

早稲田大学大学院

学生会員

岡 俊蔵

早稲田大学大学院

学生会員

張 義隆

早稲田大学理工学部

正会員

依田 照彦

## (1) まえがき

コンクリートを鋼管柱に充した鋼管コンクリート合成柱は、引張に対してじん性に富んだ鋼材と圧縮に対して有利なコンクリートを一体とした構造であるため、耐力と剛性に富み、また耐震上も優れた構造物であるとされている<sup>1)</sup>。本報告では、カンダリ(Cundall, P.A.)の提案した個別要素法<sup>2)</sup>と従来の有限要素法とを応用して、鋼管コンクリート合成柱の動的応答解析をおこない、鋼管とコンクリートとの動的合成作用を調べることを目的としている。

## (2) 解析方法

鋼管に充されたコンクリートを、曲げ引張により柱軸直角方向にひびわれが生じた後も解析できるように、不連続面で区切られた長方形個別要素の集合体とみなし、その要素間の接触力の機構を図1のように接触面に対して垂直方向およびせん断方向の Voigt のばね・ダッシュポットモデルに垂直方向のノーテンションジョイントとせん断方向のスライダーを付加したモデルで表現する。要素間の接触判定は長方形要素の4隅とその隣接する要素との間でおこない、接触時の接触力は、コンクリートを弾性体とみなしたときの等価ばね定数を持つばねの設置位置において伝達されるとした。また、非接触時にはコンクリートのひびわれを想定して、ノーテンションジョイントが働くことと仮定し、ひびわれが生じた後のすべりをスライダーで表現した。

一方、外側の鋼管は、管の収縮・膨張を考慮したはり要素とみなし、有限要素法を用いて定式化した。すなわち、鋼管を左右のはり要素に分け、鋼管全体の支配方程式を円管の軸力に関する式(1)、円管の中立軸における曲げに関する式(2) および円管の収縮・膨張に関する式(3) で表わす。

$$E_s A \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \gamma A / g \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + p = 0 \quad \dots(1)$$

$$E_s I_y \frac{\partial^4 u_x}{\partial z^4} + \gamma A / g \cdot \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = q_x \quad \dots(2)$$

$$E_s I_r \frac{\partial^4 u_r}{\partial z^4} + k u_r + (\gamma A / g \cdot \Delta \alpha / 2\pi) \cdot \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} = q_r r_m \Delta \alpha \quad \dots(3)$$

ただし、 $A=2\pi r_m t$ 、 $I_y = \pi/4 (r_o^4 - r_i^4)$ 、 $I_r = r_m \Delta \alpha t^3 / 12$ 、 $k = E_s t \Delta \alpha / r_m$ 、

$E_s$ : 鋼のヤング率、 $\gamma$ : 鋼の単位体積重量、 $g$ : 重力加速度、 $t$ : 管厚、

$r_o, r_i, r_m$ : 管の外, 内, 平均半径、 $p, q_x, q_r$ : 外力項 (図2参照。)

左右両要素の力と変位の適合条件式は、

$$w = w_L = w_R, \quad p = p_L + p_R$$

$$u_x = (u_{xL} + u_{xR})/2, \quad q_x = q_{xL} + q_{xR}$$

$$u_r = (u_{rL} - u_{rR})/2, \quad 4q_r r_m = q_{rL} - q_{rR}$$

となる。ここに、 $(w_L, u_{xL}), (w_R, u_{xR})$ : それぞれ左右のはり要素の変位、 $(p_L, q_{xL}), (p_R, q_{xR})$ : それぞれ左右のはり要素に作用する外力である。以上の関係式を用いて、鋼管部分を解析することになる。

さらに、コンクリートと鋼管は、ジベルで合成されていると仮定し、長方形個別要素の4隅とはり要素の間に垂直およびせん断方向の Voigt のばね・ダッシュポットモデルを常時設置した。

