

河川堤防の浸透に対する安全性の評価

Evaluation of Stability on Seepage flow in Hydraulic Levee

河川堤防の安全度の向上に対する社会的要請は氾濫原の人口や資産の急増によって著しく高まっており、河川堤防設計の体系化と標準化の整備は急務といえる。

今回の報告は、堤防設計を考える上で重要となる浸透に対する安全性の評価を行った事例についてまとめたものである。

星 敏彦*

丹野 貴浩**



1. 評価方法の概要

浸透による堤防の不安定化は、降雨あるいは河川水の堤体への浸透による場合と、基礎地盤のパイピングによる場合に大別される。これらの崩壊過程は、図-1, 2に示すとおりであるが以下に要約する。

- (1) 浸透によるものは、先ず降雨の浸透により堤体の飽和度が上昇し、堤体を構成する土の強度が低下する。場合によってはこの段階でのり面にすべり破壊を生ずることがある。(図-1 ①~②)
- (2) 堤体の飽和度上昇は、河川水の堤体への浸透を助長し、堤体内に浸潤面が急速に発達する。(図-1 ③)
- (3) 浸潤面上昇、前進が進行すると、堤体の間隙水圧の上昇を招き、最終的には裏のりに崩壊やすべり破壊が発生する。(図-1 ④~⑥)
- (4) また、洪水末期の河川水位の急低下時には、堤体内に浸透水が残留し(残留水圧)表のり面が崩壊する現象が見られる。(図-1 ④'、⑤')
- (5) 基礎地盤のパイピングは、局所の動水勾配あるいは浸透流速が限界値を越えることによる土の組織構造の破壊(浸透破壊)に起因し、それが拡大進行して堤防の破壊に至るものである。

以上のようなことから、堤防の浸透に対する安全性の評価は次の3項目としており、評価の手順は「河川堤防の浸透に対する調査要領」¹⁾において図-3のように示されている。以下にこれらについて要約する。

