

I-A 10 繰り返し曲げを受ける鋼箱形圧縮柱の弾塑性挙動

関西大学大学院 学生員 増田智成
 関西大学工学部 正会員 堂垣正博
 関西大学工学部 フェロー 三上市藏

1. まえがき

周知のように、1995年1月17日早朝に起こった兵庫県南部地震によって、都市機能が麻痺し、さまざまな土木構造物に甚大な被害が生じたが、これを契機に、土木構造物の耐震性をより一層向上させる必要がある。とくに、鋼構造では優れたダクティリティを有するように耐震設計することが肝要である。

そこでここでは、地震時における鋼製柱の耐震性能を明らかにするため、弾塑性有限変位を加味し、Up-dated Lagrangian手法に基づいて定式化した有限要素法によって圧縮力と水平方向の繰り返し曲げが同時に作用する箱形断面の片持ち鋼柱を解析し、その弾塑性履歴挙動を検討する。

2. 解析モデル

Fig.1に示す圧縮力 P と水平方向の繰り返し荷重 H を同時に受ける高さ h の鋼柱を解析対象とする。片持ち鋼柱は幅 b_f 、厚さ t_f のフランジと幅 b_w 、厚さ t_w の腹板からなる無補剛の箱形断面である。また、柱には不可避免的な初期たわみと残留応力が存在するものとする。

ところで、片持ち鋼柱は、Fig.1に示すように、圧縮力 P と水平方向の繰り返し荷重 H をその頂部に受けるが、弾塑性履歴挙動を解析するには、圧縮力や横荷重のような力そのものよりもそれと等価な作用の変位を与えるほうがよい。しかし、一点に2方向の変位を与えると、圧縮力による付加曲げの影響を取り入れることが難しいため、ここではFig.2のようにモデル化して解析する。すなわち、圧縮変位を頂部に、繰り返しの水平変位を基部に与えることにする。

鋼材の応力-ひずみ関係には、Fig.3に示すひずみ硬化を考慮したBi-linear型を仮定し、弾性域とひずみ硬化域での接線弾性係数をそれぞれ $E=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $E_0=E/100$ とする。また、降伏点応力は $\sigma_y=2,400 \text{ kgf/cm}^2$ とする。

3. 繰り返し荷重の種類

本研究では、地震荷重を擬した模擬的な荷重を構造物に作用させ、構造物の耐震性状を検討する。作用させる水平荷重は、Fig.4に示す変動振幅の繰り返し荷重とした¹⁾²⁾。ただし、図中の縦軸と横軸はそれぞれ初期降伏時の水平変位 δ_y で無次元化された水平変位 δ と繰り返し回数を示す。この載荷方法によれば、圧縮力と繰り返し曲げが同時に作用する鋼柱の耐荷力や塑性変形能などをうまく評価することができる。

4. 解析法

(1) つり合い方程式

初期不整を有する鋼箱形柱を有限個の2節点6自由度のはり-柱要素に離散化し、要素における節点力と節点変位の関係をUp-dated Lagrangian手法を適用してポテンシャルエネルギー最小の原理から誘導し、構造系全体で合成すれば、

$$[K]\{\Delta\delta\} = \{\Delta F\} + \{\{F_n\} - \{R_n\}\} \quad (1)$$

のつり合い式を得る。ここに $[K]$ は材料的非線形性、幾何学的非線形性およびUp-dated Lagrangian手法による非線形性を示す行列からなる接線剛性マトリックス、 $\{\Delta\delta\}$ は増分変位ベクトル、 $\{\Delta F\}$ は増分節点力ベクトル、 $\{F_n\} - \{R_n\}$ は n 荷重段階における不平衡節点力ベクトルである。

(2) 数値解析法

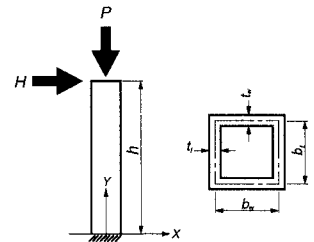


Fig.1 反復曲げを受ける圧縮柱

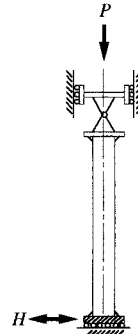


Fig.2 両端支持条件

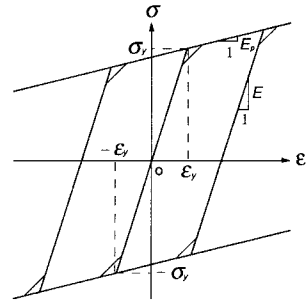
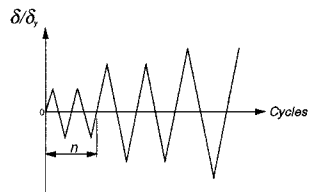


Fig.3 応力-ひずみ関係

Fig.4 変動振幅
繰り返し載荷プログラム

式(1)はUp-dated Lagrangian手法にそって誘導された多元連立の非線形代数方程式である。ここでは、この方程式を荷重増分ごとにNewton-Raphson法で解き、繰り返し荷重下の圧縮柱の弾塑性履歴を明らかにする。

