

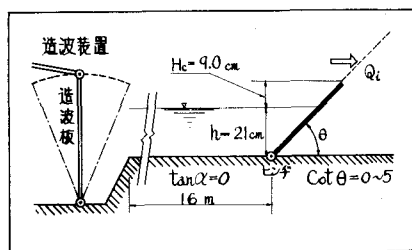
中部工業大学 正員 高田 彰

1. ま え が き

堤体に波が衝突するとき壁体の法勾配の緩急によって遡上波、反射波および越波の状況が著しく異なる。本研究では重複波水深領域の波を対象にして壁体の法勾配が変化することによって遡上高、反射率、および越波水量にどのような影響を及ぼすかを実験的に明らかにする。さらに越波水量と遡上高の関連性および越波水量と反射率の関連性を比較して相互の現象の位置づけを定量的に示す。

2. 実験方法

実験は長さ 21.4 m、高さ 0.52 m、幅 0.30 m の可傾式造波水路で行った。実験条件は図-1 に示すように水路勾配を水平 ($\tan \alpha = 0$) とし、一様水深 $h = 21$ cm、堤体法勾配 $\tan \theta = 1/\cot \theta = 1/0 \sim 1/5$ 、および静水位上の壁体天端高 $H_c = 9.0$ cm = const. とした。なお壁面はラワン材で作り支点は蝶番を取付けた。



(図-1) 実験条件

実験波は $H_0/L_0 = 0.02$ ($T = 1.6$ sec, $H_0 = 7.6$ cm) の波、 $H_0/L_0 = 0.03$ ($T = 1.2$ sec, $H_0 = 7.2$ cm) の波および $H_0/L_0 = 0.05$ ($T = 1.0$ sec, $H_0 = 7.9$ cm) の波の3種類である。

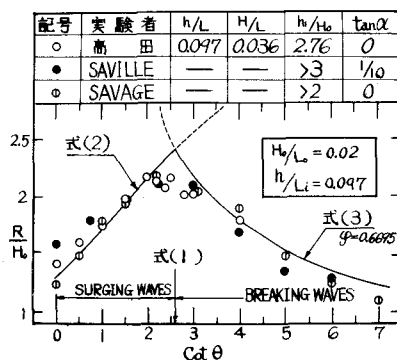
遡上高および越波水量の測定値は第4波～第8波の5波の平均値を採用し、遡上波形の面積は第6波を対象にして写真測定より求めた。また反射率は Miche の理論値を用いることにした。

3. 実験結果とその考察

(1) 遡上高と法面勾配の関係

実験の結果、 R/H_0 と $\cot \theta$ の関係は、 $H_0/L_0 = 0.02$ の波について図-2、 $H_0/L_0 = 0.05$ の波については図-3に示される。いずれも Saville および Savage の実験値を併記したが著者の実験値と比較するとほぼ妥当な値を示していることが分る。また図-2およびより任意の H_0/L_0 の波に対して遡上高の最大になる法勾配 ($\tan \theta_c$) が存在することも明らかである。その θ_c の値は次式で求めることが妥当であることが分った。

$$\sqrt{\frac{2\theta_c}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \theta_c}{\pi} = \left(\frac{H_0}{L_0} \right)_c \quad \text{-----(1)}$$



(図-2) $H_0/L_0 = 0.02$ の R/H_0 と $\cot \theta$ の関係

この式は壁面で全反射 ($\gamma_g = 1.0$) を生ずる最緩勾配を表わす Miche の理論式と一致している。すなわち、surging waves を生ずる壁面では、 $\cot \theta$ の大きいほど R/H_0 は大きくなり、

breaking waves を生ずる壁面では $\cot \theta$ の大きいほど R/H_0 は減少する。

図-2 および 3 の図中に Miche の理論式 (surging waves 領域の R/H_0 の式)、および著者の実験式 (breaking waves 領域の R/H_0 の式) を併記して実験値と比較したが、前者は実験値と、かなり良い近似値を示しており、逆上の現象を適確に表現しているように思われる。

