

施工温度がスタッド溶接に与える影響

Influence of Construction Temperature of Stud Welding

前田 憲太郎* 吉津 利洋* 吉田 協** 齋藤 繁** 見山 克己**

Kentaro Maeda*, Toshihiro Yoshidu*, Kanou Yoshida**, Shigeru Saito**, Katsumi Miyama**

概要

本報では、スタッド溶接の施工温度が溶接部の性能に与える影響を把握するために、施工温度と母材板厚を変数にした試験体を製作し、引張試験、押し曲げ試験およびビッカース硬さ試験を行った結果について報告する。施工温度は 8.6°C、-16.0 および -22.3°C の 3 種類、板厚は 9mm、16mm および 25mm の 3 種類である。溶接条件は溶接電流 1250A、溶接時間 0.8 秒とした。引張試験の結果、溶接部での破断はなく、施工温度や板厚の影響は見られなかった。ビッカース硬さ試験結果から、施工温度 -22.3°C の試験体の最高硬さが他の温度より高くなり、一部の試験体で 350Hv を超えることを把握した。押し曲げ試験ではクラック発生時の曲げ角度について検討し、板厚が大きくなると曲げ角度は大きくなるが、施工温度の影響は確認できなかった。

1. 背景および目的

北海道などの寒冷地においては、冬期間の施工時温度が氷点下になる場合があり、日本建築学会鉄骨技術指針では 0°C 以下で溶接を行う場合にはスタッド溶接部より 100mm の範囲の母材部分を 36°C 以上に予熱処理した上で溶接することとなっている。これは、低温であれば急冷効果が高くなり、靱性が低下するためであると考えられるが、40°C 程度の予熱では寒冷地の温熱環境においては鋼材表面に水分が付着する可能性がある。

本研究では、低温下でのスタッド溶接部の性能について検討することを目的として、施工温度、母材板厚を変化させスタッド溶接を行った試験体を製作し、スタッド溶接部の硬さ試験および母材曲げ試験を行い^{1), 2)}、施工温度の影響を把握する。

2. 実験方法

試験体の概要を表 1 に、形状を図 1 に示す。施工条件は表 2、母材の素材試験より得られた機械的性質は表 3 である。

試験体に用いる鋼材は SS400 平鋼とし、平鋼は FB-9×100、FB-16×100 および FB-25×100 の計 3 種とする。頭付スタッドは φ16×120L とする。施工計画時の施工温度は常温の 8.6°C、低温の -16.0、-22.3°C の 3 種類である。溶接条件は、溶接電流 1250A、溶接時間 0.8 秒とする。

試験体名は、例えば 3-25-A1 のように表し、最初の数字“3”は表 2 に示す施工条件のシリーズ番号、次の数字“25”は母材の板厚である。最後の記号は引張および硬さ試験用に製作した 5 体 (A1~A5) の試験体の判別記号、もしくは曲げ試験における 3 体 (B1~B3) の試験体記号である。

2.1 引張試験および硬さ試験

引張試験は JIS B 1198 (頭付きスタッド) による引張試験に準拠し、試験体の A1~A3 を引張試験片として試験を行う。A4~A5 はビッカース硬さ試験 (以下、硬さ試験) 用とし、図 1-1 から図 2 のように加工した後、図 3 に示すように試験を行う。硬さ試験は端部と中央部の 2 箇所の位置で行う。

2.2 曲げ試験

曲げ実験では、JIS Z 2248 (押し曲げ法) による試験を試験体 B1~B3 に対して実施する。試験体は図 1-2 に示す試験体を幅 50 mm に機械加工したものを押し曲げ試験片として用いる。

曲げ試験の概要を図 4 に示す。支え間の距離は、式(1)による。

$$L=2r+3t \quad (1)$$

ここで、L: 2 個の支え間距離 (mm)

r: 内側半径、本研究では 25mm

t: 試験片の厚さ (mm)

載荷は万能試験機を用いて行い、クロスヘッドの

*北海道科学大学寒地先端材料研究所 工学部建築学科

**北海道科学大学寒地先端材料研究所 工学部機械工学科

変位を測定することで、押し金具の変位を得る。得られた押し金具の変位より下式により試験片の曲げ角度を算出する。

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{p \times c + W \times (f - c)}{p^2 + (f - c)^2} \quad (2)$$

