

3次元不均質モデルによるLPG岩盤貯槽掘削時の地下水挙動評価

前島俊雄¹・山本浩志¹・宇野晴彦^{2*}・池谷貞右²・青木謙治³

¹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）

²東電設計株式会社 土木本部（〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3）

³京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

*E-mail: uno@tepsco.co.jp

愛媛県今治市に世界最大規模のLPG地下備蓄基地(波方基地)の建設が進められており、昨年、貯槽掘削工事が完了した。岩盤地下貯蔵は、周辺の自然地下水および人工水封により常温高压のLPGを岩盤内に封じ込めるものであり、建設中から操業までの地下水状態が水封機能維持に大きく寄与する。したがって、建設段階から数多くの調査、試験、計測データを分析し、情報化施工システムによる地下水挙動管理のもと貯槽掘削が進められた。筆者らは、透水特性データを用いた地球統計手法による水理地質モデルを構築し、3次元浸透流解析により実挙動を表現できることを確認した。ここでは、さらに、地質構造を考慮した3次元不均質モデルを構築し、掘削段階から操業までの地下水挙動評価および予測手法としての適用性を確認した。

Key Words :underground cavern,LPG strage cavern,hydrogeological model,sequential indication model

1. はじめに

昨今のエネルギー事情からLPガスの国家備蓄計画により150万トンの備蓄整備が推進されており、地上3基地（石川県七尾基地：25万トン、長崎県福島基地：20万トン、茨城県神栖基地：20万トン）の操業が始まり、世界最大規模の地下式岩盤貯槽2基地（愛媛県波方基地：45万トン、岡山県倉敷基地：40万トン）の建設が進められている。

対象とした波方基地の建設工事は、2002年（平成14年）10月に地上からの作業トンネルの掘削に着手し、水封トンネル掘削（2003年2月）、水封稼動（2004年9月）を経て、2005年2月から貯槽掘削を開始し、昨年の6月に2条のプロパン貯槽と1条のブタン・プロパン兼用貯槽掘削を完了した。

地下式岩盤貯槽は、常温高压で液化したLPG（プロパン：15°C、0.75MPaで液化）を貯蔵するもので、コンクリートやスチールなどのライニングを行わずに、貯槽周辺の地下水圧を貯蔵圧力より高く保持し、貯槽内へ向かう流れを維持するものである。この水封式の岩盤貯槽の建設に当たっては、建設段階から操業段階までの水封機能を維持すること、水封水没後は、追加対策ができないことなどから、精度の高い解析モデルを構築し、現状再現お

よび将来予測に基づく合理的な地下水制御対策を実施することが必要不可欠である。

ここでは、筆者らが既往実施している地球統計手法による3次元水理地質モデル¹⁾に基づき、さらに、地質分帯を考慮した異方的な透水性分布を求め、3次元浸透流解析での不均質モデルに適用することによる地下水挙動評価手法を提案する。

2. 波方基地の概要

(1) 基地概要

波方基地の鳥瞰図を図-1に示す。波方基地のLPG岩盤貯槽は、幅26m、高さ30m、断面積650m²のたまご型であり、プロパン貯槽は長さ485mの空洞2条、ブタン・プロパン兼用貯槽は長さ430mの空洞1条、貯槽の総体積は約91万m³となる。貯槽の設置深度は、貯槽の天端位置でEL-150m、貯槽底盤でEL-180mであり、貯蔵するLPGの貯蔵圧力と水封水圧の関係から十分な気密性・液密性が確保できる深度に設置されている。また、貯槽天端から25m上部(EL-125m)の水封トンネルを貯槽を取り囲むように設置し、水平および鉛直の水封ボーリングから水封水を供給加圧している。

