

主要割れ目を反映した3次元水理地質構造モデルによるLPG貯槽周辺の地下水挙動解析

下茂 道人^{1*}・掘田 渉²・下野 正人²・前島 俊雄³・山本 浩志³・青木 謙治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土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿一丁目25番1号)

³(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番)

⁴京都大学大学院工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

*E-mail: michito.shimo@sakura.taisei.co.jp

(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構は、現在、愛媛県波方町において水封式地下備蓄方式によるLPG貯槽を建設中であり、貯槽掘削は昨年完了した。貯槽掘削においては、岩盤の水理地質特性(地質構造、割れ目分布、透水性)や地下水挙動に関するデータ(地下水位、水圧、湧水量など)を収集・分析し、水封性能の維持に重要な地下水管理・対策に反映した。これらの情報を総合的に評価し、貯槽周辺の地下水場の理解を深めることは、貯槽完成までの地下水管理において非常に重要である。本研究では、貯槽周辺で確認された主要な割れ目に着目した3次元水理地質構造モデルを構築し、各掘削段階の湧水量や水圧挙動について解析的な評価を行なう。

Key Words : LPG underground storage, hydrogeological model, fault, fracture, permeability

1. はじめに

石油やLPGの備蓄方式の一つである水封式地下備蓄は、岩盤内空洞(以下、貯槽と呼ぶ)に貯めた液体およびガス燃料を、貯槽に向かう地下水の流れにより貯蔵する方式である。日本では、現在、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構が、国内2基地において、同方式によるLPG地下貯槽の建設を進めている。このうち愛媛県に建設中の波方基地では、昨年空洞掘削が完了した。

図-1に、波方基地における貯槽レイアウトを示す。貯槽掘削においては、水封性能の維持に重要な地下水管理・対策を進める過程で、岩盤の水理地質特性(地質構造、割れ目分布、透水性)や地下水挙動に関するデータ(地下水位、水圧、湧水量など)を取得した。貯槽掘削が完了した段階で、これらの情報を総合的に評価し、貯槽周辺の地下水場の理解を深めることは、貯槽完成に向けた今後の地下水管理において非常に重要である。これまで、地球統計手法による水理地質モデルにより、地下水挙動の表現が可能であることが示されている¹⁾。

本研究では、水理特性の空間分布および貯槽周辺の主要な割れ目を考慮した3次元水理地質構造モデルを構築し、各掘削段階の地下水流動解析と観測結果との比較により、不均質性や割れ目が貯槽周辺の地下水場に与える影響について考察する。

2. 波方基地の概要

建設地点は、愛媛県高縄半島先端部から西方に延びる東西約3km南北0.8kmの岬に位置する。地表は、最高標高96mの山稜で侵食により細かな沢地形を呈している。地質は、中生代白亜紀の花崗岩、花崗閃緑岩が分布しており、一部に石英斑岩の岩脈も見られる。これらの花崗岩類を不整合に覆う第四紀未固結堆積物が分布している。花崗岩は、風化の程度により、風化部、漸移部、新鮮部の3層に区分され、新鮮部の平均透水係数は $1 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 程度である。貯槽は、幅26m×高さ30m、断面積 650m^2

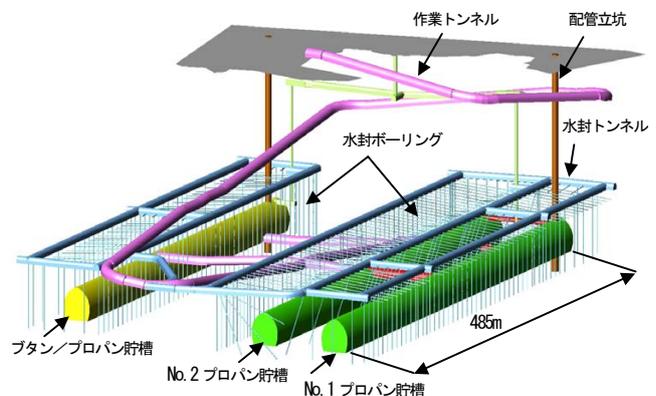


図-1 波方LPG地下備蓄基地の空洞配置

の卵形で、プロパン貯槽は 485m の空洞 2 列、ブタン／プロパン貯槽は 430m の空洞 1 列である。貯槽天端標高は、いずれも EL-150m である。

3. 水理地質構造モデルの構築

水理地質構造モデルは、図-2 に示すように貯槽建設地点の丘陵部全体（約 1.5km×約 1.5km）をモデル化対象とした。領域底面は EL-720m までとした。

