

1. まえがき

高速道路網を形成する連続高架橋の橋脚、斜張橋やつり橋の主塔などには、鋼製薄肉断面からなるラーメン形式の柱状構造物が数多く用いられている。これらの柱状構造物には比較的大きな軸力が常時作用している。ところで、わが国の道路橋示方書¹⁾によれば、鉄筋コンクリート製橋脚の耐震設計規準は設けられているものの、鋼製橋脚のそれはその必要性が叫ばれているにもかかわらず、基礎資料が不十分であるとのことである。このような現状を勘案し、一刻も早くその耐震設計法を確立するためには鋼構造の地震時応答を可能なかぎり正確に知り、その変形性状を十分調べておく必要がある。ここでは、柱の頂部に圧縮力を受ける一層門形ラーメンに地震動が作用する場合の幾何学的・材料的非線形性を考慮した弾塑性時刻歴応答をUp-dated Lagrangian手法に基づいて定式化した有限要素法を用いて明らかにし、一層門形ラーメンの形状、はりと柱の曲げ剛比、減衰比などが時刻歴応答に及ぼす影響を調べる。

2. 解析モデル

図-1に示すような柱の高さ h 、はりの長さ ℓ で、柱の基部が固定された一層門形ラーメンを解析する。鋼製門形ラーメンを構成する柱とはりはそれぞれ薄板からなる箱形断面で、そのフランジと腹板の幅と板厚はそれぞれ $(b_{cf}, t_{cf}, b_{cw}, t_{cw})$ と $(b_{bf}, t_{bf}, b_{bw}, t_{bw})$ である。ただし、柱とはりはいずれもその長さ方向に等断面である。一層門形ラーメンは、上部構造の荷重に対応する圧縮力 P を柱の頂部に受けた状態で、水平方向に地震動を受けるものとする。

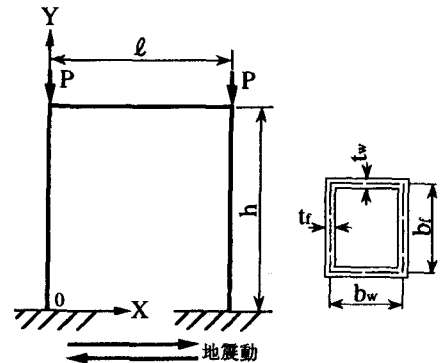


図-1 圧縮力と地震動を受けるラーメン

3. 解析方法

(1) 運動方程式

初期たわみと残留応力を含む一層門形ラーメンを2節点6自由度の有限個のはり一柱要素に離散化し、時間 t から時間 $t + \Delta t$ の間の増分時間 Δt における運動方程式を幾何学的および材料的非線形性を考慮し、Up-dated Lagrangian手法に基づいて誘導すれば

$$[M]\{\Delta \delta_i\} + [C]\{\Delta \delta_i\} + [K_i]\{\Delta \delta_i\} = -\Delta \ddot{\delta}_g [M]\{I\} - \{R\} \quad (1)$$

を得る。ここに、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[C]$ は減衰マトリックス、 $[K_i]$ は剛性マトリックス、 $\{\Delta \delta_i\}$ は変位増分ベクトル、 $\Delta \ddot{\delta}_g$ は地震動の増分加速度、 $\{I\}$ は単位ベクトル、 $\{R\}$ は内力に対する等価節点力ベクトルである。ただし、質量マトリックス $[M]$ にはLumped Massを、減衰マトリックス $[C]$ にはRayleigh減衰を用いる。また、剛性マトリックス $[K]$ は部材の塑性化による剛性の低下を表す接線剛性マトリックス、幾何学的非線形性による幾何剛性マトリックスおよびUp-dated Lagrangian手法による非線形マトリックスからなる。変位 $\{\Delta \delta_i\}$ に付けられたドット“ $\cdot$ ”は時間による微分を表す。

式(1)の運動方程式を解くために、ここでは直接時間積分法であるNewmarkの β 法を用いる。すなわち、時間 t から時間 $t + \Delta t$ の間の増分時間 Δt における増分の加速度と速度はNewmarkの β 法に従えば

$$\Delta \ddot{\delta}_i = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta \delta_i - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{\delta}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{\delta}_i, \quad \Delta \dot{\delta}_i = \frac{1}{\beta \Delta t} \Delta \delta_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{\delta}_i - \frac{\Delta t}{2\beta} (\gamma - 2\beta) \ddot{\delta}_i \quad (2)$$