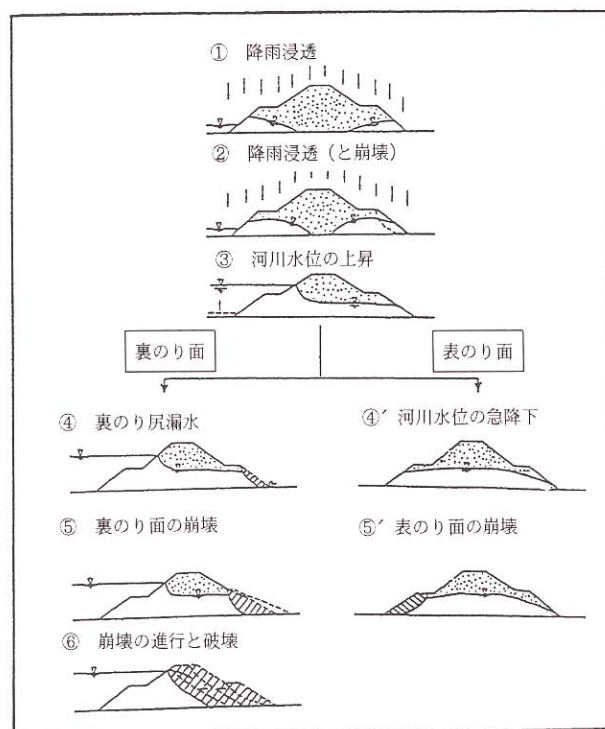


図-1 浸透による堤防の破壊過程の一例

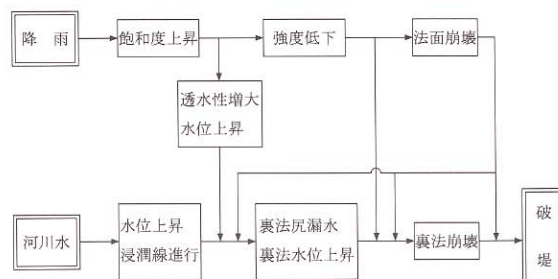


図-2 降雨・河川水(外水)の堤体浸透とのり面崩壊の関係

*) 地質部課長(RCCM:土質及び基礎) Toshihiko HOSHI

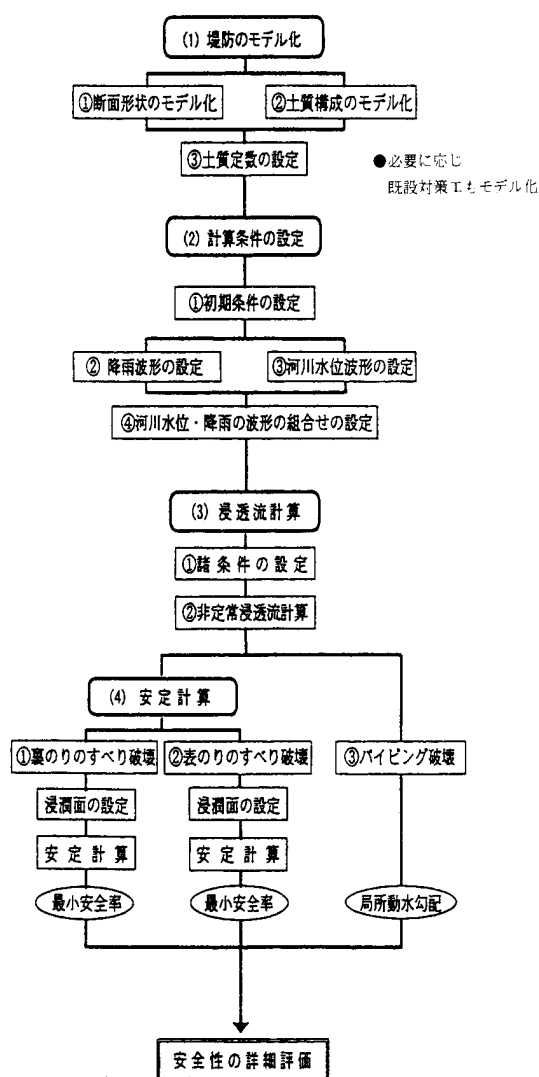
**) 地質部 Takahiro TANNO

1.1 評価の項目

- (1) 洪水時の裏のり面のすべり破壊に対する安全性
- (2) 洪水時（洪水末期の河川水位急低下時）の表のりすべり破壊に対する安全性
- (3) 洪水時の基礎地盤のパイピングに対する安全性

1.2 評価の手順

- (1) 堤防のモデル化
- (2) 計算条件の設定
- (3) 浸透流計算
- (4) 安定計算



図－3 浸透に対する安全性の評価の手順

2. 安全性の評価

今回の堤防の浸透に対する安全性の評価は、「河川堤防の浸透に対する調査要領」に準拠して行ったが、これらの内容を以下に示す。

2.1 安全度の検討手法

(1) 浸透流計算

浸透流計算にあたっては、初期条件を設定した上で、飽和・不飽和非定常浸透流計算を行う。

浸透流計算の結果からは、任意の時間の浸潤面を求めるとともに、局所動水勾配を算出する。

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・不飽和解析があるが、ここでは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った。

非定常の飽和・不飽和浸透流計算の基本式は（式－１）のとおりである。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \phi}{\partial z} + K \right) = C + \alpha \cdot Ss \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \dots(\text{式－１})$$

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)
- ϕ : 圧力水頭 (m)
- C : 比水分容量 (l/m)
- α : 1の場合飽和領域、0の場合不飽和領域
- Ss : 比貯留係数 (l/m)
- t : 時間 (hr)

(2) 局所動水勾配の算出法

パイピングに対する安全性を評価するための局所動水勾配は、図－４に示すように、裏のり尻近傍の基礎地盤を対象に浸透流計算の結果に基づいて原則として次式によって算出し、鉛直ならびに水平方向それぞれの最大値を求める。

$$\text{局所動水勾配} = \frac{\text{節点における圧力差}(\Delta p)}{\text{基礎地盤におけるひとつの要素の高さまたは幅}(\Delta d)}$$

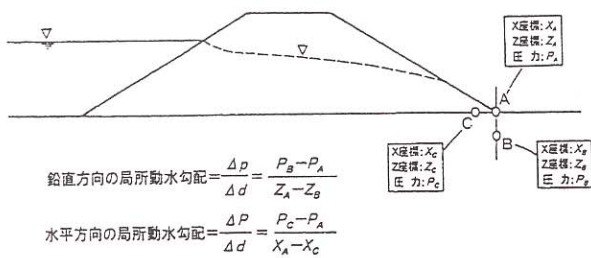


図-4 局所動水勾配の算出

(3) 安定計算

安定計算は、浸透流計算の結果をもとに最も危険と想定される浸潤面をモデル化した断面に設定し、全応力法に基づく円弧すべり面を仮定した分割法により実施する。

$$F_s = \frac{cl + (W - ub) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi}{W \cdot \sin \alpha} \quad \dots(\text{式}-2)$$

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 (tf/m²)

ℓ : 円弧の長さ (m)

ϕ : すべり面に沿う土の内部摩擦角 (°)

b : 分割片の幅 (m)

