

部分調質鋼桁について

EXPERIMENTAL STUDIES ON PARTIAL HEAT TREATED STEEL GIRDERS

菊池 洋一*・鈴木悦男**・桜井 孝***
By Yōichi Kikuchi, Etsuo Suzuki and Takashi Sakurai

1. 概 説

一般に鋼構造物において、鋼材の加工、製作を行なう場合、切断、孔明、削成、ひずみ取り、リベット締め、溶接などの加工を行なうが、熱処理調質など、鋼材の材質そのものに、手を加えることは行なわれず、すべての加工が与えられた鋼材の材質をなるべく変化させない立場に立っての製作加工が行なわれてきた。

鋼部材を熱処理調質によって、部分的に設計所要強度にまで材料強度を高めて、最も有利にその鋼部材を使用する考え方に対する検討を行なった。

まず第一に、試験体の焼入れ、焼戻しの熱処理効果、材質の変化を確認するために、材料検査を行ない、所定の材料強度を得るための熱処理条件を定めた。

第二に、溶接 I 形断面はり、支間 3 m の試験体を製作し、熱処理調質して、曲げ荷重試験を行なった。

第三に、H形鋼を合成桁に利用する場合に、上フランジ断面は、著しく断面に余裕を生じる。よって下フランジを熱処理調質することにより、上下フランジともに、許容応力近くまで利用でき、経済設計が考えられる。支間 5 m の下フランジのみを調質した H 形鋼を使用した合成桁を製作し、曲げ荷重試験を行なって、部分調質の効果の確認を行なった。

2. 熱処理効果確認試験

(1) 試験体

この試験は、SS 50 材の引張強さを、熱処理により、目標値 ($70 \text{ kg/mm}^2 \sim 80 \text{ kg/mm}^2$) に向上させるための適正施工条件を見出す目的のため行なった。種々の条件の火焰焼入れおよび焼戻しを行ない、これらの機械的性

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 名古屋大学助手 工学部土木工学科
*** 正会員 工修 株式会社東京鉄骨橋梁製作所

表-1 化学成分および性質

鋼種	板厚 (mm)	化学成分 (%)					機械的性質		
		C	Si	Mn	P	S	降伏点 (kg/mm^2)	引張強さ (kg/mm^2)	伸び (%)
SS 50	12	0.20	0.07	0.94	0.014	0.021	40.0	58.0	25.0
SS 50	9	0.17	0.29	1.27	0.014	0.004	36.0	56.0	25.0

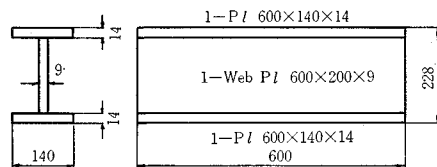


図-1 試験体寸法

質および材質の変化を確認する各種の材料試験を行なった。

使用材料は SS 50 (一般構造用鋼板)、表-1 に化学成分および機械的性質を示す。試験体寸法を図-1 に示す。

(2) 熱処理方法

H 形断面試験体を熱処理調質する方法として、図-2 に示すようにフランジおよびウェブの一部を一樣に加熱できる酸素アセチレン焰バーナーとバーナーから約 10 cm 離れた位置に Water jet を備えた可動式焼入れ装置を用いた。この加熱急冷装置を一定速度で移動し、試験体の片側フランジを焼入れし、その後、試験体を重油炉



図-2

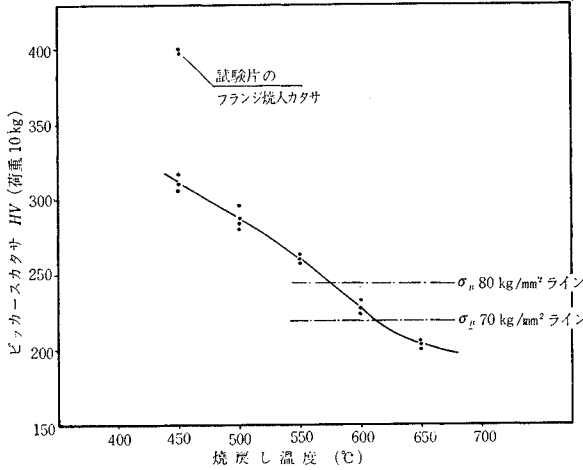


図-3 焼戻し温度と硬度との関係

表-2 焼入れ条件

試験片番号	No. 1, No. 2, No. 3	No. 4, No. 5, No. 6
焼入方法	漸進焼入	漸進焼入
酸素圧力	5 kg/cm ²	5 kg/cm ²
酸素流量	9 130 l/h	9 130 l/h
アセチレン圧力	0.5 kg/cm ²	0.5 kg/cm ²
アセチレン流量	8 300 l/h	8 300 l/h
バーナー口径	1.0 m/m	1.0 m/m
バーナー孔数	69, 23, 18 合計110孔	69, 23, 18 合計110孔
使用バーナー	F 140, F 50, F 40	F 140, F 50, F 40
バーナーT.P間隔	20 m/m	15 m/m
加燃温度	900°C	900°C
送り速度	150 mm/min	200 mm/min
冷却水	ソリュブルクエンチ NH 2%	ソリュブルクエンチ NH 2%
水量	30 l/min	30 l/min
水温	18°C	18°C

