併用継手の力学性状に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE BEHAVIOR OF COMBINED JOINTS USING FILLET WELDINGS AND HIGH STRENGTH BOLTS

増田 浩志*, 神保 秀治**, 田中 淳夫***, 植木 隆 司****

Hiroshi MASUDA, Hideharu JINBO, Atsuo TANAKA
and Takashi UEKI

The static characteristics of the combined joints using fillet weldings and high strength bolts are experimentally investigated in order to check the possibility of accumulation of the strength of each connecting element. In this study 50mm long fillet welding with 5mm size is decided as a unit of welding and M16 or M20 (S10T) high strength bolt is unit of bolt. Combinations of 0-3 units of each connecting element are selected as test specimen. Totally 76 specimens were tested. It becomes clear that the maximum strength of the combined joints using fillet weldings and high strength bolts is 5-15% smaller than the accumulated value of the slip strength of high strength bolts and the maximum strength of fillet weldings. And the maximum design strength, of combined joints using fillet weldings and high strength bolts, which is calculated by nominal strength has enough safety.

keywords : combined joints, front fillet welding, side fillet welding, high strength bolts, maximum strength

併用継手、前面隅肉溶接、側面隅肉溶接、高力ボルト、最大耐力

1. 序

高力ボルトと隅肉溶接を併用した継手についての実験は過去に日本建築学会の接合小委員会によってかなり統計的な研究が行われており、そこでは、各種併用継手の力学性状、累加耐力の成立の有無の条件等が検討されている。この研究成果は基本的に現在でも同様の継手に十分通用可能であると思われるが、この研究が行われてから既に約30年が経過しており、現在では高力ボルトの強度レベル、摩擦面の表面処理方法、溶接継目の力学性能などが上記の研究が行われた時期のものとなりと異なっている。従って、現時点で一般に用いられている接合形式について併用継手の力学性状を改めて検討しておく必要がある。このような状況を背景として本研究は、現状における併用継手の力学性状を再検討することを目的として、実験を行い考察したものである。表1に前記接合小委員会の研究と本研究における接合部の概要をまとめた。

2. 実験の概要

本研究で用いた試験体の基本的形状、寸法等の概要を図1に示す。試験体は、中板の両側から添板で接合する形式であり、基本的には、接合部の降伏耐力が母材ないし添板の有効断面の降伏耐力より小さくなるように設計している。母材は板厚25mm、板幅140mm、添板は板

表1 接合部概要

	接合小委員会	本研究
母材	SM50A	SM490A
摩擦面仕上げ	赤さび仕上げ	グリットブラスト処理
高力ボルト	F9T・ウィット系ねじ	S10T・メートルねじ
溶着金属	JIS Z 3212 D5026 手溶接 低水素系高張力鋼用	JIS Z 3312 YGW11 半自動溶接 高張力鋼用ソリッドワイヤ

図1 試験体概要及び変形量測定区間

* 宇都宮大学工学部建設学科 助手・博士(工学)
 ** バコーポレーション 工修
 *** 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博
 **** バコーポレーション 工博

Research Assoc., Dept. of Architecture, Utsunomiya University, M. Eng.
 Tomoe Corporation, M. Eng.
 Prof., Dept. of Architecture, Utsunomiya University, Dr. Eng.
 Tomoe Corporation, Dr. Eng.

厚19mm、板幅100mmの鋼板を用いている。試験部分の隅肉溶接のサイズは全て5mmとし、溶接の余盛を削り、のど厚を一定に仕上っている。溶接の長さは50mmを単位長とし、溶接端部が垂直となるように処理している。これより、本実験において隅肉溶接の有効長さは溶接長さそのものとして考えることができる。前面隅肉溶接は表裏2ビードで1単位となり、側面隅肉溶接は表裏、左右4ビードで1単位である。また治具側については、脚長12mmまたは16mmの隅肉溶接で添板の3辺を連続して溶接している。

高力ボルト接合部の摩擦面は、すべてグリッドブラスト処理とした。試験体組立に先立ち、全試験体について表面粗さを測定しており、表面粗さの平均値は74.3 μ mRy(標準偏差:7.14、変動係数:0.096)であった。

使用した高力ボルトは、トルシア形高力ボルト(S10T)とし、ボルトの呼び径はM16およびM20である。孔径は公称径+2mmとした。ボルトの初期導入張力はボルト締付試験の結果、M16では113kN、M20では181kNの値が得られた(表6参照)。ボルト配置はM16、M20ともにはしあき寸法40mm、ボルトピッチ60mmを標準とした。ただし、併用継手はトラスの弦材と斜材の接合部や筋かい材の材端接合部など接合部の長さが限定される部分への使用が想定され、この場合は高力ボルトのはしあき寸法およびボルトピッチを小さくすることが有効であるため、M20のボルトについて標準配置の他に最小はしあきかつ最小ピッチ配置を計画した。最小はしあき最小ピッチ配置ははしあき寸法が25mm、ボルトピッチが50mmである。

