



地盤の浸透破壊問題 : 土粒子の移動による破壊

田中, 勉

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 28:99-130

(Issue Date)

2024-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100490314>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100490314>



地盤の浸透破壊問題 —土粒子の移動による破壊—

Seepage failure of soil – Failure by subsurface erosion –

田中 勉¹⁾

Tsutomu Tanaka

概要：地盤の浸透破壊は、「土粒子の移動による破壊」と「全体的な破壊」に大きく分類される。ここでは、土粒子の移動による破壊について、地盤工学分野における次の4つの小項目に分類して考察を行う：(1) パイピング現象(狭義のパイピング)、(2) 粒度の異なる二層の境界における細土粒子の移動(フィルターの設計基準ほか)、(3) 内部浸食(狭義の Internal erosion)、及び、(4) 進行性法くずれ(Progressive backward sloughing)。また近年、河川工学やダム工学の分野では、「土粒子の移動による破壊」は「Internal erosion (in a broad sense)」と表現され、上述の各小項目に対応して、それぞれ、(1) Concentrated leak erosion, (2) Contact erosion, (3) Suffusion (and Suffosion), and (4) Backward erosion と定義され議論されている。ここでは、水路工、頭首工、ダム工などの水利施設構造物及びその基礎地盤の浸透破壊問題について、「土粒子の移動による破壊」に焦点を絞り、用語法、現象の説明や意義(すなわち現象が本来意味するところ)について考える。

キーワード：地盤の浸透破壊、土粒子の移動による破壊、全体的な破壊、狭義のパイピング、フィルターの設計基準、狭義の内部浸食、進行性法くずれ、広義の内部浸食

1. 地盤の浸透破壊(広義のパイピング)

地盤工学の分野では、浸透流による地盤の破壊現象全般を表す言葉として、近年、浸透破壊(Seepage failure)という用語が用いられているが、当初Terzaghiの書籍¹⁾の中ではPiping(広義のパイピング)という用語が使われ、次の2つの現象に大きく分類されるとした。

<地盤の浸透破壊(広義のPiping)>

- (1) 地下浸食による破壊(Failure by subsurface erosion)
- (2) 膨れ上がりによる破壊(Failure by bulk heave)

また、その後、Yousefi ら²⁾はこの大分類項目を、

- (1) 局所的な破壊(Local failure)
- (2) 全体的な破壊(General failure)

と表した。

ここでは、浸透破壊を、Terzaghi の考え方に基づいて、大きく次のような分類項目：

(1) 土粒子の移動による破壊(Failure by soil-particles movement)

地下浸食による破壊(Failure by subsurface erosion)、および、局所的な破壊(Local failure)に同じ、

(2) 全体的な破壊(General failure)

膨れ上がりによる破壊(Failure by bulk heave)に同じ、

と表して表現の統一を図り、議論を進めることにする。

ここでは、以下、とくに浸透破壊問題における「土粒子の移動による破壊」について述べる。

さて、前者の大分類項目(1)に関して、地盤工学分野における定義法「土粒子の移動による破壊(地下浸食による破壊、または、局所的な破壊)」(2.1 節)のほかに、近年、河川工学の分野における定義法「広義の Internal erosion」(2.2 節)が用いられるようになってきた。すなわち、河川工学の分野における最近の定義法(2.2 節参照)では、「土粒子の移動による破壊」全般が「広義の Internal erosion」と呼ばれるようになってきた³⁾⁴⁾。

ここでは、まず次章において、両者の分類法、および、その関係について述べることにする。

2. 地盤工学分野における定義法「土粒子の移動による破壊」と河川工学の分野における最近の定義法「広義の Internal erosion」

2.1 地盤工学分野における定義法「土粒子の移動による破壊」

2.1.1 「土粒子の移動による破壊」における小項目分類

地盤工学分野においては、これまで「土粒子の移動による破壊」に関して鋭意研究がなされてきた。ここでは、後述の河川工学の分野における最近の定義法「広義の Internal erosion」(2.2 節)を参照して論題を合わせるべく、地盤工学におけるこれまでの研究内容を次のような小項目に分類して議論することにする。

- (1) パイピング現象(狭義のパイピング)、
- (2) 粒度の異なる二層の境界における細土粒子の移動(フィルターの設計基準ほか)、
- (3) 内部浸食(狭義の Internal erosion)、及び
- (4) 進行性法くずれ (Progressive backward sloughing)

2.1.2 「土粒子の移動による破壊」における小項目分類 一定義と第3章で取り上げる事項(内容)ー

ここでは、2.1.1 「土粒子の移動による破壊」の小項目(1)～(4)について、まず定義を与え、次に第3章で取り上げる事項(内容)について略述する。

(1) パイピング現象(狭義のパイピング)

浸透流によって、地盤や土構造物内にパイプ状の水みちが生じ、水流とともに土粒子が洗い流され、パイプ状の水みちが生じる現象をいう。パイピングは一般的に下流から上流側へ発達していくと考えられている。パイピングは、時間の経過とともに現象が進むことから、進行性破壊と呼ばれる。ここでは、Terzaghi の(広義の)Piping と区別するために、狭義のパイピングと表す。

フローティングタイプの頭首工においては、パイピング(狭義)、ルーフィング、チャネリングなどと呼ばれて問題となり、ダム堤体、ため池堤体や河川堤防においては、パイピング(狭義)が問題となる。河川堤防背後の地盤(例えば水田など)においては、サンドボイル(噴砂口)が問題となることがある。また、パイピング現象に対しては、浸透路長の考え方(Bligh の方法、及び、Lane

の方法など)が提案され利用されてきた。

(2) 粒度の異なる二層の境界における細土粒子の移動(フィルターの設計基準ほか)

粒度の異なる二層の境界を浸透水が流れるとき(特に細粒土から粗粒土の方向に浸透水が流れるとき)、細土粒子が粗粒土層を通して移動する現象をいう。このような問題に関して、フィルダムにおいては「フィルターの設計基準」が提案され、その基準には「砂時計の原理」や「平均間隙径」などの概念が深く関係する。また、「フィルターの設計基準」は、パイピングを防止したり、排水を調節したりするために地盤や土構造物に設置される押えフィルター、押え盛土、ドレーンなどにおいても満たされなければならない。逆フィルターの概念も重要である(逆フィルターは河床におけるアーマリング効果と類をともしめるものである)。

また、表面遮水層(or フィルターケーキ)の生成、すなわち、泥水中に浮遊している細粒分(微粒子)が砂質の堤体や地盤などの表面で補足されて(ろ過されて)地盤表面に堆積層が形成される現象(すなわち Filtering 現象)についても取り上げるべき重要な事柄である。例えば、

- ① ため池堤体や河川堤防(土水路)堤体上流表面における表面遮水層の形成(貯水境界面におけるヘドロの堆積)、
- ② ボーリング孔壁や連続地中壁の掘削時における自立効果、注入井戸孔壁におけるスミア・ゾーンの形成、
- ③ 川西市の加茂井堰(頭首工)において、堰体と下流側エプロンの隙間に発生した漏水噴出現象が、倒伏調査後止まった現象(上流側に堆積したヘドロによる遮水効果と考えられている)などがある。

(3) 内部浸食(狭義の Internal erosion)

ある一つの土の中の細土粒子が浸透水の通過に伴って移動する(すなわち、細粒分が粗粒の土粒子骨格で構成される間隙を通して移動する)現象をいう。地盤は、細粒分が抜けることによって、透水係数が増加したり、地盤自体が沈下したり、不都合な事象を引き起こすことになる。

(4) 進行性法くずれ(Progressive backward sloughing)

進行性法くずれはパイピングに密接な関係をもつ堤体の被害で、古い均一型アースダムで見られる⁵⁾。まず下流法尻部分がいづらか浸食され、つぎにこれが落ち込んで滑るものである。この現象が、時間経過につれて上流側に向かって進行していき、浸透水の上流側浸入点に到達すると貯水が越流して破壊することになる。

堤体において、粘性土では1~2 mを超える長いパイプ状の水みち(空洞)がトンネル状に安定して生じるが、砂質土では20~30 cm 程度の水みちができては崩れ去る現象が、上流の浸透水流入部分に向かって進んでいく⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

砂質土を用いた二次元堤体に関する実験⁶⁾によると、下流側斜面(浸潤線のわずか下方)の浸透水が流出する浸出点で、小さなパイピングが起こり上部の砂質土が下流方向へ流動化する(Fluidized)現象がみられる。この現象が、浸潤線のわずか下方を上流に向かって時間をかけて進行していき、最終的に上流側斜面に達して堤体が越流破壊する。Progressive backward sloughing は、砂質土の場合、下流法尻付近におけるパイピングと砂粒子の流動化に始まり、パイピングと砂粒子の流失、及び、法くずれが上流側に向かって進んでいく現象といえる。

2.2 河川工学の分野における最近の定義法「広義の Internal erosion」

2.2.1 「広義の Internal erosion」における小項目分類

ここでは、河川工学の分野における最近の定義法「広義の Internal erosion」について述べる。浸透破壊問題は、近年、「地盤工学と河川工学の分野の研究者が集う国際会議 ICSE (International Conference on Scour and Erosion)」や「ダム関係土木構造物の設計や施工などに関する技術について議論する大ダム会議」などにおいて、議論されるようになってきた。そして、河川工学の分野において、土粒子の移動による浸透破壊は、「広義の Internal erosion」と統一的に定義され、次のような小項目に分類される³⁾⁴⁾。

- (1) Concentrated leak erosion,
- (2) Contact erosion,
- (3) Suffusion, 及び,
- (4) Backward erosion

ここに、地盤工学で用いられてきた内部浸食「狭義の Internal erosion」と区別するため「広義の Internal erosion」と表記している。

<「広義の Internal erosion」と「土粒子の移動による破壊」の関係>

河川工学の分野における定義法「広義の Internal erosion」の各項目(1), (2), (3), (4)は、それぞれ、地盤工学分野における定義法「土粒子の移動による破壊」の各項目(1), (2), (3), (4)に対応している。

2.2.2 「広義の Internal erosion」における小項目分類 一定義と各項目の説明ー

ここでは、2.2.1 「広義の Internal erosion」の各項目(1)～(4)について、まず定義を与え、次に各項目について説明を加える。

(1) Concentrated leak erosion (集中的な漏水浸食) (パイピング現象)

土中に連続的なパイプ状の水みち(or 空洞 or パイピング孔)が形成され、集中的に水と土粒子が流れる現象をいう。二次元矢板締切り地盤の場合には、締切り矢板近傍で砂粒子と水の混合物の集中的な層状流れ(Sheet flow)が発生する。また、堤体や地盤の場合には、粘性土では2 mを超える長いパイプ状の水みち(空洞)がトンネル状に安定して生じるが、砂質土では20～30 cm程度の空洞ができては崩れ去る現象が生じる。

(2) Contact erosion (接触浸食) (フィルタリング現象)

細粒土層と粗粒土層の間で起こる。細粒の土粒子が粗粒の土粒子間隙を通過して流失する現象をいう。ダム工学におけるフィルターの設計基準と関係している。

(3) Suffusion (サフュージョン) (細土粒子の流失現象)

中間粒径の欠けた階段粒度の土や広範囲に粒径が分布する(均等係数の大きな)土において、細粒土が粗粒の土粒子骨格中を移動して流失する現象をいう。すなわち、浸透流及び浸透力による「細土粒子の移動やそれに伴う土構造の再配列(再構成)」をいう。また、その現象がさらに進行して、「多量の細土粒子の移動とそれに伴う地盤表面の陥没やパイピングが発達すること」を Suffosion と呼ぶ⁸⁾。Suffosion は、土粒子の移動とそれによる間隙空間の Clogging や地盤表面の陥没現象として捉えられる。

(4) Backward erosion (後退浸食) (進行性法くずれ)

進行性法くずれはパイピングに密接な関係をもつ堤体の破壊現象である⁵⁾。まず下流法尻部分がいづらか浸食され、つぎにこれが落ち込んで滑るものである。この現象が起これと、斜面は、比較的急な勾配となり、さらに貯水池からの浸透水で飽和されて落ち込み、急峻で不安定となる。この現象が時間経過とともに次第に上流側に向かって進行していく。堤体の残留部分が、この進行性法くずれによって非常に薄くなり(すなわち、浸透流で流失して)最終的になくなると、堤体は越流破壊を起こす。

これらの分類名称は、将来、統一されるものと考えられるが、次の第3章では、2.1.1 にリストアップしたところの、これまで地盤工学分野で研究されてきた「土粒子の移動による破壊」における各項目(1)～(4)について詳しく議論する。

最後にまとめとして、まず第1章で述べた「浸透破壊に関する定義」について、本論文、Terzaghi¹⁾、及び、Yousef et al.²⁾によるものを整理すると Table 2.1 となる。次に第2章で述べた「土粒子の移動による破壊に関する定義」について、本論文、及び、River Engineering (and Dam Engineering)^{3) 4)}によるものを整理すると Table 2.2 となる。

Table 2.1 浸透破壊に関する定義

本論文	Terzaghi	Yousefi et al.
浸透破壊 (Seepage failure)	Failures by piping (or Piping failure)*	
1. 土粒子の移動による破壊	1. Failures by subsurface erosion	1. Local failure**
2. 全体的な破壊	2. Failures by heave	2. General failure**

* Terzaghi¹⁾ は piping を(広義の)パイピング(piping of a broad sense)として用いている。

** Yousefi et al.²⁾ は締切り矢板に接する砂地盤の破壊を Local boiling と General boiling に分類した。ここでは、Local failure (局所的な破壊) 及び General failure (全体的な破壊) の用語を用いる。

Table 2.2 土粒子の移動による破壊に関する定義

本論文	River Engineering (and Dam Engineering)
土粒子の移動による破壊	Internal erosion in a broad sense***
(1) (狭義の)パイピング****	(1) Concentrated leak erosion
(2) 粒度の異なる二層の境界における細土粒子の移動*****	(2) Contact erosion
(3) (狭義の)内部浸食 (Internal erosion in a narrow sense)	(3) Suffusion*****
(4) 進行性法くずれ (Progressive backward sloughing)	(4) Backward erosion

