

神戸大学工学部

学生員○ 西條啓文

三井建設(株)技術研究所

正会員 山地宏志

神戸大学大学院自然科学研究科

正会員 中山昭彦

1. 序論

人工的に掘削された地下空洞に高圧気体を貯蔵する CAES (Compressed Air Energy Storage)¹⁾ を実用化するには安全性、経済性の点で十分な検討が必要である。ライニングを施さない素掘りの空洞は経済的であるが、自然岩盤には少なからず不連続面である亀裂が存在し、漏気の原因になる²⁾。高圧空気の岩盤亀裂内での挙動や力学的特性については不明な部分が多い。

高圧ガス貯槽から漏気する流れは高速となることが予想され、大きな圧力勾配と粘性力が釣り合う流れで、圧縮性流体の既存の研究の大半である緩やかな流れを対象としたものとは異なる。また、膨張による仕事や摩擦による発熱も考慮する必要がある。本研究では岩盤亀裂内の空気の流れ及び温度分布等の数値解析のモデルを提案し、幾つかの解析結果よりその妥当性の検討を行う。亀裂内の流れについては空気のための単相流とし、地下水、水圧の影響は考慮しない。

2. 圧縮性流体に関する基礎式

一般に岩盤の亀裂寸法、曲率半径は亀裂幅と比較すると非常に大きい。したがって、亀裂内の空間は近似的に 2 次元の平面として扱える。運動方程式は速度を亀裂垂直方向に 2 次式の分布として仮定し、亀裂中央で評価する。質量保存式は状態方程式を代入し、圧力と温度の 2 変数についての式として亀裂中央で評価する。岩盤亀裂内の温度分布は亀裂垂直方向に 4 次式の分布として仮定し、岩盤の亀裂壁面温度、亀裂中央温度、亀裂壁面での熱伝達量の 3 変数で表す。それをエネルギー保存式に代入し、岩盤の亀裂壁面と亀裂中央で評価すると次のようになる。

$$\text{岩盤亀裂壁面;} \frac{\partial T_w}{\partial t} = \text{Diffc} + \text{Disw} \quad (1) \quad \text{岩盤亀裂中央;} \frac{\partial T_c}{\partial t} = \text{Diffc} + \text{Comp} - \text{Conv} \quad (2)$$

$$\text{Diffw} = \frac{1}{\rho C_p} \left[\frac{32k}{b^2} (T_c - T_w) - \frac{10}{b} q_w \right] \quad (3) \quad \text{Disw} = \frac{1}{\rho C_p} \left[\frac{16\mu}{b^2} (u_c^2 + v_c^2) \right] \quad (4)$$

$$\text{Diffc} = \frac{1}{\rho C_p} \left[-\frac{16k}{b^2} (T_c - T_w) + \frac{2}{b} q_w \right] \quad (5) \quad \text{Comp} = \frac{1}{\rho C_p} \left[u_c \frac{\partial p}{\partial x} + v_c \frac{\partial p}{\partial y} \right] \quad (6)$$

$$\text{Conv} = u_c \frac{\partial T_c}{\partial x} + v_c \frac{\partial T_c}{\partial y} \quad (7)$$

ただし、 u_c 、 v_c は亀裂中央の速度の亀裂長さ方向の成分、 ρ は空気の密度、 C_p は空気の定圧比熱、 k は空気の熱伝導率、 b は亀裂幅、 p は圧力、 T_w は岩盤亀裂壁面温度、 T_c は岩盤亀裂中央温度、 q_w は空気から岩盤への熱伝達量、 μ は粘性係数、 t は時間である。岩盤への熱伝達は温度変化の範囲より、亀裂垂直方向の一次元拡散方程式とする。熱伝達量は亀裂壁面の垂直方向の無限遠において初期温度が保持されるという境界条件から、岩盤壁面温度の履歴より求める。

3. 数値解析モデル

図-1 のような岩盤亀裂面を考える。大きさは $28\text{m} \times 16\text{m}$ とする。亀裂中央に高圧ガスを貯蔵する空洞があるとする。空洞から亀裂への流出については図上の空洞上側太線部を開口部とする Case 1 と空洞左側縞線部を開口部とする Case 2 を考える。開口部

