

高圧ガス貯蔵岩盤タンク設計のための 新しい岩盤の変形・浸透流解析手法の提案

Design of gas storage rock cavern by the hydro-mechanical coupled discrete model

青木謙治* 水戸義忠* 松岡哲也** 近藤大介**

Kenji AOKI, Yoshitada MITO, Tetsuya MATSUOKA, & Daisuke KONDOH

Energy storage plants in rock cavern with high internal pressure, such as LPG storage cavern, CAES (Compressed Air Energy Storage), have the possibility of LP Gas or air leakage, accompanying fracture initiation, propagation and coalescing to form continuous fracture networks around the cavern. In order to plan and design the energy storage plant, it must be required to estimate behavior of fracture propagation induced by internal pressure. The discrete particle model which simulate inter-particle mechanics explicitly, can be coupled with fluid flow mechanics, and often provide a more realistic simulation of rock mass deformation and fracture than continuum model, is examined in this study.

Key Words: LPG, storage, rock mass, Distinct Elemental Method (DEM), hydro-mechanical coupled analysis

1. はじめに

新しい岩盤内エネルギー貯蔵施設として注目されている水封式の LPG 岩盤地下貯蔵タンク・Compressed Air Energy Storage(CAES)の基本的な設計概念は、岩盤空洞の周囲に存在する地下水圧を貯蔵圧よりも高く保つことで貯蔵ガスの漏洩を防ぐというものである。そのためこれら岩盤タンクの設計にあたっては、高い内圧による周辺岩盤での亀裂ネットワークの発生・進展の予測やそれに伴うガスの流出の適正な評価が不可欠となる。そこで本研究では粒状体個別剛体要素法^[1]を用いた力学的・水理学的連成解析手法を構築し、その妥当性を評価・検証するため、目的とする LPG 貯蔵岩盤タンクなどと岩盤に対する要求機能が類似した施設である Air Cushion Surge Chamber(ACSC)において生じた漏気現象の記録^[2]を用い、解析によって得られた結果と実測値とを比較した。

2. 解析手法

2.1. 基本概念

本研究では Portyondy と Cundall^[3]によって提案された個別剛体要素法による力学的・水理学的連成モデルの概念を発展させた岩盤-浸透流連成解析手法を構築した。このモデルでは、図-1 のように岩盤を結合された粒子の集合で表す。すなわち岩盤の空隙を各粒子の接点を結んだ多角形”Domain”で表し、岩盤の亀裂を隣接する Domain 間の接点”Channel”で表す。Domain と Channel は粒状体の変形に対応して以下の仮定のもと幾何学的に変化する。

*工学博士 京都大学大学院 工学研究科

**修士 京都大学大学院 工学研究科

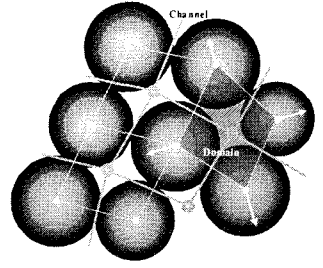


図-1 連成モデルの概念図

- ① 粒子や接点応力の変化によって Channel 幅とそれに伴う Channel の水理学的性質が変化する。
- ② Domain の幾何学的体積変化により、Domain の圧力が変化する。
- ③ Domain の圧力変化により Domain を囲む粒子は押し動かされ、新たな Channel-Domain 構造を構築する。

2.2. 解析手法の定式化と計算手順

本解析では全ての Channel での流量計算と、全ての Domain での圧力計算をタイムステップ毎に交互に行っていくが、その計算手順は以下のとおりである。

- ① 2つの隣り合う Domain 間の圧力差をもとにした Channel 内の流量の計算

隣接した Domain 間を結ぶ Channel は、不連続な岩盤と水理学的に等価な亀裂と考えることができる。ここでこの亀裂を平行平板と仮定すると、気体流量 q_G および液体流量 q_L は流出側 Domain の各流体の存在割合を用いて、次式のように表すことができる。

$$q_G = \frac{V_{Gi}}{V_i} \bigg|_{source} \cdot \frac{ga^3}{12\nu_G} \frac{\Delta h}{l} \quad (1)$$

$$q_L = \frac{V_{Li}}{V_i} \bigg|_{source} \cdot \frac{ga^3}{2\nu_L} \left(\frac{\Delta h}{l} - \rho_L \mathbf{g} \mathbf{n}_c \right) \quad (2)$$

