
部分溶込み溶接継手の強度に関する研究

Experimental Studies on the Strength of Welded Joints with Partial Penetration

鷲尾 健三(Kenzo Washio) 滝沢 章三(Shozo Takizawa)

要旨：

本研究は、部分溶込み溶接の継手強度に関し、従来より不明確なまま残されていた問題点を明らかにし、設計指針を得ることを意図した実験的研究である。実験は、溶込み量、および補強すみ肉のサイズを要因に行なった。その結果、それぞれの要因が、継手強度にかなりの影響を与えることを示し、既往の研究と比較しつつ、継手強度を求める実験式を与えた。さらに、部分溶込み溶接は、すみ肉溶接より高強度が期待でき、かつ、有用な溶接であることを確めた。

Synopsis：

Lately, the partially-penetrated welding method has received considerable attention. But little information has been available about the strength of welded joints using this method. This paper is intended for clarifying some problems which have remained uncertain, and for suggesting a possible design method. The experiments were conducted on two variable factors amount of penetration and size of fillet welding for reinforcement. The results show clearly that these factors had remarkable effect upon the strength of joints, and the experimental formula has been given by comparing the test-results with the past studies. Generally speaking, it may be concluded from our investigations that the welded joints with partial penetration are stronger than the fillet welded joints and also that the partially penetrated welding is a useful method.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

部分溶込み溶接継手の強度に関する研究

Experimental Studies on the Strength of Welded Joints with Partial Penetration

鷲 尾 健 三*

Kenzo Washio

滝 沢 章 三**

Shozo Takizawa

Synopsis

Lately, the partially-penetrated welding method has received considerable attention. But little information has been available about the strength of welded joints using this method.

This paper is intended for clarifying some problems which have remained uncertain, and for suggesting a possible design method.

The experiments were conducted on two variable factors amount of penetration and size of fillet welding for reinforcement.

The results show clearly that these factors had remarkable effect upon the strength of joints, and the experimental formula has been given by comparing the test-results with the past studies.

Generally speaking, it may be concluded from our investigations that the welded joints with partial penetration are stronger than the fillet welded joints and also that the partially penetrated welding is a useful method.

1. 緒 言

部分溶込み溶接継手とは、「材の全厚にわたって完全な溶込みを確保させない継手」と定義されるものである¹⁾この形式をもつ継手は、最近になって注目されはじめたものであるが、これに関する研究はきわめて少なく、わが国では、わずかに鶴田、木村の研究²⁾をみるにすぎない。

日本建築学会では、今般改正された鋼構造設計規準に部分溶込み溶接を認めているが、使用方法

を限定し、溶接線と直角方向へ引張力が作用する場合、および、溶接線を軸とする曲げが作用する場合の使用を禁止している。また、許容応力度も素材の剪断許容応力度としている。これらの制限に従えば、使用はきわめて困難となるため、現在は箱形断面柱のかど継手に用いられている程度である。

しかし、建設用鋼材が厚肉化しつつあり、また溶接方法の進歩とあいまって、実用化される日も近いと考えられる。

一方、部分溶込み溶接継手の使用の是非につい

* 大阪大学名誉教授工学博士

** 鋼構造研究所工学博士

でも議論のあるところでもあり³⁾ この形式の継手強度を解明することは強く望まれるところである。

部分溶込み溶接の強度を論ずる場合、溶込み量の影響を明らかにすることはまず第1に重要なことであるが、さらに、継手に付加されるすみ肉（補強すみ肉）の効果を知ることも重要である。この補強すみ肉とは、T継手や十字継手で、付加的に盛られたすみ肉溶接のことで、溶着金属の結晶粒の微細化を促進させ、溶着金属の性質を向上させると同時に、応力の伝達をスムーズにさせる効果があるといわれている。補強すみ肉は、付加的なものとして、現行の建築学会規準では、強度的に期待していない。突合せ溶接の場合は、母材と同等あるいはそれ以上の継手強度が期待できるので、補強すみ肉に強度の分担をさせる必要はないが、部分溶込み溶接継手の強度に対しては、補強すみ肉の大小がかなり影響を与えと考えられる。

本論文は、部分溶込み溶接継手の強度に及ぼす、溶込み量および補強すみ肉寸法の影響を明らかにし、継手の設計式を得ることを目的としたものである。

2. 部分溶込み溶接継手の強度におよぼす溶込み量の影響

2.1 すみ肉脚長を一定として溶込み量を変えた場合

2.1.1 試験体および実験方法

試験体形状を Fig. 1 に示すが、試験体として十字型前面継手を採用した。その理由は、

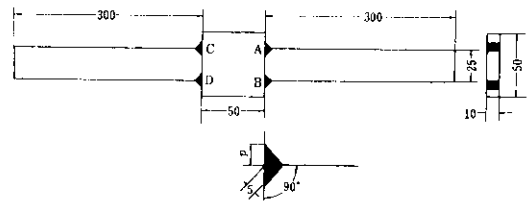


Fig. 1 G type test specimen

- 1) 前面溶接は側面溶接に比べて、溶接形状の変化に対して敏感である⁴⁾
 - 2) 当て板型継手は、板間の摩擦の影響が入りやすい⁵⁾
 - 3) 前面溶接継手では、十字型継手が強度的に最も不利である⁶⁾
- などによる。

本実験の目的は、溶込み量の変化が強度におよぼす影響を調べることにあるので、すみ肉喉厚は5mmと一定にした。

溶込み深さは、試験体にあらかじめベベルをつけて加工し、ベベル深さを変えることによって調整した。なお、試験体は、溶接終了後、機械仕上げをして、所定の寸法を得るようにした。

試験体に用いた母材および溶着金属の素材試験結果を Table 1 に示す。ただし母材は JIS 7 号試験片、溶着金属は JIS10 号試験片を用いた。

この試験体をGタイプと称することにする。試験体記号は、たとえばG-1-2というふうにつけたがGの次の数字はベベル深さを示し、最後の数字は同一形状試験体3体中の区分番号である。

载荷は50t 万能試験機を用い、試験体に引張を与えた。载荷時における変形の測定は、1/1000mmダイヤルゲージを用いた (Photo. 1)。

なお载荷に先だち、試験体各部の寸法を測定しマクロエッチを施して喉厚を測定した。

Table 1 Mechanical properties of materials (G type)

Material	Yielding stress (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elastic ratio (kg/mm ²)	Elongation (%)
Base metal	38.9	50.7	2.03×10^4	47
Welded metal	27.5	49.7	2.00×10^4	40

Base metal SM41B
Electrode JIS D 4301 5φ

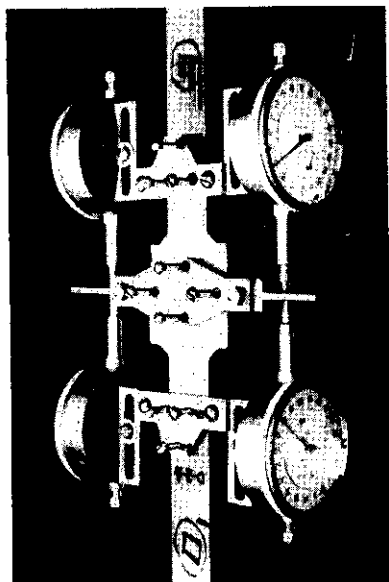


Photo. 1 Measurement of deformation

喉厚は実際喉厚とし、溶接のルートから溶接の表面までの最短長さである。

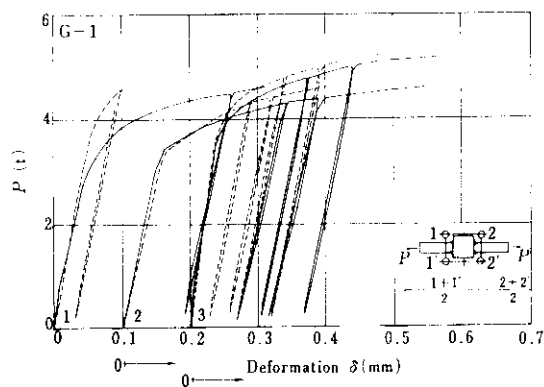
2.1.2 実験結果

実験結果を Table 2 に示す。荷重変形の代表例を Fig. 2 に示す。Fig. 3 に、単位溶接長あたりの平均強度と溶込み深さ p との関係を示した。図より明らかなように、すみ肉の脚長を一定にした場合、溶込み深さが増せば、単位溶接長あたりの平均強度（つまり、継手の強さ）は急速に上昇することがわかる。

