

キャンパー加工された圧延H形鋼桁の疲労強度

FATIGUE STRENGTH OF AS-ROLLED AND CAMBERED ROLLED H-BEAMS

山田 健太郎*・神谷 周 浩**・菊池 洋 一***
By Kentaro Yamada, Chikahiro Kamiya and Yoichi Kikuchi

1. はじめに

圧延H形鋼を橋梁の主桁断面として使用する場合、一般にキャンパー (camber) 加工を行なう。圧延H形鋼には、本来熱間圧延後の断面各部の不均一な冷却速度に起因する残留応力が存在している^{15)・16)}。このような残留応力は、キャンパー加工によって影響をうけ、その分布形が変化することが考えられる。また、キャンパー加工が、圧延H形鋼の力学的性質、すなわち静的挙動および疲労挙動に与える影響を検討しておく必要がある。

一般に、圧延H形鋼のキャンパー加工法として、次のような方法がとられている。すなわち、(1) プレスで塑性変形を与える方法、(2) バーナーで加熱してキャンパーをつける方法、(3) 片側のフランジをローラーで転圧してキャンパーをつける方法、(4) 上記の適当な組み合わせによる方法、などである。(1)、(3) は、塑性加工の一種であり、プレスおよびローラーの加圧点での変形と材質の変化が問題となり、(2) は熱応力により部材が降伏することを利用したもので、熱による材質変化や残留応力分布の変化が問題になると考えられる。

このような加工法は、桁のキャンパー加工にとどまらず、曲線桁の加工にも応用されている例がある。たとえば、Brockenbrough ら^{2)・3)・4)}は、曲線桁の加工に熱加工法を用いて、その変形量および残留応力の変化を測定して、静的曲げ強度について検討を加えている。

圧延H形鋼は曲げ部材として使用するとき、構造上要求される板厚より厚い腹板を持つ。このため静的耐荷力に対しては有利な断面になると考えられる。

西野・奥村¹⁴⁾は、大型圧延H形鋼の静的曲げ試験を行っており、静的耐荷力は、存在する残留応力の影響を受けず、桁の持つ全塑性モーメント M_p 、あるいはその

値以上までも期待できることを確かめた。

圧延H形鋼桁の疲労強度に関する研究は、溶接組立桁の疲労強度との比較の意味で、1930年代から行なわれてきている。Lea, Whitman⁷⁾の圧延I形はりの添接部に関する疲労試験、Wilson¹²⁾のカバープレート付きはりの曲げ疲労試験が著名であり、Munse¹¹⁾は、Wilsonの実験結果をもとに、圧延H形鋼の疲労強度は、母材の疲労強度の約98%であることを示した。また、ASCEの“Commentary”¹³⁾では、圧延H形鋼の実験結果をまとめて、200万回片振り疲労強度として25.2 kg/mm²の値を与えている。

Fisher, Frank ら^{5)・9)}は、溶接組立桁、カバープレートつき溶接組立桁、圧延H形鋼桁などの多数の疲労試験を行なった。これまでの試験では1系列に相当する試験本数が比較的少なかったが、Fisher, Frank らが行なった多数の実験では、応力範囲と応力比を変えており、この点が注目される。

本研究では、圧延H形鋼桁の基本的な疲労特性を知るとともに、キャンパー加工された圧延H形鋼の静的挙動、疲労挙動を検討することを目的とした。

比較したキャンパー加工法は、前記のキャンパー加工法のうち(1)のプレス加工と、(2)の熱加工であり、そのうち熱加工法は、熱だけによる加工と加熱後水冷する方法を用いて比較検討した。ここでは、上記の3種類のキャンパー加工された桁と、無加工のもの、ならびに残留応力除去焼鈍処理を施したもの計5種類について、実験を行なった。

本研究で特に検討した項目は、つぎのとおりである。すなわち、(1) 圧延H形鋼桁とキャンパー加工桁の静的曲げ挙動と残留応力分布の影響、(2) くり返し載荷のもとでの残留応力分布の変化、(3) 圧延H形鋼桁およびキャンパー加工桁の疲労強度、(4) 圧延H形鋼の疲労特性、である。

* 学生会員 工修 名古屋大学大学院工学研究科博士課程在学中

** 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科修士課程在学中

*** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

2. 試験体と試験方法

(1) 試験体

試験は、すべて H-200×100×5.5×8 の断面の圧延 H 形鋼 (材質 SS 50) を用いて行なわれた。この材料の化学成分を表-1 に示す。試験体は、図-1(a) に示すように、スパン長 1200 mm のものを用い、3 等分点 2 点載荷になるように計画された。試験体には支点には底板を、載荷点には載荷板を、それぞれ溶接し、また載荷点のスティフナーは、中立軸までの長さとした。試験は、表-2 に示すように、無加工桁 (N-タイプ) と残留応力除去焼鈍桁 (NA-タイプ) とに加えて、3 種類の方法でキャンパー加工された桁、すなわち熱加工桁 (H-タイプ)、熱+水加工桁 (W-タイプ)、プレス加工桁 (P-タイプ) の計 5 種類について行なった。

(2) 試験計画

試験は、表-2 に示すように各タイプの桁について、

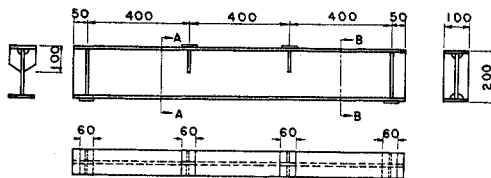
表-1 材料の化学成分

SS50	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
	0.40	0.08	0.58	0.016	0.014

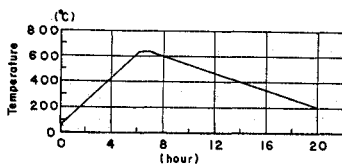
表-2 試験計画表

	N-タイプ	NA-タイプ	H-タイプ	W-タイプ	P-タイプ
静的引張試験	6	4	4	4	
初期残留応力分布の測定	3	1	1	1	1
静的曲げ試験	1	1	1	1	
曲げ疲労試験	6	5	6+1*	6+1*	6
疲労試験後の残留応力分布の測定	1	1	1	1	1

* H-タイプおよびW-タイプの桁であって、残留応力除去焼鈍処理を施したものを。



(a)



(b)

図-1 試験体寸法と残留応力除去焼鈍

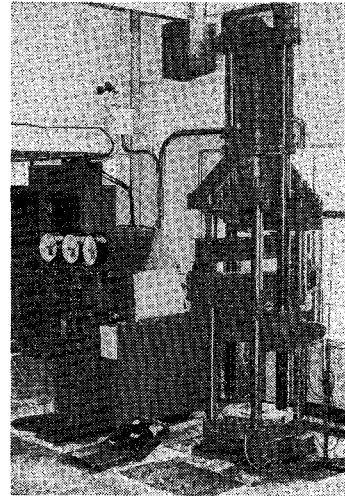


写真-1 疲労試験状況

静的引張試験、残留応力分布の測定、静的曲げ試験、および曲げ疲労試験を行なった。また、200 万回のくり返し載荷によっても、疲労きれつが生じなかった桁については、くり返し載荷後の残留応力分布も測定した。

(3) 疲労試験機

疲労試験は、すべてアムスラー型両振 100 t 万能疲労試験機に載荷桁を取りつけて実施した。くり返し速度は毎分 250 回であった (写真-1)。後述する静的曲げ試験とプレス加工桁に対するプレス加工も同じ試験機を用いた。

