

河川堤防の安全性評価に向けた強度分布の推定方法

Prediction Method of Spatial Distribution of Strength Parameters
for Safety Evaluation of River Embankments

西村伸一	Shin-ichi NISHIMURA	(岡山大学)
藤原身江子	Mieko FUJIWARA	(株ウエスコ)
工藤健雄	Takeo KUDO	(株エイト日本技術開発)
内藤秀信	Hidenobu NAITOH	(応用地質株式会社)
与那城稔	Minoru YONASHIRO	(株ウエスコ)
土屋善浩	Yoshihiro TSUCHIYA	(株エイト日本技術開発)
高山裕太	Yuta TAKAYAMA	(岡山大学)

近年の集中豪雨の増加への対策という観点から、河川堤防の維持管理の重要性が指摘されている。一方、河川堤防は、内部構造が不確定なもの多く、堤防としての機能が低下している箇所もある。そこで、維持管理の第一歩として、内部構造の的確な把握が必要である。著者らは、そのような社会的要請に対して、岡山県内の実堤防を対象として調査を行った。調査では、標準貫入試験の他、動的貫入試験、弾性波探査、サンプリング試料による土質試験を実施している。本研究では、その調査結果を基に、内部の強度分布のモデル化を行おうとしている。モデル化には、地質統計学の一手法であるインディケータシミュレーション法を用いており、内部の強度空間分布の可視化を試みている。

キーワード：河川堤防，維持管理，簡易動的コーン貫入試験，表面波探査，インディケータシミュレーション (IGC：C-2, C-3, E-13)

1. はじめに

近年の集中豪雨の増加に対抗するため、河川堤防の維持管理の重要性が指摘される。しかしながら、河川堤防は内部構造が不確定なものが多く、堤防としての機能が低下している箇所もある。そこで、維持管理の第一歩として、内部構造の的確な把握が必要である。著者らは、そのような社会的要請に対して、岡山県内の実堤防を対象として調査を行っており、本研究は、調査結果の維持管理への利用の仕方を提案するものである。

維持管理の項目は、調査、点検・巡視等があげられるが、個々の項目について治水等の目的に照らし合わせた維持管理基準が重要となる。その管理基準は従来の管理技術に加え、1級河川、2級河川など河川特性、背後地の重要性の状況に応じた管理基準値が重要となる。

現在、河川堤防の維持管理の一環として、河川堤防設計指針（国土交通省河川局治水課）¹⁾に基づき、河川堤防機能の1つでもある耐浸透機能に関する点検が実施されている状況にある。この点検においては堤防の内部構造を把握するための調査が実施されているものの、堤防自体が河川の氾濫の繰り返しの中で長い年月をかけて築堤され現

在に至る構造物であり、築堤された時点での築堤材料、施工法については不明な点が多い。このために、内部構造自体が確実に把握されていない状況にある。

これらの点検手法は、平成9年に改訂した河川砂防技術基準（案）²⁾に踏まえ、水理学あるいは土質工学的な知見に基づく安全性の照査法を用いた堤防設計法（浸透流解析＋安定計算）が導入されている。この他に、維持管理としては日時の巡視によるものがあるものの、対象河川が長い区間でもあり、巡視だけでは堤防機能を保持することは難しい状況にある。このため、堤防機能が保持されるためには、堤防の内部構造が重要な項目となってくる。

本研究では、堤防の内部構造を明らかにする手段を構築し、維持管理への利用する一手法を提案することを目的としている。そのための基礎段階の調査として、標準貫入試験の他、簡易動的コーン貫入試験³⁾、弾性波探査の一手法である表面波探査⁴⁾、サンプリング試料による土質試験を実施している。実際の河川堤防を対象とした調査を実施しており、その調査結果を基に内部の強度空間分布のモデル化を試みている。

今回は、モデル化の手法として、地質統計学の一手法であるインディケータシミュレーション法⁵⁾を用いている

が、この方法によると、多種類の調査結果(今回の場合は、表面波探査とサウンディング)を合成することができるという利点を得られる。ここでは、N値の空間分布を解析結果として得ている。さらに、本手法に依れば、推定誤差を詳細に考慮できることを利用して、N値が設定された閾値を下回る確率を求めている。最終的な目的として、このような確率値を堤体のリスクに結びつけ、維持管理に役立てようと考えている。

