
溶接角鋼管柱の座屈耐力に関する検討－溶接および冷間成形の影響－

Studies on Buckling Strength of Welded Box Column -Effect of Welding and Cold Forming-

山口 修一(Shuichi Yamaguchi) 滝沢 章三(Shozo Takizawa) 川島 義克(Yoshikatsu Kawashima) 西村 誠(Makoto Nishimura)

要旨：

角鋼管柱の座屈耐力に、溶接や冷間成形がおよぼす影響を検討するために、製造方法の異なる3タイプの角鋼管について、素材試験、残留応力測定および短柱圧縮試験を行ない、Huber, Beedle らの理論に従ってそれぞれの座屈算定式を誘導した。その結果、下記の事項が明らかになった。1)冷間成形を施したコーナー部の機械的性質は、予ひずみの影響によって著しく変化するが、座屈耐力には有利な条件となる。2)溶接箇所が多いタイプほど座屈耐力がやや低下する。

Synopsis：

For the purpose of studying how the buckling strength of welded box-columns is affected by the welding and cold-forming during the making of these boxes, three types of box-columns, each different in the manufacturing method, were subjected to the coupon tests, residual stress measurements and stub column tests, and the buckling formulas based on the theory of Huber and Beedle and others were calculated. As a result, the following two points were found: (1) The pre-strain given to the box-column corner during cold-forming increases the buckling strength. (2) The more there are weld points in the column, the lower the buckling strength.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

溶接角鋼管柱の座屈耐力に関する検討

——溶接および冷間成形の影響——

Studies on Buckling Strength of Welded Box Column

——Effect of Welding and Cold Forming——

山口 修一*

Shuichi Yamaguchi

滝沢 章三**

Shozo Takizawa

川島 義克***

Yoshikatsu Kawashima

西村 誠****

Makoto Nishimura

Synopsis:

For the purpose of studying how the buckling strength of welded box-columns is affected by the welding and cold-forming during the making of these boxes, three types of box-columns, each different in the manufacturing method, were subjected to the coupon tests, residual stress measurements and stub column tests, and the buckling formulas based on the theory of Huber and Beedle and others were calculated. As a result, the following two points were found:

- (1) The pre-strain given to the box-column corner during cold-forming increases the buckling strength.
- (2) The more there are weld points in the column, the lower the buckling strength.

1. 緒 言

鋼構造建築物には、角鋼管柱が多用されているにもかかわらず、その力学的特性に関する研究は今日なお少なく、系統的研究が強く要望されている。当社においても一連の実験的研究を行ない、逐次問題の解明に努力しており、その成果の一部として、すでに柱一はり仕口部の力学的性状に関する報告を行なった^{1,2)}。今回は、その第2報とし

て座屈耐力に関する考察を報告するものである。

さて、一般の鋼柱の場合、オイラーの座屈曲線と降伏荷重を結びつける部分で非弾性挙動を示すことは周知の事実である。この原因として、内在する残留応力、柱の元たわみ、ならびに加力の偏心誤差などがあげられるが、Huber, Beedleらの研究にはじまる Lehigh 大学での一連の研究^{3~5)}によって、残留応力が座屈耐力を低下させることが明らかにされ、これ以降各方面で数多くの研究が行なわれ^{6,7)}、H形鋼部材については座屈耐力

* エンジニアリングセンター建設開発部建築開発室課長

*** エンジニアリングセンター鋼構造研究所構造研究室

** エンジニアリングセンター鋼構造研究所構造研究室主任
研究員・工博

**** エンジニアリングセンター建設開発部建築開発室

に関する挙動が明白になったといっても過言ではない。

一方、角鋼管柱については、製造方法が一様でなく、当然残留応力分布も異なり、さらに冷間加工を行なうものもあって、同一断面でも予ひずみを受けた部分と受けない部分が混在するので、H形鋼の座屈耐力に関する考え方をそのまま適用することはできない。したがって筆者らは、角鋼管柱特有の factor, つまり

- 1) 製造方法の差異に起因する残留応力の分布
- 2) 冷間成形により導入された塑性変形

の2つを考慮した座屈耐力式の誘導を計り、今日なお未知のままに放置された分野の解析に努め、もって合理的設計への一助とならんことを意図したものである。

2. 実験概要

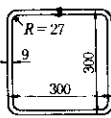
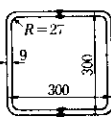
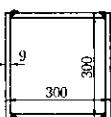
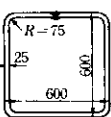
実験は次の3項目に大別される。

- (1) 素材試験
- (2) 残留応力の測定
- (3) 短柱圧縮試験

(1)では素材の機械的性質と冷間成形がそれに及ぼす影響を調べ、(2)では冷間成形と溶接によって発生する残留応力の大きさと分布、(3)では短柱の力学的性状を調べた。表1に実験の一覧と試験体記号を示す。

実験に用いた角鋼管のサイズは□—300×300×9で、表1に示すように、製造方法により3タイプにわかれる。Aは一枚の板を4箇所曲げ、端部の一箇所を溶接したもので、Bは「型」に曲げた2部材をおのおの溶接し、Cは4枚の鋼板を4箇所

表1 実験および試験体記号一覧

タイプ	断面形状		素材試験		残留応力測定		短柱圧縮試験
			引張	圧縮	外面	内外面	
A		未焼鈍	TA		RA	RSA	A
		焼鈍	TAA		RAA		AA
B		未焼鈍	TB		RB	RSB	B
		焼鈍	TAB		RAB		AB
C		未焼鈍	TC		RC	RSC	C
		焼鈍	TAC		RAC		AC
A'		未焼鈍	LT	LC			

溶接して組み合せたものである。これらの材質は SS 41 で、その化学成分を表 2 に示す。溶接は内外面ともサブマージーク自動溶接を採用した。溶接条件を表 3 に示す。また、各試験体について応力除去焼鈍を行ない、未焼鈍のものと比較した。応力除去焼鈍は当社千葉製鉄所鍛造工場の焼鈍炉で JIS Z 3701 の焼鈍条件に従って行なった。加熱条件は図 1 に示す通りで、熱電対を用いて常時表面温度を測定し、 $625 \pm 25^\circ\text{C}$ の範囲で温度保持を行なった。

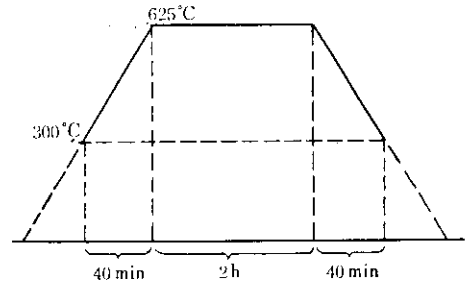


図 1 焼 鈍 条 件

表 2 鋼 板 の 化 学 成 分 (%)

試 験 体	板 厚 (mm)	材 質	C	Si	Mn	P	S
A, B, C	9.0	SS 41	0.16	0.05	0.64	0.010	0.020
A'	25.0	SS 41	0.15	0.25	0.76	0.010	0.015

表 3 溶 接 条 件

試 験 体	A, B		C		A'	
開 先 形 状						
溶 接 面	外 面	内 面	外 面	内 面	外 面	内 面
電 流 (A)	350~360	650~700	360	600	400	750
電 圧 (V)	25~28	36	25~28	26	26	34
速 度 (mm/min)	40	40	40	40	30	30

(溶接は完全溶込み)

試験体は各タイプについて、全長 3600 mm の角鋼管から図 2 に示すように取出した。まず d e 間にひずみゲージ (以下 S・G) を貼付したのち、d, e に沿って切断して、未焼鈍材の残留応力を測定した。I を未焼鈍材の素材引張試験用、II を短柱圧縮試験用供試体とした。また、e i 間の材は応力除去焼鈍したのち、f, g を切断して焼鈍材の残留応力を測定し、III を短柱圧縮試験用、IV を素材引張試験片とした。なお、ほかに □—600×600×25 の角鋼管 (A') を一体作成し冷間成形をうけた部分の素材試験に

