

堤防の内部診断とリスク評価

岡山大学大学院環境生命科学研究科
岡山大学環境管理センター長

西村伸一

堤防の内部診断

簡易動的コーン貫入試験(DCP)
スウェーデン式サウンディング(SWS)
電気式コーン貫入試験(CPT)

サウンディング

破壊試験

高精度・高密度な試験が可能
点推定

+

物理探査

平均化されたイメージ
広範囲の実施が容易



地盤物性値の
統計モデル

表面波探査
(SWM)

インディケータシ
ミュレーション

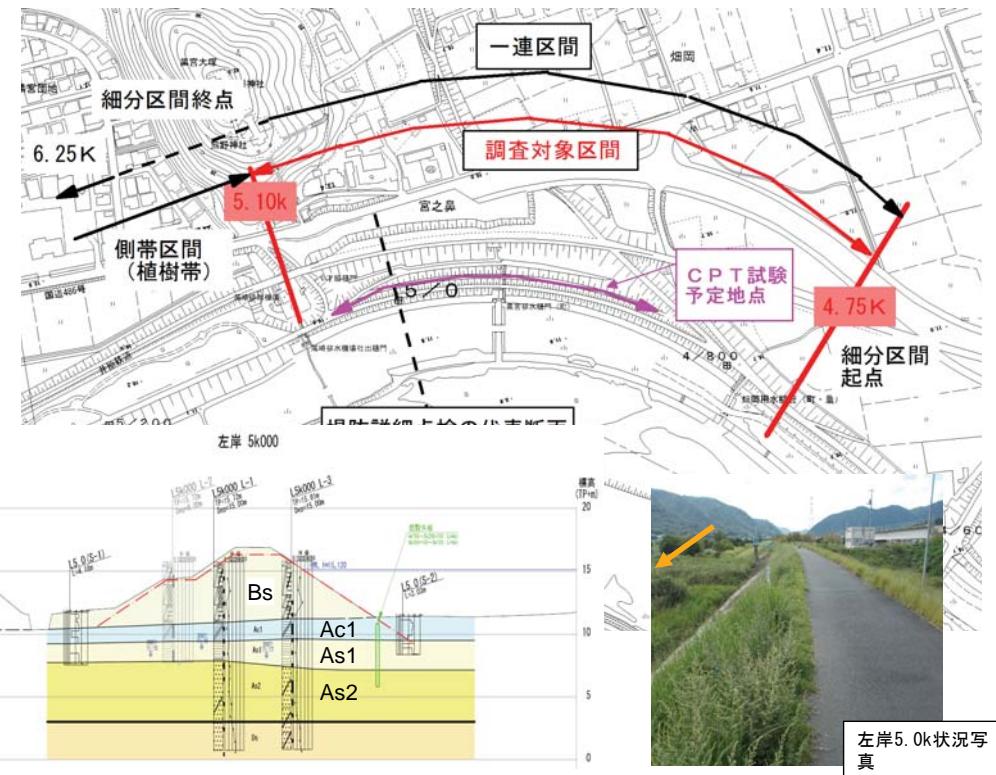


地質統計学による
空間補間



地盤物性値の高解像度推定

CPT 適用事例 一調査地点の概要一

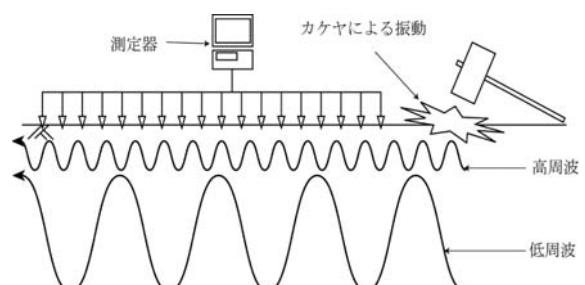


3

CPT 適用事例 一調査の方法一

『CPT(静的コーン貫入試験)とSMW(表面波探査)を組合せ調査法』

①CPT(3成分コーン貫入試験) ②SMW(表面波探査)



測定項目

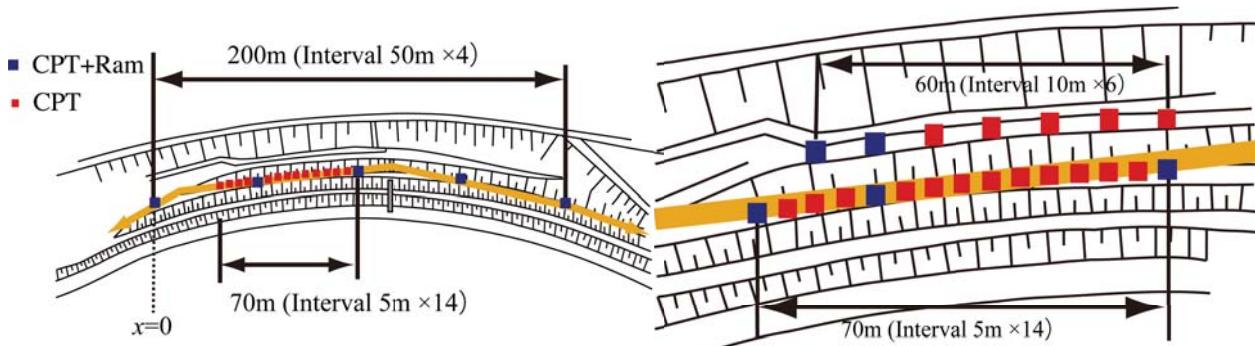
- ・先端抵抗 q_t
- ・周面摩擦抵抗 f_s
- ・間隙水圧 p_w



深さ方向に0.05m間隔
水平方向に5m間隔で
データを取得

4

CPT 適用事例 調査計画



河川堤防の平面図

調査手順:

①広範囲調査

SWM + 低密度CPT(20~100m間隔)

↓ 調査地点の絞り込み

②高密度CPT(5m間隔)→地質統計学パラメータの同定

↓

地質統計学解析による弱点箇所推定

CPT結果の整理方法

$$I_c = \left\{ (3.47 - \log Q_t)^2 + (1.22 + \log F_R)^2 \right\}^{0.5} \quad \text{Robertsonら(1995)}$$

$$\text{基準化先端抵抗} \quad Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0}$$

$$\text{基準化摩擦比} \quad F_R = f_s / (q_t - \sigma_{v0})$$

$$N_c = 0.341 I_c^{1.94} (q_t - 0.2)^{(1.34 - 0.0927 I_c)} \quad (q_t > 0.2 \text{ MPa})$$

$$N_c = 0 \quad (q_t \leq 0.2 \text{ MPa}) \quad \text{鈴木ら (2003)}$$

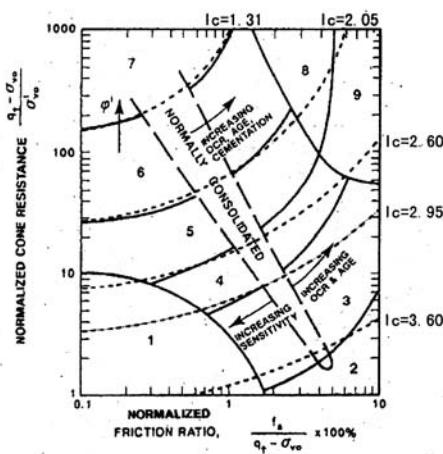
$$F_c = 1.0 I_c^{4.2} \quad (\%)$$

q_t :先端抵抗 f_s :摩擦比

σ_{v0} :上載圧(MPa)

σ'_{v0} :有効上載圧(MPa)

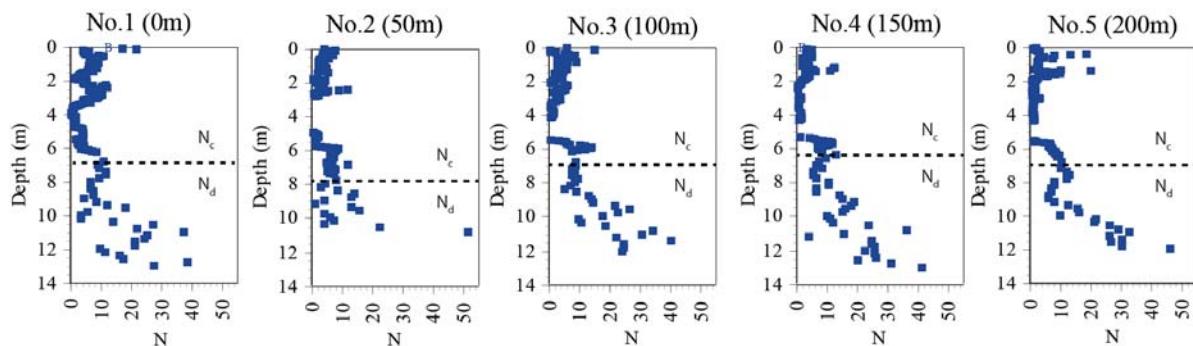
I_c による土質分類



Soil Behaviour Type Index, I_c	Zone in Fig. 3	Soil Behaviour Type
—	9	Very stiff, fine grained
—	8	Very stiff sand to clayey sand
$I_c < 1.31$	7	Gravelly sand
$1.31 < I_c < 2.05$	6	Sands: clean sand to silty sand
$2.05 < I_c < 2.60$	5	Sand mixtures: silty sand to sandy silt
$2.60 < I_c < 2.95$	4	Silt mixtures: clayey silt to silty clay
$2.95 < I_c < 3.60$	3	Clays
$I_c > 3.60$	2	Organic soils: peats
—	1	Sensitive, fine grained

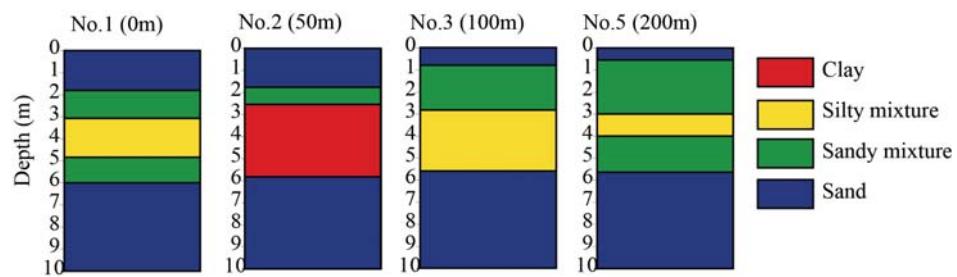
Robertson, P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test, Canadian Geotechnical Journal, Vol.28, No.1, 151-158.

