

斜め入射する砕波段波の斜面からの反射

松 富 英 夫*・神 昭 平**

1983 年日本海中部地震津波の際に秋田県北部海岸で形成されたエッジ・ボアとの関連で、水平床上を伝播した後、一様勾配斜面上に斜め入射する砕波段波の基礎的な反射特性を実験的に検討している。また、対象段波の簡易モデルを考案し、実験結果との比較・検討によりその有用性を確かめ、本モデル解の考察や前報の鉛直壁における解との比較・検討を通して対象段波の反射特性を総合的に論じている。なお、本モデル理論は鉛直壁における反射段波理論や既往の定常斜め跳水理論を包含しており、より一般的なものとなっている。

1. はじめに

著者らは、1983 年日本海中部地震津波の際に秋田県北部海岸で形成されたエッジ・ボア (Shuto, 1985) との関連で、一様勾配斜面上に伝播する砕波段波の二次元挙動特性 (Matsutomi, 2003) と水平床上を伝播した後、鉛直壁に斜め入射する砕波段波の基礎的な反射特性の検討を行った (松富・今井, 2003)。

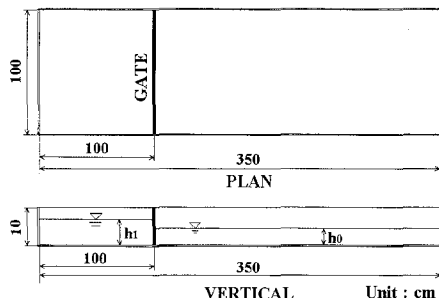
本研究は実験を通して、水平床上を伝播した後、一様勾配斜面上に斜め入射する砕波段波の基礎的な反射特性を検討する。また、対象段波の簡易モデルを考案し、実験結果との比較・検討によりその有用性を確かめ、モデル解の考察や鉛直壁における解 (松富・今井, 2003) との比較・検討を通して対象段波の反射特性を総合的に論じる。

2. 実 験

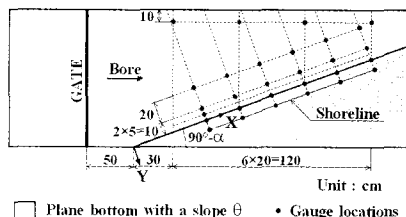
実験に用いた平面水槽を図一1に示す。透明な塩化ビニール樹脂製である。この水槽に図一2に示す塩化ビニール樹脂製の一様勾配斜面 (厚さ 4 mm で、斜面法先と水平床は粘土で滑らかに接続) を設置した。図中の黒丸●は容量式波高計の設置点で、本図は代表的な配置例を示す。測定は各測点間の同期を考慮しながら複数回 (多くの場合、8 回) に分けて行った。座標原点 O は斜面法先の最上流端で、X 軸は斜面法先に沿って取る。

段波は厚さ 2 mm の真鍮製ゲートを急開することで発生させた (Matsutomi, 2003)。実験ケースを表一1に示す。表中、 h_1 は初期ゲート上流側の一様静水深、 h_0 は初期ゲート下流側の一様静水深、 α は段波入射角 (斜面法先と直角な Y 軸を基準。図一2または4参照)、 θ は斜面傾斜角である (図一5参照)。各ケース 5 回ずつ実験を行った。発生段波は何れも移動跳水発生条件 (松富, 1989) を満足する砕波段波である。

