

平成30年度 橋梁技術発表会

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—

技術委員会 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

- 研究の背景
- 研究の目的
- 裏波を有する片面溶接
- 試験体
- 疲労試験
- 応力解析
- まとめ

2

○研究の背景

- 研究の目的
- 裏波を有する片面溶接
- 試験体
- 疲労試験
- 応力解析
- まとめ

3

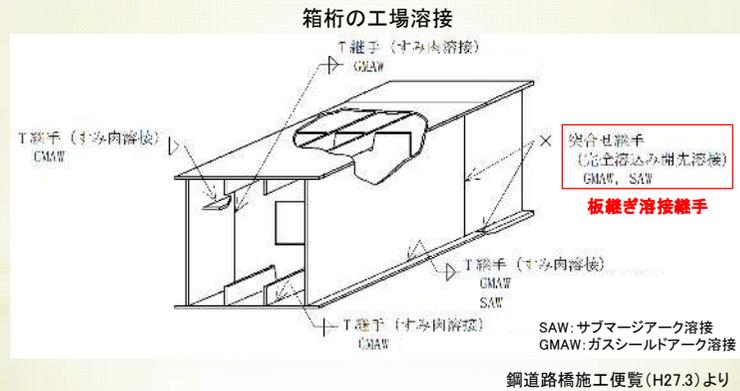
研究の背景

- 鋼橋の疲労損傷の多くは「溶接継手部」で生じている。
- 溶接継手には数多くの種類があるが、横突合せ溶接継手は最も基本的な溶接継手である。

4

研究の背景

横突合せ溶接継手の例

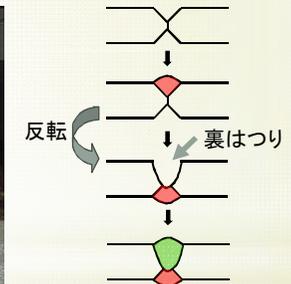


5

研究の背景

横突合せ溶接継手の例

箱桁の工場突合せ溶接(板継ぎ溶接)



