

流水型ダムのカーテングラウチングの合理化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 25

担当チーム：水工研究グループ（水工構造物）

研究担当者：佐々木隆、佐藤弘行

【要旨】

河川環境保全の観点から洪水調節用放流設備を河床標高付近に設置することで、常時の水位上昇を抑えるとともに土砂等の流下を促進する流水型ダムの計画が増加している。流水型ダムにおいては、常時満水位(NWL)が河床標高付近に存在し、NWLからサーチャージ水位(SWL)の間のアバットメント部の基礎地盤については洪水時に一時的に水浸するのみである。そのため、基礎浸透の非正常性を考慮することで、カーテングラウチングの基礎浅部における改良目標値の緩和や深度（範囲）の短縮（縮小）などの合理化が行える可能性がある。ただし、合理化検討に当たっては、合理化検討が可能となる地盤条件を明確にした上で、グラウチング処理部および未処理部の透水性のばらつきが集中的な浸透の発生を引き起こす可能性についても考慮する必要がある。

平成 24 年度は、三次元非定常流解析により、ダム基礎岩盤の透水性の空間的な相関が浸透特性に及ぼす影響を検討するための入力データとして、統計的なばらつきと空間的な相関を両方保持する三次元透水係数場を作成した。

キーワード：流水型ダム、カーテングラウチング、合理化

1. はじめに

河川環境保全の観点から洪水調節用放流設備を河床標高付近に設置することで、常時の水位上昇を抑えるとともに土砂等の流下を促進する流水型ダムの計画が増加している。

現行のダムの基礎処理、主にカーテングラウチングの計画設計においては、湛水に伴う浸透現象の非正常性を考慮せず、設計上安全側の対応として定常問題として扱っている。しかし、流水型ダムにおいては、常時満水位(NWL)が河床標高付近に存在し、NWLからサーチャージ水位(SWL)の間のアバットメント部の基礎地盤については洪水時に一時的に水浸するのみである。そのため、基礎浸透の非正常性を考慮することで、カーテングラウチングの基礎浅部における改良目標値の緩和や深度（範囲）の短縮（縮小）などの合理化の可能性を積極的に検討し、ダムの安全性を確保した上でその建設コストの縮減を図る必要がある。ただし、合理化検討に当たっては、合理化検討が可能となる地盤条件を明確にした上で、グラウチング処理部および未処理部の透水性のばらつきが集中的な浸透の発生を引き起こす可能性についても考慮する必要がある。

平成 24 年度は、三次元非定常流解析により、ダム基礎岩盤の透水性の空間的な相関が浸透特性に及ぼす影響を検討するための入力データとして、統計的なばらつきと空間的な相関を両方保持する三次元透水係数

場を作成した。

2. 空間的な相関を有する三次元透水係数場の作成

ダム基礎岩盤の透水性には、以下の 2 種類のばらつきが存在する。

① 統計的なばらつき

ダム基礎岩盤の透水性は対数正規分布に従うとされており、グラウチング施工前のパイロット孔のルジオン値は非超過確率図において直線となる場合が多い。ダム基礎グラウチングにおいては、非超過確率 85%程度で改良目標値以下となるように完了基準を設定し、統計的なばらつきを考慮している。

② 空間的なばらつき

ダム基礎岩盤の透水性は岩種、岩級などの地質特性に大きく依存する。一般的に、ダム基礎岩盤の透水性や地質状況は、ある場所に近ければ類似の性状を示すと考えられる。実際、ルジオンマップでは、高透水部が遍在することが多い。ダム基礎グラウチングにおいては、高透水部が連続しないように、完了基準や追加孔基準を設定し、空間的なばらつきを考慮している。

図-2.1 は、平成 23 年度に検討した、二次元における透水性の分布と、定常の浸透流解析の結果である。図-2.1 上図の(a)から(c)は、透水係数の統計的な平均値と標準偏差は同一であるが、空間的なばらつきを変化させている。図-2.1 下図の(a)から(c)を見ると、統