測定項目は容量式波高計による入・反射段波の時空間変化とビデオによる入・反射段波の伝播状況および平面



図一1 実験水槽



図一2 一様勾配斜面と波高計の配置

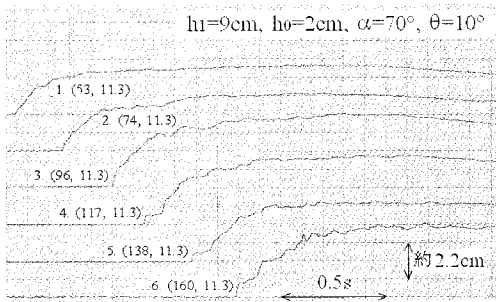
表一1 実験条件

h_1 (cm)	7, 8, 9
h_0 (cm)	2
α (°)	60, 70, 80
θ (°)	10, 20

的な拡がりである。

図一3に $h_1=9$ cm, $h_0=2$ cm, $\alpha=70^\circ$, $\theta=10^\circ$ の場合の初期汀線各位置における段波の経時変化例を示す。図中の括弧内の数値は波高計設置点の座標 (X, Y) である。図から、段波が伝播するにつれて、段波波高が増大する傾向が見て取れる。ただし、各波高計のキャリブレーションが若干異なるため、その傾向は統一的となっていない。また、エッジ・ボアの固有現象である進行の速い陸上側の水塊が段波前面に遡下するためか (Chen, 1961), $X=117$ cm 以後の段波の立ち上がり初期に薄層域が認められる。段波伝播速度が大きく変動することや定常的な反

* 正会員 工博 秋田大学助教授 工学資源学部土木環境工学科
** 東洋建設株式会社



図—3 初期汀線各位置における段波の経時変化例

射段波が生じていることも判る.

3. 斜面で斜め反射する碎波段波の簡易モデル

(1) 基礎式

水平床上を伝播した後、一様勾配斜面で斜め反射する碎波段波の簡易モデルと記号の定義を図-4に示す。そして、②を除いて、鉛直壁の場合（松富・今井，2003）と同じ次の仮定を導入する。

- ①入射段波は定常.
- ②反射段波は準定常.
- ③反射段波面 BS は直線で, 多角形 SBOS' の平坦な反射段波領域を形成.

仮定③は領域 R-0 へ伝播する反射段波面 BS の伝播速度が一樣水深部と一樣勾配斜面部で同じ（両部が一体となって伝播する）と仮定したことに相当する。

反射段波面 BO における質量と運動量の保存則は、鉛直壁で斜め反射する場合（松富・今井，2003）と同じで、次式である。

$$h_2 u_2 \sin(\alpha + \beta) = h_3 u_3 \cos \beta + (h_3 - h_2) \omega \quad \dots\dots (1)$$

$$h_2 u_2^2 \sin^2(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} g h_2^2 - \frac{1}{2} g h_3^2 = h_3 u_3^2 \cos^2 \beta$$

$$+ \{ h_3 u_3 \cos \beta - h_2 u_2 \sin(\alpha + \beta) \} \omega \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 h_2 と u_2 は入射段波（領域 R-2）の水深と流速、 h_3 と u_3 は反射段波（領域 R-3）の水平床部における水深と水平床・斜面部全体における流速（流向は斜面法先方向に平行と仮定）、 ω は領域 R-2 へ伝播する反射段波の伝播速度、 β は反射段波面 BO の斜面法先に直角な方向（Y 軸）からの鋭角、 g は重力加速度である。

一般に h_2 , u_2 と α は入射段波条件として予め与えられる。 h_3 と u_3 には後述するように一義的な関係があり(式(4)と(5)参照), 式(1)と(2)における未知量は h_3 , ω と β の3つである。問題を閉じるにはもう1つ独立な関係式が必要であり, それは次の幾何学的なもので, 鉛直壁の場合(松富・今井, 2003)と同じである。

$$\frac{\omega_3}{\omega_2} = -\frac{\sin \beta}{\cos(\alpha + \beta)} \dots\dots\dots (3)$$

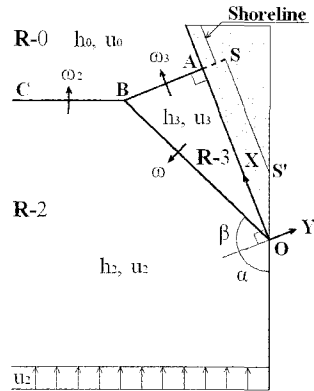
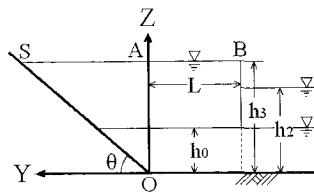


