

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

Experimental Study on Intensity of Restraint Near the Fillet Welded Joints of a Box Girder

吉田 紘一* 北野 初雄** 井藤 昭夫***

本文は溶接鋼構造物の低温割れ発生原因の重要な要素の1つである拘束応力を箱げた模型で測定し、あわせて有限要素法で解析した結果とを比較検討したものである。この結果は次のように要約できる。

- 1) フランジとウェブまたはリブとのすみ肉溶接による拘束度係数は、フランジ厚と母板厚の幾何平均厚 ($t_{AV} = \sqrt{t_F \cdot t_{DW}}$, $t_{AV} = \sqrt{t_F \cdot t_R}$) で表わすことができる。
 - 2) 拘束度は、箱げた内で鋼板の支持条件が変化したり、測定位置が変化しても、通常用いる板厚の70倍は越えないと推定される。
- 《溶接；拘束度；実験；箱げた；低温割れ》

1. はじめに

溶接鋼構造物に高張力鋼を使用する場合、最も大きな問題は、溶接金属部と溶接熱影響部を通るいわゆる低温割れに対する防止方法の確立や推測を行うことである。

この低温割れ発生原因の重要な要素としては、溶接部の冶金組織、拡散性水素、拘束応力の3つであることが明らかにされている^{1)~4)}など。

したがって、低温割れ防止のためには溶接部分の清浄や乾燥を十分に行うことはもちろんのこと、溶接材料には低水素系のものを使用することや、板厚、拘束応力などを考慮し、また溶接順序に留意しなければならないことになる。現在、鋼橋については、低温割れに関する溶接条件を決める方法として、道路橋示方書⁵⁾ II 鋼橋編、15章施工の15.3.3の(9)の予熱についての規定がある。

一方、日本溶接協会のWES 3002-1973「溶接構造用高張力鋼の溶接割れ感受性組成に関する規格」⁶⁾をもとに、溶接割れ感受性指数(P_W)による溶接施工管理も採用されてきている^{7),8)}。このWESの規格は、多くの研究成果^{1),2),3)}などによって定められたものであるが、炭素当量のような鋼材の化学組成のほかに、主に溶接棒の被覆剤中の水分量に影響される拡散性水素および溶接部の収縮に対する拘束の程度を表わす拘束度が導入されて

いる。拘束度は「溶接継手の開先間隔を弾性的に平均1mm短縮せしめるに要する単位溶接長あたりの力の大きさ」と定義されている⁹⁾。

また拘束度は、板厚に比例するものとして拘束度係数と板厚の積として表わされている^{3),8),14)}。

この拘束度は、板厚方向に溶接による角変化のない引張拘束度を表わすが、本文では箱げたの主げたフランジとウェブ、主げたフランジとダイヤフラムウェブあるいはリブが両面仮付け溶接したときのウェブや、リブに生ずる引張拘束度を模型を用いて実測し、あわせてF.E.M.(有限要素法)で解析した結果とを比較検討したものである。

2. 拘束度について

WES 3002-1973⁶⁾では、割れ防止の予熱条件として溶接後、冷却する時間が(1)式の P_W で定まる図-1の限界冷却時間(溶接後100°Cまでに冷却する時間) T_{cr} を超えるように予熱する方法を採用している。また、簡易法として(2)式の予熱温度 T が示されている。

$$P_W = P_{CM} + H/60 + K/40000 \quad (1)$$

ここに、 P_{CM} と H は溶接割れ感受性組成(%), 溶接継手の溶着金属の拡散性水素(cc/100g), K (現在では

*構造研究室長 **同室主任研究員 ***前第2研究部長 現専修大学北海道短期大学土木科教授

R_F と表示され kgf/mm^2 の次元を持つ。以下 R_F 値と呼ぶ) は、溶接継手に生ずる拘束度である。

また、簡易法による予熱温度 T ($^{\circ}\text{C}$) は次式で示される。

$$T = 1440 \cdot P_C - 392 \quad (2)$$

ここに、 P_C は板厚 (mm) t として次式で示されている。

$$P_C = P_{CM} + H/60 + t/600 \quad (3)$$

R_F 値やその測定法が種々提案されており^{7), 8), 12)~16)}, R_F 値は拘束度の大きさに応じて次のように分類されている。すなわち、板厚を h (mm) として、 $10h$, $40h$, $70h$ 程度とされている。

本文では両面仮付けすみ肉溶接による拘束度を論ずることとする。溶接によるウェブやリブの板厚方向の角変化による曲げ拘束を無視し、引張拘束のみに着目すれば、 R_F 値は拘束度係数を R_{F0} ($\text{kgf/mm}^2 \cdot \text{mm}$) として、次式で表わされる。

$$R_F = R_{F0} \cdot h \quad (4)$$

ここに、 h は母板 (主げたウェブ、ダイヤフラムウェブあるいはリブを母板と称することとする) の厚さ (mm) を表わす。 R_F 値を 1. で述べた定義に従い実測するには、開先の力による変位を求めなければならないが、開先に直接載荷するとすれば複雑な治具や荷重受けが必要となる。本文では後述する方法で、開先の変位と溶接部付近の母板の平均応力度から簡易的に R_F 値を求

める。

そこで、溶接部に作用させる荷重を P 、溶接部付近の母板の平均応力度を σ_0 、開先の弾性変位を δ とすれば、次の (5), (6) 式から (7) 式が成立する^{10), 14), 17)}。

