

令和 4 年 12 月 23 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04713

研究課題名（和文）連棟配置された建築構造物群に作用する津波荷重の解明

研究課題名（英文）Investigation of tsunami loads acting on a group of building structures

研究代表者

小幡 昭彦（OBATA, AKIHIKO）

秋田県立大学・システム科学技術学部・助教

研究者番号：30433147

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：津波被害が建築構造物の配置計画，周辺環境に大きく影響を受けることは先の震災の調査において明らかとなっている。本研究では，水理実験並びに数値流体解析（CFD）により，複数棟配置された建築構造物群に作用する津波波力の特性を明らかにすることを目的とする。

本研究で行った水理実験，数値流体解析の結果から，矩形構造物群，円筒形構造物群の2棟配置，3棟配置に作用する津波波力の傾向が確認できた。また，建物配置により津波荷重が増加する場合，減少する場合があることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は，護岸を越流する津波が連棟配置された建築構造物群に作用する津波荷重を水理実験および数値流体解析より明らかにした。その結果，一棟のみの場合と比べて，津波に対して計測用模型が障害物模型の陰に隠れる配置パターンで波力が小さくなり，津波に対して計測用模型が障害物模型と並列に並ぶ配置パターンでは波力が大きくなることが確認できた。本研究の結果より，特に配置計画などは見直すことによって津波荷重を低減させることができるかと期待できる。

研究成果の概要（英文）：The tsunami caused by the earthquake occurred off the Pacific coast of Tohoku resulted in severe and extensive damage to structures in northeastern Japan. Consequently, the establishment of safer design methods has become a matter of social responsibility. The damage survey report of the Tohoku-Pacific Ocean Earthquake confirms that the tsunami load is reduced when there is an obstacle upstream. However, few studies have been conducted on these subjects to date. In this study, hydraulic model tests and a CFD simulation are carried out on isolated and a group of rectangle or cylindrical structures to investigate the basic characteristics of tsunami forces acting on them. The characteristics of the tsunami forces acting on the isolated and grouped buildings were investigated based on the experimental and analytical results. Discussion is made of the effects of structures arrangement on the tsunami forces and pressures.

研究分野：建築構造学

キーワード：津波荷重 連棟配置 津波圧力 水理実験 数値流体解析

1. 研究開始当初の背景

先の2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において、被害の程度は地震動による構造被害に比べ地震が引き起こした津波による被害が圧倒的に大きかった。建物の安全についての設計ルールを定める建築構造分野にとって、対津波設計の確立は社会的な責務であるとともに早急に取り組まなくてはならない喫緊の課題である。本研究は、護岸を越流する津波が複数棟配置された建築構造物群に作用する津波荷重の評価を目的とする。

建築学会の「建築物荷重指針・同解説(2015)」(以下、荷重指針と略す。)に示されている波力評価方法は、それまでの水理実験結果などと比較しても、構造物前面の浸水深と流速を用い合理的に荷重を計算できる方法となっているといえる。しかし、一方で荷重指針においては、対象とする建築構造物が複数棟となった場合に対応する考え方は示されておらず、設計ではそれぞれ単体での設計方法を適用することになると考えられる。複数棟配置された建築構造物に作用する津波荷重は、波力もそれぞれに違った性質を持つと考えられるので、その挙動を反映させた設計荷重が必要である。

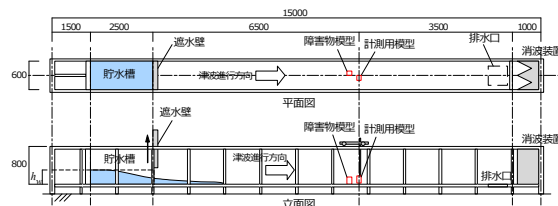


図1 実験水路の概要

表1 各貯水高さにおける最大流速、最大浸水深、フルード数

| 貯水高さ h_w (mm) | 100 | 140 | 180 |
|-----------------|------|------|------|
| 最大流速 (m/s) | 0.77 | 1.03 | 1.23 |
| 最大浸水深 (mm) | 37.0 | 42.6 | 46.4 |
| 最大フルード数 Fr | 1.28 | 1.54 | 1.92 |

