

現場透気試験による亀裂性岩盤のスレシヨールド圧の評価

下茂道人¹・島屋 進²・前島俊雄³

¹ 深田地質研究所

² 大成建設株式会社

³ 石油天然ガス・金属鉱物資源機構

Evaluation of threshold pressure of fractured rock by in-situ gas-tightness test

SHIMO Michito¹, SHIMAYA Susumu² and MAEJIMA Toshio³

¹Fukada Geological Institute

²Taisei Corporation

³Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

要旨：亀裂性岩盤内のガスの移行特性は、LPG 地下貯蔵、放射性廃棄物処分、CCS、メタンガス地山におけるトンネル掘削など、多くのエンジニアリング分野で問題となる。地盤内のガスや水の同時流（二相流）のシミュレーションにおいては、地盤固有の透過特性とともに相対透過率や毛管圧と水飽和度との関係が解析結果に大きく影響を与える。これらのパラメータは、現場試験結果に基づいて設定されることが望ましいが、試験技術が確立していないため、砂地盤や堆積岩の室内試験結果や既往の計算事例などを参考に、適用性を十分に確認しないまま亀裂性岩盤の解析に用いているのが現状である。なかでも、ガスが水と入れ替わる際に亀裂内の気液境界面に生じる差圧（スレシヨールド圧またエアークエンリー圧と呼ばれる）は、ガスの移動や分布に大きく影響するパラメータであるが、国内外において現場試験事例が非常に少ない。

著者らは、ボーリング孔を用いて亀裂性岩盤のスレシヨールド圧を測定する装置を開発するとともに、同装置を用いた複数の試験手法を考案し、LPG 岩盤タンクの建設サイトにおいて適用性確認試験を行った。本論文では、現場試験で得られた試験技術の適用性や岩盤の透過率とスレシヨールド圧との関係などについて得られた知見について述べる。

キーワード：亀裂性岩盤，スレシヨールド圧，現場試験，気密性，二相流

Abstract: Gas transport characteristics of fractured rocks is a great concern to variety of engineering applications such as LPG underground storage, nuclear waste disposal, CCS, gas flooding in the oil field and tunneling excavation in the methane-bearing ground. Besides absolute permeability, the relative permeability and the capillary pressure as a function of water saturation, have direct influences to the results of subsurface two phase flow simulation, however, number of the in-situ test results on these parameters are limited. The authors have developed equipment and the procedures to evaluate the threshold pressure of fractured rocks and applied them to a series of in-situ tests in a granitic rock at the Namikata underground LPG storage site in Ehime prefecture, Japan. This paper discusses the applicability of the developed technologies for the measurement of the threshold pressure and also the relationship between threshold pressure and permeability of fractured rocks based on the in-situ test results.

Keywords: fractured rocks, threshold pressure, in-situ test, gas-tightness, two-phase flow

1. はじめに

亀裂性岩盤内のガスの移行特性は、LPG 地下貯蔵、放射性廃棄物処分、CCS、メタンガス地山におけるトンネル掘削など、多くのエンジニアリング分野で問題となる。地盤内のガスや水の同時流（二相流）のシミュレーションにおいては、地盤固有の透過特性とともに相対透過率や毛管圧と水飽和度との関係が解析結果に大きく影響を与える。これらの解析パラメータは、現場試験結果に基づいて設定されることが望ましいが、試験技術が確立していないため、砂地盤や堆積岩に対して用いられてきたものを、適用性を十分に確認しないまま亀裂性岩盤の解析にも用いているのが現状である。なかでも、ガスが水と入れ替わる際に亀裂内の気液境界面に生じる差圧（スレショールド圧またエアージェンタリー圧と呼ばれる）は、ガスの移動や分布に大きく影響するパラメータであるが、国内外において現場試験事例が非常に少ない。

著者らは、ボーリング孔を用いて亀裂性岩盤のスレショールド圧を測定する装置を開発するとともに、同装置を用いた複数の試験手法を考案し、LPG 岩盤タンクの建設サイトにおいて適用性確認試験を行った。