なお、プロパン貯槽の離隔は、空洞相互干渉による影

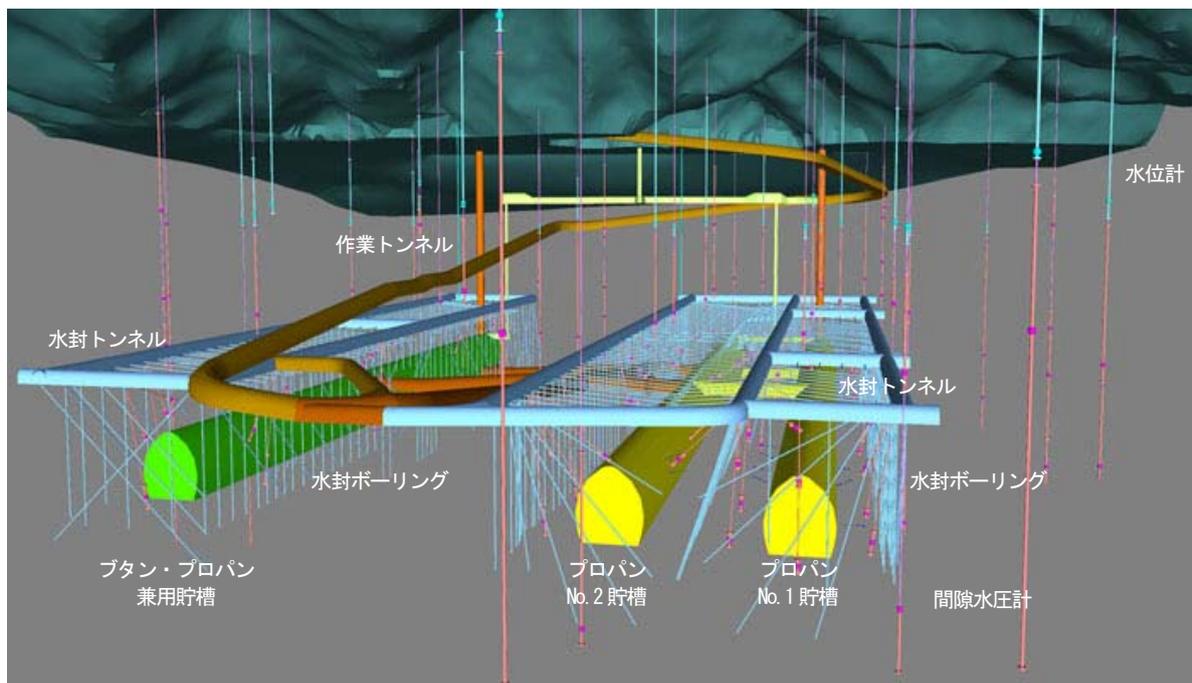


図-1 波方LPG岩盤貯槽基地および計測配置鳥瞰図

響が生じない位置とし、空洞中心間隔で70mとした。

地下水観測システムは、図-1に示すように基地全体を網羅する間隙水圧計と水封システム内側の水圧挙動を監視する間隙水圧計に分けられる。表-1に計測項目と計測計器の諸元を示す。水封システム内側の間隙水圧計の配置は、地質分帯も考慮した。間隙水圧データは、経時的に自動計測されており、計測室に集約される。その他、地下水挙動分析に用いる地下水データは、水封ボーリングの水圧および流量、坑内湧水量等である。

表-1 計測項目および計測器

計測項目	計測器
地下水観測孔（地上）	振動弦型間隙水圧
地下水観測孔（水封）	振動弦型間隙水圧
水封ボーリング水圧	圧力計
水封ボーリング流量	電磁流量計
坑内湧水量	計測堰

(2) 地質概要

波方地点は、今治市の高縄半島先端部から西方に伸びる東西約3km、南北0.8kmの岬に位置している。波方基地周辺の岩盤は、中生代白亜紀の花崗岩質岩からなり、陸域の大部分は、波方花崗岩、北部海岸付近には、高縄花崗閃緑岩が分布している。波方花崗岩との境界面は密着し、西北西-東南東の走向で南急傾斜を示している。

地質構造は、図-2に示すように、構造を変化させる割れ目、破碎帯、変質帯などの分離面と節理の卓越方向と密度などを調査・分析し、7つの地質分帯（Ⅰ-Ⅶ）に区分した。これら構造を変化させる割れ目の走向は、N20W系・N60W系・N70E系の3方向認められ、いずれも連続性が高い。当該地点の貯槽に出現する地質分帯の特徴

は、まず、割れ目が最も密に発達しているV分帯（波方花崗岩：Gr、と高縄花崗閃緑岩：Gd、境界沿い）では、N20W系、N60W系の貯槽横断方向が卓越している。ⅡとⅣ分帯の割れ目には、V分帯の2方向に加えN70E系の貯槽軸方向に近い割れ目が存在しており、その後の構造運動により形成されたものと推定される。N70E系の割れ目の周辺では、一部開口割れ目が分布しており、この分帯の透水性が高い。Ⅵ分帯は、Ⅳ分帯と同様の割れ目方向であり、中程度である。Ⅰ分帯は、貯槽軸方向の高角な割れ目が分布しているが割れ目密度は大半が疎である。

