

高压ガスの水封式地下岩盤備蓄における岩盤変形を考慮した 備蓄基地周辺の間隙水圧応答に関する研究

A Study on Estimation of Pore Pressure Response around Underground Water-Sealing Rock Cavern Facilities for Storage considering Rock Deforming Effects

086674 松本 慎司
指導教員 徳永 朋祥 准教授

Keywords: 間隙水圧, 水封式岩盤備蓄, CAES-G/T, 岩盤変形, 岩盤モニタリング

1. 背景と目的

現在, 地下岩盤空間を工学的に利用するものとして, 放射性廃棄物の地層処分, 石油・LPG等のエネルギー地下貯蔵, 圧縮空気貯蔵ガスタービン(CAES-G/T)発電, 二酸化炭素の地中貯留などが挙げられる。この中で, CAES-G/T発電や, エネルギーの地下貯蔵については, 地下水よりも密度の小さい流体を地下岩盤空洞に貯蔵し, 一定期間漏洩を防止する技術が必要となる。漏洩防止の方策として, 地下水で飽和された岩盤空洞において流体を人為的に貯蔵させる方法(水封方式)がある^[1]。

水封とは貯蔵流体の圧力よりも大きい地下水圧を貯蔵の周囲に作用させることで, 液密・気密構造を形成させる機能である。すなわち, 貯蔵空洞を地下水位以下の岩盤中に掘削すれば, 空洞内の排水により周辺岩盤から空洞内への地下水浸透が生ずる。この状態で水よりも軽い流体を貯蔵すれば貯蔵流体は水との比重差により, 混合することなく水床上に浮き, さらに空洞周辺全体からしみだしてくる地下水に押し込まれて, 漏洩を防止することができる^[2]。

水封方式では, 空洞周辺の地下水位を維持することが, 貯蔵物の漏洩を防止し, 施設の機能を維持する上で重要である。このため, 水封式岩盤タンクの安全性は, 液密・気密性能を保障する水封機能の安定性と貯蔵の力学的安全性の二面から点検・評価する必要がある。現行の保全点検システムでは, 岩盤タンクを開放して内部から直接点検・評価する方法が水封機能への影響, 安全性およびコスト等から困難なため, 岩盤タンクもしくは周辺から得られる観測データの変動傾向の変化から間接的に安全性を管理するモニタリング手法が採られている^[3]。

本研究では, 岩盤変形を考慮した場合と考慮

しない場合での, 間隙水圧応答の差を比較・検討する。岩盤変形を考慮した場合, 岩盤変形間隙水圧応答を連成問題として取扱い, 神岡鉱山跡地での CAES 実証実験場での観測データと, 解析結果との比較・検討により, 岩盤空洞におけるモニタリング技術・水封評価方法に基礎的な検討を加えることを目的とする。

2. 支配方程式

変形と間隙水挙動の連成問題を考えるとき, 支配方程式は静的な力のつり合い式と間隙水の連続の式によって構成される。これらの支配方程式において, 変数は変位ベクトルの3成分と間隙水圧の合計4つでありまた独立な式は, 各軸方向の力のつり合い式の3つと, 間隙水の連続の式の合計4つである。従って, 適切な初期条件, 境界条件のもと, 変形と間隙水挙動の連成問題を解くことができる^[4]。

等方・均質な多孔質媒体を仮定した岩盤内における, 岩盤の弾性的な挙動と間隙水挙動を連成させた構成方程式は以下の通りである^{[4][5]},

$$G \nabla^2 u_i + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_k} = \alpha \frac{\partial p}{\partial x_i} - F_i \quad (1)$$

$$\alpha \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\alpha(1-\alpha B)}{KB} \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{k}{\mu} \nabla^2 p + Q$$

$$\alpha = 1 - \frac{K}{K_s} \quad (2, 3)$$

ここに, G はせん断弾性係数, u_i は変位ベクトル, ν は排水条件における Poisson 比, p は間隙水圧, F_i は体積力ベクトル, K は排水条件における体積弾性率, B は Skempton の係数, k は浸透率, μ は間隙水の粘性係数, Q は単位時間当たり単位体積の多孔質媒体内における湧

き出し流量, K_s は固体粒子部分の体積弾性率である。式(1)は静的な力のつり合い式, 式(2)は間隙水が Darcy 流れをすると仮定したときの間隙水の連続の式である。

