

砂質土堤防の浸透による破壊形態と 土質定数に関する大型模型実験

THE LARGE-SCALE MODEL TESTS OF SANDY RIVER LEVEES ABOUT THE RELATIONSHIP BETWEEN SEEPAGE FAILURE MODES AND STRENGTH PARAMETERS

齋藤由紀子¹・森 啓年²・佐々木哲也³
Yukiko SAITO, Hirotohi MORI and Tetsuya SASAKI

¹正会員 (独) 土木研究所地質・地盤研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

²正会員 工博 前 (独) 土木研究所地質・地盤研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

³正会員 工修 (独) 土木研究所地質・地盤研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

This research focuses on the failure mode of river levees induced by seepage. The large-scale model tests for sandy river levees were conducted to examine the behavior during flood. An internal erosion became a major mode of failure in the case using soil of fine grain content (F_c) 10% at 1:2.0 incline. A deep slip has occurred in the experiment in the case of the soil of F_c 50% at 1:1.5 incline. In addition to that, the internal erosion leads followed by the deep slip was observed in the case of soil of F_c 30% at 1:1.5 incline. It is concluded that the major modes of the failure are the internal erosion, the deep slip or their combination, which is affected by soil types and incline of slope.

Key Words : river levee, model test, seepage failure, internal erosion, slip

1. 序論

1.1 背景

河川堤防の点検の結果、直轄堤防のうちおよそ3割の区間は浸透に対する安全性が不足し、要対策区間として抽出されると推察される。今後、対策を円滑に実施するためには、要対策区間の絞り込みや優先順位付け、効率的な浸透対策の設計が必要とされている。

一方、粘着力に乏しい土質材料で施工された堤防は、河川水や雨水の浸透により裏のり面に浸潤線が達した場合、のり尻部の浅い範囲において内部侵食を起こすことが知られている。内部侵食が進行した場合、のり尻部分の抑えがなくなることにより、大規模なすべりを誘発し、最終的に堤防決壊に至る可能性がある。しかし、一連の変状の発生メカニズムや発生条件には未だ不明な点が多い。

1.2 目的

本研究は、高精度な要対策区間の抽出、効率的な堤防強化工法の設計の実施を目的として、内部侵食やすべりの発生メカニズムを明らかにする小型および大型模型実験を実施した。

1.3 方法

表層部で発生し比較的スケール効果がないと考えられ

る内部侵食の発生条件に関しては小型模型実験を、すべり土塊の重量が関係しスケール効果が存在するすべりの発生条件に関しては大型模型実験を実施した。これらの実験結果をもとに内部侵食とすべりの発生メカニズムと発生条件に関する考察を行った。

2. 小型模型実験

2.1 実験方法

小型実験模型の断面形状を図-1に示す。堤体部分は、高さ20cm、天端幅20cm、奥行方向50cm、のり面勾配1:1.5 - 1:4として、天端と裏のり面をモデル化した。厚さ5cmの関東ロームを締め固めて基礎地盤を作製し、所定の土質と締め固めで堤体部分を仕上がり層厚5cmで密度管理をしながら4層に分けて作製した。また、定点観察用のカメラを設置した。

実験ケースを表-1に示す。細粒分含有率 (F_c) が異なる三種類の土質を用い、締め固め度 (D_c) を三水準変化させた合計9ケースについて実験を行った。堤体材料に使用した土質の物性を表-2、強度・透水性を表-3に示す。

実験では、河川水位を想定した水位を基礎地盤底部から23cmの高さまで上げて保持し、のり面の変状を観察した。のり尻からの排水量が一定となるまで実験を継続

し、変状がみられなかった場合、水位を下げてのり面勾配の条件を図-1に示すように0.5割急傾斜になるよう掘削、成型し、再度水位を上昇させた。各ケースでは、これらの過程をのり面の変状が見られるまで繰り返し行った。なお、降雨は与えていない。

