

トランスパレントソイルを用いた 堤防決壊プロセスの可視化に関する試み

音田 慎一郎¹・加納 隆伸²・肥後 陽介³・山口 凌大⁴・高野 大樹⁵

¹正会員 京都大学准教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: onda.shinichiro.2e@kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

²学生会員 京都大学修士課程学生 工学研究科都市社会工学専攻 (同 上)

E-mail: kanou.takanobu.77r@st.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学教授 工学研究科都市社会工学専攻 (同 上)

E-mail: higo.yohsuke.5z@kyoto-u.ac.jp

⁴学生会員 京都大学修士課程学生 工学研究科都市社会工学専攻 (同 上)

E-mail: yamaguchi.ryota.72m@st.kyoto-u.ac.jp

⁵正会員 港湾空港技術研究所 地盤研究領域土質研究グループ (神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: takano-d@p.mpat.go.jp

近年の局地的集中豪雨の出水において、堤防決壊などの甚大な被害が報告されている。こうした被害を軽減するためには、破堤時の堤体内の物理的メカニズムを解明し、対応策を検討することが必要である。本研究では、模型堤防の決壊時における堤体内の飽和度分布を求め、そのプロセスを考察するため、地盤工学の分野で利用されているトランスパレントソイルに着目し、越流水と堤体材料にヨウ化ナトリウム水溶液と石英を適用して、破堤の水理模型実験を行った。そして、得られた画像から画像解析を行うことで、堤体内の飽和度の可視化を試みた。その結果、トランスパレントソイルを用いることで、珪砂では示すことができなかった堤体内の飽和度分布の時間変化を可視化できることを示した。

Key Words: levee breaching, hydraulic experiment, transparent soil, water saturation

1. はじめに

近年、局地的集中豪雨に起因した度重なる大規模な水害により、近隣の住民や自治体が甚大な被害をうける事例が数多く報告されている。中でも、破堤による被害は壊滅的であり、軽減策を検討するためには、破堤時の堤体内の物理的メカニズムの解明が不可欠である。

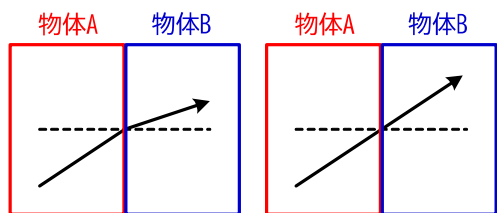
そこで、破堤の物理的メカニズムを解明するために数多くの実験的研究がされてきた。例えば、Hager & Schmocker^{1),2)}は、水理学的、地質的条件を変化させた破堤実験を行い、侵食過程の違い、水路側壁の影響、スケール効果などについて考察している。また、関根ら^{3),4)}は砂礫、粘土を含有させた模擬堤防を対象とした模型実験を行い、決壊プロセスにおける粘土・砂・礫の含有比率の影響について検討している。

破堤に関する数値解析も行われており、著者らは密度関数法とポーラスメディア法を組み合わせ、表面流と浸

透流を同時に予測できる3次元流体解析モデルを構築するとともに、河床変動モデルや土の変形モデルと組み合わせ、正面越流破堤過程⁵⁾や堤防の浸透破壊⁶⁾に関する数値解析を行っている。ただし、数値解析モデルの中に不飽和土におけるサクシジョンの影響は考慮されていない。一方、與田ら⁷⁾は、堤体の飽和度に着目した堤防の越流侵食実験を行うとともに、pick-up rate 式中の限界掃流力にサクシジョンによるせん断抵抗の増加を導入し、堤防越流破壊の数値解析を行っている。

しかし、堤体を越流する堤体表面の飽和度や間隙水圧がどのように分布しているか、また、決壊プロセスにおける飽和度と土砂移動量の関係についてはほとんど考察されていない。一般に、堤体内の間隙水圧を計測するには、堤体内に間隙水圧計を埋め込むことが多いが、堤体表面に間隙水圧計を設置することは難しく計測が困難である。

