岩盤の「割れ目」^{a)}に対応した水封評価法*

岡 本 明 夫¹ 中 澤 保 延²
長 谷 川 誠³ 小 島 圭 二⁴

How to Evaluate Jointed Rock Masses with Respect to Water-Sealing

by Akio OKAMOTO¹, Yasunobu NAKAZAWA²
Makoto HASEGAWA³ and Keiji KOJIMA⁴

1. Japan Underground Oil Storage Co., Ltd., Shibadaimon, Minato-ku, Tokyo 105
2. Mitsui Kushikino Mining Co., Ltd., Kushikino-shi, Kagoshima 896
3. Shimizu Corporation, Japan, Shibaura, Minato-ku, Tokyo 105
4. Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

The first rock caverns for oil storage in Japan have been constructed in Kuji, Kikuma and Kushikino. Although many phenomena could not maintain the necessary ground water level through some cracks and fractures which occurred during the process of actually constructing the rock caverns, we were able to complete the storage facilities into service by the various measures to render water-sealing effective. As a result, it was confirmed that the observation of the flow trends through water passage is most important to secure the water-sealing system. For this reason, we made the classification and evaluation system to be composed mainly of "Evaluating Water Passages" and "Geological Conditions such as Joint Spacing etc.", how to evaluate jointed rock masses with respect to water-sealing. This paper describes the outline of such classification for aiming and helping the development of water-sealing technology.

KEY WORDS : Rock Cavern, Joint, Classification, Evaluation, Water-Sealing System

1. 緒 言

日本で初めて、原油を備蓄するための水封式岩盤タンクを久慈市、菊間町および串木野市に1986年から建設(容量500万kL)¹⁾した。その建設過程において、水封設計思想と異なる種々の局所的な現象が発生し、そのときどきに仮説をたてて対応し、3基地を1994年に無事完成、操業させるにいたった。これらの水封思想と異なる種々の現象は、亀裂や破碎帯によるもので、自然の岩盤を対象とした大規模な岩盤タンクでは理論や実証実験と異なる現象が発生することは避けられない。

しかし、石油を安全に貯蔵するためには、これら局所的な問題を無視することはできないことから、実際の岩盤の「割れ目」に対応した水封評価法が要求された。

本報告は、このような経緯を踏まえ、岩盤タンクを対象とした水封評価技術の確立に資料を供するため、3基地の建設における実績データを整理し、「割れ目」に対応した水封評価法としてまとめたもので、その概要を紹介する。

2. 水封管理システムの概要

2・1 水封システムの採用と水封管理の必要性

岩盤タンクの液密・気密の確保には、水封システム(図1)を採用しており、これは「地下空洞に貯蔵されたガスは、岩盤の亀裂を通して上昇しようとするが、亀裂内の地下水の鉛直動水勾配がある程度大きくなると気泡の上昇が生じなくなる」という水封の原理を応用したものである。

3基地の水封システムの設計は、菊間実証プラントの実験結果²⁾⁻⁵⁾に基づくもので、「割れ目」による局所的な地下水挙動を除き、実用的には岩盤の透水係数を平均化した均質な多孔質媒体中の地下水の流れとして、ダルシー則に基づく理論¹⁾を適用した。

したがって、この設計手法では、大規模な岩盤タンクを掘削する場合、「割れ目」による局所的な水位低下が予想されることから、地下水の挙動をシステムティックに管理し、異常の早期発見とその対応に努める必要があった。

2・2 水封管理システムの構築

水封管理の最大の目的は、岩盤タンクの液密・気密を地下水で確保することであり、そのため「割れ目」を含めたタンク周辺岩盤の地下水を限界地下水位(漏油・漏気を防止するために保たなければならない最低の地下水位として消防法で規定されている)以上に保つことが要求された。特に、水封式岩盤タンクの建設は、日本では最初であることから、できる限り多くのデータを得られるように、表1で示す水封管理システムを構築した。

* 1997年3月25日受付 10月31日受理

1. 正会員 工博 日本地下石油備蓄(株)業務部調査役

2. 正会員 工博 三井串木野鉱山(株)代表取締役社長

3. 清水建設(株)土木本部技術第二部副部長

4. 正会員 理博 東京大学教授 工学系研究科地球システム工学専攻

[著者連絡先] FAX 03-3432-7620 (地下備・業務部)

