

小規模空洞を使った水封式による圧縮空気貯蔵実験 — 残留した圧縮空気の挙動計測 —

池川洋二郎¹・中川加明一郎²

¹正会員 Ph.D. 電力中央研究所 地圏環境部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

E-mail:ikegawa@criepi.denken.or.jp

²正会員 工博 電力中央研究所 地圏環境部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

トンネルが水没した時、岩盤面が露出するトンネル中に約6気圧の圧縮空気が残留した。この時の圧縮空気の挙動と、周辺岩盤の間隙水圧の計測結果より、圧縮空気の圧力が周辺岩盤の間隙水圧より小さい条件、つまり人工水封条件のもとで残留したことが分かった。また、10ヶ月間と6ヶ月間の圧縮空気の残留には再現性が示された。以下、計測と結果の概要を示す。

Key Words: underground tunnel, water sealing, trapped air, monitoring, compressed air energy storage

1. はじめに

圧縮空気貯蔵ガスタービン (compressed air energy storage gas turbine : CAES-G/T) 発電は、LNG火力発電所に圧縮空気貯蔵を組合せた発電方式である。通常ガスタービンは、燃料を燃焼させて回転力を得るタービンと、得られた回転力から同軸上で空気を圧縮する圧縮機で構成される。つまり、圧縮空気を作ると同時に、圧縮空気は燃焼で使われる。一方、CAES-G/T発電では、夜間、発電機(モータ)と圧縮機を繋ぎ、安価な電力を使って圧縮空気の貯蔵を行う。そして、昼間は、タービンと発電機を繋ぎ、貯蔵した圧縮空気を燃焼に使うことで、従来、空気の圧縮で消費していた回転力を発電に利用できるため、同型のガスタービンに、約2倍の容量の発電機が接続できる。このようにCAES-G/T発電所は、電力需要の日変化に合わせて、圧縮空気の貯蔵、CAES-G/T発電、通常のG/T発電を切替えることが可能で、効率的な発電と発電容量の増加が期待できる。

海外のCAES-G/T発電所での圧縮空気貯蔵は、岩塩ドーム中に建設した空洞を利用している。一方、当所では地下水が豊富な日本の地盤においては、水封式が最も経済的な大容量の圧縮空気の貯蔵方法であ

ると提案し、研究を進めている。ここで水封式は、ほぼ静水圧となっている地盤内の間隙水圧を用いて、地下の空洞あるいはトンネルに貯蔵物を封じ込める方法であり、原油の地下貯蔵で利用されている。

一方、圧縮空気は原油に比べて粘性が小さく透過性が高い。また、貯蔵圧力が30気圧以上となるため、貯蔵する深度が300m以上になるといった特徴がある。このため、当所では、圧縮空気の水封機能を確認するため、室内模型実験¹⁾、さらに、花崗岩や礫岩などにおいて、垂直のボーリング孔を用いた原位置試験を行っている^{2), 3), 4), 5)}。

垂直のボーリング孔を用いた原位置試験では、ボーリング孔を2個のパッカを使って小区間を設け、この小区間を水で満たした時の平衡圧を岩盤の間隙水圧 P_w とし、また、小区間を圧力 P_a の圧縮空気に置換し、圧縮空気の漏洩を検討している。

以上で示された圧縮空気の水封条件は、圧縮空気の圧力が間隙水圧以下となること。つまり、

$$P_w \geq P_a \quad (1)$$

である。また、貯槽方向の動水勾配(I)を使うと、

$$I \geq 0 \quad (2)$$

である。一方、可燃性ガスに関しては、1以上の動水勾配が必要⁶⁾とされている。

垂直のボーリング孔を用いた原位置試験では、ボーリング孔周辺の岩盤内の間隙水圧の挙動は未解明である。また、NATM工法によるトンネルでは、主として内空変位が計測され、弾塑性理論に基づいた安定性の評価が行われる。このため、深部トンネル周辺の間隙水圧の分布が実測された事例は乏しい。以上のように、圧縮空気が貯蔵されるトンネル周辺の間隙水圧の挙動は未解明のままである。

本論文では、岩盤面が露出する深部のトンネル内にトラップされて残留した圧縮空気の挙動と、トンネル周辺の間隙水圧の分布の計測概要と結果の報告を行う。以下、2. は残留した圧縮空気の概要、3. は計測の概要、4. は計測の結果、5. は考察を記述する。

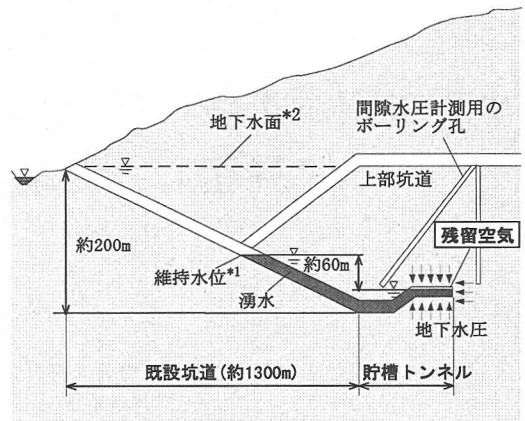


図-1 貯槽内に残留した空気の模式図

*1: 本論文で示す計測時の水位

*2: 間隙水圧の計測結果から得られる地下水面

2. 残留した圧縮空気の概要

当所では、商用の水封式CAESで想定される水平トンネルを用いた圧縮空気の水封機能を調べるため、実験を平成8～13年に計画し、実験設備の建設を段階的に進めている。実験を計画するサイトは、岐阜県の最北端の神岡町内で、跡津川が高原川に合流する付近に位置する。この地点の岩種は片麻岩で、日本で最古の岩盤と言われる飛騨片麻岩類に属し、非常に堅硬な岩盤である。また、貯槽トンネルでの岩級は、電中研式岩盤等級で主としてC_H級、一部B級が存在する。ここで、B級は割れ目の間隔が50cm以上、C_H級は50cm未満としている。これらの割れ目はせん断変形がない節理である。

図-1は、湧水により水没させた実験用の貯槽トンネルに圧縮空気が残留した様子を模式的に示す。ま

た、この水没中、既設坑道の図中の*1で示す維持水位は排水ポンプにより一定に保たれている。ここで貯槽トンネルは、図に示すように既存の坑道の最も深い箇所の新設した。

表-1は実験の概略工程を示す。事前調査の後、年度毎に実験用設備の建設を段階的に進めている。また、この表の既設坑道の水没期間を見ると、事前調査と実験用設備の建設の期間は、既設坑道は排水され、これ以外の期間は既設坑道は水没している。本論文では、表に示す①、②、③の水没期間に貯槽トンネル内に残留した圧縮空気の計測結果を示す。

まず、①と②の水没期間は、多段カップ式水位計を用いて、トラップされた圧縮空気が残留することを確認した。しかし、この多段カップ式水位計を用

表-1 実験の概略工程

年度	1996 (H8)	1997 (H9)	1998 (H10)	1999 (H11)	2000 (H12)	2001 (H13)	備考
事前調査							
実験用設備の建設						○	鉄筋コンクリートプラグの建設
残留空気の計測							
多段カップ式水位計				◆	◆		◆: 水位の確認
モニタリング						■...	残留空気の圧力, 温度, 水位 岩盤内の間隙水圧
圧縮空気の水封機能の実験						●●	最大3MPa
既設坑道の水没期間	■	■	■	■	■	■	空白部は排水期間

※2001年の水平の点線部は計画中

いた方法では、残留した圧縮空気の挙動の経時変化が分からないため、③の水没期間はセンサーを用い、経時変化の計測を行った。ここで、多段カップ式水位計と、センサー類の概要は後出の3. で示す。

図-1に示すように、上部坑道とほぼ同じ標高に地下水が存在する。これは、この標高に広がる坑道から恒常的な流下による排水が行われているためである。一方、既設坑道の水位は、周辺の地下水面より約100m低い位置に維持されている。従い、間隙水圧は周辺岩盤から既設坑道と貯槽トンネルに向かって低下していると思われる。