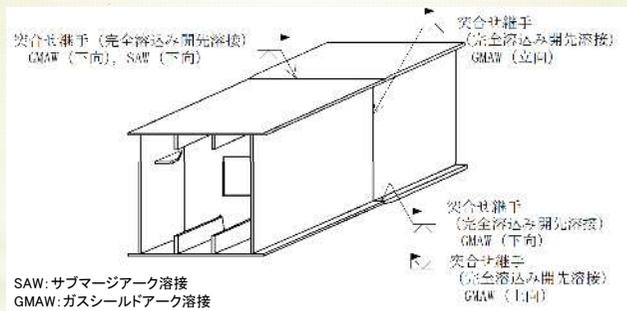
・工場製作では裏はつりを伴う両面からの完全溶込み溶接(下向姿勢)が容易

6

研究の背景

横突合せ溶接継手の例

箱桁の現場突合せ溶接



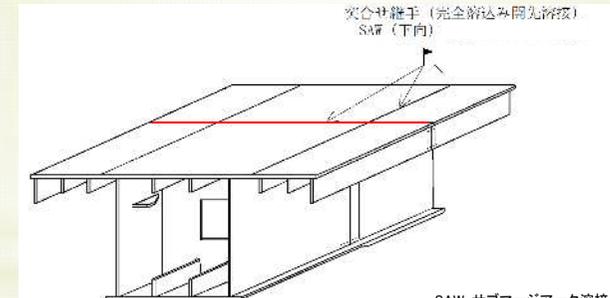
鋼道路橋施工便覧(H27.3)より

7

研究の背景

横突合せ溶接継手の例

鋼床版桁の現場突合せ溶接



SAW: サブマージーク溶接
鋼道路橋施工便覧(H27.3)より

8

研究の背景

鋼床版デッキプレートの現場突合せ溶接
サブマージアーク溶接



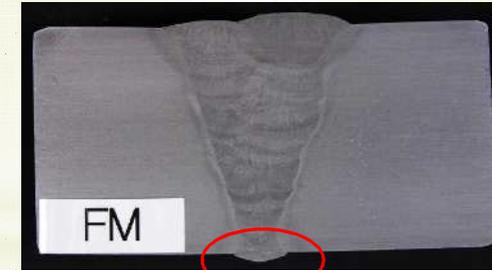
箱桁下フランジの現場突合せ溶接
ガスシールドアーク溶接



9

研究の背景

片面溶接のマクロ試験片



裏波ビード

10

研究の背景

JSSC 指針

(b) 横突合せ溶接継手

継手の種類	強度等級 ($\Delta \sigma_f$ (N/mm ²))	
1. 余盛り削除した継手	B(155)	
2. 止端仕上げした継手	C(125)	
3. 非仕上げ継手	(1) 両面溶接	D(100)
	(2) 良好な形状の裏波を有する片面溶接	D(100)
	(3) 裏当て金付き片面溶接	F(65)
	(4) 裏波の形状を確かめることができない片面溶接	F(65)

良好な形状の裏波を有する継手の疲労強度等級



両面突合せ溶接継手の疲労試験結果から類推
裏波を有する片面溶接継手の疲労試験データは少ない
良好な裏波形状の定義がない

11

研究の背景

道示 II 8.3.2 (H29.3)

(b) 横方向突合せ溶接継手

方向	継手の形式	溶接の種類	溶接及び構造の細部形式	溶接部の状態	着目	強度等級 ($\Delta \sigma_f$ (N/mm ²))
横方向	突合せ溶接継手	1. 完全溶込み 開先溶接	(1) 両面溶接(裏はつりあり)	1) 余盛り削除	—	D (100)
				2) 止端仕上げ	止端破壊	D (100)
		3) 非仕上げ		D (100)		
		2. 片面溶接	(2) 裏当て金がなく良好な形状の裏波を有する	1) 非仕上げ	止端破壊	D (100)

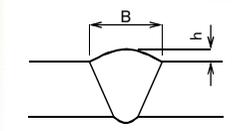
12

研究の背景

道路橋示方書・同解説Ⅱの開先溶接の余盛りの規定

開先溶接の余盛り高さ (mm)

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



裏波ビードに対する明確な基準がない

13

○研究の背景

○研究の目的

○裏波を有する片面溶接

○試験体

○疲労試験

○応力解析

○まとめ

14

研究の目的

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、

- ・裏波形状を有する片面突合せ溶接継手の試験体に対して軸引張荷重と板曲げ荷重による疲労試験及び応力解析を実施
- ・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実施

により、良好な裏波ビード形状の規格値として、道路橋示方書に示されている、開先溶接の余盛りの規定の適用について検討した。

15

○研究の背景

○研究の目的

○裏波を有する片面溶接

○試験体

○疲労試験

○応力解析

○まとめ

16

裏波を有する片面溶接

鋼床版デッキプレートなどの現場突合せ溶接継手(完全溶込み溶接)

↓
部材の反転が困難。

↓
両面溶接の場合、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。

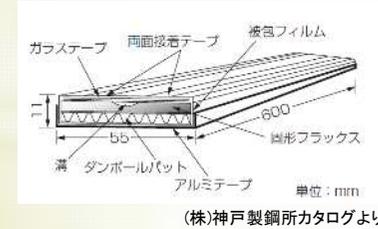
↓
溶接品質及び施工性を考慮して、裏はつりを伴わない片面からの完全溶込み溶接(片面溶接)が採用される。

17

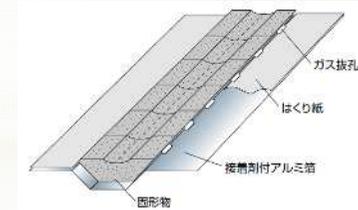
裏波を有する片面溶接

裏当材の種類

- ・ 材質・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、施工条件に合わせて選択。
- ・ 裏波ビードが形成されやすいように、幅10~12mm、深さ1mm程度の溝を有する。



