

## 実大試験堤防の湛水実験と浸透流解析による

### 噴砂発生時の堤体内および基礎地盤の水理挙動の解釈

#### Interpretation of Hydraulic Behavior of Levee and Foundation Ground during Sand Boil occurrence based on Full-Scale Levee Experiments and Seepage Flow Analysis

伊 東 樹  
Tatsuki Ito

川 尻 峻 三  
Shunzo Kawajiri

仲 村 将 磨  
Shoma Nakamura

#### 1. はじめに

近年、気候変動による降水形態の変化が報告されている。特に大雨の年間発生回数は有意に増加しており、単位時間降水量 50mm 以上の強度の強い雨ほど発生頻度が増加している傾向にある<sup>1)</sup>。このような単位時間あたりの降水量の増加は、河川水位を上昇させ、河川堤防に対する外力を増加させる。河川水位の上昇による堤防の変状・決壊は河川水の越水によるものと、河川水の堤体や基礎地盤への浸透によるものがある。ここで浸透による堤防決壊では、河川水位の上昇に伴い堤体基礎地盤に間隙水圧が作用して、堤内側で圧力が開放された地点でボイリングと噴砂が発生し、そこからパイピングが進行することが起因になることが知られている<sup>2)</sup>。ここでのパイピングとは、河川水位の上昇によって河床や河岸から基礎地盤に水圧が生じることで基礎地盤内の透水性地盤にパイプ状の水みちが形成され、基礎地盤の土が堤内へと流出することである。基礎地盤の土が流出することで堤体基礎地盤としての支持力が失われ、河川堤防の破壊・決壊に至ると考えられる。

我が国の河川堤防におけるパイピングの安定性は、国土技術研究センターが発刊している「河川堤防の構造検討の手引き」（以後、「手引き」とする）<sup>4)</sup>に基づき照査される。具体的には、堤防（堤体および基礎地盤）は 2 次元断面としてモデル化し、想定する外水位を作用させた際の裏法尻（堤内法尻部）付近での局所動水勾配  $i_c$  が 0.5 を下回るように堤体断面の諸元を設定する。この照査基準である  $i_c < 0.5$  は限界動水勾配  $i_c$  の考え方を採用したものである。ここで、土粒子密度  $\rho_s$  と間隙比  $e$  から計算される  $i_c$  は概ね 1.0 前後となることが多い。緩く堆積した粒径の揃った粘着力が無い砂質土や礫質土で構成された 2 次元状態の地盤におけるボイリング発生時の水頭差は  $i_c$  で評価できることはよく知られている<sup>5)</sup>。つまり、「手引き」における  $i_c$  は  $i_c$  に安全率を考慮した照査値と解釈することができる。しかし、実地盤においては細粒分が混入しており、理想的な緩く堆積した粒径の揃った砂質土や礫質土ではないことや、3 次元的な集水効果の影響がある。気候変動によって外力が増加する昨今では、例えば 2012 年九州北部豪雨での矢部川の堤防では計画高水位を 1.1m ほど超過した状態が 5 時間程度続いたことによって越水前に堤防が決壊し、基礎地盤のパイピングが原因であることが報告されている<sup>3)</sup>。近年ではこのようなパイピング発生メカニズム解明に関する研究が精力的に進められているが、パイピングによる堤防決壊の予測精度を向上させるためには  $i_c$  の安全率の考え方をより詳細に検討することが必要といえる。

そこで本研究では、ボイリングによる噴砂発生時の堤体内および基礎地盤の水理挙動を観察するために、実大試験堤防を構築して湛水実験を行った。実大試験堤防の基礎地盤に透水係数が異なる領域を意図的に設けることで 3 次元的な集水効果を促し、小規模噴砂発生時の堤体や基礎地盤の間隙水圧変化や  $i_c$  の変化を観察した。さらに、湛水実験結果に対して 2 次元および 3 次元浸透流解析を行い、水理挙動の解明を試みた。なお、本報告はこれまでに筆者らが学会発表<sup>6-8)</sup>した内容を統合・整理・拡充し、再構成されている。

