

論文 開口数の異なる建築構造物に作用する津波波力に関する研究

鉢呂 友惟*1・高橋 典之*2

要旨：2011年の東北地方太平洋沖地震を契機に、国土交通省から津波避難施設の構造設計指針が示された。本指針では構造物に加わる津波波圧や浮力の算定式を規定し、設計指針が示されている。開口を有する建築構造物に作用する津波波力に関しては、建物室内壁等の抵抗を考慮し（ピロティを除き）除外する前の津波波力の7割を下回らないことを原則として、開口部における津波波力を算定的に除外できるとしている。しかし同じ開口率でも開口数やその配置による津波外力の影響については述べられていない。そこで本研究では、同一開口率に対する開口数をパラメータとし、それらが建築物に作用する津波外力に与える影響について考察した。
キーワード：粒子法（SPH法）、開口率、開口数、津波波圧、津波波力

1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では広範囲に津波が発生し、建築物における被害は甚大であった。これを受けて耐津波設計に関する研究が進められ、国土交通省は津波に対する既存建物の構造設計要件を見直し、2012年には「津波避難ビル等の構造上の要件の解説¹⁾」において、構造物に加わる津波波圧や浮力の算定式を規定し設計指針を示している。ただし、開口を有する構造物に作用する津波波力については、津波作用面積(津波による波圧が作用する建築物等の部分の面積)から開口部の面積の総和を除いた面積を津波作用面積で除して得た数値(開口率)を乗じることで、津波波力を低減できるとしている。文献1)では、内壁等が存在する場合には波力の低減効果が小さくなる解析結果から開口による波力の低減率 γ の下限値を0.7と定めており、内壁等が存在しない等の特殊な場合は特別な調査又は研究によってもよいこととなっているが、開口数や開口位置による津波波力低減効果への影響については述べられていない。

そこで本研究では、流体解析を行い、開口率や開口数が構造物に作用する津波外力に与える影響について検討した。

2. 文献1)における開口低減の考え方

「津波避難ビル等の構造上の要件の解説¹⁾」においては、(1)津波作用幅から開口部の幅の総和を除いて計算する方法と、(2)津波作用面積から開口部の面積の総和を除いた面積を津波作用面積で除して得た数値(開口率)を乗じて計算する方法が提示されているが、(1)、(2)いずれの方法においても、開口部の幅の総和を除外して計算した波力が津波作用幅により計算した波力の7割を下回る場合は、当該割合が7割となるような係数(低減率 γ)を用いて波力を計算することとしている(図-1)。低減率 γ の下限値は、内

壁等が存在する場合には波力の低減効果が小さくなる解析結果から設定されており、内壁等が存在しない等の特殊な場合は特別な調査又は研究によってもよいこととなっている。

なお、内壁の存在による開口低減率の下限値(0.7)が定められていないピロティ部分については、ピロティ部の小規模施設配置(ピロティ建築物であってもエントランス部分となる区画には壁などが配される)の影響を検討した実験的研究が報告されており²⁾、既存のガイドラインによる算定波力を上回る波力がピロティ部小規模構造壁面に作用することが指摘されている。

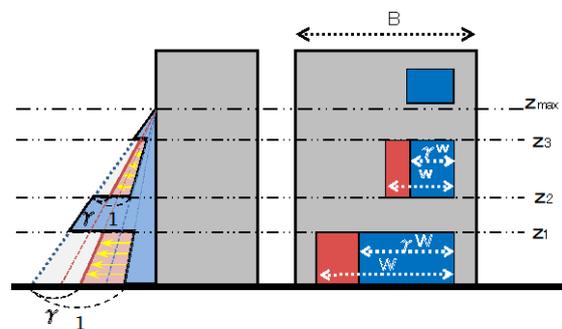


図-1 津波避難ビル等の構造上の要件における開口低減率¹⁾

3. 流体解析に基づく津波波圧・流速の算定

前章に記した現状を踏まえ、本研究では粒子法(SPH法)を用いた流体解析によって、同じ開口率でも開口数やその配置による津波波力の低減効果に関する影響について検討を行う。

