II－22　斜め入射する砕波段波の斜面からの反射

秋田大学　学生員　○神　昭平　正員　松冨　英夫

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ヂ・ボアが形成され，防災の観点からその研究の必要性が指摘された[1]．本研究は実験を通して，水平床上を伝播し，一様勾配斜面に斜めに入射する砕波段波の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，実験との比較・検討によりその有効性を確かめ，モデル解の考察を通して対象段波の反射特性を総合的に論じる．

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を設置した．●は波高計設置点である．測定は同期を考慮しながら8回に分けて行った．座標原点Oは斜面の上流端で，X軸は斜面法先に沿って取る．段波はゲート急開により発生させた[2]．

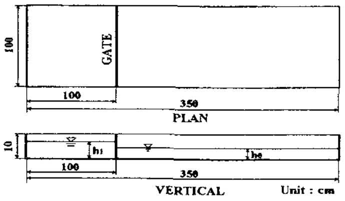

図-1 実験水槽

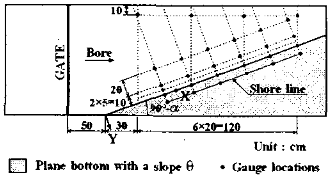

図-2 斜面と波高計の設置位置

実験は表-1に示す3ケースで，h_1は初期ゲート上流側静水深，h_0は初期ゲート下流側静水深，αは段波入射角度(斜面法先と直角なY軸方向を基準)，θは斜面傾斜角度である．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である．

表-1 実験ケース

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

3．斜面部における反射段波の簡易モデル

水平床上を伝播し，その後一様勾配斜面に斜め入射する砕波段波の簡易モデルを構築する．既報[3]とほぼ同じく次の仮定を導入する．

① 入射段波は定常，反射段波は準定常である．

② 段波面BSは直線で，直角三角形ABOの反射段波領域を形成する．

図-3に反射段波の簡易モデル，諸記号の定義と座標系を示す．仮定②は領域R-0へ伝播する反射段波面BSの伝播速度が一様水深部と一様勾配斜面部で同じである（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．

鉛直壁で斜め反射する場合[3]と同じく，上流側の反射段波面BOでの質量と運動量の保存則は次式である．

$$h_2u_2\sin(\alpha+\beta)=h_3u_3\cos\beta+(h_3-h_2)\omega \quad (1)$$

$$h_2u_2^2\sin^2(\alpha+\beta)+\frac{1}{2}gh_2^2-\frac{1}{2}gh_3^2=h_3u_3^2\cos^2\beta+\{h_3u_3\cos\beta-h_2u_2\sin(\alpha+\beta)\}\omega \quad (2)$$

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)の一様水深部における全水深と流速（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，u_3には後述するように反射段波面ABの長さ$L(X)$（図-4参照）をパラメータとして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，既報[3]と同じである．

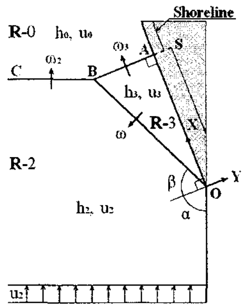

図-3 反射段波簡易モデル

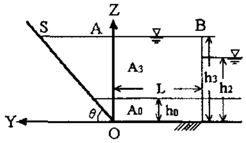

図-4 斜面部のモデル

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

ここで，ω_2は入射段波の伝播速度で，一般に条件として予め与えられる．ω_3は領域R-0へ伝播する反射段波伝播速度で，領域R-0の流速u_0=0の場合，次式が成立する．

$$\omega_3=\sqrt{gh_0}\sqrt{\frac{1}{3}\frac{h_3}{h_0^2}\frac{2L\tan\theta+h_3}{2L\tan\theta+h_0}\frac{h_3^2+h_3h_0+h_0^2+3(h_3+h_0)L\tan\theta}{h_3+h_0+2L\tan\theta}} \quad (4)$$

