ボーリング透気試験による 花崗岩の気密性および透気性の評価

下茂道人^{1*}·島屋 進²·山上順民¹·宇野晴彦³·前島俊雄⁴

1:大成建設株式会社 技術センター(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
2:大成建設株式会社 土木本部(〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)
3:東電設計株式会社(〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 KDX 豊洲グランスクエア 9F)
4:(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 2-10-1 虎ノ門ツインビルディング) *E-mail: michito.shimo@sakura.taisei.co.jp

わが国のLPG 岩盤内備蓄では、水封方式による地下空洞内備蓄方式が採用されている.水封方式では、空 洞への地下水の流入により貯蔵されたガスの漏洩を阻止する方式であり、岩盤の気密性評価が非常に重要 である.著者らは、ボーリング孔を用いて岩盤の気密性を確認するための試験装置および試験方法を考案 し、愛媛県今治市の波方 LPG 地下貯槽工事サイトで、同装置を用いた気密試験を実施した.本論文では、 ①透気開始圧と初期間隙水圧との関係、②同関係に与える周辺岩盤の透水性の影響、③透気発生前後の圧 力伝播挙動、など試験で得られた知見についてまとめる.

Key Words: LPG underground storage, fracture rock, in-situ test, borehole, gas leakage, threshold pressure

1. はじめに

わが国のLPG 岩盤内備蓄では、水封方式¹⁾による地下 空洞内備蓄方式が採用されている²⁾.水封方式は、空洞 への地下水の流入により貯蔵されたガスの漏洩を阻止す る方式であり、岩盤の気密性評価が非常に重要である.

これまで、ボーリングを用いた透気試験が、主として 空洞周辺の岩盤の健全性を確認する目的で実施されてき た³.著者らは、貯槽の気密性評価指標となる漏気開始 圧力を原位置で確認することができる新たなボーリング 孔内試験装置を開発し、愛媛県今治市の波方 LPG 貯槽基 地で、同装置を用いた気密試験を実施した.低透水性区 間と高透水性区間の2箇所の試験区間を設けた試験孔周 辺に水圧観測孔を配置し、透気開始前後の周辺間隙水圧 の挙動を測定した.本論文では、①透気開始圧(threshold pressure)と初期間隙水圧との関係、②同関係に与える周 辺岩盤の透水性の影響、③透気発生前後の圧力伝播挙動、 など試験で得られた知見について述べる.

2. 試験位置とボーリング配置

試験位置は、①貯槽と同様な水理地質条件を有すること、②水封機能に影響を及ぼさないよう水封施設の外側

であること、③試験中を通じて安定した水圧条件下にあること、等を考慮し、貯槽南東部の第3水封トンネルから水封域外に向けて掘削された坑道を選定した. 試験位置の岩盤は、水封ボーリング施工時のBTV 観察データや削孔応答データから、低角割れ目が発達する水理学的連続性の高い岩盤であることが確認された.透水係数は、貯槽設計値の1×10⁶ cm/s(0.1Lu)より高い傾向にあるも



のの、一部0.01Lu以下の透水係数を示す区間も存在す ることから、幅広い透水性を有する試験区間の選定が 可能と判断された.試験孔の配置を図-1に示す.透気 試験に用いるA孔から2mおよび5m離れた位置に、 観測孔(B-1孔, B-2孔)を配置した.さらに、境界水 圧の確認および遠方への圧力伝播のモニターのために、 斜めボーリングC孔を削孔するとともに、既設の縦水 封ボーリング2本も観測孔として用いた.

試験区間の選定

試験孔および観測孔の削孔時に実施した区間湧水 量測定,水圧応答測定,BTV 調査およびルジオン試験 の結果をもとに,図-2 および図-3 に示すように試験区 間および水圧観測区間を設定した.A 孔内においては, 貯槽設計値(1×10⁸m/s)にほぼ等しい透水性(0.08 Lu) を有し貯槽周辺の低透水岩盤を代表するGL-21.6m~ -23.6m 区間(以下,低透水性試験区間と呼ぶ)および ル ジオン試験結果が5.32Luを示し貯槽周辺の高透水岩盤 を代表するGL-18m~-20mの区間(以下,高透水性試験 区間と呼ぶ)の2区間を試験区間として選定した.A 孔 内の2m区間をダブルパッカーで区切り,区間水圧が初 期水圧に達した後に区間圧力を開放した際の周辺観測孔 への応答を調べ,B-1 孔,B-2 孔,C 孔で明瞭な水圧応 答が観測された区間を各孔の水圧観測区間として選定し



図-2 試験区間および水圧観測区間



た. なお, A 孔, B-1 孔およびC 孔の孔底付近には, 透水性が高く湧水量も多い区間が存在したため, 試験区 間への圧力影響を防ぐ目的で, ルジオン試験終了後セメ ントミルクで充填した.

