

砕波帯内における砂移動機構と戻り流れに関する実験的研究

黒岩正光*・野田英明**・広川 啓***

1. はじめに

砕波帯内の底質や物質輸送に影響を与える要因の一つとして、戻り流れが存在する。計測技術の発達に伴ってその特性が実験的に明らかにされてきた。また、戻り流れの鉛直分布は、Svendsen (1984) をはじめ、岡安ら (1987), 平山 (1991) などによって解析的に求められている。岡安ら (1987) は、実験によって砕波帯内のレイノルズ応力および渦動粘性係数の鉛直分布を求め、定常流の鉛直分布を算定しているし、平山は Longuet-Higgins (1953) の conduction equation に基づいて戻り流れを算定している。これらの戻り流れ算定法のアプローチはそれぞれ異なり、水面や底面の境界条件の与え方によって戻り流れの分布は大きく異なるようである。底面近傍の戻り流れおよびその鉛直分布の評価は底質移動に関して非常に重要な要素であると考えられる。また、海浜変形予測モデル等に砕波帯内の漂砂現象を取り入れるためにも比較的簡単で精度良い計算手法の開発が要求される。

本研究では砕波帯内における底面近傍の冲向き定常流速の特性を実験的に明らかにしようとするもので、砕波帯内の砂粒子移動と戻り流れの関係についても検討する。またトロフレベル以下の定常流速の岸沖ならびに鉛直分布について綿密に計測し、実験から得られた結果と従来の研究成果から底面近傍における定常流算定式を提案し、さらに、Svendsen (1984) の戻り流れのモデルに基づいて、得られた底面定常流算定式を用いて理論を修正し、実験結果と比較し検討する。

2. 実験装置および方法

実験は、長さ 23.1 m 幅 0.5 m、高さ 0.6 m 一部両面ガラス張りの鋼性 2 次元波動水槽を用いて行った。水槽の一端にはフラッター式造波機が、他端には 1/15 勾配斜面が設置してある。なお波動水槽の沖側一様水深部の水深は 40 cm とした。水粒子速度の測定は同軸型レーザード

ップラー流速計 (DISA 製) を、波高は容量式波高計を用いて測定した。実験条件は表-1 に示すとおりで、巻き波および崩れ波を含めた 8 ケースである。換算沖波波形勾配の小さい順に実験ケースを決定した。表中に示す砕波形式は Battjes (1974) の surf similarity parameter を用いて分類したものであって、目視による結果と一致する。図-1 は本実験で用いた座標系の一例で、図中に示す●印は流速測定点を表す。測定間隔は岸沖方向に砕波点より岸側へ 10~20 cm とし、測定可能な汀線近傍までの 8~12 の測線をとった。鉛直方向には底面から 2, 5 および 10 mm 上の点を計測した。1 ケースあたり 24~36 点

表-1 実験条件

実験 ケース名	周期 T (sec)	波高 H (cm)	砕波 水深 h_b (cm)	砕波 波高 H_b (cm)	沖波波 形勾配 H_b/L_0	砕波形式
CASE 1	2.01	4.2	7.4	8.4	0.007	Plunging
CASE 2	1.70	5.0	8.2	6.3	0.012	
CASE 3	1.51	5.0	6.8	8.5	0.015	
CASE 4	1.31	6.9	8.9	8.8	0.028	Plunging +
CASE 5	1.09	5.2	5.4	6.4	0.030	
CASE 6	1.00	5.4	6.8	6.2	0.037	Spilling
CASE 7	1.29	9.8	9.7	11.0	0.041	
CASE 8	1.01	13.1	17.6	13.7	0.088	

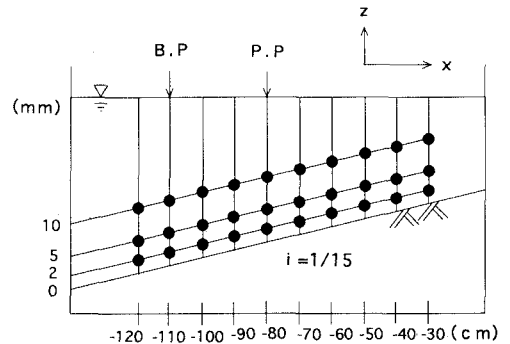


図-1 流速測定点

* 正会員 工修 鳥取大学助手 工学部
 ** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部
 *** 正会員 工修 東洋建設 鳴尾研究所

