

## 水害時に構造物が受ける荷重の推定

### Estimation of the Load brought to Structures under the Flood Disaster

- 内堀和昭, 東工大, 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, E-mail: uchibori.k.aa@m.titech.ac.jp  
田村哲郎, 東工大, 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, E-mail: tamura.t.ab@m.titech.ac.jp  
Kazuaki UCHIBORI, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta Midori-ku Yokohama Kanagawa  
Tetsuro TAMURA, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta Midori-ku Yokohama Kanagawa

Load affecting buildings caused by tsunami or flood is estimated using free surface flow simulation (VOF; Volume of Fluid method). At this point, usually, buoyant force is larger than wave force (drag) under inundation. However, buoyancy can't be estimated if there is no-gap between the bottom of buildings and ground. In this study, simple assumption for evaluating buoyant force is proposed and applied to free surface flow past cubic building.

#### 1. はじめに

津波遡上や洪水では大量の水による荷重が構造物に作用する。この荷重は構造物の破壊や流出を招き、時には破壊を免れた構造物そのものの転倒や漂流を引き起こす。このとき、構造物の破壊や流出の主な原因となるのは、水の流れによる波力（水平荷重）と浸水による浮力（鉛直荷重）である。本研究では構造物に作用するこれらの水による荷重の推定を行うことを目的とする。

一般的に流れの中に在る物体に作用する流体力は、物体表面での垂直応力（圧力）の積分値として求められる。中でも浮力は、静水圧に起因する圧力差から生じる力である(Fig. 1-(a))。また、物体にはたらく浮力は物体が押し退けた流体の体積に比例するというアルキメデスの原理としても知られている。ここで直感にそぐわない事実として、水底に隙間なく置かれた物体には浮力が作用しないという現象が挙げられる(Fig. 1-(b))。この場合、アルキメデスの原理は適用出来ない、一方で物体表面の圧力を積分することで物体に対して浮力が生じないことが確認出来る。

同様の現象が、津波遡上や洪水といった水害を想定し、浸水時に構造物に作用する浮力を推定する場合に発生する。即ち、浸水深に関わらず構造物に浮力は作用しないということである。しかしながら、実際には多くの場合、構造物と地面の間には水の流入を許容する空隙があり、そこに流れ込んだ水を介して浮力が作用すると考えられる。このような観点からも防災のための設計においては、浸水時は流れが無い場合の静水圧分布から得られる浮力が構造物に作用すると仮定している<sup>(1)</sup>。これは水の流れが遅く、構造物周囲の水位変動が小さい場合には良い予測となる。一方で流れが存在すれば浸水深さや流速の時間変化が伴う。本来であれば、構造物と地面の間の構造を再現し、そこでの水の流れと共に変化する非定常な浮力を予測することが望ましい。しかしながら、これらの再現は容易では無い。そこで本研究では近似的な浮力推定手法を提案し、浸水深と流速の影響を取り入れた非定常な浮力の推定を試みる。

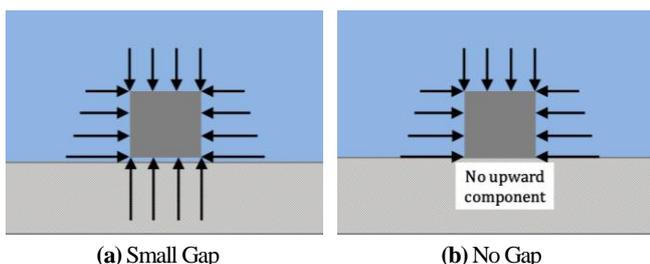


Fig. 1 Pressure Distribution on the Surface of Sunken Object.

#### 2. 数値解析手法

非圧縮性粘性流体を仮定し、基礎方程式には以下の式を用いる。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

(速度ベクトル:  $\mathbf{v}$ , 圧力:  $p$ , 重力加速度:  $\mathbf{g}$ , 密度:  $\rho$ , 粘度:  $\mu$ .)

