

海岸堤防堤脚部の局所洗掘機構について (そのⅡ)

——特にのり面上のもどり流れの特性について——

榎 木 亨*・高 畑 市 三**

1. 緒 言

海岸堤防堤脚部の洗掘現象は、堤防の破壊および堤防前面に設置された消波工の沈下、散乱の原因となるので従来からいくつかの研究が行われてきた^{1), 2), 3)}。著者らも第1報¹⁾において、構造前面の洗掘現象を説明するのに堤防前面の波を部分重複波と仮定し、その波による海岸断面に沿う砂の移動量の変化から考察を進めて、洗掘深さあるいは洗掘量を支配する諸要素の効果を明確にした。しかしながら、この海岸断面に沿う漂砂移動量の変化からは、碎波点より陸側に堤防が設置された場合の脚部の局所洗掘機構は説明できない。このような局所洗掘は一般に図-1に示す洗掘形態のうち、(a)に示すよ



図-1 洗 掘 形 態

うな逆直角三角形の洗掘形状をとるもので、実験中の観察において、のり面のもどり流れによる洗掘が卓越することが認められる。

本研究においてはこの逆直角三角形を示す洗掘をとりあげ、この洗掘機構をのり面のもどり流れの性状との関連において考察しようとするものである。

2. 局所洗掘におよぼすのり面上もどり流れの影響

図-1に示すような局所洗掘形態に“もどり流れ”がきわめて大きな要素であることを検証するために、著者らは、まず“もどり流れ”を除去する装置を取り付けた単断面堤防を用い、その装置を操作して“もどり流れ”による局所洗掘を生ぜしめないようにする移動床実験を行ない、操作しない場合と比較した。図-2はその堤防模型を示したものであり、堤防のり面は静水面で分離しその上部は滑動可能になっている。実験は、波が堤防に衝突する時点では図に示す点線の位置にのり面を保ち、波がのり面上をもどる時に滑動可能なのり面部分

を手動でスライドさせて、“もどり流れ”を堤防背後のますの中に落下せしめて、“もどり流れ”が堤脚部に作用するのを防ぐ方法で行なわれた。

この移動床実験は波形勾配 (H_0/L_0) 0.03, 堤防設置地点の水深 h と波高の比 (h/H_0) 0.5, 底質の平均粒径 0.42 mm においてのり面角度 (θ) を $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ と変化せしめて行なわれた。地形変化の計測は波の作用後 5, 10, 15, 20, 40, 60 分において行なわれたが、地形計測と同時に堤防前面の重複波高を測定し、Healy の方法で反射率を算定した。

図-3はのり面を操作した場合としない場合の反射率を比較した図である。この結果によるとのり面を操作した場合の反射率は操作しない場合と比較してわずかに低い、操作した場合も反射率そのものにはほとんど変化を与えていないことがわかる。この反射率の結果から、のり面を操作した場合としない場合に地形の差違が生ずれば、反射率による差違でなく、“もどり流れ”を除去したためと考えてさしつかえないといえる。

