

混合粒径砂を用いた大型海浜実験による粒径別 浮遊砂フラックスとモデル化

池 野 正 明*・宇 野 喜 之** ・後 藤 宏 志***・田 中 正 博****
森 信 人*・片 山 裕 之*****・岡 安 章 夫*****

1. はじめに

砕波帯内では海底砂が顕著に巻き上げられ浮遊砂現象が卓越する。海浜変形モデルの精度向上のためには浮遊漂砂の特性を把握し漂砂量の算定に適切に反映させる必要がある。これまで単一粒径砂を対象に実験により砕波帯内外における浮遊漂砂特性が解明されモデル化がなされている(柴山ら, 1994; 池野ら, 1998)。しかしながら, 細砂と粗砂が混在した混合粒径砂海浜の場合の浮遊漂砂特性はまだ十分解明されておらずモデル化も十分になされていない。

そこで, 本研究では細砂と粗砂が混在した混合粒径砂を対象に大型造波水路を用いて岸沖海浜変形実験を実施し, 浮遊砂の粒径別特性を外力と採水を併用した浮遊砂濃度計測により検討する。ついで, これらの特性を考慮して浮遊砂の粒径別巻き上げ量と粒径別濃度鉛直分布を再現できるモデルを提案する。

2. 大型岸沖海浜実験による浮遊砂計測

(1) 実験条件および実験方法

長さ 205 m, 幅 3.4 m, 高さ 6 m の大型造波水路に, 粒径 0.2 mm の細砂と粒径 0.8 mm の粗砂を 70% 対 30% の割合で一様に混合した砂を初期勾配 1/30 で敷き詰めた。まず, 堆積性波浪として波高 0.3 m 周期 3.5 s の規則波を 38 hr 作用させた後, 地形を整形せずに侵食性波浪として波高 1 m 周期 3.5 s の規則波を 20 hr 作用させた(田中ら, 2000)。

この間有意に地形変化が生じた度に繰り返し外力および浮遊砂の計測を行った。水路方向に 10 m ピッチで砂面上 10 cm と 50 cm の高さに取り付けた濃度計と鉛直面 2 次元電磁流速計および容量式波高計により砕波帯内外の下層・中層での浮遊砂フラックスを計測するとともに, 移動式台車に取り付けた濃度計と 3 次元超音波ドッ

プラー流速計および容量式波高計により砕波帯内の 3 次元浮遊砂フラックスの鉛直分布を鉛直方向に 20 cm ピッチで計測した。計測時のサンプリング周波数は 20 Hz, サンプリング時間は 3 分間あるいは 6 分間である。

(2) 採水と濃度計による浮遊砂濃度の計測方法

浮遊砂濃度の計測には光学式後方散乱型および透過型の濃度計を使用した。本実験では, 濃度計による計測とともに, 以下に述べる 2 種類の採水方法を併用し, これにより得られた浮遊砂を粒度分析により細砂と粗砂に分離し浮遊砂の混合率と粒径別浮遊砂濃度を求めた。

採水用ホース口を各濃度計と同じ位置に波進行方向と垂直になるように水平に水路内に取り付ける。まず, 毎秒高速採水(HSWSS)として, 水路内の水を造波水路の外にガソリンエンジンポンプに取り付けたホースで汲み上げ, 500 ml の採水容器に毎秒 1 サンプルを採取する。これを 40 秒間行い計 40 サンプルを採取し 40 秒間の濃度時系列を算出する(片山ら, 1999)。

つぎに, 2 分間連続採水として, ホースで汲み上げ 97 μ m メッシュのプランクトンネットからなる捕砂器で 2 分間ろ過して砂のみを採取する。捕砂器を通過した水を排水する際に流量計により採水流量を計測し, これより時間平均濃度を算出する。本実験で使用する粗砂および細砂の沈降速度は各々 0.077 m/s, 0.025 m/s であるのに対し, ホース内の流速は 1.7 m/s 程度であり十分な管内流速である。

