

大形圧延H形鋼の曲げについて

○東京大学工学部

西 野 文 雄

東京大学工学部

奥 村 敏 恵

1. まえがき

現在JISで規格化されている大型の圧延H形鋼を橋梁の主桁に使用したとき、断面形状の点からは一般の溶接組立断面と比較して必ずしも有利な断面形をしていないが、加工工数の減少に伴う価格の低下は、この断面形状の不利をおぎなうに充分であり、加工工数の低下にともなう工期の短縮とも相伴って、比較的短スパン橋梁に今後多量に用いられる可能性を有している。断面が圧延により作られたもので、その後の加工工数が少ないために信頼性が高いことも、このような形鋼の使用を助長するものであろう。

圧延のままのH形鋼には断面各部の熱間圧延後の冷却速度の差に起因する残留応力が生じているが⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、文献にみられる残留応力の測定結果は比較的小形の圧延断面に限られており、橋梁の主桁に使われるような大形断面についての測定結果はほとんどみられない。このようなことから現在JISで規格化されている圧延形鋼断面の内、最も大きないわゆる 900 シリーズの中から H-890×299×15×23 サイズの断面を選ぶ、これについて残留応力を測定することとした。さらにこの残留応力を有する部材を橋梁の主桁に使用した時に、この残留応力が桁の力学的挙動におよぼす影響を検討するために、SM 50 YB 鋼を使用した部材について材料試験および載荷試験をおこなった。

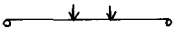
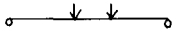
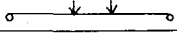
JISに規格化されている圧延H形鋼断面では、フランジ、ウェブ共にその板中板厚比は比較的小さく、したがって座屈が問題となることは少ないと思われるので、この報告では大型H形鋼部材中の残留応力が、残留変形におよぼす影響について検討することとした。

2. 実験計画

載荷試験

圧延H形鋼を橋梁部材に使用した時の挙動を調べるために、長さ7mのはりる本について2点載荷2点支持状態で純曲げ試験をおこなった。この試験の内、2本は圧延のままの試験体、一本はキャンバー加工をしたものである。載荷試験計画を表1に、試験体の詳細を図1に示す。曲げ試験体の載荷点、反力点に垂直スチフナーを溶接により取り付け、サイドパネルには水平スチフナーを入れて補強

表 1. 載荷試験計画

試験番号	断 面*	支 点 間 隔 (mm)	試 験	処 理	載 荷 方 法
RB-1	全高×全フランジ中×腹板厚×72227厚 898×299×15.4×22.7	6697	純曲げ	圧延のまま	
RB-2	891×297×15.4×22.7	6704	純曲げ	圧延のまま	
RB-3	897×298×15.0×22.2	6697	純曲げ	キャンバー加工	

* 試験パネルについての実測値の平均値

し、試験パネルの崩壊前に
サイドパネルが崩壊するの
を防いだ。

キャンバー加工は圧縮側
フランジの内表面をローラ
ーにより部材軸方向に連続
的にプレスし、圧縮フラン
ジを圧し伸ばすようにしてつ
けた。キャンバー加工の後
曲げ試験体、引張試験体
に必要な長さに切断した。
RB-3 の実測キャンバー
と図2に示す。

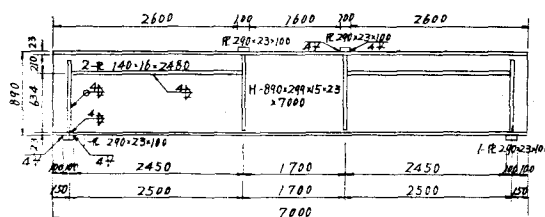


図1. 試験体詳細

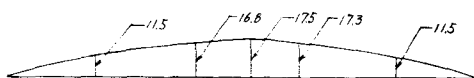


図2. 試験体RB-3のキャンバー実測値 (mm)

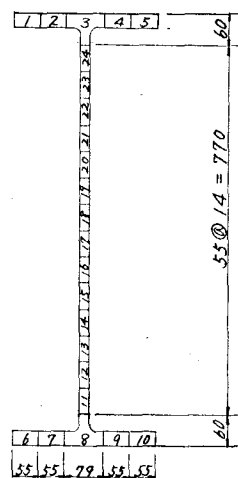
材料試験

桁の耐力と推定するために材料の応力-ひずみ関係と調べなければならない。一般に圧延断面で
は断面内での降伏応力値が一樣でなく、変化するとされているので⁴⁾、降伏応力値の分布を調べる