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

式(4)の L は段波面 AB の長さで，パラメータである．X と L には次式の関係があり，β 決定後に評価できる．

$$X = L\tan\beta \tag{6}$$

$L \to \infty$の時，すなわち $X \to \infty$の時，式(4)と(5)は鉛直壁における定常解[3]となる．

よって，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．

基礎式(1)～(3)は未知量の三角関数や累乗項を含むなど複雑である．解析解を得ることが難しく，最終的には数値解を求めることにする．解法は次の通りである．

式(1)と(2)から次式を得る．

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

式(1)，(4)，(5)と(7)から次の β と h_3 の関係式を得る．

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

ここで，

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

$$C_2 = u_2\cos\alpha,$$

$$C_3 = \left(1 - \frac{h_2}{h_3}\right)\sqrt{gh_2}\sqrt{\frac{1}{2}\frac{h_3}{h_2}\left(\frac{h_3}{h_2}+1\right)}.$$

式(8)において h_3 ($>h_2$) を仮定すれば，それに応じた β が求まる．しかし，無数の (h_3, β) の組が存在しえて，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ことになる．

4．結果と考察

本簡易モデルの反射段波波高，反射段波面 BO の向き β と反射段波伝播速度に関する解例を図-5 と図-6 に，反射段波波高の理論値と実験値，反射段波伝播速度の理論値と実験値を図-7 と図-8 に示す．図中の凡例，例えば "7-2" は h_1=7cm，h_0=2cm を，実線と破線は θ=10°と θ=90°(定常解)のときの理論値を示す．理論値と実験値はよく一致し，全体的に θ=10°の実験値は θ=90°のものより小さい．また，全ての理論解について L が大きくなるにつれて θ=90°の解に漸近する．つまり X 軸を無限にとると θ に依存しない．

5．おわりに

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砕波段波の実験を行い，その反射特性を検討した．また，簡易モデルを考案し，実験とモデル結果の比較を通してその有効性を確かめた．パラメータ L を導入することで一様勾配斜面に対する反射段波特性を検討した．領域 R-2 へ伝播する反射段波の伝播速度 ω と反射段波面 BO の向き β は段波強度にあまり依存しないこと，一様勾配斜面での反射段波は時間の経過（L または X の増大）と共に定常解(鉛直壁)に収束することを示した．

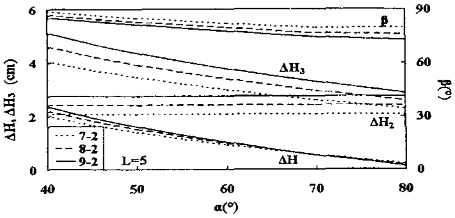

図-5 反射段波波高と段波面 BO の向き

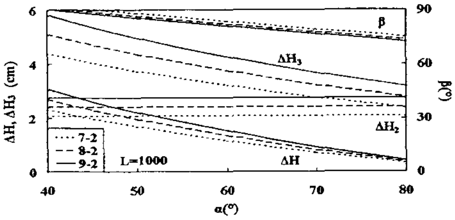

図-6 反射段波波高と段波面 BO の向き

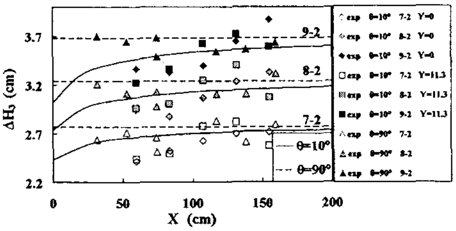

図-8 反射段波波高の実験値と理論値（α=70°）

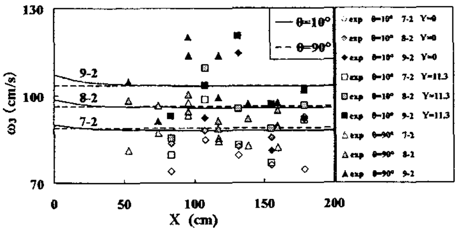

図-9 反射段波伝播速度の実験値と理論値（α=70°）

参考文献：1) Shuto, N.: Coastal Eng. in Japan, *JSCE*, 1985. 2) Matsutomi, H.: Coastal and Environ. Eng, *JSCE*, 2003. 3) 松冨ら：海岸工学論文集，第 50 巻，2003. 4) 松冨：水講論文集，第 33 巻，1989. 5) Chen, T. C.: *US Beach Erosion Board Tech. Memo.*, 1961.