

(B-4) 水叩き下流側の洗掘過程と流れの変動機構に関する実験的研究

大阪大学大学院 劉 世 輝

1. 水叩き下流側の局所洗掘または跳水部での流れの変動に関する問題は現在迄にすでに数多くの実験と研究成果が発表されてはいるが、洗掘機構に伴う水理現象とその測定が複雑かつ困難のため、流れの変動と洗掘機構が相互干渉して変遷していく過程とその解析はほとんどされていないようである。したがって、解析に先立って、それらの洗掘に伴う水理現象を的確に把握する必要がある。本研究はこういった観点から、特に水理構造物下流側の跳水部での洗掘機構に関して実験を行い、これまで観測された二、三の特性を報告すると共に各種の減勢工を設けた場合の比較実験結果の一、二例をも述べる。

2. 実験装置と実験方法：実験装置は写真1に示したように幅15cm、高さ50cm、長さ200cmで、両面は透明の塩化ビニール板の水路で、その上、下流端は夫々100×80×100cmと80×50×80cmの矩形水槽で接続し、2種類のダム模型(Figs.13-aと13-b)を水路の上流側にはめ込み、夫々固定床と移動床の場合について実験を行うものとする。移動床の構成材料はFig.2のA'、(A,B)、(A°,B°)と(A°,B°)線に示した粒度分布曲線をもった混合砂で、水叩き面と同一平面に水路全面にわたってしくものとする。ここにAとBはダムのタイプを表わす。例えば、A°とB°はA-typeとB-type damの実験に用いられた実験砂を示す。越流水頭と下流側の水深は任意に調節しうるように考慮した。実験に用いられた下流側の水深 h_2 はFig.4-aに示す。ここに h_2 は上流側水深 h_1 とそのFroude number F_1 に基いて計算した共軛水深である。各部の記号はFig.2に示す。

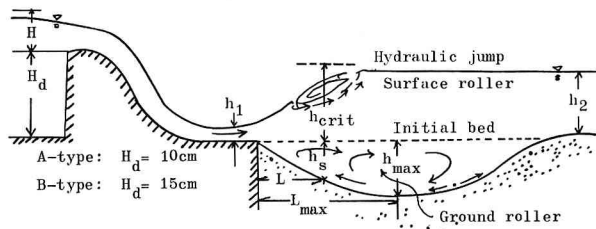
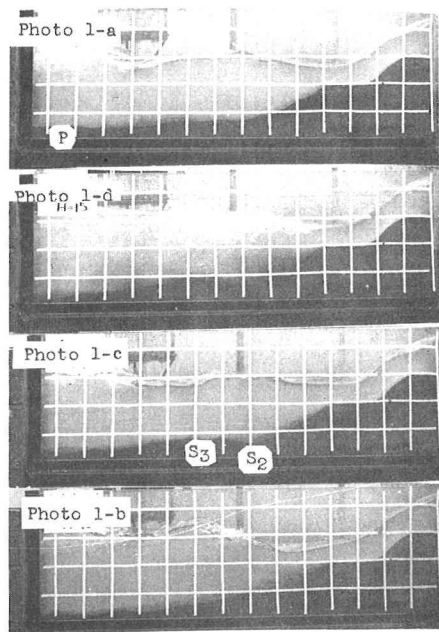


Fig. 1

3. 実験結果とその検討

(1) 洗掘孔の発達過程：Fig.1に示した条件の下で自由表面をもつ跳水部での洗掘孔の発達過程は写真1-a～1-dに示すように周期的な現象をくり返ししながら洗掘孔が発達していくことが観測された。即ち、まず、通水直後にダム下流側の砂床はjumpによって起る強い乱れと砂床とダム終端との間のseparationによって影響され、初期砂床面にある砂粒はbed付近の高流量流のみならず、圧力変動によって浮遊され下流側に輸送されていく。このときの洗掘孔はいわゆる



surface rollerとground roller の交互作用によって suspendedとbed loadの形式を相伴って不規則な周期をくり返しなが洗掘孔が発達していく。ある時間に達すると、約40~50分のほぼ一定の周期をもった洗掘変動が観測された。このときの遷移過程は写真1-aの点P(最大洗掘深さから少し下流側にある)から上、下流側に分かれて砂粒はbed load typeで輸送されていく。

