

クリッキングを用いた河川堤防の土質分布の推定

The Estimation of the Soil Distribution of the River Levee using Kriging

藤村 尚 Hisashi FUJIMURA (鳥取大学名誉教授)



相次ぐ災害を受けて、堤防の質的管理における土質工学がクローズアップされ、浸透や越流による堤体の破壊問題、不均質な堤防の構造をどのように表現するか重要な問題になってきた。ここでは、地盤構造に関して空間的にばらつきを持つ不確定性を確率論に基づき取り扱う方法としてクリッキングと呼ばれる推定法を取り上げた。

キーワード：クリッキング、地盤構造、空間変動、河川堤防、N 値 (IGC : E-0, E-3, E-13)

1. はじめに

近年、極端気象が社会に大きな影響を及ぼしている。極端現象に伴う災害変動評価では、河川堤防の安全率の低下が課題となる。さて、極端気象とも考えられる新潟・福島豪雨(2004.7)では、梅雨前線の停滞による集中豪雨で、信濃川水系の堤防の数箇所が決壊し、これによる浸水により甚大な被害が発生し、新潟県内で全壊71棟、半壊5657棟、一部損壊82棟、床上浸水1882棟、床下浸水6197棟、死者15名、重軽傷者82名といった被害に見舞われた。また、兵庫県北部を流れる円山川では、台風23号(2004.10)がもたらした、2日雨量278mmという豪雨により、円山川下流域の一市三町(豊岡市、城崎郡城崎町、日高町、出石郡出石町)で、浸水面積4083ha、浸水家屋11874棟に達する甚大な被害が発生した。円山川と出石川の多くの個所で越水し、両河川堤防の1箇所が決壊し甚大な被害となった。

このように、局所的にまとまった降雨があると、洪水が発生し、その力を抑えきれなくなった堤防が決壊・決壊して水害になる事例は数多く存在する。堤防の決壊等は、降雨だけではなく、地震によって堤防が決壊・決壊した事例もある。

十勝沖地震(2003.9)では、液状化によって、十勝川下流域の河川堤防が甚大な被害を被った。また、兵庫県南部地震(1995.1)でも、淀川の堤防が、基礎地盤の液状化により、著しい被害を受けている。

相次ぐ災害を受けて、堤防の質的管理における土質工学がクローズアップされ、浸透や越流による堤体の破壊問題、不均質な堤防の構造をどのように表現するか重要な問題になってきた。

そこで、地盤構造に関して空間的にばらつきを持つ不確定性を確率論に基づき取り扱う方法としてクリッキングと呼ばれる推定法^{1) 2) 3)}を取り上げた。このクリッキングによる推定法は従来、鉱山工学、水文や地下水の分野などで用いられてきたものである。

2. クリッキングを用いた地盤物性値の空間分布推定法

地盤構造において地層厚等をはじめとする地盤物性値の空間分布の把握は非常に重要である。地盤物性値は本来空間的にばらつく不確定性を有しているため、確定値として定めることは困難である。そこで、地盤物性値の空間的にばらつく不確定性を確率論に基づいて取り扱い、地盤物性値の空間分布を確率場としてモデル化する。

ここで推定法として用いるクリッキング理論は、南アフリカ共和国の大学教授 Krige により発案され、フランスの統計学者である Mathoron によって理論的な定式化が行われた。クリッキング理論^{1) 2)}は標本場の推定に有効であると考えられ、地盤物性値の空間分布を標本場として扱い、土質調査により得られた標本値をもとに解析対象地点(地域)の地盤物性値の空間分布を推定しようとする手法である³⁾。

クリッキングは定常確率場の推定法であるため、エルゴード性を仮定して、地盤物性値の統計量である平均値、分散、自己相関関数を推定し、推定値の不偏性と推定誤差分散を最小にするという条件のもとに、標本値を用いて標本場の推定を行うことになる。しかし、対象が非定常確率場と考えられる時には、統計量の推定が不可能となる。そこで、確率場を確定値として与えるトレンド成分と定常確率場として与えられるランダム成分との和として表現することにより、クリッキング理論の導入が可能になる。