流体解析に用いた粒子法(SPH法)は、計算格子を必要としない離散化解析手法である。格子法は自由表面の表現が困難であるが、SPH法は大変形を伴う自由表面の変形を

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (学生会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 准教授 博(工) (正会員)

容易に表現でき、建築構造物に衝突する際の流体の流動を容易に表現することができる。また、MPS法も同じく粒子法であるが、計算コストが高く大規模・高解像度の計算を行う際にかかなりの解析時間が必要となる。SPH法はMPS法ほど解析時間はかからず、本研究での開口率や開口数をパラメータとした津波波力の検討に適していると言える。そこで、津波波圧・流速の算定には粒子法(SPH法)による流体解析プログラム DualSPHysics³⁾を用いた。本章では解析概要について記述する。

3.1 解析概要

本研究における流体解析に用いたSPH法は、それぞれの粒子(計算点)に解くべき物理量を定義し、その物理量がkernel関数によって定義される分布形状で空間分布していると想定し、影響半径内に存在する粒子上での物理値を平滑化する。つまり、任意の粒子*i*近傍の微小領域を*dx*とし、粒子質量*m_i*、密度*ρ_i*とすると物理量*f(x)*が式(1)で近似される。*W*は重み関数、*h*は影響半径を表し、*N*は総粒子数である。

$$\nabla f(x) \cong \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\rho_i} f(x_i) \nabla W(x-x_i, h) \quad (1)$$

ここで、重み関数*W*はMonaghanらが提案した式(2)を用いている⁴⁾。

$$W(x, h) = \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3 & (0 \leq q \leq 1) \\ \frac{1}{4}(2-q)^3 & (1 \leq q \leq 2) \\ 0 & (q \geq 2) \end{cases} \quad (2)$$

*q*は粒子間無次元距離である。空間分布に関する項については、式(3)により近似する。支配方程式であるNavier-Stokes方程式を式(1)、(3)に従い、人工粘性Πを考慮した上で離散化すると、式(4)のように表せる。

$$\begin{aligned} \nabla f(x) &\cong - \int f(x') \nabla W(x-x', h) dx' \\ &\cong - \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\rho_i} f(x_i) \nabla W(x-x_i, h) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{dv_i}{dt} = - \sum_j m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} + g \quad (4)$$

ここで、Monaghanらは状態方程式を用いて*P*を計算し、陽的に式(4)を解くことを提案している⁵⁾。状態方程式は式(5)に示す。*b*、*γ*は係数、*ρ₀*は初期密度で1000kg/m³である。また、SPH法は圧縮性流体を扱うため、連続の式(6)を満たして密度が更新される。

$$P = b \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (5)$$

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j v_{ij} \nabla_i W_{ij} \quad (6)$$

3.2 流体解析手法の妥当性検証

本研究では、開口配置による流体力の低減を直接的に計測する水理実験を実施しているわけではないため、適用する流体解析手法について妥当性の検証を事前に実施することとした。流体解析結果の妥当性の検証には小幡らによる水理実験⁶⁾で得られた実験結果を用い、当該実験をモデル化した解析結果と比較する。

はじめに文献6)の実験概要について述べる。実験では流路長さ4500mm、幅300mmの水理実験装置に、立方体の受圧模型80mm×80mm×80mmを、貯水槽の流出口から4000mmの位置に配置している。貯水量をパラメータとして、貯水槽拡張前は30L、35L、40Lの3パターン、貯水槽拡張後は120L、160L、200Lの3パターンの計6パターンについて実施された実験結果をここでは対象とする。実験模型概要を図-2に示す。

