

溶接によって拘束応力を受ける鋼構造 継手の施工試験について (石狩河口橋主径間部)

札幌開発建設部 技術長 (正) 小西 輝 久
帯広開発建設部 道路課長 (正) 〇 高 橋 陽 一

ま え が き

最近の鋼構造は急速に大型化しており、その構造解析も平面(2次元)解析から立体(3次元)解析の領域に入ってきている。さらに使用鋼材も、溶接構造用圧延鋼材、溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材等の範囲が広がり、最近では橋梁上部工でも80キロ鋼で板厚75mmの使用例も出てきている。(例、南港連絡橋)

また溶接継手も複雑になる傾向があり、鋼構造の設計に当っては、上記の他に鋼材の溶接による材料的变化、溶接ひずみ、拘束応力による溶接ワレ等の検討が必要で、いわゆる4次元的知识が不可欠になってきた。

とくに箱断面構造は各辺の部材の自由度が小さいために、溶接の熱影響によって溶接金属が凝固する過程の中で拘束応力が発生し、弾性変形あるいは塑性変形によってこれを吸収することが困難となり熱影響部や溶着金属の部分に拘束ワレが生じることになる。しかも箱断面構造はすべてが一次部材であるために、溶接部の微小なキレシも重大な事故につながることになる。この拘束応力は一般に構造設計の段階では、実応力に加算されていないものである。

石狩河口橋主径間部では、ケーブルアンカービームと主桁ウェブとの取合い部は、当初「はめ込み溶接」と計画したが、拘束応力が問題となる部分の実物大の模型による溶接施工試験を行なった結果、当初の設計を根本的に変更することになった。ここでは、その溶接施工試験の結果について報告する。

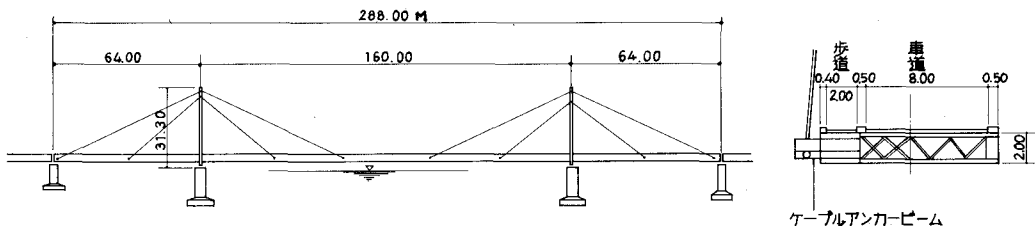


図-1 石狩河口橋主径間部

1. 溶接部の拘束ワレの原因

1.1 低温ワレ

一般にサブマージアーク溶接の欠陥は、熱影響部の母材ワレ、溶着金属層の梨形ワレなどのように、凝固直近で発生する「高温ワレ」(Hot Cracking)と、溶接熱影響による硬化部に発生するビード下割れ、ルート割れなどのように、約200℃以下に冷却される途中で発生する「低温ワレ」(Cold Cracking)に大別することができる。とくに、手溶接による低温ワレの数が圧倒的に多い。

この低温ワレの主要な発生原因は次の3点であることが明らかにされている。

(1) 溶接部の冶金組織の変化

高張力鋼などのように炭素当量(Ceq)の多い鋼材は、溶接部のワレ感受性が高く、入熱量が高過ぎると冷却の途中でベイライトおよびフェライトが析出して著しく靱性が低下することがある。とくにリムド鋼は溶着金属中に硫黄(S)の偏析が多くあらわれサルファクラックが生じやすい。

(2) 溶接金属中の拡散性水素の固溶

溶接施工時に溶接金属中の Gas Packet や微小空間中に水素が分子状に固溶されるものでその量は主として溶接棒の被覆材中の水分量に影響される。鋼材中の水素は一定応力下においておくれ破壊 (delayed failure) の原因になるものである。

