

大阪大学工学部 正員 小松定夫  
 大阪大学工学部 学生員 金田典夫  
 阪神高速道路公団 正員 吉川 紀  
 日立造船(株)技術研究所 正員 牛尾正之 正員 〇植田利夫

**1. まえがき** 橋梁の主要圧縮部材に高張力鋼あるいは超高張力鋼が採用される気運にある。わが国では南港連絡橋の上下弦材にはじめて、HT60、HT80が本格的に利用された。その部材断面は、1本の補剛材をもつ板要素からなる箱形式となっている。このような溶接集成された板要素の座屈強度を低下させる主要な不完全因子は溶接残留応力である。この溶接残留応力については、これまで多くの研究が行われてきた。しかし、その大半は軟鋼に対するもので、高張力鋼に対しては極めて少ない。しかも、組立材の残留応力は単一板の溶接ビードによる分布形より推定できるという考え方で多くの実験が行われている。ところが、必ずしも補剛板のような部材寸法比に対して明確にされていないのが実情である。そこで、南港連絡橋上部工設計基準あるいは道路橋示方書(1971)に準じて設計されたHT60、HT80材の供試体を製作し、残留応力の分布形および大きさを実験的に把握した。さらに、実験結果を、軟鋼に対してMoxham等が提案する圧縮残留応力の経験式と比較検討しながら、残留応力を簡単に推定できる方法を追求した。

**2. 測定要領** 従来と同様単一板の溶接ビードから推定することを目的として、表1に示すような各断面について長さ $l=1250\text{mm}$ の供試体を製作し、 $\frac{l}{4}$ 、 $\frac{l}{2}$ および $\frac{3l}{4}$ 点を中心に幅140mmを測定の対象にした。応力解放は機械的分割法によった。分割要領の一例を図1に示す。測定は解放前後のひずみをコンタクトゲージ(標点距離100mm)で板両面の値を読み取り、これらを平均して残留応力を求めた。なお、溶接方法は手溶接一層盛であり、予熱および焼鈍も行っていない。溶接時表2に示すように電圧、電流、溶接速度など溶接条件を記録し、入熱量の計算に用いた。また、切断面から溶着金属の断面積を測定した。

**3. 測定結果および考察**

**3.1. 入熱量Qと溶着金属の断面積Awの関係**

溶接残留応力は入熱量Qに左右される。ところで、入熱量Q

表1 供試体

HT60					
断面	断面諸元	$b/t$	$h/t_k$	$I_x/I_0$	$n_6$ 既設
①	側面ビード 1-Rib 110x12.4	—	8.9	—	—
②	側面ビード / 箱中央ビード 1-R 694x12.4	56	—	—	—
③	側面ビード / スリット 1-R 694x12.4	56	8.9	1.02	0.32
④	1-Rib 70x12.4 1-R 694x12.4	56	5.7	0.32	0.20
⑦	1-Rib 70x12.4 1-R 474x12.4	38.2	5.65	1.00	0.30
⑧	1-Rib 30x8 1-R 390x12.4	31.5	3.75	1.00	0.10
⑨	4-Rib R 110x12.4 4-R 694x12.4	56	8.9	1.00	0.32
HT80					
断面	断面諸元	$b/t$	$h/t_k$	$I_x/I_0$	$n_6$ 既設
⑤	1-Rib R 80x13.0	—	6.2	—	—
⑥	1-R 450x9.8	46	—	—	—
⑩	1-Rib R 83x12.1 1-R 460x12.1	38	6.9	1.01	0.36
⑪	1-Rib R 109x12.1 1-R 726x12.1	60	9.0	1.02	0.30
⑫	4-Rib R 80x13.0 4-R 450x9.8	46	6.15	1.00	0.48

表2 溶接条件, 材料定数

材質	HT60						HT80	
	①	②	③	④	⑤	⑥		
溶接箇所	側面ビード	側面ビード	側面ビード	側面ビード	側面ビード	側面ビード	側面ビード	側面ビード
電圧[V]			24					24
電流[A]	115	125	256	120	249	121	252	116
速度[m/min]	27	27	2.8	29	2.5	3.0	2.5	2.7
溶着量[g/cm]	1022	1111	2194	993	2390	968	2419	1031
溶着速度[g/cm <sup>2</sup> ・min]	16.0	17.4	33.3	14.5	35.3	14.1	33.7	16.4
材料定数	2.13×10 <sup>-3</sup> *						2.11×10 <sup>-3</sup> *	
材料定数	57.0						77.6	
材料定数	0.26						0.27	