水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析は、表-1 に示すフローにしたがって実施した。

(1) 水理特性・地質境界によるゾーニング

水理特性や割れ目分布の違いにより、図-3 に示すような A～F の 6 ゾーンに分割した。貯槽中央を横断する E の領域は、水封ボーリングの透水試験結果（図-3 にプロパン水封ボーリングのルジオンコンターを示す）から、隣接する領域 D、F と比較して透水性が高い。D と E の境界には、連続性の高い粘土挟在割れ目（表-2 記号⑤）が分布する。同割れ目を境に割れ目卓越方向が異なっており、構造的な変化が水理特性にも影響を及ぼしていると考えられる。E と F の境界は、岩種境界（波方花崗岩・高輪花崗岩）にあたる。貯槽南側では、D と A の境界をなす断層破砕帯（F-1、貯槽には出現しない）と派生する断層（F-2～F-6）が確認された。F-1 と F-2 で囲まれた B の領域は、水封ボーリングの透水試験から難透水性（対数平均透水係数 $5 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 以下）を呈する。さらに、プロパン No.3 水封トンネルの南側の縦水封ボーリングにおいて、低角度割れ目が分布する領域 C（貯槽には出現しない）が確認された。水理地質構造モデルの構築に当たっては、全体を分割した後、水理データに基づいて、領域ごとに水理物性の評価を行った。

表-2 水理地質構造モデルで考慮したゾーン境界および主要割れ目（断層含む）

記号	分類	名称	備考
①	分帯境界	F-1	断層破砕帯(貯槽には出現しない)
②		F-6	低透水路境界
③		低角度割れ目帯境界	低角度割れ目発達部の境界
④		岩種境界	波方花崗岩／高輪花崗閃緑岩
⑤		⑤	高透水・低透水領域の境界
⑥	断層	F-2	
⑦		F-2'	
⑧	遮水割れ目	⑦	粘土挟在割れ目
⑨		⑮	
⑩		⑰	
⑪		⑱	
⑫	透水性割れ目	PW2-H232.5	水封ボーリングで確認
⑬		PW2H322.5	
⑭		PW2-H362.5	
⑮		PW2-H382.5	
⑯		FF	水封トンネルで確認
⑰	No5B	貯槽グラウチング孔で確認	
⑱	GR500		

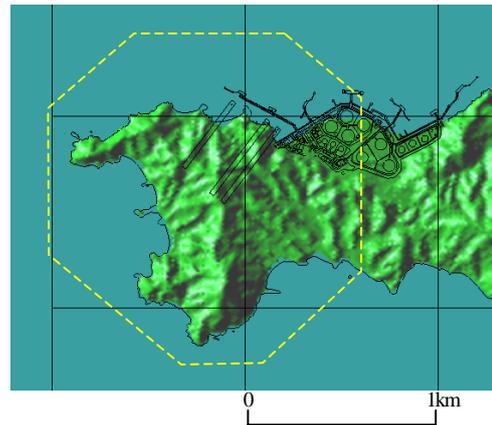
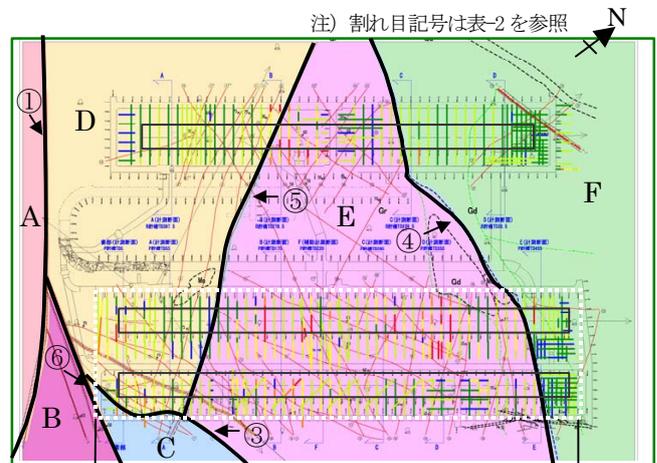


