

倉敷基地 ボーリング孔試験による 水封式LPG岩盤貯槽の気密性事前評価について

小瀧 考晃¹・瀬尾 昭治^{1*}・黒瀬 浩公²・岡崎 百合子^{3(元)}・前島 俊雄³

¹ 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)

² 東電設計株式会社 土木本部 (〒135-0062 東京都江東区東雲一丁目 7-12)

³ (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門二丁目 10-1)

*E-mail: seno@kajima.com

水封式LPG岩盤貯槽の気密試験は、貯槽内を設計圧力まで昇圧し送気を停止した後、所定の期間内の圧力変化に基づき気密性を判定するものである¹⁾。設計上の気密条件は貯槽壁面における動水勾配によって定義されているが、現実の貯槽周辺岩盤の気密性を事前に試験によって確認しておくことは、貯槽気密試験を計画する上で有用である。筆者らは、ボーリング孔を用いて岩盤の気密性を評価する試験方法²⁾を参考に、倉敷基地サイトの岩盤を対象として試験を実施した。また、新たに試験孔の周辺に観測孔を設置し、試験中の周辺間隙水圧の挙動を計測することによって、当基地岩盤の気密条件を確認することを試みた。本報文では、試験方法と試験データから当サイトの岩盤の気密性について評価した結果を報告する。

Key Words : LPG underground storage, airtightness test, hydraulic containment system, borehole test

1. はじめに

水封式 LPG 岩盤貯槽は周囲の地下水圧の作用によって貯蔵されたガスの漏洩を防止するものであり、建設完了後、LPG 受入れの前に、貯槽空洞を対象とした気密試験を実施し気密性を確認する必要がある。筆者らは、貯槽気密試験に先立って、ボーリング孔内の試験区間に貯槽を模擬した気室を形成し、試験区間内を加圧することによって、岩盤の気密性評価を試みた。試験は、倉敷基地サイト内で貯槽周辺と同等な透水性を有する岩盤を対象に定水位試験及び変水位試験の2通りの方法を用いて実施した。また、試験場所をグラウト改良する前後で同じ試験を繰り返して行って、両者の試験結果の比較を行った。

2. 試験位置及び試験孔の配置

試験位置は、当サイトの主要断層のうち高透水帯を形成している F3 断層の影響領域を選定した(図-1)。試験孔(S孔)は、図-2に示すとおり、水封トンネルの底盤から鉛直下向きに削孔した。また、試験孔を中心として離隔 1.5mの位置に3本の観測孔(M1~M3孔)を配置し、周辺間隙水圧の挙動を観測した。試験孔及び観測孔の孔径はいずれもφ86mmである。なお、これらのボーリング孔は、水封機能への影響に配慮し、外周の縦



図-1 試験実施位置図(地質平面図(EL-167.5m))

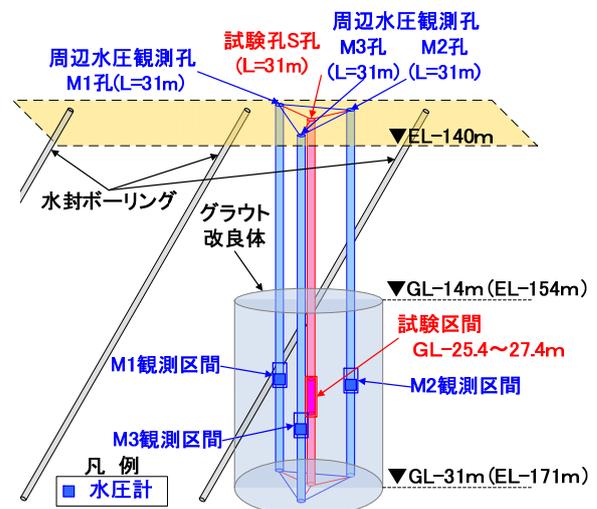


図-2 ボーリング透気試験の試験孔配置

水封ボーリングを境界として貯槽領域の反対側に配置した。初期地山状態で一連の試験を終えた後に、図-2に示すように試験孔及び観測孔の周囲にグラウト工を実施し、改良後の気密性を評価するために、再度同じ試験を繰り返した。