そこで本研究では、等しい屈折率を有する透明粒子と



(a) 屈折率が異なる場合 (b) 屈折率が同じ場合
図-1 光の屈折に関する概念図

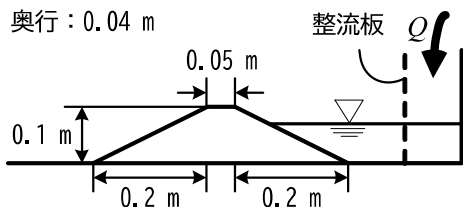


図-2 模型実験の概要図

表-1 実験条件

Case	堤体材料	流体材料	含水比 含溶液比 (%)	堤体密度 (g/cm ³)
S3	珪砂3号	水	3	1.91
1	石英	溶液X	0	1.26
2	石英	溶液X	20	1.51

間隙流体を用いて地盤を透明にするトランスパレントソイルの原理に着目した破堤の模型実験を行い、画像解析によって堤体表面や飽和度の空間分布の可視化と決壊プロセスのメカニズムについて考察することを目的とする。トランスパレントソイルは地盤工学の分野で利用されており、透水係数やせん断強度などの基本的特性を調べることで、天然砂の性質に近いことが確認されている⁸⁾。本研究でも参考文献⁸⁾に倣い、水の代用としてチオ硫酸ナトリウムで処理したヨウ化ナトリウム水溶液(以下「溶液X」)、砂の代わりに粉碎した熔融石英粒子(以下「石英」)を用いた。堤防の越流侵食実験で一般に用いられる珪砂は様々な成分で構成されているため、任意の飽和度に対する固有のRGB値を画像解析から求めることができないが、トランスパレントソイルでは、飽和度によって透明度が変化し、任意の飽和度に対する固有のRGB値を求めることができるため、飽和度の空間分布の把握が可能となる。また、溶液Xと石英の屈折率を一致させて実験を行うと堤体形状の把握が困難であるため、本研究では屈折率を一致させず、堤体形状の把握も試みた。

2. 水理模型実験

(1) トランスパレントソイルに関する基本的事項

トランスパレントソイルのメカニズムを説明するため、

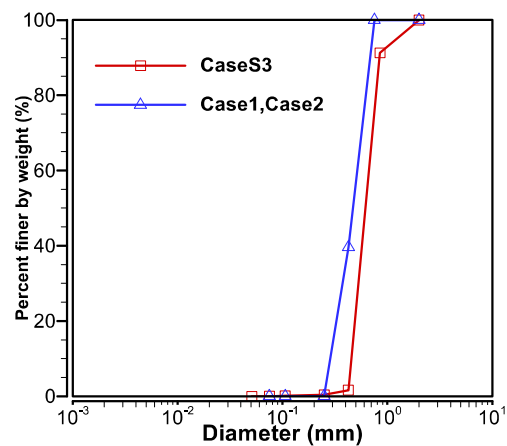


図-3 粒径加積曲線

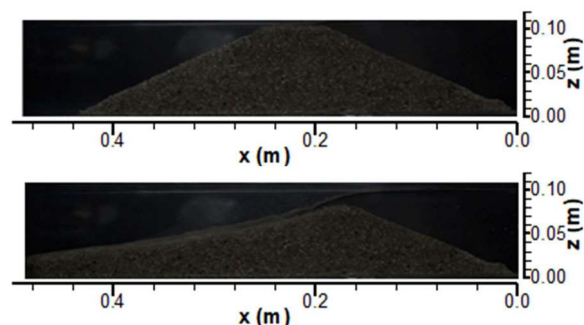


写真-1 Case S3における流況の時間変化
(上: $t=0$ s, 下: $t=3$ s)

