

(昭和 35 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

残留応力を有する柱の塑性域における 挫屈について (第2報)

正員 藤 田 譲*

Ultimate Strength of Columns with Residual Stresses (2nd Report)

By Yuzuru Fujita, Member

Abstract

The author had studied this problem and reported as the 1st Report⁽¹⁾ few years ago. In which, A "modified Shanley model" was studied and the concept of tangent modulus theory was accepted as a first approximation.

In this report, the author again treated the same problem more thoroughly by planning series of tests and a particular distribution of welding residual stresses i. e. "reversed"-specimens. (Here, "reversed" means that the flange ends of welded columns with I-section have tensile residual stresses in stead of usual compressive residual stresses.)

The new end-fixtures which consist of two tapered circular wedges and driving worm gears, were designed to make the perfect alignment of columns easy.

The findings are follows :

- The "reversed"-specimen (which have reversed distribution of residual stress) may reach at the highest ultimate strength of annealed-specimen, but may not exceed that value by a great amount.
- The test results of high-tensile steel (Welten-50, YAWATA Iron & Steel Co. Ltd.) columns showed a good agreement with the theoretical calculation as well as in case of mild steel columns in the 1st report.
- The tangent modulus load was again verified as a good design standard for welded columns.

1. 緒 言

著者は、さきに第1報⁽¹⁾において残留応力が柱の塑性域における挫屈におよぼす影響について、種々の観点から報告した。特に修正 Shanley model を使用して塑性域における柱の挙動を解明するとともに、鉚接柱とほぼ同様な断面性能を有する溶接柱が溶接による圧縮残留応力のために著しく強度が減少することを理論的並びに実験的に示した。

今回の第2報では、実験的基礎を固めるため、前回の実験柱(著者が米国リーハイ大学で実験したもの)と異なる断面を有し異なつた材料(前回は軟鋼)である高張力鋼で製作された柱を圧縮挫屈せしめた結果を報告する。

第1表 試験片および試験結果

No.	試験片記号	L_{mm}	A_{mm^2}	I_{mm^4}	r_{mm}	L/r	断面寸法 (mm)	条件	最高荷重 TON
1	W 40	1200	7140	6054 ²¹⁰³	29.1	41		As-weld	167.5
2	W 60	1790	7125	6056	29.2	61		*	147.5
3	W 80	2390	7109	6058	29.3	82		*	143.5
4	A 40	1200	7138	6089	29.2	41		Annealed	210.0
5	A 60	1790	7129	6104	29.2	61		*	207.5
6	A 80	2390	7137	6091	29.2	82		*	207.5
7	A 100	2990	7115	6038	29.1	103		*	147.5
8	R 40	1200	7128	6078	29.2	41		Reversed	221.0
9	R 60	1790	7102	6086	29.3	61		*	207.5
10	R 80	2390	7135	6077	29.2	82		*	196.5

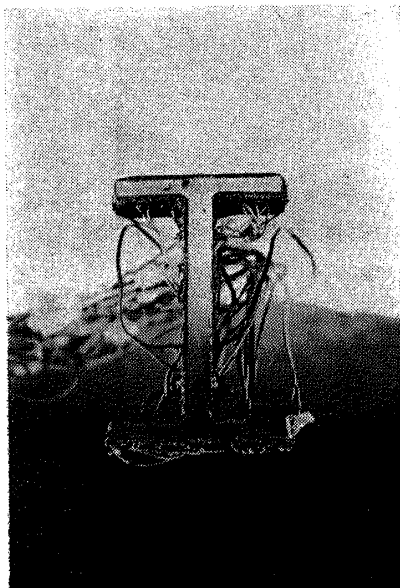
2. 試験片および試験法

緒言で述べた通り、今回は実験的基礎を得るのが目的であるので、直接的な比較を行なうことが重要であると考えられた。そこで材料はすべて一度焼鈍されロールその他の原因による原

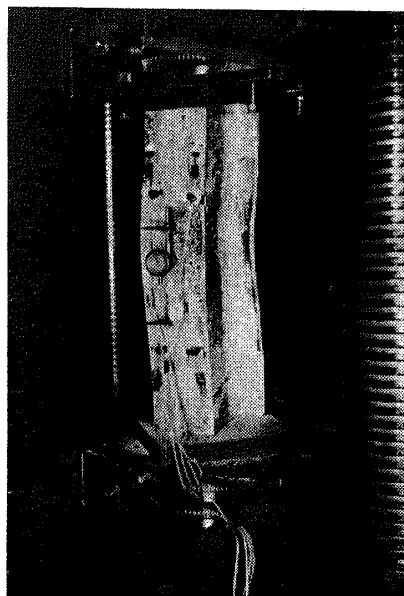
原稿受付 昭和 35 年 1 月 10 日

* 東京大学工学部

材料中の残留応力が除去された後、第1表に示す断面および長さに溶接加工された。これが As-weld すなわち W-試験片であり、これを更に焼鈍したのが annealed すなわち A-試験片である。A-試験片のフランジ端に沿



