

礫浜上の礫の挙動と礫浜の変形に関する研究

小野正順*・出口一郎**・荒木進歩***

1. ま え が き

最近の護岸は周辺海浜に及ぼす影響を小さくし、汀線へのアクセスを確保することを目的として緩勾配で透水性を持つものが多く施行されている。その多くは、護岸表面を空隙を持つブロックで覆う緩傾斜護岸であり、通常その断面変形は許されないものとして施行される。一方、礫で堤体をつくり、被覆しない礫浜も護岸として施工されている。礫の粒径を大きくしたものが捨石護岸で、粒径を小さくしたものが人工海浜である。人工礫浜や人工海浜はその機能を失わない範囲で変形は許容される。すなわち、礫浜護岸は人工海浜と同様、水理機能が損なわれないような有効な浜幅が確保できるように維持管理する必要があり、そのためには、来襲波に対する被覆材としての礫の運動と地形変動量との関係を明らかにする必要がある。

本研究では、護岸として施工された人工礫浜上において、礫をトレーサーとして追跡することにより礫の挙動の実測を行い、礫の移動特性と礫の移動によって引き起こされる礫浜の変形について検討を加えることを目的としている。

2. 礫の移動に関する現地観測

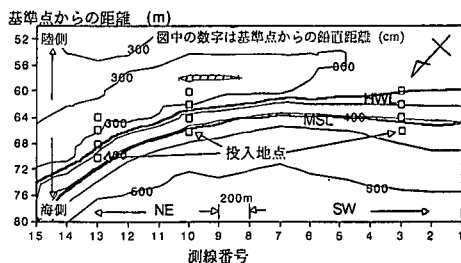
礫の移動に関する現地実測は、関西国際空港の対岸に埋立護岸として建設された礫浜上で行った。この護岸は、平均粒径 4 cm の雑石の上を厚さ 1 m にわたって粒径 4 cm-8 cm の大理石の礫で被覆して施工された勾配 1/15、総延長約 3 km の透水性礫浜護岸で、マープルビーチと呼ばれている。トレーサー追跡を行ったのは、マープルビーチの南部に位置する両端を突堤で囲まれた長さ 300 m の区間である。

著者らは 1992 年 3 月にマープルビーチ竣工後から 1995 年 10 月の間に生じた水深変化量の解析を行い、まず向岸方向の礫移動により平衡断面が形成された後、南西から北東に卓越する沿岸方向の礫輸送により、汀線変

動が生じたことを明らかにしている(出口他, 1996)。その後、1996 年末及び 1997 年 3 月の 2 度にわたり、大阪府により変形した礫浜を初期地形に修復するメンテナンスが行われ、3 月にはほぼ初期断面の 1/15 の勾配を持つ一様断面に整形された。

トレーサーは粒径 4 cm から 8 cm、重量 300 g から 600 g の大理石の礫に番号をつけたものを用い、1996 年 11 月 28 日(第 1 回調査)、1997 年 2 月 28 日(第 2 回調査)及び 3 月 21 日(第 3 回調査)の 3 回、汀線方向 3 測線、それぞれの測線上バームの頂部から沖方向 2 m 間隔で 4 地点に 1 地点当たり 10(第 2, 3 回調査)〜20 個(第 1 回調査)のトレーサーを投入し、1〜2 週間後にその移動を追跡した。ここでは第 1 回及び第 2 回調査の解析結果について検討する。

1996 年 11 月の投入地点を図一に示す。測線 3 は卓越波向に対して南側突堤の遮蔽領域で礫移動が顕著でない領域、測線 10 は沿岸漂砂移動がほぼ最大となる地点で、測線 13 は、沿岸漂砂による堆積域にあたる(出口他, 1996)。また、以後の考察は、図一に示す汀線方向(南西から北東方向)に y 軸、基準線から汀線直角方向に x 軸をとった座標系で行う。



