

大阪府立工業高等専門学校 正会員 平山 秀夫
大阪府立工業高等専門学校 日野 武司

大阪府立工業高等専門学校 正会員 ○本田 尚正
大阪府立工業高等専門学校 杉永 孝太

1. はしがき 海浜の地形変形や沿岸付近における物質の輸送機構を解明するためには、傾斜海浜上での砕波に伴って発生する乱れ・渦等、砕波現象特有の波動特性の究明が不可欠である。本研究は、このような観点から、砕波帯内における定常流(戻り流れ)の鉛直分布を表示するモデル式を解析的に算定し、海浜地形変形に役立てようとするものである。これまでの一連の研究(平山, 1990~2000)の継続である。ここでは、とくに、渦動粘性係数の鉛直分布の変化が戻り流れの鉛直分布特性に及ぼす影響について言及し、昨年提案した戻り流れの表示式(平山, 2000)の改善を図るものである。

2. 理論解析

1) 基礎式 いま、水平面内に作用する一周期平均のせん断力 $\bar{\tau}$ 、戻り流れの流速 U および渦動粘性係数 ν_t との関係式は、岡安ら(1987)に類似して、平山(1993)により次式で与えられる(鉛直座標 z' は底面から鉛直上向きを正とする)。

$$\bar{\tau} = -\rho u'w' = -\rho \nu_t \partial U / \partial z' \quad (1) \quad \nu_t = (0.0065 T) cz' \quad (2)$$

ここに、 ρ は流体の密度、 u' および w' は、水粒子速度の時間平均値に対する変動速度の水平成分および鉛直成分、 T は波の周期、 c は波速である。

ここでは、図-1に示すように、砕波帯内における鉛直方向領域を、①底面からトロフの底面までの高さ d_t の領域と、② d_t から平均水深 h までの高さの領域の2つに分けて考える。そして、このとき、 ν_t は次式に示すように、領域①と②で、それぞれ、異なった分布式で表示できると仮定する。

$$\text{①領域 } (0 \leq z' \leq d_t); \quad \nu_t = Ne^{p(z'-d_t)} \quad (3) \quad \text{②領域 } (d_t \leq z' \leq h); \quad \nu_t = N \quad (4)$$

ここに、 N は、 ν_t が、式(2)において $z'=d_t$ における値と等しくなるように定めれば、次式のように表される。

$$N = 0.0065 T c d_t \quad (5)$$

一方、 p は、 ν_t の鉛直分布を支配する任意定数であり、実験値との適合性から決定される。

以上より、領域毎の $\bar{\tau}$ および ν_t 、すなわち、渦動粘性モデル式(基礎式)は、それぞれ、次式のように表される。

$$\text{①領域 } (0 \leq z' \leq d_t); \quad \bar{\tau} = 0.0065 \rho T c d_t e^{p(z'-d_t)} \partial U / \partial z' \quad (6) \quad \nu_t = (0.0065 T) c d_t e^{p(z'-d_t)} \quad (7)$$

$$\text{②領域 } (d_t \leq z' \leq h); \quad \bar{\tau} = 0.0065 \rho T c d_t \partial U / \partial z' \quad (8) \quad \nu_t = (0.0065 T) c d_t \quad (9)$$

次に、 $\bar{\tau}$ の分布は、領域別に次式のように仮定する²⁾。

$$\text{①領域}; \quad \bar{\tau}_1 = a_1 z' + b_1 \quad (10) \quad \text{②領域}; \quad \bar{\tau}_2 = a_2 z' + b_2 \quad (11)$$

2) 境界条件式 いま、①および②領域の戻り流れの流速を、それぞれ、 U_1 および U_2 とすれば、式(6)および(10)、式(8)および(11)の関係から、 U_1 および U_2 は、それぞれ次式のように表される。

$$U_1 = -\frac{A_1}{p} z' e^{-p(z'-d_t)} - \left(\frac{A_1}{p^2} + \frac{B_1}{p} \right) e^{-p(z'-d_t)} + C_1 \quad (12) \quad U_2 = \frac{A_2}{2} z'^2 + B_2 z' + C_2 \quad (13)$$

式(12)および(13)を解くためには、計6個の未知定数(A_1 , B_1 , C_1 , A_2 , B_2 および C_2)の決定が必要である。

(1)水面条件式: 水面条件としては、水面平均渦度 ω_a を与える。それは、砕波による大規模渦の発生個数とその循環値およびエネルギー保存則に基づく平山ら(2001)の方法を適用すると、次式のように表される。

$$\omega_a = \frac{\partial U}{\partial z'} \Big|_{z=h} = \frac{8\Gamma_0^2}{\pi H^2 (4\Gamma_0 - \pi^2 H^2)} \quad (14) \quad \Gamma_0 = \left\{ \frac{2\pi^3 g^2 T H^3 h}{b} \left(\frac{\partial H}{\partial h} + \frac{H}{4h} \right) \tan \theta - \frac{4\pi^2 F H^5 T g^2}{3bh} \right\}^{1/3} \quad (15)$$

