

# 二次元浸透流解析による パイピング照査の高度化に向けた基礎研究

## FUNDAMENTAL RESEARCH TOWARDS SOPHISTICATION OF PIPING VERIFICATION BY 2D PENETRANT FLOW ANALYSIS

齊藤啓<sup>1</sup>・前田健一<sup>2</sup>  
Hiroshi SAITO and Kenichi MAEDA

<sup>1</sup>正会員 日本工営株式会社 河川・水工部 (〒102-8539東京都千代田区九段北1-14-6)  
<sup>2</sup>正会員 工博 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター (〒466-8555名古屋市昭和区御器所町)

Yabe River levee was breached due to piping failure induced by prolonged high water levels following heavy rains in Northern Kyushu in 2012. Currently, inspection is carried out by 2D penetration flow analysis, but detachment from the actual phenomenon is a problem. In order to investigate the cause, comparison was made between analysis and experiment. As a result, it became difficult to reproduce by analysis from the moment when it became a dynamic phenomenon accompanying movement of soil particles. Based on the characteristics of the above analyzes, the relationship between the foundation structure and piping was investigated and it was found that as the coating layer was thinner and the dead end position was closer to the levee, the water pressure rose and it was easier to boiling. In evaluating the progressiveness of the cavity after spray sand, various researchers have proposed.

**Key Words** : 2D penetration flow, Piping, Limit flow rate

### 1. はじめに

平成24年に九州北部で発生した豪雨により矢部川右岸7.3k地点で堤防が決壊し付近に甚大な被害を及ぼした<sup>1)</sup>。破堤箇所付近では氾濫危険水位を5時間以上超過し、水位が下がり始めたところで決壊した。図-1で見られる通り堤体が粘性土、基盤層が透水性の高い砂層や粘性シルト層などが互層で分布しており、基盤層を通じパイピング現象が発生したと報告されている。

一方、同河川延長上でも堤体の下に砂層が分布する箇所があり、決壊した地点以外に11カ所で基盤漏水が確認されている。現行の照査法ではこうした漏水がいつ、どこで発生し、堤防にとって危険か否かを判別することは難しい。

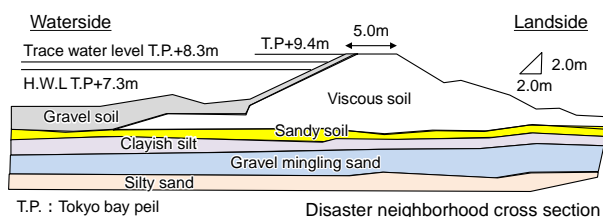


図-1 2012年矢部川破堤箇所の近傍断面、矢部川堤防調査委員会報告書を参考<sup>1)</sup>

### 2. 目的

現在、局所動水勾配とG/Wの指標をもって照査を行っている<sup>2)</sup>が、具体的に対象とする現象(噴砂、空洞の進行、空洞の貫通なのか、発生時もしくは終局状態なのか)が不明であり、また照査結果と実現象にかい離があることも指摘されている。まず現状の解析技術の程度を知りそこから課題点を見つけることが必要と考え、実務で使用される二次元浸透流解析と模型実験を比較し、解析能力を整理しその特性を把握する。

そして、浸透流解析の特性を踏まえたうえで基盤構造条件を変えてパイピングへの影響を検討し、実際に堤防を評価する上での着目点を整理する。

また、洪水の現場では噴砂がいくつも見られるが、実際に破堤に至る噴砂を見極めるためにオランダで実施されているような空洞の進行を評価することが必要と考える<sup>3)</sup>。空洞の進行を評価するにあたり様々な研究者が提案している限界流速指標を再考察し、堤防基盤部に対して有用とされる限界流速指標を選定する。

### 3. 模型実験と浸透流解析の比較検討

#### 3.1. 模型実験条件

図-2に久楽らの実験<sup>3)</sup>を参考にした本実験装置の概略図を示す。本稿では、珪砂7号のみからなるCase1, 上層が珪砂7号, 下層が珪砂2号からなるCase2について検討を実施した。基盤層は水中落下法で作成し, 堤体部分は含水比20%の藤森粘土で作成した。実験時に作用させた外力(平均動水勾配変化)は図-4の通りである。

