

重複波による底質の浮遊濃度分布

服 部 昌 太 郎*

1. ま え が き

重複波による海底底質の浮遊濃度分布と波の特性との関係を明らかにすることは、海岸・港湾構造物前面における浮遊漂砂の移動量の推定を行なう上で、重要な研究課題の一つであると考えられる。

筆者は、第16回海岸工学講演会で、重複波による底質の浮遊濃度分布形状と波の特性とに関する理論と、実験による検討について報告を行なった¹⁾。

本研究は、その後2次元重複波用波動水槽を使用して行なった実験の結果と前回の講演会で発表した筆者の理論との比較を行なうとともに、浮遊濃度分布形に関する理論計算で筆者が新たに導入した、浮遊底質粒子の移動速度と流体粒子の速度との間の若干の遅れ距離と重複波の諸特性との間の関係を、実験結果によって明らかにしようとするものである。

2. 重複波による底質の浮遊濃度分布に関する理論

重複波によって浮遊させられた底質の水平方向の濃度分布は、図-1の実験結果に示されるように、重複波の節の位置で濃度が最低に、腹の位置で濃度が最高となる、水平方向の距離に関して周期的な濃度分布形状となる。

線形波動理論では、流体粒子の移動軌跡は閉じており、波運動の1周期の間での流体の平均運動による浮遊底質の輸送は生じない。また、流体の乱れによる底質の拡散輸送は gradient 形式のものであり、浮遊底質の濃

度が均一化される方向に浮遊底質の拡散輸送が生ずる。したがって、上記のような浮遊底質の、流体の平均運動の流速による輸送と、流体の乱れによる拡散輸送とによって、図-1に示されるような浮遊底質の水平濃度分布形の周期性を、理論的に説明することはできない。

筆者は、浮遊底質の移動と流体粒子の移動との間に相対運動が存在すると考え、浮遊底質粒子はそのわずかな後方における流体粒子と同一の速度で移動すると考え、浮遊底質の移動速度と流体粒子の速度との間に、わずかな遅れ距離を仮定して、理論計算を行なった²⁾。

浮遊底質粒子と流体粒子との間に遅れ距離を仮定し、この遅れ距離と浮遊底質の拡散係数がともに場所的に一定であるとした場合の、浮遊底質濃度に関する2次元の連続方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x} \left[C \left(u + \delta_x \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right] \right) \right] \\ & -\frac{\partial}{\partial z} \left[C \left(w + \delta_z \left[\frac{\partial w}{\partial z} \right] \right) \right] + \epsilon_{sx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \\ & + \epsilon_{sz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + w_0 \frac{\partial C}{\partial z} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

となる。ここに、 C は浮遊底質の濃度で、 x, z, t の関数、 w_0 は底質の沈降速度、 δ は浮遊底質粒子の移動速度と流体粒子の速度との間の遅れ距離、 ϵ_s は浮遊底質の拡散係数、 t は時間である。また、添字 x, z は各量の水平方向と鉛直方向の成分を示す添字、その他の記号と座標系は、図-2に示される。

理論計算は、次の2つの仮定によって行なった。すなわち、

1. 浮遊底質の水平方向と鉛直方向の濃度分布間の相互干渉はなく、2次元の場合の水平方向の浮遊底質の濃度分布は、式(1)で鉛直方向の運動に関する項を無視した、1次元モデルより計算される水平濃度分布と同じ関係で表わされる。

2. 鉛直方向の浮遊濃度分布は、その形状がいずれも幾何学的に相似である。

浮遊底質の濃度分布形は式(1)に、上記の仮定と次の2つの境界条件、1) 重複波の節の位置($x=0$)に関して、水平方向の濃度分布形状が対称である、2) 底面よりの任意の基準高さにおける浮遊底質の時間平均濃度が既知である——とによって、流体運動に長波理論を適用

