

# 薄板溶接重ね継手部の強度評価

## Basic Study on Static Strength of Lap Joint

九州工業大学 大学院工学研究院

教授 寺崎俊夫

○助教 北村貴典

### 1. 緒 言

近年の自動車産業における省エネルギー問題への取り組みとして、自動車車体の軽量化とこれに伴う高剛性化が必要不可欠となっている。自動車車体などの薄板構造物ではテイラードブランク製法が多く採用されている。テイラードブランク材の組立溶接ではプレス品同士の溶接となるため、継手が重ね継手形状となり、従来より抵抗スポット溶接が用いられてきた<sup>1)</sup>。抵抗スポット溶接は2つの電極で重ね部を挟む必要があり、これが構造設計の自由度を拘束し、軽量化、高剛性化の妨げとなっていた。レーザー溶接は重ね部の一方から溶接すればよいため、重ね部を挟む必要がなく、軽量化、高剛性化を実現するための構造を採用することが可能となった<sup>2)</sup>。

レーザー溶接された重ね継手の強度に関しては様々な研究者<sup>3-5)</sup>が種々の知見を得ているが、更に実用化を推し進めるためには力学的特性解明や強度向上のための新たな継手設計基準が求められている。著者らもレーザー溶接された重ね継手の強度に関する研究を行い、レーザー溶接重ね継手において、ビード1本で溶接した場合、接合部幅が板厚の2倍以上有れば疲労強度が変わらないことを明らかにした<sup>6)</sup>。また、静的強度についても薄板に関しては、ビードを2本平行に置いて静的強度試験と数値解析を行った結果、ビード間ピッチを板厚の3倍とれば強度が改善し、3倍以上とっても改善効果は変わらないことを明らかにした<sup>7-9)</sup>。しかしながら、ビード2本置いた場合、ビード1本置く場合に比べて、溶接時間は2倍かかり、効率的とはいえない。しかし、ビードを2本置く方が1本の場合に比べてはるかに強度が高くなる。そこで、重ね継手部を板厚の3倍を振幅とした鋸歯形状に溶接を施せば、ビードを2本平行に置いた場合に比べて、強度が同程度で溶接時間を短縮できるものと考えた。鋸歯形状を考えた場

合、波長を小さく細かい間隔で溶接すれば接合面積が大きくなり、強度が大きくなると考えられるが、溶接時間は長くなる。よって、出来る限り波長が長く粗い鋸歯形状が望ましい。以上より、本報ではビード2本平行に置いた重ね継手の接合部面積と同じ面積となる鋸歯形状溶接継手と、これより波長を大きくとった粗い鋸歯形状溶接重ね継手を作成し、静的引張強度に及ぼす鋸歯ビード形状の影響を検討することを研究目的とした。さらに応力集中を緩和させる目的で、鋸歯形状の頂点を丸くした、円弧ビード形状についても検討を行った。

また、レーザー溶接を重ね継手に適用する場合、溶接始終端部には引張せん断荷重だけでなく、引き剥がし荷重が作用することが考えられ、このような荷重に対しても強度評価を行う必要がある。引き剥がし荷重はある1方向の荷重でなく、360度あらゆる方向から作用することが考えられ、溶接継手形状は円状が望ましいと考える。溶接継手形状が円状の代表例として抵抗スポット溶接が考えられるが、前述のように重ね部を表裏両面から挟む必要があるため、継手設計の自由度が阻害されるなどデメリットが多く、片側から溶接可能なレーザー溶接の適用が望ましい。しかしながら、レーザー溶接では、スポット溶接状に円の中を埋める溶接は難しく、環状に溶接することになる。引き剥がし荷重が作用する場合の重ね継手の強度評価についてはJIS Z 3137で十字引張試験が規定されている。この規定によると、継手部は接合部で界面破断することなく、一方の板から接合部がプラグが抜けるように母材部で破断する、いわゆるプラグ破断となることが継手の具備すべき条件として規定されている。そこで、本研究ではレーザーを用いて環状に溶接した重ね継手の十字引張試験を行い、界面破断とプラグ破断の破断条件について検討した。