$$R_F = P/\delta \quad (5)$$

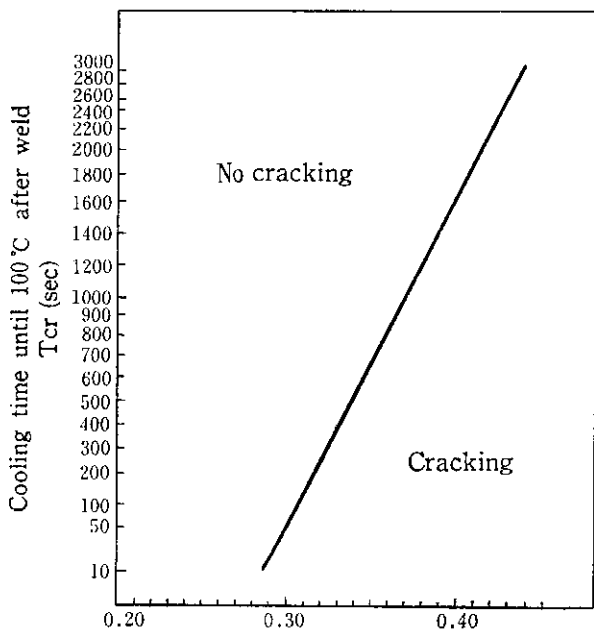
$$\sigma_0 = P/h \quad (6)$$

$$R_F = (\sigma_0/\delta) \cdot h \equiv R_{F0} \cdot h \quad (7)$$

この R_F 値を用い (1) 式の P_W を求め 図-1 から溶接条件が定まるが、最近ではさらに開先形状やのど厚の効果に関する研究^{17)~19)}、各種開先形状の継手の予熱に関する研究²⁰⁾、入熱量など溶接諸条件の拘束応力度に及ぼす影響についての研究^{21), 22)} などが進められている。ただ、現状では割れ感受性指数による溶接条件の選定を行うとすれば (1), (2) 式、図-1 による方法が簡便といえよう。

3. 供試材料

拘束度を求めるために使用した模型げたは、鋼材 SM 58 Q を板継ぎを除いて低水素系の溶接棒 (川崎製鉄株式会社製、KSA 86 被覆アーク溶接棒) を用い、手溶接により組立てた。写真-1 に模型の外観を示す。また表-1 に SM 58 Q の機械的性質と P_{CM} に関する化学成分を示す。以下 (1) 式の H と仮付け溶接部に生ずる熱サイクルを計測したので、これらについて述べる。



$$P_w = C + \frac{\text{Si}}{30} + \frac{\text{Mn}}{20} + \frac{\text{Cu}}{20} + \frac{\text{Ni}}{60} + \frac{\text{Cr}}{20} + \frac{\text{Mo}}{15} + \frac{\text{V}}{10} + 5B + \frac{\text{H}}{20} + \frac{\text{K}}{10 \times 10^3} (\%)$$

図-1 P_W と溶接後 100°C までの冷却時間との関係

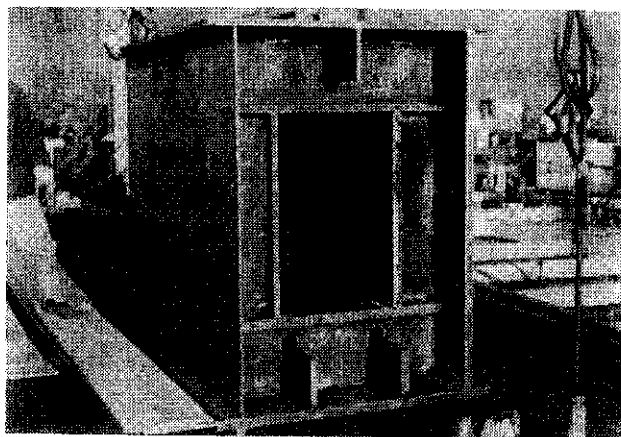


写真-1 箱げた模型の外観

3-1 拡散性水素量測定

拡散性水素量は、KSA 86 ($\phi 4$) を 350°C で 1 時間乾燥した後、 125°C の保管炉に 3 時間保ち、各溶接雰囲気 30~45 分放置し吸湿させたものを JIS Z 3113 に従って計測した。なお、溶接は所定の温度、湿度に調整された恒温恒湿室内で行った。

表-2 は溶接材料、溶接条件を、また表-3 は拡散性水素量の計測結果を示す。写真-2 は水素量の捕集要領を

表一 供試材料 SM 58 Q の機械的性質と化学成分

板厚 (mm)	引張試験			化 学 成 分 (%)									P _{CM} (%)
	降伏点 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	
8	58	65	29	0.14	0.24	1.37	0.01	0.01	0.03	—	0.040	0.001	0.22
12	56	64	27	0.15	0.27	1.35	0.02	0.01	0.04	0.029	0.041	0.001	0.24
16	59	67	36	0.15	0.27	1.35	0.02	0.01	0.04	0.029	0.041	0.001	0.24
25	56	66	28	0.15	0.26	1.36	0.01	0.08	0.03	0.071	0.038	0.001	0.24
38	51	63	29	0.14	0.25	1.36	0.01	0.15	0.02	0.088	0.040	0.001	0.23

表二 拡散性水素量計測に用いた溶接材料および溶接条件

試 験 片			溶 接 棒	溶接棒吸湿条件	溶接雰囲気条件	試験繰返し数
材 質	形 状	試験片の 脱水素処理				
SM 50 Q (t=12)	12t×25w×130l	650°C×1hr	KSA 86 (φ4)	8°C, 48% で 30~45分放置	8°C, 48%	4
				9°C, 55% で 30~45分放置	9°C, 55%	4
				13°C, 53% で 30~45分放置	13°C, 53%	4

表三 拡散性水素量の計測結果

溶 接 棒	溶接雰囲気条件	拡 散 性 水 素 量 (cc/100 g)	
		各 試 験 片 の 水 素 量	平 均 値
KSA 86 (φ4)	8°C, 48%	1.21, 1.56, 1.15, 1.40	1.33
	9°C, 55%	1.01, 1.92, 1.57, 1.52	1.51
	13°C, 53%	1.69, 1.74, 1.73, 1.80	1.74

示す。

3-2 溶接熱サイクル測定

本研究は、箱げたの各断面で仮付け溶接されたときに生ずる拘束を実験的に求めるものである。したがって模型製作では、仮付けによってすみ肉溶接部に割れの発生を防止するため、予熱を行った後溶接を開始した。ここでは、溶接開始から空冷、層間温度保持、溶接アーク通過、空冷という一連の時間経過と溶接部の温度との関係を計測したので、その計測要領と結果について述べる。

