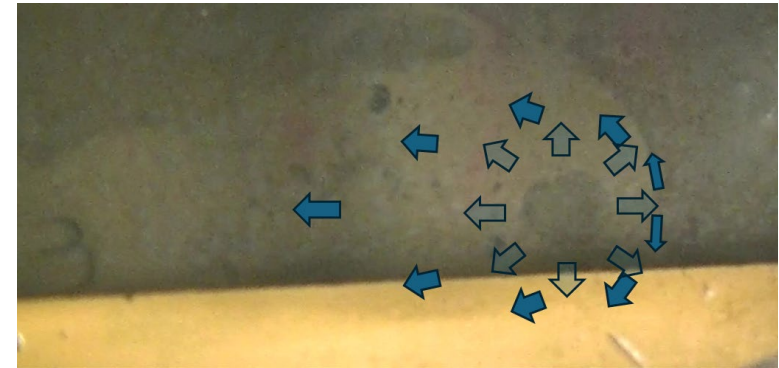
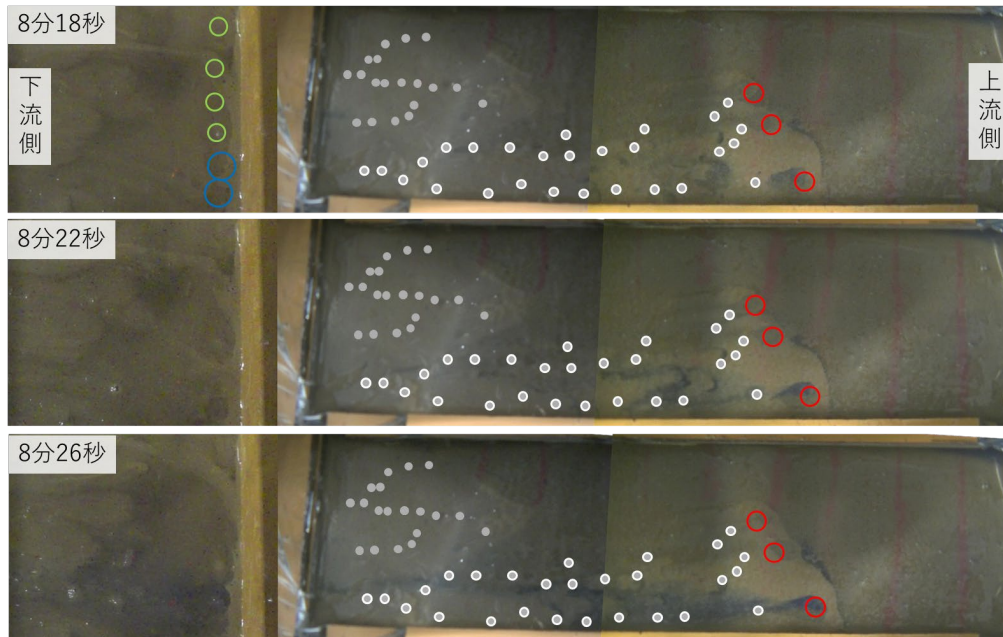


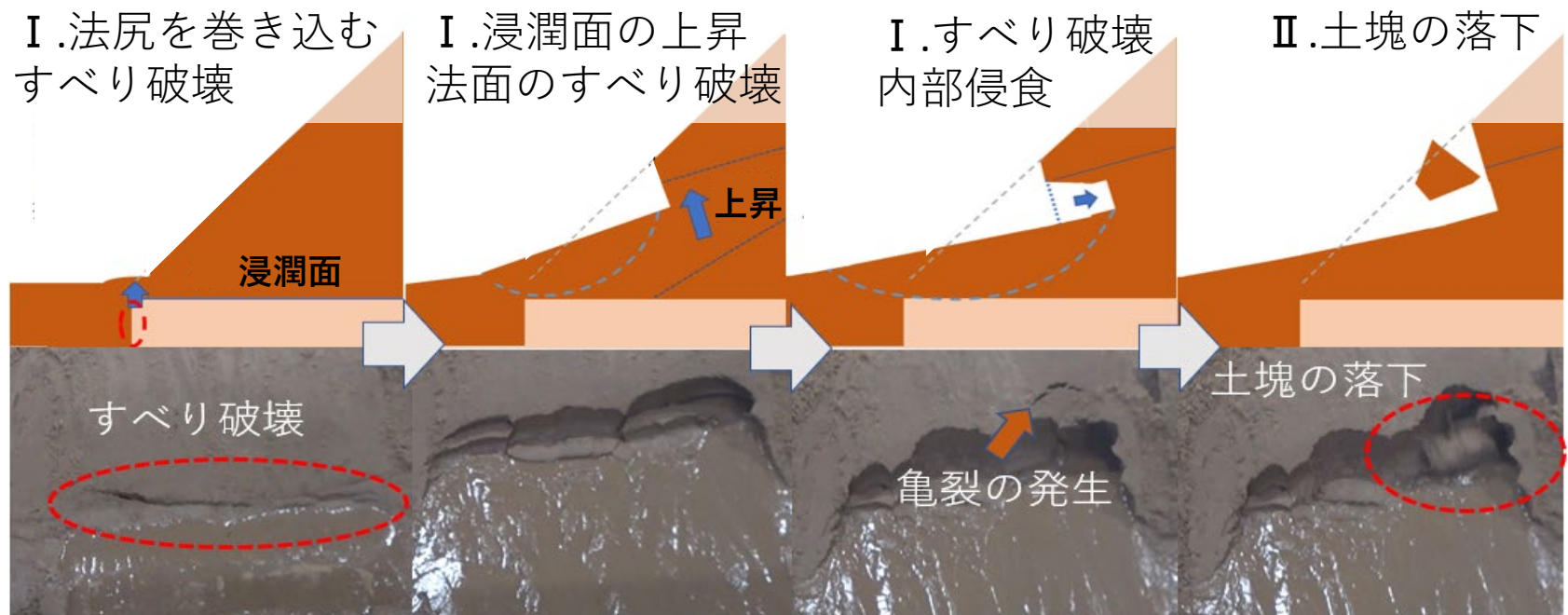
# 水工学から見たパイピング: 地盤初期状態と洪水 波形が与える影響に関する考察



# 1 はじめに 1)地盤工学的視点

- ・ 降雨および河川水が堤防を不安定化させるプロセス  
水の浸透→土の飽和度上昇  
→土の強度低下 + 間隙水圧の上昇（有効応力の低下）
- ・ 堤防崩壊・決壊にいたる一般的な要因  
大量の降雨、高い河川水位と長い継続時間、堤防土質の強度不足等
- ・ 堤体漏水：漏水を放置すれば堤体の流動や崩れにつながる  
※動水勾配、透水係数、土の強度特性に注目した研究が展開
- ・ 特に基盤漏水に関して2つのメカニズム
  - 1)揚圧力：複層構造基盤の場合、表層が不透水層（または下層より透水係数が極端に小さい条件）の場合、表層の下に揚圧力が働き、表層の荷重に打ち勝って噴砂・漏水（ボイリング）が発生する。パイピングが進行する場合もある。  
表層が固い場合。全体を膨れ上がらせ壊れて漏水が生じる破壊モード（がまの発生）
  - 2)流動化：表層条件によっては、堤体下部基盤でも流動化が生じる

## 1 2)広義のパイピング：すべり破壊、流動化とブロック崩壊



実験で確認された変状

浸潤面下部

I. 広義のパイピング, 浸透によるすべり破壊

浸潤面上部

II. ひさし状に残された土塊のブロック破壊

# 1 3)狭義のパイピング：実験事例（盤膨れを伴うもの）

80倍速動画



- |         |   |        |
|---------|---|--------|
| ①噴砂の発生  | } | 緩やかな変化 |
| ②水みちの進行 |   |        |
| ③流量の増加  | } | 急激な変化  |
| ④水みちの貫通 |   |        |

# 1 4)狭義のパイピング：実験事例（噴砂を伴うもの）

- ①噴砂，②水みちの進行  
③流量増加，④水みちの貫通

300倍速  
15倍速

カラーサンド



貫通により 50~60cm程度の空洞



堤体の陥没につながる

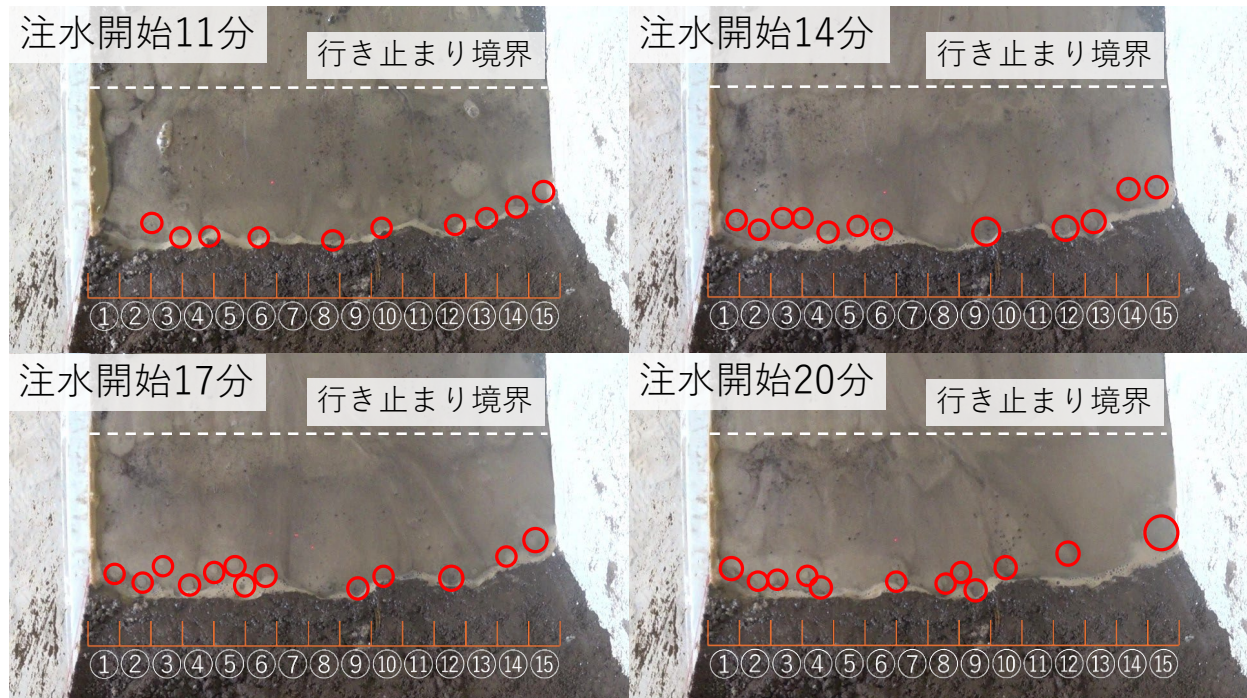
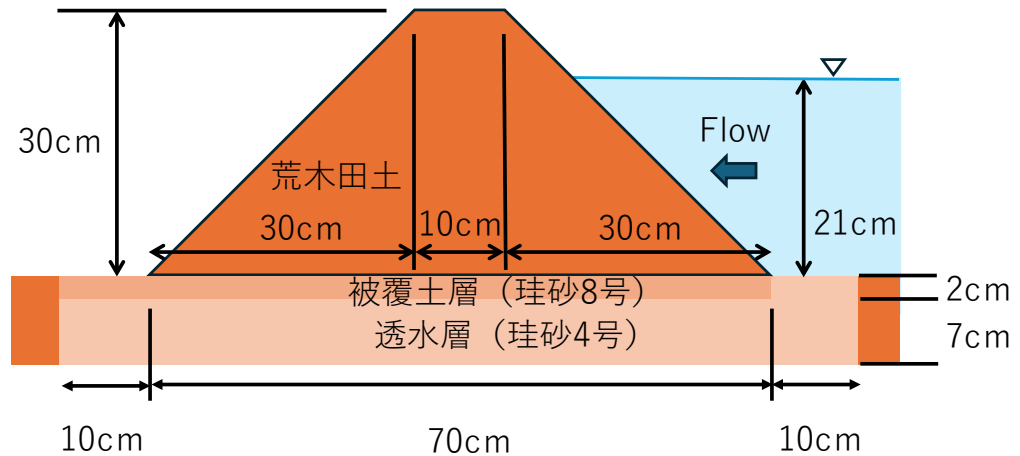