上記の方法で得られた捕砂濃度を参照し, 濃度計による電圧値から濃度値へのキャリブレーション値のクロスチェックを行った(片山ら, 1999)。特に混合粒径砂の場合には, 濃度計の出力電圧値が厳密には細砂と粗砂の混合率によって変化し, 粗砂の混入率が顕著に増加すると, 同じ濃度でも出力電圧値が低下することがわかった。このため, 別途攪乱装置を用いて粗砂の混入率の異なる混合砂を対象に濃度計の検定を実施し粗砂の混入率に応じたキャリブレーション値の補正も行った。

3. 粒径別浮遊砂濃度・フラックスの特性

(1) 濃度計のキャリブレーション

濃度計の出力電圧値を濃度値へ変換するためにキャリ

* 正 会 員 工 博 (財)電力中央研究所 主任研究員 我孫子研究所 水理部
** 学生会員 横浜国立大学大学院工学研究科
*** 正 会 員 工 修 相模鉄道株式会社
**** 正 会 員 工 修 東京電力株式会社
***** 正 会 員 工 修 横浜国立大学助手 大学院工学研究科
***** 正 会 員 工 博 横浜国立大学大学院助教授 工学研究科

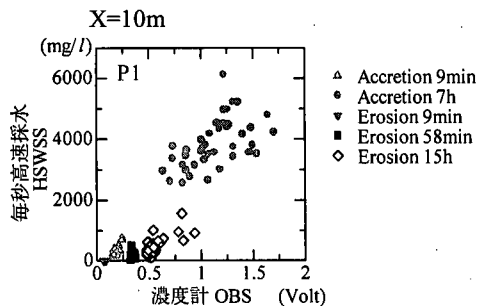


図-1 毎秒高速採水と濃度計による時系列の相関例

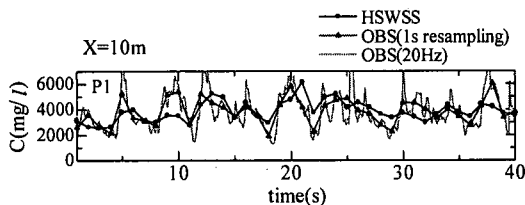


図-2 キャリブレーション後の毎秒高速採水と濃度計による時系列の比較 (堆積性 7 hr)

レーション値(傾きとバックグランド値)を適切に決定する必要がある。本研究では、まず、サンプリング周波数 20 Hz で計測された濃度計データを毎秒高速採水と同じデータ数に揃えるために 1s 区間移動平均を施した。図-1 に、毎秒高速採水による捕砂濃度時系列と、1s 区間移動平均後の出力電圧時系列との相関図の代表例を示す。この際に得られる 1 次回帰直線の傾きを採用した(概して 3,900 ppm/Volt)。つぎに、この傾きを用いて濃度計時系列の時間平均値と 2 分間連続採水による時間平均捕砂濃度が一致するようにバックグランド値を決定した。なお、本実験では浮遊砂中の粗砂の混入率は、顕著に巻き上がる砕波点付近でも最大で 20% 程度であった。

図-2 は、上記の方法により決めたキャリブレーション値を用いた濃度計時系列と捕砂濃度時系列の比較例である。図中には濃度計による計測サンプリング 20 Hz 毎の時系列と、1s 区間移動平均を施した後の時系列を併記している。図-2 によると、1s 区間移動平均後の濃度計データと毎秒高速採水による時系列のピーク値等はほぼ一致し適切なキャリブレーションがなされていることがわかる。

(2) 堆積性波浪による粒径別浮遊砂特性

図-3 に、堆積性波浪の浮遊砂計測時の波高分布と海底地形変化を示す。このケースでは、まず、 $X=15m$ の地点に小さなバーが形成され(波作用後 1 hr)、次第に岸側へ移動するが (6.6 hr)、やがて消滅し侵食域に転じるとともに (15 hr)、張ら (1994; 1995; 1996) と同様に、 $X=10m$ から岸側に主に粗砂が堆積し (30 hr)、最終地形

