
大型圧延H形鋼の残留応力と曲げ耐荷力

Effect of Residual Stress on Ultimate Bending Strength of Rolled H-Shapes

石渡 正夫(Masao Ishiwata) 浜田 敬之介(Keinosuke Hamada) 佐々木 徹(Toru Sasaki) 中西 輝行(Teruyuki Nakanishi) 近藤 信行(Nobuyuki Kondo)

要旨：

圧延H形鋼は圧延中および冷却過程において、フランジとウェブとの間に温度差を生じ、内部に残留応力を生じている。とくに桁高の大きい圧延H形鋼では残留応力は大きくなる傾向にある。本研究は圧延H形鋼の残留応力を測定し、残留応力が曲げ耐荷力におよぼす影響を明らかにすることを目的としている。実験の結果、通常の圧延H形鋼に導入されている残留応力は 20kg/mm² 以内であり、この程度では設計荷重では実用上問題となる残留変形、剛性の低下はない。また曲げ耐荷力に対しては残留応力の影響はなく、塑性ひずみが十分進行したのち、圧縮側フランジの横座屈により破壊していることもわかった。

Synopsis：

The rolled H-shapes, in the process of their rolling and cooling, bring about a difference in temperature between the flange and the web and generate residual stress inside. Residual stress is apt to become larger especially as the web is higher. This study is aimed at measuring the residual stress of rolled H-shapes and clarifying its effect on the ultimate bending strength of the H-shapes. As the result reveals, the residual stress locked up in the usual rolled H-shapes is within 20kg/mm². This means that with the residual stress remaining so low, no reduction practically will occur in the residual deformation or stiffness though this often becomes a matter of concern in respect of design load. Moreover, no effect of residual stress is observed on the ultimate bending strength, and even if the rolled H-shapes are broken, it is found due to the lateral buckling of compression of the flange after plastic strains have advanced considerably.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

大型圧延H形鋼の残留応力と曲げ耐荷力

Effect of Residual Stress on Ultimate Bending Strength of Rolled H-Shapes

石 渡 正 夫*

Masao Ishiwata

浜 田 敬之介*

Keinosuke Hamada

佐々木 徹**

Toru Sasaki

中 西 輝 行***

Teruyuki Nakanishi

近 藤 信 行****

Nobuyuki Kondo

Synopsis :

The rolled H-shapes, in the process of their rolling and cooling, bring about a difference in temperature between the flange and the web and generate residual stress inside. Residual stress is apt to become larger especially as the web is higher.

This study is aimed at measuring the residual stress of rolled H-shapes and clarifying its effect on the ultimate bending strength of the H-shapes.

As the result reveals, the residual stress locked up in the usual rolled H-shapes is within 20kg/mm^2 . This means that with the residual stress remaining so low, no reduction practically will occur in the residual deformation or stiffness though this often becomes a matter of concern in respect of design load.

Moreover, no effect of residual stress is observed on the ultimate bending strength, and even if the rolled H-shapes are broken, it is found due to the lateral buckling of compression of the flange after plastic strains have advanced considerably.

1. ま え が き

圧延H形鋼（以下H形鋼）は断面性能がすぐれているため、合理的な建設用鋼材として、橋梁、建築、港湾、仮設材等多方面に使用され、その需要量は年々増大している。

橋梁用としてH形鋼は支間25mまでの桁として使用される。当初は組立橋梁として小規模な橋に用いられていたが、昭和43年頃より高速道路の高架橋に使用され、さらに各地で本格的に採用されるようになった。このようにH形鋼が橋梁材として重要な役割を果たすようになったため、H形鋼の

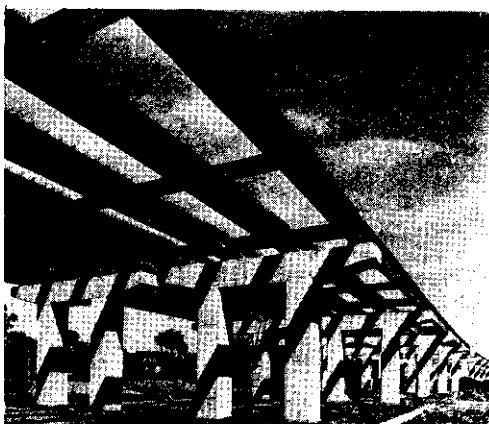


写真 1 圧延H形鋼を用いた高架橋

* 本社建材開発部土木開発室技長

*** 水島製鉄所管理部条鋼管理課

** 本社技術研究所水島研究室主任研究員

**** 本社技術研究所水島研究室

諸性質、とくに製造中に生じる残留応力が桁の耐荷力におよぼす影響を明らかにすることが、関係者より強く求められるようになった。

圧延残留応力は圧延中および冷却過程において、フランジとウェブの温度差により生じ、その分布と大きさは形鋼のH形状により異なる。橋梁材のように桁高の大きいH形鋼はウェブの冷却速度が早いので、フランジとの温度差を生じやすく、残留応力は大きくなる傾向にある。一方橋梁材として多く用いられる溶接H形鋼は鋼板を切断加工し、溶接により組立られるが、溶着部にはほぼ降伏点に近い引張残留応力が生じ、他の部分はこれに釣合う圧縮残留応力が生じている¹⁾。したがって溶接H形鋼では断面が大きくなっても溶着部はそれほど増加しないので、溶着部以外の圧縮残留応力は低下する傾向にある。このように、圧延材、溶接材では残留応力は異った分布形状を示し、力学的性状についても異った問題点をもっている。

圧延残留応力の解明は製造、利用の両面より要請される。製造面においては通常工程材の残留応力の実体を把握することが品質管理上必要であり、また利用面においては残留応力が構造部材の挙動におよぼす影響を明らかにすることにより、これを設計にいかすことができる。

構造材は大別すると、柱、はり、柱+はりに分けられる。柱材については残留応力が座屈におよぼす影響について多くの研究がなされている^{1),2)}。はり、柱+はりについては、従来中小サイズのH形鋼により研究されているが、橋梁に使用されるような大型サイズのH形鋼については研究されていない。

本研究は製造方法、加工方法により異った残留応力をもつ、JIS 最大である900mmシリーズの2サイズのH形鋼を試験材とし、残留応力の測定、曲げ耐荷力試験を行ない、残留応力が曲げ耐荷力におよぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. H形鋼の残留応力と材質

2.1 圧延残留応力の発生原因

H形鋼は通常鋼塊を分塊圧延機、ブレードダウ

ン圧延機、粗ユニバーサル圧延機、エッジャー圧延機により順次圧延し、最後に仕上ユニバーサル圧延機によって所定の形状に熱間圧延することにより製造される。H形鋼全体が均一な温度で圧延されれば問題ないが、H形鋼の形状はフランジ厚みよりウェブ厚みのほうが小さいために熱容量に差があること、ウェブからの放熱量が大きくまた圧延時水平なためにロール冷却水が飛散して冷却を早めることなどの理由により、フランジとウェブに温度差を生ずる。

この温度差は、素材が上述の工程を通り次第にH形鋼として形づくられていく過程で漸次現われ、仕上圧延機を通過する時点で最も大きくなる。仕上圧延機直後の温度分布測定例を図1に示す。フランジ温度に比べてウェブ温度はかなり

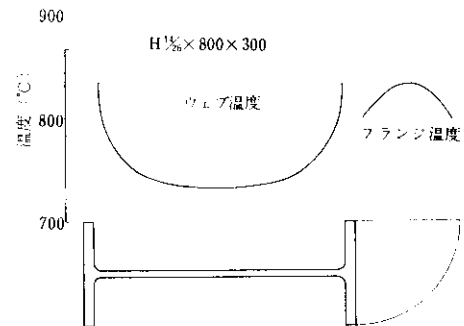


図1 仕上圧延機通過直後の温度分布

低くなっている。この結果ウェブの冷却収縮量はフランジの冷却収縮量より小さくなるので、ウェブに圧延方向の圧縮、フランジに圧延方向の引張残留応力が誘発されることになる。