(株)神戸製鋼所カタログより

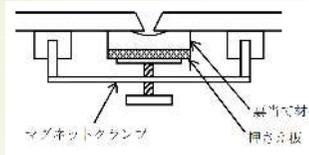


日鐵住金溶接工業(株)カタログより

18

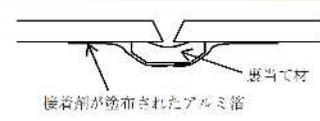
裏波を有する片面溶接

片面溶接の施工方法 裏当て材の取付け



裏当て材の密着が悪いと良好な裏波ビードが形成されないので注意！

鋼道路橋施工便覧(H27.3)より

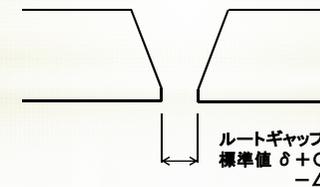


19

裏波を有する片面溶接

片面溶接の開先形状

- ・ 開先角度やルートギャップなどの開先形状・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。**

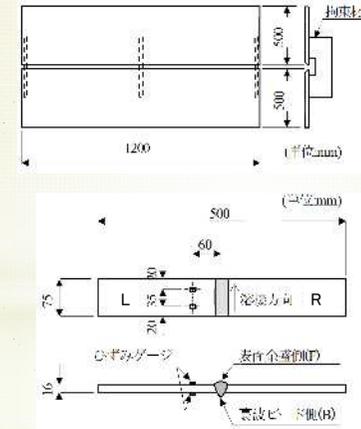


20

- 研究の背景
- 研究の目的
- 裏波を有する片面溶接
- 試験体
- 疲労試験
- 応力解析
- まとめ

試験体形状

板厚16mm SM490YA



↓ 溶接後、疲労試験体を切り出し

開先形状・溶接方法

試験体No. : A-S01
 ↳ ルートギャップ
 ↳ 溶接方法
 ↳ 荷重種類

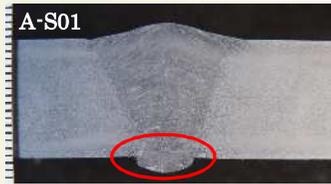
	試験体No.	開先角度 θ (°)	ルートギャップ G (mm)	溶接方法	開先形状
軸引張荷重	A-S01	45	1	サブマージ アーク溶接 (SAW)	
	A-S10	45	10	サブマージ アーク溶接 (SAW)	
	A-C04	30	4	マグ溶接 (CO ₂)	
	A-C12	30	12	マグ溶接 (CO ₂)	
板曲げ荷重	B-S01	45	1	サブマージ アーク溶接 (SAW)	
	B-S10	45	10	サブマージ アーク溶接 (SAW)	
	B-C04	30	4	マグ溶接 (CO ₂)	

溶接条件・溶接材料

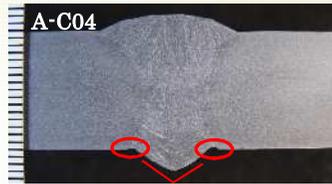
継手名称	溶接方法	パス数	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱量 (J/mm)
S01	SAW	1	760	30	24	5,700
S10	SAW	3	700~730	32	22~30	5,169~6,371
C04	CO ₂	3	200~300	28~36	23~30	1,461~2,160
C10	CO ₂	3	200~320	28~38	10~25	2,918~3,360

溶接方法	ワイヤ		フラックス		充填材
	規格	径	規格	粒度	径×長さ
SAW	JIS Z 3351 YS-S6該当	φ4.8mm	JIS Z 3352 SFMS1該当	20×200	φ1mm×1mm
CO ₂	JIS Z 3312 YGW11	φ1.2mm	—	—	—