表-3 焼戻し条件

試験片番号	No. 1, No. 4	No. 2, No. 5	No. 3, No. 6
炉型	重油炉	重油炉	重油炉
加熱温度	550°C	600°C	650°C
保持時間	40 min	40 min	40 min
冷却方法	油冷	油冷	油冷

に入れて焼戻しを行なった。表-2に焼入れ条件、表-3に焼戻し条件を示した。なお焼戻し条件を定めるため予備試験を行なった。焼戻し温度と硬度の関係を定め、これを図-3に示した。これによって、70 kg/mm²~80 kg/mm²の引張強度を得るような焼戻し温度を550°C~650°Cと想定した。

(3) 熱処理試験結果

引張試験結果を表-4に示す。この引張試験結果からすると、焼入れフランジ材の強さはバーナーの送り速度を150 mm/minの火焰焼入れを行ない、焼戻し温度を550°C~600°Cで施工すれば、所期の目標値70 kg/mm²~

80 kg/mm²の強度を得ることが明らかになった。焼入れフランジ材のカタサ分布を図-4に示した。これによると板厚中心部はいずれの場合も板表面部に比して若干低くなり、その硬度差は40 HV~50 HV程度が認められた。これは焼入速度を120 mm/minにした場合、表面と板中心部との硬度差はほとんどなくなるが、表面焼入れの特性を利用して、圧縮残留応力を考慮すれば、むしろ、芯部は軟らかい方が有利な場合もあり得る¹⁾。したがって、バーナーの送り速度は使用目的によって適当に選択する必要があり、送り速度は、120 mm/min~150 mm/minの範囲がよいと思われる。

火焰焼入れによって、フランジ材のシャルピー衝撃特性がいかに影響するかを確かめるために、各種焼入れ条件で行なったフランジ材について、それぞれの遷移温度曲線を求めた。それを図-5に示す。この

表-4 引張試験結果 (JIS 1号試験片)

試験片番号	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)
No. 1	73.3	80.9	11.3
No. 2	67.4	72.6	13.5
No. 3	58.5	64.1	16.3
No. 4	57.5	65.6	14.6
No. 5	54.8	61.5	18.4
No. 6	47.4	58.0	20.8

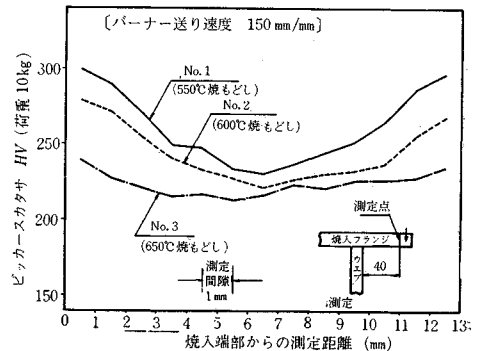


図-4 焼入れフランジ材のカタサ分布

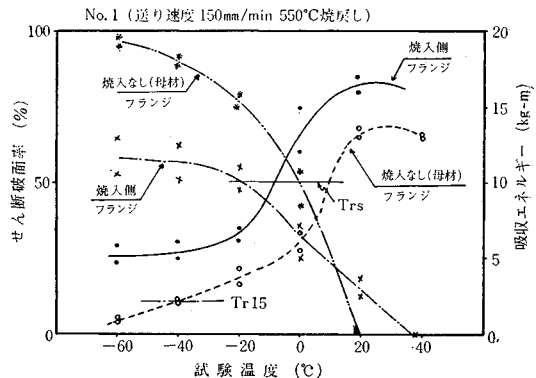


図-5 遷移温度曲線

表-5 焼入れフランジの衝撃特性

試験片	火焰焼入条件		Tr 15 (°C)	Tr S (°C)	E ₀ (kg-m)
	送り速度 (mm/min)	焼戻し温度 (°C)			
母材	—	—	-42	0	6.2
No. 1	150	550	-60	-18	13.2
No. 2	150	600	-21	-30	4.0
No. 3	150	650	-35	-27	4.4
No. 4	200	550	-41	-41	3.4
No. 5	200	600	-31	-18	6.0
No. 6	200	650	-12	-22	3.4

・E₀とは0°Cにおける衝撃値の値
 ・母材とはNo. 1の試験片の焼入れない方のフランジ材

遷移温度曲線から、Tr 15, Tr S によって整理すると表-5に示すようになる。この表より明らかな通り、火焰焼入れすることによって、切欠き特性は母材よりも良くなり、0°Cにおいては約2倍程度の値を示した。