非定常流れ場の解析手法には圧力流速分離解法を用いる。圧力流速分離解法では中間速度 $\tilde{\mathbf{v}}$ を用いて(2)式を(3), (4)式に分解する。添え字 $n$ は時間進行のステップ数を表している。

$$\tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{v}^n + \Delta t \left[ \mathbf{g} - (\mathbf{v}^n \cdot \nabla) \mathbf{v}^n + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v}^n \right] \quad (3)$$

$$\mathbf{v}^{n+1} = \tilde{\mathbf{v}} - \Delta t \frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1} \quad (4)$$

(4)式の計算において必要となる新ステップでの圧力 $p^{n+1}$ の計算には(4)式を(1)式に代入することで得られる(5)式を用いる。

$$\frac{1}{\rho} \nabla^2 p^{n+1} = \frac{\nabla \cdot \tilde{\mathbf{v}}}{\Delta t} \quad (5)$$

(3)式の時間積分にはオイラー法を用い、微小時間刻み $\Delta t$ はCFL条件に制御される不等間隔刻みとする。計算領域を直交座標上で離散化し、物理量をスタガード配置とする。移流項の離散化には勾配型の2次精度完全保存型差分<sup>(2)</sup>と安定化のために1次精度風上差分から得られる2階の数値粘性を付与する。その他の項の離散化には中心差分を用いる。(5)式の計算にはMDSOR法を用いる。

界面捕獲法にはVOF法<sup>(3)</sup>を採用する。VOF法では各格子における流体占有率をVOF関数 $\phi$ として定義し、以下のVOF関数の輸送方程式を時間発展させることで対象流体の輸送を行う。

$$\frac{D\phi}{Dt} = 0 \quad (6)$$

(6)式の時間発展にはドナー・アクセプター法<sup>(5)</sup>を用いる。流れ場の流速を用いて微小時間刻み $\Delta t$ の間に格子面を通過する流束(移流体積)を決定し、この領域に含まれる対象流体(部分体積)を輸送する。このとき、VOF関数は各格子における流体占有率を表しており、界面形状は別途決定する必要がある。本研究では界面再構築の手法としてWLIC(Weighted Line Interface Calculation)<sup>(4)</sup>を採用する。

### 3. 浮力推定手法

浮力の算出ためには構造物の底面に作用する圧力を推定する必要があるが、そもそも流体と接しない底面では圧力を計算することが出来ない。そこで物体を変形しない連続体と仮定する。その場合、物体内部の圧力分布は(7)式の線形分布となる。このとき、流体と接する面の境界条件は(8)式を用いて流体側の圧力分布とする。また、底面の境界条件は(9)式を用いて静水圧差を課す。

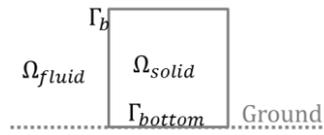


Fig. 2 Object fits with Ground.

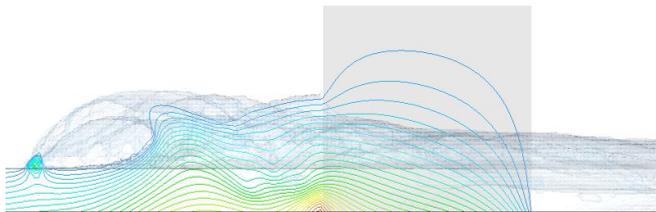
$$\nabla^2 p = 0 \text{ in } \Omega_{solid} \quad (7)$$

$$p = p_{fluid} \text{ on } \Gamma_b \quad (8)$$

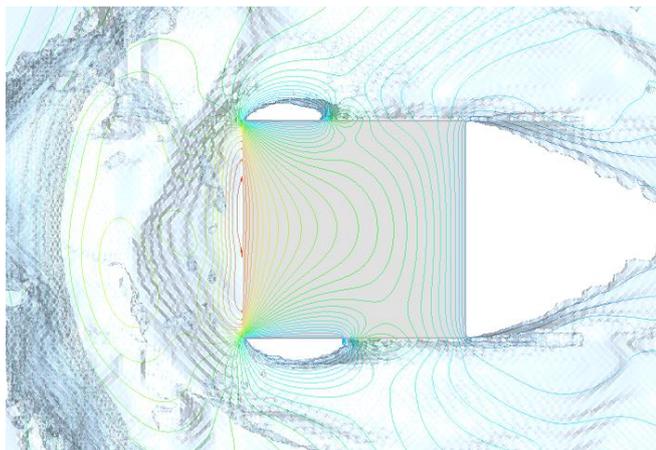
$$p = p_{solid} - \rho g \Delta z \text{ on } \Gamma_{bottom} \quad (9)$$