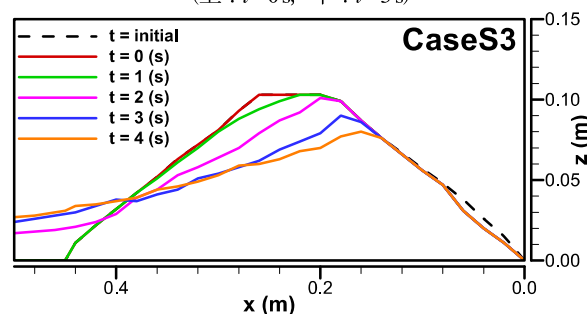


図-4 Case S3における堤体形状の時間変化

光の屈折率に関する概念図を図-1に示す。光はガラスや空気、水などの均一な物体内を進む場合直進を続けるが、これは均一な物体内において光の屈折率に変化がないためである。即ち、物体Aから屈折率が異なる物体Bに光が進む場合、図-1(a)のようにAとBの境界面で屈折するが、図-1(b)のようにAとBの屈折率が同じ場合には光は直進する。この原理を利用したのがトランスパレントソイルである。ここで、水の屈折率は23℃において1.330、石英の屈折率は1.458である。また堤体を越流、または浸透する溶液Xの濃度を变化させることによって、トランスパレントソイルの透明度を变化させることができる。ここで、チオ硫酸ナトリウムを加える理由は、チオ硫酸陰イオンが水溶液中のヨウ素と反応することによって液体を無色に保つことができるためである。

