安定化ISPH法を用いた 津波避難ビルに作用する流体力評価

浅井 光輝¹, 合田 哲朗², 小國 健二³,
磯部 大吾郎⁴, 檜山 和男⁵, 一色 正晴⁶

¹ 博士(工) 九州大学准教授 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail: asai@doc.kyushu-u.ac.jp

² 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail: goda_t@doc.kyushu-u.ac.jp

³ Ph.D. 慶應義塾大学教授 理工学部システムデザイン工学科 (〒223-8522 横浜市北区日吉 3-14-1)

⁴ 博士(工) 筑波大学教授 システム情報系 構造エネルギー工学域 (〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1)

⁵ 工博 中央大学教授 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 文京区春日 1-13-27)

⁶ 博士(工) 愛媛大学大学院講師 電子情報工学専攻 (〒790-0826 松山市文京町 3)

東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、多くの土木・建築構造物が崩壊した。今後危惧されている巨大津波が発生する前に、沿岸地域の防災・減災技術の再検討を行なう必要性が高まっている。このような実状を踏まえて、現在、迅速な避難を困難とする人々の一時的な避難のための施設として、津波避難ビルの選定・指定が進められている。構造物に作用する津波の影響は、津波そのものの流体力に加え、漂流物の衝突、基礎地盤の洗掘、あるいは浮力の影響などを複合的に判断し安全性を議論することが望ましい。

本研究では、その第一段階として、避難ビルに作用する津波流体力の評価のみに焦点をあてた基礎検討を行った。数値解析より得られた結果と経験的な既往の設計式と比較を通して、設計時に数値解析を併用する必要性と有効性を議論した。

Key Words : *Tsunami fluid force, Tsunami refuge building, Incompressible SPH*

1. はじめに

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波は、東日本の各地に甚大な被害を与えた。この津波は、防波堤を越流あるいは崩壊させた後に陸上まで遡上し、土木構造物などのインフラ設備だけでなく、家屋や多くの人的被害を与えた。今後危惧されている巨大津波が発生する前に、沿岸地域の防災・減災技術の再検討を行うことは、土木技術者として急務である。このような現行の課題を受けて各地方自治体では、迅速な避難を困難とする人々の一時的な避難のための施設として津波避難ビルの選定・指定を推進しているという実状がある。しかしながら、浅海域や陸上部では地形等の影響から津波は複雑な挙動を示し、津波避難ビルを含む陸上構造物に作用する津波の影響メカニズムの解明については未だ多くの課題が残されている。

陸上構造物に作用する津波流体力の設計式としては、飯塚・松富¹⁾による家屋に作用する流体力を抗力として評価したものや、朝倉ら²⁾による護岸を越流した際の津波の波圧分布に関する提案がある。しかしながら、水理実験においては、造波装置の性能により生成可能な波に限界があり、また相似則あるいは境界条件等の条件を実スケール・実問題と対応させることは難しく、水理実験のみから津波現象を完全には把握することは困難である。

なお、本研究で主な対象とするビルに相当する陸上構造物が開口部を持つ際の流体力の設計式に着目してみると、筆者の知る限り国土交通省国土技術政策総合研究所による津波波力算定式³⁾しか存在していない。また、そのベースとなっているのが前述の朝倉らによる矩形構造物に対する設計式であることから、開口部の取り扱いに対する厳密な設計式は未だ確立されているとは言えない。

そこで本研究では、実スケールモデルでの数値解析を

併用することで、陸上構造物に作用する津波流体力評価の現状を理解し、より合理的な評価方法を検討することを目的とする。まずは、数値解析結果と既存の津波波力算定式を比較検討することで、その適用限界について議論することにした。さらには、波頭形状と津波避難ビルの開口部形状の影響について考察した。

ここで、本研究で採用した解析手法は、自由表面流れにおける波の形状が激しく変化するような3次元問題の再現性に優れ、ラグランジュ記述の格子法のようにメッシュに起因した問題を考慮する必要がなく、単純なアルゴリズムを維持したまま解析を行うことができるといったメリットを持つ粒子法の一つであるSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を採用した。筆者らはこれまでに、SPH法の解析精度の改善を試みており、流体力の精度を向上させるためには、非圧縮性の付与方法に加え、流体と非流体の境界条件の適切な設定が重要となることを示してきた^{4,5)}。なお上記の解析ツールは、水柱崩壊全面での構造物に作用する流体力評価試験⁹⁾、斜面流下試験⁹⁾、橋梁に作用する津波流体力評価に向けた小型模型実験⁶⁾など、複数の実験で得られた実験結果と比較検証を通して、流れの現象だけでなく流体力までが精度よく求まることを確認済みである。

