多相場の数値解法による 複雑形状ブロックの水中投入の数値計算

NUMERICAL PREDICTION FOR COMPLICATED-SHAPED BLOCKS DUMPED INTO WATER WITH A MULTI-PHASE NUMERICAL MODEL

吉川教正¹·牛島 省²·牧野 統師¹·禰津 家久³

Norimasa YOSHIKAWA, Satoru USHIJIMA, Osashi MAKINO and Iehisa NEZU

¹ 学生員 京都大学大学院 社会基盤工学専攻 修士課程 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスタ) ² 正会員 工博 京都大学大学院准教授 社会基盤工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスタ) ³ フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 社会基盤工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスタ)

It is important to evaluate the falling and accumulating processes of the complicated-shaped blocks dumped to river and sea bottoms to create artificial fishery area. This paper presents a computational method for multiphase fields with a T-type solid model, which allows us to deal with the movements and collisions of the complicated-shaped objects in free-surface flows. In the T-type model, an object is represented by multiple tetrahedron elements and contact-spheres are placed near the surfaces. Thus, the volume, mass and inertial tensors are accurately represented, while the computational load to treat collisions of the objects is quite small. It was shown that the accumulation of the multiple blocks dumped into a water tank was reasonably predicted by the present method.

KeyWords : block dumping, rigid body, collision detection, free-surface flow, MICS

1.はじめに

一部の海域や河川では、ブロック構造物を水中へ投入して護岸を行ったり、魚礁を造成する場合がある. このような施工作業においては、水底付近におけるブロックの分布状況や、ブロックの積み重なりの状態が、 所定の条件を満足するよう配慮しなければならない. このためには、投入されたブロックの水中における落下過程と、水底部付近におけるブロック間の衝突を考慮した運動を正しく評価することが必要となる.実際に、バージ船からの水中投入工法に関して、ブロックの落下過程を把握するための実験的な検討が行われている¹⁾.護岸や魚礁形成のためブロックとしては、形状が複雑なものが一般に用いられるが、このようなブロックの落下過程と水底部におけるブロックの積み重なり状況を予測する数値的な手法が得られれば有効であると考えられる.

本報では,複雑な形状のブロックが水面上から水中 投入され,それらが水底部に堆積する状況を再現する 数値解法について検討する.流体中における固体の運 動を適切に扱うため,多相場の解法である MICS²⁾を 利用して,ブロックの沈降過程を計算する.MICSで は,多相場に対する計算結果からブロックに作用する 流体力が得られるので,抗力係数等の経験定数が不要 であり,ブロック等の水中落下過程を適切に扱うことができると考えられる.

一方,複雑な形状を有する物体間の衝突判定問題に 関しては,コンピュータグラフィックスの分野等で各 種のアルゴリズムが検討されている.これらの手法で は,対象物をポリゴン表示して,ポリゴン間の衝突判 定を行う方法が多く用いられている.一般には,物体 の幾何形状を包含する境界ボリュームを利用して処理 を高速化し,階層的な境界ボリュームを利用して処理 を高速化し,階層的な境界ボリュームを作成すると同 時に,対象物を単純な凸多面体に分解する.そして, Lin-Cannyのアルゴリズム³⁾やVクリップアルゴリ ズム,またより効率的とされるGJK法⁴⁾や,Chung とWangのアルゴリズム⁵⁾などを用いて,単純化さ れた凸多面体に対する衝突判定が行われる.このよう な衝突判定方法は,グラフィックスプロセッシングユ ニット(GPU)を利用して高速化される場合もあるが, 数値処理は比較的複雑である場合が多い.

本研究では,流体中における接触を伴う複雑形状物 体の運動をより効率的に扱えるように,既報⁶⁾で提案 された T型固体モデルを利用する.本報では,物体を 剛体と仮定する T型剛体モデルを使用して,ブロック の水中投入計算を行い,水理模型実験結果との比較を 通じて,解法の有効性を検討する.

2.数值解析手法

(1) T 型固体モデルの概要

本報では,自由水面流中において,剛体と仮定でき る物体の運動を扱う.物体形状が複雑であり,物体間 の接触が発生する場合には,数値計算で使用する固体 モデルは,次のような条件を備える必要がある.

- 1) 固体モデルの3次元形状が実際の対象物をよく近 似していること.
- 2) 固体モデルの体積,質量や慣性テンソルなどの特 性量が実対象とほぼ一致すること.
- 3) 固体モデルに作用する流体力や,流体との相互作 用が正確に扱えること.
- 4) 物体間あるいは物体と境界面との衝突判定が煩雑 な演算処理とならず, 効率的に行えること.

