

津波外力を受けて移動する物体の計算法の提案

水工学研究室 森 貴正
指導教員 細山田 得三

1. はじめに

近年の大規模地震として 2004 年のスマトラ島沖地震や 2011 年の東北地方太平洋沖地震が記憶に新しい。2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震は、日本での観測史上最大の地震であり、世界的に見ても 2004 年のスマトラ島沖地震以来の規模であった。これらの地震では、被害のほとんどが津波の遡上によるものであり、甚大な被害が出たが、特に遡上して氾濫するによって移動する家屋、船舶が衝突することによってさらに大きな被害が引き起された。

陸上構造物に作用する津波波力を推定する上で津波によって運ばれる物体をどのように評価するかが重要な課題である。

2. 津波によって移動する物体に関するこれまでの研究

これまでの津波に関する研究は数値シミュレーションや大規模水理実験、現地踏査などによる津波力の計測や推定などが挙げられる。また、津波漂流物(船舶やコンテナ、木材)の挙動や衝突力、東日本大震災の被災現場での構造物(橋桁など)の移動状況調査が勢力的に行われてきた。

数値計算による漂流物の移動状況の評価は多い全体の研究の中ではまだ少なく、十分な知見が得られているとは言えない。漂流物の挙動を数値計算によって求める手法としては、漂流物に作用する津波力を、流体中に置かれた物体の抗力係数から求めた外力とし、浮遊挙動を計算するような簡易的なものが多い。この場合、漂流物の移動に伴う波浪場への影響は考慮されず物体の摩擦抵抗力や回転運動に対する底面摩擦の抵抗力を含めることが困難であり、漂流物が排除している体積も評価できない。

3. 研究の目的

本研究では、通常の津波数値計算手法に新たに考案した移動物体の計算アルゴリズムを付加して、津波外力を受けて移動する物体の動きを評価するモデルを構築することを目的とした。特に物体が計算領域内部で占める位置の割り当てと、物体表面の法線方向に作用する水圧だけでなく、物体の接線方向に作用するせん断力と回転のトルクを考慮して回転方向の力を考慮するアルゴリズムを含めること、さらに摩擦による抵抗力を考慮して津波外力がない状態では静止することも含める数値計算コードを開発することを目的とした。

4. 数値計算方法

本研究では、津波の遡上数値計算に加えて構造物に作用する波力と物体の移動計算を求められることができる数値計算コードを作成した。津波の流況(波動場の計算)は非線形浅水理論式を支配方程式として、差分法によって計算した。計算格子とは、静止直交座標系を用いてスタッガード格子を採用する。種々の計算条件で計算を行ったが、ここで報告する計算に関しては格子の長さ(dx, dy)は 100m, 計算領域は 328×192($n_x=192$, $n_y=328$), 全タイムステップは 6000, 計算の時間間隔 dt は 0.5s, 波の周期は 1000s, 振幅は 5.5m である。

