

# 溶接入熱量を実験変数とした 溶接継手性能に関する基礎的研究

小林 光博<sup>1)</sup> 横山 幸夫<sup>2)</sup>

溶接入熱量が大きくなる溶接組立箱形断面柱のダイヤフラムのエレクトロスラグ溶接部および、角継手の2電極式サブマージアーク溶接部に関し、入熱量の相違が溶接部の継手性能に与える影響について調査した。研究は、実寸の溶接組立箱形断面柱を製作し、入熱量を相違させたダイヤフラムのエレクトロスラグ溶接部および、角継手の2電極式サブマージアーク溶接部から試験片を採取した。引張試験および衝撃試験などの破壊試験を行い、入熱量の相違が溶接継手性能に与える影響について考察した。

## まえがき

建築鉄骨分野における超高層建築物には、極厚材を用いた溶接組立箱形断面柱（BOX柱）が多く使用されている。この場合、柱梁接合部を剛域と仮定するために、梁フランジ位置の柱断面内に内ダイヤフラムを配し、柱梁接合部の角継手は完全溶込溶接で設計されることが多い。その反面、BOX柱の鉄骨製作において、施工効率の観点から、ダイヤフラムおよび角継手に溶接の入熱量が大きく、溶着量の多いエレクトロスラグ溶接およびサブマージアーク溶接の溶接施工法が採られることが多い。この場合、被溶接部に対して、ダイヤフラムのエレクトロスラグ溶接部では入熱量が最大1,000kJ/cm以上、また、角継手では最大500kJ/cm以上となることがある。一般に入熱量が増大すると、溶接ボンド部近傍の溶接熱影響部の衝撃特性劣化が著しくなると考えられる。しかし、建築分野において、実物大スケールの被溶接物を対象とし、エレクトロスラグ溶接およびサブマージアーク溶接の入熱量の影響を因子として、溶接継手部の性能を調査した資料や研究は少ない。

本研究は、ダイヤフラムのエレクトロスラグ溶

接部および角継手の2電極式サブマージアーク溶接部を対象に、入熱量を実験変数とし、溶接部の継手性能の基礎データを得ることを目的としている。試験は、実寸のBOX柱を製作し、エレクトロスラグ溶接部および角継手から試験片を採取し、引張試験および衝撃試験などの各種試験を行い、入熱量が溶接部の継手性能へ与える影響について、調査を行った。

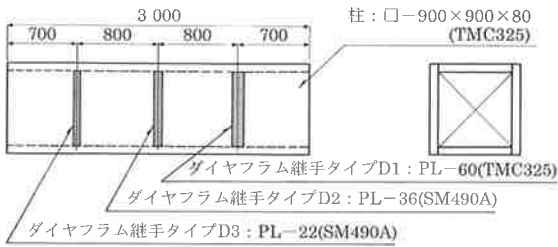
## 1. 試験概要

### (1) 試験体

図-1に試験体の形状を、また、図-2および図-3に試験体各溶接部の開先形状を示す。試験体は、エレクトロスラグ溶接部用2体(試験体DE)、角継手用1体(試験体CS)である。

入熱量の相違は、エレクトロスラグ溶接部ではダイヤフラムの板厚を変化させて対応し、継手タイプD1~D3の3種類の入熱条件を設定した。継手タイプD1、D2およびD3の溶接による実際に入熱量はそれぞれ1,110、663および465kJ/cmとなっている。角継手では、開先深さを変化させて対応し、継手タイプC1~C4の4種類の入熱条件を設定した。継手タイプC1、C2、C3およびC4の

1) 東京工場技術部技術課 2) 東京工場技術部技術課課長



(a) 試験体 DE

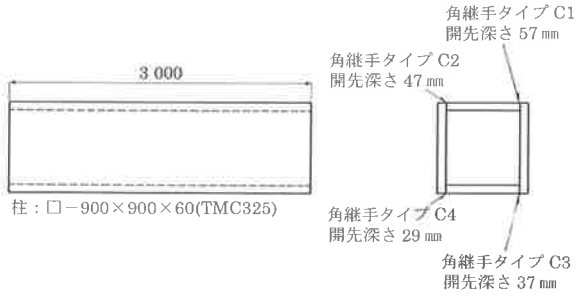


図-1 試験体の形状

溶接による実際の入熱量はそれぞれ577,456,319 および238kJ/cmとなった。表-1に使用した鋼材の機械的性質を、表-2に使用した溶接材料を示す。なお、材質におけるTMC325の表示は、建設大臣認定建築構造用TMCP厚鋼板、設計基準強度325 N/mm<sup>2</sup>を示している。

