

1. はじめに

1995年1月17日早朝に発生した兵庫県南部地震によって土木構造物ならびに各種都市機能が甚大な被害を受けた。これを契機に、鋼構造の耐震性能を向上させ、変形性に優れた鋼構造の耐震設計法を確立することが重要であろう。そこで、地震時における骨組構造の耐震性能を明らかにするため、Up-dated Lagrangian手法に基づいて定式化される弾塑性有限変位解析用の有限要素プログラムを開発し、それを鋼製橋脚を模した初期不整のある箱形断面の片持ち鋼柱に適用し、圧縮力と水平方向の反復曲げが同時に作用する場合の弾塑性履歴挙動を解析的に検討する。

2. 解析モデル

Fig.1に示すような高さ h の単一の片持ち鋼柱が、その頂部に圧縮力 P と水平方向の繰り返し荷重 H を受ける場合の弾塑性有限変位挙動を明らかにする。柱は無補剛箱形断面で、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 である。また、柱には不可避免的な初期不整いわゆる初期たわみと残留応力が生じているものとする。

ところで、単一の片持ち鋼柱は、Fig.1に示すように、頂部に圧縮力 P と水平方向の繰り返し荷重 H を受ける。この柱の弾塑性履歴を検討するため、外力としては荷重強度そのものよりそれに等価な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が扱いにくいので、ここではFig.2のような条件にモデル化して解析する。すなわち、圧縮力を頂部に、水平の繰り返し荷重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型モデルを適用し、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 $E=2.1 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $E_s=E/100$ とする。降伏点応力は $\sigma_y=2400 \text{ kgf/cm}^2$ である。

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、数サイクルごとに振幅を変化させたFig.4に示す変動振幅の繰り返し荷重とした¹⁾²⁾。図中、縦軸と横軸はそれぞれ初期降伏時の水平変位 δ_0 で無次元化された水平変位 δ と繰り返し回数である。上述の方法によれば、圧縮と繰り返し曲げが同時に作用する構造物の耐荷力、あるいは塑性変形能などが評価できる。

4. 解析手法

4.1 つり合い方程式

初期不整を有する鋼箱形断面柱を有限個の2節点6自由度のはり-柱要素に離散化する。その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、構造系全体に対して合成すれば、

$$[K]\{\Delta\delta\} = \{\Delta F\} + \{\{F_n\} - \{R_n\}\}$$

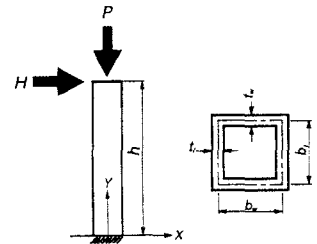


Fig.1 反復曲げを受ける圧縮柱

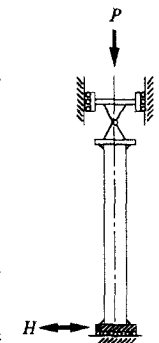


Fig.2 両端支持条件

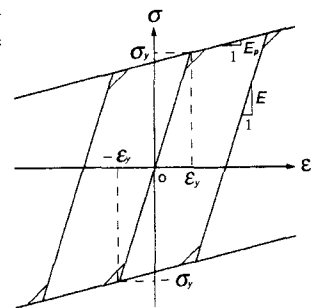


Fig.3 応力-ひずみ関係

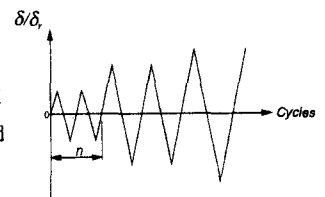


Fig.4 変動振幅
繰り返し載荷プログラム

のつり合い式を得る。ここに $[K]$ は材料的非線形性を表すマトリックス、幾何学的非線形性を表すマトリックスおよびUp-dated Lagrangian手法による非線形性マトリックス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、 $\{F_n\} - \{R_n\}$ は不平衡節点力ベクトルである。