キーワード: 岩盤タンク, 岩盤の「割れ目」^{a)}, 岩盤の分類, 水封評価法, 水封システム

a) 実際の岩盤の水みちとなる不連続面(以下本論文では「割れ目」と定義する)

ここに、 H : 水封水位から貯油槽までの高さ
 T : 気体（ガス）部の層高
 S : 液体（石油類）の液高
 P_g : ガス圧
 W : 水の単位体積重量
 W' : 石油類の単位体積重量

図1 水封システム

3. 発生した局所的な現象

3・1 現象事例

3 基地の建設および操業時に発生した「割れ目」による主な局所的な水位低下現象について、表2の水封管理状況および、表3の局所的な現象および対応例を一覧表にまとめて示す。

3・2 特徴

“水みち”となる岩盤の「割れ目」には

① 湧水が急激あるいは短時間に抜けきってしまう「割れ目」がある。これについては 久慈基地（図2）の断層等が該当する。

また、串木野基地（図3）でタンク底盤レベル以下に水位が低下していた「割れ目」（F-9断層群の一部）もこれに該当する。「割れ目」の透水係数は、いずれも 10^{-4} cm/sec 以上を示し広範な水位低下を来す。久慈基地では、調査段階で高透水帯が予想されたことから、タンク掘削時、湧水抑制のためセメントによるブレグラウト等で岩盤改良を行うとともに、水位低下を防止するためボーリング孔から人工的に注水しながら建設を進めたが、オイルイン後も局所的に水位低下する箇所（一部の断層）が残っていると判断される。このことは、「割れ目」によっては水の通りがよいため水位低下が早く、「割れ目」の一部が不飽和となり、これをグラウトや人工的に注水しても、そのような「割れ目」を改良し、短期的に飽和させることが難しいと考えられるからである。

また、前述の串木野基地の「割れ目」（F-9断層群の一部）については、局所的に開口亀裂が発達しており、これがタンク域外に流出する水の通りみちとなる可能性があることから、グラウトで岩盤改良するとともに、自然水封方式から人工水封方式に変更した。

なお、この F-9 断層群の中で粘土をはさみ、かつ湿っている箇所では、自然水封方式としたが、オイルイン後2度の不飽和域の進行傾向が認められたことから、特に大きな「割れ目」の連続部は、局所的に水位が低下するところがあると判断される。

② 限界地下水位以上で急激な水位低下を伴う湧水箇所や、水位と湧水量が経時的に減少する箇所があり、いずれも早期に注水やグラウトを実施することによって、水位を維持できる「割れ目」がある。前者は、串木野基地の貫入岩や地質境界に、後者は、菊間基地の亀裂帯の一部や串木野基地の断層に見られる。しかしながら、現場では湧水箇所すべてに水位計を設置していないので、これらの「割れ目」の周辺および連続部で岩盤の不飽和が進行し

表1 水封管理システムの概要

管 理 項 目	管 理 細 目	頻 度 等	管 理 (判断) 基 準
①地質・水理状況	・岩盤分類（硬さ、割れ目間隔） ・亀裂・断層・貫入岩・地質境界 ・亀裂と介在物および湧水状況 ・透水試験 ・出水箇所 ・ボアホール観察	・発破の都度 ・ ・ ・ボーリング孔全て ・出水時および経過状況 ・特殊な箇所のみ	・タンクアーチ部の高透水帯等の予測と先進ボーリングおよびブレグラウトの予定範囲の決定 ・設計の見直し
②涵養量	・降水量 ・蒸発散量 ・河川流出量	・日記記録計 ・ ・	・涵養量の推定と設計値との比較
③地下水位	・調査孔の一部 ・消防基準による水位測定孔 ・断層内水位	・1回/日 ・日記記録計 ・必要の都度	・限界地下水位の確保
④湧水量	・各アクセストンネル（工事用水を除く） ・各タンク別（ ・タンク区間湧水量（ ・	・1回/日 ・ ・特殊な箇所のみ（1回/日）	・設計値、ポンプ能力
⑤供給水量	・各注水孔 ・各水封トンネル ・全体	・初期（1回/日） ・1回/日 ・	・設計値 ・注水ボーリングの配置が適切か ・気密性、移流防止
⑥間隙水圧	・水位変化の把握	・必要の都度	・工事の効果 ・気密性の検討
⑦壁面観察	・壁面の濡れ、滴水 ・亀裂の湧水状況	・オイルイン前後（1回/日） ・必要の都度	・壁面の乾燥化 ・局部的水位低下
⑧グラウト	・高透水箇所の特定 ・グラウト工法（グレ、ボスト、インポート、長尺） ・グラウト材（セメント、粘土、超微粒子） ・グラウト効果	・必要の都度	・過大湧水帯に対しグラウト ・湧水量、ポンプ能力
⑨水質	・塩分、電気伝導度、イオン濃度、SS、PH等 ・バクテリア関連調査（バク濃度およびバクテリア類）	・1回/3カ月 ・	・人工水か自然水か ・注水孔の目詰まり
⑩気密試験	・不飽和箇所の把握 ・水位低下箇所（断層等）の把握	・オイルイン前 ・必要の都度	・不飽和箇所の有無 ・局部的水位低下の有無
⑪植生調査等	・樹木活性、航空写真、植物変化 ・土壌水分	・1回/年 ・日記記録計	・工事の影響の有無

