

II-110

段波の斜め反射に関する実験

秋田大学 正員○松富 英夫

秋田大学 学員 今井健太郎

1. はじめに 1983年日本海中部地震津波の際、秋田県北部海岸でエッジ・ボアが形成された。著者らはこのエッジ・ボアとの関連で、斜面上に斜め入射する段波の挙動に興味を持っている。本研究は実験を通して、水平床上を伝播し、真っ直ぐな鉛直壁や一様勾配斜面に斜め入射する段波の反射特性を検討する。鉛直壁で斜め反射する段波については、簡易モデルを考案し、実験とモデル結果の比較・検討などを行う。

2. 実験 水槽を図-1に示す。この水槽に図-2に示す一様勾配斜面や鉛直壁を設置した。●は波高計設置点で、本図は代表例である。測定は同期を考慮しながら複数回に分けて行った。座標原点Oは斜面や鉛直壁の上流端で、X軸は斜面法先や鉛直壁に沿って取る。

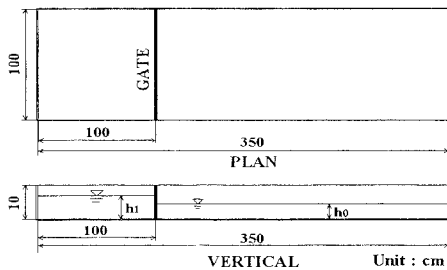


図-1 実験水槽

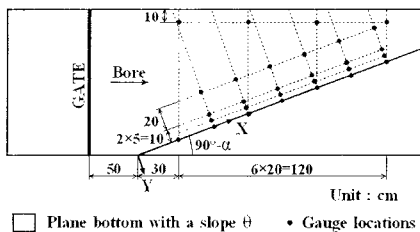


図-2 斜面と波高計の配置

段波はゲート急閉により発生させた。実験は表-1に示す27ケースで、 h_1 は初期ゲート上流側水深、 h_0 は初期ゲート下流側の一様水深、 α は段波入射角（法先や鉛直壁の直角方向を基準）、 θ は斜面傾斜角である。

測定項目は波高計による入・反射段波の時空間変化とビデオによる反射段波の平面的な拡がり等である。

3. 反射段波の簡易モデル

表-1 実験条件

h_1 (cm)	7, 8, 9
h_0 (cm)	2
α (°)	60, 70, 80
θ (°)	10, 20, 90

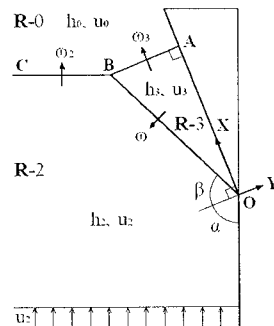


図-3 反射段波モデル、記号の定義と座標系

3.1 基礎式 水平床上を伝播し、真っ直ぐな鉛直壁で斜め反射する段波を考える。定常な入・反射段波を仮定する。図-3にモデルや諸記号の定義などを示す。

上流側の段波面BOでの質量と運動量の保存則は、

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

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

ここで、 h_2 と u_2 は入射段波（領域R-2）の全水深と流速、 h_3 と u_3 は反射段波（領域R-3）の全水深と流速（流向は鉛直壁に平行と仮定）、 ω は反射段波の領域R-2への伝播速度、 β は反射段波面BOの鉛直壁に直角な方向からの角、 g は重力加速度である。

h_2 、 u_2 と α は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(1)と(2)における未知量は h_3 、 ω と β の3つである。もう1つ基礎式が必要で、それは次の幾何学的なものである。

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

ここで、 ω_2 は入射段波の伝播速度で、予め与えられ、 ω_3 は反射段波の領域R-0への伝播速度で、領域R-0に

おける流速 u_0 が零の時は次式が成立する.

$$\omega_3 = \sqrt{gh_0} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{h_3}{h_0} \left(\frac{h_3}{h_0} + 1 \right)} \quad (4)$$

$$u_3 = \left(1 - \frac{h_0}{h_3} \right) \omega_3 \quad (5)$$

h_0 も予め与えられる. ω_3 は 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.

3.2 解法 基礎式は未知量に関する三角関数や果乗項を含むなど複雑で, その解析解を得ることは難しい. 数値的に解を求めることにする.