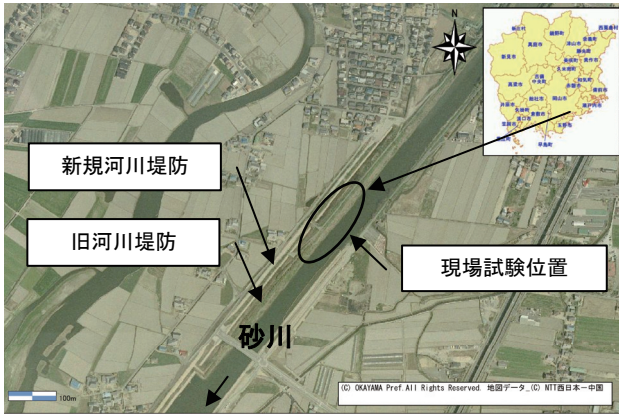


図-1 現地の概要

「岡山県統合型 GIS (地理情報システム) より」

表-1 試料の物理的性質

地点番号	採取深度 GL-m	土粒子の密度 g/cm ³	自然含水比 %	最大粒径 mm	礫分 %	砂分 %	細粒分 %	分類記号
B-1	0.5-1.0	2.660	16.5	19	19	48	33	(SCsG)
	1.0-1.5	2.627	12.1	9.5	2	66	33	(SCs)
	1.5-2.0	2.642	9.1	9.5	3	78	19	(SCs)
	2.0-2.5	2.631	19.1	9.5	4	68	28	(SCs)
B-2	2.5-3.0	2.657	38.0	4.75	2	45	53	(CsS)
	0.5-1.0	2.662	22.7	4.75	1	63	36	(SCs)
	1.0-1.5	2.655	37.8	4.75	2	41	58	(CsS)
	1.5-2.0	2.634	13.5	9.5	9	73	18	(SCs-G)
B-3	2.0-2.5	2.649	26.1	4.75	0	30	70	(CsS)
	2.5-3.0	2.650	29.0	4.75	1	32	68	(CsS)
	0.5-1.0	2.654	20.0	4.75	1	57	43	(SCs)
	1.0-1.5	2.636	10.4	9.5	4	56	41	(SCs)
B-3	1.5-2.0	2.661	23.3	9.5	3	44	54	(CsS)
	2.0-2.5	2.640	27.0	19	17	46	37	(SCsG)
	2.5-3.0	2.631	24.4	4.75	0	67	33	(SCs)

注) 採取深度は地表面よりの深さを表している

2. 現場試験

2.1 現場試験の概要

現場試験実施場所は、岡山県による河川改修工事が実施されている一級河川砂川の右岸側旧河川堤防である。砂川は、岡山 3 大河川のひとつ旭川水系に属し、岡山県赤磐市の北部より岡山市へ南下し、旭川に合流する。砂川の河川改修工事では図-1 に示すように、新規河川堤防築堤の後、旧河川堤防が撤去される計画となっている。旧河川堤防は、概ね高さ 3m、幅 4m で土質は中砂を主体とした粘性土質砂(SCs)に分類される。表-1 に標準貫入試験時に採取した

試料の物理的性質を示す。

現場試験では、旧河川堤防の強度特性を確認する標準貫入試験および簡易動的コーン貫入試験を、物理特性を確認する高密度表面波探査を実施した。

2.2 動的貫入試験

(1) 試験位置と方法

図-2 に示すように、標準貫入試験は旧河川堤防横断位置に 3 箇所実施した。また、簡易動的コーン貫入試験は、標準貫入試験実施箇所に隣接した N-1~N-3 および高密度表面波探査縦断測線に沿って 25m 間隔で N-4~N-9 の計 9 箇所実施した。

標準貫入試験は、日本工業規格(JIS A 1219 -2001)にしたがい、地表面下 1m より深度方向に 50cm 間隔で行った。

N 値は貫入量 Δh (mm) と打撃回数 n より次式で求めた。

$$N = 300(n/\Delta h) \quad (1)$$

簡易動的コーン貫入試験は、地盤工学会基準(JGS 1433-2003)にしたがい、現道舗装下より実施した。N_d 値は深度方向の強度変化を詳細に把握できるように、貫入量 $\Delta h=50$ (mm) の打撃回数 N_c より次式で求めた。

$$N_d = 100(N_c/\Delta h) \quad (2)$$

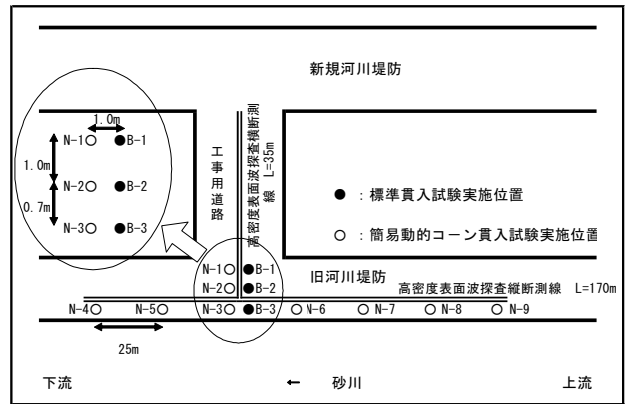


図-2 模式位置図

(2) N 値と N_d 値

図-3(a)~(c)に、N 値および N_d 値の深度方向の分布を示す。N 値と N_d 値を比較すると、N_d 値の方が N 値よりやや大きい値を示す。N 値と N_d 値については、N_d = (1~3)N の関係があり³⁾、N_d 値は N 値と同じか大きくなると報告されている。今回の結果はそれと同様の傾向を示した。なお、詳細な相関式は、後の章で議論される。