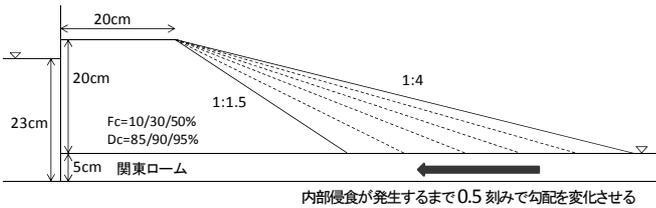


図-1 小型模型の断面形状

表-1 小型模型実験のケース一覧

		Dc		
		85%	90%	95%
Fc	10%	1-1	1-2	1-3
	30%	2-1	2-2	2-3
	50%	3-1	3-2	3-3

表-2 堤体材料の物性

		Fc10	Fc30	Fc50
粒度構成	砂礫 (%)	1.3	4.1	0.4
	砂 (%)	89.2	62.4	45.5
	シルト (%)	7.0	26.5	42.1
	粘土 (%)	2.5	7.0	12.0
最大粒径 (mm)		4.75	9.50	4.75
50%粒径 D_{50} (mm)		0.173	0.125	0.063
土の工学的分類		S-F	SF	ML
土粒子の密度 (g/cm^3)		2.689	2.698	2.664
最大乾燥密度 (g/cm^3)		1.685	1.640	1.467
最適含水比 (%)		18.6	20.2	26.6

表-3 締固め度に応じた強度・透水性

			Dc		
			85%	90%	95%
Fc	10%	c_d (kN/m^2)	0	0	18.6
		ϕ_d ($^\circ$)	32.2	37.6	33.2
		k (m/s)	2.34E-05	1.42E-05	4.59E-06
	30%	c_d (kN/m^2)	0	0	11.3
		ϕ_d ($^\circ$)	33.8	38.3	33.9
		k (m/s)	3.28E-05	3.89E-06	2.23E-08
	50%	c_d (kN/m^2)	0	0	0
		ϕ_d ($^\circ$)	33.8	35.7	36.5
		k (m/s)	1.45E-05	2.33E-07	5.34E-06

備考) 強度(c_d , ϕ_d)は、圧密排水条件(CD)の三軸圧縮試験結果

2.2 実験結果

(1) 変状の形態とメカニズム

実験の結果、比較的深い箇所ですべり面が発生し崩壊をみせる「すべり」と、のり尻部の比較的浅い範囲で崩壊が発生しそれがのり面上部に進行的に拡大する「内部侵食」の二種類の変状が観察された。なお、本研究では、目視と定点観察用のカメラの画像をもとに、小規模な崩壊が繰り返し発生する進行性の崩壊を内部侵食、短時間に比較的大規模に発生する崩壊をすべりと区分した。すべりは、細粒分が多いケース3-1と3-2ののり面勾配が急な場合において観察された(写真-1 a.)。一方、内部侵食は、細粒分が少ないケース1-1、1-2、2-1ののり面勾配が比較的緩やかな場合においても発生した(写真-1 b.)。

次に、内部侵食の発生する過程を詳細に観察した。ケース1-1について、のり面勾配1:3.5の変状の初動に着目すると、写真-2に示すように実験開始後40分から、数

分間かけてのり尻部の幅3cm程度の土塊が水平方向に1mm程度滑動した。この原因として、水の粘性や表面張力により土粒子ではなく土塊として、間隙水圧の増加による土のせん断抵抗の減少により、堤体と基礎地盤の境界付近でのり尻方向へ押し出されるように滑動したと推定される。その後、滑動した部分への浸透水の集中により土骨格が破壊され、土のせん断強度がほとんど期待できない状態となることが観察された。これ以上変状は進行しなかったが、同じケース1-1でのり面勾配1:2とした場合、写真-1 b.に示すような天端部まで内部侵食に伴う変状が進行的に発生した。変状の進行は、浸潤面より下の堤体部分の土骨格が破壊されるに伴って、その上方に存在する表層土塊の支持力が失われ、それらの土塊がのり尻方向に繰り返し倒壊する現象が観察された。一方、写真-1 a.に示すようにすべりが確認されたケースでは、のり尻部の滑動は発生せず、円弧状の深いすべり面による変状が観察された。

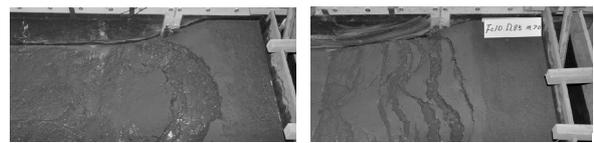


写真-1 a. すべり (Fc50, Dc85, 1:1.5) b. 内部侵食 (Fc10, Dc85, 1:2)

