



地盤及び土構造物のパイピングによる浸透破壊 : 破壊形態の分類と破壊事例の分析

田中, 勉

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 16:301-326

(Issue Date)

2012-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD01)

<https://doi.org/10.24546/81011396>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011396>



地盤及び土構造物のパイピングによる浸透破壊 —破壊形態の分類と破壊事例の分析—

Piping failure of soil and earth structures —Failure modes and case histories—

田中 勉¹⁾
Tsutomu Tanaka

概要：浸透破壊は、パイピングによる破壊 (Piping failure) と全体的な破壊 (Bulk heave failure) に分けられる。浸透破壊は、実際には、パイピング、サンドボイル、ルーフィング、クイックサンド、ヒービング、ハイドロリック・フラクチャリングなどいろいろな用語で表現されている。ここでは、まず、これらの用語を定義し、分類と整理を行う。そして、土粒子の移動やパイピングが生じる原因についてまとめる。フィルダムの破壊の原因は、46%が浸透破壊（とくにパイピング）であると言われている。しかしながら、パイピングには、いまだ未解明な部分が数多く多く残されており、その現象の解明が待たれているところである。したがって、ここでは、とくに、パイピングに関して、その現象の把握とそれによる地盤や土構造物の破壊について考えることにする。幾つかのパイピング破壊事例を詳しく取り上げ、パイピングに関して、設計においてどのように考えればよいか、予兆の早期発見と対処がどれほど重要であるか、起こってしまったときにはどのように対処すればよいか、などについて明らかにする。さらに、現象の解明には、これまでに報告されているパイピング破壊事例の研究成果が如何に重要であるか、原因の究明には、目撃者の証言が如何に重要であることを示唆する。

キーワード：浸透破壊, パイピングによる破壊, 全体的な破壊, ケースヒストリー

1. 序論

浸透破壊は、パイピングによる破壊(Piping failure)と全体的な破壊(Bulk heave failure)に分けられる。パイピングによる破壊は進行性破壊(Progressive failure)の形態を示し、全体的な破壊は突発的な破壊形態を示す。浸透破壊は、現在でも至る所で起こっており、早急に解決すべき問題である。ここでは、とくに、パイピングに関して、その現象の把握とそれによる地盤や土構造物の破壊について考えることにする。Foster et al. (2000) によると、フィルダムの破壊の原因は、46%が浸透破壊（とくにパイピング）であると言われている。しかしながら、パイピングには、いまだ未解明な部分が数多く残されており、その現象の解明が待たれているところである。パイピングの発生要因には、土質材料の種類、水理条件、異常気象、現場の条件や環境など種々のものが考えられるが、パイピング現象を正確に把握し、原因を正確に判定することによって、はじめて、

- (1) 現象の発生や破壊を防止し(防災),
 - (2) 予兆の早期発見から破壊を未然に防ぎ(減災 1),
 - (3) 発生してしまったときに被害の拡大を防ぎ被害額を最小にし(減災 2), そして,
 - (4) 原因究明と早期の復旧・復興計画を立てる(復旧・復興)
- ことが可能となる。

ここでは、まず、浸透破壊について、これまでに用いられている各種用語の定義、分類と整理を行う。次に、パイピングに関して、これまでに発生した事例を見ることによって、設計においてどのように考えればよいか、予兆の早期発見と対処がどれほど重要であるか、起こってしまったときにはどのように対処すればよいか、などについて明らかにする。さらに、現象の解明には、これまでに報告されているパイピング破壊事例の研究成果が如何に重要であるか、原因の究明には、目撃者の証言が如何に重要であることを示唆する。

2. 浸透破壊の分類と用語の定義

2.1 浸透破壊の分類

浸透破壊とは、浸透流によって、土粒子が洗い流されたり、土塊が力の釣合いを失い全体的に移動したりすることによって、土構造物や基礎地盤の働きが損なわれたり破壊したりする現象である。ここでは、このような土構造物や基礎地盤の浸透破壊について、その破壊形態を分類して説明する。浸透破壊の形態は大きく分けると次の2つになる(Terzaghi,1922)。

(1) 地下浸食による破壊 (Subsurface erosion)

(2) 膨れ上がりによる破壊 (Bulk heave failure)

ここで、(1) は、土粒子の移動による進行性破壊で、地盤内の弱点に沿って浸透水が集中的に流れ、洗掘作用を起こし、ついにはパイプ状の水孔を形成し、破壊する現象をいう。(2) は、全体的な破壊で、例えば浸透力によって下流側の地盤が全体的に急激に持ち上がり破壊する現象をいう。

実際の現象は、これら2つの破壊形態が入り混じっており、さらに複雑な様相を呈している。両者を厳密に分類することは難しいが、浸透破壊の主要因をこのように2つに分けることによってより理解が進む。実際には、浸透破壊は以下に述べるような言葉で表現される。

2.2 浸透破壊現象に関する用語

(1) **パイピング(Piping)** 土中を浸透水が流れることによって、浸透水から土粒子に流れの方向に浸透力が作用する。パイピングとは、浸透力が大きくなって土粒子が移動し、地盤内に水孔が生じる現象をいう。Fig.1 に示すように、一部分でパイピングが発生すると、その部分で動水勾配が大きくなり浸透力が増大し、さらにパイピングが助長され進行する。パイピングがつながると、チャネリング(Channeling)と呼ばれる現象が生じる。

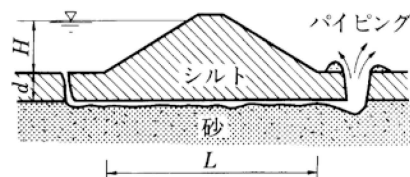


Fig.1 パイピング(土木学会編, 新体系土木工学, 1991)

(2) **サンドボイル(sand boil)** サンドボイルとは、Fig.2 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。

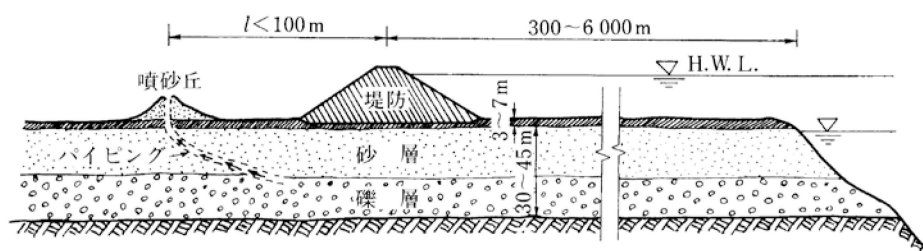


Fig.2 サンドボイル(土木学会編, 新体系土木工学, 1991)

(3) **ルーフィング(Roofing)** Fig.3 に示すように、土とコンクリートやスチールの境界面では水が通りやすく、その部分でパイピングが発生し進行した状態を、とくにルーフィングという。フローティングタイプの頭首工堰体下面において、それに沿った浸透水の流れによってルーフィングが生じることがある。

(4) **ヒービング(Heaving)** 軟弱地盤などで根切り工事をした場合に、土かぶり圧の減少、被圧地下水の浸透力による押し上げ、下層土のせん断破壊による回り込み、などによって根切り底面の土が膨れ上がる現象をいう。浸透水によるものについては、上向きに働く浸透力により地盤が上方に膨れ上がる現象をいう。

(5) **クイックサンド(Quicksand)** 飽和した砂地盤に上昇浸透流が生じ、上向きの浸透力が砂の水中単位体積重量に等しくなると、砂粒子間の有効応力が0になって、砂粒子は上昇浸透流中に浮遊した状態となる。このように、飽和砂地盤が上昇浸透流によって液体のような状態になる、すなわち液状化する現象をクイックサンドという。

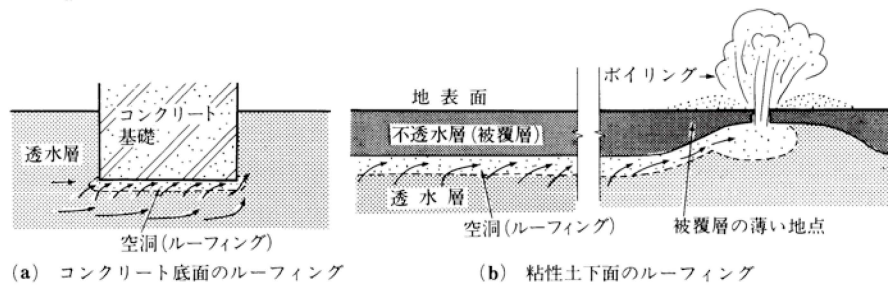


Fig.3 ルーフイング(土木学会編, 新体系土木工学,1991)

(6) ボイリング(Boiling) 上昇浸透流のある砂地盤において、大きな水頭差が作用すると、砂地盤はクイックサンド状態となり支持力を喪失する。さらに水頭差が大きくなり浸透力が大きくなると、砂粒子は浮遊状態から沸騰状態となり、砂が地表面上に吹き上がる状態となる。砂地盤が、このような状態になる現象をボイリングと呼ぶ。

(7) ハイドロリック・フラクチャリング(Hydraulic fracturing) ハイドロリック・フラクチャリングとは、岩盤や地盤の中で間隙水圧がその引張り強さ以上になったときに、岩盤や(土質)地盤に亀裂が発生する現象をいう。Fig.4 に、Open fracture 中における流水の漏出機構が示されている(Valko and Economides, 1995)。図で中央の円はボーリング孔(液の注入孔)を表している。ハイドロリック・フラクチャリングについては、元来、石油産業の分野で、岩盤に関して定義され用いられてきた。ハイドロリック・フラクチャリングは、クラックが発生し、大きくなる過程は膨れ上がりによる破壊に相当する。そのクラックが水孔や水みちとなると、土粒子を洗い流す原因、すなわち地下浸食による破壊の誘因となる。