の測点を設けた。さらに、実験条件の中で代表的な巻き波 (CASE 1) および崩れ波 (CASE 8) の 2 ケースについては砕波帯外も含め、詳細に岸沖方向に 3 cm およびトロフレレベル以下の鉛直方向に 1 あるいは 2 cm 間隔で流速を測定した。データはサンプリング周波数 100 Hz で 20 波分をデジタルレコーダー (TEAC 製) に記録した。得られた流速は位相平均し、さらに一周期平均することにより定常流速を算出した。

本研究では沖向き定常流速に着目して研究を進めるため、水平方向流速のみについて取り扱い、また乱れに関する解析結果は別の機会に発表する予定である。

3. 底面近傍の戻り流れと砂移動

3.1 底面戻り流れ

まず、砕波形式別に定常流速の岸沖分布について調べた。図-2(a), (b) および (c) はそれぞれ巻き波型、巻き一崩れ遷移型および崩れ波型の底面上 2 mm の位置における水平方向の定常流速の岸沖分布を表したものであ

る。各図の横軸は、各測点の位置 x (汀線からの距離) を砕波点距離 x_b で除して無次元化したもので、縦軸は定常流速を砕波点における長波の波速で除した無次元量で表されている。図中に示す P.P. は目視による水塊突っ込み点を表す。これらの図から明かなように、巻き波型砕波の場合、各ケースとも P.P. 付近から定常流速は急激に大きくなり $x/x_b=0.5\sim 0.6$ 付近でピーク値を取るようである。一方、崩れ波型砕波の場合、定常流速は砕波点から次第に大きくなり、 $x/x_b=0.6$ 付近でピーク値をとることがわかる。また、これらの図を比較すると砕波形式によって砕波帯内の沖向き定常流速の分布形は異なることがわかる。

3.2 流速変動の skewness と砂移動

灘岡ら (1981) によって示されたように、砂粒子の移動は流速変動の Skewness (以下 Su と略記する) が密接に関連しており、 Su の増大に伴って砂粒子は岸向きに移動し、一方、砕波帯内の底面定常流速は砂粒子を沖向きに移動させる効果を持つ。そこで同波浪条件のもとで、

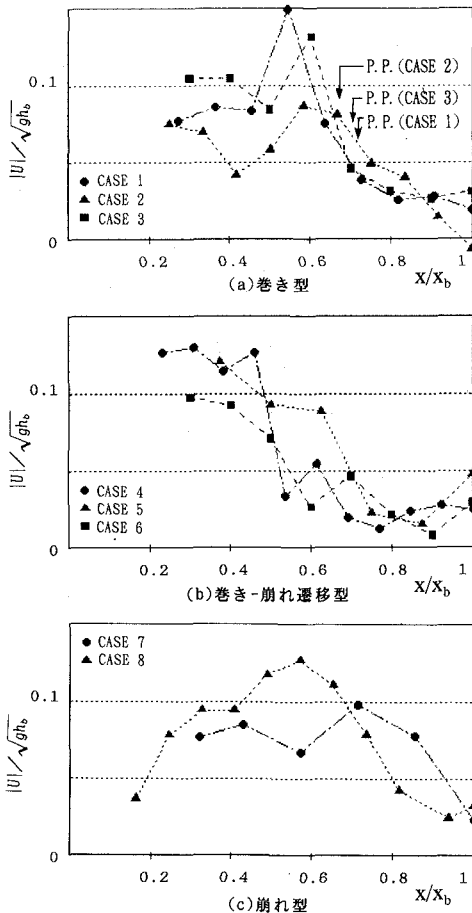


図-2 砕波帯内の定常流速の岸沖分布 (底面上 2 mm)

