建築物の津波波力に関する3次元数値実験とVRによる可視化 NUMERICAL MODEL TEST AND VISUALIZATION USING VIRTUAL REALITY SYSTEM FOR TSUNAMI FORCES AGAINST A BUILDING

野島 和也*・櫻庭 雅明* Kazuya NOJIMA and Masaaki SAKURABA

This paper presents the results of study of tsunami forces against a building. Comparison is made of several formulas to easily estimate a tsunami force that have been used in recent studies. They use hydraulic model test and numerical simulation. In order to validate several formulas, comparison between the 3-D free-surface model (CADMAS-SURF/3D), 2-D shallow water model was carried out. Study of the aperture ratio of building was also investigated using CADMAS-SURF/3D.

Keywords : Tsunami, Tsunami Force, Visualization, Virtual Reality System

1. はじめに

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震の津波遡上 により多くの建築物が倒壊する被害が発生した。これを契機 に、津波波力による建築物への荷重算定手法が検討・改定さ れている。一般の津波荷重算定式は各種の水理模型実験をも とに導出されており、静水圧に水深係数を乗じる方法もしくは 抗力・慣性力の形式で表現される方法で構成され、汎用的な ものとなっている。ただし、各津波荷重算定手法は、来襲す る津波によりそれぞれ精度が異なり、適用限界等を踏まえた汎 用性については更にケーススタディが必要である。

本研究は、3次元の自由表面流れ解析により津波の水位、 波力を算定して、建物にかかわる波力を算定する。その結果 と建築物津波荷重指針¹⁾より提示される津波波力算定式によ る結果と比較を行った。また、実用的によく用いられる2次元 浅水流モデルでも同様の条件の計算を行い津波波力算定式 により得られる波力の妥当性を検証した。これらの結果から波 力算定式の適用性・限界について考察した。また、3次元計 算は建築物の開口部の影響を考慮することができるため、この 影響も数値計算より考察した。

本研究で構築した3次元計算技術を基に、詳細な建築物 モデルを作成し、詳細な津波流況解析を実施した。本検討で は建築物の周囲のみではなく、建築物内部に生ずる複雑な流 れを再現した。数値計算の結果をVR(Virtual Reality:仮 想現実)装置²⁾に実装することで、津波来襲の疑似体験を通 して、津波の脅威を詳細にイメージできる仕組みを作った。

2. 計算方法

本研究に用いた数値解析方法は2種類採用している。建物 にかかる津波波力を算定するために、CADMAS-SURF/3D³⁾ による3次元自由表面流計算を行った。CADMAS-SURF/3D はVOF法に基づく自由表面流れ計算法であり、境界条件に 水位変化や流速を入力することにより、波の変形を計算でき る。本研究では、図-1に水路の条件に対して津波段波を 再現するために、境界条件として2~10cmの段波を与えた。 建物の位置は汀線から15cmとした。波力の算定は、建物に かかる格子点の圧力を積分した値とし、これを数値計算により 直接求められる波力とした。波力算定式による方法は後述す る。

また、平面2次元計算の結果から波力の評価を行うために、 浅水流モデルに基づく2次元計算を行った。浅水流モデルの 数値解析法は Staggered-Leap Frog 法を用いている。

対象とする水路および構造物の形状を図-1に示す。 CADMAS-SURF/3Dで用いた格子は最小格子幅として鉛直 格子幅 0.2cm、水平格子幅 1cm とした。また、2次元浅水 流モデルで用いた格子は 1cm の正方格子とした。



3. 津波波力の算定

本研究では、建築物荷重指針に記載されている津波波力と 計算で直接得られる波力の違いを考察するために、以下の波 力算定式により波力を算定した。なお、波力算定式を求める ための水位と波力は構造物前面の水位と流速を採用している。

(1) ファウジら⁴⁾

$$F = \frac{C_{DI}}{2} \rho B h_i(t) v_i(t)^2$$

$$C_{DI} = 2.0 + \frac{5.4 h_{imax}}{D}, \quad (0.01 < \frac{h_{imax}}{D} < 0.17)$$