ハイドロリック・フラクチャリングの発生について Duncan と Seed が提案した定義式は、 $\Delta u > \sigma_3 + \sigma_t$ であり、引張り強度との関係で記されている。ここに、 Δu は間隙水圧、 σ_3 は全応力表示による最小主応力、 σ_t は土の引張り強度である。また、実験的に浸透破壊を評価することもでき、 $\Delta u = m\sigma_3 + n$ としてまとめられる。ただ、 m, n は粘着力や材料に依存するが、明瞭ではなく、粘性土については未だ明確な判定がないという課題が挙げられる(岡本敏郎, 2009)。

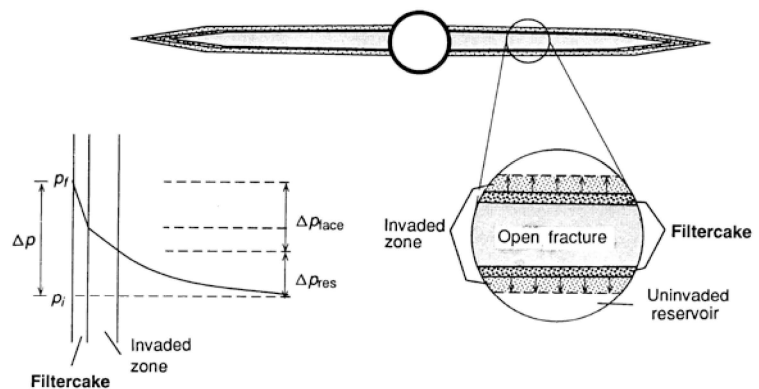


Fig.4 ハイドロリック・フラクチャリング(Valko and Economides,1995)

(8) ポンピング(Pumping) ポンピングは、泥土が、道路の路盤、基層、路面へ、あるいは、鉄道の道床、路盤に噴出してくる現象で、一般に噴泥と呼ばれているものである。噴泥(ポンピング)現象は、路床土が粘土あるいはシルトで含水量が大きい場合に起こる。とくに、鉄道において、噴泥のソースが直接下の路盤のみの場合は路盤噴泥と呼ばれる。下層の泥が水と一緒に湧出し、Fig.5 に示すように、下層部が空洞になり地盤沈下をおこすものである。その原因は、水の存在、繰返し荷重、土質条件(細粒土の存在)であると考えられている(土質工学会編, 土質工学ハンドブック, 1966)。水で飽和した土が、繰返し荷重により圧縮され、発生した過剰間隙水圧によって水と土からなる懸濁液が上部に噴出するものである。繰返し荷重によって発生する局所的な液状化現象であると考えられる。

(9) 液状化(Liquefaction) 飽和している砂質土に急に振動や水圧が作用したとき、土粒子間に働く有効応力が 0 になり、砂地盤がせん断抵抗を失い液体状になる現象をいう(農業土木学会編, 農業土木標準用語辞典, 2007)。

(10) 進行性法くずれ(Progressive backward sloughing) 進行性の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(河上, 1972, 最新フィルダム工学, 1972)。この現象は、Fig.6 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、水圧に抵抗できなくなると突発的な崩壊を生じる。

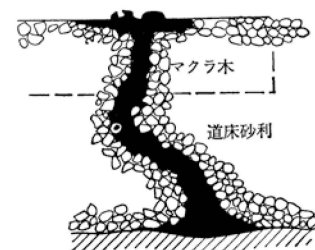


Fig.5 ポンピング(土質工学会編, 土質工学ハンドブック, 1966)

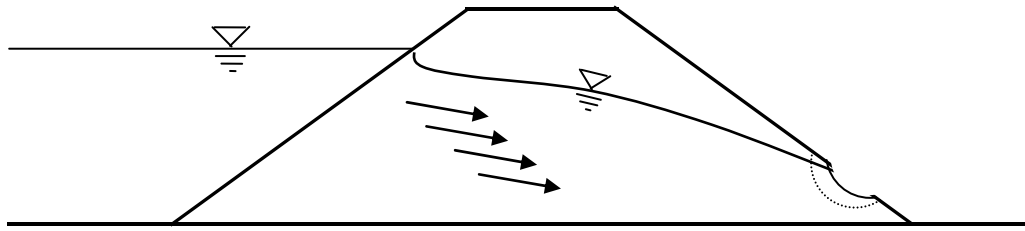


Fig.6 進行性法くずれ(Sloughing)の概念図

これらの現象を、前述した2つの分類法にしたがって分けると、次のようになる。

- (1) 地下浸食による破壊
パイピング、チャネリング、サンドボイル、ルーフィング、進行性法くずれ、(ポンピング)、(液状化)
- (2) 膨れ上がりによる破壊
ヒービング、クイックサンド、ボイリング、ハイドロリック・フラクチャリング、(ポンピング)、(液状化)

2.3 土粒子の移動やパイピングの原因

土粒子の移動やパイピングが生じる原因には、いろいろなものがあると考えられているが、その例を挙げると次のようになる。

- (1) 土の性質
 - ① 階段状の粒度分布の土
 - ② 広い範囲に分布する粒度の土
 - ③ 分散性の土（粘着力の小さな土）
 - ④ 二層からなる土（フィルター則を満たしていない二層の場合）

人工的な構造物の場合には適切なフィルターの設置により土粒子の移動等を防ぐことができると言われている（河上, 1972）。
- (2) 水理的条件
 - ① 浸潤面(浸出面)の発生
 - ② ハイドロリック・フラクチャリングの発生
- (3) 施工ミスなど
 - ① 堤体内のクラックの発生
 - ② 締固め不十分
 - ③ 霜柱などの発生による弱層の形成
- (4) 土質材料以外の構造物（コンクリートや鋼構造物）と土質地盤の境界、粘性土地盤と砂質地盤の境界
これらの境界面は、浸透流が通りやすく水みちとなりやすい。
- (5) 木製管や陶製管による底樋の腐朽や老朽化
- (6) 動物性の穴
堤体に被害を及ぼした動物として、ジャコウネズミ、地上性リスとアナグマ、モグラ、ヌートリアなどの例がある（河上, 1972, 田中, 2012）。
- (7) 植物の根
樹木などの植物の根が腐って水みちとなったり、成長して擁壁をはらませたり(城壁近くの桜並木)することによって問題となることがある。
- (8) 水溶性物質の溶解（アバットメントや基礎地盤が水溶性物質からなっている場合）
 - ① 石膏、石灰岩（カルスト地形）

逆に、自然土から溶出した水溶性物質(酸化鉄など)が堆積してフィルターや排水孔を塞ぐ場合がある。

3. 浸透破壊事例

ここでは、土粒子の移動及びパイピングによる破壊事例について述べる。取り上げる事例は次のものである。

- (1) ティートンダムの決壊 (1976.06.05)
- (2) 河川堤防背後の地盤における噴砂
 - 1) ミシシッピ川堤防背後の地盤の噴砂の事例と対策(1937)

- 2) ダニューブ川の河川堤防の破壊 (1965)
- (3) 弁天池(安芸市)の決壊 (1997.03.23.)
- (4) 江良, 麻生, 狼藪, 大谷ため池(山口県むつみ村)の決壊 (1997.07.07.)
 - 1) 江良ため池
 - 2) 麻生ため池
 - 3) 狼藪ため池
 - 4) 大谷ため池
- (5) 宝谷池(松山市)の決壊 (1997.09.20.)
- (6) トクペー中池(兵庫県加東郡社町)の決壊 (1997.08.05-07.)
- (7) 進行性法くずれ (Sloughing)による破壊
 - 1) 眠谷池(池田市)における進行性法くずれ (1997)
 - 2) Sink Creek ダムの Sloughing による破壊 (1943)
 - 3) 高山池 (淡路市) 進行性法くずれによる決壊 (2011.09.21.)
- (8) 和尚第1池(豊能町)の決壊 (1961-1962)
- (9) 動物性の巣穴を起因とするパイピングの発生

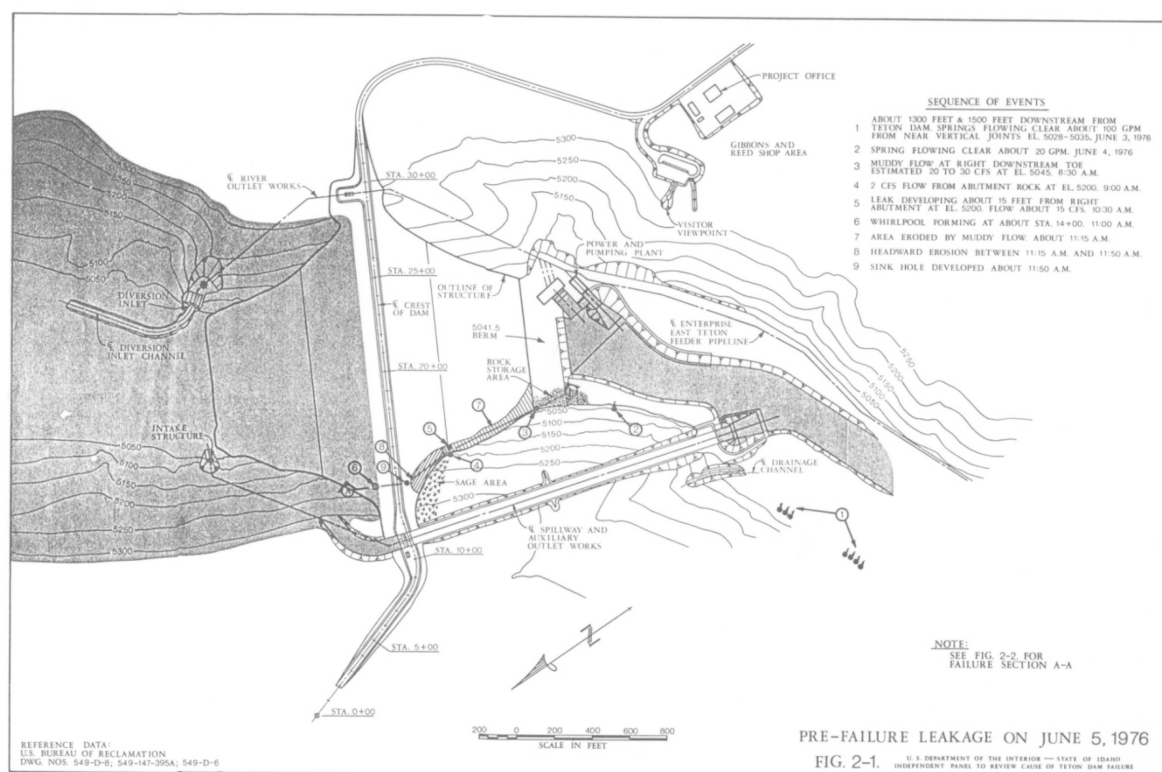


Fig.7 ティートンダムの決壊 (Sequence of events)

