

津波により一様斜面上を移動する土砂および津波石 に関する水理実験

菅原正宏*・大窪慈生*・菅原大助**
箕浦幸治***・今村文彦****

本研究では、一様斜面上を津波に伴って移動する津波堆積物（土砂・津波石）について水理実験を実施し、津波水理量と堆積物形成との関係を調べた。土砂移動実験では浮遊砂状態を作り出すため、砂投入装置より段波の先端に上方から豊浦標準砂を投下した。水理量としては流速の積分値を用い、各点での押し波の積分値と堆積砂量、引き波の積分値と侵食砂量の関係を調べ、両者の関係を表す回帰式を得た。津波石については立方体ブロックを移動させ、水路上方からビデオ撮影を行った。転動により動摩擦係数 $\mu(t)$ が時間的に変化するものとして、測定結果から逆算し、 $\mu(t)$ を密度やサイズの異なるブロックに対して一つの回帰式で表した。

1. はじめに

過去の津波を語る物証として津波堆積物が注目されており(今村, 2001), 堆積物は主に津波に伴い陸上に移動した沿岸の土砂で、中には 700 ton 程のサンゴ岩(津波石)も含まれる。津波堆積物について、現在までに様々な調査が行われるようになってきた(箕浦ら, 1997; 菅原ら, 2001)。さらに解析が進めば津波来襲の有無だけでなく、その規模や沿岸での挙動を知ること可能であるが、津波の水理量と堆積物形成や移動に関する研究は少なく(廣田・今村, 2002), 土砂・津波石移動モデルは提案されているものの、検証は十分に行われていない(野路ら, 1993)。本研究では、この基礎研究の一貫として一様斜面という地形条件を単純化した上で津波に伴って移動する津波堆積物について水理実験を実施する。まず始めに、土砂の堆積・侵食過程、次に、単一の津波石の移動と津波水理量の関係について検討することを目的とする。

2. 実験概要

(1) 実験装置

一次元水路にゲートとワイヤーを有する貯水タンク部を設け、ゲートを急開することにより貯められた水を放出し、津波を想定した段波を発生させる(図-1)。タンクでの水深を変化させることにより津波の規模を変えることができる。水路部には陸域を想定した木製の斜面を設置した。斜面の勾配は 1:10 で、非透水性斜面である。

発生した段波は水路部を伝播後、斜面を遡上し、その後引き波は斜面を下り貯水タンクの方へ伝播する。貯水タンク後方の排水ゲートより排水するため、段波は一波のみ斜面を遡上する。さらに、水路・斜面上で 20 cm おきに流速を測定した。

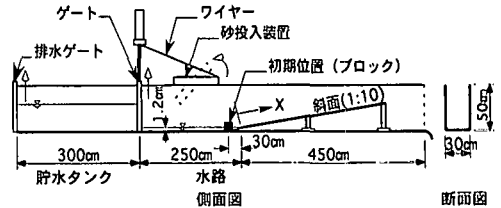


図-1 実験水路

(2) 土砂移動実験

a) 砂投入方法

一般に移動される土砂は掃流砂と浮遊砂に分けられる。津波の場合掃流力が大きく、浮遊砂が卓越すると言われているが(高橋ら, 1999), 水理実験において水路床に砂を敷き詰めても浮遊砂はほとんど発生しなかった。そこで、水路部にゲートとワイヤーにより運動させた砂投入装置を設置し、斜面突入前の段波の先端に砂(1200 cm³, 1785 g)を投下する。これにより投下した砂は水路幅全体に広がり、浮遊砂状態を作り出した。

b) 移動砂の回収

本実験では一回の津波遡上に伴う砂の堆積と引き波による堆積砂の侵食に着目した。段波により移動された土砂は幅方向に多少変化があるので、ある断面の堆積層の厚さではなく、各区分での移動砂の重量を測定した。遡上に伴う砂の移動量を測定するため、津波が最大遡上距離に達する瞬間に土砂トラップ装置(写真-1)を作成して移動する砂を捕捉した。これにより引き波のない条件での堆積量を調べることができる(長谷川ら, 2001)。トラップ装置は 20 cm×20 cm の格子状に網で分けし、砂のみを格子間隔で回収できる。

次に、津波一波が完全に引いた後、すなわち、引き波のある条件において、斜面上での砂の残存量を測定した。堆積砂量と同様に格子状に分割し回収、重量測定を行い、空間分布を調べた。堆積砂量と残存砂量の差から引き波による侵食状態を調べることができる。

c) 実験条件

本実験では、砂と津波の規模を変化させた条件を表-1

* 学生会員
** 修(理) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
*** 理 博 東北大学大学院理学研究科地学専攻
**** 正 会 員 東北大学教授 大学院理学研究科地学専攻
東北大学教授 大学院工学研究科附属災害制御
研究センター