(2)ファウジら⁴⁾

$$F = \frac{C_{D2}}{2} \rho B h_i(t) v_i(t)^2 + C_M \rho B W h_i(t) \frac{\partial v_i(t)}{\partial t}$$
(2)

(1)

$$C_{D2} = 2.0, C_M = 1.0, \quad (0.01 < \frac{h_{i\max}}{D} < 0.17)$$

(3)有川ら5)

$$F = \frac{a^2}{2} \rho Bgh_{\rm max}^2 \tag{3}$$

$$a = 1 + 0.5(1 + \zeta)Fr^2$$
 (1 < Fr < 4)

(4) 朝倉ら⁶⁾

$$F = \frac{a^2}{2} \rho Bgh^2, a = 3.0$$
 (4)

ここに、 F : 波力

C_D:抗力係数

См:慣性力係数

- *ρ* : 水の密度 *B* : 建築物の幅
- *h*:建築物前面の水深
- v :建築物前面の流速
- Fr:フルード数
- D : 海岸線からの距離
- *a*:任意の係数*ζ*:水位

4. 計算結果および考察

(1) 3次元計算による波力と算定式の比較

CADMAS-SURF/3Dによる建物周辺の段波の遡上状況を 図-2に示す。この建物全体に作用する波力が算定式によっ てどのようになるかを調査した。図-3に段波条件が最大値と なる水位差10cmの場合におけるCADMAS-SURF/3Dによ り直接求めた波力および(1)~(4)式に示す波力算定式か ら得られる結果の比較を示す。この結果より、数値計算から直 接求められる波力は最大で10kN程度であることがわかる。水 位および流速から算定式により求めた波力は大きな差異が見 られる。特に、有川らの方法で求めた波力はピークで数値計 算による波力の3倍以上となっている。この中で最も数値計 算による波力に近いのはファウジ(2)式の方法である。ファウ ジの方法(2)式は抗力と慣性力の両方を考慮した式となって いるが、慣性力の影響を考慮した場合に精度が高くなることが わかる。なお、これまで津波荷重の算定に用いられてきた朝倉 の方法はピークの出現する時刻が異なる結果となっている。

(2) 2次元計算から求めた波力の精度検証

次に CADMAS-SURF/3D で得られた波力と2次元浅水 流モデルから得られる水位と流速を用いた場合の算定波力の 比較を図-4に示す。この結果から有川らの方法では波力ピー





図-2 解析結果(時刻スナップショット)



図-3 津波荷重時刻歴の比較(1)



ク時周辺で不安定な振動が見られている。これは、段波の水 位差 10cm と比較的厳しい初期水位の条件を用いていること から、遡上先端の流速が不安定になることが考えられる。その 影響を除けば有川らの手法による結果が数値計算から求めら れる波力に近い値になる。有川らの手法による結果の不安定 性は、浅水流モデルで算出される流速が断面平均であるため に、フルード数が 3 次元計算で得られるものと異なるためであ ると考えられる。なお、3 次元計算で近い値となるファウジ (2) 式の方法はピーク時に過小評価となった。その他の算定式は いずれも過大評価となった。

(3) 開口部の影響

CADMAS-SURF/3Dにより建築物の開口部のある場合に ついて計算を行い、影響を考察した。図-5に各段波条件と 開口率における作用波力の関係を示す。図中には近似曲線 も示す。これらの結果より、水位差5cmおよび10cmの場合 においては、①開口率に比例して作用波力が低減する、②作 用波力は直線的に低減する、③段波条件が大きな津波ほど低 減率は大きくなることが分かった。①②については受圧面積が 変化することで作用波力が低下しているものと考えられる。ま た、既往の報告⁷⁾でも開口率と波力は直線的に低減すること が確認されており、本検討の結果は整合が取れたものとなって いる。本結果より、3次元津波数値計算技術が開口部を持つ ような現実的な構造を持つ建築物の波力が容易に定量的に評 価可能である。

5. VR による可視化

本検討で構築した建物周囲の3次元津波数値計算技術 をもとに、津波来襲時の建物周辺および内部の状況を、VR (Virtual Reality: 仮想現実)装置を用いて可視化し、リアリ ティのある映像を見る仕組みを作った。

