

# 礫砂混合地盤における洪水継続時間が河川橋脚の局所洗掘と不安定化過程に及ぼす影響

Influence of Flood Duration on Local Scour and Destabilization Process of River Bridge Piers in Gravel and Sand Mixed Riverbed



小池 潤平

(2024年度 修士論文概要)

東京大学 工学系研究科 社会基盤学専攻 土質・地盤研究室

## 研究の背景・概要

近年、局所洗掘現象により橋脚基礎が不安定化し、橋脚が沈下・傾斜する現象が頻発している。

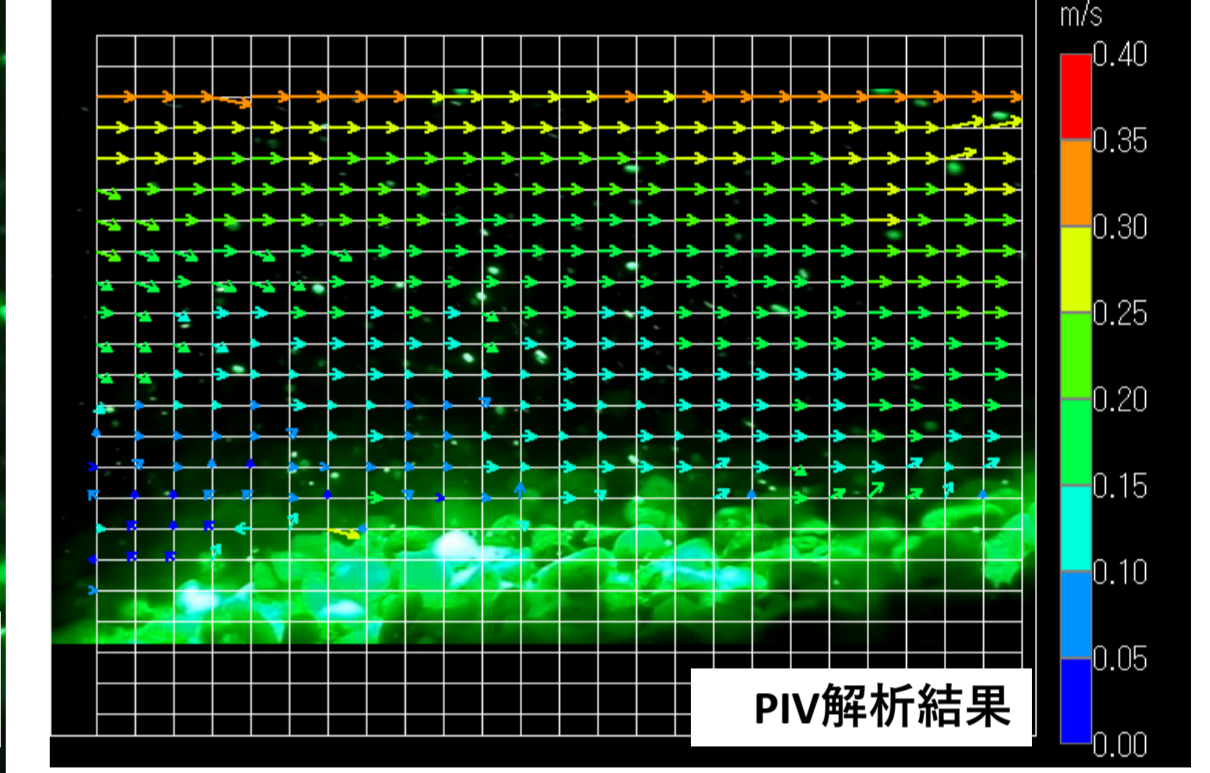
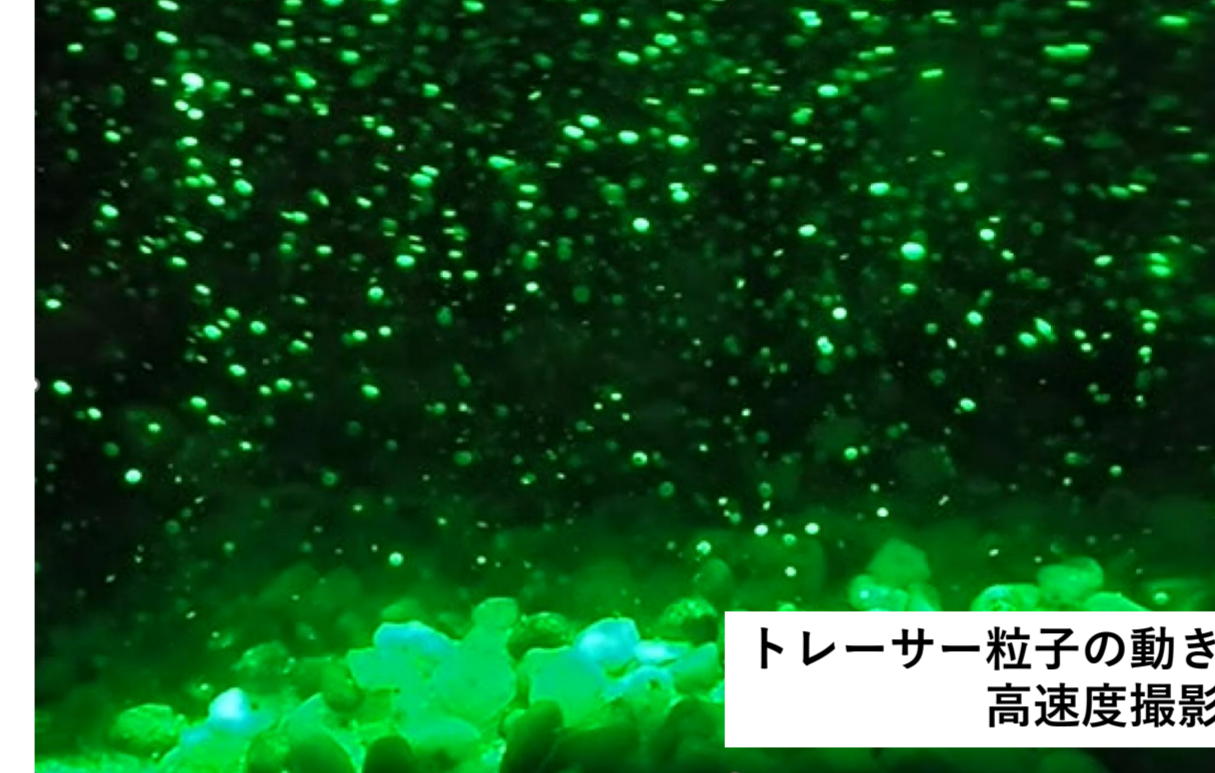
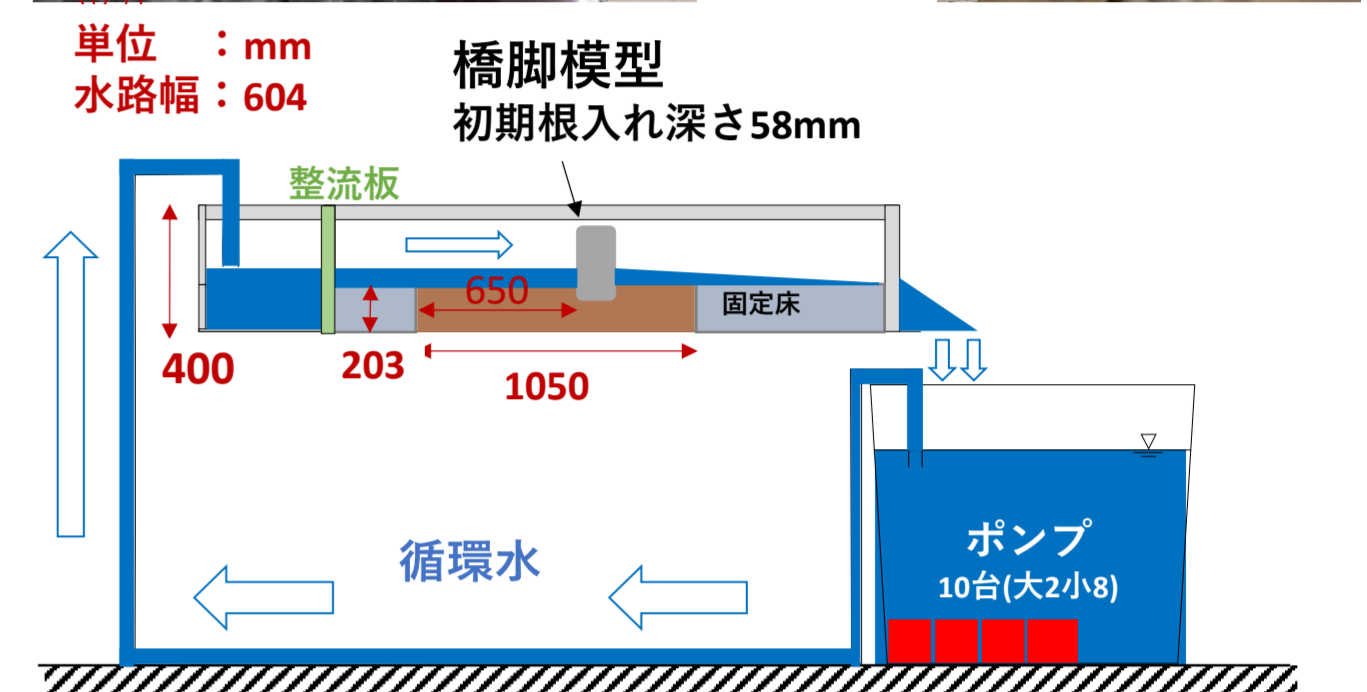
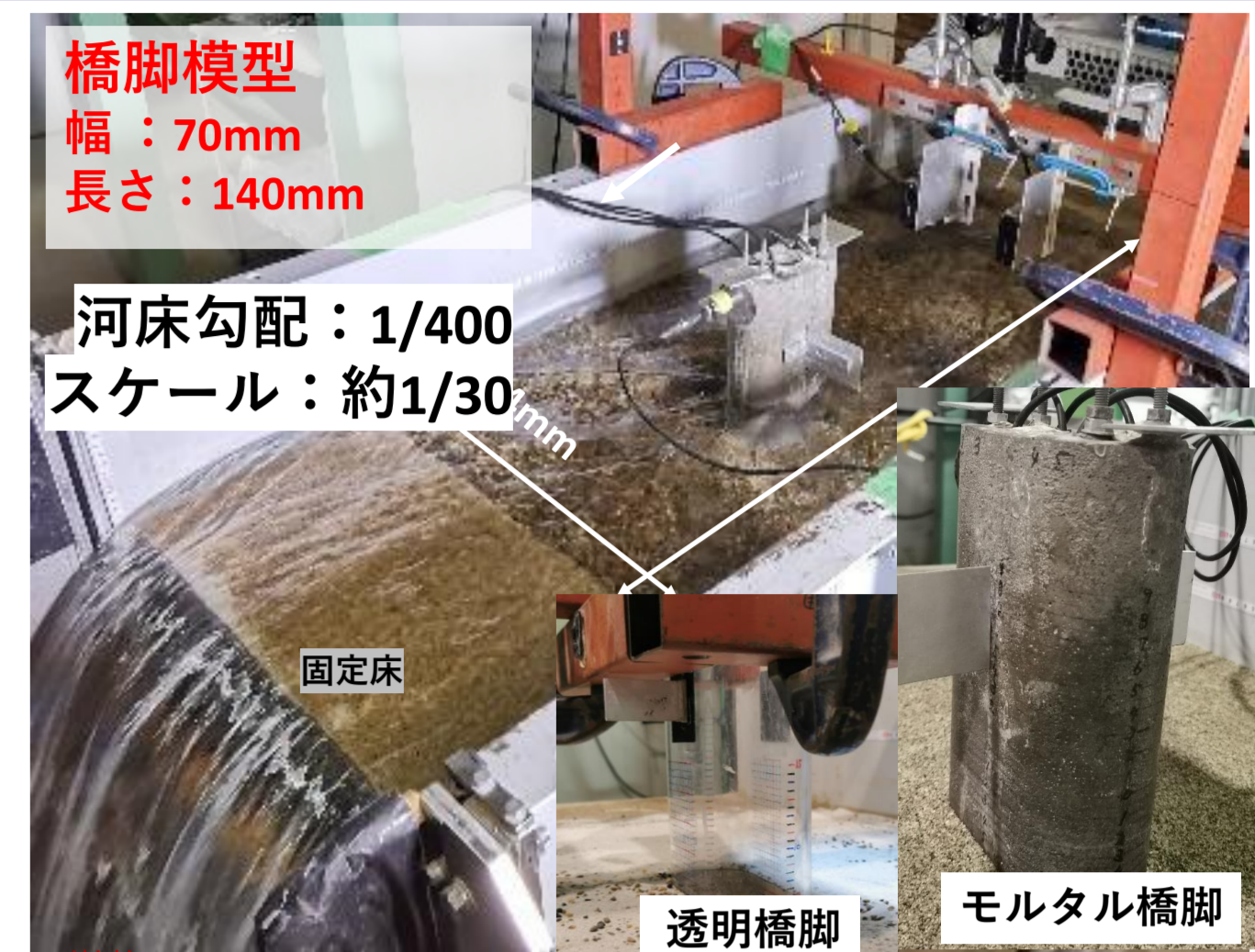
既往研究により、洪水の継続時間が洗掘の進行性に大きな影響を及ぼすことが知られているが、現実に近い礫砂混合地盤での検討は不十分である。礫砂混合地盤では、時間とともに河床表面の礫砂比が変化することで掃流に対する抵抗性が変化することや、礫砂比によって支持力特性が異なることなど、単材料に比べて複雑である。

模型実験を行い、水理学と地盤工学の観点から、礫砂混合地盤において洪水継続時間が局所洗掘による橋脚不安定化過程に与える影響を調べた。

## 実験方法

右の写真のような河川を模擬した水路を用い、水理模型実験を行った。水路に橋脚模型を設置して地盤を作製し、計10台のポンプを用いて流量を段階的に変えて水路に水を流した。礫砂比と最大流量をケース毎に変えた。

モルタル製と透明(アクリル製)の二種類の橋脚模型を用いた。モルタル橋脚では、橋脚底面に設置したロードセルによる地盤反力の測定や、レーザ変位計による橋脚変位の測定を行った。透明橋脚では、中にカメラを入れ、橋脚左岸側洗掘孔内の粒子の動きを撮影した。上流側から比重1.01のトレーサー粒子を流し、高速撮影を行い、粒子の動きをPIV解析することで、流速分布を求めた。



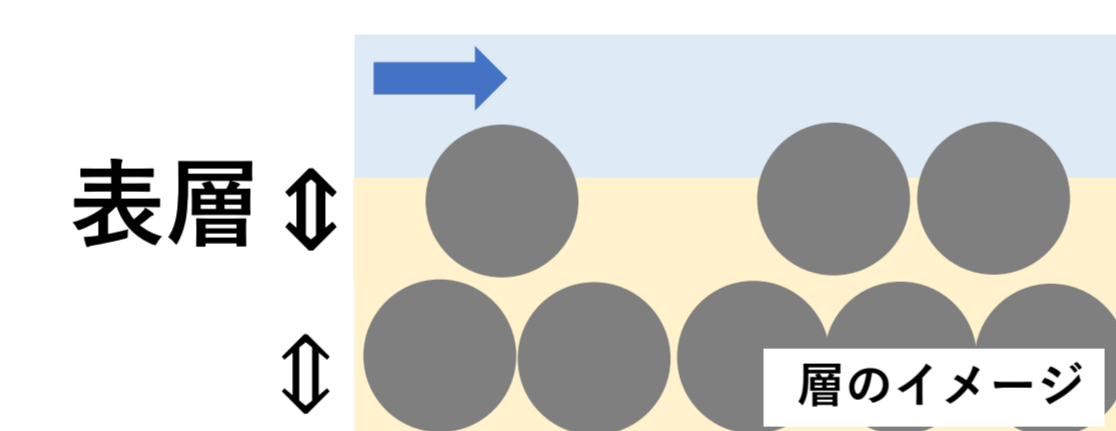
## ①水理学的考察

局所洗掘は、まず橋脚の上流側において急速に進行し、橋脚の上流側で収束した後も、橋脚側方において徐々に進行する現象がみられた。

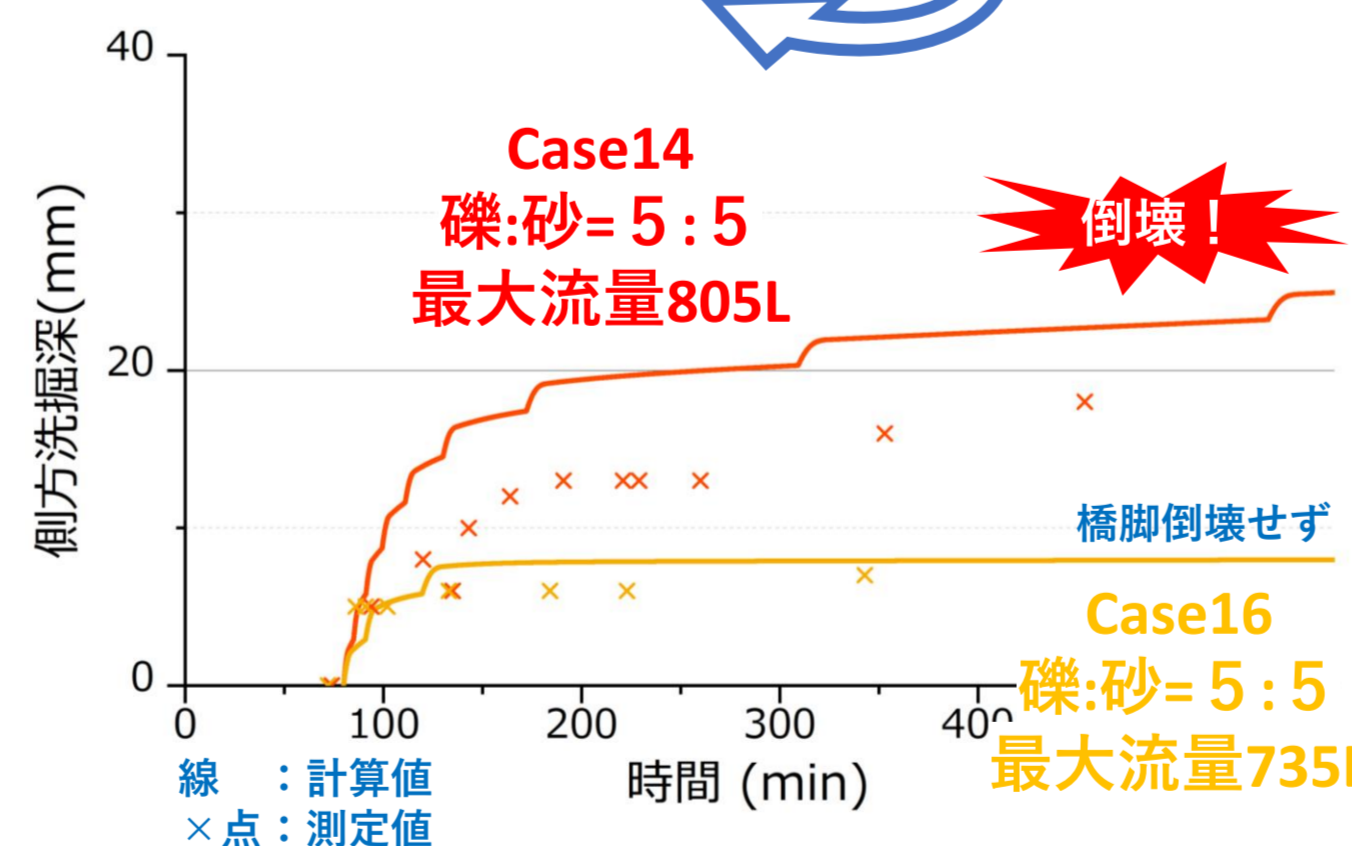
PIV解析で測定した河床近傍流速を用いて流砂量計算を行い、橋脚側方の洗掘の進行過程を説明した。礫砂混合地盤では、時間とともに河床表面の礫の割合が増加し、掃流に対する抵抗性が変化するため、礫砂比の時間変化を考慮する必要がある。既存の計算手法では流砂量が過大評価されるという問題があったため、以下に示す新しい計算手法を考案した。

〈計算プロセス〉礫が層状に重なっていると仮定し、河床面に一番近い層を表層とする。ある時刻での表層における流砂量を計算し、表層に残った礫砂量から引く。残った礫砂量から礫砂比を計算し、次の時刻の流砂量計算に適用する。これを繰り返し行う。なお、表層の礫砂がすべて掃流されたら、下の層へ移行する。

〈計算結果〉洗掘が急速に進行する段階では、初期の礫の割合が低いほど洗掘されやすい。一方、洗掘が徐々に進行する段階においては、初期礫砂比に関わらず河床面は概ね礫主体になり、表層の礫が掃流される限り徐々に洗掘は進行する(Case14)が、礫が掃流されないと洗掘の進行が停止する(Case16)ことが、計算・実験ともに確認された。



掃流力と礫砂比をもとに表層の流砂量計算

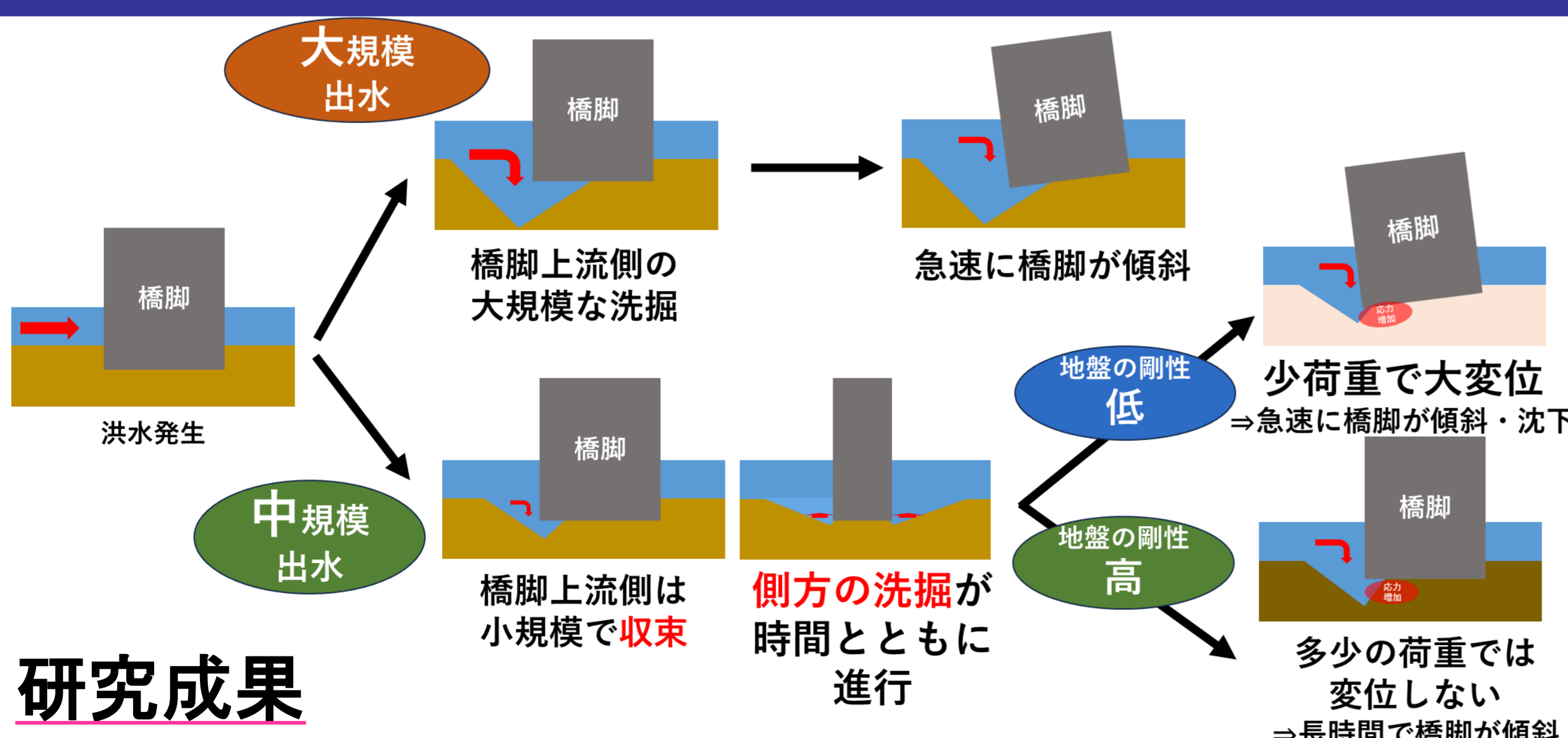
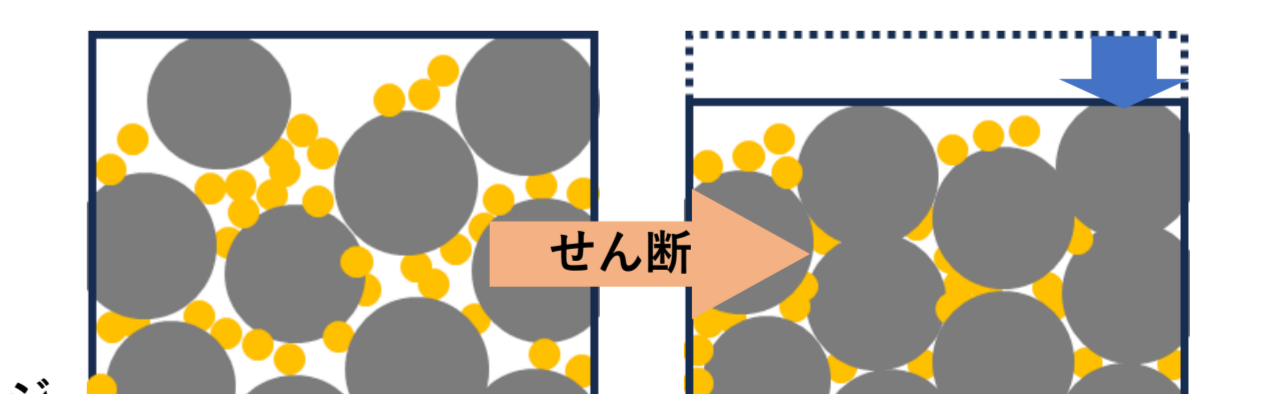
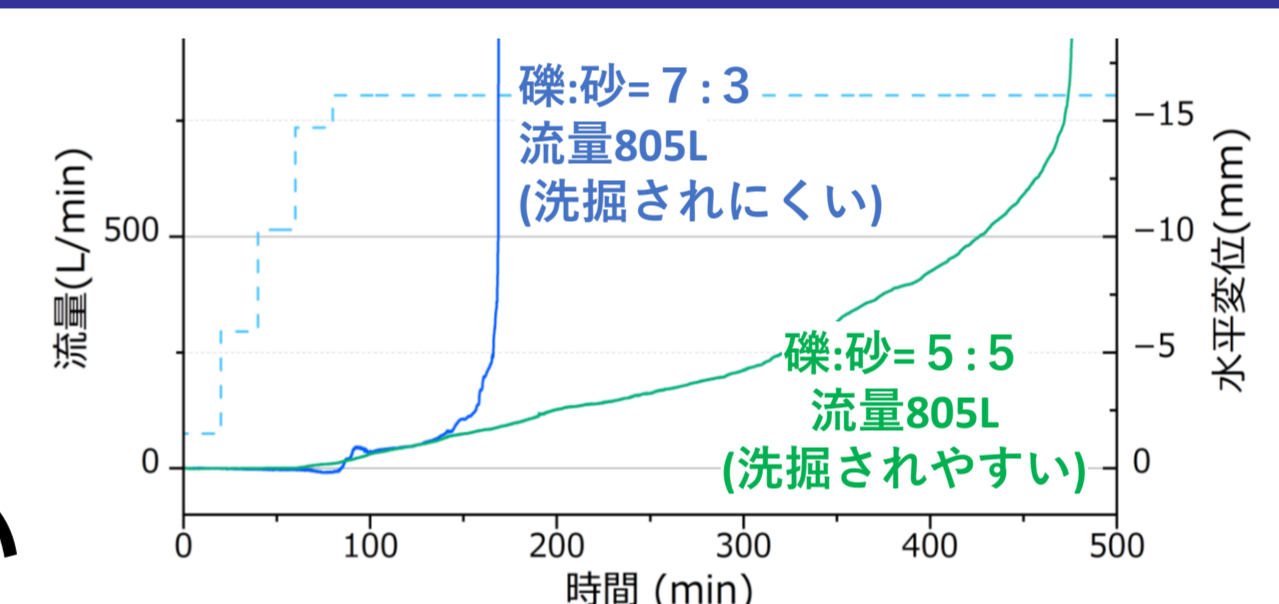