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{W \times p - c \times (f - c)}{p^2 + (f - c)^2} \quad (3)$$

ここで、 α ：試験片の曲げ角度

p ：支え中心と試験後の曲げ角度

$$c = 25 + a + \frac{D}{2} \quad (4)$$

a ：試験片の厚さ

D ：押し金具先端の直径

$$W = \sqrt{p^2 + (f - c)^2} - c^2 \quad (5)$$

f ：押し金具の試験前の位置からの変位

表1 試験体名と施工温度、試験方法

試験方法	試験体名		
	シリーズ1	シリーズ2	シリーズ3
引張試験	1-9-A1	2-9-A1	3-9-A1
	1-9-A2	2-9-A2	3-9-A2
	1-9-A3	2-9-A3	3-9-A3
硬さ試験	1-9-A4	2-9-A4	3-9-A4
	1-9-A5	2-9-A5	3-9-A5
曲げ試験	1-9-B1	2-9-B1	3-9-B1
	1-9-B2	2-9-B2	3-9-B2
	1-9-B3	2-9-B3	3-9-B3
引張試験	1-16-A1	2-16-A1	3-16-A1
	1-16-A2	2-16-A2	3-16-A2
	1-16-A3	2-16-A3	3-16-A3
硬さ試験	1-16-A4	2-16-A4	3-16-A4
	1-16-A5	2-16-A5	3-16-A5
曲げ試験	1-16-B1	2-16-B1	3-16-B1
	1-16-B2	2-16-B2	3-16-B2
	1-16-B3	2-16-B3	3-16-B3
引張試験	1-25-A1	2-25-A1	3-25-A1
	1-25-A2	2-25-A2	3-25-A2
	1-25-A3	2-25-A3	3-25-A3
硬さ試験	1-25-A4	2-25-A4	3-25-A4
	1-25-A5	2-25-A5	3-25-A5
引張試験	1-25-B1	2-25-B1	3-25-B1
	1-25-B2	2-25-B2	3-25-B2
	1-25-B3	2-25-B3	3-25-B3

