

軽石群の狭窄部と波の打ち上げ帯における堆積課程の実験的検討

海洋土木工学 PG 長山 昭夫

1. 背景と目的

大正3年(1914年)の桜島の大正大噴火では火山砕屑物である軽石が大量(推定3億トン)に周辺地域に降下し、鹿児島湾内の全ての海水面を覆い尽くし、その滞積厚さは最大で1mに達していた。また復興物資の移動については当時、海上輸送が重要な役割を担っていたが、鹿児島市沿岸に位置するほぼ全ての港湾が軽石群で埋没し、復旧活動が著しく遅延したことが報告されている。写真-1は、沖合に停泊している軍艦による物資移動のために、港湾部に滞積している軽石群を手作業で除去している様子を示す。一方、大正大噴火から100年以上経過した今現在、桜島地下ではマグマの蓄積が進み、大正大噴火を超える噴火の発生が指摘されており、仮に噴火が生じた場合、噴火軽石により周辺地域は甚大な被災を被ることは自明である。

最近では、2021年8月の東京都小笠原諸島の大規模噴火起因の軽石群が約12,000km離れた沖縄・奄美地方の沿岸域に漂着し、観光業や漁業に甚大な被害を与えたことは記憶に新しい。写真-2は、沖縄本島北部の国頭村の辺土名漁港の漂流軽石群の堆積状況を示している。この写真に示すように、沖縄から奄美にかけての多くの漁港が軽石群により埋没し、漁船の操業が停止し、軽石の除去作業に多くの時間を費やした。また小笠原諸島噴火起因の軽石群の漂流予測計算は国内の各研究所で様々な取り組みがあり、一定の成果を上げている。例えば、本学地震火山地域防災センターでは、噴火軽石の漂流予測計算(図-1)を公開し、今回の軽石の漂流は、台風が太平洋沖を通過したため、軽石群が沖縄・奄美地方まで漂流したことを明らかにしている。

一方、国土交通省港湾局は1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災により、神戸港が機能不全に陥ったことを契機に、危機的事象発生時の港湾の重要機能の低下を最小限にするための事業継続計画策定ガイドライン(Business Continuity Plan:以下、港湾BCP)を国内の重要港湾に策定している。鹿児島県内の各港湾に対して、港湾BCPが策定されているが、これは地震や津波による被災を想定しており、火山噴火に対しての想定は現在な



写真-1 港内に堆積した軽石群の除去作業
(鹿児島県立図書館デジタルアーカイブ提供)



写真-2 漂流軽石群による港湾埋没
(引用: NHK NEWS WEB)



図-1 噴火軽石の漂流計算
(引用: 鹿児島大学地震火山地域防災センターHP)

されておらず、桜島が大正大噴火級の大噴火を生じた場合、港湾BCPが機能しない可能性が高い。

以上の背景を受け、本事業は軽石群による港湾の埋塞現象の解明するために、風洞水槽内に港湾を想定した狭窄部を作成し軽石の移動特性について検討を行った。さらに軽石の滞積過程で重要となる波の打ち上げ帯にも注目し、同様の検討を行った。

2. 実験方法

2.1. 実験装置と動作条件

模型実験は海洋波動実験棟内の断面 2 次元風洞水槽 (図-2) を利用した。風洞水槽は、岸沖方向長さ 30m、沿岸方向幅 1.0m であり、静水面は底面から 0.72m に位置する。また水槽内に緩勾配 6/100 の斜面があり、その斜面に狭窄部を想定した構造物模型を設置した。実験ではこの構造物模型の沿岸方向長さを変えて実験を行った。水槽幅と狭窄部沿岸方向幅の比を R とし、構造物が無い場合を $R=1.0$ 、構造物を設置した場合を $R=0.5$ 、 0.3 、 0.15 と設定した。これらは狭窄部沿岸方向幅が 50cm、70cm、85cm に対応する。送風は岸側端部に設置されている送風機を使用し、水槽外に送風することで沖側から岸側に向かって一定風速が作用する。今回の実験における平均風速は 6 m/s であった。また構造物を設置していない場合の有義波高は 1.35cm、有義周期は 0.2sec となった。軽石の漂流方法については、沖側のゲートで軽石 524 個を堰き止め、風波が十分に発達した後、ゲートを一気に解放した。軽石の移動については水槽側面位置にハイスピードカメラを設置して撮影した。水位・風速は図中に示す構造物周りの測定点で実施した。構造物前面を Fr1 から Fr3、狭窄部を入口から RE_n、RM_i、RE_x、構造物背面を Ba1 から Ba3 とした。また Fr3、RE_n、RM_i、RE_x、Ba3 は、狭窄部幅の半分とし、模型の沿岸方向幅により変更した。