2.3 表面波探査結果

高密度表面波探査は、人工的に表面波(レイリー波)を発

生させ、多チャンネルで測定・解析して深度15~20 m程度までの地盤のS波速度を二次元断面として画像化するものである。本研究では、図-2に示す旧河川堤防上に探査測線を設置した。なお、探査測線上における受信点間隔は、縦断方向で2 m、横断方向で1 mとした。

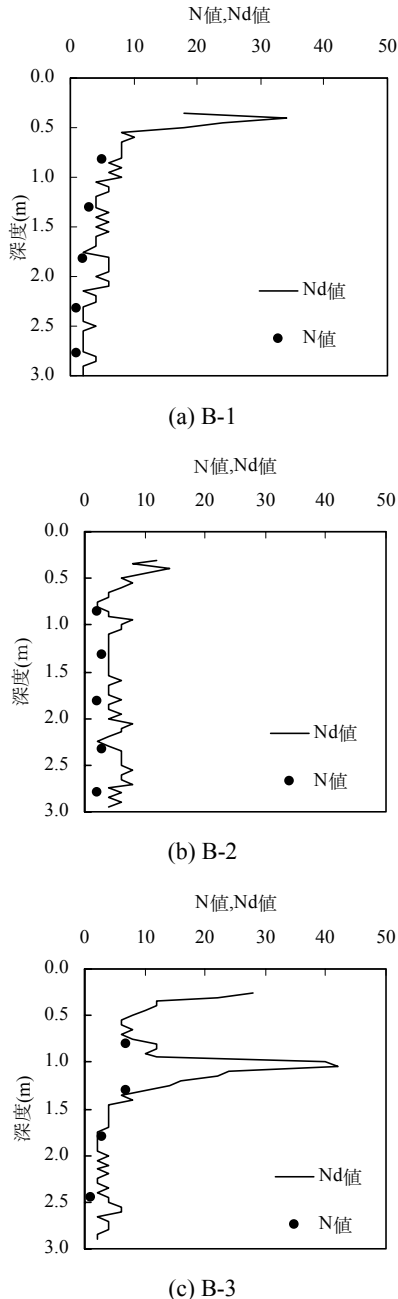


図-3 ボーリング孔におけるN値とNd値

図-4は、高密度表面波探査の結果より得られたS波速度分布図である。これをみると、S波速度の違いが捉えているものとして、次のものが挙げられる。

- ・縦断方向における堤体と基礎地盤との境界。
- ・横断方向における堤体と仮設盛土（工事用道路）との境界及び堤体と基礎地盤との境界。
- ・堤体下部における緩み領域の存在。

表面波探査では、地盤のS波速度構造を推定することができるが、地盤のS波速度は、物質の硬さなどの工学的な目安となる剛性率に直接関係する値であり、一般にN値との相関も良い。地盤のS波速度とN値の関係には、以下のようなものが知られている⁶⁾。

$$V_s = 89.8N^{0.341} \quad (3)$$

式(3)を用いて図-4のS波速度分布図を推定N値分布図にすると図-5のようになる。これによると、堤体と基礎地盤の境界や堤体内部の緩みの状況をより鮮明に見ることができる。

