沿岸域の建築物における津波荷重特性に関する研究

増田 光一¹・大河原 靖徳²・相田 康洋³・居駒 知樹⁴

¹正会員 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501千葉県船橋市習志野台7丁目24-1)

masuda.koichi@nihon-u.ac.jp

²日本大学大学院理工学研究科 海洋建築工学専攻 (〒274-8501千葉県船橋市習志野台7丁目24-1)

csya11005@g.nihon-u.ac.jp

³日本大学大学院理工学研究科 海洋建築工学専攻 (〒274-8501千葉県船橋市習志野台7丁目24-1)

csya12001@g.nihon-u.ac.jp

⁴正会員 日本大学准教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501千葉県船橋市習志野台7丁目24-1)

tomoki.ikoma@nihon-u.ac.jp

国土交通省住宅局及び国土技術政策総合研究所により、津波流体力算定式における水深係数 a に対し、津波入射方向に遮蔽物となる構造物が存在する場合、水深係数 a を3.0から2.0へ低減できると提案している。しかし、水深係数2.0の適用範囲として、遮蔽物背後500m以内を一律に2.0とする是非について具体的に検討した研究は著者らの知る限り殆どないのが現状である。

そこで本研究では、粒子法的一种であるMPS法による数値シミュレーションに基づき遮蔽物背後に存在する建築物に作用する津波荷重の特性に関する検討を行い水深係数の値の適用性を明確にした。

その結果、防潮堤のような遮蔽物を津波が越流する場合、遮蔽物背後であっても水深係数 a は2.0で実用上問題ないことを確認した。また、建築物の隣棟間隔が15m以内では前面建築物により背後にある建築物が受ける津波荷重が顕著に低減された。

Key Words : Tsunami, MPS method, Tsunami load

1. 緒言

2011年3月11日に発生した東日本大震災による建築物被害は約40万棟におよび、被害の9割が岩手県、宮城県、福島県の3県に集中している。東日本大震災では津波により沿岸都市が甚大な被害に遭った。

そこで建築物設計において津波対策を行う上で、建築物に作用する津波荷重の算定が極めて重要である。建築物に作用する津波荷重算定法として内閣府による「津波避難ビル等に係るガイドライン」¹⁾の中で、静水圧近似を基にした津波流体力算定式(1)式が提唱されている。

$$F_x = \rho g B \int_{Z_1}^{Z_2} (a\eta - z) dz \quad (1)$$

ただし、 F_x ：津波流体力、 ρ ：流体密度、 B ：建築物幅、 a 水深係数（通常 3.0）、 η ：建築物前面での遡上水位、 z ：地盤面からの高さ、 Z_1 ：受圧面の最小高さ、 Z_2 ：受圧面の最高高さである。また、波流体力算定式(1)の概念図を図-1に示す。

図-1 津波流体力算定式概念図

また、国土交通省住宅局および国土技術政策総合研究所²⁾により「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」（以下新ガイドライン）の中で(1)式に関し、通常 3.0 である水深係数 a を、遮蔽物の背後 500m において一律で $a=2.0$ とすることが提案されている。実際に東日本大震災の被害でも、津波入射方向に建築物が存在することで背後にある建築物の被害が他と比べ明らかに低減されている。よって、新ガイドラインで提案されている $a=2.0$ とする措置は妥当であると考えられる。しかし、遮蔽物から建築物までの距離の影響を考慮せずに一律に

設定されている点が問題となる可能性があると考えられる。また、独立行政法人建築研究所³⁾の東日本大震災における建築物被害調査から、様々な被害特性が明らかとなってきた。

そこで、本研究では遮蔽物背後の建築物に関して、以下に示す項目について津波荷重特性を明確にすることを目的とする。

- 1) 建築物と防潮堤の距離の影響
- 2) 建築物隣棟間隔の影響

また、本研究では陸上にある建築物への津波荷重を検討するため、津波の陸上遡上および津波荷重を精度良く予測する必要がある。そこで、数値計算的手法で、粒子法の一つであるMPS法による数値水槽を用いた数値実験により各種の実証を行った。なお、数値実験で適用する津波データは、国土交通省港湾局及び独立行政法人港湾空港技術研究所より提供された東日本大震災時に、岩手県中部沖に設置されているGPS波浪計が観測した津波データを適用した。

