

神戸大学 正会員 中山 昭彦 桜井 春輔 川谷 健
三井建設 正会員 ○山地 宏志 中田 雅夫 三澤 留津子

1. はじめに

近年注目される岩盤空洞内の高圧ガス貯蔵においては、貯蔵性能を支配する主因が、岩盤中の亀裂面や岩盤-プラグ境界を通した漏気の原因発生と考えられる。従って、貯蔵空洞の漏気対策や漏気発生時の安全対策等を検討する場合、これらの漏気、すなわち亀裂面を通る圧縮性流体の挙動を把握する必要がある。本文は、このような圧縮性流体の挙動を評価することを目的として単一亀裂面中の挙動を検討した結果を報告するものである。

2. 亀裂面中の圧縮性流体の流体力学モデル

表-1は、圧縮空気貯蔵のシミュレーションを試み、予想される空気力学的特性をまとめたものである¹⁾。上半分はシミュレーションを用いた仮定値であり、下半分はそれに基づき計算した推定値である。推定される空気流速に大きな幅があるのは仮定値の漏出量と亀裂幅の組み合わせによって生じたものである。表-1で注目されるのは亀裂幅レイノルズ数がほぼ漏出質量流量に比例する点にあり、その値は最小で12、過大に見積もっても240とかなり小さい。従って、流れは層流であるのは勿論、流れによる慣性項も無視できるストークス流となる。

次に、亀裂面内の流れ場の座標について考えよう。一般に亀裂面の走行は数十メートルから数百メートルに及ぶが、有効な割れ目幅は数十分の一ミリメートルと数オーダーの差があり、亀裂面に直交する流れの成分は無視される。また、亀裂面の走向に沿う曲率も、曲率半径が有効割れ目幅に比べると数オーダー大きいことから無視し得る。これらの仮定の下に図1に示す座標系と式(1)に示す運動方程式が得られる。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (1)$$

ここで、 u 、 v は図1に示す座標系の x 、 y 方向流速成分を、また p 、 ρ 、 μ は各々空気の圧力、密度及び粘性係数を示す。この時、質量及びエネルギー保存則は各々次式のように示される。

質量保存則

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

エネルギー保存則

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \mu \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

表-1 圧縮空気貯蔵施設周辺の亀裂の空力特性

貯蔵圧縮空気圧	30~60 気圧
漏出率	10 m ³ /k
亀裂間隙厚	10~100 μm
亀裂開口幅	0.5~1 m
有効亀裂数	10
圧縮空気流出量	0.5~2 m ³ /s
大気圧下での流出量	1.8~360 m ³ /s
亀裂厚に基づくレイノルズ数	12~240
マッハ数	0.005~?
断熱温度変化	0.005~4 °C

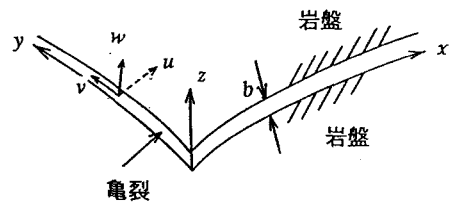
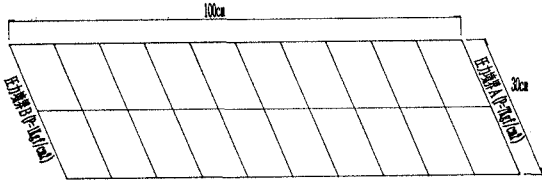


図1 亀裂内流れ場の座標定義

ここで C_p は空気の定圧比熱を、また k は空気の熱伝導率をそれぞれ示す。これら式(1)から式(5)を連立に u 、 v 、 P 、 T 、 ρ について解くには、次の状態方程式を用いれば良い。

$$\frac{P}{\rho} = RT \tag{4}$$

3. 数値解析コードとその検証



例題 要素数=40
節点数=33 シミュレーション：亀裂面内圧縮性流体の一次元流れ

図2 解析モデル

表-2 解析に用いた諸元

亀裂開口幅	0.05 mm
粘性係数	1.76×10^{-5} kgf·s/m ²
n	1.1

上述の支配方程式群を基に、亀裂面内圧縮性流体解析コードJFLOWを作成し、その検証を試みた。検証にあたっては、亀裂面内の一次元流れを解析し、定常理論群との比較を行った。

図2に解析モデルを、また表2に解析に用いた諸元を示す。ここでは、解の安定性及び収束性を評価する為、粘性係数を 10^{-5} とした。図3に各時間ステップ毎の亀裂面に沿う圧力分布を示す。尚、この解析では空気温度を一定とした。

図3に示すように、空気圧は徐々に出口面方向へと伝播して行く。定常時における圧力分布は、空気流入面の圧力が出口付近まで保存され、出口付近で急激に低下する特徴的な分布を示す。尚、定常時における圧力分布の理論解は次式のようなものである(図3参照)。

$$\frac{P}{P_0} = \left[\left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1+\frac{1}{n}} - 1 \right\} \frac{x}{L} + 1 \right]^{1+\frac{1}{n}} \tag{5}$$

図3に示す様に、定常次における理論解と数値解の誤差はほとんど発生しておらず、最大で0.1%以下である。

上述の様に、解析コードJFLOWは精度安定性とも圧縮性流体の解析コードとして使用に耐えるものと判断される。

参考文献

1) 中山昭彦他；岩盤空洞内圧縮空気貯蔵に関する流体力学的考察、土地造成工学研究所報、No. 10, p139~148, 1992

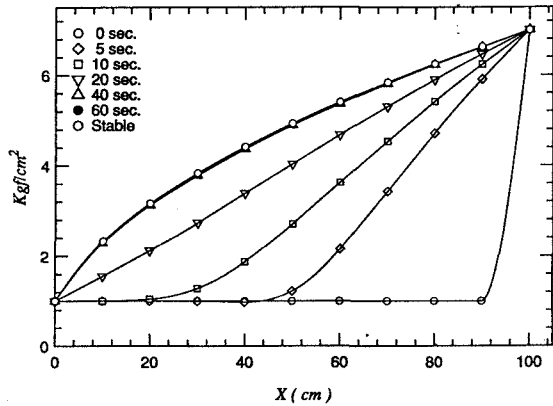


図3 亀裂面に沿う圧力分布