

部分溶け込み溶接によって組立てられた箱形部材の捩り性状に関する研究 (第1報)

藤 盛 紀 明
桐 生 栄 五 郎
新 見 芳 男

§ 1. 序

最近鋼構造計算規準が改正され、部分溶け込み溶接 (Partial Penetration, Incomplete Joint Penetration) が許可されるようになった。その解説によれば部分溶け込み溶接はせん断力にのみ有効であるとされている。米国では厚板の箱型柱を部分溶け込み溶接によって組立てることが多い。高層建物に使用された場合、地震力や風力によって捩り荷重を受ける可能性がある。この場合部材の捩り剛性は完全溶け込みのものよりも低下し、かつ部分溶け込み溶接部分には応力が集中すると考えられる。

今回は2, 3の模型的断面について、その捩り剛性と部分溶け込み溶接部分の応力集中等についての実験結果を報告する。

§ 2. 試験体

試験体は図-1に示す No. 1, No. 2, No. 3 の3体作製した。溶接ビードの余盛は、試験前にセーバーで削り落

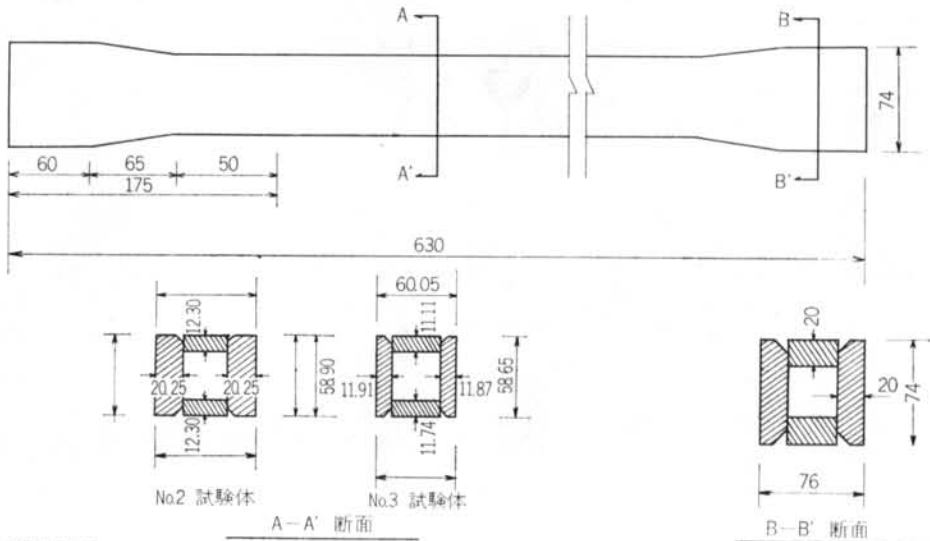
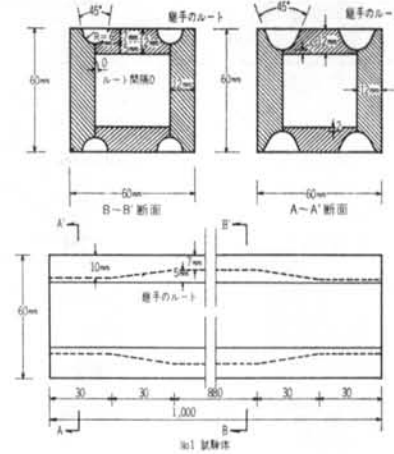


図-1 試験体形状

した。各試験体の材料の機械的性質を表-1に、溶接条件を表-2に、ピッカース硬さの例を図-2、図-3に示す。

余盛削除後の溶接部分ののど厚を表-3に、その形状を写真-1、写真-2に示す。

§ 3. 試験機

試験機の概要を図-4、写真-3、写真-4、写真-5に示す。試験機の振りモーメント $T(\text{kg} \cdot \text{cm})$ とジャッキの荷重 $P(\text{kg})$ の間には(1)式に示す関係がある。

$$T = 15P \quad \dots\dots(1)$$

試験機の振りモーメントを検定するために図-5に示

す径40mmの丸鋼を用いて振り試験を行なった。

丸鋼の外皮せん断ひずみ γ は(2)式で表わされる。

$$\gamma = 5.093 \frac{T}{Gd^3} \quad \dots\dots(2)$$

ここで T : 作用する振りモーメント($\text{kg} \cdot \text{cm}$)

d : 試験体の直径(cm)

G : 剪断弾性係数(kg/cm^2)

いま $d = 4 \text{ cm}$, $G = 0.835 \times 10^6 \text{ kg}/\text{cm}^2$ (張試験の結果より求めた値), および(1)式を(2)式に代入すると

$$\gamma \div 1.43 \times 10^{-6} \cdot P \quad \dots\dots(3)$$

実測による P と γ の関係を図-5に示す。この図より試験機の振りモーメントは(1)式で算定しても十分な精度をもっていることが判る。

試験体 No.	No. 2, No. 3
弾性係数	$2.1 \times 10^6 \text{ kg}/\text{cm}^2$
降伏点	$2.260 \text{ kg}/\text{cm}^2$
引張強さ	$4,050 \text{ kg}/\text{cm}^2$
ポアソン比	0.28
せん断弾性係数	$0.82 \times 10^6 \text{ kg}/\text{cm}^2$