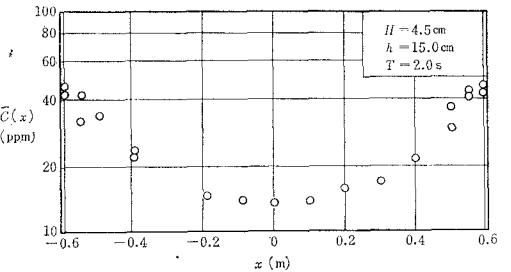


図-1 重複波による浮遊底質の水平濃度分布に関する実験結果の一例

* 正会員 工修 中央大学助教授 理工学部土木工学科

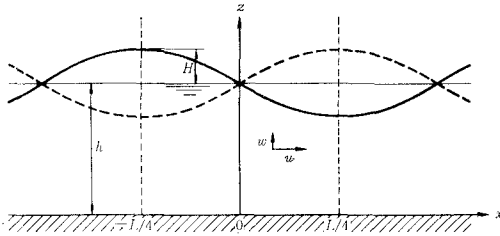


図-2 記号と座標系

して計算を行なった。その結果、重複波の1周期に関する時間平均浮遊濃度分布として、式(2)をえた。

$$\bar{C}(x, z) = \bar{C}(0, a) \exp \left[\alpha (1 - \cos kx) - \frac{\beta}{h} (z - a) \right] \quad (2)$$

ここに、

$$\alpha = \frac{2HL}{\pi \epsilon_{sx} T h} \quad (3)$$

$$\beta = w_0 h / \epsilon_{sz} \quad (4)$$

H は重複波の振幅、 L は波長、 T は周期、 k は波数、 a は鉛直濃度分布の基準濃度を与える底面からの距離、また、一は時間平均を表わす記号である。

式(2)の浮遊底質濃度分布に関する理論解に見られるように、鉛直方向の濃度分布は、Rouse ら^{3),4)} がすでに発表している指数分布形と同一のものとなり、浮遊底質の沈降速度と拡散係数との比によって、その分布形が定まる。水平方向の濃度分布は、式(2)に見られるように、浮遊底質の移動速度と流体粒子の速度との間の遅れ距離と浮遊底質の拡散係数以外に、重複波の特性にも関係することが明らかにされた。

3. 実験装置と測定方法

本研究で使用する実験結果は、前回の海岸工学講演会ですでに発表した、長さ30m、幅0.80m、高さ0.70mの2次元波動水槽による実験結果と、その後行なった重複波用実験水槽による実験結果の2種類である。

重複波用実験水槽は、長さ8.80m、幅0.70m、高さ0.90mの片面ガラス張りの水槽で、実験設備の全体的な配置は、図-3に示される。

実験に使用した模型底質は、平均粒径0.34mm、比重1.46の合成樹脂粒である。模型底質は実験水槽内に設置した直立壁前方4.5mの区間に、厚さ12cmに一樣に敷き、この上面を浮遊濃度測定の基準面とした。

重複波の波高は、電気抵抗式波高計により、また浮遊底質の濃度は中央大学で開発した、濃度測定点を通過する浮遊底質粒子数を検出する方式の濃度測定装置²⁾を使用して、それぞれ測定を行なった。実験条件は表-1に示され、表-1中の実験-Iは2次元波動水槽によるも

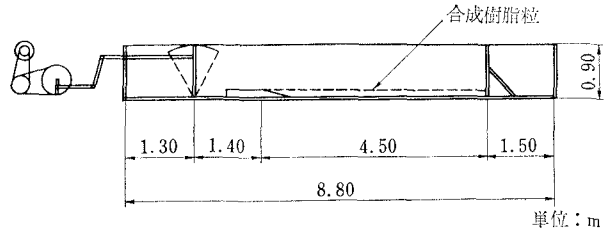


図-3 重複波実験水槽の全体的配置図

の、実験-IIは重複波実験水槽によるものである。

4. 浮遊濃度分布に関する実験結果

図-4~6は、重複波用実験水槽によって行なった、重複波の節の位置($x=0$)と腹の位置($x=L/4$)における浮遊底質の鉛直濃度分布に関する実験結果である。これらの実験結果は、重複波の節の位置における鉛直濃度分布の濃度勾配変化点における浮遊底質濃度を基準濃度とした相対濃度分布で、濃度基準点の底面よりの相対高さ a/h は、表-1中に示される。

