



かしめ部を中心に鋼板が回転し、接合強度が低下する懸念がある。また、角型かしめの場合、側壁部のみインターロックが形成され、連結部は鋼板を押し込んだだけの状態となるため、引張角度によって引張せん断荷重が異なるという面内異方性が生じる可能性がある。

そこで、筆者らは、角型かしめにおける引張せん断荷重の面内異方性低減と、より一層の接合強度の向上を目的に、(1)側壁部の長さや断面積を増加させること、(2)引張方向に対して側壁部の投影長さ変化が少ないパンチ形状であることの2点に着目した。そして、それらを満足するように複数の角型かしめを配置することが重要と考え、角型かしめが三方に存在する三又型かしめを新規に考案した。

### 3. 供試材および実験方法

#### 3.1 供試材

供試材には公称板厚0.8, 1.2, 1.6mm、鋼板強度440MPa級のZAM®(クロムフリー処理、めっき公称付着量片面90g/m<sup>2</sup>)を用い、板厚の影響を検討した。また、鋼板強度340, 440, 590MPa級、公称板厚1.2mmにて鋼板強度の影響を検討した。表1に供試材の化学成分および圧延方向の引張特性を示す。

表1 供試材の化学成分および機械的性質

Table 1 Chemical compositions (mass%) and mechanical properties of specimens

No.	板厚 (mm)	強度 (MPa)	C	Mn	P	Al	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
1	0.8	440	0.174	0.49	0.014	0.027	299	469	32
2	1.2		0.188	0.50	0.016	0.027	315	451	36
3	1.6		0.194	0.68	0.014	0.025	315	451	38
4	1.2	340	0.046	0.20	0.015	0.016	247	366	40
5		440	0.131	0.98	0.018	0.039	349	472	37
6		590	0.109	1.81	0.016	0.045	352	615	32

Si, S : Low

なお、疲労試験および耐食性試験には、表1のNo.3である公称板厚1.6mm、鋼板強度440MPa級のZAM®を用いた。

#### 3.2 実験方法

##### 3.2.1 かしめ実験

供試材の表面をあらかじめ脱脂し、無潤滑でかしめを行った。丸型かしめおよび角型かしめ実験には三徳商事(株)

のクリンチかしめ(丸型、角型)を使用した。図2に各かしめ用金型の詳細を示す。

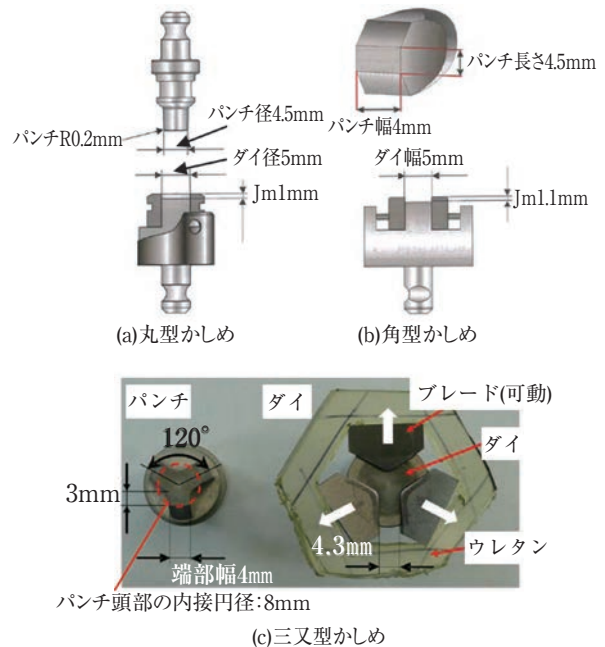


図2 かしめ金型の詳細

Fig. 2 Details of die for each mechanical clinching.

かしめ金型は、丸型かしめの場合パンチ径4mm、角型かしめの場合パンチ寸法4×4.5mmとし、ブレード上面とダイ上面の高さの差(以下、Jmと記す)は、丸型かしめで1.0mm、角型かしめで1.1mmとほぼ同じ大きさのものを選択した。また、パンチの加圧力を変化させ、図1に示すパンチとダイで挟まれた部分のかしめ部残留厚さ(以下、STと記す)をマイクロメーターにて測定した。実験中は、上部に設置したロードセルにて加圧力を測定し、金型耐荷重(丸型かしめは45kN、角型かしめは60kN)以下で行った。

三又型かしめの場合、パンチ幅は4mm、パンチの頭部の最大直径は約8mmとした。三又型かしめのパンチおよびダイはそれぞれ一対となっており、ダイ周辺には五角形の可動式ブレードを取り付けている。また、ブレードの拡張のためブレード外周部にウレタンを配置した。Jmは1.1mmとし、十分なインターロックを形成するため加圧力を100kNとした。

##### 3.2.2 引張せん断試験

引張せん断試験には、幅25mm、長さ65mmの2枚の鋼板を25mm長さ重ねて接合した試験片を使用した。引張速度は10mm/minで実施した。

角型かしめには、前述したように構造上、接合強度に面内異方性が生じる。そこで、三又型かしめでは引張角度を変化させて引張せん断試験を行った。なお、三又形状の幾何学的関係から、かしめ角度は60°周期となり、0°、60°、120°が一致する。

三又型かしめの接合強度の目標は、鋼板強度440MPa級、板厚1.6mmにおける引張せん断荷重が「スポット溶接部の検査方法及び判定基準 JIS Z 3140」B級の最小値7.99kN/点、すなわち、スポット溶接代替可能な接合強度を達成することとした。

