

◆ ダム技術特集 ◆

地盤統計学を用いたダム基礎岩盤の透水性分布推定

佐藤弘行* 山口嘉一**

1. はじめに

ダムを建設する際には、建設候補地点において様々な調査が行われる。ダムの基礎岩盤については、その力学的特性のほか、透水性に関する調査が行われる。

ダム基礎岩盤の透水性調査には一般的にボーリング孔を用いた原位置透水試験が行われるが、その最も一般的な方法がルジオントrialである。ルジオントrialは岩盤に掘られたボーリング孔にある一定圧力で水を注入し、注入された水の量から試験地点の透水性を評価する方法である。この時、ボーリング孔の設置位置は離散的であり、またその数には限りがあるため、ダム基礎岩盤全体の透水性分布を推定するためにはルジオントrial結果を基に何らかの推定手法を用いる必要がある。従来この作業は地質学的な判断に基づいて行われてきた。

一方、このようなダム基礎岩盤などの地盤において、限られた数の物理量観測値から観測値のない地点での物理量を統計的・理論的に推定する方法として地盤統計学がある¹⁾。地盤統計学は本研究で対象としている地盤の透水性の推定だけでなく、基礎地盤高²⁾の推定や基礎の支持力の推定³⁾など、様々な物理量に適用されている。

ダム基礎岩盤において、限られた数の透水性のデータから全体の透水性分布を精度良く推定することが出来れば、グラウチングを合理的かつ効率良く行うことができ、結果としてコスト縮減が達成できる。

本研究では、ダム基礎岩盤における離散的な透水性のデータからダム基礎の領域全体における透水性分布を推定するための基礎的な検討として、地盤統計学においてよく用いられる kriging をカーテングラウチング施工時のルジオントrial結果に適用し、前次数のルジオントrial結果から次の次数における施工地点でのルジオントrial値の分布を推定することを試み、その適用性の検討を行った。

2. ダム基礎グラウチングの現状と合理化に向けての課題

ダム基礎グラウチングの合理化について検討するためにはその現状を把握しておく必要がある。そこでまず初めに、本研究に関係ある部分に限定して、ダムの基礎グラウチングについて説明する。

ダム基礎グラウチングの施工においては、一般的に中央内挿法が用いられている。カーテングラウチングにおける中央内挿法の概念を図-1に示す。図-1の通り中央内挿法では、次の次数のボーリング孔は、既次数の中央に施工される。この時、施工個所の候補となる全ての地点に施工される次数孔を規定孔、施工候補の地点の中で施工が必要であると判断された地点にのみ施工される次数孔を追加孔と呼ぶ。

グラウチングの施工をどの次数で終了するかを判断するためには、グラウチングにより岩盤の透水性がどの程度低減したかを次数を追って把握する必要がある。そのための判定の指標として、一般的には遮水性に関する改良目標値に対する(非)超過確率が用いられている。図-2にその概念を示す。なお、ダム基礎岩盤におけるルジオントrial値については、一般的に対数正規確率分布を仮定することが多い⁴⁾。

図-2の①、②および③は、対数正規確率図に描いたある次数におけるルジオントrial値の超過確率の分布である。一般的にグラウチングの次数が進むにつれて遮水性は改良される(透水性は低下する)ため、次数が進むと図上の分布が下にずれてくる。

今、超過確率 15% の時の改良目標値を 5 ルジオントrial以下とする。図-2 の①と②はその基準を満た

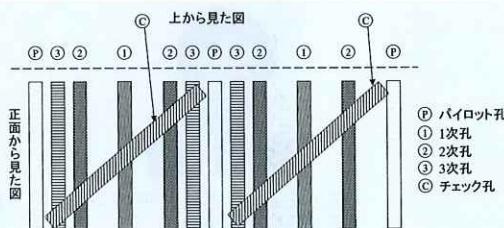


図-1 中央内挿法の概念(カーテングラウチングの場合)