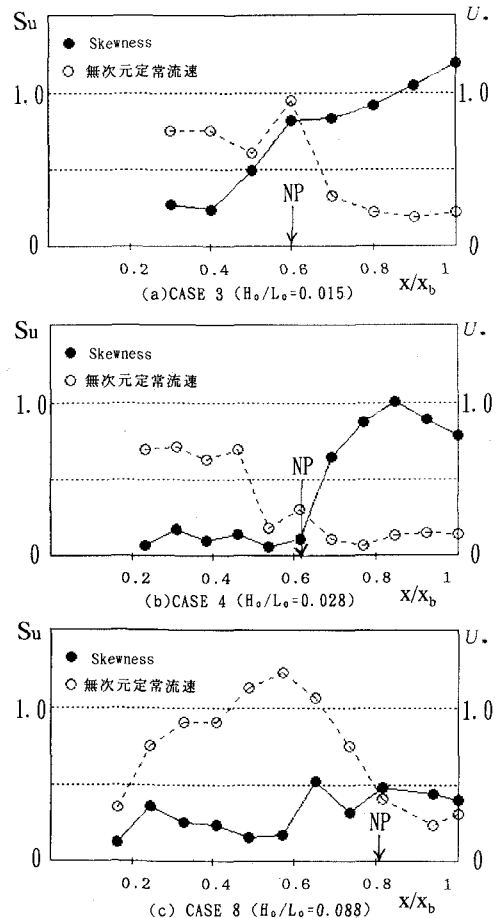


図-3 流速変動の skewness と砂粒子滞留位置

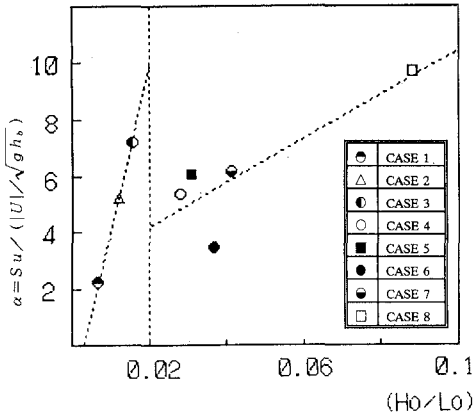


図-4 砂粒子滞留位置における α と沖波波形勾配との関係

流速測定と同時に、粒径が 0.5 mm 以下の浮遊しない砂粒子群を、砕波点より沖側に投入し目視によりその移動状況を観察した。その結果、砂粒子群は岸方向へ移動しある一箇所に滞留した。図-3(a)~(c) は、それぞれ CASE 3, 4 および 8 の実験結果から得られた、 Su および無次元定常流速 U^* の場所的变化を示すものであって、戻り流れの流速は底面上 2 mm の位置で測定されたものである。なお、図中の矢印は砂粒子群の滞留位置 (NP; Null Point) を示すものであって、NP における戻り流れの流速を、 U_N , skewness を Su_N とすると $U^* = Su_N U / U_N$ を示している。

これらの図からわかるように、CASE 3 および 4 では NP は $x/x_b = 0.6$ 付近、CASE 8 では 0.8 付近で、CASE 3 および 4 の結果と比較して、より砕波点側に存在し、波形勾配も大きく、逆に skewness は全体的に小さくなっているのがわかる。すなわち CASE 8 の場合 NP に対する skewness の効果は小さく沖向き底面定常流の効果が大きく砂粒子は砕波点よりに近づくと考えられる。

つぎに砂粒子滞留位置における Su と沖向き定常流との関係について検討した。図-4 は砂の溜る位置での Su と無次元定常流速 $U / \sqrt{g h_b}$ との比 α と沖波波形勾配 H_0 / L_0 の関係を示すものであって、この図から若干ばらつきは見られるものの $H_0 / L_0 = 0.02$ 付近を境に 2 つのパターンにわけられる。これは本実験における巻き波型と巻き-崩れ波遷移型の境界に対応している。