2. 解析手法と境界処理法

本研究では、解析手法として非圧縮性流体用に開発されたISPH (Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いた。また、ISPH法の中でも圧力振動問題を解決するために、瞬間的に微圧縮を許容した解法である安定化ISPH法を採用した。なお、境界処理法としては非一様圧力ノイマン条件を満足させ、速度についても適切な境界条件を付与することができる仮想マーカーを用いた境界処理法⁵⁾を採用した。

(1) SPH法の概念

SPH法は、連続体を有限個の粒子に離散化し、対象とする粒子の物理量を、影響半径内に存在する近傍粒子に重み関数をかけて和をとることにより、一種の重み付き平均として近似する方法である。対象粒子の物理量に添字の*i*を、近傍粒子の物理量に添字の*j*をつけ、時刻*t*での任意のスカラー関数を表現すると次のようになる。

$$\phi(\mathbf{x}_i, t) \approx \langle \phi_i \rangle = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} W(r_{ij}, h) \phi_j(\mathbf{x}_j, t) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}$ は粒子位置ベクトル、 m は粒子が代表する領域の質量、 ρ は物質の密度、 W は重み関数、 r_{ij} は対象粒子と近傍粒子の距離、 h は影響半径を示す。 $\langle \cdot \rangle$ はSPH法

図-1 SPH法の基礎概念図

の概念より、近傍粒子で定義される関数から内挿近似された値であることを示す。重み関数にはより安定した計算が可能と報告⁷⁾されている5次のスプライン関数を採用した。図-1にSPH法の基礎概念を示す。

(2) 流体解析における支配方程式

非圧縮条件下における流体問題を解くためには、質量と運動量の保存を満足しつつ、流速 $\mathbf{u}$ と圧力 p という2つの独立変数を求める必要がある。支配方程式のLagrange記述での表記は次のようになる。

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + (\nu_w + \nu_T) \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

ここで、 ν_w は動粘性係数、 ν_T は渦動粘性係数を表し、 $\mathbf{g}$ は重力加速度を示す。なお渦粘性モデルとしては、LES乱流モデルの一種であるSmagorinskyモデル^{4,8)}を採用した。

$$\nu_T = (C_s \Delta)^2 S \quad (4)$$

ここで、 C_s はSmagorinsky定数であり、本解析では0.2と設定した。また、 Δ はフィルター幅を示しておりここではSPH法における影響半径(図-1を参照)として設定し、 S はひずみ速度テンソルから評価されるひずみ率を示す。

(3) 非圧縮条件を緩和したソース項

安定化ISPH法では、ISPH法と同様に射影法を用いて、式(2)に示すナビエ・ストークス方程式の圧力勾配項を除外した仮の状態を定義し、速度と圧力を分離し、速度は陽的に圧力を陰的に更新するという手法をとる。両者の違いは下記に示す圧力ポアソン方程式のソース項にある。詳細な式展開は参考文献⁵⁾に委ね、特徴的である圧力の更新のみ説明する。

SPH法における密度は粒子配置により数値的に評価されるものであり、解析中に非圧縮であることを厳密に満足し続けることは困難である。このため、瞬間的に生じるある程度の密度誤差を許容することで、長期的に密度

図-2 仮想マーカー境界

変化が生じないようなスキームが提案された。

前述した操作を加えるため、圧縮性流体にも適用可能である一般的な質量保存則である式(3)からスタートし、圧力ポアソン方程式を求めると次のようになる。

$$\langle \nabla^2 p_i^{n+1} \rangle \approx \frac{\rho^0}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \mathbf{u}_i^* \rangle + \alpha \frac{\rho_i^0 - \langle \rho_i^n \rangle}{\Delta t^2} \quad (5)$$

ここで、上付き添え字 n は時間ステップであり、 $n+1$ は n から1ステップ進んだことを示す。また、上付き添え字 $*$ は n から $n+1$ ステップ間の仮の状態、 0 は初期値であることを示す。一方、 α は緩和パラメータと呼ばれ、 0 から 1 までの値をとる。この定式化によると、右辺1項目から主に各瞬間の速度分布を参照することで滑らかな圧力分布が得られ、右辺2項目から長時間の計算においても密度をほぼ一定に保てることで良好な体積保存性を得ることができる。本研究では、 $\alpha=0.01$ とした。