(3) 溶接部の拘束応力

自由な変形ができない部材の溶接金属とその周辺の母材は、溶接熱による膨張収縮を妨げられ大きな拘束応力をうける。拘束応力には、鋼材内部の場所によって熱サイクルの冷却過程が異なるために生ずる内部拘束と、部材継手によって自由な変形が妨げられるために生ずる外部拘束とに分けられる。拘束ワレの大きな原因は外部拘束が支配的である。

これら3項目の原因のうち、拘束(とくに外部拘束)による収縮引張応力の発生が、溶接ワレの最も多い原因である。

1.2 拘束応力

図-2 のように両端を固定した鋼材と突合せ溶接とした場合、部材各部に大きな拘束応力が生じる。

この拘束の度合の表現方法として、拘束係数 k ($\text{kg/mm}^2 \cdot \text{mm}$) および拘束度 K ($\text{kg/mm}^2 \cdot \text{mm}$) がある。力は「開先間隔と1mm短縮するときに母材に生じる応力」であり、 K は「開先間隔と1mm短縮するときに要する溶接長1mm当りの力」である。

いま図-3(A) のようなスリット溶接の拘束度について考える。図-3(B) のように短い溶接がスリット中に施工される部分溶接(l)の場合、最終的な拘束応力と収縮は溶接部に沿って一様であると予想される。このとき拘束度 K は次のようになる。

$$K = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{Eh}{L} \cdot \frac{l}{L} \cdot \frac{1}{\phi} \quad \text{----- (1)}$$

$$\phi = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta \cdot \sin n\theta d\theta \right\}^2 \quad \text{----- (2)}$$

$$X_1 = \frac{L}{2} \cos \theta_1, \quad X_2 = \frac{L}{2} \cos \theta_2 \quad \text{----- (3)}$$

スリット全長を溶接した場合 ($l \rightarrow L$)

$$K = \frac{\pi \cdot E \cdot t}{4L \cdot A\theta} \quad \text{----- (4)}$$

$$A\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_n}{n} \sin n\theta \quad \text{----- (5)}$$

$$P_n = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta \cdot \sin n\theta d\theta \quad \text{----- (6)}$$

ここに E : ヤング係数 (kg/mm^2), t : 板厚、である。また拘束度と溶接部の拘束応力 σ_w との間に次のような関係がある。

$$\sigma_w = \frac{K \cdot S}{h_w} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad h_w: \text{のど厚}, S: \text{入熱量と溶着金属の凝固温度による係数} \quad \text{----- (7)}$$

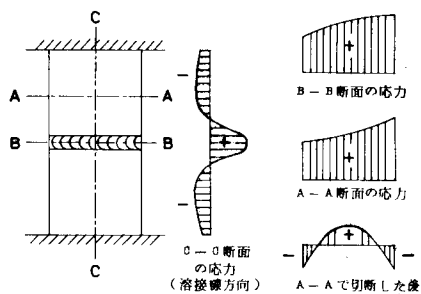
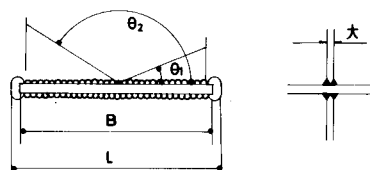
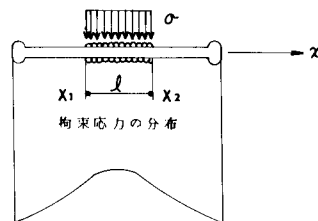


図-2 外部拘束された突合せ溶接の拘束応力



(A) スリット全長溶接の場合 ($l \rightarrow L$)



(B) スリット部分溶接の場合 (l)

図-3 スリット溶接の拘束度

2. 石狩河口橋主径間部ケーブルアンカービーム

2.1 ケーブルアンカービームの設計

石狩河口橋主径間部は図-1に示すような3径間連続斜張橋(64.00m + 160.00m + 64.00m)であるが、ケーブルアンカービームは最大442.8tのケーブル張力を受けてショートビームとしての曲げ、軸力、せん断力を生じる一方、取合い部の主桁の方もアンカービームに直角方向の曲げ、軸力、せん断力を生じて3次元的に極めて複雑な応力状態となる。その取合い部の構造を図-4に示す。