本論文では、現場試験で得られた試験技術の適用性や岩盤の透過率とスレショールド圧との関係などについて得られた知見について述べる。

2. 現場試験実施位置の概要

現場試験は、愛媛県今治市波方町に建設された波方LPG地下備蓄基地の地下トンネル内で実施した。波方基地は2つのプロパン貯槽と1つのプロパン/ブタン兼用貯槽からなる。地下施設のレイアウトを図1に示す。いずれも、幅26m×高さ30m

×長さ485m（設置深度EL-150m～EL-180m）の大規模地下空洞である。地質は、白亜紀の領家帯花崗岩である。貯蔵方式は、1960年代に北欧で開発されて以降多くの実績を有する「水封式地下備蓄方式」を採用している。同方式は、空洞に流れ込む地下水の流れにより常温高压（貯槽設計圧力は0.97MPa）で液化したLPGを空洞内にとじこめる貯蔵方式である。このため、地上タンクのような金属製のライニングは設けず、ロックボルト、吹き付けコンクリートなどの支保工で空洞を安定させている（図2）。

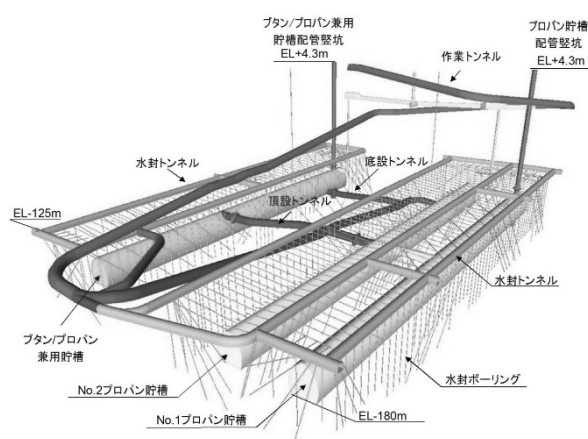


図1 波方LPG地下備蓄基地の地下施設レイアウト



図2 No.1プロパン貯槽空洞
（幅26m×高さ30m×長さ485m、天端深度EL-150m）

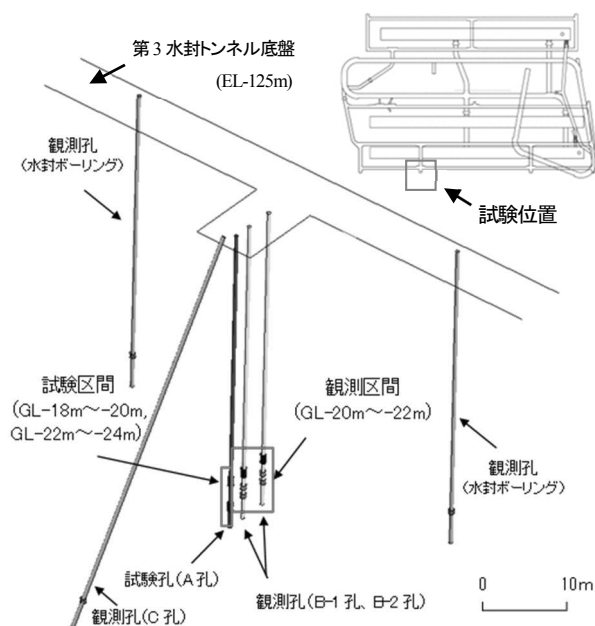


図3 試験孔配置

試験位置は、図3に示すようにプロパン貯槽南東部の第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。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、試験位置付近には低角割れ目が発達しており水理学的連続性の高い岩盤が分布することが確認された。

試験孔の配置を図3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。

3. 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、ボアホールテレビによる坑内亀裂調査およびルジオン試験の結果をもとに、図4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