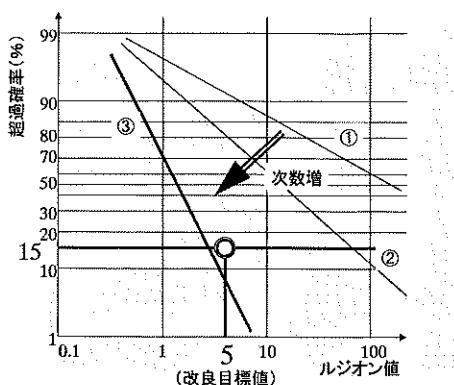


図-2 改良目標値と超過確率の概念

していないので、次の次数のグラウチングの施工が必要と判断される。図-2の③はその基準を満たしているので、所期の改良目標が達成されたと判断される。なお実施工においては、これ以外にも附加的な完了基準を設けていることが一般的であるが、基本的には超過確率の概念が用いられている。

またグラウチングは、各次数孔において、①ボーリング孔掘削による注入区間の形成、②ルジオニ試験による透水性評価、③セメント懸濁液の注入という手順をとる。

以上を踏まえて、本論文と関係のあるダム基礎グラウチングにおける透水性評価についての主な課題をまとめると以下の通りとなる。

(1) 各次数のグラウチング効果の評価が1次数遅れ、かつ同一地点の評価ではない。

パイロット孔でのグラウチングによる改良効果の評価について考える。パイロット孔でのグラウチング前のダム基礎の透水性は、パイロット孔におけるルジオニ試験により評価される。しかしその後に行うグラウチングによる改良効果は、隣接する2本のパイロット孔の中心に施工される次の次数の1次孔におけるルジオニ試験により評価される。そのため、グラウチングによる次数ごとの遮水性の改良効果の評価が1次数遅れるとともに、その評価が厳密には同一地点での変化を表したものではないことになる。ただしこの2つの課題のうち後者については、各次数孔をグラウチング領域全体に規則的に配置することでさほど大きな問題にはならないと考える。

同一地点における透水性の変化を、ダム基礎岩盤全体を対象にしてグラウチング施工前から施工完了にわたって迅速に把握することが出来れば、最も効率的なグラウチング施工位置を選定出来る

ようになり、グラウチングの合理化に大きく寄与する。

(2) 規定孔と追加孔で統計評価の母集団が異なる。

中央内挿法では、規定孔施工時には対象領域において等間隔にルジオニ試験が行われるため、当該次数孔における観測値による超過確率値から場全体の評価をしても統計的には特に問題はないと考えられるが、追加孔施工時においては改良目標値を満足しない高透水領域を対象とした局所的なルジオニ試験値しか得られないため、追加孔施工時の観測値のみから求めた超過確率値から場全体の評価をすることには問題があると考えられる。つまり、グラウチングによりダム基礎岩盤の遮水性は改良されるため、一般的には次数が進むにつれて超過確率値は減少するはずであるが、規定孔と追加孔では(さらに追加孔でも次数が異なれば)グラウチングの施工領域が異なるためルジオニ値の統計値の母集団が異なり、結果として規定孔から追加孔に変わった時にルジオニ値の超過確率値が大きくなるという逆転現象がしばしば見受けられる。

なお、ダム基礎岩盤のカーテングラウチングでは、規定孔の最終次数孔の数に比べるとかなりデータ数が少なくなるが、隣接するパイロット孔間(注入ブロック)ごとに1本のチェック孔が施工されている(図-1)。また、追加孔段階においては、指定した領域内の最終次数孔におけるルジオニ値を代表値として統計処理しているダムも見られる。このような透水性評価手法については別途検討している。

3. kriging によるダム基礎岩盤の透水性分布推定

ダム基礎グラウチングの合理化に関する基礎的な検討として、地盤統計学の基礎的なモデルである kriging により、ダム基礎岩盤の透水性がどの程度推定出来るかを試みた。また、表-2中の孔間隔は当該次数孔同士の間隔を示しており、当該次数孔終了時点での既施工の孔の間隔は1~7次孔において示している値の半分となる。

