

薄板における軟鋼とステンレス鋼の異材溶接の検討

Investigation of Welding Dissimilar Mild Steel and Stainless Steel to a Thin Plate

高橋 潤也, アグーン ウィスヌグロフ, 中島 均, 藤井 信之

Jyunya Takahashi, Agung Wisnugroho, Hitoshi Nakashima and Nobuyuki Fujii

In general, austenitic stainless steel (309 series) with high Cr and Ni contents is used as a filler metal for welding dissimilar mild steel and stainless steel. The reason is to prevent the reduction of Cr and Ni at the weld, and prevent the part from hardening further. However, this filler metal is expensive. In this study, the most common and inexpensive filler metal for mild steel was applied for welding dissimilar mild steel and austenitic stainless steel to a thin plate. We carried out hardness testing, tensile testing, and bend testing on the joint, and compared the results with those of the 309 series filler metal. The welding methods applied were gas metal arc welding, shielded metal arc welding, and gas tungsten arc welding. The results show no problem with practical application even if the filler metal for mild steel was applied.

Keyword: Austenitic stainless steel, Dissimilar welding, Mild steel, Thin plate

1. はじめに

軟鋼とステンレス鋼の異材溶接は、構造物の性能上及び経済上などの面から、鉄道車両や化学・発電プラントなどの様々な分野で適用されている。

軟鋼とステンレス鋼の異材溶接では、ステンレス鋼の母材組成よりも Cr, Ni 含有量の多いオーステナイト系ステンレス鋼溶加材（以下、309 系溶加材）の使用が推奨されている。その理由として、同溶加材は、母材の溶込み量を制御し、溶接金属組成を数%程度のフェライト相を含むオーステナイト組織とすることで、耐割れ性に優れた溶接部が得られる¹⁾ことが挙げられる。しかし、309 系溶加材は高価であるという難点がある。

著者ら²⁾は、過去に薄板における軟鋼とフェライト系ステンレス鋼の異材溶接に、軟鋼用溶加材を用いたティグ溶接法を適用した。その結果、309 系溶加材を適用した際の継手と比較しても機械的特性に差異はなく、実用上問題ないと報告した。軟鋼用溶加材は 309 系溶加材と比較して安価であるため、適用が可能であれば大きな利点となる。しかし、溶接性に優れ、使用頻度の高いオーステナイト系ステンレス鋼と軟鋼の異材溶接に軟鋼用溶加材を適用し、その継手性能を報告した例はない。

そこで、本研究では、軟鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の薄板における異材溶接に軟鋼用溶加材を適用した。そして得られた継手に対し硬度試験、引張試験及び曲げ試験を実施し、309 系溶加材を適用した際の継手と比較することで軟鋼用溶加材適用の可能性を検討した。

2. 軟鋼とステンレス鋼の異材溶接

軟鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の異材溶接では、ステンレス鋼母材中に含有される Cr 及び Ni が、溶加材及び軟鋼母材によって希釈される。これに伴い、溶接金属部にはマルテンサイト相が析出し、低温割れが生じやすくなるとされている³⁾。したがって、耐割れ性に優れた溶接部を得るためには、Cr, Ni の希釈を適正な範囲に制御する必要がある。

母材希釈に伴う溶接金属の組成変化とその組織の関係を推定する方法にシェフラの組織図が良く用いられている。図 1 にシェフラの組織図と溶込み率の定義を示す。仮に、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 と軟鋼 SS400 を溶接したと考えると、溶接金属部の組織は、図 1 より SUS304 母材組成 e 点と SS400 母材組成 d 点を結んだ線上の組織となる。そして、溶込み率に応じて組織が推定される。今、軟鋼母材とステンレス鋼母材が同じ割合で溶け込んだと仮定すると、その組織は a 点（溶込み率 50%）で示されるマルテンサイト組織となる。ここで、オーステナイト系ステンレス鋼溶加材（YS309）を用いて溶接を行うと、溶接金属は、溶加材組成を示す b 点と a 点を結んだ線上の組織となる。したがって、図 1 より溶込み率が 33%以下となるような溶接条件を選定すれば、溶接金属中にフェライト相が析出し、耐割れ性に優れた良好な溶接金属を得ることができる（c 点）。一方、軟鋼用溶加材（図 1 の d 点）を用いた場合には、溶込み率に関わらず a 点から d 点の間のマルテンサイト相が生