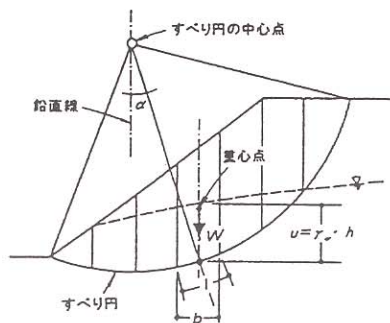


図-5 分割法による安定計算概念図

3. 解析

3.1 堤防のモデル化

(1) 断面形状及び土質構成のモデル化

- ① 断面形状は、図-6に示す現状地盤に背割堤となる旧川上の盛土と捷水路ならびに導水路の掘削からなる計

画断面である。

- ② 土質構成は、既存資料と今回の調査結果を総合して推定した。

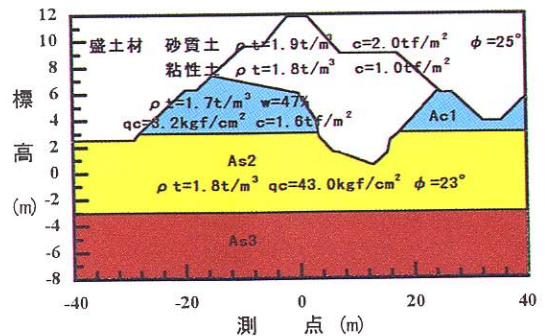


図-6 検討条件図

(2) 土質定数の設定

① 透水係数 (k)

地盤は、その構造として連続した間隙を有するいわゆる有孔物質であり、圧力やポテンシャルの差によって水の透過が可能である。このことを透水性という。

透水係数とは、透水性媒体内の透水性の度合いを数値で表したものであり、土中を流れる水の速度（流速）で示される。

既存資料の粒度分布と土層区分及び今回の土層区分等により表-1を用い、各土層毎に値を設定した。砂質土は中粒砂と粗粒砂、粘性土は極微粒砂のそれぞれ中間の値を用いた。盛土材は砂質土と粘性土の2ケースを仮定した。

- ・盛土 (B) { 砂質土 $k=1 \times 10^{-2}$ (cm/sec)
粘性土 $k=1 \times 10^{-4}$ (cm/sec)
- ・第1粘性土 (A_{c1}) $k=1 \times 10^{-4}$ (cm/sec)
- ・第2砂質土 (A_{s2}) $k=1 \times 10^{-2}$ (cm/sec)
- ・第3砂質土 (A_{s3}) $k=1 \times 10^{-2}$ (cm/sec)

表-1 Creager による D_{20} と透水係数

D_{20} (mm)	k (cm/s)	土質分類	D_{20} (mm)	k (cm/s)	土質分類
0.005	3.00×10^{-6}	粗粒粘土	0.18	6.85×10^{-3}	微粒砂
0.01	1.05×10^{-5}	細粒シルト	0.20	8.90×10^{-3}	
			0.25	1.40×10^{-2}	
0.02	4.00×10^{-5}	粗砂シルト	0.30	2.20×10^{-2}	中粒砂
0.03	8.50×10^{-5}		0.35	3.20×10^{-2}	
0.04	1.75×10^{-4}		0.40	4.50×10^{-2}	
0.05	2.80×10^{-4}		0.45	5.80×10^{-2}	
			0.50	7.50×10^{-2}	
0.06	4.60×10^{-4}	極微粒砂	0.60	1.10×10^{-1}	粗粒砂
0.07	6.50×10^{-4}		0.70	1.60×10^{-1}	
0.08	9.00×10^{-4}		0.80	2.15×10^{-1}	
0.09	1.40×10^{-3}		0.90	2.80×10^{-1}	
0.10	1.75×10^{-3}		1.00	3.60×10^{-1}	
0.12	2.6×10^{-3}	微粒砂	2.00	1.80	細砂
0.14	3.8×10^{-3}				
0.16	5.1×10^{-3}				

② 有効間隙率 (n)

有効間隙率 (不圧帯水層において、自由水面が単位当たり低下することによって、単位時間に帯水層の間隙から排水される流量) は図-7を用いて設定した。

- ・盛土 (B) $\left\{ \begin{array}{ll} \text{砂質土} & n=0.410 \\ \text{粘性土} & n=0.298 \end{array} \right.$
- ・第1粘性土 (A_{c1}) $n=0.298$
- ・第2砂質土 (A_{s2}) $n=0.356$
- ・第3砂質土 (A_{s3}) $n=0.356$

