

スタッド溶接に関する実験的研究

—スタッド溶接が母材に及ぼす影響について—

中 辻 照 幸
矢 部 喜 堂
野 田 紀 一 郎
(建築設計本部)
村 井 義 則
(建築設計本部)

§ 1. はじめに

最近スタッド溶接が、合成梁に使用するスタッドジベルをはじめとして、鉄骨部材へ外装材を取りつけるためのスタッドボルト等広範囲に使用されるようになった。

現在使用されているスタッド溶接は、アークの発生機構、スタッドベースの処理方法、フェルールの形状等により、多くの種類に分類される(表-1)。

サイクアーク方式とフィリップス方式の大きな相違点はアークの発生機構にある。サイクアーク方式は、スタッドと母材を接触させてアークを発生させるが、フィリップス方式は、半導体でつくられたカートリッジが通電によって赤熱し熱電子の放出により、スタッドと母材は接触することなくアークが発生する。その機構上の相違から図-1に示すように余盛の形状も異なってくる。

上記各種のスタッド溶接は、今日までしばしばその信頼性を議論の対象とされてきた。このたび日本建築学会では、そういう現状にあるスタッド溶接の信頼性の向上

を主目的としてスタッドジベルを対象とした「スタッド溶接工作規準(案)」を発表するに至った。

一方、柱、梁など主要構造部材には高張力鋼でかつ板厚の厚い鋼材が使用される傾向にあり、これらの部材にスタッド溶接をした場合、スタッド溶接そのものによって、あるいは溶接熱による母材材質の変化によって、その機械的性質、力学的性質の劣化が懸念される。

本研究は、スタッド溶接が母材に及ぼす影響について実験的に調べたものである。

§ 2. 実験概要

本実験は、スタッド溶接の品質試験およびスタッド溶接をした母材の引張試験(以下スタッド溶接母材引張試験と呼ぶ)より構成される。なお、試験に採用したスタッド溶接法はネルソン方式であり、他の方式の性能については今回ふれない。

スタッド溶接の品質試験を、スタッド溶接が母材に及ぼす影響を調べるに先だって前記規準(案)に基づいて行なった。試験内容は、溶接欠陥の含まれていない健全な溶接部であるか否かを調べるマクロ試験、溶接部の硬さを調べるピッカース硬さ試験、さらにスタッド溶接部が十分な強度を有するか、あるいはまた健全な破断性状を示すか否かを調べるテーパーワッシャ付引張試験、繰返し曲げ試験である。

以上の試験によりスタッド溶接部の品質を確認した上でスタッド溶接した母材の引張試験を強度、伸び、破断性状等に着眼して行なった。

なお、予熱がスタッド溶接母材に与える効果についても併せ調査した。

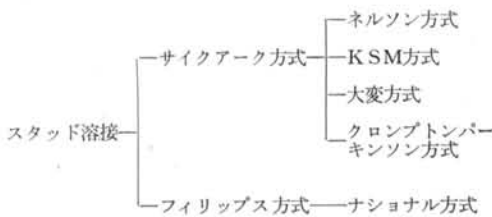


表-1 スタッド溶接法の分類

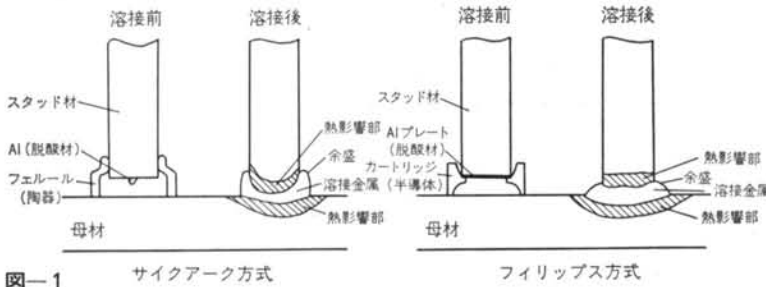


図-1

§ 3. 供試材料および溶接条件

本実験全般にわたり使用した母材はSM50Aで、板厚を9, 16, 25, 36mmの4種類とし、スタッド材はネルソンスタッドジベルS3L(19mmφ)を使用した。母材およびスタッド材の化学成分、母材の機械的性質を表-2、表-3に示す。