表2. 引張り試験の詳細 および 結果

材料状態	試験体番号	上降伏応力 (kg/mm ²)	降伏応力 (kg/mm ²)	破断強度 (kg/mm ²)	ひずみ硬化 開始点 Est	Est/ E _y	Est/ E
圧延のまゝ	A-1	38.3	34.3	52.0	0.0152	9.3	0.021
	2	36.8	33.7	53.6	0.0127	7.9	0.021
	3	34.2	31.9	52.5	0.0065	4.3	0.020
	4	34.6	32.7	53.4	0.0092	5.9	0.027
	5	38.2	34.2	52.5	0.0159	9.7	0.023
	6	36.8	33.9	52.0	0.0173	10.7	0.022
	7	34.8	33.0	53.4	0.0113	7.2	0.028
	8	35.6	33.4	53.3	0.0081	5.1	0.024
	9	36.6	33.3	53.3	0.0119	7.5	0.024
	10	37.4	34.2	52.4	0.0150	9.2	0.021
	A-10平均値	36.3	33.5	53.0	0.0123	7.7	0.023
	A-11	36.2	33.0	53.5	0.0115	7.3	0.024
	12	37.7	34.6	53.5	0.0141	8.6	0.021
	13	39.0	36.2	54.1	0.0175	10.2	0.020
	14	39.6	36.3	54.2	0.0163	9.5	0.022
	15	39.2	36.7	54.4	0.0189	10.8	0.023
	16	39.8	36.7	54.1	0.0189	10.8	0.021
	17	39.9	36.9	54.3	0.0180	10.2	0.025
	18	40.5	37.2	54.9	0.0188	10.6	0.025
	19	40.3	37.1	54.7	0.0173	9.8	0.020
	20	40.9	37.8	55.1	0.0179	9.9	0.019
	21	41.3	37.7	55.0	0.0173	9.6	0.025
	22	40.1	36.3	55.8	0.0178	10.3	0.022
	23	39.6	35.1	53.9	0.0143	8.6	0.020
	24	36.2	33.3	55.7	0.0110	6.9	0.023
	A-11 A-24平均値	39.3	36.1	54.5	0.0164	9.5	0.022

ために一つのH形断面から平
行部巾 40 mm の JIS 1号平
板引張試験片 24 枚と切り出
し、これについて引張試験を
おこなった。



試験体採取位置

引張試験の詳細を表2に示す。

残留応力の測定

部材の耐力に対する残留応力の影響を調べるとき、断面内に分布している残留応力の局所的な値ではなくて、断面内の各部での平均的な値が問題となる。したがって、部材の耐力について検討を加える目的で残留応力を測定するには、部材を比較的小さな細片に切断して、内部応力を開放し、その時の弾性変形を測定する方法がよく使われている。

圧延のままの状態の部材について一断面で、曲げ試験と同じ条件でスチフナーを溶接した部材についても同じく一断面で、さらにキャンパー加工をした部材については加工によるばらつきが大きいと思われることから隣りあった3つの断面で残留ひずみの測定をおこなった。残留ひずみ測定部材および測定断面の詳細を図3に示す。

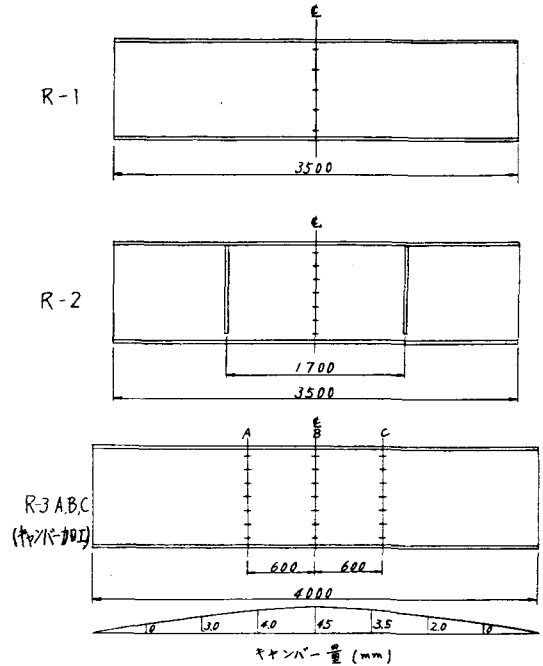


図3. 残留応力測定位置

3. 実験結果とその検討

材料試験

1断面から切り出したJIS 1号平板引張試験片24片について200トンのスクリータイプ試験機を使用して引張試験をおこなった。試験片の平行部長さ220mmの中央部にゲージ長さ50mmの差動トランスと利用した伸び計を付け、この伸びと荷重との関係とX-Yレコーダーにより自動的に記録した。ひずみ速度は通常の引張試験で採用されている速度より遅くし、これによって試験結果に対するひずみ速度の影響を小さくするよう努めた。材料が降伏した後、適当なひずみが記録された所で試験機のクロスヘッドの動きを止め、十分にリラクゼーションを起させるため5分間程度放置した後荷重を読みとり、この荷重を断面積で割った値をひずみ速度0の状態での降伏応力、いわゆる静降伏応力とした。