図一 第 1 回調査における海浜形状とトレーサー投入位置

1997 年 2 月(第 2 回調査)の投入は、ほぼ初期断面に整形された測線 5, 9 及び 13 上で行った。

礫移動の外力としての波浪とその入射方向及び潮位変動は、関西国際空港 MT 局において毎正時計測されている結果を用いた。

* 正会員 工博 大阪大学講師 工学部土木工学科
 ** 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科
 *** 学生会員 工修 大阪大学大学院 工学研究科

3. 観測された礫移動と来襲波浪特性

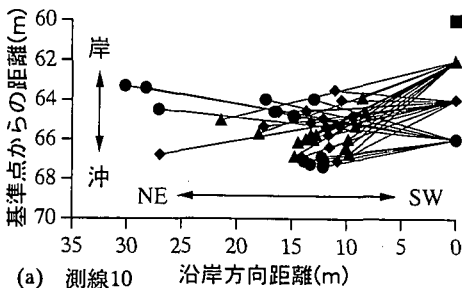
(1) 第1回調査結果

図-2に1996年11月21日～28日の間に測線10(図(a))及び13(図(b))で測定されたトレーサーの変位を、図-3に投入地点の海浜断面を示す。この期間の測線2上に投入したトレーサーは顕著な移動を示さなかった。

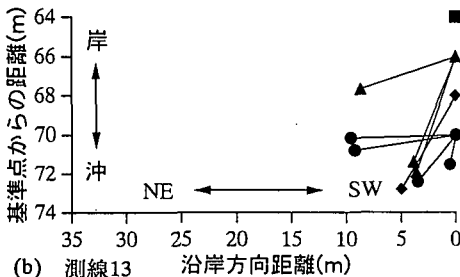
図-4は、1996年11月21日～28日の間にMT局で測定された有義波高 $H_{1/3}$ 、潮位及び平均波の諸元を用いて式(1)から計算される入射波の汀線方向エネルギーフラックスの時系列を示している。

$$E_a = EC_g \sin \theta \cos \theta = \rho g H^2 C_g \sin \theta \cos \theta / 8 \cdots (1)$$

ここに、 ρg は海水の単位体積重量で、 C_g は群速度、波向き θ はマープルビーチの法線方向からの入射角を 180° とし、時計回りに正をとった角度に変換して計算した。



(a) 測線10 沿岸方向距離(m)



(b) 測線13 沿岸方向距離(m)

図-2 測線10, 13におけるトレーサーの移動
(1996年11月21日～28日)

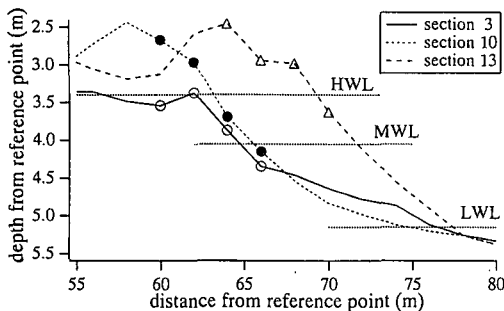


図-3 トレーサー投入測線の断面

従って、 E_a が正の場合の入射波浪エネルギーは北東から南西へ、負の場合は南西から北東に卓越する。また、潮位については対象地点のMSLを基準として表示した。

図-2より、測線10に投入したトレーサーは、 $x=60$ m地点以外で全て南西から北東に移動し、最大移動距離は30 mに及ぶ。また、 $X=62$ mに投入したトレーサーはやや沖方向、66 mに投入したトレーサーはやや岸方向の移動成分を持つ。測線13に投入したトレーサーの回収率は良くないが、 $x=64$ m地点では移動せず、 $X=66$ m以深のトレーサーは北東方向最大10 mの移動を示し、 $X=66$ m及び68 m地点では沖側の移動成分を持つ。また、先に述べたように、測線3に投入したトレーサーは全く移動しなかった。