3. 試験区間及び観測区間の選定

試験区間及び観測区間の位置を図-3に示す。試験区間の選定にあたっては、事前に BTV 観察、湧水量・湧水圧測定及びルジオン試験を実施し、貯槽で確認されている F3 断層影響領域と同様な地質・透水性を有する箇所を選んだ。試験区間（区間長 2m）のルジオン値は 2.4Lu で、貯槽周辺の F3 断層影響領域の透水性（1~3Lu）とはほぼ同等であり、BTV 観察の結果、断層と同方向の湧水割目の存在を確認した。また、観測区間（区間長 1m）については、ルジオン試験時の水圧応答測定の結果と孔間の亀裂の連続性評価の結果を勘案し、応答率の大きい区間を優先的に選定した。

なお、グラウト改良後の試験区間及び観測区間も改良前と同じ深度としたが、試験区間の改良後ルジオン値は貯槽グラウトの改良目標値 0.25Lu を満足していることを確認した。

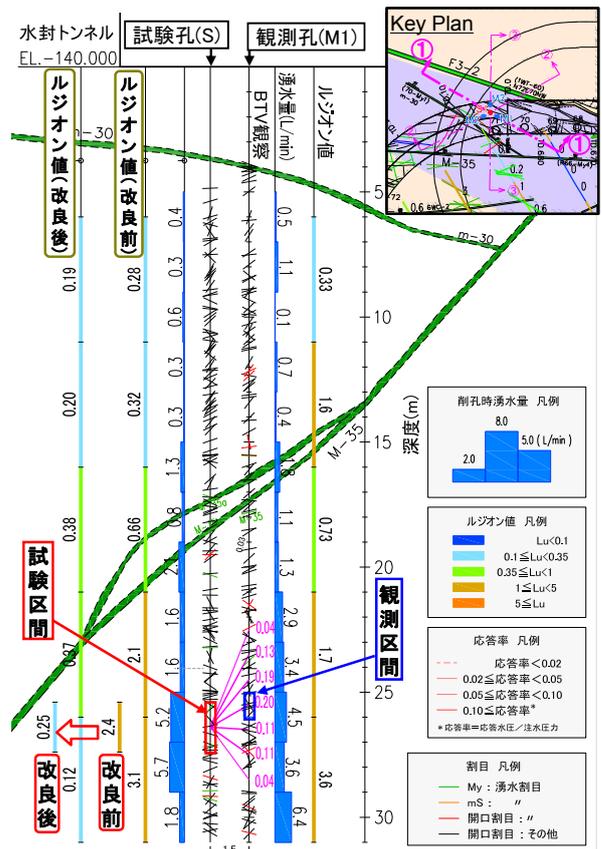


図-3 試験区間の水理地質特性 (図中 Key Plan の①-①断面)

4. 試験装置

試験装置の概要を図-4に示す。本試験では、試験孔内に気室を形成し、気室圧力や試験区間内の水位を制御する必要があるため、地上部に送気・加圧装置と注排水装置を設置し、試験区間内の水位信号を電磁弁制御にフィードバックした。主要計測機器の仕様を表-1に示す。気密性評価のためには、試験区間内の気室圧力・水位・温度の計測が重要であり、高精度の計器を選定した。試験区間内の水位についても、制御信号を得る電極式センサーとは別途に、高精度差圧計による計測を行った。