## 2. 鋸歯形状レーザ重ね継手の引張せん断強度

### 2.1 試験片作成

Fig.2-1 に静的引張試験に用いた試験片形状を示す。実験には板厚  $h=2.2\text{mm}$  の自動車用熱間圧延鋼板 SPHC を使用し、 $600^\circ\text{C}$  で1時間保持後、炉冷の残留応力焼鈍を施したものをを使用した。Table 2-1 に化学成分および機械的性質を示す。溶接は YAG レーザ溶接機を用いた。Fig.2-1 に示すように幅  $W=20\text{mm}$  に短冊状に切り出した。重ね代は  $20\text{mm}$  とした。溶接ビード形状として、Fig.2-1(a) に示すビード2本を狭いビード間隔 ( $p=1.4\text{mm}$ ) で平行に置いた重ね継手、Fig.2-1(b) に示すビード2本を広いビード間隔 ( $p=6.6\text{mm}$ ) で平行に置いた重ね継手および試験片幅  $20\text{mm}$  に波数3個 (以下では、 $n=3$  とする) の鋸歯形状溶接重ね継手 (Fig.2-1(c)) と試験片幅  $20\text{mm}$  に波数1.5個 (以下では、 $n=1.5$  とする) の鋸歯形状溶接重ね継手 (Fig.2-1(d)) を用いて静的引張試験を行った。

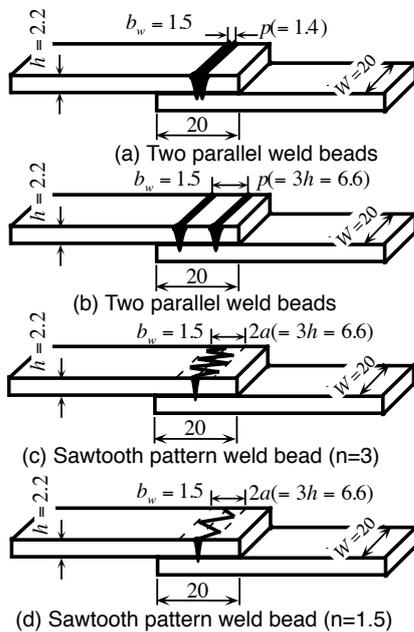


Fig.2-1 Various weld bead pattern of lap joint specimens

Table 2-1 Chemical compositions and mechanical properties

specimen	C	Si	Mn	P	S	$\sigma_Y$	$\sigma_T$
SPHC	0.019	<0.01	0.18	0.014	0.012	224	274

$\sigma_Y$ : Yield strength (MPa)    $\sigma_T$ : Tensile strength (MPa)

### 2.2 破断位置

重ね継手の静的引張強度試験を行った結果、全ての試験片において、荷重増加と共に継手部を中心に2枚の板の荷重軸のずれを一致させる向きに回転変

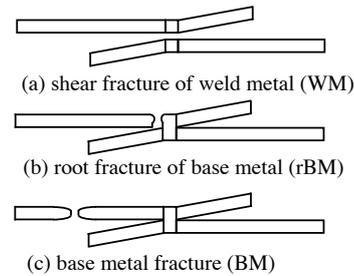


Fig.2-2 Types of fracture part

形が生じ、Fig.2-2 に示すような、3種類の破断位置を示した。Fig.2-2(a) は継手部でせん断破断する場合、(b) と (c) は母材部で破断する場合である。母材部で破断する場合は (b) に示すように継手接合部近傍で破断する場合と (c) に示すように継手部から離れた位置で破断する場合を示した。

