

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 -

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

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価では、時間経過に伴う地質環境条件の変化や天然の地質が有する不均質性、あるいは理解や情報の不十分さから生ずる不確実性が内在し、それらを完全に除去することは困難である。そのため、種々の不確実性要因を適切に安全評価に取り込み、それら不確実性要因が安全評価に及ぼす影響を定量的に評価することが重要である。^[1]一般に地下水流動解析に供する離散化された数値モデルを構築する場合には、限られたデータから対象領域の地質構造やパラメータ値などを設定する必要があることから、上記の不確実性を適切に評価して定量的な安全評価をする必要がある。本研究では、地下水流動解析に付随する不確実性およびそれが安全評価に及ぼす影響を定量的に評価するため、クリギング^{[2][3]}による透水場設定と確率論的有限要素法による浸透流解析^[4]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を構築した。

2. 浸透流解析に伴う不確実性評価手法の概略

本研究で開発した不確実性評価手法の概略的な流れを以下に示す。

既知の透水係数などのデータを分析し、確率場を推定する。未知領域を要素分割し、各要素の地層をインディケータクリギングにより推定する。なお、インディケータクリギングは、各地層をカテゴリ化し、推定領域の地層別出現確率を求めることで地層を推定することができる。地層ごとに未知領域の透水係数の期待値とその分散をオーディナリークリギングにより推定する。推定した透水係数の期待値とその分散を使用して、線形一次近似理論に基づく確率論的有限要素法浸透流解析により水頭、流量、流速とそれらの分散を推定する。

推定した流速ベクトルのバラツキをもとに、特定移行経路における移行距離の不確実性を評価する。

なお、流速などの期待値とその分散を求める同様な手法としてモンテカルロ法によるシミュレーションがあるが、確率論的有限要素法はモンテカルロ法と比較して計算時間が大幅に短縮でき、大規模な問題にも有効であると考えられる。

3. 地下水流れ到達点の不確実性評価方法の概略

ここでは、確率論的有限要素法に基づいて、著者らが考案した特定移行経路における移行距離の不確実性評価方法について説明する。

いま、図-1 に示すような空間において位置 O にあった地下水が時間 t だけ移行した後の位置を P とする。位置 O を原点として図-1 に示すように x, y 軸をとると、位置 P の座標 (X_t, Y_t) は次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} X_t \\ Y_t \end{Bmatrix} = \int_0^t \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} dt \quad (1)$$

まず、0～t を微小な時間間隔 Δt で N_t 等分 (Δt = t / N_t) すれば、式(1)右辺の時間積分は次式に示すように、離散化された総和式で近似できる。

$$X_t = \int_0^t v_x dt \cong \Delta t \sum_{i=1}^{N_t} v_{x((i-1)\Delta t)} \quad (2)$$

いま、解析対象領域を有限要素で分割し、各要素の透水係数は各々の期待

値が 0 である M 個の確率変数 $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M\} \equiv a$ で表されるものとする。ある一つの要素 e 内では、地下水の流速ベクトルおよび α に関する流速ベクトルの偏微分がそれぞれ一定であるとする、式(2)について線形一次近似理論を適