3. 不均質モデルの構築

(1) 地球統計手法を用いた水理特性分布の設定方法

3次元浸透流解析に適用した不均質モデルの透水係数分布については、建設時に計測される透水試験データの透水係数を用いて、Ordinary Krigingによる地球統計学的推定およびSequential Indicator Simulation¹⁾（以下、SISと呼ぶ）により設定した。

図-3に貯槽周辺の水封ボーリング配置および透水性（Lu値）を示す。貯槽を囲うようにして、水封ボーリングによる人工水封システムが構築されており、全てのボーリング孔に対して、透水試験が実施されている。

各建設段階での水封ボーリング孔、間隙水圧計設置孔およびグラウト孔（初期透水場：1・2次孔、グラウト実施後：最終次数孔）の透水試験データを用いて、SISによる複数（30個）の透水係数の実現値マップを作成し、複数の透水係数（ $\text{VaR}=10^4\text{cm/s}$, $\text{VaR}=10^{42}\text{cm/s}$ ・・・ $\text{VaR}=10^{78}\text{cm/s}$, $\text{VaR}=10^8\text{cm/s}$ ）に対する出現確率分布図（VaR水準

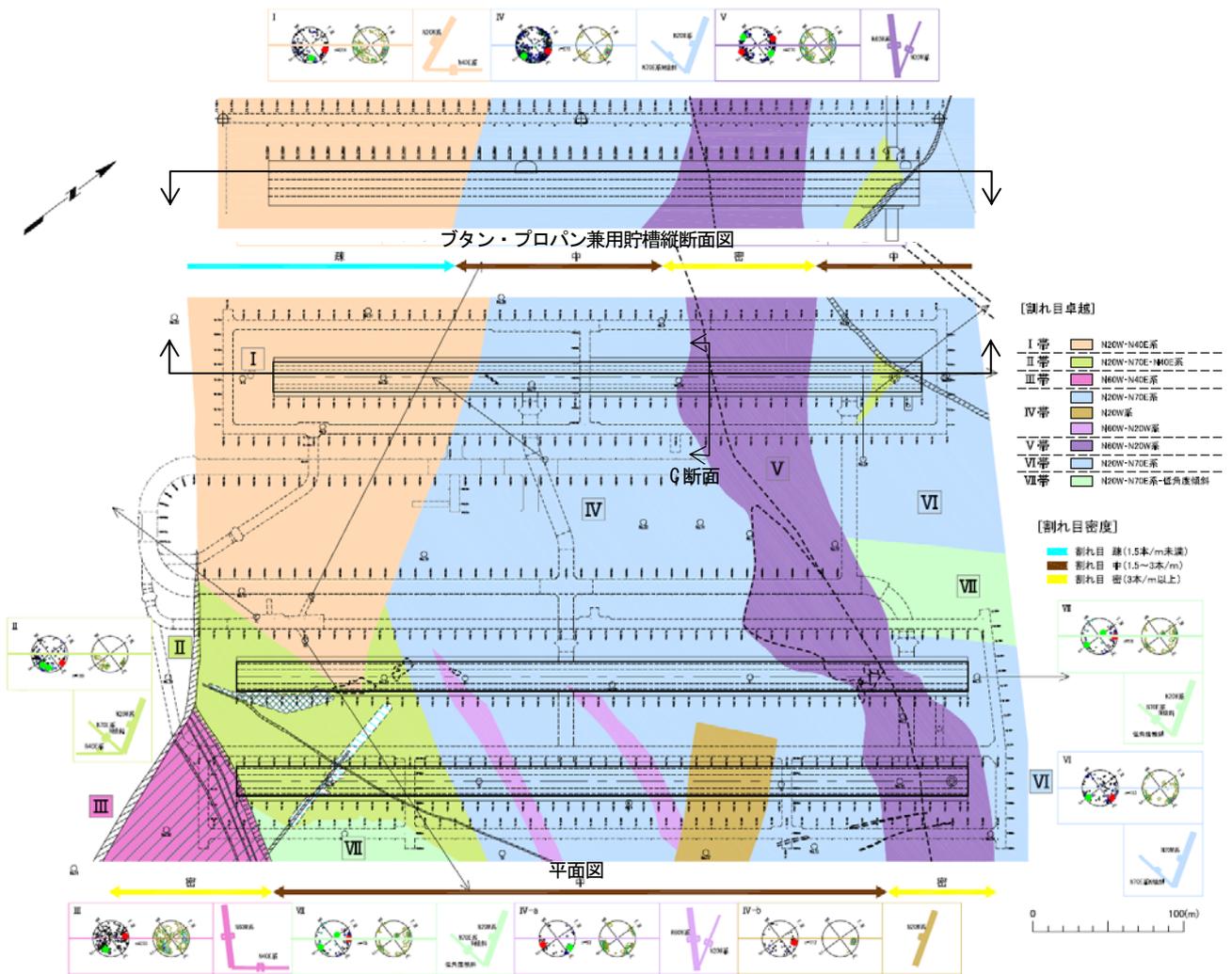


図-2 波方基地 地質図 (アーチ底盤)

マップ) を求める. この複数の出現確率分布における一定の出現確率 (ここでは50%) の分布を重ね合わせて, 一つの推定透水分布を設定した.

解析モデルについては, 貯槽掘削時の地下水制御対策工の検討に対応 (水封ボーリングを1本ずつ考慮可能) できるようにプロパン貯槽, プロパン・ブタン兼用貯槽と

(2) 解析手法・条件

3次元浸透流解析には, 異方性の透水特性が表現できる飽和・不飽和浸透流解析コード (Soil Plus Flow) を用いた.

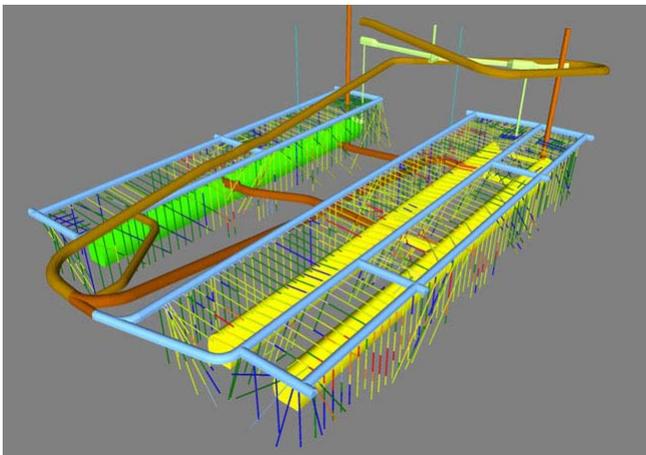


図-3 水封ボーリングの配置および透水性概要図

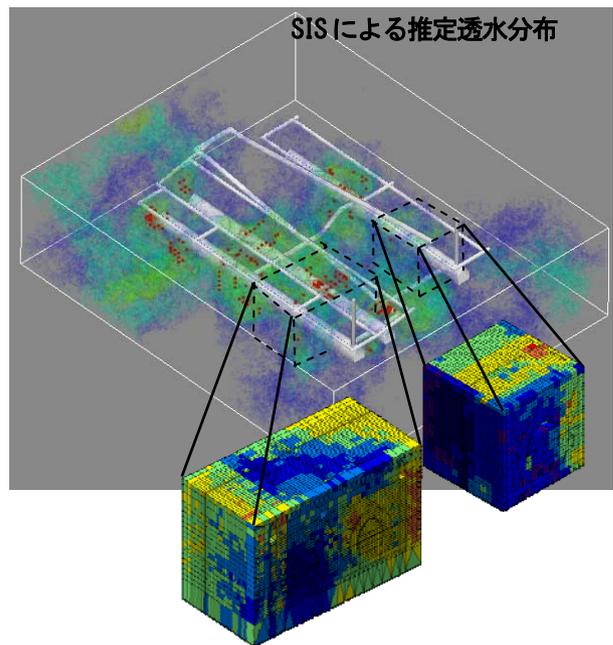
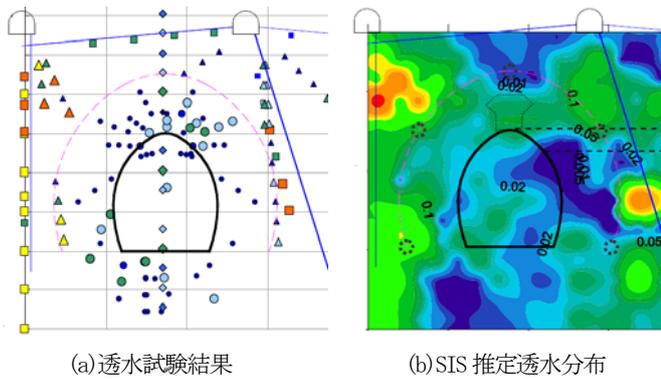