ここに、 V_G , V_L = Domain の気体、液体体積、 V = Domain の体積、 ν_G , ν_L = 気体、液体の粘性、 $\mathbf{n}_c$ = Channel の単位方向ベクトル、 $\mathbf{g}$ = 重力加速度ベクトル、 a = Channel 幅である。 $|_{source}$ は流出側の Domain を示す。なお液体の流量は Domain の圧力差だけでなく重力の影響を受けることとする。Channel 幅 a は、基底亀裂開口量を用いた Portyondy と Cundall¹⁾の方法によって粒子の位置や接点応力から計算する。

- ② Domain の流体体積変化とそれに伴う圧力の計算

各 Domain におけるタイムステップ Δt 毎の流体体積の増分 ΔV は次式とする。

$$\Delta V = \sum q \Delta t + \Delta V_d \quad (3)$$

ここに ΔV_d は Domain 体積の幾何学的変化量、 $\sum q$ は各 Domain における周辺 Channel からの流体の流入量である。ここで、 Δt を以下の式で与えた。

$$\Delta t = \frac{l_M}{v_M} \quad (4)$$

ここに l_M = 平均 Channel 長、 v_M = 解析対象地域における平均動水勾配とする。

次に、圧力変化に関して気体（貯蔵ガス）と液体で異なるモデル式を与える。

気体の場合、等温変化式を用いる。

$$P_i V_{Gi} = P_{i-1} V_{Gi-1} \quad (5)$$

ここに、 P_i = ステップ i におけるDomainの気体圧力、 V_{Gi} = ステップ i におけるDomainの気体体積である。
液体の場合、以下の弾性変化式を用いる。

$$P_i - P_{i-1} = -K_f \frac{V_{Li} - V_{Li-1}}{V_{Li-1}} \quad (6)$$

ここに、 V_{Li} ：ステップ i におけるDomainの液体体積、 K_f ：流体バルク係数である。

また、Domain の体積 V_d' は、初期条件を与える際に見かけ Domain 体積に間隙率をかけた値として算出される。
この見かけ Domain 体積は周辺粒子の接点を結んだ多角形と定義することとする。

$$V_d' = w \sum_k \frac{(y_k + y_{k+1})(x_k - x_{k+1})}{2} \quad (7)$$

ここに、 w は単位幅であり、 (x_k, y_k) は多角形の各頂点である。このときステップ i における Domain 体積変化は m_d を用いると次式によって与えられる。

$$V_{di+1} - V_{di} = m_d (V_{di+1}' - V_{di}') \quad (8)$$

③ Domain の圧力変化に伴う粒子の力学的挙動の計算

粒子に働く物体力のベクトルは次式で表される。

$$\mathbf{F}_k = P \mathbf{n}_k s \quad (9)$$

ここに、 $\mathbf{n}_k$ = 粒子間接点を結ぶ線分に対する単位法線ベクトル、 s = 線分の長さである。

④ Domain の幾何学的変化に伴う圧力変化の計算

式(5)(6)を用いて Domain の幾何学的変化に伴う圧力変化を計算する。

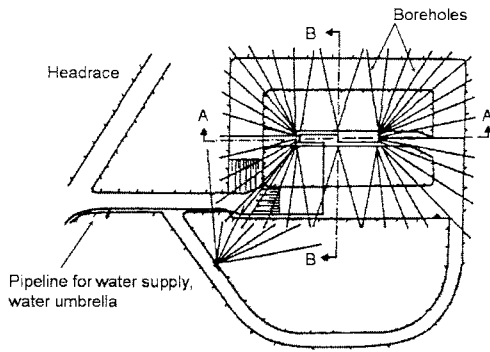
3. 解析手法の検証

3.1. 検証対象

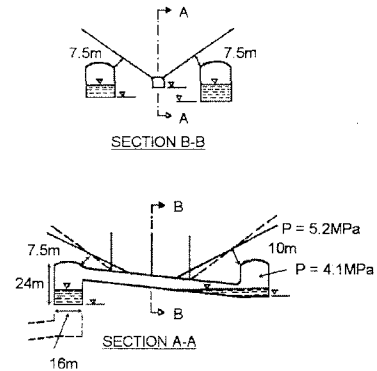
前章において述べた解析手法の妥当性を評価・検証するため、ノルウェーの Kvittdal 水力発電所の Air Cushion Surge Chamber (ACSC)において生じた漏気現象の数値解析を行い、実測結果と比較した。ACSC とはサージシャフトにかわる経済的な水力発電所の調圧設備であり、圧縮空気による高い内圧が作用することから高圧ガス貯蔵岩盤タンクと類似した要求機能を持つ。また今回対象とした Kvittdal 地点の ACSC では空洞内空気の漏洩(漏気現象)とウォーターカーテン設備の設置による漏気現象の抑制を経験しており今回の検証対象として妥当であるといえる。

