

第13回河川堤防技術シンポジウム
企画セッション『堤防設計の未来』

堤防パイピング研究の現状と実務への適用

土木学会 堤防小委員会

「パイピング研究の現状と実務への適用検討WG」(WG長 岡村未対)

早稲田大学

岡村 未対

山口大学

森 啓年

熊本高等専門学校

脇中 康太

概 要

堤防浸透の詳細点検 (2002~2010)

- ・ G/W 盤膨れ指数, ih・iv 裏法尻局所動水勾配
- ・ 対策工の設計施工 : 点検でNG ($G/W < 1$, $ih \cdot iv > 0.5$) , 被災堤防

- 課題**
- ・ 点検結果が安全側すぎる
 - ・ 多数の噴砂事例に対しパイピング破堤事例は多くない。
→パイピングに進展する噴砂の判別
 - ・ 対策堤防が再度被災する事例

「パイピングWG」からの報告

- 詳細点検法 (G/W , $ih \cdot iv$) の特徴
 - ・ 出水時の堤防の挙動と点検結果を比較検討
→被災履歴の無い堤防の噴砂発生危険度を適切に判断(やや安全側過ぎ)
→被災履歴の有る堤防への適用には適さない
- パイピングメカニズムと進展評価研究の現状
 - ・ 現行照査法はパイピングの「きっかけ」の照査
 - ・ パイピング「進展」評価研究の現状と必要性
- 実務におけるパイピング評価の先進事例 (米国)
 - ・ 米国におけるパイピングの「きっかけ」と「進展」評価

⇒結論: パイピング進展評価の研究推進と実務実装を検討すべき

詳細点検法（G/W, ih・iv）の実力

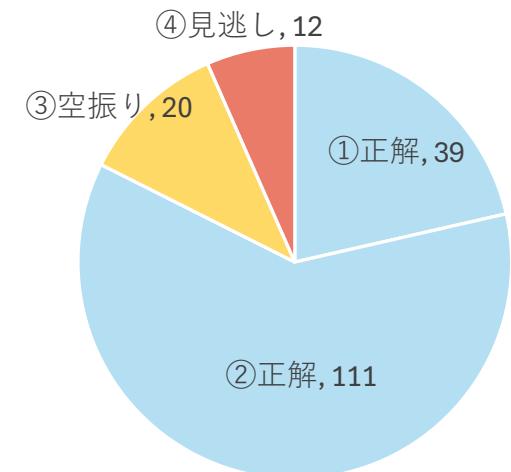
熊本高等専門学校 脇中康太

詳細点検法の実力評価

浸透点検の妥当性評価

- ・ 吉野川(149箇所), 重信川(28箇所), 矢部川(3箇所), 子吉川(2箇所)
→計182箇所の浸透点検結果にて妥当性評価
- ・ 空振り20箇所については、出水時水位が低く外力が小さいためである。
※詳細は、栗原・脇中・石田・坂本・岡村：吉野川を対象とした河川堤防の浸透点検手法の有効性の検討、第13回河川堤防技術シンポジウム、にて。
→ただし、パイピングにならないような単なるボイリングもNG判定とするので安全側ではある。
- ・ 見逃し12箇所は危険側に評価しており、特に河川管理上問題となる評価である。
→見逃しは被災履歴の有る堤防のみに見られた。

		詳細点検	
		○安全	× 危険
実現象	無被災	①正解	③空振り
	被災	④見逃し	②正解



被災履歴の無い堤防における実力評価

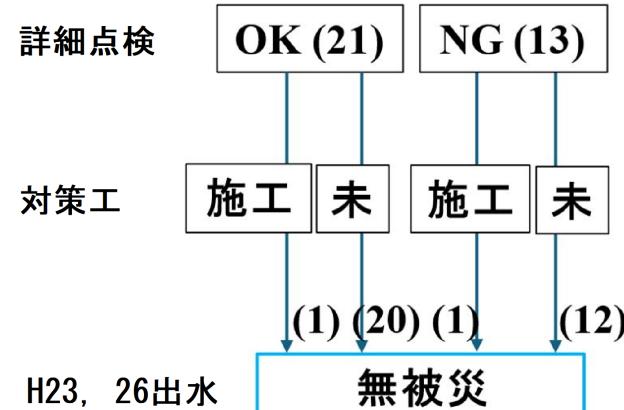
詳細点検以前の被災履歴”無し”(吉野川)

- ・ 詳細点検結果, OK : 21箇所, NG : 13箇所
→ 詳細点検後のH23, 26に大きな出水が作用したが、**計34箇所全ての箇所で無被災**。NG13箇所のうち、対策工施工済は1箇所のみ。
- ・ 空振りは有るもの、見逃しはゼロであり現状の詳細点検法は**無傷の堤防を評価する上では問題無い**と言える。

江の川での噴砂事例

- ・ 江の川では2018年, 2020年, 2021年に大量の噴砂が発生しているが、その後の詳細調査で**砂層にパイプは生じておらず、パイピングには至らない**事例であることが確認されている。噴砂は砂層由来でなく、下部の礫層からの供給と判明。

被災履歴無し



※ Mitsu Okamura et al. : Geotechnical performance of the Gounokawa River levee during the 2018, 2020, and 2021 flooding events, Soil and Foundations, Volume 65, Issue 4, August 2025.

⇒ 結論: 無傷の堤防には安全側に評価する例もあるが見逃しは無く妥当な点検

被災履歴の有る堤防における実力評価

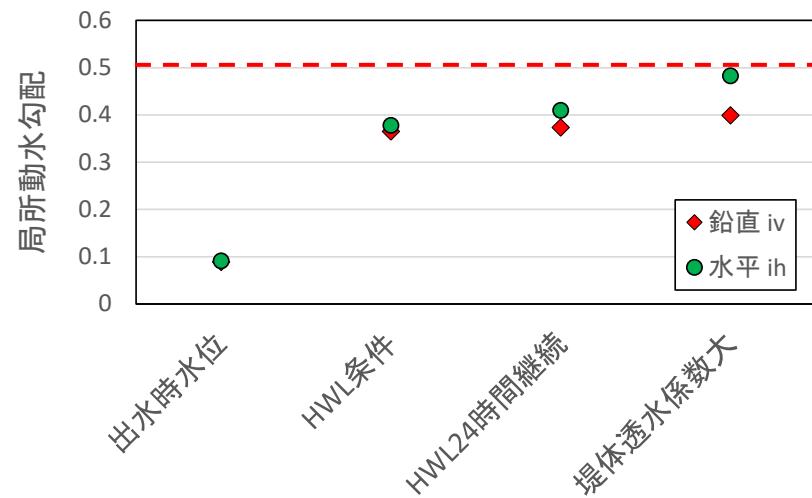
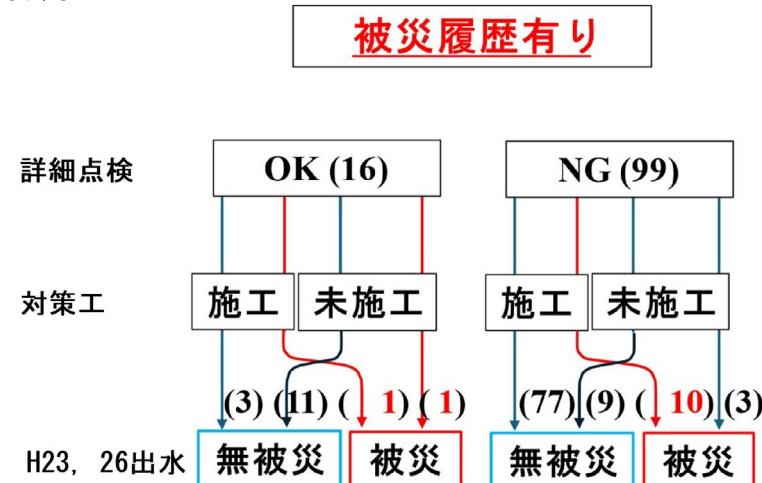
詳細点検以前の被災履歴”有り”(吉野川)