水の流れが無く、浸水による浮力のみが物体に作用する場合、上記の手法を用いて算出される浮力はアルキメデスの原理による理論値を与える。本手法は「物体と地面の間に薄い流体の層が存在する」という仮定とも考えられる。この場合、圧力は薄い流体層を介して物体に作用すると考えられる。

本手法によって得られた物体内部の瞬時の圧力分布の例を以下の図に示す(Fig. 3)。流れ場の圧力分布に連続する物体内部の圧力分布を用いて接地された構造物にはたらく浮力を推定する。



(a) Side View (Description at the Center Plane)



(b) Top View (Description at the Bottom Plane)

Fig. 3 Instantaneous Pressure Distribution including Inside of the Object

Table 1 Reference Flow Condition.

	Depth [m]	Velocity [m/s]	Froude Number
Case 1	2.0	4.0	0.9
Case 2	2.0	8.0	1.8
Case 3	2.0	16.0	3.6

### 4. 計算条件

浸水を想定した構造物周りの流れのシミュレーションを行う。構造物は一辺  $D=10[\text{m}]$  の立方体とし、構造物の周辺は  $\delta=0.2[\text{m}]$  の直交等間隔格子とする。また、構造物遠方では粗い格子を用いる。このとき、跳水や段波を含む領域には  $\delta=0.2[\text{m}]$  の格子を用いる。浸水深は人の身長より大きい  $2[\text{m}]$  とし、流速は人または自動車の速さを想定した値を用いる(Table 1)。また、流れ場の Reynolds 数  $Re_D \approx 1.0 \times 10^8$  であり境界層の解像が困難であることから物体表面は滑り条件とする。流入境界は一様流、流出境界は放射条件とし、側方境界では流入出を許容する境界条件を用いる。

### 5. 計算結果

シミュレーション時間で 50 秒が経過した流れ場を示す(Fig. 4)。Case 1 は人の駆け足程度の速さの流れである。常流であるため跳水や段波を伴わず、構造物周辺の水位変動も小さい(Fig. 4(a))。このときの浮力は波力に比べて数倍程度大きく、浮力の効果が大きいことが分かる(Fig. 5(a))。また、ここでの浮力は流れが無い場合の浸水のみによる浮力と近い値を示している。続いて Case 2 は人が走る速さ程度の流れである。射流であるため跳水が確認出来る(Fig. 4(b))。Case 1 と比較して波力、浮力ともに増加している(Fig. 5(b))。Case 3 は自動車の走行速度程度の流れであり、その勢いのために水が物体前方で  $10[\text{m}]$  以上の高さまで打ち上げられ続けている(Fig. 4(c))。波力、浮力ともに Case 2 と比べて著しい増加が確認出来る(Fig. 5(c))。

構造物周囲の水位変動に関して Case 2 及び Case 3 では構造物背後に死水領域が確認出来る。東日本大震災での津波においても類似の流れ場が発生していたことを示唆する報告<sup>(1)</sup>がある(Fig. 6)。

### 6. まとめ

浸水深と流速の時間変化を考慮した浮力の推定を行うための浮力推定手法を提案した。そこでは変形を伴わない連続体内部の圧力分布(線形分布)と静水圧分布の仮定から導かれた物体底面での圧力分布を用いて構造物に作用する浮力の推定を行った。

