

東京大学工学部 正員 ○西 野 文 雄

東京大学工学部 正員 奥 村 敏 恵

1. まえがき 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存在しているが⁽¹⁾⁽²⁾, 圧延H形鋼と橋梁の主桁として使用したとき, 静的な荷重, 動的な荷重に対して, この残留応力が力学的挙動, 耐荷力にどのような影響をおよぼすかを検討することとした。この第1段階としてSM50Y鋼を使用したJIS H-890×249×15×23断面およびH-912×300×16×34断面について残留応力を測定し, 静的な曲げ載荷試験をおこなった。

2. 実験計画と実験法 圧延のままの部材, 応力除去処理とした部材, およびキャンパーをつけるために冷間塑性加工を加えた部材について, 素材引張試験, 残留応力の測定, 曲げ載荷試験をおこなった。一般に圧延断面では断面内での降伏応力値が一律でなく, 変化すると云われているので⁽³⁾, 降伏応力値の分布を調べるために一つのH形断面について平行部幅40mmのJIS 1号平板引張試験片24枚を切り出し, これについて引張試験をおこなった。残留応力の測定は板厚方向の平均値を測定するために, 圧延部材の表面に電気抵抗線ひずみ計を張り, 次いで断面を細片に切断して, その前後のひずみの差を測定することとし, 曲げ試験をおこなった全ての部材について残留応力を測定した。実際に使用される桁では垂直補剛材が溶接されるのが普通なので, 曲げ試験桁と全く同じ状態に垂直スチフナーをつけた部材についても, 2本の垂直スチフナー間の中央断面で残留応力を測定し, その影響を調べた。実験計画の詳細を表1に示す。曲げ載荷試験は試験体を両端で支持し, 中央部25mmに等しい荷重を加え, この間の等曲げを受ける区間を試験パネルとし, この部分について各種の計測をおこなった。載荷矢, 支矢には垂直スチフナーを溶接し, 補強した。サイドパネルには水平スチフナーを入れ, 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。載荷点, 支点にはローラーをおき, 部材軸方向の変位を拘束しないようにした。荷重は基準荷重50トンから10トンおきに載荷し, 適当な荷重段階で基準荷重50トンに戻し, 残留応力を測定した。キャンパー加工は圧縮側フランジの両表面をローラーを介してプレスし, このローラーを回転することによって圧縮フランジを部材軸方向に引き伸ばすようにしてつけた。

3. 実験結果とその検討 素材引張試験から得られた結果の1例を図1に示す。○印は圧延のままのRB-2についての測定値, △印はキャンパー加工されたRB-3についての測定値である。上降伏応力と比較して, ひずみ速度0に相当するいわゆる静降伏応力⁽⁴⁾の値は10%程度低くなっている。残留応力を測定した結果の代表的な例を図2に示す。圧延のままの断面ではフランジ中央部に大きな引張残留応力が存在し, 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残留応力になっている。腹板ではフランジとの接合部周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, 腹板の大部分には圧縮残留応力が分布している。図2.Aはスチフナーを溶接した断面とスチフナーなしの断面についての残留応力の比較, および, プレスロール加工によってキャンパーをつけた断面についての残留応力の分布を示す。

スリフナーを溶接することによって残留応力はほとんど変化していないが、プレスロール加工によってその分布、値が変化しているのが明瞭にけられる。図2は同じ断面を熱管理して圧延した部材についての測定結果であり、この種の断面の市販材に含まれている残留応力分布と考えられるものである。熱管理せずに圧延したものに比べて残留応力の分布形はほとんど変わらないがその値は小さくなっている。同じ図に

表1 曲げ載荷試験計画

試験番号	公称寸法(mm)	試験体処理	転り量/支間	支間間隔(m)	載荷支間隔(m)
RB-1	890×299×15×23	圧延の材	—	7	1.7
RB-2	〃	〃	〃	〃	〃
RB-3	〃	〃	〃	〃	〃
RB-4	912×306×16×34	プレスロール加工 圧延の材	17.5mm/7m	10	2.3
RB-5	〃	熱管理下で圧延	—	〃	〃
RB-6	〃	RB-4にプレスロール加工	—	〃	〃
RB-7	〃	応力除却焼鈍	20.5mm/10m	〃	〃

応力除却焼鈍した部材の残留応力分布を示す。焼鈍により残留応力の値はほとんど無視し得る程度に小さくなっているのがみられる。

曲げ載荷試験の結果得られた荷重と支間中央でのたわみとの関係を図3に示す。残留応力除却焼鈍した試験体(RB-7)では断面の降伏荷重(図に P_y で示す)に到るまで良好な直線関係がみられる。熱管理して圧延した試験体(RB-5)についても応力除却焼鈍した試験体にけられる関係と大差なく、良好な直線関係がみられる。これに対して圧延のままの試験体(RB-4)、およびこれにキャンバー加工をほどこした試験体(RB-6)では、荷重-たわみ曲線の曲りが大きく、RB-5、RB-7についての結果と異なった傾向がけられる。RB-2、RB-3についても同様の傾向がけられた。