この取合い部の継手構造として当初は、アンカービームの引張フランジが主桁ウェブのスリットを貫通し、この部分を「はめ込み溶接」を行なう設計であった。

しかし本橋はウェブ高の低い($H = 2.00m$)扁平な鋼床版単箱断面桁であり、アンカービーム取付部は特に溶接による拘束度が大きいと考えられるヶ所であった。

このヶ所の拘束度 K を(4)式によって計算した結果を図-5に示す。 K の最大値は638 $Kg/mm \cdot mm$ であり、一般にSM50Y材は $t = 32mm$ で2パス溶接で $K = 1000 Kg/mm \cdot mm$ まで十分安全と云われていたが、後述のように溶接試験の結果貫通性にワレが発生した。

2.2 主桁との取合い部の溶接施工試験の内容

この試験はM社、Y社の両工場において材質、開先形状、溶接順序を異にして行なわれた。

試験の内容は図-7に示すように6項目にわたって実施した。模型桁に使用した材料の性質を表-1に示す。

使用した溶接棒は、Y工場では⑤16 L H(極低水素系 $\phi 5$)、M工場ではLB52(低水素系 $\phi 4$)、LB52A(極低水素系 $\phi 4$)、LB1-52H(同)である。板厚が厚いために、開先形状は最も工夫を要するところであるが、M工場の場合の開先形状と溶接層数を図-6に、そのマクロ写真を写真-2に示す。

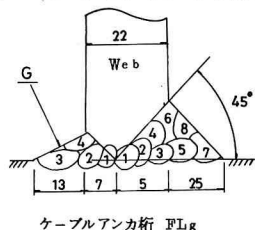


図-6 溶接層数

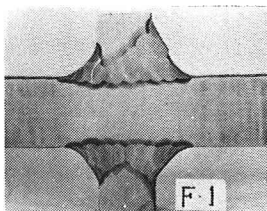


写真-2 マクロ写真

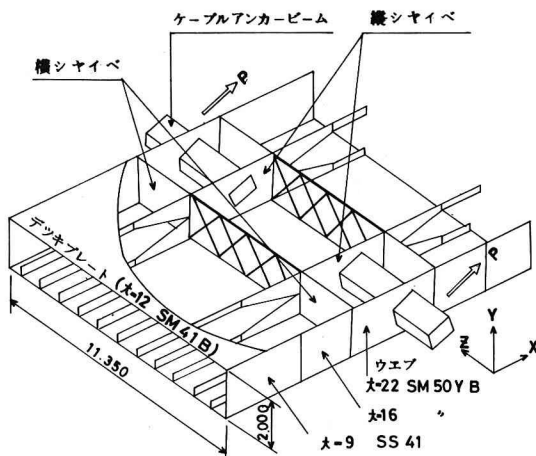


図-4 主桁とケーブルアンカービームの取合部

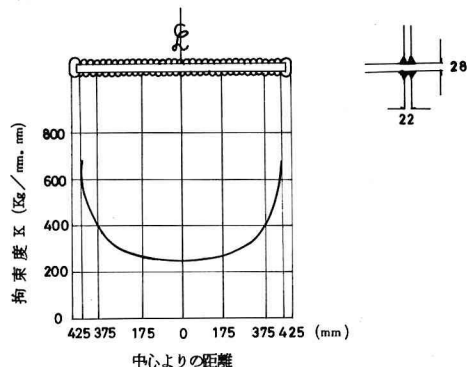


図-5 石狩河口橋スリット溶接部の拘束度



写真-1 石狩河口橋主径間部

表-1 溶接試験用鋼材

工場	材質	厚	Y. P	T. S	E. L	Ceq	衝撃値	摘要
		mm	Kg/mm^2	Kg/mm^2	%			
Y	SM50YB	28	38	54	30	0.39		FLg
	SM50B	22	37	56	25	0.43		Web
M	SM50A	28	37	56	27	0.42	$(-10^\circ C)$ 3.0	FLg
	SM50A	22	38	54	27	0.39		Web

2.3 溶接施工試験の結果

2.3.1 拘束ワレの検査

スリット部の溶接に当っては、ルートワレの防止に特に注意を払い、溶接一層ごとにワレの発生を検査することとした。ワレの検査には磁粉探傷法を多用した。溶接施工中の状況を写真-3に、磁粉探傷検査の状況を写真-4に示す。