の様に設定した。砂は豊浦標準砂とセメント強さ試験用標準砂の2種類を用いた。本実験では、現地の無次元掃流力よりも1桁位小さい状況であると予想される。実験は、設定した条件について引き波のあるなしの条件両方で、各条件3回行った。

(3) 津波石移動実験

次に、津波石としては表-2に示す立方体ブロックを用い、貯水タンクの初期水深は30 cmの場合のみ行った。図-1に示す初期位置にブロックを置いて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。撮影された映像から単位時間当たりの移動距離を読みとり、ブロックの移動速度、加速度を求めた。本実験の無次元掃流力については、現地のものとほぼ等しくなっている。

3. 土砂移動解析

(1) 移動砂の空間分布

引き波のない条件での堆積砂量の空間分布を図-2に、引き波のある条件での残存砂量の空間分布を図-3に示す。図-2での縦軸は堆積砂量 M_1 (g) を、図-3で

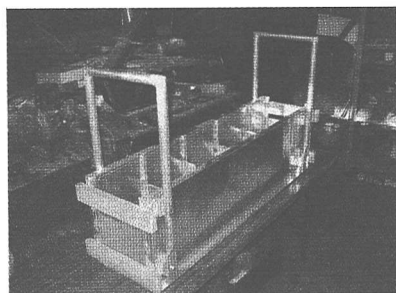


写真-1 土砂トラップ装置

表-1 実験条件

実験砂	タンク水深 (cm)
豊浦標準砂	30
平均粒径: 293.4 μm	25
標準偏差: 69.8	20
セメント強さ試験用標準砂	30
平均粒径: 357.7 μm	
標準偏差: 177.8	

表-2 使用したブロック

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

は残存砂量 M_2 (g) をとり、それぞれ横軸には、汀線を $x=0$ (cm) として、斜面上方に遡上距離をとった。図より、堆積砂量 M_1 の分布は全ての条件について遡上距離が増加するに従い減少するという楔状の堆積傾向が見られた。残存砂量 M_2 は引き波により、全体的に汀線付近に集められ、豊浦標準砂のタンク水深 30、25 cm の条件で遡上距離 70 cm 付近に残存砂量 M_2 のピークがみられたが、タンク水深 20 cm ではピークがみられない。

実験により、津波堆積物の一般的な特徴である楔形の堆積層が再現できた (今村, 2001)。

(2) 空間分布と流速

測定した流速時系列分布から流速積分値を算出した。押し波に対応する積分値は正の流速積分値 S_1 と表し、引き波は負の流速積分値 S_2 とする。流速積分値分布を図-4に示す。

堆積砂量および侵食砂量と流速積分値の対応を調べるために、投入砂量 m_0 、入射段波の流速積分値 $S_{1,0}$ 、 $S_{2,0}$ で無次元化した。それぞれ m (g/cm^2) は単位面積あたりの砂の重量である。図-5、6にその結果を示す。始めに、図-5については2つの領域に分けることができる。まず、(1)式で表現される回帰直線1は斜面上方の領域で M_1 が楔状の体積傾向を示している領域である。この領域では4つの条件全て回帰直線1とほぼ合致することから、タンク水深によらず M_1 と S_1 の間に対応関係があると考えられる。

$$\frac{m_1}{m_0} = 0.25 \frac{S_1}{S_{1,0}} - 0.048 \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、領域2は斜面下方の部分で、 M_1 の急な増加がみられる領域である。2つの領域の交点に着目すると交点

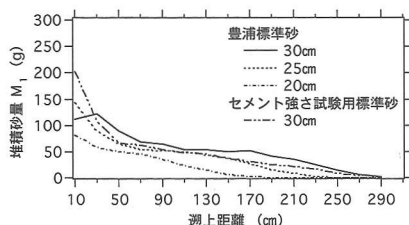


図-2 堆積砂量分布

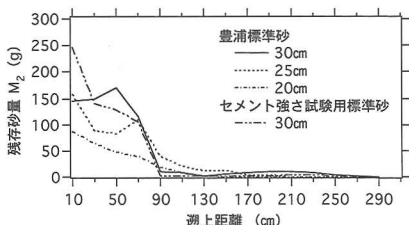


図-3 残存砂量分布

にあたる遡上距離と S_1 が減少し始める遡上距離が一致し (図-4), その点の汀線からの高さとし入射波の水位も一致した。このことから, 入射波が水路と斜面の境界の影響を受け, 流れが変化することから2つの領域に分けられるものと考えられる。

