

令和 6 年 5 月 2 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04278

研究課題名（和文）遡上津波波圧による沿岸域構造物群の破壊過程に関する研究

研究課題名（英文）Study on the destructive process of coastal structures by inundating tsunami wave force

研究代表者

長山 昭夫（Nagayama, Akio）

鹿児島大学・理工学域工学系・助教

研究者番号：40621438

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）：東北地方太平洋沖地震で発生した地震津波は東北から関東の沿岸域で遡上し市街地の構造物群を破壊した。その後の調査では、従来の浸水深を基礎とした被災想定と現実の被災状況は大きく異なることが指摘された。以上の背景を受け本研究は、大型波動水槽を利用しビル構造物の開口部を変化させた場合の模型実験を行い、池谷らが提案している開口影響を考慮した陸上構造物に作用する津波持続荷重の推算式に修正項を追加し、戻り流れ時の作用波力の推算が可能かについて検討を行った。その結果、構造物前後での物理量に加えて側面での流速から構造物内部抵抗を従来の算定式に追記することで推算精度が向上したことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東北地方太平洋沖地震で発生した地震津波は東北から関東の沿岸域で遡上し、沿岸域の構造物群を破壊した。その後の被災調査では、従来の浸水深を基礎とした被災想定と現実の被災状況は大きく異なることが指摘された。以上より、本研究は従来の開口影響を考慮した陸上構造物に作用する津波持続荷重の推算式に修正項を追加し、戻り流れ時の作用波力の推算の高精度化に関して一定の成果を得た点に学術的意義がある。また本研究の成果は、巨大地震津波の遡上津波による構造物群の被災推定の高精度化に繋がり、被災後の迅速な復興活動に資する基礎的な情報を提供できる点に社会的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：The 2011 Tohoku region Pacific Ocean earthquake caused a huge Tsunami wave that broke many shore area buildings and structures. In Japan, most of the estimated formulas are based on the assumption of static water depth pressure, have adopted three times the pressure, and calculated the wave force on the building structures. However, the formula only focuses on swash waves caused by limited experimental apparatus scale, which needs to cover the return wave condition more. For these reasons, we have discussed modifying the formula at the return wave using a large water tank in the laboratory. We pointed out that 1) the tsunami force during the return wave is the same as the swash wave in the water concentration areas, 2) the modified formula may estimate the wave force that depends on the building shape, such as frontage, and 3) we modified the formula, including the drag force from side wall velocity, and discussed the wave force during the return wave.

研究分野：水工学

キーワード：津波波力 戻り流れ ビル構造物

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

遡上津波による構造物に作用する波圧の検討はこれまでに数多くあり、様々な知見がある。例えば朝倉が提案した構造物波圧の推算式を元に、津波避難ビル等の設計指針が策定され、数多くの津波避難ビルが建設されている。また、津波による構造物の破壊分類について、例えば独立行政法人建築研究所は、建築物の構造形式に区分して、それぞれの被害分類を詳細に行っている。衝撃波圧と持続波圧を含む壁面への作用波力の推算式については、静水圧に係数を乗じて試算した推算式が大部分を占める。またピロティー構造や、内部空間を有する構造物への作用波力についても数多くの検討があり、例えば池谷らは、空隙を有する構造物への作用波力について背面水位を含む推算式を提示し、その妥当性について検討を行っている。一方、米国連邦緊急事態管理庁(FEMA)は津波からの垂直避難のための構造物設計指針を公開し、内部壁面の破壊、構造物の流失・回転の評価には構造物に作用する浮力の検討が必要であることを指摘している。しかしながら、これらの検討は遡上波作用時における津波波力についての検討であり、戻り流れ作用時には構造物にどのような津波波力が作用するかについては、十分な検討が行われていない。