図-2は実験サイト周辺の平面図と断面図を示す。貯槽トンネルの周辺には、既設坑道、分岐坑道、上部坑道がある。太い実線で示す既設坑道は勾配が約1:6の斜坑で、分岐坑道は既設坑道の途中でT字状に接続し、昇り勾配で上部坑道に繋がる。上部坑道は水平で、既設坑道の入口とほぼ同じ標高にある。このように、貯槽トンネルを建設した既設坑道の最深部の周辺には、坑道が少なく、独立した配置になっている。

表-2は岩石コアから得られた物性値を示す。せん断強度と内部摩擦角で表される強度は強く、静弾性係数も大きい。また、一軸圧縮強度(σ_c)は180MPa以上あり、本地点の岩盤は非常に堅硬であることが分かる。また、図-2(b)より、貯槽トンネルの被り厚(H)を400m、単位堆積重量(γ)を 2.7g/cm^3 とすると、地山強度比($G_n = \sigma_c / \gamma H$)は16.5と大きく、トンネルは安定すると言える。ここで、物性試験に用いた供試体は、貯槽トンネルの掘削位置にパイロットとして削孔したボーリング(図-5のB1孔)のコアから作成した。

一方、このサイトの透水係数は、透水試験の結果(図-4のA1, A2孔を利用)から、平均で $1 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ オーダーであった。また、計測された間隙水圧は、静水圧状態で、商用のCAES-G/T発電所の建設が想定される海浜での地下水状態になっている。

以上の地山の安定性と地下水の状況を検討した結果、本地点が山岳地に位置するものの、得られる試験結果は、特殊な条件の下ではなく、一般性を持つ結果が得られる地点であると解釈された⁷⁾。

図-3のように、貯槽トンネルの内壁には、吹付けコンクリートを行わず、長さ2mのロックボルトを約2m間隔でグリッド状に打設した支保のみである。ゆえに、貯槽トンネルの岩盤面は露出し、貯槽トンネル内の圧縮空気は岩盤面に直接接触するので、圧縮空気と岩盤内の間隙水圧の間には、力学的な相互作用が生じる。また、この写真の天井部分は、圧縮空気

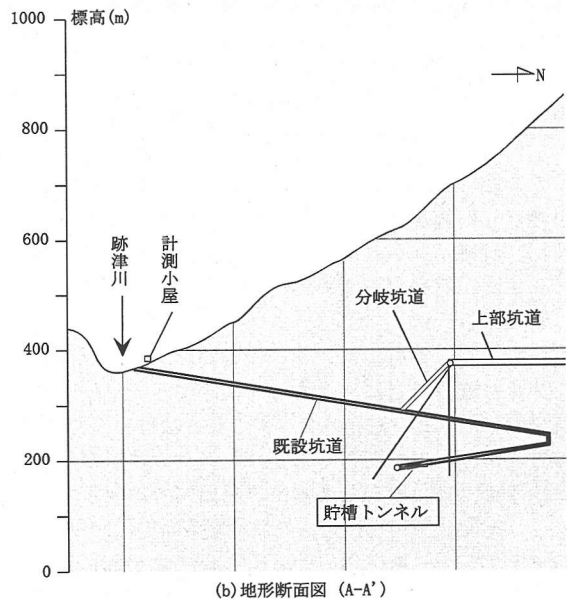
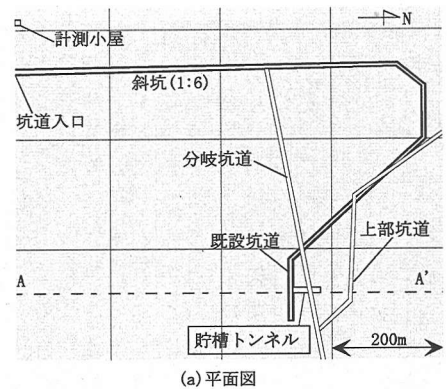


図-2 貯槽周辺の平面図と断面図
(坑道は平面図と断面図上に投影)

表-2 岩石の物性値

項目	物性値	単位
単位体積重量	2.7	g/cm^3
静弾性係数	6.27×10^4	MPa
ポアソン比	0.23	
せん断強度	35	MPa
内部摩擦角	49.3	degree
一軸圧縮強度	187.6	MPa

*B1孔(図-4参照)のコアを用いて供試体を作成

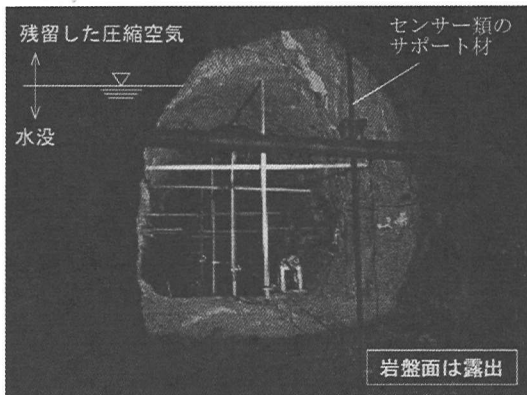


図-3 実験用の貯槽トンネルの写真と
残留した圧縮空気の水位概要

(貯槽トンネルの天井から90cm程に圧縮空気が残留。また、写真は貯槽トンネルを北向きに撮影。)

が残留した箇所である。残留状況のイメージを表すため、貯槽トンネル内における概要の水位位置を示す。また、写真の十字の鋼材はセンサー類のサポート材である。

図-4は新設の貯槽トンネルの概要を示す。貯槽トンネルは既設坑道に直交する北向きに、1mピッチの発破で掘削した。貯槽トンネルの長さは51m、断面の幅と高さは3.2mである。また、貯槽トンネルの形状は、平面的には直線であるが、断面図では既設坑道から16mの水平部の後、1:5の傾斜で上向きに20mの斜坑、そして、圧縮空気が残留した15mの水平部に分けられる。このように貯槽トンネル内に斜坑を設けた理由は、鉄筋コンクリートプラグの建設で生じた岩盤のゆるみ領域の影響を小さくするため、貯槽トンネル内の斜坑を水で満たし、鉄筋コンクリートプラグと近傍の岩盤を水没させるためである。なお、図中に示す貯槽トンネルの中と周辺の計測項目の概要は、次章で示す。

ここで、鉄筋コンクリートプラグ（以後、プラグと呼ぶ）は表-1の白丸○で示す時期に建設し、2001年に計画する圧縮空気の水封機能の実験で用いる。本論文では、次章の(4)に示すタンクテーブルの作成でプラグを用いた。プラグはそろばん珠のような形で、長さ3m、最大直径4.2m、最小直径3.2mである。このプラグに、止水性をもたせるため、透水経路になりかねない打ち継ぎ目が生じないよう流動性コンクリートを連続的に打設した。次に、プラグと岩盤のコンタクト部と、岩盤のゆるみ領域を止水することを目的に、3回に分けてグラウチングを行った。さらに、止水性を確認するため、貯槽トンネル内の斜坑を水で満たしてプラグを水没させ、貯槽トン

ネル内の圧力を約0.2MPaにした。このとき、プラグ周りで生じる透水状況の観察を行った。この確認の初期、既設坑道側のプラグのコンクリートの表面は乾燥していたが、数時間後に全体が濡れる程度であった。従い、微量な透水はあるものの、タンクテーブルの作成に関しては、影響の無い透水量と言える。

表-1の①と②の水没期間は、プラグはなく、掘削した貯槽トンネルが存在するのみである。一方、③の水没期間は、プラグの建設後となるが、プラグを貫通する配管を開放し、貯槽トンネル内と既設坑道の間を水が自由に入出力できる状態である。

以上で示した3回の貯槽トンネルの水没は、湧水により行った。貯槽トンネル入口の水平部の天井まで水没した時、この水面より上側の空気が貯槽トンネル内にトラップされる。次に、水没が進むと、既設坑道側の水面と貯槽トンネル内の水面の水位差に相当する圧力で空気が圧縮される。既設坑道の維持水位まで水没した後は、空気は圧縮された定常状態のまま残留する。

次章では、残留した圧縮空気の計測の概要を記す。

3. 計測の概要

前章では、水没した貯槽トンネルの中に、圧縮空気が残留した状況の概要を説明した。本章では、計測の概要について記述する。まず、(1)では、貯槽トンネル内に圧縮空気が残留することを確認するために用いた多段カップ式水位計の概要を記す。次に、表-3にまとめたセンサー類のうち、(2)では、岩盤内の区間間隙水圧の計測概要を示し、(3)では貯槽内に残留する空気圧縮の圧力、温度、さらに、貯槽内の水位の計測概要を示す。一方、(4)では残留する圧縮空気が占める貯槽トンネルの容積と貯槽内の水位の関係であるタンクテーブルの概要を示す。最後に、(5)では計測データのモニタリングの概要を記す。