次に, 侵食砂量 $M_1 - M_2$ と負の流速積分値の関係である図-6については3つの領域に分けることができる。侵食のみを受ける領域は (2) 式の回帰直線2で表現できた。これにより侵食量と S_2 に対応関係があると考えられる。また, 侵食と再堆積が作用する領域と引き波の小さい場合の領域に分けられるが, 砂移動と水理量の関係は把握できず, 今後の検討が必要となった。

$$\frac{m_1 - m_2}{m_0} = 0.19 \frac{S_2}{S_{2,0}} - 0.23 \dots \dots \dots (2)$$

以上より, 津波に伴う土砂移動について流速積分値が現象をよく説明しており, 局所的な流速やシールズ数では不十分であることが分かった。また, 今回の一様斜面設置により流速積分値の変曲点が斜面の開始付近で存在

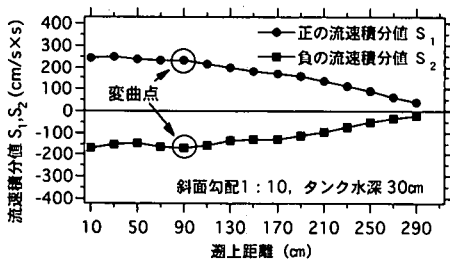


図-4 流速積分値分布

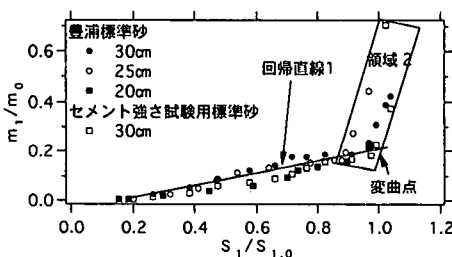


図-5 堆積砂量と押し波の水理量

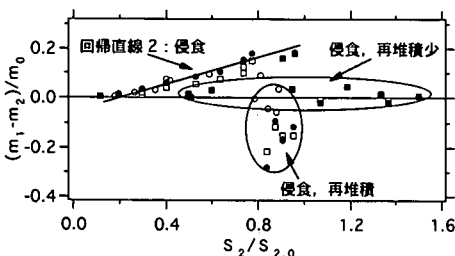


図-6 侵食砂量と引き波の水理量

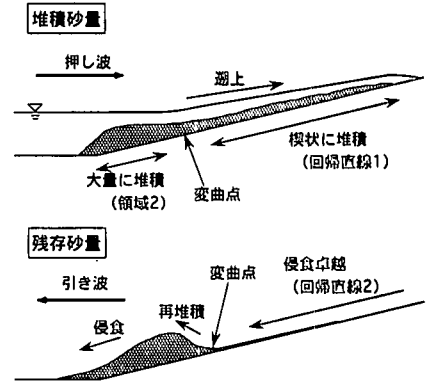


図-7 津波による土砂移動の基本的パターン

し, 土砂移動に大きな変化をもたらすことが分かった。流速積分値と堆積・侵食との関係には良好な回帰モデルが得られ (図-5, 6), 特に変曲点より斜面上方の領域では実験条件に関係なく得られた回帰式で表現されることがえられる。

(3) 土砂堆積の基本的パターン

今回の検討により, 図-7 に示す津波による土砂の移動の基本的なパターンが分かった。斜面遡上に伴い底面との摩擦や重力等の影響により流速積分値が減少し, 掃流力が失われて徐々に砂を堆積させていく。その結果, 斜面上方に向かって楔上の堆積層が形成された。このような押し波による堆積は, 図-5 の回帰直線1 が現象をよく捉えている。引き波は一度形成された堆積層を侵食する。しかし, 流速積分値の変曲点を境に, 単純な侵食過程とは別に斜面上方から運んできた砂を再び堆積させる過程を生じさせた。

4. 津波石移動解析

(1) 数値モデル

津波石は土砂と異なり点在するもので, 津波の挙動と津波石の関係調べるためには, 津波水理量 (主に流速) から津波石の移動した軌跡を再現する数値モデルが有効で, このようなモデルは提案されている (野路ら, 1993)。しかし, 滑動による移動 (図-8(a)), 流れに対する方向が一定とする等の仮定が含まれているにもかかわらず, 十分に検証されていない。実際に, 沖縄に存在する津波石 (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, 図-8(b) のように転動により移動した可能性が高い (牧野, 1981)。そこで, 水理実験により, ブロックの移動形態を確認し, 転動による移動を考慮した津波石移動の数値モデルに改良する。

