

水封ボーリングを用いた LPG貯蔵空洞周辺の水封機能確認方法

下茂 道人^{1*}・真下 秀明¹・前島 俊雄²・山本 浩志²・青木 謙治³

¹大成建設株式会社 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²(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)

³京都大学大学院工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

*E-mail: michito.shimo@sakura.taisei.co.jp

石油やLPGの備蓄方式の一つである水封式地下備蓄は、岩盤内空洞に貯めた液体およびガス燃料を、空洞に向かう地下水の流れにより封じ込める方式であり、各国で多くの実施例がある。通常のトンネルや地下空洞工事と異なり、貯蔵空洞の建設では施工中における地下水の保持が非常に重要である。筆者らは、地下水保持の目的で設置する水封ボーリングが、貯槽を囲うように配置されていることに着目し、同ボーリングを施工中の地下水管理に用いる手法を考案した。本論文では、列状に配置された水封ボーリングを用いた岩盤内の水みち調査および貯槽周辺の水圧低下部の探査方法について述べた後、現在(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構が愛媛県波方町に施工中のプロパン貯槽工事に適用して得られた知見を示す。

Key Words : LPG underground storage, groundwater management, hydraulic connections, shut-in test

1. はじめに

石油やLPGの備蓄方式の一つである水封式地下備蓄は、岩盤内空洞に貯めた液体およびガス燃料を、空洞に向かう地下水の流れにより貯蔵する方式¹⁾であり、各国で多くの実施例がある。日本では、現在、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構が、愛媛県波方町、岡山県倉敷市の2サイトにおいて、同方式によるわが国初となるLPG地下備蓄空洞の建設を進めている²⁾。図-1に、波方基地における地下備蓄空洞のレイアウトを示す。通常のトンネルや地下空洞工事と異なり、貯蔵空洞(以下、貯槽と呼ぶ)の建設では、水封性確保のため、完成時はもちろん施工中においても空洞周辺岩盤内の地下水保持が重要である。このため、貯槽周辺に水封ボーリングと呼ばれる注水孔を配置し、水封機能を損なう恐れのある地下水位や間隙水圧の低下を防止する。また、地下水管理のための情報化施工の観点から、地表面や水封トンネルから削孔した観測ボーリングによる地下水位や間隙水圧の常時監視および水封水供給量や貯槽湧水量測定による水収支の評価を行なう。

筆者らは、上記の観測に加え、貯槽周辺の水理特性や地下水状況を調査する方法を新たに考案した。これは、水封ボーリングが貯槽を取り囲むように規則的に配置されていることに着目した方法で、水みちの分布や地下水

圧に関する網羅的な情報が得られる利点がある。本報では、調査手法について述べた後、プロパン貯槽工事に適用して得られた知見を示す。

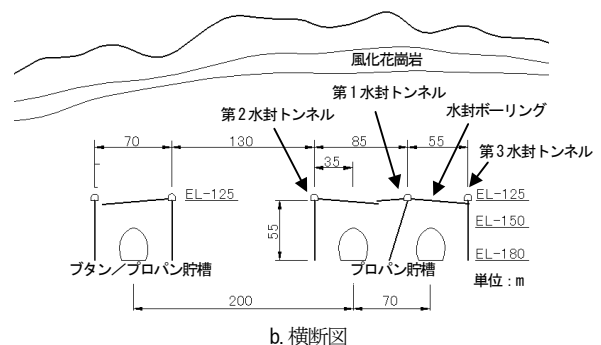
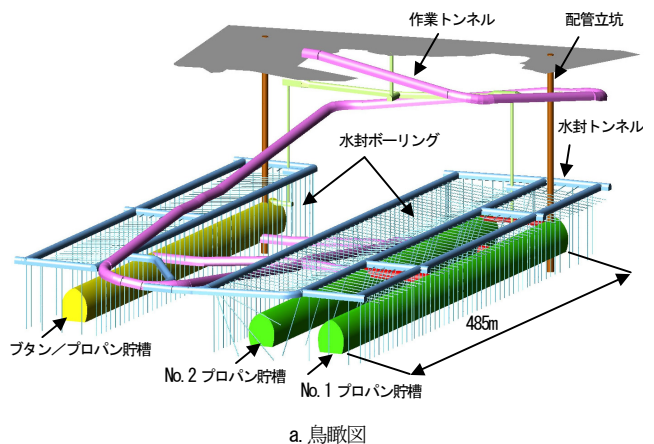


