

溶接 T-1 鋼柱座屈実験

西 野 文 雄 *

1. 序

米国リーハイ大学において、過去 10 数年に渡り、中心圧縮を受ける鋼柱の強度に関する研究が進められている。理論的、実験的研究が軟鋼及び、低合金高張力鋼で出来た、圧延型鋼柱及び溶接組立柱についてまず進められ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ この研究を通して柱断面中に存在する残留応力が、中心圧縮を受ける柱の強度に大きな影響を及ぼす事が指摘された。

一方構造用鋼材の進歩にともなって調質高張力鋼が構造用の材料として使われる様になると共に、溶接性、加工性、切欠き特性、あるいは疲労強度など材料の加工性及び、引張材として使う場合の問題点に関して多くの研究がなされて来た。著者等は調質高張力鋼を圧縮材に使った場合の強度を求める為に、T-1 鋼を取り上げて、まず、材断面中に存在する残留応力を測定し、⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ ついで圧縮材のうちでも最も基本的な構造要素である中心圧縮を受ける柱について、理論的な強度を求めた。⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾

ここでは、中心圧縮を受ける T-1 鋼柱の強度についておこなった実験について報告する。実験は各種の細長比の溶接組立箱型柱及び、H 型柱についておこなった。

過去の多くの研究により、柱の強度に大きく影響を及ぼす要素として次の 4 つが数えられている。

- 1) 細長比 2) 静降伏応力度 3) 残留応力
- 4) 偏心、初期たわみ、非対象分布をする残留応力等の不完全要素

調質高張力鋼においては 2) の静降伏応力度は通常の軟鋼の 2 倍から 4 倍に達する。又残留応力の静降伏応力に対する割合も調質高張力鋼においては、軟鋼中のそれとは異なる事が考えられる。この実験においては、偏心及び初期たわみの影響を極力少なくする様に努力をし、残留応力の影響を調べる事に中心をおいた。

2. 準備試験

柱の実験に先立ち素材の引張り試験、断面中の残留応力の測定、及び短柱圧縮試験を行なった。素材の引張り試験は材の静降伏応力度を求める為、短柱圧縮試験は柱断面が残留応力を含む場合の平均的な歪一応力関係及び断面の降伏荷重を求める目的で行なった。

引張り試験 実験に使われた柱全てについて、試験片を切り出し、引張り試験を行なった。試験はスクリータイプの万能試験を使い、応力-歪曲線はドラム式の自記記録計で記録した。

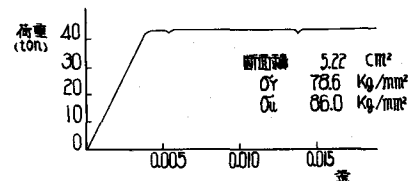


図 1 に得られた代表的な応力-歪曲線を示す。図中降伏した部分に見られる窪みは静降伏応力度を求める為に

図 1 T-1 鋼の荷重-歪曲線

* : 東大工学部総合試験所

試験機を停める事によって得られたものである。図 1 に見られる様に T-1 鋼の応力-歪曲線は完全弾塑性体に近いものである。静降伏応力度は 70 kg/mm^2 から 80 kg/mm^2 の間に、破断強度は 80 kg/mm^2 から 90 kg/mm^2 の間に分布した。ヤング率に関しては通常の軟鋼と比べて特に差は見られなかった。

残留応力分布 柱軸方向の平均的な残留応力の値を簡単に求める為、セクションング法により測定した。測定は、ゲージ長さ 25 cm のホイットモア歪計によりあらかじめ打っておいたボンチ穴間の距離を測り、次いで応力開放した後に距離を測り直し、その差から残留歪を計算した。

歪の測定は H 断面柱については板の両面について、箱断面柱については表側の面のみにて測定した。

短柱圧縮試験 柱の実験に先立ち、短柱試験を行なった。試験柱の長さは断面の降伏荷重が加えられても座屈しない（上限）と同時に平均歪測定の為中央部のゲージ長さ 25 cm の部分の残留応力分布が乱されない様に（下限）選んだ。表 1 に試験の計画を示す。

