

水封式岩盤貯槽の水封機能に関する岩盤透水性の影響評価

Evaluation of permeability for water sealing function of underground rock cavern

大西豪昭*・松本匡司**・鳥羽瀬孝臣***

Hideaki ONISHI, Tadashi MATSUMOTO and Takaomi TOBASE

Water Sealing Rock Cavern is an underground tank which stores oil and LP gas by groundwater pressure. This storage system is called “water sealing method”, the function of the system depends on rock permeability greatly.

Then, we executed an analytical evaluation of water sealing function by the model which rock permeability is not uniform, and confirmed the following. A) If the high permeability area intersecting with the rock cavern exists between water curtain, it is necessary to improve the rock permeability at this area for water sealing function. B) If the response of pore pressure is evaluated, the rock permeability can be understood and the validity of the water curtain arrangement can be confirmed.

Key Words: rock cavern, water sealing, rock permeability, pore pressure, air-tight

1. はじめに

石油や液化石油ガス（以下「LPガス」という）の貯蔵方法の一つとして水封式地下貯蔵方式がある。この方式の特徴は、地下水面下の岩盤内に空洞を掘削し、スチールなどのライニングを施工することなく、自然または人工の地下水圧により、石油やLPガスを封じ込めて貯蔵するものである。

ここで、石油やLPガスを貯蔵する空洞を「岩盤貯槽」と呼ぶ。岩盤貯槽は、図-1に示すように貯槽空洞の上部は不燃性ガスで覆われて気相状態となっている。つまり、岩盤貯槽の気密性は、この気相部の気体が空洞外に漏れ出さないようにすることであり、貯槽天端部に向かう鉛直動水勾配が0.5以上 ($I_v \geq 0.5$) の浸透流を生じさせることで、気密性を確保できると言われている¹⁾。また、液体状の石油やLPガスの漏洩を防ぐことを液密性と言い、液相部における法線方向の動水勾配が空洞側に向うこと ($I_n \geq 0$) で確保される。このように、気密性及び液密性を確保する機能を岩盤貯槽の「水封機能」と呼ぶ。一般には、気密性を確保することがより厳しい条件となるため、ここでは、気密性に着目して論を進める。

浸透流の駆動力となる動水勾配は、貯槽周辺岩盤のポテンシャルの差分によって決まる。ポテンシャルは間隙水圧と位置水頭の合計値であることから、同一標高におけるポテンシャルの差分は、間隙水圧の差分と置き換えることができる。

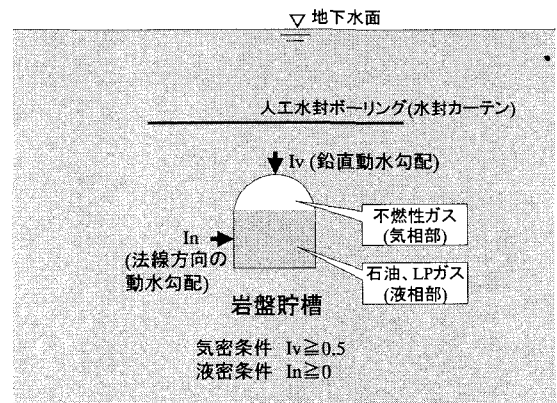


図-1 水封式岩盤貯槽の概要

* 電源開発株式会社 エンジニアリング事業部地下開発事業グループ
** 電源開発株式会社 エンジニアリング事業部地下開発事業グループ
*** 正会員 電源開発株式会社 エンジニアリング事業部地下開発事業グループ

ところで、一般に岩盤の透水性は不均質であり、透水性が変化する箇所では、間隙水圧が変化すると考えられる。マクロに見た場合の岩盤の平均透水係数を基準にして、局所的にその平均値から大きくはずれる場合（例えば、著しい高透水性箇所や難透水性箇所が存在する場合）には、当該箇所における間隙水圧は低下する。このように局所的に透水性が大きくばらつく箇所が貯槽周辺岩盤に存在するとしたら、間隙水圧の低下とともに、貯槽に向かう動水勾配も低下し、ひいては岩盤貯槽の気密性に影響を与えるおそれがある。

そこで、筆者らは、岩盤の透水性が不均質であることを考慮して、貯槽周辺岩盤の透水係数をパラメータとした3次元浸透流解析を実施し、岩盤貯槽の水封機能（気密性）に関する影響評価を試みたものである。

