Ⅰ-3　不確定性を考慮した地下水モデル構築に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 14～平 16
担当チーム：水工研究グループ（ダム構造物）
研究担当者：山口嘉一、佐藤弘行、石橋正義

【要旨】
地盤を対象とした工学分野において、しばしば地下水の挙動を精度よく求める必要がある。しかし、地下水の挙動を把握するための直接的な評価指標である透水係数のデータ数が限られているうえ、岩盤を対象とした場合には岩盤内の割れ目の性状、分布を正確に把握する手法が確立されていないため、構築される地下水モデルには不確定性が大きいことが一般的である。そのため、地下水の挙動をその不確定性を考慮して包括的に推定できる地下水モデル構築手法の開発が求められている。

本研究では、ダム基礎地盤を例として、種類や属性が異なる観測データを利用して、広範囲かつ高精度な地下水モデルを構築できるようにするために、まず透水性と他物性との相関性についてのデータ分析を行った。さらに、透水性およびその不確定性の空間分布を定量的に評価できる地下水モデルを構築する手法を提案した。
キーワード：不確定性、地下水、ダム、浸透流解析、地球統計学

1．はじめに

地盤を対象とした工学分野において、しばしば地下水の挙動を精度よく求める必要がある。しかし、地下水の挙動を把握するための直接的な評価指標である透水係数のデータ数が限られているうえ、岩盤を対象とした場合には岩盤内の割れ目の性状、分布を正確に把握する手法が確立されていないため、構築される地下水モデルには不確定性が大きいことが一般的である。そのため、地下水の挙動をその不確定性を考慮して包括的に推定できる地下水モデル構築手法の開発が求められている。

ダム基礎地盤をその例とすると、透水性を評価するために、ダム建設の調査時においてボーリング孔を用いたルジオン試験が一般的に行われる。しかし、ボーリング孔を用いた透水試験は予算的・時間的制約があり、ボーリング孔から得られる直接的な透水性指標のデータ数には制約がある。また、ダムの安全性を評価するためにはダム基礎の広範囲にわたる透水性を推定する必要があるが、ボーリング孔による透水性に関するデータはその地点を代表する点的なデータであるため、それらの点的なデータをもとに何らかの方法により透水性の空間分布を推定する必要がある。この時、透水性と相関が高く、かつ透水性のデータよりも数が多い他物性のデータがあれば、その他物性のデータを補助的な情報として利用することにより、透水性の推定がより精度よく行うことができるものと考えられる。つまり、透水性に関する観測データが存在しない地点において、もし透水性と相関の高い他物性の観測データがあれば、透水性に関する観測データが存在しなくても、透水性をある程度の精度で推定することができると考えられる。このようなことを可能にするためには、透水性と相関の高い他物性についての検討を行う必要があるため、本研究では、ダム基礎において得られた透水性のデータと、他物性のデータとの相関についての検討を行った。

地下水挙動の不確定性を評価するためには、観測された透水性に関するデータの空間的なばらつきや推定の不確定性が、地下水挙動に与える不確定性を評価する必要がある。このような透水性の不確定性が地下水の挙動に与える影響を評価する手法としては、通常、ランダムな乱数により透水係数を与えたうえで、浸透流解析のモンテカルロシミュレーションが実施される。しかし、ランダムな乱数では、一般的に地盤が有する透水性の空間的な相関による地下水挙動の影響を評価することができない。そこで本研究では、透水性の空間分布推定の際にともなう不確定性を定量的に評価することが可能で、かつ透水性の空間的な相関を再現できる地球統計学の手法を用いて、透水性の空間分布をシミュレーションし、そのシミュレーションから得られた透水係数を入力として浸透流解析のモンテカルロシミュレーションを行い、透水性の不確定性が地下水挙動に与える影響の評価を行った。この際、浸透流解析のモンテカルロシミュレーション結果から、地下水挙動の不確定性を定量的に評価するための手法として、パーコレーション理論の概念を用いた評価方法を提案した。提案した方法では、地下水流れの主透水経路を定量的かつ確率的に評価することにより、地下

水挙動の不確実性を評価することが可能となる。

２　透水性と他物性との相関性の検討

２．１　検討方法

既設 5 ダムにおいて、透水性に関する調査データと、透水性以外の調査データについて、相関性の検討を行った。透水性との相関を比較したデータは、⑴ボーリングコアから得られる情報、⑵その他、と分類できる。⑴としては、割れ目の開口量、割れ目の性状、岩級などがあげられる。⑵としては標高、各種物理探査結果などがあげられる。

２．２　検討結果

(1) ボーリングコアの観察から得られる情報と透水性との相関性

一般的には、亀裂の数が多いほど、あるいは亀裂の開口幅が広いほど透水性は大きいと考えられるため、亀裂の状態などボーリングコアから得られる情報は、透水性とある程度の相関性があるものと予想される。

図 2-1 に、A ダムにおける透水性と岩級区分の相関を示す。ルジオン値が大きくなるにつれて、CL 級や D 級の割合が高くなっており、ここでは透水性と岩級区分は比較的良好な相関があると考えられる。

しかし、ボーリング孔から得られる情報と透水性との相関があるかないかは、地質条件など各ダムの個別条件に依存する部分が大きいため、あるダムでは透水性との相関が見られる物性が、他のダムでは透水性との相関が確認できないという結果となることもあった。

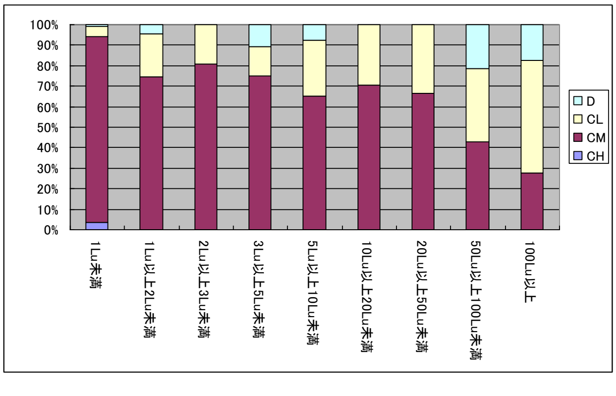


図 2-1　透水性と岩級区分の相関の一例（A ダム）

(2) ボーリングコア以外から得られる情報と透水性との相関性

ボーリングコア以外から得られる情報としては、標高などの情報、あるいは各種物理探査の結果が考えられる。透水性調査に関するボーリングの施工数量には制約があるため、特に物理探査については比較的広範囲な領域の物性の空間分布を推定することが出来るため、物理探査のデータと透水性との間に相関があれば、透水性の空間分布の推定にとって重要な情報となる。