隅肉溶接と高力ボルトの併用継手試験体では、ボルト締めを行った後に溶接を行った。溶接は炭酸ガスシールドアーク溶接で行い、溶接工はすべて同一人物が行った。

試験体の組立および実験に先立ち、溶接長、溶接のど厚、溶接表面加工状態の実測および観測を行った。試験体に用いた各材料は下記のとおりである。

表2 試験体一覧

試験体名称	単位数			試験体名称	単位数			試験体名称	単位数		
	B	F	S		B	F	S		B	F	S
B0F1S0	0	1	0	B1F1S0-16	1	1	0	B1F0S1-H	1	0	1
B0F1.5S0	0	1.5	0	B1F2S0-16	1	2	0	B1F0S2-H	1	0	2
B0F2S0	0	2	0	B2F1S0-16	2	1	0	B2F0S1-H	2	0	1
B0F0S1	0	0	1	B2F2S0-16	2	2	0	B2F0S2-H	2	0	2
B0F0S2	0	0	2	B1F1S0-20	1	1	0	B3F0S1-H	3	0	1
B0F0S3	0	0	3	B1F2S0-20	1	2	0	B3F0S2-H	3	0	2
B0F2S1	0	2	1	B2F1S0-20	2	1	0	B1F2S1-16	1	2	1
B0F1S1	0	1	1	B2F2S0-20	2	2	0	B1F1S1-16	1	1	1
B0F2S2	0	2	2	B1F0S1-16	1	0	1	B1F2S2-16	1	2	2
B0F1S2	0	1	2	B1F0S2-16	1	0	2	B1F1S2-16	1	1	2
B1F0S0-16	1	0	0	B1F0S3-16	1	0	3	B2F2S1-16	2	2	1
B1F0S0-16	1	0	0	B2F0S1-16	2	0	1	B2F1S1-16	2	1	1
B2F0S0-16	2	0	0	B2F0S2-16	2	0	2	B2F2S2-16	2	2	2
B2F0S0-16	2	0	0	B2F0S3-16	2	0	3	B2F1S2-16	2	1	2
B3F0S0-16	3	0	0	B3F0S1-16	3	0	1	B1F2S1-20	1	2	1
B3F0S0-16	3	0	0	B3F0S2-16	3	0	2	B1F1S1-20	1	1	1
B1F0S0-20	1	0	0	B3F0S3-16	3	0	3	B1F2S2-20	1	2	2
B1F0S0-20	1	0	0	B1F0S1-20	1	0	1	B1F1S2-20	1	1	2
B2F0S0-20	2	0	0	B1F0S2-20	1	0	2	B2F2S1-20	2	2	1
B2F0S0-20	2	0	0	B1F0S3-20	1	0	3	B2F1S1-20	2	1	1
B3F0S0-20	3	0	0	B2F0S1-20	2	0	1	B2F2S2-20	2	2	2
B3F0S0-20	3	0	0	B2F0S2-20	2	0	2	B2F1S2-20	2	1	2
B1F0S0-H	1	0	0	B2F0S3-20	2	0	3	B1F2S1-H	1	2	1
B2F0S0-H	2	0	0	B3F0S1-20	3	0	1	B1F2S2-H	1	2	2
B3F0S0-H	3	0	0	B3F0S2-20	3	0	2	B2F2S2-H	2	2	2
				B3F0S3-20	3	0	3				

母材: SM490A(添板: PL19(幅100mm)、中板: PL25(幅140mm))

高力ボルト: S10T(呼び径M16、M20)

溶接棒: YGW11(490N/mm²級高張力鋼用・CO₂用)

本研究で併用継手の力学性状を確認するために用意した試験体の一覧を表2に示す。試験体の総数は76体である。

3. 試験体名称

併用継手試験体の名称は「BiFjSk-n」で表記する。その意味は以下のとおりである。

Bi: 高力ボルト(1本を1単位とし、i単位用いる)

Fj: 前面隅肉溶接(ビード基本長50mmとし、表裏合わせて2ビードを1単位とし、j単位用いる)

Sk: 側面隅肉溶接(ビード基本長50mmとし、表裏と左右合わせて4ビードを1単位とし、k単位用いる)

n: 高力ボルトの呼び径および高力ボルト配置(M16の標準配置を16、M20の標準配置を20、M20の最小はしあき最小ピッチ配置をHと表記する。)

例えば、B1F2S2-16の表示は高力ボルト1本、前面隅肉溶接2単位、側面隅肉溶接2単位の併用継手で、高力ボルトは呼び径M16で標準配置とした試験体を表す。

4. 載荷と測定

載荷はアムスラー型引張試験機により破断が生じるまで単調引張とした。すべり荷重、最大荷重、破断荷重については、試験機からの読みとり値と試験機連動の計測器による測定を平行して行った。変形量については、試験体の左右に取り付けた変位計2台により測定した。変形量測定区間は全ての試験体において図1に示すものであり、その長さは150mmである。

5. 接合部構成要素の実験結果

5.1. 材料

5.1.1 母材

実験に用いた母材はSM490AのPL19、PL25の2種類でありそれぞれの板厚のものにつきJIS Z 2201(金属材料引張試験方法)による1A号試験片により引張試験を行った。

引張試験結果およびミルシートによる化学成分を表3に示す。

5.1.2 溶着金属

試験片は、JIS Z 2201(金属材料引張試験方法)に規定されたJIS 10号試験片で試験体の隅肉溶接と同じ溶接条件で作られた溶着金属中より切り出したものである。これを3本作成した。試験結果を表4に、併用継手試験体作成時の溶接条件を表5に示す。

5.1.3 高力ボルト

高力ボルトはトルシア形高力ボルト(S10T)M16およびM20を用いた。各5本のボルトによるボルト締付け試験結果を表6に示す。

5.2 接合要素単体の基本的性質

5.2.1 高力ボルト継手

本実験における高力ボルト継手の実験結果を表7にまとめた。すべての試験体についてすべり係数は安定した値が得られている。

M16の高力ボルトを用いた場合の1本当たりすべり耐力の平均は166kN、最大耐力は275kN、M20の場合はそれぞれ244kN、416kNであ

表3 母材の素材試験結果及び化学成分

素材試験片名称	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	最大応力度 σ_u (N/mm ²)	伸び(%)	化学成分(%)				
				C	Si	Mn	P	S
PL19	389	539	27.6	0.160	0.460	1.42	0.018	0.050
PL25	444	533	29.3	0.100	0.280	1.51	0.010	0.050

表4 溶着金属引張試験

素材試験片名称	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	最大応力度 σ_u (N/mm ²)	伸び(%)
溶着金属その1	412	527	32.0
溶着金属その2	392	495	37.5
溶着金属その3	421	514	38.4
平均値	408	512	36.0

表5 溶接条件

速度	30cm/min	等級及び寸法	締め付け軸力の測定値(kN)						
			1	2	3	4	5	平均値	変動係数
電圧	27～28V	S10T	110	111	107	116	122	113	0.051
		M16×90							
電流	150A	S10T	180	175	183	184	179	181	0.019
		M20×95							
バス間温度		300° 前後							

