

流体-固体運動の三次元連成数値解析の分析による津波石の移動機構

五洋建設株式会社 学生会員 ○後藤 公太
琉球大学 正会員 福田 朝生

1. 序論

沖縄県の先島地方（八重山諸島及び宮古島諸島）の津波防災を考えるためには、現在に残る津波石の分布状況を踏まえ、明和津波当時の水理現象を推定することが重要である。これには、現地の地形を考慮した数値解析¹⁾が有用と考えられる。しかし、地形を考慮した数値解析（広域モデルと呼ぶ）は、計算負荷の面から津波石の形状を考慮した解析が難しい。広域モデルでは、津波石周りの流れから流体力を推定するための抗力係数や揚力係数を用いた適切な流体力モデルが必要である。

広域モデルに対し、有用な知見を得るため、本研究では、まず津波石の移動に関する水理実験を行う。そして、福田ら²⁾により開発された、流体と固体運動の三次元運動を推定できる数値解析モデル Arbitrary Particle Multiphase (APM)³⁾を用いて、実験を対象に数値解析を行い、実験結果と解析結果を比較することで、津波石と流体運動に対する解析の説明力を確認する。さらに、解析結果から、津波石周囲の流れと津波石に作用する流体力、接触力の関係を明らかにし、抗力係数を求め、津波石の移動機構を分析する。

2. 津波石の移動に関する水理実験

図-1 に本研究で用いた水路を示す。水路床が水平な水路を用い、止水ゲートの上流側に水を溜め、止水ゲートを急開することでダムブレイクによる津波を発生させた。津波石モデルは、底面が縦横 0.097 m、高さが 0.10 m の立方体で、密度を 1,787 kg/m³ とした。津波石の移動の様子は、水路側方に設置した 2 台のビデオカメラで計測し、流れを計測するために水位計を止水ゲートから 0.5 m (Ch1) と 2 m (Ch2) に設置した。

3. 数値解析手法と解析結果の適合性確認

(1) 津波石の移動数値解析手法

本研究で用いた、流体-固体運動の三次元連成数値解析モデル APM²⁾は、流体の流れを津波石より小さい計算格子を用いて Euler 的に、津波石は剛体としての形状を考慮して Lagrange 的に解析する。流れ場の解析では、非圧縮性流体として、流体-固体連成の一流体モデルを用い、Smagorinsky モデルを用いる。また、津波石に作用する流体力とトルクは、津波石に作用する応力項を津波石の体積積分で算出する。津波石は、球体連結モデルにより作成し、実験の石と同じ密度に設定した。津波石の運動は、剛体の並進と回転の方程式を用いて解析する。計算法の詳細は文献²⁾を参照され

たい。

(2) 数値解析の適合性の確認

実験値と解析値のダム水位ごとの津波石の移動距離を図-2 に示す。津波石はダム水位が、0.17 m～0.25 m でほぼ比例して増加している。また、解析結果は実験結果の移動距離を良く説明できることが確認された。本研究では、ダム水位 0.2 m の 1 ケースを代表ケースとして考察する。

代表ケースの解析結果の津波石の移動時スナップショットを図-3 に、移動距離の時間変化を図-4 にそれぞれ示す。図-4 より、解析結果は実験結果の津波石の移動経過を良く説明できることが確認された。本研究では、図-4 の実験と解析結果の津波石の移動を参考に、津波石の動き出しによる加速区間Ⅰ、比較的一定速度で移動する等速区間Ⅱ、停止直前で減速する減速区間Ⅲの 3 つの区間に分類する。

