

大成建設(株) 正員 ○下茂 道人
同上 正員 立石 章

1 まえがき 原油、LPG等の岩盤内貯蔵において、地下空洞周辺の地下水の流れは、空洞形状(断面、長さ)、設置深さ、隣接構造物(並設空洞、アプローチトンネル、ウォーターカーテンetc.)等の影響を受けて、三次元的な挙動を示す。このような問題は、三次元FEM等による数値解析手法が有効であるが、これには一般に多大な労力を要する。そこで筆者らは、任意の空洞配置、空洞本数、空洞内圧のもとでの地下水挙動を簡便に解析するために、鏡像法を用いた三次元浸透流解析を試みた。その結果は、三次元FEM結果と良く一致し、本手法の有用性を確認した。なお、本手法の前提条件は次のようである。①半無限の均質等方な地下水場を仮定する。

②地下水面は一定かつ水平である。③地下水の流れは、Darcy則に従う。

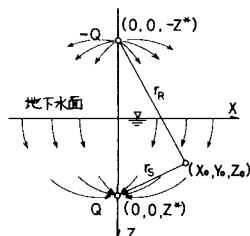
2 基礎理論 均質等方な場におかれた半径 R の球の中心に、流入源または流出源が存在する場合に、球の中心から任意の距離にある点における水圧 h は、Darcy則および連続式より、次式で与えられる。

$$h_s = \frac{Q}{4\pi K} \left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_w} \right) - \frac{P}{W} \quad (1) \quad h_R = \frac{Q}{4\pi K} \left(\frac{1}{r_R} - \frac{1}{r_w} \right) + \frac{P}{W} \quad (2)$$

ただし Q は流入強度、 P は空洞内圧であり、サクス S および R は、それぞれ流入源および流出源に関する値であることを示す。半無限地下水場において、球の中心に流入点がある場合の任意点における水圧は、図-1に示すような、鉛直下方を正とした三次元直交座標系において、 xy 面($z=0$ 面)に関して対称な位置に流入源と流出源を配置し、(1)式と(2)式を重ね合わせ、さらに重力項を加えることにより、次式で求められる。

$$h = h_s + h_R + Z_0 = \frac{Q}{4\pi K} \left(\frac{1}{r_R} - \frac{1}{r_s} \right) + Z_0 \quad (3)$$

(3)式より、 xy 面は $h=0$ の等水圧面すなわち一定地下水面となる。



上記と同様な考え方により、半無限地下水場に有限長の空洞が存在する場合には、図-1 点源への流れ

図-2に示すように、流入線源(空洞)と xy 面に関して対称な位置に仮想の流出線源を配置する。今、線源が x 軸に平行な場合を考える。線源の微小長さ dx における流入強度を $q(x)$ とする。各微小区間において、 $Q=q(x)dx$ として(3)式を適用すると、任意点における水圧は、これを空洞全長にわたって積分することにより次式で得られる。

$$h = \frac{1}{4\pi K} \int_{x^*}^{x^*+L} \left(\frac{q(x)dx}{r_R} - \frac{q(x)dx}{r_S} \right) + Z_0 \quad (4)$$

3 数値解析のための離散化 (4)式は、積分の中に未知数 $q(x)$ を含んでおり、陽な形で解けないため、次の離散化を行う。まず、図-3のように、線源 S 、 R を N 分割し、各区間ごとに流入強度 $q(x)$ を2次式で近似すると、

$$h = \frac{1}{4\pi K} \sum_{j=2}^{2N} \int_{x_{j-1}}^{x_{j+1}} \left(\frac{\hat{q}(x)dx}{r_R(x)} - \frac{\hat{q}(x)dx}{r_S(x)} \right) + Z_0 \quad (5)$$

$$r_R(x) = \sqrt{(x_0-x)^2 + (y_0-y^*)^2 + (z_0-z^*)^2}, \quad r_S(x) = \sqrt{(x_0-x)^2 + (y_0-y^*)^2 + (z_0-z^*)^2}$$

$$\hat{q}(x) = (a_1x^2 + b_1x + c_1)q_{j-1} + (a_2x^2 + b_2x + c_2)q_j + (a_3x^2 + b_3x + c_3)q_{j+1}$$

$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$; 節点座標により決まる係数

(5)式を、積分公式およびガウスの数値積分を用いて、区間ごとに積分すると、

$$h = \frac{1}{4\pi K} k_j q_j + Z_0 \quad j=1, 2, \dots, 2N+1 \quad (6)$$

ここに k_j は、節点流入強度 q_j が任意点 (x_0, y_0, z_0) の水圧に与える影響を表

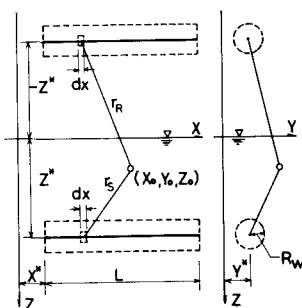


図-2 線源への流れ

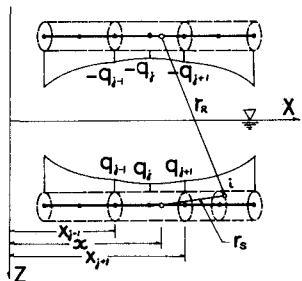


図-3 離散化モデル

めすベクトルである。今、各節点において、その節点を含む空洞断面の壁面上の任意点における水圧を、空洞内圧に等しく置くと、

$$h_i = \frac{1}{4\pi K} K_{ij} q_j + z_i \quad i, j = 1, 2, \dots, 2N+1 \quad (7)$$

