

◆ 報 文 ◆

透水性の空間分布を考慮したダム基礎の浸透特性の検討

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として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試験である。ルジオン試験は岩盤に掘られたボーリング孔に多段階の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、ルジオン試験結果を基に地質情報などを加味して、透水性を総合的に推定する必要がある。従来この作業の多くは経験豊富な技術者の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、限られた数の観測値を有効に利用して物性値の空間分布を推定する方法として地球統計学がある¹⁾。地球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、物性値などの空間分布の推定に有効なツールとして各分野で開発が行われている。

ダム基礎岩盤における透水性の推定に関して、従来の方法は安全なダムを建設するのに十分に機能しているが、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し、さらに透水性のばらつきが浸透特性に及ぼす影響を定量的に評価できれば、透水性調査やグラウチングを合理的かつ効率的に行うことができ、結果としてコスト削減が達成できるものと考えている。

本研究では、ダム基礎岩盤における透水性のばらつきが浸透特性に及ぼす影響の検討として、地球統計学の空間分布のシミュレーション手法を用

いて、空間的な相関を有する透水係数分布を発生させ、それを入力物性値とした浸透流解析のモンテカルロシミュレーションを行い、その結果の分析から、透水係数の空間的なばらつきがダム基礎の浸透特性に与える影響についての検討を行った。

2. 異なる推定手法による空間分布の推定結果の違い

限られた観測値から物性値の空間分布を推定する時、推定結果は観測値の数や精度と並んで推定方法の影響を受ける。ここでは、透水場を対象として、空間分布の推定方法の違いによる推定結果への影響について簡単に考察する。

表-1 (a) の真の透水場から表-1 (b) のような観測値の分布が得られており、表-1 (b) の観測値 (140 点) から領域全体 (2500 点) の空間分布を推定することを考える。なお、一般的に、ダム基礎岩盤の透水係数は、統計的には対数正規分布に従うと言われているため、表-1 の平均・分散、頻度分布、バリオグラムは透水係数の常用対数として統計処理したうえで表示している。

空間分布の推定方法として一般的には、距離重み付けや kriging などの方法が用いられることが多い。どちらの方法も、距離的に近い場所の値は近い値になるという空間的相関を考慮して推定が行われている。距離重み付けは、一般的に式 (1) で表される。

$$y = \frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i}{h_i} \right)}{\sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{h_i} \right)} \quad (1)$$

ここで、 y は推定値、 m は距離重み付けにおいて推定に用いるデータ数、 z_i は y に距離に近い方から i 番目の観測値、 h_i は y と z_i の距離である。一方、kriging では、空間的な相関の指標であるバリオグラムを用いて理論的な推定が行われる。観測値からのバリオグラムは式 (2) から算出される。Kriging において物性値の空間分布の推定を行うためには、観測値から求められたバリオグラムを何らかの関数に近似する必要があるが、本論文では式 (3) で表される指数関数型の関数を用いた。

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

$$\gamma(h) = \sigma^2 [1 - \exp(-h/a)] \quad (3)$$

ここで、 γ はバリオグラム、 h は距離、 $N(h)$ は距離が h となる観測値の組合せの数、 $z(x)$ は座標 x における観測値、 σ^2 は観測値の分散、 a は空間的な相関の強さを表すパラメータであり $3a$ をレンジと呼ぶ。式 (2) では、観測値の距離が h となる全ての観測値の組合せにおいて、距離 h における観測値の差の二乗和の平均値を求めており、式 (2) により求められたバリオグラムが小さいほど物性値の空間的相関は大きく、逆にバリオグラムが大きいほど物性値の空間的相関は小さいことを意味している。また、式 (3) では距離 h がレンジ $3a$ になるとバリオグラムがほぼ分散に等しくなる、つまり式 (3) においては空間的な相関がレンジの範囲程度まで及んでいることが関数によりモデル化されている。

kriging ではバリオグラムにより空間的相関を考慮した推定が行われるものの、kriging による推定結果の空間的相関と観測値の空間的相関は一致しない。つまり、推定結果のバリオグラムと観