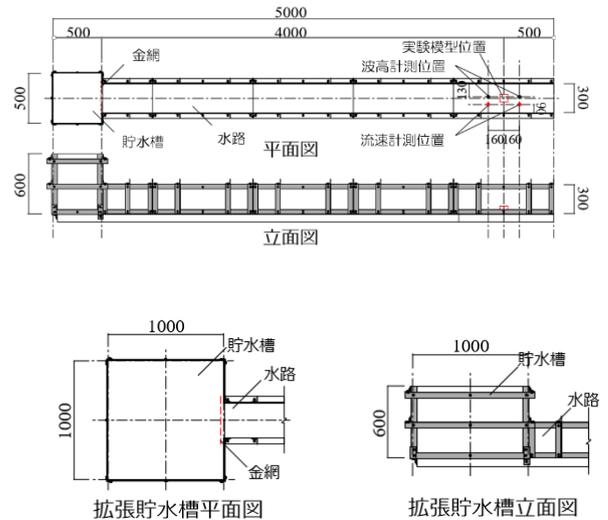


図-2 実験模型概要

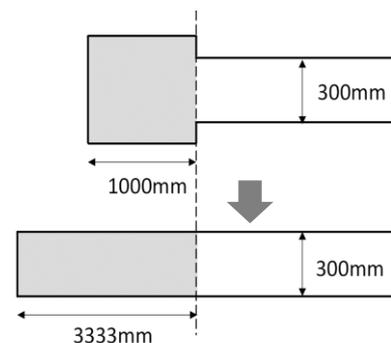


図-3 貯水槽部分のモデル化

解析では、実験水路の貯水槽部分について貯水量と貯水高さが一致するよう図-3のようにモデル化し、ダムブレーク式で解析した。ダムブレーク式は、ダムが決壊し流体が解放された状態における流れのように、自由表面流れ場を模擬した流体の造波方式である。波力と流速の最大値について実験結果と解析結果を表-1に示す。あわせて、貯水量 120L 時の波力と流速の時刻歴について、実験値と解析値の比較をそれぞれ図-4、図-5に示す。

実験結果と解析結果を比較したところ、解析では計算結果の空間平均を用いていることから最大波力、最大流速とも実験結果を若干過少評価したが、時刻歴波形の増減傾向は捉えられている。ただし、実験・解析ともに縮小モデルであり、実験で設置したプロベラ流速計などの計測器具が受圧模型面に与える影響が相対的に大きか

表-1 最大波力および最大流速の実験値と解析値の比較

貯水量 (L)	貯水高さ (mm)	最大波力 (N)		最大流速 (m/s)	
		解析	実験	解析	実験
30	120	0.62	0.82	1.09	1.02
35	140	0.95	1.23	1.12	1.17
40	160	1.12	1.51	1.23	1.30
120	120	0.98	1.47	0.81	1.02
160	160	3.01	3.47	1.17	1.29
200	200	3.77	4.02	1.40	1.41

