

(84) 不飽和状態を履歴した岩盤の水封機能に関する研究

(財)電力中央研究所 正会員 ○ 中川加明一郎
同上 正会員 駒田 広也
日本地下石油備蓄(株) 吉岡 邦明

Gas-tightness of the previously unsaturated rock

Kameichiro NAKAGAWA, Central Research Institute of Electric Power Industry
Hiroya KOMADA, Central Research Institute of Electric Power Industry
Kuniaki YOSHIOKA, Japan Underground Oil Storage Co. Ltd.

Abstract

The air is supposed to be left in joints and fractures of the rock when the groundwater level recovers from the lowered state, and it is worried that the remaining air in the previously unsaturated rock mass has influences on the condition to prevent gas leakage from rock storage caverns. So this study aims to confirm the condition for the gas to be stored in such rock mass. The investigation to examine the gas-tightness of the previously unsaturated rock mass consists of field tests as well as laboratory experiments and the results leads the conclusion that gases are able to be stored in excavated caverns in the previously unsaturated rock with the same conditions in the rock which is kept submerged.

1. 序論

石油、石油ガスなどの燃料貯蔵あるいは余剰電力による圧縮空気貯蔵を岩盤内の空洞において行う場合には、いわゆる水封式地下貯蔵方式が採用されることが多い。水封式地下貯蔵とは、地下水面下の岩盤中に掘削された空洞内に気体（あるいは液体）を貯蔵する際に、これらの漏洩をライニングによつてではなく、空洞周辺岩盤での地下水の作用により、防止しようとするものである。

これまで、水封式地下タンクの建設にあつては、周辺岩盤における地下水位を空洞までは低下させずに空洞を掘削することが多かった。これは、水封式地下タンクの実績を多く有する北欧においては、岩盤が緊密であるため、多くの場合地下水位の低下が生じにくかつたことによるものと想像される。しかしながら、わが国で多々見られる亀裂性岩盤では、特別に対策を施さない場合には、掘削中に、一次的に地下水位が空洞まで低下することも考えられる。したがつて、地下水位の低下を許し、効率的な施工を図ろうとするためには、地下水位を再度回復させた岩盤の気密機能について検討しておくことが重要となる。

水封方式における漏気防止の条件に関しては、「貯蔵圧が空洞壁面位置での初期間隙水圧より小さいこと、あるいは、周辺の地下水が空洞に流入する成分を有すること」が漏気防止の必要条件であるとの検討結果が中川らにより示されている¹⁾ものの、岩盤の不飽和履歴は検討事項とはされていない。

以上の事項を鑑み、過去に不飽和状態を履歴した岩盤が有する気密機能を、ここでは主に、現場における孔内気密試験の実施により明らかにすることとし、さらに、水位回復過程の相違を考慮した室内試験を実施して現場試験を補完することにより漏気防止条件を確認することとした。

