

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04245

研究課題名（和文）地盤改良による沿岸中層建物の耐津波補強工法の開発・検証に繋がる杭の引抜き試験

研究課題名（英文）Pull-out tests of piles leading to the development and verification of tsunami-resistant reinforcement methods for coastal mid-rise buildings by ground improvement

研究代表者

河又 洋介（Kawamata, Yohsuke）

国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・主任研究員

研究者番号：90740994

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）：2011年東北地方太平洋沖地震において、杭が引抜かれるように転倒した建物が報告されており、津波襲来時の杭の引抜き抵抗を評価して、必要に応じて補強することが重要である。本研究では、小型模型実験を実施することにより、間隙水圧上昇中～完全液状化～間隙水圧消散後の各段階における杭の引抜き抵抗を評価した。実験の結果、間隙水圧がある程度上昇しないと杭の引抜き抵抗は低下しないこと、完全液状化状態でも地震前の半分程度までしか引抜き抵抗が低下しないこと、間隙水圧が完全に消散しても地震前の引抜き抵抗まで戻らないことを明らかにした。これらの結果は、従来の考え方とは異なるものであり、更なる研究の必要性を示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

沿岸部の津波避難ビルが、地震により液状化する恐れのある地域に立地していることは珍しくない。地震発生後、数分から数十分以内に津波が襲来するため、地盤中の間隙水圧が残留している状態もしくは消散して間もない状態である可能性が高い。また、余震の影響で、津波襲来時に完全液状化状態にあることも考えられる。そのため、間隙水圧の上昇過程～完全液状化～間隙水圧消散後の各段階における、杭の引抜き抵抗を評価することにより、実際に津波が襲来したタイミングでの建物の津波耐力を推定することが不可欠となる。このような研究はこれまでにないものであり、本研究はその第一歩となりうるものである。

研究成果の概要（英文）：In the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, it was reported that some buildings were overturned due to pile pull-out by the tsunami. Therefore, it is important to evaluate the pile pull-out resistance during tsunami attack and to reinforce the piles as necessary. In this study, small model experiments were conducted to evaluate the pile pullout resistance during the pore water pressure buildup, full liquefaction, and after the pore water pressure dissipation. Based on the experimental results, it was clarified that the pile pullout resistance does not decrease until the pore water pressure increases to some extent, that the pile pullout resistance decreases only to about half of the pre-earthquake level even under full liquefaction, and that the pile pullout resistance does not return to the pre-earthquake level even if the pore water pressure completely dissipates. These results are different from the conventional view and suggest the need for further research.

研究分野：地盤工学

キーワード：杭の引抜き抵抗 液状化 津波耐力

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震における被災地調査の結果、杭基礎に支持されたRC建物が、杭が引抜けるようにして転倒した事例が複数確認されている。既に開発が進んでいる沿岸地域の自治体は、津波避難タワーを建設する土地が限られているため、沿岸部の中層建物を津波避難ビルに指定しているが、それらの建物について、地盤－杭基礎－上部構造物相互作用を適切に考慮して、津波耐力を評価しているわけではない。したがって、津波により、杭が引抜かれるように転倒する可能性は否定できない。特に、沿岸部の軟弱地盤では、地盤の液状化により、杭の引抜き抵抗が顕著に低下するため、そのリスクは高いと考えられる。

この問題の解決方法として、地盤改良工法を用いて杭の引抜き抵抗を強化することにより、建物の津波耐力を補強することが考えられる。市街地施工など、非常に厳しい条件下でも適用可能な地盤改良工法が数多く開発されており、既設中層建物を対象とした耐津波補強工法の一つとして、コストパフォーマンスの高い選択肢となりうる可能性がある。各工法の有効性を比較・検証するためには、津波襲来時の、未対策地盤中の杭の引抜き抵抗を評価することが、研究の第一段階となる。

津波の到達時間は、地震の条件（震源・震央距離、発生メカニズムなど）などにより異なるが、2011年東日本大震災や2024年能登半島地震の記録では、地震発生の数分から数十分後とされている。この時、緩い飽和砂質土地盤は、地震により「完全液状化が継続している状態」「過剰間隙水圧が抜け切れておらず残留している状態」「過剰間隙水圧が完全に消散してから間もない状態」のどれかにある。また、津波襲来の直前に発生した余震により「間隙水圧が上昇途上の状態」にある可能性も考える。しかしながら、地震時に液状化する砂質土地盤中に打設された杭の引抜き抵抗について、過剰間隙水圧比をパラメータとした研究事例は皆無である。