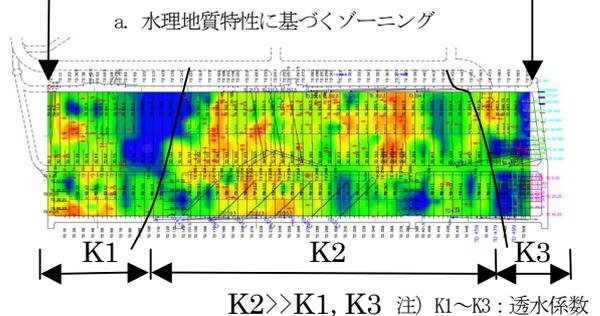
図-2 モデル化対象領域（破線で囲まれた範囲）

表-1 モデル構築・地下水解析のフロー

内容	参考とした情報
1. データの整理・分析	地質データ(水封ボーリング、計器設置孔、壁面観察) 透水試験データ(水封ボーリング、グラウト孔) 水圧応答(水封ボーリング削孔、水封圧変化) 湧水箇所
2. 水理特性・地質境界によるゾーニング 主要割れ目の抽出	岩種境界 断層・割れ目分布図 ルジオンマップ(水封ボーリング)
3. 水理物性・異方性の設定	水封ボーリング削孔時試験 グラウト孔ルジオン試験
4. 解析用メッシュの作成	地形 風化層・新鮮岩境界 構造物(作業トンネル、水封トンネル、貯槽)
5. 境界条件(涵養量)の設定	地下水位(初期水位分布キャリブレーション)
6. 地下水流動解析	実掘削工程 掘削段階毎のグラウチングデータ
7. 解析結果と観測値との比較	地下水位 地下水圧(地表観測孔、貯槽周辺観測孔) 湧水量(貯槽、水封トンネル) 水封水供給量
8. 総合評価・モデルの見直し	観測値と解析結果との比較



注) 割れ目記号は表-2を参照



K2 >> K1, K3 注) K1～K3: 透水係数

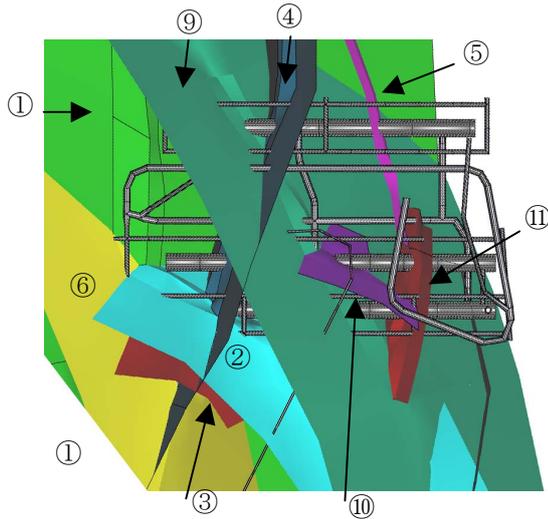
b. プロパン貯槽水封ボーリングのルジオン値コンター

図-3 水理特性・地質境界によるゾーニング

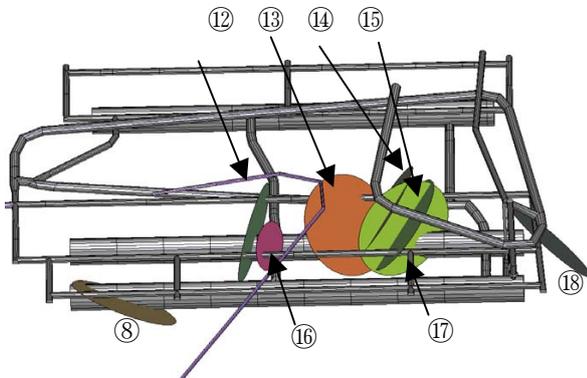
(2) 主要割れ目の抽出

貯槽掘削や水封圧変化に伴う、水圧応答の遮断から連続性の高い粘土挟在割れ目は、水理的には遮水性を有すると解釈された。一方、水封ボーリング削孔時やグラウト孔で、10 ルジオンを越える透水区間が見られた。水理地質モデルには、表-2 に示すような、貯槽周辺の水圧場や地下水挙動に影響を与えると考えられる遮水性・透水性の割れ目や断層を決定論的に反映した。