(4) 残留応力分布の測定

本試験においては、各タイプの桁について、疲労試験前に存在した残留応力分布と、200 万回のくり返し載荷

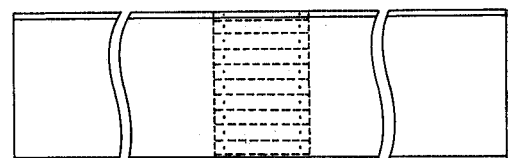
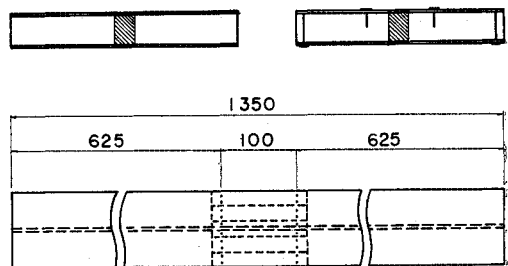


図-2 残留応力の測定

によっても疲労き裂の生じなかったものの残留応力分布を測定した。ここでは、鋼球（直径 1/16 in）を埋め込んで標点（ゲージ長さ 100 mm）とするコンタクトゲージを用い、桁を切断解放してその前後のゲージ長さの変化を求めて、ヤング率 ($E=2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$) をかけて応力に換算した。測定位置は、図-2 に示す通りである。すなわち、H-タイプ、W-タイプ、NA-タイプについては、スティフナーを溶接しない長さ 1350 mm の桁の中央部分で測定した。また P-タイプおよび 200 万回のくり返しによって疲労き裂の生じなかった桁の残留応力分布は、それぞれ曲げ試験体の中央パネルの 400 mm 区間の中央部分で測定された。N-タイプでは、スティフナーを溶接したことによる残留応力分布の変化を知るため、上記の両方について合計 3 断面測定した。

3. 試験桁の加工と残留応力

(1) 無加工桁 (N-タイプ)

N-タイプ桁は、圧延されたままの状態 で曲げ試験用桁に加工したものである。これは、圧延されたままの状態での残留応力分布を有し、材料の機械的性質も圧延されたままの状態 で保持されていると思われる。N-タイプの残留応力は、3 つの断面について測定した。そのうち 2 つは圧延されたままの状態 で測定し、残りの 1 つは曲げ試験体に加工してから測定した。その結果 図-3 (a) に示すように、両者は、ほぼ同じ傾向を示すことがわかり、スティフナーを溶接したことによる影響は見られな

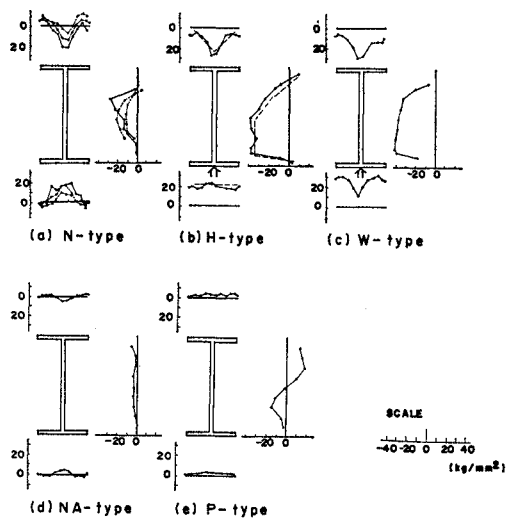


図-3 各タイプの桁の残留応力分布

かった。また静的引張試験結果を表-3 にまとめる。試験片は、フランジ端部、フランジ中央部、および腹板から切り出した。N-タイプでは、フランジに比べて腹板が 10% 程度高い降伏点を持つことがわかった。

(2) 残留応力除去焼鈍桁 (NA-タイプ)

NA-タイプは、曲げ試験用に桁を加工したのち、JIS Z 3701 (1960 年) に規定される炉内残留応力除去焼鈍を行なったものである。焼鈍条件は、図-1 (b) に示すように、最高温度 625°C で 1 時間保持し、13 時間で、200°C まで炉内冷却した。残留応力除去焼鈍の結果、図-3 (d) に示すように、残留応力の大きさは N-タイプに比べて 1/3~1/4 に減少した。また引張試験の結果、残留応力除去焼鈍のため降伏点が下がり、伸びが増加する傾向が見られた。

(3) 熱加工桁 (H-タイプ)

熱処理によるキャンパー加工は、点加熱法、線条加熱法、連続加熱法、腹板を三角形に加熱する方法、などが実際に行なわれているようである。ここでは、図-4 (a) に示すように試験区間のフランジ（中央パネル、400 mm の区間）をひずみ取り用のガスバーナー 2 本で均等に加熱し、室温で冷却する方法を採用した。加熱時間は約 1 分であった。この試験区間では、フランジが一樣に加熱されて膨張しようとするが、反対側のフランジと腹板とにより拘束される。高温時の弾性

表-3 静的引張試験結果

Specimen	Yield Point			Ultimate Strength		Elongation	
	Upper (kg/cm ²)	Lower (kg/cm ²)	Average (kg/cm ²)	(kg/cm ²)	Average (kg/cm ²)	(%)	Average (%)
N	F-1-A	3410	3310		5680		23.0
	F-1-B	3360	3250		5710		22.0
	F-2-A	3380	3260	3260	5640	5650	22.5
	F-2-B	3370	3240		5580		22.5
	Web-1	3750	3520	3570	5470	5485	21.5
	Web-2	3840	3620		5500		21.5
H	F-1	3510	3320		5630		21.3
	F-2-A	3600	3350	3320	5580	5580	21.5
	F-2-B	3430	3300		5570		20.5
	Web		3260		5760		22.5
W	F-1	4020	3780		6150		14.5
	F-2-A	3290	3170	3390	5800	5930	18.5
	F-2-B	3290	3230		5850		22.5
	Web		3840		6270		20.0
NA	F-1	3600	3070		5630		25.5
	F-2-A	3260	3080	3090	5580	5590	24.5
	F-2-B	3250	3120		5570		27.0
	Web	3360	3250		5450		22.5

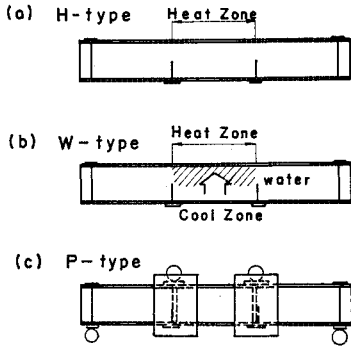


図-4 キャンバー加工法

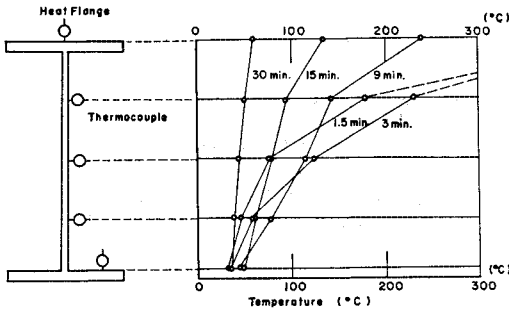


図-5 熱加工後の温度分布 (H-タイプ)

係数や降伏点は、いずれも低くなるので、この加熱フランジおよび腹板の一部は降伏する。つぎに冷却する過程で、加熱フランジには、大きな引張残留応力が発生する。同時に、残留変形としてキャンバーが生じる。図-3(b)に H-タイプの残留応力分布を示す。加熱フランジに生じた引張残留応力とつり合うように、反対側のフランジの残留応力分布が、引張側へ移動していることがわかる。