3.1 ティートンダムの決壊 (1976. 06. 05)

ティートンダムはアメリカのアイダホ州に建設された堤高 93m, 堤頂長 930m のアースダムである。1976 年 6 月 5 日, 初期湛水において, 貯水位がまさに満水面に達しようとしたとき決壊が起こった。事故後の調査によると, 決壊の原因は, 盛土内部に浸食がおりこれによって堤体材料が運び去られたため (すなわち, パイピング現象のため) だと言われている。被害は死者 12 人, 家を失った人 25,000 人, 浸水面積 780km², 被害金額 1,200 億円に達した。このように一度ダムの事故が起こると被害が莫大となり大変なことになる。

この破壊は, 亀裂性岩盤または岩盤付近の土質材料におけるハイドロリック・フラクチャリングが原因とされた。ティートンダムの決壊は, ダムの破壊でハイドロリック・フラクチャリング現象がはじめて指摘された事例である。

Fig.7 にティートンダムの決壊の状況が詳しく示されている。現象の経過を原文のまま紹介すると次のようになる (Fig.7 の右上の説明文参照)。

Sequence of events (1 gallon=4.5 l)

1. About 1300 feet & 1500 feet downstream from Teton Dam. Springs flowing clear about 100 GPM from near vertical joints EL. 5028-5035. June 3, 1976.
2. Spring flowing clear about 20 GPM. June 4, 1976.
3. Muddy flow at right downstream toe estimated 20 to 30 CFS at EL.5045, 8:30 A.M.
4. 2 CFS flow from abutment rock at EL.5200. 9:00 A.M.
5. Leak developing about 15 feet from right abutment at EL. 5200. Flow about 15 CFS. 10:30 A.M.
6. Whirlpool forming at about STA. 14+00. 11:00 A.M.
7. Area eroded by muddy flow. About 11:15 A.M.
8. Headward erosion between 11:15 A.M. and 11:50 A.M.
9. Sink hole developed about 11:50 A.M.



Fig.8 ティートンダムの決壊の様子



Fig.9 ティートンダムの決壊後の状況

3.2 河川堤防背後の地盤における噴砂

(1) ミシシippi川堤防背後の地盤の噴砂の事例と対策(1937) 河川堤防背後の地盤において、自然表層が砂質土からなっており、上方へ向かう浸透流が砂質粒子を洗い流すほど強い場所では、砂分は地盤上で湧水のまわりにリング状に堆積する(噴砂)。噴砂が発生しても観察をおこたったり放っておいたりしたままにしておくとパイピングによる崩壊を生じることになる。



Fig.10 典型的な噴砂口(W.J.Turnbull) (アースダムとアースロックダム p.63)
(Sand boils in Sack Sublevee Basin near Friars Point, Miss., 1937 High water)
(Turnbull and Mansur, 1961a, 1961b, 1961c)

噴砂の大きさと間隔について、あるダムでは約 5~7.5cm のものが 0.6~0.9m の間隔で数多く発生したという例が上げられている。Turnbull and Mansur (1961a, 1961b, 1961c) は, Mississippi 川の堤防に沿って行われた基礎地盤の間隙水圧測定の結果をまとめているが、そこでは大規模な地下浸透と噴砂が発生している。噴砂が発生する条件は場所によって大きく異なるが、上向きの動水勾配が 0.5~0.8 以上のときに細粒の非粘着性土に発生すると考えられている。Fig.10 に Turnbull によって示された典型的な噴砂口の写真を示す。

大きな噴砂口の防止方法としては、砂袋などをまわりに積み上げて防壁をつくり一時的に抑制したり、排水用のリリーフウェルの設置やフィルター材料を敷き広げたりすることによって永久に抑制することができる。小さな噴砂口が接近して無数に存在する場合には、底部が砂、上部が粗い礫からなる透水性材料を約 0.9~1.5m の厚さに敷き拡げるような逆フィルターを用いることによって防ぐことができるとされている (河上, 1972)。

(2) ダニューブ川の河川堤防の破壊 (1965) 1965 年にスロヴァキア領におけるダニューブ川の河川堤防が 2 箇所破堤した(Hulla and Kadubcová, 2000, Peter and Šebesta, 1965, 田中・浦田, 2006)。これは、河川堤防の下層地盤で地下浸食が生じたために引き起こされた。1,000km² の高品質の農業用地が洗い流され、3,910 戸が倒壊し、6,180 戸が損傷を受けた。本地点の堤内側地盤は、河川から連続した厚い礫層の上に薄いシルト層がのった状態となっている(Fig.11 参照)。堤防決壊の原因を踏まえ、1995 年から 1997 年にかけて、堤防の浸透破壊に対する安定性強化対策が講じられた。本地点で採られた対策は、堤防の堤内地側(裏法面)において盛土を追加し、堤外地側(表法流水側)において、表面に金属製フォイルを張り、地中連続壁を打設することによって、堤防の下層地盤の止水性を高めることが主体であった(Fig.12 参照)。ここで、不透水性粘土層は地表面下約 100m 以上の深さにあるため、地中連続壁は下部粘土層に達していない。

1997 年に洪水が発生し、これらの対策が効果的であったことが実証された。地下水流速が最大となったときでさえ、堤防下部の礫層間隙への砂粒子の移動が起こらなかった。

Hulla and Kadubcová (2000) は、地盤には $k_h/k_v=10$ 程度の異方透水性があると報告している。ここに、 k_h , k_v は、水平及び鉛直方向の透水係数である。ここで講じられた安定性強化対策の効果を調べるため、FEM 浸透流解析および浸透破壊に対する安定解析を行った (田中・浦田, 2006)。

解析結果から、異方透水性を考慮した場合、改修後の自由水面は、改修前に比べ最大で約 1.49m 低下し、異方透水性を考慮しない場合よりも大きな効果が表れた。また、異方透水性を考慮した場合の等ポテンシャル線分布(Figs.13(a), (b))は、考慮しなかった場合の等ポテンシャル線分布(田中・浦田, 2006)と比較して、等ポテンシャル線が堤外地側の地盤内へ集まっていることがわかる。さらに、Figs.13(a), (b)から、地盤に異方透水性がある場合、改修後の等ポテンシャル線が地中連続壁付近に集中しており、浸透水が地中連続壁を迂回して流れていることがわかる。これは、異方透水性を考慮した場合、浸透流は鉛直方向の方が水平方向よりも水頭損失が大きくなるが、地中連続壁は浸透水の流れを鉛直方向に向ける効果があるためだと考えられる。したがって、異方透水性を考慮しない場合よりも異方透水性を考慮した場合の方が地中連続壁の効果が大きいことがわかる。

異方透水性を考慮した場合、堤内地側の地盤は、改修前、安全率が $F_s=0.911\sim1.012$ となり、浸透破壊に対して危険な状態にあることがわかった。改修前の状態において、安全率 F_s が最小値を示す地点を Fig.14 に示す。シルト層が破られて礫層の土砂が噴出するものと考えられる。次に、改修後の安全率は $F_s=0.943\sim1.048$ となり、改修前と比べ、ある程度改修の効果が見られる。