## ②地盤工学的考察

礫砂比7:3のケースは5:5のケースより礫が多く、掃流されにくいにも関わらず、橋脚が早く倒壊した。これは礫砂比により支持地盤の強度・変形特性が異なるからだと考えられる。

礫砂比7:3のとき、他の礫砂比に比べて圧縮性が高く地盤の剛性が低いことが既往の研究で示されている。局所洗掘により橋脚上流側の支持地盤が流出したとき、橋脚の死荷重は支持地盤に対して偏心荷重になり、残った支持地盤への応力は増加する。このとき剛性が低い地盤では、小さい荷重で大きな変位が出ると考えられる。すなわち、同じように局所洗掘されても、地盤の強度・変形特性により橋脚の不安定化過程が異なることが確認された。

また、地盤の剛性の高さは、掃流に対する抵抗性の高さとは物理的に異なり、必ずしも”洗掘されにくい河床材料”が”剛性が高い河床材料”ではないと言える。



上記の考察から、局所洗掘による橋脚不安定化の進行過程を左図のように表した。洪水が大規模なときは、橋脚上流側が大規模に洗掘され、急速に橋脚が傾斜する。一方、洪水が比較的小さいときは、橋脚上流側の洗掘は橋脚が傾斜する前に収束し、橋脚側方の洗掘が徐々に進行する段階に移行する。洗掘の進行性は、確立した流速測定・流砂量計算手法により説明される。さらに、支持地盤の剛性が低いと、急速に橋脚変位が生じるが、地盤の剛性が高ければ、橋脚は長時間かけて傾斜する。河床材料の掃流に対する抵抗性はもちろん、地盤の剛性も考慮する必要性が示唆された。



# 河川橋脚の3次元形状に基づく局所洗掘発達メカニズムの考察 ～流速場と掃流力に着目して～



Investigation of Local Scour Development Mechanism Based on the 3D Shape of River Piers  
~Focusing on the Flow Velocity Field and Bed Shear Stress~

渡邊 真一郎

(2024年度 卒業論文概要)

東京大学 工学部社会基盤学科 土質・地盤研究室

## 概要

近年豪雨による河川橋梁の局所洗掘被害が相次ぐ中、急速に発達した3Dプリンティング技術を用いて橋脚の**3次元形状**を変化させることで、洗掘進行を抑制できることが示されている。しかし、形状により**局所洗掘発達メカニズム**がなぜ異なるのかは十分に解明されていない。本研究では、**模型実験**とそれにより**妥当性評価(Validation)**された**数値解析**を組み合わせ、橋脚周りの**流速場**と**掃流力**を評価することで、河川橋脚の3次元形状に基づく局所洗掘発達メカニズムを考察した。



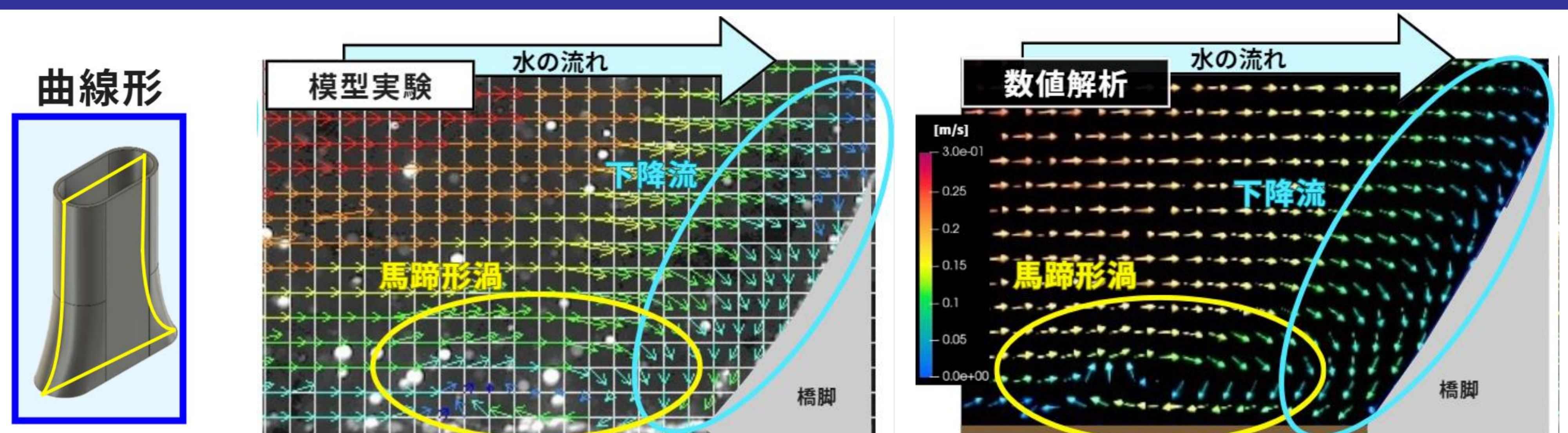
## 研究手法

**中型水路実験**を用いて水平・鉛直断面が異なる3つの橋脚形状に対する**洗掘進行プロセス**を観察し、**流速場**を粒子画像流速測定法(PIV)で可視化することにより数値解析の**妥当性**を**評価(Validation)**した。また、**多視点画像**からの**三次元復元(SfM)**により得られた**洗掘孔の3次元形状データ**を基に解析領域を定め、**数値解析手法**として**有限体積法(FVM)**を適用し橋脚周辺の**流速場**と**掃流力**分布を求めた。



## 数値解析の妥当性評価(Validation)

平坦な河床における橋脚上流端での**流速分布**は、多少の誤差はあるものの、洗掘進行に重要な**下降流**や**馬蹄形渦**の流速ベクトルの方向や大きさについては、**数値解析**と**模型実験**であるPIV計測結果が概ね**一致**した。



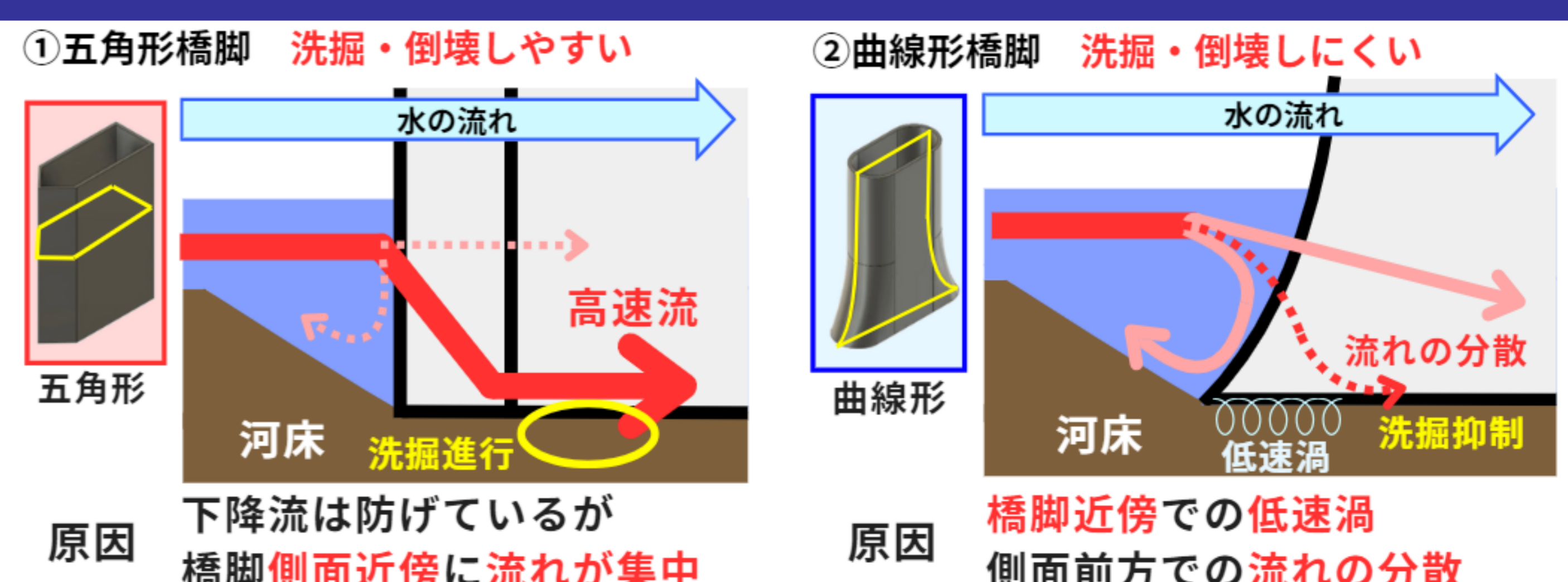
## 橋脚形状別の洗掘深・掃流力・流速場

SfMによる洗掘孔データを比較すると五角形橋脚は**側面**が洗掘されやすく、曲線形橋脚は側面が洗掘されにくい。数値解析による**掃流力**分布の比較から橋脚**側面近傍**での掃流力の大小が原因といえる。これは**流速場**について五角形橋脚では下降流が発生せず側面に**高速流**が集中する一方、曲線形橋脚では橋脚近傍での**低速渦**と側面での**流れの分散**が確認されることより説明される。



## 局所洗掘発達メカニズムの結論

**五角形橋脚**は、下降流を防げる一方**側面近傍**に流れが**集中**し、側面前方の洗掘が進行して**倒壊しやすい**。一方、**曲線形橋脚**は**橋脚近傍の低速渦**と上流側面での**流れの分散**により洗掘や橋脚変位が**抑制**される。また、河床近傍での掃流力が洗掘進行に寄与することが示唆され、形状最適化の**目的関数**設定の知見を得た。





# 出水時の細粒分吸出し現象と局所洗掘現象が河川橋脚の遅れ変位に及ぼす影響



西尾 典紘  
(2023年度 修士論文概要)

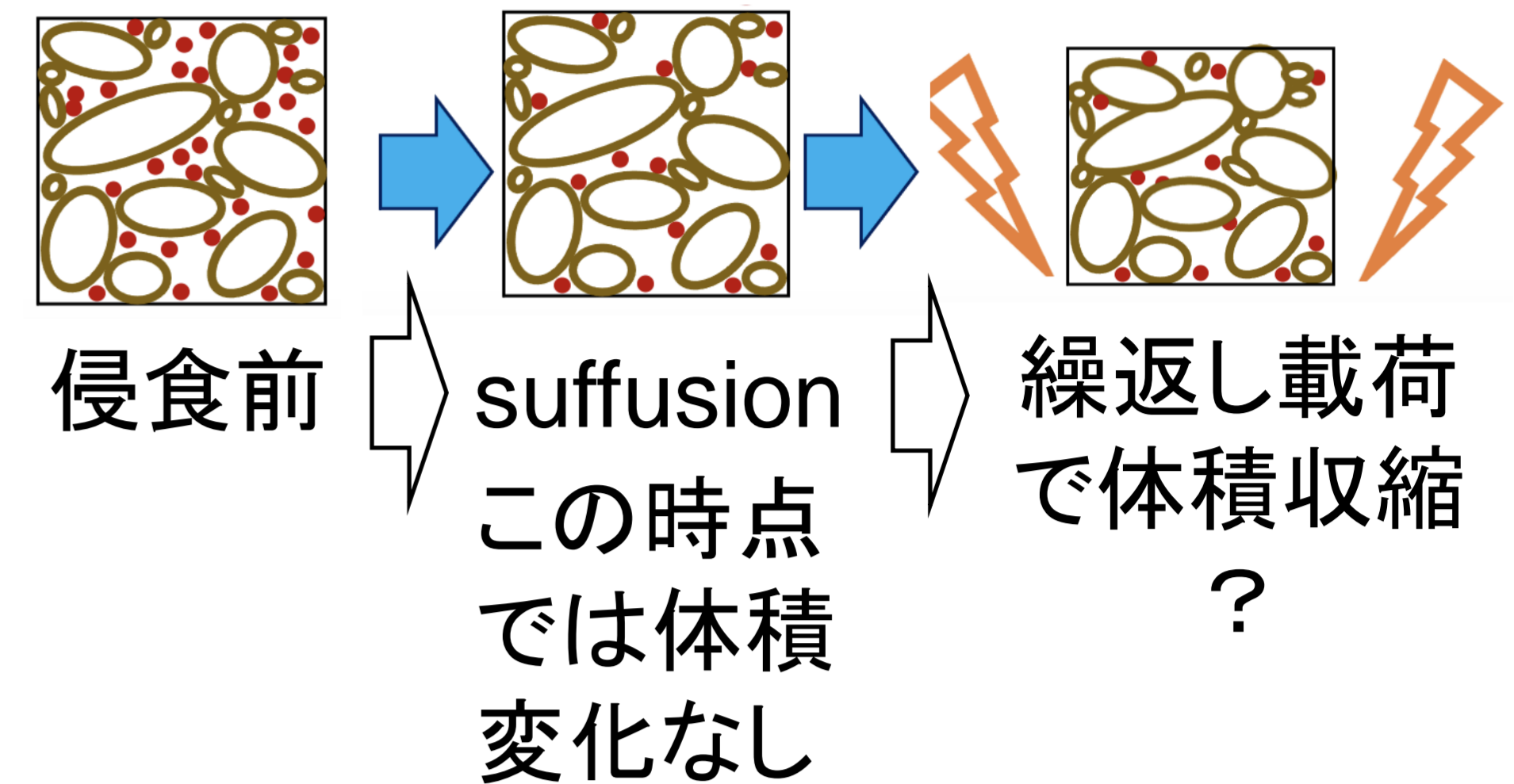
東京大学 工学系研究科 社会基盤学専攻 本郷土質・地盤研究室



## 概要

河川橋梁において、大きな出水が発生していない中で、**鉄道車両通過時**に橋脚の**変位が突然**見られる被害(以後、鉄道車両通過時の遅れ変位と呼ぶ)が近年注目されている。本研究ではそのメカニズムを、「細かい粒子の吸出し(suffusion)により橋脚基礎地盤が弱体化し、そこに鉄道車両通過による繰返し荷重が作用したことで、土粒子骨格構造が変化して**体積収縮**が発生した」と想定した。そして、中型水路を用いて、橋脚直下の土粒子の運動を観察する実験、出水後の橋脚模型に繰返し荷重を与える試験を行い、この仮説の妥当性を検討した。

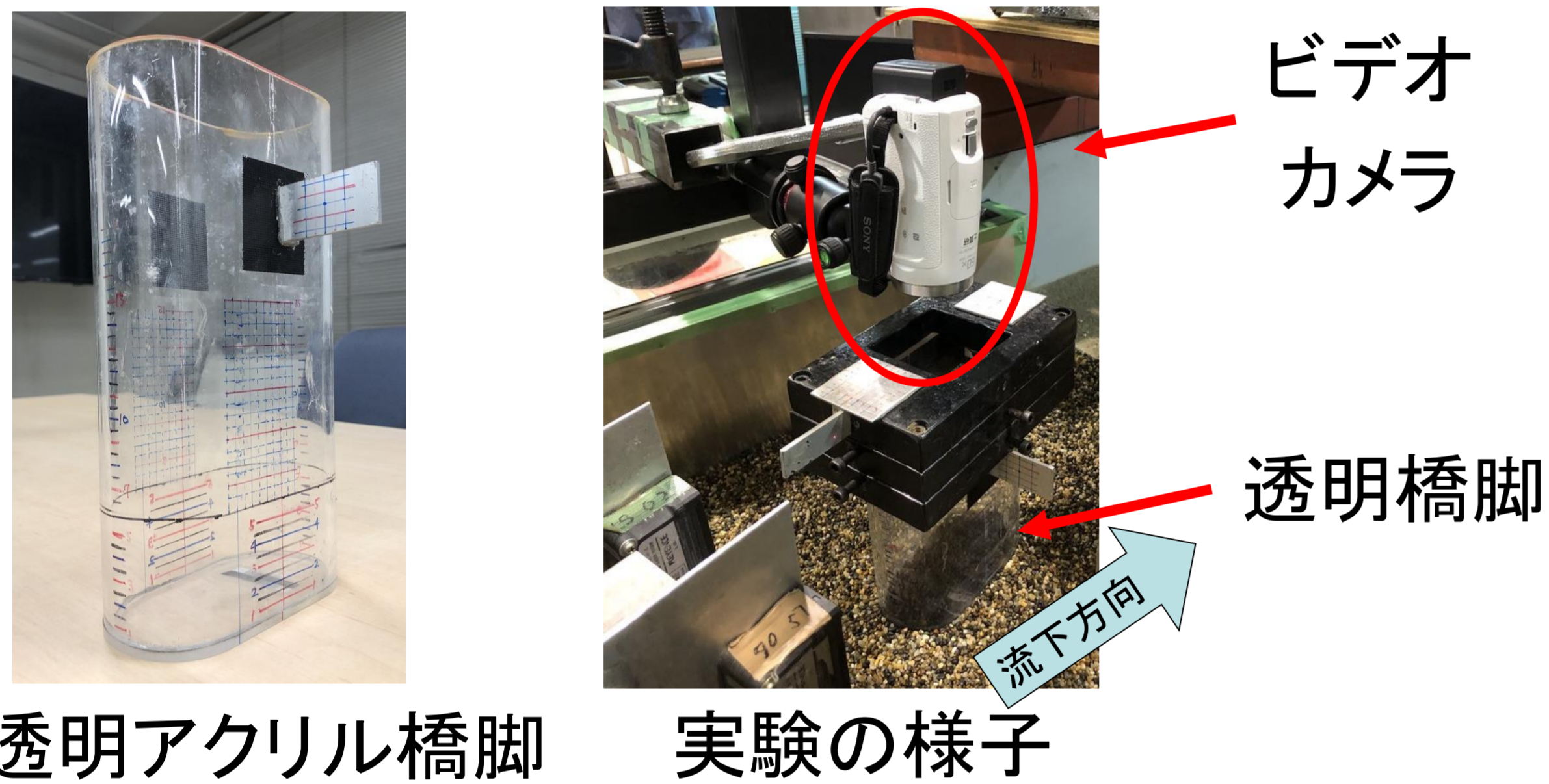
## 仮説



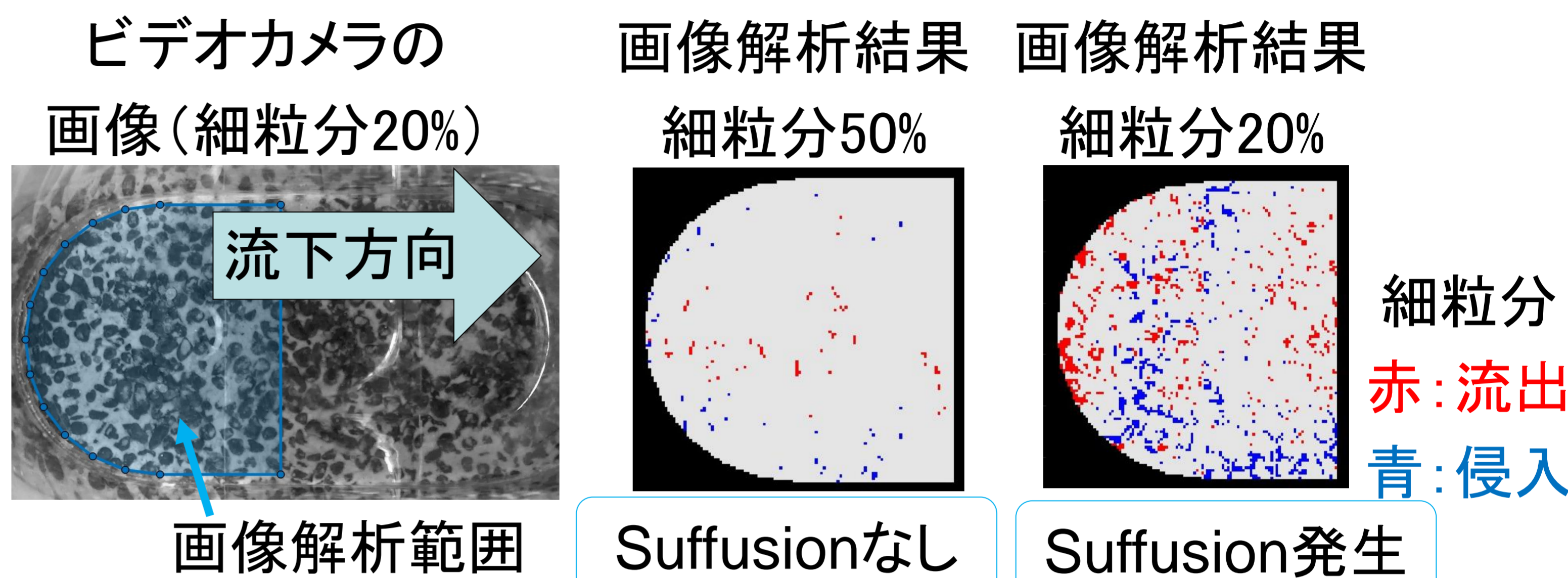
## 橋脚直下の土粒子の運動を観察する実験

### 方法

中型水路に、珪砂2号(粗粒分)と珪砂8号(細粒分)のギャップグレードな河床地盤を作成、底面が透明なアクリル橋脚を設置し、出水を模擬して水路に水を流した。出水試験中の橋脚底面の様子をビデオカメラで撮影し、suffusion発生の有無を確認した。