砕波帯内における砂粒子移動状況は砕波形式によって異なり、沖向き定常流速および流速変動の skewness と密接に関係していることがわかる。

4. 戻り流れのモデル化

4.1 底面近傍における戻り流れの岸沖分布

Svendsen (1984) の戻り流れ理論に新たな底面境界条

件式を導入するため、まず底面付近の定常流速について詳細に調べた。図-5 および 6 はそれぞれ CASE 1 および CASE 8 の底面上 2, 5 および 10 mm の位置における定常流速の岸沖分布を示したものである。この図には波峰線、波谷線ならびに平均水位をも示してある。これらの図から明かなように、底面上 5 mm と 10 mm の位置では砕波帯内外で沖向きの定常流が存在する。崩れ波 (CASE 8) の場合、定常流速は B. P. 付近から徐々に大きくなり、 $x = -150$ cm 付近すなわち目視によるボア形成点で沖向定常流は最大となる。一方、巻き波 (CASE 1) の場合、P. P. から急激に大きく、 $x = -60$ cm 付近で最大となる。これについては、柴山ら (1985), 泉宮ら (1981) も指摘している。つぎに、底面 2 mm 上の結果では、両ケースとも砕波点より沖側で顕著な岸向きの定常流が現れ、特に CASE 1 では P. P. 付近まで岸向きの定常流がみられる。これについては柴山ら (1985) の実験結果と同様に進行波による境界層が発達していると考えられ、その厚さは CASE 1 では、 $\delta = 3$ mm ($= 4\sqrt{\nu T/\pi}$: ν 動粘性係数), CASE 8 では 2 mm 程度であると予想される。また、岸向きから沖向きに定常流が変化するのは、柴山ら (1985) が指摘したように砕波による水面付近からの攪乱、組織的渦の影響が大きく、進行波による境界層がほとんど発達しなくなると考えられる。波形勾配が小さな波ほど底面付近には進行波による顕著な境界層が発達し、前述したように砂粒子がより岸側へ移動することが考えられる。

つぎに、底面上 2 mm の結果を用いて戻り流れの鉛直分布を明らかにするため、必要な境界条件式について検討する。佐藤ら (1990) が示したように、トロフレベル下の戻り流れはボア状砕波によって生じる質量流束によ

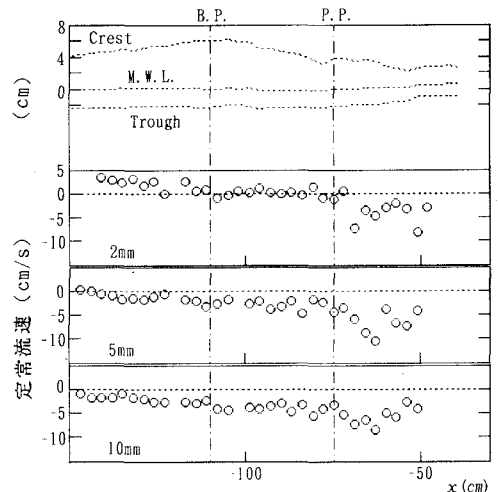


図-5 底面定常流速の岸沖分布 (CASE 1)

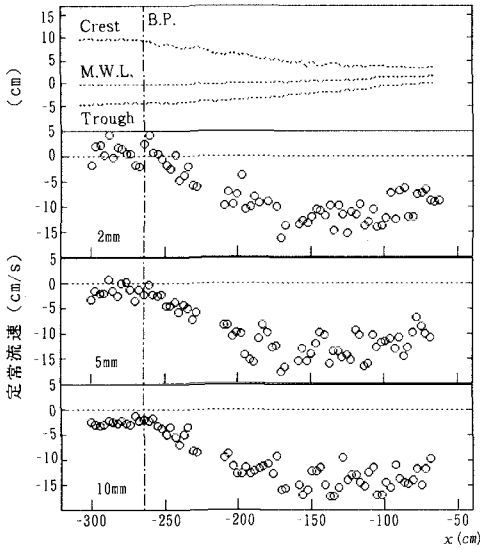


図-6 底面定常流速の岸沖分布 (CASE 8)

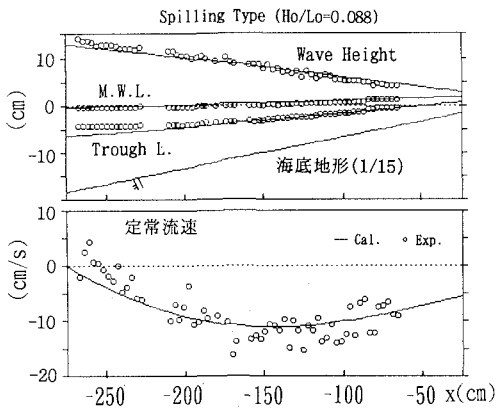


図-7 砕波帯内における波高, 波峰, 平均水位, 波谷および底面定常流速の実験値と計算値の比較

って評価でき, 底面における戻り流れもそれに規定されるとして, 底面上 2 mm の位置における流速を用いて境界条件を評価することにする。佐藤ら (1990) の式をそのまま用いることは困難で若干工夫する必要がある。そこで h/h_b の関数として, 次式を考える。

$$U_b = A_b \cdot \frac{H^2}{T^2 h} \tanh\left(\frac{h}{h_b} - 1\right) \quad (1)$$