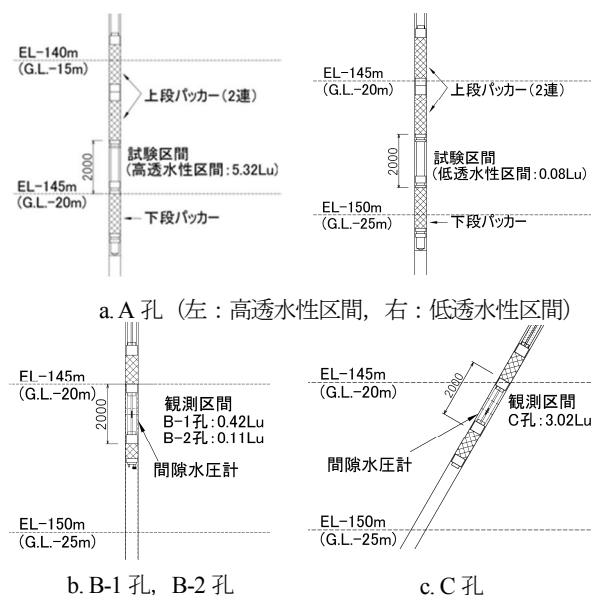


図4 測定区間

($k=1 \times 10^{-8} \text{m/s}$) にほぼ等しい透水性 (0.08 Lu, $1 \text{Lu} \approx 1 \times 10^{-7} \text{m/s}$) を有し貯槽周辺の低透水岩盤を代表するとみなせる 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。

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5, 6)。使用した計測機器の仕様および数量の一覧を表-1に示す。送気量は、2方式 (フロート式流量計, マスフローメータ) による複数レンジのガス流量計で測定した。孔内装置は、従来の透気試験装置 (Barron, 1978) と異なり、注排水および送排気用の2本の配管と、温度センサー、圧力センサー、水位センサー (差圧計) を有する。

水位センサーと地上の水タンクに接続したサーボバルブを用いて試験区間内の水位を制御することにより、試験区間内に「気室」を設けた試験

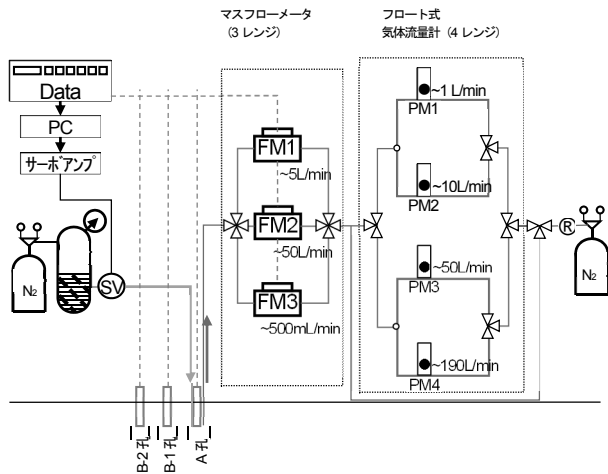


図5 地上装置

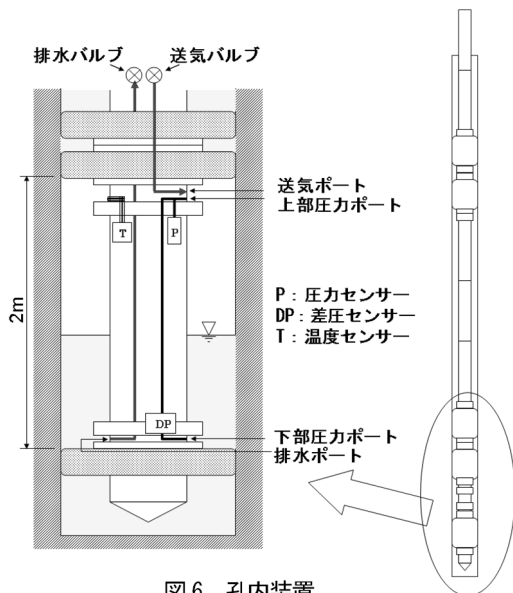


図6 孔内装置

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)	-	N ₂ ガス
		マスフローメータ	YAMATAKE CMS0005	MAX1.5MPa 0~5L/min	±2.5mL (0.5%FS)	-	N ₂ ガス
		マスフローメータ	YAMATAKE CMS0050	MAX1.5MPa 0~50L/min	±250mL (0.5%FS)	-	N ₂ ガス
試験孔 (A孔)	気体温度	温度センサ	日機装フイエスアイ(株) N311/BR14KA103K/100/ RPS/10/PH	0-70℃	±0.01℃	0.001℃	
	気体圧力	圧力計	パ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	パリダイソ 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

