

浪による水粒子運動からみた堤脚部洗掘過程に関する一考察

大阪大学工学部 正員 榎本 亨
大阪大学工学部 正員 出口 一郎

1 まえがき：著者らは、近年の海岸堤防の洗掘倒壊が碎波より岸側に堤防を設置した場合の比較的大きな碎波波形勾配($H/L_0 > 0.03$)に対して生ずる洗掘であることに着目し、このような状態を実験により再現し、堤脚部の洗掘が進行している状態、最大洗掘深さに達した状態、洗掘孔がうめもとされている状態、など、それぞれの状態における堤防前面の水粒子の挙動を実験的に明らかにして、洗掘機構の解明のための基礎資料を得た。

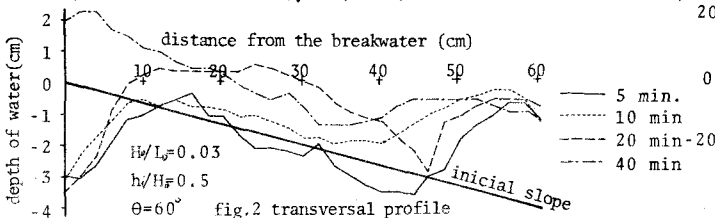
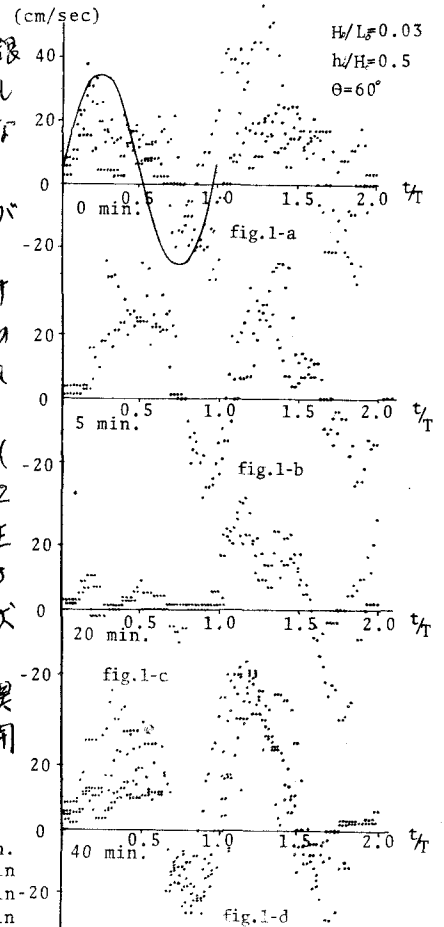
2 実験装置及び実験方法：実験諸元は、碎波波形勾配 $H/L_0 = 0.03, 0.05$ 、堤防相対設置水深 $h/H_0 = 0.5, 0.75$ 、堤防法面角度 $\theta = 60^\circ$ 、の計4ケースで、碎波波高 $H_0 = 8\text{cm}$ である。

実験は、水槽端に設置した勾配 $1/5$ の不銹鋼斜台の上に $d_{50} = 0.042\text{mm}$ のかなり均一な粒至をもつ実験砂を約 8cm 厚にしきつめて行なっている。

また、水粒子運動の解析には、 $\phi 5\text{mm}$ のガラス球に水銀を注入し、比重約 1.0 としたトレーサーを水中に投入し、その動きを 16mm 撮影機で撮影することにより行ない、移動床の地形変化は造波開始後5分、10分、15分、20分、40分に測定し、撮影は上記6回と、地形が変化する前の初期地形に測るに計7回行なった。

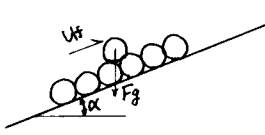
3. 水粒子速度の時間変化と地形変化との対応：トレーサーの動きから読みとった底部の水粒子速度の時間変化の一例と、それぞれの時間における堤防前面地形を図1-a~図1-d、図2に示す。