図-4 反射段波の簡易モデルと記号の定義



図—5 一様勾配斜面部のモデル

ここで、 ω_3 は領域 R-0 へ伝播する反射段波の伝播速度、 ω_2 は入射段波の伝播速度である。

ω_2 は一般に条件として与え与えられる。 ω_3 は、領域 $R-0$ の流速 u_0 が零の場合、次式となる (図-5 参照)。

$$\omega_3 = \sqrt{gh_0} \left\{ \frac{1}{3} \frac{h_3}{h_0^2} \frac{2L \tan \theta + h_3}{2L \tan \theta + h_0} \cdot \frac{h_3^2 + h_3 h_0 + h_0^2 + 3(h_3 + h_0)L \tan \theta}{h_3 + h_0 + 2L \tan \theta} \right\}^{1/2} \dots\dots (4)$$

$$u_3 = \left\{ 1 - \frac{(h_0 + 2L \tan \theta) h_0}{(h_3 + 2L \tan \theta) h_3} \right\} \omega_3 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 h_0 は一般に条件として与ええられる。式(4)と(5)の $L(X)$ は段波面 AB の長さで、パラメータである。 X は L と次式の関係があり、 β の決定後に評価される(次節参照)。

$$X=L \tan \beta \dots\dots\dots (6)$$

よって, ω_3 も h_3 のみの関数であり, 本研究の基礎式は式 (1), (2) と (3) である.

(2) 解 法

基礎式(1)~(3)は未知量に関する三角関数や累乗項を含むなど複雑である。解析解を得ることは難しく、数値解を求めることにする。

式 (1) と (2) から次式を得る.

$$\omega = -u_2 \sin(\alpha + \beta) + \sqrt{gh_2} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{h_3}{h_2} \left(\frac{h_3}{h_2} + 1 \right)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(1), (4), (5)と(7)から次の β と h_3 の関係式を得る.

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{C_3}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2}} \right) - \tan^{-1} \left(-\frac{C_1}{C_2} \right) \dots\dots\dots (8)$$

ここで,

$$C_1 = u_3 - u_2 \sin \alpha$$

$$C_2 = u_2 \cos \alpha$$

$$C_3 = \left(1 - \frac{h_2}{h_3} \right) \sqrt{g h_2} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{h_3}{h_2} \left(\frac{h_3}{h_2} + 1 \right)}$$

式(8)において L (任意の一定値)と $h_3 (> h_2)$ を仮定すれば, それに応じた β が求まる. ただし, 無数の (h_3, β) の組が存在して, 求めた (h_3, β) の組で式(3)を満足するものを解として選ぶ. そして, 式(6)から段波面BSの位置 X を評価する. L を変えて上記を繰り返せば, X に対する解, 換言して, 経時的な解が得られる.

4. 結果と考察

(1) 鉛直壁における定常解

$L \rightarrow \infty$ の時, すなわち $X \rightarrow \infty$ の時, 式(4)と(5)は各々次式の鉛直壁における定常解(松富・今井, 2003)となる.

$$\omega_3 = \sqrt{g h_0} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{h_3}{h_0} \left(\frac{h_3}{h_0} + 1 \right)} \dots\dots\dots (9)$$

$$u_3 = \left(1 - \frac{h_0}{h_3} \right) \omega_3 \dots\dots\dots (10)$$

これは, 伝播または時間が経つにつれて, 一様勾配斜面部の影響が小さくなることによる.

式(7)において $\omega=0$ と置くと, 屈折した射流水路における定常斜め跳水の関係式(Rouse, 1938)を得る. よって, 本モデル理論は鉛直壁における反射段波理論や定常斜め跳水理論を包含した一般的なものとなっている.

(2) 解 例

本簡易モデルの反射段波波高, 反射段波面BOの向き β , 反射段波伝播速度に関する解例を図-6, 7, 9と10に示す. 図中の凡例, 例えば“9-2”は $h_1=9$ cm, $h_0=2$ cmであることを示す. この凡例は以後の図でも同じである. 比較のため, 鉛直壁($\theta=90^\circ$)における定常解を図-8と11に示す.

