

## 不確実性を考慮した漂流物の衝突力に関する数値解析的検討

東北大学大学院 工学研究科 学生員 ○小谷 拓磨  
 東北大学 工学部 正会員 高瀬 慎介  
 東北大学 災害科学国際研究所 正会員 森口 周二  
 東北大学 災害科学国際研究所 正会員 寺田 賢二郎

## 1. はじめに

沿岸構造物の津波耐力設計を考える上で、遡上津波による波圧に加え、津波に漂流する瓦礫などが構造物に衝突する影響も無視できない。これは、設計耐力以上の外力が構造物へ作用する可能性があるためである。過去の漂流物に関する研究は、漂流については解析的なアプローチ<sup>1)</sup>が、衝突力については実験的なアプローチ<sup>2)</sup>がなされている傾向にある。しかしながら、漂流物の衝突現象を予測する際には、漂流物の種類、数、位置、衝突速度、衝突時の姿勢などの災害発生以前には確定できない現象そのものの不確実性に加えて、数値解析手法、漂流物の物性を仮定する際の誤差、衝突力算定の精度誤差など、数値解析の実現象に対する再現精度に起因する不確実性が含まれることになる。そのため近年では、防波施設や津波避難ビル、原子力発電所などの沿岸域の重要構造物の耐力設計には、不確実性を考慮した確率論的な津波漂流物のリスク評価を行う研究が進められている<sup>3),4)</sup>。しかし、実際の漂流物の三次元的な形状や漂流挙動による衝突力のばらつきについては十分に議論されていない。

そこで本研究では、漂流物の衝突力に関する様々な不確実性を考慮することによって、衝突力にどのようなばらつきが生じるかを、流体構造連成解析手法を用いて定量的に評価する。

## 2. 漂流物の接触の表現

本研究で用いる数値計算手法では、個別要素法<sup>5)</sup>(Distinct Element Method: DEM)を用いて漂流物と構造物の接触の表現をしている。本研究で使用したDEMは、接触力モデル

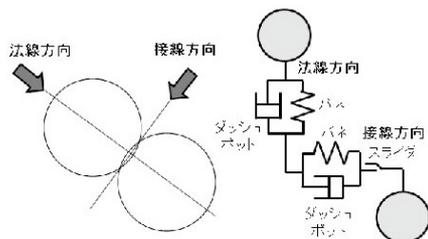


図-1 DEMの粒子間力モデル

ルが図-1で表現される一般的なものである。法線方向の接触力を表現するバネとダッシュポット、および法線方向の接触力を表現するバネとダッシュポットがあり、接線方向には摩擦力を制御するためのスライダが存在する。要素同士が接触している間はこのモデルによって接触力が評価され、運動方程式に反映される。この接触力モデルによって、法線方向の接触力 $\mathbf{F}_n$ と接線方向の接触力 $\mathbf{F}_s$ は以下のように表現される。

$$\mathbf{F}_n = C_n \dot{\mathbf{u}} + K_n \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_s = C_s \dot{\mathbf{v}} + K_s \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ は法線方向の貫入量ベクトル、 $\dot{\mathbf{u}}$ は法線方向の貫入速度ベクトル、 $\mathbf{v}$ は接線方向の貫入量ベクトル、 $\dot{\mathbf{v}}$ は接線方向の貫入速度ベクトルである。また、 $K_n$ は法線方向のバネ定数、 $C_n$ は法線方向のダッシュポットの減衰係数、 $K_s$ は接線方向のバネ定数、 $C_s$ は接線方向のダッシュポットの減衰係数である。なお、本研究では、法線方向のパラメータ（バネ定数とダッシュポットの減衰係数）と接線方向のパラメータは同値と仮定する。また、ダッシュポットの減衰係数 $C$ は、バネ定数 $K$ 、反発係数 $e$ 、要素質量 $m$ を用いて次式で表現できる。

$$C = 2\sqrt{mk} \sqrt{\frac{(\ln e)^2}{(\ln e)^2 + \pi^2}} \quad (3)$$

ここで、 $\pi$ は円周率である。上式を用いることにより、ダッシュポットの減衰係数 $C$ の代わりに反発係数 $e$ を入力パラメータとして用いることができる。よって、入力パラメータは、バネ定数 $K$ 、反発係数 $e$ 、(スライダの)摩擦係数 $\mu$ の3種類となる。

## 3. 有限被覆法を用いた流体-構造連成解析

DEMにより求められた構造の運動を流体計算の際に用いている固定メッシュに対して、構造物の速度・位置を反映するため、本研究では、有限被覆法<sup>6)</sup>を用いた。有限被

キーワード 漂流物, 衝突力, 不確実性, 流体-構造連成解析

連絡先 〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1 災害科学国際研究所 地域安全工学研究室 Tel. 022-752-2132

