

箱桁の隅肉溶接部付近の拘束度に関する研究

STUDY ON INTENSITY OF RESTRAINT NEAR THE FILLET
WELDED JOINTS OF A BOX GIRDER

井藤昭夫*・渡辺 昇**

By Akio ITOH and Noboru WATANABE

Using a model box girder, this study, attempts to obtain data on welding strengths by measuring the restraint intensity of one of the significant elements that suffer from cold cracking on steel structures. The study also employs an analysis with the finite element method to compare with the measured values. The results can be summarized as follows : 1) The strength of fillet welded joints can be expressed by the geometric average values of thicknesses among the flange, web, and rib of the main girder. 2) Although the restraint intensity varies with the boundary conditions of the steel plates in the box girder and with the measuring positions, it is shown that the restraint intensity does not exceed 70 times the thicknesses of normally used plates.

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、溶接金属と溶接熱影響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。

この低温割れ発生の原因の重要な因子としては、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)}。

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)~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当たりの力の大きさ」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)}など。

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、本文では箱桁の主桁フランジとウェブ、主桁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、冷却する時間が式(1)の P_w で定まるFig.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。また簡易法として式(2)の予熱温度 T が示されている。

$$P_w = P_{cw} + H/60 + K/40000 \dots \dots \dots (1)$$

* 正会員 専修大学北海道短期大学教授 土木科
(〒079-01 美瑛市字美瑛1610-1)

** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

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 R_F と表示されkgf/mm²の次元をもつ。以下 R_F 値とよぶ)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 (°C)は次式で示される。

$$T = 1440 \cdot P_c - 392 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 P_c は板厚(mm) t として次式で示されている。

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

R_F 値あるいはその測定法が種々提案されており^{7), 8), 12)~16)}など 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、10 h , 40 h , 70 h 程度とされている。

本文では両面仮付け隅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度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} (kgf/mm²・mm)として、次式で表わされる。

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

ここに、 h は母板(主桁ウェブ、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、開先に直接荷重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 とすれば次の式(5)、(6)から式(7)が成立する^{10), 14), 17)}。

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

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

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

この R_F 値を用いて式(1)の P_w を求めFig.1から溶

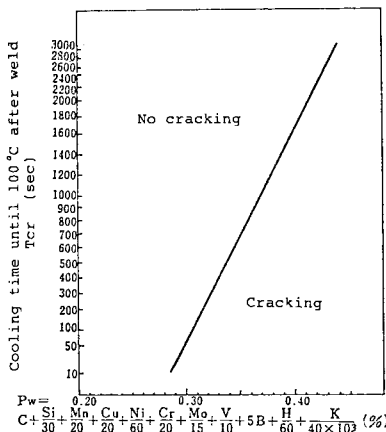


Fig.1 Relation between P_w and cooling time until 100°C after weld.

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式(1)、(2)、Fig.1による方法が簡便といえよう。

3. 模型による箱桁の拘束度係数の測定

本研究では、数種の鋼板厚(SM 58 Q)の組合せによる模型桁を使用し、 R_{F0} 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。測定には各測定位置で取付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 はストレインゲージ、 δ はグリップ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。Fig.2,3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Fig.4に各断面を示す。

Fig.2,3に示すG,D,Rの記号はそれぞれ主桁ウェブ、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。

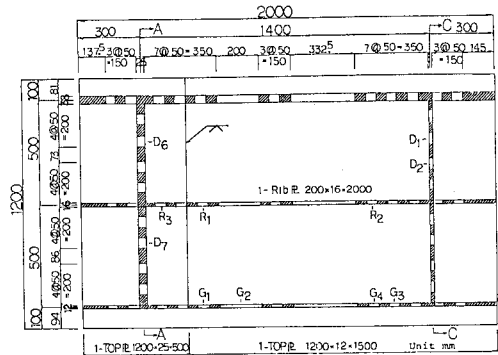


Fig.2 Measurement points of restraint coeff. R_{F0} at upper flange plate of model girder.

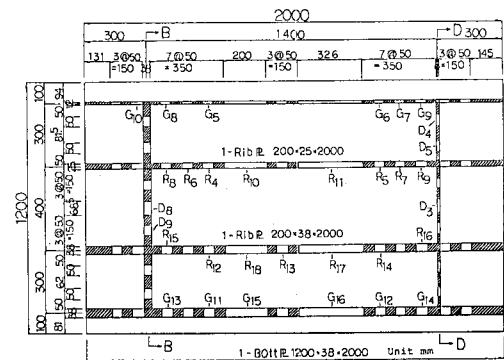


Fig.3 Measurement points of restraint coeff. R_{F0} at lower flange plate of model girder.

