

端部拘束を受ける柱の強度に関する研究

東北大学工学部 学生員 ○木村 公男
東北大学工学部 正 員 倉西 茂

1. まえがき

鋼柱の性状や強度に影響を及ぼす主要因として、残留応力、初期不整、そして端部拘束の3つを挙げる事ができるが、端部拘束の問題については、系統的な研究は少なく、解明すべき点が多い。そこで本研究では、剛結トラスを数値解析し、端部で拘束を受けるトラス弦材の強度と性状を調べ、端部拘束の影響を検討した。

2. 解析方法

構造解析は有限要素法を用いて行なった。材料非線形性および幾何学的非線形性は荷重増分法により線形化し、線形化により生ずる誤差は、残差不平衡力を逐次載荷することにより修正した。

3. 解析モデル

解析したトラスは、図-1に示すような、平行弦ワーレントラスである。格間長 $l = 10\text{ m}$ 、トラス高 $H = 7.14\text{ m}$ ($\theta = 55^\circ$)。6パネルと5パネルの2つのタイプのトラスを解析した。荷重は等分布荷重を載荷する。この場合、5パネルトラスで最大圧縮力を受けるのは中央の2弦材で、これらは非対称な端部拘束を受ける。弦材と圧縮斜材は箱形断面、引張斜材はH形断面とした。3種類の弦材に対し、それぞれ3組の斜材を用いて解析を行なった。すなわち、弦材は、細長比パラメーター λ_c が0.62, 0.81, 0.99の3種類で、斜材は、細長比パラメーター λ_D が、およそ1.1, 1.4, 1.7の3組ずつである。なお、降伏応力度は $\sigma_y = 3200\text{ kg/cm}^2$ 、ヤング率は $E = 2.1 \times 10^6\text{ kg/cm}^2$ とした。残留応力は、台形分布を仮定し、圧縮残留応力は $\sigma_{rc} = -0.4\sigma_y$ とした。また、節点は剛結として解析した。

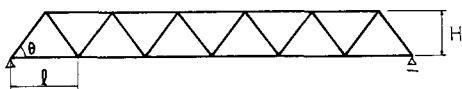


図-1 解析モデル

4. 解析結果および考察

(1) トラスの強度 — 解析の結果得られた部材軸力と、ピン接合を仮定して計算される軸力とを比較してみると、解析したすべてのトラスにおいて極限状態に至るまで、ほぼ一致している。剛結トラスでは崩壊に至るまで軸力の再分配は起こらず、一部材の崩壊により全体崩壊が引き起こされることがめから、従って、トラスの強度は、最大応力を生ずる部材強度によって決定されると言える。

(2) 弦材の強度 — 最大圧縮力を受ける中央上弦材の強度を検討してみると、6パネルトラスでも5パネルトラスでも、弦材強度はほとんど変わらないことがわかった。6パネルトラスの中央上弦材の強度を、弦材細長比パラメーター λ_c に対してプロットしたのが図-2である。弦材の最大強度 P_{max} は、降伏軸力 P_y で無次元化してあり、比較のため、弦材を両端ピンで柱として、同様の残留応力分布と $1/1000$ の初期たわみを与えて計算した柱強度も描いてある。この図から、弦材の強度は、両端ピンで柱の強度に較べてかなり大きく、特に細長比の大きな弦材の強度増加が著しいことがわかる。トラス部材はその端部で、隣接部材から変形に対する拘束を受