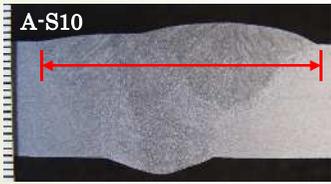
軸引張試験体の溶接部の形状



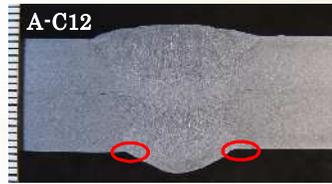
裏波の止端部の形状が悪い



裏波にアンダーカットあり(深さ0.3mm程度)



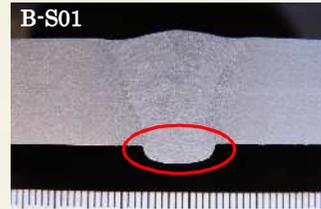
仕上げが2パスのため、表側余盛り幅が大きい



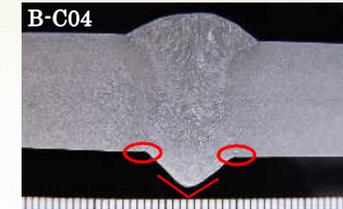
裏波にアンダーカットあり

25

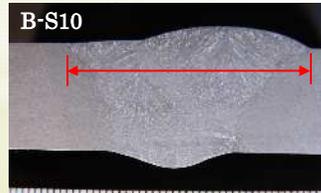
板曲げ試験体の溶接部の形状



裏波の止端部の形状が悪い



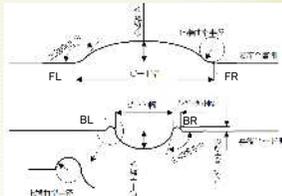
裏波にアンダーカットあり(深さ0.3mm程度)



仕上げが2パスのため、表側余盛り幅が大きい

26

溶接部の形状評価



形状は試験体寸法の平均値、0内は標準偏差。
□内は、各モデルの特徴的な形状の数値を示す。

継手名称	部位	測定数	表面余盛り幅 裏波ビード幅 (mm)	表面余盛り高さ 裏波ビード高さ (mm)	遮示の余盛り高さ 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	90	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	90	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	30	15.2 (1.1)	2.9 (0.4)	4.0	1.9 (0.9)	149 (6)
	BR					2.1 (1.3)	149 (6)

27

- 研究の背景
- 研究の目的
- 裏波を有する片面溶接
- 試験体
- 疲労試験
- 応力解析
- まとめ

28

疲労試験方法

軸方向疲労試験

試験機: 荷重能力500kN 油圧サーボ式材料試験機
 繰返し速度: 2.5~16Hz
 応力範囲: 125,160,200,250N/mm²
 下限荷重: 10kN(公称応力8.3N/mm²)



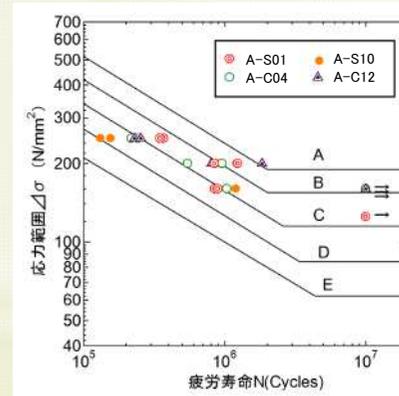
板曲げ疲労試験

試験機: 荷重能力100kN 油圧サーボ式材料試験機
 による4点曲げ
 繰返し速度: 3~9Hz
 応力範囲: 170~360N/mm²
 下限荷重: 1kN(公称応力18.8N/mm²)



29

軸方向疲労試験結果

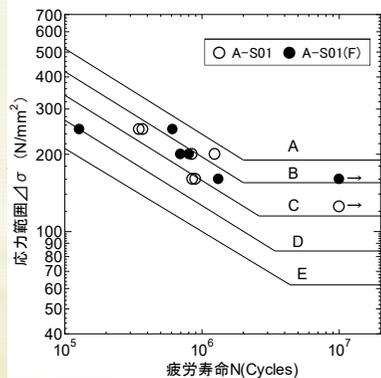


- ・疲労破壊起点は全て溶接止端である。
- ・A-S01、A-S10試験体は裏波ビード止端が疲労破壊起点である。
- ・A-C04、A-C12試験体は表面余盛止端が疲労破壊起点である。
- ・試験体の種類による疲労強度の差はあまりない。
- ・全ての試験体でJSSC指針のD等級を満足する。