冒頭で述べたいくつかの凸多面体に対するポリゴン モデルの衝突判定法では,多面体の角部の衝突判定な どが正確に行われるが,一般に数値処理が複雑である. 本研究で扱われる問題では,流体計算が物体運動の計 算と並行して行われるため,さらに計算負荷の小さい 衝突判定アルゴリズムが望まれる.

水工学分野では,流体中に含まれる大スケールの物体を表すモデルとして,複数の球体を連結するモデル(以下,球体連結モデル)が用いられることが多い⁷⁾. 球体連結モデルでは,衝突判定は球体要素間の接触を調べることにより行われるので,上記のポリゴンモデルと比較して,処理は極めて容易となる.しかし,球体連結モデルでは,実際の対象物に対する形状表現に限界があり,質量や慣性テンソルなどの物体の特性量を正確に表現できないものもある.また,球体要素は物体領域を正確に表していないため,流体力の算定も正確に行えないという問題を有する.

本研究で用いる T 型固体モデル⁶⁾は,上記の問題 点を解決するために提案されたもので,以下のような 特徴がある.

- 1) 対象とする物体を四面体要素の集合として表す.
- 2) 固体モデルの体積,質量や慣性テンソルなどの特 性量は,各四面体要素の特性量により表される.
- 3) 固体モデルと流体との相互作用は,四面体要素を 通じて評価される.
- 4) 物体間の衝突判定には,固体モデル表面近傍に配 置した接触判定球を用いる.

図-1 に T 型固体モデルのポリゴン表示と四面体要素, そして接触判定球の配置例を示す.図-1(a)は1つの



(a) 六脚ブロックのポリゴン表示



(b) 四面体要素のワイヤフレーム表示



図-1 T型固体モデルによる物体の表現

立方体の各面に,同一形状の立方体を接続した形状の 六脚ブロックを対象として作成された,固体モデルの ポリゴン表示である.この固体モデルに対して,図-1 (b)のように,四面体要素分割を行う.実際の作業で は,CADソフトウエアでポリゴンモデルを作成し,そ の出力に対して非構造格子生成ソフトウエアを用いて 四面体要素を定めている.また,図-1(c)は,ブロッ ク表面近傍の四面体要素内に配置された接触判定球の 分布を示している.

有限要素法による固体計算の例に見られるように, 四面体要素分割を適切に行えば,曲面から構成される 物体に対しても外形は比較的精度よく近似される.T 型固体モデルでは,衝突判定以外の数値処理には四面 体要素を用いるので,球体連結モデルに見られるよう な物体の特性量に関連する精度の低下は少ない.一方, 衝突判定には接触判定球を利用するので,ポリゴンモ デルと比較して処理の負荷は小さいという特徴がある. (2) T型固体モデルの衝突判定と接触力

剛体運動の計算には,接触判定球を利用して求められる接触力と接触力モーメントを使用する.

接触判定球は,物体間あるいは物体と境界面との衝 突判定と接触力の評価のみに使用され,物体運動や流 体力の計算には利用されないので,その大きさや位置 は自由に設定できる.このため,既報⁶⁾と同様に,図-2 に概略的に示すように,物体表面を表す面を1つ以 上有する四面体要素に対して,その重心点に球を配置 することとする.また,接触判定球の直径は,四面体 と同体積となるように定める.図-1(c)の接触判定球 の配置は,上記のようにして定められたものである.

なお,接触位置に関する精度が要求される場合には, 四面体内接球を利用する方法や,四面体と独立して接 触判定球を密に配置するなどの改善策が考えられる.



図-2 接触判定球の配置の概略

接触判定球間で生ずる接触力の評価方法は,個別要素法⁸⁾で用いられる球体モデルの場合と同様であるが,相対速度を算定する際には,物体全体の剛体運動

を考慮する必要がある.図-3に示すように,接触判定 球は他の接触判定球や壁面と接触しても形状は不変で, 対象物とオーバラップするものと考える.接触判定球 の中心から接触面へ向かう単位法線ベクトルを n とす るとき,n方向に作用する力 F_n は次式で表される.

$$\boldsymbol{F}_n = -\left[k_n d_n^{\gamma_n} - \eta_n(\boldsymbol{v}_r \boldsymbol{n})\right] \boldsymbol{n}$$
(1)

ここに, k_n , γ_n および η_n はモデル定数, d_n は n 方向 のオーバラップの深さである.モデル定数は前報⁹⁾ と 同様に定めた.また, v_r は接触判定球どうしの相対速 度であるが, 個別要素法の場合と異なり,物体は剛体 運動しているので,物体 k の速度ベクトル v_k と,接 触対象である物体 m の速度ベクトル v_m の差を用いな ければならない.また,相対速度を算出するときには 各物体の回転運動を考慮する必要がある.その場合に は,物体 k の角速度 ω_k と重心点 x_{Gk} から接触面に向 かうベクトル r の外積から定められる接触面の速度を 用いる.接触相手である物体 m についても同様にし て接触力を求める.