が可能である(図6)。このような従来の透水試験装置や透気試験装置に無い機能により、後述するような種々の条件下での気密性確認試験が可能である。

5. 試験手順

低透水区間と高透水試験区間において、2種類の気密試験(シャットイン試験および定容積試験)と透気試験を実施した。シャットイン試験は、気室内水位を任意の位置まで降下させた後、排水・送気バルブを閉鎖(シャットイン)し、試験区間への地下水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試験である。一方、定容積試験は、気室内の水位を一定に保った状態で、送気により段階的に気室圧力を上昇させ漏気の有無を判定する試験である(判定方法は後述する)。透気試験は、試験区間の水をすべて排除した状態で、初期水压より高い気室圧力を段階的に作用させた時の送気量(漏気量)を測定する。

6. 試験結果

図7に、低透水区間(初期区間水压1.35MPa)におけるシャットイン試験の結果を示す。試験は、気室圧力が0.35MPa, 0.62MPa, 0.96MPaの3条件で順次実施した。各圧力段階において、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。0.96MPaでの試験後、長時間放置したところ、容積、圧力、温度とも定常状態に近づいた。

図8に、同じく低透水区間で実施した定容積気密試験の結果(圧力、温度、水位)を示す。試験は、気室圧力が1.20MPa~1.51MPaの条件で実施した。各圧力段階で、ガス流量計のラインを開放し

現場透気試験による亀裂性岩盤のスレショールド圧の評価

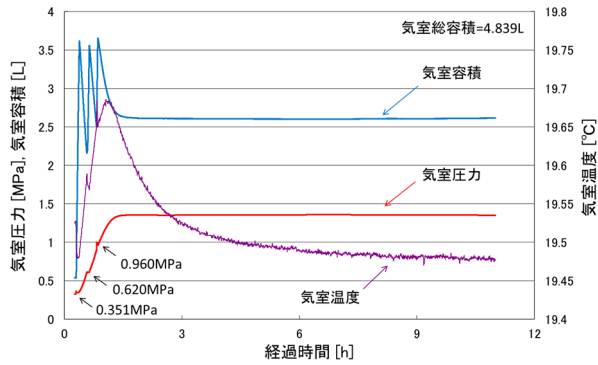


図7 シャットイン気密試験結果（低透水性区間）

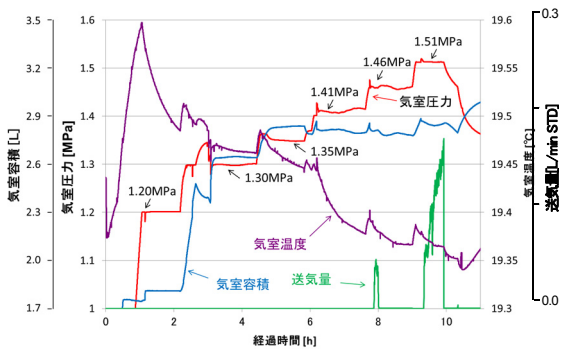


図8 定容積気密試験結果（低透水性区間）

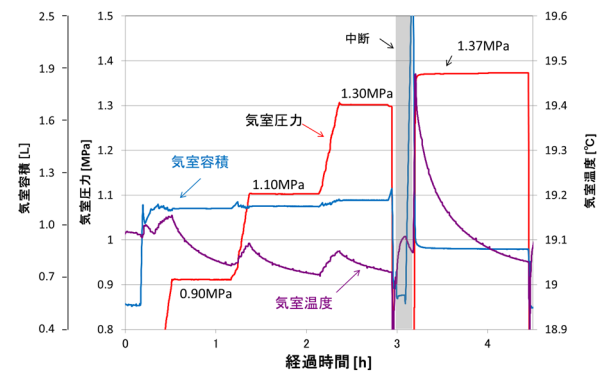
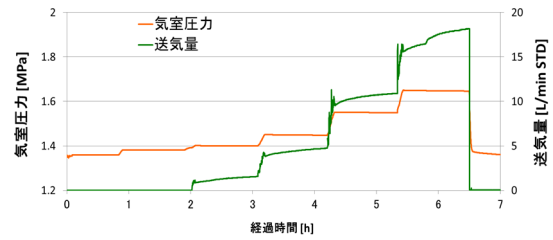