割れ目の形状は、BTV、トンネル、水封ボーリング、貯槽壁面の割れ目位置から図-4 のようにモデル化した。



a. ゾーン境界および連続性の高い粘土挟在割れ目



b. 高透水割れ目および連続性の低い粘土挟在割れ目

注) 割れ目番号は、表-1を参照。

図-4 ゾーン境界と遮水割れ目のモデル化

(3) 透水係数分布の設定

水封ボーリング孔、間隙水圧計設置ボーリングおよびグラウト孔などで、多数の透水試験データが蓄積されている(図-5)²⁾。水理地質構造モデルには、これらのデータから推定される貯槽周辺岩盤の透水係数の不均質性を反映した。任意の点の透水係数の推定方法としては、重みつき内挿法の一つである Inverse Distance 法(測定点までの距離の二乗に比例して観測値の重みを算定する)を用いた。風化層および領域の透水係数は、透水試験デ

ータの対数平均を用い、断層・割れ目の透水係数はルジオン試験結果等から決定した(表-3)。

施工中にはグラウチングを実施しており、貯槽壁面近傍の透水係数は、掘削の進捗とともに初期物性から徐々に変化する。グラウチングによる透水性改良効果は、各掘削段階のグラウトデータを順次追加し、チェック孔から一定距離(5mとした)の範囲内にある透水係数を改良後の透水係数で置き換えることにより考慮した。

図-3のゾーンEでは、N20WおよびN70E方向に、それぞれ湧水割れ目および粘土割れ目の卓越が見られた。このことから、N20W方向に主軸方向を有する透水異方性を考慮した(本解析では、異方性比を1:10とした)。

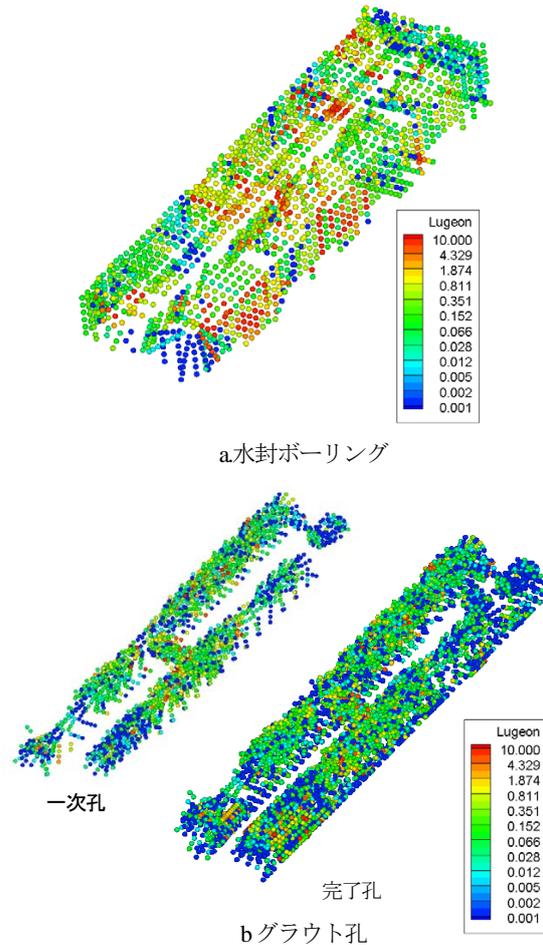


図-5 不均質透水係数の計算に用いた試験データ

表-3 領域および割れ目の透水(量)係数の設定値

領域(名称:図-3参照)	透水係数[m/s]	
風化層・漸移層	2.0E-07	
A 波方花崗岩(断層破碎帯F-1以南)	1.0E-08	
B 低透水領域(F-1~F-2間)	5.0E-09	
C 低角度割れ目卓越領域	7.0E-08	
D 波方花崗岩(中透水性領域)	1.0E-08	
E 波方花崗岩(高透水性領域)	3.0E-08	
F 高輪花崗閃緑岩	5.0E-09	
断層・割れ目(記号:表-2参照)	透水量係数[m ² /s]	
	断層直交	断層平行
①	1.0E-10	1.0E-07
⑧		1.0E-06
⑦		5.0E-07
⑥、⑨~⑪	1.0E-10	
⑫	1.0E-10	2.0E-06
⑬~⑮		5.0E-07
⑯、⑰		1.0E-05
⑱		5.0E-06