(4) 仮想マーカー による境界処理

仮想マーカー境界処理法は、壁面における速度のすべり・非すべり条件、圧力ノイマン条件をより適切に処理することができる。流速に関する境界処理は、参考文献⁹⁾に委ね、圧力に関する境界条件のみを記述する。

まず図-2に示すように、壁粒子に対して壁境界面と対称な位置に仮想マーカーを設置する。この仮想マーカーはSPH法に使用する粒子とは異なり、粒子に境界条件を満足するための適切な物理量を与えるための点として用いる。

式(2)を参照すれば、壁粒子上で水粒子の速度の法線方向成分がゼロとなるためには、下記に示す非一様の圧力ノイマンを満たす必要があることがわかる。

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho(\nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g}) \cdot \mathbf{n} \quad (6)$$

ここでの $\mathbf{n}$ は壁の内向き法線ベクトルである。

SPH法において式(6)を満たすためには、仮想マーカー上での圧力 p_w 及び外力 $\mathbf{f}_w$ を用い、次式により評価する p'_w を壁粒子に与えれば良い。

図-3 朝倉式の概念図

$$p'_w = \langle p_v \rangle + 2dp \langle \mathbf{f}_v \rangle \cdot \mathbf{n} \quad (7)$$

ここで、 d は境界面から壁粒子までの距離、 $\langle p_v \rangle$ 、 $\langle \mathbf{f}_v \rangle$ はそれぞれ、仮想マーカー上での圧力、外力を近傍粒子の物理量を用いて重み付き平均により評価した値である。このとき、影響半径内に水領域以外の領域を持つことになるため、修正を加えた重み関数を用いる必要がある⁹⁾。

3. 波先端の形状による影響

既往の研究⁹⁾から、波先端形状の違いにより構造物に作用する衝撃的な力が異なることが知られている。しかし、1章でも述べたように水理実験において生成できる波には限界があり、実験より実際に起こりうる最大の津波波力の観測は難しい。そこで本章ではできる限り段波形状を再現したモデルと非段波状の2つの波を用いて、波先端の形状に起因する流体力の相違を確認する。得られた結果に対して、津波避難ビル設計等における津波波力算定式の際に参照される朝倉²⁾による実験式（以下、朝倉式として参照）との比較検証を行う。

(1) 朝倉式の概要

まずは朝倉式についてまとめる。朝倉らは護岸を越流する津波が陸上構造物に作用する際の津波波圧を、2次元水理模型実験を基に次式のように提案した。

$$P = \rho g(3\eta_{\max} - z) \quad (8)$$

ここで、 P は津波波圧、 $\eta_{\max}$ は最大遡上水深、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 z は当該部分の地盤面からの高さを示す。また、その概念図を図-3に示す。

また、波状段波の一種であるソリトン分裂波の場合には、波の先端が構造物に作用する際の衝撃的な波圧を考慮することで、

$$P = \rho g(\max(5.4\eta_{\max} - 4z, 3\eta_{\max} - z)) \quad (9)$$

として再定義しており、これは津波波圧の増加を表現したモデルとなっている。同式によれば、ハザードマップ

図-4 解析モデル全体図

を描く際に実施した数値解析等から最大遡上水深が評価されれば、簡便に津波波力が算定できる。

(2) 解析モデル概要

続いて、本解析で用いる解析モデルの全体図を図-4に示す。解析条件は、粒子間隔は0.1m、総粒子数約3400万、時間増分0.001秒、実時間3.2秒とし、九州大学の高性能演算サーバシステム、HA8000-tc/HT21を用いて16ノードを使用し48時間の解析を行なった。まず、初期条件としては、水深5mの津波が来襲することを仮定し、浅水長波理論より全ての水粒子に7m/sの速度を付与した。また、境界条件としては、津波避難ビルから10m離れた位置以降（同図中、黒の点線より左側）に存在する水粒子に7m/sの速度を強制的に付与することで、周期の長い波が持続的に来襲することを再現することにした。この際、ビル壁面および底面境界においては、摩擦の影響は考慮せず、すべり境界を与えることにした。波先端形状については、(A)段波、(B)非段波の2種類を使用する。