(2) 運動方程式

津波石に働く外力として流体力, 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 式になり、抗力と付加質量力から成るとして (3) 式で表し、底面摩擦力は転動により動摩擦係数が時間的に変化するものとして $\mu(t)$ を用いて表すと、津波石の運動方程式は (4) 式になる。

$$F_m = C_D \frac{1}{2} \rho_f (u-v)|u-v|A + C_M \rho_f V \ddot{u} - (C_M - 1) \rho_f V \ddot{v} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\rho_s V \dot{v} = F_m - \mu(t)(\rho_s - \rho_f) V g \cos \theta - (\rho_s - \rho_f) V g \sin \theta \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで C_D , C_M : 抗力, 付加質量力係数, u : 津波石の位置の流速, v : 津波石の移動速度, A , V : 津波石の投影面積, 体積, ρ_s , ρ_f : 津波石, 流体の密度, θ : 津波石の位置の斜面角度である。野路ら (1993) は非定常流場において C_D , C_M が時間的に変動するとして、水理実験によりこれら 2 係数を定式化している。一方、大窪・今村 (2002) は、野路ら (1993) によるモデルの問題点を指摘し、 C_D , C_M を立方体に用いられる一般的な値 $C_D = 1.05$, $C_M = 1.67$ (萩原, 1986) とした場合の方が良い結果が得られることを示している。そこで、 $C_D = 1.05$, $C_M = 1.67$, また、 $A = d^2$, $V = d^3$ (d : 一辺の長さ) として計算を行う。

ここで、(4) 式を変形した次式から測定結果を用いて $\mu(t)$ を逆算する (中川ら, 1979)。

$$\mu(t) = \frac{F_m - \rho_s V \dot{v}}{(\rho_s - \rho_f) V g \cos \theta} - \tan \theta \quad \dots\dots\dots (5)$$

(3) 結果の整理

撮影された映像からブロックが転動により移動することが確認できた。そこで (5) 式により算出された $\mu(t)$ と転動移動との関係を以下のように考察した。

ブロックが転動により移動すると、重心の運動は円弧を連ねた形となり、底面からの垂直抗力は時間的に変化する (右城ら, 1997)。ここで、水平速度 v で移動するブロックが、図-9 のように滑らず完全転動により移動すると仮定した場合、ブロック (水平から 45° 回転したもの) に働く垂直抗力の低下量 F_c は、ブロックの回転角速度 ω を用いて次のように表すことができる。

$$F_c = \rho_s V \frac{d}{\sqrt{2}} \omega^2 = \frac{\pi^2}{4\sqrt{2}} \cdot \frac{\rho_s V v^2}{d} \quad \dots\dots\dots (6)$$

F_c がブロックの水中重量に比べて大きい程、ブロックに

働く底面摩擦力は低下すると考える。そこで、 F_c と水中重量の比 ((7) 式) をとり、これから求めた β と (5) 式より求めた摩擦係数 $\mu(t)$ の関係を調べた。その結果、図-10 のようになり、(8) 式を得た。モデルのサイズや密度によらず、ほぼ同一の式で表されることがわかる。

$$\frac{F_c}{(\rho_s - \rho_f) V g} \propto \frac{v^2}{(1 - \rho_f / \rho_s) g d} = \beta^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\mu(t) / \mu_0 = 4.43 / (\beta^2 + 4.43) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 μ_0 : 滑動時の動摩擦係数である。

(4) モデルの検証

数値モデルを実験条件に適用し検証を行った。計算方法は、従来の滑動時の動摩擦係数を用いた場合 (滑動モデル) と、(8) 式を用いた場合 (転動モデル) の 2 通りで、初期位置から最終位置まで移動する一連の過程をシミュレーションした (図-11 中の①②)。さらに、最大位置を実験値に合わせ、転動モデルを用いて、引き波により引き戻される過程のみのシミュレーションも行った (図-11 中の③)。ここで、ブロックに働く流体力の算出に必要な流速は測定したものを用いた。その結果を図-12 に示す。滑動モデルより転動モデルを用いた場合の方が実験結果と良い一致を示している。ブロック A に関