### 2. 研究の目的

上述の背景を基にして、本研究では、地盤内の液状化進展程度を、「水圧上昇過程」「完全液状化」「水圧消散過程」「水圧消散後」の4つの段階に分類して、小型杭模型を用いた引抜き実験を実施することにより、各段階における杭の引抜き抵抗を明らかにすることを目的と設定した。

従来の設計法では、液状化が生じるような砂質土地盤中に打設された杭の引抜き抵抗は、杭周囲の摩擦力をベースに評価しており、有効上載圧に比例し、過剰間隙水圧比に反比例するとされているが、それを確認・検証した事例はない。一方、過去の地震で一度液状化した地盤を継続して調査した結果、地盤条件次第では、過剰間隙水圧が完全に消散しても、すぐに、液状化強度は元のレベルまで回復しないことが明らかとなっている。これは、従来の設計法の考え方と異なる傾向であり、小型杭模型実験を通じて、設計法の妥当性を確認することとした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 砂試料の室内試験

原位置から砂試料を採取して、粒度試験、最大・最小密度試験、液状化試験を実施することにより、本実験で用いる試料として適しているかどうかを確認した。また、一度使用した砂試料を、再利用する必要があるが生じたが、前の実験で細粒分が流出して、性質が変化していることが懸念されたため、再利用した試料について同様の室内試験を実施した。

#### (2) 試験装置の製作

本研究で用いた試験装置は、円筒形土槽、水圧調整用水槽、载荷装置（杭の引抜き試験機）から構成されている。このうち、土槽および水槽は、過去の研究で製作したものである。円筒形土槽と水圧調整用水槽を接続して、その水頭差により、地盤内の間隙水圧を調整する仕組みである。土槽の模型地盤地表面の高さに、排水用の孔が空いており、この孔から越流させることで、模型地盤地表面で間隙水圧が強制的にゼロとなるように設計されている。

本研究では、あらたに载荷装置を製作した。载荷機構として、電動のスクリュージャッキを採用した。モーターを逆回転させることで、引抜き・押し込みの両方向载荷が、モーターの回転速度を変えることで、载荷速度を調整することが可能となっている。

#### (3) 杭模型の引抜き試験

円筒形土槽内に模型杭と砂地盤を設置して、水圧調整用水槽の水位を変化させることで、所定の過剰間隙水圧比を再現した。その後、载荷装置を用いて杭を引抜き、引抜き抵抗を計測した。得られた結果を基に、液状化の各段階における杭の引抜き抵抗を評価し、耐津波補強として採用しうる地盤改良工法について考察を加えた。

### 4. 研究成果

#### (1) 砂試料の物性・液状化特性

南海トラフ地震において津波の来襲が想定されている、磐田市竜洋海洋公園（静岡県磐田市駒

場 6866-5) 敷地内、竜洋水門近くの土を採取した。計画の段階で、地表面付近の土を採取して、室内試験を実施したところ細粒分が多く含まれており、本実験で用いる試料としては不適であることが判明した。その後の調査で、元の砂浜が、現在の地表面より下にあることがわかったため、約 1 m 掘り下げてから約 300kg の砂試料を採取し、粒度試験、最小・最大密度試験および液状化強度試験を実施した。また、一度使用した砂試料の再利用にあたり、粒度試験、最小・最大密度試験を実施して、性質の変化を確認した。

3 回の粒度試験結果をまとめたものを図 1 に示す。計画の段階で採取した試料は、細粒分含有率が 40% の細粒分混じり砂、G.L. -1m の試料は、細粒分含有率 6% の粘性土混じり砂と分類された。また、再利用時の粒度試験結果は、初めて使用した時の結果と顕著な違いは見られなかった。初回使用時および再利用時の最小・最大密度試験の結果を表 1 に示す。わずかな変化が認められるが、粒度試験結果と併せて考慮して、同等の試料として、引抜き実験結果の整理・比較を行うこととした。初回実験前に実施した液状化強度試験（有効拘束圧 50 kPa、相対密度 60%）の結果を図 2 に示す。得られた液状化強度比より、採取した砂試料は、本実験の目的に適した試料と判断した。