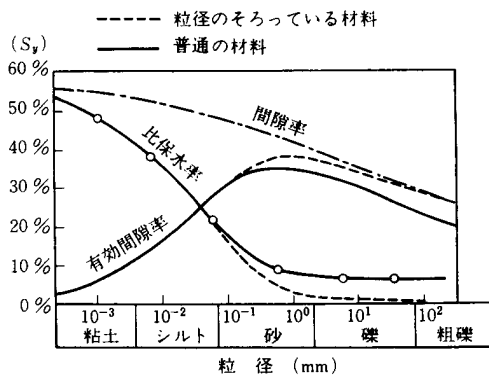


図-7 粒径と有効間隙率の関係²⁾
(Davis, De Wiest による)

③ 比貯留係数 (S_s)

比貯留係数 (単位当たりの水頭低下により有効応力が増加して、単位当たりの帯水層から排出される水量) を表-2を用いて設定した。

- ・盛土 (B) $\left\{ \begin{array}{ll} \text{砂質土} & S_s=4.6 \times 10^{-5} (\text{m}^{-1}) \\ \text{粘性土} & S_s=2.4 \times 10^{-4} (\text{m}^{-1}) \end{array} \right.$
- ・第1粘性土 (A_{c1}) $S_s=2.4 \times 10^{-4} (\text{m}^{-1})$
- ・第2砂質土 (A_{s2}) $S_s=4.6 \times 10^{-5} (\text{m}^{-1})$
- ・第3砂質土 (A_{s3}) $S_s=4.6 \times 10^{-5} (\text{m}^{-1})$

表-2 比貯留係数の代表例³⁾
(Dominico, Mifflin による)

物質	比貯留率 (m^{-1})
塑性粘土	$1.9 \times 10^{-3} \sim 2.4 \times 10^{-4}$
締まった粘土	$2.4 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-4}$
やや硬い粘土	$1.2 \times 10^{-4} \sim 8.5 \times 10^{-5}$
ルーズな砂	$9.4 \times 10^{-5} \sim 4.6 \times 10^{-5}$
密な砂	$1.9 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-5}$
密な砂礫	$9.4 \times 10^{-6} \sim 4.6 \times 10^{-6}$
割れ目のある岩石	$1.9 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-7}$
固結した岩石	$3.0 \times 10^{-7} \sim$

④ 不飽和浸透特性

不飽和浸透特性とは不飽和領域における浸透特性を支配する物理常数である。しかし、現在までの浸透流解析の多くは飽和領域を対象としているため、この不飽和領域を対象する物理常数が確立されていない。

ここでは、「河川堤防の浸透に対する調査要領」で提案されている体積含水率 θ と比透水係数 k_r の関係及び体積含水率 θ と負の圧力水頭 ϕ の関係を用いた。

以下にその値を示す。

・盛土 (B) - 砂質土 ・第2砂質土 - (A_{s2}) ・第3砂質土 - (A_{s3})				・盛土 (B) - 粘性土 ・第1粘性土 - (A_{c1})			
固質土: [G], [G-F], [GF] 砂質土: [S], [S-F], [SF]		固質土: [G], [G-F], [GF] 砂質土: [S], [S-F], [SF]		粘性土: [M], [C]		粘性土: [M], [C]	
θ	k_r	θ	ϕ	θ	k_r	θ	ϕ
0.000	0.000	0.049	12.00	0.000	0.000	0.009	12.00
0.010	0.010	0.060	1.90	0.005	0.003	0.060	1.90
0.020	0.020	0.066	1.50	0.010	0.006	0.062	1.50
0.030	0.030	0.068	1.00	0.015	0.010	0.066	1.00
0.040	0.040	0.078	0.80	0.020	0.015	0.068	0.80
0.050	0.050	0.084	0.70	0.025	0.020	0.070	0.70
0.060	0.060	0.090	0.60	0.030	0.030	0.072	0.60
0.070	0.080	0.100	0.50	0.035	0.040	0.074	0.50
0.080	0.090	0.112	0.40	0.040	0.060	0.076	0.40
0.090	0.110	0.126	0.30	0.045	0.070	0.081	0.30
0.100	0.130	0.136	0.25	0.050	0.090	0.084	0.25
0.110	0.160	0.150	0.20	0.055	0.100	0.088	0.20
0.120	0.190	0.164	0.15	0.060	0.110	0.092	0.15
0.130	0.230	0.178	0.10	0.065	0.130	0.095	0.10
0.140	0.290	0.190	0.06	0.070	0.230	0.098	0.05
0.150	0.360	0.200	0.00	0.075	0.290	0.100	0.00
0.160	0.450						
0.170	0.550						
0.180	0.650						
0.190	0.800						
0.200	1.000						