## 2. 実大試験堤防実験

### 2. 1 実大試験堤防の概要と実験条件

図-2.1 は本研究で使用した試験堤防の全景を示している。図-2.2 は試験堤防の構築に使用した地盤材料の粒度分布である。堤防の大きさは高さ 2m、敷幅 10m、奥行き 2m、法面勾配 1:2 とし、堤体に使用した地盤材料は河川土工マニュアルで示されている堤体材料 B (半透水性部) の範囲に概ね収まっている。なお、堤体の平均的な締固め度  $D_c$  は  $D_c = 81\%$  程度である。支持地盤は厚さ 1m で砂質土と礫質土で構成されている。堤内地盤の大部分は堤体土と同じシルト質土で構成されているが、裏法尻近傍の堤内地盤では、局所的な土質構成の違いが堤体および基礎地盤の水利挙動に与える影響を把握するため、基礎地盤の砂質土の一部 (厚さ 0.2m、長さ 0.6m、幅 0.5m) を堤内側に延長している。これは、基礎地盤内を通水する河川水位を砂質土の延長部に集水させて、填砂やパイピングの発生の促進を目的としている。礫層の河床への露出の有無や砂層と礫層の厚さについては、西村ら<sup>9)</sup>の考案したパイピング危険度簡易点検フローに基づいて設定した。湛水実験は 2 日間にわたり実施した。1 日目 (2022/10/18) では法尻の局所動水勾配が 0.5 をわずかに超過するように、河川水位  $H_R = 1\text{m}$  まで 0.25m/時間で上昇させたあと、2 時間の湛水を行った。その後、自然流下で河川水位を低下させて、2 日目 (2022/10/19) は法尻の局所動水勾配が 0.5 を超過するように 1m/時間で 2m (堤防天端高さ) まで  $H_R$  を上昇させて 4 時間湛水させた。

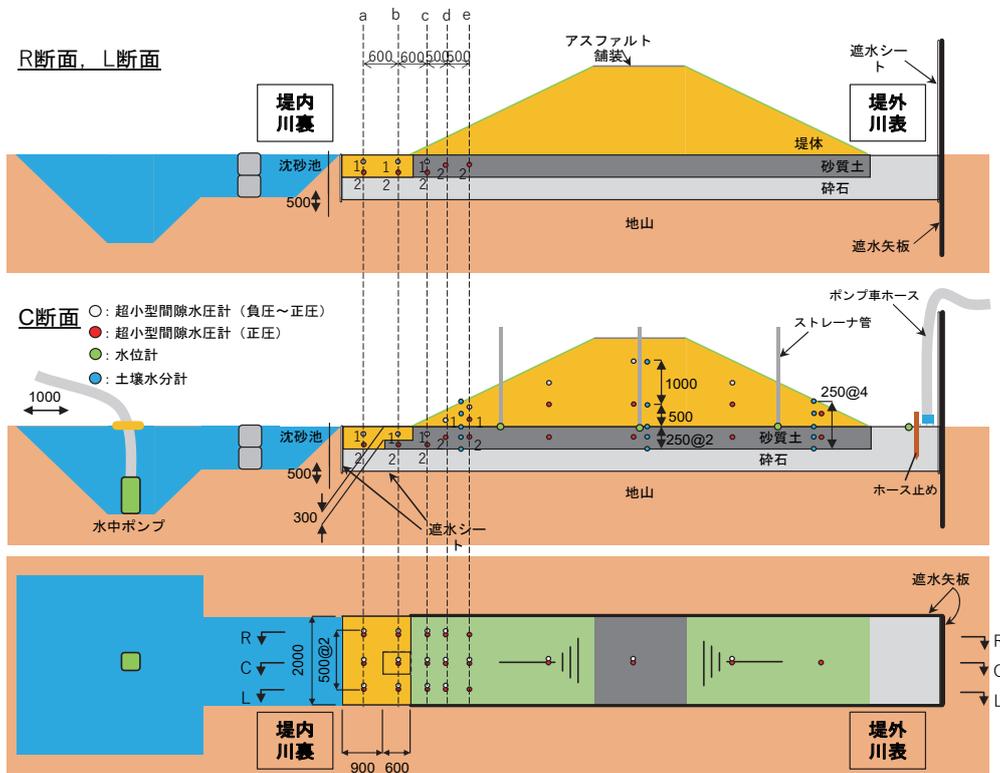


図 2-1 本研究で対象とした実大試験堤防の概要

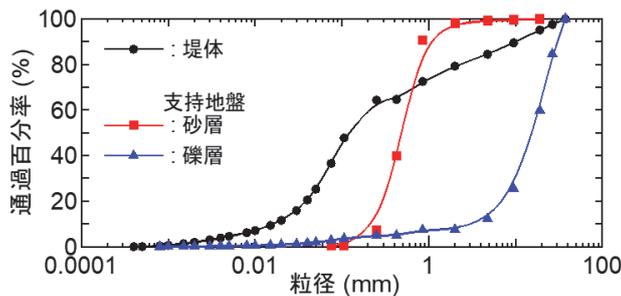


図 2-2 実大試験堤防に使用した地盤材料の粒度分布

湛水実験中の観測内容は、リアルタイム水位計による堤体内水位（10分間隔）、土壌水分計による体積含水率（10分間隔）、超小型間隙水圧計による間隙水圧（1分間隔）、トータルステーション（TS）測量による法面変状（10分間隔）、RTK ドローンを用いた UAV 測量による変位分布（2回の湛水前後の計4回）である。なお、地表面付近に設置した超小型間隙水圧計は、テンシオメータとなっておりサクシオンの計測が可能である。

