

圧縮空気貯蔵実験用の小規模空洞にトラップされる空気の挙動
— 空洞形状の計測によるタンクテーブルの作成 —

The behavior of trapped air in a small testing chamber for comprised air energy storage
- Making of tank table by measuring the shape of the chamber -

池川 洋二郎* 中川 加明一郎** 志田原 巧***
Yojiro IKEGAWA Kameichiro NAKAGAWA Takumi SHIDAHARA

The behaviors of trapped air in a small testing underground chamber for storing compressed air is studied, when the chamber is submerged about 60m in depth. The pressure and the temperature of the air can be monitored, whoever the relationship between the volume and the height of water surface in the chamber, *i.e.* tank table, must be measured as volume in Boyle-Charles' law. A substitution method using water could not used, because the chamber has not been isolated by blocking concrete. Thus it will describe a new method to obtain a tank table by shape measurements of the chamber and analyzing the shape results. This method has been applied for the testing chamber and good relation is observed.

1. はじめに

地下空洞へ圧縮空気の貯蔵を行う場合、日本の硬質な岩盤では地下水圧を用いて封じ込める水封式が最も経済的な方法であるとし、岐阜県神岡町神岡鉱山の坑道内で小規模な空洞(直径3m、長さ50m程)を用いた実証実験^{1), 2)}を行うため実験設備の建設を行っている。この建設中の空洞が図-1のように約60m水没するときにトラップされて残留する空気の挙動を解明することを目的とする予備実験を行った。残留空気量を評価するにはボイル=シャルルの法則($pV/T=一定$)における圧力(p)・体積(v)・絶対温度(T)の計測が必要で、計測項目のうち圧力と温度はセンサーで計測できるが、一方、水没過程で空洞内で変化する水面位置と空気部分の体積の関係(以後、タンクテーブルと呼ぶ)を事前に求める必要があった。

タンクテーブルを求める方法としては、貯槽の形状が矩形や円筒形などの場合に公式を用いて計算する方法、さらに、アルキメデス(前220年)の原理を利用する水置換による方法に分けられる。しかし、空洞は凹凸のある岩盤面が露頭していて円筒形などの形状に単純化できないこと、さらに、空洞がコンクリートブロックなどで閉塞がされていないため水置換法も利用できなかった。

ここでは空洞壁面をグリッド状に分割して形状を計測し、計測結果から解析により水面上部と空洞で囲まれる空気体積を求めることでタンクテーブルを作成する方法を開発した。さらに、原位置への適用を行ったので概要を報告する。

2. 空洞形状の計測方法

図-2に空洞形状の計測概念を示す。対象となる空洞壁面をグリッド状に分割を行い、計測地点の基準座標系に基づき、交点の座標を計測する。ここでは計測点が多数生じるため、離れた所から座標値を計測する方

* 正会員 Ph.D (財)電力中央研究所 地盤耐震部
** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 地質部
*** 正会員 (財)電力中央研究所 地質部

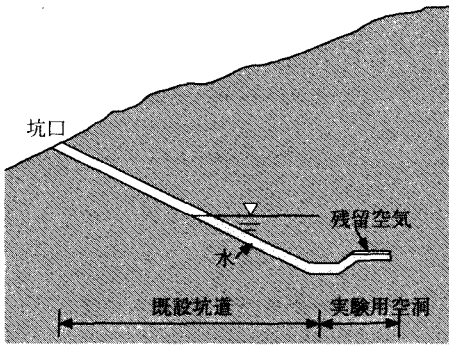


図-1 坑道水没時に残留する空気の模式図

法が必要であった。例えば、光波測量を適用することを考えると各計測点にプリズム式反射鏡を設置するために、足場組み、あるいは高所作業車が必要となり、千点程度の計測点があるため限られた工程の中で計測することが困難であった。