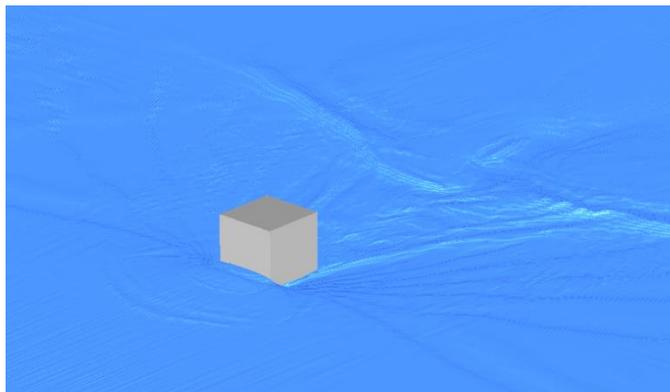
比較的遅い流れ場において構造物に作用する浮力は、流れが無い場合の静水圧による浮力と近い値を示すことが確認された。そこで生じた静水圧による浮力との差異は、流れによって生じた動圧の影響によると推測される。また、流れが速くなるに従い、波力と浮力には共に増加する傾向が見られた。特に波力の増加は流速の増加の影響を受け易く、これは速度の二乗に比例する動圧の特徴とも一致する。これらの点から提案手法によって得られた浮力の傾向は定量的に妥当であると考えられる。一方でより速い流れにおける提案手法の有効性は不明瞭である。

本研究で取り扱った構造物の形状、浸水深および流速では浮力が波力より大きくなる傾向が見られた。更に浸水深が深くなれば、波力に対する浮力の影響はより一層顕著となるであろう。本研究において示した浮力の値は、構造物の自重による相殺を考慮していない。但し、構造物内部は通常ほとんどが空洞であり、構造物内部の浸水の状況が実際の浮力の大きさを左右すると考えられる。これに伴い、構造物の開口部を増やすことで浸水を早め、水による荷重を軽減することも重要施設の設計において検討されている。

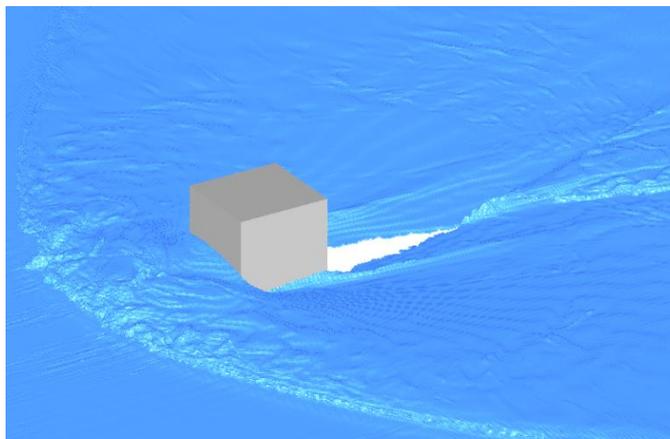
避難ビルの設計において示されている津波波圧算定法<sup>(1)</sup>では、波力は水の流れが無い場合の浸水(浸水深=波高)による浮力の 3 倍と規定されている。即ち、波力と浮力は共に浸水深によってのみ評価される。一方、提案手法では浸水深と流速の時間変化を考慮している。本研究で取り扱った条件に対して上記の算定法を適用した場合、波力がかなり大きく評価されるが、初期の水塊の衝突やアスペクト比の大きい構造物を考慮すれば妥当な仮定とも考えられる。

参考文献

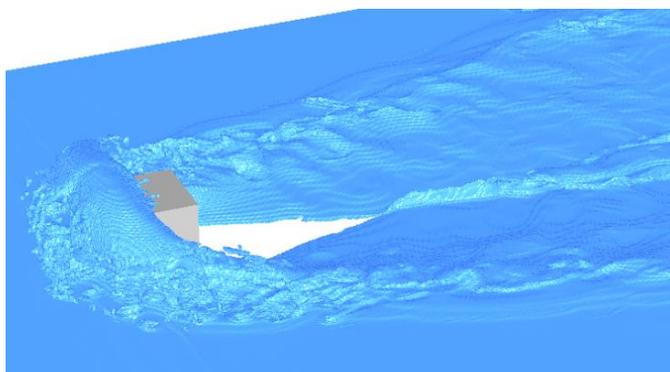
- (1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 独立行政法人 建築研究所, "平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震調査研究 (速報) (東日本大震災)", (2011).
- (2) 梶島岳夫, "乱流の数値シミュレーション", 養賢堂, (1999).
- (3) C. W. Hirt, B. D. Nichols, and R.C. Hotchkiss, "SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries", Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-8355, (1980).
- (4) K. Yokoi, "Efficient implementation of THINC scheme: A simple and practical smoothed VOF algorithm", J. Comput. Phys., Vol.226, (2007), pp. 1985-2002.