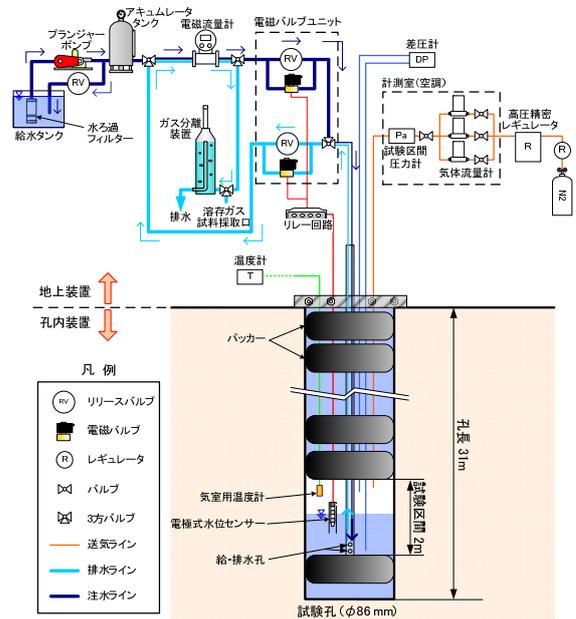


図-4 試験装置概要図

5. 定水位試験

(1) 試験方法

定水位試験の模式図を図-5に示す。試験方法としては、パッカーで閉塞した試験区間内に送気と排水を行って、気室を形成する。次に、気室圧力と水位を一定に制御・保持した状態で、送気バルブのみを閉鎖（シャットイン）して、気室圧力と温度の変化、並びに排水流量を測定する。気室圧力は、初期の間隙水圧に対し十分に小

表-1 主要計測機器の仕様

区分	計器種別	測定対象	測定範囲	精度 (分解能)
試験孔	圧力計	試験区間 圧力	FS 3.45 MPa	±0.35 kPa (±0.0001% FS)
	差圧計	試験区間 水位	差圧 200 hPa	±0.6 mm (水頭換算) (0.1 mm)
	温度計	試験区間 温度	0-45 °C	±0.3 °C (0.1 °C)
	電磁流量計	注水・排水流量	FS 55L/min	±0.1 L/min
	気体流量計	送気量	0-2 NL/min 0-10 NL/min 0-50 NL/min	±1% FS
観測孔	間隙水圧計	観測区間 間隙水圧	FS 2.0 MPa	±0.8 kPa

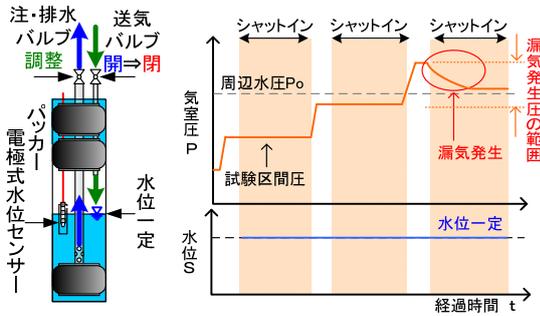


図-5 定水位試験模式図

さいい圧力から開始し、漏気が確認できるまで、段階的に昇圧する。

漏気の判定は、シャットイン中の気室圧力低下の有無により行うが、気室圧力は気室の体積と温度による影響の他、排水中に溶解する気体が外部に排出されることによる圧力低下を考慮する必要がある。各々の補正方法を以下に示す。

a) 気室の体積及び温度変化の影響補正

漏気が無い場合、気室内の気体物質量は保存され、ボイル・シャルルの法則が成り立つ。

$$\frac{PV}{T} = (\text{一定}) \quad (1)$$

ここに、 P : 圧力 [MPa(abs)], V : 体積 [L], T : 温度 [K].

シャットイン時(t_0)の気室圧力・体積・温度をそれぞれ $P_0 \cdot V_0 \cdot T_0$ とし、時刻 t_n 後の気室圧力・体積・温度をそれぞれ $P_n \cdot V_n \cdot T_n$ とすると、時刻 t_n 後の体積・温度変化の影響を考慮した気室圧力の補正值 P'_n は、次式で表される。

$$P'_n = \frac{T_0}{T_n} \frac{V_n}{V_0} \times P_n \quad (2)$$

b) 気体の溶解を考慮した圧力の補正

排水中の窒素ガス溶解度を D [mL/L(気室圧下)], 排水

流量を Q_n [L/min] とすると、シャットインから時刻 t_n 後の気体排出量 M_n は次式で算出される。

$$M_n = \sum_{n=0}^{n=t_n} (D \times Q_n) \quad (3)$$

算出された気体排出量 M_n [L] を理想気体の状態方程式を用いて物質質量に換算する。

$$n'_n = \frac{P_n \times M_n}{R \times T_n} \quad (4)$$

ここに、 n'_n : 時刻 t_n 後の気体排出量の物質質量換算値 [mol], $P_n T_n$: 時刻 t_n 後の気室圧力 [MPa(abs)], 気室温度 [K], R : 気体定数 [8.314 J/molK].