この残留応力の大きさは、仕上圧延機通過直後にはH形鋼に内部応力は存在せず、冷却収縮量の相違のみが応力を発生させ、しかも冷却途中に内部応力による塑性変形が起こらないと仮定すれば以下のようにして予測することができる。すなわち図2に示すような収縮量の関係およびそれによって生ずる内部応力の釣合によって(1)、(2)式が成立する。(注：ウェブの圧縮応力もプラスで表わす)

$$x + y = l\alpha (T_{if} - T_{im}) \quad \dots\dots (1)$$

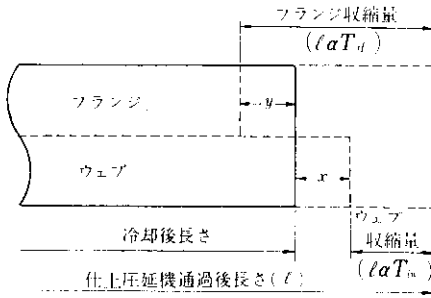


図2 冷却および内部応力による変形量の関係

$$\begin{aligned} xEA_w/\ell(1-\alpha T_{iw}) \\ = yEA_f/\ell(1-\alpha T_{if}) \end{aligned} \quad \cdots(2)$$

ここに、

- x : 残留応力によるウェブ変形量
- y : 残留応力によるフランジ変形量
- ℓ : 仕上圧延機通過後のH形鋼長さ
- α : 線膨張係数

T_{iw} : ウェブ仕上温度

T_{if} : フランジ仕上温度

E : ヤング率

A_w : ウェブ断面積

A_f : フランジ断面積

冷却後のウェブ残留応力 σ_w およびフランジ残留応力 σ_f は、(3)、(4)式で表わされるので、(1)、(2)式より x, y を求めて代入し整理すると(5)、(6)式のようになる。

$$\sigma_w = xE/\ell(1-\alpha T_{iw}) \quad \cdots(3)$$

$$\sigma_f = yE/\ell(1-\alpha T_{if}) \quad \cdots(4)$$

$$\sigma_w = \frac{E\alpha(T_{if}-T_{iw})}{1+A_w/A_f} \quad \cdots(5)$$

$$\sigma_f = \frac{E\alpha(T_{if}-T_{iw})}{1+A_f/A_w} \quad \cdots(6)$$

(5)、(6)式から残留応力は、ウェブとフランジの仕上温度差によって直線的に増加し、またウェブとフランジの応力は、各々の断面積によって変化することがわかる。

残留応力の軽減方法は、温度差をなるべく小さくするように圧延することが肝要である。このために圧延中ウェブを冷却する要因を極力排除する

とともに積極的にフランジを水冷する方法やその他の方法が行なわれている。圧延時に生じた残留応力を、製品で除去する方法としては、応力除去焼鈍や線条加熱などが考えられるが、いずれも作業能率が悪い上に、材質劣化や形状不良を生ずるおそれがあるので好ましくない。

2.2 圧延残留応力の測定方法と測定結果

熱応力として存在する残留応力には、上述の圧延方向の応力のほかに、板表面は内部より冷却速度が大きいためにより生ずる板厚方向での分布もあるはずであるが、これは板厚平均では0になると考えられる。したがってここでは板厚方向の平均的応力 (body stress) としての圧延方向残留応力を問題にしていることになる。このような応力の測定方法として著者らが採用したのは、セクションング法である。この方法は、ウェブ高さの3倍以上の長さのH形鋼各断面位置に、ワイヤーストレインゲージあるいはコンタクトストレインゲージ鋼球を設置し、ゲージ周辺を切断して応力解放を行ない、切断前後の標点距離の変化からひずみ量を求め応力を算出する方法である。

試料長さの残留応力測定値におよぼす影響は、H-6.5/9×300×150mmでは図3に示すようになるので、少なくともウェブ高さの3倍以上の長さは必要である。短い試料を使用するとすでに応力の一部が解放されているので、残留応力を過少評価することになる。

残留応力の測定例を、後に耐力試験を行なったH-15/23×890×299mmとH-16/34×912×300

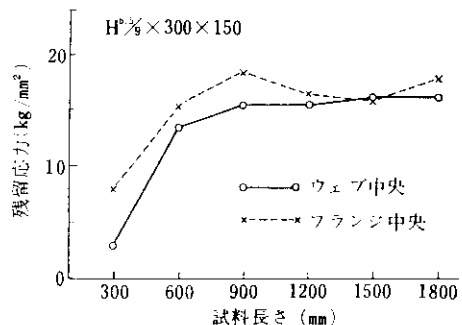


図3 試料長さによる中央断面での残留応力測定値の変化

mm(材質はともに S M50Y)について、図 4 に示す。いずれも市販されているもののうち、ウェブ高さが最も大きいために、仕上温度不均一が生じ

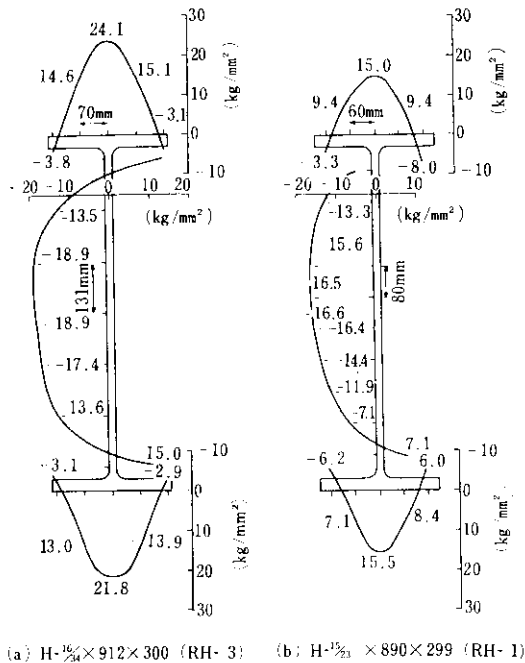


図 4 細幅H形鋼の残留応力分布

やすいものである。応力分布は、ウェブおよびフランジ中央にピークを有する曲線になり、H 15/23 × 890 × 299 mm では、ウェブ、フランジの最大値はそれぞれ 18.9 kg/mm² (圧縮) と 24.1 kg/mm² (引張) になる。また H 16/34 × 912 × 300 mm では、最大値がウェブの 16.6 kg/mm² (圧縮) とフランジの 15.5 kg/mm² (引張) になる。前者は特に残留応力

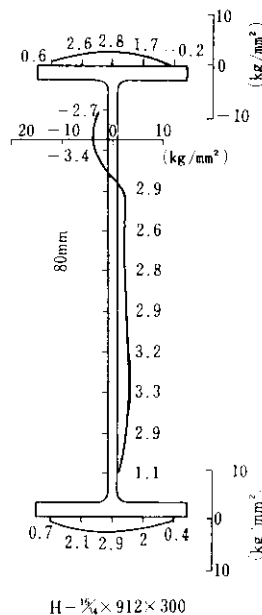


図 5 焼鈍材残留応力分布 (RH-5)

の影響を見るため、フランジとウェブの温度差を特に大きくして圧延したものである。また比較材として応力除去焼鈍を行なった材の残留応力分布を 図 5 に示す。一般に広幅H形鋼は、細幅H形鋼にくらべてウェブの温度が下がり難いので、残留応力の値も小さくなる。図 6 に広幅サイズの H 12/19 × 350 × 350 mm の測定結果を示すが、上述の細幅H形鋼に比べて格段に低い。