表2 水封管理状況

	久慈基地		菊間基地		串木野基地	
	状 況	対 応 策	状 況	対 応 策	状 況	対 応 策
地質・水理状況 ・母岩および岩級区分 ^{a)} ・亀裂間隔 ^{a)} ・亀裂、断層、破碎帯 ・湧水状況 ・透水係数 母岩設計値 高透水部	H M L 久喜花崗岩95% (2% 31% 66%) I II III IV V — — 5% 82% 13% 11条の断層・破碎帯および貫入岩断層・貫入岩およびその周辺で大量の湧水があり広範囲かつ急激な水位低下を伴う②③ 岩盤は全般的に湿っている	地質が概ね判明した時点で水封検討を実施した結果湧水量を6,000l/日以下に抑制することが必要となり通常のセメントグラウト以外に広域グラウトを採用した⑤	H M L 新嘉坡花崗岩97% (63% 32% 5%) I II III IV V — 2% 65% 31% 2% 22条の亀裂帯限られた亀裂から滴水および湧水があり水位低下はほとんど認められない 乾燥している岩盤が一部で認められる		H M L 自蔵神状花崗岩76% (63% 32% 5%) I II III IV V 13% 34% 22% 26% 4% 14条の断層(貫入岩脈含む)帯岩脈の交差したF-9断層群の一部ではタンク底盤レベル以下に水位が低下していた⑩ また局所的な異常出水があり水位低下を伴うものと伴わないものがある 岩盤が乾燥している箇所が多い	詳細地質調査を実施した結果高透水帯が賦存するため自然水封方式を一部人工水封方式に変更した⑪
水収支('84~'94の平均)	掘削の早い段階で沢水への影響が認められた②	土壌水分調査(異常なし)				
・降水量 (A) ・蒸発散量 (B) ・河川流出量 (C) ・D=A-B-C ・D'(1日当りに換算)	1,324 mm/年 321 " 382 " 621 " (2,331 m ³ /日)		1,234 mm/年 636 " 324 " 274 " (466 m ³ /日)		2,154 mm/年 596 " 681 " 877 " (1,938 m ³ /日)	
湧水量 (E)	設計値で3,760l/日としていたが途中で10,000l/日を越えることが予想された 3,400l/日(掘削中最大4,700l/日) 6,200 " (水封トンネルの湛水時最大7,400l/日急増①) 4,500 " (減少傾向が続く)	湧水量を6,000l/日に見直し上配湧水抑制対策としてタンク内よりセメントグラウト、タンクの外から粘土による広域グラウト実施した⑤⑥	ほぼ設計値290l/日程度であったがまた塩水の混入箇所が認められた 210l/日(掘削中最大420l/日) 340 " (湛水により急増①) 250 "	亀裂へのグラウト試験の結果通常のセメントグラウトでは効果がないことが判明し湧水抑制対策は実施しなかった 塩水混入が多い箇所へ特殊グラウトの実施⑩	高透水帯の発見まではほぼ設計値240l/日程度の湧水であったが人工水封に切り替えて増水した 1,320l/日(最大2,300l/日) 1,370 " 1,000 " (減少傾向が続く)	高透水帯の岩盤改良には30~50mのインバートグラウトを必要とした また亀裂間隔Ⅲ以上の岩盤には通常のセメントグラウトでは効果が悪いことが判明した⑫