2. 研究の目的

津波被害が建築構造物の配置計画、周辺環境に大きく影響を受けることは先の震災の調査において明かとなっている。そのような問題について本研究では、水理実験並びに数値流体解析(CFD)により、二棟配置された建築構造物群に作用する津波波力の特性を明らかにするとともに、合理的な対津波設計を確立する上での基礎的知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 水理実験概要

本実験は、秋田高等専門学校が所有する水理実験施設で行った。図1に実験水路の概要を示す。水路は長方形断面形状であり、貯水槽(約2.5m)を含め水路の全長は約15m、水路の幅は0.6m、高さは0.8mである。実験水路水上側から4.0mの位置に遮水壁が設けられており、津波の押しは貯水槽に水を溜め、遮水壁を瞬間的に開放することで再現した。津波は消波装置近辺にある床面の排水溝から排水される。本実験では、試験模型を遮水壁より6.5mの位置に設置し波力を観察した。実験で再現する津波の大きさは、貯水槽に溜める水の量を変えることで調整する。本実験では、模型を越流しない程度の津波を最大とし、貯水高さ h_w を3パターン($h_w = 100\text{mm}$ 、 140mm 、 180mm)とした。模型を設置しない場合の各貯水高さ h_w における最大流速、最大浸水深、フルード数を表1に示す。

実験に用いる構造物を想定した試験模型は、簡単のため窓ガラスなどの開口部がない矩形構造物および円筒形構造物とし、アクリル板によって作成した。模型は水路に二棟ないし三棟配置し、一体は波力の計測を行う計測用模型、残りは津波の流れに影響を与える障害物模型である。津波の進行方向上流に障害物模型、下流に計測用模型を配置した。模型の形状は矩形構造物なら立方体形状とし幅×奥行き×高さが $80\text{mm} \times 80\text{mm} \times 120\text{mm}$ 、

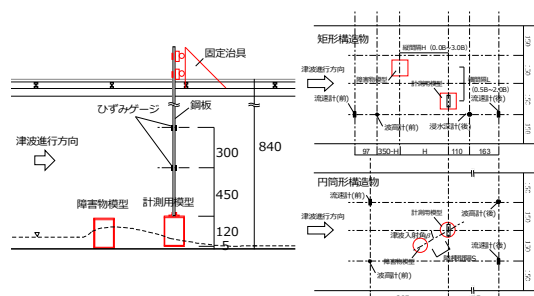


図2 模型設置概要

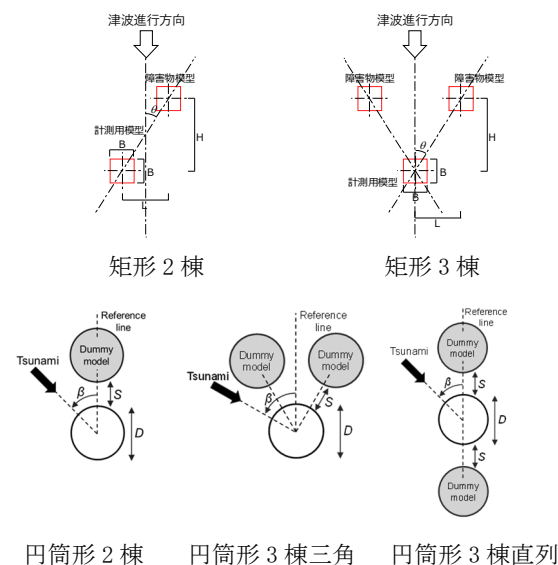


図3 模型配置概要

円筒形構造物であれば直径 80 mm、高さ 80 mm の円筒とした。本実験では、障害物模型の有無による影響を比較するため、障害物模型を除いて計測用模型のみを設置した「一棟のみ」の場合も行う。実験変数は、計測用模型、障害物模型の位置関係とする。