計算の主な流れを図-1 に示す。

(1)波動場の計算

以下に浅水長波理論の基礎方程式を示す。式(1)は連続式で、式(2), (3)は x, y 方向の運動方程式である。

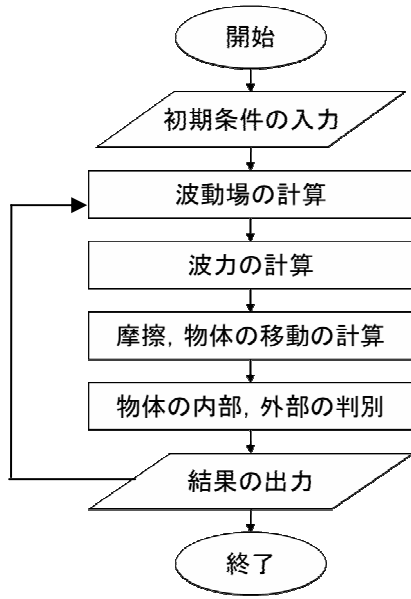


図-1 計算の流れ図

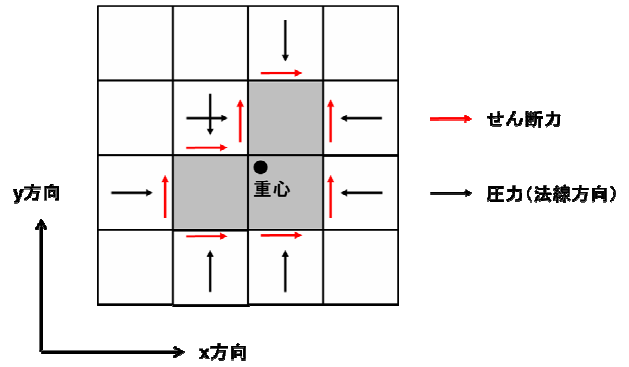


図-2 物体と形状と外力の関係

(3)物体の移動計算

物体の移動を2次元で考えると、水平方向、鉛直方向の並進運動と回転運動にわけて考えることができる。物体に作用する外力は、 f_x 、 f_y 、モーメント M であり、移動計算では摩擦力も考慮する。これらに並進運動の運動方程式と回転運動の運動方程式を適用することにより、 x 、 y 方向の重心の移動距離、物体の回転角 θ を求めることができる。以下に運動方程式を示す。(4)、(5)は x 、 y 方向の運動方程式であり、(6)は回転の運動方程式である。

$$f_x = ma = mx_g'' \Rightarrow x_g'' = \frac{f_x}{m} \quad (4)$$

$$f_y = ma = my_g'' \Rightarrow y_g'' = \frac{f_y}{m} \quad (5)$$

$$M = I\alpha = I\theta'' \Rightarrow \theta'' = \frac{M}{I} \quad (6)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial m}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \frac{\partial m^2/h}{\partial x} + \frac{\partial mn/h}{\partial y} + gh \frac{\partial(h+z_*)}{\partial x} - A \left(\frac{\partial^2 m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 m}{\partial y^2} \right) + \frac{gm_n^2}{h^{7/3}} m \sqrt{m^2 + n^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial mn/h}{\partial x} + \frac{\partial n^2/h}{\partial y} + gh \frac{\partial(h+z_*)}{\partial y} - A \left(\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} \right) + \frac{gm_n^2}{h^{7/3}} n \sqrt{m^2 + n^2} = 0 \quad (3)$$

ここで、 x 、 y は水平座標、 t は時間、 h は水深、 m 、 n は x 、 y 方向の線流量、 g は重力加速度、 z_* は地盤標高、 m_n はマンニングの粗度係数、 A は水平渦動粘性係数を表している。

(2)波力の計算

図-2 には静止直角座標にある物体に作用する津波外力について示している。ここで、圧力とせん断力を計算し、圧力は静水圧分布により算出する。これらの x 方向の合力を f_x 、 y 方向の合力を f_y とする。モーメント M は各格子に作用する力と重心からの距離によって計算する。

ここで、 m は物体の質量、 a は加速度、 x_g 、 y_g は x 、 y 方向の重心の移動距離、 I は慣性モーメント、 α は角加速度、 θ は回転角である。これらの式を時間積分することにより、移動距離と回転角を計算できる。

(4)物体の内部、外部の判別

物体が並進運動、回転運動することで物体が位置する座標は当然変わってくる。そのため、計算領域の各格子で物体の内部と外部の判別を行い、新たに移動した座標に物体を反映する必要がある。そこで、本研究では巻き付き判定法と呼ばれ

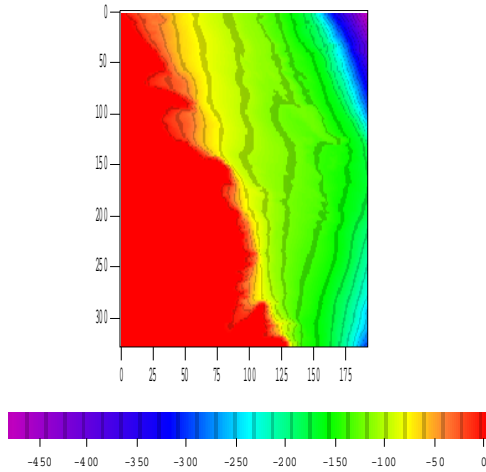


図-4 地形の標高

る方法を用いて各格子の内部と外部の判別を行う。

この方法では、判定を行う格子の座標を原点とする座標に変換する。そして物体を構成する点を結ぶ線分に変数を与え、すべての線分の変数の総和を求めて判定する。その線分がy軸を左から右に移動して交わった時、格子点が上ならインクリメント(+1)、下ならデクリメント(-1)とする。また、y軸を右から左に移動して交わった時、上ならデクリメント、下ならインクリメントとする。そしてy軸と交差しない場合は0とする。1回転して変数の総和が±2の場合は物体の内部と判定され、変数の総和が0の場合は物体の外部である。この方法で、すべての領域の格子に対してこの判定を行い、内側か外側を判断する。この方法によって判別された物体の例を図-3に示す。

