

不均質場における地下水流動の不確実性評価手法の開発(その3)

- 3次元展開 -

前田建設工業株式会社 正会員 ○野本 康介 正会員 吉野 尚人 正会員 松井 幹雄
核燃料サイクル開発機構 非会員 澤田 淳 正会員 武部 篤治

1. はじめに

著者らは、透水係数の不確実性が地下水流動解析結果に与える影響を定量的に評価するため、確率有限要素法による浸透流解析^[1]に基づく特定移行経路における移行距離の不確実性評価手法(以下、確率解析法)の開発を進めてきた^[2]。また、構築した確率解析法の有効性を検討するために、モンテカルロ法による解析手法との比較検討を行ってきた^[3]。これらは2次元の解析領域を対象としており、確率解析法を実際の地質環境へ適用する場合には、現地調査における複数のボーリングなどの3次元的なデータを反映し、地下水流れの不確実性を3次元で評価する必要がある。本報では、2次元版と同じ解析機能に奥行き方向の処理を加えて3次元化した確率解析法プログラムに移行到達時間の不確実性評価法を追加するとともに、事例的に行った解析結果を報告する。

2. 移行到達時間の定式化

既往の研究^[2]では指定した時間に対する地下水移行到達点の期待値と分散を定式化した。本報では、地下水移行経路情報のもう一つの指標として、地下水流れによる移行開始点から指定断面までの到達時間(以下、移行到達時間)の期待値と分散についても定式化を行った。なお、確率解析法における移行到達時間の期待値 $E[t]$ と分散 $Var[t]$ は、線形一次近似理論に基づいた場合、下式で表される。

$$E[t] \cong \sum_{e=1}^{N_e} \left(\frac{\Delta X_{<e>}}{v_{x<e>}} \right)_{(\alpha=0)} \quad (1)$$

$$Var[t] \cong \sum_{m=1}^M \left[\left\{ \sum_{e=1}^{N_e} \left(\frac{\Delta X_{<e>}}{v_{x<e>}^2} \frac{\partial v_{x_{<e>}}}{\partial \alpha_{m_{<e>}}} \right)_{(\alpha=0)} \right\}^2 Var[\alpha_m] \right] \quad (2)$$

ここで v_x は指定断面へ向かう方向の要素内の流速、 ΔX は指定断面に向かう方向の要素の長さ、 α は $m=1 \sim M$ 個の確率変数、添字 $<e>$ は移行中に通過する $e=1 \sim N_e$ 個の要素を表す。

3. 事例解析の諸条件等

事例解析に用いた諸条件を表-1に示す。

解析対象領域は、MIU-3号孔の標高0[m](上端から220[m]下がり)地点をX,Y,Z軸の原点とし、各軸を図-1に示すように定義した。

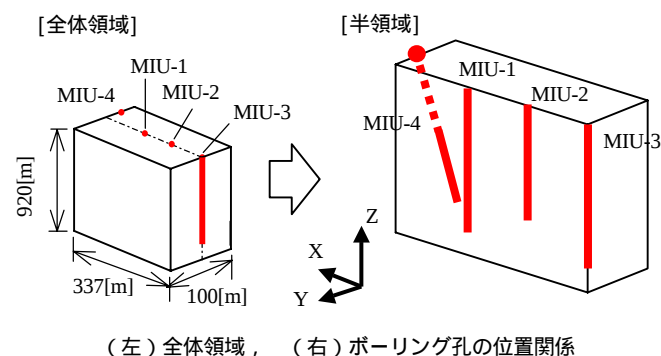
クリギングにより推定した透水係数の期待値の分布と、確率有限要素法で求めた流速の期待値ベクトルの概要を図-2に示す。

4. 解析結果と考察

確率解析法を組み込んだ3次元プログラムによる解析結果の一例として、MIU-3号孔の

表-1 解析の諸条件

解析対象領域	MIU-1～3号孔 ^[4] を中心断面に、MIU-4号孔 ^[5] の孔口を領域端に含んだ3次元領域
透水係数の推定方法	クリギング
要素分割	1要素は約10[m]の直方体($X_{33} \times Y_{10} \times Z_{92}$ 等分割)。要素総数=30,360
水理境界条件	X_{max} : MIU-4号孔の水頭平均値199.0[m] X_{min} : MIU-3号孔の水頭平均値213.9[m] 底面(Z_{min})・側面(Y_{max}, Y_{min}): 不透水境界
モンテカルロ法の試行回数	1,000回
移行開始点	(x, y, z) = (0, 0, -200[m])