ここに, H は波高, T は波の周期, h は実水深, h_b は砕波波水深, A_b は無次元定数で, 2.6 とした。

図-7 は崩れ波型の砕波帯内における底面 2 mm 上の沖向き定常流速, 波高, 平均水位およびトロフレベルの岸沖方向の実験値と計算値を示したもので, この図から若干ばらつきはあるものの (1) 式は実験結果とよく一致することがわかる。なお, 砕波帯内の波高分布は平均

水位の上昇を考慮した西村ら (1985) の計算手法によった。また, トロフレベルは Hansen (1990) の式, すなわち次式で計算した。

$$\eta_t = -0.5H \tanh(4.85/\sqrt{U_{tr}}) \quad (2)$$

で, ここに

$$U_{tr} = (L/h)^2 \cdot (H/h) \quad (3)$$

である。

4.2 戻り流れの鉛直分布

座標系を図-8 のようにとると, Svendsen (1984) による戻り流れの鉛直分布は, 次式で表される。すなわち,

$$U = \frac{1}{2} \alpha (z+h)^2 + \left(2 \frac{U_m - U_b}{d_{tr}} - \frac{1}{3} \alpha d_{tr}\right) (z+h) + U_b \quad (4)$$

であり,

$$U_m = -C \left(\frac{H}{h}\right)^2 \left(B_0 + \frac{A}{H^2} \cdot \frac{h}{L}\right) \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{\nu_t} \left[C^2 \left(\frac{H}{h}\right)^2 \cdot B_0 \left\{ 2 \left(\frac{C_x}{C} + \frac{(H/h)_x}{H/h} \right) + \frac{B_{0x}}{B_0} \right\} + g \frac{\partial b}{\partial x} \right] \quad (6)$$

で表される。ここに, U_b は底面流速, C は波速, d_{tr} は底面からトロフレベルまでの距離, L は波長, b は平均水位である。 A は無次元定数で 0.9 とする。添え字の x は微分を表す。なお, α の計算は差分によって求めた。 ν_t は水深方向に一定な渦動粘性係数で, 土屋ら (1986) が用いた算定式で評価する。また, B_0 は

$$B_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{\eta}{H}\right)^2 dt \quad (7)$$

で定義される値で, Hansen (1990) が提案した次式を用いて評価する。すなわち,

$$B_0 = B_{0b} \left[1 - \alpha \left(b - \frac{h}{h_b} \right) \left(1 - \frac{h}{h_b} \right) \right] \quad (8)$$