物質質量 n'_n から気体排出による圧力の減少分を算出し、気体排出を考慮した補正值 P_{Sn} を算出する。

$$P_{Sn} = P_n + (\text{気体排出による圧力減少分}) \\ = \frac{n_n \times R \times T_n}{V_n} + \frac{n'_n \times R \times T_n}{V_n} \quad (5)$$

ここに、 n_n : 時刻 t_n 後の気室内の気体物質質量 [mol], V_n : 時刻 t_n の気室体積 [L].

求めた気室圧力の補正值 P_{Sn} に対し、さらに式(2)を用いて体積・温度変化の補正を行って、最終的な補正圧力を得る。

$$P'_{Sn} = \frac{T_0}{T_n} \frac{V_n}{V_0} \times P_{Sn} \quad (6)$$

(2) 試験結果

a) 漏気の判定

グラウト改良前に実施した定水位試験の結果を図-6に示す。試験開始前の初期水圧を基準として、①～⑤の5段階の昇圧ステップを設定した。ステップ間の昇圧幅のうち漏気発生の可能性が高い初期水圧-0.02MPa以降については0.01MPaずつの昇圧とした。各ステップで気室圧力及び水位の安定を確認した上で送気バルブを閉じ、

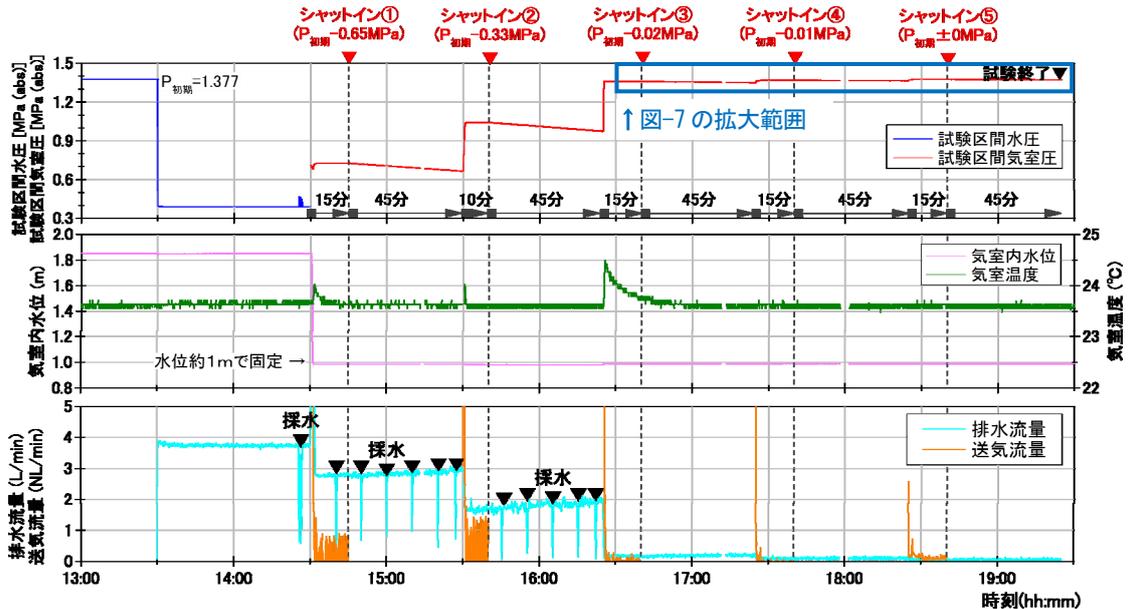


図-6 定水位試験結果例 (グラウト改良前)