(1) 多段カップ式水位計

多段カップ式水位計は、図-4に示すように貯槽トンネルの切羽付近に設置し、表-1の①と②の水没期間に、圧縮空気の残留を確認するために用いた。多段カップ式水位計の仕組みは、垂直に設置した棒に、200cc程度の空のカップを垂直方向に10cm間隔で固定した簡易なもの(図-8(a)参照)である。貯槽トンネルが水没した時、貯槽トンネル内の水面より下のカップには水が入る。一方、水面より上は残留空気が存在し、カップは空のまま残る。これより、貯槽

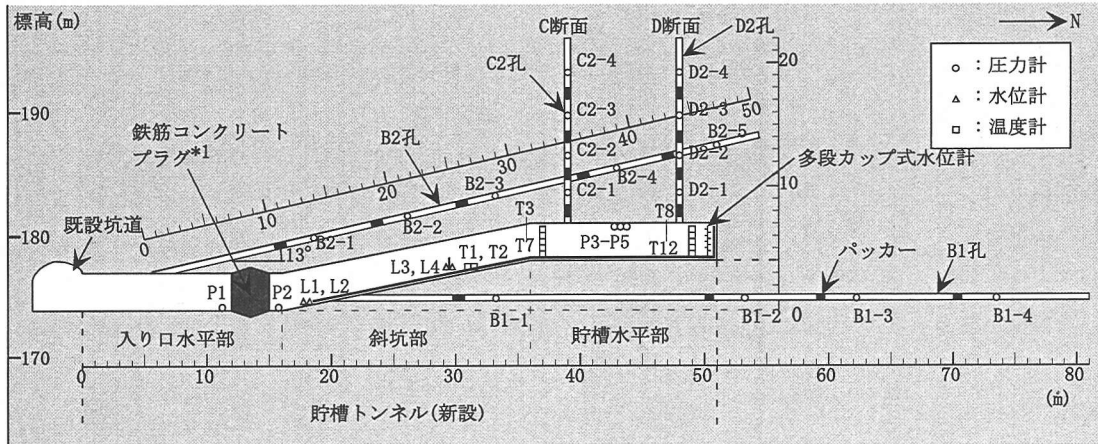


図-4 貯槽のトンネル軸方向の断面図

*1: 貯槽を閉塞し、貯槽内の圧力を制御するために建設、水封式による商用貯槽には不要

トンネル内の最大水位の範囲が10cm間隔であるが求まる。計測結果の確認は、表-1の黒い菱形◆の位置で示される、対応する水没期間後の排水期間の始めに行った。以上の方法で、多段カップ式水位計を用いた圧縮空気の残留状況の確認を、2回、行った。

(2) 岩盤内の区間間隙水圧の計測

図-4は、貯槽トンネルの近傍の区間間隙水圧の計測概要も示す。貯槽トンネルを上下に挟むよう削孔した貯槽近傍のB1孔とB2孔を示す。貯槽トンネルのパイロットとして削孔したB1孔は、水平で北向きに長さ81mである。B2孔は北向きで上向き13°、長さ50mである。また、トンネル軸に直交するC断面とD断面には図-5に示すように、上方向、左右方向に15mのボーリングを設けている。図-4ではB2孔とC2孔、あるいはB2孔とD2孔が交差するように描かれているが、B2孔はC2孔およびD2孔から西側(図で奥側)に1~2m程ずれている。ここで、黒い四角■はパッカ、白い丸○は水圧計である。

図-5は、貯槽トンネルの周辺の区間間隙水圧の計測の概要を示す。標高365m程の上部坑道から貯槽トンネルを挟むように、削孔したボーリング孔、A1とA2を用いる。A1孔は垂直で長さ203m、A2孔は下向き55°で長さ252mである。

岩盤内の間隙水圧は、ボーリング孔を2個のパッカで挟んだ小区間の水圧を計測する。計測される圧力は、小区間の平均的な圧力で、ここでは区間間隙水圧と呼ぶ。表-3に示すように、間隙水圧計測用のボーリング孔は、A1孔からD3孔までの10本あり、区間間隙水圧の計測は、39箇所ある。また、表-3に示す

ように、いずれも計測範囲は0~5MPa、精度はフルレンジに対し±0.25%である。

(3) 貯槽トンネル内の計測

図-4は、貯槽トンネル近傍の区間間隙水圧の計測概要のほか、貯槽トンネル内の計測項目の概要も示す。貯槽トンネル中の計測は、圧縮性の空気容積を、式(1)で表されるボイル=シャルルの法則を用いて求めることを目的とする。

$$pv/T = \text{const.} \quad (3)$$

ここで、 p : 圧力、 T : 絶対温度、 v : 体積である。

圧力は、表-3に示すように計5点で計測する。P1は図-4のプラグの既設坑道側にある白丸○の位置にあり、水没時の既設坑道側の水深を計測する。また、水没時はプラグの貫通管を開放し、水の出入りが自由な状態であるため、P1とP2は同じ値である。一方、残留する圧縮空気の圧力は、図-4のように貯槽トンネルの天井部に設置するP3、P4、P5の3点で計測する。

温度は斜坑部にT1とT2の2点、また、貯槽となる水平部には、垂直方向の温度分布が2断面で計測できるよう、T3~T7の5点と、T8~T12の5点を設置する。残留した圧縮空気の計測では、貯槽トンネルの最上部に取付けたT3とT8を用いる。

残留する圧縮空気の容積(v)は、水没時の貯槽トンネル内の水面より、上側の空洞容積である。しかし、図-3で示したように凹凸がある岩盤面が露出するため、簡単な幾何学的な計算で容積を求めることができない。このため、(4)で示す貯槽トンネル内の水位

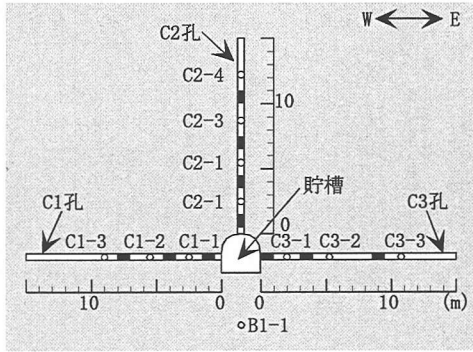


図-5 C断面での区間間隙水圧の計測概要
(D断面も同様)

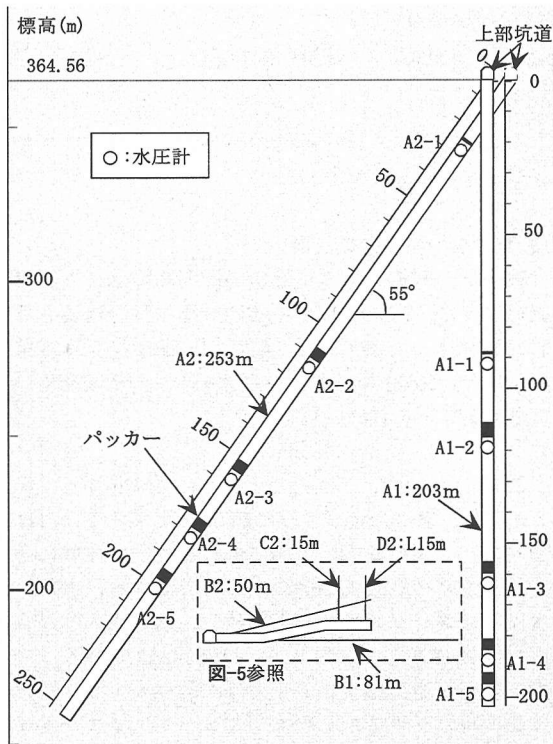


図-6 貯槽トンネル周辺の区間間隙水圧の計測概要

と空洞容積の関係であるタンクテーブルを用い、計測される水位から空洞容積を求める必要がある。

水位は表-3に示すように、L1~L4の4点で計測する。L1とL2の計測レンジは7m、L3とL4の計測レンジは1mである。残留する圧縮空気計測では、水没と共に水位面が大きく変化するため、計測レンジが大きいL1とL2を利用する。また、表-3に各センサの計測範囲と、フルレンジに対する計測精度を示す。