CPT試験結果 低密度広域試験



N_c : CPTによる換算N値

N_d : ラムサウンディングによる換算N値

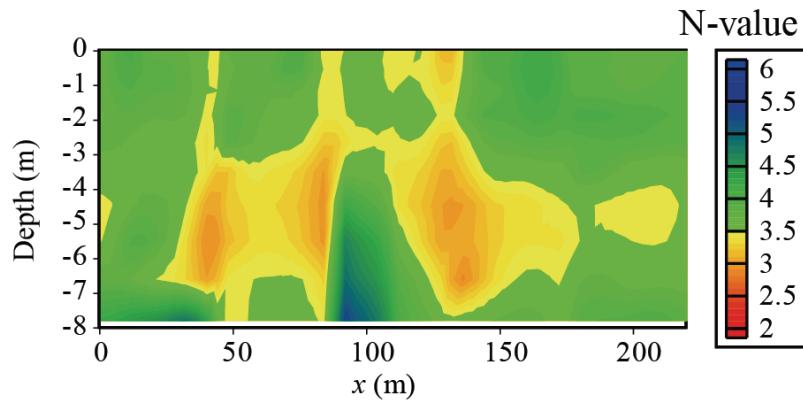
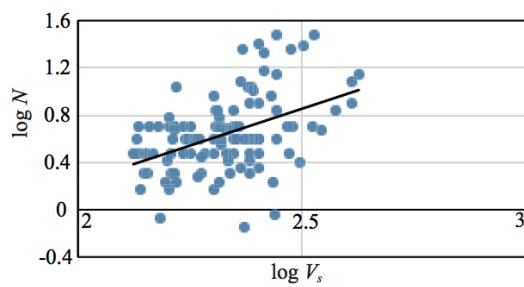


推定された土質分類

表面波探査の結果

S波とN値の換算式

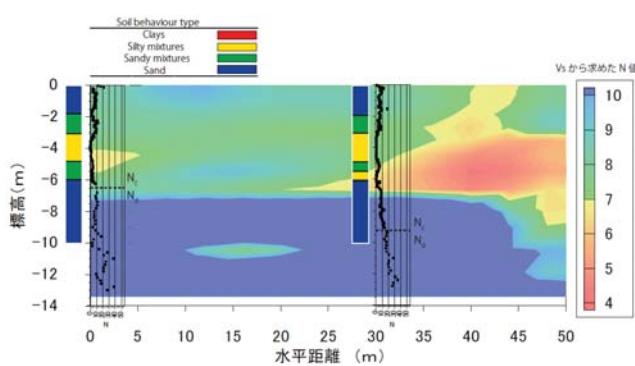
$$N = 10^{-2.2645} \times V_s^{1.2477}$$



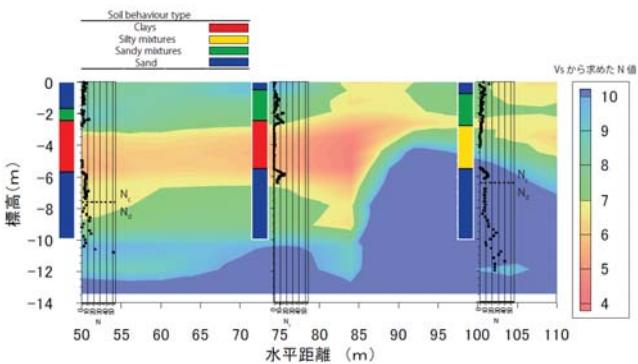
推定されたN値の空間分布

CPTおよびSWM結果

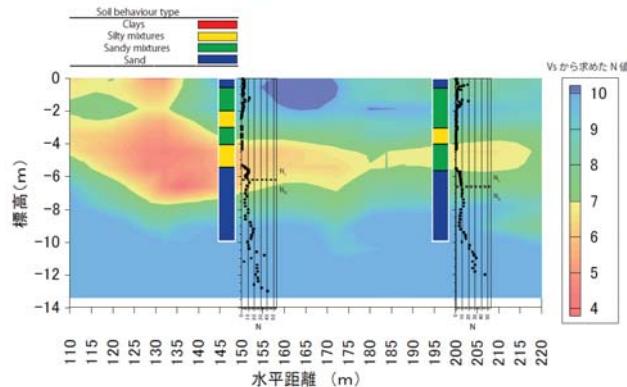
小田川 SWM と CPT 結果の柱状図 (0-50m)



小田川 SWM と CPT 結果の柱状図 (50-110m)

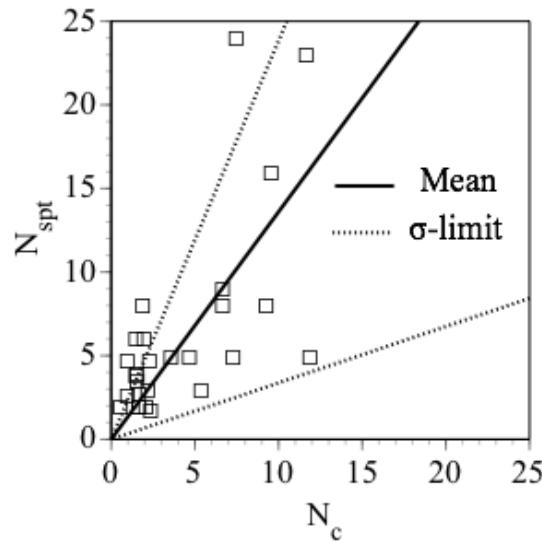


小田川 SWM と CPT 結果の柱状図 (110-220m)



CPTによる土質判定と
 V_s および N_c との関係

N_c から N_{spt} への換算



$$N_{SPT} = (1.36N_c)(1 + 0.752\varepsilon_r)$$

ε_r : $N(0,1)$ の正規確率変数

地盤物性値の確率論的記述方法

地盤物性値の統計量

物性値 x の変動係数: $CV = s/\bar{x}$

$$\bar{x}: \text{サンプル平均} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$s: \text{サンプル標準偏差} \quad s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

物性値 x の母集団の平均値を μ , 母分散 σ^2 が未知の場合の μ の $a\%$ 信頼区間:

$$\langle \mu_{1-\alpha} \rangle = \left[\bar{x} - t_{cd, 2, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}; \bar{x} + t_{cd, 2, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \right]$$

$t_{cd, 2, n-1}$: 自由度 $n-1$ のt-分布の $a\%$ 点

サンプル数 n が小さいとき次式の安全側を採用

$$\mu = \bar{x} \pm t_{cd, 2, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