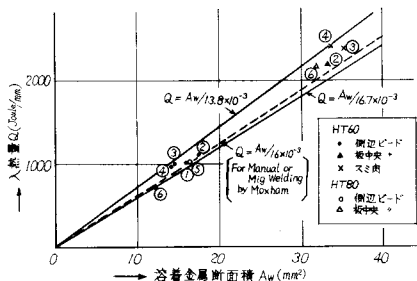


図2 入熱量Qと溶着金属断面積(A<sub>w</sub>)の関係

(Joule/mm)と溶着金属断面積A<sub>w</sub>(mm<sup>2</sup>)についてMoxhamは軟鋼に対してつきのような実験式を与えている<sup>(1)</sup>

$$Q = A_w / 16 \times 10^{-3} \text{ (For Manual and Mig Welding)} \text{ ----- (1)}$$

表1の断面①～⑥について得た結果をプロットすると図2のようになり、HT60、HT80の場合にも(1)式と同様な線形関係が認められる。ただし、この比例定数は溶接方法によって変化するから、実物でサブマージアーク溶接等で行なわれるときは別途求めておく必要がある。

3.2. 残留応力分布 断面①～⑥について得た測定結果を図3に示す。図中、各点はそのそれぞれ▲、●、△印にて区別している。残留応力分布について、ビード部では一定の引張応力になると言われている<sup>(2)</sup>。これを補剛板について理想化してみると、図4のような分布形で表わせる。図中σ<sub>rc</sub>、σ<sub>rc2</sub>はそれぞれ母材および補剛材の圧縮残留応力、σ<sub>rt</sub>～σ<sub>rt2</sub>は母材端部、母材および補剛材のスミ肉溶接部の引張残留応力、η<sub>t1</sub>～η<sub>t2</sub>は引張残留応力域の幅、b<sub>w1</sub>～b<sub>w2</sub>は母材端部、母材および補剛材のスミ肉溶接脚長である。今回の側面ビード盛の場合は、b<sub>w1</sub>=0である。