# 1 5)狭義のパイピング：実験事例（複数の噴砂）： 噴砂口によって異なる性質

・ 複層構造の基礎地盤を有する堤防に対して浸透実験

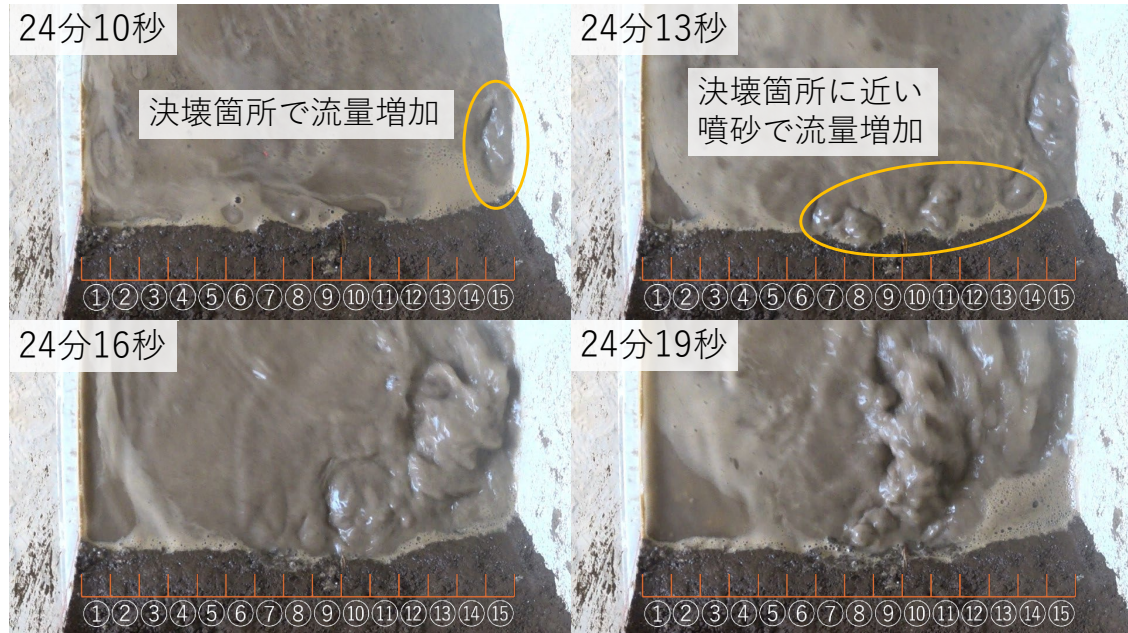
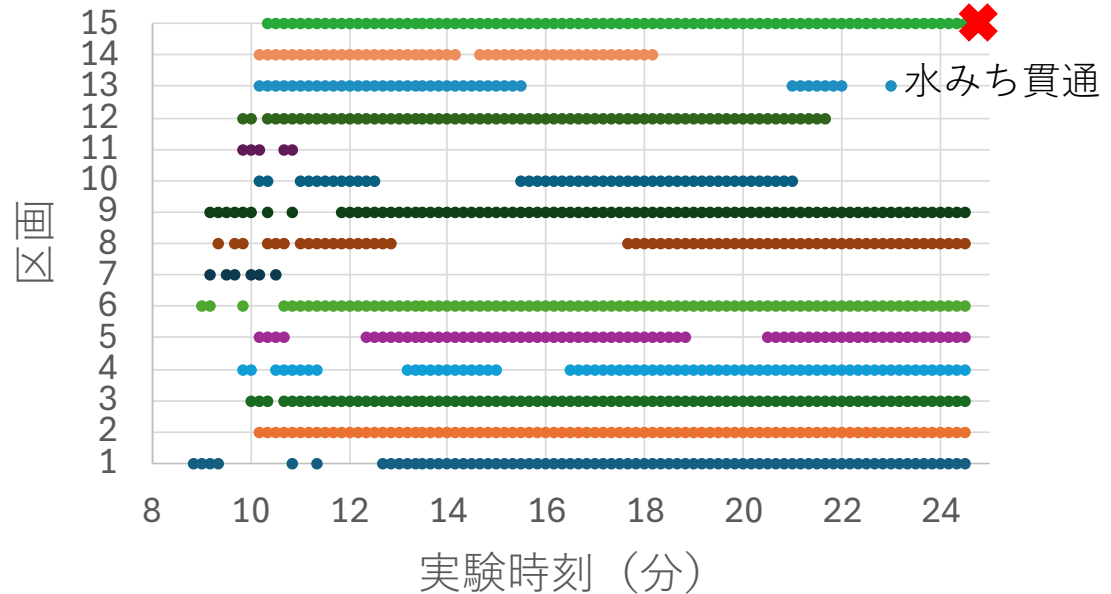
・ 噴砂が**横断的に複数箇所**で発生し、**複数の水みちが並行**して進行していくことが確認された。

・ 外観上、**継続して噴砂しているもの、弱くなってしまうものがある。**



# 1 6)狭義のパイピング：実験事例（複数の噴砂） →堤防の下を見る必要性

- ・ 噴砂の発生箇所の変化，決壊した噴砂と周囲の噴砂の間に連動した流量の増加
- ・ 水みちは基礎地盤内で進行する中で水みちが**合体などにより，広がって進行している可能性**が示唆された。
- ・ パイピング現象の**横断的な変化や影響の存在**を示唆
- ・ パイピングの**平面的な進行メカニズム**：詳細な検討が必要である



真中、我妻、田中、五十嵐、複層構造基礎地盤におけるパイピング現象の堤防法尻長手方向での時間変動特性、土木学会関東支部研究発表会2025（発表予定）

# 1 はじめに 7)水工学的視点 (1/2)

1) ダルシー則で扱われる土の浸透現象だけではなく、土粒子の移動・土構造の破壊（ボイリング、パイピング等）、土の侵食、移動を含む非ダルシー的連鎖現象

2) 堤防浸透に対する安全性の照査：

- ・ 浸透に対する設計外力として、計画高水位に達する洪水状態、計画規模の洪水時の降雨

- ・ 既往最大洪水の降雨量、水位波形（ピーク水位が高い、洪水継続時間が長い）に対する安全性の確認

越水なき破堤

1)長良川の事例

洪水継続時間で注目されたのは、1976年長良川の堤防決壊（約4日間、高水位が継続）。（パイピングの研究が進んでいた）大陸の大河川（1日-100日）と類似した高水位の継続。浸透破壊が注目されたきっかけ。

堤体内浸透が裏法部を不安定化させた or パイピングが進行した  
（決壊箇所とそのエビデンスとなる痕跡はなかった）

2)矢部川の事例（漏水そのものは多くの箇所が生じていた）

甲斐ら(2013)（河川技術論文集）でパイピング現象が実スケールでも生じたことが推察されている（氾濫危険水位を上回った時間は5時間程度）

堤防が陥没した動画が確認されている

# 1 はじめに 7)水工学的視点

今回の視点：大きく2つのメカニズム

1. 下層から上層への揚圧力が噴砂・ボイリングを発生させパイピングが上流に進行していく

2. 基盤浸透で飽和し有効応力を低減された基盤の流動や崩れ

どちらが支配的かは、河川水位がピークに達するまでの水位上昇速度、基盤の初期飽和度に影響されるか？最終状態は同じ破壊モードになるのか？

パイピングの進行を観察できる状態で、最終的な動水勾配は同じである以下の3ケースを比較する

A：地盤不飽和（含水率10%で締固めた複層構造）で水位急上昇

（我妻、真中、田中、五十嵐、複層構造基礎地盤におけるパイピング現象の平面的な進行と地盤内の流動状況の解明、第12回河川堤防技術シンポジウム2025）

B：地盤不飽和（Aと同じ条件）・水位緩やか（段階的）上昇

（真中、田中、五十嵐、非定常動水勾配条件下におけるパイピング現象の地盤緩み挙動による発達過程の解明、第13回河川堤防技術シンポジウム2026（発表予定））

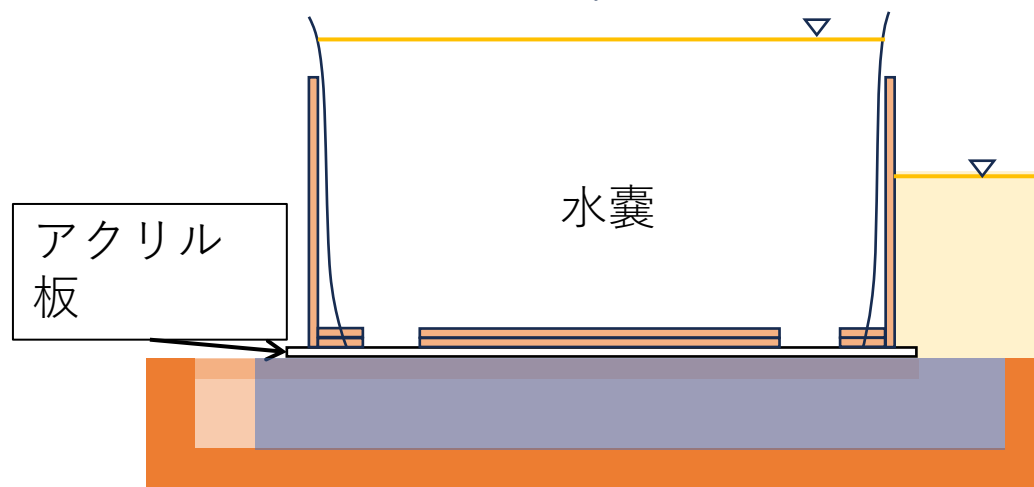
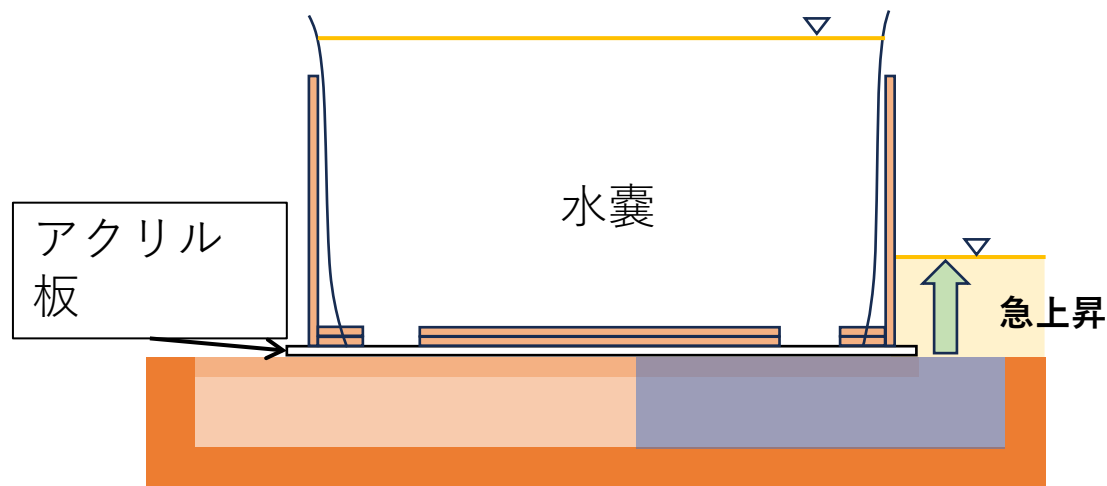
C：地盤飽和で水位急上昇（水位上昇速度はAと同じ）

気候変動で年降水量は減るが低頻度降雨の降雨量は上昇すると予想されている地点が多い。洪水ピークだけではなく、洪水頻度に関連して初期飽和度、洪水波形も変化すると考えられることから、「初期状態と破壊に至るルートの変化」について考察する