(4) 解析メッシュの作成

メッシュ (図-6) には、地形、風化層・新鮮岩盤境界および地下構造物 (貯槽、作業・水封等のトンネル) を考慮した。掘削形状を正確に表現するため、貯槽周辺は約 3mの解像度で分割した。水理地質境界によるゾーニング (領域毎の物性割り当て) や主要割れ目の反映 (割れ目と交差する要素の抽出、透水係数の割り当て) はメッシュ作成後に行った。図-7に透水係数分布を示す。

(5) 境界条件の設定

海面下は海水位 (EL±0m) の水頭固定、側方および底部境界 (EL-720m) は不透水とした。地表面は、降雨涵養境界とし、観測井の地下水位データによるキャリブレーションにより有効涵養量を 300mm/年とした。

(6) 貯槽掘削解析

貯槽周辺の地下水場は、掘削の進捗により初期状態から時々刻々と変化する。各掘削段階で得られる情報 (地下水位、水圧、湧水量など) は、周辺岩盤の水理特性を反映したものであり、構築した水理構造地質モデルの妥当性の検討や見直しを行う上で有用である。貯槽掘削解析は、飽和・不飽和浸透流解析手法により、図-8 に示す 6 段階 (4 ベンチ完了時についてはポストグラウト前後 2 時点) を対象として行った。掘削は、実際の掘削進捗を反映するために、対象とする要素を削除し、空洞壁面を大気圧境界とすることによりモデル化した。

4. 解析結果と観測値との比較

(1) 貯槽湧水量

各掘削段階でのプロパン貯槽への湧水量の観測値と解析結果との比較を図-9 に示す。観測値は、掘削の進捗とともに増加するが、2 ベンチ掘削以降大きな増加は見られない。掘削完了時の湧水量は、均質モデル (透水係数 $1 \times 10^{-8} \text{m/s}$) の結果とほぼ等しい。これは、実施工に

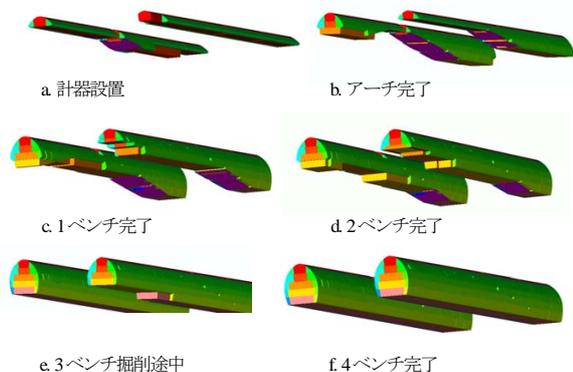


図-8 掘削解析対象段階と解析ステップ名称

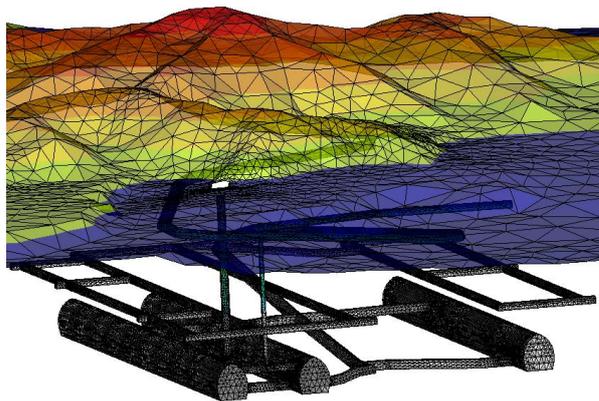
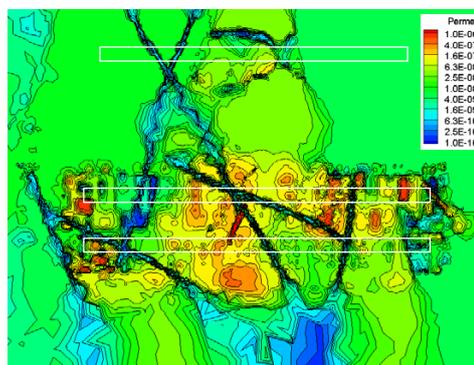
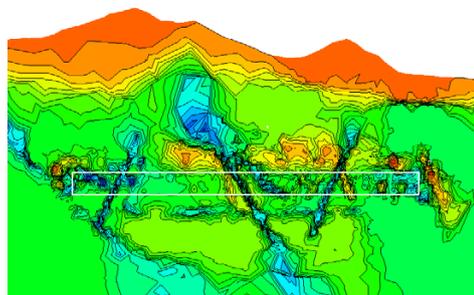


