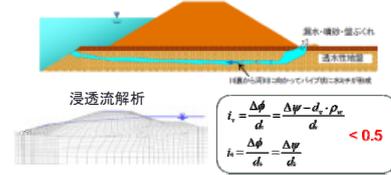


パイピング・盤ぶくれを考慮した 河川堤防の総合的な信頼性解析

新潟大学 自然科学系 大竹雄

研究の背景・目的



- 河川堤防は線状構造物
- 透水性地盤のパイピング破壊に着目
- 発生要因に不明なところが多い
- 対策優先順位の設定が困難
- 不完全情報で信頼性更新の定量化

<http://mainichi.jp/graph/2012/07/14/20120714k0000e040138000e038.html>

研究の流れ

- 文献調査**
 - 国内外のパイピング破壊に関する文献の調査
 - オランダ基準(VNK2)着目
- 精度検証**
 - 国内外実験データを用いた、Sellmeijer式のモデル化誤差定量化
- 感度分析**
 - 重要な因子の抽出
- 国内実データに適用**
 - ガンマが観測された河川でオランダ基準の適合性を確認
- Bayesian Updating**
 - 目視点検情報(変状なし、漏水、ガンマ)による信頼性の更新

透水性基礎地盤堤防へ信頼性解析の適用

パイピングに基づく損傷形態の場合 - オランダ国照査方法を活用

3要素の並列システム(基本的に独立)

A N D Failure $F = F_u \wedge F_H \wedge F_p$

Sellmeijer式 $H_c = CL = F_1 F_2 F_3 L$

抵抗項 $F_1 = \eta \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \tan \theta$

スケール項 $F_2 = \frac{d_{70m}}{\sqrt{v k L}} \left(\frac{d_m}{d_{70m}} \right)^{0.4}$

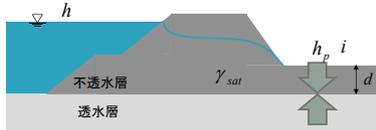
形状項 $F_3 = 0.91 (D/L)^{0.28} (D/L)^{0.04}$

現象別説明:

- <F_u> Uplift 盤ぶくれ ⇒ 漏水、しみ出し
- <F_H> Heave 浸食開始 ⇒ ガマ
- <F_p> Piping パイプ形成 ⇒ 塊体変状

注: Sellmeijer式 Bligh, Laneの式の拡張、限界水頭差H_cを評価する簡便式

プロセス①: Uplift(盤ぶくれ)



$$Z_u = g_u(x) = m_u i_{c,u} - m_\phi i$$

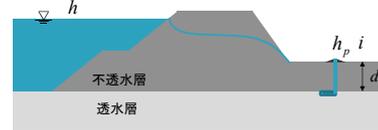
$$i_{c,u} = \Delta\phi_{c,u} / d$$

$$\Delta\phi_{c,u} = d \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w}$$

m_u, m_ϕ : モデル係数
 $i_{c,u}$: 限界動水勾配
 i : 局所動水勾配
 d : 被覆土層の厚さ
 γ_{sat} : 飽和単位体積重量
 γ_w : 水の単位体積重量



プロセス②: Heave(浸食開始)



$$Z_h = g_h(x) = i_{ch} - \min\{i, i_{cu}\}$$

i_{ch} : Terzaghiの限界動水勾配(平均0.7、標準偏差0.1)
 i : 局所動水勾配
 i_{cu} : Upliftの限界動水勾配



信頼性更新(Direct method)

$$P(F|\varepsilon) = \frac{P(F \cap \varepsilon)}{P(\varepsilon)}$$

F: Failure
 h(X): Observation Function
 g(X): Performance Function
 $\varepsilon \equiv \{h(X) < 0\}$

$$P(F|\varepsilon) = \frac{P(g(\mathbf{X}) < 0 \cap h(\mathbf{X}) < 0)}{P(h(\mathbf{X}) < 0)} = \frac{\int_{F \cap \varepsilon} f_X(X) dX}{\int_{\varepsilon} f_X(X) dX}$$

- モデルがシンプル → 計算可
- モデルが複雑 → MCSにより計算

MCSによる方法

1. 各確率変数のサンプルをn個生成する
2. 事前確率の計算 (破壊域にあるサンプル数 / n)

$$\hat{P}(F) = \frac{1}{n} \sum_j I[(g(X_j) < 0)]$$

F: Failure
 h(X): Observation Function
 g(X): Performance Function
 $\varepsilon \equiv \{h(X) < 0\}$

3. 事後破壊確率の計算

$$\hat{P}(F|\varepsilon) = \frac{\sum_j I[(g(X_j) < 0)] \cdot I[h(X_j) < 0]}{\sum_j I[h(X_j) < 0]}$$

河川堤防への適用

事前分布に従った基本変数でMCSにより事前確率を算出



水位 h_{obs}
 浸出点位置 x_{ext}

観測条件を満たすサンプルを抽出

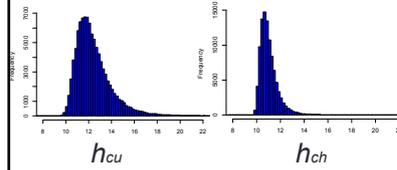


事後分布による超過確率の算出

※超過確率算出の際の水位はHWLを用いる

目視点検(観測関数)