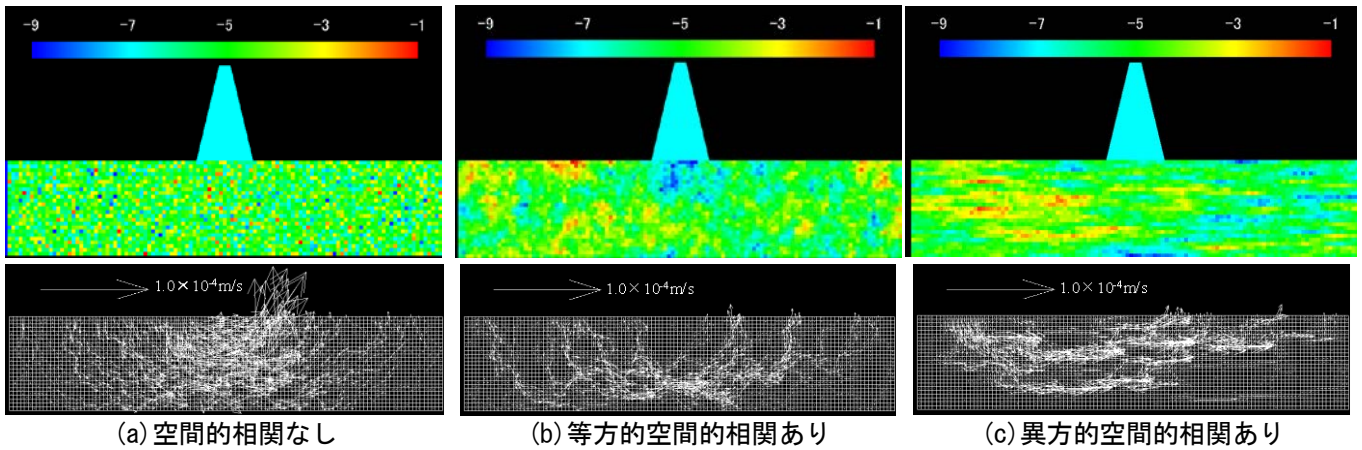


図-2.1 乱数の発生方法の違いによる浸透特性の変化
(上段：透水係数分布（常用対数值）、下段：流速分布）

計的な特性が同一でも、空間的なばらつきが異なることにより、浸透特性が大きく異なることがわかる。

実際のダム基礎岩盤の透水性は、図-2.1(c)上図のように、異方的な空間的相関を有している場合が多いと考えられる。図-2.1(c)上図のように、異方的な空間的相関を有している場合には、図-2.1(c)下図のように高透水部を連結するような水みちが発生する可能性があり、カーテングラウチングの合理化を検討するためには、ダム基礎岩盤の透水性の空間的な分布を考慮することが重要である。

本研究が対象とする流水型ダムにおいては、常時満水位(NWL)が河床標高付近に存在し、NWLからサーチャージ水位(SWL)の間のアバットメント部の基礎地盤については洪水時に一時的に水浸するのみである。そのため、基礎浸透の非定常性を考慮することで、深部に存在する高透水部が卓越した水みちとならなければ、カーテングラウチングの施工範囲を縮小することができる可能性がある。

そこで平成24年度は、三次元非定常流解析により、ダム基礎岩盤の透水性の空間的な相関が浸透特性に及ぼす影響を検討するための入力データとして、統計的なばらつきと空間的な相関を両方保持する三次元透水係数場を作成した。

2.1 空間的な相関を有する三次元透水係数場の作成の作成方法

空間的な相関を有する透水係数場の発生方法としては、Sequential Gaussian Simulation (SGS, 逐次ガウスシミュレーション)を用いた●。

SGSでは、通常型クリギング(Ordinary kriging)を用いる●。通常型クリギングでは、点 x_0 における値を、その近傍に存在する n 個の標本点 $x_{\alpha}(\alpha=1, \dots, n)$ のデータ値と重み係数 w_{α} を用いた線形結合によって推定す

る。その際重み係数の総和が1となるような制約条件を取ることで、式(1)のようになる。

$$\begin{cases} Z^*(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} Z(x_{\alpha}) \\ \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

ここで推定分散は式(2)で与えられる。

$$\sigma_E^2 = -\gamma(x_0 - x_0) - \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n w_{\alpha} w_{\beta} \gamma(x_{\alpha} - x_{\beta}) + 2 \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} \gamma(x_{\alpha} - x_0) \quad (2)$$

ここで $\gamma(\mathbf{h})$ はバリオグラムである。重み係数に関する制約条件のもとに推定分散を最小化すると、数式3に示すような通常型クリギング推定式を得る。

$$\begin{pmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \dots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \dots & \gamma(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n - x_0) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

μ はラグランジュ乗数である。ここで行列式を実行することにより、通常型クリギング推定式を数式4のような形式に書き直すことができる。

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n w_{\beta} \gamma(x_{\alpha} - x_{\beta}) + \mu = \gamma(x_{\alpha} - x_0) \\ \sum_{\beta=1}^n w_{\beta} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

これより、通常型クリギングの推定分散は式(5)で与えられる。

$$\sigma^2 = \mu - \gamma(x_0 - x_0) + \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} \gamma(x_{\alpha} - x_0) \quad (5)$$

