

砕波帯内の浮遊漂砂量の算定モデル

柴山 知也*・Winyu Rattanapitikon**・岡安 章夫***

1. はじめに

地形変化を引き起こすような漂砂のうち、砕波帯内では浮遊漂砂の割合が大きくなることが知られている。特に砕波点付近では浮遊砂濃度の非常に高い領域が形成されることが指摘されている (Shibayama et al., 1986) が、現行の地形変化モデルには砕波帯内の浮遊漂砂の移流の効果が正確に、かつ明示的に取り込まれているとは言い難い。そこで本研究では、浮遊漂砂濃度の鉛直分布と砕波帯内定常流 (undertow) の分布より、浮遊漂砂量を正確に推算できる数値予測モデルを提案する。モデルの検討にあたっては、小型の造波水路を用いた計測結果のみではなく、大型水路を用いた実規模実験の計測結果も含めて検討を行い、より広範なスケールに適用できるモデルの提示を目指した。さらに、この浮遊漂砂量予測モデルと既存の掃流漂砂量予測モデルを組み合わせることにより全漂砂量の算定を試み、実測結果との比較検討を行った。

2. 浮遊漂砂領域と掃流漂砂領域

本モデルにおいては、全水深を底面波動境界層外縁を境界として2つの領域に区分し、上層での漂砂を浮遊漂砂と定義する。下層においては、これまで一般的に分類されている浮遊砂と掃流砂が混在するものと考えられるが、ここではこれらをまとめて便宜的に掃流砂と呼ぶことにする。

底面境界層外縁は、砕波帯内では砂漣が発達しないと仮定し、Jonsson (1966) の

$$\frac{30\delta_s}{k_s} \log \frac{30\delta_s}{k_s} = 1.2 \frac{A_b}{k_s} \quad \dots\dots\dots (1)$$

を用いて決定した。ここで δ_s は境界層の厚さ、 A_b は底面軌道流速振幅である。また、 k_s は Nikuradse の相対粗度で、ここでは Nielsen (1992) にならい

$$k_s = 170(\phi_{2.5} - 0.05)^{0.5} d \quad \dots\dots\dots (2)$$

とした。 ϕ は Shields 数、 d は底質粒径である。

3. 浮遊漂砂の算定

浮遊漂砂量は、浮遊砂濃度 $c(z, t)$ と底質移動速度 $u_s(z, t)$ の積として次のように表すことができる。

$$q = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h c(z, t) u_s(z, t) dz dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 T は周期、 h は水深、 z と t はそれぞれ鉛直、時間座標である。

しかしながら、時間変動する $c(z, t)$ と $u_s(z, t)$ を正確に評価することは難しく、既存の多くのモデルも浮遊漂砂量を時間平均量から求めている。そこで、本モデルでも浮遊砂濃度として時間平均した濃度 $C(z)$ を、底質移動速度として定常流速 (undertow) $U(z)$ を用いる。また、前節で述べた通り、本モデルでは浮遊砂を底面波動境界層外縁より上の領域についてのみ考慮するので、積分の下限を境界層外縁 δ_s とし浮遊漂砂量を

$$q = \int_{\delta_s}^h C(z) U(z) dz dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

で評価する。

3.1 浮遊砂の鉛直分布

まず、時間平均の浮遊砂濃度の推定法については Shibayama・Rattanapitikon (1993) のモデルを用い、基準点濃度と渦動粘性係数から算定した。浮遊砂の濃度分布は1次元の拡散方程式を用いて

$$cw + \epsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

と表せる。ここで、 w は底質の沈降速度、 ϵ_s は拡散係数で渦動粘性係数に比例するものと仮定する。この渦動粘性係数は岡安ら (1989) にならい、砕波帯内では鉛直座標の1次関数とし、砕波によるエネルギー逸散率 D_B を用いて評価した。