表 1 実 験 計 画

断 面	溶接組立長さ	実験柱番号	試 験 詳 細
6" × 7" H 2-150×127 1-150× 95 (セシ断板)	6000	A W 1 STWA	柱 (223m) 短柱 (0.6 m) 残留応力測定 引張り試験
	6000	A W 2 A W 3	柱 (17 m) 柱 (223m) 残留応力測定 引張り試験
6" × 7" H 2-150×127 1-150× 95	6000	B W 1 STWB	柱 (223m) 短柱 (0.6 m) 残留応力測定 引張り試験
	6000	B W 2 B W 3	柱 (17 m) 柱 (223m) 残留応力測定 引張り試験
9"×10 $\frac{1}{2}$ " H 2-230×191 1-230×127	6000	C W 1	柱 (315m) 残留応力測定 引張り試験
	6000	C W 2 STWC	柱 (202m) 短柱 (103m) 残留応力測定 引張り試験
6" × 6" 箱 2-150× 64 2-140× 64	6000	D W 1 STWD	柱 (241m) 短柱 (0.63m) 残留応力測定 引張り試験
	6000	D W 2	柱 (366m) 残留応力測定 引張り試験
10" × 10" 箱 2-250×127 2-225×127	6000	E W 1 STWE	柱 (368m) 短柱 (103m) 残留応力測定 引張り試験
	6000	E W 2	柱 (495m) 残留応力測定 引張り試験

短柱試験は6"×6"の箱断面のものはスクリュタイプの試験機で他は全て油圧式の万能試験機で行なった。均一応力分布を与える為、試験柱の上下両端に板をあて、試験機中に入れた。平均歪は柱の中心部に取付けた2つのフレームの間の距離の変化を1対2個のダイヤルゲージで読み求めた。

もう一つのダイヤルゲージにより、試験機の頭の動きを記録し、これによって静降伏荷重を求めた。中心載荷をするための調整は試験体と試験機の間に入れた一組の傾斜をつけた円板を回転させ、試験体の4隅にはりつけた電気抵抗線歪計の読みを使って行なった。図2に短柱試験の様子を示す。

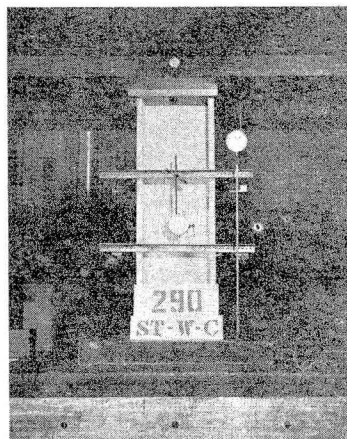


図2 短柱試験

3. 中心圧縮柱実験

中心圧縮柱の試験は12本のT-1鋼溶接組立柱について行なった。H形、箱形共2つの異なった断面を選んだ。細長比としては実験結果がオイラー曲線及び降伏荷重で定義される座屈曲線から最も外れる領域に分布する様30から60の間に選んだ。表1に柱の実験計画を示す。実験に使った4つの断面全てについて、ガス切断によって切り出した板によって試験柱を組み立てた。この外に、セン断によって切り出した板で6"×7"のH断面の試験柱を作り、ガス切断のものと全く同じ条件で試験した。

試験片の溶接は自動溶接により通常この程度の柱を作る時に使われる方法によった。

12本の実験柱の内、8本はH断面柱、残り4本が箱形断面柱である。実験は1つの軸について単純支持になる様に、ローラーを使った端部ブロックを使用した。

座屈をある特定の軸の廻りに強制するため、8本のH断面柱の内6本についてはウェブに平行にローラーをおき、他の2本についてはウェブに直角にローラーをおいた。この詳細を表2に示す。

表2 中心圧縮柱実験詳細及び実験結果

断 面	柱番号	座 屈 軸	細長比	最大初期たわみ	最高荷重 (ton)	最高荷重 降伏荷重	備 考
				長 さ			
6"×7" H	AW1	ウェブに平行	60	0.2×10^{-3}	425	0.66	瞬間的崩壊
	AW2	"	45	0.1	528	0.82	曲げ及び振りにより崩壊
	AW3	ウェブと直角	30	0.2	535	0.83	
6"×7" H	BW1	ウェブに平行	60	0.1	440	0.69	瞬間的崩壊
	BW2	"	45	0.2	513	0.80	曲げ及び振りにより崩壊
	BW3	ウェブと直角	30	0.2	537	0.84	
9"×10 $\frac{1}{2}$ " H	CW1	ウェブに平行	55	0.3	1160	0.79	瞬間的崩壊
	CW2	"	35	0.4	1335	0.90	
6"×6" BOX	DW1		40	0.7	405	0.91	瞬間的崩壊
	DW2		60	1.0	323	0.69	
10"×10" BOX	EW1		30	0.1	1335	0.94	瞬間的崩壊
	EW2		50	0.5	1245	0.87	