水位計 Ch1, Ch2 地点で計測した水位の時間変化を図-5 に示す。Ch1, Ch2 共に解析結果は実験結果の水位変化を良く捉えていることが確認された。

4. 津波石の移動機構

(1) 津波石周囲の流れと流体力および接触力の関係

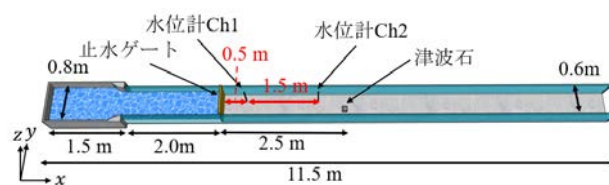


図-1 水路モデル

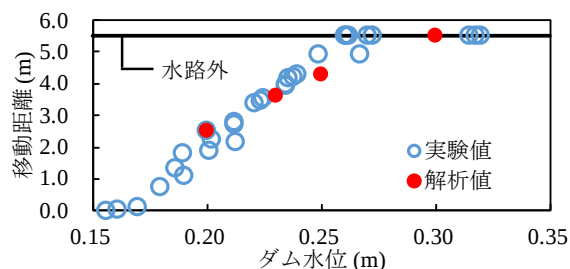


図-2 各ダム水位による津波石の移動距離

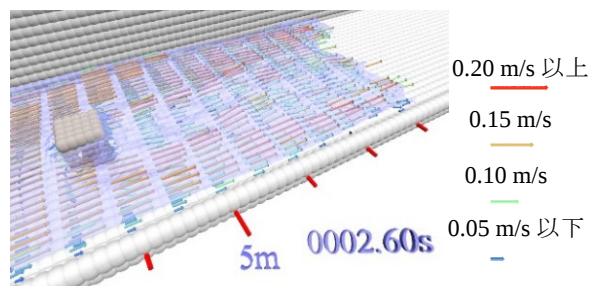


図-3 2.6 s 時点の津波石の移動の様子

キーワード 津波石、流体-固体運動の三次元連成数値解析、流体力、抗力係数、浮力、摩擦力

連絡先 〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8

五洋建設株式会社 TEL 03-3817-7557

津波石周囲の流れの考察に、津波石と共に移動する検討領域を設けた。検討領域境界面と津波石周囲の流れの様子を図-6に示す。ベクトルは底面から0.01m地点の流速、背景のグラデーションは水位を表す。また、図-7に津波石上流の S_1 地点と下流の S_2 地点の流れの相対速度 $\bar{u}_{r,S_i}$ ($=\bar{u}_{S_i}-u_b$: i は断面番号で、 $\bar{u}_{S_i}$:各断面の断面平均 x 方向流速、 u_b :津波石の x 方向速度)と断面平均水深 $\bar{h}_{S_i}$ の時間変化を、図-8に x, z 方向成分の流体力 F_x^f, F_z^f と接触力 F_x^c, F_z^c の時間変化を示す。

これらの結果より、津波衝突時を除いて、2.6s~6s付近で水位が上昇する時間は(図-7)、浮力の増加により z 方向の接触力が減少することで、津波石に作用する x 方向の摩擦力 $-F_x^c$ が減少し、それにつり合うように x 方向の流体力も変化している。水深が低くなる6s~11s付近では、その逆の関係が見られる。また、この時の相対速度は上流側より下流側の方が大きくなっていることから、津波石を挟んで流体が加速している。

(2) 抗力係数と流れの関係

解析結果から得られた津波石に作用する流体力 F_x^f を用いて、次式で定義する抗力係数 C_D' を推定する。

$$C_D' = \frac{F_x^f}{\rho^w A_x |\bar{u}_{S_1} - u_b| (\bar{u}_{S_1} - u_b) / 2} \quad (1)$$

ここに、 A_x は津波石の投影面積、 ρ^w は流体密度である。図-9は式(1)の C_D' と分母、分子の各時間変化を示す。

津波石加速区間では、津波石に津波先端が衝突することで一時的に F_x^f が大きく、 C_D' が1.5程度となる。等速区間では、 C_D' が1.3程度で一定となり、減速区間では、 $\rho^w A_x |\bar{u}_{S_1} - u_b| (\bar{u}_{S_1} - u_b) / 2$ は減少し、逆に F_x^f は、津波石上下流の水位差により増加することから、 C_D' は時間経過と共に大きく増加した。

5. 結論

本研究では、APMによる津波石の移動機構を分析した。本研究の主要な検討結果を以下に示す。

- 1) 水理実験と数値解析の比較結果より、APMは津波石と流体運動に対して、高い説明力を示した。
- 2) 津波衝突時を除いて、津波石に作用する浮力によって規定される垂直抗力を介して、摩擦力が求まり、流下方向の流体力が、摩擦力とつり合うように津波石が移動する特徴が確認された。
- 3) 本ケースの抗力係数は、津波等速区間で概ね1.3となり、津波石減速区間では、流下方向の流体力が圧力差により増加することで、抗力係数が徐々に増加した。

本研究では、津波石の移動機構の検討に、APMを用いた分析の有用性を示した。今後は、異なる水理条件を行い、津波石の移動機構のさらなる理解を深めることが重要である。

参考文献

- 1) Fumihiko Imamura, Kazuhisa Goto, and Shigeki Ohkubo: A numerical model for the transport of a boulder by tsunami, Journal of Geophysical Research, Vol. 113, C01008, 2008.