津波避難ビルのモデルを図-5に示す。国土交通省国土技術政策総合研究所により設計された「6階建て鉄筋コンクリート造共同住宅」³⁾のパラペットと底面の基礎部分を取り除き簡単にしたものを(b)開口部有とする。それを基準とし、全ての開口部を埋めたものを(a)開口部無、1階に開放部分を設けたものを(c)ピロティと定義する。また同図中には、開口部が占める面積の比率を示している。(b)開口部有と(c)ピロティについては4章で用いるものとし、本章では(a)開口部無のモデルのみを使用し、波先端形状の影響のみを考察した。

※赤字は幅に対して開口部が占める割合を示す。

図-5 津波避難ビルモデル

図-6 構造物全体に作用する津波波力

(3) 解析結果

図-6に構造物全体に作用する津波波力を示す。まず、図の内容の説明を行う。同図中の未加工データは、波が到達した直後に短時間に作用する衝撃的な波力（以下、衝撃津波波力と参照）を観測するためにサンプリング周波数1000Hz（解析の時間増分を0.001sとし、毎ステップの結果をプロット）でデータを取得しているものである。この未加工データは解析を通して振動しているが、構造物の前面において、津波が急に遮断されることで流れが複雑な状態となり、圧力の空間分布が非一様となることで圧力振動が生じたものと考えている。（後の4章2節において、再度議論する。）

図-7 フロア毎の津波波圧の平均値（フィルタ処理後）

図-6に示すように、作用時間の短い衝撃的な津波波力の第一波後に、持続時間の長い重複的な津波波力が発生しており、ここではこの極大点を最大重複波力として定義することにした。また、極大点の定義を明確にするため、100Hzのローパスフィルタ処理を施すことにした。図-6のフィルタ処理後のデータがこのローパスフィルタ処理後のデータであり、同図中の未加工データが1000Hzのサンプリング周波数での結果である。フィルタ処理により高周波のノイズが除去され明確に極大点が定義できることが確認できる。なお、大型水理実験¹⁰⁾においても400Hzのサンプリング周波数で圧力を計測したところ同様な振動が観測されているが、実験計測時でのノイズであるのか不明であり、また計算結果においても誤差である可能性もあるため、ここでは圧力振動の要因については議論しないことにした。

図-6に示すように、構造物全体に作用する津波波力が波先端形状によって大きく異なっており、これまで実験等からも指摘されている事実と同じ傾向を得た。特に、段波状の津波に関しては、最大重複波力に対して衝撃津波波力が大幅に上回った。

図-7には、津波波力の空間分布をより詳細に議論するために、フロア毎に評価した津波波圧の平均値を示す。同図は全て、先ほど既述したものと同様のフィル

図-8 無次元津波波圧分布

タ処理を行った津波波圧のみを示している。ここで、津波波圧の平均値は、フロア毎に作用する流体力の合算値をそのフロアが持つ面積で除することで評価した。なお、6階に作用する波圧は、低階層の値に比べて非常に低い値であったことから、図-7のプロットからは除外している。同図より、段波時に観測された衝撃的な津波波圧は特に低層の1, 2階のみで観測されることを確認した。

(4) 朝倉式との比較

朝倉式と本解析結果の比較をまとめて図-8にて比較する。同図では、横軸には無次元津波波力を、縦軸には無次元鉛直高さをとることとした。なお、前述のように最大重複波圧にはフィルタ処理後のデータをプロットした。また、衝撃津波波圧の評価においては、考え得る圧力の最大値を与えることを目的とし、未加工データより得られたものを示すことにした。この図より、非段波状の津波により構造物に作用する波圧は、衝撃津波波圧・最大重複波圧ともに朝倉式に包絡されていることが分かる。一方、段波状の場合、最大重複波圧に関しては朝倉式が包絡しているものの、衝撃津波波圧に関してはソリトン分裂を考慮した朝倉式さえ超過している。今回観測された朝倉式を超過するという事実は、有川ら¹⁰⁾による大型水理実験からも指摘されており、衝撃的な波圧に関しては別途評価式を定義することが望ましいものと思われる。以上のことより、実スケールの数値解析結果は、以下の2点の結果からこれまでに水理実験から提案されてきた津波波圧評価式の妥当性と、その限界を裏付ける結果が得られたものと考えてる。