図 2-2 に、E ダムにおける電磁波探査の結果（速度分布）と透水性の比較の結果を示す。ここでは、透水性と相関があると考えられる亀裂の状態と、電磁波探査結果の比較を示している。おおむね、亀裂が多いほど電磁波速度は小さくなる傾向にあり、亀裂と透水性の相関を考慮すると、電磁波探査と透水性の相関がある程度存在すると考えられる。

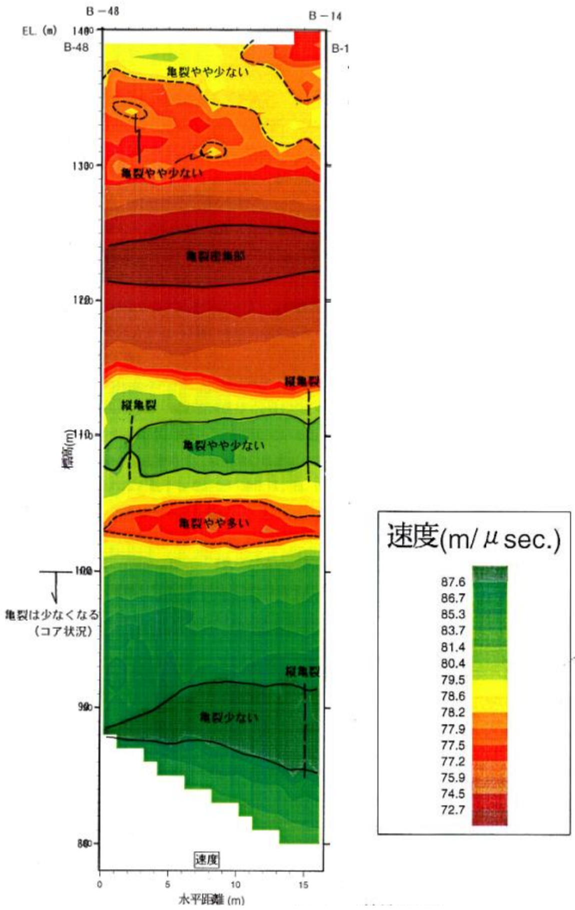


図 2-2　E ダムにおける物理探査結果と透水性の比較

(3) まとめ

表 2-1 に、本研究において検討した透水性と他物性の相関についての検討結果をまとめる。表 2-1 には、透水性との相関が確認できた項目のみ載せているが、割れ目性状や地質構造と透水性の相関が比較的確認できる結果となった。

今回の検討においては、亀裂の状態などボーリングコ

アからの情報を比較的多く得ることができたが、ボーリングコア以外からの情報、例えば物理探査などのデータについては分析に耐えうる質の高いデータはあまり多く入手することはできなかった。そのため、次章以降においてはシミュレーションを用いて、地下水挙動の不確実性を評価するために本研究が提案した手法を適用した結果を紹介する。

表 2-1　透水性との相関の検討のまとめ

	ダム名	Aダム	Bダム	Cダム	Dダム	Eダム
基本情報	地質年代	新第三紀	ジュラ紀～二畳紀	白亜紀	新第三紀	新第三紀
	代表地質	火山砕屑岩類	美濃帯堆積岩コンプレックス	花崗閃緑岩	火山砕屑岩類	安山岩
(1)ボーリングコアから得られる情報	割れ目性状	○ 酸化	○ 酸化	○ 酸化・開口	○ 酸化・開口	−
	地質構造	○:節理	○:断層	○:節理	○:断層、撓曲	−
	割れ目の方向性	−	−	○	−	−
	風化	○	○	−	−	−
	変質	−	−	○	−	−
	貫入岩及び鉱物脈	× 玄武岩(貫入) 石英脈	−	− 貫入岩	× 方解石脈	−
	地質区分	○	○	−	○	−
	岩級区分	○	−	○	○	−
(2)その他	地形要素	○	−	−	−	−
	物理探査	−	−	−	−	○

※　○透水性との相関があると考えられるデータ

×透水性との相関がないと考えられるデータ

−データを入手することができなかったもの

3　空間的な相関を考慮した透水係数の空間分布の推定

地下水挙動の不確実性を評価するためには、透水性の空間的な不確実性を評価する必要がある。地下の透水性には一般的に空間的な相関が存在するものと考えられるため、ここでは、空間的な相関を考慮しながら透水性推定に伴う不確実性を評価したうえで空間分布を推定することが可能な手法について説明する。

3．1　空間的な相関を評価するための指標－バリオグラム

空間的な相関を定量的に評価するための指標として、バリオグラムがある。バリオグラムは式（3-1）により表される。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[z(x) - z(x+h) \right]_i^2 \tag{3-1}$$

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(3-1)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(3-1)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(3-1)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 3-1** に示すように、相関距離が h−Δh/2 から h+Δh/2 の間にある観測値（**図 3-1** 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。

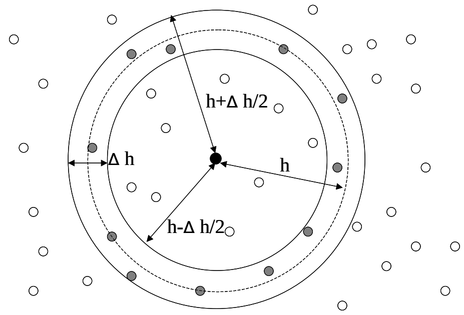


図 3-1　バリオグラムの相関距離 h の定義

観測値の数は限られているため、式（3-1）において、任意の相関距離におけるバリオグラムを精度よく求めることは困難である。しかし、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が必要であるため、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必要がある。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(3-2)で表される指数関数モデルを用いた。

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

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、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 3-2 に、あるダムにおけるカーテングラウチングのパイロット孔から得られたルジオン値の度数分布を示し、**図 3-3** にはそれから得られたバリオグラムと近似関数のを示す。なお、**図 3-2** に示すルジオン値の分布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。**図 3-3** を見ると、パイロット

