

1. まえがき

近年、構造物はその周辺の環境にマッチし、美しい景観を創出するように設計することが望まれるようになってきており、斜張橋やつり橋の主塔には従来のトラス形式のものに加えて鋼製の薄肉ラーメン構造が多く用いられるようになってきた。また、都市部の連続高架橋や、ベイエリアに建設される高規格道路の高架橋では港湾部における航路を確保するため、背の高い橋脚が多用されている。ところで、わが国の道路橋示方書¹⁾において、ラーメンを構成するはり一柱の座屈照査は有効座屈長さ係数に基づいてなされる。ラーメンの有効座屈長さ係数は、両端単純支持された中心圧縮柱のオイラー座屈強度を基準に、その骨組形状、はりと柱の剛比および柱の基部の支持条件などに関連づけて定められている。ここでは、鋼箱形断面からなる門形ラーメンを対象に、その柱の頂部に鉛直荷重が作用する場合の終局強度を、弾塑性有限変位理論に基づいてUp-dated Lagrangian法によって定式化された有限要素法を用いて明らかにする。初期不整の大きさやはりと柱の剛比と1層門形ラーメンの弾塑性有限変位挙動および終局強度の関係を調べる。さらに、本解析によって求められる有効座屈長さ係数と弾性座屈理論に基づいて求められたそれとの比較を行う²⁾。

2. 解析モデル

図-1に示すように、柱の基部が固定された高さ h 、長さ l の薄肉箱形断面からなる1層門形ラーメンを解析する。箱形断面の柱とはりを構成するフランジと腹板の幅と板厚はそれぞれ $(b_{cf}, t_{cf}, b_{cw}, t_{cw})$, $(b_{bf}, t_{bf}, b_{bw}, t_{bw})$ である。また、柱とはりの断面は長さ方向に一定である。柱の頂部に鉛直荷重 P が作用する場合、ラーメンの面内への変形と面外への変形が考えられるが、ここでは面内変形のみを考える。ただし、箱形断面形状の柱とはりを構成するフランジと腹板の局部座屈は考えない。

初期不整として、図-2のような残留応力を仮定する。また、柱の初期たわみは道路橋示方書¹⁾の製作基準を参考に

$$w_0(x) = w_{0,\max} \left(1 - \cos \frac{\pi x}{2h} \right) \quad (1)$$

とする。ここに、 $w_{0,\max}$ は初期たわみの最大値である。なお、はりの部分の初期たわみは考えない。

3. 解析方法

鉛直荷重を受ける1層門形ラーメンを弾塑性有限変位解析するにあたって、つぎの仮定を設ける。すなわち、①Bernoulli-Eulerの平面保持の仮定、②鋼材の材料特性として完全弾塑性体を仮定し、ひずみ硬化を無視する、③柱とはりを構成するフランジと腹板の局部座屈は考慮しない。

図-1の1層門形ラーメンを2節点6自由度の有限個のはり一柱要素に離散化する。つり合い状態にある任

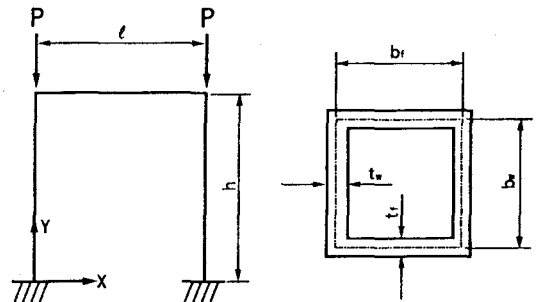


図-1 鉛直荷重を受ける1層門形ラーメン

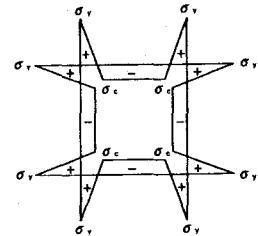


図-2 残留応力分布

意の荷重強度 P_i から $P_i + \Delta P$ の間の増分荷重 ΔP に対する変形を求めるため、材料的・幾何学的非線形性を考慮し、Up-dated Lagrangian 手法に従って増分形のつり合い方程式を誘導すれば

$$[K_p + K_s + K_u][\Delta \delta] = \{\Delta f\} + \{f\} - \{r\} \quad (2)$$

を得る。ここに $[K_p]$ は弾塑性域での接線剛性マトリックス、 $[K_s]$ は幾何剛性マトリックス、 $[K_u]$ は Up-dated Lagrangian 手法に伴う非線形剛性マトリックス、 $\{\Delta \delta\}$ は増分変位、 $\{\Delta f\}$ は増分外力ベクトル、 $\{f\} - \{r\}$ は不平衡力ベクトルである。