- ・実スケールの構造物を対象とし、本数値解析により評価した最大重複波圧は朝倉式による評価値と調和的であった。

- ・衝撃的な津波波圧は、朝倉式が対応するものではなく、別途衝撃的な圧力の評価が必要である。

以上、今回は2ケースの津波先端形状の結果と実験結

果との比較を実施するに留まったが、数値解析の利便性を活用し、より複数の津波先端形状モデルを入力することで、衝撃的な津波波力に対しても評価可能な設計式の提案へと今後発展させていきたいと考えている。

4. 開口部による影響

前章にて、数値解析による津波波圧評価が過去の実験ベースの波圧算定式とほぼ対応した結果が得られることを確認した。ここでは、窓枠による開口部を考慮したより現実的な構造物に対して津波波力を評価し、過去の知見との比較をしながら、開口部の影響を考慮する。なお、構造物に開口部が存在する場合、津波波力が軽減することは、既往の研究から奥田ら¹¹⁾や李ら¹²⁾により確認されており、構造物の津波に対する耐久性を考える上で重要な要素とされている。ここでは、朝倉式をベースに考案された国土交通省国土技術政策総合研究所（以下、国総研と表記する）による開口部を持つ構造物に関する津波波力算定式³⁾との比較を行いながら、開口部の影響を検討すると共に、数値解析の有効性を考察する。

(1) 津波波力算定式の概要

まずは、本研究にて参照する国総研による津波波力算定式について整理する。図-9にその概念図を示すように、この算定式では3節で述べた朝倉らによる設計式の津波波圧の発生を仮定し、次式にて津波波力を算定する。

$$Q_z = \rho g \int_{z_1}^{z_2} (\alpha h - z) B dz \quad (10)$$

ここでの、 Q_z 、 g 、 z_1 、 z_2 、 B は、構造設計用の進行方向の津波波力、重力加速度、受圧面の最小高さ、受圧面の最高高さ、当該部分の受圧面の幅を示している。また、 α は水深係数と呼ばれ、「津波が来襲する方向に津波を軽減する効果が見込まれるような遮蔽物がある場合」や「海岸および河川から500m以上離れている場合」において低減される相似の比率としての係数である。

また、開口部の取り扱いについては「開口部（津波波圧により破壊するよう設計した非耐圧部材）における津波波力は、高さ毎の受圧面の幅から開口部の面積を除外した面積を受圧面の面積で除して得た割合を津波波力に乘じることにより低減することができる。ただし、原則として、除外する前の津波波力の7割を下回らないこととする。」と定められている。ただし例外として、ピロティを有する部分の津波波力には津波波力の低減の下限は適応されないことになっている。また、水深係数の α はその最大値である3.0とした。

図-9 津波波力算定式の概念図

図-10 構造物全体に作用する津波波力

(2) 解析概要

入力波および解析条件は、3章で用いた図-4 (A)段波と同一とする。また、津波避難ビルのモデルは、図-5に示す3ケースを用いた。これらのモデルは、幅に対して開口部の面積が占める比率が7割を超えていないことから、津波波力算定式を用いて津波波力を見積もる際に補正する必要はない。

(3) 解析結果

構造物全体に作用する津波波力を図-10に、(b)開口部有のビル前面と背面から観測した津波の流れの時系列変化を図-11に、フロアごとの津波波力を図-12に示す。図-10より、(a)開口部無の時と同様に、(b)開口部有と(c)ピロティモデルにおいても、衝撃津波波力の観測後、津波波力は急激に減少し、それからまた徐々に上昇して最大重複波力をとるという傾向がみられた。また図-12に示す各フロアの波力をみると、津波の浸水深よりも低い位置に存在する1階と2階では衝撃津波波力が観測された。なお、前章より、朝倉式は最大重複波力を評価するものであるとの考察を受け、ここでは衝撃津波波力は比較対象外とし、ここでも最大重複波力について中心に整理する。このため、3章と同様、図-12には100Hzのローパスフィルタ処理を施した結果のみを示すことにした。また、5階と6階に作用する津波波力は低層階に比べて非常に低い値であったことから、図-12のプロットからは除外している。

〈前面図〉

〈背面図〉

図-11 (b)開口部有のビル前面と背面から観測した津波の流れの時系列変化

図-12 フロア毎の津波波力(フィルタ処理後)

