

に有意な差は認められなかった。

3. 鋼 材

60キロ鋼は、試験実施当時（1962年）と現在で製鋼所の社内規格が変わっているが、現在の規格にも合格する機械的性質を有することが、ミルシートによって報告されている。80キロ鋼もミルシートによればその社内規格に合格したものである。

これらの鋼材は、試験体の製作と同時に各板からJIS 1号試験片をとり、応力除去焼鈍を行なった試験体に用いた板からとった試験片は試験体と共に熱処理をした後に、すべて引張によって材料試験を行なった。その結果は表-1のとおりであった。

表 - 1 使用鋼材の材料試験結果

種別	試 験 柱 ¹⁾			降 伏 点 ²⁾ kg/mm^2			³⁾ % σ_p/σ_{ys}	⁴⁾ kg/mm^2 σ_t	kg/mm^2 E_t	% 伸び	備 考
	細長比	処理	位置	σ_{yu}	σ_{yl}	σ_{ys}					
60 キ ロ 鋼	30	A	C.W	510	495	479	99	572	130	168	JIS 1号試験片使用 G.L. 200mm 1) A : 溶接のまま B : 応力除去 C : カバープレート W : 腹板 2) σ_{yu} : 上昇伏点 σ_{yl} : 下降伏点、ただし 80キロ鋼では 0.2% オフセット σ_{ys} : 静降伏点 3) σ_p : 比例限応力 4) σ_t : 抗張力
	"	B	"	468	447	433	100	572	230	175	
	40	A	"	-	551	535	83	641	140	160	
	50	A	"	-	576	564	84	651	130	115	
	60	A	"	-	518	505	98	611	150	135	
	"	B	"	-	478	470	87	591	210	145	
	70	A	"	546	440	526	86	620	180	143	
	80	A	"	559	552	547	82	633	180	168	
	"	B	"	497	480	466	85	600	300	175	
80 キ ロ 鋼	30.40	A	W	-	751	731	76	842	160	125	
	"	A	C	-	716	709	81	786	90	125	
	50	A	W	-	760	719	82	813	0	140	
	"	A	C	-	733	730	84	803	120	135	
	60	A	C.W	-	785	775	78	839	60	130	
	70	A	W	-	727	718	74	805	90	140	
	"	A	C	-	738	724	89	805	80	140	
	80	A	C.W	-	761	752	73	812	100	120	
	30.40	B	W	-	772	756	73	840	90	150	
	"	B	C	-	740	721	87	806	30	145	
	50	B	W	-	739	739	79	808	70	145	
	"	B	C	-	727	718	85	802	40	160	
	60	B	C.W	-	758	739	91	816	50	140	
	70	B	W	-	737	723	89	802	20	145	
	"	B	C	-	734	716	79	801	0	155	
	80	B	C.W	-	769	711	96	835	60	150	

4. 残留応力

80キロ鋼については、その試験体の製作の過程において残留応力の測定を行なった。これは細長比30のものと40のものを合わせた長さの柱を製作し、応力除去を行なうものはその状態で処理をおき、これを所定の長さに切断すると同時にその位置で解放される応力を測定したのである。測定には抵抗線ひずみ計を用いた。

その結果は図-2および図-3のとおりであって、溶接のまゝの試験体の溶接ビード部引張残留応力は予想外に小さかった。また側壁のそれぞれについて見れば、単独ではその内部の残留応力は釣り合っておらず、平均的にはカバープレートに圧縮残留応力が存在し、腹板の平均残留応力は引張りになっている。これは恐らく溶接方法に起因するものであろう。

