

(35) 岩盤地下水の確率統計的アプローチと浸透流解析の実測データへの適用例

STOCHASTIC APPROACH FOR UNDERGROUND FLOW IN A ROCK MASS

安藤 賢一 · Shlomo P. Neuman · 大西 有三
Kenichi Ando, Shlomo P. Neuman, Yuzo Ohnishi

Abstract

Stochastic continuum flow modeling was conducted for a fractured rock mass. Two dimensional models were used in conjunction with hydraulic conductivity and piezometric head. The boundary condition was established by ordinary kriging. One hundred realizations of hydraulic conductivity were generated conditionally sequential indicator simulation, and flow was computed numerically for each realizations. We conclude that the continuum stochastic approach is well suited for interpretation and simulation of flow in fractured rock.

1. まえがき

近年環境問題が取りざたされる中、地盤や岩盤における地下水の汚染問題がクローズアップされている。その一例として、放射性廃棄物の地下深部岩盤中への処分があげられる。その問題に関しては、放射性核種の地下水中の移行を含めた不連続性岩盤の浸透流に関する研究が国内外でなされている。

本研究は、地下水の汚染問題を扱う上で必要となる浸透流解析のアプローチとして、連続的な透水モデルを確率論的に扱うものである。対象とする媒体は、地下水の流れを把握することの困難が予想される亀裂性岩盤とする。亀裂性岩盤の浸透流解析としては、亀裂をディスク・パイプ等にモデル化するフラクチャーネットワークモデルあるいは透水係数で表現する連続体モデルが挙げられ、その解析は決定論的または確率論的に行われている。Cacasら¹⁾は、亀裂性岩盤中の地下水の移流と拡散問題をパイプによるネットワークモデルとして表現している。フラクチャーネットワークモデルにおいては、岩盤の透水係数、水頭はもちろんのこと、掘削面やコアの観察による亀裂の幅、頻度、方向等の把握が重要で、かつ複雑な亀裂から浸透経路となる亀裂の選択手順が曖昧である。また従来の連続体モデルは、比較的簡単に解析が可能であるが、割れ目系岩盤をポーラスで等価な場として取り扱うため、特性値の異方性や空間的变化が評価できない。これに対しNeumanら²⁾は、得られた透水係数を確率論的に評価した透水場を想定し、異方性や空間的变化を評価しながら、比較的簡単で亀裂等の地質データを必要とせずに岩盤中の地下水の流れを評価する試みを行っている。

そこで本研究では透水係数の実測値をもとに、クリギング手法の一つであるモンテカルロ法によるコンディショナルシミュレーションを用いた。具体的にはFEMの要素イメージを単位とした高いレゾリューション(分解能)で個々の要素に透水係数を与えることにより表現した透水場を、確率論的に同一(平均、分散

* 正会員 (株) 大林組 土木技術本部設計第二部

** アリゾナ大学 工学部 水門水資源学科 地下水モデリンググループ

*** 正会員 京都大学 工学部 交通土木工学科

の等しい)な100ケースモデル化した。さらに水頭についてはトレンドを考慮して2次の残差方程式よりクリギングを用いて境界条件を設定し、浸透流解析を行った。

2 確率統計推定法

2.1 クリギング

透水係数や水頭のように空間的にある種の相関関係が存在する場合あるいは存在すると仮定できる場合、その相関関係を利用して空間的に広がる物性値を推定する手法の一つとして、クリギングが挙げられる。クリギングでは、計測点間の距離をパラメータとした共分散関数(Covariance)を求め、推定誤差分散を最小にする最適化を行うことにより、任意の点における推定値を重み付けされた計測値の和により表すことができる。

2.2 コンディショナルシミュレーション

本研究で用いたコンディショナルシミュレーションは、計測された透水係数を基本に、同様に確からしい透水場をシミュレートする。その際計測値は、どの透水場においても拘束条件として保存される。