### 2.3 単位板幅当たりの溶接長さによる整理

Fig.2-3 に本報で取り上げた重ね継手溶接ビード形状の考え方を示す。著者ら<sup>7-9)</sup>が以前に示したように、Fig.2-3 に示すようにビード2本を狭いビード間隔 ( $p=1.4\text{mm}$ ) で平行に置いた重ね継手よりもビード2本を広いビード間隔 ( $p=6.6\text{mm}$ ) で平行に置いた重ね継手の方が静的引張強度が高くなることを期待できる。Fig.2-4 に静的引張試験結果を示す。図の縦軸に静的引張強度をとり、横軸には単位板幅当たりの溶接長 (以下では  $l_w$  とする) をとって整理している。図中の破線は供試材の引張強さを示している。図中の△印がビード2本を狭いビード間隔 ( $p=1.4\text{mm}$ ) で平行に置いた重ね継手、○印がビー

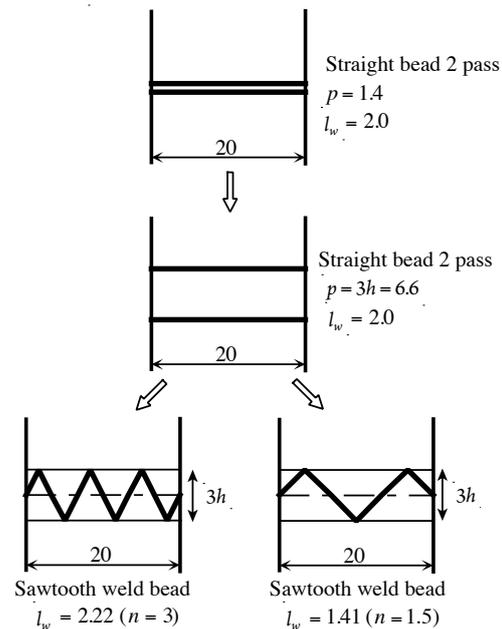


Fig.2-3 Weld bead pattern of lap joint

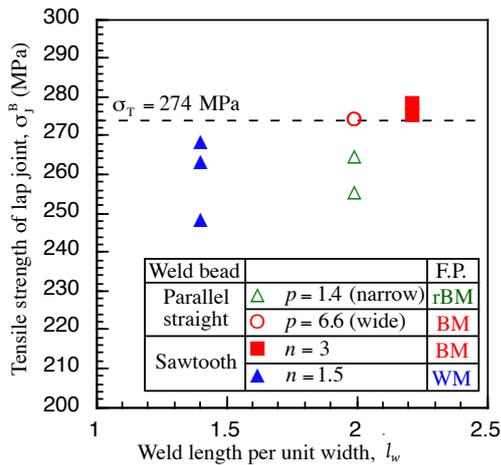


Fig.2-4 Influence for strength of lap joint by different weld bead pattern

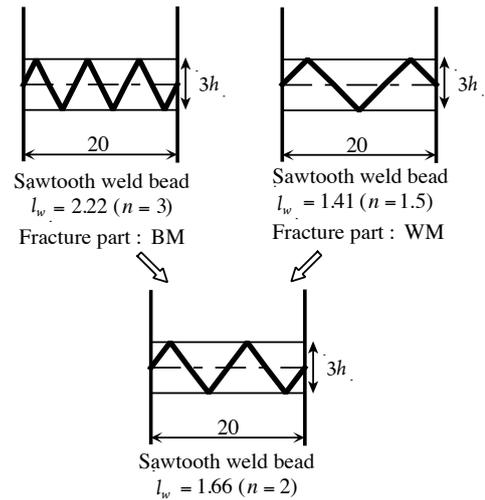


Fig.2-5 Sawtooth weld bead pattern of lap joint

ド2本を広いビード間隔 ( $p=6.6\text{mm}$ ) で平行に置いた重ね継手の試験結果である。ビード間隔が狭い継手の方が低い強度を示しており、破断位置も継手部近傍で母材破断 (以下、rBM) となった。一方、ビード間隔が広い継手は供試材の引張強さと同程度の引張強度を示し、破断位置も継手部から離れた位置で母材破断 (以下、BM) となった。

次に、Fig.2-3 に示すように細かい鋸歯形状 ( $l_w=2.22, n=3$ ) と粗い鋸歯形状 ( $l_w=1.41, n=1.5$ ) の2者について、試験結果を Fig.2-4 に■印と▲印でそれぞれ示す。細かい鋸歯形状の継手は供試材の引張強さと同程度の引張強度を示し、破断位置も BM となった。しかし、粗い鋸歯形状の継手は低い強度を示し、破断位置も継手部でせん断破断 (以下、WM) となった。