ここでは、地層および N 値の空間分布の推定にクリッキング手法を用いる。この方法は、土質調査によって得られた標本値を用いて、任意の地点における地盤物性値を求めるといったものである。この方法においては、トレンド成分の決定とランダム成分の統計量の推定を同時に行う必要があるが、一般的には、トレンド成分を重回帰分析などにより決定し、次にランダム成分の自己相関係数あるいは共分散関数を推定するという手段がとられている。

クリッキング手法を用いると、ある地点における地盤物性値を、推定値と推定誤差により定量的に評価することができる。

ークリッキング理論による空間分布推定法の特徴ー

クリッキング理論による地盤物性値の空間分布推定の特徴について説明する。その例として、図-1 に示す一次元のモデルについてクリッキングを適用した。まず、図-1 の実線で示したような土質定数が存在し、赤丸印の標本値が得られたとする。次に、この標本値から統計量を推定し、ユニバーサル・クリッキングにより推定値と推定誤差を求める。このとき自己相関係数を次のように定めた。

$$\rho(x) = \exp \left[- \left\{ \left(\frac{\Delta x}{L_x} \right)^2 \right\} \right] \quad (1)$$

また、このときの相関距離 L_x を標本点間隔を 10 とした。なお、実際の問題への適用に当たっては、これらの統計量もまた、調査結果から得られた標本値あるいは経験的な知識から設定することになる。

図-2 は実線が推定値を、破線が推定値+推定誤差を示しているが、図-1 に比べて図-2 の推定値が滑らかになっているのは、推定値が平均的な変動のみを表しているためである。また、推定値が標本値を通り、さらに推定誤差が標本点では 0、それ以外の点では標本点から離れるに従って大きくなっている。従って、標本点を多くすれば推定誤差は小さくなり、推定値は真の値に近づくと考えられる。標本数の異なる例として、図-2 と図-3 に示す。図-2 は標本数 11、図-3 は標本数 6 の場合の推定結果である。ここで、図-2 は標本分散 0.029、標本平均 1.0、同様に図-3 は標本分散 0.034、標本平均 0.983 である。この両図を比較すると、標本値が多いほうが推定誤差は小さくなり、推定値も真の値に近くなっている。

以上のように、クリッキングによって実際の地盤における地盤物性値の空間分布を推定するとき、土質調査からの土質データについて調査位置が分かっているならば、標本値から得られる統計的性質だけでなく、標本値自体も考慮した上での空間分布の推定が可能である。さらに、地盤の不確定性を標本点以外の地盤物性値を推定するときの誤差として定量的に評価することができる。

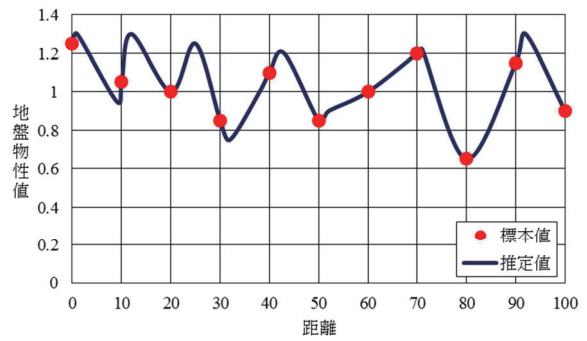


図-1 地盤物性値の空間分布モデル

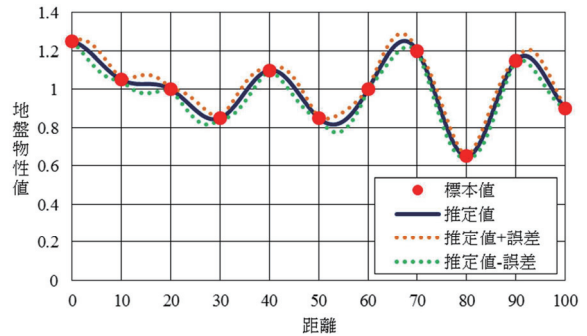


図-2 クリッキングによる推定値と推定誤差(標本数 11)

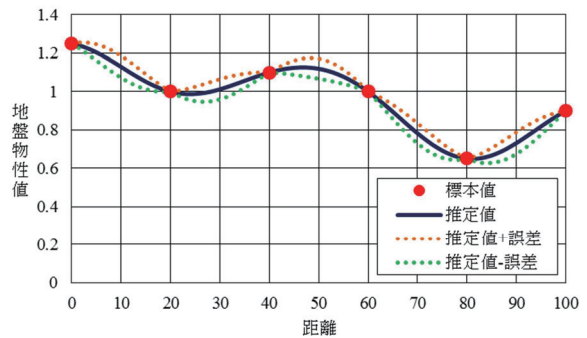


図-3 クリッキングによる推定値と推定誤差(標本数 6)