写真-1 変状の種類

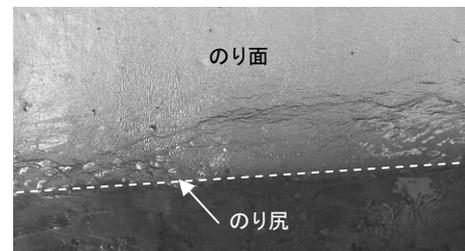


写真-2 内部侵食の初動 (実験開始後45分)

(2) 内部侵食の発生条件

内部侵食が発生したのり面勾配を表-4に土質と締固め度に応じて示した。実験結果から、細粒分含有率が高い堤体材料、高い締固め度の場合については、内部侵食が発生しにくくなる傾向が確認できる。また、のり面勾配が1:4と非常に緩い場合についても同様の傾向があった。

内部侵食の発生条件について、赤井¹⁾、久保田²⁾の研究などが存在する。赤井は土粒子に着目し、土粒子の自重および浸透流の浸透水圧による起動力と、土粒子同士の摩擦力による抵抗力の釣り合いから限界動水勾配を算出する式を提案した(図-2)。

図-3では、横軸に内部摩擦角 ϕ_d 、縦軸に模型実験における平均動水勾配を取り、赤井が提案した内部侵食の発生条件を実線よりののり面勾配ごとに描き、あわせて本研究の実験結果をのり面勾配とともに示している。なお、本研究では、土粒子同士の摩擦力について、内部侵食がのり面表面で発生し、かつ細粒分含有率が少ない比較的透水性が高い土で問題となることから、ここでは圧密排水条件(CD)の三軸圧縮試験により求めた内部摩擦角 ϕ_d がそれにあたると仮定した。

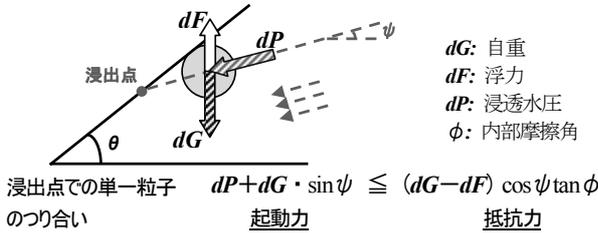
図-3によると、赤井の式で仮定している浸出点での単一粒子の力のつり合いだけでは、今回の実験結果における内部侵食の発生条件を必ずしも説明できないことを示

唆している。また、締め目が不十分な場合は内部侵食を発生しやすいことから、土の変形強度特性や透水性なども考慮する必要があることが窺える。

表-4 内部侵食発生時ののり面勾配

		Dc		
		85%	90%	95%
Fc	10%	1:3.5 内部侵食	1:3.5 内部侵食	×
	30%	1:1.5 内部侵食	×	×
	50%	1:1.5 すべり	1:1.5 すべり	×

×:変状発生せず



式を展開し、起動力と抵抗力が等しくなり粒子が動き出す場合の限界動水勾配を求めると次のとおり

$$i_c^* = \frac{4c}{3} \frac{\gamma'}{\gamma_w} \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)$$

i_c^* : 限界動水勾配
 c : 粒子の形状・間隙の大きさに関する係数
 γ' : 水中単位重量
 γ_w : 浸透水の単位重量

図-2 赤井の式における内部侵食の考え方

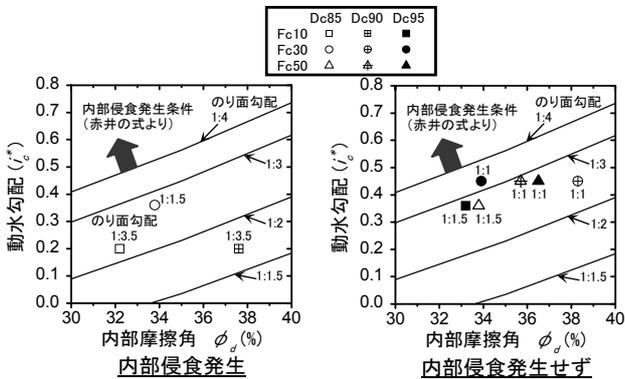


図-3 既往理論における内部侵食発生条件¹⁾と実験結果

2.3 まとめ

本節では、主に内部侵食の発生条件について、土質、締め目度、のり面勾配等を変えた模型実験により検討した。その結果、細粒含有率が高い堤体材料、高い締め目度の堤防やのり面勾配が緩い堤防ほど内部侵食は発生しない傾向があることを確認できた。また、内部侵食はのり尻部が滑動する現象から始まり、その後ののり面勾配によっては変状が進行的に発生することを観察した。