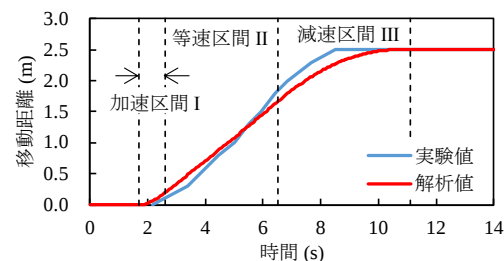


図-4 津波石の移動距離の時間変化

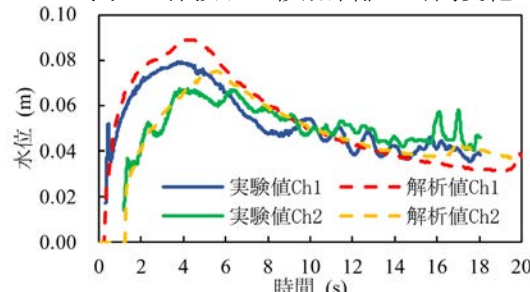


図-5 水位計 Ch1 と Ch2 の水位の時間変化

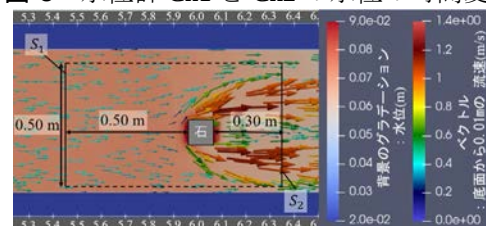


図-6 6.0s 時点の津波石周囲の流れと検討領域

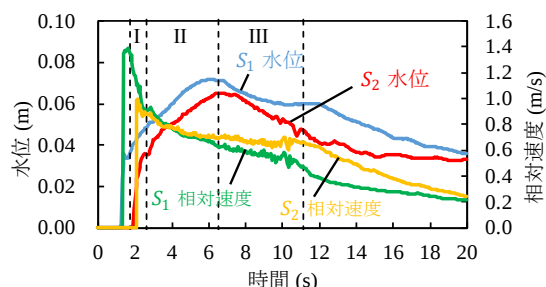


図-7 S_1, S_2 断面の水位と相対速度の時間変化

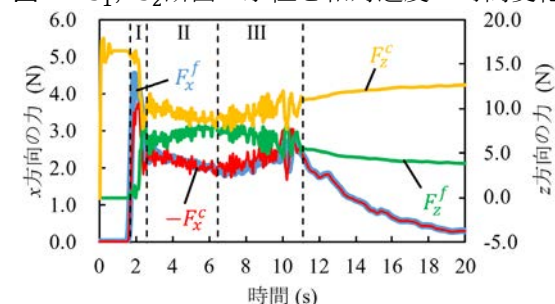


図-8 x, z 方向の流体力と接触力の時間変化

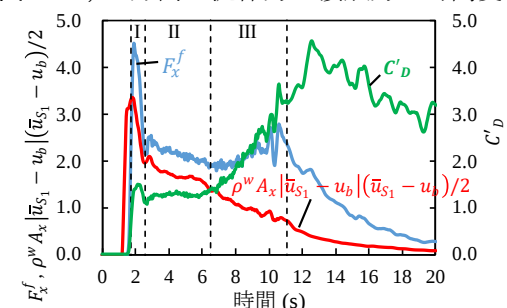


図-9 $F_x^f, \rho^w A_x |\bar{u}_{S_1} - u_b| (\bar{u}_{S_1} - u_b) / 2, C_D'$ の時間変化

- 2) Fukuda, T. and Fukuoka, S.: Interface-resolved large eddy simulations of hyperconcentrated flows using spheres and gravel particles, Advances in Water Resources. Vol. 129, pp.297-310, 2019.