

大規模LPG岩盤タンクの 3次元水理地質モデルの構築に関する研究

青木謙治^{1*}・水戸義忠¹・張傳聖¹・宇野晴彦²・前島俊雄³

¹京都大学大学院 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)

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

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)

* E-mail:aoki@kumst.kyoto-u.ac.jp

本研究では、建設中のLPG地下備蓄基地において、地下水制御を主目的とする情報化設計施工システムの一環として構築した地球統計手法と浸透流解析をベースとする3次元水理地質構造の新しいモデル化システムを提案した。このモデル化システムでは、透水係数の統計的な関連性(空間的な相関関係)に加えて、地下水位の挙動(間隙水圧変化)に対しても高い適合性を有するように、地球統計学シミュレーションと浸透流解析手法をベースとしている。このシステムを用いて実際の水理地質構造をモデル化したところ、地下水挙動および水理特性とその変化を高い精度で予測できることが明らかとなり、水封機能の評価に必要な高精度の水理地質モデルの構築とそれに基づく地下水制御の実施に有効であることが示された。

Key Words : LPG storage cavern, hydrogeological model, geostatistics, finite volume method

1. はじめに

現在、世界最大級の規模を有するLPG地下備蓄基地が石油天然ガス・金属鉱物資源機構によって波方・倉敷の2地点で建設されている。この貯蔵方式は、液化石油ガスを常温高压で岩盤空洞内に貯蔵するもので、地下水面下の岩盤空洞にコンクリートやスチールなどのライニングを行わず、貯槽周辺の地下水圧を貯蔵圧力より高く保持し、貯槽内へ向かう岩盤内の地下水の作用により液密および気密機能を確保する(水封方式)ものである。

プロパンは15℃、0.75MPaで液化することからこれらのLPG貯蔵空洞の設計内圧は0.95MPaと設定されている。このような高い内圧に対する液密と気密機能を確保するためには、貯槽周辺はもちろんのこと、サイトスケールにわたる水理地質構造を高精度に把握し、水封機能を確認することが要求される。また、運用段階のみならず建設段階においても常に貯槽周辺の間隙水圧を完成後の貯槽内圧よりも高い状態に維持することが要求される。このため、貯槽上部にボーリング孔を系統的に配置して人工的に地下水を供給する人工水封システムを設置し、安定した水封状態を確保する方策が必要となる。

このような水封機能の確保を行う上で重要となるのが水理学的な観点からの情報化設計施工である。このプロジェクトでは、計画段階から建設段階そして運用・保守

段階に至るまで多岐にわたる調査および計測が実施され、大量のデータが取得されることになるが、時間・空間的広がりをもったこれらのデータを適時解析処理し、その結果をもとにより合理的な地下水制御対策を行うことが重要である。そこで本研究では、建設中のLPG地下備蓄基地を研究対象として、建設プロジェクトの進行に伴って追加・統合される水理地質データから、サイトスケールでの岩盤の水理挙動を評価することが可能な、地球統計手法と浸透流解析をベースとする3次元水理地質モデルの新しい構築法を提案する。図-1に研究対象とするLPG備蓄基地の鳥瞰図を示す。

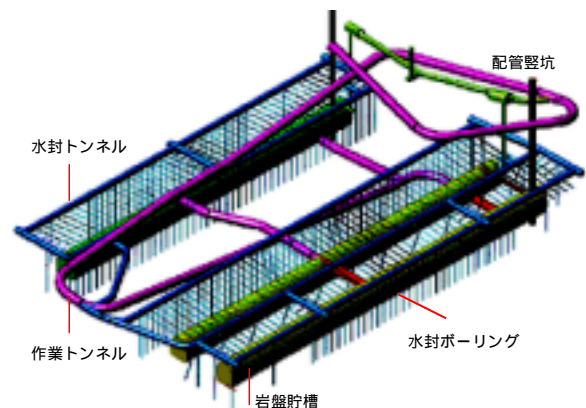


図-1 研究対象とするLPG備蓄基地の施設鳥瞰図

2. 地球統計手法を用いた岩盤水理特性の空間分布の推定

本研究では地球統計学的手法を用いることで、LPG地下備蓄基地建設サイトで計測される透水試験データを基に、サイトスケールでの岩盤の水理地質モデルを構築する。地下掘削の各段階で、透水係数を対象として、Ordinary Kriging (OK) による地球統計学的推定、およびSequential Indicator Simulation (以下、SISと呼ぶ) による地球統計学的シミュレーションを行った。

