

透過性堤体斜面上のもどり流れについて

東洋建設 正 松浦純一, 鳥取大学 正 木村 晃, 瀬山 明

1. はじめに: ここ数年来、著者らは堤体前面に設置した消波ブロックの安定性に関する検討を続けてきた。この研究もその一環として行なったもので、従来の研究において ①ブロックの安定性に最も大きな影響を及ぼす砕波衝撃力の大きさが透過性堤体と不透過な堤体で差があること、②その差はブロック周辺のもどり流れ及び堤体の透過性に起因することなどが明らかになってきた。この研究はこれらの点をふまえて実施したもので、砕波衝撃力に対するブロックの安定性の評価を可能とする第一歩として、ブロックを含む透過性堤体斜面上のもどり流れの水利特性を検討したものである。

2. 運動方程式: 透過性堤体斜面上の流体の連続式は図-1を参考にして次式で与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} - w = 0 \quad (1)$$

ここに、 x 軸は静水面を原点にして斜面上に沿って上向きに正、 y 軸は原点から斜面上に直角上向きに正であり、 u 、 w はそれぞれ x 軸ならびに y 軸方向の平均流速であり、 t は時間、 $h(x, t)$ は水面形状である。

境界面を通じて流量の出入りがあるのでここでは運動量式を用いて流れの場を記述した。図-2の微小区間 I II III IV を考えると、単位時間あたりに I II から流出する運動量 F は次式で与えられる。

$$F = \int \partial(\rho u) / \partial t dV + \partial(\int \rho u^2 dA) / \partial x \Delta x - \rho |w| \Delta x \sin \theta \quad (2)$$

ただし、 ρ は流体の密度、 V は流体の体積、 A は I II の断面積である。右辺第一項は区間内の水位変化による運動量の流出、第二、第三項は I II からの mass flux による Bodily な運動量の流出を与える。この微小区間に作用する外力は乱れによる付加応力を別にすると質量力、圧力および摩擦力でありここではそれぞれ以下の様に与えた。

$$\text{質量力: } F_g = \rho g h \Delta x \sin \theta \quad (3)$$

g は重力加速度、 θ は堤体が水平となす角度、 Δx は区間の長さ

圧力: 静水圧分布を仮定すると

$$F_p = \rho g (\partial h / \partial x) h \Delta x \cos \theta \quad (4)$$

摩擦力: 平均流速を u としたが流れが非定常であり速度分布も明らかでないので乱流における次式を使う。

$$F_d = \rho f_d u |u| \Delta x / 8 \quad (5)$$

ここに f_d は摩擦係数である。以上の各式をとりまとめて整理すると最後に次式が得られる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{|w|u}{h} = g \sin \theta - g \frac{\partial h}{\partial x} \cos \theta - \frac{1}{8} f_d \frac{u |u|}{h} \quad (6)$$

3. w の評価: この研究では透過層内での流体の運動は近藤の理論を用いて評価した。近藤によると、無限に長い透過層内を伝播する進行波の波形 η は次式で与えられる。

$$\eta = \frac{H_0}{2} e^{-nx} \sin(\sigma t - mx) \quad (7)$$

ここに H_0 は境界面における波高、 σ は角周波数であり、 m 、 n はそれぞれ次式で与えられる。

$$m = \frac{\sigma}{\sqrt{gh}} \sqrt{\frac{1}{2} [1 + \sqrt{1 + (f/\tau)^2}]}, \quad n = \frac{\sigma}{\sqrt{gh}} \sqrt{\frac{1}{2} [-1 + \sqrt{1 + (f/\tau)^2}]} \quad (8)$$

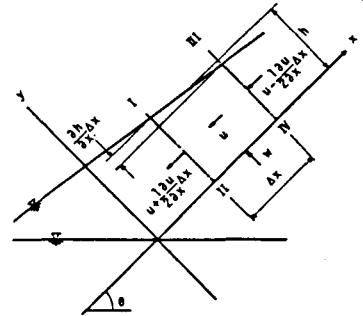


図-1

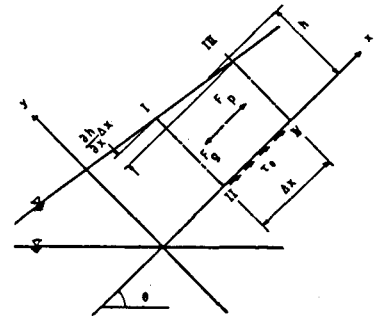


図-2

f は透過層の抵抗係数、 τ は空隙率 λ および質量係数 C_m の関数で表される慣性力係数であり、これらの値を用いて透過層内の水平水粒子速度 U は次の様に与えられる。

$$U = \frac{\lambda \sigma H_0 e^{-n x}}{2 h / m^2 + n^2} \sin(\sigma t - m x + \delta) \quad (9)$$