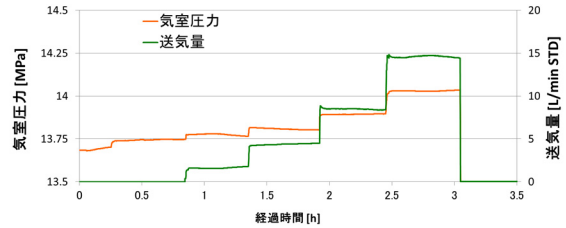
図9 定容積気密試験結果（高透水性区間）

たところ、気室圧力 1.41MPa まで漏気は認められなかった。気室圧力 1.46MPa のとき、一時的に漏気が発生し、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9に、高透水区間（初期区間水圧 1.37MPa）

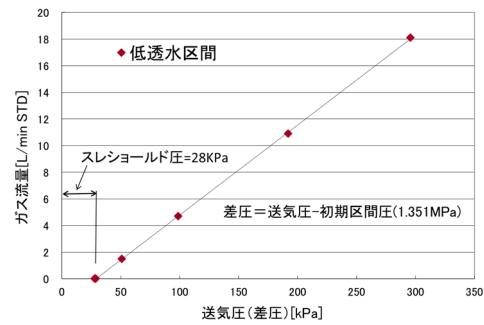


a. 低透水性区間

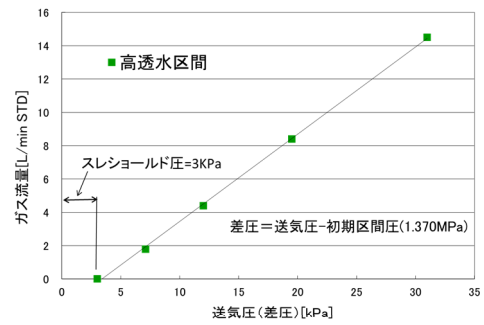


b. 高透水性区間

図10 透気試験結果



a. 低透水性区間



b. 高透水性区間

図11 送気圧と漏気量の関係

におけるシャットイン試験の結果を示す。試験は、気室圧力が、0.90MPa、1.10MPa、1.30MPa、1.37MPaの各条件で実施した。いずれのケースも、漏気のは発生は確認されなかった。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。

図 10 に、低透水区間および高透水区間で実施した透気試験の結果を示す。送気ラインから窒素ガスを試験区間に送り昇圧した。試験区間の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。低透水区間、高透水性区間とも、この時点で漏気は発生せず、気室圧力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を確認された。漏気量（温度 20℃、大気圧で標準化した体積流量）と送気差圧（=送気圧-初期区間水圧）との間には、図 11 に示すような線形関係が確認された。

7. 試験結果の評価

シャットイン試験や定容積試験における気密室内の圧力は、温度や体積変化の影響により変動する。理想気体を仮定した場合、気室からの漏気が無ければ、(1)式に示すような温度・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(2)式に示すような計測機器の精度や試験条件で決まる不確かさ $\varepsilon(\Delta P)$ の範囲に収まると考えられる。

$$\Delta P = P_2 \cdot \frac{V_2 T_1}{T_2 V_1} - P_1 \quad (1)$$

$$\varepsilon(\Delta P) = P_2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon P}{P_2}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon P}{P_1}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon T}{T_2}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon T}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon V}{V_2}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon V}{V_1}\right)^2} \quad (2)$$

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 1、2 は、気密性評価開始および終了時の値を示す。

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。

図 12 に、初期水圧 0.960MPa のシャットイン試験において、温度・圧力がほぼ安定した 10 時間経過後から 60 分間の ΔP の時間変化を示す。同図よ

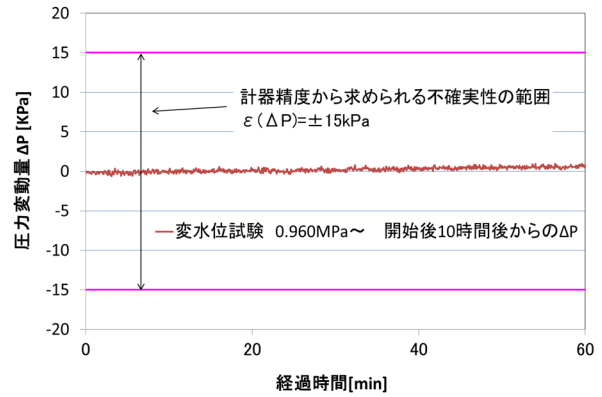


図 12 シャットイン試験の ΔP (低透水性区間)