この残留応力分布は、図-5 に示す温度分布の測定値と各温度での鋼の降伏点とヤング係数²²⁾を入力として計算することができる^{10), 21)}。計算結果は、図-3(c)に破線で示すが、残留応力の測定値とよく一致した。熱加工によるキャンバー量を曲率で示すと、約 $2.2 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$ であり、降伏曲げモーメント M_y に相当する曲率 ϕ_y と比較すると $\phi/\phi_y=1.4$ であった。

(4) 熱+水加工桁 (W-タイプ)

キャンバー加工、あるいは、ひずみ取り加工では、作業の能率を考えて、バーナーで加熱したのち、水で冷却する方法がとられる。一般に、加熱部分と加熱されない部分の温度の差を大きくする方向に水冷すると、キャンバー加工またはひずみ取り加工の能率が良い。W-タイプのキャンバー加工では、加熱方法は前記の H-タイプと同様に行なったが、加熱後、加熱側と反対側の腹板から加熱フランジの裏面にかけて、徐々に水をかけて冷却

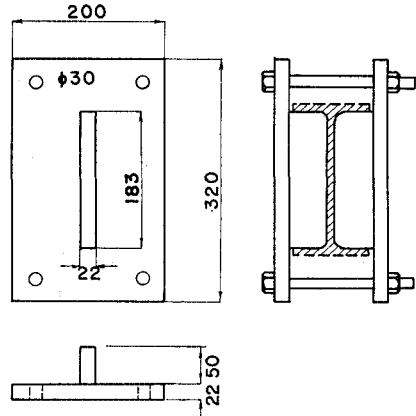


図-6 プレス加工用の治具

した (図-4 (b) 参照)。

残留応力分布は、図-3(c) に示すように H-タイプと似ているが、腹板から冷却してゆくため、腹板・フランジ交点で分布形に変化を生じた。また引張試験の結果、この部分では、急冷されたことによる降伏点の増加と伸びの減少が見られた。W-タイプのキャンバー量を曲率で表わすと、約 $3.84 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$ であった。すなわち $\phi/\phi_y=2.4$ である。

(5) プレス加工桁 (P-タイプ)

通常行なわれているプレス加工を模したものであり、ここでは二点載荷で降伏曲げモーメントを越える荷重を加えて残留変形を与えた。プレス加工は、作用荷重と反対方向に荷重をかけるため、加圧点でのフランジおよび腹板の局部変形を防止する必要上、図-6 に示すような治具を用いて、両側から腹板を拘束して局部的な変形を防止した。また、載荷点が疲労の欠陥にならないよう

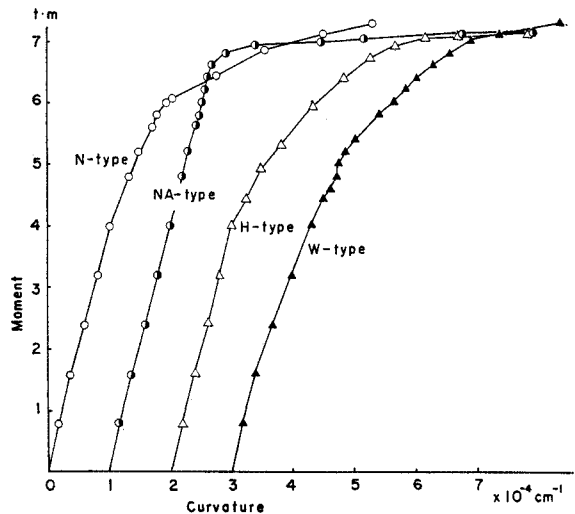


図-7 各タイプの曲げモーメント-曲率曲線

に、100×100×22 mm の板を介して
 載荷した。

プレス加工では、H-タイプと同程度
 のキャンパーを得るように、ダイヤル
 ゲージで制御しながら載荷した。
 すなわち、キャンパーは $\phi/\phi_y=1.4$ で
 ある。与えたプレス荷重が降伏荷重を
 越えるものであったため、プレス加工
 を行なった後に測定した残留応力分布
 は、図-3(e) に示すようになった。上・
 下フランジでは、N-タイプに見られ
 る分布形を示さず、一般的に N-タイ
 プに比べて残留応力は小さくなって
 いる。また腹板では、通常圧延H形鋼
 に見られる残留応力分布とは違って、
 腹板の上下で、残留応力の正負が逆
 になるような分布形を示した。

4. 静的曲げ試験結果

(1) 静的曲げ試験

前節 3. では、圧延H形鋼に存在す
 る残留応力が、キャンパー加工や残留
 応力除去焼鈍によって変化すること
 を示した。つぎに、このような残留
 応力が、桁の曲げ挙動に与える影響
 を実験的に検討した。

静的曲げ試験は、2. で述べたよう
 に2点載荷で行ないN-タイプ、NA-
 タイプ、H-タイプ、W-タイプの桁を
 用いた。

(2) 曲げモーメント-曲率曲線

各タイプの試験桁の荷重と曲率の関
 係を 図-7 に示す。各タイプの試験桁
 は、ともに引張側フランジの引張試験
 でえられた降伏点応力度を用いて計算
 した全塑性モーメント M_p をこえる
 耐荷力を示した。また、これらの桁
 は、支点および載荷点で側方変形を拘
 束したので、いずれの場合も横方向へ
 の不安定による耐荷力の減少はみられ
 なかった。ここで、桁の全塑性モー
 メント M_p は $M_p=f \cdot M_y=f \cdot \sigma_y \cdot W$ に
 よって求められる。ここに、 f は断面
 の形状係数、 σ_y は下フランジの下降