表 1 最小・最大密度試験結果

	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	
	初回	再利用
土粒子の密度, $\rho_s$	2.688	2.696
最大密度, $\rho_{d \max}$	1.569	1.608
最小密度, $\rho_{d \min}$	1.255	1.273

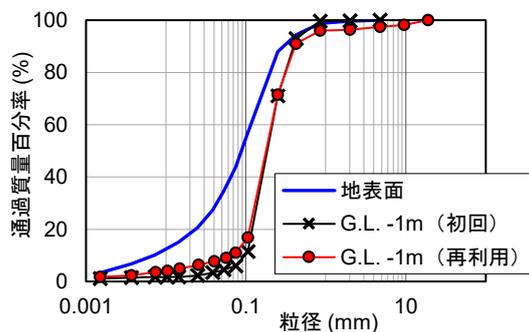


図 1 粒径加積曲線

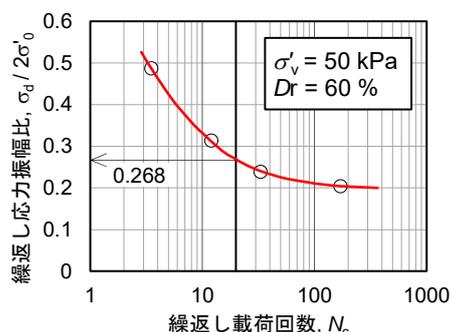


図 2 液状化強度試験結果

## (2) 異なる間隙水圧条件下における杭の引抜き抵抗

試験装置および試験体を図 3 に示す。円筒形土槽内の中央に、模型杭（先端開口の 16 mm×16 mm、厚さ 1.2 mm の鋼製角パイプ）を、土槽底面の透水平板上に設置した。地盤製作中の杭の移動を防ぐため、荷重装置を用いて上から抑えつけるように杭を固定し、自然乾燥状態の砂試料を気中落下させることで、相対密度 40%（乾燥単位体積重量：13.3 kN/m<sup>3</sup>、飽和単位体積重量：18.2 kN/m<sup>3</sup>）の模型地盤を作製した。模型地盤中には間隙水圧計を 4 深度に埋設して、想定通りの間隙水圧分布が得られていることを確認した。また、杭表面にひずみゲージを、杭頭にロードセルおよびレーザー変位計を設置し、杭の軸ひずみ分布と杭の引抜き変位と荷重を計測した。

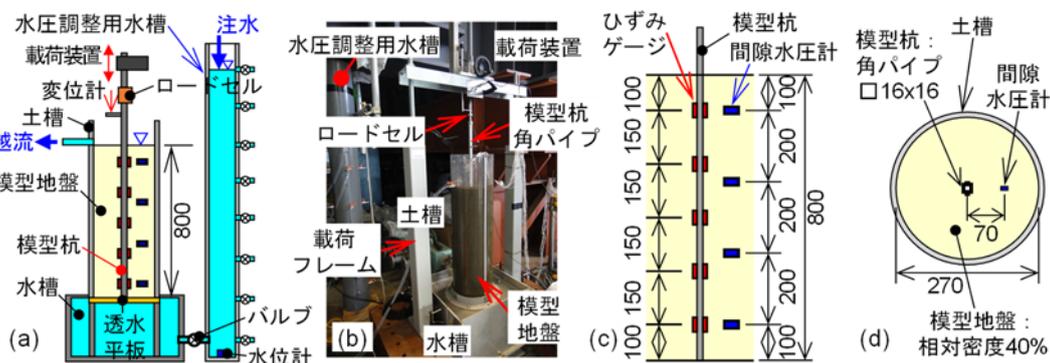


図 3 試験装置および試験体 (a) 全体図, (b) 全景写真, (c) 試験体断面図, (d) 試験体平面図

引抜き実験の実験条件一覧を表 2 に示す。すべてのケースにおいて、水圧調整用水槽と土槽を繋ぐ配管のバルブを閉めた状態で、水槽内に注水して水位を模型地盤面と合わせた。バルブを開けて模型地盤内に注水する一方で、水槽内にも注水して水槽内水位を一定に保ち、模型地盤内の間隙水圧分布を静水圧状態とした。その後、水圧調整用水槽の水位を変化させて、表 2 に示す水圧調整過程を再現した。本実験手法では、土槽下からゆっくりと水を流入させることにより、各段階における過剰間隙水圧比を調整している。土粒子の再配列および浮遊を伴う、地震時の液状化現象と同等の状況を再現するため、過剰間隙水圧比を 1.0 以上まで上昇させ、疑似ボイリングを発生させた。