第1図 残留応力測定



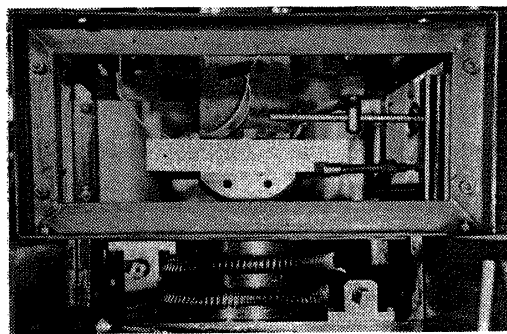
第2図 短柱圧縮試験

つて再び溶接ビードを盛つた後機械仕上げを行なったのが reversed すなわち R-試験片である。この R-試験片は W-試験片と全く逆の残留応力分布が期待できる。これを確かめるため、W および R 試験片の残留応力の測定を行なった。そのため SR 4 gage をある1つの断面に沿って貼付し、その前後を切断することにより、残留応力を開放して測定が行なわれた。試験片の模様を第1図の写真に示す。

なお W-試験片本体の圧縮を受ける際の応力-歪関係を知るため、高さ 700mm の短柱圧縮試験が行なわれた。(第2図参照)

試験片の断面は適当な L/r を得るため、普通の I 断面とは異なり、web が厚くなっているが、この実験が weak-axis に関する曲げ挫屈実験であることから、少しも一般性を失わない。

柱の挫屈試験では特に試験片の初期撓みと荷重の偏心度が非常に重要な factor である。試験柱 R-80 試験



第3図 端部支持装置

片を除いては、極めて優秀な工作のためその初期撓みは少なく $v_0/r \leq 0.005$ の order である。荷重の偏心度を最小にするため従来種々の方法が考案されているが、この報告では全く新しい端部支持装置を考案製作し非常に精度よく面も容易に調整を完了し、且つ満足すべき結果を得ることができた。(第3図)

試験柱は機械仕上された両端にまず $300 \times 300 \times 50$ mm の基板 (Base plate) が溶接される (第3図)。その基板の下部に円筒の一部がボルトにより締めつけられる。この円筒の中心線は丁度基板の表面にあるよう製作されており、この円筒の中心線と柱の weak-axis とが一致するよう調整される。(この際一

定の量だけずらして調整すれば任意の偏心量を与えることができるわけである) したがって柱が撓んで基板が傾斜しても荷重中心は常に柱の下端中心を通ることになり、しかも回転は自由であるから、完全な両端支持の軸圧縮試験を行なうことができる。

この円筒の下に上述の端部支持装置がおかれる。この装置は2枚のテーパーした円板を重ね、その円周上にギアを切り、それに噛み合うウォームギアを把手で回転することにより、2枚の円板の相対回転変位を利用して任意の傾斜面を得ようとするものである。2個の円板楔 (circular wedge) の円周上での相対変位は約 2mm が傾斜 1 秒に相当するよう設計され目盛が刻まれている。使用の結果は微動調整のできる、荷重に対する安定のよいことなど優れた性能を有し、他の方面への利用価値が多いと思われる。

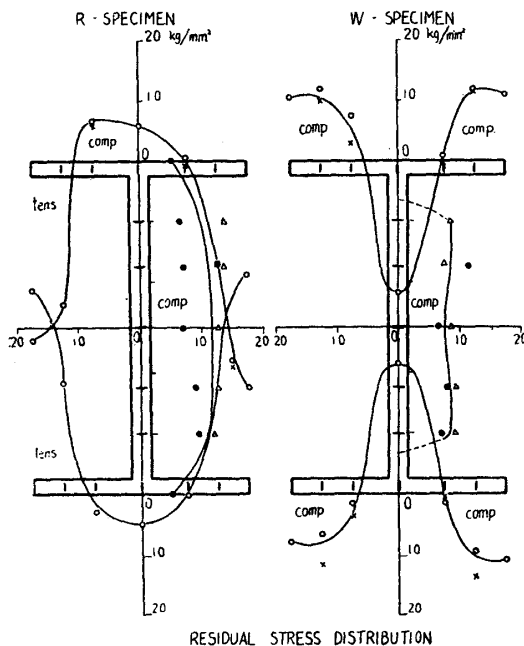
調整はまず試験柱を空間に対して鉛直にすることから始まる。ついで荷重を、予想される柱の耐えうる最高荷重の 20% 程度の範囲で増減し、試験片の上部、中央部および下部の3ヶ所のフランジの上面に貼られた 12 枚の SR 4 gage の示す歪が等しくなるよう調整する (第4図)。かくして試験片は、鉛直にしかも偏心なしに均等に圧縮されることになる。この調整を怠つては精度の高い挫屈実験は望めない。試験の set-up が第5図に示されている。