透水係数等の不均質かつ不連続な物性を扱う場合において、計測されたデータの不確定性を評価して、確率場としてモデル化する手法が考えられる。こうした空間的不確定性を表現する方法の一つとして、今回用いた数値実験の手法であるモンテカルロシミュレーションが挙げられる。モンテカルロシミュレーションの場合、不確定性を表現するために有意な情報を得るには、多数の確率論的に等しい確率場(平均、分散、共分散関数)を必要とする。その数についての明確な規定はなく、例えばCacasらは20個のフラクチャネットワークモデルを、Diverstorp³⁾らは30個のフラクチャネットワークモデルを対象に解析を行っている。数10個から数100個以上となる透水場の場合、膨大な計算時間と作業が必要となる。

そこで、計測されたデータを全ての透水場で既知として固定した場合、計測点を条件とした確率場においてはその不確定性が減るだけでなく、推定を必要とする未知のポイント数も減らすことができ、より現実に近い透水場をシミュレートすることが可能となる。

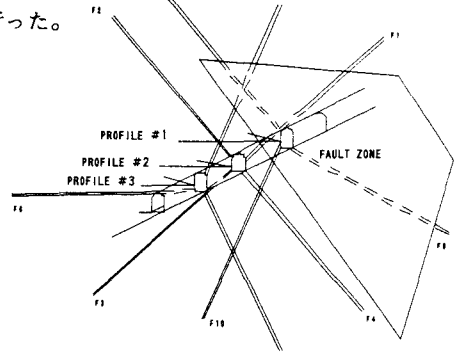


図-1 Fanay Augeres地下調査坑道及びボアホールレイアウト

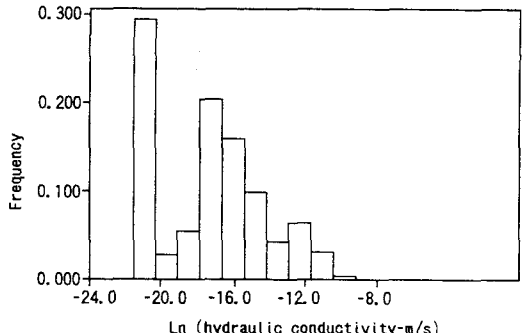


図-2 計測された透水係数のヒストグラム

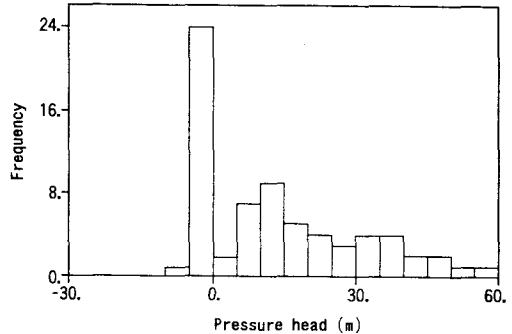


図-3 Stage-1で計測された圧力水頭のヒストグラム

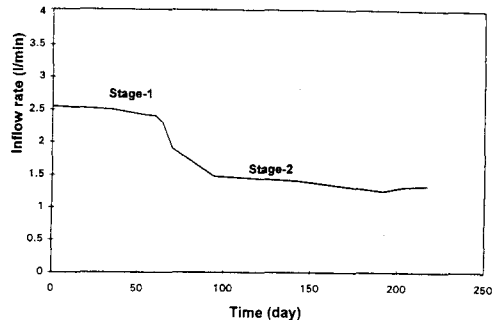


図-4 調査坑道への地下水流入量の時系列データ

3. 実測データ

本研究で解析例に使用する水理特性に関する実測データは、フランスのFanay Augeres鉱山跡の放射性廃棄物に関する地下実験施設において計測されたもの¹⁾を使用する。地下実験施設の中心となる調査用坑道は、結晶質岩系岩盤中の地表面下150m、地下水面下数メートルに位置し、長さ100m区間に10本の計測ボアホールが放射状に配置されている(図-1)。ボアホールでは水頭、透水係数を計測するとともにトレーサー試験も行われ、調査用坑道では地下水の流入量も継続的に計られている(図-2、図-3、図-4)。

このデータを用いる理由としては、1)亀裂性岩盤である結晶質岩でのデータであり長期にわたり、種々の試験が行われていること、2)Cacas¹⁾らにより3次元亀裂モデルを用いて移流拡散解析が行われ、このモデルはGelhar⁴⁾によれば現状最も良好に亀裂性岩盤を評価しているフラクチャーネットワークモデルであることが挙げられる。