2. 岩盤貯槽の気密性

岩盤貯槽にLPガス（貯蔵内圧0.97MPa）が貯蔵された状態での気密性について、三次元浸透流解析により検討を行った。

(1) 解析条件および解析モデル

解析条件を表-1に、解析モデルを図-2に示す。

表-1 解析条件

項目	諸元
岩盤貯槽の設置深度（天端標高）	EL-150m
水封ボーリング孔の設置標高	EL-125m
水封水圧（水位換算）	EL -30m
地下水位	EL -30m
岩盤貯槽の高さ	30m
岩盤貯槽の幅	26m
水封ボーリング孔の設置間隔	10m
LPガス貯蔵内圧	0.97MPa
LPガスの比重	0.5

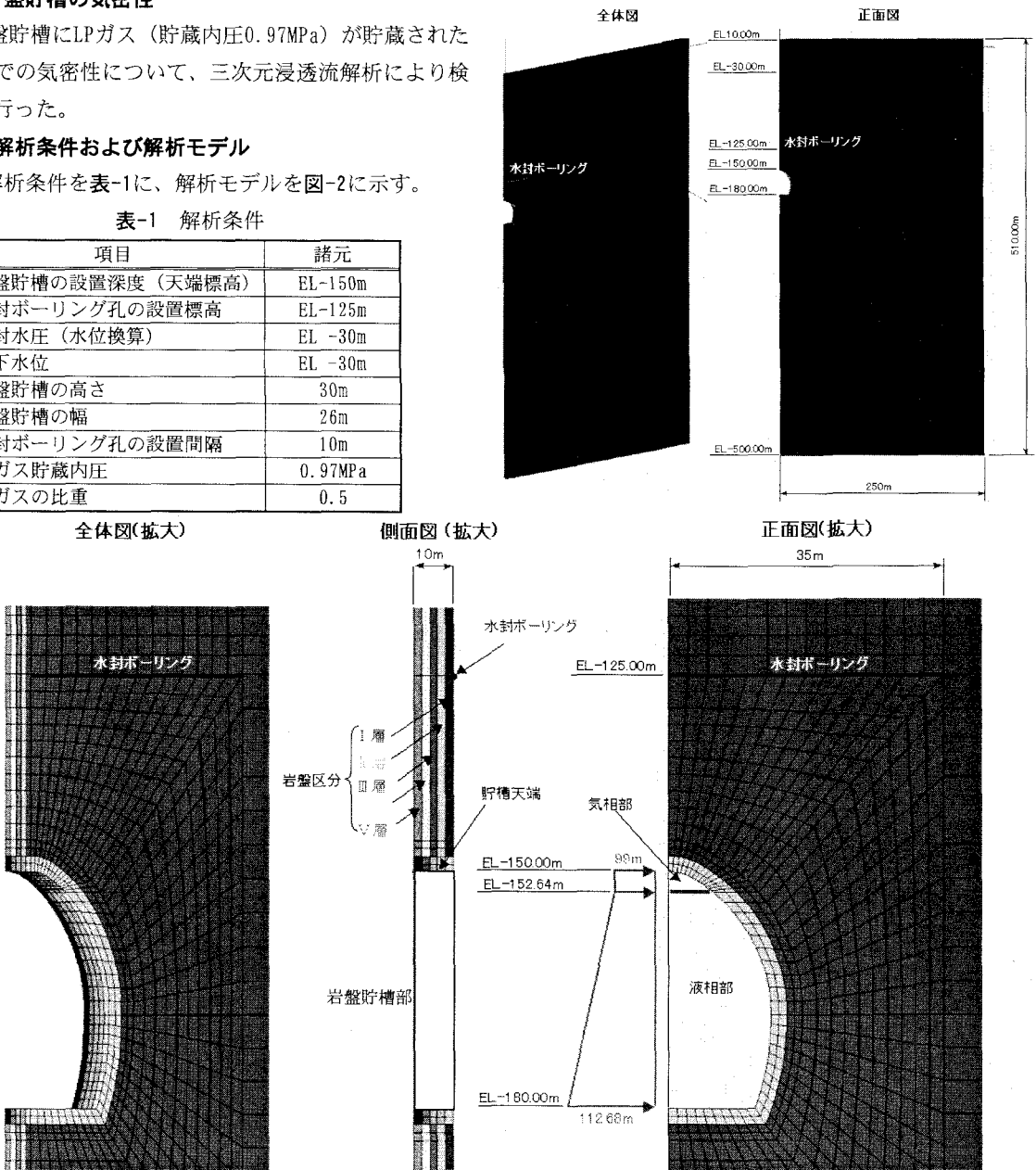


図-2 三次元浸透流解析モデル

(2) 解析ケース

図-2に示すとおり、岩盤貯槽長軸方向にボーリング孔間10m幅の鉛直断面において2m毎にⅠ～Ⅴの5層に区分する。水封ボーリング孔が設置されている層をⅠ層及びⅤ層とし、その中間部をⅢ層とする。そして、基準となる透水係数を k_0 として、Ⅰ～Ⅴの各層の k_0 に対する透水係数比率を表-2に示すように変化させる解析ケースを設定した。なお、ここで言う基準透水係数とは、多くの調査データを用いてマクロ的に統計処理された平均透水係数と理解すればよい。つまり、ここでの検討は、平均値からの「はずれ量」の影響についての感度分析と行うことができる。

表-2 解析ケース

検討ケース	基準透水係数 k_0 に対する透水係数比率				