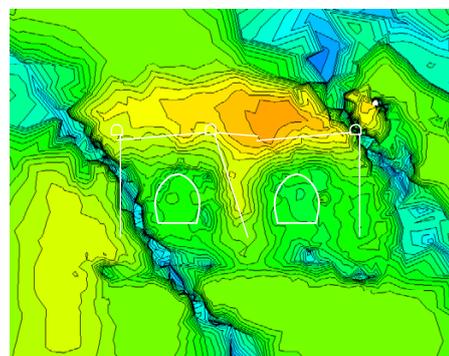
図-6 解析メッシュ (可視化のため岩盤は非表示)



a. 水平断面 (EL-125m)



b. No.2 プロパン貯槽縦断



c. 横断面 (BB 計測断面, TD175)

図-7 透水係数分布

において湧水量が均質モデルの予測値以内となるようにグラウチングを計画・実施した結果である³⁾。不均質モデルの結果も観測値に近い値が得られており、グラウチングの効果が再現できることが分かった。区間湧水量の観測値と解析結果の比較を図-10に示す。均質モデルでは、両貯槽とも一樣な分布となっているのに対し、不均質モデルでは、貯槽中央の透水性が高い区間（図-3の領域E）の湧水量が両端の区間と比較して多い。この傾向は、観測値と整合的であることから、湧水量分布には、グラウチング前の透水係数の影響が残っていると解釈できる。

(2) 水封供給量・水封トンネル湧水量

図-11に水封ボーリング供給量および水封トンネル湧水量を示す。水封トンネルは、水没後の水封水供給性能を大きく損なわない範囲でグラウチングを実施した。このため、No.1水封トンネル（図-11b, No.1PW）においては、割れ目からの水封水のリターンが多く見られた。不均質モデルでは、割れ目に起因する水封供給量、水封トンネル湧水量の増加を、ほぼ正確に表現している。

(3) 地下水位・地下水圧

貯槽掘削時の地下水位・地下水圧変化の例として、観測井戸No.18の観測結果を示す（図-12）。同観測孔は、No.2プロパン貯槽のほぼ中間地点（貯槽TD250付近）の直上にある地上から設置されたボーリングであり、孔内水位と地下水圧（深度EL-58.2m）を測定している。地下水位は、解析結果（不均質、均質モデルとも）および観測値とも貯槽掘削を通じてほとんど変化が見られない。地下水圧も、貯槽掘削の影響をほとんど受けないが、水封圧変化に伴って変動している。

すなわち、水封水の供給により、浅部の地下水圧は貯槽掘削の影響を大きく受けなかったことを示している。

(4) 貯槽周辺間隙水圧

図-13に、貯槽掘削完了段階のC計測断面（プロパン貯槽TD310）の間隙水圧分布の解析結果を示す。C断面には、粘土挟在割れ目⑮、⑰（図-4記号⑨、⑩）が交差している（図-14）。不均質モデルでは、均質モデルと比較して、粘土割れ目と貯槽間に水圧の低い領域が形成されている。これは、貯槽上部の水平水封ボーリングからの供給が粘土割れ目により遮られていることによると考えられる。図-15に、貯槽を隔てて左右対称の位置にある二つの観測点（No.3-C-2, No.2-C-2）の掘削に伴う間隙水圧の変化を示す。観測された間隙水圧は、粘土割れ目の下部にあるNo.3-C-2で均質モデルと比較して小さく、粘土割れ目の上部にあるNo.1-C-2で、均質モデルより大きな値を示している。水圧分布に見入られる両観測点の水圧挙動の違いは、不均質モデルで再現されている。

