

流体剛体連成解析による大型漂流物を考慮した 津波避難ビルの安全性評価

九州大学大学院 学生会員 鍋倉昌博
九州大学大学院 正会員 浅井光輝

1. 目的

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波は、多くの土木構造物を崩壊させた。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・減災技術の早急な見直しが必要となっている。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が各地域で推進されている。なお、構造物に作用する津波の流体力は、ピロティなどの低層階での開口を設けることにより軽減する事ができるものの、開口部に漂流物が捕捉された場合には津波波力が増大する危険性があり、また漂流物自体の衝突確率を増加するなど負の影響も考えられる。そこで本研究では、津波避難ビルの安全性を多面的に評価するため、津波時に作用する流体力だけでなく漂流物の衝突に対しても同時に評価し、ビルの開口部・津波進行方向の影響等を数値シミュレーションにより評価することにした。

2. 解析手法

2-1 SPH 法

解析手法は、形状変化の激しい流れの3次元問題の解析に適している粒子法的一种であるSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)法を採用した。SPH法は、連続体を有限個の粒子に離散化し、対象とする粒子の影響半径内に存在する近傍粒子に重み関数をかけて、一種の重み付き平均として近似する手法である(図-1)。粒子 j の質量 m^j 、密度 ρ^j とし、重み関数を W 、影響半径を h とすると、物理量 $f(x)$ は以下の式で表される。

$$f(x) = \sum_{j=1}^N \frac{m^j}{\rho^j} f(x^j) W(x - x^j, h) \quad (1)$$

流体運動の支配方程式としては、ナビエ・ストークス方程式と質量保存則を解く。また、本解析ではSPH法の中でも圧力を陰的に、速度を陽的に解くという特徴を持ち、非圧縮性流体に適した解法である安定化 Incompressible SPH (ISPH)法を採用した。これにより、物理的には瞬間的に微圧縮性を許容することで、安定した圧力分布を得ることができると同時に、長期的な体積保存性にも優れた結果を得ることができる。

2-2 流体剛体連成解析

境界面での力の伝達として基本物理に従って流体と剛体問題を連成する定式化に、田邊ら⁽²⁾によって

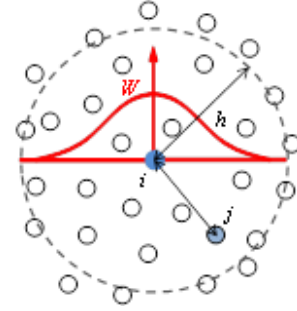


図-1. SPH 法の概念図

提案された粒子法の安定化手法および仮想マーカーを用いた高精度境界処理を加えた。

剛体の重心位置ベクトル $\mathbf{X}$ は全体座標系の基底ベクトル $\mathbf{e}^{(i)}$ を用いて

$$\mathbf{X} = \sum_{I=1}^3 X^{(I)} \mathbf{e}^{(I)} \quad (2)$$

と表すものとし、次の運動方程式に従う。

$$M \frac{d^2 \mathbf{X}}{dt^2} = M \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{F} \quad (3)$$

ここで、右肩の括弧付きの数字は各座標軸の成分であることを明示する。また M は剛体の質量、 $\mathbf{F}$ は剛体に作用する外力ベクトル、 $\mathbf{V}$ は剛体の速度ベクトルとする。また、剛体重心周りの回転運動に関する運動については、慣性テンソル $\mathbf{I}$ を用いて次式により与えられる。

$$\mathbf{I} \dot{\boldsymbol{\Omega}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{I} \boldsymbol{\Omega} = \mathbf{M} \quad (4)$$

$$\mathbf{I} = \sum_{I=1}^3 \sum_{J=1}^3 I^{(I,J)} \mathbf{e}^{(I)} \otimes \mathbf{e}^{(J)} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \sum_{I=1}^3 \Omega^{(I)} \mathbf{e}^{(I)}, \quad \mathbf{M} = \sum_{I=1}^3 M^{(I)} \mathbf{e}^{(I)} \quad (6)$$

ここで $\boldsymbol{\Omega}$ は角速度ベクトル、 $\mathbf{M}$ は剛体に作用するモーメント、 $\boldsymbol{\Omega}$ の上に付いているドットは時間微分を示す。また $\times$ 、 $\otimes$ はそれぞれ外積およびテンソル積を示す。最終的に、剛体の速度・角速度が定めれば剛体粒子上での速度ベクトル $\mathbf{v}$ 、および位置ベクトル $\mathbf{x}$ は次のように更新して剛体の動きを表現している。

$${}^{n+1}\mathbf{v}_i = {}^n\mathbf{V} + {}^n\boldsymbol{\Omega} \times ({}^n\mathbf{r}_i - {}^n\mathbf{R}) \quad (7)$$

$${}^{n+1}\mathbf{x}_i = {}^n\mathbf{x}_i + {}^n\mathbf{v}_i \Delta t \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{r}$ は剛体粒子の位置を、 $\mathbf{R}$ は剛体の重心位置をそれぞれ示す。