- ・ 詳細点検結果, OK : 16箇所, NG : 99箇所
→OK16箇所のうち2箇所見逃し

NGで対策工施工箇所で10箇所被災
⇒被災履歴の有る堤防では見逃しが多く見られ,
詳細点検法は適切でない。
点検後・被災後の対策工設計にも用いられる
が, これも適切でない評価。

吉野川右岸33.6kp

- ・ 詳細点検OK, 対策工未施工
→H26出水時に漏水
(S27, H16にも漏水)
→被災後の再現解析で出水時水位・
危険側条件で再現解析を試みるも
失敗。
⇒被災履歴を有し完全に見逃した事例



被災履歴の有る堤防における実力評価

吉野川右岸18.0kp

- ・ 詳細点検NG, 対策工施工

→H23出水時に漏水

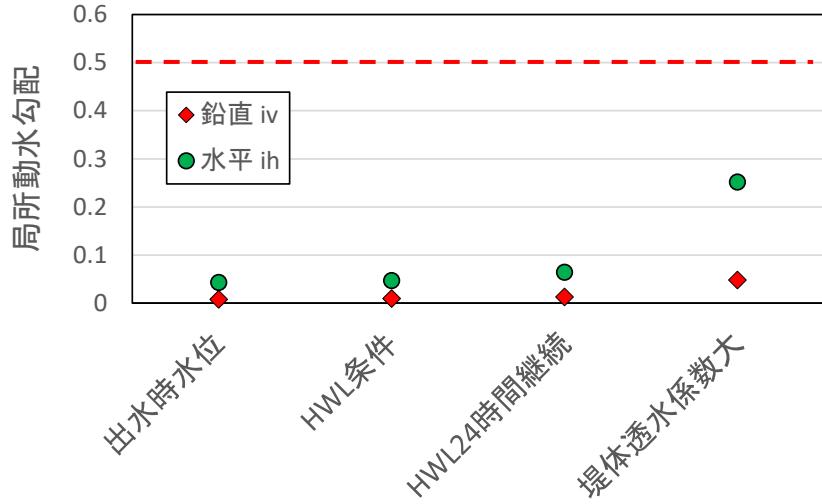
(S23, 24, H2, H16にも漏水)

H2に止水矢板, H17に遮水シート,

→被災後の再現解析で出水時水位・

危険側条件で再現解析を試みる

も失敗。



まとめ

- ・ 詳細点検法は、被災履歴の無い堤防においては安全側に評価する部分もあるが、見逃し例は1つも無く評価法として妥当であると言える。
- ・ 一方、被災履歴を有する堤防では、少なからず見逃しの事例が見られ、ジャストポイントで再現解析を試みるも再現不可となつており、評価法として適切でない。