表6 高力ボルト締付け試験結果

速度	30cm/min	等級及び寸法	締め付け軸力の測定値(kN)						
			1	2	3	4	5	平均値	変動係数
電圧	27～28V	S10T	110	111	107	116	122	113	0.051
		M16×90							
電流	150A	S10T	180	175	183	184	179	181	0.019
		M20×95							
バス間温度		300° 前後							

表7 高力ボルト継手実験結果

試験体名称	すべり耐力 ePs (kN)	すべり耐力時 変形量 (mm)	最大耐力 Pmax (kN)	すべり係数測定値	
				μ	(1): 平均値 (2): 標準偏差 (3): 変動係数
B1F0S0-16	151	0.09	269	0.67	(1): 0.73
B1F0S0-16	160	0.13	293	0.71	
B2F0S0-16	355	0.25	575	0.79	
B2F0S0-16	331	0.16	558	0.73	(2): 0.04
B3F0S0-16	518	0.21	812	0.77	
B3F0S0-16	474	0.17	797	0.70	
B1F0S0-20	221	0.15	429	0.61	(1): 0.66
B1F0S0-20	247	0.07	436	0.68	
B2F0S0-20	486	0.21	831	0.67	
B2F0S0-20	472	0.18	827	0.65	(2): 0.03
B3F0S0-20	704	0.24	1206	0.65	
B3F0S0-20	739	0.27	1221	0.68	
B1F0S0-H	243	0.16	437	0.67	(1): 0.69
B2F0S0-H	522	0.31	850	0.72	
B3F0S0-H	716	0.29	1238	0.66	

表8 前面隅肉溶接継手実験結果

試験体名称	ePwfy (kN)	ePwfu (kN)	変形量		Af (cm ²)	kwfy	kwfu
			ePwfy時 (mm)	ePwfu時 (mm)			
B0F1S0	345	413	0.22	0.48	4.81	3.11	2.84
B0F1.5S0	546	619	0.33	0.55	6.48	3.66	3.17
B0F2S0	811	900	0.48	0.73	9.11	3.87	3.28

表9 側面隅肉溶接継手実験結果

試験体名称	ePwsy (kN)	ePwsu (kN)	変形量		As (cm ²)	kwsy	kwsu
			ePwsy時 (mm)	ePwsu時 (mm)			
B0F0S1	372	480	0.22	0.89	8.30	1.94	1.92
B0F0S2	754	918	0.30	0.94	16.8	1.94	1.82
B0F0S3	1179	1431	0.39	0.99	25.7	1.99	1.85

表10 前面隅肉溶接継手追加実験結果

試験体名称	溶接 サイズ (mm)	ePwfy (kN)	ePwfu (kN)	変形量		Af (cm ²)	kwfy	kwfu
				ePwfy時 (mm)	ePwfu時 (mm)			
B0F1S0-s5	5	303	357	0.19	0.37	4.52	3.19	2.67
B0F2S0-s5	5	512	647	0.24	0.58	7.97	3.06	2.75
B0F1S0-s10	10	425	596	0.25	1.14	7.88	2.56	2.56
B0F2S0-s10	10	815	1142	0.44	1.69	16.1	2.40	2.39
B0F1S0-s15	15	457	696	0.25	1.75	11.9	1.82	1.97
B0F2S0-s15	15	913	1395	0.46	6.18	23.4	1.86	2.02

表11 側面隅肉溶接継手追加実験結果

試験体名称	溶接 サイズ (mm)	ePwsy (kN)	ePwsu (kN)	変形量		As (cm ²)	kwsy	kwsu
				ePwsy時 (mm)	ePwsu時 (mm)			
B0F0S1-s5	5	338	432	0.15	1.12	9.33	1.72	1.57
B0F0S2-s5	5	672	917	0.26	1.23	17.09	1.87	1.82
B0F0S1-s10	10	499	746	0.24	2.69	17.94	1.32	1.41
B0F0S2-s10	10	973	1464	0.16	5.59	32.22	1.44	1.54
B0F0S1-s15	15	517	917	0.25	6.13	23.81	1.03	1.30
B0F0S1.6-s15	15	1012	1495	0.45	8.47	37.27	1.29	1.36

(a) 前面隅肉溶接継手

(a) 前面隅肉溶接継手

(a) 前面隅肉溶接継手

(b) 側面隅肉溶接継手

(b) 側面隅肉溶接継手

(b) 側面隅肉溶接継手

図2 荷重-変形関係

図3 隅肉溶接耐力-溶接長さ関係

図4 耐力上昇係数-溶接サイズ関係

る。

5.2.2 隅肉溶接継手

本実験における前面隅肉溶接のみの継手および側面隅肉溶接のみの継手の実験結果を表8および表9にまとめ、荷重変形関係を図2に、各隅肉溶接継手の最大耐力および降伏耐力と溶接長さの関係を図3に示す。表中に示した前面隅肉溶接、側面隅肉溶接の降伏耐力($ePwfy$, $ePwsy$)は荷重変形関係における接線剛性が初期剛性の1/3になるときの荷重であり、図2に○で示す。降伏耐力上昇係数(κ_{wfy} , κ_{wsy})、最大耐力上昇係数(κ_{wfu} , κ_{wsu})は以下の(1)、(2)式で求めた値である。

前面隅肉溶接の耐力上昇係数

$$\kappa_{wfy} = \frac{ePwfy}{Af \cdot \sigma_y / \sqrt{3}} \quad (1a) \quad \kappa_{wfu} = \frac{ePwfu}{Af \cdot \sigma_u / \sqrt{3}} \quad (1b)$$

側面隅肉溶接の耐力上昇係数

$$\kappa_{wsy} = \frac{ePwsy}{As \cdot \sigma_y / \sqrt{3}} \quad (2a) \quad \kappa_{wsu} = \frac{ePwsu}{As \cdot \sigma_u / \sqrt{3}} \quad (2b)$$

$ePwfy$, $ePwfu$: 前面隅肉溶接の降伏耐力および最大耐力(kN)

$ePwsy$, $ePwsu$: 側面隅肉溶接の降伏耐力および最大耐力(kN)

Af : 前面隅肉溶接の破断部分面積(実測値)(cm^2)

