

大成建設 正員 ○岩野 政浩

大成建設 正員 浜田 政則

1. まえがき

地下原子力発電所や石油地下備蓄基地等の巨大な地下構造物が計画されるようになり、地下空洞の地震時挙動を把握する事が必要となってきた。この種の研究は、せん断波に対しては、二次元有孔弾性波動論を用いた手法⁽¹⁾、P波に対しては、波動ポテンシャルを用いた手法⁽²⁾等によって、無限領域での解析が進められてきた。さらに、SH波に対しては、地表面の存在を考慮した鏡像法を用いた理論的手法⁽³⁾、及び積分方程式による離散化手法⁽⁴⁾等によって解析が展開されている。本研究は、円孔の大きさに比較し、かなり深い所に建設される地下空洞の地震時の安全性を考える上で、鉛直下方より入射するせん断波、P波に対して理論的解析を行った。解析対象としては、無限、半無限均質弾性体中の円孔空洞を考え、空洞境界面での動的な歪の増幅度を求め、動的問題の静的問題への置き換えの可能性を考察するものである。

2. 解析手法

今、伝播してくる波動を図-1に示すようにx軸の負方向に進行する平面せん断波であり、その波形は無限に連続する正弦波で、変位振幅を a とする。円孔によって擾乱されない状態での波形は、x方向変位 $u=0$ 、y方向変位 $v=a e^{i p(t+\frac{z}{C_s})}$ と表現される。ここで p は円振動数、 C_s はせん断波速度である。この入射波を基に、地表面での反射波、さらに円孔よりの散乱波(せん断波、体積波)を求める。この場合、散乱波の地表面における反射波は、深い所に存在する円孔への影響は小さいと考え無視する。各々の成分を極座標表示したものを式(1)~(4)に示す。

$$\text{入射波: } U_1^i = a e^{i p t} \frac{z m^{m-1}}{2} J_m(z) \sin m\theta, \quad U_0^i = a e^{i p t} \frac{z m^{m-1}}{2} \{J_{m-1}(z) - J_{m+1}(z)\} \cos m\theta \quad (1)$$

$$\text{反射波: } U_1^r = a e^{-i p t} \frac{z m^{m-1}}{2} J_m(z) \sin m\theta, \quad U_0^r = a e^{-i p t} \frac{z m^{m-1}}{2} \{J_{m-1}(z) - J_{m+1}(z)\} \cos m\theta \quad (2)$$

$$\text{散乱波: (せん断波) } U_1^s = -e^{i p t} \frac{z m^{m-1}}{2} A_m H_m^{(2)}(z) \sin m\theta, \quad U_0^s = -e^{i p t} \frac{z m^{m-1}}{2} A_m \left\{ \frac{m}{2} H_m^{(2)}(z) - H_{m+1}^{(2)}(z) \right\} \cos m\theta \quad (3)$$

$$\text{(体積波) } U_1^v = -e^{i p t} \frac{C_p}{C_s} D_m \left\{ \frac{m}{2} H_m^{(2)}(z) - H_{m+1}^{(2)}(z) \right\} \sin m\theta, \quad U_0^v = -e^{i p t} \frac{C_p}{C_s} D_m H_m^{(2)}(z) \cos m\theta \quad (4)$$

ここで C_p は体積波速度、 z 、 θ は $z = \frac{p r}{C_s}$ 、 $\theta = \frac{p r}{C_s}$ という無次元量、 J_m は第一種ベッセル関数、 $H_m^{(2)}$ は第二種ヘルムホルツ関数である。

覆工に対しては、二次元平面歪問題と考えているので、基本的な波動方程式は、変位ポテンシャルを用いて示すと、 $(\lambda + 2G)\nabla^2 \phi_1 = S \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial x^2}$ 、 $G \nabla^2 \phi_2 = S \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial x^2}$ となる。さらに変位 U_r 、 U_θ は変位ポテンシャルを用いて示すと $U_r = \frac{\partial \phi_1}{\partial r} \phi_1 + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_2}{\partial \theta} \phi_2$ 、 $U_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_1}{\partial \theta} \phi_1 - \frac{\partial \phi_2}{\partial r} \phi_2$ と表現される。ここで S は単位体積重量、 λ 、 G はラーメの定数である。上の微分方程式を解くと式(5)に示すように変位が表現される。

$$\begin{aligned} U_r^s &= e^{i p t} \left\{ B_m \left\{ \frac{m}{2} H_m^{(2)}(z) - \frac{p}{C_s} H_{m+1}^{(2)}(z) \right\} + C_m \left\{ \frac{m}{2} H_m^{(1)}(z) - \frac{p}{C_s} H_{m+1}^{(1)}(z) \right\} \right. \\ &\quad \left. - \frac{m}{2} E_m H_m^{(2)}(z) - \frac{m}{2} F_m H_m^{(1)}(z) \right\} \sin m\theta \\ U_\theta^s &= e^{i p t} \left\{ \frac{m}{2} \left\{ B_m H_m^{(2)}(z) + C_m H_m^{(1)}(z) \right\} - E_m \left\{ \frac{m}{2} H_m^{(2)}(z) - \frac{p}{C_s} H_{m+1}^{(2)}(z) \right\} \right. \\ &\quad \left. - F_m \left\{ \frac{m}{2} H_m^{(1)}(z) - \frac{p}{C_s} H_{m+1}^{(1)}(z) \right\} \right\} \cos m\theta \end{aligned} \quad (5)$$

