

阿南高専

正員 井内大治

"

" ○ 湯浅博明

1. 概説 河川の流水から堤防の基部を守るため堤防に直角に短い突出堤が作られる場合がある。このような部分においては流れによって河床が局所的に洗掘される。この報告はこのような突出堤、河口部および海岸などにおける舌堤などの先端部における局所的な洗掘状況について解明するために行った実験的研究であって、突出堤先端部の洗掘状況について突出堤の長さおよび流量などを変化させて実験を行ない、水面形状、河床形状およびエネルギー損失などの実測資料を求め移動床および固定床における損失について吟味をし、さらに次元解析を行なって局所洗掘に及ぼす突出堤の長さの影響を求めたものである。

2. 洗掘に関する考察 固定床における流れと理論的に研究するには一般には運動の方程式、連続の方程式の他に流れの抵抗法則を表わす式が用いられる。移動床についてはさらに流砂の連続式、流砂の運動方程式、移動床における流れの抵抗法則を表わす式として水と砂との関係を表はす抵抗式などが必要である。また局所洗掘の解析によく相似理論などが用いられる。

(1) 洗掘水深 流水の掃流力によって河床の局所洗掘が行なはれ、河床のすべての点において限界掃流状態になったと仮定する。Fig. 1 において突出堤を含む2つの断面における水深とそれぞれ h_1 , h_2 とすれば摩擦速度が等しいとの条件より

$$V_{*c1} = V_{*c2} \left(= \frac{\sqrt{s} n \theta}{h_c R_c^{2/3} B} \right) \quad (1)$$

したがって h_{c1} と h_{c2} との間には

$$h_{c1}/h_{c2} = (B_2/B_1)(R_{c2}/R_{c1})^{3/2} \quad (2)$$

の関係となる。また連続の条件を用いて変形すれば

$$V_2/V_1 = (S_1/S_2)^{1/2} \quad (3)$$

となる。ここで S_1 , S_2 は①, ②断面における潤辺の長さである。

(2) 損失水頭について 移動床急変部の流れにおいては局所洗掘によって流れ易くなり損失水頭 h_L は固定床の場合に比べて一般に小さく、また洗掘が進行するに従って減少して行く傾向が見られ、洗掘が終了した場合の損失はほぼ摩擦損失に近いものと思われる。したがって急変部の実験においては固定床と移動床の実験結果から形状損失の項が分離できる。Fig. 1 において洗掘が十分進み最終的状態になったとき、急変部を含む断面①-①, ②-②および③-③における水深、河床高さ、流速、河中とそれぞれ h_1 , h_2 , h_3 , z_1 , z_2 , z_3 , v_1 , v_2 , v_3 , b_1 , b_2 , b_3 とする。水路床に基準面ととり①-②の区間における損失水頭と $h_L = h_2 + h_f$ とし、壁面の摩擦を無視しエネルギー方程式および運動量方程式と適用すればそれぞれ

$$\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + z_2 + h_L + \int_0^L \frac{S_f}{\omega A} dx \quad (4)$$

$$\rho Q (v_2 - v_1) = \frac{\omega}{2} b_1 h_1^2 - \frac{\omega}{2} (b_1 - b_2) h_1^2 - \frac{\omega}{2} b_2 h_2^2 + \frac{\omega}{2} b_2 (h_2^2 - h_1^2) + \int_0^L \tau_0 b dx \quad (5)$$

となる。ここで $v_1 = Q/b_1 h_1$, $v_2 = Q/b_2 h_2$, $h_f = \int_0^L \frac{S_f}{\omega A} dx$, h_L : 形状損失, h_f : 摩擦損失, S : 潤

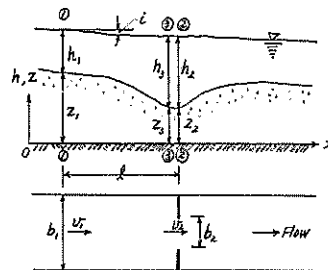


Fig. 1. Definition Sketch of Flow.