(2) 試験項目

表-3にエレクトロスラグ溶接部および角継手の試験項目一覧を示す。

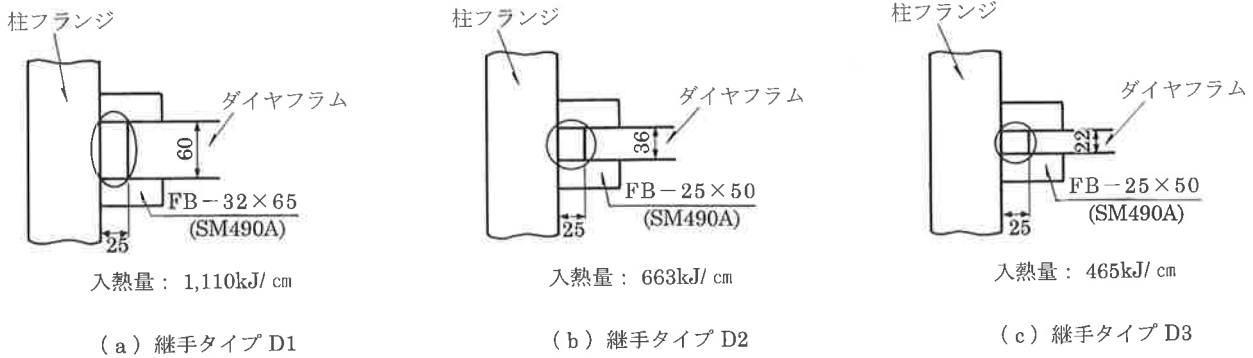
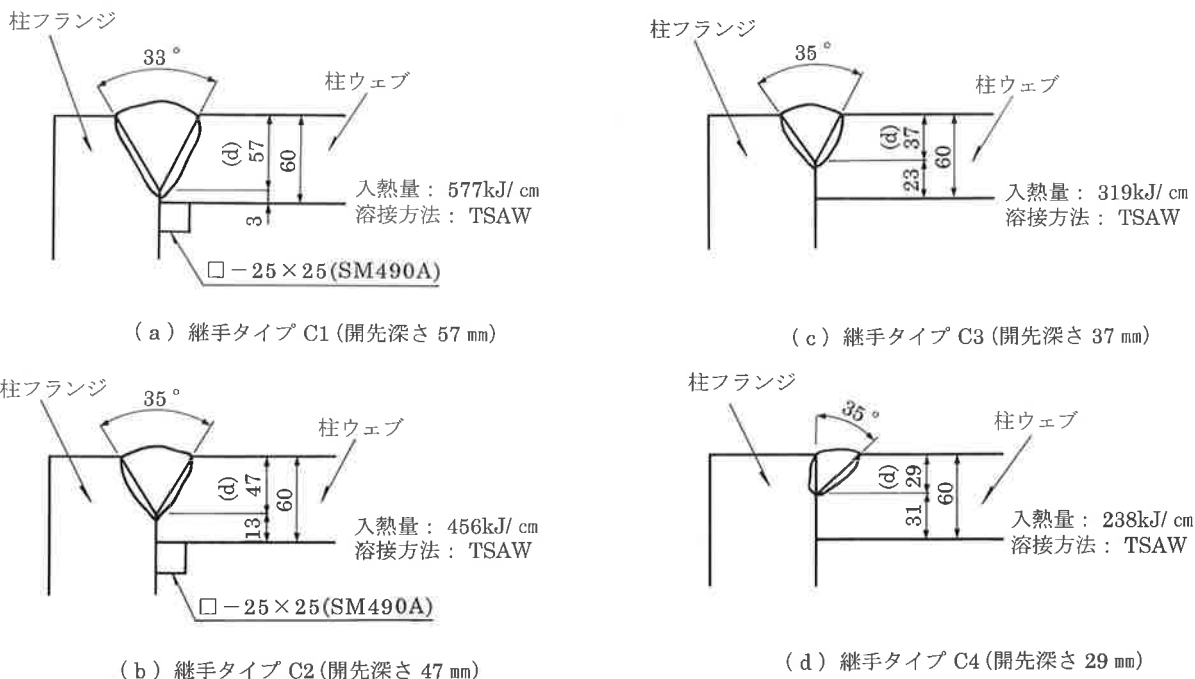