## 結果

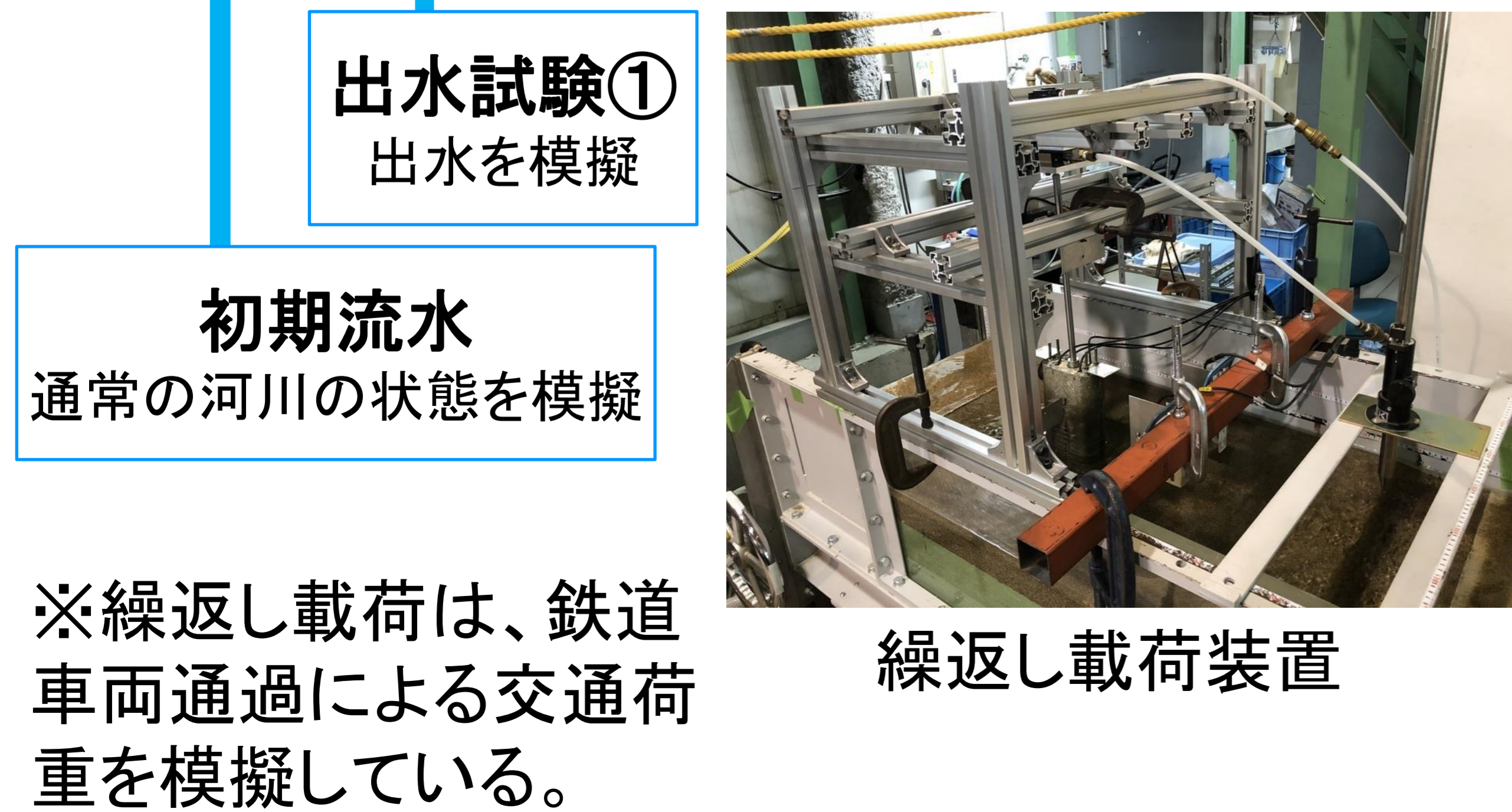
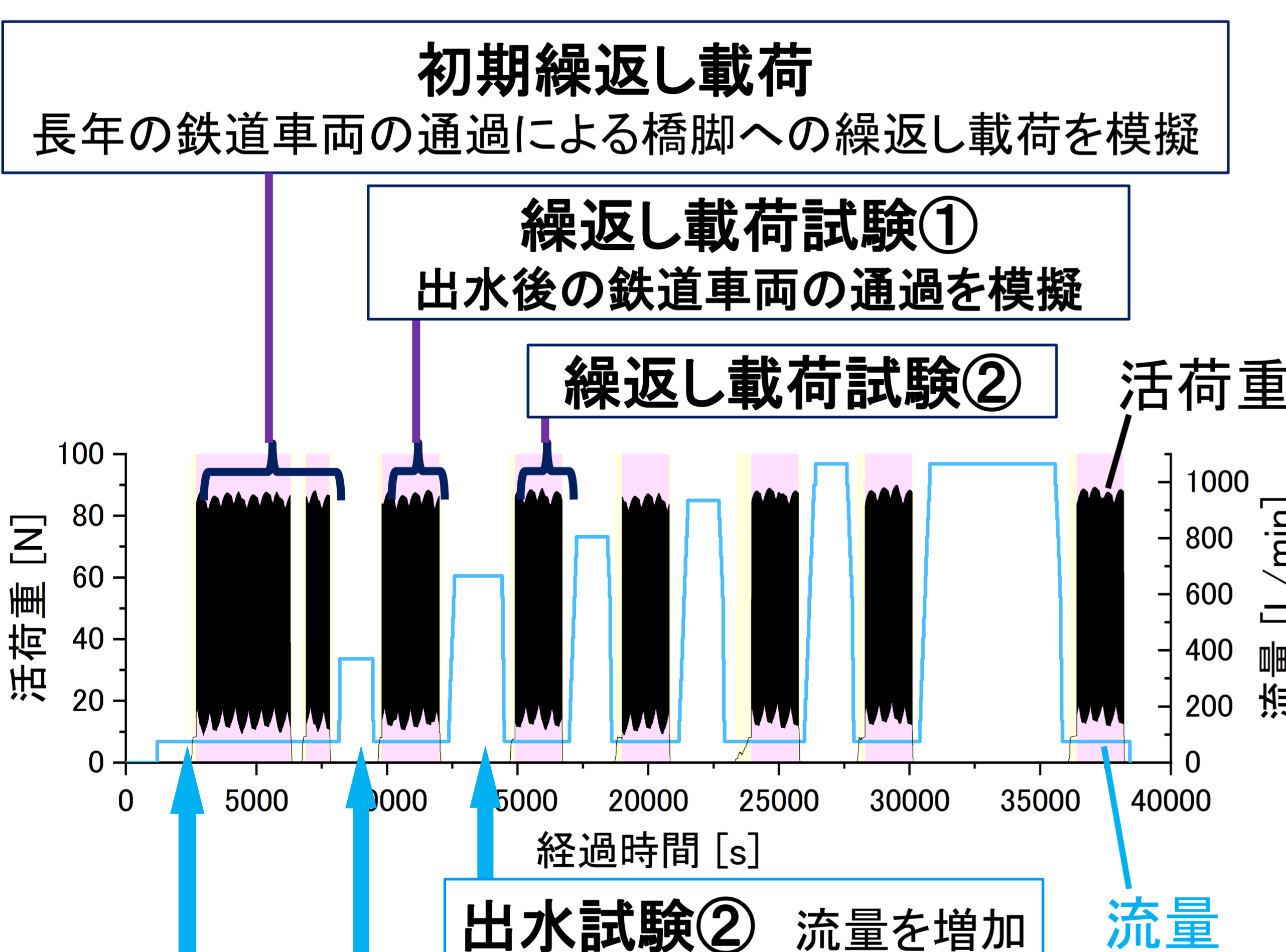


細粒分質量分率・相対密度を変えた実験の結果、橋脚直下の地盤で**Suffusionが生じる条件**は以下の3つであることが明らかになった。

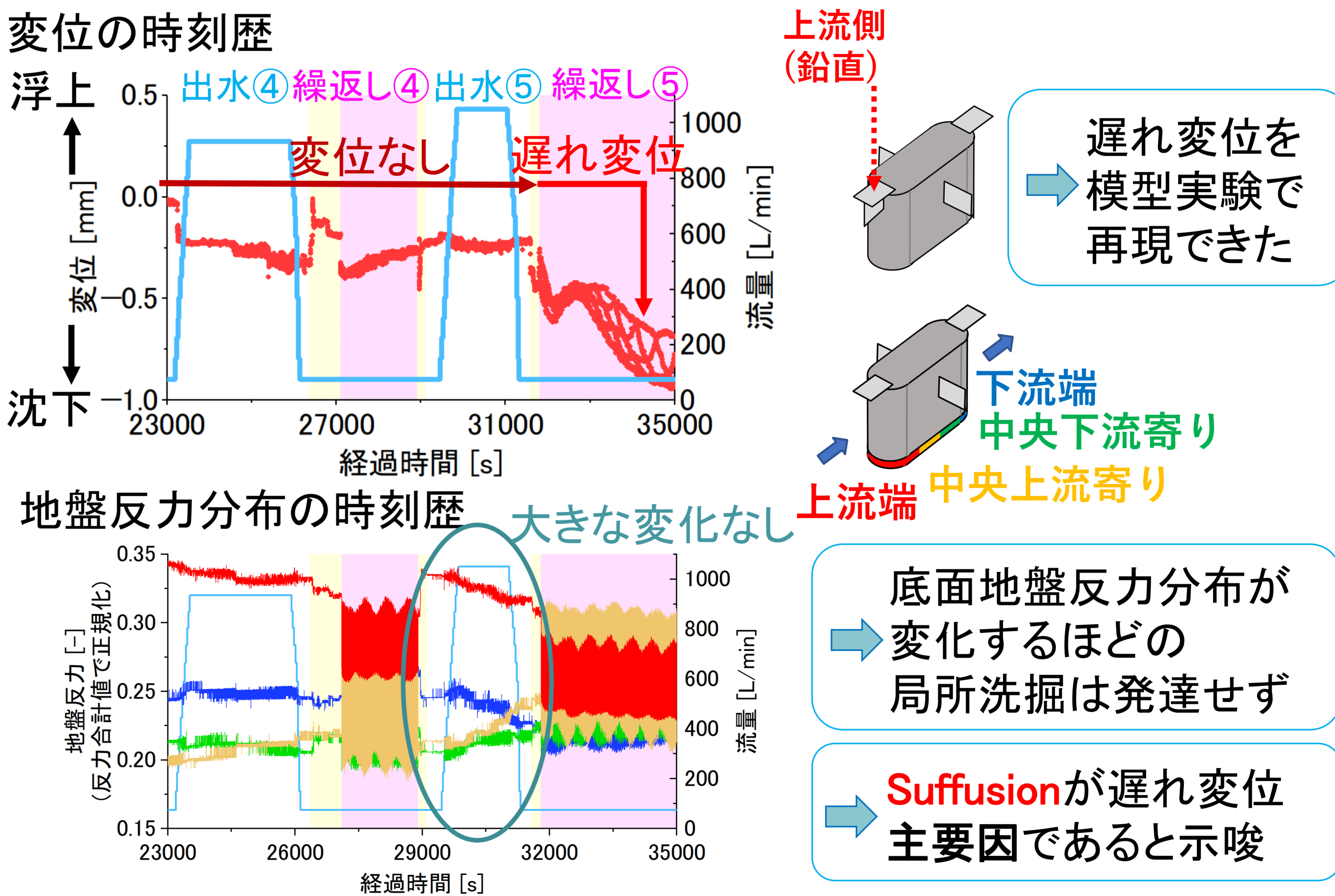
- ① 主に**粗粒分**が骨格を形成 (細粒分15%、20%で発生 ⇔ 30%、50%で発生せず)
- ② **密度**がさほど高くない (相対密度79%で発生 ⇔ 相対密度96%で発生せず)
- ③ 橋脚前面の**根入れ**が**消失**するほど**局所洗掘**が進行

## 出水後の橋脚模型に繰返し荷重を与える実験

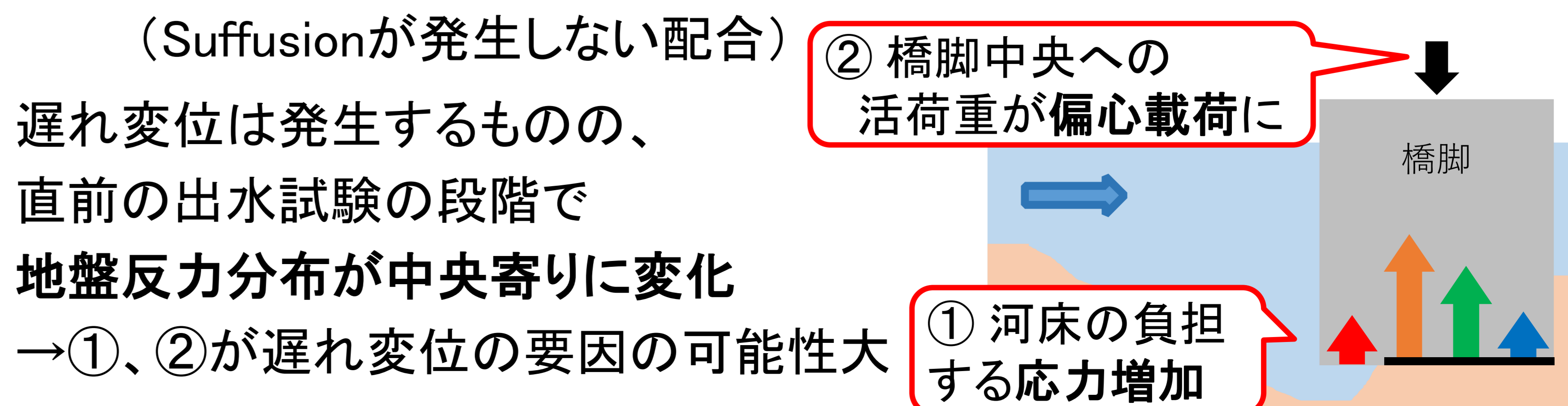
### 方法



## 結果 細粒分20%の場合 (Suffusionが発生する配合)



## 結果 細粒分50%の場合





# 橋脚の3次元形状が基礎周辺の局所洗掘の進行過程に及ぼす影響

Influence of 3D shape of piers on progress of local scour around the foundation



幸坂 祐紀

(2023年度 卒業論文概要)

東京大学 工学部 社会基盤学科 土質・地盤研究室

## 研究の概要

近年、コンクリートなどのセメント系材料を用いた3Dプリンティング技術(3DCP)の実用化に関する研究が進み、国内でも実構造物に適用された事例が増えつつある。3DCPを用いた工法では、従来の工法に比べて構造物のデザインの自由度が飛躍的に向上し、特に従来の工法では難しい自由曲面を持つような形状の実現が可能になっている。

また、橋脚基礎周辺の地盤を侵食する局所洗掘は、河川の増水時に進行して橋脚に被害を与えるため、長年その対策が研究されている。そこで本研究では、橋脚に持たせた自由曲面が局所洗掘の抑制につながる可能性に期待し、過去ほとんど論じられてこなかった、橋脚の3次元形状が局所洗掘に及ぼす影響に注目した模型実験を行った。

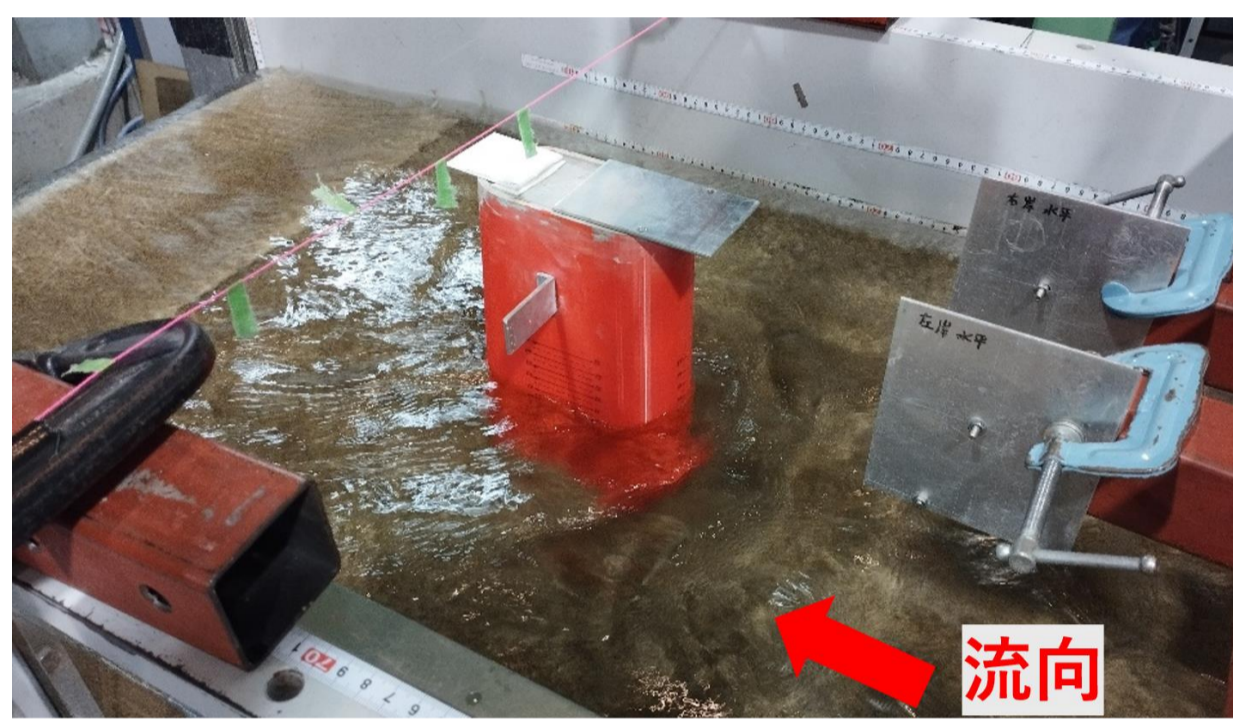


局所洗掘による橋脚の被災(山口県 栗野川橋梁、2023年7月19日撮影)

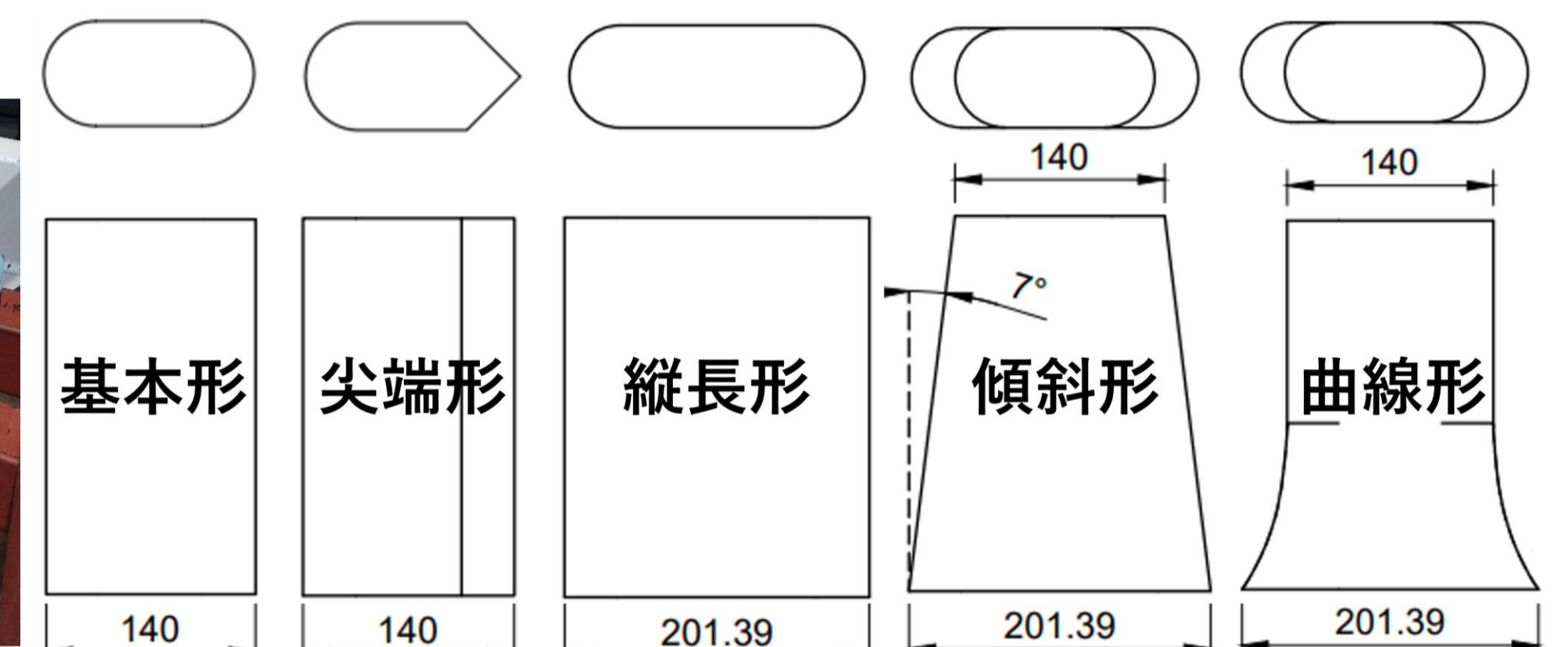
## 実験方法

河床を模した地盤材料を敷き詰めた水路内に、様々な形状の橋脚模型を建てて、段階的に流量を上げながら通水した。橋脚模型は3Dプリンターにより作製した。

橋脚が倒壊するまでの時間(=倒壊時の流量)、橋脚変位や局所洗掘深の進行過程、倒壊時点の洗掘孔の形状により、その形状の局所洗掘に対する効果を検討した。

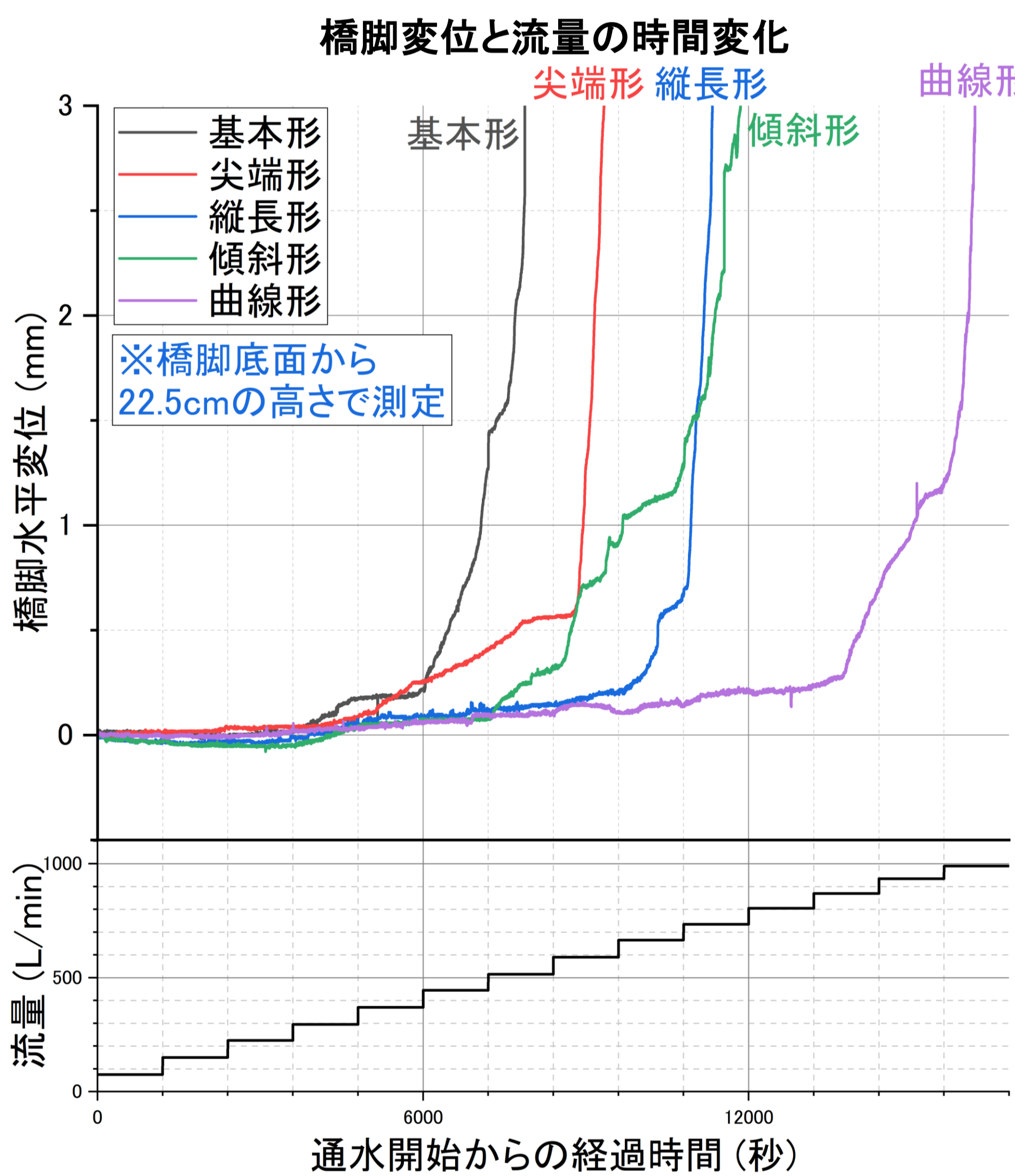


実験中の様子



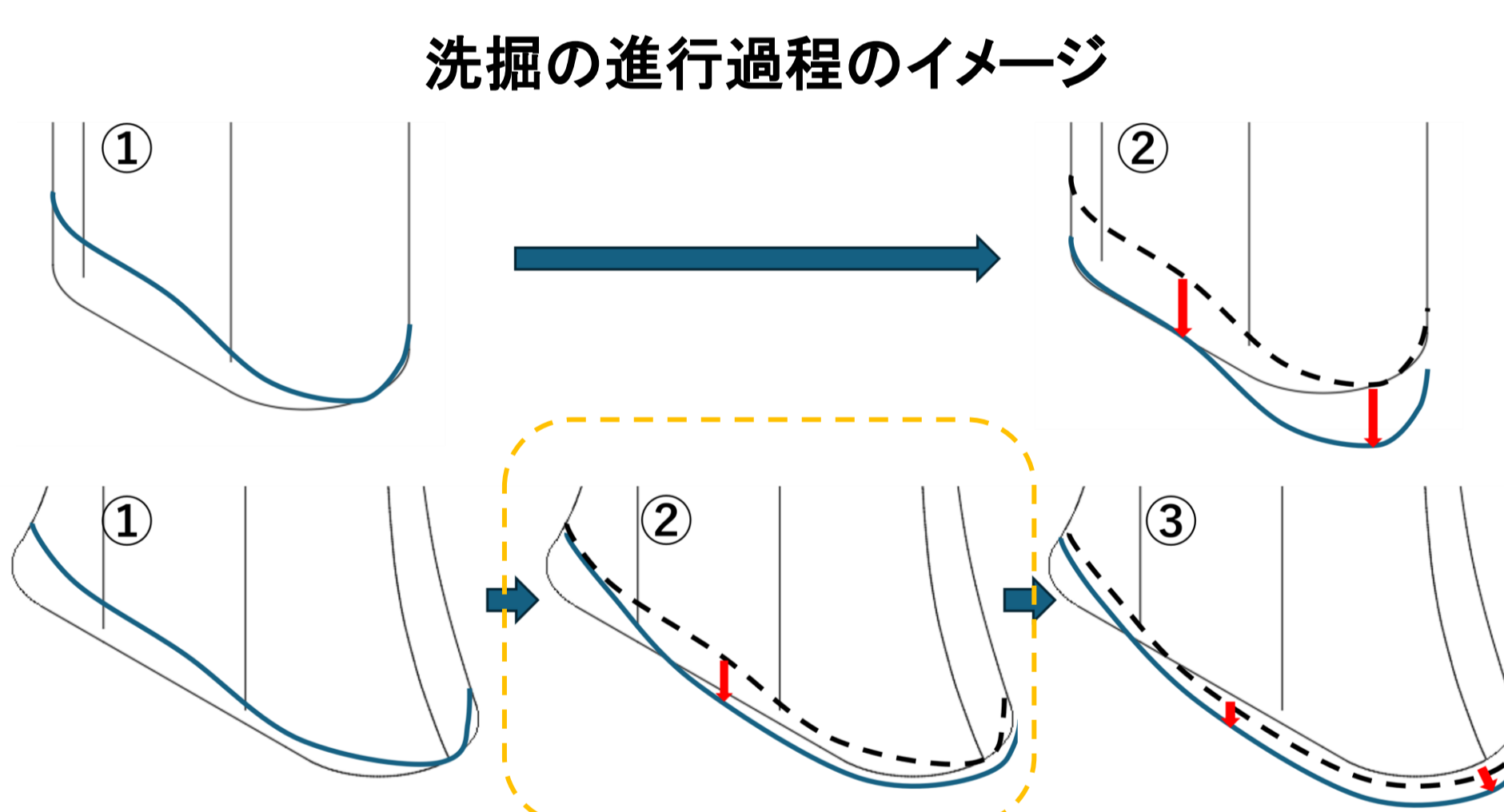
橋脚模型の例(5種類を掲載)(単位のない数字はmm、高さは250mm)