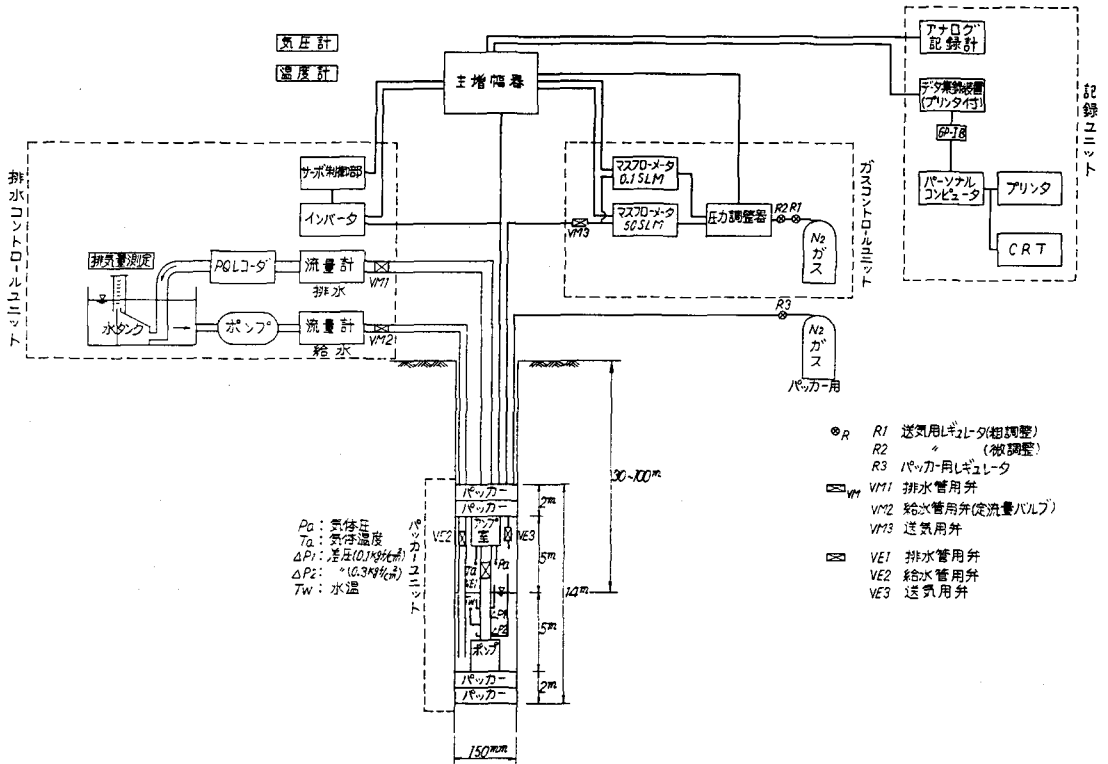


図-1 孔内気密試験装置システム概略図

2. 現場孔内気密試験²⁾

2.1 孔内気密試験装置

過去に不飽和状態を経験した岩盤が有する気密機能を明らかにするために、今回新たに原位置孔内気密試験装置を製作し、現場のボーリング孔内で気密試験を実施することとした。試験装置のシステムの概略を図-1に示し、孔内装置の部分の概要を図-2に示す。孔内装置の外径は140mmであり、孔径150mmのボーリング孔内で試験を行うことができる。孔内装置の上下に取り付けたパッカーにより試験区間が10mに仕切られる。そして、下部に設置された水中ポンプを用いて試験区間内の水を強制的に排水することにより、気体室が形成される。またこの水中ポンプは、気体室の容積が一定となるように、すなわち、パッカー間での水位が一定となるように、排水が自動的に制御されるようにしてある。本試験装置における主な測定項目は、気体室内圧、気体室内温度、気体室長（気体室容積）、水中温度、排水量、排気量である。これらにより、気体室での気体の出入りを求めることができる。