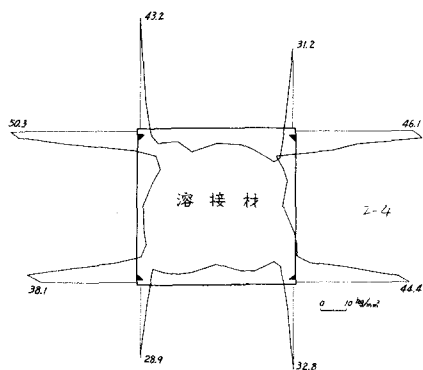


図-2 80キロ鋼溶接材の残留応力

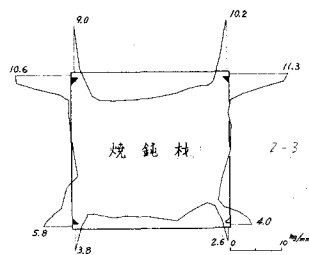


図-3 80キロ鋼残留応力除去処理材の残留応力

残留応力除去焼鈍は、大きな引張残留応力を約5分の1に低減する効果を示したが、上記の板間の不平衡残留応力を低減する効果はそれに較べて僅かであった。

いずれの場合にも、溶接残留応力の分布の形状は、モデル化した場合には図-4のように見なして良さそうである。図において、「融合領域」と称したのは、溶着金属の極く近傍であって鋼材が加熱過程においても冷却過程においても塑性変形をしたと考えられる領域であり、これはカバープレートにはあらわれない。この領域の中は測定結果では腹板で1mm程度であった。「熱影響領域」は加熱過程においても腹板においても2.5mm程度と見なせば良い。それよりもビードから離れた「遠方領域」では、残留応力はほぼ一様である。

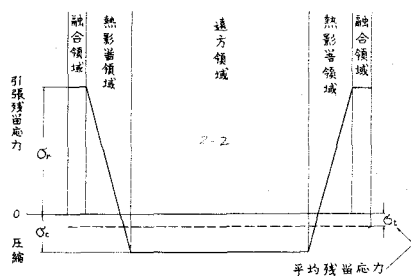


図-4 モデル化した溶接残留応力分布

この結果を軟鋼について知られている結果とくらべて見た結果を上記各領域の中に差のあることが知られたが、このような分布形状の生じる原因が主として塑性変形にあると信じられることから、ここでは極めて粗い近似として、これらの巾が鋼材の降伏応力(常温)と直線関係をもつものと仮定して解析を進めることにした。

5. 座屈強さの計算

中心圧縮材の非弾性領域における座屈強さが、柱の断面形に依存することは古くから知られている事実であるが、これを鋼材のヤング率から説明するかわりに残留応力によって説明しようとする試みは比較的新しいものである。これは鋼材を完全弾塑性体と考え、これに残留応力を考え合わせて解を求めようとするものである。

その結果によれば、あるひずみ状態におけるヤング率（完全弾塑性体では弾性領域における値にひとしいか、またはゼロ）を E_t とし、断面における等価剛度 B を

$$B = \int E_t \dot{\gamma}^2 dA$$

で定義すれば、座屈荷重は次式であらわされる。

$$\frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{P_Y}{EA}} = \sqrt{\left(\frac{B}{EI}\right) \left(\frac{P_Y}{P_k}\right)}$$

ここに λ は細長比、 P_Y は降伏荷重、 P_k は座屈荷重であって、式の左辺は細長比を無次元化した量である。

任意の残留応力分布を用いてこれを計算するには電子計算機を必要とするが、逆に計算機があれば任意の分布に対して計算することは困難でない。しかし前記の表にも見られるとおり、鋼材には現実に比例限が存在し、完全弾塑性体ではないので、これを計算に入れようとするとは簡単ではない。そこで近似的な解を得るために次のように仮定する。

- イ) 材料に比例限が存在するのは、板の内部に残留応力が存在するためである。
- ロ) 板は薄いから、板厚方向の前項の残留応力分布の影響は微小であって、ランダムであると考えても大差がない。
- ハ) その残留応力の大きさの分布は第1次近似としては直線状である。
- ニ) その最大値 σ_p と降伏応力 σ_Y の差が比例限応力 σ_p である。

このような仮定によって鋼材の比例限が存在することによる影響を計算してみると図-5のようになる。すなわち比例限の存在は、完全弾塑性体に残留応力のある場合にくらべて、同じ溶接残留応力でも、細長比の大きい柱の座屈強さを低下させ、細長比の小さい柱の座屈強さを向上させる効果を持つ。

なお、側壁平均残留応力の板間差についても同様の検討が容易に行なわれる。

完全弾塑性体でなく、降伏後も切線弾性係数 E_t がゼロでない有限な値を持つ場合について、表-1に示された程度の数値を用いて計算した結果では、その影響は細長比が極めて小さくない限り、微小であることが確かめられた。

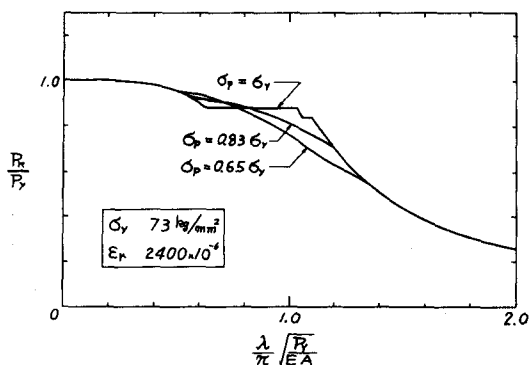


図-5 座屈荷重におよぼす母材比例限の影響

6. 実験結果

60キロ鋼による試験体の実験結果は図-6に示したとおりであった。図中に黒丸で示した小型円柱の実験結果は、参考のために日本道路公団と石川島播磨重工業株式会社の行なつた成績を記入したものである。