SGSでは、これらの式を用いて推定点における推定値と推定分散を算出する。推定点の値は正規分布に従うものとし、その正規分布には、算出された推定値と推定分散をそれぞれ用い、これに従う乱数を発生させて値を得る。

本研究では、参考文献●で公開されているソースコードを修正して、空間的な相関を考慮した透水係数場の生成を行った。本研究における SGS の概念図を図-2.2 に示した。

SGS を行う際にはシミュレーション対象点の周囲にある点のデータを用いる。図-2.2(a)に示すように、シミュレーションの対象点を中心とした円の内部に存在する点を用いることとし、その円の半径は相関距離と等しくなるように設定した。

ここで、シミュレーションにおける初期には、図-2.2(b)に示すようにシミュレーション対象点の周囲にシミュレーション済みの点は存在しないことがある。このような場合は SGS を行うことができない。

そのため、図-2.2(c)に示すように基準データを使用する。この基準データとは、例えば観測値データなど値が確定しているデータである。本研究における基準データは、指定された統計量の正規分布に従って乱数を用いて発生させた。基準データの位置は、各ケースの相関距離と等しい間隔で発生させることとした。これは、シミュレーション対象点を中心とした円の内部に基準データが必ず含まれるようにするためである。

そして図-2.2(d)に示すようにシミュレーションにおける後半のシミュレーションでは、シミュレーション済みの要素中心点が円の中に十分存在する状況が起こる場合が多くなる。このような場合にはシミュレーション済みの要素中心点のデータを基準データより優先させて使用するよう設定した。

2.2 対象モデル

三次元透水係数場を作成した対象モデルを図-2.3 に示す。図-2.3 上図のように、堤高 100m の重力式コンクリートダムの基礎岩盤をモデル化し、図-2.3 下図のように有限要素分割をしたモデルに対して、透水係数場を作成した。なお、原点は図-2.3 の下図のモデルの左下の点とした。