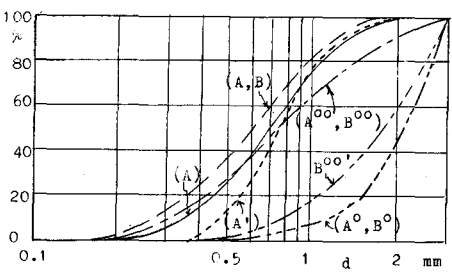


Fig. 2 Size distribution curves.

洗掘孔上流側の砂粒はground roller or back flowによって砂床面に沿って洗掘孔上流側の勾配を増大する如く輸送されていく。部分の砂粒は背面をroll upして高速度流によって下流側に輸送されていくが、比較的粒径の大きいものは再び洗掘孔内に堆積する。そして洗掘孔上流側勾配 $\tan \theta$ 。がその水理条件に対応したある一定の値に達すると流れの

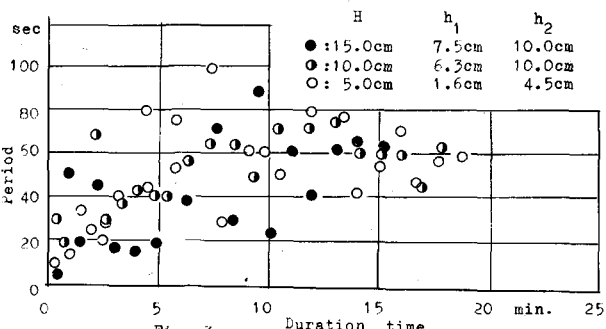


Fig. 3

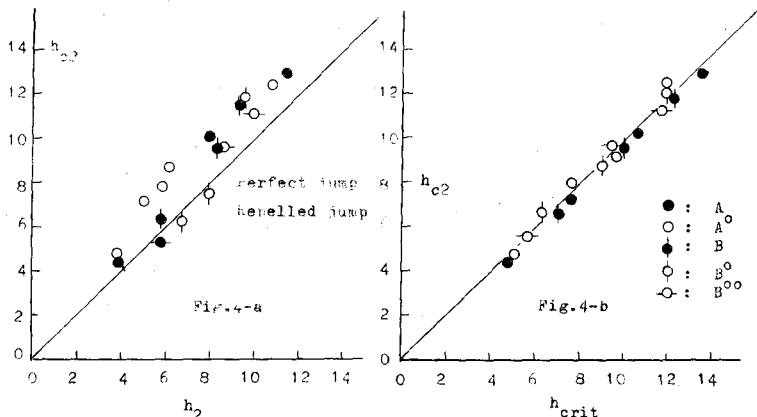
平衡状態が破れ、跳水の前端が瞬間的に水叩き終端迄前進して砕波して、非常に大きい乱れが瞬間的に生じ、回転方向が互いに逆であるような τ 。surface rollerとground rollerが交互作用して砂粒を写真1-bに示したような主に浮遊形式で下流側に輸送していく。このときの経過時間は1~2秒の程度である。その後は写真1-cに示した如く跳水前端は初期の位置に漸次後退して、二次洗掘孔 S_2 とその直ぐ下流側に堆積砂堆 S_3 を形成する。後に、この S_2 の部分はback flowに依って S_3 部分の砂粒からbed load typeの輸送砂で埋められ、限界勾配 $\tan \theta_c$ に達する迄上流側に向う輸送が続けられる。再び限界勾配に達すると(写真1-d)、前述した瞬間的の過渡現象がくり返えされ洗掘孔が発達していく。この洗掘機構の周期の二、三の例を示すとFig. 3の如くである。図によれば、洗掘周期の変化は非常に複雑のようであるが、全体の傾向としては最大洗掘深さに収束するのに対応してある終局的な一定の周期に漸近していくようである。図に示したものはA'-typeの混合砂を用いた実験値であるが、水理構造物とその水理条件が一定の場合では、平均粒径の大きい混合砂の場合の洗掘周期は一般に粒径の小さいものに比して大きい。逆に粒径が一定の場合のは、平均洗掘周期は h_2/h_1 or F_1 の増加に伴って増大していくようである。