### 3.2.3 疲労試験

疲労試験は「スポット溶接継手の疲れ試験方法 JIS Z 3138」に準拠し、引張せん断および十字引張試験に供する疲労試験片を作製して実施した。疲労試験条件は、最大荷重と最小荷重の比0.1、振動数20Hz、最大繰り返し数 $10^7$ 回とした。また、引張せん断の試験片寸法は幅40mm、長さ140mm、十字引張では幅50mm、長さ150mmとした。なお、疲労試験を行った接合方法はスポット溶接（静的引張せん断荷重17.5kN、静的十字引張荷重10.9kN）、丸型かしめ（静的引張せん断荷重3.4kN、静的十字引張荷重4.2kN）、角型かしめ（静的引張せん断荷重5.9kN、静的十字引張荷重3.3kN）、および三又型かしめ（静的引張せん断荷重9.4kN、静的十字引張荷重4.2kN）の四種類である。

### 3.2.4 耐食性試験

図3に耐食性試験片と設置状態の概略図を示す。耐食性試験に用いた供試材の明細は前項の疲労試験と同じである。なお、スポット溶接の接合部表面をジンクコート（イチネンケミカルズ製）にて補修塗装した。

耐食性試験は「塩水噴霧試験法 JIS Z 2371」に準拠し、試験条件は5%塩化ナトリウム水溶液を用い、槽内温度

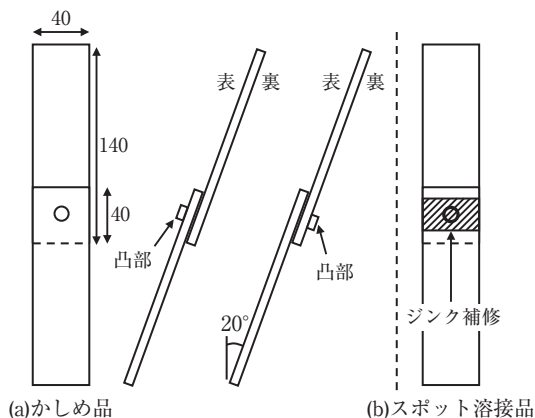


図3 耐食試験片と設置方法の概略図

Fig. 3 Schematic diagram of corrosion resistance specimen and setting method.

は $35 \pm 2^\circ\text{C}$ とし噴霧量 $1.5\text{g} \pm 0.5\text{g/hr}$ で行った。外観評価は2,000時間まで行った。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 引張せん断荷重に及ぼす板厚の影響

#### 4.1.1 丸型かしめ

図4に鋼板強度440MPa級で一定とし、同一の板厚同士で丸型かしめを行った場合の引張せん断荷重に及ぼすSTの影響を示す。板厚1.6mm同士の場合、金型耐荷重の上限からSTを1mm以下に薄くできなかったが、引張せん断荷重はSTにかかわらず3.6~3.7kNとほぼ一定の値を示した。板厚1.2mm同士の場合、板厚1.6mmと同様にSTの影響は小さく、引張せん断荷重は2.6~2.7kNとほぼ一定であった。一方、板厚0.8mm同士の場合、STが約1.3mm以下ではかしめ時に上板の側壁部に延性破壊による微小割れが生じたため、引張せん断荷重が低かった。微小割れが生じないST1.4mm以上の場合、STの影響はなく引張せん断荷重は1.2~1.5kNの範囲でほぼ一定であった。

以上より、丸型かしめ時に微小割れが発生しない場合、(1)各板厚の引張せん断荷重はSTにかかわらず一定であること、(2)板厚を厚くすると引張せん断荷重は増大することがわかった。

なお、今回のST範囲内では、上板が破断せずに下板のインターロックから外れる「抜け」は生じず、すべて側壁

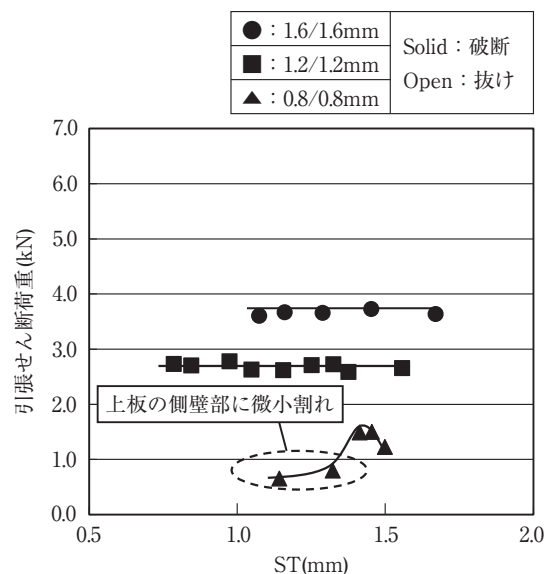


図4 各板厚における引張せん断荷重に及ぼすSTの影響(丸型かしめ)

Fig. 4 Effect of ST on tensile-shear load for several thickness of each specimens (round type of mechanical clinching).

部からの破断となっていたため、STに関係なく各板厚における引張せん断荷重がほぼ一定であったと考える。

また、板厚0.8mmにてSTを小さくした場合、側壁部に微小割れ生じていたが、今回用いた金型のJmが板厚に対して大きかったため、側壁部にかかる引張歪が大きくなり、伸びの限界を超えたことが主要因と推察する。

図5に引張せん断荷重に及ぼす各板厚の組合せの影響を示す。なお、各条件における引張せん断荷重は、側壁部からの破断を示した試験片の平均値である。上板が

0.8mmでは引張せん断荷重が1.3~1.5kN程度、1.2mmでは2.3~2.7kN程度、1.6mmでは3.7~4.0kNであった。このことから、上板が厚い方が引張せん断荷重は増大することがわかった。また、上板の板厚が同じ場合、下板は薄い方が引張せん断荷重は若干高い傾向にあった。

