

# SAUSE レポート

五大開発株式会社

平成 19 年 5 月 6 日

## 1. 河川堤防点検・対策の手引き

平成 16 年 7 月に新潟県・福島県、福井県などで発生した豪雨災害から明らかになった自然的・社会的状況の変化による新たな課題に的確に対応して、自然災害に対して安全で安心な社会の形成を図る必要があります。

このため、国土交通省では平成 16 年 11 月 11 日に社会資本整備審議会河川分科会に豪雨対策総合政策委員会を設け、改善すべき内容について審議されました。これにより緊急的に対応すべき事項について 12 月 2 日に「総合的な豪雨災害対策についての緊急提言」がまとめられました。

国土交通省では、この緊急提言を受けて各種施設について時限や数値目標を設けて緊急的かつ強力にその具体化を図るものとして 12 月 10 日に「豪雨災害対策緊急アクションプラン」を作成しました。

このような豪雨災害に起因する背景で河川堤防点検・堤防強化の対策が求められており、各自治体でもアクションプランを定めるなどの動きがあります。

その中で河川堤防の安全性検討で 2次元非定常浸透流 FEM および 円弧すべり法による安定計算 を用いた評価が求められており、SAUSE（ニタコンサルタント社製）はこの河川堤防の浸透流 FEM と円弧すべり法による安定計算を簡易に、また連動して行えるソフトです。

参考資料としては

「河川堤防の構造検討の手引き」(財)国土技術研究センター，平成 14 年 7 月.

「中小河川における堤防点検・対策の手引き(案)」(財)国土技術研究センター，平成 16 年 11 月. などがあります。

これらの手引きにおいて河川堤防の安全性検討では、主に堤体破壊に起因する外力としては図 1 のような①河川水位の上昇、②降雨の涵養を考慮し、検討する堤体の破壊現象としては主に図 2 のような、堤内地側の①川裏法面のすべり破壊、②川裏法先のパイピング破壊、堤外地側の③川表法面のすべり破壊などを挙げています。

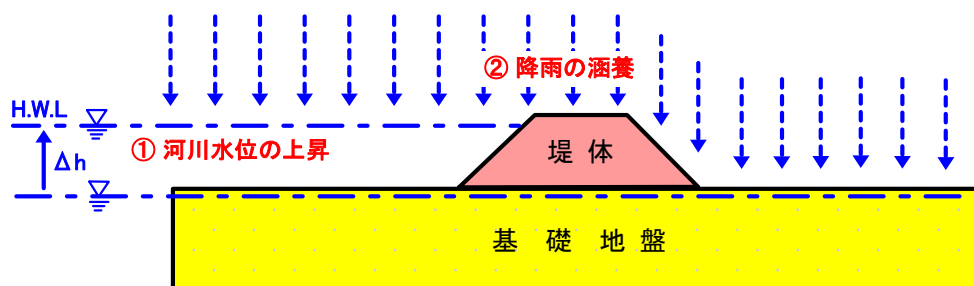


図1 堤体破壊に起因する外力

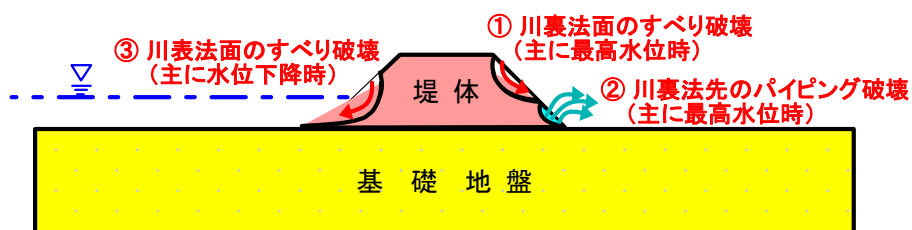


図2 検討する堤体の破壊現象

具体的にはこの堤体のすべり破壊に対しては、浸透流FEMで水位の上昇量を予測し、円弧すべり法による安定計算により安定度を検討します。また、堤体法先のパイピング破壊に対しては、浸透流FEMで水圧分布を求め、それを用いて局所動水勾配を算出し、パイピングが起こるか否かを検討します。