図-2 エレクトロスラグ溶接部の開先形状



注) TSAW : タンデムサブマージアーク溶接

図-3 角継手の開先形状

表-1 使用鋼材の機械的性質

板厚 (鋼種)	試験片 採取方向	降伏点 または 0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏比 (%)	伸び (%)	絞り (%)	シャルピー 吸収 エネルギー (J)	使用 部位
PL-80 (TMC325)	C	435	570	76.3	33	—	256.3	柱
	Z	377	532	70.9	37	74	110.5	
PL-60 (TMC325)	C	403	557	72.4	34	—	223.6	柱 ダイヤフラム
	Z	393	541	72.6	37	74	129.4	
PL-36 (SM490A)	C	349	506	70.0	32	—	114.4	ダイヤフラム
PL-22 (SM490A)	C	371	528	70.3	29	—	161.1	ダイヤフラム

[注] 試験片採取方向の C は幅方向, Z は板厚方向を示す。

表-2 使用溶接材料

	ワイヤ		フラックス		メーカー
	銘柄	径φ	銘柄	粒度	
エレクトロスラグ溶接	YM-55A	1.6 mm	YF-15	20 × D	日鐵溶接工業(株)
TSAW 溶接	US-36L	L:6.4, T:6.4	FS-BT1	PFI-53ES	㈱神戸製鋼所

表-3 試験項目

継手の種類	エレクトロスラグ溶接部	角継手
試験項目	全溶着金属引張試験	全溶着金属引張試験
	衝撃試験	衝撃試験
	柱フランジ引張試験	継手引張試験
	熱影響部引張試験	—

2. 試験結果

(1) エレクトロスラグ溶接部

表-4から表-7に, エレクトロスラグ溶接部の全溶着金属部(DEPO部)の引張試験結果, DEPO部および溶接熱影響部 (HAZ部) の衝撃試験結果,

柱フランジの引張試験結果およびHAZ部の引張試験結果を示す。ここで, 各試験片は溶接の始端部, 中間部および終端部より採取している。なお, 表-5におけるHAZ部の衝撃試験片は, そのノッチ位置を溶接BOND部より0.5mmとし, また, 表-7におけるHAZ部の引張試験片は, ビッカース硬さ試験による硬さ分布において, 硬さが最も低い値を示した位置より採取している。

(2) 角継手

表-8から表-10に角継手の DEPO 部引張試験結果, DEPO部およびHAZ部の衝撃試験結果および継手引張試験結果をそれぞれ示す。

表-4 エレクトロスラグ溶接部の全溶着金属部引張試験結果

継手タイプ (板厚)	入熱量 (kJ/cm)	採取 位置	降伏点 または0.2% オフセット耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
D1 (PL-60)	1,110	S	408	544	23.4
		M	373	515	26.6
		E	353	514	24.4
D2 (PL-36)	663	S	445	578	22.6
		M	422	552	25.6
		E	399	542	20.6
D3 (PL-22)	465	S	470	596	20.4
		M	458	576	22.2
		E	456	579	20.0

[注] 試験片採取位置および試験片形状

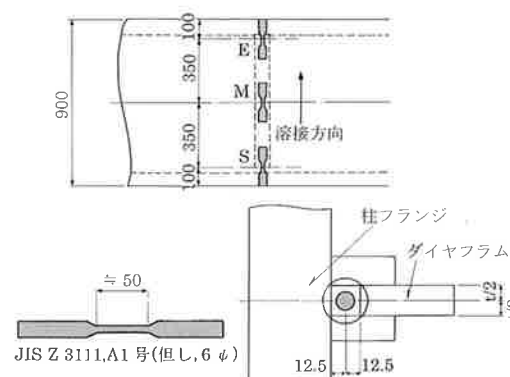


表-5 エレクトロスラグ溶接部の衝撃試験結果

継手タイプ (板厚)	入熱量 (kJ/cm)	採取位置	シャルピー衝撃試験			脆性破面率 (%)		
			吸収エネルギー(J)					
			S	M	E	S	M	E
D1 PL-60	1,110	DEPO	106	32	83	35	75	53
		HAZ	203	158	208	28	53	32
D2 PL-36	663	DEPO	132	52	104	35	68	43
		HAZ	218	214	201	33	28	38
D3 PL-22	465	DEPO	149	68	120	33	72	37
		HAZ	226	191	215	22	38	27