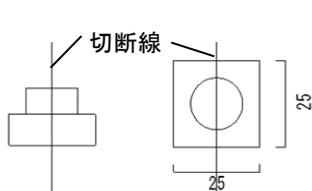


図2 ビッカース硬さ試験用試験片

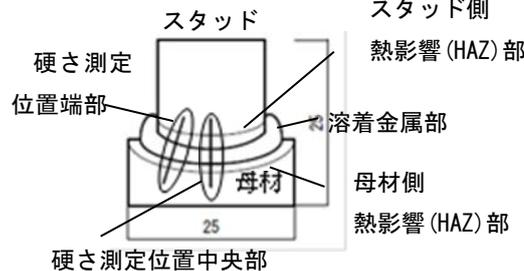


図3 硬さ測定試験片概要および測定位置

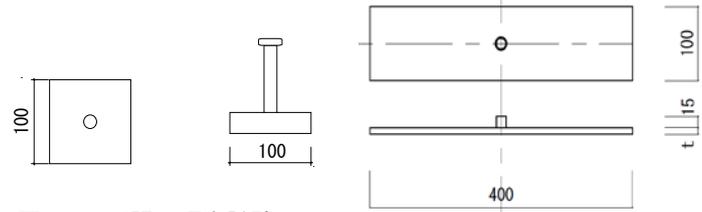


図1-1 引張、硬さ試験用試験体形状

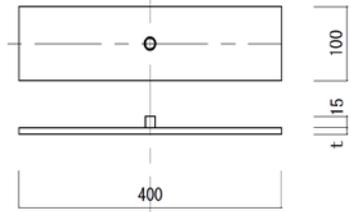


図1-2 曲げ試験体形状

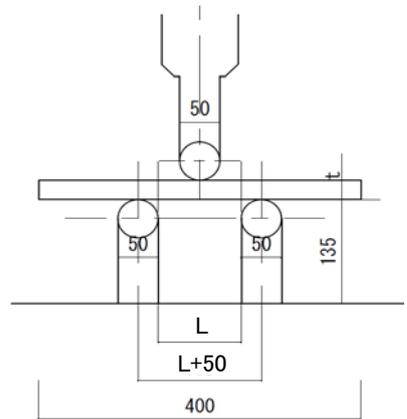


図4 曲げ試験詳細

3. 実験結果および考察

3.1 引張試験の結果

破壊状況を写真1に示す。全ての試験体でスタッド軸部が破断した。

最大耐力を図5に示す。各試験体の引張耐力にほぼ変化はない。1体だけ最大耐力が低いものがあるが、加力中に保持具から試験体が滑ったためである。

この結果において溶接部で破断した試験体はなく、引張耐力において板厚、施工温度による影響は見られなかった。

3.2 マクロ試験およびビッカース硬さ試験結果

写真2にシリーズ3のマクロ写真を示す。全ての試験片でスタッド側の熱影響部の幅が広く、母材側の幅が狭い傾向が見られる。

端部の硬さ試験結果を図6~8に示す。図の横軸

表2 施工条件

シリーズ	試験体表面温度	工場内温度	工場内湿度	作業場温度	溶接電流
1	-16°C	-16.3°C	83.1%	16°C	1250A
2	8.6°C	8.9°C	76.0%	10°C	1250A
3	-22.3°C	-	50%	-24°C	1250A

表3 母材の機械的性質

母材	板厚 (mm)	σ_{yh} (N/mm ²)	σ_{yl} (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	Y.R. (%)	EL (%)
FB9	9.09	283.54	266.70	430.97	65.79	31.34
FB16	16.12	269.47	256.85	415.51	64.85	32.38
FB25	24.96	269.47	252.72	411.24	65.53	35.75

である距離は、スタッド側の最初の圧痕を0としており、距離が大きくなるほど母材側の測定点を示す。図中の凡例は、■が熱影響（HAZ）部（距離が小さいほうがスタッド側、大きい方が母材側）、▲は溶着金属部を示す。

硬さ測定位置が中央部と端部における試験片ごとの硬さの最大値の関係を図9に示す。-22.3℃板厚25mm中央部、16mmの端部では最高硬さ350Hvを超えていた。最高硬さと表3に示す母材の引張強さ σ_u の関係を図10に示す。ビッカース硬さの最高値 Hv_{max} と母材の炭素当量 C_{eq} の関係を図11に示す。炭素当量は、(1)式により算出し、ミルシートに記載された化学的成分を用いた。なお、Ni, Cr, Mo, Vの記載がないためこれらの値は0として算出したため、実際には、より大きな値となると考えられる。