トランスパレントソイルに関する既往の研究⁸⁾においては、熔融石英と溶液の屈折率を一致させ、極めて透明に近い状態で行われてきた。しかし、本実験における目

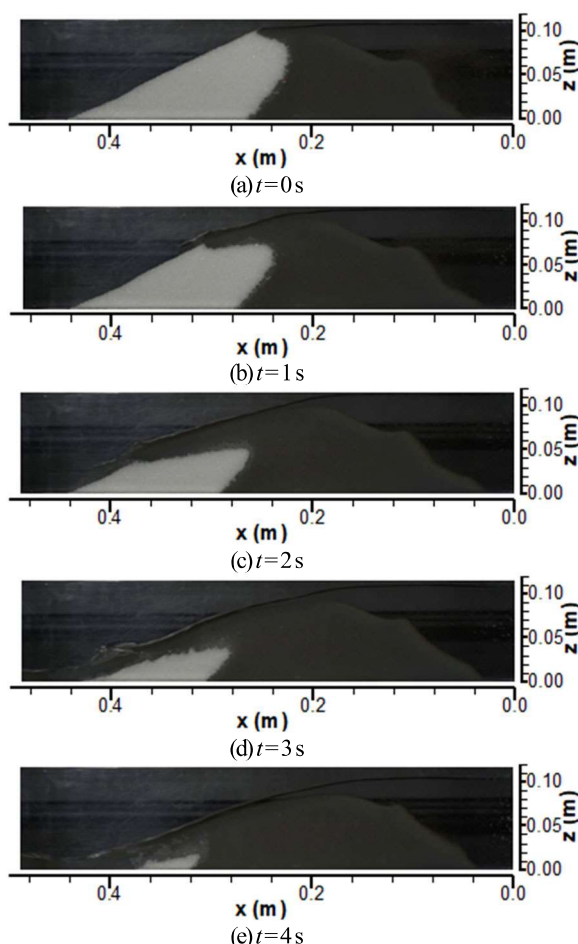


写真-2 Case 1における流況の時間変化

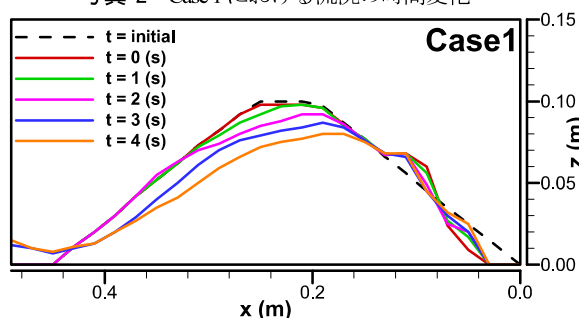


図-5 Case 1における堤体形状の時間変化

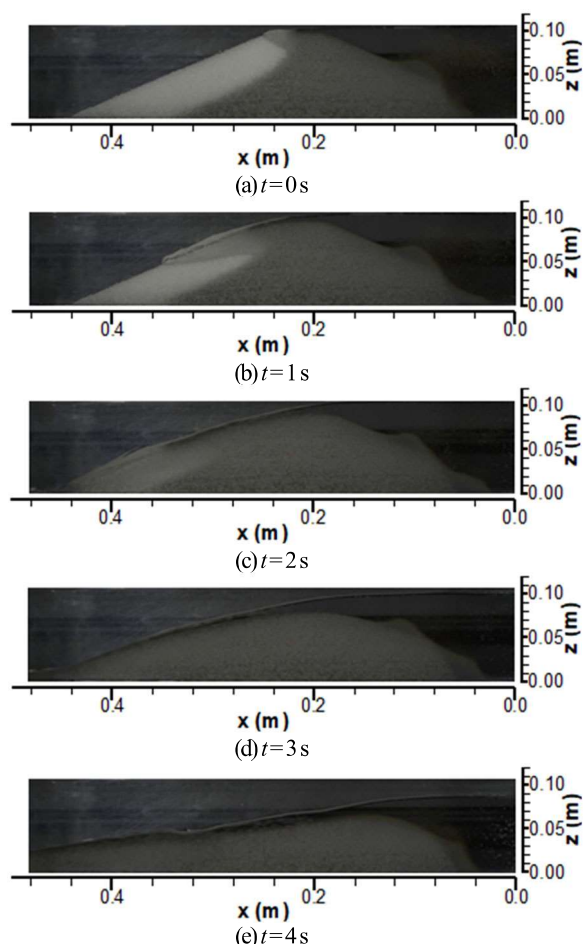


写真-3 Case 2における流況の時間変化

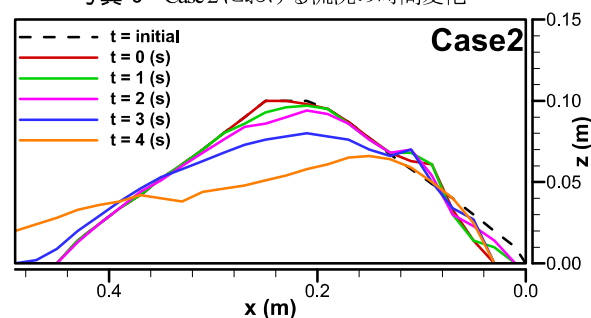


図-6 Case 2における堤体形状の時間変化

標は、(1) 堤体形状の把握、(2) 画像解析を行うことによって得られる堤体内の飽和度分布の可視化であり、屈折率を一致させると目標 (1) が困難となる。そこで本研究では石英と溶液 X の屈折率は一致させずにを行った。

(2) 実験方法

水平直線水路に堤体模型を設置し、上流から溶液を流して破堤実験を行う。各実験の様子を水路の側面からビデオカメラで撮影し、それらをもとに画像解析をすることにより、決壊プロセスと飽和度の空間分布を考察する。水路模型実験の概要図を図-2 に示す。長さ、幅、高さが 0.8 m、0.04 m、0.12 m の直線水路に、高さ、天端幅、のり面勾配がそれぞれ 0.1 m、0.05 m、1:2 の堤体を作成した。上流端から 0.1 m のところに整流板が設けている。

水路の側面、底面はアクリルでできており、水路側面から撮影したビデオカメラの映像から堤体の形状、堤体内の飽和度の空間分布について画像解析を行った。

実験条件を表-1 に示す。珪砂 3 号と水を用いた越流破堤実験を Case S3、石英と溶液 X を用いた越流破堤実験を Case 1、Case 2 とする。越流破堤実験では $Q=0.08 \text{ l/s}$ の流量を上流から与え、本研究では天端を乗り越えた時刻を $t=0 \text{ s}$ とし、堤体の高さが 0.02 m 失われた時刻をもって破堤とみなし、実験を終了した。珪砂 3 号と石英の粒径加積曲線を図-3 に示す。Case S3 の堤体材料の含水比は 3%、Case 1 の含溶液比は 0%、Case 2 の含溶液比は 20% である。また、溶液 X の屈折率は 18.1℃ において 1.445 である。

(3) 実験結果

Case S3 の流況の時間変化を写真-1 に、堤体形状の時間変化を図-4 に表す。ここでは実験動画から得られた画像を編集することなく示している。写真-1 をみると、越流水によって堤体が侵食していく様子は確認できるが、目視だけでは飽和度の分布を判定することは難しい。また、図-4 より侵食は法肩から始まり、侵食された珪砂が法尻に堆積する決壊プロセスが確認できる。