4. 試験装置

試験装置は、地上装置および孔内装置からなる(図-4, 5).使用した計測機器の仕様、数量の一覧を表-1に示す. 送気量は、フロート式流量計とマスフローメータの2方 式で測定した.想定される範囲の流量を精度良く測定す るために、測定レンジの異なる流量計を配置し、流量に 応じて切り替えて使用した.透気試験孔 (A 孔)の孔内装 置の構造を模式的に図-5に示す.通常の透水試験と異な





り,試験区間内に「気室」を設け,注排水ラインおよび 送排気ラインにより気室内の水位や圧力を調整できるよ うにした⁴⁾.気室内には,温度,圧力,水位(差圧計) センサーを設置した.注排水ラインの流量をサーボバル ブで制御することにより,透水試験,透気試験のほか, 気室内水位を制御した試験にも対応できるようにした.

5. 試験手順

試験の手順を図-6 に示す. A 孔内の試験区間(以下, 気室と呼ぶ)の気密性の確認は,変水位試験と定水位試 験の2方法により実施した.変水位試験は,真空ポンプ により気室内の水を一定水位まで降下させた後,排水・ 送気バルブを閉鎖(シャットイン)し,地下水の流入に よる気室内の水位(容積),圧力,温度の変動から気密性 を判定する.一方,定水位試験は,気室内の水位を一定 に保った状態で,気室圧力を所定値まで上昇させた後に シャットインし,その後の圧力変動から漏気の有無を判 定する.気密性確認の後,気室圧力を段階的に変えなが ら送気量を測定する透気試験を実施した.最後に,注水 試験と透気試験に対する周辺水圧の応答を確認するため の孔間圧力応答試験を実施した.

6. 試験結果

(1)区間水圧測定

図-7 に、区間水圧測定結果の例を示す.低透水性区間で1.354MPa,高透水性区間で1.367MPaであったが、水 封水圧の変動により区間水圧に変動が見られたため、試 験データの評価には、各試験開始前の区間水圧を用いた.

表-1 使用計器一覧

| 設置場所 | 種別 | 名称 | メーカー・形式 | 測定範囲 | 精度 | 分解能 | 備考 |
|-------------|------|------------------------------|---|--------------------------|-----------------------|---------------------|------|
| 地上 | 流量計 | マスフローメータ | YAMATAKE CMS9500 | MAX1.5MPa 0~500mL/min | ± 2.5mL (0.5%FS) | - | N₂ガス |
| | | マスフローメータ | YAMATAKE CMS0005 | MAX1.5MPa 0~5L/min | ± 25mL (0.5%FS) | - | N₂ガス |
| | | २२७०-४-१ | YAMATAKE CMS0050 | MAX1.5MPa 0~50L/min | ± 250mL (0.5%FS) | - | N₂ガス |
| 試験孔 (A孔) | 気体温度 | 温度センサ | 日機装ワイエスアイ(株) N311/BR14KA103K/100/ RPS/10/PH | 0-70°C | ± 0.01°C | 0.001°C | |
| | 気体圧力 | 圧力計 | バロサイエンティフィック 9002K | Max 7MPa (絶対圧) | ± 0.7kPa (0.01%FS) | 0.001kPa (0.1mm) | |
| | 気室水位 | 差圧計 | バリダイン P55D-1-N-4-38-S-4-A | 差圧5m (水頭換算) | ± 6.5mm | 0.1mm | |
| 観測孔 | 間隙水圧 | 水圧計 (B -1孔, B-2孔) | GEセンシング PMP4030 | 最大圧力1.5MPa (絶対圧) | ± 0.6kPa (0.04%FS) | - | |
| | | 水圧計 (C孔) | 大倉電気 PT3000A | 最大圧力2MPa (ゲージ圧) | ± 5kPa (0.25%FS) | - | 3点 |