2.2. 軽石の物性値

実験に使用した軽石の一部を写真-3 に示す。軽石は鹿児島南部の大隅半島に堆積しているもので、実験前にふるい分けを行い、平均値が短径 50mm、長径 70mm、厚み 45mm となった。図-3 に軽石の Zingg 係数と密度を示す。Zingg 係数は長短度と扁平度の比であり、数値が 1.0 の場合は球状、1.0 以下の場合には扁平形状、1.0 以上は針形状を示す。この図から、多くの軽石は球形状に近い形状であることがわかる。また軽石の密度は 0.5g/cm³ から 0.8 g/cm³ の間にあり、海水密度 (1.03 g/cm³) よりも小さく、水表面に浮遊することがわかる。また軽石の給水実験を行った。水道水に 25 時間浸水した後に密度を算出すると 0.75 g/cm³ から 0.9 g/cm³ となり、密度が増加した。つまり、軽石は内部有気孔に毛管現象で水を吸い上げて、密度自体は大

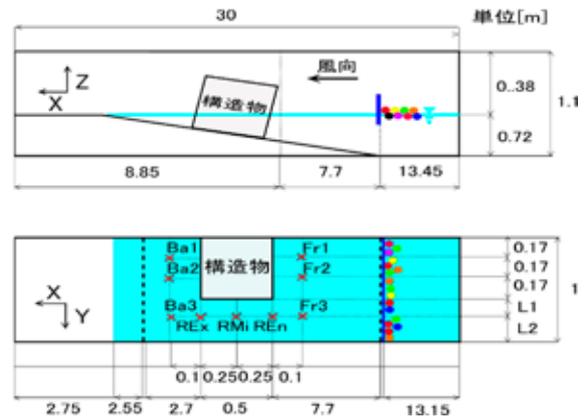


図-2 実験装置全体図

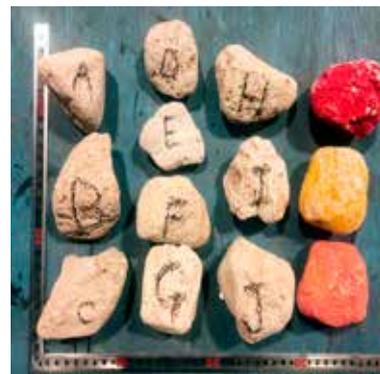


写真-3 実験に使用した軽石

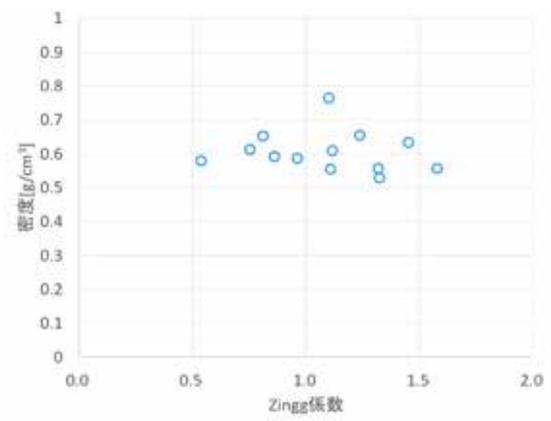


図-3 軽石の物性値

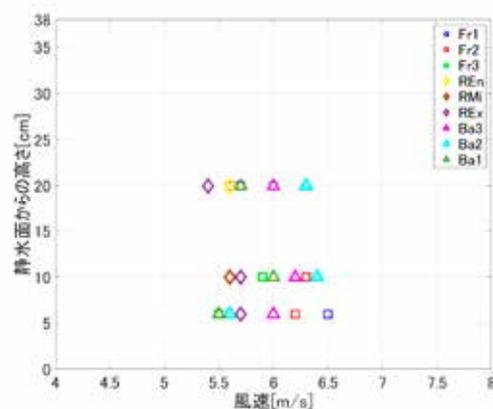


図-4 風速の鉛直方向分布

きくなるが、材料自体の密度が小さいため、給水によっても密度が 1 g/cm^3 を下回り、長時間漂流を継続することがわかる。

3. 実験結果

3.1. 風場の変動

図-4 に風洞水槽の測定点における風速の鉛直分布を示す。この図は、構造物を設置していない条件 ($R=1.0$) での結果である。この図より、水面付近（静水面付近から 6cm ）の風速は、 5.5m/s から 6.5m/s の範囲にあることがわかる。一般的に、風速は壁が存在すると対数則に則るが、今回は水面が存在しており、その水面が常時振動しているために、対数則に則った風速分布とはならなかった。