覆法は、図-2に示すように、近似関数が定義される数学領域 $\Omega^M$ と、支配方程式が満たされるべき物理領域 $\Omega^P$ を独立して定義するという点で、有限要素法と異なる。しかし、解析対象を要素で部分分割し、各要素間の未知量を節点値により補間近似するという点においてFEMと一致するため、FEMを一般化した手法とみなすことができる。以上の特性から、FCMでは解析対象とは独立に節点を単位とするPU条件(Partition of Unity)を満たす近似関数(重み関数)定義する。有限被覆法は有限要素法と異なり、要素内に流体と構造の境界が存在することを許容するため、その境界位置を正確に考慮した流れ場を求めることが可能である。本論文では、任意形状を有する解析領域の適用性に優れている四面体要素に着目し、1次の四面体有限要素の形状関数を重み関数とする。

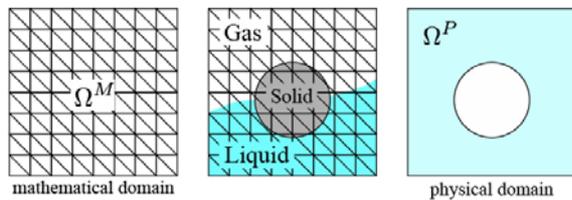


図-2 数学領域 $\Omega^M$ と物理領域 $\Omega^P$

#### 4. 数値解析における瓦礫の漂流挙動

本研究に用いた解析手法の検証のため、図-3に示す解析モデルを設定し、漂流物の有無による挙動の比較を確認した。この解析では、 $t=0$ 秒において水柱(青色)を解放して流体力を発生させる。なお、本研究では漂流物(黄色)と被衝突構造物(茶色)を球形のDEM要素の集合体として表現した。図-4に解析結果を示す。この結果より、流体力によって剛体が漂流し、他の漂流物からの衝突の影響も受けながら、構造物に衝突する複雑な挙動が三次元的に表現できることが確認できる。本研究で用いる手法が、複数の漂流物を想定した場合でも、その複雑な流体場と漂流物の挙動を表現できることがわかった。

#### 5. おわりに

本研究では、漂流物が衝突する際の様子による不確実性による衝突力のばらつきを評価するため、実験では困難である確率場の推定を三次元流体構造連成解析手法によって評価する。今後はDEMによって算出される衝撃力と実験地との比較検討を行い、考慮すべき不確実性の定量化などを行っていく。

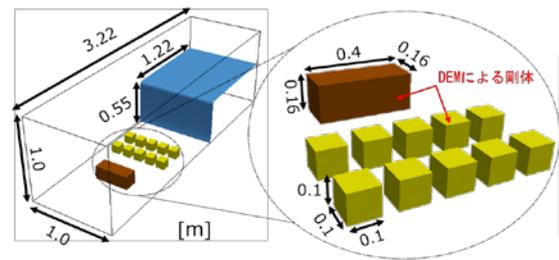
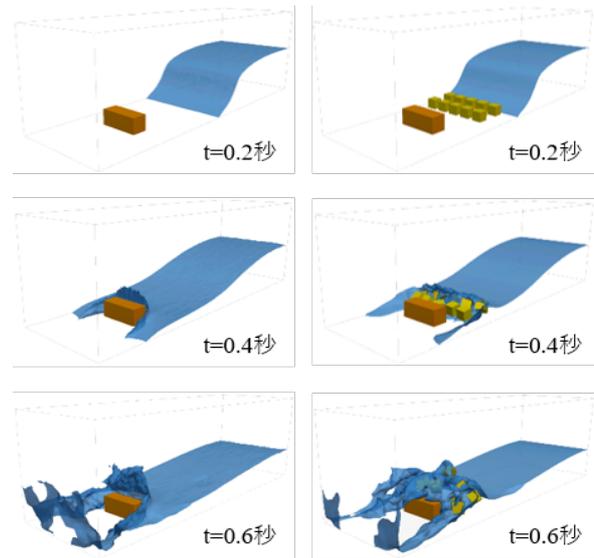


図-3 解析モデル



(a) 漂流物なし

(b) 漂流物あり

図-4 解析結果

#### 参考文献

- 1) 後藤智明, 佐々木順次, 首藤伸夫: 津波による木材の流動, 海岸工学論文集, 第29巻, pp.491-495, 1982
- 2) 松富英夫: 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No. 621/II-47, pp.111-127
- 3) 吉田郁政, 武内大記, 大森政則, 藤井直樹, 柳沢賢: 津波漂流物による衝突力ハザードの算定方法について, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.912-917, 2007
- 4) 木原直人, 松山昌史, 藤井直樹: 漂流物挙動解析による津波漂流物衝突に関する確率論的評価手法, 土木学会論文集 B2, Vol.69, No.2, pp.341-345, 2013
- 5) Cundall, P. A.: A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, Proc. Int. Symp. on Rock Fracture, pp.11-18, 1971.
- 6) 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 小山直輝, 金子賢治, 車谷麻緒, 加藤準二, 京谷孝史: 構造物の破壊を考慮した有限被覆法に基づく構造流体連成解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.71, No.2 (応用力学論文集 Vol.18), pp.203-212, 2015