つぎに、火焰焼入れ施工条件によって、いかに組織の変化を来たしたか確認するために、それぞれの金属顕微鏡組織を調べた。これらの結果は図-6に示す。

この組織検査からすると、焼入れ施工以前の母材組織は、図-6.1~図-6.5に示すごとく、フランジ材およびウェブ材とも組織的には、パーライト、フェライトの分布であり、通常の焼ならし状態、またはas rolled鋼板組織である²⁾。

つぎに、各種の火焰焼入れ施工条件で焼入れしたフラ

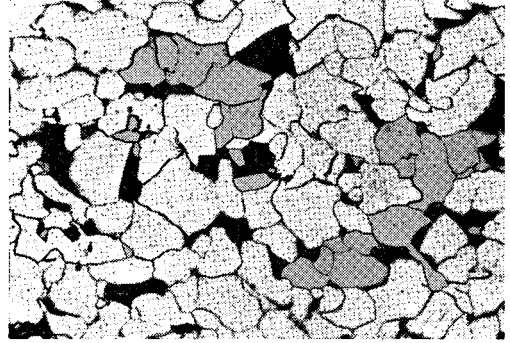


図-6.3 ウェブ母材 (A部)×500

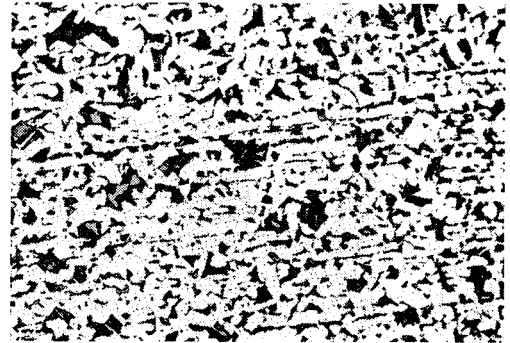


図-6.4 下フランジ材 (焼入れなし母材) (B部)×100

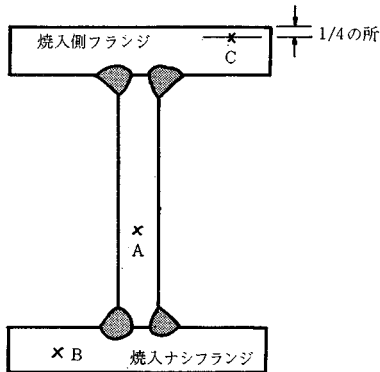


図-6.1 検鏡採取位置

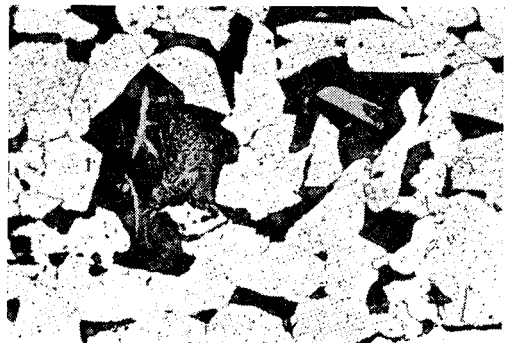


図-6.5 同上×500

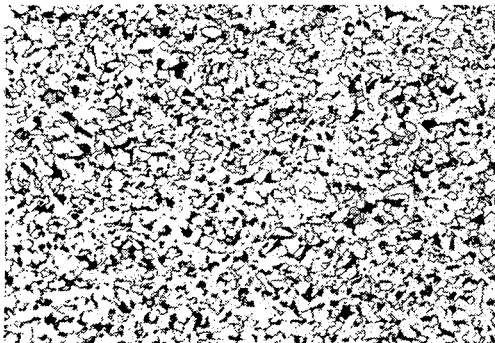


図-6.2 ウェブ母材 (A部)×100

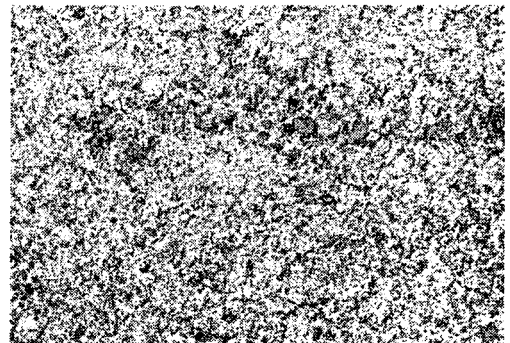


図-6.6 No. 1 焼入れフランジ (C部)×500

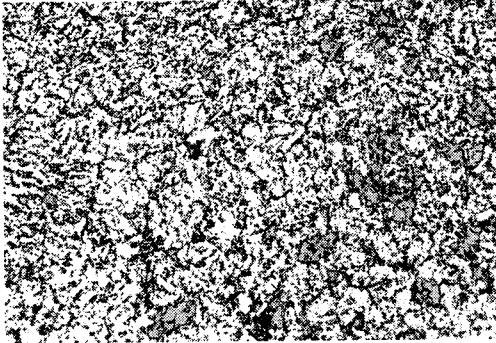


図-6.7 No. 2 焼入フランジ (C部)×500

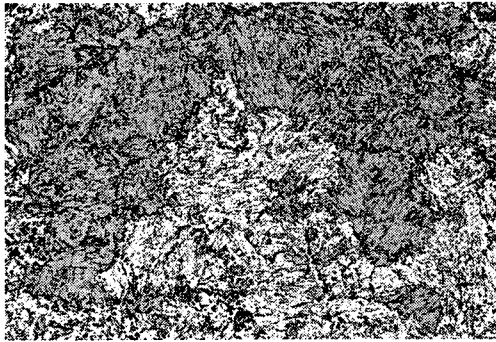


図-6.8 No. 3 焼入フランジ (C部)×500

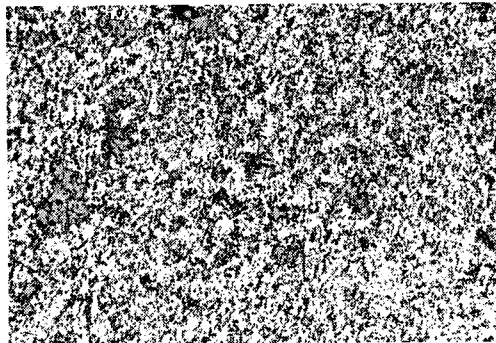


図-6.9 No. 4 焼入フランジ (C部)×500

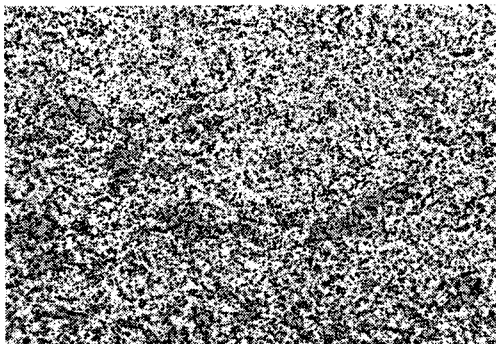


