



# 堤防の安全性をどのように考えるか？ 海外との比較に学ぶ

～米国の堤防評価・設計・建設マニュアルの改定案～

**Evaluation, Design, and Construction of Levees**

USACE Draft, EM 1110-2-1913, December 2023

# リスク低減設計って結局なんなん？

- 米国とオランダの堤防は「リスク低減設計※」導入
  - ※ Risk Corrective Design, Risk Based Designなど
- イメージとして「氾濫ブロック毎の人口・資産を考慮し、1/10,000年の氾濫においても一桁の人命損失に低減、などの目標に応じた整備優先順位」を提示
- ただ、個別具体の堤防の評価・設計方法が見えない…

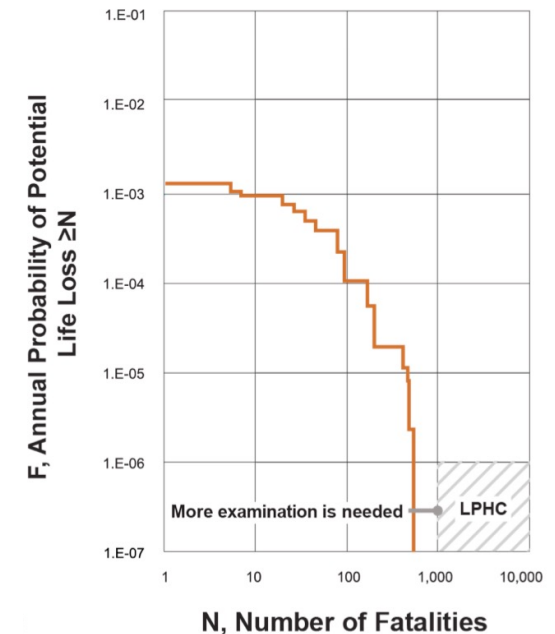


米国堤防設計マニュアル改定

2000年発行 → 2022年意見照会開始

「リスク評価導入」が改定ポイント

特にパイピング評価方法について着目



リスク評価のイメージ

出典：Levee Safety Program Guidelines

# 背景

決定論的評価

## 1969年 全米洪水保険運用開始

- 自治体単位で加入，個人で契約
- 被害者救済と治水対策推進が目的
- 堤防が連邦認可を受けるなど自治体が洪水リスクを低減した度合いに応じ保険料率引き下げ（最大45%）

## 2000年 堤防設計マニュアル改定（1978発行）

## 2005年 ハリケーン・カトリーナ

## 2007年 全米堤防安全法

- 連邦認可堤防の陸軍工兵隊による記録・検査を義務づけ

## 2014年 水資源改革開発法

- 堤防の状態や人的・物的損害の可能性を評価し、それらの情報を公開する「米国堤防安全プログラム」の指針を提示

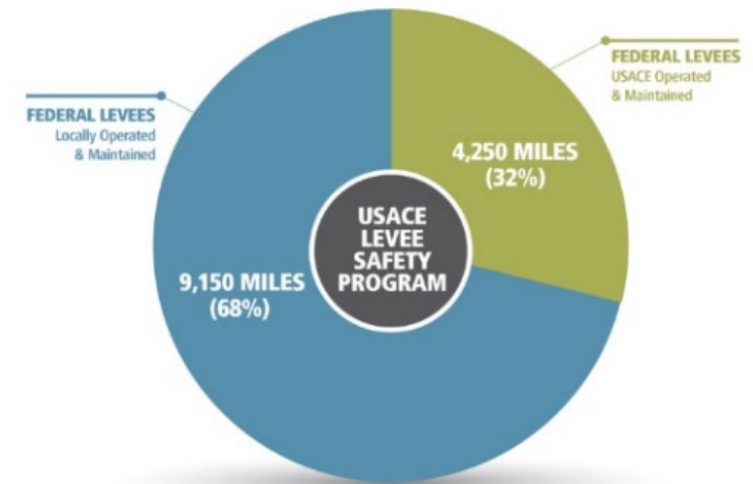
## 2023年 堤防設計マニュアル改定案

リスク評価

約21,000kmの堤防が連邦認可

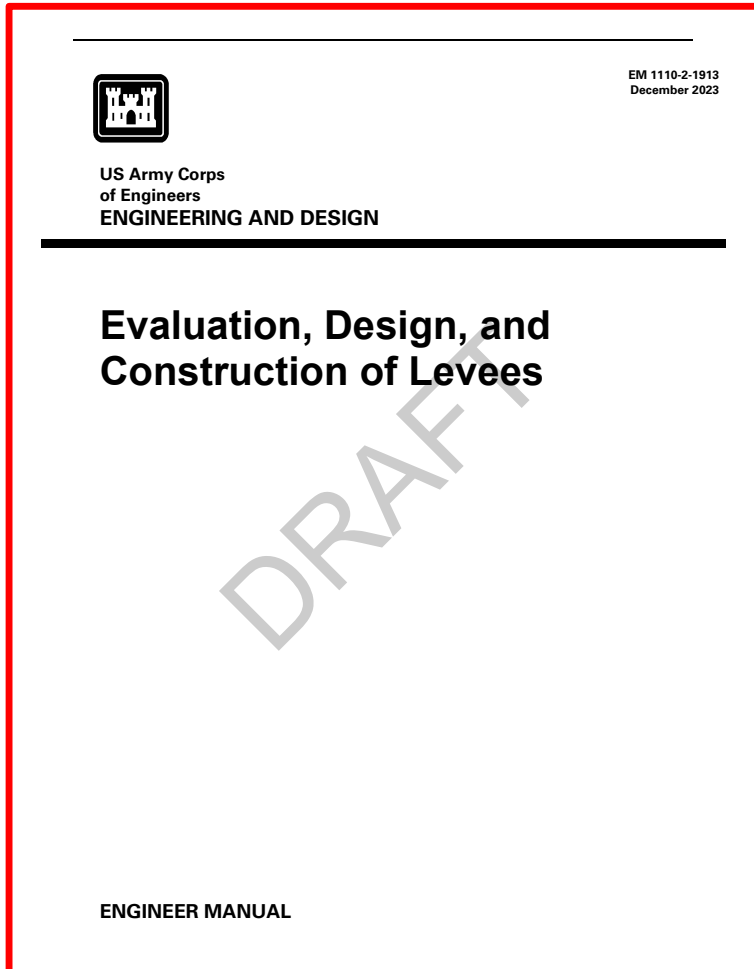
### MILES OF FEDERALLY AUTHORIZED LEVEES