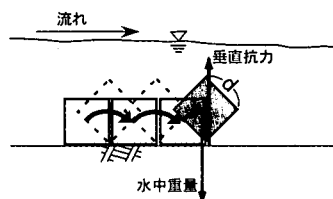


図-9 転動により移動するブロック

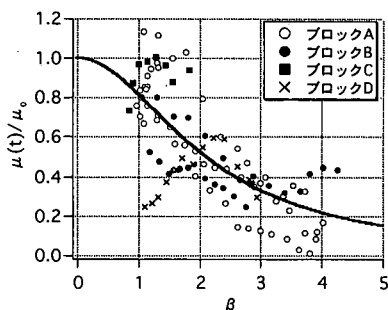


図-10 $\mu(t)$ と β の関係

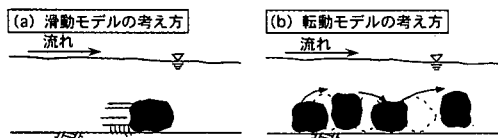


図-8 津波石移動の概念図

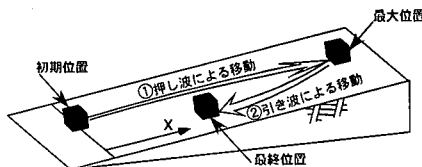


図-11 ブロックの軌道

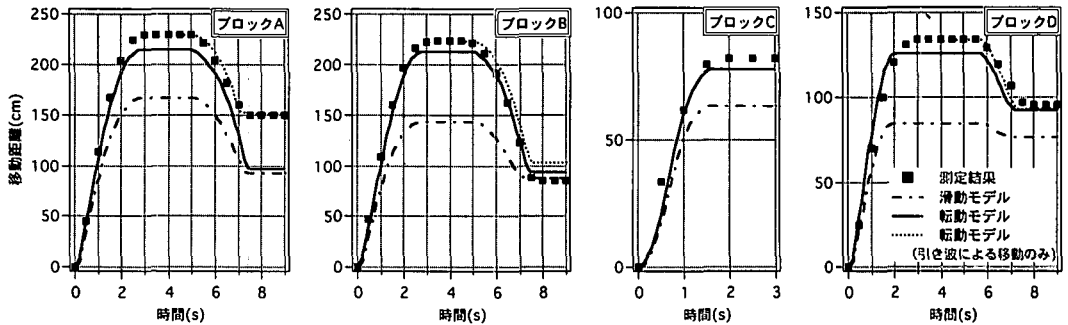


図-12 計算結果と実験結果の比較 (津波石について)

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場合、最終位置もよく一致している。以上から、提案した転動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。

5. ま と め

本研究により、土砂に関しては堆積砂量、侵食砂量と流速積分値の関係を表す回帰モデルを得て、津波石に関しては既存のモデルを基礎として転動による移動を考慮したモデルに改良した。両者とも扱いは異なるが、津波の水理量との関係を示した結果である。単体としての津波石については局所的な流れ場が、土砂の堆積・侵食については履歴または全体の流れの積分値が強く関係することが示されたものと考ええる。

これらの結果を逆に利用して、津波の局所的または全体の流れの情報を得る方法を検討して行きたい。また、今回の実験で、土砂、津波石共に引き波による移動が最終結果に大きな影響を及ぼしているため、引き波の流速を精度良く再現することが重要で、今後の課題である。

謝辞：本研究の一部は、科研費基盤(B)(2)(12574016)の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 今村文彦(2001): 津波災害一予測と災害一, 地学雑誌, 110 (6), pp. 828-837.
- 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.
- 大窪慈生・今村文彦(2002): 津波石移動計算法の改良, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, II-61, pp. 210-211.
- 菅原大助・箕浦幸治・今村文彦(2002): 西暦 864 年貞観津波による堆積に関する現地調査, 月刊地球, 総特集号津波研究の最前線・II, 号外 No. 28, pp. 110-117.
- 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔(1999): 掃流砂屑・浮遊砂屑の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 606-610.
- 中川博次・辻本哲郎・細川泰廣(1979): 移動床における掃流砂礫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.
- 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.
- 萩原国宏(1956): 流体力, 新体系土工学, 第 25 巻, p. 58.
- 長谷川史朗・高橋智幸・上畑善行(2001): 津波遡上に伴う陸域での堆積物形成に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 311-315.
- 廣田剛志・今村文彦(2002): 津波による一様斜面上での土砂堆積実験, 土木学会東北支部技術研究発表会概要集, pp. 194-195.
- 牧野 清(1981): 改訂増補 八重山の明和大津波, 城野印刷, 462 p.
- 箕浦幸治・今村文彦・高橋智幸・首藤伸夫(1997): 地中海文明と津波, 月刊地球, No. 219, pp. 574-581.