3. 大型模型実験

3.1 実験方法

実験ケースは、表-5に示すとおり土質と締め目度の条件を変えて、計5ケースとした。使用した土質材料の物性は、小型模型実験と同様である(表-2)。

堤防模型の断面形状を図-4に示す。堤体部分は、高さ3m、天端幅3m、のり面勾配1:2を基本として、天端と裏のり面をモデル化した。堤防延長方向の長さは6.2mである。堤体部分は、仕上がり層厚0.15mで密度管理をしながら20層に分けて作製した(表-6)。模型内には、堤体

内水位を測定するためのマンメータ、堤体内の変状を検知するための傾斜計、模型撤去時にすべり面位置を確認するための色砂柱(珪砂8号、直径100mm)を埋設するとともに、定点観察用のカメラを設置した。

実験におけるのり面勾配と外水位の条件を表-7に示す。Step1からStep4までののり面勾配と外水位の条件を段階的に変えて浸透実験を行った。のり面勾配を1:2から1:1.5に変更する際は、図-4の破線の位置までのり面を掘削した。降雨は与えていない。各段階では、裏のり面に大きな変状が見られる、もしくは堤体内水位に変化がみられなくなるまで一定の外水位を保持した。

表-5 大型模型実験のケース一覧

		締め目度設定値 Dc	
		85%	90%
土質 (細粒含有率 設定値 Fc)	10%	Case1	Case2
	30%	Case3	Case4
	50%	—	Case5

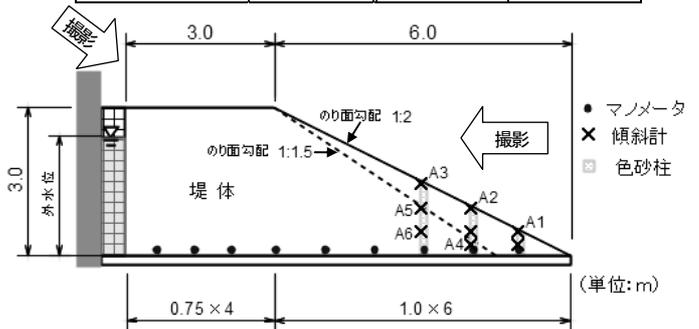


図-4 大型模型の断面形状

表-6 大型模型の作製条件

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
使用土質 (表2参照)	Fc10	Fc30	Fc30	Fc30	Fc50
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.685	1.640	1.640	1.640	1.467
最適含水比 (%)	18.6	20.2	20.2	20.2	26.6
作製時の含水比 (%)	14.9	15.1	23.6	21.5	32.4
締め目度 Dc (%)	84.6	90.7	84.6	89.0	91.7
透水係数 k (m/s)	2.34E-5	1.42E-5	3.28E-5	3.89E-6	2.33E-7

表-7 大型模型実験の実験条件

	のり面勾配	外水位
Step1	1:2	2.3m
Step2	1:2	2.7m
Step3	1:1.5	2.3m
Step4	1:1.5	2.7m

3.2 実験結果

(1) 変状の形態とメカニズム

実験の結果、いずれのケースも最終的には堤防ののり面に変状が見られた。その形態は「内部侵食」「内部侵食とすべりの複合」「すべり」の3つに分類された。以下、変状の形態毎に実験結果を述べる。

内部侵食による変状 (Case1, 2, 4)

Case1,2,4について、実験最終段階における変状状況を写真-3, 4, 5に、Case1,2の実験最終段階における断面形状を図-5, 6にそれぞれ示す。Case1,2は、表-7で示したStep1の条件でのり面の変状が確認されたため、Step2以降には進んでいない。Case4は、Step3を省きStep1,2,4の条件で順次実験を実施した。

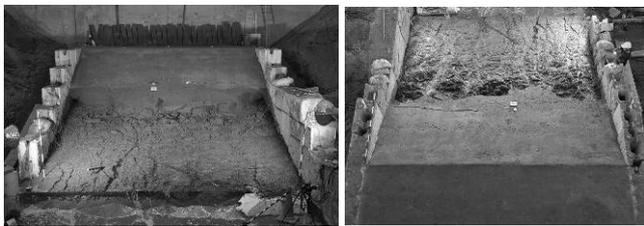
堤体内浸潤線は、のり尻部の観察と排水状況より、Case1は実験開始から29時間経過時点、Case2は28時間経

