

岩盤タンクの気密性評価における 応力-浸透流連成解析手法の適用性

青木謙治^{1*}・水戸義忠¹・田尾拓也¹・張傳聖¹・田坂嘉章²・前島俊雄³

¹京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

²東電設計株式会社 技術開発本部（〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3）

³（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構（〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番）

*E-mail:aoki@kumst.kyoto-u.ac.jp

本研究では、水封式高压ガス貯蔵岩盤タンクの気密性評価に対する解析手法として粒状体個別要素法とChannel-Domain Network解析を用いた3次元の応力-浸透流連成解析手法を構築した。またその適用性を把握するため、高压ガス貯蔵施設であるair cushion surge chamberにおける漏気発生時ならびにウォーターカーテン設置後の漏気抑制時の実測データと本解析手法で得られた解析結果とを比較したところ、両者がよく一致することが確認された。このことから、本研究で構築した3次元の応力-浸透流連成解析手法が、高压ガス貯蔵岩盤タンクの気密性の評価に対して高い適用性を有することが示された。

Key Words : *coupled hydromechanical modelling, distinct element method, channel-domain network model, gas storage cavern, 3 dimensional simulation*

1. はじめに

現在、世界最大級の規模を有するLPG地下備蓄基地が石油天然ガス・金属鉱物資源機構によって波方・倉敷の2地点で建設されている。この貯蔵方式は、液化石油ガスを常温高压で水封原理により岩盤空洞内に貯蔵するもので、地下水面下の岩盤空洞にコンクリートやスチールなどのライニングを行わず、貯槽周辺の地下水压を貯蔵圧力より高く保持し、貯槽内へ向かう岩盤内の地下水の作用により液相および気相の漏洩を防止するものである。

プロパンは15°C、0.75MPaで液化することから設計内圧は0.95MPaとされている。このような高い内圧に対する液密と気密機能を確保するためには、貯槽上部にボーリング孔を系統的に配置して人工的に地下水を供給する人工水封システムが設置され、建設時から作業までのすべて期間を通じて安定した水封機能を確保する方策が必要となる。

LPGに限らず高压ガス貯蔵を目的とした岩盤空洞の気密性を確認するうえでは、空洞に内圧を作用させることに伴う、空洞周辺の力学的・水理学的な挙動を原位置で把握することが重要となる。

このような岩盤空洞の気密性の評価にあたっては、岩盤-地下水-貯蔵ガスの相互挙動を考慮し、空洞の力学的・水理学的安定性を設計段階および施工途上で綿密に

検討する必要がある。従来の内圧の低い燃料貯蔵用空洞の気密・液密性の評価には、空洞の力学的安定解析と地下水浸透流解析とをそれぞれ別個に行う方法が用いられてきた。しかしながら、このような方法では、岩盤の亀裂の力学的挙動とそれに伴う間隙水压・間隙ガス圧変化との関係を十分に考慮することはできない。そこで、本研究では、このような高压ガス貯蔵岩盤タンクに対する気密性の評価を目的として、岩盤-地下水-貯蔵ガスの相互作用を考慮した応力-浸透流連成解析手法の構築を試みた。

2. 応力-浸透流連成解析手法

気密試験を含め、貯蔵空洞の気密性を評価するにあたっては、貯蔵ガス圧による岩盤の変形と地下水・貯蔵ガスの浸透による3次元の応力-浸透流連成挙動を考慮する必要がある。特に、間隙水压の伝播に伴う選択的な透水経路の発生や進展の現象を適正に評価することが重要である。

そこで、本研究では、岩盤の力学的挙動については、3次元の粒状体個別要素法（DEM）²⁾を適用し、貯蔵ガス・地下水の浸透流のモデル化に際しては、粒状体個別要素法との連成を目的として考案されている3次元の

Channel-Domainによるnetwork解析手法²⁾を適用することとした³⁾。

粒状体個別要素法は、岩盤を粒子の集合体でモデル化し、岩盤の巨視的な挙動を粒子の挙動によって表す方法である。隣接した粒子間の弾性変位が線形ばね理論に、亀裂発生・岩盤破壊が粒子結合の引張・せん断強度に、破壊後挙動が粒子間の摩擦力に従うことにより亀裂の発生・進展と岩盤の変形を取り扱う。一方、network解析は、流量を計算するChannelと圧力を計算するDomainによって亀裂内を流れる地下水・貯蔵ガスの流れを表す方法である。