孔におけるルジオン値のバリオグラムは、指数関数モデルで比較的良好に近似出来ている。

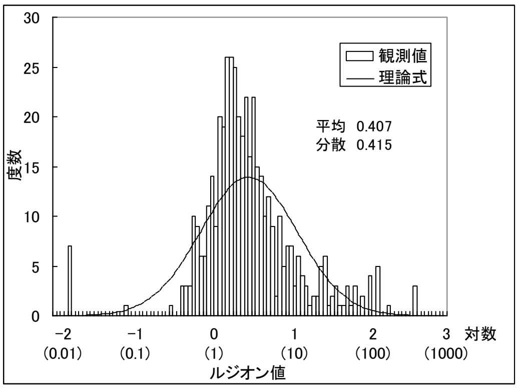


図 3-2　パイロット孔におけるルジオン値の度数分布

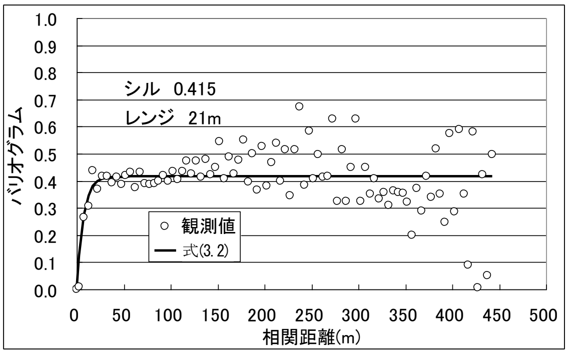


図 3-3　バリオグラムとその近似関数

３．２　空間的な相関を考慮した透水性の空間分布の推定

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。

表 3-2 (a) の真の透水場から表 3-2 (b) のような観測値の分布が得られているものと仮定する。ここで、表 3-2 (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。

空間分布の推定方法として一般的には、距離重み付けの方法が用いられることが多い。距離重み付けは、一般的に式（3-3）で表される。

$$y = \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{z_i}{h_i} \right) \Bigg/ \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{1}{h_i} \right) \tag{3-3}$$

距離重み付けは、距離が近いと値が似ている（重みが大きい）ということを利用しているが、理論的・統計的な背景が存在するわけではない。

地球統計学の kriging は、前述のバリオグラムを用いた統計的な手法である。kriging の主な方法は次のとおりである。

①式（3-1）の観測バリオグラムから、式（3-2）の理論的バリオグラムを求める。

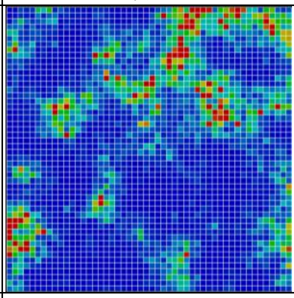
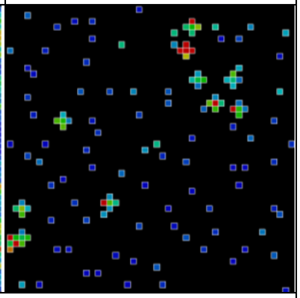
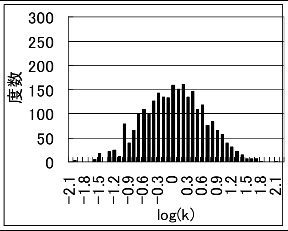
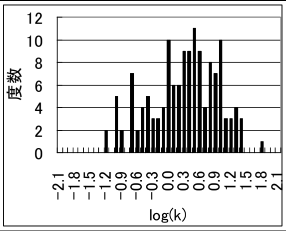
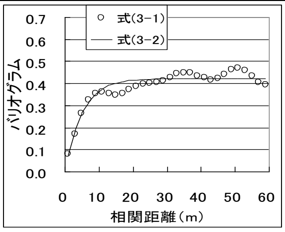
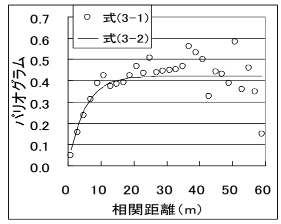
②①を基にして得られる物性値の推定点における連立一次方程式を解き、推定点における推定値を求める。

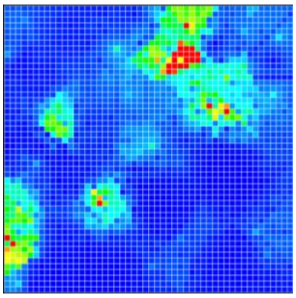
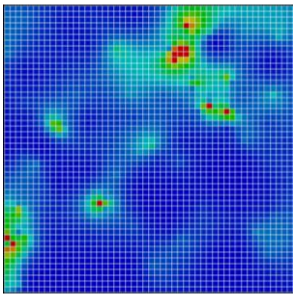
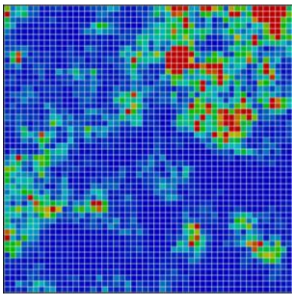
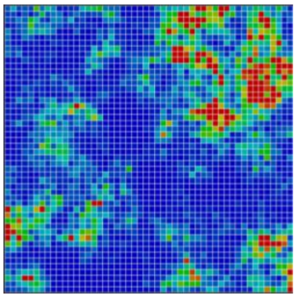
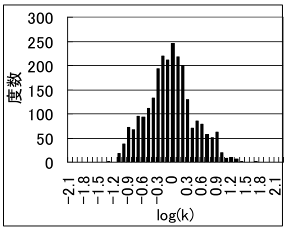
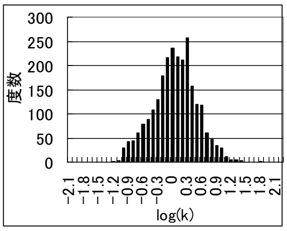
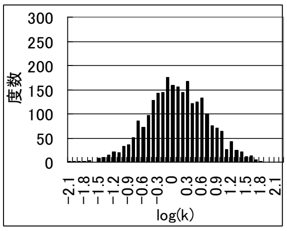
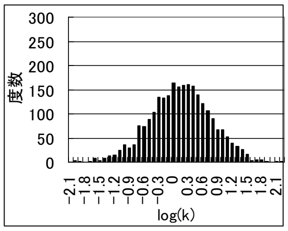
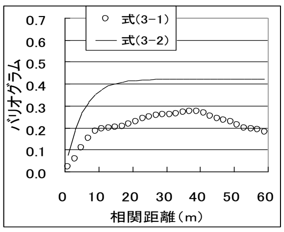
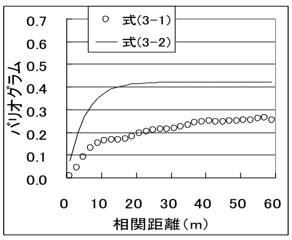
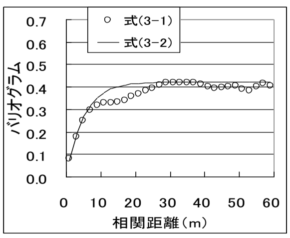
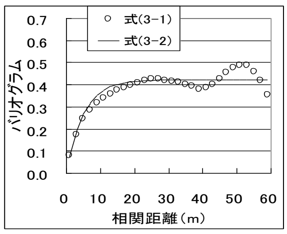
kriging ではバリオグラムにより空間的相関を考慮した推定が行われるものの、kriging による推定結果の空間的相関と観測値の空間的相関は一致しないという短所があることが知られている。つまり、kriging による推定結果のバリオグラムと、観測値のバリオグラムは一致しない。この kriging の短所を解消するため、推定結果のバリオグラムと観測値のバリオグラムが等しくなるような推定方法が提案されている。この代表的な方法が Sequential Gaussian Simulation（SGS）である。