動的応答解析は図3のフローに従い、個別要素の場合には近似差

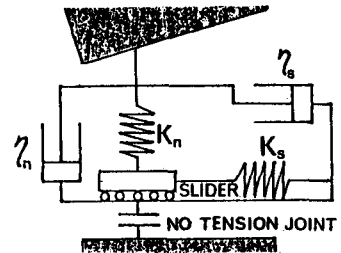


図1 個別要素間の接触力の機構

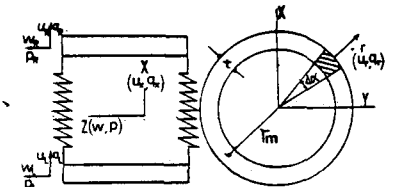


図2 鋼管のモデル化

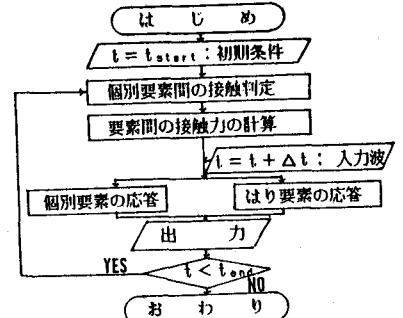


図3 動的応答解析のフロー

分法を、はり要素の場合には線形加速度法を用いておこなった。

### (3) 解析結果および考察

表1に示す材料定数および寸法をもつ10層に分割した下端固定、上端自由のモデルに、周期0.4(sec)の正弦加速度を下端水平方向から入力し、 $2.0 \times 10^{-5}$ (sec)の時間間隔でモデルの動的応答を調べた。なお、動的応答解析においては、応答値に及ぼす影響が大きいと思われる入力加速度 $\alpha$ 、上載荷重によるコンクリートの初期圧縮応力度 $\sigma_c$ およびジベルの接線ばね係数 $K_s$ をパラメータに選び(表2参照)、計算を実施した。また、これらの計算に先立ち、表1の値をもつ初期圧縮応力度 $\sigma_c$ が10(kgf/cm<sup>2</sup>)および50(kgf/cm<sup>2</sup>)である場合について固有周期を求め、それぞれ0.14(sec)および0.30(sec)であることを確認した。

図4～図6は柱頂部の水平方向変位量が最大となった時刻におけるはり要素の変形性状を示したものである。これらの図を基に、各パラメータの動的応答に及ぼす影響について考察する。応答値は、どの場合も入力加速度 $\alpha$ にほぼ比例しているので、入力加速度 $\alpha$ の影響は小さいと考えられる。次に、コンクリートの初期圧縮応力度 $\sigma_c$ およびジベルの接線ばね係数 $K_s$ に注目すると、コンクリートの初期圧縮応力度 $\sigma_c$ が小さく、ジベルの接線ばね係数 $K_s$ が大きい場合には、応答値は小さく、コンクリートに下端でひびわれが生ずることがあったとしても、すべりは起らず、ジベルの存在によりコンクリートと鋼管が一体化されていたと判断できる。しかしながら、コンクリートの初期圧縮応力度 $\sigma_c$ が大きい場合およびジベルの接線ばね係数 $K_s$ が小さい場合には、応答値が非常に大きくなり、コンクリートは下端で浮き上がりを生じ中間部ですべりを起こしている。この場合には、動的耐力向上に対して充されたコンクリートが十分な機能を果たしていないことがわかる。従って、ジベル等によるコンクリートと鋼管との一体化、特に、固定端近傍におけるジベルの配置が耐震性向上のために果たす役割は大きいと推察できる。

本報告では比較のため、完全弾性体モデルを用いて、応答値の小さいケース1-1-1と応答値の大きいケース1-3-2について応答計算を試みた(図4、図5に添字Eをつけて示す)。応答値の小さい場合には解析モデルと弾性体モデルの応答値はほぼ一致したが、応答値の大きい場合には解析モデルの応答値は弾性体モデルの応答値の6倍ほどになった。このことは、本解析モデルによってコンクリートのひびわれおよびすべり現象が定量的に考察できることを意味していると思われる。

### (4) あとがき

鋼管コンクリート合成柱の動的挙動を個別要素法と有限要素法を応用して調べた。その結果、ひびわれが生じた後のコンクリートのような不連続体の動的挙動の解析に個別要素法が有用であることがわかった。

(参考文献) 1)中井、吉川：土木学会論文集、1984.4.