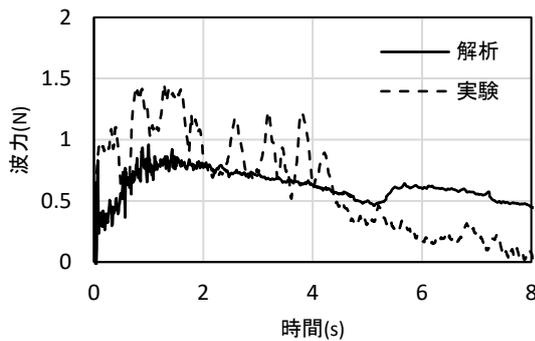


図-4 貯水量 120L の波力時刻歴

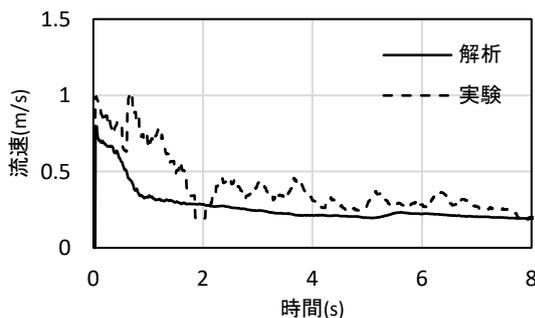


図-5 貯水量 120L の流速時刻歴

ったと考えられるが、解析においては計測装置のモデル化までは行っていないことなどから、実験値と完全に一致しない部分もあった。

4. 流体解析による波圧・波力の検証

本章では、前章で説明した粒子法に基づく流体解析手法を用いて、開口を有する構造物に作用する津波波圧を算出し、開口数や開口率が構造物に作用する津波外力に与える影響について考察する。

4.1 計算および計測条件

検討対象建物は 1 層建築物を模擬し、計算機スペックと解析時間を考慮した結果、実大スケールの 1/10 縮小モデルを想定する。検討対象建物は剛体であり、床面積 0.5m×1.5m、高さは 0.36m である。

SPH 法で定める計算領域は、図-6に示す $(x, y) = (0 \sim 4.0, 0 \sim 3.5)$ の平面上の空間とし、貯水量は $(x, y, z) = (0 \sim 0.4, 0 \sim 3.5, 0 \sim 1.0)$ と設定した。上記の解析領域設定では、総粒子数は 272,095、流体粒子数は 193,851 となる。解析時間は 3 秒間とし、時間増分は 0.01s とした。

なお、建築物左右の境界面からの反射波による影響がないように境界面を設定するとともに、後方の境界面からの跳ね返り反射波の影響もないように後方境界面を無いものとして設定した。検証建物に対する流体の流入・流出状況の一例を図-7に示す。