図-1 波方LPG地下備蓄基地の空洞配置

2. 波方基地の概要

建設地点は、愛媛県高縄半島先端部から西方に延びる東西約 3km 南北 0.8km の岬に位置する。地表は、最高標高 96m の山稜で侵食により細かな沢地形を呈している。地質は、中生代白亜紀の花崗岩、花崗閃緑岩が分布しており、一部に石英斑岩の岩脈も見られる。これらの花崗岩類を不整合に覆う第四紀未固結堆積物が分布している。花崗岩は、風化の程度により、風化部、漸移部、新鮮部の 3 層に区分され、新鮮部の平均透水係数は $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 程度である。花崗岩の割れ目は、NW-SE, NE-SW 走向で急傾斜がやや卓越している。貯槽は、幅 26m × 高さ 30m、断面積 650 m^2 の卵形で、プロパン貯槽は 485m の空洞 2 列、ブタン／プロパン貯槽は 430m の空洞 1 列である。貯槽天端標高は、いずれも EL-150m である。

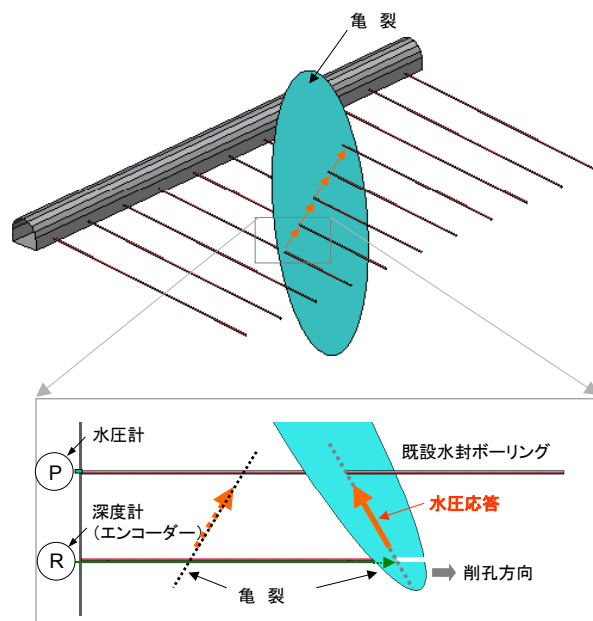


図-2 削孔応答測定による水みち確認法の概念

3. 水封ボーリングを用いた調査手法

水封ボーリングは、貯槽掘削に先立ち、水封トンネルから水平・鉛直（一部斜孔）方向に 10m を基本間隔として平行に掘削する。このような水封ボーリング配置の規則性に着目し、貯槽周辺の水理地質構造や地下水状況を網羅的に把握する下記の 2 種類の調査方法を考案した。

(1) 削孔応答測定による水みち分布の把握

貯槽周辺岩盤内の水みち分布や水理物性の評価には、ボーリング毎にボアホール TV 観察や水理試験を実施するのが望ましいが、長時間の孔口開放による水圧低下が懸念される。また、経済性および工程的にも現実的でない。そこで、図-2 に示すような、削孔工事サイクルの中で実施可能な水みち調査法を考案した。これは、完成したボーリング孔の口元に水圧センサーを設置し、隣接する新設孔の削孔時における水圧変化を測定する方法である³⁾。新設孔が既設孔に連結する水みちを貫くと孔内水圧が低下しその応答が既設孔に伝わる（図-3）。水圧応答時の削孔深度をボーリングマシンに取り付けたロータリーエンコーダで測定し水みちの位置を特定する。削孔完了後、口元にパッカーを設置し、全孔水押し試験により孔周辺岩盤の透水性を調べる。水押し試験の結果、設定値（波方では、1Lu 以上とした）以上の透水性を示す孔では、10m 区間毎の簡易ルジオン試験（初期水圧 + 1MPa での注水試験）を実施し、透水性分布を調べる。完成した孔を測定孔とし、順次削孔応答測定・透水試験を行なうことにより、最終的に水封ボーリングを連ねる面的な水みちおよび透水性分布が得られる。