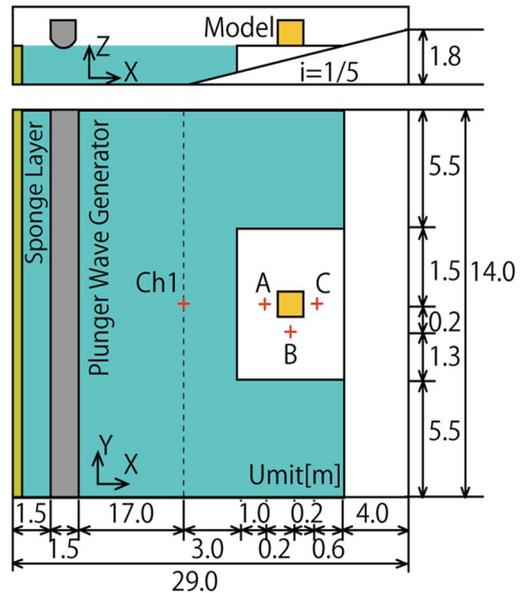


図-1 実験水槽全体図

2. 研究の目的

本研究では、大型波動水槽を利用し、ビル構造物を対象にその開口部を変化させた場合の津波波力について模型実験を行った。さらに得られた実験値が従来の推算式で再現可能かについて検討を行い、津波持続荷重の推算式に修正項を追加し、戻り流れ時の作用波力の推算が可能かについて検討を行った。

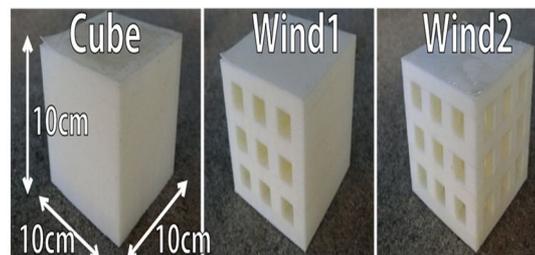


写真-1 構造物模型

3. 研究の方法

3.1. 実験条件

図-1 に実験水槽全体図、模型設置位置と水位・流速の測点を示す。水槽は岸沖方向長さ 29.0 m、沿岸方向長さ 14.0 m、静水面は沖合底面部から 0.60 m に位置している。また岸側に勾配 1/5 の斜面があり、その斜面部に静水面と同じ高さの位置に岸沖方向長さ 2.0 m、沿岸方向長さ 3.0 m の平面ステージが設置されている。このステージ上にビル形状を想定した模型を設置した。水位と流速の測定は斜面開始位置 Ch1、平面ステージ上の測点 A・B・C の位置で行った。水位は静電容量式波高計を底面から高さ 10 mm の位置に設置した。流速はステージ底面に設置された電磁流速計で測定を行った。使用した模型を写真-1 に示す。3D プリンターで内部空間を想定した開口部を有する模型を作成した。今回は 3 種類の形状を対象とした。模型は全辺が 10 cm の直方体とし、開口部を有していない直方体(Cube)、開口部の位置が岸沖方向の 1 方向のみの直方体(Wind1)、開口部の位置を岸沖方向と沿岸方向に 2 方向とした直方体(Wind2)とした。開口部は、建築基準法施行令の採光有効開口部面積が居室床面積の 7 分の 1 以上の条件を満足するように設定した。またこれらの模型に 3 分