実験柱の端部には約 5 cm 厚の板を溶接し、この板を端部ブロックにボルトを使って固定した。この実験に使った端部ブロックでは、柱にかかる荷重点を微動装置によって変化させる様になっており、これを使って初期たわみ及び偏心の影響が最少になる様につとめた。

端部ブロックの詳細については文献 10 を参照されたい。

測定装置としては電気抵抗線歪計を柱の長さに応じて柱の上下端部から 20 ないし 30 cm 離れた断面及び柱の真中の断面の各々の 4 隅に張りつけ、端部ブロックの微動装置により中心圧縮荷重が加えられているかどうかの検出に使用した。他に柱の長さの midpoint にダイヤルゲージを当て、各荷重段階でのたわみを記録した。実験中の柱の様子を図 3 に示す。

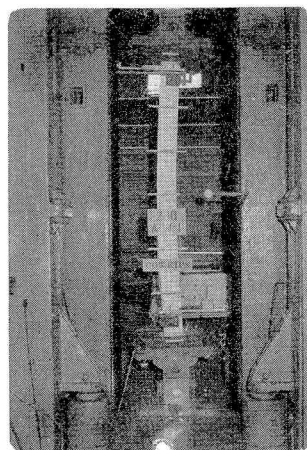


図 3 柱 試 験

4. 実験結果及び考察

残留応力分布 表 1 に示す様に同じ断面の柱について 2 ～ 3 ケ所について残留応力を測定したが、それぞれの間にはそれ程大きな差は認められなかった。図 4 及び 5 に代表的な結果を示す。

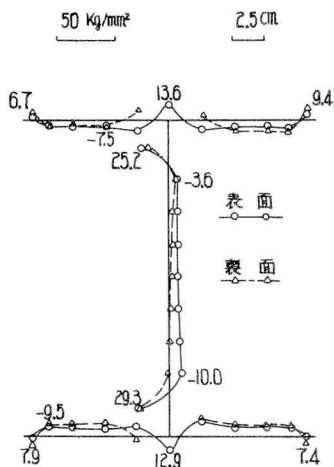


図 4 9"×10 $\frac{1}{2}$ " H 断面柱の残留応力

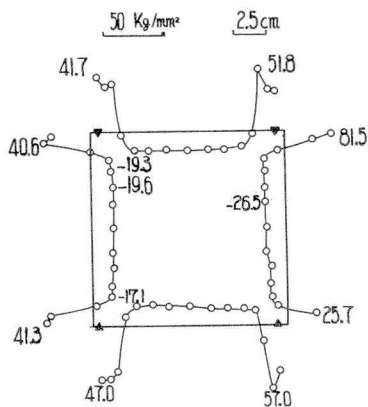


図 5 6"×6" 箱断面柱の残留応力分布

溶着金属及びその周辺、それにガス切断の板で組立てられた H 断面柱においてはフランジの端部に引張り残留応力がみられ、その他の部分には圧縮残留応力が分布している。圧縮残留応力は断面の内比較的大い部分になめらかに分布しており、その値はごく限られた部分を除いて 20 kg/mm^2 以下である。

この実験に使ったのと全く同じ断面の軟鋼柱について柱の実験が行なわれ、その時に残留応力も測定

されている。⁽¹⁾ その結果と比べる事により、残留応力の分布は当然の事ながら軟鋼柱に存在するものも T-1 鋼柱に存在するものも非常によく似ている事がわかる。残留応力の値についてみるならば、軟鋼では圧縮残留応力の値は T-1 鋼柱のものより多少小さく、引張り残留応力ではその最大値は T-1 鋼の値の $1/2$ から $2/3$ 位である。圧縮応力の分布している部分の全断面積に対する割合は軟鋼柱の方が心持ち少ない。

無次元化した柱の座屈曲線の上で柱の強度を比べるならば、同じ形の残留応力分布をする柱の場合、圧縮残留応力と材の降伏応力との比が大きければ大きい程、残留応力の影響による強度の低下は大きい。⁽⁷⁾ 従って、T-1 鋼柱の方が圧縮残留応力値が軟鋼柱より多少大きく、広い範囲にわたって分布してはいるが、分布している圧縮残留応力の平均値的なものが考えられるとして、その値と降伏応力との比をとるならば、T-1 鋼柱では $1/10$ から $3/10$ 位になるのに対し、軟鋼柱では $1/2$ から $2/3$ 位になり⁽¹⁾ T-1 鋼柱の方が残留応力の影響による強度の低下が少ない事が予想される。