3.2. Kvittdal 地点の概要

Kvittdal ACSC の概要は図-2 に示すとおりで、B(幅) = 16m, Z(高さ) = 17-24m, L(長さ) = 386m, A_v (断面積) = 260-370m², A_h (ウォーターベッド表面積) = 5,200m², V_t (空洞体積) = 110,000m³, V_a (空気容量) = 70-80,000m³, 矩形 115×78m である。本地点の構成岩は先カンブリア時代の灰色～黒灰色の石英及び長石を含む硬質な角閃石片麻岩(ミグマタイト状片麻岩)であり、一軸圧縮強度 160MPa, 引張強度 15MPa, ヤング率 35GPa, ポアソン比 0.11 という値が得られている。また水圧破碎試験による応力測定結果から水平方向の最小岩盤主応力として 5.2MPa が得られている。岩盤の透水係数は平均で 2×10^{-16} m² である^[4]。



(a) Horizontal view



(b) Vertical section

図-2 Kvilldal ACSC の概要

3.3. Kvilldal ACSC における漏気現象

設計当初においては Kvilldal 地点では、岩盤性状が良質で透過係数が低い値を示したことから空洞周辺には高い間隙水圧が作用するものと期待されていた。しかしながら実際には許容範囲を超える $240\text{Nm}^3/\text{hr}$ という漏気量が観測されたため、空気注入作業を中断せざるを得なかった。その後、ウォーターカーテンの設置により、空洞周辺岩盤内の流量および間隙水圧が大きく改善され、物理的漏気量がほぼゼロとなった。

3.4. 解析モデル

図-2 に示したように Kvilldal ACSC は矩形形状であり、今回は図-2(b)に示す B-B 断面の左半部を対象とし図-5 に示すモデルを構築した。空洞部は高さ：24m、幅：16m、ウォーターベッド水位：10m とし、解析領域の大きさは $100\text{m} \times 100\text{m}$ の正方形領域とした。また力学的境界条件として、鉛直方向は岩盤の密度と土被りから 13.7MPa と設定し、水平方向は水圧破碎試験結から得られた最大水平応力と推定された 5.2MPa と設定した。一方、水理学的境界条件としては右側境界で圧力分布が対称であると仮定して不透水境界とし、他の外側境界は圧力固定条件とした。なお貯蔵空洞については気体部とウォーターベッド部をそれぞれ大きな Domain とした。

本解析で用いた粒子パラメータを表-1 に示す。これらのパラメータは、別途二軸圧縮試験シミュレーションを行うことによって岩盤の巨視的な挙動に対応するものを設定した。また水理学的パラメータを表 2 に示す。二つの無次元量 m_a と m_d は見かけ間隙率と等価になるように 1×10^{-3} に設定し Channel の基底亀裂開口量 a_0 は実測透水係数 $2 \times 10^{-16} \text{m}^2$ に一致するように $1.58 \times 10^{-5} \text{m}$ に設定した。