本研究では、開口数や開口率が波力や波圧に与える影響について検討するため、開口高さによる影響がないよう開口高さを 0.3m の一定値とし、浸水深は開口高さより低く

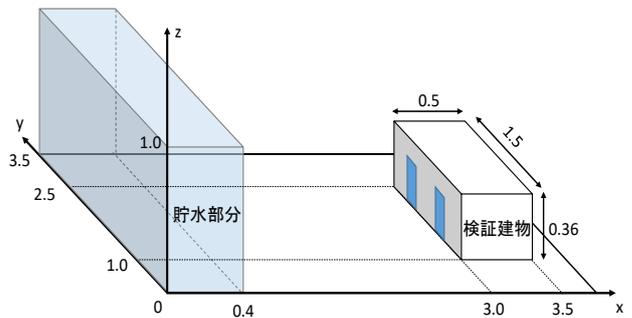


図-6 計算領域と検討対象建物

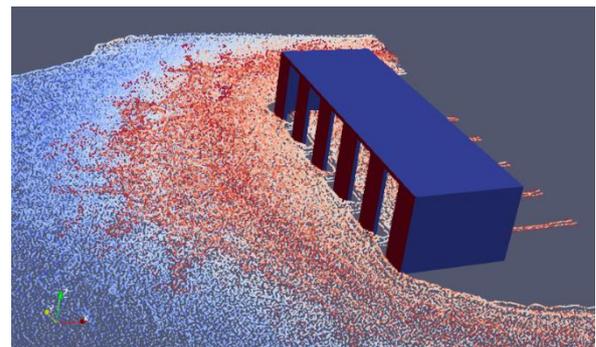


図-7 開口部への水流流入の様子

なっている。

SPH法は、粒子に生じる応力の空間分布を計算する手法であり、粒子位置における応力から粒子の加速度が計算される。このとき、粒子が局所的に集まる部分と、粒子が存在しなくなる部分が生じる⁷⁾。解析対象の総粒子数が増えれば、流体粒子の移動時に生じる粗密における計算値のばらつきを低減させることができるが、計算に必要なメモリが増大するとともに、解析時間も大幅に増大する。そこで、解析対象の総粒子数を少なく保ちつつ、流体粒子の移動時に生じる粗密における計算値のばらつきを低減させるために、本論文では、測定対象中心とその周囲の26点(計測点に対してx方向に±0.01m間隔ずつ、y方向に±0.05m間隔ずつ、z方向に±0.02m間隔ずつ離れた点)の計27点の波圧時刻歴を空間平均した値を用いることとした。なお、建物を構成している粒子の反発力による影響を考慮し、測定点は建物構成粒子から1.5h(h:平均粒子間隔。平均粒子間隔の2倍以上離れた粒子からの作用はないものとする)離れた地点の波圧を抽出している。加えて、時刻歴評価において時間軸上で0.05s幅の平滑化ウィンドウを導入し、局所的な計算結果のばらつきを低減させることにした。また、本研究では開口数や開口率が建築物に作用する津波外力に与える影響について考察するため、建物に衝突し跳ね上がった微小な飛沫粒子による外力作用は考慮しないものとした。

4.2 開口率・開口数の設定

開口率を0.1~0.5まで変化させ、各開口率に対して開口数を1~5まで変化させて、壁面に加わる波力や平面波圧分布の特徴について比較分析を行った。開口数が1の場合は、受圧面及び受圧面の反対側の外壁の中心に開口を配置し、開口数が2以上の場合は壁面部分と開口部分が等幅・等間隔で並ぶように開口を配置した。開口高さは0.3mに設定し、開口幅と開口率は比例関係にあるとする。

なお本研究では、受圧面における開口率と開口数が津波波力に与える影響について検討するため、開口を通り抜けた流体はそのまま背面の開口を通り抜けるよう、背面の開口数を前面の開口数と同数に設定した。