表-1 真の分布と観測値の分布

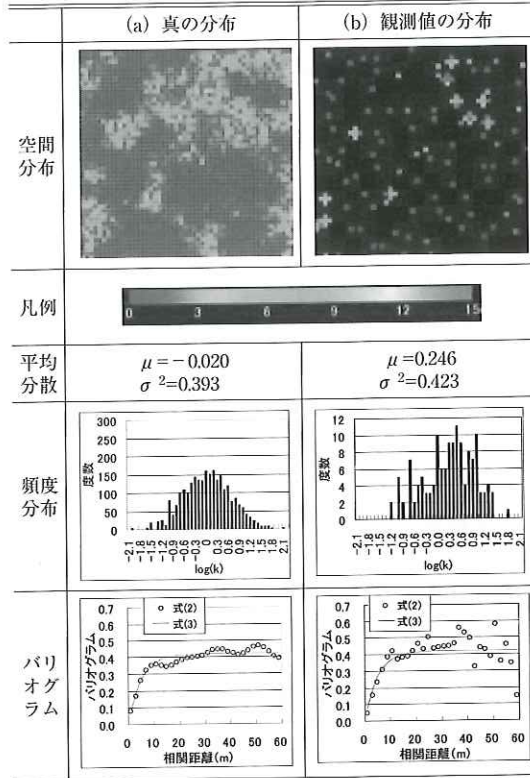
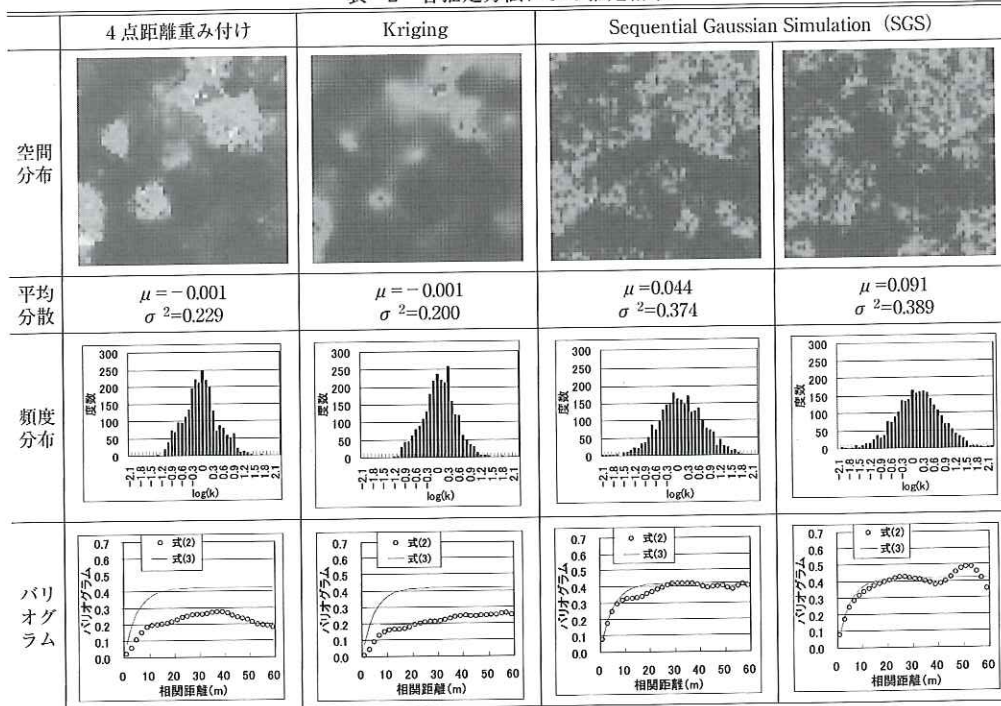