## ①形状による倒壊に耐える流量の違い



## ②形状による局所洗掘の進行過程の違い

各形状の洗掘孔形状や洗掘深の時間変化について比較する。基本形と縦長形はともに半円状の洗掘孔が形成されていたのに対し、**傾斜形や曲線形の洗掘孔は馬蹄形**であった。また、傾斜形や曲線形の洗掘深で見られた**橋脚上流端の洗掘が底面付近に達すると進行が停滞し、橋脚側面のみの洗掘が進行する時間がある**という特徴は、基本形や縦長形にはなかった。以上から、洗掘進行過程に以下のような違いがあると考えられる。



この過程を経ることで、橋脚の倒壊を遅らせることができる！

### ・傾斜なしの形状

- ①洗掘が橋脚底面付近に到達
- ②そのまま橋脚直下の地盤まで洗掘が進行し、橋脚が倒壊

### ・傾斜ありの形状

- ①洗掘が橋脚底面付近に到達
- ②洗掘の進行が橋脚側面に回り、橋脚直下の洗掘は進行しない
- ③橋脚直下で洗掘、橋脚倒壊

### ・水平断面形状を変えた場合

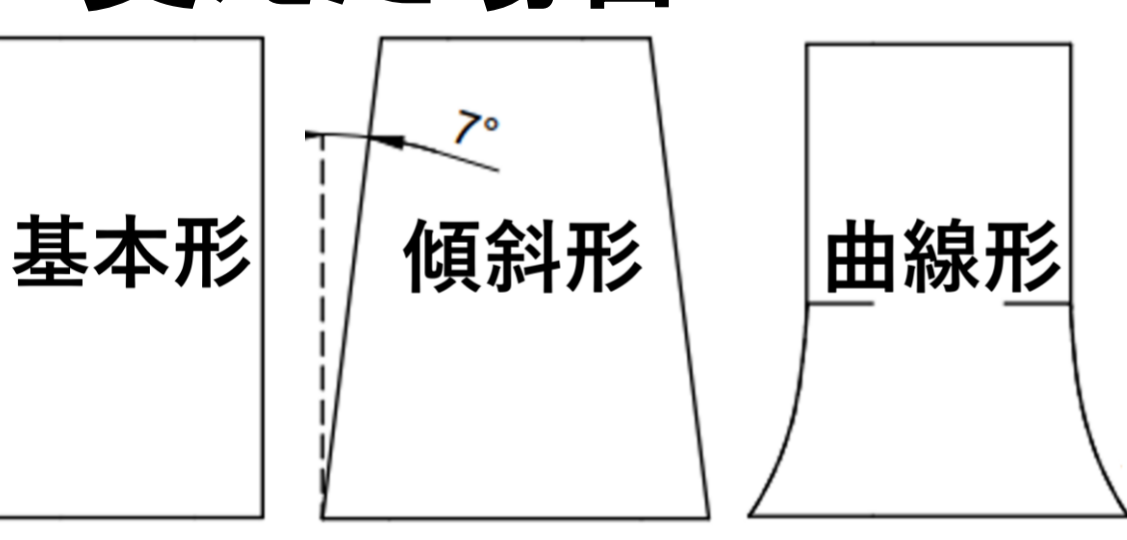
基本形から水平断面形状のみを変えた尖端形では、基本形の約1.3倍の流量で倒壊した。多少の効果は見られたものの、基本形を除く4形状のうちでは**最も効果が小さかった**。

### ・底面を広げた場合

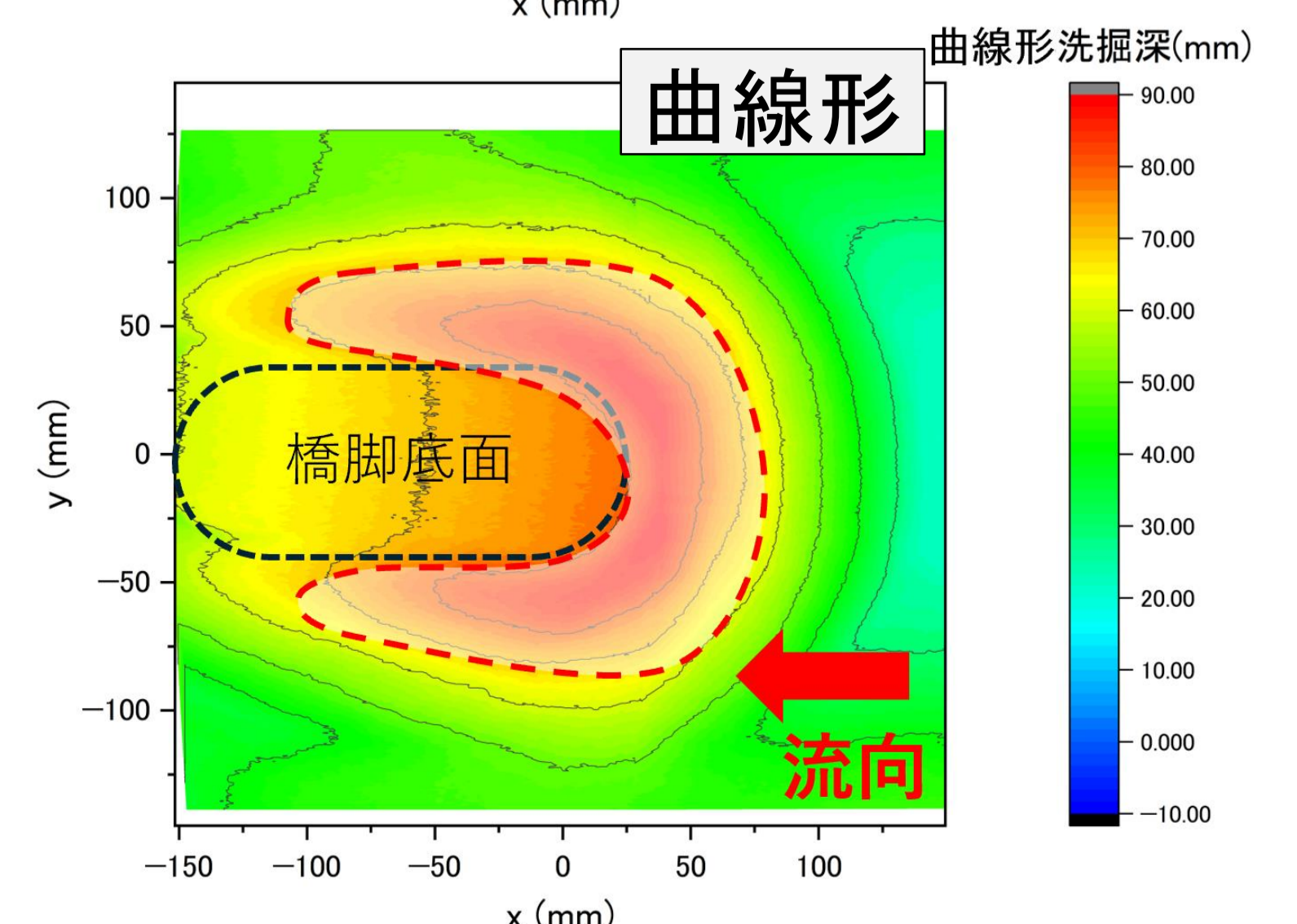
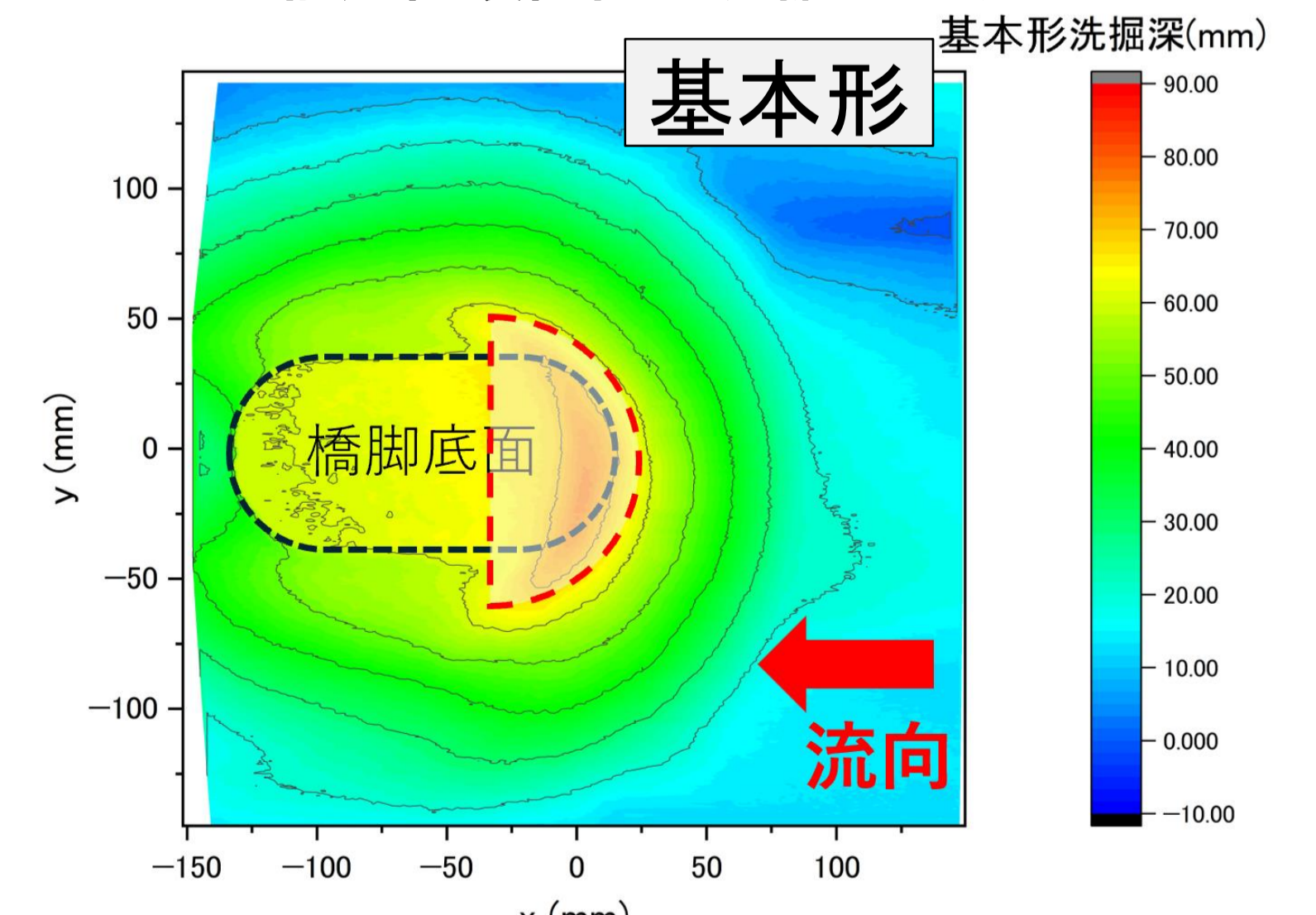
基本形を河川の流下方向に長くし、底面を広げた縦長形では、基本形の約1.4倍の流量で倒壊した。底面の長さの比に概ね比例しており、橋脚は**長いほど安定する**ことがわかった。

### ・鉛直断面形状を変えた場合

基本形と同じ天面、縦長形と同じ底面を持つ傾斜形、曲線形では、それぞれ基本形の約1.6倍、約1.9倍の流量で倒壊した。いずれも縦長形より倒壊が遅く、さらに傾斜形よりも曲線形のほうがより大きな流量に耐えていることから、当初の期待通り、橋脚下部についての**傾斜が大きくなるほど安定**ことがわかった。



橋脚倒壊直前の洗掘孔形状





# 中規模出水時に生じる局所洗掘が河川橋梁基礎の不安定化に及ぼす影響

## Influence of Local Scour on Destabilization of River Bridge Foundation during Middle Flooding

竹崎 奏詠

(2022年度 修士論文概要)

東京大学大学院 社会基盤学専攻 土質・地盤研究室



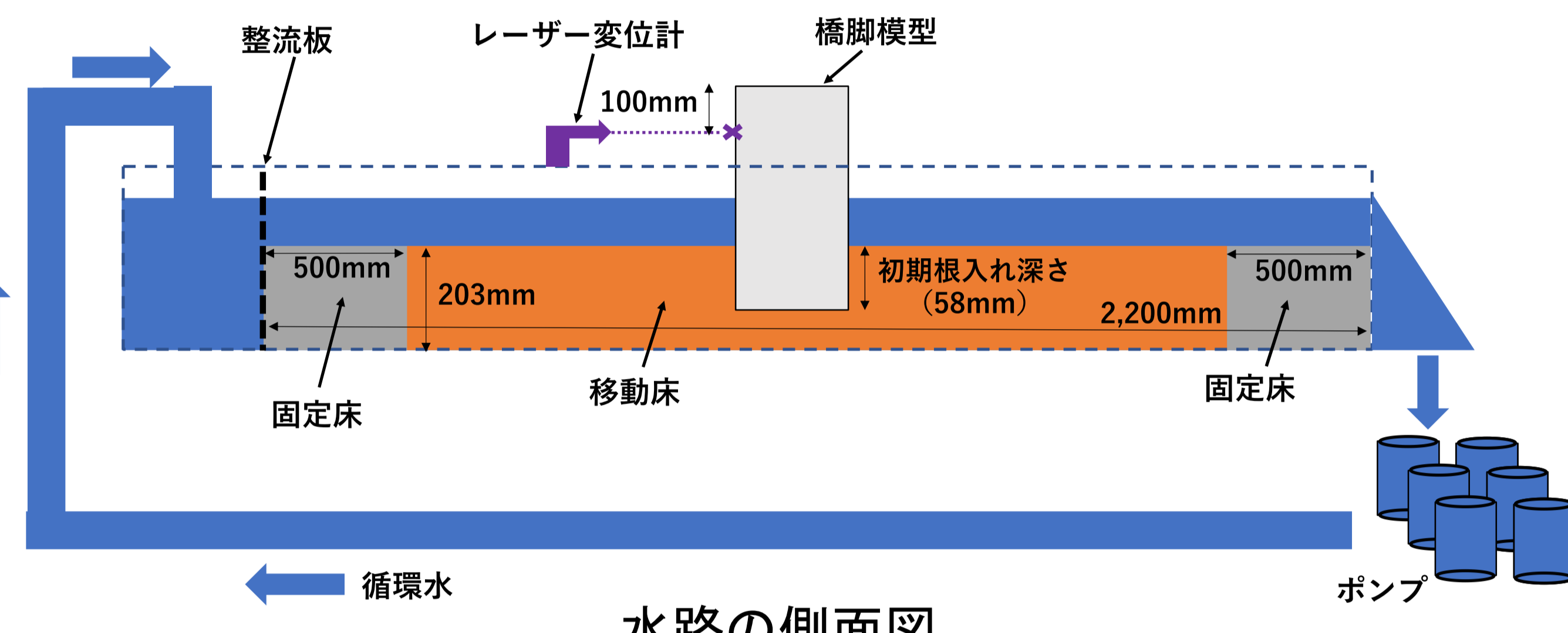
令和4年8月に中規模出水で被災した濁川橋梁(JR磐越西線)

**背景** 近年、既往最高水位を大きく下回る中規模出水時に、河川橋脚が局所洗掘によって倒壊する事例が増加傾向にある。また、近年の洪水の特徴として、1. 洪水継続時間が比較的**長く**、2. 水位が**急上昇**する時間帯が見られることが挙げられる。そこで、洪水継続時間および水位の上昇速度が橋脚の不安定化に与える影響について実験的検討を行った。また、実施した実験ケースに対して、洗掘により流失した土砂量の理論的計算も行った。

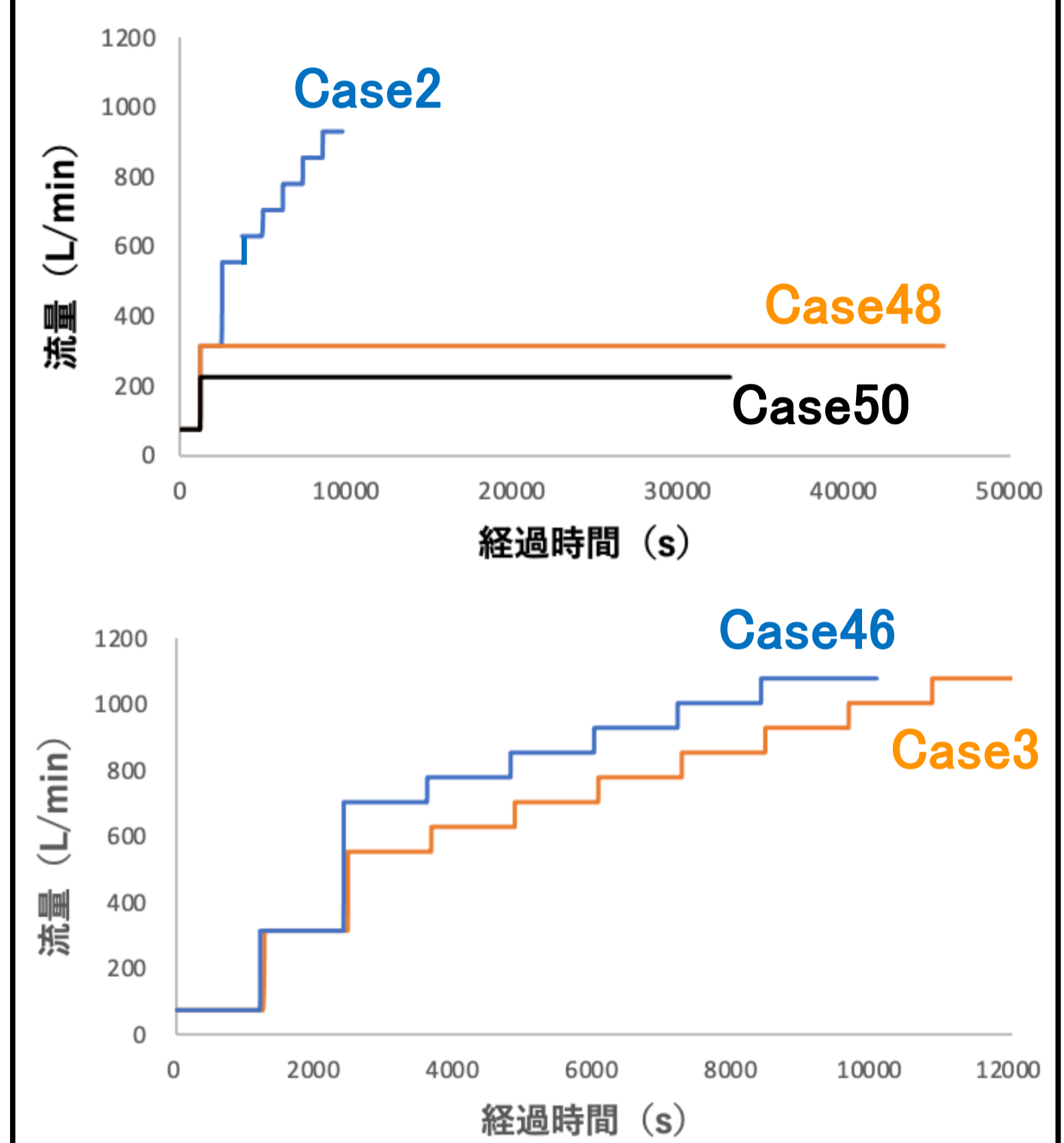
### 実験条件

水路中に河床模型(スケール比: 1/30)を構築し、その上に所定の根入れ深さで小判型の橋脚模型を設置して水を流し、橋脚模型の上・下流方向の水平変位を測定する実験を行った。流量はポンプによって最大1080L/min(実スケール換算で88.7m<sup>3</sup>/s)まで段階的に増加させた。なお、実験ケース間で河床勾配、初期根入れ深さ、相対密度を統一し、Case2, 3, 46では最大流量を除き、各流量の流水時間を20分に設定した。

実験条件					
検討項目	Case	河床材料	河床勾配	初期根入れ深さ(mm)	相対密度(%)
流水時間の影響	Case2	珪砂4号 (d <sub>50</sub> =0.74 mm)	1/400	58	79
	Case48				
	Case50				
水位の上昇速度の影響	Case3	珪砂2号:7号=1:1 (d <sub>50</sub> =0.85 mm)			
	Case46				

