

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14824

研究課題名（和文）水理模型実験に用いる地盤材料の相似性と破壊モードへの影響分析による実験手法の革新

研究課題名（英文）Enhancements in Experimental Methods for Failure Mode Analysis Considering Geomaterial Similarity in Hydraulic Model Test

研究代表者

松田 達也（Matsuda, Tatsuya）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：50736353

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：重力場模型実験において異なるスケールのもと、3つの砂材料を用いた実験を実施した。遠心力場模型実験では遠心加速度を変化させながら実験を実施した。重力場における大型模型実験結果を基準に実験結果を比較したところ、浸透破壊に至るまでのプロセスは、土粒子へ作用する水平方向の流体力と鉛直方向の重力による比がフルード則に従うように考慮した粒径の地盤材料を用いることで地盤変状が生じる水位差や破壊に至る最大水位差は相似性を有することが明らかとなった。遠心力場実験では既往の知見のとおり、粘性流体を用いることで浸透破壊に至るまでのプロセスが統一され、Modeling of Modelsが成立することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は豪雨・洪水による河川構造物の被害、高波浪・津波による海岸・港湾構造物の被害メカニズム解明に向けた流体・地盤連成問題に関する基礎的な要素が含まれており、本研究成果で得られた知見は、激甚化する自然災害による構造物等の被災メカニズムの解明における模型実験の精度向上に繋がると考える。また、将来的には重力場水理模型実験において流体・地盤・構造物の相互作用による連成問題の定量的評価に向けた相似条件の検討へと拡張・応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Three different scale of the model experiments in the gravity field were carried out. In the centrifuge model experiment, the centrifugal acceleration was varied. The results were compared with the results of the large model experiment in the gravity field, and it was found that the processes leading to seepage failure were similar in terms of the water level difference that causes ground deformation and the maximum water level difference that leads to failure, when the grain size of the soil material was considered so that the ratio of horizontal fluid force acting on the soil particles to vertical gravity follows the Froude's law. The results of the centrifuge model experiments showed that the water level difference that causes ground deformation and the maximum water level difference that leads to failure is similar. In the centrifuge experiments, it was confirmed that the process of seepage failure is unified by using a viscous fluid and that the Modeling of Models is valid.

研究分野：地盤工学

キーワード：模型実験 浸透破壊 相似則 地盤材料

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

河川工学または海岸工学分野で取り扱う水理模型実験では、主としてフルード相似則を用いて実物と模型で相似性を合わせることが多い。局所的な土砂輸送特性に基づく洗掘と堆積現象を対象とした重力場の水理模型実験では、移動床に用いる地盤材料をフルード相似則に従って幾何縮尺を厳密に適用すると、例えば現地が砂地盤である場合、縮尺比によっては模型で用いる地盤材料がシルトや粘土サイズに該当してしまう。砂と粘土では材料性状が異なることから、実験で得られた結果が現地の現象を適切に再現できないことが容易に想定できる。そのため、これまでの水理模型実験では現地と同等の地盤材料を用いる手法や同質でできるだけ小さな材料を用いる手法、材料密度が現地の地盤より小さい材料を用いる手法により検討が行われてきた。

申請者は近年、重力場造波水路実験において波浪による土砂移動現象に関する基礎的研究を実施している。研究背景として、三浦ら(2004)における多孔質弾性地盤を対象とした波浪による海底地盤の変形挙動、有効応力変動に関する動的解析(以下、数式解)の結果、波浪の進行方向と逆向きに海底砂が漂いながら移動(漂砂)する可能性が示されており、波浪場における土砂移動は表層流速による底面せん断力(掃流力)と地盤内水圧変動による浸透力の両者を考慮する必要が示唆されているためである。申請者らの実験(松田ら(2017))では、流体場はフルード相似則に従い、地盤材料の選定には土粒子の沈降速度がフルード相似則に従うように粒径を決定する方法(以下、Dean Number)を適用した条件で実施した。実験の結果、波浪による地盤内の有効応力変化を数式解と比較すると、Prototypeの地盤材料に近い材料(豊浦砂)を用いた場合は数式解との乖離が見られ、一方で、Dean Numberを適用した材料(珪砂8号)の場合は地盤深度の各点において数式解との整合性があることが明らかとなった。さらに、表層地盤付近の有効応力が低下するタイミングで波の進行方向と逆向きの流速が卓越し、画像解析結果より表層粒子が個々で移動する現象に加え、ある深さまで地盤が層単位で変動する様子を捉えることに成功した。