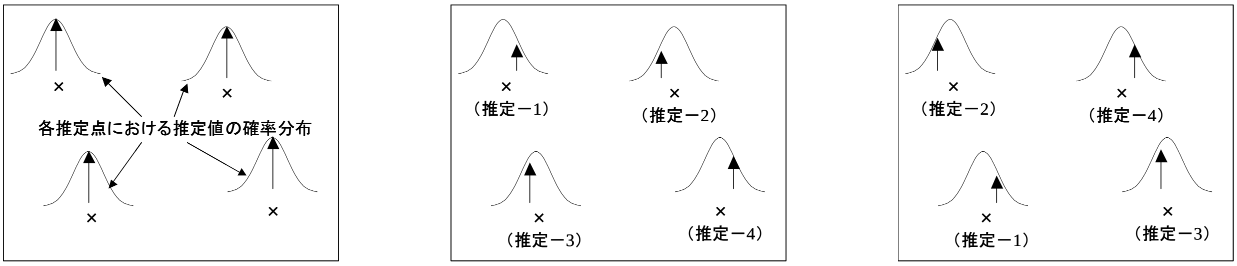
表 3-1 に、距離重み付け、kriging、SGS による推定結果を示す。距離重み付けと kriging による推定結果を見ると、滑らかな（平均化された）空間分布となっている。また、推定結果の分散やバリオグラムは表 3-1 (b) の観測値の分散やバリオグラムよりも小さくなっており、空間的な相関が保存されておらず過小評価されていることがわかる。一方、SGS による推定結果を見ると、表 3-1 (a) と似たような傾向の空間分布となっており、また SGS による推定結果の分散・バリオグラムは観測値のそれとほぼ同じ分布を示しており、観測値の空間的な相関性が再現されていることがわかる。

なお、表 3-2 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、シミュレーションであるために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 3-4 (b) と (c)）。一方、kriging においては、図 3-4 (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。

表 3-2　各推定方法による推定結果

<table>
<tr><td></td><td>(a) 真の分布</td><td>(b) 観測値の分布</td></tr>
<tr><td>空間
分布</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>凡例</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>平均
分散</td><td>μ=−0. 020
σ^2=0. 393</td><td>μ=0. 246
σ^2=0. 423</td></tr>
<tr><td>頻度
分布</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>バリ
オグ
ラム</td><td></td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td colspan="4">(c)空間分布の推定</td></tr>
<tr><td></td><td>4 点距離重み付け</td><td>Kriging</td><td colspan="2">Sequential Gaussian Simulation (SGS)</td></tr>
<tr><td>空間
分布</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>平均
分散</td><td>μ=−0. 001
σ^2=0. 229</td><td>μ=−0. 001
σ^2=0. 200</td><td>μ=0. 044
σ^2=0. 374</td><td>μ=0. 091
σ^2=0. 389</td></tr>
<tr><td>頻度
分布</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>バリオ
グラム</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>



(a)kriging による推定　　(b)SGS による推定－1　　(c)SGS による推定－2

図 3-4 kriging と SGS の推定方法の概念図

４　透水性の不確定性が地下水挙動に与える影響の確率論的評価方法の提案

４．１　主透水経路の定量的評価方法の提案

浸透流解析の結果を評価するための代表値としては、浸透流量、流速分布、水頭分布などが用いられることが多い。しかし、それらの値から、地下水の挙動の不確実性を定量的にわかりやすく評価することは難しいのが現状である。

そこで本研究では、浸透流解析の結果から地下水の挙動を定量的に評価するための方法として、パーコレーション理論の概念を用いた主透水経路の評価方法を提案する。

本研究で提案する、パーコレーション理論の概念を用いた主透水経路の評価方法の概略は以下のとおりであり、その概略図を**図 4-1** に示す。

①浸透流解析により流速分布が得られる。

②流速の大きな要素から色を塗る。

③ある流速の値の要素に色を塗った時に、色を塗られた要素のつながりが、上流端と下流端につながる。この時、要素のつながりをクラスターと呼び、クラスターが上下流端につながった状態をパーコレーションと呼ぶ。また、上下流端につながった時の流速の値をパーコレーション閾値と呼ぶ。

以上の方法により得られたパーコレーション閾値は、主透水経路と判断されるクラスター内の流速の最小値であり、このパーコレーション閾値が大きいほど主透水経路の流速は大きいため、パーコレーション閾値を評価することにより主透水経路を定量的に評価することが可能になるものと考える。また、次節で説明するように、クラスターを用いることにより、各要素が主透水経路に含まれる確率を、定量的に評価することが可能である。