で与えられる。ここに、 $\gamma = 1/2$ 、 $\beta = 1/4$ である。この関係を式(1)の運動方程式に代入すれば、時間増分 Δt での変位増分ベクトル $\{\Delta \delta\}$ を未知数とするつぎのような非線形代数方程式が得られる。すなわち

$$\left[\frac{1}{\beta \Delta t^2} [M] + \frac{1}{\beta \Delta t} [C] + [K] \right] \{\Delta \delta_i\} = \left[\frac{1}{2\beta} [M] + \frac{\Delta t}{2\beta} (\gamma - 2\beta) [C] \right] \{\dot{\delta}_i\} + \left[\frac{1}{\beta \Delta t} [M] + \frac{\gamma}{\beta} [C] \right] \{\delta_i\} - \Delta \ddot{\delta}_g [M] \{I\} - \dot{\delta}_{i,g} [M] \{I\} - \{R\} \quad (3)$$

ここに、 $\ddot{\delta}_{i,g}$ は時間 t での地震加速度を表す。したがって、上式を解けば、時間 $t + \Delta t$ での変位増分ベクトル $\{\Delta \delta_i\}$ を求めることができる。さらに、求められた変位増分ベクトルを式(2)に代入すれば、加速度と速度の増分を求めることができる。

(2) 数値計算法

式(3)は複雑な多元連立の非線形代数方程式であるので、増分時間 Δt での増分変位 $\{\Delta \delta_i\}$ を修正Newton-Raphson法を適用して求める。増分時間 Δt での増分変位 $\{\Delta \delta_i\}$ が求められれば、つぎの増分時間の反復計算にはいる。その際、接線剛性マトリックス $[K]$ を再度組み立てることになる。

なお、鋼材の材料特性として、図-2に示すようなひずみ硬化を考慮したBi-Linear型の応力-ひずみ曲線を仮定し、その弾性域およびひずみ硬化域での接線弾性係数をそれぞれ $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ および $E_p = E/100$ 、降伏点応力を $\sigma_y = 2400 \text{ kgf/cm}^2$ とした。

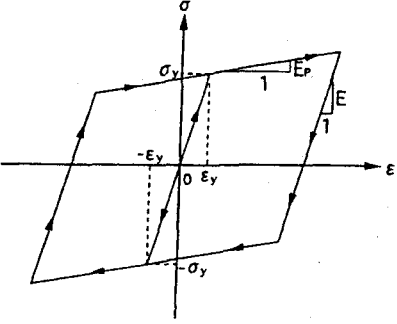


図-2 応力-ひずみ曲線

4. 数値解析結果とその考察

まずはじめに、地震動のみが作用する場合を考える。柱とはりの曲げ剛比が $I_{bh}/I_{cl} = 1$ の一層正方形ラーメンに $\ddot{\delta}_g = 500 \sin(2\pi t/T_0)$ の加速度が作用する場合の時刻歴応答解析を行う。ここに、柱の修正細長比は $\bar{\lambda} = 1$ 、最大初期たわみは柱の長さ h の $1/1000$ とし、圧縮残留応力は降伏点応力の 0.3 倍とした。また、その固有周期は $T_0 = 1$ 秒である。左側の柱の頂部における水平方向変位と横荷重の関係、いわゆる時刻歴変位応答曲線を図示すれば、図-3のようになる。図中の実線と破線はそれぞれ降伏のチェックをしたいわゆる弾塑性解析とそれをしていない弾性解析の結果を示す。図に示す弾塑性解析の結果（実線）から明らかなように、構造物が塑性域に入るのは入力加速度を受けてから 0.2 秒ほど経過してからである。塑性域が発生した箇所は柱の基部のフランジと腹板の接合部であり、それはほんの一部分であったため、柱頂部の変位応答曲線には顕著に影響が現れていない。しかし、時間が経過するにつれ、塑性域が広がるため、弾塑性と弾性解析の応答に違いがはっきりと現れるようになる。これは、弾塑性を考慮すれば、弾性解析の場合に比べて復元力が弱くなるからである。また、弾性解析による応答曲線によれば、その応答は上下にほぼ等しく推移している。一方、弾塑性解析による応答曲線では、最初に塑性した側に大きく振動していることがわかる。

なお、地震波形を用いた時刻歴応答解析結果は講演会当日に詳述する。

参考文献 1) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，1990-2。

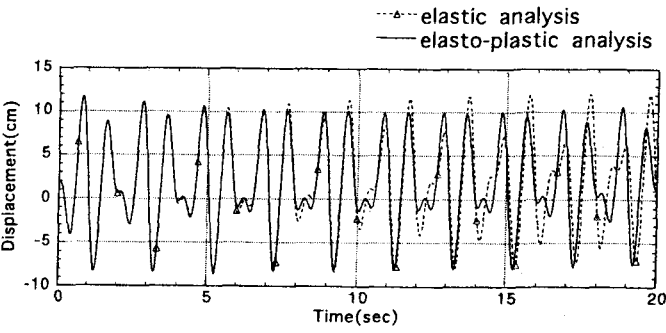


図-3 時刻歴応答曲線