となり、これを解いて q_j を求める。また、得られた q_j より (6) 式を用いて、任意点の水圧を計算できる。複数空洞についても、各空洞を分割し、全節点に対し (7) 式の K_{ij} を作成することにより、上記の一本の空洞の場合と同様に取り扱える。

4 計算例 (1本の空洞) 図-4に示すような1本の空洞への流れについて、三次元FEM(節点数2676,要素数で147)および本手法(10要素,21節点)の両者による解析を行った。図-5,6に切羽断面、空洞軸縦断面内の間隙水圧分布の解析結果を示す。本手法による解析では、空洞壁面上の点で境界条件 $P=0$ を与えている。よって図-5に見られるように空洞上下端では、 $P=0$ の等間隙水圧線は空洞形状と少々ずれている。

また図-6より、本手法により計算した場合の $P=0$ の等間隙水圧面は、切羽部が半球状の回転楕円体に近い形状になっている。しかし、空洞のごく近傍を除いて、本手法による間隙水圧分布は、FEMの結果と良く一致している。空洞への総流入量については、FEM結果が $1.49 \times 10^5 K$ ($K; m, s$ 単位系) であるのに対し、本手法による結果は、境界条件を側壁で与えた場合に $1.49 \times 10^5 K$ 、天端で与えた場合に $1.36 \times 10^5 K$ であった。なお、本手法による計算に要した計算機のCPU時間は、FEMの場合の約 $1/30$ であった。

(注水ボーリングを有する空洞) 本手法の特長は、任意の直径、長さおよび内圧を有する複数の空洞が任意の深さにおいて、 xy 各方向に配置されている場合を扱えることである。ここでは簡単な例として、上記の空洞の15m上方に直径10cm、長さ40mの注水ボーリングを、5m間隔に27本配置した場合を示す。各注水ボーリングは、2要素5節点で分割した。境界条件は、空洞側壁に於て空洞内圧 2 kgf/cm^2 を与え、各注水ボーリング上端において注水圧 3 kgf/cm^2 を与えた。図-7,8に示す間隙水圧分布の計算結果において、注水ボーリングの効果により、その上部がほぼ静水圧分布となり、間隙水圧分布の乱れが空洞のごく近傍に限られていることがわかる。また、空洞への地下水総流入量は $1.08 \times 10^5 K$ となり、そのうち $5.55 \times 10^4 K$ がボーリングからの注水量であった。各注水ボーリング1本あたりの注水量は、空洞軸方向に変化し、最小144 K (切羽前方)、最大235 K (空洞中央直上) と計算された。

5 あとがき 複数地下空洞周囲の三次元地下水挙動の簡便な解析手法および計算例を示した。本手法はモデル化が簡単であり、計算量もわずかであるが、三次元FEMの結果と良い一致を見た。よって、実際の問題に対しても適用が可能であると考えられる。ただし、本手法は、一定地下水位、均質等方地盤、Darcy則に従う流れを前提条件としている。なお、本手法の検証のための三次元FEM最近流解析を行うにあたり、岡山大学の河野教授ならびに西垣助手に御指導頂いた。

参考文献 E. REINIUS (1977) GROUNDWATER FLOW TO ROCK CAVERNS. ROCKSTORE 77, 119-124

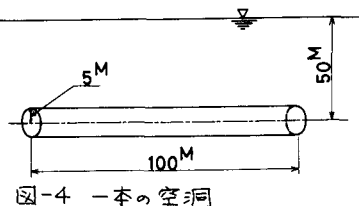


図-4 一本の空洞

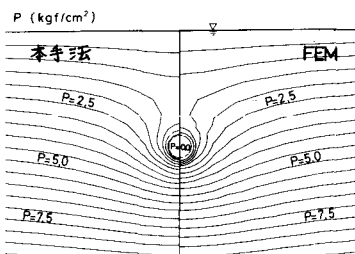


図-5 間隙水圧分布 (切羽断面)

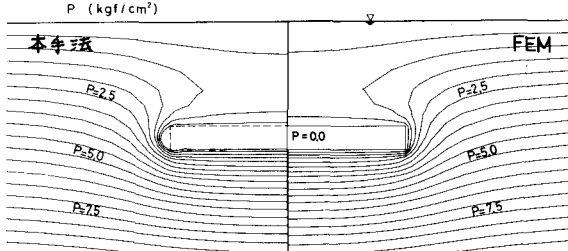


図-6 間隙水圧分布 (縦断面)

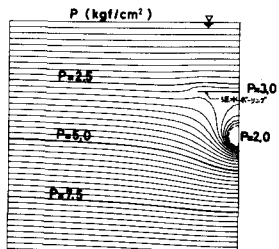


図-7 間隙水圧分布 (切羽断面)

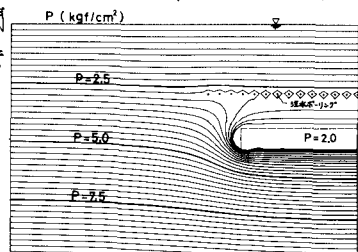


図-8 間隙水圧分布 (縦断面)