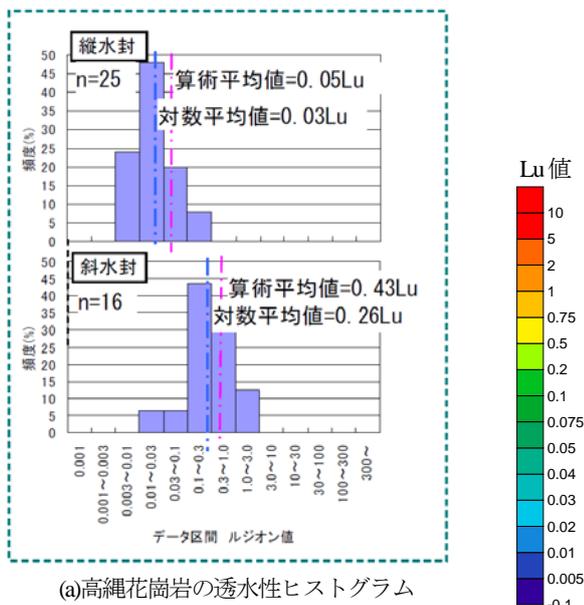
図-4 推定透水分布と不均質モデル概要



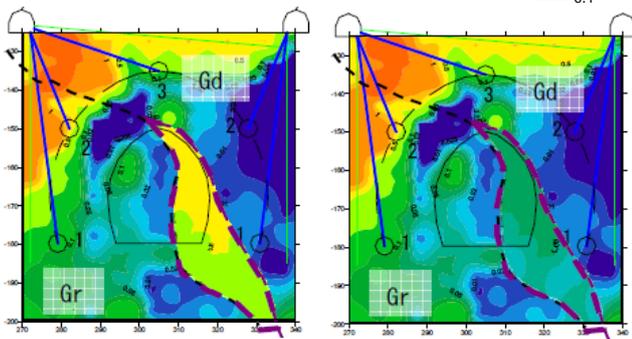
(a) 透水試験結果 (b) SIS 推定透水分布
図-5 透水試験データおよび推定透水分布 (Lu値)

もに、**図-4**に示すように、局所的な貯槽周辺領域において貯槽軸方向約100m毎の分割モデルを作成し、SISから求めた3次元推定透水分布による不均質な透水特性をメッシュ毎に与えた。なお、貯槽周辺のグラウトゾーンについては、グラウト最終次数孔の透水特性を考慮した。

解析条件については、各分割モデルの周辺に幅1000m、深さ500mのモデル領域 ($k=1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$:以降、透水性は、 $k=1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ を0.1Luとして表示する)を設定し、側方境界は、EL-0mで全水頭固定、底部境界は、不透水境界とした。



(a) 高縄花崗岩の透水性ヒストグラム



(b) 横断方向透水性分布 (c) 軸方向透水性分布

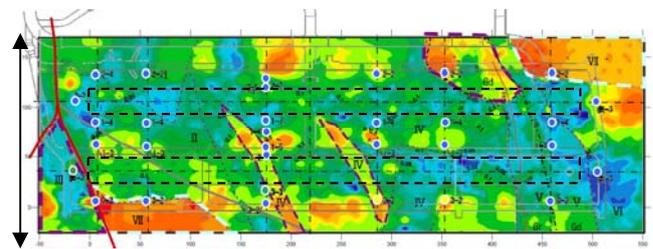
図-6 透水性特性の異方性の設定

(3) 透水特性の設定

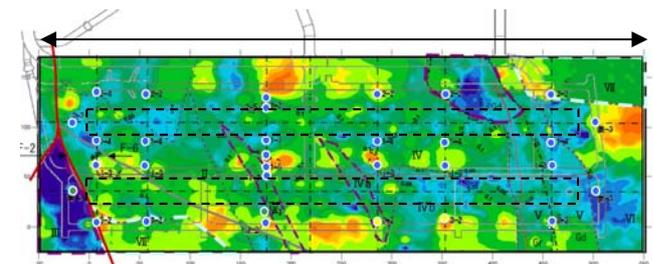
解析モデルの透水性の不均質性については、**図-5(a)**に示す水封ボーリング孔、間隙水圧計設置孔およびグラウト孔の透水試験データに基づき、**図-5(b)**に示すSISの推定透水分布 (凡例は**図-6**参照)を設定することを述べたが、当該地点では、地質分帯による明らかな透水分布の境界および割れ目の卓越方向による異方性を考慮するために、分帯毎にSISによる透水特性を設定することとした。透水性の異方性については、貯槽周辺に10m間隔で実施されている水封ボーリングの打設方向 (水平、縦、斜め) とLu値の関係から評価した。