図4にX-Yレコーダーで記録した代表的な荷重-ひずみ関係を示す。圧延のままの断面から切り出したA1~A24の試験片全てについて、はっきりした上降伏点差が記録された。降伏後塑性流れを生じるが、塑性流れを生じている範囲での荷重の変化はほとんどなく、この変動の範囲は応力値に換算して最大0.3 kg/mm²程度であり、この領域では完全塑性体とみなし得るものであろう。塑性流れの後、ひずみ硬化領域に入りひずみの増大と共に再び荷重が増大する。このひずみ硬化の開始点は試験と

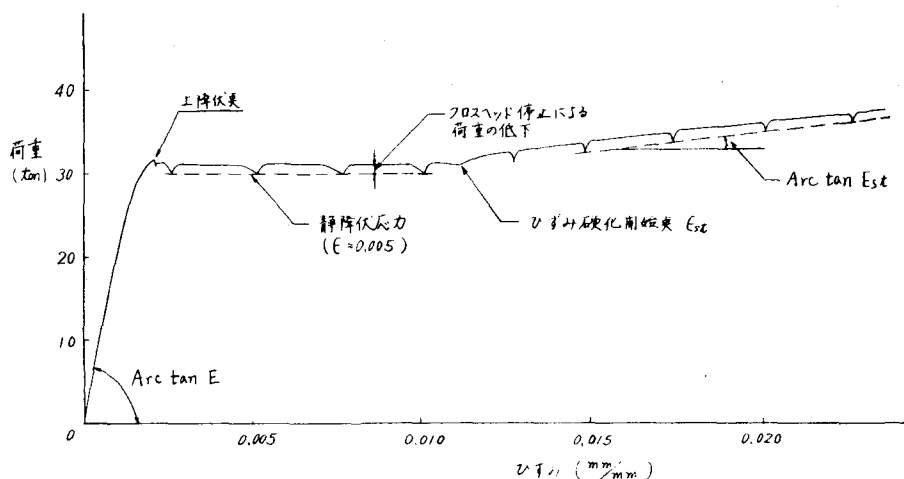


図 4. 引張り試験片の荷重—ひずみ関係

した A1～A24 の試験片それぞれについて一定してはいないが、いずれの試験片についてもその開始点を明瞭に記録することが出来た。

引張試験の結果得られた上降伏点、ひずみ速度 0 に相当する静降伏応力、および破断応力の値を表 2 に示す。上降伏点と比較して静降伏応力の値は 10 % 程度低くなっている。フランジ部の静降伏応力の平均値 33.5 kg/mm^2 に対して、腹板での平均値は 36.1 kg/mm^2 と 10 % 程度高い。フランジ内でも端部と中央部では $1 \sim 2 \text{ kg/mm}^2$ 程度の差がみられ、中央部の静降伏応力の値の方が高い。

表 2 にはさらに引張試験の結果得られたひずみ硬化開始点のひずみ値 E_{st} 、 E_{st} と降伏ひずみ E_r との比およびひずみ硬化領域での弾性率 E_{st} と弾性率 E との比を示す。

残留応力測定

図 3 に示す 6 つの残留応力を測定する断面に温度補償形の電気抵抗線ひずみ計を部材軸方向に貼り付け、0 点調整をおこなった後、部材を 200 mm 中に機械切断し、ついでストレインゲージに平行に細片に切断した。切断片が室温近くにもどった所でひずみを読みとり、この値を残留ひずみとした。測定の結果得られた残留ひずみに弾性率 $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ を乗じた値をその点の残留応力とし、その分布を図 5 に示す。腹板では板の両面に貼ったストレインゲージによる測定値の平均値をその点での残留応力値とした。