地盤物性値の統計量（つづき）

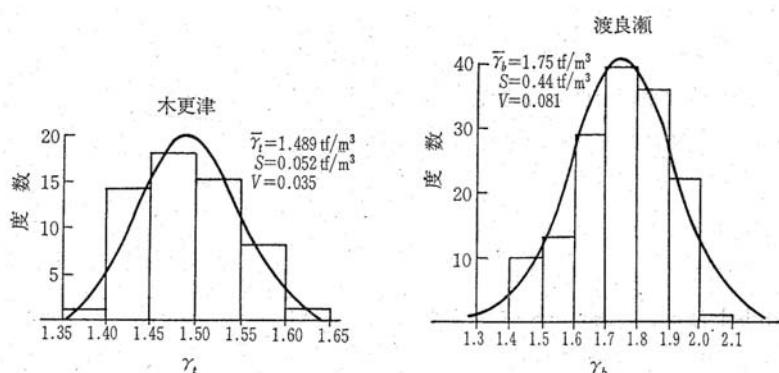


図-3.10 単位体積重量の度数分布¹⁷⁾

単位体積重量は正規分布

ばらつきが小さい

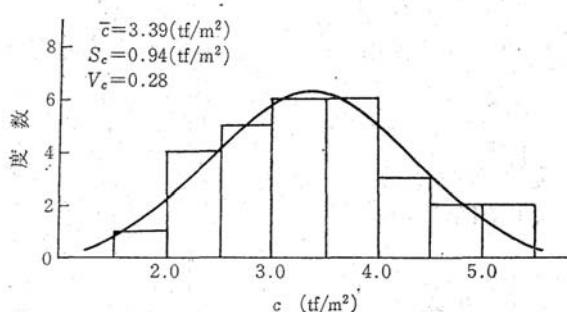


図-3.7 c_u の分布型の例

非排水強度は正規分布

ばらつきが大きい

地盤物性値の統計量（つづき）

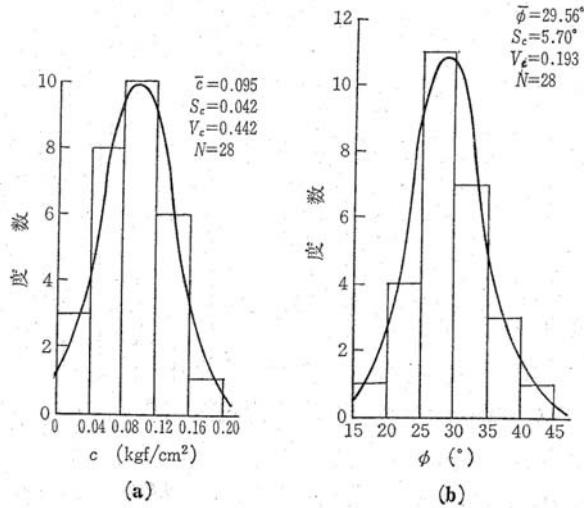


図-3.20 c, ϕ の度数分布 ($S_r > 70\%$)¹⁷⁾

表-3.7 c, ϕ の平均値、分散、変動係数¹⁷⁾

飽和度 $S_r (\%)$	40以下	40~70	70以上
平均値 $\bar{c} (\text{kgf/cm}^2)$	0.146	0.154	0.095
$\phi (^\circ)$	30.20	27.38	29.56
分散 $S_c (\text{kgf/cm}^2)^2$	0.014	0.010	0.002
$S_\phi (^\circ)^2$	26.89	31.23	32.45
変動係数 V_c	0.795	0.664	0.442
V_ϕ	0.172	0.202	0.193
N	64	136	98

粘着力は正規分布

ばらつきが大きい

内部摩擦角は正規分布

ばらつきが小さい

パラメータの空間分布の定式化1

共分散関数

$$C(\Delta z) = \frac{1}{(n-2)} \sum_i^n \{U(z_i) - \bar{U}\} \{U(z_i + \Delta z) - \bar{U}\}$$

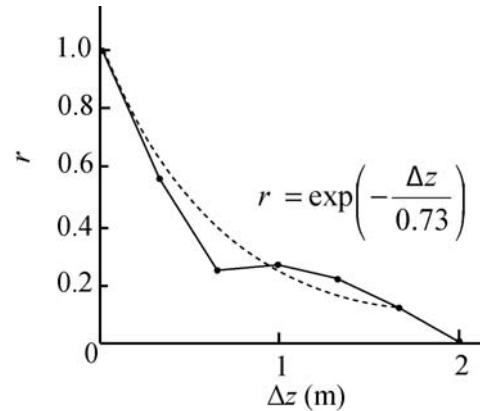
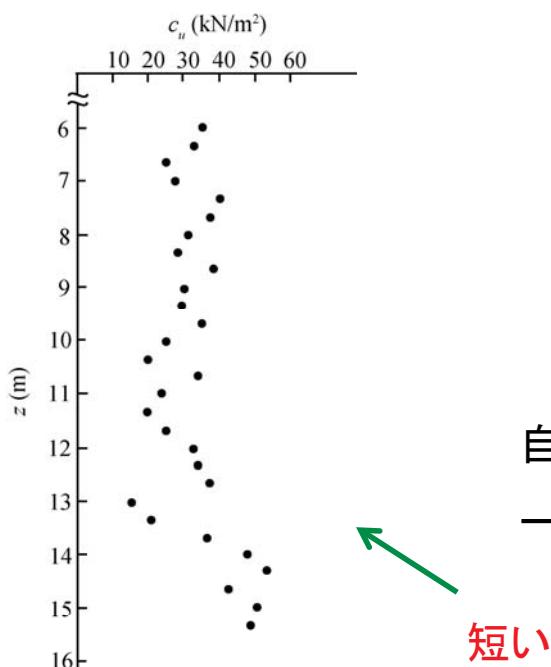
自己相関関数

$$r(\Delta z) = \frac{1}{(n-2)s^2} \sum_i^n \{U(z_i) - \bar{U}\} \{U(z_i + \Delta z) - \bar{U}\}$$

近似関数

$$r(\Delta z) = \exp(-\Delta z/l_z) \quad l_z: \text{相関距離}$$

パラメータの空間分布の定式化2



自己相関関数の例

一次元モデル(地盤工学会, 1985)

短い間隔のサンプリングが必要

地盤パラメータの統計モデルの決定

確率変数 U の定義

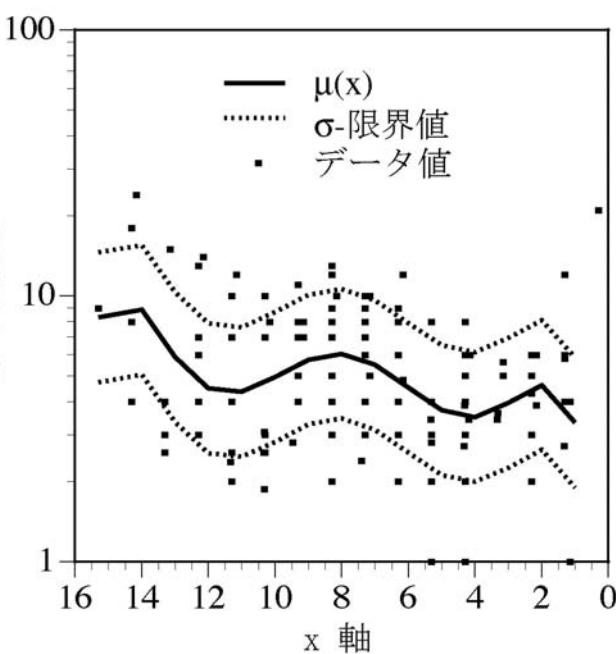
$$U(X) = \mu(X) + \psi(X)$$

$\mu(X)$: 平均値関数,

$\psi(X)$: 任意の確率変数

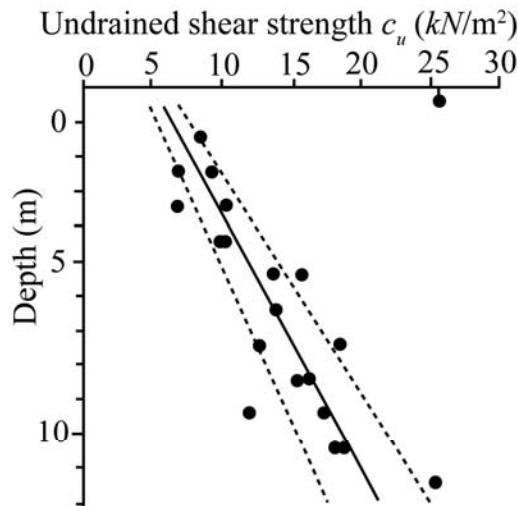
$X = (x, y, z)$ or $X = (x, z)$

確率変数値



地盤物性値に対応した確率変数の概念

非定常確率過程の例



$$U(\mathbf{x}) = \mu(\mathbf{x}) + \sigma(\mathbf{x})\psi(\mathbf{x})$$

$$\text{Cov}[\psi(\mathbf{x}_i), \psi(\mathbf{x}_j)] = C_\psi(\mathbf{r})$$

$$U(z) = (c_0 + c_1 z) + (d_0 + d_1 z)\psi(z)$$

$$\mu(z) = c_0 + c_1 z$$

$$\sigma(z) = d_0 + d_1 z$$

c_0, c_1, d_0, d_1 : regression constants

$\psi(z)$: $N(0,1)$ random variable

土質定数の空間的相関性

よく使われる共分散関数の例

$$\text{Cov}[U_i, U_j] = C_U(\mathbf{r}) = C_U(-\mathbf{r}) \quad \mathbf{r} = \mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j$$

指指数型 : $C_U(r) = \sigma_U^2 \exp\left\{-\left[\sum_{i=1}^d \frac{r_i^2}{l_i^2}\right]^{1/2}\right\}$

Gauss型 : $C_U(r) = \sigma_U^2 \exp\left[-\frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^d \frac{r_i^2}{l_i^2}\right]$

σ_U : 標準偏差
 l : 相関距離

独立指指数型 : $C_U(r) = \sigma_U^2 \exp\left[-\sum_{i=1}^d \frac{|r|}{l_i}\right]$

同定された共分散関数の例

自己相関特性 (σ^2 : 分散, V : 鉛直方向, H : 水平方向)