3. 実験結果および考察

残留応力の測定結果を第6図に示す。試験片は全く同一の溶接条件すなわち

心線 No. 36	(5/32"φ)
フラックス	Gr. 80
電流	540 Amp.
電圧	30 Volt.
速度	45 cm/min.

で溶接されたので各試験片を通じて、ほぼ同じ残留応力分布が期待できる。そこで測定は W-80 および R-80 試験片に隣る部分から切断されたもの各個1につき行なわれた。予期されたように R 型試験片と W 型試験片とは全く逆な残留応力分布となつている。W 型試験片では最大 12 kg/mm^2 程度の圧縮残留応力が認められる。ビード近傍の引張り力は 21 kg/mm^2 で R 型試験片のフランジ端の引張応力より幾分低い



第6図

平均応力 σ と断面の弾性部分の曲げ剛性 EI_e との関係を求めることにより容易に計算できる。

また第2図に示した短柱圧縮試験の結果を利用して、前報に述べた近似式を計算した結果が破線で書き入れられている；

$$\frac{P}{P_t} = (0.90) \frac{\tau_t + a_0}{\tau_t^3 + a_0} \quad (1)$$

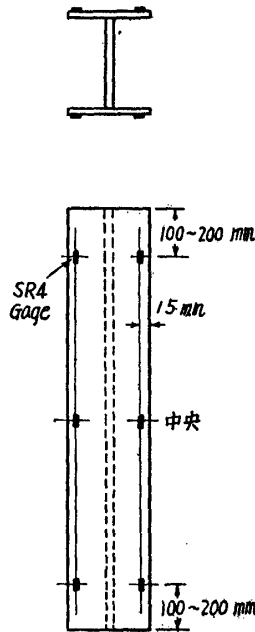
ここに、

P_t = 切線係数荷重,

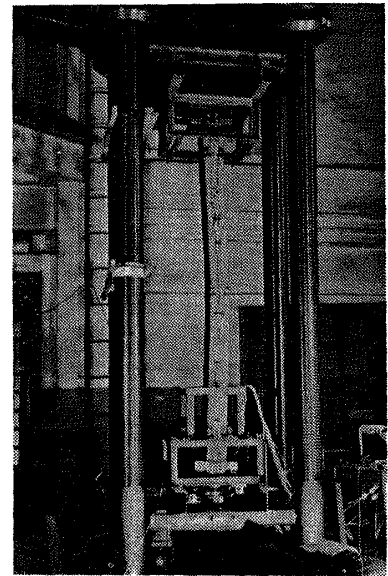
$$\tau_t = \frac{1}{E} \frac{d\tau}{d\epsilon} \text{ at } P_t,$$

a_0 = 短柱圧縮試験結果から得られる常数で次式で与えられる。

$$\tau = \tau_t + a_0(1 - P/P_t) \quad (2)$$



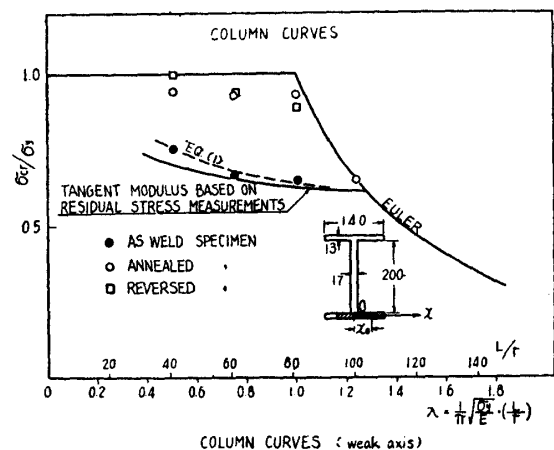
第4図



第5図

がこれはフランジ表面の値のみのためと思われる。

各試験柱の最高荷重は第1表中に示してある。これを column curve に点置したのが第7図である。第7図中には実験値の他切線係数荷重の曲線も記入されている。これは前述の残留応力測定結果を用いて、前報⁽¹⁾と全く同様に