なお、この熱サイクルの計測は、熱電対をフランジとウェブの板厚がともに 38 mm である断面部に挿入して

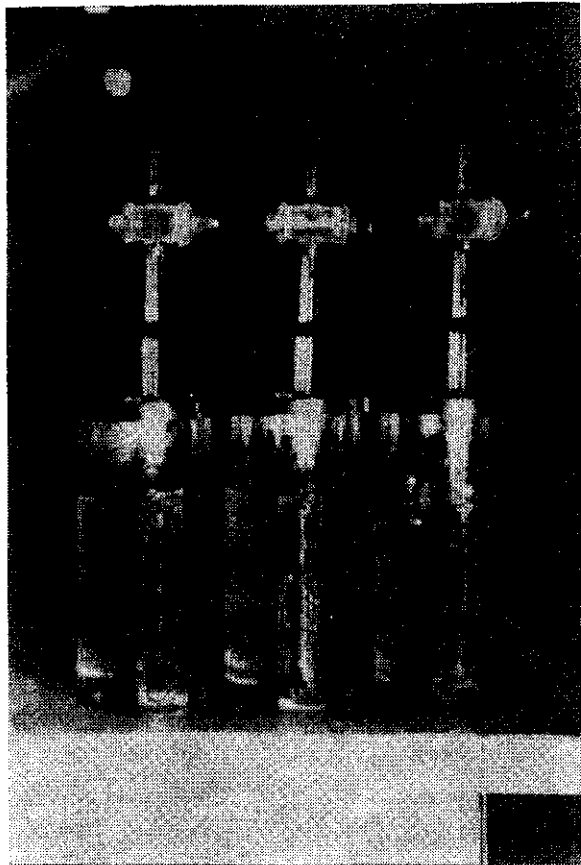
行った。

また、熱電対は Ar-Cr φ 0.6 を使用し、温度補正は水中に熱電対を挿入し、零点調整を行った。

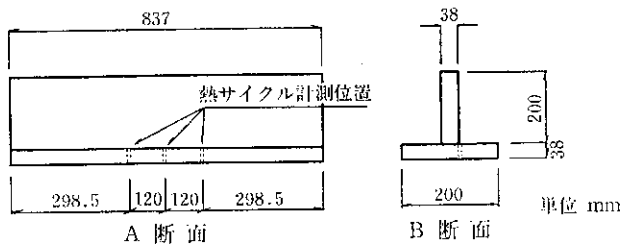
図-2, 3 はそれぞれ熱サイクル試験体形状と計測位置を示す。溶着金属部に関しては、図-3 の孔内での計測と同時に、溶接中に熔融金属の上部から熱電対を挿入し計測した。

表-4 は熱サイクルの計測結果を示す。なお、熔融金属に挿入した熱電対での計測では、アーク到達から 100°C までの冷却時間は 1343 秒であった。

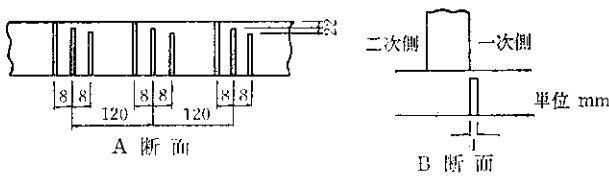
表-4 は熱サイクルの計測での溶接アーク到達温度と



写真—2 拡散性水素量の補集状況



図—2 熱サイクル試験体形状



図—3 熱サイクル計測位置

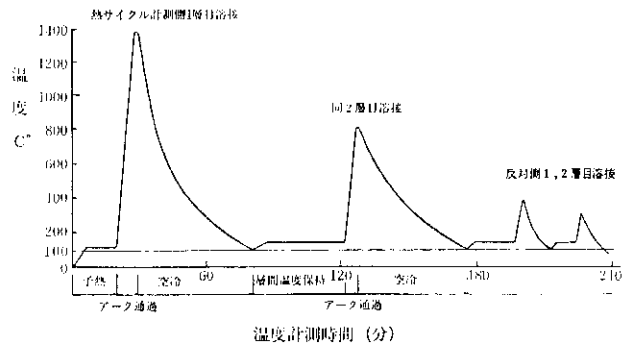
冷却時間を、また図-4は熱サイクルの計測例として溶着金属部での結果を図示したものである。

4. 模型による箱げたの拘束度係数の測定

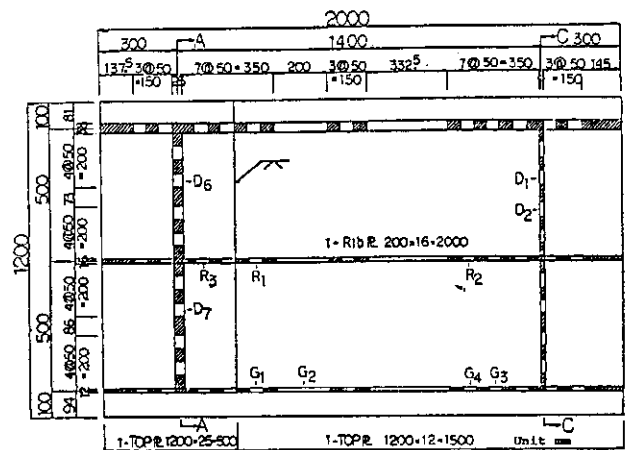
本研究では、数種の鋼板厚(SM 58 Q)の組合わせによる模型げたを使用し、 R_{70} の実測を行った。仮付け溶接長は、実際の施工状況から最小50mmとした。測定に

表—4 熱サイクル計測でのアーク到達温度と冷却時間

計測項目 溶接位置	アーク到達平均温度(°C)		アーク到達~100°Cの平均冷却時間(秒)			
	溶着金属	母材下2mm	母材下4mm	溶接金属	母材下2mm	母材下4mm
1次側 1層目	1226	>1300	966	2754	2622	2620
1次側 2層目	432	498	490	—	1158	1163
2次側 1層目	158	155	156	1571	1517	1526
2次側 2層目	140	138	140	1306	1217	1233



図—4 溶着金属部での熱サイクル



図—5 模型げたの上フランジにおける拘束度係数 R_{70} の測定位置

は各測定位置で取付けピースの回転変形とフランジの曲げ変形を除くため、ジャッキをできるだけ開先面に近づけ、 σ_0 はストレングージ、 δ はグリッパゲージを用いて行った。なお、溶接脚長は板厚38mmのところでは9mm、他は6mmとした。図-5, 6は上フランジと下フランジを、斜線部は溶接部を示す。また、図-7に各断面を示す。

