

# 加圧方式による水封式燃料貯蔵施設を対象とした地下水挙動評価に関する検討

大津宏康\*・大西有三\*\*・安達哲也\*\*\*

本研究は、加圧方式による水封式燃料貯蔵施設を対象とし、燃料貯蔵前の空洞加圧に伴う空洞周辺岩盤内の非定常的な地下水挙動について基礎的な検討を加えた。この結果として、水封機能性の設計方法として、従来の定常状態の解析結果を用いることは妥当であるが、その定常状態に達するまでの経過時間が最も重要な検討課題となることを示した。さらに、本検討に用いた数値解析手法は、原位置での空洞加圧実験での地下水挙動解析結果より、空洞加圧に伴う非定常的な地下水挙動の評価及び予測に適用する上で有効であることを明らかにした。

**Key Words** : groundwater, aquifer sealing method, coupled stress-flow analysis

## 1. 序 論

水封式燃料貯蔵方式の原理は、岩盤中に構築された空洞内部に貯蔵される燃料およびその蒸発ガスの漏洩を、地下水の圧力により防ぐものである。つまり、この貯蔵方式は、地下水を積極的に制御することで、構造物自体の性能となる燃料の漏洩に対する気密性・液密性を確保するものである。このため、水封式燃料貯蔵施設の設計では、従来の空洞掘削に伴う岩盤の安定性に加えて、空洞掘削後の地下水制御時の挙動評価が重要な検討課題となる。

ここで、従来の水封式燃料貯蔵施設での貯蔵燃料の気密性・液密性の検討は、上田ら<sup>1)</sup>の式に基づく駒田ら<sup>2)</sup>の設計式および、Åberg<sup>3),4)</sup>の理論式のように、定常状態の地下水挙動にのみ着目した理論が適用されてきた。また、現状の日本での水封式燃料貯蔵施設<sup>5)</sup>は原油を対象としているため、蒸発ガスの圧力に対抗する水封水圧が低い常圧貯蔵方式が採用されてきた。

すなわち、原油のように貯蔵される燃料の蒸発ガスの圧力が常圧の場合には、気密性の検討対象となる空洞周辺の水圧分布は、空洞掘削後の定常状態からほとんど変化しない。このため、貯蔵燃料の気密性・液密性の検討を定常状態に限定しても、貯蔵対象が現状の原油のように常圧貯蔵の場合には有意な問題とはならなかった。

これに対して、今後液化プロパンガスおよび液化天然ガス等の燃料を、同様な地下水制御の方式で貯蔵する施設<sup>6)</sup>が計画されている。

例えば、液化プロパンガスは、温度を下げることある

いは、加圧することで液体状態に変化する。すなわち、液化プロパンガスは、常圧低温で地下の岩盤空洞に液体状態に貯蔵することが可能である。ただし、この場合には空洞周辺の地下水が凍結し、凍土圧により周辺岩盤の安定性に課題が生じる。これに対して、液化プロパンガスは、岩盤の安定性に課題を生じない常温状態でも8~9 kgf/cm<sup>2</sup>以上に加圧することで、液体状態に変化させ岩盤空洞に貯蔵することが可能である。

現在計画されている液化プロパンガスの水封式燃料貯蔵方式は、液化プロパンガスを8~9 kgf/cm<sup>2</sup>以上に加圧し、液体の状態に従来の原油貯蔵と同様に地下水以下の地下の空洞に貯蔵するものである。ただし、液化プロパンの場合には原油と異なり、燃料を常温状態に液体に維持するため、地下の空洞に燃料を貯蔵する以前に、空洞の内圧を8~9 kgf/cm<sup>2</sup>以上に加圧しておく必要がある。このため、今後の水封式燃料貯蔵施設の設計では、従来の設計方法と異なり、燃料貯蔵前の空洞内圧を上昇させる段階での非定常的な地下水挙動について検討する必要がある。

本来、水封式燃料貯蔵方式での貯蔵燃料の気密性は、岩盤の割れ目を通しての蒸発ガスの漏洩に係わる問題である。このため、近年近藤ら<sup>7)</sup>、坂口ら<sup>8)</sup>の研究に示されるように、気密性について気液2相体としての数値解析およびモデル実験による検討が報告されている。

しかし、従来の水封式燃料貯蔵施設の気密性についての設計は、浸透流解析結果での空洞天端での鉛直動水勾配を規準としていることから、本研究では段階的な空洞内圧変化に伴う非定常的な地下水挙動を巨視的に評価する手法として応力・浸透連成解析<sup>9)</sup>を適用する。

また、原位置での空洞加圧の事例として、第三紀泥岩中に建設された地下空洞で実施された加圧実験<sup>10),11)</sup>を取り挙げ、その空洞加圧に伴う周辺岩盤内での地下水挙動について考察を加える。さらに、その空洞加圧実験時の

\* 正会員 工博 大成建設(株) 土木設計第1部  
(〒163 新宿区西新宿 1-25-1)