4. コンディショナルシミュレーションによる透水場の設定

2・3節で述べた透水係数の確率場の数として本研究では、各確率場の任意の要素に設定した透水係数について平均・分散を算出し、80個以上の透水場においてそれらの数値がほぼ安定したため(図-5)、100個の透水場をシミュレートした。シミュレートする要素の大きさの単位としては、透水係数を測定したパッカー長を基準となる長さとし、本研究では2.5mとした。図-6および図-7にシミュレートした透水場の例を示す。2例を比較すると双方とも左下方に透水係数の低い領域が有り、右上方にもやや透水係数の低い領域がみられるが個々の要素に着目すると計測点以外の同一の要素に対して図-6と図-7で透水係数が異なっている。これら100個の透水場の個々の要素ごとに平均した透水場を参考として図-8に示す。図-8は、ほぼクリギングによって得られた透水場と考えられ、図-6あるいは図-5と比較すると明らかに平均化され不均質性が減じている。

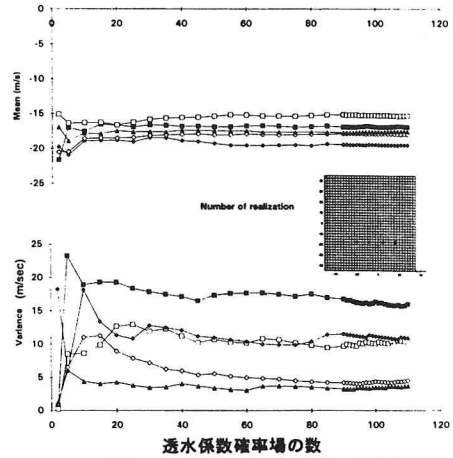


図-5 任意の要素における透水係数の平均と分散

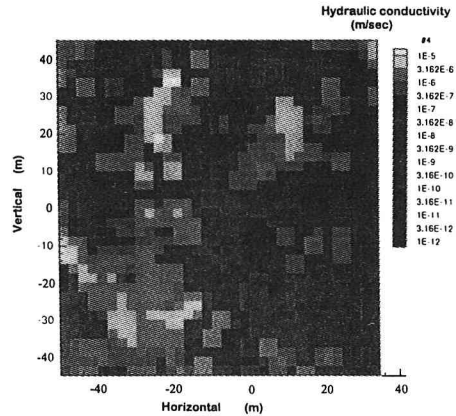


図-6 透水係数確率場 (Case-1)

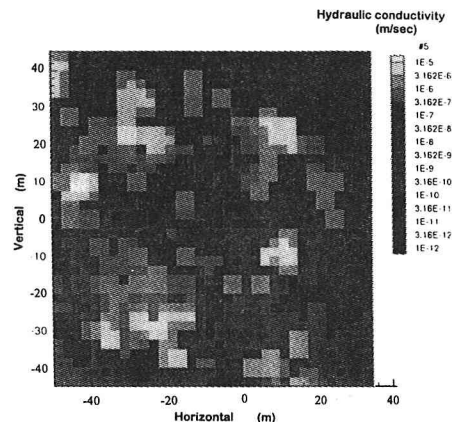


図-7 透水係数確率場 (Case-2)

5. クリギングによる境界条件としての水頭設定

浸透流解析において境界条件となる水頭は、水平方向定常流を考えた場合鉛直方向には全水頭の差はなく、水平方向にある一定の傾きが存在する等の明確なトレンドを有し、連続的な値を示す。今回のモデルにおいては、そうしたトレンドが存在すると同時に、調査坑道周辺の坑道による影響を加味して、クリギングにより境界条件となる水頭を推定した。図-2に示した流入量の時系列的变化を考慮して、Stage-1とStage-2の2段階を設定し、両者をほぼ定常状態とみなし各ステージに対して境界条件となる水頭を推定した。図-9にStage-1におけるクリギングによる推定水頭値のコンターを示す。

6. 浸透流解析結果

図-10に示す解析モデルにおいて、飽和領域のみを解析領域として第4節で得られた100ケースの透水場に対して、第5節で推定した異なった時刻の2ステージの水頭を境界条件とし、調査用坑道についても圧力水頭をゼロとした。解析コードはSUTRA⁵⁾を本研究用に一部変更したものを使用し、2次元を解析対象の次元とした。