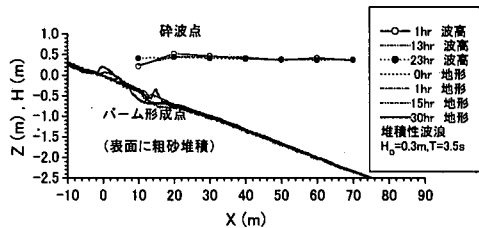
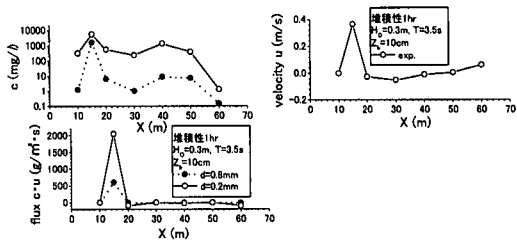
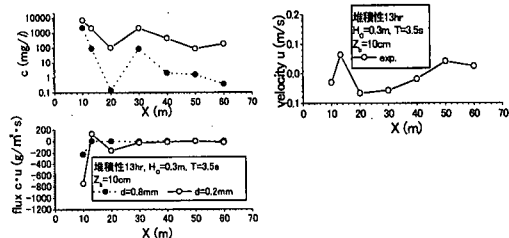


図-3 堆積性波浪作用時の波高分布と地形変化



(a) 底面上 10 cm の高さにおける岸沖分布 (堆積性 1 hr)



(b) 底面上 10 cm の高さにおける岸沖分布 (堆積性 13 hr)

図-4 堆積性波浪による粒径別浮遊砂濃度・定常流速・フラックスの特性

を形成した (38 hr)。6.6 hr と 38 hr の地形の掲載は省略している。この間、砕波点は $X=15m$ の地点から $X=12m$ の地点まで次第に岸側へ移動している。このケースでは plunging 砕波であった。

図-4 に、堆積性波浪作用時の粒径別時間平均浮遊砂濃度 c 、岸沖定常流速 u 、岸沖粒径別時間平均フラックス $c \cdot u$ の代表例を示す。図 (a) が 1 hr 後、図 (b) が 13 hr 後における底面上 10 cm の高さにおける岸沖分布である。流速およびフラックスは沖向きが正の値である。まず、図 (a) によれば、このケースの初期の段階では、砕波点 $X=15m$ の地点で最も激しく巻き上げられ、粗砂 1,700 ppm、細砂 5,600 ppm の濃度が得られている。

この場合のフラックスは、粗砂・細砂とも $X=40m$ より沖側ではやや沖向きに小さな値、 $X=40 \sim 20m$ では岸向き、 $X=15m$ の砕波点では沖向きに大きな値となっている。つぎに、図 (b) によれば、砕波点が岸側へ移動したのに伴い、砕波点付近の $X=10m$ の地点で粗砂 2,200 ppm、細砂 7,100 ppm の濃度が得られている。この場合のフラックスは、 $X=20m$ より沖側では上記と同様の傾

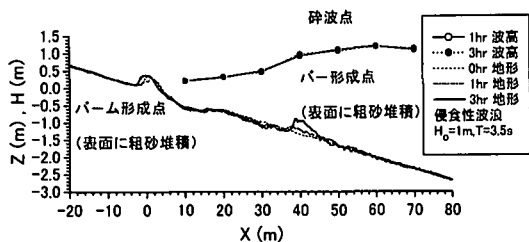
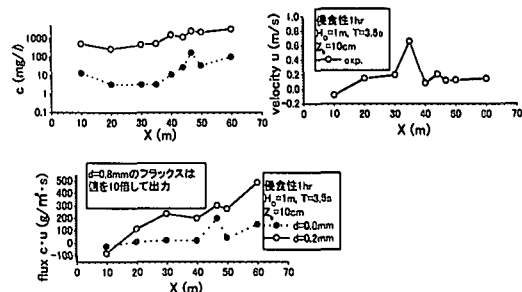
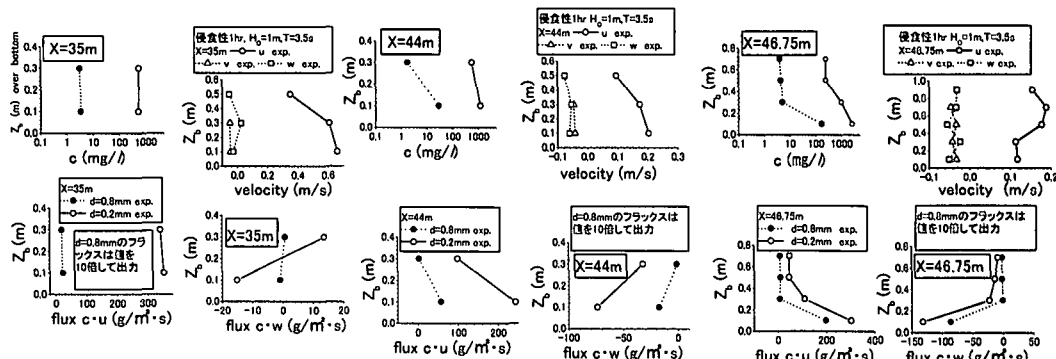