であり, ここに,

$$\alpha = (15\xi_{00})^{-1} \quad (9)$$

$$b = 1.3 - 10(\xi_0 - \xi_{00}) \quad (10)$$

$$\xi_0 = h_x / \sqrt{H_0/L_0} \quad (11)$$

$$\xi_{00} = h_x / \sqrt{0.142} \quad (12)$$

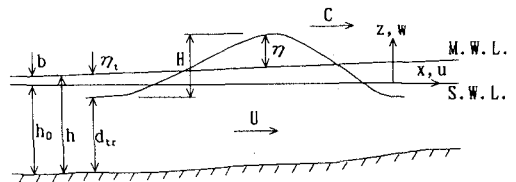


図-8 座標系

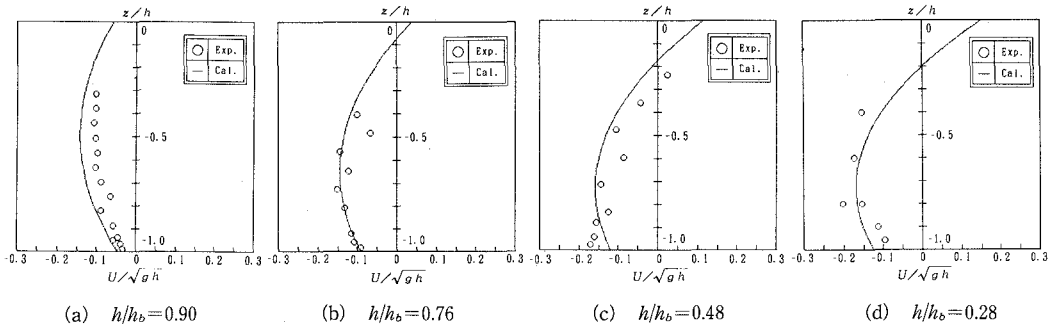


図-9 戻り流れの鉛直分布の実験値と計算値の比較

$$B_{0b} = 0.125 \tanh(11.40/\sqrt{U_{rb}}) \dots\dots\dots (13)$$

で、 U_{rb} は碎波点におけるアーセル数である。

式(4)に含まれる底面流速 U_b に式(1)の底面流速を適用し、戻り流れの鉛直分布を計算した。

図-9(a)~(d)は横軸に無次元定常流速、縦軸に z/h をとって、戻り流れの鉛直分布の実験値と計算値を比較したものである。それぞれ $h/h_b = 0.90, 0.76, 0.48$ および 0.28 の位置における結果を示すものである。なおここで示す h は静水深を表す。これらの図から実験値と計算値はかなりよく一致することがわかる。しかしながら、碎波点付近すなわち $h/h_b = 0.90$ では計算値は若干過大評価しているようであるが、この原因については、明かではない。これは Svendsen (1984) の戻り流れの式は inner region 内において適用される理論であって、碎波点近傍では適用が困難であるためと考えられ、検討の余地がある。

5. おわりに

本研究では、碎波帯内の戻り流れと砂移動について実験的に検討した。さらに戻り流れの鉛直分布について理論的に検討した。得られた結果を要約すると次のようである。

1) 碎波帯内において、砂粒子は波による岸向き流速と沖向き定常流による掃流力のバランスするところに停滞し、その砂の停滞位置は碎波形式によって異なり、流速変動の skewness と無次元定常流の比で表されることがわかった。

2) 底面近傍の定常流速はボア進行に伴う質量流束に規定され、それを底面境界として Svendsen のモデルに

適用することにより碎波帯内の戻り流れの鉛直分布が評価できることがわかった。今回、巻き波型碎波については検討できなかったが、崩れ波型同様に底面の境界条件の算定方法がわかれば鉛直分布は予測できると考えられる。

最後に、本研究を実施するにあたり、実験や解析に協力を惜しまなかった関根聡一・田端 寛両君(当時鳥取大学大学院生および4年生)に感謝の意を表する。

参考文献

泉宮尊司・堀川清司 (1981): 碎波帯における定常流に関する実験的研究, 第28回海講論文集, pp. 34-38.
 岡安章夫・柴山知也・堀川清司 (1987): 碎波帯内定常流速の鉛直分布に関する研究, 第34回海講論文集, pp. 31-35.
 佐藤慎司・光信紀彦 (1990): 不規則波による海浜断面地形変化の数値計算, 海岸論文集, 第37巻, pp. 309-313.
 柴山知也・樋口雄一・岡安章夫 (1985): バックウオッシュと巻き碎波による碎波帯内の流速場の構造, 第32回海講論文集, pp. 65-69.
 土屋義人・山下隆男・植木 実 (1986): 碎波帯における戻り流れについて, 第33回海講論文集, pp. 31-35.
 灘岡和夫・近藤隆道・田中則男 (1981): LDAを用いた碎波帯内の流速場に関する実験的研究, 第28回海講論文集, pp. 24-28.
 西村仁嗣・砂村継夫 (1985): 二次元海浜変形の数値シミュレーション, 第32回海講論文集, pp. 340-343.
 平山秀夫 (1991): 碎波帯内における戻り流れと水面過度の推定法に関する研究, 海岸論文集, 第38巻, pp. 76-80.
 Svendsen, I. A. (1984): Mass flux and undertow in a surf zone, Coastal Eng., Vol. 8, pp. 347-363.
 Hansen, J. B. (1990): Periodic waves in the surf zone: analysis of experimental data, Coastal Eng., Vol. 14, pp. 19-41.
 Longuet-Higgins, M. S. (1953): Mass transport in water waves, Phill. Trans. Roy. Soc. London, Series A, Vol. 245, No. 903, pp. 535-581.