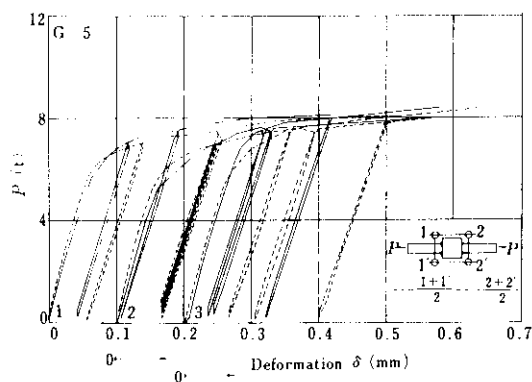
ところで、継手の強度は、溶接部の大きさに対する溶込み深さの占める割合によって変化すると考えられる。この意味から、 $p/(p+s)$ (p : 溶込み深さ, s : すみ肉脚長) をベースにして、単位喉断面あたりの平均強度を比較した。(Fig. 4 参照)

溶込みなしの通常のすみ肉の場合は $p/(p+s) = 0$ となり、すみ肉なしの部分溶込みの場合は、 $p/(p+s) = 1$ となるが、本節の実験は、 $0 \leq p/(p+s) < 0.6$ の範囲に相当した。

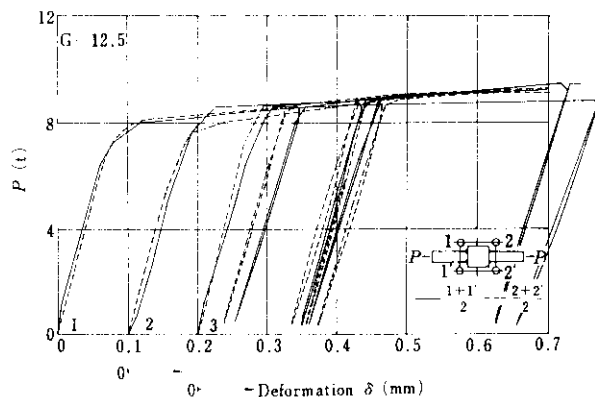
図よりわかるように、単位喉断面あたりの平均強度は、 $p/(p+s)$ の増加に伴ってやや上昇する傾向がある。直線相関にあると仮定して、平均強度 σ_R と $p/(p+s)$ の関係を求めれば、



(1) G-1 test specimen



(2) G 5 test specimen

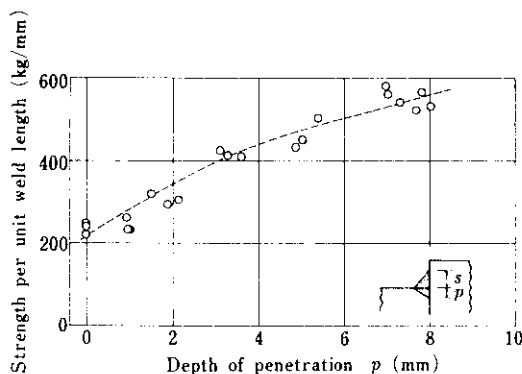


(3) G-12.5 test specimen

Fig. 2 G type, relationship between load and deformation

Table 2 G type test specimen actual size and test results

Test specimen	Size of fillet weld (mm)	Depth of penetration (mm)	Actual throat (mm)	Max. load (t)	Strength per unit weld length (kg/mm)	Strength per unit area of throat (kg/mm ²)
G-1-	1	5.73	4.75	4.66	234.6	49.3
	2	5.53	4.64	4.67	234.6	50.6
	3	5.64	4.61	5.20	262.1	56.8
G-3-	1	6.27	5.53	6.56	326.7	59.2
	2	6.00	5.84	6.20	309.6	56.6
	3	5.93	5.50	5.84	291.4	53.0
G-5-	1	5.77	7.23	8.28	414.4	57.3
	2	6.13	7.42	8.19	409.1	55.1
	3	7.03	7.18	8.55	425.0	59.2
G-7-	1	6.60	7.90	9.00	450.0	57.0
	2	6.38	7.88	8.62	430.6	54.6
	3	6.85	8.33	9.98	501.0	60.1
G-9-	1	6.48	9.44	11.60	583.5	61.8
	2	6.15	9.75	10.96	546.4	56.0
	3	5.90	9.75	11.16	599.1	57.3
G-12.5	1	6.15	8.21	10.60	531.0	64.7
	2	6.40	8.85	10.32	519.1	58.6
	3	6.40	9.50	11.40	568.3	59.8

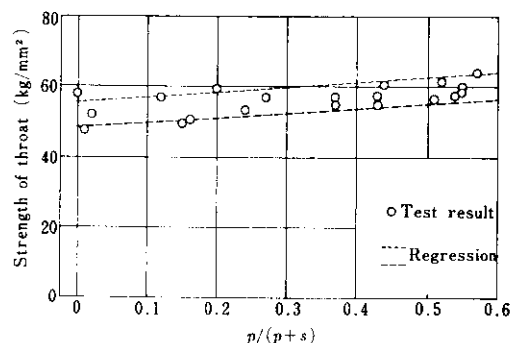
Fig. 3 G type, relationship between p and strength per unit weld length

$$\sigma_R = 140p/(p+s) + 51.9$$

$$\varepsilon = 3.2(\text{kg/mm}^2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 ε : 平方誤差

となる。つまり、 $p/(p+s)=0$ の強度に対し、 $p/(p+s)=0.2$ では約5%， $p/(p+s)=0.4$ では約11%， $p/(p+s)=0.6$ では約16%，それぞれ強度が上昇する。

Fig. 4 G type, relationship between $p/(p+s)$ and strength per unit area of throat.

2.2 溶着金属量を一定として溶込み量を変えた場合の強度

2.2.1 試験体および実験方法

試験体形状を Fig. 5 に、試験体寸法および溶接条件を Table 3 に示すが、溶着金属量は、横断面積が 50mm² になるように設計した。試験体にはあらかじめベベルをつけて、ベベル深さの大小によって溶込み深さを変化させた。試験体は、

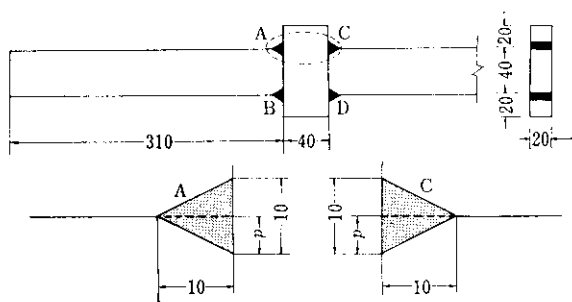


Fig. 5 H type test specimen

溶接終了後機械仕上げをして、所定の寸法を得るようにした。

なお、溶接長であるが、十字型継手では、溶接長が脚長の2倍以上であれば強度に対する影響がなくなるとの実験結果があるため⁷⁾本実験に用いた溶接寸法に見合うよう、脚長を20mmとした。溶接条件は Table 3 に併記したが、1層目は3.2φ、2層目以上は5φの溶接棒(JIS D 4301)を用いた。母材はSS41である。

Table 3 Size and welding conditions (H type)

Mark of test specimen	H-0-	H-2-	H-4-	H-6-	H-8-	H-10-
Depth of penetration p (mm)	0	2	4	6	8	10
Conditions of weld.	The 1st. pass JIS D 4301 3.2φ 140~160A 25V 20~25cm/min					
	The 2nd. pass~JIS D 4301 5.0φ 300~320A 30V 15~20cm/min					

Table 4 Mechanical properties of materials

Material	Yielding stress (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elastic ratio (kg/mm ²)	Elongation (%)
Base metal	22.5	47.2	2.02×10^4	41.3
Welded metal	37.6	50.7	—	21.2

Table 5 H type test specimen actual size and test results

Test specimen	Depth of penetration (mm)	Size of fillet weld (mm)	Actual throat (mm)	Max. strength (t)	Strength per unit weld length (kg/mm)	Strength per unit area of throat (kg/mm ²)	Angle of rupture (°)	
H-0-	1 0.60	10.20	7.64	12.25	304.7	33.9	27	16
	2 0.00	10.80	7.64	12.45	309.7	40.5	32	13
	3 0.58	10.23	7.64	12.20	303.4	39.7	21	17
H-2-	1 2.11	8.30	8.44	13.95	347.0	41.1	44	17
	2 1.77	8.17	8.16	13.50	337.5	41.4	17	23
	3 2.21	8.20	8.68	14.35	355.2	40.9	17	42
H-4-	1 3.15	6.05	8.44	13.70	342.5	40.6	13	26
	2 3.43	6.48	8.11	13.75	338.7	41.8	22	44
	3 3.39	6.03	8.14	14.40	351.2	40.0	24	36
H-6-	1 5.41	4.24	8.69	15.60	380.5	43.8	35	39
	2 5.64	4.17	9.10	15.90	395.5	43.9	31	28
	3 4.74	4.29	8.72	15.50	379.9	43.6	21	25
H-8-	1 6.51	1.96	8.38	16.85	411.0	49.0	90	90
	2 6.14	2.19	8.16	15.45	384.3	47.1	41	90
	3 6.27	2.16	8.27	14.50	364.3	44.0	90	90
H-10-	1 8.10	0.00	8.10	16.25	400.2	49.4	90	49
	2 7.90	0.00	7.90	15.70	404.6	51.2	90	90
	3 7.95	0.00	7.95	16.20	401.0	50.4	90	90