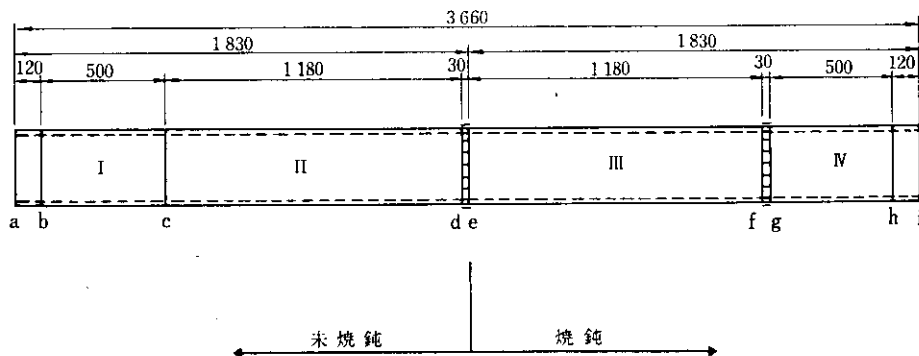


図 2 試 験 体 の 採 取 要 領

用いた。

3. 素 材 試 験

3-1 素材の機械的性質

試験片は□—300×300×9角鋼管の冷間成形や溶接の影響が少ない平板部から採取した。試験結果を表4に示す。

3-2 冷間成形による機械的性質の変化

予ひずみをうけた鋼の機械的性質については多くの実験があるが^{8,9)}、これらはいずれも予ひずみが一樣に与えられた場合のもので、A、Bタイプ角鋼管のコーナー部分のように板厚中心を境に内側が圧縮、外側が引張の塑性加工を受けたものについては少なく、その性状もあまり明確にされていない。

以上の理由により試験ではコーナー部分の機械的性質を調べた。試験片は本研究の試験体として採用している□—300×300×9より採取すべきであるが、板厚が薄いため同種鋼材で大型の□—600×600×25より取出した。試験片形状および採取位置を図3に示す。载荷にあたっては塑性域ではひずみ制御を採用し、測定はひずみ速度ゼロの位置、すなわち、ひずみも荷重も安定した状態にて行なった。この理由は次による。

- a) 一般に塑性域での測定はひずみ速度により荷重の値にかなり差があり、Beedle らの実

験⁴⁾にはひずみ速度 1000 (μ in/in/sec) とゼロの間には前者の方が降伏強度で16%大きいと報告されている。

- b) さらに同報告では、ひずみ速度ゼロの時の素材試験結果と、短柱圧縮試験の結果がよく合致すると指摘されている。

試験により得られた応力—ひずみ曲線を図4に、比例限度力、降伏応力を表5に示した。ここで比例限度力は、明瞭な値が得られない場合永久ひずみ量が 0.02% の時の値を用いた。また、降伏応力は、降伏棚のある場合には下位降伏点を、

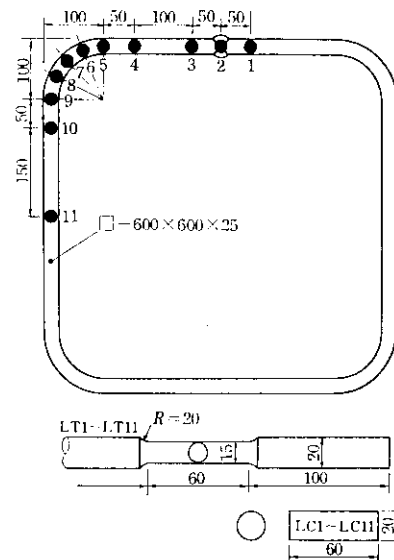


図3 LC, LT 試験片、形状寸法、採取位置

表4 素 材 の 機 械 的 性 質

記 号	厚 (mm)	幅 (mm)	断 面 積 (mm ²)	降伏荷重 (kg)	破断荷重 (kg)	降伏応力 (kg/mm ²)	破断強度 (kg/mm ²)	伸 び (%)	ヤング係数 (t/cm ²)
T A	8.78	39.9	350.6	9 310	17 100	26.8	48.8	24.0	2 080
T B	8.80	39.9	351.1	8 910	17 000	25.3	48.3	24.3	2 120
T C	8.68	39.7	344.4	8 310	14 700	24.2	42.8	28.5	2 090
T A A	8.78	39.6	347.7	9 110	17 200	26.2	49.5	24.0	2 160
T A B	8.88	39.4	349.9	9 000	16 900	26.1	48.5	26.0	2 140
T A C	8.66	39.5	342.1	7 990	14 600	23.3	43.1	26.0	2 140

(JIS 1号試験片4本の平均値)

それ以外は永久ひずみ量 0.2% の時の値を採用した。応力算出に使用する断面積は載荷前の試験片断面積を用いた。

試験の結果、圧縮試験、引張試験とも同じ傾向を示し、冷間成形を受けたコーナー部分では降伏棚がなくなり、降伏応力は素材の値に対して 1.5 倍、比例限度力も 1.2 倍の上昇が見られた。

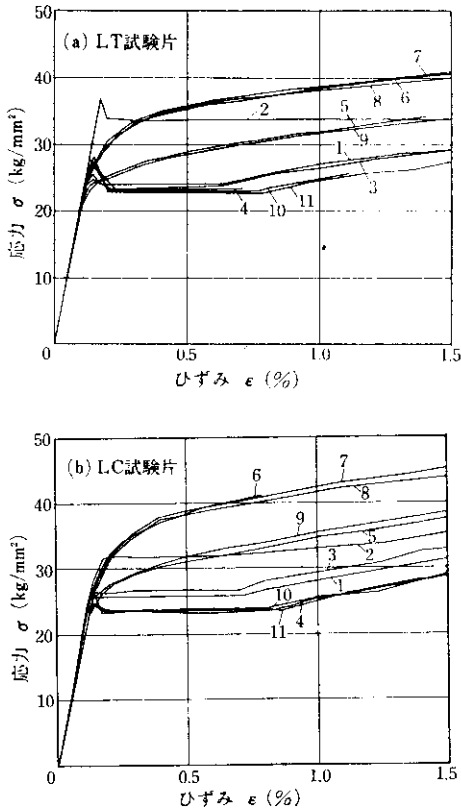


図 4 応力-ひずみ曲線（数字は試験片採取位置）

4. 残留応力の測定

4.1 測定方法

角鋼管の材軸方向に内在する残留応力を切断法により測定した。測定位置を図 2、図 5 に示す。

鋼管の材軸方向への残留応力は材の端部からその管径程度離れると一様になる⁴⁾といわれている。したがって、測定位置での残留応力には長さ

表 5 LC, LT 試験片、試験結果

位 置	圧縮試験 (LC)		引張試験 (LT)	
	σ_P	σ_Y	σ_P	σ_Y
1	25.5	26.0	22.8	23.6
2	28.2	31.8	33.5	33.5
3	25.4	26.3	23.8	23.8
4	23.5	23.5	23.1	23.1
5	24.8	29.6	24.2	27.5
6	28.0	36.5	27.7	34.1
7	28.0	37.4	26.9	34.2
8	27.7	36.8	26.6	33.9
9	26.1	30.0	24.1	27.0
10	23.4	23.4	23.3	23.3
11	23.4	23.4	23.0	23.0

σ_P : 比例限度力 (kg/mm²)

σ_Y : 降伏応力 (kg/mm²)

の影響はないと判断される。また、試験体が長く内面に S・G を貼付するのが困難なため、外面の残留応力のみについて測定した。別に、内外面の残留応力を調べるため、S・G が貼付可能な長さ 600 mm の角鋼管についても測定した。しかし、試験体の長さとしては不十分と考えられるので、測定結果は参考値とした。