\*\* 正会員 工博 Ph.D. 京都大学教授 工学部交通土木工学科

\*\*\* 正会員 工修 大成建設(株) 土木設計第1部

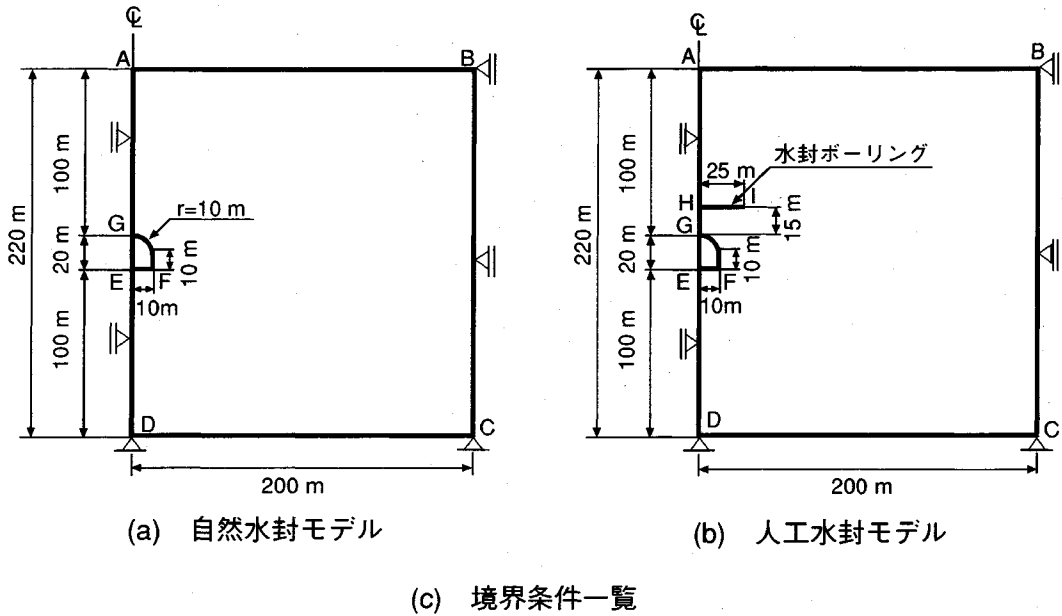


図-1 解析モデル図および境界条件

地下水挙動についての解析結果より、本検討に用いた数値解析手法は、空洞加圧に伴う非定常的な地下水挙動の評価および予測に適用する上で有効であることを明らかにする。

## 2. 地下水制御に伴う地下水挙動の評価

本節では、加圧方式による水封式燃料貯蔵施設を対象として、空洞内圧の段階的な変化に伴う非定常的な地下水挙動の解析結果より、従来の定常状態のみに着目した設計方法の妥当性について検討を加える。さらに、水封方式による地下水挙動の相違を明らかにするため、自然水封方式と人工水封方式のモデルでの解析結果について比較検討する。

### (1) 解析条件

本検討では、加圧方式の水封式燃料貯蔵施設の解析モデルとして、図-1に示す二次元平面ひずみモデルでの自然水封方式および人工水封方式による大規模空洞を想定する。

これらの解析モデルに対して、空洞内圧の段階的な変化に伴う地下水挙動を、有限要素により定式化した応力・浸透連成解析手法<sup>9)</sup>で解析した。

空洞内圧は、図-2に示すように、1回の加圧サイクルを10日間とし、0.0→2.5→5.0→7.5→10.0→5.0→

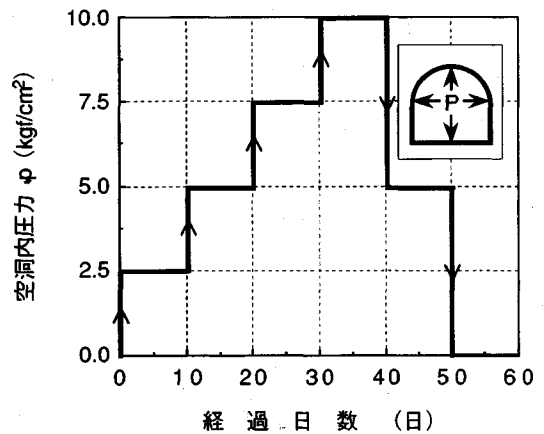


図-2 設定空洞内圧の経時変化

表-1 解析用物性値一覧表

変形係数 E	5,000 kgf/cm <sup>2</sup>
ポアソン比 $\nu$	0.33
透水係数 k	$1.0 \times 10^{-6}$ cm/sec
側方応力係数 $K_0$	1.0
単位体積重量 $\gamma$	$2.0 \times 10^{-3}$ kgf/cm <sup>3</sup>

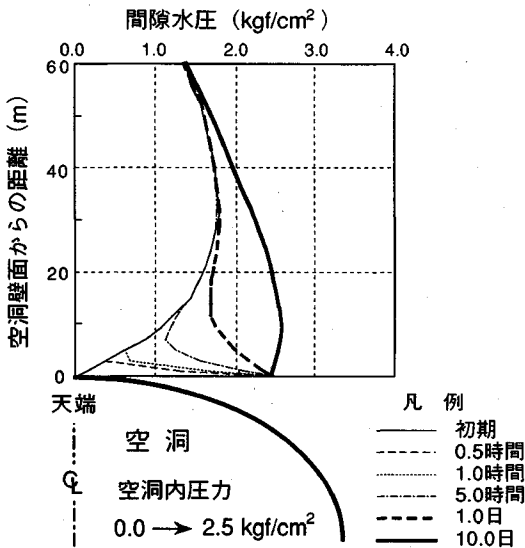


図-3 間隙水圧分布の経時変化 (自然水封モデル)

0.0 kgf/cm<sup>2</sup> の段階的に変化させるものとした。なお、この空洞内圧は、図-1 (c) の境界条件に示すように空洞の壁面の全域に作用するものとした。

また、図-1 (b) に示す人工水封方式の場合、水封ボーリングの注水圧は、その深度での静水圧に相当する 8.5 kgf/cm<sup>2</sup> と設定した。

解析用物性値は、堆積軟岩を想定し表-1 に示すように設定した。

さらに、初期応力分布および初期間隙水分布は、地表面を原点とした有効土被り圧による等方応力、静水圧を仮定した条件で、空洞を掘削した解析結果での定常状態を採用した。

(2) 解析結果および考察

自然水封方式での、空洞内圧の変化に伴う周辺岩盤内の間隙水圧分布の変化についての解析結果として、空洞内圧を 0.0→2.5 kgf/cm<sup>2</sup> まで加圧した後の、空洞天端方向の間隙水圧分布の経時変化を図-3 に示す。

図-3 に示すように、空洞内圧を増加させた直後に間隙水圧が、初期状態である空洞掘削後の間隙水圧分布から上昇するのは、空洞から数 m のごく近傍の領域に限定される。その後、空洞に近い領域から順次間隙水圧は上昇し始め、その間隙水圧が上昇する範囲が空洞から離れた領域へと拡大していく。ただし、この間隙水圧変動は、天端から約 60 m、すなわち空洞を面積が等価な円に換算した場合の直径  $D$  ( $D$ =約 21 m) との比で約 3.0  $D$  の空洞天端からの距離で収束する傾向にある。

なお、従来の水封式燃料貯蔵方式での燃料の液密性・気密性の判定規準としては、Åberg<sup>3),4)</sup> の理論に示されるように、定常状態での空洞天端の鉛直動水勾配が適用されてきた。ここでは、この判定規準の妥当性について