図-4は各のり面角度ごとの操作した場合と操作しない場合の地形計測の結果であるが、どののり面角度にお

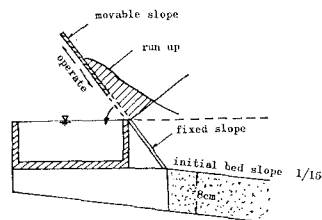


図-2 堤 防 模 型

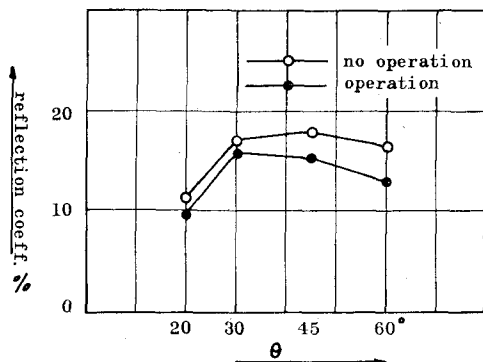


図-3 反射率に及ぼす操作の効果

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 大成建設(株) 前大阪大学大学院

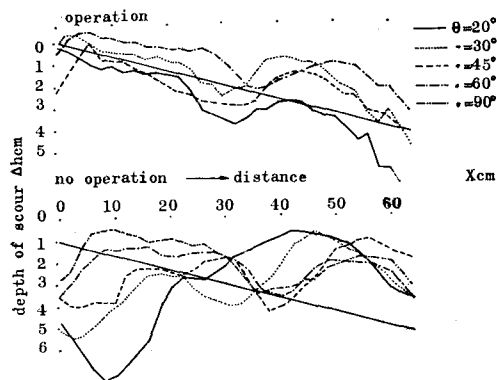


図-4 のり面操作の有無にともなう地形の変化

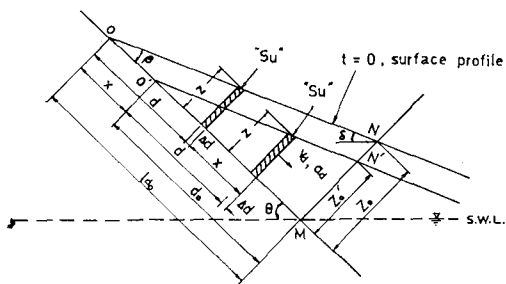


図-5 もどり流れの模型化

いても操作しない場合は洗掘されるのに対し、操作した場合は洗掘がほとんど生じないという明白な地形の差違を示している。

以上の結果から、堤防堤脚部の局所洗掘は、“もどり流れ”が最大の原因であると推察できる。

3. もどり流れの特長について

前述の結果から局所洗掘現象を把握するには、まずこのもどり流れの特性を明らかにする必要があるが、著者らはこの“もどり流れ”を静水面より上ののり面上の領域での“もどり流れ”の流速(V_d)と、堤脚部の水深の影響を受ける堤脚部近傍での“もどり流れ”の流速(V_s)の二つに分けて考察を進めることとする。

(1) V_d について

“もどり流れ”のうち静水面より上の領域の運動については、すでに Brantzæg^{5) 6) 7)}によって、一つのモデルを考えた流速算定方法が提案されている。すなわち、彼は波が最終打上げ点に到達した後、堤防ののり面に沿って流下する水塊は図-5に示すように三角形断面積を有し相似の形を示してのり面上を流下する。三角形の断面は微小体 S_u に分割され、この個々の独立した微小体は相互の連続性をもたず、その微小体に作用する重力、圧力、境界の摩擦抵抗により移動する。という仮定の下に次式にもとづいて流速を求めている。

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

$$\text{ここに } F = (\rho Z \Delta d) \left(\frac{dV_d}{dt} \right)$$

$G = \rho g Z \Delta d$: 微小体 S_u の重量

$F_p = \rho g Z \Delta d \tan \beta \cdot \cos \theta$: 微小体に作用する圧力

$R_b = \frac{1}{2} \rho f \cdot V_d^2 \cdot \Delta d$: 微小体に作用する摩擦力

なお上式中の ρ は水の密度、 θ はのり面角度、 f は不透過のり面上の“もどり流れ”を滑面乱流状態と考えた時の摩擦係数であり、他の記号は、図-5を参照されたい。

式(1)より、

$$\frac{dV_d}{dt} = A^2 - \frac{V_d^2}{B^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$A^2 = g(\sin \theta - \tan \beta \cdot \cos \theta)$$

$$B^2 = \frac{2Z}{f}$$

が得られ、最大打上げ高さに到達した時点をと $t=0$ とし、その時の $V_d=0$ という条件の下で式(2)を解くと、

$$V_d = A \cdot B \tanh\left(\frac{A}{B}t\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

が得られる。なお Brantzæg は上式中の β についても実験結果から、

$$\beta = \theta - 7.67 H/L \quad \dots\dots\dots (4)$$

という実験式を与えている。

著者らは上記 V_d の算定値を検証するため、固定床実験によって V_d を求めた。

図-6は64コマの16mmカメラで撮影した“もどり流れ”の水面形の時間的変化の例を示したものである。

また図-7は図-6より求められる V_d と式(3)で与えられる V_d の計算値との比較であって、図中 Cal. 1 は式(3)中の β , Z に実測値の β , Z を使い、 f を開水路乱流における摩擦係数を用いた値、Cal. 2 は式(1)において R_b を無視して求めた

$$V_d = g(\sin \theta - \tan \beta \cdot \cos \theta)t \quad \dots\dots\dots (5)$$