As : 側面隅肉溶接の破断部分面積(実測値)(cm^2)

σ_y : 溶接金属の降伏強さ(N/mm^2)

σ_u : 溶接金属の引張強さ(N/mm^2)

本実験において σ は溶着金属と母材のそれぞれの降伏強さないし引張強さの平均としている($\sigma_y = (408 + 389)/2 = 399 (\text{N/mm}^2)$, $\sigma_u = (512 + 533)/2 = 523 (\text{N/mm}^2)$)。また、隅肉溶接の破断角度は、隅肉溶接のみの継手に限らずすべての試験体において前面隅肉溶接では $20^\circ \sim 25^\circ$ 、側面隅肉溶接ではほぼ 45° であり、その破断角度を図5に示す。隅肉溶接の破断面積は破断後の溶接幅を実測しそれに溶接長さを乗じて求めた。溶接破断部の幅は隅肉溶接の耐力算定に用いる理論のど厚の前面隅肉溶接で1.20倍、側面隅肉溶接で1.18倍程度であった。

図3よりこの溶接長さの範囲において、隅肉溶接継手の最大耐力、降伏耐力と溶接長さの間にはほぼ比例関係が成り立ち、前面隅肉溶接、側面隅肉溶接ともに溶接長さに関する寸法効果による影響はないものと考えられる。従って、前面隅肉溶接、側面隅肉溶接の1単位当たりの降伏耐力、最大耐力は全試験体の平均値をとることとし、それぞれ378kN、429kNおよび384kN、472kNとする。

最大耐力上昇係数については日本建築学会の「鋼構造限界状態設計指針・同解説」³⁾に示されている実験値(前面隅肉溶接で2.06、側面隅肉溶接で1.35)に対しかなり高い値となっている。これは、本隅肉溶接がJIS Z 3312の高張力鋼用ソリッドワイヤ(YGW11)を使用した比較的大きな電流による炭酸ガスシールドアーク溶接であるために溶接サイズの5mmに対し溶け込み量の割合が大きいことと、母材板厚25mm、添板板厚19mmに対し隅肉溶接のサイズが5mmと極端に小

図5 破断角度

さいため、溶接金属の硬化の度合いが激しかったことによるものと考えられる。そこで、この点を確認するために同じ板厚の試験体で溶接サイズを5mm、10mm、15mmと変化させた追加実験を行い、耐力上昇係数を検討した。その結果を表10、11に示し、耐力上昇係数と溶接サイズの関係を図4に示す。この結果より上述の事情が裏付けられたことになり、一般的なサイズである母材または添板の厚さの0.7倍程度の隅肉溶接を用いた場合には最大耐力上昇係数は従来の実験結果とほぼ同等のものとなることが判る。なお、追加実験における溶接サイズ5mmの値が本実験の試験体の値より幾分か小さくなっているが、この点は本実験の試験体の表面がグリットブラスト処理であったのに対し追加実験の試験体の表面がミルスケールのついたままの状態であり、その結果母材への溶け込み量に差が生じたためであると考えられる。隅肉溶接の変形能についてみると、最大変形能力は前面隅肉溶接継手で0.5～0.7mm、側面隅肉溶接で0.9～1.2mmであった。これらの値は高力ボルト継手におけるすべり量以下である。

6. 併用継手の実験結果

6.1 併用隅肉溶接継手

本実験における前面隅肉溶接と側面隅肉溶接との併用隅肉溶接継手の引張実験結果を表12にまとめ、荷重変形関係を図6に示す。

6.2 高力ボルトと隅肉溶接の併用継手

本実験における高力ボルトと隅肉溶接の併用継手の引張実験結果を表13にまとめ、M20ボルト(標準配置)を用いた試験体の荷重-変形関係を図7に示す。M16を用いた試験体およびM20の最小はしあき最小ピッチ配置の試験体についてはM20の標準配置の試験体とほぼ同じ挙動を示したので荷重変形関係は省いている。

7. 考察

7.1 接合部の挙動

図7に示した併用継手の荷重変形関係を見ると、すべての試験体について隅肉溶接継目の破断により最大耐力を示すが、併用継手の

表12 併用隅肉溶接継手

試験体名称	実験結果		考察結果							
	耐力 Pmax (kN)	変形量 δ max (mm)	7.2節				7.5節			
			jNu (kN)	Pmax jNu (kN)	jNu (kN)	Pmax jNu (kN)	cjNu (kN)	Pmax cjNu (kN)	cjNu (kN)	Pmax cjNu (kN)
B0F2S1	1281	0.55	1322	0.97	1216	1.05	696	1.84	553	2.31
B0F1S1	846	0.64	898	0.94	805	1.05	486	1.74	392	2.16
B0F2S2	1644	5.41	1795	0.92	1610	1.02	972	1.69	784	2.10
B0F1S2	1337	0.97	1370	0.98	1185	1.13	762	1.75	574	2.33
平均				0.95		1.06		1.76		2.22

図6 併用隅肉溶接継手 荷重-変位関係

図7 荷重－変形関係(高力ボルト(M20)と隅肉溶接の併用継手)