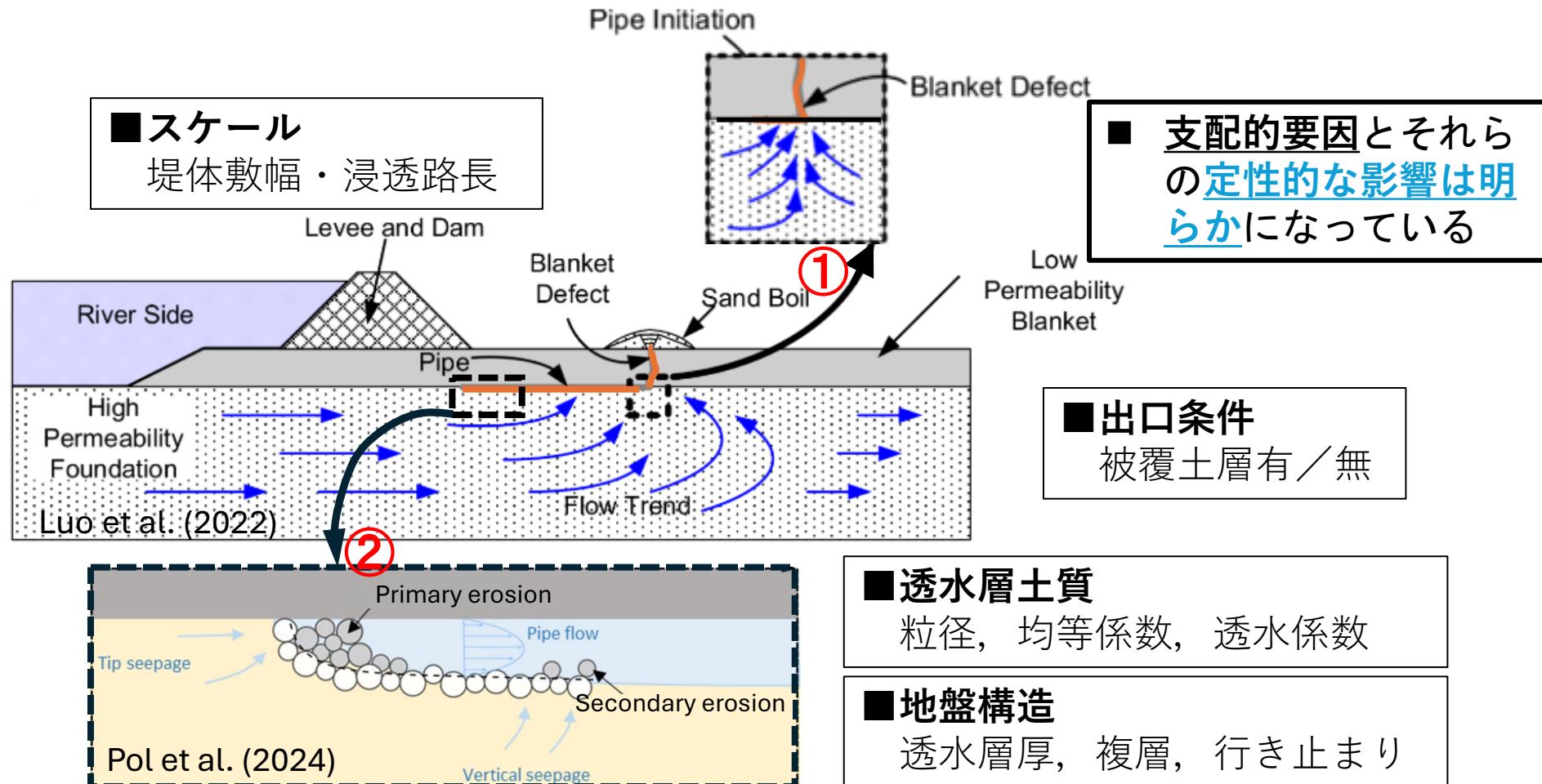
パイピングメカニズムと進展評価研究の現状

早稲田大学 岡村未対

パイピングメカニズムと進展の支配的影響要因

Roof support条件でのパイピングメカニズム（基本形）

- ① パイピングのきっかけ **噴砂孔の形成** (G/W : 被覆土層有、ihiv : 無)
- ② **パイプの進展** パイプ先端の崩壊(Primary erosion)→崩壊土砂輸送・壁面浸食、排出(Secondary erosion)



Roof Support 条件のパイピング実験

■パイプ進展の平均動水勾配 H_c/L

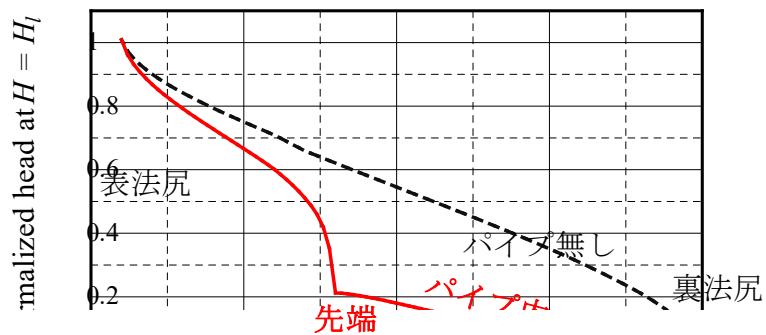
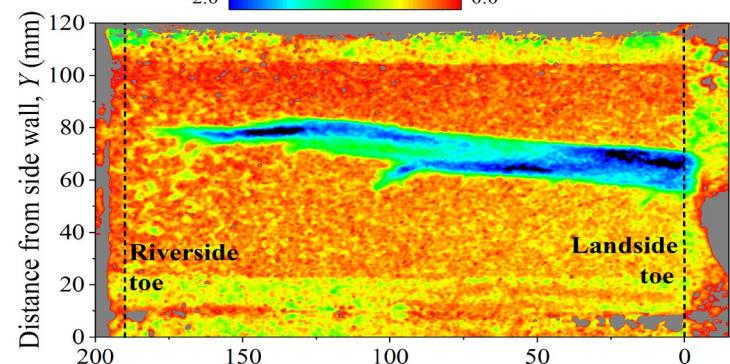
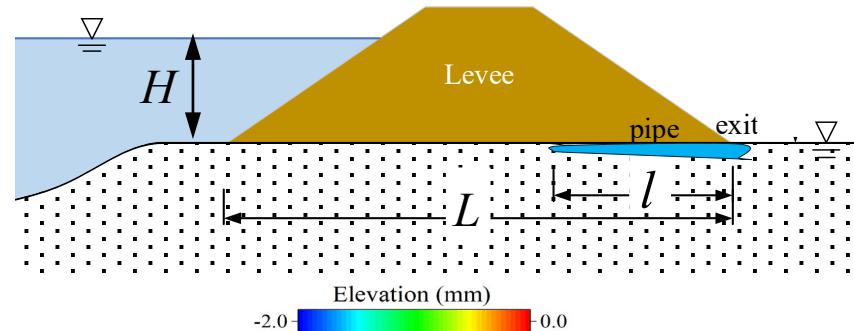
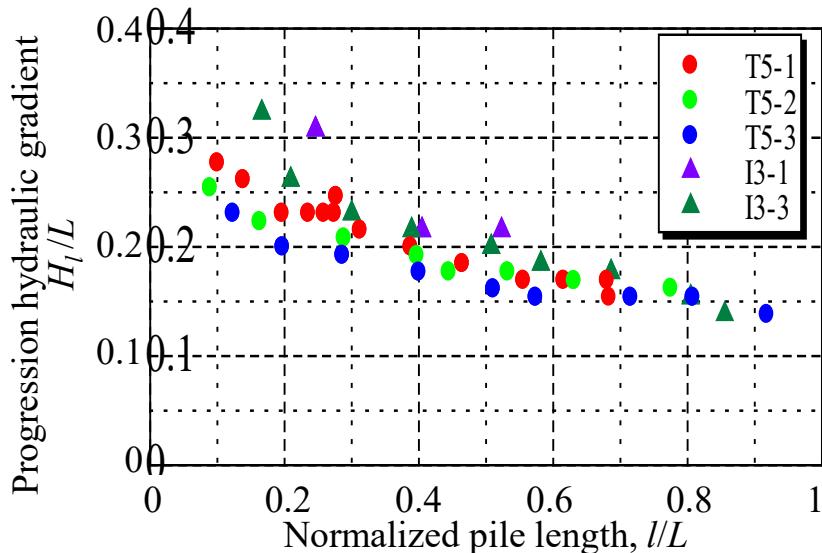
- 地盤構造, 被覆土層の有無, 透水層の土質(粒度分布)
- 堤体スケール (不十分)