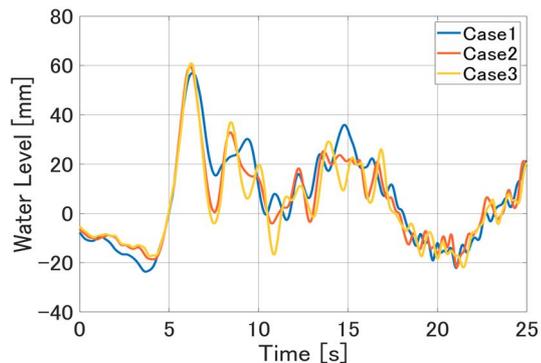


図-2 Ch1における各caseの水位変動

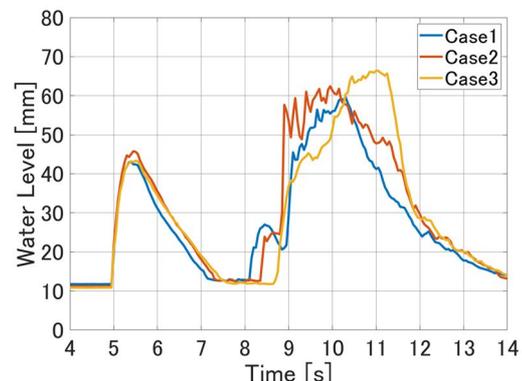


図-3 平面ステージ測点Aでの水位変動

力計を取り付け、水平2方向と垂直方向の作用力を測定した。

3.2. 戻り流れまでの水位と流速

今回は水槽端部に設置されているプランジヤ造波装置の動作条件を変更し case を3つ設定した。図-1における岸側斜面開始位置 Ch1 における水位変動を図-2に示す。どの case においても第1波目の最大水位は60 mm 程度であり、その後分散波が入射することがわかる。また岸沖方向流速は、全ての case において第1波目の最大水位時に最大で280 mm/s となった。次に、平面ステージ上の測点における遡上波による水位と流速について検討を行った。図-3に各 case の測点 A での水位変動、図-4に岸沖方向流速を示す。図-3の水位については、5.0 sec から遡上波により水位が上昇し、その後下降する。8.0 sec 以降は戻り流れによる水位上昇が始まり、その水位は14.0 sec まで続く。図-4より遡上波と戻り流れの作用により流速成分は、8.0 sec から9.0 sec までを境界として反転することがわかる。また戻り流れの方が遡上波よりも水位が高いことがわかる。これは、実験水槽の形状の影響を受け遡上波が遡上する際に、平面ステージの設置されていない浅水域では、平面ステージ上よりも水深が深いため流速が大きく、平面ステージ背面に向かって入射波が回折し、この流れがステージ後方で合流して岸から沖へと流下するためである。

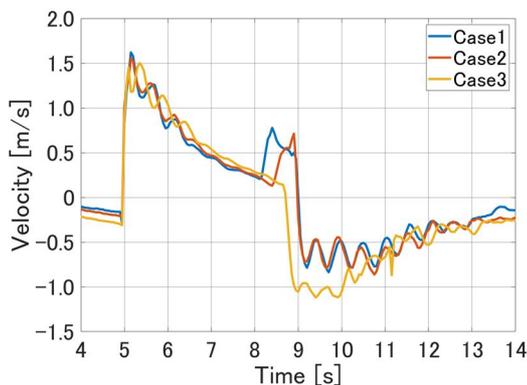


図-4 平面ステージ測点Aでの流速

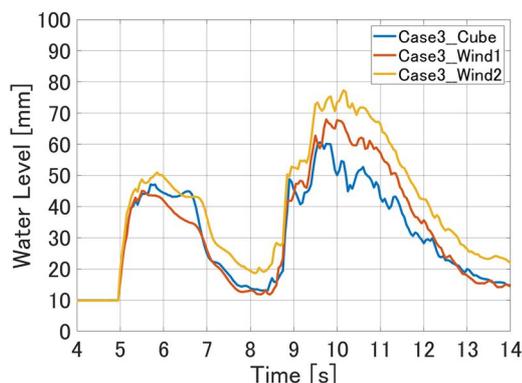


図-5 case3における測点Aでの水位変動

4. 研究成果

4.1. 水位と流速の変動

図-5に case3 における各構造物模型を設置した場合の測点 A における水位を示す。遡上波作用時の5.0 sec から8.5 sec における水位変動は、どの模型形状でも同様の傾向を示し、その差異は約10 mm となる。一方、戻り流れが最大水位となる10.0 sec 付近では水位差が20 mm 程度となり、その直後の水位低下時における水位差は大きくなる傾向となる。特に Cube では水位低下が速く、Wind1・Wind2 では遅いことがわかる。これは常流下においては構造物形状が周辺の水位変動に影響を与えているためであり、内部空隙を通過または滞留する水の存在により、水位低下が遅延する可能性がある。