表-2 各推定方法による推定結果



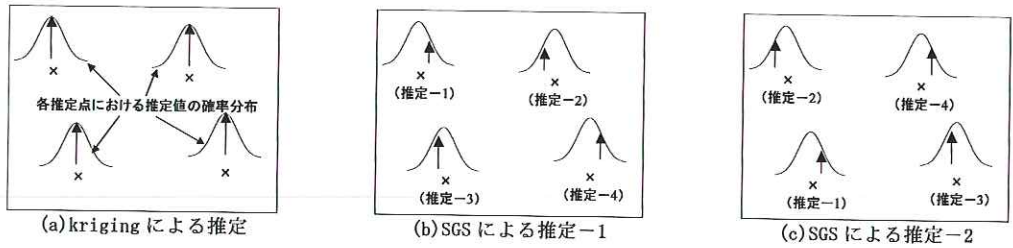


図-1 kriging と SGS の推定方法の概念図

測値のバリオグラムが一致しないという短所を kriging は有している。この kriging の短所を解消するため、推定結果のバリオグラムと観測値のバリオグラムが等しくなるような推定方法が提案されている。この代表的な方法が Sequential Gaussian Simulation (SGS) である。表-2 に、距離重み付け、kriging、SGS による推定結果を示す。距離重み付けと kriging による推定結果を見ると、滑らかな (平均化された) 空間分布となっており、これらの推定結果の分散やバリオグラムは表-1 (b) の観測値の分散やバリオグラムよりも小さく、空間的な相関が保存されていないことがわかる。一方、SGS による推定結果を見ると、表-1 (a) と似たような空間分布となっており、また SGS による推定結果の分散・バリオグラムは観測値のそれとほぼ同じ値を示しており、空間的な相関性が保存されている。

なお、表-2 では SGS の推定結果を 2 つ示しているが、SGS は観測値から得られた空間的相関を再現できるという長所を有しているものの、推定結果が無限に存在するという特徴も持っている。これは、SGS においては、推定する座標の順番を乱数で決めながら、各推定座標における推定誤差を考慮しつつ、観測値から得られたバリオグラムを再現するような推定がなされるためである (図-1 (b) と (c))。一方、kriging においては、図-1 (a) のように各推定点における期待値が推定されるため、推定結果は 1 つになる。このように SGS の推定結果は複数になるため、SGS を用いた物性などの推定結果の評価にあたっては注意が必要となることがある。

3. 一次元浸透における透水係数のばらつきの影響

透水係数のばらつきが浸透特性に及ぼす影響の基本的な検討として、一次元場における浸透を考える。

図-2 および図-3 のように、水平および鉛直に層をなす地盤の平均透水係数は、それぞれ式 (4) および (5) で表される。

$$K_h = \frac{k_1 + k_2 + \dots + k_n}{n} \quad (4)$$

$$K_v = \frac{n}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}} \quad (5)$$

ここで、 K_h は図-2 の平均透水係数、 K_v は図-3 の平均透水係数、 n は層の数である。(相加平均) \geq (調和平均) の関係から、 $K_h \geq K_v$ となる。ここで、 K_i ($i=1 \sim n$) が正規分布と仮定すると、式 (4) から明らかに K_h は一定値 ($=K_i$ の平均値) となるが、 K_i の平均値が一定でも K_i のばらつき (標準偏差 σ) により K_v は変化する。 K_i の平均値を 1 とし、の標準偏差を変化させた時の K_v のシミュレーション結果を図-4 に示す。 K_i の標準偏差 σ が大きくなるにつれて、 K_v は小さくなる。

一方、ダム基礎岩盤の透水係数の分布は、対数正規分布になると言われている。 K_i が対数正規分布の時に、標準偏差 σ による K_h と K_v の変化を見るため、 $\log_{10}(K_i)$ ($i=1 \sim n$) の平均を -5 の一定とし、標準偏差 σ を変化させた時の K_h と K_v のシミュレーション結果を図-5 に示す。なお、図-5 では、 K_h と K_v を 10^{-5} で割って正規化している。標準偏差 σ が大きくなるにつれて、 K_h は大きくなり、 K_v は小さくなる。

このようにシンプルな一次元の浸透モデルにおいても、マクロな浸透特性は透水係数の統計的、空間的なばらつきの影響を受ける。さらに、二次元、三次元の浸透モデルにおける透水係数の統計的、空間的なばらつきがそれぞれの浸透特性に及ぼす影響は、より複雑になるものと予想される。そこで 4 章では、ダム基礎地盤の二次元浸透場を対象とし、透水係数の統計的、空間的なばらつきがその浸透特性に及ぼす影響の検討を行った。