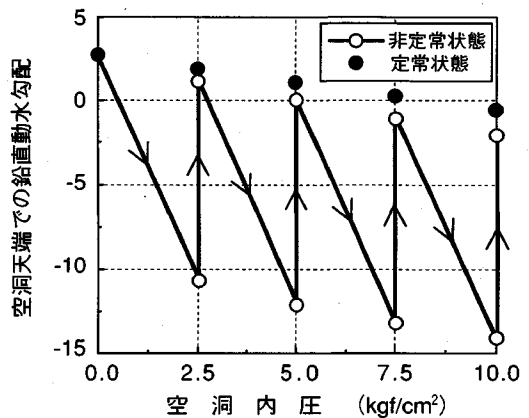


図-4 空洞天端での鉛直動水勾配の推移 (自然水封モデル)

検討するため、図-3 に示すような段階的な空洞加圧に伴う非定常過程を含めた間隙水圧分布に対する、空洞天端位置での鉛直動水勾配を算定する。なお、ここでの鉛直動水勾配とは、各タイムステップに対する空洞天端の要素を構成する各節点の全水頭値より算定した要素中心での動水勾配の鉛直成分と定義する。

各空洞内圧の上昇段階毎での、加圧直後および加圧 10 日後の空洞天端での鉛直動水勾配と、二次元定常浸透流解析による空洞天端での定常状態の鉛直動水勾配の比較を図-4 に示す。なお、同図に示す鉛直動水勾配の符号は、空洞に流入する方向を正の値とし、空洞から流出する方向を負の値と定義する。

図-4 の鉛直動水勾配の比較結果に示すように、空洞加圧時の空洞天端での動水勾配は、加圧直後に最小値となり、定常状態で最大値となる。この動水勾配の変化傾向は、図-3 の間隙水圧分布の経時変化に示したように、急速な空洞内圧の変化に対して、周辺間隙水圧の変化が遅れて生じることに起因する。すなわち、空洞内圧増加直後には、空洞近傍の間隙水圧の増加が、空洞内圧の増加に比べて小さいために、一時的に動水勾配の方向が逆転して最小値となる。その後、空洞周辺の間隙水圧が上昇するに連れて、動水勾配の値は上昇する。

そして、この自然水封方式の解析結果で、空洞加圧 10 日後の地下水挙動は、定常状態に達していないため、空洞天端での鉛直動水勾配は、定常状態の値より多少小さな値となる。

この結果より、空洞天端での鉛直動水勾配は、空洞内圧が 7.5 kgf/cm<sup>2</sup> までは空洞内圧上昇直後には負の値となるが、定常状態に到達すれば、空洞の液密性を満足する正の値まで回復する。ただし、定常状態に到達する前に、空洞内圧を上昇させた場合には、空洞天端での鉛直動水勾配は、定常解に比べて小さな値で推移し、空洞内圧が大きくなるに連れてその差は大きくなる。例えば、図-4 に示す結果で、一サイクルが 10 日とした空洞内

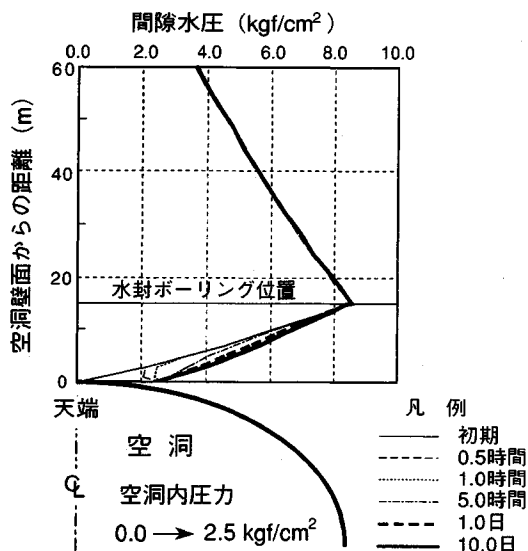


図-5 間隙水圧分布の経時変化 (人工水封モデル)

圧の上昇パターンでは、鉛直動水勾配が正の値に回復するのは、空洞内圧が5.0 kgf/cm<sup>2</sup>までとなる。

以上の検討結果より、燃料を貯蔵する前に空洞を所定の圧力まで加圧した状態で、空洞周辺の地下水挙動が定常状態に到達した場合に、その段階での最大値となる動水勾配を確保することが可能となる。つまり、地下水挙動が定常状態に到達していることを前提条件として、加圧方式での水封式燃料貯蔵施設の液密性・気密性の検討にも、従来のように定常状態の動水勾配を判定の規準として適用可能である。ただし、この場合には、燃料貯蔵前の空洞加圧状態で、空洞周辺の地下水挙動が、動水勾配が最大値となる定常状態に到達するまでの経過時間の判定が最重要な検討課題となる。そして、燃料貯蔵前の空洞加圧時の地下水挙動が定常状態に到達していない場合は、定常解に基づく燃料の液密性・気密性の判定結果は過大評価になる危険性がある。

一方、人工水封方式での、空洞内圧の変化に伴う周辺岩盤内の間隙水圧分布についての解析結果として、空洞内圧が0.0→2.5 kgf/cm<sup>2</sup>の加圧過程での、空洞天端方向の間隙水圧分布の変化を図-5に示す。

人工水封方式での空洞天端方向の間隙水圧変化の傾向は、自然水封方式での解析結果と同様に、内圧変化直後に空洞近傍のみでの間隙水圧変化が変化した後、空洞に近い領域から順次間隙水圧の変化する範囲が空洞から離れた領域へと拡大していく。ただし、その間隙水圧が変動する領域は空洞と水封ボーリングとの間の範囲に限定される。

ここで、自然水封モデルを用いた検討と同様に、各空洞内圧上昇段階毎での、加圧直後および加圧10日後の空洞天端の鉛直動水勾配と、二次元定常浸透流解析によ

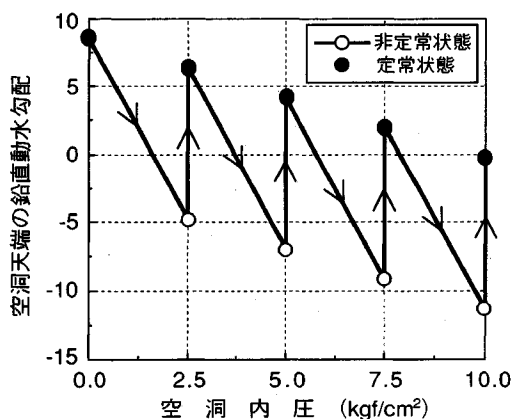


図-6 空洞天端での鉛直動水勾配の推移 (人工水封モデル)