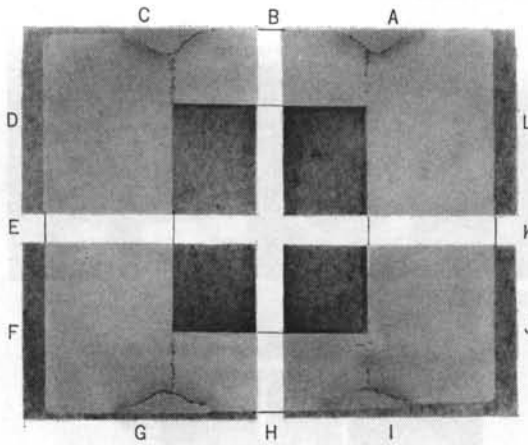
表-1 試験体材料の機械的性質

試験番号	No. 1				No. 2				No. 3			
	A	C	G	I	A	C	G	I	A	C	G	I
溶接位置												
平均	7.28	7.43	7.32	7.21	4.35	3.20	3.40	3.30	6.30	5.10	6.20	6.09
標準偏差	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.32	0.16	0.85	0.45	0.41	0.09
の厚												
最大	7.40	7.90	7.60	7.40	4.50	3.60	3.60	3.50	7.50	5.40	6.90	6.6
最小	7.20	7.30	7.20	7.00	4.00	2.50	3.30	3.00	4.90	4.80	5.70	5.70

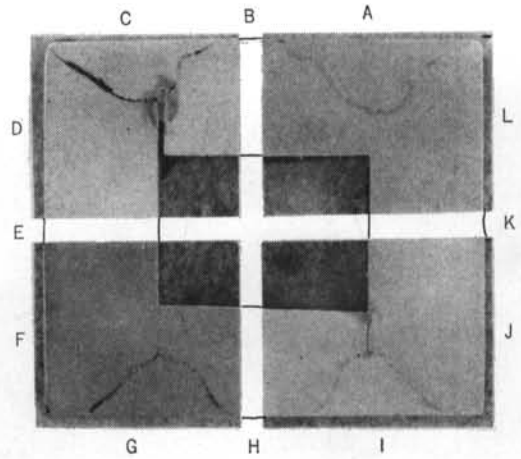
表-3 のど厚(mm) (溶接位置は図-11参照)

試験体 No.	溶接法		使用機材		溶着法	溶接条件			ワイヤ エンション (mm)	ヤスチ 角度	
	種類	溶接工	溶接棒・ワイヤ	溶接機	ビードの盛り方	パス数	溶接電流 (Amp)	アーク電圧 (Volt)			溶接速度 (cm/min)
1	手溶接	JIS-Z 3801 A-2 F A-2 V	イルミナイト系 径 5.0mm 銘柄: B-17 (神戸製鋼)	可動鉄心型 交流アーク 溶接機 銘柄: KR-400 (大阪変圧器)		1層	215	30	28		
						2層	"	"	"		
						3層	"	"	"		
2	ノンガス 半自動 溶接	自動化	フラックス入り ワイヤ 径 3.2mm 銘柄: OW-56 (神戸製鋼)	〔溶接電源〕 交流アーク 溶接機 銘柄: B500A (大阪電気) 〔半自動溶接機〕 銘柄: DAIDEN -AUTO A4-T (大阪電気)		1層	300	27	30	40	70°
3	全上	全上	全上	全上		1層	450	29	30	35	70°

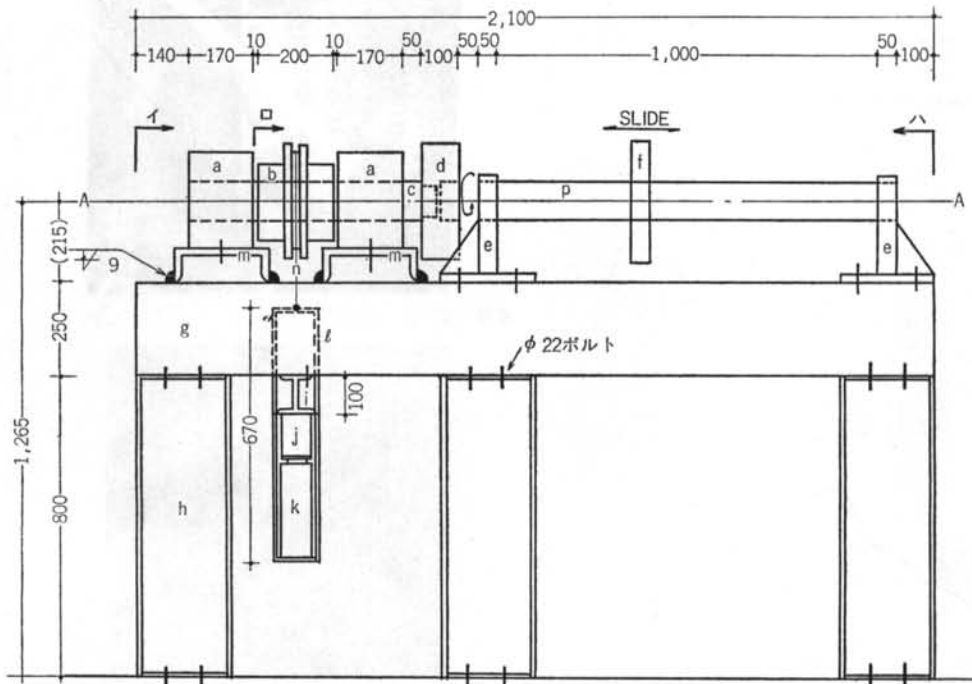
表-2 溶接作業条件



写真一 No.2 試験体の断面詳細 (符号はゲージ張付位置)



