

1. まえがき

鋼構造物の耐震性能の向上を図るため、近年、地震時の構造物の合理的な評価法の必要性が認識され、具体的な評価法の確立が急がれている。とくに、地震時の土木構造物の耐震設計基準に関しては、鉄筋コンクリート製橋脚に対する地震時保有水平耐力の照査¹⁾があるのみで、鋼製橋脚に対しては、基礎的な資料が不十分ということで基準化されるに至っていない。そのため、さまざまな側面から理論的および実験的研究がなされている^{2), 3)}。そのなかで、薄肉箱形断面形状の鋼片持ち柱が圧縮力と水平方向の繰返し曲げを同時に受ける場合の弾塑性有限変位挙動に関する理論的研究も行われているが、パラメトリック解析による詳細な検討はあまりなされていない。ここでは、初期たわみと残留応力を考慮し、圧縮力を受ける鋼片持ち柱に繰返しの反復曲げが作用する場合の弾塑性履歴挙動を差分法によって明らかにする。

2. 解析法

Fig.1に示すようなフランジの幅 b_f 、板厚 t_f 、腹板の幅 b_w 、板厚 t_w の箱形断面からなる高さ h の片持ち柱がその頂部に圧縮力 P と水平方向の繰返し横荷重 H を同時に受ける場合の弾塑性挙動を明らかにするため、初期たわみ、残留応力およびひずみの2次の微小項を考慮した弾塑性有限変位場のつり合い式と境界条件式をLinおよびMassonnet⁴⁾の弾塑性理論に基づいて誘導する。その際、以下の仮定を設けて基礎式を誘導する。すなわち、①ベルヌーイ・オイラーの平面保持の仮定、②柱は完全弾塑性体からなり、Baushinger効果やひずみ硬化は考慮しない。③部材の降伏判定はvon Misesの等価応力を用いる。

(1) つり合い式：圧縮力と反復曲げのもとに弾塑性状態にある柱の x および z 方向の力のつり合い式は、LinおよびMassonnetの弾塑性論にしたがって

$$\frac{dN_x}{dx} = 0$$

$$\frac{d^2 M_y}{dx^2} + N_x \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} = 0$$

のように求められる。ここに、 N_x および M_y はそれぞれ弾塑性状態での軸力と曲げモーメントで

$$N_x = EA \left\{ \frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{d\bar{w}}{dx} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{dw_0}{dx} \right)^2 \right\} - N_x^p$$

$$M_y = -EI_y \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} - \frac{d^2 w_0}{dx^2} \right) - M_y^p$$

である。ただし、 u は x 方向の変位、 w は初期たわみ w_0 と荷重による付加たわみ w の和、 N_x^p および M_y^p はそれぞれ仮定の軸力と曲げモーメントで、弾塑性状態での真の断面力を求めるため、柱が弾塑性状態にあっても全断面弾性を仮定して求められる弾性断面力を修正するための断面力である。また、 EA と EI_y はそれぞれ柱の伸び剛さと曲げ剛さである。

(2) 境界条件式：Fig.1に示すように、柱の下端が固定されている場合、その境界条件は

$$u = 0, \quad w = 0,$$

$$\frac{dw}{dx} = 0$$

(5)