溶接方法はネルソン方式スタッド溶接法で、その溶接条件は表-4に示すとおりである。予熱は板厚19mmと36mmの場合について、スタッド溶接点を中心に半径5cmの範囲にわたりガスバーナーで加熱し、表面温度計で温度チェックを行なった。予熱温度は75℃および150℃である。

§ 4. スタッド溶接品質試験

4.1 試験片数量および寸法

試験片は表-5に示すように各板厚、各予熱温度ごとに、500mm×600mmの鋼板にピッチ100mmで30本ずつ同一径(19mmφ)、同一長さ(150mm)のスタッドを溶接した後、

100mm×100mmにガス切断し試験に供した。

4.2 マクロ試験およびビッカース硬さ試験

4.2.1 試験片数量および試験方法

マクロ試験とビッカース硬さ試験には同一の試験片を使用し、表-5の30本中任意に5本ずつ抽出し、これに供した。

ビッカース硬さ試験は、マクロ試験で溶接欠陥の有無を肉眼検査した後、図-2に示す要領で行なった。

4.2.2 試験結果

マクロ試験の結果、試験片全数に溶接欠陥は認められ

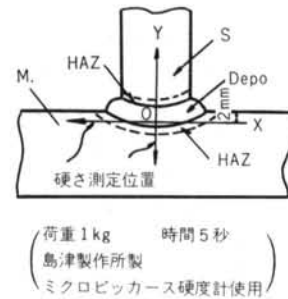


図-2 硬さ測定方法

供試材		化 学 成 分 (%)													
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Al	Ceq*	
母材 SM50A	板厚 (mm)	9	0.158	0.28	1.49	0.012	0.009	0.02	0.01	0.01	tr	<0.002	<0.002	0.028	0.420
	19	0.152	0.37	1.40	0.015	0.011	0.01	0.01	0.01	tr	0.034	<0.002	0.021	0.405	
	25	0.156	0.36	1.39	0.014	0.010	0.01	0.01	0.01	tr	0.028	<0.002	0.024	0.407	
	36	0.156	0.37	1.37	0.012	0.011	0.01	0.01	0.01	tr	0.028	<0.002	0.026	0.404	
スタッド**	No. 1	0.117	0.08	0.50	0.008	0.028	0.02	0.01	0.01	tr	<0.002	<0.002	0.075	0.259	
	No. 2	0.117	0.08	0.49	0.008	0.020	0.02	0.01	0.01	tr	<0.002	<0.002	0.075	0.257	

$$* Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$$

** スタッド材は同一ロットから任意に2本抽出

表-2 供試材の化学成分

母材板厚 (mm)	降伏点 (kg/mm ²)	最大強度 (kg/mm ²)	伸び (%)	硬さ (Hv)
9	38.2	54.4	26.3	175
19	39.5	54.0	28.3	175
25	36.0	53.8	29.0	180
36	36.1	52.1	30.3	180

注) JIS Z2201 1号A標準試験片3体の平均値

表-3 母材の機械的性質

電 流	範 囲	1500A~1800A
	最頻値	予熱なし 1550A 予熱あり 1600A
電 圧		33V
アークタイム		0.9秒
引き上げ代		2.5mm
突っ込み代		4mm
極 性		直流正極性

表-4 溶接条件

板厚 (mm)	予熱			
	予熱なし	75℃予熱	150℃予熱	150℃予熱
9	30	—	—	—
19	30	30	30	30
25	30	—	—	—
36	30	30	30	30

表-5 品質試験片数量(本)