表-1 対象ロックフィルダムの諸元

流域面積	15.2km ²
有効貯水量	5,200,000m ³
基礎の地質	熔結凝灰岩
型式	中央コア型ロックフィルダム
堤高	57m
堤頂長	390m
堤体積	1,793,000m ³

表-2 ルジオン値の統計値

	次数		規定孔				追加孔				
			P孔	1次孔	2次孔	3次孔	4次孔	5次孔	6次孔	C孔	
算術平均	データ数		450	398	761	1,337	593	668	89	30	347
	孔間隔(m)		12	12	6	3	1.5	0.75	0.38	0.19	12
	平均値		10.84	7.57	3.85	3.24	4.66	6.11	6.04	4.91	2.20
	不偏分散		1495.44	596.82	290.04	151.63	12.16	8.93	19.93	8.59	3.21
	標準偏差		38.67	24.43	17.03	12.31	3.49	2.99	4.35	2.93	1.79
	超過確率15%値		49.51	32.00	20.88	15.55	8.15	9.10	10.39	7.84	3.99
	平均値		0.4073	0.2644	0.2332	0.2175	0.5448	0.7173	0.6976	0.6373	0.1999
	変換値		2.55	1.84	1.71	1.65	3.51	5.22	4.96	4.34	1.58
標準偏差	不偏分散		0.4153	0.4672	0.2909	0.2712	0.1323	0.0883	0.0833	0.0441	0.1905
	変換値		2.60	0.93	1.91	1.87	1.36	1.23	1.21	1.11	1.45
	超過確率15%値		0.6444	0.6835	0.53	0.5207	0.3637	0.2975	0.2886	0.2101	0.4008
	変換値		4.41	4.83	3.39	3.32	2.31	1.98	1.94	1.62	2.52
対象ダム	超過確率15%値		0.0517	0.9479	0.7632	0.7382	0.9085	1.0148	0.9862	0.8474	0.5995
	変換値		11.29	8.87	5.80	5.47	8.10	10.35	9.69	7.04	3.98

3.1 対象ダム

解析に用いたデータは、既設の中央コア型ロックフィルダムにおける1列配列のカーテングラウチング施工時に得られたルジオン値である。

対象ダムの諸元は表-1の通りである。また表-2に各次数におけるルジオン値の統計値を示す。なお、表-2の対数平均の変換値は、その直上の値を対数から通常の値に変換した値である。

対象ダムのカーテングラウチングでは3次孔までが規定孔でそれ以降が追加孔となっている。前述の通り、規定孔では注入対象領域全体に等間隔に施工されるが、追加孔では追加孔基準を満たす高透水部にしかグラウチングが施工されないため、規定孔と追加孔ではルジオン試験の統計値の母集団が異なる。そのため、グラウチングの次数が進むにつれて遮水性は改良されルジオン値の統計値は小さくなるはずであるが、表-2を見ると規定孔から追加孔に変わった時に一部の統計値が大きくなる逆転現象が見受けられる。しかし全体的には、グラウチングによる遮水性の改良効果により、次数が進むにつれてルジオン値の統計値が小さくなる傾向が認められる。

3.2 バリオグラム

krigingにより物性値の推定を行うためには、距離による物性値のばらつきの程度の違いを表すバリオグラムを観測値から求めておく必要がある。

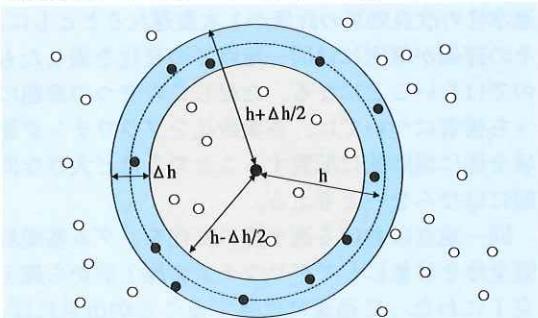
ある領域内で観測された物理量の相関が距離によってどの程度異なるかを定量的に表す指標をバリオグラムという。観測値からは、以下の式(1)によりバリオグラムが求められる。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x) - z(x+h)]_i^2 \quad (1)$$