図-6.10 No. 5 焼入フランジ (C部)×500

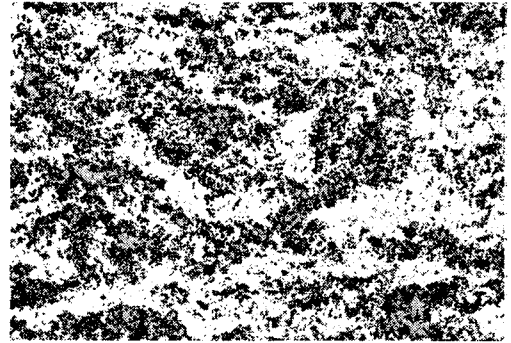


図-6.11 No. 6 焼入フランジ (C部)×500

ンジ材の組織は、図-6.6～図-6.11 に示すとおり、かなり組織変化を来している。この場合顕微鏡写真採取位置は、すべて板厚中央部分で採取した。これによると図-6.6～図-6.10 の No. 1～No. 5 の試験片は、ほとんどソルバイト組織で、板端部も同様な性状を示している。図-6.11 の No. 6 の試験片は、パーライト中にセメントタイトが一種の粒状化を来したような過熱組織を呈していた。これは表-3 に示すように焼戻し温度の差によるものと思われる。

以上、熱処理後の顕微鏡組織には異状なく、焼割れなどの欠陥は認められなかった³⁾。

3. 部分調質 I 形断面ばりについて

(1) 試験体

試験体は支間 3 m の溶接 I 形断面ばりで、上フランジを局部座屈、横倒れが生じないように抱束して載荷することとした。試験体寸法を図-7 に示した。

試験体は部分調質効果を明らかにするため、つぎの 4 種のものを作成した。

A型：下フランジのみを調質する。

B型：上下フランジを調質し、腹板は調質しない。

C型：上下フランジ、腹板、全体を調質する。

D型：調質を行なわない。

また、試験体の材料は、熱処理効果の低い SM 50 をさけ、予備実験に使用した SS 50 と 50 kg/mm² 級耐

表-6 試験体と焼戻し条件

試験体番号	材質	調質箇所	焼戻し条件
A-1	SS 50	下フランジ (火焰焼入)	600°C 40 分油冷
A-2	Corten	〃	550°C 〃
B-1	SS 50	上下フランジ (火焰焼入)	600°C 〃
B-2	Corten	〃	550°C 〃
C-1	SS 50	桁全体 (炉中焼入)	600°C 〃
C-2	Corten	〃	550°C 〃
D-2	SS 50	調質せず	—
D-4	Corten	〃	—

