

II-69

砂漣上の波の波高減衰について

北海道大学工学部 手塚 暁仁
 北海道大学工学部 学生員 渡部 靖憲
 北海道大学工学部 正 員 浜中 建一郎

1. はじめに

進行に伴って生ずる波の減衰は、ポテンシャル流れとしての波動場でのエネルギー損失と、底面境界層内のせん断流によるエネルギー損失とによって起こる。その内、前者は非常に小さく、通常の海岸工学の問題では無視し得る。一方、後者の底面境界層においては、その厚さは表面波の波長に比べ非常に薄く、局所的に見れば水平振動流と見なし得る。このことから、砂漣の存在する底面上を波が進行するときの底面境界層内の流れは、最初の近似として砂漣上の水平振動流によって近似される。渡部・成嶋・浜中(1993)は、砂漣上の水平振動流による境界層流れを数値解析によって求め、その時のエネルギー損失が、水平床の場合に比し数倍になることがあることを確かめた。しかしながら、ポテンシャル流れとしての波動場と、粘性の卓越する境界層流れは同一の相似則には従わず、上に述べたエネルギー損失による波高減衰は、水理実験の模型縮尺の場合と実海域の場合とは個別に考察しその関係を求めておかなければならない。

このことから本研究では、上に述べたのと同様な数値解析により砂漣上の水平振動流によるエネルギー損失を求め、その結果を用いて波の進行に伴う波高減衰を求めることを目的とする。

2. 砂漣上の振動流境界層の数値計算

数値計算は、空間的には浜中・佐藤(1992)の方法と同様にスペクトル法を用い、時間的に安定性を良くするためにADI法を用いた。

ここでは有次元量には $*$ をつけて表す。砂漣の波長を l_s^* とし、砂漣の波高を a^* とする。このとき砂漣の波数 k_s^* は、 $k_s^* = 2\pi/l_s^*$ 。計算領域上端での流速 u^* は

$$u^* = a^* A^* \sin \sigma^* t^* \quad (1)$$

として与える。ここで σ^* は周波数。このとき A^* は長さの次元を持つ。これ等の諸量と流体の動粘性係数 ν^* とで、この問題は決定される。(1)で与えられる流速の元で、水粒子の移動距離 L^* は次のようになる。

$$L^* = \int_0^{T^*/2} u^* dt^* = 2A^* \quad (2)$$

上の諸量を σ^* と k_s^* とで無次元化する。砂漣形状は無次元量

$$\varepsilon = k_s^* a^* = 2\pi/l_s^*$$

で決定される。(1)式は両辺に k_s^* をかけて σ^* で割ると、

$$u = \frac{k_s}{\sigma} u^* = k_s^* A^* \sin t^* = a \sin t, \quad \text{ここで } t = \sigma^* t^*, a = k_s^* A^* \quad (3)$$

また、無次元粘性係数 ν は運動方程式を無次元化することにより

$$\nu = \frac{k_s^* \nu^*}{\sigma^*}$$

となる。従って、この問題は3つの無次元量 ε 、 a 、 ν で決定される。

3. 波の緒元と数値計算の緒元との関係

砂漣上の流れ内のEnergy lossによる波の波高減衰を求めるため以下の様な仮定を設ける。
 定常波動場のもとで

(i)砂漣の波長は、境界層上端での振動流の水粒子の移動距離に等しい。

Wave attenuation over sand ripples

by Akihito TEZUKA, Yasunori WATANABE and Ken-ichiro HAMANAKA

(i)砂漣の波形勾配は、波の進行方向に沿って一定。

(ii)計算領域上端での流速は、ポテンシャル波動場の底面流速に等しい。

仮定(ii)より、 ε は適当な一定値とする。仮定(i)と(2)と(3)から

$$2A^* = l_s^* \quad \therefore k_s^* A^* = k_s^* l_s^* / 2 \quad \text{すなわち、} \alpha = \pi$$

一方、微小振幅波の解から底面での水粒子の移動距離 L_b は

$$L_b = H / \sinh k h, \quad \text{ここで、} h: \text{水深、} k: \text{波の波数、} H: \text{波高である。}$$

また仮定(i)と仮定(ii)から

$$L_b = l_s^* = 2\pi / k_s^* \quad \therefore k_s^* = 2\pi / L_b \quad (4)$$

(4)から、無次元粘性係数と波の緒元との関係は

$$\nu = \frac{(k_s^*)^2}{\sigma^*} \nu^* = 2\pi \left(\frac{\sinh k h}{H} \right)^2 T \nu^* \quad (5)$$

従って、ある一定値 ε 、 $\alpha = \pi$ のもとで種々の値の ν に対する数値計算によるEnergy lossを求めておけば、(5)より任意の周期 T 、任意の水深 h のもとでの種々の波高を持った波に対する底面でのEnergy lossを知ることが出来る。

4. 無次元化Energy loss

流体中の単位面積当たりのEnergy lossは次式で与えられる。

$$E_l^* = 2\mu^* \left\{ \left(\frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right)^2 \right\} + \mu^* \left(\frac{\partial v^*}{\partial x^*} + \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right)^2 \quad (6)$$