5. 流体解析結果

各開口率に対する開口数の変化をパラメータとして流体解析を行った結果を以下に示す。

5.1 壁面に作用する波力についての考察

本節では、壁面に作用する波力合計値の時刻歴変化について検討する。各開口率について壁面に作用する波力合計値の時刻歴が開口数により異なるかどうかを図-8に示す。

開口率0.1の場合は、開口数が増えれば壁面に作

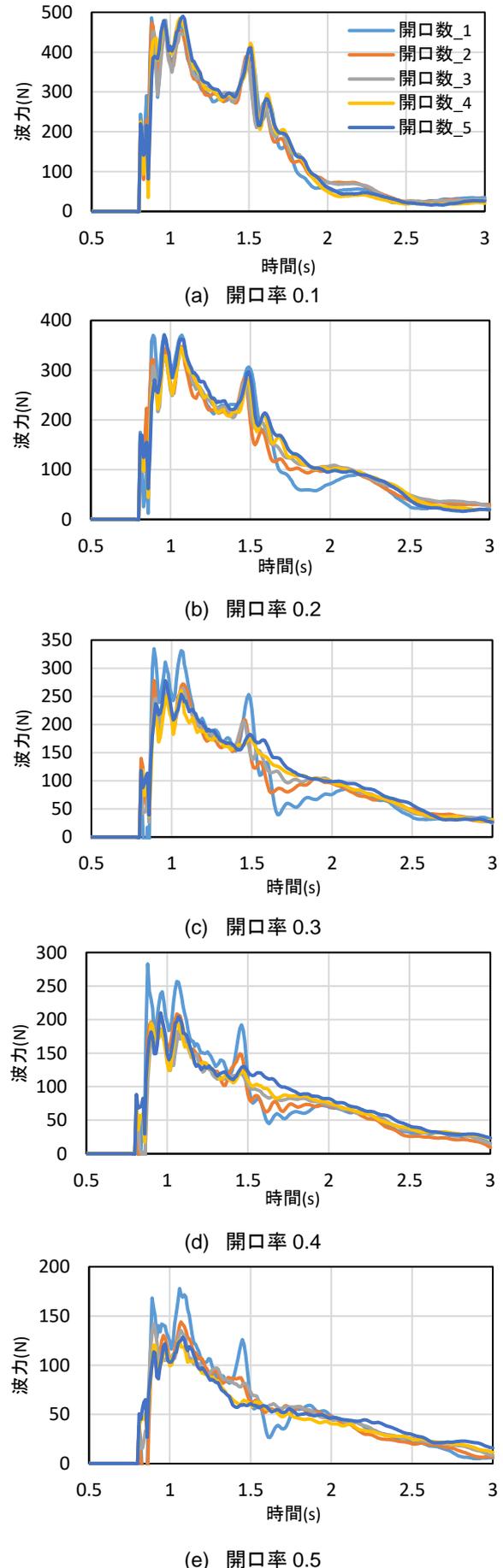


図-8 開口率別の波力時刻歴変化

用する波力合計値の最大値や時刻歴が概ね一致しており、開口数の変化が建築構造物に加わる全波力にあまり影響を与えないことが確認された。

開口率 0.2 の場合は、壁面に作用する波力合計値の最大値は開口率 0.1 と同様に概ね一致しているが、最大波力到達後の時刻歴波形に対して開口数の違いが影響することが確認された。開口数が少ないほど、最大波力到達後の波力の減少が早まる傾向が見られた。

開口率が 0.3 より大きくなると、壁面に作用する波力合計値の最大値に対しても開口数の違いが影響することが確認された。壁面に作用する波力合計値の最大値は開口数が少ないほど大きくなり、解析結果からは 100N ほどの差が生じることが確認できるが、これをフルード相似則に従い実大スケールに換算すると 100kN の差が生じていることになる。また、最大波力到達後の時刻歴波形については、開口率 0.2 と同様に、開口数が少ないほど最大波力到達後の波力の減少が早まる傾向が見られた。

以上まとめると、開口率が 0.3 より大きい場合は開口数によって壁面に作用する波力合計値の最大値に違いが出るのが分かった。また、開口率が 0.2 より大きい場合は、開口数が少ないほど最大波力到達後の波力の減少が早まる傾向が見られた。

5.2 平面波圧分布についての考察

本節では、壁面および開口の存在が作用する波圧の平面分布に与える影響を分析する。特に前節で、開口率が 0.3 より大きい場合は開口数によって波力に違いが出るということが確認されており、ここでは、開口率 0.4 の場合に注目して分析を進める。

図-9 に開口数別の波圧の平面分布を示す。なお図-9 の平面分布は、最大波力時(時刻 $t=0.90s$)のものを示しており、測定点高さを $z=0.06m$ としている。

図-9 より、開口数が 1 の場合は壁面にかかる波圧の最大値が他のケースよりも大きく 5500[N/m²]程度であったが、開口数 2 以上ではおよそ 4000[N/m²]程度で、開口数の増加に伴い僅かではあるが徐々にその値が小さくなる傾向が見られた。

一方、開口数が多くなるにつれ、開口部分の測定点 ($z=0.06m$ の点) において波圧が計測されるようになり、壁面部分の測定点において計測される波圧との差が小さくなる傾向が見られた。これは、開口数が多いと開口幅が狭くなり、開口部と隣り合う壁面の脇を回り込む流体が開口部で滞留したためと考えられる。図-10 中の黄緑色点は壁面前面の粒子、橙色点は開口部の中央を進む粒子を表し、開口数 5 の場合は開口数 2 と比べて橙点の粒子が開口部分で滞留していることがわかる。一方、開口数が少ない場合は、開口幅が大きく、開口部に隣り合う壁面の脇を回り込む流体同士の合流・滞留が生じにくく、開口部分の測定点 ($z=0.06m$ の点) において波圧は計測されず、壁面部分の測定点において壁面で遮られた流体が壁面前面に溜まり、壁面に加わる波圧が増大したのではないかと考えられる。