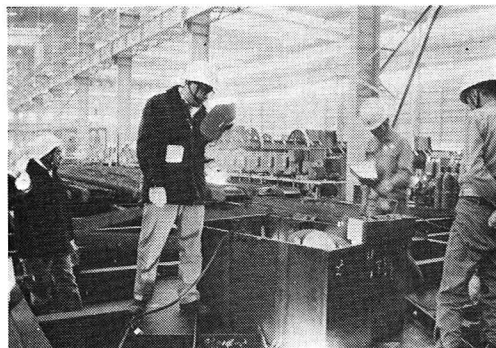


写真-3 溶接試験術の施工

溶接作業中にワレは発見できなかったが、ガウジングによって、溶接の趾端部に拘束ひずみ過大によるトウワレがあることが分った。

特にM工場のUフランジの場合は全溶接終了後16



時間後に急に成長したもので、写真-5に示すように貫通部材の熱影響部附近が板厚方向にハクリされるようにワレが進行しているのが良く分る。

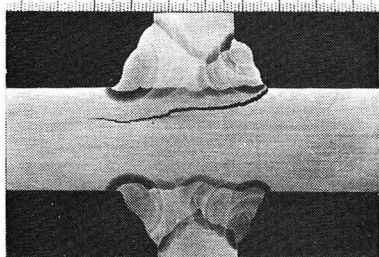


写真-5 進行した拘束ワレ

	Y 工場	M 工場
試験術 (側面)		
試験術 (断面)	外側 BFlg SM50YB t=28 Web SM50B t=22 AFlg SM50YB t=28 2000 (height), 16 (flange), 648 (web), 390 (bottom flange)	外側 UFlg SM50A t=28 Web SM50A t=22 LFlg SM50A t=28 1900 (height), 16 (flange), 484 (web), 484 (bottom flange)
貫通部溶接順序	内 1 22 外 3 内 5 外 6 2 4 7 8 AF1g BF1g 2 (t=28)	内 2 外 1 内 6 外 5 4 3 8 7 LF1g UF1g 4 (t=18)
引張試験 JIS Z 3121		
型曲げ試験		Y 社と同一寸法 JIS Z 3122
自由曲げ試験		
衝撃試験	試験温度 $-10^{\circ} -20^{\circ} -30^{\circ} -40^{\circ} \text{C}$	試験温度 $-10^{\circ} -20^{\circ} -30^{\circ} -40^{\circ} \text{C}$
疲労試験	応力振巾 200~1350 Kg/cm^2	0 ~ 1300 Kg/cm^2
拘束ワレ検査	ラミネーションチツク 磁粉探傷 マクロ写真	磁粉探傷 毛管浸透検査 サルファーチエツク マクロ写真 ミクロ写真 カタサ分布測定

図-7 拘束部溶接試験内容 (石狩河口橋)