	Ⅰ層	Ⅱ層	Ⅲ層	Ⅳ層	Ⅴ層
Case0_00	-	-	-	-	-
Case1_01	0.1	-	-	-	-
Case1_02	0.01	-	-	-	-
Case1_03	10	-	-	-	-
Case1_04	100	-	-	-	-
Case3_01	-	-	0.1	-	-
Case3_02	-	-	0.01	-	-
Case3_03	-	-	10	-	-
Case3_04	-	-	100	-	-
Case15_01	0.1	-	-	-	0.1
Case15_02	0.01	-	-	-	0.01
Case15_03	10	-	-	-	10
Case15_04	100	-	-	-	100

(3) 解析結果および評価

解析結果の一例を図-3および図-4に示す。上段に岩盤貯槽周辺のポテンシャル分布、中段に水封ボーリング孔間での間隙水圧（全水頭換算）、下段に貯槽天端での鉛直動水勾配を示している。

岩盤貯槽の気密性に影響を与える可能性のある（鉛直動水勾配（ I_v ）が0.5に近づくか、それを下回る）ケースは、①水封ボーリング孔間（Ⅲ層）の透水係数が基準透水係数よりも10倍以上に大きい場合（case3_03、case3_04、図-3参照）と、②水封ボーリング孔位置（Ⅰ層、Ⅴ層）の透水係数が基準透水係数よりも1/10倍以下に小さい場合（case15_01、case15_02、図-4参照）の2ケースである。この2ケースの場合には、岩盤貯槽の気密性を確保するために、何らかの対処方策が必要になると考えられる。