3. 調査地の概要

(1) 調査地の概要

CAES 実験は岐阜県飛騨市にある神岡鉱山(図1)内の跡津精密坑道を利用し, 坑道の坑口より約180m下方の標高, 地山被り約450mの地下に新設された空洞にて行われた。空洞の約180m上位には上部坑道が存在し, この坑道では排水が行われていた。また, 下部坑道では実験期間中は坑口付近まで水没していた。空洞周辺の水圧に影響を及ぼす地下水位が, この坑口と一致していると仮定すると, 空洞周辺の地下水圧は静水圧相当で約1.8MPaと推定される。実験現場の模式図を図2に, 空洞内容と計測機器と配置を図3に示す⁶⁾。

神岡鉱山は, 日本列島の地体構造区分では飛騨変成帯内に位置している。CAES 実験空洞周辺には主として飛騨変成岩類の片麻岩類が分布し, 一部安山岩岩脈の貫入がみられる。岩質は結晶質であり, 新鮮・硬質である。

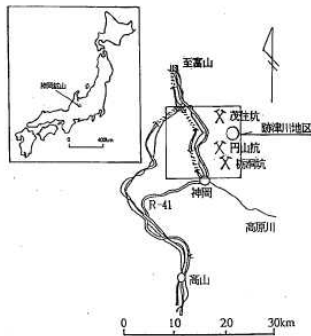


図1 神岡鉱山の位置

表1 岩盤物性値

排水ヤング率 (GPa)	ポアソン比	体積弾性率 (GPa)	密度 (g/cm ³)
48.4	0.15	20.5	2.9
透水係数 (m/sec)	土粒子の体積弾性率 (GPa)		
10 ⁻¹¹ 10 ⁻⁸	45		

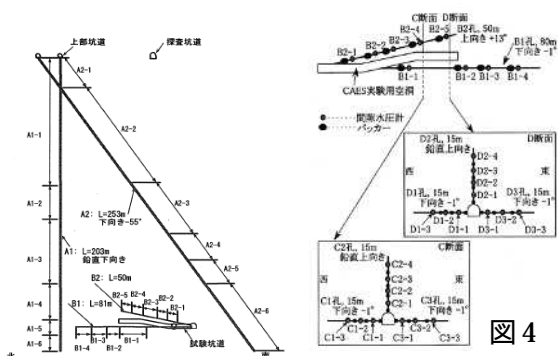


図4 間隙水圧測定位置

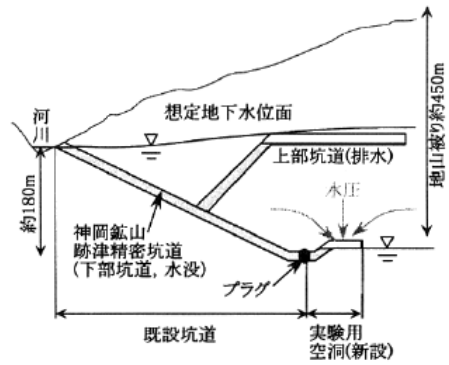


図2 実験現場の模式図

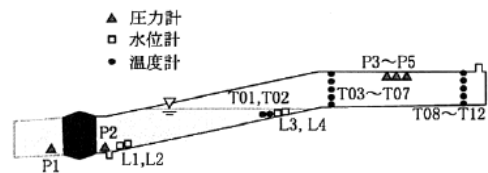


図3 空洞内容と計測機器の配置

(2) 測定の概要

CAES 実験は2001年9月3日から同12月12日までの約3か月間行われた。本研究では, 周辺岩盤が水で飽和していると考えられる透水試験終了時(同9月22日)までを解析可能期間と設定した。実験開始までの約4ヵ月間は下部坑道の坑口まで水没していた。下部坑道の坑口付近に地下水位があるとした場合の静水圧に相当する圧力に達していたため, 実験開始時には空洞周辺岩盤は水で飽和していると考えた。

(3) 解析に用いる物性値と観測データ

解析に必要な岩盤物性値を表1にまとめる。観測データは, 図3の空洞内圧, 空洞水面, 図4に示す位置での間隙水圧である。空洞内圧の時間変化を図5に示す。

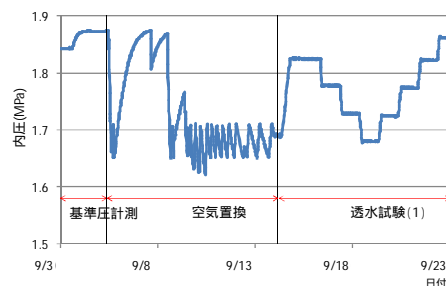


図5 空洞内圧の時間変化

なお、空洞内の水面は透水試験時から一定に保たれるため、解析は透水試験の期間(9月14日から9月22日)と設定した。

4. 間隙水圧観測データ

観測結果は、空洞圧力変化以外にも潮汐や地球潮汐・大気圧応答等、様々な影響を受けるため、間隙水圧観測データを潮汐解析プログラム BAYTAP-G により、trend 成分を抽出することを試みた。以下に、A1-1 と C1-3 における解析結果を示す。

