

すみ肉溶接継手の残留応力

Transverse Welding Residual Stresses in Fillet Welded Joints

中野 修* 小玉 茂** 井藤 昭夫***

Osamu NAKANO, Shigeru KODAMA and Akio ITOH

本文は、高張力鋼 SM50B, SM53B, SM58Q を使用した構造物のすみ肉溶接継手の残留応力を実験的に求めたものである。実験では、3 種の曲げ拘束度 K_B の異なる I 断面の供試体を用いた。

残留応力は溶接積層後に供試体を切断し、開放ひずみによる変位から平面ひずみ状態として求めた。

主な研究の結果は、次のとおりである。

- (1) SM50B のみについてであるが、温度 300℃ から 100℃ までの冷却時間は一般に K_B 値が大きくなれば増加する。
- (2) FEM 解析の結果、積層による K_B の値は回転拘束のない継手の K_B の約 1.6 倍から 1.9 倍となること、溶接金属部の残留応力の最大値は熱影響部のそれより大きい。また、SM50B, SM53B および SM58Q での残留応力の最大値は、それぞれ降伏強度の約 80%, 48%, 45% である。

＜すみ肉溶接継手；残留応力；高張力鋼；けた＞

In this paper, residual stresses in fillet welded joints between girders made of hi-strength steels SM50B, SM53B and SM58Q, are experimentally studied using I-section specimens. Specimens of three different bending restraint values (K_B) are examined. The residual stresses in plain strain are obtained by finite element analysis from the free displacements that are caused by cutting of the specimens after welding.

The main results of this study are as follows.

- (1) The cooling time for SM50B from 300℃ to 100℃ generally increases when the value of K_B is high.
- (2) According to FEM analysis, the value of K_B in lamination is from 1.6 to 1.9 times the value of K_B in non-rotational restraint fillet joints, depending upon the metals in the vicinity of the weld. The maximum residual stresses in the deposit metals are larger than those in the heat effected zones.

Those maximum stresses for SM50B, SM53B and SM58Q are about 80%, 48% and 45% of the yield strengths, respectively.

Keywords: fillet welded joint, residual stress, hi-strength steel, girder.

*構造研究室長 **同室員 ***元第2研究部長 現専修大学北海道短期大学土木科教授

1. ま え が き

溶接残留応力の発生の原因は、溶接が局部加熱であることと材料が降伏することによる。つまり、局部加熱により材料が膨張しようとするが、温度変化のない所では膨張を起こさないため、変形が局部的に拘束される。また、鋼材のように高温時での降伏応力は室温に比べて小さいので一段と降伏しやすくなる。この結果、鋼材の温度が室温に戻った後も塑性ひずみが残留し、この塑性ひずみにより残留応力が発生することになる。^{1),2)}

したがって、溶接構造物の弾性域では、溶接により生ずる食違いを一体化しようとする弾性ひずみによって生ずる力と、塑性域内部に存在する残留固有ひずみによる応力がそれぞれ溶接部に別個に存在することになる。

これらの応力を解析的に求める方法は種々提案され、2次元の理想化したモデルによる解や簡易化した平均固有ひずみによる方法などがある。

橋梁のような構造物の溶接に関しては、3次元の残留応力解析を行わなければならない。ところが、溶接長の3次元の拡がりや拘束条件、あるいは材料の降伏強度、熱膨張係数、弾性係数などは強い温度依存性があり、解析はきわめてむずかしい。

また、弾性ひずみによる応力と塑性ひずみによる応力およびそれらの分布を分離して求めることも困難であり、実際に残留応力を求めるには、一般に溶接された鋼材な

どをノコギリで切断し(分割法と呼ばれている)、ひずみを開放しひずみゲージで測定することが多い³⁾

著者らは、すみ肉溶接継手(以下継手と呼ぶ)の低温割れに及ぼす拘束度の研究をしてきた⁴⁾⁻⁷⁾

本文では、曲げ拘束度と残留応力との関連などを究明するための基礎資料を得る目的で、3種の鋼材(SM50B, SM53B, SM58Q)を用いた供試体の残留応力を求めたので報告する。

なお、本報文での残留応力は、供試体を切断して生ずる変位をダイヤルゲージで測定し、これら変位からFEM(有限要素法)で逆算して求めたものである。

2. 供試体の材料と熱サイクル計測

供試体の材料はSM50B, SM53B, SM58Qの3鋼種であり、それぞれに使用した板厚は16, 25, 32, 38 mmである。表-1に、これら鋼材の機械的性質と化学成分を示す。溶接方法は、低水素系溶接棒(川崎製鉄株式会社製, KSA-76, KSA-86)を用いて被覆アーク溶接で行った。表-2に、溶接棒の機械的性質と化学成分を示す。

また、本実験では低温割れのひとつの因子とされている溶接部の拡散性水素量を計測した。その溶接条件と計測結果を、表-3に示す。なお、この拡散性水素量の計測要領は文献5)に記述されている方法で行った。