(1) Ordinary Krigingによる透水係数分布の推定

Ordinary Krigingにより、地下掘削前に地表からのボーリング孔で得られた透水試験データを基にサイトスケールにわたる3次元的な透水係数の推定モデルを作成し、引き続き水封トンネルおよび水封ボーリングの掘削に伴って取得される透水試験データを逐次追加・統合することで、モデルの更新を図った。

図-2に掘削に伴って更新される透水係数分布の推定結果と推定誤差分散を示す(水封トンネルの標高における水平断面図)。これらの図から、データの追加・統合に伴って推定精度が改善され(推定誤差分散が低下し)、推定結果が合理的に更新されていくことがわかる。このことから、情報化設計施工の重要性を認識することができる。また、推定誤差分散の値から、調査精度が一様であるか否かを確認することができ、このことは不良箇所の見落とし防止にも有効である。

(2) SISによる透水係数のVaR水準マップ

SISは、乱数で決定された推定対象領域内の任意の点をIndicator Krigingにより推定し、これを既知データとして逐次推定を行っていく方法である。このとき得られる予測分布は実現値マップ (Realization) と呼ばれる。SISでは逐次推定を行っていくため、推定データ間に対しても空間的相関関係が考慮されるため、Ordinary Krigingに見られる平滑化効果¹⁾が生じにくく、より高い精度で予測を行うことができる長所がある。また、乱数列によって異なる結果を得ることができるため、不確定性の評価を行うことが可能である²⁾。

本研究では、乱数列を変化させた多数の推定結果から空間位置毎に確率分布を得ることによって、一定のしきい値に対する信頼水準の分布を作成した(図-3に一例を示す)。この分布図は、その位置のデータ値がしきい値以上となる確率を示すものであり、設計基準値や改良基準値となる透水係数をしきい値とすれば、リスク解析の基本データとして直接用いることも可能である。

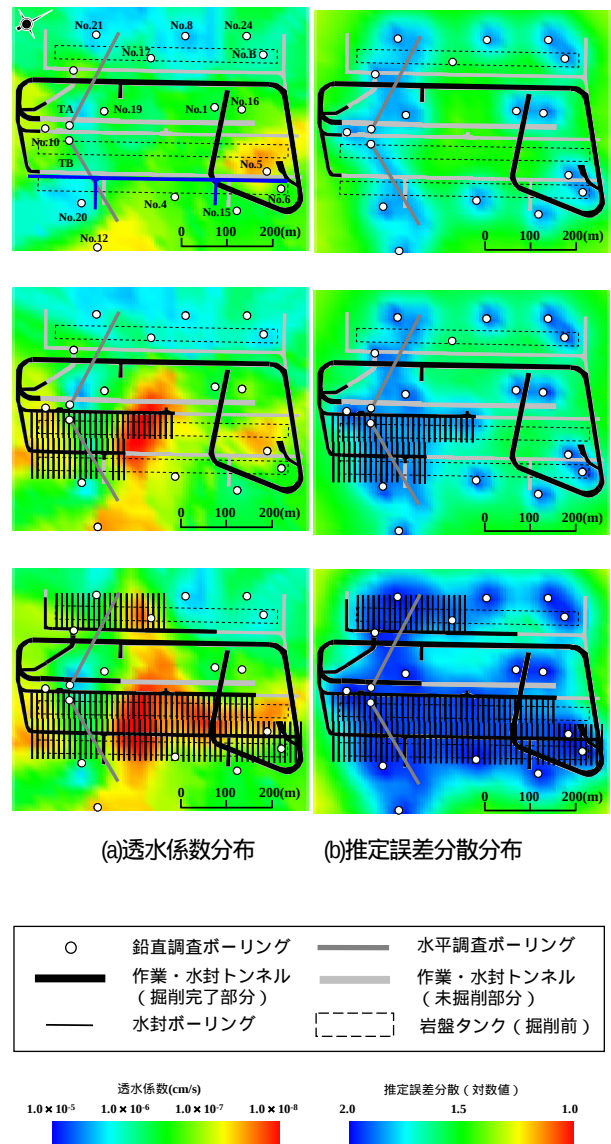


図-2 掘削の進行に伴うOK推定結果の推移(水封トンネルの標高における水平断面図)