写真二 No.3 試験体の断面詳細 (符号はゲージ張付番号)



Nn	説 明	Nn	説 明
a	フランマージョイント 5-122 (UK 5製) φ100 自動調心型スライダ軸受付	i	I-100×100×6×8 $\epsilon=560$
b	加力用滑車	j	ロードセルまたはブルービングリング
c	加力用軸 φ100	k	ジャーナルジャッキ B J 1515
d	テストピース固定治具A	l	加力受箱
e	スライド軸固定台	m	I-250×90×9×13 $\epsilon=560$
f	テストピース固定治具B	n	ワイヤロープ 1号 φ12.5 B
g	I-250×90×9×13 $\epsilon=2100$	o	加力受指押え H100×100×8×8 $\epsilon=200$
h	I-250×90×9×13 $\epsilon=800$	p	スライド軸

図一4 振り試験機

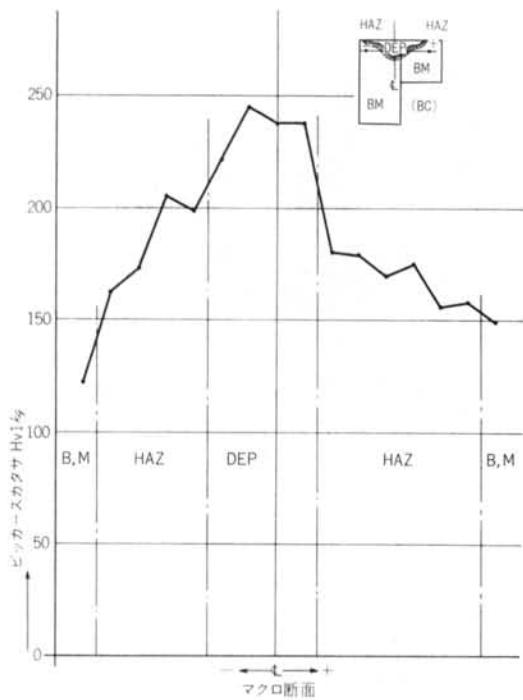


図-2 振り試験供試体 No.2 ビッカース硬さ試験

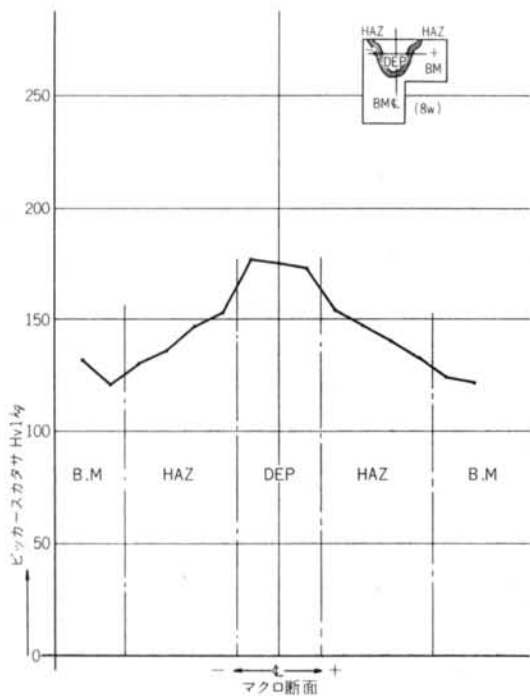


図-3 振り試験供試体 No.3 ビッカース硬さ試験

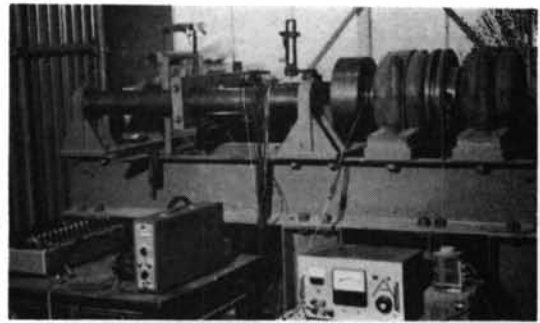


写真-3 振り試験機

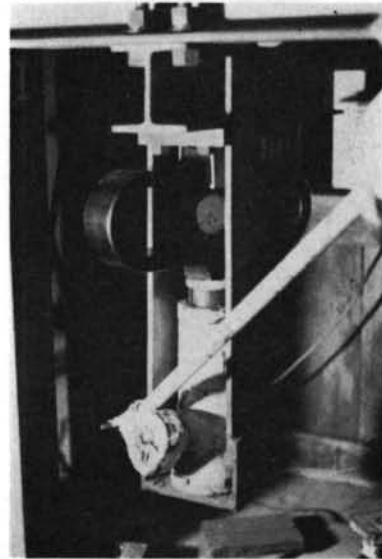


写真-4 振り試験機ジャッキ部

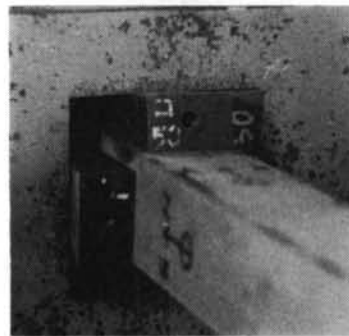


写真-5 振り試験機チャック部

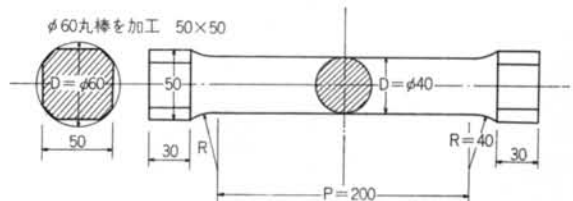


図-5 試験機のトルクチェック用の試験片

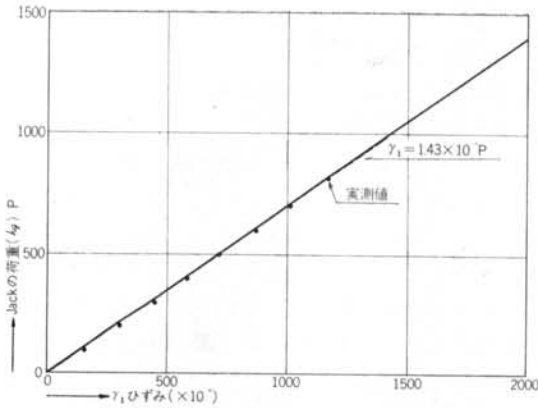


図-6 φ40mm 丸棒の振り試験結果

§ 4. 振り角測定装置

使用した振り角測定装置の概要を図-7、写真-6に示す。振り角(単位長さ当りの回転角 rad/cm)を装置先端の変位に置き換え、その変位を太陽電池(商品名 Sharp

