

三次元固液混相流モデルによる地滑り津波の解析

水資源開発公団 正会員 廣瀬真由
 大阪市立大学大学院 正会員 重松孝昌
 大阪市立大学大学院 正会員 小田一紀

1. はじめに

地滑り津波に代表されるような、粒子群の運動が水面変動を伴う周囲流体の運動を誘起するような固液混相流現象を詳細に検討した研究例は、極めて少ない。砕波のような大規模に水面形状が変化する現象を解析するための数値モデルの開発は活発ではあるが、水面変動を伴う三次元固液混相流モデルはほとんどなく、したがって、このような現象を予測する手法が確立されていないのが実情である。そこで、本研究では、水面変動を伴うような固液混相流モデルの構築を目的とする。

2. 計算手法および定式化

本研究では、個々の粒子の運動を三次元個別要素法を用いて計算する。三次元個別要素法の詳細は、重松ら(2000)を参照されたい。また、粒子の運動に誘起される流体運動は空隙率や流体力を考慮した基礎方程式を差分法によって解析した。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon u_i}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\varepsilon}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} + g_i + F p_i \quad (2)$$

ここに、 u_i ：流速， t ：時間， ε ：単位体積あたりに占める流体の割合， ρ_f ：液体の密度， g ：重力加速度， Fp は流体力を表し、添え字 i は i 方向の成分を表す。

水面変動の計算は、VOF 法に空隙率の影響を考慮することによって以下のように定式化した。VOF 法では、セル体積に対する液体の量を表す関数 F 関数を導入し、ドナーセルとアクセプターセル間で授受される液体量を計算することによって、 F 関数の輸送方程式を解いている。本研究で対象とする固液混相流では、新たに Saturate 関数 S を導入し、この S 関数の輸送方程式を解いている。ここで、

$$S = V_f / (V - V_p) \quad (3)$$

ここに、 V ：セルの体積， V_p ：セル中の固体が占める体積， V_f ：セル中の液体が占める体積である。

Saturate 関数の輸送方程式

$$\frac{\partial \varepsilon S}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon u_i S}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

をドナーセル・アクセプター法によって計算するが、このとき、セル間の移流量 Q を次式のように定式化した。

$$Q = V_D \varepsilon_{AD} \min[C_d S_{AD} + D, S_D], \quad D = \max[C_d(1 - S_{AD}) - (1 - S_D), 0] \quad (5)$$

ここに、 $V_D = \Delta x_D A$ (A ：移流面の面積， Δx_D ：ドナーセルのメッシュ幅) はドナーセルのセル体積を表し， ε_{AD} は移流量を支配する空隙率(後述)， $C_d = |U| \Delta t / \Delta x_D$ は Courant 数 (U ：ドナーセルの流速)， S_D はドナーセルの S 関数値を表し， S_{AD} は液面が移流面に対して垂直となる場合には S_D を，液面が移流面に対して水平となる場合には S_{AD} をとる。また， $\min[a, b]$ は a, b のうちの小さい方を，また， $\max[a, b]$ は大きい方をとる関数である。

3. 計算条件

本モデルは三次元計算が可能であるが、ここでは、準二次元的な計算を行った。計算は、図-1 に示す Watts(1997) の実験を参考にして、 x 方向に 250cm， y 方向に 10cm， z 方向に 50cm の領域をとり、水深 h を

Keyword： 三次元固液混相流，三次元個別要素法，VOF 法，水面変動，数値計算
 連絡先： 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138 Tel.& Fax. 06-6605-2733

37.3cmとした。計算のメッシュ間隔は、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2.0\text{cm}$ とした。粒子群は、粒径1.2cm、粒子数202個を計算の対象とした。その他の計算に必要なパラメータを表-1に示す。

流体計算に関する境界条件として、 x 軸の右端には Sommerfeld の放射境界条件を、 y 軸に垂直な面に対してはいずれもノースリップ境界条件を、また、水底ではスリップ条件を課した。

4. 計算結果

図-1に示すように、Watts は初期条件として水面下に粒子群を配置したが、図-2は水面上に粒子群を配置した後に計算を行った結果を示したものである。一連の図より、斜面を転がり落ちた粒子群が水中に突入し、これによって波が斜面上で生成し、沖へと伝播していく様子が再現できていることがわかる。