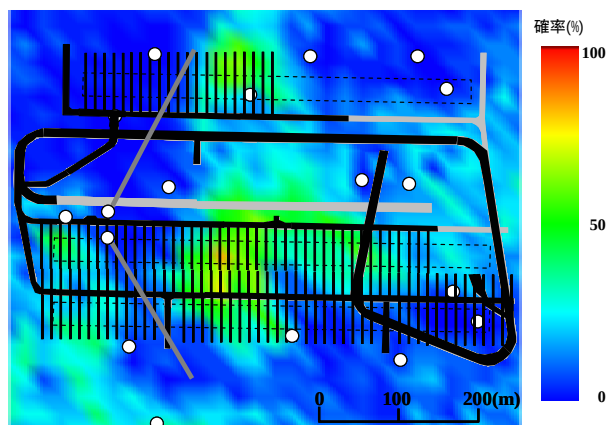


図-3 SISによるVaR水準マップ(VaR=10⁻⁵cm/sの場合)

3．浸透流解析を利用した高精度水理地質モデルの構築

ここでは、水封トンネル掘削時のデータから作成した3次元水理地質モデルに対し浸透流解析を行うことを通して、その後掘削される貯蔵空洞を含めたサイトスケールにわたる高精度な水理地質モデルの構築を試みる。

(1) 3次元浸透流解析の方法

地球統計手法を用いると、規則的な格子上の点におけるデータ値を容易に推定することができるが、本研究では、このような構造格子に対して有限体積法を用いて3次元浸透流解析を行った。地球統計手法によって推定した透水係数値を等間隔立方格子の中心に配置し、不均質な透水特性を反映させた解析モデルを作成した。

解析モデルの側面と上下面には、固定圧力境界条件として自然水圧を与える。この条件のもと、まず定常状態の間隙水圧の分布を求めた後、水封トンネル掘削期間において非定常3次元浸透流解析を行う。具体的な解析手順は次の通りである。

現場で計測された水封トンネル掘削に伴う湧水量をもとに流量境界条件を設定する。

解析期間を30日とした浸透流解析を行う。

上記の解析で得られた地下水位を次の期間の解析の初期条件とする。

上記～の作業を繰り返す。

(2) Ordinary Krigingによる推定モデルを用いたシミュレーション

まず、Ordinary Krigingによって推定された3次元透水係数分布(図-4)を入力した浸透流解析モデル(図-5)を作成し、シミュレーションを行った。間隙水圧が経時観測されている2箇所(No.15, 16孔: 図-2参照)において、実測値と解析値とを時系列で比較したものの例が図-6である。本図を見ると、水封トンネルの掘削に伴い、解析値は実測値と同様の傾向で低下するが、実測値よりもやや低い値を示していることがわかる。この原因として、Ordinary Krigingには平滑化効果が生じるため隣接する推定データ間の類似性が実際よりも高くなり、結果として高透水部の水理学的連続性を過大評価しているものと考えられる。

(3) SISによる実現値マップを利用したシミュレーション

前項の議論を踏まえて、SISによって予測された複数(30個)の透水係数の実現値マップを基に複数の浸透流解析モデルを作成し、シミュレーションを行った。先にも述べたように、SISによる実現値マップの場合、推定値間についても空間的相関関係が反映されているため、

Ordinary Krigingのような平滑化効果が生じにくい。

図-7は、間隙水圧の実測値と代表例として5個の実現値マップから作成された5種類のモデルの解析値を時系列で比較したものの例である。本図を見ると、いずれのモデルにおいても、間隙水圧は同様の低下傾向を示していることと、モデルによって解析値にばらつきがあることがわかる。

ここで、このばらつきは不確定性によるものと考えられ、実測値に最もよく適合するモデルをその段階における最適モデルとして同定するのが合理的である。本研究では、実測値と解析値の誤差の平均を基にモデルの同定を行った。同定したモデル(Model-3)の透水係数分布を3次元的に等数値面で表したものを図-8に示す。

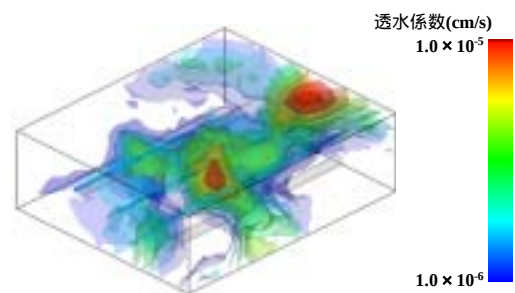


図-4 OK推定による透水係数分布(等数値面図)

