

偏心載荷を受けも鋼柱の終局耐力

国 鉄 正員 ○三浦 重
 東大工学部 正員 西野文雄
 東大工学部 正員 奥村敏恵

序 構造用圧縮材として中心圧縮を受けも柱の強度に関しては、過去多くの理論的、実験的研究が行われてきた。これらの研究を通じ、柱の強度、あるいは耐荷力に影響を与える諸要素の評価が、定性的にも定量的にも正確なものとなりつつある。しかしながら実際の構造物に使用される柱、あるいは、実験に使われる柱では柱自体に含まれる不完全性、あるいは、製作上、実験上の誤差等により、その耐力に大きな影響を受けることが予想される。柱に含まれるいわゆる不完全性が、柱の耐荷力におよぼす影響をより正確に評価することにより、設計基準に含まれる不確定要素を逐次除去し、さらに合理的な設計基準を確立出来るであろう。ここでは偏心および残留応力が柱の耐力におよぼす影響を実験的に確認することを目的とし、実験柱に出来るだけ忠実な計算を行なってこれを裏付けた。

実験 実験の目的は溶接柱の細長比、降伏応力度、残留応力、荷重の偏心等がその耐力に与える影響を正しく評価することにある。とりわけ本実験では残留応力、偏心のいわゆる二次的な影響を正確に評価することを目的とした。実験柱は使用鋼材により3つのシリーズに分けられる。細長比、降伏応力、残留応力の影響を総合的に表わす結果が得られるように、各シリーズ=種の細長比に対し

表 1 実験の詳細および結果

実験の詳細					実験結果		計算結果		計算結果と比較	
断面	柱番号	柱長さ L (mm)	細長比 L/r	偏心率 e/L	最大荷重 P _m (ton)	$\frac{P_u}{P_y}$	$\frac{P_u^h}{P_y}$	$\frac{P_u^h}{P_y}$	$\frac{P_u}{P_y^h}$	$\frac{P_u^h}{P_y^h}$
 2R 240×12 (WEL-TEN 80C) 2R 216×12 (WEL-TEN 80C)	A20-0	2,800	30	—	757	0.895	—	1.000	—	—
	A30-1	"	"	0.001	720	0.852	0.866	0.985	0.886	0.916
	A30-3	"	"	0.003	678	0.810	0.807	0.860	0.918	0.928
	A30-5	"	"	0.005	670	0.766	0.758	0.800	1.034	0.968
	A50-0	4,660	50	—	673	0.747	0.871	1.000	0.855	0.871
	A50-1	"	"	0.001	634	0.705	0.719	0.777	0.981	0.925
	A50-3	"	"	0.003	551	0.624	0.604	0.643	1.017	0.927
	A50-5	"	"	0.005	506	0.562	0.560	0.568	1.041	0.951
	B40-0	4,040	43	—	422	0.882	—	1.000	—	—
	B40-1	"	"	0.001	382	0.803	0.786	0.911	1.022	0.863
 2R 240×12 (YES 36B) 2R 216×12 (YES 36B)	B40-3	"	"	0.003	353	0.728	0.725	0.801	1.032	0.905
	B40-5	"	"	0.005	305	0.647	0.670	0.720	0.966	0.931
	B70-0	6,520	70	—	325	0.682	0.727	1.000	0.938	0.727
	B70-1	"	"	0.001	284	0.601	0.576	0.702	1.003	0.869
	B70-3	"	"	0.003	254	0.531	0.478	0.566	1.066	0.880
	B70-5	"	"	0.005	217	0.447	0.438	0.475	1.021	0.885
	H30-0	2,800	30	—	586	0.931	—	—	—	—
	H30-1	"	"	0.001	580	0.920	—	—	—	—
	H30-3	"	"	0.003	574	0.854	—	—	—	—
	H30-5	"	"	0.005	525	0.824	—	—	—	—
 2R 240×12 (WEL-TEN 80C) 2R 216×12 (YES 36B)	H50-0	4,660	50	—	610	0.884	—	—	—	—
	H50-1	"	"	0.001	545	0.803	—	—	—	—
	H50-3	"	"	0.003	467	0.676	—	—	—	—
	H50-5	"	"	0.005	423	0.646	—	—	—	—