図-5 侵食性波浪作用時の波高分布と地形変化



(a) 底面上 10 cm の高さにおける岸沖分布



(b) 鉛直分布

図-6 侵食性波浪による粒径別浮遊砂濃度・定常流速・フラックスの特性 (侵食性 1hr)

向であるが、粗砂・細砂とも $X=10$ m の地点で岸向きに大きな値に変化している。

(3) 侵食性波浪による粒径別浮遊砂特性

つぎに、図-5 に、侵食性波浪の浮遊砂計測時の波高分布と海底地形変化を示す。このケースでは、 $X=40$ m 付近にバーが形成され始め(波作用後 1hr)、バーは発達しながら次第に沖側へ移動し(3hr)、図面の掲載は省略するが、20hr 後には $X=50$ m の地点まで沖側へ 10m 程度移動した。このバーの表層には、張ら(1994; 1995; 1996)と同様に粗砂が堆積した。この間、前ケースで汀線付近に形成されたバームは徐々に岸側に移動しているが、表層に堆積した粗砂が流出することはなかった。このケースでは plunging 碎波であった。

図-6 に、侵食性波浪 1hr 作用時の粒径別時間平均浮遊砂濃度、定常流速、粒径別時間平均フラックスの代表例を示す。図(a)が砂面上 10 cm の高さにおける岸沖分布、図(b)が碎波帯内の代表地点における鉛直分布である。図中、 u 、 v 、 w は岸沖方向・水路奥行き方向・鉛直方向流速であり、 u は沖向き正、 v は図-5 に対して紙面表向き正、 w は鉛直上向き正であり、フラックスの向きも流速の向きの定義に準ずる。図-6 によると、侵食性波浪の場合は、碎波帯内外に渡って全体的に粗砂・細砂の濃度が高く、 $X=40\sim 50$ m の区間の碎波点付近では、粗砂の濃度が最大値を示す。碎波点付近における濃度の最

大値自体は、堆積性波浪時の碎波点付近における濃度の最大値に比べて小さくなっている。これは、堆積性波浪時には $X=10\sim 15$ m の浅海域で碎波が生じるため、碎波による大規模渦が減衰拡散することなく直接海底面に到達し、より顕著に砂を巻き上げるものと推察される。この場合のフラックスは、 $X=20$ m から沖側では沖向きの大きい値、 $X=10$ m の地点では岸向きであった。

碎波帯内のフラックスの鉛直分布を見ると、バー形成点のやや沖にあたる $X=46.75$ m での粗砂と細砂のフラックスを水深方向に積分すると、各々 $0.003 \text{ cm}^3/\text{cm/s}$ と $0.6 \text{ cm}^3/\text{cm/s}$ 程度の浮遊漂砂量となる。また、この地点では沖向きフラックスの半分程度の値の鉛直下向きフラックスも存在している。これは、海底斜面に沿って斜め下沖向きに浮遊砂が移動していることを意味している。バーの岸側にあたる $X=35$ m では、粗砂・細砂の濃度やフラックスが海底面から上に行っても、あまり低減せず、水深方向にほぼ一様に沖向きのフラックスとなっているが、鉛直方向のフラックス成分は小さい。