図6に各板厚の組合せと側壁部厚さの関係を示す。上板が厚くなると側壁部厚さは増加することが認められた。また、上板が0.8mmの場合、下板が薄い方が側壁部厚さは厚い傾向にあり、上板が1.2mmおよび1.6mmでも

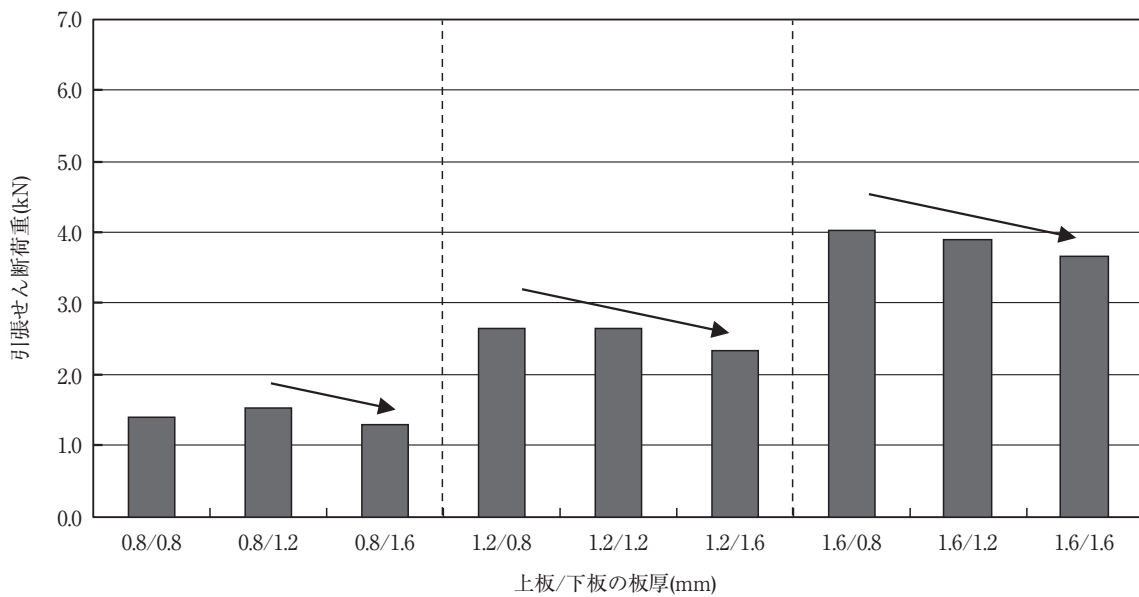


図5 引張せん断荷重に及ぼす各板厚の組合せの影響(丸型かしめ)

Fig. 5 Effect of specimen's thickness-combination on tensile-shear load (round type of mechanical clinching).

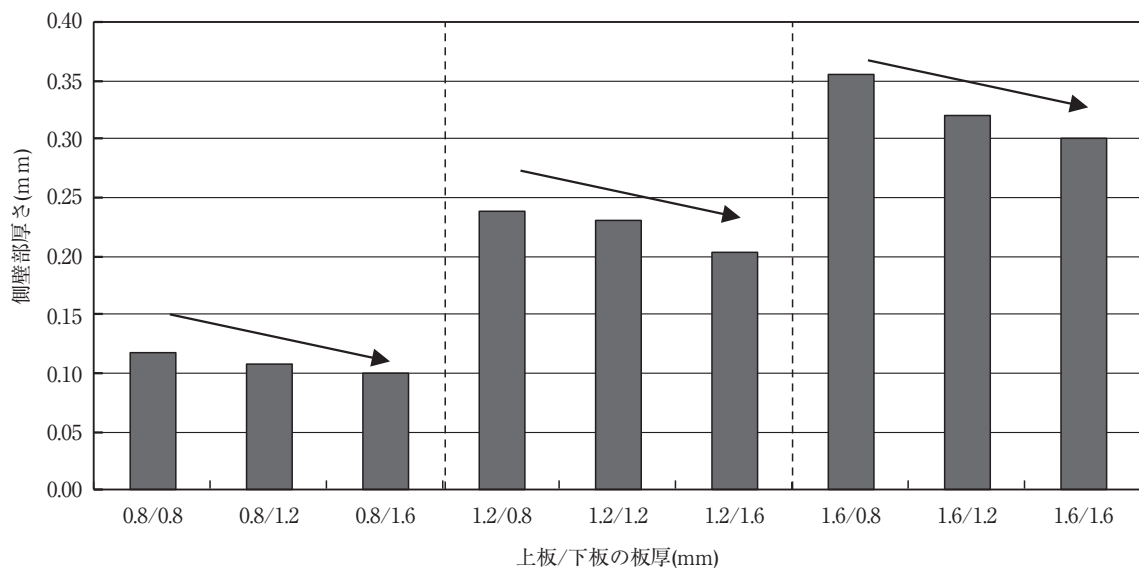


図6 板厚の組合せと側壁部厚さの関係(丸型かしめ)

Fig. 6 Relationship between combination of specimen's thickness and sidewall thickness (round type of mechanical clinching).