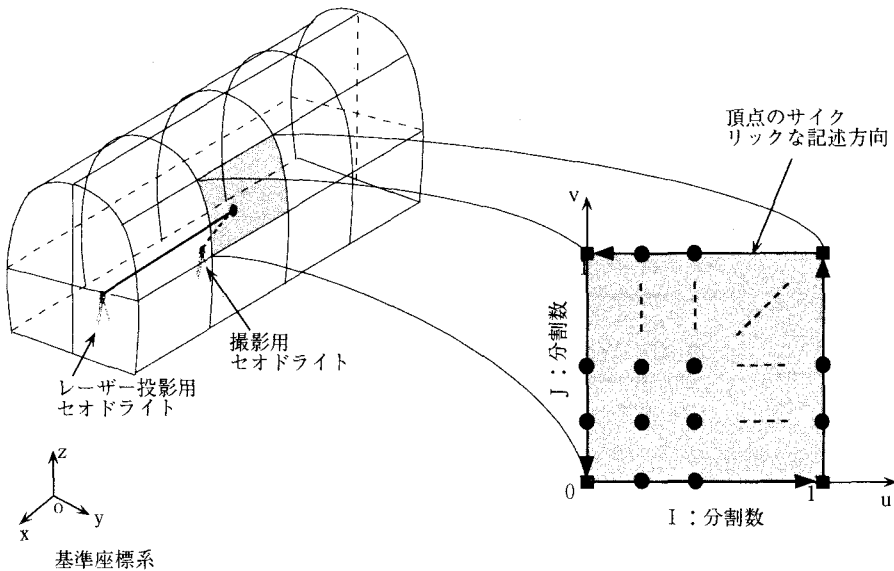
そこで当所にて開発を行った岩盤壁面の遠隔計測手法³⁾(以後、SPTSと呼ぶ)を用いて計測を行うこととした。計測装置は、レーザー投影用と撮影用のリモコン・セオドライト、画像処理装置、制御・計測用のPCから構成される。SPTS法は投影したレーザースポットを別の角度から撮影を行い、空間に生じる三角形からスポットの座標を求める方法で、離れた場所から座標の計測を行うことができる。また、撮影したレーザースポットを画像処理で求め、岩盤面が変位した場合には撮影方向を微

調整によりスポットを追跡し、変位のモニタリングを自動で行うことができる。

今回の空洞形状の計測では従来のSPTS法の制御ソフトに追加・修正を行い、図-2(b)に示すように分割した各グリッド内の座標値を内挿法で求めて、2台のセオドライトの方向を制御することで計測できるようにした。これによりグリッド交点を計測した後、複数グリッド内の座標計測を連続的かつ効率的に計測が可能になった。ここで、内挿点の計算過程でグリッド境界上の点が二重に計測されないようにしている。

3. タンクテーブルの解析方法

タンクテーブルの作成過程は、計測結果を用いた解析用のデータの作成、水面位置により変わる空気部分の空洞形状と体積の解析に分けられる。



(a) 空洞壁面のグリッド分割と計測概念

(b) 媒介変数 (u, v) による座標系とグリッド内挿点の計算概要

図-2 空洞形状の計測概念図

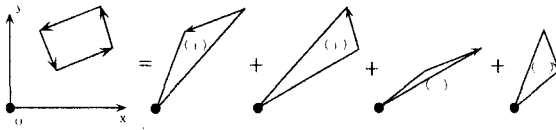


図-3 空洞容積の計算概念図

(2次元で三角形分割後に面積の重ね合わせを示す。同様に3次元では4面体に分割し、重ね合わせを行う。)

解析用のデータはFEMや可視化などと同じく、節点座標と節点要素関係を記述する。ここでは図-8に示すように水面形状は多角形になるため、従来の3角形や4角形に分割する方法から多角形を扱うことができる方法^{4), 5)}を用いた。