Table 2 Observed and calculated restraint coeff. R_{F0} between flange and web plate.

MEASUREMENT POINTS		$t_{GW} \times t_F$ (mm)		t_{AV} (mm)	d (mm/10 ³ kg)		σ_c (kg/mm ² /10 ³ kg)		R_{F0} (kg/mm ² mm)		R_{FO} O.B.
E	C	CL			CAL.	O.B.	CAL.	O.B.	CAL.	O.B.	R _{FO} CAL.
G1 G2 G3	*	Ga	12 × 12	12.00	0.07293	0.0852	0.90972	0.694	12	8	0.66
					0.07293	0.0812	0.90972	0.756	12	9	0.75
					0.03970	0.0714	0.93381	1.124	13	15	1.15
G5 G6 G7	*	Ga	12 × 38	21.35	0.01683	0.0203	0.44015	0.472	26	23	0.88
					0.01683	0.0175	0.44015	0.438	26	25	0.96
					0.01577	0.0154	0.45242	0.472	28	30	0.92
G9 G10	*	Ga	12 × 38	21.35	0.00856	0.0105	0.32899	0.483	50	46	1.08
					0.00656	0.0080	0.32899	0.416	50	54	1.08
					0.00721	0.0130	0.34741	0.462	48	35	0.70
G11 G12	*	Ga	38 × 38	38.00	0.00378	0.0035	0.0942	0.216	58	61	1.05
					0.00378	0.0042	0.2254	0.210	58	50	0.86
					0.00206	0.0021	0.18776	0.178	91	80	0.88
G13 G14	*	Ga	38 × 38	38.00	0.00887	0.0084	0.24117	0.252	29	30	1.03
					0.00919	0.0112	0.236	0.252	29	21	0.80
					0.00907	0.0117	0.14463	0.252	29	21	0.80
G15 G16	*	Ga	50 × 50	50.00	0.00117	0.00117	0.14463	0.12049	69	102	1.02
					0.00117	0.00117	0.14463	0.12049	69	102	1.02
					0.00455	0.00455	0.18237	0.18237	40	40	1.02

Table 3 Observed and calculated restraint coeff. R_{F0} between flange and diaphragm web plate.

MEASUREMENT POINTS		$t_{DW} \times t_F$ (mm)		t_{AV} (mm)	d (mm/10 ³ kg)		σ_c (kg/mm ² /10 ³ kg)		R_{F0} (kg/mm ² mm)		R_{FO} O.B.
E	C	CL			CAL.	O.B.	CAL.	O.B.	CAL.	O.B.	R _{FO} CAL.
D1 D2	*	D3	8 × 12	8.79	0.16075	0.1414	1.18720	1.040	7	7	1.00
					0.16075	0.1372	1.18720	1.660	7	12	1.71
D4 D5	*	D3	10 × 10	10.00	0.30140	0.30140	1.38500	1.38500	4	4	1.00
					0.30140	0.30140	1.38500	1.38500	4	4	1.00
D6 D7	*	D3	8 × 38	17.43	0.05255	0.05255	0.50330	0.50330	18	13	0.72
					0.05255	0.05255	0.50330	0.50330	18	13	0.72
D8 D9	*	D3	8 × 38	17.43	0.06060	0.06060	0.59119	0.59119	9	9	1.00
					0.06060	0.06060	0.59119	0.59119	9	9	1.00
D10 D11	*	D3	25 × 25	25.00	0.01113	0.01113	0.40330	0.470	36	28	0.78
					0.01113	0.01113	0.40330	0.610	36	39	1.08
D12 D13	*	D3	25 × 25	25.00	0.02710	0.02710	0.41709	0.41709	15	15	1.00
					0.02710	0.02710	0.41709	0.41709	15	15	1.00
D14 D15	*	D3	38 × 38	38.00	0.03332	0.03332	0.19810	0.231	59	55	0.93
					0.03332	0.03332	0.19810	0.231	59	55	0.93
D16 D17	*	D3	38 × 38	38.00	0.00228	0.00228	0.21006	0.252	92	90	0.98
					0.00228	0.00228	0.21006	0.199	92	85	0.93
D18 D19	*	D3	38 × 38	38.00	0.00826	0.00826	0.26893	0.26893	29	29	1.00
					0.00826	0.00826	0.26893	0.26893	29	29	1.00
D20 D21	*	D3	50 × 50	50.00	0.00220	0.00220	0.14840	0.14840	67	67	1.00
					0.00220	0.00220	0.14840	0.14840	67	67	1.00
D22 D23	*	D3	50 × 50	50.00	0.00126	0.00126	0.12605	0.12605	100	100	1.00
					0.00126	0.00126	0.12605	0.12605	100	100	1.00
D24 D25	*	D3	50 × 50	50.00	0.00473	0.00473	0.17967	0.17967	37	37	1.00
					0.00473	0.00473	0.17967	0.17967	37	37	1.00