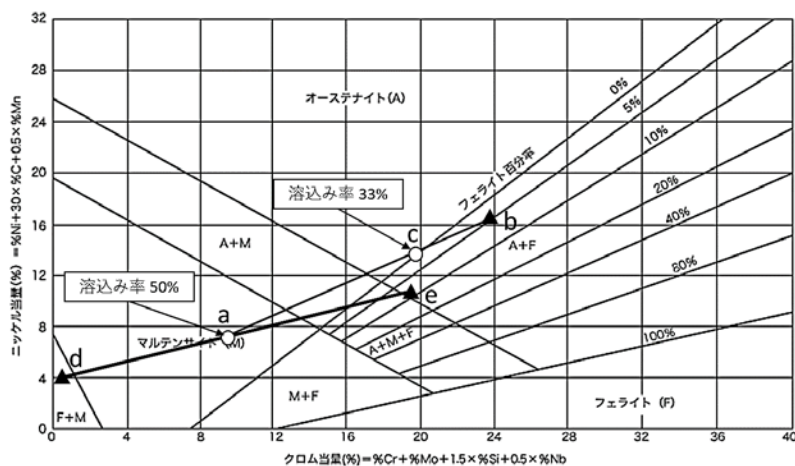


図1 シェフラの組織図と溶込み率の定義

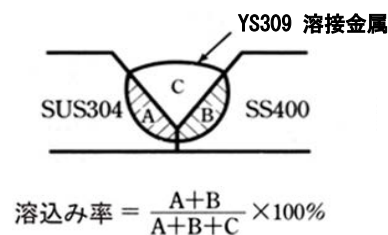


図2 試験材料の形状

じることとなる。溶接部としてマルテンサイト相は、避けるべきである。よって、オーステナイト系ステンレス鋼溶加材が推奨されている。しかし、経験則ではあるが、軟鋼用溶加材を用いてもそれほど強度が低下しないことを体験したことがある。その差を明確にすべく本検討を行った。

3. 実験概要

3.1. 試験材料

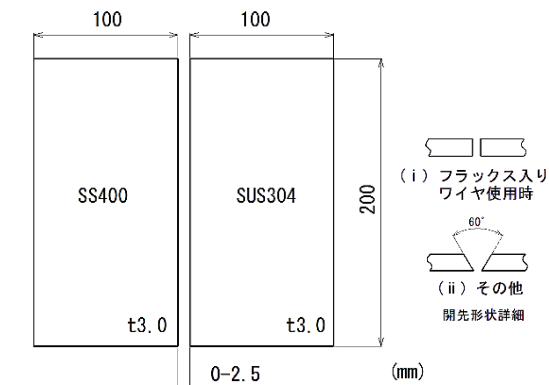
本研究で用いた試験材料は、板厚 3 mm の一般構造用圧延鋼板 SS400 と冷間圧延ステンレス鋼板 SUS304 である。表 1 に各試験材料の化学組成と機械的性質を示す。また、試験材料の形状を図 2 に示す。

溶接は各試験材料の 200 mm 側を突合せ、裏ビードが形成される条件下向き溶接された。パス数は 1 パスとした。開先角度については、60° の V 形としたが、フラックス入りワイヤを用いたマグ溶接では、良好な裏波を形成することができなかった。そこで、この条件については、良好な裏波が形成可能となった I 形開先を適用した。ルート間隔は 0 - 2.5 mm の範囲とした。

3.2. 溶接法及び溶接条件

本研究では、実用性を考慮し、マグ溶接、被覆アーク溶接、ティグ溶接の 3 種類の溶接法を適用した。軟鋼用溶加材及び 309 系溶加材については、代表的な溶加材をそれぞれ適用している。なお、マグ溶接については、ソリッドワイヤ及びフラックス入りワイヤの 2 種類を適用した。表 2 にシールドガス、溶加材の化学組成及び試験片記号を示す。

溶接条件を表 3 に示す。先に述べたように、309 系溶加材を使用した場合、溶込み率が概ね 33% 以下となるよ



うな条件を選定しなければ、良好な溶接部は得られない。

また、溶込み率は、溶接速度及び溶接電流の増加に伴い増加する^[3]。したがって、本実験では作業性を損なうことがない範囲で低電流、低速度の条件を選定した。作製された突合せ試験片は、各条件につき 2 枚であり、これらより各種試験片を採取した。なお、溶接試験片を作製した者は、職業訓練指導員免許（溶接科）を有するものである。