(5)式を積分すると浮遊砂濃度分布として次式が得られる。

$$c(z) = c_b \left(\frac{b}{z} \right)^M \quad \dots\dots\dots (6)$$

c_b は底面基準点 b における基準点濃度で、 $M = w/\epsilon_{sb}$ である。ここで ϵ_{sb} は砕波帯内での拡散係数であり、底面と砕波による上方からの乱れの影響の両者を考えて以下の

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 学生会員 M.Eng. 横浜国立大学大学院 工学研究科

*** 正会員 工博 横浜国立大学助手 工学部建設学科

ように定めた。

$$\epsilon_{sb} = (k_1 u_* + k_2 k_3 D_b^{1/3}) z \dots\dots\dots (7)$$

u_* は底面摩擦速度, k_1 は定数 (=0.04), k_2 は碎波の影響を代表する係数で, 碎波の形態 (崩れ波碎波, 巻き波碎波等) によって別々の値 (0.144~0.45) をとることとなる。また, k_3 は碎波点で 0.3, 碎波帯での outer region と inner region の境界であるボア形成点で 1 となる補正係数である。

本研究では, 底質粒径の 100 倍の点を浮遊砂濃度の基準点とすることにより, 分布曲線を仮定することなく実測結果からの内挿を用いて基準点濃度を評価することができる。次元解析及び実測データとの回帰分析により, Shibayama・Rattanapitikon (1993) 同様, 基準点濃度を算定する式として

$$c_b = \frac{10}{3} \frac{(\phi - 0.05)\nu}{b\sqrt{(s-1)gd}} \dots\dots\dots (8)$$

を用いる。ここで ν は動粘性係数である。

以上のようにして算定した浮遊砂濃度と鹿島ら (1983) の大型水路での浮遊砂濃度の実測値とを比較したものが図-1 である。計算値と実測値の一致度は良く, 上述のモデルが現地規模での現象に適用可能であることを示している。また, Shibayama・Rattanapitikon (1993) は先にこの浮遊砂濃度分布の算定式がスケールの小さい現象に対して有効であることを示しており, 今回の比較によってこのモデルによってスケールの異なる現象を统一的に評価できることが確かめられた。

3.2 碎波帯内定常流の分布

岡安ら (1989) は碎波帯内での剪断応力と渦動粘性係数の鉛直分布を z の 1 次関数として表し, エネルギー逸散率 D_b を用いて評価した。これを用いると碎波帯内の定常流 (undertow) の分布として以下の式が得られる。

$$U = k_4 \rho^{1/3} D_b^{1/3} \left[k_5 \left(\frac{z}{d_i} - \frac{1}{2} \right) - 0.22 \left(\ln \frac{z}{d_i} + 1 \right) \right] + U_m \dots\dots\dots (9)$$

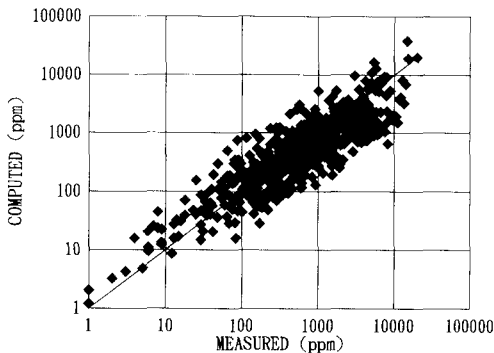


図-1 大型水路における碎波帯内の浮遊砂濃度の計算値と実測値 (鹿島ら, 1983) との比較

ここで, d_i は波谷での水深, U_m は波谷より下での断面平均定常流の値である。また, k_5 は碎波点で 0, ボア形成点で 1 となる補正係数である。

断面平均定常流 U_m は Svendsen (1984), Stive・Wind (1986), Fredsøe・Deigaard (1992) 等を参考に実測波高を用いて

$$U_m = 0.77 \frac{B_0 \sigma H^2 \coth(kh)}{h} + k_5 \left(0.1 \frac{cH}{h} \right) \dots (10)$$