Table 4 Observed and calculated restraint coeff. R_{F0} between flange and rib plate.

MEASUREMENT POINTS		$t_R \times t_F$ (mm)		t_{AV} (mm)	d (mm/10 ³ kg)		σ_c (kg/mm ² /10 ³ kg)		R_{F0} (kg/mm ² mm)		R_{FO} O.B.
E	C	CL			CAL.	O.B.	CAL.	O.B.	CAL.	O.B.	R _{FO} CAL.
R1 R2	*	R3	10 × 10	10.00	0.09099	0.09099	1.14452	1.14452	14	14	1.00
					0.09099	0.09099	1.14452	1.14452	14	14	1.00
R3 R4	*	R3	16 × 12	13.85	0.07114	0.0686	0.72127	0.894	10	13	1.30
					0.07114	0.09224	0.72127	1.068	10	11	1.10
R5 R6	*	R3	16 × 25	20.00	0.17090	0.17090	0.68640	0.68640	4	35	1.13
					0.17090	0.17090	0.68640	0.68640	4	35	1.13
R7 R8	*	R3	25 × 38	30.82	0.01228	0.0194	0.39230	0.554	31	28	0.82
					0.01228	0.0063	0.25527	0.178	34	28	0.82
R9 R10	*	R3	25 × 38	30.82	0.00750	0.0073	0.25527	0.210	34	28	0.82
					0.00750	0.0063	0.25527	0.195	38	30	0.78
R11 R12	*	R3	38 × 38	38.00	0.00834	0.0063	0.26548	0.195	38	34	0.89
					0.00834	0.0056	0.26548	0.145	38	34	0.89
R13 R14	*	R3	38 × 38	38.00	0.00413	0.0042	0.22466	0.259	54	61	1.07
					0.00413	0.0042	0.22466	0.200	54	58	1.03
R15 R16	*	R3	38 × 38	38.00	0.01355	0.0126	0.23055	0.195	17	15	0.88
					0.01355	0.0126	0.19758	0.247	13	13	1.00
R17 R18	*	R3	38 × 38	38.00	0.00466	0.0046	0.19670	0.226	49	49	1.07
					0.00466	0.0042	0.200	0.147	42	35	0.83
R19 R20	*	R3	50 × 50	50.00	0.00241	0.00241	0.15944	0.132	21	16	0.76
					0.00241	0.00241	0.15944	0.132	21	16	0.76
R21 R22	*	R3	50 × 50	50.00	0.00181	0.00181	0.12673	0.12673	59	24	1.04
					0.00181	0.00181	0.12673	0.12673	59	24	1.04
R23 R24	*	R3	50 × 50	50.00	0.00493	0.00493	0.15098	0.15098	28	28	1.00
					0.00493	0.00493	0.15098	0.15098	28	28	1.00

箱桁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_{F0} を把握するため解析に加えた断面値を示す。

また Fig. 10 は本研究の実験から得られた R_{F0} の値を式 (4) に代入して求めた R_F 値と、既往の研究の成果¹⁾である大拘束度で $R_F=70 h$ 、中拘束度で $R_F=40 h$ 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_{CW} 、 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。

Fig. 7~9 で記号の G_w 、 D_w 、 R_h はそれぞれ母板が主桁ウェブ、ダイヤフラムウェブ、リブの R_{F0} を表わし、

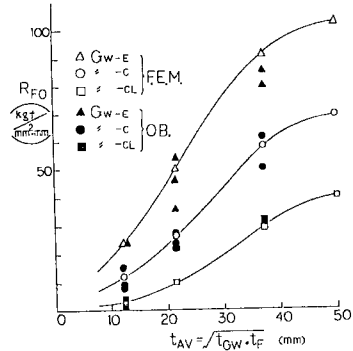


Fig. 7 Restraint coeff. R_{F0} between flange plate and web plate.