当初計画では、Case 1 から 5 の引抜き実験後に、実験結果を基にした数値解析を実施する予定であったが、想定していた実験結果と大きく異なる結果が得られたため、研究計画を再検討した。その結果、数値解析を実施するよりも、Case 6 から 9 の実験を行い、Case 1 から 5 の実験結果を補完する方が、研究目的に則した成果が得られると判断した。

Case 1 は、計画から試験体製作、载荷条件の選定まで試行錯誤している段階の実験であり、本報告書では、その結果を参考データとして扱うこととする。Case 6 から 9 では、Case 1 から 5 にて一度使用した砂試料を再利用したため、Case 5 と Case 6 を同等の条件で実施・比較することで、全ケースの結果を比較することの妥当性を確認した。また、Case 8 は、载荷速度が杭の引抜き抵抗におよぼす影響を確認するために実施した。

表 2 引抜き実験の実験条件一覧

Case	水圧調整過程	想定条件	備考
1	静水圧状態 → 引抜き	静水圧状態	試行段階
2	静水圧状態 → EPWPR 0.6 相当 → 引抜き	水圧蓄積過程 EPWPR 0.6 相当	
3	静水圧状態 → EPWPR 1.0 オーバー → EPWPR1.0相当 → 引抜き	完全液状化状態	
4	静水圧状態 → EPWPR 1.0 オーバー → 約 20 時間放置 → 静水圧状態 → 引抜き	水圧完全消散後	
5	静水圧状態 → 約 21 時間放置 → 引抜き	静水圧状態	
6	静水圧状態 → 約 14 時間放置 → 引抜き	静水圧状態	Case 5 と同等
7	静水圧状態 → 約 16 時間放置 → EPWPR 0.8 相当 → 引抜き	水圧蓄積過程 EPWPR 0.8 相当	
8	静水圧状態 → 約 16 時間放置 → EPWPR 1.0 オーバー → EPWPR1.0 相当 → 引抜き	完全液状化状態	引抜き速度倍
9	静水圧状態 → 約 17 時間放置 → EPWPR 1.0 オーバー → EPWPR0.6 相当 → 引抜き	水圧消散過程 EPWPR0.6 相当	

※表中の EPWPR は、過剰過激水圧比 (Excess Pore Water Pressure Ratio)

入力変位として、Case 5 における杭の引抜き変位の時刻歴を図 4 に示す。模型杭を载荷速度 12 mm/min、変位 5 mm まで引抜き、荷重の変動が落ち着いた後に元の位置まで押し込んだ。同様のプロセスで、変位 20 mm、50 mm まで引抜き、押し込みを繰り返した。Case 8 では、2 倍の速度の 24 mm/min で模型杭を引抜き・押し込んだ。試験時のサンプリング周波数は 1 Hz とした。

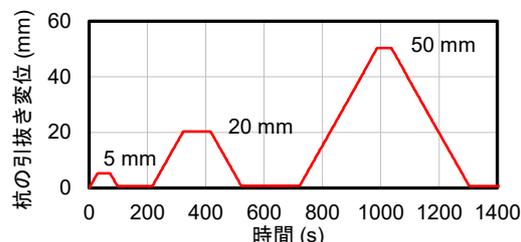


図 4 杭の引抜き変位の時刻歴例 (Case 5)

各 Case における、間隙水圧分布を図 5 に示す。

Case 4 では、水圧調整用水槽の水位を静水圧状態にして長時間放置することで、ゆっくりと土槽内の水圧を静水圧状態に戻したが、間隙水圧計の計測値に顕著なドリフト成分が入ってしまったため、正確な水圧分布は不明である。しかしながら、理論上、土槽内と水槽内は平衡水位状態となっているはずであることから、引抜き実験実施時には静水圧状態になっていると仮定して、実験結果の比較・検証を行った。Case 6 の水圧分布が、目標としていた静水圧状態よりも大きい値を示しているもの、各 Case で想定通りの間隙水圧分布を再現できていることがわかる。