Case1 と Case2 における流況の時間変化を写真-2, 3 に示す。Case 1 と Case 2 を比較すると、溶液 X が裏法尻に到達するのはともに越流後 2 s である。また、浸透が到達していない堤体内の領域において色の比較すると、含水比が 0 % の Case 1 では白く、Case 2 と色の違いがはっきり確認できる。浸透面に着目すると、Case 1 の傾きは Case 2 より大きいことがわかる。これは飽和度による浸透速度の違いが影響していると考えられる。図-5, 6 に堤体形状の時間変化を示す。Case 1 における破堤は 4 s であるのに対し、Case 2 では 2 から 3 s であることが確認できる。なお、図-5, 6 をみると表法尻が凹み、その上部が膨らんでいるが、これは流入した溶液によって法尻の石英が巻き上げられ、その上部に堆積したためである。

3. 画像解析の方法

実験で得られた画像に対し、画像認識に関連するライブラリである Open cv と、画像処理ソフトウェアである ImageJ を用いて画像解析を行う。その手順を以下に示す。

- 越流破堤実験と同じ光量のもと、珪砂 3 号に対し、飽和度を 0, 18, 50, 80, 100 % に変化させた 5 つの地盤模型を用意し、水路模型に設置してそれぞれの材料の動画を撮影する。トランスパレントソイルにおいても同様に、飽和度を 0, 30, 60, 80, 90, 100 % に変化させた 5 つの地盤模型水路模型に設置し、動画を撮影する。模型地盤の高さは、材料と溶液が分離するのを防ぐために 0.01 m とする。
- a) で撮影した動画を、Open cv を用いて 1 s 毎の画像として切り出す。結果の一例として、トランスパレントソイルの飽和度別の画像を写真-4 に示す。
- ImageJ を用いて b) において切り出した画像の RGB 値の分布を調べる。その際、人の影やカメラのライトの映り込みがない領域を選択する。
- c) で計測した RGB 値の分布をもとに、3 つの材料に対して各飽和度固有の RGB 値の範囲を決定する。
- d) をもとに、前節で行った実験動画の切り取り画像に着色をし、飽和度の空間分布について可視化を試みる。

以上の手順によって得られた解析結果をもとに、破

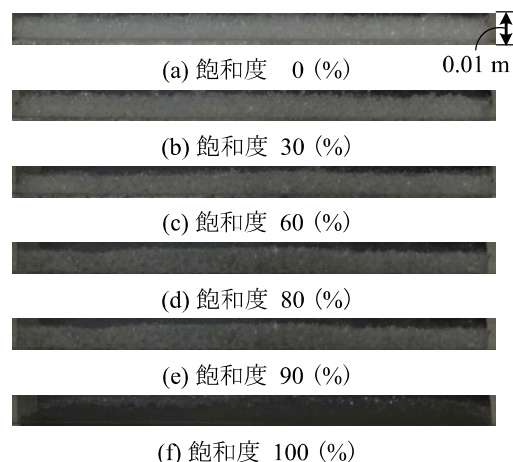


写真-4 飽和度別の模型地盤

表-2 3号砂を用いた場合の飽和度と RGB 値の関係

飽和度 (%)	R 値	G 値	B 値	着色
0	56 ~ 71	52 ~ 67	46 ~ 61	青
18	43 ~ 58	43 ~ 58	38 ~ 53	緑
50	45 ~ 60	43 ~ 58	36 ~ 51	黄緑
80	47 ~ 62	43 ~ 58	36 ~ 51	黄
100	43 ~ 58	39 ~ 54	33 ~ 48	赤