## 2. 2 実験結果および考察

図-2.3は河川水位  $H_R$  および堤体内水位  $H_L$  の経時変化を示している。図中の経過時間  $t$  は、2022/10/18 9:20 の河川水位上昇時間を  $t = 0$  時間としている。河川水位を上昇させて、 $t = 2.8$  時間と  $t = 24.5$  時間に図-2.4に示すような小規模噴砂を確認した。この噴砂の発生箇所は堤内地盤に延長した砂質土層と堤内地盤の境界付近の直上であった。図-2.5は任意時間での間隙水圧  $u_w$  のコンター、堤体内水位  $H_L$ 、河川水位  $H_R$  をまとめた図である。実験開始前における  $u_w$  は堤内地盤および裏法尻付近では負圧が観測されており、堤体および基礎地盤にはサクシオンが発生している。1日目の湛水を開始して  $H_R = 0.69$  m に到達した段階では、堤内地盤の延長させた砂層部では正の値となっている一方で、その上部のシルト層では若干のサクシオンが確認できる。このことから、砂層の上部のシルト層の湿潤過程では、その下部の砂層で  $u_w$  が蓄積されていると考えられる。

図-2.6は実験終了後に実施した開削調査から得られた裏法尻および堤内地盤の断面 a)C 断面、b)R 断面である。C 断面は堤内地盤に砂層が延長された断面であるが、砂層の行き止まり面では砂層が堤内地盤側に向かって流動しているのがわかる。また、法尻付近ではシルト層が砂層側に倒れ込み、砂層が法尻を上部に押し上げるように変形している。その直下では礫層が上部の誘うに向かって隆起するように食い込んでいることから、礫層から砂層への上向きの浸透流が発生していたと考えられる。