表-3 計測項目の一覧

	計測項目	数量	測定範囲	精度
岩盤内	間隙水圧			
	A1-1~A1-5	5	0~5MPa	±0.25%
	A2-1~A2-5	5	同上	同上
	B1-1~B1-4	4	同上	同上
	B2-1~B2-5	5	同上	同上
	C1-1~C1-3	3	同上	同上
	C2-1~C2-4	4	同上	同上
	C3-1~C3-3	3	同上	同上
	D1-1~D1-3	3	同上	同上
	D2-1~D2-4	4	同上	同上
D3-1~D3-3	3	同上	同上	
貯槽内	圧力			
	P1	1	0~3MPa	±0.1%
	P2	1	同上	同上
	P3~P5	3	同上	同上
	水位			
	L1,L2	2	0~7000mm	±0.06%
	L3,L4	2	0~1500mm	±0.06%
	温度			
T1,T2	2	0~50℃	±0.1℃	
T3~T12	10	同上	同上	

(4) タンクテーブル

図-7(a)は貯槽トンネル内の水位と、空洞容積の関係であるタンクテーブルの計測概要⁹⁾を模式的に示す。タンクテーブルは、図に示すように水の送排水量と水面の位置の関係を計測することで作成した。ここで、水の送排水は、止水対策を施した鉄筋コンクリートプラグを貫通する配管を利用した。また、図示する給排気管を大気開放し、貯槽内の空気が自由に入出力できるようにした。流量は別途用意した流量計で計測した。水位は(3)で示したL1とL2の水位計で計測した。

以上より、貯槽トンネル内の水の容積と水位の関係が求まる。しかし、求めるものは水面より上の空洞容積である。このため、給水時に水面を給排気管の最上部まで上げ、給排気管から水が溢れ出た時を、鉄筋コンクリートで閉塞された貯槽トンネルの総容積とした。さらに、この総容積から、流量計で

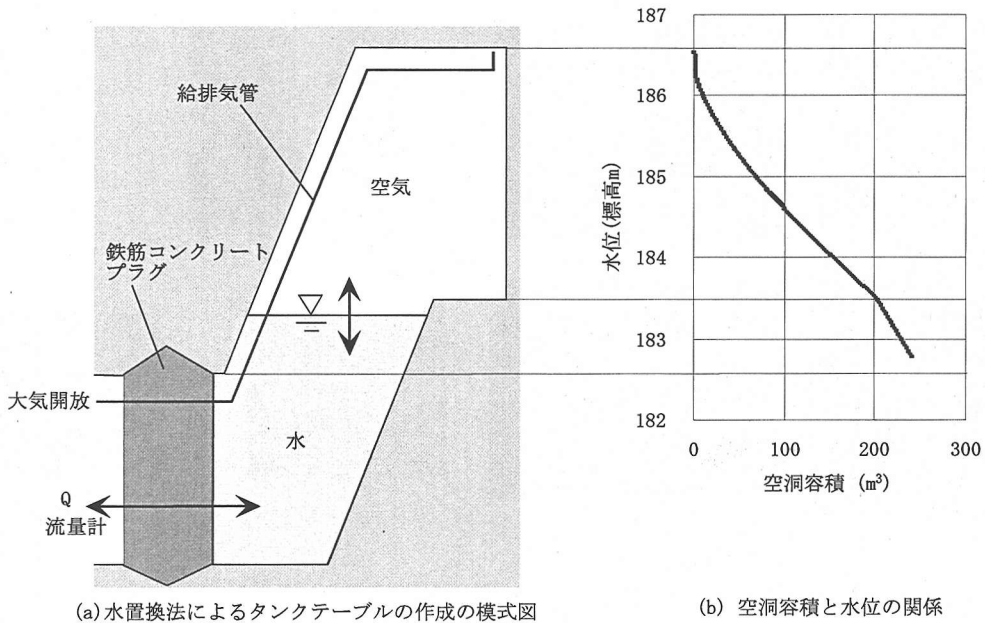


図-7 タンクテーブルの作成の概要
(貯槽トンネル内の水位と水面の上部の空洞容積の関係)

求めた容積を引くことで、水面上部の空洞の容積を求めた。

一方、貯槽トンネル内には湧水が生じている。このため、上記のタンクテーブルの計測時に別途、給排水を停止して貯槽トンネル内の水面位置を保ち、湧水による水面位置の上昇速度と水面の面積から湧水量の計算を行った。ここで水面の面積は、測量で得られた水面の形状から、幾何学的な計算により求めた。求めた湧水量は、約7.7L/minで、この湧水量はタンクテーブルの作成において考慮した。

このようにして、求めた貯槽トンネル内の水位と空洞容積の関係(タンクテーブル)を図-7(b)に示す。空洞最上部に水位があるときは、空洞容積はゼロで、水位が下がるとともに容積が大きくなっている。また、標高約183.5mの所に編曲点が現れている。これは、この標高が貯槽の水平部の床面と一致し、図(a)でも分かるように、水面の断面積が変化するためである。

(5) モニタリング

表-3に示す各センサーからは、電圧などのアナログ値が出力される。この出力は、センサー位置でアナログからデジタル値に変換した後、FM波に周波数変調し、ボーリング孔内あるいは1300mの既設坑道内に敷設したケーブルを使って電送する。データは既設坑道の坑口付近に設置する計測小屋の中で、FM波

からデジタル値に復調し、計測用PCにデータを保存している。

ここでセンサーの位置でデジタル化することで、同一ケーブル上に多くのセンサーが接続可能となり、敷設するケーブル本数を削減できる。また、デジタル化後に電送することで、温度やノイズの影響を受けにくくなる。

計測小屋のPCに蓄積されるデータは、当所から定期的に取得できるように、ISDN回線を用いて当所のLANに接続した⁹⁾。さらに、データのコピーなどは、オペレーティングシステムに添付されるファイル転送機能(ftp)を用いた。

4. 計測の結果

計測の結果は、大きく2分される。まず、(1)では表-1の①と②の水没期間に、多段カップ式水位計を用いて、貯槽トンネル内に圧縮空気が残留したことを確認した結果を示す。次に、(2)では表-1の③の期間に、貯槽トンネル内に残留した圧縮空気の経時変化の結果を示す。また、(3)では③の期間の貯槽トンネル周辺で計測した間隙水圧の経時変化を示す。

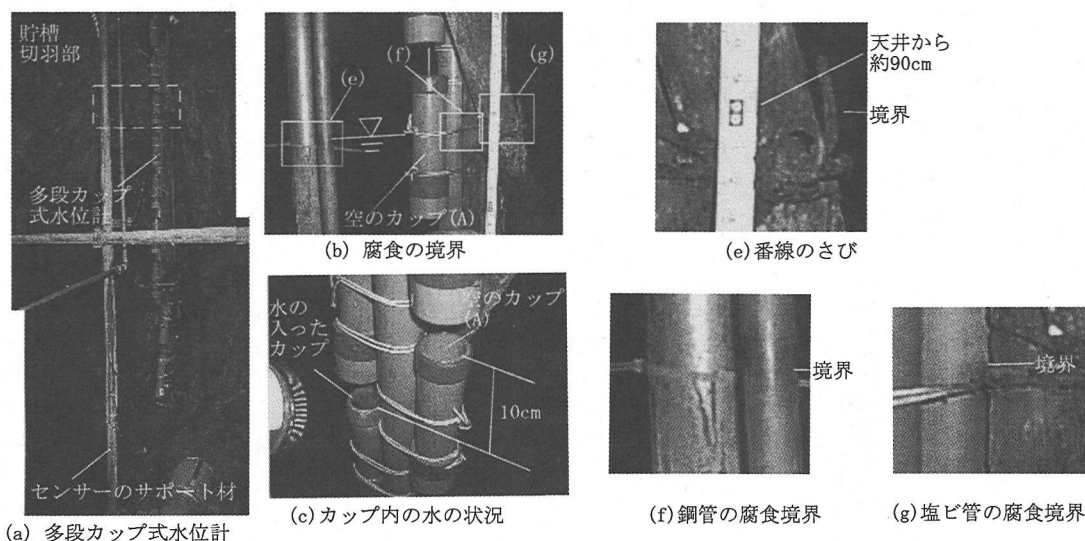


図-8 多段カップ式水位計による計測結果
(1999年と2000年は同様の結果)