■メカニズム, パイプの断面形状, 水圧分布

- 3~10d (d:粒子径) の浅いパイプ

■パイプの進展速度

- overload (H_c 以上の水位を負荷)
- 研究は近年始まったばかり

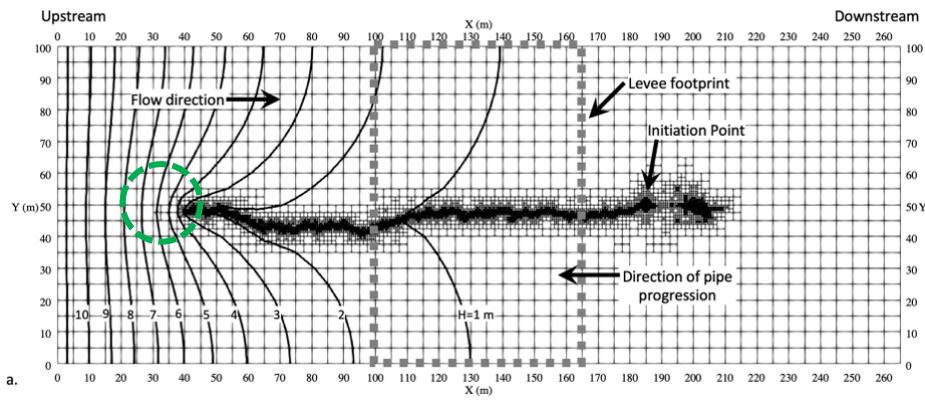


パイプの進展メカニズム

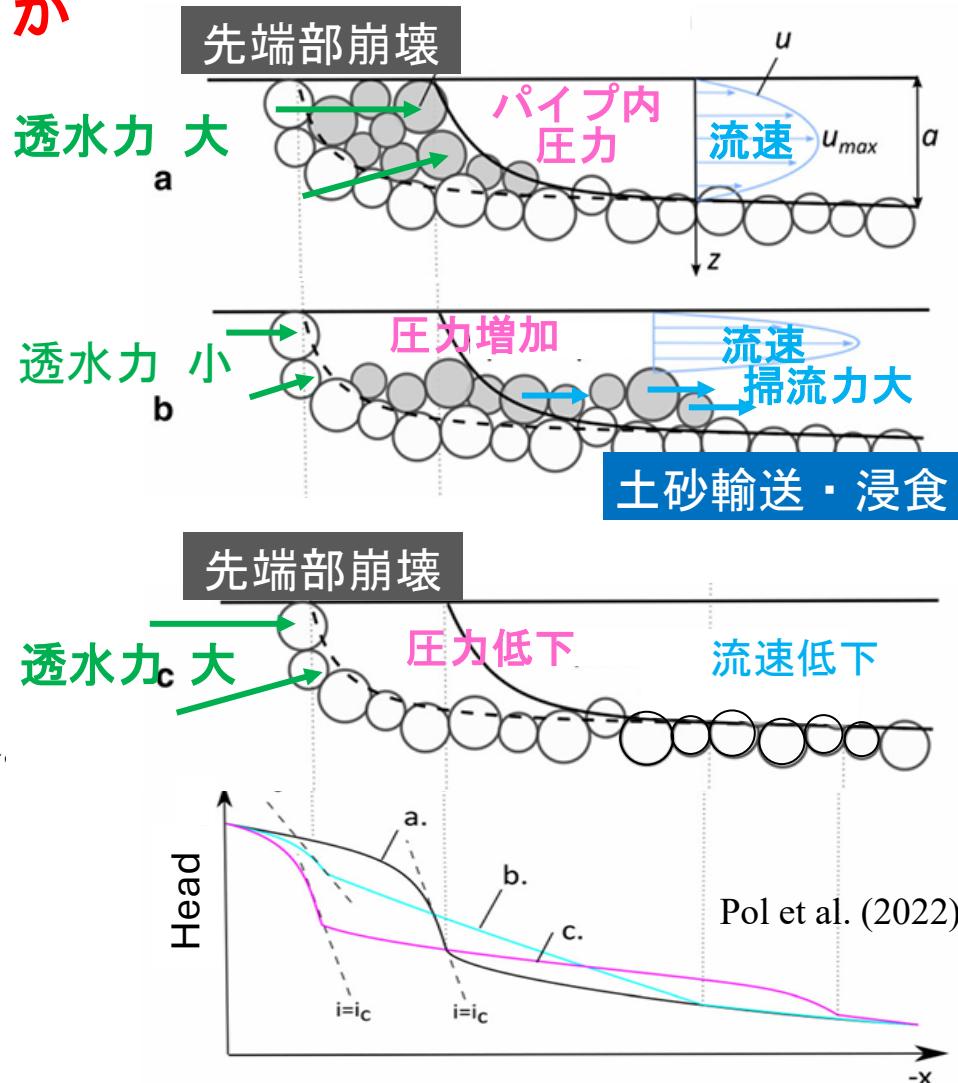
- Primary erosion : 先端部の透水力（動水勾配）による崩壊
- Secondary erosion : パイプ内流れによる掃流・浸食

Primary erosion と Secondary erosion が
交互に起きる。

- パイプ先端の前面地盤では大きな動水勾配 i_h が発生
- パイプが進展するほど i_h は増加するが、進展速度はほぼ一定で増加しない



Robbins and Griffiths (2022)



パイプの進展予測法

- ・ 浸透流解析 (Laplaceの式) : 2D/3D(パイプ形状), 層流, 乱流
- ・ 砂の質量保存則: 先端崩壊量, パイプ内の掃流砂量, パイプ壁面浸食量
- ・ 先端の崩壊条件: 透水力, 内部浸食
- ・ パイプ内の砂の安定条件: 限界シールズ数

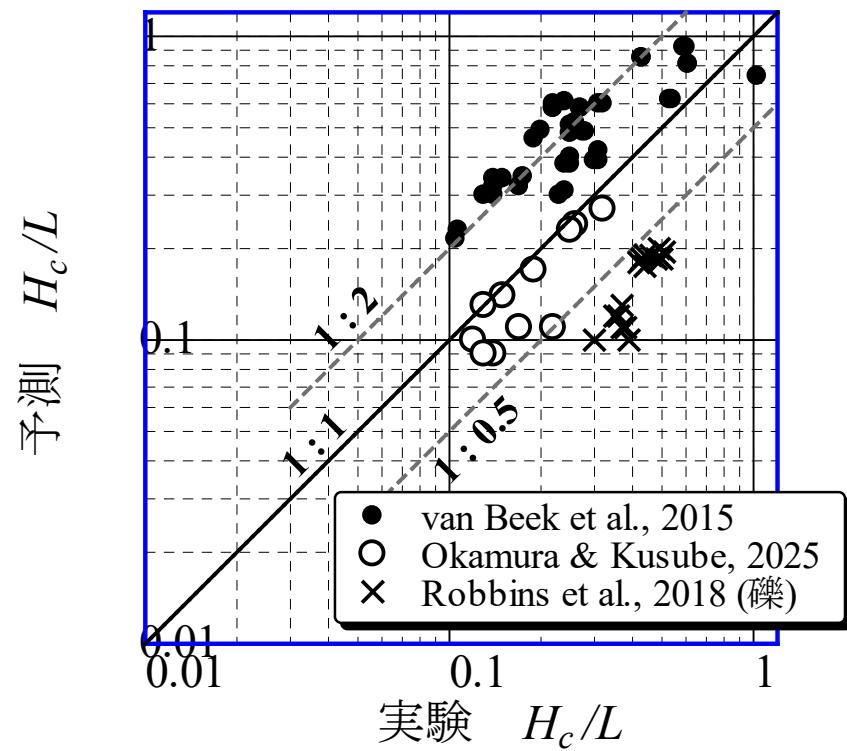
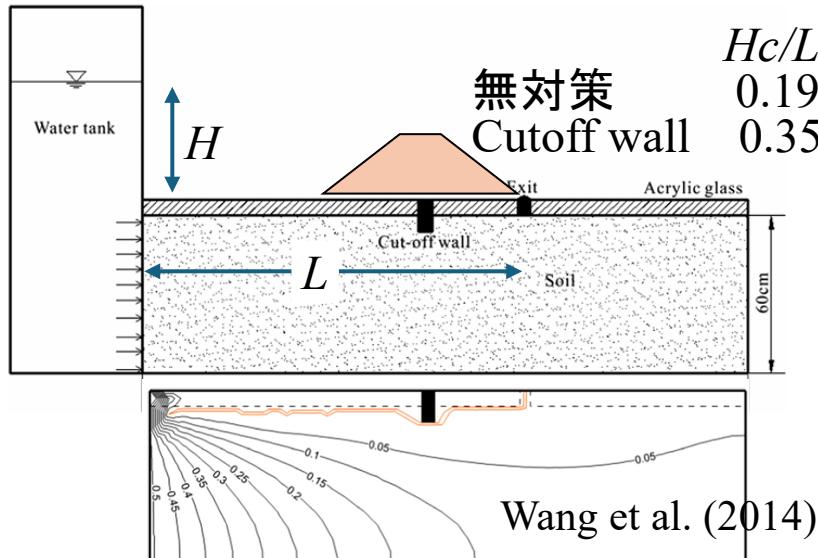
1. 地盤とパイプ (透水係数大) の浸透流解析+パイプ内の砂の安定条件