過時点でのり尻部に到達したと考えられる。その後、Case1は実験開始から37時間経過時点、Case2は36時間経過時点でのり尻部に浸透水が集中し内部侵食が発生した。小さな表層土塊がのり尻方向に繰り返し倒壊することにより、変状は時間とともにのり面上部に拡大し、写真-3, 4に示す実験最終時点では、のり面の約半分が泥状に変化してのり尻方向へ移動した。深度方向の変状は、図-5, 6に示すとおり、のり面の表面から0.5m程度と浅い範囲であった。一方、Case4について、堤体内浸潤線はのり尻部の観察、堤体底面の圧力水頭等より、いずれのStepにおいてものり尻まで到達していたと考えられる。しかし、のり尻の内部侵食はStep1では発生せず、Step2, 4でのり尻部のみの部分的な発生に留まった。

Case2の地盤内に設置した傾斜計の時間変化を図-7に示す。時間とともにのり面表層の傾斜計がのり尻から順にのり尻方向へ前傾していくことが分かる。



正面から撮影
上方から撮影
写真-3 Case1の実験最終段階(Step1)の変状状況



正面から撮影
上方から撮影
写真-4 Case2の実験最終段階(Step1)の変状状況



正面から撮影
上方から撮影
写真-5 Case4の実験最終段階(Step4)の変状状況

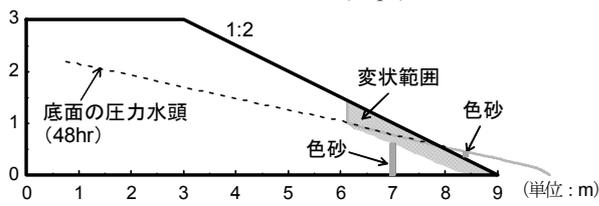


図-5 Case1の実験最終段階(Step1)の模型断面形状

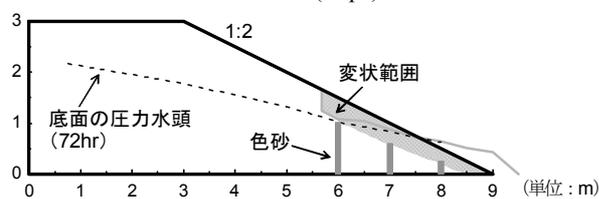


図-6 Case2の実験最終段階(Step1)の模型断面形状

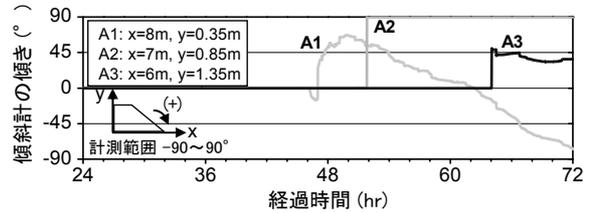


図-7 Case2の地盤内傾斜の時間変化(Step1)

内部侵食からすべりに至る変状 (Case3)

Case3について、実験最終段階における変状状況を写真-6、図-8に、地盤内に設置した傾斜計の時間変化を図-9にそれぞれ示す。Case3では、Step1から4までの条件で順次実験を実施した。

堤体内浸潤線は、のり尻部の観察より、のり面勾配1:2のStep1では実験開始から48時間経過した時点、のり面勾配1:1.5のStep3では36時間経過した時点でのり尻に到達したと考えられる。堤体内浸潤線がのり尻部に達した後、いずれの段階でもCase1,2と同様にのり尻部に浸透水が集中し内部侵食が発生した。Case1,2と異なり、Case3のStep1~3では変状はのり尻部のみの部分的な発生に留まり、のり面上部への拡大はみられなかった。外水位を2.3mから2.7mに上昇させたStep4では、累計192時間時点において、変状が進行し、のり面の約半分が泥状に変化してのり尻方向へ移動した。この変状は、Case1,2と同じであった。その後、196時間経過時点で天端にクラックが入り、216時間経過時点ではすべりによる変状が発生した(写真-6)。図-8に示すとおり、変状は堤防の底面付近まで深く達していた。同図より、底面の圧力水頭はのり面の高さを超過しており、間隙水圧の増加によるせん断抵抗の減少により、堤体と基礎地盤の境界付近で滑動するような挙動を示したと考えられる。写真-7のとおり、のり尻から水平距離1mの位置に入れた色砂は、堤防底面付近で水平に線を描くような痕跡が残っており、前述の挙動を裏付けている。