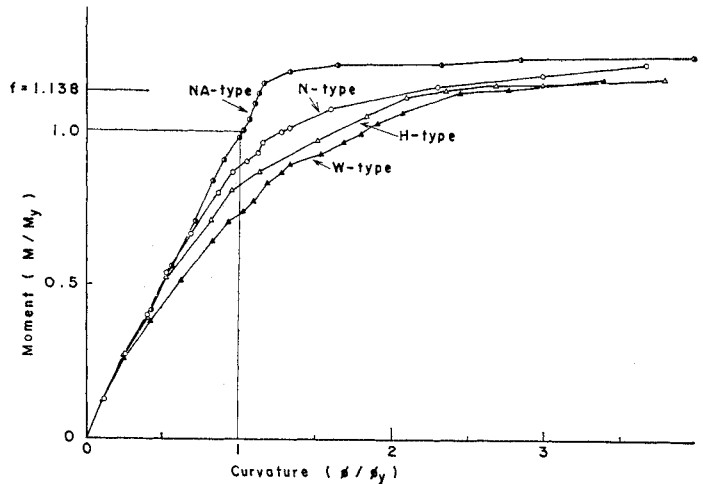


図-8 無次元化曲げモーメント-曲率曲線

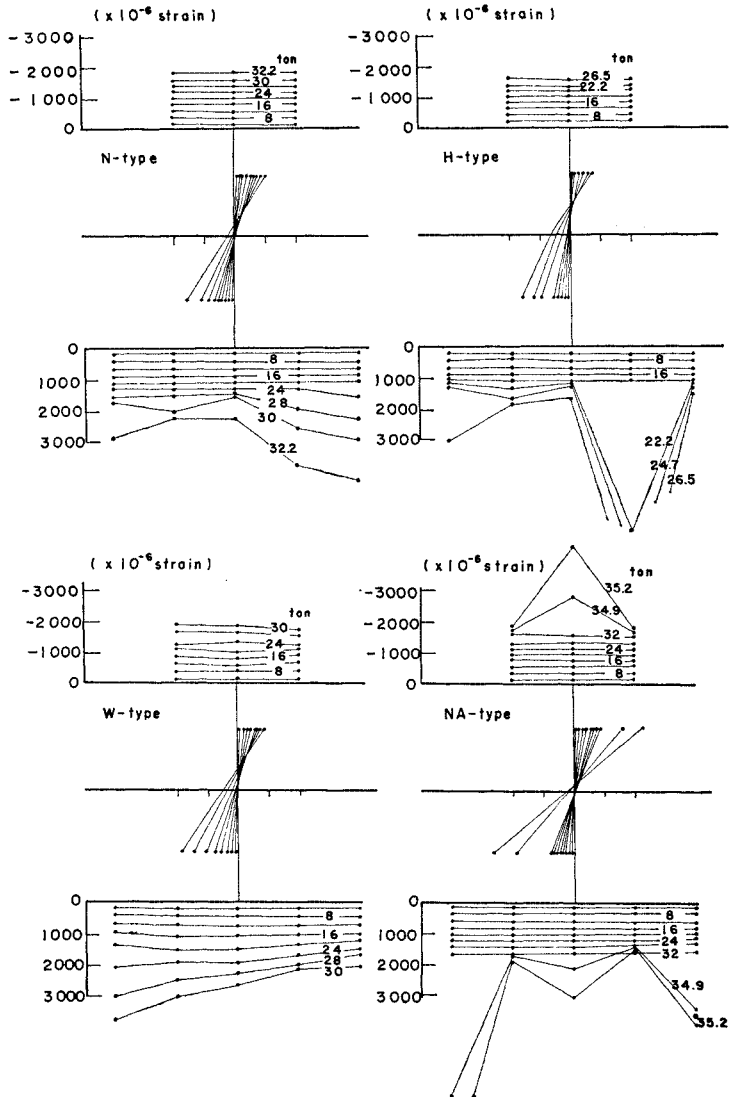


図-9 ひずみ分布の測定値

伏点応力、 W は弾性断面係数である。

つぎに、曲げモーメントと曲率の関係を各タイプについて求めたものを無次元化して図-8に示す。この図から各タイプの静的曲げ挙動を比較すると、N-タイプ、H-タイプおよびW-タイプが、荷重の初期の段階から直線性を示さなくなることがわかる。これは、3.で述べた残留応力の影響であると考えられる。すなわち、引張フランジに存在する高い引張残留応力と載荷による曲げ応力との和が、荷重の初期の段階で降伏点に達して、局部的に塑性域に入ることによると思われる。この現象は西野^{14), 27)}らも指摘しているが図-9に示すように、フランジの軸方向に貼付したひずみゲージ(ゲージ長さ10mm)の各荷重段階におけるひずみ分布からも推定できる。たとえば、H-タイプの桁では、22.2tの荷重のとき、引張フランジにおいてひずみのばらつきがみとめられる。このばらつきは、材料が完全に均一でないために生ずる局部的な降伏流れによるものである。反対に、圧縮側フランジでは、曲げによる圧縮応力に対して引張残留応力が存在するので、このひずみの局部的なばらつきは生じていない。

(3) 残留曲率

つぎに、静的曲げ試験において、ある荷重段階で、荷重を零に戻した場合の残留たわみを考えてみる。たとえば、H-タイプの桁で、 $M/M_y=0.7$ ($M=4.36\text{ t}\cdot\text{m}$)まで載荷した後、除荷するとする。一般にこのような場合の荷重変形曲線における除荷曲線は、直線になることが知られており、荷重を零に戻した場合には、載荷曲線で直線からはずれた部分が残留変形として残る。この場合の残留曲率は、図-10のABで与えられ、 $\phi/\phi_y=0.1$ 程度となる。つぎにふたたび同じ荷重方向に載荷すると、桁はみかけの弾性限が増加したような挙動を示し、 $M/M_y=0.7$ までは、荷重・変形曲線は直線的に変化する。このことは、最初に存在した残留応力が、第1回目の載荷によって部分的に降伏して応力の再配分が生じたものと考えられる。このように、圧延桁およびキャンパー加工桁の載荷試験では、残留応力が存在する結果として、荷重変形曲線が非弾性的に変化することが多いが^{14), 27)}、実際にそれによる残留変形は小さい。さらに、第2回目以降の載荷に対しては、弾性的な挙動を示すことから、第1回目の荷重より小さい荷重をくり返す場合には、残留変形の蓄積も生じないと考えられ、実際に圧延H形鋼を曲げ部材として使用する場合には、あまり問題にならないと考えられる。

引張側フランジに大きな引張残留応力をもつN-タイプ、W-タイプ、H-タイプに比べて、残留応力除去焼鈍を施したNA-タイプの桁では、荷重-変形の関

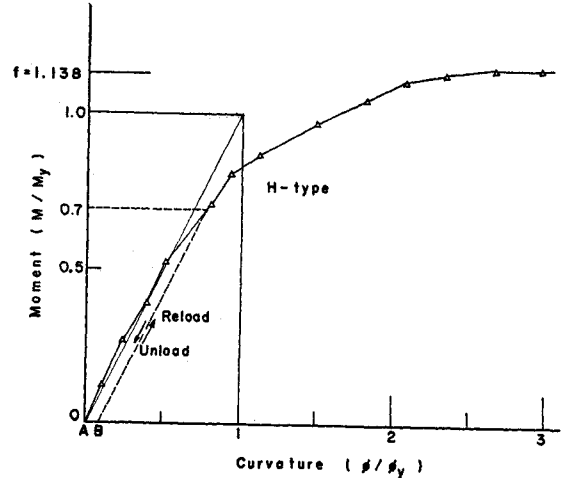


図-10 曲げモーメント-曲率曲線と残留曲率 (H-タイプ)

係は、桁の降伏曲げモーメントを越すまで直線性を保ち、残留応力除去をした影響が顕著に見られる。

5. 曲げ疲労試験結果

(1) S-N 曲線

圧延H形鋼桁およびキャンパー加工桁に対する曲げ疲労試験を行なった結果を、図-11~図-14 および表-4に示す。ここで縦軸は、フランジの曲げ応力振幅を示し、横軸は破断までのくり返し数を対数目盛で示した。ここで各タイプのS-N曲線は、図中の疲労き裂の生じなかった桁を除いた桁のフランジ応力振幅と破断までのくり返し数に対して、最小二乗法を用いて決定された。なお後述のSt-タイプ・クラックを生じたもの(N-2, N-7)およびSp-タイプ・クラックを生じたもの(特に疲労寿命の短いもの(H-10)は除外してS-N曲線を決定した。

図-13と図-14のW-タイプとH-タイプのS-N

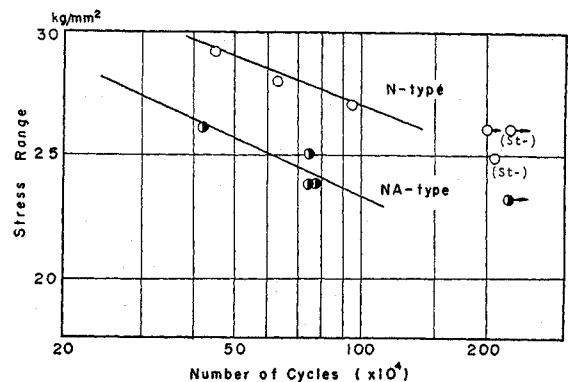


図-11 S-N 曲線 (N-タイプおよび NA-タイプ)