基本的な検討フローを図3に示します。

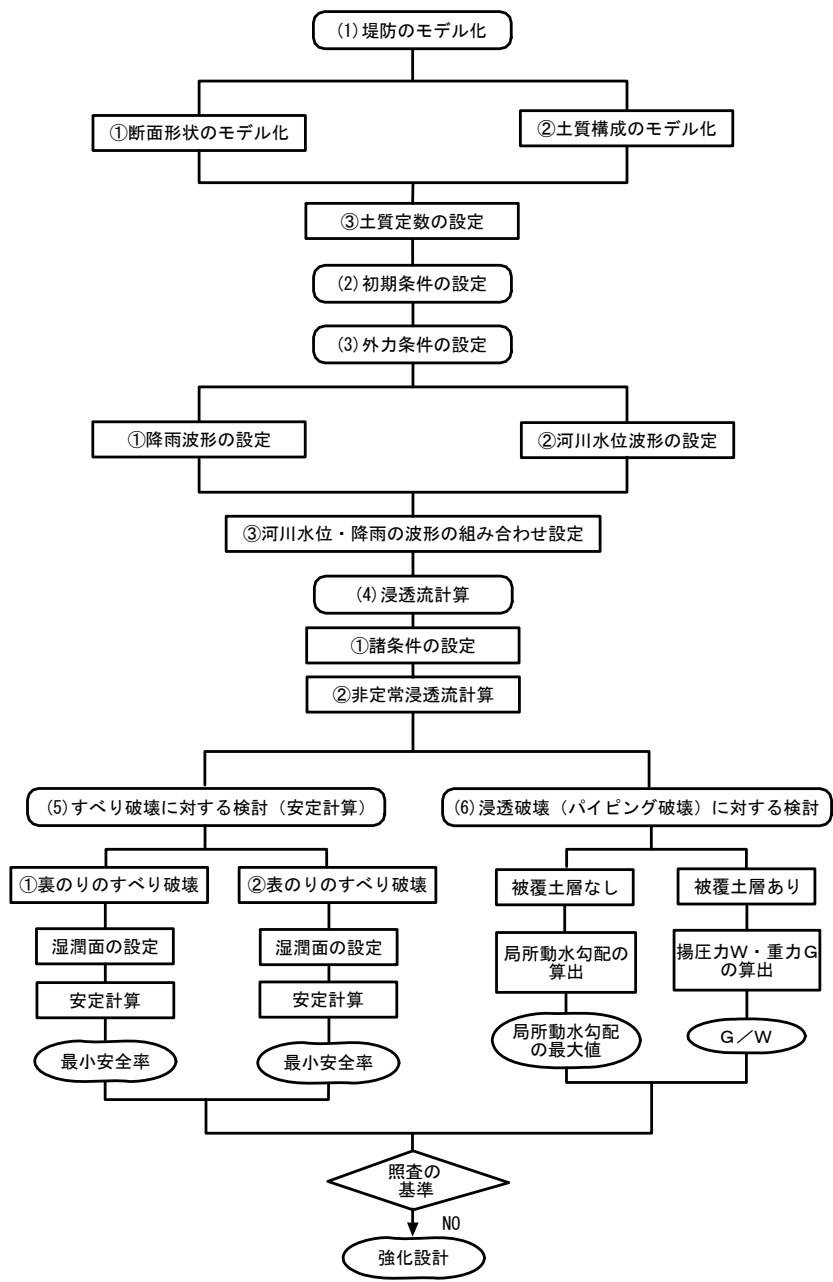


図3 検討フロー

## 2. 解析条件の設定

浸透流FEMおよび円弧すべり法による安定計算により河川堤防の安全性を検討するが、以下の項目を設定し、モデル化を行う。作業工程一がわかり易いよう、説明は必要最小限に留めてあるので、詳細は前述の手引き等を参照してください。