*** River Engineering (and Dam Engineering)^{3) 4)} では、Internal erosion は(広義の)Internal erosion として用いられている。(広義の)Internal erosion とは土粒子の移動による破壊全般をいう。

**** (狭義の)パイピング(Piping in a narrow sense)とは、土中にパイプ状の水みちが生じその中を浸透水と土粒子が流れる現象をいう。

***** フィルターの設計基準と関係する。

***** Suffusion 現象がさらに進行して、「多量の細土粒子の移動とそれに伴う地盤表面の陥没やパイピング孔の発生・進展」が起こることを Suffosion と呼ぶ。

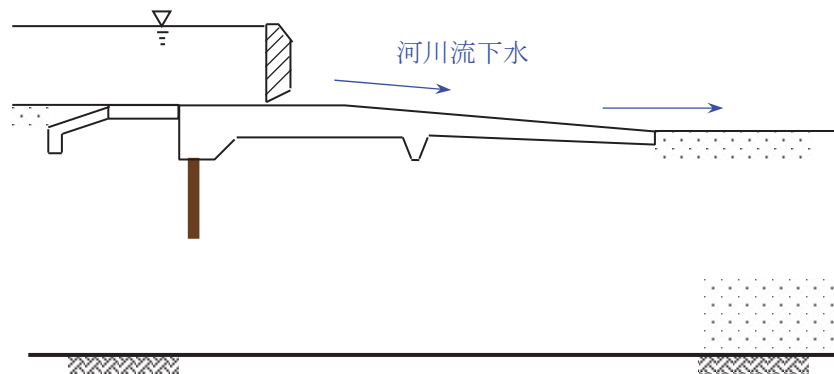
3. 土粒子の移動による破壊 (Failure by soil-particles movement)

3.1 パイピング現象(狭義のパイピング)

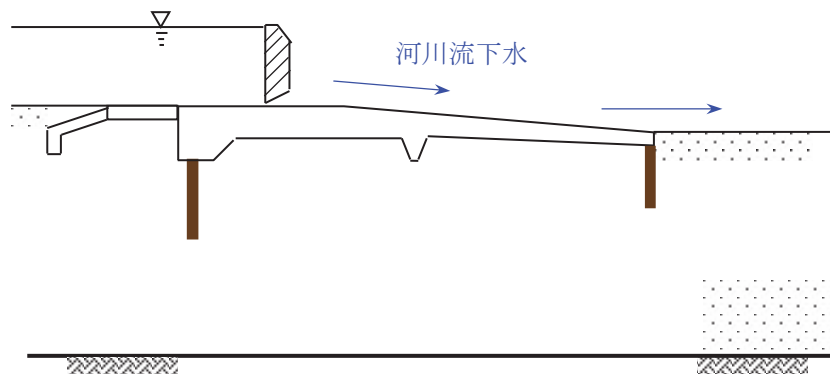
「パイピング」という用語は、以下、狭義のパイピングを表すものとして使用する。

3.1.1 フローティングタイプの頭首工におけるパイピング現象の発生

Fig.3.1 に示すように、岩盤などの下部不透水性境界が深く止水壁が岩着していない場合、堰体は透水性砂礫地盤上に載った状態となる。このような状態の頭首工をフローティングタイプの頭首工という。基礎地盤中には浸透水が流れ、構造物や基礎地盤は流量(漏水量)、圧力(水圧)、浸透破壊に対して安全に設計されなければならない。Fig.3.1 は、フローティングタイプの頭首工において、下流側エプロンの下流端に、(a) 止水矢板がない場合、及び、(b) 止水矢板がある場合に分けて示している。パイピング現象は、一般的に、下流側の出口部分から始まると考えられている⁹⁾。したがって、土粒子の移動現象が開始するかどうかは、浸透水の出口部分において、(a) の場合には土粒子の移動開始条件¹⁰⁾ (出口動水勾配 i_e = 限界動水勾配 i_{eL}) を超えるかどうか、(b) の場合には Terzaghi の角柱土塊¹¹⁾ が力の釣合い条件を超えるかどうかで判定できる。そして、土粒子移動開始条件、角柱土塊の力の釣合い条件となるときの水頭差を限界水頭差と呼ぶ(ただし、Bligh の方法¹²⁾ や、Lane の方法¹³⁾ を基に設計された場合には、パイピングに対して大きな安全率を有しており、FEM 解析による浸透破壊安定解析結果は上記(a), (b)の条件を大きく下回ることになる)。



(a) 下流側エプロンの下流端に止水矢板がない場合



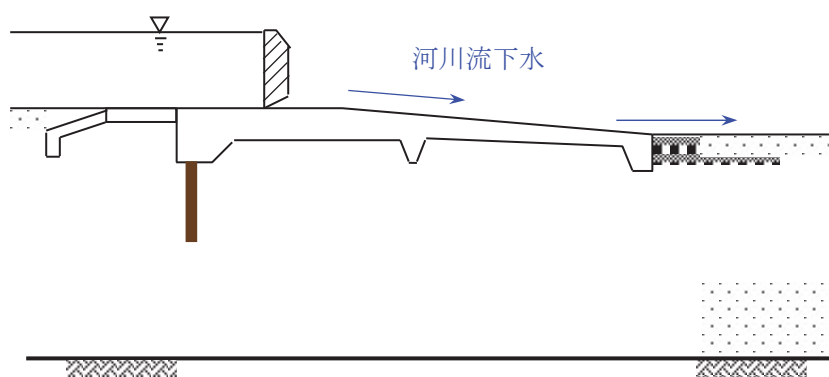
(b) 下流側エプロンの下流端に止水矢板がある場合

Fig.3.1 フローティングタイプの頭首工

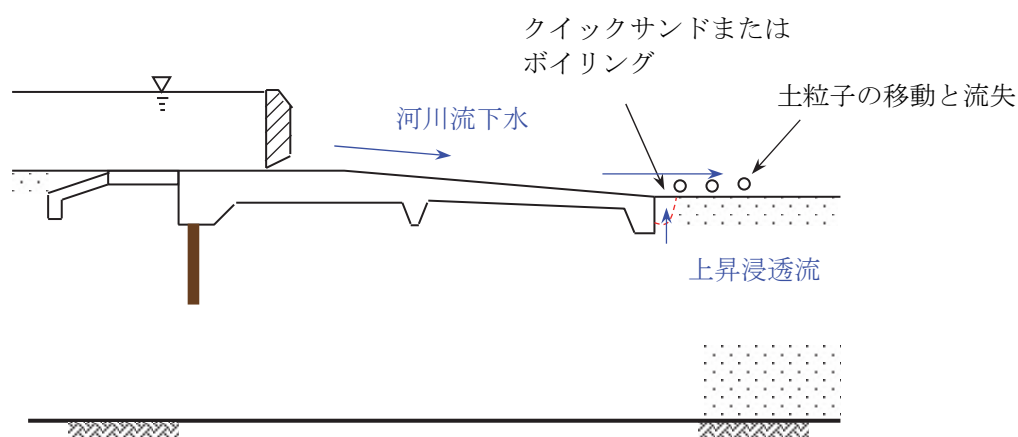
(1) パイピング, ルーフィング, チャネリング

<パイピング現象による破壊プロセス No. 1>

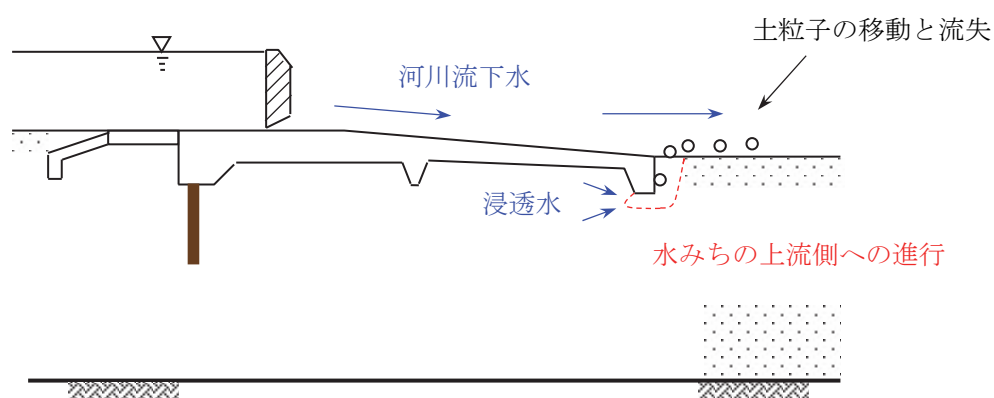
ここでは、フローティングタイプの頭首工堤体下部におけるパイピング現象について考える。土粒子の移動による破壊は、前述のとおり Fig.3.2 に示すように、下流から上流に向かって進行すると考えられている⁹⁾。下流側地盤の浸透水の出口部分でクイックサンドやボイリング現象が生



(a) 初期条件

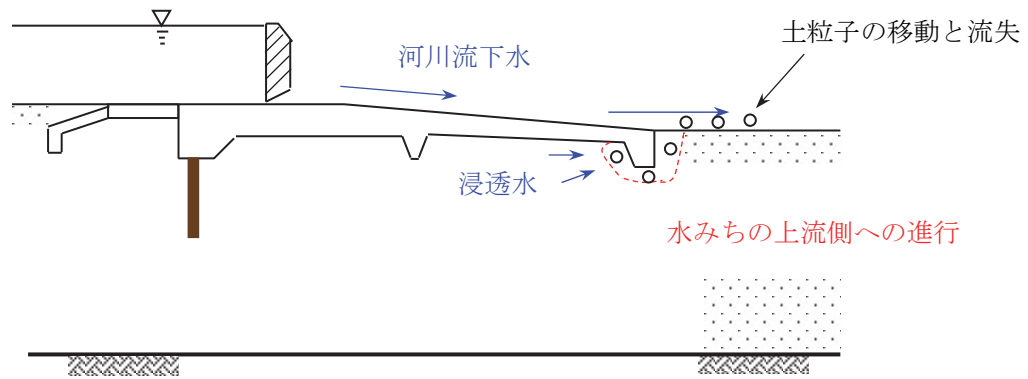


(b) 下流側浸透流出口部分における浸透破壊の発生

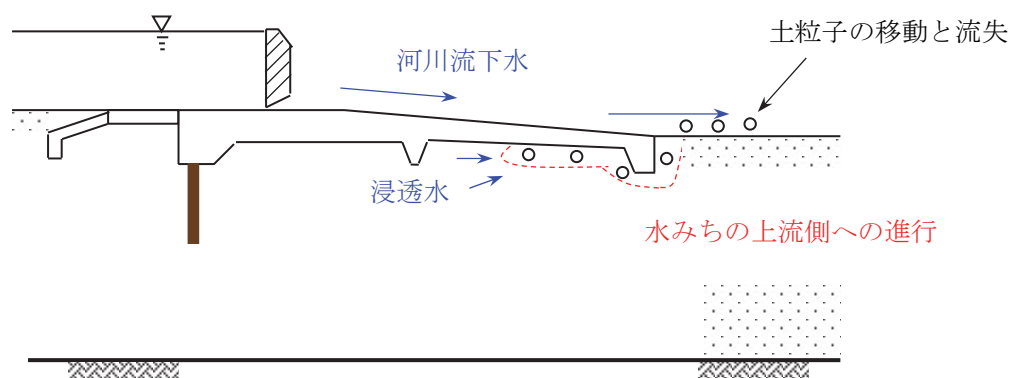


(c) 水みちの上流側への進行(その1)

Fig.3.2 フローティングタイプの頭首工堤体下部におけるパイピング現象の進行 (Continue)



(d) 水みちの上流側への進行(その2)



(e) 水みちの上流側への進行(ルーフィング現象)

Fig.3.2 フローティングタイプの頭首工堤体下部におけるパイピング現象の進行 (Continued)

じ、不安定となった土粒子が河川流下水によって洗い流され、その背後にある、地盤内とくに構造物底面境界に沿ってパイプ状の水みちが形成され、上流側に向かって進行する。この現象は進行性破壊(Progressive failure)の形態を示し時間の経過とともに現象が進んでいく。このような現象はパイピングと呼ばれ、特に構造物底面境界に沿って生じる場合、ルーフィングと呼ばれる。

水みちは時間経過とともに上流側へ進んでいき、上流側地盤表面に達すると、吸込み口が形成される。吸込み口付近の水面には渦を生じ(場合によっては空気を吸い込みながら)、水が一気に流入し地盤が破壊する。水みちが下流側から発達し上流側地盤に達する過程には時間を要し、建設後 30～50 年経ってパイピング破壊が起こることもある。水みちの安定性や大きさは土質により異なり、一般的に、粘性土ではトンネル状に安定していて長延長であり、砂質土では崩れやすく規模が大きくなりやすい(3.1.2 参照)。以上が、一般的な水みちやパイピング孔の形成過程である。

Fig.3.2 で示される<パイピング現象による破壊プロセス No. 1>は、Ashley Dam, Elwha River Dam, and Hauser Lake Dam などの破壊事例に基づき、Terzaghi & Peck⁹⁾ によって示された基本的なパイピング・プロセスである。

<パイピング現象による破壊プロセス No. 2>

一方、種々の原因によってエプロンの下部などに独立して空洞(水みち)が生じ、それがパイピングの経路として繋がっていく現象は、チャネリング(Channeling)と呼ばれる。水利施設構造物下

部における空洞発生の原因として、主に次の4つが考えられる。

(a) 河川流下水による表層土粒子の吸出しと洗い流し

頭首工下流部の浸透水出口部分(エプロン及び護床工の境界部分)の表層土粒子は、跳水や洪水時の河川流下水によって負圧が生じて吸い出され下流へ流される可能性がある¹⁴⁾。