パラメータ	自己相関関数, 相関距離	備考
S_u (VST)	$C(h) = \sigma^2 \exp(-h/a_\theta), a_\theta = \frac{a_V a_H}{(a_V^2 \sin^2 \theta + a_H^2 \cos^2 \theta)^2}$ $a_V = 1\text{m}, a_H = 10\text{m}$	
S_u	Scale of fluctuation $\delta_V = 2.5 \text{ m}$ ($\delta = 2a$)	Clay
q_c	Scale of fluctuation $\delta_V = 0.9 \text{ m}$ ($\delta = 2a$)	Sand, clay
S_u (VST)	Scale of fluctuation $\delta_V = 3.8 \text{ m}$ ($\delta = 2a$)	Clay
N	Scale of fluctuation $\delta_V = 2.4 \text{ m}$ ($\delta = 2a$)	Sand
q_c	Scale of fluctuation $\delta_H = 47.9 \text{ m}$ ($\delta = 2a$)	Sand, clay
S_u (VST)	Scale of fluctuation $\delta_H = 50.7 \text{ m}$ ($\delta = 2a$)	Clay
q_c	$C(h) = \sigma^2 \exp\left\{-\left(h/b_H\right)^2\right\}, b_H = 30\text{m}$	
S_u (VST)	$C(h) = \sigma^2 \exp(-h/a_H), a_H = 23\text{m}$	
N	$C(h) = \sigma^2 \exp(-h/a_H), a_H = 23\text{m}$	

地盤定数の統計モデル1

(CPT N_c)

正規(対数正規)分布

$$f_s(\mathbf{s}) = (2\pi)^{-\frac{M}{2}} |\mathbf{C}|^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2} (\mathbf{s} - \mathbf{m})^t \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{s} - \mathbf{m})\right\}$$

$\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_M)$: probabilistic parameter vector

$\mathbf{m} = (m_1, m_2, \dots, m_M)$: mean value vector

平均値関数

$$m_k = a_0 + a_1 x_k + a_2 y_k + a_3 z_k + a_4 x_k^2 + a_5 z_k^2 + a_6 x_k z_k$$

(x_k, y_k, z_k) : coordinate of k th measure point

(a_0, a_1, \dots, a_6) : regression constants

地盤定数の統計モデル2

共分散関数

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{ij} \end{bmatrix} =$$
$$\sigma^2 \exp\left(-|x_i - x_j|/l_x - |y_i - y_j|/l_y - |z_i - z_j|/l_z\right) \quad (a)$$
$$\sigma^2 \exp\left\{-\left(x_i - x_j\right)^2/l_x^2 - \left(y_i - y_j\right)^2/l_y^2 - \left(z_i - z_j\right)^2/l_z^2\right\} \quad (b)$$
$$\sigma^2 \exp\left\{-\sqrt{\left(x_i - x_j\right)^2/l_x^2 + \left(y_i - y_j\right)^2/l_y^2 + \left(z_i - z_j\right)^2/l_z^2}\right\} \quad (c)$$
$$N_e \sigma^2 \exp\left(-|x_i - x_j|/l_x - |y_i - y_j|/l_y - |z_i - z_j|/l_z\right) \quad (d)$$
$$i, j = 1, 2, \dots, M$$

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

地盤定数の統計モデル3

MAIC (Minimizing Akaike's Information Criterion)

$$\text{AIC} = -2 \cdot \max \left\{ \ln f_s(\mathbf{S}) \right\} + 2L$$
$$= M \ln 2\pi + \min \left\{ \ln |\mathbf{C}| + (\mathbf{S} - \mathbf{m})^t \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{S} - \mathbf{m}) \right\} + 2L$$

$\mathbf{S} = (S_1, S_2, \dots, S_M)$: Measured data



統計モデルの決定

統計モデル

平均値関数:

$$m = 0.783 - 0.006x - 0.016y - 0.053z + 0.00002x^2 + 0.020z^2 + 0.0004xz$$

共分散関数:

$$C(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = (0.597)^2 \exp \left\{ -\sqrt{\left(\frac{\Delta x}{10.0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{10.0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta z}{0.48} \right)^2} \right\}$$

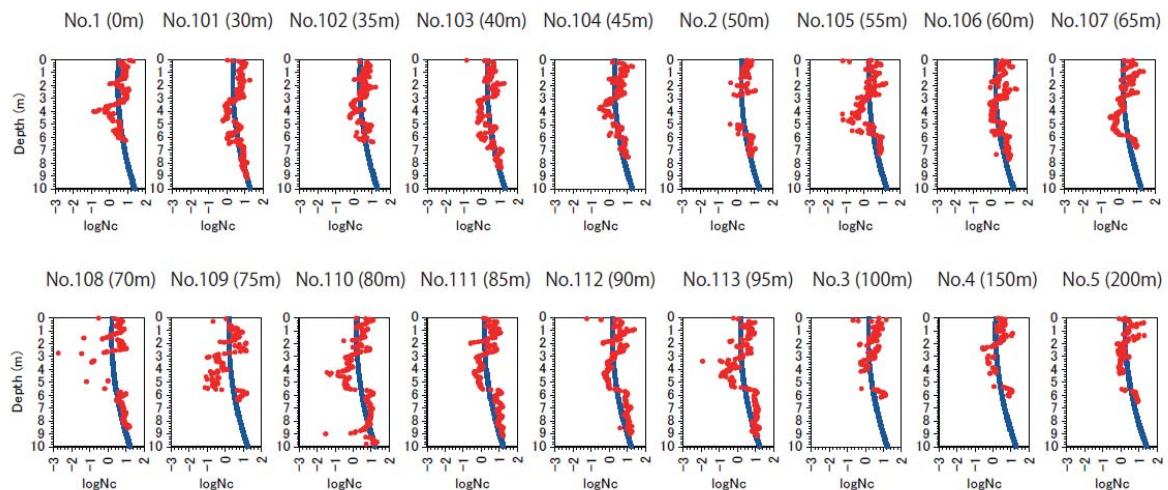


インディケータシミュレーション(地質統計学手法)

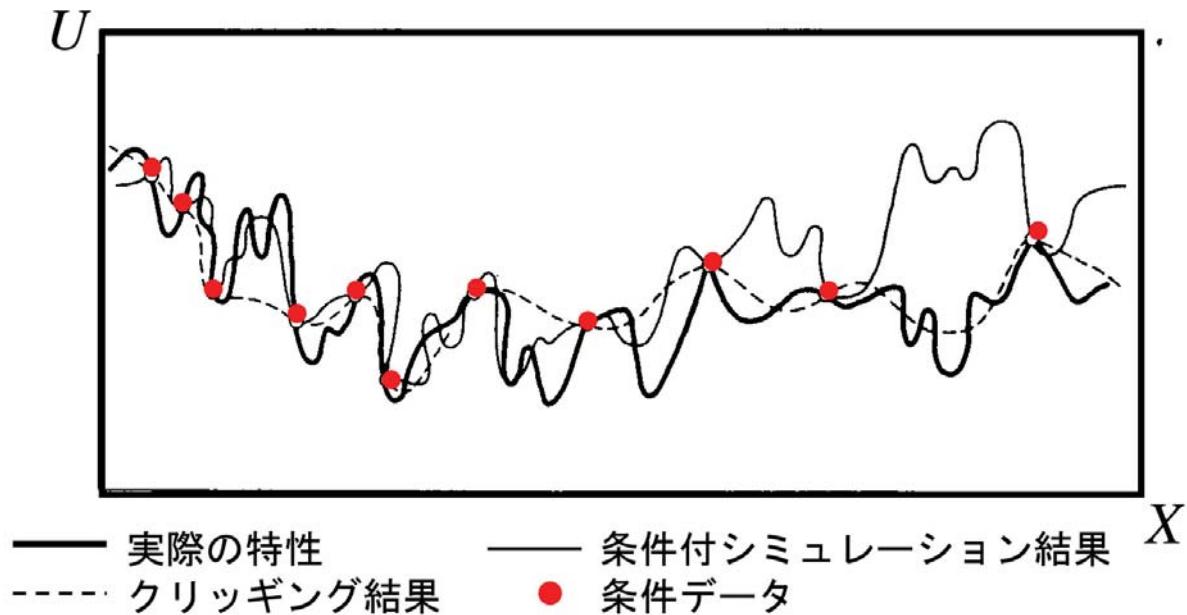


空間の内挿

確定された平均値関数と実測 N_c 値



土質定数の内挿補間



Indicator simulation method 1

Indicator value for a parameter, R

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

$\mathbf{u} = (x, z)$: the positions where the data were measured

r_k ($k=1, 2, \dots, K$): K specific values of R , and the threshold value for the binary parameter i

Indicator simulation method 2

Probability distribution function of the variable R

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

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

Hard data **Soft data**

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

$i(\mathbf{u}_\alpha, r_k)$: binary value of the hard data at the point \mathbf{u}_α and for the threshold value r_k .