ここで、 γ はバリオグラム、 h は相関距離、 $N(h)$ は距離が h になる観測値の組合せの数、 $z(x)$ は x における観測値である。つまり式(1)は、観測値の距離が h になる全ての組合せについて、差の二乗和の平均値を求めていることになる。式(1)により求められたバリオグラムが小さいほど物性値の相関は大きく、逆にバリオグラムが大きいほど物性値の相関は小さいことになる。また一般的には、相関距離が大きくなればなるほど観測値の相関は小さくなっていき、式(1)で表されるバリオグラムは観測値の分散に近づいて行く。

なお、実際の観測値においては、相関距離が h の観測値の組合せはあまり多くないことがほとんどである。そのため、図-3に示すように、相関距離が $h - \Delta h/2$ から $h + \Delta h/2$ の間にある観測値(図-3の○)を、相関距離が h の組合せとしてバリオグラムを求めることが一般的である。

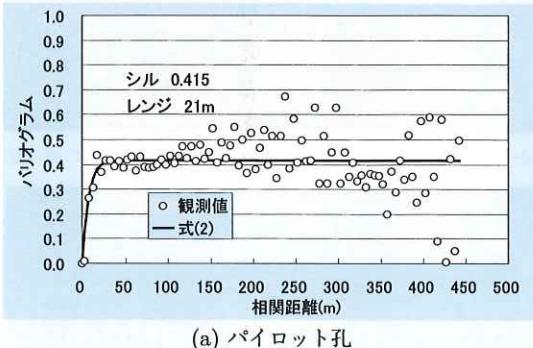
また、観測値の数は限られているため、式(1)で表されるバリオグラムのデータ数も限られており、任意の相関距離におけるバリオグラムを知ることは出来ない。しかし、krigingにより任意の距離の地点の物性値を推定するためには、任意の相関距離におけるバリオグラムを推定しなければ

図-3 バリオグラムの相関距離 h の定義

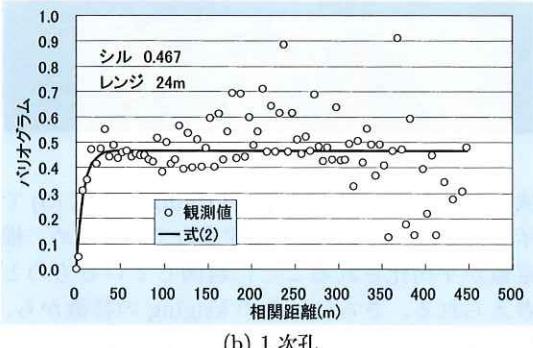
ならない。その際、一般的には観測値から求められた離散的なバリオグラムを連続関数で近似する方法が用いられる。本研究ではその連続関数として、一般的に用いられている式(2)で表される指數関数モデルを用いた。

$$\gamma(h) = \sigma^2 \left[1 - \exp \left(-\frac{3h}{L} \right) \right] \quad (2)$$

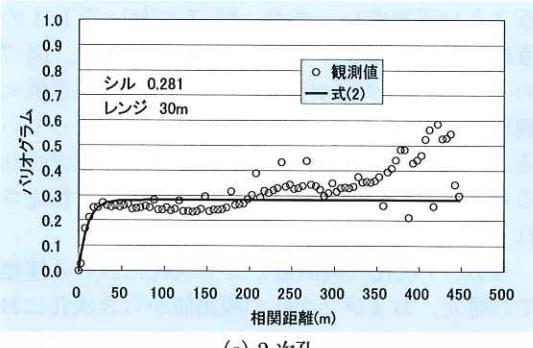
ここで、 γ はバリオグラム、 h は相関距離であり、 σ^2 はシル、 L はレンジと呼ばれている。シルは相関距離が無限遠の時の観測値のばらつきを表し、レンジは観測値が相関を有する範囲を表している。相関距離が無限遠になれば物性値は分散程度にばらつくと考えられるので、シルには観測値の分散が用いられることが多い。本研究では、