(b) コンクリート床板や堰体下部における空洞形成

コンクリート構造物とそれに接する下部地盤の境界部分の取り付けが悪く空洞が形成されたり、時間経過につれてコンクリート床板下の地盤が収縮沈下し空洞が形成されたりする。地震による下層地盤の沈下も考えられる。基礎地盤が軟弱な場合には、さらに収縮の可能性が高くなる。(昭和20年代後半～30年代前半に建設された頭首工においては、基礎地盤が軟弱な場合、上部コンクリート構造物(床板や堰体)が木製の支持杭などで補強されていることがある。)

(c) コンクリート床板の目地破損により発生した隙間とそれを通した水及び土粒子の移動

下流側エプロン(コンクリート床板)の目地が破損し、その隙間を通して表流水が流入したり、浸透水が流出したりする。これらの現象が土粒子の移動を伴って起こると床板下部に空洞やパイピング孔が生じることになる。

(d) 護床工下部の地盤材料の流失

護床工下部の地盤材料が流失し、護床工が沈下することがある。それに伴って、エプロン下部の浸透路長が減少すること、さらに護床工下部地盤の土粒子移動に伴って(土粒子移動に引きずられて)護床工直近のエプロン下部の土粒子が下流側へ流失すること、などが考えられる。

これらの現象(a)～(d)は、連関して起こることもあり独立して生じることもある。また、大きな変動は想定された最大値を越えて水頭差が作用したとき、地震や洪水など大きなイベントがあったときなどに起こるものであり常時生じているわけではない。＜パイピング現象による破壊プロセス No. 2＞は、このような種々の要因によって基礎地盤の各所に空洞(水みち)が形成され、これらの空洞(水みち)やパイピング孔が繋がって下流から上流へ連続したパイピング孔となる現象(チャネリング現象)によってパイピングが発達していくプロセスをいう。そして、上流側吸込口から下流側流出口に連続した空洞(水みち)やパイピング孔の中を、まわりの土粒子を巻き込みながら大量の水が流れることになる(すなわち、パイピング破壊へと繋がることになる)。また、このようにして起こるチャネリング現象には長時間を要することがある。

(2) 浸透路長の考え方(Blighの方法、及び、Laneの方法)

パイピングを防止するための算定式として、Bligh (1910)の方法¹²⁾、Lane (1935)の方法¹³⁾がある。

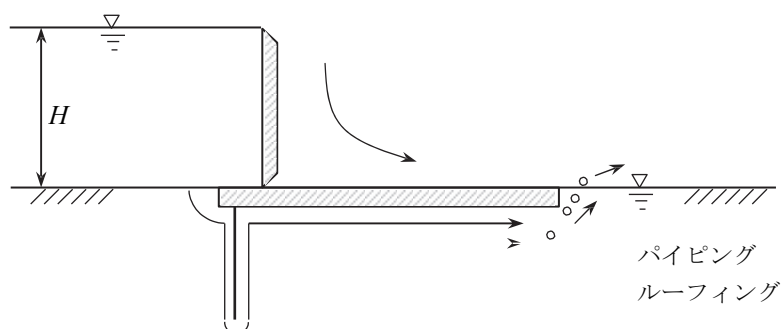


Fig.3.3 パイピングとルーフィング現象の説明

透水性地盤上に堰を設けると、上下流の水頭差 H によって、基礎地盤内に浸透流が生じる。この水流によって、地盤を構成する細土粒子が浸透水の出口部分から移動、流失し、地盤内に水孔が生じることがある(この現象は、河川越流水により加速される)。この水孔が基礎地盤内部へ進行し空洞ができると、やがて基礎の破壊に至る。このような作用をパイピング(貫孔作用)という。

ブライ(Bligh, 1910)¹²⁾、及び、レーン(Lane, 1935)¹³⁾は、構造物と基礎地盤の接触面(基礎面)に沿う浸透が最も危険であると考えた。そして、パイピングの防止のため、堰基礎面(Fig.3.3)や取付け擁壁の背面に沿う浸透路の長さ(クリープ長(Creep length))を確保する必要があると考えた。

ブライ及びレーンは、破壊した構造物、破壊していない構造物について統計的に整理し、次のような結果を得た。

① ブライの方法 (Bligh, 1910)

クリープ比 (Creep ratio) C_c を、

$$C_c = \frac{L}{H} \quad (3.1)$$

と定義する。ここに、

L : 堰の基礎面に沿って測った浸透路長(実際の浸透路とは異なる)

H : 上下流の最大水位差

である。パイピングを防ぐには、クリープ比 C_c が基礎地盤の土質に応じて定められた値 C (Table 3.1)以上、すなわち、

$$C_c \geq C \quad (3.2)$$

であればよい。

② レーンの method (Lane, 1935)

地盤の鉛直方向と水平方向の透水性を加味して、次のような重みつきクリープ比(Weighted creep ratio) C_w を考える。

$$C_w = \frac{L_w}{H} \quad (3.3)$$

ここに、

$$L_w = \frac{k_v}{k_h} L_h + L_v: \text{重みつきクリープ長 (Weighted creep length)}$$

k_h : 水平方向の透水係数

k_v : 鉛直方向の透水係数

L_h : 水平、または、ゆるい傾斜(45°以下)のクリープ長

L_v : 鉛直、または、きつい傾斜(45°以上)のクリープ長

である。一般に、 $k_v/k_h = 1/3$ である。パイピングを防ぐには、①と同じように、重みつきクリープ比 C_w が基礎地盤の土質に応じて定められた値 C' (Table 3.1)以上、すなわち、

$$C_w \geq C' \quad (3.4)$$

であればよい。確保すべき浸透路長は、(3.2), (3.4)式を満たすように決定する。

<浸透路長の計算方法>

浸透路長の計算方法(ブライの L , レーンの L_w)を Fig.3.4 を参照して示すと次のようになる。

ブライ : L (Plain creep length)

$$L = AB + BC + CD + DE + EF + FG + GH + HI + IJ + JK$$

レーン : L_w (Weighted creep length)

$$L_w = \frac{1}{3}(BC + EF + GH + HI + IJ) + (AB + CD + DE + FG + JK)$$

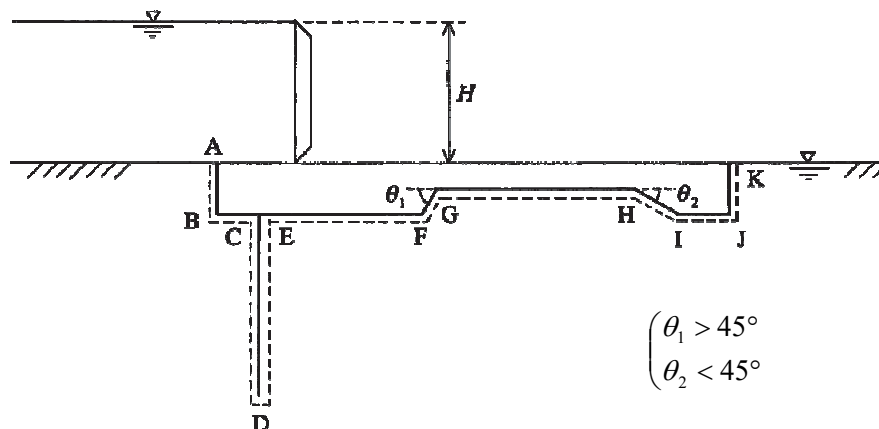


Fig.3.4 ブライ及びレーンの浸透路長

Table 3.1¹⁵⁾ Bligh の C と Lane の重みつきクリープ比 C'

基礎地盤	Bligh の C	Lane の C'
微細砂または沈泥	18	8.5
細砂	15	7.0
中砂	—	6.0
粗砂	12	5.0
微粒礫	—	4.0
中粒礫	—	3.5
礫及び砂の混合	9	—
玉石を含んだ粗流礫	—	3.0
玉石と礫を含んだ転石	—	2.5
転石、礫と砂	4~6	—
軟粘土	—	3.0
中粘土	—	2.0
重粘土	—	1.8
硬粘土	—	1.6

(沈泥、微細砂、細砂、中砂、粗砂の粒径は Table 3.2 に示すとおりである。)

Table 3.2 各種土質における粒径と透水係数の概略値¹⁵⁾

区分	粘土	沈泥	微細砂	細砂	中砂	粗砂	小砂利
d (mm)	0~0.01	0.01~0.05	0.05~0.10	0.10~0.25	0.25~0.50	0.50~1.0	1.0~5.0
k (cm/s)	0.000003	0.00045	0.0035	0.015	0.085	0.35	3.0

また、止水壁を2列に入れるときに、浸透路長の算定において注意すべき点として次の事柄が指摘されている¹⁵⁾。「止水壁を2列に入れるときは、二つの止水壁の長さの合計よりその間隔を大きくすることが必要で、もしそれよりも間隔が狭いときは、垂直浸透路の長さを止水壁の長さの2倍にして計算してはならない。」

Bligh や Lane の方法がまだ考案されていなかった時代には、浸透路長が短いという理由によって浸透破壊が起こっていた^{16)~18)} (Ashley dam 1909, Hauser Lake Dam 1908, Elwha River dam 1912 の決壊など)。

(3) Ashley Dam の破壊事例¹⁶⁾ が教えるところ

Ashley Dam は、Massachusetts 州 Pittsfield に位置するダムである(ダムといっても頭首工に近い構造物である)。地盤は、不透水性岩盤上に堆積した粘土を挟む細砂で構成されていた。この構造物は、スラブバットレス式ダムで、上流側止水壁(深さ 2.74 m)と、下流側止水壁(深さ 2.13 m)を有する鉄筋コンクリート底版の上に建てられていた。破壊は、1909 年、上流側水位が 10.06 m になったときに、突然水がダムの底をくぐって奔流して起こり、破壊後は地盤に長さ 15.85 m、最深部の深さ 6.10 m の空洞を生じ構造物はその上に架け渡された形になった。破壊形態は「パイピングによる破壊プロセス No. 1」による(3.1.1(1)参照)。この破壊形態「パイピングによる破壊プロセス No. 1」には、このほかに Elwha River Dam, Hauser Lake Dam などの事例がある。これらの構造物は、Bligh (1910)及び Lane (1935)によって浸透路長の考え方が提案されるより前に建設されたものである。ここで、Ashley Dam の事例を、Bligh (1910)の方法、Lane (1935)の方法によって判定すると、
 <Bligh (1910)の方法、Lane (1935)の方法による判定>

土質(薄い粘土層を挟む細砂)に対して、

Bligh (1910)の方法 $C_c = L/H = 2.238 < 15 (= C)$

Lane (1935)の方法 $C_w = L_w/H = 1.288 < 7 (= C')$

であり、両者とも条件を満たしていないことがわかる。Ashley Dam の事例について、FEM 浸透流解析および浸透破壊に対する安定解析が行われているが¹⁶⁾、Prismatic failure の考え方¹⁹⁾による地盤の浸透破壊安全率 F_s は 1.13~1.41 (摩擦考慮なし)、1.42~1.77 (摩擦考慮あり)であり、(建設後しばらくの間)短期的には地盤が安定であると考えられるが限界状態ぎりぎりの状態にあることがわかる。ここでの値は、地盤の水中単位体積重量 γ が 0.8~1.0 gf/cm³ の場合に対応している。

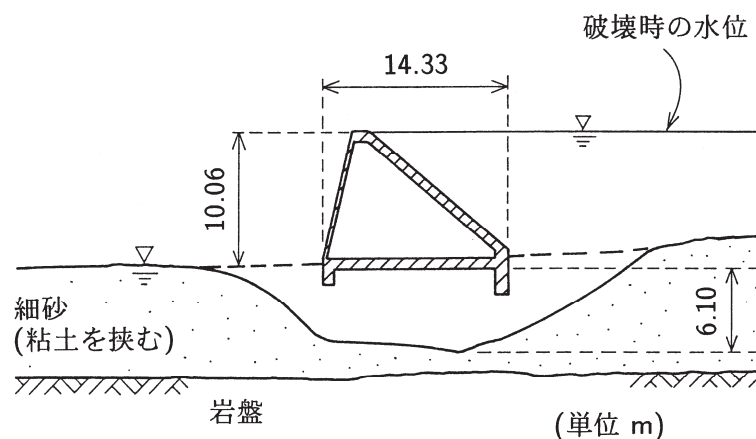


Fig.3.5 Ashley Dam の概略図¹⁶⁾

さて、Ashley ダムの破壊事例では、頭首工堰体が橋のように架け渡された状態で下部基礎地盤の土粒子が抜けたと報告されている。堰体の沈下を伴わないで基礎地盤だけが流失する現象があることに注意すべきである。「この事柄は、堰体やエプロンの沈下量計測では基礎地盤の浸透破壊を予測できないこと」を意味している。この状況は次のように説明することができる。

フローティングタイプの頭首工において、エプロンなどのコンクリート床板が打設されるときにはコンクリートは地盤に支持されているが、一旦コンクリートが固まってしまうとまわりの構造物に支持される場合がある(これは、コンクリート床板が、堰体、護岸工、岩盤まで基礎杭が打たれ強固になった堰柱、などと一体化され堅固なコンクリート構造体が出来上がっている場合である)。この場合、下方の基礎地盤の土粒子が一部分で流失して空洞(水みち)が生じてても、コンクリート床板には表面上沈下現象が現れない。そして、コンクリート床板と基礎地盤の間には空洞(水みち)が残ったままとなる(いわゆるルーフィングが生じる)。一方、護床工は一般的に下方基礎地盤に支持されているので、下方基礎地盤の土粒子の移動・流失は護床工の沈下に直接結びつく。多くの頭首工において護床工の沈下が目につくのはこのためである。護床工の沈下は、一般的に、必ず起こるものであり問題がないと考えられているが、護床工の下方基礎地盤の土粒子の移動が、エプロン下部の土粒子移動(パイピング)を誘発することがあるので注意が必要である。このようにコンクリート床板(エプロン)と護床工には支持される状況に大きな差異がある。