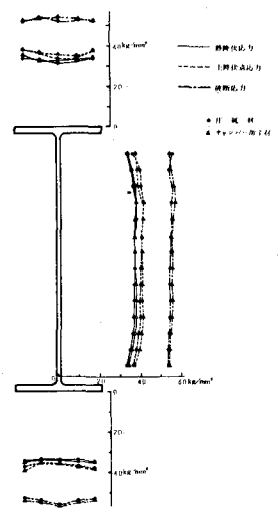


図1 降伏応力および破壊応力の分布 (RB-2, RB-3)

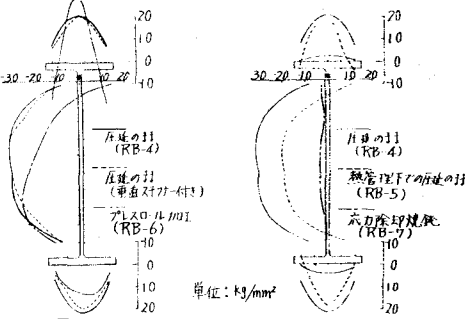


図2 残留応力分布 (RB-4~RB-7)

同じ圧延部材と比較するとキャンバー加工されたRB-6の方がキャンバー加工のないRB-4より曲げ剛性の低下が大きく、荷重-たわみ関係が直線からのずれがはげしい。一方RB-2とRB-3ではこの差はそれほど明瞭ではなかった。

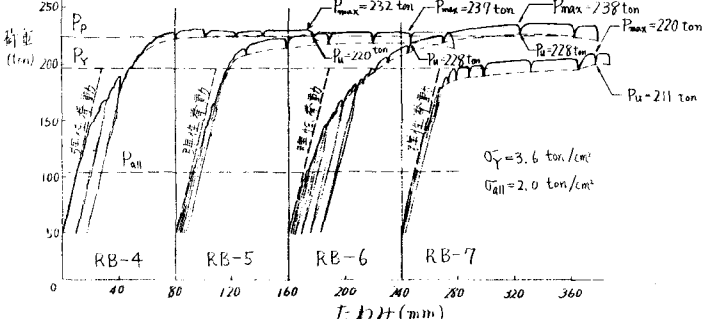


図3 荷重-支間中央たわみ関係 (RB-4~RB-7)

表2に試験の結果得られた最大荷重と理論値との比較を示す。 P_{max} は試験機が示した最大荷重、 P_u は各種計測のために試験機をロスヘッドを止めることによってリフゼーションを生じた後の最大荷重を示し、 $P_{0.1}$ をこのはりの耐荷力と考える。 $P_{0.1}$, P_y

は試験パネルの鉄応力が許容応力 20.7ton および降伏応力に達する荷重、 P_p は試験パネルが全塑性状態に達する荷重を示す。残留応力除却焼鈍した RB-7 を除いた全ての桁の耐荷力が全塑性モーメントに相当する荷重 P_p を越えており、その値も試験桁によってほとんど変化せず一定の値となっている。RB-7 の耐荷力が P_p を下回ったのは焼鈍によって鋼材自身の強度が弱くなったことによるものと思われる。以上のことから静的な荷重を受けろかぎり、残留応力の存在によって桁の曲げ耐荷力が低下することはないと考えてよいであろう。

表2 載荷試験結果

試験番号	実験結果 (ton)		比較値 (ton)		
	P_u	P_{max}	P_{all}	P_y	P_p
RB-1	256	265			
RB-2	250	261	144	208	239
RB-3	250	263			
RB-4	220	232			
RB-5	228	237			
RB-6	228	238	104	196	225
RB-7	211	220			

RB-4 ~ RB-7 の試験体について試験パネル内のフランジ中央奥で部材軸方向にそって記録したひずみ分布、および試験パネル中央断面あるいは 1/4 奥での腹板表面のひずみ分布を各荷重段階について描いたものを図4に示す。試験桁は上下対称断面であり、したがって上下両フランジでのひずみ値が等しく、また試験パネルには等曲げモーメントが作用するのでフランジ面上では部材軸方向にそってひずみ分布が一樣になることが予想されるのに対し、図4にみられるように応力除却焼鈍した RB-7 を除いて同一荷重に対する圧縮、引張フランジでのひずみ値は大きく異なり、さらに引張りフランジではその分布も部材軸方向に大きく乱れている。弾性領域ではひずみの分布は一樣であるが、鋼材のように一定応力のもとで塑性流れを生じる材料では作用応力が降伏応力に達すると、ひずみが一樣に増えるのではなく、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、結果としてゲージ長さ 10mm 程度のひずみ計で計測するとひずみが大きくばらつくと考えられる。このことから図4で引張りフランジのひずみ分布が大きくばらついているのは、その部分の応力が降伏応力に達し、部分的に塑性流れが生じているためと考えられる。このように見ると図2の残留応力をもとに図4のひずみ分布を説明することができる。すなわち引張りフランジには一般に大きな引張り残留応力が存在す