溶接ビードを平行に置いた試験片の単位板幅当たりの溶接長は  $l_w=2.0$  となるので、コストの面から、母材部で破断して供試材の引張強さと同程度の引張強度を示し、かつ、 $l_w < 2.0$  となる鋸歯ビード形状が望まれているが、 $n=1.5$  の鋸歯ビード形状では粗すぎる結果となった。

## 2.4 強度向上と溶接コスト低減を両立した鋸歯溶接ビード形状

前節の結果に基づいて、Fig.2-5 に示すように、試験片幅 20mm 当たりの波数  $n=2$  となる鋸歯ビード形状重ね継手を作成し、静的引張試験を行った。結果を Fig.2-6 に●印で示す。Fig.2-6 には比較のため、Fig.2-4 に示した実験結果も Fig.2-4 の場合

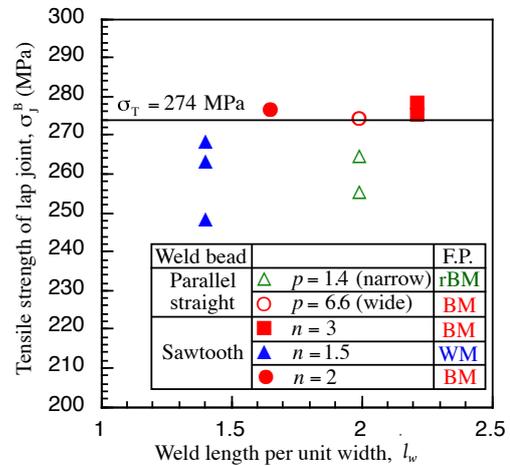
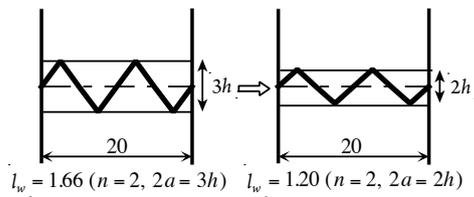


Fig.2-6 Influence for strength of lap joint by different weld bead pattern

と同じ記号で併記している。Fig.2-6 に示すように、 $n=2$  の鋸歯ビード形状重ね継手は供試材の引張強さと同程度の引張強度を示し、破断位置も BM となった。しかも、 $l_w=1.66 < 2.0$  であり、強度向上と溶接コスト低減を両立した溶接ビード形状として、波数  $n=2$  の鋸歯ビード形状は有効であることがわかる。

## 2.5 鋸歯ビード形状の振幅を小さくした場合

Fig.2-6 において、試験片幅 20mm 当たりの波数  $n=2$  の鋸歯ビード形状が、強度向上と溶接コスト低減を両立した溶接ビード形状として有効であることを示した。ここで、さらなる溶接コスト低減を目的として、Fig.2-7 に示すように、試験片幅 20mm 当たりの波数  $n=2$  を変えずに、鋸歯形状の振れ幅を板厚の3倍 ( $3h$ ) から2倍 ( $2h$ ) に変更した鋸歯ビード形状重ね継手について静的引張試験を行っ



Fracture part : BM  
Fig.2-7 Sawtooth weld bead pattern of lap joint that narrowed pitch