## 2 実験ケース 1)不飽和（最適含水比） + 急上昇ケース

### 急上昇ケース

基礎地盤が最適含水比の湿潤状態から注水を開始し、水位を急速に与える。

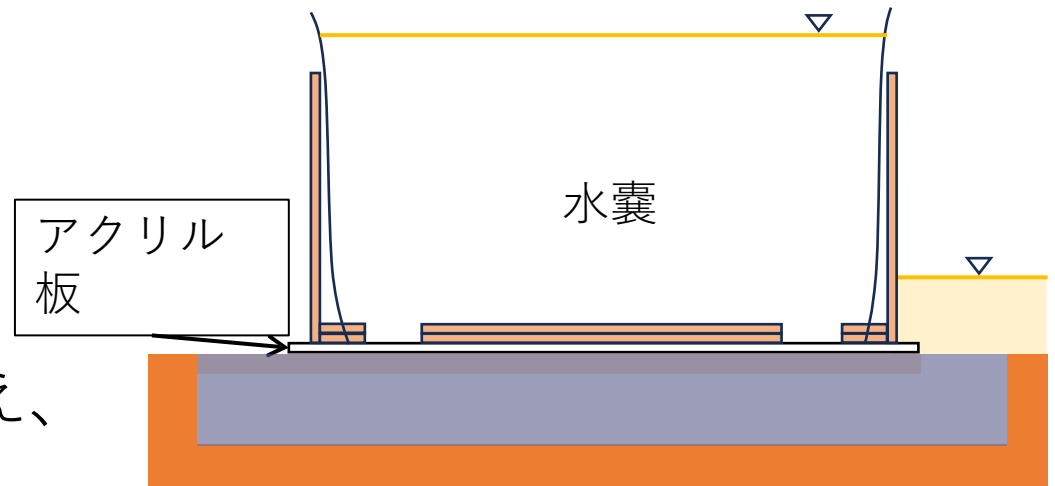


浸透が基礎地盤の行き止まり層に到達する前に水位上昇が完了する。

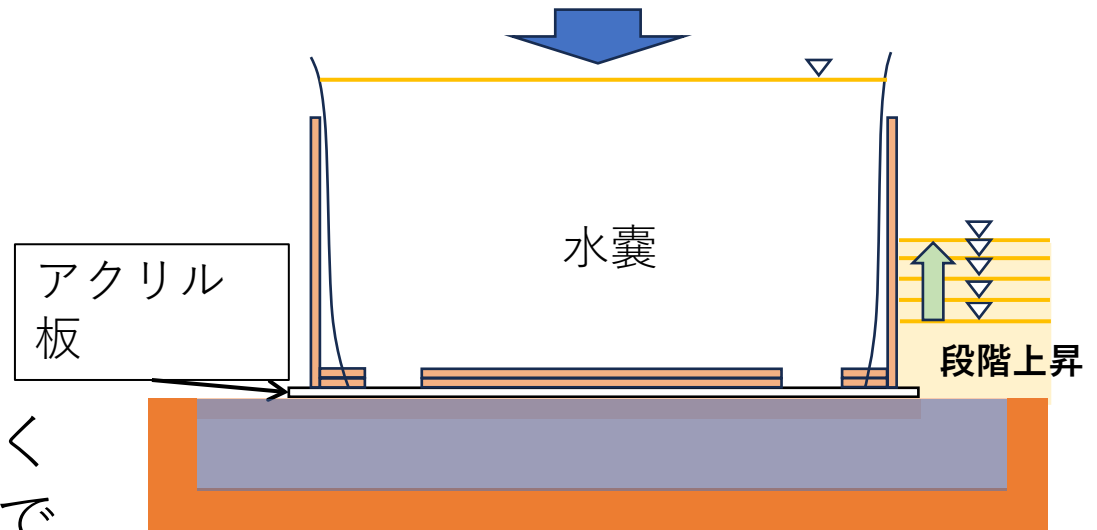
## 2 実験ケース 2)不飽和（最適含水比）＋段階的上昇ケース

### 段階上昇ケース

$i=0.10$ となる水位を与え、  
基礎地盤に変化が見られなくなるまで水位を維持する。



地盤に変化が見られなくなり10分経過した段階で  
 $i=0.01$ を増加させる分の  
水位を新たに加える。

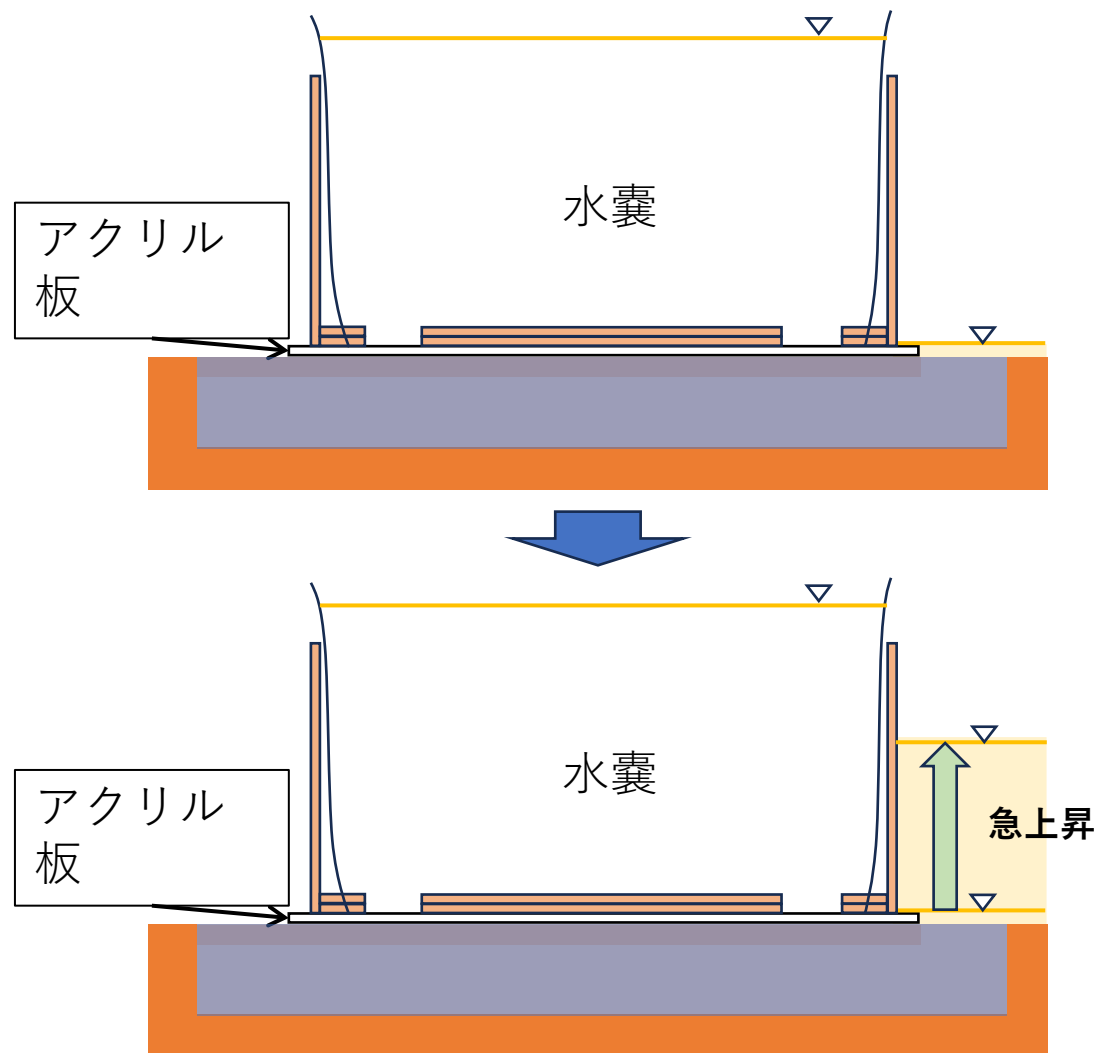


## 2 実験ケース 3)飽和+急上昇ケース

### 湿潤状態から急上昇ケース

低水位を維持したまま  
1時間注水を行い、基  
礎地盤が十分に飽和状  
態となるようにする

低水位状態から $i=0.20$   
となる水位まで急上昇  
させる。



## 2 実験ケース 4)急上昇と段階上昇の違い

### 段階上昇ケース

$i=0.1$ ↑

出来事	動水勾配	注水開始からの経過時間
水位7cm到達	0.10	1分
噴砂発生		12分55秒
水位上昇開始	0.11	30分20秒
水位上昇開始	0.12	46分10秒
水位上昇開始	0.13	60分15秒
水位上昇開始	0.14	76分10秒
水位上昇開始	0.15	91分5秒
水位上昇開始	0.16	107分5秒
水位上昇開始	0.17	122分10秒
水位上昇開始	0.18	135分45秒
水位上昇開始	0.19	165分35秒
決壊		171分25秒