短柱試験 短柱試験により得られた代表的な荷重—平均歪関係を図 6 に示す。図 6 と図 1 を比べる事により短柱試験の結果得られた、荷重—歪曲線が残留応力の存在の為母材の引張り試験によって得られた関係と違っているのがよくわかる。

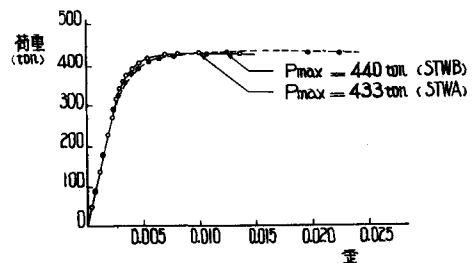


図 6 短柱試験結果

中心圧縮柱実験 柱の圧縮実験の結果を表 2 に示す。表中の初期たわみは AISC の示方書に規定されている許容値 0.001 以内に入っている。

細長比が 5.0 より大きい板では最高荷重を加え載荷を停めた後数秒から 1 分程度たわみがゆっくり増え、次いで瞬間的に崩壊した。これに対し、細長比 4.5 以下の柱ではたわみは荷重と共に増え最高荷重に達した後も急激な荷重の減少は見られず、荷重下降部分の荷重—たわみ関係を記録する事が可能であった。

箱断面柱及びウェブに平行な主軸を座屈軸に選んだ柱は期待した様に曲げ座屈によって崩壊したが、ウェブに直角な軸を座屈軸に選んだ AW 3 と BW 3 の柱に最高荷重が加えられた時には、座屈軸に対する曲りの他に捩れも見られた。

実験で得られた最高荷重を無次元化した柱の座屈曲線上にプロットしたものを図 7 に示す。比較のため同じ断面の軟鋼柱についての実験結果も図 7 に示してある。⁽¹⁾

軟鋼の場合と同じく箱形 T-1 鋼柱は H 形 T-1 鋼柱をウェブと平行な軸の廻りに座屈させたものよりも強いと云う結果が得られている。

この事は理論的にも云える事である。⁽⁷⁾ ウェブと直角な軸の廻りに座屈する H 形柱は箱形柱と同じ傾向を示す事が期待されるが⁽⁷⁾ 図中の△で示される 2 点は箱断面柱の結果より下に位置している。これは捩り座屈の影響であり、捩り座屈荷重よりも小さい事を計算によって示す事が出来た。⁽²⁾