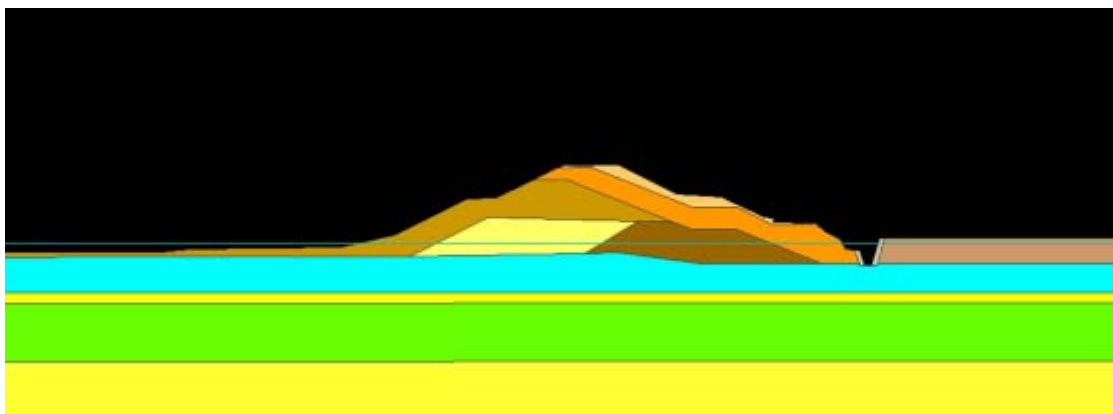


図4 河川堤防のモデル化の例

### 2.1 堤防のモデル化

#### (1) 断面形状のモデル化

堤外地は平常時に河川水が存在する箇所まで、堤内地側は河川や水路等の水位条件が把握できる箇所までの範囲をモデル化します。

#### (2) 土質構成のモデル化

既往の土質調査（ボーリング調査、土質試験結果等）の結果と共に、築堤履歴等を十分に勘案し、適切にモデル化します。

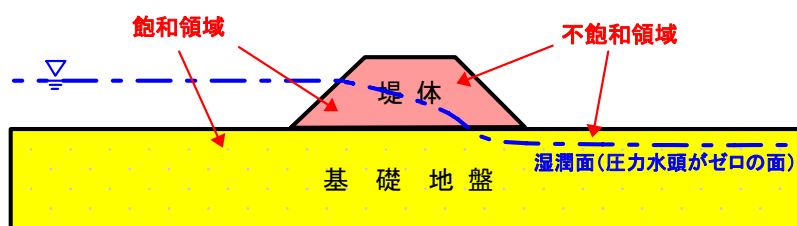


図5 飽和領域と不飽和領域

#### (3) 土質定数設定

##### a) 浸透流解析に必要な土質定数

飽和透水係数、比貯留係数、不飽和特性（比透水係数、水分特性曲線）などを設定します。飽和領域は飽和透水係数、比貯留係数の設定が必要となりますが、不飽和領域では不飽和特性が必要となります。不飽和領域では実際には空気と水の相互作用で、その特性は決まると考えられますが、その詳細なメカニズム・モデル化は複雑となるため、簡易に比透水係数により、その透水係数を減じる（通常、飽和透水係数の 0.0

～1.0 倍) ことによりモデル化を行います。その際、材料毎に水分特性曲線を設定しますが、これは負の圧力水頭 (サクション) と体積含水率の関係、体積含水率と比透水係数の関係を曲線で与え、この2つの関係より、負の圧力水頭にあわせて透水係数が自動的に減じられる (透水し難くなる) ことをモデル化します。