次に、図-9の傾斜の時間変化をみると、Case1,2と比較してCase3では複数の傾斜計が短時間に大きく変動していることが分かる。天端にクラックが発生した196時間経過時点から、のり面全体が一気に変状したと考えられる。



正面から撮影
上方から撮影
写真-6 Case3の実験最終段階(Step4)の変状状況

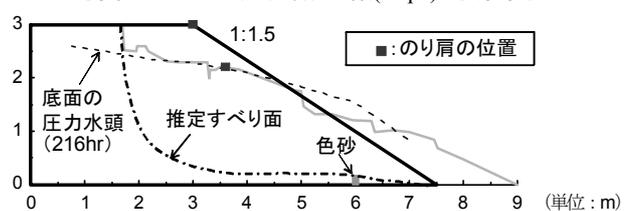


図-8 Case3の実験最終段階(Step4)の模型断面形状

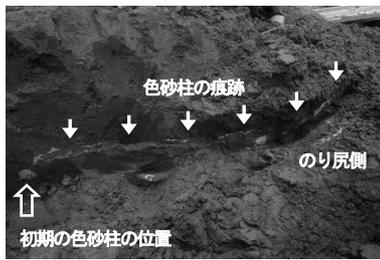


写真-7 Case3のすべり面

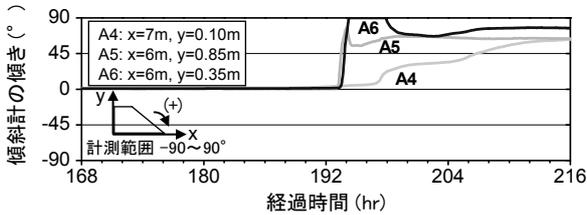


図-9 Case3の地盤内傾斜の時間変化(Step4)

すべりによる変状 (Case5)

Case5について、実験最終段階における変状状況を写真-8、図-10にそれぞれ示す。Case5は、Step2を省きStep1,3,4の条件で順次実施した。

堤体内浸潤線は、のり尻部における排水状況より、のり面勾配1:2のStep1では実験開始から552時間経過した時点、のり面勾配1:1.5のStep3では実験開始から264時間経過した時点で概ねのり尻部に到達したと考えられる。浸潤線がのり尻部に達した後も、内部侵食の発生は観測されなかった。Step4では、Step3からの累計938時間時点でのり面にクラックが発生し、1004時間時点で写真-8に示すすべりによる変状が発生した。写真-9に示すとおり、のり尻から水平距離1mの位置に入れた色砂は、のり面から0.3mの深さでのり尻方向に0.35mずれており、この位置ですべりが生じたと推察される。



写真-8 Case5の実験最終段階(Step4)の変状状況

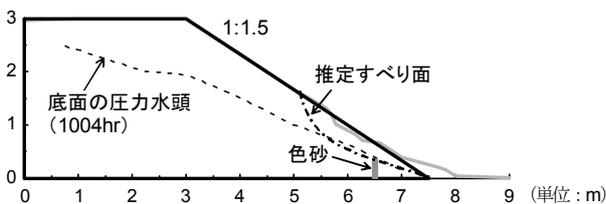


図-10 Case5の実験最終段階(Step4)の模型断面形状

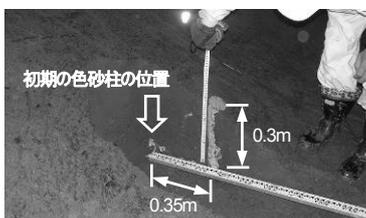


写真-9 Case5のすべり面

(2) すべりの発生条件

大型模型実験におけるすべり発生時の条件を土質と締固め度に応じて表-8に示す。実験結果から、細粒分含有率が高い堤体材料、緩い締固め度の場合については、すべりが発生しやすい傾向が確認できる。細粒分含有率が30%程度のいわゆる中間土の場合は内部侵食を伴ってのすべり、細粒分含有率が50%程度の土についてはすべりのみという違いがみられた。

表-8 すべり発生時の実験条件

		締固め度設定値 D_c	
		85%	90%
土質 (細粒分含有率設定値 F_c)	10%	Step1 内部侵食	Step1 内部侵食
	30%	Step4 内部侵食とすべりの複合	Step4 内部侵食
	50%	-	Step4 すべり