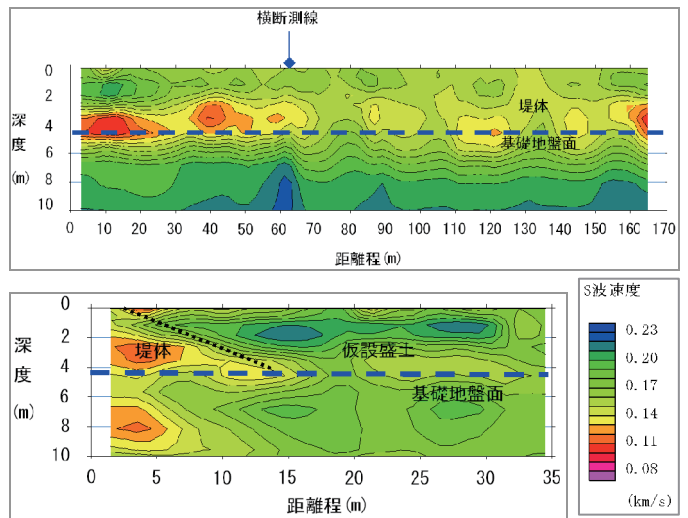


図-4 S波速度分布図（上：縦断方向，下：横断方向）

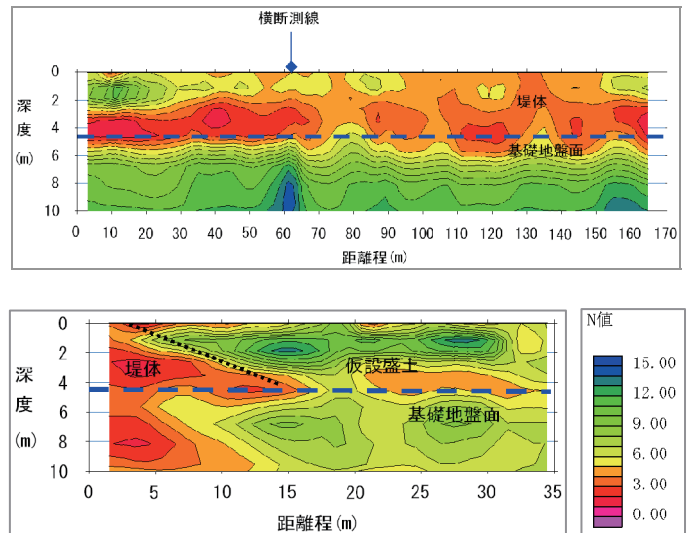


図-5 推定N値分布図（上：縦断方向，下：横断方向）

図-5は、一般的な V_s とN値の関係からN値の分布をモデル化したものである。このため、推定N値分布図を現地に合った精度の高いものにするためには、標準貫入試験などサウンディング結果を用いてN値分布図を補正する必要がある。

次項では、高密度表面波探査、標準貫入試験及び簡易動

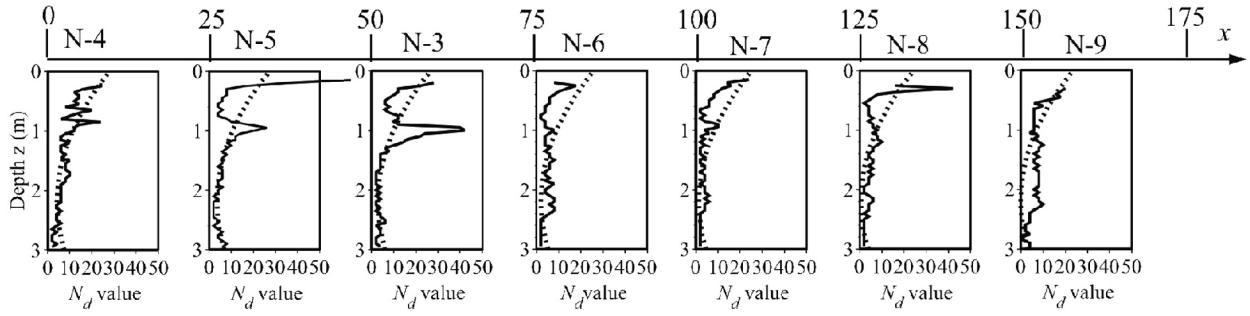


図-6 動的貫入試験の実測値と同定された平均値関数 (実線：実測値 破線：平均値関数)

的コーン貫入試験の結果から、インディケータシミュレーション法を用いて堤体内部の N 値分布のモデル化を試みる。

3. 地質統計学手法による N 値分布のモデル化

3.1 地盤パラメータの統計モデルの一般的記述

地盤定数を代表する変数を ξ とし、これが空間座標 $\mathbf{u}=(x, y, z)$ の関数であるとする、一般に、次式で与えられ、 ξ は平均値関数 $\mu(\mathbf{u})$ と確率成分 $U(\mathbf{u})$ の線形結合で表されると仮定している

$$\xi(\mathbf{u}) = \mu(\mathbf{u}) + U(\mathbf{u}) \quad (4)$$

ここで、変数 ξ は空間的に離散化してベクトル $\xi=(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_M)$ で与えられるとする。ただし、 M はテスト箇所の個数である。土質試験から得られた結果を $\Xi=(\Xi_1, \Xi_2, \dots, \Xi_M)$ と定義すると、ベクトル Ξ は、確率ベクトル $\xi=(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_M)$ の 1 つの実現値であると考えることができる。もし変数 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_M$ が M 次元正規分布を構成すると仮定すると、その確率密度関数は次式で与えられる。

$$f_{\Xi}(\xi) = (2\pi)^{-M/2} |\mathbf{C}|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\xi - \mu)' \mathbf{C}^{-1}(\xi - \mu)\right\} \quad (5)$$