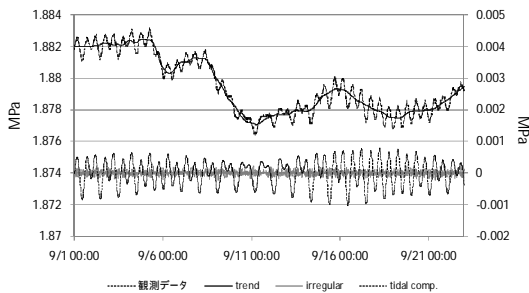


図6 A1-1 における解析結果

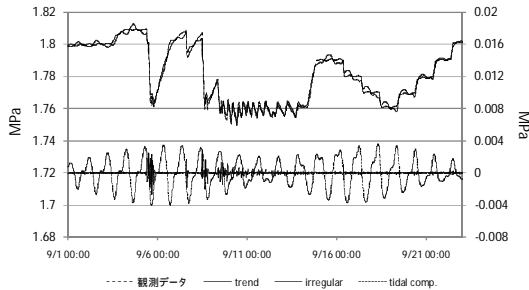


図7 C1-3 における解析結果

A1-1 では観測データを trend 成分と潮汐・ノイズに分解することができたが、C1-3 では trend 成分を抽出することができなかった。そこで、観測データと空洞内圧力データをフーリエ解析し、分潮成分の周期と振幅を求めることにした。以下にフーリエ解析結果を示す。

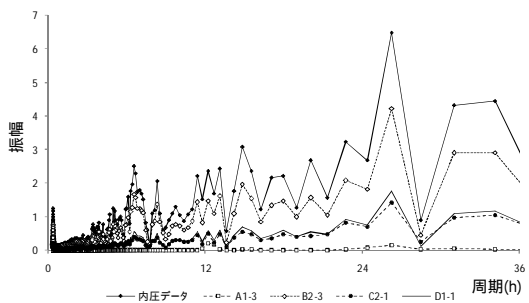


図8 フーリエ解析結果

空洞周辺の観測データは空洞内圧または空洞からの排水の影響等により、分潮成分を抽出することはできなかった。

今後、このような観測データを適切に処理するには、本研究で行った手法以外に、新たな知見が必要となると考えられる。

5. 神岡実験場のモデル化

神岡実験場を想定した解析モデルについて述べる。モデルのスケールは図9に示す。モデルは2層に分かれ、上部の風化部に関しては透水係数 $5 \times 10^{-6}(\text{m}/\text{sec})$ を、下部の新鮮部には $5 \times 10^{-8}(\text{m}/\text{sec})$ を与えた。その他の岩盤物性は表1に示した通りである。

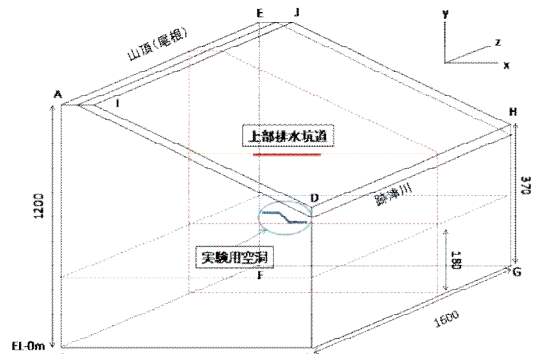


図9 解析モデルの概要

初期条件は、上部を地表と想定しているので、地表に地下水位があるとした場合の静水圧に相当する圧力を与えた。

境界条件は、面 DCGH では辺 DH に川が流れていると想定したので、DH を地下水位とした静水圧を与えた。側方境界は、山が東西に広がっており、側方への水の流れがないと考え、No Flow 境界とした。面 ABFE では辺 AE が山頂を含む尾根と想定し、No Flow 境界とした。上面境界は地表を想定しており、降水量に伴う、水の涵養量(500mm/yr)を境界条件に与えた。底面境界は実証実験場からも十分遠方であるため No Flow 境界とした。上部坑道には坑道壁面に大気圧を与えた。

実験空洞境界は、実証実験空洞内圧値を用いて、時間変化を伴う境界条件を与えた。空洞下部の水面下は、空洞内圧に水面からの水の圧力を加えた境界条件を壁面に与えた。

6. 解析結果

B1-3 における岩盤変形-間隙水挙動の連成解析結果と変形を拘束した場合の解析および、2つの解析結果との差を合わせて図 10 に、さらに比較として軟岩を想定した岩盤物性での解析結果を図 11 に示す。