[注] 1) 試験温度：0℃  
2) 試験片採取位置

表-6 エレクトロスラグ溶接部の柱フランジ引張試験結果

継手タイプ (板厚)	入熱量 (kJ/cm)	採取位置	降伏点 または0.2% オフセット耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
D1 (PL-60)	1,110	S	—	—	—
		M	376	512	38
		E	379	518	38
D2 (PL-36)	663	S	373	528	40
		M	374	523	38
		E	358	524	38
D3 (PL-22)	465	S	388	532	40
		M	391	538	37
		E	386	539	38

表-7 エレクトロスラグ溶接部の熱影響部引張試験結果

継手タイプ (板厚)	入熱量 (kJ/cm)	採取位置	降伏点 または0.2% オフセット耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	
						[注] 試験片採取位置および試験片形状
D1 (PL-60)	1,110	S	C	318	493	26.0
			D	302	477	29.2
		M	C	309	484	30.0
			D	283	484	28.6
		E	C	333	484	33.6
			D	304	470	32.0
D2 (PL-36)	663	S	C	416	541	14.8
			D	429	584	19.2
		M	C	380	538	21.4
			D	342	512	29.4
		E	C	351	501	28.8
			D	376	534	23.8
D3 (PL-22)	465	S	C	394	536	17.6
			D	424	551	26.2
		M	C	377	519	31.4
			D	355	526	24.0
		E	C	424	542	24.6
			D	398	527	27.2

表-8 角継手の全溶着金属部引張試験結果

継手タイプ	入熱量 (kJ/cm)	採取位置	降伏点 または0.2% オフセット耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	[注] 試験片採取位置および試験片形状
C1	577	U	417	531	21.6	
		N	389	520	24.6	
		L	388	513	25.2	
C2	456	U	427	532	24.0	
		N	419	529	25.2	
		L	418	520	26.0	
C3	319	U	480	567	22.0	
		N	457	555	23.4	
		L	457	563	23.2	
C4	238	U	521	589	22.4	
		N	536	604	23.6	
		L	539	599	19.6	

表-9 角継手の衝撃試験結果

継手タイプ	入熱量 (kJ/cm)	シャルピー衝撃試験吸収エネルギー (J)			[注] 1) 試験温度: 0℃ 2) HF: フランジ側熱影響部 DM: 溶着金属 HW: ウェブ側熱影響部 3) 試験片採取位置
		HF	DM	HW	
C1	577	190	36	224	
C2	456	85	93	225	
C3	319	224	104	271	
C4	238	138	138	270	

表-10 角継手の継手引張試験結果

継手タイプ	入熱量 (kJ/cm)	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	[注] 試験片採取位置および試験片形状
C1: 完全溶込み溶接部	571	508	
C2: 部分溶込み溶接部	456	518	
C3: 部分溶込み溶接部	319	519	
C4: 部分溶込み溶接部	238	547	

### 3. 考 察

#### (1) エレクトロスラグ溶接部

図-4にDEPO部の引張強さと溶接入熱量との関係を示す(表-4)。DEPO部の引張強さは、溶接始端部、中間部および終端部で同様に、溶接入熱量の増加に従って低くなる。溶接入熱量が1,110 kJ/cmの場合と465kJ/cmの場合とを比較すると、前者は後者の約10%引張強さが低下している。なお、溶接入熱量が1,110kJ/cmの場合、引張強さは母材の規格値(490N/mm<sup>2</sup>)を満足している。

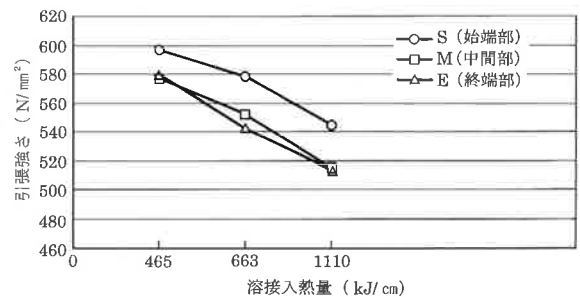


図-4 エレクトロスラグ溶接部全溶着金属部引張試験結果(引張強さ-溶接入熱量)