式(1)と(2)から次式を得る.

$$\omega = -u_2 \sin(\alpha + \beta) + \sqrt{gh_2} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{h_3}{h_2} \left(\frac{h_3}{h_2} + 1 \right)} \quad (6)$$

式(1), (4), (5), (6)から次の h_3 と β の関係を得る.

$$\left(1 - \frac{h_0}{h_3} \right) \sqrt{gh_0} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{h_3}{h_0} \left(\frac{h_3}{h_0} + 1 \right)} \cos \beta - u_2 \sin(\alpha + \beta) + \left(1 - \frac{h_2}{h_3} \right) \sqrt{gh_2} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{h_3}{h_2} \left(\frac{h_3}{h_2} + 1 \right)} = 0 \quad (7)$$

式(7)において $h_3 (>h_2)$ を適当に仮定すれば, それに対応した β を数値的に求めることは容易である. ただし, 多くの (h_3, β) の組が求まる. そこで, (h_3, β) の組で式(3)を満足するものを選び出すことになる.

3.3 定常衝撃波 式(6)において $\omega=0$ と置くと, 射流水路における定常衝撃波(定常跳水)の関係式を得る. しかし, 本理論では入射段波の上流域が常流・射流にかかわらず一般に $\omega=0$ とならず, この点が従来の理論と異なり, より一般性があるものとなっている.

4. 結果と考察 図-4に本モデルの解例を示す. 凡例, 例えば“9-2”は $h_1=9$ cm, $h_0=2$ cmを示す(以下同じ). 図によると, 領域 R-0 へ伝播する反射段波の波高 $\Delta H_3 (=h_3-h_0)$ は, 入射角 α が 90° に近づくにつれて, 入射段波の波高 $\Delta H_2 (=h_2-h_0)$ に収束する. 領域 R-2 へ伝播する反射段波の波高 $\Delta H (=h_3-h_2)$ は, α が 90° に近づくにつれて, 零に収束する. 反射段波面 BO の角 β は段波強度にあまり依存せず, $\alpha < 40^\circ$ で $\alpha=0^\circ$ (直角入射) 時の 90° にはば達し, $\alpha=90^\circ$ (無反射) でも零にならない(この角は Mach 角に相当).

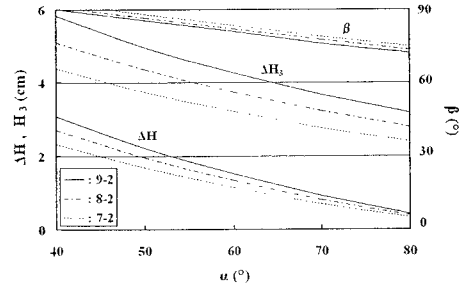


図-4 反射段波波高と段波面 BO の方向(理論)

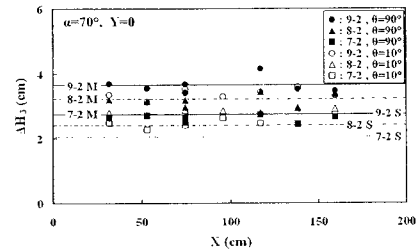


図-5 反射段波波高への斜面角度の影響

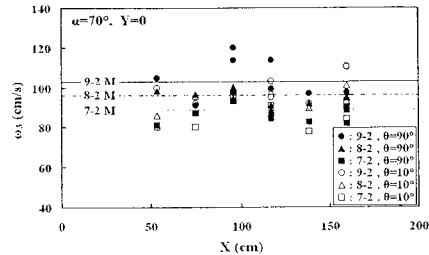


図-6 反射段波の伝播速度(段波面 AB)

図-5に $\alpha=70^\circ$, 斜面勾配 $\theta=10^\circ$ と 90° (鉛直壁) 時の領域 R-0 へ伝播する法先や壁沿い ($Y=0$) の反射段波の波高 ΔH_3 の実験値と本理論(添字 M を添付)および入射段波の波高 ΔH_2 に関する Stoker 理論(添字 S を添付)の比較を示す. 図中, $\circ$ や $\triangle$, $\square$ は実験値, 実線や一点鎖線, 点線は理論値である(以下同じ). $\theta=10^\circ$ の実験値は平均的に 90° のものより小さく, 全てが本理論と Stoker 理論の間に位置している.

図-6に $\alpha=70^\circ$, $\theta=10^\circ$ と 90° 時の領域 R-0 へ伝播する法先や壁沿いの反射段波の伝播速度 ω_3 の実験値と本理論の比較を示す. $\theta=90^\circ$ の実験値と理論は比較的良好一致し, $\theta=10^\circ$ の実験値は 90° のものより小さい.

5. おわりに 水平床上传播し, 真っ直ぐな鉛直壁や一様勾配斜面に斜め入射する段波の実験を行い, その反射特性を検討した. 鉛直壁で斜め反射する段波については簡易モデルを考案し, 有効性を確かめた.