一般にフランジ中央部には大きな引張り残留応力が存在し、端部に行くにしたがって値が小さくなり、端部では大部分圧縮応力になっている。腹板ではフランジとの接合部近辺にはフランジ中央部と同じく大きな引張り残留応力が生じているが、少し腹板の中に入るとその値は急激に減少している。端部を除いて、腹板の大部分には圧縮残留応力が生じている。図にみられるように圧延のままの断面でのフランジの引張残留応力の最大値は $22 \sim 24 \text{ kg/mm}^2$ に達しており、これはフランジでの降伏応力の平均値 33 kg/mm^2 の 70 % 程度に相当する。腹板での圧縮応力の最大値も 20 kg/mm^2 程度に達し、絶対値については引張残留応力値とそれ程大きな差はない。曲げ載荷試験に使用した試験術と同じ条件で垂直スチフナーを 2 本溶接した図 3 の R-2 のはりについて、中央部で残留応力を測定した結果

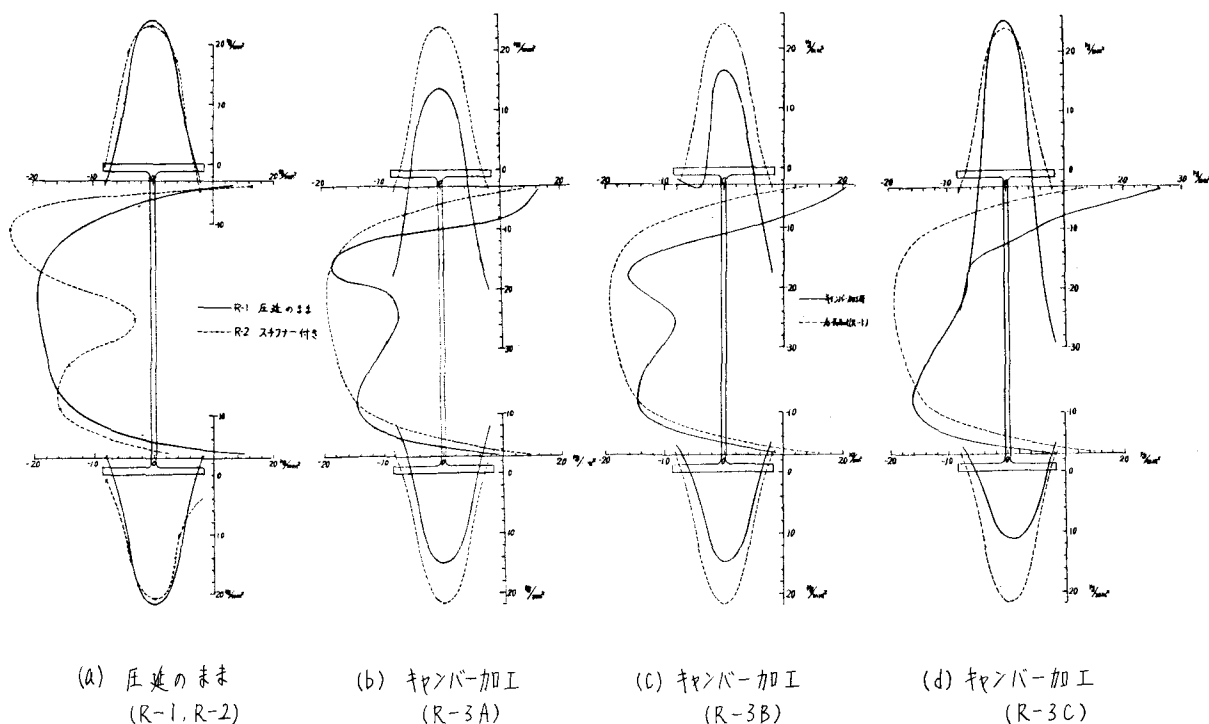


図5. 残留応力分布

を図5(a)に実線で示す。フランジの残留応力は実線と点線と比較して明らかのようにスチフナーと溶接することによってほとんど影響を受けていない。腹板での分布形は少し変化し、腹板中央部での圧縮残留応力が減少し、かわりに端部に近い所の圧縮残留応力値は大きくなっている。図5のb, c, dの分布は、キャンバー加工をした全長4mのはり(図3のR-3)の中央部および両側に600mm離れた3つの断面で測定した結果を示す。同じ図に比較のため圧延のままの部材R-1についての測定結果を実線で示す。A, B, C 3つの測定断面と比較して明らかのように、残留応力の分布形も値も一定ではなく、ばらついている。さらにR-1についての測定結果にみられるような対称性もくずれている。圧延のままの状態の断面中に存在していたフランジ中央部の引張残留応力値は、R-3Cの上フランジを除いて6~8 kg/mm^2 減少している。キャンバー加工によってフランジ中の残留応力値は形をほとんど変えず値のみが6~8 kg/mm^2 圧縮側にずれているのがみられる。フランジ中の残留応力値が減少しているのに釣り合うように、腹板中の圧縮残留応力も腹板全体としては減少し、分布形も中くぼみ形になっている。