3.3. 各種試験

3.3.1 硬度試験

本研究では、マイクロビッカース硬さ試験機を用いて、継手の硬度分布を測定した。測定位置を図 3 に示す。測定位置は、溶接ビードに対して直角方向の継手横断面である。測定間隔は、0.2 mm とし、荷重 1.96 N で行った。

3.3.2 引張試験

試験材料寸法の関係上、引張試験片は JIS Z 2201 金属材料引張試験に規定されるものを適用した。試験片枚数は 4 枚とし、1 枚の接合された突合せ試験片から採取し

表 1 試験材料の化学組成と機械的性質

試験材料	化学組成 (mass%)								引張強度 (MPa)	伸び (%)	硬さ (HV)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe			
SS400	0.12	0.21	0.58	0.016	0.017	-	-	残	396	20	190
SUS304※	≤0.080	≤1.0	≤2.0	≤0.045	≤0.030	8.0 - 11	18 - 20	残	680	40	260

※化学組成については、JIS G 4305に規定される値を示す。

表 2 シールドガス，溶加材の化学組成及び試験片記号

溶接法	シールドガス	溶加材 (φ mm)	化学組成 (mass%)								試験片記号
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	
マグ溶接 (ソリッドワイヤ)	100% CO ₂	YGW12 (1.2) ※1	0.06	0.88	1.5	0.01	0.01	—	—	残	MAG-M
	96.5% Ar + 3.5 %O ₂	YS309 (1.2) ※2	0.05	0.45	2.0	0.02	0.002	14	23	残	MAG-S
マグ溶接 (フラックス入りワイヤ)	100% CO ₂	T49J0T1-1CA-U (1.2) ※1	0.05	0.45	1.4	0.01	0.009	—	—	残	MAG-FM
	100% CO ₂	TS309L-FB0 (1.2) ※2	0.03	0.61	1.2	0.02	0.01	13	24	残	MAG-FS
被覆アーク溶接	—	E4316 (3.2) ※1	0.08	0.64	0.86	0.01	0.008	—	—	残	S-M
	—	ES309L-16 (3.2) ※2	0.03	0.42	1.4	0.02	0.002	13	24	残	S-SUS
ティグ溶接	100% Ar	W49A3U16 (2.0) ※1	0.09	0.73	1.4	0.01	0.010	—	—	残	T-M
	100% Ar	YS309L (2.0) ※2	0.02	0.39	1.9	0.02	0.003	14	23	残	T-SUS

※1 軟鋼用, ※2 309系

表 3 溶接条件

溶接法	試験片記号	溶接電流 (A)	溶接電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	開先形状	
マグ溶接 (ソリッドワイヤ)	MAG-M	110 - 120	18, 22	300	V 形	
	MAG-S					
マグ溶接 (フラックス入りワイヤ)	MAG-FM	140 - 150	20		I 形	
	MAG-FS					
被覆アーク溶接	S-M	90 - 100	20	240	V 形	
	S-SUS					
ティグ溶接	T-M	100	13			120
	T-SUS					

