

構造物にかかる流体力に関する基礎的検討

八戸工業大学大学院 立花 郁巳
 八戸工業大学大学院 遠藤 貫太
 八戸工業大学大学院 堀合 紳弥
 八戸工業大学大学院 高瀬 慎介
 八戸工業大学大学院 加藤 雅也

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震は国内観測史上最大の規模であり、発生した津波は木造住宅を倒壊させ、RC 構造物の外壁や開口部を損傷させるなど大きな被害を与えた。倒壊した際の瓦礫が津波に巻き込まれることで被害が拡大したと考えられている。現在、千島・日本海溝地震による20m級の津波の予測がされており、東北地方太平洋沖地震による津波被害を超える規模の被害をもたらすとされている。

構造物を建設する際に波力の算定が行われており、波の衝突時の波力を求め設計に用いられている。しかし、波の力は衝突時だけでなく遡上している間、構造物にかかり続ける。また、波力の算定には様々な抗力係数がモデル化されているが近似的な値を用いていることから避難ビルなどの重要構造物や複雑な形状をした構造物には、より詳細な流体力の計測が重要である。また、壁状の直立平面やタンク形状のような円柱、建屋模型のような矩形および立方体などの形状を用いた波力、流体力の研究¹⁾²⁾³⁾は多くされているが津波避難タワーなどのような複雑な形状の研究例は少ない。

そこで本研究では、津波遡上により構造物にかかる流体力について数値解析を行い詳細な流体力の計測を行うことを目的とする。はじめに、水理模型実験と数値解析の結果を比較し精度の検討を行った。その後、津波避難タワーを模して作成したモデルと、それと同じ容積の矩形モデルを用いたダムブレイク解析を行い、浸水深と形状の違いで作用する流体力がどのように変化するかを比較し考察、検討を行った。

2. 実験概要

実験に用いた水路の概要を図-1に示す。水路は全長 20m、水路幅 0.60m、水路深さ 1.0m の開水路で、底面は剛性、側面はアクリルガラス製である。波を遡上させるために水路内にブロックと鉄板を用いた台を設置し、その上に底面積 0.15×

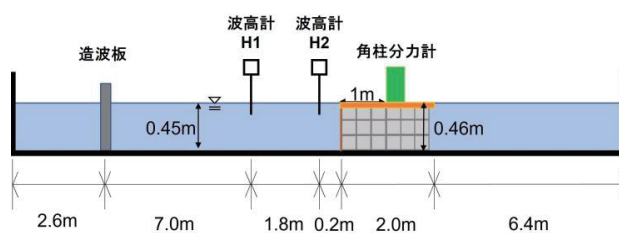


図-1 水路の概要

* Fundamental Study of Fluid Forces acting on Structures by Ikumi Tachihana, Kanta Endo, Shinya Horiai, Shinsuke Takase, Masaya Kato

0.15m²、高さは 0.3m の角柱分力計を設置する。造波装置により津波を発生させた波の波高の変化と角柱にかかる流体力を波高計 H1, H2 と分力計を用いて計測する。また、本実験において発生させる津波は孤立波とする。造波する孤立波の波高は 10cm とし、孤立波を造波する際の造波板の振幅と速さは孤立波理論（式-1, 2）を用いて設定した。

$$\eta = H \operatorname{sech}^2 \left\{ \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right\} \quad \dots \text{ (式-1)}$$

$$c = \sqrt{g(h + H)} \quad \dots \text{ (式-2)}$$

ここで、 η : 孤立波波高の理論値、 c : 流速、 H : 波高、 h : 水深、 x : 位相、 t : 時間、 g : 重力加速度である。また、再現性を得るために同じ条件の実験を 3 回行った。

3. 再現解析概要

OpenFOAM 内の二相流ソルバーである interFoam を用いて解析を行った。OpenFOAM を用いて作成した水路のモデルを図-2 に示す。配置や測定位置は水理模型実験同様であり、モデルは開水路で壁面、底面 Slip 条件、角柱は noSlip 条件と設定した。モデルの寸法は造波板のゼロ位置から作成したため全長 17.4m、幅 0.6m、高さ 1.0m であり、角柱を配置する台の高さは実験と同じく 0.46m である。また、角柱の寸法も同じく底面積 0.15 × 0.15m²、高さ 0.3m で作成している。流体力のデータ抽出には、OpenFOAM の FunctionObject 機能である forceCoeffs を用いた。この機能は、トルク係数 C_m 、抗力係数 C_d 、揚力係数 C_l を出力することができるため、角柱の抗力係数 C_d を時系列データで取り出し、その抗力係数から式-3 を用いて流体力を求める。