3. 河川堤防とその基礎における地盤構造の推定

河川堤防の破堤・決壊等を招く要因となる地盤災害の危険地予測において、地下の地盤構造を知ることは非常に有意義なことである。しかし、各河川について地盤情報は少なく、限られたデータをもとに推定しなければならない。河川堤防のボーリングはおおよそ 200m 毎の点の情報となる。そのため、地盤構造を推定するに当たって、空間的にばらつきを持つ地盤物性値を、確定値として定めることは困難である。

そこで、事例としてクリッキングによる鳥取県東部の千代川堤防の地盤の推定を行った。千代川の河口～稲常橋(鳥取市河原町稲常)の区間(約 13.8km)の右岸・左岸堤防を対象にして、地層および N 値分布の推定を行う。

表-1 地層区分と地質名

地層年代	地層名	地質記号	地質名	地層年代		地層名	地質記号	地質名				
				地層年代	地層名							
新生代第四紀	完新世	盛土	B	新生代第三紀	鮮新世	岩盤	R	火山岩類				
		沖積層	Ac		中新世							
		As	砂質土									
		Ag	礫質土									
	更新世	洪積層	Dc	粘性土	中生代				白亜紀			花崗岩類
			Ds	砂質土								
Dg			礫質土									

3.1 千代川堤防の地盤推定

同地域の地盤を構成する地層および地質の区分を表-1に示す。地層分布の推定に用いたボーリングデータの位置を図-4に示す。これらのボーリング調査により得られた実際の各地層厚データを標本値として地層厚の空間分布推定に適用する。ボーリングが層の途中で終わっている場合については、その層より上の層の層厚までをデータとして採用している。鳥取東部の地質層序の16~18種類に準じ、同質の地層が複数重なっている場合については、上部に位置するものから表した。相関距離は150m, 100m, 50mの3パターンとした。

N値の位置は、地層分布の推定に使用したものと同じである。地盤を地表面から1mごとの層と見なし、GL-30mまでを推定した。

3.2 千代川堤防の地層とN値の解析例

標高は国土地理院刊行の数値地図、ボーリングデータは国と県のデータを使用した。堤防位置は、両岸に沿ってGPSで取得し、推定する断面もこれに準ずるものである。右岸の地盤推定には千代川以東で得られたボーリングデータ(図-4:青点)を、左岸の地盤推定には千代川以西で得られたボーリングデータ(図-4:赤点)を使用した。ボーリング位置は河川を中心に両岸にそれぞれ約2.5km以内に分布するものを使用した。

図-5と図-6はそれぞれ右岸と左岸の地層分布を、図-7および図-8は右岸と左岸のN値分布の結果を例示している。図の(a)~(c)は、相関距離を150m, 100m, 50mに設定して推定したものである。これらの図は、堤防に沿って切り出した断面を、南北方向の軸に投影したものとなっている。