2. MPS法(Moving Particle Semi-implicit Method)

MPS法は越塚ら⁴⁾が開発した粒子法の一つである数値解析手法であり、空間に配置した粒子の移動を時々刻々捉えることで流れ場を表現するラグランジュ的な手法である。このことにより複雑な格子生成プロセスを必要とせず、さらに格子法(オイラー的手法)の問題点である数値拡散による自由表面の消失が生じない。そのために津波の砕波や遡上のような自由表面の大変形を伴う非線形現象の解析に適していると考えられる。MPS法の支配方程式は(2)式の連続の式、(3)式のナビエ・ストークス方程式である。(2)式は質量保存則であり、密度の時間変化がゼロであり一定であることを示す。(3)式は運動量保存則より導かれ、左辺は速度ベクトルに対するラグランジュ微分であり、右辺第一項は圧力勾配項、第二項は粘性項、第三項は重力項を示し P は圧力、 ν は動粘性係数、 g は重力加速度である。離散化及びモデル化といった詳細は越塚ら⁴⁾の論文に詳細が記載されているために本報では詳細は割愛する。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\vec{u} + g \quad (3)$$

さらに、本研究で適用するMPS法のプログラムは、越塚ら⁴⁾により開発されたMPSプログラムコードの基、増

田⁵⁾により開発されたプログラムに、相田ら⁶⁾により開発された流入、流出の機能を持つ造波境界を適用したプログラム・コードを適用した。適用するMPSプログラムの津波荷重の数値計算精度は、相田⁶⁾の研究の中で水槽実験との比較から検証されているものである。

3. 流入データ作成方法

本研究では、東日本大震災の際に岩手県中部沖に設置されているGPS波浪計が観測した津波データをMPS法に適用し各種の検討を行う。しかし、MPS法は、粒子数増加に伴い計算負荷が幾何級数的に増加する欠点をもつ。

つまり現状のMPSプログラムでは、計算精度を確保しながら、GPS波浪計が設置されている海域から陸上まで全てを再現することは困難である。そこで、気象庁による津波警報発令の際にも実際に適用されている波高と水深の4乗根の積は一定あるとするグリーンの法則を適用した。さらに(4)式により算出した沿岸での換算波高に対する流速を、長波理論における流速の理論式(5)式により算出し、得られた波高、流速から流入データを作成した。

$$H = 4\sqrt{\frac{h_l}{h}}H_l \quad (4)$$

ただし、 H : 沿岸での波高、 H_l : 沖合での波高、 h : 沿岸での水深、 h_l : 沖合での水深とする。

$$u = \eta\sqrt{\frac{g}{h}} = \sqrt{\frac{g}{h}}\frac{H}{2}\sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (5)$$

ただし、 u : 粒子速度、 g : 重力加速度、 h : 水深、 η : 定常海面からの水面高さ、 H : 波高、 T : 周期、 t : 時間とする。

4. 津波遡上特性に関する検討

(1) 数値計算概要

本研究では、陸上にある建築物を対象とした検討を行うため、陸上に遡上した津波の遡上特性の検討を行う必要がある。そこで、まず初めに津波遡上特性の検討を2次元MPS法による数値実験により行った。計算条件を表-1に示し、数値水槽概要図を図-2に示す。なお、本項では防潮堤の有無による検討を行った。防潮堤モデルを設置した場合、設置しない場合での計算モデルそれぞれを

作成し、防潮堤背後10mから陸側に100m地点まで10m毎の波高、流速の解析を行った。流入データは、(4)式に、岩手県中部沖に設置されているGPS波浪計（設置海域の水深200m）が観測した津波データの計算領域（水深10m）における換算波高、および(5)式より得られた流速より作成し、それを流入データとした。

なお、本研究では防潮堤高さを宮古市のものを参考に決定したが、遮蔽物背後の建築物に作用する津波荷重特性の検討を行うことを目的としているため、計算領域の海底地形および防潮堤の形状等細かな条件は考慮せずに作成することとした。

表-1 数值計算条件

Seawall	YES	NO
Number of particle	607955	607935
Particle size [m]	1.0	1.0
Simulation time [sec]	700.0	700.0
dt [sec]	0.01	0.01
Output time step [sec]	0.1	0.1

図-2 数值水槽概要図

(2) 結果および考察

図-3には、防潮堤の有無に関する各地点毎の遡上水位の最大値を示す。防潮堤の有無に関する比較を行ったところ、防潮堤を有する場合、防潮堤より10m地点での遡上水位が最大となっていることがわかる。しかし、防潮堤から10m以降では遡上水位が減少し、50m地点以降は15m程度となり、防潮堤を有さない場合と比較して約5m程度遡上水位は低くなっていることがわかる。

また、各地点毎の最大遡上流速の比較を行ったグラフを図-4に示す。結果から防潮堤を有する場合では、防潮堤越流後、流速は増加し、50m地点で最大となっている。この点に関し、津波が越流する際防潮堤により生じる水位差によって流速に影響を与えたと考えられる。