4. 透水係数の空間的相関を考慮したダム基礎の二次元モンテカルロシミュレーション

ダム基礎における透水性の統計的、空間的なばらつきがその浸透特性に及ぼす影響の基礎的な検討のため、ダム基礎の透水係数を乱数で与えた浸透

流解析のモンテカルロシミュレーションを行い、その結果を分析した。

4.1 解析条件

解析モデルは図-6に示すとおり、フィルダムコア部およびグラウチング未施工の基礎岩盤部を模擬したモデルとした。基礎岩盤は4m×4mの正方形要素に分割した。コアの透水係数は 1×10^{-7} m/sで一定とし、基礎岩盤の透水係数は対数正規分布に従うと仮定し、透水係数の平均はm/s単位での常用対数で-5、標準偏差 σ は常用対数で0.3、1.2と変化させて乱数を発生させた。ダム基礎の透水係数の空間的な相関性については、①空間的相関を考慮しない場合、②SGSにより等方的な空間的相関を考慮した場合(水平・鉛直方向のレンジ30m)、③SGSにより異方的な空間的相関を考慮した場合(水平方向のレンジ150m、鉛直方向のレンジ20m)、について検討した。表-3に透水係数の発生ケースを示す。なお、本来、透水係数の異方性とは1つの要素のx方向とy方向の透水係数が異なることを意味するが、ここでは同一要素のx方向とy方向の透水係数は等しいとし、マクロな透水係数の空間分布がx方向とy方向で異なる、つまりx方向とy方向のレンジが異なることをここでは異方性と呼んでいる。表-3のCase2-1、Case2-2、Case2-3の $\sigma = 1.2$ の各ケースについて、ある1回のシミュレーションにおける基礎岩盤部2875要素の透水係数の頻度分布を図-7に、空間分布を図-8にそれぞれ示す。図-7では、概ね想定した平均、分散の透水係数の分布が得られている。図-8を見ると、図-8(a)では空間的相関を考慮していないため完全にランダムな分布となっているが、図-8(b)では同程度の大きさの透水係数がある程度固まった分布がシミュレートされており、さらに図-8(c)では水平方向に空間的相関が卓越した分布が再現されている。表-3の各ケースについてそれぞれ浸透流解析を100回行い、統計処理を行った。図-9に、Case2-2とCase2-3において発生させた透水係数から算出した水平x方向、鉛直y方向のバリオグラムの100回の平均を示すが、概ね想定したバリオグラムが得られている。なお、図-9の縦軸は分散で無次元化している。

4.2 解析結果

図-10に図-8の透水係数分布における基礎岩盤部の流速分布を示す。透水係数が等方的な空間的相関を有するCase2-2では若干選択的な浸透が発生しており、水平方向に強い空間的相関を有するCase2-3ではかなり選択的な浸透が発生してい

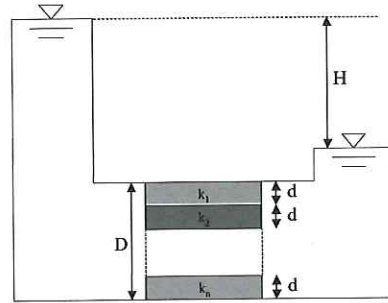


図-2 浸透方向に水平に層をなす地盤

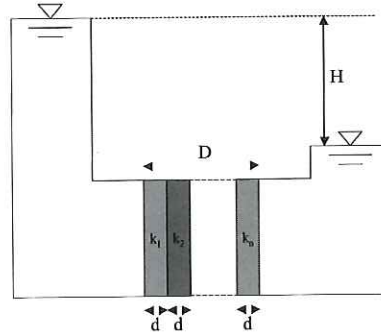


図-3 浸透方向に鉛直に層をなす地盤

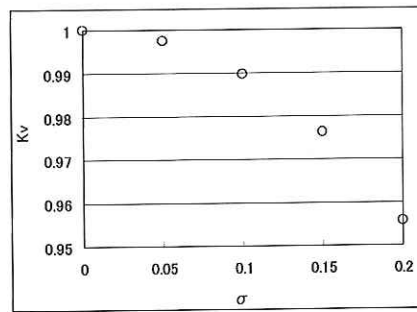


図-4 K_i が正規分布の場合の K_v

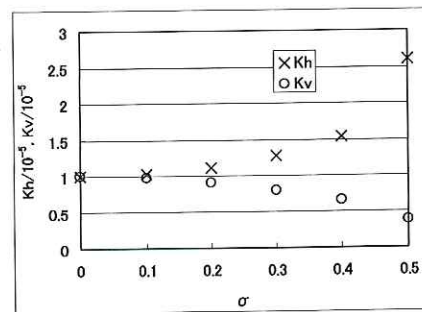


図-5 K_i が対数正規分布の場合の K_h と K_v

る。

図-11および図-12に、 $\sigma = 0.3$ と $\sigma = 1.2$ の時の浸透流解析結果の頻度分布を示す。浸透流解析結果の検討項目として、ここでは浸透流量とパーコ