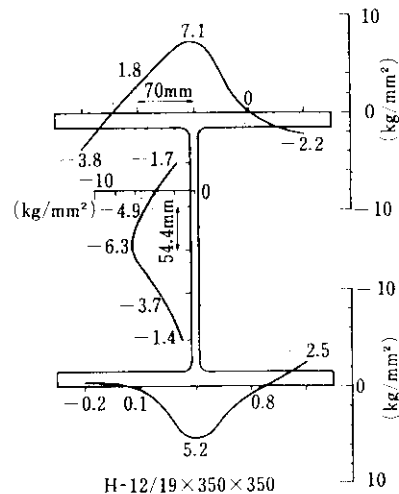
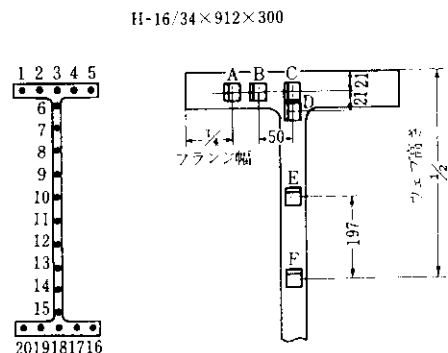


図 6 広幅H形鋼の残留応力分布

2.3 材質試験結果

H 形鋼断面各位置の材質試験を H 16/34 × 912 × 300 mm (S M50Y A) について行なった。すなわち 図 7 に示す各位置より、JIS 4 号引張試験片および JIS 4 号衝撃試験片を採取した。引張試験の結果を 図 8 に、衝撃試験の結果を 図 9 に



引張試験片採取位置

衝撃試験片採取位置

図 7 試験片採取位置

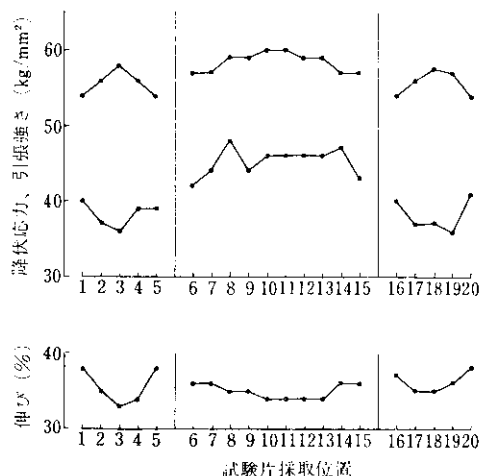


図 8 引張試験結果

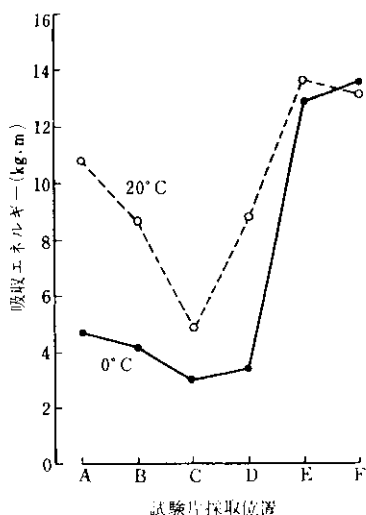


図 9 衝撃試験結果

示す。これらの図から、フランジに比べてウェブの降伏応力が高いことおよびフランジの吸収エネルギーがウェブに比べてかなり低い点が注目される。これはウェブとフランジの圧下率や冷却状況の相違に起因している。

3. 曲げ載荷試験

3.1 目的

残留応力をもったH形鋼を橋桁として用いる場合、次の問題点があげられる。

- (1) 設計荷重範囲内で弾性挙動を有し、十分な極限耐力力を有すること。
- (2) 設計荷重状態で、実用上問題となる剛性の低下、残留変形を生じないこと。

この問題を解明するため 900mm シリーズの二種類のH形鋼 (H15/23×890×299, H16/34×912×300) を用い、各種の残留応力分布 (圧延材, キャンパー材, 焼鈍材) のものと、比較のため同断面の溶接材について曲げ載荷試験を行ない、曲げ耐力力, 残留変形量, 残留応力による桁の力学的挙動の差異, 腹板の座屈等を調べた。

この試験は昭和44年, 45年度, 東京大学工学部奥村研究室への委託研究として行なわれた。試験機は東京大学工学部総合試験所大型構造物試験機を使用した。

3.2 試験桁と試験方法

曲げ載荷試験に用いた試験桁の詳細を 表 1, 図 10 に示す。RH-1, RH-3は2・2の残留応力の測定に使われた材料と同じものであり、それ

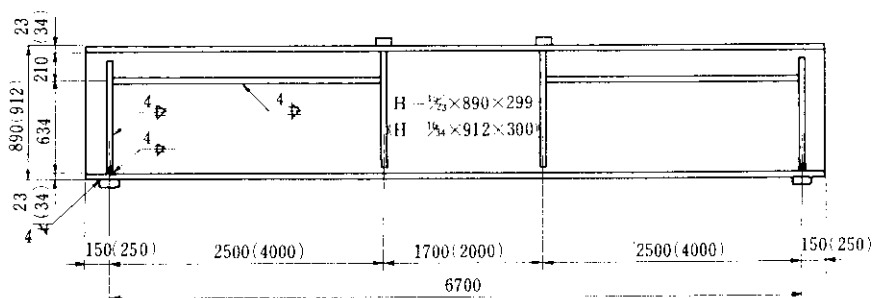
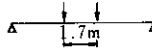
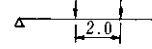


図 10 試験体詳細

表 1 曲げ荷重試験桁詳細

試験番号	断面 ウェブ厚/フランジ厚 ×全高×フランジ幅	支点間隔 (mm)	材 質	処 理	残留応力 分 布	載 荷 方 法
R H-1	H-15/23×890×299	6,700	SM50YA	直 材	図4(a)参照	
R H-2	H-15/23×890×299	"	"	キャンパー材	図11 "	同 上
R H-3	H-16/34×912×300	10,000	"	直 材	図4(b) "	
R H-4	H-16/34×912×300	"	"	キャンパー材	図12 "	同 上
R H-5	H-16/34×912×300	"	"	焼鈍材	図5 "	"
WH 1	H-16/34×912×300	"	"	溶接材	図13 "	"

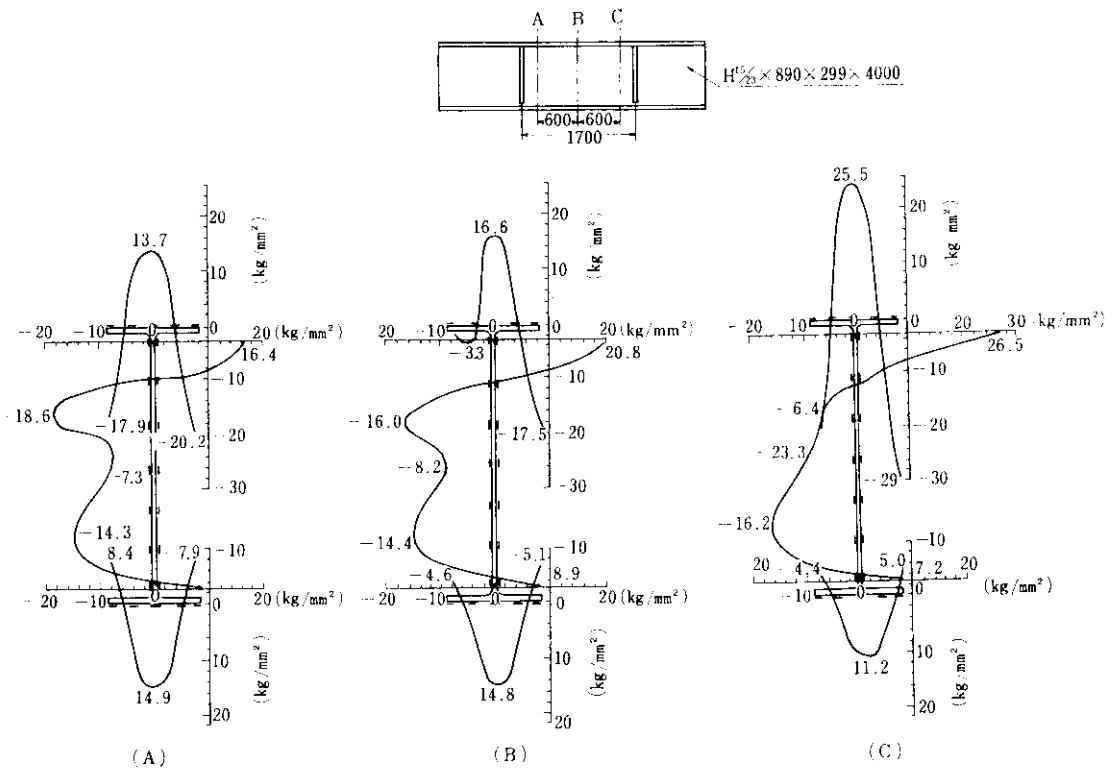


図 11 キャンパー材RH-2の残留応力分布 (キャンパー量 17.5/7,000)