一方、溶接低温割れに関する因子は、現在のところ溶

表-1 供試材料の機械的性質と化学成分

鋼種と板厚 (mm)	引 張 試 験			化 学 成 分 (%)										Ceq (%)
	YP	TS	EL	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	
SM50B16	363	510	26	0.15	0.24	1.32	0.018	0.004	—	—	—	—	—	0.38
25	〃	〃	28	0.16	〃	1.27	0.020	0.006	—	—	—	—	—	〃
32	343	〃	26	〃	0.32	1.31	0.017	0.003	—	—	—	—	—	0.40
38	333	〃	29	〃	0.32	〃	〃	〃	—	—	—	—	—	〃
SM53B16	392	539	26	0.15	0.24	1.32	0.018	0.004	—	—	—	—	—	0.38
25	382	〃	33	〃	0.33	1.31	0.016	0.005	—	—	—	—	—	0.39
32	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	—	—	—	—	—	〃
38	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	—	—	—	—	—	〃
SM58Q16	608	667	33	0.11	0.28	1.30	0.020	0.003	—	0.09	0.03	0.061	0.040	0.36
25	579	〃	26	0.12	0.29	1.31	0.007	0.002	—	0.18	0.02	0.130	0.039	0.39
32	559	〃	29	0.15	0.30	1.34	0.014	—	—	0.02	〃	0.088	0.041	0.41
38	〃	〃	26	〃	〃	〃	〃	0.003	—	0.02	〃	〃	〃	〃

* YP:降伏強度(MPa), TS:引張強度(MPa), EL:伸び(%) Ceq=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14

表-2 溶接棒の機械的性質と化学成分

銘 柄	引 張 試 験			化 学 成 分 (%)					
	YP	TS	EL	C	Si	Mn	P	S	Mo
K S A -76	500	569	32	0.06	0.42	1.49	0.013	0.008	—
K S A -86	569	618	26	〃	0.43	1.24	0.011	0.009	0.235

* YP:降伏強度(MPa), TS:引張強度(MPa), EL:伸び(%)

接による加熱温度の冷却速度，熱影響部の硬化，溶接部の水素量，継手の拘束度などである。割れは，これらが相互に作用して発生すると考えられている。その発生機構は熱影響部が起点となり，溶接金属部に伝播していく

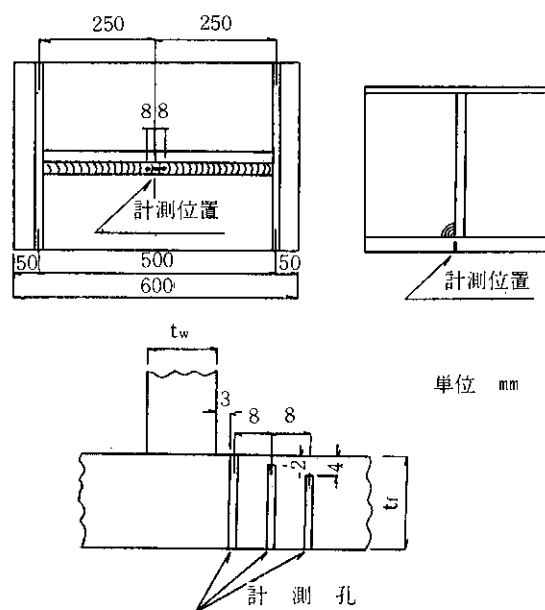
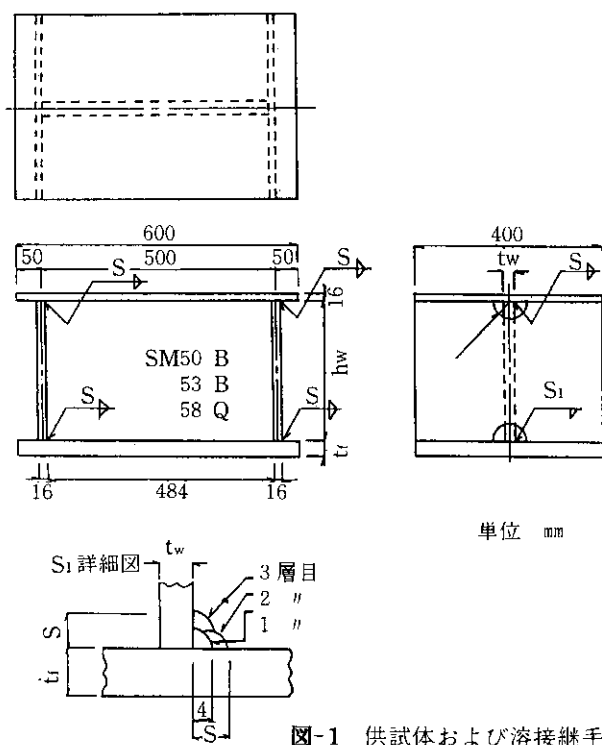
ものである。本実験では，各供試体の残留応力を開放変位から求め，また各積層状態の曲げ拘束度を FEM で算出し，さらに低温割れに大きな影響を与える加熱から冷却にいたる時間を計測した。溶接部の温度計測には，文献

表－3 拡散性水素量計測に用いた溶接材料および溶接条件と計測結果

試 験 片			溶接材料と溶接条件		水素量計測値 (cc/100gr)	水 素 量 平 均 値 (cc/100gr)
鋼 種	形 状	乾 燥	銘 柄	温度と吸湿条件		
S M50B	12 t × 25 w × 130 i	650°C, 1hr	K S A－76(φ5)	12°C, 65%, >30min	1.5, 1.4, 1.4, 1.4	1.43
				13°C, 77%, >30min	1.6, 1.7, 1.5, 1.5	1.56
				12°C, 65%, >30min	1.3, 1.5, 1.2, 1.3	1.33
S M53B S M58Q			K S A－86(φ5)	" " "	1.2, 1.3, 1.3, 1.2	1.25

表－4 供試体寸法

鋼 種	タイプ	t _f	t _w	h _w	W	S	製作数	適 要
S M50B	A	25	16	300	400	7	3	S ₁ は1, 2, 3層各1体
	B	32	25	300	400	8	3	"
	C	38	38	200	300	9	3	"
	小 計						9	"
S M53B, S M58Q	A	S M50B タイプ A と同じ					3, 3	"
	B	" B "					3, 3	"
	C	" C "					3, 3	"
	小 計						9 + 9 = 18	"
	合 計						27	