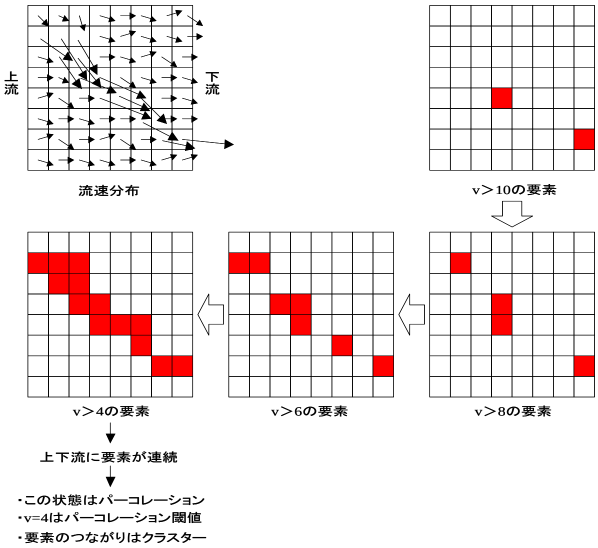


図 4-1　主透水経路の評価方法の概念図

４．２　主透水経路の確率論的評価方法の提案

４．１で提案したパーコレーション理論の概念を利用した主透水経路の定量的評価方法を用いて、主透水経路を確率論的に評価する方法を提案する。

本研究で提案する主透水経路の確率論的な方法は以下のとおりであり、**図 4-2** その概念図を示す。

①浸透流解析のモンテカルロシミュレーションを行う。

②①により得られた流速分布に、４．１で提案した主透水経路の定量的評価方法を適用し、クラスターおよびパーコレーション閾値を求める。

③1 つ 1 つの浸透流解析結果から得られたクラスターを重ね合わせることにより、各要素がクラスターに含まれるかどうかの確率分布を求める。つまり、各要素について主透水経路に含まれるかどうかの確率分布を求める。

以上で得られた確率分布により、各要素が主透水経路になりやすいかどうかを評価することが可能であり、透水性の空間分布の不確実性が地下水挙動に及ぼす不確実性を定量的に評価することができる。

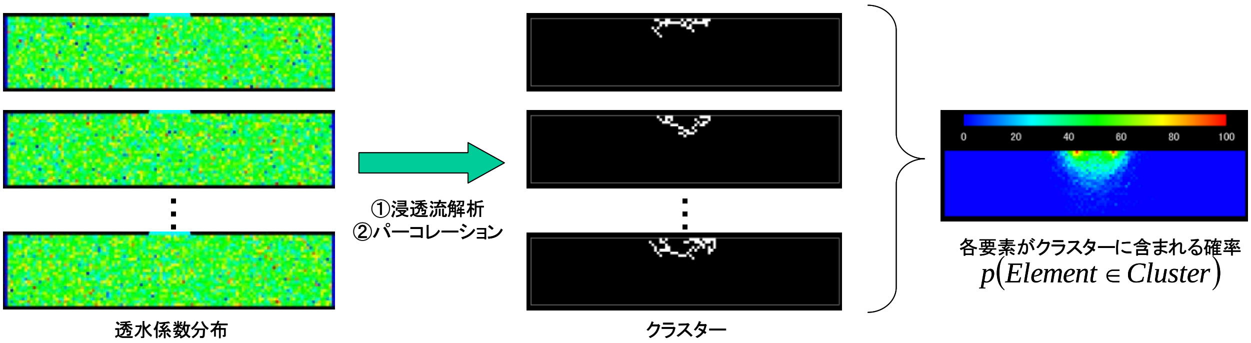


図 4-2　主透水経路の確率論的評価方法の概念図

４．３　主透水経路の定量的、確率論的評価方法の提案

３章で述べた透水性の空間分布の推定手法、４．１で提案した主透水経路の定量的評価方法、および４．２で提案した主透水経路の確率論的評価方法を用いることにより、地下水挙動の不確実性を総合的に評価することが可能と考えられる。図 4-3 に、本研究で提案した確率論的な方法による不確定性を考慮した地下水モデル構築方法のフローを示す。以下に、地下水挙動の不確実性を評価するために、本研究で提案した方法をまとめる。

①透水試験による透水性の観測データを取得する。

②透水性の観測データが存在しない地点に関しては、透水性と相関があると考えられるデータが存在する場合には、そのデータを補助的に活用して、透水性の空間分布を推定する。

③透水性の観測データが存在しない地点に関しては、透水性の推定に不確実性が存在する。その不確実性を、乱数を用いたシミュレーションにより推定するが、空間的な相関を考慮できる方法を用いる。

④不確実性を考慮して推定された透水性を入力物性値として、浸透流解析のモンテカルロシミュレーションを実施する。

⑤浸透流解析のモンテカルロシミュレーションにより得られた流速分布にパーコレーション理論を適用し、主透水経路を定量的かつ確率論的に評価する。

以上の方法により、透水性の空間分布の推定に伴う不確定性を評価するとともに、その不確定性が地下水挙動に及ぼす影響の不確定性を、定量的かつ確率論的に評価できるものと考える。

前述のとおり、本研究では、透水性と相関があり、かつ三次元的に広い範囲で観測され、かつある程度質の高い補助データを入手することはできなかった。そのため、次章では、二次元および三次元場におけるシミュレーションにより、③以降の手順について説明する。

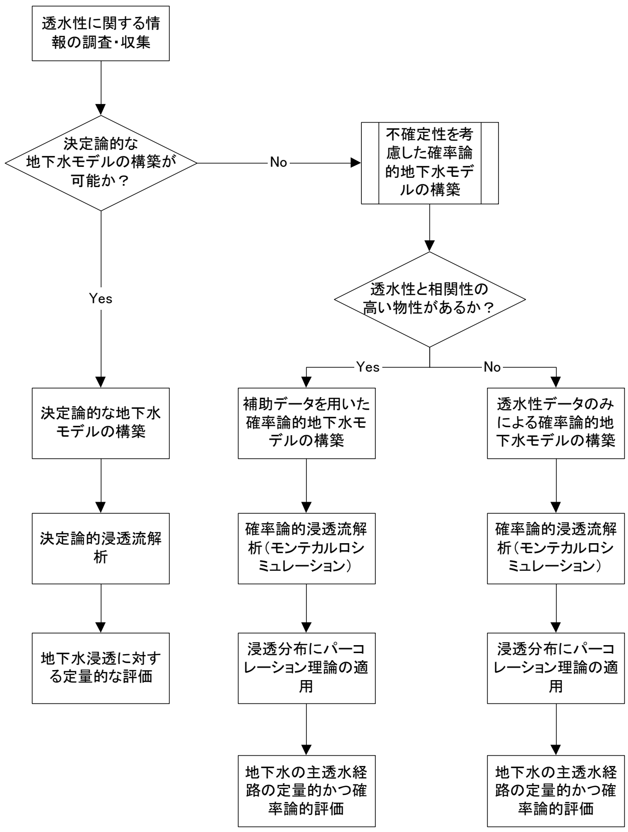


図 4-3　本研究で提案した確率論的な方法による不確定性を考慮した地下水モデル構築方法のフロー

５　シミュレーションによる主透水経路の定量的、確率論的評価の例

４章において、本研究で提案した地下水挙動の不確定性を評価する方法を詳述した。４章による方法を適用して広域的な地下水挙動を精度よく推定するためには、透水性と相関の高く、かつ三次元的に広範囲に観測されたデータを入手することができれば理想的ではあるが、本研究ではそのようなデータを得ることができなかったため、ここでは、実際の観測データを用いた検討ではなくシミュレーションにより、本研究で提案している地下水