表13-(c) 実験結果及び考察結果一覧
《高力ボルト+前面隅肉溶接+側面隅肉溶接》

試験体名称	実験結果		考察結果									
	Pmax (kN)	δ max (mm)	7.4節					7.5節				
			jNu (kN)	Pmax jNu (kN)	jNu' (kN)	Pmax jNu' (kN)	cjNu (kN)	Pmax cjNu (kN)	cjNu' (kN)	Pmax cjNu' (kN)	cjNu' (kN)	Pmax cjNu' (kN)
B1F2S1-16	1298	0.75	1486	0.87	1380	0.94	790	1.64	647	2.01		
B1F1S1-16	1007	0.63	1062	0.95	969	1.04	580	1.74	486	2.07		
B1F2S2-16	1691	5.84	1959	0.86	1774	0.95	1066	1.59	878	1.93		
B1F1S2-16	1408	2.32	1535	0.92	1350	1.04	856	1.65	668	2.11		
B2F2S1-16	1342	2.55	1650	0.81	1544	0.87	883	1.52	740	1.81		
B2F1S1-16	1099	0.65	1226	0.90	1133	0.97	673	1.63	579	1.90		
B2F2S2-16	1696	7.32	2123	0.80	1938	0.88	1159	1.46	971	1.75		
B2F1S2-16	1530	4.11	1699	0.90	1514	1.01	949	1.61	761	2.01		
B1F2S1-20	1288	1.07	1560	0.83	1454	0.89	842	1.53	699	1.84		
B1F1S1-20	1017	0.55	1136	0.90	1043	0.98	632	1.61	538	1.89		
B1F2S2-20	1627	4.90	2033	0.80	1848	0.88	1118	1.46	930	1.75		
B1F1S2-20	1424	2.39	1609	0.89	1424	1.00	908	1.57	720	1.98		
B2F2S1-20	1359	3.72	1798	0.76	1692	0.80	987	1.38	844	1.61		
B2F1S1-20	1150	0.72	1374	0.84	1281	0.90	777	1.48	683	1.68		
B2F2S2-20	1717	9.86	2271	0.76	2086	0.82	1263	1.36	1076	1.60		
B2F1S2-20	1541	4.64	1847	0.83	1662	0.93	1053	1.46	865	1.78		
B1F2S1-H	1320	1.07	1570	0.84	1464	0.90	842	1.57	699	1.89		
B1F2S2-H	1728	4.90	2043	0.85	1858	0.93	1118	1.55	930	1.86		
B2F2S2-H	1744	9.86	2290	0.76	2106	0.83	1263	1.38	1076	1.62		
平均値				0.84		0.92		1.54		1.85		

表13-(a) 実験結果及び考察結果一覧
《高力ボルト+前面隅肉溶接》

試験体名称	実験結果		考察結果					
	Pmax (kN)	δ max (mm)	7.3節			7.5節		
			jNu (kN)	Pmax jNu (kN)	cjNu (kN)	Pmax cjNu (kN)	cjNu (kN)	Pmax cjNu (kN)
B1F1S0-16	529	0.36	589	0.90	304	1.74		
B1F2S0-16	912	0.60	1013	0.90	514	1.78		
B2F1S0-16	768	0.24	753	1.02	397	1.94		
B2F2S0-16	1119	0.69	1178	0.95	607	1.84		
B1F1S0-20	672	0.43	663	1.01	356	1.89		
B1F2S0-20	1036	0.65	1087	0.95	566	1.83		
B2F1S0-20	894	0.44	901	0.99	501	1.78		
B2F2S0-20	1141	0.97	1326	0.86	711	1.60		
平均値				0.95		1.80		

表13-(b) 実験結果及び考察結果一覧
《高力ボルト+側面隅肉溶接》

試験体名称	実験結果		考察結果					
	Pmax (kN)	δ max (mm)	7.3節			7.5節		
			jNu (kN)	Pmax jNu (kN)	cjNu (kN)	Pmax cjNu (kN)	cjNu (kN)	Pmax cjNu (kN)
B1F0S1-16	602	0.53	637	0.94	370	1.63		
B1F0S2-16	1005	0.69	1110	0.91	646	1.56		
B1F0S3-16	1570	3.37	1583	0.99	922	1.70		
B2F0S1-16	771	0.54	801	0.96	463	1.67		
B2F0S2-16	1199	0.85	1274	0.94	739	1.62		
B2F0S3-16	1564	2.87	1747	0.90	1015	1.54		
B3F0S1-16	980	1.17	965	1.02	557	1.76		
B3F0S2-16	1400	4.17	1438	0.97	833	1.68		
B3F0S3-16	1666	4.86	1911	0.87	1109	1.50		
B1F0S1-20	668	0.42	711	0.94	422	1.59		
B1F0S2-20	1167	1.20	1184	0.99	698	1.67		
B1F0S3-20	1606	3.96	1657	0.97	974	1.65		
B2F0S1-20	928	0.49	949	0.98	567	1.64		
B2F0S2-20	1269	1.58	1422	0.89	843	1.51		
B2F0S3-20	1654	3.86	1895	0.87	1119	1.48		
B3F0S1-20	1041	10.39	1187	0.88	713	1.46		
B3F0S2-20	1267	9.60	1660	0.76	989	1.28		
B3F0S3-20	1577	4.01	2133	0.74	1265	1.25		
B1F0S1-H	691	0.40	721	0.96	422	1.64		
B1F0S2-H	1131	0.90	1193	0.95	698	1.62		
B2F0S1-H	880	0.47	968	0.91	567	1.55		
B2F0S2-H	1266	0.95	1441	0.88	843	1.50		
B3F0S2-H	1462	6.01	1689	0.87	989	1.48		
平均値				0.92		1.56		

表14 被接合材降伏荷重

	全断面 降伏耐力 (kN)	M16ボルト孔 欠損部降伏耐力 (kN)	M20ボルト孔 欠損部降伏耐力 (kN)
添板 2-PL19	1477	1211	1152
母材 PL25	1553	1353	1309

挙動は最大耐力が弾性限界のすぐ後に生じているものと、弾性限界を示した後に明瞭な降伏現象が生じ、3～5mm程度の塑性変形を生じた後に最大耐力を示すものに大別される。

後者での、降伏現象はほぼ1300kN程度で生じている。これは表14に示すボルト孔欠損部有効断面の降伏荷重より明らかにこの降伏現象は添板が降伏したことによるものと考えられる。ただし、このボルト孔欠損部における降伏耐力は高力ボルトによる材間圧縮力の存在、隅肉溶接が併用されていることの影響から表14に示すボルト孔欠損部の降伏荷重よりかなり大きくなり、1300kN程度となったものと考えられる。

図2に見られるように、隅肉溶接のみの試験体では降伏現象が明瞭に認められるものは少なく、かつ最大耐力を示すまでの変形量は

0.6～1.2mm程度と極めて小さい値である。一方、高力ボルト接合部では、0.2mm前後ですべりが発生し、その後1～2mm程度のすべりを生じて支圧状態となり、その後5、6mm程度の変形を生じて最大耐力に達する。このような隅肉溶接の変形量と高力ボルトのすべり量の対応から考えて高力ボルトと隅肉溶接の併用継手の耐力評価では、高力ボルトについてすべり耐力を基本とし、隅肉溶接については最大耐力を基本とすることが妥当であると考えられ、この点は文献1)と変りはない。

