

阪田 義隆[○] (北大理・院)・池田 隆司 (北大理)

はじめに

氾濫流や土石流が運んだ不淘汰な砂、礫からなる帯水層は、固有の透水性を有する多様な水文单元(hydrofacies)の集合として、複雑な不均質性を有する。その層厚はしばしば数 10m から 100m 以上に達し、深度方向には指数関数で近似される間隙減衰のようなトレンドが存在する(例えば Einsele 2000)。こうした非定常場としての深部方向の不均質性は、これまで調査の限界や知識の不足によってほとんど議論されてこなかったが、平面方向の不均質性と同様、帯水層全体のモデル化をする上で不可欠な情報である。

近年、高品質かつ低コストな非凍結サンプリング技術が開発され、乱れの影響を受けやすい礫質土も攪乱に近い試料として連続的に採取できるようになった。こうして得た試料は採取地点の粒径分布に加え、透水性に支配的な礫間の充填度(Kolterman and Gorelick 1995)を保存していると期待される。豊平川扇状地における既往研究(阪田ほか 2011)では、礫質土試料中の基質の充填程度の指標として"Matrix Packing Level"を導入した。すなわち、コアを基質充填度(I~IV)で分類し、単位メートル当たりコアの長さを集計し、各レベルの分布割合 L1~L4 とする。次いで充填度の高い部分(L1+L2)の透水性を多孔体モデル、低い部分(L3+L4)を亀裂モデルとして合成した透水係数モデルを提案した。このモデルパラメータは、単孔の現場透水試験結果と互いの対数値が再現されるよう、通常最小二乗法(OLS)によって推定される。

本研究では、この決定論的モデル(以下、OLS モデル)を初期ドリフトとした回帰クリギング(Regression Kriging)によって鉛直方向の不均質性の再現を提案する。

検討手法

回帰クリギング(Hengle 2007)では、誤差項の共分散構造を考慮した一般化最小二乗法(GLS)の繰り返しによって、トレンドを表すドリフト項の係数と、共分散関数とともに推定する。しかしデータの質・量が制約される実際問題では、トレンド項の共分散構造を直接的に推定することは困難である。そこで本研究では、共分散関数を指数モデルと仮定し、指数モデルのパラメータの感度解析により GLS 定数の推定を行った。用いるデータは、豊平川扇状地で得た透水試験による透水係数と、同一地点の粒径および基質充填度のデータ(合計 32 データ)である。解析ケースは、指数モデルのシル(Sill)が、繰り返し計算段階での誤差項から計算されるセミバリオグラムの平均値の場合と、最大値の場合の 2 ケースで、それぞれのレンジ(Range)

は 1, 2, 5, 10, 20m の 5 ケースを想定した。計 10 ケースに対して、10 回の繰り返し計算を行った。

非定常場のクリギングでは、外生ドリフトを用いたクリギング(外生ドリフトクリギング)がより一般的である。そこで、OLS モデルの変数である代表粒径 d_{20} (20%通過通過重量粒径)と基質充填度の割合の内、透水性への影響の大きい L_3 と L_4 の 3 変数を外生ドリフトとしたクリギングを行い、これと OLS モデルによる回帰クリギングと比較した。この場合も誤差項の共分散構造が不明なことから誤差項の共分散を指数モデルで仮定し、シルが 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 の 5 ケース、レンジが 1, 2, 5, 10, 20m の 5 ケースの計 25 ケースで比較した。なお回帰クリギングの繰り返し計算は、先の感度解析から収束が見込める 1 回とした。

最後に、OLS モデルを初期ドリフトとした回帰クリギングを用いて、帯水層基底までの鉛直透水係数分布を推定した。解析データは、扇状地中央の調査地点 BW03 において、扇状地基底(深度 2~63m)までの 1m 毎の粒径および基質充填度の割合(L_1 ~ L_4)を用いた。

検討結果

図 1 は、OLS モデルを初期ドリフトとした回帰クリギングにおけるパラメータの感度解析結果である。シルは与えるレンジによって 0.1~0.4 の値で変化するが、10 回の繰り返し計算は 1 回目の計算でほぼ収束する。GLS パラメータは、比例係数 β_1 がほぼ 1、定数項 β_0 も相対的に小さい。この値は共分散構造の Sill の設定(平均か最大か)あるいは、Range(今回 5 ケース)によらない。このことは、OLS モデルが初期ドリフト項として有効なことを示す。

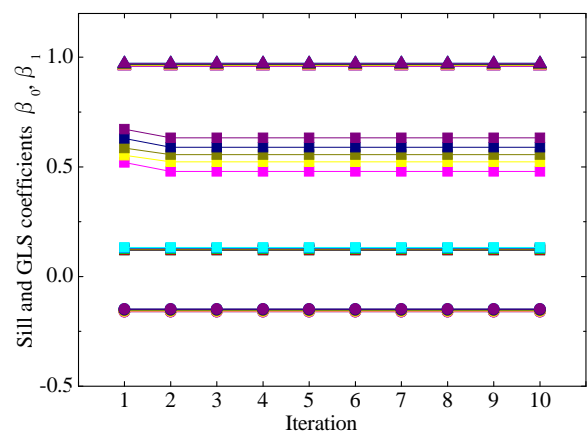


Fig.1 OLS モデルを初期ドリフトとした回帰クリギングにおけるパラメータの感度解析結果 (■:シル, ●: GLS 定数係数 β_0 , ▲: GLS 比例係数 β_1)