これらから、防潮堤を有する場合、防潮堤背後50m以内では、防潮堤の影響による急な水面変動や、流速が増加することで、同範囲内に存在する建築物に対する被害拡大の要因となることが考えられる。

また、図-5には津波来襲より300s後、図-6には津波来襲後420s後のそれぞれの防潮堤が有る場合、無い場合での同時刻における数値計算のスナップショットを示す。

本計算モデルで適用した高さ5.0mの防潮堤では、津波
遡上を約5分程度遅らせることができたことが図-5の視

覚的結果から考えられる。また、図-6から、防潮堤を越流した津波は防潮堤の背後面で流速が速くなっていることが視覚的にも見受けられる。

図-3 防潮堤からの距離ごとの最大浸水深さ比較

図4 防潮堤からの距離ごとの最高流速比較

図-5 津波来襲300sのスナップショット

図-6 津波来襲420sのスナップショット

5. 防潮堤背後建築物に作用する津波荷重の検討

(1) 数値計算概要

本項では、4章の結果を基に、防潮堤の背後10m, 50m, 100m地点に建築物モデルを設置した場合の、建築物モデルに作用する津波荷重の比較を、3次元MPS法を適用した数値実験より行った。なお、流入データは、4章でのMPS法によるシミュレーションにより、防潮堤上部での遡上水位、遡上流速の解析結果から流入データを作成し検討を行った。数値計算条件を表-2に示し、数値水槽概要図を図-7に示す。解析項目は建築物モデルに作用する水平方向の津波荷重である。

表-2 数値計算条件

Distance to a seawall [m]	10	50	100
Number of particle	2,119,948	2,117,108	2,117,108
Particle size [m]	0.5		
Simulation time [sec]	100		
dt [sec]	0.01		
Output time step [sec]	0.1

図-7 数値水槽概要図

(2) 結果および考察

図-8には各地点に設置した建築物モデルに作用する水平荷重の比較を行ったものである。なお、無次元化に用いている Fx は、建築物モデル設置位置での遡上水位の値を、新ガイドラインの提案に基づき、遮蔽物背後の $\alpha=2.0$ とした(1)式に代入することで算出した流体力の値である。

結果より、防潮堤と建築モデルとの距離が50m地点での値が最大値となり、新ガイドラインが提案する $\alpha=2.0$ とした場合、50m地点では、無次元値が1.0を超えており、 $\alpha=2.0$ では、過小評価となる可能性があると考えられる。

この点に関し、図-7における防潮堤背後からの距離Xの値を10m, 50m, 100mとした場合の各地点での遡上水位および遡上流速からフルード数を算出し、その比較を行ったグラフを図-9に示す。

図-9より防潮堤から50m地点では Fr は1.0付近の値を示し、射流状態に近い流れとなっていることがわかる。これは図-3が示すように、防潮堤越流直後、10m付近では水位が高く大きな位置エネルギーを有しているが、その後位置エネルギーが運動エネルギーに変化していく50m以遠で流速が速くなったと考えられる。これらの影響に

より、防潮堤背後50m地点での津波荷重が最大となったと考えられる。また、150s以降、フルード数が距離Xに依存しなくなるのは、防潮堤からの越流流量が増え、計算領域全体が一様流に近くなったからと考えられる。

図-8 津波荷重の比較

図-9 フルード数の比較

6. 建築物隣棟間隔に関する検討

(1) 数値計算概要

5章より、防潮堤のような遮蔽物を津波が越流する場合 $\alpha=2.0$ では僅かに過小評価となる場合があることがわかった。そこで本項では、入射方向に存在する遮蔽物を津波が越流しない場合での影響の検討を行うため、3次元MPS法を適用し、建築物の隣棟間隔に関する検討を行った。なお、本研究ではより危険側での検討を行うことを目的とし、5章において過小評価となりうる地点である防潮堤から50m地点における建築物隣棟間隔に関する検討を行うこととした。検討方法としては、図-10に示す通り建築物モデルを2棟設置し、Architecture model-AをX=5mから30m地点まで5mずつ変化させた場合でのArchitecture model-Aに作用する水平荷重の比較を行った。なお、数値計算条件を表-3に示す。

表-3 数値計算条件

X-distance [m]	5.0	10.0	15.0	20.0	30.0
Number of particle	2,082,271	2,088,805	2,096,551	2,103,085	2,117,367
Particle size [m]	0.5				
Simulation time [sec]	100				
dt [sec]	0.01				
Output time step [sec]	0.1

図-10数値水槽概要図

(2) 結果および考察

図-11は、隣棟の距離 X をそれぞれ変化させた場合での、Architecture model-Aに作用する津波荷重の比較を示す。無次元化に用いている Fa は、Architecture model-Bに作用する津波荷重の値である。