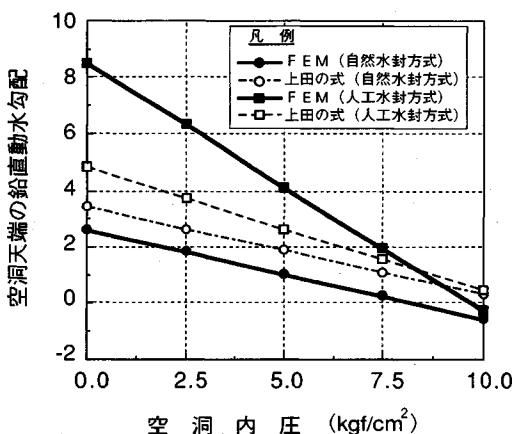
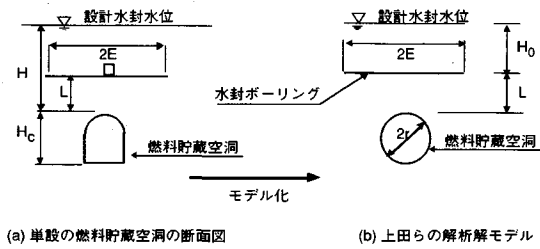


図-7 空洞天端の定常状態での鉛直動水勾配の比較

る定常状態の空洞天端の鉛直動水勾配の比較を図-6に示す。

図-6の鉛直動水勾配の比較結果に示すように、空洞加圧時には、動水勾配は、加圧直後が最小値となり、定常状態が最大値となる。そして、人工水封方式の解析結果で、空洞加圧10日後の地下水挙動は、ほぼ定常状態に到達している。これは、水封ボーリングの圧力境界の影響により、空洞周辺の間隙水圧挙動の変化が早期に終了するためである。つまり、人工水封方式では、燃料の液密性・気密性を定常状態の動水勾配により判定するための前提条件である、空洞周辺の地下水挙動が定常状態に到達するまでの時間が短縮される。したがって、人工水封方式を適用することにより、設計段階で従来のように定常状態が動水勾配を判定の規準として適用することの妥当性が高くなる。

また、図-6に示す結果より、空洞天端での鉛直動水勾配は、空洞内圧が約9.0 kgf/cm<sup>2</sup>までは空洞内圧上昇直後には負の値となるが、定常状態に到達すれば、空洞の液密性を満足する正の値まで回復する。このため、空



(a) 単設の燃料貯蔵空洞の断面図 (b) 上田らの解析解モデル  
 図-8 単設の燃料貯蔵空洞の横断面の解析のモデル化<sup>2)</sup>

洞の設置深度が同じ場合には、人工水封方式の方が、自然水封方式に比べて大きい鉛直動水勾配を確保することが可能となる。

次に、以上の自然水封方式および人工水封方式での、空洞内圧変化に伴う非定常状態での地下水挙動の解析結果に基づき、図-1に示す構造系での、定常状態での解析結果より燃料の気密性・液密性について検討する。なお、この検討では、Åbergの提案する空洞天端での鉛直動水勾配が1.0を上回ることを判定規準とする。

図-7に、FEMによる定常浸透流解析結果での空洞天端での動水勾配を示した。なお、同図には参考のために、図-8に示すようなモデル化の下での駒田ら<sup>5)</sup>によって誘導された式(1)に基づく、空洞周辺の平均的な動水勾配の算定結果を併せて示した。

$$I_0 = \frac{Q}{2\pi rk} = \frac{H_0 - \left(\frac{P_c}{\gamma_w} - L^*\right)}{r + \ln \frac{a + (L^* - r) / \sqrt{E^2 + (L^* - r)^2}}{a - (L^* - r) / \sqrt{E^2 + (L^* - r)^2}}} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

$$Q = \frac{2\pi k \left\{ H_0 - \left(\frac{P_c}{\gamma_w} - L^*\right) \right\}}{\ln \frac{a + (L^* - r) / \sqrt{E^2 + (L^* - r)^2}}{a - (L^* - r) / \sqrt{E^2 + (L^* - r)^2}}}$$

$$a = \sqrt{\frac{L^{*2} - r^2}{\sqrt{\{(L^* + r)^2 + E^2\} \{L^* - r\}^2 + E^2}}}$$

$$L^* = L + r$$

ここに、それぞれ、 $I_0$ は貯油槽周辺の動水勾配、 $Q$ は貯油槽への湧水量、 $k$ は透水係数、 $P_c$ は空洞内圧、 $E$ は水封ボーリングの長さ、 $L$ は水封ボーリングから空洞天端までの長さを表す。なお、ここでの動水勾配 $I_0$ は、実用的に空洞壁面での平均的な法線方向の動水勾配を表す。

図-7に示すように、FEM解析結果での空洞天端の鉛直動水勾配が1.0を上回る空洞内圧は、自然水封方式では約5.0 kgf/cm<sup>2</sup>、人工水封方式では約8.5 kgf/cm<sup>2</sup>と推定される。したがって、燃料貯蔵用空洞の設置深度が同じ場合には、人工水封方式の方が、自然水封方式に比べて高い空洞内圧に対して気密性を確保することが可

能である。なお、空洞内圧が10.0 kgf/cm<sup>2</sup>の場合には、水封ボーリング位置での静水圧である水封水圧の効果が見失われるため、人工水封方式と自然水封方式での鉛直動水勾配の算定値はほぼ一致した結果となる。

一方、参考のために示した、式(1)に基づく平均的な動水勾配は、FEM解析結果と定量的には一致しない。特に、空洞内圧を10.0 kgf/cm<sup>2</sup>の場合には、式(1)に基づく平均的な動水勾配は、FEM解析結果と異なり正の値となり、式(1)に基づく液密性・気密性の判定は過大評価となる。