5)に述べたように熱電対を用いた。

供試体の形状寸法を図-1と表-4に、また熱サイクル計測の位置、寸法を図-2に示すが、計測の対象とした鋼種はSM50Bのみである。

3. 熱サイクルの計測結果

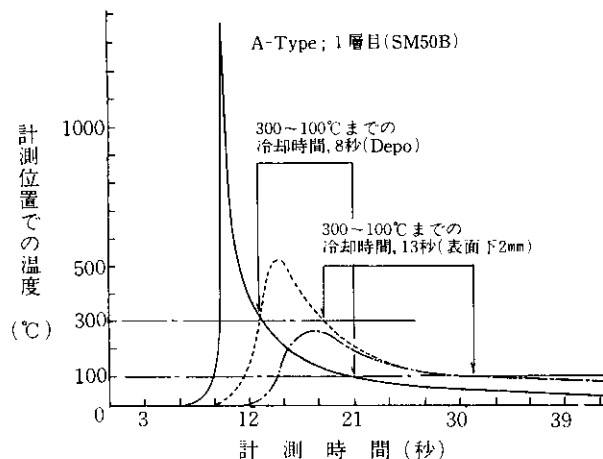


図-3 供試体 A-Type の熱サイクル

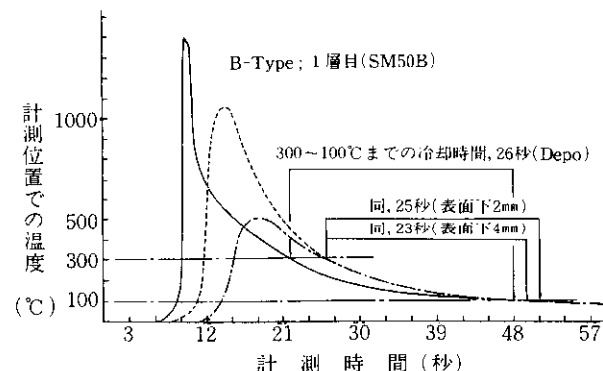


図-4 供試体 B-Type の熱サイクル

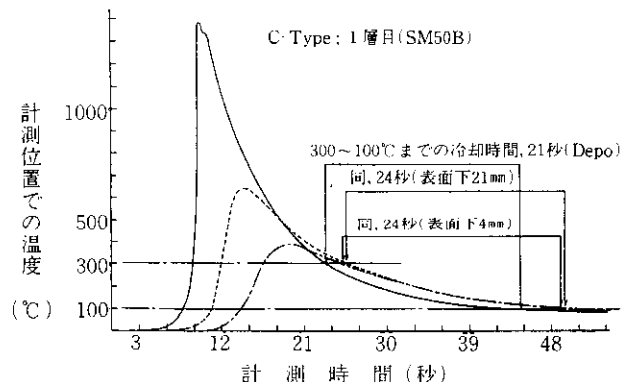


図-5 供試体 C-Type の熱サイクル

低温割れに影響を及ぼすとされている一因子として、継手の加熱温度からの冷却時間がある。この冷却時間が少ないほど、つまり冷却速度が大きいほど割れが発生しやすい。

ここでは、継手部の温度が300℃から100℃にいたる低温域での冷却時間を計測した。その結果は図-3～5に示したとおりであり、各供試体での積層数、冷却時間を表-5に取りまとめた。ただし、図-3～5には積層が1層の場合のみを示した。

4. 供試体切断による変位の測定結果

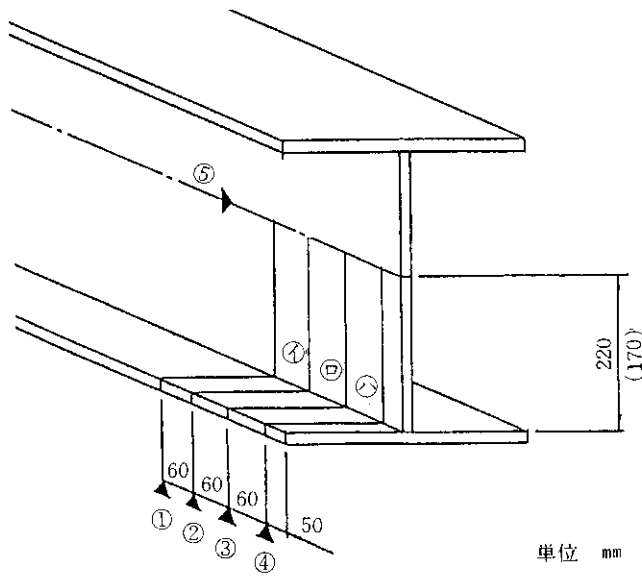
残留応力は各積層が終了した A, B, C-Type の供試体計 27 個についてノコ盤（ハンドソー）で切断し、そのときに生ずる変位をダイヤルゲージで測定した。残留応力は、この変位に等価を載荷による断面の平面ひずみから求めた。