挙動の不確定性を評価する手法の適用例を紹介することとする。ただし、実際の観測データに対しても、問題なく本研究で提案した手法を適用することは可能であり、システムは構築されている。

５．１　ダム基礎の二次元浸透場を対象としたシミュレーション

（１）解析モデル

ここでは、ダム基礎の上下流方向の二次元断面を対象とした場合の、主透水経路の定量的・確率論的な評価方法の例を紹介する。

図 5-1 に解析モデルを示す。堤高 100m、貯水位 100m のロックフィルダムのコアと基礎岩盤をモデル化している。基礎岩盤は、4m×4m の要素で分割した。カーテングラウチングの深度は 0m、52m、100m とし、ブランケットグラウチングの深度は 12m とした。

（２）透水係数分布

コア、カーテングラウチング、ブランケットグラウチングの透水係数は一定値とし、それぞれ、10^{-7}m/s、2×10^{-7}m/s、5×10^{-7}m/s とした。基礎岩盤の透水係数はばらつきを考慮し、m/s 単位における常用対数での平均が-5、常用対数での標準偏差が 0.3 と 1.2 の 2 種類設定した。また、基礎岩盤の透水係数の空間分布は、①空間的相関がない場合、②等方的な空間的相関がある場合、③異方的な空間的相関がある場合、の 3 パターン設定した。等方的な相関の場合には相関距離は 30m とし、異方的な相関の場合には水平(x)方向の相関距離は 150m、鉛直(y)方向の相関距離は 20m と設定した。

表 5-1 に解析ケースをまとめる。図 5-2 に、Case2-1-C0 から Case2-3-C0 の透水係数の度数分布、図 5-3 に Case2-2-C0 と Case2-3-C0 のバリオグラムを示す。おおむね、想定どおりの度数分布とバリオグラムが得られている。

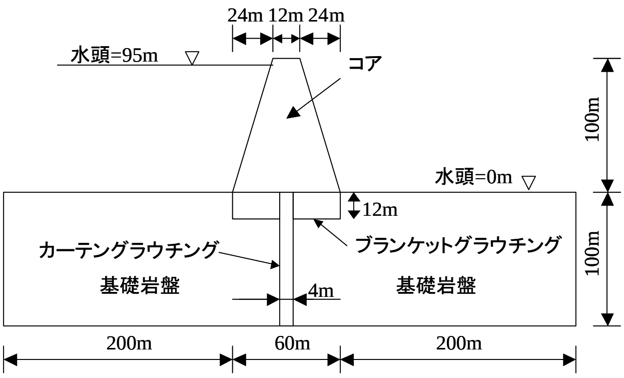


図 5-1　解析モデル

表 5-1　解析ケース

#case	分布	標準偏差	空間的相関	カーテングラウチング
Case1-1-C0	対数正規分布	0.3	なし	なし
Case1-2-C0		0.3	等方	なし
Case1-3-C0		0.3	異方	なし
Case1-1-C52		0.3	なし	あり(深度52m)
Case1-2-C52		0.3	等方	あり(深度52m)
Case1-3-C52		0.3	異方	あり(深度52m)
Case1-1-C100		0.3	なし	あり(深度100m)
Case1-2-C100		0.3	等方	あり(深度100m)
Case1-3-C100		0.3	異方	あり(深度100m)
Case2-1-C0		1.2	なし	なし
Case2-2-C0		1.2	等方	なし
Case2-3-C0		1.2	異方	なし
Case2-1-C52		1.2	なし	あり(深度52m)
Case2-2-C52		1.2	等方	あり(深度52m)
Case2-3-C52		1.2	異方	あり(深度52m)
Case2-1-C100		1.2	なし	あり(深度100m)
Case2-2-C100		1.2	等方	あり(深度100m)
Case2-3-C100		1.2	異方	あり(深度100m)

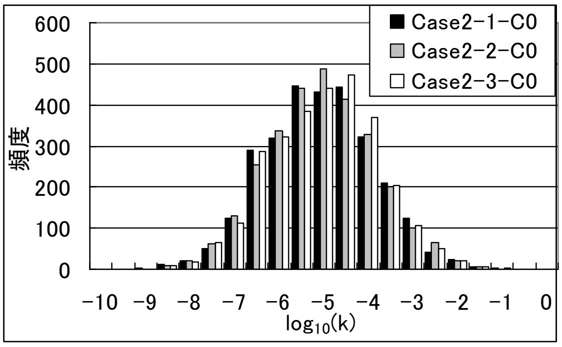


図 5-2　基礎岩盤の透水係数の頻度分布（単位は m/s）

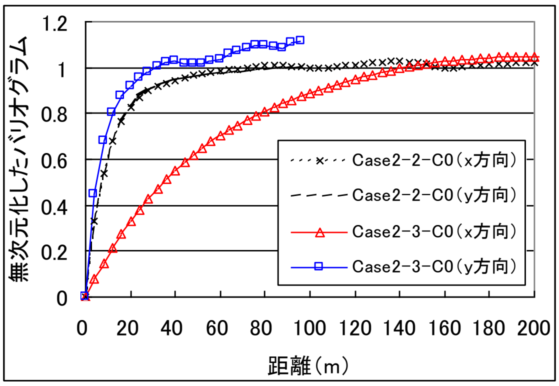


図 5-3　Case2-2-C0 と Case2-3-C0 の x 方向と y 方向のバリオグラム（100realizations の平均）

（３）検討結果

図 5-4 の上段に透水係数の空間分布、中段に浸透流解析から得られた流速分布、下段にクラスターを示す。透水係数の空間分布により、流速分布やクラスター形状は影響を受けており、特に異方的な相関がある Case2-3-C0 の場合にはかなり選択的な浸透が発生している。