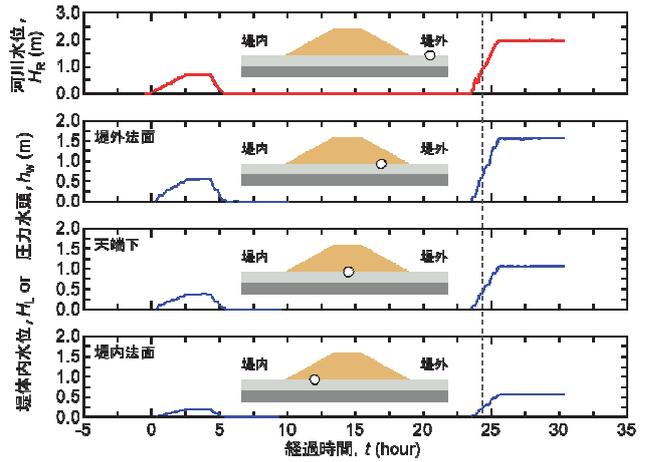


図 2-3 河川水位および堤体内水位の経時変化



図 2-4 小規模噴砂の発生状況

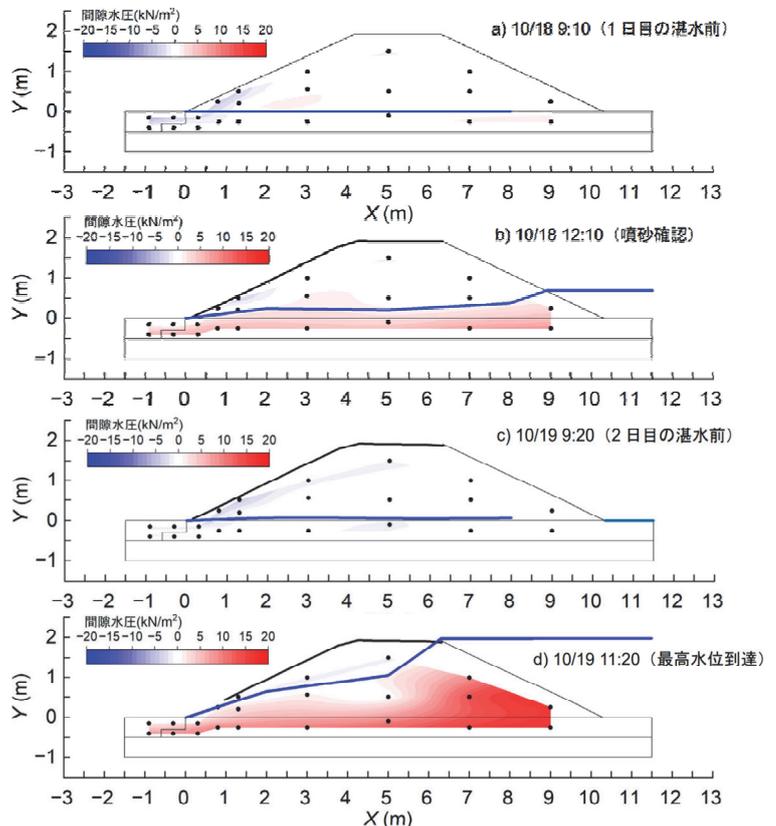


図 2-5 任意時間での間隙水圧コンターと堤体内水位

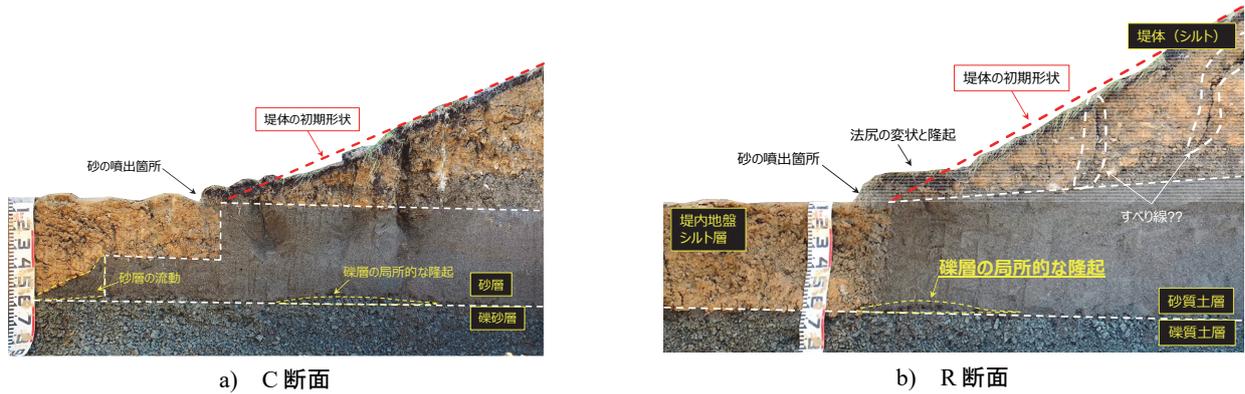


図 2-6 湛水実験終了後の裏法尻付近の開削断面

図-2.7 は図-2.1 に示す計測地点のうち堤内法尻近傍の間隙水圧計 (b-1, b-2, c-1) で得られた間隙水圧  $u_w$  を用いて計算した b-1 地点の鉛直局所動水勾配  $i_{c,v}$  と水平局所動水勾配  $i_{c,h}$ , 合成局所動水勾配  $i_{comb}$  の値を示す。  $i_{comb}$  は、田中ら<sup>10)</sup>の報告を参考に算出した。18日の河川水位  $H_R = 0.69m$  で1回目の噴砂が確認されている<sup>6)</sup>。このときの  $i_{comb}$  はC断面で  $i_{comb} = 2.87$  であり、断面形状による局所動水勾配の違いは鉛直方向で顕著に見られた。ここで対象とした試験堤防の噴砂発生地点における  $i_c$  を湛水試験前に実施した現場密度試験の値を参考に計算すると、被覆層となるシルト質土では  $i_c = 0.98$ , その下層の砂質土層では  $i_c = 0.94$  であった。すなわち、本実験においては噴砂発生時に実測された局所動水勾配は限界動水勾配よりも2倍程度大きな値となった。ここで、地盤材料の粘着力が大きい場合や締固め度が高い場合には、ボーリング発生時に周辺地盤がせん断抵抗を發揮するため  $i_c$  よりも大きな動水勾配でボーリングすることが報告されてる<sup>11)</sup>。このことから本実験では、被覆土層に相当するシルト質土がせん断抵抗を發揮したことで、噴砂発生時に実測された動水勾配は  $i_c$  よりも大きくなったと推定される。

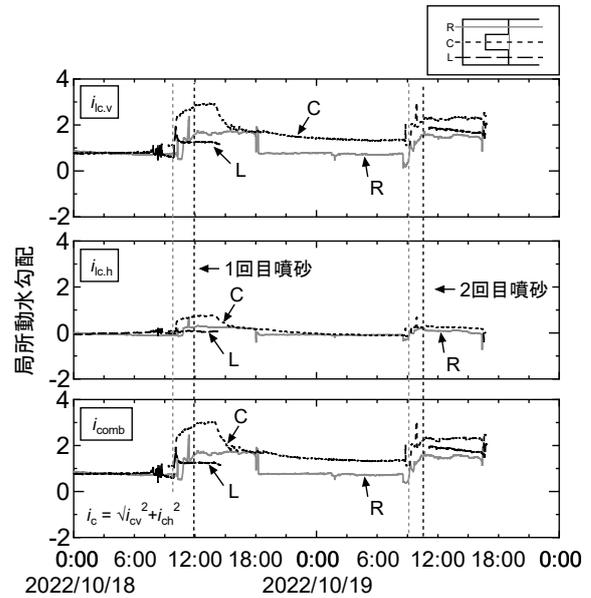


図 2-7 各種動水勾配の経時変化

### 3. 飽和・不飽和浸透流解析による再現解析

#### 3. 1 2次元および3次元浸透流解析による噴砂発生時の水理挙動

図-3.1 (a)2次元浸透流解析, (b)3次元浸透流解析) に図-2.1 を元で作成した浸透流解析の有限要素モデルと境界条件を示す。解析に用いたパラメータは、試験堤防の築堤中に実施した現場密度および現場透水試験や、築堤後に採取した乱れの少ない供試体に対する各種室内土質試験の結果を基本としたが、室内土質試験や現場透水試験結果の寸法効果を考慮し、各種試験から得られた飽和透水係数  $k_{sat}$  を10倍し、解析に使用した。