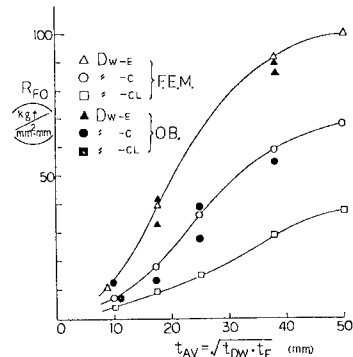


Fig. 8 Restraint coeff. R_{F0} between flange plate and diaphragm web plate.

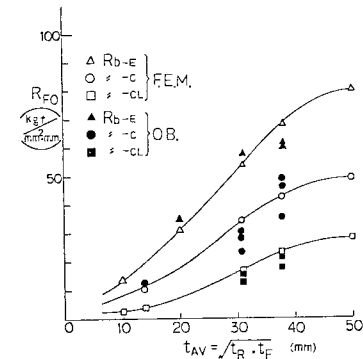


Fig. 9 Restraint coeff. R_{F0} between flange plate and rib plate.

添字の E, C, CL は 3. で述べた端部、中間部、および Fig. 6 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 Fig. 10 には CL に相当するものは省略した。

6. 考 察

本研究で扱った隅肉溶接部の R_{F0} は、5. 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バラ

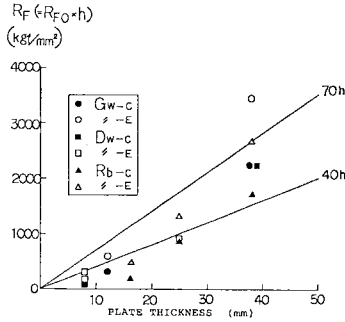


Fig. 10 Comparison of restraint intensity.

メーターで表示しておくことが望ましい。それで R_{F0} 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、これ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、Fig. 7~9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。

たとえば、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、主桁ウェブ（ウェブ高 1550 または 1563 mm）の G_{w-E} は Table 2 から 80, 85 $\text{kgf/mm}^2 \cdot \text{mm}$ 、またダイヤフラムウェブ（ウェブ高 300 mm）の D_{w-E} は Table 3 から 86, 90 $\text{kgf/mm}^2 \cdot \text{mm}$ で、リブ（リブ高 200 mm）での R_{b-E} は Table 3 から 60, 61 $\text{kgf/mm}^2 \cdot \text{mm}$ である。そこでこの 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、それぞれの 0.937, 0.687 となる。このことから主桁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 Table 1 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。

まず式 (1) 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。次に主桁ウェブ、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 $\text{kgf/mm}^2 \cdot \text{mm}$ であるので R_F 値は式 (4) から 3240, 3420, 2318 kgf/mm^2 となる。この R_F 値を用い式 (1) と Fig. 1 からそれぞれ T_{Cr} を 550, 650, 270 s 以上になるように予熱するか、また簡易法の式 (2), (3) 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。

7. 結 論

本研究は、橋梁などの箱桁断面の隅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成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隅肉溶接による R_{F0} は、Fig. 7~9 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) 主桁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 の範囲での主桁ウェブで 2.06~1.31, ダイヤフラムウェブで 1.87~1.28 となる。ただしリブでは 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 Table 2~4, Fig. 7~9 から溶接部相互間の長さが 200 mm 程度以上になると、 R_{F0} は主桁ウェブで 40, ダイヤフラムウェブで 37, リブで 28 $\text{kgf/mm}^2 \cdot \text{mm}$ となり、いずれも 40 $\text{kgf/mm}^2 \cdot \text{mm}$ よりも大きくならない。

(4) Table 2~4 から R_{F0} 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、Fig. 6 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_{F0} のおよその値を知ることができる。

(5) Fig. 10 に示すように t_{AV} が 38 mm の G_{w-E} の場合を除いて、通常使用される箱桁断面での引張拘束度は、母板厚を h (mm) として、 $h < 20$ では 40 h 以下、 $20 < h < 50$ で 40 h から 70 h の範囲であると推測される。

8. 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桁断面について、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り扱ったことと、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桁へ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. による解析から箱桁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、さらに既往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・伊藤慶典・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裸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・斉藤忠雄・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，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諸条件の影響，溶接学会誌，第52巻，第1号，pp. 49~55，1983.

(1984. 5. 17・受付)