上述より、移動床を対象とした水理模型実験では適切な相似関係に則って地盤材料を選定しなければ、実現象と相似な現象を模型実験において再現できないことを示した。しかしながら、現状では地盤材料の選定に関する相似則に関する研究が不十分であり、単純化した現状をもとに相似則を考察し、基準化を図る必要がある。

三浦均也, 浅野信吾, 大塚夏彦, 上野勝利: 波浪に対する海底地盤応答の連成解析のための地盤の定式化, 地盤工学シンポジウム論文集, Vol.49, pp.233-240, 2004.

松田達也, 三浦均也, 佐藤隼可, 諫山恭平, 澤田弥生: Dean Numberを適用した移動床造波水路実験における地盤内水圧応答, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73, No.2, pp.I_1117-I_1122, 2017.

2. 研究の目的

本研究の目的は、流体 - 地盤連成問題に関する重力場の水理模型実験を対象に、

- (1) 流体 - 地盤連成問題に関するシンプルな事象を対象とした各種模型実験(重力場大型・小型、遠心力場)を実施し、取り扱う地盤材料による現象の違いについて分析する。
- (2) (1)の実験データをベースに、地盤材料の取扱いに関する相似則について取りまとめる。特に、考慮すべき相似性と緩和が可能な相似性およびその程度について、判断方法および指標を提案する。

ことである。

本研究では、流体 - 地盤連成問題に関するシンプルな事象を対象とした模型実験において、取り扱う地盤材料による現象の違いについて分析することで、得られた実験データをベースに、地盤材料の取扱いに関する相似則について取りまとめ、指標を提案することである。対象とする現象を「矢板周りの浸透破壊現象」とする。本事象は地盤工学における「土の透水」において古典的かつ基礎的な現象であり、既往の知見が多く得られている現象である。主として矢板によって生じた水頭差による地盤内の水流を考え、浸透力による浸透破壊の照査を行う。すなわち、浸透破壊の生起判定に関する極限状態での照査を行うものである。しかし、実際は水理学的知見による流れと土粒子の移動、地盤工学的知見による浸透力と有効応力変化が融合した進行的破壊現象が生じる現象である。地盤工学分野ではこれまでピーク時での破壊判定が主であり、模型実験においても破壊に至るまでの力学挙動に着目した相似則に則った検討が行われてきた。よって、模型実験における崩壊挙動を評価するための地盤の相似性に関する検討はこれまで不十分である。そこで、本検討は「ポスト破壊」における挙動において重要なファクタなどを検討すべく、既往の知見を尊重したうえで、新しい発展性を有しており、古くてかつ新しい課題と考える。

本研究は豪雨・洪水による河川構造物の被害、高波浪・津波による海岸・港湾構造物の被害メカニズム解明に向けた流体 - 地盤連成問題に関する基礎的な要素が含まれており、本研究結果で得られた知見は、激甚化する自然災害による構造物等の被災メカニズムの解明における模型

実験の精度向上に繋がると考える。また、将来的には重力場水理模型実験において流体 - 地盤 - 構造物の相互作用による連成問題の定量的評価に向けた相似条件の検討へと拡張・応用が期待できる。

3. 研究の方法

本研究では「矢板周りの浸透破壊現象」を対象とし、相似則に則った重力場および遠心力場での模型実験を実施する。実験では地盤条件（地盤材料の種類、地盤の密度、飽和度等）を実験パラメータとし、以下の点に則って実験データを取得し、詳細なデータベースを構築することを目指す。