7.2 併用隅肉溶接継手

併用隅肉溶接継手の最大耐力の評価には、二つの考え方がある。第1の考え方は、前面隅肉溶接、側面隅肉溶接とも単体としての最大耐力を単純に累加する方法であり、その場合最大耐力は下式で表される。

$$jNu = Pfu + Psu \quad (3)$$

第2の考え方は、前面隅肉溶接と側面隅肉溶接の各単独継目の耐力のバランスによって前面隅肉溶接が最大耐力に至り、側面隅肉溶接が降伏耐力である場合と、側面隅肉溶接が最大耐力に至り、前面隅肉溶接が降伏耐力である場合を考えたものである。この最大耐力は下式で表される。

$$jNu' = \min(Pfu + Psy, Pfy + Psu) \quad (4)$$

Pfu, Pfy : 前面隅肉溶接継目の最大耐力および降伏耐力実験値 (kN)
 Psu, Psy : 側面隅肉溶接継目の最大耐力および降伏耐力実験値 (kN)

このように各接合要素の耐力を累加した耐力を累加耐力 (jNu) と呼び、最大耐力の実験値を累加耐力で除した値を累加効率 ($Pmax/jNu$) と呼ぶこととする。(3)、(4)式による累加耐力 jNu, jNu' およびこれらに対する累加効率を表12にまとめた。

以上のような検討の結果、併用隅肉溶接継手の累加効率は、前面隅肉溶接継目、側面隅肉溶接継目それぞれの最大耐力を単純累加した場合0.92～0.98、平均値0.95程度であり、第2の考え方による場合は、1.02～1.13、平均1.06となっている。後者の方が安全側の評価となっていることは当然のことではあるが、併用隅肉溶接継手については(3)式と(4)式のどちらを採用しても累加効率の平均値は±5%以内の評価ができる。

7.3 高力ボルトと前面隅肉溶接または側面隅肉溶接との併用継手

高力ボルトと前面隅肉溶接または側面隅肉溶接との併用継手に関する実験結果および考察結果を、表13(a)、(b)に示す。この表には、

高力ボルトのすべり耐力とそれぞれの溶接継目の最大耐力の和による累加耐力 (jNu) および累加効率 ($Pmax/jNu$) を示した。

$$jNu = Pbs + Pfu + Psu \quad (5)$$

Pbs : 高力ボルトのすべり耐力 (kN)

高力ボルトと前面隅肉溶接の併用継手における、累加効率は0.86～1.02、平均0.95であり、高力ボルトと側面隅肉溶接の併用継手においては、0.74～1.02、平均0.92である。累加効率 $Pmax/jNu$ を縦軸に、 jNu/Pey を横軸にとって両者の関係を示したのが図8である。ここで Pey は素材試験結果を用いた添板のボルト孔欠損部降伏耐力計算値である。

図8を見ると累加効率は、 jNu/Pey が増加すると低下する傾向が認められる。 Pey は添板のボルト孔欠損を考慮した降伏耐力であり、この値が高力ボルトのすべり耐力に影響を与えていると考えられるが、この種の併用継手では有効断面の降伏耐力は隅肉溶接を併用した影響で多少上昇すると考えられ、その影響が jNu/Pey が大きくなる場合に現れたものと考えられる。

各試験体における上述の添板の有効断面の降伏の影響を考え、以後の考察においても併用継手の耐力を図によって検討する場合、统一的に横軸は検討する耐力を Pey で除したものをを用いることとする。

7.4 高力ボルトと前面隅肉溶接および側面隅肉溶接との併用継手

高力ボルトと前面隅肉溶接および側面隅肉溶接との併用継手について、隅肉溶接継目の耐力時における接合部の変形の適合条件を考慮しない場合と、考慮した場合について、7.2節と同様に二つの考え方による検討を行う。前者の考え方による累加耐力 (jNu) と後者の考え方による累加耐力 (jNu') およびそれぞれの累加効率を表13(c)にまとめ、併用継手が最大耐力に至るまでに添板の有効断面の降伏現象が起きていることを考慮して $Pmax/jNu$ と jNu/Pey の関係を図9に、 $Pmax/jNu'$ と jNu'/Pey の関係を図10に示す。

$$jNu' = Pbs + \min(Pfu + Psy, Pfy + Psu) \quad (6)$$

前者の考え方による場合の累加効率は、0.76～0.95、平均値0.84であり、後者の考え方による場合の累加効率は0.80～1.04、平均0.92である。

併用隅肉溶接、高力ボルトと前面隅肉溶接のみ、高力ボルトと側面隅肉溶接のみの場合に比べ、高力ボルトと前面および側面隅肉溶接の3つが併用された場合の累加効率が低下しているが、これは累加耐力にこれら3つの接合要素の変形の適合性が考慮されていないためと考えられる。この点を考慮した累加耐力 jNu' が、この点を考

図8 $Pmax/jNu$ - jNu/Pey 関係

図9 $Pmax/jNu$ - jNu/Pey 関係

図10 $Pmax/jNu'$ - jNu'/Pey 関係

慮していない累加耐力 jNu より累加効率が低いのはそのことを裏付けていることになる。

図 9.10 より jNu 、 jNu' についての累加効率はともに jNu 、 jNu' を Pey で除した値が増加するとほぼ直線的に低下している。これは 7.3 節で述べたように添板の有効断面の降伏の影響によるものである。