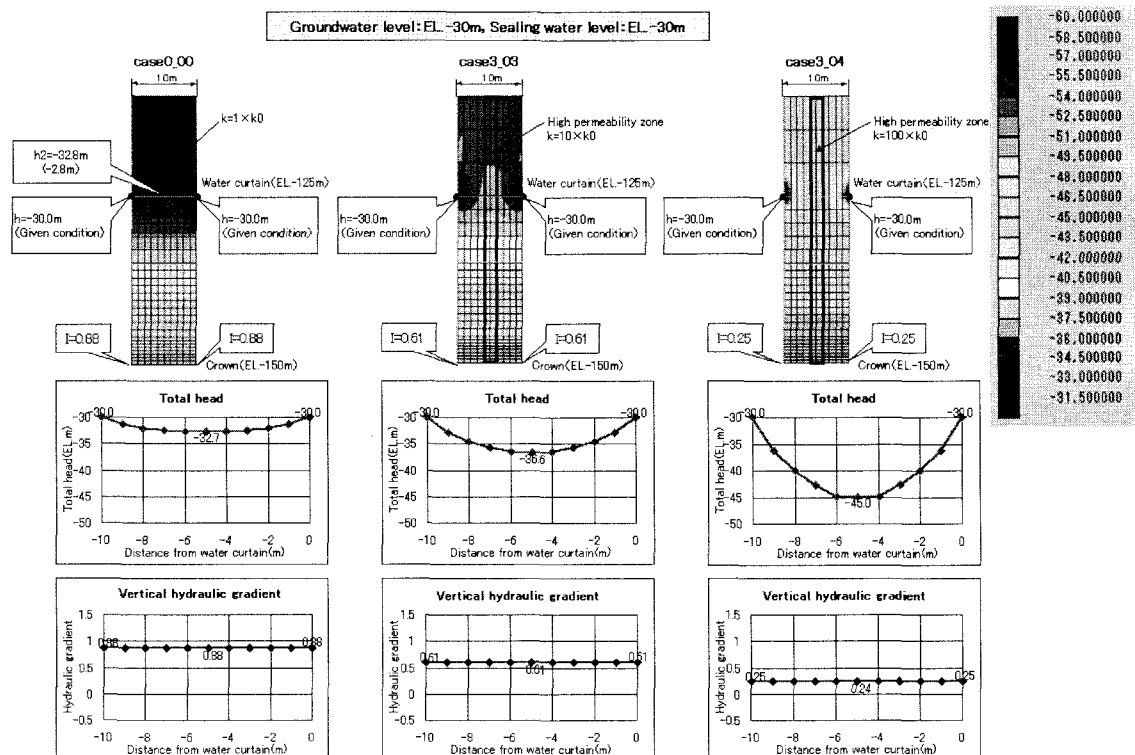


図-3 解析結果 (case0_00, case3_03, case3_04)

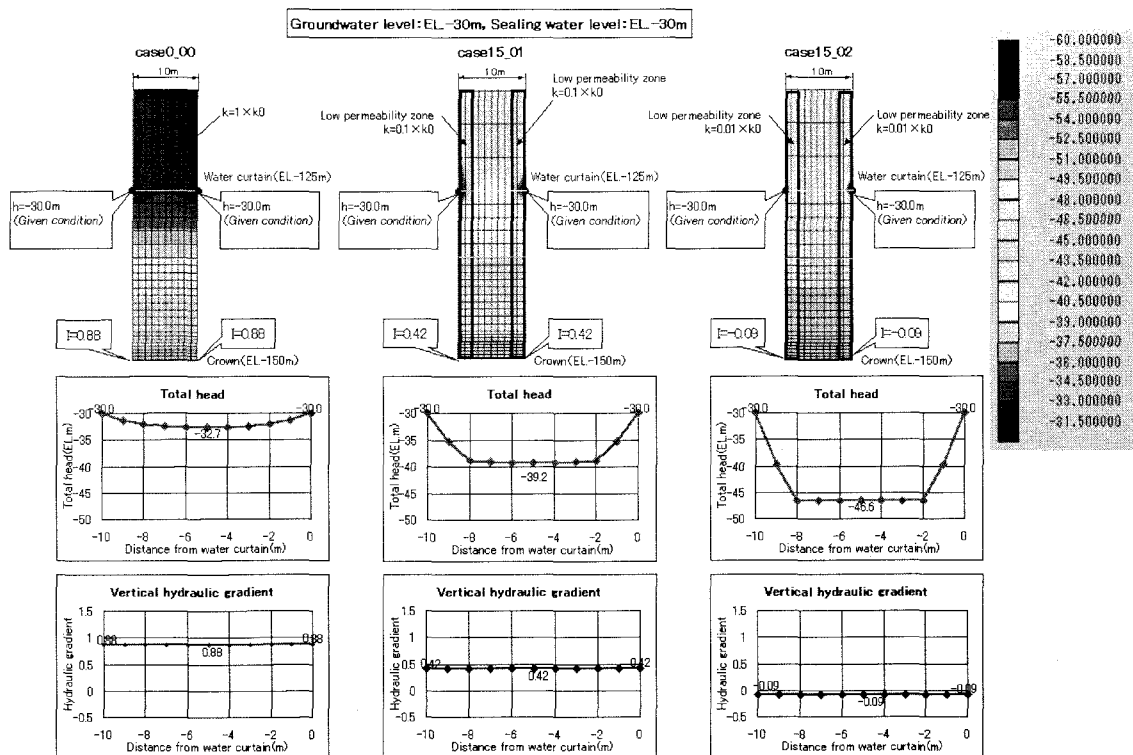


図-4 解析結果 (case0_00, case15_01, case15_02)