(SOURCE: NATIONAL LEVEE DATABASE, SEPTEMBER 2020)

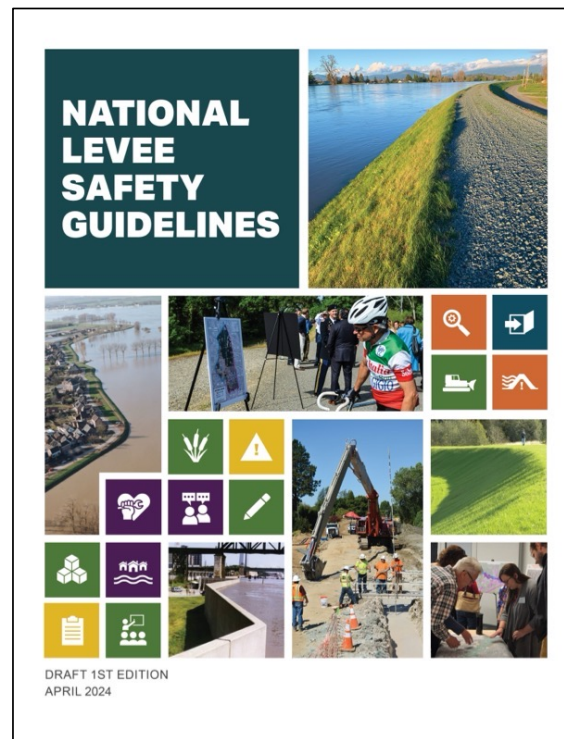


出典：Levee Safety Program Guidelines

# 今日紹介するマニュアル・ガイドライン



※特に出典を明記しないものは  
堤防設計マニュアルを出典とする



USACE  
Civil Works / Levee Safety  
Program

<https://www.usace.army.mil/Missions/Civil-Works/Levee-Safety-Program/>

# 構成

章立てには明確に出てないが、riskの使用頻度が44倍に  
赤字の章は特に使用頻度が高い

2000年版

risk: 4回

序論

§ 1 序論

§ 2 現地調査

§ 3 室内試験

§ 4 土取場

§ 5 浸透対策

§ 6 法面の設計と地盤沈下

§ 7 堤防の施工

§ 8 特定箇所留意点

参考資料

2023年改定案

risk: 175回

序論

§ 1 堤防の評価、設計、建設過程

§ 2 堤防の資料収集と地盤調査

§ 3 堤防の室内試験

§ 4 土取場

§ 5 地盤状態の評価

§ 6 堤防区間の評価と対策

§ 7 法面の設計

§ 8 地盤沈下

§ 9 侵食の評価と設計

§ 10 堤防の施工

§ 11 特定箇所留意点

§ 12 堤防の維持管理

参考資料

パイピング評価方法は参考資料から § 6 に移動

# 堤防設計マニュアルの位置付け

- 堤防の評価，設計および建設を対象としたマニュアル（従来通り）
- 評価は二段階で実施することに。①決定論的評価，②リスク評価

p2 0.8.1

このマニュアルは、既存の堤防がさまざまな洪水イベントに対してどのように性能を発揮するかを評価するために使用することができる。ただし、既存の堤防がこのマニュアルで提示されている設計および施工基準を満たす必要はない。

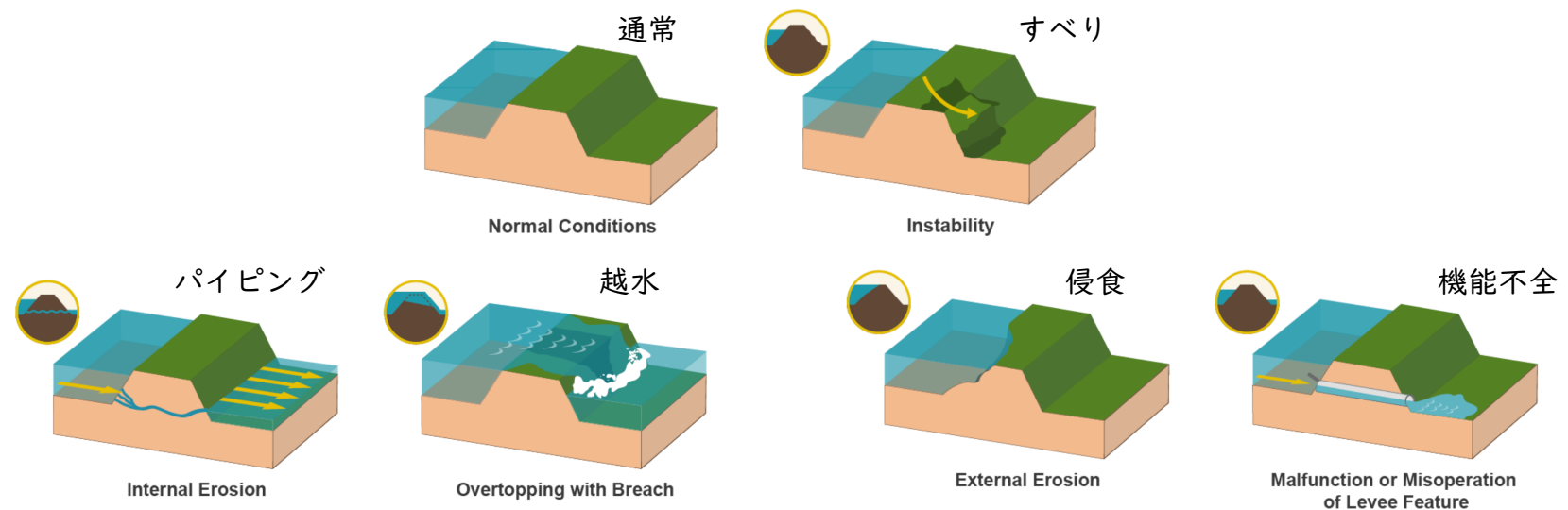
（中略）

リスク評価は、従来の工学基準では完全には考慮されていない過去の性能、特定の現場条件、または不確実性を考慮するための枠組みを提供する。これにより、意思決定者は既存の堤防を改良する必要性について判断することができる。