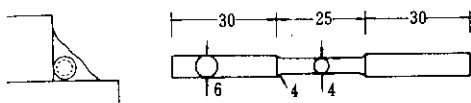


Fig. 6 Tensile test piece of welded metal

試験体に用いた母材および溶着金属の素材試験結果を Table 4 に示す。これは、母材は JIS 1 号試験片を用いたものであり、溶着金属は Fig. 6 に示すように、試験体作成時と同一溶接条件で行なった溶接部から切り出した小試験片によるものである。

この試験体を H タイプと称することにするが、記号は、たとえば H-2-1 というふうにつけた。H は試験体シリーズ名であるが、その次の数字はベベル深さの寸法 (mm) を示し、最後の数字は同種試験体 3 体中の区分を示している。

载荷は 50 t 万能試験機を用い、試験体に引張荷重を与えた。载荷時における変形の測定は 2・1 と同じく 1/1000mm ダイアルゲージを用いた。

なお、载荷に先だち、試験体各部の寸法を測定するとともに、マクロエッチを施して喉厚を測定した。喉厚は溶接のルートから溶接表面までの最短長さとしている。またマクロエッチの代表例を Photo. 2 に示す。

2・2・2 実験結果

実験結果を Table 5 に示し、荷重変形の代表例を Fig. 7 に示す。

Fig. 8 には、単位溶接長あたりの平均強度と溶込み深さとの関係を示した。図に示されるように、溶着金属量を一定にした場合、溶込み量と単位溶接長あたり平均強度とは、ほぼ直線関係にあり、溶込み量の増加とともに平均強度も上昇する。溶込みなしのすみ肉に比べ、全溶着金属のうち半分が溶込んだもの ($p/(p+s)=0.5$) では約 15 %、全部が溶込んだ場合 ($p/(p+s)=1.0$) は約 30 % の強度上昇があった。

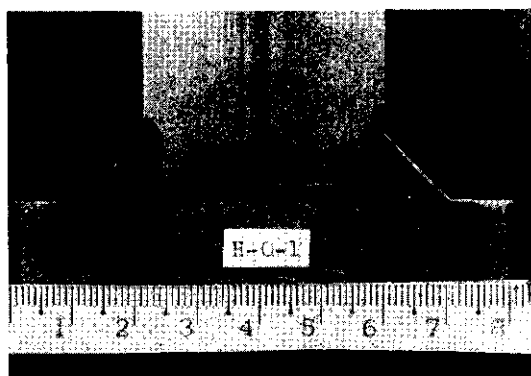
Fig. 9 に、単位喉断面積あたり平均強度 σ_R を示した。図の横軸は、前節と同様 $p/(p+s)$ とした。これによれば σ_R の値は $p/(p+s) < 0.4$ ではほぼ一定、 $p/(p+s) \leq 0.4$ の範囲では $p/(p+s)$ の

増加とともに上昇している。

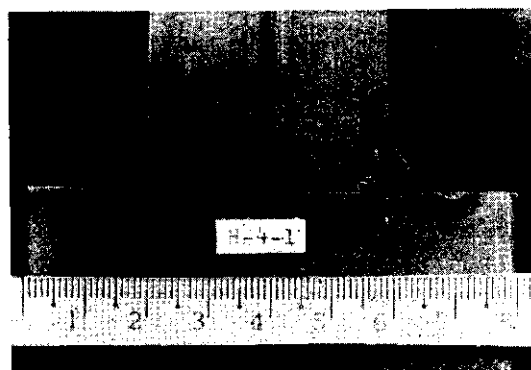
実験結果は次の近似式で示される。

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq p/(p+s) < 0.4 \quad \sigma_R &= 40.7 (\text{kg/mm}^2) \\ &\quad \varepsilon = 0.7 (\text{kg/mm}^2) \\ 0.4 \leq p/(p+s) \leq 1.0 \quad \sigma_R &= 14.3 p/(p+s) \\ &\quad + 35.7 (\text{kg/mm}^2) \\ &\quad \varepsilon = 1.2 (\text{kg/mm}^2) \end{aligned} \right\} (2)$$

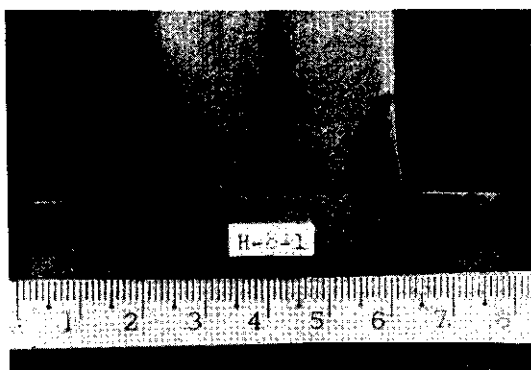
ただし ε : 平方誤差



(1) H-0-1

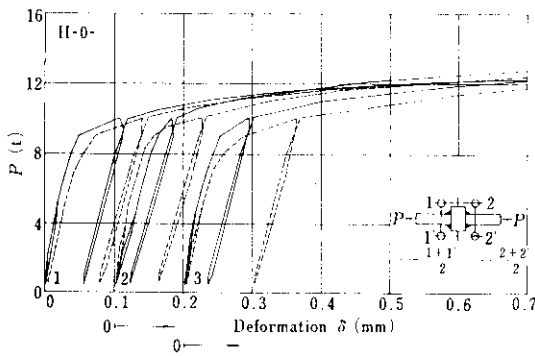


(2) H-4-1

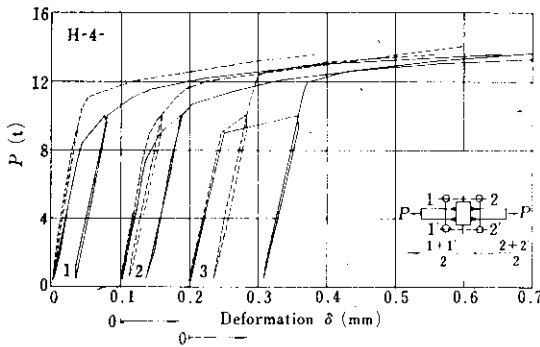


(3) H-8-1

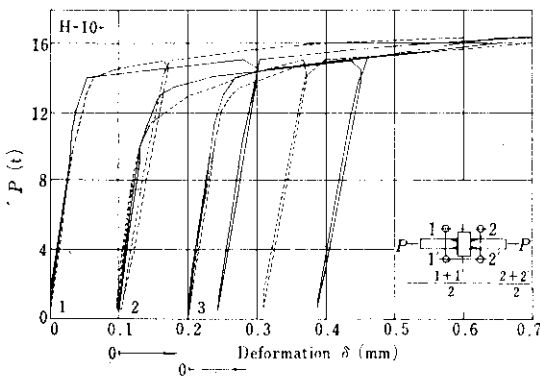
Photo. 2 H type test specimen macro-etching



(1) H-0 test specimen

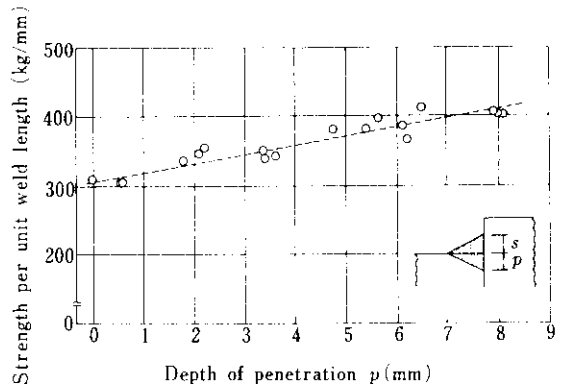
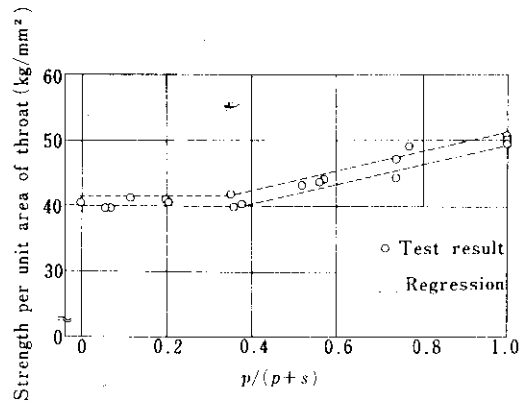