7.5 公称耐力に対する安全率の検討

以上の最大耐力に関する実験結果の検討より、接合部の最大耐力を評価するには、高力ボルトはすべり耐力で評価し、隅肉溶接継目に関しては前面隅肉溶接または側面隅肉溶接単独の場合はそれらの最大耐力で評価すればよいが、前面隅肉溶接と側面隅肉溶接の両方を組み合わせて用いる場合は、両者の最大耐力の単純累加とする評価と(4)式による最大耐力を用いる評価があることを示した。以下、このような考え方に基づいて最大耐力の公称値を算定した場合について、実験値がどの程度の安全率を有しているかを検討する。ただし、この場合の隅肉溶接の最大耐力の公称値として、5.2.2 で述べた今回の試験体における隅肉溶接の過大な耐力上昇の影響を除いて考えるため、実験で得られた最大耐力上昇係数の平均値を「鋼構造限界状態設計指針・同解説」³⁾に示された過去の実験による平均値で除した値、すなわち前面隅肉溶接継手については $3.09/2.06 = 1.50$ 、側面隅肉溶接継手については $1.85/1.35 = 1.38$ を乗じることとする。

併用継手の公称耐力 ($cjNu$) は(7)、(8)式で求め、接合要素の公称耐力は以下に示す算定式を用いる。降伏耐力計算値 $cPfy$ 、 $cPsy$ は $cPfu$ 、 $cPsu$ の最大耐力計算式の σu を σy に置き換えて算出したものである。公称耐力と最大耐力実験値を公称耐力で除した安全率を表 12、13 にまとめた。 $Pmax/cjNu$ と $cjNu/Pey$ の関係を図 11 に、 $Pmax/cjNu'$ と $cjNu'/Pey$ の関係を図 12 に示す。

$$cjNu = cPbs + cPfu + cPsu \quad (7)$$

$$cjNu' = cPbs + \min(cPfu + cPsy, cPfy + cPsu) \quad (8)$$

$$cPbs = n \cdot m \cdot \mu \cdot Ni$$

$$cPfu = 1.50(1.4Af \cdot \sigma u / \sqrt{3})$$

$$cPfu = 1.38(1.0As \cdot \sigma u / \sqrt{3})$$

$cPbs$: 高力ボルトのすべり耐力計算値 (kN)

$cPfy$, $cPfu$: 前面隅肉溶接継目の降伏耐力および最大耐力計算値 (kN)

$cPsy$, $cPsu$: 側面隅肉溶接継目の降伏耐力および最大耐力計算値 (kN)

n : ボルト本数

m : セン断面の数

μ : すべり係数 = 0.45

Ni : 設計ボルト張力 M16=104 (kN)、M20=162 (kN)

Af : 前面隅肉溶接の理論のど断面積 (cm²)

As : 側面隅肉溶接の理論のど断面積 (cm²)

σu : 被接合材の引張強さ = 490 (N/mm²)

公称耐力に対する最大耐力の安全率は高力ボルトと前面隅肉溶接の併用継手においては 1.74 ~ 1.94 で平均 1.80、高力ボルトと側面隅肉溶接の併用継手においては 1.25 ~ 1.76 で平均 1.56 である。上記の算定式は高力ボルトと前面隅肉溶接または側面隅肉溶接との併用継手についていずれも十分安全側の評価となっている。高力ボルトと前面隅肉溶接および側面隅肉溶接の併用継手においては、 $Pmax/cjNu$ は 1.36 ~ 1.74 で平均 1.54、 $Pmax/cjNu'$ は 1.60 ~ 2.11 で平均 1.85 である。(7) 式による評価より (8) 式による評価の方が安全側であるが、どちらの評価方法においても実験値に対しては十分安全側の評価である。この評価結果を(7)式による場合と(8)式による場合に分けて高力ボルトと前面隅肉溶接または側面隅肉溶接の併用継手の評価結果と共に図示したものが図 11、12 である。(7) 式を採用した場合、併用継手 (B+F+S) の $Pmax/cjNu$ は併用継手 (B+F、B+S) の $Pmax/cjNu$

図11 $Pmax/cjNu$ - $cjNu/Pey$ 関係

図12 $Pmax/cjNu'$ - $cjNu'/Pey$ 関係

図13 Py/jNy - jNy/Pey 関係

図14 $Py/cjNy$ - $cjNy/Pey$ 関係

表15 降伏耐力について

試験体名称	実験結果		考察結果			
	耐力	変形量	7.6.1節		7.6.2節	
	P_y (kN)	δ_y (mm)	jNy (kN)	P_y (kN)	$cjNy$ (kN)	P_y (kN)
B1F1S0-16	492	0.24	536	0.92	253	1.95
B1F2S0-16	815	0.38	907	0.90	412	1.98
B2F1S0-16	693	0.14	700	0.99	346	2.00
B2F2S0-16	952	0.36	1071	0.89	505	1.88
B1F0S1-16	529	0.23	545	0.97	285	1.86
B1F0S2-16	866	0.25	925	0.94	476	1.82
B2F0S1-16	691	0.27	709	0.97	378	1.83
B2F0S2-16	1027	0.37	1089	0.94	570	1.80
B3F0S1-16	803	0.25	873	0.92	472	1.70
B1F1S1-16	907	0.39	916	0.99	444	2.04
B2F1S1-16	960	0.36	1080	0.89	538	1.79
B1F1S0-20	613	0.27	610	1.00	305	2.01
B1F2S0-20	928	0.43	981	0.95	464	2.00
B2F1S0-20	835	0.31	848	0.98	450	1.85
B1F0S1-20	610	0.25	619	0.99	337	1.81
B2F0S1-20	863	0.34	857	1.01	483	1.79
B1F1S1-20	946	0.40	990	0.96	496	1.91
B1F0S1-H	628	0.25	628	1.00	337	1.86
B1F0S2-H	991	0.40	1008	0.98	528	1.87
B2F0S1-H	835	0.34	876	0.95	483	1.73
平均値				0.96		1.87

と同程度の値となり、全体としてのばらつきも小さい。しかし、(8)式を採用した場合、併用継手(B+F+S)の $P_{max}/c_j N_u'$ は併用継手(B+F、B+S)の $P_{max}/c_j N_u'$ より高い値となり、全体としてのばらつきも大きい。また、(8)式は(7)式に比べ全体的に過小評価の程度が大きいが判る。従って、高力ボルトと前面隅肉溶接および側面隅肉溶接の併用継手においては(7)式による最大耐力の評価式を用いることが妥当であると考えられる。