供試体の切断は、図-6の(a)に示す①～⑤の順序に行った。試験片は溶接線中央の①、端部の②、またこれから中間部の③を各供試体から得ることにした。

表-5 熱サイクル計測結果

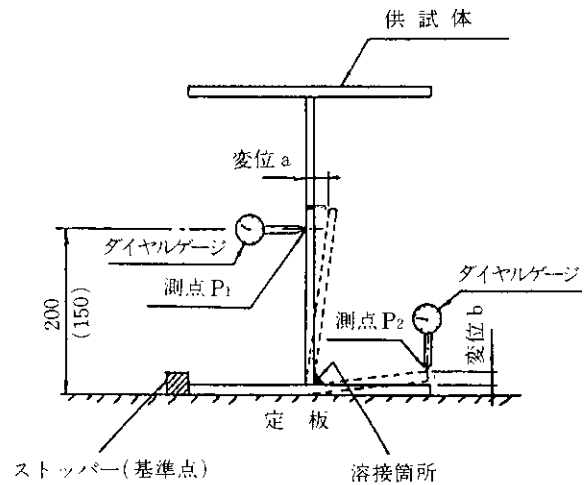
鋼 種 試 験 体	積層数	最高加熱温度(℃)			300～100℃ までの冷却時間(秒)		
		Depo	2 mm 下	4 mm 下	Depo	2 mm 下	4 mm 下
S M 50 B, A-Type	1	1,361	508	259	8	13	—
	2	980	649	309	8	11	12
	3	367	283	178	13	—	—
S M 50 B, B-Type	1	1,370<	1,032	544	26	25	23
	2	1,289	768	508	18	21	20
	3	545	426	293	20	22	—
S M 50 B, C-Type	1	1,370<	624	381	21	24	24
	2	793	546	402	17	23	20
	3	576	433	307	24	27	30

図-6の(b)に、残留変位の測定要領を示した。なお、()内の数値はC-Typeでの値を表わした。



(a) 切断の順序と部位

表-6は、測定した水平変位 a と垂直変位 b を取りまとめたものである。また、ノコ盤による切断の状況を写真



(b) 変位の測定要領

図-6 供試体切断と変位の測定要領

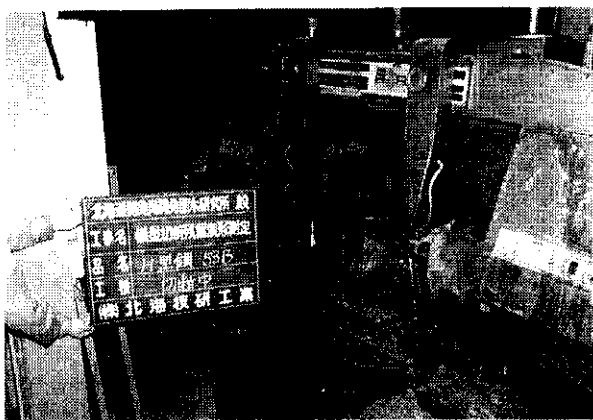


写真-1 ノコ盤による供試体の切断

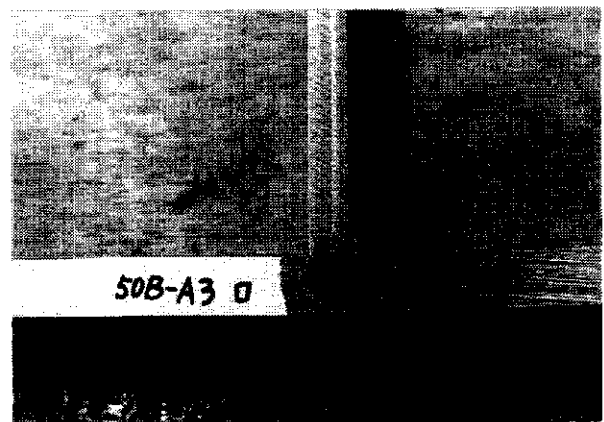


写真-3 SM50B (A-Type) の切断面



写真-2 残留変位の測定

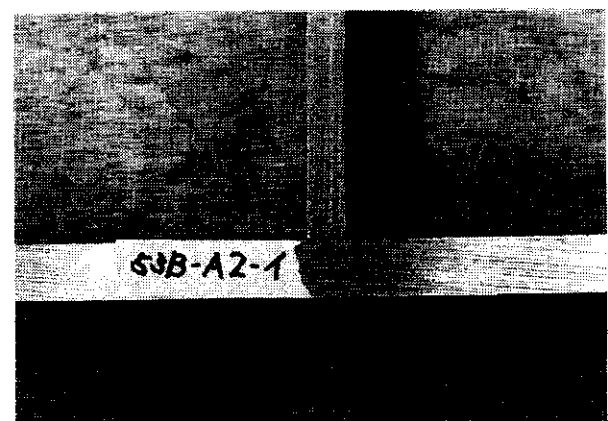
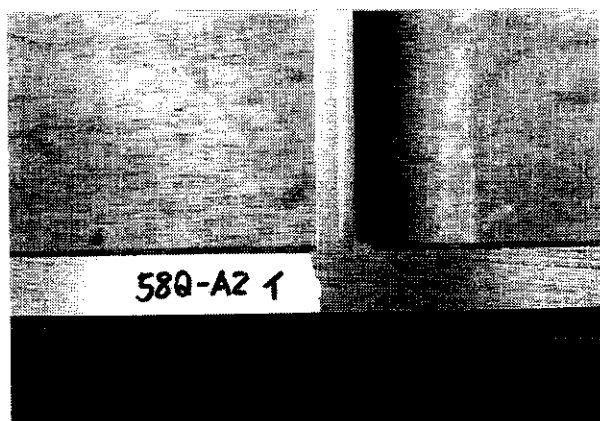


写真-4 SM53B (A-Type) の切断面



写真一5 SM58Q (A-Type) の切断面

表一6 供試体切断後の変位 (単位mm)