Jump frontが水叩き終端で砕波する直前の水深 h_{crit} を固定床のときの共軌水深 h_{sc} に対してplotするとFig. 4-6のようになる。この関係から判ることは、共軌水深を水叩き下流端に起させる洗掘孔形状が、この流れの不安定、即ち、周期洗掘を起させる必要条件と考えられよう。したがって、ある水理条件に対して、その共軌水深に対応した洗掘孔形状を予測することができよう。

(2) 洗掘孔上流側の限勾配に対する次元解析：前述の洗掘孔上流面の限界勾配について次元解析すると、

$$\tan \theta_c = f_1 (F_1, h_2/h_1, B/h_1, d/h_1, \phi, L_o/h_1, H_L/h_1) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 B は水路幅、 d は混合砂の代表粒径、 ϕ は水中に於ける混合砂の安息角、 H_L は跳水による損失水頭、 L_0 は水理構造物を支配する長さ、実験用砂が一定の場合、 d/h_1 と ϕ は一定であるから、 L_0/h_1 が一定の場合では、 $\tan \theta_c$ は一定になるはずである。さら



に B/h_1 と H_L/h_1 は共に h_2/h_1 と F_1 の関数表わされるから、(1)式は、

$$\text{と } F_1 \text{ の関数で } \tan \theta_c = f_2(F_1, h_2/h_1) \quad (2)$$

になる。今、 F_1 をparameterとして実験dataを整理するとFig. 5のようになりにsystematicな関係をうる。Fig. 6は2種類のダム模型と各種の混合砂についてplotした結果である。この場合では下流側の水深は共軌水深に対応したものであるから、水理構造物に対して

夫々一定の傾向を示している。摩擦速度 u_* が砂粒の限界摩擦速度 u_{*c} に比してかなり大であるとき、混合砂の粒径が $\tan \theta_c$ に及ぼす影響を無視しうることが予想した通りである。^{*}

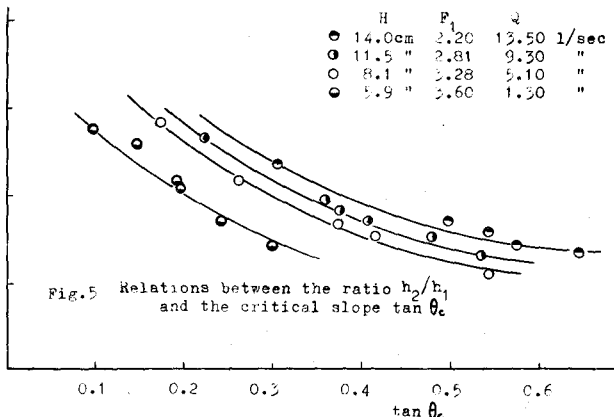


Fig. 5 Relations between the ratio h_2/h_1 and the critical slope $\tan \theta_c$

(3) 洗掘深さの発達過程: Figs. 7

と 8 は最大洗掘深さ h_{max} と経過時間 t との関係を示す。これからわかることは、最大洗掘深さに到達するに必要な時間は比較的短く、その間、直線的に h_{max} が増大していく。勿論、ある一定の水理条件に対して粒径が大きい程直線勾配が緩かである。Fig. 9は粒径をparameterとして h_{max} と単位幅流量 q に対してplotした関係を示す。これから次の関係が求まる。

$$h_{max} = K(q)^n \quad (3)$$

ここに、 K は実験条件で決まる定数。(本

実験では $n=0.17 \sim 0.52$) 図によるとA-type damの場合では粒径が小さい程 h_{max} は q の変化に対して敏感であり、B-typeの場合ではその逆の効果を呈している。この関係から一般に h_1/q^n が洗掘を支配する主要な要素であることが確認される。