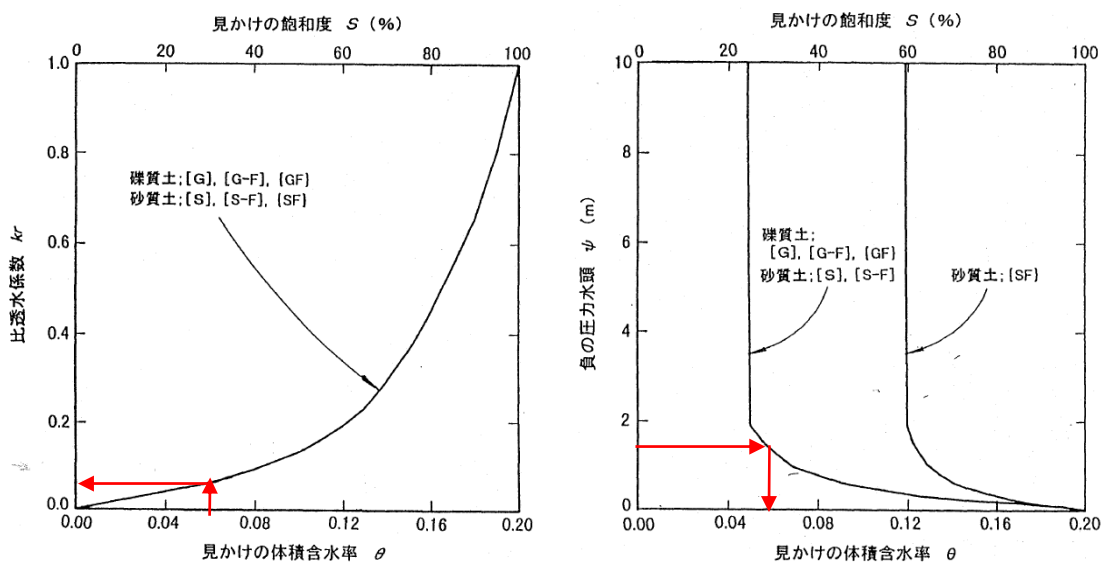


図6 水分特性曲線(比透水係数～体積含水率関係、体積含水率～負の圧力水頭関係)

#### b) 安定計算に必要な土質定数

湿潤密度、粘着力、内部摩擦角を設定します。

### 2.2 初期条件設定

#### (1) 事前降雨量の設定

多雨時期の月間雨量平均値程度。過去 10 年から 30 年の平均値を用います。

#### (2) 初期地下水位の設定

出水期(多雨期)の平均地下水位程度を水平に設定します。

### 2.3 洪水外力設定

#### (1) 降雨波形の設定

当該河川の計画降雨 (総降雨量) を用い、降雨強度は 10mm/hr を目安とします。総降雨量と降雨強度をもとに長方形の降雨波形を設定します。

#### (2) 河川水位波形の設定

複数の水位波形をもとに、所定の方法で求めた台形の水位波形で、計画高水位をピーク水位とする波形を設定します。

### 3. 解析の実行および安定性の検討

#### (1) 浸透流 FEM

浸透に対する安全性照査の方法は、「中小河川における堤防点検・対策の手引き（案）」に準拠した非定常浸透流 FEM および円弧すべり法による安定計算を用います。

非定常浸透流計算は非定常の外力を与えて経時的に湿潤面の位置や水頭の変化を追跡するもので、湿潤面の形状と局所動水勾配を計算することができます。一方、円弧すべり法による安定計算は、表のりおよび裏のりのそれぞれにとって最も危険と想定される湿潤面を抽出し、これを設定することで洪水時のすべり破壊に対する安全率を求めることができます。

浸透流計算の方法には定常解析法と非定常解析法があり、さらに非定常解析においては飽和解析と飽和・不飽和解析がありますが、ここでは、原則として実際に近い現象が再現できる非定常の飽和・不飽和浸透流計算を行うものとします。定常解析とは、解（浸透流解析では水頭など）が時間に依存せず、境界条件の水位もしくは水頭でその分布が決まる解析手法であり、非定常解析では降雨の有無・強度や境界での水位変動などに伴い、時間の変化に合わせた解が得られる解析手法です。

非定常の飽和・不飽和浸透流計算の基本式は次のとおりです。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial \psi}{\partial z} + k \right) = (C + \alpha \cdot S_s) \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

ここに、

$x$  : 堤防横断面の水平方向の軸

$z$  : 堤防横断面の鉛直方向の軸

$k$  : 透水係数 (m/hr)

$\psi$  : 圧力水頭 (m)

$C$  : 比水分容量 (1/m)

$\alpha$  : 1 の場合飽和領域、0 の場合不飽和領域

$S_s$  : 比貯留係数 (1/m)

$t$  : 時間 (hr)

(2) すべり破壊に対する検討

a) 円弧すべり法による安定計算方法

浸透流計算によって得られた湿潤面の中から最も危険なものを抽出し、次式によってすべり破壊に対する最小安全率を算出します。

$$F_s = \frac{\sum cl + \sum (W - ub) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi}{\sum W \cdot \sin \alpha}$$