注水量 (F)	水封トンネルを一部貯水して掘削を進めたが注水量は設計値2,880l/日を下回った 700l/日 3,200 " (水封トンネルの湛水により急増①) 1,800 " (減少傾向が続く)		注水孔の加圧配管または貯水しながら掘削を進めたが設計値150l/日を下回った 80l/日 140 " (湛水により急増①) 110 "	水質改善を実施	前記高透水帯への注水量は3,000l/日以上でありタンク域外への逸水を防ぐ必要があった 250l/日 300 " 220 " (減少傾向が続く)	カーテングラウトの採用⑫ 高透水域への人工注水孔の設置⑫
水位	全般的に水位が低下傾向にあり限界地下水位を確保できない箇所が発生した④。 またその箇所は掘削中急激に水位が低下しタンク天端まで不飽和になった範囲でもあった③	掘削中水位維持対策を実施(低位安定した)	掘削により若干水位は低下するが掘削後の水封トンネル等の湛水により回復した(但し1箇所を除く⑬) また掘削中に実証プラントの水封水位の低下傾向が認められた	局所的な水位低下については掘削中水位維持対策実施(低位安定した) 粘土グラウトを実施し低下傾向は止まった	タンク底盤下の高透水帯の水位回復を確認する必要があった	高透水帯への水位測定孔とタンク周辺岩盤に間隙水圧計を設置して前記逸水・高透水帯の改良および注水対策の効果を判定した⑭
気密試験	オイルイン前にタンク内を圧縮空気ですり上げ(0.3kg/cm ² 程度)した結果サービストンネル、堅坑上部室および水位測定孔の一部で不飽和箇所が認められた なおその範囲は水位低下により一度タンク天端が不飽和になった箇所である⑦	オイルイン前に高透水帯の水位回復を図るため不飽和範囲について注水強化工事を実施し解消した (局所的に水位が低下していた⑧)	不飽和箇所が認められなかった		高透水帯の改良工事が長期になるのですでに完成していたタンクにオイルインを実施するため⑬ 気密試験を実施した結果不飽和箇所が認められた⑭ なおその箇所は掘削当初湧水が多かったが次第に枯れてきた所である 高透水帯の改良工事が終了し残りのタンクの気密試験の結果F-9断層群の延長上の一部より不飽和箇所が認められた⑭	水封水位を上昇させることにより不飽和箇所は解消された⑮ オイルイン前に注水強化工事を実施し解消した(開口性亀裂)確認
オイルイン後の不飽和域	時間の経過により不飽和域の進行傾向が認められた その位置はタンク上部の電気室、堅坑上部室等で前述の水位低下により一度不飽和域となった範囲と一致する⑨	オイルイン後2回目の注水強化工事を実施中	不飽和域が認められない		時間の経過により不飽和域の進行傾向が認められた その範囲はF-9断層群であるが前述の水位低下が認められなかった別の自然水封方式のタンクである⑯	オイルイン後2回の注水強化工事を実施し不飽和域の進行は現在のところおさまっている