$$D = \frac{1}{2} C_d \rho U^2 S \quad \dots \text{ (式-3)}$$

ここで、 D : 流体力、 C_d : 抗力係数、 ρ : 密度、 U : 代表速度、 S : 代表面積である。

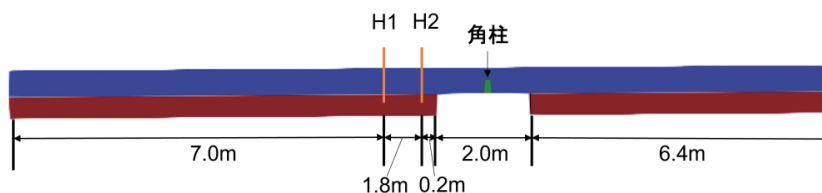


図-2 再現解析モデル

4. 解析精度の検証結果

実験結果および解析結果を図-3, 4, 5 に示す。図-3 のグラフでは波高 H1 の比較を行った。波高の時刻歴変化における最初の波のグラフ形状に着目すると解析結果は実験結果を再現できていることがわかる。その後の反射波については実験と違う挙動を示しているが、孤立波である最初の波を良い値で再現できていることから H1 での解析結果の精度は概ね良い結果を得られた。図-4 のグラフでは波高 H2 の比較を行った。H1 の比較と同じく最初の波のグラフ形状に着目すると解析の値が実験の値より大きいことがわかる。しかし、差は数 cm であるため H2 での解析結果の精度も概ね良い結果が得られた。また、図-3, 4 より孤立波の進行速度も解析で再現できていることがわかる。図-5 のグラフでは流体力の比較を行った。流体力の最大値は近い値を示していることがわかる。また、流体力の時刻歴変化におけるグラフの形状についても再現できていることがわかる。これらの示すことから OpenFOAM による解析は、実験値と近い値と水の挙動を再現できることが分かったため、解析精度は良いと考えられる。

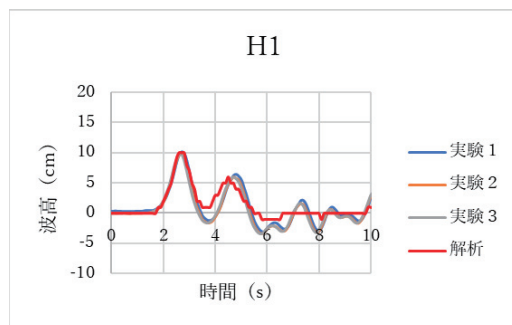


図-3 波高 H1

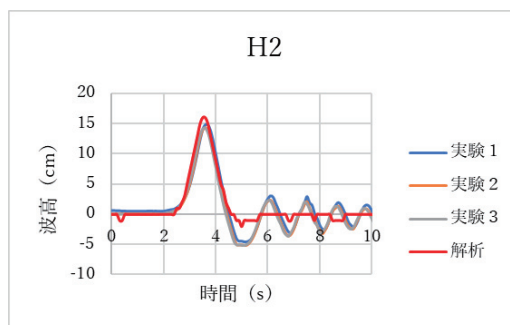


図-4 波高 H2

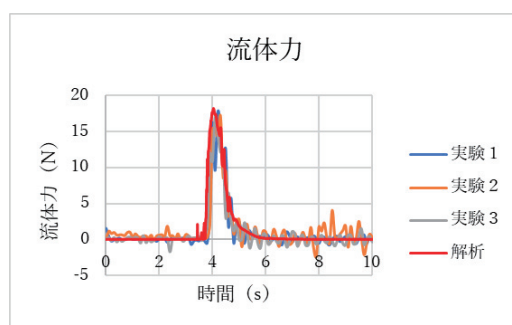


図-5 流体力

5. 解析概要

OpenFOAM を用いて避難タワーモデルを設置した水路の解析モデルを図-6 に示す。境界条件は、開水路で底面、壁面は Slip 条件、モデルは noSlip 条件、避難タワーモデル後方の壁は outFlow の条件にし、水が流出するようにした。水路のモデルの寸法は高さ 80m, 全長 200m, 幅 76m である。水柱は高さ 40m と 30m の 2 つの条件で行う。水柱の長さは 70m, そこから 60m 離れたところに避難タワーモデルを配置する。避難タワーモデルの正面、側面を図-7, 8 に示す。高さ 17.4m, 幅 21.2m, 全長 29.8m の三階建てを想定している。この避難タワーモデルをモデル 1 とする。モデル 1 と同じ容積の矩形モデルを図-9 に示す。この矩形モデルをモデル 2 とする。解析は、モデル 1 の水柱 40m と 30m, モデル 2 の水柱 30m の 3 ケース行った。