P_y : 断面の降伏荷重P_y^h : 残留応力を有する柱の耐力計算値。P_y^h : 残留応力を含まない柱の耐力計算値。

て、各々、偏心を4種に変化させ、合計24本の柱に対して両端ピン支持の条件で実験を行なった。これら実験の詳細を表1に示す。この実験では柱の曲げによる崩壊のみを考慮し、捩り座屈、局部座屈は生じないように箱形断面を選び、断面構成板の中厚比は20とした。断面は溶接により組立て各シリーズと同一の断面の柱について実験した。使用鋼材はAシリーズに鋼質80ヤロ鋼、WEL-TEN 80C、Bシリーズに非鋼質50ヤロ鋼、YES36Bを使用した。Hシリーズはこれら二種の鋼材の混用柱とし、曲げの軸に平行な板に80ヤロ鋼、曲げの軸に直交な板に50ヤロ鋼を用いた。柱の長さは、その耐荷力が種々の不完全性の影響を、最も受けやすいとされる長さ、即ち、オイラー荷重が降伏荷重と等しくなる長さ、及びその約6割の長さを選んだ。表1に示すように、偏心量は、柱長に対して一定の割合で変化させた。両端ピンの支持条件を実現するための装置として端部ロッツに、回転半径250mm、長さ600mmの半シリンダー状のローラーを使用した。又、この端部ロッツには、加圧板とローラーと、座屈軸と直交方向に相互に移動させるためのスプリュー式の微動装置が付いており、載荷量を調整できるようにになっている。又、レーバーの付いた二枚のディスクを相互に回転させることにより荷重の平均化を取り除くことが出来る。これらの装置により、中心圧縮状態を実現し、偏心量を正確に与えることが可能となる。実験に先立ち、この端部ロッツを使用し柱の耐荷力に影響をおよぼさないと考えられる範囲内で出来るだけ大きな荷重をかけ、この時に生じる柱断面内主要部でのひずみのばらつき、および柱中央までの撓みあみが最少になるように調整し、この状態を中心圧縮と考えた。偏心を与えるには、この状態を基準とし、上下端での移動量をほぼ同一に保ちつつ、端部ロッツの微動装置を操作し、柱の上下端各2ヶ所に取り付けた $\frac{1}{100}$ mm精度のダイヤルゲージの読みが、所定の値になるようにした。

実験結果および考察

使用したそれぞれの鋼材について素材引張試験を行ない、荷重—ひずみ曲線をX—Yレコーダーで記録した。実験柱の断面内に発生すると考えられるひずみの大きさは、その最大値で降伏ひずみの3倍程度であり、この範囲内での素材引張試験結果から得た応力—ひずみ曲線は完全弾塑性に近いものであった。残留応力測定結果の一例を図1に示す。全布の形状、大きさと等は、鋼種の違いにより大差ないものであった。この結果、柱の圧縮強度に影響すると考えられる圧縮残留応力の、降伏応力に対する比は、材の降伏応力の大きいAシリーズの試験体では13~14%であるのに対し、これが小さいBシリーズでは26~30%程度である。実験鋼材、細長比、偏心量を变化させた24本の柱の試験

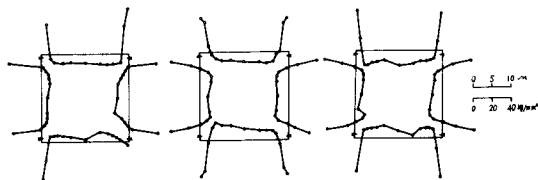


図1 残留応力分布

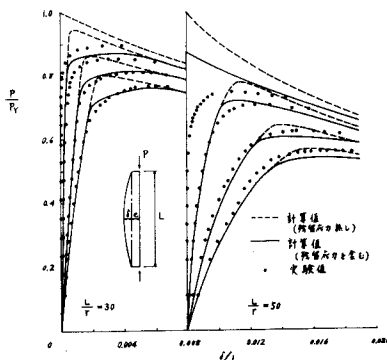


図2 荷重—平均ひずみ曲線 (Aシリーズ)

