

ライニング式高圧気体地下貯蔵における漏洩部のモデル化に関する検討

清水建設 技術研究所 正会員 ○米山 一幸、 正会員 奥野 哲夫
同上 フェロー会員 石塚 与志雄、 正会員 八田 敏行

1. はじめに

ライニング式高圧気体貯蔵は、気密性を有するライニング材を地下空洞の壁面に施工することにより、比較的浅深度の岩盤中に高圧の気体を貯蔵する技術であり、圧縮空気貯蔵などに既に適用されている。この方式では、一般に貯槽付近の地下水位よりも高い圧力で気体を貯蔵するため、ライニング材に万一破損などが生じた場合は貯蔵気体が貯槽外へ漏洩し、周辺岩盤内に拡散することが予想される。この現象を予測するためには、一般に用いられている地下気液二相流解析技術が有効であるが、漏洩部（ライニング材破損部）における気体流動を解析上で適切にモデル化することが重要であり、検討課題となっている。本検討では、漏洩部のモデル化方法の一案として、先細ノズルにおける等エントロピー気体流れの理論式により気体流量を計算する方法を提案し、この計算機能を組み込んだプログラムによりモデル解析を実施した結果を報告する。

2. 漏洩部のモデル化方法

地下二相流解析において、モデル領域へ気体の流入する部分の境界条件としては、①流入部の浸透率と境界圧力を指定する方法、または、②流入量を指定する方法が通常用いられる。これらの方法をライニング式高圧気体貯蔵の漏洩部のモデル化へ適用する場合、①の方法については漏洩部の気体流れが層流条件を満たさない場合に誤差が大きくなる点、②の方法については漏洩部近傍の地盤内の圧力の変化による漏洩量の変化が考慮できない点が問題となる。

このため、本検討では次式の先細ノズルにおける等エントロピー気体流れの理論式より漏洩部の気体流量を定義する方法を用いた。

$$m = A \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{2\kappa p_0 \rho_0}{\kappa - 1} \left\{ 1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right\}} \quad \text{---- (1)}$$

上式で m は漏洩部の気体流量（質量流量）、 A は漏洩口の断面積、 p_0 は貯槽内の気体圧、 p は漏洩口に隣接する地盤内の気体圧（出口圧力）、 κ は気体の比熱比を示す。図 1 には、(1)式で貯槽内圧 p_0 を一定とした場合の出口圧力 p と気体流量 m の関係を示す。 p が p_0 に等しいとき流量 m は 0 であり、 p が p_0 より低下するに従って m は増加する。しかし、 p が p_c まで低下すると、漏洩部の気体流速は音速に達し、 m は最大値となりそれ以上増加しなくなる。この圧力 p_c は臨界圧力と呼ばれ、次式より求められる。

$$p_c = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} p_0 \quad \text{---- (2)}$$

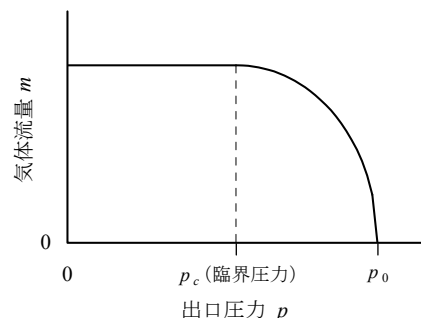


図 1 ノズル流れにおける気体流量

表 1 解析ケース

漏洩部モデル	地盤浸透率	
	$2.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$	$5.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$
ノズル流れモデル	Case 1A	Case 2A
定圧条件 ($p_0=10 \text{ MPa}$)	Case 1B	Case 2B
定流量条件 ($m=0.24 \text{ kg/sec}$)	Case 1C	Case 2C

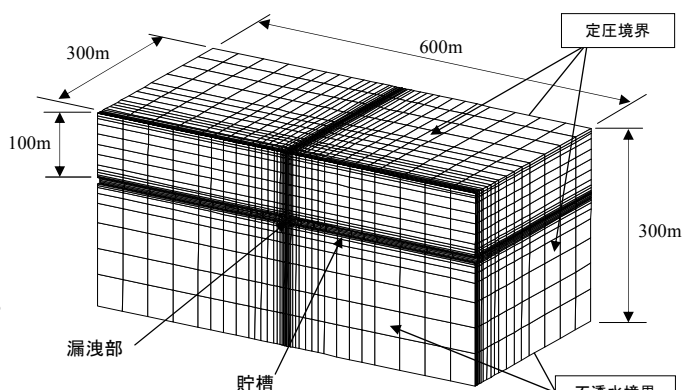


図 2 解析モデル（1/2 モデル）

キーワード： 高圧気体貯蔵、ライニング、漏洩、二相流、数値解析

連絡先： 〒105-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL. 03-3820-5287 FAX. 03-3820-5959

3. モデル解析

(1)式に基づくノズル気体流れの計算機能を組み込んだ地下二相流解析プログラム（積分差分法）を作成し、モデル解析を実施した。解析モデルとして深度 100m のトンネル型貯槽を想定し、貯蔵気体は空気、貯蔵圧は 10MPa とした。漏洩口としては、貯槽天端に面積 10mm^2 の円孔状の破損が生じた場合を想定した。提案したノズル流れモデルの他に、前節の①の方法で円管内の層流の理論式より漏洩口の浸透率を設定したモデル（定圧条件）、②の方法で空気流量を臨界圧力到達時の最大流量としたモデル（定流量条件）についても解析を実施した。解析ケース、解析モデルを表 1、図 2 に示す。また、解析結果を図 3、図 4、図 5 に示し、結果の概要を以下に列記する。