図 5-5 に、各要素がクラスターに含まれる確率を示す。カーテングラウチングない時、等方的な相関がある場合には深度方向に確率の高い領域が広がる傾向にあり、異

方的な相関がある場合には水平方向に確率の高い領域が広がる傾向にある。カーテングラウチングの施工深度が深くなると、特に異方的な相関がある場合には、水平方向にかなり広い範囲に確率の高い領域が広がっている。

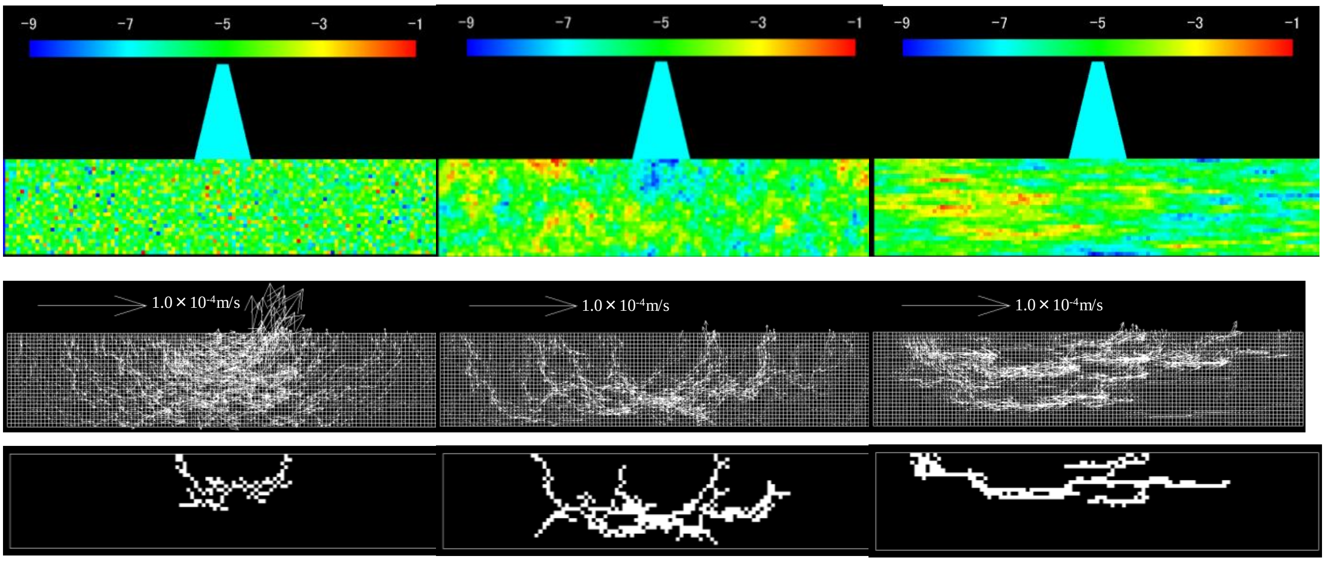
このように、本研究で提案した手法を用いることにより、透水性の推定の不確実性をモンテカルロシミュレーションにより確率的に考慮し、さらにパーコレーションの概念を用いることで地下水挙動の不確実性を定量的に評価することができる。

５．２　ダム基礎の三次元浸透場を対象としたシミュレーション

（１）解析モデル

５．１と同様にダム基礎を対象として、三次元での検討を行った。

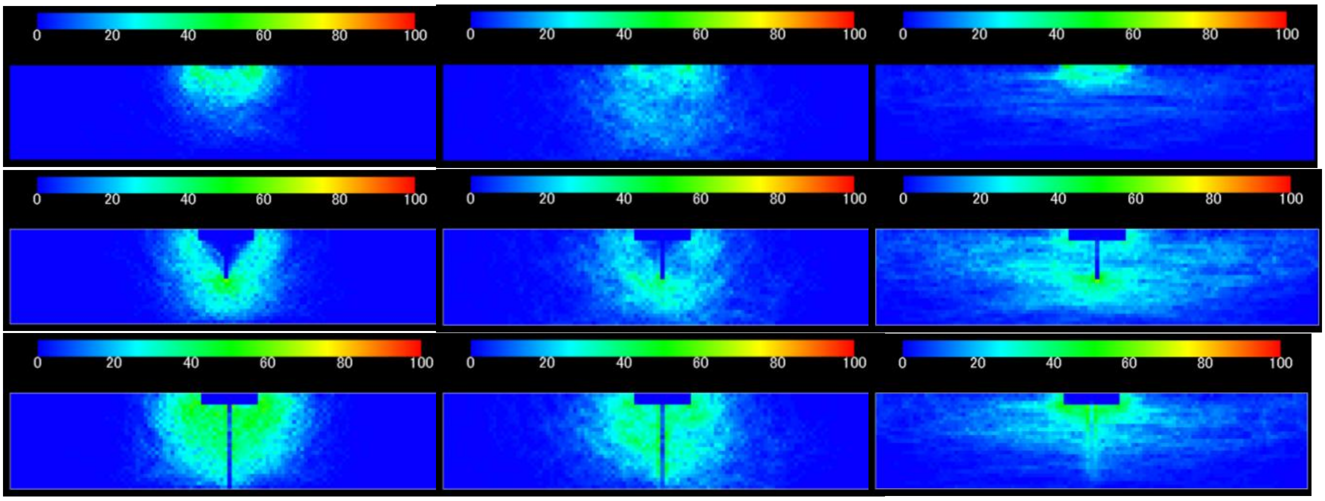
図5-6に解析モデル、図5-7に上面の境界条件を示す。解析モデルはロックフィルダムの基礎岩盤部の長方形領域とし、上面の中央部分にはロックフィルダムのコアが載っているものと仮定して不透水条件とし、コアより上流には100mの貯水があるものと仮定した。なお、コアはモデル化していない。パソコン能力および浸透流解析ソフトによる要素数の制約のため、5m×5m×5mの立方体で要素分割した。上面以外の5つの面は不透水とした。



(a)Case2-1-C0の一例　(b)Case2-2-C0の一例　(c)Case2-3-C0の一例

図5-4　乱数の発生方法の違いによる浸透特性の変化

（上段：透水係数分布、中段：流速分布、下段：クラスター分布）



(a)空間的な相関がない場合　(b)等方的な相関がある場合　(c)異方的な相関がある場合

図5-5　要素がクラスターに含まれる確率分布（σ=1.2の場合）

（上段から、カーテンなし、カーテン深度52m、カーテン深度100m）

（2）透水係数分布

透水係数の m/s における常用対数での平均値は-5、常用対数での標準偏差は 0.9 とした。空間的な相関については、異方的な相関を考慮し、相関距離は 150m (x 方向)、40m (y 方向)、20m (z 方向) とした。