図 3 に模型配置の概要を示す。実験における矩形模型の配置パターンは、横間隔 L は $0.0B \sim 3.0B$ を $0.5B$ 刻みで 7 通り、縦間隔 H は $0.0B \sim 3.0B$ を $1.0B$ 刻みで 4 通りに「一棟のみ」を加え 5 通りとする。障害物模型と計測用模型が平面的に干渉する横間隔 L 、縦間隔 H それぞれ $0.0B$ 、 $0.5B$ の組み合わせ 4 パターンを除外し、その他の計 31 パターンの実験を実施した。円筒形模型の配置パターンは「一棟のみ」に加えて 2 棟配置、3 棟三角形配置、3 棟直列配置の 3 ケースである。円筒形模型 2 棟、3 棟配置では、各配置の基準線に対して津波入射角を β (反時計回りを正とする) で表す。 β は 2 棟配置および 3 棟直列配置では 0° から 90° まで、3 棟三角形配置では 0° から 60° までの範囲を 30° 間隔で変化させる。隣接するタンク間の距離 S は $S/D = 1.0, 0.5, 0.25$ とする。各配置パターン、各貯水高さ h_w についてそれぞれ 5 回の実験を行い、実験結果の時刻歴は 5 回の実験のアンサンブル平均値を用いる。

流速はプロペラ式流速計を用いて、浸水深は容量式波高計を用いて、それぞれ模型の前面および背面で計測する。図 2 に模型設置概要を示す。模型は、模型設置位置上部に取り付けられた架台より鋼板を吊り下げ、その先端に設置する。模型が津波を受ける際に水路床面に接触しないように、模型と水路床面との間には 5.0mm のクリアランスを設ける。波力は模型を吊るした鋼板に作用する曲げモーメント勾配より計測する。

(2) 数値流体解析概要

本解析では三次元数値流体解析ツールボックス OpenFOAM 内にある VOF 法による不混和流体の非圧縮性・等温二相流のソルバーである interFOAM を用いる。支配方程式は連続の式と三次元の Navier-Stokes 方程式である。表 2 に解析条件一覧を示す。本解析では解析時間の短縮を図るため、水路の不要な部分を省略し、貯水槽および水路の 10m (長さ 10m、幅 0.6m、高さ 0.3m) を切り出して解析領域とした。図 4 に解析領域の概要を示す。空間を OpenFOAM 付属の格子分割ツール BlockMesh により x 、 y 、 z 方向について最小格子幅 5mm を基準として分割する。実験では波力の計測のため、模型底と水路床面の間には 5mm のクリアランスを設けているが、ここでは簡単のため省略する。境界条件は、領域上面、下流側の端面を自由流出とし、それ以外の領域の面及び模型表面を壁とする。初期条件で図 4 に示す通り、実験における貯水を模擬した直方体形状の水塊を設置し、解析開始と同時にその水塊の拘束を解くことによって水理実験を再現する。実験における貯水高さ $h_w = 180\text{mm}$ を対象とし、解析の水塊の高さは 180mm とする。

4. 研究成果

(1) 一棟のみにおける水路実験結果

図 5～図 7 に矩形構造物一棟のみの前面・背面の流速、浸水深、波力の時刻歴を示す。いずれの結果も貯水高さ h_w が大きくなるにつれて値が大きくなる傾向にある。図 5 より、前面流速の値は津波到着直後が最も大きく、時間が経過するにつれて徐々に減少する。その後、本実験では 5.0s～6.0s の範囲で急激に減少し、流速の値は 0.1m/s を下回り、収束した。図 6 の前面浸水深時刻歴では、津波衝突後少しの間一定の値を維持するが、その後 4.0s 程度経過してから徐々に大きくなり、5.0s～6.0s の範囲で最大に達する。前面の流速と浸水深の関係では、流速が最大となる時刻での浸水深は小さく、逆に浸水深が最大となる時刻で流速は大きく減少することについては、津波は模型到達直後、模型前面で滞留を生じ浸水深が上昇し、徐々にその滞留域が上流に広がるため、滞留域が波高計、流速計に

表 2 解析条件一覧

| | |
|---------|-----------------------------------|
| ツールボックス | OpenFOAM ver.6 |
| ソルバー | interFoam (VOF法による非圧縮性2層流ソルバー) |
| 離散化スキーム | Euler法 (1次精度, 陰的) |
| 差分法 | Gauss linear (2次精度中心差分) |
| 乱流モデル | LES (標準smagorinskyモデル) |