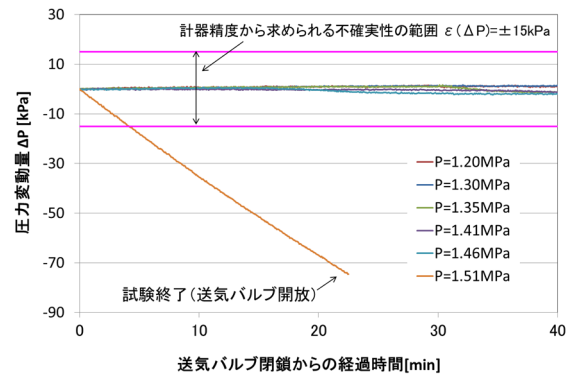


図 13 定容積試験の ΔP (低透水性区間)

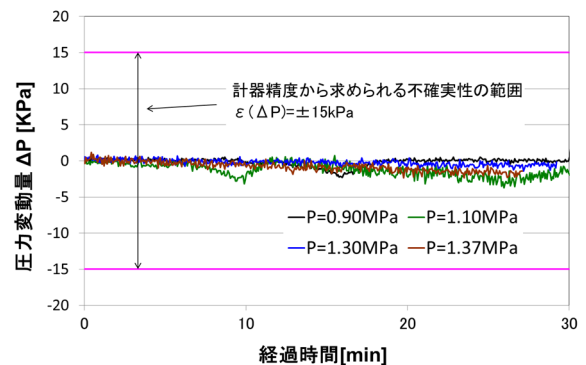


図 14 定容積試験の ΔP (高透水性区間)

り、 ΔP は、ほぼ一定で、かつ変動幅は不確実性 $\varepsilon(\Delta P)$ 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、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なかったため、シャットイン試験による気密性評価は実施しなかった。

図 13 に、低透水区間で実施した定容積試験に対する ΔP の変化を示す。気室圧力が 1.46MPa 以下の試験結果に対する ΔP はほぼ一定で、かつ変動幅は不確実性 $\varepsilon(\Delta P)$ 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。一方、気室圧力が初期区間水圧 1.35MPa より 0.16MPa 高い気室圧力 1.51MPa に対する ΔP には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。前述のように、気室圧力を 1.46MPa に昇圧した直後に一時的な漏気が発生したことから、低透水区間においては、少なくとも気室圧力が 1.41MPa、すなわち初期区間水圧より 60kPa 高い気室圧力まで漏気が発生しないことが確認された。

すなわち、低透水性区間のスレショールド圧（すなわち、岩盤内への漏気が開始する時点でのガスと水の境界に働く毛管圧）は、シャットイン試験および定容積試験の結果から 60kPa と評価された。

図 14 に、高透水区間で実施した定容積試験に対する ΔP の変化を示す。いずれも ΔP には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ることから、高透水区間においても区間初期水圧 (=1.37MPa) 以下の気室圧力では、漏気は生じないと判定された。

スレショールド圧は、図 11 に示した送気差圧と送気量の関係からも得られる。すなわち、送気

差圧と漏気量の直線内挿式の横軸（送気差圧）との切片が、漏気開始する時点の差圧すなわちスレショールド圧とみなすことができる。このようにして求めた低透水区間および高透水区間のスレショールド圧は、それぞれ 28kPa および 3kPa と求められた（図 11）。

以上の結果をまとめると、スレショールド圧は、低透水性区間で、60kPa（定容積試験）または 28kPa（透気試験）、高透水区間では 3kPa（透気試験）と求められた。

得られた結果をもとに、岩盤の透過率とスレショールド圧との関係について検討する。

試験区間からのガス流量は、(3)式に示す軸対称流を仮定した理論解で求められる。

$$Q_{std} = \frac{2\pi kL(P_2 - P_1)}{\mu \ln\left(\frac{L}{2r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2r_w}\right)^2}\right)} \quad (3)$$