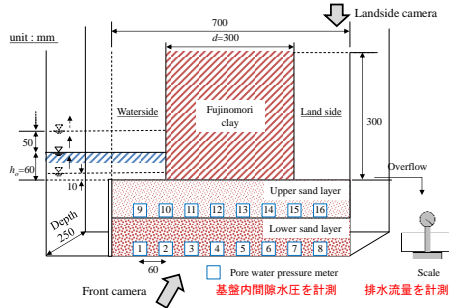


図-2 模型実験の概要図

### 3.2. 解析条件

模型実験との比較を行う解析は2次元非定常浸透流FEMにより実施する。メッシュ図を以下に示す。スケール及び外力等の条件は模型実験と同一である。初期水位は基盤層上端までとしており堤体は不飽和, 基盤層は飽和となっている。堤外側は図-4に示す通り水位を上昇し, 堤内側は基盤層上端が大気境界となっている。アクリル壁は透水係数を小さくすることで不透水境界を表現している。

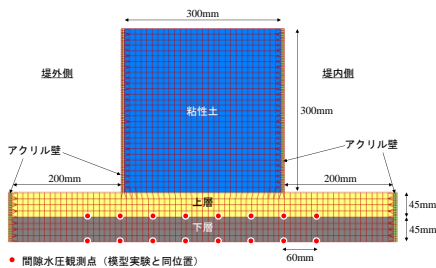


図-3 浸透流解析の概要図(メッシュ図)

表-1 実験ケース一覧

ケース名	堤体土質	基盤層		備考
		上層	下層	
Case1	藤森粘土 ( $k:3.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ )	珪砂7号 ( $k:1.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ) 層厚: 90mm		透水係数は試験値
Case2	藤森粘土 ( $k:3.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ )	珪砂7号 ( $k:1.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ) 層厚: 45mm	珪砂2号 ( $k:1.8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ) 層厚: 45mm	透水係数は試験値

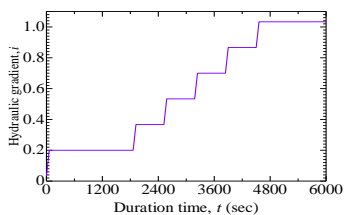


図-4 平均動水勾配の経時変化(浸透路長/水位で算出)

### 3.3. 模型実験より推定されるパイピング機構

図-5に先行研究と実験結果を基にして作成したパイピングフローチャートを示す。パイピング現象はボイリング, パイピング, 空洞の貫通からなると考えられ, 実験の結果からそれぞれの現象を支配する要因を以下のように推定した。(それぞれの現象についての考察は既報<sup>9)</sup>を参照)