Secondary erosion

Sellmeijer (1988) (改良) → パイプ形状 2D/3D, パイプ内流れ 層流/乱流

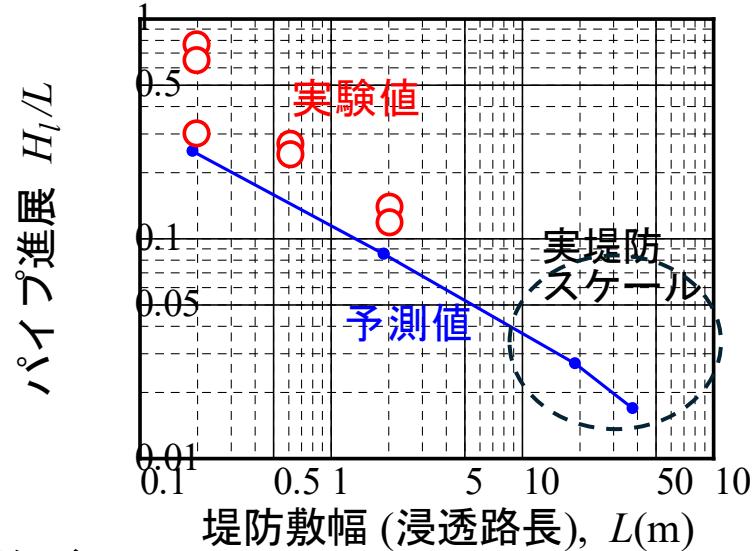
2. 浸透流解析+固層の質量保存則

Primary erosion + Secondary erosion



まとめ

1. Roof Support 条件で多くの実験により、進展水位に及ぼす種々の要因の影響が明らかになってきた
 - ・地盤の構造（透水層厚、行き止まり、複層）
 - ・出口条件（被覆土層の有無）
 - ・透水層の土質（粒度分布、透水係数）
 - ・スケール（浸透路長）
 \Leftarrow 大型実験は少数、検証は不十分
2. 進展メカニズムの解明
 - ・先端部の崩壊とパイプ内の浸食・土砂輸送が交互に生じることでパイプが断続的に進展
3. パイピング進展水位の予測法
 - ・比較的簡単な Secondary erosion の解析（浸透流解析 + 掃流砂条件）によりある程度の精度で進展水位を予測できるレベルに達している



米国における堤防パイピング 評価基準の変遷とその背景

ブランケット理論から
リスク情報を用いたアプローチへの移行

・ 山口大学大学院 創成科学研究科 森 啓年

本日の話題

- ①2000年基準: 経験則と「ブランケット理論(BT)」に基づく決定論的評価

目的: 盤ぶくれ・噴砂の「発生防止」(=日本の照査思想)