図-5 に各測定点における風速比を示す。これは構造物が存在しない $R=1.0$ での風速を U_0 、構造物を設置した場合における各点の風速を U とし、その比を整理した結果である。この図より、構造物が設置されている状態では、構造物前面の Fr1、Fr2 背面の Ba1、Ba2 において風速比は 0.5 を下回り、風速が小さくなることがわかる。さらに背面の Ba1、Ba2 においては、 0.1 から 0.2 程度となり構造物による風の遮蔽効果がわかる。一方、構造物の存在により風が集中するとされる狭窄部の REn、RMi、REx では 1.3 から 1.7 となり、強風が作用していることがわかる。さらにこれらの沖側の Fr3、岸側の Ba3 においても、 1.0 以上になることがわかる。つまり、構造物による狭窄部が存在する場合、狭窄部とその沖側と岸側においても風速が増加することがわかる。今回は、最も狭窄部が狭い $R=0.15$ の場合、狭窄部入口である REn で最大 1.7 となった。

3.2. 波場の変動

図-6 に各測定点における有義波高を示す。全ての点において $R=0.5$ の条件で最も高くなることがわかる。特に Fr2 では、最大で 15mm となり、入射波と反射波が合成されるためにこの点で最大値をとることがわかる。一方、狭窄部の REn、RMi、REx は通過面積が狭くなることで波高が大きくなるのが想定されたが、構造物前面とほぼ同様な値をとった。これは、今回は有義波高が 10mm 程度と小さいこと、また駆動力は風速のみ、沖側水深も 0.72m と浅いために、波高が増加しにくい環境であったことが想定される。また構造物背面では、波高がどの条件においても著しく低くなり、構造物の遮蔽効果によるものとわ