S・G 貼付後、まず、自動ノコ切断機により幅 30 mm に切断し、その後一個の S・G ごとに 30 mm × 30 mm に分割した。熱発生を防ぐため絶縁油で冷却した。残留応力はこの解放により求めたひずみに、素材試験より得られた弾性係数を乗じて求めた。

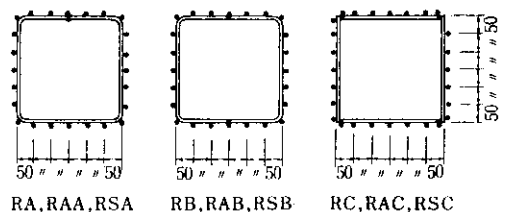


図 5 残留応力測定 (S・G 貼布位置)

4.2 測定結果

図6に未焼鈍材、焼鈍材の残留応力測定結果を示す。前述のようにこれらは管の外面の残留応力である。

図7は長さ 600 mm の短管から求めた試験体内外面の残留応力の分布と、その平均値を示したものである。これらより次の事項が認められる。

- (1) 各タイプとも未焼鈍材は溶接部で最大の引張残留応力が存在し、引張残留ひずみは降伏ひずみを越える部分もある。
- (2) RSA, RSB では内外面で残留応力分布に大きな差があるが、RSC ではほぼ同一の分布形状を示している。
- (3) 一般に溶接による残留応力は鋼板の両面では差がないといわれている⁵⁾。したがって、本試験で示された内外面の残留応力の差は冷間成形により生じた残留応力の差と判断される。これは、冷間成形を行っていない RSC

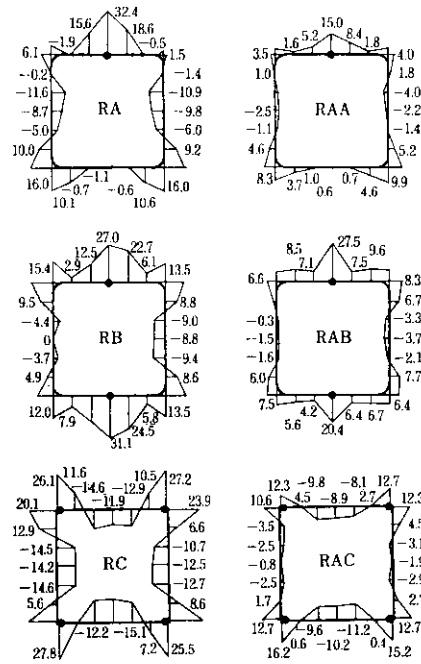


図6 残留応力分布 (kg/mm²)

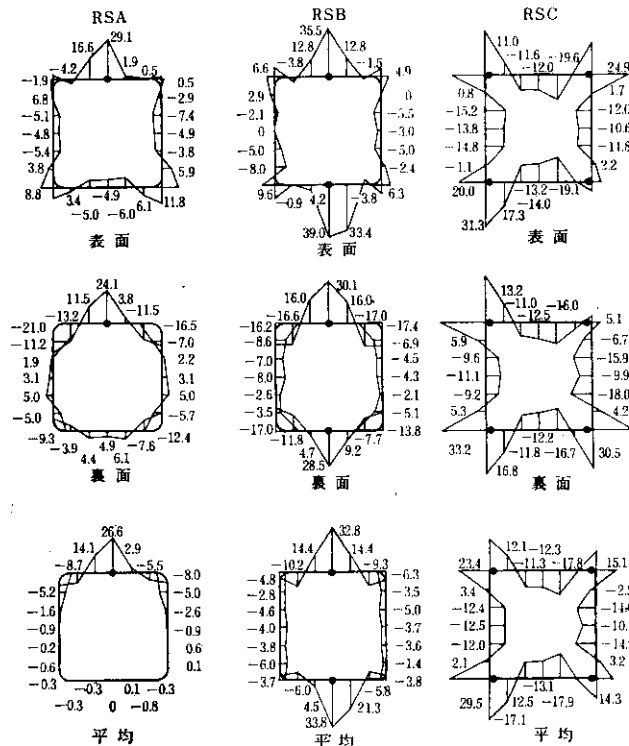


図7 残留応力分布 (kg/mm²)

の内外面の残留応力に差がないことから推定される。

- (4) 冷間成形による残留応力は板厚方向に釣り合い、その結果、内外面の平均値はゼロに等しくなると考えられる。したがって、RSA、RSB の残留応力の平均値は冷間成形によるものは相殺され、溶接による残留応力のみを示している。
- (5) RSA の平均値の図では、溶接部から離れたコーナー（図の下方）の残留応力がほとんどゼロであり、この部分には溶接による残留応力は存在しない。
- (6) (5)の結果、RA の溶接部分から離れたコーナーの残留応力は冷間成形によるものと判断され、外面で引張、内面で圧縮となり、その大きさは降伏応力の約 60%, 16.0 kg/mm^2 である。
- (7) RA, RB, RC と長さ 600 mm の RSA, RSB, RSC では残留応力の分布形状は若干異なり、大きさも後者の方が小さい。これは、試験体長の影響によるものと考えられる。
- (8) 応力除去焼鈍の結果では、焼鈍材は未焼鈍材に比べ全体的な分布性状は変わらず、その大きさも半分程度しか減じなかった。焼鈍条件は JIS に従っており、焼鈍が不十分であった理由は明確でない。

5. 短柱圧縮試験

5.1 試験体

短柱圧縮試験用の試験体は表 1 に示すように A, B, C タイプのおおのについて焼鈍材と未焼鈍材の 2 体、計 6 体からなる。試験体の端部はノコ切断後、フェーシングマシンで研摩加工し、材軸に直角な平面に仕上げた。

なお、本試験は、Tall らによる Stub Column Test Procedure⁽¹⁰⁾ に従って行なった。Tall らは試験体の長さ L を次のように決めている。

$$L_{\min} = 2d + 10i \quad (\text{あるいは } 3d)$$

$$L_{\max} = 20i \quad (\text{あるいは } 5d)$$

d : 試験体幅

i : 断面 2 次半径

本試験では細長比を 10 とし、 $L=10i=1180 \text{ mm}$ とした。また、試験前に実測断面積を求め、後の解析に使用した。

5.2 試験方法

試験は当社鋼構造研究所の 1000 t 大型構造物試験機を使用して行なった。試験状況を写真 1 に示す。

図 8 に試験方法を示した。上下耐圧盤と試験体

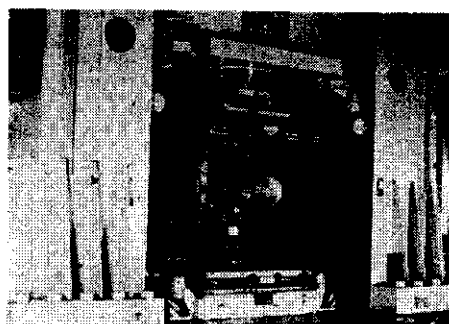


写真 1 実験状況

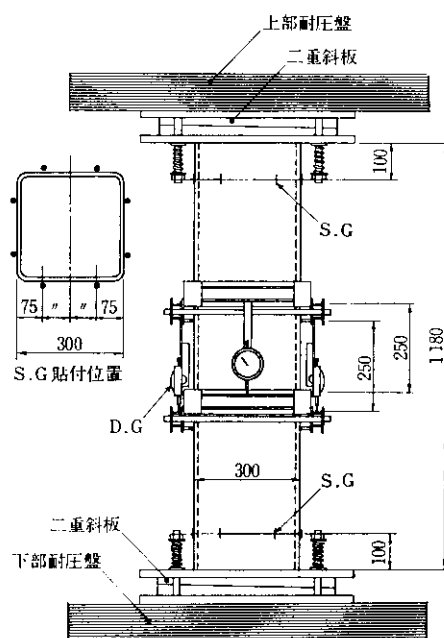


図 8 短柱圧縮試験試験方法

との間に2重斜板(写真2, 写真3参照)を使用しているが, これは端面の加工誤差を吸収するためのもので, 2枚の斜板を回転させることにより, あらゆる角度に耐圧板が傾斜する機構になっている。これにより, 部材の端面が直角に加工されていなくても, 全断面に均等な圧縮応力を与えることが可能となる。