一例を示すがV分帯中の高縄花崗岩部(Gd)は貯槽横断方向の割れ目が卓越しており、**図-6(a)**に示すような水封ボーリング毎の透水性のヒストグラムを描くと斜水封ボーリングのLu値が縦水封ボーリングのLu値より1オーダー高い値となった。これは、同じ分帯内で斜めボーリングが貯槽横断方向割れ目を捉えており、縦水封ボーリングと交差する軸方向よりも透水性が高い異方性を示しているものと考えられた。したがって、この分帯の透水特性には、**図-6(b)(c)**に示すように貯槽横断方向 (面内方向)には高く、貯槽軸方向 (面外方向)に低い、透水性の異方性を設定した。

この透水性の設定方法により前述した**図-2**の地質分帯毎にSISを実施し、貯槽全体の透水性分布を算出した。**図-7**には、プロパン貯槽でのアーチ天端スライスのLu値分布 (凡例は**図-6**参照)を示す。分帯によって、透水性の異方性を示し、貯槽横断方向と貯槽軸方向で透水性が異なることがわかる。なお、図には2次元平面で表示しているが解析モデルへの反映は、3次元的地質分帯を考慮した3次元透水性分布を適用した。なお、透水試験データについては、算術平均の値を適用した。



(a) 貯槽横断方向の透水性分布



(b) 貯槽軸方向の透水性分布

図-7 プロパン貯槽の透水性分布 (Lu値)

4. 解析結果

LPG岩盤貯槽建設においては、建設過程全ての段階において水封機能維持のための地下水挙動評価が必要である。したがって、再現解析においては、現状のみならず貯槽掘削時のアーチ掘削、ベンチ掘削および掘削完了時の掘削プロセスが再現できるモデルを構築する必要がある。本検討では、貯槽周辺の全間隙水圧計に対して、再現解析を実施しているが、ここでは、均質解析と大きな乖離を有し、前述で異方性の透水特性を与えたブタン・プロパン兼用貯槽C断面について述べることにする。再現解析で対象とした掘削ステップは下記の通りである。

表-2 再現解析・予測解析の掘削ステップ

	建設段階	水封圧	貯槽圧
①	アーチ掘削時	0.43 MPa	大気
②	1ベンチ掘削時	0.84 MPa	大気
③	1ベンチ掘削完了時	0.92 MPa	大気
④	2ベンチ掘削時	0.80 MPa	大気
⑤	2～3ベンチ斜路掘削時	0.80 MPa	大気
⑥	4ベンチ掘削時	0.70 MPa	大気
⑦	掘削完了時	0.95 MPa	大気
⑧	水封トンネル水没時	0.95 MPa	大気
⑨	気密試験時	0.95 MPa	0.97MPa

図-8に解析結果の評価として、均質モデル（花崗岩新鮮部0.1Lu）および不均質モデルの解析結果から得られた間隙水圧と計測値の差分コンターを示す。差分は、解析値－計測値の値であり、ここでは、貯槽周辺の5つの間隙水圧計の差分からコンター図を描いた。