(a) パイロット孔



(b) 1次孔



(c) 2次孔

図-4 観測値のバリオグラムとその近似関数

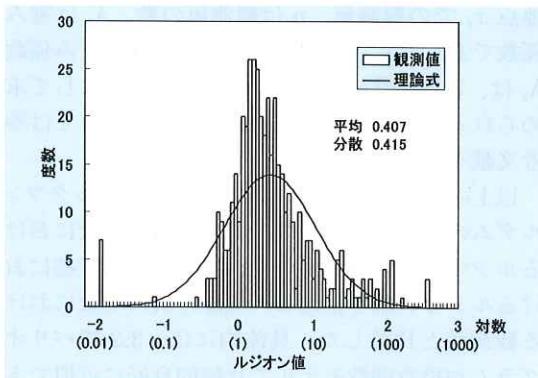


図-5 パイロット孔におけるルジオン値の度数分布

シルには観測値の普遍分散値を用い、レンジは観測点間距離が原点付近におけるバリオグラムの関数の近似の程度を重視して決定した。

図-4(a)から(c)に、対象となるダム基礎岩盤のカーテングラウチング施工時に得られたルジオン値から計算されたバリオグラムと、その近似関数を示す。なお、対象としたダム基礎岩盤においてもルジオン値はほぼ対数正規分布をなしていたので、バリオグラムは常用対数に変換して計算している。ルジオン値の度数分布図の一例として、パイロット孔の分布を図-5に示す。

図-4を見ると、パイロット孔から2次孔までのバリオグラムは指数関数モデルで比較的良好に近似出来ている。しかし図を示すを省略したそれ以降の次数では、相関距離が小さいときのバリオグラムは小さくなってしまい相関は認められたものの、指数関数モデルではあまり良く近似出来なかった。検討対象としたダムにおいては、3次孔までが規定孔で等間隔に施工されているが、4次孔以降は追加孔となり、高透水部の必要な個所でしかルジオン値が得られていない。そのため、追加孔では施工個所が局所的に限定されているために、観測値のバリオグラムが指数関数モデルでは近似出来なくなっているものと考えられる。3次孔のバリオグラムが指数関数モデルで近似出来なかった原因については検討中であるが、明確には分かっていない。

3.3 kriging の適用

kriging では、任意の物理量は式(3)で表される線形形式により推定できるものと仮定している。

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (3)$$

ここで、 $z^*(x_0)$ は地点 x_0 での推定値、 $z(x_i)$ は

地点 x_i での観測値、 n は観測値の数、 λ_i は重み係数であり、 $\sum \lambda_i = 1$ である。式(3)の重み係数 λ_i は、3.2 で得られたバリオグラムを元にして求められる。重み係数の求め方の詳細については参考文献を参照されたい⁵⁾。

以上の手法を用いて、対象となる既設ロックフィルダムのカーテングラウチングのある次数におけるルジオン値の観測値から、次の次数の座標におけるルジオン値を推定し、実際の次の次数における観測値と比較した。具体的には、3.2 でバリオグラムが指指数関数モデルで比較的良好に近似できたパイロット孔から 2 次孔までのデータを用いて kriging による推定とその適用性の評価を行った。

図-6(a) はパイロット孔におけるルジオン値の観測値、(b) はそれから推定した 1 次孔座標でのルジオン値の推定値、(c) は 1 次孔におけるルジオン値の観測値である。なお、推定はすべてルジオン値を対数値に変換して行っており、図-6(b) は推定値を対数値から通常の値に変換して示している。

図-6(a) と (c) の観測値を見ると、河床部深部に赤で示されるルジオン値の高い領域が存在していることが分かる。図-6(b) においてもその領域の範囲はほぼ推定できているものの、その色は黄色から緑色となっており、定量的には高透水部の透水性は全体的に小さく推定されている。

定量的な推定精度を確認するため、同一地点におけるパイロット孔からの推定値(図-6(b))と 1 次孔の観測値(図-6(c))を比較した図を図-7(a)と図-7(b)(常用対数値)に示す。