表-4(a) N-タイプの桁の疲労試験結果

Beam No.	Max. Stress (kg/mm ²)	Min. Stress (kg/mm ²)	Stress Range (kg/mm ²)	Cycles (×10 ⁴)	Type of Crack
N-1	33.70	4.35	29.35	45.8	Fe-type
N-2	30.43	4.35	26.08	231.0	St-type, Run out
N-4	30.43	4.35	26.08	200.0	No Crack
N-5	31.52	4.35	27.13	94.0	Fe-type
N-6	32.60	4.35	28.25	62.3	Fe-type
N-7	29.35	4.35	25.00	205.4	St-type

表-4(b) NA-タイプの桁の疲労試験結果

Beam No.	Max. Stress (kg/mm ²)	Min. Stress (kg/mm ²)	Stress Range (kg/mm ²)	Cycles (×10 ⁴)	Type of Crack
NA-1	27.17	4.35	22.82	218.3	No Crack
NA-2	28.26	4.35	23.91	75.9	Fe type
NA-4	29.35	4.35	25.00	75.6	Fe-type
NA-5	30.43	4.35	26.08	42.0	Fe-type
NA-6	28.26	4.35	23.91	75.8	Fe-type

表-4(c) P-タイプの桁の疲労試験結果

Beam No.	Max. Stress (kg/mm ²)	Min. Stress (kg/mm ²)	Stress Range (kg/mm ²)	Cycles (×10 ⁴)	Type of Crack
P-1	29.35	4.35	25.00	67.5	Sp-type
P-2	30.43	4.35	26.08	38.8	Sp-type
P-4	26.09	4.35	21.74	200.0	No Crack
P-5	28.26	4.35	23.91	112.0	Fe-type
P-6	27.17	4.35	22.82	187.9	Fe-type
P-8	31.52	4.35	27.17	45.7	Fe-type

表-4(d) W-タイプの桁の疲労試験結果

Beam No.	Max. Stress (kg/mm ²)	Min. Stress (kg/mm ²)	Stress Range (kg/mm ²)	Cycles (×10 ⁴)	Type of Crack
W-2	30.45	4.35	26.08	49.4	Fe-type
W-5	23.91	4.35	19.56	203.5	No Crack
W-6	25.00	4.35	20.65	213.0	No Crack
W-7	26.09	4.35	21.75	70.5	Fe-type
W-8	27.17	4.35	22.82	71.7	Fe-type
W-9	28.26	4.35	23.91	71.2	Fe-type
WA-1	27.17	4.35	22.82	83.2	Fe-type

表-4(e) H-タイプの桁の疲労試験結果

Beam No.	Max. Stress (kg/mm ²)	Min. Stress (kg/mm ²)	Stress Range (kg/mm ²)	Cycles (×10 ⁴)	Type of Crack
H-3	30.43	4.35	26.08	34.2	Fe-type
H-4	31.52	4.35	27.17	32.2	Fe-type
H-5	28.26	4.35	23.91	56.8	Fe-type
H-6	26.09	4.35	21.74	102.4	Fe-type
H-7	23.91	4.35	19.56	242.0	No Crack
H-10	25.00	4.35	20.65	54.3	Sp-type
HA-1*	27.17	4.35	22.82	92.9	Fe-type

曲線中の半黒丸の試験体は、W-タイプおよびH-タイプの桁をそれぞれ残留応力除去焼鈍を行なった後に疲労試験を行なったものである。W-タイプおよびH-タイプについてそれぞれ1体ずつ疲労試験を行なった結果では、残留応力除去焼鈍の処理は、少し長い疲労寿命を与えているようである。しかしながら、N-タイプとNA-タイプを比較すると、残留応力除去焼鈍処理が必ずしも疲労強度の向上につながると思われない。

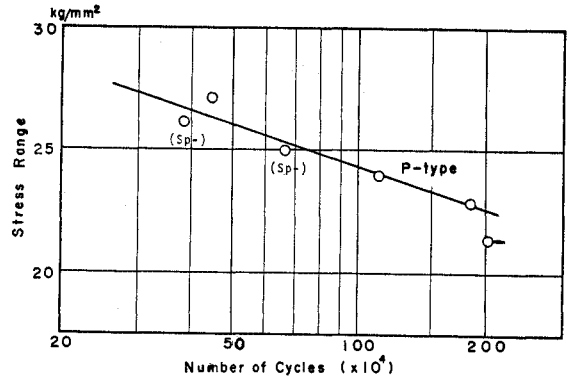


図-12 S-N 曲線 (P-タイプ)

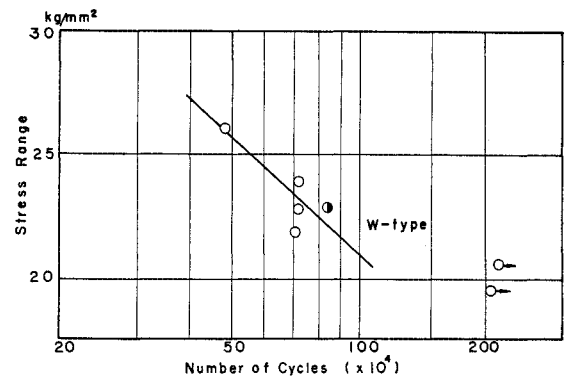


図-13 S-N 曲線 (W-タイプ)

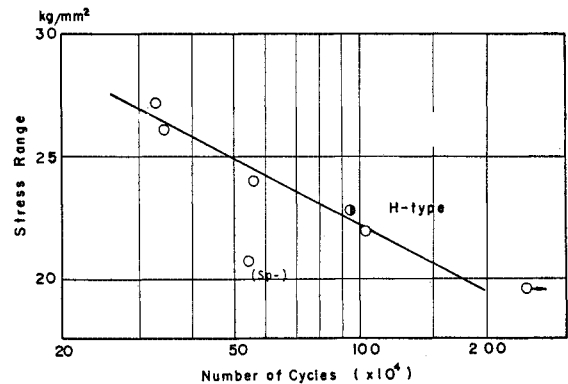


図-14 S-N 曲線 (H-タイプ)

つぎに各タイプの S-N 曲線から、200 万回疲労強度を推定すると表-5 のようになる。ここで N-タイプ、NA-タイプ、H-タイプそれに W-タイプでは、200 万回のくり返し荷重によって疲労き裂の生じなかった桁のフランジの曲げ応力をもって、200 万回疲労強度とした。表-5 からわかるように、無加工桁 (N-タイプ) に比べて、残留応力除去焼鈍桁 (NA-タイプ)、プレス加工桁 (P-タイプ)、熱+水加工桁 (W-タイプ)、熱加工桁 (H-タイプ) の順に疲労強度の低下を示した。

表-5 各タイプの200万回疲労強度

Type	Max. Stress (kg/mm ²)	Min. Stress (kg/mm ²)	Stress Range (kg/mm ²)
N-type	30.43	4.35	26.08
NA-type	27.17	4.35	22.82
P-type	26.95	4.35	22.60
W-type	25.00	4.35	20.65
H-type	23.91	4.35	19.56