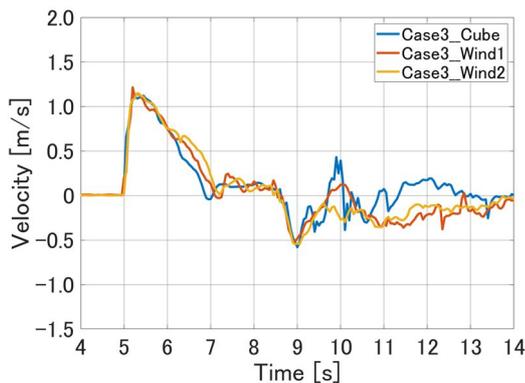


図-6 case3での測点Aでの岸沖方向流速成分

図-6に case3 での各構造物模型を設置した場合の測点 A における岸沖方向流速を示す。流速は正の値は岸向き、負の値は沖向きで示している。遡上波作用時の8.0 sec までにおける流速は模型形状にほとんど影響を受けないことがわかる。一方、戻り流れの9.0 sec 以降では差異が生じ、特に Cube においては9.0 sec は沖向き流速となり、10.0 sec 付近では岸向きに流速が反転し、その後さらに沖向きに流速が生じる。Cube は内部空洞が無く、戻り流れ作用時に壁面を沿った流れが生じ、模型背面でこの流れが衝突することで渦の形成が促進されることが考えられる。また Wind1 と Wind2 の差異については、10.0 sec 付近の流速が沖向きから岸向きへの反転に違いが生じる。岸沖方向のみに間口がある Wind1 では、流速の反転が

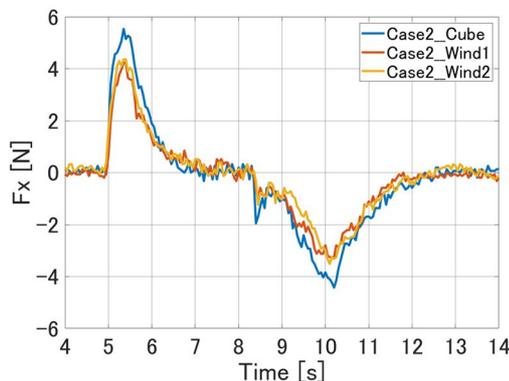


図-7 壁面波力Fxの変動

生じるが、Wind2 では流速は反転しない結果となった。これは間口の設置方向の違いによるもので、沿岸と岸沖方向に間口が設置されている場合は、構造物背面で渦が形成されにくい可能性がある。

4.2. 壁面波力の変動

図-7 に case2 における各模型に作用する壁面波力を示す。この図より、遡上波と戻り流れ作用時共に Cube が最も大きな波力が生じることがわかった。また間口のある Wind1・Wind2 において、遡上波と戻り流れ作用時共に 20% 程度の最大波力の低減がみられた。今回の実験条件では、戻り流れ時に平面ステージ上に岸から沖に向かう流れが集中するため、遡上波時と同程度の波力が作用する結果となった。つまり、戻り流れが集中する地域においては戻り流れ時の波力について検討する必要があることがわかる。

5. 推算波力の検討

5.1. 壁面波力と作用浮力の推算

池谷らの開口影響を考慮した陸上構造物に作用する津波持続荷重の推算式を使用し、実験値を再現可能であるかについて検討を行った。この推算式の特徴は構造物への作用波力について構造物の開口率 λ を導入し、構造物前面と背面の水位差による全水圧(第1項と称す)と内部抵抗力 F_D (第2項と称す)の和で表現している点である。図-8 にこの提案式の概念図を示す。また評価式は以下の式(1)から(3)である。

$$F_x = \frac{1-\lambda}{2} \rho g B (h_3^2 - h_0^2) + F_D \quad (1)$$

$$h_3 = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho K_D v_4^2 B_w \quad (3)$$

ここで、 ρ :水の密度、 g :重力加速度、 λ :面積開口率、 h_2 :構造物前面の水深、 h_3 :地表から計った淀み点における圧力水頭、 h_w :構造物高さ、 V_2 :構造物前面の断面平均流速、 B :構造物幅、 A_w :流水断面積、 F_D :構造内部抵抗力、 K_D :抵抗係数である。今回、遡上波作用時と戻り流れ作用時には流れ方向が反転することに合わせて、各項として使用する実験値を変更している。例えば背面の淀み点水位は、波作用時は測点Cの水位、戻り流れ時は測点Aの水位とした。また作用浮力はFEMA(2019)で提案されている浸水深から排水体積を算出する手法を使用した。