ここに、

$F_s$  : 安全率

$u$  : すべり面の間隙水圧

$W$  : 分割片の重量

$c$  : すべり面に沿う土の粘着力

$l$  : 円弧の長さ

$\phi$  : すべり面に沿う土の内部摩擦角

$b$  : 分割片の幅

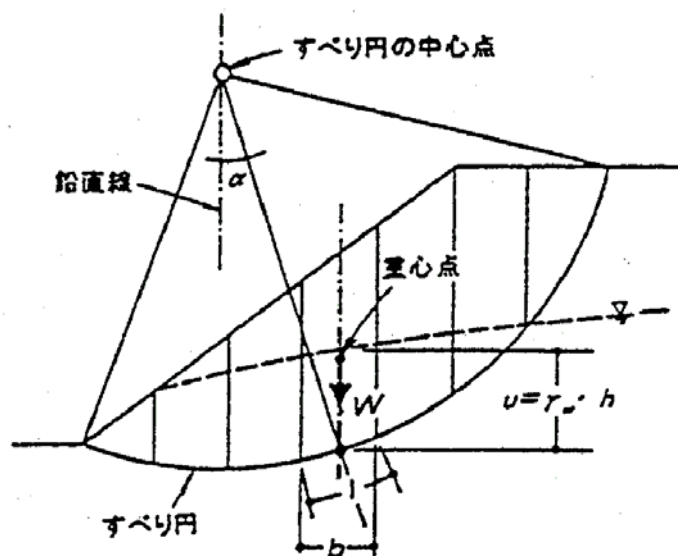


図7 すべりに対する検討の考え方(「手引き」より)

b) 照査の基準

安定計算で得られた最小安全率をもとに、以下の割増係数を考慮した基準ですべり破壊に対する安全性を検討する。所定の安全性が確保できない場合には、対策工を施す堤防強化区間について検討を行います。

① 裏のりのすべり破壊に対する照査基準

$$F_s = 1.20 \times \alpha_1 \times \alpha_2$$

$F_s$  : すべり破壊に対する安全率

$\alpha_1$  : 築堤履歴の複雑さの割増係数

$\alpha_1 = 1.2$  築堤履歴が複雑な場合

1.1 築堤履歴が単純あるいは把握されている

$\alpha_2$  : 基礎地盤の複雑さの割増係数

$\alpha_2 = 1.1$  被災履歴あるいは要注意地形がある場合

1.0 被災履歴あるいは要注意地形がない場合

表1 裏のりのすべり破壊に対する照査基準

照査基準 $F_s$	築堤履歴の複雑さの割増係数 $\alpha_1$		基礎地盤の複雑さの割増係数 $\alpha_2$	
	築堤履歴複雑	築堤履歴単純 把握されている	被災履歴あり 要注意地形あり	被災履歴なし 要注意地形なし
	$\alpha_1 = 1.2$	$\alpha_1 = 1.1$	$\alpha_2 = 1.1$	$\alpha_2 = 1.0$
1.58	○	—	○	—
1.45	—	○	○	—
1.44	○	—	—	○
1.32	—	○	—	○

② 表のりのすべり破壊に対する照査基準

$$F_s \geq 1.0$$

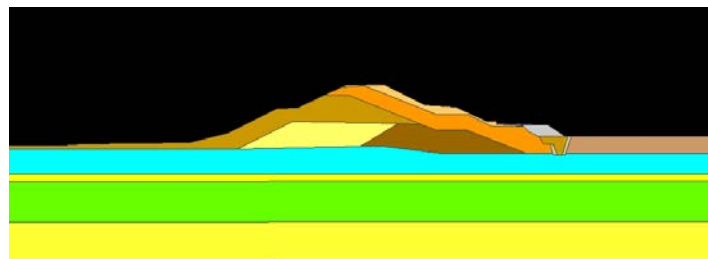


図8 対策工の例(水路埋め立ておよび盛土施工)

### (3) 浸透破壊（パイピング破壊）に対する検討

パイピングに対する安全性照査に必要な局所動水勾配  $I_c$  は、浸透流計算の結果から得られた全水頭  $\phi$ 。あるいは圧力水頭  $\psi$  をもとに、裏のり尻近傍の基礎地盤について次式によって算出し、鉛直方向ならびに水平方向の最大値を求め、 $I_c < 0.5$  を基準に照査を行う。所定の安全性が確保できない場合には、対策工を施す堤防強化区間について検討を行います。

$$i_v = \frac{\Delta\phi}{d_v} = \frac{\Delta\psi - d_v \cdot \rho_w}{d_v} \quad (\text{鉛直方向})$$

$$i_h = \frac{\Delta\phi}{d_h} = \frac{\Delta\psi}{d_h} \quad (\text{水平方向})$$

ここに、

$i_v$  : 鉛直方向の局所動水勾配

$i_h$  : 水平方向の局所動水勾配

$\Delta\phi$  : 節点間の全水頭差

$\Delta\psi$  : 節点間の圧力水頭差

$d_v$  : 節点間の鉛直距離

$d_h$  : 節点間の水平距離

$\rho_w$  : 水の密度 ( $\rho_w = 1.0 \text{ tf/m}^3$ )

