

関西大学工学部 正会員 堂垣正博 日立造船(株) 正会員 増田智成
 関西大学大学院 学生員 ○安田和宏 関西大学工学部 フェロー 三上市藏

1. まえがき 兵庫県南部地震の際に鋼製橋脚が受けた損傷は、鉄筋コンクリート製のものに比べ軽微であったといわれる。その理由のひとつに、橋脚基部に充填されたコンクリートの存在がある。近年、中井・北田¹⁾や宇佐美²⁾は、この種の構造物の耐荷性状と変形性能を明らかにするため、理論的および実験的研究を精力的に行っている。ここでは、彼らと同様、地震時のコンクリート充填鋼製橋脚の耐震性能を明らかにするため、圧縮力と水平方向の繰返し曲げが同時に作用する鋼柱の弾塑性履歴挙動をUp-dated Lagrangian 手法に基づいて定式化した有限要素法で解析的に明らかにする。

2. 解析モデル 解析対象のコンクリート充填鋼柱は、Fig.1 に示すような高さが h 、コンクリート充填高さが h_c 、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 の無補剛箱形断面で、圧縮力 P と水平方向の繰返し荷重 H を同時に受けるものとする。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。

このような柱の弾塑性履歴挙動を検討する場合、外力として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、圧縮力 P を頂部に、繰返し荷重に相当する変位 δ を基部に与えることにする。

コンクリート充填鋼柱を構成する鋼板には、Fig.2(a) に示すひずみ効果を考慮したBi-linear型の応力-ひずみ関係を仮定し、弾性域とひずみ硬化域の接線係数をそれぞれ $E_s=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$, $E_{sp}=E_s/100$ 、降伏点応力を $\sigma_y=2,400 \text{ kgf/cm}^2$ とする。また、コンクリート材料には、Fig.2(b) に示すTri-linear型の応力-ひずみ関係を仮定し、接線係数を $E_{c1}=1.5 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$, $E_{c2}=0.5 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ とし、それらに対応するコンクリートの圧縮強度はそれぞれ $\sigma_{cy1}=150 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma_{cy2}=200 \text{ kgf/cm}^2$ である。ただし、コンクリートは引張には抵抗せず、曲げ変形のみを考慮する。また、鋼材とコンクリートの付着は考えない。

3. 解析手法 コンクリート充填鋼柱を有限個のはり-柱要素に離散化し、要素での節点力-節点変位の関係をUp-dated Lagrangian手法に基づき、ポテンシャル・エネルギー最小の原理から誘導し、構造系全体に合成すれば

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

(1)

の剛性方程式を得る。ここに、 $[K]$ は接線剛性マトリックス、 $\{\Delta F\}$ は増分変位ベクトル、 $\{F_n\} - \{R_n\}$ は不平衡節点力ベクトルである。式(1)は多元連立非線形代数方程式で、荷重増分ごとにNewton-Raphson法で解き、繰返し荷重下での柱の履歴挙動を明らかにする。

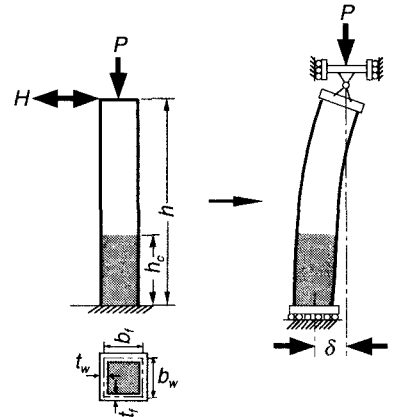


Fig.1 解析モデル

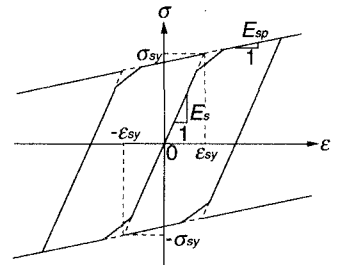
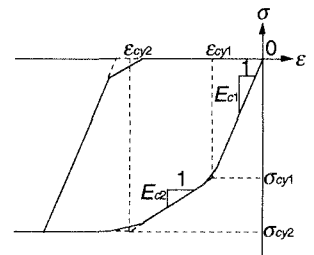


Fig.2(a) 鋼材の応力-ひずみ関係

Fig.2(b) コンクリート材料の
応力-ひずみ関係

4. 数値解析結果とその考察 初期不整を有するさまざまな断面寸法の柱を対象にすることができるが、ここでは正方形断面で、フランジと腹板の幅厚比が $b_f/t_f = b_w/t_w = 20$ ($R_f = R_w = 0.356$)、初期たわみの最大値が $h/500$ 、圧縮残留応力が $-0.2\sigma_y$ の柱を解析する。ただし、有限要素数を30、断面の分割数を140とした。