➡ 堤防の評価には技術者による相当程度の工学的判断が求められる

# 堤防の要求性能

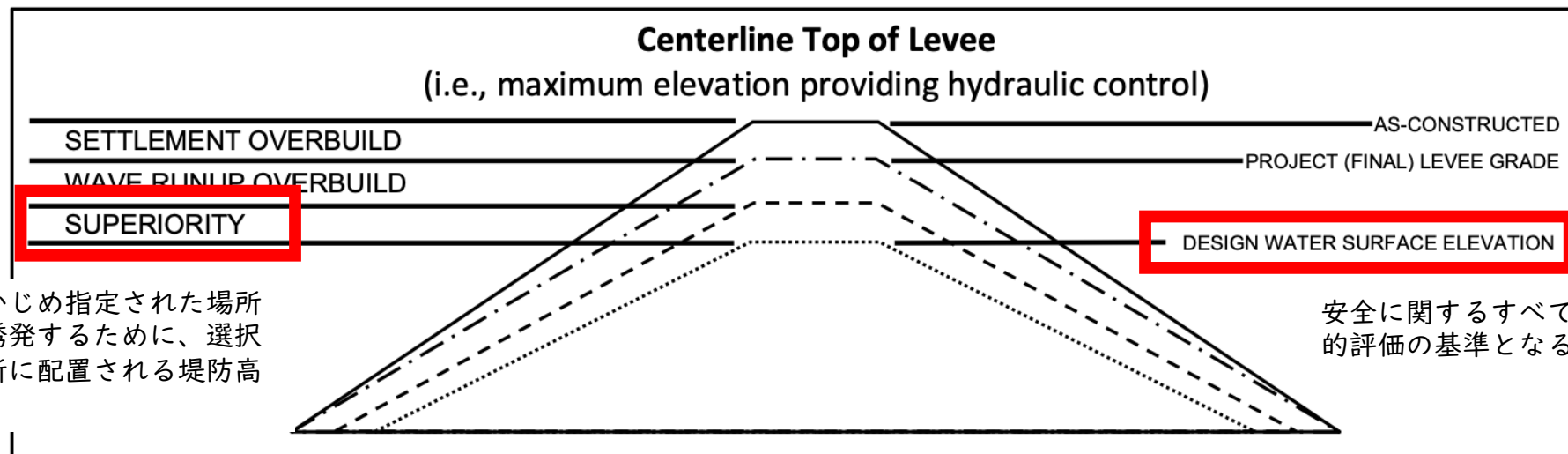
- 越水する前に決壊しないこと。また，越水に対する強靱性にも言及（要求性能ではない）。
- 想定被災メカニズム：「内部侵食（パイピング）」，「すべり」，「越水を含む表面侵食」，「地震」，「河川構造物の機能不全」。



出典：Levee Safety Program Guidelines

# 外力と堤防高さの定義

- 河川水位の設計外力はDWSE (Design Water Surface Elevation : 設計水位) を定常水位として扱う。なお、降雨は扱わない。
- 選択的な区間において越水させるための Superiority という堤防高が存在。
- 余裕高 (Freeboard) は 時代遅れの方法 としている。



他のあらかじめ指定された場所で越流を誘発するために、選択された場所に配置される堤防高の追加分

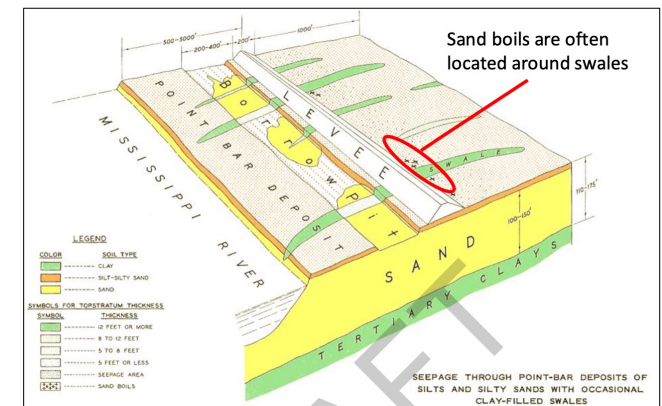
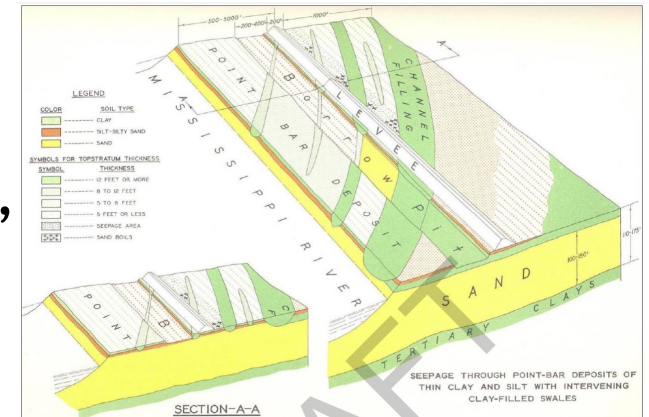
安全に関するすべての決定論的評価の基準となる水位