一方、裏のり尻近傍の堤内地地盤の表層が粘性土で被覆されている場合には、次式により盤ぶくれの安全性を照査します。

$$G/W = (\rho \cdot H) / (\rho_w \cdot P) > 1.0$$

ここに、

$G$  : 被覆層の重量 ( $\text{tf/m}^2$ )

$W$  : 被覆層底面に作用する揚圧力 ( $\text{tf/m}^2$ )

$\rho$  : 被覆層の密度 ( $\text{t/m}^3$ )

$H$  : 被覆層の厚さ (m)

$\rho_w$  : 水の密度 ( $\text{t/m}^3$ )

$P$  : 被覆層底面の圧力水頭 (全水頭と位置水頭の差) (m)

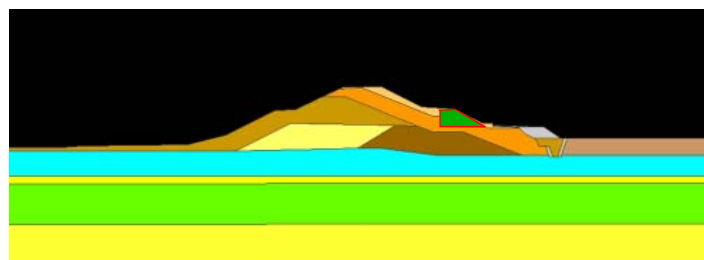


図9 対策工の例（ドレーン材による置換）

<付録>

より詳細な条件設定は以下のように行います。

## 2.1 堤防のモデル化

### (1) 断面形状のモデル化

堤防の横断面形状および堤内地、堤外地の地盤面（地表）をモデル化します。モデル化の範囲は、堤外地側については平常時に河川水が存在する箇所までとします。ただし、高水敷の幅が 100m を越える断面については、河川や水路等の水位条件が把握されている箇所（水位一定境界）、もしくは裏のり尻から堤防高の 10 倍程度の範囲をモデル化します。

### (2) 土質構成のモデル化

土質構成については、堤防横断方向の土質断面図をもとにモデル化します。

深度方向のモデル化は基礎地盤の上面から 10m 程度を考えるものとするが、透水性地盤ではその下限までとします。ただし、透水性地盤が厚い場合には地下水面から水位変動量（計画高水位と地下水位または平水位の差）の 3～6 倍、最大 20m 程度の深さを目安としてモデル化します。また、基礎地盤が粘性土のような難透水性地盤で構成される場合には、堤内地盤高もしくは河川の平水位のいずれか低い高さ以下 2～3m までをモデル化します。