したがって、式(1)は、水封式燃料貯蔵施設の液密性・気密性の判定のための規準式ではなく、あくまで人工水封方式での水封設備の諸元を定めるための簡易的に留めるものと位置付けるべきである。

以上の検討結果より、加圧方式による水封式燃料貯蔵施設での燃料の液密性・気密性の設計には、一般的な条件を考慮できるFEM解析を適用すべきである。また、その解析手法としては、燃料貯蔵前の空洞周辺の地下水挙動が定常状態に到達していることを前提条件として、定常浸透流解析手法が適用可能である。ただし、この場合には、燃料貯蔵前の空洞加圧状態で、空洞周辺の地下水挙動が、動水勾配が最大値となる定常状態に到達するまでの経過時間の判定が最重要な検討課題となる。

### 3. 原位置での空洞内圧変化に伴う地下水挙動に関する検討

本章では、第三紀泥岩中に建設された空洞で実施された加圧実験時の地下水挙動<sup>10),11)</sup>について分析するとともに、その挙動解析に対する本検討に示した数値解析方法の適用性について検討を加える。

#### (1) 概要

実験サイトの地質は、事前の地質調査結果および試掘坑内の観察結果から、新第三紀鮮新世の泥岩からなり、一部に砂層を介在しているが、卓越した亀裂のない均質な層であることが確認されている。

事前調査で得られた岩石の平均的な物性は、表-2に示すように要約される。

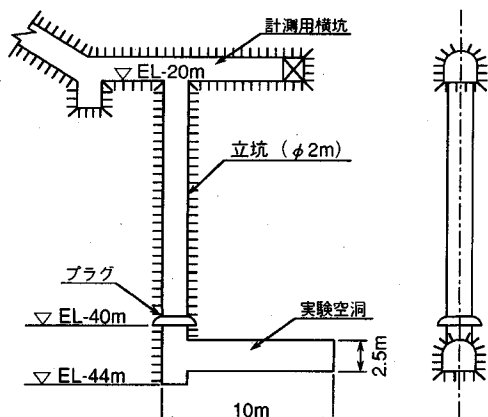
加圧用の実験空洞は、図-9に示すように、地表面下約100m(地下水位下約60m)の深度に設置されており、事前に掘削された上部の計測用横坑から立坑により連結されている。

実験空洞周辺の地下水挙動は、立坑掘削に先立ち計測用横坑から所定の位置に埋設された19個の間隙水圧計(使用範囲0~10 kgf/cm<sup>2</sup>、計測精度±1%以下)により計測された。

なお、地下水位は、立坑掘削開始から加圧実験期間を通して、常にEL+15.0でほぼ一定であり、掘削および加圧による外乱の影響を受けなかった。

表—2 岩石の物性値一覧表

比重 $G_s$	2.51	
間隙比 $e$	1.25	
弾性波速度 $v_p$ (km/sec)	1.8~2.1	
変形係数 $E$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	平板載荷試験	5,000~6,000
	室内三軸圧縮試験	3,000~10,000
透水係数 $k$ (cm/sec)	湧水圧試験 (JFT)	$1.2 \times 10^{-6}$
	室内透水試験	$(1.6 \sim 4.8) \times 10^{-7}$



図—9 実験施設の概要

ここで、この実験での空洞内圧の設定方法は、表—3に示すように、注水による加圧方式と圧気による加圧方式に分けられる。

注水加圧方式の実験では、プラグにより密閉された実験空洞内の水位を上昇させて空洞の空気の体積を減少させることで、ボイルの法則に基づき空洞内圧を上昇させた。具体的な実験工程は表—3に示すように、注水により実験空洞内圧を  $0.0 \text{ kgf/cm}^2$  から  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  単位で  $2.0 \text{ kgf/cm}^2$  まで上昇させた後、排水により空洞内水位を  $1.0 \text{ kgf/cm}^2$  単位で低下させた。

一方、圧気加圧方式の実験では、空洞内水位を低下させて、密閉した実験空洞をほぼ空の状態に保ち、空気圧により実験空洞内圧を上昇させた。具体的な実験工程は、表—3に示すように、空気圧を  $0.0 \text{ kgf/cm}^2$  から  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  単位で  $2.0 \text{ kgf/cm}^2$  まで上昇させた後減圧した。

## (2) 空洞加圧時の地下水挙動

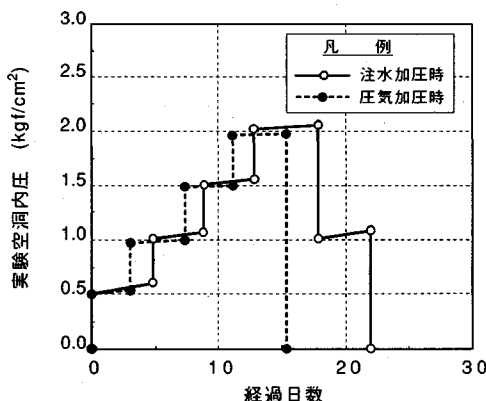
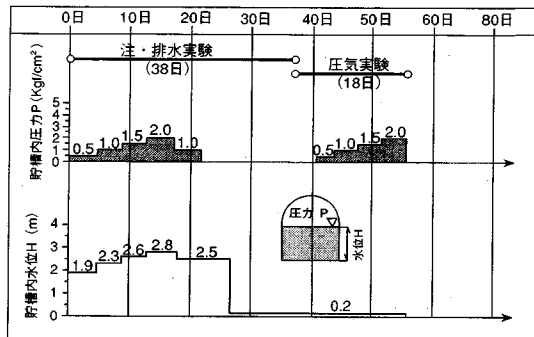
本節では、実験空洞での注水加圧実験と圧気加圧実験時の周辺間隙水圧の変化の相関について検討する。

### a) 地下水挙動の計測結果

当初、注水加圧実験および圧気加圧実験での空洞内圧は、表—3に示すような加圧ステップが計画された。

これに対して、実験過程での空洞内圧は、加圧中の実験空洞への湧水により空洞内水位が上昇するため、図—10に示すように、安定値になるまで上昇する傾向を示した。この内圧の上昇傾向は、空洞内の空気量が少ない