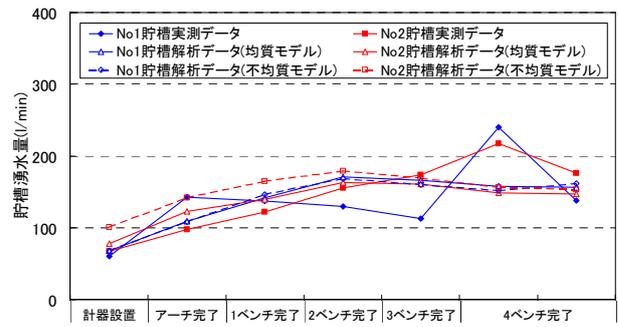


図-9 貯槽湧水量の変化

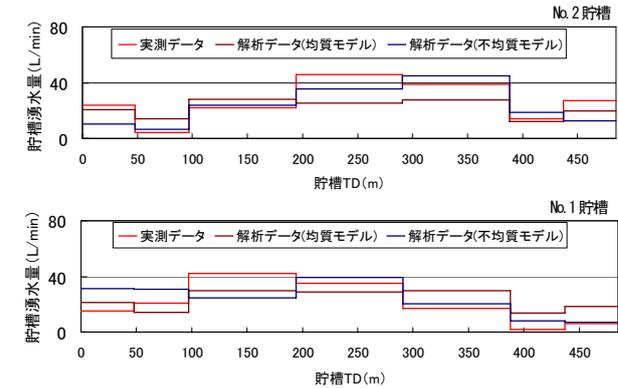
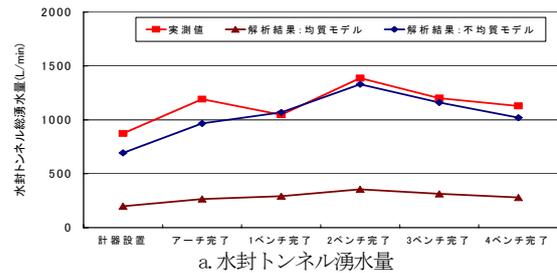
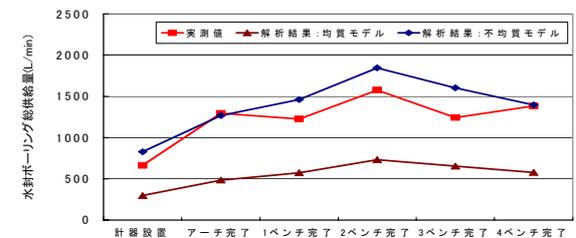


図-10 貯槽区間湧水量

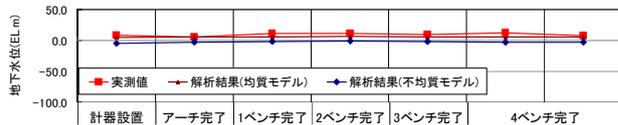


a. 水封トンネル湧水量

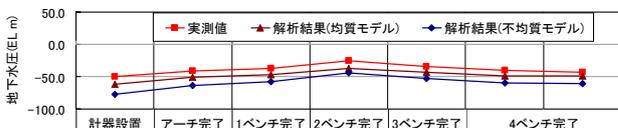


b. 水封ボーリング総供給量

図-11 水封トンネル湧水量・水封ボーリング供給量

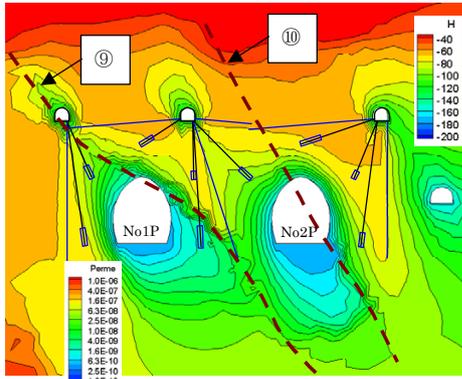


a. 地下水位

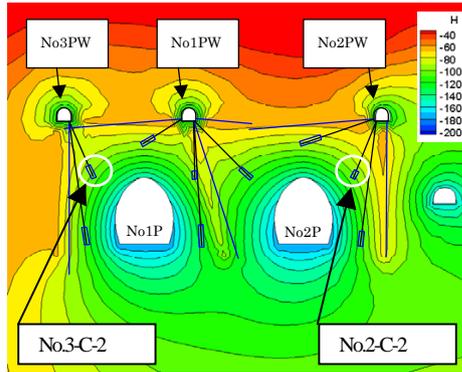


b. 地下水圧（水頭換算）

図-12 地下水位・地下水圧の変化（観測孔No.18）



a. 不均質異方性モデル



b. 均質等方性モデル

図-13 貯槽周辺間隙水圧 (C断面, TD310)