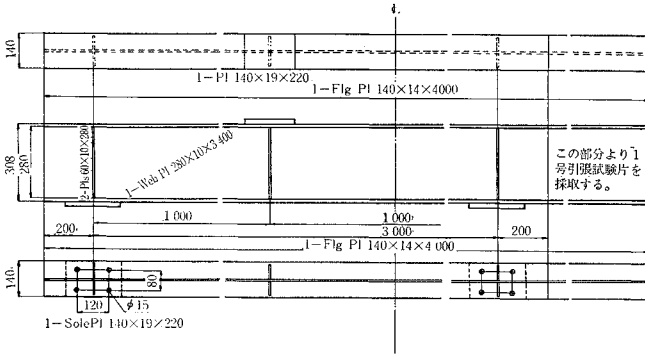


図-7 試験体概要図

蝕鋼の2種類について試験を行なった。

熱処理条件は火焰焼入れのバーナーの送り速度は 100 mm/min とし、焼戻し温度は表-6 に示すとおりである。この熱処理調質は、降伏強度に関し、約 50% 向上を目標としたものである。

(2) 熱処理鋼の引張強度

試験体は図-7 に示すように、4 m のものを熱処理後端部より 60 cm 切断して、試験片を採取した。これらの引張試験の結果を表-7 に示した。この表からわかるように火焰焼入れの結果、A-1 試験体では、降伏強度を 64%、B-1 試験体では 56% および 70%、A-2 試験体では 120%、B-2 試験体では 90% 向上することができた。また、炉中焼入れにより全体を調質した C-1 試験体では 35% および 52% であり、C-2 試験体では 29% および 49% 向上することができた。

(3) 曲げ載荷試験

載荷試験は図-8 に示すように静的 75 t ジャッキ 2 基を用いて、横倒れ座屈などが生じないように考慮して、載荷を行なった。載荷はフランジが降伏して、はりに欠陥が生じるまで行なった。各試験体の曲げ試験の結果と

して、荷重-たわみ曲線を図-9、図-10 に示した。またこれらの試験体をハイブリッドビームとして計算した値を比較のために書き込んでおいた。それらについて弾性限界で比較すると表-8 に示す値となった。A型では片側フランジだけの調質なので弾性限は変わらないが調質効果は塑性域に表われている。B型では調質効果は顕著に表われ非常に高い弾性限が得られた。C形では材料調質の度合は低かったが、はりとしての弾性限はかなりの向上を示している。

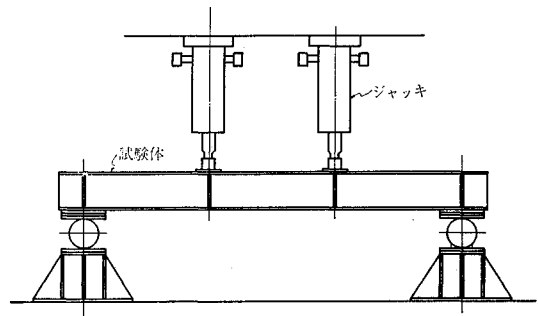


図-8 載荷状況

表-8

試験体	計算値		実験値	
	弾性限荷重 (t)	非調質との比	弾性限荷重 (t)	非調質との比
A-1	22.7	1.06	25.0	1.14
B-1	36.4	1.69	39.2	1.78
C-1	31.2	1.45	31.5	1.42
D-2	21.5	1.00	22.0	1.00
A-2	26.5	1.04	29.2	1.28
B-2	44.3	1.74	45.0	1.97
C-2	33.4	1.31	32.5	1.43
D-4	25.4	1.00	22.8	1.00

表-7 引張試験結果

試験体 (SS 50)					試験体 (Corten)				
	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)		降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)		
A-1	上フランジ	32.3	53.6	27.5	C-1	上フランジ	43.8	61.5	15.1
	ウエブ	32.6	53.5	24.5		ウエブ	57.3	69.9	9.6
	下フランジ	53.6	66.3	15.1		下フランジ	49.4	64.6	12.5
A-2	上フランジ	36.9	48.7	27.5	C-2	上フランジ	45.7	59.5	18.6
	ウエブ	35.3	50.3	28.2		ウエブ	39.5	56.1	21.1
	下フランジ	76.6	81.2	10.9		下フランジ	52.8	67.2	13.5
B-1	上フランジ	55.8	65.3	18.8	D-2	上フランジ	30.6	55.7	27.3
	ウエブ	32.8	51.9	25.3		ウエブ	30.9	54.0	22.8
	下フランジ	51.0	62.5	17.6		下フランジ	31.1	55.2	27.0
B-2	上フランジ	69.8	77.4	10.0	D-4	上フランジ	35.5	52.6	28.0
	ウエブ	36.8	50.2	26.4		ウエブ	35.6	50.3	30.5
	下フランジ	69.8	77.8	11.1		下フランジ	36.6	52.7	27.0

