

大阪大学工学部 正員 穂木 亨
大阪大学工学部 正員の出口 一郎

1. 予えがき：波浪長より岸側に海岸堤防を設置した場合、沖波波形勾配0.03～0.05といった条件に対してはその堤脚部に逆三角形型の局所洗掘孔を生ずることが知られている。前者はこの局所洗掘孔をとり上げ、その洗掘規模は堤防法面を越上した水塊によるむどり流れに大きく影響されることを実験的に実証した。本実験はこの局所洗掘機構を解明するにあたり、まず法面を越上した水塊がどのような波形、流速をもって堤脚部に達するかということと種々の堤防設置水深に対して検討したものである。

2. 法面上のむどり流れ(Vd)に対する考察：堤防法面を流下するむどり流れを解析するには、まずむどり流れを長波性の波動と考えその波動方程式を解析的(もしくは差分式で)求める方法が考えられるが、当然この方法は法面角度が小さい場合のみ有効であり法面角度が大きい場合には適用できない。そこでここではBrantjaegが考えたモデルと同様のモデルを考え、慣性項が極めて小さいとしてむどり流れの流速を求めてみた。可能な限り同一に示すモデルを考え、微小体Suに作用する力のつり合いを考えると(微小体Suの流下する流速をVaとする)

$$F = G \sin \theta - F_p - R_b \quad (1)$$

$$\text{ここに } F = (\rho Z \delta a) (dV_d/dt), \quad G = \rho g Z \cdot \delta a, \quad F_p = \rho g Z \tan \beta \cdot \cos \theta$$

$$R_b = \frac{1}{2} \rho f V_d^2 \delta a \quad \text{それぞれSuに作用する重力、圧力、摩擦力であり}$$

(1) 式よりSuの運動方程式が次のように与えられる。

$$dV_d/dt = A^2 - V_d^2/B^2 \quad (2)$$

$$A^2 = g(\sin \theta - \tan \beta \cdot \cos \theta), \quad B^2 = 2Z/f \quad (3) \quad (4)$$

最大打上げ波に達した時刻を $t=0$ としその時 $V_d=0$ という初期条件で β 、 Z を定数として(2)式を解くとBrantjaegと同じ型の(5)式が得られる。

$$V_d = A \cdot B \tanh \{ (A/B)t \} \quad (5)$$

さらにこれを積分してSuの移動距離Xが次のように与えられる。

$$X = B^2 \log \{ \cosh \{ (A/B)t \} \} \quad (6)$$

また、法面を越上するときの流速 V_0 は(2)式の右辺第2項の符号を変えSuが静水面より上昇する際の初期流速を V_0 として、次のように得られる。

$$V_0 = -V_d + A \cdot B \tanh \{ (A/B)t \} \quad (7)$$

しかし図-1から明らかに(5)式が有効なのは、むどり流れの先端が静水面を流下するまでの間であり、それ以後のむどり流れに対しては適用できない。Z軸を適当に移動することによってある程度静水面より下まで(5)式が有効なようにすることは可能であるがその場合には一般性が失われる。しかし堤脚部の底質の移動を問題にする場合、必要なのは堤脚部に達したむどり流れの流速(以後 V_s とする)であり(5)式から求められる流速から何らかの方法で V_s が推定できればよいわけである。この V_0 と V_s との関係について以下で述べる。

3. むどり流れの測定に関する実験：2で述べた考え方に従い、(5)式で静水面上のむどり流れ流速 V_d を計算するために、むどり流れの波形を16mmシネカメラで撮影し、同時に堤脚部法面方向流速 V_s をピトー管で測定した。なお、むどり流れの中に $\phi 5\text{mm}$ のガラス球トレーサーを投入し、 V_d の実測も行なった。図-2にその波形の時間変

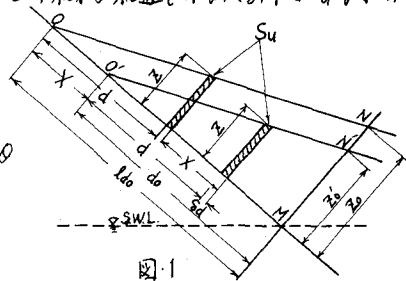


図-1

むどり流れ波形モデル

表-1 実験諸元

沖波波形勾配 H_0/L_0	0.03	0.05		
相對設置水深 h_i/H_0	0.25	0.50	0.75	1.0
堤防法面角度 θ	30°	60°		

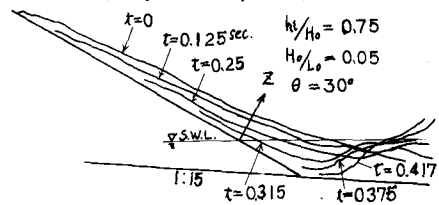


図-2 むどり流れの波形

化の一例を示す。この波形を三角形近似して(7)式中の β 、 Σ を競みとり取を計算するわけである。 β は図2からわかるように、時間経過とともにわずかつ変化しているが、その平均値 $\bar{\beta}$ の θ 、 h_i/H_0 及び H_0/L_0 の変化にもとづく変動を示したのが図3である。図から明らかのように β は H_0/L_0 の影響はほとんどないが、 h_i/H_0 及び θ に大きく依存しているようであり、碎波より規則に設置した捨石堤の β に関するBrantzaegの実験式も考え合わせて、 β は $\beta = (\theta - K H_0/L_0) f(h_i/H_0)$ という形で表わされると推定できるが、定数 K 及び $f(h_i/H_0)$ の関数形の決定はなお今後数多くの実験を繰返して行われなければならない。この β 及び Σ を用いて求めた V_0 の計算値と実験値とを比較すると、 $\theta=30^\circ$ の緩勾配の場合は比較的良好はよく一致するが、 $\theta=60^\circ$ の場合は実験値の方が小さく現れてくる。これは $\theta=60^\circ$ の場合のもどり流れの波形は相似三角形として十分近似できないためと考えられる。