S・Gは上下の端部から10cmの位置に8枚ずつ, 計16枚貼付した。また, 試験体の中央部にゲージ長250mmとして, 1/1000mmダイヤルゲージ(以下D・G)を各辺に一個ずつ, 計4個を取付けた。D・G取付け状況を写真4に示す。

S・Gは試験体全面に均等に圧縮応力が加わっているかどうかを調べるために貼ったもので, 断面のひずみはD・Gの測定値から求めた。

実験は次の手順で行なった。まず下部の2重斜板上に試験体を載せ, 下げ振りをを用い, 2重斜板をまわしながら試験体が鉛直に立つようにする。次に上部2重斜板の耐圧面を水平にし一回目の載荷を行なう。S・Gを測定しながら比例限以下と見られる100tまで載荷し, ひずみ測定値から全断面に均等に応力が流れているかどうかチェックする。8枚のS・Gによる最大ひずみと平均ひずみの差が最大ひずみの5%以内に入っていない場合は除荷し, 上部2重斜板を回転させ, 同様な操作を行なう。このような操作を数回繰り返すことにより, ひずみの誤差が5%以内に入った段階で加力し, 最大荷重にいたらしめた。

塑性域では素材試験の場合と同様なひずみ制御を行なった。

5.3 試験結果

図9に試験結果から得られた応力-ひずみ曲線を示す。なお, 同図には素材の応力-ひずみ曲線も併記した。

比例限応力はオイラーの座屈曲線と非弾性座屈の分岐点を示すという意味で座屈耐力の検討の際は重要であるが, 残留応力の測定からこの値はある程度推定できる。すなわち素材の降伏応力 σ_y と圧縮残留応力 σ_{rc} の差, $\sigma_y - \sigma_{rc}$ となるはずである。短柱圧縮試験より求まる比例限応力も残留応力より求めた値と同じ値を示すはずであるが,

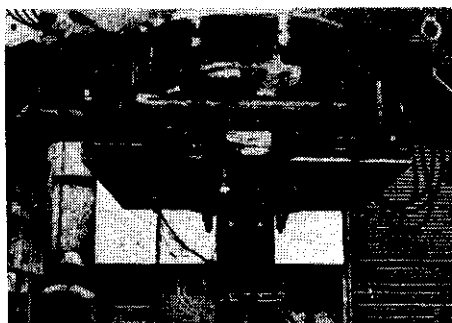


写真2 上部2重斜板

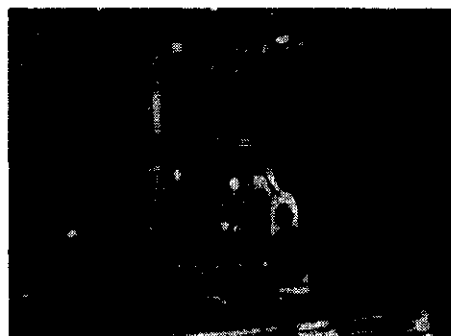


写真3 下部2重斜板

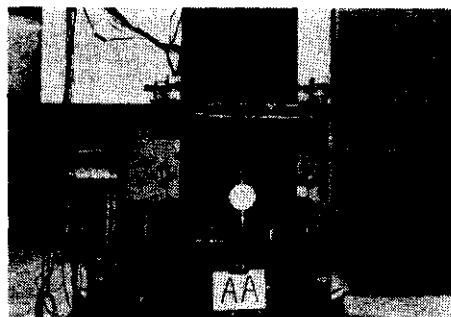


写真4 D・G取付け用治具

本試験の結果からは正確な値が読みとれなかった。しかし, 各タイプとも焼鈍材が未焼鈍材に比べ大幅に比例限が上っていることは明瞭であり, 残留応力の存在が座屈耐力低下の原因になることが推測される。

本試験の最大応力は素材試験により求めた値を上回っているが, これはA, Bタイプの場合, 5.に示すように冷間成形を受けた部分の降伏応力の増加がかなりの影響を与えているものと思われる。なお, 各試験体とも, ひずみ量0.5%以下で

局部座屈をおこし、それ以降の性状は明確ではない。局部座屈後の状態を写真 5, 写真 6 に示す。

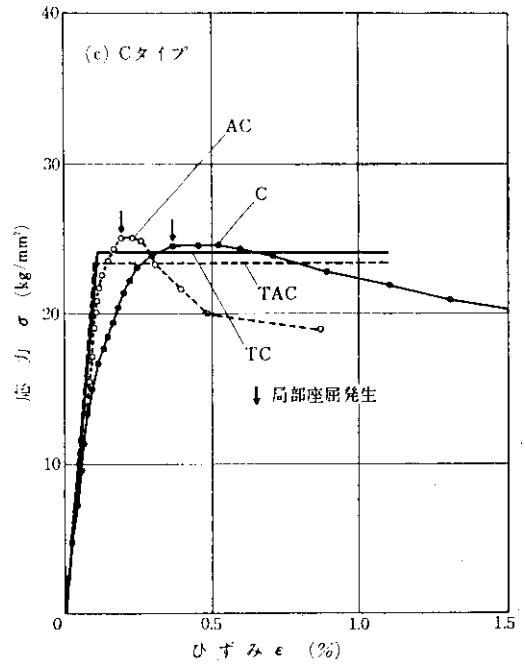
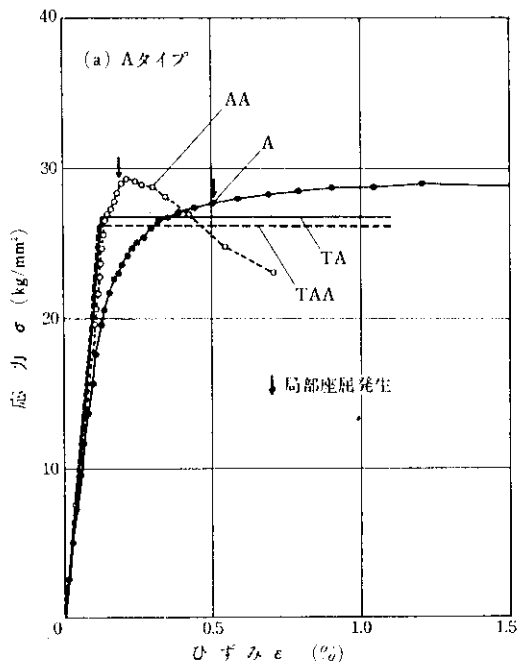


図 9 短柱圧縮試験による応力-ひずみ曲線

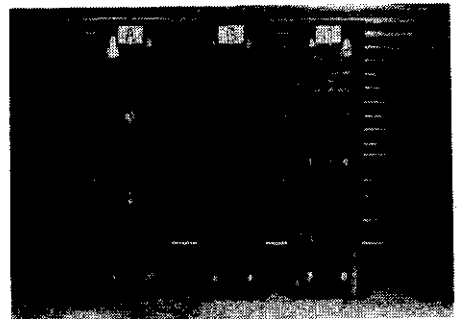
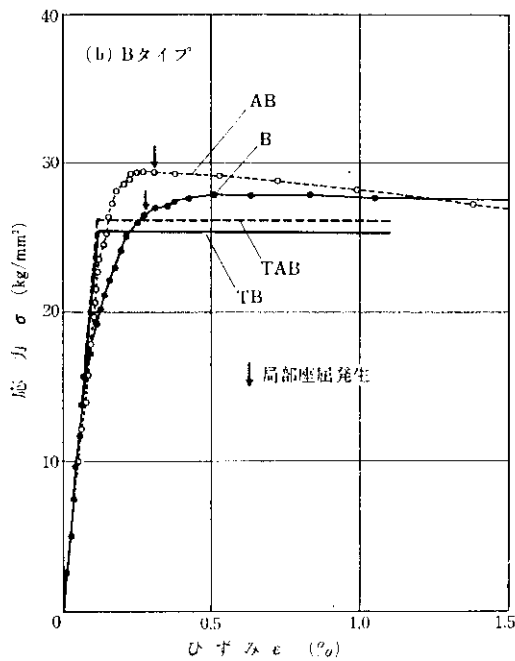