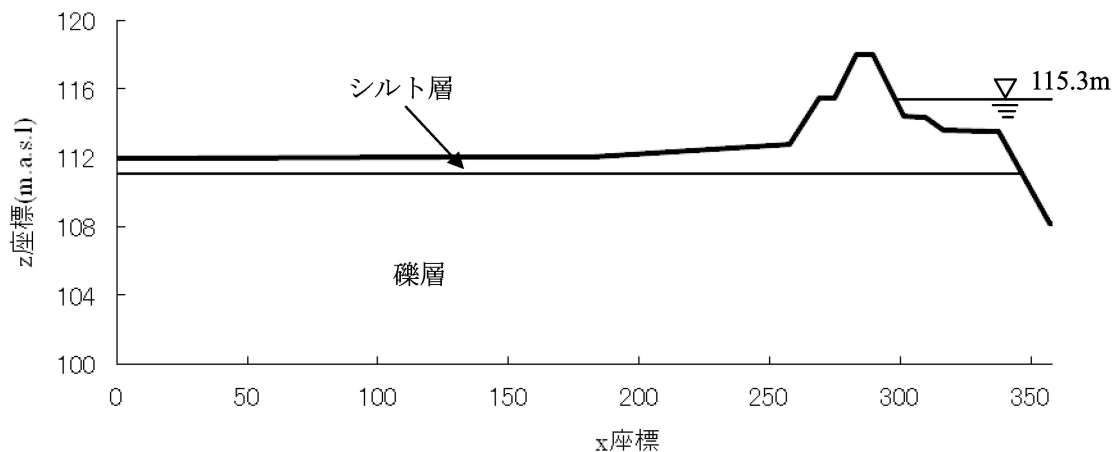


Fig.11 改修前のダニユープ川河川堤防の概略図

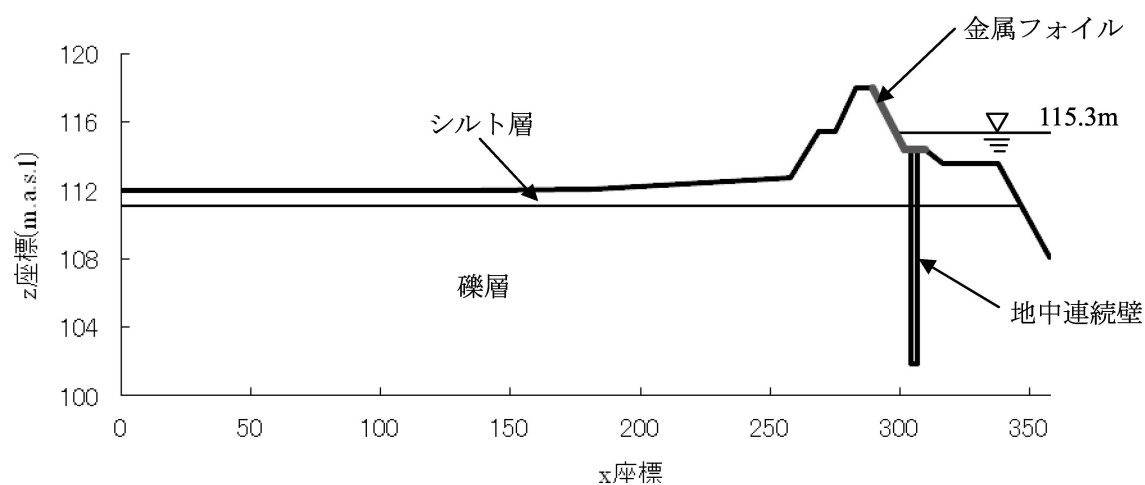
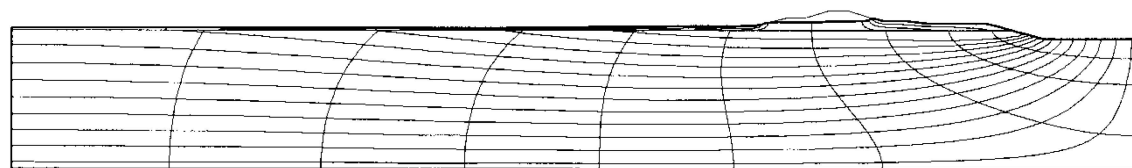
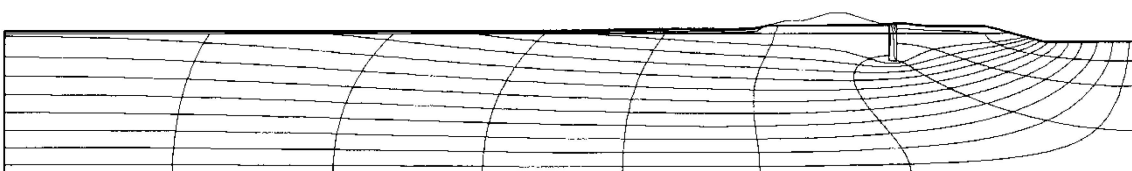


Fig.12 改修後のダニユープ川河川堤防の概略図



(b) 改修前の流線網(異方透水性を考慮)



(b) 改修後の流線網(異方透水性を考慮)

Fig.13 異方透水性を考慮したときの改修前後の浸透流

得られた結論をまとめると次のようになる。(1) 堤体内の自由水面は、改修後、改修前に比べて、異方透水性を考慮しない場合には最大で約 1.19m、異方透水性を考慮した場合には最大で約 1.49m 低下する。異方透水性を考慮した場合の方が考慮しない場合よりも、改修後の自由水面の低下量が大きい。(2) 異方透水性を考慮しない場合、堤内地側の地盤は、改修前後において、浸透破壊に対して安全である。(3) 異方透水性を考慮した場合、堤内地側の地盤は、改修前、浸透破壊に対して危険となる。(4) 異方透水性を考慮した場合、異方透水性を考慮しない場合

に比べ改修の効果が大きい。(5) 金属フォイルの長さは、浸透破壊に対する安全率の増加に与える影響が小さい。
(6) 浸透破壊に対して安定性を高めるためには、地中連続壁の打込み深さを大きくする必要がある。

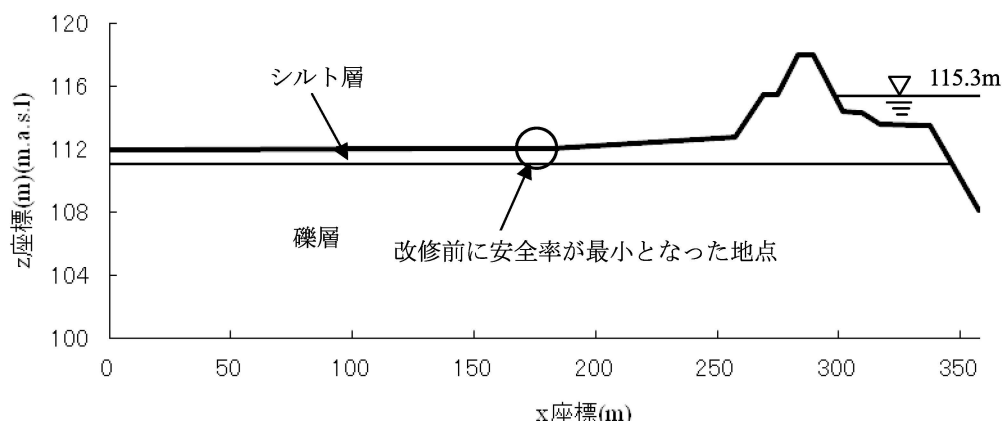


Fig.14 異方性を考慮した場合に改修前に安全率が最小となった地点

3.3 弁天池(安芸市)の決壊(1997.03.23.)

安芸市内野原に位置する弁天池は、安芸市の中心から約4km北の田園地帯にある。堤高8.7m、堤頂幅4m、堤底幅30m、満水位7m、貯留量約8万 m^3 である。1680年頃(江戸時代はじめ)の新田開墾に伴って平地に堤防を築いて造られた。すぐ東の清水谷川から取水されている。

弁天池は1992年の集中豪雨のあと数ヶ所で水が噴き出したため、また、池の南の農地で頻繁に水がにじみ出るという現象が見られたため、1992年秋から1993年春(平成5年6月)にかけて底樋部分を含む約170m幅に渡って災害復旧がなされた。それまでの決壊の記録はない。

1997年3月23日(日)午前2時30分頃南側堤体が幅21.5mに渡って決壊した。田植え期であり、第22回つつじ祭のために3月20日頃から満水状態であった。水位は、通常、満水状態から7割の状態にあるが、数日前の雨で増



Fig.15 平成9年(1997年)3月26日の高知新聞記事

水し満水状態であった。決壊の前兆、及び、決壊の様子と被害の状況をまとめると次のようになる。

＜決壊の前兆＞

- (1) 前年(1996年)の秋から冬にかけて、決壊地点の放水口の上部約1m付近で漏水が起こっていた。
- (2) 決壊の数日前、普段より漏水が多くなっていた。
- (3) 前日、石垣の上より、いつもより多くの水が出ていた。
- (4) 前日3月22日の夕方には漏水が泥水になっていた。

＜決壊の様子と被害の状況＞

- (1) 約500m南の県道において流れ出した水の水位は約1mであった。
- (2) 濁流は約1km南の安芸川(約1.5km南西)まで走った。
- (3) 園芸ハウスの破壊や農地の浸食及び泥土の堆積などの耕地被害により、被害総額は約2億円となった。被害の詳細は、床上浸水1戸、床下浸水4戸(土砂に埋まる)、農地冠水約13.1ha(うち園芸ハウス3.2ha(ナスなど))(被害農家約30戸)、水道管が流され約20戸が一時断水(18世帯)などであり、けが人はなかった。

Fig.16 に決壊した堤体を貯水池側からみた様子(1997年3月3月27日)(破壊断面の下方に底樋及び斜樋の残骸が見える)、Fig.17 に決壊した堤体を下流側から望む写真(1997年4月10日)を示す。この時点で、温室はすでに一部片付けられている。



Fig.16 決壊した堤体を貯水池側から見た様子(1997年3月3月27日)



Fig.17 決壊した堤体を下流側から望む(1997年4月10日)

3.4 江良、麻生、狼藪、大谷ため池(山口県むつみ村)の決壊(1997.07.07.)

山口県阿武郡むつみ村では、当時75個(山口県内には312個)のため池があったが、台風9号(この台風は、四国、中国をゆっくり横断した)により、4つのため池(江良、麻生、狼藪、大谷ため池)が決壊した。阿武町福賀で総雨量930mm、むつみ村で総雨量670mmが記録された。時間最大雨量は40mm/hrの強雨であった。この台風による被害

総額はため池決壊を含めて 130 億円となった。

(1) **江良ため池** 江良ため池堤体は、堤高約 12m、貯水量約 5 万 m^3 であり、蔵國喜川に流れている。堤体は 2 度の築堤工事を経て高さ 12m になったものである。旧堤体の高さは 8m である。旧堤体の遮水材料には非常に硬い青灰色の粘土が用いられ、現堤体の遮水材料には玄武岩の風化した非常に硬い粘性土が用いられていた(Figs.18, 19)。それ以外の堤体土には花崗岩の風化したマサ土が用いられていた。決壊通報によると、「1997 年 7 月 27 日 10 時 5 分頃に決壊した」と報告されている(山本ら, 1998)。それまでの累積雨量は 372mm であった。午前 9 時 50 分周辺 6 地区の住民 149 世帯 411 人に対して公共施設への避難指示が出された。

堤体の決壊を当初から目撃した人の話によると、莫大な累積雨量によってため池が満水になった結果、越流水が下流側マサ土斜面を徐々に浸食し、その崩壊部が拡大していった堤体が決壊したということである。ため池が満水になった他の原因として、洪水吐側のマサ土斜面の崩壊に伴い、土砂及び樹木が洪水吐を閉塞したことも考えられる。破堤の原因は越流による堤体の浸食であると考えられる。



Fig.18 江良ため池堤体の決壊



Fig.19 江良ため池決壊部分の近接写真
(下部に青灰色の粘土(旧堤体), 上部にマサ土がみえる)