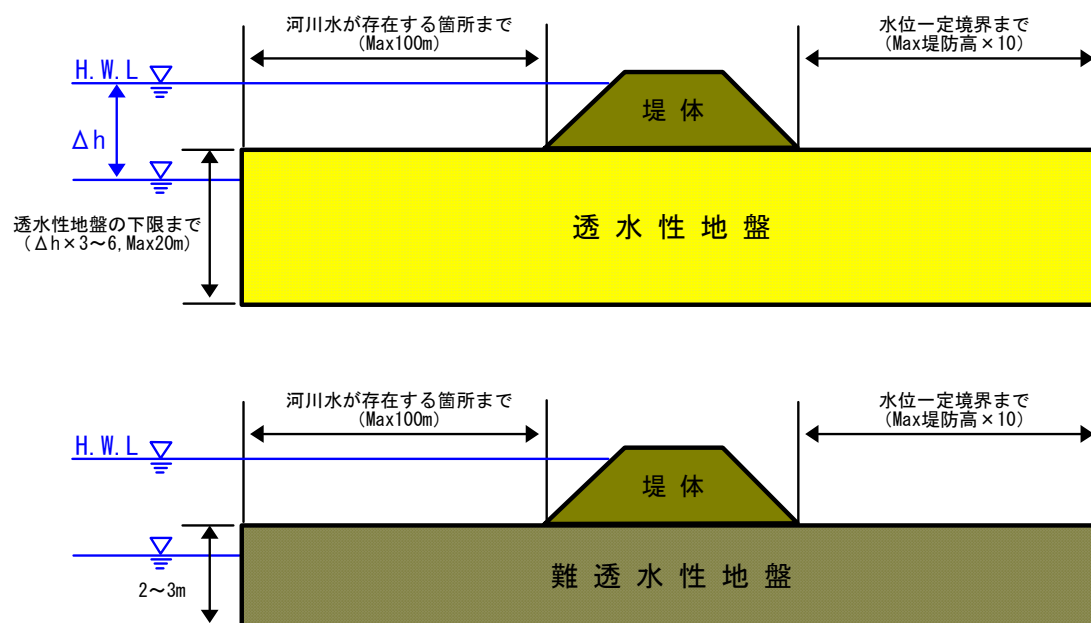


図-2.1 モデル化の範囲

### (3) 土質定数設定

浸透に対する堤防の安全性の照査に必要な土質定数は表 2.1 に示すとおりで、原則として原位置（現場）における試験および室内での土質試験の結果にもとづいて、モデル化した土

質区分ごとに適切に設定する。土質定数の設定にあたっては、土質の不均質さを十分に考慮するとともに、経験的に知られている値についても勘案します。

a) 浸透流解析に必要な土質定数

ア) 飽和透水係数  $k_s$

いわゆる透水係数で、原則的には現場透水試験（主として基礎地盤）および室内の透水試験（主として堤体）の結果にもとづいて設定するが、粒度試験の結果等をもとに土質の不均一さを十分に考慮して適切に設定する必要があります。

なお、粘性土については、特別な条件（亀裂が多い等）がない限りは、飽和透水係数  $k_s$  として、

シルトを主体とする場合  $k_s=1 \times 10^{-5}$  cm/sec

粘土を主体とする場合  $k_s=1 \times 10^{-6}$  cm/sec

を設定します。

b) 安定計算に必要な土質定数

表 2.1 浸透に対する堤防の安全性の照査に必要な土質定数

必要な土質定数		用途	備考
飽和透水係数		非定常浸透流 計算	現場および室内での透水試験結果にもとづいて設定する。
不飽和浸透 特性	比透水係数 $\theta \sim k_r$		体積含水率 $\theta$ と比透水係数 $k_r$ （不飽和透水係数/飽和透水係数）の関係、および体積含水率 $\theta$ と負の圧力水頭 $\phi$ の関係（水分特性曲線）を示すもので、実際に求める場合には特別な試験が必要で、本手引き（案）では原則として図 2.1、図 2.2 および表 2.1 に示す不飽和浸透特性を設定する。
	水分特性曲線 $\theta \sim \phi$		
湿潤密度 $\rho_t$	安定計算	原則として室内試験結果にもとづいて設定する。	
粘着力 $c$		粘性土については非圧密非排水（UU）条件の三軸圧縮試験または等体積一面せん断試験、砂質土については圧密非排水（CU）条件の三軸圧縮試験または等体積一面せん断試験の結果にもとづいて設定する。	
内部摩擦角 $\phi$			

## 2.2 初期条件設定

浸透に対する安全性照査では、初期条件として事前降雨量および初期地下水位を設定します。堤防を不安定化させるような降雨や洪水の発生は、通常は梅雨時期や秋雨時期のいわゆる多雨期です。したがって、堤防の安全性はこのような時期を想定して照査します。

### (1) 事前降雨量の設定

事前降雨量は、総降雨量として多雨期の月降水量の平均値程度を設定し、堤体の透水係数を勘案して事前降雨量が全て堤体に浸透するよう 1mm/hr 程度の強度で連続して降らせるものとします。

### (2) 初期地下水位の設定

初期地下水位は出水期（多雨期）の平均地下水位程度を水平に設定するが、詳細調査時の土質調査において確認された地下水位が出水期の平均的なものであるか不明瞭な場合、あるいは出水期の平均地下水位が堤内地盤面下 0.5m 以深にある場合には、（堤内地盤高 - 0.5 m）程度に設定するものとします。

## 2.3 洪水外力設定

浸透に対する安全性照査では外力として洪水時の河川水位波形、降雨波形を設定します。

### (1) 降雨波形の設定

降雨量は次のような手順で設定する。

- ① 原則として当該河川の計画降雨量（総降雨量）を用います。
- ② 降雨強度は 10mm/hr 程度を標準とします。
- ③ ①で設定した総降雨量と②で設定した降雨強度をもとに、長方形の降雨波形を設定します。

### (2) 河川水位波形の設定

<解析条件一覧表へ>