$w(\mathbf{u}_a, r_k)$: probability distribution of the soft data

n and n' are the numbers of the hard and the soft data

Indicator simulation method 3

Parameter λ and v : weighting parameters and determined related to the covariance function

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

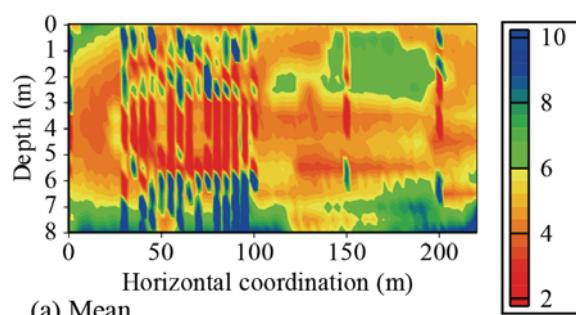
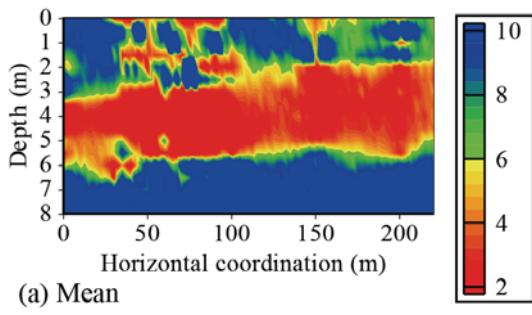
p : uniform random number from 0 to 1.0

l : iteration number for the Monte Carlo method

$r^{(l)}$, is assigned as a N-value.

地質統計学シミュレーションの結果

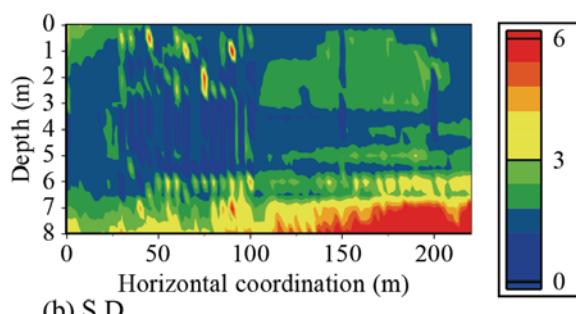
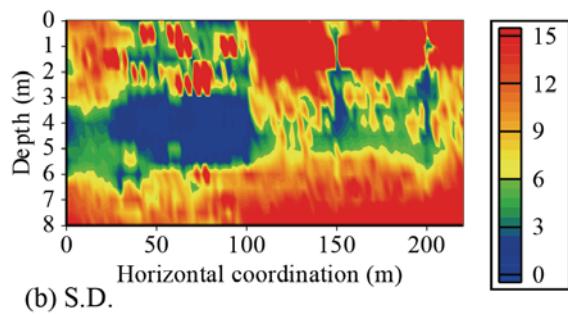
N値の期待値の空間分布



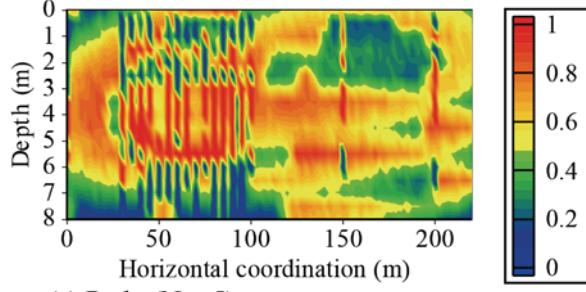
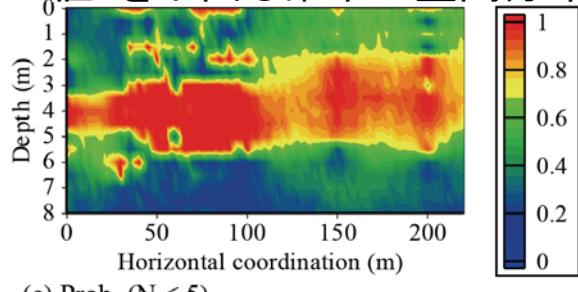
ハードデータ: CPT結果
ソフトデータ: SWM結果

地質統計学シミュレーションの結果

N値の標準偏差の空間分布



N値5を下回る確率の空間分布



Softデータ無し

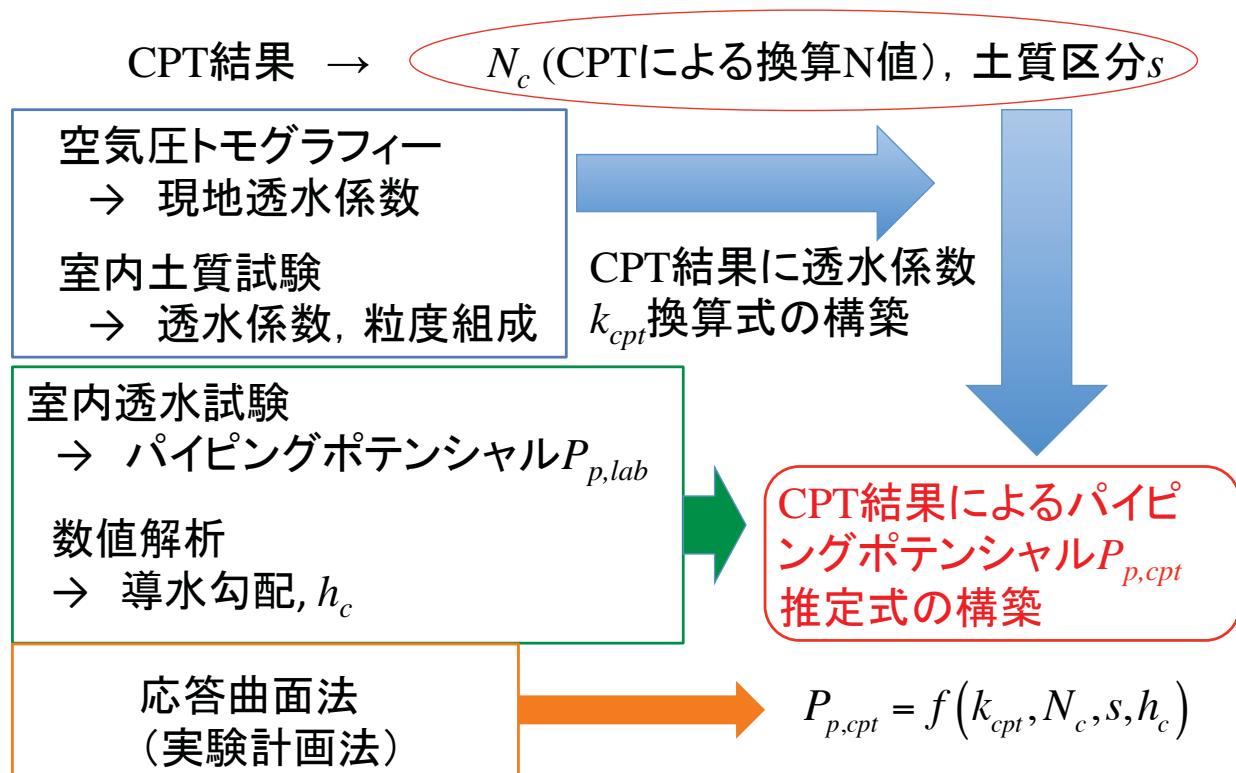
Softデータ有り

まとめ

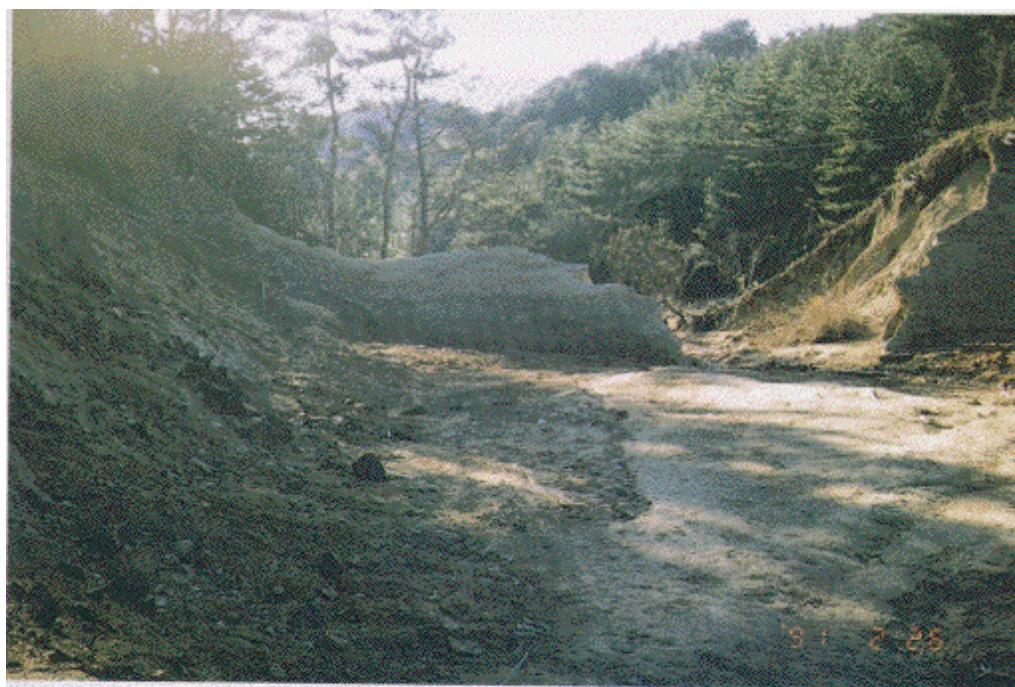
- (1) SWM結果を予備調査として行い、CPTの低密度試験区間と高密度試験区間を両方設けることによって、調査の効率性を満足しつつ、地質統計学のパラメータを決定するのに必要なデータを得ることが可能である。
- (2) インディケータシミュレーションにおいて、SWMとCPTの結果を合成する方法を示し、N値が5を下回る箇所の空間分布を求めた。
- (3) シミュレーション結果と土質分類結果から、比較的パイピングポテンシャルが高いと推定される箇所を同定することができた。