載荷試験装置および試験方法

載荷試験には容量2000トンの油圧式載荷、ロードセルによる荷重計測式の大型構造物試験機を用いた。試験ばりの両支束には軸方向の変位と回転変位が自由に生じるように、テフロンを用いた滑り支束とローラーを組み合せ配置した。載荷支束間は支束間隔に比して短いので、載荷支束にはローラーのみを置いた。載荷、支持状態および試験体の設置状態を図6に示す。横座屈崩壊を防ぐために、試

験ばりの両支桌にフレームを組み、この桌で圧縮フランジの横方向変位を拘束した。さらに載荷桌に置いた一組のディスクを動かして、荷重が鉛直に加わるように調整した。RB-1 の試験には設置に便利のように円の一部を削ったローラーを載荷桌に使用したが、完全な円でないために滑りを拘束し、試験結果に影響をおよぼした。試験途中で、この摩擦力の作用に気付き、ローラーを完全な円筒にとりかえたが、結局信頼できるのは最大荷重のみという結果になった。

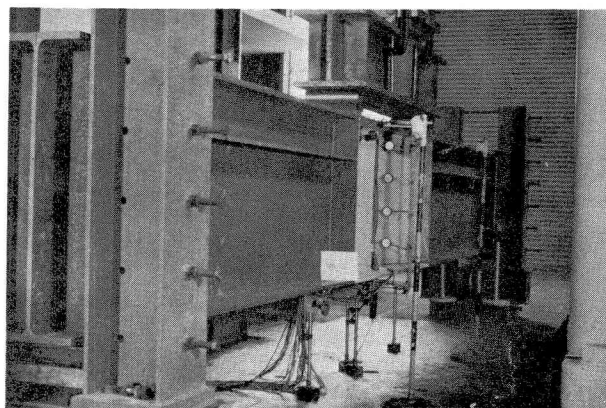


図 6. 曲げ載荷試験

試験は基準荷重として 50 トンを加えた後、10 トン間隔で載荷し、ひずみ、変位の計測をおこなった。試験体に生じる永久変形を調べるため、この荷重段階の各段階毎に基準荷重 50 トンにもどし、残留ひずみ、残留変位を記録した。試験の始めから荷重と試験体中央での変位の関係を X-Y レコーダーで記録し、この荷重—たわみ関係が水平に寝始めた後は、一段階の載荷量を荷重ではなく、たわみ量とともに決めた。

載荷試験結果

X-Y レコーダーで記録した荷重と試験体の支間中央でのたわみとの関係を図 7 に示す。図の実線は実際に記録された結果を示し、この曲線にみられる鋭いくぼみは、ひずみとたわみの計測のために試験機クロスヘッドを止め、10 分程度時間をおき、十分にリラクゼーションをおこさせたことによる荷重の低下を示している。試験機で記録した最大荷重とその位置を P_{max} で示す。 P_u はリラクゼー

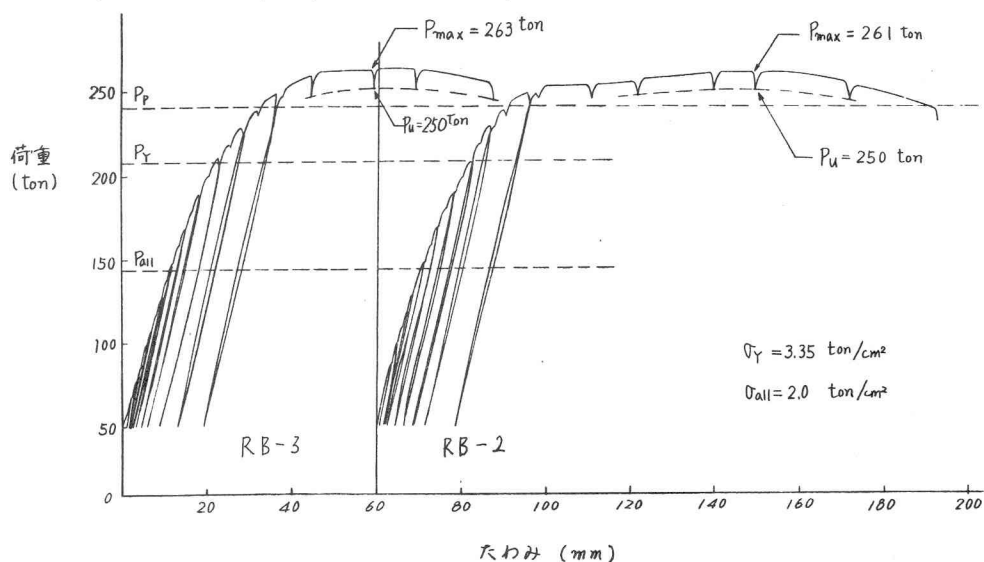


図 7. 荷重—中央たわみ関係

ションと起させたあとの荷重の読みの最大値を示し、この値を試験ばりの耐力と考える。 P_{max} と P_u は同じ荷重段階で生じた。実験の結果得られた P_{max} , P_u を表すに示す。