らの残留応力分布は図4に示したとおりである。RH-2, RH-4はそれぞれRH-1, RH-3と同一工程で製造したものをロールバンダーによりキャンパー加工したものであり, 残留応力分

布は図11, 図12に示すように圧延残留応力に塑性加工残留応力が加わったため複雑な応力分布を示している。なおキャンパー加工量はRH-2は17.5mm/6,700mm, RH-4は13.5mm/

10,500mmであり、スパン15mの橋桁に換算するとそれぞれキャンパー量は88mm(1/170), 30mm(1/500)となる。

RH-5はRH-3と同一材を応力除去焼鈍したものであり、その応力分布は図5に示したとおりである。WH-1はRH-3と同一寸法の溶接H形鋼であり、その残留応力分布を図13に示す。

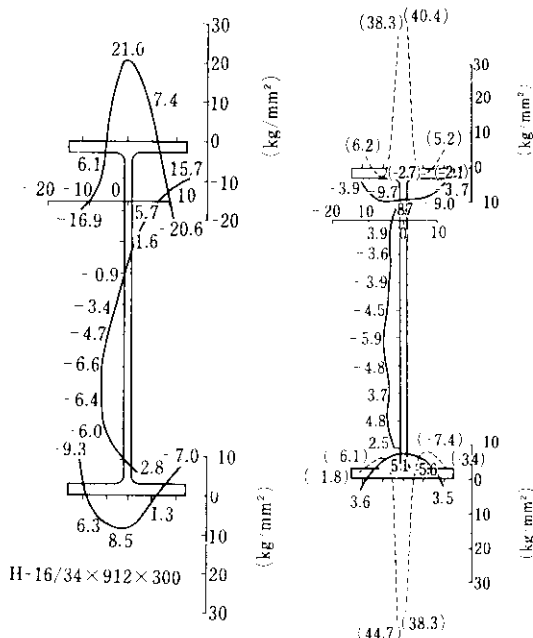


図12 キャンパー材のRH-4残留応力分布(キャンパー量13.5/10,500)

図13 溶接H形鋼WH-1の残留応力分布

WH-1のすみ肉溶接部付近には、ほぼ降伏点に等しい引張残留応力が発生し、その他の部分には圧縮残留応力が分布していることがわかる。なお溶接条件を表2に示す。

表2 溶接H形鋼WH-1の溶接条件

溶 接 機	サブマージドアーク溶接機
溶 接 脚 長	9 mm (1パス)
溶 接 材 料	心線 KW-36 フラックス KF-50
溶 接 電 流	840A
電 圧	32V
速 度	34cm/min

試験桁の支点および荷重点にはローラーを置き摩擦の影響を取除くようにセットした。横座屈防止には荷重点から15cm外側に離れた位置にφ22mmのスタッドジベルを溶接し固定した。



写真2 曲げ载荷試験

荷重は50tを基準とし、10tおきに荷重を増加させ適当な荷重段階で基準荷重50tまで除荷し残留変形を測定した。RH-3, RH-4では設計許容荷重110tと50tの間10回のくり返し载荷を行った。曲げ試験中の状況を写真2に示す。

測定はストレンゲージにより中央曲げパネル内の応力を計測し、ダイヤルゲージにより試験桁の鉛直たわみ、腹板の面外変形を測った。

3.3 試験結果と考察

(1) 曲げ耐荷力

各試験体の支間中央点の荷重-たわみ関係を図14, 15に、結果の総括を表3に示す。この図で見られる各荷重段階でのくぼみは荷重載荷時の時間経過による塑性ひずみ進行により起るリラクゼーションを示している。図および表中の P_a , P_y , P_p は次式により求められる。

$$\begin{aligned}
 P_a &= \frac{2M_a}{\ell_1} = \frac{2\sigma_a \cdot W}{\ell_1} \\
 P_y &= \frac{2M_y}{\ell_1} = \frac{2\sigma_y \cdot W}{\ell_1} \\
 P_p &= \frac{2M_p}{\ell_1} = \frac{2\sigma_p \cdot W_p}{\ell_1}
 \end{aligned} \quad (7)$$

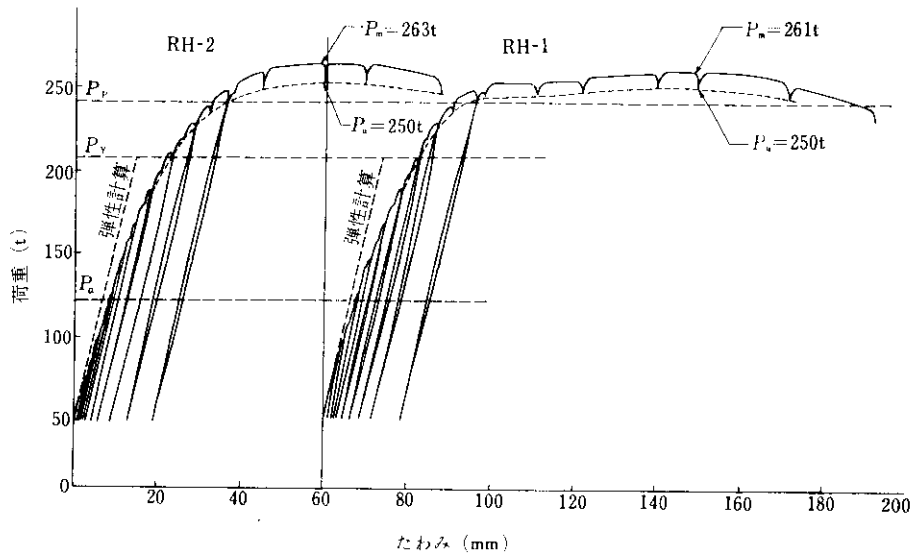


図14 荷重—中央たわみ関係 (RH-1, RH-2)