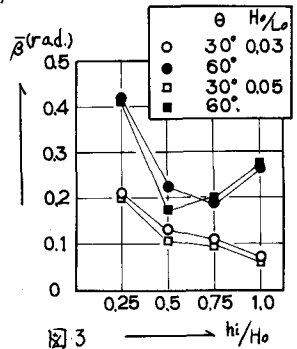


図3

4. 静水面上のもどり流れの堤脚部における減衰効果について：次に V_0 とピトー管で測定した堤脚部法面方向流速 V_0 との関係であるが、静水面上のもどり流れの最大値 V_0 が堤脚部に達してどれほど減衰しているかということとをみると、図4に示すようになる。(ただし V_0 はピトー管で測定した流速の最大値) 図から明らかのように波形勾配が小さいほど、 θ に法面角度が小さいほど減衰する割合が小さいようであり、 $h_i/H_0=0.5$ のところがピークになっている。この減衰残値については、堤脚部水深のクッション効果を考慮し、もどり流れを定常流のsubmerged jumpもしくはfree jumpと同様の流れとして考察する方法もあるが、本実験は比較的設置水深の浅い碎波後の領域で行ったものであり、もどり流れ自体非定常な流れであるので、堤脚部水深の影響は考慮せず、堤防前面の波ともどり流れの位相の関係からこの減衰残値を考察してみよう。まず堤防に入射する波形を図5に示すような鋸状波と仮定する。

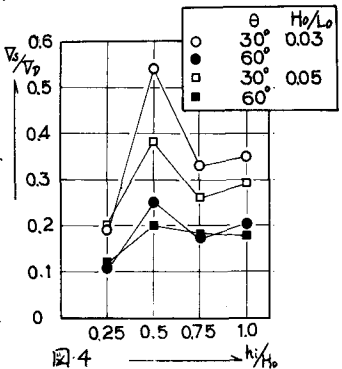


図4

その鋸状波が法面上静水面より上に上昇し始める時刻を $t=0$ とし $t=\Delta t_1$ 後にもどり流れが流下し始め、 $t=\Delta t_1+\Delta t_2$ で静水面を切り、 $\Delta t=\Delta t_1+\Delta t_2+\Delta t_3$ に堤防前面の水位に達すると考える。この時刻 Δt において堤脚部の水面変動にもとづく水粒子速度(図5中の一長鎖線)がもどり流れと同一方向の逆向き流速下らば質量保存則から考えて、もどり流れの減衰は小さく、両者の流速方向が反対ならば減衰度は大きいと推定できる。したがってこのもどり流れと堤脚部水面変動による水粒子速度の位相差がこのもどり流れの減衰に大きく影響するものと考えられる。そこで図5中の Δt_1 は(7)式において $V_u=0$ と置いて求められ、 Δt_2 は(6)式において $X=L_0$ と置いて(L_0 は堤防法面上への迎上高さの結果より求められる。)求められる。また Δt_3 は実験によると Δt_1 及び Δt_2 に比べて極めて小さいので $\Delta t=\Delta t_1+\Delta t_2$ としてさしつかえない。図6はこの位相差 Δt と減衰度の関係を示したもので、明らかに位相差が大きいとき、すなわち堤脚部水面変動による水粒子速度の方向が逆向きのときは減衰度は小さく下がっている。(ただし Δt_1 に関しては(7)式中の V_0 等、若干不明な点があるのでここでは Δt_1 の値は16mm/secから実験した値を用いている。) このように位相差モデルで堤脚部流速の減衰残値を説明できるようであるが碎波後の波形の非対称性、set-up等を考慮した詳細な実験による検討を加えていこうと考えている。

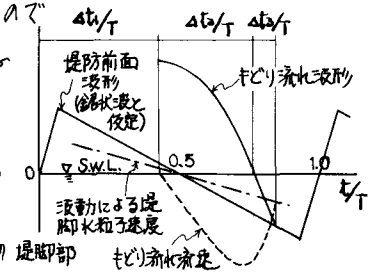


図5 堤脚部位相差モデル

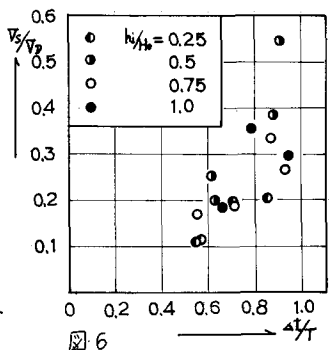


図6