すべり発生の有無について、現行手法³⁾では一般全応力法による円弧すべり計算で判定している。今回の実験では、前項で述べた三種類の破壊形態がみられたが、これらについて現行の円弧すべり計算により、すべり発生のケースの抽出を試みた。模型実験で使用した土質材料・密度の条件について、圧密非排水条件(CUB)の三軸圧縮試験を実施した結果を表-9に示す。円弧すべりに使用する土質定数については、非排水強度としてCUB全応力強度、排水強度として圧密排水条件(CD)と同一とみなしてCUB有効応力強度を用いた。

現行手法にしたがって、粘着力 $c=1\text{kN/m}^2$ とCUB全応力の内部摩擦角を用いて円弧すべり計算を行ったところ、表-10のとおり内部侵食・すべりの変状形態の違いに関わらずいずれも円弧すべり安全率が1を下回った。現行手法は安全側の評価を与えることが確認された。仮に、粘着力 c にCUB全応力の試験値を用いて計算した場合、Case1を除いて、円弧すべり安全率は1.8程度以上で安全という評価となった。これは、非排水強度の設定にあたり低拘束圧下において過度の粘着力を見込んだ結果であると考えられ、このことからCUB全応力の c の試験値をそのまま見込むことは危険側の評価となることが分かる。

一方、CUB有効応力の c' と ϕ' を用いて円弧すべり計算を行ったところ、表-10のとおり比較的透水性が高い土質材料 ($F_c=10\%$, 30%) を用いたケースについて、円弧すべり安全率とすべりの発生状況が一致した。これは、透水性が高い土質材料を用いた均質な堤防のすべりが、排水条件で発生することを示唆している。

以上の結果から、現行手法は内部侵食とすべりのいずれの崩壊形態であっても、安全側の評価を与えることが確認された。今後、抽出された要対策区間に浸透対策を選定・設計する場合、大規模なドレーン工など過度な対策を回避するために、すべりの安全性評価において適切な土質定数を設定することが重要である。具体的には、比較的透水性が高い堤防について、堤体構造などを考慮の上、工学的判断により排水条件の土質強度を設定することが適切である場合も存在することが、本実験により示唆された。一方、土質定数を見直す場合、のり尻部の内部侵食の発生を抑制するため、堤体内浸潤線をのり尻

に到達させない対策である腰積み擁壁や小規模なドレーン工の設置も必要であり、あわせて検討が必要である。なお、土質定数の排水条件の設定における工学的判断の精度向上のため、実験の実施や被災事例の分析などを通じて、今後さらなる検討が必要である。

表-9 圧密非排水条件(CUB)の三軸圧縮試験結果

		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	
CUB	全応力	c_{cu} (kN/m ²)	1.8	28.2	10.9	57.0	14.6
		ϕ_{cu} (°)	12.1	16.1	15.2	13.8	19.0
	有効応力	c' (kN/m ²)	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0
		ϕ' (°)	26.1	35.2	36.3	37.1	38.4

表-10 円弧すべり計算結果

		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	
		Step1	Step1	Step4	Step4	Step4	
模型実験での変形状態		内部侵食	内部侵食	内部侵食 ↓ すべり	小規模な 内部侵食	すべり	
安全率	CUB 全応力	$c=1.0$ kN/m ²	0.55	0.66	0.43	0.47	0.64
		$c=$ 試験値	0.69	4.82	1.81	7.52	2.53
	CUB 有効応力	$c=1.0$ kN/m ²	1.01	1.34	0.85	1.09	1.25

3.3 まとめ

本節では、主にすべりの発生条件について、土質、締固め度、のり面勾配等を変えた模型実験により検討した。その結果、模型堤防の崩壊形態として「内部侵食」「内部侵食とすべりの複合」「すべり」が観察された。また、細粒分含有率が高い堤体材料、緩い締固め度の堤防ほどすべりが発生しやすい傾向にあることを確認できた。すべりの発生の有無について、現行手法は安全側に評価する傾向がみられた。