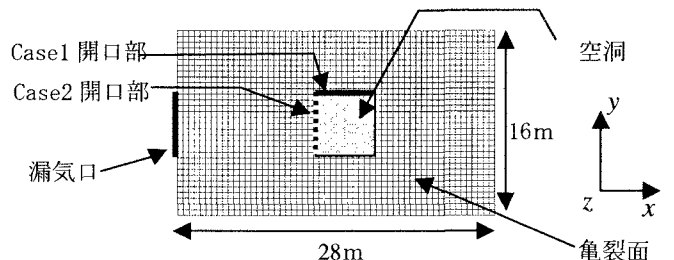


図-1 解析に用いた岩盤亀裂の計算モデル

を除く空洞周りの他の部分は不透面とする。亀裂面内は図上の左側中央部の漏気部のみで外気に接し、境界で圧力は大気圧となる。圧縮空気の貯蔵条件は最初の 200 秒間で圧力は 1 気圧から 2 気圧に、温度は 20℃から 21℃に定常変化するとし、その後それぞれ一定の圧力、温度を保つものとする。計算に用いた物性値は気体定数を 29.72(KJ/K)、定圧比熱を 0.2403 (KJ/K・kg)、比熱比を 1.4、熱伝導率を 6.64×10^{-6} (KJ/m・sec・K)、粘性係数を 1.86×10^{-5} (Pa・sec)、亀裂幅を 1.5(mm)とする。また、格子はレギュラー格子、格子数は 33×57 とする。

4. 解析結果

解析結果を図-2、図-3に示す。なお、等圧線は 0.25atm、岩盤亀裂中央温度の等温断面は 0.1℃、岩盤亀裂壁面温度の等温断面は 20℃の間隔である。

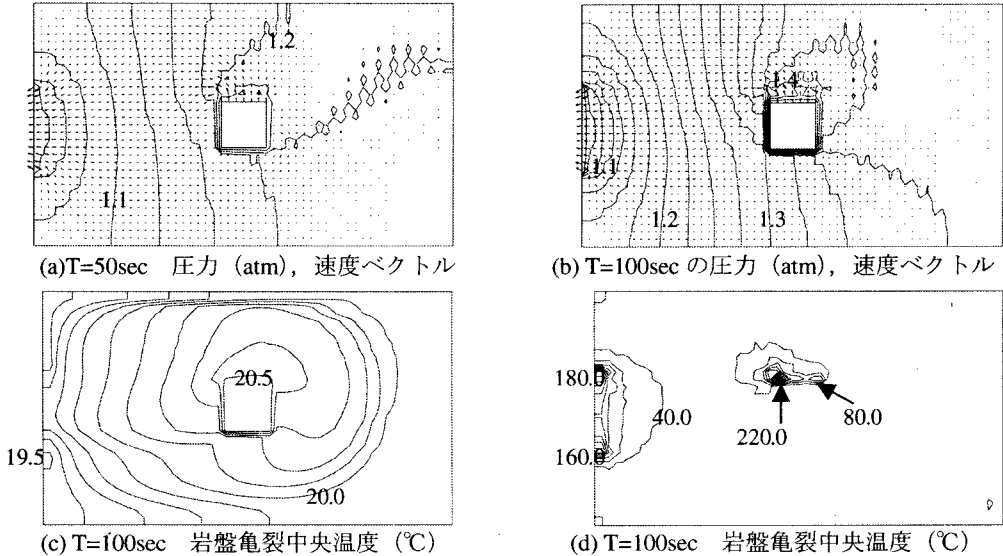


図-2 Case1 の速度ベクトル, 圧力, 温度分布図

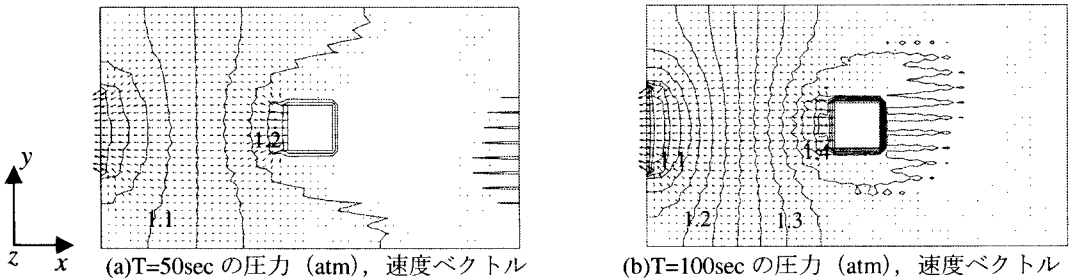


図-3 Case2 の速度ベクトル, 圧力分布図

Case1 を見ると、岩盤亀裂内では空洞から漏気部に向かい圧力勾配が形成されているが、時間が進むにつれ空洞流出部、亀裂漏気部付近で大きな勾配を見せた。温度状態は亀裂中央では、さほど大きな変化は見えなかったが、亀裂壁面では空洞流出部、亀裂漏気部付近で局所的に温度は上昇した。Case2 では空洞流出部から漏気部まで直線的な流れとなっているのがわかる。両方の Case で空洞流出部、亀裂漏気部付近で特に計算値が振動する傾向が見られ、より高压に達した時の状態を解析するためにメッシュ数の増加、スタッガード格子の採用等により計算モデルを安定化させることが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 黒崎晏男：環境と省エネルギーのためのエネルギー新技術体系, pp.1002-1015, 1995.
- 2) 中田雅夫, 山地宏志, 櫻井春輔, 志田原巧：土木学会論文集, No.610/III-45, pp.31-42, 1998.