目視観測されたトレーサーの動きは、移動限界を超えた波浪来襲時に動きやすい礫が向岸方向流速により岸側に転動し、ひき波時に沖側に転がりながら移動するというパターン(鋸歯状運動)で、波高が増大すると移動個数は増加するが、その移動は間欠的で波の1周期の間に常に移動するようなことはなかった。

一方、図-4に示すようにトレーサー投入直後(21日午後)の高潮位時に有義波高が1 mを越える波が来襲し(入射角 150°)、この時のエネルギーフラックスも南西から北東向きで大きな値を持つ。またこの波が波高50 cm以上の値となる継続時間は、ほぼ10時間である。その後、有義波高が50 cmを大きく上回る波浪は25日と27-28日にかけて来襲した。前者の波向は約 190° で、沿岸方向には大きなエネルギーフラックスを持たない。後者の波向は $200^\circ \sim 160^\circ$ の間で変化し、エネルギーフラックスの方向も変化する。

測線3は、南西から北東のエネルギーフラックスを持つ波浪に対して遮蔽領域になること、及び測線3上での移動が全く生じなかったことから、第1回の調査期間においてマープルビーチの礫移動に寄与したのは投入直後の高波浪と推定できる。

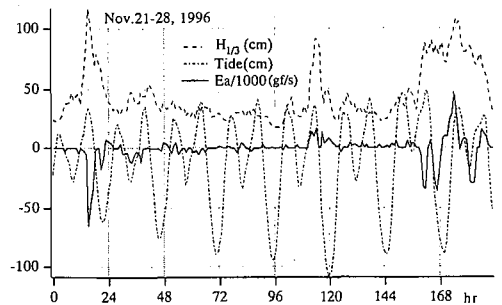


図-4 第1回調査期間の来襲波、潮位変動
(1996年11月21～28日)

(2) 第2回調査結果

第2回の調査は、ほぼ初期断面形状(勾配1/15の一様勾配断面)に補正された断面上の測線5, 9及び13上にトレーサーを投入して追跡した。図-5に1997年2月28日～3月7日の間に測線9(図(a))及び13(図(b))で測定されたトレーサーの変位を、図-6に投入地点の海浜断面を示す。なお、この期間においては、測線5上に投入したトレーサーに人為的な動き(投石)が認められたので検討の対象から除外した。

また、図-7は第2回調査期間における有義波高、潮位及び沿岸方向エネルギーフラックス E_a の時系列を示したものである。

図-5より明らかなように、この期間に観測されたトレーサーの移動方向は、測線9に投入されたトレーサーは南西及び北東の両方、測線13のトレーサーは $x=74$ m以深では南西、 $x=72$ m以浅では北東と水深方向に異なった動きを示している。またいずれの測線上でも比較的沖側に投入されたトレーサーは、向岸方向の移動成分を持つ。

一方、図-7より対象期間には、有義波高が50 cm以上の波浪が3回来襲しているが、そのうち有義波高が1 mを越える波浪は1回しか発生(3月1日)しておらず、観測された期間は低潮位時で波向約 200° であった。

図-6に示す海浜断面と潮位を考えると、測線9及び13の沖側に投入されたトレーサーの南西側への移動は、

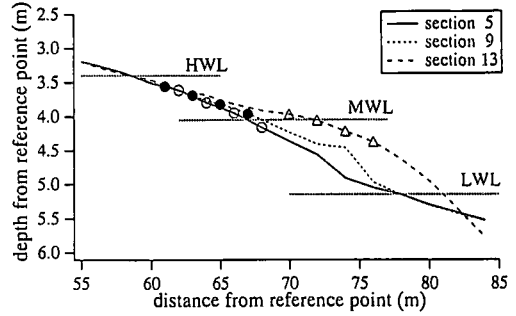


図-6 トレーサー投入測線の断面形状

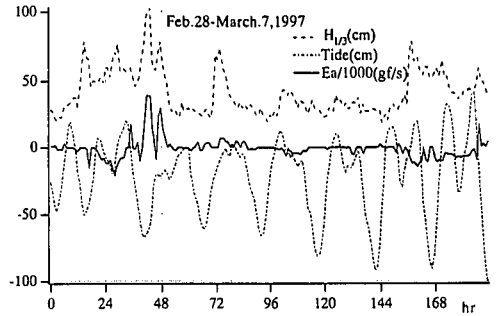


図-7 第2回調査期間の波浪特性と潮位
(1997年2月28日～3月7日)