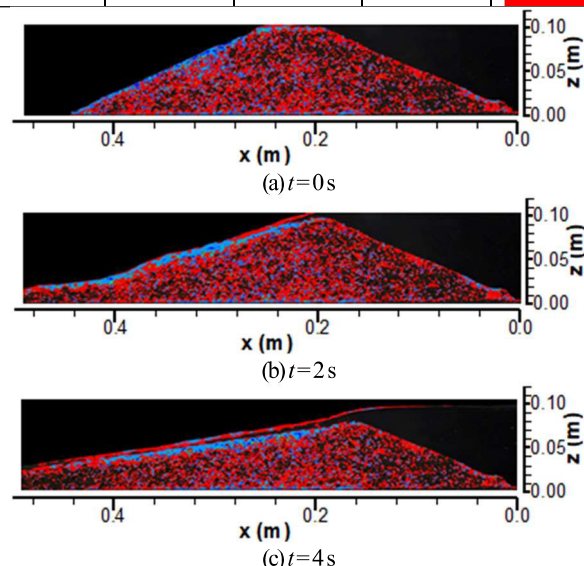


図-7 Case S3 における画像解析結果

表-3 石英を用いた場合の飽和度と RGB 値の関係

飽和度 (%)	R 値	G 値	B 値	着色
0 ~ 30	85 ~ 120	85 ~ 120	85 ~ 120	青
30 ~ 60	90 ~ 75	90 ~ 75	90 ~ 75	緑
60 ~ 90	80 ~ 40	80 ~ 40	80 ~ 40	黄緑
100	45 ~ 20	45 ~ 20	45 ~ 20	赤

堤実験時における飽和度の空間分布についての考察を行う。ただし、水路や背景による影響が確認された領域において、同時刻の写真を参照し、実験に無関係と考えられる領域においては、図の見やすさから水路や背景と同色になるよう着色の編集を行った。