(4) 気密性確保への対処方策

基準透水性係数に対して10倍以上の透水性を有する箇所を「高透水性箇所」とし、逆に1/10倍以下の透水性を有する箇所を「難透水性箇所」と定義する。解析結果を踏まえ、高透水性箇所及び難透水性箇所に対しては次の対処方策が考えられる。

- ① 水封ボーリング孔間の高透水性箇所に対してはグラウチングを行い、その透水性係数を $k_0 \times 10$ 以下に改良する。(図-5参照)
- ② 水封ボーリング孔設置箇所が難透水性箇所であった場合には、難透水性箇所以外の近傍に水封ボーリング孔を追加設置し、水封圧力ポイントを増やすようにする。(図-6参照)

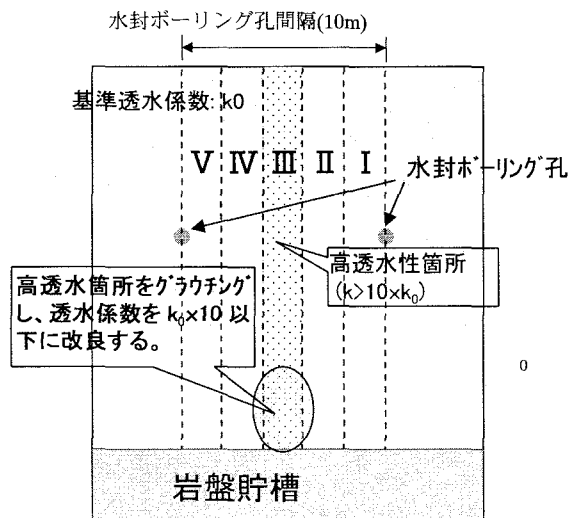


図-5 高透水性箇所における対処方法

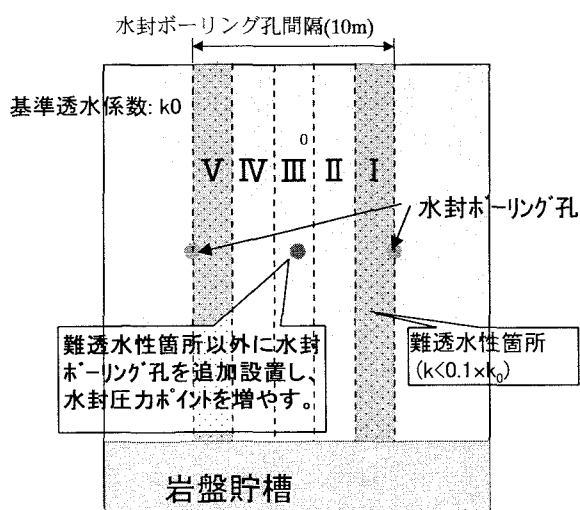


図-6 難透水性箇所における対処方法

3. 施工段階での水封効果の確認

岩盤貯槽周辺の不飽和防止のため、貯槽空洞を掘削する前に、水封トンネル及び水封ボーリング孔を利用して人工水封システムを稼働させる必要がある。前章で提案したグラウチングや水封ボーリング孔の追加設置などの対策工は水封トンネルにおいて施工されると考えられる。そこで、岩盤貯槽施工前の段階において、貯槽周辺岩盤における透水性を評価し、水封効果を確認できる方法を検討した。

(1) 水封効果確認試験

水封効果確認試験は、水封ボーリング孔の効果を事前に確認することを目的とし、図-7に示すように、水封ボーリング孔を一時的に注水孔と観測孔とに分け、注水孔に所定の圧力で注水した際に、それに隣接する観測孔でどのような圧力応答があるのか確認するものである。

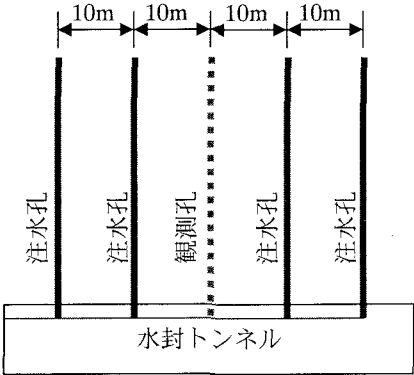


図-7 水封効果確認試験概念

(2) 解析条件および解析モデル

図-2に示す解析モデルを利用するが、貯槽空洞は施工前と仮定して、貯槽空洞は考慮せずに岩盤のままでモデル化する。また、水封トンネルは空虚、水封ボーリング孔の間隔は10mとし、注水孔を模擬した節点には水圧を作用させ、観測孔を模擬した節点では水圧の応答を検査するようにした。