鋼種	模型の Type	積層 数	変位 a (測点P ₁)			変位 b (測点P ₂)		
			イ	ロ	ハ	イ	ロ	ハ
SM50B	A	1	0.4	0.4	0.8	0	-0.1	-0.1
		2	1.2	1.3	1.4	-0.1	0	0.2
		3	2.3	3.0	2.6	-0.2	0	0.2
	B	1	0.6	0.7	0.3	0.1	0.1	0.3
		2	1.6	1.3	1.3	0	0	0.2
		3	2.4	2.1	1.8	-0.1	0	0.1
	C	1	0.5	0.7	0.7	-0.1	-0.2	-0.3
		2	0.7	0.6	0.8	-0.1	0.1	-0.1
		3	1.4	1.2	1.1	-0.3	-0.7	-0.2
SM53B	A	1	0.7	0.6	0.4	-0.2	-0.2	-0.1
		2	2.5	2.2	2.0	0	0	-0.1
		3	1.7	1.4	0.7	0.1	0	-0.3
	B	1	0.3	0.2	0.4	0.1	0.1	-0.2
		2	1.3	1.7	1.0	0	-0.3	0
		3	2.0	1.8	1.3	0.1	0	0
	C	1	0.4	0.4	0.3	-0.1	0	-0.1
		2	0.6	0.8	0.7	-0.2	-0.2	-0.2
		3	0.8	0.9	0.5	-0.1	0	0.1
SM58Q	A	1	1.7	1.5	1.4	0	-0.1	-0.3
		2	2.9	2.8	2.5	0.1	0	-0.1
		3	1.5	1.8	1.8	0.1	0.3	0.4
	B	1	1.1	0.9	0.7	0	0.1	0
		2	1.9	1.9	1.6	0	0	-0.1
		3	2.0	1.5	1.8	0	-0.1	-0.1
	C	1	0.5	1.0	0.9	-0.2	-0.2	-0.2
		2	1.4	1.1	0.8	-0.2	-0.2	-0.2
		3	1.3	1.1	1.2	-0.4	-0.4	-0.3

一1に、残留変位の測定状況を写真一2に、また各鋼種の切断面を写真一3～5に示した。

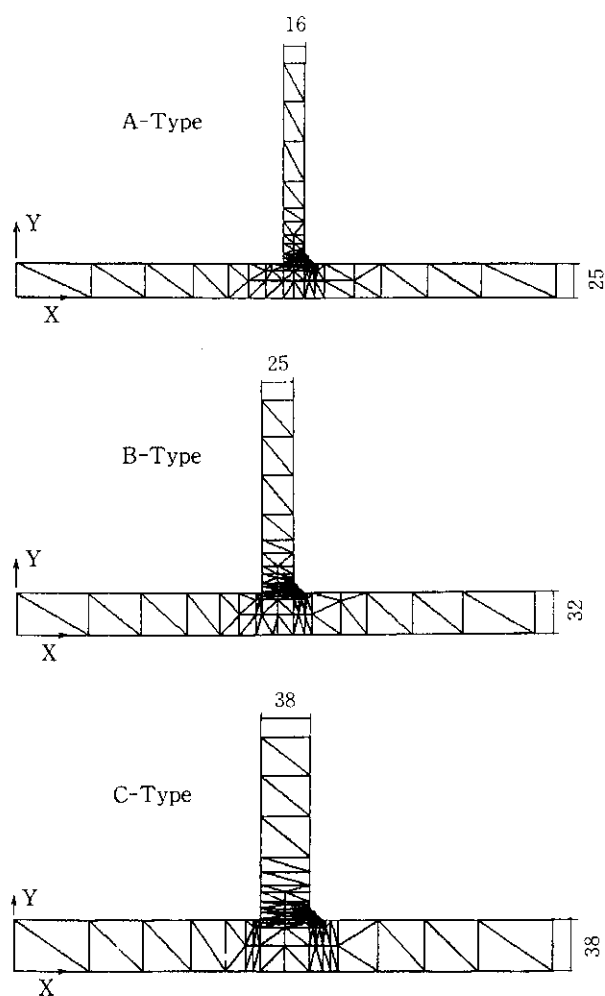
5. 残留応力の推定と曲げ拘束度

継手部の残留応力は、表一6に示した水平および垂直変位から次のような方法で推定した。

すなわち、各溶接積層が終了し、切断した試験片の変位と同じ量で逆方向の変位を生ずる荷重を切断面の⑤の位置のウェブ直角方向に作用させ、そのときに生ずる継手部の応力を残留応力とした。ただ、垂直変位による影響は実測値が全般的に小さいことから無視することにした。

この解析は、図一7に示した供試体断面をメッシュ分割し、FEMにより行った。解析はほぼ平面ひずみ状態と考えられる試験片の部位イを対象とし、弾性係数を206MPa ($2.1 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$)、ポアソン比を0.3とした。