まず、対象範囲における千代川堤防の基礎地盤は、河口部が砂丘、鳥取市街地ほぼ全域が三角州、上流部が河川埋積谷低地、扇状地になる。

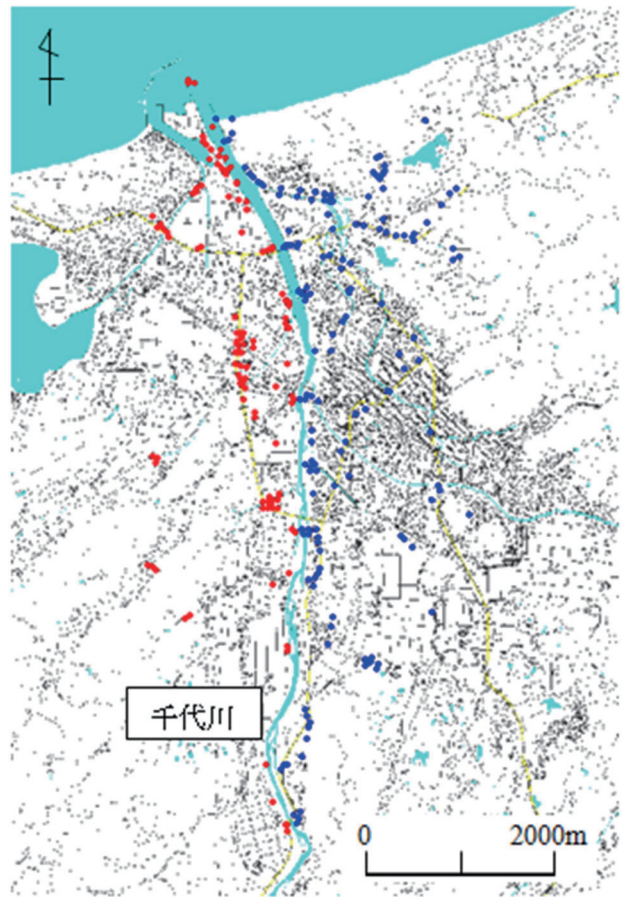


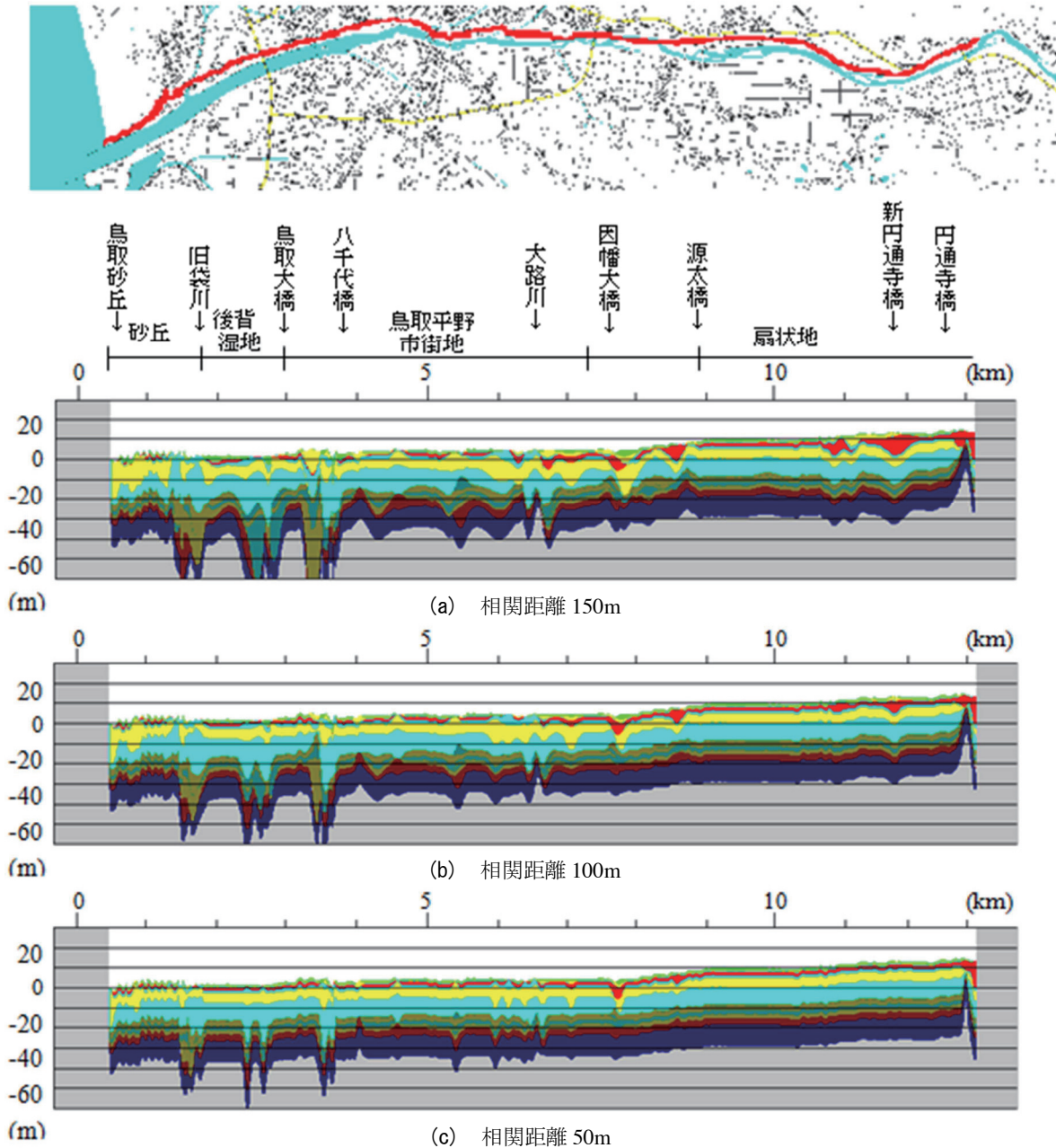
図-4 千代川とボーリング位置

河口部ではAs層およびDs層が発達し、その間にAc層を挟んでいる。市街地ではごく浅い部分に上部Ac層が薄く堆積し、その下のAs層もさほど発達していないが、深部のAc層が厚いところで20mを超えて分布している。これより上流側では、Ag層が徐々に発達していき、Ac層は薄くなっていく。またAc層を挟んで洪積層が浅いところから現れてくる。

地層分布は、ボーリングデータ間の距離およびその値と相関距離により著しく変化している。

次に、N値分布の推定結果について、右岸、左岸ともに深さ方向に対してN値が増加する傾向を示す。また、市街地などAc層が発達している箇所ではN値が小さく、砂丘および上流部のような砂質土や礫質土が発達している箇所ではN値が大きい。

相関距離が小さくなるほど一様の分布が目立っている。このことは、推定範囲を1つに定めたことによりデータ分布を全体で唯一の母集団として解析を行ったので、どの箇所においても平均値および分散が同じになった結果である。今回の例示では、相関距離として150mを用いるのが妥当であろう。



地質構成表

地層時代	地層名	地質名	地質記号						
