

I-78

圧縮力と繰り返し横荷重を受ける鋼箱形柱の弾塑性有限変位挙動

川田工業(株) 正会員 嶋田貴志

関西大学工学部 正会員 堂垣正博

1. まえがき 鋼構造の耐震性能を向上させ、地震時の合理的な設計法を確立するため、近年、鋼製橋脚を対象とした変形能に関する理論的あるいは実験的研究が精力的に行われている。鉄筋コンクリート製橋脚の地震時保有水平耐力の照査法はすでに確立されているが、鋼製橋脚に対しては基準化されるに至っていない。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り返しの水平荷重が作用する場合の履歴挙動を差分法で明らかにする。

2. 解析法 Fig.1に示す長さ l の鋼片持ち柱はフランジの幅と厚さがそれぞれ b_f, t_f 、腹板の幅と厚さがそれぞれ b_w, t_w の箱形断面で、その頂部に圧縮力 P と水平方向の繰り返し横荷重 H を同時に受けるものとする。また、部材はひずみ硬化のあるbi-linear型の弾塑性体からなるものとする。

(1) つり合い式：初期たわみおよびひずみに2次の微小項を考慮した弾塑性有限変位場の x, z 方向の力のつり合い式をLinあるいはMassonnetの弾塑性論に基づいて誘導すれば

$$\frac{dN_x}{dx} = 0 \quad (1)$$

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

を得る。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

$$N_x = EA \left\{ \frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{d\bar{w}}{dx} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{dw_0}{dx} \right)^2 \right\} - N_x^p \quad (3)$$

$$M_y = -EI_y \left(\frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} - \frac{d^2 w_0}{dx^2} \right) - M_y^p \quad (4)$$

である。ただし、 u は x 方向変位、 $\bar{w}$ 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、柱が弾塑性状態にあっても全断面弾性として求められた断面力を修正するためのものである。また、 EA と EI_y はそれぞれ伸び剛さと曲げ剛さである。

(2) 境界条件式：Fig.1に示す作用荷重のもとに解析してもよいが、ここでは両端の支持条件をFig.2のように考えて解析する。すなわち、下端での境界条件は

$$u = 0, \quad w = w_l, \quad \frac{dw}{dx} = 0 \quad (5)$$

で与えられる。また、柱の頂部での境界条件は

$$N_x = -P, \quad w = 0, \quad M_y = 0 \quad (6)$$

で与えられる。ここに、 w_l は横荷重に等価な水平方向の強制変位である。

ところで、繰り返しの横荷重を部材に作用させる場合、さまざまな方法が考えられる。ここでは、Fig.3に示すような2種類の方法を考える。すなわち、第1の方法

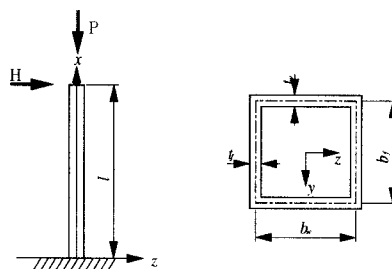


Fig.1

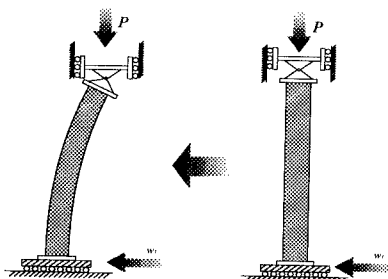


Fig.2

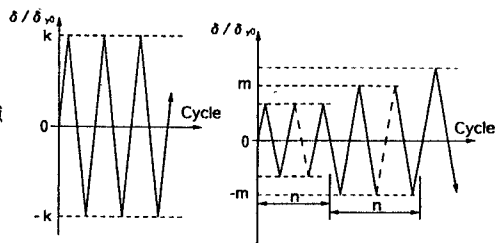


Fig.3

は一定振幅の水平変位の繰り返し曲げで、第2の方法は変動振幅の水平変位の繰り返し曲げである。図中、 δ は水平変位の振幅、 δ_{y0} は柱基部の降伏時の水平変位である。また、横軸のサイクル数は繰り返し回数を表す。