にもとづいて計算した値である。

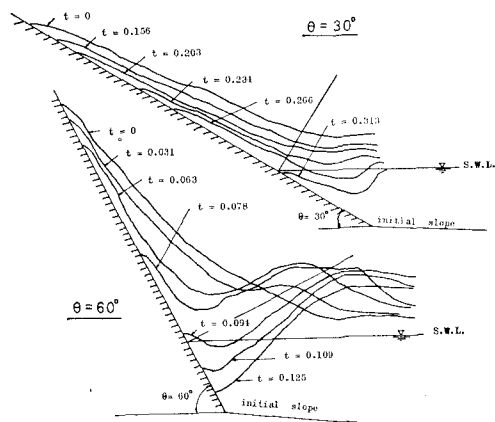


図-6 水面形の時間的変化

この結果、のり面角度が緩やかな場合は、実測値の方が計算値よりもやや大きくあらわれているけれども、計算式中の β を正確に把むことによって式(3)または、(5)で十分“もどり流れ”の流速は求めうる事がわかる。

また図-7中の Cal. 1 と Cal. 2 を比較しても、ほとんどその差はなく、摩擦の効果を無視した式(5)で十分 V_d を求めうることも明らかである。なお著者らの求めた β は図-8に示すように Brantzaeg の求めた式(4)とは大きく異なっているが、さらに今後これについては十分検討しなければならない。

(2) V_s について

局所洗掘を左右するのはこの堤脚部近傍における V_s であって、この V_s が先に述べた V_d と一致するものかどうかは、 V_s がのり面角度および波動運動による堤脚部水深の変動の影響を受けることから極めて疑わしい。

この堤脚部におけるもどり流れの流速(これを衝突流速と呼ぶ)は、堤脚部のもどり流れの状態によって大きく異なるようである。

こののり面の“もどり流れ”を一方向の流れに類似して考える場合、水門やカルバートなどの下流部における Wall jet, あるいは下流水深の影響をうけて生じる Submerged jump, またダムの越流部の流れの状態において生じる Free jump などが考えられる。いま V_s の変化

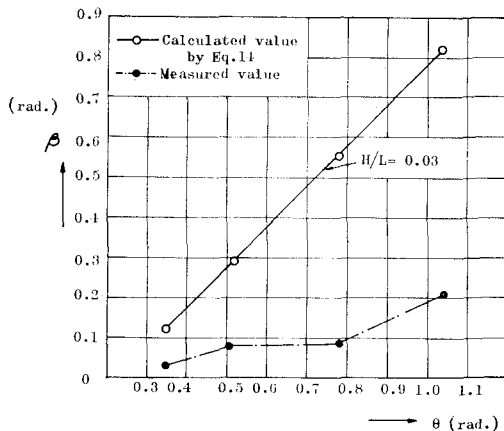


図-8 β とのり面角度との関係

から、いずれの場合に類似できるかを考えてみる。

図-9は最大衝突流速 V_s ののり面角度にともなう変化を求めたものである。図中の V_s は上述の固定床実験において、ビト管を用いた差圧式流速計で計測した値であり、 V_d は静水面を通過する最大の“もどり流れ”の流速である。この図から V_s/V_d の値は θ が大きくなるにつれて著しく減少することがわかる。この最大衝突速度の減衰は図-6における水面形の時間的变化と Rajaratnam⁸⁾によって式(6)のように定義された Submergence factor (S) を用いて考察すると、堤脚部流れの状態を明らかにすることができる。

$$S = \frac{y_t - y_2}{y_2} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 y_t : 下流側水深、 y_2 : Free jump の共役水深であり、 S の値によって上述の3つの流れの状態は次のようにわけられる。

- $S=0$: Free jump
- $S \rightarrow \infty$: Submerged jet (wall jet)
- $0 < S < \infty$: Submerged jump

いま図-6に示す“もどり流れ”の水面形を用いて、静水面を通過する際の流速を V_d 、その流体厚を D として、その射流側フルード数 F_1 を求めると、この F_1 に対する Free jump の共役水深 y_t がえられる。この y_2 および下流側水深 y_t より、各のり面角度に対する S を求めると、 $\theta=20^\circ$ および 30° の場合は $S=0$ となり $\theta=45^\circ, 60^\circ$ の場合には $S=2.0 \sim 3.0$ の値をとる。この値と上記 S による流れの状態とを対応させて考えてみると、本実験の場合は、 $\theta=20^\circ, 30^\circ$ の緩勾配を有するのり面角度では、下流側で Free jump をおこし、ダムの越流部の流れに類似できるものと推定される。