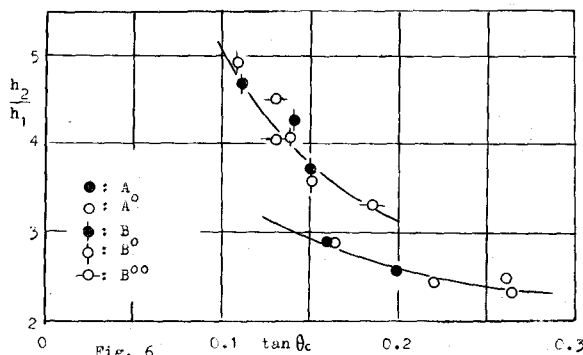


Fig. 6

* 劉 世 燾: 局所洗掘の相似則について, 昭和 39 年度, 第 18 回土木学会年次講演会概要。

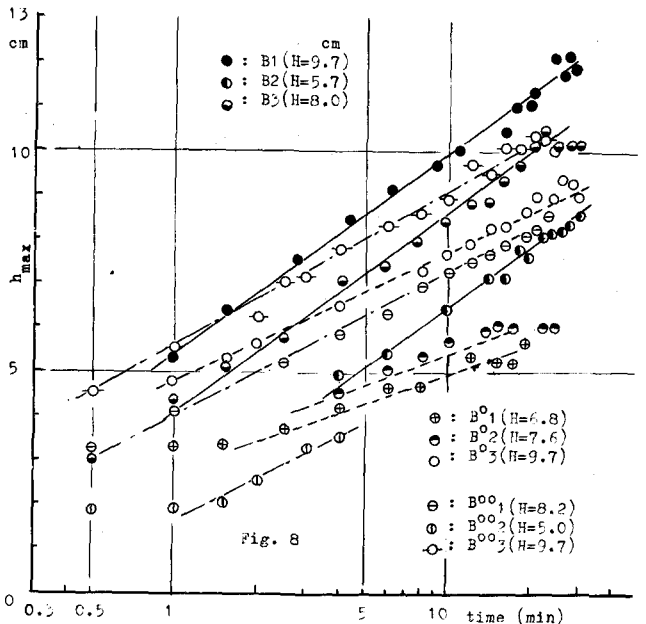
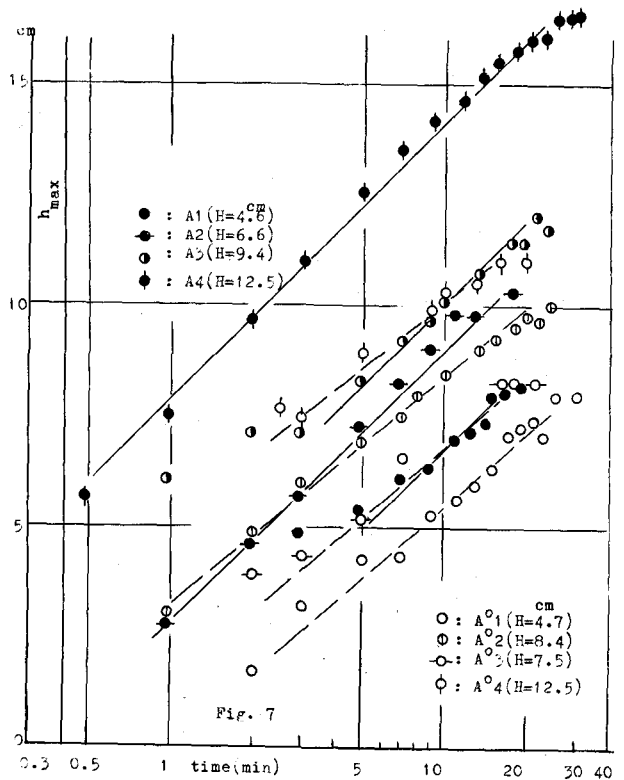
(4) 洗掘孔の形状：各種の混合砂，水理構造物と水理条件に対して洗掘孔の形状を h_{max}/h_1 と L/h_1 に対して整理すると，上流側の形状は粒径に関係せず，ほぼ一致している。また，一定の粒径に対して h_s/h_{max} と L/h_1 を log-log paper 上に plot すると，Figs.10と11のような直線的関係をうる。即ち，次の式で表わすことができる。

$$h_s/h_{max} = c(L/h_1)^m \quad (4)$$

ここに， c と m は混合砂の特性と水理条件によってきまる定数。本実験では $m=0.58\sim 0.71$ であった。上式から， h_{max} ，水理条件と水理構造物の特性が既知であるならば，洗掘孔上流面の形状が求められる。同一の水理条件と構造物に対しては，粒径が小さい程 m の値が大きく，洗掘形状は深いものとなる。しかし， m 値の変化はこの場合では m 値のものに比して小である。