ここで、DomainとChannelは次の仮定条件のもと幾何学的に変化するものとする。

- 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。
- ②Domainの幾何学的体積変化により、Domainの圧力が変化する。
- ③Domain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。

3. 応力 - 浸透流連成解析手法の適用性

ここでは、提案した解析手法の妥当性を検証するため、ノルウェーのKvilldal水力発電所のAir Cushion Surge Chamber (ACSC)において生じた漏気現象⁴⁾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压ガス貯蔵岩盤タンクと類似した要求機能を持つ。Kvilldal地点のACSCは、空洞内空気の漏洩（漏気現象）とウォーターカーテンの設置による漏気現象の抑制が行われた世界的にも数少ない事例であり、提案した解析手法の検証対象として適当であると考えた。

(1) 解析対象地点の概要

KvilldalのACSCの概要は図-1に示すとおりで、空洞幅16m、空洞高さ17-24m、空洞長さ386m、断面積260-370m²、ウォーターベッド表面積5,200m²、空洞体積110,000m³、空気容量80,000m³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。

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240Nm³/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。

(2) 解析モデル

Kvilldal地点におけるACSCは概ね矩形形状を呈しているので、領域を4分割した3次元モデルを作成した（図-2）。解析領域の寸法は、一般的に力学的安定解析において解析領域条件とされている空洞の大きさの3倍以上を保つことと、浸透流解析の解の妥当性も考慮し、幅：16m、高さ：24mの空洞に対し、幅120m×奥行き150m×高さ120mとした。

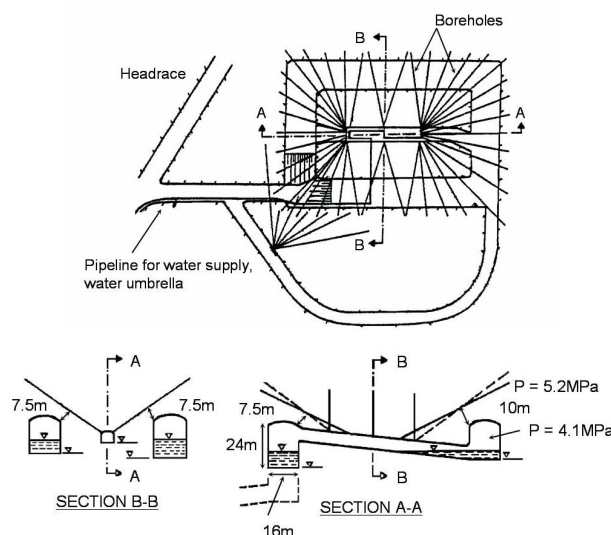


図-1 Kvilldal地点ACSCの概要図

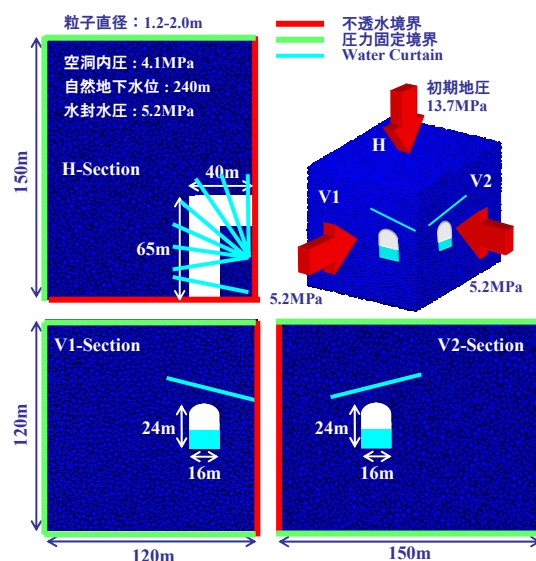
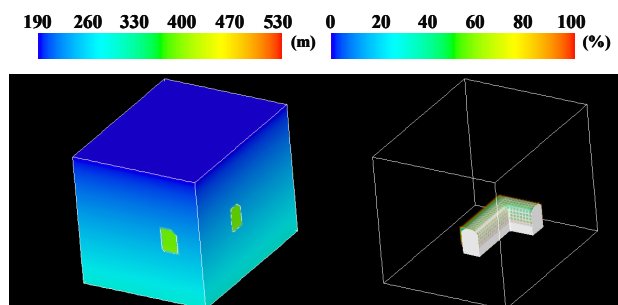