同様であった。

以上より、同じ金型、かつ、鋼板強度440MPa級の本実験の場合、引張せん断荷重は側壁部厚さに依存すると判断される。

#### 4.1.2 角型かしめ

鋼板強度440MPa級を用い、同一の板厚同士で角型かしめを行った場合の各板厚における引張せん断荷重に及ぼすSTの影響を図7に示す。角型かしめは、今回使用

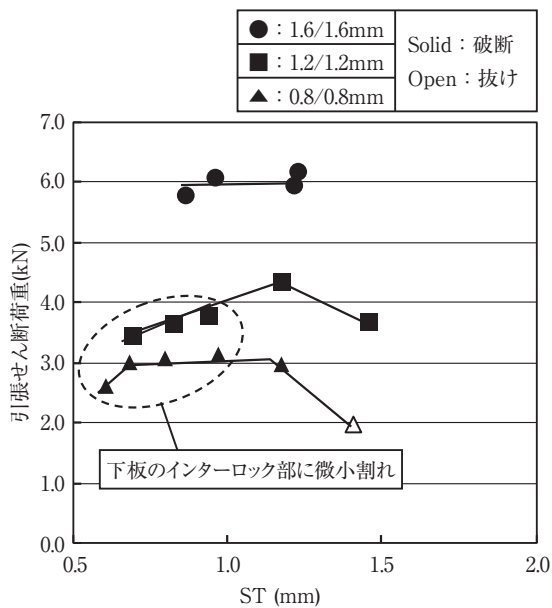


図7 各板厚における引張せん断荷重に及ぼすSTの影響(角型かしめ)

Fig. 7 Effect of ST on tensile-shear load for several thickness of specimens (rectangular type of mechanical clinching).

した丸型かしめより金型耐荷重が高いことから、板厚1.6mm同士でもSTが1mm以下となった。板厚1.6mm同士の場合、引張せん断荷重はSTにかかわらず5.7~6.1kNとほぼ一定であった。板厚1.2mm同士や板厚0.8mm同士の場合、STが1mm以下では下板に微小割れが発生し、STを小さくするほど引張せん断荷重が若干低くなる傾向にあった。板厚1.2mm同士の荷重範囲は3.4~4.3kN、板厚0.8mm同士の場合「抜け」を示したST1.45mmを除くと、荷重は2.6~3.1kNの範囲であった。なお、「抜け」を示した条件以外は、すべて側壁部の破断となっていた。

以上より、角型かしめの引張せん断荷重は、前述の丸型かしめと同様に、同一板厚の組合せでは、板厚を厚くすると増大する傾向にあった。

図8に角型かしめにおける引張せん断荷重に及ぼす各板厚の組合せの影響を示す。各条件における引張せん断荷重は、側壁部からの破断を示した試験片の平均値である。上板が0.8mmでは引張せん断荷重が2.5~3.0kN、1.2mmでは3.2~4.1kN、1.6mmでは4.9~6.0kNであり、丸型かしめと同様に、角型かしめにおいても、引張せん断荷重は上板が厚い方が引張せん断荷重は増大する傾向にあった。また、上板が0.8、1.2mmの場合、上板の板厚が同じであれば下板の板厚の薄い方が引張せん断荷重は若干高い傾向にあった。なお、上板1.6mmにおいて下板が0.8mmの場合、他に比べて引張せん断荷重は低かった。これは上板に対して下板の板厚が1/2と薄いことから、引張せん断試験時に下板の方が変形しやすく、「抜け」が生じやすいことから、破断となるにはST値を小さくする必要があった。そのため、側壁部

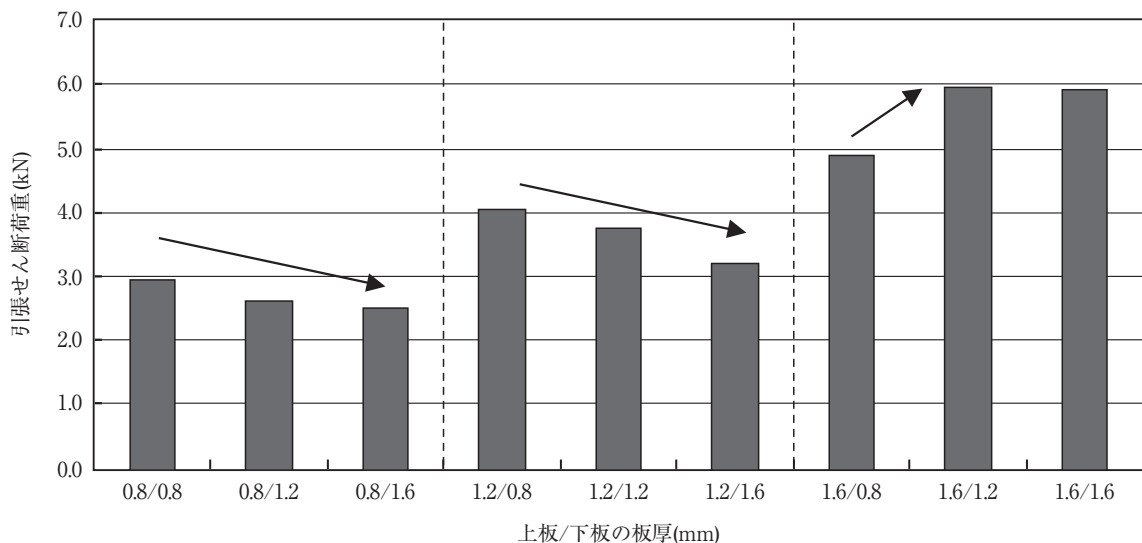


図8 引張せん断荷重に及ぼす板厚の組合せの影響(角型かしめ)

Fig. 8 Effect of specimen's thickness-combination on tensile-shear load (rectangular type of mechanical clinching).