4.2 数値解析法

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、繰り返し荷重下の柱の弾塑性履歴を明らかにする。

5. 数値解析結果と考察

数値解析に必要なパラメータとして、フランジと腹板の幅厚比を20、箱断面形状比を1、最大初期たわみを $h/500$ 、圧縮残留応力を $-0.2\sigma_y$ とした。また、有限要素数を25、断面内の分割数を132とした。

5.1 有限要素解の精度

有限要素解の精度を検討するため、圧縮力を受ける鋼柱の終局強度を検討する。Fig.5に鋼柱の終局強度曲線を示す。図中、西村・青木の結果を示す。図から明らかなように、本解は西村・青木の解析解とかなりよい一致を示している。

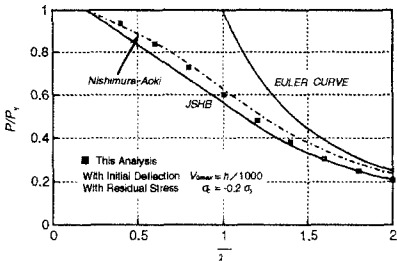


Fig.5 終局強度曲線

5.2 細長比

細長比が強度に及ぼす影響を考察する。軸力比 $P/P_y=0.2$ で、変動振幅載荷の曲げが作用する場合、 $\lambda\text{-}0.25$ と $\lambda\text{-}0.5$ に対応する水平荷重-水平変位履歴曲線をFig.6(a),(b)に示す。変動振幅は $\delta/\delta_y=1, 1.5, \dots, 4$ とし、各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、 $\lambda\text{-}0.25$ ではひずみ硬化の作用が強く働き、強度劣化がほとんどみられない。一方、 $\lambda\text{-}0.5$ では、P-Δ効果の影響が大きいので、強度劣化するのがわかる。

5.3 軸力比

軸力比 P/P_y が強度に及ぼす影響を考察する。 $\lambda\text{-}0.5$ で、変動振幅載荷の曲げが作用する場合、軸力比 $P/P_y=0.2$ および 0.3 に対応する水平荷重-水平変位履歴曲線をFig.6(b),(c)に示す。この場合も、変動振幅は $\delta/\delta_y=1, 1.5, \dots, 4$ とし、各振幅でのサイクル数を1回とした。この図からは、最高荷重、最高荷重時の変位に軸力比の相違による差はみられないが、明らかに軸力比 $P/P_y=0.3$ の時の方が強度劣化の程度が著しい。したがって、軸力比が大きいほど強度劣化の程度が著しいといえる。

参考文献 1) 鈴木森晶・宇佐美勉：土木学会論文集，No. 519, 1995-7. 2) 鈴木森晶・宇佐美勉・竹本潔史：土木学会論文集，No. 507, 1995-1. 3) 酒造敏廣・事口壽男・西 幸二：構造工学論文集，Vol. 39A, 1993.

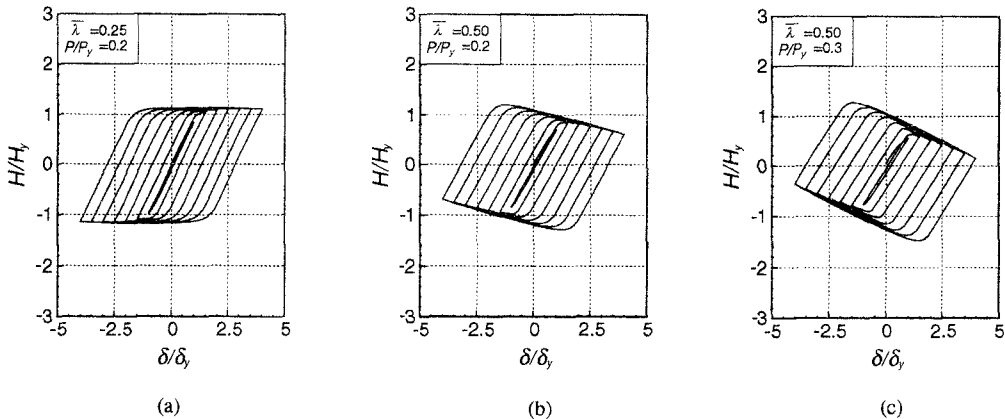


Fig.6 水平荷重-水平変位履歴曲線