- 矢板を隔てて生じた水位差に伴って生じる浸透力による地盤の有効応力変動等を評価する。古典的な地盤工学の知見をもとに浸透破壊の生起条件について評価する。
- 砂面計で地表面の変状を計測するとともに、高速度カメラおよびビデオカメラで断面における地盤の変形を計測し、地盤材料による変形の違いを定量的に評価する。
- 浸透破壊後の地盤変状、土砂輸送過程を高速度カメラで捉え、崩壊後の様子について定量的に分析する。特に、地盤材料による土砂輸送現象への影響を明らかとする。

得られたデータベースをもとに、地盤材料の取扱いに関する相似則についてまとめる。特に、考慮すべき相似性と緩和が可能な相似性とその程度について判断方法および指標をとりまとめる。

4. 研究成果

模型実験の概要

実験装置の概略図を図-1 に示す。本研究では、重力場においてスケールが異なる大型、中型小型模型を用いて実験を実施した。大型実験をプロトタイプとし、小型および中型実験を縮尺模型として現象の再現性を検討した。ここで、小型模型は大型模型に対し 1/8 スケール、中型模型は大型模型に対し 1/2 スケールである。加えて、遠心力場において前述の小型模型スケールでの実験を実施し、遠心加速度を変えた実験を実施した。模型装置の寸法を表-1 に示す。地盤材料は珪砂 8 号 ($D_{50} = 0.109 \text{ mm}$)、珪砂 7 号 ($D_{50} = 0.168 \text{ mm}$)、豊浦砂 ($D_{50} = 0.189 \text{ mm}$) を用い、相対密度 $D_r = 40 \%$ 、相対密度 $D_r = 80 \%$ の地盤条件とした。外力はフルード則に則った流量（大型： $242.7 \text{ cm}^3/\text{s}$ ；中型： $42.9 \text{ cm}^3/\text{s}$ ；小型： $1.29 \text{ cm}^3/\text{s}$ ）で上流側に注水した。

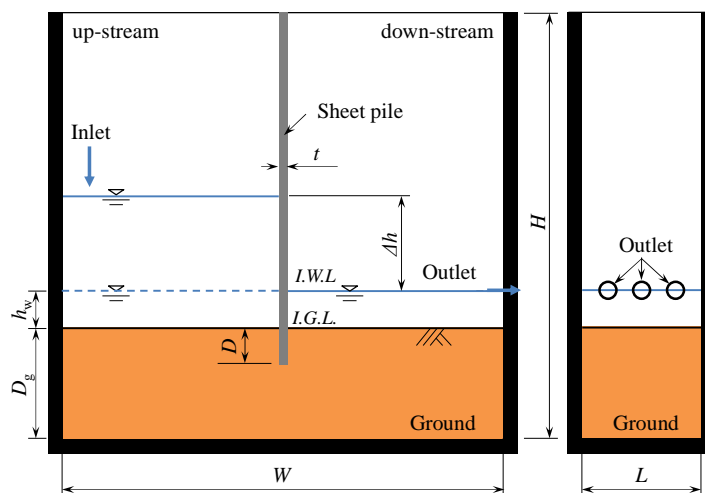


図-1 矢板周り浸透破壊実験の装置概要

表-1 各実験スケールにおける装置寸法の諸元

[mm]	H	W	L	t	D	D_g	h_w
大型	1,200	1,200	400	20	100	300	100
中型	600	600	200	10	50	150	50
小型 (遠心)	145	150	39 (50)	3 (5)	13	38	15

模型実験の結果

大型実験において豊浦砂を用いた実験条件をプロトタイプとし、各実験スケールでの相似性を確認するため、フルード則に従い、長さスケールと時間スケールを小型実験では 8 倍と $8^{0.5}$ 倍、中型実験では 2 倍と $2^{0.5}$ 倍となるように、各実験で得られた値に乗じた。模型実験の結果におい