- ②最新基準案(2023年ドラフト): 「リスク情報を使ったアプローチ」の採用

目的: 発生防止に加え、「後退侵食型パイピング(Backwards Erosion Piping: BEP)の進行阻止」と「リスク情報を用いた設計調整」



「单一基準」から「段階的基準(発生防止+進行阻止)&リスク評価」へ

①2000年基準：経験則と「ブランケット理論（BT）」に基づく決定論的評価

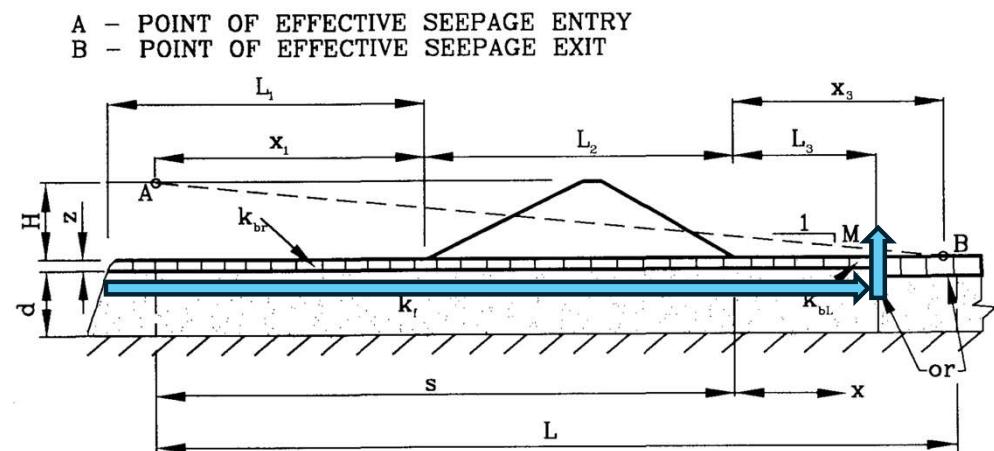
概要

1940年代に実施された大規模調査と室内実験モデルの研究成果を元にブランケット理論(BT)を構築。

被覆土と透水性基盤からなる地盤の浸透流量と揚圧力を簡易に計算可能。リリーフウェル、抑え盛土などの設計に活用。

前提条件

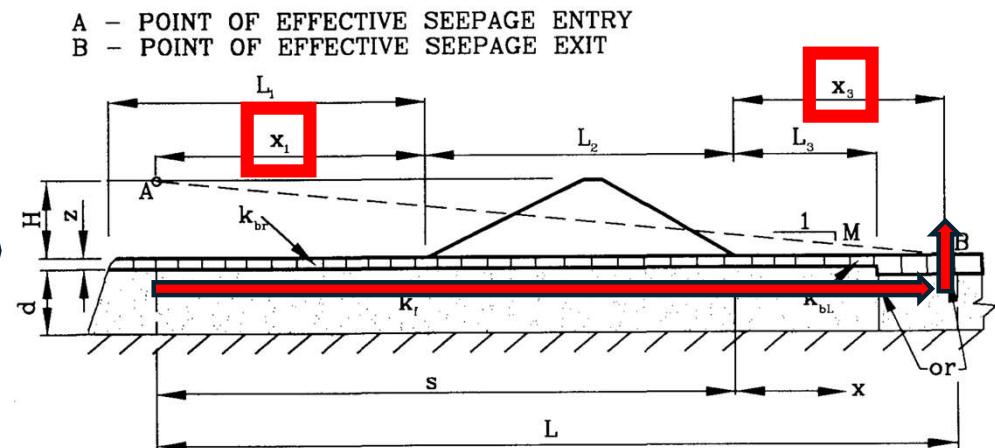
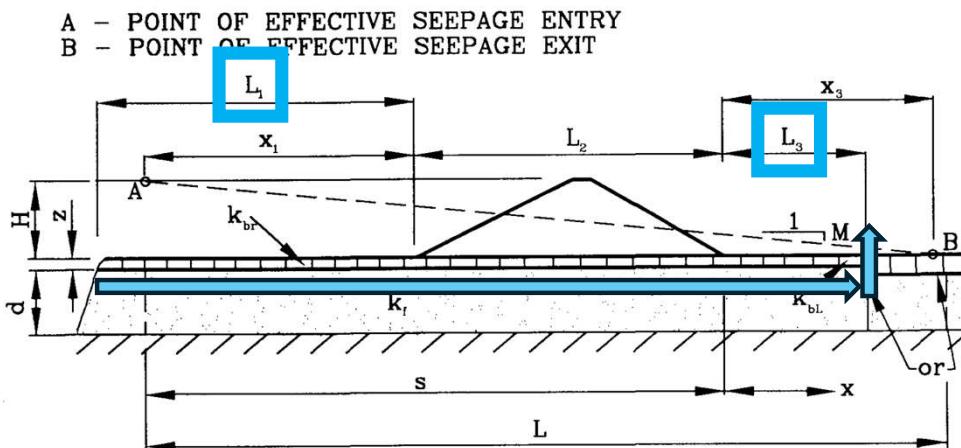
- 被覆土層内では鉛直方向、透水層内では水平方向の流れ
- 堤体は不透水性
- 地盤は均質な厚さと透水性を持つ单層の透水層と被覆土層に単純化



有効浸透長

有効浸透流入長 (x_1) と 有効浸透流出長 (x_3)

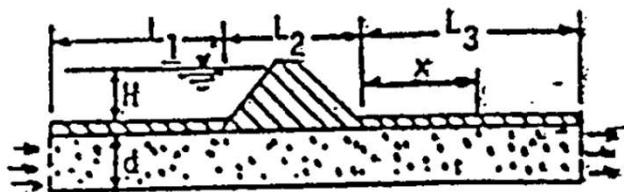
土層構造で決定される距離 (L_1, L_3) ではなく、被覆土層の抵抗を考慮した「見かけ上の」浸透の出入り口までの距離



過剰圧力水頭

有効浸透長と被覆土層の現地状況から、位置xの過剰圧力水頭を求めることが可能。

b. CASE 2 - Impervious topstratum
both riverside and landside



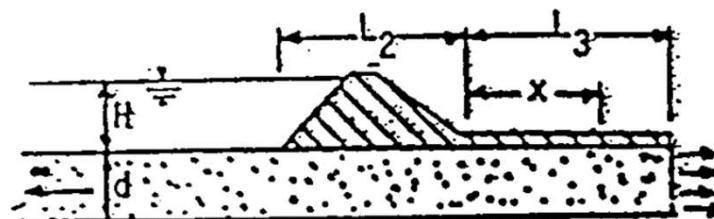
$$\xi = \frac{d}{L_1 + L_2 + L_3}$$

$$h_o = H \left(\frac{L_3}{L_1 + L_2 + L_3} \right)$$

$$h_x = h_o \left(\frac{L_3 - x}{L_3} \right) \text{ for } x < L_3$$

$$h_x = 0 \text{ for } x > L_3$$

d. CASE 4 - Impervious landside top stratum & no riverside top stratum



$$\xi = \frac{d}{0.43d + L_2 + L_3}$$

$$h_o = H \left(\frac{L_3}{0.43d + L_2 + L_3} \right)$$

$$h_x = h_o \left(\frac{L_3 - x}{L_3} \right)$$

安全評価

位置xの過剰圧力水頭 h_x から

安全率を算出

$$\underline{FS_{vg} = \frac{i_{cv}}{i_v} = \frac{\gamma' z_b}{\gamma_w h_x}}$$

where:

FS_{vg} = factor of safety based on vertical gradient

i_{cv} = critical vertical gradient = γ'/γ_w

i_v = vertical exit gradient at point of interest = h_x/z_t , typically the landside toe

z_t = vertical distance to surface, typically the landside blanket thickness

h_x = excess head (above hydrostatic) at the point of interest, typically bottom of blanket
(h_o at the embankment toe and h_x at a distance x from the embankment toe)

γ' = average effective (or buoyant) unit weight of blanket (overlying soil) = $\gamma_{sat} - \gamma_w$