浮遊底質の濃度分布に対する理論式(2)より、重複波の節($x=0$)と腹($x=L/4$)の位置における相対鉛直濃度分布は、それぞれ、

$$\frac{\bar{C}(0, z)}{\bar{C}(0, a)} = \exp \left[-\frac{\beta}{h} (z - a) \right] \quad (5)$$

および、

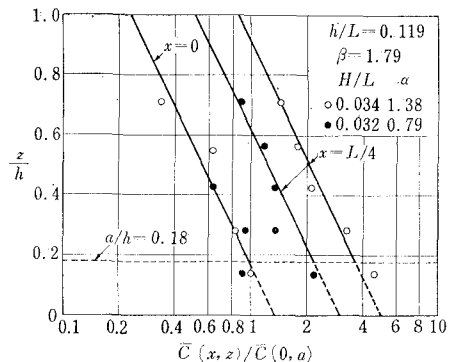


図-4 浮遊底質の相対濃度分布

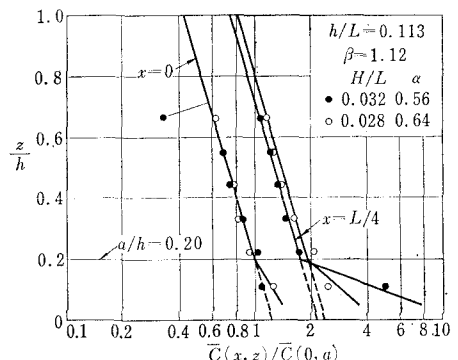


図-5 浮遊底質の相対濃度分布

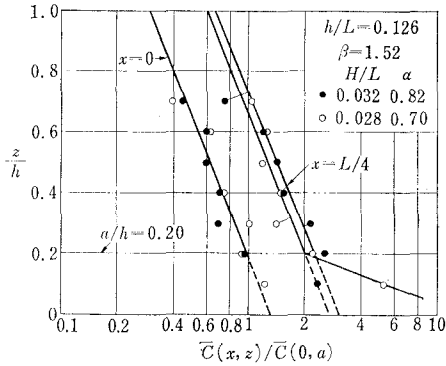


図-6 浮遊底質の相対濃度分布

$$\frac{C(L/4, z)}{C(0, a)} = \exp\left[\alpha - \frac{\beta}{h}(z-a)\right] \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる。

図-4～6 にはそれぞれ、実験結果と最もよく一致する、式(5)と(6)とより計算される理論濃度分布が実験で示されている。この理論濃度分布の計算に使用した、式(5)と(6)中のパラメータ、 α と β の値は表-1中に示される。図-4～6の実験結果と理論結果との一致の程度は良好であり、浮遊底質の移動速度と流体粒子の速度との間に遅れ距離を仮定した理論の妥当性が確かめられた。

5. 水平方向の遅れ距離に対する検討

重複波による底質の浮遊濃度分布に関する理論においては、浮遊底質の移動速度と流体粒子の速度との間の遅れ距離と浮遊底質の拡散係数は、場所的に一定であると仮定しただけで、これらと重複波の特性との間の関係については、理論的な検討を行っていない。

浮遊底質の鉛直方向の拡散係数は、底面付近に存在する高濃度層より上方の領域では、ほぼ一定となることが筆者の実験結果²⁾や本間・堀川⁹⁾および野田⁶⁾の研究よ

り認められている。

浮遊底質の鉛直方向の拡散係数は、重複波の節の位置における相対鉛直濃度分布より、式(5)を用いて計算することができる。筆者の行なった実験に対して、式(5)より計算される、浮遊底質の鉛直方向の拡散係数は、表-1に示され、筆者の行なった実験の範囲では、鉛直方向の拡散係数 ε_{sz} は、重複波の波高にはほとんど関係せず、水深と重複波の波長との比で表わされる相対水深に関係することが認められる。

波動運動のように、流体運動が非定常であり、しかも水平方向と鉛直方向とにそれぞれ流速分布が存在する流体の乱れと乱れ拡散係数に関しては、未だ十分なる解明がなされていない。