各水位面上側の空気部分の形状は、与えた水面位置と交差する面を探し、交差する面は水面位置で分割を行い閉じた空洞を

表すよう形状の同定解析^{4), 5)}を行った。

体積の計算は(1)、(2)式で示されるように、4面体の体積を重ね合わせる方法である。しかし、図-3の2次元の例で示すようにベクトルの方向から符号が異なる面積の重ね合わせをすることで、要素分割を行った解析用データの作成を行うことを不用にした。凹凸のある立体を4面体に分割することは非常に困難であるが、多角形を表すデータを用いて体積計算を行うことができる。

$$V_{tetra} = \frac{1}{6}(\vec{a} \times \vec{b} \cdot \vec{c}) = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \end{vmatrix} \quad (1)$$

$$V_{chamber} = \sum_{i=1}^n V_i^{face} \quad \text{ここで、} \quad V_i^{face} = \sum_{i=0}^{n-1} V_i^{tetra} \quad (2)$$

以上の解析では、1次元の配列中に空洞の表面の多角形を記述⁶⁾するようにしており、各々の多角形に対して個別の配列を利用するよりコンピュータ資源を節約できるようにしている。

4. 現場適用の結果

図-4は図-1の実験用空洞の部分にあたる断面および平面図を示す。空洞断面サイズは3.2m、長さは51mである。さらに斜坑部を挟むように入水平部と貯槽水平部に分けられ、入口より貯槽部が1m程高くなるように掘削を行っている。空洞水没時には(c)に示すように入水平部の天井より上の空気かトラップされ、水没水位が増すにつれて残留空気は圧縮され圧力が上昇するとともに体積が小さくなり、空洞内の水位が上昇する。図-5は坑道調査のための排水時にSPTS法により空洞の形状計測をしている時の様子で、斜坑部にセオドライト2台を据え、奥側になる貯槽水平部を見たときの写真である。壁面はロックボルトによる支保のみで岩盤面が露出している。

原位置の空洞形状の計測では、基準座標系を設けた後にロックボルトが打たれた箇所を基準に内壁面を100程のグリッド状に分割し、交点をSPTS装置を手動で動かして図-6の計測結果で示すように計測を行った。さらに、グリッド内を3×3面に分割する内分点に各々のセオドライトの方向を自動制御しながら計測を行った結果を図-7に示す。

水面上部の空気部分の空洞形状の同定解析において得られた各水位面を図-8に示す。同定解析で得られた各々の形状データを用いて(1)(2)式により体積の計算を行った。

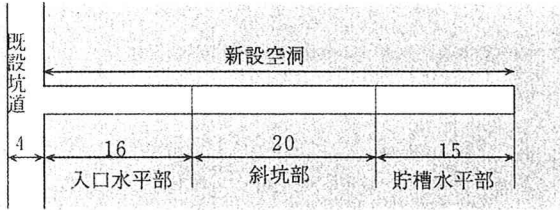
図-9は横軸に貯槽入口部の底盤からの高さ、右の縦軸に貯槽容積を示し、形状の計測結果(□)と空洞の設計値(◇)から作成したタンクテーブルを示す。また、左の縦軸は残留する空気の圧力を示し、水没時に計測された残留空気圧(実線)、坑道と貯槽部の水面の差より求める圧力(×)、今回の形状計測に基づくタンクテーブルより計算した圧力(■)、空洞の設計形状からの計算した圧力(◆)を示す。

5. 考察とまとめ

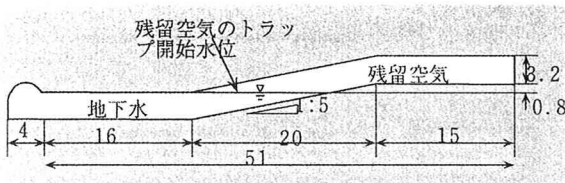
図-9で形状計測結果より計算した空気圧力が計測された圧力より約40KPa(0.4kgf/cm²)小さい結果になっ



(a) 空洞断面



(b) 平面図



(c) 断面図(空洞軸方向)