新生代第四紀	完新世	盛土	盛土	B	新生代第三紀	岩盤	火山岩類	R	
		沖積層	粘性土	A c					
			砂質土	A s					
	礫質土		A g						
	更新世	洪積層	粘性土	D c			中生代		花崗岩類
			砂質土	D s					
礫質土			D g						

図-5 右岸における地層分布の推定

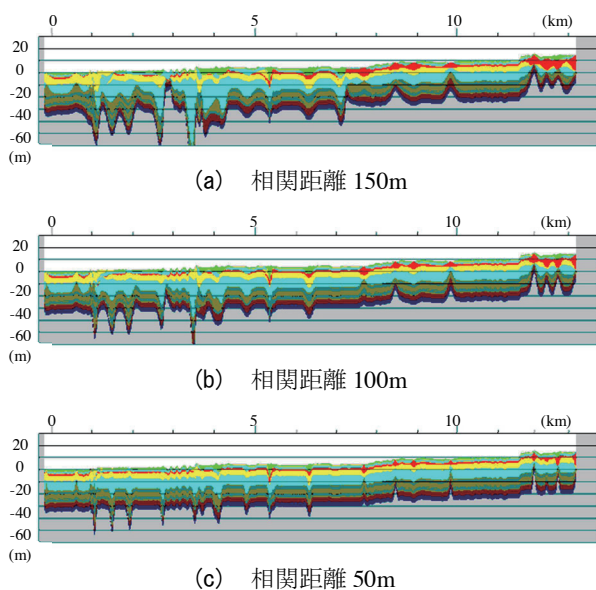


図-6 左岸における地層分布の推定

3.3 ブロック化したときの千代川堤防の地層と N 値の解析例

図-9は千代川両岸における推定範囲をⅠ～Ⅳの6つのブロックに分けて解析した。このとき、隣接するブロック同士の地盤の連続性を考慮するため、各ブロックの推定に用いるデータには、推定するブロックに加え、隣接するブロックのものも含めて行った。地層および N 値分布の相関距離ごとの推定結果のうち、図-10、図-11は右岸の地層分布と N 値分布を示している。なお、図中の縦線はブロックの境界を示している。先の図-5、図-7と比較すると、地域の地盤特性を反映した表現になっている。

解析例を基に、右岸と左岸の地層分布の推定結果を比較してみると、全体的な地盤の特徴はよく似た結果を示しているが、左岸堤防に比べて右岸の推定値が大きく変動している。特に市街地部分においてはその差が顕著である。両岸で N 値分布は異なり、その値は右岸のほうが大きい結果になっている。