- ・ボイリング: 被覆土層厚と基盤内の揚圧力
- ・パイピング: パイプ内の流速と土粒子径
- ・空洞の貫通: 限界動水勾配

パイピング現象は照査式にあるような1つの式で説明できるものではなく, 段階により現象を支配する要因が異なる現象と考える。

上述したパイピング機構に対し, 実務で用いられる浸透流解析が現象をどの段階まで把握できるか検討するため, 模型実験と浸透流解析結果の比較を行う。

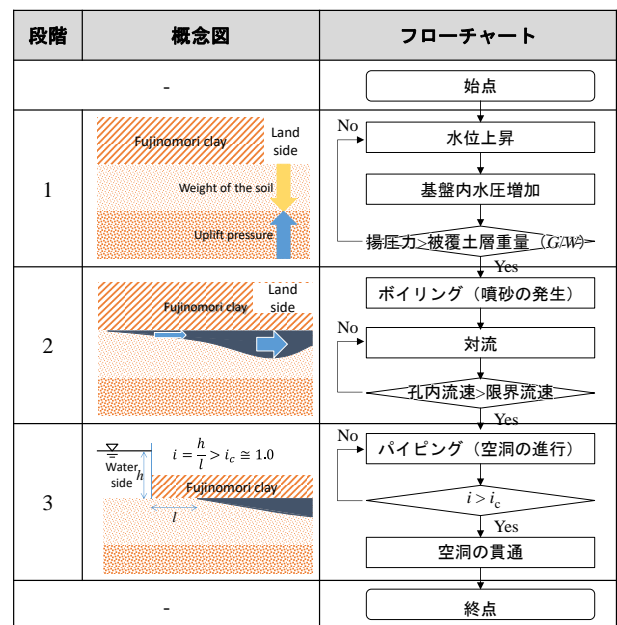


図-5 互層基盤のパイピングフローチャート

### 3.4. 基盤層内水圧分布の比較

#### 3.4.1. Case1: 単一層

表-2上段に模型実験と浸透流解析における単一層基盤下層内の間隙水圧分布を示す。なお, グラフの間隙水圧分布は実験初期からの増分としている。

模型実験と浸透流解析を比較したところ, 堤外側の水頭値はほぼ一致するが, 堤内側は模型実験の水頭値が4cm程度大きくなる。浸透流解析上は堤内側地表面境界を大気圧に設定しているため堤内側で水頭値が0となるが, 模型実験では浸透により圧力が減衰しきらない分, 過剰間隙水圧として発生したと考える。

表-2 模型実験及び浸透流解析における基盤層内間隙水圧分布

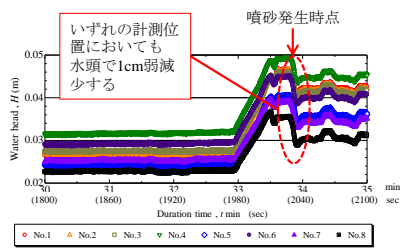
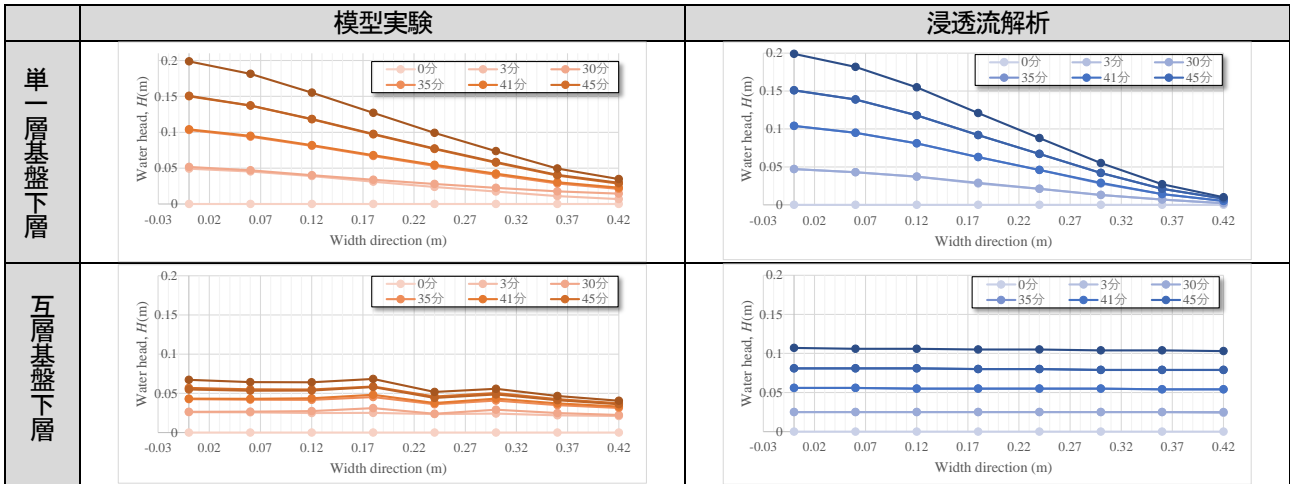