注) 表中の○印内数字は表3中の○印番号に対応

ているのに気付かず、オイルイン後に注水やグラウトを実施した箇所がある。そこは掘削当初岩盤が湿っていたり、滴水が認められたが次第に乾燥した箇所と一致する。このことから、湧水の経時的な変化に着目することが、水封管理にとって極めて有効であることがわかった。

ることがわかった。

さらに、注水やグラウトで地下水位を維持するには、亀裂の間隔が小さい場合はグラウトが、大きい場合は注水が効果的であり、かつ、岩級区分（地下備蓄方式では、岩盤の亀裂間隔と岩盤の硬

表3 局所的な現象および対応例一覧表

基地名	番号	現象	対応
久慈・菊間	①	水封トンネル水没時の湧水量・水封水供給量の急激な増加	工事中水封トンネルの水没による湧水量等確認要
久慈	②	調査横坑掘削時の広域的な水位低下	地質・水理状況の把握、高透水帯(10 ⁻⁴ cm/sec以上)の詳細把握
〃	③	下部坑道の掘削による上部坑道の急激な水位低下	掘削順序、高透水帯の水位把握、グラウト処置
〃	④	水位測定孔W-10、W-18の水位低下	水位確保対応(粘土グラウト等)
〃	⑤	掘削中の地質・水理状況の変化による湧水量の見直し	湧水予測値と湧水抑制(粘土グラウトの採用)
〃	⑥	タンクアーチグラウト時水位低下域の見逃し	高透水帯の水位把握(水脈としてミクロ、マクロに把握)
〃	⑦	タンク気密試験時の不飽和域の発見	想定原因、注水強化等工事
〃	⑧	注水強化等工事で判明した局所的な水位低下	想定原因、注水強化等工事
〃	⑨	オイルイン後の不飽和域の進行傾向	想定原因、注水強化等工事
串木野	⑩	タンク上部に水位があったが、タンク掘削時部分的にタンク底盤以下に水位が下がっていた	地質・水理状況の詳細調査
〃	⑪	高透水帯が確認され水封方式の設計変更・湧水量の見直し	自然水封方式より人工水封方式に
〃	⑫	高透水帯への湧水抑制と水位確保	長尺グラウト等
〃	⑬	オイルイン中の隣接空槽タンクへの人の立入り可能条件に設計変更	縦水封の強化等
〃	⑭	タンクTK-101の気密試験時の不飽和域の存在	監視体制の強化
〃	⑮	第1水封トンネル水封水位を上昇させたことによるタンクTK-102Aの湧水量の異常増	想定原因、水バランスの検討
〃	⑯	タンクTK-103の気密試験時の不飽和域の発見	注水強化・グラウト
〃	⑰	オイルイン時の水封状況(多雨による湧水増加、水封水の逆流、TK-101のシフト運転等)	水封データの分析
〃	⑱	オイルイン後の不飽和域の進行傾向	想定原因、注水強化等工事
菊間	⑲	タンク掘削による水位測定孔の水位低下(W-10)	水位確保対応(注水孔、水封孔の追加)
〃	⑳	タンク湧水量の塩素イオン濃度の増加	水封データの分析、トレンド監視、グラウト処理
久慈	㉑	地震による水封関連への影響	水封データの分析、間隙水圧の変化測定

図2 久慈基地地質図 (EL +3m レベル)

図3 串木野基地地質図 (EL -27.5 m レベル)

さで分類している)と関係があることがわかった。

③ 岩盤タンクの掘削期間中、岩盤の湿りや滴水状況がほとんど変化がなく、水位低下も僅かな「割れ目」がある。これは、串木野基地および菊間基地の亀裂の間隔の大きい箇所に見られる。このため特に串木野基地では、大半のタンクを人工的に注水を必要としない自然水封方式を採用している。

なお、菊間基地では、現在まで不飽和域の発生が認められないことから、この種の「割れ目」を含んだ岩盤は均質体として取り扱うことができる。

また、一部の岩盤では湿りがほとんど見られなく、水位低下も認められない箇所がある。その理由として“水みち”となる亀裂が存在していないか、存在しても粘土等の介在によって不透水ゾーンとなっていると考えられ、透水係数では 10^{-7} cm/sec 以下の値を示す。

以上のように、岩盤の「割れ目」をその湧水の連続性(湧水量変化)に注目して分類すると3種類あり、①と②の「割れ目」は、水位を確保するための何らかの対応が必要であることが判明した。

なお、本報告では「割れ目」①に該当する“水みち”をL、以

下同様に②をM、③をSと名称する。

4. “水みち”となる岩盤の「割れ目」分類

4・1 背景

今回の3基地の建設等で発生した局所的現象やその対応について、発生現場の岩盤と湧水状況との関係について調べた結果、以下に示す通り、客観的に分類でき、かつ、どう対応すればよいかも判明した。

- 亀裂の間隔が40 cm以上の岩盤では、湧水のある「割れ目」と、その周辺の岩盤が湿っている状態が多く、通常は、湧水状況が経時的に変化しないSの“水みち”となっている。しかし、小規模な断層や破砕帯が賦存している場合には、水位の低下を伴うMやLの“水みち”が存在する。この対応としては、水位低下前にボーリング孔等によって注水することにより水位を維持することができる。

- 亀裂の間隔が20~40 cmでは、湧水のある「割れ目」を含めて岩盤全体が湿っており、MやLの“水みち”については、水位低下防止のために注水とグラウトが必要である。ただ、通常