図-6と7によると, 領域R-0へ伝播する反射段波の段波波高 $\Delta H_3 (=h_3-h_0)$ は, 段波入射角 α が 90° に近づくにつれて, 入射段波波高 $\Delta H_2 (=h_2-h_0)$ に収束している. 領域R-2へ伝播する反射段波の段波波高 $\Delta H (=h_3-h_2)$ は, α が 90° に近づくにつれて, 零に収束している. β は $\alpha \rightarrow 90^\circ$ (無反射)の場合でも零にならない. L が大きくなるにつれて, 領域R-2へ伝播する反射段波の段波波高 ΔH , R-0へ伝播する反射段波の段波波高 ΔH_3 と反射段波面BOの向き β は大きくなり, 図-8に示す鉛直壁

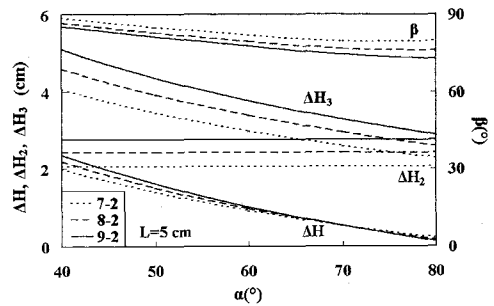


図-6 反射段波波高と反射段波面BOの向き ($\theta=10^\circ$)

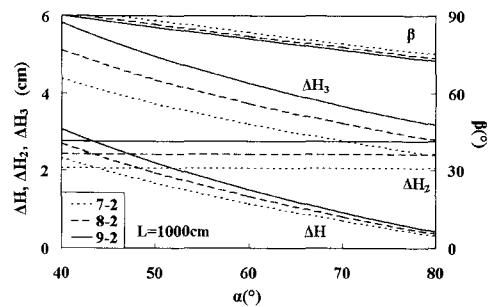


図-7 反射段波波高と反射段波面BOの向き ($\theta=10^\circ$)

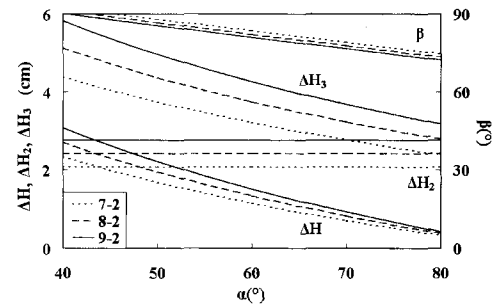
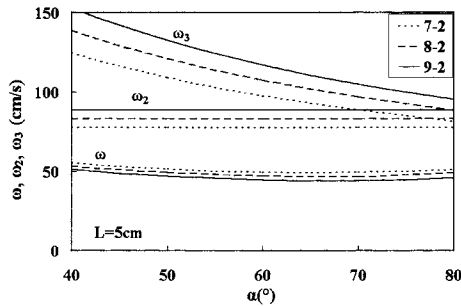
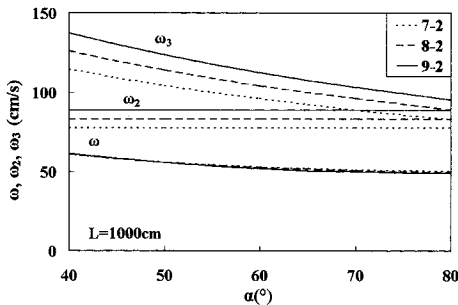
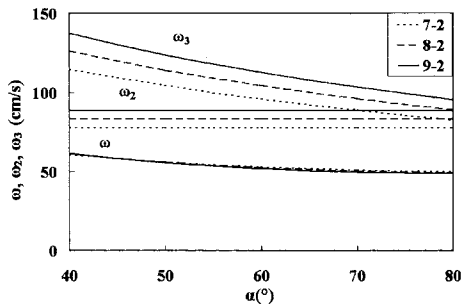


図-8 反射段波波高と反射段波面BOの向き ($\theta=90^\circ$)

における定常解に漸近する.