2.2 試験対象岩盤の概要

試験の対象とした岩盤は、比較的亀裂が多く発達した花崗岩を主体に構成されており、調査横坑の掘削等により地下水位の

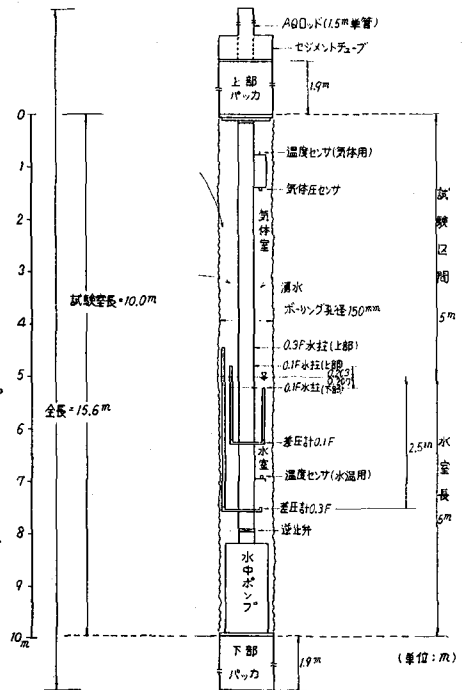


図-2 孔内装置の概要

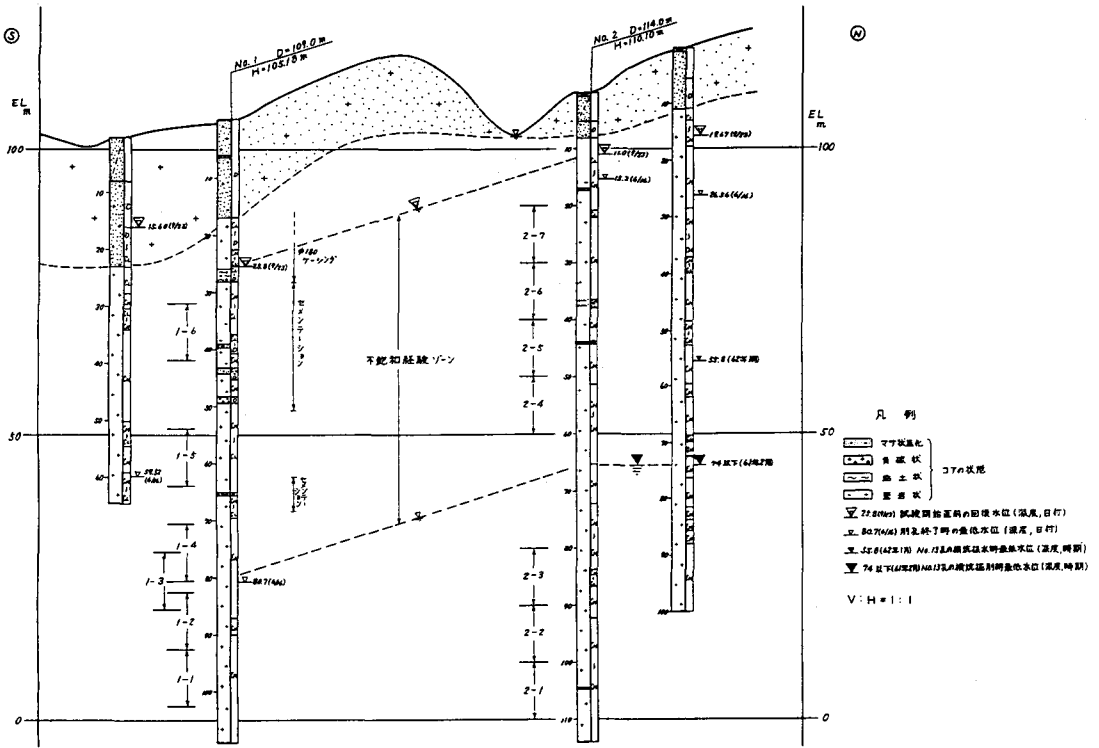


図-3 試験地点の概要

低下したことが観測されている。この岩盤に試験孔として No. 1 及び No. 2 の2本のボーリング孔を掘削し、これらの地下水位の変動により不飽和を経験した区間および不飽和履歴を受けていない区間において、気密試験を実施することとした（図-3）。なお、試験前にダブルパッカー法により孔内区間水圧として間隙水圧をもとめたが、間隙水圧は何れのボーリング孔とも静水圧分布を示し、特に被圧された領域はないことが確認された。

2. 3 地下水中の含有気体量

地下水中に含まれる気体量を測定するために、湧気量試験と称して、試験室内に窒素ガスを送気し、初期の気体室内圧を約 0.5 kgf/cm^2 に設定し、給気を止め試験室内の気体圧、気温、気体室長及びその他の各センサーの挙動、給・排水量、排水中の排気量の経時変化を計測することとした。そして、これらの計測結果より、湧水と共に運び込まれる気体量を算定することにより、試験区間の地下水中に含まれ、大気圧のもとでは過飽和となる分の含有気体量濃度と、間隙水圧との関係を図-4のように得た。

No. 1 孔においては、孔内水を圧力を封じ込めたまま採水し、溶存気体量を測定することも行った³⁾。また溶存気体の成分分析も実施した。気体分析結果によると溶存している気体は殆ど窒素及び酸素からなり、