以上より、(開口率が 0.3 以上で) 開口率が等しい場合でも開口数によって、壁面部分に作用する波圧最大値が異なり、開口数が少ないほど壁面部分に作用する波圧最大値が高くなる傾向が確認された。また、開口数によって流体の滞留状況も異なり、開口数が多いほど開口幅が狭く、開口部と隣り合う壁面の脇を回り込む流体が開口部で合流・滞留しやすくなることが確認された。これは、前節で確認した、開口数が少ないほど最大波力到達後の波力の減少が早まる(開口数が多いほど最大波力到達後の波力の減少が遅くなる)傾向の要因として、開口部まわりの滞留の有無が影響していることを示唆している。

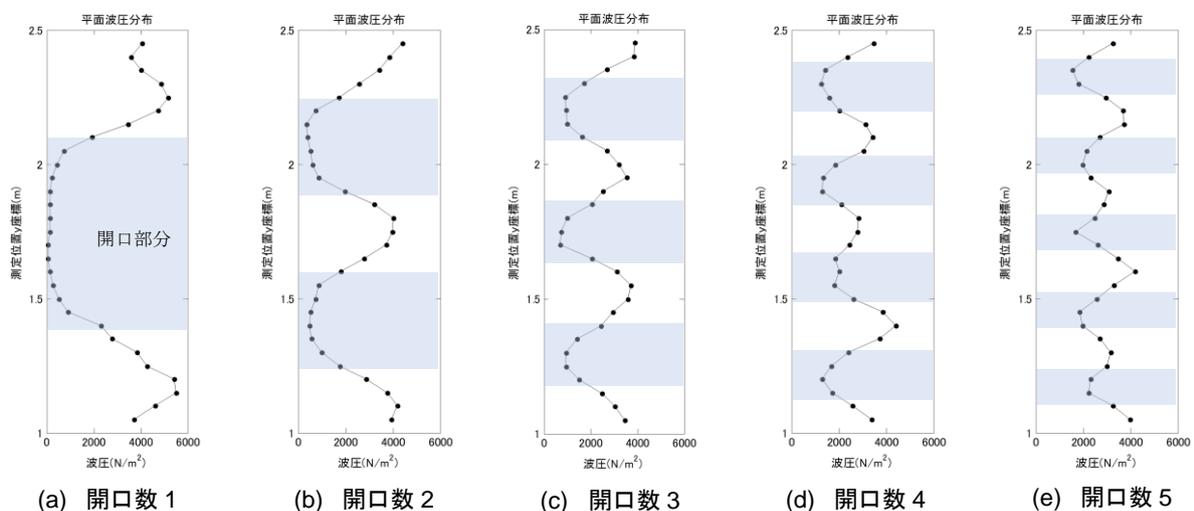


図-9 開口数別の平面波圧分布(開口率 0.4)