(1) 多段カップ式水位計の結果

図-8(a)は図-4の貯槽トンネル内の切羽に設置した多段カップ式水位計の写真を示す。図(a)の多段カップ式水位計のうち、破線の四角で囲む位置を、水平方向から撮影した写真が図(b)で、上側斜めから撮影した写真が図(c)である。図(c)はカップ内の水の有無を確認している状況で、図中に示す空のカップより上側は全てのカップが空で、下側は全て水で満たされていた。この空のカップと水の入ったカップの境界位置は、表-1の①と②の水没期間の両方において同じ結果で、再現性があった。この結果から、残留した圧縮空気の水面位置は図(c)に示す空のカップと水の入ったカップの10cmの間に存在していた。

さらに、図(b)の四角で囲む箇所に、貯槽トンネル内の水面位置と思われる箇所に腐食の境界があった。ここで、四角で囲む箇所に付けた記号は、それぞれ、図(e)、図(f)、図(g)を意味する。図(e)は多段カップ式水位計の固定に使った番線のさび、図(f)はセンサー類のサポートに用いる鋼材の表面の腐食物、図(g)は塩ビ管の表面に付着したさびである。これらの腐食の境界は同一標高にあり、図(e)に示すように、貯槽トンネルの天井から約90cmだった。

また、図(f)に示す鋼管は、表-1の①の水没期間には設置しておらず、②の水没期間のみを経験している。一方、図(e)と図(f)は、①と②の両方の水没を経験している。さらに、これらの腐食境界の高さが一致していることより、①と②の水没期間中の貯槽トンネル内の水位は、一致していると言える。

以上の多段カップ式水位計の結果と、水面位置に生じた腐食境界の観察の結果から、表-1の①の約10ヶ月の水没期間と、②の約6ヶ月の水没期間の両方において、貯槽トンネル内の水面位置は、図-8で示す腐食境界の位置に存在したと言える。

(2) 残留した圧縮空気の経時変化

図-9の(a)は残留した圧縮空気の圧力の経時変化、(b)は残留した圧縮空気の温度の経時変化、(c)は貯槽トンネル内の水面位置の経時変化を示す。

図(a)の残留した圧縮空気の圧力の変化は、水没開始から水没終了まで、ほぼ直線的に増加し、水没終了後は、全水頭で約63mの一定値を示す。ここで、全水頭は、式(4)を用いて求めた値である。

$$\text{全水頭} = P_s + EL_p - EL_{P3} \quad (4)$$

ここで、 P_s ：圧力センサーの値、 EL_p ：圧力センサー(P_s)の標高、 EL_{P3} ：貯槽トンネル内の圧力センサーP3の標高である。これは、貯槽トンネルの天井部分だが、圧縮空気の水封条件が最もクリティカルとなるため、天井部に設置する圧力センサーP3の標高を基準として全水頭の整理を行ったことを示す。以後、全水頭は全て式(4)を用いて整理を行う。

図(b)は、残留した圧縮空気の温度にT3とT8の平均値を用い、貯槽トンネル内の水温にT1とT2の平均値を用いてプロットする。残留した圧縮空気は、初期状態で18.5℃程度だったが、水没開始後に約0.3℃上

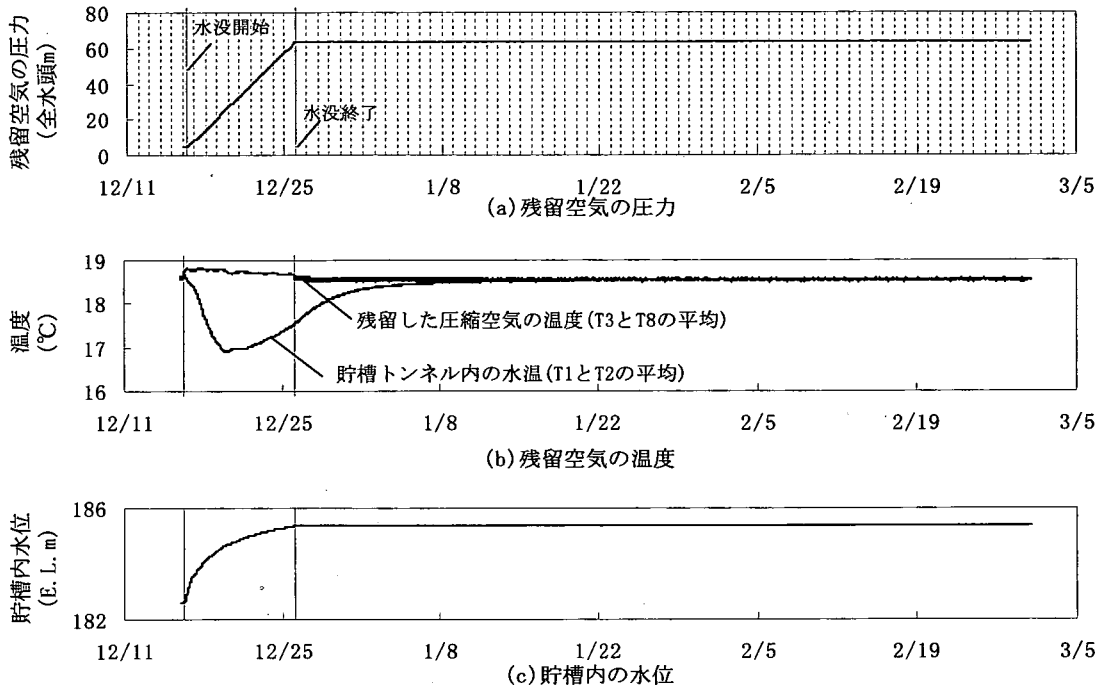
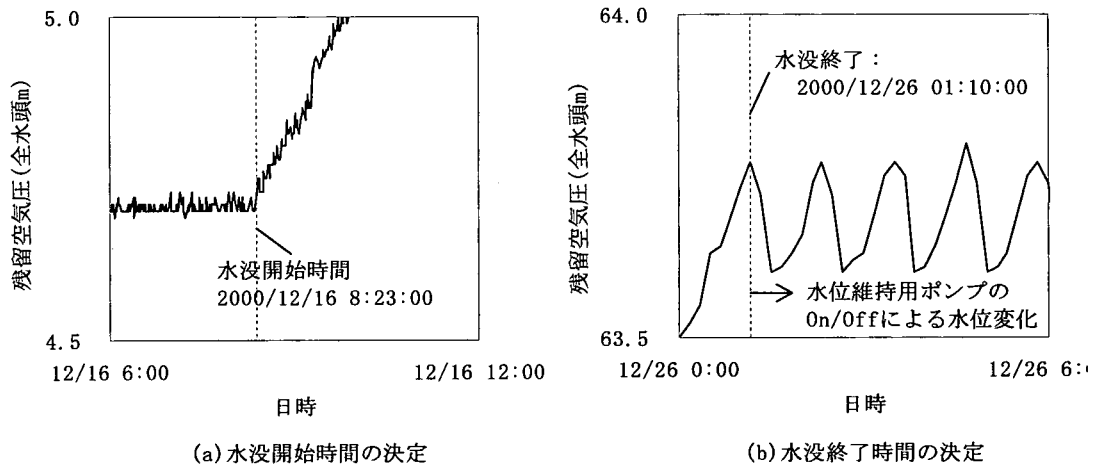


図-9 残留した圧縮空気の圧力，温度，貯槽トンネル内の水位の経時変化 (2000/12/16-2001/1/31)



(a) 水没開始時間の決定

(b) 水没終了時間の決定

図-10 残留空気圧の変化から水没の開始・終了時間の決定

昇し、その後、徐々に18.5℃に漸近し、一定値になっている。一方、水温は初期状態で18.5℃だったが、水没開始と共に17℃弱まで低下、その後、徐々に上昇して18.5℃に漸近し、一定値になっている。水温が17℃弱に低下した理由は、上部坑道で行われる換気に伴う水の潜熱で温度が低下した湧水が、既

