

砕波による波高減衰に関する一考察

熊本大学 工学部 正 員 池川 満
 熊本大学 工学部 正 員 田村 幹修
 熊本大学 工学部 学生員 山田 文彦

1.はじめに 砕波の内部機構とくに、砕波による乱れは、砕波後の波高減衰に関して支配的な役割をすることが、樁木らをはじめ数多くの研究より明らかになっているが、従来、明確に乱れの効果を取り入れた例は少なく、十分な成果は得られていない現状である。本研究では、波高減衰の数値計算モデルとして、砕波後の流体内部にエネルギー消散領域を設定し、乱れに起因するエネルギー消散の効果を、流速に比例するとして等価な線形消散係数として評価しようとするものである。この消散係数は乱れの強さを意味するものであり、ここでは酒井ら、佐伯らによる水塊・渦・負泡連行深の挙動に関する成果を考慮し、領域内での段階に変化させてゆく。今回は、研究の予初めとして微少振幅波理論に基づき、有限要素法による定常解析を行い、実験値と比較したのでここに報告する。

2.基礎式

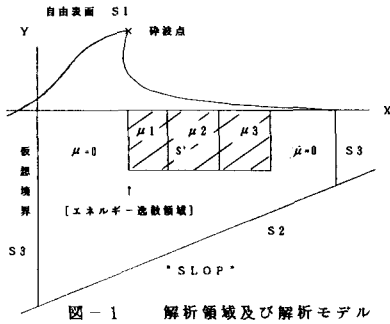


図-1 解析領域及び解析モデル

上図に示すように、2次元の領域で水平にx軸、鉛直上向きにy軸をとり、周波数 σ ($=\frac{2\pi}{T}$: Tは周期)の入射波を考える。この時、エネルギー消散領域での流体運動は式①, ②で示される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad \text{--- ①}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x} (P_p) - F_x \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial y} (P_p + gy) - F_y \end{aligned} \right\} \quad \text{--- ②}$$

ここに F_x, F_y は、エネルギー消散係数という流体抵抗で粘性と乱れの効果を考慮し、次式に示すように流速に比例する線形の係数 μ を用いて定義する。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \nu \nabla^2 u + (u \frac{\partial \mu}{\partial x} + w \frac{\partial \mu}{\partial y}) \equiv \mu \cdot u \\ F_y &= \nu \nabla^2 w + (u \frac{\partial \mu}{\partial x} + w \frac{\partial \mu}{\partial y}) \equiv \mu \cdot w \end{aligned} \right\} \quad \text{--- ③}$$

③式に示すように、線形のエネルギー消散係数を仮定すると、流体運動は非回転となり、ポテンシャル関数 ϕ を導入でき、連続の式・圧力方程式は解析全領域において、次式で示される。

$$\text{ポテンシャル関数: } \phi(x, y, t) = \phi(x, y) e^{i\sigma t} \quad \text{とすると,}$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad \text{--- ④}$$

$$(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mu \phi) + P_p + gy = 0 \quad \text{--- ⑤ } (i=1, 2, 3)$$

ただし、エネルギー消散領域以外では $\mu=0$ である。

一方、各領域の境界面、たとえば図中の S' での条件は

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial n} &= \frac{\partial \phi}{\partial n} \\ \frac{1}{g} (\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mu \phi)_1 &= \frac{1}{g} (\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mu \phi)_2 = -(P_p + gy) = -H \end{aligned} \right\} \quad \text{--- ⑥}$$

で示され、それぞれ mass-flux, energy-flux を規定するものである。

解析方法として、 ϕ を未知量とすると、エネルギー消散領域において ϕ が不連続となり、各領域間で⑥式を満足させる必要が生じ、取り扱いが面倒になる。そこで⑥式の波圧成分(H)が、全領域で連続であることに注目して、これを未知量として解析を行う。

ここで、運動の周期性を考えると、

$$H = H \cdot e^{i\sigma t} \quad \text{とすると}$$

$$\phi = -\beta \cdot H, \quad \beta = \frac{g}{(i\sigma + \mu)} \quad \text{--- ⑦}$$

このHを用いると、各条件式は次式のようにになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{内部: } \frac{\partial}{\partial x} (\beta \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta \frac{\partial H}{\partial y}) &= 0 \\ S_1: i\sigma H|_{S_1} &= -\beta \frac{\partial H}{\partial y}|_{S_1} \\ S_2: -\beta \frac{\partial H}{\partial n} &= 0 \\ S_3: \beta \frac{\partial H}{\partial n} &= \beta \frac{\partial H}{\partial n} \quad (H_0 = -\frac{1}{\beta} \phi_0) \end{aligned} \right\} \quad \text{--- ⑧}$$

解析としては、考えるエネルギー消散領域ごとに、 μ を変え、境界 S_2 での入射波の条件に対応した計算を行うことになるが、このための有限要素法による解析手法の詳細は、文献(4)を参照されたい。