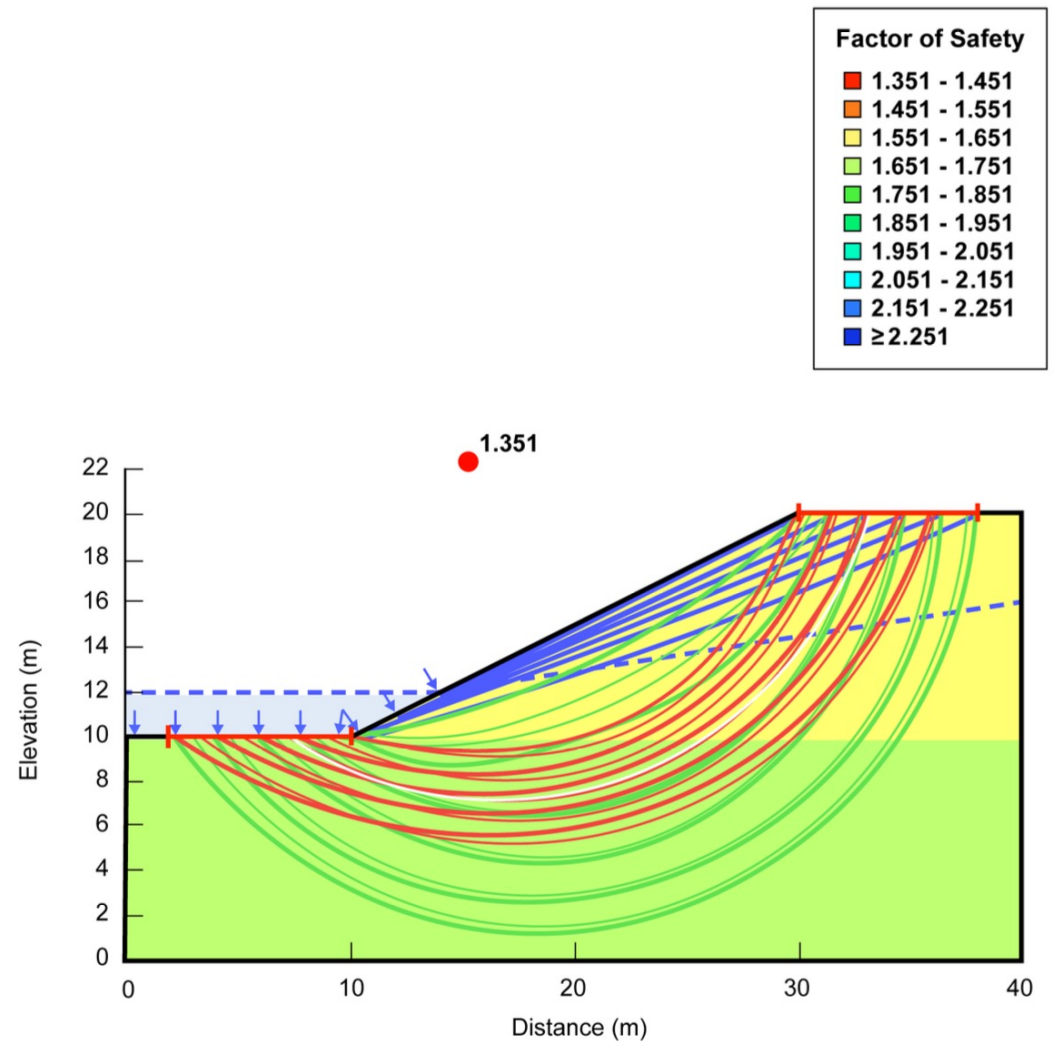
# 堤防の調査

- ①資料調査（既存の地盤調査結果や堤防図面，施工記録など），②現地踏査，③現地調査（ボーリング，CPT，物理探査など）の流れで実施。
- 区間分割は60～300m，さらに細分も可．代表的な断面を選定。
- 調査深度は堤高の3倍以上（本数指定はなし）．サンプリングは1.5mを超えない密度で調査を実施。
- 土質サンプルからは含水比，粒度，土粒子の密度，密度と間隙率，透水係数（縦横比も含む），圧密，締固め度，せん断強度などの土質試験を適宜実施。