図-9と10によると, 領域R-0へ伝播する反射段波の伝播速度 ω_3 は, α が 90° に近づくにつれて, 入射段波伝播速度 ω_2 に収束している. 領域R-2へ伝播する反射段波の伝播速度 ω は $\alpha \rightarrow 90^\circ$ の場合でも零にならず, 例示程度の入射段波強度の変化では入射段波強度にほとんど依存しない. 参考までに, “9-2”のケースでも入射段波の上流域は常流(“15-2”から射流)である. L が大きくなるにつれて, 領域R-0へ伝播する反射段波の伝播速度 ω_3 は小さくなり, 領域R-2へ伝播する反射段波の伝播速度 ω は図-11に示す鉛直壁における定常解に漸近する.

図-12と13に $\alpha=70^\circ$, $\theta=10^\circ$ と 90° における反射段波面BOの向き β と領域R-0へ伝播する反射段波の流速 u_3 の X に対する変化例を示す. X が大きくなるにつれ

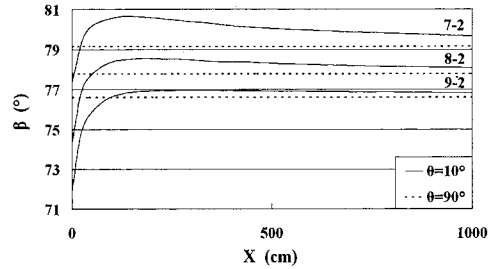
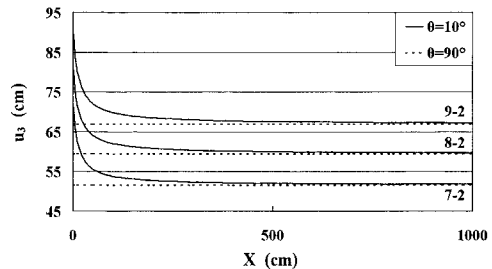

 図-9 反射段波の伝播速度 ($\theta=10^\circ$)

 図-10 反射段波の伝播速度 ($\theta=10^\circ$)

 図-11 反射段波の伝播速度 ($\theta=90^\circ$)

て、両者共に鉛直壁における定常解に収束している。

以上の反射段波波高、反射段波伝播速度、反射段波面BOの向きと反射段波流速の諸傾向は本簡易モデルの有用性を示すものである。

(3) 反射段波波高

図-14に $\alpha=70^\circ$ 、 $\theta=10^\circ$ と 90° における領域R-0へ伝播する反射段波の段波波高 ΔH_3 のX方向変化例を示す。 $\theta=10^\circ$ の場合を示した理由は、 20° の場合に比べて鉛直壁における定常解への収束が緩やかで、Xが小さい段階の鉛直壁における実験結果と明瞭な差が現れるからである。図中、◇と□、△は実験値で、白抜きが $h_1=7$ cm、灰色が8 cm、黒塗りが9 cmの場合のものである。Y=0は斜面法先または鉛直壁沿い、Y=11.3 cmは $\theta=10^\circ$ の場合の初期汀線沿いである。これらは以後の図でも同じ


 図-12 反射段波面BOの向き ($\alpha=70^\circ$)

 図-13 領域R-0へ伝播する反射段波の流速 ($\alpha=70^\circ$)

である。図から、①理論値はXが大きくなるにつれて鉛直壁における定常解に収束すること、②理論値と実験値が全体的によく一致すること、③X=30~60 cmでは実験値においても鉛直壁と一樣勾配斜面の場合で顕著な差が現れること、④Xが大きくなるにつれて、一樣勾配斜面の実験値が鉛直壁のものに近づくこと、などが判る。

(4) 反射段波伝播速度

図-15に $\alpha=70^\circ$ 、 $\theta=10^\circ$ と 90° における領域R-0へ伝播する反射段波の伝播速度 ω_3 のY=0とY=11.3 cmにおけるX方向変化例を示す。図から、実験値は大きく変動しているが、①理論値と実験値が比較的良好に一致すること、② $\theta=10^\circ$ の場合の実験値は平均的に 90° の場合のものより小さいこと、③理論値はXが大きくなるにつれて定常解に収束すること、などが判る。これらも本モデルの有用性を支持するものである。