(4) フロア毎の津波波力に関する考察

図-12に示したフロア毎の津波波力の結果を津波波力算定式による津波波力の見積もりと比較する。なお、衝撃津波波力も参考までに計測することにしたが、この値はフィルタ処理前の未加工データより評価していることに注意していただきたい。

まず、計算結果と津波波力算定式による津波波力を

図-13 無次元最大重複波力の鉛直分布

図-13にまとめて示す。図中の破線は波力算定式による結果を示し、また解析値は平均値(=ローパスフィルタ処理後の曲線の極大値として計測)をプロットしており、解析で与えられた未処理結果で観測される圧力振動に伴う極大値付近の最大値と最小値をエラーバーにより表示している。同図から計算より得られた最大重複波力は、平均値だけでなく局所的な最大値とともに津波波力算定式の範囲内で概ね収まっていることが確認できる。また開口部のあり・なしに関わらず概ね津波波力算定式以内に収まっている。

前章の例題と同様に波力の値は振動している。ここで、圧力振動の要因を圧力分布図より考察する。図-11には、(b)開口部有のビルに作用する津波の流れを最大重複波力観測点付近のみ0.02秒間隔で表示している。また前面図には、壁面に作用する圧力値をプロットしている。同図に示した圧力分布とその推移の結果から、観測される圧力振動は、単一の粒子で生じる圧力振動ではなく、空間的な圧力の乱れにより生じているものと考えられる。

なお、開口部がある場合には、式 (10) が示すように、一般的に波力を開口率に合わせて低減することになっ

ているが、数値解析の結果からは算定式以上に開口部による波力の低減効果が期待できることが示された。特に低層に開口部を大きく設けたピロティ構造の場合には、低層で発生すると予想される衝撃的な力も回避できるだけでなく、重複波力まで算定式以上に低減する効果が期待できる。ここで、同図中のピロティ構造の場合において、波力算定式（破線）と各階で評価したプロット値が一階においてのみ極端に外れているのは、1階のみ開口率が高いためである。

続いて、衝撃津波波力と津波波力算定式により見積もられる津波波力を無次元化し比較した結果を表-1に示す。表より、3ケースのいずれも1,2階で生じる衝撃津波波力は、津波波力算定式を超過するという結果が得られた。同式が朝倉式を参考としていることから容易に推察はできたが、国総研による開口部有の場合の津波波力算定式も衝撃力に関しては過小評価となる危険性があるとの結果を得た。

(5) 構造物全体に作用する津波波力に関する考察

以上の結果を基に津波流体力に与える開口部の影響を考察する。図-14には、構造物全体に作用する津波波力と構造物前面の開口面積比との関係を示す。ここで開口面積比とは、開口部無のモデルにおける前面の面積に対する開口面積の比率として定義している。このグラフより、衝撃津波波力と最大重複波力の両者は開口面積比が増加するほど、減少していくことがわかる。

5. おわりに

津波避難ビル選定指針に役立つ数値解析シミュレータを確立するために、第一段階として流体力の評価にのみ着眼して数値実験を行った。津波の波頭形状と津波避難ビルの形状をパラメータとして、既存の津波波力算定式と数値解析結果との比較検証を行い、以下の結果を得た。

- ・朝倉式、国総研式など既存の津波波力算定式による津波波力の見積もりは衝撃的な波力を考慮しておらず、数値解析より得られた衝撃波圧で比べればその一部は算定式を上回った。
- ・実スケールの構造物を対象とし、本数値解析により評価した重複波力は、朝倉式・国総研の算定式と調和的であることを確認した。
- ・開口部やピロティ構造には、衝撃的及び重複波力の両者を大きく低減する効果があることを確認した。また、その効果は国総研による算定式よりも期待できる可能性がある。
- ・第1波が到達直後にに関する衝撃波圧に関しては、有川

表-1 無次元衝撃津波波力との比較図

	無次元衝撃 津波波力 (1階)	無次元衝撃 津波波力 (2階)	無次元津波 波力算定式 (1階)	無次元津波 波力算定式 (2階)
開口部有	4.25	2.69	1.96	1.55
開口部無	14.54	7.04	2.70	2.12
ピロティ	2.45	2.19	0.88	1.55