3.2 計算条件の設定

(1) 初期条件の設定

初期条件は、多雨時期の堤体下の水面の形状や堤体の飽和度が的確に把握されている事例はきわめて限られており、一般には多雨時期の地下水位を計算によって再現することとし、そのために適切な降雨量及び初期地下水位を条件として設定するものとしている。しかし、今回の検討における外力の設定は最大雨量における洪水実績に基づいて行っており、計算による初期条件の再現は行っていない。初期条件の具体的な設定は次のとおりである。

- ・事前降雨量は、実績において降雨がないことから考慮していない。
- ・初期地下水位は、捷水路と導水路の常時の水位を直線でつないだ水位とする。

(2) 外力条件

① 洪水時の降雨量とその波形

降雨量は河川水位（外水位）波形とともに非定常浸透流解析入力の条件として必要なものである。

堤防への降雨の浸透は、河川水位と同様に堤体内の浸潤面を上昇させる要因となる。

本解析では、洪水実績から最大雨量である降雨量及び波形を使用する。

図－8に降雨経時変化図を示す。

② 洪水時の内外水位波形

内・外（河川水位）水位の上昇は、降雨量同様に堤体内の浸潤面を上昇させる要因の一つである。

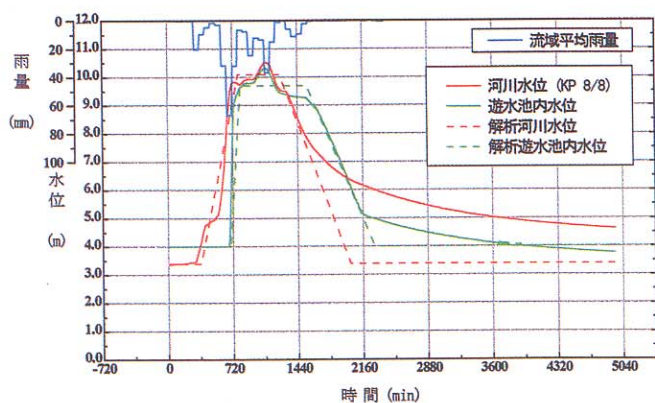
本解析では、降雨量と同じく、洪水実績に基づいた波形を使用するものであるが、より安全性を評価するものとし、「河川堤防の浸透に対する調査要領」¹⁾に準拠して以下の点を変更している。

- ・高水位継続時間
- ・洪水末期の水位急低下速度（波形の勾配）

図－8に外水位経時変化図を示す。

なお、解析においては次の4ケースで行った。

		河 川 水 位	
		内外水位	外 水 位
盛 土 材	砂質土	Case-1	Case-2
	粘性土	Case-3	Case-4



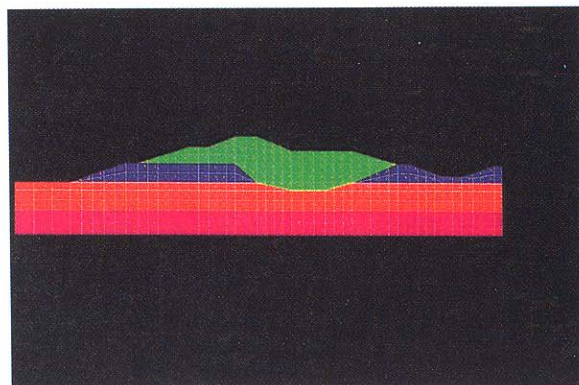
図－8 降雨及び内・外水位経時変化図

4. 解析結果

有限要素法による非定常飽和・不飽和浸透流計算の結果を以下に要約する。

なお、有限要素法における浸透流計算の要素分布図を図－9に示すが計算条件は、次のとおりである。

- ・水平方向の範囲は、捷水路から導水路までとする。
- ・鉛直方向の範囲は、地盤面から深度約11m以浅の透水層までとする。
- ・計算時間のステップは、基本的には1時間毎とした。



図－9 要素分割図

4.1 浸透流計算結果

(1) Case-1（盛土材 砂質土，内・外水位）

以下に経時変化毎の状況と模式図を図－10に示す。

- ① 解析当初より断続的な降雨があり、堤体中央部の浸潤線の上昇が見られる。
- ② 降雨が継続し、それに伴う外水位の上昇により堤外側の浸潤線も上昇を始める。
- ③ 外水位の越流が始まり、内水位も上昇する。それに伴い堤体内堤内側浸潤線の上昇が見られる。
- ④ 降雨も止まり、内外水位が低下し、それに伴い浸潤線も低下を始める。浸潤線は、ほぼ水平に下降する。
- ⑤ 内・外水位も初期状態まで下がり、浸潤線もそれを結ぶ形で形成される。