今後の計画

CPT結果のパイピング破堤推定への応用



地震と豪雨によるため池堤体の リスク評価



降雨による破堤（1）

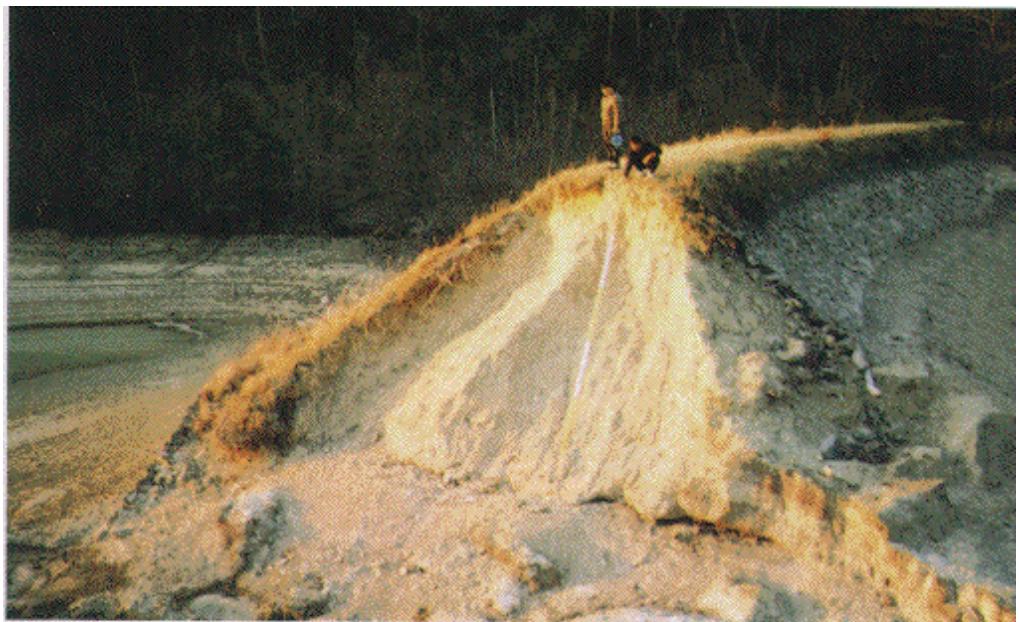
降雨による破堤 (2)

Ph.12
子父雁池の決壊部



37

Ph.13 宿瀬小池の決壊部



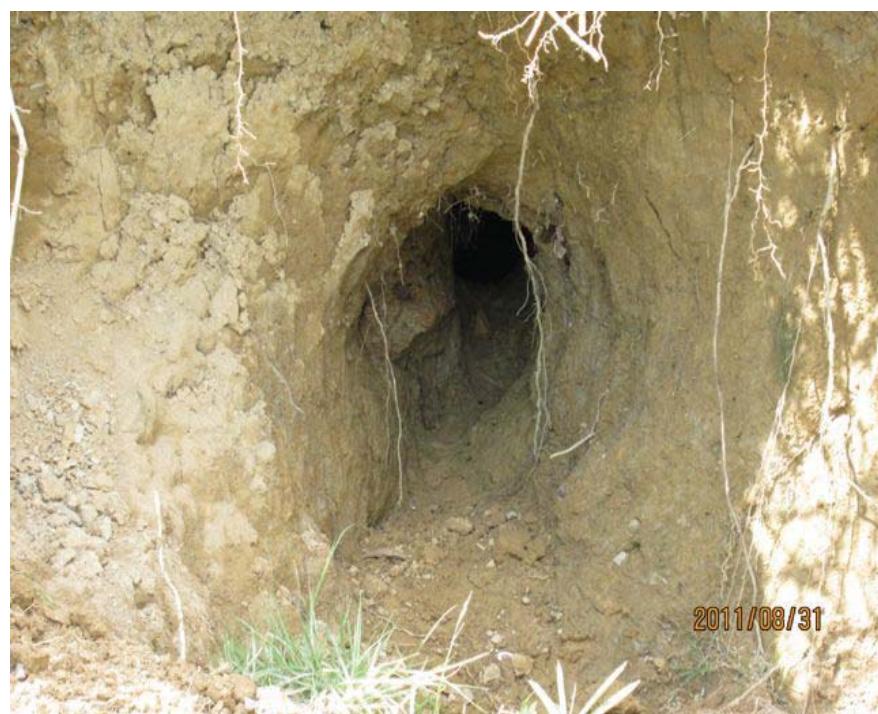
降雨による破堤 (3)

38



パイピングを起こしたため池の堤防(1)

39



パイピングを起こしたため池の堤防(2)

40



地震によるため池堤体の崩壊
(兵庫県南部地震)



井出の尻池の堤体崩壊(兵庫県南部地震)



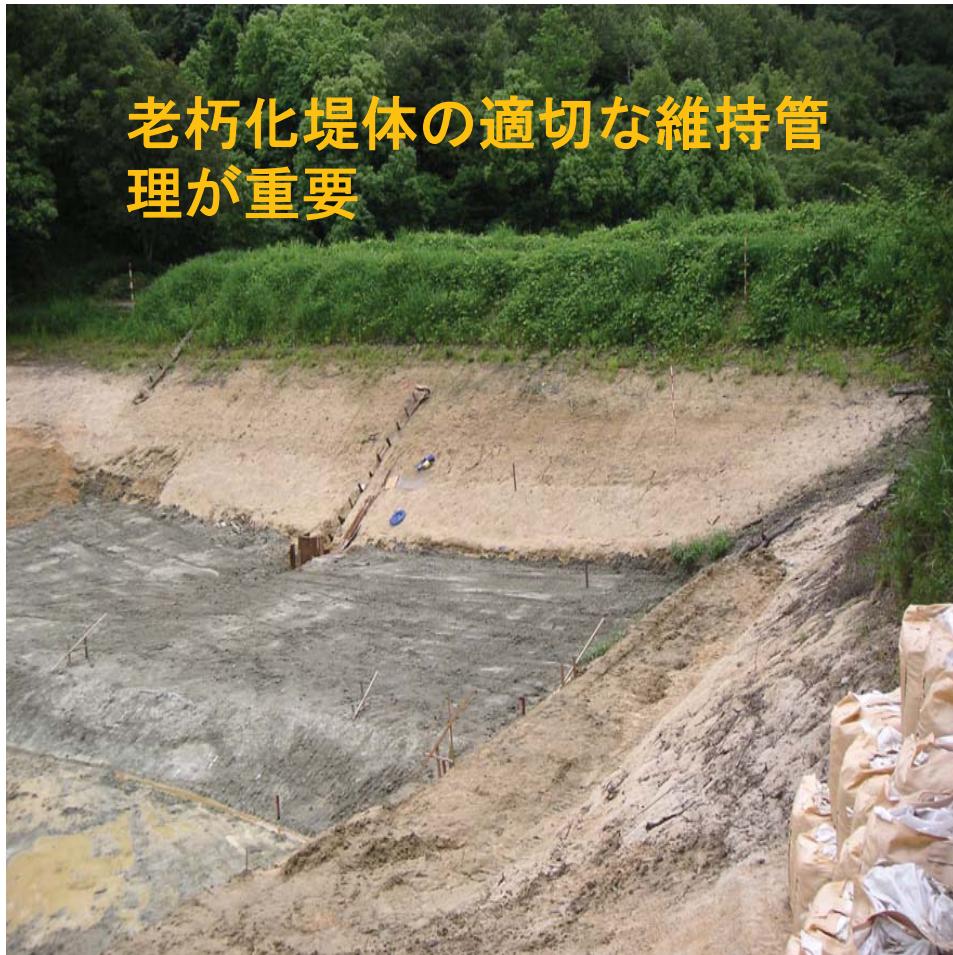
井出の尻池の湖底噴砂(兵庫県南部地震)

- ・ため池は全国に21万ヶ所
- ・江戸時代以前の築堤も多い
- ・老朽化が激しい

兵庫県南部地震における被災ため池分布



老朽化堤体の適切な維持管理が重要



地震・豪雨防災

適切な維持管理(補修・改修)

信頼性設計概念

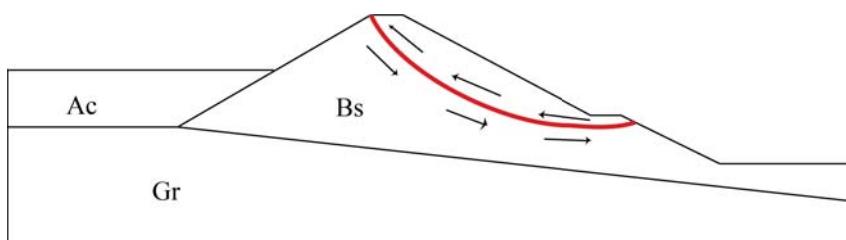
リスク評価

破堤・氾濫解析
+
被害算定

堤体の内部診断

- ・サウンディング
- ・弾性波探査
- ↓ 地質統計学
空間分布モデル

堤体の信頼性解析



すべり面の解析

信頼性解析法
動的有限要素法
(土・水連成解法)