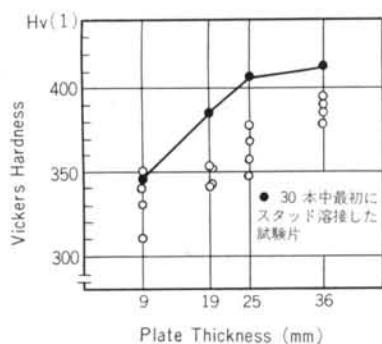


図-3 母材板厚とビッカース最高硬さ

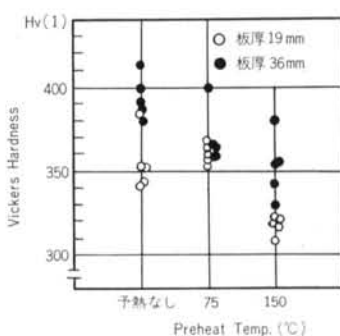


図-4 予熱温度とビッカース最高硬さ

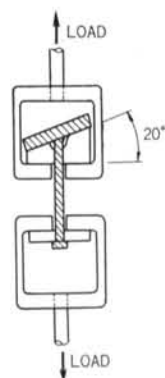


図-5 テーパーワッシャ付引張試験治具

ず、健全な溶接部であった。

図-3は予熱なしの場合のビッカース最高硬さと板厚の関係を示したものであるが、板厚が大きくなるにしたがって最高硬さが高くなる傾向にある。

図-4は板厚19mmと36mmについて予熱温度と最高硬さの関係を示したものである。予熱温度の上昇によって最高硬さが減少する傾向が認められる。

4.3 テーパーワッシャ付引張試験

4.3.1 試験片数量および試験方法

テーパーワッシャ付引張試験は、板厚19mmと36mmのものについて行ない、表-5の30本中任意に10本ずつ抽出し、これに供した。

引張試験は、図-5に示すような治具を用いて行なった。

4.3.2 試験結果

テーパーワッシャ付引張試験の結果を表-6に示す。

合否判定条件は、写真-1に示すようにスタッド軸部破断で、かつ最大耐力が 41 kg/mm^2 以上のものを合格とした。表中の不合格となった1本は、最大耐力が 43 kg/mm^2 と十分であるが、写真-2に示すように溶接部が抜けるように破断した。そして、破断面にブローホールが見られ、破面の約85%が脆性破面であった。

4.4 繰返し曲げ試験

4.4.1 試験片数量および試験方法

繰返し曲げ試験は板厚19mmと36mmのものについて行ない、表-5の30本中任意に15本ずつ抽出し、これに供した。

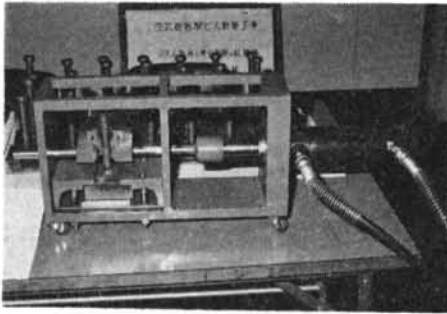
繰返し曲げ試験に際して、写真-3に示すような試験治具と、押し引き型油圧ジャッキを組合わせた繰返し曲げ試験機を製作して試験を行なった。



写真-1 テーパーワッシャ付引張試験結果
スタッド軸部破断(合格)
板厚19mm, 予熱なし



写真-2 テーパーワッシャ付引張試験結果
溶接金属部破断(不合格)
板厚19mm, 予熱なし



写真一三 繰返し曲げ試験機



写真一四 繰返し曲げ試験結果

スタッド軸部破断 (合格)
板厚19mm, 予熱150℃



写真一五 繰返し曲げ試験結果

溶接金属部破断 (不合格)
板厚19mm, 予熱150℃

4.4.2 試験結果

繰返し曲げ試験結果を、表一七に示す。

合否判定条件は、図一六、図一七に示す。ほとんどの破面は、図一六に示したようにスタッドを凹にくりぬいた破断状況を示し、延性破面である (写真一四)。しかし、全試験片中2本が図一七に示すような破断をし、約

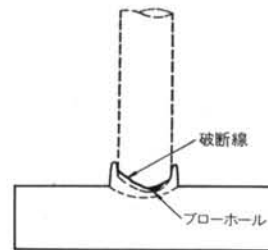
板厚 (mm)	予熱温度	最大耐力 (kg/mm ²)		不合格数/試験本数
		範囲	平均値	
19	予熱なし	43.0~47.3	45.4	1/10
	75℃	43.9~45.9	45.0	0/10
	150℃	44.3~49.4	45.5	0/10
36	予熱なし	44.4~47.8	45.3	0/10
	75℃	43.9~46.6	45.3	0/10
	150℃	44.6~47.1	45.6	0/10

表一六 テーパーワッシャ付引張試験結果

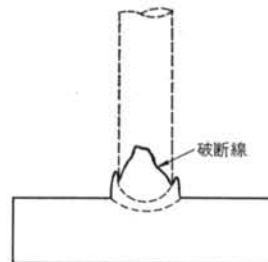
板厚 (mm)	予熱温度	繰返し回数*	ブローホール発生数/試験本数	不合格数/試験本数
19	予熱なし	3 (3) 4 (0)	4/15	0/15
	75℃	3 (1) 4 (0) 5 (2)	1/15	0/15
	150℃	3 (4) 4 (0)	2/15	1/15
36	予熱なし	4 (0)	2/15	0/15
	75℃	3 (1) 4 (0)	2/15	1/15
	150℃	4 (0)	0/15	0/15