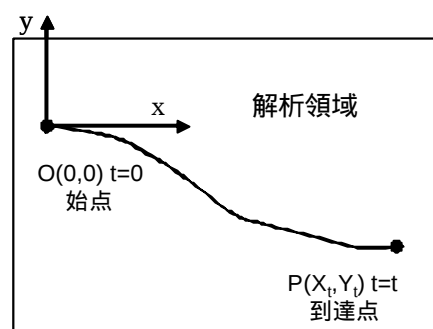


図-1 任意点からの地下水流れの模式図

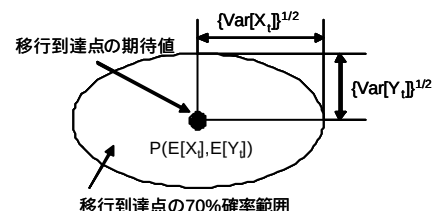


図-2 移行到達点の期待値および楕円形と仮定した 70% 確率範囲

キーワード：不確実性評価、クリギング、確率論的有限要素法、浸透流解析、地層処分

連絡先 〒179-8914 東京都練馬区旭町 1-39-16 電話 03-3977-2241 fax03-3977-2251

用することにより、 X_t の期待値と分散が以下の式で表される。

$$E[X_t] \cong \sum_{e=1}^{Ne} \{v_{x(e)} \Delta t_{(e)}\}_{(a=0)} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[X_t] &\cong \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \left\{ \sum_{e=1}^{Ne} \left(\frac{\partial v_x}{\partial \alpha_m} \Delta t_{(e)} \right)_{(a=0)} \right\} \left\{ \sum_{e=1}^{Ne} \left(\frac{\partial v_x}{\partial \alpha_n} \Delta t_{(e)} \right)_{(a=0)} \right\} \text{Cov}[\alpha_m, \alpha_n] \\ &= \sum_{m=1}^M \left\{ \sum_{e=1}^{Ne} \left(\frac{\partial v_x}{\partial \alpha_m} \Delta t_{(e)} \right)_{(a=0)} \right\}^2 \text{Var}[\alpha_m] \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 Ne は $a=0$ のときの点Oから点Pにいたる移行経路を含む要素の個数、 $v_{x(e)}$ はこれらの要素のうちの e 番目の要素の x 方向流速ベクトル成分、 $\Delta t_{(e)}$ は移行経路のうち e 番目の要素内にある間の移行時間、 $\partial v_x / \partial \alpha_m$ は e 番目の要素における α_m に関する x 方向流速の偏微分であり、確率変数どうしは互いに独立であるとした。なお、 Y_t についても同様に算出できる。ここでは、到達点Pの期待値 $\pm 1\sigma$ の予測範囲（ σ は標準偏差、点Pがこの範囲にある確率が70%）は、図-2に示すような主軸が座標軸に一致する楕円形で表されるものとした。

4. 適用例

本研究で開発した手法の適用例として、岐阜県東濃地域にある「深地層研究所計画用地：MIUサイト」[5]のMIU1～3孔のボーリングデータを使用した。MIU1～3孔の地質構造は、上部に堆積岩、下部に花崗岩が分布する。特定移行経路における移行距離の不確実性評価の一例として、MIU3孔の深度236.48m（海拔0m）を始点とし、1000年、2000年、3000年後の到達点の70%確率範囲を図-3に示す。図中の曲線は、本手法で求めた地下水の移行経路の期待値であり、背景色は流速ベクトルの分散を表している。同図より、複雑な経路を長期間にわたって地下水が移行しており、そのバラツキが推定できていることがわかる。また、到達点のバラツキは始点から離れるほど大きくなることわかる。

5. おわりに

本研究では、クリギングにより未知領域の透水係数の期待値とその分散を推定し、確率論的有限要素法に

より流速などのバラツキを評価するとともに、特定移行経路における移行距離の不確実性を評価できる手法を構築した。今後の課題として、本手法の3次元化、解析結果の検証が挙げられる。そのため、本手法の改良や適用性の向上を目的とした検討を重ね、より現実に近い不確実性評価手法を構築したいと考えている。

・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、畑中耕一郎氏、前田建設工業株式会社土木設計部、梨本裕氏に貴重なご意見を賜った。末筆ながらここに記し謝意を表する。

・参考文献：[1]核燃料サイクル開発機構(2003)：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成14年度報告—”，JNC TN1400 2003-004, pp5-57～5-60. [2]Kriging, D.G.(1952), “A statistical approach to some basic mine valuation problems in the Witwatersrand”, Journal of Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, No.53(3), pp47-64, Disc., pp64-70. [3]Clayton V. Deutsch, André G. Journel(1998): “GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide Second Edition”, Oxford University Press, New York Oxford. [4]嶋田三朗, 梨本裕, 松井幹雄, 相木克介(1990): “浸透流確率有限要素法”, 前田技術研究所報 VOL.30, pp25-34. [5]核燃料サイクル開発機構(2001): “超深地層研究所地層科学研究基本計画”, サイクル機構技術資料, JNC TN 7410 2001-009.

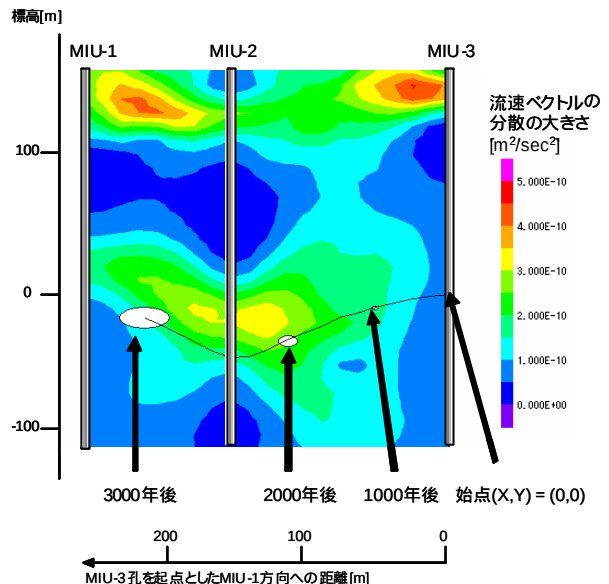


図-3 特定移行経路における移行距離の不確実性評価の適用事例