次に、構造物側面流速を考慮した以下の式(4)を修正項として式(1)に追加した。

$$F'_x = \frac{1}{2} \rho K_D v_4^2 B_w \quad (4)$$

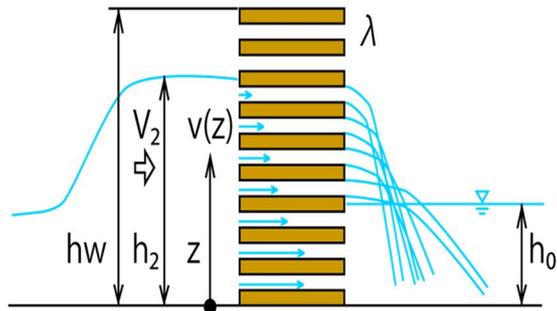


図-8 通過割合を元にした津波波力の概念図

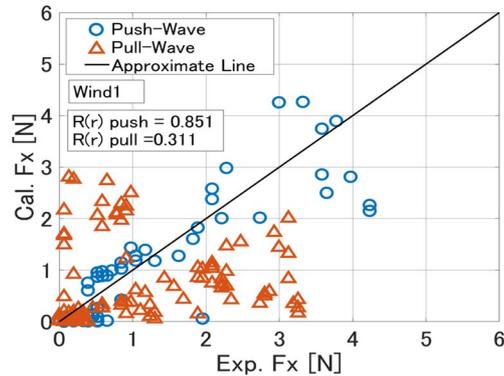


図-9 壁面波力 F_x の推算

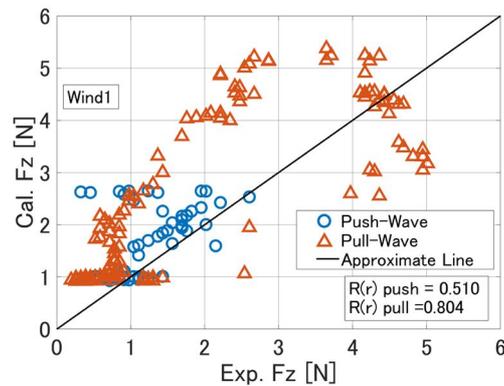


図-10 浮力 F_z の推算

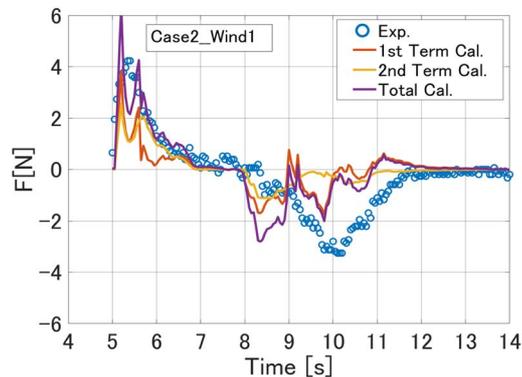


図-11 波力 F_x の第1項と第2項の比較

ここで、 K_D ：抵抗係数、 v_4 ：構造物側面流速、 B_w ：側面断面積である。

5.2. 壁面波力の推算

結果の一例として、Wind1 での壁面波力の実験値と推算値を整理した結果を図-9 に示す。この図は遡上波と戻り流れで区分し、遡上波における相関係数を $R(r)$ push, 戻り流れでは $R(r)$ pull としている。この図から遡上波時の相関係数は 0.851 と高く、推算値は実験値を再現可能であることがわかる。一方、戻り流れ作用時に着目すると、 $R(r)$ pull は 0.311 と低く、推算値は実験の再現性が低くなることがわかる。また他の模型形状においてもこれらと同様の結果となったことを確認した。

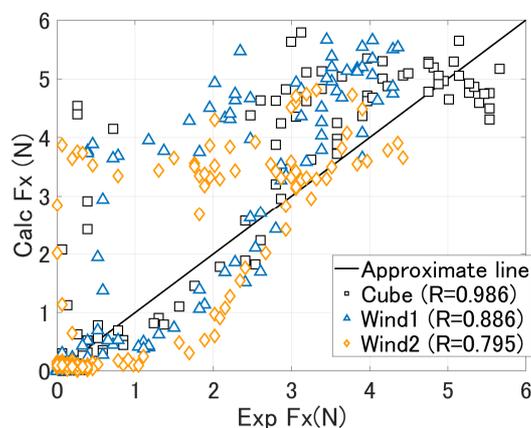


図-12 修正式による作用波力の比較

5.3. 作用浮力の推算

次に Wind1 での作用浮力における推算値と実験値を整理した結果を図-10 に示す。遡上波時の $R(r)$ push は 0.510, 戻り流れ時の $R(r)$ pull は 0.804 となり、遡上波時の相関は低く、戻り流れ時の相関は高い結果となった。また全体の傾向として推算値が過大評価となることがわかる。この傾向は Wind2 でも確認でき、Cube ではこのような傾向はみられなかった。つまり、内部空洞を有する構造物形状では、浸水深のみを使用した作用波力の推算には精度の限界があり、構造物空洞内に滞留する水量による抵抗力を考慮する必要がある。