一方 θ が大きくなると下流側水深の影響を受け Submerged jump が生じているものと考えられる。この Submerged jump については、最大流速が自由噴流の場合にくらべて急速に減少することが認められているが

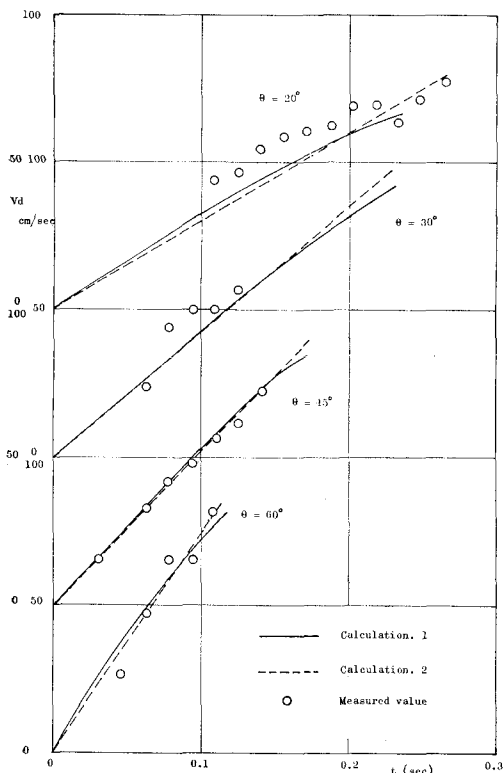
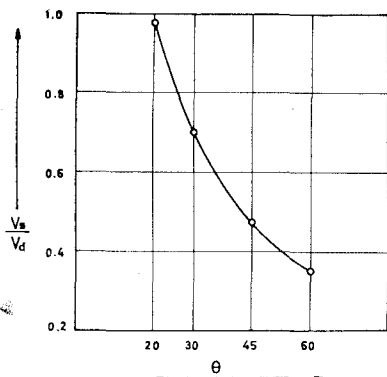


図-7 もどり流速 V_d の時間的变化

図-9 V_s/V_d と θ との関係

この事実はまた、図-9の V_s/V_d の急激な減衰とよく一致している。

以上のような推定方法によると、堤脚部近傍の“もどり流れ”の現象は、一般に考えられるように一つの流れの状態(たとえば Wall jet)によって類似できるものではなく、のり面上を流下する流速 V_d 、その流体厚 D および下流水深によって Free jump あるいは Submerged jump という異なった状態を示すものといえよう。このように下流側水深が極めて大きく、その流れに寄与するわけであるが、ここでいう下流側水深は、堤防設置水深はもちろんのこと、のり面角度と来襲波の特性によっても大きく影響されるので、図-9に示したのり面角度と V_s/V_d の関係でもって一義的に緩勾配のり面の場合は Free jump、勾配のり面の場合は Submerged jump と規定することはできない。今後さらに設置水深、来襲波の特性を変化させて詳細な検討を加えていく所存である。

4. 最大洗掘深さと最大衝突速度との関係

著者らは、前章において堤脚部の流れの状態が Free jump および Submerged jump に類似できると推定し

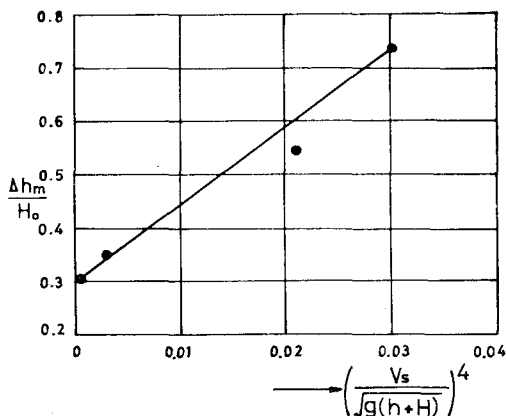
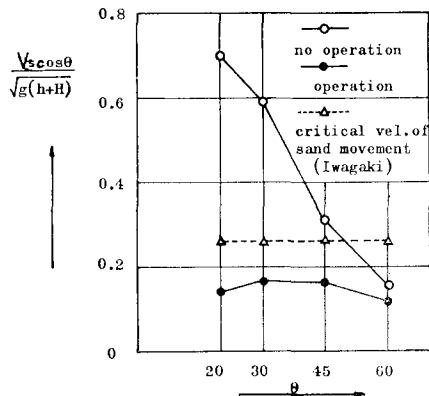