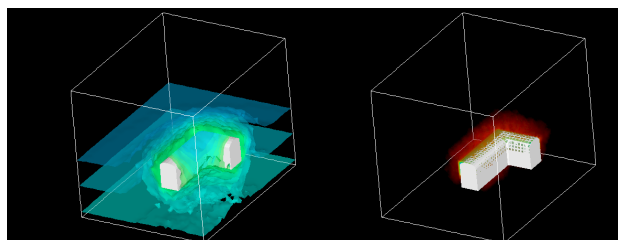
図-2 解析モデル

(3) 解析パラメータ

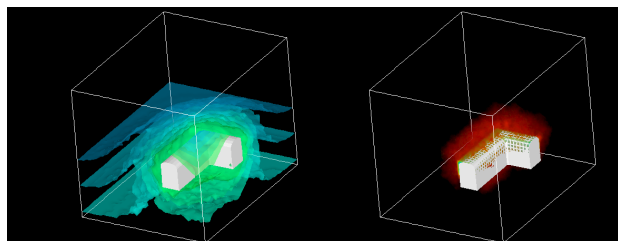
解析領域にはミグマタイト状片麻岩が分布しており、亀裂密度も非常に低いことから、粒状体モデルの力学的な粒子パラメータについては、柱状コアによる一軸圧縮試験及び圧裂引張り試験から得られた物性値から同定した。また、水理学的な粒子パラメータについては、原位置透水試験結果から同定した。



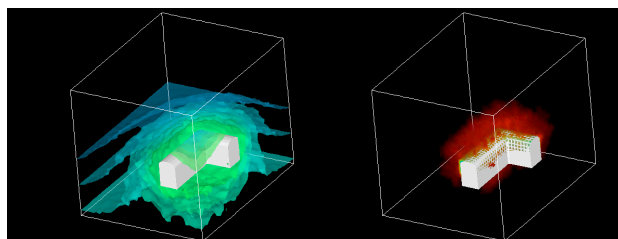
(a) 初期状態



(b) 22日経過後



(b) 66日経過後



(b) 110日経過後

図-3 漏気発生時の解析結果(左:間隙水圧, 右:飽和度)

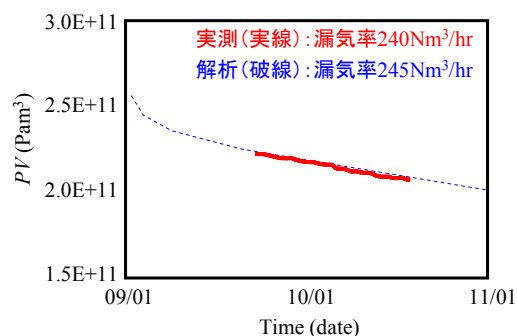


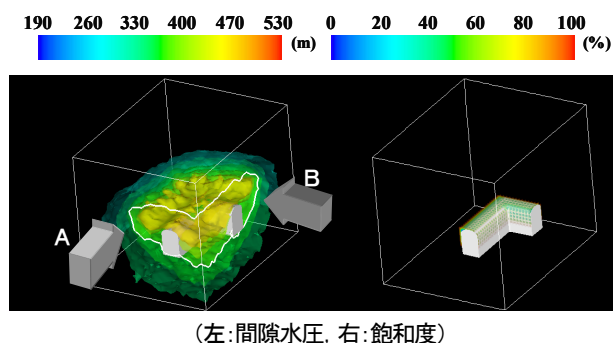
図-4 空洞内空気のPV変化(漏気発生時)