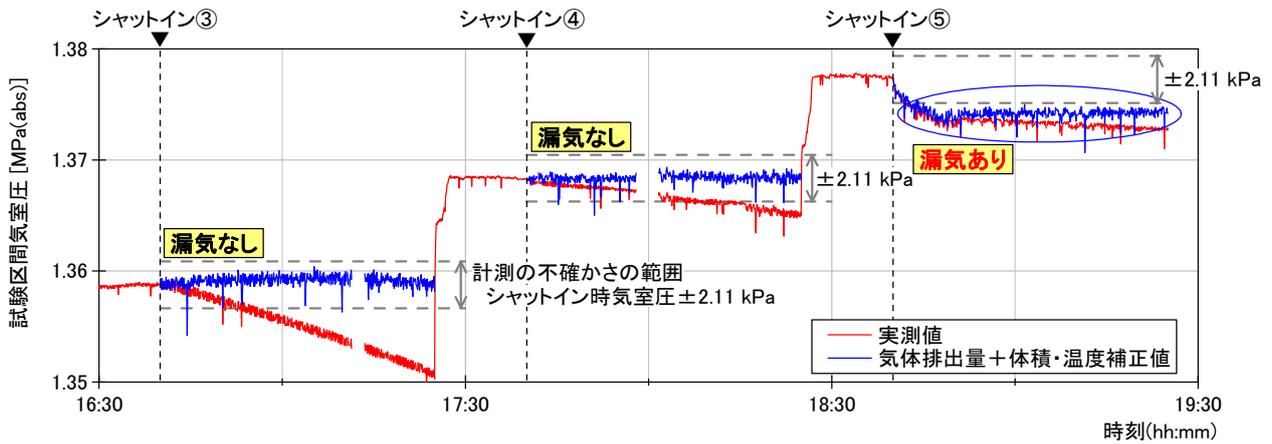
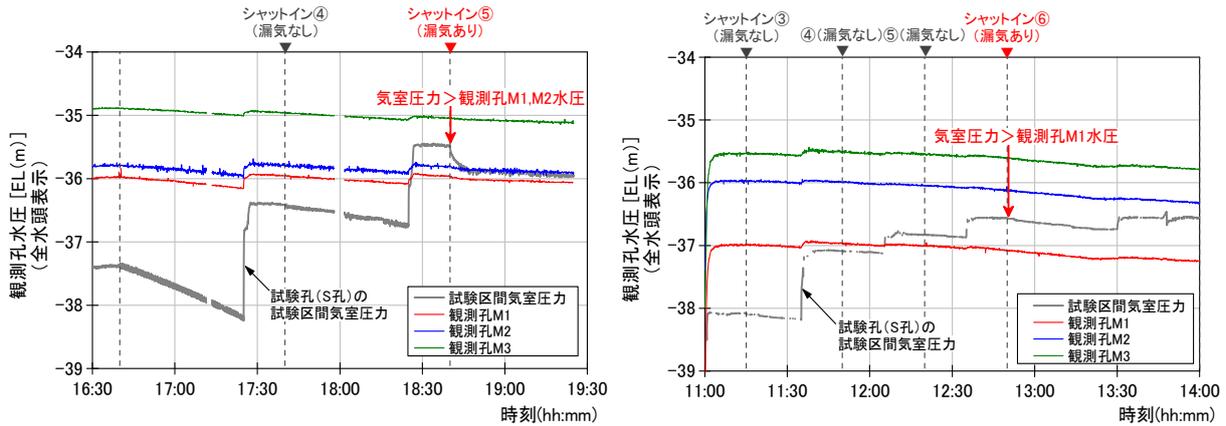


図-7 定水位試験結果（拡大図）と漏気判定の例（グラウト改良前）



(1) グラウト改良前

(2) グラウト改良後

図-8 試験区間圧力と周辺間隙水圧の比較（グラウト改良前・後）

シャットイン中の圧力、水位、温度及び排水流量を計測した。また、送気前後における排水中の気体溶解度を算出するために、送気前及び①、②ステップで5～10分間隔で採水を行い、溶存気体量を測定した。

漏気の判定のために気室圧力を補正した結果を図-7に示す。補正後の気室圧力(青線)は、③及び④ステップでは横ばいであるが、⑤ステップではシャットイン直後から減少し、各計器の精度から算定した計測の不確かさの範囲から逸脱している。すなわち、⑤ステップにおいて漏気が発生したと判断した。

なお、漏気に伴う圧力低下後に一定値で安定しているのは、気室圧力と周辺間隙水圧が平衡状態に達したためと推察される。

b) 気密条件の評価

漏気発生時の気室圧力と周辺間隙水圧の関係を調べるために、気室圧力と観測孔内の間隙水圧の経時変化をそれぞれ水頭換算し比較した(図-8)。

グラウト改良前の試験に着目すると、漏気発生前の気室圧力は観測孔のいずれの水圧よりも小さい。すなわち、試験区間の孔壁における動水勾配は、周辺岩盤から試験区間に向かう方向が正である。一方、漏気発生時の気室圧力は、観測孔 M1 及び M2 の水圧より大きくなっており、試験区間の孔壁における動水勾配が部分的に逆