4. 浮遊砂の粒径別巻き上げ量と濃度鉛直分布のモデル化

(1) 粒径別巻き上げ量のモデル化

以上の実験結果に基づき、まず混合海底砂の粒径別巻き上げ量(基準点濃度)のモデル化を試みる。上記の堆

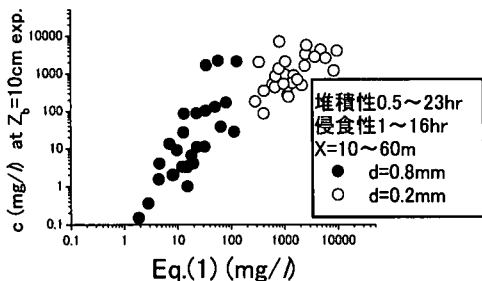


図-7 粒径別巻き上げ量の算定式による実験結果の再現例

積性および侵食性波浪による実験結果とも、細砂・粗砂とも巻き上げ量は各々の粒径と底面流速に応じたシールズ数の1.5乗に比例していた。また、細砂・粗砂とも各々のシールズ数が0.05よりも大きくなると巻き上げが生じることもわかった。さらに、粗砂および細砂の巻き上げ量と各々の粒径砂が100%の場合の既往の巻き上げ量（柴山ら，1994）との比は、海底砂面表層の粗砂と細砂の混合率に対応していることも明らかとなった。

そこで、まず上記の特性を考慮してモデル化を試みる。N種類の粒径砂から構成される混合海底砂におけるi番目の粒径 d_i に対する粒径別巻き上げ量 p_i （基準点濃度 c_{0i} ）の算定式として次式を提案する。

$$c_{0i} = \frac{p_i}{w_{si}} = P_i A' \rho_w \frac{(\Psi_i - 0.05)^{1.5} \nu}{\sqrt{(\rho_s / \rho_w - 1) d_i} 100 d_i} \dots (1)$$

ここに、 w_{si} は粒径 d_i に対する沈降速度、 ρ_w と ρ_s は水と砂の密度、 P_i は海底砂面表層の粒径 d_i の砂の混入率、 Ψ_i は粒径 d_i の砂のシールズ数、 ν は水の動粘性係数である。 A' は係数で3.0の値とした。また、ここでは便宜上基準点濃度を与える位置は海底砂面上各々の粒径の100倍の高さとした。

図-7は、堆積性および侵食性波浪による碎波帯内外における底面付近の粗砂と細砂の時間平均濃度の実験値と本提案式(1)による算定値との比較例である。式(1)中のシールズ数 Ψ_i の算定に用いる底面流速振幅には実測値を入力した。なお、海底砂面表層の粗砂と細砂の混合率は、海底砂面計測とコアサンプリングを併用して算定した海底砂の粗砂と細砂の混合率分布図（田中ら，2000）から、対応する地点の海底砂面表層の混合率を読み取って算定式に入力した。図-7によると、実験結果と式(1)との相関は高く、粗砂と細砂の巻き上げ量（基準点濃度）を適切に推定できるものと判断できる。

(2) 粒径別濃度鉛直分布のモデル化

つぎに、以下に示す3タイプの濃度鉛直分布モデルを構築して粗砂と細砂に対して代表地点に対し適用性を比較検討する。

1) MODEL 1: 碎波による渦粘性の鉛直分布を考慮

侵食性1hr $H_0=1m, T=3.5s$
底面粗砂混入率 70% at $X=10m$, 30% at $X=20m \sim 60m$
● $d=0.8mm$ exp. ○ $d=0.2mm$ exp.
— $d=0.8mm$ model1 — $d=0.2mm$ model1
- - $d=0.8mm$ model2 - - $d=0.2mm$ model2
×× $d=0.8mm$ model3 ×× $d=0.2mm$ model3