このように形状は変化してしまうが、格子サイズを物体に対して小さくすれば解消することができる。

4. 構造物条件と地形データ

計算に用いる地形データを図-4に示す。図-3の赤色の部分が陸であり、本研究では陸の標高をすべて2mに設定している。次に構造物の座標位置について図-5に示す。

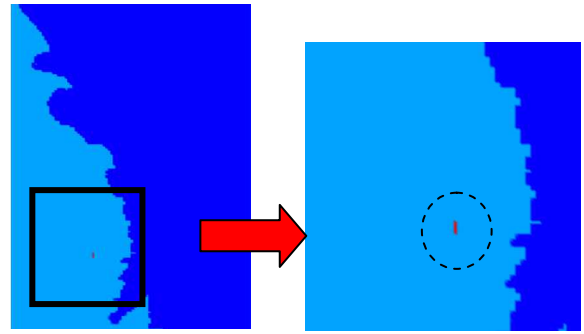


図-5 構造物の位置

図-5の点線で囲んだ長方形のものが計算する構造物である。

構造物は移動しない場合と移動する場合の2つのケースで計算を行った。まず、構造物の形状は縦500m、横100mの長方形である。構造物の高さは10m、密度は 50kg/m^3 、静止摩擦係数は0.4、動摩擦係数は0.3と設定しており、浮力と揚圧力は考慮していない。

5. 計算結果

構造物が移動しない場合の水平方向波力 f_x 、 f_y の時間変化とモーメントの時間変化を図-6と図-7に示す。ここで、図-6の青い線が f_x で、赤い線が f_y を示している。

次に移動する場合の水平方向波力 f_x 、 f_y の時間変化とモーメントの時間変化を図-8と図-9に示す。図-6、図-8の縦軸は波力 f_x 、 f_y であり、単位はkN、横軸は時間である。図-7、図-9は縦軸にモーメントであり、単位は $\text{kN}\cdot\text{m}$ 、横軸に時間である。

移動しない場合と移動する場合の両方について言えることは、波力とモーメントはそれぞれ、波がぶつかると同時に大きく変動していることである。また、2波目、3波目の方が波が大きいいため、1波目より波力が大きい。