た．図 4 に引張試験片形状を示す．また，試験速度は，10 mm / min とした．

3.3.3 曲げ試験

曲げ試験では JIS Z 3122 に規定されている突合せ溶接継手の曲げ試験方法を適用し，曲げ表面に現れる割れの発生状況を確認した．

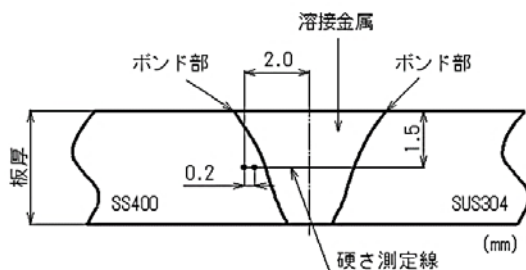


図 3 測定位置

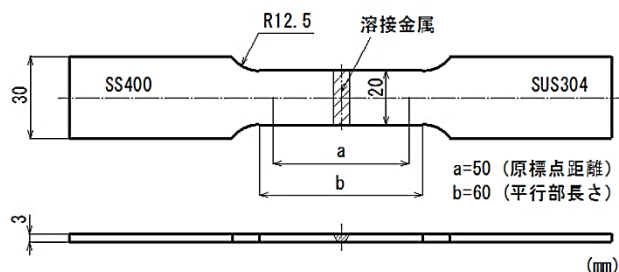


図 4 引張試験片

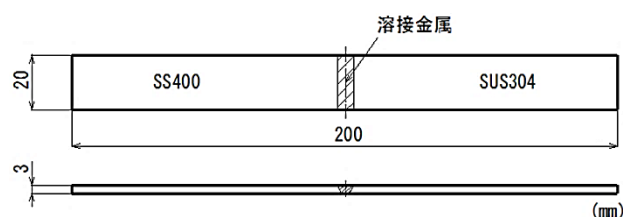


図 5 曲げ試験片

実施した試験は，表曲げ及び裏曲げ試験である．曲げ試験片については，表面及び裏面の余盛を除去し，1枚の突合せ試験片から合計8枚採取した．その内の4枚をそれぞれ表曲げ，裏曲げ試験片とした．試験片寸法を図5に示す．

また，本研究では，曲げ試験時に測定された最大曲げ荷重から曲げ応力を算出している．曲げ応力 σ については，以下の式を用いて算出した^[4-5]．

$$\sigma = M_{bmax} / Z \quad (1)$$

ここで， M_{bmax} は最大曲げモーメント， Z は断面係数である．試験片断面における水平方向の長さを b ，垂直方向の長さを h とすると，試験片断面の形状は長方形であることから，断面係数 Z は，以下の式で表すことができる．

$$Z = bh^3 / 6 \quad (2)$$

曲げ試験では，両端支持による3点曲げとなるため，最大荷重を P ，支点間距離を L とすれば， $M_{bmax} = PL / 4$ となるため，これと(2)式を(1)式に代入すると，求める σ (MPa) は以下の式のようにになる．

$$\sigma = 3PL / 2bh^2 \quad (3)$$

本試験では，荷重が最大の時，試験片の曲率半径は最小となり，その後，荷重は減少しながら試験片は破断せずに曲がり続けた．したがって，(3)式における支点間距離 L は，曲げ治具支持間の距離 20 mm として計算を行った．

4. 実験結果

4.1. 硬度試験

本実験では、表 3 に示す各条件で接合を行った結果、すべての試験片において割れなどの欠陥を確認することはできなかった。

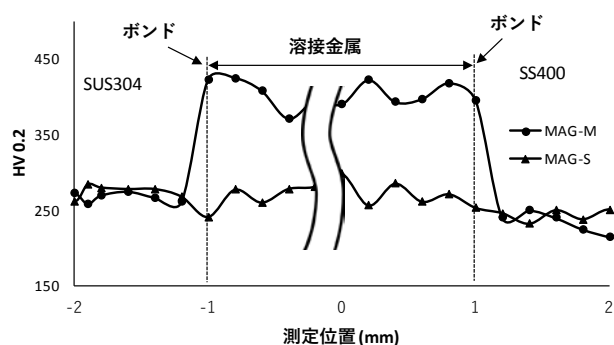
図 6 に各試験片の硬度分布を示す。309 系溶加材試験片の溶接金属部では硬度の上昇はほとんど見られない。一例として、図 7 に 309 系溶加材試験片 (MAG-S) の溶接金属部における組織を示す。

MAG-S 試験片の溶接金属部には、マルテンサイト相の析出は確認されず、その組織はフェライトを含むオーステナイトである¹⁶⁾。したがって、図 1 から分かるように、この試験片の溶込み率は、フェライト相が析出する条件である約 33% 以下であったことが分かる。但し、同

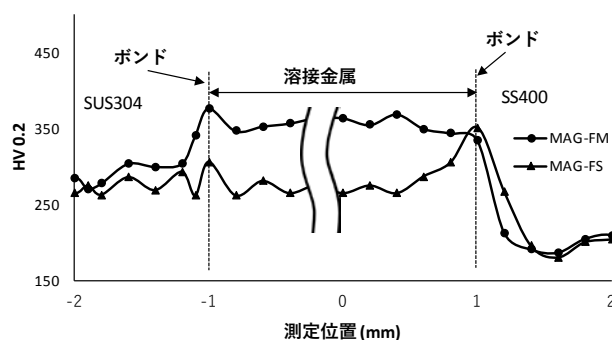
じ 309 系溶加材試験片である MAG-FS 試験片の軟鋼側ボンド部において硬度の上昇が見られる。この理由は、溶接電流値によるものと考えられる。表 3 に示したように、MAG-FS 試験片では比較的高電流 (140 A) であったため、溶込みが大きくなり、この部分におけるマルテンサイト相の存在割合が上昇したためと考えられる。

