# 地球統計学的シミュレーションを用いた大規模 LPG岩盤タンクの3次元水理地質モデルの構築

青木 謙治<sup>1\*</sup> · 水戸 義忠<sup>1</sup> · 張 傳聖<sup>1</sup> · 林 達也<sup>1</sup> · 宇野 晴彦<sup>2</sup> · 前島 俊雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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)
 <sup>2</sup>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)
 <sup>3</sup>(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すること で、大規模空洞周辺の地下水挙動を高精度に予測できることが明らかとなり、気密性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

近年,地下構造物の建設分野においては,建設プロジ ェクトの計画段階から建設段階そして保守段階に至るま で,多岐にわたる調査および計測が実施される傾向にあ り,そのため力学特性や透水特性等の岩盤特性に関する データはその種類,量ともに増大している.建設プロジ ェクトを安全かつ合理的に進めていくにあたっては,時 間・空間的広がりをもったこれらの大量のデータを適時 解析処理し,その結果をもとに設計・施工の更新を図る ことが重要である.

ここで,建設プロジェクトを合理的に進めていくにあ たっては,このようなデータの拡充に伴い随時モデルを 更新していくことで,現実の水理地質構造をより高精度 に表現できるモデルを構築していくことが重要である.

そこで本研究では、実際に現在建設中である水封式の LPG地下備蓄基地を研究対象として、地球統計学的シミ ュレーションと3次元浸透流解析を組み合わせることで、 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、サイトスケール及び構造物周辺の岩盤 内の地下水挙動を高精度に評価することが可能な3次元 水理地質モデルを構築した. さらに、本研究で用いた水 理地質モデルの構築法を基に、地下構造物の建設プロジ ェクトにおける3次元水理地質モデルの構築システムを 提案した.

# 2. サイトの概要

対象とするLPG地下備蓄基地の透視図を図-1に示す. このLPG地下備蓄基地では,花崗岩部の堅硬で緻密な岩 盤内に45万トンのブタン・プロパン貯蔵タンク(底盤深 度:EL-180m)を建設し,LPガスを貯蔵する計画である. 施工手順としてはまず,地表から約12~13%の斜坑で作 業トンネルをEL-125m(水封トンネル設置深度)まで掘 削する.次に,岩盤に給水する水封トンネル(底盤深 度:EL-125m)および水平・鉛直水封ボーリングを地下 の貯蔵施設上部に掘削し,地下水圧の安定化を図るため のウォーターカーテンを設置する.その後,掘削に伴う 周辺岩盤の水理挙動を常に計測・制御しながら,岩盤貯 槽を掘削する.



図-1 研究対象とするLPG備蓄基地の施設鳥瞰図

# 3. 地球統計学手法と浸透流解析を用いた3次元水 理地質モデルの構築

#### (1) 水理地質モデル構築法の概要

本研究では、地球統計学手法を用いることによって 岩盤の透水性を3次元的に評価することができる水理地 質モデルを作成する.モデル作成にあたっては、地球統 計学シミュレーションの一方法であるSequential Indicator Simulation (SIS)を用いる.このSISにより得られた複数の Realizationをそれぞれ3次元浸透流解析モデルに適用させ 浸透流解析を行い、3次元有限体積法により、トンネル の掘削に伴う間隙水圧の変化をシミュレートする.そし てシミュレーション結果を間隙水圧の実測値と比較する ことで、複数のモデルの中から、実際の間隙水圧変化を 最適にシミュレートしたモデルを施工時期までにおける モデルとして一つ同定することで、岩盤の水理特性を合 理的に評価した水理地質モデルを構築する.