そこで、本研究においては、浮遊底質の移動速度と流体粒子の速度との間の遅れ距離と重複波の特性との関係を検討するため、浮遊底質の水平方向の拡散係数が鉛直方向の拡散係数と同等程度の大きさであると仮定して、実験結果より浮遊底質の遅れ距離を計算する。重複波の特性と底質の鉛直浮遊濃度分布の実験結果より、上述の仮定に基づいて計算された、浮遊底質の水平方向の遅れ距離は、表-1中に示される。

重複波の節と腹との間 $0 \leq x \leq L/4$ での、重複波による流体粒子の水平方向の平均速度 $\bar{u}$ は、流体運動に長波理論を適用すると、

$$\bar{u} = \frac{4}{L} \int_0^{L/4} u dx = \frac{2HL}{\pi hT} \sin \alpha t \dots\dots\dots (7)$$

式(7)で与えられる流体粒子の平均流速の振幅を、

$$\hat{u} = \frac{2HL}{\pi hT} \dots\dots\dots (8)$$

とくと、式(8)と(3)より、浮遊底質の水平方向の濃度分布形に関係する式(2)中のパラメータ α は、

$$\alpha = \frac{\hat{u} \left| \frac{\partial x}{\partial t} \right|}{\varepsilon_{sx}} \dots\dots\dots (9)$$

表-1 実験条件と実験結果

実験	h (cm)	T (s)	H (cm)	h/L	H/L	α	β	ε_{sz} (cm^2/s)	$\hat{u}$ (cm/s)	$\hat{\varepsilon}$ (cm)	$ \partial x / \partial t / \hat{\varepsilon}$	$w_0 / \hat{u}$	a/h	備考
I	29.1	1.70	4.0	0.109	0.015	1.03	2.34	12.5	13.7	36.6	0.0256	0.0730	0.18	
			6.0		0.023	1.25			20.6	55.0	0.0138	0.0485		
			8.0		0.030	1.39			27.5	73.5	0.0086	0.0364		
	15.0	2.00	4.0	0.063	0.017	1.13	2.24	14.9	20.2	63.5	0.0131	0.0494	0.22	
			5.0		0.021	1.44			25.2	79.4	0.0103	0.0397		
			6.0		0.025	1.65			30.2	95.2	0.0085	0.0331		
II	35.2	1.74	9.4	0.119	0.032	0.79	1.79	19.7	28.8	78.8	0.0069	0.0347	0.18	図-4
			10.2		0.034	1.38			31.4	85.7	0.0099	0.0319		
	45.0	2.06	12.0	0.113	0.030	0.64	1.12	40.2	32.6	106.0	0.0074	0.0307	0.20	図-5
			13.8		0.035	0.56			37.4	122.0	0.0049	0.0268		
	50.0	1.96	11.0	0.126	0.028	0.70	1.52	33.1	28.3	87.2	0.0094	0.0354	0.20	図-6
			12.8		0.032	0.82			32.8	102.0	0.0081	0.0305		

と書直せる。

図-7 は、実験結果より計算される浮遊底質の移動速度と流体粒子の速度との間の水平方向の遅れ距離 δ_x と $\hat{u}$ との関係を示したもので、図-7 より重複波による流体粒子の平均水平速度の振幅が増大すると、浮遊底質粒子の遅れ距離が减小する傾向が認められる。

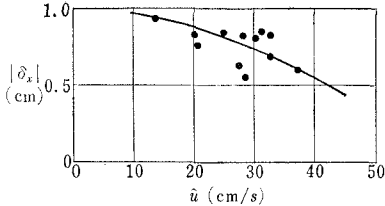


図-7 $|\delta_x|$ と $\hat{u}$ との関係

浮遊底質粒子の慣性効果を表わす量として、底質の沈降速度 w_0 と $\hat{u}$ との比 $w_0/\hat{u}$ を、また浮遊底質の遅れ距離に関する量として、浮遊底質の遅れ距離 $|\delta_x|$ と流体粒子の重複波による移動距離に比例する量 ξ との比 $|\delta_x|/\xi$ とに着目する。ここに、 δ は重複波の節と腹との間 ($0 \leq x \leq L/4$) の流体粒子の水平移動の振幅に比例する量で、流体運動に式(7)の場合と同様に長波理論を適用すると、

$$\xi = H/|h/L| \dots\dots\dots (10)$$

で与えられる。

図-8 は、 $|\delta_x|/\xi$ と $w_0/\hat{u}$ との関係を示したもので、図-8 に見られるように、両者の間に密接な相関が認められる。