の引張歪が大きくなり側壁部の板厚が薄くなったためと推定している。

### 4.2 引張せん断荷重に及ぼす鋼板強度の影響

#### 4.2.1 丸型かしめ

板厚1.2mmで一定とし、各鋼板強度における引張せん断荷重に及ぼすSTの影響を調査した結果を図9に示す。なお、今回のSTの範囲では「抜け」はなく、すべて側壁部からの破断であった。鋼板強度340MPa同士の場

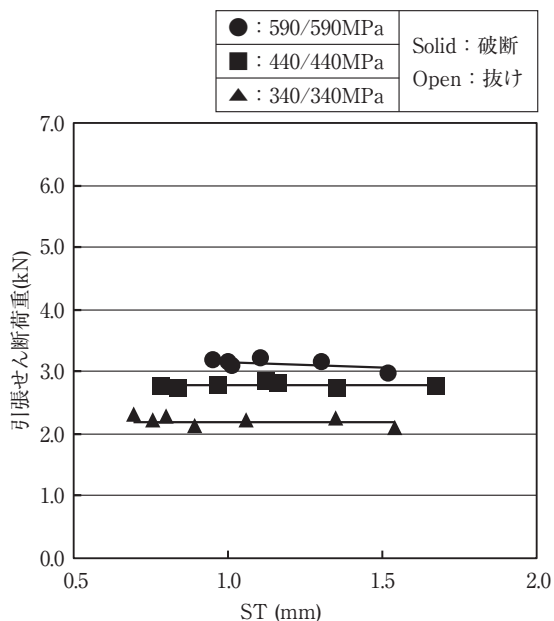


図9 各鋼板強度における引張せん断荷重に及ぼすSTの影響(丸型かしめ)

Fig. 9 Effect of ST on tensile-shear load for several strength of each specimens (round type of mechanical clinching).

合、引張せん断荷重が2.1~2.3kN、440MPa級同士の場合、2.7~2.8kN、590MPa級同士の場合、3.0~3.2kNとほぼ一定であり、STの影響はほとんど無く、鋼板強度の高い方が引張せん断荷重は増大した。

図10に引張せん断荷重に及ぼす鋼板強度の組合せの影響を示す。各条件における引張せん断荷重は、側壁部からの破断を示した試験片の平均値である。上板強度が340MPa級では引張せん断荷重が2.0~2.2kN、440MPa級では2.5~2.8kN、590MPa級では3.1~3.2kNであった。以上より、上板強度の高い方が引張せん断荷重は高いことがわかった。また、上板強度が同じ場合、下板強度の影響は非常に小さかった。

#### 4.2.2 角型かしめ

板厚1.2mmを用いて、各鋼板強度における引張せん断荷重に及ぼすSTの影響を調査した結果を図11に示す。引張せん断荷重は、鋼板強度340MPa同士の場合、3.2~4.2kNの範囲で上下に変化した。440MPa級同士では「抜け」を除くと、4.7~4.9kNとほぼ一定であった。他方、590MPa級同士の場合、「抜け」を除き3.4~4.2kNの荷重範囲であり340MPa同士とほぼ類似する荷重であるが、STが大きくなると引張せん断荷重が増加する傾向を示した。

図12に引張せん断荷重に及ぼす鋼板強度の組合せの影響を示す。各条件における引張せん断荷重は、側壁部からの破断を示した試験片の平均値である。引張せん断荷重は、上板強度が340MPa級で2.8~4.0kN、440MPa級で3.3~5.1kN、590MPa級で3.3~3.7kNであり、前項の丸型かしめと異なり、鋼板強度が最も高い590MPa級は全体

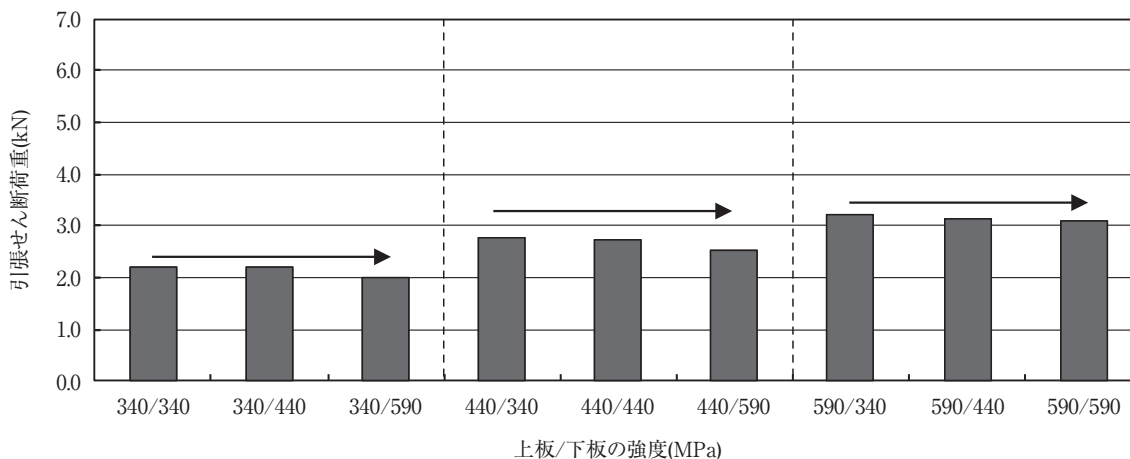


図10 引張せん断荷重に及ぼす鋼板強度の組合せの影響(丸型かしめ)

Fig.10 Effect of specimen's strength-combination on tensile-shear load (round type of mechanical clinching).

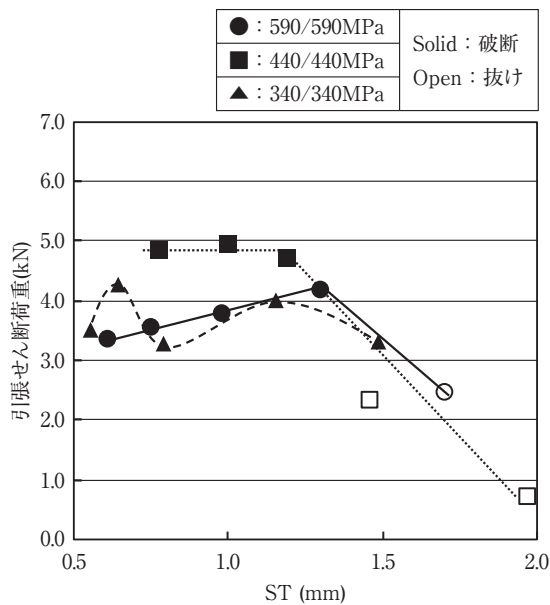


図11 各鋼板強度における引張せん断荷重に及ぼすSTの影響(角型かしめ)

Fig.11 Effect of ST on tensile-shear load for several strength of each specimens (rectangular type of mechanical clinching).