これら Bligh や Lane の算定式は、研究成果が出された時点までに建設され供用されていたまたは供用されている頭首工について、実際に破壊が起こった事例と、破壊が起こらなかった事例について整理し、破壊が起こらないためには浸透路長(Creep length)をどのような値にとるべきかをまとめたものである。すなわち、これらの研究結果には建設からの経過年月(年数)の因子が入っていることになる。Bligh の研究時点で例えば 30 年経過して未破壊の事例が入っていたとすれば、提示された値には、パイピング破壊が 30 年間は起こらないという条件が入っていることになる。Lane の論文は Bligh の論文の 25 年後にまとめられたものであるので、同じ事例が入っている場合には、Lane の式では Bligh よりもさらにプラス 25 年の安定性が担保されることになる。このような観点に立つと、Bligh の方法や Lane の方法には、パイピングに対して 50~60 年、あるいは、70 年近くの安定性を担保する条件が入っていることになる。日本においては、近代的なフローティングタイプの頭首工が、昭和 30 年(1955 年)頃からたくさん建設されてきた経緯があり、当時建設された頭首工は現時点(2024 年時点)で 60 年以上の年齢を重ねていることになる。現在、当時建設された数箇所の頭首工について、パイピング発生事例が報告されているところであるが²⁰⁾、日本においては、まさに浸透破壊に対して注意すべき時期に来ているのかもしれない。

建設当初、浸透破壊に対して十分安定であっても、実際には、建設後長い年月が経過する間に、想定を超える大きな洪水流量の流下や水頭差の負荷、近傍における地震の発生による基礎地盤の沈下、年代経過に伴う材料の劣化(すなわち、エプロン(コンクリート床板)などの亀裂形成や目地破損)、などによって経年的に浸透破壊安定性が損なわれていることがあり、パイピングが進行している可能性がある。したがって、たとえ建設当初、標準断面について「有限要素法などを用いて浸透破壊に対する限界水頭差」が正確に求められたとしても、その値よりも小さな水頭差において浸透破壊が起こる可能性がある。浸透破壊に対して正確な安定性評価を行うためには、これらの計算において、50~60 年近くにわたる経年進行的な土粒子移動に伴う水みち形成等のシナリオを解析条件に取り入れる必要があることになる。

(4) 逆フィルター (インバーティッド・フィルター(Inverted filter)²¹⁾)

矢板で締め切られた下流側掘削地盤や取水堰の下流側地盤の表層など、上昇浸透流のある地盤において、上層へ行くにしたがって河床砂礫が粗粒化する現象をいう。これは、表層の砂礫が上昇浸透流を受け細粒分が河川表流水などによって洗い流され粗粒になろうとする現象である。この

ような土層構成は上昇浸透流のある地盤の上部に押えフィルターを設置した場合と力学的に同一の構図であるといえる (Fig.3.6 参照) (Terzaghi & Peck⁹⁾ は Loaded inverted filter と表記して, Loaded filter と Inverted filter を同義のものとしてとらえている)。上昇浸透流を受けた地盤が浸透破壊に対して自ら安定になろうとすることを意味している。基礎の表面付近が細かい粘着力の小さい砂やシルトの場合には, 流出点において天然のフィルターを形成する傾向があるためフィルターは不要であるとも言われる²¹⁾。ただし, 過信することは禁物である。また, 逆フィルターは, 下部土層を上昇浸透流や河川表流水に対して安定化しようとするものであり, 力学的には押えフィルターと同一の効果があるが, フィルターの設計基準(3.2.1)を満たすものではない。一方, 押えフィルターはフィルターの設計基準を満たすように設計されるものである。

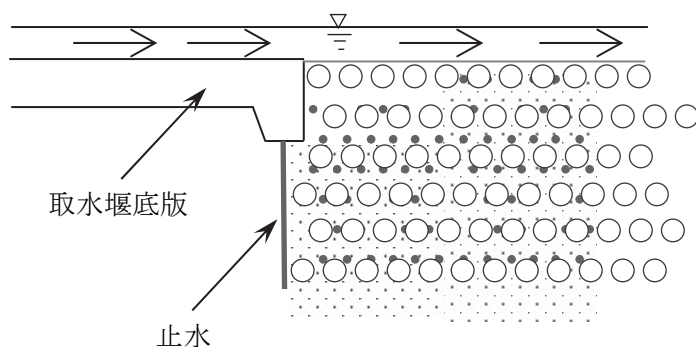


Fig.3.6 インバーティッド・フィルターの形成

3.1.2 ダム堤体, ため池堤体や河川堤防に発生するパイピング

Fig.3.7 に示すように, 均一な土質材料からできたため池堤体や河川堤防では, 下流側斜面に浸透水の浸出面 (浸潤面, Surface of seepage) が生じる。下流側斜面においては, 浸透水が, 斜面を斜め下方向外側に横切るため, 土粒子は流速方向すなわち斜面に斜め下方向外側への浸透力を受ける。下流側斜面上の土粒子は, 支持されるものがないので, 浸透力が大きくなると, 流速方向に飛び出す (流失する) ことになる。さらに, 場合によっては背後の土粒子が順次流失し, パイプ状の水みちが生じ現象が上流に向かって進行していく。3.1.1(1)と同様に, この現象はパイピング(Piping)と呼ばれる (Fig.3.8)。浸出面が生じる可能性のある下流側斜面は, Fig.3.9 に示すように, 押え盛土 (Loading berm) または押えフィルター (Loaded filter) を設置することによってパイピングの発生を防

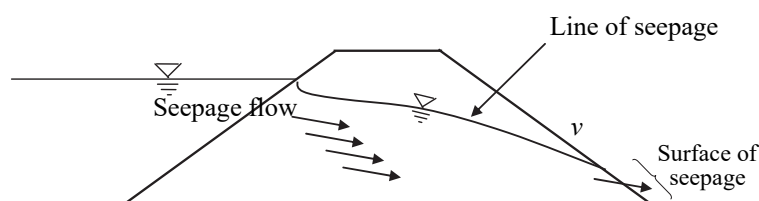


Fig.3.7 下流側斜面における浸出面の発生

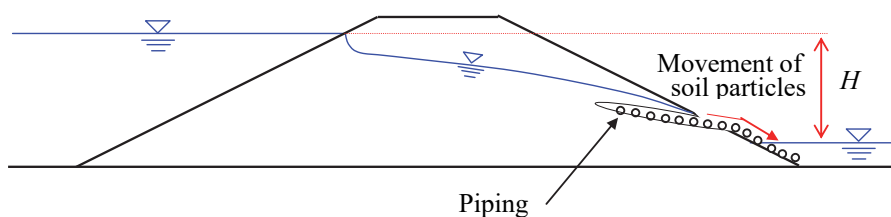


Fig.3.8 パイピングの発生

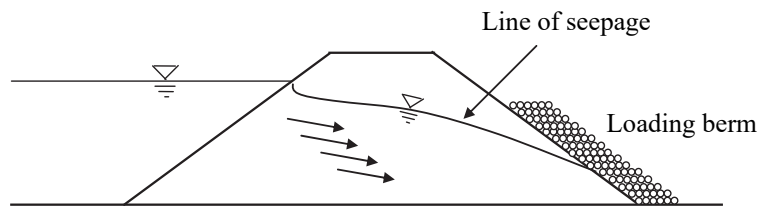


Fig.3.9 押え盛土の設置

ぐ必要がある。または、下流側斜面上に浸出面を生じさせないために、堤体内にドレーンが設置される。押え盛土、押えフィルターやドレーンは3.2.1 フィルターの設計基準を満たす必要がある。

堤体や地盤の場合には、粘性土では2 mを超える長いパイプ状の水みち(空洞)がトンネル状に安定して生じるが、砂質土では20~30 cm 程度の水みちができては崩れ去る現象が、上流の浸透水流入部に向かって進んでいく(3.4 参照)。

以上では、下流から上流側へ進行していくパイピング現象について説明したが、ため池堤体や河川堤防では、上流から下流側へ形成されるパイピング孔もある。例えば、ジャコウネズミ(アメリカ)⁵⁾ やヌートリア(日本)²²⁾などの動物によって通路(トンネル)が上流から下流側へ連続的に形成されたことが報告されている。通路が下流方向に延びて下流側斜面に達したとき、貯水位が高くなり入口部分が水に没してしまうと、通路が水の通り道となり(パイピング孔となって)、ため池の貯水が抜けることになる⁵⁾²²⁾。

(1) ドレーンの設置

ダム設計においては、遮水機能と力学的及び水理学的な安定機能を満たす必要がある。均一型フィルダム(Homogeneous type dam)は、一つの土質材料で遮水機能と安定機能を満たすように設計される。近代的な均一型フィルダム堤体の設計においては、下流側斜面上に浸出面を発生させないように、ドレーンを設けることが義務づけられている。Fig.3.10 に堤体下流側に設けられる種々のドレーン: (a) 下流側法先ドレーン(Toe drain), (b) 水平ドレーン(Horizontal drain), (c) 立上がりドレーン(Chimney drain), (d) 複合ドレーン(Combined drain)を示す²³⁾。

ドレーンの設置に当たっては注意すべきことがある。ドレーンは直訳すると排水を意味し、地盤内の水を排水することが目的のように考えられがちである。排水に伴い土粒子が流失しないように、ドレーンは接する地盤土粒子に対してフィルターの設計基準を満たしている必要がある。私たちは、常日頃から、「ドレーンはフィルターの設計基準に基づいて設計しなければならない」ことを忘れてはならない。

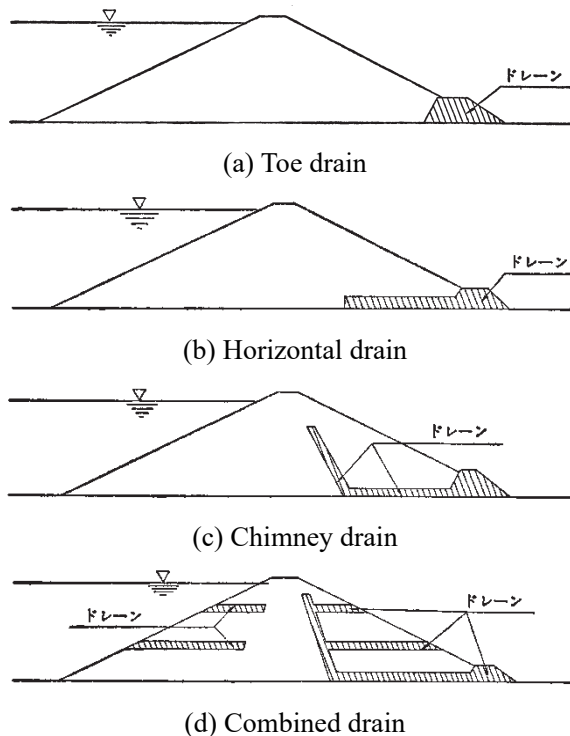


Fig.3.10 ドレーンの種類(ダム設計基準(1978)²³⁾より)

(2) 排水管における(排水用の)ジョイント、スロットや穴の目開きの設計

ジョイント、スロットや孔のあるパイプを、排水効率を上げるためにフィルターやドレーン内に設置する場合の設計について考える。排水管の最大目開き(Opening) D について、例えば、アメリカ開拓局基準(U.S. Bureau of Reclamation, 1973)²⁴⁾によると、パイプに接するフィルターは次の条件を満たさなければならないとされている((Cedergren, 1989)²⁵⁾, (土質工学会編, 1975)²⁶⁾。

排水管のジョイント、スロットや孔にフィルター材が入らないという条件：

$$F_{85}/D \geq 2 \text{ (or, } D/F_{85} \leq 0.5) \quad (3.5)$$

この条件式(3.5)式は、後述の 3.2.1 フィルターの設計基準 (ii) 「 $B_{85}/F_{15} > 1/4 \sim 1/5$ (or, $F_{15}/F_{85} < 4 \sim 5$)」と比較するとわかりやすい。フィルター内にジョイント、スロットや孔のある排水管が設置される場合、フィルター材は、排水管のジョイント、スロットや孔に粒子が入らない条件が満足されるように設計されなければならない(例えば、後掲の Fig.3.13(a) 参照)。(3.5)式の()内の式における 0.5 は、4~5 や 6 という値からみるとかなり安全側に設定されていることになる。ここに、4~5 はフィルターの設計条件(後掲の(3.7)式参照)、6 は砂時計の原理(後掲の(3.8)式参照)に基づく値である。これらの値との大きな違いは、フィルターの 15%粒径 D_{15} が平均的な間隙径であると考えられている(仮定されている)のに対して、排水管の孔径 D は実際の空隙孔径であること、また、(フィルターの設計や砂時計の原理のように)土粒子の流失をアーチ作用で止めるのではなく物理的に入ってこないように完全に止めようとしていることなどによると考えられる。

3.1.3 サンドボイル(Sand boil(噴砂口))

サンドボイル(噴砂口)とは、Fig.3.11²⁷⁾に示すように、パイピングによって発生した砂と水の混合物が地表に噴出して噴砂丘を形成する現象をいう。Mississippi 川の堤防に沿って大規模な地下浸透と噴砂が発生した事例が、Turnbull and Mansur (1961a, 1961b, 1961c)^{28) 29) 30)}によって調査・報告されている。スロバキア³¹⁾など、そのほかの国々でも同様の問題が起こっている。日本でも、2012年7月13~14日の九州北部豪雨のときに、福岡県矢部川左岸の水田で多数目撃されている³²⁾。

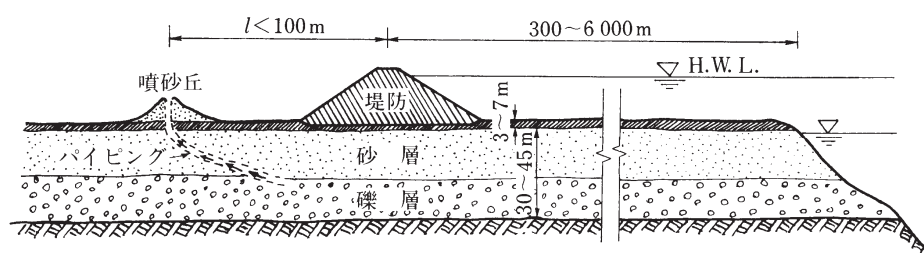


Fig.3.11 サンドボイル(土木学会編, 新体系土木工学,1991)²⁷⁾

3.2 粒径の異なる二層の境界における土粒子の移動

3.2.1 フィルターの設計基準

遮水機能を土質材料で受け持たせ、安定機能を砂礫またはロック材料で受け持たせることによって、2つ以上の材料を機能的に利用するという考え方で設計されるのがゾーン型フィルダムで