ここに $\delta = \arctan(n/m)$

ただこの理論は直立な透過性堤体を対象としたものであるため、この研究で対象としている傾斜面をもつ堤体の境界面での水粒子速度は Solit にならって次式であたえた。

$$w = \|U\| \sin \theta \quad (10)$$

(7)以下の各式に含まれる定数は次に説明する実験結果より決定した。

4. 実験結果: 実験は長さ 20 m のコンクリート製一部ガラス張水槽を用いて行なった。

水槽の一端には図-3のような透過性堤体(斜面勾配 1/1、底面における堤体幅 100 cm)を平均径 2.5 mm の砕石で製作した。堤体の幅は服部が与えた透過層内の波高伝達率の急変点 ($x > L/4$) より大きくしたので、ほぼ無限堤体とみなしてよい。一様水深部の水深は 20 cm と一定にした。透過層内の水位変動は側方よりビデオカメラで記録し、解析した。透過層内の波高の分布の一例を示したものが図-4である。図中の丸印が実験結果であり、実線は次式が best fit するように最小 2 乗法で決定した曲線である。

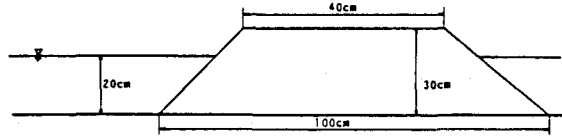


図-3

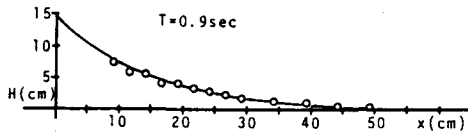


図-4

$$n(x-x_0) = \ln(H_0/H) \quad (11)$$

H は x における波高、 x_0 はここで用いた仮想原点であり、傾斜面をもつ堤体を直立な透過性堤体で近似するための補正で、いずれのケースでも堤体表面から捨石の直径程度堤体内に取ると良い結果が得られた。(11)式をもとに n 、 x_0 を決定し、(8)式から f 、 m を決め(9)、(10)式に代入して斜面上に直角な水粒子速度 w を算定した。

5. 数値計算: ここまでの準備をもとに斜面上におけるもどり流れの数値計算を行なった。計算は(1)、(6)式を特性曲線法を用いて解いた。すなわち、 $c = \sqrt{g h \cos \theta}$ とおくと、

$$dx/dt = u + c \text{ 上で}$$

$$d(u+2c)/dt = g \sin \theta - f_d |u| / 8h + w |u| / h + w \sqrt{g \cos \theta / h}$$

$$dx/dt = u - c \text{ 上で}$$

$$d(u-2c)/dt = g \sin \theta - f_d |u| / 8h + w |u| / h - w \sqrt{g \cos \theta / h} \quad (12)$$

が成立する。これを解いた結果の一例を示したものが図-5である。横軸は原点から斜面上に沿った長さ、縦軸は水面の高さを表す。図中の点線が(5)式における斜面の摩擦係数 f_d が 0 の場合、実線が $f_d = 0.02$ の場合の計算結果である。図からわかるように摩擦係数を適当に与えると斜面上でのもどりがれの特性をほぼ正確に計算することができる。

6. おわりに: 透過性堤体斜面上でのもどり流れの数値シミュレーションを試みた。本文中で示したように比較的良好な結果が得られ、この方法による消波ブロック周辺の水理特性の解析が可能であることが確認できた。

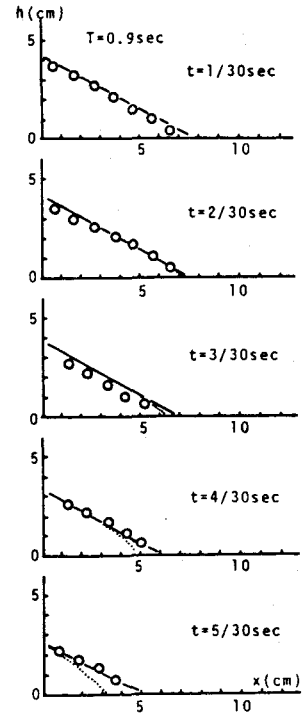


図-5