1 次孔の観測値では 200 ルジオン程度のかなり大きなルジオン値が存在するが、パイロット孔からの推定値は全て 50 ルジオン以下となっており、高ルジオン値の定量的な推定精度はあまりよくない。また図-6(b) は図-6(a) のパイロット孔の観測値から推定した結果なので、kriging の仮定⁵⁾から図-6(b) の平均値は図-6(a) の平均値(2.55)と等しくなり、図-6(b) の平均値は図-6(c) の平均値(1.84)よりも若干大きくなる。なお、パイロット孔間隔が 12m であるため、パイロット孔のルジオン値の平均値が 1 次孔のそれより若干大きいのが、観測地点の違いによるものなのか、グラウチングによる改良効果なのかの厳密な判断は難しい。図-6(b) の推定結果の平均値が図-6(c) の平均値よりも大きいにも関わらず、図-6(b) の推定結果が図-6(c) の観測値と比較して赤い高透水領

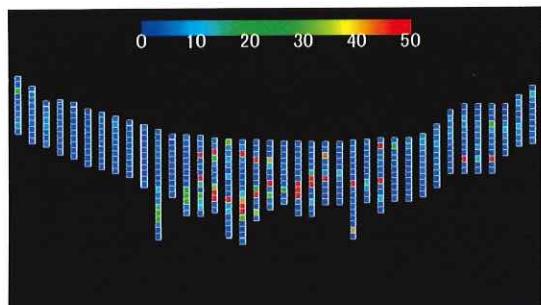


図-6 (a) パイロット孔における観測値

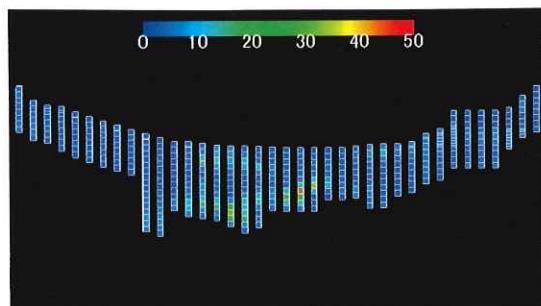


図-6 (b) パイロット孔の観測値から 1 次孔座標での推定値

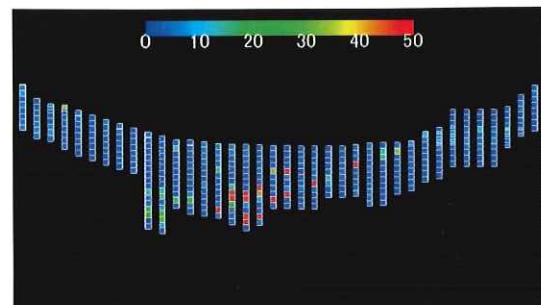


図-6 (c) 1 次孔における観測値

域が少なくなっているのは、kriging では式(3)で示される線形内挿により推定されているため、推定値が平均化されることに起因しているものと考えられる。さらに、この kriging の特徴から、kriging では孤立して存在する高透水部を抽出することは出来ない。また、図-7において 1:1 の直線の上側にあるデータ(推定値 > 観測値、図-7 の○、278 個)の方が下側にあるデータ(推定値 < 観測値、図-7 の×、120 個)よりも多くなっている。これは、相対的に大きな値が小さく推定されるのとは逆に、相対的に小さな値は大きく推定される傾向があることに起因している。

なお、1 次孔の観測値から 2 次孔における座標での推定、および 2 次孔の観測値から 3 次孔における座標での推定も行ったが、推定値が平均化される傾向に変わりはなかった。