(2) 疲れ限度線図

本実験よりえられた200万回疲労強度を、縦軸に最大応力、横軸に最小応力をとった疲れ限度線図上に示すと図-15 のようになる。

比較のため、母材、ガス切断線をもつ母材、縦ビードのある母材²⁴⁾、スティフナーのある母材²⁵⁾の200万回疲労強度を同図に示す。これらはいずれも、母材の破断強度が50 kg/mm²級の鋼材の試験結果をまとめたものである。

疲れ限度線図上で、ある応力比の疲れ限度と母材の引張破断強度を直線で結ぶと、任意の応力比に対する疲れ限度が近似的にえられる。そこでこれらの実験値と母材の破断強度を直線で結んで圧延H形鋼の試験結果を比較すると、無加工桁(N-タイプ)は、ほぼ母材の疲労強度が期待できることがわかった。また、キャンパー加工桁も、溶接継手の引張試験結果より高い疲労強度を示した。

Fisher, Frank, Hirt⁹⁾らは、実験結果を5種類の応力とくり返し数の関係式で整理している。そのうちの、モデルAの関係式 $\log N = B_1 + B_2 \sigma_r + B_3 \sigma_{min}$ は、最小応力 σ_{min} 、応力範囲 σ_r とくり返し数 N との関係を示している。いま、最大応力 σ_{max} が、 $\sigma_{max} = \sigma_{min} + \sigma_r$ で表わされることを考慮して前式を書きなおすと、 $\log N = B_1 + B_2 \sigma_{max} - (B_2 - B_3) \sigma_{min}$ となり最大応力 σ_{max} 、最小応力 σ_{min} およびくり返し数の間の関係式となる。た

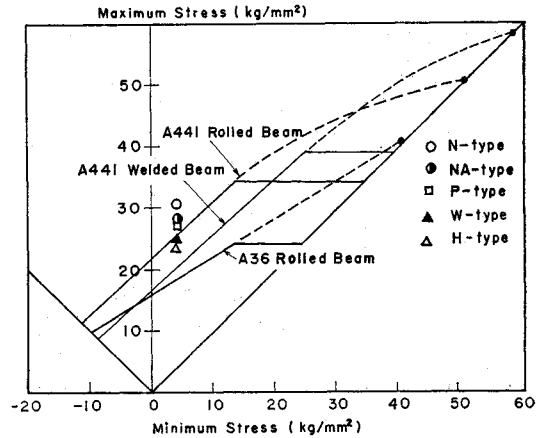


図-16 疲れ限度線図 (Fisher, Frank, Hirt らの実験⁹⁾ との比較)

たとえば、 $N = 2 \times 10^6$ とすると、前式は、200万回疲れ強さに対する疲れ限度線を示していることになる。

Fisher らの行なった多くの実験のうち、A 36 圧延鋼桁、A 441 圧延鋼桁、A 441 鋼溶接桁について、200万回疲れ強さに対する疲れ限度線図を求めて、本実験の結果と比較すると、図-16 のようになる。それらの桁のフランジの引張破断強度は、A 36 圧延鋼桁では、42.1 kg/mm²、A 441 圧延鋼桁では 50.9 kg/mm²、A 441 鋼溶接桁では、59.1 kg/mm² である。A 441 圧延鋼桁は、A 36 圧延鋼桁および A 441 鋼溶接桁より高い疲労強度を持ち、本実験に近い値を示している。

一般に、溶接継手および溶接組立桁の疲労試験では、母材の静的強度の上昇は、必ずしも疲労強度の上昇につながらない。しかしながら圧延H形鋼では、溶接組立桁に見られる熱影響部などの比較的疲労の欠陥となる部分を含まないため、疲労強度は、母材の強度の上昇にたがって向上すると考えられる。

(3) 疲労クラックの分類

圧延H形鋼桁に生じた疲労クラックについて、破断面を観察して分類すると、表-4 および図-17 に示すように、4種類の結果がえられた。

a) St-タイプ・クラック

このタイプのクラックは、載荷点のスティフナーの取付溶接止部端から発生して、腹板へ広がったクラックである。このタイプのクラックは、N-タイプで2例見られた。すなわち、N-2 桁で37万回のくり返し後、クラックが発生した。しかし、このクラックはこれ以上進行せず、231万回で試験機を止めた。またN-7では、112万回および115万回でそれぞれ両側のスティフナーからクラックが入り、徐々に下フランジの方向へ進行して、205.4万回のくり返しの後、下フランジが破断した。N-2

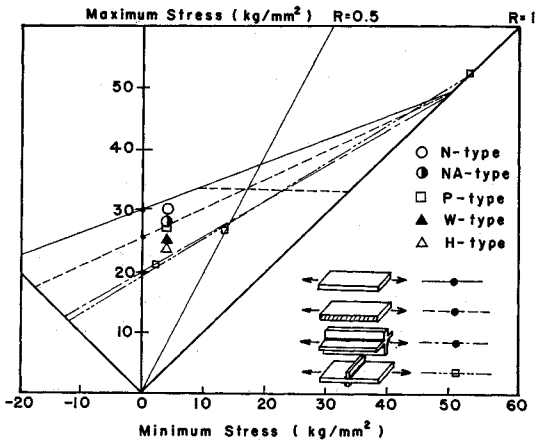


図-15 疲れ限度線図上に示した試験結果

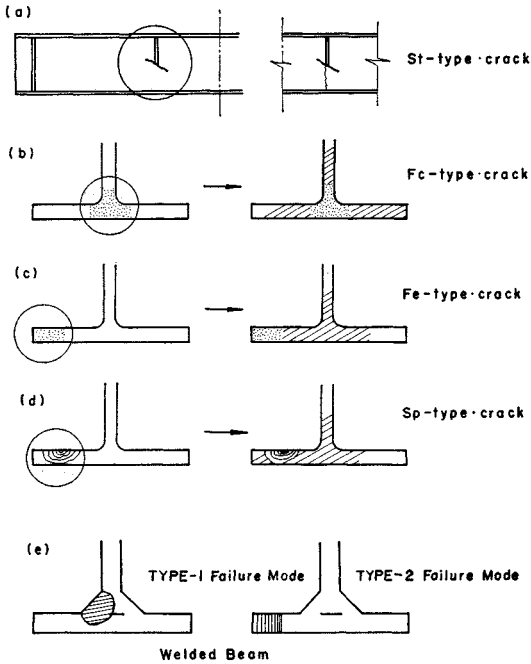


図-17 圧延 H 形鋼桁に発生した疲労クラックの分類

および N-7 の桁以外のすべての桁は、このスティフナーの端部をグラインダーで仕上げたところ、このタイプのクラックはこれ以上発生しなかった。

b) Fc-タイプ・クラック

このクラックとつぎに述べる Fe-タイプ・クラックが、圧延 H 形鋼特有の疲労破面を示していた。すなわち、Fc-タイプ・クラックは、下フランジ中央部でフランジ・ウェブ交点付近 (flange center) から発生したもので、溶接組立桁に見られるような応力集中による貝殻状の明瞭なクラックの開始点の見られない破断面を持つものである。

c) Fe-タイプ・クラック

Fe-タイプ・クラックは、Fc-タイプ・クラックと同様に明瞭なクラックの発生点を持たないクラックである。Fc-タイプと違って、発生した場所がフランジの端部 (flange tip) にあるものを、Fe-タイプ・クラックと名づけた。

d) Sp-タイプ・クラック

スティフナーまたは載荷板の溶接のときに発生したスパッタやアークストライクが、クラックの発生点となっているものである。本試験では、比較的溶接欠陥に敏感な材料 (SS 50) を用いたため、応力集力による貝殻状の明瞭なクラックの発生点が観察された。このような Sp-タイプのクラックの発生した桁は、全部で 3 例見られた。そのうち H-10 に見られたものは、載荷点のスティフナーの近くの下フランジにアークストライクと思