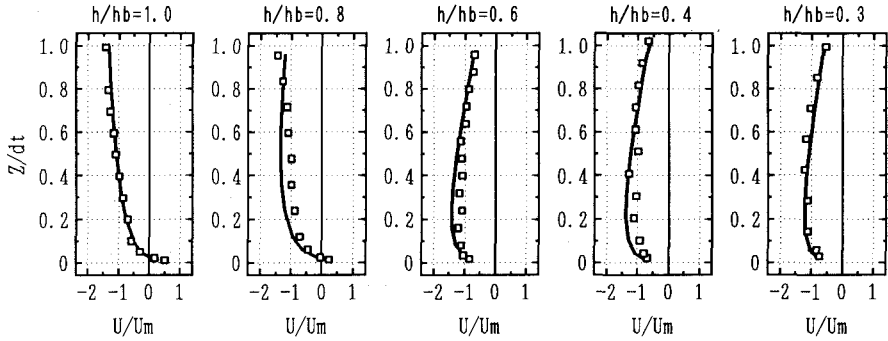
で評価した。また, D_b も波高変化より計算した。

図-2 は本モデルによる碎波帯内定常流の計算値と Okayasu et al. (1988) および灘岡ら (1982) による実験室規模での実測値との比較である。両者の一致は良好である。また, 図-3 は鹿島ら (1983) による現地スケールでの実験における断面平均定常流速の実測値と計算値との比較である。図中, 星印で示してあるのが鹿島らによる実測値で菱形印で示したものが計算値である。鹿島らの実験では鉛直方向の測点数が少ないため鉛直分布の比較はできないが, 断面平均定常流に関してはここでも両者の一致は良いといえる。これらの図から, 定常流速算定についても本モデルが広範なスケールにおいて有効であると考えられる。

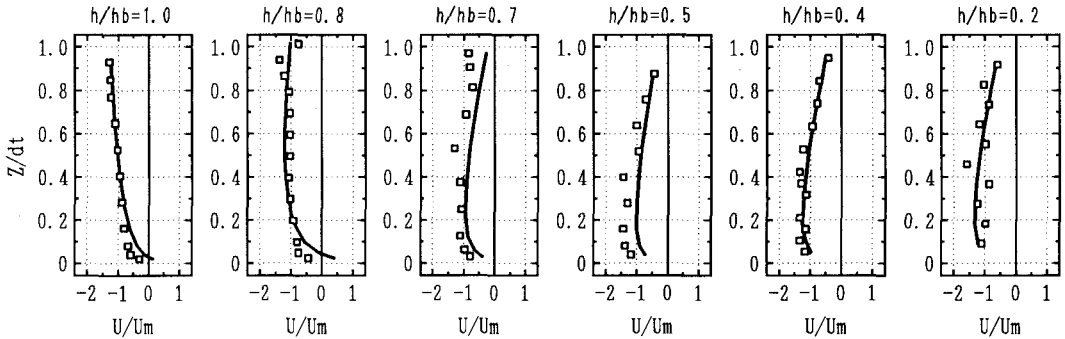
3.3 浮遊漂砂量の評価

以上の浮遊砂濃度分布と定常流分布を (4) 式に代入することにより各断面における浮遊漂砂総量を求めた。本モデルによる浮遊漂砂量の算定結果と地形変化から求めた全漂砂量の実測値との比較を図-4 に示す。図-4(a) は鹿島ら (1983) による大型実験水路における計測結果との比較であり, 図-4(b) は Shibayama・Horikawa (1985) による中型実験水路での全漂砂量の計測結果との比較である。実験開始後の経過時間毎に別の図とし, 本モデルによる浮遊砂輸送量を底面境界層外縁から水表面まで積分した浮遊漂砂総量と地形変化から求めた全漂砂量の両者を示してある。大型水路では特にこの二量が一致しており, 現地スケールでの漂砂に関しては相対的に底面極近傍での漂砂の全漂砂量に対する寄与が小さいことが推測されるとともに, 本モデルの有用性が確認できる。