転している。

次に、グラウト改良後の試験については、グラウト改良前と同様な漏気判定の結果、漏気が確認されたのは⑥ステップであり、漏気発生前の気室圧力と周辺間隙水圧の関係は、漏気発生時の⑥ステップで気室圧力が観測孔 M1 の水圧よりも明瞭に大きくなっている。

これらの結果から、少なくとも、試験区間の孔壁における動水勾配が逆転しなければ、漏気は発生せず気密性が保たれると評価した。なお、グラウト改良前後で気室圧力と観測孔 M2 の水圧との関係が異なっているのは、試験孔周辺の亀裂が改良され、透水性分布が変化したことによると判断した。

6. 変水位試験

(1) 試験方法

変水位試験の模式図を図-9に示す。変水位試験は、定水位試験と同様の手順で気室を形成した後に、排水バルブ及び送気バルブを同時に閉じ、湧水によって試験区間内の水位が上昇する状態を放置する。水位が上昇し気室の体積が減少することに伴って気室圧力が上昇する過程で、圧力・体積(水位)・温度を連続的に測定する。

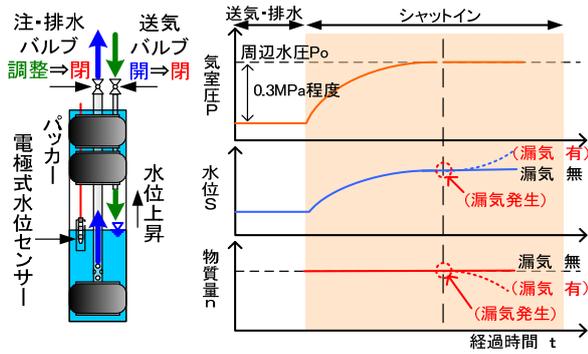


図-9 変水位試験模式図

漏気の判定は、気体圧力・体積・温度の関係がボイル・シャルルの法則に合致しているか否かで判断できる。

シャットイン後、時刻 t_n 経過後、漏気が無い (= 気体物質量一定) 場合には以下の関係が得られる。

$$P_0 \times \frac{V_0}{T_0} = P_n \times \frac{V_n}{T_n} = n_0 R \quad (7)$$

ここに、 $P_0 V_0 T_0$: シャットイン時の気室圧力 [MPa(abs)], 気室体積 [L], 気室温度 [K], $P_n V_n T_n$: 時刻 t_n 後の気室圧力 [MPa(abs)], 気室体積 [L], 気室温度 [K], n_0 : シャットイン時の気室内の気体物質量 [mol], R : 気体定数。

この式を変形すると次式となる。

$$P_n = \frac{n_0 R}{V_n / T_n} \quad (8)$$

シャットイン後に物質量が一定ならば、気室圧力 P_n と [気室体積]/[気室温度] (V_n/T_n) の間には反比例の関係が成立する。

(2) 試験結果

a) 漏気の判定

グラウト改良前に実施した変水位試験の結果を図-10に示す。試験開始前の初期水圧を基準として、初期水圧 -0.3MPa まで減圧した状態で、気室圧力、水位及び気室温度の安定を確認した後、送気バルブ及び排水バルブを閉鎖 (シャットイン) し放置した。シャットイン後の水位の上昇に伴って気室圧力及び温度は上昇するが、気室圧力がわずかに数分で安定するのに対して、温度は上昇後の降下傾向が緩やかに継続した。水位はさらに変化が緩やかでシャットイン開始から約 9 時間経過した後、漸く安定した。

漏気の判定のために、気室圧力 P と [気室体積]/[気室温度] (V/T) をプロットした (図-11)。計測値はシャットイン直後からしばらくは理論曲線に沿った挙動を示しているが、ある時点で理論曲線から乖離し始め、気室圧力が横ばいの状態で [気室体積]/[気室温度] が減少している。このことから、計測値が理論曲線から乖離した時点で漏気が始まったと判断した。