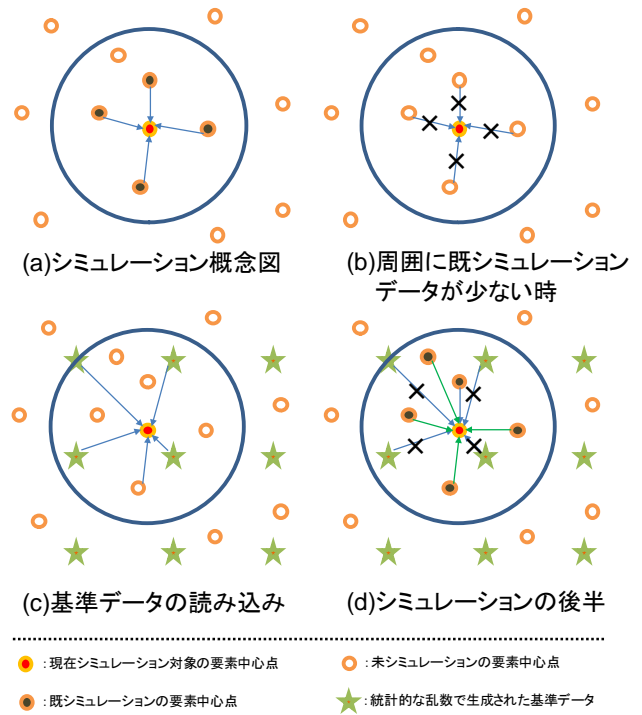


図-2.2 SGS の概念図

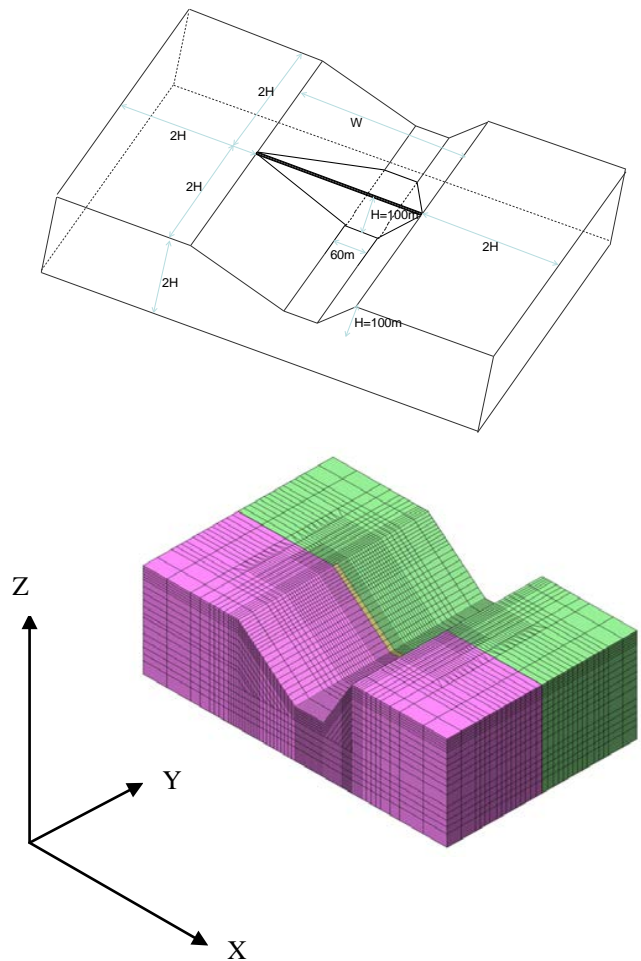


図-2.3 対象モデル

2.3 作成ケース

カーテングラウチングのパイロット孔におけるルジオン値の空間的な相関距離の既往の研究成果●)をふまえて、三次元透水係数場の作成ケースは表-2.1の3ケースとした。表-2.1のcase2はcase1よりも鉛直方向の相関距離が長いケースを想定し、case3はダム軸方向と上下流方法の相関距離が長いケースを想定している。各ケース10000個の透水係数場を作成した。

表-2.1 作成ケース

ケース番号	統計量(常用対数値)		パリオグラムモデル	相関距離(レンジ)(m)		
	平均値	標準偏差		ダム軸方向(x)	上下流方向(y)	鉛直方向(z)