(a) Case 1 Depth=2.0 [m], Velocity=4.0 [m/s], Froude Number=0.9.

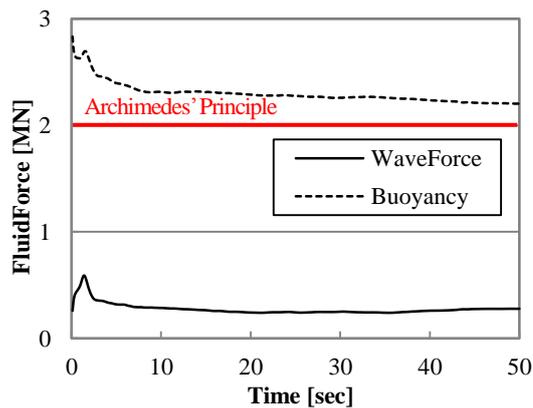


(b) Case 2 Depth=2.0 [m], Velocity=8.0 [m/s], Froude Number=1.8.

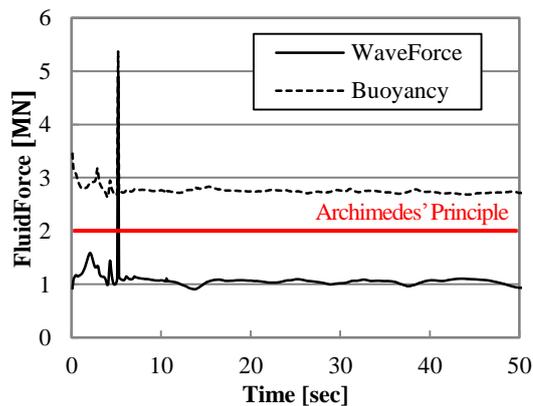


(c) Case 3 Depth=2.0 [m], Velocity=16.0 [m/s], Froude Number=3.6.

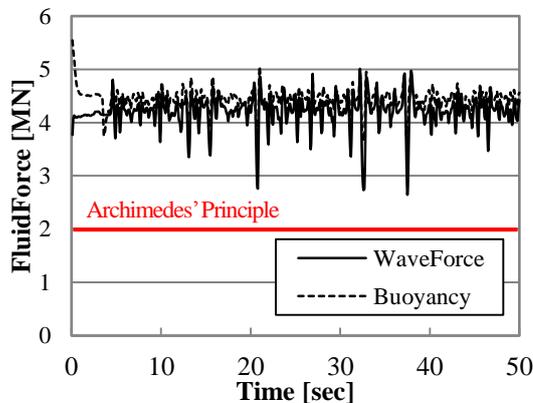
Fig. 4 Description of Water Interface.



(a) Case 1 Depth=2.0 [m], Velocity=4.0 [m/s], Froude Number=0.9.



(b) Case 2 Depth=2.0 [m], Velocity=8.0 [m/s], Froude Number=1.8.



(c) Case 3 Depth=2.0 [m], Velocity=16.0 [m/s], Froude Number=3.6.

Fig. 5 Time Series Data of Fluid Force

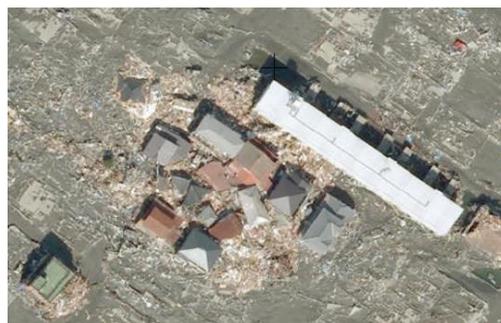


Fig. 6 Mark of Dead Water behind the Building.