ここで、 $\mu=(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_M)$ は確率変数 $\xi=(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_M)$ の平均値関数であり、次式の座標値に関する多項式で与える。ただし、本研究では、2次元問題を取り扱うため、モデル化も2次元に限定して考えるものとする。

$$\mu_k = a_0 + a_1 x_k + a_2 z_k + a_3 x_k^2 + a_4 z_k^2 + a_5 x_k z_k \quad (6)$$

(x_k, z_k) はパラメータ ξ_k に対応する座標を表し、 $(a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$ は、平均値関数の回帰係数を表す。

\mathbf{C} は $M \times M$ の共分散行列であるが、次に示す4タイプから選択する。共分散関数に関しては、様々なタイプが提案されている⁷⁾。その中で、本研究では、比較的単純な関数で、長いサンプリング間隔に対して0に収束する性質をもつ指数関数型の4つを選定している。0に収束することは、共分散関数として好ましい性質であると考えられる。

$$\mathbf{C} = [C_{ij}] = \begin{cases} \sigma^2 \exp\left(-|x_i - x_j|/l_x - |z_i - z_j|/l_z\right) & (a) \\ \sigma^2 \exp\left\{-\frac{(x_i - x_j)^2}{l_x^2} - \frac{(z_i - z_j)^2}{l_z^2}\right\} & (b) \\ \sigma^2 \exp\left\{-\sqrt{\frac{(x_i - x_j)^2}{l_x^2} + \frac{(z_i - z_j)^2}{l_z^2}}\right\} & (c) \\ N_e \sigma^2 \exp\left(-|x_i - x_j|/l_x - |z_i - z_j|/l_z\right) & (d) \end{cases}$$

$$i, j = 1, 2, \dots, M$$

$$\begin{cases} N_e = 1 & (i = j) \\ N_e \leq 1 & (i \neq j) \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 $[C_{ij}]$ は、 i, j 点間の共分散 C_{ij} を要素とする共分散マトリクスを表し、 σ は標準偏差、 l_x, l_z は、 x, z 方向の相関距離をそれぞれ表す。相関距離とは、地盤物性値の空間的な繋がりや強さを表しており、この値が大きいことは、長い区間に渡って、パラメータ値が一定であることを意味している。また、パラメータ N_e は、2点間の距離が0付近の急激な相関性の減少（金塊効果⁵⁾と呼ばれる）を表現するパラメータである。

対数尤度を基に、情報量基準AIC⁸⁾が式(8)で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{AIC} = & -2 \cdot \max\{\ln f_{\Xi}(\Xi)\} + 2L = M \ln 2\pi \\ & + \min\{n|\mathbf{C}| + (\Xi - \mu)' \mathbf{C}^{-1}(\Xi - \mu)\} + 2L \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 L は、式(4)のモデルを決定するパラメータの数であるが、本研究の場合は、式(6)の回帰係数の数と式(7)の l_x, l_y, N_e で与える共分散を決定するパラメータ数の和を表す。AICを最小化することによって(MAIC)、最適な共分散関数（4つのタイプの中の1つ）、平均値関数とその回帰係数の数、標準偏差 σ 、相関距離 l_x, l_y 、金塊効果のパラメータ N_e を決定することができる。

3.2 現地のデータによる統計モデルの決定

現地で計測された N_d 値に対して、MAICを適用した結果、次に示す平均値関数と共分散関数が選択された。

$$\mu = 28.1 - 0.030x - 21.2z + 4.95z^2 \quad (9)$$

$$C = [C_{ij}] = 6.44^2 \exp\left(-|x_i - x_j|/36.9 - |z_i - z_j|/0.17\right) \quad (10)$$

ここでは、平均値関数として水平軸に対しては1次、深度に関する2次関数が最適な関数として選択されている。

図-6には、求められた平均値関数と実データを示している。今回は、トレンドが、地表面に向かって大きくなっているのが特色である。共分散関数においては、最も単純な指数型が最適な関数として選ばれているが、相関距離が、水平方向に対して36.9m、鉛直方向に対して0.168mと求まっており、前者は後者の200倍となっている。過去に求められた値⁹⁾と比較すると、鉛直方向の相関距離は若干短い、あり得る範囲の値であると判断される。