* x(y) は x 回の繰返し曲げで破断した試験片が y 本であったことを示す

表一七 繰返し曲げ試験結果



図一六 破断状況 (合格)



図一七 破断状況 (不合格)

50~65%程度の脆性破面率であった(写真-5)。このような破断をしたものには、ブローホール(直径3~4mm程度)が含まれていた。

また、図-6のような破断をしたものにも、小さなブローホール(直径約1mm程度)が含まれている場合もあった。

§ 5. スタッド溶接母材引張試験

本試験では、スタッド溶接の熱影響の大きさ、硬さ分布が板厚、板幅およびスタッド溶接ピッチの変化に伴って、母材の引張強度、伸びおよび破断性状に及ぼす影響について調査した。

5.1 試験体作成

試験体の数量および試験体の形状、寸法は表-8、図-8に示すとおりである。

板厚を同一とする試験体は、予め所定のピッチで1枚物の鋼板にスタッド溶接し、その後に試験体を切り出し加工した。これは、アークブローの影響を防ぐためである。

なお、試験体の荷重軸はすべて鋼板のロール方向と一致させている。

5.2 試験方法

載荷はアムスラー型200トン万能試験機、および電子管リレー式400トン万能試験機(表-8の○印の試験体に使用)を使用した。

試験体には Barba の式 ($l=4\sqrt{A_0}$, l : 標点距離, A_0 : 断面積) にしたがって標点を取り、写真-6に示すように標点位置に変位計をセットし、ペンオシロまたはX-Yレコーダーで荷重と標点間伸びとの関係を調べた。

また、さらに試験体平行部長さ600mmを標点距離にとり、破断後の伸びを測定した。

5.3 試験結果

5.3.1 強度

図-9に予熱なしでスタッド溶接を行なったスタッド溶接母材引張試験体の降伏耐力および最大耐力を示す。図中の(I)印は、各板厚ごとの素材強度のばらつき範囲を示す。図からわかるように降伏耐力、最大耐力ともスタッド溶接ピッチ、板幅に対して顕著な傾向は認められず、ほぼ素材強度のばらつき範囲におさまる。

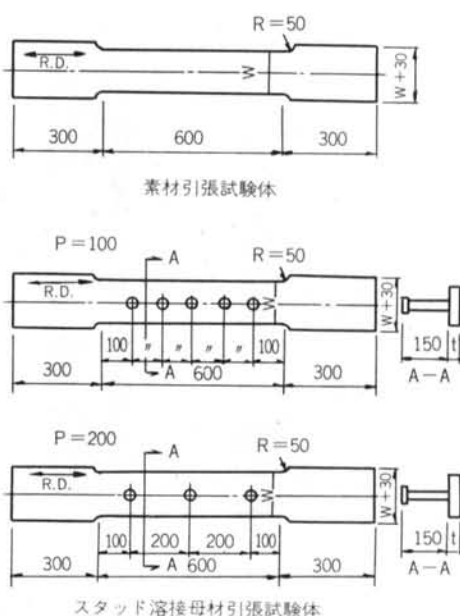
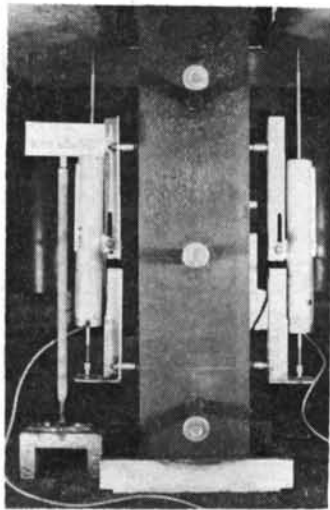