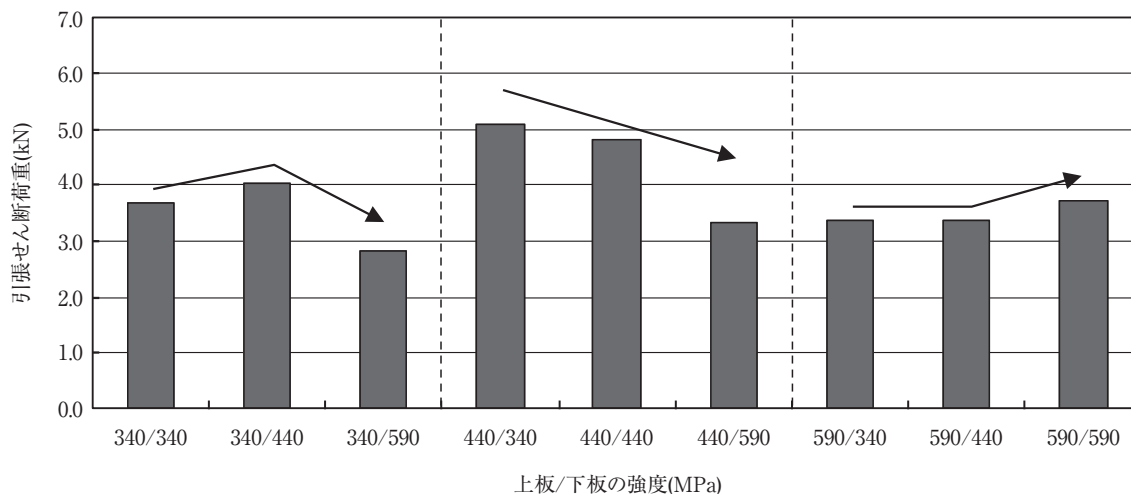


図12 引張せん断荷重に及ぼす鋼板強度の組合せの影響(角型かしめ)

Fig.12 Effect of specimen's strength-combination on tensile-shear load (rectangular type of mechanical clinching).

的に引張せん断荷重が低い水準にあった。これは図13に示すように、590MPa級のみインターロック部で微小割れが生じたことが主要因と推察され、高強度材の荷重増大には極限変形能などの延性改善が重要と認識した。

### 4.3 三又型かしめの検討

#### 4.3.1 三又型かしめ後の断面形状

図14に三又型かしめ後の外観と断面形状を示す。供試

材には上板、下板いずれも板厚1.6mm、鋼板強度440MPa級を使用した。図14(a)に示すように、パンチ側の上板はパンチ形状が転写されてY型に凹み、裏面のダイ側では下板にY型の凸部が形成されていた。図14(b)の断面形状の観察結果より、三又型かしめの場合側壁部に微小割れが生じておらず、インターロックが形成されていた。なお、かしめ外周部にあたる部分は角型かしめと同様の連結部となっていた。

三又型かしめが、角型かしめと異なり微小割れが生じにくいのは、インターロック成形時、隣り合う側壁部同士が互いに同じブレードを押し外側に移動させようとするため、側壁部を圧縮する静水圧応力が作用していたものと推察する。

#### 4.3.2 引張せん断荷重

図15に三又型かしめにおける引張せん断荷重と引張角度の関係を示す。三又型かしめにおける引張せん断荷重は、引張角度0°、60°、120°で最大荷重9.0kN、30°および90°で最小荷重8.6kNとなり、引張せん断荷重は全ての引張角度において、目標値7.99kN/点を満足した。

引張せん断荷重の面内異方性の指標とする最大荷重と最小荷重の比は1.05であり、角型かしめの1.15と比べて小さく良好であった。

なお、比較として十字形状パンチの四又型かしめ<sup>6)</sup>と角型かしめの引張せん断荷重を図中に示す。角型かしめの引張せん断荷重は4.8~5.4kNの範囲であり、最も低い値を示した。四又型かしめは、引張せん断荷重が引張角度0°で最大荷重8.6kN、45°で最小荷重7.3kNとなり、引