- 1) 定圧条件のケースでは、浸透率 $2 \times 10^{-14}\text{m}^2$ では流量（図 3）、出口圧力（図 4）ともノズル流れモデルとほぼ等しいが、 $5 \times 10^{-14}\text{m}^2$ では流量が(1)式による最大流量以上になり、現実には起こりえない結果となっている。これは、流量が大きい場合、層流の理論式より漏洩口の浸透率を設定する方法の誤差が大きくなることを示している。これにより、ノズル流れモデルと定圧条件モデルの貯槽周囲の空気の拡散状況の解析結果も異なってくる（図 5）。
- 2) 定流量条件のケースでは、浸透率 $5 \times 10^{-14}\text{m}^2$ の場合は初期段階を除いて流量、出口圧力ともノズル流れモデルとほぼ等しいが、 $2 \times 10^{-14}\text{m}^2$ では出口圧力が貯蔵圧以上になっており、実際の現象と矛盾する。これは、後者のケースでは出口圧力が臨界圧力まで低下しないためであり、地盤の浸透率が低い場合は定流量条件による漏洩部のモデル化が困難であることを示している。
- 3) ノズル流れモデルを用いたケースは、各ケースとも実際の現象と矛盾のない結果を示す。

これらの結果より、ノズル流れモデルを用いることにより、定圧条件、定流量条件よりも現実に近い解析が可能と考えられる。

4. まとめ

ライニング式高圧気体貯蔵の漏洩予測解析において、ノズルの気体流れの理論式により漏洩部をモデル化する方法を提案した。提案した方法によるモデル解析を実施した結果、従来の方法よりも実際の現象に近い予測解析が可能であることが示された。

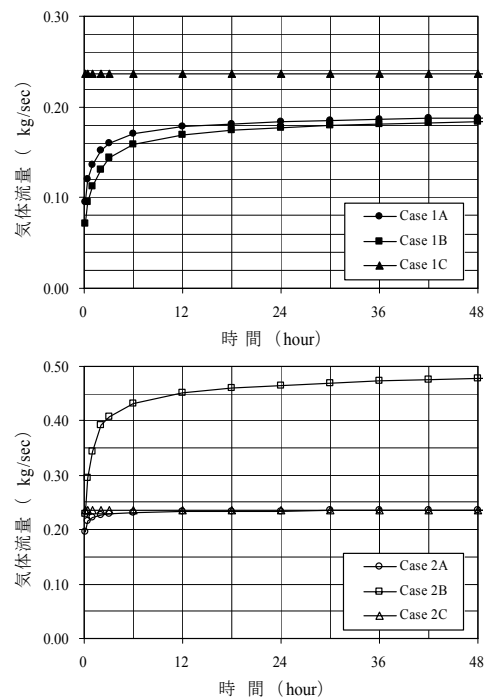


図 3 空気流量の時間変化

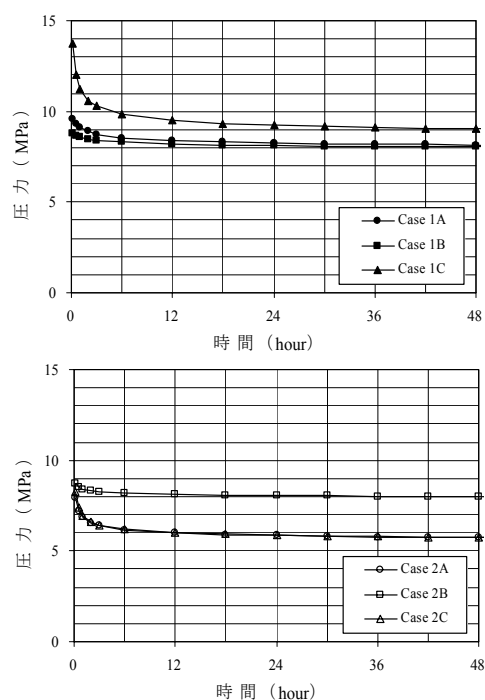


図 4 出口圧力の時間変化

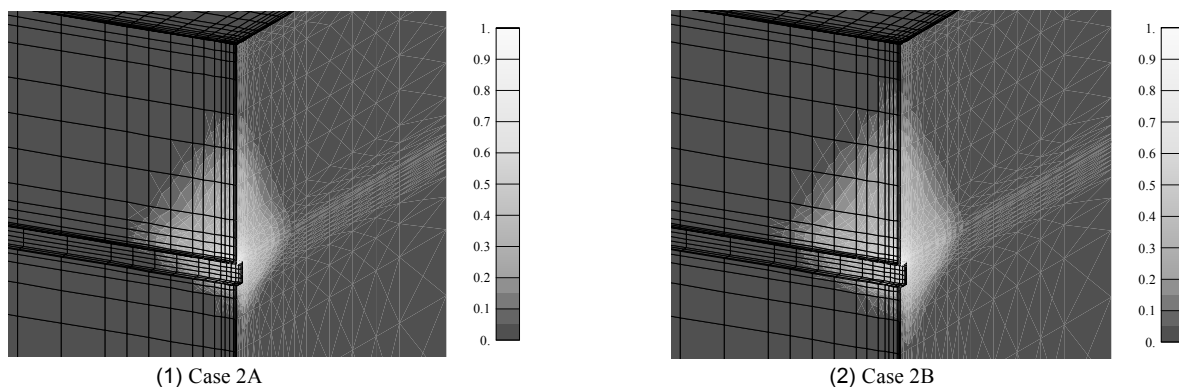


図 5 貯槽周囲の空気飽和率分布（時間 $t=24$ hour）