図-8 試験体形状・寸法

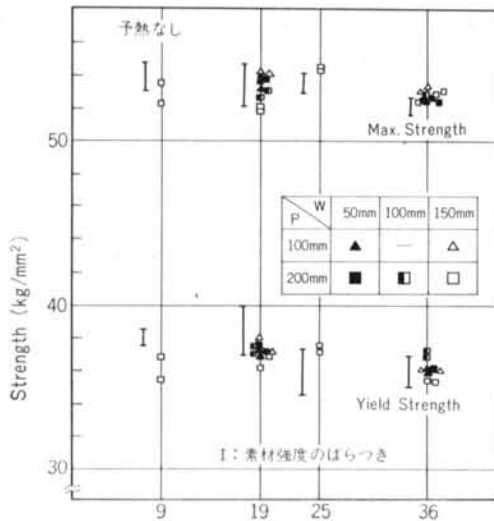
板厚 t (mm)	板幅 W (mm)	素材 引張 試験体	スタッド溶接母材引張試験体			
			スタッド ピッチ P (mm)	予熱温度		
				予 熱 なし	75℃	150℃
9	150	②	200	②		
			100	2		
19	50	2	200	2		
			100	②		
	100	2	200	2		
			150	②	②	②
25	150	②	200	②		
			100	2		
36	50	2	200	2		
			100	②		
	100	②	200	②		
			150	②	②	②

注) ○印は 400 ton 試験機で載荷 (計48体)

表-8 試験体数量(体)



写真一六 スタッド溶接母材引張試験



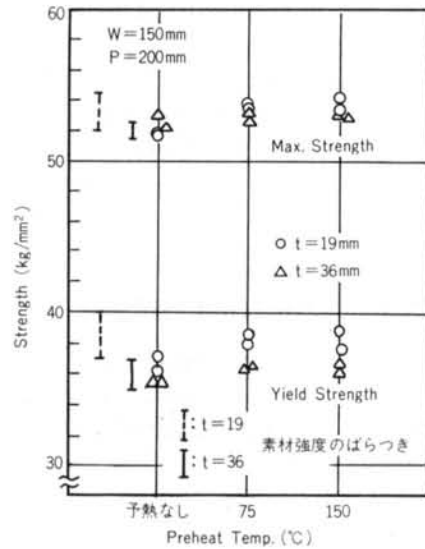
図一九 スタッド溶接母材引張強度 (予熱なしの場合)

図一十は板幅150mm, スタッド溶接ピッチ200mmの板厚19mmと36mmのものについて強度に与える予熱の効果を調べたものであるが, この場合も素材強度のばらつきの範囲におさまリ, スタッド溶接時の予熱が母材の強度に与える影響はほとんどないと考えられる。

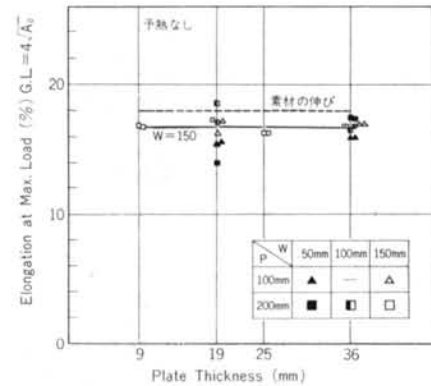
5.3.2 伸び

a) 最大荷重時

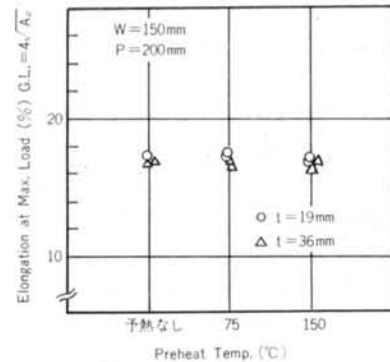
各スタッド溶接母材引張試験体の最大荷重時における標点間距離 ($l=4\sqrt{A_0}$) の伸び率を図一十一 (予熱なしの場合), 図一十二 (予熱をした場合) に示す。図一十一の破線は素材引張試験体の伸び率を示し, 実線は板幅150mmのスタッド溶接母材引張試験体の伸び率を示している



図一十 スタッド溶接母材引張強度 (予熱した場合)



図一十一 最大荷重時における伸び率 (予熱なしの場合)



図一十二 最大荷重時における伸び率 (予熱した場合)