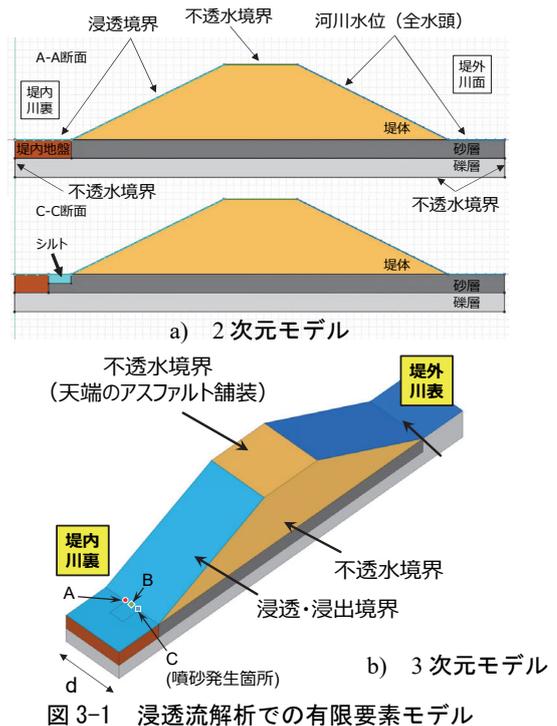


図 3-1 浸透流解析での有限要素モデル

図-3.2 は実大試験堤防実験による観測と2次元浸透流解析の結果によって得られた堤体内水位の比較である。2回目水位上昇時の堤内法面において、観測値と解析値に若干の差はあるものの、上昇・下降過程ともに類似した傾向がみられることから、本解析モデルによって実大試験堤防実験での堤体内の水力挙動をおおむね把握できると判断した。

図-3.3 に解析によって得られた小規模噴砂発生時 ( $t = 2.8$  時間) の裏法尻付近の  $i_{cl,v}$  のコンターを示す。噴砂は図中に示すように延長した砂質層上部の法尻付近で発生した。 $i_{cl,v}$  は、噴砂が発生した砂質土とシルト質土の境界部付近の直上の法尻部で大きな値を示している。この  $i_{cl,v}$  の値は照査値とされている 0.5 をわずかに超えており、安全率を考慮した照査値を用いることで噴砂の発生を予測できている。なお、図中には示していないが別途確認した流線ベクトルでは、この  $i_{cl,v}$  が増加している領域には堤内地盤に延長した砂質土を通して、その下層の礫質層から河川水が局所的に流入している状況にあった。このことから噴砂箇所での動水勾配の増加は、堤内地盤内に局所的に延長した砂質土層が影響していると考えられる。

図-3.4 は図-3.1 に示した2次元浸透流解析および3次元浸透流解析によって得られた  $t = 2.8$  時間前後での  $i_{cl,v}$  の時間変化を示している。なお、 $i_{cl,v}$  を抽出した点は2次元浸透流解析ではそれぞれの解析断面における裏法面と堤内地盤の交点部として、3次元浸透流解析は噴砂発生地点とした。3次元浸透流解析では先述したように  $t = 2.8$  時間付近で 0.5 を超えており、マニュアルの照査値の妥当性を確認できる。その一方で、2次元浸透流解析では河川水位の上昇に伴い局所動水勾配は増加する傾向にあるものの 0.5 を超えることはなく、今回の解析パラメータの設定範囲では噴砂の発生を予測することが困難な結果となった。このことから本実験のような局所的な集水効果によって局所動水勾配が発生する場合には、3次元浸透流解析による検討も必要であると言える。