パイピングのリスクが高い地盤条件の例



# 決定論的評估



出典：Levee Safety Program Guidelines

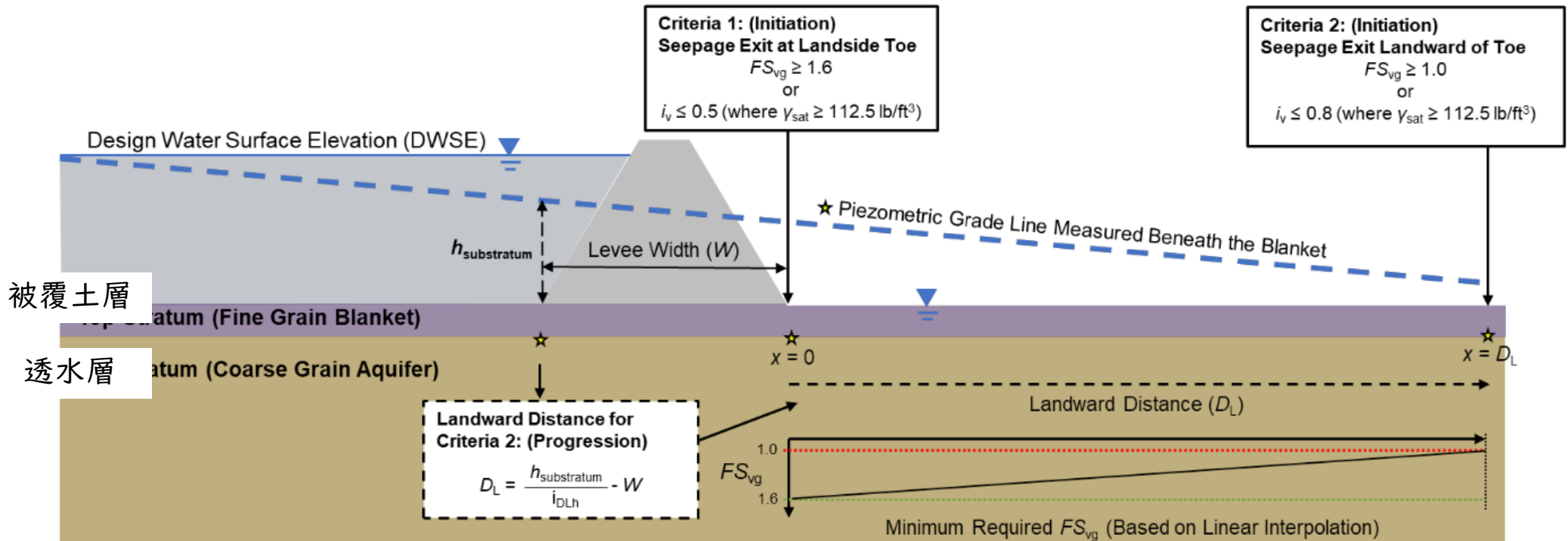
# 堤防の性能評価（内部侵食）

- 基礎地盤の後退侵食（Backwards Erosion Piping）を対象に定常の浸透流解析もしくはBlanket Theory\*を利用
  - \*1940年代に開発された，単純化した内部侵食の判定式
- 評価式は「Initiation Criteria：開始基準」と「Progression Criteria：進行基準」の二つ
- 開始基準を満足しなくとも，進行基準を満足することを確認すれば安全であると評価することも可能．なお，被覆土層がない場合は進行基準のみを適用．
- 最終的な判断はリスク評価で調整．

# 開始基準と進行基準

川裏法尻の揚圧力：開始基準

堤内地出口の揚圧力：開始基準



堤内地出口までの浸透経路長：進行基準

# 安全評価（開始基準）

基準値（DWSE）

川裏法尻： $>1.6$

$D_L$ （出口）： $>1.0$

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

揚圧力的な概念

低下するほど不安定に

where:

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

$i_{cv}$  = critical vertical gradient =  $\gamma'/\gamma_w$

$i_v$  = 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)

$\gamma_s$ の間違い？  $\gamma'$  = average effective (or buoyant) unit weight of blanket (overlying soil) =  $\gamma_{sat} - \gamma_w$

$\gamma_{sat}$  = saturated unit weight of blanket limited to no more than 112.5 lb/ft<sup>3</sup>

$\gamma_w$  = unit weight of water

# 安全評価（進行基準）

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

浸透経路長的（レーンの式）な概念

where:

$D_L$  = the distance from the landside levee toe.

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

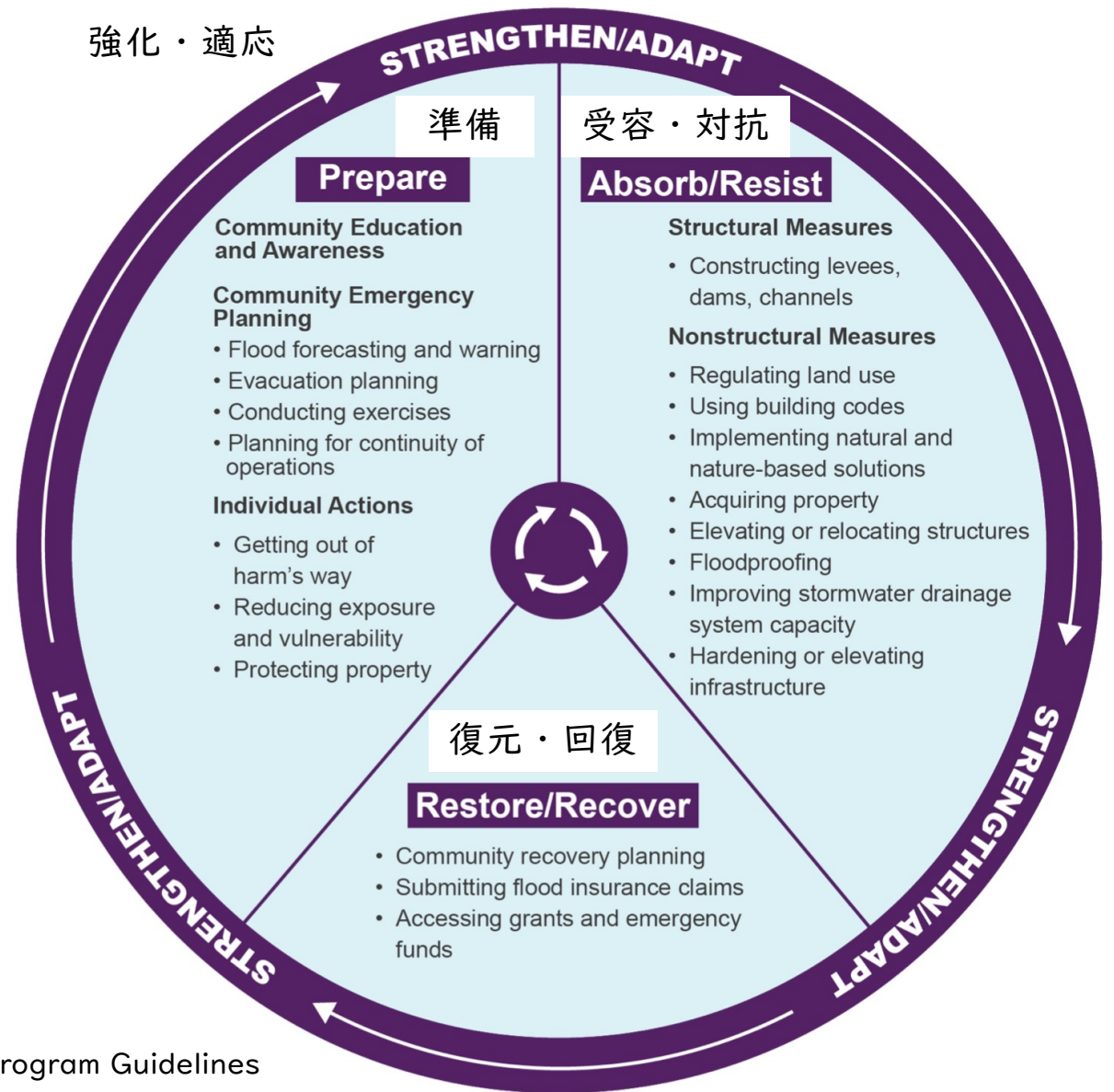
$i_{DLh}$  = horizontal hydraulic gradient to select  $D_L$  as discussed below.