図-5, 6に示すG, D, Rの記号は、それぞれ主げたウ

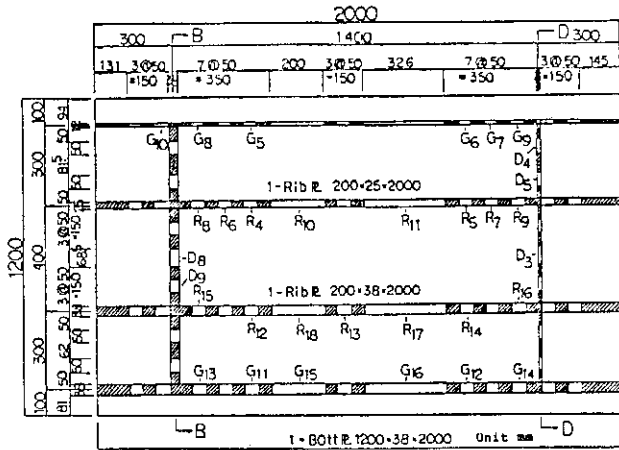


図-6 模型げたの下フランジにおける拘束度係数 R_{F0} の測定位置

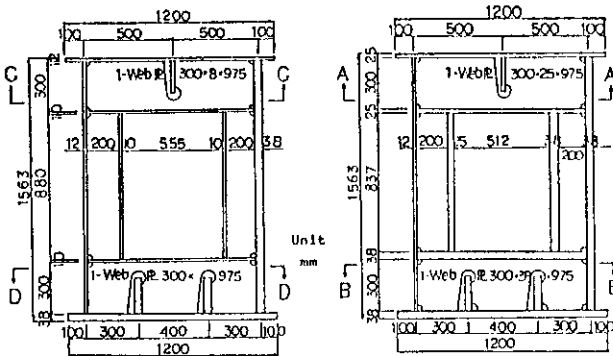


図-7 模型げたの断面図

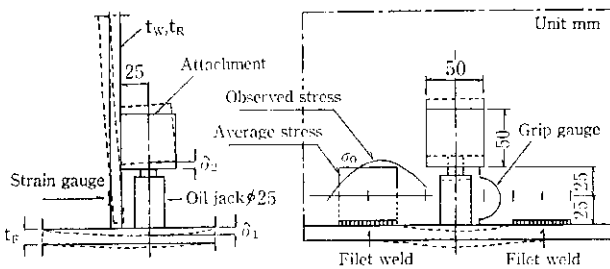


図-8 変位と応力の測定要領

ウェブ、ダイヤフラムウェブおよびリブについての測定位置を表わす。

(7)式の σ_0 , δ の測定は2. で述べたように、開先に直接荷重して求めるのが困難であるため、図-8に示すような方法により行った。すなわち、母板に鋼片を取付け、この鋼片を油圧ジャッキで押し広げることによって生ずる母板の σ_0 を、母板の荷重面と裏面とのひずみゲージから、また、開先の変位 δ をグリップゲージからそれぞれ求めることにした。

なお、母板の平均応力度 σ_0 は、拘束度の定義から一様な応力度であるから、図-8に示す要領で測定される引張

ひずみのうち、溶接ビードの始端から終端までのひずみを算術平均することにより求めた。また、開先変位 δ は δ_1 と δ_2 との和であるとした。

荷重強度 P は、すべての測定位置で 1000 kgf とした。

測定値のとりまとめは、比較的拘束度の大きいと思われる端部、すなわち、主げたウェブとダイヤフラムあるいはダイヤフラムとリブとの交差部付近と、交差部から 150 mm 程度以上離れた位置を中間部と称し、整理することにした。

5. F.E.M. による R_{F0} の計算

4. で述べた R_{F0} の実測値は、測定位置が開先部の溶接部のごく近傍であるため、そこで得られるひずみや変位が相当ばらつくものと考えられる。

また、模型げたの各板厚の種類に限られるために、箱げた断面としての R_{F0} を論ずるのに、数種の板厚の組み合わせによる各断面での理論解を F.E.M. で求めることにした。

解析は、主げたフランジと主げたウェブあるいはダイヤフラム、リブの組み合わせで、それぞれについて平面曲げ～薄肉シェル要素による 3 次元解析によった。

メッシュ分割の例として、母板が主げたウェブとリブの場合を図-9に示した。

図中で () 書きと記号 ⑦ と ⑧ は、リブの場合を示す。

要素の荷重方法や応力度、変位の取扱いは図-8に示した要領に従い、また母板、フランジの支持辺での境界条件は表-5に示す。

表-5で U_x , U_y , U_z および θ_x , θ_y , θ_z は図-9の座標軸 X , Y , Z 軸に関する変位と回転角を表わす。

なお、太線部はすみ肉溶接部を示す。

また、図-9の鋼片を示す E は端部を、 C は中間部を、 CL は E , C の場合の R_{F0} と比較するために設置したも

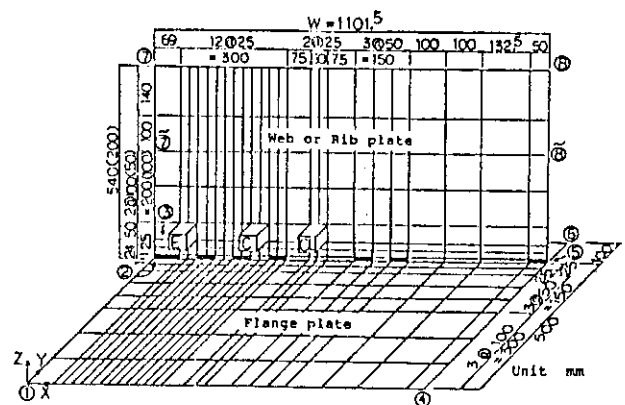


図-9 フランジとウェブまたはリブのメッシュ分割例

表-5 模型げたの各部材の境界条件

部 材	支 持 条 件		
	主 げ た ウ ェ ブ	ダ イ ア フ ラ ム	リ ブ
①—④ ③—⑥ ①—②—③ ④—⑤—⑥	$U_x=U_y=U_z=0$ $\theta_x=\theta_y=\theta_z=0$	$U_x=U_y=U_z=0$ $\theta_x=\theta_y=\theta_z=0$	$U_x=U_y=U_z=0$ $\theta_x=\theta_y=\theta_z=0$
⑦—⑧	do.	do.	—
$\tilde{7}$ — $\tilde{8}$	—	—	$U_x=0, \theta_y=0$
②—⑦ ⑤—⑧	$U_x=U_y=U_z=0$ $\theta_x=\theta_y=0$	$U_x=U_y=U_z=0$ $\theta_x=\theta_y=0$	$U_x=U_y=U_z=0$ $\theta_x=\theta_y=0$
$\tilde{2}$ — $\tilde{7}$ $\tilde{5}$ — $\tilde{8}$	—	—	do.

