

II-84

斜面上を移動する津波石に働く底面摩擦力について

東北大学大学院 学生員 ○大窪 慈生

東北大学大学院 正 員 今村 文彦

東北大学工学部 学生員 菅原 正宏

1. はじめに

沖縄県石垣島などでは津波によって移動したサンゴ礁岩塊（津波石）が多数存在する。このような津波石を用いた歴史津波の再現計算の検証や津波流体力に関する検討を目的に、津波石の移動を再現する数値モデルが開発されつつある（野路ら，1993；今村ら，2001）。

開発されたモデルでは津波石の滑動による移動を仮定し、津波石に働く底面摩擦力を求めている。しかし、サンゴ礁岩塊は角が削れて丸味を持った形状であることから、転動により移動したことも考えられる。そこで、本研究では、ブロック（津波石モデル）を転動により移動させる水理実験を行い、津波石に働く底面摩擦力のモデル化を目的とした。

2. 底面摩擦力のモデル化

2.1 実験方法

実験装置には図-1 に示す一次元水路を用い、ゲートより上流側に水を貯め、ゲートを急開させて段波を発生させる。水路床及び斜面は木製の滑面できているが、実況にあわせてブロックを滑りにくくするため、ゲートより下流側から 200cm から斜面全体に布を敷いた（粗度係数： $n=0.025$ ）。表-1 に示す立方体ブロックを段波により移動させ、水路上方から移動するブロックをビデオで撮影した。さらに、水路及び斜面上で 20cm おきに流速を測定した。

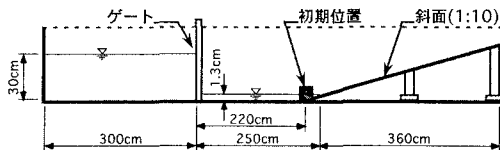


図-1 実験水路

表-1 使用したブロック

	サイズ(cm^3)	密度(g/cm^3)
ブロックA	3.2 ³	1.55
ブロックB	1.6 ³	1.79
ブロックC	3.2 ³	2.71
ブロックD	1.6 ³	2.71

2.2 等価摩擦係数の逆算

ブロックに作用する外力として流体力、底面摩擦力、重力の斜面方向成分を考える。流体力 F_m は Morison

式にならない、抗力と付加質量力から成るとして(1)式で表し、底面摩擦力は摩擦係数 $\mu(t)$ を用いて滑動形式で表示すると、ブロックの運動方程式は(2)式になる。

$$F_m = C_D \frac{1}{2} \rho_f (u - v) |u - v| d^2 + C_M \rho_f d^3 \dot{u} - (C_M - 1) \rho_f d^3 \dot{v} \quad \dots (1)$$

$$\rho_s d^3 \ddot{v} = F_m - \mu(t) (\rho_s - \rho_f) d^3 g \cos \theta - (\rho_s - \rho_f) d^3 g \sin \theta \quad \dots (2)$$

ここで C_D ・ C_M ：抗力・付加質量力係数， u ：ブロック位置の流速， v ：ブロックの水平方向速度， d ：ブロックの一辺の長さ， ρ_s ・ ρ_f ：ブロック・水の密度， θ ：ブロックの位置の斜面角度である。 C_D ・ C_M は立方体に用いられる値 $C_D=1.05$ ， $C_M=1.67$ とする。

ブロックが転動により移動する場合，(2)式の摩擦係数 $\mu(t)$ （等価摩擦係数）は時間的に変動すると考えられる。そこで，(2)式を変形した次式から $\mu(t)$ を逆算する（中川ら，1979）。

$$\mu(t) = \frac{F_m - \rho_s d^3 \ddot{v}}{(\rho_s - \rho_f) d^3 g \cos \theta} - \tan \theta \quad \dots (3)$$

(3)式から $\mu(t)$ を求めるためには、各時間の v ・ $\dot{v}$ ， u ・ $\dot{u}$ が必要である。 v は、撮影されたブロック移動の映像を用いて、単位時間当たりのブロック移動距離から、 $\dot{v}$ は単位時間での v の変化量から求めた。 u ・ $\dot{u}$ は実験で測定した値を用い、測定点間の値は線形補間により算出した。ただし、ブロックの初期位置に段波が到達した後の 0.4s 間は、単位時間内でブロック速度が急激に変化するため $\mu(t)$ の算定は行わなかった。

2.3 等価摩擦係数のモデル化

立方体ブロックが転動により移動すると、ブロック重心の運動は円弧を連ねた形となるため遠心力が働く（右城ら，1997）。ブロックに働く遠心力が水中重量を越えるとブロックは浮遊する。以上から、完全転動により移動するブロックに働く遠心力と水中重量の比（(4)式）がブロックと底面の接合程度の低下、つまり、 $\mu(t)$ の低下に関係すると考えられる。

$$\frac{F_c}{(\rho_s - \rho_f) d^3 g} \propto \frac{v^2}{(1 - \rho_f / \rho_s) g d} = \beta^2 \quad \dots (4)$$