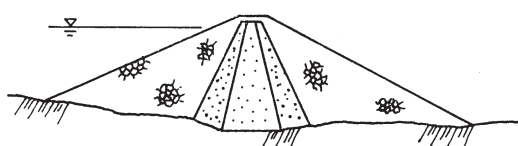


Fig.3.12 ゾーン型フィルダム(ダム設計基準(1978))²³⁾

ある(Fig.3.12)²³⁾。現在世界で最も高いダムは、タジキスタンにある堤高 325m のロウグンダム(Rogun Dam)であるが、ゾーン型フィルダムでできている。浸透水は、土質材料でできた遮水ゾーンから砂礫やロック材料でできた半透水性または透水性ゾーンへと移動する。下流側フィルターは、これら 2 つの材料の境界において、細土粒子が砂礫やロック材料の間隙を通過して流失することを防がなければならない。また、浸透水を滞りなくスムーズに流し出す必要もある。上流側フィルターは、貯水位が降下するとき、遮水材料に停滞している浸透水を土粒子の移動を伴わずに上流側の半透水性または透水性材料中に安全に排出させる必要がある。

このようにして、フィルターは、相反する次の 2 つの条件を満たさなければならない³³⁾³⁴⁾。

(i) フィルターはベース材料に対して十分な透水性を持つほど粗くなければならない

$$F_{15}/B_{15} > 4 \sim 5 \quad (3.6)$$

(ii) フィルターはベースの土粒子の移動がおこらないほど細くなければならない

$$F_{15}/B_{85} < 4 \sim 5 \quad (3.7)$$

ここで、B (Base material, ベース材料)は保護される材料、F (Filter, フィルター)は保護する材料である。 F_{15} はフィルターの 15%粒径、 B_{15} 及び B_{85} はそれぞれベース材料の 15%及び85%粒径である。ゾーン型フィルダムにおいて、土質材料と砂礫材料の粒度が大きくかけ離れている場合には、一つのフィルターで上述の条件を満たせない場合がある。この場合、それぞれの層間で条件が満たされるように段階的に層状のフィルター(Graded filter or Stratified filter)が設置される。

ここで、フィルターによる土粒子補足メカニズムについて考察を深めておく。その前に、透水係数を表す土の有効径(透水係数算定に關係する代表粒径)について考えてみる。

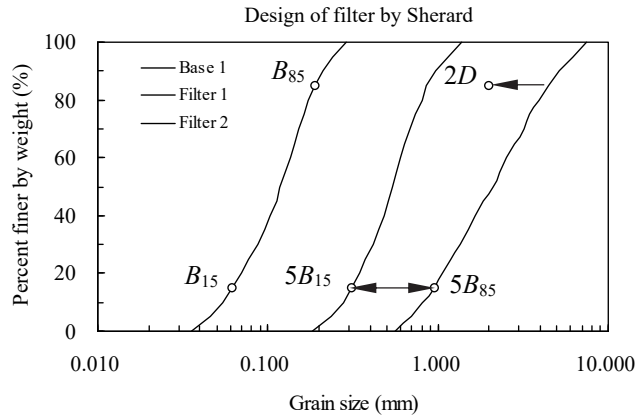
(1) 透水係数を表す土の有効径(透水係数算定に關係する代表粒径)、または、平均的な間隙径

透水係数は、代表粒径 D の 2 乗に比例すると考えられている(Muskat, 1937)³⁵⁾。Hazen (1911)³⁶⁾ は透水係数を表す有効径として D_{10} を提案しているが、フィルターの設計理論では 15%粒径 D_{15} ($=F_{15}$)が平均的な間隙径を表すものとして用いられている。透水係数算定に關係する代表粒径として、これまで、この他に D_5 (Kenny et al., 1984)³⁷⁾, D_{20} (Creager et al., 1947)³⁸⁾ が提案されて用いられている。これらの値から総合的にみると、Terzaghi (1922)¹⁾ や Bertram (1940)³⁹⁾ は、フィルターの設計理論の構築において、平均的な間隙径として少し大きい目の値(D_{15})を採用したと考えることができる。フィルターに関して少し大きい目の間隙径 F_{15} を想定し、ベース材料に関して想定した粒径 B_{85} 以上の土粒子を止めることによって、 B_{85} 以下の土粒子が流失しないように設定されていることになる(設計の観点から安全側の考慮)。

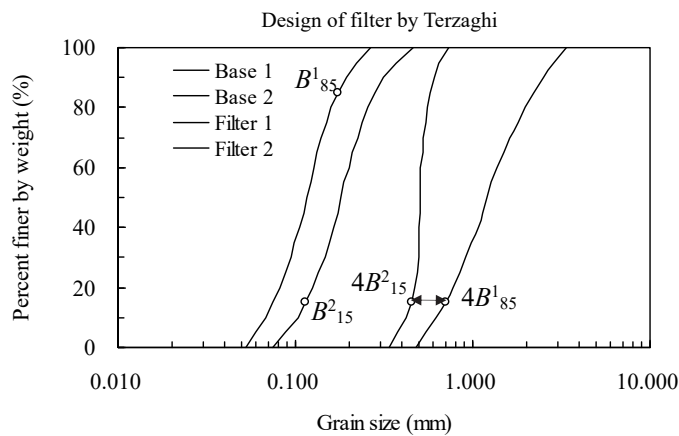
(2) 式(3.6)、(3.7)における数値 4~5、及び、フィルターの設計例

まず、(3.6)式について考察する。透水係数が平均的な間隙径の 2 乗に比例すると考えると、(3.6)式は $k_F > (16 \sim 25) k_B$ であることを表している。ここに、 k_F 及び k_B はフィルター及びベース材料の透水係数である。(3.6)式の条件は、「フィルター(保護する材料)は、その中で大きな水頭損失が生じると浸透水を安全に排除することができなくなるので、十分大きな透水性を持つ必要があること」を意味している。

次に、(3.7)式について考える。(3.7)式の条件は、ベース材料(保護される材料)が、フィルターを通過して流失しないための条件である。この理論では、流失を防ぐべきベース材料の粒径の大きさを B_{85} におくところに特徴がある。ベース材料の 85%粒径以上の粒子の流失を防ぐことにより、ベース材料全体の流失を防ごうとするものである。(3.6)、(3.7)式について、Terzaghi (1922)¹⁾, Bertram (1940)³⁹⁾ によって当初行われた研究では、4 が与えられている。その後、Sherard et al. (1984a, b)⁴⁰⁾⁴¹⁾



(a) 1 つの粒度曲線で示される単一粒度の Base 材料の場合



(b) 2 つの粒度曲線で示される粒度に幅のある Base 材料の場合

Fig.3.13 フィルターの設計例

により, 4 が安全側の数値であることがわかり, 5 が与えられた。日本のダム設計基準(農林水産省農村振興局編(2003a)^{33) 34)}; 日本大ダム会議編(1978)²³⁾; 建設省河川局監修/日本河川協会編(2008)⁴²⁾)では, 5 が用いられている。

ここで, Fig.3.13 は, フィルターの設計例を, 次の 2 つの場合, (a) Sherard et al.(1984a, 1984b)^{40) 41)}の方法を用いて, 1 つの粒度曲線で表される単一粒度の Base 材料の場合, (b) Terzaghi et al. (1996)⁴³⁾の方法を用いて, 2 つの粒度曲線で表される粒度に幅のある Base 材料の場合, に分けて示している。Fig.3.13 において, Base の粒度曲線が 1 つまたは 2 つで表されているが, これは本質的ではなく例示にすぎない。

(3) 透水性材料と不透水性材料の定義と透水係数に関する代表粒径

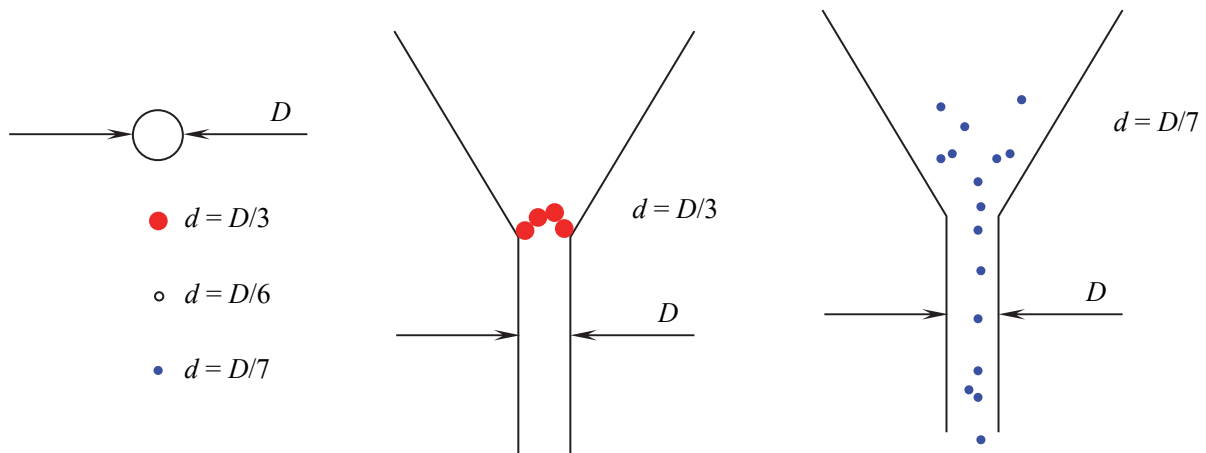
ここで, ダム工学における透水性材料と不透水性材料の定義について考える。透水係数 k は, 透水性材料の場合 $k > 1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, 不透水性材料の場合 $k < 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ と定義されている。ベース材料を不透水性材料, フィルターを透水性材料としたとき, 透水係数は透水係数に関する代表粒径 D の二乗 D^2 に比例することから, 代表粒径で 10 倍以上, すなわち, (15%粒径を代表粒径とすると) $F_{15}/B_{15} > 10$ に設定しなければならないことを意味する。このように設定することによって, $k_F > 100 k_B$ となり, 透水性材料候補を選定することができる。そして, 1 %以下の誤差を許して透水性材料の水頭損失を無視できることになる。

(4) 砂時計の原理からみたフィルターの設計基準(ii)

ここで、(3.7)式における、5 という数値、及び、 B_{85} (85%粒径)の 85 という数値について考える。まず、前者に関して、砂時計におけるホッパー部分(またはロート部分)の原理について考えてみる。砂時計の砂が安定してホッパー部分を落下するためには、すなわちアーチ作用による砂の目詰まりがおこらないためには、ホッパーの出口の直径 D が砂粒子径 d の 6 倍以上：

$$D \geq 6d \quad (3.8)$$

でなければならないとされている(ホッパーの七不思議)(日高重助, 1992⁴⁴⁾, 田口善弘, 1995⁴⁵⁾(Fig.3.14 参照)。フィルターの設計理論とはちょうど逆の考え方である。「砂粒子を通すという砂時計のホッパーの原理」では 6 という数値が定義されているが、「細土粒子を通さないというフィルターの設計」においては 4 または 5 という安全側の値が与えられていることになる。



(a) 砂の目詰まり条件： $D < 6d$ (b) 砂の落下条件： $D \geq 6d$

Fig.3.14 砂時計の原理(砂時計のホッパーの原理)

次に、後者に関して、 B_{85} (85%粒径)の 85 という数値とベース材料に求められる別の性質(条件)について考えてみる。(ここで、質量割合で全体の 15%部分の粗い土粒子の流失を対象とする根拠は経験的(実験的)なものであろうか?)

さて、(3.7)式について、フィルターは、ベース材料に関して(85%粒径) B_{85} 以上の土粒子の流失を防ぐことによって B_{85} 以下の土粒子の流失を止めようとするものである。したがって、ベース材料が、 B_{85} 粒径以下の粒子部分について「狭義の Internal erosion」を起こさないこと、すなわち、ベース材料は土粒子細粒分の流失が起こらないという条件(Self-filtration の条件)⁴⁶⁾を満たさなければならないことを意味している。

(5) フィルターの各種試験

上述した土粒子の移動による破壊を防ぐ基準は、幾つかの材料に対して得られたものであるで、すべての材料に適用されるものではない。重要な水利施設構造物及び基礎地盤の設計においては原位置の材料や実際の使用材料を用いて実験で確かめることが推奨される。フィルターの各種試験として、Fig.3.15 に示すように、(a) 非浸食試験(No Erosion Filer Test, ピンホール試験)、(b) 段階圧短期透水試験(パイピング試験)、(c) ダーティー・ウォーター試験(DW 試験)がある(農林水産省農村振興局編, 2003a)³³⁾。

3.2.2 フィルターが満たすべき5つの条件

参考文献 46 によると、フィルターは次の5つの条件を満たす必要があるとされている。

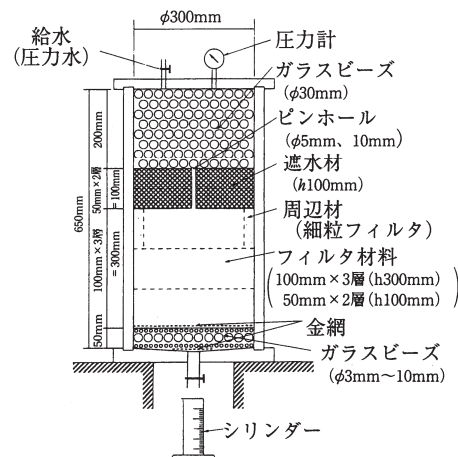
- ① 土粒子保持(Retention) : フィルターは浸食された土粒子(Eroded soil particles)の移動を制限または止めなければならない。
- ② 自己濾過(Self-filtration) : (または内部安定性と定義され) フィルターは内部的に(内部浸食に対して)安定でなければならない
- ③ 非粘着性(No cohesion) : フィルターはクラックを保持したり、または自己膠着(自己結合)したりする可能性があってはならない。
- ④ 排水性(Drainage) : フィルターは水圧を安全に排除(消散)するために十分透水性でなければならない。
- ⑤ 強度(Strength) : フィルターは、破砕されることなく、ダム堤体内の応力を伝達しなければならない。