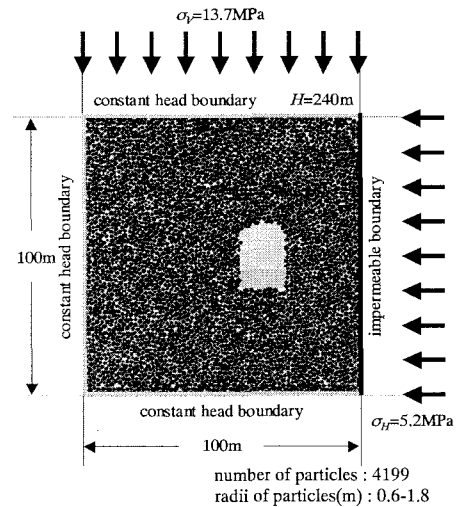


図-3 Kvilldal ACSC 解析モデル

表-1 力学的粒子パラメータ

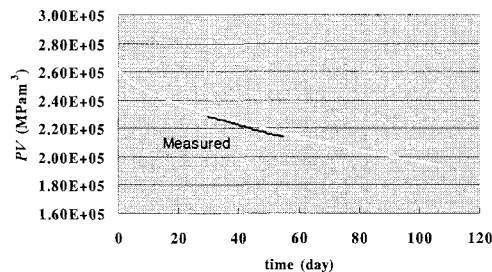
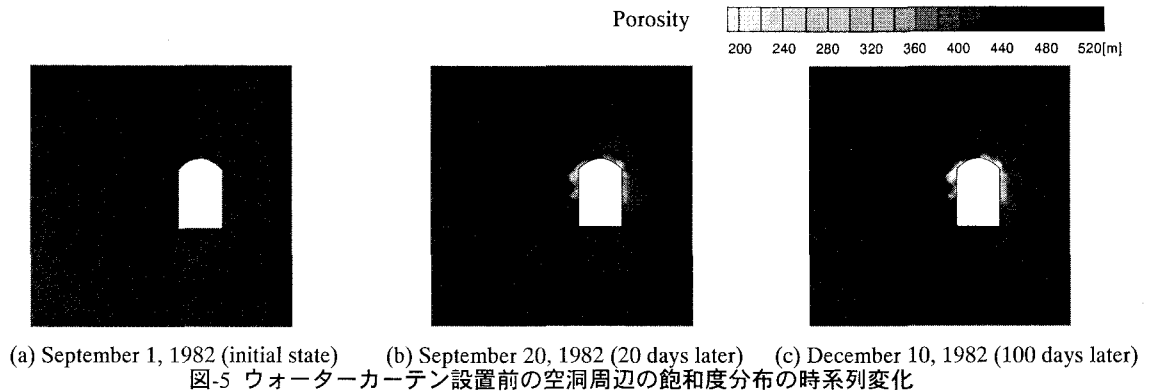
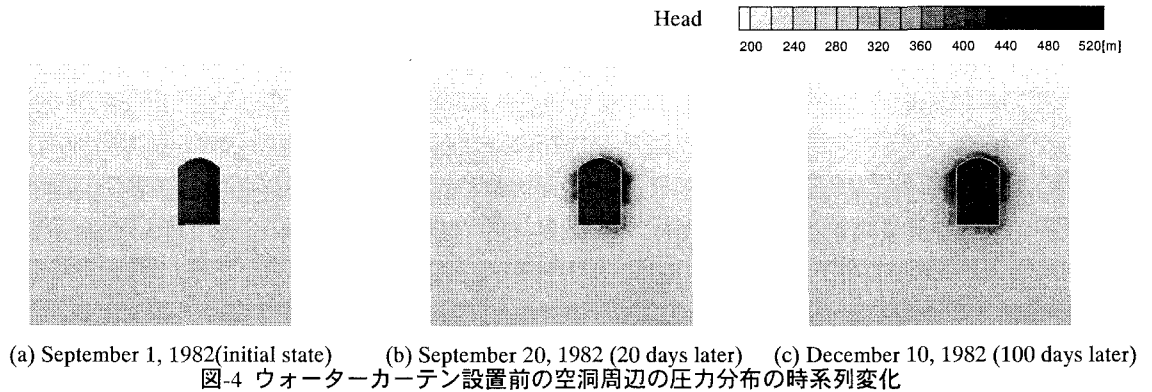
Microproperties	Notation	Unit	Value
Ball-ball contact modulus	E_C	GPa	43
Ball stiffness ratio	k_n/k_s		1.2
Ball friction coefficient	m		0.5
Contact-bond normal strength	s_C	MPa	137
Contact-bond shear strength	t_C	MPa	137

表-2 水理学的パラメータ

Microproperties	Notation	Unit	Value
Multiplier for domain volume	m_d		1×10^{-3}
Residual channel aperture	a_0	m	1.58×10^{-5}
Normal force for calibration	F_0	N	1×10^{12}
Multiplier for channel aperture	m_a		1×10^{-3}

3.5. 解析結果：ウォーターカーテン設置前

図-4, 5 はウォーターカーテン設置前の解析結果であり, それぞれ初期状態, 20 日後, 100 日後の飽和度, 圧力分布を示している. 本図をみると時間の経過に伴い空洞内圧は周辺岩盤に伝播しており, また空気も周辺へと漏洩している. 図-6 は PV 時間的変化を示したものであり解析結果と実測結果はよく一致している. また 25 日間の周辺岩盤への漏気量の平均値も実測結果が $245 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ であるのに対して解析結果は $240 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ となりよく一致している.