図-6 試験手順





(2)変水位気密試験

図-8に、低透水性区間における変水位試験の結果を示 す.試験は、初期気室圧力が 0.351MPa, 0.620MPa, 0.960MPaの3条件で実施した.シャットイン後は、地下 水の流入による気室容積の減少に伴い、気室温度が上昇 した.0.960MPaの試験では、放置期間を長くとったとこ ろ、最終的に気室圧力が周辺圧力とバランスし圧力上昇 が停止した後、気室温度が初期温度まで低下した.

ボイル・シャルルの定理より、気室からの漏気が無い 場合、温度・容積で補正した気室の圧力変動量 ΔP は、 理論的には0で、実際には計測機器の精度や試験条件で 決まる不確実性 $\varepsilon(\Delta P)$ の範囲に収まると考えられる.

ここに、P, T, V は、それぞれ、気室の圧力(MPa)、 温度(K)、容積(L)で、サフィックスi、tは、気密性評価 開始および終了時の値を示す.なお、

$$\varepsilon(\Delta P) = P_i \cdot \sqrt{\left(\frac{eP}{p_i}\right)^2 + \left(\frac{eP}{p_i}\right)^2 + \left(\frac{eT}{T_i}\right)^2 + \left(\frac{eT}{T_i}\right)^2 + \left(\frac{eV}{V_i}\right)^2 + \left(\frac{eV}{V_i}\right)^2}$$
ここに、 eP , eT , eV は、それぞれ、圧力、温度、
容積(水位)計測に用いるセンサーの精度である. **表-1**
に示した計測器精度および試験条件から計算される合成
不確かさは約15kPa となる。各計測項目の不確かさは、
 $eP/P = 5.1 \times 10^4$, $eT/T = 3.4 \times 10^5$, $eV/V = 7.6 \times 10^3$ であり、
水位測定に用いた差圧計の精度の影響が支配的である。

図-9 に、初期水圧 0.960MPa の変水位試験の温度・圧 力が安定した開始後 10 時間から 60 分間の ΔP の時間変 化を示す. ΔP は、ほぼ一定で、かつ変動幅は $\epsilon(\Delta P)$ より 十分小さな範囲に収まっており、漏気は生じていないと 判定された. すなわち、低透水性区間では、気室の排水 を停止した場合、気室圧力は周辺圧力とバランスするま で上昇し、その後安定するという結果が得られた.

なお、高透水性区間は、シャットイン後の水位上昇が 速く、分析に足る十分な試験時間が取れかかったため、 変水位試験は実施しなかった.

(3)定水位気密試験

a)低透水性区間

図-10a に、気室圧力が 1.20MPa~1.51MPa の条件で実施した定水位気密試験結果 (圧力,温度,水位)を示す. 各圧力段階で、ガス流量計のラインを開放したところ、 気室圧力 1.41MPa まで漏気は認められず、1.46MPa で一時期漏気が発生し、その後自然に停止した. 1.51MPa で は、送気ラインを開放時に漏気が継続した.

図-10b に、各試験に対する ΔP の変化を示す. 区間初 期水圧1.35MPaより0.16MPa高い気室圧力1.51MPaで Δ P に明瞭な低下傾向が見られ、継続的な漏気の発生が示 唆された. すなわち、低透水性区間においては、気室圧







図-11 定水位気密試験結果(高透水性区間)

力が区間水圧より 60kPa(1.41MPa に対応)以上高くなるまで漏気が発生しないことが確認された.

b)高透水性区間

高透水性区間において、気室圧力0.90MPa,1.10MPa, 1.30MPa,1.37MPaの各条件で実施した試験結果を図-11a に示す.各圧力条件に対するΔPの時間変化を図-11bに 示す.いずれも継続的な低下傾向は見られず、かつ計器 精度から求められる不確実性の範囲内にあり、高透水区 間においても区間初期水圧(=1.370MPa)以下の気室圧 力では、漏気は生じないと判定された.なお、高透水区 間では、気室内水位を一定に保ちながら気室圧力を周辺 圧力以上に保つことが困難であったため、より高い圧力 に対する気密性は、次の透気試験で確認することとした.