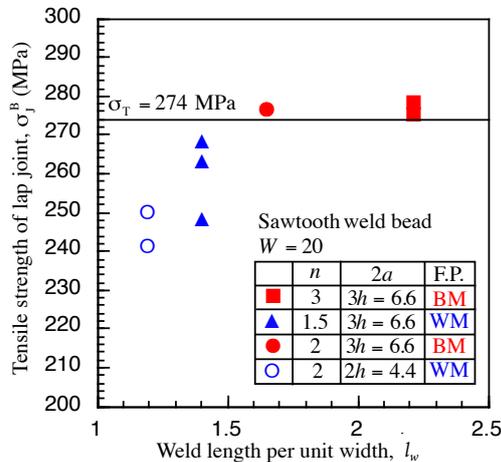


Fig.2-8 Influence for strength of lap joint by different weld bead pattern

た。試験結果を Fig.2-8 に○印で示す。 Fig.2-8 には比較のため、 Fig.2-6 に示した鋸歯ビード形状重ね継手の実験結果も同じ記号で併記している。 Fig.2-8 に示すように鋸歯形状の振れ幅を  $2h$  にした鋸歯ビード形状重ね継手は供試材の引張強さに対してかなり低い継手強度を示し、破断位置も WM であった。すなわち、鋸歯ビード形状の振れ幅を板厚の3倍以上に大きくすることは強度向上に有効であること、振れ幅が板厚の2倍では強度向上効果が現れないことがわかった。

## 2.6 ビード形状を円弧にした場合

鋸歯ビード形状の場合、形状が山、谷の繰り返しとなるため、頂点では応力集中しやすいものと考えられる。そこで、 Fig.2-9 に示すように、粗い鋸歯形状 ( $l_w = 1.41, n = 1.5$ ) の重ね継手と波長、振れ幅はそのままビード形状を円弧にした試験片について静的引張試験を行った。試験結果を Fig.2-10 に▽印で示す。 Fig.2-10 には比較のため、 Fig.2-6 に示した鋸歯ビード形状重ね継手の実験結果も Fig.2-6 の場合と同じ記号で併記している。 Fig.2-10 に示すように円弧ビード形状にした場合、供試材の引張強さと同程度の引張強度を示し、破断位置も BM となった。よって、鋸歯ビード形状の場合、頂点での応力

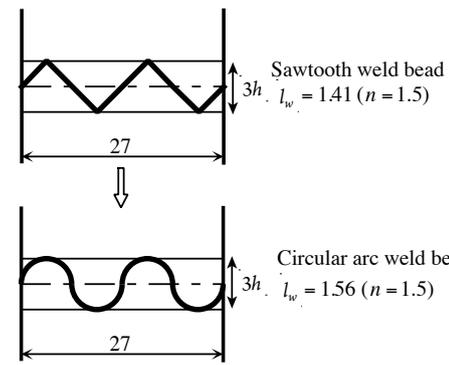


Fig.2-9 Circular arc weld bead pattern of lap joint

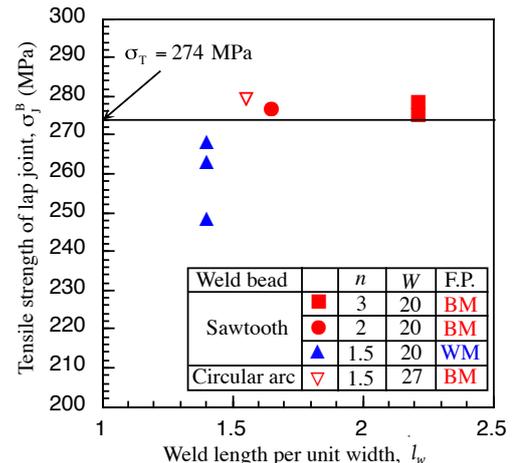


Fig.2-10 Influence for strength of lap joint by different weld bead pattern

集中が強度低下に大きな影響を与えることがわかる。また、鋸歯ビード形状に対して、円弧ビード形状は波長、振れ幅が同じ場合は単位板幅当たりの溶接長が長くなるが、頂点での応力集中を緩和できるなど強度向上、溶接コスト低減の観点から有効な溶接ビード形状であることがわかった。

## 3. レーザ溶接重ね継手の引き剥がし強度

### 3.1 実験方法

レーザ溶接により、環状溶接継手を作成した。本研究では自動車用鋼板として高張力鋼板 HTS90 を使用した。板厚は 1.0mm と 1.6mm の2種類を用いた。十字引張試験の模式を Fig.3-1 に示す。ジグへの固定用ボルトを通すための直径 20mm の孔を2ヶ所予めあけた 150×50mm の鋼板を十字に重ねて、所定の直径になるように環状に溶接を行った。継手形状を Fig.3-2 に示す。十字に重ねた2枚の鋼板の中央に環状に溶接した。等しい外径で接合ビード幅を変化させるため、 Fig.3-2 に示すように内側を直径の小さい円で溶接することにより、外径一定でビード幅の異なる試験片を作成した。