このように、フィルターは、その設計基準 3.2.1 の条件 (i) (① 土粒子保持(Retention)), 及び、条件 (ii) (④ 排水性(Drainage)) のほかに、② 自己濾過(Self-filtration), ③ 非粘着性(No cohesion), ⑤ 強度(Strength)が求められる。

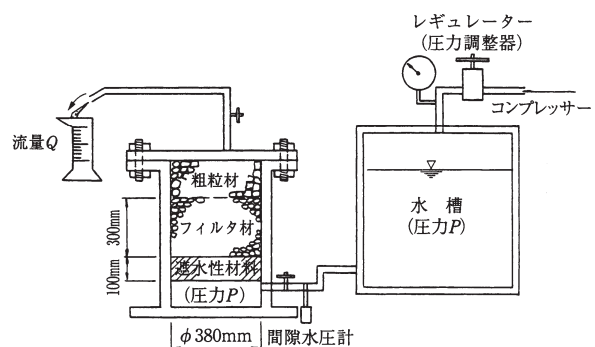
また、フィルターには、そのほかに次のような Self-healing effects が期待されている。

3.2.3 フィルターに期待される Self-healing effects (自然治癒効果, 自己回復効果, 自癒効果)^{40) 41) 47)}

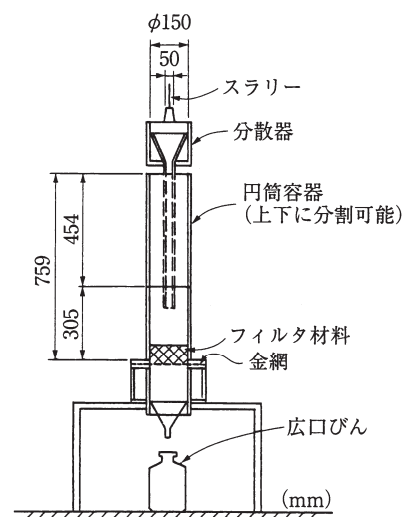
ゾーン型フィルダムにおけるフィルターは、上述の 3.2.2 のほかに、セルフヒーリング効果(自癒効果, Self-healing effects)としての機能が期待されている。一般的に、フィルターは、中心遮水壁を挟んで上流側と下流側に設置されるが、(ダム)フィルターの Self healing effects として、それぞれ次のような効果が期待されている^{40) 41) 47)} (Fig.3.16 参照)。



(a) 非浸食試験 (No Erosion Filter Test, ピンホール試験)



(b) 段階圧短期透水試験 (パイピング試験)



(c) ダーティー・ウォーター試験 (DW 試験)

Fig.3.15 フィルターの各種試験
(農林水産省農村振興局編, 2003a)³³⁾

(1) 上流側フィルター

上流側フィルターに接した遮水性ゾーンにクラックが生じたとき、上流側フィルター粒子が、クラックに流れ込み水の漏出を防ぐ。

(2) 下流側フィルター

下流側フィルターに接した遮水性ゾーンにクラックが生じたとき、下流側フィルターが、クラック中を流れてきた細土粒子を止め、パイピング現象を止める。これは、前述の 3.2.2 の ① 土粒子保持(Retention)と同一の機能である。

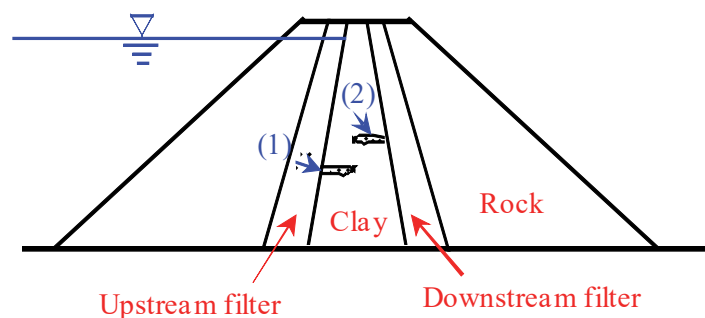


Fig.3.16 フィルターに期待される Self-healing effects

3.2.4 粒度の異なる二層間における土粒子の移動

粒度の異なる二層間における土粒子の移動の条件を決める基準はないが、3.2.1 フィルターの設計基準 (ii), 及び、ホッパーの出口径の条件を用いてある程度判定できる ((3.7)式, (3.8)式参照)。細粒土層 S と粗粒土層 R が直接接しており、地盤中を S から R へ水が流れる場合を考える。 S と G は Self-filtration の条件(土粒子細粒分の流失が起こらないという条件)を満たしており、粘性土分を含まない場合、

S の土粒子が R 層へ移動しない条件は、

$$R_{15}/S_{85} < 4 \sim 5 \quad (3.9)$$

S の土粒子が R 層へ移動する可能性がある条件は、

$$R_{15}/S_{85} \geq 6 \quad (3.10)$$

となる。 R_{15}/S_{85} の値が $5 \sim 6$ のときは細粒土が移動するかしないかの限界状態である(振動などの刺激があると細土粒子が移動する?)。ここに、 R_{15} は粗粒土の 15% 粒径, S_{85} は細粒土の 85% 粒径である。

3.2.5 ヘドロの堆積によるため池堤体上流面における表面遮水効果⁴⁸⁾

フィルター・ケーキの生成(堤体表面にマッドケーキ(Mud cake)層の形成)について考える。

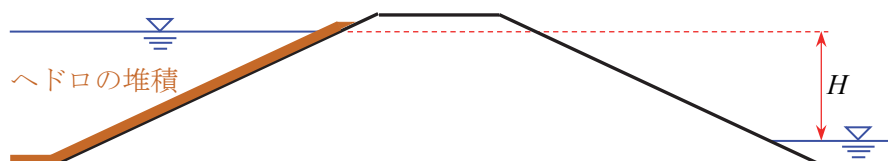


Fig.3.17 堆積したヘドロの表面遮水効果

新しく造られたため池堤体において、最初、多少の漏水があったとしても時間が経過すると少なくなる現象が認められている。上流から流れてきた細土粒子(ヘドロ)が堤体上流側斜面に堆積し、自然に細粒土層(マッドケーキ)が作られ、表面遮水壁のような効果を発揮し、堤体内への浸透流の侵入を軽減することがある(Fig.3.17 参照)。しかし、このような効果が常に期待できるわけではないので注意が必要である。たとえば、背後の地山に破碎層等があり、時間が経過しても漏水が少なくなること⁴⁹⁾、場合によっては貯水池に水が溜まらないこともある。

マッドケーキは、ため池堤体表面や土水路表面に形成されたという報告のほかに、「地中連続壁の孔壁と壁面自立」や「ボーリングの孔壁と壁面自立」に利用されたり、「注入井戸の孔壁と閉塞」などで問題になったりすることが報告されている。

＜川西市 K 堰右岸下流側河床部(堰体と下流側エプロンの境目)からの漏水(噴出)と停止＞

頭首工において、上流側におけるマッドケーキの堆積によって(浸透水の侵入が減少し)、堰体と下流側エプロン下部からの漏水(噴出)がなくなった(可能性がある)と考えられている事例がある(川西市, K 堰)。K 堰は 2001 年川西市の猪名川に建設されたゴム堰(ゴム引き布製ゲート)である。2023 年 3 月 9 日、堰体とコンクリート床板(下流側エプロン)の境目に幅約 20 cm の隙間があり下部から漏水が噴出した(Fig.3.18, 3.19 参照)。漏水(噴出)の発見後、原因究明のためゴム堰の倒伏・起立調査がなされ(20230427)、以後漏水(噴出)が止まったことが報告されている(Fig.3.20, 3.21 参照)。その後の事象:「2023 年 08 月 15 日の台風 7 号通過時のゴム堰自動倒伏・起立」や「2023 年 12 月 19 日の上流側水道用水取入れ口の浚渫に合わせたゴム堰の倒伏・起立調査」の後も、漏水(噴出)は確認されていない。上流側におけるマッドケーキの堆積によって漏水(噴出)が止まったと考えられている。しかし、すでに形成されていると考えられる下流側エプロンや堰体下部の空洞(水みち)が塞がれることはない。したがって、この場合のマッドケーキは、大きな洪水の流下で剥が

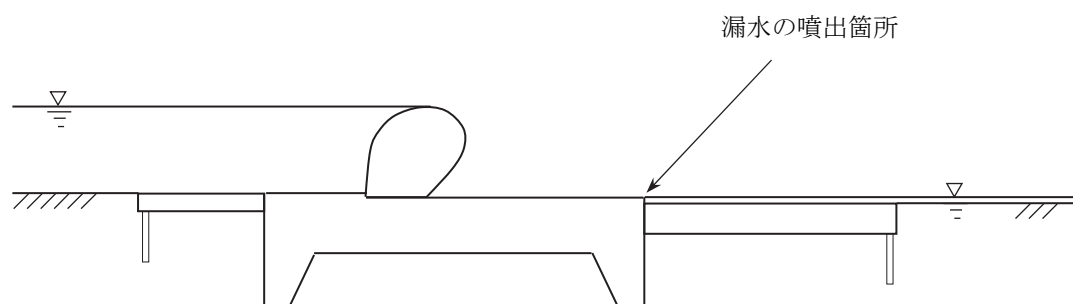


Fig.3.18 漏水噴出の確認(20230309(10 時))



(a) 起立時(右岸下流)



(b) 漏水噴出箇所(近景)

Fig.3.19 漏水噴出状況

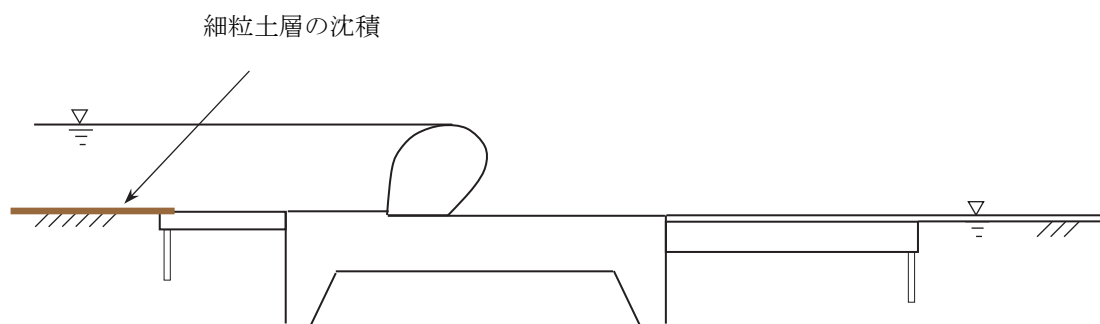


Fig.3.20 細粒土の新堰の予想(20230427)



(a) 2023 年 4 月 27 日倒伏中



(b) 2023 年 4 月 27 日起立後(漏水噴出なし)

Fig.3.21 倒伏調査後の状況

され、漏水(噴出)が再び起こる可能性があるので、余談を許さない状態にある(下流側エプロンや堰体下部の空洞(水みち)に対する対策措置が必要である)。

3.3 内部浸食(狭義の内部浸食(Internal erosion of the narrow sense))

一つの土の中で、細土粒子が浸透水によって流失する現象は内部浸食(狭義の内部浸食)と呼ばれる。範囲の広い粒度分布の土(Broadly graded soil)や階段粒度の土(Gap graded soil)で起こるといわれている(Terzaghi et al, 1996)⁴³⁾。内部浸食によって細土粒子が流失した地盤は、透水係数が増加して漏水量が増加したり浸透水が集中したりすることによって沈下や陥没が生じ危険な状態におかれる。また、移動した細土粒子が下流側で詰まると(Clogging), 透水係数の低下により水圧が上昇し想定外の力が作用することによって地盤は破壊に対して危険な状態となる。

範囲の広い粒度分布の土を用いて盛土を行う場合においては、締固め時に材料の分離(Segregation)が起こることがあるので、注意しなければならない。材料の分離が起こり、大きな粒径粒子の塊^{かたまり}が生じレンズ状になったり、層状につながったりすると、その大きな間隙を縫って(通って)細粒分が流れ出ることになる。一方、階段粒度の土では、大きな粒径の粒子が骨格を形成し、細粒分は骨格構成粒子とはならず、このような宙ぶらりんな細土粒子が、大きな粒径によって形成された骨格粒子間隙中を通して流失することになる。また、粘着力の小さな分散性の高い粘土(Dispersive clay)はパイピングを受けやすいといわれており、使用にあたっては十分注意が必要である。

3.3.1 狭義の内部浸食と広義の内部浸食

狭義の内部浸食と広義の内部浸食について述べる。「地盤工学分野」では内部浸食という用語は、ある土の細土粒子が浸透水の通過に伴って移動することを意味する用語として用いられてきた。一方、河川工学やダム工学の分野では、Internal erosion という用語が External erosion に対して用いられ、土の中で起こる土粒子の移動現象全体を表す用語として用いられている。したがって、混乱を避けるため、Internal erosion を、前者では「狭義の」と表し、後者では「広義の」と表すことにする。また、前者における「狭義の Internal erosion」は、後者では「Suffusion」と呼ばれて区別されている。

3.3.2 内部浸食(狭義)の判定手法

狭義の内部浸食を受けるかどうかの判定は、例えば、① Kezdi (1969)の方法⁵⁰⁾、② Sherard (1979)の方法⁵¹⁾を用いて、次のように行うことができる。粒径加積曲線を任意の点(粒径)で分割し、粗い方の土(f と表す)の15%粒径 f_{15} と細かい方の土(b と表す)の85%粒径 b_{85} の比 f_{15}/b_{85} を計算する。そして、