(4)透気試験

透気試験では、気室圧力を段階的に上げながら送気量 を測定した.低透水性区間および高透水性区間の試験結 果を図-12 に示す.気室圧力が初期区間水圧をわずかに 上回った時点で気室内の水は完全に排除された.低透水 性・高透水性区間とも、この時点で漏気は発生せず、気 室をさらに上昇させるとガス流量計の出力が正の値を示 し漏気が確認された.気室圧力と初期区間水圧の差圧と 漏気量との関係は、図-13 に示すように、ほぼ直線関係 を示した.直線と横軸との切片、すなわち、漏気が開始 する時点での差圧(スレショールド圧と呼ぶ)は、低透 水性区間で28kPa、高透水性区間で3kPaであった.この スレショールド圧の相違は、試験区間に存在する割れ目 の開口幅が小さい(大きい)ほど、毛管抵抗が大きい(小 さい)ことに起因すると考えられる.

(5)孔間圧力応答試験

漏気発生時の周辺間隙水圧の挙動を調べる目的で、A 孔とB-1,B-2孔間での透水および透気による孔間圧力応 答試験を実施した.図-14 に試験結果を示す.結果は、A 孔の圧力に対する応答比率で正規化して示した(右軸:A







孔, 左軸: 観測孔). 観測孔までの距離と圧力減衰率(最 大応答値から算定)の関係を図-15 に示す. 低透水性区間, 高透水性区間の試験結果とも,透水試験と透気試験の圧 力減衰には顕著な差異があり,後者の減衰が小さいこと が分かった. 今後,解析的な検討により結果の分析を行う 予定であるが,水と気体の圧縮率および透過特性(透水 係数,透気係数)の相違に起因するものと考えられる. なお,高透水区間の結果において, B-1 孔と B-2 孔の減 衰率が逆転していることから, A 孔の高透水区間と各観 測孔が異なる水みちで連続している可能性が考えられる.

7. まとめ

ボーリング孔気密試験により得られた知見を,以下に まとめる.

- ・低透水性区間,高透水性区間とも,気室圧力を初期区間水圧まで上昇させても,連続的な漏気は発生しなかった.すなわち,試験区間周辺の動水勾配が0でも漏気は発生しなかった(貯槽の設計動水勾配は0.5).
- ・連続的な漏気が発生する気室圧力と初期区間水圧との 差圧(スレショールド圧)は、低透水性区間で、60kPa (変水位試験結果)または28kPa(透気試験結果)で あり、高透水区間では3kPaであった.
- ・透水試験時と透気試験時の岩盤内の圧力伝播には明瞭



な差がみられたことから、気密性確認のための間隙水 圧モニタリングの有用性が確認された.

参考文献

- 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.
- Åberg, B. : Prevention of gas leakage from unlined reservoir in rock, Proc. *Int. Symp. Storage in Excavated Rock Caverns*, pp.399-413, 1977.
- Barron, K.: An air injection technique for investigating the integrity of pillars and ribs in coal mines. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 15(2), pp. 69-76, 1978.
- 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-ボーリンク孔内 での水封機能の実証-,電力中央研究所報告 U91058, p.45, 1992.

EVALUATION OF GAS TIGHTNESS AND TRANSPORT CHARACTERISTICS OF GRANITIC ROCK BY BOREHOELE GAS INJECTION TEST

Michito SHIMO, Susumu SHIMAYA, Masahito YAMAGAMI, Haruhiko UNO and Toshio MAEJIMA

A series of borehole gas injection tests were carried out at Namikata underground LPG storage site to investigate the fundamental gas transport characteristics of fractured granitic rock. It was confirmed from the results at two sections of 0.08Lu and 5.32Lu, that air leakage does not occur until the gas pressure exceeds the groundwater pressure, i.e., until hydraulic gradient toward the test section becomes zero. Threshold pressure was found to be 28kPa and 60kPa for the 0.08Lu section and 3kPa at the 5.32Lu section. It was also found that spatial pressure decay becomes much small after gas leakage occurs. These results show the effectiveness of groundwater pressure observation during the cavern gas-tightness test.