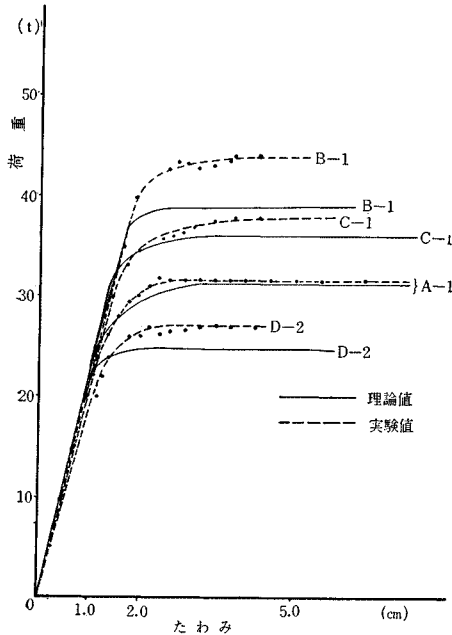


図-9 荷重-たわみ曲線 (SS 50)

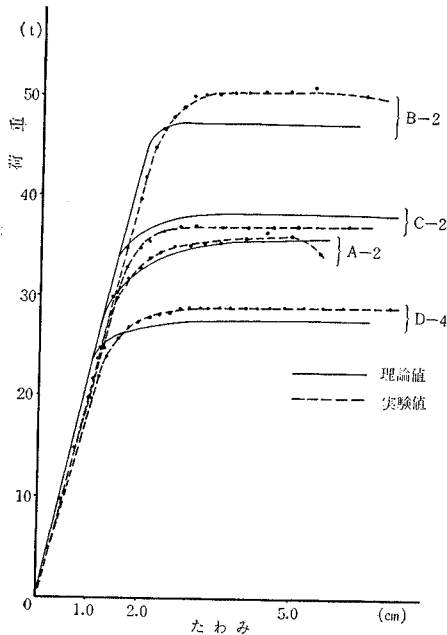


図-10 荷重-たわみ曲線 (Corten)

4. 部分調質 H 形鋼合成桁

(1) 試験目的

H形鋼を道路橋として使用する場合、小支間のものは単純プレート ガーダー、支間 20 m をこえる場合は合成桁として使用されている。H形鋼を用いて合成桁を設

計する場合、床版の合成作用を考慮することから、上下対称断面の H 形鋼を使用する場合、当然圧縮側フランジに応力の余裕を生ずる。

表-9 に示すごとく、現在製造されている SM 50 Y の降伏点 36 kg/mm^2 の鋼材を使用した場合、 $\sigma_{ta}=2100 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\sigma_{ca}=2000 \text{ kg/cm}^2$ とすると、引張側を許容応力近く設計すると、圧縮側は $733 \text{ kg/cm}^2 \sim 911 \text{ kg/cm}^2$ の余裕を生じ、不経済な設計となる。これに対し、フランジ断面の不对称な H 形鋼を製造することが考えられるが、現在の圧延技術では困難であり、将来の課題と考えられる。

ここに H 形鋼の引張側フランジを熱処理により調質して、引張側フランジを主体に降伏強度を上げ、これを合成桁に利用することが有利と考えられる。

この案による実例として、道路橋の試算設計を行なった。支間 25 m ~ 30 m、幅員 9.5 m、主桁数 3 ~ 7 とし、材質は SM 50 Y を表-9 に、下フランジを 60 kg/mm^2 鋼なみに調質したものを表-10 に、 80 kg/mm^2 鋼なみに調質したものを表-11 に示した。これによると、 60 kg/mm^2 鋼なみに降伏点を 46 kg/mm^2 に調質すること

表-9 YP 36 kg/mm^2 、 $\sigma_a^U=2000 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\sigma_a^L=2100 \text{ kg/cm}^2$

L (m)	断面	σ (kg/cm^2)			A_s (cm^2)	鋼重 (kg/m^2)
		σ_b^U	σ_{st}^U	σ_{st}^L		
25	5H 900×300×16×28	57.5	1169	2074	1549.0	164
26	5H 912×302×18×34	57.1	1089	1874	1820.0	186
27	5H 912×302×18×34	60.5	1172	2002	1820.0	186
28	7H 900×300×16×28	61.4	1109	1845	2168.6	218
29	7H 900×300×16×28	64.9	1186	1949	2168.6	218
30	7H 900×300×16×28	68.3	1267	2070	2168.6	218

表-10 H.T.S-60、 $\sigma_a^U=1800 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\sigma_a^L=2600 \text{ kg/cm}^2$