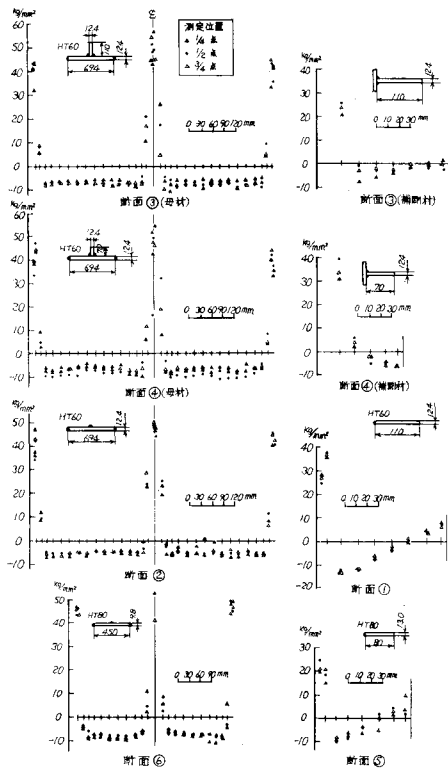


図3 残留応力分布

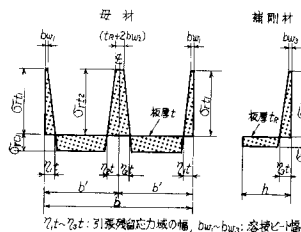


図4 理想化した残留応力分布

3.2.1. 圧縮残留応力σ<sub>rc</sub>および引張残留応力σ<sub>rt</sub> 実測されたσ<sub>rc</sub>を図5に示す。図5からσ<sub>rc</sub>はHT80の方がHT60に比べて若干大きい。しかし、材料の常温での降伏点応力σ<sub>y</sub>の実測値(表2参照)で無次元化すると、図5に示すように、HT60は0.7～0.8、HT80は0.6であり、いずれも降伏点応力に達していない。この傾向は従来の結果と一致している<sup>(3)</sup>。つきに、図6に実測されたσ<sub>rc</sub>を示す。σ<sub>rc</sub>はA<sub>w</sub>によって変化すると考えられ、したがって、その大きさを直接比較することは出来ないが、σ<sub>rc</sub>/σ<sub>y</sub>はHT60で0.09～0.15、HT80で0.1となっている。これは文献(4)の結果と大差ない傾向を示している。また、σ<sub>rc</sub>/σ<sub>y</sub>・(η<sub>t</sub>)/A<sub>w</sub>は図6の下のようになり、無補剛板と補剛板で1.5と1.2で若干差がある。なお、図5、6には、前刷(I-209)で得られた断面寸法(b=416、h=73、t=8.6、t<sub>R</sub>=10.5)の異なるHT80補剛板の実験結果を×印にて、また、南港連絡橋のパイロットメンバー(HT80、実物大、b=1400、η<sub>t</sub>=0.43)の結果を示す。

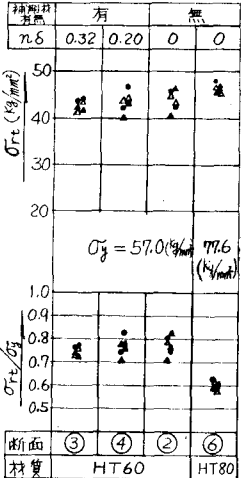


図5  $\sigma_{rc}$ ,  $\sigma_{rc}/\sigma_y$

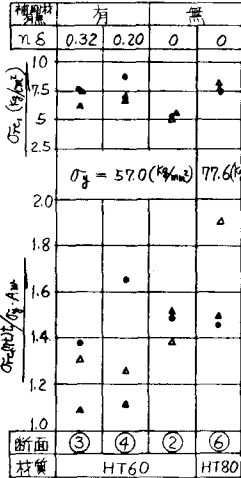


図6  $\sigma_{rc}$ ,  $\sigma_{rc}(t)/A_w$

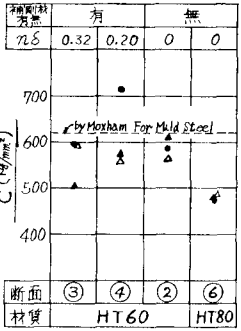


図7  $C$  (HT60, HT80)

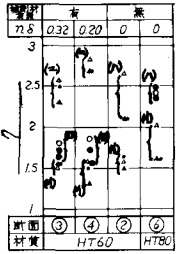
$h=250, t=32, t_r=40, n_s=0.45$  の調査結果を  
 0印にて示し比較している。(5)

3.2.2. 溶接による圧縮力  $F_c$  軟鋼に対する  
 OXham 等の考え方によれば、溶接によって導入さ  
 れる圧縮力  $F_c$  は  $F_c = CA_w$  (2) で表  
 わせる。この  $C$  は定数で、半無限板の側面に熱源が  
 一定速度で進むときの Rosenthal の温度分布からス  
 タートして、引張残留応力域を矩形分布と仮定し、  
 理論的には、 $C = \frac{96Ed}{16 \times 10^{-3}} = 1300$  (kg/mm<sup>2</sup>) ( $E$ :  
 縦弾性係数,  $d$ : 線膨脹係数) (3) と求

まるものである。しかし、実際には測定された残留  
 応力の分布から、 $C = 620$  (kg/mm<sup>2</sup>) と修正されている。高強度鋼の場合  
 熱サイクルによる熱応力が軟鋼と異なることおよび補剛材のように半無限  
 板と考えられないような狭板が母材に集成されるときには、入熱量の母材  
 補剛材への分配が明確でないから、その適用に慎重を要する。しかし、(2)式  
 の形に表わされることは十分予想できるから、(2)式を適用し、 $\sigma_{rc}$  の分布から求  
 めた  $F_c$  を  $A_w$  で除して  $C$  を求めると図7のようになる。断面③④⑥を比較  
 してみると補剛材の有無、大小でほとんど差がなく、HT60の場合  $C \approx 580$   
 (kg/mm<sup>2</sup>) である。また、断面⑥ HT80 の場合  $C \approx 480$  (kg/mm<sup>2</sup>) である。