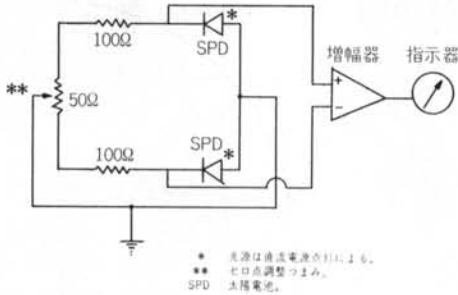


図-7 振り角測定装置のブロックダイアグラム

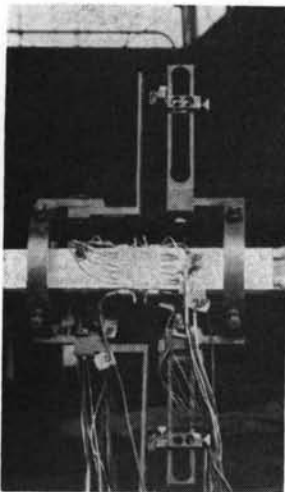


写真-6 振り角測定装置

Photoelectric Diode, SPD540, SPD541) を用いて差動的に検出した。太陽電池の出力は照度と受光面積に比例する。上下2個の太陽電池に個々に光源を設け、スライダックによって照度を個々に調整できるようにした。

装置は左右2つの部分に分かれ、片側に太陽電池をもう一方にはマスクをつけ、試験体が振られると、振り角に応じて受光面積が変化するようにした。

振り角 θ (rad/cm) と太陽電池の出力の関係は各太陽電池に付属した光源の光量(照度)によって異なる。これらをキャリブレーションするために5cm角の正方形断面の棒を使用した。

太陽電池の変位 x (mm)は(4)式で表わされる。

$$x = \ell \cdot r \cdot \theta \quad \dots(4)$$

ここで x : 太陽電池の変位(mm)

ℓ : 測定距離(左右の装置の試験体の接点間の距離)(cm)

r : 試験体の中心から太陽電池の中心までの距離(mm)

正方形断面の棒の振り角は(5)式で与えられる。

$$\theta = 7.11 \times \frac{T}{Ga^4} \quad \dots(5)$$

ここで a : 正方形の一辺の長さ(cm)

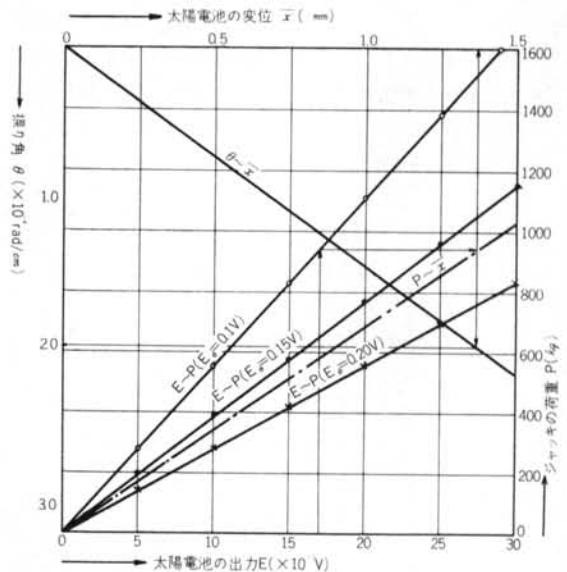
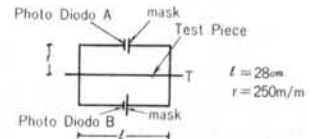


図-8 振り角測定装置のキャリブレーショングラフ

キャリブレーションに使用した棒の場合 $a = 5 \text{ cm}$,
 $G = 0.82 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, および(1)式を(5)式に代入して
 $\theta \doteq 0.208 \times 10^{-6} P$ ……(6)