得られた結果は、プレグラウチングなど貯槽掘削時の地下水対策検討に反映する。

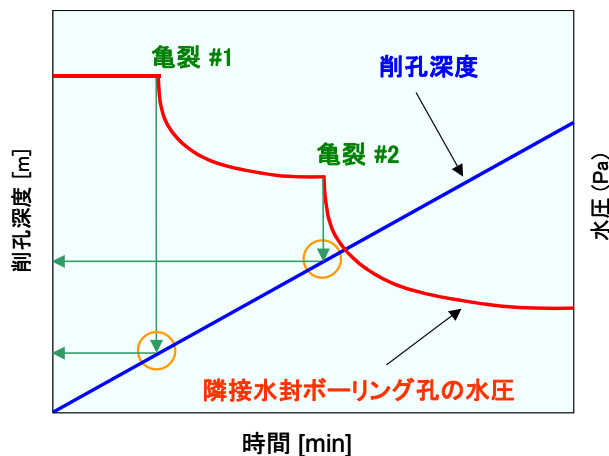


図-3 削孔応答データ（概念図）

(2) 水封ボーリングを用いた水圧低下部の探索

貯槽掘削は、湧水と自然および人工水封による供給水との均衡を保ち地下水圧を所定の値に維持しつつ進めることが重要である。そこで、水封ボーリングを用いた水圧測定方法（以下、水封機能確認試験と称する）を考案した。本試験の概念を図-4 により説明する。水封ボーリングは、貯槽掘削開始前から長期間にわたり給水を継続していることから、当初は準定常状態（水圧や流量が落ち着いた状態）にあると考えられる（図-4a）。水封水圧は全孔同一であるが、注水量はボーリング周辺の透水性に応じて孔毎に異なる。この状態で、ある 1 本の水封ボーリングの注水を停止すると、周辺の水理場は新たな安定水圧場に向かう非定常状態となる（図-4b）。流量 Q_i で注水している孔への注水量を 0 にした場合の水圧変化は、水理学的に見ると当該孔から流量 Q_i で揚水した場合、すなわち、単孔定流量揚水試験における孔内

水頭低下に等しい。さらに、 Q_i はボーリング周辺の透水係数に比例するため、注水停止による仮想的揚水量- Q_i は、透水係数に応じて孔ごとに「自動的に」設定される。以上から、1 本の水封ボーリングからの注水を停止した際の水圧低下は、均質地盤において単位量揚水試験を実施したときのそれに等しい。すなわち、水圧低下量はボーリング周辺の岩盤の透水係数によらず、境界条件（周辺水圧、掘削形状）のみに依存すると考えられる。よって、水封ボーリングへの注水停止後の水圧低下量測定を各水封ボーリングについて実施することにより、貯槽周辺の水圧分布を網羅的に把握することができる。

上記の手法の妥当性を確認するため、3次元 FEM 浸透流解析による数値解析的な検討を行なった。図-5 に示すように、透水性の異なるゾーンで構成される岩盤モデルを考え、1 本の水封ボーリング（図-6 中の試験孔）の注水を停止した後の注水孔の経時的な水圧変化を求めた。表-1 に示すように、透水係数、比貯留係数、境界条件、グラウチングの有無などをパラメータとして、種々の要因が試験孔の水圧低下に及ぼす影響を検討した。

図-7 に、給水停止前後の水封ボーリング標高での定常水頭分布を示す（基本ケース）。均質モデルおよびゾーンモデルの結果はほぼ等しく、給水停止孔の水頭が約 20m 低下する結果となった（図-7a）。一方、高透水ゾーンを介在するモデルでは、初期定常状態において、高透水層に沿った水圧低下領域が形成され、近傍の水封ボーリングからの給水を停止すると、さらに空洞天端近くまで水頭が低下する結果となった（図-7b）。

解析で得られた水圧低下曲線の一例を図-8 に示す。試験孔の水圧は、単孔定流量揚水試験結果と同様に、一定時間経過後、時間の対数に比例して直線的に低下する結果となった。片対数プロット上の水圧低下勾配 $|dH/d\log_{10}t|$ に着目すると、均質モデル 8.0 に対し、高透水層が介在するモデルでは 16.0 となり、均質モデルと比較して対数時間で 2 倍の速度で低下する結果となった。

異なる透水性や境界条件に対して得られた水頭低下速度 $|dH/d\log_{10}t|$ と定常水頭低下量との関係を図-9 に示す。図より、 $|dH/d\log_{10}t|$ と最終安定水頭との間には、一意的な相関関係が見られることから、水封ボーリング周辺の透水性や貯留性によらず、注水停止後の $|dH/d\log_{10}t|$ を知る