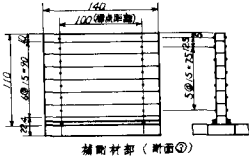
したがって、軟鋼の  $C = 620$  (kg/mm<sup>2</sup>) に対して、それぞれ 0.9, 0.8 倍となっている。前刷 (I-209)  
 の HT80 補剛板では  $A_w/Q$  が断面⑥と同程度であって、 $C = 480$  (kg/mm<sup>2</sup>) と得られており、一致して  
 いる。また、南港連絡橋のパイロットメンバーの実験結果からは  $C' = 430$  (kg/mm<sup>2</sup>) であった。この  
 実物では溶接方法がサブマージアーク溶接で、 $A_w/Q = 18 \times 10^{-3}$  であったので、(2)式から  $C$  が  $A_w/Q$   
 に反比例することを利用して、手溶接の  $C = 480$  (kg/mm<sup>2</sup>) から、 $C' = 480 \times \frac{16 \times 10^{-3}}{18 \times 10^{-3}} \approx 425$  (kg/mm<sup>2</sup>)  
 となり、 $C' = 430$  (kg/mm<sup>2</sup>) と一致している。以上の結果から、高強度鋼に対して溶接方法が手溶接  
 と異なるときの  $C$  の値は、 $A_w/Q$  が予め求められておれば、HT60 の場合  $k_0 = A_w/Q = 16 \times 10^{-3}$   
 $C_0 = 580$ ; HT80 の場合  $k_0 = 16 \times 10^{-3}$ ,  $C_0 = 480$  として、つきのように  $C$  を推定する  
 ことができる。 $C = C_0 \times \frac{k_0}{k}$  (4) この  $C$  を用いると(2)式より圧縮  
 力  $F_c$  が推定できる。

3.2.3. 引張残留応力域の面積 ( $\eta t$ )  $t$  および  $\eta$  引張残留応力域の面積 ( $\eta t$ )  $t$  は  $A_w$  に比  
 例すると推定できるから、 $A_w$  で除して無次元化すると図8のようになる。図から側面ヒート盛の方が  
 板中央ヒート盛、スミ肉溶接のときより、同じ  $A_w$  に対して、( $\eta t$ )  $t$  が大きくなる傾向が示されている。  
 また、断面②と④では  $\eta$  が異なるがその影響はほとんどないようであり、溶接の種類 (側面ヒート  
 盛、板中央ヒート盛、スミ肉溶接) によってほぼ一定になる。つきに  $\eta$  を求める図9のようになり、  
 側面ヒート盛で  $\eta_1 \approx 1.5$ , 板中央ヒート盛で  $\eta_2 = 2.4$ , 板中央スミ肉で  $\eta_2 = 1.7$ , また、補剛  
 板の側面スミ肉で断面③の場合  $\eta_3 = 2.5$ , 断面④の場合  $\eta_3 = 2.7$  となっている。  $\eta_3$  について



- (4) 側面ヒート盛
- (5) 板中央肉
- (6) 板中央ヒート盛
- (7) 補剛材中央

図 9 7



補剛材部 (断面②)

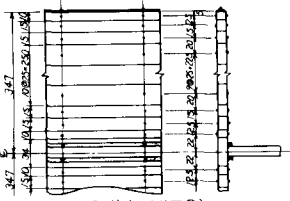


図 11 分割要領

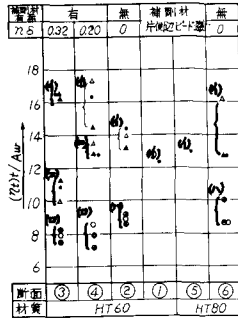


図 8  $(\eta_1)z/Aw$

た組立材の残留応力の推定をするときには、単一板に補剛板としての剛性に相当する拘束度を与えるが、それに見合う修正を施す必要がある。

### 3.2.5. 高張力鋼補剛板の圧縮残留応力 $\sigma_{rc}$ の推定

図 4 に理想化した残留応力分布において、3.2.1 より  $\sigma_{rc1} = \sigma_{rc2} = \sigma_{rc3} \equiv \sigma_{rc}$  (材質により一定) とおけるから、応力の釣合いより、