γ_{sat} = saturated unit weight of blanket limited to no more than 112.5 lb/ft³

γ_w = unit weight of water

基準値

川裏法尻 : $FS_{vg} > 2.7$ 相当

経験則として、川裏法尻における鉛直動水勾配を0.3以下に抑制推奨
(飽和単位重量1,800kg/m³の安全率)
日本と比較して相当高い基準

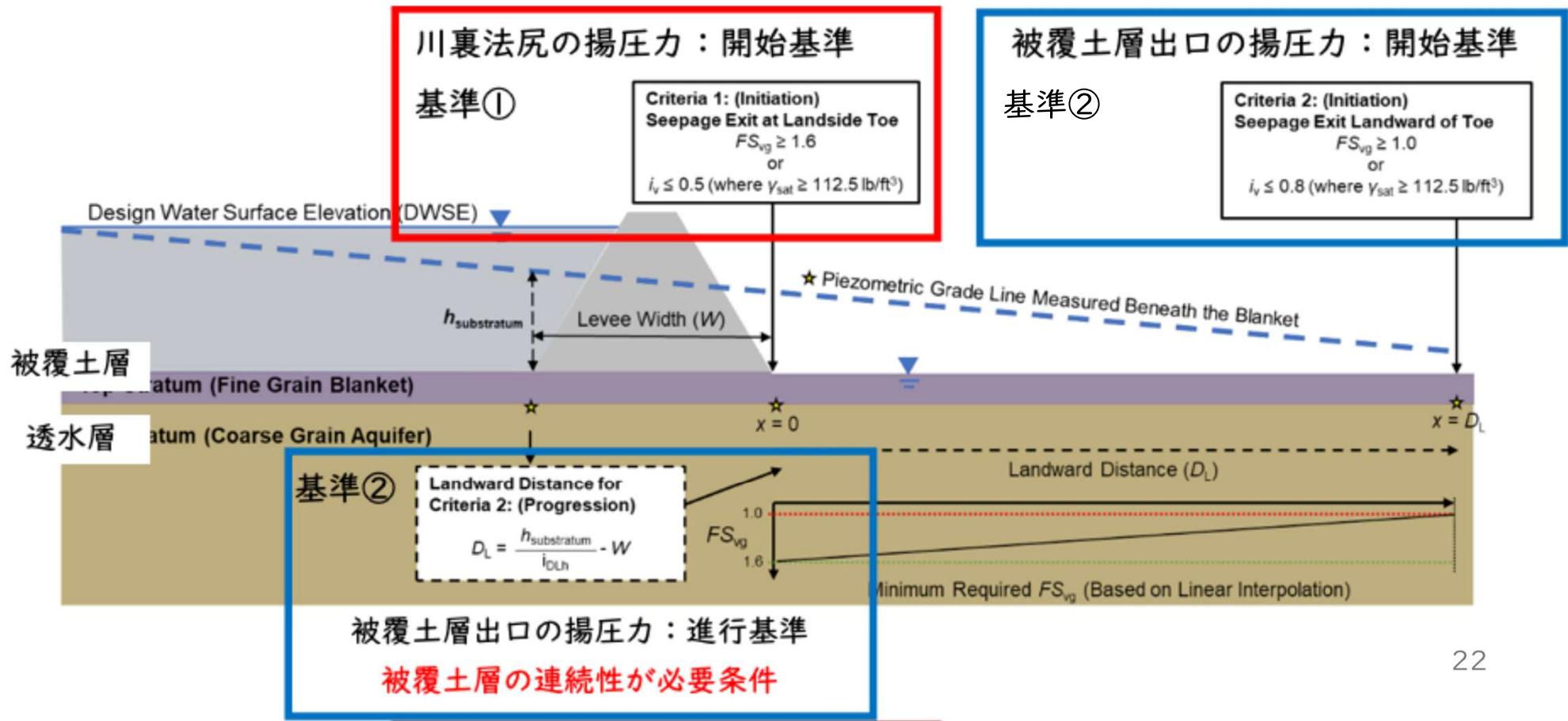
米国におけるパイピング対策として押え盛土 ($z_b \uparrow$) とリリーフウェル ($h_x \downarrow$) の導入が進む一因になったと推察。

②最新基準案：「リスク情報を用いたアップ
ロード」の採用 ~Phase I 決定論的評価~

堤防の性能評価（内部侵食）

- 基準①と基準②の二段階基準

特に基準②は「Initiation Criteria：開始基準」と
「Progression Criteria：進行基準」の二つの組合せ



安全評価（基準①：開始基準）

FEM等により求めた

位置xの過剰圧力水頭 h_x から
安全率を算出

$$FS_{vg} = \frac{i_{cv}}{i_v} = \frac{\gamma' z_b}{\gamma_w h_x}$$

where:

FS_{vg} = factor of safety based on vertical gradient

i_{cv} = critical vertical gradient = γ'/γ_w

i_v = vertical exit gradient at point of interest = h_x/z_t , typically the landside toe

z_t = vertical distance to surface, typically the landside blanket thickness

h_x = excess head (above hydrostatic) at the point of interest, typically bottom of blanket
(h_o at the embankment toe and h_x at a distance x from the embankment toe)

γ' = average effective (or buoyant) unit weight of blanket (overlying soil) = $\gamma_{sat} - \gamma_w$

γ_{sat} = saturated unit weight of blanket limited to no more than 112.5 lb/ft³

γ_w = unit weight of water

2000年基準値

川裏法尻： $FS_{vg} > 2.7$ 相当



基準値 (DWSE)

川裏法尻： $FS_{vg} > 1.6$

※もしくは $i_v < 0.5$

日本と比較してまだ高い基準
なお、 i_v は同等

安全評価（基準②：進行基準）



$$D_L = \frac{h_{substratum}}{i_{DLh}} - W$$

where:

D_L = the distance from the landside levee toe.

$h_{substratum}$ = total head at the base of the top stratum or blanket at the waterside toe of the levee based on a seepage analysis.

i_{DLh} = horizontal hydraulic gradient to select D_L as discussed below.

W = levee width

被覆土層の必要な延長 D_L を
透水層の土質に応じた
水平動水勾配とともに算出

レーンの加重クリープ比と比較して小さく、日本と比べて高い基準

	Characterization of the Substratum	i_{DLh}
均等係数 →	$C_u \leq 2$ and fines content $\leq 5\%$	0.02
	$C_u \leq 4$ and $5\% < \text{fines content} \leq 10\%$	0.05
	All other coarse-grained soils	0.1

安全評価（基準②：開始基準）

FEM等により求めた
位置 D_L の過剰圧力水頭 h_x から
安全率を算出

$$FS_{vg} = \frac{i_{cv}}{i_v} = \frac{\gamma' z_b}{\gamma_w h_x}$$

基準値 (DWSE)

D_L (被覆土層延長) : $FS_{vg} > 1.0$
※もしくは $iv < 0.8$

川裏法尻の基準より低い。
日本と同等の基準。
 iv は日本と比べて低い基準。

決定論的評価の結果を踏まえ、Phase 2において破壊確率と不確実性を考慮したリスク評価を行い、対策の要否・優先度および設計調整を意思決定する。



現状評価を主眼とした日本のパイピング照査とは異なり、進行基準に基づく許容進行経路長 D_L を通じて、複数の対策シナリオを比較・検討するための入力情報を提供する点に特徴

参考資料参照

②最新基準案：「リスク情報を用いたアップ
ロード」の採用 ~Phase2 リスク情報を利
用了した設計調整~

まとめ（再掲：本日の話題）

①2000年基準: 経験則と「ブランケット理論(BT)」に基づく決定論的評価

目的: 盤ぶくれ・噴砂の「発生防止」(=日本の照査思想)