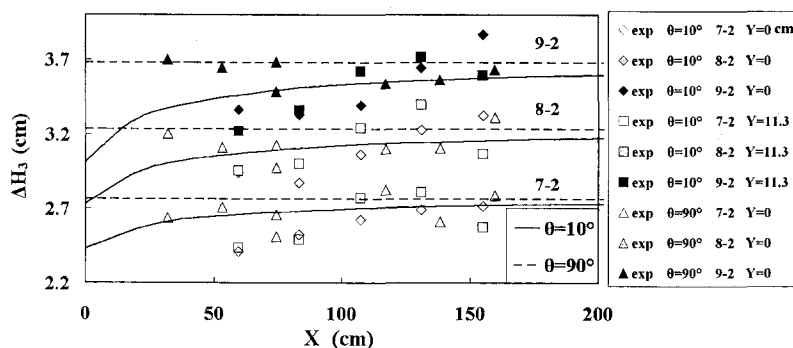
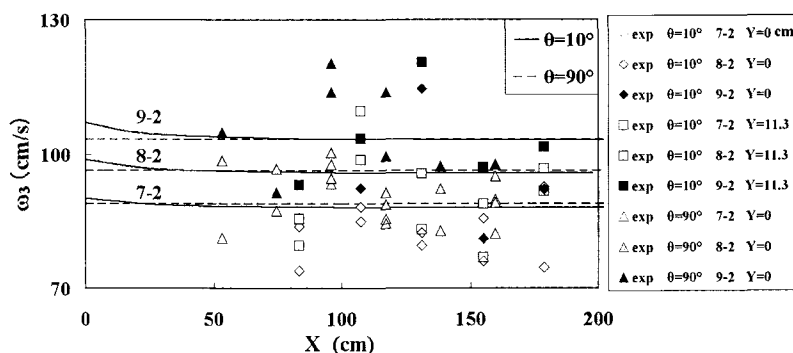
5. おわりに

本研究で得られた主な結論は次の通りである。

① 水平床上を伝播した後、一樣勾配斜面に斜め入射する碎波段波の反射実験を行い、基礎的な反射特性を検討すると共に、汀線沿いに反射段波が伝播(一種のMach Stemを形成)し、進行の速い陸上側の水塊が反射段波の前面域へ巻き込むなどの現象を確認した。

② 一樣勾配斜面で斜め反射する碎波段波の簡易モデルを考案し、モデル解の考察や実験結果との比較・検討を通してその有用性を確かめた。

③ 一樣勾配斜面における反射段波は、時間の経過(X

図-14 反射段波波高の実験値と理論値の比較 ($\alpha=70^\circ$)図-15 反射段波伝播速度の実験値と理論値の比較 ($\alpha=70^\circ$)

または L の増大) と共に、鉛直壁における反射段波へ漸近する。

④ 本モデル理論は前報の鉛直壁における反射段波理論や既往の定常斜め跳水理論を包含しており、より一般的なものとなっている。

⑤ 一様勾配斜面の場合でも、反射段波面 BO の向き β や領域 R-2 へ伝播する反射段波の伝播速度 ω は段波強度にあまり依存せず、入射角 $\alpha \rightarrow 90^\circ$ でも零ではないことなど、対象段波の反射特性を総合的に検討した。

謝辞: 本実験を行うにあたり秋田大学大学院博士後期課程 今井健太郎氏と卒研生 大沼康太郎君の助力を得た。平成 15 年度文科省振興調整費(代表: 京都大学教授 河田恵昭) の補助を受けた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 松富英夫 (1989): 移動跳水(波状段波非)発生条件の検討, 第 33 回水理講演会論文集, pp. 271-276.
- 松富英夫・今井健太郎 (2003): 斜め入射する碎波段波の反射特性, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 261-265.
- Chen T. C. (1961): Experimental study on the solitary wave reflection along a straight sloped wall at oblique angle of incidence, US Beach Erosion Board Tech. Memo., No. 124, 24 p.
- Matsutomi, H. (2003): Two-dimensional behavior of a strong bore over a sloping beach, Jour. of Hydraulic, Coastal and Environmental Eng., JSCE, No. 740/II-64, pp. 197-208.
- Rouse, H. (1938): Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 422 p.
- Shuto, N. (1985): The Nihonkai-chubu earthquake tsunami on the north Akita coast, Coastal Eng. in Japan, JSCE, Vol. 28, pp. 255-264.