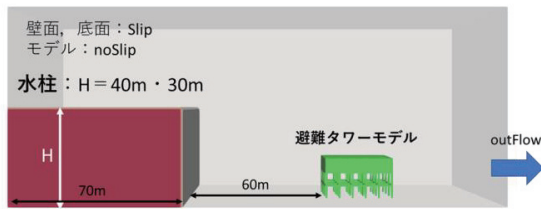


図-6 水路モデル

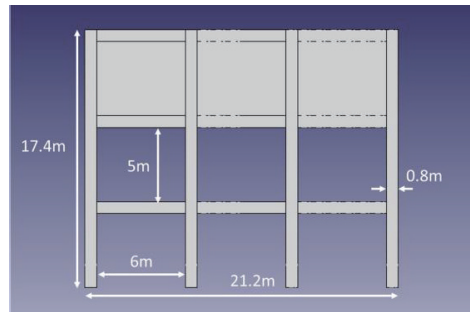


図-7 避難タワーモデル
(モデル 1) : 正面

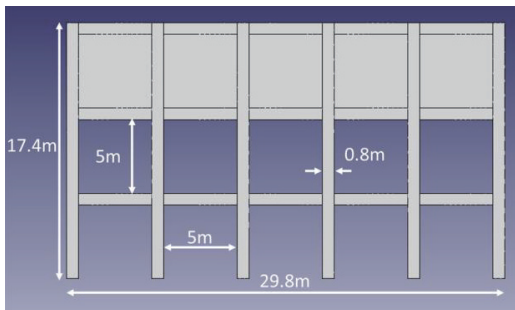


図-8 避難タワーモデル
(モデル 1) : 側面

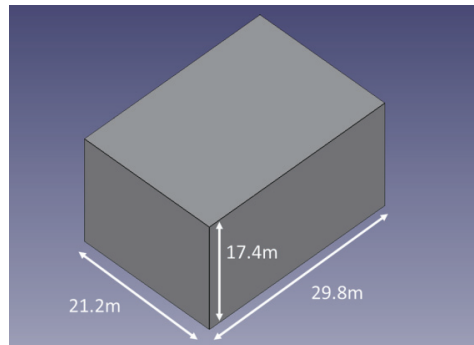


図-9 矩形モデル (モデル 2)

6. 解析結果

水柱 30m のモデル 1 とモデル 2 の比較を図-10 に示す。モデル 1 の流体力の最大値はモデル 2 の最大値の約 1/3 であり形状による遡上津波への有効性があることを確認できた。また、モデル 2 の流体力は衝突時に最大値を出しその後減少していくが、モデル 1 の流体力は衝突時に上昇し、その後わずかに減少し徐々に最大値まで上昇している。水柱 30m と水柱 40m のモデル 1 の比較を図-11 に示す。ここで、水柱 30m の浸水深は約 7m であり、水柱 40m の浸水深は約 11m であった。水柱 40m の流体力の最大値は 30m より約 2 倍大きい値となっている。また、水柱 40m の場合でも流体力は衝突時に上昇、その後、減少し最大値まで上昇する挙動がみられた。これは、モデル 1 のような形状で水が滞留し水位が上昇し構造物にかかる流体力も上昇したと考えられる。水柱 30m、モデル 1 のシミュレーション結果を図-12 に示す。