(m)

図-4 貯蔵実験用の空洞概要

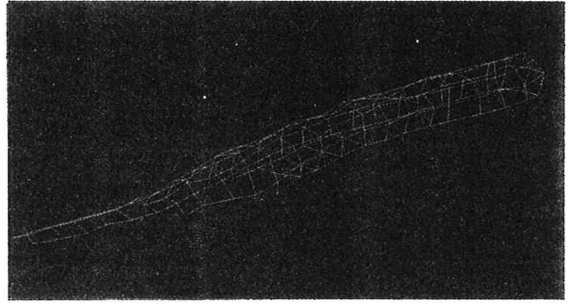


図-6 手で計測した空洞壁面グリッド
(計測点数：133)

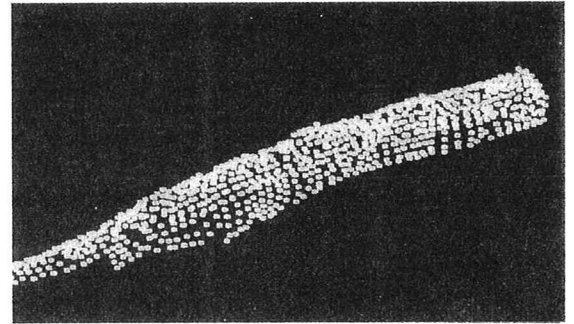


図-7 各グリッドの内挿計測の結果
(計測点数：1044)

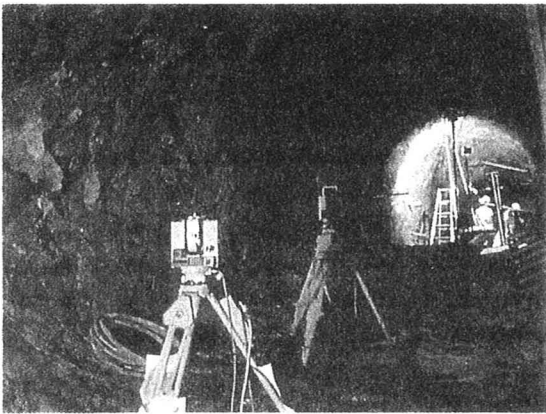


図-5 SPTS法による実験用空洞の形状計測の様子

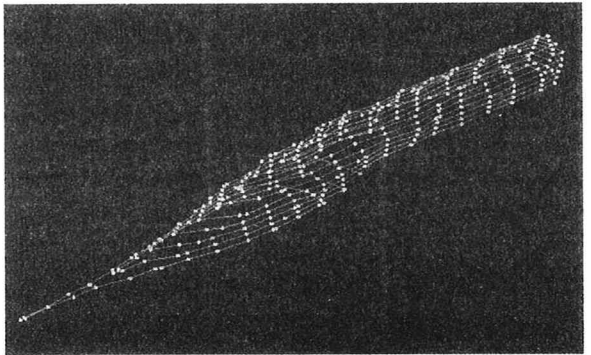


図-8 タンクテーブルの解析時に得られた水面
(図-6のデータを利用)

ているが、これはタンクテーブルの解析に用いた空洞形状は約2mのグリッドの計測結果のためで、例えば、円の中に内接する多角形の面積を求めると同じように、実際より小さい容積の計算結果となっているためと思われる。さらに内挿計測による形状計測結果を用いたタンクテーブルの作成を進める必要があるが、形状計測により求めたタンクテーブルは、図-4の設計形