移動しない場合の波力の変化図-6を見てみる

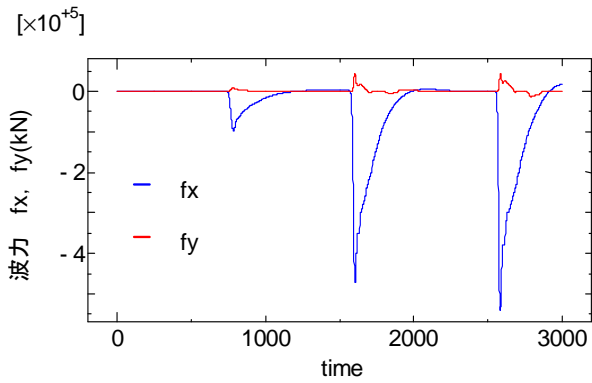


図-6 波力の時間変化

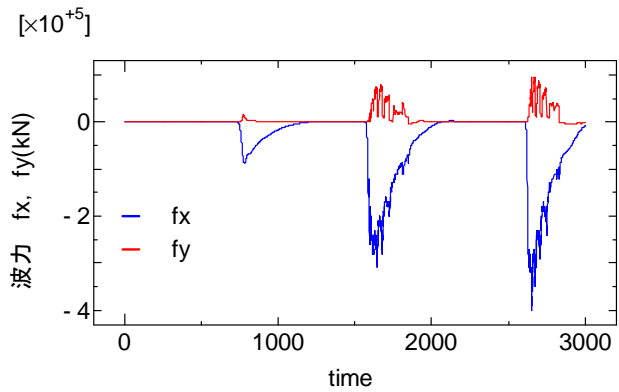


図-8 波力の時間変化

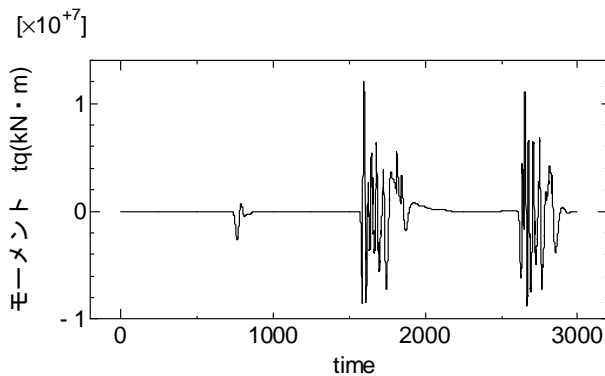


図-7 回転モーメントの時間変化

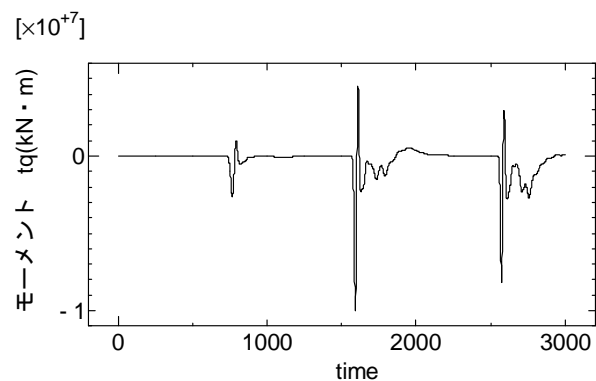


図-9 モーメントの時間変化

と、 f_y がプラスなのに対して、 f_x はマイナスとなっている。これは、 x 方向は右向きをプラス、 y 方向は上向きをプラスとしているためである。また、大きさとしては f_x の方が f_y よりも大きくなっているのは、 x 方向の受圧面積が大きいためである。図-7 のモーメントの変化を見ると、モーメントは初めにマイナス方向に変化していることがわかる。これは、モーメントを反時計回りが正としており、波が物体に対して少し右下からぶつかっているためこのような結果となったと考えられる。

図-8 の移動する場合の波力の時間変化を見ると、移動しない場合よりも f_y が大きくなり、 f_x が小さくなっていることがわかる。これは、津波外力によって物体が移動、回転するため、 x 方向と y 方向の波の受圧面積が変化するためである。また、波力やモーメントの変動が大きく、変化がギザギザになっているのは、物体が移動、回転す

ることが原因である。

次に構造物が移動する場合の波の様子を示す。これは、1500 秒～1875 秒あたりまでの様子であり、この様子を波力の時間変化と照らし合わせても一致していることがわかる。

6. まとめ

本研究では津波外力による物体の移動計算を行った。そして、構造物が移動する場合と移動しない場合で波力の変化を比較し、違いを確認できた。また、本研究により津波外力による物体の移動をアニメーションにより再現でき、どのような挙動を示すか確認できた。津波外力によって移動する物体の計算法の一つの道筋をつくることができたが、浮力や揚圧力を考慮していない点や構造物同士の衝突を考慮していない点が今後の課題である。また、それらを計算する際のネスティ

ングも課題として挙げられる.