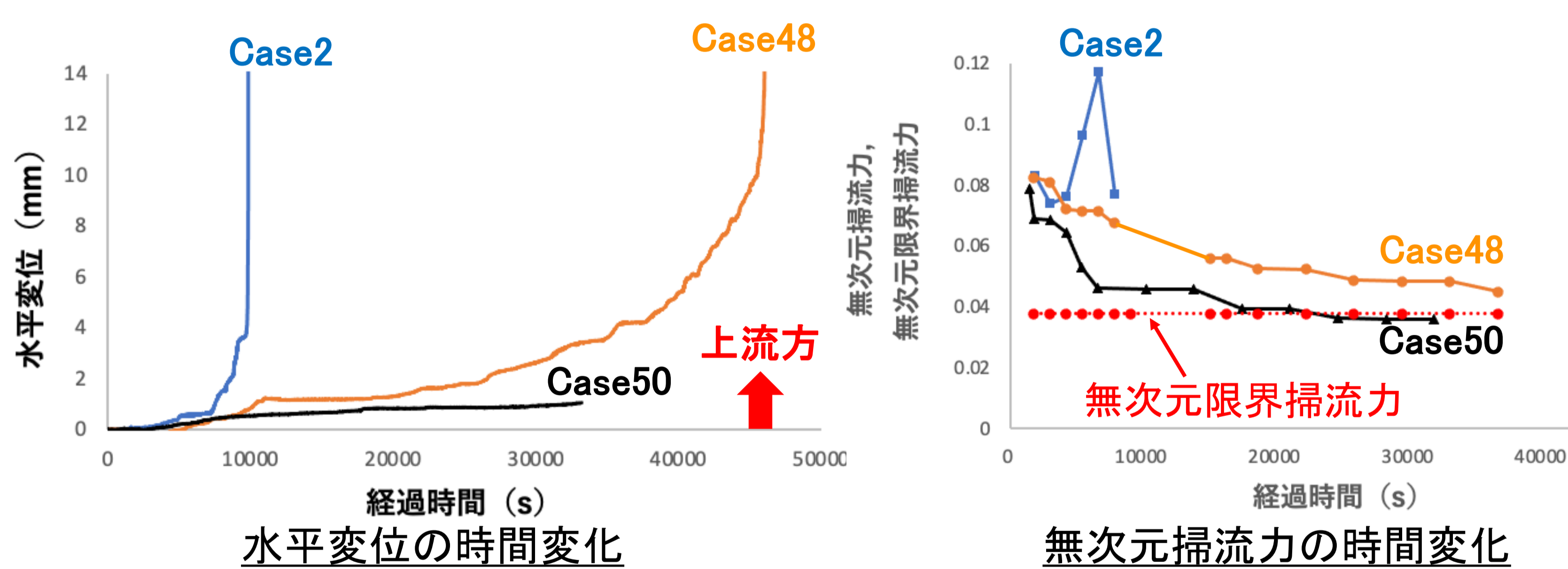


### ハイドログラフ



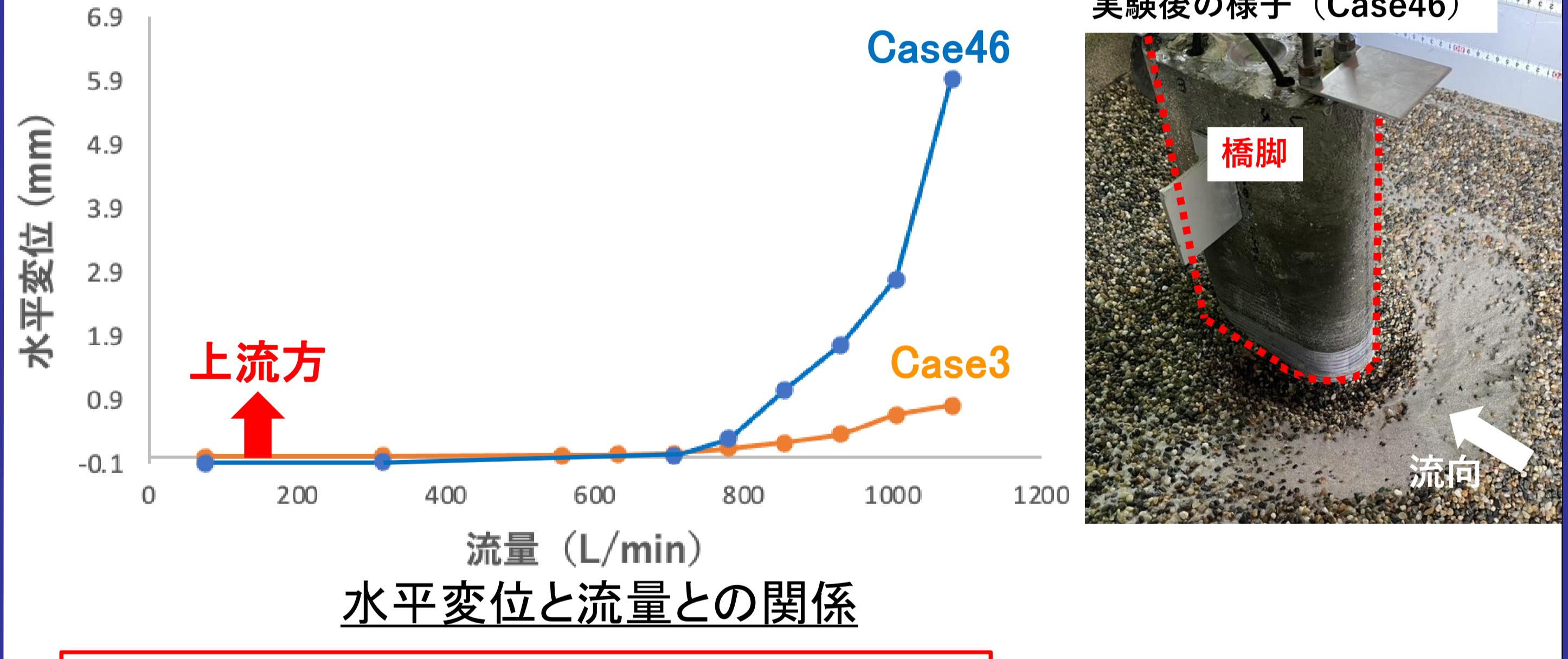
### 実験結果(洪水継続時間の影響)

低流量下であっても橋脚の変位が**時間とともに進行**したケース(Case48)と、変位が**途中で収束**したケース(Case50)が見られた。この差異が生じた理由は、Case48では時間の経過によらず、橋脚左岸側側面の河床に作用する無次元掃流力が無次元限界掃流力を**上回っている**のに対し、Case50では変位の進行が収束した時の経過時間(18000秒付近)以降の時間帯では無次元掃流力が無次元限界掃流力を**下回っている**ことから説明される。



### 実験結果(水位の上昇速度の影響)

流量を**急増**させた実験ケース(Case46)では、流量を段階的に増加させた実験ケース(Case3)に比べ変位の進行が**急**であった。これは、Case46では流水時間が**短く**、洗掘孔内の粗化が十分進行する**前**(i.e. 粒子骨格が安定構造になる**前**)に流量を**急増**させたため変位が**急激**に進行したと推測される。

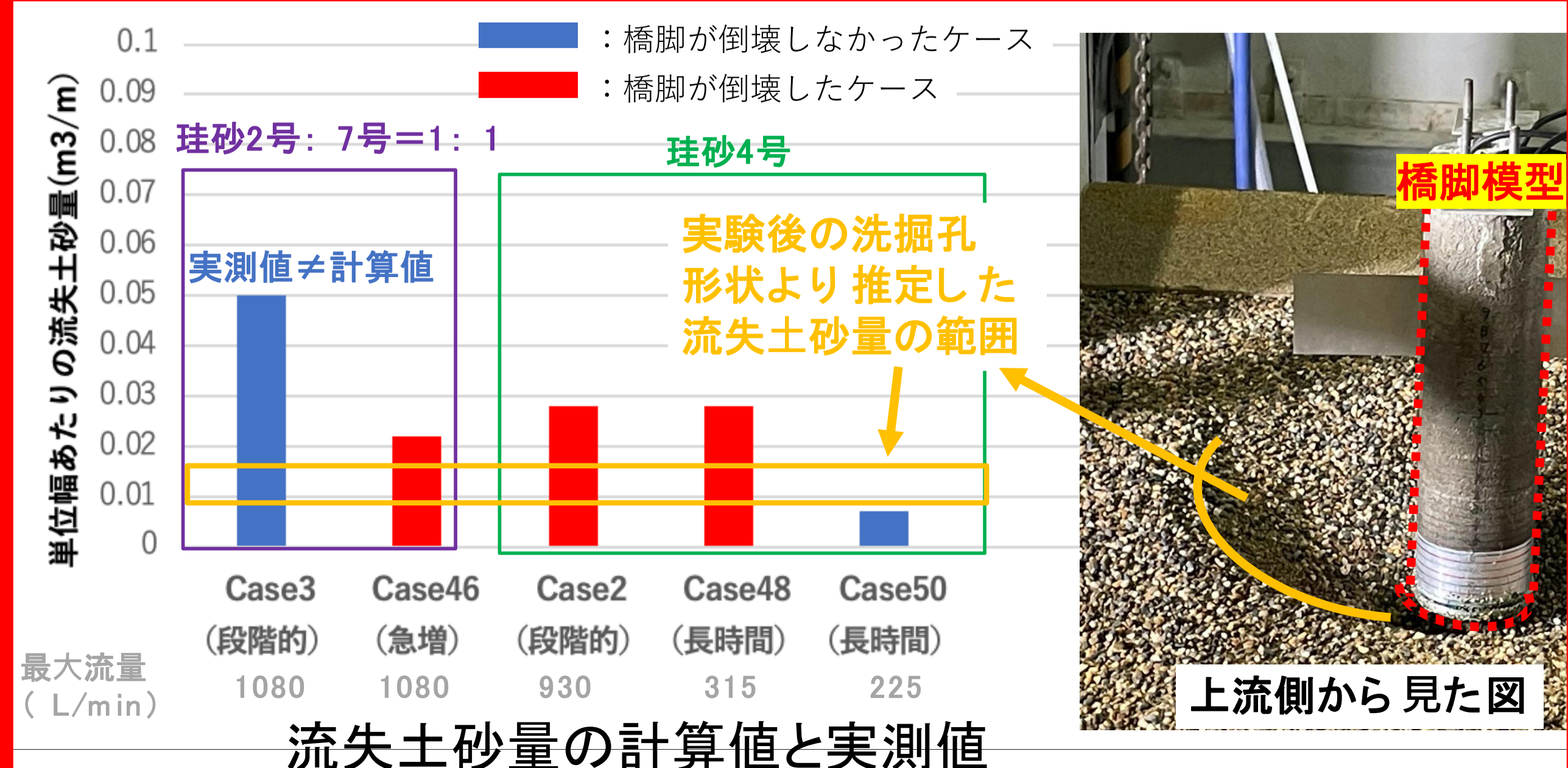
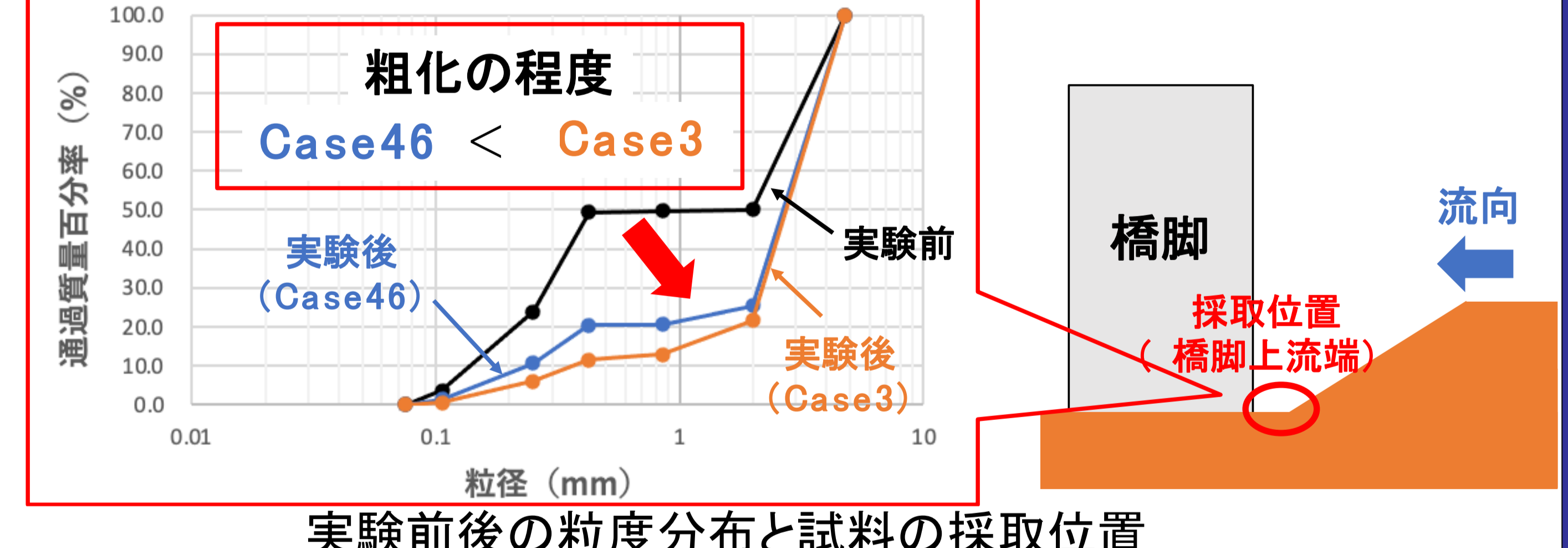


### 洗掘によって流失した土砂量の理論計算と実測値との比較

単粒度地盤では、橋脚左岸側側面の流砂量 $q_B$ を以下の式を用いて求めた。混合材地盤では、以下の式に砂礫混合比の時間変化および、礫の突出効果と砂の遮蔽効果を考慮して流砂量を求めた。そして、求めた流砂量を時間積分することで流失土砂量を求めた。

$$q_B = \frac{\sqrt{sg}(\tau^* d)^{1.5}}{\mu_d} \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_c^*}{\tau^*}}\right) \left(1 - \frac{\tau_c^*}{\tau^*}\right) f(z_b)$$

s: 土粒子の水中比重, g: 重力加速度(m/s<sup>2</sup>), d: 平均粒径(m),  $\mu_d$ : 動摩擦係数,  $\tau^*$ : 無次元掃流力,  $\tau_c^*$ : 無次元限界掃流力,  $f(z_b)$ : 速度分布関数



珪砂4号の場合、Case2, 48では両方で流水時間が大きく異なるものの**流失土砂量の計算値が同レベルになった**。また、橋脚が倒壊した実験ケースは橋脚が倒壊しなかった実験ケースに比べ、流失土砂量の計算値が**大きくなっており**、実測値と計算値も**概ね対応**していることがわかる。

### まとめ

- 低流量下でも橋脚の変位が**時間とともに進行**する場合と**途中で変位が収束**する場合があります。掃流力と抵抗力との関係を求めることでその違いを説明することができた。
- 流量の上げ幅が**急**な程、橋脚の変位の進行が**急**になり得る。
- 単粒度に対しては、「**流出土砂量**」を用いることで、**流水時間の影響**と**倒壊の有無**を統一的に説明できる可能性がある。



# 洗掘対策ブロックの形状と河床材料の違いが河川橋脚基礎の不安定化プロセスに及ぼす影響

The effects of scour protection blocks on the destabilization process of pier

小池 潤平

(2022年度 卒業論文概要)

東京大学 工学部 社会基盤学科 土質・地盤研究室



## 研究の概要

近年、洗掘現象により橋脚基礎が不安定化し、橋脚が沈下・傾斜する事象が頻発しており、早急な対策が求められている。橋脚周りにコンクリートブロックを敷設する手法が対策として主流であるが、維持管理標準においても、その効果の定量的な評価に至っていない。対策工の変状により、その効果が十分に発揮されていない事例もある。

本研究では、橋脚や対策工ブロックの模型と水路を用いた水理模型実験を行った。河床材料やブロックの種類を変え、敷設されたブロックがどのように変状し、その効果がどのように変化するかを検討した。



ブロックが変状・流出している様子(JR東日本提供)

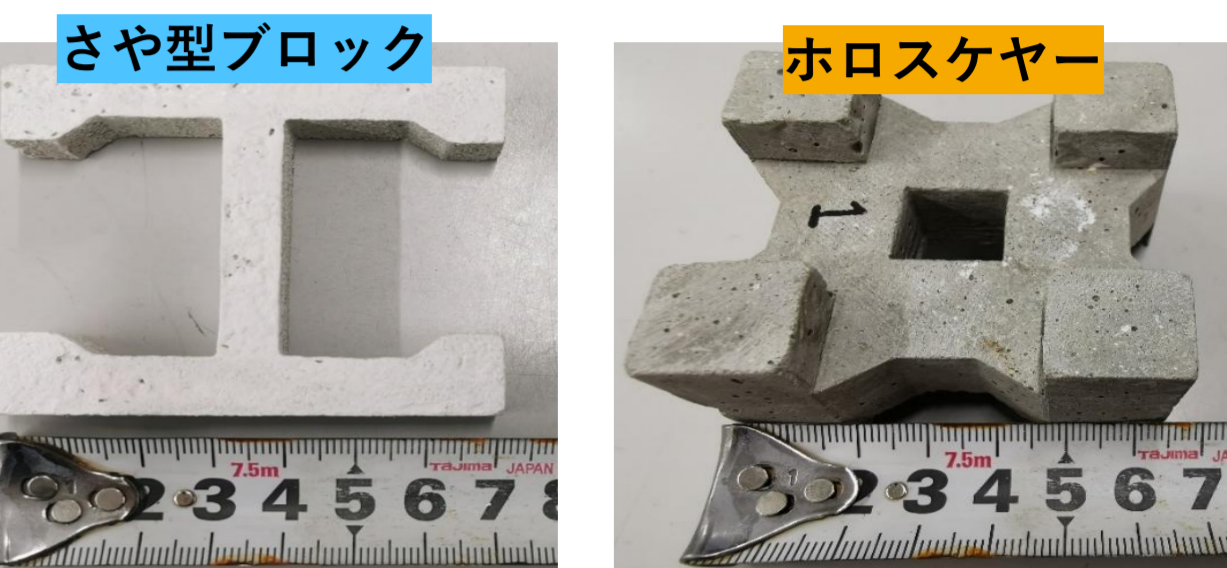
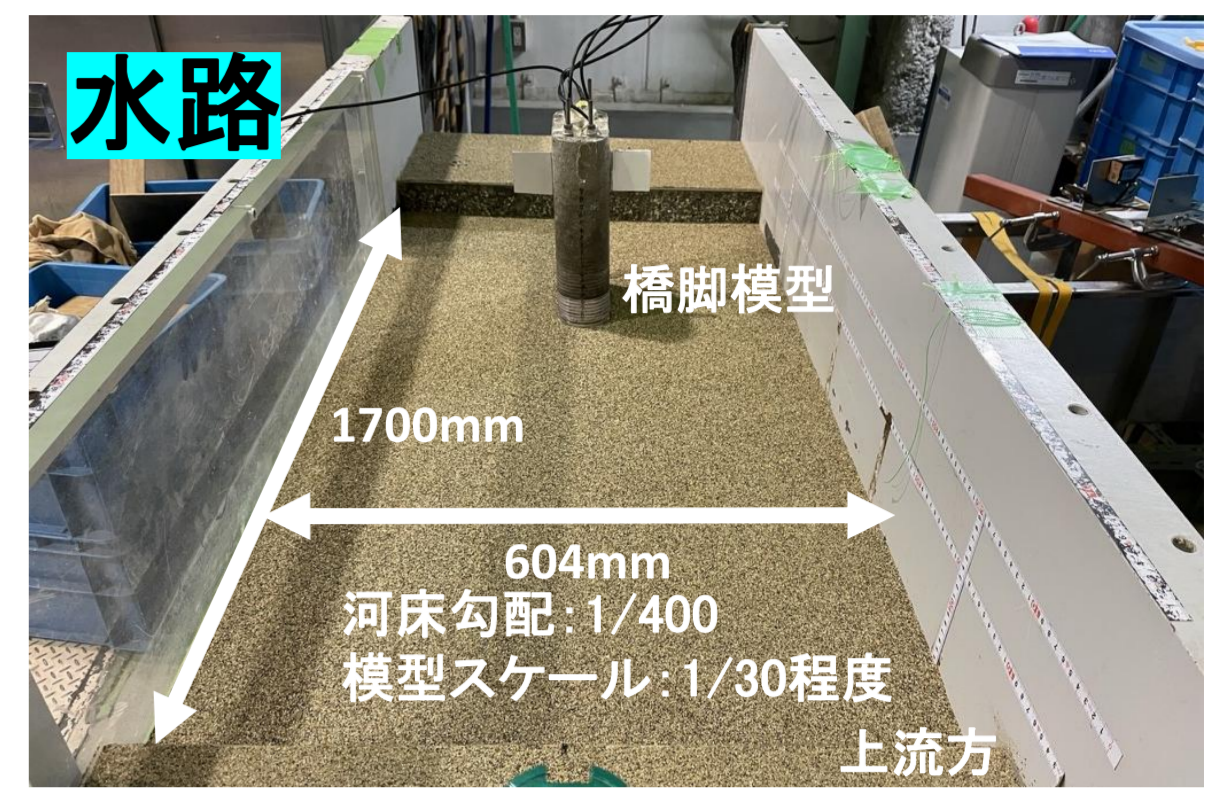


モルタル橋脚とさや型ブロックが敷設された様子 透明橋脚とビデオカメラ



## 実験方法

右の写真のような河川を模擬した水路を用い、水理模型実験を行った。



ブロックの模型

3Dプリンターを用いて作製した水溶性の型枠を用いて、2種類(さや型ブロック・ホロスケヤー)のブロック模型を用意した。

水路に地盤を作製し、橋脚模型とブロックを設置し、計10台のポンプを用いて、流量を段階的に変えて水路に水を流した。

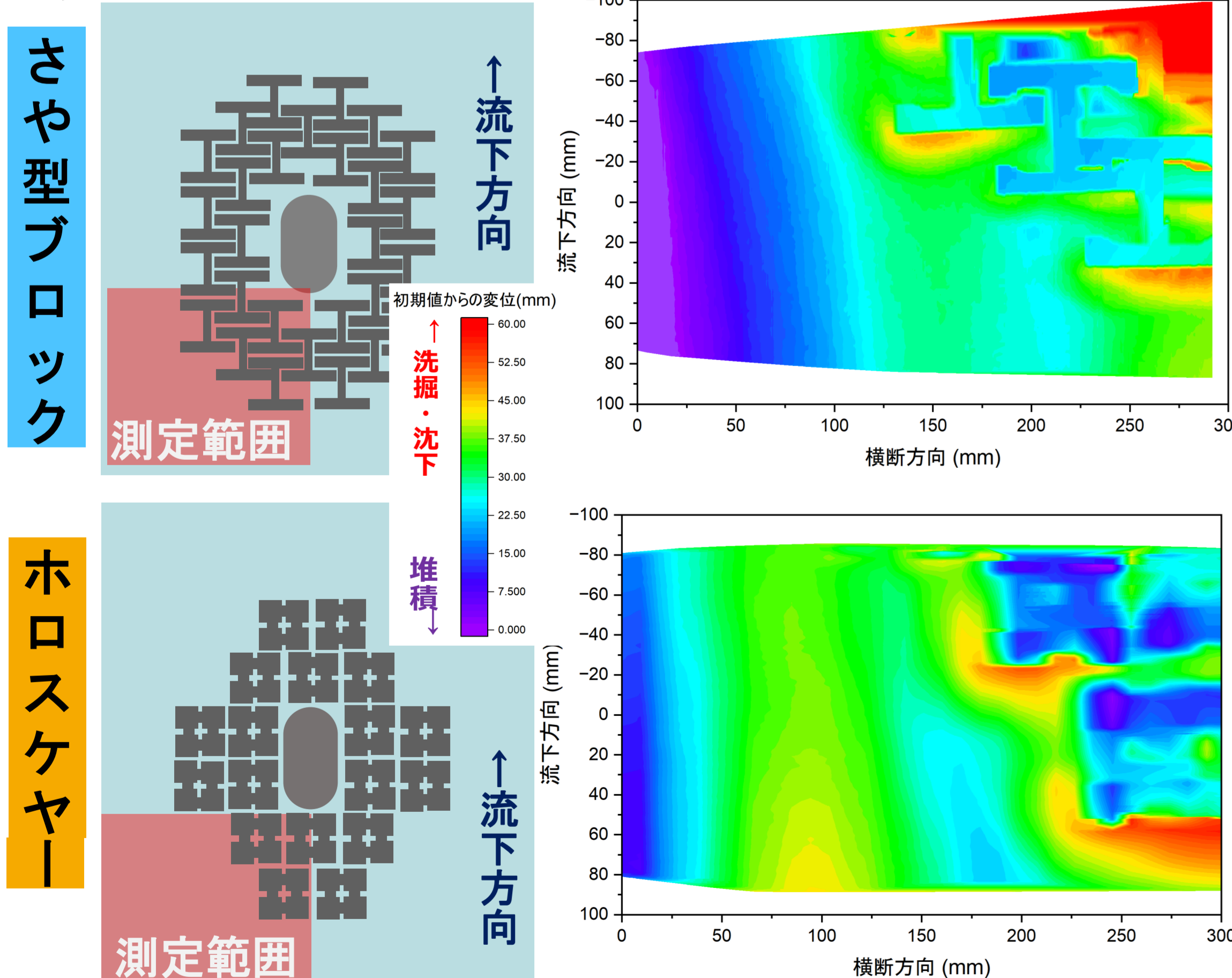
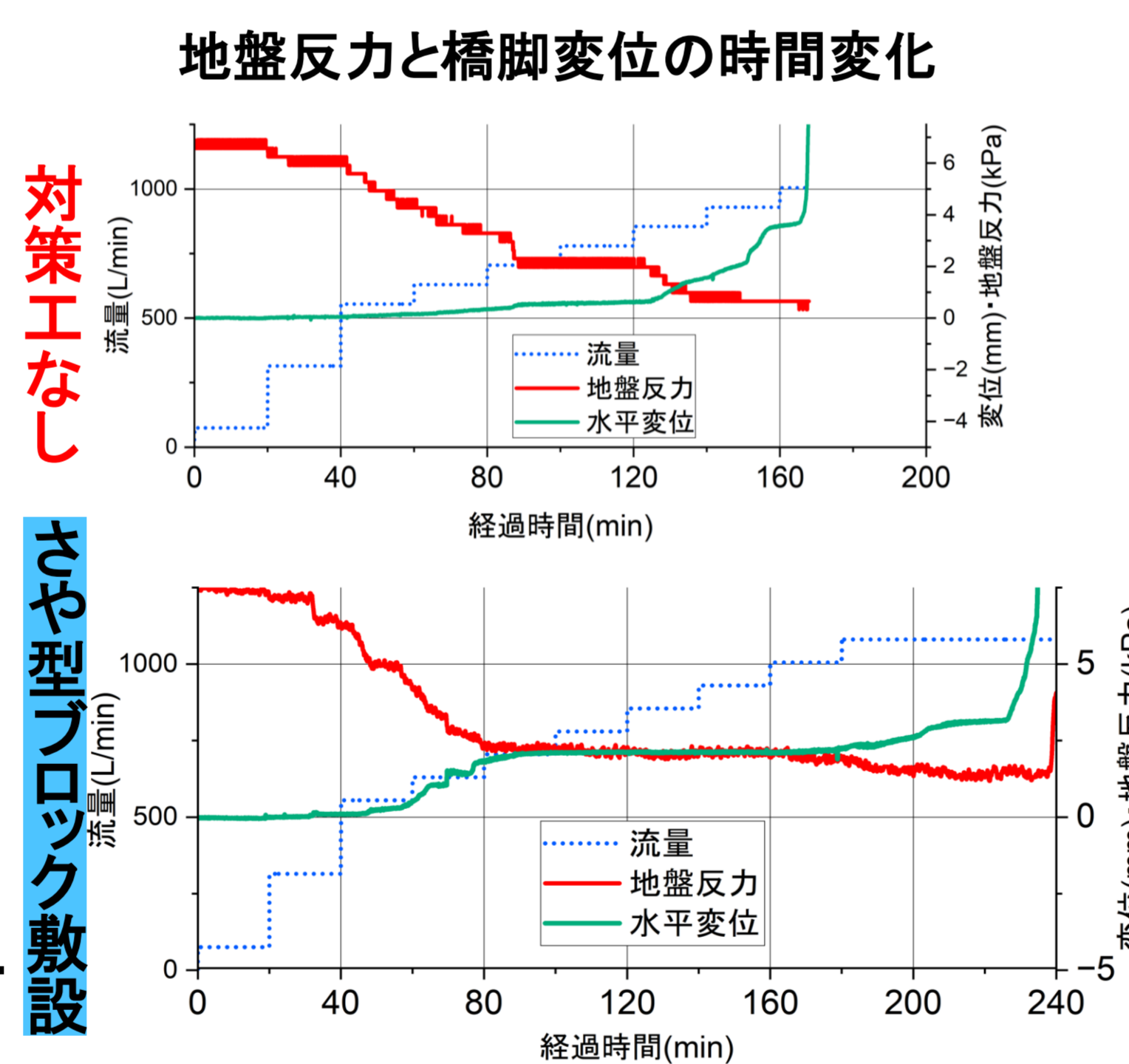
橋脚底面に設置したロードセルを用いた地盤反力の測定や、レーザ変位計を用いた橋脚やブロックの変位測定、透明橋脚とカメラを用いた変状の様子の定点撮影などを行った。