本モデルでは Shibayama・Rattanapitikon (1993) の濃度分布式を用いているが浮遊砂輸送量は底面波動境界層外縁まで積分している。積分の下限を Shibayama・Rattanapitikon 同様, 底質粒径の 100 倍としたときの浮遊漂砂量の相違は図-4(a) のケースで 20~30%, 図-4(b) のケースでも高々 3 倍程度であり, 浮遊砂濃度を境界層外縁まで外挿し積分することに本質的な問題はないと考えられる。



(a) 岡安ら (1988) の実測値との比較



(b) 灘岡ら (1982) の実測値との比較

図-2 実験室規模における砕波帯内定常流速の計算値と実測値との比較

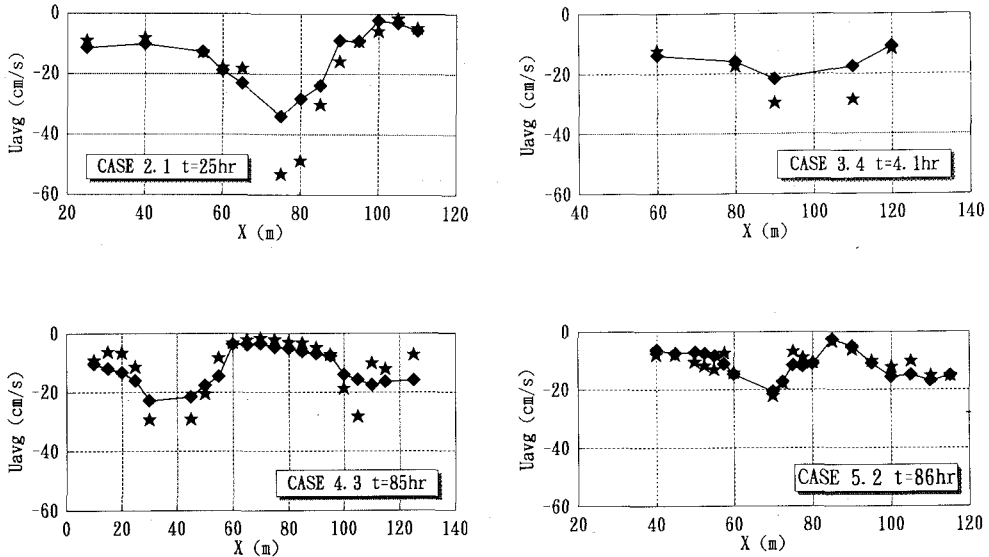
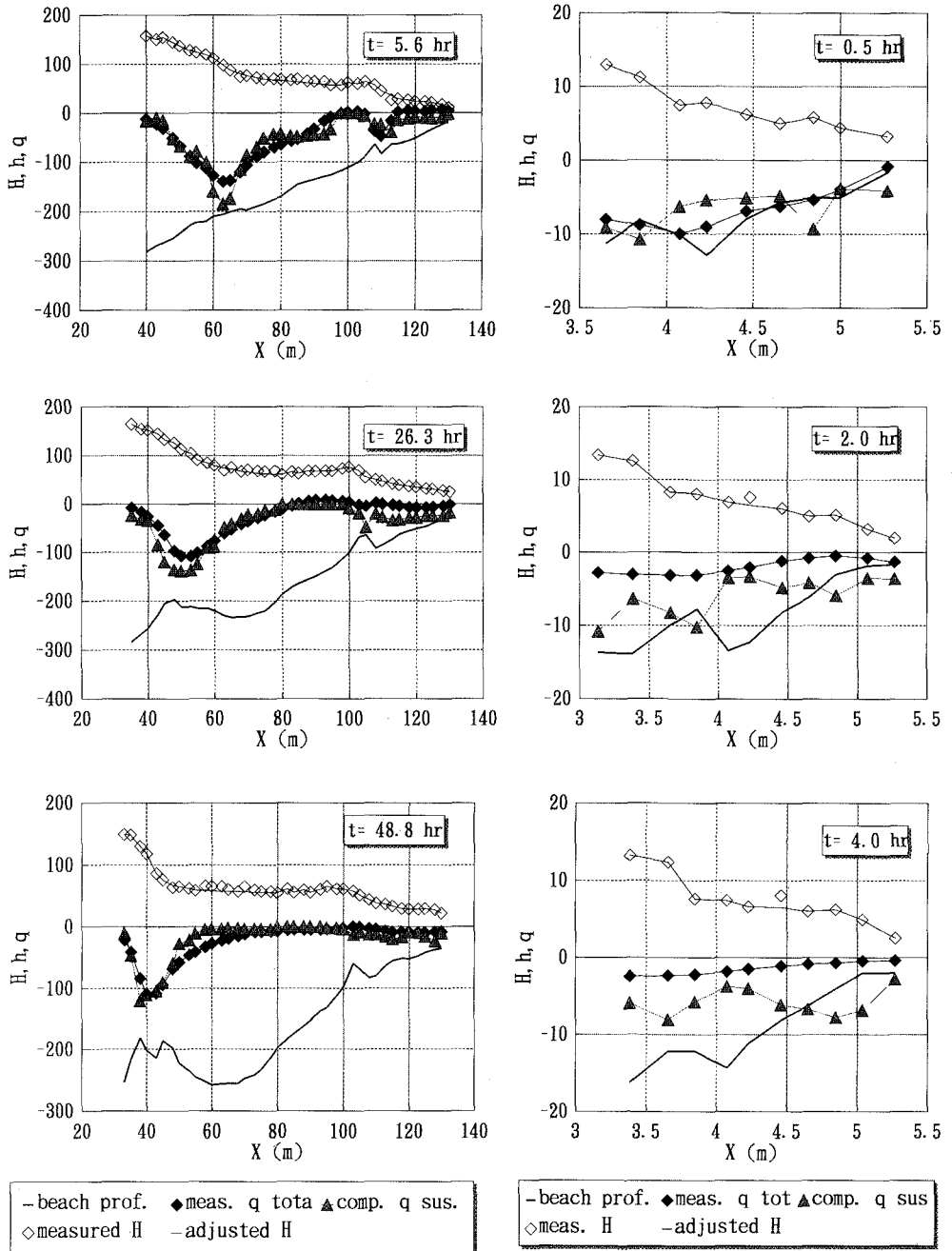