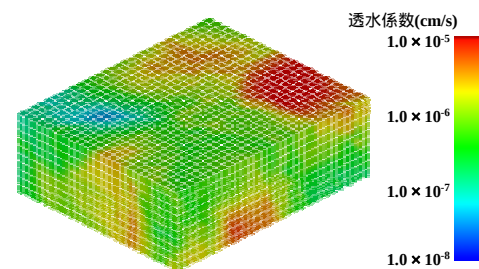


図-5 有限体積法における解析モデル

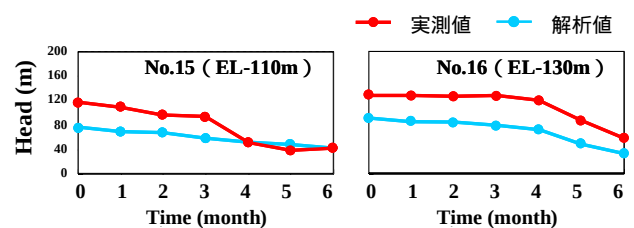


図-6 間隙水圧の実測値と解析値の比較(OK)

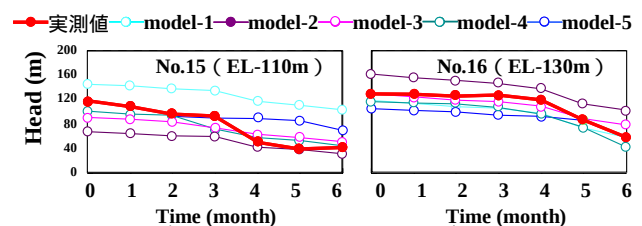


図-7 間隙水圧の実測値と解析値の比較(SIS)

ここでこのモデルを用いて、間隙水圧が経時観測されている他の2地点（No.5, 20孔：図-2参照）での間隙水圧を予測したものが図-9である．本図にはOrdinary Krigingモデルを用いた予測結果も併せてプロットしている．実測値と解析値がよく一致していることがわかり、同定したモデルの適用性が高いことが分かる．なお、Ordinary Krigingモデルを用いた予測結果はやや低い値を示している．

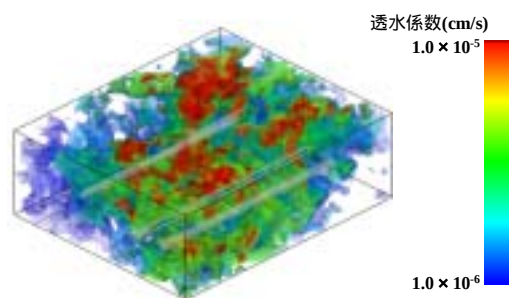


図-8 SISと浸透流解析を基に同定された透水係数分布(等数値面図)

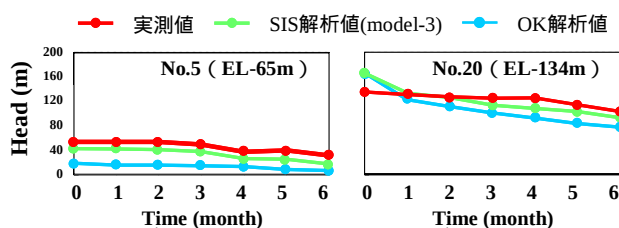


図-9 間隙水圧の実測値と解析値(SIS, OK)の比較

5．結論

本研究では、建設中のLPG地下備蓄基地において、地下水制御を主目的とする情報化設計施工システムの一環として構築した地球統計手法と浸透流解析をベースとする3次元水理地質構造の新しいモデル化システムを提案した．このモデル化システムでは、透水係数の統計的な関連性（空間的な相関関係）に加えて、地下水位の挙動（間隙水圧変化）に対しても高い適合性を有するように、地球統計学シミュレーションと浸透流解析手法をベースとしている．このシステムを用いて実際の水理地質構造をモデル化したところ、地下水挙動および水理特性とその変化を高い精度で予測できることが明らかとなり、水封機能の評価に必要な高精度の水理地質モデルの構築とそれに基づく地下水制御の実施に有効であることが示された

参考文献

- 1) Wackemagel, H.: Multivariate Geostatistics, Springer, 1995.
- 2) Chiles, J.P.: Geostatistics, Modeling Spatial Uncertainty, Wiley Inter-Science, 1999.

THREE-DIMENSIONAL HYDROGEOLOGICAL MODELLING AROUND THE LARGE ROCK CAVERN FOR THE LPG STORAGE PROJECT

Kenji AOKI, Yoshitada MITO, Chuan Sheng CHANG, Haruhiko UNO
and Toshio MAEJIMA

A three-dimensional hydrogeological modelling method for large LPG storage projects is developed in order to predict hydraulic behaviors around the cavern precisely for the observational design and construction from a hydrogeological point of view. The geostatistical technique is employed to deal with a large amount of the spatial data that can be obtained at each stage of the project. Furthermore a new hybrid modelling method considering geostatistical and hydrogeological correlations between a pair of spatial data at different locations is proposed to obtain a geostatistically and hydrogeologically relevant model.