(2) **麻生ため池** 麻生ため池は、堤高 16m、貯水量 10 万 m^3 の 1921 年(大正 16 年)に築造された大ダムである。7 月 27 日深夜に決壊した(決壊の通報は 7 月 28 日 1 時 38 分にあった)。破堤の原因は底樋管付近に発生したパイピングが原因であるとされている。それまでの累積雨量は 521mm であった。本堤体土には花崗岩及び花崗閃緑岩の風化したマサ土が用いられている(Figs.20, 21)。堤体の決壊を目撃した人の証言によると、「最初、底樋管の埋設箇所から発生し、次第にその規模を増大して、堤頂から深さ約 5m に達する空洞が形成された。その後、空洞上部が崩落し、V 字形の大決壊に至った。」ということである(山本ら, 1998)。現場透水係数の測定が行われ、 $4.1 \sim 6.2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ が得られている。遮水材料としての基準値 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ より 1 桁大きな透水係数が実測されている。決壊の原因は、底樋管に沿ったパイピングであると考えられる。



Fig.20 麻生ため池堤体の決壊(1997年8月2日)



Fig.21 麻生ため池決壊部分の近接写真(1997年8月3日)
(堤体にはマサ土が盛立てられている)

さて、ここで見た2つのため池について、破堤の原因は「越流による破壊」及び「パイピングによる破壊」であるが、事後の決壊断面はほぼ同じ形状を示している。したがって、破壊の原因を、事後の形状だけから正しく判定することができないことが指摘される(Fig.18 及び Fig.20)。決壊の瞬間を目撃した人の証言が正確な原因究明の鍵を与えることになる。また、堤体に実際にパイピングが生じていても、その後、水位の上昇による越流と浸食破壊の方が先行して起こった場合には、越流が直接の破壊原因であると判定されることになることになり、パイピング現象は隠されることになる。このことは、事後の堤体の破壊形状からだけでは正確な原因を特定することが大変難しいことを意味している。

(3) **狼藪ため池** 狼藪ため池は、貯水量 $25,000\text{m}^3$ のため池である。破堤の原因は、ため池の後ろの山が崩れてため池に流れ込み水があふれ出たため、貯留水が越流して堤体が破堤したと考えられている。それまでの累積雨量は 678mm であった。貯水池には厚さ 2m のヘドロが堆積していた。堤体には樹木が生育し、ため池の半分にはがまが繁茂し、杉の植林が行われており、維持管理が行き届いていなかった。山本ら(1998) は、堤体の目視調査から、斜樋管と底樋管周辺のマサ土地盤が著しく浸食されていることから、破堤の原因は管のまわりのマサ土地盤のパイピングによるものと判断している。底樋、斜樋管は木造であった。このように、決壊の原因は、底樋管に沿ったパイピングであると考えられる。

(4) **大谷ため池** 堤高 2.3m 、貯水量 $4,000\text{m}^3$ のため池である。7月27日午前10時過ぎに決壊した。当池は、人里離れており、現地を見いだすことができなかったため、著者らによるは直接調査結果はない。したがって、決壊の原因は不明である。

3.5 宝谷池(松山市)の決壊(1997.09.20.)

宝谷池は、松山市畑寺町にある、堤高 15.4m、貯水量 3 万 m³ の大ダムである。松山市には農業用ため池 365 ヶ所が存在する(愛媛県のため池は 3340 ヶ所存在する)。

平成 9 年(1997 年) 9 月 20 日(土) 午前 4 時過ぎ、決壊の兆候「ザーザーと激しく水路を流れる水音」があり、午前 5 時 50 分頃、濁流が水路からあふれ出した。決壊は、午前 5 時 52 分頃である。決壊の瞬間の証言によると、「堤に約 50cm の穴が開いて水があふれ出し、みるみる穴が大きくなり崩れていった。」ということである。決壊の原因は、底樋に沿ったパイピングであると考えられる(Figs.22, 23, 24, 25 参照)。

ため池は、1997 年 9 月 16 日の台風 19 号以降、満水状態であった。このとき、107mm/day の降雨が観測されている。堤体は、昭和 58 年(1983 年)、2,260 万円をかけて改修されたものであった。改修から、14 年(=1997-1983)が経過していた。被害は、床下浸水(水深約 1m) 31 棟、けが人 1 人、農地埋没 5a(サトイモ)であった。堤体の土質は、物理試験の結果からシルト質砂 (SM) であった。粒径加積曲線を Fig.23 に示す。この土は粘着力がなく、パイピングに対する抵抗性は大変小さいと考えられる。

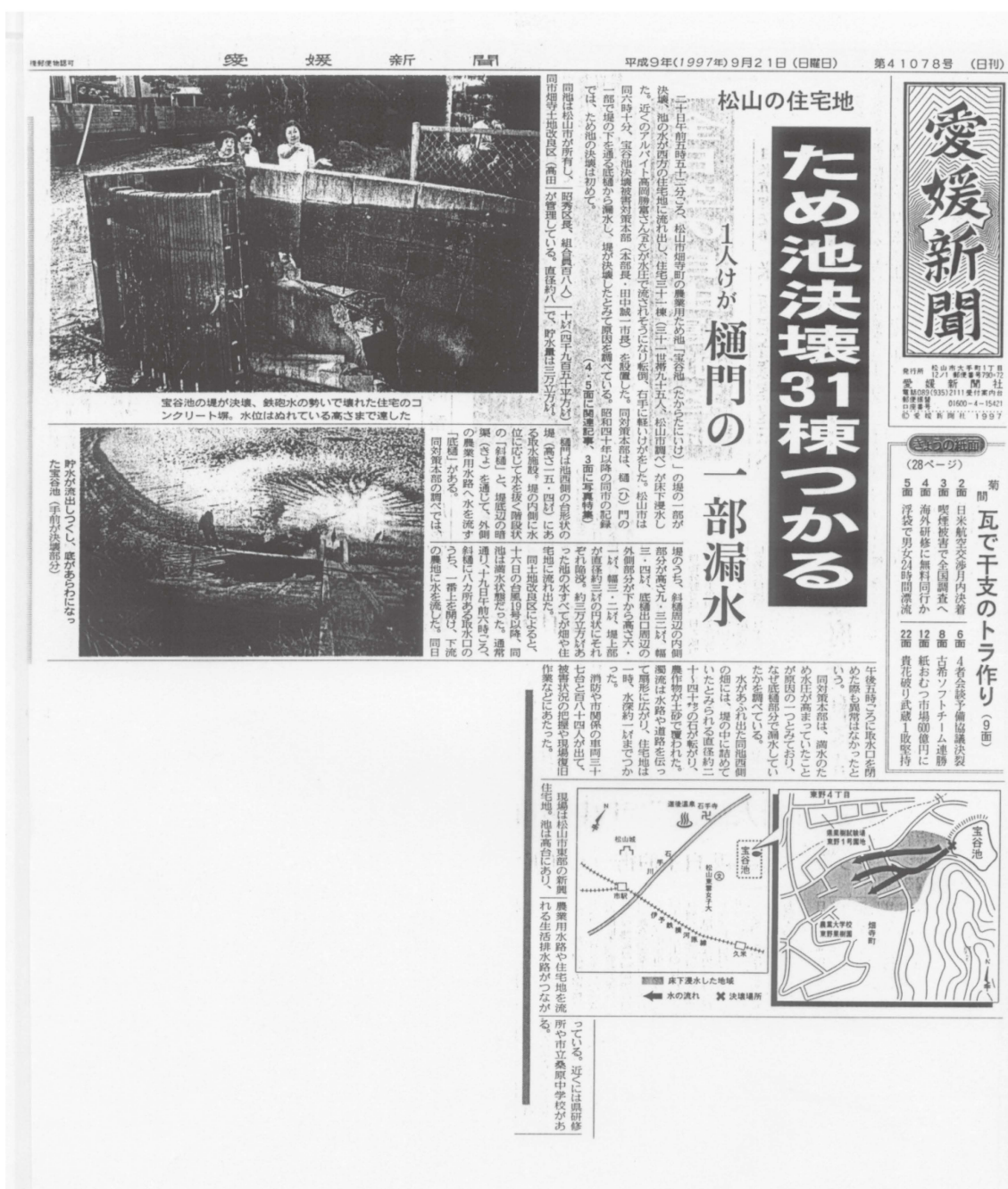


Fig.22(a) 平成 9 年(1997 年)9 月 21 日の愛媛新聞記事 1

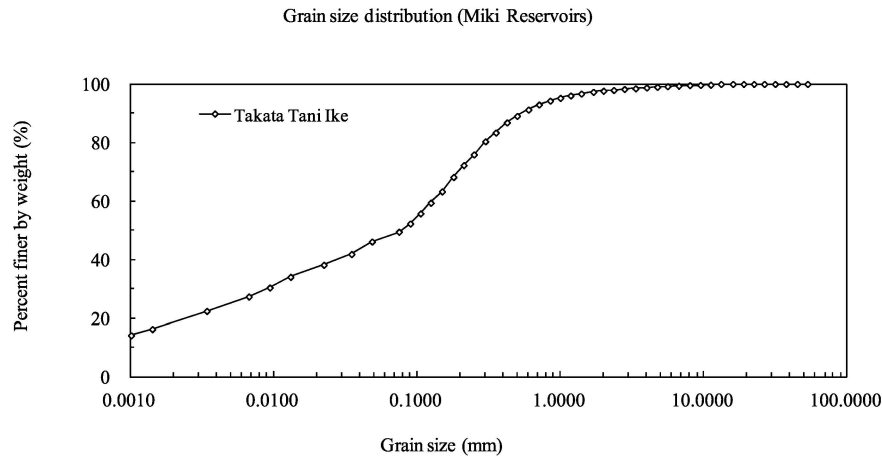


Fig.23 宝谷池堤体材料の粒径加積曲線



Fig.24 破堤した宝谷池堤体
(下部に底樋が見える)



Fig.25 底樋の左側におけるパイピング孔
(右側に底樋がある)

3.6 トクペー中池(兵庫県加東郡社町)の決壊(1997. 08. 05-07.)