T-1 鋼の様な高張力鋼の場合には局部座屈に対して安全な断面であっても捩り座屈荷重の方が曲げ座屈荷重よりも小さくなる事がある事は注目に値する。

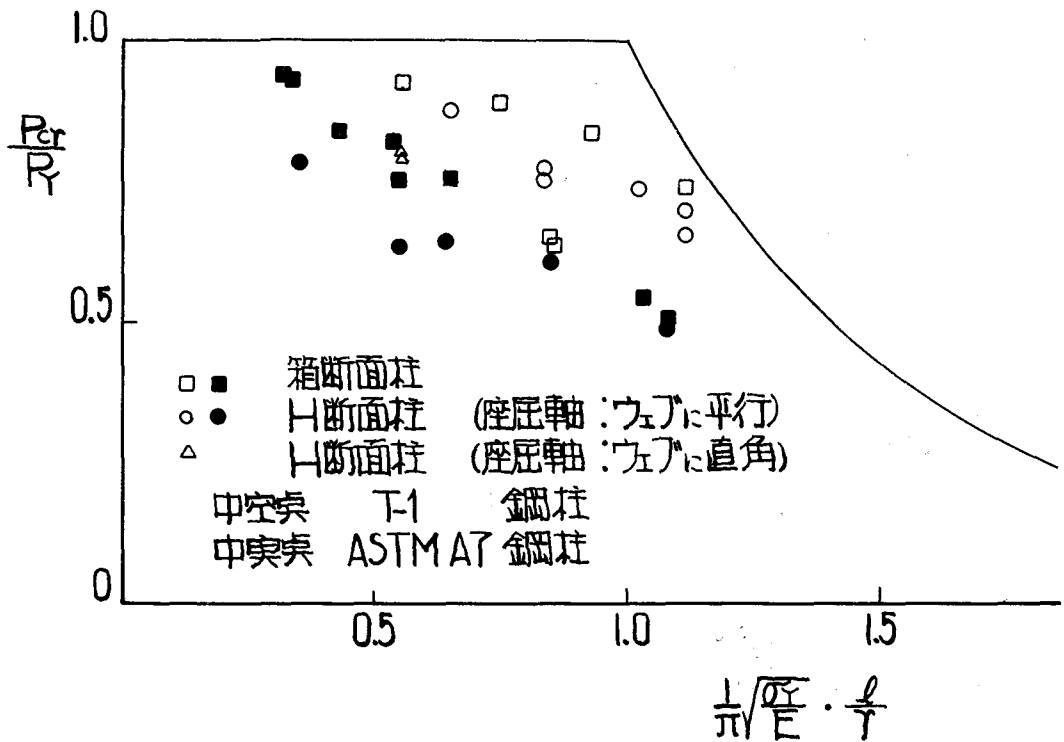


図 7 中心圧縮柱実験結果

T-1 鋼柱の実験結果と軟鋼柱の実験結果を図 7 で比べることにより、この様な無次元化された柱の座屈曲線上では T-1 鋼柱の方が軟鋼柱より強いと云う結論が下せる。これは T-1 鋼柱の残留応力の測定結果を軟鋼柱のそれと比べる事により理論的にも云える事である。⁷⁾ この実験においては初期たわみ及び偏心の影響を出来るだけ少なくし残留応力の影響が大きく表面に出る様に努力はしたが、それら不完全要素を完全に取り除く事は不可能であり、この実験結果には当然それらの影響が入っており、先に得られた結論もこれら不完全要素による影響も含めた上で下せる事に注意されねばならない。

5. おわりに

近年我国においても、長大橋梁あるいは超高層建築物が作られる機運にあり、調質高張力鋼が圧縮部材に使われる可能性も大きいと思われるので、いくつかの参考になればと思ひ著者が米国リーハイ大学で行なった実験の一部の概要をここに報告した。

実験の詳細については、リーハイ大学を通じて別に発表の機会があるものと思う。著者の指導教官でありこの実験及び関連した研究のみならず、著者が米国滞在中あらゆる面でお世話になった L. Tall 教授に、この紙面を通して感謝の意を表したい。同様にスポンサーであった U. S. Steel Corp. の名をここに記して謝意としたい。

参考文献

1. Yang, C.H., Beedle, L.S. and Johnson, B.G.
"Residual Stress and the Yield Strength of Steel Beams", The Welding Jour.,
Research Supplement, Vol.31, April 1952
2. Huber, A.W., and Beedle, L.S.
"Residual Stress and the Compressive Strength of Steel," The Welding Jour.,
Research Supplement, Vol. 33, Dec. 1954
3. Beedle, L.S. and Tall, L.
"Basic Column Strength," ASCE Proc. Paper 2555, Vol. 86, ST 7, July 1960
4. Odar, E., Nishino, F. and Tall, L.
"Residual Stress in T-1 Constructional Alloy Steel Plates,"
Fritz Eng. Lab. Report No. 290.4, Lehigh Univ., Bethlehem, Pa., Jan., 1965
5. Odar, E., Nishino, F. and Tall, L.
"Residual Stress in Rolled-Heat-Treated T-1 Shapes,"
Fritz Eng. Lab.Rep.No. 290.5, Lehigh Univ., Bethlehem, Pa.(In Preparation)
6. Odar, E., Nishino, F. and Tall, L.
"Residual Stress in Welded T-1 Constructional Alloy Steel Shapes,"
Fritz. Eng. Lab. Rep. No. 290.8, Lehigh Univ., Bethlehem, Pa., (In Preparation)
7. Nishino, F. and Tall, L.
"Residual Stress and Buckling Strength of Thin-Walled Columns,"
Fritz Eng. Lab. Pep. No. 290.7, Lehigh Univ., Bethlehem, Pa., (In Preparation)
8. Nishino, F. and Tall, L.
"Column Curve Computation," Fritz Eng. Lab. ReP. No. 290.6,
Lehigh Univ., Bethlehem, Pa., (In Preparation)
9. Nishino, F. and Tall, L.
"Residual Stress and Local Buckling Strength of Steel Cslumns,"
Fritz Eng. Lab. Rep. No. 290.11, Lehigh Univ., Bethlehem, Pa. (In Preparation)
10. Huber, A.W.
"Fixtures for Testing Pin-End Columns," ASTM Bulletin No.234, Dec. 1958
11. Nishino, F.
"Buckling Strength of Columns and Their Component Plates," Ph. D. Dissertation,
Lehigh Univ., Bethlehem, Pa., 1964