### 急上昇ケース

$i=0.2$

出来事	注水開始からの経過時間
水位14cm到達	2分
噴砂発生	3分20秒
決壊	20分15秒

初期が同じ不飽和条件の場合

$i=0.2$ まで急上昇させたときは約20分で決壊

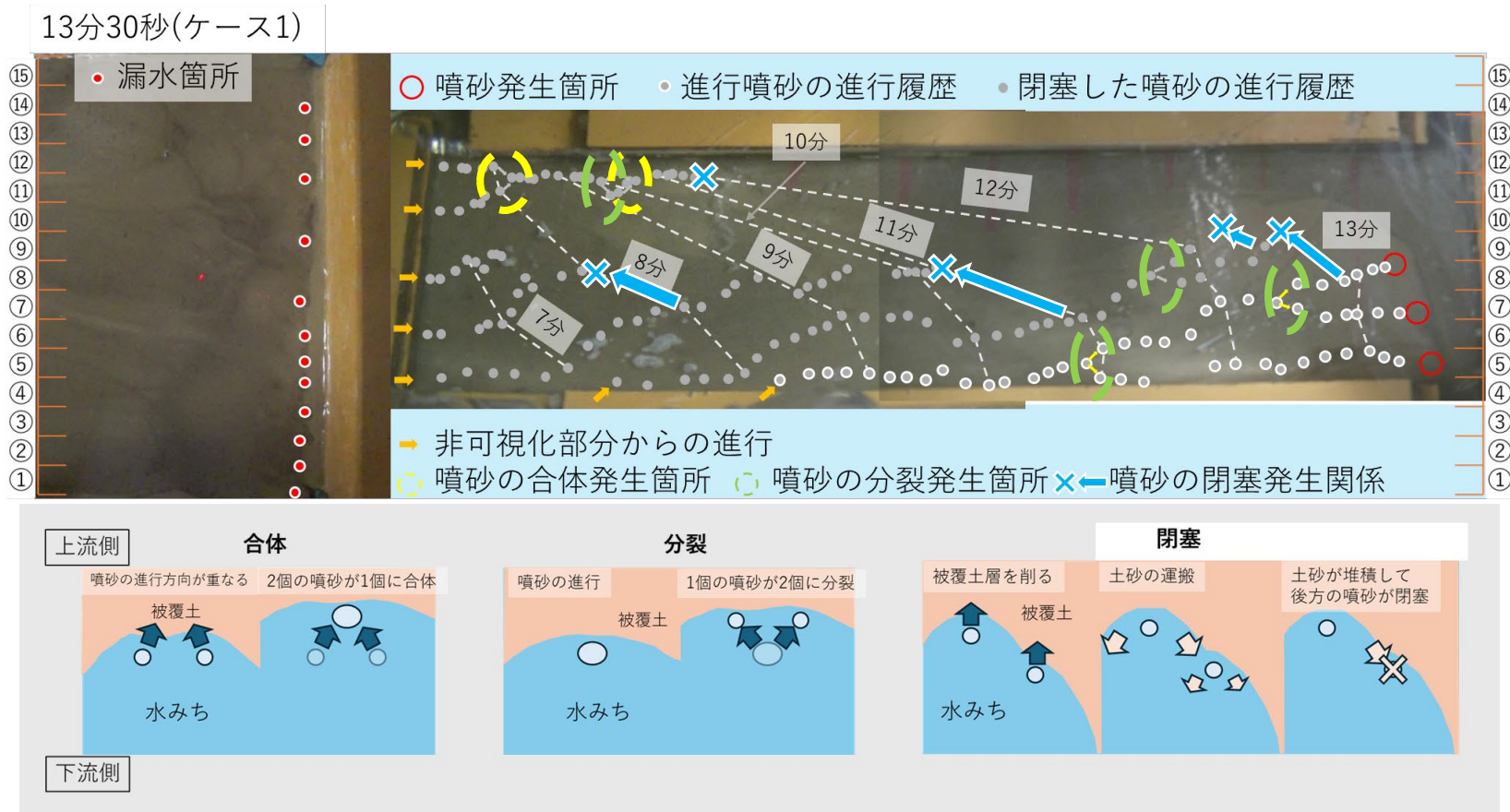
一方で、 $i=0.1$ から段階的に水位上昇させた場合

$i=0.18$ で緩みによる進展もあるにもかかわらずおよそ30分経過しても決壊に至らなかった

### 3 1)不飽和（最適含水比）＋急上昇ケース：三次元的動態

噴砂は**分裂や合体**などがあり，**法尻の漏水個数と堤体下の噴砂の個数が一致しない**場合がある

漏水の箇所と水みちの先端には**横断方向にズレ**がある場合がある



### 3 2)不飽和+急上昇：水みち進行中に上流タンクの水を着色してみると

噴砂内の水の流れを把握するために  
噴砂の進行中に浸透流を着色と法尻での漏水の強弱を区別



漏水の強さ

強

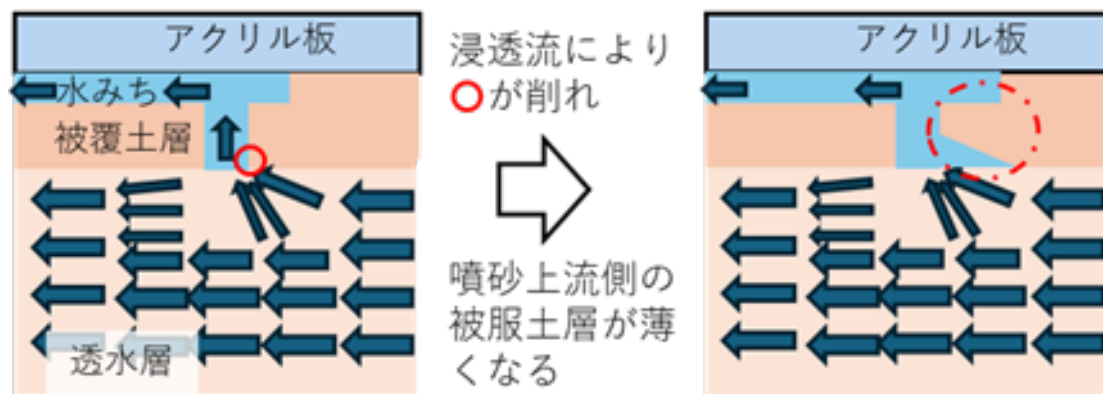
- ・ 上昇流  
法尻で水が湧き上がっている

- ・ 安定した漏水  
継続して漏水が確認できる

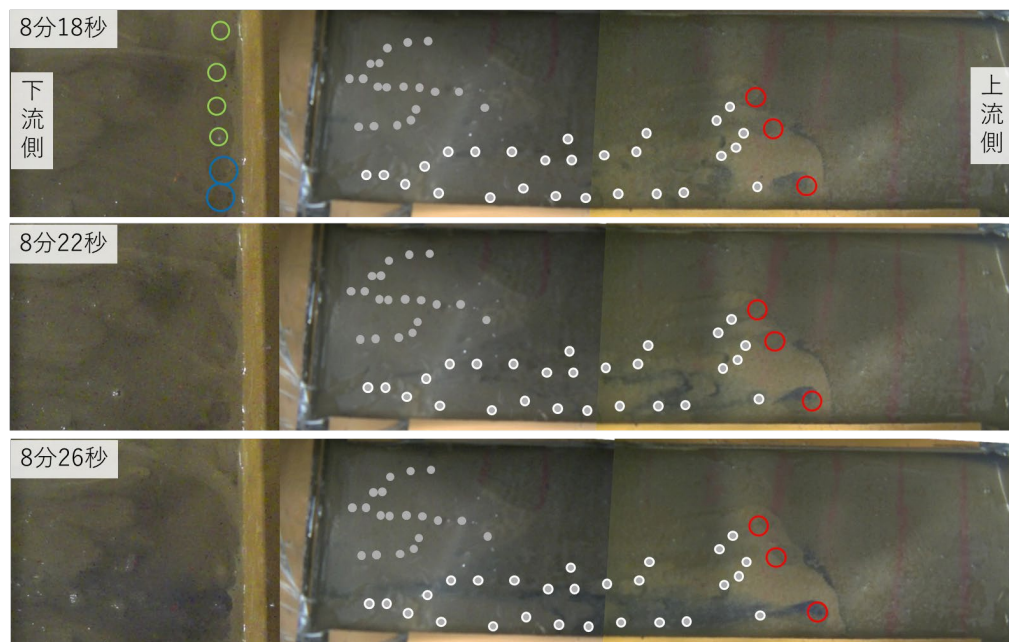
弱

- ・ 不安定な漏水  
漏水が弱く他の漏水によって見えなくなる場合がある

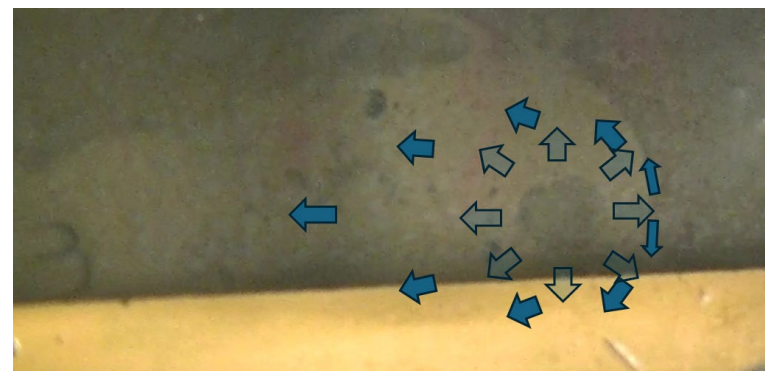
### 3 3)不飽和+急上昇：水みちの進行と上昇流



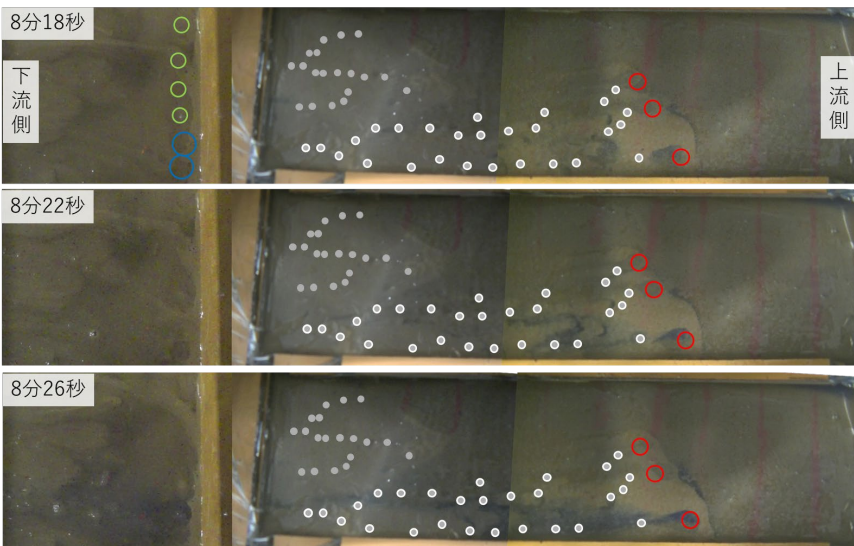
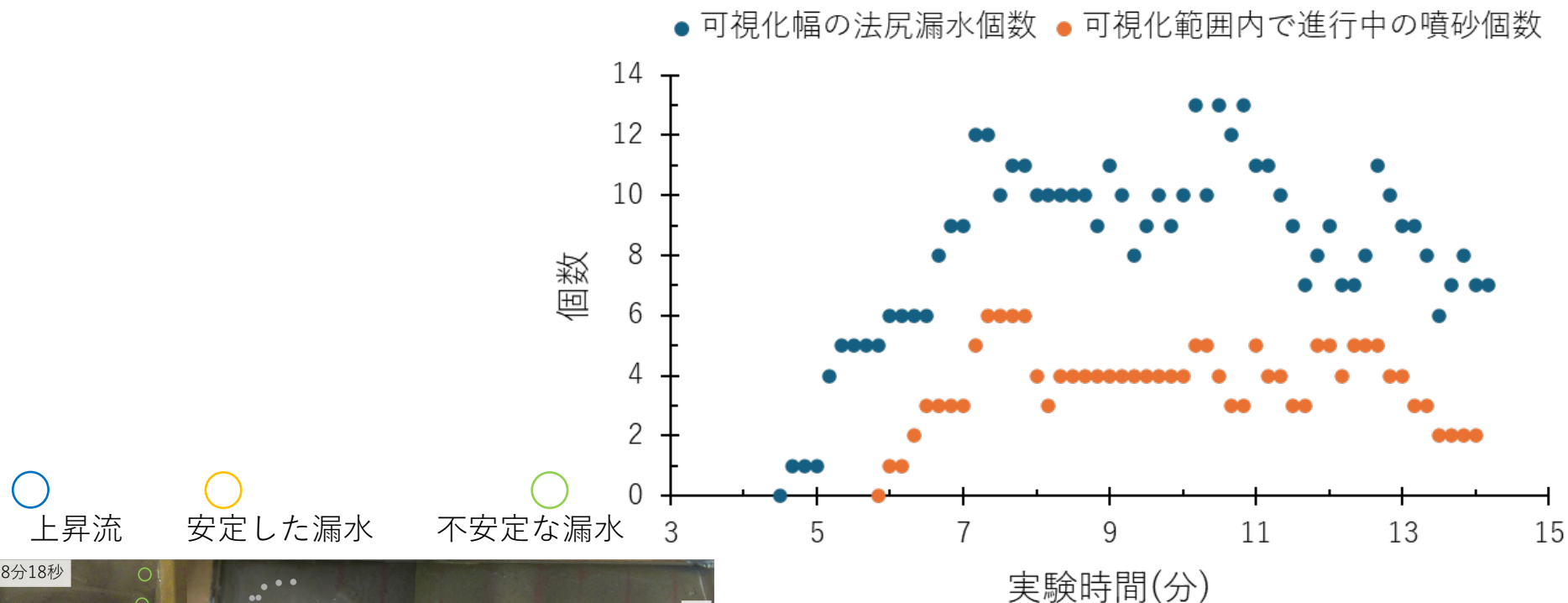
○ 上昇流    ○ 安定した漏水    ○ 不安定な漏水



噴砂より上流側にも着色が確認された  
→上昇流は堤体下部に当たること広がる  
このとき上流側の流れが被覆土層を削る



### 3 4)不飽和 + 急上昇：水みち内の流れ



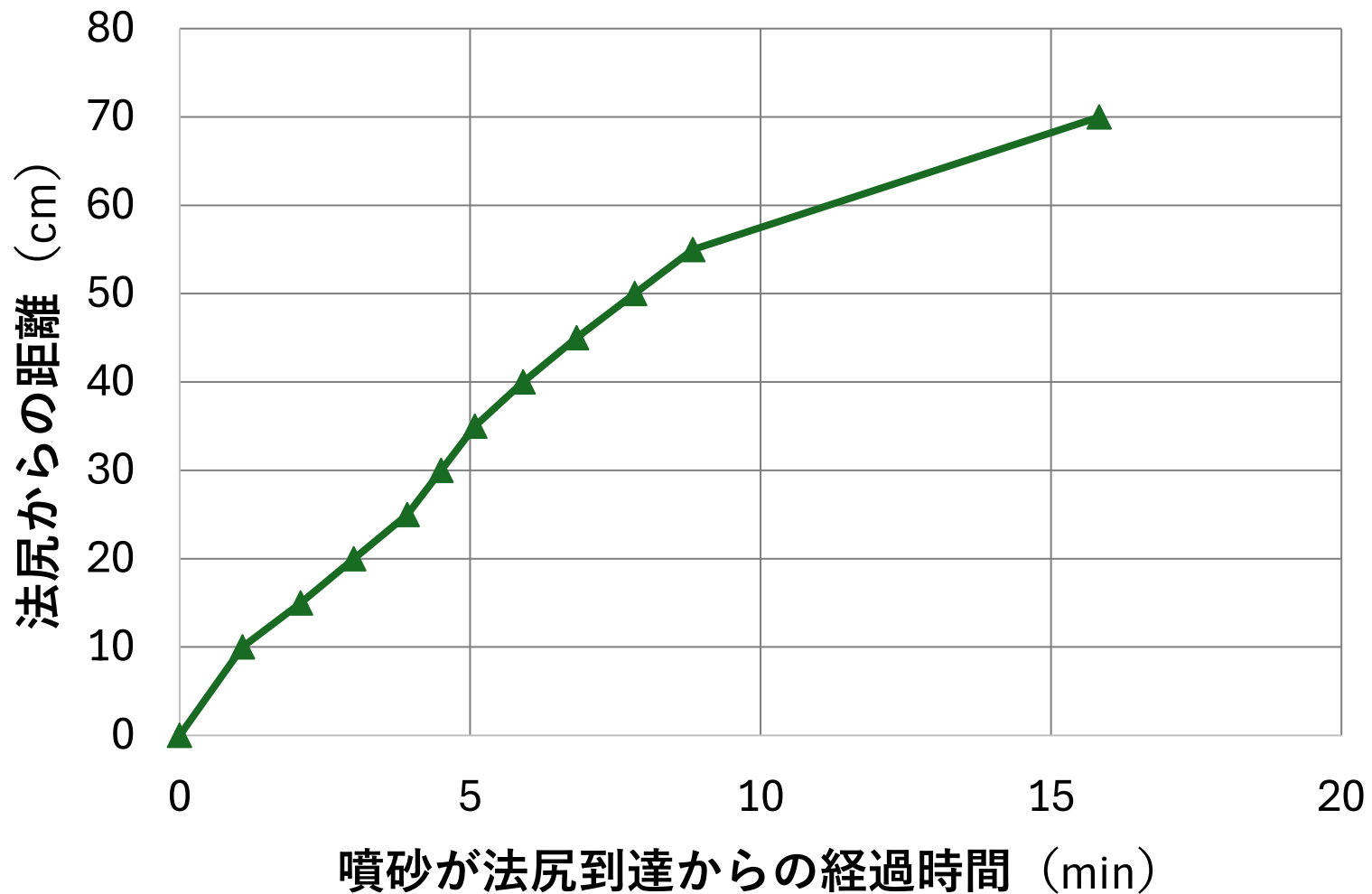
・ 水みち内の着色された流れは噴砂からまっすぐ下流側に進行し上昇流の発生箇所と一致する