図-6 噴砂発生時点の間隙水圧挙動

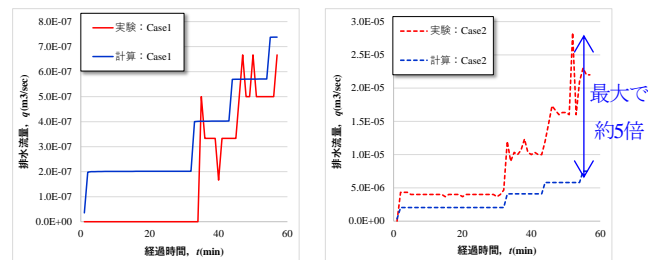


図-7 模型実験及び浸透流解析における排水流量の経時変化

### 3.4.2. Case2 : 互層

表-2下段に模型実験と浸透流解析における互層基盤層内の間隙水圧分布を示す。なお、グラフの間隙水圧分布は実験初期からの増分としている。

模型実験と浸透流解析を比較したところ、実験開始から30分までの水頭値は概ね一致するが、その後模型実験の水圧上昇が鈍化した。一方、浸透流解析では水位の上昇に伴い基盤内で水頭値が様に上昇することがわかる。模型実験では実験中噴砂が度々観察されており、ある噴砂発生時点の間隙水圧挙動をみると(図-6)基盤内水圧が様に1cm程度低下することがわかる。浸透流解析ではこうした噴砂に伴う圧力低下について見込まれていないため、模型実験より水圧分布が大きくなっており、噴砂の発生が実現象を再現可能かどうかの境界になると考える。

### 3.5. 排水流量比較

図-7に単一層基盤と互層基盤における模型実験と浸透流解析の堤内側排水流量グラフを示す。

実験時の単一層基盤における30分までの排水流量が  $0\text{m}^3/\text{s}$  となっているが、これは排水流量が極端に少なく重量計の精度で計測ができなかったためである。重量計でも計測できる程度まで流量が増えた30分以降を見ると、実験と解析の誤差が  $1.0 \times 10^{-7}\text{m}^3/\text{s}$  と小さく両者は

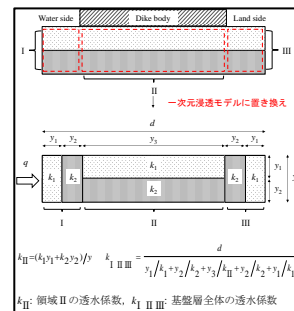


図-8 互層基盤における噴砂の発生がない理論上の透水係数

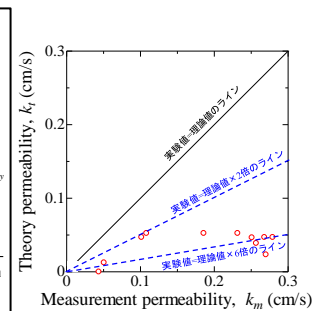


図-9 噴砂を考慮しない理論透水係数と噴砂の発生を考慮した実験時の透水係数

概ね一致するといえる。

互層基盤を見ると、初期の段階から実験値が解析値の2倍程度あり、その後水位増加に伴いその差が拡大し、最大で5倍程度となる。前節にならない、本節でも噴砂発生と排水流量の関係を透水係数に着目して検討する。

図-8に、基盤浸透を一次元モデルに置き換えた場合の透水係数の算出方法を示す。理論上の透水係数と、空洞が貫通する直前(漏水流量最大時)の透水係数を比較したグラフを図-9に示す。その結果、理論上の透水係数より実験時の透水係数の方が2~6倍程度大きくなる。これは図-8のモデル化が解析に近いことを示しており、噴砂による流れの局所化や空洞への流れの三次元的集中が排水流量に影響すると考える。

## 4. 浸透流解析による基盤層特性の検討

### 4.1. 概要

前章において、模型実験と浸透流解析を基盤層内の間隙水圧や排水流量の観点より比較を行い、噴砂以降の水圧や排水流量は解析で実現象の再現が困難であることがわかった。逆に噴砂発生以前であれば比較的解析でも再現可能と考える。前章の結果を踏まえ、解析の長所である試行的な検討を短時間でできる特徴を生かし、基盤層特性が噴砂に及ぼす影響を検討した。検討ケースは互層基盤に焦点をあて、「行き止まり位置」と「層厚比」について検討を行った。