また、図-9には、貯槽右側の間隙水圧の掘削ステップ毎の経時変化を示す。差分コンターおよび経時変化より

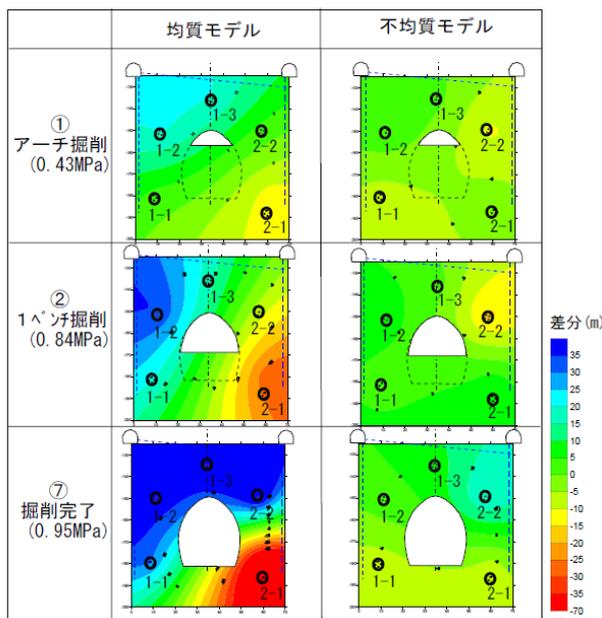


図-8 C断面間隙水圧差分コンター

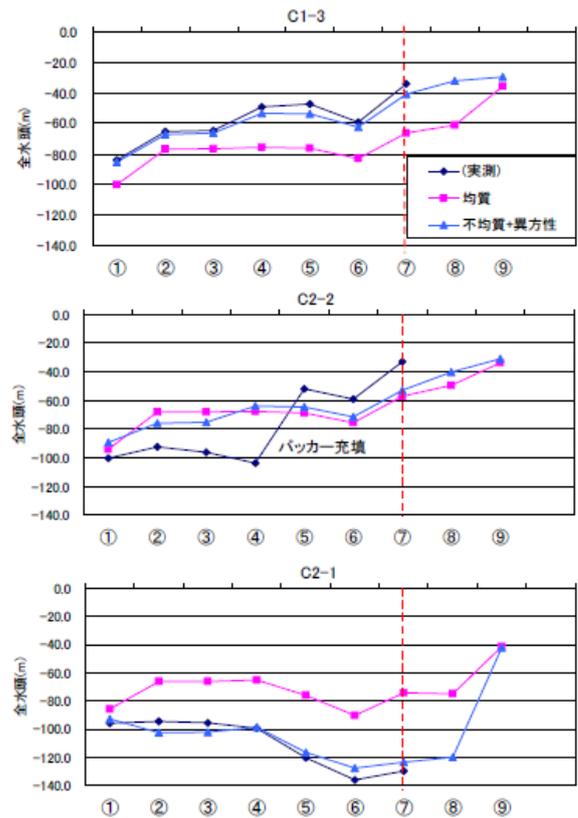


図-9 間隙水圧の経時変化（C断面右側）

下記のことがわかる。

①アーチ掘削時の均質モデルと不均質モデルにおける間隙水圧計の計測値との差分は、それほど大きくないが、②1ベンチ掘削時に均質モデルでは、1-3（計測値>解析値）、2-1（計測値<解析値）の間隙水圧計で、計測値との差が大きくなる。先の図-6の透水性分布図を見ると、1-3方向の貯槽近傍は透水性が等方的で低く、2-1方向は、胴切方向の透水性が周囲より高いため、貯槽へ向かう流れが生じており、不均質モデルにより貯槽周辺の間隙水圧の挙動が再現されているものと考えられる。経時変化によれば、掘削が進行すると均質モデルでは、これらの箇所の間隙水圧の差が大きくなる。一方、不均質モデルについては、2～3ベンチ掘削、掘削完了の各段階において、間隙水圧挙動は計測値に近い値となっている。図-10に現状の貯槽周辺間隙水圧の計測値と均質モデルおよび不均質モデルによる解析値の比較を示す。このような不均質モデルでの間隙水圧挙動が計測値と概ね整合する傾向は、貯槽周辺の全間隙水圧計で確認しており、ここで設定した不均質モデルにより概ね貯槽掘削時の地下水挙動を再現できることを確認した。

図は、横軸に計測値、縦軸に解析値をプロットしたものであり、解析値が計測値に近い場合は、1対1に近い範囲（図中の実線）に分布する。また、図中には、破線で、解析値－計測値の±10mの範囲を示してある。青印の均質モデルの結果に比べて、赤印の不均質モデルの方がバ