### 3 5)不飽和 + 急上昇：基礎地盤のゆるみと噴砂位置のジャンプ（進行加速）



我妻、真中、田中、五十嵐、複層構造基礎地盤におけるパイピング現象の平面的な進行と地盤内の流動状況の解明、第12回河川堤防技術シンポジウム2025

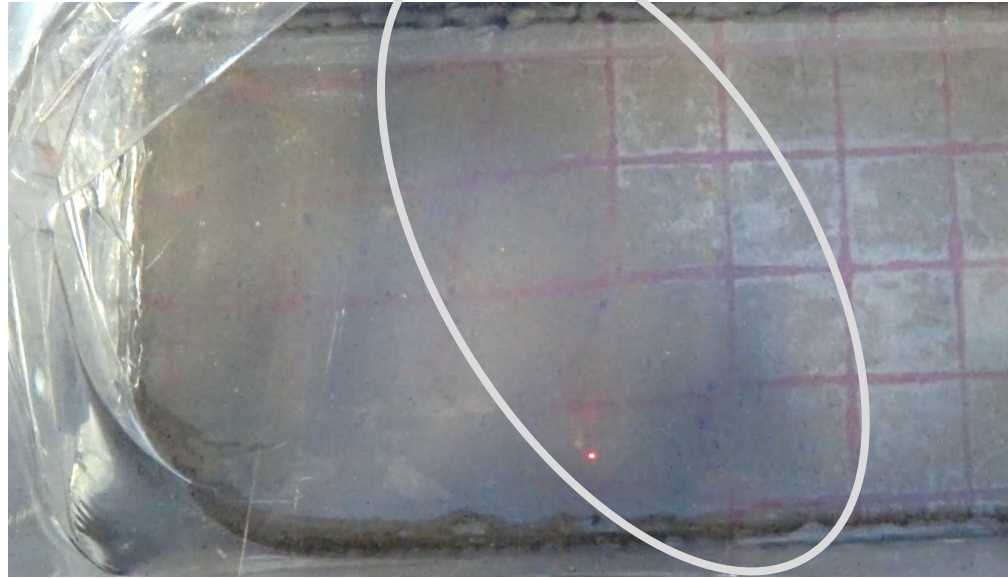
### 3 6)不飽和 + 急上昇：パイピングの速度



噴砂が法尻到達からの進行距離の変化

## 4 1)不飽和 + 段階的上昇：基礎地盤のゆるみ

### ・ 緩み先端域の判断方法

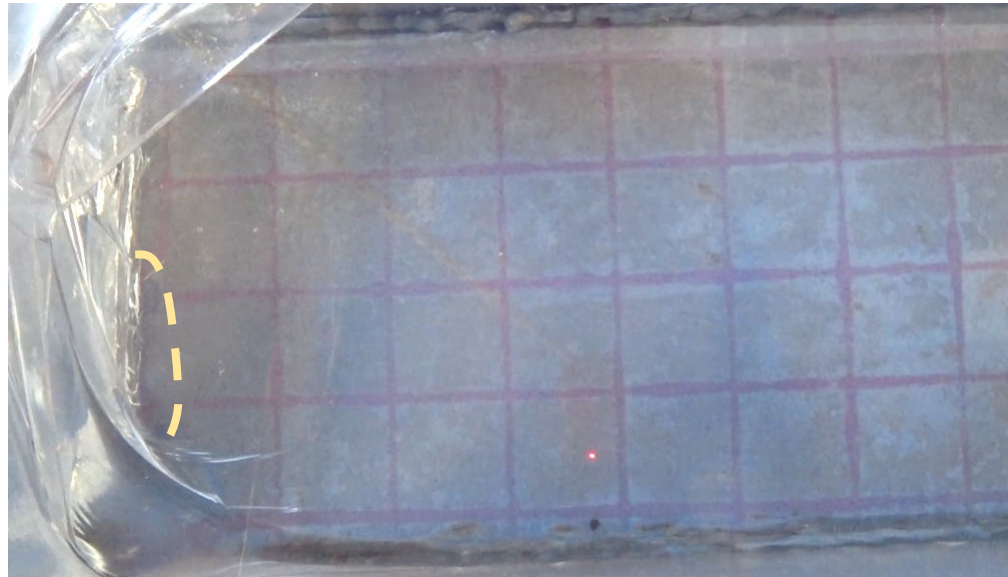


基礎地盤内の色が単色の茶色？になって飽和状態になっている場所と、不飽和で空気が残って白色が混在している場所の境界

もしくは、カラーサンドが歪んでいる、消失している個所を結んだ線

## 4 2)不飽和 + 段階的上昇：基礎地盤のゆるみ (1/2)

- ・水みちではなく、緩みによる進展

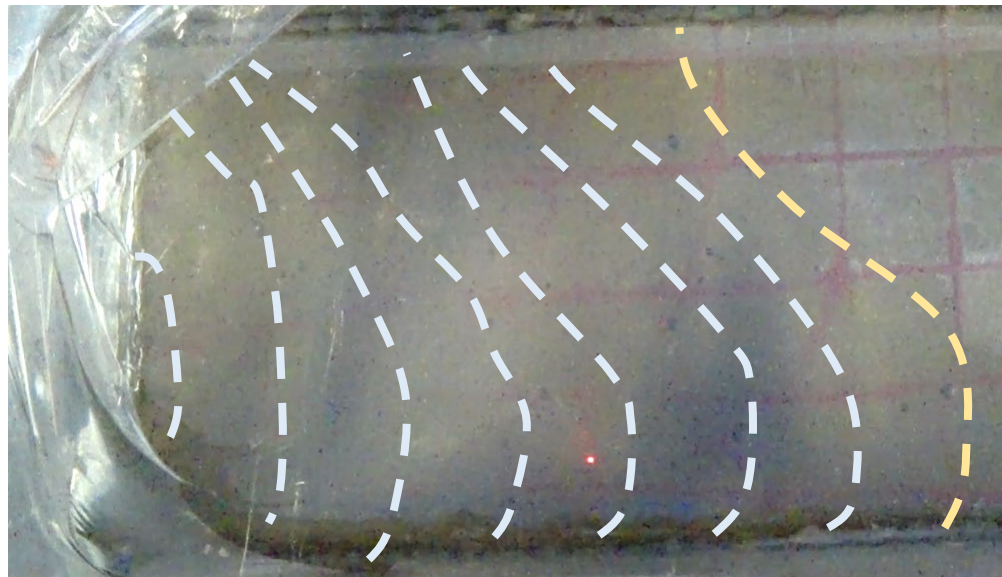


緩み域の拡大

真中、田中、五十嵐、非定常動水勾配条件下におけるパイピング現象の地盤緩み挙動による発達過程の解明、第13回河川堤防技術シンポジウム2026（発表予定）

## 4 2)不飽和 + 段階的上昇：基礎地盤のゆるみ (2/2)

- ・水みちではなく、緩みによる進展

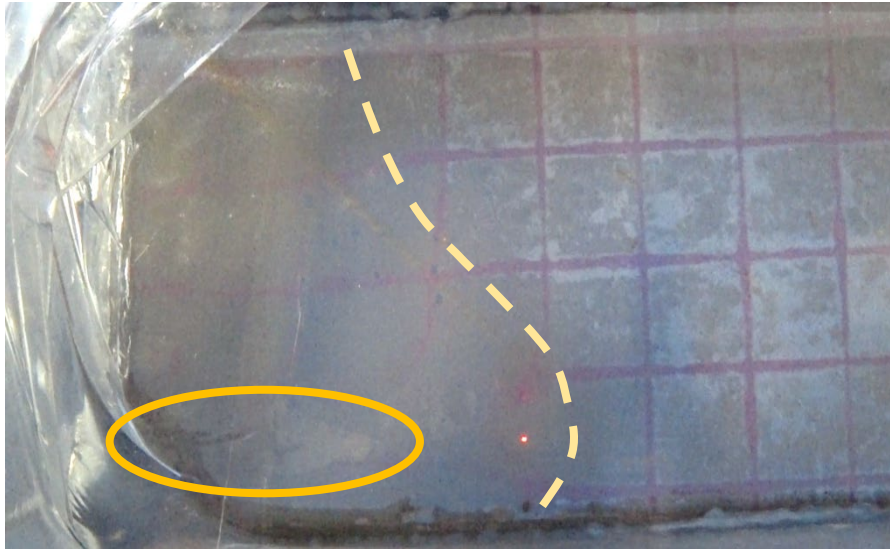


緩み域の拡大

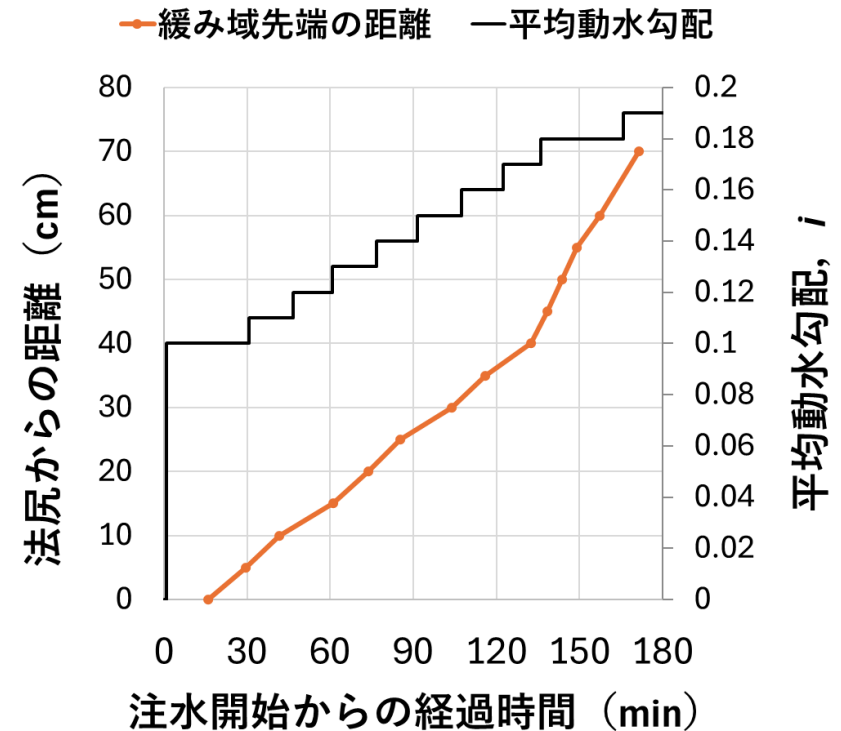
真中、田中、五十嵐、非定常動水勾配条件下におけるパイピング現象の地盤緩み挙動による発達過程の解明、第13回河川堤防技術シンポジウム2026（発表予定）

## 4 3)不飽和+段階的上昇：基礎地盤ゆるみ域内での噴砂

### 緩み域後方での水みちの発生と消失



緩み域後方に、水みちと思われる周囲と異なって濁った流れ。しかし、時間とともに衰退

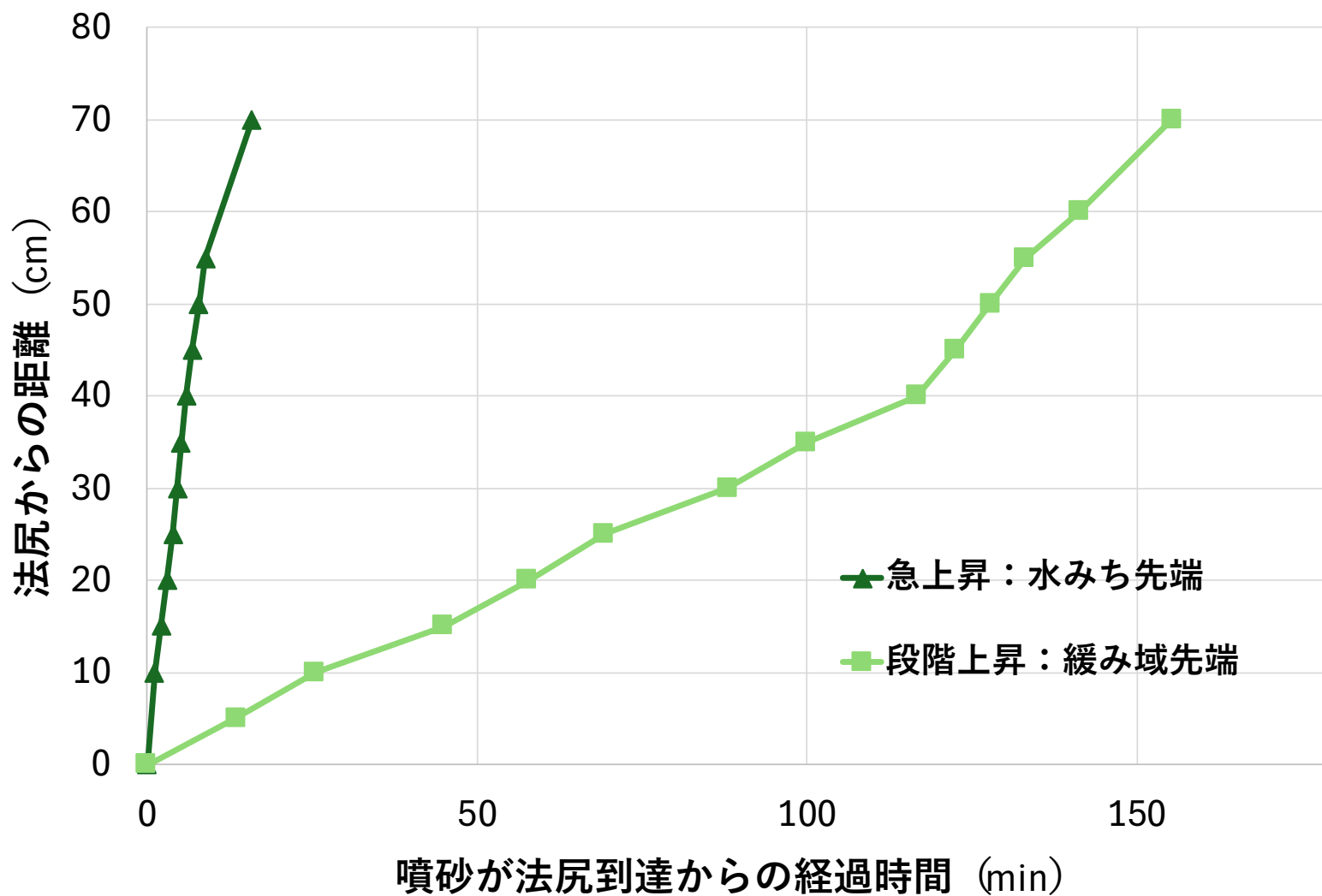


### 緩み域先端の進行距離の変化

・ ゆるみの下流側の噴砂は進行速度に影響を与えないが、（不飽和+急上昇）の場合のように噴砂の上流側のゆるみは新たな噴砂を引き起こす（進行速度は遅くなる）

真中、田中、五十嵐、非定常動水勾配条件下におけるパイピング現象の地盤緩み挙動による発達過程の解明、第13回河川堤防技術シンポジウム2026（発表予定）

## 4 4)急上昇と段階的上昇：噴砂または緩み域の進行速度の違い



### 噴砂が法尻到達からの進行距離の比較

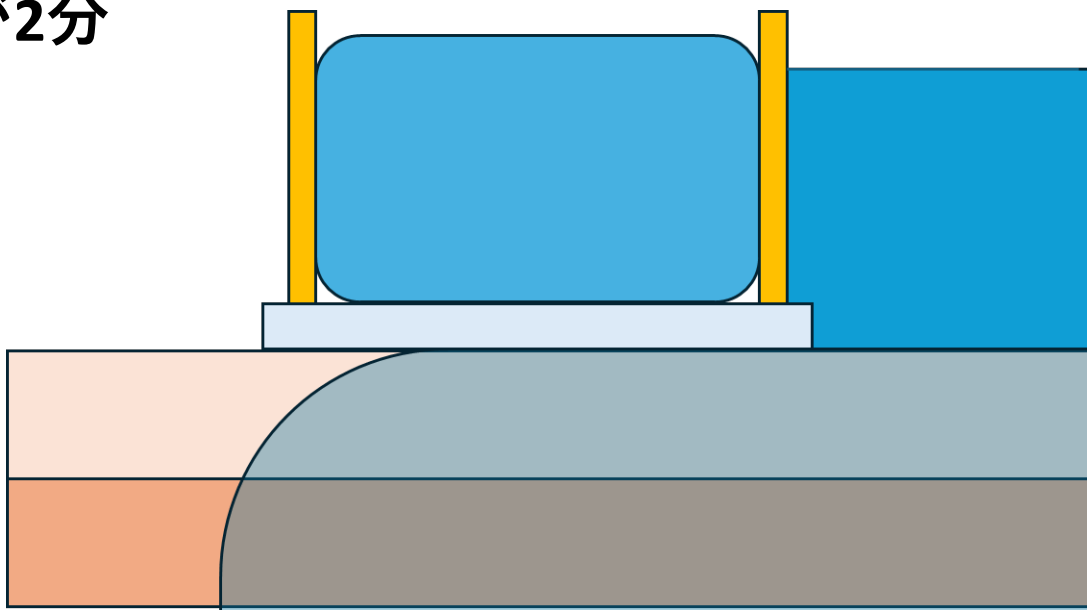
真中、田中、五十嵐、非定常動水勾配条件下におけるパイピング現象の地盤緩み挙動による発達過程の解明、第13回河川堤防技術シンポジウム2026（発表予定）