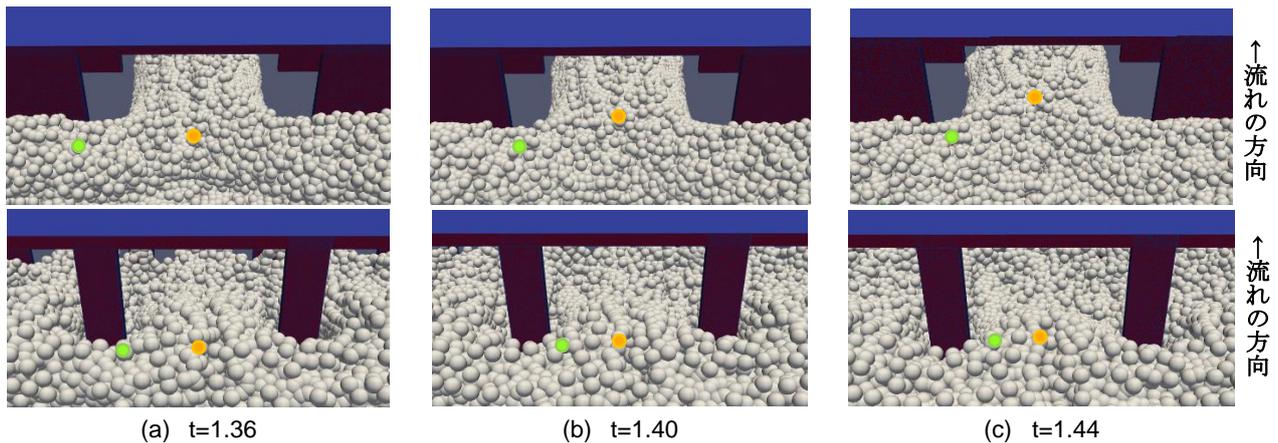


図-10 開口率 0.4 における開口部の滞留の様子(上段が開口数 2, 下段が開口数 5)

6. 結論

本論文では、同一開口率に対する開口数をパラメータとし、それらが建築物に作用する津波外力に与える影響について考察した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 開口率が小さい場合(開口率 0.1 の場合)は、開口数の違いが壁面に作用する波力合計値の最大値および波力時刻歴に殆ど影響しないが、開口率が 0.3 より大きい場合は開口数によって壁面に作用する波力合計値の最大値に違いが出るのが分かった。また、開口率が 0.2 より大きい場合は、開口数が少ないほど最大波力到達後の波力の減少が早まる傾向が見られた。
- 2) 開口率が 0.3 より大きい場合について、波圧の平面分布を分析したところ、開口数によって壁面部分に作用する波圧最大値が異なり、開口数が少ないほど壁面部分に作用する波圧最大値が高くなる傾向が確認された。また、開口数によって流体の滞留状況も異なり、開口数が多いほど開口幅が狭く、開口部と隣り合う壁面の脇を回り込む流体が開口部で合流・滞留しやすくなるのが確認された。これは、開口数が少ないほど最大波力到達後の波力の減少が早まる(開口数が多いほど最大波力到達後の波力の減少が遅くなる)傾向の要因として、開口部まわりの滞留の有無が影響していることを示唆している。

現行のガイドライン(津波避難ビル等の構造上の要件の解説¹⁾)では、開口による津波波圧の低減について、内壁等が存在しない等の特殊な場合は特別な調査又は研究によってもよいこととなっているだけで、開口数や開口位置による津波波力低減効果への影響が明示されていないわけではない。本研究の結果、開口率が等しくても開口数が異なることで、壁面に加わる波力が異なること、最大波力到達後の波力の減少時間が異なることが分か

った。今後、建築構造物の受圧前面だけでなく背面の開口数や開口配置が、構造物全体に作用する波力にどのような影響を与えるのかを分析し、開口による波力低減を適切に評価する手法の開発につなげる予定である。

謝辞

水理実験データは秋田県立大学の小幡昭彦先生から提供を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：津波避難ビル等の構造上の要件の解説，2012.2
- 2) 本田隆英，織田幸伸，伊藤一教，渡辺征晃，高島知行：ピロティ構造を対象とした津波波力に関する実験的研究，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.70，No.2，pp.I_456-I_461，2014.10
- 3) Crespo AJC, Domínguez JM, Rogers BD, Gómez-Gesteira M, Longshaw S, Canelas RB, Vacondio R, Barreiro A, García-Feal O. : DualSPHysics | Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics, *Computer Physics Communications*, 187, pp.204-216, 2015
- 4) Monaghan JJ and Lattanzio JC : A refined method for astrophysical problems, *Astronomy & Astrophysics*, 149, pp.135-143, 1985
- 5) Monaghan JJ and Kos A. : Solitary waves on a Cretan beach, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 125, pp.145-154, 1999
- 6) 小幡昭彦，西田哲也：建築物背面に回り込む津波に関する実験，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.47-48，2017.8
- 7) Monaghan JJ : SPH without tensile instability, *Journal of Computational Physics*, 159, pp.290-311, 2000.4