#### (2) SISによる岩盤水理特性の推定

地球統計学手法の中で最も一般的に用いられている Ordinary Kriging は、推定値の空間分布を平滑化させるこ とになり、Ordinary Krigingは大局的な岩盤の透水性を定 量的に評価するにあたっては至便であるが、局所的な水 理特性を精度良く推定するにはやや不向きであるといえ る. そこで本研究では、地球統計学的シミュレーション SISにより、水理地質構造の局所性を合理的に評価する ことを試みた.SISの大きな特徴として、乱数列によっ て推定位置を決定する点と、既に求めた推定値を次の推 定に用いる点が挙げられる.よって,異なる乱数列を用 いてSISを行うことで、多様な様相を呈するRealizationが 複数得られることがわかる. このRealizationは, 推定値 どうしの関係性も考慮に入れて空間構造をモデル化して いるため、平滑化効果の影響を最小限に抑えることがで き、データ間の空間的ばらつきを合理的に評価できると いった特徴を持っている.尚、本研究では50個の Realizationを作成した.

#### (3) 3次元浸透流解析による水理地質モデルの同定

ここでは、SISにより構築した複数のRealization を用い て3次元浸透流解析を行うことで、トンネルの掘削に伴 う間隙水圧変化のシミュレーションを行う.

#### a) 3次元浸透流解析の方法

本研究で行う3次元浸透流解析には、有限体積法を用いる.計算の手順は次の通りである。解析条件として、 Realizationの透水係数値を立方体の中心のグリッドに配置し、透水係数の推定値結果に見られる不均質な透水特性を反映させた解析モデルを作成する.また、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.以上の条件のもと、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3 次元浸透流解析を行う.解析手順を以下に示す.

①現場において計測されている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.

②解析期間を30日とし、非定常浸透流解析を行う.
③解析結果を次の解析のための初期条件とし、さらに現場の湧水量を参照に、①の手法により流量境界条件を更新する.

④②,③の作業を繰り返す.

#### b)シミュレーションと水理地質モデルの同定

SISにより作成した計50通りのRealizationを透水係数値 に設定した浸透流解析モデルを作成する.そしてそれぞ れのモデルに対して,水封トンネル掘削期間における間 隙水圧変化のシミュレーションを行う.

次に、50通りのモデルから求めたシミュレーション結 果を間隙水圧の実測値と比較することで、実際の間隙水 圧の挙動を最も高い精度でシミュレートしている最適な モデルを決定する.本研究においては、図-2に示した5 箇所の間隙水圧センサーにおいて得られたデータを基に 比較を行った。

図-3は、間隙水圧の実測値と5つのSISモデルの間隙水 圧のシミュレーション結果を比較した図である。なお、 50ケースを同時にプロットすると煩雑になるため、本図 には、5つのケースを代表例として示している。

本図を見ると、いずれのSIS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ものの、モデルによっ てその値にばらつきが生じていることがわかる.

本研究では、これらのシミュレーション結果と実測値 との標準誤差を計算し、実際の間隙水圧の変化を最も高 い精度でシミュレートしているモデルを水封トンネル掘 削段階における水理地質モデルと同定した.このモデル の透水係数分布を3次元的に等数値面で表した図を、図-4に示す.ここで、無色の部分は透水係数が10<sup>6</sup>cm/s未満 となる部分である。





図-3 間隙水圧の実測値と解析値の比較

## 4. 水理地質モデルの有効性の検討

ここでは、上記の3.の方法によって構築した水理地質 モデルの有効性を検討するために、水封トンネル掘削段 階で構築したモデルを用いて、貯槽掘削に伴う間隙水圧 変化をシミュレートし、貯槽掘削により新たに得られた 間隙水圧の実測値と比較を行う.

水封トンネル掘削段階における水理地質モデルに対し て、貯槽掘削期間(2005年4月~2006年3月末)における 間隙水圧変化のシミュレーションを行い、シミュレーシ ョン結果と実測値と比較したものを図-5に示す.

全体的に実測値と解析値が一致した結果が得られたこ とにより、モデルの有効性を示すことができた.ただし、 センサーの位置が深度130mといった水封トンネルの深 度より下方に存在する一部のボーリング孔において、実 測値と解析値は水圧変動の傾向が合っているものの、値 はやや乖離している結果が得られた.この原因として, このモデルを作成するにあたり用いたデータに水封トン ネルより下の深度,つまり125m以深のデータがほとん ど含んでいないため,精度がやや低くなったものと考え られる.