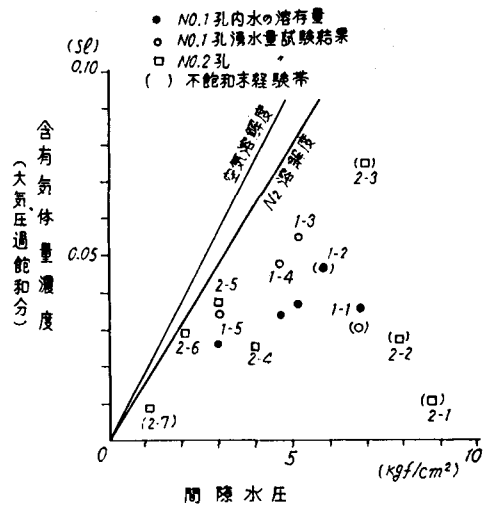


図-4 地下水中の溶存気体濃度

窒素・酸素比は極めて空気のものに近いことが判った。

サンプリングにより推定された地下水中の空気の総気体量濃度から、空気の溶解度を2%としてこの分を差し引き、大気圧過飽和分の溶存気体量濃度として図-4中にプロットしたが、湧気量試験による気体量濃度とほぼ同等の値を示していることが判る。図-4中には、空気及び窒素の場合の、間隙水圧と対応する最大の溶存気体量濃度との関係を同時に示したが、湧気量試験結果は何れの試験区間においてもこれらを下回っている。これより、今回の試験の対象とした岩盤においては、地下水位の低下及び回復という不飽和履歴により岩盤中に残留した空気は、地下水中に溶解した状態で存在していたものと判断できる。

2. 4 試験結果

各々の試験区間において、気密試験として試験室内に窒素ガスを給気して、試験開始時の気体室内の圧力を、試験前の間隙水圧より0.5 kgf/cm² 小さな圧力に設定し、その後給気しない状態で、試験室内の気体圧、気温、気体室長及びその他の各センサーの変動、そして、給・排水量、排水中の排気量の挙動を計測することとした。不飽和履歴区間での気密試験結果の例を図-5に示す。今回の試験結果の解釈において、上述した湧水中の溶存気体の遊離、あるいは貯蔵気体の排水中への溶解と搬出という、気体室内における気体の収支を考慮することにより、不飽和履歴区間においても、未經験区間と同等の気密性があることが確認された。

貯蔵限界圧を知るために気体室内圧を段階的に昇圧して行き、各圧力段階における平衡送気量を漏気量として計測した。不飽和経験帯における気体室内圧力と漏気量の計測例を図-6に示す。この図に示されるように、気体室内の圧力がほぼ初期の間隙水圧を超えると急激に漏気量が増大するという漏気特性は、不飽和経験帯及び未經験帯の何れの試験区間においても、同様のものであることが認められた。すなわち限界貯蔵圧は初期の間隙水圧にほぼ等しいものであることがわかった。図-6には、この試験に対応する条件で実施した、軸対称有限要素法による気液二相流解析¹⁾を適用して行つた計算結果も同時に示した。計算結果は現場試験結果とほぼ同じ傾向を示すが、この結果が不飽和履歴を考慮して得られたものではないことからすれば、不飽和を履歴しても地下水位が回復すれば、岩盤は不飽和未經験の場合と同様の漏気防止能を有するものと推察できる。

3. 室内気密試験

上に述べた現場試験箇所においては、不飽和を経験した岩盤は、地下水位が下方から自然回復するという再飽和過程を経たものであった。これに対し、実施設では地下タンク上方から注水によって再飽和が図られることも考えられる。したがって、不飽和履歴岩盤の気密機能に関する上記の現場試験を補完する意味で、室内試験により、不飽和履歴岩盤の気密機能に及ぼす水位回復過程の相違の影響を明らかにすることとした。

室内試験では、現場試験のボーリング孔より採取した岩石コアのうち自然のクラックを含む供試体（直径50 mm、高さ100 mm程度）を作成し、これに対して気密試験を行つた。また、力学的に圧碎して人工的にクラックを設けた岩石コアに対しても気密試験を行つた。

室内気密試験装置の概略を図-7に示す。この試験装置内にセットされた供試体に対し、飽和過程の相違

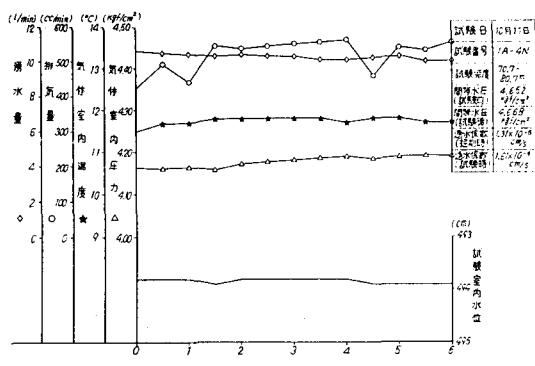


図-5 気密試験結果 (No. 1-4)