表—3 実験空洞内圧と水位の関係



図—10 実験空洞内圧の経時変化の比較

注水加圧実験で顕著に現れている。これに対して、圧気加圧実験では空洞内水位が低いため、実験中の空洞内圧の上昇量は、注水加圧実験に比べて小さくなっている。このため、空洞内圧が安定するまでの時間は、図—10に示すように、全般的に注水加圧実験の方が圧気加圧実験に比べて長くなっている。ただし、計画空洞内圧が高くなるに連れて、実験空洞への湧水が減少するため、この実験中の空洞内圧の上昇量は小さくなった。

ここで、両加圧実験での間隙水圧の伝播状況を把握するため、各加圧段階毎での空洞内圧変化量  $\Delta p_0$  に対する空洞周辺での間隙水圧の変動量  $\Delta p$  の比（以下間隙水圧変動率と称する）と、実験空洞壁面からの距離の関係を図—11に示した。なお、この計測結果の整理で、各加圧段階毎での空洞内圧変化量  $\Delta p_0$  は、図—10に示す実測の案内空洞圧力に基づき算定した。また、空洞周辺での間隙水圧の変動量  $\Delta p$  は、空洞内圧変化量  $\Delta p_0$  を算定したのと同時点での加圧後 3~5 日目の間隙水圧の変化量に基づき算定した。

図—11に示すように、両加圧実験結果での空洞周辺の間隙水圧の変動率は、空洞壁面近傍ほど大きく、空洞から離れるに連れて小さくなる。そして、この空洞周辺の間隙水圧変動は、壁面から 8~10 m、すなわち空洞を

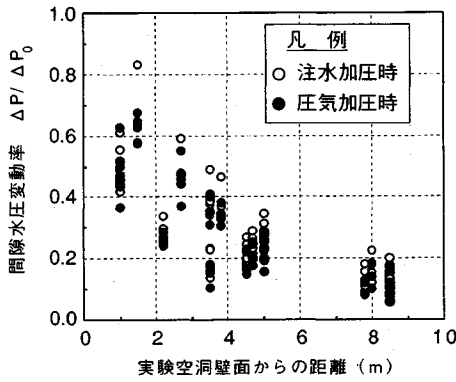


図-11 圧力変動率と空洞壁面からの距離の関係

表-4 解析用物性値

	泥岩層	砂層
変形係数 E	5,000 kgf/cm <sup>2</sup>	1,000 kgf/cm <sup>2</sup>
ポアソン比 $\nu$	0.33	0.33
透水係数 k	$3.0 \times 10^{-7}$ cm/sec	$1.0 \times 10^{-3}$ cm/sec
側方応力係数 $K_0$	1.0	1.0
単位体積重量 $\gamma$	$2.0 \times 10^{-3}$ kgf/cm <sup>3</sup>	$2.0 \times 10^{-3}$ kgf/cm <sup>3</sup>

面積が等価な円に換算した場合の直径  $D$  ( $D \approx 2.6$  m) との比で  $3.0D \sim 3.8D$  の空洞壁面からの距離で収束する傾向にある。なお、この間隙水圧変動の影響範囲が空洞の換算直径の約  $3D$  程度に限定される傾向は、図-3 に示した自然水封モデルでの解析結果とほぼ一致している。

また、図-11 に示す間隙水圧変動率と空洞壁面からの距離との関係で、注水加圧実験結果と圧気加圧実験結果の間に、有意な相違は認められない。この傾向を明らかにするために、同じ計測箇所での注水加圧実験と圧気加圧実験の間隙水圧変動率の相関を図-12 に示した。同図に示すように、両加圧実験結果での間隙水圧変動率は、多少のパラッキはあるがほぼ同じ程度の値となっている。

これらの図に示すように、この実験では加圧方式による間隙水圧変動の相違は僅かであった。

(3) 計測結果の解析および考察

ここでは、(1) に示した空洞内圧変化に伴う空洞周辺岩盤での非定常的な間隙水圧変化について解析し考察を加える。なお、この検討に適用する解析手法としては、これまでの筆者ら<sup>9), 12)</sup>の研究成果に基づき、対象とする岩盤の変形係数が  $10,000$  kgf/cm<sup>2</sup> 以下であることから、二次元平面ひずみ場のモデルに応力・浸透連成解析手法を適用した。

a) 解析条件および解析モデル

(1) に示した空洞内圧変化に伴う間隙水圧の計測結果は、実験空洞での加圧実験に先立つ、図-9 に示した計測用横坑・作業用斜坑・立坑・実験空洞の掘削による影響を受けたものである。これに対して、本検討の目的

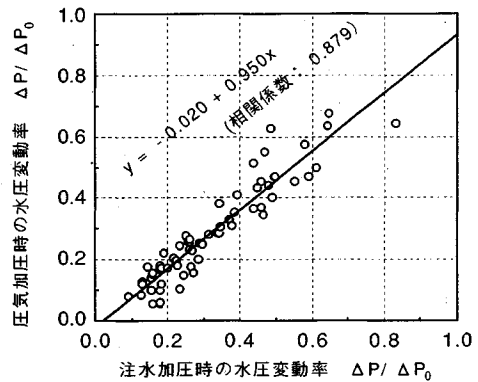
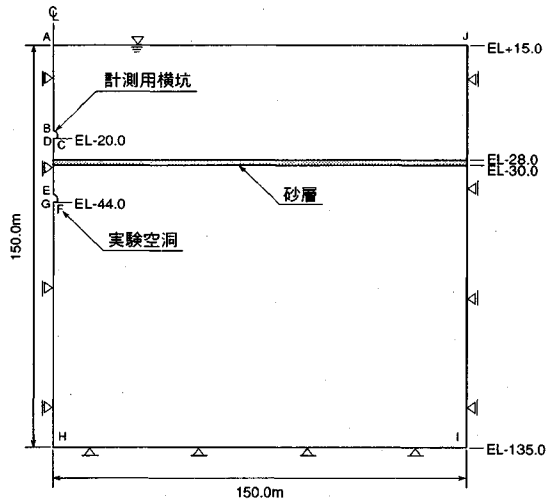