設坑道を経由して流下し、貯槽トンネル内に入ったためと思われる。また、水没開始直後の残留した圧縮空気の温度上昇は、断熱圧縮によるものと思われる。

図(c)は貯槽トンネル内の水面位置の経時変化である

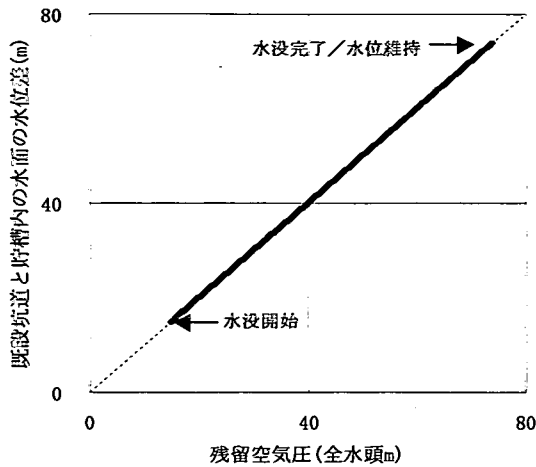


図-11 残留空気圧と水位差の関係

る。水没開始と同時に、水面位置は指数曲線状に上昇し、水没終了と同時に一定値を保っている。これは、水没の進行と共に既設坑道の水深が深くなり、既設坑道の水面と貯槽トンネル内の水面の差に相当する圧力で残留した空気が圧縮され、貯槽内の水面が上昇していることを示す。また、水没後、水面位置が一定していることから、残留した圧縮空気の容積は、減少することなく、一定である。

図-10は水没の開始と水没を確認するため、図-9(a)の残留空気圧の経時変化における編曲点を詳細に見たものである。図-10(a)では水没開始時刻の判定、図-10(b)では水没終了時刻の判定を行った。ここで求めた水没開始と水没終了時刻は、図-9、図-12、図-13、図-14、図-15では縦の細い実線の位置で示す。また、水没には9日と16時間47分を要した。一方、図-10(b)では、残留空気圧が15cm程、上下に変動している。この理由は、既設坑道の維持水位で、排水を行うポンプの発停により、既設坑道の水面が動いているためである。

図-11は貯槽トンネル内に残留した圧縮空気圧の圧力と、既設坑道の水面と貯槽トンネル内の水位差の関係で、期間は水没開始から水没終了までである。既設坑道の水面と貯槽トンネル内の水面の水位差は、図-4のP3で計測される既設坑道の水没深度から、L1で計測される貯槽トンネル内の水位を引いた値である。また、残留空気圧はP3の値を全水頭で表示した。このグラフより、水没の過程において、残留した圧縮空気圧は、既設坑道内と水面と貯槽トンネル内の水面の差に相当していることが分かる。

ここで、残留した圧縮空気圧の温度変化は考慮していない。

(3) 岩盤内の間隙水圧の経時変化

貯槽トンネル周辺で計測した間隙水圧の経時変化を、図-12、図-13、図-14、図-15に示す。これらの図では、縦軸は式(4)で得られる貯槽トンネルの天井に設置する圧力計P3の標高を原点とする全水頭で表す。また、これらの図中に示す2本の垂直の細い実線は、図-10で確認を行った貯槽トンネルの水没開始時刻と水没終了時刻を表す。

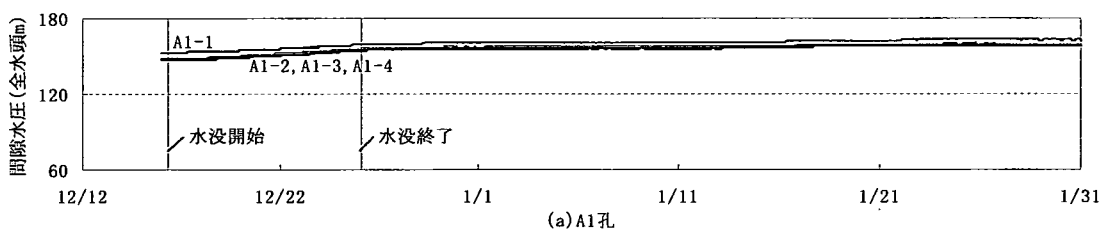
図-12は図-6で示したA1孔とA2孔の区間間隙水圧の計測結果である。図-9(a)のように残留した圧縮空気圧の圧力が全水頭で63mに対し、水没終了後のA1孔とA2孔の区間間隙水圧は140m以上と大きい。また、式(4)で求まる静水圧の全出頭は約175mであるが、貯槽トンネルから離れ、地下水面に近づくと、静水圧に近い値になっている。また、地下水面に近いA2-1は、ほぼ静水圧を示している。ここでA1-5は、欠測である。

図-13は、図-4で示したB1孔とB2孔の区間間隙水圧の経時変化である。貯槽トンネルで圧縮空気が残留した箇所の上側に位置するB2-1とB2-3の計測値は小さく、残留した圧縮空気圧の圧力に近い。また、貯槽トンネルの下側に位置するB1-1は、他と比べると小さい値を示すが、全出頭で120mに近い値である。B2-5は欠測であるが、貯槽トンネルの上部に位置するB2-1とB2-3を除く区間の計測値は、全体的に全水頭でほぼ120m以上の値になっている。

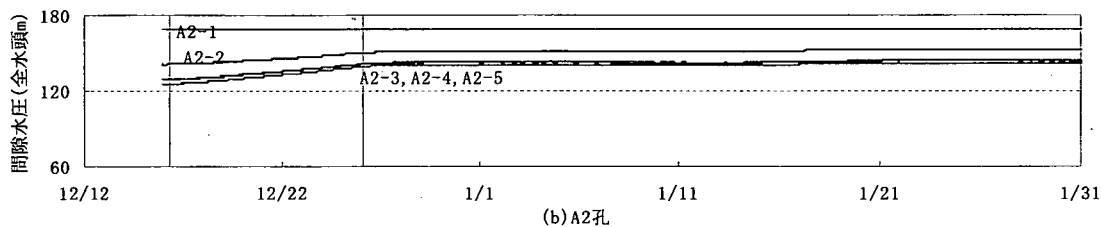
図-14と図-15は、図-4におけるC断面とD断面での区間間隙水圧の経時変化である。計測区間の配置は図-5に示す。この中ではC3-1は、図-13(b)のB2-3やB2-4と同様の小さい値となっている。しかし、残りの区間では、全水頭の値は120m以上である。

以上より、図-13、図-14、図-15で示した貯槽トンネル近傍における区間間隙水圧の結果を見ると、2つに分類できる。まず、ほぼ120m以上の全水頭がある区間、さらに、残留した圧縮空気圧の圧力(63m)に近い値を示す箇所(B2-1、B2-3、C3-1)である。全出頭がほぼ120m以上ある区間は、静水圧の影響が支配的で、水で飽和された領域と考えられる。一方、貯槽トンネル内に残留した圧縮空気圧の圧力に近い区間は、不飽和の領域でと思われ、残留した圧縮空気圧の圧力が支配的になっている領域と思われる。

また、計測された全ての区間間隙水圧において、静水圧に近い値を示すA2-1を除き、水没開始から水没終了の期間に区間間隙水圧は上昇し、水没終了後、ほぼ一定値になっている。これは、既設坑道内