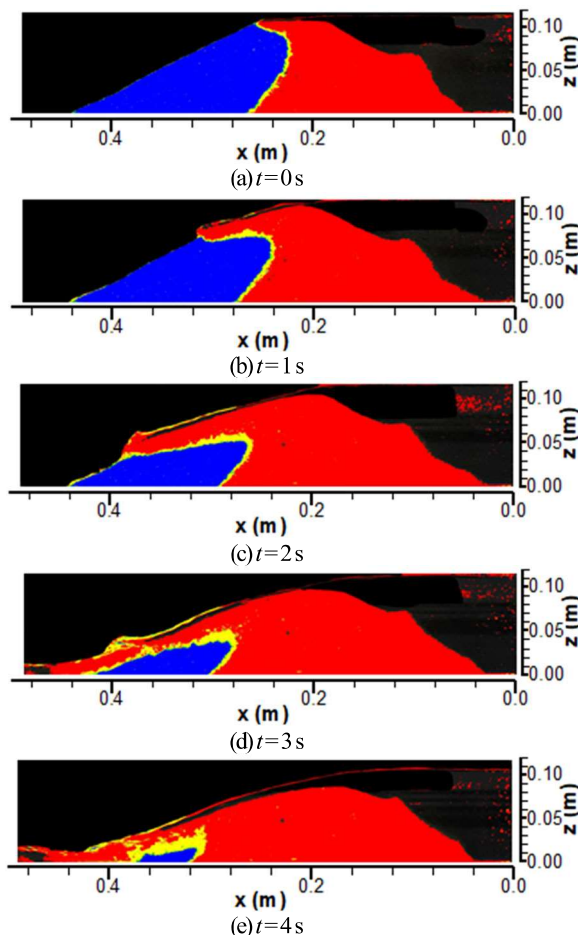


図-8 Case1における画像解析結果

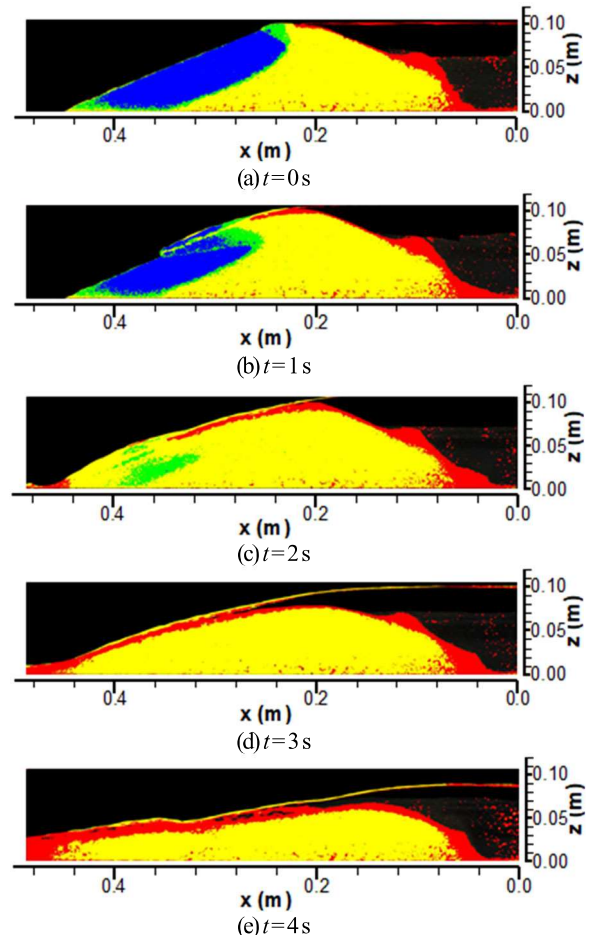


図-9 Case2における画像解析結果

4. 解析結果と考察

珪砂3号の0.01 m模型地盤において画像解析より得られた飽和度とRGB値の関係を表-2に示す。各飽和度に対してR値、G値、B値に幅をもたせて表示しているのは、それぞれの模型地盤画像の複数の測定点から求めたRGB値の上限と下限の値を示しているからである。また、表-2のRGB値をもとに画像に着色したのが図-7である。Case S3の結果をみると、飽和度0%を除く4つの飽和度の模型地盤において、RGB値に大きな違いは見られない。即ち、乾燥状態とそれ以外という大まかな判断しかできず、珪砂を用いた破堤実験では、飽和度の空間分布を求めることが難しいといえる。これは、珪砂特有の成分による固有の色の違いが大きく関係していると考えられる。

次に、石英を使った0.01 m模型地盤において画像解析より得られた飽和度とRGB値の関係を表-3に示す。ここで例えば、表中の飽和度0~30%に対してR値、G値、B値に幅をもたせて表示しているのは、飽和度0%と30%の2つの模型地盤画像の複数の測定点から求めたRGB値の上限と下限の値を示しているからである。本研究では、0、30、60、80、90、100%の模型地盤に対して画像解析を行ったが、80%と90%のRGB値にはっきり

とした差が見られなかったため、ここでは表中の4つ範囲を採用した。表より飽和度の範囲に応じて、RGB値が少しずつ異なることがわかる。そこでCase 1とCase 2ではこの表のRGB値をもとに画像に着色を行う。図-8は、Case 1における画像解析結果を示したものである。堤体内の赤色、青色の境界が浸透面を表しており、浸透面より上流側では赤色を示していることから完全に飽和していることがわかる。また、その境界において緑色、黄色に着色された30%から90%の非常に薄い層が見られ、乾燥と飽和の領域が隣接している。一方、越流水近傍の堤体表面に着目すると、越流水の堤体内への浸透によって堤体表面の飽和度が上昇し、堤体表面の侵食が起こっている様子が確認できる。

一方、Case 2における画像解析結果を示したものが図-9である。なお、 $t=0$ sの堤体内において、青い領域が確認できるが、これは、含溶液比20%の試料を作成したにも関わらず、時間の経過とともに溶液が鉛直下方に流動してしまい、飽和度が30%以下になったことを示しており、0%ではないことに注意されたい。時間変化をみると、堤体の上流側において黄色と赤色の領域が存在しており、これは溶液が堤体内を浸透することによって飽和度が上昇している様子を示している。即ち $t=1$ sの図では、表法面の堤体表面において飽和層が、またそ

の下層においては飽和度が60~90%の概ね飽和した層が見られる。一方、越流による堤体裏法表面の様子に着目すると、 $t=0\text{ s}$ では裏法肩において黄緑色の領域が見られ、飽和度の上昇がわかる。 $t=2\text{ s}$ の図をみると、堤体表面には赤い領域が確認でき、飽和度の上昇とともに侵食が起こっている。よって、どちらのCaseにおいても堤体表面の間隙水圧が上昇し、ある程度有効応力が減少することで侵食されやすい状況が発生して侵食されているものと考えられる。Case 1とCase 2の結果を比較すると、乾燥石英のCase 1に比べて不飽和石英のCase 2では堤体内において飽和領域が少なく、不飽和石英では飽和しづらいことがわかる。これは初期状態で堤体内に含まれる溶液Xによって空気の流動が防がれるためであると思われる。