レーション閾値⁴⁾を示す。また、表-4に各検討項目の平均値と最大値を示す。図-11の $\sigma=0.3$ の時の結果を見ると、いずれの検討項目についても、空間的相関のないCase1-1の分布幅が最も小さく、空間的相関がありかつ水平方向の相関が大きいCase1-3の分布幅が最も大きくなっている。

図-12のように、透水係数の σ が大きくなると、各検討項目のいずれのケースについても分布幅は大きくなり、特にCase2-3の分布幅がかなり大きくなっている。また、表-4を見ると、いずれの検討項目についても、 $\sigma=0.3$ の時のCase1-1・Case1-2・Case1-3の平均値にはあまり変化がないが、最大値については空間的相関がありかつ水平方向の相関が大きいCase1-3の最大値が最も大きくなっている。また、 $\sigma=1.2$ の場合では、いずれの検討項目においても、Case2-1とCase2-2の平均値はほぼ同じ値を示しているが、最大値は空間的相関のあるCase2-2の方がかなり大きくなっている。

5. まとめ

ダム基礎グラウチングの合理化・効率化を目的として、ダム基礎岩盤の透水性のばらつきがその浸透特性に与える影響についての基礎的な検討を、浸透流解析のモンテカルロシミュレーションにより行った。その際、透水係数の空間的な相関による影響についても検討した。それにより、透水係数の標準偏差が小さい時には、空間的な相関によらず浸透流量やパーコレーション閾値などの浸透特性の平均値はあまり変化しないものの、標準偏差が小さい場合でも空間的相関がある場合には浸透流量などの分布幅や最大値は大きくなることがわかった。また、透水係数の標準偏差が大きかつ水平方向の空間的相関が強い時には、浸透流量などの平均値、分布幅、最大値はかなり大きくなる傾向にあることが分かった。

今後は、実際のダム基礎における様々な観測データを用いて三次元的な透水性の空間分布の推定を行い、その結果を用いて、透水性のばらつきが浸透特性に及ぼす影響の検討を行う予定である。さらに、透水性のばらつきの影響をダム基礎グラウチングの設計に反映させる方法についても検討していく予定である。

参考文献

1) Clayton V. Deutsch & Andre G. Journel : GSLIB, Geostatistical Software Library and User's Guide, Second Edition, 369p., 1998.

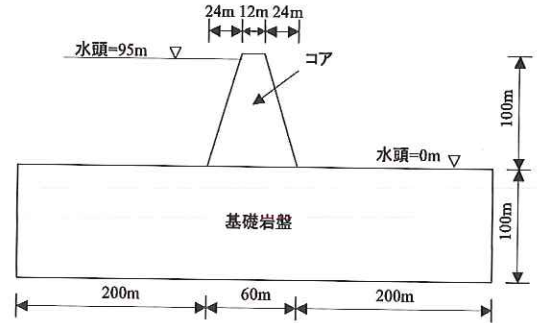


図-6 解析モデル

表-3 解析ケース

#case	分布	標準偏差	空間的相関
Case1-1	対数正規分布	0.3	なし
Case1-2		0.3	等方
Case1-3		0.3	異方
Case2-1		1.2	なし
Case2-2		1.2	等方
Case1-3		1.2	異方

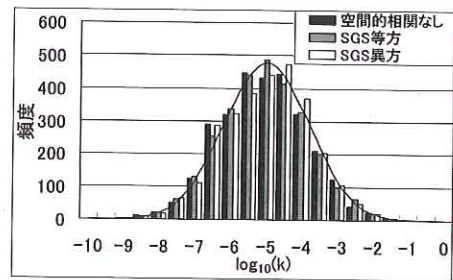


図-7 基礎岩盤の透水係数の頻度分布 (単位は m/s)