表4 分類要素の区分表

「湧水の連続性」				「亀裂の間隔」		「亀裂の幅」・「断層・破砕帯」			
ランク	基 準	判 断 材 料		ランク	基 準	ラ ン ク	判 断 材 料		
		水位低下	湧水量				水位低下	湧水量	規 模
S	湧水量が変化しない	小	少	I	100cm 以上	亀裂Ⅰ	小	少	小
M	湧水量が減少する	中	中	Ⅱ	40～100cm	亀裂Ⅱ	中	中	中
L	湧水量がなくなる	大	多	Ⅲ	20～ 40cm	断層および破砕帯	大	多	大
ただし、湧水箇所のみで判断するのではなく、 水脈全体として把握するケースもある。 また、程度差によってSS、LLのランク を設定した。				Ⅳ	5～ 20cm	ただし、地質的には断層および破砕帯や地質境界 でも小さい場合には亀裂Ⅰ、亀裂Ⅱに分類するケ ースがある。			
				V	5cm 以下				
				地下備方式の岩盤分類 ^{o)} による。					

「割れ目」	「割れ目」の透水係数 (ki)		
	小 ← → 大		
	亀裂 I (透水係数概略値 ($10^{-3} \sim 10^{-1}$ cm/sec))	亀裂 II (透水係数概略値 ($10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec))	断層および 破砕帯 (透水係数概略値 (10^{-3} cm/sec以上))
岩盤の平均 透水係数 (km)	小	小	小
	I	SS	SS
	II	S	M
	III	S	M
	IV	M	L
	V	LL	LL
備考	太線で囲んだ範囲は出現頻度が多い		

図4 分類要素の組み合わせ

単一「割れ目」の間隙水圧・湧水量変化

	S	M	L
地下水面形状 (最終)			
間隙水圧変化			
湧水量経時変化			
備考	$q > Q$ の時地下水面は低下する → 現場での現象は、湧水量が減少もしくはなくなる。 $q \leq Q$ の時地下水面は低下しない → 現場での現象は、湧水量が変わらない。		

Q : 表面流入量
 q : 空洞内湧水量
 t : 経過時間
 t_0 : 初期状態
 t_s : S の最終状態
 t_m : M の "
 t_l : L の "
 p : 間隙水圧
 z : 表面からの深度
 h : 表面から空洞天端までの深さ
---: 途中の経過を示す

図5 L, M, S の物理的意味あい

図6 「割れ目」の分類例 (概略展開図で表示したもの)

のセメントグラウトでは効果が低く、注水の方が効果的である。

● これに対して亀裂の間隔が 20 cm 以下の岩盤になると「割れ目」からの湧水は多量でかつ岩盤全体が滴水する状況であり、M や L の「水みち」を早期に発見しないと水封機能に致命的な打撃を与える。この対応としては、岩盤タンクを掘削するときからタンク上部に水封水を満たし、グラウトで岩盤改良をしながら水位を維持する等の方法がある。

4・2 分類要素の選定

4・1 から、分類要素として「湧水の連続性」「亀裂の間隔」「亀裂の幅」「断層および破砕帯」を選定した。また、現場ではこれが複雑に絡み合っている箇所があるので、分類判断材料に「水位低下」「湧水量の多少」「亀裂の幅、断層、破砕帯」「貫入岩」「地質境界」「水脈」等を考慮した。なお、「水位低下」を判断材料としたのは、掘削の進捗に対応した局所的な水位を測定することが困難なことによる。

以下、分類要素を判断材料によってランク分けした区分表を表4に示す。

4・3 分類要素の組み合わせ

3 基地の建設で見られた「水みち」と亀裂を構成する岩盤を表4の分類要素の区分表でランク分けし、整理・組み合わせたものを図4に示す。この組み合わせによると何らかの水位維持対策を必要とした「水みち」L, M が、岩盤の亀裂の間隔と亀裂の幅によって、実際と同じように精度よく対応している。したがって、この分類法は、局所的な水位低下を起こす「割れ目」の水封評価法として、現場的には十分役立つものと考えられる。