Case-1 は盛土材が砂質土であり透水係数も高く、($k = 1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$) 降雨および内・外水位の影響が顕著に表れる。その内の降雨が浸潤線の上昇に最も寄与していると考えられる。また、解析中残留水圧が最大(水頭差 4.5m 程度)となる D 形状(Time=42)で表のり面の破壊が想定されることからこの浸潤線のモデルにて安定解析を行うこととする。

(2) Case-2 (盛土材 砂質土, 外水位)
以下に経時変化毎の状況と模式図を図-11 に示す。

- ① 解析当初より断続的な降雨があり、堤体中心部の浸潤線の上昇が見られる。
- ② 降雨が継続し、それに伴う外水位の上昇により堤外側の浸潤線も上昇を始める。
- ③ 降雨により外水位はさらに上昇する。内水位の上昇は無いものの、外水位の上昇と降雨の影響により堤内側浸潤線もつられて上昇する。
- ④ 降雨も止まり、外水位が低下する。それに伴い浸潤線も水平に低下する。浸潤線は堤外側の方が若干高く残る形状となっている。
- ⑤ 外水位も初期状態まで低下し、浸潤線も内・外水位を結ぶ形で形成される。

Case-2 は、Case-1 と同様、盛土材を砂質土としているため、降雨および外水位の影響が顕著に表れる。また、内水位の上昇が無い為、浸潤線の上昇が若干遅いものの、浸潤線最高位および残留水圧の最大となる時間帯 (Time=42) もほぼ Case-1 と同様である。これより D 形状での表のり面の破壊を想定した安定解析は、Case-1 と同様に行うものとする。

(3) Case-3 (盛土材 粘性土, 内・外水位)
以下に経時変化毎の状況と模式図を図-12 に示す。

- ① 解析当初からの降雨により、天端表層に若干の浸透が見られる。浸透に至らない降雨は法面を流下するもの

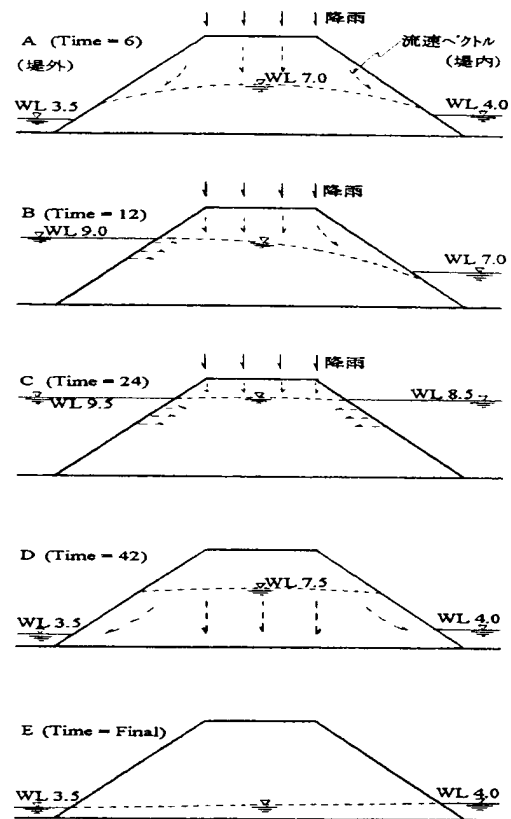


図-10 解析結果模式図 (Case-1)

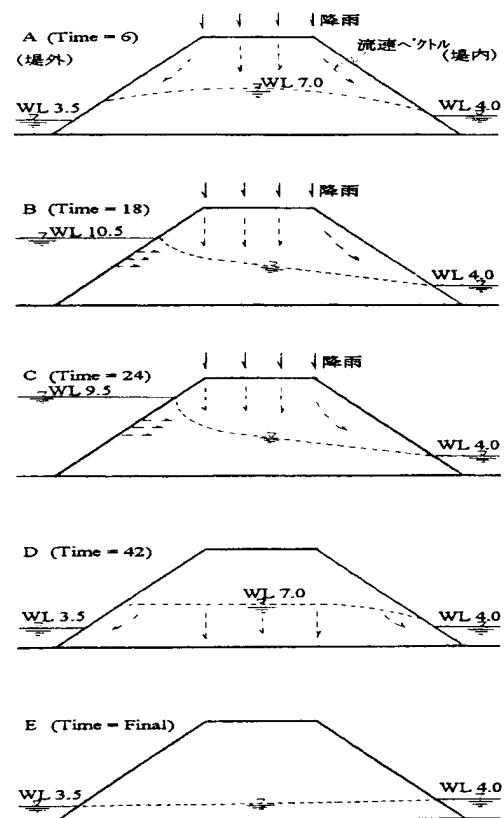


図-11 解析結果模式図 (Case-2)