### 4.2. 行き止まり位置に関する検討

#### 4.2.1. 間隙水圧分布

表-3に行き止まり位置に関する検討結果を示す。

堤内側基盤層長さ（透水層の行き止まり位置）による水圧分布を比較すると、長さが10倍になることで基盤層内の水圧が全体的に1/3程度となる。行き止まり位

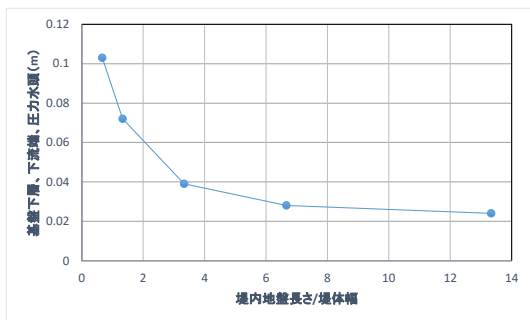


図-10 堤体幅で無次元化した堤内地盤長さと基盤下層、下流端の圧力水頭の関係

置が堤体から遠くなるほど、基盤層内の圧力が分散し全体的な圧力低下につながったと考える。

図-10に堤体幅で無次元化した堤内地盤長さと基盤下層、下流端の圧力水頭の関係を示す。図-10より行き止まり位置が堤体に近くなるほど、噴砂発生に影響する圧力水頭が2次関数的に増加する。行き止まり位置と噴砂は密接に関係しており、パイピング照査を行う際堤内側下流端の境界条件（浸出面設定の有無）について注意が必要である。

### 4.3. 互層基盤の層厚比に関する検討

#### 4.3.1. 間隙水圧分布

表-4に互層基盤の層厚比に関する検討結果を示す。基盤層内の水圧分布は上層厚に関わらずほぼ同一の分布形状となる。浸透水は土粒子から抵抗を受けることで圧力が減衰し、一般的に「間隙径が小さくなるほど」、「浸透路長が長くなるほど」、「流速が大きくなるほど」、減衰量が大きくなる。被覆層が薄い場合、被覆層が厚い場合と比較して浸透路長が短く、流速が大きくなる（流速については後述）ためそれぞれの圧力減衰効果を打ち消すように作用する。被覆層厚が厚い場合には逆がいえ、結果的に両ケースで同程度の水圧減衰になったと考える。ただし、圧力減衰が同程度で堤内側下流端の水圧も同程度の場合、被覆土層厚が小さい条件の方が噴砂の危険性は高まる。

#### 4.3.2. 堤内側排水流量

排水流量を比較すると上層厚が薄い方が厚い方より約3倍排水流量が大きくなるのがわかる。間隙水は主に粒径の大きい基盤下層を浸透しており、その基盤下層厚さを比較すると、上層厚が薄い方が厚い方より約3倍大きいことから排水流量の結果は妥当と考える。

