

転動移動する津波石に働く底面摩擦力

東北大学大学院 学生員 ○大窪 慈生
 東北大学大学院 学生員 菅原 正宏
 東北大学大学院 正員 今村 文彦

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の研究が行われてきた（野路ら，1993；今村ら，2001）。

従来の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（牧野，1981）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、立方体ブロック（津波石モデル）を移動させる水理実験を行い、転動する津波石に働く底面摩擦力をモデル化し、モデルの精度を向上させることを目的とした。

2. 水理実験

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。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。その結果、ブロックが転動により移動することが確認された。さらに、水路及び斜面上で 20cm おきに流速を測定した。

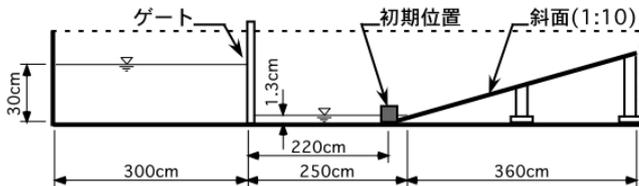


図-1 実験水路とブロック初期位置

表-1 使用したブロック

	一辺の長さ(cm)	密度(g/cm ³)
ブロックA	3.2	1.55
ブロックB	1.6	1.79
ブロックC	3.2	2.71
ブロックD	1.6	2.71

3. 底面摩擦力のモデル化

3.1 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 式にならう、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。

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

$$+ C_M \rho_f d^3 \dot{u} - (C_M - 1) \rho_f d^3 \dot{v}$$

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

ここで $C_D \cdot C_M$ ：抗力・付加質量力係数， u ：ブロックの位置の流速， v ：ブロックの水平方向速度， d ：ブロックの一辺の長さ， $\rho_s \cdot \rho_f$ ：ブロック・水の密度， θ ：ブロックの位置の斜面角度である。 $C_D \cdot C_M$ 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）。

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

(3)式の右辺には v ， \dot{v} ， u ， \dot{u} が含まれている。 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

キーワード：津波石，転動，等価摩擦係数，最大位置，最終位置

連絡先：〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06 津波工学研究室 Tel. 022-217-7515

化するため $\mu(t)$ の算定は行わなかった。

3.2 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き、遠心力が水中重量を越えるとブロックは浮遊する（右城ら，1997）。そこで，完全転動により移動するブロックに働く遠心力 F_c 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。

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

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。

$$\mu(t) / \mu_0 = 4.43 / (\beta^2 + 4.43) \quad \dots (5)$$

ここで μ_0 : 滑動時の動摩擦係数である。

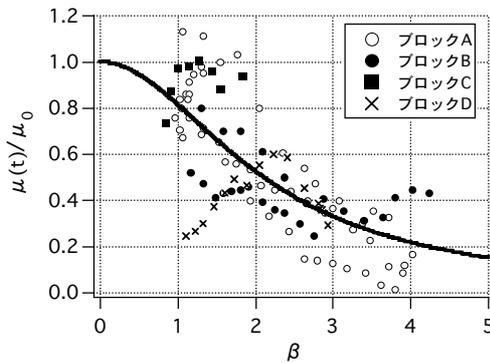


図-2 $\mu(t)$ と β の関係

4. 数値モデルの検証

モデルを実験条件に適用する。表-2 に示す 3 通りの計算方法で，測定した流速を用いて検証を行った。その結果を図-3 に示す。計算①②の結果を比較すると，②の方が格段に実験結果と良い一致を示している。ブロック A に関しては最終位置に大きな誤差が生じているが，最大位置を実験値に合わせた

計算③では，最終位置もよく一致している。以上から，提案したモデルを用いればブロックの移動を高い精度で再現されることが分かった。

表-2 検証した計算方法

計算方法	摩擦係数	計算過程
①	μ_0	全過程
②	(5)式	全過程
③	(5)式	引き波による移動のみ (最大位置を実験値とする)

5. 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れば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。また，今回の実験で引き波による移動が，最終位置に大きな影響を及ぼすことが分かった。今後は，引き波の再現計算の精度を上げることが必要といえる。

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 年明和大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。
 牧野清（1981）：改訂増補 八重山の明和大津波，城野印刷，462p。
 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。

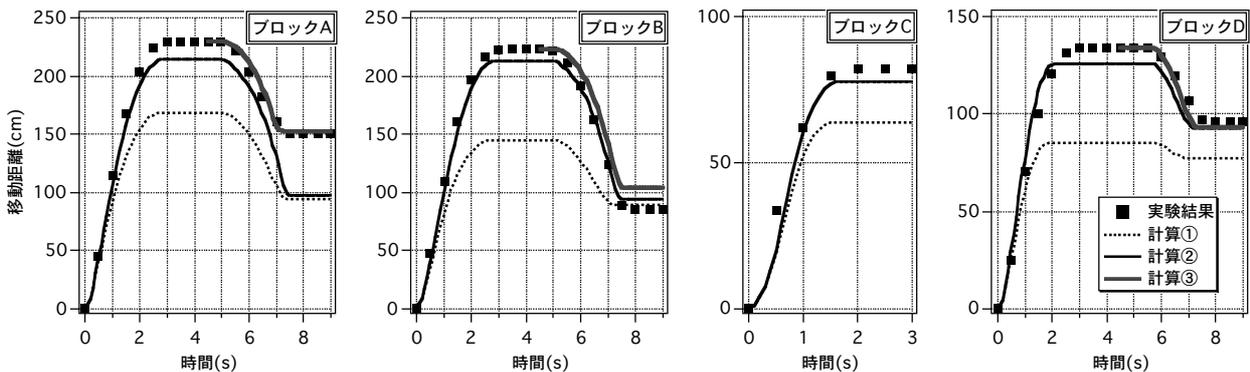


図-3 実験結果と計算結果の比較（ブロックの軌跡）