2)Cundall, P.A., Strack, O.D.L.: Géotechnique 29, 1979.

表1 材料定数および寸法

|               |                       |                     |
|---------------|-----------------------|---------------------|
| 外径            | 397.7                 | mm                  |
| 壁厚            | 5.6                   | mm                  |
| 高さ            | 310.0                 | cm                  |
| 断面積の面積        | 69.0                  | cm <sup>2</sup>     |
| 断面積の2次モーメント   | 13260.0               | cm <sup>4</sup>     |
| 鋼の単位体積重量      | $7.85 \times 10^{-3}$ | kgf/cm <sup>3</sup> |
| コンクリートの単位体積重量 | $2.35 \times 10^{-3}$ | kgf/cm <sup>3</sup> |
| コンクリートのヤング係数  | $2.1 \times 10^5$     | kgf/cm <sup>2</sup> |
| コンクリートの弾性係数   | $1.3 \times 10^5$     | kgf/cm <sup>2</sup> |
| 初期圧縮応力度のばね係数  | $3.26 \times 10^5$    | kgf/cm              |
| 個別要素間の接線ばね係数  | $1.36 \times 10^5$    | kgf/cm              |
| ジベルの接線ばね係数    | $2.70 \times 10^5$    | kgf/cm              |
| シベルの接線ばね係数    | $1.00 \times 10^5$    | kgf/cm              |
| 要素間の法線ばね係数    | $2.00 \times 10^5$    | kgf/(cm/sec)        |
| 要素間の接線ばね係数    | $1.20 \times 10^5$    | kgf/(cm/sec)        |
| コンクリートの摩擦係数   | 0.82                  |                     |

表2 パラメータの値

|   | $\sigma_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\alpha$ (gal) | $K_s$ (kgf/cm)     |
|---|-----------------------------------|----------------|--------------------|
| 1 | 10                                | 50             | $1.00 \times 10^4$ |
| 2 | 50                                | 200            | $1.00 \times 10^3$ |
| 3 |                                   | 400            |                    |

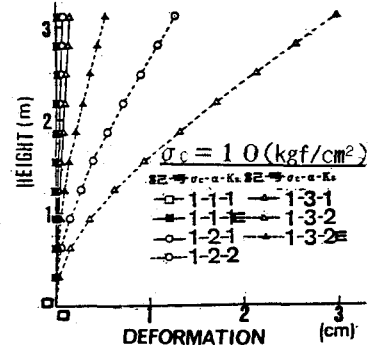


図4 鋼管の変形量の分布

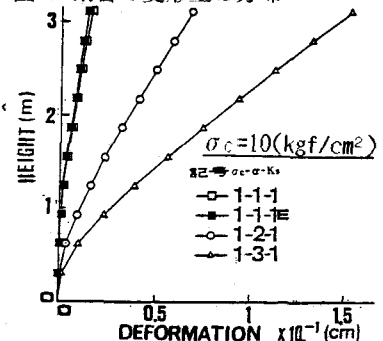


図5 鋼管の変形量の分布

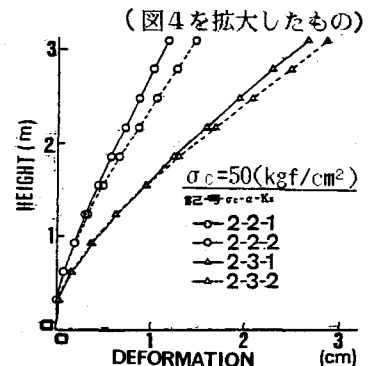


図6 鋼管の変形量の分布