海底 勾配	沖波 波形勾配	沖波 形式	周期	等価エネルギー-逸散係数						図-2
				$\mu 1$	区間長	$\mu 2$	区間長	$\mu 3$	区間長	
1/50	0.0053	P	2.99	0.8	1/10	0.25	9/20	0.1	9/20	(a)
1/50	0.016	P	1.8	0.6	1/10	0.25	9/20	0.1	9/20	(b)
1/50	0.020	P	1.63	0.6	1/10	0.2	9/20	0.1	9/20	
1/40	0.0085	P	2.35	0.5	1/10	0.4	9/20	0.25	9/20	(c)

但し、PはPLUNGING型 沖波
区間長は沖波帯長に占める割合を示す

表-1 数値解析データ

3結果と考察 計算に際しての、エネルギー-逸散領域の設定方法は、

1) 碎波点 Mehauteの式⑩より碎波波高 H_b を、合田の式⑫より碎波水深 h_b をニュートン近似法を用いて決定した。

$$H_b/h_b = 0.76 S^{3/4} (H/L_0)^{1/4} \quad \text{--- ⑩}$$

$$H_b/L_0 = 0.17 \left\{ 1 - \exp \left[-15 \frac{h_b}{L_0} (1 + 15 S^{3/4}) \right] \right\} \quad \text{--- ⑫}$$

2) 領域長 白石らによる碎波帯長の実験データより⑬式を用いた。

$$L_b/L_0 = 33 (H_b/L_0)^{1/4} + 0.04 \quad \text{--- ⑬}$$

ここで L_b : 碎波帯長, L_0 : 碎波波長

碎波の形態や碎波に伴う乱れの大きさ等は、入射波の特性(沖波波形勾配・海底勾配)等と密接に関係し、また乱れによるエネルギー-逸散過程では、酒井・佐伯らの実験結果によると、1) 突っ込みに伴う乱れ 2) 渦の発生に伴う乱れ 3) 渦の移動に伴う乱れの3つの領域に大別できると示されている。この様な非線形の碎波現象を数値的に取り扱う場合、エネルギー-逸散の効果は、実験現象に則した形で評価することが重要であるが、本研究では、その第一段階として上述のように数値モデルとして、3つのエネルギー-逸散領域を設定し、そこで逸散係数および各領域長を適宜変化させ、実験値との適合度を検討した。

図-2は、その適合度を示すために表わしたもので、図中の実験が計算結果を表す。いずれの場合もよく合っていることがわかる。適当な値の逸散係数を仮定したにもかかわらず、よく実験値を表現できる事は、3層モデルの妥当性を意味すると共に、碎波の波高減衰に関しては、線形の逸散係数で十分評価できる事を意味するものと考えられる。

ここで、突っ込みに伴う乱れに着目すると、海底勾配が緩やかで沖波波形勾配が小さい plunging 型碎波になるほど、その乱れは大きく、逆の場合は小さくなるが実験でも観測されるが、表-1に示した実験値に適合する3層モデルの各領域での逸散係数の値は、第1層目の μ_1 が沖波波形勾配が小さく、海底勾配がゆるやかな程大きな値を示しており、これは碎波時の乱れの大小とよく対応していることがわかる。区間長に就いては、第1層が全体の1/10、残りの部分が第2,3層で等分割する分け方です十分のようである。

さらに多くのデータとの比較を行い、沖波波形勾配と海底勾配を導入した、逸散係数の統一的な評価方法について検討中である。詳細は講演時に発表の予定である。

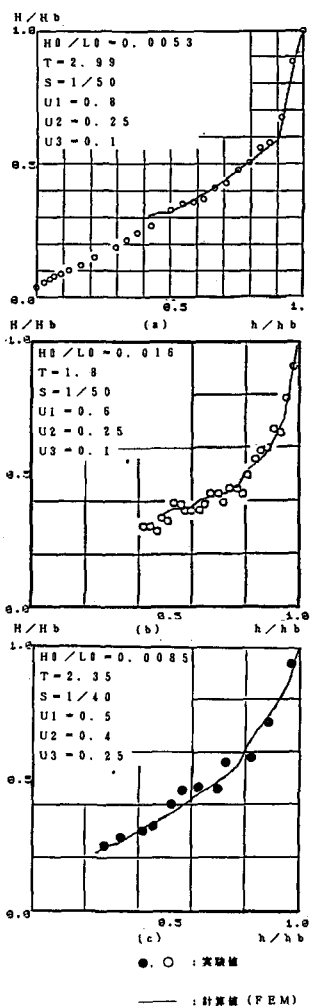


図-2 実験値との比較

参考文献

1) 橋本 亨: 碎波特論 1973年度
水工学に関する基礎研究報告集 B-2
2) 酒井 哲郎, 田中 孝明: 斜面上の碎波における水塊の突入と渦の寄与 第32回海岸工学講演会論文集 pp 20~24
3) 堀内 樹, 島 泉, 小野 敏行, 山下 敏彦, 佐伯 浩: 碎波後の波の変形と負波連行深に関する研究 第33回海岸工学講演会論文集 pp 16~20
4) 滝川 清, 田村 純徳: 有限要素法による波動解析について (3) 第53年度土木学会西部支部研究発表会報告集 pp 242