計算値は残留応力分布の形を図-4のとおりに仮定し、各領域の巾は前記の仮定に従って降伏応力と直線関係にあるものとして求め、溶接材の引張残留応力の最大値を降伏応力に一致させて計算したものである。焼鈍材ではその応力を5分の1に低減したものと仮定した。比例限は表-1から60キロ鋼の平均値を求めて計算に入れた。

この結果から知られるように、溶接材と焼鈍材では明らかに座屈強さが相違し、溶接材の方が弱い。また計算値は実験結果ときわめて良い一致を示した。さらに焼鈍材は機械加工によって削り出した小型試験材とも極めて近い座屈強さを示しており、溶接による残留応力の大部分を除去した柱が残留応力を持たない小型柱とバラッキの範囲で同程度の強さを持つと言って良いであろう。

80キロ鋼試験体の実験結果は、図-7と図-8にそれぞれ示した。図-7には土木研究所の行なった同種の鋼材による結果を参考として記入してある。計算はこれまでに材料試験、残留応力測定等について記した結果を用いて行なった。明らかにこれらの結果はたがいに極めて良い一致を示している。

図-8には焼鈍材による実験結果と、石川島播磨重工業株式会社で行なった小型角型断面柱の結果を並記してある。小型柱の1種は大型角柱試験体と同種の鋼材であり、別の1種は別箇の製鋼所でつくられた80キロ鋼による試験片で行なったもので、いずれも板から削り出したものである。ただしこの小型柱の成績は、端条件が不完全であった疑いがあるので、弾性座屈値がオイラー式に一致するように等価座屈長を推定して、全体を修正してある。この修正に疑問の余地があるが、3者の値はたがいに良い

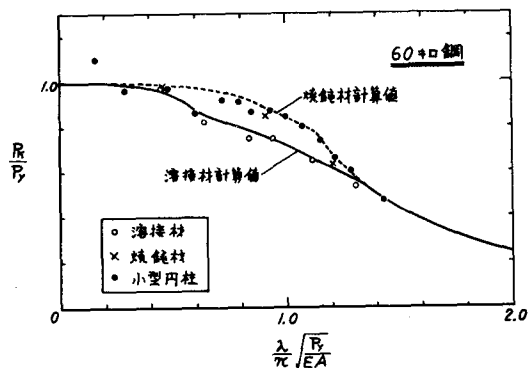


図-6 60キロ鋼試験体座屈試験結果

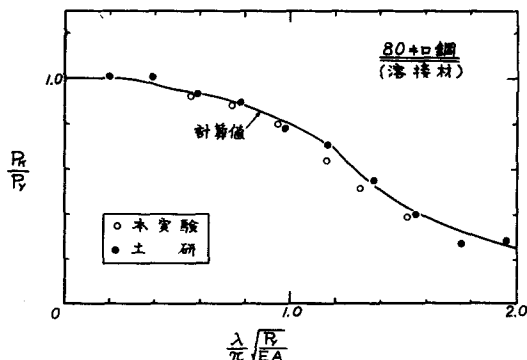


図-7 80キロ鋼溶接試験体座屈試験結果

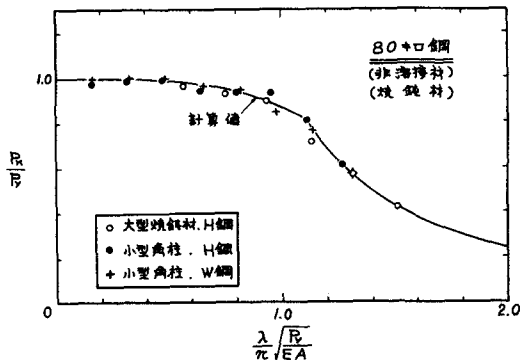


図-8 80キロ鋼試験体座屈試験結果

一致を示し、焼鈍材について行なった計算結果の曲線に載った。その意味において60キロ鋼の場合と全く同様である。この図で見られる限り、高張力が同程度の異種鋼材間の違いは無さそうである。

なお、この場合も溶接材の方が焼鈍材にくらべて、有意に座屈強さが低いが、その差は60キロ鋼による試験体ほど大きくない。これは残留応力分布の形状の違いの他に、残留応力そのものが小さかったことによるものと考えられる。