浸透流解析を行った結果の評価項目は、計測で得られた水頭のシミュレーション結果との比較並びに計測された調査用坑道への地下水流入量と解析結果の比較の2点とする。

表-1に圧力水頭の計測値と数個の透水場における浸透流解析より得られた水頭との差を統計処理した結果を示す。一例として浸透流解析結果より図-11に計測された水頭との差をヒストグラムに、図-12にはそのスカッタープロットを示す。計測値との差は、平均して1 m強あり、平均値はStage-1が若干小さくStage-2の方が分散はやや小さい結果となった。

調査用坑道への地下水流入量に着目した場合の比較を、表-2に要約する。表の最下段における計測地下水流入量は、坑道100mの地下水湧水の総計を毎分の量で示している。また、図-13にStage-1における地下水流入量の解析結果のヒストグラムを、図-14にStage-2におけるヒストグラムを示す。Stage-1においては、平均値が10.09 ℓ/min、最小値が

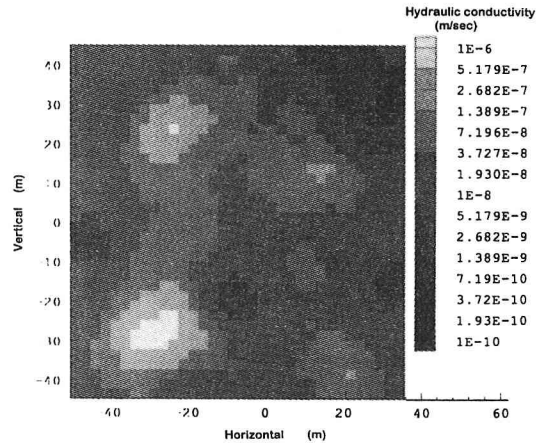


図-8 各要素の100個の透水係数確率場の平均

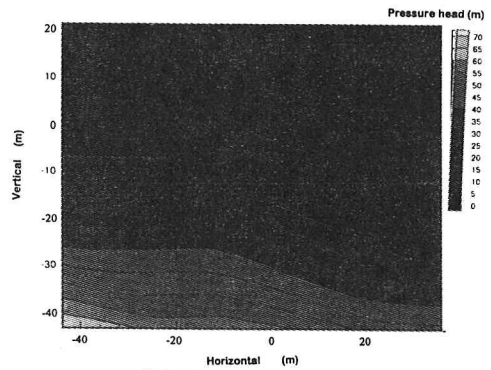


図-9 クリギングで推定したStage-1における圧力水頭のコンター (m)

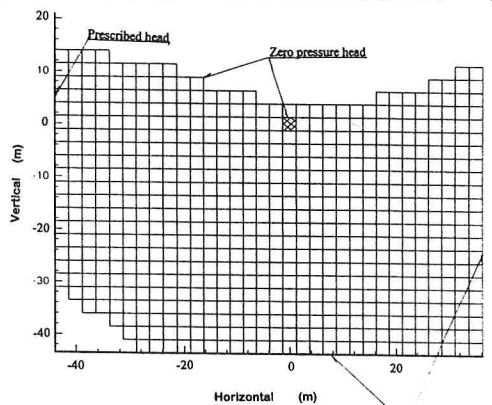


図-10 浸透流解析モデル

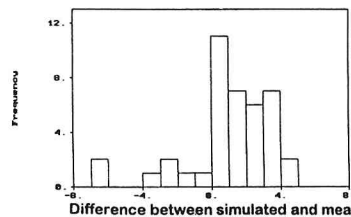


図-11 計測した水頭値-シミュレーションによる水頭値 (m)

1.57 ℓ/min、最大値34.49 ℓ/min、Stage-2においては平均値が5.97 ℓ/min、最小値が0.73 ℓ/min、最大値23.18 ℓ/min、両ステージにおいて流入量は計測値より大きくでているものの解析値の分散の中、特にヒストグラムにおける最頻度の領域に計測値が位置している。