ので、溶接の間隔が E や C に比べて大きい場合の載荷位置を示す。

6. R_{FO} の実測値と F.E.M. による解析結果

R_{FO} の実測値と F.E.M. による解析結果を、表-6~8 および 図-10~12 に示す。ここに t_F, t_{GW}, t_{DW}, t_R は主げたフランジ、主げたウェブ、ダイヤフラムウェブ、リブの厚さを表わす。

本文では、これら図、表の作成にあたり、 R_{FO} を表わすパラメーターについて種々検討した結果、母板厚と主げたフランジ厚との幾何平均厚をとり、整理することにした。この幾何平均厚を t_{AV} と表わした。なお、表-6~8

で * 印のものは測定断面に存在しないものであるが、通常箱げた断面を構成する鋼板は t_{AV} が 10 mm から 50 mm 程度と想定し、この範囲の R_{FO} を把握のため解析に加えた断面値を示す。

また、図-13 は本研究の実験から得られた R_{FO} の値を (4) 式に代入して求めた R_F 値と、既応の研究の一成果¹¹⁾ である大拘束度で $R_F=70h$ 、中拘束度で $R_F=40h$ で表わされる曲線と対比したものである。母板の厚さである t_{GW}, t_{DW}, t_R をすべて h とみなし、 R_F 値をランダムに書き入れた。

図-10~12 で記号の G_W, D_W, R_b は、それぞれ母板が主げたウェブ、ダイヤフラムウェブ、リブの R_{FO} を表わ

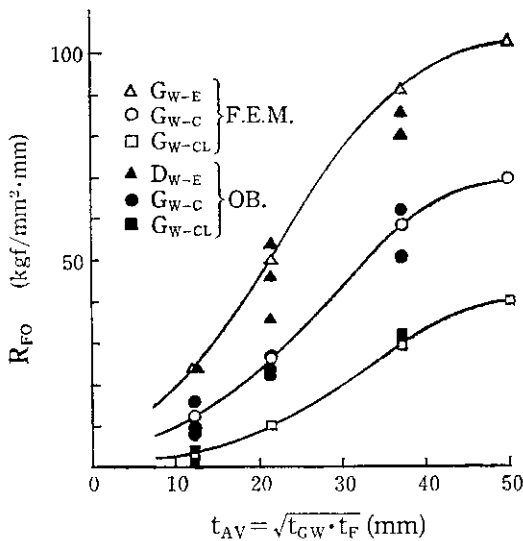


図-10 t_{AV} とフランジ~主げたウェブでの拘束度係数 R_{FO} との関係

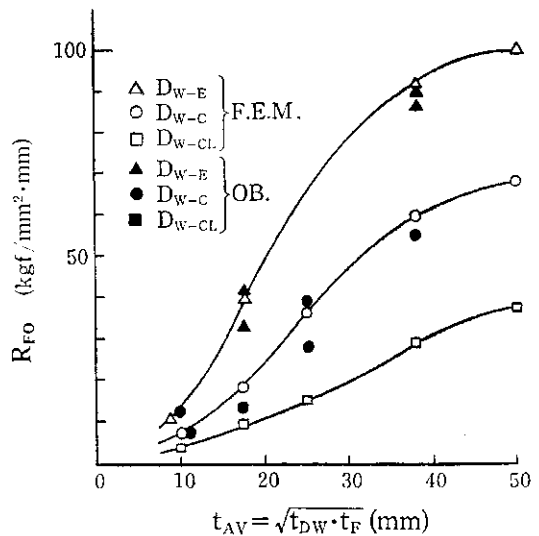


図-11 t_{AV} とフランジ~ダイヤフラムウェブでの拘束度係数 R_{FO} との関係

表—6 フランジ～ウェブでの拘束度係数 R_{F0} の実験値と計算値

測 点			$t_{GF} \times t_F$ (mm)	t_{AV} (mm)	δ (mm/10 ³ kg)		σ_0 (kgf/mm ² /10 ³ kg)		R_{F0} (kgf/mm ² . mm)		実験値 計算値
E	C	CL			計 算	実 験	計 算	実 験	計 算	実 験	
	G ₁		12×12	12.00	0.07293	0.0852	0.90972	0.694	12	8	0.66
	G ₂				0.07293	0.0812	0.90972	0.756	12	9	0.75
	G ₃				0.06970	0.0714	0.93381	1.124	13	15	1.15
		G ₄	12×12	12.00	0.18013	0.1708	0.59254	0.820	3	4	1.13
	G ₅		12×38	21.35	0.01683	0.0203	0.44015	0.472	26	23	0.88
	G ₆				0.01683	0.0175	0.44015	0.438	26	25	0.96
	G ₇				0.01577	0.0154	0.45242	0.472	28	30	1.07
G ₈			12×38	21.35	0.00656	0.0105	0.32898	0.483	50	46	0.92
G ₉					0.00656	0.0080	0.32898	0.416	50	54	1.08
G ₁₀					0.00721	0.0130	0.34741	0.462	48	35	0.70
		*	12×38	21.35	0.03398	—	0.36346	—	10	—	—
	G ₁₁		38×38	38.00	0.00378	0.0035	0.22254	0.216	58	61	1.05
	G ₁₂					0.0042		0.210		50	0.86
G ₁₃			38×38	38.00	0.00206	0.0021	0.18776	0.168	91	80	0.88
G ₁₄						0.0021		0.178		85	0.96
		G ₁₅	38×38	38.00	0.00887	0.0084	0.26239	0.252	29	30	1.03
		G ₁₆								0.00919	0.0112
	*		50×50	50.00	0.00207	—	0.14463	—	69	—	—
*			50×50	50.00	0.00117	—	0.12049	—	102	—	—
		*	50×50	50.00	0.00456	—	0.18237	—	40	—	—