1	-5	1	指数型	75	75	20
2				75	75	40
3				150	150	20

2.4 作成結果

2.4.1 作成した透水場

図-2.4に、 $z=12.5\text{m}$ におけるxy平面の透水係数分布の例を示す。また、図-2.5に、 $y=15\text{m}$ におけるxz平面の透水係数分布の例を示す。

図-2.4では、case1とcase2のx方向とy方向の相関距離は75mであり、case3のx方向とy方向の相関距離は150mである。

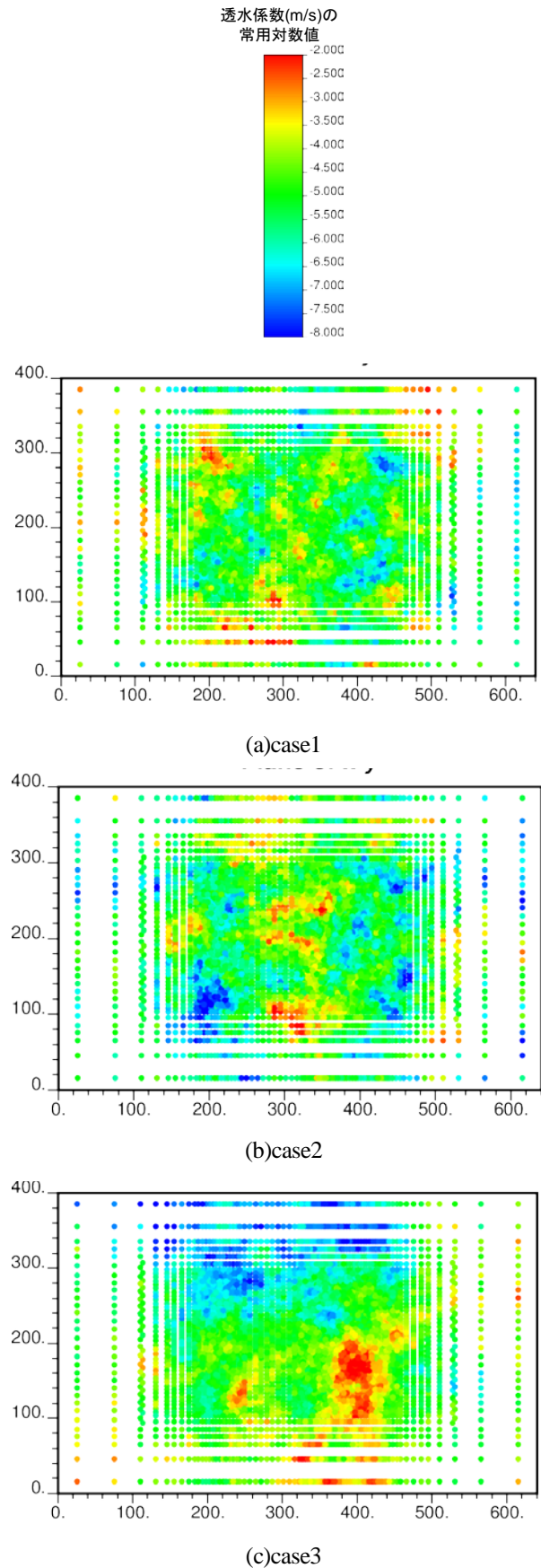
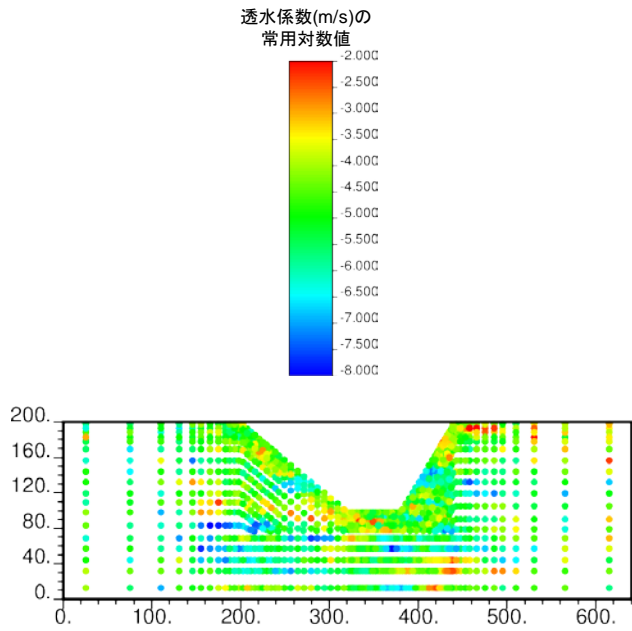
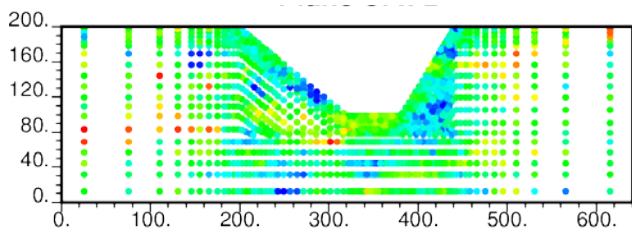