ここに、 Γ_0 は渦の循環、 H は波高、 b は定数($b=15$)、 F は摩擦係数($F=0.01$)である。なお、ここでは、波高推定式の簡略式 $H/h=0.5$ (全国海岸協会編, 1987)を用いて、 $\partial H / \partial h = 0.5$ とする。

(2)底面条件式: 底面条件としては、砕波帯内の傾斜海浜上における底面質量輸送速度 U_δ を与える。

$$U_1 \Big|_{z=0} \equiv U_1 \Big|_{z=\delta} = U_\delta \quad (16)$$

ここに、 δ は境界層厚である。なお、ここでは、 U_δ は平山(1990)の式を適用する。

(3)連続式: 連続式は、領域①および②を考慮して、次式で表される。

$$\int_0^{d_t} U_1 dz' + \int_{d_t}^h U_2 dz' = 0 \quad (17)$$

(4)その他の付加的条件式: まず、運動の連続性から、 $z'=d_t$ では、次式の関係が成立しなければならない。

$$U_1 \Big|_{z=d_t} = U_2 \Big|_{z=d_t} \quad (18) \quad \tau_1 \Big|_{z=d_t} = \tau_2 \Big|_{z=d_t} \quad (19)$$

次に、底面せん断力として、ここでは次式で示される岡安ら³⁾の推定値を用いる。

$$\bar{\tau}_1 \Big|_{z=0} = -0.0003 \rho c^2 \quad (20)$$

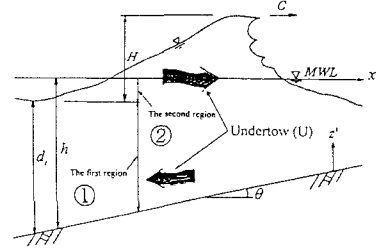


図-1 砕波帯内における戻り流れの模式図

3)理論結果 式(12)および(13)に、式(14)、(16)、(17)、(18)、(19)および(20)を代入し、6元連立方程式を解くことにより、計6個の未知定数(A_1, B_1, C_1, A_2, B_2 および C_2)は、それぞれ、次のように決定される。

$$A_1 = (A_2 d_i + B_2 - B_1)/d_i \quad (21) \quad B_1 = -3c/(65Td_i) \quad (22) \quad C_1 = (A_1 + B_1)e^{pd_i}/p + U_\delta \quad (23)$$

$$A_2 = (BF + G + E\omega_a)/(Eh - D) \quad (24) \quad B_2 = -A_2 h + \omega_a \quad (25) \quad C_2 = C_1 - A_1(d_i + 1/p)/p - B_1/p - A_2 d_i^2/2 - B_2 d_i \quad (26)$$

ここに、 $D = 12(e^{pd_i}/d_i - pd_i - 1) - p^3 h^3 - 2p^3 d_i^3 - 3ph(2e^{pd_i} - 2pd_i - 2 - p^2 d_i^2) - 6p^2 d_i^2$ (27)

$$E = 12(e^{pd_i}/d_i - p - 1/d_i) - 3p^3 h^2 - 3p^3 d_i^2 - 6ph(e^{pd_i}/d_i - p - 1/d_i - p^2 d_i) - 6p^2 d_i \quad (28)$$

$$F = -12(e^{pd_i}/d_i - p/2 - 1/d_i) - 6ph(pe^{pd_i} - e^{pd_i}/d_i + 1/d_i - e^{pd_i}/h) \quad (29) \quad G = -6p^3 U_\delta h \quad (30)$$

以上の結果を用いて、底面から水面に至る戻り流れの流速(U)およびせん断力(τ)の鉛直分布を求めることができる。

3. 理論値と実験値との比較および考察

ここでは、本理論値と岡安ら³⁾の実験値とを比較し、本理論値の一般的特性について考察する。

図-2は、 p の変化による U の鉛直分布特性の変化を示している。この図より、理論値と実験値との適合性から、 p の最適値は0.25程度と推定できる。

図-3は、本理論値($p = 0.25$)と、他の理論値および実験値とを比較したものである。この図において、「exponential」(平山ら, 2000)は、 v_i を全領域で式(7)の指数関数分布により与え、その他の条件は本理論と同じとして得られた結果を示している。また、「by conduction eq.」(平山, 1991)は Longuet-Higgins (1953)の水平床における質量輸送の理論を傾斜面上に拡張して得られた結果を示し、「linear (1)」(平山, 1998a)および「linear (2)」(平山, 1998b)は、それぞれ、 U の鉛直方向領域を1領域および2領域とし、 v_i を全領域で式(2)の直線分布により与えて得られた結果を示している。なお、後者の三理論値の計算には、本理論値とは異なり、水面条件は、Longuet-Higgins (1960)の水平床における理論と類似な方法で水面過度を近似的に表現した平山(1991)の方法による。