辺の長さ, τ_0 : 底面に働く単位面積当りの剪断力である。(4), (5)式より τ_0 と消去すれば形状損失 h_s

$$h_s = J_s [\rho \alpha (v_s - v_1) - \frac{\rho}{2} b_1 (h_1^2 - h_2^2)] + \left(\frac{\rho}{2g} + h_2 + z_2 \right) - \left(\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + z_1 \right) \quad (6)$$

無次元化して整理すれば

$$\frac{h_s}{h_1} = J \left[\left(\frac{1}{Jr} - 1 \right) h^2 - \frac{1}{2} ar (\beta \delta - \alpha) \right] + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Jr} - 1 \right) F_1^2 + \frac{L}{h_1} \quad (7)$$

ここで $J_s = J_1/J_2$, $J_1 = \frac{1}{\omega} \int_0^{\beta \delta} \frac{dx}{x}$, $J_2 = b_1 \int_0^{\beta \delta} dx$, $J = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{dx}{x}$, $h_2/h_1 = \alpha$, $h_2/h_1 = 3$, $b_1/b_2 = 1$, $h_2/h_1 = 2$, $\gamma = h_2/h_1$, $h(\alpha)$: α - $\beta \delta$ 間の任意の位置における水深である。 $h_2 = h_1$ 時 $\beta \delta - \alpha = 0$ となり, また $L=0$ とすれば (7) 式は

$$\frac{h_s}{h_1} = \left[J \left(\frac{1}{Jr} - 1 \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Jr} - 1 \right)^2 \right] F_1^2 \quad (8)$$

と表はさ水形状損失 h_s と h_1 の比が α , r , F_1 などと与えられる。

3. 突出堤の局部洗掘に関する実験

(1) 実験装置と実験方法 実験に用いた水路は Fig. 2 に示すように巾 40cm, 深さ 40cm, 長さ 11m の鉄製水路である。水路の中央に種種の長さで突出する堰を設け, 其の下流端に低い砂どめ堰と設けて, 平均粒径 0.9mm の一様な砂と約 17cm の厚さにしきならし, 上流より約 6 時間通水して定常状態になったときの水面と砂面形をポイントゲージを用いて 2~10cm 間隔に測定し, 突出堤上下流の平均水深, 最大洗掘水深, 洗掘形状などを測定した。また固定床の場合についても同様な実験を行った。この一連の実験の種類を Table-1 に示す。

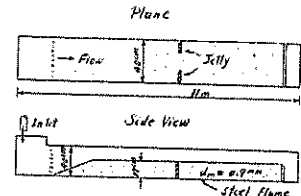


Fig. 2. Experimental Channel.

(2) 実験結果

1) 流況 Fig. 3 はこの実験結果の一例を示した。移動床においては固定床に比べて水面の変化は非常に小さい。

2) 損失水頭 形状損失 h_s と摩擦損失 h_f の項を分離するために移動床および固定床における損失の実測値と求めた。Fig. 4 はえれえ水の損失の実測値と流量との関係を示したものである。

	α	$\beta \delta$	α	$\beta \delta$	α	$\beta \delta$	α	$\beta \delta$	α	$\beta \delta$	α	$\beta \delta$
Fixed Bed	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Movable Bed	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

Table 1. Classification of Experiment.

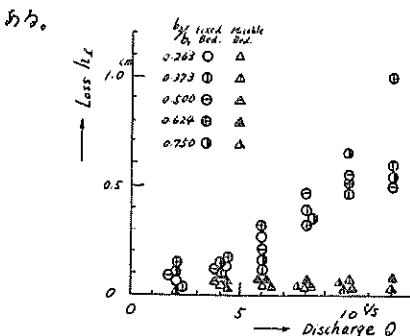


Fig. 4. Observed Values of Loss.