図-2.4 xy平面の透水係数分布

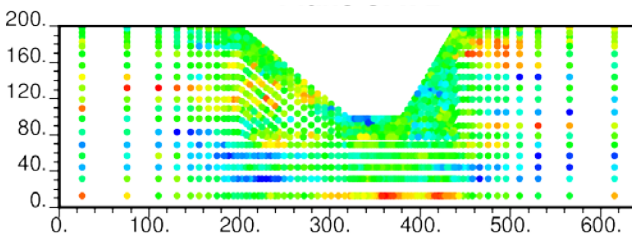
2.4.2 作成した透水場の統計量



(a)case1

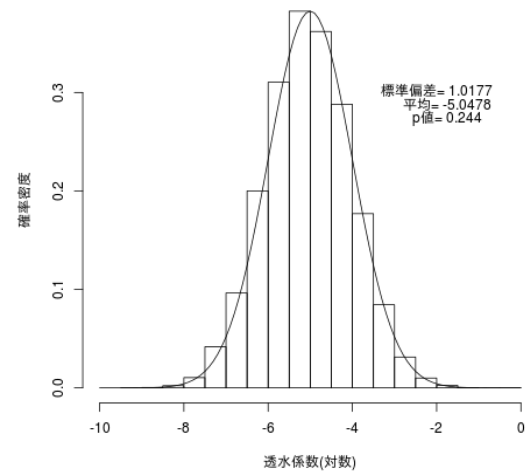


(b)case2

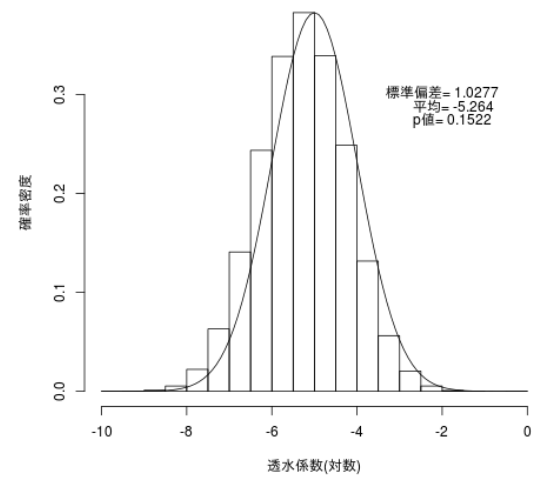


(b)case3

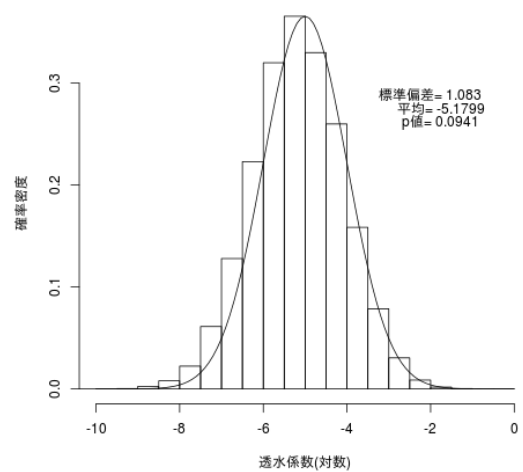
図-2.5 xz 平面の透水係数分布



(a)case1

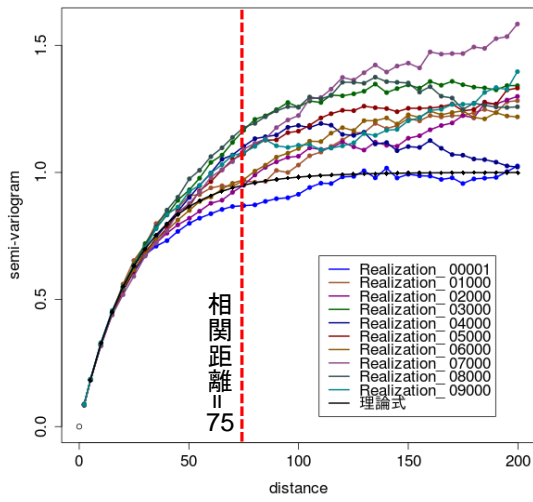


(b)case2

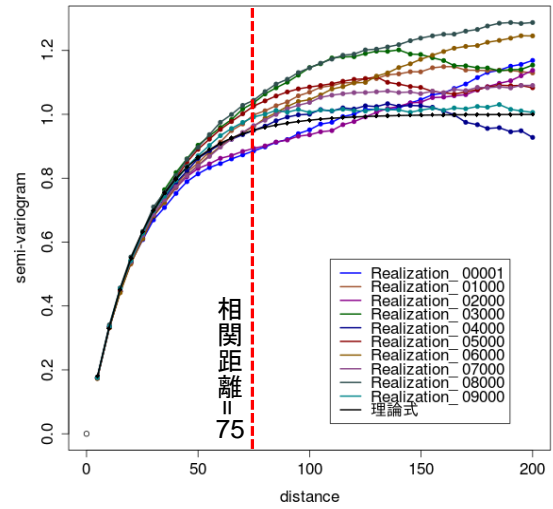


(b)case3

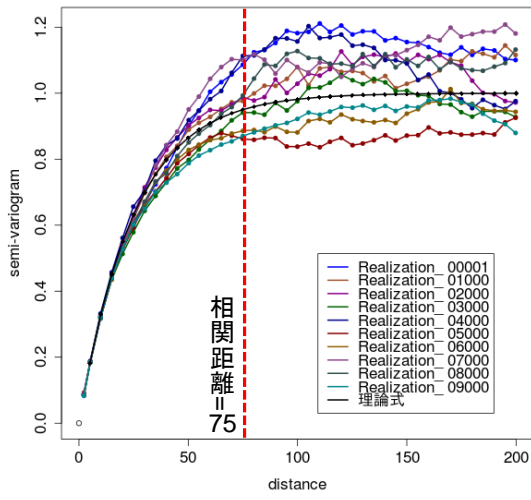
図-2.6 透水係数の頻度分布



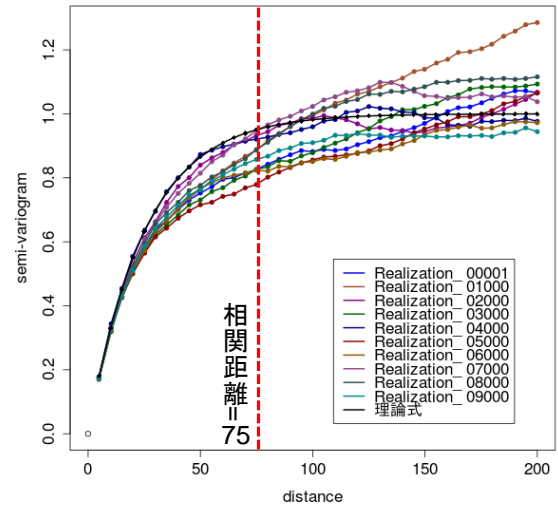
(a)case1



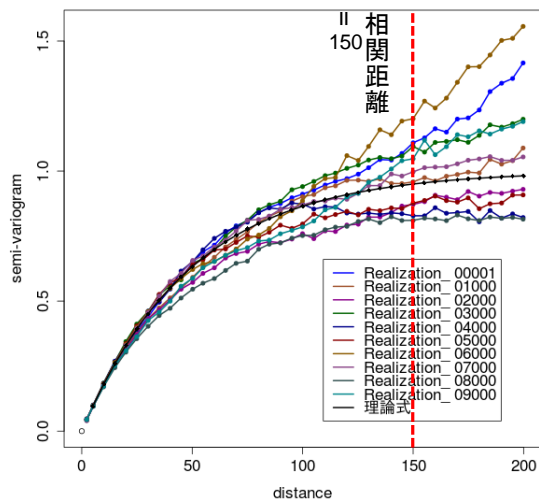
(a)case1



(b)case2

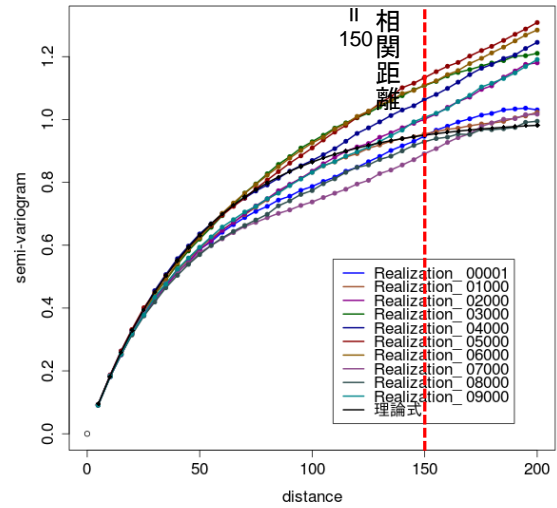


(b)case2



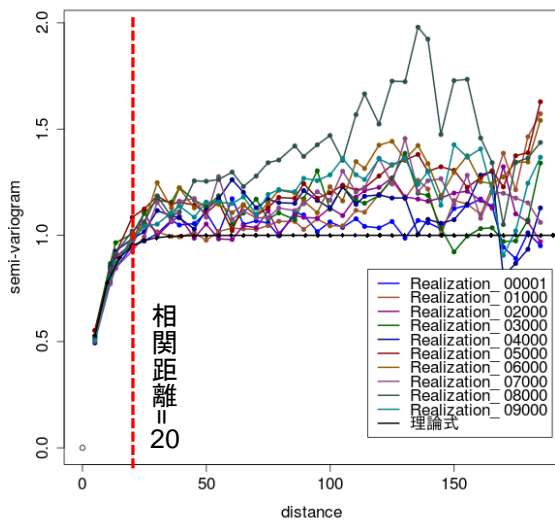
(b)case3

図-2.7 x方向のバリオグラム

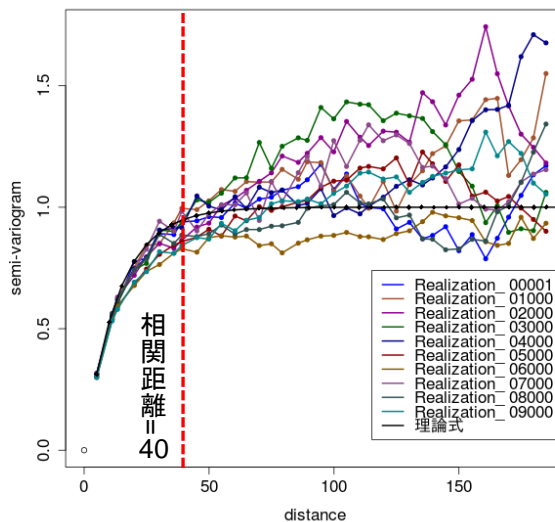


(b)case3

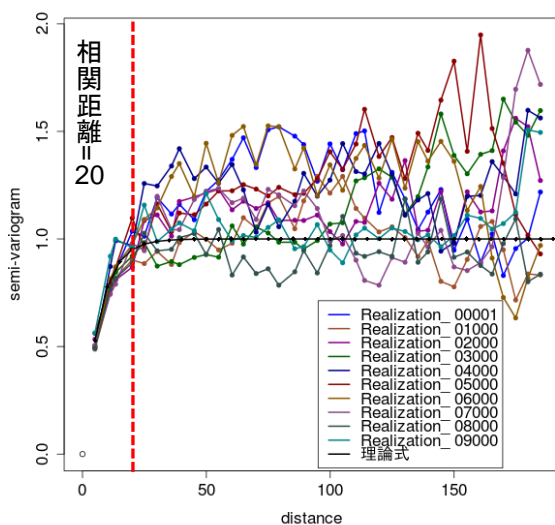
図-2.8 y方向のバリオグラム



(a)case1



(b)case2



(b)case3

図-2.9 z方向のバリオグラム

6. まとめ

平成 23 年度は、グラウチング技術指針の改訂（平成 15 年）の約 2 年前から現在までに試験湛水を行った国交省所管 78 ダムのカートングラウチングについての資料の収集を行い、カートングラウチングの合理化内容について整理を行い、流水型ダムのカートングラウチングにおいても合理化を図ることができる可能性のある項目の抽出を行った。また、空間的な相関を再現可能な透水性のばらつきの発生方法の確認とカートングラウチングの深度による影響の基礎的検討として、二次元定常浸透流解析を行った。以下に、本年度の成果をまとめる。

- (1) 本研究の調査により、平成 15 年のグラウチング技術指針の改訂後に試験湛水を実施したダムにおいては、大きく分けて計画変更と仕様変更によりカートングラウチングの合理化が実施されていることがわかった。これらの合理化内容を整理し、流水型ダムに積極的に活用することで、流水型ダムのカートングラウチングの合理化をかなり図ることが可能になると考えられる。