表—7 フランジ～ダイヤフラムウェブでの拘束度係数 R_{F0} の実験値と計算値

測 点			$t_{DW} \times t_F$ (mm)	t_{AV} (mm)	δ (mm/10 ³ kg)		σ_0 (kgf/mm ² /10 ³ kg)		R_{F0} (kgf/mm ² . mm)		実験値 計算値
E	C	CL			計 算	実 験	計 算	実 験	計 算	実 験	
	D ₁		8×12	9.79	0.16075	0.1414	1.18720	1.040	7	7	1.00
	D ₂					0.1372		1.660		12	1.71
		*	10×10	10.00	0.30140	—	1.38500	—	4	—	—
	D ₃		8×38	17.43	0.05575	0.0525	1.02410	0.714	18	13	0.72
D ₄			8×38	17.43	0.01254	0.0112	0.50330	0.378	40	33	0.80
D ₅						0.0121		0.504		41	1.03
		*	8×38	17.43	0.06060	—	0.59119	—	9	—	—
	D ₆		25×25	25.00	0.01113	0.0148	0.40330	0.420	36	28	0.78
	D ₇					0.0154		0.610		39	1.08
		*	25×25	25.00	0.02710	—	0.41709	—	15	—	—
	D ₈		38×38	38.00	0.00332	0.0042	0.19810	0.231	59	55	0.93
D ₉			38×38	38.00	0.00228	0.0028	0.21006	0.252	92	90	0.98
D ₁₀						0.0023		0.199		86	0.93
		*	38×38	38.00	0.00926	—	0.26862	—	29	—	—
	*		50×50	50.00	0.00220	—	0.14840	—	67	—	—
*			50×50	50.00	0.00126	—	0.12805	—	100	—	—
		*	50×50	50.00	0.00473	—	0.17967	—	37	—	—

表-8 フランジ〜リブでの拘束度係数 R_{FO} の実験値と計算値

測 点			$l_R \times l_F$ (mm)	l_{AV} (mm)	$\bar{\sigma}$ (mm/10 ³ kg)		σ_0 (kgf/mm ² /10 ³ kg)		R_{FO} (kgf/mm ² ・mm)		実験値 計算値
E	C	CL			計 算	実 験	計 算	実 験	計 算	実 験	
*			10×10	10.00	0.08098	—	1.14452	—	14	—	—
		*	10×10	10.00	0.34347	—	1.10017	—	3	—	—
	R ₁ R ₂		16×12	13.85	0.07114	0.0686 0.0924	0.72127	0.894 1.068	10	13 11	1.30 1.10
		*	16×12	13.85	0.17090	—	0.68640	—	4	—	—
R ₃			16×25	20.00	0.01228	0.0154	0.39230	0.554	31	35	1.13
	R ₄ R ₅ R ₆ R ₇		25×38	30.82	0.00750 0.00750 0.00694 0.00694	0.0063 0.0073 0.0063 0.0056	0.25527 0.25527 0.26548 0.26548	0.178 0.210 0.195 0.145	34 34 38 38	28 28 30 34	0.82 0.82 0.78 0.89
R ₈ R ₉			25×38	30.82	0.00413	0.0042 0.0053	0.22446	0.259 0.309	54	61 58	1.07 1.03
		R ₁₀ R ₁₁	25×38	30.82	0.01355 0.01491	0.0126 0.0182	0.23055 0.19758	0.195 0.247	17 13	15 13	0.88 1.00
	R ₁₂ R ₁₃ R ₁₄		38×38	38.00	0.00466	0.0046 0.0042 0.0042	0.19670	0.226 0.147 0.200	42	49 35 46	1.07 0.83 1.10
R ₁₅ R ₁₆			38×38	38.00	0.00245	0.0028 0.0028	0.16815	0.168 0.173	68	60 61	0.88 0.90
		R ₁₇ R ₁₈	38×38	38.00	0.00716 0.00684	0.0080 0.0070	0.15044 0.15832	0.132 0.173	21 23	16 24	0.76 1.04
	*		50×50	50.00	0.00241	—	0.14381	—	59	—	—
*			50×50	50.00	0.00158	—	0.12673	—	80	—	—
		*	50×50	50.00	0.00493	—	0.14098	—	28	—	—

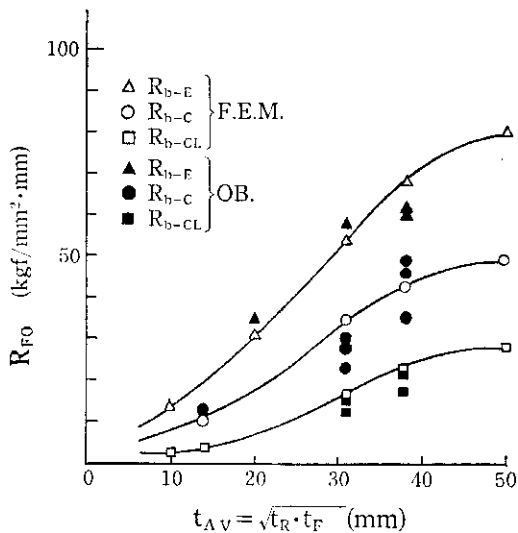


図-12 l_{AV} とフランジ〜リブでの拘束度係数 R_{FO} との関係

し、添字の E, C, CL は 4. で述べた端部、中間部および図-9 に示した溶接部間の大きい場合 (ここでは、E, C に比べて 3 倍以上に相当) を表わすものとする。ただし、図-13 には CL に相当するものは省略した。

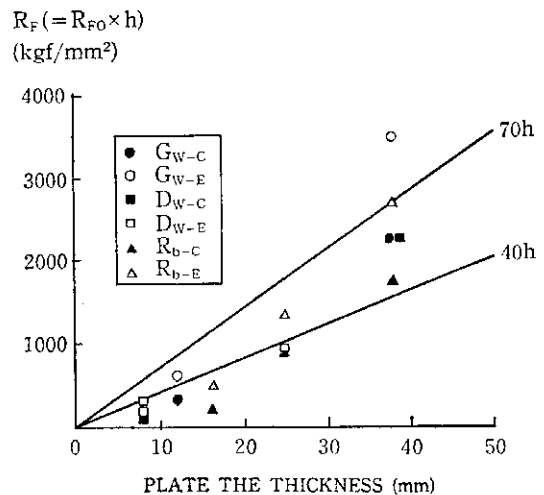


図-13 母板厚と拘束度 R_F との関係 (既応の成果との比較)