30

軸方向疲労試験結果

表面余盛の影響



表面余盛有

表面余盛無

A-S01

A-S01(F)

疲労強度に顕著な差は認められない



疲労強度に対する表面余盛削除の影響はない

31

軸方向疲労試験結果

溶接時の角変形の影響

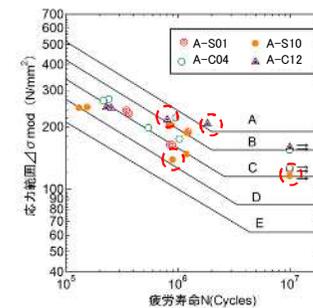
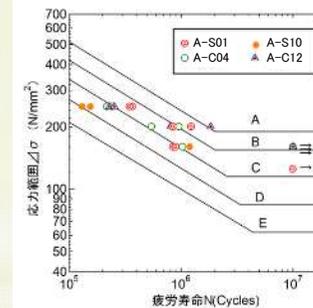


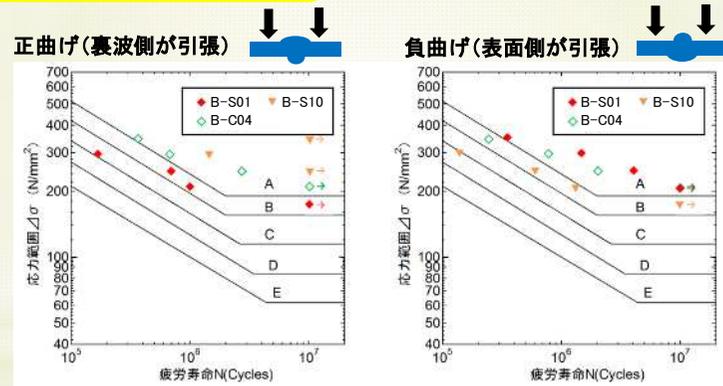
図 軸方向荷重の疲労試験結果

図 板曲げを考慮して整理した軸方向荷重の疲労試験結果

- ・若干差は認められるが、明確なものではない(今後の課題)。
- ・板曲げを考慮しても全ての試験体でJSSC指針のD等級を満足する。

32

板曲げの疲労試験結果

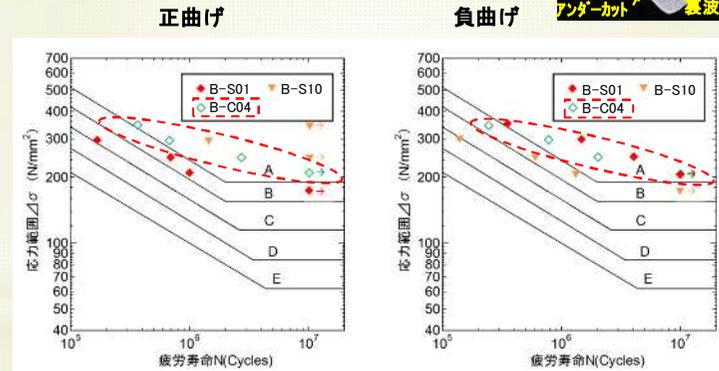


疲労強度 B-S10>B-C04>B-S01 疲労強度 B-S01>B-C04>B-S10

- ・疲労破壊起点は引張側の溶接止端である。
- ・全ての試験体でJSSC指針のC等級を満足する。

33

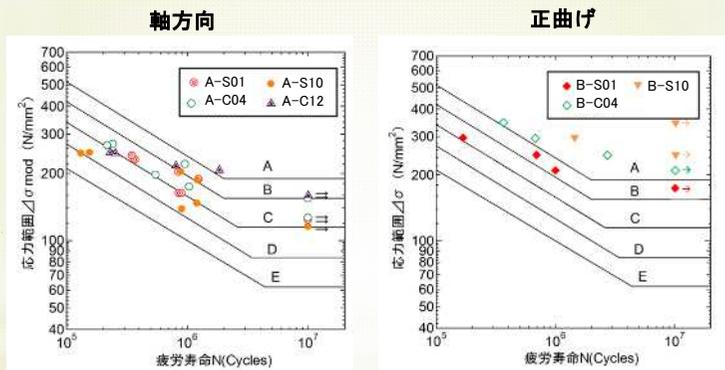
板曲げの疲労試験結果



- ・C04(マグ溶接 ルートギャップ4mm)裏波ビードの鋭い凸形状及びアンダカットによる疲労強度の低下はほとんどない。

34

軸方向と板曲げの疲労試験結果比較