表3. 載荷試験結果と理論値との比較

試験番号	実験結果	比 較 値					
	$P_u (P_{max})$	P_{all}	P_Y	P_p	M_{all}	M_r	M_p
RB-1	256 (265)						
RB-2	250 (261)	144	208	239	155	260	298
RB-3	250 (263)						

単位 荷重 P : ton
モーメント M : ton·m

断面の許容モーメント M_{all} 、および降伏モーメント M_Y は許容曲げ応力 σ_{all} 、降伏応力 σ_Y 、断面係数 W を使って

$$M_{all} = \sigma_{all} \cdot W, \quad M_Y = \sigma_Y \cdot W$$

と表わされる。全塑性モーメント M_p は断面内の降伏応力のばらつきを考慮すると

$$M_p = \int_A y \sigma_Y dA$$

と表わされる。ここに y は塑性中立軸から面積要素 dA に到る垂直距離である。実験断面について許容モーメント、降伏モーメント、全塑性モーメントの値を計算した結果、ならびに試験パネルがこのモーメントに達する荷重 P_{all} , P_Y , P_p を同じく表すに示し、図7に画いた。許容曲げ応力としては鋼道路橋設計示方書⁽⁴⁾に規定されたSM50Yに対する値 2.0 ton/cm^2 と使用した。降伏モーメントの計算には曲げに大きく寄与するフランジでの平均降伏応力を用いた。全塑性モーメントは断面内での降伏応力の実測値をそのまま用いて計算したものである。

図7にみられるように荷重-たわみ曲線は基準荷重 50 ton を起えて載荷を始めるとすぐに直線からくずれ始め、その後降伏荷重よりはずるかに低い荷重から除荷した場合にも、基準荷重の 50 ton まで除荷すると残留変形が残った。除荷時の荷重-たわみ曲線では荷重とたわみの間に比例関係があり、除荷後の載荷の場合にも除荷前の荷重にもどるまでは荷重とたわみの間には比例関係がみられ、処女載荷時の荷重-たわみ曲線とは大きく異なっている。材料そのものの比例限度は図4にみられるように降伏応力の 90% 以上に達していることから、この荷重-たわみ関係の曲りは残留応力の影響によるものと思われる。荷重が大きくなるにつれて荷重-たわみ曲線の直線からのずれは大きくなるが、試験パネルが許容モーメントに達する荷重 P_{all} の付近ではそのずれはそれほど大きくなく、全体的には弾的な挙動をしている。さらに荷重が大きくなり、降伏モーメントに相当する荷重 P_Y の付近でも荷重-たわみ関係は比較的安定であり、全塑性モーメントに相当する荷重 P_p 付近に達して初めて大きく降伏し、塑性流れが生じている。RB-2の試験では塑性流れの後に再び荷重が上昇し、たわみが 90 mm 付近に達したときに最大荷重に達し、断面に大きな局所変形が生じ崩壊した。これに

反し、RB-3 では塑性流れを生じた後再び荷重が増大する前に、横座屈が生じ、崩壊した。RB-2 と RB-3 で直接の崩壊の原因が異なっているために、荷重-たわみ関係の終りに近い所に差がみられるが、いずれにしても荷重面内で十分に変形し、塑性流れが生じはりとしての強度を十分に発揮した後崩壊している。最大荷重は RB-2、RB-3 とともに試験パネルが全塑性モーメントに達する荷重 P_p を越えているが、これはひずみ硬化によるものと思われる。

試験パネルの両端と中央の 3ヶ所で測定した荷重-たわみ関係をもとに求めた、モーメント-曲率関係を図 8 に示す。図中の 2本の点線は残留応力の無い断面、および図 8 (a) の R-1 についての実測残留応力を含む断面について、モーメント-曲率関係を計算した結果を示す。計算にあたって、材料を完全弾塑性体と仮定したが、断面内各部での降伏応力値としては表 2 に示す実測値を用いた。実験値と残留応力を含めた計算値との間には良好な相関がみられる。