① Kezdi (1969)の方法⁵⁰⁾

$$f_{15}/b_{85} < 4 < f_{15}/b_{15} \quad (3.11)$$

② Sherard (1979)の方法⁵¹⁾

$$I_r = f_{15}/b_{85} < 5 \quad (3.12)$$

であれば、その点において材料は内部浸食に対して安定である(または、Self-filteringの条件が満たされている)と判定される。いくつかの点で、同様にして計算を繰り返し、全ての点で安定であると判定された場合に、材料は最終的に内部浸食に対して安定であると判定される。(3.11), (3.12)式は、フィルターの設計基準を準用した式である。

また、Kenny and Lau (1985)は別判定手法、

③ Kenny and Lau (1985)の方法⁵²⁾

$$P(d \text{ to } 4d) > P(< d) \quad (3.13)$$

を提案している。(3.13)式は、中密から密な状態の安定な土の限界的な粒度曲線は $[d$ と $4d$ の間の径を持つ粒子の割合] $[d$ より小さな粒子の割合]より大きくなるような曲線であることを表しており、細粒分すなわち $d \leq D_{20}$ に対して適用される。(3.13)

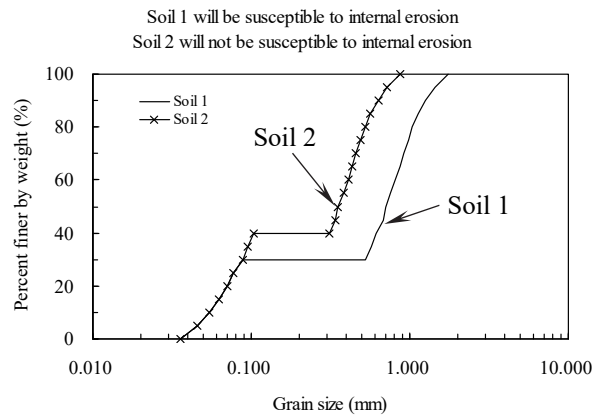
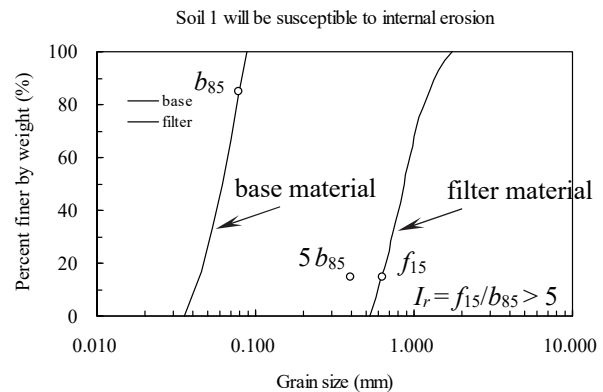
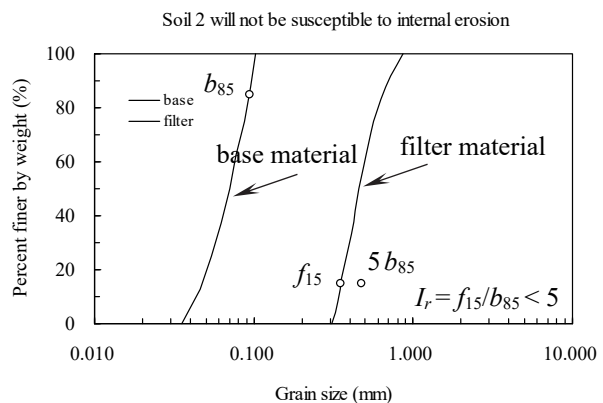


Fig.3.22 階段粒度の土における内部浸食の可能性



(a) 浸食のおそれありの判定(Soil 1)



(b) 浸食のおそれなしの判定(Soil 2)

Fig.3.23 Soil 1, Soil 2 の内部浸食の可能性の判定

式は(3.11), (3.12)式と考え方が全く異なるように見えるが, Chapuis (1992)⁵³⁾は, ①, ②, ③の方法について粒径加積曲線の勾配という観点から統一的な解釈を試みている。統一的な解釈については, 原著論文(Chapuis, 1992)⁵³⁾を参照されたい。一例として, Sherard (1979)の方法⁵¹⁾を用いて, Fig.3.22 に示すような階段粒度の土について内部浸食の可能性を判定した。Fig.3.22 で, Soil 1 は内部浸食の可能性があり, Soil 2 は可能性がないものを表す。判定の方法を Soil 1, Soil 2 に対して示すと Figs.3.23(a), (b)のようになる。Figs.3.23(a), (b)において, Soil 1 の場合 $I_r = f_{15}/b_{85} > 5$ となるので細粒分が粗粒分の間隙を通して洗い流される可能性があるが, Soil 2 の場合 $I_r = f_{15}/b_{85} < 5$ となるので細粒分が粗粒分の間隙を通して洗い流される可能性はないと判定される。現在, このほかにも, 種々の考え方が研究され提案されているところである ((Marot et al., 2014)⁵⁴⁾などを参照)。

3.4 進行性法くずれ (Progressive backward sloughing)

進行性法くずれはパイピングに密接な関係をもつ堤体の被害で, 古い均一型アースダムで見られる(アースダムとアースロックダム 設計と施工(河上房義監訳, 1972)⁵⁾, ため池堤体における破壊事例⁷⁾)。この現象は, Fig.3.24 に示すように, まず下流法尻部分がいくらか浸食され, つぎにこれが落ち込んで滑るものである。この現象が起こると, 斜面は, 比較的急な勾配となり, さらに貯水池からの浸透水で飽和されて落ち込み, 急峻で不安定となる。ダムの残留部分は, この進行性法くずれで非常に薄くなり(すなわち, 浸透流で流失し)最終的になくなると, 堤体は越流破壊を起こす。

砂質土を用いた二次元堤体に関する実験⁹⁾によると, 下流側斜面(浸潤線のわずかな下方)の浸透水が流出する浸出点で, 小さなパイピングが起こり上部の砂質土が下流方向へ流動化する(Fluidized)現象がみられる。この現象が, 浸潤線のわずかな下方を上流に向かって時間をかけて進行していき, 最終的に上流側斜面に達して堤体が越流破壊する。Progressive backward sloughing は, 下流法尻付近におけるパイピングと土粒子(砂粒子)の流動化に始まり, パイピングと土粒子(砂粒子)の流失, 及び, 法崩れが上流側に向かって進んでいく現象といえる。

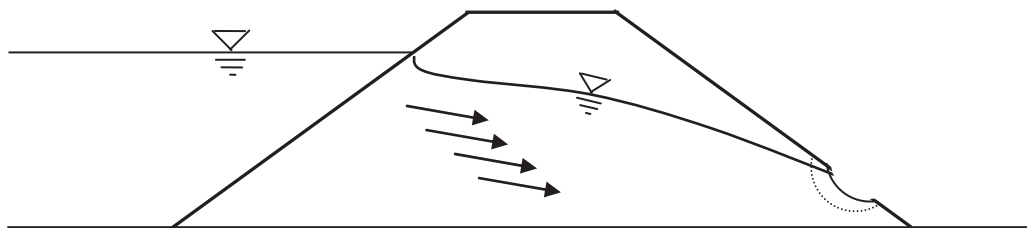


Fig.3.24 進行性法くずれ(Progressive backward sloughing)の概念図

4. まとめ

浸透流による地盤の破壊すなわち浸透破壊は, 「地盤工学分野」において, 土粒子の移動による破壊, 及び, 全体的な破壊に大きく分類される。ここで, 「土粒子の移動による破壊」に関する問題は, 「河川工学とダム工学の分野」においては, 「広義の Internal erosion」と定義され, 現象が4つの小項目に分類されて議論されている。ここでは, 浸透破壊に関わる諸現象, 及び, その分類と用語法について考察した。「土粒子の移動による破壊」と「広義の Internal erosion」の関係, 浸透破壊問題

における「土粒子の移動による破壊」に関する用語法についてまとめると次の通りである。

4.1 「土粒子の移動による破壊」及び「広義の Internal erosion」

河川工学とダム工学の分野における「広義の Internal erosion」の小項目分類、及び、それに対応して論題を合わせるべく、地盤工学分野における「土粒子の移動による破壊」の小項目分類を行い、それらの関係について議論した。結論を述べると次のようになる。

4.1.1 「土粒子の移動による破壊」

地盤工学分野における「土粒子の移動による破壊(Failure by soil-particles movement)」は、「地下浸食による破壊(Failure by subsurface erosion)」, 及び, 「局所的な破壊(Local failure)」に同じであり, 次の各項目に分類できる。

- (1) パイピング現象(狭義のパイピング),
- (2) 粒度の異なる二層の境界における細土粒子の移動(フィルターの設計基準ほか),
- (3) 内部浸食(狭義の Internal erosion), 及び
- (4) 進行性法くずれ (Progressive backward sloughing)

ここで, 地盤浸透流問題において, 土粒子の移動による破壊現象全般を表す「パイピング(広義)」と, いわゆるパイプ状の水みちの形成を表す「パイピング(狭義)」を区別するため, それぞれ, 「広義のパイピング」, 及び, 「狭義のパイピング」と表すことにする。

4.1.2 「広義の Internal erosion」

浸透破壊問題のうち「土粒子の移動による浸透破壊」は, 近年, 「地盤工学と河川工学の分野の研究者が集う国際会議 ICSE (International Conference on Scour and Erosion)」や「ダム関係土木構造物の設計や施工などに関する技術について議論する大ダム会議」などにおいて, 議論されるようになってきた。そして, 「広義の Internal erosion」と統一的に定義され, 次のように分類されている³⁾⁴⁾。

- (1) Concentrated leak erosion,
- (2) Contact erosion,
- (3) Suffusion, 及び,
- (4) Backward erosion

ここで, 河川工学の分野で用いられる, 土粒子の移動による破壊現象全般を表す「Internal erosion (広義)」と, 地盤工学で用いられてきた, ある一つの土の中の細土粒子が浸透水の通過に伴って移動する現象を表す「内部浸食(Internal erosion) (狭義)」を区別するため, それぞれ, 「広義の Internal erosion」, 及び, 「狭義の Internal erosion」と表すことにする。

4.1.3 「土粒子の移動による破壊」と「広義の Internal erosion」における各項目の関係

地盤工学分野における「土粒子の移動による破壊(Failures of subsurface erosion by Terzaghi)」の各項目 4.1.1 (1)~(4)は, 「広義の Internal erosion」の各項目 4.1.2 (1)~(4)にそれぞれ対応付けることができる。

4.2 土粒子の移動による破壊

ここでは, 4.1.1 で述べた 4 つの小項目について議論した。

(1) パイピング現象(狭義のパイピング)

まず、フローティングタイプの頭首工におけるパイピング現象の発生について考察した。そして、パイピング現象は、これまで、パイピング、ルーフィング、チャネリングなどと呼ばれてきたが、これらの用語について説明を行うとともに、土粒子の移動による浸透破壊プロセスを、＜パイピング現象による破壊プロセス No. 1＞と＜パイピング現象による破壊プロセス No. 2＞に分けて考察した。また、浸透路長の考え方(Blighの方法、及び、Laneの方法)、Ashley Damの破壊事例が教えるところ、逆フィルター(インバーティッド・フィルター (Inverted filter))について議論した。

次に、ダム堤体、ため池堤体や河川堤防に発生するパイピングについて議論した。ここでは、ドレーンの設置、及び、排水管における(排水用の)ジョイント、スロットや穴の目開きの設計について考察した。

また、サンドボイル(Sand boil (噴砂口))の現象について説明を加えた。

(2) 粒度の異なる二層の境界における細土粒子の移動(フィルターの設計基準ほか)

ここでは、まず、日本で使用されているフィルターの設計基準(i), (ii)について述べた。そして、フィルターの設計基準に関連する5つの話題：「透水係数を表す土の有効径(透水係数算定に関係する代表粒径)」、または、平均的な間隙径」、「式(3.6), (3.7)における数値4~5、及び、フィルターの設計例」、「透水性材料と不透水性材料の定義と透水係数に関係する代表粒径」、「砂時計の原理からみたフィルターの設計基準(ii)」、「フィルターの各種試験」について詳しく考察した。

そして、フィルターが満たすべき5つの条件、フィルターに期待される Self-healing effects(自然治癒効果、自己回復効果、自癒効果)、粒度の異なる二層間における土粒子の移動、ヘドロの堆積によるため池堤体上流面における表面遮水効果について議論した。

(3) 内部浸食(狭義の Internal erosion)

内部浸食について、まず、狭義の内部浸食と広義の内部浸食について定義し、内部浸食(狭義)の判定手法に関して一例を示した。

(4) 進行性法くずれ (Progressive backward sloughing)

アースダムとアースロックダム 設計と施工(河上房義監訳(1972))⁵⁾、ため池堤体における破壊事例⁷⁾、及び、砂質土を用いた実験結果⁶⁾に基づいて、破壊メカニズムについて考察を行った。

4.3 浸透破壊問題における「土粒子の移動による破壊」に関する用語法

ここで述べてきた浸透破壊問題における「粒子の移動による破壊」と「広義の Internal erosion」に関する用語法は、将来、統一されるものと考えられるが、現時点ではいまだ未統一であるといえる。

浸透破壊に対して用いられる用語法は、国によって、分野によって、また研究者や技術者によって異なり、さらに時代の経過につれて異なってくる。用語法はいずれ統一されるであろうが、文献を参照するときなどには、それが拠っている分類法(専門用語の定義の仕方)を理解する必要がある。すなわち、用語の定義は、人によって文献によって微妙に異なっていると理解しておかなければならない。ある現象はいくつかの現象(すなわち、いくつかの項目)に関連して生じるものであるので、その現象を完ぺきに項目ごとに分類することは不可能である。分類法は、それ自体が目的ではなく、現象をスムーズに理解できるように考え出されたものである。

「土粒子の移動による破壊」における用語の分類が難しい理由は、次に示す「噴砂口」や「進行性法くずれ」などの例のように、これらの現象が、実際には、いくつかの現象(すなわち、いくつかの

項目)が関連して生じているためであると考えられる。そして、「噴砂口」は、「広義の Internal erosion」において、Concentrated erosion に分類されたり、Backward erosion に分類されたりしている。

4.3.1 噴砂口(Sand boil)