7.6 降伏耐力の検討

以上、併用継手の最大耐力について検討してきたが、次に継手の降伏耐力について検討する。継手の降伏耐力の実験値(P_y)は荷重変形関係において接線剛性が初期剛性の1/3になるときの荷重を基本とし、荷重変形関係で明らかな剛性低下が認められるものについてはその値とする。なお、ここでは降伏耐力(P_y)に添板の有効断面の降伏現象の影響があると考えられる試験体についてはこれを除外して検討する。即ち、M16を使用したものについては $P_{max} < 1211\text{kN}$ 、M20を使用したものについては $P_{max} < 1152\text{kN}$ となる試験体について検討を行う。

7.6.1 実験値に関する検討

降伏耐力の累加耐力(jN_y)は前面隅肉溶接継目および側面隅肉溶接継目の降伏耐力と高力ボルトのすべり耐力を累加したものとする。 jN_y と jN_y で降伏耐力の実験値(P_y)を除いた降伏耐力の累加効率を表15にまとめ、 P_y/jN_y と jN_y/P_{ey} の関係を図13に示す。降伏耐力の累加効率は0.89～1.01で、平均0.96である。従って、併用継手の降伏耐力は各接合要素の降伏耐力を単純に累加した値の95%程度であると考えられ、この値は最大耐力の場合とほぼ同等である。

7.6.2 公称耐力に対する安全率

併用継手の降伏耐力実験値に対する公称耐力($c_j N_y$)の評価を行う。隅肉溶接の降伏耐力の計算値については(7)式において溶着部の引張強さを降伏強さに置き換えて算定する。また、降伏耐力上昇係数は7.5節で述べた内容と同様に補正した値を使用する。即ち、図4より降伏耐力上昇係数は「鋼構造限界状態設計指針・同解説」における最大耐力上昇係数に近い値になることが確認されたため、ここでも前面隅肉溶接継手については2.06、側面隅肉溶接継手については1.35を基準とし、前面隅肉溶接継手については $3.55/2.06 = 1.72$ 、側面隅肉溶接継手については $1.96/1.35 = 1.45$ を公称値に乘じることとする。 $c_j N_y$ および $P_y/c_j N_y$ を表15にまとめ、 $P_y/c_j N_y$ と $c_j N_y/P_{ey}$ の関係を図14に示す。公称耐力に対する降伏耐力実験値の安全率は1.70～2.04で、平均1.87であり、最大耐力についての安全率と比べ幾分か大きいことが判る。

8. まとめ

本論文では高力ボルト摩擦面の表面処理法としてグリットブラスト処理を行い、炭酸ガスシールドアーク溶接による隅肉溶接を用いた併用継手の力学性状を確認するため一連の実験を行い、主として併用継手の最大耐力に関する評価を行った。

本実験で採用した隅肉溶接継目は、隅肉溶接のサイズが接合する鋼材の板厚に比べ極端に小さかったため、その最大耐力は公称値に対し非常に大きいものであった。しかし、その点を考慮した検討によって、隅肉溶接を用いた併用継手の最大耐力の評価は適正に行う

ことができた。本実験において得られた主要な結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 前面隅肉溶接と側面隅肉溶接を併用した継手では、その最大耐力は両者の変形性能の違いをある程度考慮した場合の評価式((4)式)と両者の最大耐力を単純に累加した場合の評価式((3)式)では累加効率として約10%程度の差があるがその差はあまり大きなものではない。7.2節の検討結果から(4)式の評価式は必ずしも前面隅肉溶接部と側面隅肉溶接部の変形性能を適切に評価しているとはいえず、やや安全側すぎると考えられる。一方(3)式の評価式を採用した場合でも公称値を用いた場合の最大耐力実験値に対する安全率は十分あるので、設計式の単純化を考え併用隅肉溶接継手の最大耐力の評価式として(3)式の評価式を採用して問題はないと考えられる。
- 2) 高力ボルトと隅肉溶接の併用継手の最大耐力は高力ボルトのすべり耐力と隅肉溶接継目の最大耐力の累加耐力で適切に評価できる。また、文献1)と本研究では高力ボルトの強度レベル、摩擦面の表面処理方法、溶接継目の力学性能などが若干異なっている点があるが、その場合でも文献1)の耐力評価と同じ考え方に基づいた評価方法によって妥当な評価が可能である。従って、併用継手を構成する高力ボルトおよび隅肉溶接それぞれの接合要素の力学挙動が本論文と同様である併用継手について同じ耐力評価方法を採用できると考えられる。
- 3) 設計で用いる高力ボルトと隅肉溶接の併用継手の降伏耐力設計式は、上記最大耐力評価式の隅肉溶接の引張強さを降伏強さに置き換えたものとした場合、実験値に対して十分な安全率を有しており、設計上十分実用的である。
- 4) 併用継手とする場合、高力ボルトを1本又は2本しか用いない場合でも、そのはしあき寸法は鋼構造設計規準に示された規定値である2.5d(d:ボルト径)よりかなり小さく本実験のように1.25dとしても構造上問題はない。

参考文献

- 1) 併用継手小委員会：各種ファスナーの併用継手に関する実験的研究(その1)、(その2)日本建築学会論文報告集 第161号、1969.7 第166号1970.11
- 2) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工指針、1993
- 3) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計指針・同解説、1998
- 4) 仲 威雄、加藤 勉、森田耕次：溶接継手の耐力－すみ肉溶接継手の終局耐力－、日本建築学会論文報告集 第146号、1968.4
- 5) 加藤 勉：すみ肉溶接継手の耐力に関する研究、日本建築学会論文報告集 第75号、1962.8
- 6) 鶴田 明、寺田貞一：すみ肉溶接の静的強度に関する研究、日本建築学会論文報告集 第69号、1961.10
- 7) 森田耕次、江波戸和正、田中浩史、里見孝之：部分溶込溶接継目のせん断挙動に関する実験的研究、構造工学論文集 Vol. 38B、1992.3

(2000年7月4日原稿受理、2000年12月8日採用決定)