L (m)	断面	σ (kg/cm^2)			A_s (cm^2)	鋼重 (kg/m^2)
		σ_b^U	σ_{st}^U	σ_{st}^L		
25	4H 900×300×16×28	61.8	1406	2571	1239.2	137
26	5H 890×299×15×23	65.0	1448	2515	1354.5	147
27	5H 808×302×16×30	72.5	1461	2582	1538.0	159
28	5H 900×300×16×28	68.3	1457	2531	1549.0	162
29	5H 912×302×18×34	67.7	1345	2276	1820.0	184
30	5H 912×302×18×34	71.3	1437	2417	1820.0	184

表-11 H.T.S-80、 $\sigma_a^U=2000 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\sigma_a^L=3500 \text{ kg/cm}^2$

L (m)	断面	σ (kg/cm^2)			A_s (cm^2)	鋼重 (kg/m^2)
		σ_b^U	σ_{st}^U	σ_{st}^L		
25	3H 900×300×16×28	67.7	1796	3400	912.4	109
26	4H 800×300×26×28	77.6	1836	3437	1069.6	121
27	4H 890×299×15×23	73.8	1883	3432	1083.6	122
28	3H 912×302×18×34	74.9	1924	3497	1092.0	122
29	4H 900×300×16×28	77.4	1882	3391	1239.2	133
30	5H 890×299×15×23	80.8	1917	3334	1354.5	143

により、総鋼重は約 20%、 80 kg/mm^2 鋼なみに降伏点を 70 kg/mm^2 に調質することにより、鋼重を約 30% 節減が可能である。

(2) H形鋼合成桁試験体

試験体寸法を 図-11 に示す。H形鋼の下フランジを調質し、腹部を切断し、上フランジ プレートを溶接で取付けた。これは試験機の性能に応じた剛性の合成桁とするためである。試験体の材質は SS 50、引張強さ 53.3 kg/mm^2 、降伏点 34.9 kg/mm^2 、伸び 44.8% (5号試験片) である。熱処理調質したものは、引張強さ 62.2 kg/mm^2 、降伏点 51.8 kg/mm^2 、伸び 36.6% で、調質により、降伏強度を 48% 高めることができた。

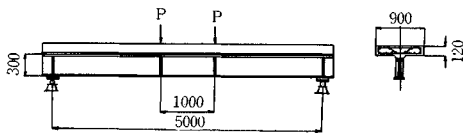


図-11 合成桁試験体寸法

焼入れ方法は、予備実験に述べたように、移動可能な酸素アセチレン焰加熱装置により漸進焼入れを行なった。その焼入れ条件は、送り速度を 150 mm/min 、加熱温度を 900°C とした。焼入れ後、試験体を重油炉に入れ、加熱温度を 570°C にして 40 分保持し、空冷による焼戻しを行なった。図-12 に焼入れの状況を示す。焼入れによる変形は、焼戻しにより減少し、使用上差し支えない程度であった。それにスタッド ジベル ($\phi 22 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$) を 10 cm 間隔で 2 列に非調質の上フランジに取付け、コンクリートを打設した。使用したコンクリートの圧縮試験結果は、 $\sigma_{28} = 500 \text{ kg/cm}^2$ 、 $E_c = 2.85 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ であった。

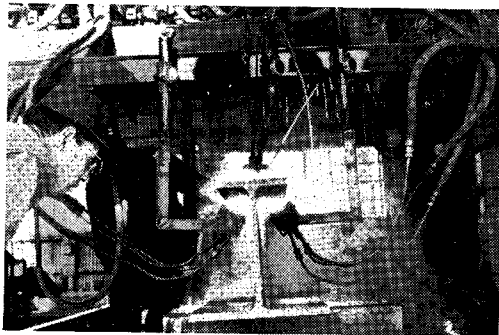


図-12 焼入れ状況

(3) 合成桁の曲げ試験

合成桁の曲げ試験として、図-13 に示すように、ジャッキによる 2 点載荷を行なった。曲げ試験による荷重-たわみ曲線を 図-14 に示した。この合成桁の計算値はコンクリートの弾性限 360 kg/cm^2 に達するまでは $n =$