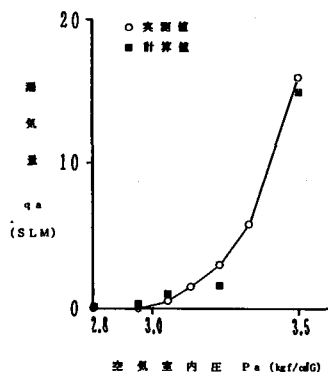


図-6 貯蔵圧と漏気量の関係

を考慮するために上端から注水または下端から注水したのち、下方への通水を行いながら下部空洞に空気を圧入する。そして供試体上下間の圧力差を確認しながら貯蔵気体圧を上昇させてゆく。漏気開始時のこの圧力差より計算される動水勾配を限界動水勾配とし、下向きの動水勾配を正として、同一の供試体での上部注水飽和させた場合の限界動水勾配と下部注水飽和させた場合のそれとの関係として表したものが図-8である。この結果によれば、今回の供試体では限界動水勾配は何れの場合も負となり、このことは貯蔵気体圧が静水圧以上になつても漏気防止能があることを示すものである。そして、同一の供試体であつても上部注水飽和させた場合の限界動水勾配よりも下部注水飽和させた場合のそのほうがこの漏気防止能がより大きくなることが示される。ただし、限界動水勾配が0付近となる場合には両者の差はなくなることにも分かる。

4. 結論

本報告は、過去に一旦地下水位が低下した回復するという不飽和履歴を受けた岩盤の水封機能について、実験的に検討した結果を述べたものである。内容を要約して記すと以下のようになる。

- (1) 不飽和履歴岩盤内の地下水中には大気圧のもとで過飽和となる空気が溶存していることがわかった。
- (2) 今回開発した水封式地下タンクの機能を模擬する原位置孔内気密試験装置を用いて不飽和履歴岩盤の気密特性を調べたところ、不飽和状態を未経験の区間と同様の気密性を有することがわかった。

- (3) 岩石コアのクラックに対して室内気密試験を実施したところ、水位回復過程の相違にかかわらず、貯蔵圧が静水圧以下であれば漏気しないことが確認できた。

なお、今回の研究を実施するにあたり、日本地下石油備蓄株式会社ならびに（財）電力中央研究所地下水利研究室を初め関係諸氏の多くの御協力を頂いた。末筆ながら深謝の意を表する次第である。

5. 参考文献

- 1) 中川, 他: 岩盤内圧縮空気貯蔵空洞からの漏気防止条件, 土木学会論文第370号/Ⅲ-5, pp. 233-241, 1986
- 2) 中川, 他: 現場孔内試験による不飽和履歴岩盤の水封気密機能に関する検討, 電力中央研究所・研究報告, U87092, 1988
- 3) 馬原, 他: 地下水年代決定法の検討(その1)——深部地下水採水技術——, 電力中央研究所・研究報告, U88020, 1988

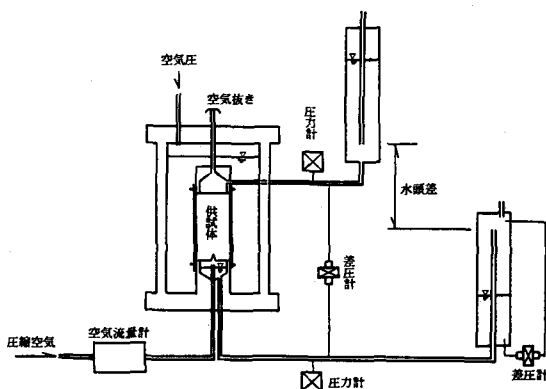


図-7 室内気密試験装置概略図

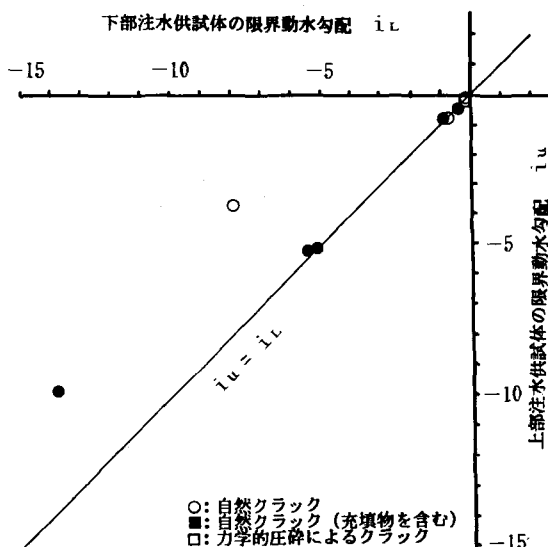


図-8 限界動水勾配の比較