一方、軟鋼用溶加材試験片の溶接金属部における硬度は、いずれの溶接法においても 309 系溶加材試験片のそれよりも上昇していることが分かる。軟鋼用及び 309 系溶加材試験片における溶接金属部の硬度差は、マグ溶接試験片 (ソリッドワイヤ) 及びティグ溶接試験片で約 150HV0.2、マグ溶接試験片 (フラックス入りワイヤ) で約 100HV0.2、被覆アーク溶接試験片で、約 200HV0.2 であった。

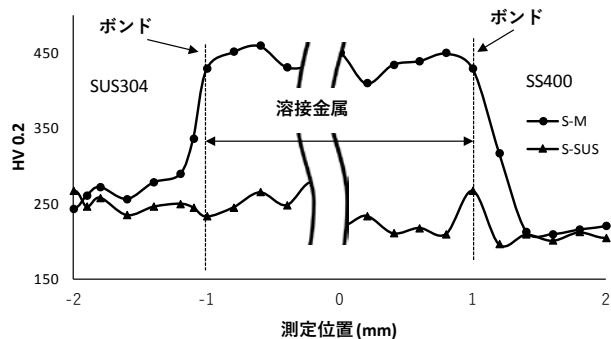
図 8 に軟鋼用溶加材試験片 (MAG-M) の溶接金属部



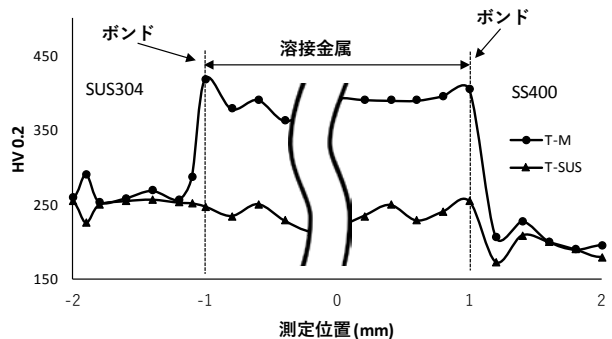
(a) マグ溶接 (ソリッドワイヤ)



(b) マグ溶接 (フラックス入りワイヤ)



(c) 被覆アーク溶接



(d) ティグ溶接

図 6 各溶接法における硬度分布

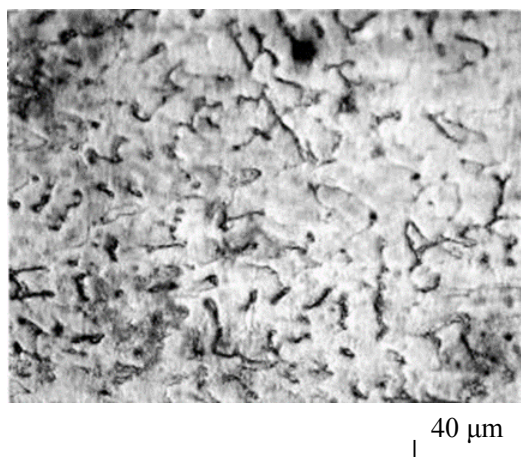


図 7 309 系溶加材試験片 (MAG-S) の溶接金属部組織

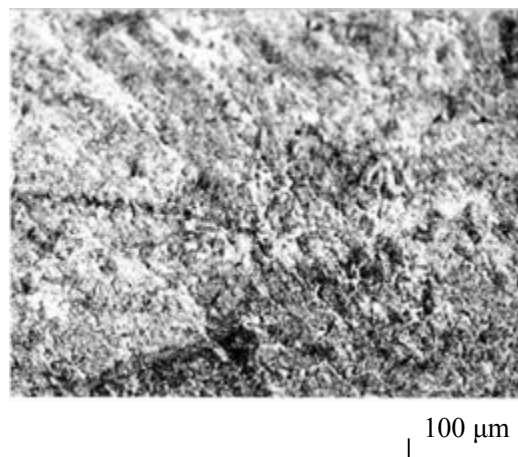


図 8 軟鋼用溶加材試験片 (MAG-M) の溶接金属部組織

における組織を示す。MAG-M 試験片の溶接金属部では、組織の微細化が見られ、図 1 より、マルテンサイト組織であることが分かる。したがって、軟鋼用溶加材試験片の溶接金属部における硬度の上昇は、マルテンサイト相の析出によるものと推察される。しかし、測定された軟鋼用溶加材試験片の平均硬度は約 400HV0.2 であり、通常のマルテンサイト組織の硬度（約 700HV 以上）と大きく異なる。これについては、本研究で用いた試験材料及び溶加材の炭素量が 0.3% 以下と低いため、マルテンサイトの硬度があまり上昇しなかったものと考えている。図 9 にマルテンサイトの硬度に及ぼす炭素量の影響を示す^[2]。マルテンサイトの硬度は、炭素量の増加に伴い高くなる。