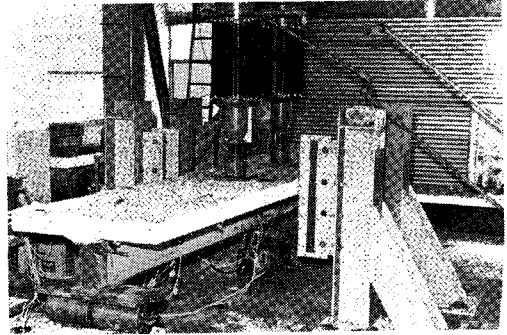


図-13 合成桁の曲げ試験

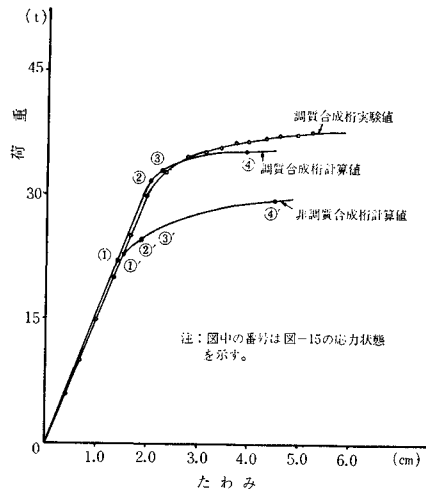


図-14 荷重-たわみ曲線

7.4、それ以後は $n=8.7$ を使用し、鋼桁の下フランジが素材の降伏強度 (3500 kg/cm^2) に達するまで弾性計算を行なった。その限度の荷重は 21.7 t であった。塑性域における計算値は、合成桁断面の応力状態を 図-15 のように想定して、そのつりあい条件式、 $\int A\sigma dA=0$ より中立軸を求め、抵抗曲げモーメントを次式により算出した。

$$M = \int A\sigma y dA$$

そのうち、応力分布から求められた曲率 (ϕ) と曲げモーメント (M) から、次式により荷重とたわみの関係を求めた。

$$\delta = \iint \phi dx dy$$

この合成桁は下フランジのみ $\sigma_y = 5200 \text{ kg/cm}^2$ に調質しており、腹板は $\sigma_y = 3500 \text{ kg/cm}^2$ の Hybrid 形式の桁である。したがって、下フランジが弾性域にあって腹板の下部が降伏するような状態が存在する。それに対して塑性計算を行なった結果、その影響が小さく、下フランジが降伏強度 (5200 kg/cm^2) に達し、降伏をはじめめる点 ($P=31.9 \text{ t}$) まで実験値とほぼ一致した傾向を

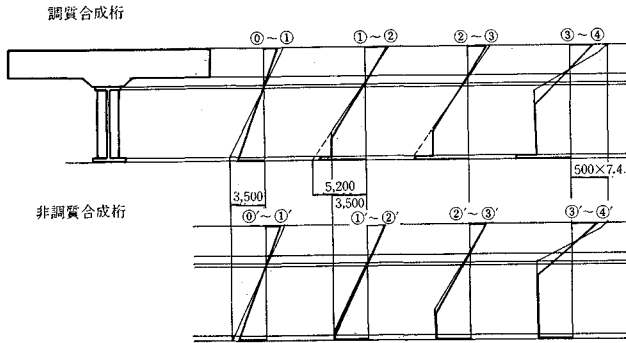


図-15 弾塑性域の応力状態

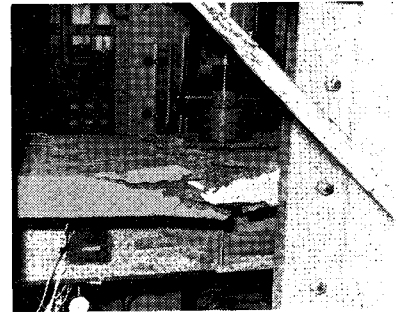


図-16

示した。

下フランジが降伏しはじめると合成桁としての立中軸は上方に移動し、コンクリートのハンチ部に引張応力によるきれつが生じ、たわみが十分増大したのち、コンクリートの上面が図-16に示すように圧潰した。

スタッド ジベルのずれは、十分に塑性変形が進行するまでほとんど見られず、十分なすべり抵抗を示していた。この試験結果を要約すると、H形鋼の下フランジを調質し、降伏強度を48%高めることにより、合成桁としての弾性限を42%高めることができた。これは所期の結果をあげたものと思われる。

5. 結 語

以上の試験結果によって、鋼部材の熱処理調質により、部分的に設計所要強度にまで材料強度を高め、最も有利にその鋼部材を使用することが可能であることを確認した。調質材の降伏点応力に多少のばらつきと伸び率の減少が見られたが、焼戻し温度、冷却速度を一定にす

ることと、素材の伸びの多いものを使用することにより、十分実用化できるものと思われる。

また、H形鋼合成桁に部分調質を利用した場合、鋼材重量を20%~30%節減することが可能であり、さらに経済的最大の支間を5m~10m延すことができると考えられる。

本実験に関し、材質検査に石川島播磨重工技術研究所の方々にご援助頂き、また、H形鋼合成桁の実験に関し、富士製鉄(株)にご援助を頂いたことを深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 鈴木春義・田村 博:「再現熱影響部延性試験による高張力鋼の溶接性の評価」, 金材研報告, Vol. 4 (1961) No. 3 p.240~256.
- 2) Chang, H.C. & N. Cholas, J. Grant: Mechanism of inter crystalline fracture, Journal of Metals (May 1956), p. 544.
- 3) 上崎・秋園:「炭素鋼の高温検鏡における二, 三の基礎的問題」, 日本金属学会誌, Vol. 28 (1964) No. 12, p.833~836.

(1969.1.31・受付)