ここで、 $\mu^* = \rho^* \nu^*$ 、上式に

$$\nu = \frac{(k_s^*)^2}{\sigma^*} \nu^*, \quad u = \frac{k_s^*}{\sigma^*} u^*, \quad v = \frac{k_s^*}{\sigma^*} v^*, \quad x = k_s^* x^*, \quad y = k_s^* y^*$$

を代入すると、無次元Energy loss E_l が求まる。

$$\therefore E_l = \frac{1}{\rho^* (\sigma^*)^3} E_l^* \quad (7)$$

次に、全水深にわたっての砂漣一波長、一周周期当たりのEnergy lossを与える。有次元量で表せば、

$$E_T^* = \int_{-h}^0 dy^* \int_0^{l_s^*} dx^* \int_0^{T^*} dt^* E_l^* \quad (8)$$

長さを k_s^* で、時間を σ^* で無次元化し、 E_l^* として(8)式を用いると、

$$E_T^* = \frac{\rho^* (\sigma^*)^2}{(k_s^*)^4} E_T \quad \text{ここで、} E_T = \int_{-h}^0 \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} E_l dt dx dy \quad (9)$$

従って、有次元長さで単位水平距離当たりのEnergy lossは、

$$E_n^* = \frac{E_T^*}{l_s^*} = \frac{\rho^* (\sigma^*)^2}{l_s^* (k_s^*)^4} E_T \quad (10)$$

5. 砂漣上の波の波高減衰

5.1 一定水深の場合

以下、すべての変量を有次元で考える。ある断面を通過する一周周期当たりのEnergy fluxは

$$F = \rho g H^2 C_g T / 8 \quad (11)$$

$$\text{ここで、} C_g = \frac{C}{2} \left\{ 1 + A \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right\}, \quad C = \frac{L}{T} = \frac{\sigma}{k}$$

単位水平距離当たりの一周期間でのEnergy lossを E_n とすると、

$$-\frac{dF}{dx} = E_n \quad (12)$$

今、周期と水深を一定と考えると、(8)式は、

$$F = F_c H^2 \quad \text{ここで、} F_c = \rho g T C_g \quad (13)$$

(12)、(13)式より、

$$2F_c H \frac{dH}{dx} = -E_n \quad (14)$$

中心差分で考えると、

$$\frac{H_{i+1} - H_{i-1}}{2\Delta x} = -\frac{(E_n)_i}{2F_c H_i} \quad (15)$$

5.2 一定水底勾配の場合

砂漣上の数値計算で、 ε と α を一定のもとで種々の ν の値に対する E_n が求まったとする。
この場合、 C_g も x で変化するから、

$$F = F_g C_g H^2 \quad \text{ここで、} F_g = \rho g T / 8 \quad (16)$$

とおくと、(12)式から、

$$\frac{dF}{dx} = F_g \left(\frac{dC_g}{dx} H^2 + 2C_g H \frac{dH}{dx} \right) = -F_g \quad (17)$$

よって、

$$2C_g H \frac{dH}{dx} = -\frac{E_n}{F_g} - \frac{dC_g}{dx} H^2 \quad (18)$$

中心差分をとると、

$$\frac{H_{i+1} - H_{i-1}}{2\Delta x} = -\frac{1}{2C_g} \left(\frac{E_n}{F_g H_i} + \frac{dC_g}{dx} H_i \right) \quad (19)$$

6. 層流境界層理論によるエネルギー損失と波高減衰率

水平床上の境界層内において粘性によって逸散するエネルギーは、(6)式に層流境界層理論による流速を適用すると

$$E_n \approx \frac{\mu}{2} \beta \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \frac{1}{\sinh^2 k h} \quad , \quad \beta = \sqrt{\frac{\sigma}{2\nu}} \quad (20)$$

上式を(12)式に適用し積分すれば

$$\frac{H}{H_i} = \exp\left(-\varepsilon_b \frac{\Delta x}{L}\right) \quad , \quad \text{ここで } \varepsilon_b = \frac{4\pi^2}{\beta L (\sinh 2k h + 2k h)} \quad (\text{波高減衰率}) \quad (21)$$