(左) 全体領域, (右) ボーリング孔の位置関係

図-1 解析対象領域の概要

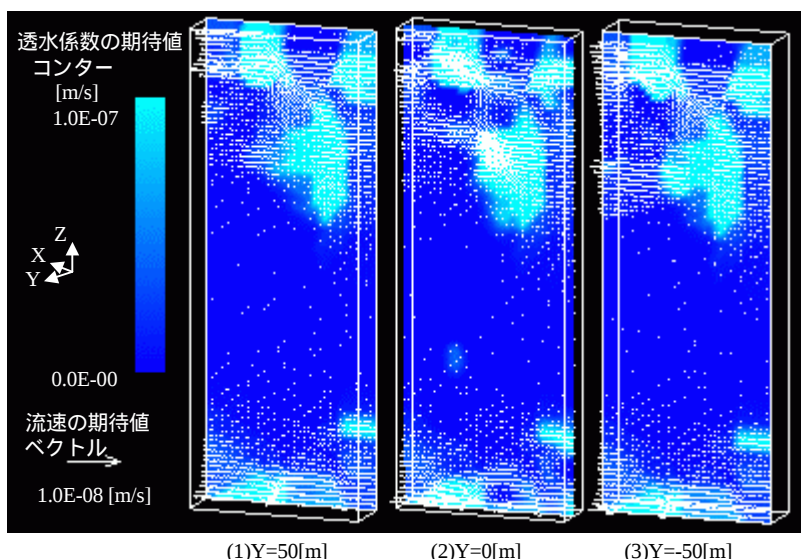
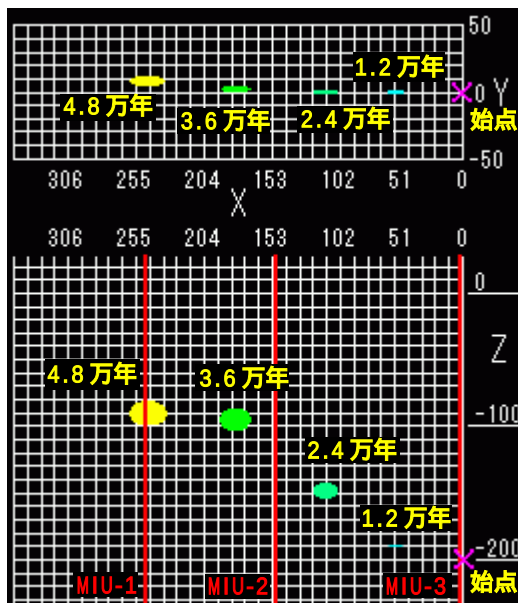


図-2 透水係数の期待値コンターと流速の期待値ベクトル

キーワード：不確実性評価，クリギング，確率有限要素法，モンテカルロ法，地層処分

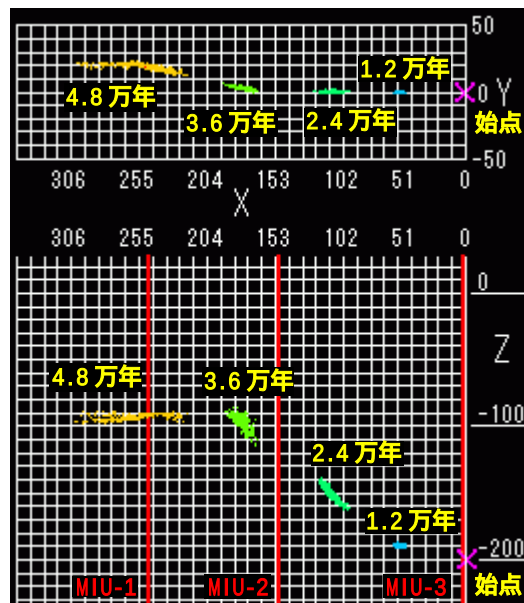
連絡先 〒179-8903 東京都練馬区高松 5-8 J.CITY 電話 03-5372-4750 FAX03-5372-4768

標高-200[m]地点((x,y,z) = (0,0,-200[m])) を移行開始点とし, 1.2 万年 ~ 4.8 万年後における移行到達点を算定した結果を図-3 に示す。移行到達点のバラツキは標準偏差 σ (= (分散)^{1/2}) の3 倍を軸に持つ楕円で表した。また, 確率有限要素法により求めた各要素の流速の期待値と標準偏差に対し, モンテカルロ法を適用して求めた移行到達点の分布 (試行回数 1,000 回) を図-4 に示す。両者はほぼ近い領域を表していることがわかる。



(上) 平面(XY)図, (下) 立面(ZX)図

図-3 確率解析法より求めた移行到達点範囲 (期待値 $\pm 3\sigma$)