## ①ブロックの種類の違いによる効果の違い

地盤条件は4号珪砂(砂単体)とし、ブロックの種類を変えた3ケース(無対策・さや型ブロック敷設・ホロスケヤー敷設)を比較する。

無対策のケースでは、開始50分頃に変位が発生し、160分頃に倒壊した。さや型ブロックを敷設したケースでは、同じく開始50分頃から変位が発生したが、240分頃まで倒壊しなかった。

ホロスケヤーを敷設したケースでは、一切変位が発生しなかった。

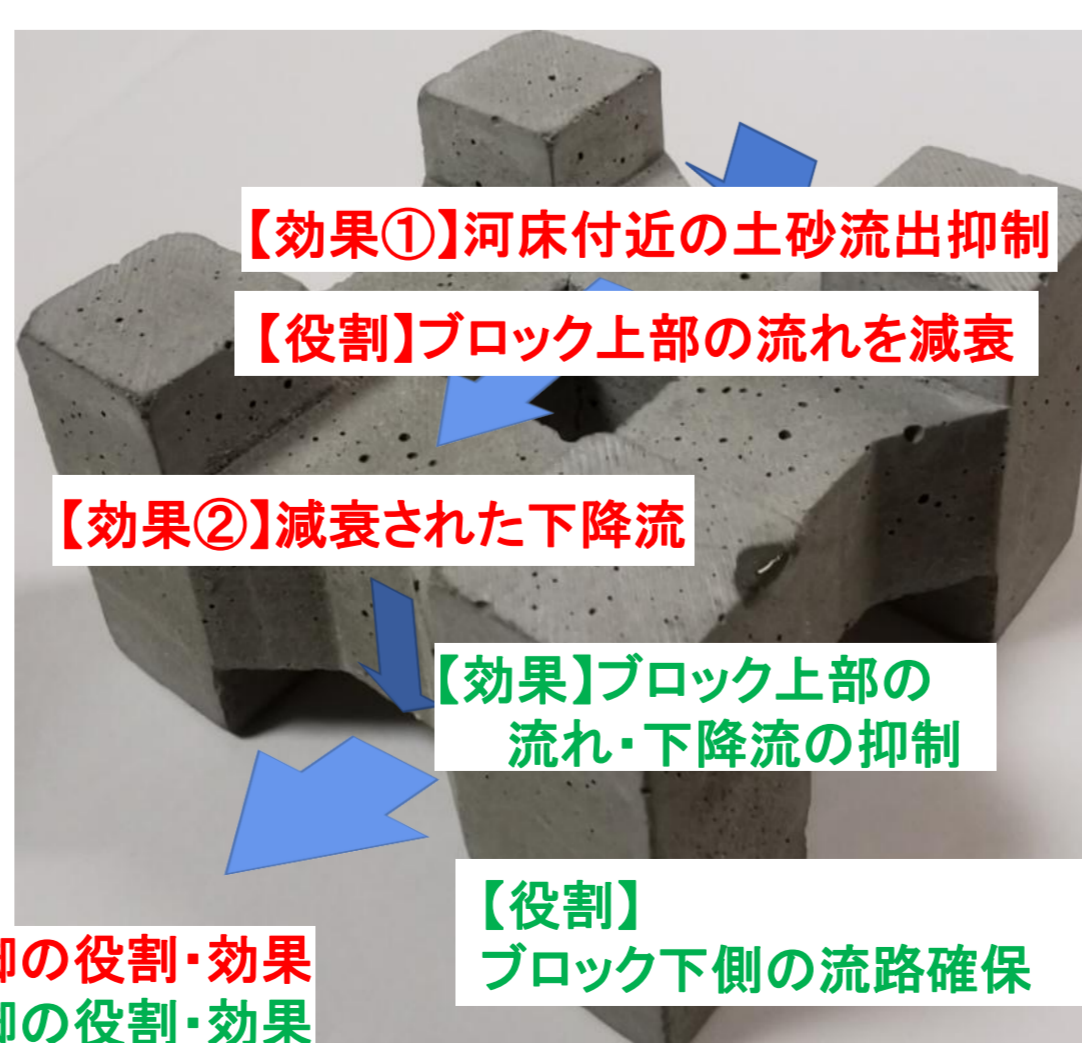


左図は橋脚の上流左岸側における、ブロックと河床の変位のを示している。

さや型ブロックを敷設したケースでは、橋脚周辺の洗掘が進行している。一方、ホロスケヤーを敷設したケースでは、ブロック上流側の洗掘が進行し、橋脚上流側の洗掘は比較的抑制されている。

ホロスケヤーの片側の突起を取り除いたブロックを用いた実験も行った結果、ホロスケヤーの効果が高かった要因としては、右図に示すようなホロスケヤー特有の立体形状が挙げられる。

ブロックの種類によって変状の様子・橋脚の不安定化リスクが異なるため、より詳細な維持管理基準が求められる。

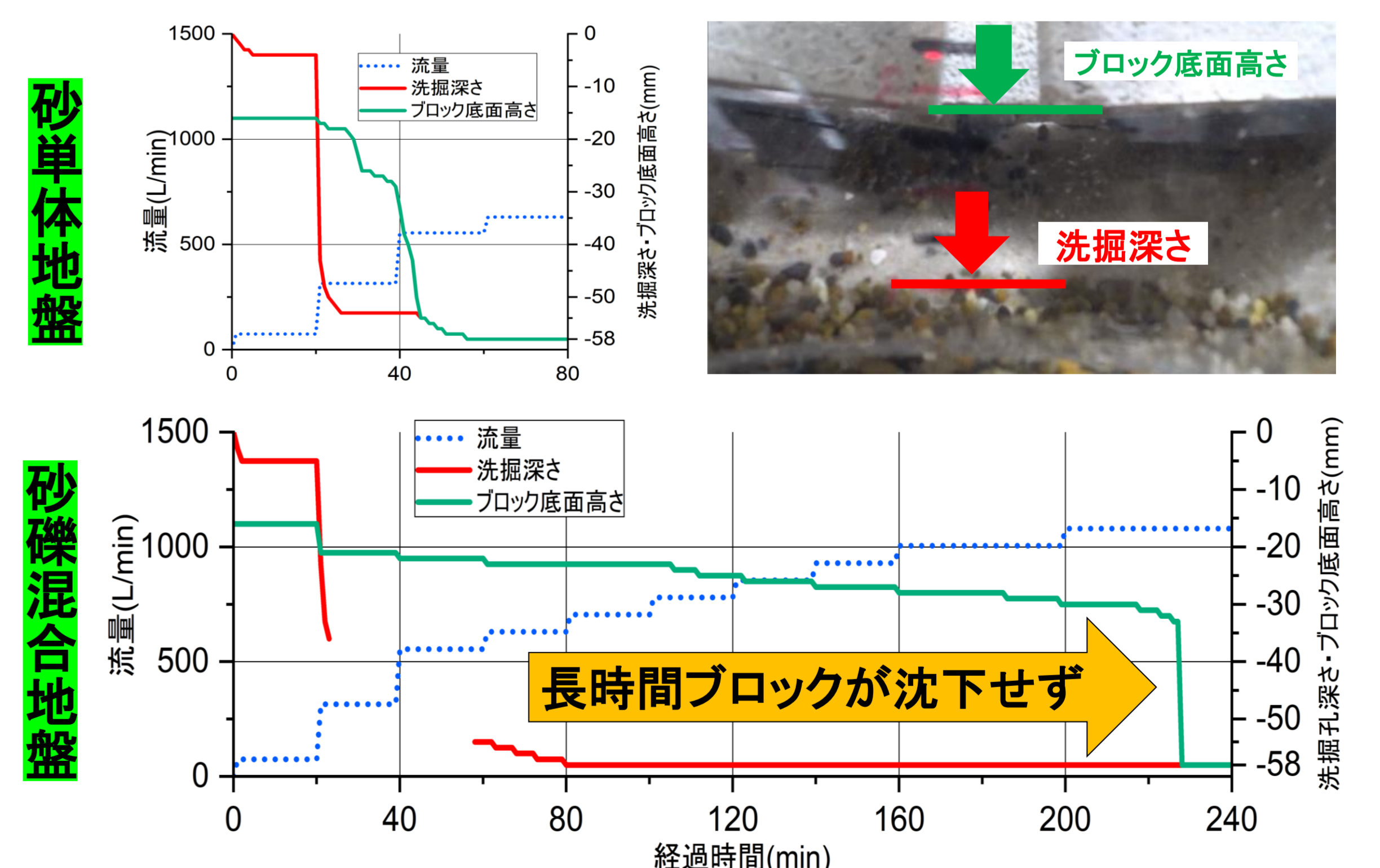


## ②河床材料の違いによる効果の違い

ブロックはさや型ブロックとし、地盤条件を変えた2ケース(4号珪砂(砂単体)・2号珪砂と6号珪砂の重量比1:1混合(砂礫混合))の結果を比較する。

砂単体地盤では橋脚変位が出たのに対し、砂礫混合地盤では橋脚変位が出なかった。

洗掘深さとブロックの底面高さの時間変化をグラフにすると、砂礫混合地盤において、洗掘の進行に対してブロックの沈下が遅れる傾向が確認された。



ブロックの沈下が遅れる要因としては、礫材がブロック同士のすき間に取り込まれているからだと考えられる。



さや型ブロックは、砂地盤より、砂礫混合地盤においてより変状しにくく、より高い効果を発揮する。しかし、ブロックの下に隠れた洗掘孔の発見が難しいなど、維持管理上の課題が考えられる。



# 河川の増水・出水による基礎地盤の局所洗掘現象が橋脚の固有振動数に及ぼす影響



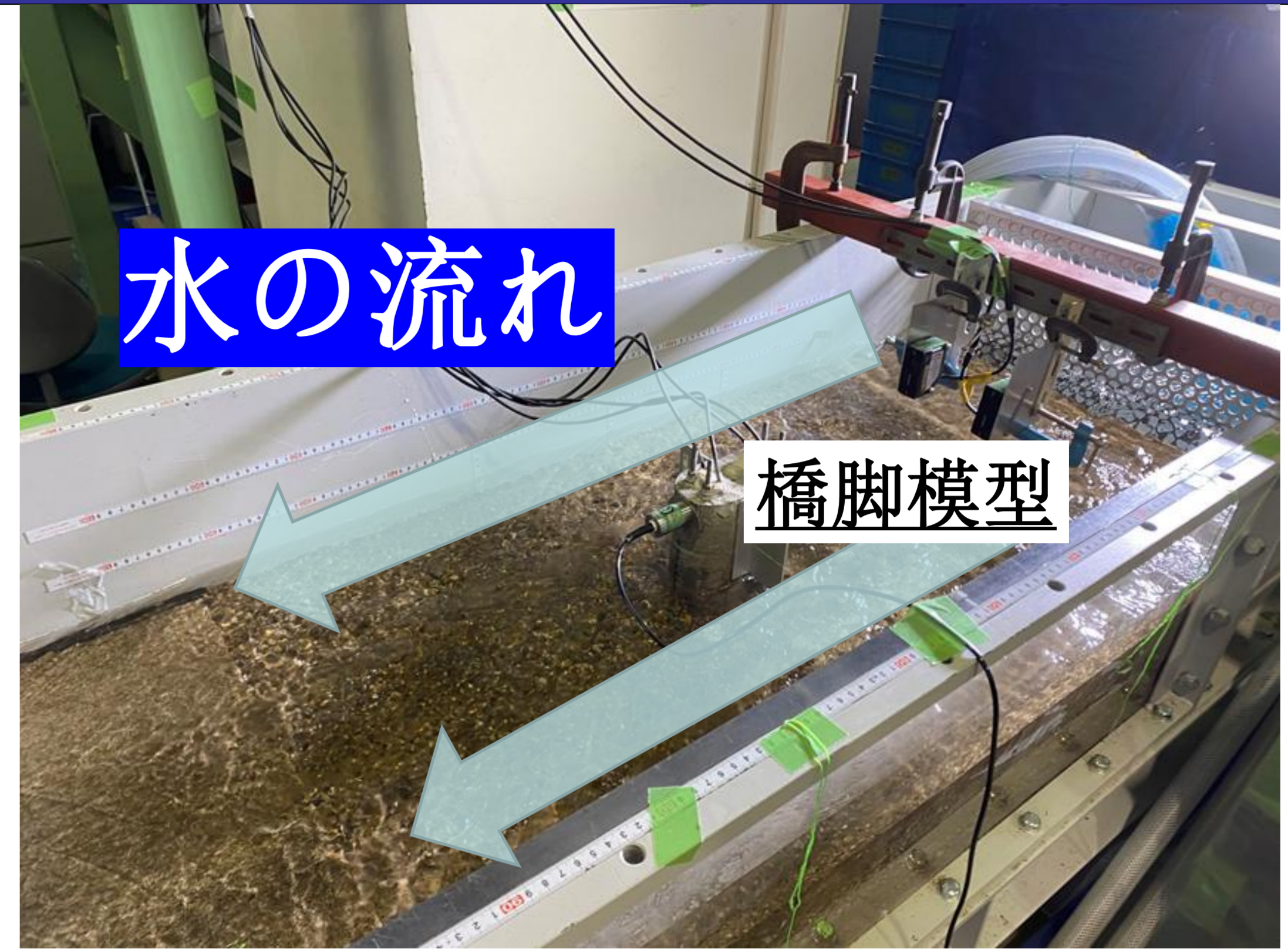
## 新名 航 (2020年度 修士論文概要)

東京大学 工学部 社会基盤学科 土質・地盤研究室

### 概要

近年、台風や豪雨をはじめとする自然災害が多発し、多くの土木構造物が著しい被害を受けている。河川橋脚基礎の洗掘は古くから知られた現象で数多くの被災事例が近年も見られるが、現状の洗掘被災リスクの維持管理指針は必ずしも体系的でなく、この信頼性を向上させるための知見が求められている。

そこで本研究では「洗掘被災リスクの評価をより精緻に行うための1つの知見として、**橋脚の固有振動数と健全度の関係**を定量的に評価すること」を目的とし、出水を模した模型実験を実施した。



### 模型実験の詳細

開水路中に深さ0.17mの河床模型を構築し、水路中央にモルタル製橋脚模型を設置した。洗掘による橋脚の被災事例がセグメント1に立地する橋梁に多く見られることを勘案し、河床勾配は1/400とした。ポンプによって流量を段階的に増加させて、河床模型の洗掘を進行させた。河床模型を構成する材料として、本実験では鹿島珪砂4号、鹿島珪砂5号、鹿島珪砂2号と鹿島4号の混合砂、鹿島珪砂2号と鹿島5号の混合砂の4種類を用い、相対密度を管理した。流量が変化するタイミングでは一旦流れを止め、橋脚模型の上流側天端を打撃して下流側天端に設置した圧電型加速度計により加速度応答を測定した。高速フーリエ変換後のフーリエスペクトルのピークを橋脚模型の固有振動数とした。また、この固有振動数の測定時に橋脚模型近傍の河床高さを目視によって記録し、平均的な残存根入れ深さと固有振動数の関係を定量的に評価した。橋脚模型底面には4分割ロードセルが設置され、橋脚模型直下の地盤反力分布を経時的に測定した。同様にレーザー変位計を用いて橋脚模型の水平方向変位を経時的に測定した。

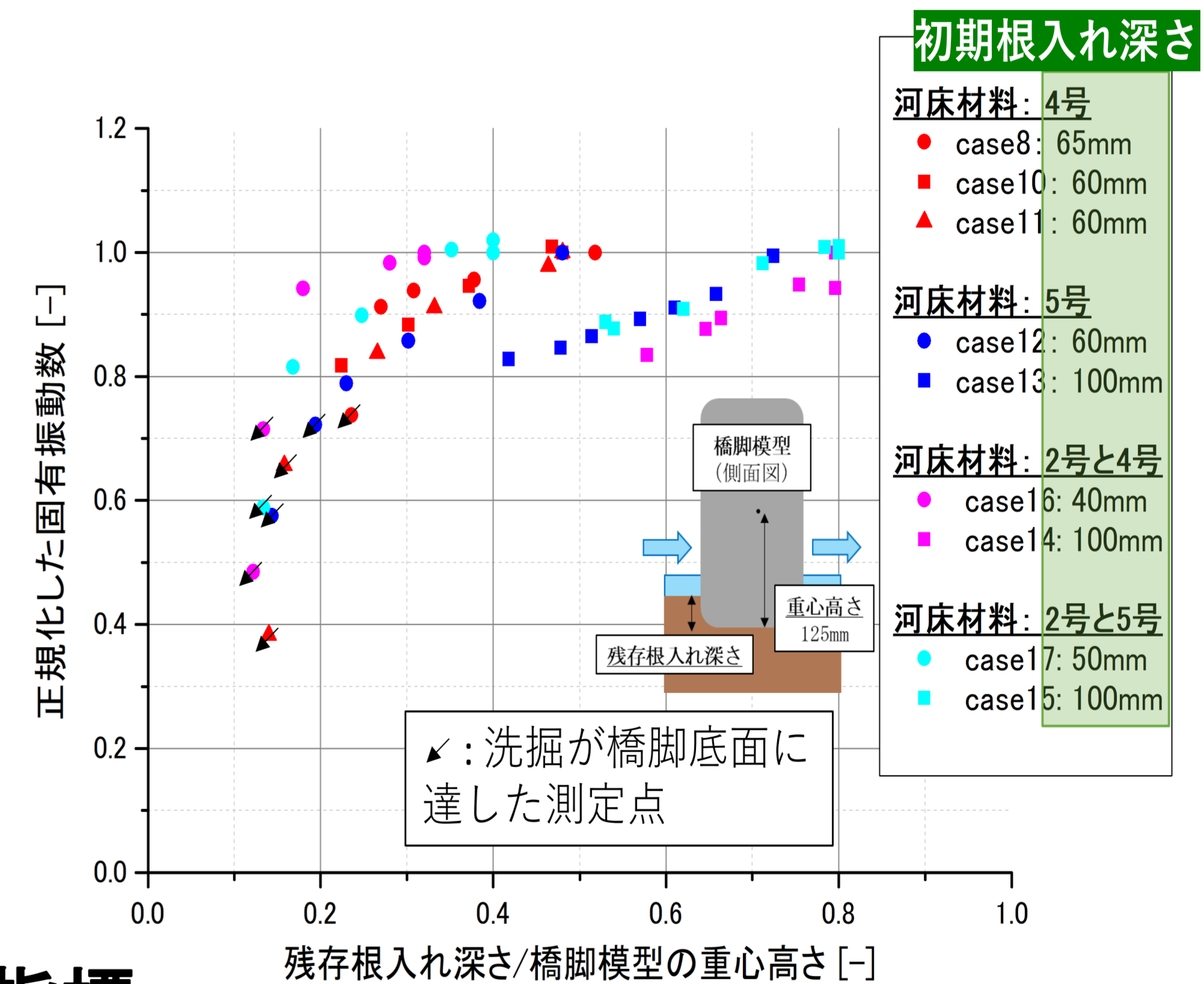
### 残存根入れ深さと固有振動数の関係

橋脚模型の固有振動数は、残存根入れ深さ（橋脚模型の拘束条件）に大きく依存する。これは残存土被りが洗掘・浸食されるにつれ、橋脚模型に対する地盤の水平方向の拘束圧（剛性）が低下するからだと考えられる。特に「残存根入れ深さ/橋脚模型の重心高さ」が約0.2を超えて低下すると、橋脚模型の底面地盤の浸食が始まり橋脚模型長さ方向の有効長さが減少し、固有振動数により鋭敏に影響を与える。

一方で同等の残存根入れ深さで比較した場合、河床材料の種類や相対密度が橋脚模型の固有振動数に与える影響は小さい。これは、橋脚模型の固有振動数が河床材料の違いよりも橋脚模型の拘束条件に大きく依存していることが原因であるからだと考えられる。

### 橋脚模型の不安定化を最も鋭敏に検出する指標

水平方向変位・地盤反力分布・固有振動数のうち、固有振動数が最も鋭敏に洗掘に伴う橋脚模型の不安定化を検出した。次点で地盤反力分布の変化が検出され、それと同程度もしくは少し遅れて橋脚天端の水平方向変位の変化が検出された。これは、固有振動数は橋脚模型近傍の残存根入れ深さ低下による影響を直ちに受けるが、地盤反力分布・水平方向変位は残存根入れ深さが十分に消失し橋脚模型の底面が露出してはじめて変化することが原因であると考えられる。

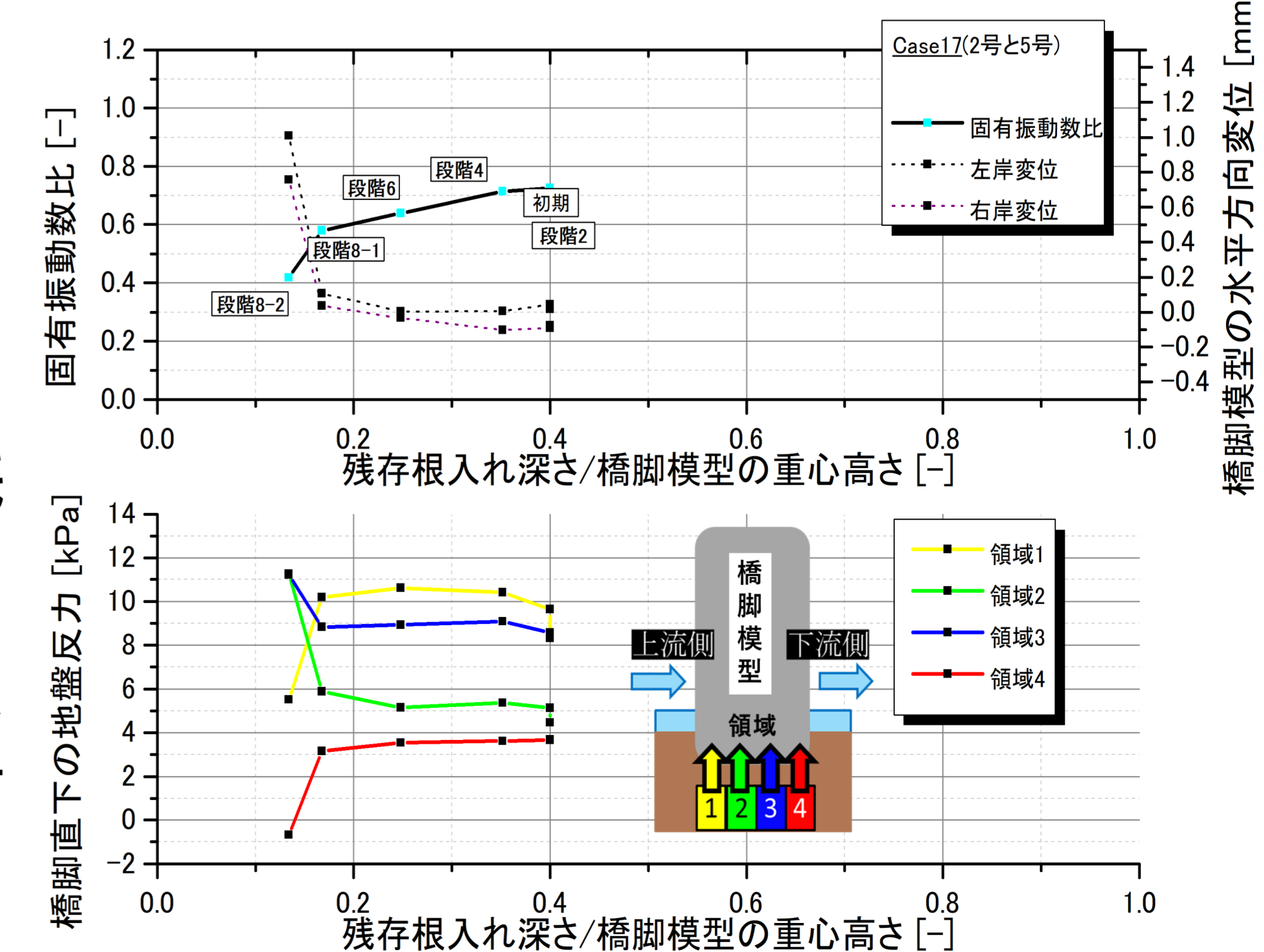


試験材料	相対密度Dr = 79% 時の密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	相対密度Dr = 90% 時の密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	D <sub>50</sub> , 平均粒径 [mm]
4号	1.549	1.575	0.74
5号	1.692	-	0.31
2号と4号	1.679	-	1.3
2号と5号	1.889	-	0.74