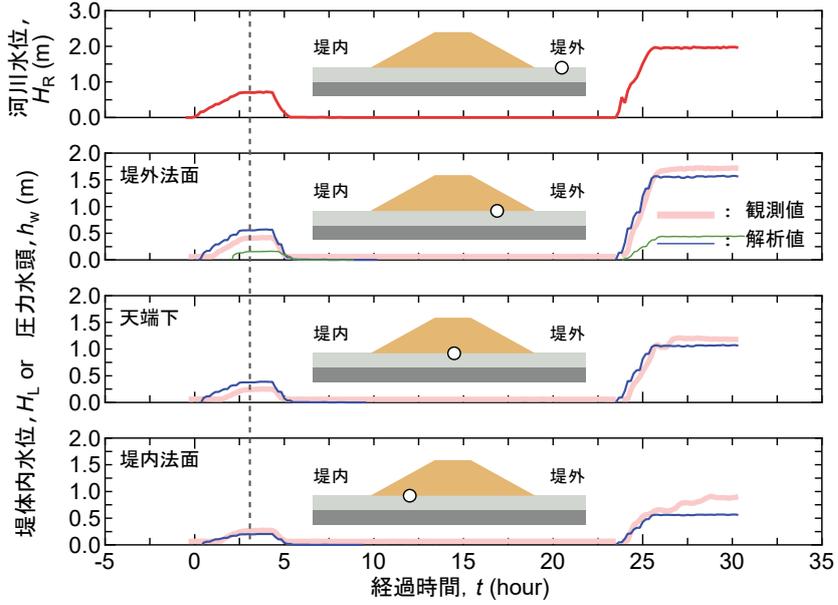


図 3-2 堤体内水位の実測値と2次元解析結果の比較

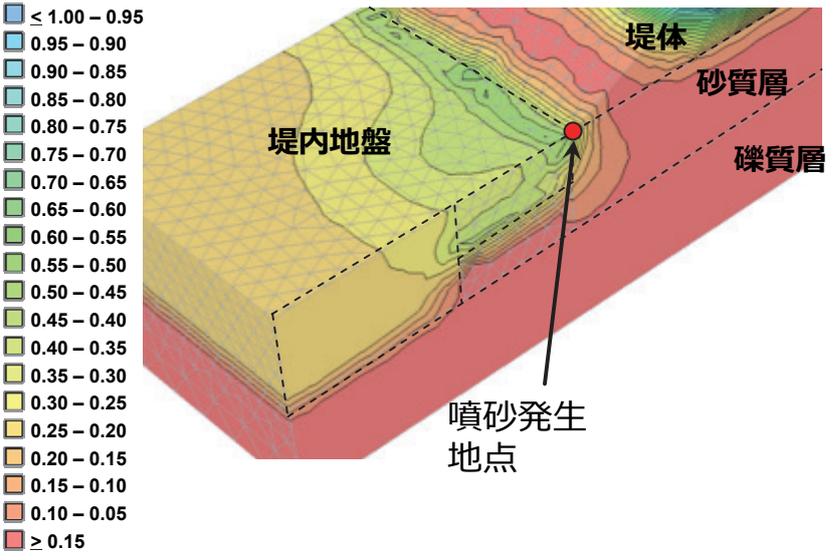


図 3-3 小規模噴砂発生時の鉛直局所動水勾配のコンター図

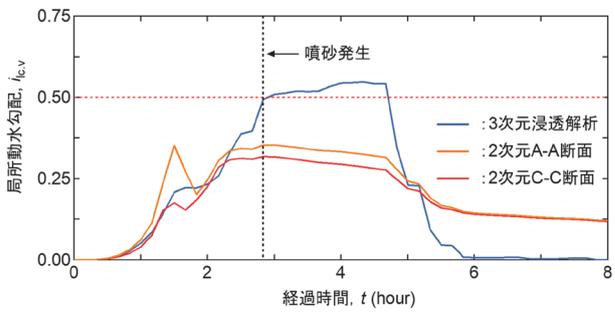


図 3-4 2次元および3次元解析得られた局所動水勾配の経時変化

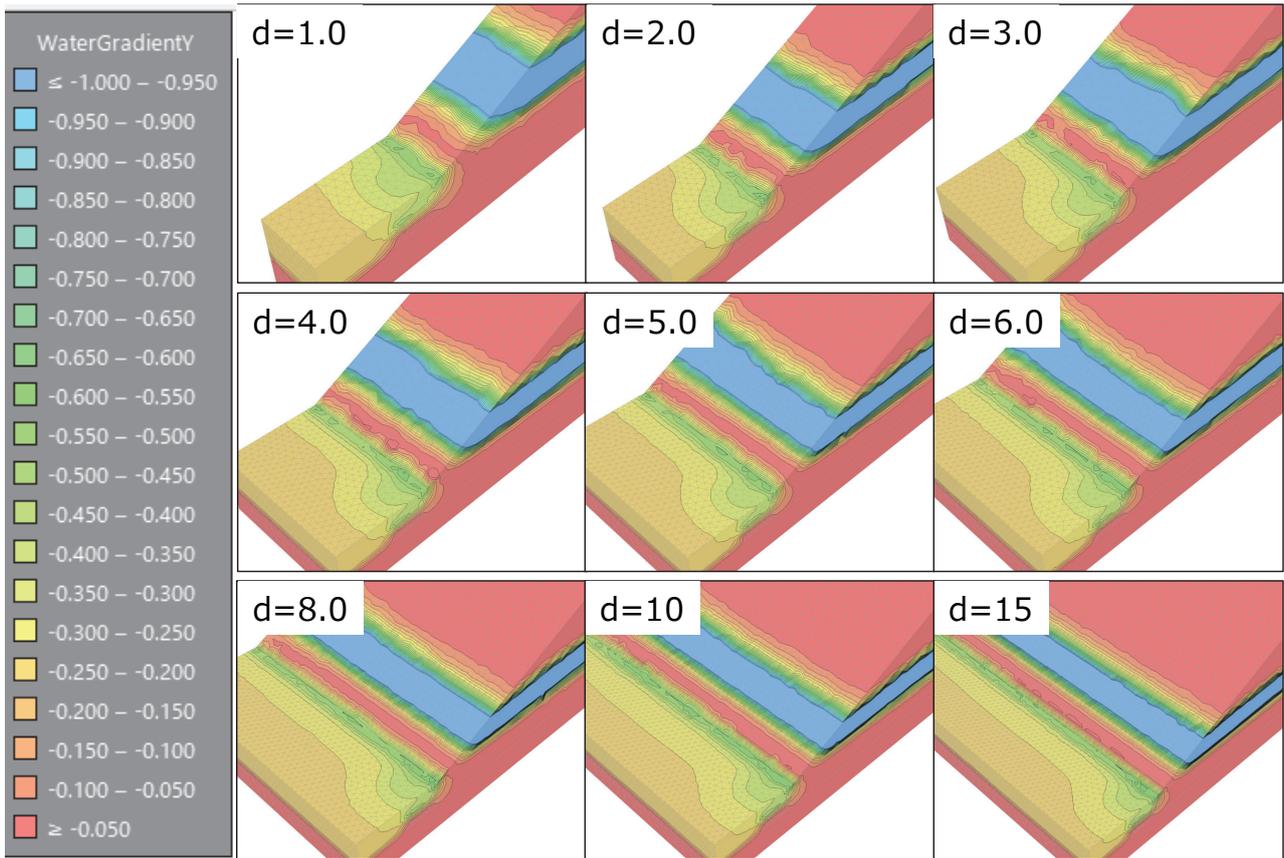


図3-5 解析領域  $d$  の違いが小規模噴砂発生時の鉛直局所動水勾配のコンターに与える影響

### 3. 2 3次元浸透流解析における堤外地盤のモデル化領域が局所動水勾配に及ぼす影響

堤内地盤の土質構成を3次元的に変化させた試験堤防の湛水実験結果を再現可能な解析モデルを用いて、解析領域をパラメトリックに変化させることで、その影響を観察した。これらの結果から、堤内地盤への河川水の流入範囲が川表法尻の局所動水勾配の変化に及ぼす影響や、照査断面による局所動水勾配の変化について考察を行った。本検討では、図-3.1に示した3次元解析モデルの  $d$  を  $d = 0.6 \sim 6\text{m}$  までは概ね  $0.2\text{m}$  間隔で、 $d = 6\text{m}$  以上では  $d = 6, 8, 10, 15\text{m}$  に変化させた解析を行った。なお、 $d = 0\text{m}$  は2次元解析である。解析に用いたパラメータは、前述の解析と同様に試験堤防の築堤中に実施した現場密度および現場透水試験や、築堤後に採取した乱れの少ない供試体に対する各種室内土質試験の結果を基本としたが、室内・現場透水試験結果は寸法効果を考慮し、各種試験から得られた飽和透水係数  $k_{\text{sat}}$  を10倍して解析に使用した。