図-3 大型水路における断面平均定常流の計算値と実測値 (鹿島ら, 1983) との比較



(a) 大型水路 (鹿島ら, 1983) における比較

(b) 実験室規模 (Shibayama・Horikawa, 1985) における比較

図-4 浮遊漂砂量の計算値と全漂砂量の実測値との比較

4. 全漂砂量の算定

図-4(b)に見られるように、規模の小さな実験では相対的に底面での漂砂による寄与が大きくなることが推測される。そこで本研究では、既存の漂砂量式を援用して

掃流砂量を評価し、これと上記のモデルとを組み合わせると全漂砂量を算定することを試みる。

掃流漂砂量の算定には渡辺 (1981) のモデルで係数を2とした式を用いた。渡辺モデルでは一般に係数として7を用いるが、これは掃流砂のメカニズムを基礎とした

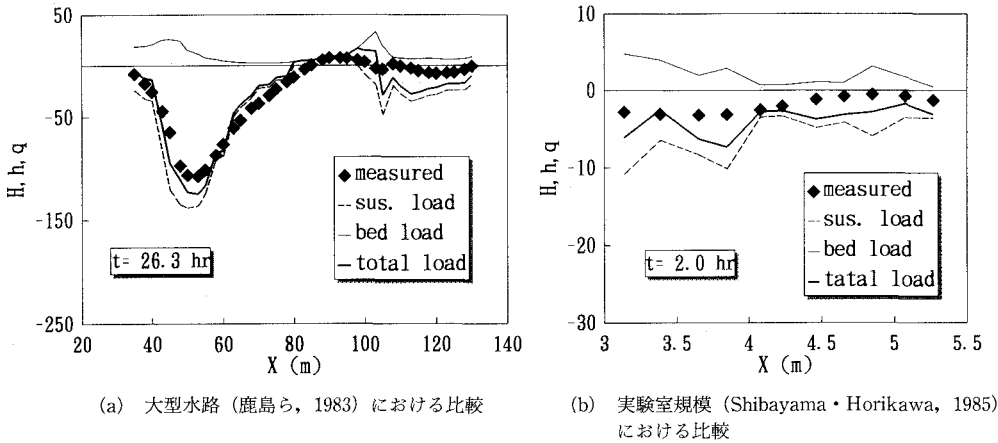


図-5 全漂砂量の計算値と実測値との比較

全漂砂量の予測モデルとなっているため、今回はこのうちの仮定の掃流砂の寄与分を与えるものとして、係数2を採用した。

以上のようにして算定した全漂砂量と先に図-4に示した実測データとを比較したものが図-5である。大型水路に対しては計算された掃流砂が小さく、計算結果は図-4に示したものとさほど変わらない。これは底面近傍での漂砂の寄与が小さいとした前節での推測を裏付けるものと考えられる。一方、実験室規模の場合は計算された冲向きの掃流漂砂がかなり大きく、これにより計算結果がかなり改善されていることがわかる。この場合も前節での浮遊漂砂の推算がほぼ妥当であることが裏付けられた。

また、初期のデータに関してswash zoneで両漂砂量の不一致が見られた。これは本研究で対象とした以外の砂移動機構がswash zoneに存在しているためと考えられる。

5. おわりに

砕波帯内の浮遊砂輸送量を精密に見積るために、浮遊砂鉛直分布について、新たな推定式を提案した。また砕波帯内定常流(undertow)の簡便な推定式を提案した。これらの式は現地規模のデータを含めて過去の実測データを精度良く再現でき、またこれらの値を用いて砕波帯内での砕波点の近傍を含めた浮遊砂輸送量を精度良く推定することができた。

参考文献

岡安章夫・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 砕波帯におけるエネルギー

ギー収支と戻り流れのモデリング, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 31-35.

鹿島達一・斉藤昭三・清水隆夫・丸山康樹・長谷川 寛・榊山 勉 (1983): 大型造波水路による岸沖漂砂の実験, 電力中央研究所土木研究所環境部データ集, No. 1-8.

灘岡和夫・近藤隆道・田中則男 (1981): LDAを用いた砕波帯内流速場に関する実験的研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 24-28.

渡辺 晃 (1981): 海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 285-289.

Fredsoe, J., and R. Deigaard (1992): Mechanics of Coastal Sediment Transport, Adv. Series on Ocean Eng., Vol. 3, World Scientific, USA, 369 p.

Jonsson, I. G. (1966): Wave boundary layer and friction factors, Proc. 6th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 127-148.

Nielsen, P. (1992): Coastal bottom boundary layers and sediment transport, Adv. Series on Ocean Eng., Vol. 4, World Scientific, USA, 324 p.

Okayasu, A., T. Shibayama and K. Horikawa (1988): Vertical variation of undertow in the surf zone, Proc. 21st Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 478-491.

Shibayama, T., A. Higuchi and K. Horikawa (1986): Sediment transport due to breaking waves, Proc. 20th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1509-1522.

Shibayama, T. and K. Horikawa (1985): Numerical model for two-dimensional beach transformation, Proc. of JSCE, No. 357/II-3, pp. 167-176.

Shibayama, T. and W. Rattanapitikon (1993): Vertical distribution of suspended sediment concentration in and out surf zone, Coastal Eng. in Japan, JSCE, Vol. 36, No. 1, pp. 49-65.

Stive, M. J. F. and H. G. Wind (1986): Cross-shore mean flow in the surf zone, Coastal Eng., Vol. 10, pp. 325-340.

Svendsen, I. A. (1984): Mass flux and undertow in the surf zone, Coastal Eng., Vol. 8, pp. 347-365.