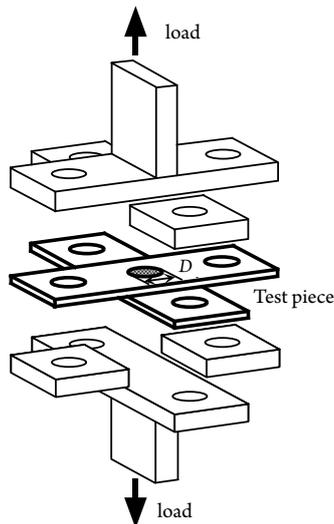


Fig.3-1 Apparance of CTS test

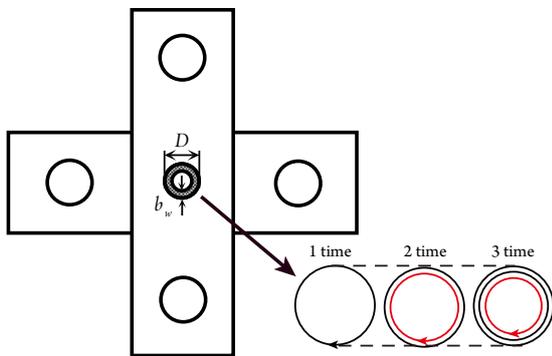


Fig.3-2 Specimen of ring bead welding

### 3.2 実験結果

板厚 1.0mm と 1.6mm の 2 種類の HT590 鋼板を用いて、溶接部の外直径を 6.3mm と 11.0mm と変化させた場合の十字引張試験結果を Table 3-1 に示す。実験に置ける最大荷重を  $P_{max}$ 、Fracture part は界面破断した場合が Interface、プラグ破断した場合が Plug を表記している。また、レーザ溶接条件である溶接速度  $v$ 、レーザパワーも記述している。Table 3-1 に示すように、外直径  $D$  が一定で接合部

幅  $b_w$  が増加するにつれて、破断荷重が増加し、破断位置が界面破断からプラグ破断へと移行する。また、プラグ破断となる破断荷重はほぼ一定値を示すことがわかった。

### 3.3 界面破断とプラグ破断の境界の検討

界面破断とプラグ破断の境界を検討するため、以下のような仮定の下に実験結果を整理した。

プラグ破断した場合の破断荷重  $P_{plug}$  は式 (1) で与えられるものとする。

$$P_{plug} = \alpha \tau_{HAZ}^B \pi D h \text{ ----- (1)}$$

ここで、 $\alpha$  は応力集中係数、 $\tau_{HAZ}^B$  は HAZ 部のせん断強さ、 $D$  は接合部の外直径、 $h$  は板厚である。 $\tau_{HAZ}^B$  を HAZ 部の硬さ  $H_V^{HAZ}$  で表すと  $\tau_{HAZ}^B = 9.8 H_V^{HAZ} / (3\sqrt{3})$  となるから、式 (1) は式 (2) のように書き換えられる。

$$P_{plug} / \pi D h = \alpha \{9.8 H_V^{HAZ} / (3\sqrt{3})\} = \text{const.} \text{ ---- (2)}$$

つまり、 $P_{plug} / \pi D h$  の値はプラグ破断するのであれば一定値となる。

また、界面破断した場合の破断荷重  $P_{interface}$  は式 (3) で与えられるものとする。

$$P_{interface} = \beta \sigma_{WM}^B \{ \pi (D/2)^2 - \pi (D/2 - b_w)^2 \} \text{ (3)}$$