ては破壊・最大水位差、最大洗堀形状と洗堀量を踏まえて相似性の分析を行った。

【破壊・最大水位差】

各実験における破壊・最大水頭差を示す。ここで、破壊水頭差とは下流側の地盤が隆起(変状)し始めた時点、最大水位差とは浸透破壊が生じる直前の水位差が最大値になる時点と定めている。表-2 および表-3 に大型実験に対する各実験値の増減率を示す。増減率とは、大型実験により得られた結果に対する各実験と大型実験値の差の比率としており、0%が大型実験と同値であったことを示すこととなる。各実験ともに複数回実施しており、平均値を用いている。

実験結果を確認すると、小型実験の破壊・最大水頭差において珪砂 8 号が差異 5% 程度であり、中型実験は相対密度 $D_r = 40\%$ の場合は珪砂 8 号、相対密度 $D_r = 80\%$ の場合は珪砂 7 号が大型実験と相似傾向にあることが示された。

表-2 大型実験に対する小型実験の各水位差の増減率(%)

地盤条件	相対密度 D_r : 40 %			相対密度 D_r : 80 %		
	珪砂 8 号	珪砂 7 号	豊浦砂	珪砂 8 号	珪砂 7 号	豊浦砂
破壊水位差	-5.1	-20.0	-9.1	-3.0	-8.6	-13.0
最大水位差	4.8	10.0	13.0	-6.4	-13.0	-17.0

表-3 大型実験に対する中型実験の各水位差の増減率(%)

地盤条件	相対密度 D_r : 40 %			相対密度 D_r : 80 %		
	珪砂 8 号	珪砂 7 号	豊浦砂	珪砂 8 号	珪砂 7 号	豊浦砂
破壊水位差	-2.8	7.1	24.0	8.6	4.7	2.7
最大水位差	5.8	13.0	26.0	8.7	1.3	-6.1

【最大洗堀形状と洗堀量】

図-2 に浸透破壊後の洗堀深が最大に至った時点における洗堀形状の比較を示す。洗堀形状に着目すると相対密度 D_r が 40 % の場合は洗堀深が比較的近似傾向にあるが、相対密度 D_r が 80 % の場合は洗堀深に差が生じていることがわかる。洗堀形状は実験ケースによって形状に違いが生じ、密度による差異やばらつきが確認された。

