

## 巻き波砕波に関する水理実験とその数値計算

防衛大学校 学生会員 ○笠原 健治  
防衛大学校 正 会 員 藤間 功司  
防衛大学校 正 会 員 嶋原 良典

### 1. はじめに

鉛直積分型の支配方程式を用いた津波数値計算において砕波を再現する場合、流量フラックス拡散型の砕波減衰項が用いられることが多い。この場合、砕波減衰項は線流量の空間に関する2階微分に、渦動粘性係数を掛け合わせたもので表現される。一般に、砕波形態は①崩れ波砕波、②巻き波砕波、③巻き寄せ波砕波、④砕け寄せ波砕波、に分類される。上記の砕波モデルを用いる場合、砕波形態は渦動粘性係数に係る定数 $\beta$ の重み付けによって考慮される。しかし、現在の津波数値計算では、実際の砕波形態に関わらず、 $\beta=0.23$ が用いられる。これは、岩瀬ら(2001)が崩れ波砕波を対象に定めた値であり、巻き波砕波のように、よりエネルギー散逸が大きい現象にこの値を適用するには疑義が残る。そこで、本稿では巻き波砕波に関する水理実験を行い、その再現計算を通じて、巻き波砕波を再現するのに適した定数 $\beta$ の決定を試みた。

### 2. 水理実験

#### (1) 実験装置の概要

本研究で使用した実験装置を図-1に示す。全長19m、幅0.4mの矩形断面の水路である。勾配3/5の斜面の後、水平から1/60まで無段階に変化可能な14mの変勾配区間に接続されている。水路の上流端に給水機構、下流端に排水機構が設けられて

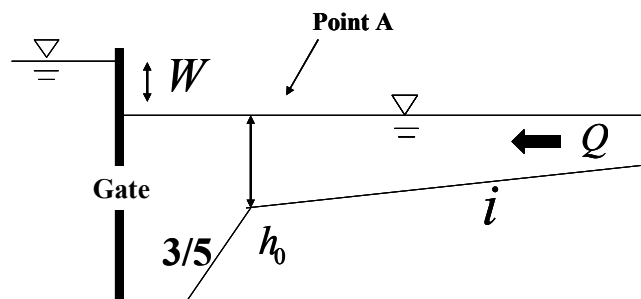


図-1 実験装置の概要

おり、水路内の水を循環させることにより、定常流を作ることができる。水路に設置されたゲートの前後部に水面差を設け、ゲートを急開することで、造波を行った。水位の測定には容量式波高計(ケネック製)を用い、サンプリング周波数は200Hzとした。可変勾配区間入口(図-1 A点)を基準点( $x=0\text{m}$ )とし、入射波を目視により追跡し、砕波位置を決定した。

#### (2) 実験条件

水理実験は、入射波の波高、水路勾配、水深及び流量を変化させ5ケース実施した。なお、いずれのケースも可変勾配区間において巻き波砕波が発生した。実験条件とその観測諸量を表-1に示す。 $I$ は水路勾配、 $Q$ は流量、 $h_0$ 及び $H_0$ はA点における水深と入射波の最大水位、 $W$ はゲート前後部の水位差、 $H_b$ は砕波波高、 $x_b$ は砕波位置である。水路の底面は鋼板であり、Manningの粗度係数は $0.012(\text{s/m}^{1/3})$ であった。

表-1 巻き波砕波を起こす実験条件

| Case | $I$  | $Q(\text{m}^3/\text{s})$ | $h_0(\text{cm})$ | $W(\text{cm})$ | $H_0(\text{cm})$ | $H_b(\text{cm})$ | $x_b(\text{m})$ |
|------|------|--------------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|
| 1    | 1/60 | 0.0                      | 16.0             | 6.0            | 4.7              | 7.8              | 4.3             |
| 2    | 1/75 | 0.0                      | 15.0             | 8.0            | 5.1              | 7.8              | 4.3             |
| 3    | 1/67 | 0.0                      | 13.0             | 6.0            | 5.0              | 6.0              | 3.5             |
| 4    | 1/60 | 9.0                      | 16.0             | 10.0           | 5.5              | 8.6              | 4.8             |
| 5    | 1/60 | 18.0                     | 17.0             | 9.0            | 4.7              | 7.9              | 5.0             |

キーワード 津波 砕波形態 水理実験 数値計算

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20 防衛大学校 建設環境工学科 TEL: 046-843-3810 (内線 3524)

### 3. 数値計算

#### (1) 支配方程式及び計算方法

水理実験の再現計算には以下に示す非線形分散波理論式（鉛直積分型の Peregrine 式）を用いた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{\frac{3}{2}}} M |M| = \frac{h^2}{3} \frac{\partial^3 M}{\partial t \partial x^2} + \nu_{\beta} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (2)$$