図-3.5は3次元浸透流解析の代表的な結果として、噴砂発生時刻における  $i_{\text{cl},v}$  のコンター図であり、噴砂発生箇所付近での断面を示している。 $d$  の大きさに依らず噴砂発生時刻には噴砂箇所付近を中心に  $i_{\text{cl},v}$  が  $i_{\text{cl},v} = 0.5$  程度の領域が局所的に分布していることがわかる。このことから本解析の範囲内では  $d$  の大きさに依らず、堤内地盤内に延長した砂質土の3次元的な集水効果を表現できていると言える。

図-3.6は  $d$  と堤内地盤の任意地点における  $i_{\text{cl},v}$  の関係を示している。なお、C地点が実大試験堤防での噴砂発生箇所であり、図5中の「○」の地点である。 $d = 0\text{m}$  の結果は2次元浸透流解析の結果を示しているが  $i_c = 0.35$  程度であり、 $i_c > 0.5$  の照査基準値を適用した場合には噴砂の発生を予測できない。一方で、 $d$  を変化させた3次元浸透流解析の結果は、 $d$  が小さい範囲ではバラつきがあるものの  $d = 5\text{m}$  程度までの  $i_{\text{cl},v}$  は  $d$  とともに増加する傾向にある。 $d = 5\text{m}$  程度以降は  $d$  の増加に対して  $i_{\text{cl},v}$  の増加量は緩慢となっている。これは今回着目した噴砂発生箇所への河川水の流入量が  $d = 5\text{m}$  程度以降が増加していないためと考えられ、3次元浸透流解析において適切な解析範囲があることを示唆する結果である。また、噴砂発生箇所であるC地点や、C地点と同条件のA地点ではB地点よりも  $i_c$  が大きく、実大試験堤防

の再現解析に相当する  $d = 2.0\text{m}$  では概ね  $i_c > 0.5$  となっており、現在の照査基準値によって噴砂の発生を予測できる結果である。しかし、 $d$  の増加に対する  $i_{c,v}$  の増加傾向は一定ではなく、増減を繰り返すような結果となっており、今後は解析に用いたパラメータの検討が必要であると考えている。