われる溶接欠陥が存在し、グラインダーで仕上げたのにかわらず非常に短い疲労寿命を示している。他の 2 例 (P-1 と P-2 桁) でも、やはり Fe-タイプおよび Fc-タイプのクラックの発生した桁より短い疲労寿命を示しているようである。また Fe-タイプ・クラックと Fc-タイプ・クラックが発生した桁相互の疲労寿命の差はあまり認められなかった。なお St-タイプ・クラックを除いてすべての破断は、桁の中央等曲げモーメントの区間 400 mm の間で生じた。

Fisher ら⁵⁾の実験のうち、圧延鋼桁では、上述の Fe-タイプ・クラックと Fc-タイプ・クラックのほかに、両振載荷を行なったために生じたと思われる 2 種類のクラックを報告している。その 1 つは、木製のスティフナーを載荷点の両クラックの間にはさんだところ、その接触面からクラックが生じたものと、他の 1 つはジャッキの接触面から発生したものである。本実験と Fisher らの実験を考え合わせて、圧延 H 形鋼の疲労クラックの特徴として、特に Fe-タイプ・クラックと Fc-タイプのクラックをあげることができる。

(4) 残留応力と疲労クラック

図-18 には 200 万回以上のくり返し載荷に耐えた桁の残留応力分布を測定した結果を示す。くり返し載荷前断面に含まれる残留応力分布形 (図-3) に比べて、N-タイプ、H-タイプ、W-タイプで残留応力の変化は著しく、P-タイプ、NA-タイプのそれは比較的少ない。

ここで、残留応力が変化した理由としてつぎの二つが考えられる。すなわち (1) 残留応力と作用応力との和が降伏点をこえて、残留応力の再配分が生じたことと^{18), 20)}、(2) くり返し応力による残留応力の減少によるものが^{8), 12), 20)}考えられる。前者は、最初の 1 サイク

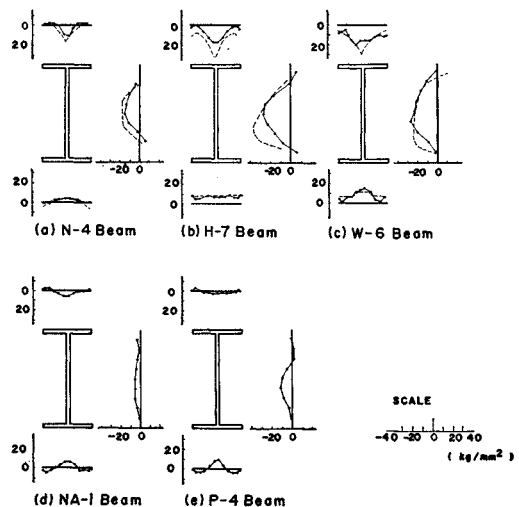


図-18 2×10^6 回以上のくり返し載荷後の残留応力分布

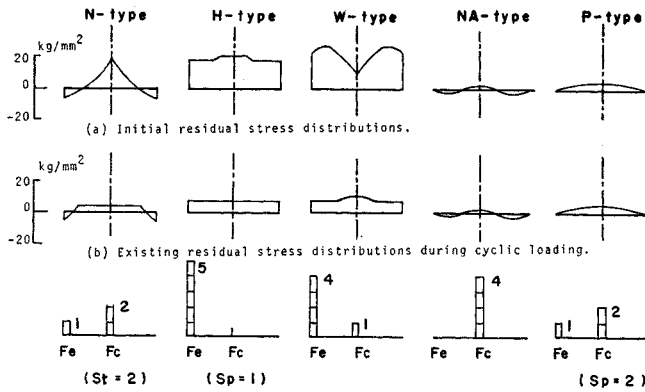


図-19 残留応力分布と疲労クラックの分類

ルの載荷で起こり、後者は多くのくり返し数を要する。

いま最初の残留応力分布(図-3)に作用応力を加えて残留応力の再配分を計算して図-18に破線で示す。P-タイプ、H-タイプそれにW-タイプでは、下フランジに引張残留応力が存在しており、作用応力により応力の再配分が生じる。この計算値は、200万回のくり返し載荷後の残留応力の測定値とよく一致した。すなわち、200万回くり返し後の残留応力の分布は、第1回目の載荷によって再配分されたと考えられ、疲労試験中に存在する残留応力分布であると考えられる。これはまた、疲労試験中のくり返し載荷による残留応力の減少がほとんどないことを示している。

つぎに図-19に、分類したクラックの発生件数と、疲労強度に相当する最大荷重のもとで残留応力の再配分を計算した結果を模式的に示す。圧延桁の場合、フランジ端部の方がフランジ中央部に比べて載荷の際のさけられない微少な偏心と重なって、クラックの開始点となりやすいと思われる。たとえば、H-タイプの桁とW-タイプの桁では、フランジ端部からクラックが発生している(Fe-タイプ・クラック)。この場合、H-タイプの桁ではフランジの端部も、中央部もほぼ等しい引張残留応力が存在する。逆にN-タイプ、P-タイプ、NA-タイプの各桁では、フランジ端部に比べて、フランジ中央部の引張残留応力が大きく、クラックの発生は、フランジ中央部からのもの(Fc-タイプ・クラック)が多い。

以上のように、圧延H形鋼特有のクラックであるFe-タイプ・クラックとFc-タイプ・クラックでは、クラックの発生におよぼす残留応力分布の影響があると思われる。

(5) 残留応力を考慮した疲労強度

残留応力が疲労強度に与える影響は、一般に存在する残留応力を平均応力と考えて、考慮することができ(12), (19), (20)。そこで、圧延H形鋼桁の疲労強度に、疲労

試験中に存在する残留応力を加えて、疲れ限度線図に示す。たとえば、H-タイプの桁の場合、表-5に示すように、200万回疲労強度は、フランジの曲げ応力度について、最大応力 23.91 kg/mm²、最小応力 4.35 kg/mm²で与えられる。フランジの最大応力に相当する曲げモーメントは、4.43 t・m であり、その曲げモーメントによって、疲労試験前に存在していた残留応力分布(図-3(b))は、再配分をうけて、引張側フランジでは、約 9.3 kg/mm²のほぼ均一な残留応力になることが考えられる。また、この再配分をうけた残留応力分布は、くり返し載荷によって変化しないと考えられる。

いま前記の最大応力と最小応力に、この疲労試験中に存在する残留応力を加えると、残留応力の存在を考慮した場合のフランジ応力として、最大応力 33.2 kg/mm²、最小応力 13.6 kg/mm²をえる。同様にして、各タイプの桁の200万回疲労強度について、存在する残留応力を最大応力と最小応力に加えて疲れ限度線図上に示すと、図-20のようになる。