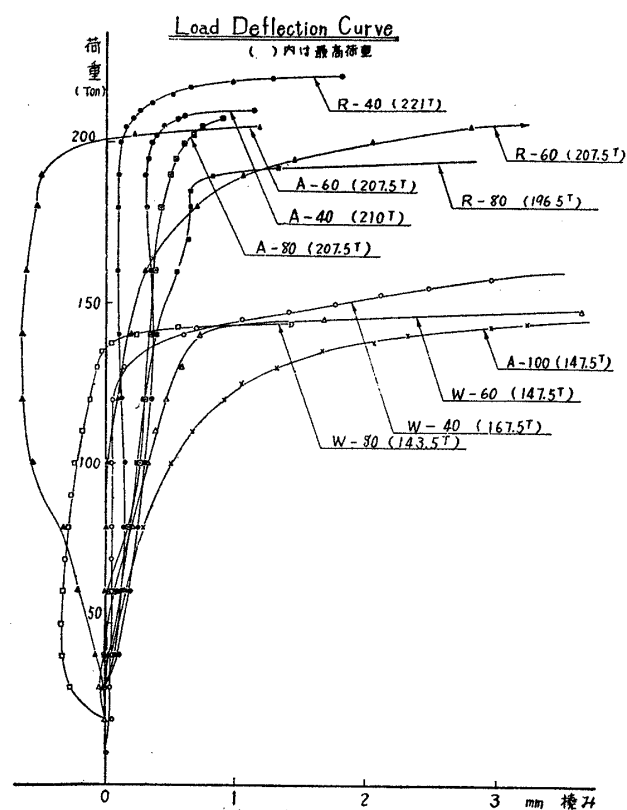
第7図

前報で詳述したように、柱の塑性域における最高荷重は切線係数荷重を越えて更に上昇し、その度合は残留応力分布とその大きさおよび断面形とによつて決まり、上記の近似式で表わされる。第7図から、W試験片の最高荷重はよくこの近似式で説明されることが再確認された。

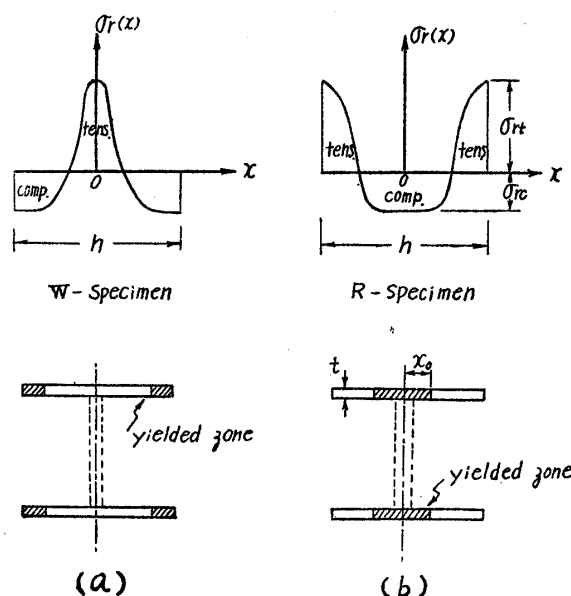
A試験片は L/r が 40~80 範囲でほとんど同じ最高荷重である。これは実験の精度の高いことを示しており、殊に $L/r=80$ の近傍は丁度弾性と塑性の境界点にあり最も imperfection の現れ易い場所であることを注目したい。A-80 と W-80 とは同一断面同一長さの柱にかかわらず、実に 64 ton すなわち 30% 以上の柱の強度の減少を呈したこととなり、圧縮残留応力の影響の大きいことが、前報に引続いて明確に証明されたと言えよう。

試験柱の初期撓みは上述の通り R-80 を除いて極めて僅かであり、そのことはすべての試験柱を通じて最高荷重の近傍まで柱の中央の撓みが僅かに 0.5 mm すなわち $v/h \leq 0.004$ の程度であることと相まって、初期撓みそ

他の imperfection の影響はほとんどないと言えよう (第8図参照)。R-80 試験片のみは中央で約 2.5 mm の初期撓みが存在したので、2mm の偏心量を与えて初期撓みの効果を打消して実験を行なつた。