本研究では、堤体内の飽和度分布の可視化と越流による表面侵食の挙動について考察したが、侵食挙動をより詳細に検討するには、堤体表面に対象領域を絞って動画を撮影したほうが良いと考えられる。また、今回の計測では、4つの区分に分けて飽和度分布を示したが、より細かい精度で表示ができるのか検討する必要がある。これらの点については今後の検討課題としたい。

5. おわりに

本研究では、トランスパレントソイルを用いて越流による破堤実験を行い、画像解析を行うことで堤体内の飽和度分布を求め、決壊プロセスを考察した。その結果、珪砂は様々な成分で構成されているため、画像解析を行っても飽和度に対する固有のRGB値が求められず、飽和度分布を示すことができなかった。一方、トランスパレントソイルでは、飽和度固有のRGB値を求めることができ、堤体内の飽和度分布の時間変化を可視化できること、また、堤体表面では浸透により飽和度の上昇した層が侵食されていることを示した。今後、トランスパレ

ントソイルの決壊プロセスへの更なる適用について検討したい。

謝辞：本研究はJSPS科研費 20H00264の助成を受けたものである。また、京都大学技術職員の小森直人氏には模型実験において多大なる援助を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Schmocker, L. and Hager, W.H.: Modelling dike breaching due to overtopping, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.47, No.5, pp585-597, 2009.
- 2) Müller, C., Frank, P.J. and Hager, W.H.: Dyke overtopping: effects of shape and headwater elevation, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.54, No.4, pp410-422, 2016.
- 3) 関根正人, 佐藤耕介, 菅 俊貴: 模擬河川堤防の決壊プロセスに及ぼす含有する砂礫・粘土の影響に関する検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.I_1099-I_1104, 2018.
- 4) 関根正人, 菅 俊貴, 松浦泰地: 模擬河川堤防の決壊プロセスに与える堤体材料の礫・砂・粘土の混合比率の影響, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75, No.2, pp.I_949-I_954, 2019.
- 5) Onda, S., Hosoda, T., Jaćimović, N. and Kimura, I.: Numerical modelling of simultaneous overtopping and seepage flows with application to dike breaching, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.57, No.1, pp.13-25, 2019.
- 6) 音田慎一郎, 北林資也, 肥後陽介, 細田 尚: 開水路流れと土の弾塑性変形連成解析の堤防浸透破壊への適用性, 土木学会論文集 B1(水工学), 土木学会, Vol.73, No.4, pp.I_811-I_816, 2017.
- 7) 奥田敏昭, 中川 一, 水谷英朗, 川池健司, 張浩: 堤体飽和度に着目した堤防の越流侵食のメカニズムに関する研究, 自然災害科学, Vol.33, No.1, pp.29-41, 2014.
- 8) Carvalho, T., Suescun-Florez, E., Omidvar, M., and Iskander, M.: A Nonviscous Water-Based Pore Fluid for Modeling With Transparent Soils, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.38, No.5, pp.1-7, 2015.

(Received June 30, 2021)

(Accepted September 3, 2021)

TRIAL VISUALIZATION IN EMBANKMENT BREACHING PROCESS USING TRANSPARENT SOIL

Shinichiro ONDA, Takanobu KANOU, Yosuke HIGO,
Ryota YAMAGUCHI and Daiki TAKANO

Levee breaching occurs recently during floods in torrential rain and causes severe damages in landside area. For disaster mitigation, it is of great importance to understand the mechanism of flows and sediment transport in the breaching process and consider countermeasures. In this study, to obtain spatial distribution of saturation and examine the breaching process, hydraulic experiment of levee breaching due to overtopping flows is carried out, using transparent soil. Then, conducting image analysis, visualization of saturation in the embankment body is shown, which cannot be obtained in the case of sand.