(6)式を(4)式に代入すると
 $x = 0.208 \times \ell \cdot r \cdot P \times 10^{-6}$ ……(7)

太陽電池に与えられる照度を、マスクを全開した時の太陽電池の出力 (E_0) に置き換えた。

図-8は $\ell = 28 \text{ cm}$, $r = 250 \text{ mm}$, $E_0 = 0.1 \text{ V}$, 0.15 V , 0.2 V (上下の太陽電池の出力は同一にした)の時の(4)式, (7)式および, ジャッキの荷重 P (kg)と指示計の読み E ($\times 10^{-3} \text{ V}$) の関係である。

この装置の精度は, 指示計の精度, 光源光量の安定性等に左右される。この実験に使用した装置では, 太陽電池の変位は $1/100 \text{ mm}$ 以上の精度で測定可能であった。

なお実験は, 外光の急変による影響を受けないようにして行なった。

この装置は装置の接点に摩擦がないので, その種の要因が重要な実験には有効な方法と思われる。

§ 5. 箱形部材の振り断面二次モーメントとせん断応力

振り角と振りモーメントの間には(8)式のような関係がある。

箱形部材の場合には, まず開断面のときと同様に, これを数個の方形に分割して(9), (10)式により振り断面二次モーメント I_{ts} を計算する。 I_{ts} は Saint-Venant の法則が適用される。さらに箱形部分はその連続性のため二次のせん断応力が生ずる。したがって箱形部材の振り断面二次モーメント I_t は(11)式のようになる。

$$T = GI_t \theta \quad \text{……(8)}$$

ここで T : 振りモーメント ($\text{kg} \cdot \text{cm}$)

I_t : 振り断面二次モーメント

G : せん断弾性係数 (kg/cm^2)

θ : 振り角 (rad/cm)

$$I_{tsi} = \alpha_i b_i d_i^3 \quad \text{……(9)}$$

$$I_{ts} = \sum_{i=1}^n I_{tsi} \quad \text{……(10)}$$

ここで I_{tsi} : 各方形断面の振り断面二次モーメント

b_i : 方形の長辺

d_i : 方形の短辺

$$\alpha_i = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{192}{\pi^5} \cdot \frac{d_i}{b_i} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^5} \right)$$

$$\cdot \tanh \frac{n\pi b_i}{2d_i} \quad (\text{図-9参照})$$

I_{ts} : 各方形断面の振り断面二次モーメントの合計

n : 分割された方形断面の数

$$I_t = I_{ts} + I_{tB} \quad \text{……(11)}$$

ここで I_{tB} : 連続性のために生ずる振り断面二次モーメント

完全溶け込み溶接によって組立てられた箱形部材の場合 I_{tB} は(12)式のようになる。(図-10参照)

$$I_{tB} = \frac{4A^2}{C} \quad \text{……(12)} \quad A = h_1 \cdot h_2 \quad \text{……(13)}$$

$$C = \int \frac{1}{d} ds = \frac{h_1}{d_1} + \frac{h_2}{d_2} + \frac{h_3}{d_3} + \frac{h_4}{d_4} \quad (14)$$

この場合各部分の最大せん断応力は

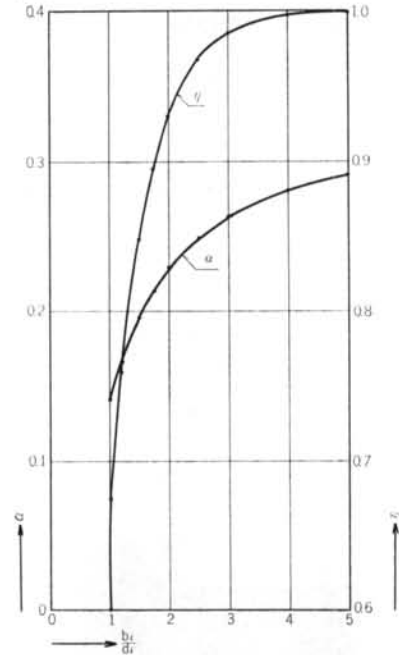


図-9 α および γ

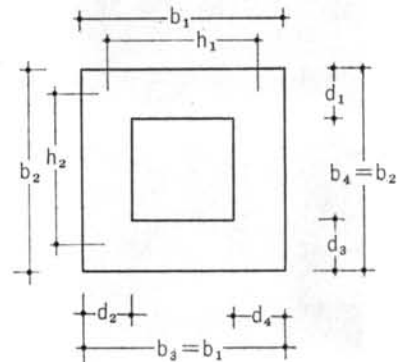


図-10 (13), (14)式の符号

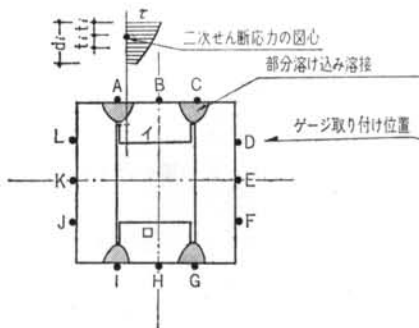


図-11 ゲージ取り付け位置その他

$$\tau_t = \tau_{st} + \tau_{Bt} \quad \dots\dots(15)$$

$$\tau_{st} = \frac{M_t}{I_t} d_i \eta_i (\eta_i \text{は図-9 参照}) \quad \dots\dots(16)$$

$$\tau_{Bt} = \frac{q_B}{d_i} \quad \dots\dots(17)$$

$$q_B = \frac{M_t}{I_t} \cdot \frac{2A}{C} \quad \dots\dots(18)$$

部分溶け込み溶接の場合、溶接部近傍では二次せん断応力の乱れが生ずる。板厚方向の二次せん断応力の分布の図心(図-11参照)と板の外側面の距離 t_i の2倍を新しい板厚と考える。すなわち板の内側部分 ($d_i - 2t_i$) は振りに対して有効でないとする。