この波によって生じたものと考えられる。有義波高が50 cm以上となる3月6日～7日の期間は、南西から北東へのエネルギーフラックスを持つ波で、上記両測線の岸側に投入されたトレーサーは、この波によって移動したものと推定される。

4. 礫の移動限界と移動量に関する数値計算

以上で述べた礫の移動の様子を数値的に再現することを試みた。礫浜上の礫の挙動に関する数値計算は、図-8に示されるような多数の同一径の球体上を運動する球体としてモデル化した。球体の径は全て同じで、下側の球体は千鳥で配列されている。したがって、上側の突出球体の初期の静止状態は図に示される2つの場合について行った。

礫の運動方程式については、青木ら(1994)あるいは荒木ら(1996)に行われている断面2次元の捨石単体の動的挙動シミュレーションを平面2次元場に拡張したものを用いた。

数値解析の概要は、以下の通りである。礫の運動形態を回転のみの運動と回転と滑りを伴う運動の2通りを考え、礫の接触点での法線方向と接線方向の運動方程式及び礫の回転運動の運動方程式から、礫の回転角速度と移動量が算定される。数値計算には4次のRunge-Kutta法

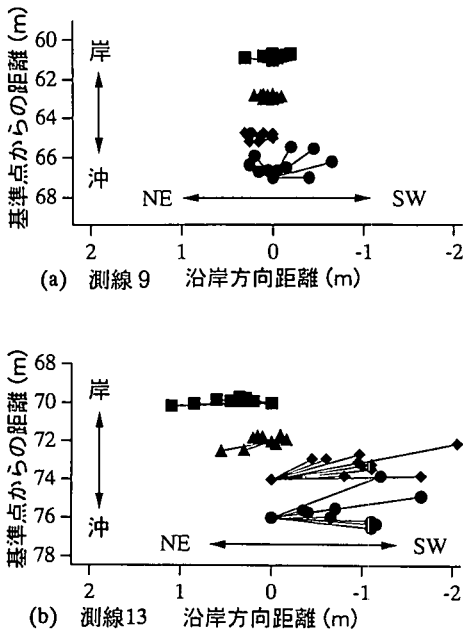
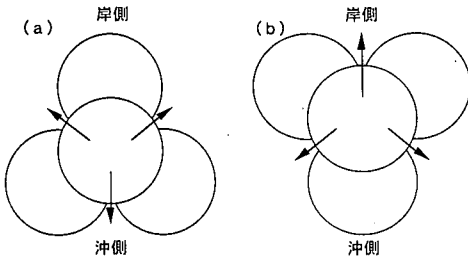


図-5 測線10, 13におけるトレーサーの移動
(1997年2月28日～3月7日)



図—8 礫の平面配置

を用いた。礫に作用する波力ベクトル $\vec{F}_p$ は、式(2)に示すように抗力と慣性力から求めた。

$$\begin{aligned} \vec{F}_p = & \frac{\rho_f C_D}{2} \frac{\pi B^2}{4} |\vec{u}_R - \vec{u}_p| (\vec{u}_R - \vec{u}_p) \\ & + \frac{\rho_f}{2} \frac{\pi B^3}{6} \frac{d}{dt} (\vec{u}_R - \vec{u}_p) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$C_D = 2 + 24/R_e$$