図 4 解析領域概要

境界条件を自由流出とし、それ以外の領域の面及び模型表面を壁とする。初期条件で図 4 に示す通り、実験における貯水を模擬した直方体形状の水塊を設置し、解析開始と同時にその水塊の拘束を解くことによって水理実験を再現する。実験における貯水高さ $h_w = 180\text{mm}$ を対象とし、解析の水塊の高さは 180mm とする。

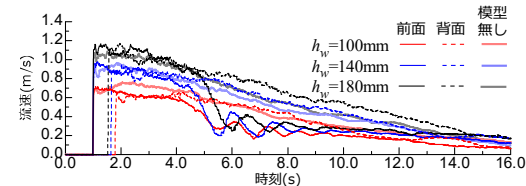


図 5 実験結果流速時刻歴 (一棟のみ、矩形)

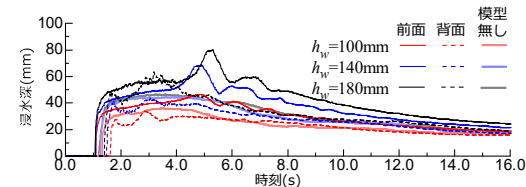


図 6 実験結果浸水深時刻歴 (一棟のみ、矩形)

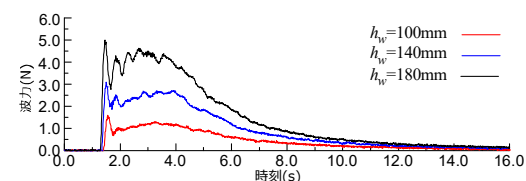


図 7 実験結果波力時刻歴 (一棟のみ、矩形)

差し掛かった時間で、浸水深が大きく上昇し、流速が大きく減少する。

図 7 より矩形構造物一棟のみ波力時刻歴に関しては、津波到達直後 0.5s 以内でサージフロント波力を確認し、波力値が最大となる。しかし、サージフロント波力はごく短時間で発生するため計測が困難で、すべての配置パターンで正確に計測がなされているか判断が難しい。本検討では、サージフロント波力の評価については今後の検討課題とし、各配置パターンにおける最大波力は、計測開始 2.5 秒以降の波力最大値で評価する。計測された波力はサージフロント以降周期的な増減をしており、振動が生じている。この振動は津波の衝撃を受けて鋼板が変形することによるもので、サージフロント時の衝撃で大きく表れ、一定時間継続し小さくなる。本研究では最大波力到達時にはこの振動の影響はごく小さくなると判断した。

図 8～図 10 に円筒形構造物一棟のみの前面・背面の流速、浸水深、波力の時刻歴を示す。いずれの結果においても矩形構造物と同様に貯水高さ h_w が高いほど大きな値になっている。流速は最大値に到達後急激に低下するが、浸水深は津波到達後も徐々に上昇する。これらは模型前に発生した滞留によるものである。

図 11 に一棟のみの波力時刻歴より実験結果と解析結果の比較を示す。矩形、円筒形ともに実験結果では津波衝突直後のサージフロント波力がわずかに確認されるのに対し、解析結果では津波到達後 3 秒程度で最大値を迎えており、若干傾向が異なる。一方で、波力の最大値は近い値となっており、最大波力の傾向は概ね再現されている。サージフロント波力が解析では再現されていないことについては今後の検討課題である。解析結果は実験結果と比較して、3 秒程度までの最大値をおおむねよく捉えている。

(2) 二棟配置における波力時刻歴

図 12 に、一例として $h_w=180\text{mm}$ の二棟配置における縦間隔 $2.0B$ となる実験結果波力時刻歴を示す。図 12 より、縦間隔 $2.0B$ となる二棟配置の波力は横間隔 $0.0B$ のときに最も小さく、横間隔が大きくなるにつれて徐々に大きくなる。これは、横間隔が小さい場合においては津波上流に障害物模型が存在することにより、津波の流れが障害物模型に衝突、分岐することで津波先端部が対象模型に直接衝突しないことによるものである。障害物模型と計測用模型の横間隔が離れるにつれて、この影響は小さくなる。