この新しい断面をもとに I_{tB} を算定すれば、(8)式以下の式を、部分溶け込み溶接によって組立てられ箱形部材にも適用できる。

二次剪断応力は閉じた断面では(19)式が成立する。

$$\int_0^d \tau(t) dt = \text{constant} \quad \dots\dots(19)$$

ここで $\tau(t)$: 板厚の各位置における二次剪断応力

d : 板厚

もし、 $\tau(t)$ が1定であれば($\tau(t) = \tau_{Bt}$)(19)式は(20)式となる

$$\tau_{Bt} \cdot d = \text{constant} \quad \dots\dots(20)$$

したがって、部分溶け込み溶接部分は d が減少しているので、応力の増大がおこる。

§ 6. 実験結果

6.1 振り断面二次モーメント

§ 5 の(8)式より

$$I_t = \frac{T}{G\theta} \quad \dots\dots(21)$$

(10)式より

$$I_{tB} = I_t - I_{ts} \quad \dots\dots(22)$$

No.2, No.3 の $T \sim \theta$ 曲線を図-12, 図-13, に示す。部分溶け込み溶接を使用した場合の I_t および I_{tB} は、完全溶け込み溶接を行なった場合のそれと、図-11に示すイ、ロ部分を除いた場合のその中間になるはずであ

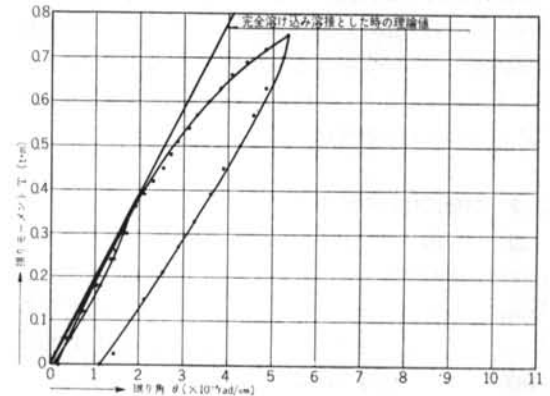


図-12 No.2 の $T \sim \theta$ 曲線

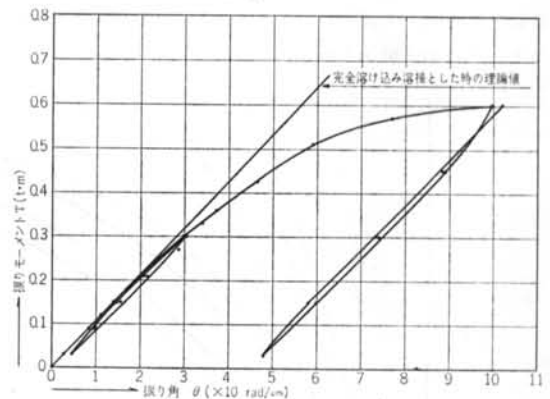


図-13 No.3 の $T \sim \theta$ 曲線

	(10)式から求めた I_{ts} (cm ³ /rad)	実験から求めた I_t' (cm ³ /rad)	$I'_{tB} = I_t' - I_{ts}$ (cm ³ /rad)	完全溶け込み溶接とした時の		図-8のA, B部分を除いた時の	
				I_t (cm ³ /rad)	I_{tB} (cm ³ /rad)	I_t (cm ³ /rad)	I_{tB} (cm ³ /rad)
No. 2	30.6	230.1	199.5	238.4	207.8	104.8	145.4
No. 3	10.9	138.6	127.7	137.6	126.7	120.9	110.0

表-4 実験および計算から求めた振り断面二次モーメント

る。表-4 に実験値より求めた No. 2 および No. 3 の I_t' および I_{tB}' を示す。(以下実験値より求めた I_t および I_{tB} を I_t' , I_{tB}' と書く) 表-4 には完全溶け込み溶接とした時、および溶け込み不足部分より内側(図-11 のイ、ロ部分)を無視して計算した時の I_t および I_{tB} も示してある。実験値から求めた I_t' , I_{tB}' は完全溶け込み溶接とした時の I_t , I_{tB} にほぼ等しく、その誤差は No. 2 で 3%, No. 3 で 0.7% である。これは試験体寸法の精度を考慮した場合、無視しうるほど小さな値である。

この実験に使用された形状(溶け込み不足部分の大きさは、試験体寸法に比べて比較的大きいと考えられる)では、隅を部分溶け込み溶接によって組立てた箱形部材の振り剛性は、完全溶け込み溶接として算定しても、大した誤差がないと考えられる。すなわち二次せん断流の乱れによる I_{tB} の減少は小さい。