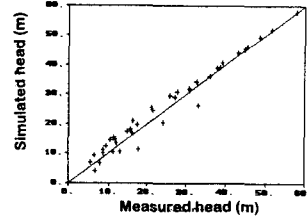


図-12 計測とシミュレーションによる水頭値比較 (m)

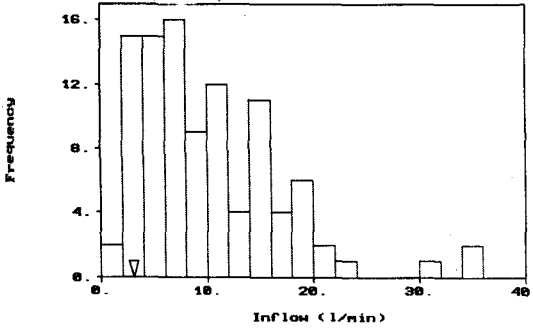


図-13 Stage-1における100個の確率場に対する調査坑道への地下水流入量 (l/min)

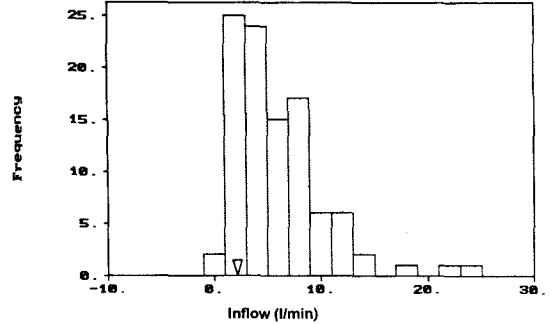


図-14 Stage-2における100個の確率場に対する調査坑道への地下水流入量 (l/min)

表-1 計測とシミュレーションによる調査坑道への地下水流入量比較

	Stage-1	Stage-2
Mean of 100 realizations	10.09	5.97
Maximum of 100 realizations	34.49	23.18
Minimum of 100 realizations	1.57	0.73
Median of 100 realizations	8.25	4.90
Mode of 100 realizations	2 to 8	1 to 5
Using geometric mean hydraulic conductivities	2.14	1.35
Measured	2.42	1.48

表-2 計測とシミュレーションによる水頭比較

Realization	#15		#18		#48		#72		#95	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Mean	1.00	1.30	1.0	1.2	1.0	1.3	1.5	1.7	1.6	1.6
Variance	4.70	2.95	6.3	2.0	6.8	1.9	1.5	1.7	5.1	3.4
Max	3.70	3.65	4.6	5.4	4.7	4.1	4.3	3.7	4.4	4.1
Min	-6.52	-4.62	-9.0	-6.8	-6.8	-4.8	-2.9	-1.7	-5.2	-3.5

7. まとめ

本研究では、亀裂性岩盤である結晶質岩中の地下水の流れを、コンディショナルシミュレーションにより非常に不均質かつ確率的に等しくシミュレートした100ケースの透水場を対象として、クリギングにより設定した境界条件により浸透流解析を行った。実測の水頭、調査坑道への地下水流入量を比較し、本研究で示した手法が不連続解析と同等以上の精度の結果を、亀裂に関する詳細な地質情報を考慮せずに行うことができた。

今後の展開としては、トレーサ試験のシミュレーションによる拡散問題への適用性、さらには今回取得された透水係数のデータが相関係数の観点から不足しているためできなかった3次元解析への適用性も含めて研究を行っていく予定である。

8. 参考文献

- 1) Cacas, M.C., E. Ledoux, G. de Marsily, A. Barbreau, P. Calmels, B. Gaillard, and R. Margritta, Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation, 1. The flow model, Water Resour. Res., 26(3), 479-489, 1990a.
- 2) Neuman, S.P., A proposed conceptual framework and methodology for investigating flow and transport in swedish crystalline rocks, Brief Position Paper submitted to SKB,
- 3) Dverstorp B. and J. Andersson, Conditional simulations of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures, Water Resour. Res., 23(10), 1876-1886, 1987.
- 4) Gelhar L. W., Stochastic Subsurface Hydrology, Prentice Hall, New Jersey, 1993
- 5) Voss, C. I., SUTRA usermanual, U.S. Geological Survey, 1984