式(2)は非線形の代数方程式であるので、解が収束するまで繰り返し反復して解く。なお、非線形方程式の解法には、増分法と修正 Newton-Raphson 法の混合法を用いる。

4. 解析結果および考察

広範な数値解析を実施する前に、解析に必要な要素数と横断面の分割数を決定した。その結果、柱とはりの要素数はそれぞれ20分割、6分割、横断面の分割数は112で精度のよい解の得られることがわかった。以下、この分割数を用いる。また、鋼材の材料特性として、縦弾性係数 $E = 2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、降伏点応力 $\sigma_y = 2400 \text{ kgf/cm}^2$ とする。

まず初めに、ラーメンの曲げ剛比 $k = I_b h / I_c \ell$ の相違による終局強度の違いを調べると、図-3の終局強度曲線を得る。ここに、縦軸にはラーメンの終局強度 P_{ult} を柱の全塑性軸力 P_y で無次元化した値を、横軸には柱の修正細長比 $\bar{\lambda} = (\ell / \pi) \sqrt{(\sigma_y / E) (I / A)}$ を用いた。また、初期たわみの最大値 $w_{0,max} = h / 1000$ 、圧縮残留応力 $\sigma_c = -0.3 \sigma_y$ とした。図から明らかなように、曲げ剛比の増加とともに終局強度は徐々に増大するが、 $k = 5$ 以上になれば、いずれの $\bar{\lambda}$ の値に対しても終局強度がほぼ一定の値に収束する。

つぎに、最大初期たわみの相違による終局強度曲線と比較すれば、図-4を得る。ここに、はりと柱の曲げ剛比は $k = 1$ 、圧縮残留応力は $\sigma_c = -0.3 \sigma_y$ とした。解析に用いた最大初期たわみは道路橋示方書で定められた製作基準の0.5倍、1倍および2倍とした。図から明らかなように、最大初期たわみの増加とともにいずれの修正細長比でもほぼ一定の割合で強度が低下している。

図-5は残留応力の相違による終局強度曲線の違いを表している。ただし、はりと柱の曲げ剛比は $k = 1$ で、降伏点応力の0.1、0.2、0.3倍の圧縮残留応力を仮定した。また、最大初期たわみは $w_{0,max} = h / 1000$ である。図からわかるように、 $\bar{\lambda} \leq 0.5$ あるいは $\bar{\lambda} \geq 1.2$ であれば、ラーメンの終局強度は残留応力の大きさに関係なく、ほぼ一定の値を示す。

参考文献

- 1) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，1990-2。
- 2) 福本晴士編：座屈設計ガイドライン，土木学会，1987。

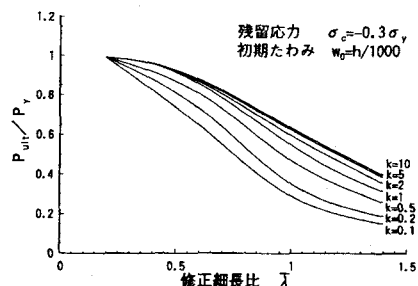


図-3 曲げ剛比の相違による終局強度曲線

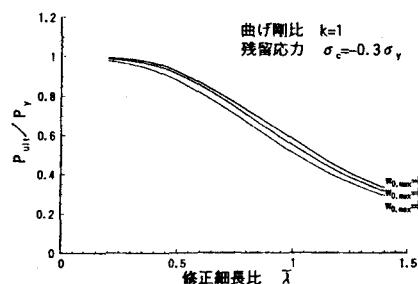


図-4 初期たわみの相違による終局強度曲線

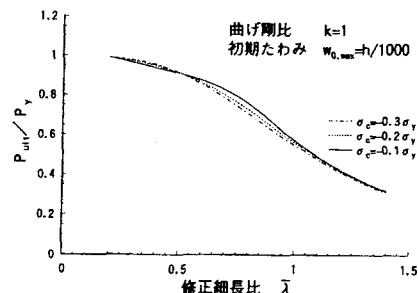


図-5 残留応力の相違による終局強度曲線