なお、図1では、トレーサーが最も堤防に近づいた時(堤脚部から 2cm 以内の距離)を $x=0$ にとってある。図2より、堤脚部には造波開始後5分で典型的な洗掘孔を生じ、20分までその地形を保ち、40分で大きくつめもとされ、最終的には堤脚部からかなりの距離にわたり初期状態よりも堆積している。一方洗掘前と洗掘孔が生じた造波開始後5分における水粒子速度の間には大きな差異はみられないが、堤脚部がうめもとされる直前の造波開始



始後20分における水粒子速度は、堤脚部で極端に小さく下っており、さらに堤脚部がうめ
もとされに後における水粒子速度は、再び洗掘初期におけるそれと同程度の大きさをも
同様の時間変化を示している。すなわち、堤脚部に生じた地形変化の影響が、造波開始
後20分で堤防前面の水粒子速度の変化となって現れ、さらにその変化した水粒子運動によ
って、新たに地形変化（造波開始後40分における）を引き起こすわけで、水粒子運動が
地形を変化させる速さは、地形が変化することによって水粒子の運動の状態が変化する速
さよりも速いことがわかる。また、この傾向は今回行なった実験のすべてのケースにおい
てみられた。

4 水粒子の残留速度と地形変化の関係：図1から明らかに、堤脚部の水粒子は、
常に離岸方向の残留速度をもっているが、底質の輸送を問題にする場合、この残留速度が
重要な要因の一つと考えられるので、ここで残留速度が地形変化に及ぼす影響について若
干の考察を行なう。まず図3に示すような直径Dの球状の所粒が移動する場合を考える。



この所粒が掃流状態で輸送される場合、その移動速度は Eagleson
らの研究を参照して式(1)のように導かれる。

$$U_s = e^{-At} \int_0^t e^{At} (A_1 U_f + A_2 \dot{U}_f - A_3 \sin \alpha - A_4 \cos \alpha) dt \quad (1)$$

ここに $A_1 = \frac{\rho_f D^2}{8} \cdot \frac{1}{M_s + C_H M_f}$, $A_2 = \frac{M_f (1 + C_H)}{M_s + C_H M_f}$, $A_3 = \frac{g (M_s - M_f)}{M_s + C_H M_f}$, $A_4 = \frac{\varepsilon g (M_s + M_f) U_f}{M_s + C_H M_f}$

fig.3 definition sketch

で、 U_f : 所粒に作用する流速、 ρ_f : 流体密度、 M_f : 所粒が排除する
流体の質量、 C_H : 質量力係数、 C_D : 抵抗力係数、 ε : 所粒摩擦係数、 T : 波の周期である。
また、所粒に作用する流速 U_f は、残留速度 E_f をもった形で簡単に

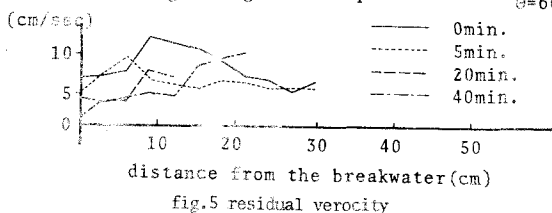
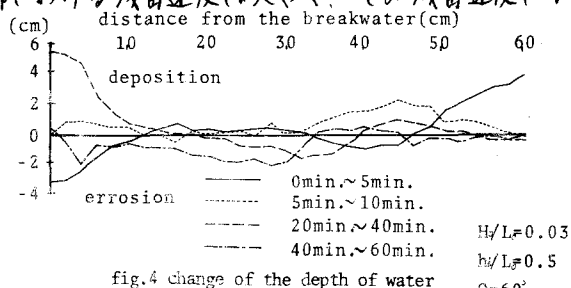
$$U_f = E_f + A_f \sin \alpha t \quad (2)$$