(2) H-4 test specimen



(3) H-10 test specimen

Fig. 7 H type, relationship between load and deformation

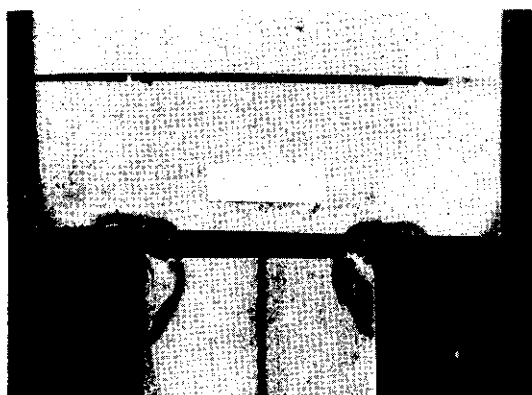
Fig. 8 H type, relationship between p and strength per unit weld lengthFig. 9 H type, relationship between $p/(p+s)$ and strength per unit area of throat

3. 部分溶込み溶接継手の強度によぼす補強すみ肉の効果

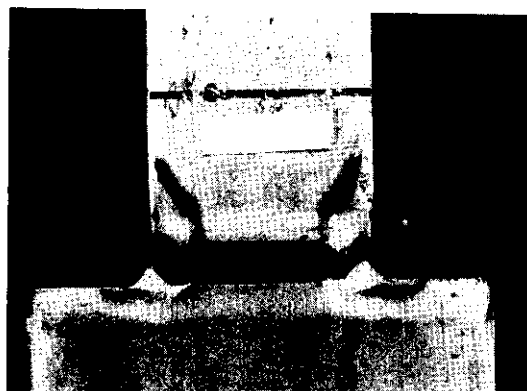
3.1 試験体および実験方法

試験体形状は2・2で示したものと同じで、十字型前面部分溶込み溶接継手である。溶込み深さは2種類であるが、それぞれについて、補強すみ肉の脚長を変化させた。試験体形状、設計寸法、溶接条件などを Fig. 10, Table 6 に示すが、使用鋼材、使用溶接棒はHタイプの場合と同一であり、素材の機械的性質も同じである。(Table 4 参照)

試験体は、溶接後機械仕上げを行ない、所定の寸法を得るようにした。この試験体をIタイプと称することにする。試験体記号はたとえばI-6-2



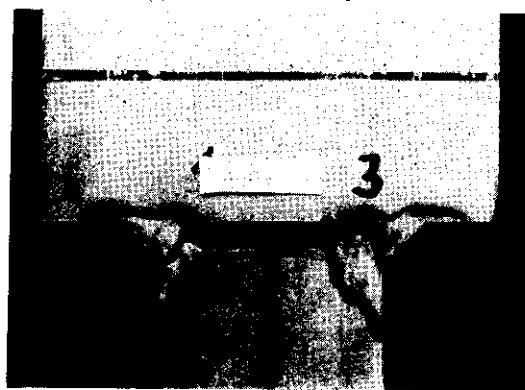
(1) I-6-0-3 test specimen



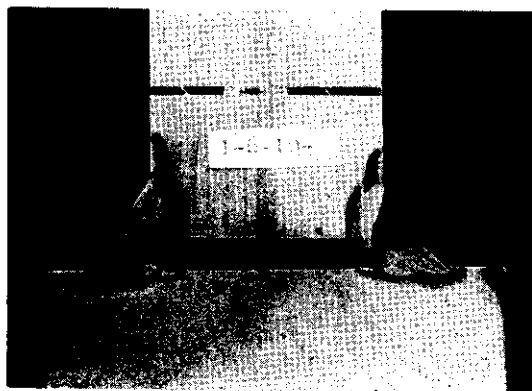
(4) I-10-0-2 tests peecimen



(2) I-6-6-2 test specimen



(5) I-10-6-1 test specimen



(3) I-6-10-1 test specimen

Photo. 3 State of rupture

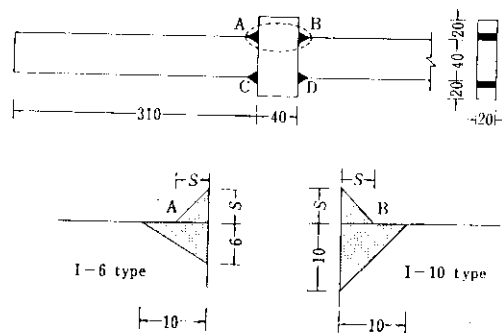


Fig. 10 I type test specimen

Table 6 Size and welding conditions (I type)

Mark of test specimen	I-6-0	I-6-2	I-6-4	I-6-6	I-6-8	I-6-10
	—	I-10-2	I-10-4	I-10-6	I-10-8	I-10-10
Depth of penetration p (mm)	0	2	4	6	8	10
Conditions of weld	The 1st. pass JIS D 4301 3, 2 ϕ 140~160A 25V 20~25cm/min					
	The 2nd pass~JIS D 4301 5, 0 ϕ 300~320A 30A 15~20cm/min					

-1とかI-10-4-2というふうに示したが、2番目の数字は溶込み深さを示し、3番目の数字は補強すみ肉の脚長を示す。また最後の数字は同種試験体3体中の区分番号である。なお試験体記号I-10-0、つまり溶込み深さ10mm補強すみ肉なしのものは

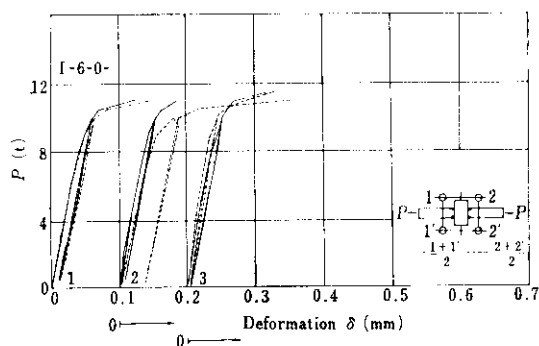
前節で述べたH-10に等しいためここでは省略した。

载荷は50 t 万能試験機を用い、試験体に引張荷重を与えた。载荷は継手破断まで行なった。载荷時の変形の測定は前節Hタイプと同一の治具を用い1/1000mmダイヤルゲージにて測定した。また载荷に先だち試験体各部の寸法を精密に測定した。

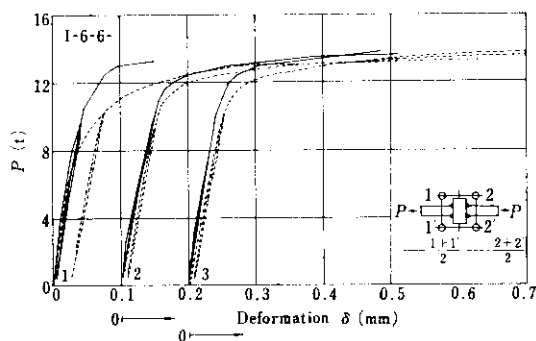
3-2 実験結果

载荷試験結果の代表例を Fig.11および Photo.3に示す。また実験結果の一覧を Table 7 に示す。

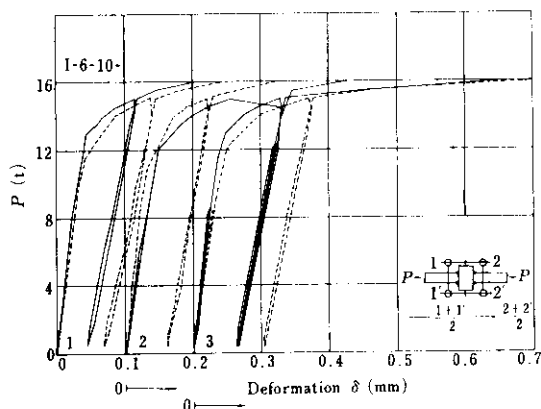
Fig. 12 および Fig. 13 に、単位溶接長あたりの平均強度 ($P_{\max}/\Sigma l$) とすみ肉の脚長との関係