図2は、回帰クリギングと外生ドリフトクリギングの推定絶対誤差(a)および、推定値の予測分散(b)である。25 ケースの全体に渡って、回帰クリギングに比べ、外生ドリフトクリギングの結果の方が大きい傾向が分かる。特に、推定誤差は回帰クリギングが 1 以下 (対数透水係数では 1 オーダー) に収まるのに対して、外生ドリフトクリギングでは 2~3 以上 (2~3 オーダー) に達するものも多い。

対数透水係数のドリフトを外生変数の線形関係で表現するクリギングは、外生変数の感度が非常に高くなるため、単変数 (粒度や基質充填度の割合) そのものでなく、それを結びつけたより物理的なモデル (OLS モデル) をトレンド項の推定に適用すべきことを示している。

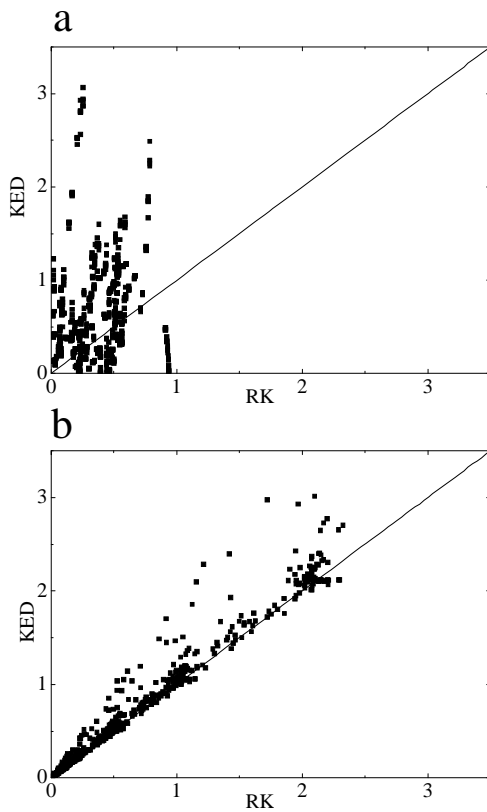


Fig.2 回帰クリギング(RK)と外生ドリフトクリギング(KED)の比較, (a)予測絶対誤差, (b)予測分散

図3は、回帰クリギングで推定した BW03 地点における透水係数鉛直分布(a)と、推定分散の内の Drift 起源と誤差項起源(b)である。深度 1m 毎で推定された透水係数は、隣接点間で 1~2 オーダーの変化で、全体では 5 オーダーに達する強い不均質性を示す。また巨視的には、深度方向に減少する傾向が認められる。これは基質充填度が深度方向により高くなる(IV,III→II,I)ことを反映している。予測分散は、大半がドリフト成分に起因するものである。このことは、礫層の透水性の支配因子が粒径と充填度の 2 つでよく表されること、OLS モデルが決定論的な物理モデルとして有効なことを示すと解釈できる。

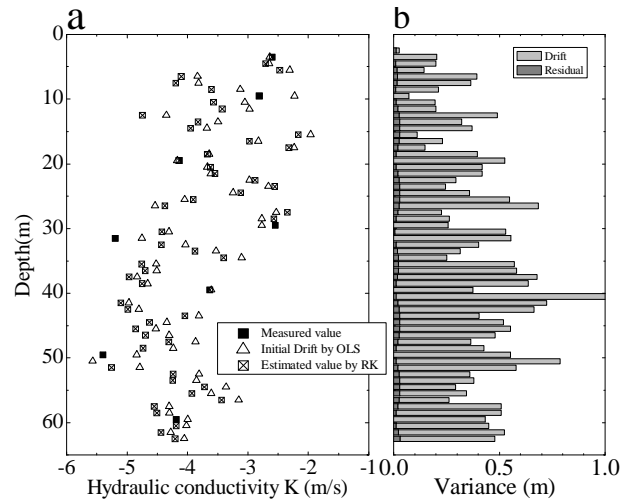


Fig.3 BW03 地点での透水係数鉛直分布(a)と推定分散の内の Drift 起源と誤差項起源(b)

総括

本研究では、扇状地礫層の鉛直方向の不均質性を再現する手法として、不攪乱試料を用いた OLS モデルを初期ドリフトとしたクリギング法を提案し、その有効性を示した。

OLS モデルは、回帰クリギングにおける収束が早い、比例係数が 1 に近似される、定数項が十分小さいことから、初期ドリフトとして極めて有効である。一方、従来の単変数の線形式をドリフトとする外生クリギングは、各外生変数の感度依存が大きくなりすぎるため、誤差が大きくなりやすい。不均質性の大きい扇状地礫層の場合には OLS モデルのような、より物理的に説明されるモデルが望まれる。

しかしながら、OLS モデルは単純化しすぎており、特に充填の乏しい部分を亀裂モデルとする妥当性に議論の余地がある。また透水試験の精度に加え、目視観測による基質充填度などデータの客観化、定量化も必要である。更には、帯水層全体へ拡張するための、平面方向との空間相関性も含めた三次元的な扱いが大きな課題となる。

参考文献

- Einsele G. 2000. SEDIMENTARY BASINS Evolution, Facies, and Sediment Budget, Second, completely revised and enlarged edition. Springer. New York; 660.
- Hengel T. 2007. A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables. JRC scientific technical reports. European Committies. EUR22904EN; 27-36.
- Kolterman CE. and Gorelick. SM. 1995. Fractional packing model for hydraulic conductivity derived sediment mixtures. Water Resources Reserch, Vol.31, No.12: 3283-3297.
- 阪田義隆, 伊藤和伯, 磯崎真一, 池田隆司. 2011. 不攪乱試料から導出される扇状地堆積物の透水係数分布モデル, 地盤工学ジャーナル, Vol.6(1); 109-119.