3.6. 解析結果：ウォーターカーテン設置後

図-7はウォーターカーテン設置後の解析結果であり、ウォーターカーテンの設置により、圧力分布は8ヶ月後には平衡状態に達している。なお、空洞周辺の水圧は4.1 MPa よりも高い値を示している。また図-8 は空洞内の PV の実測結果と解析結果の比較であり、非常によく一致しており、ウォーターカーテンの設置により漏気が抑制されていることが分かる。

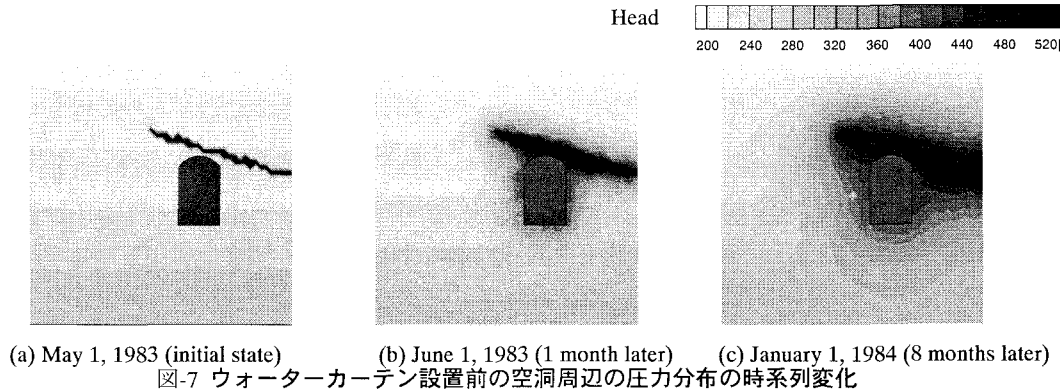


図-7 ウォーターカーテン設置前の空洞周辺の圧力分布の時系列変化

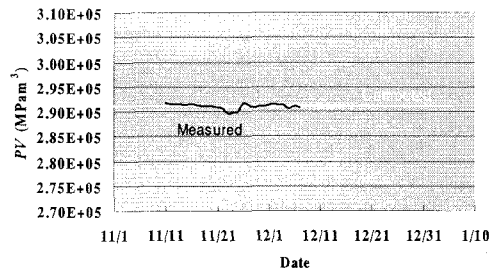


図-8 ウォーターカーテン設置後の空洞内空気の PV 変化

4. まとめ

本研究では、水封式高压ガス貯蔵岩盤タンクの設計において重要な課題となる貯蔵ガスの漏洩を抑制する機能の設計に対する解析手法として粒状体個別剛体要素法を用いた力学的・水理学的連成解析手法を構築した。またその妥当性の検証のため、高压ガス貯蔵岩盤タンクと同様の機能が要求される ACSC において生じた漏気現象の発生時の実測データと、ウォーターカーテン設置後の漏気抑制時の実測データを用い、解析結果と比較して妥当性の評価を行った。その結果、本解析手法が高压ガス貯蔵施設における漏気現象とウォーターカーテンによる抑制を評価できることが分かった。このことから、本研究で構築した岩盤、地下水および貯蔵ガスの相互影響を考慮した力学的・水理学的連成解析手法が、高压ガス貯蔵岩盤タンクの設計において非常に有効な方法であることが検証された。

参考文献

- [1]Cundall, P. A. & Strack, O. D. L. 1979. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies,” *Géotechnique*, 29: 47-65
- [2]Barton, N. et al. 1987. Rock mechanics investigations for unlined pressure tunnels and air cushion surge chambers. *Proc. Int. Conf. On hydro power in Oslo*, pp.641-656.
- [3]Potyondy, D.O. & Cundall, P.A. 1999. Modeling of Notch Formation in the URL Mine-By Tunnel: Phase IV - Enhancements to the PFC Model of Rock, Itasca Consulting Group, Inc., Report to Atomic Energy of Canada Limited, Ontario Hydro Nuclear Waste Management Division Report No. 06819-REP-01200-10002-R00.
- [4]Kjorholt, H. et al. 1989. Water Curtain performance at the Kvilldal air cushion. *Proc. Int. Conf. On storage of gases in rock caverns*, pp.26-28.