で表わされるとすると、図1-aの地形変化の初期状態における水粒子速度は $E_f = 5.0$,
 $A_f = 30.0$, $\alpha = \frac{2\pi}{T}$ とおくことにより、堤脚部では高い精度を要求しないかぎりこの表
現で十分水粒子速度を近似している。この曲線は図中実線で示す。式(2)を式(1)に代入し、
一周期平均をとると所粒の一周期平均の移動速度が次式のように求まる。

$$\bar{U}_s = \frac{1}{T} \int_0^T U_s dt = E_f - \frac{A_3}{A_1} \sin \alpha - \frac{A_4}{A_1} \cos \alpha + \frac{A_1 A_f + A_2 A_f^2}{A_1 - \alpha^2} + \frac{e^{-At}}{T A_1} (e^{-At} - 1) \left(\frac{1}{\alpha} (A_1 E_f - A_3 \sin \alpha - A_4 \cos \alpha) - \right. \\ \left. \frac{A_1 A_f \alpha}{A_1 \alpha^2} + \frac{A_2 A_f}{A_1} - \frac{A_2 A_f \alpha^2}{(A_1 - \alpha^2) A_1} \right) \quad (3)$$

式(3)からわかるように、底質の一周期平均移動速度は水粒子残留速度と線型に結びついて
いる。以上はLagrange的にみて底質の移動速度であるが、ある断面を通過する一周期平均
の底質の移動量を、 $\bar{U}_s$ に比例すると考えられる。したがって式(3)より $\bar{U}_s$ は水粒子残留速
度に比例すると考えられ、底質の移動量の連続式より地形の変化量は変化率の大きさによ
って定まる。しかし、堤脚部のごく近傍では、堤脚からの土砂の供給がないため、残留速
度の方のみで地形の洗掘、堆積が定まる領域も存在しよう。そこで、これらの関係をみ
るために、残留速度の距離のな変化及び造波開始後0分~5分、5分~10分、20分~40分、
40分~60分の間に生じた地形変化量を示したのが図4、図5である。これらの図から明ら

かなように、洗掘初期の状態では堤脚部における残留速度は大きく、その残留速度によって堤脚部の洗掘が起こるものと思われるが、その後洗掘孔が生じてからは、残留速度の大小もしくは場所的な変化率と、洗掘量との間には規則的な関係はみいだせず、さらに堤脚部近傍における残留速度の方向と大きさで地形の洗掘、堆積及びその量が決まると考えられる領域を明らかにすることできなかった。特に著者は、かつて堤脚部の局所洗掘における最大洗掘深さは、法面を流下する水より流れの堤脚部での流速の分布に比例するという関係を実験的にみいだしたが、洗掘初期の状態では31.5cm/secあり、堤脚部よりも流れ流速が造波開始後5分では7.2cm/secにまで減少しており、このことから洗掘初期の状態では法面上の水より流れは堤脚部の局所洗掘に対して支配的な役割（堤脚部の底質を攪拌させ底質を動きやすくする。）はもっているが、ある程度洗掘が進行した状態では、水より流れが底質移動に与える影響は小さいことが明らかである。



以上の事実にもとづいて、図2を再検討してみると、堤脚部の洗掘孔は堤脚部に向かっている限り急な勾配で傾斜している。式(3)を考慮してこの洗掘過程について考えてみると、洗掘初期には多くの離岸方向に動き得る堤脚部底質も、洗掘が進行しはか増加するにつれて（造波開始後5分） U_{10} が減少し、最終的に洗掘状態に達した（造波開始後20分）状態では U_{10} はさらに減少し、もはや底質は離岸方向には動き得ずこの時点で堤防前面の水粒子の移動にも変化が現われ、ついには洗掘孔がうめもとされる（造波開始後40分）わけである。このように洗掘過程における地形変動に対しては残留速度の特性の他に、洗掘孔の形状も重要な要素の一つとして考えなければならぬと思われるが、この洗掘孔の最終的な形状については講演時に詳述する。以上 $H/L_0=0.03$, $h/L_0=0.5$, $\theta=60^\circ$ の場合について考察を進めたが、今後さらにその前面の変形過程について掃流による移動のみならず波浪による移動も含めた所移動も考慮して、この最終洗掘形状を明らかにしていきたいと考える。最終に本研究は文部省科学研究費の一部を用いて行われたことを記し、実験に協力していただいた当時4年生の溝内俊一君に感謝する次第である。

〔参考文献〕

Eagleson, P.S., R.G. Dean and L.A. Peraltu : The Mechanics of the Motion of Discrete Spherical and Bottom Sediment Particles due to Shallowing Waves, Tech. Memo. No. 104 (1958) B.E.B.