- ・板曲げ荷重下の疲労強度は軸方向荷重下よりも約1等級高い。
- ・また、JSSC指針の補正係数(応力範囲×4/5)を考慮してもD等級を満足する。

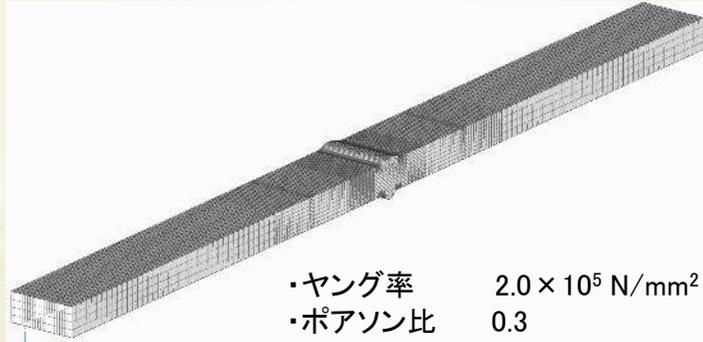
35

- 研究の背景
- 研究の目的
- 裏波を有する片面溶接
- 試験体
- 疲労試験
- 応力解析
- まとめ

36

応力解析

- ・プリポスト(モデル作成)ツール FEMAP
- ・解析ツール CAEFEM

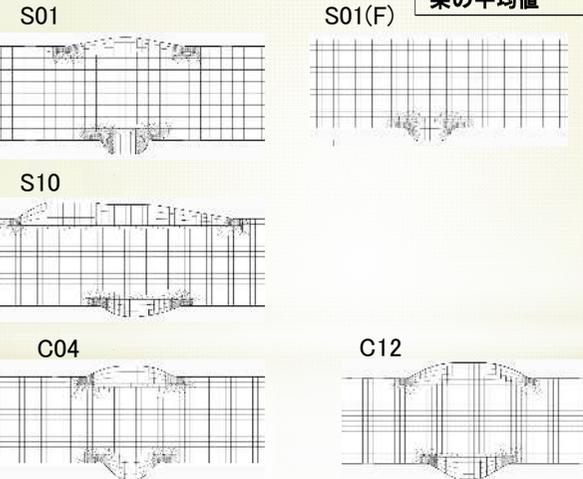


- ・ヤング率 $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
- ・ポアソン比 0.3

37

解析モデル

- ・溶接止端部近傍要素寸法 0.1mm
- ・溶接形状は疲労試験体の測定結果の平均値

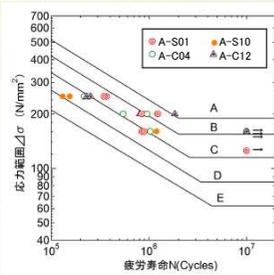


38

解析結果(応力集中係数)

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

解析モデル	応力集中係数				疲労破壊の起点
	FL	FR	BL	BR	
S01	1.29	1.30	2.57	2.56	裏面
S01(F)	—	—	2.31	2.32	裏面
S10	1.53	2.12	1.61	1.66	裏面
C04	1.59	1.57	2.76	2.74	表面
C12	1.80	1.82	2.03	1.98	表面