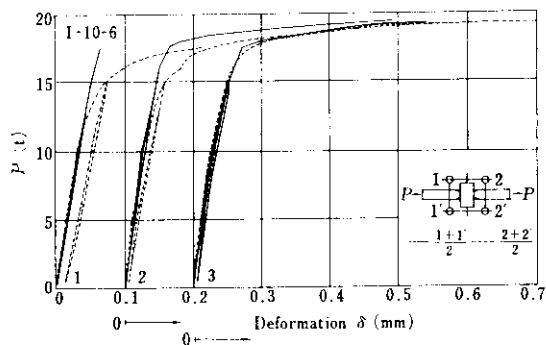
(1-1) I-6-0 test specimen



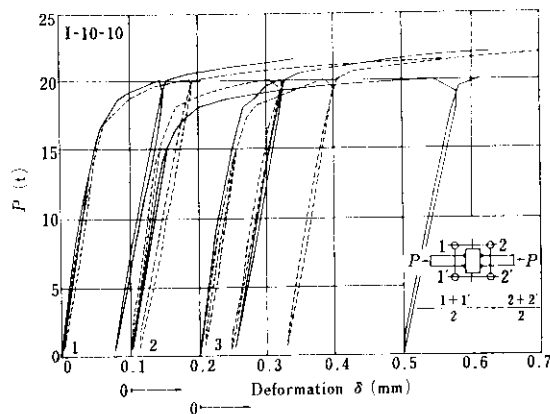
(1-2) I-6-6 test specimen



(1-3) I-6-10 test specimen



(2-1) I-10-6 test specimen



(2-2) I-10-10 test specimen

Fig. 11 I type, relationship between load and deformation

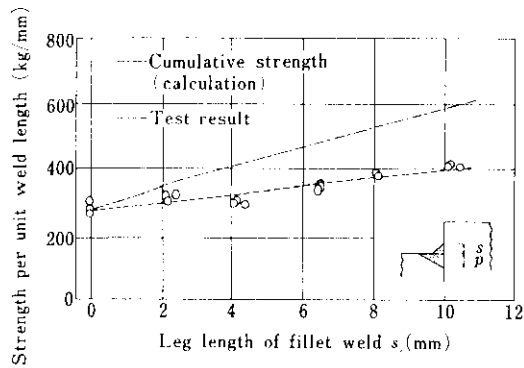


Fig. 12 I-6 type, relationship between s and strength per unit weld length

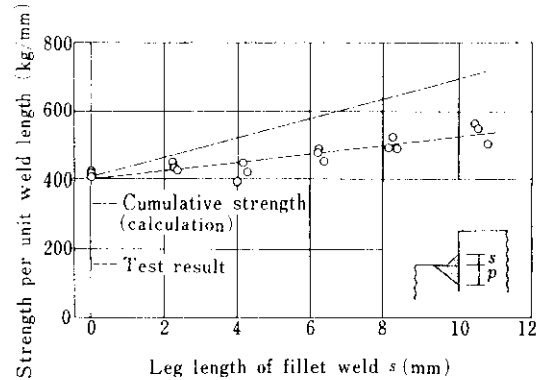


Fig. 13 I-10 type, relationship between s and strength per unit weld length

Table 7 I type test specimen actual size and test results

Test specimen	Depth of penetration (mm)	Size of fillet weld (mm)	Actual throat (mm)	Max. load (t)	Strength per unit weld length (kg/mm ²)	Strength per unit area of throat (kg/mm ²)	
I-6-0-	1	4.96	0.00	4.96	11.25	282.7	61.07
	2	5.37	0.00	5.37	10.80	271.4	50.32
	3	4.72	0.00	4.72	12.25	304.7	64.88
I-6-2-	1	5.49	2.40	5.93	12.80	320.0	53.96
	2	5.00	2.23	5.47	12.20	305.0	55.71
	3	5.01	2.19	5.55	12.50	318.9	57.44
I-6-4-	1	5.24	4.17	6.80	12.10	301.0	44.25
	2	4.91	4.08	6.44	12.00	300.0	46.62
	3	4.95	4.42	6.50	12.00	298.5	45.91
I-6-6-	1	5.09	6.44	8.17	13.35	338.8	41.46
	2	5.07	6.46	8.07	13.60	340.0	42.11
	3	5.22	6.46	8.21	13.80	343.3	41.82
I-6-8-	1	5.48	7.99	9.22	15.45	382.4	41.49
	2	4.60	8.15	9.00	15.00	374.1	41.46
	3	5.11	8.10	9.40	15.10	377.5	40.14
I-6-10-	1	4.22	10.16	10.41	16.40	408.0	39.18
	2	4.74	10.14	10.52	16.25	406.3	38.61
	3	4.81	10.46	10.63	16.12	403.0	37.91
I-10-2-	1	7.85	2.26	8.21	17.20	430.0	52.40
	2	8.36	2.24	8.62	17.80	445.0	51.62
	3	8.53	2.34	8.81	17.00	415.0	49.24
I-10-4-	1	7.81	4.28	8.89	16.70	417.5	47.14
	2	7.91	4.15	8.89	18.10	443.6	49.92
	3	8.37	4.00	9.20	15.70	386.7	42.05
I-10-6-	1	8.56	6.35	10.69	18.00	450.0	42.10
	2	7.41	6.25	9.76	19.50	480.3	49.19
	3	7.96	6.23	10.13	19.40	477.8	47.16
I-10-8-	1	8.05	8.25	11.31	20.70	520.1	46.50
	2	8.26	8.36	11.55	19.50	485.1	42.10
	3	7.96	8.18	11.14	19.90	487.7	43.79
I-10-10-	1	8.23	10.57	13.09	21.90	547.5	41.84
	2	8.23	10.81	13.17	20.00	497.5	37.09
	3	8.13	10.47	12.93	22.40	557.2	43.09

を示した。これらの図より、部分溶込み溶接継手の強さに対する補強すみ肉の効果は明瞭であり、補強すみ肉の脚長を大きくすれば継手の強さ（最大荷重）も高くなることが示される。

ところで、補強すみ肉を有する部分溶込み溶接継手の強さが、溶込み部とすみ肉部それぞれ単独の強さの相和となると仮定し（継手の強さ＝溶込み部単独の強さ＋すみ肉部単独の強さ）かつ、すみ肉の寸法効果* を無視して継手の強さを計算したのが、Fig.12, Fig.13 の一点鎖線である。つまり、溶込み部単独の単位溶接長あたりの平均強度は $p=6\text{mm}$ のものは、I-6-0試験体より、 286.3kg/mm 、 $p=10\text{mm}$ のものは、前節H-10-試験体より 401.9kg/mm が求まっている。また、脚長 10mm のすみ肉溶接の単位溶接長あたりの平均強度は、前節H-0-試験体より 305.9kg/mm なる実験値がある。したがって、I-6-0では 286.3kg/mm 、I-6-10は $286.3+305.9=592.2\text{kg/mm}$ 、I-10-10は $401.9+305.9=707.8\text{kg/mm}$ と計算される。寸法効果* を無視しているため補強すみ肉なしの場合の値と、補強すみ肉脚長 10mm の場合の計算値を直線で結べば、溶込み部とすみ肉部それぞれ単独の強さの相和と仮定したときの値が示される。図中一点鎖線で示したものがこの計算値であり、○印および破線は実験値である。

図より明らかなように、仮定計算値と実験値とは一致せず、両者の差は補強すみ肉の脚長が増せば比例的に大きくなる。このことは、補強すみ肉の大きさを増せば、継手の強さは確実に高くなるが、その強さは、溶込み部とすみ肉部それぞれ単独の強さの相和に達しないことを示している。

この理由は溶込み部とすみ肉部との剛性の相異、加力軸と喉面の角度変化に伴う、応力伝達機構の変化、などが原因していると考えられる。いずれにしても、継手の強度を求めるための喉厚として、溶込み深さとすみ肉の脚長との和 $(p+s/\sqrt{2})$

* すみ肉溶接の単位喉断面あたりの強度が、すみ肉の脚長の大小によって変化することを寸法効果と称する。従来の研究では、脚長が大きくなれば強度が低下するといわれている（Var dir EB⁹⁾、D. Feder⁹⁾、鶴田¹⁰⁾¹¹⁾ら）低下する理由については議論が多い（加藤、森田¹²⁾¹³⁾、佐藤、松井、瀬尾¹⁴⁾¹⁵⁾）。

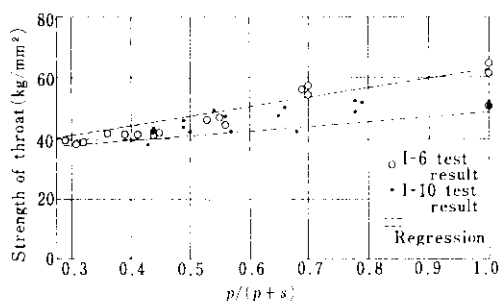


Fig. 14 I type, relationship between $p/(p+s)$ and strength per unit area of throat