図-12 注水加圧時と圧気加圧時の水圧変動率の比較



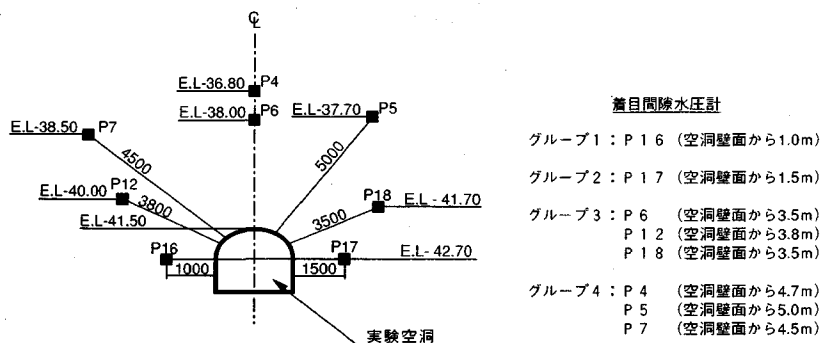
力学的境界条件	
変位既知境界	A-B, D-E, G-H, I-J ( $U_x=0$ ), H-I ( $U_x=0, U_y=0$ )
応力既知境界	B-C, D-E, F-G (空洞内圧力)
水理学的境界条件	
圧力既知境界	B-C, D-E, F-G (空洞内圧力), J-A ( $\psi=0$ ), I-J (静水圧)
流量既知境界	A-B, D-E, G-H, H-I ( $Q=0$ )

図-13 解析モデル図および境界条件

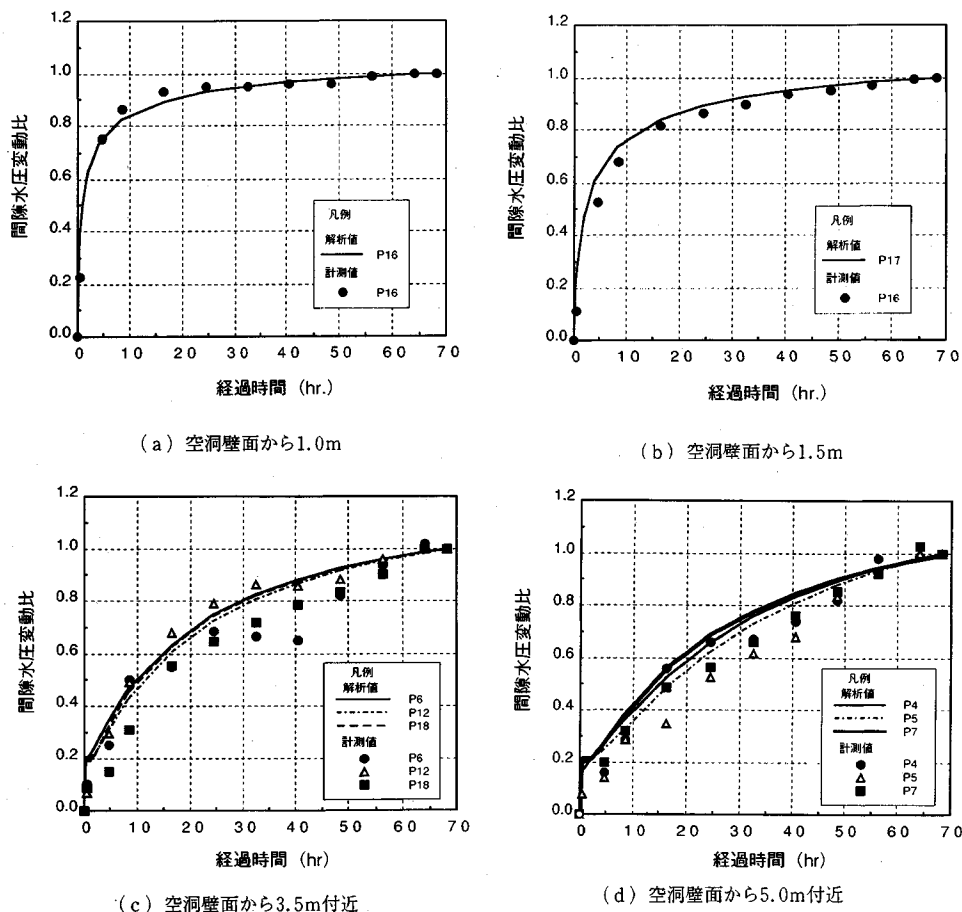
は、空洞全域に内圧が作用した場合の周辺岩盤内への非定常的な間隙水圧の伝播して行く特性について評価することである。このため、本解析では、計測値自体ではなく、空洞加圧に伴う間隙水圧変化について定性的な比較検討を行う。

なお、本解析では、(1) に示したように圧気加圧実験の方が実験空洞への湧水に伴う空洞内圧変化が小さいことから、解析対象としては圧気実験を採用した。

解析モデルとしては、図-13 に示す二次元平面ひずみモデルを採用した。また、この解析での境界条件を同図に併せて示した。



図—14 着目間隙水圧計位置図



図—15 間隙水圧変動比の経時変化の比較

解析用物性値は、事前の試験結果に基づき、表—4に示すように設定した。

次に、初期応力分布および初期間隙水圧分布は、図—13に示すモデル図での、地表面を原点とした有効土被り圧による等方応力、静水圧を仮定した条件で、計測用横坑および実験空洞を掘削した解析結果での定常状態を採用した。

b) 解析結果および考察

本解析の目的は、a)で述べたように空洞内圧変化に伴う間隙水圧の経時的な変化について検討を加えることである。したがって、解析結果と計測結果の比較は、間隙水圧変動比の経時変化を用いて検討を加える。

ここで、(1)の計測結果の分析より、空洞内圧変化に伴う間隙水圧変化は、実験空洞壁面から離れるに連れて減少する傾向がある。このために、解析結果と計測結果の比較として、図—14に示す実験空洞壁面からそれ



ぞれ1.0 m, 1.5 m, 3.5 m および5.0 mの距離のグループに分類した観測点での間隙水圧変化に着目した。

図-14に示すように実験空洞壁面からの距離で分類した、各グループの観測点での間隙水圧変動比の経時変化の、解析結果と計測結果の比較を図-15に示した。

同図に示す比較で、解析結果の間隙水圧変化は、計測結果と同様に、実験空洞に近い位置では急激に上昇するのに対して、実験空洞から離れるに連れてゆるやかに上昇する傾向を示す。これらの解析結果の内、実験空洞壁面からそれぞれ1.0 m および1.5 mの位置での解析結果の間隙水圧変動比は、計測結果とほとんど一致している。また、実験空洞壁面からそれぞれ3.5 m および5.0 mのグループでの計測結果の間隙水圧変動比は多少バラツキを示すが、解析結果の変動比はほぼ計測値を平均した範囲の値を示す。