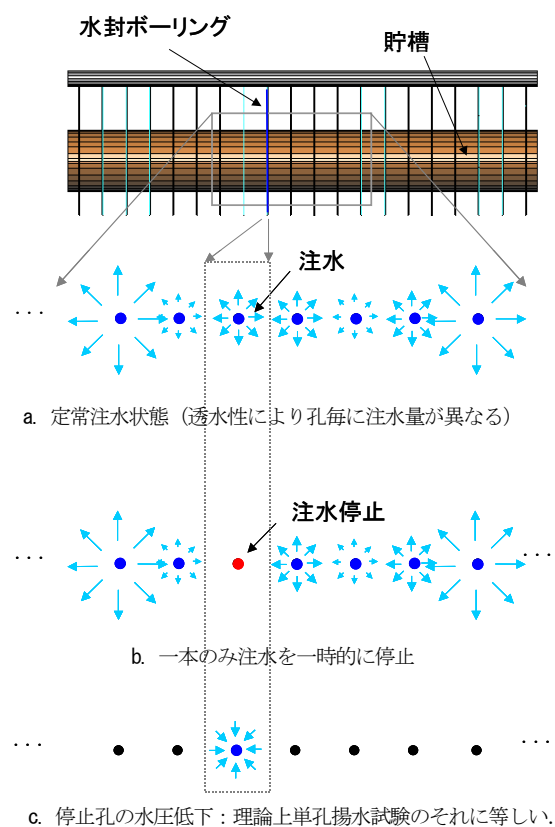


図-4 水封機能確認試験の概念

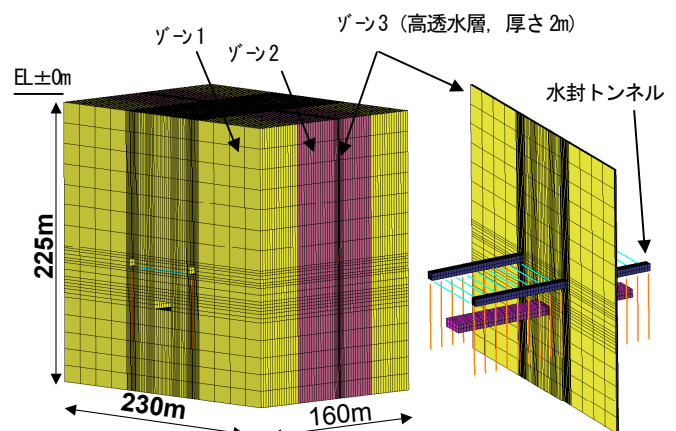


図-5 解析的検討のための三次元モデル（アーチ掘削）

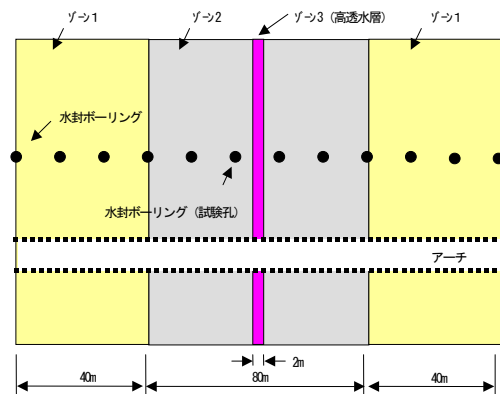
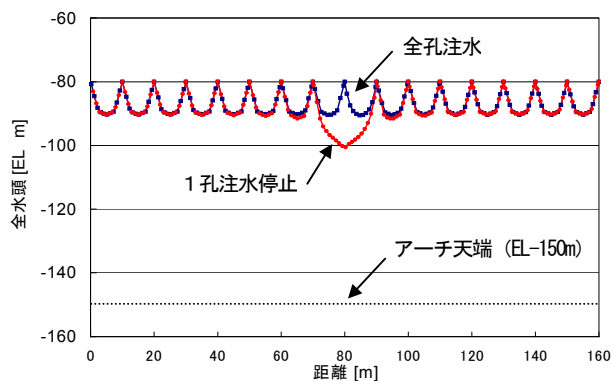