5.4. 戻り流れ作用時の誤差の検討

壁面波力における相関係数が遡上波と戻り流れでは異なる点について検討を行うために、推算値と実験値の時間変動を確認した。その結果を図-11 に示す。この図は実験値、推算値として式(1)の第1項、第2項とその和を示している。この図より、遡上波作用時の 8.0 sec までは衝撃波圧の発生からその減衰について推算値は実験値を精度良く再現していることがわかる。また 5.5 sec 付近で一旦、推算値が増減を繰り返すが、これは構造物背面に到達した水流同士が合流することで背面位置での水位が上昇し、構造物前面との水位差が少なくなるためである。一方、戻り流れ作用時には、推算値は実験値の増減を再現出来ず。特に 9.0 sec から 10.5 sec までの実験値の上昇の再現が困難であることがわかった。

図-12 に修正項式を追加した場合の推算結果を示す。これらの図より推算値が実験値を過大評価する傾向にあるものの、修正項を追記することで推算精度が向上することがわかる。

6. まとめ

- (1) 戻り流れが集中する領域に構造物模型を設置した場合、戻り流れ時の壁面波力は、遡上波による壁面波力と同程度の力が作用することがわかり、戻り流れ時における壁面波力の検討が必要であることを確認した。また、構造物模型への作用浮力については、遡上波時に最大値となり構造物形状により差異が生じた。特に間口を有し内部空洞が多い場合、作用浮力は減少傾向となり内部空洞が無い構造物と比べ 25 %程度減少した。
- (2) 従来の壁面波力に関する算定式による遡上波時から戻り流れ時までの壁面波力の実験値の再現性について検討した結果、遡上波時では相関が高く、戻り流れ時では相関が低くなった。誤差の一因として構造物背面の渦の形成による流速変動が再現できていないことが考えられる。排水体積から作用浮力を算出する従来の算定式による実験値の再現性について検討した結果、遡上波時に相関が低く、戻り流れ時に相関が高くなる結果となった。この原因は、構造物内部の浸水体積を考慮していないために推算値が過大評価しているためであることを確認した。
- (3) 戻り流れ作用時における津波波力の推算精度を向上させるために、構造物前後での物理量に加えて側面での流速から構造物内部抵抗を従来の算定式に追記した。その結果、推算精度が高くなった。これは、従来の算定式は各場の物理量が同じ変動をとることを前提としているが、実際には戻り流れ時に構造物前面の流速は減少するために再現性が低くなり、この減少分を側面流速による内部抵抗を可算することで再現性が向上することが考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Akio Nagayama	4. 巻 -
2. 論文標題 Tsunami Wave Height by Bandpass Filter Along the Southern Kyushu States Considering Offshore Islands	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The 32nd International Ocean and Polar Engineering Conference	6. 最初と最後の頁 -
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 -

1. 著者名 長山昭夫, 前田智晴	4. 巻 78
2. 論文標題 遡上波と戻り流れによる開口部に有する構造物に作用する津波波力の検討	5. 発行年 2022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 p. 1_259-1_264
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/kaigan.78.2_1_259	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 Akio Nagayama	4. 巻 -
2. 論文標題 Tsunami Wave Height by Band Pass Filter along the Southern Kyushu States Where Include Offshore Islands	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Society of Offshore and Polar Engineers	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 長山昭夫, 前田智晴	4. 巻 -
2. 論文標題 押し波と引き波による開口部に有する構造物に作用する津波波力の検討	5. 発行年 2022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 -
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Akio Nagayama
2. 発表標題 Tsunami Wave Height by Bandpass Filter Along the Southern Kyushu States Considering Offshore Islands
3. 学会等名 Paper presented at the The 32nd International Ocean and Polar Engineering Conference
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長山昭夫
2. 発表標題 遡上波と戻り流れによる開口部に有する構造物に作用する津波波力の検討
3. 学会等名 土木学会海岸工学講演会
4. 発表年 2022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	田中 智行 (TANAKA Tomoyuki) (20452609)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授 (15401)	
研究分担者	柳川 竜一 (YANAGAWA Ryoichi) (70649095)	香川高等専門学校・建設環境工学科・准教授 (56203)	

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