以上の浮遊底質の移動速度と流体粒子の速度との間の遅れ距離と重複波の特性とに関する、実験結果に基づく考察では、浮遊底質の水平方向と鉛直方向の拡散係数の大きさが同等程度であると仮定して行なったが、図-8 に示されるような、浮遊底質の遅れ距離と重複波の特性との関係を浮遊底質の濃度分布に関する実験結果より、

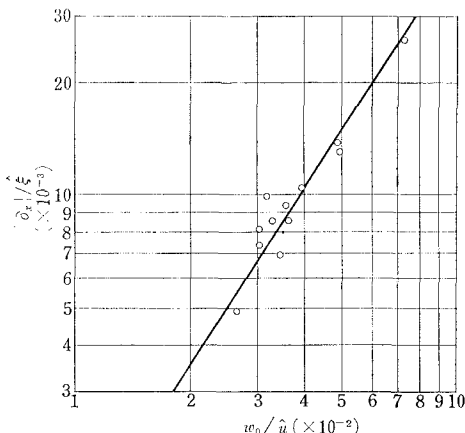


図-8 $|\delta_x|/\xi$ と $w_0/\hat{u}$ との関係

見出すことができた。

6. 結 論

本研究において、筆者が行なった重複波による底質の浮遊濃度分布に関する理論で導入した、浮遊底質の移動速度と流体粒子の速度との間の遅れ距離の大きさと重複波の特性との関係を、浮遊底質の濃度分布に関する実験結果より検討を行なった。

重複波による底質の浮遊濃度分布は、図-4~6 に示されるように、実験結果は式(2)の理論結果と良好な一致を示しており、理論計算に導入した浮遊底質の移動と流体粒子の移動との間に、相対運動が存在すると仮定した理論的取扱いが妥当であることが確かめられた。

浮遊底質の移動速度と流体粒子の速度との間の遅れ距離に関しては、浮遊底質の水平方向と鉛直方向の拡散係数が同等程度のものであると仮定し、浮遊底質の濃度分布に関する実験結果より計算を行なった。この結果は、重複波の諸特性とともに表-1 に示される。

浮遊底質の遅れ距離は、重複波による流体粒子の速度が増大するとともに減少することが認められる。浮遊底質の慣性効果を表わす量 $w_0/\hat{u}$ と浮遊底質の遅れ距離に関する無次元量 $|\delta_x|/\xi$ との間には、図-8 に示されるようにきわめて密接な相関が存在することが明らかにされた。

終りに、本研究にあたり終始ご指導を賜わった、中央大学林 泰造教授に感謝の意を表わします。本報で発表した実験結果は当時、中央大学学生であった宇野沢生、古谷八郎、内田義孝の諸君が行なった実験によるものである。なお、本研究の一部は、昭和44年度文部省特定研究「漂砂を伴う海岸災害の総合的研究研究」(代表者京都大学防災研究所 土居義人教授)によって行なったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 服部昌太郎：重複波による底質の浮遊機構，土木学会第16回海岸工学講演会講演集，1969，pp. 147~152.
- 2) Hattori, M.: The mechanics of suspended sediment due to standing waves, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 12, 1969, pp. 69~81.
- 3) Rouse, H.: Modern concept of the mechanics of fluid turbulence, Trans. of ASCE, Vol. 111, 1946, pp. 67~133.
- 4) O'Brien, M. P.: Review of the theory of turbulent flow and its relation to sediment-transportation, Trans. of AGU, 1933, pp. 487~491.
- 5) Hom-ma, M. and K. Horikawa: Suspended sediment due to wave action, Proc. of 8th Conference on Coastal Engineering, 1962, pp. 168~193.
- 6) 野田英明：波による底質の浮遊，土木学会第14回海岸工学講演集，1964，pp. 306~314.