実際の映像や、VR 映像のようにリアリティのある映像は、 防災教育および災害発生時の人命確保に有用である。実際 の映像や、VR 映像のようにリアリティのある映像を見ることで、 沿岸住民は津波来襲時の状況を容易に想像することができる。



東日本大震災では避難行動を取らなかったことにより、津波の 犠牲になったケースも震災後の調査で明らかになっており、住 民に避難行動を取らせることが、人命確保に必要なことのひと つである。VR 映像による防災学習を通して得た津波来襲の 知識が、避難行動の誘導につながるものと考える。

津波による浸水範囲や浸水深さなどが示されるハザードマッ プは、津波来襲時にどこまで避難すればよいかを検討する上 で有効なツールである。しかしながら、ハザードマップのような 平面情報では、津波の速さ、来襲する方向、流れの時刻変 化などの詳細な状況を頭に思い描くことは難しい。津波が来襲 するときのイメージを具体的に持つことが、津波に対する危機 意識の向上につながり、避難行動促進へと繋がると考える。

本研究では、3次元シミュレーションによる詳細な津波の挙動を計算するとともに、VR (Virtual Reality)装置²⁾に実装することにより、津波来襲の疑似体験を通して、来襲する津波を詳細にイメージできる仕組みを作った。

(1) VR 装置

VR 装置は、PC およびディスプレイそれぞれ1台で構成さ れる簡易なものから、PCクラスタシステムおよび多数の大型 の映像装置から構成される高度なものまでいくつかの種類が ある。VR 映像から得る臨場感は、VR 装置の能力に大きく左 右される。本研究では、数値計算および VR 可視化に関して 共同研究を行っている、中央大学計算力学研究室(樫山教 授)のHolostage (CHRISTIE 社)を用いて津波シミュレー ションの結果を映像化した。Holostageは、CAVE(Cave Automatic Virtual Environment) と呼ばれる没入型の VR 装置であり、3 面の大型スクリーンおよび 7.1ch のスピー カから構成される(図-6参照)。各スクリーンには、右目用 の映像と、左目用の映像が交互に移し出され、液晶シャッター メガネを用いることで立体的に視認することができる。また、液 晶シャッターメガネには、マーカーと呼ばれる部品が取り付け られていて、磁気センサーによりマーカーを追跡することで、 VR 装置は利用者の目の位置を把握し、歪みのない視覚を作 成することができる。



図-6 Holostage (VR 装置) 概要

(2) 詳細建築物モデルの作成

本研究では、人間の視点で津波を疑似体験できることを目 的とし、建物は内部に至るまで詳細にモデル化した。疑似体 験は、東北地方太平洋沖地震で津波が来襲した、陸前高田 市を対象とした。10mを超える津波の来襲により全ての階が 浸水した陸前高田市の5階建ての宿舎について、3D CAD を用いて詳細にモデル作成を行った(図-7参照)。建物の寸 法は、現地にてレーザー式の計測機器により計測した。計測 が不可能な箇所については、間取り図や写真から判断して寸 法を決定した。建物の位置については、GISと航空写真によ り位置と方向を取得した。

(3) VR 装置用データの作成と実装

VR 装置に実装するにあたり、CADMAS-SURF/3D の出 力結果を可視化ソフトウェアである AVS/Express に取り込み、 データの処理を行った。AVS/Express では以下の処理を行 い、図-8に示すような3次元可視化イメージを、時刻ステッ プごとに作成する。

- 計算結果の VOF 関数値からの水面形状の抽出
- 建物形状データ(3D CAD)の取り込みと合成
- 水面へのテクスチャの適用
- 地表面への航空写真の貼付け
- 光源設定や材料質感などの見栄えに関する各種設定 および調整
- VR 装置型式のデータ出力