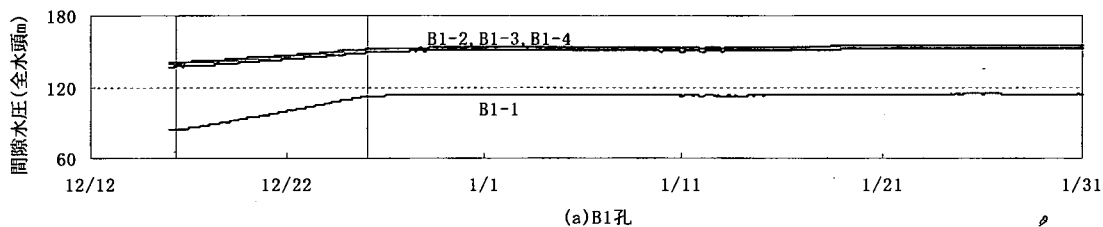


(a)A1孔

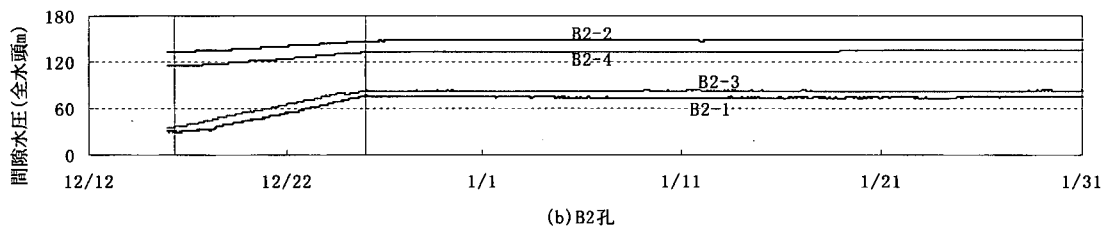


(b)A2孔

図-12 A1とA2孔における間隙水圧の経時変化 (2000/12/16-2001/1/31)



(a)B1孔



(b)B2孔

図-13 B1とB2孔における間隙水圧の経時変化 (2000/12/16-2001/1/31)

の水没深度が変化することで生じる圧力変化が、ほぼ同時に間隙水圧の計測区間において生じていることを示す。

次に、図-16は、水没終了後の区間間隙水圧の平均値をC断面とD断面の計測区間の位置にプロットした図である。ここで、残留した圧縮空気の圧力は、全水頭で63mである。この図を見ると、全体的には全水頭で120m以上だった間隙水圧は、貯槽トンネルの近傍数mの区間で63mまで急激に減少している。

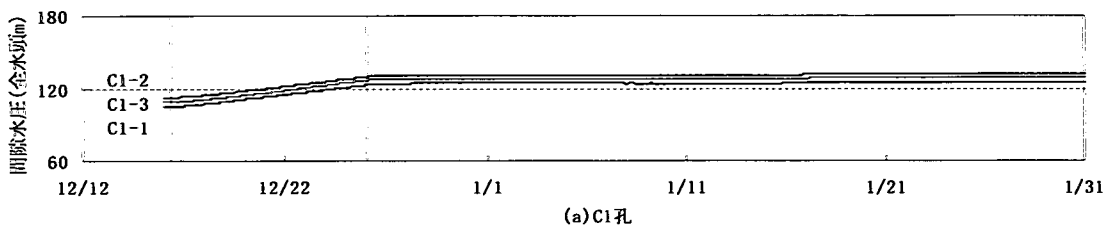
図-17は、図-16で示した水没終了後の区間間隙水圧の平均値を用い、貯槽トンネルからの距離と動水勾配の関係を示す。ここで、動水勾配は、隣合う区間間隙水圧を、対応する計測区間の midpoint の距離で割った値である。また、動水勾配の計算に、貯槽トン

ネル内の圧力を用いる場合は、貯槽トンネルに最も近いパッカ端の距離を用いた。この図より、バラツキはあるものの全体的には、貯槽の近傍数mの領域に、13~28程度の大きな動水勾配が生じ、この領域を離れると動水勾配はゼロに近づいている。

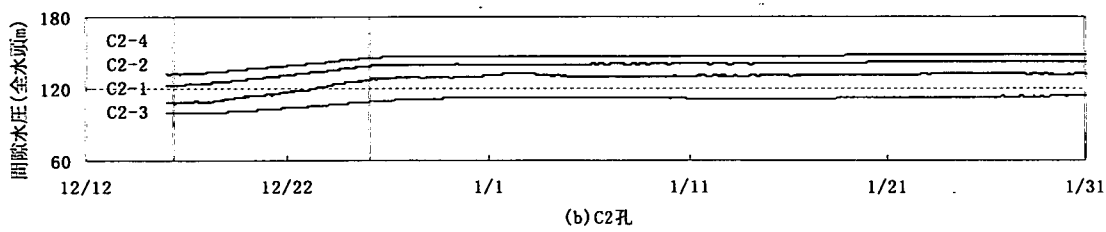
5. 考察

貯槽トンネルが水没した時、トンネル内に残留した圧縮空気の挙動と、周辺岩盤の間隙水圧の計測結果から、次のことが考察される。

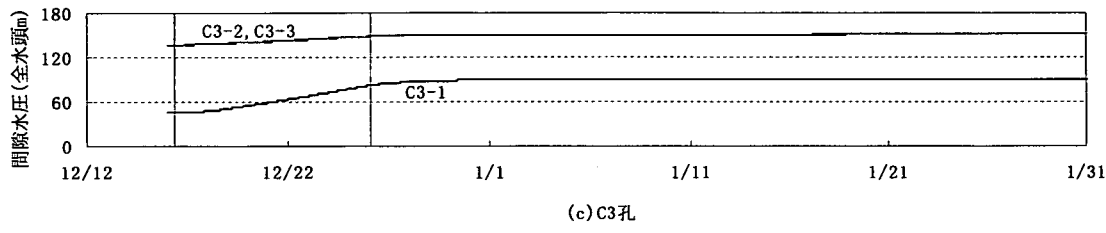
多段カップ式水位計による計測結果と、水面位置に生じた腐食の境界面の観察から、貯槽トンネルが



(a) C1孔

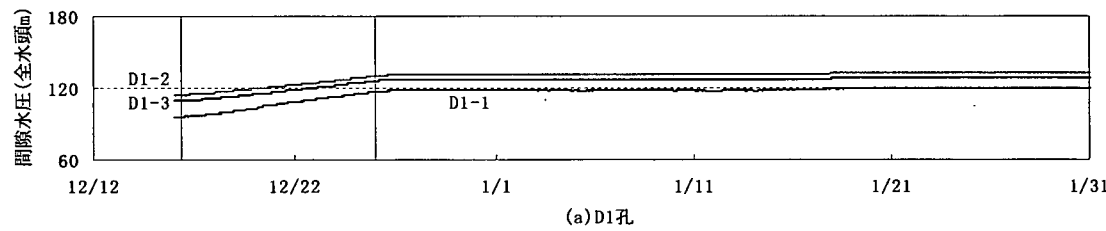


(b) C2孔

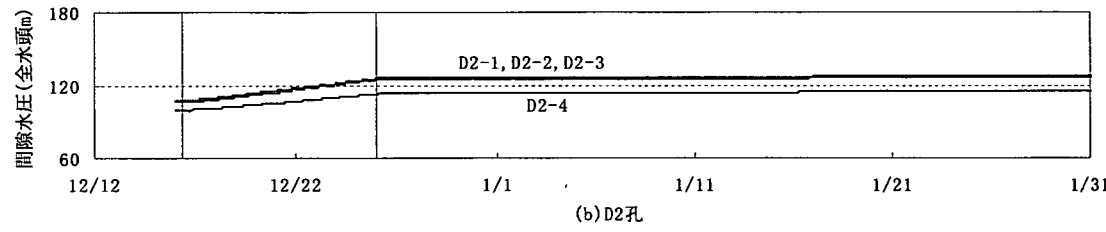


(c) C3孔

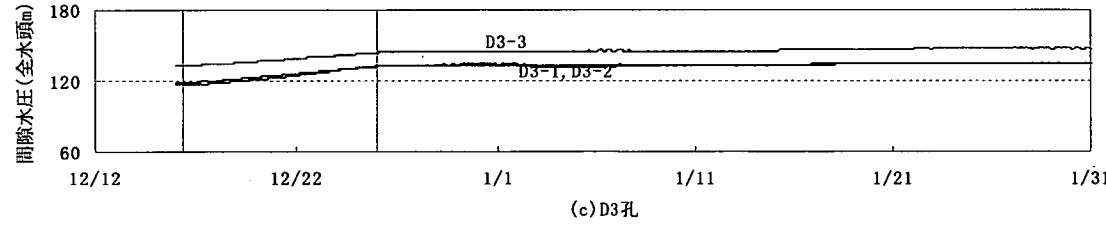
図-14 C1,C2,C3孔における間隙水圧の経時変化 (2000/12/16-2001/1/31)