■ : 応力集中係数の最大値

■ : 応力集中係数の最大値と疲労破壊起点が不一致

応力集中係数と疲労強度に明確な関連性はない(角変形の影響)

39

解析結果(応力集中係数)

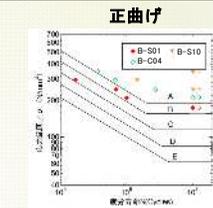
応力集中係数:止端部近傍の最大の主応力を公称応力で除した値

解析モデル	板曲げ	応力集中係数				疲労破壊の起点
		FL	FR	BL	BR	
S01	正曲げ	—	—	2.20	2.20	裏面
	負曲げ	1.28	1.29	—	—	表面
S01(F)	正曲げ	—	—	2.44	2.45	裏面
	負曲げ	1.22	2.21	—	—	表面
C04	正曲げ	—	—	2.40	2.39	裏面
	負曲げ	1.54	1.52	—	—	表面

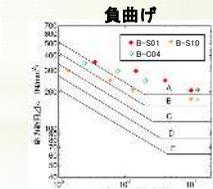
■ : 応力集中係数の最大値



応力集中係数が低い溶接止端形状ほど疲労強度が高い傾向あり



疲労強度 B-S10 > B-C04 > B-S01

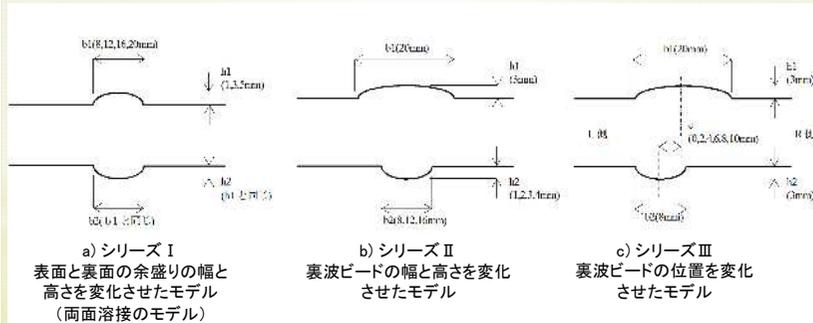


疲労強度 B-S01 > B-C04 > B-S10

40

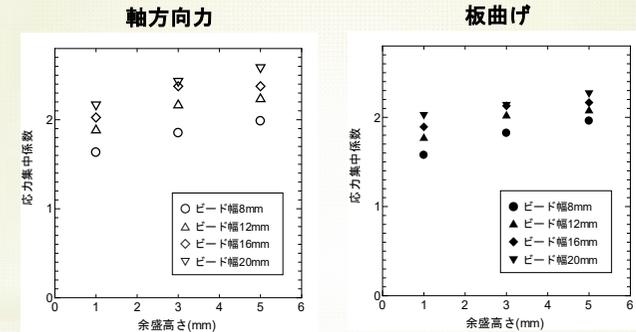
応力解析(応力集中係数におよぼす溶接形状と寸法)

- 表面余盛と裏波ビードの幅と高さを変化させた3タイプの溶接部モデルで解析
- 止端部の曲率半径は1.0mm、溶接形状は反楕円形



41

応力解析結果 シリーズ I

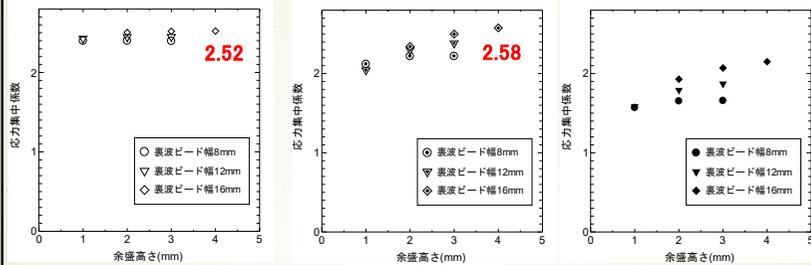


- 余盛り高さ及び余盛り幅が大きくなると応力集中係数も大きくなる。
- 板曲げの方が応力集中係数が高くなる割合が小さい。
- 道示の規定を満足する形状での応力集中係数は、軸方向力力で2.5程度、板曲げで2.2程度以下である。