4. 結論

4.1 小型・大型模型実験の比較

小型・大型模型実験について、内部侵食とすべりの発生条件の比較を図-11、図-12にそれぞれ示す。内部侵食に関しては既往の研究より模型のスケール効果が無いと考えられたが、図-11より、細粒分含有率 F_c が30%の堤体の場合、同じ動水勾配では小型より大型模型の方が内部侵食は生じやすい傾向が確認された。内部侵食の発生には、平均動水勾配ではなく、局所的な現象も考慮する必要があることが窺える。一方、すべりに関しては、スケールが大きくなることですべり土塊の重量が増えることから、小型より大型模型の方がすべりは生じやすいと考えられる。 F_c が30%の堤体について図-11と図-12を比べると、内部侵食が発生した範囲の中で大型模型の1ケースのみがすべりに移行したことが分かる。いったん内部侵食が生じるとのり尻付近のせん断抵抗が著しく低下するとともに排水不良が生じる。のり尻における押さえがなくなった状態で堤体内の間隙水圧が上昇もあわせて発生し、深いすべりに至ったと考えられる。

4.2 成果と課題

降雨や河川水の浸透によって発生する河川堤防の浅い内部侵食や深いすべりについて、その発生メカニズムや発生条件を明らかにし、高精度な要対策区間の抽出、効

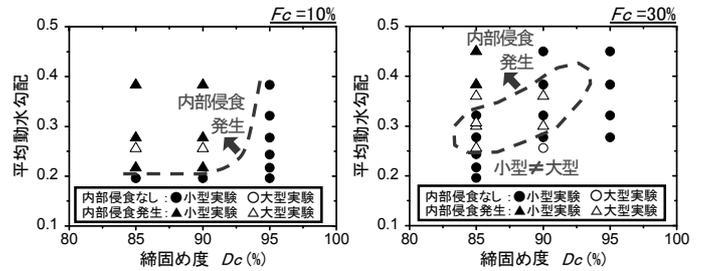


図-11 内部侵食発生条件に関する小型・大型模型実験の比較

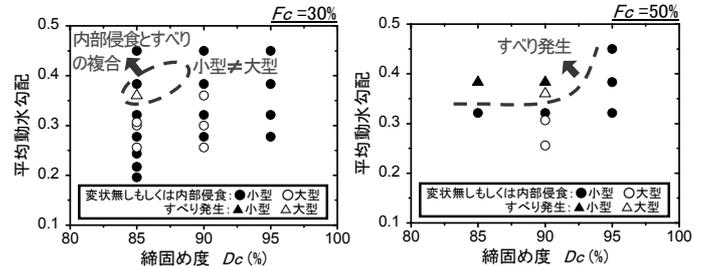


図-12 すべり発生条件に関する小型・大型模型実験の比較

率的な堤防強化工法の設計の実施を目的に、土質、締固め度、のり面勾配等の条件を変えて模型実験を実施した。

その結果、細粒分含有率が少ない堤体材料、緩い締固め度、急なりのり面勾配ほど内部侵食は発生しやすい傾向があることが確認できた。内部侵食の発生条件について、浸潤線の浸出点における単一土粒子の力のつり合いで考察したところ、浸透流による動水勾配と土粒子同士の摩擦力だけでは内部侵食の発生を必ずしも表現できないことが示唆された。今後、締固めの効果による土の変形強度特性や透水性等も考慮した評価手法をさらに検討する必要がある。

すべりは、細粒分含有率が高い堤体材料、緩い締固め度の堤防ほど発生しやすい傾向にあり、すべり単独の場合と内部侵食を伴う複合的なすべりに分類されることが確認できた。すべりの発生条件について、一般全応力法の円弧すべり計算で考察したところ、すべり面で発揮される土質定数に現行手法で用いられる非排水強度を用いると、安全側の評価になることが確認された。一方、土質定数に排水強度を用いた場合、透水性の高い堤防については、円弧すべり安全率とすべりの発生状況が一致する傾向にあった。破壊時における排水条件を考慮の上、適切な土質定数を設定することにより、より高精度な安全性評価、対策設計の合理化がはかれると考えられる。今後、土質定数の排水条件の設定における工学的判断の精度向上のため、被災事例の分析や実験の実施などを通じて、さらなる検討が必要である。

参考文献

- 赤井浩一：浸透水流による盛土裏法面の局部破壊について、土木学会論文集，No.36, pp.44-48, 1956.
- 久保田敬一：浸透水流による築堤斜面の安定性について、土木学会誌，41-3, pp.8-13, 1956.
- 財団法人国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き，2002.7.
- 森啓年、齋藤由紀子、佐々木哲也：堤防の内部侵食に関する小型模型実験，第46回地盤工学研究発表会，投稿中，2011.7.

(2011.5.19受付)