- (2) 既設ダムのカートングラウチングの合理化項目から、流水型ダムの特徴をふまえたうえで、流水型ダムのカートングラウチングにも適用可能と考えられる合理化内容について整理した。流水型ダムのカートングラウチングの合理化を考えるにあたっては、貯水ダムと同様、ダム基礎岩盤の水理地質構造などを踏まえてダムの安全性を確保する必要があるとともに、現状では試験湛水により堤体および基礎地盤などの安全性を確認する必要があることに留意する必要がある。
- (3) 空間的な相関を再現可能なばらつきの発生方法の確認、およびダム基礎の透水性の空間的な相関が浸透特性に及ぼす影響の基礎的検討のため、カートングラウチングの施工深度を変えて二次元定常の浸透流解析を実施した。その結果、統計的なばらつきと空間的な相関を両方保持する乱数の発生方法を提案できた。

今後は、透水性の統計的・空間的ばらつきを考慮した非定常浸透流解析により、流水型ダムのカートングラウチングの合理化の検討を実施していく予定である。

参考文献

- 1) (財) 国土開発技術センター発行、建設省河川局開発課
監修：グラウチング技術指針・同解説、1983年11月.
- 2) 国土交通省河川局治水課：グラウチング技術指針(案)・
同解説、2002年4月.
- 3) (財) 国土技術研究センター編集：グラウチング技術指
針・同解説、大成出版社、2003年7月.
- 4) 佐藤弘行、山口嘉一：地盤統計学を用いたダム基礎岩盤
の透水性分布推定、土木技術資料、Vol.43、No.3、pp.30-35、
2001.
- 5) Clayton V. Deutsch & Andre G. Journel : GSLIB,
Geostatistical Software Library and User's Guide, Second
Edition, 369p., 1998.

RESEARCH ON RATIONALIZATION OF CURTAIN GROUTING FOR DRY DAMS

Abstract: The number of construction plans of dry dams which do not impound the water except during the flood are increasing from the viewpoint of the river environmental preservation. The present standards for foundation treatment and grouting do not consider the effects of the change of water level of reservoir on unsteady seepage in dam foundation, and these design standards are thought to stand on the safety side. But as for the dry dams, the NWL (Normal Water Level) is almost at the riverbed and there is almost no water from the NWL to SWL (Surcharge Water Level) except during flood control. We can rationalize the design and execution of curtain grouting for dry dams if we consider and evaluate the unsteady seepage due to the impounding water level on the safety of dry dams.

In this fiscal year, we collected the technical documents concerning the curtain grouting of 78 dams which constructed after 2001 when grouting standards was revised. From technical documents, we extracted the many rationalization points in design and execution of curtain grouting in 78 dams. Based on the results, we proposed possible rationalization items of curtain grouting for dry dams in consideration of characteristics of dry dams. We conducted Monte-Carlo simulation of two dimensional steady seepage analysis to investigate the influences of spatial variations of permeability and the depth of curtain grouting. We could generate random numbers for permeability coefficients keeping statistical and spatial variations accurately.

Key words : dry dam, curtain grouting, rationalization.