(5) 最大洗掘深さに到達する時間：最大洗掘深さに到達するに必要な時間は，一般に一定の水理条件に対しては，粒径が粗である程，必要時間が長い。水叩き終端に近い点では遠い点に比して，終局深さに達する時間が短い。洗掘孔上流側部分の指数 n は粒径に関係せず一定であった。

(6) 洗掘孔の形状と流れの pattern との関係：Fig.12 は流況と洗掘孔の形状の一例であって，この図から興味深い傾向が見出される。即ち，洗掘孔の上流側の形状はほぼ abrupt drop のある jump の場合の ground roller の下側の boundary (Fig.12の $B_0, B_1, B_2, \dots$ を結ぶ線) と一致している。これによると自由噴流の拡散理論は第一近似として洗掘孔の形状を予想することができなくなる。したがって，自由表面と固定境界を有する場合の流速分布 back flow, eddy-zone 等の特性を的確に把握する必要がある。また，この図から



判るように、Albertson 等の submerged jet から半経験的に求められた jet の nominal boundary の拡がり角度は本実験の場合に比べて小である。この相違は自由表面の存在、即ち、free hydraulic jump の特性に帰するものと思われる。

(7) 砂粒の sorting 効果：洗掘孔がある一定の形状に安定したとき、その上流側部分の表層砂粒を粒質分析すると、Fig. 2 の A' 線は A に、そして B^{oo} は B' になっている。これは周期洗掘の際、浮遊による砂粒の sorting effect がきいているものと考えられる。この結果から混合砂の粒径は洗掘の発達過程に影響をもたらすが、終局的な洗掘形状、例えば上流側の洗掘孔の縦断面形状または $\tan \theta$ に無関係であることは (4) の関係からも判る。

(8) Floor sills と baffle piers の効果：水叩き終端に sills や apron 部に baffle piers 等 (Figs. 13-a と 13-b) を設けた場合の洗掘に関して比較実験を行った結果を Figs. 14-a と 14-b に示す。End sills があることによって、systematic な roller がつぶされ、乱れの scale が小さくなり、洗掘量は軽減される。特に、dentated sill の効果が著しい。ただし、B-S-1 の場合は逆の効果を呈した。これは減勢工の設置にかかわらず、このような flip type である水理構造物に対してかえって水勢を助長することになる。なお、basin の長さを伸ばして、baffle piers と dentated sill を共用すると、かなり良い結果が得られた。このときは周期性洗

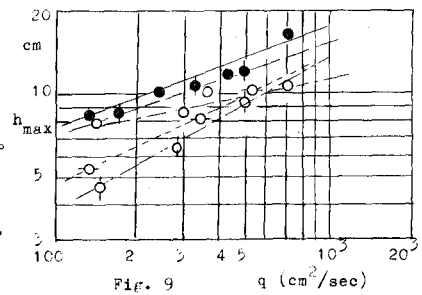


Fig. 9 q (cm²/sec)