7. 考 察

本研究で扱ったすみ肉溶接部の R_{FO} は、6. で述べたように実際の溶接施工に反映させるためになんらかのパラメーターで表示しておくことが望ましい。それで R_{FO} は、母板とフランジの剛性が相互に影響するものと考

え、各断面ごとに、母板とフランジ厚に注目し、この幾何平均厚で表わせば、おおむね良好なとりまとめができることがわかった。

測定結果については、図-10~12で R_{F0} の実測値とF.E.M.による解析結果とが全般的におおむね一致するものと思われるが、ばらつきは各測定断面でのひずみや変位を測定する際、非常に狭い場所で行うので、実験誤差として現われた結果と考えられる。

また、 R_{F0} は各母板の断面形状や境界条件により、かつ溶接部が交差部か中間部かにより、その値が変わることがわかる。

例えば、フランジ厚、母板厚とも38 mmの場合、端部での R_{F0} の実測値をみると、主げたウェブ(ウェブ高1550または1563 mm)の G_{W-E} は表-6から80, 85 kgf/mm²・mm、またダイヤフラムウェブ(ウェブ高300 mm)の D_{W-E} は表-7から86, 90 kgf/mm²・mmで、リブ(リブ高200 mm)での R_{b-E} は表-7から60, 61 kgf/mm²・mmである。そこで、各々の R_{F0} の値を平均し D_{W-E} を基準として G_{W-E} や R_{b-E} との比 G_{W-E}/D_{W-E} および R_{b-E}/D_{W-E} をみると、それぞれ0.937, 0.687となる。このことから、主げたウェブとダイヤフラムウェブの R_{F0} はほぼ等しいが、リブでの R_{F0} はこれらウェブでの R_{F0} より約30%ほど小さい。したがって、この相違は母板の高さではなく、表-5に示したように母板の支持条件の差異によるものと推察される。

また、同じくフランジ厚、母板厚とも38 mmの場合、 R_{F0} の端部と中間部との比は、 G_{W-E}/G_{W-C} が1.48, D_{W-E}/D_{W-C} が1.60, R_{b-E}/R_{b-C} が1.40であり、端部での R_{F0} は、中間部の R_{F0} の1.40~1.60倍となる。

したがって、 R_{F0} は母板厚により一義的に定まらないことがわかる。次に本研究で得られた R_F 値をもとに、一例として、母板厚が38 mmの溶接で割れ防止のため溶接条件を検討すると次のようになる。

まず、(1)式の P_{CM} と H を標準的な値として、それぞれ0.228%, 2 cc/100 gとする。次に主げたウェブ、ダイヤフラムウェブ、リブでの最大の R_{F0} は、いずれも母板厚が38 mmの場合で、85, 90, 61 kgf/mm²・mmであるので、 R_F 値は(4)式から3240, 3420, 2318 kgf/mm²となる。この R_F 値を用い(1)式と図-1からそれぞれ T_{cr} を550, 650, 270 sec以上になるように予熱するか、また簡易法の(2), (3)式から求まる予熱温度 T を75°Cとして溶接すれば割れが発生しないことになる。

また、同様に本研究に使用した模型げたについての T_{cr} および必要な予熱温度は、次のようになる。

表-1から板厚38 mmでの P_{CM} は0.23%, 表-3から

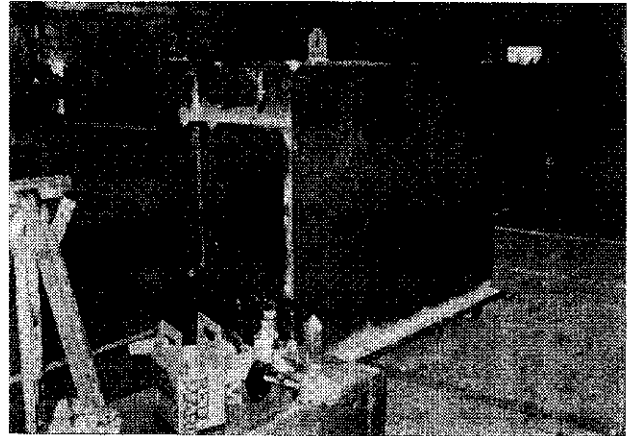


写真-3 カラーチェックによる深傷試験

H の最大値は1.74 cc/100 gとなるので、図-1から T_{cr} は各母板で600, 605, 240 secとなり、一方、(2), (3)式から予熱温度は73°Cとなる。

したがって、表-4でアーク到達から100°Cまで冷却する時間がいずれの計測位置においても1000 sec以上であり、また図-4にみられるように、予熱温度を100°Cとして施工管理したため、本模型には割れの発生がないと判断される。この検証にカラーチェック(写真-3)を行ったが、すべての溶接個所に割れの発生がないことが確認できた。

8. 結 論

本研究は、橋梁などの箱げた断面のすみ肉溶接による引張拘束度を求めるのに、まず拘束度係数を各種板厚の組合せからなる模型を用いて実測し、かつF.E.M.により算出した変位と溶接部付近の応力度から求めた拘束度係数とを比較したものである。

主な成果の要約は、以下のようになる。

(1) フランジとウェブまたはリブとのすみ肉溶接による R_{F0} は、図-10~12に示すようにフランジ厚と母板厚の幾何平均厚 t_{AV} で表わすことができる。

(2) 主げたウェブおよびダイヤフラムの溶接交差部、すなわち端部と中間部との R_{F0} の比は t_{AV} が小さいほど大きい。 t_{AV} が10~50 mmの範囲での主げたウェブで2.06~1.31, ダイヤフラムウェブで1.87~1.28となる。ただ、リブでは1.69~1.63で端部と中間部とで R_{F0} の比はほぼ一定である。

(3) また、表-6~8と図-10~12から、溶接部相互間の長さが200 mm程度以上になると、 R_{F0} は主げたウェブで40, ダイヤフラムウェブで37, リブで28 kgf/mm²・mmとなり、いずれも40 kgf/mm²・mmよりも大きくならない。

(4) 表-6~8から R_{T0} の実測値とF.E.M.による解析結果とは全般的に一致しており、図-9に示す程度のメッシュ分割や要素の境界条件から理論的に R_{T0} のおおよその値を知ることができる。