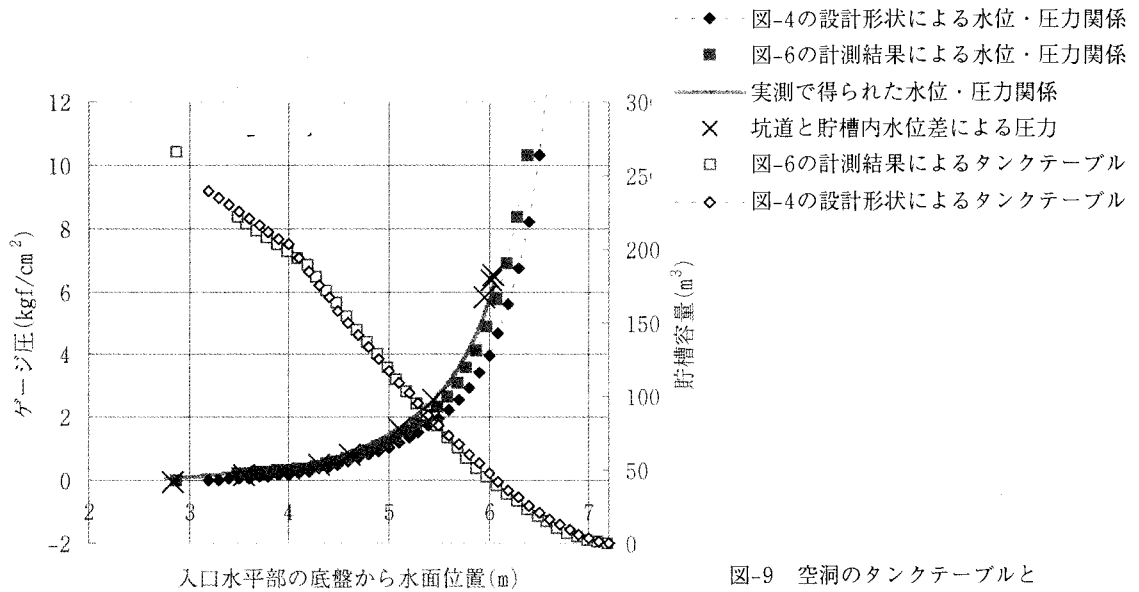


図-9 空洞のタンクテーブルと水位と圧力の関係

状より求めたタンクテーブルより整合性が良いことが分かる。

残留空気の挙動は、坑道と貯槽内水位の差より計算される圧力とセンサー計測による圧力は良い一致を得ており計測値は残留空気の挙動をよく表していると考えられ、水没過程においてトラップされた空気が漏れなく残留していることを示すものと思われるが、更に定常時の挙動の評価が必要である。

地下地盤中に貯蔵する圧縮性流体の容積の評価において温度、圧力の計測とともに、タンクテーブルは基本的に重要な項目である。商用として考える水封式の貯槽空洞は閉塞されないこと、湧水があること、また、吹付けコンクリートのみで2次覆工が不必要となることを考えると、ここで開発と適用を行った形状の計測と解析によりタンクテーブルを作成する手法は経済的かつ有効な手法になると考える。

参考文献

- 1) 中川、池川、他：水封式CAESに関する現場実験空洞の周辺地下水挙動、日本応用地質学会平成11年度研究発表会講演論文集、pp135-138.
- 2) 志田原、中川、池川：水封式CAESに関する現場実験空洞の地質、日本応用地質学会平成11年度研究発表会講演論文集、pp243-246.
- 3) 池川洋二郎、伊藤洋、大西有三：岩盤に生じる局所変位の遠隔自動計測装置の開発、土木学会論文集 No. 624/Ⅲ-47
- 4) Ikegawa, Y. and Hudson, J. A. : A novel automatic identification system for three-dimensional multi-block system, Engineering computings, Vol.9 pp169-179, 1992.
- 5) 池川洋二郎：岩盤不連続面構造の立体幾何形状のコンピュータ処理に用いるダイレクテッドボディについて、土木学会論文集 No.505/Ⅲ-29, pp. 31-38, 1994.12
- 6) Cundall P.A. Formulation of Three-dimensional Distinct Element Model - Part I. A Scheme to Detect and Represent Contacts in System Composed of Many Polyhedral Blocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.25, No.3, pp107-116, 1988.