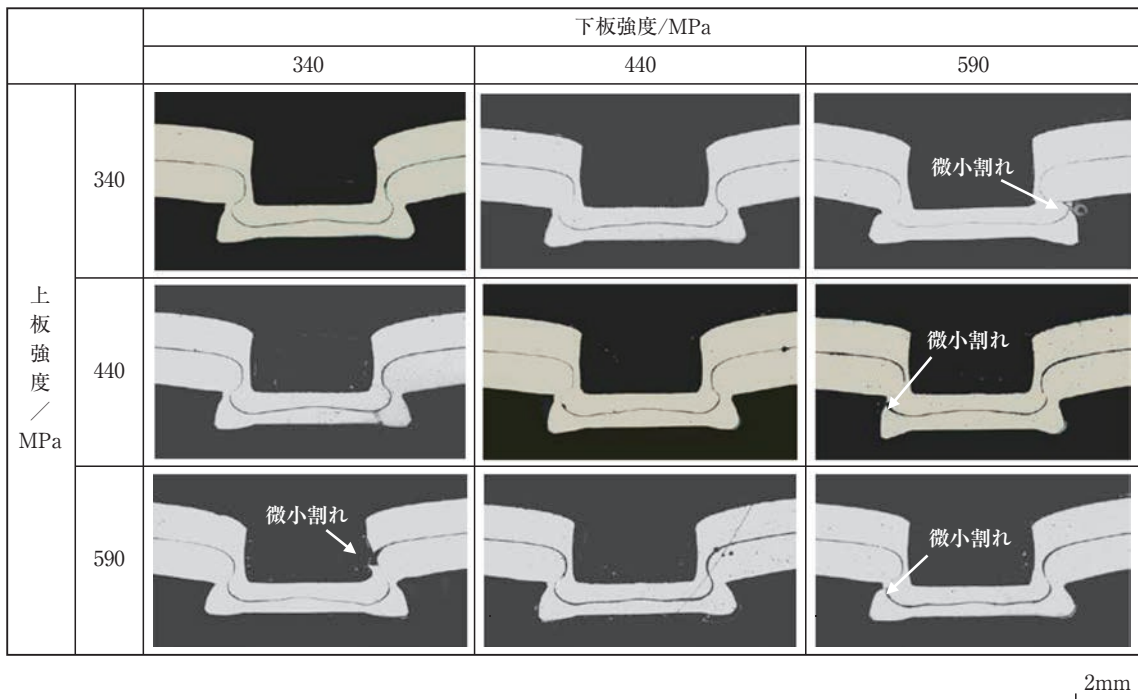


図13 各鋼板強度の組合せにおける縦断面形状(ST:1.05mm)  
 Fig.13 Cross-sectional shapes for several combinations of specimen's tensile strength (ST:1.05mm).

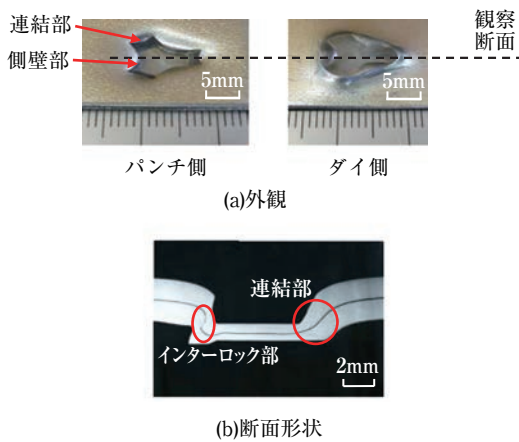


図14 三又型かしの外観と断面形状  
 Fig.14 Appearance and cross-sectional shape of trifurcate type of mechanical clinching.

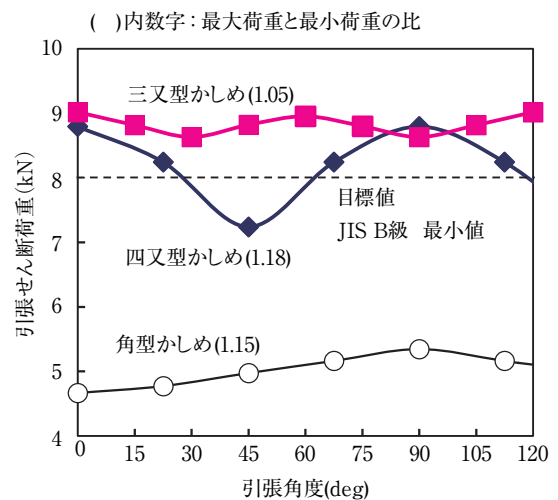


図15 各かしめにおける引張せん断荷重と引張角度の関係  
 Fig.15 Relationship between tensile-shear load and tensile angle for each type of mechanical clinching.

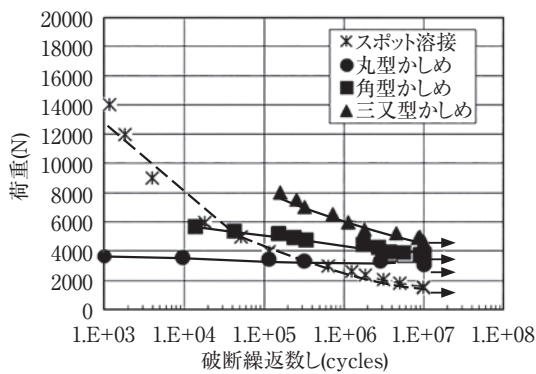
張角度45°で目標値7.99kN/点を満足できなかった。さらに、最大荷重と最小荷重の比は1.18であり、面内異方性が最も大きかった。

本結果から、引張せん断荷重、すなわち、接合強度の向上、ならびに、面内異方性の低減に三又型かしめが有効であることがわかった。なお、詳細な調査が必要であるが、理由としては側壁部の引張方向への投影長さが重要な因子であると考えている<sup>4)</sup>。

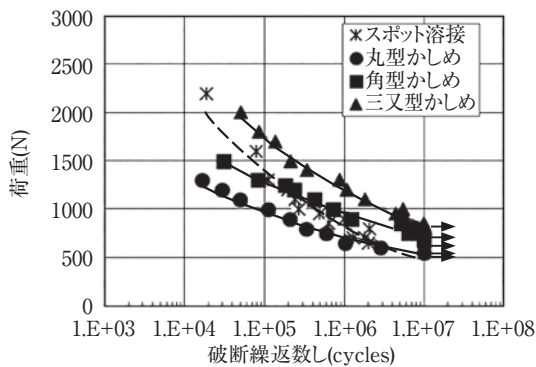
#### 4.4 疲労試験

図16にスポット溶接および各種かしのL-N線図を示す。本実験では、繰り返し回数 $10^7$ 回で破断に至らない荷重を疲労限とした。図16(a)に、引張せん断の疲労試験におけるL-N線図を示す。疲労限はスポット溶接が1,600Nであったのに対し、丸型かしめは3,320N、角型





(a)引張せん断



(b)十字引張

図16 スポット溶接および各種かしめのL-N線図

Fig.16 L-N diagrams of specimens made of spot welding method and each type of mechanical clinching.