噴砂口(Sand boil)は、まず浸透水の出口付近の表面細粒土層がクイックサンドやボイリング、ヒービングなどによって噴砂を起こし、土粒子の流失に伴い、水みちが上流側へ向かって発達していく現象(Progressive backward phenomenon)である。ここでは、噴砂口(Sand boil)に関して、(1) パイピング現象(狭義のパイピング)、すなわち、(1) Concentrated leak erosion に分類したが、「広義の Internal erosion」に関する文献によっては、(4) Backward erosion と分類されている。

4.3.2 進行性法くずれ(Progressive backward sloughing)

進行性法くずれ(Progressive backward sloughing)は、下流側斜面(浸潤線のわずか下方)の浸透水が流出する浸出点に始まり、浸潤線のわずか下方を上流に向かって時間をかけて進行していくと考えられる。粘性土の場合、長さ 1~2 m 程度以上のパイプ状の水みち(パイピング孔)が発達するとともに法くずれを起こし、現象が上流側へと進展していき、上流側堤体斜面に達することによって越流破壊に至る。砂質土の場合、長さ 20~30 cm 程度のパイプ状の水みち(パイピング孔)が発達してはすぐに崩れるとともに、下流側堤体表面において、砂粒子が浸透水によって流動化(Fluidized)して洗い流されていく。そして、堤体はこのような現象が上流側堤体斜面に達することによって越流破壊に至る。このように、「広義の Internal erosion」における小分類項目: (4) Backward erosion は、発生メカニズムの点から、パイピング現象と法くずれ、または、砂粒子の流動化と法くずれが相互に関連して進行的に起こる現象であるといえる。

謝辞

令和 5 年 10 月 31 日、農林水産省東海農政局第 1 会議室で開催された、令和 5 年度 行政技術研修(頭首工)における講義、タイトルは「土構造物及び基礎地盤の浸透流と浸透破壊」、に関して作成した講義資料：

土構造物及び基礎地盤の浸透流と浸透破壊その 1ー全体的な破壊ー

土構造物及び基礎地盤の浸透流と浸透破壊その 2ー土粒子の移動による破壊ー

のうち、後者のものをまとめ直したものである。講義の実施に当たり、農林水産省 農村振興局 整備部 設計課 企画調整室の土屋恒久氏、小倉健一郎氏ほかには大変お世話になった。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Terzaghi, K. (1922): Der Grundbruch an Stauwerken und Seine Verhütung, Wasserkraft 17, pp.445-449.
or Terzaghi, K. (1960): From theory to Practice in Soil Mechanics, Wiley, New York, pp.114-118.
- 2) Yousefi, M., Sedghi-Asl, M., and Parvizi, M. (2016): Seepage and Boiling around a Sheet Pile under Different Experimental Configuration, ASCE, Journal of Hydrologic Engineering, 12 Aug. 2016. 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001449, 06016015.
- 3) Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Internal_erosion, or
ICOLD ed. (2013): Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dykes, and Their Foundations. 1:

- Internal Erosion Processes and Engineering Assessment (Bulletin 164). Paris: International Commission on Large Dams. 2013.
- 4) Tejada, I. G., Sibille, L., Chareyre, B. and Vincens, E. (2016): Numerical modeling of particle migration in granular soils, Proceedings of the 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 8), pp.139-147, 2016, Oxford, Great Britain.
 - 5) 河上房義監訳(1972): アースダムとアースロックダム 設計と施工, pp.63-65, pp.95-98, 森北出版.
 - 6) Tanaka, T., Hirose, T., Nagai, S. and Doi, H. (2014): Experimental findings regarding piping failure of embankments, Seventh International Conference on Scour and Erosion (ICSE-7), pp.87-93, Perth, Australia, December 2014.
 - 7) Tanaka, T., Kusumi, S., Miki, T., Tachimura, R. and Inoue, K. (2014b): A case study of piping failure of dams caused by Typhoon No.15 in 2011 on Awaji Island, Seventh International Conference on Scour and Erosion (ICSE-7), pp.95-103, Perth, Australia December 2014.
 - 8) Smith, P.E.M. (2012): Assessment of the internal stability on a dam core, Proceedings of the 6th International Conference on Score and Erosion, pp.1409-1416.
 - 9) Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1948): Soil Mechanics in Engineering Practice, 1st ed., John Wiley and Sons, New York, pp.502-503, pp.510-512, 1948.
 - 10) Harza, L.F. (1935): Uplift and seepage under dams on sand, *Transactions of ASCE*, No.100, pp.1352-1406, 1935.
 - 11) Terzaghi, K. (1943): Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York, pp.257-261, 1943.
 - 12) Bligh, W.G. (1910): The practical design of irrigation works, Second edition, London, Constable & Company Limited, pp.163-205, 1910.
 - 13) Lane, E.W. (1935): Security from under-seepage masonry dams on earth foundations, *Trans. of ASCE*, No.100, pp.1235-1351, 1935.
 - 14) Chen XIE, Siow-Yong LIM (2012): Effect of jet-flipping on scour development downstream of a sluice gate, ICSE6 Paris - August 27-31, 2012, pp.1425-1432.
 - 15) 農林水産省構造改善局編 (1978): 土地改良事業計画設計基準 設計 頭首工, 農業土木学会発行, 昭和 53 年 10 月, pp.51-53, p.58.
or 農林水産省農村振興局整備部設計課監修 (2008): 土地改良事業設計基準及び運用・解説 設計「頭首工」基準 基準の運用 基準及び運用の解説, 付録 技術書, 農業農村工学会発行, 平成 20 年 3 月, pp.209-212.
 - 16) 田中 勉, 永井 茂 (1997): 浸透破壊事例の解析 - Ashley Dam の破壊事例 -, 神戸大学大学院自然科学研究科紀要 15-B, pp.67~72, 1997.
 - 17) 田中 勉, 永井 茂 (1998): Hauser Lake Dam の浸透破壊事例の解析, 日本地下水学会誌, Vol.40, No.1, pp.33~42, 1998.
 - 18) 田中 勉, 永井 茂 (1997): 浸透破壊事例の解析 - Elwha River Dam の破壊事例 -, 土と基礎, Vol.45, No.8 (Ser. No.475), pp.5~8, 1997.
 - 19) 田中 勉 (1996): 上昇浸透流を受ける矢板背後地盤の浸透破壊 - Prismatic failure の概念と解析結果 -, 農業土木学会論文集, 第 186 号(第 64 巻, 第 6 号), pp.969-979, 1996.
 - 20) 熊本日日新聞 (2022): 松の木堰倒壊, コンクリ製の農業用堰が倒壊 熊本市の天明新川, 老朽

- 化原因か 農家 1600 戸が取水できず 2022 年 5 月 18 日 (<https://newspicks.com/news/7076700>).
- 21) 発電水力協会編 (1972) : 最新フィルダム工学, p.77, (社)発電水力協会.
 - 22) 田中 勉, 芝 優大, 久住慎也, 平尾拓也 (2012) : 平成 23 年 5 月豪雨による三木市被災ため池調査, 神戸大学大学院農学研究科, 平成 23 年 5 月豪雨による三木市被災ため池調査報告書, 平成 24 年 5 月 31 日, pp.1-85.
 - 23) 日本大ダム会議編 (1978): 第 2 次改訂 ダム設計基準, 日本大ダム会議, p.88.
 - 24) アメリカ開拓局基準 (U.S. Bureau of Reclamation Standard) (1973): Design of Small Dams, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., Second edition.
 - 25) Cedergren, H.R. (1989): Seepage, drainage, and flow nets, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., pp.151-200 (1st ed. 1967, 2nd ed. 1977).
 - 26) 土質工学会編 (1975): 土質工学ライブラリー3 掘削のポイントー第 1 回改訂版ー, 土質工学会(現在 地盤工学会に改名), pp.277-278, pp.301-302.
 - 27) 土木学会編 (1991): 新体系土木工学, 74 堤防の設計と施工-海外の事例を中心として(玉光弘明, 中島秀雄, 定道成美, 藤井友並), p.239, p.273, p.153, 土木学会.
 - 28) Turnbull, W. J. and Mansur, C. L. (1961a): Investigation of Underseepage-Mississippi River Levees, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol.126, part I, p.1429.
 - 29) Turnbull, W. J. and Mansur, C. L. (1961b): Design of Underseepage Control Measures for Dams and Levees, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol.126, part I, p.1486.
 - 30) Turnbull, W. J. and Mansur, C. L. (1961c): Construction and Maintenance of Underseepage Control Measures, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol.126, part I, p.1540.
 - 31) 田中 勉, 浦田 憲 (2006): ダニューブ川における河川堤防下層地盤の浸食と対策工法の効果, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 第十号, pp.225-234.
 - 32) 土木研究所編 (2013) : 河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント(平成 25 年 6 月版). https://www.pwri.go.jp/team/smd/pdf/syousasekkei_point1306.pdf
(2012 年の九州北部豪雨において矢部川左岸 16.0k 付近の田圃に発生したガマ)
 - 33) 農林水産省農村振興局編 (2003a): 土地改良事業計画設計基準・設計「ダム」技術書〔共通編〕, 農林水産省農村振興局, pp.295-300.
 - 34) 農林水産省農村振興局編 (2003b): 土地改良事業計画設計基準・設計「ダム」技術書〔フィルダム編〕, 農林水産省農村振興局, pp.165-170.
 - 35) Muskat, M. (1937): The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media, McGraw-Hill, New York, pp.10-13, pp.56-69 (Reprinted by J.W. Edwards, Ann Arbor, 1946).
 - 36) Hazen, A. (1911): Discussion of 'Dams and Foundation', by A.C. Koenig, Transactions of ASCE, Vol.73, pp.199.
 - 37) Kenney, T.C., Lau, D. and Ofoegbu, G.I. (1984): Permeability of compacted granular materials, Canadian Geotechnical Journal, Vol.22, p.726-729.
 - 38) Creager, P., Justin, J.D., and Hinds, J. (1947): Engineering For Dams, New York, John Wiley and Sons, inc. Chapman and hall, Ltd. London, Vol.3.
 - 39) Bertram, G.E. (1940): An experimental investigation of protective filters, Publication of the Graduate School of Engineering, Harvard University, No.267, pp.1-21.
 - 40) Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., and Talbot, J.R. (1984a): Basic properties of sand and gravel filters,

- ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 110(GT6), pp.684-700
- 41) Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., and Talbot, J.R. (1984b): Filters for silts and clays, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 110(GT6), pp.701-718.
- 42) 建設省河川局監修／日本河川協会編 (2008): 改訂新版 建設省河川砂防基準(案)同解説・設計編 [1] , 技報堂, pp.211-214, p.219.
- 43) Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, C. (1996): Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed., John Wiley and Sons, New York, pp.81-82.
- 44) 日高重助 (1992): 粉体系の数値実験とその応用, 粉体工学会誌, Vol.29, No.6, pp.465-471.
- 45) 田口善弘 (1995): 砂時計の七不思議, 中公新書 1268, 中央公論社, pp.3-38.
- 46) ICOLD ed. (1994): Embankment Dams, Granular Filters and Drains (Bulletin 95). Paris: International Commission on Large Dams. 1994.
- 47) Sherard, J.L., and Dunnigan, L.P. (1989): Critical filters for impervious soils, Journal of Geotechnical engineering, ASCE, Vol.115, No.7, pp.546-566.
- 48) 粘土の不思議編集委員会編 (1986): 入門シリーズ 12 粘土の不思議, 土質工学会 (現 地盤工学会), pp.117-117, 156-160.
- 49) 高橋 清 (2011): 水上池左岸地山の湧水対策工について, 平成 23 年度農業農村工学会 第 68 回京都支部講演会講演要旨集, pp.1-27 - 1-28.
- 50) Kezdi, A. (1969): Increase of protective capacity of flood control dikes, Department of Geotechnique, Technical University, Budapest, Report No.1 (In Hungarian).
- 51) Sherard, J.L. (1979): Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils, Transactions, 13th International Congress on Large Dams, New Delhi, India, Vol.2, pp.25-35.
- 52) Kenny, T.C. and Lau, D. (1985): Internal stability of granular filters, Canadian Geotechnical Journal, Vol.22, pp.215-235.
- 53) Chapuis, R.P. (1992): Similarity of internal stability criteria for granular soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol.29, pp.711-713.
- 54) Marot, M., Rochim, A., Nguyen, H.H., Bendahmane, F. and Sibille, L. (2015): Systematic methodology for characterization of suffusion sensibility, Proceedings of the 7th International Conference on Score and Erosion, pp.213-223.

Seepage failure of soil –Failure by subsurface erosion–

Tsutomu Tanaka

Abstract

Seepage failure of soil is classified to two categories, “Failure by subsurface erosion” and “Failure by bulk heave” by Terzaghi, in the geotechnical engineering field. “Failure by subsurface erosion” is expressed as “Failure by soil-particles movement or Local failure”, and “Failure by bulk heave” as “Bulk-heave failure or General failure”. In this paper, “Failure by subsurface erosion” is discussed. The “Failure by subsurface erosion” is also classified in the following 4 terms and discussed from geotechnical aspects: (1) Piping (in a narrow sense), (2) The movement of fine soil particles through a boundary of two soils with different grain sizes (related to the design method of sand filters), (3) Internal erosion (in a narrow sense), and (4) Progressive backward sloughing. In recent years, “Failure by subsurface erosion” is expressed as “Internal erosion (in a broad sense)”, in river- and dam-engineering fields. The four terms mentioned above are also associated with (1) Concentrated leak erosion, (2) Contact erosion, (3) Suffusion, and (4) Backward erosion, respectively. As for the seepage failure problems on hydraulic structures such as canal works, head works, and dams, and subsoil under those structures, this paper focuses on the “Failure by subsurface erosion” and discusses the terminology and significance (or original meaning) of each seepage failure phenomenon.

Key words: Seepage failure, Failure by subsurface erosion, Failure by bulk heave, Concentrated leak erosion, Contact erosion, Suffusion (and Suffosion), Backward erosion, Internal erosion (in a broad sense)

©2024 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.