継手部近傍のメッシュ分割を、図一8に示した。図一8でのメッシュ内の数値は要素番号であり、このうち、番



図一7 供試体断面のメッシュ分割図

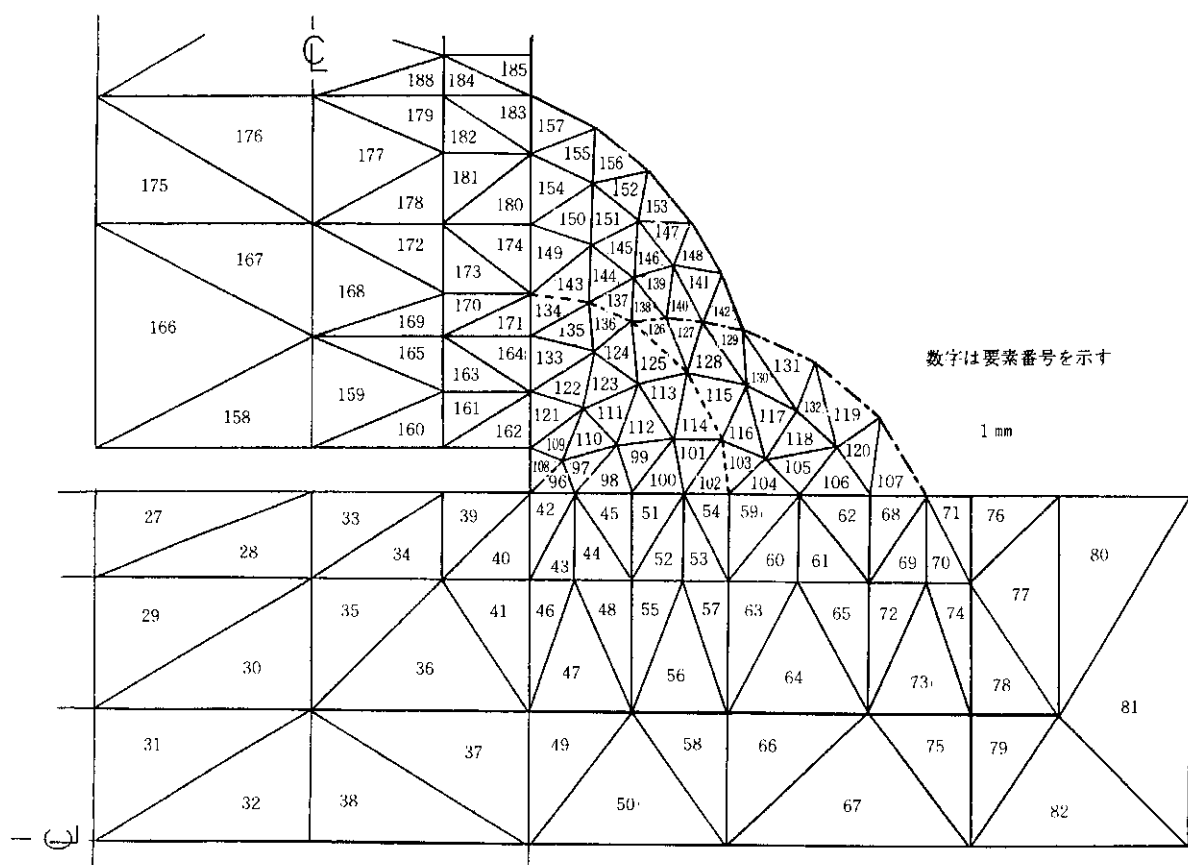


図-8 断手部のメッシュ分割図

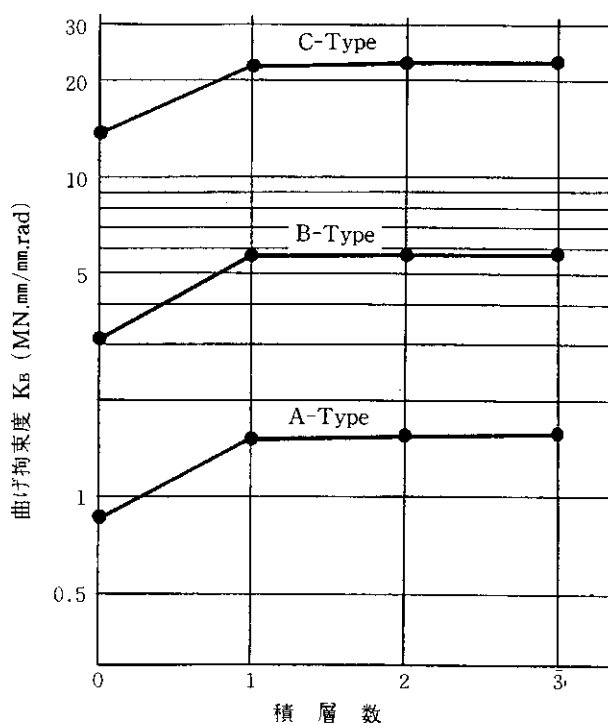


図-9 溶接の積層数と曲げ拘束度 K_B

号 96～157 は Depo (溶接金属部) を示す。また、これら要素の境界で点線部は溶接の 1 層目を、1 点鎖線は 2 層目を、実線は 3 層目を表わす。

表一は各供試体の積層による Depo と HAZ (熱影響部) の主応力、主応力方向などを示した。これら主応力は、各メッシュ分割要素の中で最大値を示すもののみを表わした。なお、主応力方向の θ は図一七の X 軸を基準にして反時計方向まわりに計ったときの角度である。

表中の入熱量は模型製作時に得られた結果であり、変形 α は供試体切断後の水平変位 a を回転量で表わした。

一方、溶接積層数の増加と曲げ拘束度 K_B との関係 (K_B は鋼種には無関係で、継手と供試体の断面形状と支持条件に係る) を図一九に示した。 K_B は次のように算出した。まず積層数 0 の値は、継手の回転拘束がない場合で文献 7) に示した解析値である。以降の 1, 2, 3 層の K_B は、図一十に示した要領で作用された曲げモーメントと継手の回転角とから算出した。この際の演算は、平面ひずみ状態として図一七のメッシュ分割による FEM 解析により行った。