ここで F_c : 完全転動するブロックに働く遠心力である。そこで、 $\mu(t)$ と β の関係を調べた結果、図-2 のようになり次の関係式を得た。

$$\frac{\mu(t)}{\mu} = \begin{cases} 4.43 / (\beta^2 + 4.43) & \text{for } \beta < 4.2 \\ 0.20 & \text{for } 4.2 \leq \beta \end{cases} \quad \dots (5)$$

ここで μ : 滑動時の動摩擦係数である。

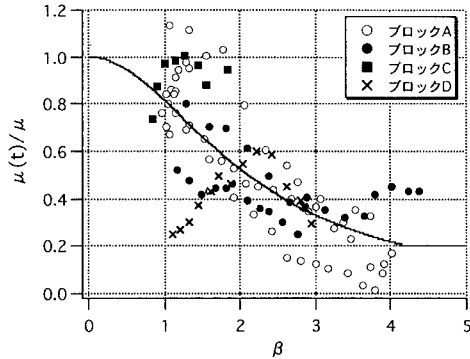


図-2 $\mu(t)$ と β の関係

3. 数値モデルの検証

数値モデルを実験条件に適用する。計算は表-2 に示す4通りの方法で行った。その結果を図-3 に示す。計算①②の結果を比較すると、最大移動距離は②の方が実験結果に近くなっている。しかし、最大移動距離や最終移動距離に差が生じている。t=0.5s でブロックの位置と速度を測定値に修正した場合の計算③では最大移動距離の誤差は数 cm 程度である。さらに最大移動距離を修正した計算④では、最終移動距離もよく一致している。以上から、移動初期でのブロック位置・速度の情報が重要であり、これを修正することで、提

表-2 検証した計算方法

計算方法	摩擦係数	追加条件
①	滑動時の値で一定	なし
②	(5)式	なし
③	(5)式	・ t=0.5s でブロックの位置と速度を測定値に修正
④	(5)式	・ t=0.5s でブロックの位置と速度を測定値に修正 ・ 最大移動距離を実験値に修正

案したモデルによりブロックの移動が高い精度で再現されることがわかった。

4. 終わりに

転動により移動する津波石に働く底面摩擦力を水理実験によりモデル化し、検証を行った。提案したモデルを用いると、移動初期に修正を加えるとブロックの移動を高精度で再現できることが確認できた。今後は、段波衝突直後のブロックの挙動及び、形状の違いを考慮した等価摩擦係数に関する検討が課題である。

参考文献

- 野路正浩・今村文彦・首藤伸夫 (1993) : 津波石移動計算法の開発, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 176-180.
- 今村文彦・吉田功・Andrew Moore (2001) : 沖縄県石垣島における 1771 年明和と津波と津波石移動の数値解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 346-350.
- 中川博次・辻本哲郎・細川泰廣 (1979) : 移動床における掃流砂れきの不規則運動性状について, 京都大学防災研究所年報, 第22号B-2, pp. 553-573.
- 右城猛・吉田博・矢野光明・高石協・八木則男 (1997) : 斜面を落下する落石の運動定数と跳躍量に関する考察, 土木学会論文報告集, 第581号/VI-37, pp. 49-58.

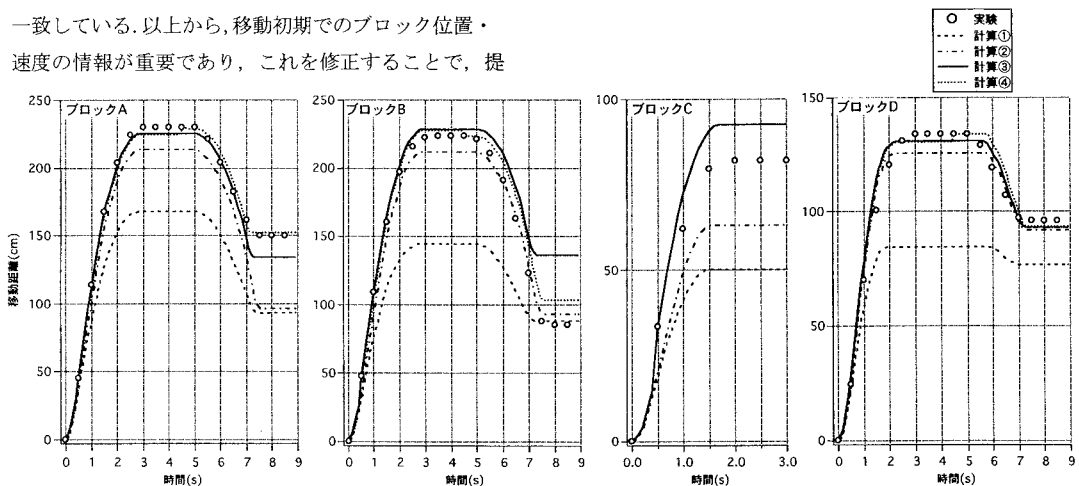


図-3 実験結果と計算結果の比較 (ブロックの軌跡)