### 河床材料の諸元

Case	河床材料	根入れ深さ/橋脚幅(70mm)[-]	相対密度 [%]	実験前の固有振動数[Hz]
Case8	4号	0.93 (65mm)	79	34.3
Case10	4号	0.86 (60mm)	79	42.8
Case11	4号	0.86 (60mm)	90	44.9
Case12	5号	0.86 (60mm)	79	43.6
Case13	5号	1.43 (100mm)	79	54.1
Case14	2号と4号	1.43 (100mm)	79	57.6
Case15	2号と5号	1.43 (100mm)	79	57.1
Case16	2号と4号	0.57 (40mm)	79	36.1
Case17	2号と5号	0.71 (50mm)	79	40.6

### 実験の概要





# 河川橋脚基礎における洗掘現象の進行および橋脚の不安定化に関する検討

仁ノ平 直樹

(2019年度 卒業論文概要)

東京大学 工学部 社会基盤学科 土質・地盤研究室



## 背景

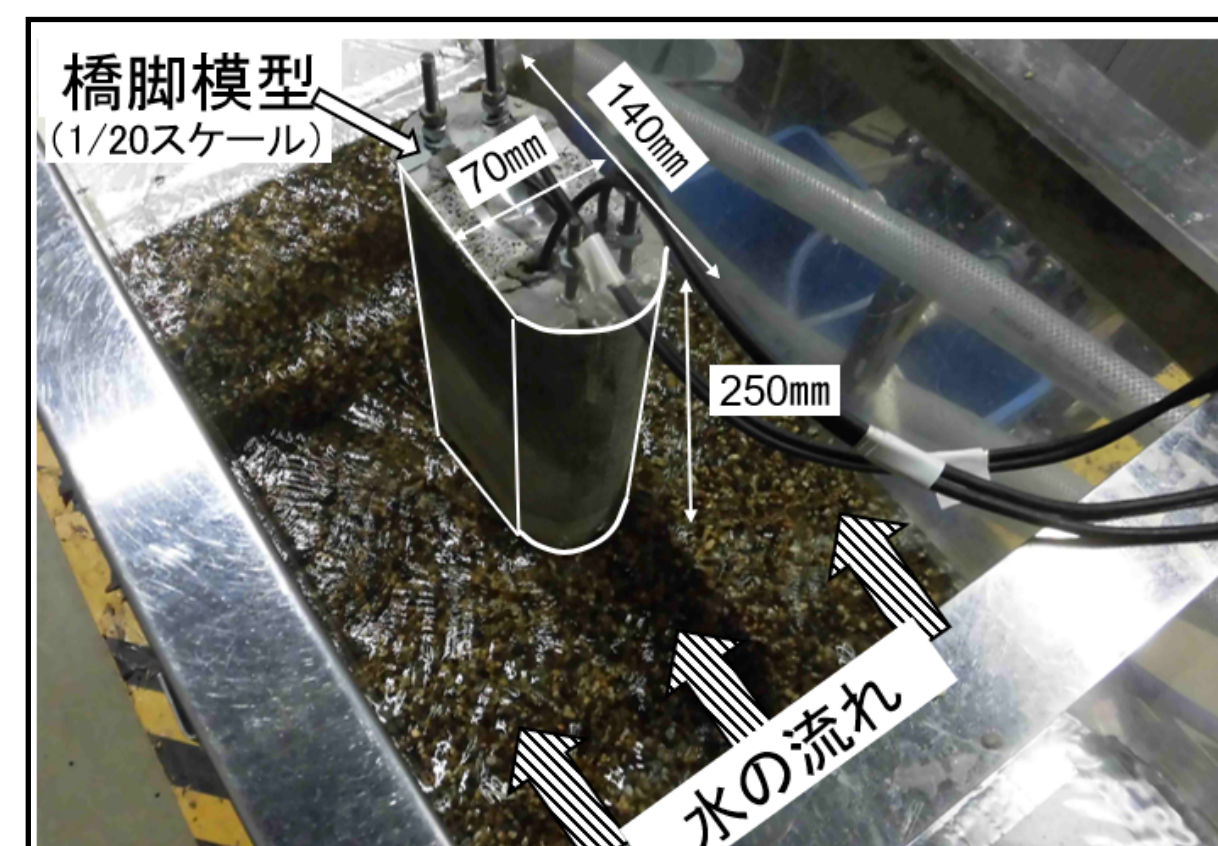
近年、降雨状況の変化などに伴い、洗掘により昭和初期までに建てられた旧式橋梁の橋脚が倒壊する事例が増えている。そこで本研究では洗掘現象に及ぼす河床材料の影響を調べるため、河床材料を変えた模型実験を行った。



## 模型実験の概要

水路中に河床模型を構築し、その上に橋脚模型を設置して水を流し、地盤反力及び橋脚模型の水平変位を測定する実験を行った。流量は4つのポンプによって段階的な調整が可能である。礫材と珪砂の混合比が異なる6種類の材料を用いて実験を行った。なお、各ケースは根入れ深さ30mm、相対密度79%で統一されている。

## 小型水路

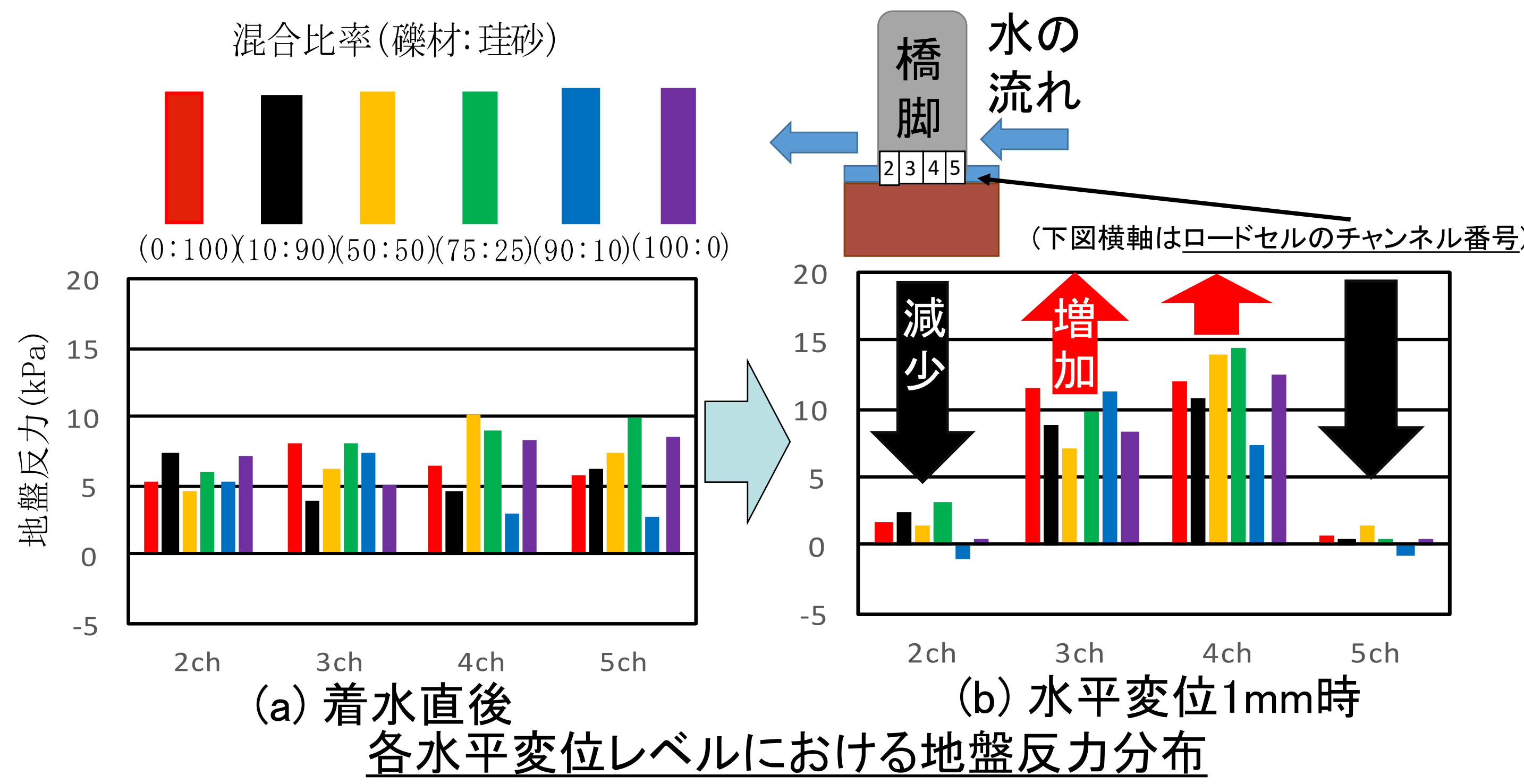


実験の様子

## 全実験ケース

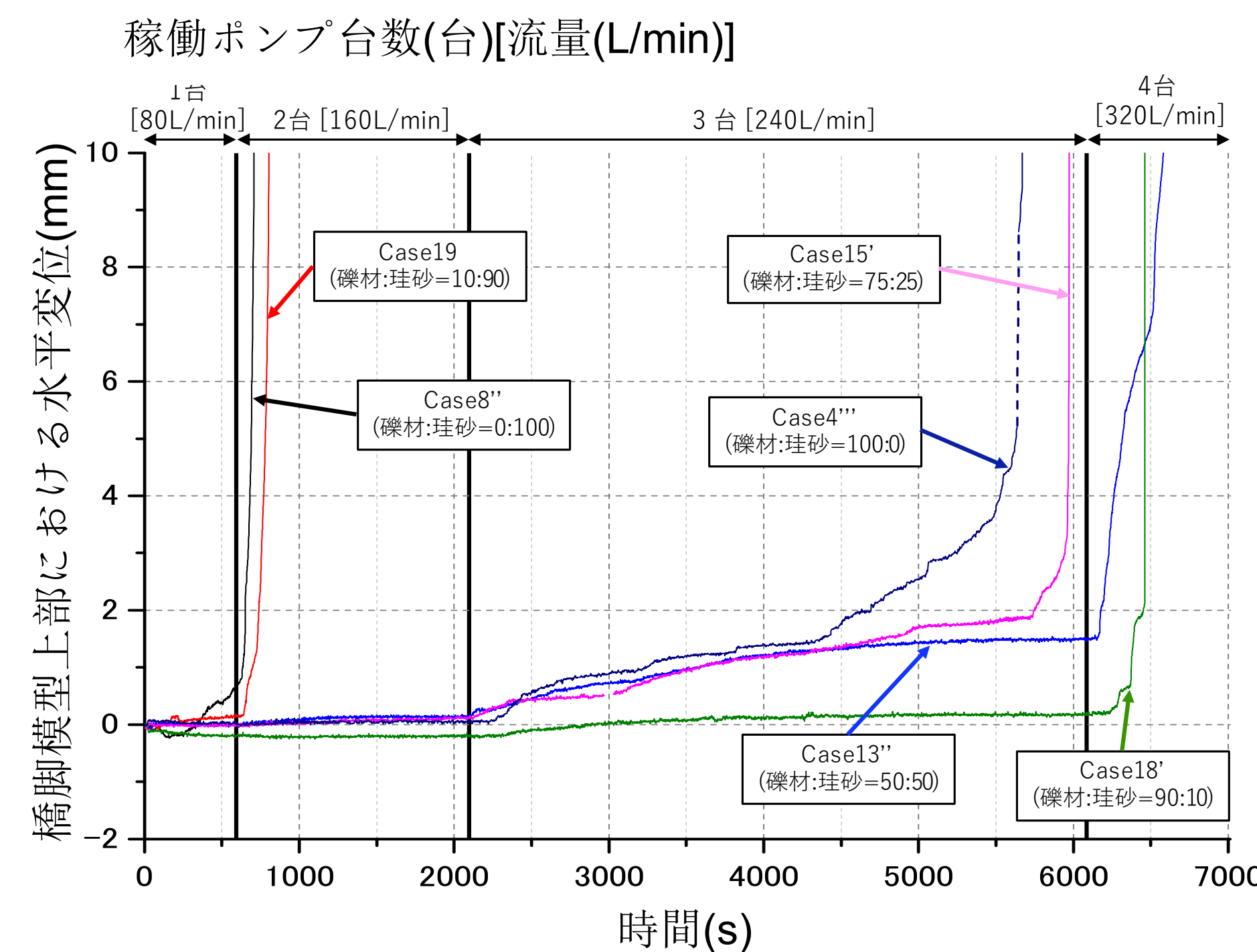
ケース番号	試料概要	最大密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	最小密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	最大間隙比	最小間隙比	乾燥密度 [g/cm <sup>3</sup> (Dr=79%)	間隙比 (Dr=79%)
case8"	珪砂7号	1.524	1.178	1.235	0.728	1.435	0.834
case19	混合土 (礫材:珪砂=10:90)	1.599	1.298	1.029	0.647	1.525	0.727
case13"	混合土 (礫材:珪砂=50:50)	1.781	1.563	0.689	0.482	1.73	0.526
case15"	混合土 (礫材:珪砂=75:25)	1.929	1.566	0.688	0.370	1.839	0.437
case18"	混合土 (礫材:珪砂=90:10)	1.771	1.541	0.717	0.494	1.717	0.541
case4"	礫材	1.640	1.480	0.790	0.610	1.604	0.651

## 河床材料が地盤反力分布に与える影響



小変位で地盤反力は底面の中央部(3ch,4ch)に集中し、端部(2ch,5ch)の地盤反力は0kPaに収束することがわかった。また、洗掘により橋脚模型が不安定化する過程では地盤反力分布の変化の特徴は河床材料の種類にあまり依存しないことが示唆された。

## 河床材料が橋脚の安定性に与える影響



橋脚模型上部における水平変位の時刻歴

相対密度を一定とした条件下では、礫材単材料(case4)に比べ、礫材に少し珪砂を混合した混合土の方が洗掘抵抗性が大きいことがわかった。これは、礫材単材料に比べ混合土の方が、粒子同士のかみ合わせが良くなるためであると考えられる。また、粗粒土の混合割合も河床の洗掘抵抗性に大きな影響を与えることがわかった。

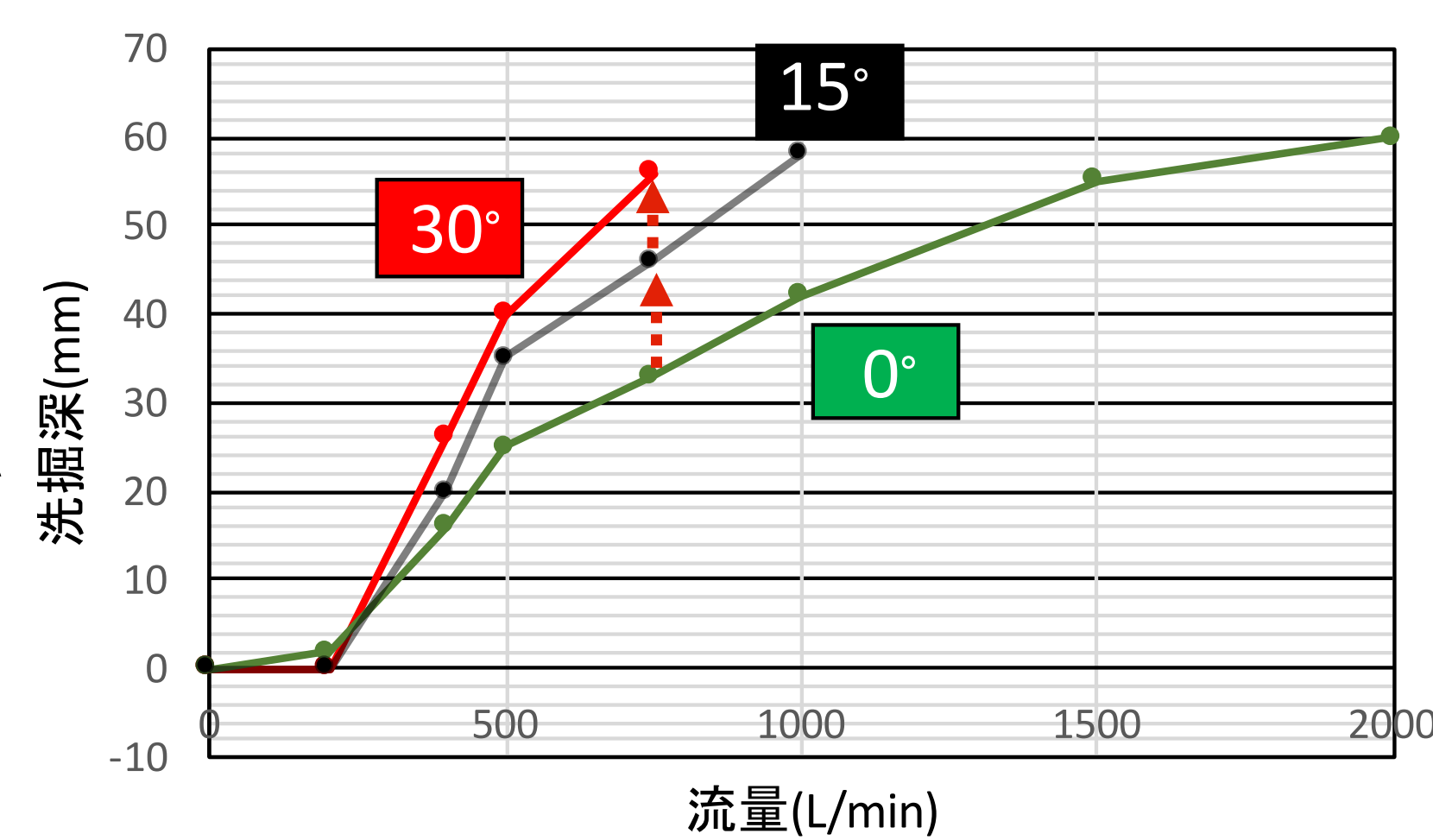
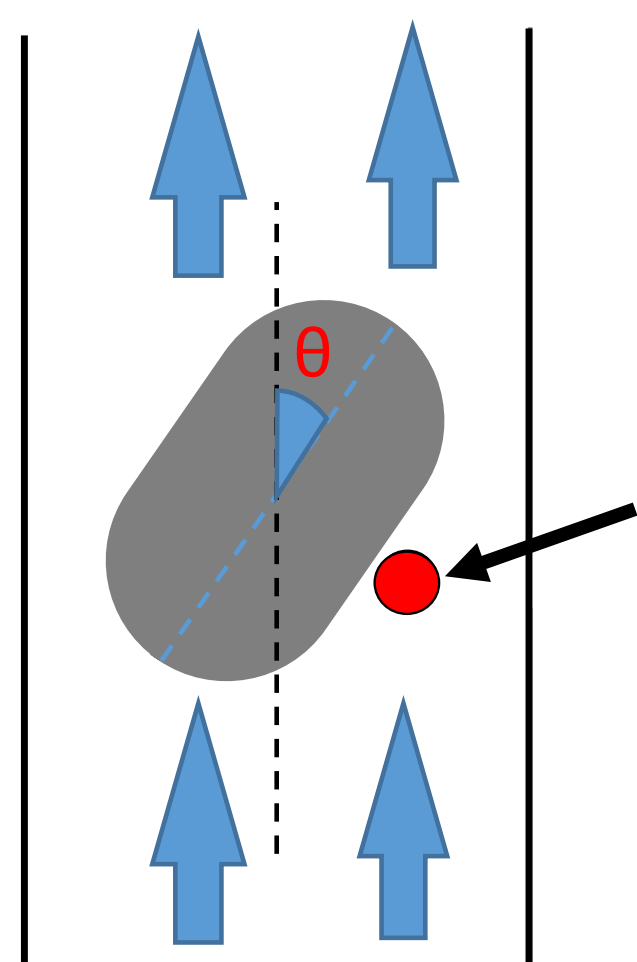
## 模型実験の概要

水路中に河床模型を構築し、その上に橋脚模型を設置して水を流し、洗掘深さ及び橋脚模型の水平変位を測定する実験を行った。流量は電磁弁の調整により調節可能であり各流量においてそれぞれ約20分経過後に次の流量にあげるといった操作を繰り返した。またこの実験を桁の有無や橋脚模型の設置角度等の条件を変化させて計7ケース行った。

## 橋脚の角度が洗掘深さに与える影響

水の流れに対する橋脚の角度は橋脚の安定性や洗掘の進行程度に大きな影響を与えることがわかった。

- 0° → 0.53m/s で倒壊
- 15° → 0.45m/s で倒壊
- 30° → 0.43m/s で倒壊

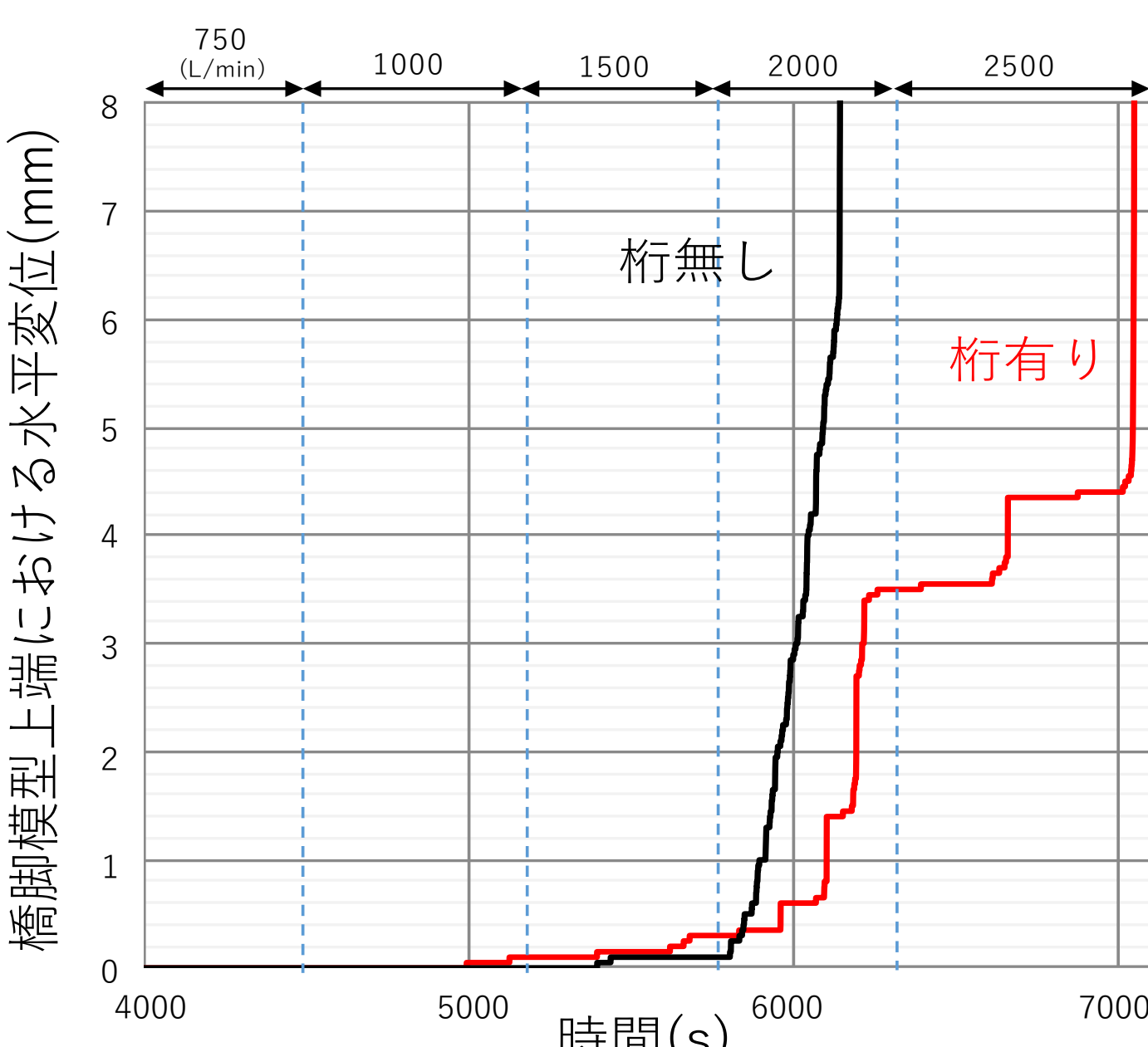


橋脚模型の設置角度と洗掘深の関係



## 桁拘束が橋脚の安定性に与える影響

桁拘束により橋脚模型の上流側への水平変位は小さくなることがわかった。これは、桁拘束の有無で洗掘深に変化は見られなかったことを考慮すると、桁拘束がある実橋梁の場合、水平変位が大きくない段階でも洗掘は十分に進行している可能性があることを示唆している。