図-3に示したように、対象地盤では標準貫入試験と簡易動的貫入試験が同時に実施されている。図-7にはこの2つの試験結果の相関関係が示されている。ここで、相関式は、式(11)で与えられ、図では実線で示している。ただし、 \bar{N} は、標準貫入試験 N 値を N_d 値の関数と考えた場合の平均値関数を表す。

$$\bar{N} = 0.562N_d \quad (11)$$

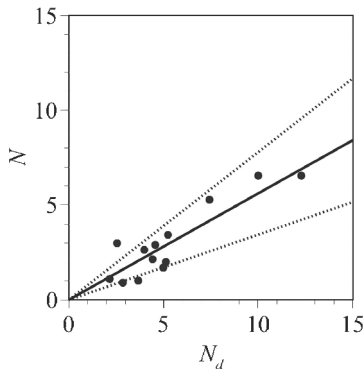


図-7 標準貫入試験値 N と動的貫入試験値 N_d の相関性

また、この相関式は換算誤差を含んでおり、図-7では σ 限界値（平均値から標準偏差 σ だけ隔たった値）として破線で示されている。ただし、標準偏差は、変動係数が一定であると仮定して求めている。変動係数は、0.388と決定されており、シミュレーションにおいては、標準貫入試験 N 値が次式で与えられる。

$$N = 0.562N_d(1 + 0.388\varepsilon_N) \quad (12)$$

ここで、 ε_N は、 $N(0,1)$ 型の正規確率変数を表し、シミュレーションでは正規乱数として与えられる。

3.3 サウンディングと表面波探査の合成による N 値推定

(1) インディケータシミュレーション法

本研究では、2種類のデータの合成によって、より精度の高い N 値の空間分布を求めようとしているが、データの合成法としてインディケータシミュレーション法^{5,10)}を用いている。この手法では、補助データ（ソフトデータ）を用いることができ、この情報によって主なデータ（ハードデータ）の分布を更新するという方法に基づいている。ここでは、動的貫入結果による N 値をハードデータとして、表面波探査による N 値をソフトデータとして用いている。インディケータシミュレーションは、任意のパラメータ R （ここでは N 値）に対して、式(13)以下で定式化される。

$$i(\mathbf{u}; r_k) = \begin{cases} 1, & (R(\mathbf{u}) \leq r_k) \\ 0, & (R(\mathbf{u}) > r_k) \end{cases} \quad k=1, \dots, K \quad (13)$$

i は、パラメータ R の2値変換値である。 r はパラメータ R の任意の値を表し、 r_k ($k=1, 2, \dots, K$)は、 R の特定の値であり、2値変換値の閾値を表しており、 K 段階存在する。 \mathbf{u} は座標を表し、 $\mathbf{u} = (x, z)$ であり、式(13)における i は、この座標点における値である。 n 個の計測点 u_i における2値変換値 $i(u_i; r)$ から、式(14)をとおして、任意の位置 \mathbf{u} におけるパラメータ R の確率分布関数 F が得られる。

$$F(\mathbf{u}; r_k(n+n')) = \text{Prob}\{R(\mathbf{u}) \leq r_k(n+n')\} \quad (14)$$

$$= \lambda_0 F(r_k) + \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}(\mathbf{u}; r_k) i(\mathbf{u}_{\alpha}; r_k) + \sum_{\alpha'=1}^{n'} v_{\alpha'}(\mathbf{u}; r_k) v(\mathbf{u}_{\alpha'}; r_k)$$

$$\lambda_0 = 1 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}(\mathbf{u}; r_k) - \sum_{\alpha'=1}^{n'} v_{\alpha'}(\mathbf{u}; r_k)$$

式(14)中、 w はソフトデータ (n' 個)を表し、確率分布関数の形で与えられるが、以下にその決定手順を示すものとする。

- 1) ソフトデータ w の確率分布関数として、ハードデータと同じ確率分布関数 F を仮定する。
- 2) ソフトデータの計測値を用いて、インディケータクリッキング^{5,10)}を実施する。
- 3) クリッキングの結果として得られる出力点毎の確率分布を、インディケータシミュレーションのソフトデータとする。

λ_{α} 、 $v_{\alpha'}$ は、補間係数で、次の連立方程式を解くことによって決定される。

$$\sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta}(\mathbf{u}_m) C_{\beta\alpha} + \sum_{\beta'=1}^{n'} v_{\beta'}(\mathbf{u}) C_{\beta'\alpha} = C_{m\alpha}, \quad \alpha=1, \dots, n \quad (15)$$

$$\sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta}(\mathbf{u}_m) C_{\beta\alpha'} + \sum_{\beta'=1}^{n'} v_{\beta'}(\mathbf{u}) C_{\beta'\alpha'} = C_{m\alpha'}, \quad \alpha'=1, \dots, n'$$

$C_{\alpha\beta}$ は、ハードデータの計測点 α 、 β 間の共分散、 $C_{m\alpha}$ は、任意点 m と点 α 間の共分散を表す。一方、 $C_{\alpha'\beta'}$ は、ソフトデータの計測点 α' 、 β' 間の共分散、 $C_{m\alpha'}$ は、任意点 m と点 α' 間の