表-3 土質の違いによる浸透現象への影響比較

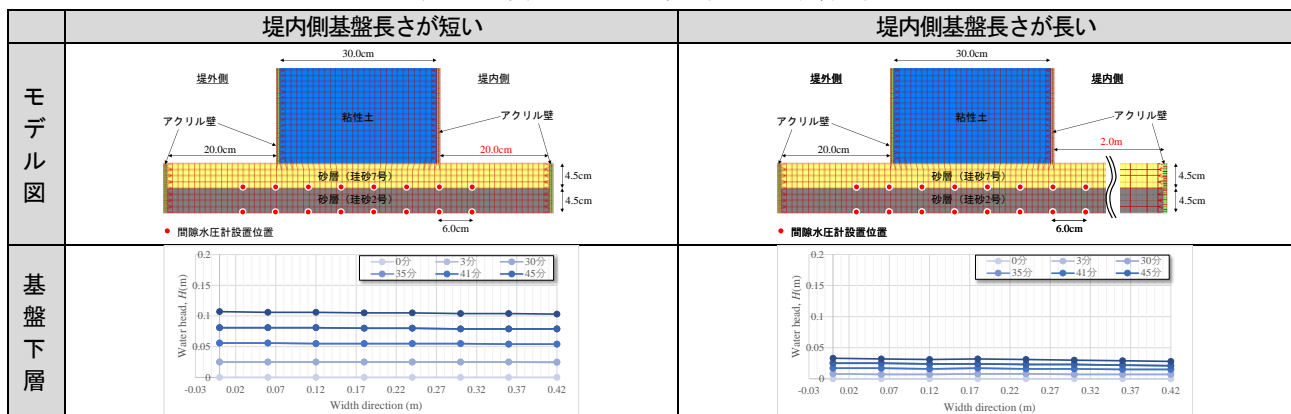
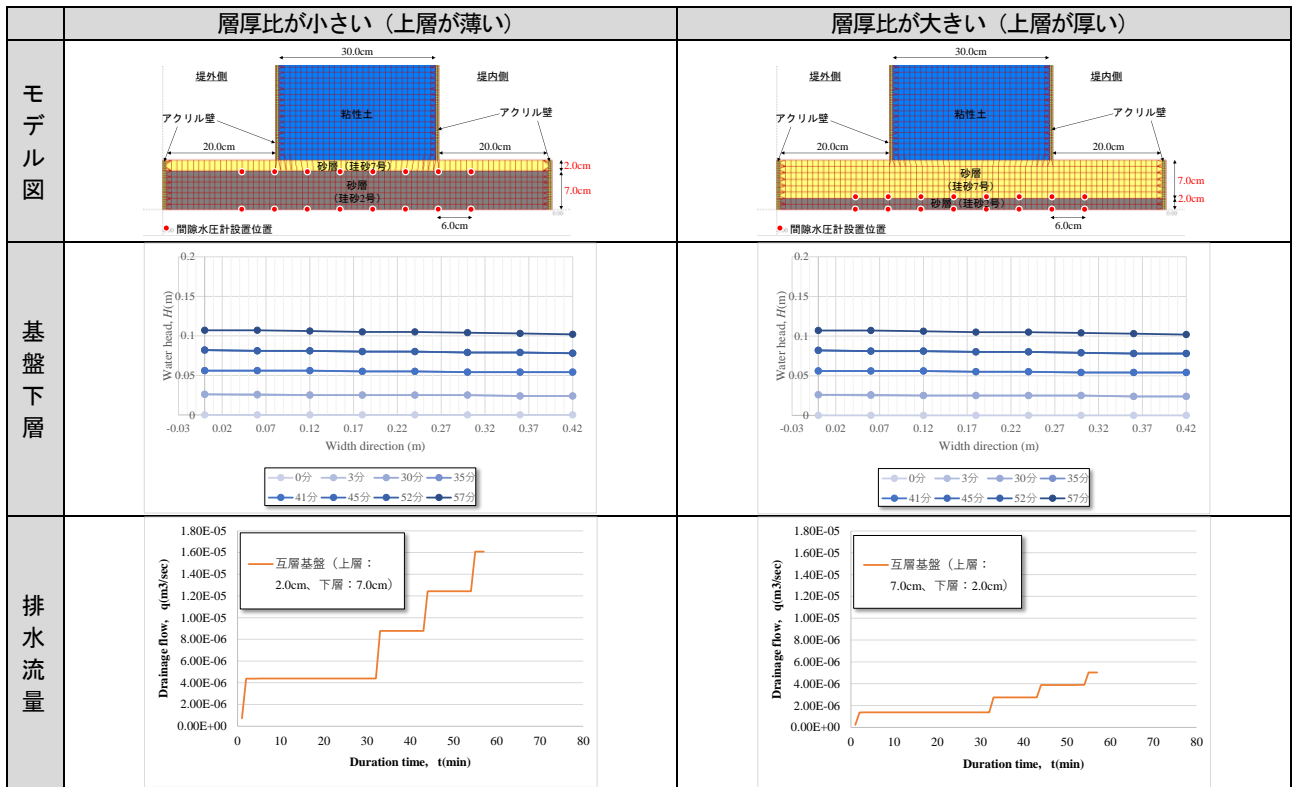


表-4 被覆土層厚の違いによる浸透現象への影響



## 5. 空洞の進行性評価に向けた限界流速の検討

噴砂発生後破壊に至るかどうかなどを確認するには空洞の進行を評価する必要があるが、現在国内のパイピング照査にはそれを評価する指標がない。空洞の進行を評価するためには、様々な研究者が提案している限界流速指標からパイピングに適した評価指標を選定すること、また空洞内の推定流速を求めることが必要となる。本章はそれらの課題に対して検討した先駆的な内容となる。