橋脚模型上部における水平変位の時刻歴

## まとめ

- 相対密度が一定の場合、地盤反力の変化の特徴は河床材料の種類にあまり依存しないが洗掘抵抗性は河床材料の種類に大きく依存することが示唆された。
- 橋脚の角度や桁の有無は洗掘の進行程度や橋脚の安定性に大きな影響を与えることがわかった。

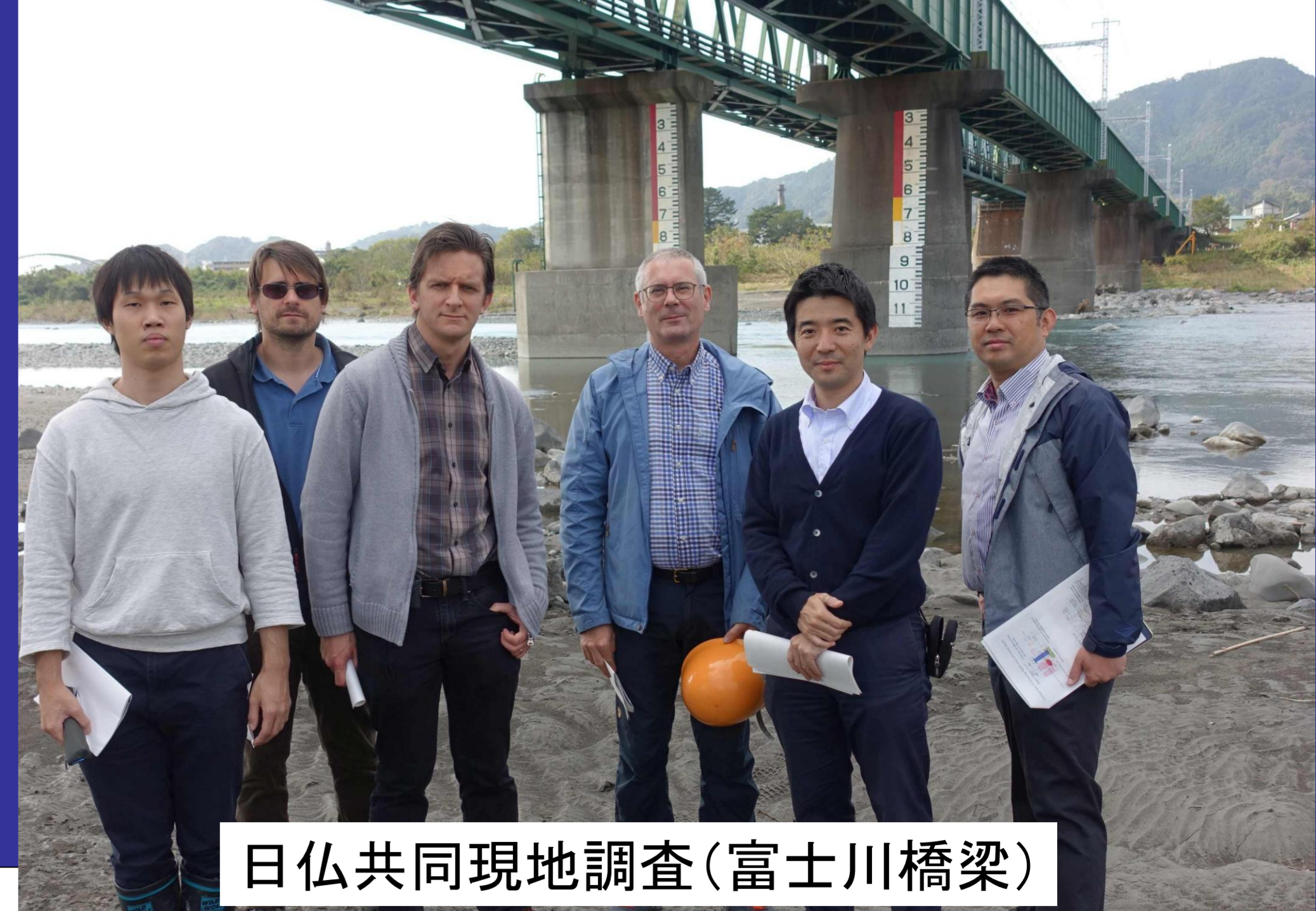


# 出水により洗掘被害を受けた河川橋脚基礎の支持力低下特性の検討



新名 航  
(2018年度 卒業論文概要)

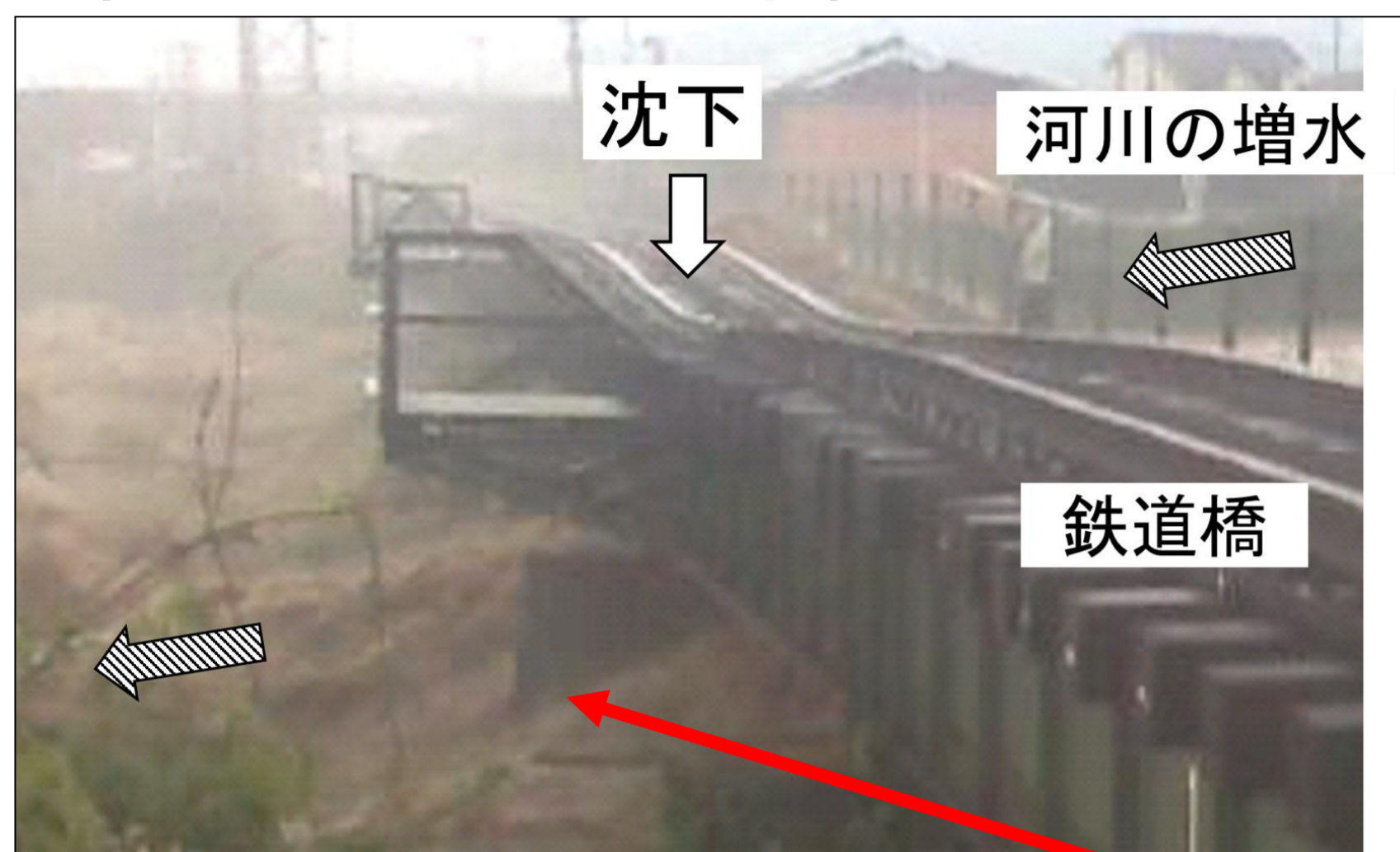
東京大学 工学部 社会基盤学科 土質・地盤研究室



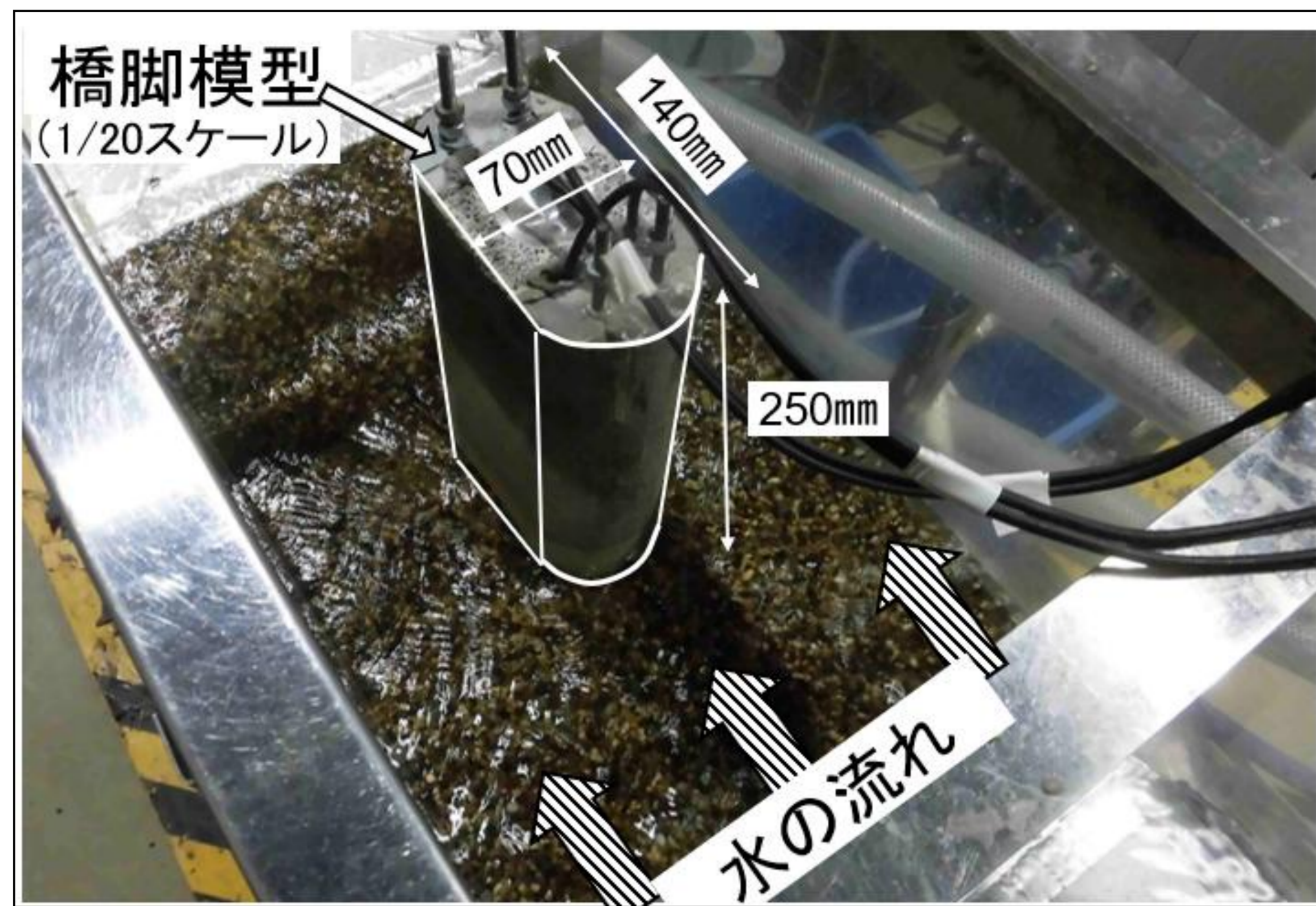
日仏共同現地調査(富士川橋梁)

## 概要

近年、洗掘により多くの土木構造物が著しい被害を受けている。洗掘現象を地盤工学的な観点から考察するため、本研究では、洗掘過程にある橋脚および橋脚基礎の挙動を定性的に理解することを目的とし、橋脚模型の根入れ深さと河床模型の地盤材料を変化させた模型実験を行った。



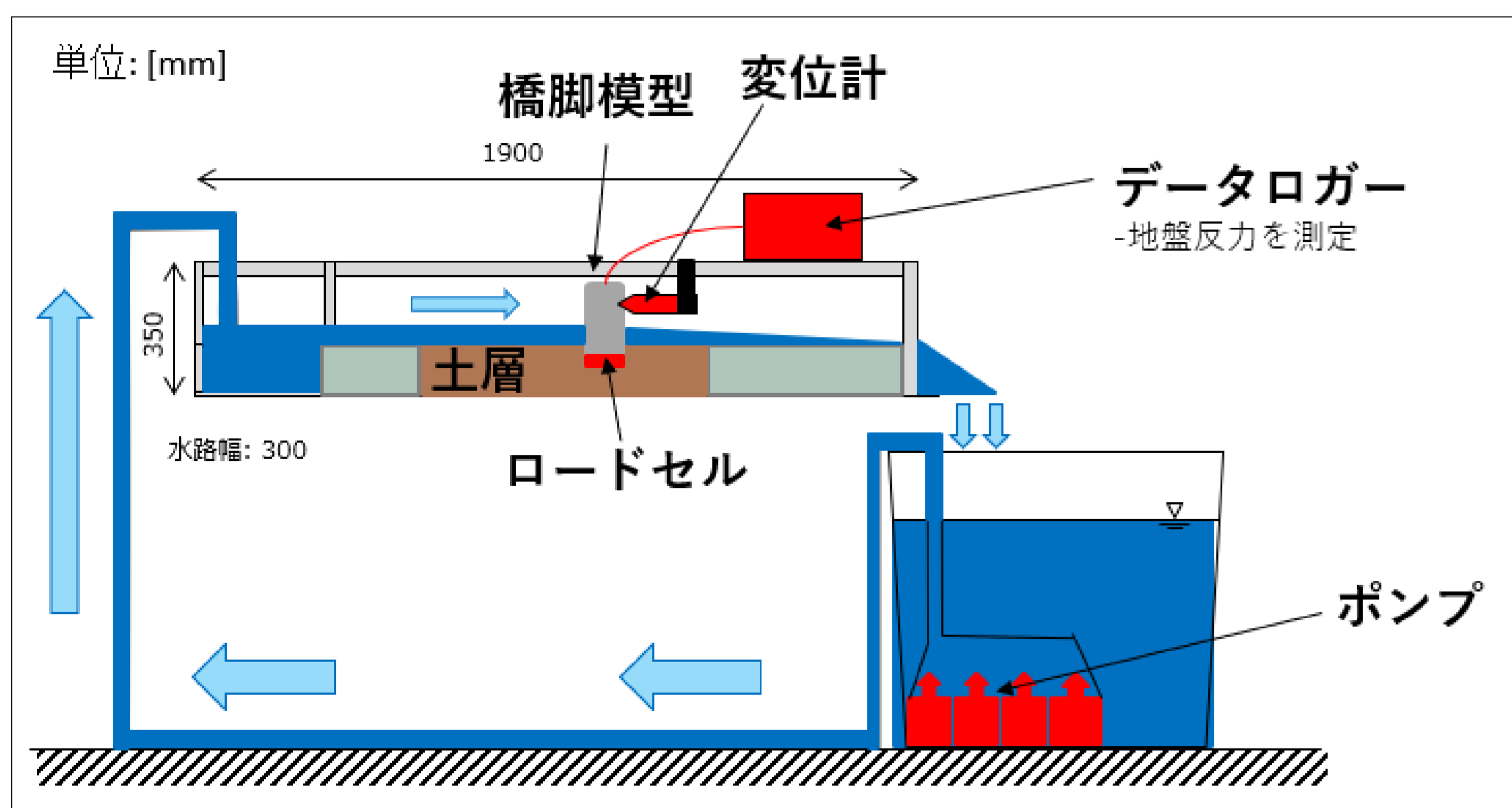
洗掘被災の事例



実験の様子

## 模型実験の詳細

本研究では、水路中に基礎地盤を模した河床模型を構築し、その上に橋脚模型を設置して水を流し続けながら地盤反力を測定する実験を行った。地盤反力は橋脚底部に取り付けられたロードセルによって測定されている。ロードセルは奥行き方向に4つの領域に分割されており、傾斜の進行に伴って地盤反力分布が変化していく様子を検出することができる。また、橋脚の下流側には変位計が設置されており、水平方向の変位を検出することができる。橋脚の根入れ深さが0mm, 10mm, 20mm, 30mmのケースを、河床模型にそれぞれ礫材と珪砂7号を用いたものについて計8ケース行った。



実験装置の概要図

ケース	地盤材料	根入れ深さ[mm]
Case-1	礫材	0(平置き)
Case-2		10
Case-3		20
Case-4		30
Case-5	珪砂7号	0(平置き)
Case-6		10
Case-7		20
Case-8		30

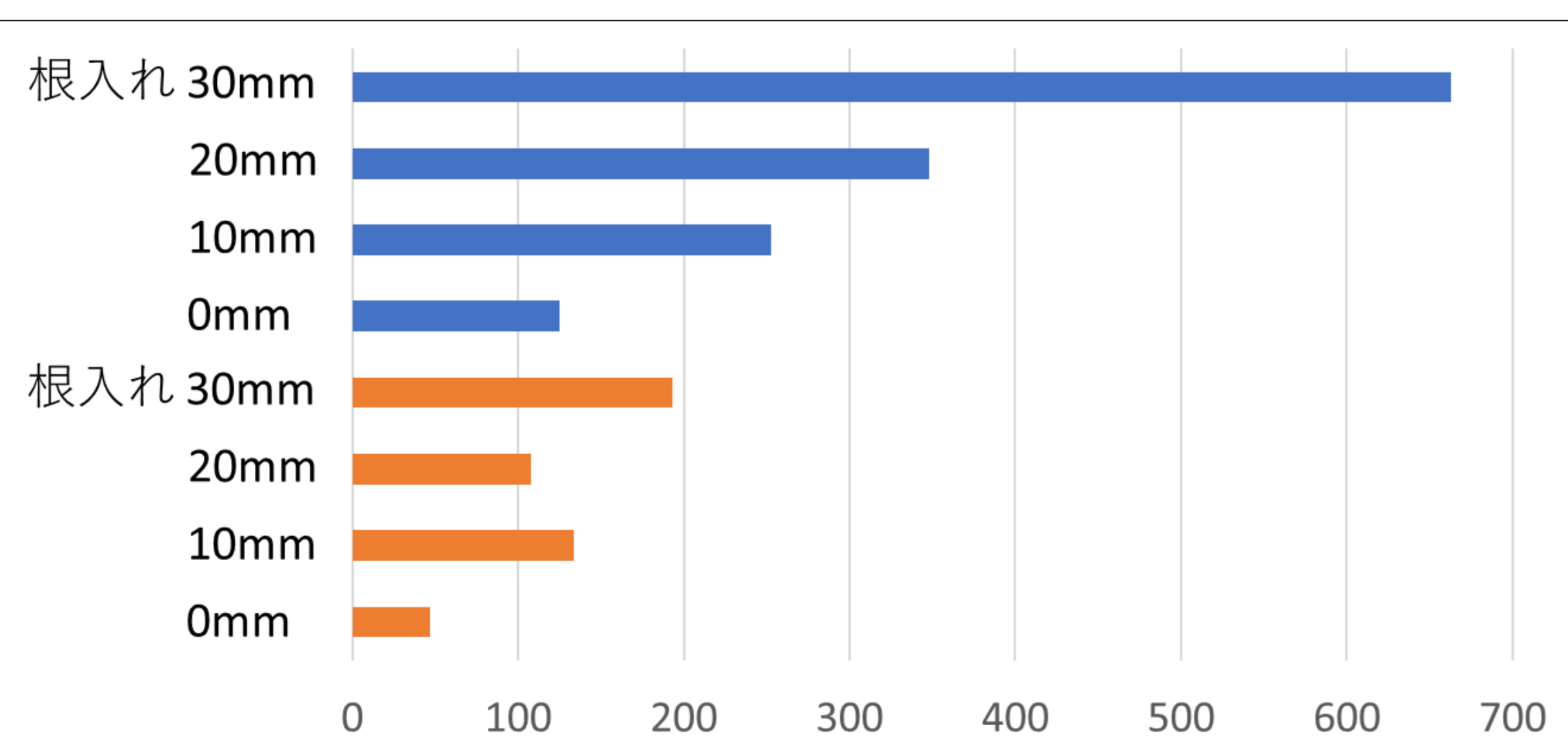
全実験ケース



分割ロードセル

## 浸食時間の違い

珪砂の一部ケースを除いて、橋脚の根入れを深くすると洗掘にかかる時間は長くなる傾向が観察された。また、河床模型に礫材を用いた場合と珪砂7号を用いた場合を比較すると、前者のほうが洗掘にかかる時間は長くなる傾向にあった。珪砂7号の一部ケースの逆転については、橋脚近傍における河床模型の締固め精度のばらつきなどが原因としてあげられる。

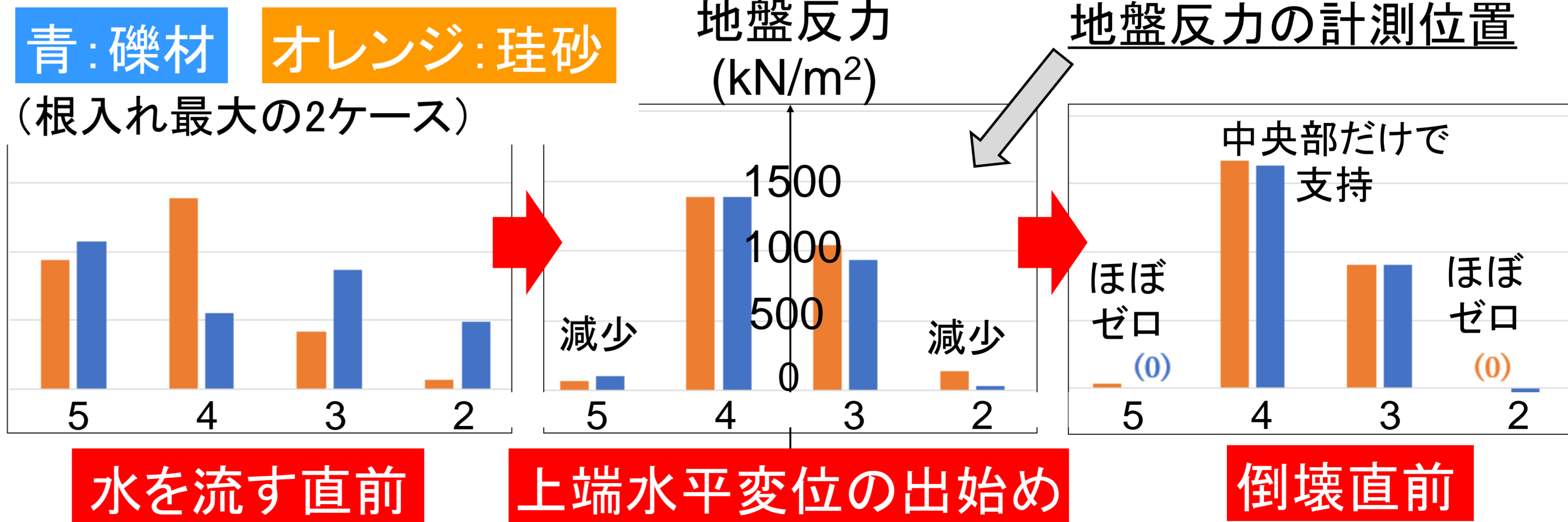


横軸は橋脚の不安定化から倒壊までの時間[s]

(青: 河床材料が礫材, オレンジ: 河床材料が珪砂7号)

## 地盤材料が地盤反力分布に与える影響

根入れを統一して地盤材料を変化させた2ケースを比較する。水を流す直前には地盤反力の違いはあったが、洗掘により基礎地盤の浸食が進むにしたがって、最終的には同じような地盤反力分布に落ち着く様子が観察された。これは、洗掘の進行過程における地盤反力分布の変化は、地盤材料によらないことを示唆している。



洗掘の進行段階における地盤反力分布の比較。

## まとめ

洗掘により、つま先部とかかと部の地盤反力が大きく減少し、橋脚は不安定化する。この傾向は河床材料に寄らないが、不安定化に至るまでに要する時間は河床材料・根入れ深さによって大きく異なる。