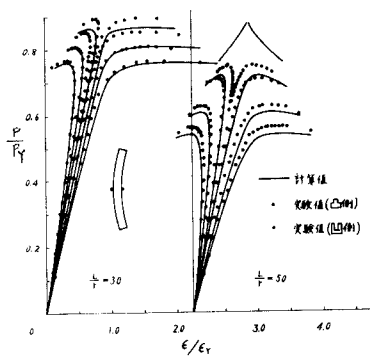


図3 荷重—ひずみ曲線 (Aシリーズ)

の結果得られた最大荷重を表1に示す。実験の結果得られたAシリーズの柱8本の柱中央線での荷重一たあみ関係、および圧縮線、引張線双方での荷重一ひずみ関係をそれぞれ図2、図3に示す。

弾塑性柱の解析 弾塑性柱の解析を厳密に行なうことは非常に困難であるが、従来種々の仮定のもとにいくつかの計算法が試みられてきた。ここでは一般によく用いられるのと同様、次の仮定を設けた。①曲げによるひずみは直線分布する。②材の応力一ひずみ曲線は完全弾塑性曲線となる。③与えられた、軸力、及び曲げモーメントの組合せに対し、唯一つの曲率に対応する。したがって柱の変形は最終的な釣合状態のみによって定まる。④残留応力の分布は断面の両を軸に対して対称であり、板厚方向、柱軸方向には変化しない。これらの仮定のもとに、柱を軸方向に有限個の要素に分割し、各分割断面での釣合式および柱両端での境界条件が同時に満たされるような各断面毎のひずみ分布を見出す。このひずみを断面内で積分することにより求められる軸力、及び曲げモーメントから計算される変位と、軸力との関係をプロットすることにより柱の荷重一たあみ曲線を得ることが出来る。断面力の積分に当っては測定結果をもとにモデル化した残留応力を計算に含めた。

計算との比較 柱中央線における、荷重一たあみ曲線、及び圧縮線、引張線双方の荷重一ひずみ曲線の計算値と実験値と比較するため、Aシリーズについての計算結果を図2、図3中に実験、実験値で画いた。実験値は残留応力を有する柱についての計算結果、実験値は残留応力を含まない柱についての計算結果である。細長比の異なる二種の柱の荷重一たあみ曲線には大きな差が見られる。即ち、細長比の小さい柱では残留応力の影響により柱に部分降伏が生じた後も偏心量にかかわらず荷重の増加が見られるが偏心量の大きい柱では中心圧縮に近くなるに従い、部分降伏によって弾性曲線からはずれた後の降荷が速やかである。従って何らかの不完全性が存在することによる部分降伏によって、細長比が小さい場合に比し、その最高荷重は大きな影響を受けらるであろう。計算による曲線と実験値とは、一次的には比較的良好一致しておりこのような計算を行なうことによって、柱の耐荷力を推定することが可能と思われ。計算により求められた各柱の最高荷重を降伏荷重により無次元化した値を表1に示す。実験値と残留応力を含む場合の計算値との比 P_u/P_{yk} はいずれも1に近く、細長比の大きい柱の中心圧縮柱がやや大きな誤差を示す地は、よく一致している。次に、残留応力の影響を含む場合と、含まない場合の計算値の比 P_u/P_{yk} は残留応力の影響の程度を示す。この値が小さい程残留応力の影響は小さいと考えられる。この値を比較すると同種の鋼材を用いた柱では、①同一の細長比の場合偏心量の小さい程残留応力の影響を大きく受け、②柱長に対し同一割合の偏心量では細長比の大きい方、即ち標準化された細長比が1に近いものの方が影響を大きく受け、又、使用鋼材の異なるA、B両シリーズの比較では、全般にBシリーズの方が残留応力の影響を大きく受けている。これは前述の如く、降伏応力の小さいBシリーズでは残留応力の降伏応力に対する割合が相対的に大きいことが一因であると考えられる。なお上に述べた傾向は偏心量を柱の長さに対して同一割合で変化させた場合に対してのものであることに注意する必要がある。一般に柱に含まれる種々の不完全性についても同様にあってはまると考えてよい。