としては、強度を過大に評価することを示している。

Fig. 14 は、単位喉断面あたりの平均強度 σ_R を $p/(p+s)$ をベースにして示したものである。（ p ：溶込み深さ、 s ：補強すみ肉の脚長）、実験によれば、 $p/(p+s)$ が増大すれば σ_R も増大する。言いかえれば補強すみ肉の脚長 s が大きくなれば σ_R は低下し、 $s=0$ の強度と比較すれば $s=p$ のときは約80%、 $s=2p$ のときは約70%の強度となった。これは、補強すみ肉の脚長をあまり大きくしても、継手の強度は投入した溶着金属量に比べてそれ程伸びないことを示している。

σ_R と $p/(p+s)$ とが直線相関にあると仮定すれば

$$\sigma_R = 22.9 \times p/(p+s) + 32.9 \quad \text{.....(3)}$$

なる関係を得るが、 $p/(p+s)$ が大きな範囲、つまり、補強すみ肉の脚長の小さい範囲 $(p/(p+s) > 0.7)$ あたりから）I-6タイプとI-10タイプでの σ_R に差が生じる。(3)式を基準にすれば $p/(p+s)=0.3$ のときの平方誤差は 2.0kg/mm^2 であるが、 $p/(p+s)=1.0$ では平方誤差が 6.8kg/mm^2 となる。この理由は今回の実験からは明確にできないが、I-6タイプのものはI-10タイプに比べて溶接部が小さく、そのために寸法効果の影響を受けたためか、あるいは、薄板にみられる局部ネックの効果¹⁰⁾を受けたためではなからうかと考えられる。しかし、この実験に用いた試験体のように厚さが 20mm もあるものにもあてはまるかどうかは今のところ不明である。

なお、破断状態については、破面が母材の熱影響部にくい込むものが多く、(Photo. 3) 平均応

力による破壊理論が仮定している「破断はルートを通る一平面で起る」を満足するものはほとんどなかった。

4. 実験結果の検討

4.1 従来の設計式および破壊理論との比較

日本建築学会規準では、部分溶込み溶接の許容応力度は、一般のすみ肉溶接と同じ値、つまり、素材の許容剪断応力度(許容引張応力度 $\times 1/\sqrt{3}$)としている。すみ肉溶接の許容応力度を材の許容剪断応力度としたのは、剪断歪エネルギー説に準拠するものであるが、Van der EB⁹⁾の実験にも示されるように剪断歪エネルギー説では、すみ肉溶接の強度が過小に評価されることが示されている。つまり Van der EB⁹⁾の実験は、前面すみ肉溶接を単独に取り出し、それに任意方向の応力をかけて破壊値を求めたものであるが、純引張を受けた場合、素材強度の約85%の強度となった。剪断歪エネルギー説では、58%の強度と計算されるから、実際の溶接強度は、剪断歪エネルギー説で与えられるものより約45%も強いことになる。

筆者らの実験のうち、溶込みのない通常のすみ肉溶接として、たとえば H-0 タイプをとり上げてみる。このタイプの強度 σ_R は、 $40.0 \leq \sigma_R \leq 41.4$ (kg/mm²)である。溶着金属の引張強度 σ_w は、素材試験 (Table 4) より $\sigma_w = 50.7$ kg/mm²であるから $0.78 \leq \sigma_R/\sigma_w \leq 0.82$ となり、日本建築学会で与えている $1/\sqrt{3} = 0.58$ より約38%も強度が高い。

実験によって示されたように、部分溶込み溶接継手は、同じ喉厚をもつすみ肉溶接継手よりも高強度が期待できる。したがって、部分溶込み溶接の許容応力度を、一律に許容剪断応力度とすることは安全側に過ぎよう。なぜならば本実験で示されたように $p/(p+s)=1$ つまり完全な部分溶込み溶接継手では、単位喉断面あたりの強度は、溶着金属の引張強度と同等の値を得た。これは学会規準にしたがって計算したものより70%以上も高い値となる。筆者らは、継手の強度基準として材の剪

断強度をとるより、むしろ材の引張強度をとり、それに継手形状や応力状態を考慮しつつ許容強度を求める方がより合理的であると考える。

さて、溶接の強度を理論的に求めるために、従来より、破壊理論を応用することが試みられている。これらは、溶接部に作用する応力がある一定値に達すると破壊をおこすとしているが、いずれも次の仮定に基づいている。

- (1) 破断はルートを通る一平面で起る。
- (2) 破断時の応力は破断面に様に分布する。

従来破壊説のうち代表的なものを示せば次のとおりである。

(1) 最大主応力説

溶接部に働く主応力のうちの1つが、溶着金属の圧縮または引張の最大強度に達したとき破壊が起るとしたものである。この説では、主応力が最大となる面をもって破断面とするのである。

(2) 最大剪断応力説

破壊は最大剪断応力によるすべり破壊であるとする説であり、剪断応力が最大となる面を破壊面とするものである。つまり、この説では破断面に働く剪断応力が材の剪断強度に達したとき破壊するとしたものである。

(3) 剪断歪エネルギー説

変形に費された仕事量が一定値に達すると破壊がおこるとしたものであり、仕事量が最大となる面を破壊面としたものである。この説は前述したように日本建築学会規準で採用している。

これらの説は、いずれも破壊面に働く応力によって破壊強度を求めている。したがって、まず破壊面の位置(破壊角)を知る必要があり、破壊角は重要視される。その意味で、本実験でも破壊角を測定したが、Hタイプを例として、Fig.15に示した。図中、破壊説を、部分溶込み溶接に応用した計算値を示した。計算の過程を略記すれば次のとおりである。

部分溶込み溶接として Fig. 16 を想定するが OCは喉厚であり、 θ は破壊角である。

$\sigma_{\perp}$ を破壊面に垂直な応力度とし、 $\tau_{\perp}$ を破壊面に平行な剪断応力度とすれば、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\perp} &= (P/al) \times \cos(\gamma - \theta) \times \sin\theta \\ \tau_{\perp} &= (P/al) \times \cos(\gamma - \theta) \times \cos\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

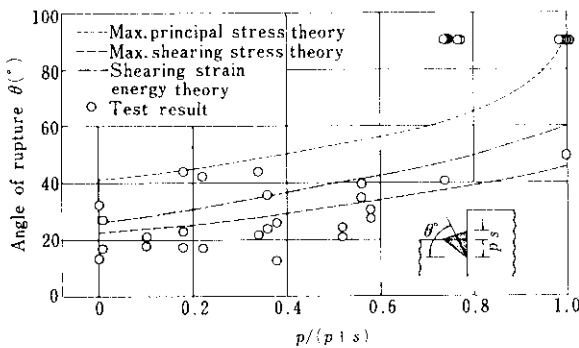


Fig. 15 H type, relationship between $p/(p+s)$ and angle of rupture

ただし、 a : 喉厚

l : 溶接長

(1) 最大主応力説

主応力 σ_1 は

$$\sigma_1 = \sigma_{\perp}/2 + \sqrt{(\sigma_{\perp}/2)^2 + \tau_{\perp}^2}$$

(4) 式より

$$\sigma_1 = (P/2al) \cdot \cos(\gamma - \theta) \{ \sin\theta + \sqrt{1 + 3\cos^2\theta} \}$$

σ_1 が最大となる破壊角 γ は $\partial\sigma_1/\partial\theta = 0$ より

$$\tan(\gamma - \theta) = \frac{3\cos\theta \sin\theta - \sqrt{1 + 3\cos^2\theta} \cdot \cos\theta}{1 + 3\cos^2\theta + \sqrt{1 + 3\cos^2\theta} \cdot \sin\theta} \quad (5)$$

上式(5)なる超越関数を解けば破壊角 θ が求まる。

(2) 最大剪断応力説

(4) 式より破壊面に働く剪断応力度が求まるが、 $\partial\tau_{\perp}/\partial\theta = 0$ より剪断力が最大となる θ が求まる。
つまり

$$\sin(\gamma - \theta) = 0 \text{ より } \theta = \gamma/2 - n\pi/2 \quad (n = -1, 0) \quad (6)$$

(3) 剪断歪エネルギー説

単軸応力状態では、 $\sigma_c = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3\tau_{\perp}^2}$ で示されるから(4)式より

$$\sigma_c = (P/al) \sqrt{1 + 2\cos^2\theta} \cdot \cos(\gamma - \theta)$$

この σ_c が最大となる面が破壊面であるとするから $\partial\sigma_c/\partial\theta = 0$ より

$$\tan(\gamma - \theta) = \sin 2\theta / (2 + \cos 2\theta) \quad (7)$$

となり、これを解けば破壊角 θ が求まる。

Fig. 15 よりわかるように、測定値はばらつきが大きい。また、破断が母材の熱影響部を走るものがあり本実験では規則性が見い出せない。従来の研究では通常の前面すみ肉溶接の場合 ($p/p+s$