4.2. 引張試験

図 10 に各試験片及び各母材の引張強度を示す。図中括弧内の数字は、測定された伸びを示している。なお、ここに示す伸びとは、溶接部を含む原標点距離 50 mm に対する伸びを表している。

図 10 より、いずれの溶接法においても軟鋼用及び 309 系溶加材試験片の引張強度に大きな差異は認められなかった。両者の値は軟鋼母材のそれとほぼ同等であ

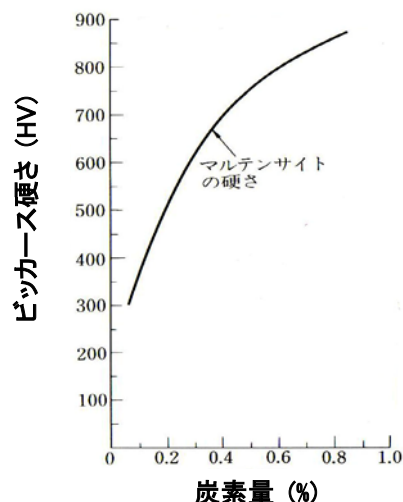


図 9 マルテンサイトの最高硬さに及ぼす炭素量の影響

る。なお、すべての試験片は軟鋼母材側から破断が生じていた。また、軟鋼用溶加材試験片の伸びは、309 系溶加材試験片のそれよりも 12% 程度低下した。溶接金属部の硬化が原因と考えられる。

一般的に、軟鋼用溶加材試験片のような機械的性質が不連続となる継手では、変形から破断に至るまでの過程が通常の継手とは異なり、それが継手強度に影響を及ぼ

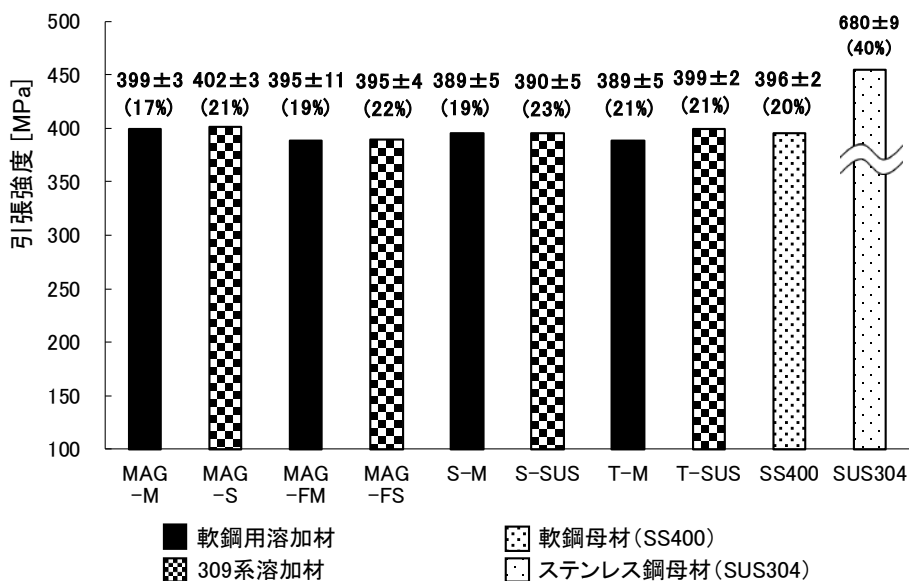


図 10 母材及び各試験片の引張強度

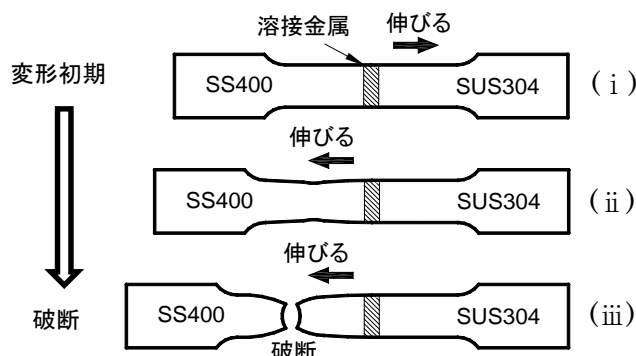


図 11 軟鋼用溶加材試験片の破断形態

すことが知られている¹⁷⁾。しかし、軟鋼用溶加材試験片では、309 系溶加材試験片のそれと比較してほぼ同等の値であった。これについては、軟鋼用溶加材試験片の破断が図 11 に示すような形態で進行したためと考えている。