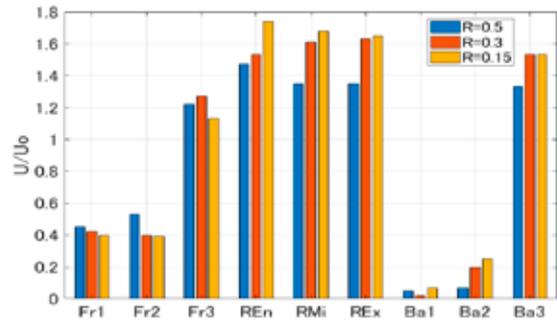


図-5 狭窄部周辺での風速比

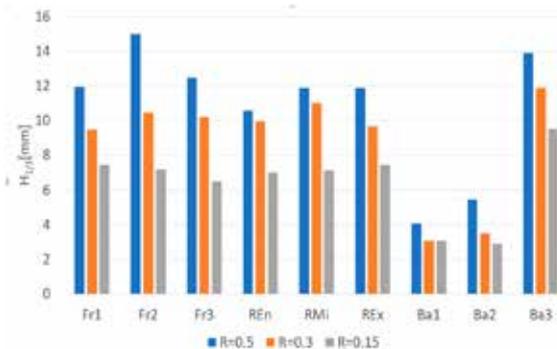


図-6 狭窄部周辺での有義波高

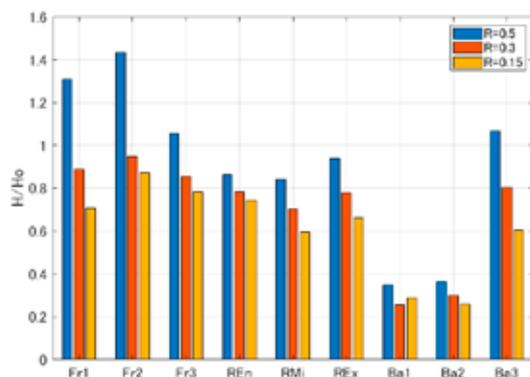


図-7 狭窄部周辺での水位比

かる。

図-7 に各測定点における水位について、構造物が無い条件での最大水位と最低水位の差である水位 H_0 を算出し、構造物がある条件での同測定点での水位 H との比を水位比として求め整理した。水位比については、構造物を設置した状態の $R=0.5$ の構造物前面 Fr1、Fr2 においては、 $R=1.0$ よりも大きな値をとり、構造物背面 Ba1、Ba2 では 0.4 を下回るが、それ以外の測定点においては、 0.7 から 1 程度となり、構造物を設置していない場合と比べて著しく変化は無かった。特に $R=0.5$ における構造物前面の Fr1、Fr2 は有義波高も大きく、水位比も大きいことから、今回の条件下では、波が高い状態が継続していたことが推

測できる。

3.3. 軽石の移動速度と通過流量の関係

図-8 は狭窄部の REn から REx までの通過軽石の移動速度を箱ひげ図として示したものである。今回、狭窄部幅が軽石の長径に比べ2倍から4倍程度で、多くの軽石がこの狭窄部の壁面に衝突しながら滞積と移動を繰り返す現象を確認した。算出した移動速度は狭窄部の入口から出口までを通過した軽石のみを対象としており、狭窄部に滞留して出口まで到達しなかった軽石は対象としていない。この図より、狭窄部幅が狭いほど移動速度が速くなるのが分かり、構造物が無い場合に比べ、最も狭窄部幅が狭い R=0.15 では5倍程度速度が大きくなるのがわかった。また狭窄部幅の広い R=0.5 においては、R=1.0 と比べほとんど移動速度が変化しないこともわかる。今回の条件下では、R=0.5 程度であると軽石の移動速度への影響はほぼないことがわかる。

図-9 に狭窄部における軽石の通過流量について整理した結果を示す。狭窄部を通過した軽石個数と各体積、通過に要した時間から通過流量を算出した。この図においても狭窄部の入口から出口までを通過した軽石を対象としており、狭窄部内で滞留している軽石は対象外とした。この図より、狭窄部幅 R=0.3 の場合、最も通過流量が多くなり、構造物が存在しない場合と比べて、2.5倍増加する結果となった。また狭窄部幅の最も狭い R=0.15 と最も広い R=0.5 では、R=1.0 に比べて通過流量が減少することがわかった。これは、狭窄部幅が狭い場合、多くの軽石が狭窄部に滞留するために、通過流量自体は減少するためである。一方、狭窄部幅が広い場合は、構造物前面の波が高いため、その部分に軽石が滞留しやすいため、狭窄部自体に移動する軽石の総量が少ないためにこのような結果になったことが推測できる。

3.4. 打ち上げ帯における軽石の移動

図-10 には、波の遡上域における軽石の移動距離を示す。これは、波が砕波後の遡上域での軽石の移動について検討したものである。上図は軽石 10 個の移動距離であり、下図は軽石 50 個の移動距離を示している。また沖から運ばれた軽石は、波の遡上により、軽石本体が気中に露出し始める。さらに後からやってきた波で岸向きにさらに遡上するといっ