結果より、前面建築物の荷重に対し背後建築物に作用する津波荷重は最大で8割程度低減していることがわかる。前面建築物により背後建築物前面位置での法線方向の流れが減少し、これにより背後建築物の荷重が減少したと考えられる。

また、遮蔽物背後15m以内ではグラフの変化から、遮蔽物による津波荷重低減が顕著に現れていると考えられる。図-12は、隣棟間隔15mを境界とし、 $X \geq 15m$ 、 $X < 15m$ それぞれの範囲における最大値の線形近似曲線および図-11の各地点における最大値を表したグラフである。結果より、本数値実験で行った隣棟間隔の範囲内では、 $X \leq 15m$ の場合、前面建築物による低減率は(6)式により算出することができる考えられる。さらに $X \geq 15m$ の範囲では、(7)式のように求めることができる。

図-11 各隣棟間隔における津波荷重の比較

図-12 各隣棟間隔における津波荷重の最大値の比較

$$R_a = [1 - (0.015x + 0.12)] \times 100 \quad (6)$$

ただし、 R_a ：隣棟間隔15m以内の前面建築物による流体力低減率(%)， x ： x 方向の隣棟間隔(m)

$$R_c = [1 - (0.008x + 0.23)] \times 100 \quad (7)$$

ただし、 R_c ：隣棟間隔15m以上の前面建築物による流体力低減率(%)， x ： x 方向の隣棟間隔(m)

今回の流速では隣棟間隔15mに境界があるが、前面建築物後方の流線は流速により変化するのでこの境界は流速により変動すると考えられる。また、建築物の幅と奥行き比によっても変化すると考えられる。

7. 結言

本研究より以下に示す知見を得た。

- 1) 防潮堤背後50m付近では流速が増加し、射流状態に近い状況になる可能性があることがわかった。
- 2) 防潮堤のような遮蔽物を津波が越流する場合、遮蔽物背後であっても新ガイドラインに示す $\alpha=2.0$ では僅かに過小評価となる地点があるが、実用上は $\alpha=2.0$ で問題ないことがわかった。一方、遮蔽物を津波が越流しない場合においては、新ガイドラインに示す $\alpha=2.0$ で十分適用可能であることがわかった。
- 3) 今回のケースでは建築物隣棟間隔において、隣棟間隔15m以内では、前面建築物により津波荷重の低減が顕著にみられ、本研究で検証した隣棟間隔5m~30mの範囲内では前面建築物による低減率に対し隣棟間隔15m地点を境目とした(6)式、(7)式を提案した。

謝辞：本研究を行う上で、大変貴重な東日本大震災時のGPS波浪計データをご提供頂いた国土交通省港湾局及び独立行政法人港湾空港技術研究所の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 津波避難ビルに係るガイドライン検討会 内閣府政府統括(防災担当)：津波避難ビル等に係るガイドライン，2005年6月。
- 2) 国土交通省住宅局及び国土技術政策総合研究所：東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針，平成23年11月17日付国住指第2570号。
- 3) 独立行政法人建築研究所；平成23年(2011年)東北地方

太平洋沖地震関係特設ページ, pp6-1~pp6-150,
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/20110311/0311report.html>

用性に関する研究, 日本大学理工学部博士論文,
2010年.

- 4) S.Koshizuka and Y.Oka ; Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid.Nucl Sci.Eng, 123, pp.421-434, 1996.
- 5) 増田光弘 : 津波中の浮体挙動解析への粒子法の適用性に関する研究, 日本大学理工学部博士論文, 2010年.
- 6) 相田康洋, 増田光一, 居駒知樹 : 建築物に作用する津波遡上流による流体圧の評価法に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第78巻, 第684号, 223-229, 2013年2月.

A study on the characteristics of tsunami load on Architectural building in coastal zone
A STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF TSUNAMI LOAD ON ARCHITECTURAL BUILDING
IN COASTAL ZONE

Koichi MASUDA, Tomoki IKOMA, Yasuhiro AIDA, Yasunori OHKAWARA

Housing Bureau Ministry of Land, Infrastructure and Transport has proposed building behind obstacle is two times the hydrostatic pressure of the wave height. In this regard, the present study examined the tsunami load acting on the building behind a obstacle from numerical experiments by MPS method. MPS method is a type of particle method. From the results obtained, we have examined the proposal of the Housing Bureau Ministry of Land, Infrastructure and Transport. As a result, even in the case of bank overtopping, $a=2.0$ is effective even behind a seawall. In addition, in the case of the pitch of building is 15m or less, tsunami load is significantly reduced by building on the front.