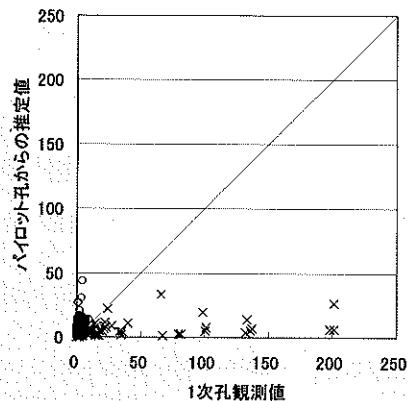


図-7 (a) 推定値と観測値の比較

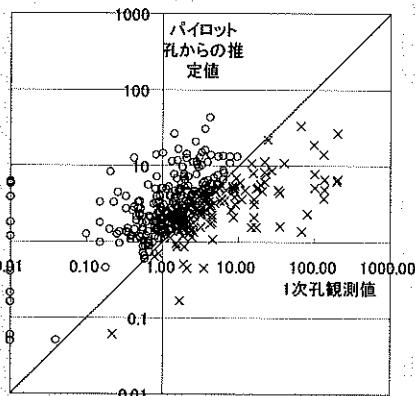


図-7 (b) 推定値と観測値の比較(常用対数値)

4. まとめ

本研究では、ダム基礎岩盤の透水性分布推定の高度化、およびグラウチングによる改良効果の評価の合理化を目的として、地盤統計学の一手法である kriging を用いて基礎的な検討を行った。それにより、以下のことが分かった。

- (1) 対象としたダム基礎のルジオン値から求めたバリオグラムから、対象ダム基礎のルジオン値の分布には距離による相関が存在する。
- (2) グラウチング領域全体にわたり等間隔に施工される規定孔については、観測値から得られたバリオグラムは指數関数モデルでほぼ近似できた。しかし、局的にしか施工されない追加孔では、観測値から得られたバリオグラムは指數関数モデルでは近似出来なかった。
- (3) kriging により、ある次数でのルジオン値の観測値を用いて、次の次数の座標でのルジオン値の分布の推定を行い、観測値との比較を行った。連続的に存在する高透水部の存在領域は比較的良く

推定出来るものの、孤立して存在する高透水部の存在は推定できず、また推定結果は定量的には平均化されることが分かった。

本研究で用いた kriging は kriging の中でも ordinary kriging⁶⁾ と呼ばれる地盤統計学の最も基本的なモデルであり、さらに精度良くダム基礎岩盤の透水性分布を推定するためには、他の手法の適用ないしは併用を検討する必要がある。地盤統計学には kriging の他にも、観測データを有効に活用するためのより高度な推定手法が数多く存在している。

また、ダム基礎岩盤の透水性分布を推定するためには、入力データとなる観測値の精度と数が重要であることは言うまでもない。そのため、今後はトモグラフィーなどの比較的広範囲を対象に得られるデータなども用いて、複数の試験から得られた観測値を有効に利用するため地盤統計学を用いた観測データの有機的な融合を図って行きたい。

さらに、本研究ではダム基礎岩盤の透水性を対象にしたが、今後は透水性以外の観測値に対しても地盤統計学による手法を適用し、ダム基礎岩盤における物性値の推定の高度化を図って行きたい。

参考文献

- 1) Clayton V. Deutsch & Andre G. Journel : GSLIB, Geostatistical Software Library and User's Guide, Second Edition, 369p., 1998.
- 2) 本多真、鈴木誠、上田稔、近藤寛通：地形情報を用いた基礎地盤面のモデル化と推定、土木学会論文集, No.561, III-38, pp.63-74, 1997.
- 3) 白木渡、恒国光義、松島学、安田登：地盤物性値間の回帰関係を利用したコクリッギングによる送電線鉄塔基礎の支持力の推定、土木学会論文集, No.582, III-41, pp.47-58, 1997.
- 4) 松田達、竹林征三、田村徳郎：ダム基礎岩盤の透水特性とグラウチング効果の評価について、大ダム, No.95, pp.30-51, 1981年3月.
- 5) 筑紫二郎、矢野友久、河野洋：砂丘地の土壤特性値の空間変動に対する Kriging 法の適用性、農業土木学会論文集, No.127, pp.35-42, 1987.
- 6) 前掲 1), pp.65-66, 1998.

佐藤弘行*



国土交通省土木研究所
ダム部フィルダム研究室
研究员
Hiroyuki SATOH

山口嘉一**



同 フィルダム研究室長、
工博
Dr. Yoshihiko YAMAGUCHI