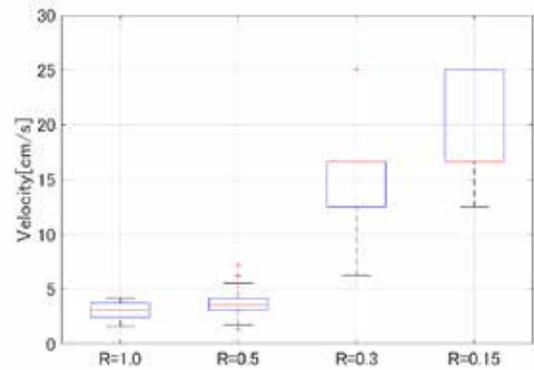


図-8 狭窄部での軽石の移動速度

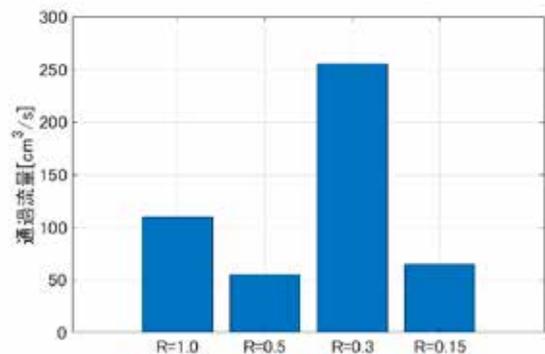


図-9 狭窄部での軽石の通過流量

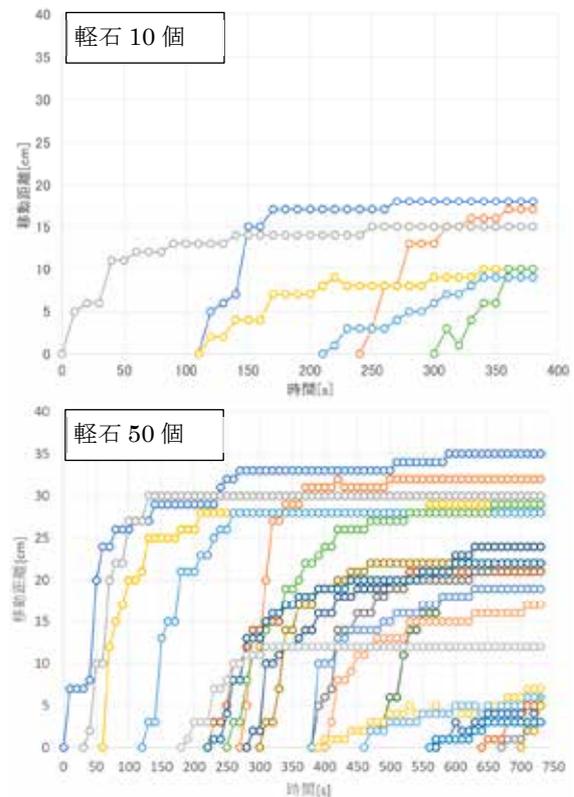


図-10 遡上域における軽石の移動速度

た過程をとる。この過程において、軽石の個数が増加すると、移動距離がどのように変動するかについて検討した。これらの図より、軽石個数が増えると、移動距離が増加する傾向にあることがわかる。これは、軽石自体が波の遡上域に複数あることで、衝突しやすく全体として岸への移動が促進される結果だといえる。

4. まとめ

- 1) 構造物模型による狭窄部の有無により、風速は加減速され、構造物前面と背面では、風速比が減少し、狭窄部と狭窄部沖側と岸側では風速比が増加した。今回は狭窄部が最も狭い場合風速比は 1.7 となった。
- 2) 有義波高は、構造物条件により影響を受け、 $R=0.5$ の場合、構造物前面では大きな値となった。また狭窄部の有義波高は、構造物前面との大きな違いは見られず、特徴的な変化はなかった。一方、最大水位と最低水位の水位差を元に、 $R=1.0$ との比である水位比を検討した結果、 $R=0.5$ は構造物前面で大きな値をとった。狭窄部においては 0.7 から 0.9 の値となった。
- 3) 狭窄部の軽石の移動速度については、狭窄部が狭くなるほど移動速度が上昇し、狭窄部の最も狭い $R=0.15$ では、 $R=1.0$ 比べ 5 倍大きくなる結果となった。一方、通過流量については $R=0.3$ で最大値をとり、 $R=0.15$ では $R=1.0$ 以下となった。これは狭窄部が狭いために多数の軽石が滞留することで、通過流量が減少するためだとわかった。
- 4) 波の遡上域における軽石の移動距離について、軽石が複数存在する場合、遡上波の影響で軽石同士が衝突し合い、全体として岸への移動が促進される。