$W$  = levee width

Characterization of the Substratum	$i_{DLh}$
$C_u \leq 2$ 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



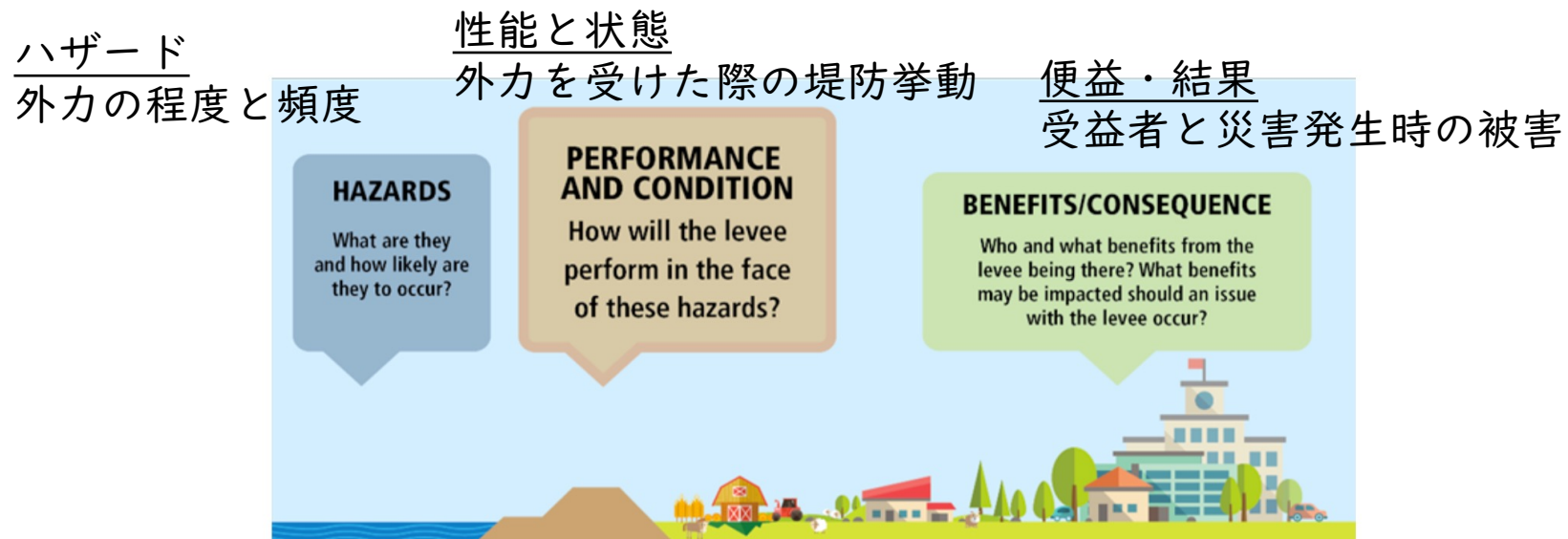
# リスク評価



出典：Levee Safety Program Guidelines

# リスク評価①

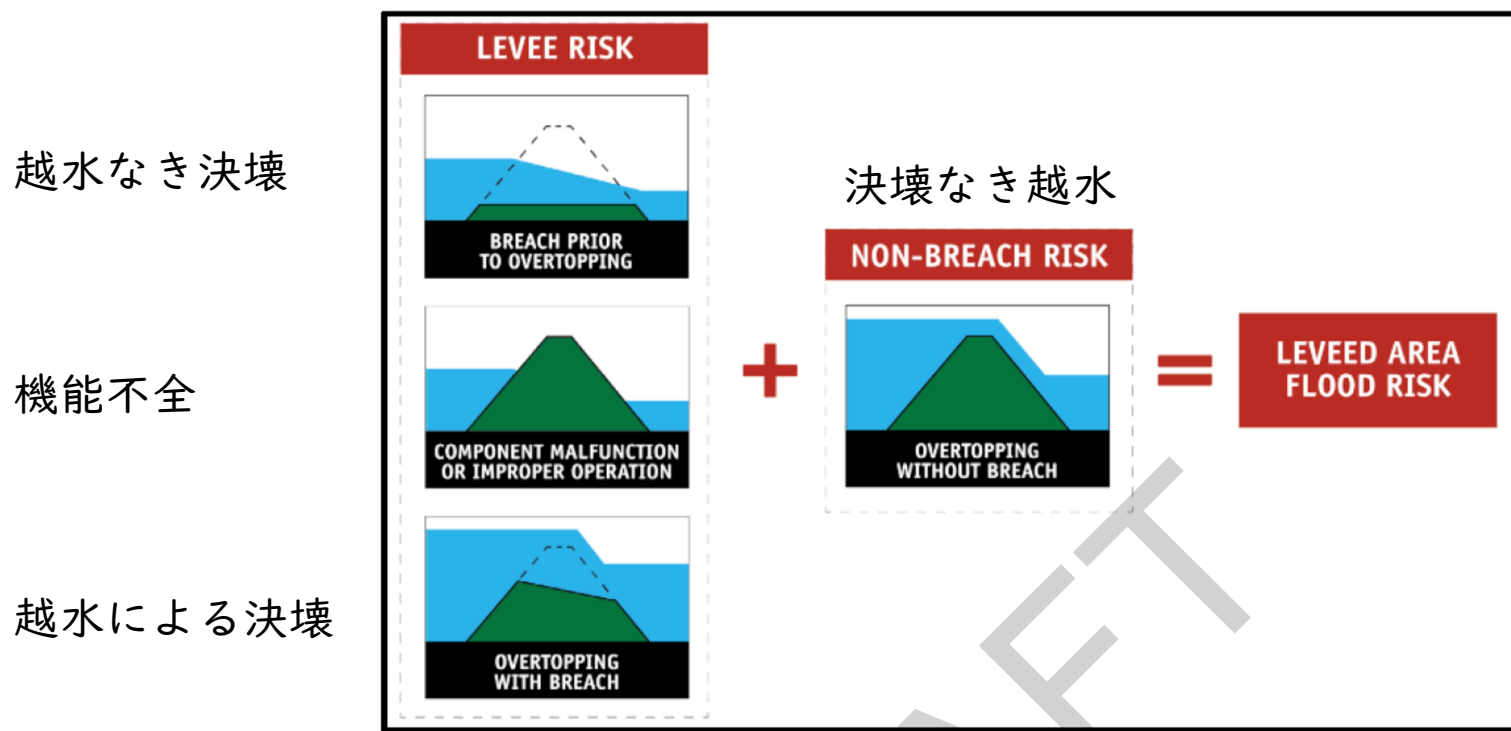
- 決定論的評価結果をその信頼性をもとに適宜調整（修正）する過程。調査や解析，対策の規模についても，リスクに応じて変更することを推奨。  
（技術者の工学的判断を重視）
- リスク評価は3要素で構成。