図-10 最大洗掘深さと最大衝突速度との関係

た。しかしながらこれらの流れによる下流部洗掘機構は定常流においても明確でなく、またとくに Submerged jump についてはその流れの内部機構についても現在不明な箇所が多い。したがって、堤脚部の流れをこのような流れに類似せしめて洗掘深さを求めることは現在のところ不可能といえる。

したがってここでは洗掘にもっとも大きな影響を示すと考えられる堤脚部における最大衝突速度 V_s と最大洗掘深さ Δh_m との関係を次元解析によって求めると図-10のような関係がえられる。実験値は極めて数が少ないが、無次元化した最大洗掘深さは、最大衝突速度の無次元量の4乗に比例する。この事実は最大洗掘深さが砂の移動量に比例すると考えるならば、Kalinske-Brown 型の流砂量公式における指数 m を 1.5 と定めたものと一致し、著者らの第1報⁹⁾における $m=1.5$ の仮定をうづけるものといえる。

したがって、この V_s の完全な推定が可能となるなら

図-11 のり面操作の有無にともなう V_s の変化

ば局所洗掘深さが容易に算定できよう。

なお参考のためにこの V_s ののり面変動と図-4に示したのり面を操作した場合の V_s の変化を示したのが図-11である。

図中に岩垣⁹⁾によって与えられる定常流の移動限界流速を同時に示してある。

図からわかるように $\theta=60^\circ$ の場合を除いてのり面を操作しない場合の流速は砂移動限界流速よりも大きいのに対し、のり面を操作した場合の流速は限界流速よりも小さいことがわかる。この事実が図-4に示すのり面操作の有無による地形の相違となってあらわれてきたものと十分考えられる。

$\theta=60^\circ$ の場合は流速はのり面の操作の有無にかかわらず限界流速よりも小さいが、のり面を操作しない場合洗掘が生じているのは、前述の Submerged jump による乱れが大きいとみえられ、単に洗掘が V_s のみに

よって規定できるものでないことを示している。

5. 結 語

以上、まず著者らは局所洗掘に密接な関係があると思われるのり面の“もどり流れ”の流速をとりあげ、その流速は簡単な流体モデルを考えて算定した値とほぼ一致することを明らかにした。さらにこの“もどり流れ”の流速と堤脚部における衝突速度との相関関係から、洗掘を支配する堤脚部の流れの実態を、定常流の構造物周辺の流れと対比しながら考察し、その流れがのり面勾配、入射波の特性ならびに下流水深によって、Free jump あるいは Submerged jump の様相を示すことを明らかにした。一方この最大衝突流速と最大洗掘深さの関係を求め、最大洗掘深さは最大衝突速度の4乗に比例することを実験値によって確かめた。今後この堤脚部の流れの状態をさらに検討し、その様相の異なる堤脚部の流れに応じた洗掘機構を検討していく所存である。最後に本実験に協力していただいた大阪大学大学院生出口一郎君に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 榎木亨・崎川芳一：海岸堤防堤脚部の洗掘について，京都大学防災研究所年報第4号，昭35，pp. 198-209.
- 2) Sawaragi, T. : Scouring due to wave action at the toe of permeable coastal structure, Proc. of 10th Conf. on Coastal Eng. 1966, pp1036-1048.
- 3) 佐藤昭二・田中則男・入江 功：直立壁堤脚部の波による二次元洗掘実験，第13回土木学会海岸工学講演会講演集，Vol. 13, 昭41. pp. 156-161.
- 4) 榎木 亨：海岸堤防基部の洗掘機構に関する研究(そのI) 第14回土木学会海岸工学講演会講演集，Vol. 14, 昭42, pp. 329-335.
- 5) Brantzaeg, A. : A simple mathematical model of wave motion on a rubble mound breakwater slope, Proc. 8th Conf. on Coastal Eng., pp. 444-467.
- 6) Brantzaeg, A. and Tørum, A. : A simple mathematical model of wave motion on a rubble mound breakwater slope, Proc. of 10th Conf. on Coastal Eng., 1966, pp. 977-989.
- 7) Brantzaeg, A., Tørum, A. and Østby, O.R. : Velocities in downrush on rubble mound breakwaters, Proc. 11th Conf. on Coastal Eng., 1968, pp. 815-832.
- 8) Rajaratnam, N. : Submerged hydraulic jump, Jour. of the Hydraulics Division, A.S.C.E. Vol. 91, July, 1965.
- 9) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集第41号，昭31.