すなわち、surging waves ($\sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{\pi} \geq H_0/L_0$) の R/H_0 は次式で示される。

$$\frac{R}{H_0} = \sqrt{\frac{\pi}{2\theta}} \cdot \sqrt{\frac{\sinh \frac{4\pi h}{L} \cdot \coth \frac{2\pi h}{L}}{\sinh \frac{4\pi h}{L} + \frac{4\pi h}{L}}} + \pi \frac{H_0}{L_0} \frac{\sinh \frac{4\pi h}{L}}{\sinh \frac{4\pi h}{L} + \frac{4\pi h}{L}} \left(\coth \frac{2\pi h}{L} \right)^2$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{3}{(4 \sinh \frac{2\pi h}{L})^2} - \frac{1}{4 (\cosh \frac{2\pi h}{L})^2} \right\} \dots \dots (2)$$

breaking waves ($\sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{\pi} < H_0/L_0$) の R/H_0 は次式で示される。

$$\frac{R}{H_0} = \frac{\varphi}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}} \left(\coth \frac{4\pi h}{L} \right)^{1/4} (\cot \theta)^{2/3}} \dots \dots (3)$$

式中、 φ は次式で示される。

$$\varphi = \left\{ \sqrt{\frac{\pi}{2\theta_c}} \cdot \sqrt{\frac{\sinh \frac{4\pi h}{L} \coth \frac{2\pi h}{L}}{\sinh \frac{4\pi h}{L} + \frac{4\pi h}{L}}} + \pi \frac{H_0}{L_0} \phi \left(\frac{h}{L} \right) \right\}$$

$$\times \sqrt{\frac{H_0}{L_0}} \left(\coth \frac{4\pi h}{L} \right)^{1/4} (\cot \theta_c)^{2/3} \dots \dots (4)$$

$$\phi \left(\frac{h}{L} \right) = \frac{\sinh \frac{4\pi h}{L}}{\sinh \frac{4\pi h}{L} + \frac{4\pi h}{L}} \left(\coth \frac{2\pi h}{L} \right)^2$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{3}{(4 \sinh \frac{2\pi h}{L})^2} - \frac{1}{4 (\cosh \frac{2\pi h}{L})^2} \right\} \dots (5)$$

実験条件における φ の値を求めると。

$H_0/L_0 = 0.02$, $h/L = 0.097$ では $\varphi = 0.6695$

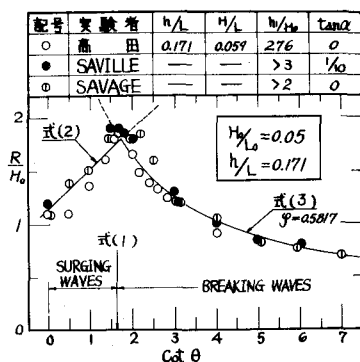
$H_0/L_0 = 0.03$, $h/L = 0.136$ では $\varphi = 0.5794$

$H_0/L_0 = 0.05$, $h/L = 0.171$ では $\varphi = 0.5817$

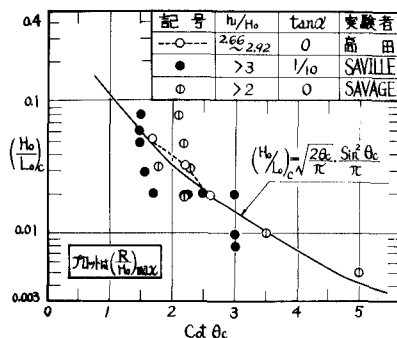
いま $h/L \rightarrow \infty$ の深水波を考えると式(2),(3)および(4)は次式のようになる。

$$R/H_0 = \sqrt{\pi/2\theta} + \pi \cdot H_0/L_0; (\text{非碎波}) \dots \dots (6)$$

$$R/H_0 = \frac{\varphi_0}{\sqrt{H_0/L_0} (\cot \theta)^{2/3}}; (\text{碎波}) \dots \dots (7)$$



(図-3) $H_0/L_0 = 0.05$ の R/H_0 と $\cot \theta$ の関係



(図-4) $(R/H_0)_{\max}$ を生ずる条件

$$\text{式中 } \mathcal{G}_0 = \sqrt{\frac{H_0}{L_0}} \cdot (\cot \theta_c)^{\frac{2}{3}} \left\{ \sqrt{\frac{\pi}{2\theta_c}} + \pi \frac{H_0}{L_0} \right\} \quad \text{----- (8)}$$

$H_0/L_0 = 0.02$ では $\mathcal{G}_0 = 0.5678$, $H_0/L_0 = 0.03$ では $\mathcal{G}_0 = 0.5731$,
 および $H_0/L_0 = 0.05$ では $\mathcal{G}_0 = 0.5816$ である。