これらの式における外力・モーメントの評価に関しては文献⁽²⁾を参照されたい。

3. 解析例

3-1 解析概要

解析モデルの概要を図-2に、構造物のモデル概要を図-3に示す。構造物モデルは両者ともに窓開口条件は等しく、ピロティ構造物は低層部をピロティに変換したモデルとなっている。漂流物は図-4に示す漁船規模の船を想定したモデルを使用し検討することにした。また構造物の前面に漂流物となる船を配置し、その背後に津波を見立て、初速 5m/s を付与した水塊を設定した。本稿では、船の初期位置を構造物中心軸に配置した際の結果を示す。構造物モデルとしては、ピロティ開口部があるモデルと開口部がないモデルの2種類を比較検討した。解析条件として、粒子間隔は 0.20m、総粒子数約 1500 万、時間増分 0.001 秒、実時間 40 秒とし、理化学研究所の京を用いて解析を行った。

3-2 解析結果

図-5は流入開始から 11 秒後の解析結果をモデルごとに比較している。ピロティモデルでは津波はピロティ内部に浸水し、その流れとともに移動した漂流物は構造物と衝突した。一方で、ピロティなしモデルでは構造物前面で発生する反射波の影響から衝突は生じなかった。

また、本解析におけるビルに作用する津波波力を測定した結果を図-6に示す。このグラフは津波進行方向と同方向の合力を各時間毎にプロットしたものである。同図よりピロティ開口部を有する場合には、津波波力を低減できていることが分かった。しかしその一方で、図-5に示すようにピロティ開口部があることで、漂流物が構造物に衝突する危険性が上がることを確認した。

4. おわりに

本研究では、SPH 法による流体シミュレーションコードに剛体解析機能を追加し、漂流物の衝突の影響までを考慮し、津波避難ビルの安全性について検討した。現時点では、限られたケースによる解析結果にとどまっているため、今後は解析例を増やし、統計的に調査する予定である。また、漂流物の衝突時の衝突力についても定量的に評価していく予定である。

参考文献

- (1) 浅井光輝, 合田哲郎, 小國健二, 磯部大吾郎, 檜山和男, 一色正晴, 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, 応用力学論文集, pp649-658, 2014
- (2) 田邊将一, 浅井光輝, 宮川欣也, 一色正晴: SPH 法による流体剛体連成解析とその橋梁流失被害予測への応用, 応用力学論文集, pp329-338, 2014

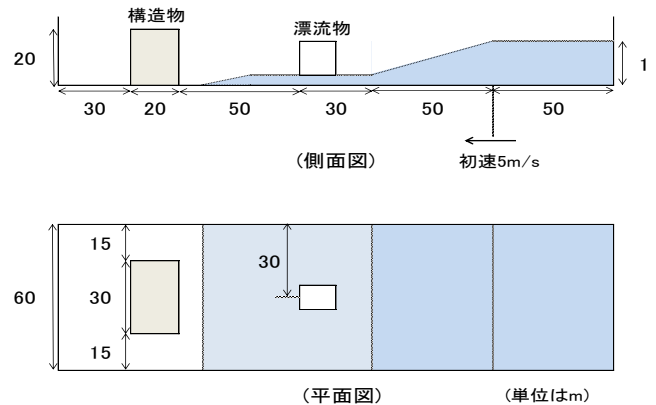


図-2. 解析モデル概要

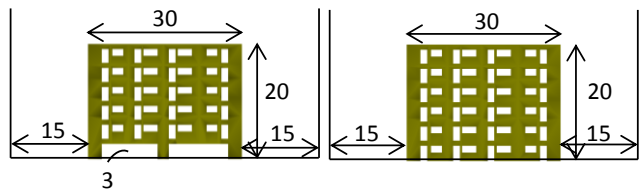


図-3. 構造物のモデル概要

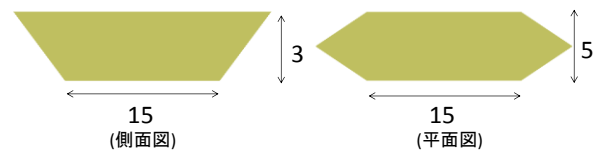


図-4. 漂流物モデル

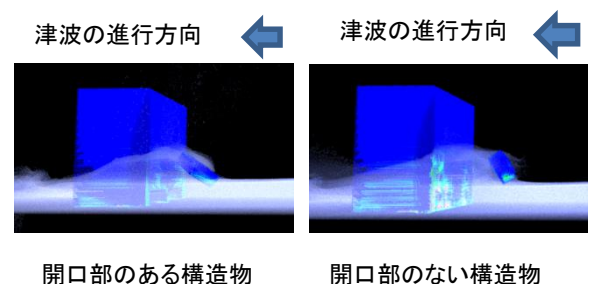


図-5. 構造物と漂流物の正面図
(t=11.0s)

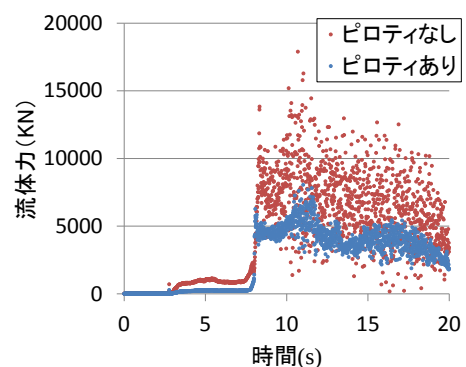


図-6. 津波波力の比較