$$\frac{\sigma_{rc}}{\sigma_y} \doteq \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_{rc}}{\sigma_y} \cdot \frac{\left\{ \left( \frac{bw_1}{t} + \frac{bw_2}{t} \right) + (\eta_1 + \eta_2) \right\}}{(b/2 - \eta_1 - \eta_2)} (1 + \alpha) \quad \text{----- (5)}$$

$$\text{ここで、} \alpha = \beta \cdot \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{bw_1}{t} \right) \left\{ 1 + \frac{bw_2}{t} + \eta_2 \left( \frac{bw_1}{t} \right) \right\}}{\left\{ \left( \frac{bw_1}{t} + \frac{bw_2}{t} \right) + (\eta_1 + \eta_2) \right\}} \quad \text{----- (6)}$$

6式の誘導に際して、 $\frac{\sigma_{rc}}{\sigma_y} \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{bw_1}{t} \right) = \frac{(b/2 - \eta_3)}{(b/2 - \eta_1 - \eta_2)}$  は  $\frac{\sigma_{rc}}{\sigma_y}$  に比べて通常小さいので省略している。したがって、座屈強度に対して安全側の値になる。式中、 $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  などは図 9 から溶接の種類によってば一定値を示す。又、 $bw_1, bw_2, bw_3$  は板厚  $t$  に応じて規定される。但し、 $\eta_2$  は  $\alpha = 0, \alpha \neq 0$  のときで図 9 のように使い分ける。また、 $\alpha$  の中の修正係数  $\beta$  は実験データとさらに集積して、補剛材の高さなどに依りて変化させるものである。5式にて、 $\alpha = 0$  のときは、両側辺ヒート、板中央ヒート状態での無補剛の残留応力状態であり、補剛材の残留応力状態は、これに  $(1 + \alpha)$  を乗じて容易に推定することができる。例えば断面③では  $(1 + \alpha) \doteq 1.45$  となり、図 6 の断面③の  $\sigma_{rc}$  と断面②の  $\sigma_{rc}$  の比が 1.5 程度であることからその傾向が示されている。また、補剛材の局部座屈に影響する  $\sigma_{rc}$  の推定は、まず 6式より  $F_c$  を求めて、この中、母材部の圧縮力 ( $\sigma_{rc} \times$  圧縮残留応力の作用する面積) を除いて近似的に算出することができる。

## 4. 結論

以上、高張力鋼 HT60、HT80 について、つぎの結果を得た。

- (1) 溶着金属断面積  $A_w$  と入熱量  $Q$  の関係を明らかにした。
- (2) 引張残留応力  $\sigma_{rc}$  ならびに圧縮残留応力  $\sigma_{rc}$  の大きさについて調べた。
- (3) 溶接によって部材に導入される圧縮力  $F_c$  と溶着金属の断面積  $A_w$  の関係を与えた。
- (4) ヒート盛の単一部材から溶接集材材の残留応力の大きさの推定する方法について述べた。

## 5. 文献

- (1) J.B. Dwight & K.E. Moxham: 「Welded Steel Plates in Compression」, The Structural Engineer, Feb. 1969, No.2, Vol.47.
- (2) 伊藤文人, 田島二郎: 「高張力鋼を用いた溶接角柱の圧縮強度」, 鉄道技術研究所報告, No.516号, Jan. 1966.
- (3) 佐藤邦彦, 松井繁明, 町田隆: 「高張力鋼溶接部における熱応力発生過程と残留応力」, 溶接学会誌, Vol.35
- (4) 奥村敏忠, 西野文雄, 長谷川彰夫: 「箱形断面柱の局部座屈強度」, 18回橋梁構造工学研究発表会, 1966
- (5) 阪神高速道路公団: 「南港連絡橋主橋梁部上部工事パレットメンバー施工報告書」, 1972