## リスク評価②

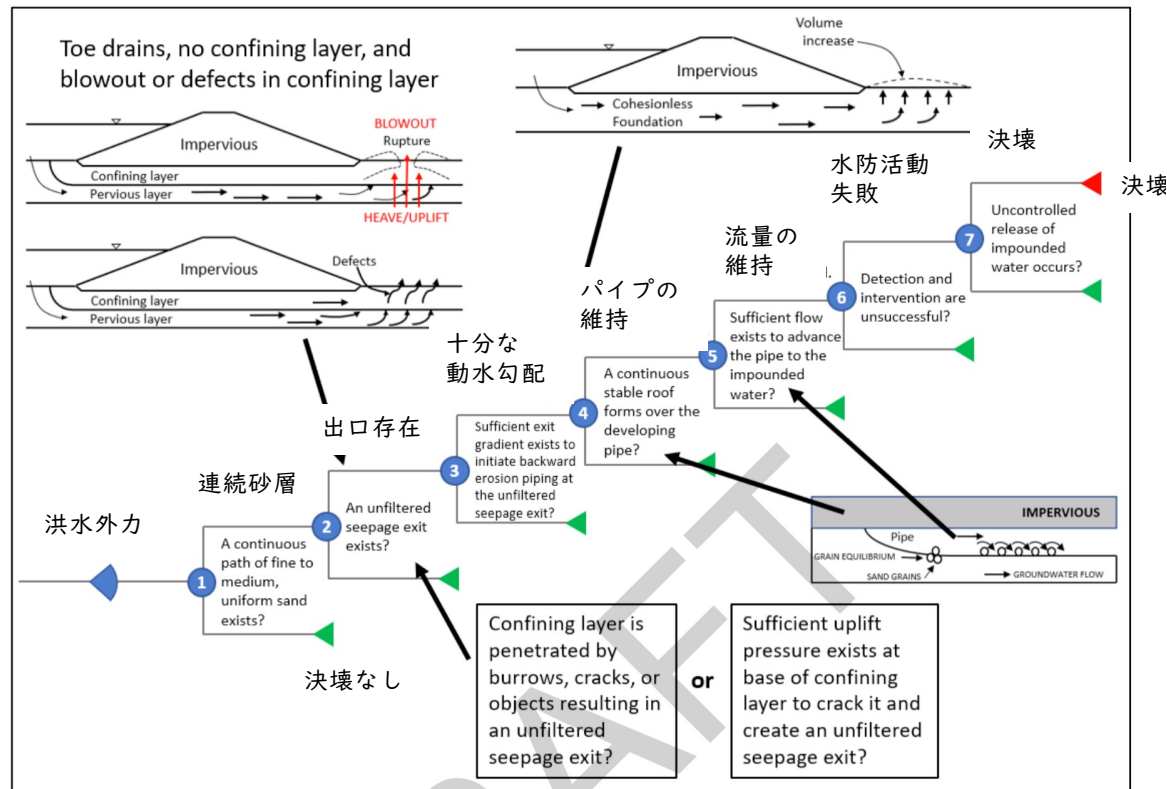
- 浸水被害シナリオは「越水なき決壊」，「堤防などの機能不全」，「越水による決壊」，「決壊なき越水」



# リスク評価③

- FMET (Failure Mode Event Tree) により決壊が発生するか検討

FMET例  
(パイピング)