ここで、 $\beta$  は応力集中係数、 $\sigma_{WM}^B$  は溶接金属部の引張強さ、 $b_w$  は接合部幅である。

$\sigma_{WM}^B$  を溶接金属部の硬さ  $H_V^{WM}$  で表すと  $\sigma_{WM}^B = 9.8 H_V^{WM} / 3$  となるから、式 (3) の両辺を  $\pi D h$  で割って整理すると式 (4) となる。

$$P_{interface} / (\pi D h) = \beta (9.8 H_V^{WM} / 3) \cdot \{ \pi (D/2)^2 - \pi (D/2 - b_w)^2 \} / (\pi D h) \text{ ---- (4)}$$

Table 3-1 Experimental results of CTS test

$h$ (mm)	$D$ (mm)	$b_w$ (mm)	Welding number of times	$v$ (mm/min)	Laser power (W)	$P_{max}$ (N)	Fracture part	$\{ \pi (D/2)^2 - \pi (D/2 - b_w)^2 \} / (\pi D h)$	$P_{max} / (\pi D h)$ (N/mm <sup>2</sup> )
1	6.3	0.4	1	2000	1000	4900	Interface	0.37	248
1	6.3	0.5	2	2000	1000	5664	Plug	0.46	286
1	6.3	0.6	3	2000	1000	6980	Plug	0.54	353
1	6.3	0.8	5	2000	1000	7528	Plug	0.70	380
1	11	0.4	1	2000	1000	5416	Interface	0.39	157
1	11	0.5	2	2000	1000	10056	Plug	0.48	291
1	11	0.7	4	2000	1000	10984	Plug	0.66	318
1	11	0.9	6	2000	1000	9596	Plug	0.83	278
1.6	6.3	0.4	1	2000	1500	7212	Interface	0.21	228
1.6	6.3	0.8	1	1600	1500	10608	Interface	0.44	335
1.6	6.3	1	2	1600	1500	13400	Plug	0.53	423
1.6	6.3	1.4	3	1600	1500	12244	Plug	0.68	387
1.6	6.3	2	5	1600	1500	12176	Plug	0.85	384
1.6	11	0.4	1	2000	1500	5908	Inter Face	0.24	107
1.6	11	0.8	1	1600	1500	16952	Inter Face	0.46	307
1.6	11	1.1	2	1600	1500	16972	Plug	0.62	307
1.6	11	1.4	4	1600	1500	18288	Plug	0.76	331
1.6	11	2	1	500	1500	17752	Plug	1.02	321

つまり、 $\{\pi(D/2)^2 - \pi(D/2 - b_w)^2\} / (\pi Dh)$  と  $P_{\text{Interface}} / (\pi Dh)$  は比例関係にある。

以上より、Table 3-1 の実験データを  $P_{\text{max}} / (\pi Dh)$  と  $\{\pi(D/2)^2 - \pi(D/2 - b_w)^2\} / (\pi Dh)$  で整理したものを Table 3-1 の 9, 10 列目と Fig.3-3 に示す。Fig.3-3 に示すように、板厚が異なっても、接合部の外直径  $D$  が同じであれば、プラグ破断となる  $P / (\pi Dh)$  の値はほぼ一定値を示すことがわかった。また、板厚、接合部の外直径を変化させても、界面破断とプラグ破断の境界となる  $\{\pi(D/2)^2 - \pi(D/2 - b_w)^2\} / (\pi Dh)$  は約 0.5 となることがわかった。

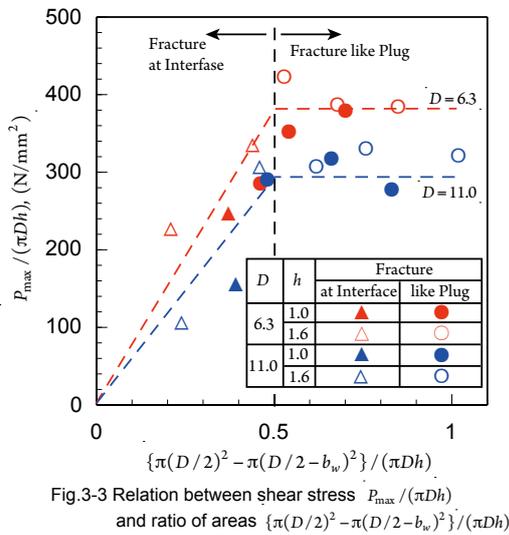


Fig.3-3 Relation between shear stress  $P_{\text{max}} / (\pi Dh)$  and ratio of areas  $\{\pi(D/2)^2 - \pi(D/2 - b_w)^2\} / (\pi Dh)$