(i) 引張荷重が作用した初期段階では、耐力の低い SUS304 母材が伸びる。(ii) SUS304 母材の変形が進むにつれ、SUS304 母材は加工硬化し、溶接金属部及び軟鋼母材が伸び始める。(iii) しかし、溶接金属部は硬化しているため、この部分の伸びはわずかである。また、継手全体に占める硬化部分の範囲が比較的狭いことから、変形は軟鋼母材で進行する。ついには、継手において最も強度の低い軟鋼母材で破断が生じ、引張強度及び伸びは軟鋼母材とほぼ同じ値を示した。

以上のことから、軟鋼用溶加材の適用によって溶接金属部が硬化しても、引張強度及び継手の伸びに及ぼす影響は小さいことがわかる。

4.3. 曲げ試験

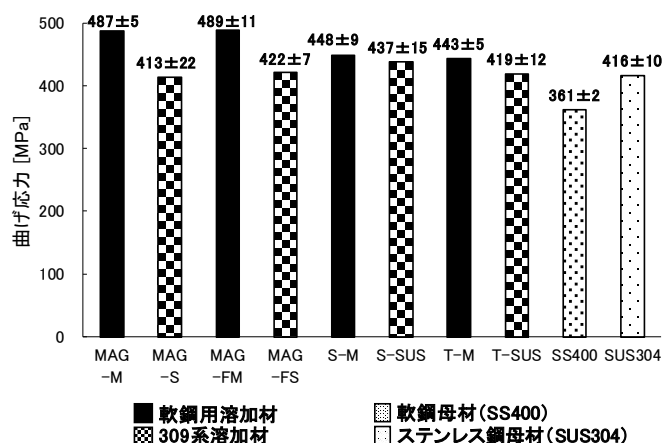
図 12 に各母材及び各試験片の曲げ応力を示す。なお、曲げ試験で破断したものは、一つもなかった。

軟鋼用溶加材試験片の曲げ応力は、309 系溶加材試験片のそれよりも高くなる傾向が見られた。この傾向は表

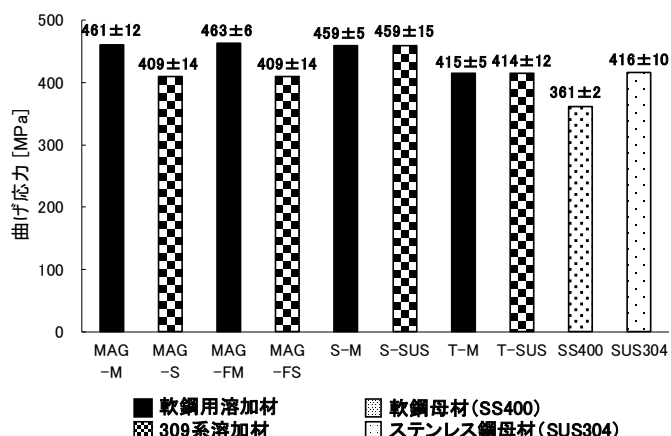
曲げ及び裏曲げ試験においても同様であった。この原因については、溶接金属部が硬化したことによって、曲げに必要な荷重は大きくなり、曲げ応力が上昇したものと考えられる。試験後の試験片を観察したところ、軟鋼用溶加材試験片では、図 13 に示すように、溶接部近傍において変形がほとんど生じていなかった。また、押金具の中心と曲げ中心の位置がずれ、曲げ中心が軟鋼側に移動していた。これについても、引張試験と同様、軟鋼母材側の伸びが他の継手部よりも大きかったためと考えられる。

本研究で曲げられたすべての曲げ試験片については、曲率半径約 7 mm を保ったまま 180° まで曲げることができた。これらの曲げ表面には割れの発生は認められなかった。軟鋼用溶加材試験片において割れが生じなかった理由については、以下のことが要因として考えられる。(1) 溶接金属の強度が高いため、軟鋼母材側が伸びる。(2) 溶接金属部の平均硬度は、約 400HV0.2 程度であり、じん性の低下が小さかった。(3) 母材が薄板(3 mm)であるため、硬化した範囲が狭い。(4) 1 パス溶接であるため、入熱量が小さく残留応力が小さい。