図-3より、周期 T の大小に関わらず、 U の鉛直方向領域を2領域とした本理論値、「exponential」および「linear (2)」の方が、それを1領域とした他の理論値と比べて、とくに領域①(z'/h が概ね0.7以下の領域)において実験値との適合性が良いことがわかる。さらに、本理論値は、水面付近(領域②、すなわち、 z'/h が概ね0.7以上の領域)では、「exponential」および「linear (2)」と比較して、実験値に若干近づく結果となっており、ここに、 v_i の鉛直分布を2領域で別途に設定した効果がみられる。ただし、上述のとおり、本理論と「linear (2)」では水面過度の与え方が異なっている。したがって、 v_i の影響のみを厳密に追求するには、今後さらに、碎波帯内における水面過度の推定方法の差異に着目した比較検証が必要である。

4. あとがき

ここでは、戻り流れの鉛直分布を理論的に求めるにあたり、渦動粘性係数の鉛直分布特性に着目して理論展開を行った。その結果、理論値と実験値との適合性において、従来の理論に比べて若干の改善を得ることができたと思われる。なお、これまでの一連の研究結果から、戻り流れの鉛直分布を規定する因子のうち、最も影響が大きいのは、水面条件の与え方であると考えられる。今後は、これを水面過度によって与える方法そのものの是非も含めて、碎波帯内での水面条件の改善が必要である。

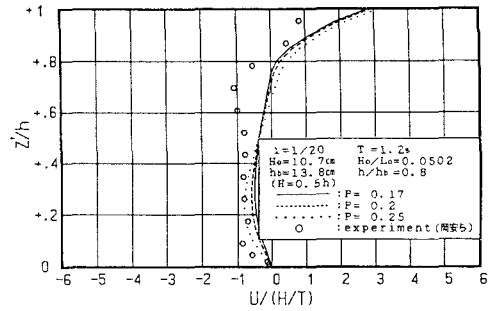
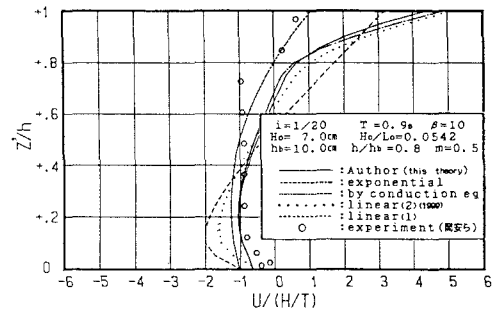
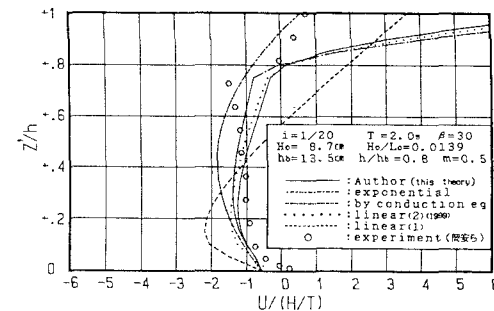


図-2 p の変化による U の変化特性



(a) $T = 0.9\text{sec}$ の場合



(b) $T = 2.0\text{sec}$ の場合

図-3 本理論値と実験値および他の理論値との比較

参考文献 岡安・柴山・堀川(1987): 碎波帯内定常流速場の鉛直分布に関する研究, 第34回海講, pp.31-35. 平山(1990): 碎波帯内における質量輸送(戻り流れ)の鉛直分布に関する研究, 海講第37巻, pp.41-45. 平山(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, 海講第38巻, pp.76-80. 平山(1993): 碎波帯内における戻り流れの鉛直分布に関する理論的研究, 海講第40巻, pp.66-70. 平山(1998a): 傾斜海岸上における碎波帯内定常流速の鉛直分布に関する理論的研究(I), 府立高専紀要第32巻, pp.57-63. 平山(1998b): 碎波帯内における戻り流れの鉛直分布の理論とその再検討, 海講第45巻, pp.106-110. 平山・谷村・難波(2000): 碎波帯内における過度粘性係数の表示法とそれに基づく戻り流れの鉛直分布特性, 関西支部年講, pp. II-74. 平山・本田(2001): 碎波に伴って発生する大規模水面過度による平均過度の推定法, 水工論第45巻, pp.445-450. Longuet-Higgins(1953): Mass transport in water wave, Phil. Trans. Royal Soc, London, Series A, No. 903, Vol. 245, pp.535-581. Longuet-Higgins(1960): Mass transport in the boundary layer at a free oscillating surface, J. F. M., Vol. 8, pp.293-306. 全国海岸協会編(1987): 海岸保全施設築造基準解説, pp.52.