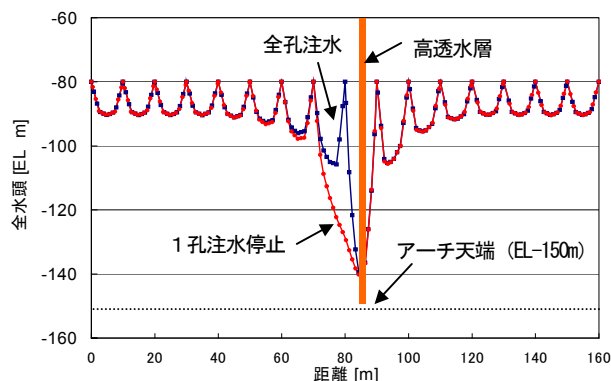
図-6 解析モデル（貯槽中央断面）

表-1 解析ケース

モデル名称	透水係数 [m/s]			比貯留係数 [1/m]	境界条件	グラウト貯槽周辺10m
	ゾーン1	ゾーン2	ゾーン3			
均質モデル	1×10^{-8}	1×10^{-8}		基本ケース 1×10^{-7} 比較ケース 1×10^{-8}	基本ケース 水封水圧 0.45MPa 領域周囲不透水 比較ケース 水封水圧 0.45MPa 地下水位 EL-80mで固定	なし 基本ケース なし 比較ケース 1×10^{-7}
ゾーンモデル	1×10^{-7}	1×10^{-9}				
高透水層介在モデル	1×10^{-7}	1×10^{-8}	基本ケース 1×10^{-6} 比較ケース 1×10^{-5}			



a. 高透水層を含まないモデル (均質モデル)



b. 高透水層を介在するモデル

図-7 注水停止前後の EL-125m レベルの水圧分布

ことにより、定常状態を待たずに最終水頭低下量を推定できることがわかった。

上記の水封機能確認試験により、万一水圧低下箇所が発見された場合には、それまでに得られた地質、透水性、湧水分布、グラウチングデータなどを総合的に分析し原因を究明した上で、必要に応じてグラウチングや水封ボーリングなどの対策を実施する。対策実施後、再度試験を行ない対策効果の確認を行なう。

4. 調査結果

(1) 水封ボーリング削孔応答測定

図-10 に削孔応答測定結果の一例を示す。同図より、深度 62m, 31.7m, 44.5m に明瞭な水圧応答が見られ、新設・既設孔間を連結する水みちがあることが確認された。同様な測定を全ての水封ボーリングの削孔時に実施した結果、貯槽周辺の水みちの分布が図-11 のように得られた。同結果と水押し試験および簡易ルジオン試験から得られた透水性係数分布 (図-12) との比較から透水性がより高い個所に水みちが集中する傾向が明らかになった。

No.3 水封トンネル南側では、縦水封ボーリング削孔時に多数の水圧応答が見られた (図-13a)。ボアホール TV

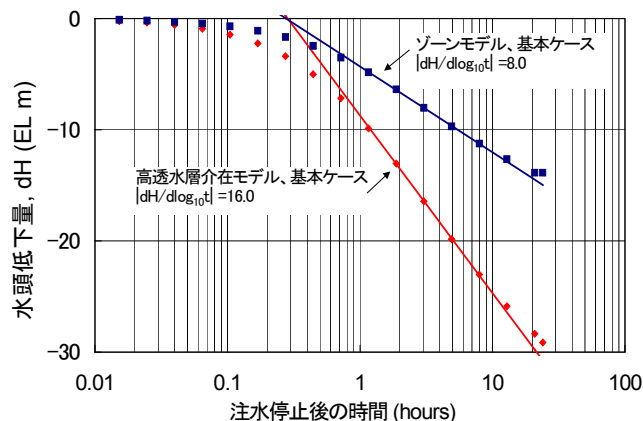


図-8 注水停止後の水頭低下曲線 (解析結果)

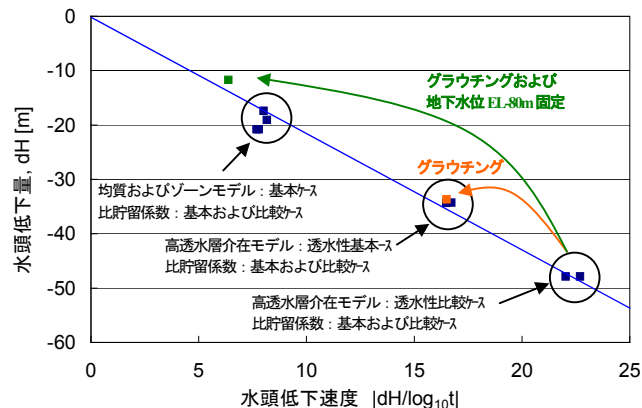


図-9 dH と $|dH/d\log_{10}t|$ との関係 (解析結果)