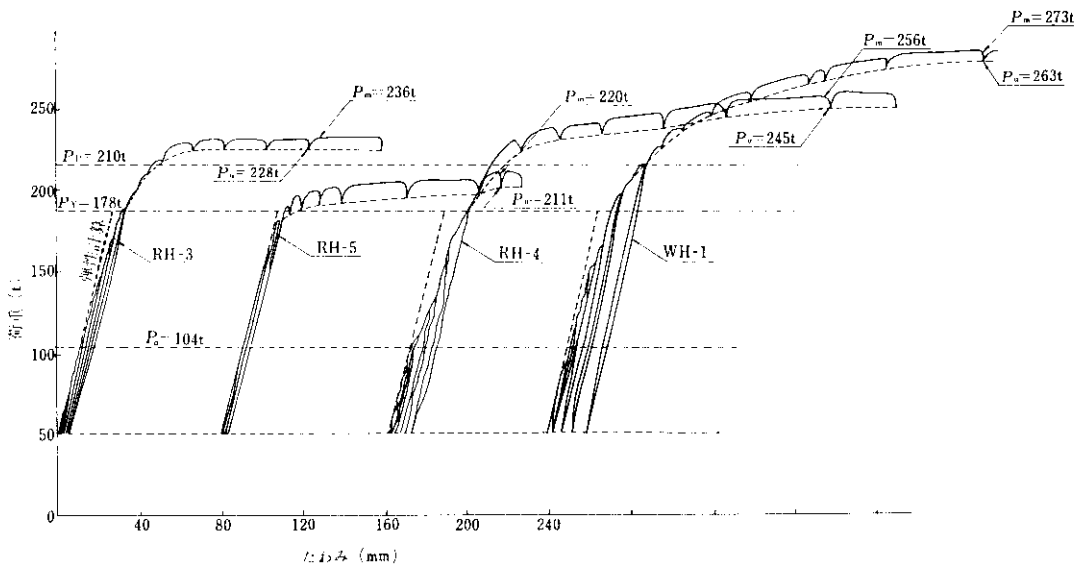


図15 荷重—中央たわみ関係 (RH-3, RH-4, RH-5, WH-1)

ここで、

P_a, M_a : 許容荷重, 許容モーメント
 P_y, M_y : 降伏荷重, 降伏モーメント
 P_p, M_p : 全塑性荷重, 全塑性モーメント

断面内の降伏点のバラツキを考慮
 すると、 $M_p = \int_A y \sigma_y dA$ となる
 σ_a : 許容応力度, SM50Yで $2.0t/cm^2$
 σ_y : 降伏応力度, SM50Yで $3.35t/cm^2$

表 3 載 荷 試 験 結 果

試験番号	実験結果 曲げ耐荷力 $P_u(P_{max})(t)$	比 較 値					
		許容荷重 $P_a(t)$	降伏荷重 $P_y(t)$	全塑性荷重 $P_p(t)$	許容モーメント $M_a(t \cdot m)$	降伏モーメント $M_y(t \cdot m)$	全塑性モーメント $M_p(t \cdot m)$
RH-1	250 (261)	124	208 (224)	239 (257)	155	280	322
RH-2	250 (263)						
RH-3	228 (236)	106	178 (191)	210 (225)	212	382	450
RH-4	245 (256)						
RH-5	211 (220)						
WH-1	263 (273)						

$$\sigma_a = 2 \text{ t/cm}^2$$

※ 上段 $\sigma_y = 3.35 \text{ t/cm}^2$ (静降伏応力)

下段 $\sigma_y = 3.6$ " (降伏応力)

(静降伏応力度), 3.6 t/cm^2 (降伏
応力度)

W : 断面係数

W_p : 塑性断面係数

ℓ_1 : 支点から載荷点までの距離

H-15/23 $\times$ 890 $\times$ 299: $W = 7,760 \text{ cm}^3$

$W_p = 8,913 \text{ cm}^3$, $\ell_1 = 250 \text{ cm}$

H-16/34 $\times$ 912 $\times$ 300: $W = 10,600 \text{ cm}^3$

$W_p = 12,500 \text{ cm}^3$, $\ell_1 = 400 \text{ cm}$

各試験体とも P_a ではほぼ弾性的な挙動を示し、 P_y でも残留応力の影響により若干の剛性の低下はあるが、なお弾性的である。以後荷重の増加とともに塑性ひずみが進行し、ひずみ硬化をとま

いながら、最高荷重に達し、上フランジまたはその附近のウェブの座屈により破壊している(写真3)。

弾性挙動について RH-1, RH-2 では直材、キャンパー材の差はほとんどないが、 $P_a \sim P_y$ の範囲では RH-2 の曲線がやや傾斜しており、剛性の低下が見られる。RH-3, RH-5 を比較すると同様にキャンパー加工による影響がみられる。これはキャンパー加工により導入された残留応力が原因していると思われる。

この実用上の問題については後に述べる。RH-5 は応力除去焼鈍により残留応力を除去した部材であるが、 P_y の近くまで弾性挙動を示している。

曲げ耐荷力(P_u)は RH-1, RH-2 はともに 250 t を示し静降伏応力度を 3.35 t/cm^2 として計算した全塑性荷重 $P_p = 239 \text{ t}$ を上回った値を示している。RH-3, RH-4 の曲げ耐荷力は同様に $P_p = 210 \text{ t}$ をかなり上回っている。このことから曲げ耐荷力ではキャンパー加工による影響は認められない。RH-5 は曲げ耐荷力は $P_u = 211 \text{ t}$ と P_p をやや下回った値を示している。これは焼鈍により降伏点が低下したことが原因と考えられる。

WH-1 は同断面の溶接 H 形鋼であるが、 P_y までの挙動は RH-5 に類似している。曲げ耐荷力は 263 t とかなり大きな値を示しているが、これはフランジの降伏応力が 4.3 t/cm^2 と規格値よりかなり高い材料であることによると考えられる。

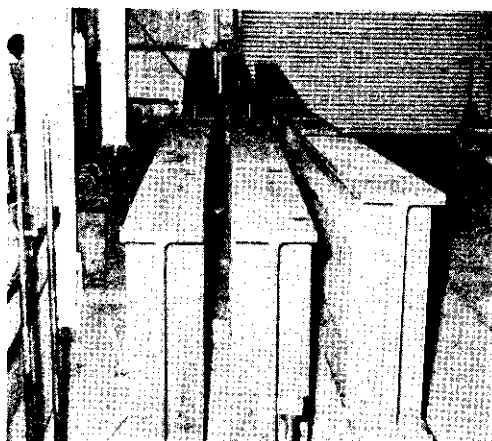


写真 3 載荷試験後の桁

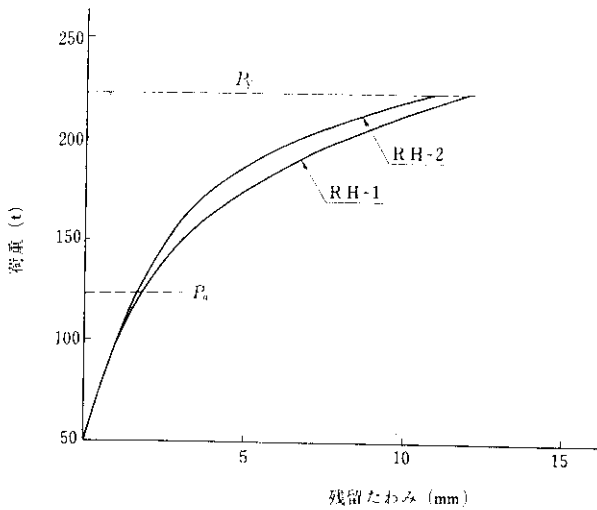


図 16 荷重—残留たわみ関係 (RH-1, RH-2)

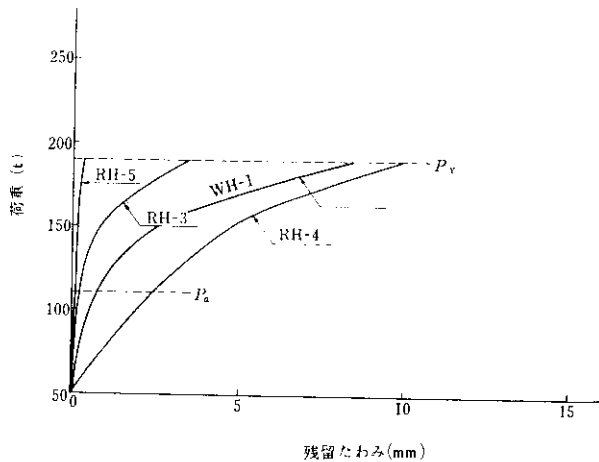


図 17 荷重—残留たわみ関係 (RH-3, RH-4, RH-5, WH-1)