K_B の値(単位 ; MN, mm/mm, rad)は積層数 0 の A,

表-7 供試体切断による変形 α , 換算残留応力 (σ_{Depo} :溶接金属部, σ_{HAZ} :熱影響部), 主応力方向 θ

供試体	鋼種	積層	溶接材料	入熱量 (KJ/cm)	α	σ_{Depo}	θ	要素 No.	σ_{HAZ}	θ	要素 No.
A-TYPE (幾何平均厚 $A_v=20\text{mm}$)	S M50B	1層	K S A-76/3.2 ϕ	10.8	2.0	19.1,	62.10,	134	6.1,	33.38,	174
		2 "	"	9.8, 9.8	6.0	73.4,	64.52,	134	23.5,	33.47,	174
		3 "	"	10.8, 9.8, 9.8	11.5	127.4,	35.37,	142	41.5,	27.81,	185
	S M53B	1層	"	11.4	3.5	33.4,	62.10,	134	10.9,	33.38,	174
		2 "	"	10.3, 10.8	12.5	153.0,	64.52,	134	49.1,	33.47,	174
		3 "	"	11.4, 10.8, 10.8	8.5	94.1,	35.37,	142	30.6,	27.81,	185
	S M58Q	1層	K S A-86/3.2 ϕ	12.0	8.5	81.1,	62.10,	134	26.5,	33.38,	174
		2 "	"	11.3, 11.7	14.5	177.5,	64.52,	134	57.0,	33.47,	174
		3 "	"	10.3, 10.8, 10.8	7.5	83.0,	35.37,	142	27.1,	27.81,	185
B-TYPE (幾何平均厚 $A_v=28.284\text{mm}$)	S M50B	1層	K S A-76/4.0 ϕ	11.3	3.0	36.8,	-38.98,	134	12.0,	-29.93,	171
		2 "	"	11.3, 11.7	8.0	111.3,	-38.34,	134	37.6,	-29.93,	171
		3 "	"	12.3, 11.7, 12.3	12.0	218.4,	124.87,	142	63.2,	118.89,	185
	S M53B	1層	"	12.3	1.5	18.3,	-38.98,	134	6.0,	-29.93,	171
		2 "	"	12.3, 12.3	6.5	90.4,	-38.34,	134	30.5,	-29.93,	171
		3 "	"	12.9, 12.3, 12.3	10.0	182.0,	124.87,	142	52.6,	118.89,	185
	S M58Q	1層	K S A-86/4.0 ϕ	12.9	5.5	67.4,	-38.98,	134	22.1,	-29.93,	171
		2 "	"	12.3, 12.3	8.5	132.2,	-38.34,	134	44.6,	-29.93,	171
		3 "	"	12.9, 12.3, 12.9	10.0	182.0,	124.87,	142	52.6,	118.89,	185
C-TYPE (幾何平均厚 $A_v=38\text{mm}$)	S M50B	1層	K S A-76/4.0 ϕ	11.7	3.3	76.3,	-27.84,	134	24.9,	122.14,	174
		2 "	"	12.3, 11.7	4.7	143.4,	-25.63,	134	45.0,	122.27,	174
		3 "	"	11.7, 11.7, 12.3	8.4	281.1,	122.96,	142	83.6,	120.18,	185
	S M53B	1層	"	12.3	2.7	61.1,	-27.84,	134	19.9,	122.14,	174
		2 "	"	12.3, 12.9	4.0	122.9,	-25.63,	134	38.5,	122.27,	174
		3 "	"	12.3, 12.3, 11.7	5.3	160.6,	122.96,	142	47.8,	120.18,	185
	S M58Q	1層	K S A-86/4.0 ϕ	12.3	3.3	76.3,	-27.84,	134	24.9,	122.14,	174
		2 "	"	12.3, 12.3	9.3	286.7,	-25.63,	134	90.0,	122.27,	174
		3 "	"	12.9, 12.9, 12.3	8.7	261.0,	122.96,	142	77.6,	120.18,	185

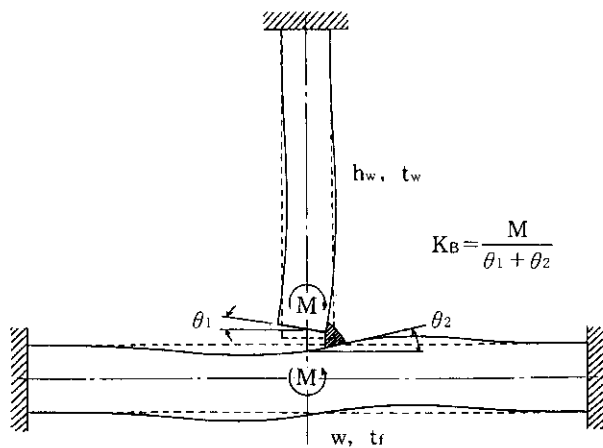


図-10 継手の回転角と曲げ拘束度 K_B

B, C の各 Type で, それぞれ 0.8619, 3.1458, 13.6137, 1層では 1.5390, 5.8638, 22.8367, 2層では 1.5416, 5.8701, 22.8786, 3層では 1.5847, 5.9833, 23.1440 である。

以上の解析から, 得られた主応力 σ_1 と K_B との関係を図-11, 12 に表わした。

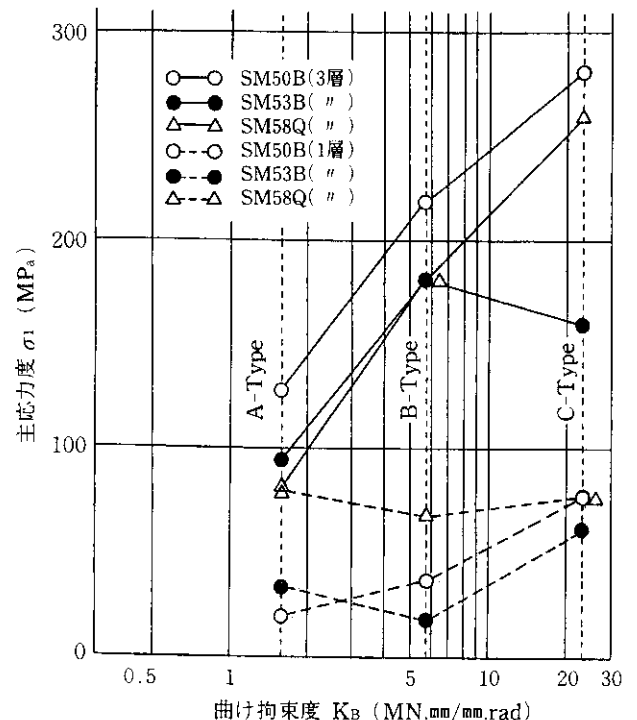


図-11 曲げ拘束度 K_B と主応力度 σ_1 との関係 (Depo; 溶接金属部)