図-14 構造物全体に作用する津波波力

らの大型実験より得られた結果と同様、波力算定式を超過する恐れがあることを確認した。

上記に整理したように、現行の算定式は衝撃津波波力評価まで評価するものではなく、重複波力評価に適した算定式であることを確認した。また、重複波力評価に用いる際には、特に開口部がある場合を対象とした国総研の算定式は逆に過大評価している可能性ある。これは、もともと開口部がない場合の朝倉式を参考に行っているため、十分に考えられる結果である。今後、津波波力算定式の見直しの際には、津波波力はフルード数あるいは比エネルギーに依存するといった報告結果¹³⁾を踏まえた詳細な議論が必要である。以上のまとめと考察のように、既存の設計式に併せて数値解析を併用すれば、実スケールで複雑な構造物に対する津波の影響までを評価できる可能性があり、数値流体解析は有効な手段となり得る。

今後は、先述したような複数の波頭形状を考慮した衝撃的な津波波力に対する設計式の提案や、漂流物の衝突や基礎地盤の洗掘といった津波による複合的な被害についての検討を実施していく予定である。

謝辞：本研究の一部は科研費(基盤研究(B)26282106)の助成を受けた。また一部は、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の支援による。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 飯塚秀則, 松富英夫: 津波氾濫流の被害想定, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.381-385, 2000.
- 2) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊, 藤井直樹, 大森正則: 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.911-915, 2000.
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所 一般社団法人 建築性能基準推進協会 協力 独立行政法人 建築研究所: 津波避難ビル等の構造上の要件の解説, 2012.
- 4) Asai, M., AbdIraheem M., Aly, Sonoda, Y., Sakai, Y.: A stabilized incompressible SPH methods by relaxing the density invariance condition, *Journal of Applied Mathematics*, Vol.2012, Article ID 139583, 2012.
- 5) 浅井光輝, 藤本啓介, 田邊将一, 別府万寿博: 階段状の非適合境界を有する粒子法解析における仮想マーカーを用いたすべり・非すべり境界処理法, *Transactions of JSCES*, Paper No.20130011, 2013.
- 6) 田邊将一, 浅井光輝, 中尾尚史, 伊津野和行: 3 次元粒子法による橋桁に作用する津波外力評価とその精度検証, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.293-302, 2014.
- 7) M. Yildiz, R. A. Rook and A. Suleman, : SPH with the multiple boundary tangent method, *Int. J. Number. Meth. Engng.*, Vol. 77, pp.1416-1438, 2009.
- 8) H. Gotoh, S. Shao, and T. Memita, : SPH-LES model for numerical investigation of wave interaction with partially immersed breakwater, *Coastal Engineering Journal*, Vol. 46, No. 1, pp.39-63, 2004.
- 9) 合田良實: 耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 1990.
- 10) 有川太郎, 大坪大輔, 中野史文, 下迫健一郎, 高橋重雄, 今村文彦, 松富英夫: 遡上津波力に関する大規模実験, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.796-800, 2006.
- 11) 奥田泰雄: 建築物に作用する津波荷重のシミュレーション, 国土技術研究会(ポスター), 2010.
- 12) 李光浩, 青木悟, 水谷法美, 芦沢哲, 平川信也: 開口部を有する構造物への津波力に関する研究, 土木学会論文集 B2, I_806-I_810, 2012.
- 13) 高島大輔, 木原直人, 田中伸和: 陸上構造物全面に作用する津波波圧に関する数値実験, 土木学会論文集 B2, Vol.69, No.2, I_851-I_855, 2013.

(2014. 6. 20 受付)

EVALUATION OF TSUNAMI FLUID FORCE ACTED ON TSUNAMI REFUGE BUILDING BY USING A STABILIZED ISPH.

Mituteru ASAI, Tetsuro GODA, Kenji OGUNI,
Daigoro ISOBE, Kazuo KASHIYAMA and Masaharu ISSHIKI

The tsunami caused by the great east Japan earthquake lead to collapse infrastructures including bridge and breakwater. It is important to reconsider disaster prevention and mitigation techniques towards next millennium tsunami. Currently, most of local governments in Japan are promoting the selection and specification of tsunami refuge buildings for people who live in the difficult area to evacuate within the limited time. However it's difficult to settle the design code of tsunami refuge building because there are so many incertitude accident during tsunami related to water induced impact force, buoyancy force, tumble of the building and so on. Numerical simulation by a particle method has been conducted for the evaluation of tsunami fluid force acting on tsunami refuge building as a first step. Finally, efficiency and adequacy of numerical simulation in the design of tsunami fluid force has been discussed by comparing with the current design code in Japan.