(2) 残留変形

基準荷重(50 t)より荷重を増加させて行き、荷重を除荷すると残留変形(たわみ)を生ずる。各試験桁の荷重と残留変形の関係を図16, 図17に示す。RH-1, RH-2とも残留変形は P_a で2 mm程度, P_y で11~12 mmである。RH-3は P_y で0.3 mmと低い値を示しているがRH-4は P_a で2.5 mm, P_y で10 mm程度である。この結果より実際の橋での残留たわみは数 mm 以内であると予想され、当初心配されたような橋面にくぼみを生じ車の走行性に問題を生じることはないことがわかった。直材とキャンパー材とを比較すると

RH-1, RH-2ではほとんど差がないが、RH-3, RH-4ではキャンパー材の方が残留変形が大きい。RH-4はキャンパー加工による加工残留応力が部分的にはかなり大きいので、比較的早く断面内に部分降伏を起すことによると考えられる。RH-5は P_y までは残留変形量が小さく、ほぼ完全な弾性挙動を示している。WH-1はRH-3とRH-4の中間の値を示している。

RH-3, RH-4について設計荷重 P_a と基準荷重50 tとの間で10回のくり返し載荷を行なったときの残留たわみ量を図18に示す。この結果よりRH-3ではほとんど残留たわみを生じないが、RH-4では初めの数回で残留たわみを生じ以後進行していない。このことから、当初に桁に導入されている残留応力は荷重の載荷により局部的に塑性ひずみを生じ、断面内の残留応力分布の再配分が行なわれるが、以後は同じ荷重ではその部分のひずみが進行せず、残留変形も生じないものと考えられる。

(3) ひずみ分布

試験パネルのウェブ上下フランジ中央点のひずみ分布を図19, 図20に示す。図19より各荷重によるひずみ分布は圧縮フランジでは比較的一様に分布しているが、引張フランジでは荷重が大きくなるとひずみの乱れを生じている。これは残留応力によるひずみ(ϵ_r)と作用荷重によるひずみ(ϵ_b)との重ね合わせにより、引張側フランジではともに引張ひずみとなるため、 $\epsilon_r + \epsilon_b > \epsilon_y$ となって早く塑性ひずみを生ずることによる。RH-1とRH-2とを比較するとRH-2の引張フランジのひずみ分布の方が乱れを生じていないが、これはキャンパー加工により引張側残留応力が減少していることによると考えられる。ウェブのひずみ分布では、荷重が増加するにしたがって、中立軸が上に移動する。これは引張側フランジに生じた塑性ひずみにより、その部分はそれ以上の荷重に対し、応力増加に抵抗できなくなり、その部分は欠損断面のようになり均合いのため上方に中立軸が移動する。

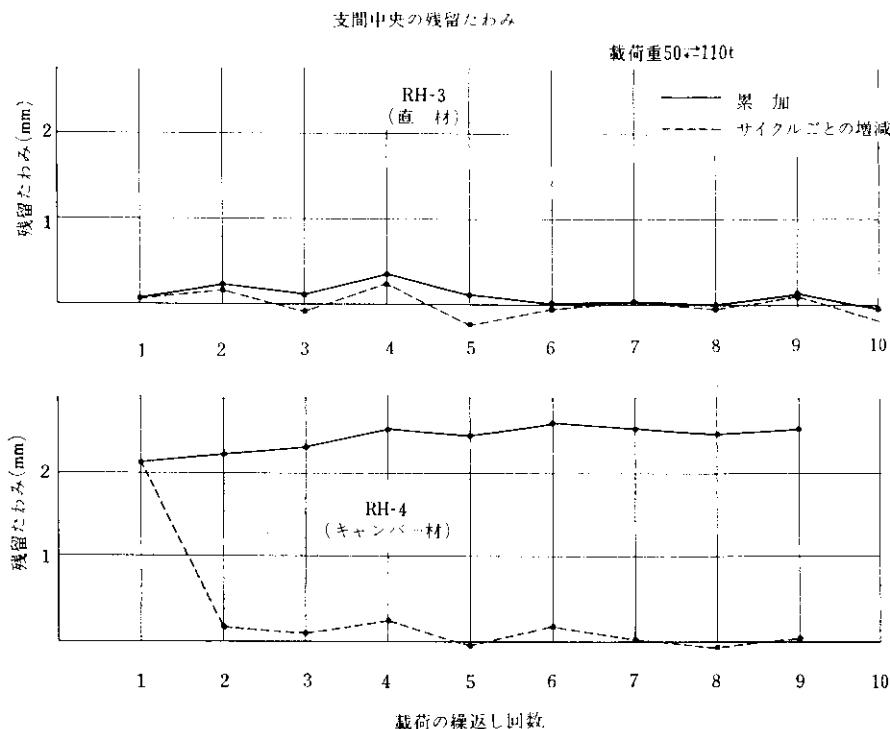


図 18 残留たわみ (RH-3, RH-4)

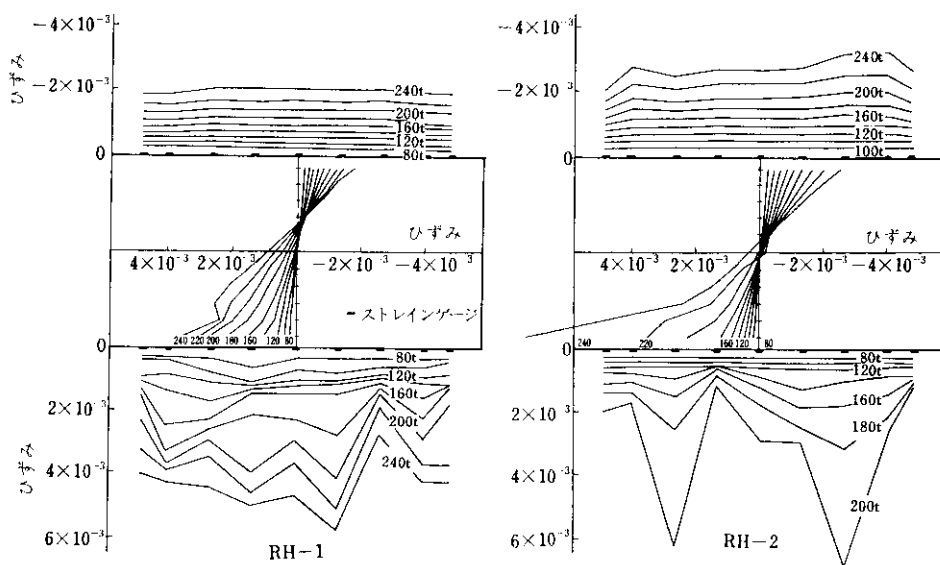


図 19 ひずみ分布 (RH-1, RH-2)