(3) 解析ケース

前章の検討で、気密性に影響を与えるケース、すなわち水封ボーリング孔間に高透水性箇所が存在する場合（case3_03, case3_04）と、水封ボーリング孔設置位置に難透水性箇所が存在する場合（case15_01, case15_02）のそれぞれについて、表-3に示すとおり、地下水位と注水孔の有効水圧（＝注水水圧－地下水位）を変化させるケースを設定した。

表-3 解析ケース

有効水圧(m)	地下水位(EL.m)	注水水圧(EL.m)
25	-85	-60
55	-85	-30
65	-95	-30

表中数字は全水頭換算水位

(4) 解析結果および評価

ここで、注水孔の有効水圧に対する観測孔の応答値（間隙水圧上昇量）の比率を「間隙水圧上昇率」と定義する。水封ボーリング孔間に高透水性箇所が存在する場合の解析結果を表-4に示す。また、水封ボーリング孔設置位置が難透水性箇所であった場合の解析結果を表-5に示す。

表-4及び表-5の結果をまとめると次のことが言える。

- ① 透水性が一樣な場合には、有効水圧が変化しても間隙水圧上昇率は62～67％で、ほぼ一定である。
- ② 間隙水圧上昇率は、有効水圧が変化した場合でも、水封ボーリング孔間の透水係数比率が10倍のモデルで35～38％、水封ボーリング孔間の透水係数比率が100倍のモデルで6～8％となった。
- ③ 間隙水圧上昇率は、有効水圧が変化した場合でも、水封ボーリング孔設置位置の透水係数比率が1/10倍のモデルで 22～24％、水封ボーリング孔設置位置の透水係数比率が1/100倍のモデルで3～4％となった。

上記の間隙水圧上昇率（平均）と操業時の鉛直動水勾配の関係を図-8に示す。この関係から、水封効果確認試験における観測孔で実測された「間隙水圧上昇率」を用いて操業時の貯槽天端の鉛直動水勾配を想定することが可能と考えられ、鉛直動水勾配0.5以上を確保するためには、間隙水圧上昇率が30％以上必要であることが判る。

表-4 水封ボーリング孔間に高透水性箇所が存在する場合の解析結果

ケース	有効水圧 H_0 (m)	透水性		
		一様	Ⅲ層 10倍	Ⅲ層 100倍
操業時	0	$I_v=0.88$	$I_v=0.61$	$I_v=0.03$
施工時 (貯槽無)	25	$\Delta H=+16.8$ $\alpha=67\%$	$\Delta H=+9.6$ $\alpha=38\%$	$\Delta H=+1.9$ $\alpha=8\%$
	55	$\Delta H=+34.2$ $\alpha=62\%$	$\Delta H=+19.3$ $\alpha=35\%$	$\Delta H=+3.7$ $\alpha=7\%$
	65	$\Delta H=+40.7$ $\alpha=63\%$	$\Delta H=+23.0$ $\alpha=35\%$	$\Delta H=+4.2$ $\alpha=6\%$
	平均上昇率	$\alpha=64\%$	$\alpha=36\%$	$\alpha=7\%$

I_v : 貯槽天端部の鉛直動水勾配
 ΔH : 観測孔での間隙水圧上昇量(m)
 α : 間隙水圧上昇率(=H/H₀)

表-5 水封ボーリング孔位置に難透水性箇所が存在する場合の解析結果

ケース	有効水圧 H_0 (m)	透水性		
		一様	I、V層 1/10倍	I、V層 1/100倍
操業時	0	$I_v=0.88$	$I_v=0.42$	$I_v=-0.09$
施工時 (貯槽無)	25	$\Delta H=+16.8$ $\alpha=67\%$	$\Delta H=+6.0$ $\alpha=24\%$	$\Delta H=+1.0$ $\alpha=4\%$
	55	$\Delta H=+34.2$ $\alpha=62\%$	$\Delta H=+12.0$ $\alpha=22\%$	$\Delta H=+1.8$ $\alpha=3\%$
	65	$\Delta H=+40.7$ $\alpha=63\%$	$\Delta H=+14.5$ $\alpha=22\%$	$\Delta H=+2.0$ $\alpha=3\%$
	平均上昇率	$\alpha=64\%$	$\alpha=23\%$	$\alpha=3\%$