設計基準との比較 鋼種の異なる各シリーズの柱の実験結果を同一の座屈曲線とで比較するため細長比に $\frac{1}{\sqrt{E}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$ なる標準化パラメーターを乗じたものを横軸にとった座屈曲線を図4に示す。同図上に米国 Column Research Council の残留応力を含む柱の基準強度曲線、又、設計公式として、

我国の鋼鉄道橋設計示方書案* (1968)、DIN 4114 (独 1952)、

AISC Spec. (米 1963) による許容応力の曲線を示す。ハイブリッドの H シリーズについては降伏荷重を断面積で除したものを便宜的に降伏応力 σ_y として標準化した値を示す。偏心をとり除いた柱の耐力低下は残留応力の影響が支配的と考えられるが、各グループの最高値で示される中心圧縮柱の実験結果は、CRC 曲線とよく一致を示す。柱の長さに対し同一割合の偏心量の变化に応じた耐力低下は、降伏応力の大きい柱より小さい柱で、細長比の小さい柱より大きい柱で大きくなっているのが見られる。

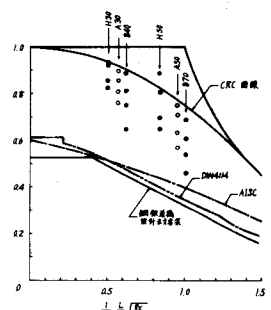


図4 実験結果と設計公式

各柱の実験による最高荷重を示す実験の縦座標と、各々の柱と同一の細長比に対する各設計基準の許容応力曲線の縦座標との比を、設計上の安全率として表2に示す。鋼鉄道橋

の新設計示方書案についての安全率を見ると、中心圧縮の柱では、細長比の小さい柱に比べ細長比の長い柱の方が安全率に余裕があるが、偏心量が増加するに従って両者の安全率に差はなくなり $e/L = 0.005$ の場合にはほぼ同程度となる。DIN 4114 についても同じことが云える。これに対し AISC の場合は、偏心量が少ない柱で細長比の違いによる安全率の差が小さくなり、偏心量の増加に伴って、細長比の大きい

表2 安全率

Column number	Factor of Safety			column number	Factor of Safety		
	By Spec.	DIN	AISC		By Spec.	DIN	AISC
A30-0	1.92	1.82	1.79	A50-0	2.25	2.09	1.84
A30-1	1.83	1.73	1.71	A50-1	2.12	1.97	1.73
A30-3	1.75	1.64	1.62	A50-3	1.87	1.74	1.53
A30-5	1.64	1.56	1.54	A50-5	1.69	1.57	1.38
B40-0	1.97	1.86	1.83	B70-0	2.19	1.99	1.73
B40-1	1.80	1.70	1.66	B70-1	1.93	1.76	1.53
B40-3	1.67	1.58	1.55	B70-3	1.71	1.55	1.35
B40-5	1.45	1.37	1.34	B70-5	1.43	1.31	1.14
H30-0	1.90	1.82	1.82	H50-0	2.38	2.23	2.02
H30-1	1.87	1.80	1.80	H50-1	2.16	2.02	1.84
H30-3	1.74	1.67	1.67	H50-3	1.87	1.75	1.60
H30-5	1.68	1.61	1.61	H50-5	1.74	1.63	1.48

い方の柱の安全率に余裕がなくなっている。このように細長比の違いによる安全率のバランスを考慮する際に、柱に含まれると考えられる偏心の如き不完全性の大きさの限度により、細長比に応じてとるべき安全率の大きさも大いに左右される。即ち不完全性が比較的小さいと考えられるときには細長比によって安全率をかなり大きく減じる必要はないが、不完全性が大きいときには細長比の大きい方で大きな安全率を見込むべきであると思われる。なお鋼鉄道橋示方書案、DIN 4114、AISC の各々の基準の安全率 1.9、1.71、1.67 を確保するためには概ね偏心量を柱の長さの千分の一以下におさえる必要があることが表2により明らかである。

* 土木学会 「新高張力鋼を用いた鋼鉄道橋設計および製作示方書に関する研究報告」 昭和43年度。