$$R_e = (|\vec{u}_R - \vec{u}_p|) B / \nu$$

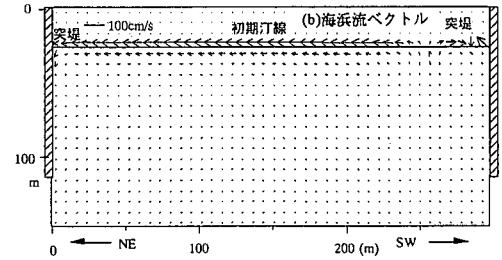
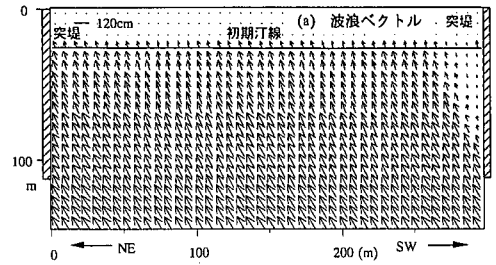
ここに、 ρ_f は水の密度、 ν は水の粘性係数、 B は礫の直径、 $\vec{u}_R$ は流体の流速、 $\vec{u}_p$ は礫の移動速度ベクトルである。

これら諸量のうち流体の流速は、条件として与える必要がある。礫移動の計算を行う前に礫浜上での波の変形計算と、その結果得られるラジエーション応力を用いた海浜流計算を行い(例えば、樫木他, 1990)、あらかじめ計算領域全体における波と海浜流による水粒子速度場の時間変化を与えておき、その上で礫を移動させた。海底の透水性による波変形(波高減衰効果と波長変化)は、礫の粒径の関数として与えられる等価線形抵抗係数を通じて考慮されることになる。

礫移動の計算は、複雑な海浜断面形状と潮位の関係を単純化するため、一様勾配斜面上(初期海浜形状上、勾配 1/15)で行った。

図—9 は、1996 年 11 月 21 日～28 日にかけての礫移動に支配的だったと考えられる有義波高 1.2 m、周期 5.0 s、波向 150° の来襲波に対して計算された波浪ベクトル(図(a))と海浜流ベクトル(図(b))を示したものである。測線 3 は回折領域に入り、海浜流の反流域が形成され、一様な沿岸流は測線 5 付近から発生する。

図—10 は、図—9 に示す流速場で計算される測線 10 上の礫の 1 周期後の移動量(図(a))で、図(b)は、入射波高 80 cm、周期 4 s の場合に計算される波浪・海浜流場で同じ測線上での礫移動量の計算結果である。なお、礫の粒径は 6 cm とした。まず、図(a)より入射波高が 120 cm の場合は、汀線より 30 m 沖の水深 2 m の地点まで礫の残留変位が生ずるが、1 周期内に粒径程度の残留変位を生ずるのは高々離岸距離 15 m、水深 1.5 m の地点までである。一方、入射波高が 80 cm の場合は、汀線付近で



図—9 礫浜上の波変形と海浜流計算例

の礫の残留変位は生じず、離岸距離 6-12 m、水深 40-80 cm の間でのみ残留変位が生ずる。ちなみに、佐藤・田中の表層移動限界水深は、図(a)に示す入射波高 120 cm の場合は 121 cm、図(b)に示す入射波高 80 cm の場合は 81 cm となり、本計算で得られた礫の移動限界水深は、ほぼこれらの値と一致する。

実測で最も大きな汀線方向変位が観測されたのは、図—2 に示す測線 10 の $x=66$ m の位置に投入したトレーサーである。この地点の水深は、図—10 に示す離岸距離 30 m 地点、水深は 70 cm の位置に対応する。この地点で、波高 120 cm の入射波浪場で計算される 1 周期後の礫の残留変位は約 8 cm/周期(平均移動速度は 1.8 cm/s)である。この速度で汀線方向に 30 m 移動するためには、時間にして約 1700 s (28 min.)、375 波の継続入射が必要となる。図—4 に示す 11 月 21 日の高波浪継続時間は、この時間よりも十分長い。

図—10 に示す結果より、礫移動の計算結果は入射波高に大きく依存していることが分かる。入射波高を 60 cm とした場合にはほとんどの領域で礫の移動が生じなかった。一方、計算結果では、汀線付近の移動が計算されない。これは、時間平均された平均水位上昇量を考慮した汀線より沖側でしか流体運動場が表現されていないからであり、いわゆる遡上波帯における運動が無視されているためである。今後この点についてさらに再現性の高い流体運動予測モデルの開発が必要である。