第8図



第9図

さて今、第9図に示すような理想化されたI形柱を考えてみよう。webは無視されるから、実は矩形断面と同一である。この理想化されたI形柱がwebを通る weak-axis の周りに曲げ挫屈する場合を考えよう。(a)図がW型、(b)図がR型の残留応力を示し、残留応力分布を $\sigma_r(x)$ 、最大引張残留応力を σ_{rt} 、最大圧縮残留応力を σ_{rc} 、フランジ厚を t 、高さを h 、降伏応力を σ_y としよう。第1報で詳述した通り W-型試験片では荷重の増大に伴ない遂に各フランジ端から降伏して、塑性域がフランジ端から中央に向つて進展する。塑性域での曲げ剛性が零になると仮定すれば W-型試験片の曲げ剛性は塑性域の進展とともに急激に減少し、容易に切線係数荷重 (tangent modulus load, P_t) に達して挫屈することになる。それでは残留応力の分布形を逆にしてフランジ端に引張残留応力を残すことにより挫屈荷重を高めることができるであろうか、という疑問の生ずるのは当然であり、もし可能ならば、工作法または設計法によつて少くとも塑性域での柱の挫屈に関する限り残留応力の影響を排除することができるはずである。しかしながら次の簡単な計算によつて、残留応力の分布形により柱の挫屈荷重を増すことはできるが、高々 $A\sigma_y$ すなわち全断面が降伏応力となる荷重あるいは焼鈍した試験片と同じ荷重までで、それより高くすることはできないと言える。換言すれば、溶接した柱はどのような残留応力分布を与えても高々焼鈍した柱と同じ挫屈強度を有し、それより高くは一般にならない。勿論本実験のようにフランジ端に溶接ビードを盛つた場合には溶着金属の降伏点が母材のそれよりも高ければ、その差が現われるのは当然であろう。A-40よりR-40の挫屈値の高いのは、以上の理由もその一つであろうと思われる。

R型試験片(第9図(b))で X_0 の点までフランジ中央部が降伏したとしよう。そのときの荷重 P_{X0} は、圧縮応力を正として

$$P_{X0} = A(\sigma_y - \sigma_{rc}) + \int_{-X_0}^{X_0} (\sigma_{rc} - \sigma_r) 2tdx \quad (3)$$

であり、更に降伏が進んで全断面降伏したときの荷重を P_{y0} とすれば、

$$\begin{aligned} P_{y0} &= A(\sigma_y - \sigma_{rc}) + \int_{-(h/2)}^{h/2} (\sigma_{rc} - \sigma_r) 2tdx \\ &= A\sigma_y - \int_{-(h/2)}^{h/2} (\sigma_r) 2tdx = A\sigma_y \end{aligned} \quad (4)$$

$$\therefore \int_{-(h/2)}^{h/2} (\sigma_r) 2tdx = 0. \quad (5)$$

すなわち最高荷重は高々 $A\sigma_y$ に達するのみである。R型残留応力分布のときには中立軸の附近から降伏が始まるため曲げ剛性の減少は比較的軽微なので $A\sigma_y$ まで荷重が上がる可能性は大である。本実験の場合も A型とほとんど同じ挫屈荷重を有している。実際に R型試験片では先ずウェブの中央附近が降伏し、次いでフランジ中央が降伏を始め最高荷重の近傍ではフランジ端から 25mm 以内の部分のみが有効に働いている様子が明瞭に観察され、以上の考え方の正しいことを示している。

5. 結 論

以上の実験結果から次の事実が明らかである。

- (1) いかなる残留応力分布を与えても $A\sigma_y$ すなわち (断面積) × (降伏応力) より高い挫屈荷重とすることはできない。すなわち残留応力は必ず柱の塑性域における強度を低下させる。
- (2) 普通使用される溶接 I 形柱は最悪の残留応力分布であり、30% 程度またはそれ以上の挫屈強度の減少を予想せねばならぬことが第1報の場合と全く同様に実証された。
- (3) 第1報で述べた最高荷重の近似式(1)は極めてよく実験値と一致したが、設計基準としては安全側にもあり切線係数荷重を推すことができる。
- (4) 軟鋼でも 50 キロ H.T. でも全く同様な実験結果が得られた。将来、yield level の明瞭でない材料による実験的検証が望ましい。

最後に、本研究にあたり種々御指導を戴いた吉識、木原両教授に深く感謝致します。また実験実施に当つては東大船舶工学科助手金子幸平氏に負うところが非常に大きく、協力して戴いた越川 滋、堀場靖雄の両君とともに厚く感謝の意を表します。なお、本実験は土木研究所の御厚意により該研究所の 1,000 ton 圧縮試験機を使用して実施されたのであること、試験片の材料は八幡製鉄の御厚意によるものであり、またその加工は石川島重工(第1工場)の御協力を得たものであることを附記して、各関係者の方々に心から御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) 藤田 譲, “残留応力を有する柱の塑性域における挫屈について”, 造船協会論文集, 第102号, 昭和33年2月