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、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法を併用した混合法で解けば、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、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可能なように諸式を無次元化した。

4. 数値解析結果とその考察 解析した鋼片持ち柱はフランジと腹板の幅厚比がともに $\beta_f = \beta_w = 10, 20$ の正方形断面で、修正細長比が $\lambda_p = 0.5, 1$ である。初期たわみの形状は片持ち柱の座屈モードとし、その最大値を柱高の1/500とした。また、残留応力も加味し、圧縮残留応力 $\sigma_c = -0.3\sigma_y$ とした。部材はひずみ硬化を考慮したbi-linear型の弾塑性体からなり、 $\sigma_y = 2,400\text{kgf/cm}^2$ 、ヤング率 $E = 2.1 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$ 、ひずみ硬化域での接線弾性係数 $E/100$ である。

(1) 単調増加の横荷重が作用する場合 さまざまな大きさの圧縮力の下で片持ち柱が単調増加の横荷重を受ける場合、水平変位と横荷重の関係はFig.4のようになる。図から明らかなように、圧縮力の増加とともに最高荷重は減少する。また、ピーク後の荷重の低下が顕著である。

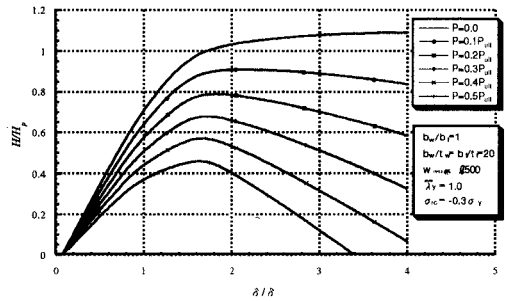


Fig.4

(2) 一定振幅の水平変位の場合 $P/P_u = 0.2$ の圧縮力と一定振幅($\delta/\delta_{y0} = 2$)の水平変位の繰り返し曲げが作用する場合、水平変位と水平荷重との関係はFig.5のようになる。ただし、繰り返し数は6回である。また、 P_u は片持ち柱の極限強度である。図から明らかなように、荷重-変位曲線に現れる履歴ループはひずみ硬化の影響で繰り返しの回数が増加するとともに原点を中心に拡大していく。

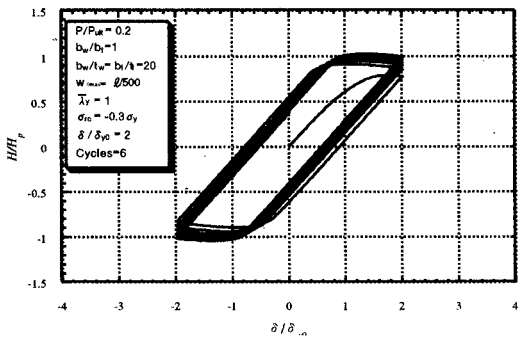


Fig.5

(3) 変動振幅の水平変位の場合 $P/P_u = 0.2$ の圧縮力と変動振幅($\delta/\delta_{y0} = 1 \sim 4$)の水平変位の繰り返し曲げが作用する場合、水平変位と水平荷重との関係はFig.6のようになる。ただし、それぞれの振幅に対する繰り返し数は1回とした。水平荷重と水平変位の曲線から明らかなように、履歴ループはひずみ硬化の影響で繰り返しの増加とともに原点を中心に拡大する。また、水平変位の振幅が大きくなるにしたがって最高荷重後の強度の低下が現れるようになる。

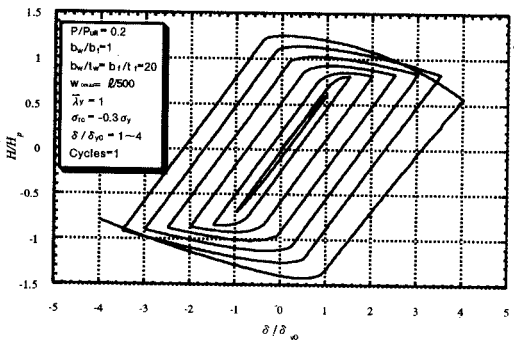


Fig.6

なお、他の解析結果は講演会当日に述べる。