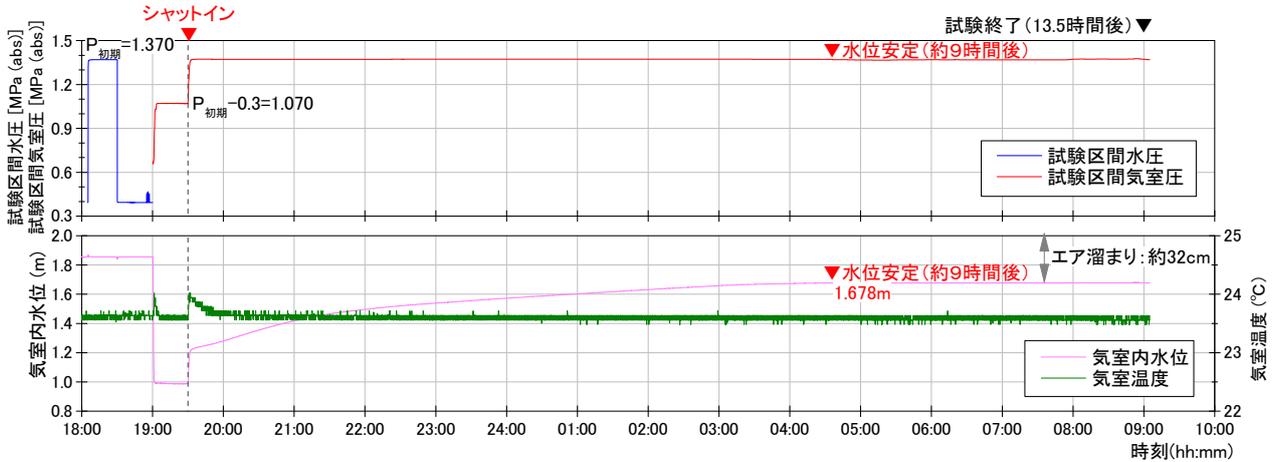


図-10 変水位試験結果例 (グラウト改良前)

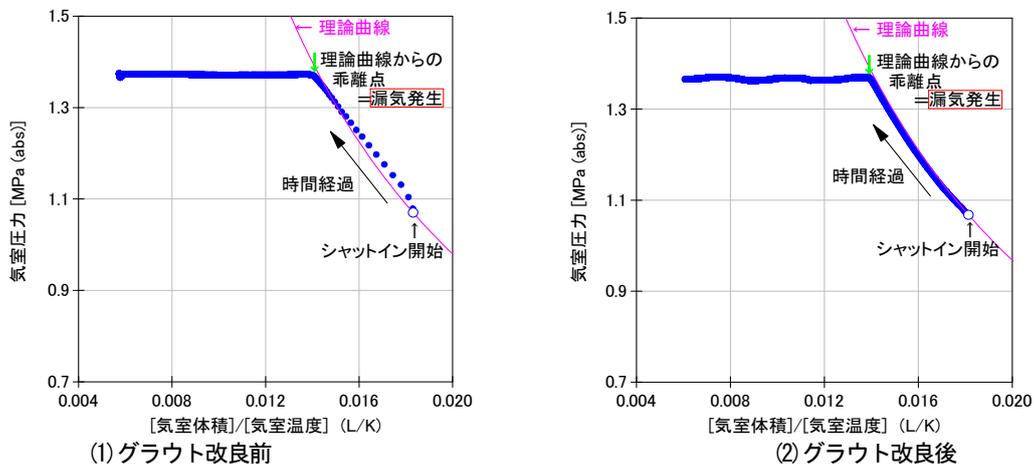


図-11 変水位試験結果 P-V/T 関係図 (グラウト改良前・後)