- 2) 細山田得三, 津田朗宏: 直交短形格子を用いた移動物体周りの流れの数値計算, 第5回応

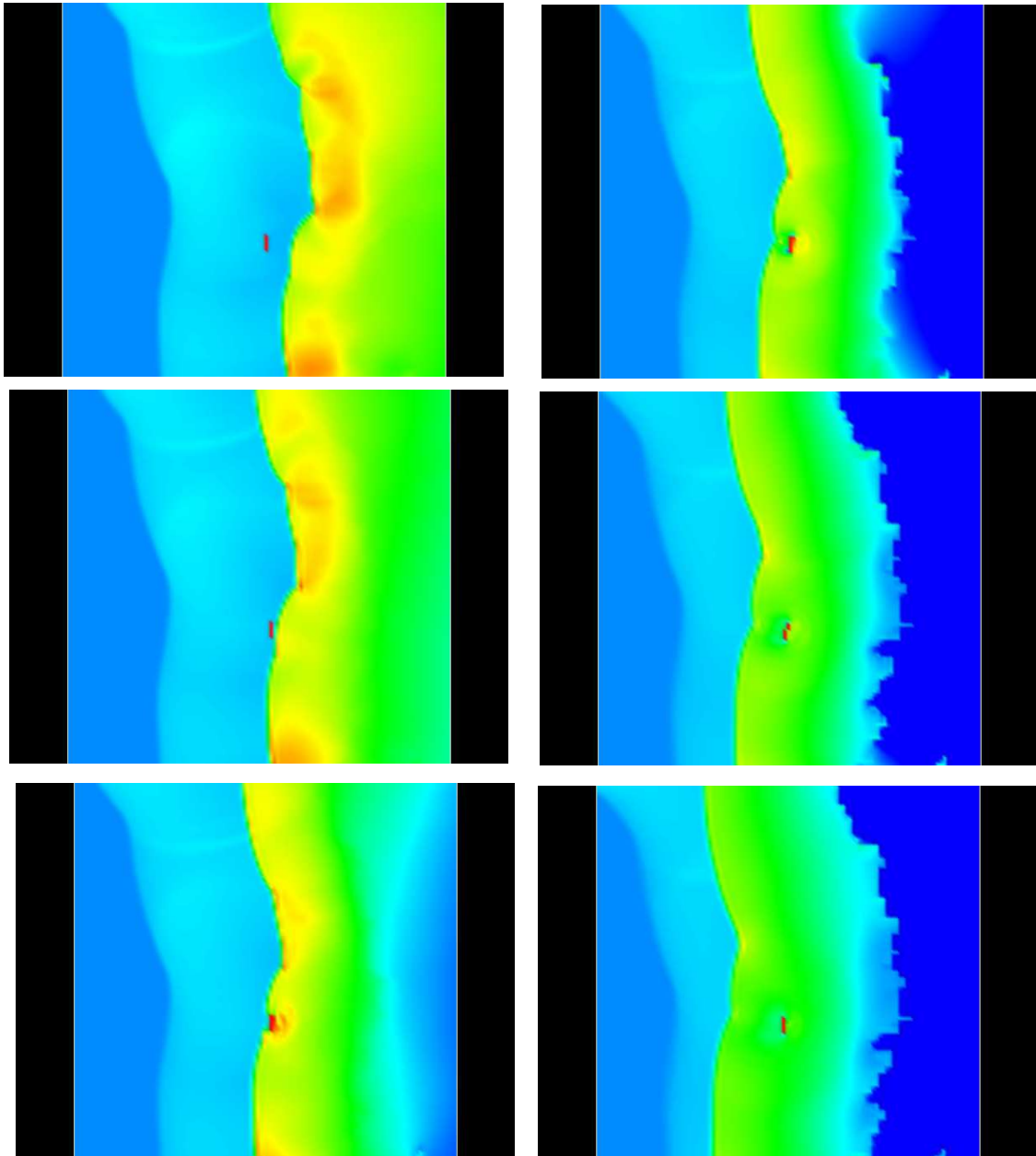


図-10 物体に対する波の作用状況と物体の移動

左上より、下へ 1500, 1575, 1650 秒

右上より、下へ 1725, 1800, 1825 秒

参考文献

- 1) 高橋智幸: 津波防災における数値計算の利用, 日本流体学会数値流体力学部門, pp23 ~pp32, 2004

用力学論文集, pp699~pp707, 2002.

- 3) 藤井直樹・大森正則・池谷毅: 港湾における津波漂流物の数値解析, 第52回海岸工学論文集, pp296~pp300, 2005

- 4) 安野浩一郎・西畑剛・森屋陽一：浮体特性を考慮した漂流シミュレーションの適用性に関する研究，第 23 回海洋開発論文集，pp87～pp92，2007
- 5) 藤井直樹・大森正則・池谷毅・朝倉良助：津波による漂流物の移動に関する基礎的研究，第 21 回海洋開発論文集，pp127～pp132，2005
- 6) 熊谷健太郎・小田勝也・藤井直樹：津波によるコンテナの漂流挙動シミュレーションモデルの適用性，第 53 回海岸工学論文集，pp241～pp245，2006
- 7) 橋本貴之・越村俊一・小林英一：津波による大型船舶の漂流挙動解析，第 56 回海岸工学論文集，pp316～pp320，2009
- 8) 渡辺 晃：波による円筒形浮体の運動，第 25 回海岸工学論文集，pp377～pp381，1978

謝辞

本研究を進めるにあたり，指導教官の細山田教授から丁寧かつ熱心なご指導を賜りました．ここに深く感謝の意を表します．有益な助言をいただいた犬飼直之助教をはじめ，研究の協力をいただいた修士の登藤先輩に感謝の意を表します．また，日常の議論や研究を通じて多くの知識や示唆をいただいた水工学研究室の皆様に感謝します．