共分散を表す。最終的に次式によってパラメータ R の乱数が作成される。

$$r^{(l)}(\mathbf{u}) = F^{-1}(\mathbf{u}; p^{(l)} | (n+n')) \quad (16)$$

ここで、 $p^{(l)}$ は、 $[0,1]$ の範囲の一樣乱数を表し、添え字 l はモンテカルロ法の試行回数を表す。シミュレーションでは、式(16)で作成される乱数 r が、パラメータ R の実現値として使用される。

(2) シミュレーション結果

図-8, 9にはシミュレーション結果が示されている。前者は、ソフトデータを用いない場合、すなわちサウンディング結果のみで N 値を推定する場合、後者は、ソフトデータを用いる場合である。また、図(a), (b), (c)は、平均値、標準偏差、および、 N 値が2を下回る確率を表している。これらの図は、シミュレーション結果を、水平方向に対して5m間隔、鉛直方向に対して0.2m間隔に、点推定値として出力することによって作成されている。

図-8(a)は、 N_d 値の情報のみで作成されているが、これから導かれる N 値の分布は、実測値どおり地表面で大きな値を示しており、深度毎には平均化されている。図-5に示す表面波探査による N 値と同様、図左側の地表面近くに比較的 N 値の大きいところが見られる。また、図-9(a)は、表面波探査結果の影響を受けており、図面の両端の N 値は小さく予測されている。一方、中央部では比較的大きな N 値が推測されている。

図-8(b), 図-9(b)の標準偏差によると、ハードデータである N_d の計測点では標準偏差の値が非常に小さくなっている。これは、ハードデータの計測点ではインディケータシミュレーション値は確定値となるため、図-8, 図-9のどちらの場合でも同様である。

図-8(c), 図-9(c)は、低い N 値が予測される領域を表している。ここでは、低 N 値の閾値を2と設定しているが、この値は実情に合わせて任意の値を選ぶことができる。図によると、平均 N 値が小さいところの確率が大きくなっている。また、標準偏差の小さいところは確率値が小さくなっている。したがって、 N_d の計測地点では確率値が小さくなっている。また、図-8では、深度3m付近の確率が大きくなっているが、ソフトデータの影響をうける図-9では、図面の左右の確率が大きくなっている。

5. まとめ

本研究は、河川堤防の現状把握を目的とし、現地調査を行った結果をまとめ、強度推定の解析を行ったものである。

その結果は、以下のように要約される。

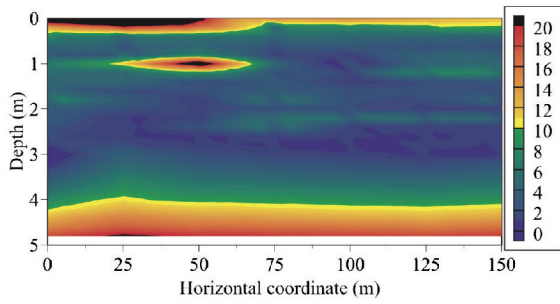
- 1) 現地調査として、ボーリングによる土質調査、標準貫入試験、簡易動的コーン貫入試験を実施した。その結果、標準貫入試験結果と簡易動的コーン貫入試験結果は、比較的良い相関を示した。簡易動的コーン貫入試験は、高密度で実施可能であるため、堤体の内部状態の同定のためには有効な手法になると考えられる。
- 2) 堤体の縦断方向と横断方向について、表面波探査を実施した。その結果、サウンディング結果と比較的良好一致が見られた。表面波探査は、堤体内部の平均的な情報を推定するのに有効で、実施が簡便であるという利点を持つ。局所的な物性変化などには対応できないため、サウンディング結果と組み合わせることによって有効性を増すと考えられる。
- 3) 情報量統計学の一手法であるMAICを利用し、地盤定数の統計モデルを決定する方法を示した。ここでは、とくに、簡易動的貫入試験結果 N_d 値に対して2次元の統計モデルを決定しようとした。結果、平均値関数および共分散関数を適切に決定することができた。
- 4) 地質統計学の一手法であるインディケータシミュレーション法を利用することで、簡易動的コーン貫入試験結果と表面波探査の2種類の試験結果を合成した。ここでは、点推定値が得られ、実際の貫入試験である動的貫入試験結果をハードデータ、表面波探査結果をソフトデータとした。2つのデータを合成することにより適切な N 値の分布構造を得ることができた。
- 5) 堤体内部の N 値が設定した閾値（ここでは2）を下回る確率を求めた、今後、このような確率分布を堤体のリスク評価に結びつけ、堤体の維持管理に利用することが期待される。