I_v : 貯槽天端部の鉛直動水勾配
 ΔH : 観測孔での間隙水圧上昇量(m)
 α : 間隙水圧上昇率(=H/H₀)

(5) 水封効果確認試験に関する水封管理

水封効果確認試験で、観測孔での間隙水圧上昇率が30%未満であった場合には、透水試験を実施した上で、高透水性箇所に対してはグラウチングを、難透水性箇所が存在する場合にはその近傍に水封ボーリング孔の追加設置が必要と考えられる。水封効果確認試験に関する一連の水封管理に関するフローを図-9に示す。

4. おわりに

一般に、設計段階では、全体最適性を確保することに主眼が置かれ、調査データを統計処理した「平均値」が採用される。しかし、岩盤は不均質であり、局所的に「平均値」からはずれた箇所が存在する。したがって、施工段階においては、この平均値からの「はずれ量」を地盤リスクとみなして、適切な局所対応を行う必要がある。

今回の検討は、施工段階におけるリスクマネジメントの観点から、貯槽周辺岩盤の透水係数の不均質性に焦点を当て、三次元モデルによる定常解析を行い、岩盤貯槽の水封機能(気密性)を確保するための処方箋を提案した。しかし、実際の岩盤の圧力応答などの挙動は、時間ファクターがあり、間隙水圧上昇率を確認するためにどれくらいの観測時間が必要であるかについては、今回の定常解析では示されていない。

今後は、時間的要素を考慮した非定常解析を行うことも可能であるが、それに必要な比貯留係数など正確なデータが得難いパラメーターも多いため、現実的な方法としては水封効果確認試験の際には、応答が安定するまで時間をかけて試験を行うことが望ましいと考えられる。

<参考文献>

- 1) 平成6年度石油ガス地下岩盤タンク保安技術基準作成その2業務報告書, 高圧ガス保安協会, 1995.3

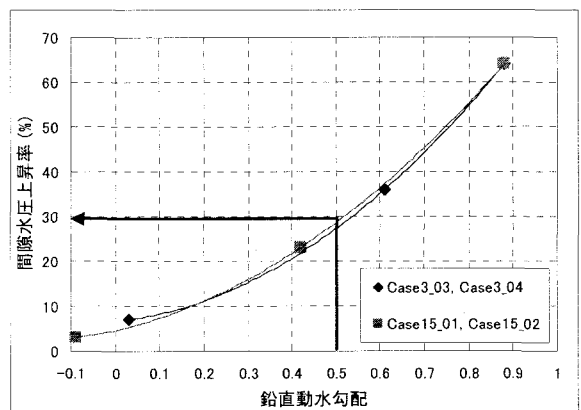


図-8 間隙水圧上昇率と鉛直動水勾配の関係

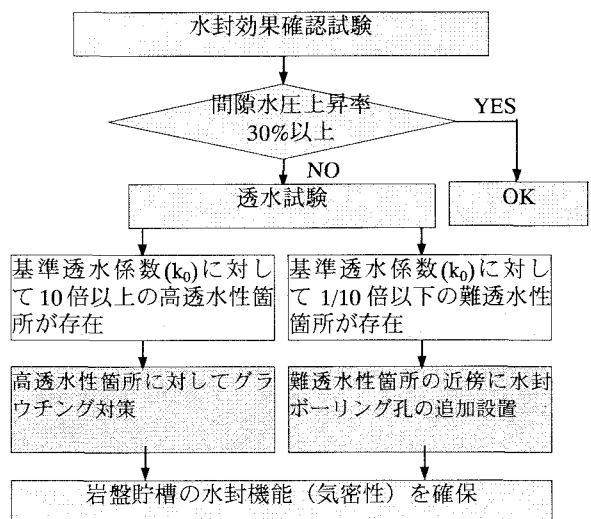


図-9 水封効果確認試験に係る水封管理フロー