図-3 物体間の接触力の評価方法の概略

図-3の接触面と平行な方向 (ベクトル t の方向) に 作用する接触力 F_t も同様に,次式から計算される.

$$\boldsymbol{F}_t = \left[k_t d\tau^{\gamma_t} - \eta_t v_t\right] \boldsymbol{t} \tag{2}$$

 k_t , γ_t および η_t はモデル定数である.相対速度ベクトル v_t は法線方向接触力を考えたときと同様に、剛体運動の速度ベクトルと角速度ベクトルを考慮して定められる.接線方向の変位 $d\tau$ は,接触判定球どうしが接している間は積分されるが,一旦それらが離れると、初期化されて0となる.また,接線方向には滑りを考慮する.

以上のようにして得られた接触力の総和を求めて, 物体重心点に作用する接触力ベクトルとする.また, 各接触面における接触力 $F_n + F_t$ と重心点 x_{Gk} から 接触面までのベクトル r の外積を求め,それらの総和 を物体 k に作用する接触力モーメントとする.

3.水理実験と解法の適用性

(1) 実験の概要

計算手法の適用性を確認するため,ブロック模型を 水中に投入する実験を行った.実験では,幅0.3m,奥 行き0.1m,高さ0.2mの水槽内の底面に図-4に示す六 脚ブロックを3つ固定し,静水時の水深が0.15mとな るように水を満たした.固定ブロックは,図-4のx₁ 軸回りに45度回転させた後,手前側のブロック脚部 が接地するように回転させ,最終的に3点で底面に接 する姿勢とした.



図-4 六脚ブロック

実験では,約1秒ごとに1個の割合で,合計6個の ブロックを水上から順に投入した.投入高さはブロッ ク重心点が底面から0.16mとなる位置とし,平面位 置は水槽中央とした.ブロックはモルタル製で比重は 約2.3であり,図-4に示すブロックの一辺の長さdは 20mmである.

(2) 数値計算

MICS における多相場の基礎式を以下に示す.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_i} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (\mu u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu u_j) \right]$$
(5)

式 (3) は Euler 表記による質量保存則,式(4) は非圧 縮条件,式(5) は保存形表示された運動方程式である. *t* と *x_i* は時間と3次元直交座標系の座標成分を表す. ρ, μ, *p* は順に計算セル内の体積平均操作によって求 められる密度,粘性率,圧力である.また, u_i はセル 内の質量平均により算出される流速成分である. f_i は 外力の加速度成分を表す.

計算手順は,コロケート格子を用いる非圧縮性流体 の計算法と同様であり,予測段階,圧力計算段階,修正 段階という3つの手順から成る MAC 系解法が用いら れる.計算時間を短縮化するために,予測段階の解法 には,陰的解法である C-ISMAC 法を用いる.計算精 度が要求される非線形項の離散化には,5次の TVD ス キームを用いる.また,圧力計算段階では,C-HSMAC 法を利用し,BiCGSTAB 法により圧力変化量の連立 1次方程式の数値解を求める.

上記の水理実験を対象とする計算では,計算セルの 大きさを各方向に 5mm として, $60 \times 10 \times 20$ 個のセ ルを用いた.多相場の計算における時間増分 Δt は, 1.0×10^{-2} 秒とした.なお,物体運動の計算において, 時間増分が過大であると,衝突判定が適切に行えなく なる.この基準として,次の接触判定球の直径 d_s に 基づくクーラン数 C_s を考慮する.

$$C_s = \frac{v_r \Delta t_b}{d_s} \tag{6}$$

ここに, v_r は接触判定球間の接触面に垂直な方向の相 対速度であり, Δt_b は物体運動の時間増分である.こ の C_s が1より十分小さくなるように,可変時間ステッ プ法⁹⁾ により, $\Delta t_b = 0.05\Delta t$ とした.実時間 10 秒ま での計算を行い,これに要した計算時間は,単一 CPU (Pentium4, 2.66 GHz)の演算で約1時間であった.

(3) 実験結果と計算結果の比較

図-5 と図-6 に,計算により得られた各時刻のブロックの積み重なりと水面形状および流況を示す.

