

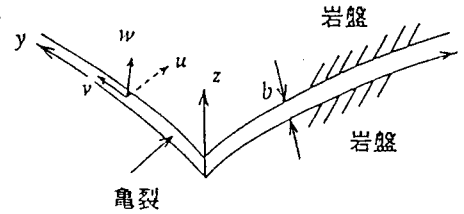
神戸大学工学部 学生員 ○藤井 哲生
神戸大学工学部 正員 中山 昭彦

1. はじめに

本研究は、高压空気貯蔵空洞(CAES)から岩盤への圧縮空気漏気現象を解明し、その特性を知る第一歩として単一亀裂を通して漏出する空気の流れの数値計算を行った。CAESでは数十気圧という高压の空気を貯蔵するため非常に狭い亀裂を通して漏気すると考えられる。解析は圧縮性ととも粘性が重要になる特殊性を考慮にいれるが地下水を含めた水圧の影響は考えていない。

2. 基礎方程式

図-1に示すような亀裂内流れを考え、空気の圧力、流速、及び温度の解析をする。亀裂面に沿った方向を x 、 y とし、亀裂面に垂直な方向を z 方向と定め、それぞれの流速成分を u 、 v 、 w とする。亀裂面の長さは、亀裂幅 b に比べかなり大きく、流速は亀裂面に沿うので z 方向の運動方程式は、



亀裂内流れ場の定義 図-1

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (1)$$

と書ける。 x 、 y 方向成分は、レイノルズ数が低いので慣性項は無視し

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (3)$$

とそれぞれ書ける。但し、 ρ は空気の密度 μ は粘性係数である。また亀裂幅が一定であるとした時、 $w=0$ と見なせ質量保存式は

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

となる。エネルギー保存式は

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \left(u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} \right) + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \mu \Phi \quad (5)$$

と表せる。ここで C_p は空気の定圧比熱、 k は熱伝導率、 $\mu \Phi$ は運動エネルギーの散逸を表す。(2)～(5)式に、状態方程式を加えた5式から u 、 v 、 P 、 T 、 ρ を求める。但し本研究では、亀裂面として平坦なもののみ考え、また亀裂面の曲率も除去している。

岩盤内の熱伝導は、一様で等方性とし、温度変化の範囲を亀裂面の長さ方向の大きさに比べ小さいとすると、熱伝達は z 方向のみと考えられるので、岩の温度 T_R は次の熱伝導方程式

$$C_R \frac{\partial T_R}{\partial t} = k_R \frac{\partial^2 T_R}{\partial z^2} \quad (6)$$

で支配される。ここで C_R は岩の熱容量、 k_R は岩の熱伝達係数である。(6)式は上の式と連成しており

$$T_R(x, y, 0, t) = T(x, y, 0, t) \quad (7)$$

の関係がある。岩盤に伝達される熱量 q_w は次式で与えられる。

$$-k_R \frac{\partial T_R}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_w(x, y, t) \quad (8)$$

3. 数値計算法と計算条件

温度 T を z 方向についての4次式とし(7)，(8)式より温度 T を q_w ，亀裂中心面での温度 T_c ，亀裂壁面での温度 T_w で表す。これと(5)式を用いて各時間における新たな温度 T_c ， T_w を求める。圧力 P は(2)，(3)式、及び状態方程式を(4)式に代入すれば、

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{P}{RT} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{z(b-z)P}{\mu RT} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{z(b-z)P}{\mu RT} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (9)$$

となり、 P ， T_c ， T_w についての2次元問題となる。その際、初期温度 $T(=T_c)$ は既知とする。解析モデルは直方体の圧縮貯蔵空洞と外気との両方に通じている長方形の亀裂面を考え、漏気が起こるのは、圧縮空洞に関しては上辺のみで、長方形亀裂面に関しては左辺の一部のみであり、残り3辺は全て不透面であるとする。外気圧、及び外気温度は1気圧、20℃とし、貯蔵内の圧力、温度は緩やかに加圧するものとする。

3. 計算結果

貯蔵内の最終圧力を5気圧にした時の圧力、及び流速を図-2に、 T_w 、 T_c の温度分布を図-3に示す。

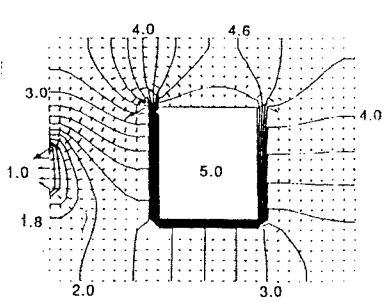


図-2 圧力分布と流速ベクトル

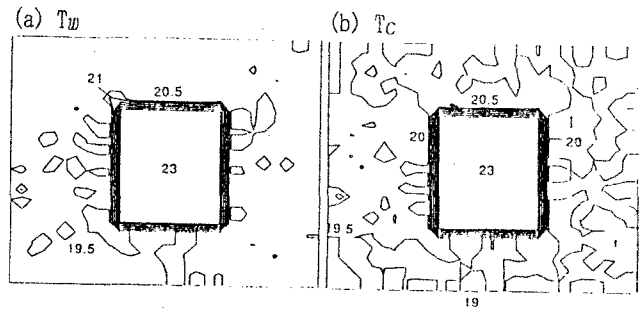


図-3 温度分布

図-2から圧力変化は加圧開始直後、貯蔵空洞に接する辺から左右対称的に上昇を開始し、時間が経過するにつれて外気に通ずる面近くまで高压域が伝播してゆくのが分かる。流速については、貯蔵空洞に近い部分、特にその両端部で大きく、やがて外気側の流速が高速になってゆくのが分かる。

次に、図-3より、 T_w は一般に初期温度より高く、 T_c は初期温度よりも低くなっているが、温度変化は小さいと見て取れる。また、 T_w については、速度の大きいところ、即ち、貯蔵空洞の出口付近、及び外気に接する部分で多少の温度上昇が見られる。これは、速度勾配の最大である壁面では運動エネルギーの熱への変換が大きいためであると考えらる。 T_c については、 T_w とは逆に多少の温度低下が見られる。これは、亀裂中心面での流速が、高速であるために起こる断熱冷却のためであると考えられる。

4. おわりに

本研究により圧力勾配は外気に近い場所だけでなく、貯蔵空洞の端部でも大きくなるのが分かった。それに伴い、空気の流速、及び温度変化もこの圧力勾配の大きくなる所で大きくなるのが分かった。しかし、実際の空洞から漏出する空気は幾つかの複合された経路を流れるので、このような複合経路を流れる漏出空気の解析を今後行う必要がある。