無次元パラメータとしては、図-1に示す量を用い、 ρ_c 、 ρ_r 、 γ_0 、 E_c/E_r 、 ν_r/ν_c の5つを用いる。ここで D は円孔内径、 L はせん断波の波長、 T は覆工厚、 H は地表面までの距離、 E_c 、 E_r 、 ν_c 、 ν_r は覆工、岩盤の弾性定数、ポアソン比を示す。式(1)~(5)の変位を用い、次に示す式(6)~(11)の境界条件を満足するよう、未知定数(A_m 、 F_m)を決定する。ここで添字(I)は覆工を、(II)は岩盤を示す。

$$\text{円孔内径}(r=D/2): \sigma_{rr}^{(I)} = 0 \quad (6), \quad \tau_{r\theta}^{(I)} = 0 \quad (7)$$

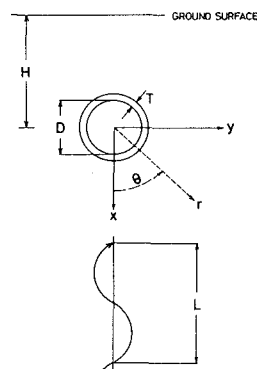


図-1 解析モデル

$$\text{円孔外径}(r = r_0 + T): U_1^{(P)} = U_1^{(P)} - (8), U_2^{(P)} = U_2^{(P)} - (9), \sigma_{11}^{(P)} = \sigma_{11}^{(P)} - (10), \tau_{12}^{(P)} = \tau_{12}^{(P)} - (11)$$

入力歪振幅 $\gamma_{xy} = \left| \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right| = a \frac{P}{E_0} = 1.0$ として未知定数 ($A_m \sim F_m$) を決定し、円孔自由境界面上の円周方向歪 $\epsilon_{\theta\theta}$ を求めると、これは応答歪倍率となり、以後この量を用いて考察を進める。

P波に対しては、入力波として、 $u = a e^{iP(t + \frac{z}{c_p})}$, $v = 0$ を考え、せん断波の場合と同様に解析を行う。この場合、円孔より散乱する波、覆工内の波動に関しては、せん断波と等しくなる。

動的問題において、非常に波長の長い波動が入力した場合、静的なものとして取り扱える。そこで円孔の静的FEMモデルを設定し、強制変位を与える形で、適当な初期歪状態を作り、円孔の存在による円孔境界面での歪の増幅度を求める。

3. 結果及び考察

図-3は覆工がない場合のせん断波入力による円周方向歪の最大増幅度を示したものである。この図-3より $H/L = \infty$ つまり自由境界面が存在しない場合には、 D/L に対してほぼ一様な分布を示し、最大ではほぼ1.5倍である。 $H/L = 0.25$ の場合に最大の応答を示し、最大値は3.0倍である。これは円孔が地表面より $\frac{2n+1}{4}$ ($n=0,1,\dots$) 波長の節の位置にある時、歪対称変形が最大となる事よりう

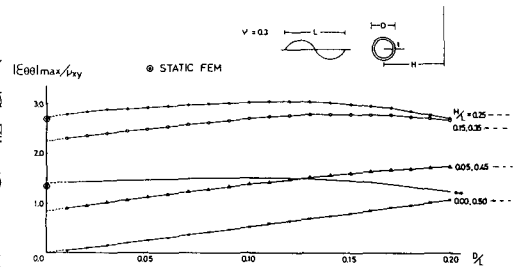


図-3 歪増幅度曲線 (覆工なし)

なづける。又 $H/L = 0.25$ の場合を中心として、 H/L に対称な分布性状を与え、 $H/L = 0.50$ を境にしてこの現象はくり返される。これより地表面から $1/4$ 波長までの領域を解析すれば、それより深い所に存在する円孔の最大歪増幅度は明らかになる。 $D/L = 0$ の点は、静的な場合を表現しており静的FEMの結果とよく一致している。図-4,5は覆工が存在する場合のせん断波入力による円周方向最大歪増幅度を、覆工の剛性、厚さを種々変化させてプロットしたものである。図-4は地表面が存在しない場合、図-5は最大応答値を示す $H/L = 0.25$ の場合である。ふたつの図より、定性的には、覆工の剛性が、岩盤に比べ小さい場合、覆工厚の影響は小さいが、剛性が大きい場合にはかなり影響をうける。 D/L の差による応答値の変化は小さく、動的要因の影響が小さい事を示し、 $D/L = 0$ の場合は静的FEM結果に近づく。

図-4と図-5を比較する事で、覆工の剛性、厚さといったパラメータより、円孔の存在位置による影響が大きい。定量的には、実用に供する円孔空洞においては、無限領域で1.7倍、地表面の影響を考慮する場合でも最大3.5倍の歪の増幅度を考えれば良い。さらに、静的な解析で十分表現できる事が図-4の結果よりわかる。

以上より、自由境界面を考慮し、せん断波、P波入力に対し、地盤内円孔空洞周辺に働く地震力を評価した。さらに、一定の条件下における円孔空洞に対しては、動的要因を静的要因に置き換える可能性を示した。なお、P波については詳細を当日発表する予定である。

(参考文献)

- (1) 地中構造物に働く地震力に関する研究：岡本他(1963)：土木学会論文報告集，第92号，PP37-51
- (2) DYNAMIC STRESSES IN AN ELASTIC CYLINDER：C.C.Mow他(1963)：Proc. A S C E, E M 3, PP21-41
- (3) RESPONSE OF TUNNELS TO INCIDENT SH-WAVES：V.W.Lee他(1979)：Proc. A S C E, E M 4, PP643-659
- (4) 地下空洞周辺における面外振動問題の解析について：丹羽他(1981)：第36回土木学会年次学術講演会，PP529-530

図-5 歪増幅度曲線 (覆工あり; $H/L = 1/4$)

図-4 歪増幅度曲線 (覆工あり; 無限)