図-4は最大遡上高 (R/H_0)_{max}を生ずるための (H_0/L_0)と、
 $\cot \theta_c$ の関係を実験で調べ、式(1)と比較したものである。
 図中には著者の実験の他に、Saville および Savage の実験
 値もプロットしたが式(1)はかなり良く近似しており、実際の
 現象を適確に説明しているように思われる。したがって式(1)
 を最大遡上高を生ずる条件式とみなすことができる。

(2) 波の反射率

Miche の線形理論によれば、反射率 $r (= H_r/H_i)$ は、次式で
 示される。

$$r = \frac{r}{s_r} = \sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{\pi} \cdot \frac{L_0}{H_0} \quad \text{----- (9)}$$

式中 s_r : 反射係数 (≤ 1)

一方、室田博士(阪大)の実験によれば、Miche の式は、か
 なり良く反射率の現象を説明できることを検証している。それ
 ゆえ本研究では反射率の実験を省略し、式(9)で求め、図-5、
 6 および 7 の図中に示した。

(3) 越波水量と遡上高、および反射率との関連性

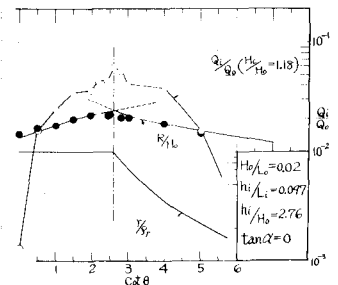
天端高を一定にして $\cot \theta$ を変化させた場合の越波水量の実験
 を行ったが、遡上高との相関性および反射率との相関性を比較
 検討するために示したものが図-5、6 および 7 に示される。

ただし、越波水量 Q_i を深水波の一周期の移動水量 $Q_0 = \frac{H_0 L_0}{2\pi}$
 との割合 $Q_i/Q_0 = 2\pi Q_i / (H_0 L_0)$ で示した。

これらの図より明らかなように越波水量の最大になる法勾配
 が存在し、その法勾配は最大遡上高を与える法勾配、および全
 反射 ($r/s_r = 1.0$) を生ずる最緩法勾配と一致する。換言すれば
 、surging waves と breaking waves の境界において越波
 水量および遡上高が最大になることが明らかになった。したが
 って重複波水深領域において最大越波水量および最大遡上高を
 生ずる壁体の傾斜角は、式(1)で表わすことができる。

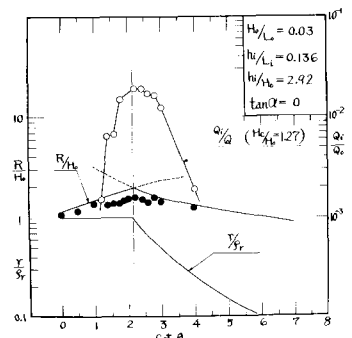
surging waves の範囲では Q_i/Q_0 , R/H_0 は θ が小さくな
 るほど増大し、相関性が認められるが r/s_r は const. (=1.0) とな
 り相関性はない。一方、breaking waves の範囲では Q_i/Q_0 ,

$$\begin{aligned} \frac{R}{H_0} &= \sqrt{\frac{\pi}{2\theta}} \frac{H_0}{H_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \\ \frac{R}{H_0} &= \frac{0.6695}{\sqrt{\frac{1}{2\theta} \left(\cot \theta \right)^{\frac{2}{3}}}} \left(\cot \theta \right)^{\frac{2}{3}} \end{aligned}$$



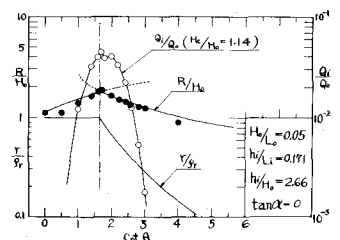
(図-5) Q_i/Q_0 , R/H_0 , r/s_r の相関性
 ($H_0/L_0 = 0.02$ の波)

$$\begin{aligned} \frac{R}{H_0} &= \sqrt{\frac{\pi}{2\theta}} \frac{H_0}{H_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \\ \frac{R}{H_0} &= \frac{0.5794}{\sqrt{\frac{1}{2\theta} \left(\cot \theta \right)^{\frac{2}{3}}}} \left(\cot \theta \right)^{\frac{2}{3}} \end{aligned}$$