(1) 既往の研究との比較 本解析法の妥当性を検討するため、圧縮力と水平荷重を受けるコンクリート充填鋼柱を解析し、既往の実験および解析の結果²⁾と比較する。漸増荷重を受ける柱頂部での水平荷重-水平変位の関係をFig.3に示す。ただし、水平荷重 H および水平変位 δ を降伏時の水平荷重 H_y および水平変位 δ_y で無次元化した。図から明らかなように、最高荷重までの変形過程において、本解は宇佐美らの解析結果²⁾と極めてよく一致している。また、実験結果との比較においても、荷重-変位関係にかなりよい相関がみられ、本解析法は、コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の挙動を明らかにするのに信頼できる解法であることがわかる。

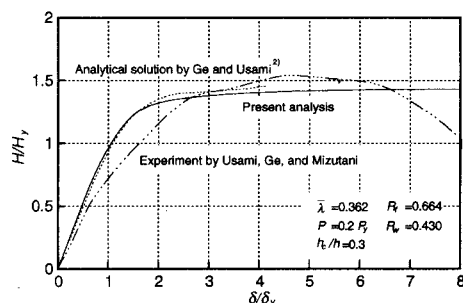


Fig.3 既往の研究との比較

(2) 軸力比 軸力比 P/P_y が強度および履歴挙動に及ぼす影響を検討する。修正細長比が $\lambda = 0.5$ 、コンクリート充填率が $h/h_0 = 0.3$ の柱に変動振幅の繰り返し水平荷重が作用する場合、 $P/P_y = 0.2$ および 0.3 の時の水平荷重-水平変位履歴曲線はFig.4のようになる。ただし、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。

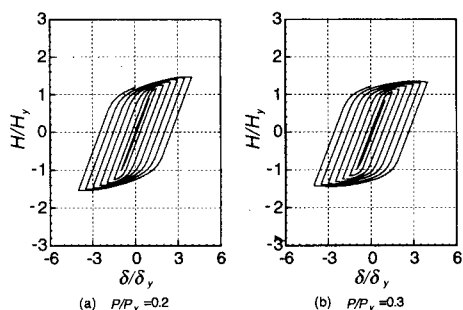


Fig.4 軸力比の相違による履歴挙動

図(b)に示す $P/P_y = 0.3$ の場合、図(a)の $P/P_y = 0.2$ の場合に比較して、強度の低下が認められる。これは、圧縮力の増大とともに水平方向の変形による付加曲げがより顕著に作用するようになったためと考えられる。

(3) コンクリート充填率 コンクリート充填率が鋼製橋脚の変形性能に及ぼす影響を明らかにするため、 $\lambda = 0.5$ 、 $P/P_y = 0.2$ の場合の水平荷重-水平変位曲線を求め、コンクリート充填率と強度の上昇率および塑性率 μ

$$\mu = \frac{\delta' - \delta_y}{\delta_y} \quad (2)$$

の関係を求めれば、Fig.5を得る。ただし、縦軸はコンクリート未充填の鋼柱を基準にした強度の上昇率と塑性率を表す。ここに、 δ' は片持ち柱が降伏後、最高荷重を経て再び降伏水平荷重 H_y に達したときの水平変位である。図から明らかなように、最高荷重は中空断面の鋼柱と比較して約1.1倍だけ上昇するが、変形性能はコンクリート充填率の増加とともにかなり向上する。しかし、コンクリート充填率が40%以上になれば、変形性能に差異は見られない。

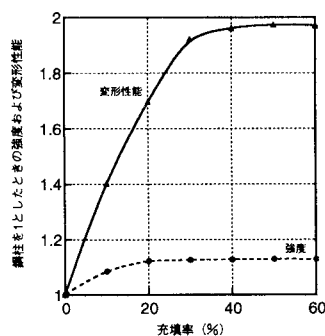


Fig.5 充填率の相違による強度および変形性能の比較

5. あとがき コンクリート充填鋼柱の弾塑性履歴挙動を有限要素法で解析し、つぎのような結果を得た。

- (1) 圧縮力の増大による水平方向の付加曲げが強く働くため、軸力比が大きいほど強度が低下する。
 - (2) コンクリートの充填効果により若干の強度上昇がみられるが、それ以上に変形性能が顕著に向上する。
- 参考文献1)中井・北田・中西：土木学会論文集，No.513/I-31，pp.89-100，1995-4. 2)葛・宇佐美：土木学会論文集，No.513/I-31，pp.77-88，1995-4.