②最新基準案(2023年ドラフト): 「リスク情報を使ったアプローチ」の採用

目的: 発生防止に加え、「後退侵食型パイピング(Backwards Erosion Piping: BEP)の進行阻止」と「リスク情報を用いた設計調整」



「单一基準」から「段階的基準(発生防止+進行阻止)&リスク評価」へ

ご清聴ありがとうございました

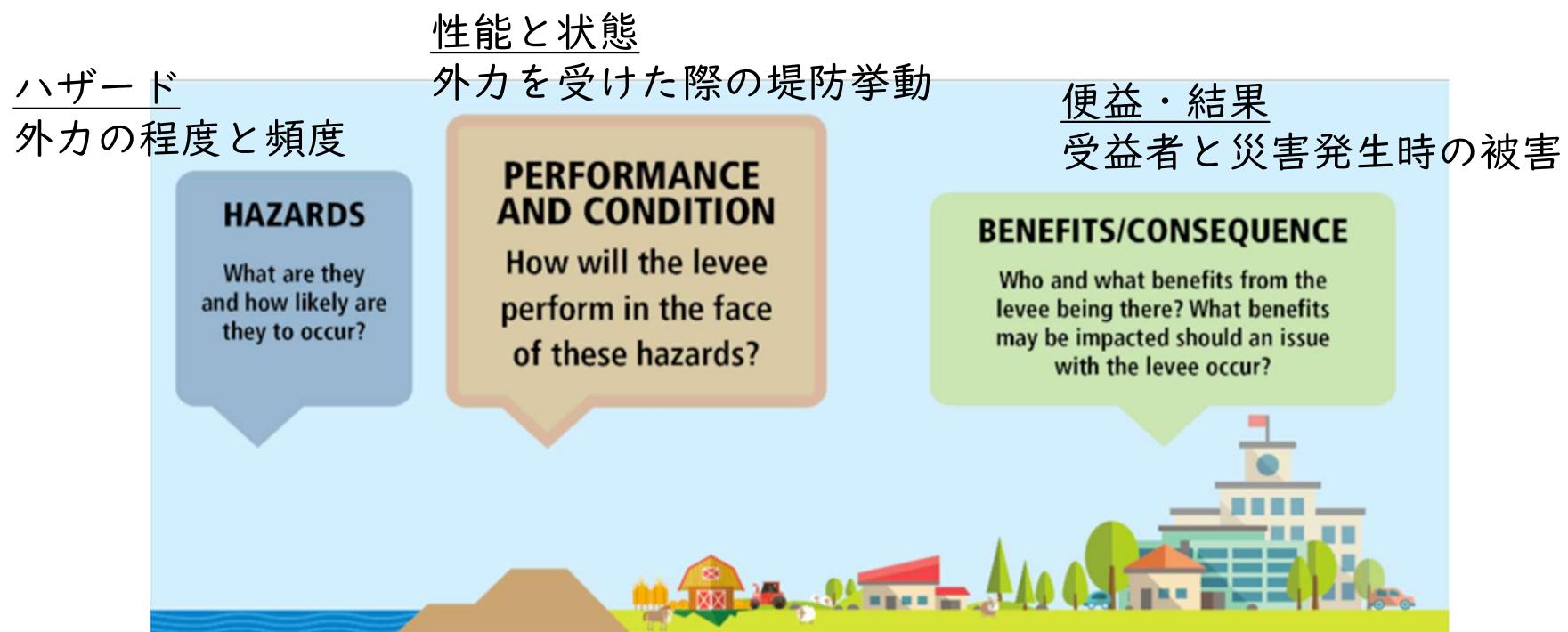
参考文献：

1. U.S. Army Corps of Engineers (2000), EM 1110-2-1913, Design and Construction of Levees
2. U.S. Army Corps of Engineers (2023), EM 1110-2-1913, Evaluation, Design, and Construction of Levees (Draft)
3. U.S. Army Corps of Engineers (2024), National Levee Safety Program

参考資料：リスク情報を利用した設計調整

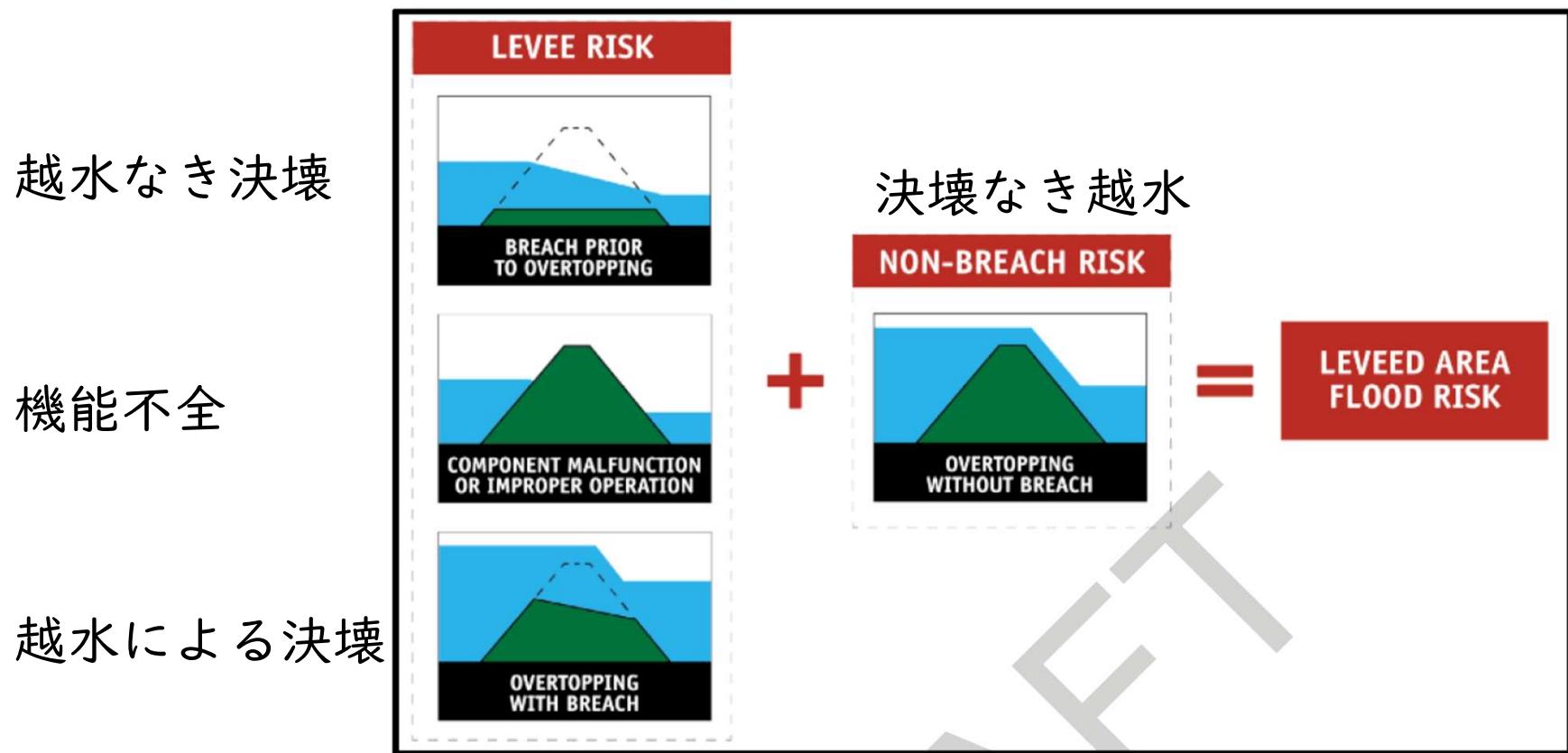
リスク情報を利用した設計調整①

- 決定論的評価結果をその信頼性をもとに適宜調整（意思決定）する過程.
調査や解析、対策の規模についても、リスクに応じて変更することを推奨。（技術者の工学的判断を重視）
- リスク評価は3要素で構成。



リスク情報を利用した設計調整②

- 想定破壊モード (PFM: Potential Failure Mode) は「越水なき決壊」，「堤防などの機能不全」，「越水による決壊」，「決壊なき越水」



リスク情報を利用した設計調整③

- FMET (Failure Mode Event Tree) に洪水外力から決壊に至るまでの因果連鎖をイベントツリーとして整理し、条件付き確率を評価

FMET例
(パイピング)