(上) 平面(XY)図, (下) 立面(ZX)図

図-4 モンテカルロ法より求めた移行到達点分布

図-5 に確率解析法とモンテカルロ法で算定された移行経路長の期待値の比較を示す。両解析法による結果はほぼ等しいことがわかる。また, 図-6(a) ~ (c)に両解析法による X,Y,Z 方向それぞれの標準偏差の比較を示す。4.8 万年後では X 方向の流速が急激に増加する領域に入るため X 方向の標準偏差に違いが見られるものの, それ以外は両解析法でほぼ等しい値である。

図-7 に両解析法による指定断面 (X 軸に直交する YZ 平面) に対する移行到達時間の結果比較を示す。両解析法の期待値はほぼ等しいことがわかる。標準偏差も若干の差はあったもののほぼ等しい値である。

5. おわりに

確率解析法を組み込んだ 3 次元プログラムを構築した。また, 地下水移行時間の期待値と分散についても定式化を行った。確率解析法による事例検討を行い, 移行到達点と移行到達時間の期待値と標準偏差を流速の統計量を用いたモンテカルロ法と比較した結果, 両者はほぼ等しいことを確認した。今後は実際の地質環境データを用いた適用事例を蓄積してゆく予定である。

・謝辞: 本研究を進めるにあたり, 核燃料サイクル開発機構東海事業所処分研究部システム解析グループ内田雅大氏に貴重な意見を賜った。末筆ながらここに記し謝意を表す。

・参考文献: [1] 嶋田三朗ほか(1990): “浸透流確率有限要素法”, 前田技術研究所報 VOL.30, pp25-34. [2] 吉野尚人ほか(2004), “不均質場における地下水流動の不確実性評価手法の開発 - 特定移行経路における移行距離の不確実性評価 -”, 土木学会第59回年次学術講演会, CS1-020,2004. [3] 吉野尚人ほか(2005), “不均質場における地下水流動の不確実性評価手法の開発 (その 2) - モンテカルロ法との比較検討 -”, 土木学会第60回年次学術講演会 [4] 核燃料サイクル開発機構(2001): “超深地層研究所計画の現状-平成8年度~平成11年度-”, JNC TN7400 2001-001. [5] 核燃料サイクル開発機構(2002): “超深地層研究所計画 年度報告(平成13年度) (研究報告)”, JNC TN7400 2002-004.

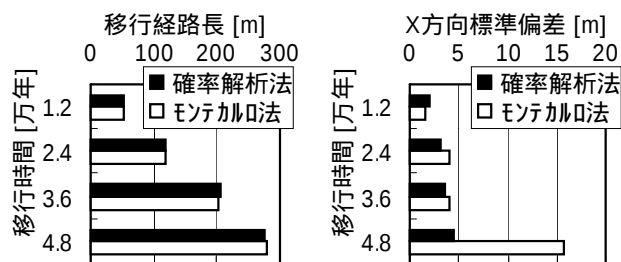


図-5 移行経路長期待値の比較

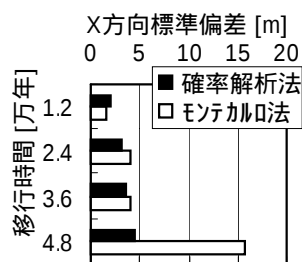


図-6(a) X 標準偏差の比較

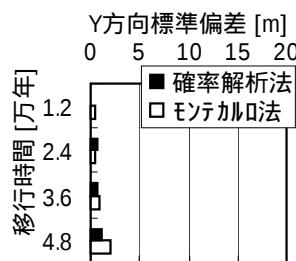


図-6 (b) Y 標準偏差の比較

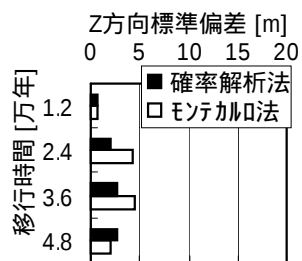
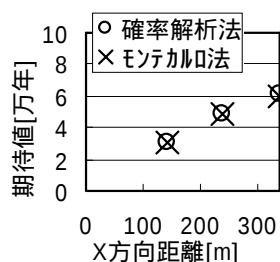
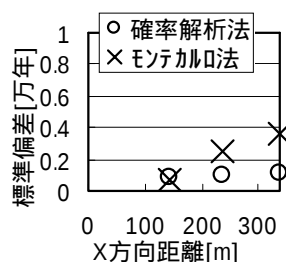


図-6 (c) Z 標準偏差の比較



(1) 移行到達時間の期待値



(2) 移行到達時間の標準偏差

図-7 移行到達時間の結果比較