$= 0$) 最大剪断応力説がよく合うといわれている¹⁷⁾。本実験でも $p/(p+s) = 0$ のものは破壊角の平均が 22° で最大剪断応力説の $22^\circ 30'$ に一致している。これは溶込み量が増せば、従来の破壊説から導かれる破壊角のうちどれに合うかといった議論は成り立たなくなるようである。

一方、すみ肉溶接継手の破壊に関し、加力方向を変化させて、引張および圧縮破壊特性を調べた研究 (Van der EB¹⁹⁾) や斜方すみ肉溶接に関する研究 (仲²⁰⁾ 桜井²¹⁾ Van de Perre²²⁾ 太田¹⁹⁾) らなどがあるが、従来の破壊理論を適用しても、実験結果をうまく説明できない場合が多い、この原因は、ルート部の応力集中を無視しているためであろう⁶⁾、部分溶込み溶接継手の応力状態も、すみ肉溶接に比べて勝るとも劣らず複雑であると予想される。溶接の強度を的確に知るためには破壊法則を知ることも重要であるが、ルート部の応力集中などを考慮して議論を進めることは非常に困難である。特に建築鉄骨においては複雑な継手形式や応力状態のものが多いため、むしろ実験を重ねて、実験式を求める方がより有効であると考え

4.2 実験式

I. I. W. (International Institute of Welding) 第15委員会では、1960年以降10ヶ国 (オランダ、日本、イギリス、ベルギー、ドイツ、ユーゴスラビヤ、スウェーデン、フランス、アメリカ) が共同して、主にすみ肉溶接の設計式を確立すべく研究している。その成果として1964年次の実験式が示された²³⁾²⁴⁾。

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 1.8(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \quad (8)$$

ただし、 σ_c : 全溶着金属強度

$\sigma_{\perp}$: 喉面に働く垂直応力度

$\tau_{\perp}$: 喉面で溶接線と直角方向に働く剪断応力

$\tau_{\parallel}$: 喉面で溶接線方向に働く剪断力

上式は、式の形式としては剪断歪エネルギー説と類似しているが、全く実験的、統計的に導いたものである。

また F. K. Ligtenberg²⁵⁾ はさらに単純化した式

を示している。つまり

$$P_{rupt} = 0.8 \cdot \sigma_c \cdot \Sigma A \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし P_{rupt} : 継手の最大耐力

σ_c : 全溶接金属の強度

ΣA : 全喉断面積

ここに示した(8)式、(9)式はいずれも、溶込みのない一般のすみ肉溶接を対象にした式で、「部分溶込み溶接継手」に関しては、全く実験はなく、もちろん適用範囲外である。しかし、すみ肉溶接の強度を σ_c という素材の引張強度から評価した点注目すべきことで、溶接形状のファクターの多い部分溶込み溶接継手にも適用できれば、一般のすみ肉溶接継手と $p/(p+s) = 0$ の点で一致することからもきわめて便利である。

ところで、(9)式は単純化されたものであり、計算は容易であるが、溶接部に働く応力状態を全く考慮していない点、単純化されすぎており、ここで述べる部分溶込み溶接継手のように、溶接形状の影響を多くうけるものには適用しにくい。したがって、従来の実験式として、(8)式をとり上げ、部分溶込み溶接継手の実験結果と比較しつつ検討する。

部分溶込み溶接では、「溶込み」と言う factor が入るため次のような式となる。想定する溶接形状はFig.16に示したものと同一である。なお(8)式では、応力はすべて喉面のそれを用いる。したがって破壊面は考慮しない。

喉断面に働く垂直応力 $N_{\perp}$ と剪断力 $T_{\perp}$ は次の

ようになる。ただし溶接線方向の剪断力 $T_{\parallel}$ は 0 となるため考慮しない。

$$N_{\perp} = P \sin \gamma$$

$$T_{\perp} = P \cos \gamma$$

喉厚をルートから溶接表面までの最短長としているから、 $\gamma > \alpha$ と $\gamma = \alpha$ とに分ける必要がある。

単位喉断面あたりの平均強度を σ_R とすれば、

(1) $\gamma > \alpha$ のとき

$$\gamma = \beta \text{ となり}$$

$$\sigma_{\perp} = (P/al) \sin \beta$$

$$\tau_{\perp} = (P/al) \cos \beta$$

$$\text{ただし、} \beta = \gamma = \tan^{-1}(h/s)$$

$$\therefore \sigma_R = \sigma_c \times 1 / \sqrt{1 + 0.8 \cos^2 \beta} \quad \dots\dots\dots (10)$$

(2) $\gamma = \alpha$ のとき (p が大きくなり喉面が OA となるとき)

$$\sigma_{\perp} = (P/al) \sin \alpha$$

$$\tau_{\perp} = (P/al) \cos \alpha$$

$$\text{ただし } \alpha = \tan^{-1}(p/h)$$

$$\therefore \sigma_R = \sigma_c \times 1 / \sqrt{1 + 0.8 \cos^2 \alpha} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで $\beta = 45^\circ$ の場合は $h = s$ であるから(10)、(11)式はそれぞれ

$$(1) \gamma > \alpha \text{ のとき } \sigma_R = 0.85 \sigma_c \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$(2) \gamma = \alpha \text{ のとき } \sigma_R = \sigma_c \times 1 / \sqrt{1 + 0.8 \cos^2 \alpha} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{ただし } \alpha = \tan^{-1}(p/s)$$

となる。したがって(12)(13)両式からは、 $\alpha < \gamma \leq 45^\circ$ の範囲、つまり $p/(p+s) \leq 0.5$ では、 $\sigma_R = \text{const}$ と

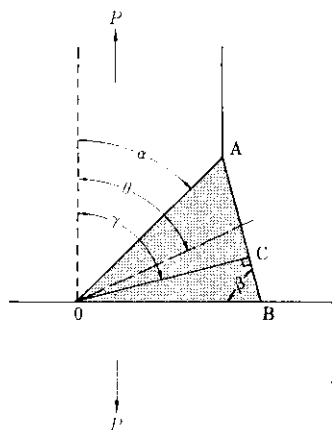


Fig. 16 溶接形状

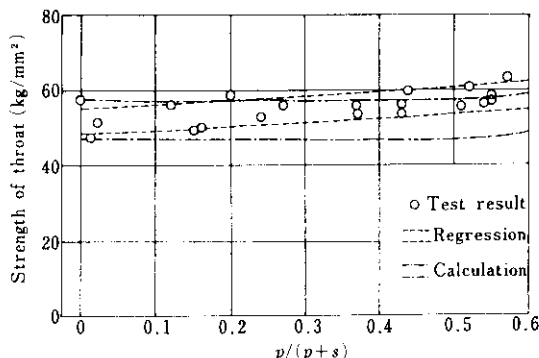


Fig. 17 G type, comparison of the results with calculated results

なり $\alpha > 45^\circ$ では($p/p+s > 0.5$)溶込み量が大きくなるにつれて σ_R も大きくなる。

さて、2・1 で述べた、すみ肉脚長を一定にして溶込み量を変えた場合の実験 (Gタイプ) は、(12) (13)式が比較の対象となる。これらの式から計算される値と実験値とを比較したのが Fig. 17である。ただし、計算に用いた σ_c の値は $p/(p+s) = 0$ (溶込みなしのすみ肉溶接継手) の平均強度から算出しており、この実験では $\sigma_c = 62.2 \text{ kg/mm}^2$, $\varepsilon = 6.0 \text{ kg/mm}^2$ である。図には誤差を考慮しているため、2本の一点鎖線で記したが、これには含まれる部分が、(12), (13)式による計算値である。

この図より、 $p/(p+s)$ が小さい範囲 ($p/p+s < 0.3$) では、計算値と実験値とよく一致している。 $p/p+s$ が0.4を越える付近より実験値がやや高めになる。(σ_R の平均値で $p/(p+s) = 0.4$ では約9%, $p/(p+s) = 0.5$ では約12%実験値の方が高い)。しかし、 $p/(p+s) > 0.4$ の範囲でも、実験値の70%以上のものが計算値の誤差範囲に入っており、しかも安全側である。

一方、2・2 で述べた、溶着金属を一定として溶込みを変化させた実験 (Hタイプ) では、 β が変化するため、(10), (11)式が比較の対象となる。これらの式から計算される値と実験値とを比較したのが Fig. 18である。この実験の場合には $\sigma_c = 466 \text{ kg/mm}^2$, $\varepsilon = 0.51 \text{ kg/mm}^2$ となるが、誤差が小さいため、計算上はこれを無視した。図よりわかるように、計算値は実験値とよい一致を示している。