が, 素材引張試験体に比べて約1%程度低下している。また, 図一十二は最大荷重時の伸び率に与える予熱の影響

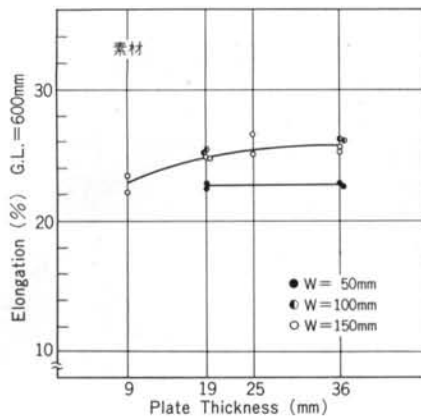


図-13 素材引張試験体の破断後の伸び率

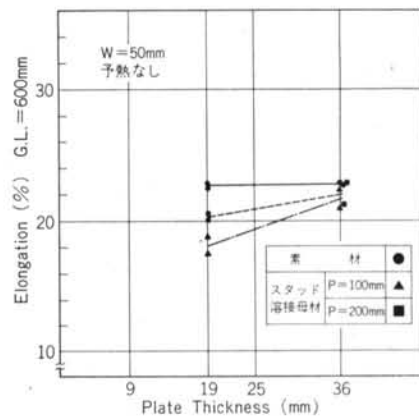


図-16 スタッド溶接母材引張試験体の破断後の伸び率

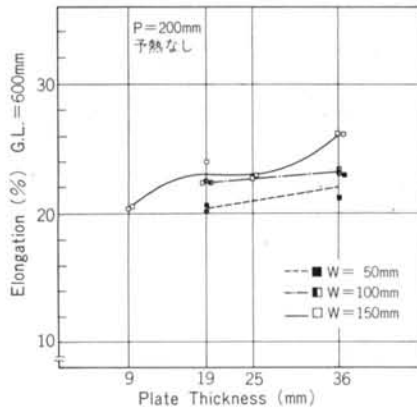


図-14 スタッド溶接母材引張試験体の破断後の伸び率 (予熱なしの場合)

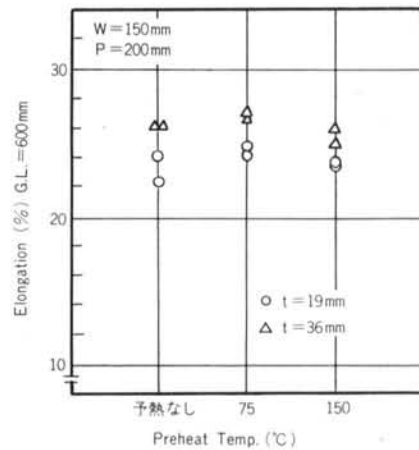


図-17 スタッド溶接母材引張試験体の破断後の伸び率 (予熱した場合)

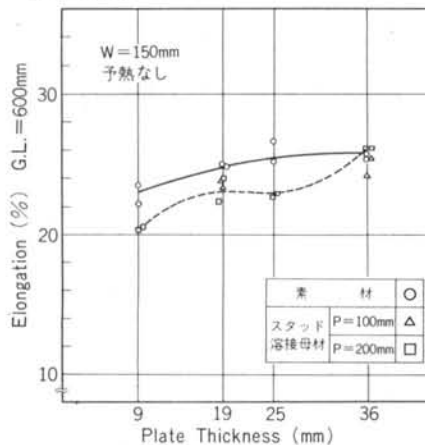


図-15 素材とスタッド溶接母材引張試験体の破断後の伸び率について調べたものであるが、約17%とほぼ一定で予熱の影響は認められない。

b) 破断後

図-13~17に試験体平行部長さ600mmを標点距離にと

った場合の、破断後の伸び率を示す。

図-13は素材引張試験体の伸び率で、図-14は予熱なしでスタッド溶接をピッチ200mmで行なった試験体の破断後の伸び率である。両図とも板厚が小さいものほど、また板幅が小さいものほど伸び率は小さい傾向にある。

(これは標点距離を600mmと一定にしたためである)そして同板厚、板幅の素材引張試験体の伸び率に比べてスタッド溶接母材引張試験体の伸び率は低い傾向にある。これは最大荷重時の伸び率の低下と同じ理由で、試験体が縦方向に引張応力を受けた場合、スタッド溶接近傍の母材はスタッドに拘束されて横方向の収縮変形がしにくく、縦方向の伸びが拘束されるため伸び率が低下する。

しかし板幅150mmの試験体に着目すれば、図-15に示すように板厚が36mmの場合、素材引張試験体と同程度の伸び率になる。このように板厚、板幅が大きくなれば、スタッドの拘束が破断後の伸び率に与える影響はほとんど