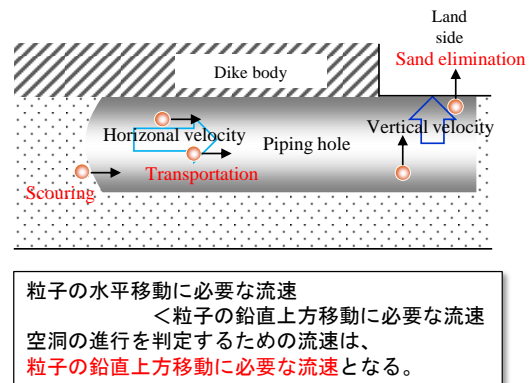


図-11 パイピング現象における空洞進行の概念図

### 5.1. 空洞の進行を評価するための限界流速

土粒子径（重量）と流速との関係からなる限界流速はこれまで様々な研究者が提案している。長瀬<sup>6)</sup>が指摘するように限界流速には、「単粒子-水流の場合」か、「多粒子-浸透流の場合」かの区別が必要であり、さらに重力方向に対して、「鉛直上向き-斜め-水平」に区分される。それらを区別しパイピング現象における空洞の進行を適切に評価できる限界流速指標を選択することが重要となる。

図-11にパイピング現象における空洞進行の概念図を示す。空洞内に発生する水平流により土粒子が洗掘・運搬され、噴砂箇所が発生する鉛直上向き流れにより排砂される。空洞進行が継続するためには洗掘、運搬、排砂が必要となるがこのうち最も土粒子の移動に必要

な流速が大きいのは重力の影響を受ける排砂となる。

鉛直場の水流を対象とした限界流速にはJustin<sup>7)</sup>、Stokes、中島<sup>8)</sup>がある。Justinの理論式は理想的な単一粒子の運動則を表すもので、実験値と比較すると過大評価となることが指摘されている。Stokesの抵抗則は流体中を球が運動する時、渦が生じない程度の緩やかな流れ（レイノルズ数の小さな流れ）の場合に成立するが、噴砂箇所では比較的流れが乱れており噴砂孔流速への評価指標として用いるのは難しいと考える。中島は円筒管を用い、各種土質材料において噴砂の発生、対流、排砂の様子を実験により観察し、排砂時点の流速を限界流速としてグラフ中に整理している。本検討では、対象とする限界流速の定義と近い考えである中島の検討結果を評価指標として採用する。

## 5.2. 模型実験および浸透流解析の噴砂孔内流速

表-5に模型実験と浸透流解析における噴砂孔流速の検討概要および整理した結果を示す。その結果、模型実験の噴砂孔内流速は約 $1.0 \sim 5.6 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 、二次元解析では $4.4 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、三次元解析では $6.6 \times 10^{-3} \text{m/s}$ となった。二次元解析では模型実験より2オーダー流速が小さい結果となったが、これは空洞への流れの3次元的集中が解析では表現できないためと考える。二次元解析と同様の境界条件で実施した三次元解析では模型実験より1オーダー流速が小さい結果となった。二次元解析と異なり空洞への流れの3次元的集中が再現可能なためより実現象に近い結果となるが、模型実験では噴砂孔内にさらに噴砂が発生したり、複数の噴砂が併合したりすることで流速が増加しており、このことが三次元解析でも若干過小評価になった要因と推察する。今後噴砂孔付近の流速を求めることで流速の時間的変化と観察される現象の関係を検証する。

表-5 模型実験，浸透流解析における噴砂孔内流速

概要	模型実験			浸透流解析	
	噴砂孔数から算出	噴砂高さから算出	高速度カメラから算出	二次元モデル(SAUSE)	三次元モデル(3D FLOW)
堤内側(上から見た様子) 目視で数えられる噴砂の数と噴砂孔径から流速を算出 ↓堤外側	目視で観察される噴砂高さから鉛直流速を推定	高速度カメラで粒子をトレースし、水平流速を推定	噴砂孔は空洞としてモデル化 解析格子データより噴砂孔の鉛直方向流速を算出し	解析格子データより噴砂孔の鉛直方向流速を算出し	縦横1.0cm 深さ4.5cm
堤内側からの排水量に対する噴砂の数及び噴砂孔径から鉛直流速を推定 $v = \frac{4 \times Q_{ps}}{\pi \times N_{ps} \times d_{ps}^2}$ v: 鉛直流速、Q <sub>ps</sub> : 堤内側排水流量、N <sub>ps</sub> : 噴砂数、d <sub>ps</sub> : 噴砂孔径	$v = \sqrt{2gh}$ v: 鉛直流速、g: 重力加速度、h: 噴砂高さ	$v = \frac{l}{L - t}$ l: 移動距離、L: 移動に要した時間			
流速	$1.5 \times 10^{-2} \text{m/sec}$	$5.6 \times 10^{-2} \text{m/sec}$	$1.0 \times 10^{-2} \text{m/sec}$	$4.4 \times 10^{-4} \text{m/sec}$	$6.6 \times 10^{-3} \text{m/sec}$