この部分のサルファプリントをとったのが写真-6である。とくにSが偏析しているとは考えられない。

写真-7は、このワレをガウジングののち再溶接したマクロ写真である。熱影響の範囲が相当深部に入り込んでいるのが分る。

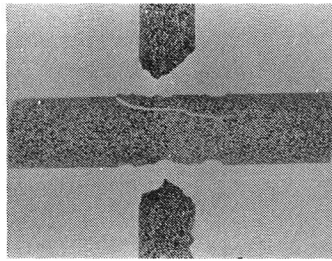


写真-6 サルファプリント

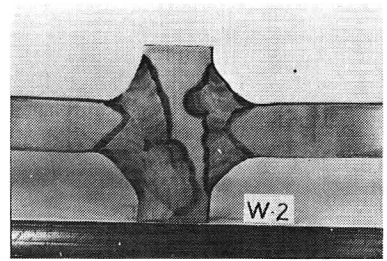


写真-7 ガウジング後再溶接

2.3.2 溶接部のミクロ写真

写真-8 (A) は貫通部材 (SM50A) の母材、(B) は同じ部材の溶接境界 (ボンド) 部のミクロ写真 (X100, M1工場) である。

鋼材は溶接による熱影響をうけると冶金的に性質が全く異質のものに変化することがよく分る。

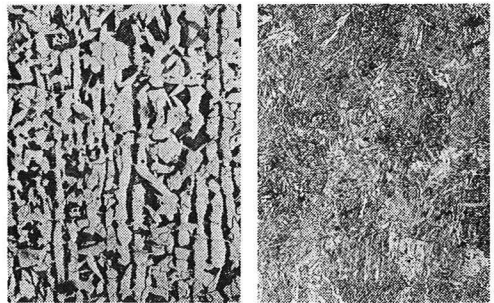


写真-8 溶接部のミクロ写真 (SM50A) 100x
(A) 母材 (B) 溶接熱影響部

2.3.3 溶接部の引張試験

貫通部材のロール直角方向の引張試験では強度的に母材の規格 (SM50B $\sigma_b > 50 \text{ kg/mm}^2$, Y工場) を満足して (A) 母材 (B) 溶接熱影響部

はいるが、いずれも貫通部材の部分で破断している。しかも写真-9に示すように、この場合しぼりがほとんどなく、したがってのびも約10%程度と極端に小さい。

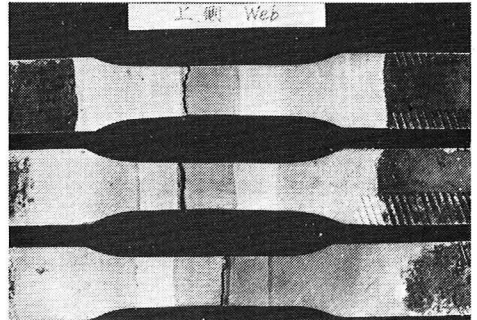


写真-9 溶接部の引張試験 (SM50YB)

2.3.4 溶接部の型曲げ試験

型曲げ試験の結果では、貫通部材のロール方向の試験片ではいずれも破断していないが、板厚方向の試験では両工場とも全て浅い角度で破断した。破断時の曲げ角度は $140^\circ \sim 156^\circ$ (平均 147°) であり、破断時の表面のびは平均11%であった。(母材ののびは約30%である) 試験片の状況を写真-10に示す。

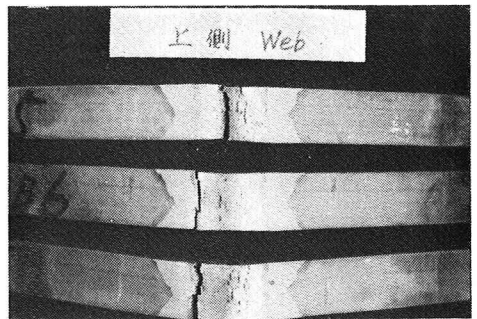


写真-10 溶接部の型曲げ試験 (SM50A)

溶接部の板厚方向はこのように靱性が小さいので、これに強い拘束応力が切らいていると金属組織中の小さい欠陥でも大きなワレに成長する可能性は十分にあるのでこのような継手構造はできるだけ避けるべきである。

2.3.5 溶接部の自由曲げ試験

自由曲げ試験でも、上記の型曲げ試験の結果と同じように、貫通部材のロール方向の試験片では 30° (内側半径 = 50mm) まで曲げてみても小さなキズが発生するだけで破断に至らないが、板厚方向の試験片では両工場とも全て破断した。曲げ角度はSM50A材で 38° , SM50B材で 70° (内半径 = 104mm) であった。試験片の状況を写真-11に示す。

2. 3. 6 溶接部の衝撃試験

溶接部の耐衝撃性は母材の性質の影響を大きく受ける。一般的な溶接入熱量のもとでは、耐衝撃性の高い母材の溶着金属、熱影響部ともに高い耐衝撃性を示すのがふつうである。また、溶接金属および熱影響部の耐衝撃性は試験温度によって敏感な影響を受けることが知られている。ここでは -10°C から -40°C までの吸収エネルギーを測定した。試験の結果を図-8に示す。