6.2 部分溶け込み溶接部分のひずみ

図-14, 図-15 に $T \sim \gamma$ 曲線を示す。ゲージの取り付け位置と番号は図-11 に示してある。K, L の位置は部分溶け込み溶接部分の応力の乱れを受けないと考えられる。したがってそのせん断応力は(15), (16), (17), (18)式によって計算される。

I_t の代わりに I_t' を用い、C, A に完全溶け込み溶接とした値を用いて計算した K, L 位置のせん断ひずみ γ と、その実験値を表-5 に示す。($T=0.3 t \cdot m$ の

時)

前節の振り断面二次モーメントと同じく、No. 3 においては実験値と計算値はほぼ等しく、No. 2 はいく分誤差が生じている。これは、No. 2 の方が部分溶け込み溶接部分の応力の乱れが大きいことを示している。同じことは B, H 位置のひずみと E, K 位置のひずみの差によっても判る。

(20)式は次のように書き変えることができる。

$$\gamma_{Bi} \times t_i = \text{constant} \quad \dots\dots(23)$$

ここで γ_{Bi} : 二次せん断ひずみ ($\times 10^{-6}$)

t_i : 板厚 (mm)

今 A, C, G, I 位置の γ_{si} を 0 とすれば、この位置の γ_{Bi} は

$$\alpha_{A.C.G.I} \cdot \gamma_{Bi}^{A.C.G.I} = t_i \cdot \gamma_{Bi} \quad \dots\dots(24)$$

ここで $\gamma_{Bi}^{A.C.G.I}$: A, C, G, I 位置の二次せん

断ひずみ

$\alpha_{A.C.G.I}$: A, C, G, I 位置ののど厚

t_i : 任意の位置の板厚

γ_{Bi} : 任意の位置の二次せん断ひずみ

いま表-5 に示した E, K 位置の t_i, γ_{Bi} を使用して、 $T=0.3 t \cdot m$ の時のこの位置の $t_i \times \gamma_{Bi}$ を計算すると

No. 2 において $t_i \times \gamma_{Bi} = 6176 (\times 10^{-6} \text{mm})$

No. 3 において $t_i \times \gamma_{Bi} = 7265 (\times 10^{-6} \text{mm})$

表-6 に $T=0.3 t \cdot m$ の時 A, C, G, I の位置

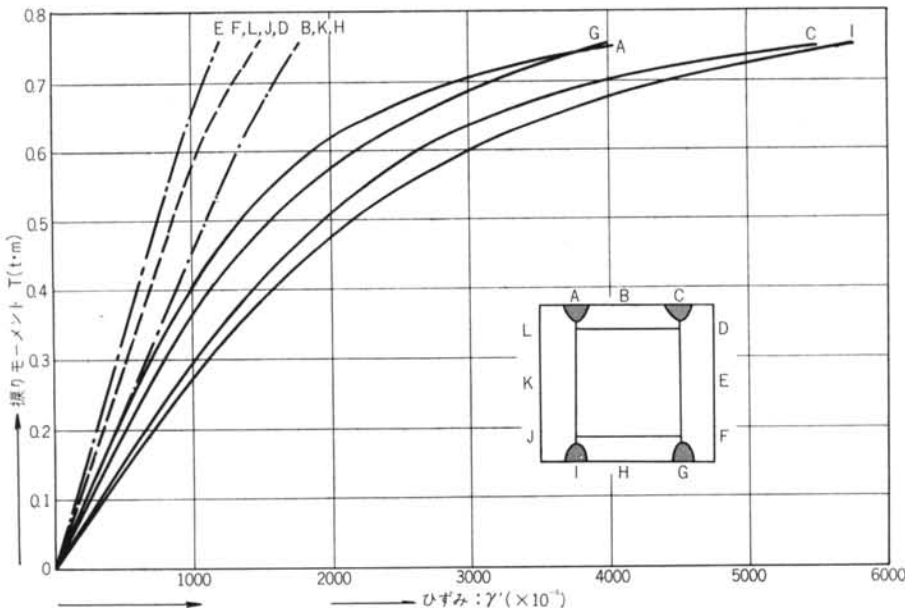


図-14 試験体 No. 2 $T \sim \gamma$ 曲線

の $a \times \gamma_{Bi}$ を示す。表から分るように、No. 3 の C, G を除いて他のものは計算値よりも小さな値を示している。ひずみの測定位置は表面なので、この結果は内側隅角部の応力集中を意味していると考えられる。

表-7 は、各ひずみ測定位置の $T \sim \gamma$ の比例限と $T \sim \theta$ の比例限である。

完全溶け込み溶接の場合、最大せん断応力は E, K, B, H に起こり、 $T \sim \theta$ の比例限は E, K, B, H の $T \sim \gamma$ の比例限に左右される。表-7 から分るように、実験に使用した断面の場合、 $T \sim \theta$ の比例限は部分溶け込み溶接部分の A, C, G, I の $T \sim \gamma$ の比例限に左右されている。

試験体番号		No. 2				No. 3			
ゲージ位置		B	H	E	K	B	H	E	K
板厚 (mm)		12.30	12.30	20.25	20.25	11.74	11.11	11.91	11.87
	平均	12.30		20.25		11.43		11.89	
実測ひずみ $\gamma' (\times 10^{-6})$		675	655	440	602	1005	890	925	945
	平均	665		521		948		935	
計算による γ_{Bi}^*						305			
計算による γ_{st}^*						256			
* $\gamma_t = \gamma_{Bi} + \gamma_{st}$						561			
$\frac{\gamma' - \gamma_t}{\gamma_t} \times 100$						8.2%			
						0.4%			