以上から、クリッキングを用いて地盤構造を推定することはある程度可能であり、これによって、河川堤防に関して考えられる地盤災害に対し、注意すべき箇所を定め、具体的な調査を行い、対策や実施工が可能になると考えられる。その際に、推定範囲をボーリング位置のばらつきや地盤特性などによってブロック分けし、そのブロックごとに相関係数を決定することで、推定結果の精度は大きく向上する。

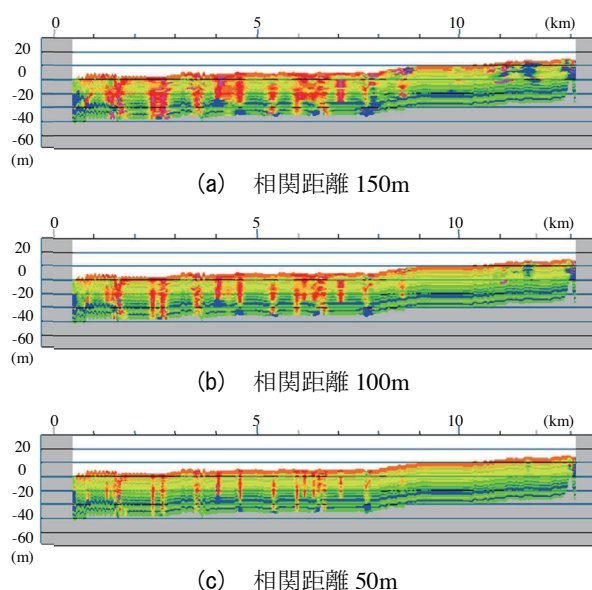


図-7 右岸における N 値分布の推定

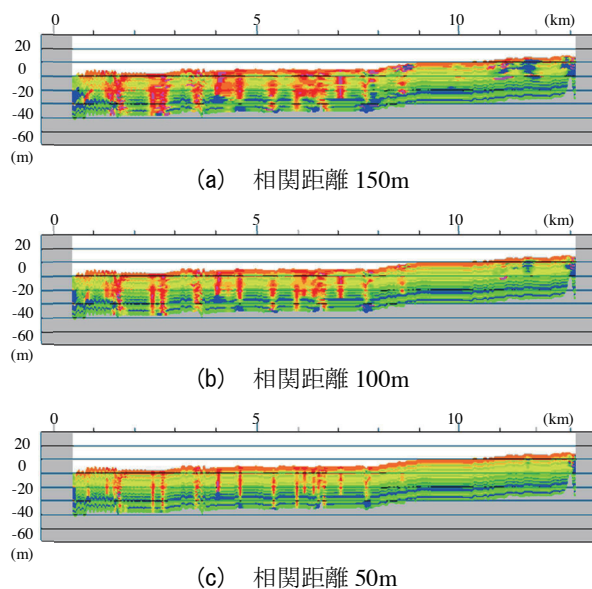


図-8 左岸における N 値分布の推定

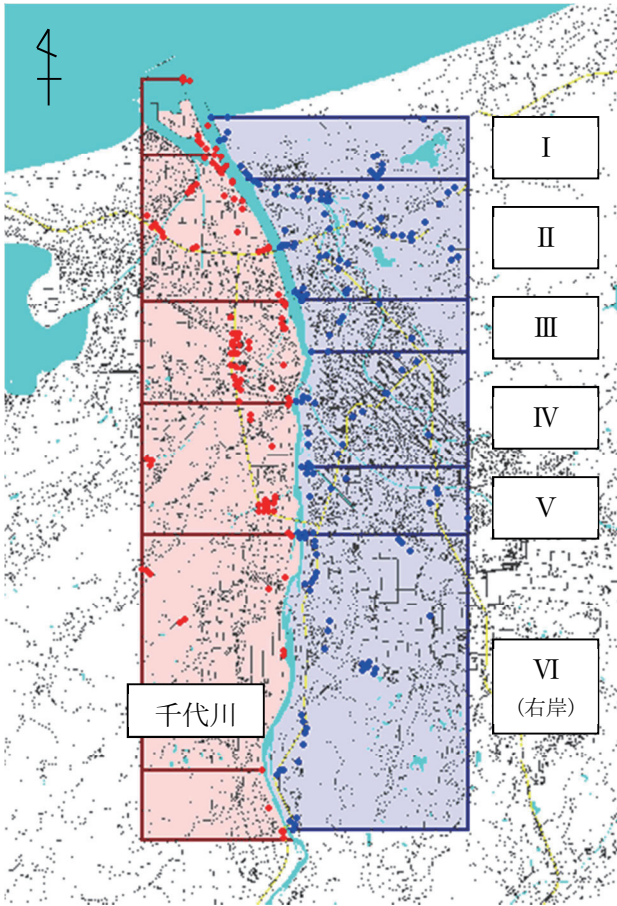


図-9 ブロック区域とボーリング

4. 結語

河川堤防とその基礎の地盤構造について、標本場の推定法であるクリッキング手法を用いて解析を行った。鳥取市における千代川両岸を対象とし、地層および N 値分布の推定を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) クリッキング手法を用いて、鳥取市における千代川両岸の下部の地層および N 値の分布を推定し、それぞれの特徴を捉えることができた。