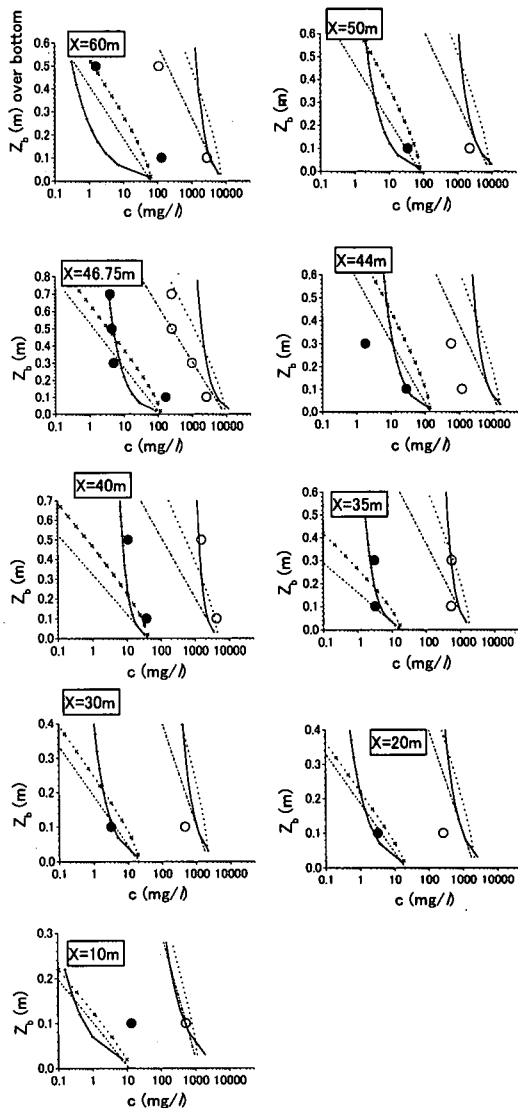


図-8 粒径別浮遊砂濃度の鉛直分布のモデルによる再現例（侵食性1hr）

したモデル

柴山ら（1994）にならい、鉛直拡散係数が海底面からの鉛直高さに比例し渦粘性係数の関数になると仮定することにより、時間平均鉛直1次元拡散方程式とその解を混合粒径砂の場合に拡張して以下のように算定する。

$$c_i(z_b) w_{si} + \varepsilon_{ssi} z_b \frac{\partial c_i(z_b)}{\partial z_b} = 0 \dots (2)$$

$$c_i(z_b) = c_{0i}(100d_i/z_b)^{w_{si}/M_i'} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 z_b は海底砂面上の鉛直高さ、 $\epsilon_{si}(=M_i')$ は粒径別渦粘性係数で一樣粒径砂に対する柴山ら (1994) の提案式を粗砂と細砂に適用できるように次式のように修正する。

$$\epsilon_{si} = M_i' = k_1 u_{*i} + k_2 k_3 k_4 (H^3 g / 4 Th)^{1/3} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 u_{*i} は粒径 d_i の砂に対する底面摩擦速度、 g は重力加速度、 H は波高、 T は周期、 h は水深、 $k_1(=0.04)$ および $k_2(=0.216)$ は plunging 型碎波の場合の係数であり、 $k_3(=0.3 \sim 1.0)$ は碎波点から碎波帯内に渡り変化する係数である (柴山ら, 1994)。 k_4 は混合粒径砂のために新たに導入した係数であり、碎波による乱れが粒径別拡散に及ぼす影響を考慮して粗砂 1.0、細砂 0.4 とした。

2) MODEL 2: 移流・拡散混合モデル

Nielsen (1992) および Ikeno・Shimizu (1998) にならい、時間平均鉛直 1 次元拡散方程式に鉛直移流効果を付加した式 (5) およびその解式 (6) を混合粒径砂に対して拡張する。

$$w_{si} \frac{\partial c_i(z_b)}{\partial z_b} + \epsilon_{si} \frac{\partial^2 c_i(z_b)}{\partial z_b^2} + \frac{p_i}{L_{si}} \exp(-z_b/L_{si}) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$c_i(z_b) = c_{0i} \left\{ \frac{1}{1 - \frac{\epsilon_{si}}{w_{si} L_{si}}} \exp(-z_b/L_{si}) + \left(-\frac{1}{1 - \frac{\epsilon_{si}}{w_{si} L_{si}}} \right) \exp(-w_{si} z_b / \epsilon_{si}) \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 ϵ_{si} と L_{si} は粒径 d_i の砂の鉛直拡散係数と鉛直移流スケール長であり、次式を援用する (Nielsen, 1988)。

$$\epsilon_{si} = w_{si} \zeta [1.24 \exp(-40(w_{si}/\hat{u}_b)^2) + 0.2] \dots\dots\dots (7)$$

$$L_{si} = \begin{cases} 0.15\pi a f \zeta / w_{si} & ; 2\pi a f / w_{si} \leq 18 \\ 1.4 \zeta & ; 2\pi a f / w_{si} \geq 18 \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 ζ は砂速高さであり、ここでは実験結果から 0.1 m とする。 $\hat{u}_b$ は底面岸沖流速の振幅、 a は水位振幅、 f は入射波の周波数である。