$$C_{eq} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad (6)$$

文献2)によれば、ビッカース最高硬さと炭素当量

の関係は、概ね以下の範囲にあることが示されている。

$$Hv_{max} = 900C \cdot eq \pm 50 \quad (7)$$

-22.3℃での溶接の結果は、炭素当量との関係は比例関係にあるが、(2)式より大きな値となった。

3.3 曲げ試験結果

3.3.1 試験状況

実験時の状況について写真5に、実験後の試験体について写真6, 7に示す。

2-9-B2,1-9-B2は、下側支点の片側がしっかりと固定されていなかったため、試験中に支点間距離が3cm程少しずつ広がってしまい、加力位置が中央部分

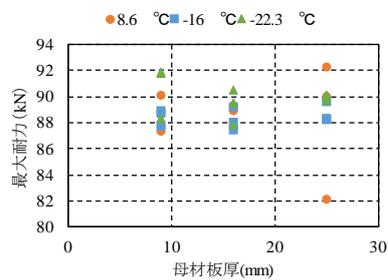


写真1 引張試験終了後

図5 引張試験の結果

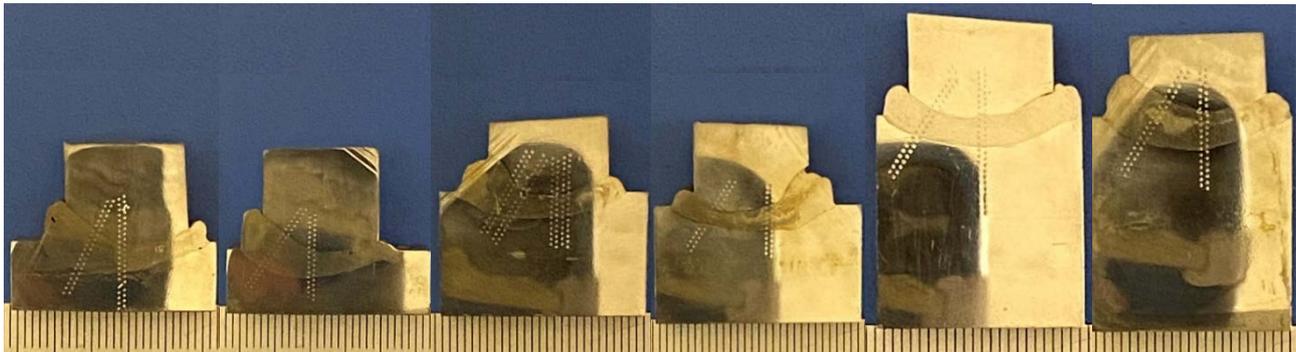


写真2 マクロ試験結果(9 mm)

写真3 マクロ試験結果(16 mm)

写真4 マクロ試験結果(25 mm)

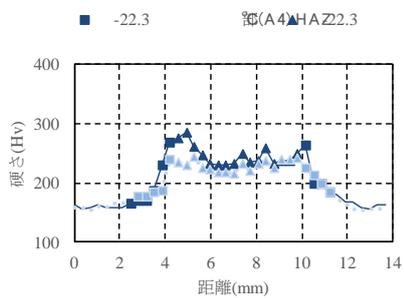


図6 ビッカース硬さ試験結果(9 mm)

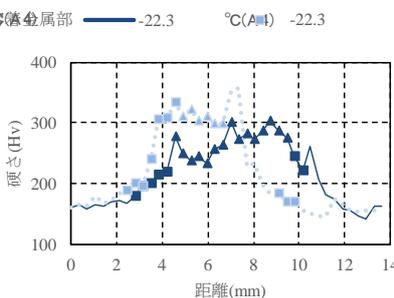


図7 ビッカース硬さ試験結果(16 mm)

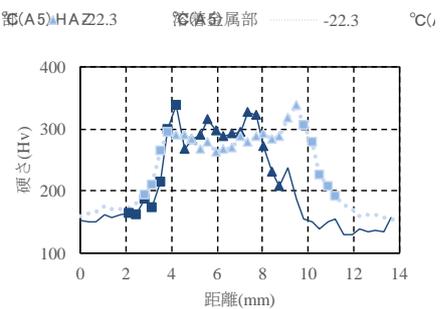


図8 ビッカース硬さ試験結果(25 mm)