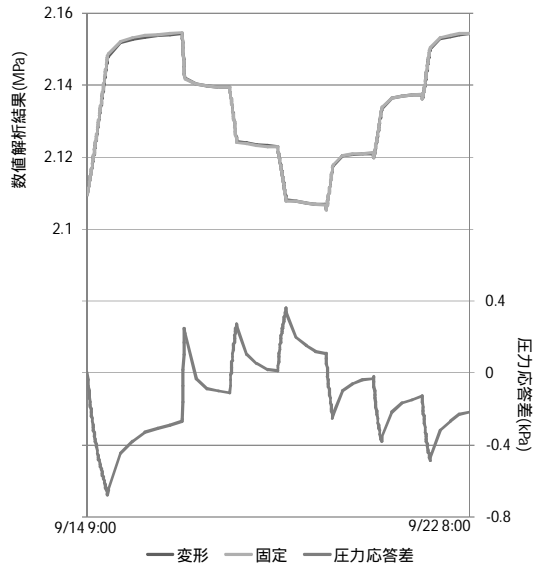


図 10 B1-3 における数値解析結果

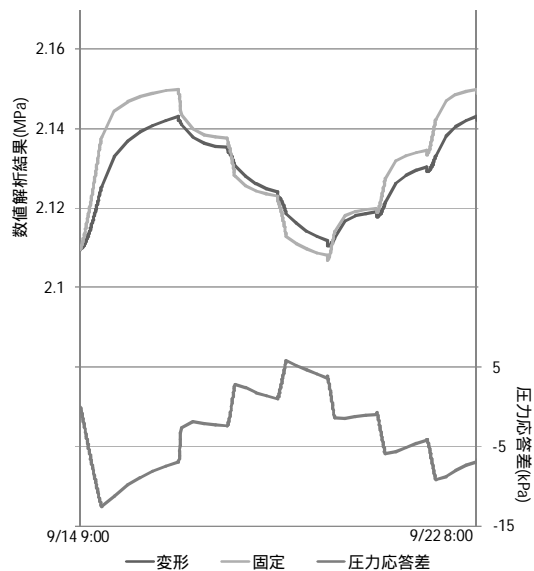


図 11 軟岩を想定した数値解析結果 (B1-3)

解析結果より、変形条件解析の圧力変化が小さくなることが示された。また、軟岩を想定した場合、硬岩と想定した場合より圧力変化の差が大きくなることがわかった。これは圧力が一定である期間の圧力応答差が 0 に近づいてきて

いることから、圧力が岩盤変形に作用するため、岩盤の持つ貯留性が影響したためであると考えられる。

7. 結論

本研究では、神岡鉱山 CAES 実証実験場を想定した解析モデルを構築し、岩盤変形-間隙水挙動の連成解析、変形を拘束した解析を行った。また、実証実験により得られた間隙水圧観測値の適切な処理を試みた。

間隙水圧観測値は地球潮汐の影響を受けているため、潮汐成分の除去を試みた、また、分潮成分の振幅を各孔で比較することを目的としてフーリエ解析を行った。しかし、空洞からの影響が潮汐による影響よりも大きいと判断されたため、空洞周辺において適切な処理を行うことができなかった。

連成解析・変形拘束解析では間隙水圧の微量の差が得られた。また比較解析結果から、岩盤の持つ貯留性が影響したと判断された。地下岩盤空洞周辺の間隙水圧応答を評価する際には、岩盤変形を考慮することが望ましい。

参考文献

- [1] 中川加明一郎：圧縮空気貯蔵ガスタービン発電、土と基礎、Vol.50, No.11, pp3-5, 2002.
- [2] 大竹健司、橋本信雄：液化石油ガス地下岩盤貯槽方式における水封システムの要点、土と基礎、46-6 (485), 1998.
- [3] 城代邦宏：水封式岩盤タンクの保全点検システムに関する研究、国立大学法人横浜国立大学大学院環境情報学府 博士論文、2008.
- [4] 徳永朋祥：準静的多孔質弾性論に基づく地盤・岩盤と間隙水の相互作用と地球科学的意義、地球雑誌 Journal of Geography, 115(3), pp262-278, 2006.
- [5] Wang, H.F.: Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology, Princeton Univ. Press, Princeton, pp71-95, 2000.
- [6] 末永弘、中川加明一郎：岩盤の水封メカニズムについて - 圧縮空気貯蔵実験結果に基づいて -、土木学会論文集, No.799/ -72, pp123-137, 2005.