Iタイプ (溶込み量一定) の実験結果を同様に

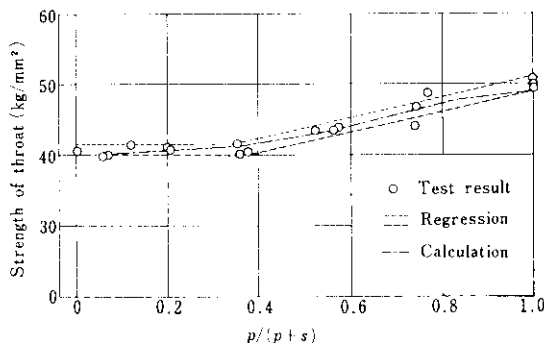


Fig. 18 H type, comparison of the test results with calculated results

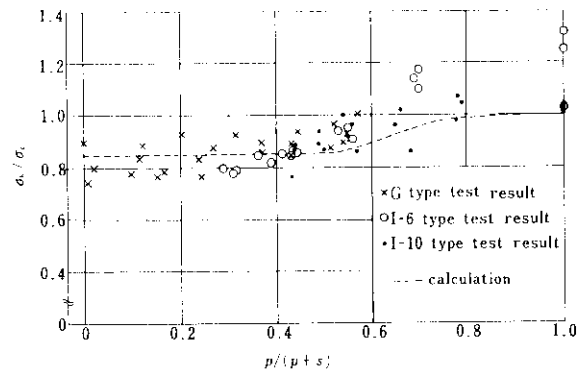


Fig. 19 G & I type, comparison of the test results with calculated results

示したのが Fig. 19である。図中、Gタイプの実験結果を併記したが、これはG, I両タイプとも、止端の角度が 45° であり、2者が同系列にあると考えられることと、Gタイプを併記することにより、 $p/(p+s)$ が0~1.0の全範囲で比較できるからである。ただしGタイプとIタイプとでは素材の機械的性質が異なるので、単位喉断面あたりの平均強度 σ_R をそのままでは比較できない。したがって、Gタイプ、Iタイプ、各々の実験で得られた σ_R と、各々の σ_c との比、つまり σ_R/σ_c で比較した (Gタイプ、 $\sigma_c = 62.2 \text{ kg/mm}^2$, Iタイプ、 $\sigma_c = 46.6 \text{ kg/mm}^2$) 図中点線で示したものが計算値である。

図に示されるように、 $p/(p+s) > 0.7$ の範囲では、I-6タイプの実験値が計算値よりも高い ($p/p+s = 0.7$ で平均18%, $p/p+s = 1.0$ で平均20%, 実験値の方が高い) しかし、計算値と実験値とが15%以上差があるものは全体の8%程度であり、しかもすべて安全側であった。したがって、全体的にみれば、計算値は実験値と比較的よい一致を示しているとみなせよう。

以上より、補強すみ肉一定で溶込みが変わった場合、溶着金属量が一定で溶込みが変わった場合、また、溶込み量が一定で補強すみ肉の脚長が変わった場合、いずれも、部分溶込み溶接継手の強度は、(10)~(13)式で求め得るといえる。

これらの式をまとめれば次のようになる

$$\sigma_R = \sigma_c / \sqrt{1 + 0.8 \cos^2 \varepsilon} \quad (14)$$

ただし, $r > \alpha$ のとき $\xi = \beta$

$r = \alpha$ のとき $\xi = \alpha$

(4)式において, σ_v を材の許容引張強度とすれば, 部分溶込み溶接の設計式となるものである。

5. 結 論

部分溶込み溶接継手の強度に関する実験結果を要約すれば

(1) 補強すみ肉の脚長を一定にした場合でも, 溶着金属量を一定にした場合でも, 溶込み量を増せば, 単位溶接長あたりの強度, 単位喉断面あたりの強度はいずれも上昇する。

(2) 溶込み量を一定とした場合, 単位溶接長あたりの強度は, 補強すみ肉のサイズが大きくなれば上昇する。ただし, 継手の強さは, 溶込み部単独の強さと, すみ肉部単独の強さとの相和に達しない。また, 単位喉断面あたりの平均強度は, 補

強すみ肉のサイズが増せば低下する。

(3) いずれの実験においても, 破断面が母材の熱影響部にくい込むものが多く, 従来の破壊理論が仮定している「破断はルートを通る一平面で起る」を満足するものはほとんどなかった。などである。

このように, 部分溶込み溶接継手の強度は, 溶接形状の変化によって影響を受け, かつ, 同量の溶着金属をもつすみ肉溶接継手に比べて高強度が得られる。さらに, 補強すみ肉溶接を付加することによって継手の強さを増し得ることなどから, 従来の実験式と比較しつつ, 部分溶込み溶接継手に関して設計式を示した。

本研究にあたり, 終始ご指導をいただいた, 大阪大学溶接工学教室・佐藤邦彦教授ならびに同学建築工学教室・五十嵐定義教授, また, 種々の御教示をいただいた東京大学建築学科森田耕次先生に記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会: 鋼構造設計規準, 同解説, (1970)
- 2) 鶴田明, 木村富夫他: 鋭角すみ肉溶接の研究, 建築学会論文報告集, 第69号 昭和36年10月
- 3) 仲威雄: 鉄骨建築における溶接の応用と安全性のために, 建築学会大会梗概集, 昭和44年8月
- 4) 鷺尾健三, 滝沢章三: 異形すみ肉溶接の強度に関する研究, 建築学会大会梗概集, 昭和45年10月
- 5) 太田省三郎: 溶接継手の耐力に関する研究第1報 鉄道技術研究報告, (1961) 186
- 6) 渡辺正紀, 佐藤邦彦: 溶接力学とその応用, (1965) [朝倉書店]
- 7) 中山繁: 十字すみ肉溶接継手における力の伝達と継手強度に及ぼす溶接長の影響, (未発表)
- 8) Van der EB: The Testing of End Fillet Welds 4th Congress, Preliminary Publication of International Association for Bridge & Structural Engineering, (1952)
- 9) D. Feder: Einfluß der Nahtdicke auf Statische Festigkeit von Flanken Kehlnahten, Schweißen und Schneiden, 19 (1967) 7
- 10) 鶴田明, 寺田貞一: すみ肉溶接の強度に関する研究, 建築学会論文報告書, 69号 昭和36年10月
- 11) 鶴田明, 箕面存信他: 前面すみ肉溶接における応力分布の研究, 溶接学会誌, 27 (1958) 4
- 12) 加藤勉, 森田耕次他: すみ肉溶接継目の終局強度, 建築学会大会梗概集, 昭和43年10月
- 13) 加藤勉, 森田耕次: すみ肉溶接継目の終局強度, 建築学会大会梗概集, 昭和44年8月
- 14) 佐藤邦彦, 瀬尾健二: すみ肉溶接部の力の伝達に及ぼすすみ肉形状の影響及びその強度と切欠材の強度との関連について, 溶接学会大会概要, 第5集
- 15) 佐藤邦彦, 松井繁明, 瀬尾健二: 引張を受ける十字型すみ肉模型の塑性変形挙動と強度, 溶接学会大会概要, 第3集
- 16) R. Hill: On Discontinuous Plastic States, with Special Reference to Localized Necking in thin Sheets, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1 (1952)
- 17) 太田省三郎: 溶接継手の耐力に関する研究, 第2報, 鉄道技術研究報告, (1961), 192
- 18) 鶴田明, 箕面存信, 舟橋功男: 大型すみ肉溶接の強度について, 溶接学会誌, 25 (1956) 8

- 19) 太田省三郎：斜方すみ肉溶接の強さに関する一考察，溶接学会誌，27（1958）7
- 20) 仲威雄：斜方すみ肉溶接の強さについて，日本建築学会論文報告集，（1952）1
- 21) 桜井季男：すみ肉溶接継手の比較，溶接学会誌，21（1952）1
- 22) 仲威雄：すみ肉溶接の耐力に関して，溶接界，5（1963）2
- 23) Calculating Formulas for Welded Connections Submitted to Static Loads. I. I. W. Doc. XV-156-63, XV-139-64 Welding in the World, 2（1964）4
- 24) 太田省三郎：溶接継手の強度計算公式 一主として I. I. W. の提案する設計公式について一 溶接学会誌，35（1966）11
- 25) F. K. Ligtenberg：International Test Series Final Report I. I. W. Comm. XV. Doc XV-242 68
- 26) 仲威雄，加藤勉，森田耕次：溶接継手の耐力，建築学会論文報告集，146号，昭和43年4月

