bulletin 520, The Welding Research Council, New York, 2009.