ただし、No. 2 においては $C = 13.86$ $A = 26.83 \text{cm}^2$

No. 3 においては $C = 61.40$ $A = 22.79 \text{cm}^2$

$$* \gamma_{Bi} = \frac{\tau_{Bi}}{G} \quad \gamma_{st} = \frac{\tau_{st}}{G} \quad \gamma_t = \frac{\tau_t}{G}$$

表-5 B, H, E, K 位置のせん断ひずみ ($T = 0.3 \text{ t} \cdot \text{m}$ の時)

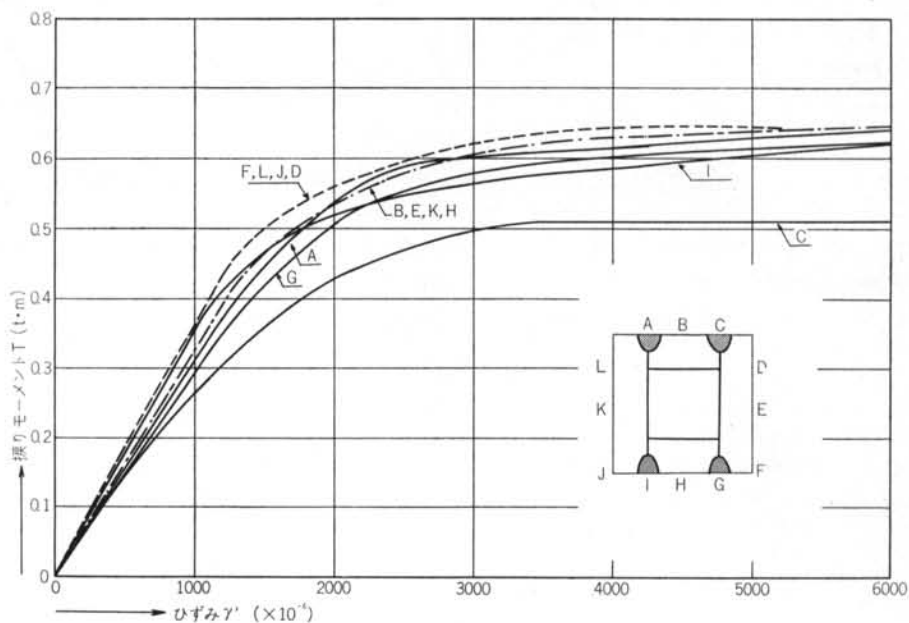


図-15 試験体 No. 3 $T \sim \gamma'$ 曲線

試験体番号		No. 2								No. 3							
ゲージ位置		A	C	G	I	D	F	J	L	A	C	G	I	D	F	J	L
のど厚 (mm)	平均 a	4.35	3.2	3.4	3.3					6.32	5.08	6.23	6.23				
	最大 a_{max}	4.5	3.6	3.6	3.5					7.5	5.9	6.9	6.60				
	最小 a_{min}	4.0	2.5	3.0	3.0					4.9	4.8	5.7	5.7				
ひずみ r ($\times 10^{-6}$)		605	1000	1117	800	505	500	480	500	920	1198	1017	848	832	870	835	815
$a \times r$		2632	3200	3798	2640					5814	6085	6335	5283				
$a_{max} \times r$		2723	3600	4021	2800					6900	7068	7017	5596				
$a_{min} \times r$		2420	2500	3351	2400					4508	5750	5797	4834				

表-6 A, C, G, I位置の $a \times r$ ($\times 10^{-6} \cdot \text{mm}$)

ゲージ位置 試験体番号	T-r の比例限(t・m)												T- θ の比例限 (t・m)
	A	C	G	I	B	H	E	K	D	F	J	L	0.36
No. 2	0.31	0.32	0.32	0.27	0.75	0.62	0.65	0.55	0.60	0.60	0.54	0.60	0.36
No. 3	0.30	0.17	0.16	0.18	0.30	0.51	0.37	0.58	0.51	0.51	0.24	0.39	0.19

表-7 T-r, T- θ の比例限

No. 3 において図-15から分るようにCの応力集中が特に大きい、これは写真-2に示すように、組立精度(1mmほどのすき間がある)の影響があるかも知れない。

内側隅角部の応力集中については、今後光弾性実験、差分法による解析等が必要である。

§ 7. 考察

今回の実験に使用した断面形状(比較的大きな溶け込み不足を含む)の範囲内では次のことがいえる。

- (1) 初期の振り断面二次モーメントは完全溶け込み溶接

として算定しても実用上問題はない。

- (2) 振りモーメント～振り角曲線の比例限は、振りモーメント～部分溶け込み溶接部のせん断ひずみ曲線の比例限によって決定される。

なお、組立精度が悪く、板の接合部のすき間が大きい場合には、その部分の応力集中が大きくなる可能性がある。

部分溶け込み溶接をしたことによる内側隅角部の応力集中と塑性域の拡がり、それと振りモーメント～せん断ひずみ、振りモーメント～振り角、最大耐力との関係等は第2報以下に報告したい。

<参考文献>

- 1) 倉西正嗣：“弾性学”機械工学講座
- 2) 小野薫，加藤渉：“応用弾性学の基礎”コロナ社
- 3) Timoshenko：“Theory of Elasticity”