どなくなると考えられる。

スタッド溶接ピッチの差が伸び率に与える影響については、図-15、図-16からわかるように、板厚19mm、板幅50mmの試験体にはのみ伸び率に差がみられる。

また、スタッド溶接時の予熱が伸び率に与える影響については、図-17に示すように予熱温度によってほとんど伸び率に差が認められない。

5.4 変形挙動および破断性状

素材引張試験体あるいは板厚、板幅の大きなスタッド溶接母材引張試験体を引張载荷すると、試験体平行部の上端あるいは下端から降伏が開始し、試験体全体に降伏域が進展していく。これに対し板厚が小さく、板幅が小さいスタッド溶接母材引張試験体では、スタッド溶接部から降伏が開始する。このことから板厚、板幅が増大するにしたがって、スタッド溶接部の影響が小さくなるのがわかる。

最大荷重時においては、素材引張試験体の場合、最大荷重点とくびれの開始点はほぼ一致するように見える。

(実際はくびれの開始点は最大荷重点の手前にある)しかし、スタッド溶接母材引張試験体では、最大荷重点以前にスタッドとスタッドの間にくびれが生じているのが肉眼で観察できる。この傾向は板幅が小さいほど顕著であり、ちょうど「蛇が玉子を飲みこんだ状態」によく似ている。これはスタッドによる拘束のため、スタッド近傍の母材の引張変形にともなう断面の収縮率が減少するためである。

破断は、ほとんどの試験体がスタッドとスタッドの間の母材部で生じ、その破面は延性破面である。しかし板厚36mm、板幅150mm、スタッド溶接ピッチ100mmの試験体だけは写真-7に示すように、スタッド溶接部を貫通して破断した。この場合においても、前述のように強度および伸び率は母材と同程度であり、破面は延性破面である。

§ 6. まとめ

スタッド溶接に関する実験として、スタッド溶接の品質試験およびスタッド溶接が母材に及ぼす影響に関する実験を行なった。以上の実験の結果を要約すると次のとおりである。

- 1) スタッド溶接部のビッカース最高硬さは、板厚が大きくなるにしたがって大きくなる。板厚19mmで $H_V = 370$ 程度、板厚36mmで $H_V = 400$ 程度であった。

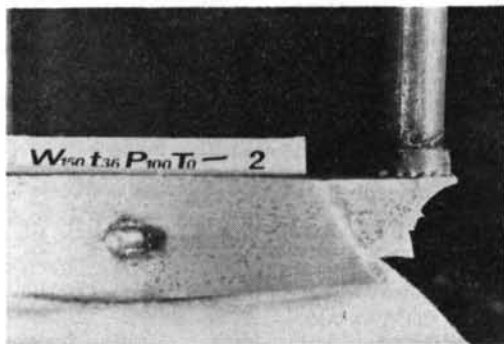


写真-7

- 2) 予熱によってスタッド溶接部のビッカース最高硬さは低下する傾向にあり、150℃の予熱によってビッカース最高硬さは50程度低下する。
- 3) テーパーワッシャ付引張試験、および繰返し曲げ試験の不合格率に予熱の影響は認められなかった。すなわち、ブローホールの発生率は予熱の影響を受けないと考えられる。
- 4) スタッド溶接をした母材の強度は、素材の強度と同程度でほとんど差は認められなかった。
- 5) スタッドを溶接することによって母材の伸び率は低下する傾向にある。板厚19mm、板幅150mmを例にとれば素材の伸び率(G.L.600mm)25%に対し23%である。これはスタッドの拘束によるものであるが、板厚、板幅が大きくなるとスタッドの拘束の影響は少なくなり、板厚36mm、板幅150mmでは素材の伸び率と同程度になる。
- 6) スタッド溶接ピッチの伸び率に与える影響は、板厚19mm、板幅50mmのような板厚、板幅の小さい場合には見られるが、板厚が大きくなるか、または板幅が大きくなればその影響はほとんどなくなる。
- 7) スタッド溶接母材の強度、伸び率に与える予熱の影響は、ほとんど認められなかった。
- 8) スタッド溶接母材の破断は、ほとんどの試験体ではスタッドとスタッドの間の母材で破断した。板厚36mm、板幅150mm、スタッド溶接ピッチ100mmの場合、スタッド溶接部から破断したが、強度、伸び率とも素材と同程度であった。

謝辞

本実験を行なうにあたりご協力いただいた西武不動産(株)、新日本製鐵(株)鉄構開発部葛城氏他、および日本スタッドウェルディング(株)の諸氏に謝意を表します。