堤体のパイピングも対象

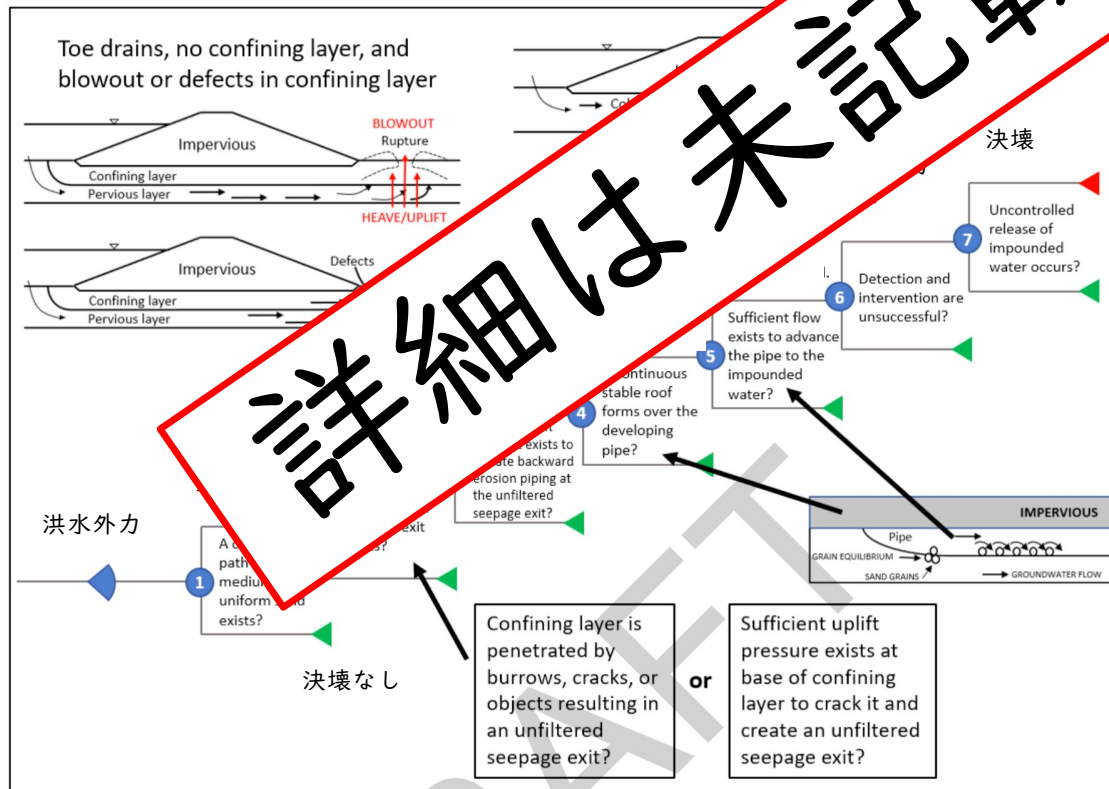


水防活動の失敗例

# リスク評価③

- FMET (Failure Mode Event Tree) により... 検討

FMET例  
(パイピング)



堤体のパイピングも対象



水防活動の失敗例

# ベストプラクティスは掲載①

ミシシッピ川堤防のパイピング防止のための抑え盛土

- 当初はパイピング防止のために堤内地の一部のみに抑え盛土を計画。法尻から約120m離れた既存のウェルドレーンまで延長する予定なし。
- 設計中に5年確率洪水が発生し、ウェルドレーン付近で噴砂確認。
- リスク評価により、連続する微細で均一な砂層が川からウェルドレーンまで存在ことを確認。既存の設計では、被災の可能性を十分に低減できないこと、またウェルドレーン付近のパイピング発生確率が許容範囲を超過。
- 設計変更により、抑え盛土の施工範囲を追加。150万ドルのコスト増加、被災確率を3桁低減。決定論的評価な安全係数の基準を「拡張した」事例。

## ベストプラクティスは掲載②

モーガンザ・トゥ・ガルフ堤防プロジェクトにおけるすべり安全率

- ルイジアナ州ミシシッピ川沿い約160キロの堤防プロジェクト。
- ハリケーン・カトリーナ後、堤防および防潮壁の設計基準が変更され、安全率を1.3から1.5に引き上げ、コストが大幅に増加。
- 2012年にリスク評価を実施、カトリーナ時の問題の大部分は防潮壁に関連しており、築堤部ではなかったことから、技術的検討（決定論的評価を含む）を行い安全率を1.5から1.3に引き下げ。
- 小型の堤防断面を実現し、約70億ドルのコスト削減

# おわりに

- 「リスク低減設計」は、決定論的評価とリスク評価を組み合わせ、技術者が工学的判断を実施。
- 現段階では定型的な方法は存在せず、地域や堤防の状況によりその方法は変化。
- 改定の意見募集に関する要点では、主な改定点の一つとして「ベストプラクティスの掲載」。
- 堤防設計や被災調査ベストプラクティスを収集し、現場判断を尊重するフレームワーク。
- やっていることは我が国とほぼ同じ。
- 決定論的評価としては、パイピングの進行基準は興味深い概念。

The infographic is titled "Engineer Manual (EM) 1110-2-1913 FAST FACTS". It features the U.S. Army Corps of Engineers logo and the text "US Army Corps of Engineers, Levee Safety Program".

**OVERVIEW**  
The U.S. Army Corps of Engineers (USACE) has updated its guidance for evaluating, designing, and constructing levees. Engineer Manual (EM) 1110-2-1913, first published in 1978 and updated in 2000, historically relied on traditional standards for designing and constructing levees. The guidance has been updated and is now available for review.

**PROVIDE FEEDBACK**  
USACE is seeking input on EM 1110-2-1913 including areas where the manual is unclear and recommendations for training or resources that may support implementation of the manual once final. Please share your feedback with EM1913@usace.army.mil by September 1. USACE plans to finalize the manual in December 2022.

**GET INVOLVED**  
USACE will host webinars in July and August 2022 to provide an overview of the manual, answer questions, and collect feedback. Check [www.usace.army.mil/Missions/Civil-Works/Levee-Safety-Program](http://www.usace.army.mil/Missions/Civil-Works/Levee-Safety-Program) or email [EM1913@usace.army.mil](mailto:EM1913@usace.army.mil) for more information on upcoming webinars.

**WHAT'S NEW?**

- 1 The manual has adopted practices that can be applied nationwide.** Previously, the manual included methods primarily derived from experiences with levees along the Mississippi River. Adapting these methods to consider other conditions, such as levees along the coast or with steep streams and rivers, was a challenge. Many practices adopted in the updated manual have been applied for levees in California, Louisiana, Missouri, Florida, New York, and Pennsylvania, among other areas.
- 2 The manual includes a framework to adjust the design of a levee based on floods that may occur and the levee's likely performance during those events.** Examples of how this framework has been applied are available and support consideration of a range of potential floods and levee performance to inform levee design and construction.
- 3 Significant advancements have occurred since the manual was first published.** The manual incorporates modern-day methods for the analysis, data collection, and investigations required to evaluate, design, and construct levees. Many of these practices can be seen in projects such as the Hurricane Storm Damage Risk Reduction System in Louisiana and the California Department of Water Resources Urban Levee Evaluation Project in California.
- 4 Many best practices have emerged since the manual was last updated that support a more comprehensive understanding of how levees behave and perform during floods and how people and property behind levees are impacted.** A summary of lessons learned is available in the USACE *Levee Portfolio Report*. For example, new practices related to erosion have emerged and are integrated in the manual among others that help practitioners consider a levee's performance when evaluating, designing, and constructing it.
- 5 Industry.** The draft manual has undergone several rounds of review by USACE agency experts across the nation with experience evaluating, designing, and constructing levees. An external peer review was also completed by industry leaders, which shaped the manual and practices provided.

**COMMENTS**  
Comments should be submitted to [EM1913@usace.army.mil](mailto:EM1913@usace.army.mil) by Sept. 1, 2022. USACE plans to update and publish the manual based on this input by December 2022.