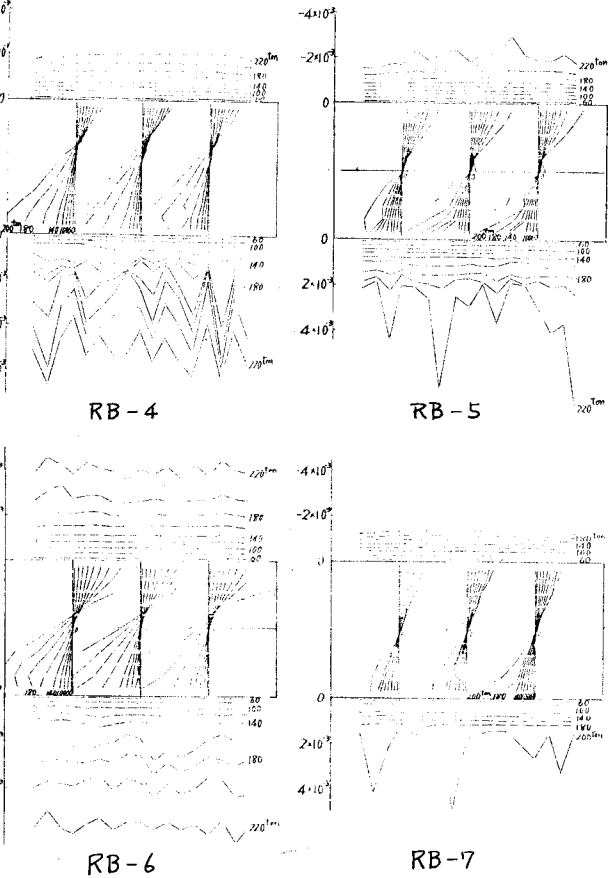


図4 ひずみ分布 (RB-4 ~ RB-7)

るため、比較的小さな載荷重のもとでも外力による応力と残留応力とがたれ合われ、その値が降伏応力に達すると部分的に降伏し、ひずみ分布が乱れ始める。引張フランジでひずみ分布の乱れ始める荷重はRB-4が一番小さく、残留応力の測定結果とよく一致している。圧縮フランジ中央部にも同じく引張り残留応力が存在するために、外力による応力と残留応力の方向が反対となりこの部分が早期に降伏することはない。したがって圧縮フランジでは崩壊荷重に近づいて始めてひずみが乱れ始める。しかしながら同一荷重に対する圧縮フランジでのひずみの値は試験材により異なっており、RB-6のひずみ値が最も大きい。同一荷重に対して、ひずみの値が大きいのは剛性の低下によるものと考えることが出来る。因るにみられるようにRB-6ではフランジ両縁に大きな圧縮残留応力が分布しているため、この部分が早期に降伏して剛性が低下したものと考えると、RB-6でひずみの読み値が大きい事実とよく一致する。一方残留応力の値が小さいRB-7については、大きな作用荷重のもとでも引張りフランジ・圧縮フランジ共にひずみの分布は一樣であり、さらに両者のひずみの値にもほとんど差はない。以上のことから、この試験パネルでは、残留応力の存在によって、断面の耐える最高荷重よりもはるかに低い荷重のもとで部分的に降伏しており、断面そのものは均一な材料でできているにもかかわらず、実際には残留応力の存在によって引張フランジが異種材料で作られたハイブリッド断面と似た挙動をしている。

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する。しかしながら断面の許容モーメントに相当する荷重を加え、次いでこの荷重を取り除いたときの残留たわみは最も大きなもので3~5mm程度であり、スパン長さ7m~10m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. まとめ

大形の圧延け形鋼断面内には小形断面内にみられるよりも大きな残留応力が分布しており、このために比較的小さな外力の作用のもとでも部分的に応力の大きな所が生じ、降伏し始める。したがって断面そのものは均質な材料でできているにもかかわらず、実際には、ハイブリッド断面のような挙動をしている。圧延け形鋼の腹板は一般に構造上の要求からきまる以上に厚く、不経済な断面となっているが、腹板に分布する圧縮残留応力の存在が薄い腹板を有する断面と圧延出来ない理由の一つになっている。静的な荷重を受けるがぎり、残留応力の存在によって曲げ耐力が低下することはなく、曲げ耐力は全塑性モーメントを越える。

5. 文献

- (1) Beedle, L.S. and Tall, L. "BASIC COLUMN STRENGTH", Proc. of ASCE, Vol. 8, July 1960
- (2) 特集「残留応力と圧延」日本橋構造協会誌, Vol. 3, No. 16, 昭和42年4月