- (2) クリッキング手法による地盤構造の推定には、相関距離を変化させたときの推定結果の変化について示し、相関距離が推定結果に大きく影響することを示した。
- (3) 解析対象地域をボーリングの位置のばらつきやデータの特徴を考慮していくつかのブロックに分割し、それぞれのブロックごとに地質と N 値の推定を行うことで、詳細な地盤情報が得られた。

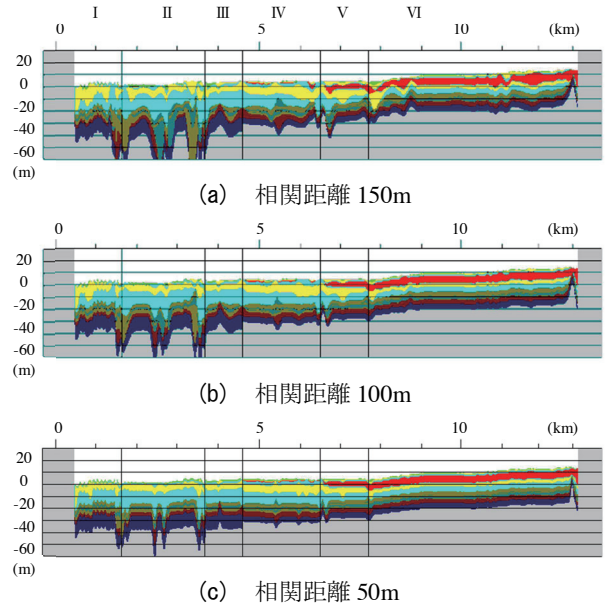


図-10 右岸におけるブロック毎の地層分布の推定

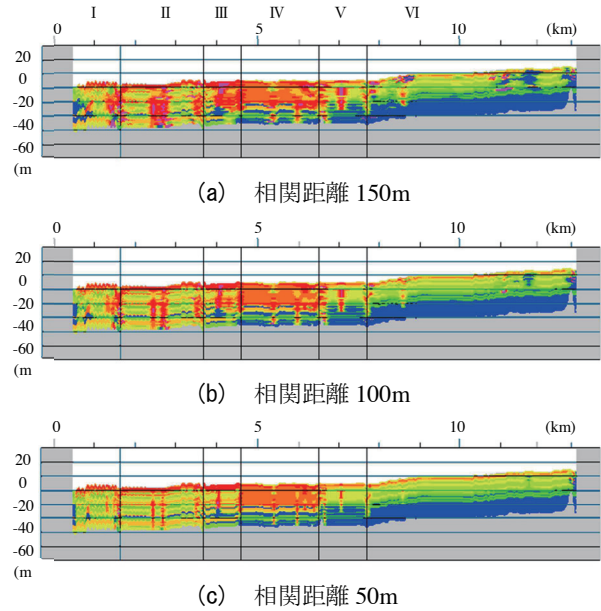


図-11 右岸におけるブロック毎の N 値分布の推定

参考文献

- 1) Ripley, B.D: Spatial Statistics, John Wiley and Synthesis, 1983.
- 2) Journel, A.G and Haldrup, Ch.J: Mining Geostatistics, 1987.
- 3) 鈴木 誠, 石井 清: 土質定数の空間分布推定法を用いた確率有限要素法, 土木学会論文集, No.394/III-9, pp.97-104, 1986.

(2010年8月13日 受付)