以上の結果より、軟鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の異材溶接では、軟鋼用溶加材試験片の継手性能の著しい低下は見られなかった。



(a) 表曲げ試験



(b) 裏曲げ試験

図 12 母材及び各試験片の曲げ応力

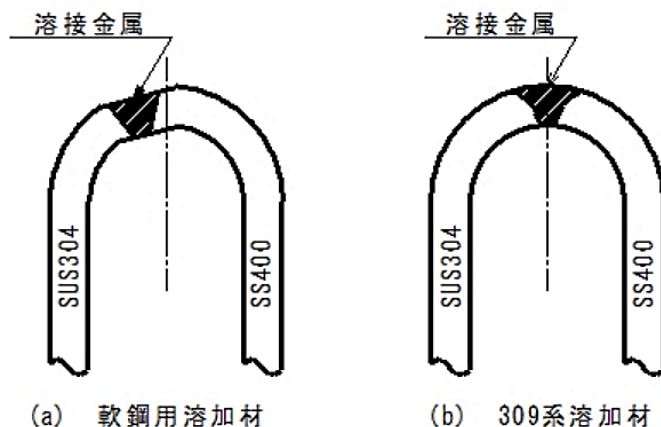


図 13 曲げ試験後の試験片形状

5. まとめ

軟鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の異材溶接に、軟鋼用溶加材を適用した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 溶接後の各試験片において、割れの発生は認められなかった。
- 2) 溶接金属部の平均硬度は、約 400HV0.2 であり、309 系溶加材試験片と比較して、100 - 200HV0.2 程度の上昇が見られた。
- 3) 引張強度では、309 系溶加材試験片との明確な差は認められなかった。また、伸びについては、309 系溶加材試験片よりも約 12%低下した。
- 4) 曲げ試験では、すべての試験片において割れの発生は認められなかった。また、軟鋼用溶加材試験片の曲げ応力は、309 系溶加材のそれよりも上昇する傾向が見られた。
- 5) 溶接金属部に硬化が認められるものの、継手性能の著しい低下は認められないことから、実用上問題は無い。

参考文献

- [1] 丸山敏治：「金属材料異材継手のアーク溶接技術」溶接学会誌，Vol.71, No.6, p. 25 (2002).
- [2] 居村篤志，仙北直之，小竹真太郎，松本洋祐，藤井信之：「薄板におけるフェライト系ステンレス鋼と軟鋼の異材溶接の検討」職業能力開発総合大学校紀要，Vol.42, pp. 56-63 (2013).
- [3] 湊昭二：「ステンレスクラッド鋼の溶接」圧力技術，Vol.19, No.5, p.23-25 (1981).
- [4] 日本規格協会：「コンクリートの曲げ強度試験方法，JIS A1106 (2006)」.
- [5] 日本規格協会：「ファインセラミックス接合の曲げ強さ試験方法，JIS R1624 (2010)」
- [6] 西本和俊，夏目松吾，小川和博，松本長：「ステンレス鋼の溶接」，産報出版社，東京，pp.70-71 (2001)
- [7] 佐藤邦彦，豊田政男：「機械的性質の不連続部を含む材の静的引張強度に関する基礎研究」溶接学会誌，Vol.40, No.9, pp.49-64 (1971)

(原稿受付 2017/11/27, 受理 2018/5/24)

*高橋 潤也，修士（工学）
職業能力開発総合大学校，能力開発院，〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1
Jyunya Takahashi, Faculty of Human Resources Development,
Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi,
Kodaira, Tokyo 187-0035.
Email: j-takahashi@uitek.ac.jp

*アグーン ウィスヌグロフ，修士（工学）
インドネシア共和国
Agung Wisnugroho, Republic of Indonesia.

*中島 均，博士（環境科学）
職業能力開発総合大学校，能力開発院，〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1
Hitoshi Nakashima, Faculty of Human Resources Development,
Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi,
Kodaira, Tokyo 187-0035
Email: nakashima@uitek.ac.jp.

*藤井 信之，博士（工学）
職業能力開発総合大学校，能力開発院，〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1
Nobuyuki Fujii, Faculty of Human Resources Development,
Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi,
Kodaira, Tokyo 187-0035.
Email: nfujii@uitek.ac.jp