参考までに「水みち」を湧水量の変化によって L, M, S にラ

表5 解析条件一覧表

条件・パラメータ	概 要
流体の成分	水、空気、圧縮性流体2成分
未知数	圧力、飽和率
基本方程式	質量保存則、ダルシー則
数値解法	同時完全陰的差分法（離散化）、ニュートン・ラフソン法（線形化） 共役残差法（行列方程式の解法）
3次元解析対象領域	平面 1.55km ² 断面 EL-200m～地表近傍の大気層
要素数	平面 66×28 計31,418 断面 17
地形	地形図デジタル化により作成
地質	風化帯、新鮮岩体、断層帯の区分（断層帯に含まれる断層の幅は2m）
透水係数	風化帯、新鮮岩体、断層帯の区分により設定 数値はトライ&エラーにより修正
間隙率	風化帯、新鮮岩体の区分により設定 数値はトライ&エラーにより修正
不飽和特性	水飽和率-相対浸透率（水、空気）を風化帯、新鮮岩体に対して設定 水飽和率-毛細管圧力 水残留率 風化帯 0.2 新鮮岩体 0.4
降水量	月毎に観測値を用いて設定 蒸発散量 25%
境界条件	頂面 定圧境界 底面 閉境界 側面 海岸線、南側稜線 地表以下定圧境界 河川 大気層定圧境界 南側稜線を除く稜線 閉境界
初期値	再現解析 初期水位から設定 予測解析 再現解析シミュレーションを継続
工事	調査横坑 掘削、水没、抜水、閉塞、坑内水平ボーリング タンク・坑道 掘削 水封水供給工事、粘土グラウトボーリング工事
操 業	オイルイン 油面レベル タンク毎に設定 内圧 0.03kgf/cm ² 水封水位 作業トンネルB、水封連絡トンネル、水封トンネル・ボ・リング EL+9m 作業トンネルA EL+3m 調査横坑 EL+40m～60m
タイムステップ	再現解析 1,244ステップ/4,010日 予測解析 74ステップ/365日
マッチング量	タンク・坑道湧水量、供給水量、河川流量、観測孔水位

ンク分けしているが、その物理的な意味合いを図5に、また、「割れ目」の分類例を図6に示す。

5. 数値解析による「割れ目」分類の妥当性

5・1 数値解析による現象の再現

数値解析では、2成分2相（水、空気）3次元非定常浸透流解析により、調査段階から建設、操業まで全期間を通じ、基地周辺を含めた水文・水理挙動の再現シミュレーション⁷⁾を実施した。解析条件一覧表を表5に、再現シミュレーションのフローを図7に示す。シミュレーションモデルは、風化帯・断層・高透水帯を考慮した地質・水文構造とし、坑道・タンク等の掘削工事および人工注水等の各種工事ならびにオイルインの進捗状況を逐次組み込み、計算結果を経時的に実測データ（河川流量、観測孔水位、湧水量、水封水供給量）にトライ&エラー（透水係数や間隙率の各種パラメータ・解析条件を最適化）でマッチングさせた。

その結果、この水文・水理モデルは、長期にわたる建設期間中のさまざまな現象をよく再現できることがわかった。

5・2 “水みち”分類の妥当性

この水文・水理モデルを使った久慈基地および串木野基地の再現シミュレーション結果を代表例として、以下に「割れ目」分類の妥当性を検討する。

図8は、タンク掘削前の岩盤の飽和状況で、白い部分は水で飽和され、カラーの部分は不飽和になっていることを示す（久慈基

地）。この断面は、タンク上部の調査横坑や水封トンネルの掘削時、急激、かつ広範囲に水位低下を起こしたF-5断層（透水係数で 10^{-4} cm/sec オーダ）沿いに切ったものである。

図9は、タンクアーチ部の掘削中（10本のうち7本の掘削が進められている）の飽和状況を示したものである（久慈基地）。図9ではタンク群の右側でアーチ部まで不飽和の範囲が拡がり、タンク上部の沢水に影響した実際の現象をよく再現している。したがって、断層内に“水みち”Lが存在することを意味するものである。

図10は、タンク掘削終了時の飽和状況を示すもので、特にタンク群左側でゆっくりと不飽和の範囲が拡がっており、実際の現象をよく説明している（久慈基地）。したがって、“水みち”Mの存在を意味するものであるが、大きな断層内であるので分類上はLと判定した。なお、図11はオイルイン後の飽和状況を示すもので、限界地下水水位以下が飽和されていることがわかる。