図-4 水封トンネル掘削段階における水理地質モデル



図-5 間隙水圧の実測値と解析値の比較

## 5. モデルの高精度化

ここでは、貯槽掘削に伴い新たに得られた現場データ を用いてモデルの高精度化を行う.

まず、貯槽掘削に伴い新たに得られた透水係数データ を加えて、SISを用いることでモデルの更新を行う.こ のモデルをもとに浸透流解析を行うことで、貯槽掘削期 間における間隙水圧変化をシミュレートする.そして、 50通りのモデルから求めたシミュレーション結果を間隙 水圧の実測値と比較することで、実際の間隙水圧の挙動 を最も高い精度でシミュレートしている最適なモデルを 同定する.図-6に、同定したモデルから求めた解析値と 実測値を、先ほどと同じ3つのボーリング孔において表 示した前項において同定した水封トンネル掘削段階にお けるモデルを用いた場合の解析結果も同時に示してある.

貯槽周辺の透水係数データを加えてモデルを更新した 貯槽掘削段階におけるモデルの方が, 誤差平均が小さく なった.特に125m以深のセンサーにおける乖離が小さ くなり, 貯槽周辺の透水試験データを拡充したことによ り,モデルが更新され,実際の岩盤の水理地質構造をよ り高精度に反映できたと推察される.

## 6. 貯槽周辺モデルの構築

これまでは、サイトスケールの水理挙動を解析するた めの水理地質モデルを構築してきたが、ここでは、貯槽 周辺の詳細な間隙水圧の変化をシミュレートするための セクターモデルを構築する。

セクターモデルの寸法は、図-7に示すように、2つの プロパン貯蔵タンクを中心とする600m(縦断方向)× 140m(横断方向)×76m(深度方向)の領域にモデルを 構築する。この領域に4m間隔の立方体グリッドを設定 し、SISによる50個のRealizationを作成し、浸透流解析に よりモデルを同定する。図-7には、計測断面における間 隙水圧センサーの位置を同時に示してある。5断面の計 測断面のうち、3断面(x=150,360,540m)の計測結果を 用いてモデルを同定し、他の2断面(x=200m)の計測結 果を元にモデル化手法の適用性を検討した。

図-8は、間隙水圧の実測値と、最終的に同定されたモ デルを用いたときの解析値とを比較したものである。本 図を見ると、解析値は、実測値を高精度に近似している ことがわかる。



図-6 間隙水圧の実測値と解析値の比較



図-7 モデルの領域と間隙水圧センサーの位置



図-8 間隙水圧の実測値と解析値との比較

## 7. おわりに

本研究では、実際に現在建設中である水封式のLPG地 下備蓄基地を研究対象として、地球統計学的シミュレー ションの一手法であるSequential Indicator Simulation (SIS)と 有限体積法による3次元浸透流解析を組み合わせること で、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、サイトスケール及び構造物周辺の 岩盤内の地下水挙動を高精度に評価することが可能な3 次元水理地質モデルを構築した.

## DEVELOPMENT OF THE THREE-DIMENSIONAL HYDRO-GEOLOGICAL MODELLING METHOD USING GEOSTATISTICAL TECHNIQUES

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

In this study, the authors try to develop a three-dimensional hydro-geological modelling method for underground cavern in order to predict the hydraulic behaviors around the opening accurately. The geostatistical technique is employed to integrate widely spread spatio-temporal data at each stage of project. In this study, the sequential indicator simulation (SIS), one of the widely applied geostatistical simulation methods, is implemented to estimate the hydraulic conductivity. By SIS method, different realizations of hydraulic conductivity distribution are generated from a series of random numbers. Then all the generated models are verified by Finite Volume Method based numerical simulations, the most relevant model is identified by comparing the measured and the computed values of pore pressure at the specific positions. The comparison results show that the relevant model simulates the hydraulic behavior with high performance. As the results of the examination, the author achieves to propose a system to realize the observational construction from hydrogeological viewpoint for construction of underground facilities.