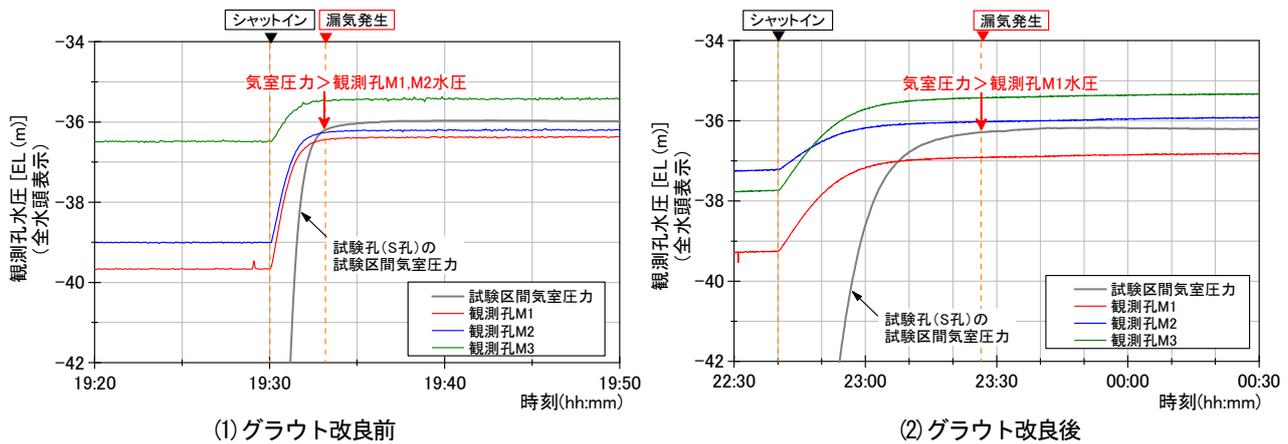


図-12 試験区間圧力と周辺間隙水圧の比較（グラウト改良前・後）

b) 気密条件の評価

定水位試験と同様に、気室圧力と観測区間内の間隙水圧の経時変化を比較した（図-12）。

グラウト改良前・後の試験ともに、気室圧力が観測孔の水圧よりも小さいときは漏気が発生しない。一方、気室圧力が一部の観測孔の水圧を超えて、動水勾配が逆転した時点で、漏気が始まっている。

これらの結果から、変水位試験においても、試験区間の孔壁における動水勾配の方向が周辺岩盤から試験区間に向かう方向に正であれば、気密性が保たれていると評価した。漏気発生前後における気室圧力と周辺間隙水圧の関係は、定水位試験の結果と全く同じ傾向を示しており、試験方法に依存しなかった。

7. まとめ

ボーリング孔を用いて倉敷基地サイトの岩盤の気密性を評価した。得られた知見は以下のとおりである。

- ・ グラウト改良前、及び改良後のいずれ試験においても、試験区間の気室圧力が周辺間隙水圧よりも小

い場合、すなわち、試験区間孔壁の動水勾配の方向が周辺岩盤から試験区間に向かう方向に正であれば、漏気は発生せず気密性が保たれることが確認された。

- ・ 漏気発生前後の気室圧力と周辺間隙水圧の関係は、定水位試験法と変水位試験法で全く同じ傾向を示しており、試験法に依存しないことが確認された。

今回実施した定水位試験は、基本的なコンセプトが貯槽気密試験と同じであり、試験で得られた知見以外にも、各種計測機器の選定や試験時の昇圧及びモニタリング計画、さらに試験データの分析・評価方法等、貯槽試験に向けて有益な情報が得られた。

参考文献

- 1) 前島俊雄, 岡崎百合子, 金戸辰彦, 森孝之, 征矢雅宏, 黒瀬浩公: 倉敷基地 LPG 岩盤貯槽の気密試験方法と試験結果の評価について, 第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2014 (投稿中)。
- 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ーボーリング孔内の水封機能の実証ー, 電力中央研究所報告, 研究報告 U91058, 1992.

EVALUATION OF ROCK MASS AIRTIGHTNESS USING PRELIMINARY BOREHOLE TESTS IN KURASHIKI LPG UNDERGROUND STORAGE SITE

Takaaki KOBUCHI, Shoji SENO, Hiroki KUROSE,
Yuriko OKAZAKI and Toshio MAEJIMA

The airtightness test is necessary to the acceptance of the hydraulic containment LPG underground storage. Therefore, a preliminary examination in rock mass airtightness had been required under construction. The borehole testing method was applied in the Kurashiki site. The airtightness could be evaluated with changes of the air quantity in the chamber of test borehole under various pressures. In order to confirm the criterion of the leakage into rock fissures, the relation among the air pressure in the chamber and surrounding pore pressures measured in observation boreholes was examined. This paper describes the methodology and results of borehole tests.