図-5にシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーと溶接入熱量との関係を示す(表-5)。シャルピー吸収エネルギーは、DEPO部およびHAZ部の溶接始端部、中間部および終端部で同様に、溶接入熱量の増加に従って低くなる。また、シャルピー吸収エネルギーは、HAZ部よりDEPO部で溶接終始端部より中間部が低い値を示している。これは、冷却速度が遅い部位では結晶粒が粗大化し、靱性を低下させるためと考えられる。

図-6に柱フランジ引張試験の引張強さと溶接入熱量との関係を示す(表-6)。柱フランジの引張強さは、溶接始端部、中間部および終端部で同様に、溶接入熱量の増加に従って低くなる。溶接入熱量が1,110kJ/cmの場合と465kJ/cmの場合とを比較すると、前者は後者の約5%引張強さが低下して

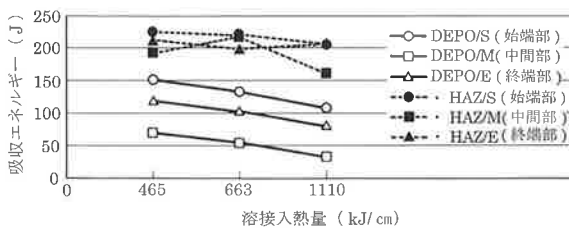


図-5 エレクトロスラグ溶接部  
シャルピー衝撃試験結果  
(吸収エネルギー-溶接入熱量)

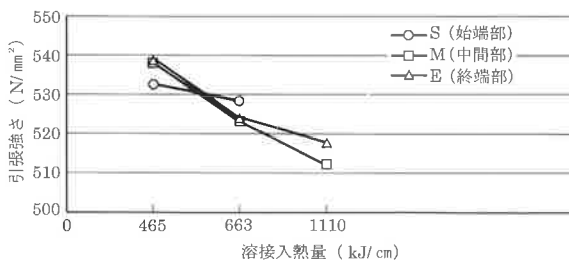


図-6 エレクトロスラグ溶接部  
柱フランジ引張試験結果  
(引張強さ-溶接入熱量)

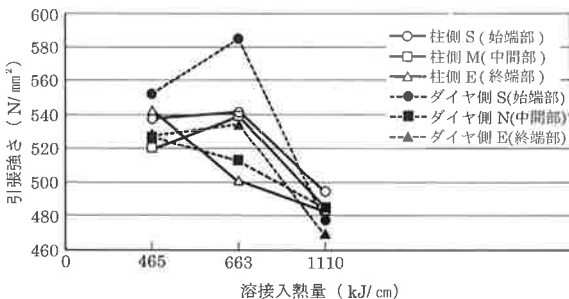


図-7 エレクトロスラグ溶接部  
熱影響部引張試験結果  
(引張強さ-溶接入熱量)

いる。なお、溶接入熱量が1,110kJ/cmの場合、引張強さは母材の規格値(490kJ/mm<sup>2</sup>)を満足している。

図-7にHAZ部の引張強さと溶接入熱量との関係を示す(表-7)。全体的傾向として、引張強さは溶接入熱量の増加に従って低くなる。溶接入熱量が1,110kJ/cmの場合と465kJ/cmの場合とを比較すると、前者は後者の約10%引張強さが低下している。なお、溶接入熱量が1,110kJ/cmの場合、引張強さは母材の規格値(490N/mm<sup>2</sup>)を満足できない部分がほとんどであった。

(2) 角継手

図-8に角継手DEPO部引張試験の引張強さと溶接入熱量との関係を示す(表-8)。引張強さは、表層部、中央部および初層部で同様に、溶接入熱量の増加に従って低くなる。溶接入熱量が577kJ/cmと238kJ/cmの場合とを比較すると、前者は後者の約13%引張強さが低下している。なお、溶接入熱量が577kJ/cmの場合、引張強さは母材の規格値(490N/mm<sup>2</sup>)を満足している。