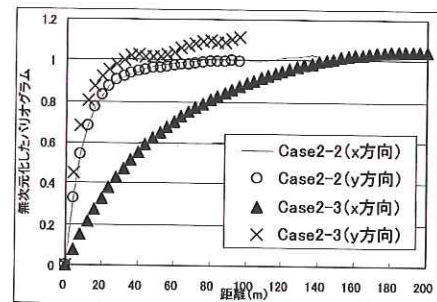
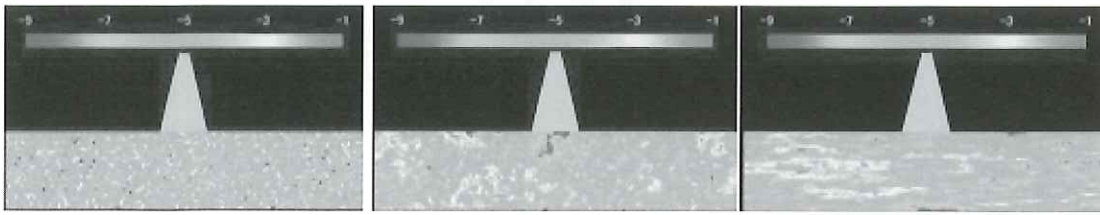


図-9 Case2-2とCase2-3のx方向とy方向のバリエオグラム (100回の平均)

2) 本多眞、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キ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) 小田垣孝：パーコレーションの科学 (第3版)、裳華房、1997。

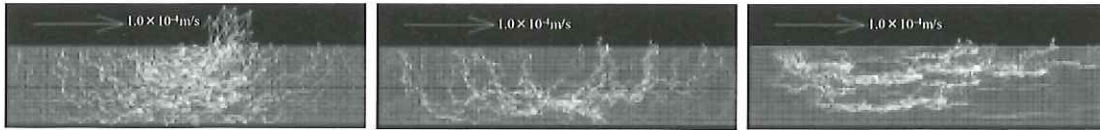


(a) Case2-1

(b) Case2-2

(c) Case2-3

図-8 透水係数の空間分布 (常用対数表示)

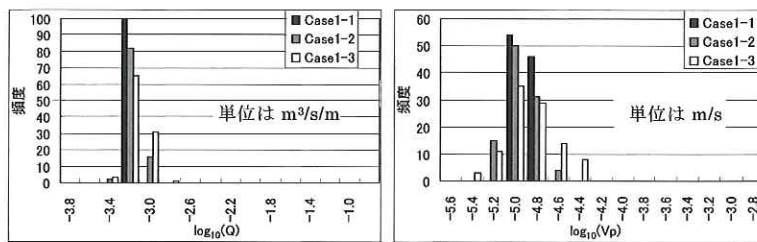


(a) Case2-1

(b) Case2-2

(c) Case2-3

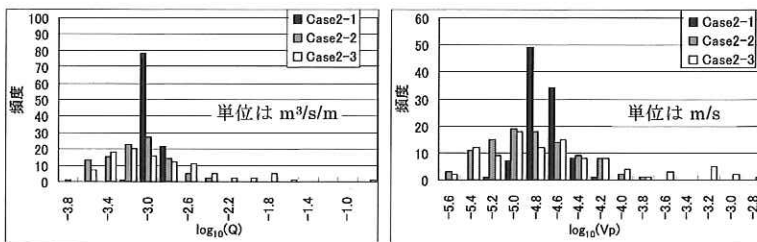
図-10 図-8における基礎岩盤部の流速分布



(a) 浸透流量

(b) パーコレーション閾値

図-11 浸透流解析の結果 ($\sigma = 0.3$ の場合)



(a) 浸透流量

(b) パーコレーション閾値

図-12 浸透流解析の結果 ($\sigma = 1.2$ の場合)

表-4 解析結果まとめ

#Case	浸透流量 ($\times 10^{-4} \text{m}^3/\text{m/s}$)		パーコレーション閾値 ($\times 10^{-5} \text{m/s}$)	
	平均値	最大値	平均値	最大値
Case1-1	7.2	7.9	1.2	1.6
Case1-2	6.8	9.8	1.2	2.5
Case1-3	7.4	12.7	1.5	4.2
Case2-1	11.0	19.2	2.1	5.2
Case2-2	9.3	42.4	2.2	19.7
Case2-3	40.1	1640.5	9.5	160.1

佐藤弘行*



独立行政法人土木研究所
水工研究グループダム構
造物チーム研究員
Hiroyuki SATOH

山口嘉一**



独立行政法人土木研究所
水工研究グループダム構
造物チーム上席研究員,
工博
Dr.Yoshikazu YAMAGUCHI