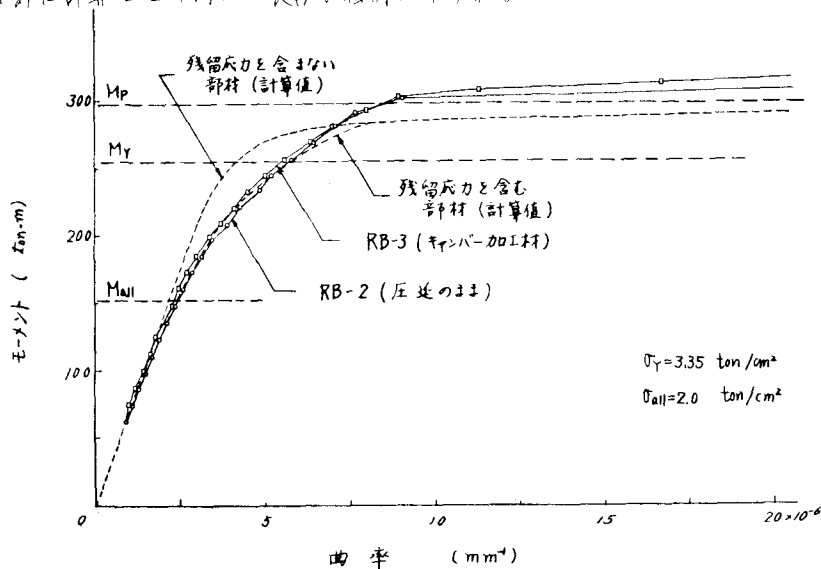


図 8 モーメント 曲率関係

試験パネルのフランジ幅中央点によって測定したひずみ分布、および中央断面での腹板でのひずみ分布を図 9 に示す。図中の各ひずみ線につけた数字は荷重値 (ton) を示す。この試験桁のように上下対称断面の桁では、一般に両フランジでのひずみ値が等しく、また等曲げを受ける区間ではフランジのひずみ分布が一樣になることが予想される。これに反し、実測ひずみ分布は、圧縮フランジでは比較的一様となっているのに対し、引張りフランジでは乱れが著しい。同一荷重時に両フランジで実測された値は、引張りフランジの方が圧縮フランジよりはるかに大きい。この原因として断面内に分布する残留応力によって生じる部分的な早期降伏が考えられる。下フランジには降伏応力の 70% にも達する引張残留応力が存在している所に、外力モーメントによる引張応力がたし合わさるものと考えると、断面の降伏荷重 208 ton の約 30% に相当する 60 ton 程度の荷重のもとで降伏が始まり、荷重の増加と共に、降伏領域はフランジ中央部から縁端部に広がる。一方上フランジの大部分では残留応力と外力による応力の方向が反対になっているため、降伏応力を越える程度の作用応力が作用して

も降伏しない。この試験桁のように完全弾塑性体とみなし得る材料でできている試験パネルが、単曲げを受けているとき、ひとたび降伏が始まると、ごくわずかのばらつきの範囲内で材料の弱い所にひずみが集中し、結果として降伏ひずみとひずみ硬化開始点のひずみが隣り合って混在し、ゲージ長さ 10 mm のストレインゲージで測定したひずみ値がばらつくと考えても不思議はない。RB-2 と RB-3 のひずみ分布は本質的には同じ傾向を示しているが、引張フランジでの乱れが始まる荷重は RB-2 の方が低く、一方圧縮フランジの乱れは RB-3 の方が多い。このことは図 5 に示す残留応力分布の事実から予想される結果とよく一致しており、残留応力の存在によって断面内に早期部分降伏が生じることを示すものである。