（3）検討結果

図 5-8 に、主透水経路として抽出されたクラスターの一例を載せる。このように、三次元においても二次元と同様に、本研究で提案した方法により、地下水挙動の不確実性を定量的に評価することが可能であるが、三次元の場合には数値的な信頼性を確保するためには、かなりの回数のモンテカルロシミュレーションを実行する必要があることが、二次元の場合と唯一異なる点である。

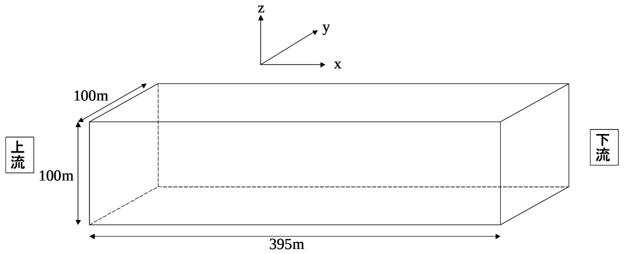


図 5-6　解析モデル

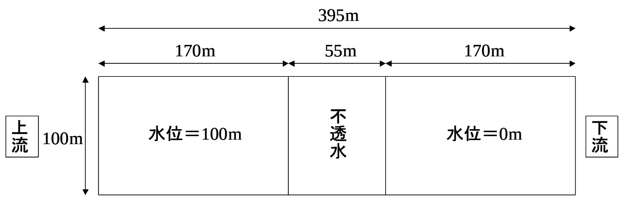


図 5-7　上面の境界条件

6　まとめ

本研究では、透水性と他物性との相関の分析として、既設 5 ダムを対象として、透水性と他の物性との相関についての検討を行った。また、不確定性を考慮した地下水モデル構築法の開発として、定量的かつ確率的に主透水経路を評価する方法を提案し、二次元および三次元において、シミュレーション的な検討を行った。以下にこれらの成果をとりまとめる。

①既設 5 ダムにおいて、透水性と他物性との相関について検討を行った。ボーリングコアから得られる情報を比較的多く入手することができ、割れ目の性状や地質構造などと透水性の相関がよい場合が多いことがわかった。また、広範囲での透水性の空間分布を推定する際に重要と考えられる物理探査のデータについては、1 ダムにおけるデータのみ入手することができ、亀裂の性状と物理探査データの相関がよいことがわかった。

②不確定性を考慮した地下水モデル構築法の開発として、浸透流解析のモンテカルロシミュレーションの結果から、主透水経路を定量的かつ確率的に評価できる方法を提案した。提案した方法をもとに、二次元場および三次元場のシミュレーションを実行し、地下水挙動の不確実性を再現した。特に、透水性に異方的な相関がある場合には、地下水の主透水経路に選択的な流れが卓越することなどがわかった。

今後は、ダム基礎地盤の浸透やグラウチングに関する具体の研究課題において、本研究で提案した手法を適用し、より実務的な課題へと移行していく予定である。

参考文献

1) Deutsch & Journel：GSLIB second edition, 1998.

2) 小田垣孝：パーコレーションの科学（第 3 版）、裳華房、1997.

3) 佐藤弘行・山口嘉一：透水性の空間的相関を考慮したシミュレーションによるダム基礎の浸透特性の検討、第 39 回地盤工学研究発表会、2004.

4) 佐藤弘行・山口嘉一：透水性の空間的相関を考慮したシミュレーションによるダム基礎の浸透特性の検討（第 2 報）、第 59 回土木学会年次学術講演会、2004.

5) 佐藤弘行・山口嘉一：透水性の空間分布を考慮したダム基礎の水みちの確率評価、第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.423-428、2005.

6) Hiroyuki Satoh & Yoshikazu Yamaguchi：Probabilistic Evaluation of Underseepage of Dam Rock Foundation Considering Spatial Correlation in Permeability, ICOLD, 2005.

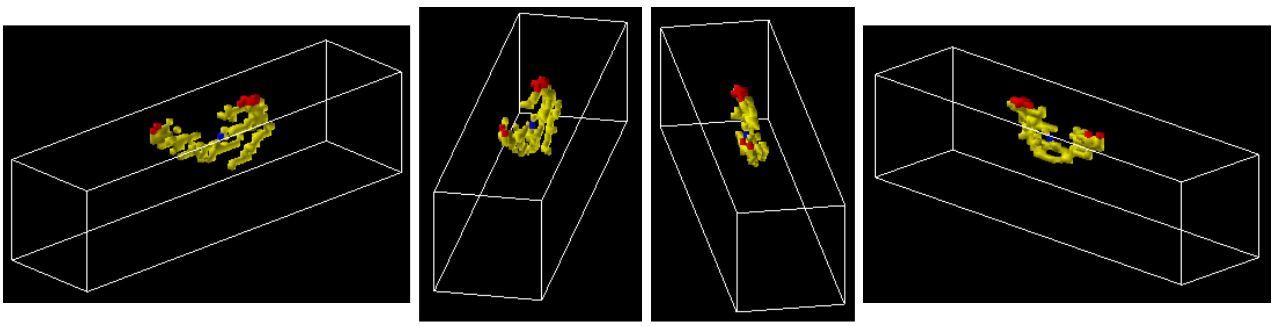


図 5-8　三次元のクラスターの一例

RESEARCH ON DEVELOPMENT OF GROUNDWATER MODELING CONSIDERING UNCERTAINTY OF PERMEABILITY DISTRIBUTION

It is necessary to estimate the groundwater behavior accurately in many situations such as the design of dam foundation or the safety evaluation of the dam body and its foundation. But groundwater modeling has the uncertainty because the number of permeability test is limited. It is important to develop a groundwater model which is able to describe the uncertainty of the groundwater behavior.

In this study, we investigated the correlation between permeability and other properties using data obtained at 5 existing dams, and developed a groundwater model based on Geostatistics, seepage analysis, and percolation theory. Percolation theory is applied to the results of seepage analyses to evaluate the main flow path quantitatively and probabilistically.

Keywords：groundwater, uncertainty, seepage analysis, probabilistic method