+
円弧すべり法



有効応力の評価



破壊確率の評価

堤体の信頼性解析

N値の平均値関数

$$\mu = 1.89 + 0.175z$$

N値の共分散関数

$$C_{ij} = 0.604 \cdot (1.24)^2 \exp\left(-\frac{|y_i - y_j|}{6.14} - \frac{|h_i - h_j|}{0.63}\right) \quad (i \neq j)$$

$$C_{ii} = (1.24)^2 \quad (i = j)$$

N_{SPT} の ϕ' への変換関数

$$\phi' = (20N_1)^{0.5} + 20 + 3.0\varepsilon_f$$

変換誤差

$$N_1 = N_{SPT} / (\sigma'_v / 98)^{0.5} \quad \varepsilon_f: N(0, 1) \text{ 正規確率変数}$$

σ'_v : 有効土被り圧(kPa)

堤体の信頼性解析

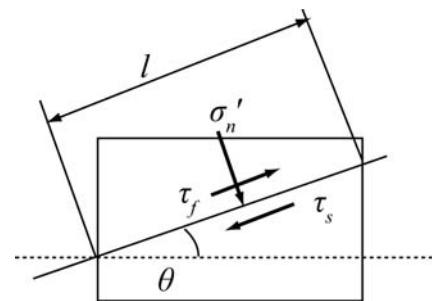
性能関数

$$g = \sum_{i=1}^n (\tau_{fi} - \tau_{si}) l_i$$

$$\tau_f = c' + \sigma_n' \tan \phi'$$

$$\sigma_n' = \frac{(\sigma_z' + \sigma_x')}{2} + \frac{(\sigma_z' - \sigma_x')}{2} \cos 2\theta - \tau_{xz} \sin 2\theta$$

$$\tau_s = \frac{(\sigma_z' - \sigma_x')}{2} \sin 2\theta + \tau_{xz} \cos 2\theta$$



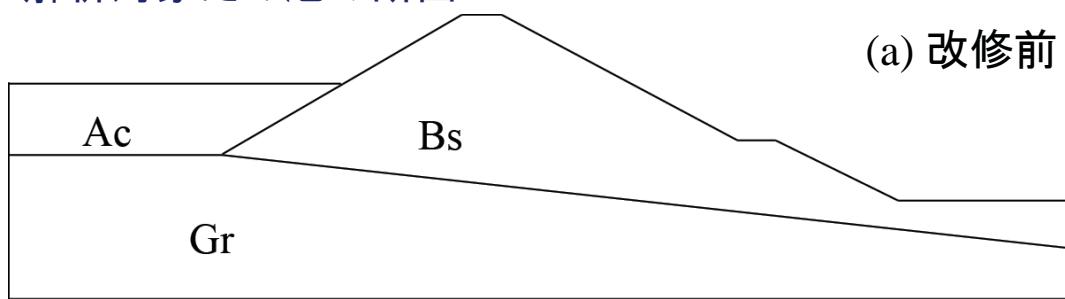
Slip surface across an element

破壊確率

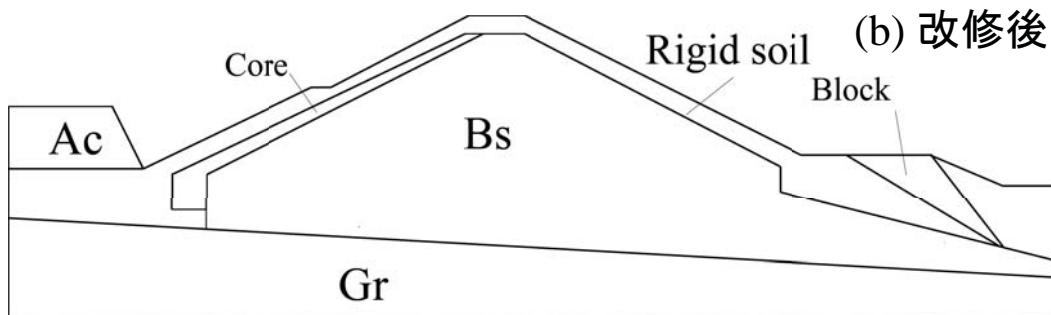
$$F = \text{Probability}(g < 0)$$

堤体の信頼性解析

解析対象ため池の断面



(a) 改修前



(b) 改修後

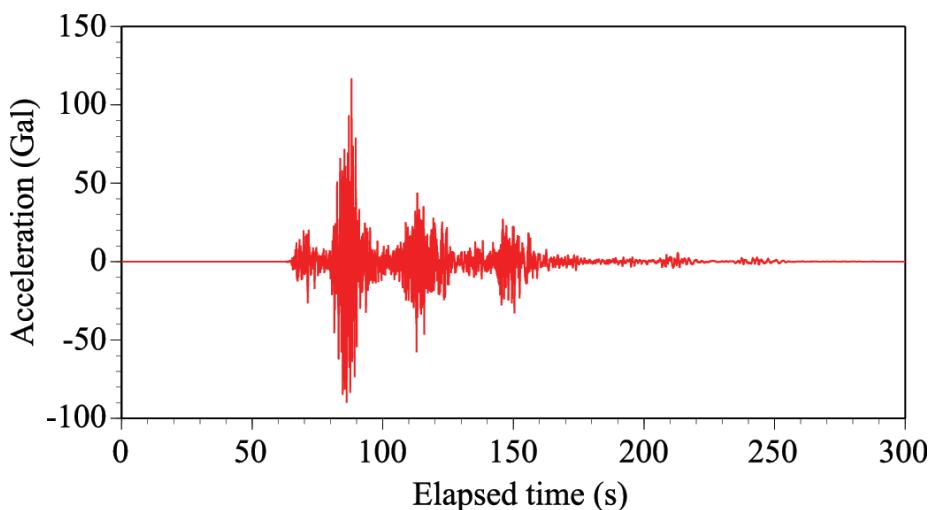
堤体の信頼性設計

解析に用いた材料定数

Materials	Young's modulus (kN/m ²)	Cohesion (kN/m ²)	Internal friction angle (°)	Unit weight (kN/m ³)	Permeability (m/s)	Poisson's ratio
Bs (Sat)	12,350	0	*	20.9	8.55×10^{-6}	0.3
Bs (Unsat)	12,350	0	*	19.8	8.55×10^{-6}	0.3
Ac	1,000	0	37.4	15.0	2.71×10^{-8}	0.2
Core	16,800	0	37.4	20.9	9.95×10^{-8}	0.2
Rigid soil	16,800	0	37.4	20.9	8.55×10^{-6}	0.3
Block	16,800	200	50.0	23.0	8.55×10^{-6}	0.3
Gr	25,000,000	200	50.0	23.0	6.06×10^{-6}	0.3

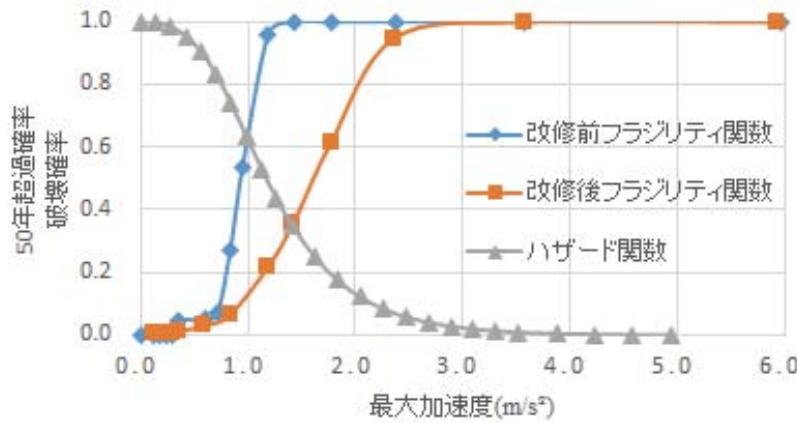
*: N_{sws} より推定

堤体の信頼性設計



サンプル地震波(南海トラフ地震)

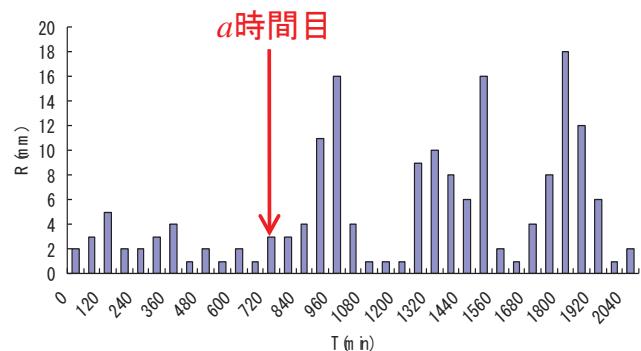
堤体の信頼性設計



ハザードおよびフラジリティ

擬似降雨の作成

一雨を**72時間**として年最大の降雨を抽出する
観測点…岡山気象台
観測年…1952年～1960年
1976年～2009年(44年分)