## 4 5)不飽和+急上昇：水みちの進展のメカニズム

- ・ 浸透に対して水位上昇速度が速い場合、狭義のパイピングによる進行

$i=0.2$ では、基礎地盤行き止まりまでの湿潤の時間が3分10秒に対し、高水位への到達が2分

基礎地盤が完全に飽和する前に高水位になることで、水圧が分散されずに高い浸透水圧が被覆土層に作用し水みちが形成される



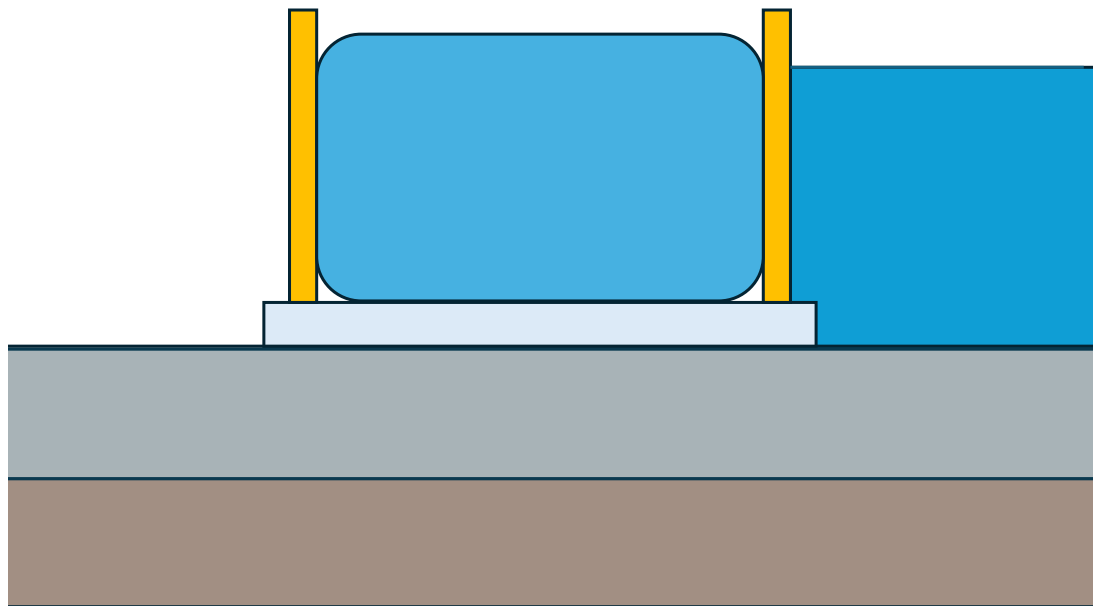
## 4 6)不飽和＋段階的水位上昇：水みちの進展のメカニズム

- ・ 浸透に対して水位上昇速度が遅い場合、緩みによるパイピングの進行

$i=0.1$ から段階上昇では、基礎地盤行き止まりまでの湿潤の時間が8分25秒に対し、高水位の $i=0.18$ までの時間が135分45秒

基礎地盤が完全に飽和した後で高水位になることで、基礎地盤が流動化し、地盤全体から浸透水が染み出るようになり、局所的な水圧が加わる場所が生まれない

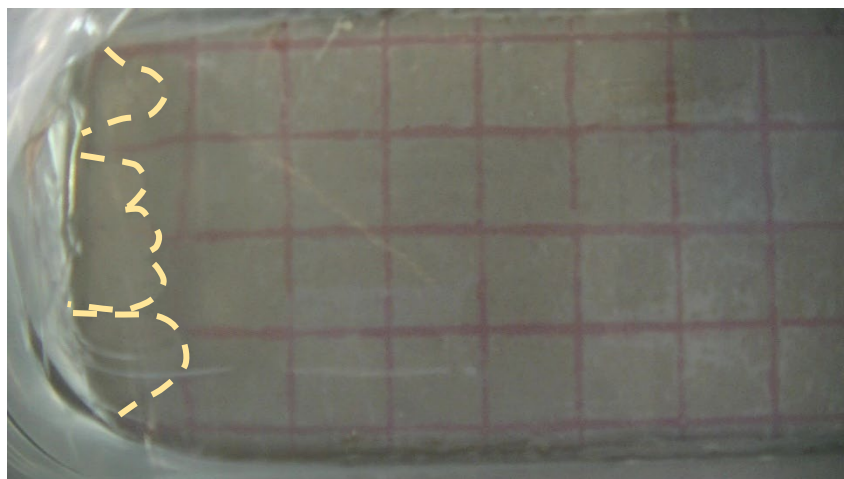
基礎地盤が単層構造の時の状況に近い



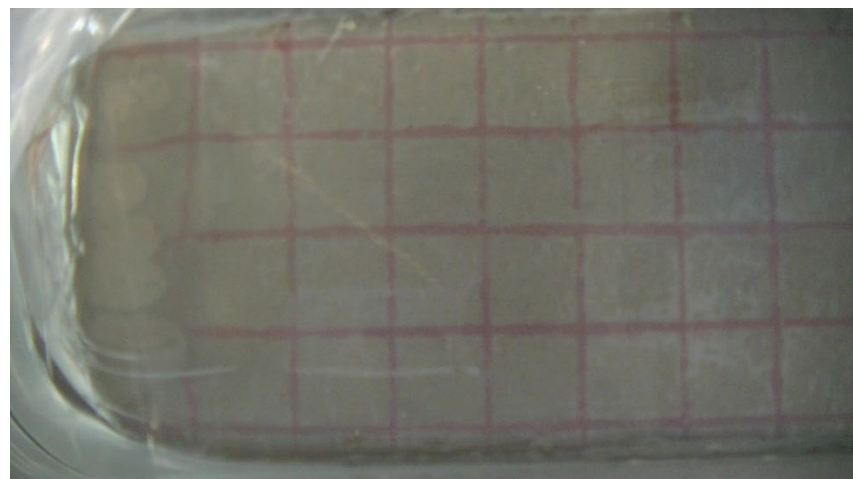
## 5 1)飽和 + 急な水位上昇：水みちの進展（1枚目/8枚中）

水位上昇開始後2分40秒

複数の水みちが並列して進行している。



水道の輪郭を示した図

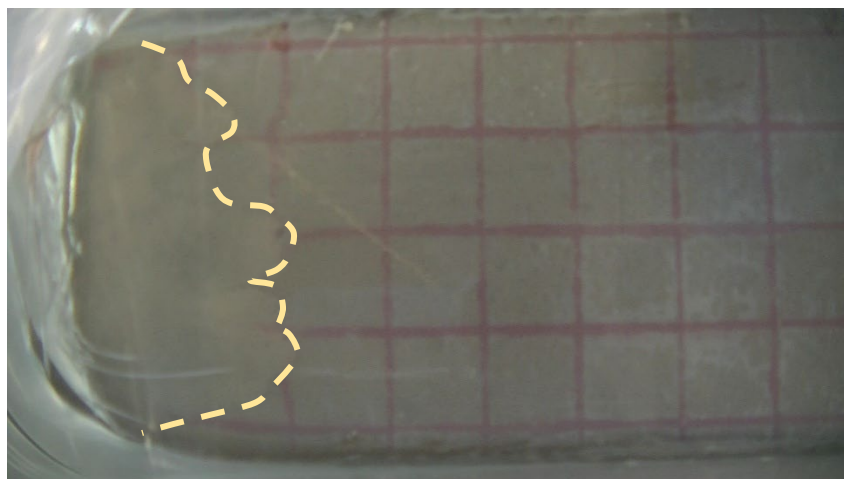


元画像

## 5 1)飽和 + 急な水位上昇：水みちの進展 (2枚目/8枚中)

水位上昇開始後3分40秒

水みちの間で進行に差が生まれる。



水道の輪郭を示した図

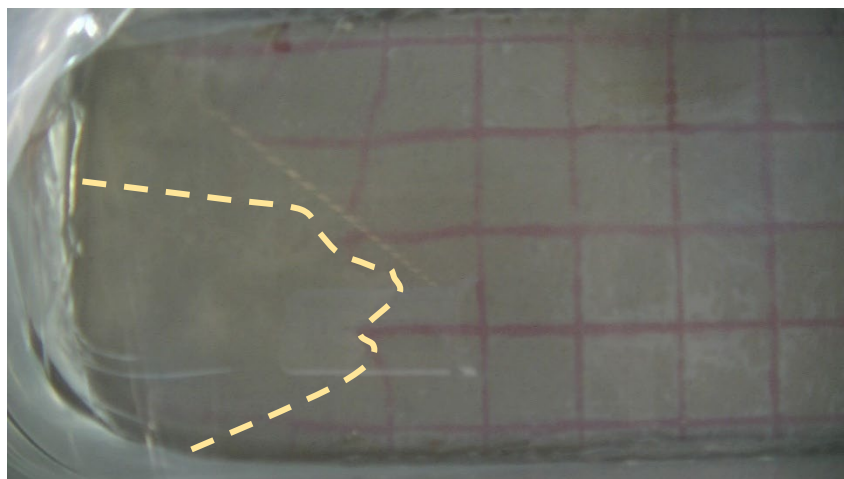


元画像

## 5 1)飽和 + 急な水位上昇：水みちの進展 (3枚目/8枚中)

水位上昇開始後4分30秒

一部の水みちだけ進行する。



水道の輪郭を示した図

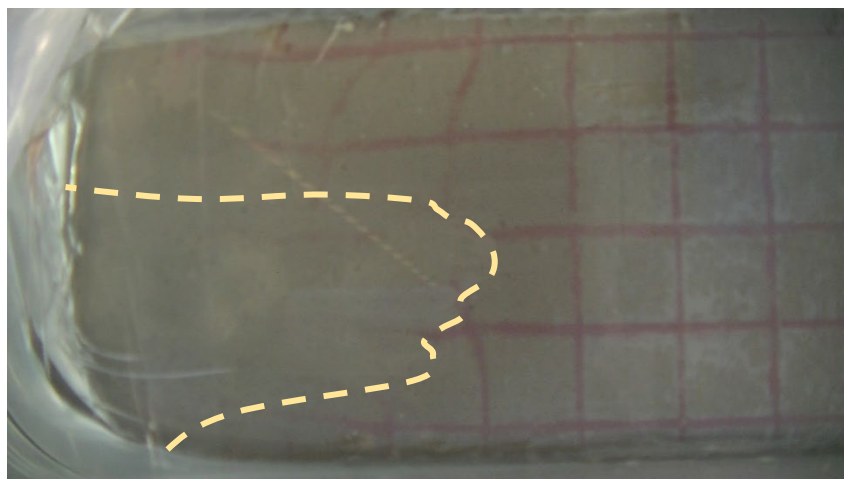


元画像

## 5 1)飽和 + 急な水位上昇：水みちの進展（4枚目/8枚中）

水位上昇開始後5分20秒

一部の水みちだけ進行する。



水道の輪郭を示した図



元画像

## 5 1)飽和 + 急な水位上昇：水みちの進展 (5枚目/8枚中)

水位上昇開始後6分

水みちは輪郭がなくなり消失した。



緩み域を示した図

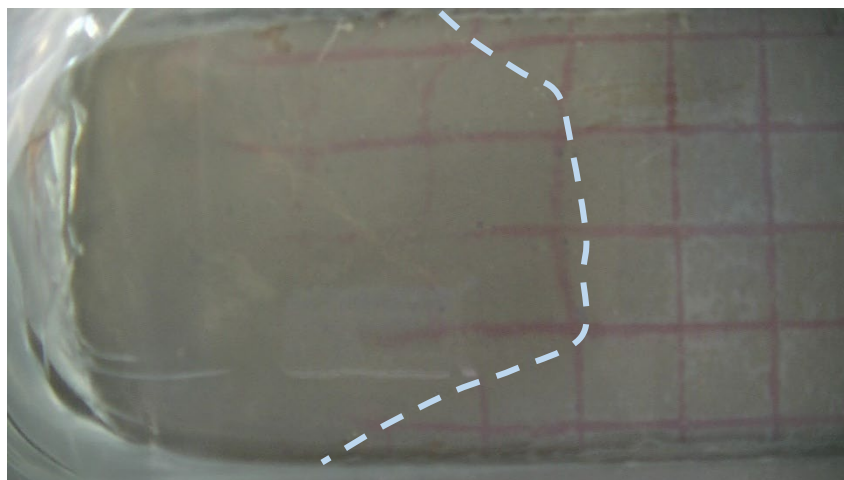


元画像

## 5 1)飽和 + 急な水位上昇：水みちの進展（6枚目/8枚中）

水位上昇開始後6分10秒

緩みによる進行が始まる



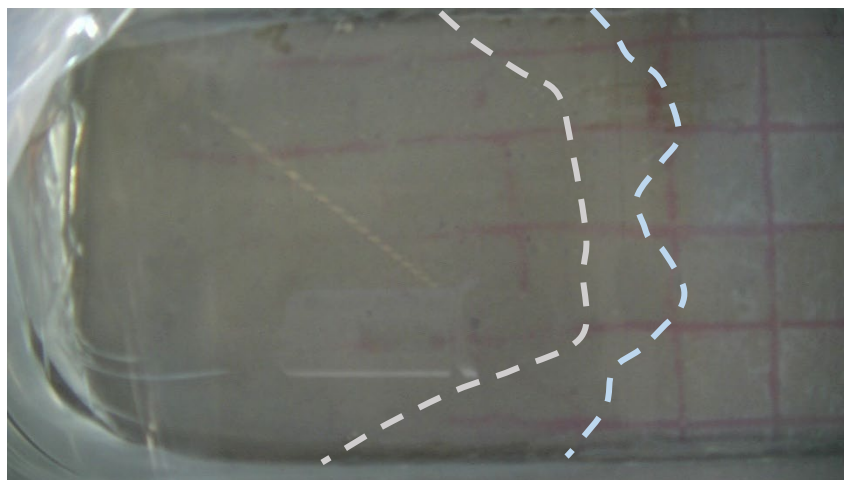
緩み域を示した図



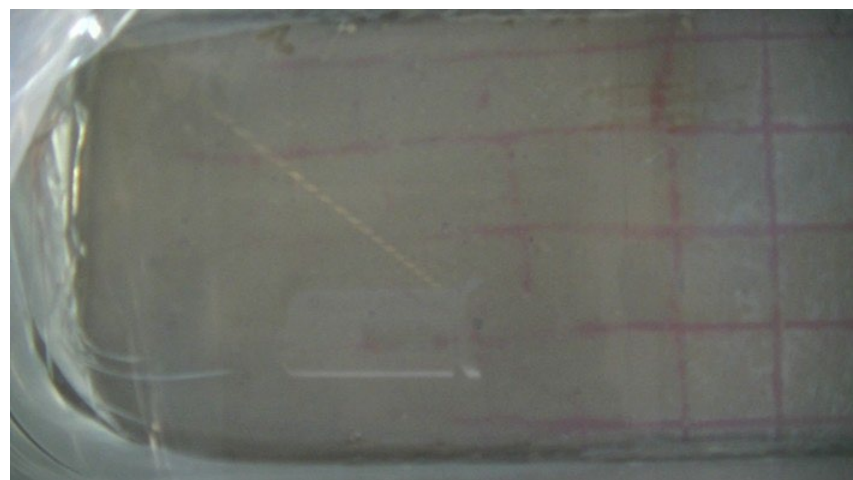
元画像

## 5 1)飽和 + 急な水位上昇：水みちの進展（7枚目/8枚中）

水位上昇開始後9分20秒