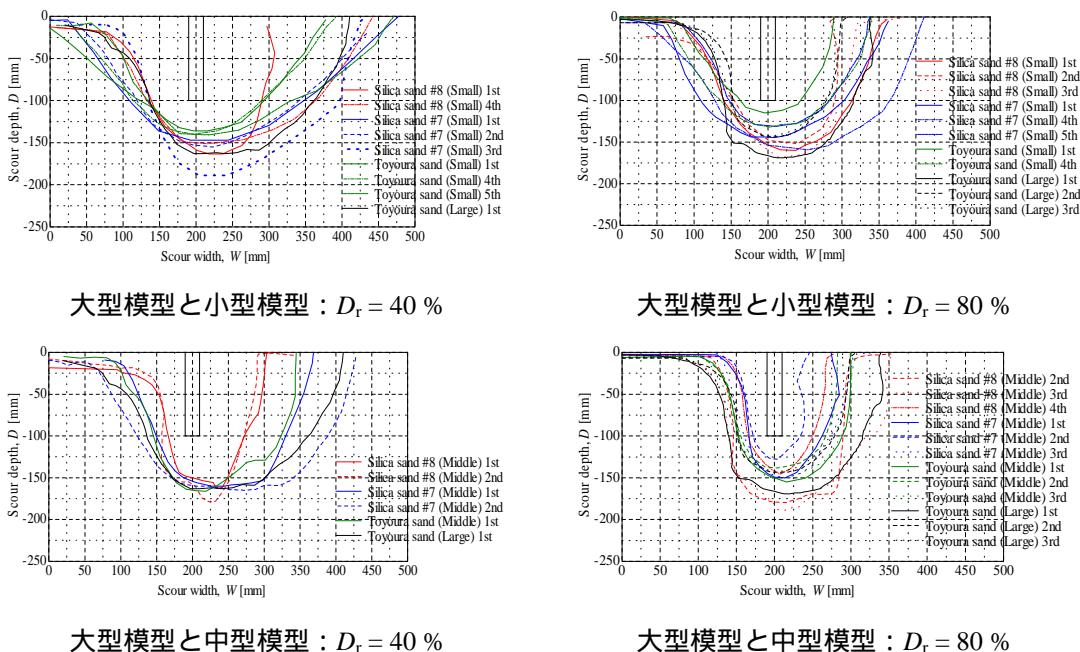


図-2 大型模型に対する縮尺模型の最大洗堀形状の比較

洗堀状態を定量的に評価するため、平均洗堀量を算出した結果を表-4 と表-5 に示す。ここで、平均洗堀量は各実験において上流側に定めた基準点から下流側に向かって水平 20mm 間隔ごとの洗堀面積を算出し、算出された洗堀面積を積分した量である。

本実験条件に限っては、洗堀量については小型実験、中型実験ともに相対密度 D_r が 40 % の場合においては珪砂 7 号が大型実験に近い傾向を示すことがわかった。しかしながら、洗堀現象については装置奥行き方向に一樣な洗堀形状が形成されず、局所的な破壊による 3 次元性が見られたため、局所性を排除した検討により、今後、より精度が向上した分析が可能と考える。

表-4 大型実験に対する小型実験の洗堀量の増減率(%)

地盤条件	相対密度 D_r : 40 %			相対密度 D_r : 80 %		
	珪砂 8 号	珪砂 7 号	豊浦砂	珪砂 8 号	珪砂 7 号	豊浦砂
洗堀量	-18.0	8.5	-15.0	16.0	16.0	-8.6

表-5 大型実験に対する中型実験の洗堀量の増減率(%)

地盤条件	相対密度 D_r : 40 %			相対密度 D_r : 80 %		
	珪砂 8 号	珪砂 7 号	豊浦砂	珪砂 8 号	珪砂 7 号	豊浦砂
洗堀量	-36.0	-4.9	-11.0	26.0	-21.0	-17.0

【重力場模型実験と遠心力場模型実験の比較】

遠心力場実験では豊浦砂を用い、遠心加速度を 10g および 50g とし、相似則を踏まえて遠心加速度に応じ粘性流体を用いて実験を実施した。遠心力場実験では既往の知見のとおり、付加する遠心加速度に応じた粘性流体を用いることで浸透破壊に至るまでのプロセスが統一され、Modeling of Models が成立することを確認した。さらに、流体の粘性が変わると浸透破壊形状が異なることが分かり、浸透速度が破壊の進展過程に影響を及ぼすことを確認した。

地盤材料の取扱いに関する相似則に関する考察

縮尺模型実験では流体条件に加え、土粒子に作用する流体力の相似性を考慮した力学的相似条件を課さなければ破壊現象を再現できないと考える。そこで、土粒子に作用する力のつり合いを考慮して重力場における模型実験の地盤材料を選定について分析する。ここでは、Dean Number (Dean, 1973) を適用した考察を行う。Dean Number とは、土粒子運動を踏まえ、水平方向と鉛直方向の速度比が相似となるよう、土粒子の粒径を決定する方法である。

本実験では大型実験をプロトタイプと考えており、実験に用いた豊浦砂($D_{50|p} = 0.189$ mm)を対象に Dean Number を適用する。その結果、平均粒径は小型実験で $D_{50|m} = 0.097$ mm、中型実験で $D_{50|m} = 0.137$ mm となる。これは、小型実験では珪砂 8 号に近い粒径、中型実験では珪砂 8 号と珪砂 7 号の間に位置する粒径の材料を用いることになる。

上記の Dean Number を踏まえて実験結果を再考する。破壊・最大水位差は小型・中型実験において珪砂 8 号と珪砂 7 号が比較的相似性を有することがわかる。このことから、Dean Number を考慮した地盤材料の選定は浸透破壊直前の現象に対して相似性を有するがわかった。一方で、浸透破壊後の現象となる洗堀形状や洗堀量に着目すると、土粒子粒径だけではなく地盤密度の影響も生じており、浸透破壊後の現象では十分な相似性が得られていない。このため、今後は地盤条件が洗堀の進展に与える影響をより詳細に分析しながら洗堀形状の形成に関する指標を定める必要がある。