図-9にシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーと

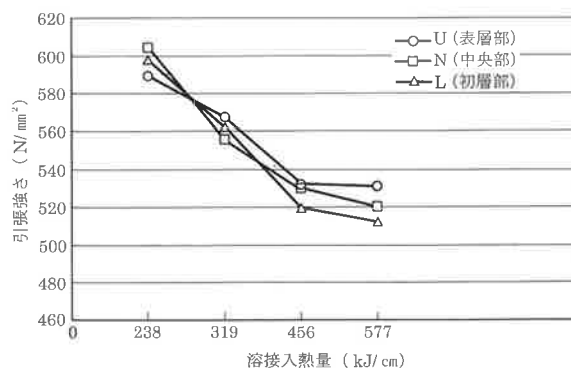


図-8 角継手溶接部  
全溶着金属部引張試験結果  
(引張強さ-溶接入熱量)

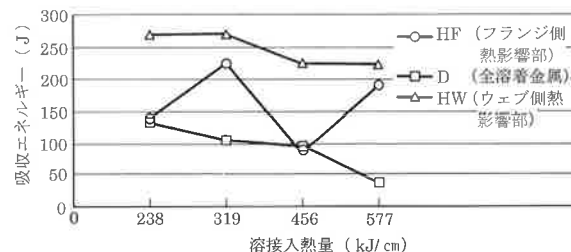


図-9 角継手溶接部  
シャルピー衝撃試験結果  
(吸収エネルギー-溶接入熱量)

溶接入熱量との関係を示す。DEPO部およびウェブ側のHAZ部において、溶接入熱量の増加に従ってシャルピー吸収エネルギーが低下した。また、シャルピー吸収エネルギーは、HAZ部よりDEPO部で低い値を示している。これは、冷却速度が遅い部位では結晶粒が粗大化し、靱性を低下させるためと考えられる。

図-10に継手引張試験における引張強さと溶接入熱量との関係を示す(表-10)。引張強さは溶接入熱量の増加に従って低くなる。溶接入熱量が577kJ/cmと238kJ/cmの場合とを比較すると、前者は後者の約7%引張強さが低下している。なお、溶接入熱量が577kJ/cmの場合、引張強さは母材の規格値(490kJ/mm<sup>2</sup>)を満足している。

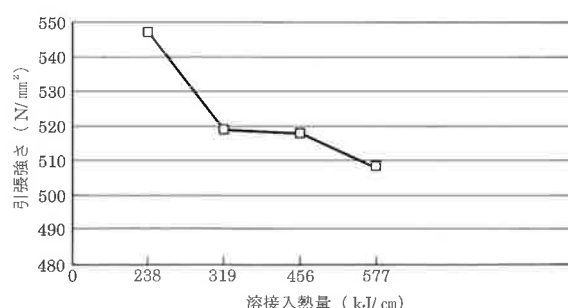


図-10 角継手溶接部  
継手引張試験結果  
(引張強さー溶接入熱量)

#### 4. まとめ

溶接入熱量を実験変数としたダイヤフラムのエレクトロスラグ溶接部と角継手の継手性能について考察し、以下のことが判明した。

##### (1) エレクトロスラグ溶接部

全溶着金属部、溶接熱影響部および柱フランジの引張試験の結果、すべての部位で溶接入熱量の増加に従って引張強さが低下した。溶接入熱量が1,110kJ/cmと465kJ/cmの場合とを比較すると、前者は後者の約5～10%引張強さが低下した。

シャルピー衝撃試験の結果、シャルピー吸収エネルギーは、溶接入熱量の増加に従って低下した。シャルピー吸収エネルギーは、冷却速度の遅い部位ほど低い値を示し、冷却速度の低下による結晶粒の粗大化が溶接部の靱性を低下させることが考えられた。

##### (2) 角継手

全溶着金属部および継手の引張試験の結果、溶接入熱量の増加に従って、引張強さが低下した。溶接入熱量が577kJ/cmと238kJ/cmの場合とを比較すると、前者は後者の約7～13%引張強さが低下した。シャルピー衝撃試験の結果、溶接入熱量の増加に従って吸収エネルギーが低下した。

#### あとがき

本試験は、株式会社日本設計と駒井鉄工株式会社の共同研究で行ったものであり、関係各位に謝意を表します。とくに、株式会社日本設計の伊藤優部長には様々なご指導をいただきお世話になりました。紙面を借りてお礼申し上げます。