観察結果から、この領域は低角度の開口亀裂が発達する領域であることが確認された。

No.2 水封トンネル TD382.5 水封ボーリングでは、削孔時に顕著な水圧応答が確認された。水押し試験の結果、孔内に 10Lu を超える区間が確認されたため、ボアホール TV 観察を行なったところ、NS 走向の高傾斜開口亀裂が確認され、直下の貯槽と交差すると推定された。そこで、アーチ掘削時に、切羽からの探査ボーリングを実施したところ、ほぼ想定された位置にこの亀裂が出現したため、プレグラウチングを実施した。その結果、掘削時における同区間の湧水はごく僅かであった。

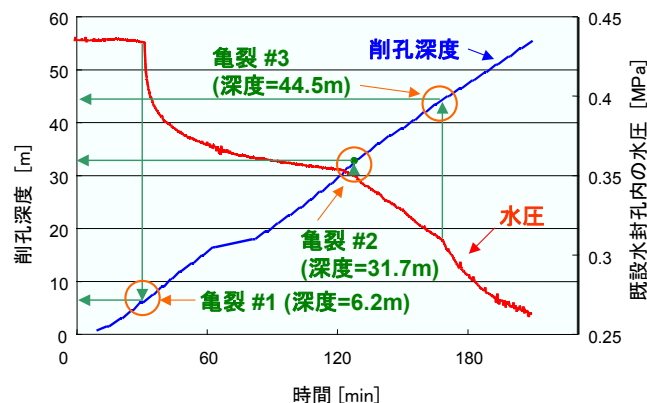


図-10 削孔時の水圧応答データの例 (削孔：第 2 水封トンネル TD42.5m 水平水封ボーリング、既設孔：同 TD32.5m)

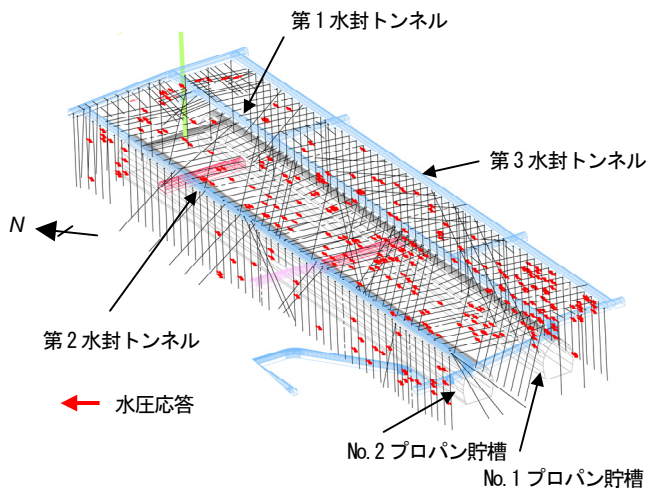


図-11 削孔時の水圧応答分布

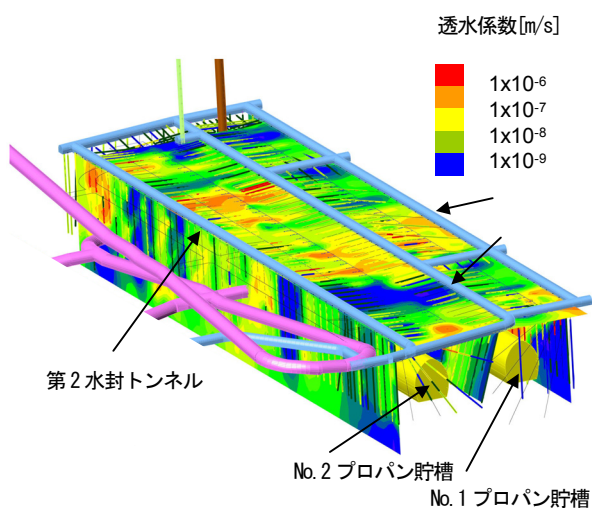


図-12 透水係数分布（水封ボーリングデータより内挿）

以上のように、水封ボーリングを用いた削孔応答測定により、貯槽周辺の水みちの位置や透水性分布を把握でき、貯槽掘削時における地下水対策の立案に有用な情報が得られることが分かった。