Observation	Uplift	Heave	Piping
No seepage (変状なし)	NO: $Z_u^p > 0$		
Seepage (漏水)	YES: $Z_u^p < 0$		
Sand Boils (ガマ)	YES: $Z_u^p < 0$	YES: $Z_h^p < 0$	NO: $Z_p > 0$



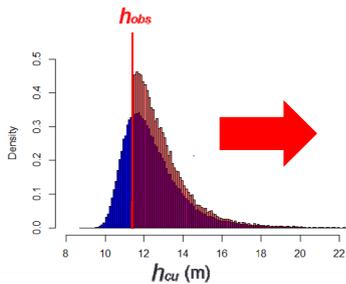
$$Z_u^p = h_{cu} - h_{obs}$$

$$Z_h^p = h_{ch} - h_{obs}$$

h_{cu} : Upliftの限界水位 (m)
 h_{ch} : Heaveの限界水位 (m)
 h_{obs} : 観測水位 (m)

洪水 ⇒ 変状なし

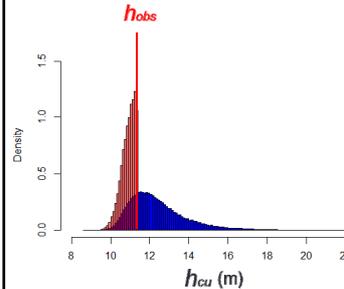
Observation	Uplift	Heave	Piping
No seepage (変状なし)	NO: $Z_u^p > 0$		



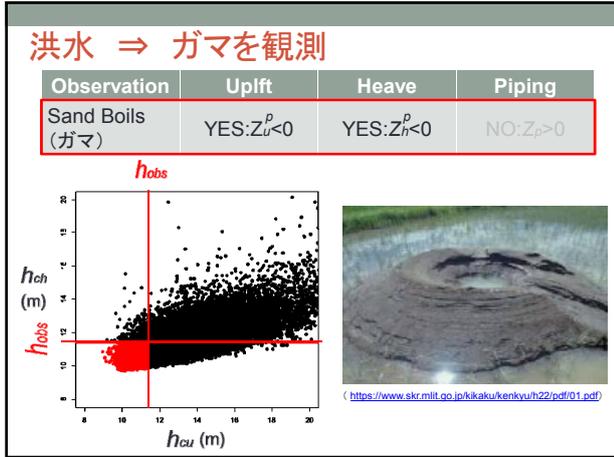
サンプルの抽出
 パラメータの更新

洪水 ⇒ 漏水を観測

Observation	Uplift	Heave	Piping
Seepage (漏水)	YES: $Z_u^p < 0$		

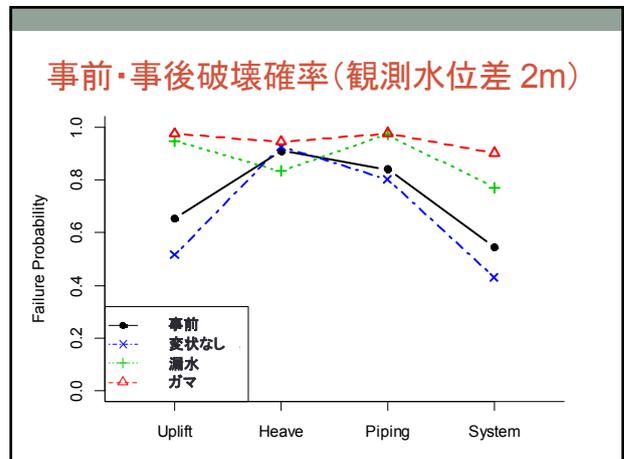
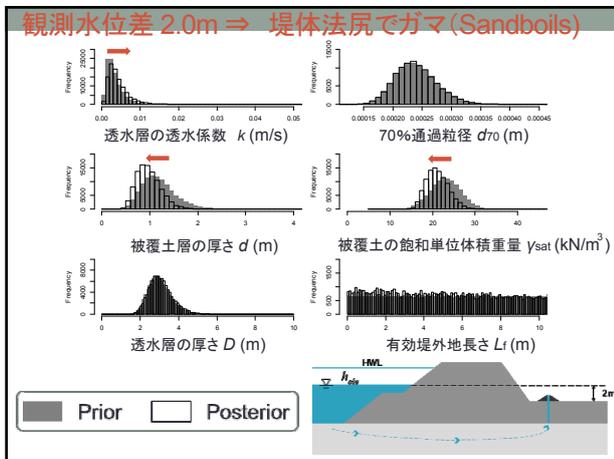
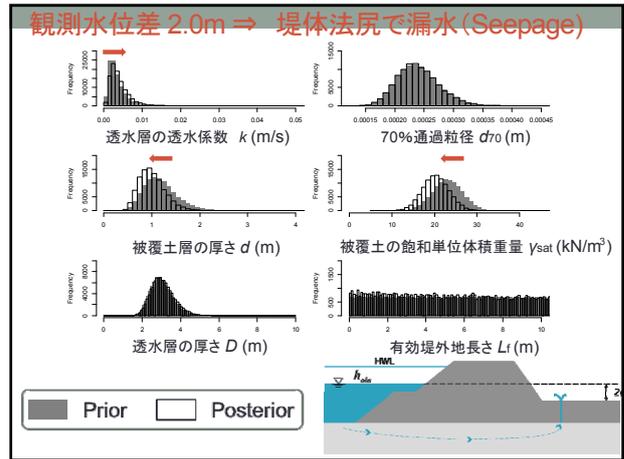
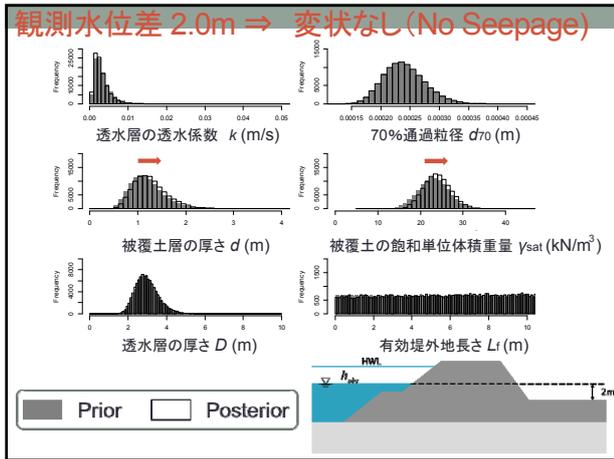