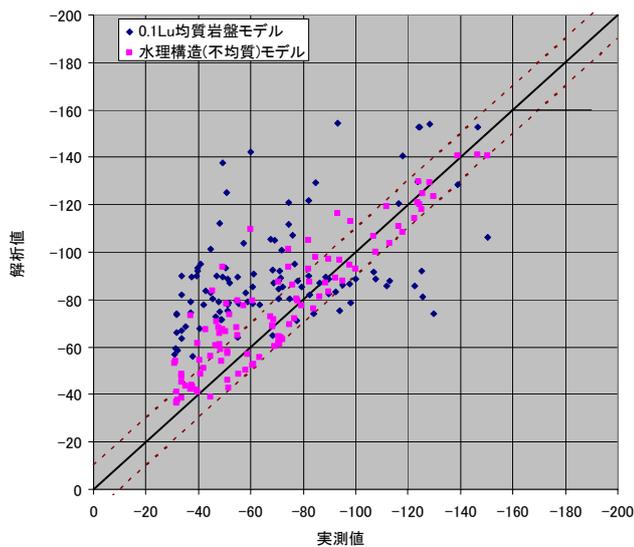


図-10 現状間隙水圧の計測値と解析値の比較

ラツキが少ない結果となった。不均質モデルの解析結果から得られた間隙水圧は、現状を下回るもので10m程度の差（貯槽大気圧時に貯槽周辺の間隙水圧計の設置精度を1mとした場合、全水頭で10mの差が生じることから許容値と考える）となっており、掘削プロセスも合わせた地下水挙動評価に適用できるものとする。

この不均質モデルを用いて、今後実施される水封トンネル水没時および気密試験時の間隙水圧挙動の予測解析を実施した。図-11に掘削完了時も合わせた予測解析の全水頭コンターを示す。なお、先に示した図-9のブタン・プロパンC断面の間隙水圧経時変化に、⑧水封トンネル水没、⑨気密試験時の予測解析結果も示した。解析結果によれば、水封トンネル水没後に、アーチ直上部の水圧が上昇し、気密試験時に貯槽内圧の作用により、2-1の間隙水圧は70m程度の圧力上昇が予測される。今後、水封トンネル水没、配管堅坑水没および作業トンネル水

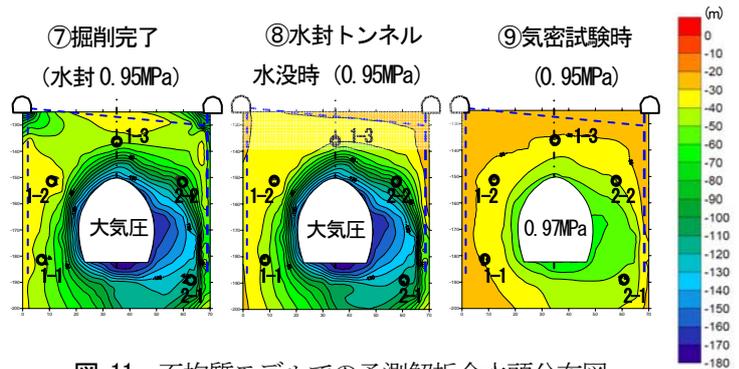


図-11 不均質モデルでの予測解析全水頭分布図

没などの水理的インパクトに対する地下水挙動を随時評価し、地質構造を考慮した不均質モデルでの浸透流解析の予測精度を向上させる。

5. 結論

水封式地下岩盤貯槽建設における情報化施工システムとして、地質構造計測データを用いた地球統計手法による不均質水理構造モデルを構築し、地下水挙動評価を行った。その結果、掘削初期段階から現状までの地下水挙動を概ね表現することができ、地下水挙動評価手法としての適用性を確認した。今後、操業に向けた対策および追加モニタリングを実施し、水封トンネル水没などのインパクトによるモデル精度および予測精度の向上を図り、継続的な貯槽の水封機能を確認し、品質を確保する。

参考文献

- 1) 青木謙治, 水戸義忠, 張傳聖, 前田侑里, 宇野晴彦, 前島俊雄: 地球統計学シミュレーションを用いた岩盤の3次元水理地質モデルの構築, 12th Japan Symposium on Rock & Mechanics, pp803-806, 2008.9

SIMULATION OF GROUNDWATER FLOW DURING LPG STRAGE CAVERN CONSTRUCTION USING 3D NON-HOMOGENEOUS MODELS

Toshio MAEJIMA, Hiroshi YAMAMOTO, Haruhiko UNO, Sadau IKEYA and Kenji AOKI

LPG storage caverns utilize natural groundwater as well as artificial hydrodynamic sealing systems to keep normal- temperature and high-pressure liquefied petroleum gas inside the caverns, and it is important to ensure the water sealing function during both construction and operation. Based on data from field exploration, testing and monitoring, groundwater and cavern excavation management at the site is conducted using an observational construction system. In this study, we use an 3D non-homogeneous hydraulic structural model, is used to predict the groundwater flow behavior during each excavation stage. The validity of the hydraulic structural model and the simulation method are confirmed.