図20において、RH-3とRH-4では上記と同様の傾向が見られる。また焼鈍材(RH-5)のひずみ分布は他の試験材とは異なり、ひずみの乱れがな

く理論どおりの分布を示している。溶接材(WH-1)は上下フランジともかなり早くからひずみの乱れが認められ、その傾向はRH-4に類似している。

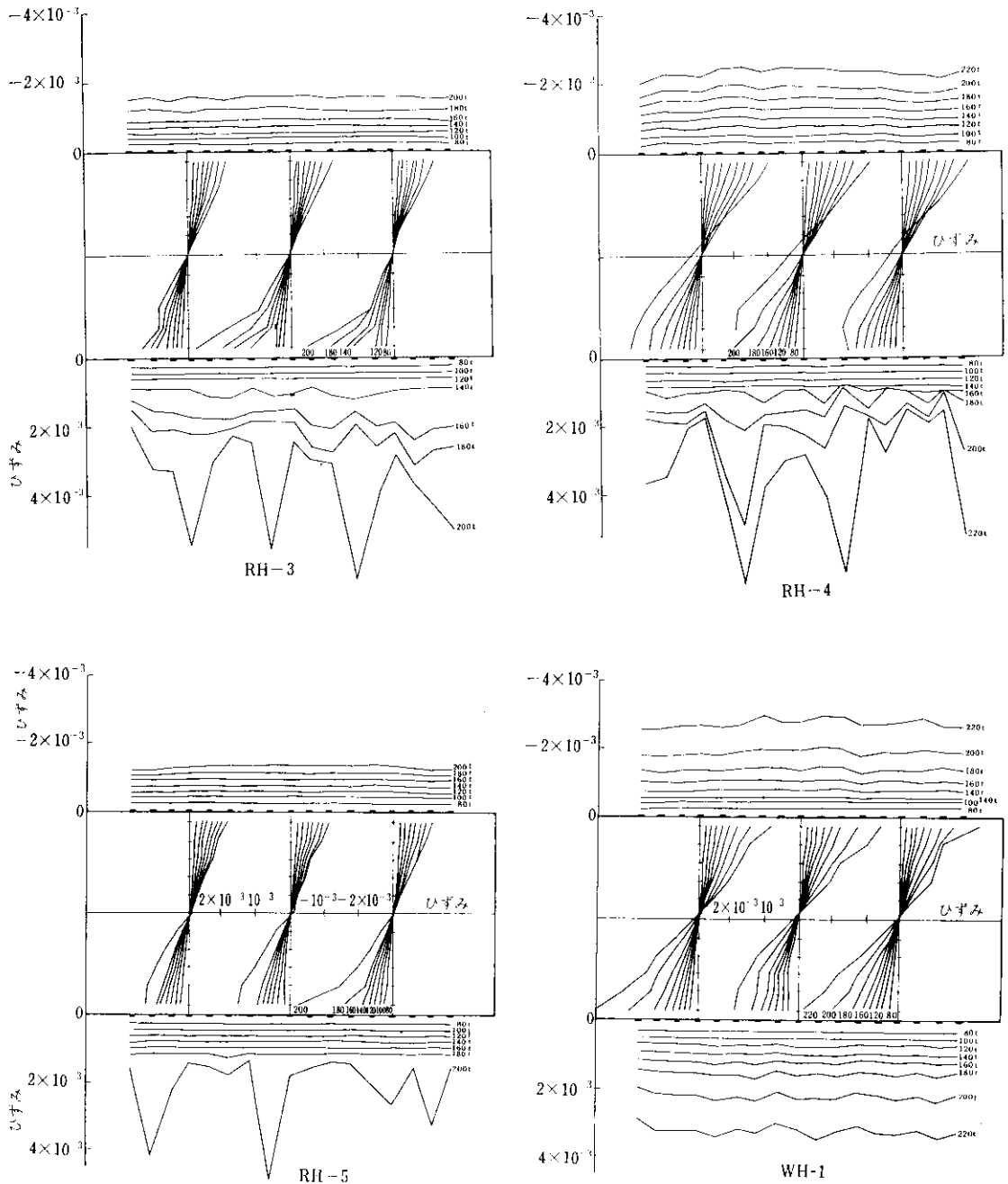


図 20 ひずみ分布 (RH-3 ~ WH-1)

(4) ウェブのたわみ

試験に用いたH形鋼のウェブ高 h_w とウェブ厚 t_w との比 (h_w/t_w) は H15/23×890×299 で56, H16/34×912×300 で53, またフランジ幅 b_f とフ

ランジ厚 t_f との比 (b_f/t_f) はそれぞれ13, 9であり塑性設計における限界値⁵⁾ $h_w/t_w=70$, $b_f/t_f=17$ 以下であるので, この桁は全塑性モーメントに達するまでウェブおよびフランジが局部座屈を起

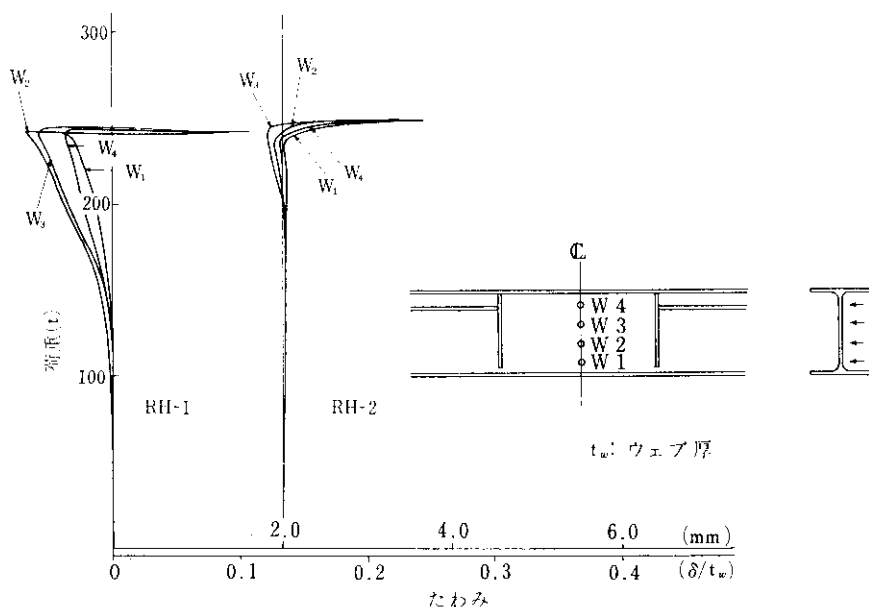


図 21 荷重—ウェブたわみ関係図

さないと考えられる。

図 21 に RH-1, RH-2 について腹板の荷重一面外たわみの関係を示す。RH-1 は初期たわみの影響により P_y までに面外のたわみを生じているが、安定しており、最高荷重に達した後座屈を生じている。RH-2 は最高荷重に達するまでほとんどたわみを生じていない。

RH-3, RH-4, RH-6 はいずれも全塑性モーメントに達するまでウェブに大きなたわみを生ずることはなかった。

(5) 残留応力をもった桁の力学的挙動の計算

ここで残留応力をもった H 形鋼の力学的挙動の計算方法について述べる。

H 形鋼断面内で残留応力は均合っている。すなわち

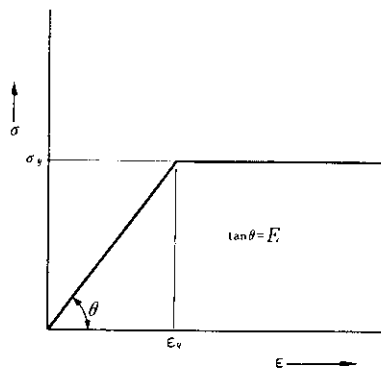
$$\int_A \sigma_r dA = 0 \quad \dots\dots (8)$$

ここで

σ_r : H 形鋼断面内のある微少部分の残留応力

dA : σ_r の残留応力が生じている微少断面積

H 形鋼微少断面内の鋼材の応力—ひずみの関係は図 22 のような完全弾塑性体と仮定し、外力モーメントによるひずみ ϵ_b と残留ひずみ ϵ_r は単純

図 22 鋼材の σ - ϵ 関係

に重ね合わせができるものとする。すなわち

$$\epsilon = \epsilon_r + \epsilon_b \quad \dots\dots (9)$$

$$\epsilon \leq \epsilon_y \quad \text{で}$$

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$$\epsilon > \epsilon_y \quad \text{で}$$