#### 4. まとめ

本研究では、河川水位の上昇によって堤内地盤の噴砂発生時の堤体および基礎地盤の水利挙動の把握を目的として、実大試験堤防の湛水実験と2次元および3次元浸透流解析を試みた。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 実大試験堤防への湛水実験において小規模噴砂発生時の局所動水勾配は、限界動水勾配よりも高い値を示した。これは土の粘着力などのせん断強さが発揮されているためと考えられる。
- 2) 小規模噴砂が発生した実大試験堤防の湛水実験に対して3次元および2次元浸透流解析を行い、噴砂発生時の水利挙動の把握を試みた。その結果、3次元浸透流解析では基礎地盤の土質構成による3次元的な集水を再現したことで、湛水実験での噴砂発生付近の領域において局所動水勾配が0.5を超過した。これは3次元効果が発生する場合には3次元浸透流解析による検討が有用であることを示唆する結果である。
- 3) 3次元浸透流解析における堤防縦断方向の解析領域を広げることで噴砂発生箇所付近の局所動水勾配は大きくなる傾向を確認できたものの、解析範囲がある程度の大きさ以上からは局所動水勾配の増加傾向は緩慢となった。この結果は浸透流解析において3次元効果を考慮可能な最適な解析範囲が存在することを示唆している。

なお、本研究では堤体の変状やパイピングの発生による透水係数の変化等を考慮できていない。このため現在では、さらに再現性の高い解析結果を得ることを目的に、間隙水圧の上昇によって形成された緩み領域を再現した解析を進めている。

#### 謝 辞

本実験で使用した排水ポンプ車の配備には、北海道開発局北見河川事務所から格別の協力を得た。本研究の一部は科研費20H02405および科研費20H00266の助成によって行われた。また、間隙水圧の測定データは西村 聡 教授（北海道大学）が実施したものをご提供頂いた。末筆ながら記して深甚なる謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会（国土交通省水管理・国土保全局）：気候変動を踏まえた治水計画のあり方提言，2021。
- 2) Bligh, W. (1910). Dams, barrages and weirs on porous foundations. Eng. News Record. 64, No. 26, 708-710.
- 3) 矢部川堤防調査委員会（国土交通省九州地整法整備局）：矢部川堤防調査委員会報告書，2013。
- 4) 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（改定版），2012。
- 5) 常田賢一，澁谷啓，片岡沙都紀，河井克之，鳥居宣之，新納格，秦吉弥：基礎からの土質力学，理工図書，2017。
- 6) 仲村将磨，南徳香，川尻峻三，伊東樹，西村聡，佐藤泰地，豊原耀太：河川堤防における小規模噴砂発生時の堤体内水利挙動に関する一考察，地盤工学会北海道支部技術報告集，Vol. 63, pp.177-182, 2023。
- 7) 伊東樹，川尻峻三，廣岡明彦：3次元浸透流解析における堤外地盤のモデル化領域が局所動水勾配に及ぼす影響，第11回河川堤防技術シンポジウム論文集，pp.13-14, 2024。

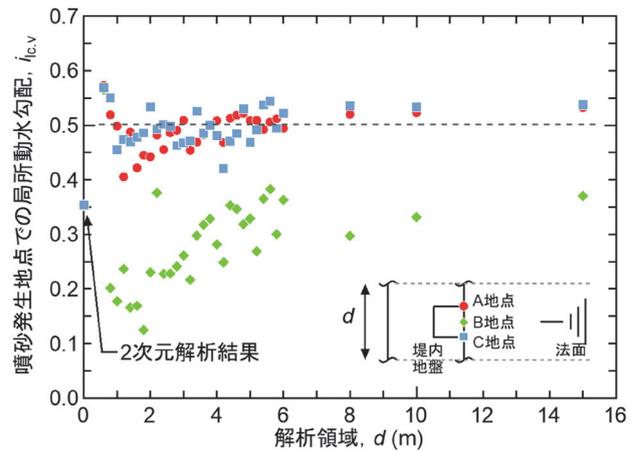


図3-6 解析領域  $d$  と解析での局所動水勾配の関係

- 8) 伊東樹, 川尻峻三, 廣岡明彦: 実大試験堤防における小規模噴砂発生時の間隙水圧と動水勾配の変化, 第 59 回地盤工学研究発表会講演集, 2024.
- 9) 西村征哉, 前田健一, 榎山総平, 高辻理人, 泉典洋: 透水性基礎地盤を有する河川堤防のパイピング条件に基づく簡易な点検フローの提案, 第 5 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.13-16, 2017.
- 10) 田中秀岳, 笹岡信吾, 福島雅紀: 河川堤防におけるパイピング進行性評価のための合成局所動水勾配を用いた評価手法の検討, 河川技術論文集, Vol. 26, pp. 485-490, 2000.
- 11) 西垣誠, 梅田美彦, 上山一彦: 地盤掘削地におけるボイリング, パイピング現象の 2,3 の考察, 土と基礎, Vol. 37, No. 6, p69-74, 1989.

#### 著 者

伊東 樹	九州工業大学大学院, 学士 (工学), 地盤工学
川尻 峻三	研究員, 九州工業大学大学院工学研究院, 博士 (工学), 地盤防災工学
仲村 将磨	北見工業大学大学院, 学士 (工学), 地盤工学