図-7 3D モデルによる集合住宅建物形状の再現

全ての時刻のシミュレーション結果を VR 装置型式のデータ に変換し、VR 装置に実装してアニメーション動画として可視 化を行った。 $\mathbf{Z} - 9$ は VR 装置のスクリーンに津波シミュレー ションの結果を投影した様子を示す。 $\mathbf{Z} - 9$ の a) 図は、建 物背後の視点であり、窓枠から津波が吹き出ている様子が確 認できる。 $\mathbf{Z} - 9$ の b) 図は、建物の内部に移動し、部屋の 中から海側を眺めた図である。この時 VR 装置内では、水面 が人の腰のあたりにあり、自分が水没しているように感じた。ま た、海側の窓から濁流が波打って室内に流れ込む様子を体感 できた。 $\mathbf{Z} - 9$ の c) は階段踊り場に移し、階段の方向を眺 めた図である。津波は上の階から流れ落ちてくるだけでなく、 下の階からも階段を駆け上がり、立っている場所に押し寄せて いることが確認できた。 VR 装置での疑似体験を通し、以下に ついて感じた。

- VR装置では1/1スケールでの立体映像により、来襲 する津波の威圧感、恐怖感を感じることができた。
- 建物内部からの視点では、居住空間へ津波が侵入した 際の視界の変化を体験することができ、視界不良により 避難が困難になる様子を確認することができた。
- 視点を切り替えることで、建物の内側・外側の違いや 階層の違いによる津波の印象の変化を体感することが できる。



図-83次元可視化イメージの作成



a)建物背面



b)建物内部



c)通路(階段踊り場)図-9 VR装置による可視化

6. おわりに

本研究において、津波段波による建築物へ作用する波力の 影響を3次元の数値計算に求め、津波波力算定式と比較を 行った。また、建築物の開口部の影響についても考察した結 論は以下に示す通りである。

- 3次元の自由表面流の計算から直接波力を算定した結果と既往の算定式を比較した結果、同等の傾向を示す式および過大評価となる式があった。流速、水位の変化の影響度合いからこのような差異が生じたと考えられる。
- 2次元の浅水流モデルによる算定式と比較した結果、
 数値不安定が生じる傾向が見られるが、3次元計算から

直接算定した波力と同等の傾向が見られる式があった。

 開口部の影響により段波の大きい場合が波力の減衰が 大きいことが数値計算より説明することができた。

本検討では、比較的単純なモデルで検討を行っているため、 現実的な建築物の波力算定にあたっては、より複雑なモデル により検証を行う必要がある。今後は、建築物の配置、大きさ 等の様々なケーススタディを行い、数値計算および津波波力 算定式の適用性および妥当性の検証を更に進める予定である。

また、本研究では、人間の視点から津波の様子を体感す ることを目的とし、詳細な建物モデルを導入した津波の数値シ ミュレーションを実施した。数値シミュレーションの結果を VR 装置に実装し、津波の来襲を視覚的に擬似体験できる仕組み を作った。VR 装置は、1/1 スケールの映像により高い臨場感 を体感することでき、防災意識の向上、防災教育への高い効 果が期待できる。今後は、視覚的な体験だけではなく、聴覚 に関しても体験できる仕組みを取り入れ、臨場感を高めて防災 教育に貢献できるようにする予定である。

参考文献

- 日本建築学会:建築物荷重指針・同解説 (2015)、日本建築 学会 (2015)、643p
- 2) K.Kashiyama : Application of VR Technology to Computational Mechanics, IACM Expressions, 35(2014), pp.14-17
- 3) 財団法人沿岸技術研究センター: CADMAS SURF/3D
- ファウジ、鴫原、藤間、水谷:陸上構造物に作用する津波波力の推定手法に関する考察、土木学会論文集 B2、Vol.65、No.1 (2009)、pp.321-325
- 5) 有川、大家:防潮堤背後の建物に作用する津波力に関する実験 的検討、土木学会論文集 B2、Vol.70、No.2 (2014)、pp.I_ 806-I_810
- 朝倉、岩瀬、池谷、高雄、金戸、藤井、大森: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、Vol.47 (2000)、pp.911-915
- 松富、決得、嶋津、長沼、桜井:開口部を有するRC造建物 における津波の水平力と鉛直力の低減、土木学会論文集B2、 Vol.70、No.2 (2014)、pp.I_371-I_375