図 13 に円筒形実験における一棟のみおよび二棟配置の $\beta=0^\circ\sim 90^\circ$ の場合について、波力の時刻歴を示す。津波に対して障害物模型が計測用模型の前方に位置する $\beta=0^\circ\sim 30^\circ$ では、一棟のみよりも二棟配置の方が波力は小さい。これは津波が障害物模型側面で剥離することで、津波先端部が対象模型に直接衝突しないことによるものであると考えられる。これを本研究では、連棟配置における「シールド効果」と呼ぶ。一方、津波先端部が直接計測用模型に衝突する $\beta=60^\circ\sim 90^\circ$ の場合には、一棟のみよりも二棟配置の方が波力は大きい。これはシールド効果が発生しない角度であることに加え、一棟のみよりも構造物数が多いことで津波を堰き止める効果が増し、浸水深が上昇したためと考えられる。これを本研究では、連棟配置における「堰き止め効果」と呼ぶ。図 14 および図 15 に一棟のみと二棟配置の $\beta=0^\circ$ および $\beta=90^\circ$ の場合について波力の時刻歴を示す。シールド効果が発生する津波入射角 $\beta=0^\circ$ では、隣棟間隔 S/D が小さくなるにつれて波力は小さくなる。一方、堰き止め効果が発生する津波入射角 $\beta=90^\circ$ では、隣棟間隔 S/D が小さくなるにつれて波力は大きくなる。

(3) 配置パターンと無次元化波力の関係

図 16 に実験結果における横間隔と無次元化波力の関係を示す。ここでの無次元化波力は各配置パターンの波力最大値 F_{max} を同じ横間隔時における一棟のみの最大波力 $F_{s,max}$ で除した値である。図 16 よりすべての実験結果貯水高さ h_w および解析結果において、配置パターンと波力の関係は同様の傾向があることが確認された。

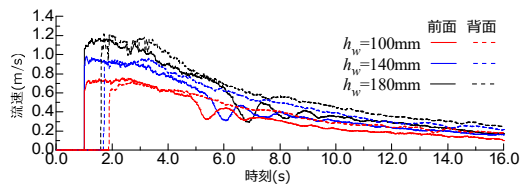


図 8 実験結果流速時刻歴（一棟のみ、円筒形）

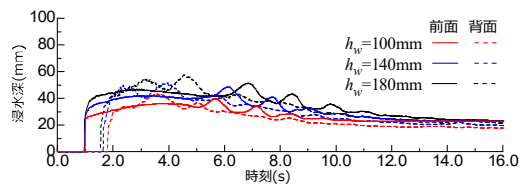


図 9 実験結果浸水深時刻歴（一棟のみ、円筒形）

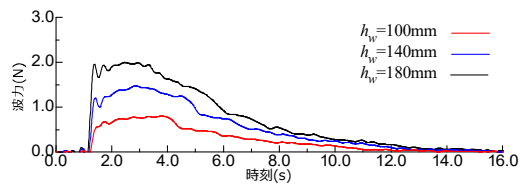


図 10 実験結果波力時刻歴（一棟のみ、円筒形）

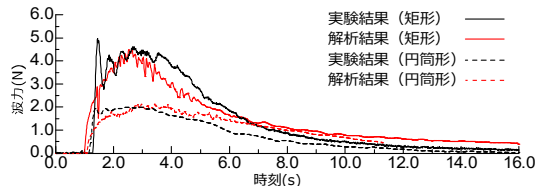


図 11 波力時刻歴（一棟のみ）

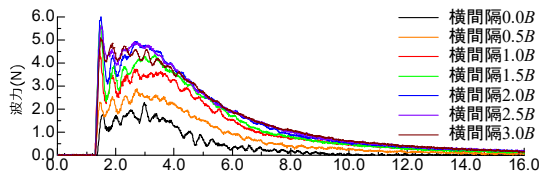


図 12 実験結果波力時刻歴 (二棟配置、矩形、縦間隔 2.0B、 $h_w=180\text{mm}$)