$$\sigma = E \cdot \epsilon_y$$

$$\dots\dots (10)$$

図 23 に示すように曲げモーメントによる曲率 (ϕ) とひずみ (ϵ_b) との関係は中立軸より y の位置で次のようになる。

$$\epsilon_b = \phi \cdot y \quad \dots\dots (11)$$

また純曲げを受けているので

$$\int_A \sigma dA = 0 \quad \dots\dots (12)$$

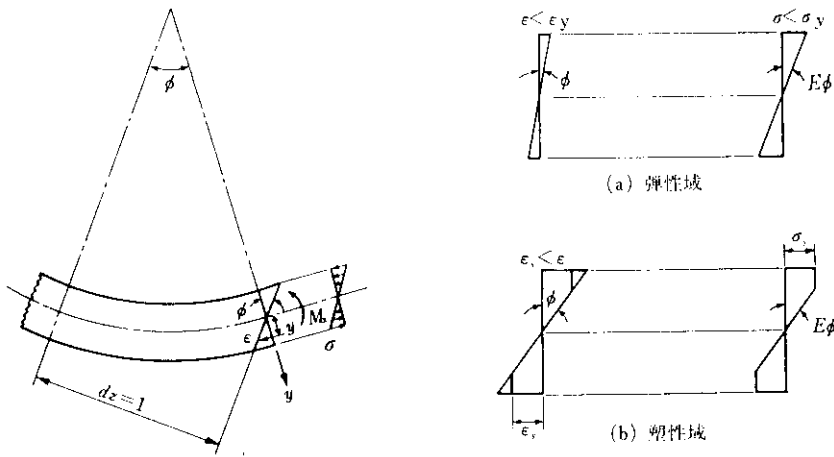
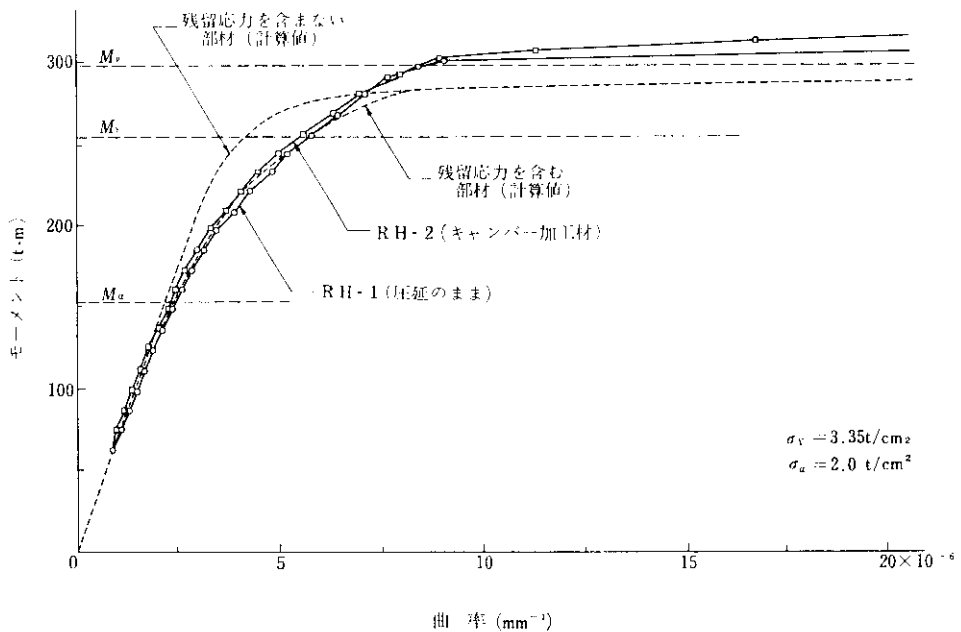
図 23 曲げによる曲率 (ϕ), ひずみ (ϵ), 応力 (σ) の関係

図 24 曲げモーメント—曲率関係

(9)~(12)式より中立軸の位置を決定すれば、曲率 (ϕ) を生ずるときの曲げモーメントは

$$M = \int_A (\sigma \cdot y) dA$$

この方法により RH-1, RH-2 について $M-\phi$

の関係を計算した結果を 図 24 に示す。計算に用いた σ_y は各断面から精密引張試験を行なって求めた値を用いた (図 25)。

計算値と曲げ試験結果はよく一致しており、残留応力と外力による応力とは単純に重ね合せがで

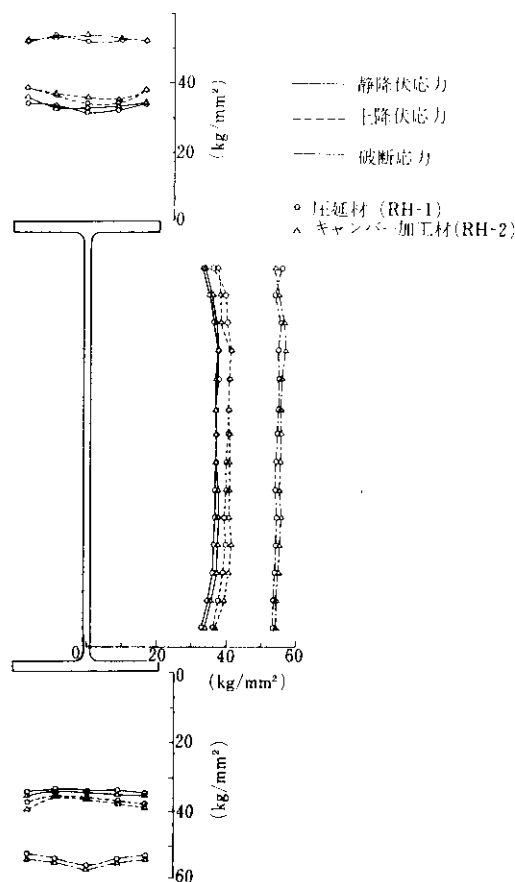


図 25 降伏応力および引張応力値の分布

ることが立証された。

4. 総 括

研究結果を総括すると次のとおりである。

(1) H形鋼の残留応力は圧延中、圧延後の冷却過程におけるウェブ、フランジ部の温度差により生ずるが、通常工程では最高 20kg/mm^2 以内である。

(2) H形鋼各断面位置の材質試験結果からフランジはウェブに比して降伏点強度、シャルピー衝撃値とも若干低下している。これは各断面位置により、圧下率や冷却状況の差が原因している。

(3) キャンパー加工によりH形鋼にはより複雑な残留応力が導入されている。

(4) 各種の残留応力をもったH形鋼の曲げ耐荷力試験の結果、直材、キャンパー材とも曲げ耐荷力は残留応力に関係なく、その最高荷重は全塑性モーメントに相当する荷重以上の値が得られた。しかし降伏荷重までの桁の挙動は残留応力が影響している。キャンパー材は直材より降伏荷重がやや低下する傾向にある。

(5) 応力除去焼鈍材は降伏荷重までは完全な弾性を示しているが、熱処理により降伏点が低下しているため耐荷力が不足している。

(6) 溶接材の降伏荷重までの挙動はキャンパー材と同じような傾向を示している。

(7) 直材、キャンパー材とも設計荷重での残留変形は 2mm 以内であり、 20m の橋桁でも数ミリと考えられ、実用上の問題はないと考えられる。

(8) 残留応力と作用応力は単純な重ね合せにより、鋼材を完全弾塑性体として桁の力学的挙動を十分説明することができる。

6. あとがき

通常工程の圧延H形鋼を橋桁として使用する場合、実用上問題となる剛性の低下、変形は認められず、曲げ耐荷力は十分得られることがわかった。

現在の設計理論は降伏強度を基準とした許容応力度設計が基本となっており、残留応力の存在による早期部分降伏はこの理論では説明し難い問題である。実際の構造部材の挙動は塑性域まで考慮した、塑性設計理論を導入しなければならない。すなわち構造部材は圧延材(鋼板、形鋼)を溶接し組立られるものであり、圧延残留応力、溶接残留応力が内蔵されることは避けられず、また構造的に応力集中も生じている。このような構造材の實際を考慮した設計法は国内外で採用されつつある。本研究がH形鋼の残留応力に関する研究の一資料となれば幸である。

おわりに本研究にあたり御指導いただいた、東京大学工学部奥村教授、西野助教授に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) JSSC 特集「残留応力と座屈」, (1969), 4
- 2) 福本, 西野共訳, Theodore V. Galambos「鋼構造部材と骨組」, [丸善]
- 3) 藤田他: 塑性設計法