ここで、 $\eta$ は水位、 $M$ は線流量、 $h$ は静水深、 $D$ は全水深（ $=\eta+h$ ）、 $n$ は Manning の粗度係数、 $g$ は重力加速度である。式(2)の右辺第2項が碎波減衰項であり、渦動粘性係数は  $\nu_{\beta} = 0.23\sqrt{gD\eta}$  で表される。

差分スキームは2段階混合差分法（岩瀬ら，1998）を用い、移流項は2次精度の風上差分、空間格子間隔は 1cm として計算を行った。流れがあるケース（CASE4 及び 5）では、初期条件として全ての計算格子点に流量を設定した。上流端境界条件として、計算ステップごとに流量を付加し、下流端境界条件は、A 点で測定した水位時系列を強制入射として与えた。碎波指標には水表面流速波速比を用い、碎波限界の決定には、流れのフルード数から碎波限界を算定する式(3)（笠原ら，2008）を用いた。

$$\frac{u_s}{C} = 0.206 + \frac{0.032}{(Fr - 0.072)^2 + 0.074} \quad (3)$$

#### (2) 巻き波碎波の $\beta$ の決定

渦動粘性係数に係る定数  $\beta$  の値を、水理実験結果と数値計算結果の比較から決定する。決定は碎波以後の水位計測点における最大水位の実験値（ $H_{\text{exp}}$ ）と計算値（ $H_{\text{cal}}$ ）の分散値を持って評価する。例えば、CASE1 の場合、碎波点は 4.3m であるため、碎波点以後の水位計測点である、4.5m、4.75m、5m、6m、7m における水位が比較の対象となる。図-2 は、碎波減衰過程を対象に、係数  $\beta$  に対する水位の実験値（ $H_{\text{exp}}$ ）と計算値（ $H_{\text{cal}}$ ）の誤差分散を示したものである。分散については、式(4)で評価する。なお、 $N$  は各実験ケースにおける碎波後の水位測定点の総数であり、 $N=26$  である。

$$\text{variation} = \frac{\sum (H_{\text{exp}} - H_{\text{cal}})^2}{N} \quad (4)$$

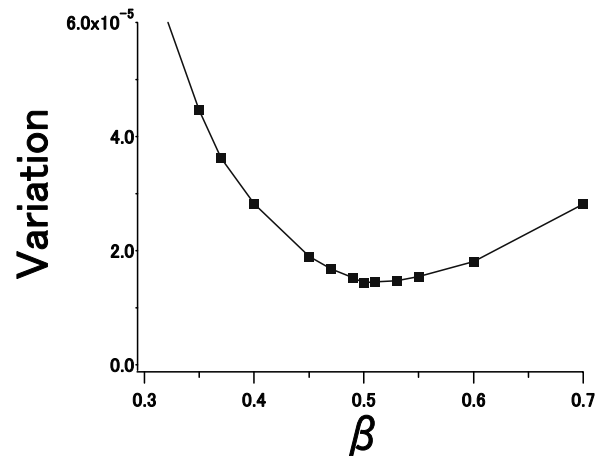


図-2  $\beta$  と水位分散値の関係（CASE1-5）

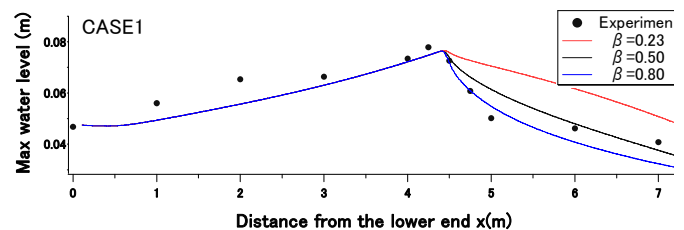


図-3  $\beta$  の違いによる最大水位の空間分布（CASE1）

図-2 から、水位誤差が最小になるのは  $\beta=0.50$  のときであり、この値を巻き波碎波における  $\beta$  とする。図-3 から、 $\beta=0.23$  とすると、水位を過大評価、0.80 とすると過小評価になることがわかる。

### 4. まとめ

水理実験とその再現計算を通じ、巻き波碎波の再現に適した定数  $\beta$  の値を提案し、 $\beta=0.50$  とすることで、碎波減衰領域における水位を精度よく再現できることを確認した。

### 参考文献

- 岩瀬浩之・見上敏文・後藤智明（1998）：非線形分散波理論を用いた実用的な津波計算モデル，土木学会論文集，No.600/II-44，pp.119-124
- 岩瀬浩之・深澤雅人・後藤智明（2001）：ソリトン分裂波の碎波変形に関する水理実験と数値計算，海岸工学論文集，第48巻，pp.306-310
- 笠原健治・藤間功司・嶋原良典（2008）：流れを遡る津波の碎波機構に関する研究，海岸工学論文集，第55巻，pp.101-105