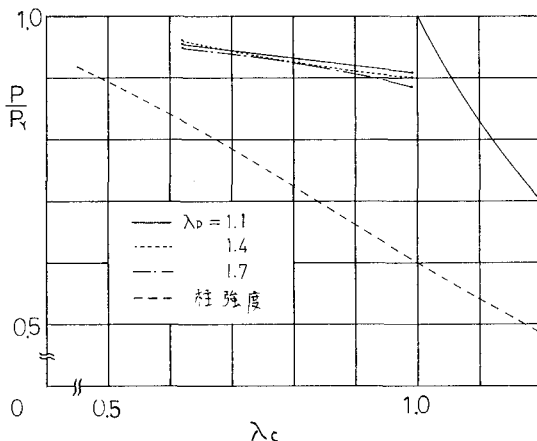


図-2

けら、弦材の強度が大きいのは、この端部拘束の影響によるところが大きいものと考えられる。

(3) 弦材の受ける端部拘束 — トラス部材はその端部で、変形に対する拘束を受けるが、作用軸力の小さいうちは逆に、各部材の伸縮による全体変形のために、端部は強制的に回転させられ、2次応力と呼ばれる端モーメントを受ける。本解析においても中央上弦材は、初めは2次応力を受け、極限状態では拘束を受けているものと思われ、そこでこの拘束状態を調べてみた。図-3は、6パネルトラスの中央上弦材の作用軸力 P と端モーメント M の関係を示したものである。 P と M はそれぞれ、 P_r と降伏曲げモーメント M_y で無次元化してある。このグラフは、 $\lambda_c=1.4$ に対するものだが、この $P/P_r-M/M_y$ 関係に及ぼす斜材剛度の影響は極めて小さい。なお、図中、 M の(-)は2次応力、(+)は拘束モーメントに対応する。 $\lambda_c=0.62$ ；2次応力は軸力の増加に伴ない、ほぼ線形に増加するが、 P が $0.5P_r$ を越えたと減少し始める。これは、仮定している残留応力のために、断面に塑性域が生じ剛度が低下して、軸力によるたわみが大きくなり、その変形の分だけ2次応力が減少するものと思われ、その後、隣接部材の応力状態と関連し複雑な経路をたどり、崩壊直前に拘束モーメントとして作用する。 $\lambda_c=0.99$ ；剛度が小さいので、軸力によるたわみが大きく、2次応力は荷重に対して線形とはならない。塑性域が広がり剛度が低下すると、軸力によるたわみが急増し、2次応力は減少し、まもなく拘束作用をもたらす。 $\lambda_c=0.81$ ；上記の中間的な性状を示す。

一方、5パネルトラスの中央上弦材は、両端で異なる拘束を受ける。しかし両端の $P/P_r-M/M_y$ 関係を検討したところ、“平均的”に見ると、6パネルトラスの場合に非常に近いことがわかった。両端の拘束状態が異なる部材も、両端の拘束作用を平均し等しい端部拘束を受けらる部材としてとり扱い得るものと考えられる。

(4) 柱モデルによるシミュレーション — トラスの上下弦材の間隔が常に H を保つこと、上下弦材の歪が等しいことを仮定すれば、弦材の曲率は $\varphi = \frac{2P}{EAH}$ と表わされる。従って2次応力は $M = \frac{r^2}{H/2} \cdot P$ で与えられる。数値解析の結果、この式は2次応力のよい推定式となることが確かめられた。

上式に従って、2次応力を軸力 P を $e = \frac{r^2}{H/2}$ だけ偏心させらることによりモデル化し、柱モデルにより弦材の性状をシミュレートした。隣接部材による拘束作用は、柱の両端にばね定数 $k = \frac{3EI}{L}$ の線形回転ばねを考慮することにより算出した。この柱モデルにより得られた $P/P_r-M/M_y$ のグラフを図-4に示す。図-3と4を比較してみると、柱モデルの場合、モーメントの値をかなり小さく評価してしまうが、2次応力の最大値を生ずる軸力や、端モーメントが拘束方向に作用し始める軸力、さらには強度などはよく一致しており、定性的に弦材の性状を、よく表わしているものと思われ、2次応力を過小評価するのは柱モデルの場合、最初から拘束を加えらるからである。

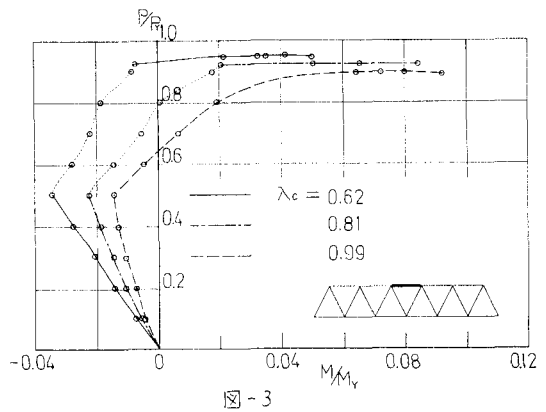


図-3

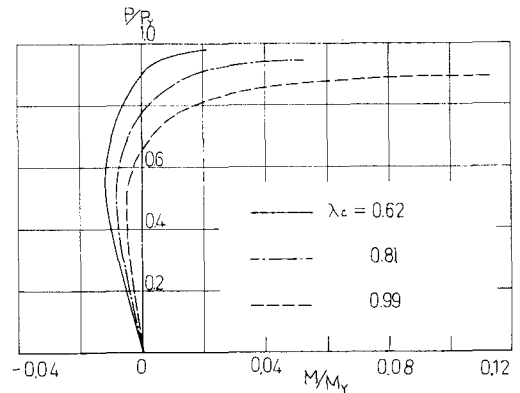


図-4