このような問題点はあるものの、いくつかの波浪条件の異なる入射波に対する礫移動量の計算を行い、沿岸方向の礫移動量と式(1)で表される入射波浪エネルギー

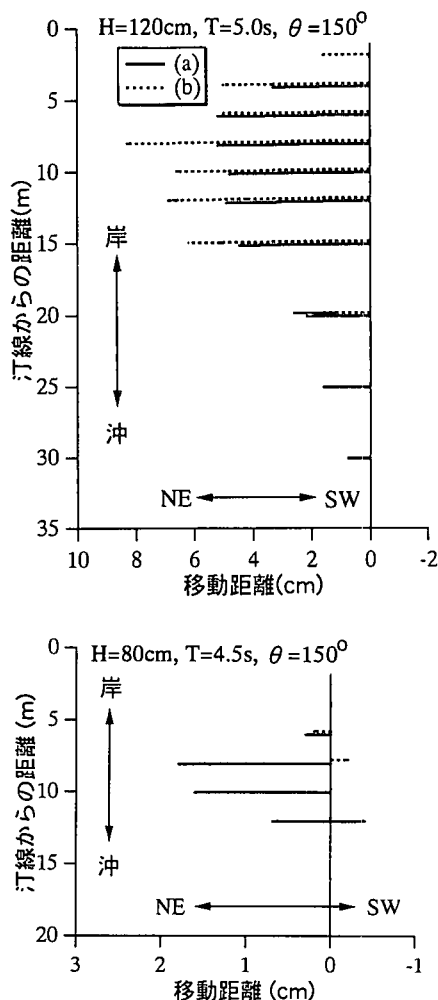


図-10 計算された礫の1周期後の移動距離

フラックスの沿岸方向成分 E_a の関係を見たところ、線形な関係が見出されなかった。この理由は、同じ E_a の値

を持つ場合でも波高が小さく汀線に対する入射角が大きい場合と波高が大きく汀線に対する入射角が小さい場合で礫移動の様子に大きな差異があるからである。粒径が小さく、常に移動する砂の場合と異なり、間欠的な移動を示す礫のような底質の移動量に対して入射波浪エネルギーフラックスとの関係から推定するためには、さらに詳細な検討が必要であることが分かった。

5. あとがき

人工礫浜（マーブルビーチ）上での礫の移動に関する現地実測を行い、移動特性について検討を加えた。その結果、礫の移動は高波浪来襲時に間欠的に転動することによって生ずることが分かった。さらに礫の移動に関する数値計算モデルに基づき、入射波浪特性と礫の移動について解析を行った。砕波帯内の水深が比較的深い領域の礫移動については計算によって再現される可能性があることを示したが、汀線近傍の移動については計算で再現することができなかった。今後このような領域における礫移動に対して再現性の高い数値予測モデルの開発に努めるつもりである。

参考文献

- 青木伸一・榎木 亨・伊藤禎和 (1994): 振動外力を受ける斜面上の捨石の挙動に関する数値的検討, 第49回年次学術講演会講演概要集, pp. 826-827.
- 荒木進歩・伊藤禎和・出口一郎 (1996): 動的応答を考慮した捨石防波堤の平衡勾配について, 海岸工学論文集第43巻, pp. 826-830.
- 佐藤昭二・田中則男 (1962): 水平床における波による砂移動, 第9回海岸工学講演会論文集, pp. 95-100.
- 榎木 亨・岡原義典・出口一郎 (1990): 選水層を用いた波浪及び海浜流制御について, 海岸工学論文集, Vol. 37, pp. 639-543.
- 出口一郎・小野正順・榎木 亨 (1996): 礫浜の変形に関する研究, 海岸工学論文集, Vol. 42, pp. 506-510.