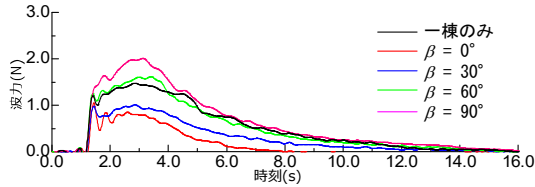


図 13 実験結果波力時刻歴 (二棟配置、円筒形、 $S/D=0.25$ 、 $h_w=140\text{mm}$)

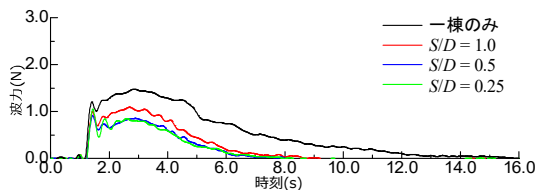


図 14 実験結果波力時刻歴 (二棟配置、円筒形、 $\beta=0^\circ$ 、 $h_w=140\text{mm}$)

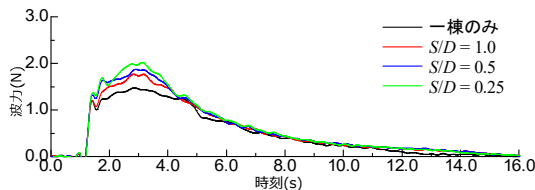
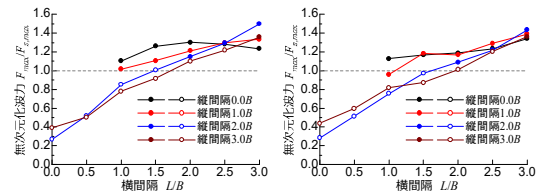
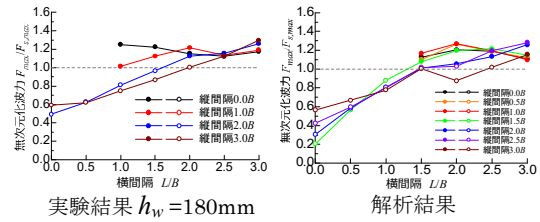


図 15 実験結果波力時刻歴 (二棟配置、円筒形、 $\beta=90^\circ$ 、 $h_w=140\text{mm}$)



実験結果 $h_w=100\text{mm}$ 実験結果 $h_w=140\text{mm}$



実験結果 $h_w=180\text{mm}$ 解析結果

図 16 矩形構造物の各貯水高さにおける横間隔-無次元化波力関係

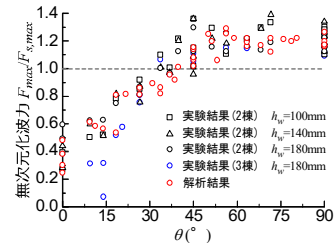


図 17 矩形構造物の θ -無次元化波力関係

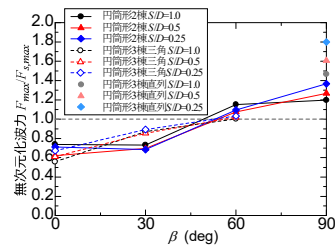


図 18 円筒形構造物の β -無次元化波力関係

図 16 では、横間隔を縦間隔で除した値が 1.0 未満となる配置パターンを白抜き、1.0 以上となる配置パターンを中塗りのプロットで示す。白抜きのプロットは一部を除きおおむね無次元化波力が 1.0 を下回り、一棟のみの場合と比べて波力が小さくなる、一方で中塗りプロットは無次元化波力が 1.0 以上となり、一棟のみの場合と比べて波力が大きくなる。この結果、津波に対して計測用模型が障害物模型の陰に隠れる配置パターンで波力が小さくなり、津波に対して計測用模型が障害物模型と並列に並ぶ配置パターンでは波力が大きくなることを確認できた。