と考えられる。また、堤体内初期水位の上昇は見られない。

- ② 降雨の継続により、天端表層および法尻付近の浸透が進む。外水位による堤体への急激な浸透は見られない。
- ③ 降雨及び内外水位による堤体内への浸透が進む。浸透水は堤体中央部方向に向けて移動している。堤体下部では毛管現象と考えられる浸潤線の上昇も見られる。
- ④ 降雨も止まり、堤体内の浸透水は放射状に排水される。
- ⑤ 内・外水位も初期状態まで下がり、浸潤線も内・外水位を結ぶ形で形成される。

Case-3は盛土材が粘性土であり、透水係数が低く ($k = 1 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$) 降雨及び内・外水位の影響も少ない。浸透水も盛土表面の浸透にとどまり、浸潤線もほとんど上昇しない形となる。

解析結果より、浸潤線が外水位よりも高くなる形状(残留水圧の発生)が見られないことから、このモデルでの飽和度上昇に伴う強度低下による表のり面の破壊は発生しないものと考えられる。

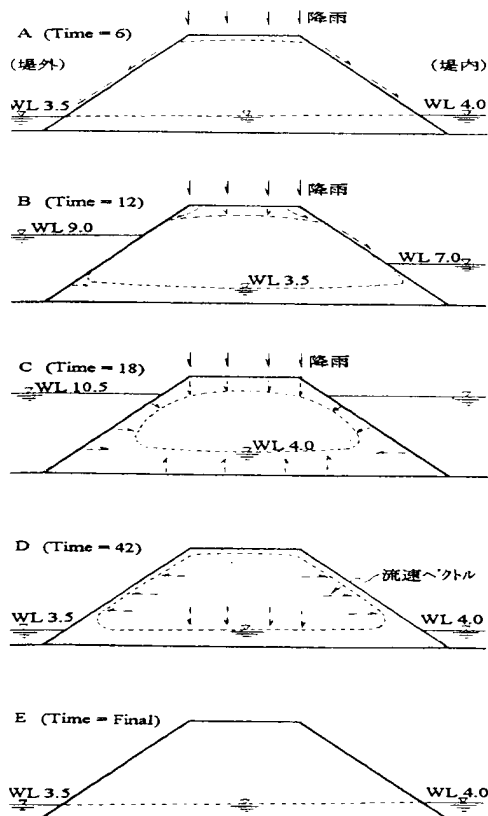


図-12 解析結果模式図 (Case-3)

- (4) Case-4 (盛土材 粘性土, 外水位)
以下に経時変化毎の状況を示す。

- ① 解析当初からの降雨により、天端表層に若干の浸透が見られる。浸透に至らない降雨は法面を流下するものと考えられる。また、堤体内初期水位の上昇は見られない。
- ② 降雨の継続により、天端表層及び法尻付近の浸透が進む。外水位による堤体への急激な浸透は見られない。
- ③ 降雨及び内外水位による堤体内への浸透が進む。浸透水は堤体中央部方向に向けて移動している。堤体下部では毛管現象と考えられる浸潤線の上昇が見られる。
なお、内水位は上昇させないため、堤内側法面からの浸透は無い。
- ④ 降雨も止まり、堤体内の浸透水も放射状に排水される。
- ⑤ 外水位も初期状態まで下がり、浸潤線も内外水位を結ぶ形で形成される。

Case-3と同様盛土材が粘性土であるため、透水係数が低く降雨および外水位の浸透に対する影響は少ないものと考えられる。また、残留水圧の発生も概ね無いことから、このケースでの盛土の強度低下による表のり面の破壊は発生しないものと考えられる。

4.2 パイピング破壊についての評価

パイピングによる破堤は、河川水が堤防を浸透して堤防の川裏側へ流出するときに土粒子が水と共に流出し裏のり先付近でのり崩れあるいは陥没が発生し、これが進行して破堤に至るものである。

パイピング破壊に対する安全性は、限界動水勾配によって評価するものであるが、一般に砂質土の限界動水勾配は0.8～1.1程度となる。

これらのことから、浸透流計算により求められる局所的な動水勾配が1を越えないことが目安となるが、この値には安全率に相当する余裕が含まれておらず、他の機関の指針などを考慮すると基準値は0.5を目安とすることが考えられる。