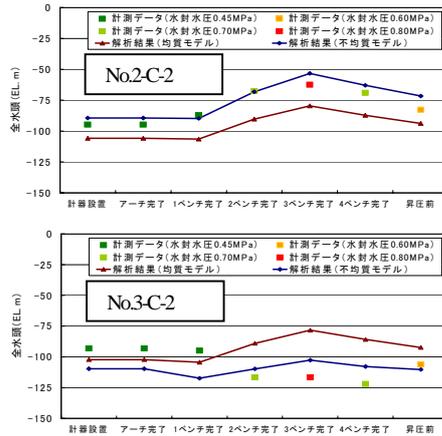


図-15 貯槽周辺間隙水圧 (掘削段階ごと)

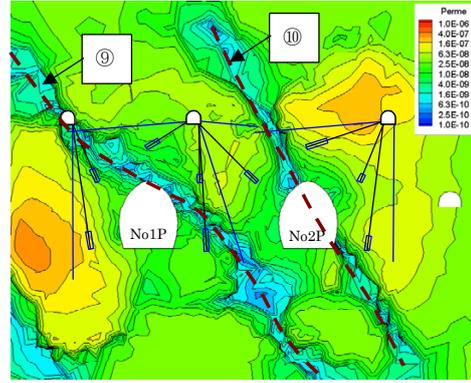


図-14 透水係数分布 (不均質異方性モデルC断面, TD310)

5. まとめ

波方 LPG 貯槽の事前調査および施工段階で得られた地質および岩盤水理特性に関する情報をもとに透水不均質性、異方性およびそれに与える主要割れ目 (断層、粘土介在割れ目、高透水割れ目など) を反映した三次元水理地質構造モデルを構築し、複数の掘削段階を想定した地下水流動シミュレーションを実施した。解析結果と観測結果との比較により、構築した水理地質構造モデルにより、貯槽周辺の建設段階から現在に至る地下水流動場の変化を、高い信頼性のもとに表現できることが確認された。

参考文献

- 1) 青木謙治, 水戸義忠, 張傳聖, 林達也, 宇野晴彦, 前島俊雄: 地球統計学的シミュレーションを用いた大規模LPGタンクの3次元水理地質モデルの構築, 第37回岩盤力学に関するシンポジウム, PP.61-66, 2007.
- 2) 下茂道人, 真下秀明, 前島俊雄, 山本浩志, 青木謙治: 水封ボーリングを用いたLPG貯蔵空洞周辺の水封機能確認方法, 第37回岩盤力学に関するシンポジウム, PP.55-60, 2007.
- 3) 安達哲也, 下茂道人, 前島俊雄, 山本浩志: LPG 岩盤貯槽掘削時のグラウト計画と止水対策結果の評価 - 波方プロパン貯槽工事 -, 第62回土木学会年次講演会, PP.583-584, 2008.

SIMULATION OF FLOW AROUND LPG STORAGE CAVERN BY 3D HYDROGEOLOGICAL MODEL CONSIDERING MAJOR FRACUTURES

Michito SHIMO, Wataru HOTTA, Masato SHIMONO
Toshio MAEJIMA, Hiroshi YAMAMOTO and Kenji AOKI

For the construction of the underground LPG caverns, groundwater management during construction is essential since the LPG is stored with the help of the groundwater flow toward caverns. JOGMEC, Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, is now constructing the LPG storage caverns at Namikata, Ehime Pref. This paper presents an approach for creating a three dimensional hydrogeological model based on the information on geology and hydraulic rock properties obtained during the construction. By comparing flow simulation results with observations, it was found that both types of fractures, sealing and conductive, play an important role on pressure distribution around caverns as well as flow rate.