7. 結果と考察

数値解析によって得られたエネルギー損失と2つのパラメータ ν 及び ε との関係を図1に示す。この時、 ν は、3.で示したように波の緒言によって決定される。また、隣接する計算点間は直線補完によって評価した。図より ε の増大に伴いエネルギー損失のピークが発達し、特に実際に存在する砂漣の規模と同程度である $\varepsilon = 0.56$ の場合には広い範囲にわたる ν において大きなエネルギー損失が存在している。ここで、 $\varepsilon = 0.56, 0.4$ についてはその強い非線形性や不安定性により小さい ν に対して安定にくく信頼できる計算ができなかった。図2に水平床上の波高減衰率の理論値、実験値及び本研究で得られた数値解析解を表す。本研究の解は、ほぼ理論値及び実験値と一致しており、このことも今回の計算の妥当性を証明している。図3. Aは、2次元造波水路など実験室でよく用いられる緒言の波（水深30cm, 周期1.5秒, 初期波高8cm）の初期波高を基準として波が進行する過程での波高比の変化を表したものである。 ε が大きくなるとやはり急激に波高が低下していることがわかる。20m程度の延長をもつ造波水路においても砂漣等の凹凸のある底面をもつものと滑面のものとは水路終端では4倍近くも減衰波高に違いがでてくる。さて、この図から分かるように水平床上の波高比は直線的に減少しているが砂漣のある場合にはその変化率は変わってくる。図3. Bは、このときの波高減衰率である。 $\varepsilon = 0$ 付近では減衰率はほぼ一定であるが、 $\varepsilon = 0.56$ のそれ

はピークをもった形をしている。このピークは初期波高、水深、周期などの対応して変化するが、このピーク付近で流体の運動体系が大きく変わっていることが予想される。図4. は実海域に対応する水深、周期を用いた同様の結果である。実海域においても波高減衰率について、実験室規模のものと同様なことが言える。またこの図は非常に長い波の進行に対する減衰過程を示しているが、任意の初期波高を選びその点を原点として波が進行すると考えることにより任意の距離での波高減衰を知ることができる。また、図4で示すような実海域では減衰効果が小さいにもかかわらずフルード則を用いた模型実験での減衰作用は、無視できないものとなる可能性があることに注意が必要である。

8. 結論

- ・剥離を伴い非常に複雑な流れを発生させる砂漣等の凹凸をもつ底面上の流れに対する波高減衰を評価することができた。
- ・漂砂や底質移動などの実験等、底面に砂漣等をもつ実験では、実海域における波浪の減衰効果と異なった波高減衰が発生する可能性がある。
- ・実海域とフルード則に従う模型実験との間の波高減衰の違いを比較したかったのだが、そのためにはさらに小さな ν に対応するエネルギー損失を求める必要があり、それを今後の課題とする。

参考文献 渡部・成嶋・浜中(1993):土木学会年講, II, P. 786-787
 浜中・佐藤(1992):海講, P. 1-5

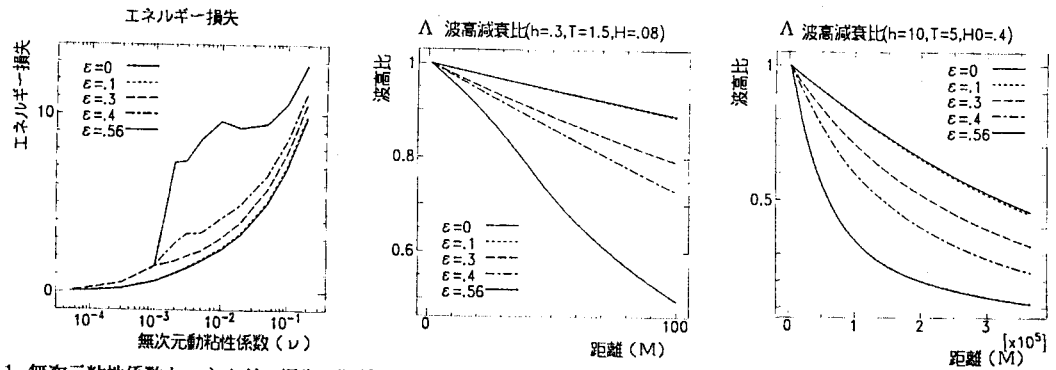


図1 無次元粘性係数とエネルギー損失の関係

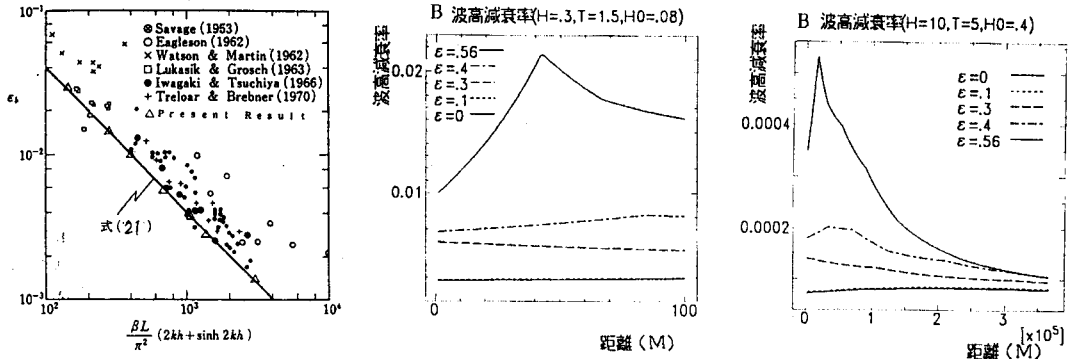


図2 波高減衰率の比較

図3 波高比と波高減衰係数

図4 波高比と波高減衰係数