#### 4. 結 言

波数や形状の異なる鋸歯ビード形状溶接重ね継手の静的引張試験を行い、継手強度に及ぼす鋸歯溶接ビード形状の影響を検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 本報で用いた板厚 2.2mm の熱間圧延鋼板 SPHC を用いて鋸歯ビード形状重ね継手を作成する場合、振れ幅を板厚の 3 倍とし、試験片幅 20mm 当たりの波数  $n=2$  となる鋸歯ビード形状重ね継手が強度向上と溶接コスト低減を両立した溶接ビード形状として有効である。
- 2) 鋸歯ビード形状の場合、振れ幅が板厚の 3 倍以上あれば強度向上効果が期待できるが、板厚の 2 倍では強度向上効果が得られない。
- 3) 溶接ビード形状を円弧形状とした場合、波長と振れ幅が同じ鋸歯形状と比較して、強度向上が期待できる。

また、重ね継手の溶接始末端部を想定した引き剥がし荷重に対する引き剥がし荷重に対する強度を検討するため行った十字引張試験より、以下の知見が得られた。

- 1) 外直径  $D$  が一定で接合部幅  $b_w$  が増加するにつれて、破断荷重が増加し、破断位置が界面破断からプラグ破断へと移行する。
- 2) プラグ破断となる破断荷重はほぼ一定値を示す。
- 3) 接合部の外直径  $D$  が同じであれば、プラグ破断となる  $P / (\pi Dh)$  の値はほぼ一定値を示す。
- 4) 板厚  $h$ 、接合部の外直径  $D$  を変化させても、界面破断とプラグ破断の境界となる  $\{\pi(D/2)^2 - \pi(D/2 - b_w)^2\} / (\pi Dh)$  は約 0.5 となる。

#### 参考文献

- 1) 例えば、社団法人自動車技術会疲労信頼性部門委員会 スポット溶接構造信頼性分科会：自動車車体スポット溶接構造の疲労強度と寿命推定、技術報告シリーズ、社団法人自動車技術会 (1986)
- 2) 森清和，樽井大志，中村卓磨，山本陽一：レーザー溶接の車体組み立てへの応用，シンポジウム「21 世紀の自動車における接合技術」JAAA2002 (2002)，p.89-93
- 3) Charles E. Albright, Chris Hsu, R.Olan Lund, Fatigue Strength of Laser-Welded Lap Joints, ICAREO (1990), 357-363
- 4) 小野守章，樺沢真事，大村雅紀，薄鋼板レーザー重ね溶接継手の強度特性，溶接学会論文集，14 (1996)，586-591
- 5) 戸梶恵郎，塩田祐久，皆木亜由美，宮田尚志，レーザー突き合せ溶接継手の疲労強度，鉄と鋼，85，1 (1999)，66-70
- 6) 寺崎俊夫，祖父江武史，北村貴典，レーザー溶接された重ね継手の疲労強度について，溶接学会論文集，19，3 (2001)，507-512
- 7) 寺崎俊夫，岡村雄作，北村貴典，北側彰一，レーザー重ね継手の静的強度を支配する因子について，シンポジウム「21 世紀の自動車における接合技術」(JAAA2002)，(2002)，79-88
- 8) 寺崎俊夫，北村貴典，数値解析によるレーザー重ね継手の静的強度予測，溶接学会論文集，21，3 (2003)，419-424
- 9) 寺崎俊夫，北村貴典，数値解析によるレーザー重ね継手の静的強度に及ぼす継手形状因子の検討，溶接学会全国大会講演概要，73，(2003)，250-251