図-3は、Watts の実験結果との本手法による計算結果の比較を示したものである。同図(a)は、計算領域左端から24.2cmの位置(斜面上で粒子群初期位置の真上)における水面変動量を表したもので、図中の点線は、Watts による実験値を表している。同図中の一点鎖線は式(5)中の ε_{AD} としてドナーセルの空隙率 ε_D を用いて計算した結果を、破線は $\varepsilon_{AD} = (\varepsilon_A + \varepsilon_D)/2$ として計算した結果、また、実線は $\min[\varepsilon_D, \varepsilon_A]$ として計算した結果を示している。同図よりわかるように、 $\varepsilon_{AD} = \varepsilon_D$ として計算した結果は、水面の低下を約2倍も過大評価し、その後の水面の回復過程も遅い。しかし、 $\varepsilon_{AD} = (\varepsilon_A + \varepsilon_D)/2$ あるいは $\varepsilon_{AD} = \min[\varepsilon_D, \varepsilon_A]$ とした場合には、水面低下量も小さくなり、水面の回復過程も $\varepsilon_{AD} = \varepsilon_D$ の場合よりも早くなっており、実験結果に近づいていることがわかる。図-3(b)は、計算領域の左端から182.7cmの位置における水面変動量を示したものである。同図より、前述の場合と同様に、 $\varepsilon_{AD} = (\varepsilon_A + \varepsilon_D)/2$ あるいは $\varepsilon_{AD} = \min[\varepsilon_D, \varepsilon_A]$ として計算した方が $\varepsilon_{AD} = \varepsilon_D$ として計算した場合よりも実験値に近い計算結果となっていることが分かる。これらのことは、Saturate 関数の移流計算では、アクセプターセルの空隙率を考慮する必要があることを示している。

4. 結論

本研究では、水面変動を誘発する粒子群の挙動を解析することができ、モデルを開発した。定量的な予測を行うためにはまだ改良の余地があるものの、水面変動を伴う固液混相流の解明に有用なモデルが開発されたと考えている。

参考文献

重松ら(2000): 海岸工学論文集第47巻, pp.996-1000.

Watts P.(1997): Water Waves Generated by Underwater Landslides, Doctor thesis, 319p.

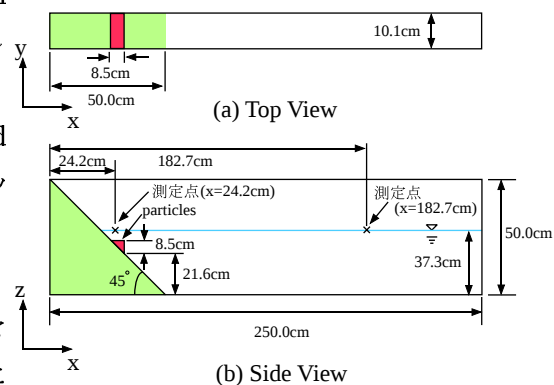


図-1: 計算条件
表-1 パラメータ一覧

粒径	1.2 [cm]
密度	2.22 [g/cm ³]
ヤング率	4.0×10^8 [g/cm · s ²]
ポアソン比	0.17
反発係数	0.3
摩擦係数	0.577

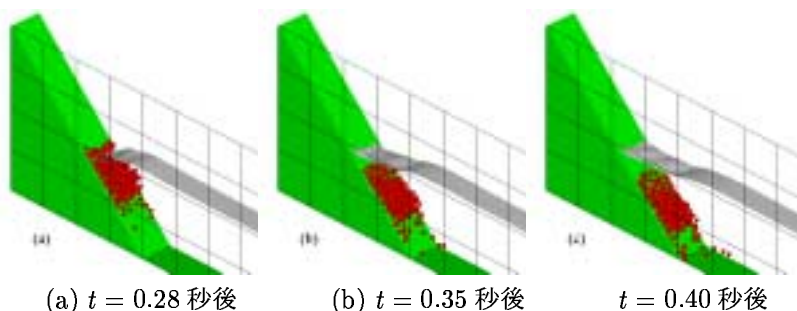


図-2: 計算結果の一例(粒子群の初期配置が水面上の場合)

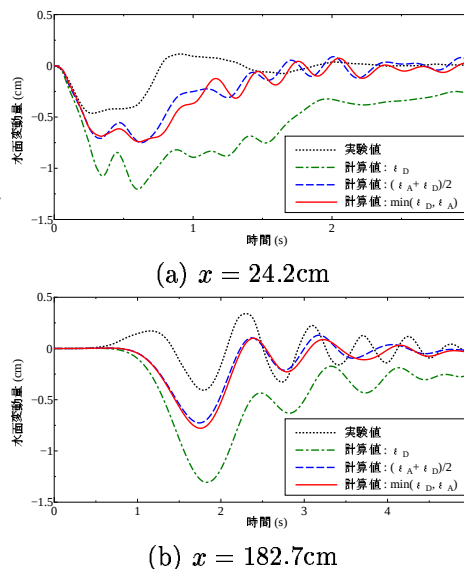


図-3: 水面変動量