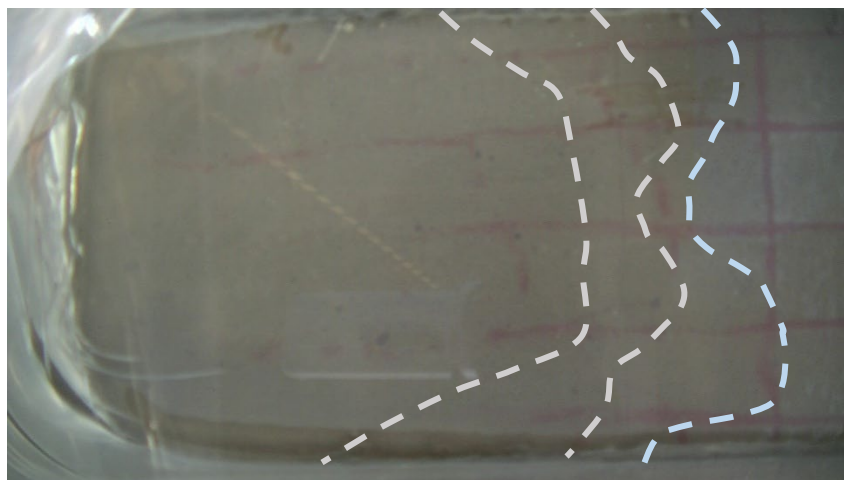
緩み域を示した図



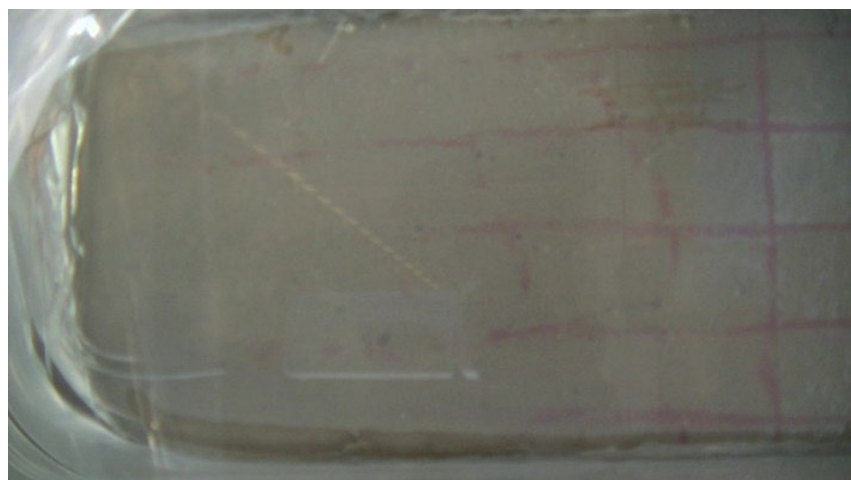
元画像

## 5 1)飽和 + 急な水位上昇：水みちの進展（8枚目/8枚中）

水位上昇開始後13分50秒



緩み域を示した図

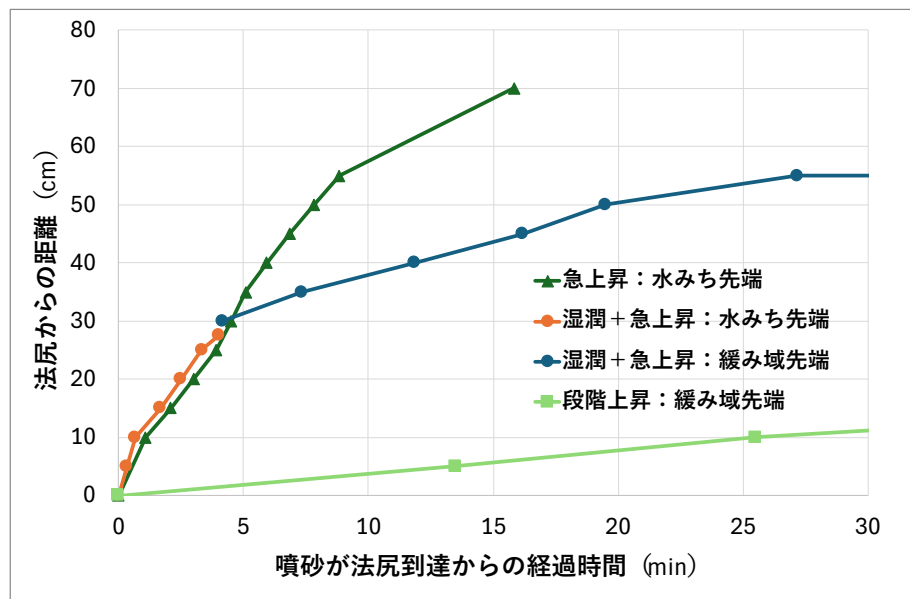
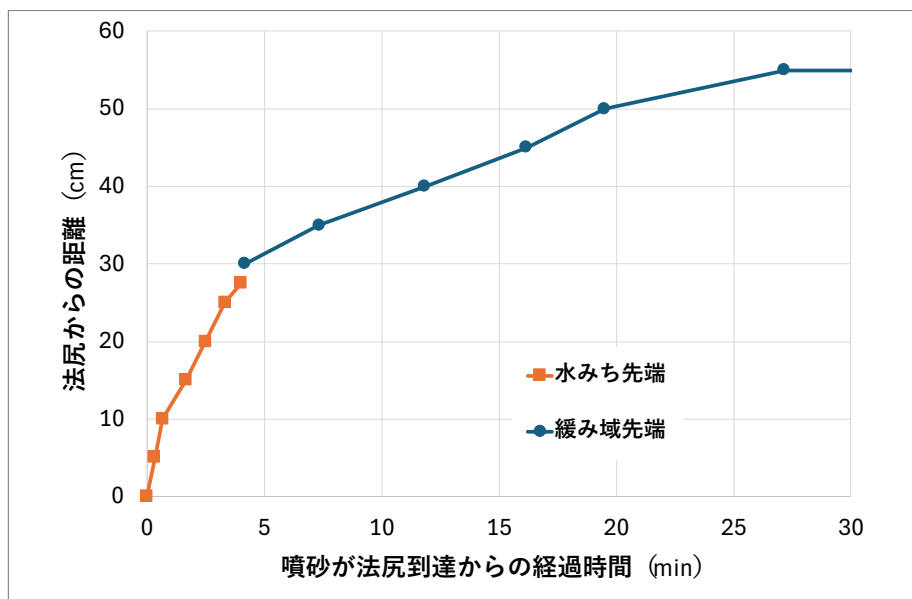


元画像

## 5 2)飽和 + 急な水位上昇：水みちの進行速度（飽和・不飽和比較）

湿潤状態から急上昇のケースは、水みちが形成されている間は急上昇ケースとほぼ同じ進行速度だったが、水みちが消失し緩みによる進行が始まると急速に進行速度が遅くなる。

水みちが消失し、緩みによる進行に切り替わった要因としては、堤外側に近づくほど基礎地盤が飽和し緩みやすくなっていることが一因と考えられる。

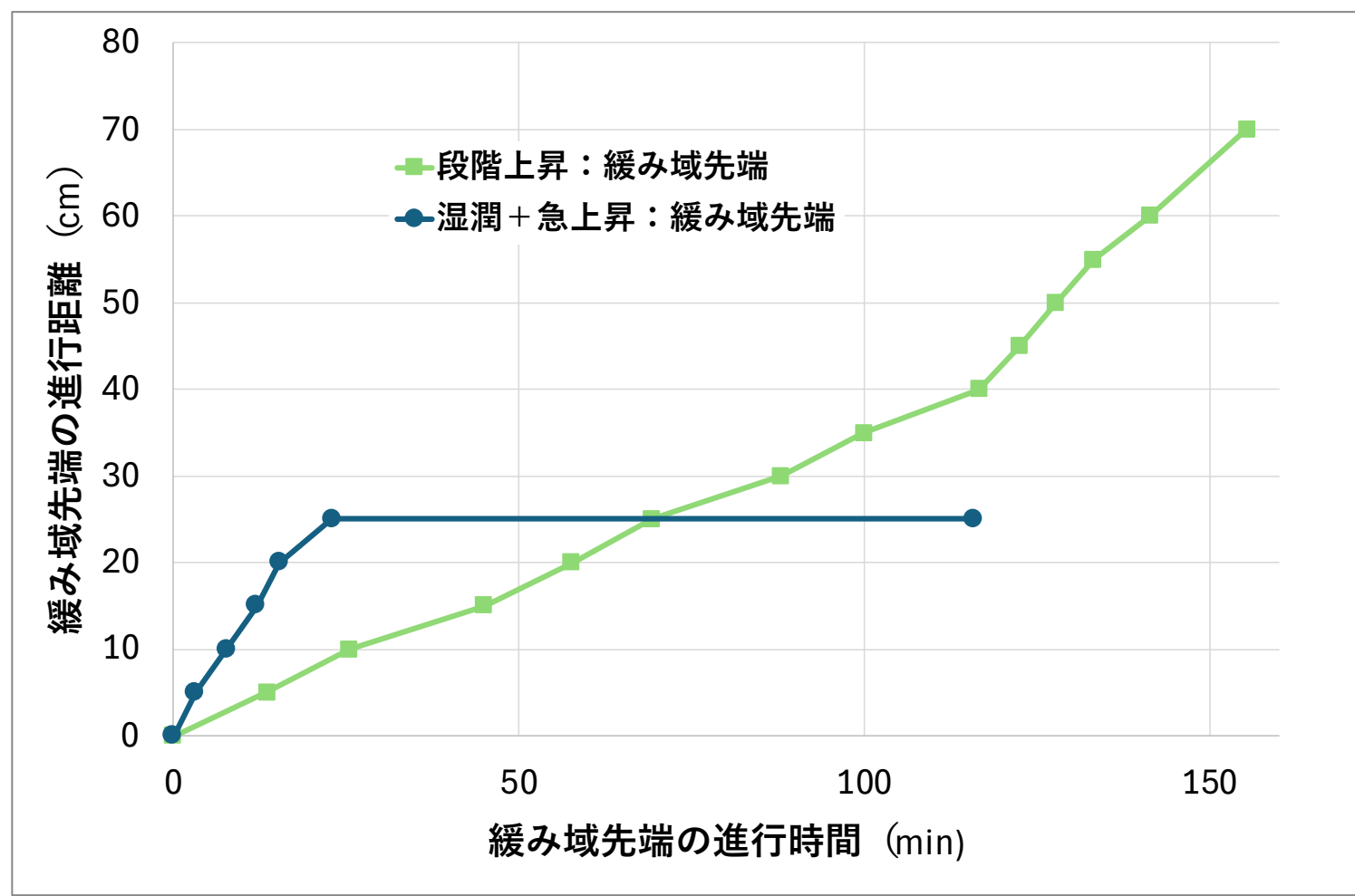


噴砂が法尻到達からの  
進行距離の変化

噴砂が法尻到達からの進  
行距離の比較（飽和・不  
飽和条件）

## 5 2)飽和 + 急な水位上昇：水みちの進行速度（3ケース比較）

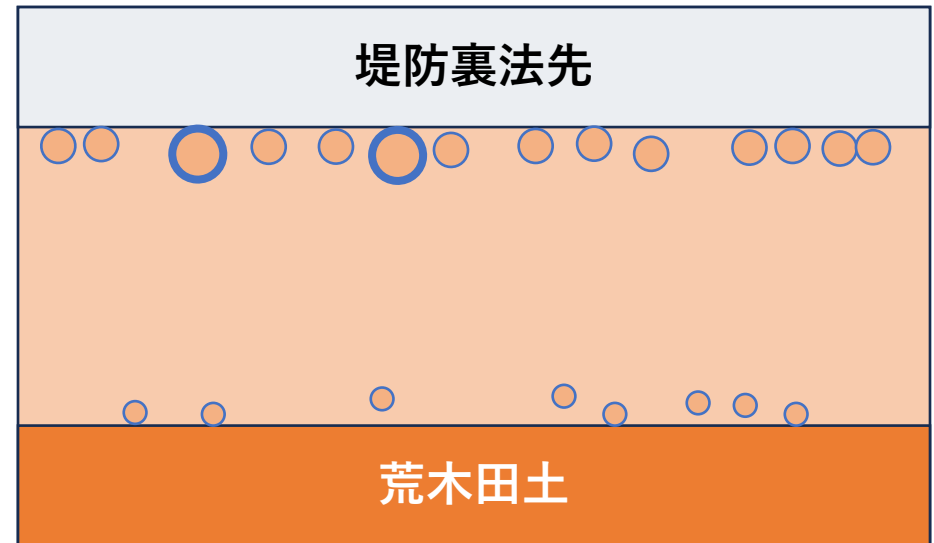
湿潤で急勾配でパイピングか緩み進行に変化したケースでは、進行先端が30cm以下の地点で安定し、2時間経過しても決壊しなかった（水みちが過去に形成されていたことで十分に排水することができ、それ以上の緩みが発展しない）



## 6 堤体下部基盤部の進行の違いは堤内地側から確認できるか？

### 1) 不飽和 + 急な水位上昇の場合

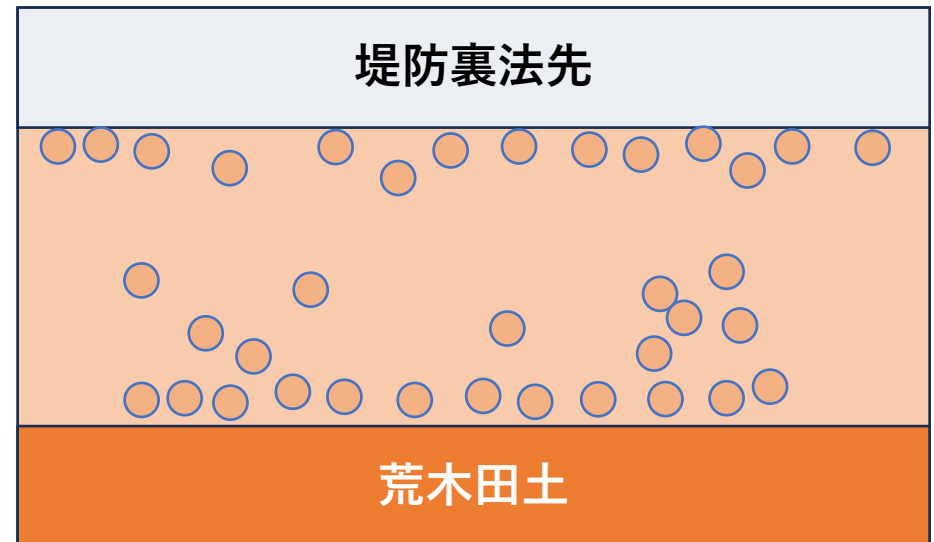
堤防裏法尻と行き止まり境界の2か所で複数の噴砂が発生。裏法尻での噴砂のほうが個数が多く勢いも強い。堤体下部を進行する水みちの後方の法尻に、特に勢いが強い噴砂が複数個ある。



初期は不飽和だが、行き止まり層が噴砂発生条件になり、堤体側に移動。

## 6 堤体下部基盤部の進行の違いは堤内地側から確認できるか？ 2) 不飽和 + 段階的水位上昇の場合

堤防裏法尻と行き止まり境界の2か所を中心に、基礎地盤全体で複数の噴砂が発生。



初期は不飽和だが、段階的に進行しているうちに堤内側表層下部全体が飽和し、表層全体に揚圧力が働いているので、中央付近でも噴砂が発生か

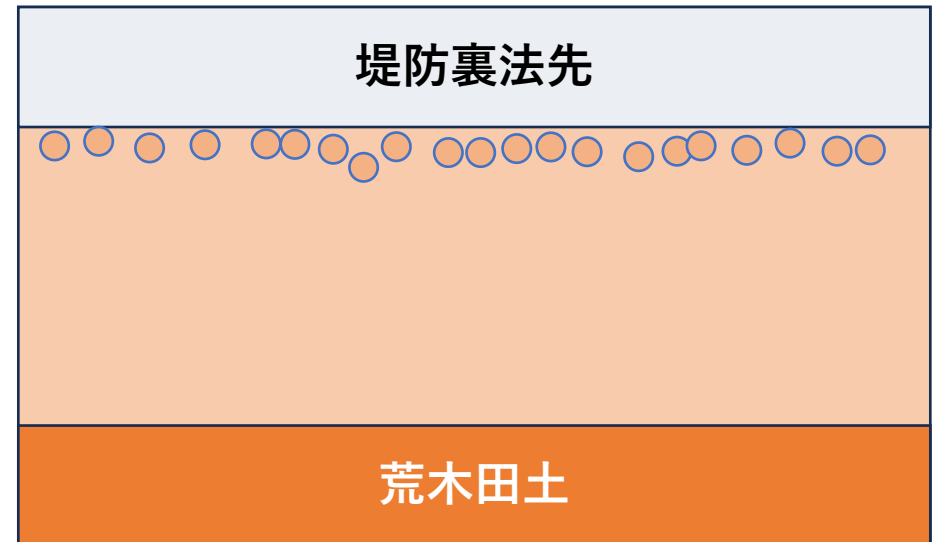
## 6 堤体下部基盤部の進行の違いは堤内地側から確認できるか？

### 3)飽和＋急な水位上昇の場合

水みちが形成されている間は急上昇ケースと同じように、堤防裏法尻と行き止まり境界の2か所で複数の噴砂が発生。緩みによる進行が開始された後は噴砂の勢いが弱まり、行き止まり境界の噴砂も消失。