ここに、 $Q_{std}[\text{m}^3/\text{s STD}]$ は大気圧および温度 20°C の条件で標準化した体積流量、 $\kappa[\text{m}^2]$ は岩盤の絶対透過率、 $\mu[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ は動粘性係数、 $L[\text{m}]$ は試験区間長、 $r_w[\text{m}]$ は井戸半径、 $P_1, P_2[\text{Pa}]$ は試験区間の初期圧力と試験圧力である。図 11 の結果から、低透水区間および高透水区間の絶対透過率は、それぞれ $6.00 \times 10^{-15} \text{m}^2$ および $4.64 \times 10^{-14} \text{m}^2$ と求められる。これに対応する水理開口幅 $b[\text{m}]$ は、平行平板の単一割れ目を仮定した三乗則

$$\kappa = \frac{b^3}{12L} \quad (4)$$

により、低透水区間で 0.052mm、高透水区間で 0.104mm と求められる。

一方、幅 b の開口割れ目の毛管圧力は、次の Young-Laplace 式で計算される。

$$P_c = 2\gamma \cdot \cos\theta / b \quad (5)$$

ここに、 P_c [Pa]は毛管圧力、 γ [N/m]は温度 20℃の水の表面張力(=0.07275N/m)、 θ [radian]は水と固体表面の接触角 (0 と仮定) である。(5)式に(4)式で得られた水理開口幅 b を代入すると、低透水区間および高透水区間の毛管圧力は、それぞれ 2.8kPa および 1.4kPa と求められる。

今後、試験データの蓄積が望まれるが、今回得られた試験データのみに基づいて考察すると、水理開口幅を用いた理論解で求めた毛管圧力は、特に低透水区間において試験結果より小さな値となった。

8. まとめ

スレショールド圧は、岩盤内のガスや石油などの貯蔵や移動に関わる重要な岩盤特性であるが、現場において実際に測定された事例は、国内外を含めて非常に少ない。本研究では、ボーリング孔を用いてスレショールド圧を測定する試験装置とそれを用いた複数の測定方法（シャットイン法、定容積試験、透気試験）を開発し、花崗岩サイトにおける現場試験によりその有効性を確認した。

得られた主な知見は以下のとおりである。

- (1) シャットイン試験では、気室圧力と地下水圧が最終的に平衡し（すなわち試験区間に向かう動水勾配が 0 の状態）、試験区間から岩盤への漏気は確認されなかった。これは、亀裂に働く毛管圧力すなわちスレショールド圧の効果によるものと考えられる。ちなみに、LPG 貯槽では、貯槽上部の動水勾配が常に 0.5 (例えば空洞天端直上 10m の地点の水頭が貯槽圧+5m) 以上となるように貯槽深度や水封圧力が設計されており、高い

気密性が確保されている。

- (2) シャットイン試験および定容積試験では、補正圧力変動量 ΔP と、温度、圧力、容積（水位）測定に用いたセンサーの精度から決定される不確実性指標を用いることにより、正確な漏気判定が可能である。
- (3) 透気試験で得られる透気量と送気差圧（=送気圧-初期区間水圧）の関係からもスレショールド圧の評価が可能である。
- (4) 0.1ルジオン～5ルジオン程度の透水性を有する花崗岩のスレショールド圧は、数 kPa～数 10kPa 程度であることが分かった。これは、透気試験で求めた絶対透過率から理論解で求めた毛管圧力と比較して同程度か小さめの値である。
- (5) 透水性や初期区間水圧などの条件により適切な試験方法の選定が可能であり、複数の手法を適用することにより測定結果の信頼性を向上させることができる。
- (6) 開発した試験技術は、亀裂性岩盤に限らず、泥岩や頁岩などの堆積岩など多様な岩盤のスレショールド圧の現場測定に適用可能である。今後、同手法の適用により、岩盤のスレショールド圧に関する測定データの蓄積を目指したい。

参考文献

- Åberg, B. (1977): Prevention of gas leakage from unlined reservoir in rock, Proc. Int. Symp. Storage in Excavated Rock Caverns, 399-413.
- Barron, K. (1978): 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), 69-76.
- 加藤元彦・前島俊雄・中島秀一 (2007) : 地下 150 m に LPG 岩盤貯槽を建設, 土木施工, 2007 年 3 月号, 48-53.