図 16 より、波力は配置パターンにおける横間隔と縦間隔の比率に関係すると考えられる。そこで、障害物模型と計測用模型のそれぞれの中心を結ぶ直線と津波進行方向とのなす角度を θ ($0^\circ < \theta \leq 90^\circ$) と定義し、 θ と無次元化波力との関係を確認する。図 17 に実験、解析より得られた矩形構造物の θ -無次元化波力関係を示す。無次元化波力は $\theta=0^\circ$ の時に最も小さく、 $0^\circ < \theta \leq 45^\circ$ の範囲においては θ が大きくなるにつれて値が大きくなる傾向がある。 $45^\circ < \theta \leq 90^\circ$ では、無次元化波力は θ によらずおおむね一定の傾向を示し、1.0 よりも大きくなる。本研究の範囲において、無次元化波力が 1.0 となる境界は $30^\circ < \theta \leq 45^\circ$ である。図 17 より、無次元化波力は θ と関係性があること、 $45^\circ < \theta \leq 90^\circ$ では一棟のみと比べて波力が増大することが示された。

図 18 に実験から得られた円筒形構造物の β -無次元化波力関係を示す。矩形構造物の実験、解析結果と同様、円筒形構造物でも波力は $\beta=0^\circ \sim 30^\circ$ の場合に一棟のみの値より小さくなり、一棟のみの 5~9 割程度である。一方、 $\beta=60^\circ \sim 90^\circ$ の場合に一棟のみの値よりも大きく、1.1~1.4 倍の値を示す。特に 3 棟直列配置の $S/D=0.25$ 、 $\beta=90^\circ$ のとき最も大きくなる。

以上より、本研究の範囲内において、単体よりも波力が大きくなる配置パターンの関係を明らかにした。一方で、無次元化波力が 1.0 を超える配置ケースでは、閉塞率が大きくなっており、その影響も考えられる。それを明らかにするため、今後、波力と閉塞率の関係を検討する必要がある。

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 0件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 小幡昭彦, 寺本尚史, 亀谷裕紀, 高館祐貴, 佐藤公亮, 植松康 | 4. 巻 67B |
| 2. 論文標題 円筒形オイルタンク群に作用する津波力に関する研究 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 日本建築学会構造工学論文集 | 6. 最初と最後の頁 295-301 |
| 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 Akihiko OBATA, Naofumi TERAMOTO, Hiroki KAMEYA, Yuki TAKADATE, Kosuke SATO, Yasushi UEMATSU | 4. 巻 7 |
| 2. 論文標題 Experimental Investigation of Tsunami Loads on a Group of Cylindrical Oil Storage Tanks | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Advanced Experimental Mechanics | 6. 最初と最後の頁 155-161 |
| 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 小幡昭彦, 寺本尚史, 西田哲也 | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 二棟配置された矩形構造物に作用する津波力に関する検討 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集 | 6. 最初と最後の頁 1131-1136 |
| 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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 小幡昭彦, 寺本尚史, 西田哲也 |
| 2. 発表標題 津波進行方向に障害物を有する建築構造物に作用する津波波力に関する検討 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 小幡昭彦、寺本尚史、西田哲也 |
| 2. 発表標題 津波進行方向に障害物を有する建築構造物に作用する津波波力 |
| 3. 学会等名 日本建築学会東北支部研究報告集、第85号 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 小幡昭彦、寺本尚史、西田哲也 |
| 2. 発表標題 二棟配置された建築構造物に作用する津波波力 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 寺本尚史、佐藤公亮、亀谷裕紀、植松康、小幡昭彦 |
| 2. 発表標題 連棟配置された円筒形構造物に作用する津波力に関する検討、その1:水理模型実験 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 亀谷裕紀、寺本尚史、小幡昭彦、佐藤公亮、植松康 |
| 2. 発表標題 連棟配置された円筒形構造物に作用する津波力に関する検討、その2:数値流体解析 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小幡昭彦、寺本尚史、西田哲也 |
| 2. 発表標題 ダム崩壊型実験における構造物前面に作用する津波圧力分布 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 小幡昭彦、寺本尚史、西田哲也 |
| 2. 発表標題 構造物前面における津波の波圧分布に関する検討 |
| 3. 学会等名 日本建築学会東北支部研究報告集第83号 |
| 4. 発表年 2019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 | 寺本 尚史 (teramoto naofumi) (00315631) | 秋田工業高等専門学校・その他部局等・准教授 (51401) | |
| 研究 分担者 | 佐藤 公亮 (sato kosuke) (50788510) | 三重大学・工学研究科・准教授 (14101) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|