## 5.3. 噴砂孔内流速の評価

図-12に実験および解析で算出した噴砂孔内流速と中島が提案する限界流速を比較した結果を示す。

模型実験における空洞進行時の噴砂孔内流速の推定値は約 $1.0 \times 10^{-2} \sim 5.6 \times 10^{-2} \text{m/s}$ であり、中島が提案する指標と比較するといずれも珪砂7号を移動させるための限界流速と概ね一致する。

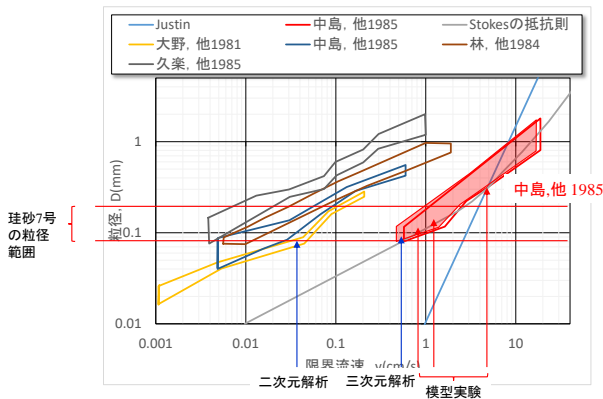


図-12 噴砂孔内流速の評価結果

二次元解析の噴砂孔内流速は模型実験より2オーダー小さい結果となっており、中島の提案する指標と比較しても過小評価となる。三次元解析の噴砂孔内流速は模型実験の結果より1オーダー小さい結果となるが、中島の提案する限界流速の範囲と一致する。解析により噴砂孔内流速を求める際には補正係数の設定も考慮する必要がある。

## 6. まとめ

パイピング照査で用いられている二次元浸透流解析結果が実現象とかい離している現状を踏まえ、解析の特性を把握する目的で解析と実験の比較を行った。その結果、土粒子の移動を伴わない噴砂以前の現象は再現できるが、噴砂以後においては解析と実験でかい離がみられた。

解析と実験の比較結果を踏まえ、二次元解析により基盤構造とパイピングの関係を試行的に調べた結果、被覆層が薄いほど、また行き止まり位置が堤防に近いほど水圧が上昇し噴砂しやすいことがわかった。

また、噴砂発生後の空洞進行を評価するため、模型実験および浸透流解析において噴砂孔内流速を求め中島が提案する限界流速指標と比較を行った。模型実験で推定される噴砂孔内流速は中島が提案する限界流速と概ね一致しており、援用した評価指標の妥当性が示されたが、今後限界流速実験の再現を行い、検証および精査を行う。

## 参考文献

- 1) 矢部川堤防調査委員会：矢部川堤防調査委員会報告書,2013.
- 2) 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(改訂版), pp.47, 平成24年2月.
- 3) Technical Report on Sand Boils(Piping), Technical Advisory Committee on Flood Defences, 1999.
- 4) 久楽勝行, 吉岡淳, 佐藤正博：水平方向浸透流下における砂地盤のパイピングについて, 第20回土質工学研究発表会, pp.1483-1484, 1985.
- 5) 齊藤啓, 前田健一, 泉典洋：基盤漏水に伴う噴砂及びパイピング進行条件の検討, 河川技術論文集第22巻, 2016.
- 6) 長瀬迪夫：浸透破壊に関する考え方と破壊発生の条件(その2), 応用地質年報No.15, 1993.
- 7) J.D. Justin: The Design of Earth Dams, A.S.C.E. Trans. No.1531, pp.49-51, 1923.
- 8) 中島秀雄他：X線を用いた土の浸透破壊実験とその考察, 応用地質年報No.9, P.21-41, 1987.

(2017.4.3受付)