写真 5 終局状態 (未焼鈍材)

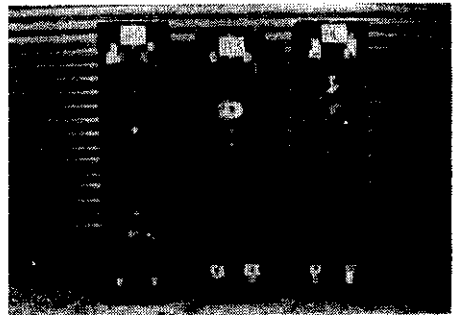


写真 6 終局状態 (焼鈍材)

6. 座屈耐力

中心圧縮材の座屈応力 σ_{cr} が、

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (1)$$

E : 弾性係数

λ : 圧縮材の細長比

となることは、オイラーの座屈理論としてよく知られている。(1)式は、断面内応力が比例限度をこえない範囲における座屈応力であり、Huber, Beedle らの理論³⁻⁵⁾に従えば、残留応力をもつ材の非弾性域におけるそれは、

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \frac{I_e}{I} \quad (2)$$

として求めることができる。ここで、(2)式における I は圧縮材の断面2次モーメントであり、 I_e は圧縮残留応力によって先に降伏した部分がもはや剛性には寄与しないと考え、弾性部分のみから求めた断面2次モーメントである。

I_e/I は、圧縮材に存在する残留応力分布の実測値から算出することができるが、角鋼管柱の場合は溶接による残留応力のほかに、冷間成形による予ひずみの影響があるため、 I_e/I がかなり複雑となり、したがって座屈耐力の解析も複雑となることは避けられない。

以下に、Huber, Beedle らの理論をもとにして、本実験に用いた角鋼管柱を対象とし、残留応力および予ひずみの factor を考慮に入れた座屈算定式を誘導しよう。

(1) 残留応力分布モデルの設定

残留応力分布の実測値は4・2に示してあるが、計算の便宜上、これを図10のモデルに置換する。すなわち、これらモデルは実測値をもとに、その断面内での引張残留応力と圧縮残留応力との釣り合いより定めたものであり、板厚方向での応力変化は無視してある。AおよびBタイプでは、コーナー部の冷間成形による影響を調べるために、①全断面で降伏点が一様であるとした場合、②コーナー部の降伏点を図11に示すように他の部分の1.5

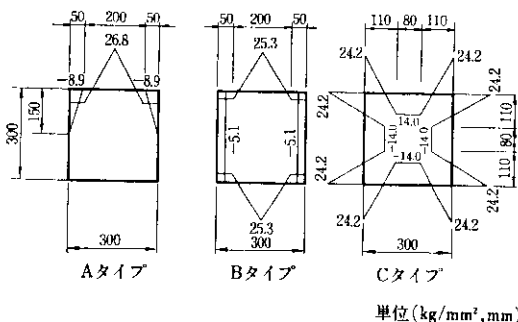


図10 残留応力分布モデル

倍とする場合、の2条件について考察することにする。

さて、3・2ですでに述べたごとく、 $\square-600 \times 600 \times 25$ の圧縮試験結果では、コーナー部は冷間成形の影響を受けて降伏棚が消失し、永久ひずみ0.2%時の応力値が降伏点の約1.5倍を示している。短柱圧縮試験体のサイズは $\square-300 \times 300 \times 9$ であるが、コーナー部の表面ひずみが $\square-600 \times 600 \times 25$ のそれとほぼ等しいことから、倍率1.5を採用し、同一断面で σ_y , $1.5\sigma_y$ と2種類の応力-ひずみ曲線をもつ材に置換したのが図11のモデルである。

以下の計算過程はBタイプについてのみ記すが、ほかのタイプについても同様の手順で算出することができる。

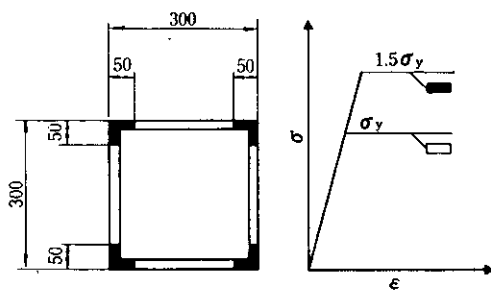


図11 コーナー部の降伏点モデル

(2) 全断面で降伏点が一様であるとして

仮定した場合

図12は短柱圧縮試験における圧縮応力の増加に伴う応力とひずみの関係、およびその時点における塑性域の広がりを段階ごとに示したものである。圧縮残留応力の最大値を σ_{re}

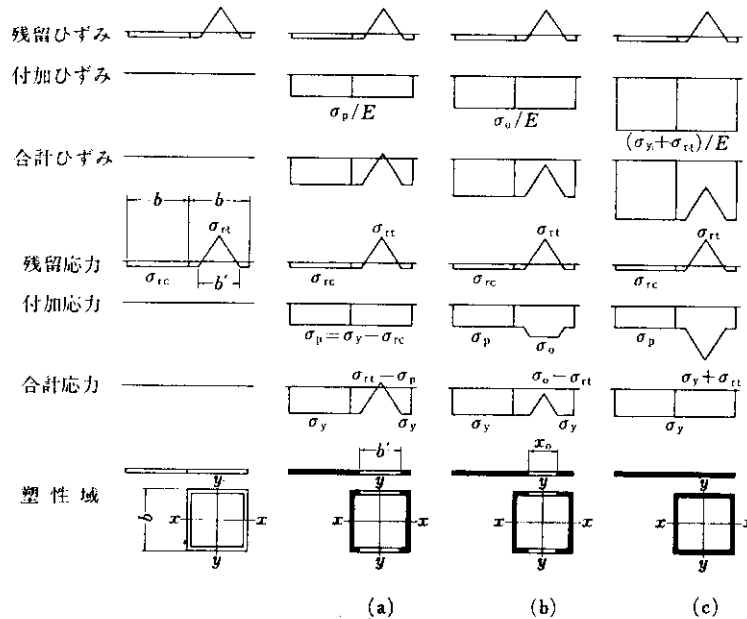


図 12 Bタイプにおける応力とひずみの関係 (冷間成形を考慮しない場合)

とすれば、図12(a)に示すように平均応力 σ が $\sigma_y - \sigma_{rc}$ に達した時点で断面の一部が降伏を開始する。この応力が短柱圧縮試験における比例限 σ_p であり

$$\sigma_p = \sigma_y - \sigma_{rc} \quad \dots\dots\dots (3)$$

図12(b)は、 σ が σ_p をこえた状態での応力とひずみの関係を表わしているが、弾性域の幅を x_0 とすればその部分での付加応力 σ_0 は次式となる。

$$\sigma_0 = \sigma_y + \sigma_{rt} - \frac{x_0}{b'} (\sigma_{rc} + \sigma_{rt}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 σ_{rt} は引張残留応力の最大値、 b' は図に示す領域幅である。この状態に至るまでに付加された平均応力 σ およびひずみ ϵ は、柱の幅を b とすれば、

$$\sigma = \frac{1}{2b} \left\{ 2b\sigma_p + \frac{(b' + x_0)(\sigma_0 - \sigma_p)}{2} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\epsilon = \frac{1}{E} \sigma_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