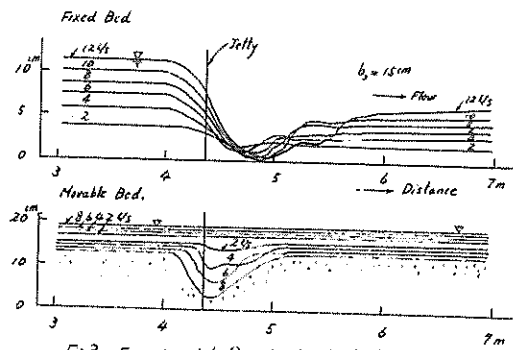


Fig. 3. Experimental Results of Water Surfaces and Bed Profiles on the Fixed Bed and Movable Bed.

4. 洗掘に関する次元解析

(1) 局所洗掘水深 突出堤先端の局所洗掘に関する諸要素の間に次の関係が成立する。

$$F(h_1, h_2, b_1, b_2, i, \gamma, P, r, g_s, d, \sigma) = 0 \quad (9)$$

ここに h_1 は急変部より分離した水深, h_2 は突出堤先端部の水深, i は勾配, γ は単位巾当りの流

量, ρ は液体の密度, γ は液体の単位体積重量, g_s は単位中単位時間当りの掃流土砂の体積, d は砂の平均粒径, σ は砂の密度である。いま変数として h_1, ρ および g_s を選んで π 項と求め π 項相互の変換および省略を行って変形をすれば

$$h_1/h_2 = \phi_1(h_1/b_1, b_1/b_2, Fr) \quad (10)$$

となる。Laurson¹⁾の研究は(10)式の左辺と右辺の2項との関係と, Garde²⁾の研究は h_1/h_2 の関係と求めたものである。また流量 Q および水路中 b_1 が一定であれば Fr 数および h_1 が一定となる。1 が

$$h_1/h_2 = \phi_2(b_1/b_2) = m(b_1/b_2)^n \quad (11)$$

と表はされ m, n の値は実験資料から定めることになる。

(2) 上下流における限界掃流水深 局部洗掘が発生する突出堤より十分に離れた處における限界掃流水深は(1)式に示したように流量 Q , 粒径 d , 河中 B などによって定まる。粒径 d および粗度係数 n が一定であれば限界掃流水深は流量 Q に比例する。

Fig. 5 は $n=0.012$, $2d^2=55d$ として $hR^{3/2}$ と流量 Q の関係と図示したもので図中の実線は計算値を示す。

5. 実験結果に対する考察 突出堤付近の流水における損失は形状損失と摩擦損失であって、摩擦損失は河床がかなり変化してもあまり変化しないと考へられ洗掘によって減少するのは形状損失である。Fig. 6 は(8)式について $f=0.75$ の時の h_2/h_1 の計算値と Fr 数とパラメーターとして示したものである。なお計算に當って f の値を用いなければならぬが実験結果によれば f の値は Table 2 のようになって n の平均値が 1.85 である。またこの実験においては Fr 数の

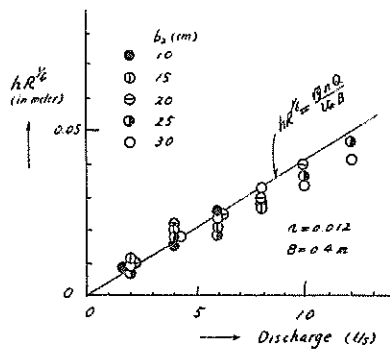


Fig. 5 Relation Between $hR^{3/2}$ and Discharge.

0.4~0.8 位の値になった。図より明らかなように洗掘の増加 (d の増加) とともに形状損失は減少する。前出 Fig. 4 は移動床および固定床における損失水頭の実験結果を図示したものである。また Fig. 7 はこの実験における Fr 数と図示したもので図中の実線は計算値である。

つぎに最大洗掘水深をきめる要素として次元解析によれば(11)式で示される。

Fig. 8 は流量が一定なものについて h_2/h_1

と b_1/b_2 の実験値と図示したもので図中の実線は(12)式を用

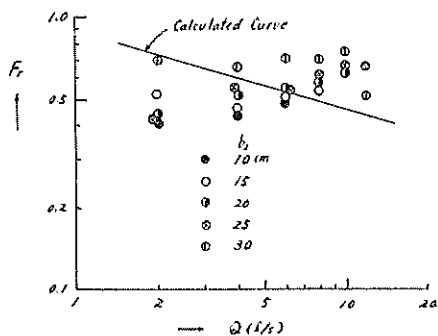


Fig. 7. Relation between Fr and Q .