3) MODEL 3: 拡散のみのモデル

上記式 (5) および式 (6) 中の移流寄与項を省略することにより ($L_{si} \rightarrow 0$, $\epsilon_{si}/L_{si} \rightarrow \infty$), 通常の拡散のみのモデルとして算定する。

(3) 実験結果の再現

図-8 は、侵食性波浪による碎波帯内外代表地点における粒径別濃度鉛直分布の 3 タイプのモデルによる再現例である。図-8 によると、碎波点より沖では拡散のみのモデル、碎波点あるいはバーのやや沖では移流・拡散混合モデル、碎波帯内あるいはバーの頂点から岸にかけては渦粘性の鉛直分布を考慮したモデルが有効であることがわかる。

5. 結 論

1) 混合砂大型実験により、碎波帯内外の粒径別浮遊砂濃度・フラックスの特性を明らかにした。

2) 粒径別巻き上げ量の算定式を提案し 3 タイプの濃度鉛直分布モデルを構築して適用性を検討した結果、碎波点より沖では拡散のみのモデル、碎波点あるいはバーのやや沖では移流・拡散混合モデル、碎波帯内あるいはバーの頂点から岸にかけては渦粘性の鉛直分布を考慮したモデルが有効である。

本実験は東京電力(株)と(財)電力中央研究所の共同研究(LAMBDA-I)として、東京大学と横浜国立大学の協力のもとに実施したものである。本実験を遂行するにあたり、東京大学港湾研究室の先生方や学生諸君および横浜国立大学の学生諸君、(株)シーアールエスおよび(株)八重州土木技術センターに多大なご協力を頂きました。また、東京工業大学、建設省土木研究所、運輸省港湾技術研究所、五洋建設技術研究所の方々から計測器を貸して頂きました。以上の関係者に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 池野正明・清水隆夫・久保道仁・定森良夫 (1998): 波の多方向不規則性と浮遊漂砂を考慮した 3 次元海浜変形数値予測モデルの開発と検証, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 531-535.
- 片山裕之・岡安章夫・永田達也 (1999): 連続採水による現地碎波帯浮遊砂濃度および粒度分布の時系列変化, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 571-575.
- 柴山知也・Winyu. Rattanapitikon・岡安章夫 (1994): 碎波帯内の浮遊漂砂量の算定モデル, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 431-435.
- 田中正博・井上亮・佐藤慎司・磯部雅彦・渡辺 晃・池野正明・清水隆夫 (2000): 2 粒径混合砂を用いた大型海浜断面実験と粒径別漂砂量の算出, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 551-555.
- 張 達平・田中茂信・山本幸次 (1994): 大型 2 次元水路による海浜砂の分級機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 361-365.
- 張 達平・山本幸次・佐藤慎司・田中茂信 (1995): 混合砂の分級過程に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 481-485.
- 張 達平・佐藤慎司・戸崎正明・田中茂信 (1996): 混合砂海浜の断面変形と粒径別漂砂量に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 461-465.
- 張 達平・佐藤慎司・山本幸次・田中茂信 (1997): 不規則波による浮遊砂輸送とバー地形の発達に関する大型実験, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 481-485.
- Ikeno, M. and T. Shimizu (1998): Characteristics of suspended sediment transport in the surf zone of irregular waves and their reproduction by a cross-shore beach deformation model, Proc. 26 th Int. Conf. on the Coastal Eng., pp. 2317-2330.
- Nielsen, P. (1988): Three simple models of wave sediment transport, Coastal Eng., Vol. 12, pp. 43-62.
- Nielsen, P. (1992): Combined convection-diffusion modeling of sediment entrainment, Proc. 23 rd Int. Conf. on the Coastal Eng., pp. 3202-3215.