Dean, R. G.: Heuristic models of sand transport in the surf zone, Proc. Conf. Eng. Dyn. in Surf zone, pp. 208-214, 1973.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tatsuya Matsuda, Kinya Miura, Naoto Naito, Yuki Ando	4. 巻 24
2. 論文標題 MODEL TESTS ON RESPONSE OF CONCRETE BLOCK ON SEABED SUBJECTED TO UPWARD SEEPAGE FLOW	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 50-57
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2023.105.g12217	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tatsuya Matsuda, Naoto Naito, Kinya Miura	4. 巻 24
2. 論文標題 MODEL TESTS ON SAND BOILING AROUND COFFERDAM CONSIDERING THE EFFECT OF GEOMATERIAL PROPERTIES	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 50-57
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2023.102.g12218	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 松田達也, 内藤直人, 伊藤志龍, 坪川良太, 佐々真志, 宮武誠, 越智聖志, 牛渡裕二, 飯田泰成	4. 巻 77(2)
2. 論文標題 海浜堆砂厚および後浜地下水位の影響を考慮した高波による護岸背後土砂の流出現象に関する解析的検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2（海岸工学）	6. 最初と最後の頁 I_787-I_792
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tatsuya MATSUDA, Naoto NAITO, Kinya MIURA
2. 発表標題 MODEL TESTS ON SAND BOILING AROUND SHEET PILE REGARDING PROPERTIES OF GROUND MATERIAL
3. 学会等名 12th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials & Environment（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuya Matsuda, Kinya Miura, Naoto Naito and Yuki Ando
2. 発表標題 MODEL TESTS ON CONCRETE BLOCKS SINKING INTO SEABED GROUND WITH UPWARD SEEPAGE FLOW GENERATED
3. 学会等名 12th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials & Environment (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安藤優希, 松田達也, 堀口翔平, 内藤直人, 三浦均也
2. 発表標題 実験スケールと地盤材料条件が矢板周りの浸透破壊現象に及ぼす影響の評価
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木陸斗, 松田達也, 竹野史哉, 岡本遥河, 三浦均也, 内藤直人
2. 発表標題 波浪が作用する円柱基礎周りに設置した捨石工による洗堀対策効果
3. 学会等名 第77回土木学会全国大会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本遥河, 松田達也, 三浦均也, 内藤直人, 鈴木陸斗
2. 発表標題 粒子スケール効果を考慮した造波水路実験による土砂動態分析
3. 学会等名 第77回土木学会全国大会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田達也, 三浦均也, 内藤直人, 矢上英里香, 安藤優希, Nur Atiqah Syazrina Binti Aziz
2. 発表標題 矢板周りの浸透破壊に着目した実験スケール効果の分析
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田達也, 田村謙太郎, 上田竜也, 内藤直人
2. 発表標題 個別要素法による防波堤の単調載荷解析
3. 学会等名 第66回応用力学講演会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田達也, 内藤直人, 伊藤志龍, 坪川良太, 佐々真志, 宮武誠, 越智聖志, 牛渡裕二, 飯田泰成
2. 発表標題 海浜堆砂厚および後浜地下水位の影響を考慮した高波による護岸背後土砂の流出現象に関する解析的検討
3. 学会等名 第68回海岸工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田達也, 内藤直人, 福元豊
2. 発表標題 小型模型実験による矢板周りの浸透に伴う破壊過程の考察
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢上英里香, 松田達也, 三浦均也, 内藤直人, 藤井湧
2. 発表標題 矢板周りの浸透破壊を対象とした模型実験における地盤材料がブレ破壊からポスト破壊現象へ及ぼす影響
3. 学会等名 第32回中部地盤工学シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://www.geomech-lab-tut.org

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------