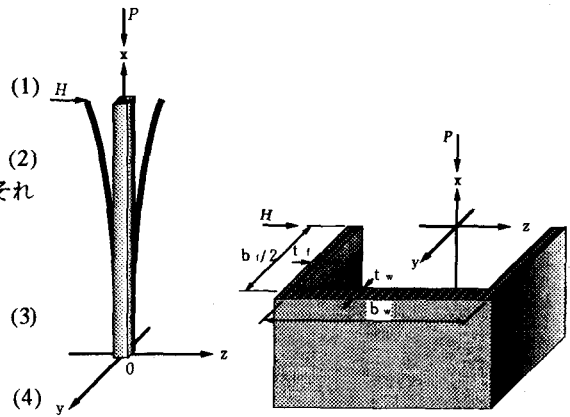


Fig.1 Compressed box column under cyclic load

で与えられる。一方、柱の頂部に鉛直方向の圧縮力と水平方向の横荷重が作用すれば、その境界条件は

$$u = -u_l, \quad w = w_l, \quad M_y = 0 \quad (6)$$

で与えられる。ただし、圧縮力や水平方向の横荷重そのものを直接与えるのではなく、ここではそれらに等価な鉛直変位 u_l と水平変位 w_l を与えることにする。

ところで、繰返し曲げを柱に作用させる場合、さまざまな方法が考えられるが、ここではFig.2に示すような2種類の載荷法を考える。すなわち、第1の方法は一定振幅の水平変位の繰返し載荷法で、第2の方法は振幅の変動する水平変位の繰返し載荷法である。図中、 δ は水平変位の振幅を、 δ_c は柱の基部が降伏する時の水平変位を表す。また、横軸のサイクル数は繰返し回数を表す。

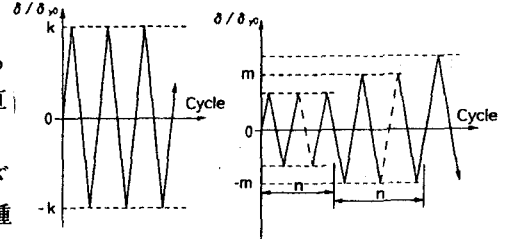


Fig.2 Pattern of cyclic loading

3. 数値解析法

上述のつり合い式と境界条件式に断面力と変位の関係を代入し基礎式を変位表示し、それらに差分法を適用すれば、多元連立の非線形代数方程式を得る。それを増分法と修正Newton-Raphson法を取り入れた混合法で解けば、非線形解を得ることができる。なお、多元連立一次方程式の解法には三角分解法を、反復計算には加速Jacobi法を用いて演算時間の短縮を図った。また、数値解析結果が広範な片持ち柱に適用できるように諸式を無次元化した。

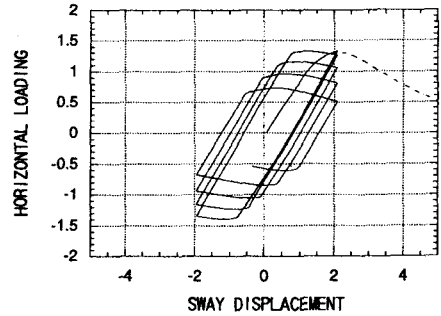


Fig. 3 Horizontal load vs. horizontal

4. 数値解析結果とその考察

まずはじめに、繰返し横荷重が水平方向にのみ作用する片持ち柱を解析し、反復曲げ挙動を明らかにする。柱の頂部における水平方向の横荷重と変位の関係を図示すれば、Fig.3を得る。ここに、縦軸と横軸はそれぞれ柱の基部が降伏モーメントに到達したときの横荷重 H_y と水平変位 δ_y で無次元化したそれらを表す。なお、柱の断面は正方形で、その修正細長比は $\lambda = 0.5$ 、最大初期たわみは $w_{0max} = h/1000$ 、圧縮残留応力は $\sigma_c = 0.3 \sigma_y$ である。さらに、図中には単調負荷状態で解析した結果を破線で示した。図から明らかに、単調載荷時の荷重-たわみの関係は柱の基部が初期降伏するまでは線形関係にある。その後、荷重とたわみの関係に非線形性が現れる。柱の基部が全塑性モーメントに達した後、柱の剛性が低下し、荷重-たわみ曲線には除荷の現象が現れている。

反復曲げを受ける柱の場合、さまざまな荷重の振幅と繰返しの回数が考えられる。ここでは、荷重の振幅として、柱の基部が初めて降伏に達する時点での水平変位 δ_y の2倍を与えた。また、その繰返し数は5回とした。この図から明らかに、繰返しの回数が増すたびに強度が著しく低下していることがわかる。

なお、その他の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，1992。
- 2) 宇佐美勉・坂野 茂・是津文章・青木徹彦：鋼製橋脚モデルの繰返し弾塑性挙動におよぼす荷重履歴の影響，構造工学論文集，Vol.39A，pp.235-247，1993-3。
- 3) 酒造敏広・事口寿男・西 幸二：鋼変断面片持ち柱の弾塑性履歴性状に関する基礎的実験，構造工学論文集，Vol.39A，pp.271-284，1993-3。
- 4) Massonnet, Ch. : General theory of elasto-plastic membrane-plate, Engineering Plasticity, J. Heimann & F. A. Leckie, Cambridge at The University Press, 1968。