例の画像



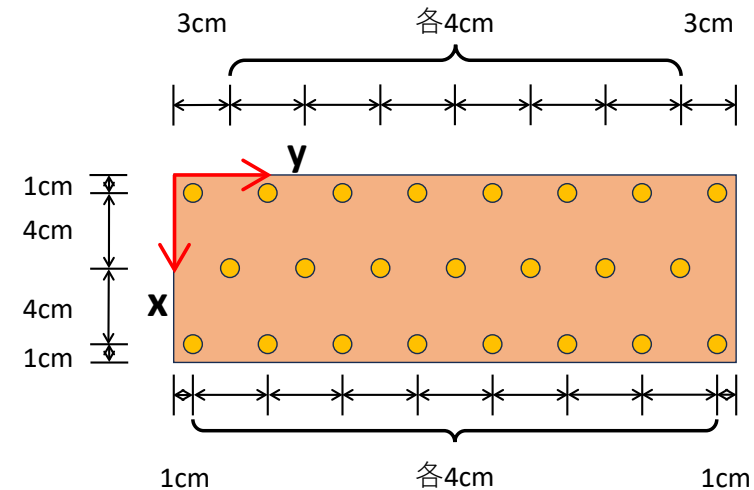
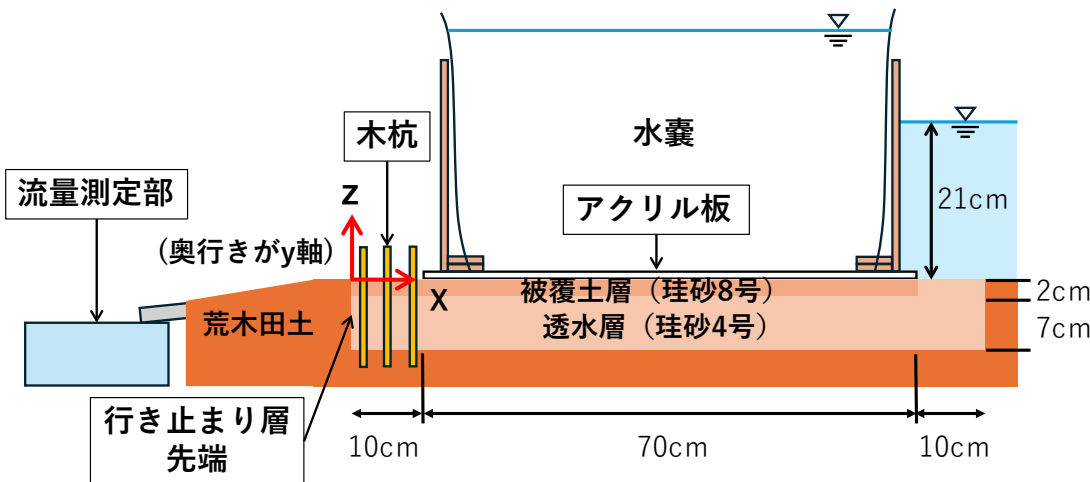
初期から飽和なので、行き止まり層と堤防モデルがなくなつた個所で噴砂発生条件になるが、堤防内の現象変更に伴い行き止まり層の揚圧力は低下したか

## 7 メカニズムを考慮した対策工に関する研究 1)実験方法

法尻より下流の揚  
圧力を下げるこ  
とで、急速に進行す  
る（狭義の）パイ  
ピングを抑えられ  
ないか

表-1 実験条件

Case 名	裏法尻の 杭の有無	被覆土層	透水層
n	なし	三河珪砂8号 ( $k : 1.50 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ) 層厚：0.02m	三河珪砂4号 ( $k : 7.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ ) 層厚：0.07m
p	あり		

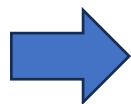


真中蒼惟，我妻大誠，田中規夫，五十嵐善哉，堤防裏法尻への杭打設が複層構造基礎地盤におけるパイピング現象に与える影響，土木学会論文集B1(水工学)，Vol. 82, No. 17, 2026（掲載予定）．

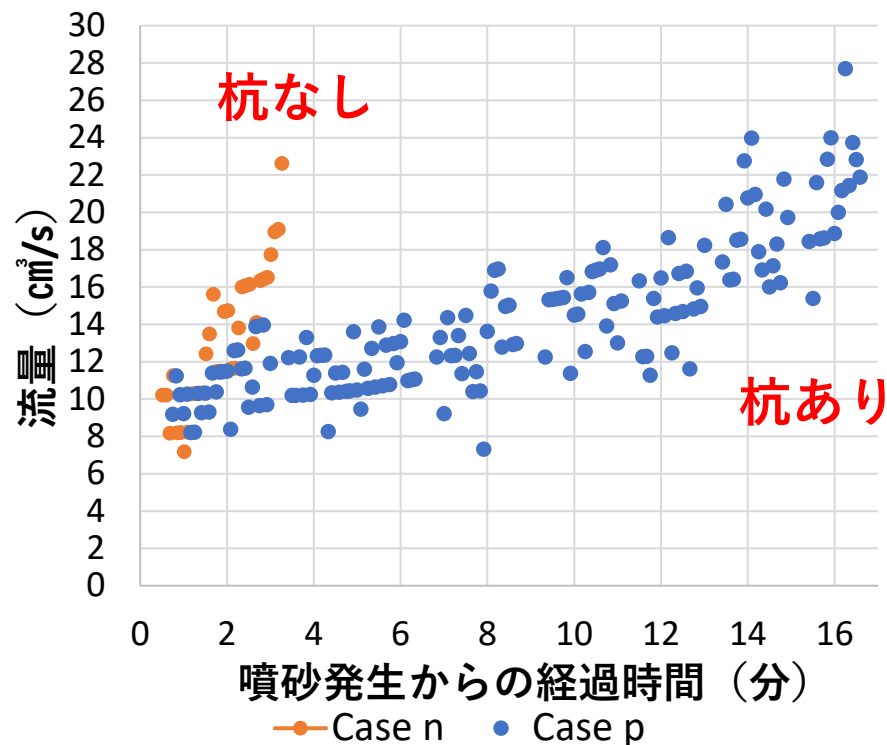
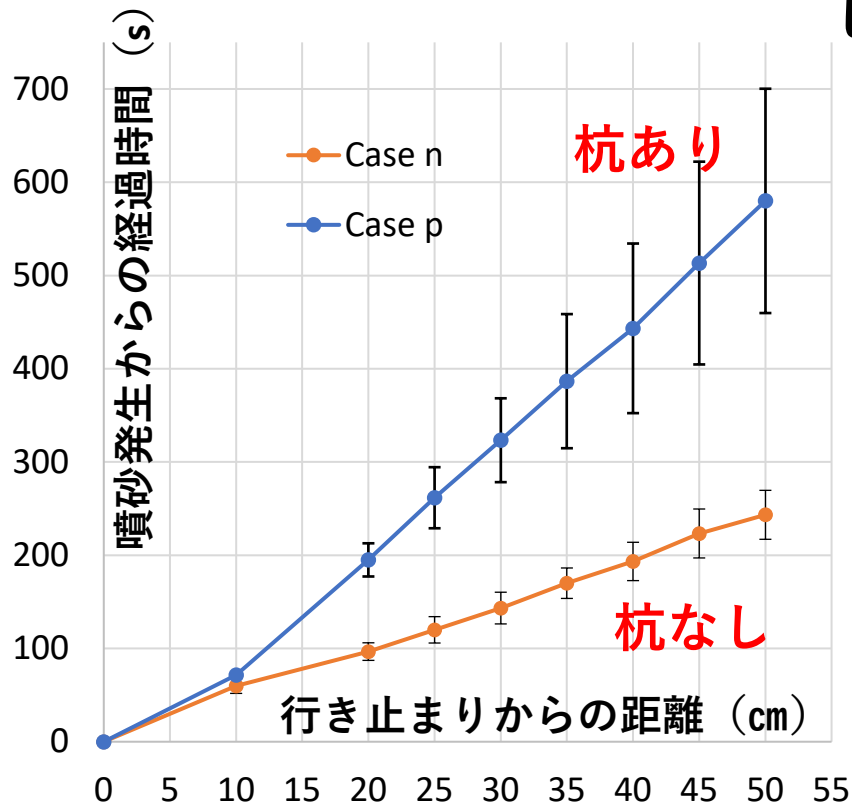
## 7 メカニズムを考慮した対策工に関する研究

### 2) 対策工の有無による進行状況の違い

狭義の) パイピングを抑えられないか



杭を打って圧力を解放したほうが、パイピングはゆっくり進行し漏水量も少ない



行き止まり層先端付近で発生した噴砂の進行距離の変化

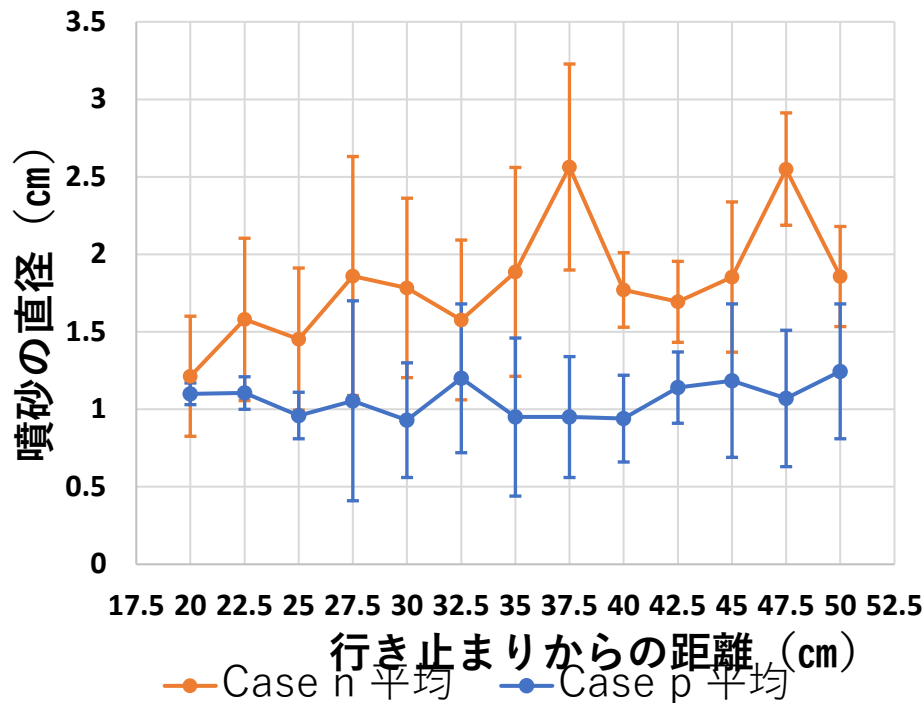
漏水流量の時間変化

真中ら (2026掲載予定) .

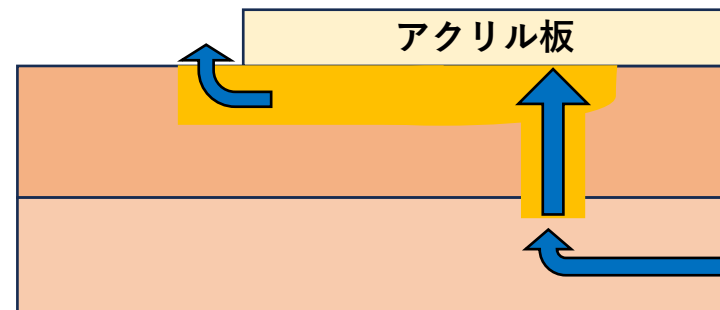
## 7 メカニズムを考慮した対策工に関する研究

### 3)パイピング抑制のメカニズム

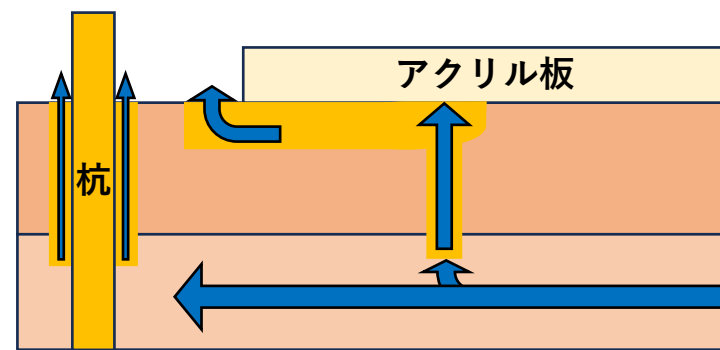
進行する先端部の噴砂部の直径  
は約半分で速度も低下する



最も進行している水みち先端の噴  
砂の大きさの平均の時間変化



杭の打設がない場合は透水層から  
水みちに浸透流が流れる



杭の打設がある場合は水みちだけ  
でなく、透水層を貫通する杭周辺  
からも浸透流が流れる

杭打設によるパイピング抑  
制のメカニズム

真中ら（2026掲載予定）。

- ・2つのメカニズム（**揚圧力による噴砂、飽和に伴うゆるみ**）のどちらが支配的になるかが重要。水位上昇条件、地盤初期状態によって、**最大値として同じ動水勾配でも異なる現象**を引き起こす。**水みちの進行速度も大きく異なる**

- ・同じような土質条件でも、降雨や河川側の条件（前期降雨や流域特性、水位上昇速度）が強い影響を及ぼす可能性がある

- ・（例）上流部の豪雨が外水として降雨が少ない下流部に浸透影響を及ぼす場合はパイピング側に近づく現象、豪雨の最中・梅雨時の豪雨・前期降雨で地盤が十分飽和している状況での高水位は緩みが主体でパイピングが発生しても途中で止まる可能性もある。

- ・（応用）**内水氾濫を許容するとパイピングが生じても決壊に至るまでの時間を稼げる可能性**がある。

- ・**噴砂の分布は内部状態を反映したものである可能性**がある

- ・揚圧力を下げることで**パイピングの進行を遅延化**できる

- ・（課題）今回は堤体の浸透を考慮していないので、堤体の滑りもあわせて考える必要あり

埼玉大学大学院修士1年 真中蒼惟君に実験(未発表を含む)と資料作成を補助していただいた。

記して謝意を表します。