5. 数値解析結果とその考察

広範な片持ち鋼柱の反復曲げ挙動を明らかにするにあたり、さまざまな断面の鋼柱が考えられるが、ここではフランジと腹板の幅厚比を $b/t = b_w/t_w = 20$ 、箱断面形状比を $b_w/b = 1$ とする。また、圧縮力を受ける片持ち柱の座屈モードに対応する初期たわみの最大値を $v_{0max} = h/500$ 、台形分布に仮定した圧縮残留応力を $-0.2\sigma_y$ とした。なお、有限要素の個数を25、断面内の分割数を132とした。

(1) 有限要素解の精度

まずはじめに、有限要素解の精度を検討するため、圧縮力を受ける鋼柱を解析した。その結果、Fig. 5に示す終局強度曲線を得た。図中には、西村・青木・西井・福本³⁾の有限要素解と道路橋示方書の強度曲線も示す。また、図中の P_y は全塑性軸力、 $\bar{\lambda}$ は修正細長比である。図から明らかなように、本解は西村・青木・西井・福本の終局強度曲線とよく一致している。

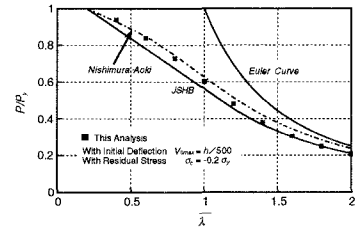


Fig.5 圧縮柱の終局強度曲線

(2) 修正細長比

圧縮力が $P/P_y = 0.2$ の鋼柱に変動振幅の反復曲げが作用する場合、修正細長比が $\bar{\lambda} = 0.25$ と $\bar{\lambda} = 0.5$ の場合の水平荷重-水平変位の関係はFig. 6(a), (b)のように求められる。ただし、反復曲げの振幅を $\delta/\delta_y = 1, 1.5, \dots, 4$ のように変動させ、それぞれの振幅でのサイクル数は1回とした。図から明らかなように、 $\bar{\lambda} = 0.25$ ではひずみ硬化の作用が強く働き、強度劣化がみられない。一方、 $\bar{\lambda} = 0.5$ では、 $\bar{\lambda} = 0.25$ の場合に比較して、 $P-\Delta$ 効果の影響で強度劣化の起こることがわかる。

(3) 軸力比

修正細長比が $\bar{\lambda} = 0.5$ の片持ち柱に変動振幅の反復曲げが作用する場合、圧縮力が $P/P_y = 0.2$ と 0.3 の水平荷重-水平変位の関係はFig. 6(b), (c)のように得られる。図には最高荷重および最高荷重時の変位に軸力比の相違による差異はあまり

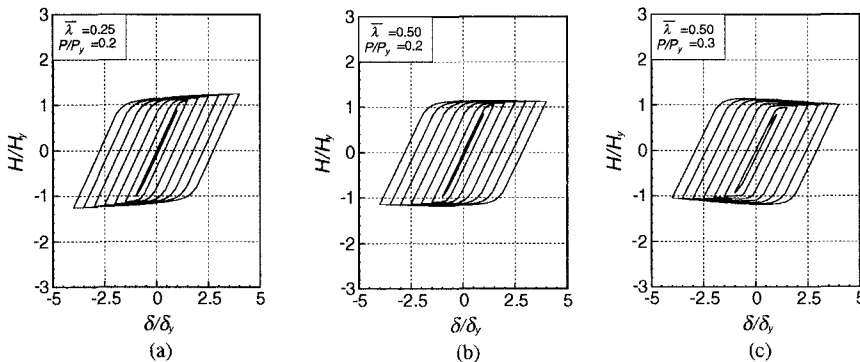


Fig.6 水平荷重-水平変位履歴曲線

みられない。また、圧縮力が $P/P_y = 0.3$ の場合に若干の強度劣化が認められる。

(4) エネルギー吸収能による耐震性能の検討

圧縮力が $P/P_y = 0.2$ で、変動振幅の反復曲げが作用する場合、 $\bar{\lambda} = 0.25, 0.5$ でのエネルギー吸収量および水平変位を $\bar{\lambda} = 0.25$ での降伏時のエネルギー吸収量および水平変位で無次元化して求めた曲線をFig. 7に示す。この図から、 $\bar{\lambda} = 0.25$ の柱が $\bar{\lambda} = 0.5$ の場合と比較してエネルギー吸収能がきわめて大きいことがわかる。

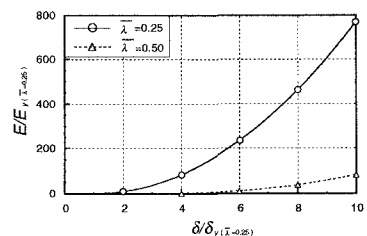


Fig.7 エネルギー吸収能

参考文献1) 鈴木・宇佐美・竹本：土木学会論文集，No.507, 1995-1. 2)

鈴木・宇佐美：土木学会論文集，No.519, 1995-7. 3) 西村・青木・西井・福本：土木学会論文集，No.410, 1989-10.