(図-6) Q_i/Q_0 , R/H_0 , r/s_r の相関性
 ($H_0/L_0 = 0.03$ の波)

$$\begin{aligned} \frac{R}{H_0} &= \sqrt{\frac{\pi}{2\theta}} \frac{H_0}{H_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \\ \frac{R}{H_0} &= \frac{0.5817}{\sqrt{\frac{1}{2\theta} \left(\cot \theta \right)^{\frac{2}{3}}}} \left(\cot \theta \right)^{\frac{2}{3}} \end{aligned}$$



(図-7) Q_i/Q_0 , R/H_0 , r/s_r の相関性
 ($H_0/L_0 = 0.05$ の波)

R/H_0 および $1/\sin \theta$ はともに θ が小さくなるほど減少するので $\cot \theta$ の減少関数として相関性が認められる。

図-8は、最大越波水量を生ずる $(H_0/L_0)_c$ と $\cot \theta_c$ の条件の実験を行い、式(1)と比較したものである。これからも明らかなように、両者はかなり良い近似を示している。ゆえに式(1)を最大越波水量を生ずる条件式として差支えないように思われる。

(4) 越波水量と遡上波形の相関性

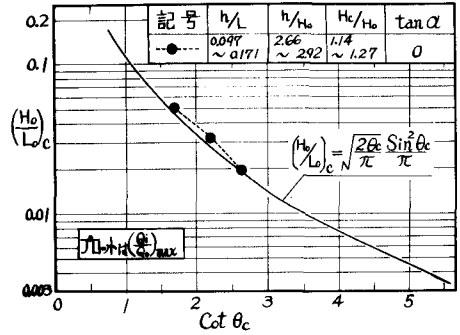
図-9に示すように越波をさせない無限法勾配の遡上波の実験を行い、遡上波が最高に昇りきったときの仮想天端高（静水位上 $H_c = 9.0$ cm）に相当する水平面より上部の遡上波形の面積の部分に越波すると仮定し、その考え方の妥当性を比較検討した。写真測定（シャッター速度 $1/250$ ）による波形面積の測定と実際に越波させた場合の比較が図-10に示されている。

これより両者はかなり良く近似しており、このような考え方がほぼ妥当であることが分った。すなわち、越波をさせない場合の遡上波形が理論的（特性曲線法など）および実験的に求めることができれば天端に相当する仮想天端面より上の遡上波形の面積を計算することによって越波水量を推定することができる。それゆえ、より詳細に遡上波形を調べる研究が重要と考えられるし、その成果によって、越波水量の計算式を導くことも可能と考えられる。しかしこのような考え方は波の実質部分が連続体として越波する場合にだけ適用できるものであって大小の水壅の越波については別に考える必要がある。

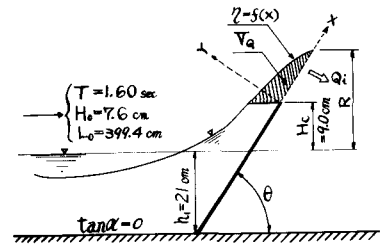
4. 結 論

重複波水深における越波、遡上波および反射波の関連性について実験的に調べた結果、越波水量と遡上高は同様の傾向を示しており相関性が認められる。越波水量と反射率は surging waves の領域では関連性はないが breaking waves の領域では相関性が認められる。又、遡上波形の面積を求めることによって越波水量の推定可能なことが明白になった。主な実験結果を次に示す。

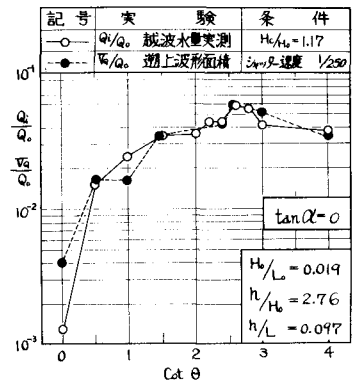
(i) surging waves 領域の遡上高と壁面傾斜角の関係は式(2)、breaking waves のそれは式(3)で示される。
 (ii) 越波水量および遡上高を最大にする条件は一致しており、その条件式は式(1)で示される、又、全反射 ($1/\sin \theta = 1.0$) を生ずる最緩傾斜角の条件式と一致する。
 (iii) 越波をさせない場合の遡上波形の仮想天端より上の波形面積と実際に越波をさせた場合の実測値とはかなり良い近似が得られる。



(図-8) $(Q_0/Q_0)_{max}$ を生ずる条件



(図-9) 遡上波形の面積



(図-10) 遡上波形面積と越波水量実測値との比較