図-5 は,水槽底面に固定された3個のブロックの上 に,最初のブロックが水中投入され,それが他のブロッ クと衝突した後,停止するまで過程を表す計算結果で ある.大きな水面変動と,周辺の流れを伴いながらブ ロックは水中を落下してゆく.落下中の姿勢の変化は 見られない.最終的には,底面に固定されたブロック と水槽壁面に接触した姿勢でブロックは停止する.

また,図-6は,2個目以降のブロックが投入されて, 底部に積み上げられていく過程を表す計算結果である. 毎秒1個の割合で6個のブロックを投入した後,図-6 (e)に示されるように,底部の3個のブロックの上に, 投入したすべてのブロックが堆積する形となった.

水槽の幅の狭い側面側から見た計算結果を図-7 に示 す.6個のブロックを投入した最終状態では,このよ うに,前後の水槽壁面に接触する状態でブロック群が 積み上がっている.

一方,実験では,6個のブロックを投入した後の積 み上がり状態として,いくつかのパターンが見られた.



図-5 最初のブロックの落下過程(計算結果)



図-6 複数のブロックの堆積過程(計算結果)



図-7 水槽側面からみたブロック配置

50回の投入を行い, ブロックが水中に埋没する場合に は,図-8に示す2つの最終状態となった.図-8(a)に 示されたパターンAでは,図-6(e)の計算結果と同 様に,底部に固定された3個のブロックの上に投入し たすべてのブロックが重なる状態となっている.これ に対して,3個目あるいは4個目に投入されるブロッ クが,すでに堆積したブロックと接触した場合に,転 動して水槽底面まで落下する場合があった.この転動 落下が生ずると,多くの場合に図-8(b)に示されたパ ターンBのように,水槽底部に4個のブロックが存在 する最終状態となる.パターンAとBの発生割合はほ ぼ同程度であった.2つのパターンが生ずるのは,投 入位置のわずかなずれやブロック形状の不均一性によ ると考えられる.



(a) パターン A



(b) パターン B

図-8 ブロックの積み重なり(実験結果)



図-9 パターン B に近い積み上がり状態 (計算結果)

図-9 に,初期投入位置を乱数により最大±5 mm シ フトした場合に得られた計算結果を示す.これは,図-8 (b)のパターンBの実験結果に近い状態となっている.

ブロックの積み上がり状態を予測する際に,投入初 期条件が最終堆積形状に関係する場合には,乱数等で 初期投入位置や初期姿勢を設定して複数回の計算を行 い,平均的な分布を求めることが望ましいであろう.

5.おわりに

T型剛体モデルを使用して,六脚ブロックの水中投入計算を行った結果,ブロックの堆積状況などが妥当に計算できることが示された.今後は,ブロック形状や投入条件を変えた比較検討を進めたい.

参考文献

- 1) 五明美智男,志村豊彦,大野嘉典,松見吉晴.人工湧昇マ ウンド基材の投入方法の最適化に関する研究.海洋開発 論文集, Vol. 21, pp. 337-342, 2005.
- 2) 牛島省、山田修三、藤岡奨、禰津家久.3次元自由水面流 れによる物体輸送の数値解法 (3D MICS)の提案と適用 性の検討.土木学会論文集, Vol. 810/II-74, pp. 79–89, 2006.
- M. Lin and J. Canny. A fast algorithm for incremental distance calculation. Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automaion, pp. 1008–1014, 1991.
- 4) E. G. Glbert, D. W. Johnson, and S. S. Keerthi. A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space. *IEEE journal* of robotics and automation, Vol. 4, No. 2, pp. 193–564, 1988.
- K. Chung and W. Wang. Quick collision detection of polytopes in virtual environments. *Proc. ACM symp.* on Virtual Reality Software and Technology, pp. 125– 131, 1996.
- 4島省,福谷彰,牧野統師,禰津家久.3次元流体中を運 動する接触と変形を考慮した任意形状固体モデルの数値 解法.応用力学論文集,Vol. 10, pp. 139–146, 2007.
- 7)藤岡奨,牛島省. 運動する任意形状物体を含む流れ場の MICS による数値計算法.水工学論文集, Vol. 50, pp. 751-756, 2006.
- P. A. Cundall and O. D. L. Strack. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47–65, 1979.
- 9) 牛島省, 竹村雅樹, 山田修三, 禰津家久. 非圧縮性流体解 析に基づく粒子 - 流体混合系の計算法 (MICS) の提案. 土木学会論文集, No. 740/II-64, pp. 121-130, 2003.

(2007.9.30 受付)