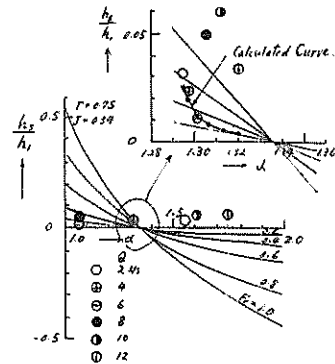


Fig. 8. Calculated Curve Fig. 7.

b_2/b_1	2	4	6	8	10	12	mean
10 cm	1.80	2.21	2.44				2.15
15	1.18	1.69	1.94	2.26			1.72
20		1.07	1.38	1.65	1.86		1.80
25			1.38	1.53	1.76	1.92	1.55
mean	1.49	1.37	1.94	1.81	1.48	1.73	1.85

Table 2. Measured Value of f .

いて計算した値である。この結果を用いて係数と定めるとほぼ $m=1$, $n=-\frac{6}{7}$ となり実験式として

$$h_2/h_1 = (b_1/b_2)^{-6/7} \quad (12)$$

という。

6. 結論 この報告は突出堤先端付近における洗掘現象について実験的研究を行ない、水面形状、河床形状、突出部における損失とくに形状損失などについてその性質を明らかにするとともに次元解析を用いて実験結果を整理しつぎのようなことがわかった。

1) 突出堤付近の流れにおける損失は洗掘の進行に伴って減少し洗掘が終了すれば殆ど摩擦損失となる。したがって形状損失を考慮しなくてもよい。

2) 突出堤より十分離れた上下流の水深は河床材料の粒径が一定であればほぼ一定となり Fig. 5 に示したような関係で表される。

3) 次元解析の結果によれば突出部の水深は流量および粒径が一定であれば突出長さによって定まり突出堤による縮小中 b_2 と水路中 b_1 の比 b_2/b_1 の値によって定まる。

これらの実験結果が勾配および粒径を一定として約6時間通水した後洗掘状況について研究を行なったものである。

参考文献

- 1) Emmet M. Laursen; An Analysis of Relief Bridge Scour. Proc. of A. S. C. E., 1963. H.Y. 3, pp. 92~113.
- 2) R. J. Garde, K. Subramanya, and K. D. Hambudripad; Study of Scour around Spur Dikes, Proc. of A. S. C. E. 1961. H.Y. 6. pp. 22~164.

(追記)

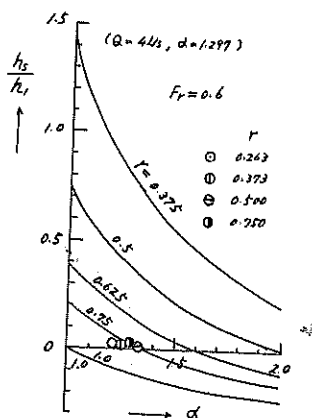


Fig. 9 Calculated Curve Eq. 8.

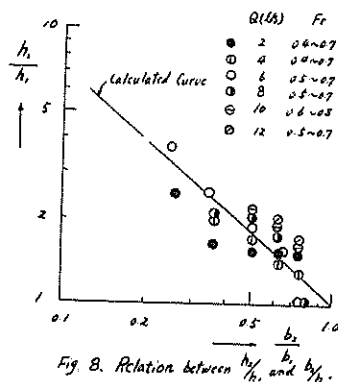


Fig. 8. Relation between h_2/h_1 and b_2/b_1 .