https://www.pwri.go.jp/teami/ocsearch/wadai_05.html

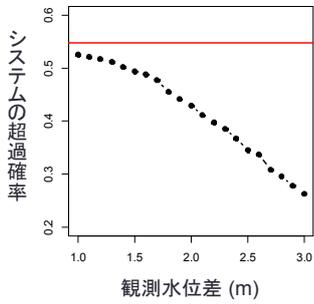


計算条件

symbol	単位	事前分布	平均値	標準偏差	更新
d	m	対数正規	1.20	$0.30 \times \mu$	○
D	m	対数正規	3.00	$0.20 \times \mu$	○
B	m	確定値	24.0		○
L_r	m	一律	7.50		○
x_{sat}	m	一律	22.5	6.98	○※
γ_{sat}	kN/m ³	正規	23.0	$0.15 \times \mu$	○
γ_w	kN/m ³	確定値	10.0		○
γ_s	kN/m ³	確定値	26.5		○
θ	deg	確定値	37		○
d_{70}	m	対数正規	$2.40E-04$		○
d_{75}	m	確定値	0.000208		○
k_h	m/s	対数正規	$5.00E-06$	$0.70 \times \mu$	○
k	m/s	対数正規	0.0034	$0.70 \times \mu$	○
h	m	確定値	T.P + 12.7		○
h_p	m	確定値	T.P + 9.38		○
β		確定値	0.25		○
β'	m ² /s	確定値	$1.33E-06$		○
ω		対数正規	0.7	0.1	○
m_u		対数正規	1	0.1	○
m_p		対数正規	1	0.1	○
m_s		対数正規	1	0.14	○



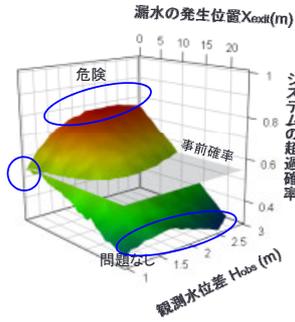
変状なし (No Seepage)



「洪水発生 ⇒ 変状なし」という観測情報が得られた時、その区間の堤防の信頼度はUPする。逆に危険度(超過確率)はDownする。杭基礎に対して載荷試験をするようなもの。

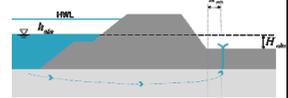
— 事前信頼性
●— 事後信頼性

漏水 (Seepage)

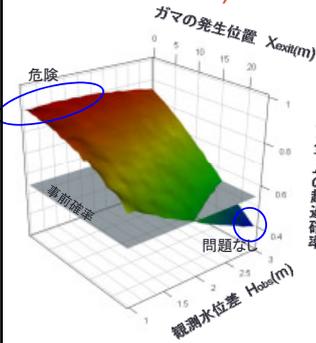


「洪水発生 ⇒ 漏水あり(粒子の移動なし)」

観測水位差が小さい場合には問題なし。ある程度の水位差まで達してから、漏水が発生した場合には、超注意。一気にパイピングへ至る可能性が高い。観測記録により、危険度はより高く更新される。堤防から離れれば離れるほど、危険度は小さく更新される。



ガマ (Sandboils)



「洪水発生 ⇒ ガマ(粒子の移動あり)」

観測水位差が小さい場合に最も危険である。

ガマの噴出点は、法尻より遠い程、影響は小さいことが定量化される。