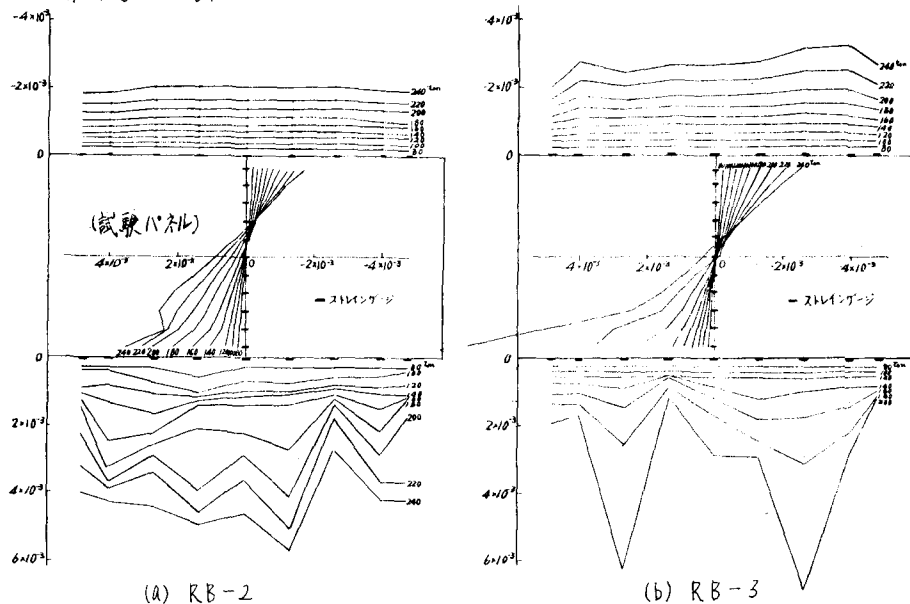


図 9. ひずみ分布

残留応力の存在による部分降伏の結果、比較的小さな荷重を加えたときにも、荷重を除くとたわみが残留している。しかしながら、この断面の許容荷重 144 ton から度したときの残留たわみは 3 mm 前後、降伏応力 208 ton から度したときでも 10 mm 前後であり、支間 7 m に比較して十分小さく、橋梁主桁に使用したとき、この残留たわみが問題となることは少ないものと思われる。

4. 結論

SM 50 YB 鋼を用いた圧延 H 形鋼 890 × 299 × 15 × 23 について材料試験、残留応力の測定、曲げ載荷試験をおこない次の結論を得た。

- (1) 降伏応力の値は断面内の位置によって異なり、フランジでの平均値に比べて、ウェブの平均値は 7 % 程度高い。
- (2) 比較的ひずみ速度を遅くして、引張り試験をしたにもかかわらず、得られた上降伏点応力は静降伏応力を 10 % 程度上回っている。
- (3) 圧延のままの状態ではフランジの大部分に引張残留応力が存在し、ウェブの大部分には圧縮残留応力が分布しており、その最大値は 20 kg/mm² から 24 kg/mm² に達している。

- (4) キャンバー加工された断面では圧延のままのものと比べて、フランジの残留応力が多少圧縮側に移行している。
- (5) 曲げ載荷試験の結果、残留ひずみと外力によるひずみがたし合わせり、残留応力の存在によって早期部分降伏が生じ、断面の曲げ剛性が低下することが確かめられた。
- (6) 断面そのものはほぼ均質な材料でできているにもかかわらず、実際にはハイブリッド断面と似た挙動をしている。
- (7) 残留応力を考慮して計算によって求めたモーメント-曲率関係と実測値との間に良好な一致がみられた。
- (8) 静的な荷重を受けるかぎり残留応力が存在することによって曲げ耐荷力が低下することはない。降伏モーメントを越える曲げモーメントが作用しても断面が不安定になることはなく、曲げ耐荷力は全塑性モーメントを5%程度上回った。

ここに報告した大型圧延H形鋼の試験によって、静荷重を受けるかぎり、曲げ耐荷力におよぼす残留応力の影響が問題となることは少ないと思われるが、くり返し荷重を受けるときの挙動については今後の研究に待たねばならない。現行の鋼道路橋の設計示方書⁽⁵⁾では、いわゆるハイブリッドガーダーを使うことは許されていないが、この実験でみるかぎり、実際の挙動はハイブリッドガーダーに近く、このような術が現に使用されているのを考えれば、ハイブリッドガーダーの使用について考慮してもよいのではないかとと思われる。プレートガーダーでは、見かけ上の緑応力が降伏応力に達する荷重を耐荷力と考え、許容応力が決められているが、この実験に使用した圧延断面のようなものでは見かけ上の緑応力が降伏応力に達する荷重はそれ程大きな意味を持っていない。圧延技術上の問題から、局部座屈を防ぐに必要な板厚より、はるかに肉厚の断面となっているため、断面内に降伏領域が広がっても不安定になることはなく、耐荷力そのものは全塑性モーメントを上回っている。このような点も積極的に設計に取り入れてもよいのではないかとと思われる。

5. 文献リスト

- (1) Beedle, L. S. and Tall, L. : BASIC COLUMN STRENGTH, Proc. of ASCE, Vol. 8, July 1960
- (2) Odar, E., Nishino, F. and Tall, L. : RESIDUAL STRESS IN ROLLED HEAT-TREATED T-1 SHAPES, WRC Bulletin No. 121, April 1967
- (3) 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
- (4) 日本道路協会「溶接鋼道路橋設計示方書解説 1967年追補」 道路, 昭和42年11月
- (5) 日本道路協会「鋼道路橋設計示方書」 昭和39年6月