(4) 式を (5)、(6) 式に代入のうえ整理して、

$$\sigma = \frac{1}{2b} \left\{ 2b\sigma_p + \frac{(b' + x_0)(\sigma_{rc} + \sigma_{rt})}{2b'} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\epsilon = \frac{1}{E} \left\{ \sigma_y + \sigma_{rt} - \frac{x_0}{b'} (\sigma_{rc} + \sigma_{rt}) \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{ここで、} E_t = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad \dots\dots\dots (9)$$

なる接線弾性係数 E_t を導入する。平均応力が σ_p に至るまでは $E_t = E$ であり、全断面が降伏したのちは $E_t = 0$ となる。非弾性域における E_t は (7)、(8) 式より以下のように求められる。

$$\frac{d\sigma}{dx_0} = -\frac{x_0}{2bb'} (\sigma_{rc} + \sigma_{rt}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{d\epsilon}{dx_0} = -\frac{1}{Eb'} (\sigma_{rc} + \sigma_{rt}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

(10)、(11) 式を (9) 式に代入して

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{\frac{d\sigma}{dx_0}}{\frac{d\epsilon}{dx_0}} = \frac{E}{2b} x_0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

また、圧縮残留応力と引張残留応力の釣り合いから次の関係が得られる。

$$\frac{b'}{b} = \frac{4\sigma_{rc}}{\sigma_{rc} + \sigma_{rt}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

(8) 式より

$$x_0 = \frac{b'}{\sigma_{rc} + \sigma_{rt}} (\sigma_y + \sigma_{rt} - E\epsilon) \quad \dots\dots\dots (14)$$

(12) 式より

$$x_0 = 2b \frac{E_t}{E} \quad (15)$$

(7)式に(14)、(15)式を代入のうゑ x_0 を消去し、(13)式を用いて整理すれば次の2式が得られる。

$$\sigma = C_1 + C_2 E \varepsilon - C_3 E \varepsilon^2 \quad (16)$$

$$\sigma = \sigma_y - \frac{1}{4C_3} \left(\frac{E_t}{E} \right)^2 \quad (17)$$

$$C_1 = \sigma_y - \frac{\sigma_{rc}(\sigma_y + \sigma_{rt})^2}{(\sigma_{rc} + \sigma_{rt})^2}$$

$$C_2 = \frac{2\sigma_{rc}(\sigma_y + \sigma_{rt})}{(\sigma_{rc} + \sigma_{rt})^2}$$

$$C_3 = \frac{\sigma_{rc}}{(\sigma_{rc} + \sigma_{rt})^2}$$

すなわち、(16)式および(17)式は、それぞれ残留応力分布を基礎として誘導された短柱圧縮試験時における応力-ひずみ関係と応力-接線係数関係を表わす理論式である。

x 軸回り、 y 軸回りの I_e を $I_{e(x)}$ 、 $I_{e(y)}$ と置けば、

$$\frac{I_{e(x)}}{I} = \frac{b^3 - (b-2t)^3}{b^4 - (b-2t)^4} x_0 \quad (18)$$

$$\frac{I_{e(y)}}{I} = \frac{2t}{b^4 - (b-2t)^4} x_0^3 \quad (19)$$

(15)、(18)および(19)式を用いれば、座屈式が(2)式より次のように求められる。

$$\sigma_{cr(x)} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} 2b \frac{b^3 - (b-2t)^3}{b^4 - (b-2t)^4} \frac{E_t}{E} \quad (20)$$

$$\sigma_{cr(y)} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \frac{16tb^3}{b^4 - (b-2t)^4} \left(\frac{E_t}{E} \right)^3 \quad (21)$$

(20)式が x 軸回りの、(21)式が y 軸回りの座屈式をそれぞれ表わしている。(17)式より、ある平均応力時における E_t/E を求め、座屈式よりその応力が座屈応力となるような細長比 λ を定めれば座屈線が求められることになる。

(3) コーナー部の冷間成形による影響を考慮した場合

図13は、図12と同様に応力とひずみの関係を示したものである。図の(a)は、平均応力 σ_p がに達した状態であり、この時点で断面の一部が降伏する。しかし、コーナー部は降伏点が高いため、まだ弾性域にあり、図12(a)の状態とは異なる。さらに圧縮応力が増加すると、ほかの一部が降伏を始める。その状態を示したのが図13(b)である。同図を参考にしながら σ_0 を求めると、

$$\sigma_0 = \sigma_y + \sigma_{rt} - \frac{x_0}{b'} (\sigma_{rc} + \sigma_{rt}) \quad (22)$$

付加された平均応力 σ とひずみ ε は

$$\sigma = -\frac{1}{2b} \left\{ b' \sigma_p + (2b - b') \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_p) \times \frac{b' - x_0}{2} \right\} \quad (23)$$

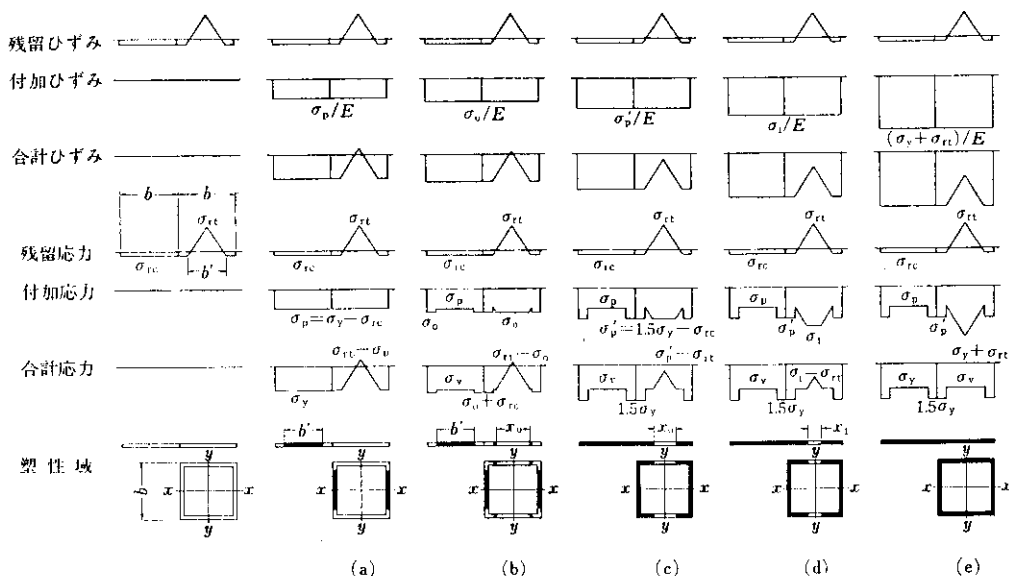


図13 Bタイプにおける応力とひずみの関係(冷間成形を考慮した場合)

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma_0 \quad (24)$$

接線弾性係数 E_t は

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{E}{2b} (2b - 2b' + x_0) \quad (25)$$

であるから、(22)、(23)、(24)、(25)式より次式が求められる。

$$\sigma = C_4 + C_5 E \varepsilon - C_6 E^2 \varepsilon^2 \quad (26)$$

$$\sigma = \sigma_p + \frac{(2b - b')^2}{4bb'} (\sigma_{rc} + \sigma_{rt}) - \frac{1}{4C_6} \times \left(\frac{E_t}{E} \right)^2 \quad (27)$$

$$C_4 = \frac{\sigma_{rc}}{(\sigma_{rc} + \sigma_{rt})} \times (2\sigma_{rc} + 2\sigma_{rt} - \sigma_p)$$

$$C_5 = \frac{\sigma_{rt}^2 - \sigma_{rc}^2 + 2\sigma_{rc}\sigma_p}{(\sigma_{rc} + \sigma_{rt})^2}$$

$$C_6 = \frac{\sigma_{rc}}{(\sigma_{rc} + \sigma_{rt})^2}$$

座屈式も同様に求められ、次の2式となる。

$$\sigma_{cr(x)} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \left[\frac{(2bE_t/E - b - 3b') \{b^3 - (b - 2t)^3\}}{b^4 - (b - 2t)^4} + \frac{2t(b^3 - b'^3)}{b^4 - (b - 2t)^4} \right] \quad (28)$$

$$\sigma_{cr(y)} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \left[\frac{(b - b') \{b^3 - (b - 2t)^3\}}{b^4 - (b - 2t)^4} + \frac{2t \{b^3 - b'^3 + (2bE_t/E - 2b - 2b')^3\}}{b^4 - (b - 2t)^4} \right] \quad (29)$$