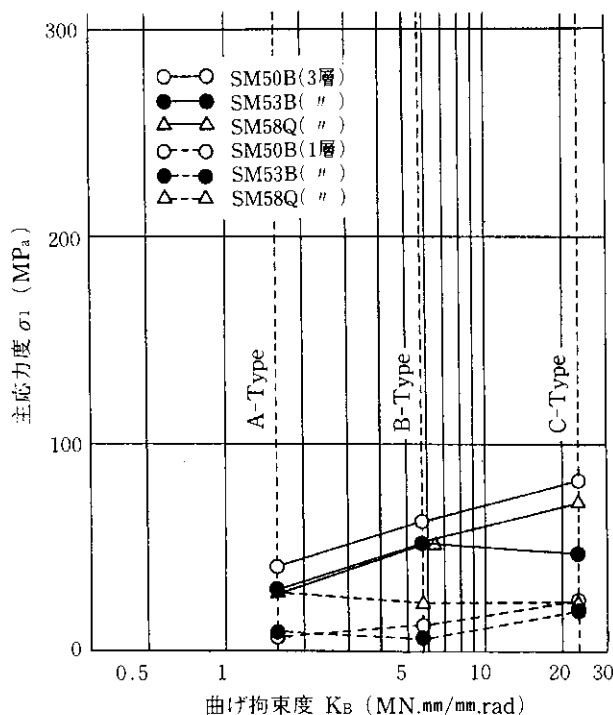


図-12 曲げ拘束度 K_B と主応力度 σ_1 との関係
(HAZ; 熱影響部)

6. 考 察

本報文中で扱った継手に関する実験で、おおむね次のことが明らかになった。

1) 引張拘束度 R_F に関する拡散性水素量と、溶接による温度が $300 \sim 100^\circ\text{C}$ にいたる冷却時間を熱サイクル計測で確認した。ここでは SM50B についてだけ行ったが、曲げ拘束度の小さい A-Type の冷却速度が大きいことが判明した。

2) 溶接積層数と曲げ拘束度との関係を明らかにした。

この結果、継手の回転が拘束されなかった従来の理論解と異なり、積層数が 1 層以降の曲げ拘束度は積層数にあまり影響されず、回転の拘束がないとした理論解の約 1.6 倍から 1.9 倍になることがわかった。

3) 曲げ拘束度と継手近傍の主応力を、各積層ごとに残留変位から明らかにした。その結果、積層数が多くなるに従って主応力は増大することと、Depo での値が HAZ での値より大きいことがわかった。Depo での最大値は SM50B で、降伏強度の約 80%、SM53B では約 48%、

SM58Q では約 45% であった。これらの結果から、低温割れが HAZ から発生し伝播することを説明できないが、Bond 近傍で引張りの主応力が他の部位より大きくなることがうかがわれた。

7. あとがき

低温割れは、種々な要因の複雑な組合せにより起こる。

本報文では、この割れを究明するための基礎資料、すなわち鋼種別による拡散性水素量、SM50B のみについてであるが、 300°C から 100°C にいたる冷却時間の計測、さらに溶接後に供試体を切断することによって生ずる残留変位から残留応力を推定し、取りまとめた。

これら結果のうち、低温割れに寄与する残留応力を推定しようとする当初の目的は達したと思われる。

今後は、これら実験の結果や既往の成果をもとに溶接低温割れに関する研究をさらに進めていきたい。

参考文献

- 1) 渡辺正紀, 佐藤邦彦: 溶接力学とその応用, 朝倉書店, 第 8 章 溶接応力, pp. 302-310, 第 9 章 溶接残留応力の測定, pp. 332-350, 昭和 40 年 12 月。
- 2) 溶接学会編: 溶接工学の基礎, 丸善株式会社, 第 5 章 溶接冶金概論, pp. 100-115, 昭和 57 年 1 月。
- 3) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫, 田中 匡: 溶接継手の残留応力分布の解析, 溶接学会誌, 第 48 巻 第 8 号, pp. 58-62, 昭和 54 年。
- 4) 井藤昭夫, 渡辺 昇: 箱桁の隅肉溶接部付近の拘束度に関する研究, 土木学会論文集 第 362 号/1-4, pp. 233-238, 昭和 60 年 10 月。
- 5) 吉田紘一, 北野初雄, 井藤昭夫: 箱げたのすみ肉溶接部付近の拘束度に関する実験的研究, 土木試験所月報 No. 393, pp. 1-11, 昭和 61 年 2 月。
- 6) 井藤昭夫, 渡辺 昇: 箱桁の仮付け溶接された隅肉溶接継手の引張拘束応力および拘束度係数についての一考察, 土木学会論文集 第 368 号/1-5, pp. 219-224, 昭和 61 年 4 月。
- 7) 井藤昭夫, 渡辺 昇: すみ肉溶接継手の拘束度に関する実験的研究, 溶接学会論文集 第 6 巻 第 3 号, pp. 18-23, 昭和 63 年 8 月。