(2) 水封機能確認試験

貯槽アーチ部掘削完了時に、水封ボーリング設置工事の途中段階で実施した水封機能確認試験の結果（水平水封 180 孔、縦水封 122 孔）を図-14 に示す。図中の直線は、均質 3 次元モデルで得られた $|dH/d\log_{10}t|$ と水頭低下量の関係を示す。測定値（図中▲）は、数値解析予測結果と整合的である。すなわち、注水を一時停止した水封ボーリングの水頭低下速度 $|dH/d\log_{10}t|$ から当該孔周辺の水頭値を知ることができることが確認された。ただし、 $|dH/d\log_{10}t| > 8$ 以上のボーリング孔については数値解析結果から外れている。これは、過大な水頭低下を避けるため、低下量が 15m を越えた時点で試験を強制終了したことによる。

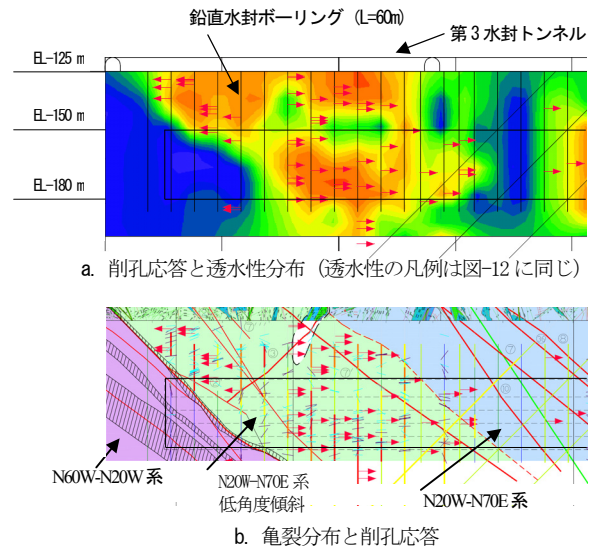


図-13 低角割れ目に沿った水圧応答（第3水封トンネル南鉛直水封ボーリング）

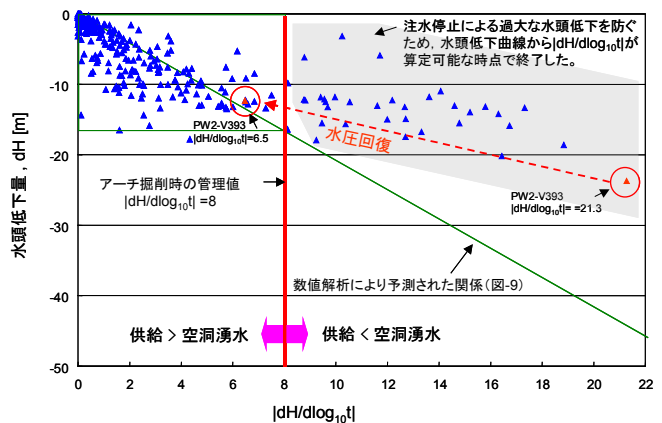


図-14 水封効果確認試験結果（アーチ掘削完了直後）

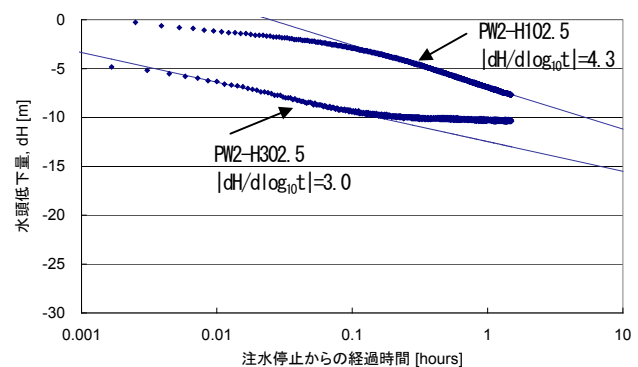


図-15 水封効果確認試験結果（ $|dH/d\log_{10}t| < 8$ の例）

水封機能確認試験の結果を受けて、貯槽周辺間隙水圧測定結果、アーチ掘削時の地質調査結果、貯槽内湧水分布、水封水供給量分布などを総合的に検討し、必要と判断された箇所に水封ボーリングを設置した。

図-15 に、 $|dH/d\log_{10}t| < 8$ 、すなわち水封水と貯槽湧水との均衡が十分保たれていると判断された領域の試験結果の例を示す。理論的に予測された片対数軸上での直線的低下領域が試験結果でも確認され、その勾配より

$|dH/d\log_{10}t|$ を求めた。PW2-H302.5（第2水封トンネルTD302.5水平水封ボーリング）では、水頭が直線的に低下した後、約10mまで低下した時点で安定した。