42

応力解析結果 シリーズ II

軸方向力の表面余盛側 軸方向力の裏波ビード側 板曲げの裏波ビード側

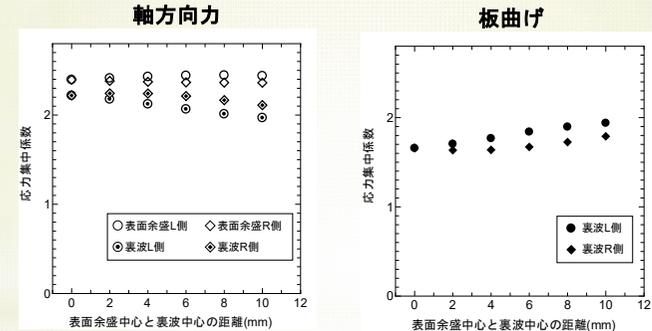


- 表面余盛側の応力集中係数は裏波ビードの幅と高さに影響を受けない。
- 裏波ビード側の応力集中係数は裏波ビードの高さが大きいほど大きくなる。
- 裏波ビード側の応力集中係数の最大値はシリーズ I のモデルの最大値と同等である。

片面溶接の裏波ビード形状は両面溶接のビード形状と同等に評価できると考えられる

43

応力解析結果 シリーズ III



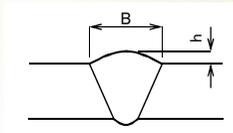
- 表面余盛側の応力集中係数は裏波ビードの位置によってほとんど変化しない。
- 裏波ビード止端の応力集中係数は、軸方向力では裏波ビードの位置が中心から離れるに従って若干小さくなり、板曲げでは若干大きくなる

44

応力解析結果からの良好な裏波ビード形状

道路橋示方書・同解説Ⅱの開先溶接の余盛りの規定

開先溶接の余盛り高さ (mm)	
ビード幅(B)	余盛り高さ(h)
$B < 15$	$h \leq 3$
$15 \leq B < 25$	$h \leq 4$
$25 \leq B$	$h \leq (4/25) \cdot B$



裏波ビードにも上記規定を適用しても問題ないと考えられる

ただし、裏波ビードの幅 $\geq 8\text{mm}$ が対象。
溝付きの裏当てを用いて適切な片面溶接の施工を行えば、
裏波ビードの幅は 8mm 以上となるのがほとんどである。

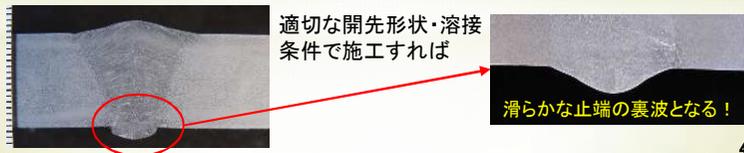
45

- 研究の背景
- 研究の目的
- 裏波を有する片面溶接
- 試験体
- 疲労試験
- 応力解析
- まとめ

46

まとめ

- ① 裏波の止端部の形状が悪い場合や、裏波の余盛り幅に対し裏波の高さが大きい場合でも、**JSSC指針のD等級は満足する。**
- ② 止端部の応力集中係数は、**余盛りの幅と高さの影響を受ける。**
良好な裏波ビードの定義(裏波ビードの溶接形状の規格値)として、**道路橋示方書・同解説Ⅱの開先溶接の余盛りの規定を適用しても問題ない**と考える。
- ③ ただし、適切な開先形状や溶接条件(電流・電圧・速度)で施工すれば止端の開き角が大きい滑らかな裏波を形成できるので、**滑らかな裏波となるように施工すべきである。**



47

ご清聴ありがとうございました。

48