トクペー中池は、加東郡社町 (現在加東市社)にある、堤高3.2m, 貯水量2,300m³, 受益面積2.5haのため池である。築堤(改修)は30～50年以上前といわれている。1997年8月5～7日の集中豪雨により破堤した。3日間の降雨量は76+3+86=165mm, 最大時間雨量89.0mmであった。木製の底樋の上方がパイピングで抜けた。破堤の原因は木製の底樋管の腐朽と、その周囲の土のパイピングであると考えられる。底樋とその上の部分が完全に抜けてしまったが、穴の上部の土は硬く安定し(セメンテーションが起こり), 人が乗っても崩れなかった。盛土は50年以上経過しており, 土粒子が相互に結合して安定しているように考えられる(Figs.27, 28 参照)。



Fig.27 トクベール中池堤体のパイピング孔

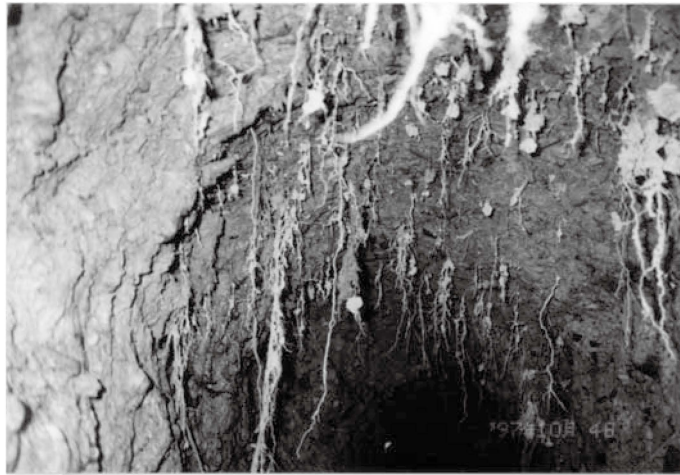


Fig.28 トクベール中池堤体のパイピング孔 (近傍の写真)
(上部に人が乗っても崩れない程しっかりしたパイピング孔のアーチ部)

3.7 進行性法くずれ(Sloughing)による破壊

(1) 眠谷池(池田市)における法くずれ(1997) 池田市畑3丁目にある、眠谷池は堤高7.0mの均一型の農業用ため池である。1997年の近畿農政局計画部 地域計画課の広域農村総合整備基本調査「北摂地域」(田中, 1998)のときに偶然に遭遇した事例である。堤体の下流側法面が浸出水の浸出による浸食によって崩れていく様子がうかがわれた(Figs.29, 30 参照)。

この現象は、進行性法くずれ(Sloughing)と考えられ、堤体の法すべりまたはパイピング破壊へ至る可能性があっ



Fig.29 眠谷池における進行性法くずれ



Fig.30 進行性法くずれの下部写真
(水の集中した流れとパイピング孔がみえる)

た。管理者による発見と通報によって、すぐに対処され(水位の降下と改修)堤体の破壊が免れた。Sinker Creek ダムでは(河上, 1972, 最新フィルダム工学, 1972), 下流法先で Sloughing 現象が起こってから破壊に至るまでの時間は短い(8 時間程度)と言われているが, このため池堤体材料には粘土分がやや多く含まれており現象が遅く進んだと考えられること, 対処が早かったことなどの理由で破壊に至らなかったと考えられる。

進行性法くずれ(Sloughing)とは, 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。この現象は, Fig.31 に示されるように, 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む。急峻で不安定なダムの残留部分は, この法くずれで非常に薄くなり, 最終的に水圧に抵抗できなくなって突発的な崩壊を起こすことになる。一方, 砂試料を用いた二次元堤体のパイピング破壊に関する実験的研究では, パイピングの先端が時間の経過とともに上流側に進み, 最終的に上流斜面(水面付近)に達して破壊を起こすことが知られている(田中・土居, 2010)。

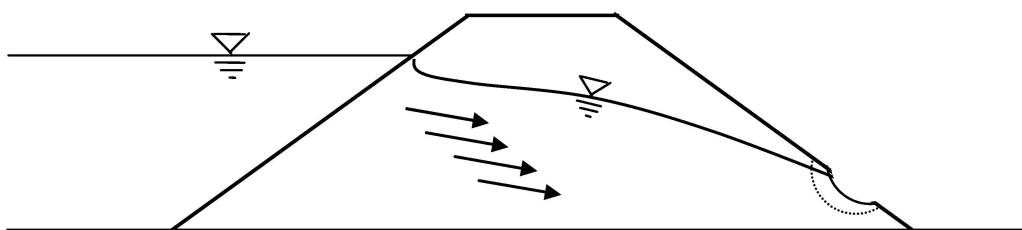


Fig.31 進行性法くずれ(Progressive backward sloughing)の概念図

(2) Sinker Creek ダムの Sloughing による破壊 (1943) (河上, 1972, 最新フィルダム工学, 1972) アメリカ, アイダホ州の Sinker Creek ダム(高さ 21m)は, 1943 年, Sloughing 現象によって破壊した事例である。この均一型ダムは, 1910 年に建設され 1918 年に高さ 21m までかさ上げされたかんがい用のダムであり, 堤体はシルト質と砂質の砂礫からできていた。灌漑用の貯水池であったので, 一年の一時期に満水になるだけであった。初めの 25 年間, 満水時にはいつでも下流面の大部分が飽和していたため, 満水期間をできる限り短くするための努力が払われたが, ダムの状態が危険であるとは考えられていなかった。

1943 年春の降雨で, 池は平年より数ヶ月はやく満水状態となり, 頻繁に監視が行われたが, 下流面が平年よりさらに大きい範囲にわたって飽和していることを除けば, 注目すべきことは何もなかった。

6 月中旬, 軟弱化した下流法先の小塊が Sloughing を起こし, 低いけれどもほとんど鉛直の面を後に残した。量は少ないが集中した漏水によりこの飽和面は不安定となり, ややあつてから再び Sloughing を起こし, 前より高い面が残る結果となった。薄く残ったダムが破堤に至るまでこの過程が続いたが, 下流法先で最初の Sloughing が起こってから破壊に至るまでの時間は約 8 時間であったといわれる。破堤に至るまで漏水量はあまり多くなかったため, 蓄えられていた全ての水が巨大な洪水となって下流に達する最悪の破壊となった。

(3) 高山池(淡路市)の進行性法くずれによると考えられる決壊 (2011.09.21.) 淡路市中田にあるこのため池は

堤高 7.0m, 堤頂長 102.0m, 上流斜面勾配 1:2.3, 下流斜面勾配 1:2.2, 天端幅 5.0m の均一型アースフィルダムである。総貯水量は 25,000m³ である。2011 年 9 月 21 日の台風 15 号の通過により豪雨が発生した。洲本観測所で最大時間雨量 51.0mm/hr, 最大日雨量 317.5mm/day を記録し、津名事務所で同 71.0mm/hr, 390.0mm/day, 一宮事務所で同 45.0mm/hr, 355.0mm/day が観測されている。地元農家への聞き取り調査によると、「豪雨によって（河川流入量が増加して貯水量が増加した。貯留水は、）洪水吐の流れ出して水位が上昇し、堤体の裏法の中段より高い位置で崩落が 2 箇所発生した(Fig.32)。中央で発生した崩落が拡大し貫通した。水量がだんだん大きくなり、流速も増して、堤体がどんどん浸食を受け V 字に拡大した。」ということである。崩壊は進行性法くずれの原因であると考えられる。崩壊の半月前の 9 月 2 日に台風 12 号が四国を横断しその影響で大雨があった。この雨によって堤体土が飽和するとともに、貯水位が高くなっていたと予想され、このことが進行性法くずれの発生と関係があるものと考えられる。



Fig.32 高山池の全貌



(a) 中央部決壊の様子

(b) 左岸側 Sloughing の様子

Fig.33 決壊した高山池中央部の様子と途中で止まった左岸側 Sloughing の様子

破壊形態をまとめると次のようになる。2 箇所で、堤体下流側法尻部分がパイピングによって浸食された(法くずれ)。この部分がさらに落ち込み滑り現象が進んでいった。斜面は、次第に急な勾配となり、貯水池からの浸透水で

浸食され落ち込み、急峻で不安定となった。この法くずれでダムの残留部分は非常に薄くなり、最終的に水圧に抵抗できなくなって突発的な崩壊を生じた。中央部(底樋の上部)で現象が進み、上流端に達して貯水が越流し崩壊が起こった。左岸側のもう一つの法くずれは現象が途中で止まって被災断面に残ることになった。

Fig.32 に高山池の全貌、Fig.33 に、(a)決壊した高山池中央部の様子と(b)途中で止まった左岸側 Sloughing の様子を示す。目撃談では、Fig.32 の赤の矢印で示す 2 箇所の部分で Sloughing 現象が始まったということである。Sloughing による破壊について、現象が始まってから決壊に至るまでは比較的少時間であると言われていることから、途中で現象が止まった状況の写真は貴重である。法くずれの上方に深さ 35cm 程度のパイピング孔が確認されており、パイピングと法くずれが連動して起こったことが予想される。

高山池の標準断面形状の上に法くずれ部分の形状を重ねたものを Fig.34 に示す。淡路島では、2012 年 9 月台風 15 号によって、このほかにもため池堤体の被災がいくつかあったが、このときのため池堤体の被災の原因には進行性法くずれと考えられるものが多いというのが特徴的である。



Fig.34 高山池の横断面形状と法くずれ部分の形状

3.8 和尚第 1 池(豊能町)の決壊 (1961-1962)

豊能町のこの池は、上流側から和尚第 1～第 3 池からなる重ね池の一つであり、3 堤とも昭和 36～37 年(1961～1962 年)頃に改修されている。1997 年の近畿農政局計画部 地域計画課の広域農村総合整備基本調査「北摂地域」(田中, 1998)のときに、大阪府の農業土木技術者より現地で説明を受けた事例である。和尚第 1 池は、旧堤の底樋の部分を改修して盛土し直したものである。冬に工事され、凍てついた土で締め固められた。築堤後 5～6 年して、パイピングによって水が抜け、そのまま放置されているということであった。