かしめは3,700N、三又型かしめは4,700Nであり、三又型かしめが最も疲労限界が高く、スポット溶接の2.9倍であった。

図16(b)に十字引張の疲労試験におけるL-N線図を示す。疲労限界はスポット溶接が550Nであったのに対して、丸型かしめは550N、角型かしめは700N、三又型かしめは850Nであり、三又型かしめが最も疲労限界が高く、スポット溶接の1.5倍であった。

以上より、かしめ、特に三又型かしめは、スポット溶接よりも疲労特性に優れるため振動が加わる用途に適すると考えられる。なお、かしめが疲労特性に優れる理由として、スポット溶接では板間のナゲット端の「線」に応力集中するのに対して<sup>7)</sup>、かしめは側壁部やインターロック部の面で荷重を受けること、ならびに、接触面のすべりによって応力集中しにくいことが示唆されている<sup>8)</sup>。

#### 4.5 耐食性試験

図17に各種接合品における塩水噴霧試験2,000時間後の外観を示す。なお、供試材には前項の引張せん断の

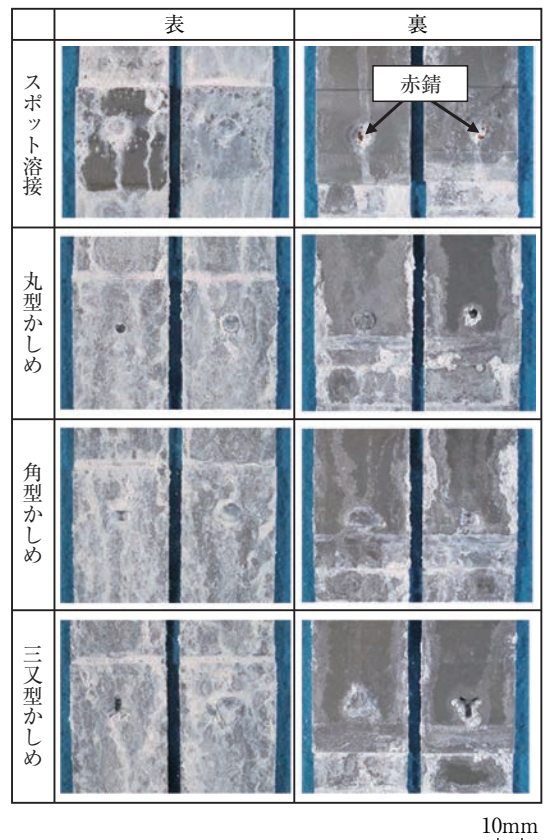


図17 塩水噴霧試験2,000時間後の各種接合品の外観

Fig.17 Appearance of specimen using each type of mechanical clinching after 2,000 hours in salt spray test.

疲労試験と同じ試験片を用いた。塩水噴霧2,000時間後、裏側のジンク補修したスポット溶接部に赤錆が生じていたが、かしめ品はジンク補修していないにもかかわらず赤錆が発生していなかった。これはZAM<sup>®</sup>の優れた犠牲防食作用によるものと考えられる。

#### 5. 結言

高耐食性溶融亜鉛合金めっき銅板ZAM<sup>®</sup>を供試材とし、丸型かしめ、角型かしめ、さらにはスポット溶接の代替可能な接合強度を目標に新規考案した三又型かしめに関する基礎的な調査を実施した。

得られた結果は以下の通りである。

- (1) 丸型かしめおよび角型かしめでは、同一の板厚同士の場合、引張せん断荷重はSTによらず一定であること、ならびに、板厚を厚くすると引張せん断荷重は増大することがわかった。また、各板厚の組合せの場合、上板が厚い方が引張せん断荷重は増大した。なお、丸型かしめでは、引張せん断荷重

はかしめ時の側壁部厚さに依存する傾向が認められた。

- (2) 鋼板強度の影響としては、丸型かしめの場合、上板強度の高い方が引張せん断荷重は高いこと、また、上板強度が同じ場合、下板強度の低い方が引張せん断荷重は若干高い傾向を示した。角型かしめの場合、丸型かしめと異なり、鋼板強度が最も高い590MPa級の引張せん断荷重は高い水準に無いことがわかった。これは延性不足によりインターロック部で微小割れ生じたことが主要因と推察した。
- (3) 三又型かしめの引張せん断荷重は、全ての引張角度において、目標値7.99kN/点を満足しており、特に引張角度0°、60°、120°で最大荷重を示した。また、引張せん断荷重の面内異方性の指標である最大荷重と最小荷重の比は1.05であり、角型かしめの1.15と比べて小さく良好であった。
- (4) 疲労試験では、特に三又型かしめがスポット溶接より耐疲労性に優れていた。また、塩水噴霧試験において、かしめ部に赤錆は認められず、耐食性に優れていた。

以上より、新規考案の三又型かしめを含め、かしめ技術に関する本技術資料の基礎的な知見を基に、スポット溶接の代替など、ZAM®のさらなる用途展開が期待されると考える。

#### 参考文献

- 1) 中村尚文, 桜田康弘, 森川茂, 朝田博: 日新製鋼技報, 88 (2007), 36.
- 2) 日新製鋼株式会社: ZAM®総合カタログ, (2015), 43.
- 3) 堀川裕史, 朝田博: 日新製鋼技報, 92 (2011), 39.
- 4) 大塚雅人, 黒部淳: 第62回塑性加工連合講演会講演論文集, (2011), 231.
- 5) 公開特許公報: 特許第5765818号
- 6) 公開特許公報: 特開2001-321856
- 7) 結城良治: 精密機械, 50-10 (1984), 30
- 8) 安部洋平, 田呂丸和哉, 加藤亨, 森謙一郎: 塑性と加工, 52-610 (2011), 59.