局所動水勾配の算出結果を表-3に示すが、これによるといずれのケースも基準値

より小さくなっており、パイピング破壊に対する安全性は確保されている。

表－3 局所動水勾配の算出結果

解析条件	水平方向の局所 動水勾配 X	鉛直方向の局所 動水勾配 Y
Case-1	0.00674	0.00745
Case-2	0.01791	0.01064
Case-3	0.00563	0.00987
Case-4	0.0074	0.00844

4.3 安定計算結果

すべり破壊についての評価は、浸透流計算によって得られた浸潤面の中から最も危険なものを抽出し、円弧すべり面法による安定計算を行った。

計算結果は、表－4に示すとおりであるが以下に要約する。

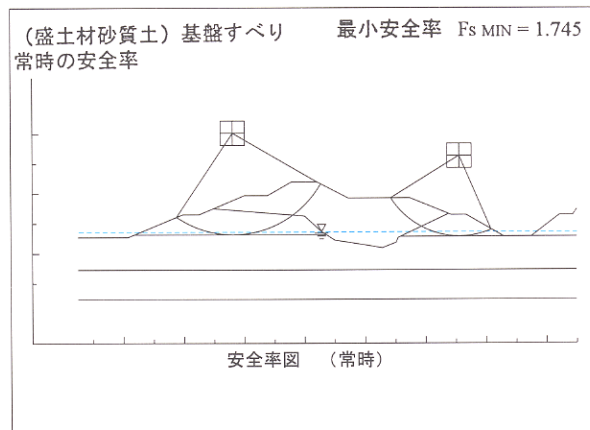
表－4 安定計算結果

検討条件	水位条件	表のり		裏のり	
		基 盤 すべり	盛土内 すべり	基 盤 すべり	盛土内 すべり
常 時	常時水位	1.75	4.36	2.57	4.78
浸透考慮	内外水位 考 慮	1.70	3.77	2.34	3.79
	外水位のみ 考 慮	1.74	4.24	2.49	4.34

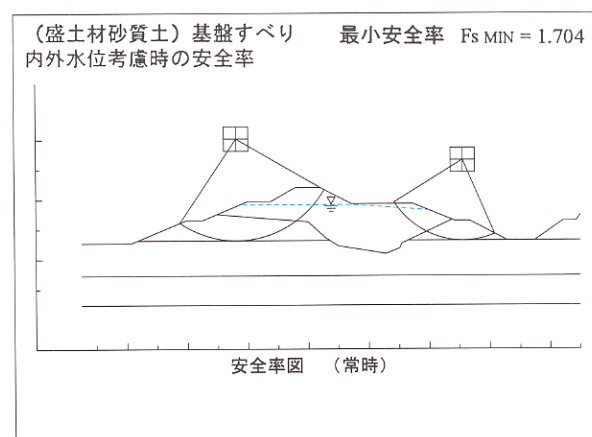
①盛土材が粘性土の場合(Case-3, 4)は、浸透流計算結果に示されるように、堤体内の浸潤線の上昇および残留水圧の発生が見られないことから、常時のすべり安全率に対する低下はないものと考えられる。

②盛土材が砂質土の場合(Case-1, 2)は常時のすべり安全率に対して浸透による安全率は低下している。背割堤表のりの安全率は基盤すべりで $F_s=1.75$ に対して $F_s=1.70\sim1.74$ に低下し、盛土内すべりで $F_s=4.36$ が、 $F_s=3.77\sim4.24$ に低下する。

また、背割堤裏のりの安全率は基盤すべりで $F_s=2.57$ が $F_s=2.34\sim2.49$ に低下し、盛土内すべりで $F_s=4.78$ が $F_s=3.79\sim4.34$ に低下する。



図－13 常時の安全率（盛土材砂質土）



図－14 浸透を考慮した場合の安全率
(盛土材砂質土、内外水位考慮)

5. あとがき

洪水時の降雨及び河川水の堤体内への浸透による堤防の破壊については数多く報告されており、実例及び現場実験による解析がなされてきた。浸透によって堤防が不安定化するメカニズムについては全てが解明されていないのが実状であるが、堤防の浸透問題に関する各種の解析手法の発展により、安全性を工学的に評価する方法が開発されつつある。

今回の評価は、建設省河川局治水課における「河川堤防の浸透に対する調査要領」の手法に準拠して評価したものである。

参考文献

- 1) 建設省河川局治水課：河川堤防の浸透に対する調査要領，1997.10
- 2) 地盤工学会：根切り工事と地下水，PP100，1991.1
- 3) 地盤工学会：根切り工事と地下水，PP99，1991.1