以上は図13(b)の状態であり、 σ_0 が $1.5\sigma_y - \sigma_{rc}$ となった時点で、コーナー部は応力値が $1.5\sigma_y$ となり降伏し図13(c)の状態となる。したがって、(22)式の右辺を $1.5\sigma_y - \sigma_{rc}$ と等しく置けば

$$1.5\sigma_y - \sigma_{rc} = \sigma_y + \sigma_{rt} - \frac{x_0}{b'} (\sigma_{rc} + \sigma_{rt})$$

より

$$x_0 = \frac{b'}{\sigma_{rc} + \sigma_{rt}} (\sigma_{rc} + \sigma_{rt} - 0.5\sigma_y) \quad (30)$$

図13(c)に至るまでに付加された平均応力を σ_p' とすれば、(30)式と(22)、(23)式より

$$\sigma_p' = \sigma_y - \sigma_{rc} + \frac{\sigma_y (2\sigma_{rt}^2 - 2\sigma_{rc}^2 - \sigma_y \sigma_{rc})}{4(\sigma_{rc} + \sigma_{rt})^2} \quad (31)$$

平均応力が σ_p を越えた状態が図13(d)であ

る。この時点における塑性域の広がりは図12(b)の状態と同様であるので、結果のみを記せば次の通りである。すなわち

$$\sigma = C_7 + C_8 E \varepsilon - C_9 E^2 \varepsilon^2 \quad (32)$$

$$\sigma = \left(1.5 - \frac{b'}{2b}\right) \sigma_y - \frac{1}{4C_9} \left(\frac{E_t}{E}\right)^2 \quad (33)$$

$$C_7 = \left(1.5 - \frac{b'}{2b}\right) \sigma_y - \frac{\sigma_{rc}(\sigma_y + \sigma_{rt})^2}{(\sigma_{rc} + \sigma_{rt})^2}$$

$$C_8 = \frac{2\sigma_{rc}(\sigma_y + \sigma_{rt})}{(\sigma_{rc} + \sigma_{rt})^2}$$

$$C_9 = \frac{\sigma_{rc}}{(\sigma_{rc} + \sigma_{rt})^2}$$

$$\sigma_{cr(x)} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \cdot 2b \frac{b^3 - (b - 2t)^3}{b^4 - (b - 2t)^4} \frac{E_t}{E} \quad (34)$$

$$\sigma_{cr(y)} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \cdot \frac{16tb^3}{b^4 - (b - 2t)^4} \left(\frac{E_t}{E}\right)^3 \quad (35)$$

とくに、平均応力 σ が $(1.5 - b'/2b)\sigma_y$ に達すると全断面が降伏し、図13(e)の状態となる。

以上により、残留応力の分布から短柱圧縮試験における応力-ひずみの関係、応力-接線弾性係数関係、さらには柱の座屈式がすべて解析的に求められた。

同様な手順により、Aタイプ、Cタイプについても諸式を誘導のうえ数値計算を行ない、それらの結果を図示すれば、図14、図15および図17が得られる。

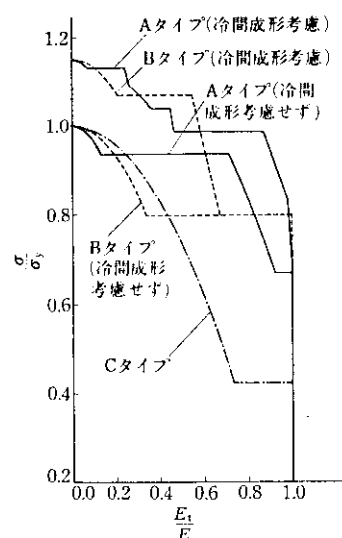


図14 応力と接線弾性係数の関係(計算値)

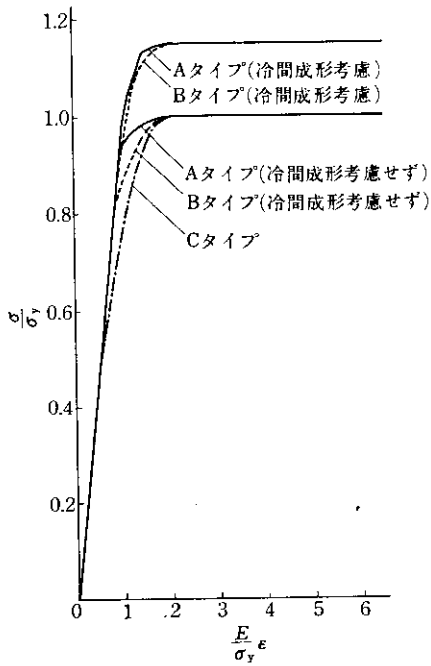


図15 応力とひずみの関係 (計算値)

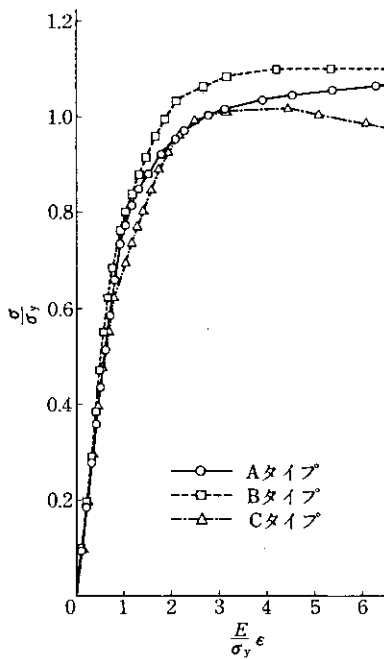


図16 短柱圧縮試験結果による応力とひずみの関係

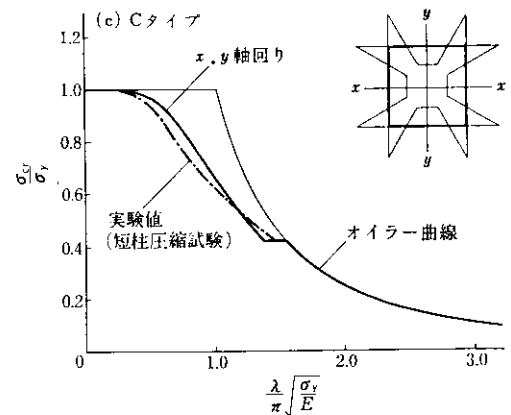
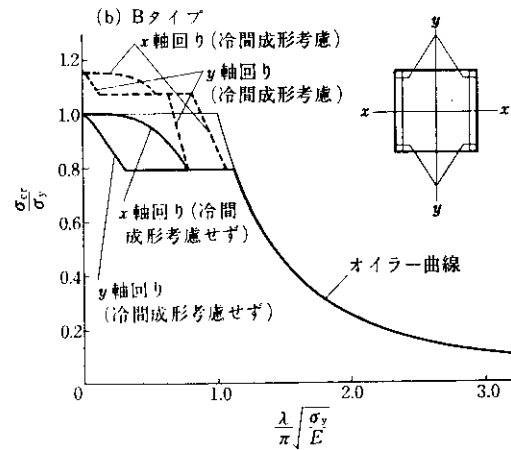
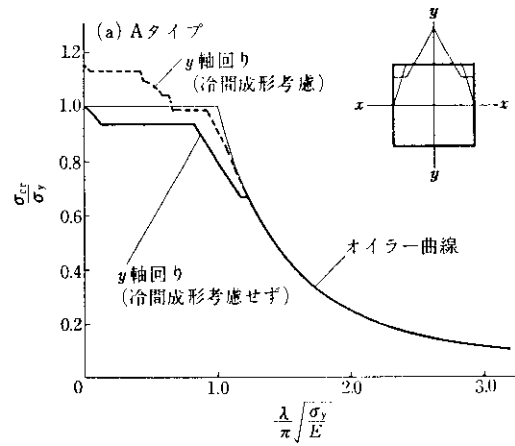