(5) 図-13に示すように、 t_{AV} が38mmの G_{W-E} の場合を除いて、通常使用される箱げた断面での引張拘束度は母板厚を h (mm)として、 $h < 20$ では $40h$ 以下、 $20 < h < 50$ で $40h$ から $70h$ の範囲であると推測される。

9. あとがき

本研究は、溶接構造物で比較的大きな拘束度が生ずると考えられる箱げた断面について、模型実験により得られた拘束度係数をもとに検討した。

拘束度係数は、母板の両面が仮付け溶接されたものを対象として、しかも母板の溶接による角変化を無視した引張拘束度の概念から求めた。

なお、本文で得られた拘束度係数は、開先の変位に含まれる母板やフランジの曲げ変形を微小なものとして取扱ったことと、本溶接時に仮付け溶接が溶融するため計測された値より小さくなるものと予想されるので、実際の箱げたの適用には注意しなければならない。

ただ、本文で述べた実験方法やF.E.M.による解析から、箱げたの仮付け溶接による拘束度の概要を把握することができた。

今後の課題として、簡便でしかも実用的な実験方法の改良、母板やフランジの溶接で板の角変化に起因する曲げ拘束、また溶接順序と拘束度との関係などと、さらに既応の研究との関連について研究を進めなければならないと考える。

参 考 文 献

- 1) 渡辺正紀, 佐藤邦彦: 溶接割れ試験体の拘束係数と拘束応力について, 溶接学会誌, 第33巻, 第7号, pp. 33-43, 1964.
- 2) 伊藤慶典, 別所 清: 高張力鋼の溶接割れ感受性指数について, 溶接学会誌, 第37巻, 第9号, pp. 55-63, 1968.
- 3) 伊藤慶典, 別所 清: 高張力鋼の溶接割れ感受性指数について(第2報) —溶接構造物への適用—, 溶接学会誌, 第38巻, 第10号, pp. 60-70, 1969.
- 4) 佐藤邦彦, 松井繁朋, 佐藤慶典, 別所 清: 鋼構造物の溶接割れ防止のための適正予熱条件の選定に関する研究(第1報) —局部予熱を行なった場合の溶接部の冷却過程—, 溶接学会誌, 第40巻, 第11号, pp. 41-51, 1971.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書, 同解説, I 共通編,

II 鋼橋編, 15, 3, 3, 昭和55年12月.

- 6) 日本溶接協会: 日本溶接協会規格, 溶接構造物用高張力鋼板の溶接割れ感受性組成に関する規格, WES 3002-1973, HPIS-B-101 A (1973), 昭和48年3月制定.
- 7) 土木学会, 本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会, 鋼材分科会: 本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書, 別冊4, 鋼上部構造用鋼板の所要性能, pp. 29-34, 昭和48年3月.
- 8) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会: 北海道における耐候性鋼材使用の道路橋の設計及び施工指針, 3章3, 2溶接, pp. 42-52, 昭和56年7月.
- 9) 仲 威雄: 溶接の収縮と亀裂, pp. 139, 小峰出版, 昭和25年.
- 10) 佐藤邦彦, 松井繁朋: 溶接継手の拘束応力とこれにともなう溶接割れの研究, 溶接学会誌, 第36巻, 第10号, pp. 38-51, 1967.
- 11) 日本鋼構造協会, 溶接割れ研究班: 鋼構造物における溶接割れ防止のための予熱条件の選定, JSSC誌, Vol. 8, No. 80, pp. 36-41, 1972. 8.
- 12) Working Group on Restraining Intensity Joint Committee of the Japan Welding Society (J.W.S.) and of the Society of Naval Architects of Japan (S.N.A.J.): Japanese Studies on Structural Restraint Severity in Relation to Weld Cracking (Preliminary Report), Welding in the World. Vol. 15, No. 7/8, pp. 156-161, 165-187, 1977.
- 13) Kunihiko Satoh, Yukio Ueda, Shigetomo Matsui: 1972-1973 Literature Survey on Welding Stresses and Strains in Japan, Transaction of JWRI Vol. 2, No. 10, pp. 127-133, 1973.
- 14) 佐藤邦彦, 上田幸雄, 木原 博: 溶接割れに関連する拘束応力, 歪の研究の最近の動向, 溶接学会誌, 第42巻, 第1号, pp. 57-72, 1973.
- 15) 松井繁朋: 溶接施工時の割れ防止対策, 溶接学会誌, 第44巻, 第7号, 溶接構造物の割れ防止と安全性に関するシンポジウム, pp. 12-20, 1975.
- 16) 寺尾貞一, 齋藤忠雄, 伊都祥富: すみ肉溶接と突合せ溶接の交叉継手に関する研究, 造船協会論文集, 第110号, pp. 455-463, 昭和36年11月.
- 17) 上田幸雄, 福田敬二, 金 裕哲, 古木良一: スリット溶接継手に生じる拘束応力, 拘束ひずみの一般的特性及び拘束度の力学的指標としての意義, 溶接学会誌, 第51巻, 第8号, pp. 18-25, 1982.
- 18) Shigetomo Matsui, Yuji Ohkuma, Hisao Hasegawa, Kunihiko Satoh, Michio Inagaki, Shigeo Akashi, Yoshikazu Kuriyama, Tomokazu Godai, Yoshiharu Ideguchi: Weld Cracking Susceptibility in Various Groove Shapes, IIW-Doc. IX-

1048-77, pp. 1-12, July, 1977.

- 19) Haruyoshi Suzuki, Nobutaka Yurioka: Prevention against Cold Cracking by the Hydrogen Accumulation Cracking Parameter PHA (1), IIW-Doc. IX-1232-82, pp. 1-7, Apr. 1982.
- 20) Haruyoshi Suzuki: Cold Cracking and its Prevention in Steel Welding (Report 2 Root

Cracking), Transaction of the Japan Welding Society, Vol. 10, No. 2, pp. 10-19, Oct. 1979.

- 21) 鈴木春義: 溶接入熱と拘束度を考慮した割れ指数 P_H , 溶接学会誌, 第50巻, 第5号, pp. 50-54, 1981.
- 22) 松井繁朋, 寺崎俊夫, 阪口 勝, 高木乙磨: 拘束応力におよぼす溶接条件の影響, 溶接学会誌, 第52巻, 第1号, pp. 49-55, 1983.

*

*

*