土質材料は、最適含水比付近で施工されたため、締め固められたときにはほぼ空気間隙率が 5%程度であり飽和に近い状態であったと考えられる。昼間に工事が行われ、夜間保温対策などがなされなかったため、締め固められた土が、地表面で凍てつき、さらに、地中の水分が上昇して凍ることによって霜柱がたった状態となり、地表近くの締め固め地盤は大変ゆるんだ状態となった。次の日、この状態のまま盛土が行われ「霜柱により浮き上がった土の層が堤体中に残った」と考えられる(Fig.35 参照)。この層が弱層となり、浸透水が集中的に流れ、パイピング破壊が起こったと考えられる。

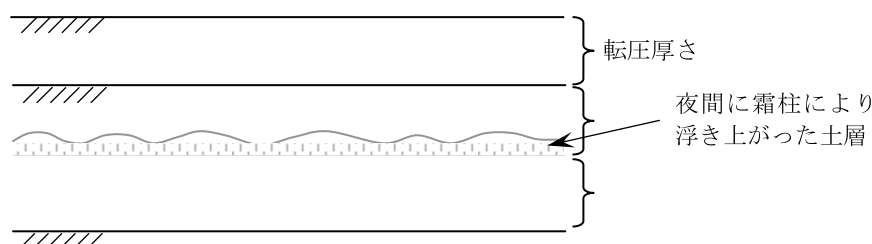


Fig.35 夜間に霜柱によって浮き上がった土層とその上への転圧盛土

3.9 動物性の巣穴を起因とするパイピングの発生

(1) ジャコウネズミ 米国における最も厄介な動物は、ジャコウネズミと地上性リスであると言われている(河上, 1972)。ジャコウネズミは、巣を作るために、あるいは通路を掘るために堤体内に入り込む。ジャコウネズミの穴の入口は、普通は水面下にある。柳やその他の灌木が水際に生えているときには、根が穴の入口を補強し、またその存在を隠すので、ジャコウネズミはそれらの木の下を掘るようである。ダムの両側に水がない場合には、ジャコウネズミは、上流斜面の下をずっと長く穴を掘る(Fig.36(a))。

多くのジャコウネズミがいる場合には、それらの穴の一つ一つが短くても小さなアースダムの堤体にとっては危険になる。ジャコウネズミが低いアースダムの貯水池と下流法尻の貯水池との間にトンネルを掘ったときもとても危険になる(Fig.36(b))。

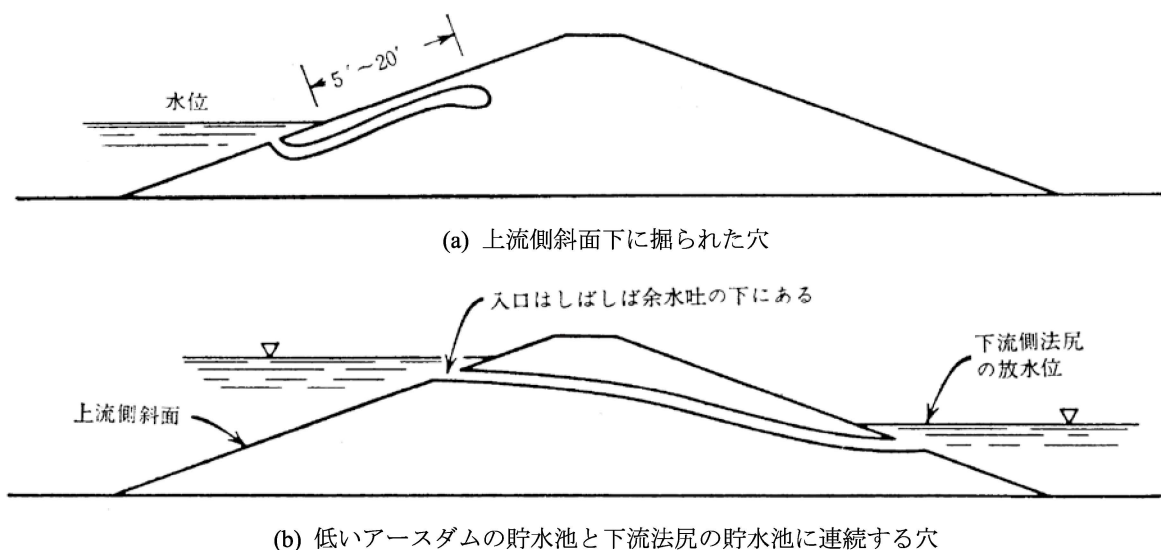


Fig.36 ジャコウネズミによって掘られた堤体内の巣穴 (河上, 1972)

(2) ヌートリア 日本では、各地でヌートリアによるため池堤体の巣穴とそれに起因するパイピング破壊が問題となっている。Web (<http://had0.big.ous.ac.jp/plantsdic/other/zoo/nutoria/nutoria2.htm>, 及び, Wikipedia) によると、岡山県自然保護センターのヌートリアの生息について次のように書かれている(一部改筆修正)。岡山県自然保護センターには2つの大きなため池があり、ヌートリアが棲んでいる。自然保護センター内は、鳥獣保護地域に指定されており、2つのため池の内、上流側の上池にはタンチョウが野外飼育されていることもあって、結果的には完全に保護された状態になっている。ヌートリアは、南アメリカ大陸からやって来た移入生物である。草食性で、餌は水草の実や根、若芽などであり、水田に侵入して稲も食べるといわれている。また、地中に穴を掘って巣を作るため、畦や堤防に穴を開けることもしばしばで、害獣として駆除の対象になっている。体長は50~70センチ(尾を含む)、体重は5~15Kg、草食性で主に河川等の水辺に生息する。もともと日本列島に住んでいた動物ではなく、1930年頃から軍服用の毛皮獣として輸入、飼育されるようになり、その一部が逃げ出して現在のように西日本を中心とする各地で見られる様になった。Fig.37 はため池の岸部に戯れるヌートリア、Fig.38 は巣穴の入口、また、Fig.39 はヌートリアのアップ写真を示す。



Fig.37 ため池の岸部に戯れるヌートリア(<http://had0.big.ous.ac.jp/plantsdic/other/zoo/nutoria/nutoria2.htm>)



Fig.38 ヌートリアの巣穴(<http://had0.big.ous.ac.jp/plantsdic/other/zoo/nutoria/nutoria2.htm>)



Fig.39 ヌートリアの近接写真 (Wikipedia より)

兵庫県三木市の人谷中池 (2011/07/24) は平成 23 年(2011 年) 5 月 30 日の豪雨時に、ヌートリアの巣穴に起因すると考えられるパイピングの発生によって大きな陥没坑が生じた(田中他, 2013)。この地区の近辺では、ヌートリアが野生化して住み着いているのが目撃されていることから、ヌートリアの巣穴がパイピングの引き金となった可能性が指摘されている。また、人谷中池のすぐ下流にある人谷下池には背後の土手にヌートリアの巣穴がありその生息が確認されていることからその可能性が確実視されている。人谷中池について, Fig.40 に波浪によって浸食された上流側斜面, Fig.41 にヌートリアの巣穴の入口, Fig.42 にヌートリアの巣穴の入口部分の近接写真を示す。



Fig.40 波浪によって浸食された上流側斜面 (人谷中池)



Fig.41 ヌートリアの巣穴の入口 (人谷中池)



Fig.42 ヌートリアの巣穴の入口部分の近接写真 (人谷中池)

3.10 堤体のパイピングによる破壊事例のまとめ

フィルダム、ため池、河川堤防などの堤体のパイピングによる破壊事例について述べた。破壊要因及び破壊事例全般からいえる事柄についてまとめると次のようになる。

- (1) 老朽化したため池では、樋管まわりのパイピング破壊が生じることがある。
- (2) 新しいため池でも、締固めが悪いとパイピング破壊をおこしたり、樋管まわりでのパイピングが発生したりする。
- (3) 洪水吐の容量不足や流木などによる洪水吐断面の閉塞が原因で生じた越流によって、堤体の表層土壌の浸食が進行し破壊した例が多い。
- (4) ため池の少ない県では、比較的小さな降雨量でも、大きな破壊が繰り返されている。技術の伝承がない、理論のわかる技術者がいないことに問題があるのではないかと考えられる。
- (5) 地元業者に堤体盛土工事に慣れた人がいないところで問題が起こっている。「道路盛土や造成盛土と同じ感覚で盛土してはならない。堤体内浸透流への配慮が必要である。」ことが指摘される。
- (6) 改修後間もないため池ほど破壊の規模が大きい。また、規模の大きなため池ほど大きな破壊を起こす。粘土分が適当に含まれているため池堤体では、築堤後数年経つと土質が安定化し(セメンテーションが起こり)、破壊しても規模が比較的小さい。ここでは、初期湛水時に破堤した例、築堤後4年目に破堤した例、13年目に破堤した例、50年以上経過して破堤した例を取り上げた。
- (7) 動物性の巣穴が原因と考えられるパイピングが起こることがある。
- (8) 兵庫県下には43,000個程度のため池がある。単純に計算すると、20個/年の改修でも2,000年に1度しか改修の機会が回ってこないことになる。(正確には、条例ため池等、ある程度規模の大きなため池について計算するのが妥当であるかもしれない。)

4. 結論

浸透破壊は、パイピングによる破壊(Piping failure)と全体的な破壊(Bulk heave failure)に分けられる。浸透破壊は、実際には、いろいろな用語で表現されている。ここでは、まず、これらの用語を定義し、分類と整理を行った。そして、土粒子の移動やパイピングが生じる原因についてまとめた。ここでは、とくに、パイピングに関して、その現象の把握とそれによる地盤や土構造物の破壊について考えた。幾つかのパイピング破壊事例を詳しく取り上げ、設計においてどのように考えればよいか、予兆の早期発見と対処がどれほど重要であるか、起こってしまったときにはどのように対処すればよいか、などについて明らかにした。さらに、現象の解明には、これまでに報告されているパイピング破壊事例の研究成果が如何に重要であるか、原因の究明には、目撃者の証言が如何に重要であるかを示唆した。まとめると次のようになる。