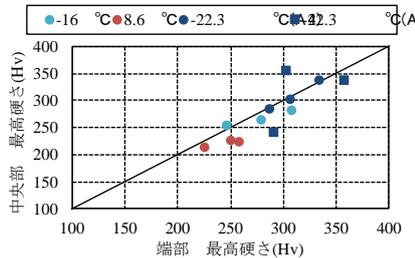


図9 端部と中央部の最高硬さ

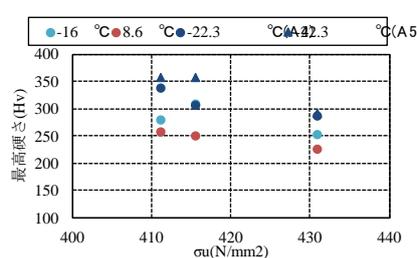


図10 最高硬さと最高引張強さ

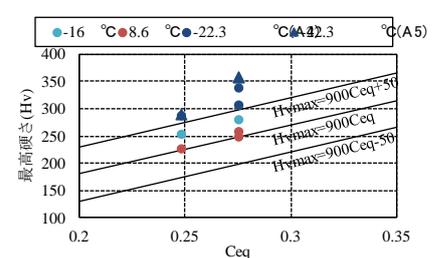


図11 最高硬さと炭素当量



写真5 押し曲げ試験時の様子



写真6 実験後試験片



写真7 クラック発生場所

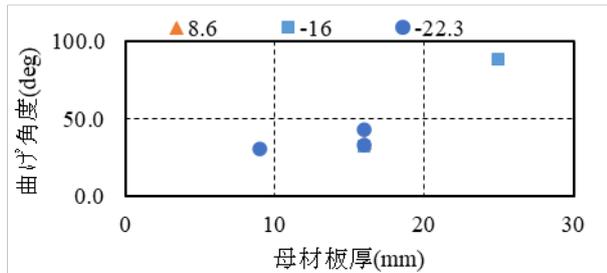


図12 クラック発生時曲げ角度と母材板厚

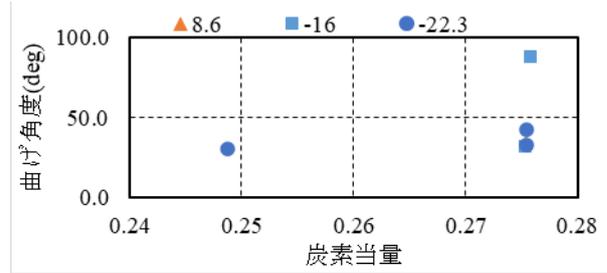


図13 クラック発生時曲げ角度と炭素当量

からずれてしまった。3-25-B1は、試験終了後、下の台が回転している事を確認したが、試験開始時から回転していたか、加力中に回転したかは確認できない。3-9-B2は、試験体の設置中の不手際により、誤ってわずかな荷重を加えてしまった。

3.3.2 実験結果

クラック発生時曲げ角度と母材板厚の関係を図12に示す。クラック発生時の曲げ角度は、30~60°の間に分布しており、板厚が大きくなると曲げ角度が大きくなる傾向がみられる。また、施工温度による差は見られなかった。

クラック発生時曲げ角度と炭素当量との関係を図13に示す。炭素当量との明瞭な関係は見られなかった。

4. まとめ

溶接施工温度を変化させた試験体の性能を把握するために、引張試験、硬さ試験および押し曲げ試験を行った結果を以下にまとめる。

- 1) 引張試験を行った結果、溶接部で破断したものはなかった。
- 2) 試験体の硬さ試験を行った結果、施工温度が低いものは、高いものと比べて硬さが高くなる傾向があり、-22.3°Cで施工した試験体のうち、板厚25mmの中央部、16mmの端部で、最高硬さが350Hvを超えた。母材板厚による影響は見られなかった。
- 3) 最大硬さと炭素当量の関係では、-22.3°Cの試験体は文献2)に示された(2)式より大きくなる。
- 4) 押し曲げ試験によりスタッド溶接部にクラック

クが発生する曲げ角度は、板厚が大きくなるほど大きくなる。しかしながら施工温度や炭素当量との明瞭な関係はみられない。

謝辞

試験体の製作には、北見市の(株)安田鉄工所のご協力を得た。また、実験データの収集には、北海道科学大学2018年度4年生リンジュンミン君、2019年度4年生門脇堯洋君、小川竜馬君の多大な協力を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 初瀬 隆司, 長尾 直治, 尾形 素臣, 谷口 徹, 中辻 照幸: 厚板高張力鋼に対するスタッド溶接の影響について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系, 日本建築学会, pp.1477-1478, 1983
- 2) 秋山 茂雄, 木村 義正, 伊藤 真人: 低温下におけるスタッド溶接の性能試験日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 日本建築学会, pp.1279-1280, 1989.10
- 3) 長尾 直治, 河野 六郎, 大隈 哲夫, 渡邊 一夫, 矢幡 秀介, 堀 継夫, 伊藤 輝男, 蜷川 利彦: 低温下におけるアークスタッド溶接の研究: その2. 炭素当量をパラメータとした実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C(構造Ⅲ), pp.1277-1278, 1989.10
- 4) 前田 憲太郎, 齋藤 繁, 田沼 吉伸, 高島 敏行, 見山 克己: スタッド溶接の施工温度と溶接部のビッカース硬さに関する検討, 鋼構造年次論文報告集第24巻, 鋼構造協会, pp.739-744, 2016.11