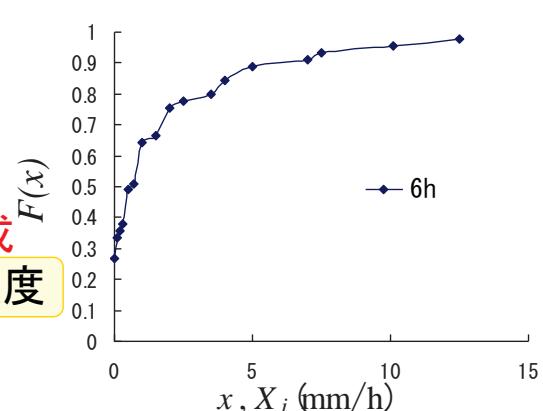


降り始めから a 時間目の降雨強度
 $x(\text{mm}/\text{h})$ の累積分布 $x-F(x)$ を
72時間分作成

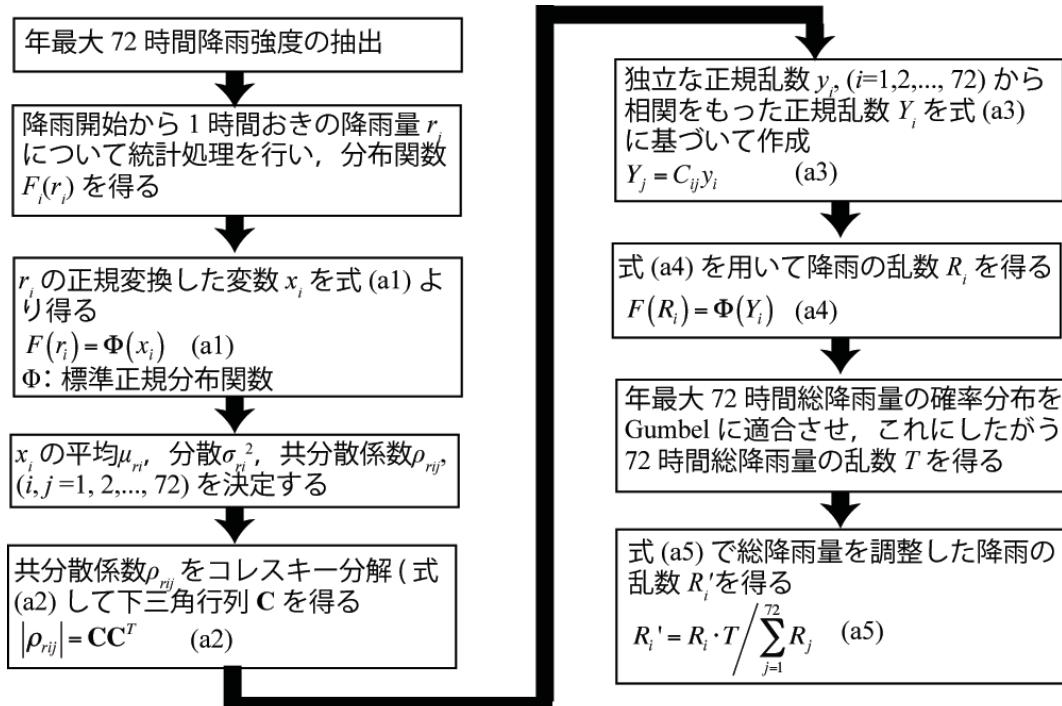


累積分布を用いて**乱数を生成**
→擬似降雨の降雨強度

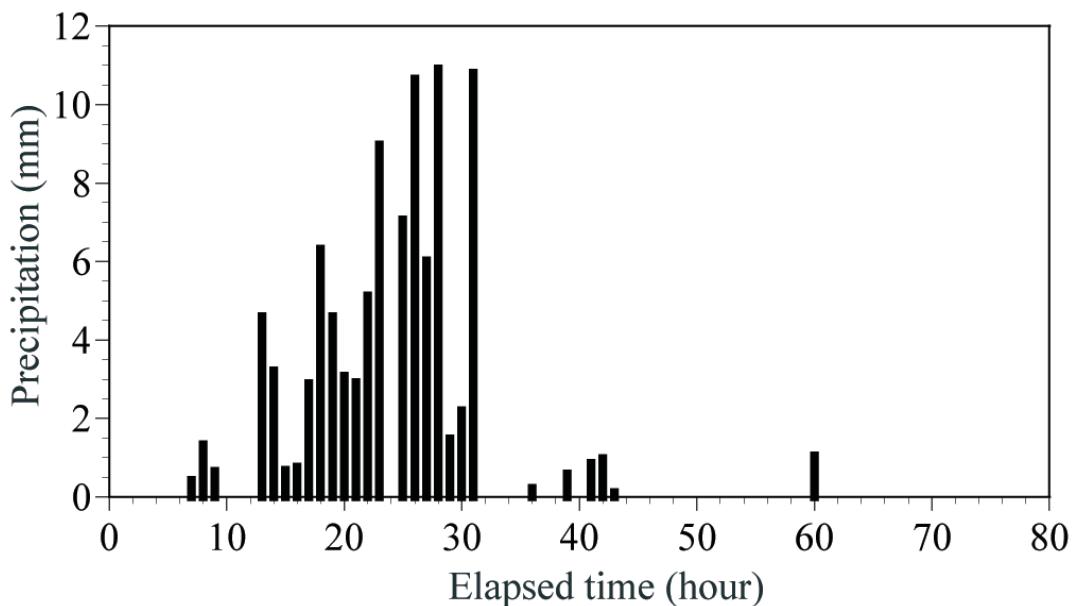
実際の72時間連続降雨分布



疑似降雨作成方法



疑似降雨の作成例



越流破堤確率の算定法

$$Q_{out} = C_d \cdot B \cdot h^{3/2}$$

$$Q_{in} = \frac{1}{3.6} \cdot r_e \cdot A$$

$$r_e = f_p \cdot r$$

Q_{out} : 流入流量(m³/s)
 Q_{in} : 流出流量(m³/s)
 C_d : 設計流量係数
 B : 洪水吐における堰の有効幅(m)
 h : 越流水深(m)
 r_e : 有効降雨強度, A : 流域面積(km²)
 f_p : ピーク流出係数(0.7~0.8の一様分布の確率変数)

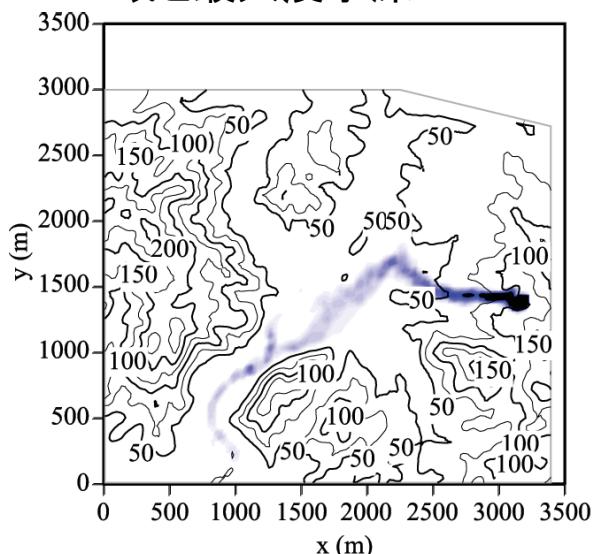
72時間内の収支からピーク越流水深 h_p を算定

越流確率:

$$P_{fo} = \Pr\{h_d < h_p\} \quad h_d: \text{洪水吐の設計越流水深(m)}$$

想定される被害の推定

推定される浸水
域と最大浸水深



算定された被害額 C_f

区分	被害額(千円)
農地	4,200
農作物	9,028
住居	105,000
事業所	35,961
公共建物	4,796
農業用納屋	0
営業停止損失	20,607
家庭の応急対策	9,675
事業所の応急対策	7,182
合計	196,449

堤体の信頼性設計

今後50年の地震時および豪雨時損傷確率

$$P_{fe50} = - \int_0^{\infty} H(a)F(a)da \quad P_{fo50} = 1 - (1 - P_{fo})^{50}$$

今後50年の総合損傷確率

$$P_{all} = P_{fe50} + P_{fo50} - P_{fe50} \cdot P_{fo50}$$

総合損傷リスク $R = P_{all} \times C_f$

	改修前	改修後
地震時 50 年損傷確率	0.6882	0.4294
豪雨時 50 年損傷確率	0.2337	0.0000
50 年総合損傷確率	0.7611	0.4294
総合損傷リスク(千円)	149,517	84,357

まとめ

- (1) 今後50年における地震と豪雨による損傷確率から、総合的な損失確率を算定した。その結果、改修前断面に対しては、確率が0.76、改修後の断面に対しては0.43となった。破堤による損失を考慮して、異なる2つの事象の総合的なリスク評価を行い、改修によって、リスクを6,600万円減じることができることが分かった。
- (2) 広域の地震時リスクによって、ため池の改修戦略（優先順）を合理的に決定することができると考えられる。