図-20に見られるように、N-タイプの桁以外は、応力比 $R=0$ の場合で、約 26~27 kg/mm²のほぼ等しい疲労強度を持つと考えられる。これは、引張試験における破断強度の平均値の約 46~48%に相当する。残留応力の存在を考慮した疲れ限度線図が、ほぼ等しい疲労強度を示すことから、逆に、前述したキャンパー加工された桁の疲労強度の違いが、残留応力の存在によるものではないかと思われる。またキャンパー加工のさい問題にされる材質変化などは比較的少なく、疲労強度にあまり影響を与えないのではないかとと思われる。

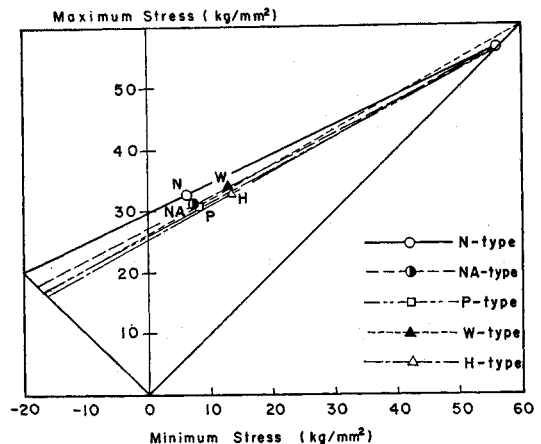


図-20 残留応力の影響を考慮した疲れ限度線図

6. 結 語

圧延H形鋼の静的挙動および疲労挙動について基礎的な実験を試みた。供試体は、H-200×100×5.5×8 (SS 50) の桁に3種類のキャンパー加工をほどこした。すなわち、熱加工 (H-タイプ)、熱+水加工 (W-タイプ)、プレス加工 (P-タイプ) を行なったものを用いた。また、無加工桁 (N-タイプ) と残留応力除去焼鈍処理を行なった桁 (NA-タイプ) についても、比較のために実験を行なった。

静的曲げ試験では、各タイプの桁は、いずれも全塑性モーメント M_p をこえる耐荷力を示した。このことは、圧延H形鋼に存在する残留応力は、静的曲げ耐荷力に影響を与えないことを示している。また、キャンパー加工法の違いが静的曲げ耐荷力に与える影響も認められない。

曲げ疲労試験は、上記の5つのタイプの桁について、合計31本を用いて行なって、S-N曲線を求め、200万回疲労強度を求めた。圧延H形鋼は、溶接組立桁に存在する熱影響部や、溶接欠陥などの疲労クラックの核となる部分を持たないため、ほぼ母材の引張疲労強度まで期待できると考えられる。

圧延H形鋼にキャンパー加工を施すと、疲労強度は低下する。その割合は、熱加工したものが大きく、プレス加工の場合は比較的小さい。しかしながら同程度の断面形状をもつ溶接組立桁の実験値と比べると、なお高い疲労強度を持つことがわかった。したがって、圧延H形鋼をキャンパー加工した場合も、溶接組立桁の疲労強度と同程度か、それ以上の疲労強度を期待できると考えられる。本研究では、さらに圧延H形鋼桁に生じた疲労クラックの形式を分類し、これをもとに圧延H形鋼特有のクラックを明らかにすることができた。

最後に本研究における桁の製作加工およびキャンパー加工は、日本車輛大江工場で行ない、好意あるご協力をいただいたことを付記して感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) ASCE, Subcommittee on Cover Plates : "Commentary on welded cover-plated beams", Proc. ASCE Vol. 93, No. ST 4, August, 1967.
- 2) Brockenbrough, R.L., K.D. Ives : "Experimental stresses and strains from heat curving", Proc. ASCE Vol. 96, No. ST 7, July, 1970.
- 3) Brockenbrough, R.L. : "Theoretical stresses and strains from heat curving", Proc. ASCE Vol. 96, No.

- ST 7, July, 1970.
- 4) Brockenbrough, R.L. : "Criteria for heat curving steel beams and girders", Proc. ASCE Vol. 96, No. ST 10, October, 1970.
- 5) Fisher, J.W., K.H. Frank : "Effect of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams", NCHRP Report 102, Highway Research Board, 1970.
- 6) Gurney, T.R. : "Fatigue of Welded Structures", Cambridge University Press, London, 1968.
- 7) Lea, F.C., J.G. Whitman : "The failure of girders under repeated stresses", Welding Journal, Vol. 18, Jan., 1939.
- 8) Lee, T.T., D.M. Wilson : "Residual Stresses and Fatigue Behavior of Welded Structural Members", Iowa State University, Iowa, Jan., 1967.
- 9) Hirt, M.A., B.T. Yen, J.W. Fisher : "Fatigue strength of rolled and welded steel beams", Proc. ASCE Vol. 97, No. ST 7, July, 1971.
- 10) Manson, S.S. : "Thermal Stress and Low-cycle Fatigue", McGraw-Hill, 1966.
- 11) Munse, W.H., L.M. Grover : "Fatigue of Welded Steel Structures", Welding Research Council, New York, 1964.
- 12) Osgood, W.R. : "Residual Stresses in Metals and Metal Construction", Reinhold Publishing Corporation, New York, 1954.
- 13) Wilson, W.M. : "Flexural Fatigue Strength of Steel Beams", Bull. No. 377, Univ. of Ill., 1943.
- 14) 西野文雄・奥村敏恵 : 大型圧延H形鋼の曲げ性状, 土木学会第25回年次学術講演会概要集, 昭和45年11月
- 15) 特集「残留応力と座屈」, 日本鋼構造協会誌, Vol. 3, No. 16, 昭和42年4月
- 16) 特集「機械要素の強度設計と残留応力」, 機械設計 Vol. 15, No. 2, 日刊工業新聞社, 1971年1月
- 17) Almen, J.O., P.H. Black 著 (宮下松男・今井邦典訳) = "金属の残留応力と疲労", 日刊工業新聞社, 昭和39年
- 18) Galambos, T.V. 著 (福本啓士・西野文雄共訳) : "鋼構造部材と骨組一強度と設計一", 丸善, 昭和45年
- 19) 日本金属学会強度委員会編 : "金属材料の強度と破壊", 丸善, 昭和43年
- 20) 日本材料学会編 : "金属の疲労", 丸善, 昭和39年
- 21) 渡辺正紀・佐藤邦彦 : "溶接力学とその応用", 朝倉書店, 昭和40年
- 22) 日本金属学会・日本鉄鋼協会編 : "鉄鋼材料便覧", 丸善, 昭和42年
- 23) 大久保忠良・池村雅司 : "リングの曲げねじれ座屈およびH形鋼の残留応力", 土研資料-593, 建設省土木研究所, 昭和45年3月
- 24) 鋼鉄道橋設計標準解説「3. 建造物設計標準 (鋼鉄道橋)」, 解説および付属資料, 土木学会, 昭和45年
- 25) 日本鋼構造協会耐久性分科会「溶接継手の疲れ強さに関する実験的研究—リブ十字形前面すみ肉溶接継手の疲れ強さ」, 日本鋼構造協会誌, Vol. 7, No. 72, 昭和46年12月
- 26) 大久保忠良 : "大型圧延H形鋼を用いた橋梁の問題点", 橋梁と基礎, Vol. 5, No. 3, 昭和46年3月
- 27) 西野文雄・伊藤学・星基正明 : 「ハイブリッドばりおよび大型圧延H形鋼ばりの曲げ挙動」, 日本鋼構造協会誌, Vol. 7, No. 71, 昭和46年11月

(1971.7.11・受付)