(4) 漏気発生時の解析結果

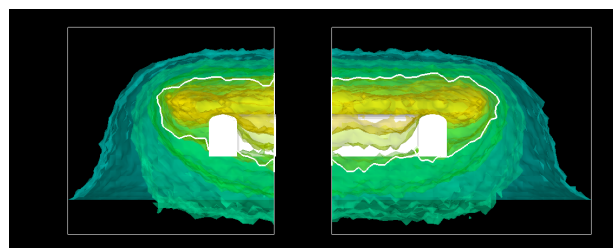
まず、ウォーターカーテン設置以前における漏気発生時の解析結果について述べる。図-3に解析の初期状態、22日経過後、66日経過後、110日経過後の空洞周辺岩盤の間隙水圧分布及び飽和度分布を示す。ここで、間隙水圧分布は圧力水頭の換算値とし、飽和度はドメイン内の水の体積の割合として示す。時間の経過に従って、空洞内圧が周辺岩盤に伝わって周辺岩盤の間隙圧が高まり、貯蔵ガスが岩盤へ侵入していく状況及び程度がわかる。図-4は、ACSC内のPVの逡減曲線の計測値と解析値とを比較したものであり、両者がよく一致しているのがわかる。また、ACSCからの漏気率を求めると、実測値の240Nm³/hrに対して、解析値は245Nm³/hrとなり、漏気率に関してもよく一致していることがわかる。

(5) 漏気抑制時の解析結果

図-5に間隙水圧安定時(7ヶ月経過後)の空洞周辺岩盤の間隙水圧分布及び飽和度分布を示す。ウォーターカーテンによる水封機能により、空洞周辺に貯蔵圧よりも高い間隙水圧が作用し、ACSCの気密性が確保されていることがわかる。図-6はACSC内のPVの挙動であり、両者がよく一致していることがわかる。



(左:間隙水圧, 右:飽和度)



(左:A方向からの鳥瞰図, 右:B方向からの鳥瞰図)

図-5 漏気抑制時の解析結果

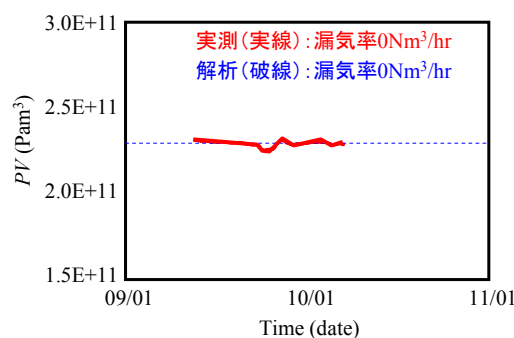


図-6 空洞内空気のPV変化(漏気抑制時)

5. 結論

本研究では、水封式高压ガス貯蔵岩盤タンクの気密性評価に対する解析手法として粒状体個別要素法と Channel-Domain network解析を用いた3次元の応力-浸透流連成解析手法を構築した。またその適用性を把握するため、高压ガス貯蔵施設であるAir Cushion Surge Chamberにおける漏気発生時ならびにウォーターカーテン設置後

の漏気抑制時の実測データと本解析手法で得られた解析結果とを比較したところ、両者がよく一致することが確認された。このことから、本研究で構築した3次元の応力-浸透流連成解析手法が、高压ガス貯蔵岩盤タンクの気密性の評価に対して高い適用性を有することが示された。

参考文献

- 1) Cundall P.A., & O.D.L. Strack: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Géotechnique*, 29, pp.47-65, 1979.
- 2) Potyondy D.O. et al.: Modeling of Shock- and Gas-Driven Fractures Induced by a Blast Using Bonded Assemblies of Spherical Particles, *Rock Fragmentation by Blasting*, pp.55-62, A.A. Balkema, 1996.
- 3) Kenji Aoki, Yoshitada Mito, Tetsuya Matsuoka, & Daisuke Kondoh: Design of gas storage rock cavern by the hydro-mechanical coupled discrete model, *2nd PFC*, 2004.
- 4) Kjørholt, H. et al.: Water Curtain performance at the Kvittdal air cushion. *Proc. Int. Conf. On storage of gases in rock caverns*, pp.26-28, 1989.

HYDROMECHANICAL COUPLED DISCRETE MODELLING FOR THE ASSESSMENT OF AIRTIGHTNESS OF UNLINED LARGE ROCK CAVERN

Kenji AOKI, Yoshitada MITO, Takuya TAO, Chuan Sheng CHANG,
Yoshiaki TASAKA and Toshio MAEJIMA

For the planning and designing of gas storage caverns with high internal pressure, it is required to predict the initiation of fracture network due to internal gas pressure and evaluate the amount of gas leakage through the fracture network. In this study, the authors develop the hydro-mechanical coupled analysis based on 3-D DEM model that explicitly simulate inter-particle mechanics in order to perform a realistic simulation that can express rock deformation and fracturing coupled with fluid flow of gas and liquid. The applicability of this numerical method is examined through the case study of the actual air cushion surge chamber (ACSC) site.