4.1 浸透破壊の分類と用語の定義

浸透破壊をパイピングによる破壊と全体的な破壊に分類し、実際に用いられている、パイピング(チャネリング)、サンドボイル、ルーフィング、ヒービング、クイックサンド、ボイリング、ハイドロリック・フラクチャリング、ポンピング、液状化、進行性法くずれについて、用語を定義し、分類と整理を行った。そして、土粒子の移動やパイピングが生じる原因についてまとめ、次のように分類した。

- (1) 土の性質
- (2) 水理的条件
- (3) 施工ミスなど
- (4) 土質材料以外の構造物（コンクリートや鋼構造物）と土質地盤の境界、粘性土地盤と砂質地盤の境界
- (5) 木製管や陶製管による底樋の腐朽や老朽化
- (6) 動物性の穴
- (7) 植物の根
- (8) 水溶性物質の溶解（アバットメントや基礎地盤が水溶性物質からなっている場合）

4.2 浸透破壊事例

パイピングが原因で生じた9種類の事例:

- 1) ティートンダムの決壊 (1976.06.05)
- 2) 河川堤防背後の地盤における噴砂
- 3) 弁天池(安芸市)の決壊 (1997.03.23.)
- 4) 江良, 麻生, 狼藪, 大谷ため池(山口県むつみ村)の決壊 (1997.07.07.)
- 5) 宝谷池(松山市)の決壊 (1997.09.20.)
- 6) トクベール中池(兵庫県加東郡社町)の決壊 (1997.08.05-07.)
- 7) 進行性法くずれ (Sloughing)による破壊
- 8) 和尚第1池(豊能町)の決壊 (1961-1962)
- 9) 動物性の巣穴を起因とするパイピングの発生

に関して、詳細に事例を分析し破壊要因について考察した。そして、次のような結論を得た。

- (1) 亀裂性岩盤または岩盤付近の土質材料におけるハイドロリック・フラクチャリングが原因でパイピングが起こることがある。
- (2) 河川堤防背後の地盤において、地盤が礫層と砂層の互層からなり、表層が砂質土からなっている場合、上方へ向かう浸透流によってサンドボイル(噴砂)を生じることがある。噴砂が発生しても観察をおこたったり放っておいたりしたままにしておくとパイピングによる崩壊を生じることになる。
- (3) 老朽化したため池では、樋管まわりのパイピング破壊が生じることがある。
- (4) 新しいため池でも、締固めが悪いとパイピング破壊をおこしたり、樋管まわりでのパイピングが発生したりする。
- (5) 洪水吐の容量不足や流木などによる洪水吐断面の閉塞が原因で生じた越流によって、堤体の表層土壌の浸食が進行し破壊した例が多い。
- (6) 平成9年(1997年)台風9号による山口県の江良ため池及び麻生ため池の破堤の原因は「越流による破壊」及び「パイピングによる破壊」であるが、事後の決壊断面はほぼ同じ形状を示している。したがって、破壊の原因を、事

後の形状だけから正しく判定することができないことが指摘される。決壊の瞬間を目撃した人の証言が、正確な原因究明の鍵を与えることになる。また、堤体実際にパイピングが生じていても、水位の上昇による越流と浸食破壊の方が先行して起こった場合には、越流が直接の破壊原因であると判定されることになることになり、パイピング現象は隠されることになる。このことは、事後の堤体の破壊形状からだけでは正確な原因を特定することが大変難しいことを意味している。

(7) 改修後間もないため池ほど破壊の規模が大きい。また、規模の大きなため池ほど大きな破壊を起こす。粘土分が適当に含まれているため池堤体では、築堤後数年経つと土質が安定化し(セメンテーションが起こり)、破壊しても規模が比較的小さい。ここでは、初期湛水時に破堤した例(ティートンダム)、築堤後4年目に破堤した例(弁天池)、13年目に破堤した例(宝谷池)、50年以上経過して破堤した例(トクペー中池)を取り上げた。

(8) 進行性法くずれ(Progressive backward sloughing)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。この現象は、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。この現象が起これば、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む。急峻で不安定なダムの残留部分は、この法くずれで非常に薄くなり、最終的に水圧に抵抗できなくなって突発的な崩壊を起こすことになる。一方、砂試料を用いた二次元堤体のパイピング破壊に関する実験的研究では、パイピングの先端が時間の経過とともに上流側に進み、最終的に上流斜面(水面付近)に達して破壊を起こすことが知られている。

(9) 土質材料は、最適含水比付近で施工されるため、締固められたときにはほぼ空気間隙率が5%程度であり飽和に近い状態であると考えられる。昼間に工事が行われ、夜間保温対策などがなされないと、締固められた土が、地表面で凍てつき、さらに、地中の水分が上昇して凍ることによって霜柱がたった状態となり、地表近くの締固め地盤は大変ゆるんだ状態となる。次の日、この状態のまま盛土が行われると「霜柱により浮き上がった土の層が堤体中に残った」状態になる。この層が弱層となり、浸透水が集中的に流れ、パイピング破壊が起こることがある。

(10) ジャコウネズミやヌートリアなどによる動物性の巣穴が原因と考えられるパイピングが起こることがある。また、破壊事例全般から、次のことがいえる。

(11) ため池の少ない県では、比較的小さな降雨量でも、大きな破壊が繰り返されている。技術の伝承がない、理論のわかる技術者がいないことが問題であると考えられる。

(12) 地元業者に堤体盛土工事に慣れた人がいないところで問題が起こっている。「道路盛土や造成盛土と同じ感覚で盛土してはならない。堤体内浸透流への配慮が必要である。」ことが指摘される。

(13) 兵庫県下には43,000個程度のため池がある。単純に計算すると、20個/年の改修でも2,000年に1度しか改修の機会が回ってこないことになる。(正確には、条例ため池等、ある程度規模の大きなため池について計算するのが妥当であるかもしれない。)

参考文献

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.

土質工学会編 (1966): 土質工学ハンドブック第2版, pp.324-325.

Foster, M., Fell, R. and Spannagle, M. (2000): The statistics of embankment dam failures and accidents, Canadian Geotechnical Journal, Vol.37, pp.1000-1024.

発電水力協会編(1972): 最新フィルダム工学, (社)発電水力協会, p.555.

Hulla, J. and Z.Kadubcová, Z.: Erosive filtration in the flood embankments subsoil, Proceedings of the 3rd. International Conference on Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering, Wolski & Mlynarek eds., Balkema, Rotterdam, pp.305-312, 2000.

河上房義 (1972): アースダムとアースロックダム, pp.63-65, pp.95-98, 森北出版.

農業土木学会編 (2007): 農業土木標準用語辞典, 改訂5版, p.162, 農業土木学会.

岡本敏郎 (2009): 河川堤防とフィルダムにおける浸透破壊の評価法と課題, 地盤工学誌「土と基礎」Vol.57, NO.9, PP6~9.

Peter, P. and Ščesta, Š.: After katastrophy of the Danube embankments (in Slovak). Inenýrské stavby, 7: 1-8, 1965.

田中 勉(1998): 北摂地域における地域活性化の方向 一生産環境・生活環境整備の現状とあり方一, 平成9年度広域農村総合整備基本調査「北摂地域」報告書, 平成10年3月, pp.1-59.

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.

- 田中 勉, 土居 央, 井上一哉(2010): 二次元堤体のパイピング破壊に関する実験的研究, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 第十四号, pp.203-212.
- 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施設環境学研究室 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 3 月 31.
- Terzaghi, K. (1922): : Der Grundbuch an Stauwerken and seine Verhutung, Wasserkraft, 17, pp.445-449. または, Terzaghi, K. (1960) : From Theory to Practice in Soil Mechanics, Wiley, New York, pp.114-118.
- Turnbull, W. J. and C. L. Mansur (1961a): Investigation of Underseepage-Mississippi River Levees, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol.126, part I, p.1429.
- Turnbull, W. J. and C. L. Mansur (1961b): Design of Underseepage Control Measures for Dams and Levees, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol.126, part I, p.1486.
- Turnbull, W. J. and C. L. Mansur (1961c): Construction and Maintenance of Underseepage Control Measures, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol.126, part I, p.1540.
- Valko, P. and Economides, M.J. (1995): Hydraulic Fracture Mechanics, p.183, John Wiley & Sons Ltd.
- 山本哲郎, 枅井 明, 芋岡敏彦, 松本 直(1998): 1997 年台風 9 号によって決壊したため池の堤体調査事例, 土と基礎 46(5), pp.40-42.

Piping failure of soil and earth structure

—Failure modes and case histories—

Tsutomu Tanaka

Abstract

Modes of seepage failure of soil can be classified into two groups: ‘Piping failure’ and ‘Bulk heave failure’. Seepage failure is practically expressed in many ways, such as piping, sand boil, roofing, quick sand, heaving, hydraulic fracturing, etc. In this study, first, those technical terms are defined and classified into failure types of two groups. The causes of piping or the movement of soil particles are then discussed. It has been reported by Foster (2000) that 46% of failure of fill-type dams arises from seepage failure. However, many unresolved issues remain in piping failure, and the mechanism must be clarified as soon as possible. Therefore, here, the piping phenomena are considered, and piping failure of soil and earth structures is discussed. Some cases of piping failure are discussed, and the following issues are clarified with respect to piping: what matters should be taken into consideration in the design of hydraulic structures, how important are the early detection of signs and early coping with piping, and what kind of countermeasures should be taken when it occurs. To clarify the piping phenomena, it is essential to stress the importance of the following: ‘how important case studies are’, and ‘how valuable an eyewitness report is’.