図にはSM50A材の母材の各温度における吸収エネルギーも図示してあるが、熱影響部は各温度とも母材より一様に約 $1.0\text{Kg}\cdot\text{m}$ 減することが分る。

また板厚方向の衝撃値は低温時に急速に低下する傾向がある。然し架橋地点の最低気温は -30°C と考えると、SM50YB以上の材料を使用すれば基準値 $2.8\text{Kg}\cdot\text{m}$ を確保できる。実橋では貫通部材にSM53Bを使用し、最終的にリベット継手構造とした。

M1026 石狩河口橋
溶接実験桁

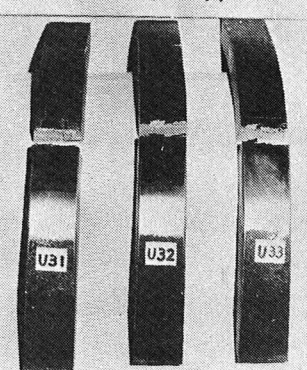


写真-11 溶接部の自由曲げ試験
(SM50A)

2. 3. 7 溶接部の疲労試験

疲労試験の応力振巾はM工場では $0 \sim 1300\text{kg}/\text{cm}^2$ 、Y工場では $20\text{kg}/\text{cm}^2 \sim 1350\text{kg}/\text{cm}^2$ で 2.0×10^6 回を目標に試験を行なった。

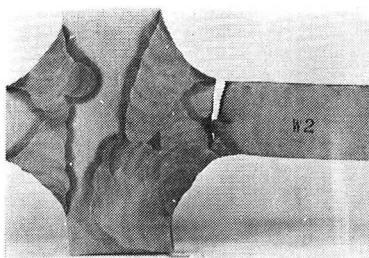


写真-12 疲労試験片(SM50A)

この試験ではSM50YBの方は破断しなかったが、SM50Aのうち、板厚方向に载荷した試験片が 1.3×10^6 回で、溶接の始末附近からワレが生じ破断した。この試験片は、当初の拘束ワレを補修したもので他の試験片より熱サイクルを多く受けているものである。破断後の試験片形状を写真-12に示す。

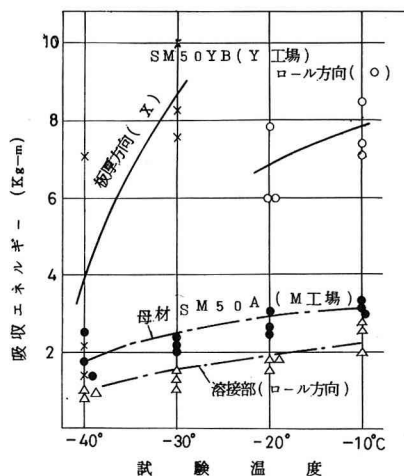


図-8 溶接部衝撃試験

3. ケーブルアンカービーム取合い部の最終設計

以上の溶接試験の結果、当初設計のケーブルアンカービームの引張フランジを主桁ウェブに「はめ込み溶接」する方法は極めて重大な問題があることが分った。とくに、斜張橋のケーブルアンカービームは大きな繰り返し荷重を常時受ける主要な部材であるので、写真-13に示すように、応力分散リブをもつリベット継手構造に設計変更を行なった。

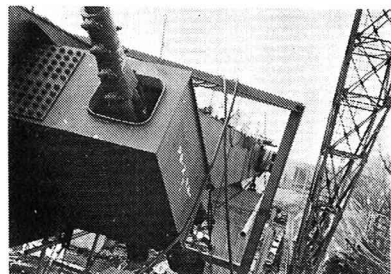


写真-13 ケーブルアンカービーム

むすび

最近の鋼構造物の継手構造はますます複雑化する傾向があり、溶接による拘束ワレに関する配慮が一層要求されることになる。しかし現行の示方書、施工指針では溶接部については冶金学的な配慮と、松散性水素の面からワレを論じているが拘束ワレに関する規定がないため、鋼構造物の設計に当ってこの点に特に注意すべきである。参考文献 高橋、新山「溶接による拘束応力を受ける鋼構造継手の施工について」1973.2 開発局研究会