以上の比較結果より、空洞内圧の上昇に伴う周辺岩盤内での非定常的な間隙水圧の変化挙動について、解析結果は計測結果と概ね良好な一致を示している。

したがって、本検討に示した数値解析手法は、液化プロパンガス等を対象とした加圧方式による水封式燃料貯蔵での、空洞内圧変化に伴う水封機能性の検討に適用する上で有効であることが確認された。

#### 4. 結 論

本研究では、加圧方式による水封式燃料貯蔵施設を対象とし、燃料貯蔵前の空洞加圧に伴う空洞周辺岩盤内の非定常的な地下水挙動を評価するための基礎的な検討を加えた。この検討で得られた知見は、以下のように要約される。

1) 空洞加圧時の地下水挙動の評価についての検討結果より、以下のような知見が得られた。

a) 空洞加圧時の空洞周辺の動水勾配は、加圧直後に最小値となり、定常状態で最大値となる。このため、地下水挙動が定常状態に到達していることを前提条件として、加圧方式での水封式燃料貯蔵施設の液密性・気密性の検討にも、従来のように定常状態の動水勾配を判定の規準として適用可能である。ただし、この場合には、燃料貯蔵前の空洞加圧状態で、空洞周辺の地下水挙動について、動水勾配が最大値となる定常状態に到達するまでの経過時間の判定が最重要な検討課題となる。そして、燃料貯蔵前の空洞加圧時の地下水挙動が定常状態に到達していない場合は、定常解に基づく燃料の液密性・気密性の判定結果は過大評価になる危険性がある。

b) 加圧方式での水封式燃料貯蔵施設の燃料の液密性・気密性を検討する上で、人工水封方式を適用することにより、自然水封方式に比べて空洞周辺の地下水挙動が定常状態に到達するまでの時間が短縮される。このため、設計段階で、従来のように定常状態の動水勾配を判定

の規準として適用することの妥当性が高くなる。

2) 原位置での、空洞加圧に伴う間隙水圧変動についての挙動解析結果より、空洞内圧の変化に伴う周辺岩盤内での非定常的な間隙水圧の変化挙動は、二次元モデルによる数値解析により表現されることが確認された。この結果より、本検討に示した二次元平面ひずみモデルを用いた数値解析手法は、空洞内圧変化に伴う非定常的な地下水挙動の評価および予測に適用する上で有効であることが確認された。したがって、本検討に示した数値解析手法は、液化プロパンガス等を対象とした加圧方式による水封式燃料貯蔵での、空洞内圧変化に伴う水封機能性の検討に適用する上で有効であることが確認された。

最後に、本研究を進めるに当たり、終始温かい御指導と御助言を賜った京都大学工学部足立紀尚教授に心より感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 上田年比古・杉尾哲：被圧水で満たされた円形暗渠の取水量について、土木学会論文報告集, No. 194, pp. 92~101, 1971.
- 2) 駒田広也・中川加明一郎・北原義浩・林正夫：水封式燃料地下貯蔵用空洞周辺の浸透流に関する検討, 土木学会論文報告集, No. 300, pp. 69~80, 1980.
- 3) Åberg, B.: Model Tests on Oil Storage in Unlined Rock Cavems, Storage in excavated rock cavems, Rock Store 77 Vol.2, pp.517~530, 1977.
- 4) Åberg, B.: Prevention of Gas Leakage from Unlined Reservoirs in Rock, Rock Store 77 Vol.2, pp.399~414, 1977.
- 5) 宮永佳晴・福原明：地下石油備蓄基地の設計について、電力土木, No. 219, pp. 63~74, 1989.
- 6) 花村哲也：地下空間と地下水環境, 昭和63年地下水技術協会秋期講習会テキスト, pp. 59~77, 1988.
- 7) 佐藤邦明・伊藤洋・坂口雄彦：地下空間からの漏気について、土木学会, 地下空間利用シンポジウム1990, pp. 145~150, 1992.
- 8) 坂口雄彦・伊藤洋・佐藤邦明・清水昭男：岩石および開口割れ目における透気に関する基礎研究, 土木学会論文報告集, No. 445/Ⅲ-18, pp. 17~25, 1992.
- 9) 大津宏康・大西有三・亀村勝美：間隙水と変形・応力の連成を考慮した地盤構造物の設計に関する一考察, 土木学会論文報告集, No. 457/Ⅲ-21, pp. 87~96, 1992.
- 10) 伊佐秀・鎌富淳一・大川孝：泥岩内小空洞における注水加圧実験(その1 空洞の気密性について), 第38回土木学会年次講演会講演集, Ⅲ-127, pp. 251~252, 1983.
- 11) 下茂直人・立石章・亀村勝美・大津宏康：泥岩内小空洞における注水加圧実験(その2 岩盤内の地下水挙動について), 第38回土木学会年次講演会講演集, Ⅲ-128, pp. 253~254, 1983.
- 12) 大津宏康：地下水制御とその大規模地下構造物への適用に関する研究, 京都大学博士論文, 1993.

(1993. 10. 20 受付)

## A STUDY ON THE ESTIMATION OF GROUND WATER BEHAVIOR DUE TO CONSTRUCTION OF UNDERGROUND PRESSURIZED FUEL STORAGE PLANT

Hiroyasu OHTSU, Yuzo OHNISHI and Tetsuya ADACHI

This paper is concerned with the estimation of ground water behavior surrounding underground pressurized fuel storage plant. The investigation describes an unsteady ground water behavior due to pressuring rock cavern prior to storage of fuel. The results make it clear that a vertical hydraulic gradient, which is the index determining whether pressurized fuel is stored safely or not, becomes the minimum value just after pressurization of storage caverns, while it becomes the maximum value at the steady state. Therefore, the prediction of elapsed time until ground water behavior surrounding underground becomes steady state is the most important factor to investigate the safety of pressurized fuel storage plant. And also, this finding was verified through the investigation of in-situ experimental results.

---