図-16に、一時的に $|dH/d\log_{10}t| > 8$ 、すなわち均質岩盤で想定される水頭値より低い水頭値を示した試験結果の例（第2水封トンネルTD393鉛直水封ボーリング）を示す。同孔で実施した一回目の試験結果は、 $|dH/d\log_{10}t| = 21.3$ を示した。アーチ掘削時の地質観察によると、同孔の近傍では南落ちの高角割れ目が分布することが確認されたため、それらの割れ目を貫通する確率が高い方向に斜めの水封ボーリングを施工した（図-17）。その後、同孔で二回目の試験を実施したところ、試験結果は $|dH/d\log_{10}t| = 6.5$ となり（図-16）、水封ボーリングによる水頭上昇効果が確認された。

以上の結果より、提案した水封機能確認試験が、貯槽周辺の水圧低下部の抽出および対策効果の評価に適用可能であることを確認した。

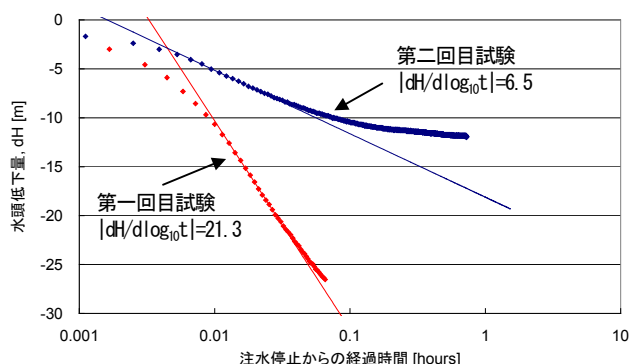


図-16 水封効果確認試験結果
（第2水封トンネルTD393鉛直水封ボーリング）

5. まとめ

水封ボーリングを用いた水みち分布および水圧低下部の調査手法を実施工に適用し、その有用性を確認した。

提案した手法は、施工の各段階で繰り返し実施することにより、水圧低下部の有無や水封強化対策の効果判定ができる利点を有しており、水封式地下備蓄空洞施工時の新たな地下水管理手法として期待される。

参考文献

- 1) Åberg, B.: Prevention of gas leakage from unlined reservoirs in rock, *The First Int. Symp. on Storage in Excavated Caverns, ROCKSTORE 77*, Stockholm, Sweden, pp. 175-222, 1977.
- 2) 加藤 元彦, 前島 俊雄, 中島 秀一, 地下150mにLPG岩盤貯槽を建設, 資源土木, 2007年3月号, pp.48-53, 2007.
- 3) 澤田 淳, 内田 雅大, 仙波 毅, 下茂 道人, トーマスドール: ボーリング掘削時の水理応答観測による透水性割れ目調査, 第27回岩盤力学に関するシンポジウム, PP.186-190, 1996.

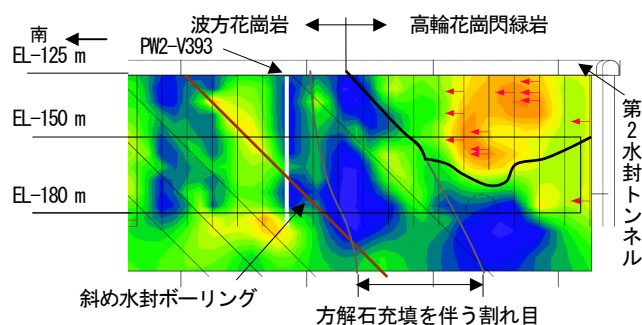


図-17 水封効果確認試験実施位置
（第2水封トンネルTD393鉛直水封ボーリング）

HYDRAULIC TESTING USING INJECTION BOREHOLE ARRAY FOR GROUNDWATER MANAGEMENT DURING CONSTRUCTION OF LPG STORAGE CAVERN

Michito SHIMO, Hideaki MASHIMO, Toshio MAEJIMA, Hiroshi YAMAMOTO and Kenji AOKI

This paper presents groundwater management techniques for construction of the underground LPG storage caverns using array of water injection boreholes. By systematically monitoring the pressure responses during drilling, a spatial profile of the hydraulic connections should be obtained. Locations of localized depressurized zones created during the cavern excavation should be detected by conducting short-period shut-in tests using injection borehole array. The proposed techniques were employed in an on-going construction at Namikata, operated by JOGMEC, Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, and the applicability of the tests to the real construction works has been confirmed.