図17 座屈曲線

図14は応力と接線弾性係数の関係を表わしたもので、縦軸および横軸にはそれぞれ平均応力 σ と素材の降伏点 σ_y との比接線弾性係数 E_t と弾性係数 E との比をとり、無次元化している。また、図15は応力とひずみの関係を表わしたもので、縦軸は上と同じく、横軸にはひずみ ε と降伏ひずみ σ_y/E との比をとっている。

短柱圧縮試験の結果より得られた応力とひずみの関係を図16に示したが、これを図15と比較すると、全体的にはほぼ類似した傾向を示しているが、比例限以降のひずみで実験値は計算値をかなり上回っていることがわかる。また、A、Bタイプコーナー部における冷間成形の影響は、短柱圧縮試験での最大荷重の大きさに現れているが、図11のモデルによる計算値よりもその値は小さい。

これらの理由は、残留応力の分布や、断面各点の応力-ひずみ関係を簡単なモデルに置換したためと考えられ、とくに図5に見られるように、実際は降伏棚が存在せず、初期の応力から徐々にひずみが増大するコーナー部の応力-ひずみ関係を、永久ひずみ0.2%時の応力値が降伏点となるような完全弾塑性と見なしていることがその主因と思われる。したがって、当然実際の応力-ひずみ関係を用いて精密な数値計算を行なえば、実験値と計算値のよりよい近似が期待される。

図17は3タイプについての座屈曲線を示したものであるが、これらにより、おおよそ次の3項目にわたる興味ある現象が確認された。

- (1) 角鋼管柱はその製造方法の違いによって残留応力の分布や冷間成形の影響が異なるため、タイプによって座屈耐力が大きく変化する。
- (2) Cタイプは溶接箇所が多く、したがって溶接残留応力も大きいことから、ほかのタイプに比べて座屈耐力が低下する。
- (3) A、Bタイプにおける冷間成形は、座屈耐力向上には有利な条件となる。

Huber, Beedle らは、残留応力の分布が主軸に対して対称であるとして解析を進めており、したがってAタイプのx軸回りの座屈曲線はBeedleらの方法では決定されない。このような非対称残留応力を有する柱の座屈耐力に関しては、偏心圧

縮の考えを導入するなど、ほかの方面から追求すべきであり、筆者らの今後の課題である。

さて、Lehigh 大学における一連の研究は、主としてH形鋼の座屈耐力に関するものであり、この強軸回りの座屈式は、

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{\lambda^2}$$

と簡単に表わされ、実験値とも良く一致している³⁻⁵⁾。ここで E_t は、残留応力分布の実測値から算出するか、もしくは短柱圧縮試験の $\sigma-\varepsilon$ 曲線から得られる $d\sigma/d\varepsilon$ を用いるかの2つの方法があり、いずれによっても同じ結果が得られる。このことは、H形鋼がウェブを無視しうること、残留応力が比較的単純な分布をしていることなどから納得できることである。

本論で示した角鋼管の場合も、理論的には座屈式における E_t/E に短柱圧縮試験の結果から得られる値を代入し算出できる。A、Bタイプは冷間成形を施したり、全周4面における溶接箇所が同一かつ対称でないため、残留応力分布や断面各点の $\sigma-\varepsilon$ 関係を単純なモデルに置換したものでさえ、(28)、(29)式に示すごとく非常に複雑な座屈式となり、さらに塑性域の広がり方も実際の場合とモデル化したものとは異なることが予想されるため、H形鋼のように短柱圧縮試験による E_t/E をそのまま座屈式に代入することはできない。このことは、残留応力の分布から求めた短柱圧縮試験における $\sigma-\varepsilon$ 曲線とその実験値との違いからも判断される。Cタイプは、残留応力の分布が、A、Bタイプに比べ比較的単純であり、 $\sigma-\varepsilon$ 関係も理論値と実験値がほぼ類似している。したがって、短柱圧縮試験の結果から得られた E_t/E を用いて座屈曲線を求ると判断される。図17(c)にこの結果を併記したが、短柱圧縮試験から求めた座屈曲線と、残留応力分布から求めたそれとは比較的よい一致を示している。

いずれにせよ、角鋼管は複雑な残留応力分布になり、かつ冷間成形による影響も大きいことから座屈式は相当複雑になるため、設計に供するにはより実用的な座屈式を導く必要がある。このためには、さらに溶接や冷間成形の力学的特性の詳細な究明や、細長比の変化による座屈特性の解明な

どの基礎的研究が要請される。

7. 結 言

本実験において明確になった事項をまとめれば次のとおりである。

- 1) 冷間成形を施したA, Bタイプにおけるコーナー部の応力-ひずみ曲線は, 予ひずみの影響により降伏棚が消失し, 永久ひずみ0.20%時の応力値は素材の降伏点の約1.5倍となる。
- 2) A, Bタイプのコーナー部の残留応力は, 溶接に起因するものと, 冷間成形によるものとの和となり, とくに後者の影響により表裏で著しく異なる。
- 3) 角鋼管柱は, その製造方法により, 残留応力および冷間成形による予ひずみの違いがあるため, 座屈耐力が大きく変化することが認められた。
- 4) Cタイプは溶接箇所が多く, したがって溶接残留応力も大きいことから, ほかのタイプに比べて座屈耐力が低下する。また, A, Bタイプにおける冷間成形は, 1)の理由により座屈耐力の向上には有利な因子となる。
- 5) 座屈式における E_t/E に, 短柱圧縮試験の結果から求めた値を代入するH形鋼におけるHuber, Beedle らの手法は, Cタイプに関しては応用できるが, A, Bタイプに対しては実際上不可能であり, 残留応力実測値による筆者らの手法によらねばならない。

参 考 文 献

- 1) 荻野, 山口, ほか: 角鋼管柱とH形鋼よりを用いた接合部の性状に関する実験的研究 (その1, 基礎実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1972)
- 2) 山口, 滝沢, ほか: 角鋼管柱とH形鋼よりを用いた接合部の性状に関する実験的研究, 川崎製鉄技報, 5(1973) 1, 43
- 3) Huber, Beedle: Residual Stress and the Compressive Strength of Steel, Welding J. Welding Research Supplement, 33 (1954) 12
- 4) Beedle, Tall: Basic Column Strength, Structural J. ASCE, 86 (1960) ST 7
- 5) Estuar, Tall: Experimental Investigation of Welded Built-Up Columns, Welding J. Welding Research Supplement, 42 (1963)
- 6) 加藤勉, ほか: 残留応力と座屈, JSSC, 3 (1967) 16
- 7) 加藤勉, ほか: 残留応力をもつ材の座屈耐力に関する実験研究, JSSC, 6 (1970) 54
- 8) Chajes, Britvec, Winter: Effects of Cold-Straining on Structural Sheet Steels, J. Structural Division, ASCE, 89 (1963) ST 2
- 9) 藤本, ほか: 塑性履歴をうけた鋼材ならびに部材の力学的性状に関する研究 (その1, 鋼材の引張ならびに圧縮に対する機械的性質), 日本建築学会論文報告集, (1973) 167
- 10) Tall: Stub Column Test Procedure, Fritz Laboratory Report No. 220A. 36, Lehigh University, (1961)