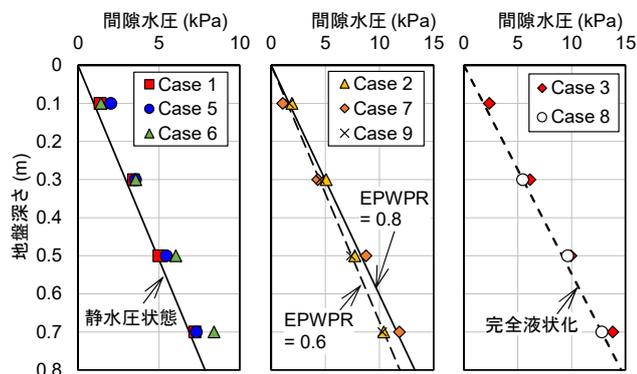


図 5 引抜き試験時の間隙水圧分布

杭の引抜き変位-荷重関係として、静水圧状態の Case 1, 5, 6 を比較したものを図 6(a)に、静水圧～水圧蓄積過程～完全液状化状態の Case 5, 2, 7, 3 を同一図面上にプロットしたものを図 6(b)に、完全液状化～水圧消散過程～水圧消散後の Case 3, 9, 4 を比較したものを図 6(c)に示す。また、载荷速度を変えた Case 3 と 8 を比較したものを図 6(d)に示す。図 6(a)より、試行段階の Case 1 では顕著に小さい抵抗を示しているが、Case 5 と Case 6 は同等の挙動を示しており、砂

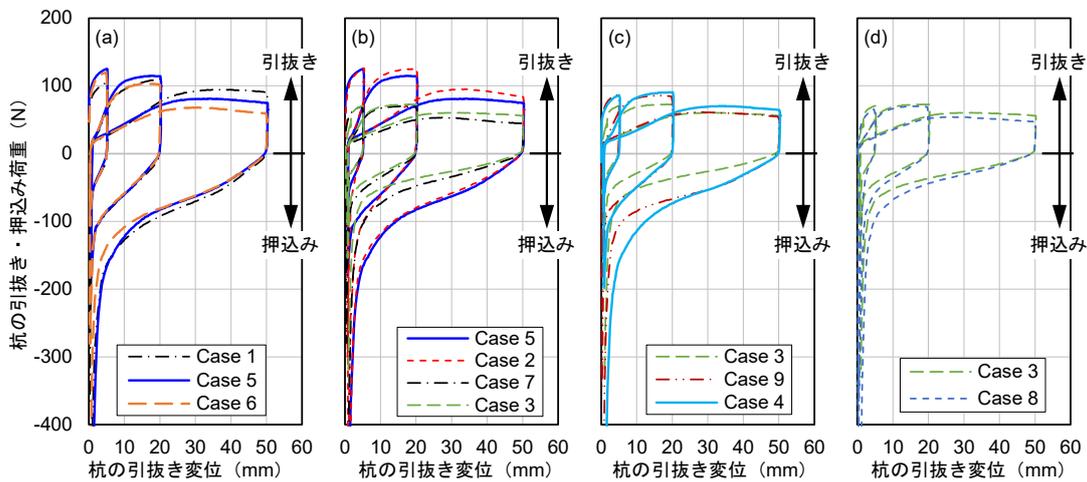


図6 杭の引抜き変位-荷重関係の比較

試料の再利用の影響は軽微でありことがわかる。このことから、Case 2 から 9 まで比較することは妥当と判断した。図 6(b) から、それぞれ Case 5 と Case 2, Case 7 と Case 3 において、ほぼ同等の挙動を示していることが見てとれる。このことから、杭の引抜き抵抗は、過剰間隙水圧比が 0.6 まで、顕著な低下は見られないが、それを超えると急激に低下して、過剰間隙水圧比が 0.8 まで上昇すると、完全液状化状態とほぼ同等の値を示すことがわかる。一方、水圧消散過程を比較すると、過剰間隙水圧比 0.6 まで消散した Case 9 では、引抜き抵抗の回復が見てとれるが、完全に消散した後の Case 4 は、Case 9 とほぼ同等である (図 6(c))。また、载荷速度を変えた Case 3 と 8 では、ほぼ同等の挙動が得られており (図 6(d))、本実験で適用した範囲では、载荷速度の影響は見られなかった。