謝辞

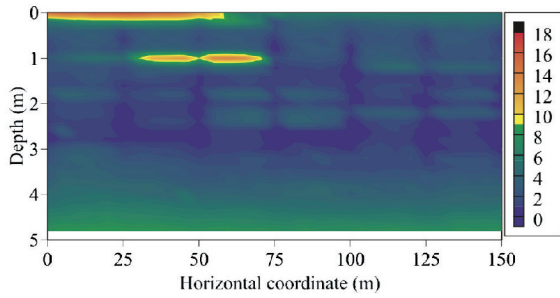
本研究の現地調査の実施については、岡山県土木部に便宜を図っていただいた。記して謝意を表す。また、本研究は、岡山地域セミナーの一環として実施された研究であり、地盤工学会中国支部には、援助を賜り、謝意を表す。なお、本研究の一部は、平成21年度国土技術研究センター研究開発助成対象研究として実施したものである。

参考文献

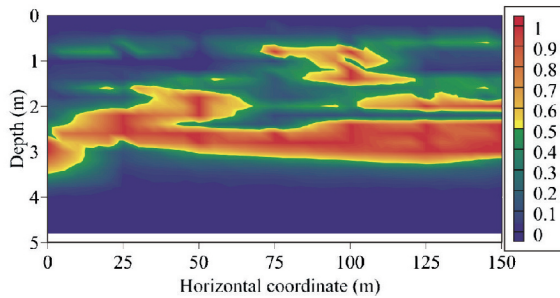
- 1) 国土交通省河川局治水課：河川堤防設計指針，2007。
- 2) 国土交通省河川局：河川砂防技術基準（案），1997。
- 3) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp.277-278，2004。
- 4) 林 宏一：表面波を用いた地下浅層部の探査，非破壊探査，Vol.53, No.5, pp.254-259，2004。
- 5) Journel, A.G. and Huijbregts., Ch. J. : *Mining geostatistics*, Academic Press, 1978。



(a) N 値の平均値

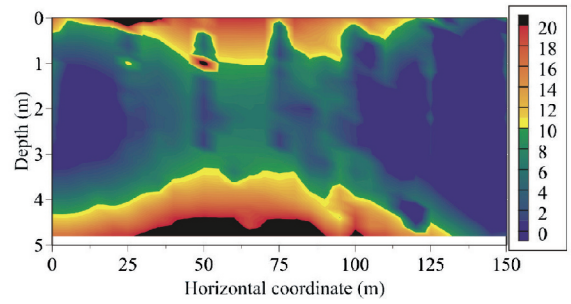


(b) N 値の標準偏差

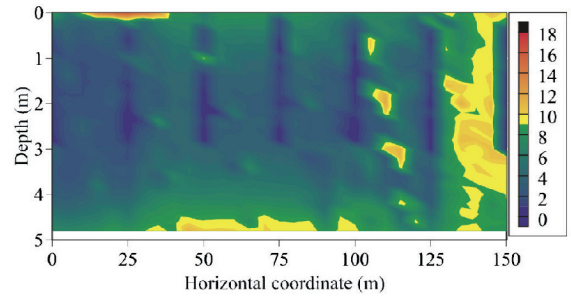


(c) N 値が 2 を下回る確率

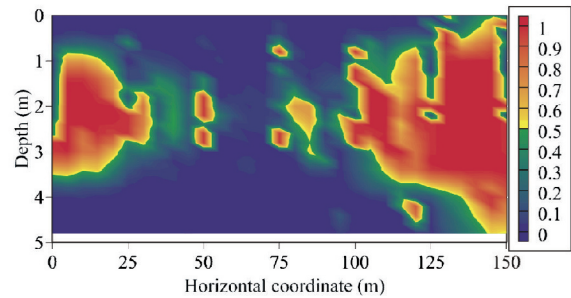
図-8 推定された N 値の空間分布
(ソフトデータ無し)



(a) N 値の平均値



(b) N 値の標準偏差



(c) N 値が 2 を下回る確率

図-9 推定された N 値の空間分布
(ソフトデータ有り)

- 6) 今井常雄, 麓 秀夫, 横田耕一郎: 日本の地盤における弾性波速度と力学的特性, 第4回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 89-96, 1975.
- 7) Zhang, D.: *Stochastic methods for flow in porous media coping with uncertainty*, ACADEMIC PRESS, 2002.
- 8) Akaike, H.: A new look at the statistical model identification, *IEEE Trans. on Automatic Control*, AC-19, No.6, pp.716-723, 1974.

- 9) 西村伸一: 土構造物の地震時における性能設計と変形量予測に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.121-126, 2007.
- 10) Deutsch, C. V. and Journel, A. G.: *Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford University Press, 1992.

(2010年7月20日 受付)