図12は、串木野基地の例でオイルイン後の飽和状況を示す。図12中左側4本のタンクが人工水封方式で、右側6本のタンクが自然水封方式である。

この断面は、図12の左側でF-9断層群（透水係数 10^{-4} cm/sec オーダ）を右側でF-12断層（透水係数 10^{-5} cm/sec オーダ）沿いに切ったものである。また、母岩の透水係数は地質区分により 10^{-6} ～ 10^{-7} cm/sec オーダである。白い部分が水で飽和された範囲を、カラーの部分が不飽和の範囲を示し、久慈基地と同様

図7 再現シミュレーションのフロー

図8 水飽和状況図（初期状態）
F-5断層沿いの断面を示す（久慈基地）

図11 水飽和状況図（オイルイン後）（久慈基地）

図9 水飽和状況図（タンクアーチ部掘削中）（久慈基地）

図12 水飽和状況図（オイルイン後）
F-9およびF-12断層沿いの断面を示す（串木野基地）

図10 水飽和状況図（タンク掘削終了時）（久慈基地）

ただし、岩盤タンク周辺の無着色（白色）域は、
水で飽和された状態を示す

に限界地下水位以下が飽和されていることがわかる。なお、タンク上部左側の不飽和範囲がF-9断層群を示し、右側のF-12断層では不飽和範囲が見られない。

掘削中の観察では、F-12断層の湧水状況はほとんど変化がなかったことから、このF-12断層は“水みち”Sに相当し、図12とよく整合する。なお、小さな断層であるので分類上は亀裂Ⅰと

判定した。この数値解析例からも“水みち”には、水位の低下を伴う L, M のタイプと、水位の低下をほとんど伴わない S タイプがあることを示している。

しかし、大規模な岩盤タンクの掘削現場で、すべての「割れ目」の水位を測定することは不可能であり、“水みち”の湧水の連続性に着目し、岩盤の亀裂の間隔や亀裂の幅、断層等の大きさを組み合わせることによって、3 基地建設時の局所的な水位低下現象を適切に表現することができること、また、シミュレーションで再現できることから「割れ目」分類による水封評価法は妥当なものとする。

6. 結 論

3 基地の岩盤タンク建設で発生した局所的な水位低下現象の事例を分析した結果、水封機能にどのような「割れ目」が、どの程度の支障を与えるのかを評価する方法として、湧水の連続性と岩盤区分等を組み合わせた分類法が、実際の現象と整合することから、現場的には有効であることが判明した。また、この分類法が、今後より多くのデータを集積することによって、さらに実用的かつ精度のよいものに改良されることを期待する。

なお、この分類法を作成せざるを得なかった背景には、大規模な岩盤タンクでは局所的な水位をすべて測定することは困難であ

り、水位が低下してしまった場合の水位回復方法が最も困難であったことから、水位低下を未然に防ぐための現場的な評価法を早急に作成する必要があることを付記する。

謝辞 数値解析は、東京大学工学部地球システム工学科登坂博行助教授のご指導と、日鉱探開(株)谷藤吉郎氏、同山石毅氏、セントラルコンピュータサービス(株)小林仁氏のご協力の下に実施した。ここに感謝の意を表する。

引 用 文 献

- 1) 蒔田敏昭：地下石油備蓄基地建設の概要、資源と素材，Vol. 107, p. 927-938, (1991)
- 2) 宮下国一郎・青木謙治・花村哲也・田島孝也：岩盤内原油備蓄タンクの計測技術，土木学会論文集 No. 355/VI-2, p. 30-37, (1985)
- 3) 下茂道人・竹田直樹・宮下国一郎・青木謙治：岩盤内空洞掘削と地下水環境 - 菊間実証プラント -，土と基礎，Vol. 134, No. 11, p. 57-63, (1986)
- 4) 百田博宣・藤代泰行・青木謙治・花村哲也：降雨浸透を考慮した岩盤中の地下水挙動に関する解析的検討，土木学会論文集，No. 379/VI-6, p. 74-82, (1987)
- 5) 木村洋行・下茂道人・立石 章：鏡像法を用いた三次元浸透流解析，第 16 回土質工学研究発表会講演集，(1982)
- 6) 日鉱資源工営・電発 JV：地質記録総括業務，(1992)
- 7) 岡本明夫・登坂博行・小島圭二・谷藤吉郎・山石 毅・小林 仁：建設全期間にわたる地下石油備蓄基地周辺の水文・水理挙動再現シミュレーション，日本応用地質学会研究発表会講演論文集，(1995)