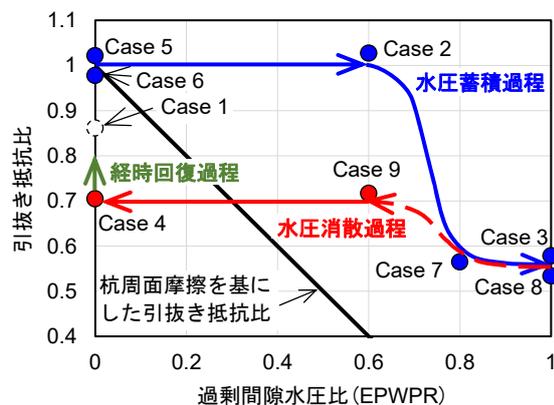


図7 過剰間隙水圧比-最大引抜き抵抗比関係

過剰間隙水圧比と最大引抜き抵抗比の関係を示す。Case 8 と 9 の間は、実験データがないため、破線表示としている。縦軸の比は、静水圧状態での実験で、試行段階の Case 1 を除いた Case 5 と Case 6 の平均を 1.0 と定義した。同図より、以下のことが明らかとなった。1) 水圧蓄積過程では、過剰間隙水圧比が 0.6 を超えると、急激に引抜き抵抗が低下する、2) 完全液状化状態でも、杭の引抜き抵抗は、地震前の状態の約 50% である、3) 水圧消散過程では、一度液状化した後に過剰間隙水圧比が 0.6 まで消散すると、杭の引抜き抵抗が回復するが、さらに水圧消散が進んでも、顕著な抵抗の回復は見られない、4) 完全液状化状態における Case 3 と Case 8 では、ほぼ同等の引抜き抵抗を示しており、引抜き速度の影響は小さい。これらの傾向は、杭周面に作用する摩擦を基に算出した引抜き抵抗と大きく異なるものであり、今後の詳細な検討が待たれる。

### (3) 耐津波補強として考える地盤改良工法の選定

図 7 の結果を基に、杭の引抜き抵抗を安全側に考慮すると、地震により過剰間隙水圧比が 0.6 を超えると、津波が到達する地震後数分から数十分の間では十分な回復を期待できないため、地震前の 50% 程度と見込まれる。この引抜き抵抗で十分な津波耐力が期待できる場合は、根固め対策は不要と判断できる。一方、液状化により低下した引抜き抵抗では、杭が引抜かれる恐れがある場合、過剰間隙水圧比を 0.6 以下に抑制することが求められる。詳細な検討が必要だが、大きな引抜き力は、建物の外周付近の杭に作用することから、外周部の補強により、十分な補強効果が確保できる可能性が高い。したがって、建物周囲を格子状に固化する、建物周辺にグラベルドレーンを設置する、表層部分を砕石等透水性の高い材料に置換するなどの工法が選択肢になると考えられる。また、地震前の引抜き抵抗でも不十分な場合は、地盤を固化する範囲を広げて、転倒に対する抵抗モーメントを増大させる必要がある。

しかしながら、上記の検討は、津波の繰返し作用、地震による地盤の水平抵抗の低下、杭の損傷、上部構造物自体の津波耐力を考慮していないため、より総合的な判断が必要となる。また、1 シリーズの小型模型実験のみで、定量的な評価を行うことは難しい。本研究の成果を基に、大型実験や数値解析など、更なる検討を進める予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 河又洋介, 中澤博志
2. 発表標題 既存沿岸中層建物の耐津波補強工法の開発 - 小型模型杭を用いた引抜き試験の計画 -
3. 学会等名 地盤工学会 研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河又洋介, 中澤博志
2. 発表標題 既存沿岸中層建物の耐津波補強工法の開発 - 小型模型杭を用いた引抜き試験の結果と考察 -
3. 学会等名 地盤工学会 研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河又洋介, 中澤博志
2. 発表標題 液状化地盤中の杭の引抜き抵抗に関する実験的検討
3. 学会等名 地震工学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河又洋介, 中澤博志
2. 発表標題 既存沿岸中層建物の耐津波補強工法の開発 - 異なる間隙水圧条件下における小型模型杭を用いた引抜き試験結果 -
3. 学会等名 地盤工学会 研究発表会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担 者	中澤 博志  (Nakazawa Hiroshi)  (20328561)	静岡理科大学・理工学部・教授    (33803)	

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
---------	---------