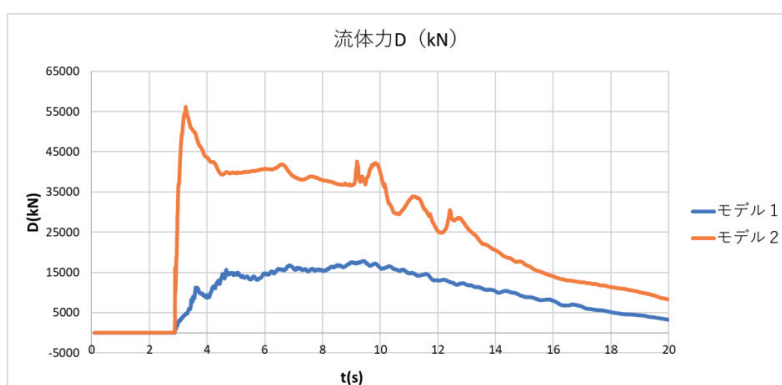


図-10 水柱 30m のモデル 1, モデル 2

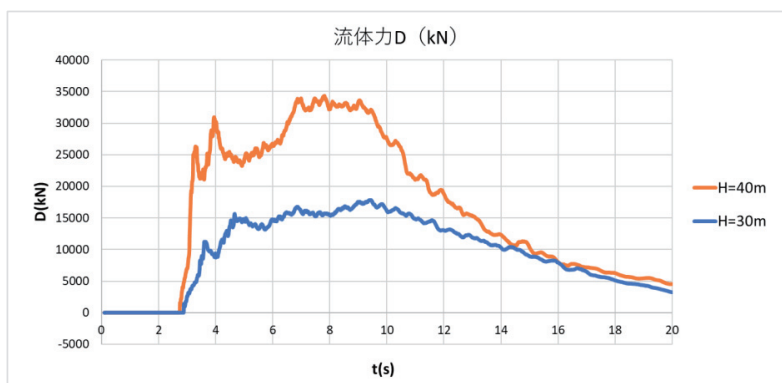


図-11 水柱 40m, 水柱 30m のモデル 1

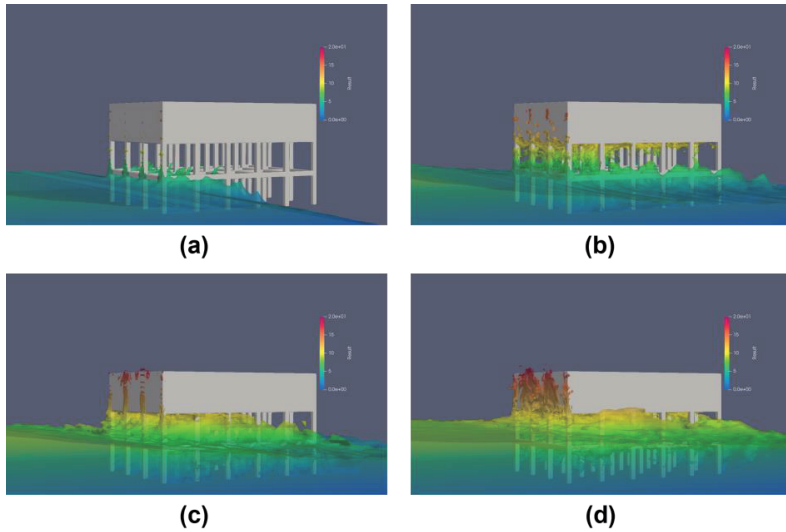


図-12 シミュレーション結果（水柱 30，モデル 1）

7. おわりに

本研究では、水理模型実験と再現解析の結果の比較により、OpenFOAMによる孤立波と反射波による波高変化の再現、流体力について満足する結果で解析することができると分かった。津波避難タワーを模して作成したモデルと、それと同じ容積の矩形モデルを用いたダンプレイク解析に関しては、津波避難タワー形状の遡上津波に対する有効性があることを確認でき、避難タワーモデルの流体力の時間変化は矩形モデルと違い衝突時ではなく、時間が経過し水位が上昇したときに最大値を示すことが分かった。また、浸水深が約 4m 変化するだけで今回用いたモデルでは構造物全体にかかる流体力は約 2 倍になることが分かった。しかし、今回は構造物全体にかかる流体力を解析で求めたが、避難タワーモデルのような形状は部材ごとに流体力のかかり方に違いがあるため、部材ごとにかかる流体力の解析を今後の課題として検討を続けたい。

8. 参考文献

- 1) 織田幸伸, 本田隆英, 高島知行: 陸上構造物に働く津波波力の時系列評価に関する研究土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, I_796-I_800, 2014.
- 2) 榊山勉: 津波遡上によるタンクに作用する流体力に関する研究土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, I_891-I_895, 2014.
- 3) 高橋研也, 前田勇司, 西畑剛, 小牧大樹: 陸上構造物に作用する津波波圧と波向の影響に関する実験的研究土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, I_306-I_310, 2014.