(a) D1孔



(b) D2孔



(c) D3孔

図-15 D1,D2,D3孔における間隙水圧の経時変化 (2000/12/16-2001/1/31)

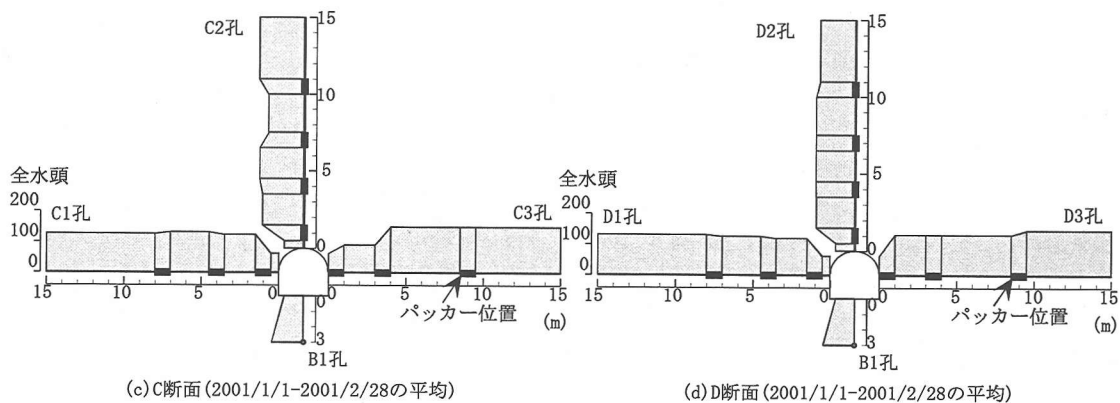


図-16 C断面とD断面における貯槽近傍の間隙水圧の分布

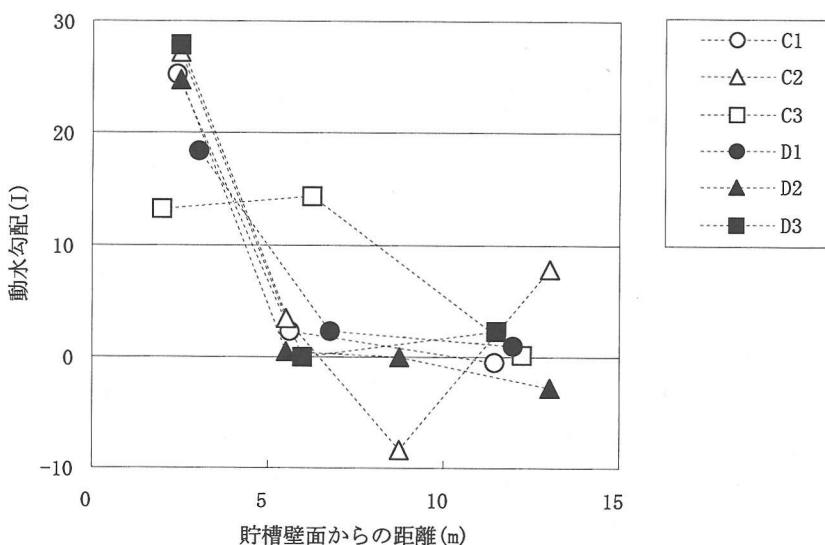


図-17 貯槽壁面から距離と動水勾配の関係

水没した1998年の約10ヶ月間と、1999年の約6ヶ月間、同量の圧縮空気が貯槽トンネル内に残留した。従って、本地点での残留には再現性があると考えられる。

貯槽トンネルの水没の開始から水没が終了し、定常状態で放置した期間の圧縮空気の経時変化の計測データを取得した。この計測データより、貯槽トンネルにトラップされた空気は、水没時には既設坑道内の水面と貯槽トンネル内の水面の差に相当する圧力で、圧縮されることが分る。また、水没後の定常状態で放置した期間は、残留した圧縮空気の容積は一定で、漏れることなく残留したことが分る。

貯槽トンネル周辺の間隙水圧の分布と、経時変化のデータから、既設坑道が水没開始から水没終了の

期間において、貯槽トンネル周辺の区間間隙水圧の変化は、地下水面に近い一つの計測区間を除き、全ての計測区間において水没と同期した変化を示した。これより、本地点の岩盤内の間隙水圧の伝播速度は速く、広範囲に及ぶものと考えられる。

岩盤内の間隙水圧の分布から、貯槽トンネルの近傍数mの領域で、間隙水圧が全水頭で約60m低下し、動水勾配では10～30程に相当していた。これらの結果から、圧縮空気が式(1)や式(2)の圧縮空気の水封条件を満たす状態で残留したことが分る。この残留した条件は、圧縮空気の圧力が、周辺の間隙水圧より小さい人工水封の条件である。

6. まとめ

岩盤面が露出するトンネルを水没させた時、圧縮空気が長期間、残留し、再現性があることを計測データより明らかにすることができた。

未解明であったトンネル内に残留する圧縮空気の挙動と、トンネル周辺の間隙水圧の経時変化の挙動を、計測データより示した。また、人工水封条件が成り立っていたことを計測データより明らかにすることができた。

深部トンネル周辺の間隙水圧に関する纏まったデータは非常に乏しい。このため、深部地盤の利用の検討と評価において、重要な基礎データを示すことができたと考える。

貯槽近傍の間隙水圧の分布において、急激な変化が生じていた理由は、透水性の応力依存性のためと考えられるが、さらに、メカニズムの解明が望まれる。

謝辞：本論文で紹介した残留空気の挙動計測は、多くの方々の努力と、貴重な意見に支えられました、ここで謝意を表します。特に、電中研の日比野氏、伊藤(洋)氏、志田原氏、さらに清水建設の八田氏、米山氏、ダイヤコンサルタントの小俣氏、山下氏には貴重な御意見をいただいた。

参考文献

- 1) 中川加明一郎, 駒田広也, 宮下国一郎, 村田満: 岩盤内圧縮空気貯蔵空洞からの漏洩防止条件, 土木学会論文集, No. 370/III-5, 1986. 6.
- 2) 中川加明一郎, 志田原巧: CAES-G/T発電のための硬岩地下空洞の圧縮空気貯蔵機能評価-ボーリング孔内で

の水封機能の実証-, 電力中央研究所報告研究報告, U91058, 1992. 3.

- 3) 中川加明一郎, 志田原巧, 大山隆弘, 池川洋二郎: 孔内試験による岩盤の透気特性評価, 電力中央研究所研究報告, U95028, 1996. 3.
- 4) 中川加明一郎, 志田原巧: 堆積岩における水封式圧縮空気貯蔵技術の成立性-古代三紀礫岩における評価研究-, 電力中央研究所総合報告: U35, 1999. 1.
- 5) 中川加明一郎, 志田原巧: 堆積岩における圧縮空気貯蔵のための水封機能評価-古代三紀礫岩における孔内水封試験-, 電力中央研究所研究報告, U98040, 1999. 3.
- 6) Aberg, B.: Prevention of gas leakage from unlined reservoirs in rocks, Rock store 77, 399-413, 1977.
- 7) 志田原巧, 中川加明一郎: 神岡実験場における水封式圧縮空気貯蔵技術の実証-実験場の水理地質特性適性-, 電力中央研究所研究報告, U96033, 2001.
- 8) 池川洋二郎, 中川加明一郎, 志田原巧: 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-, 第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 68-72, 2000. 1.
- 9) 水鳥雅文: 電中研テクノウェブシステムの開発-エクストラネットによる研究情報の共有化-, 電力中央研究所研究報告, U980011, 1998. 11.

(2001. 3. 9 受付)

A SITE TEST FOR COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE USING A DEEP TUNNEL BY WATER SEALING METHOD -MEASURING RESULTS FOR A BEHAVIOR OF STAYING COMPRESSED AIR-

Yojiro Ikegawa and Kameichiro Nakagawa

When a tunnel is submerged, the air is stayed in it. Here, the rock mass surfaces are exposed in the tunnel. The condition of water sealing for the staying compressed air is that, the pressure of the compressed air is smaller than the pressure of void water pressure in rock masses. By the results of measurements, it is ensured that the compressed air stays for ten months in the tunnel. Moreover, the change in terms of the time of void water pressure in rock masses have been cleared. Then the outline of the results for the field measurements will be described.