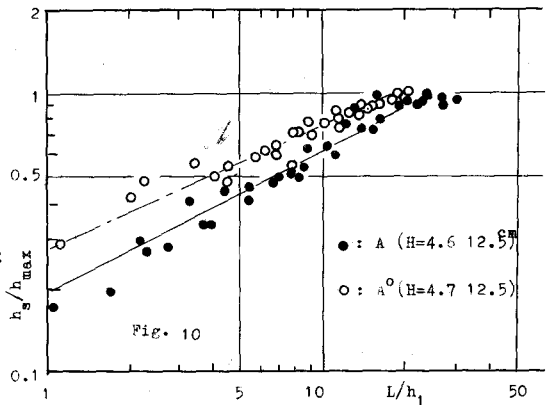


Fig. 10

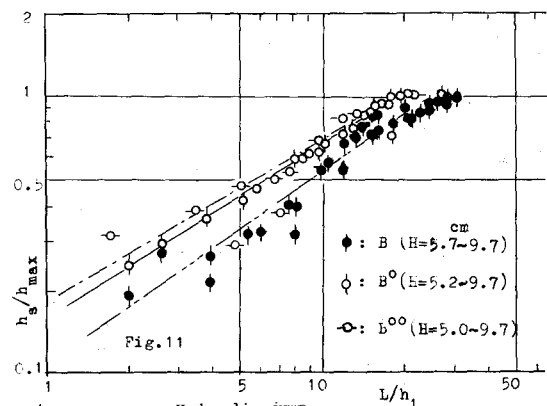


Fig. 11

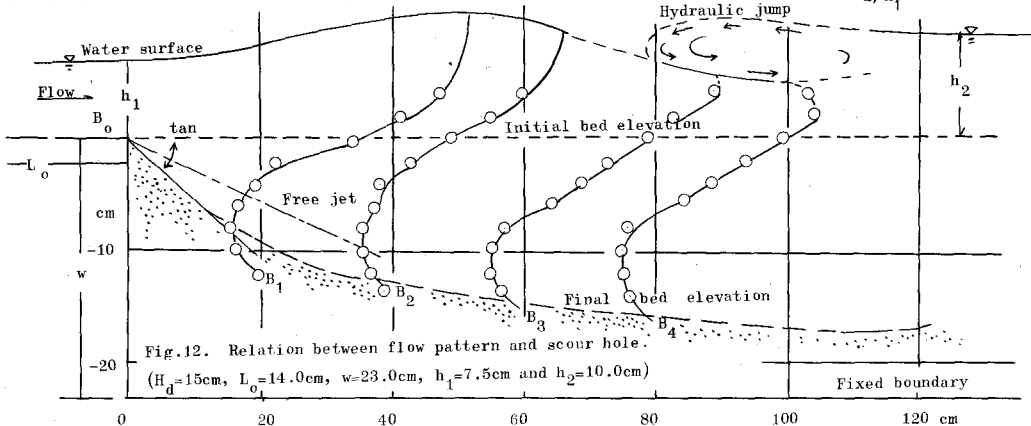


Fig. 12. Relation between flow pattern and scour hole.
($H_d=15$ cm, $L_o=14.0$ cm, $w=23.0$ cm, $h_1=7.5$ cm and $h_2=10.0$ cm)

掘は起らず、洗掘量も各 type のダムに対して、S-0 の場合に比べて 50% 減少されている。最大洗掘深さも約 20~55% 程減少している。この場合砂粒の輸送は主に bed load type であり、これは周期性洗掘で現われる瞬間的な強い攪乱がなく、減勢構造物によって定常的で均質的な乱れに変換されるためであるといえよう。

以上、水叩き下流側の洗掘の過程と流れの変動機構に関し、特に、free hydraulic jump の場合に着目し、考察したことを要約すると、次の如くである。

(a) 洗掘孔の発達は roller の成長に伴って bed load と間歇的な浮遊形式の輸送を周期的にくり返し、次第に洗掘孔を拡大していく。このうちの輸送量としては浮遊によるものがはるかに大きい。 $\tan\theta$ は各水理条件に対して一定であり、混合砂の粒径にほとんど無関係である。

(b) 模型実験で乱れの強い局所洗掘の相似に用いる混合砂は sorting effect に留意して、代表粒径を d_{85} 以上のものをとることが望ましい。(c) 洗掘孔上流側の砂床勾配は h_2/h_1 と F_1 によって Fig. 5 の如く変化する。(d) 洗掘部の流速分布は submerged jet の拡散特性とかなり相違があり、洗掘孔上流側の形状は固定床の ground roller の下側の boundary とほとんど一致する。(e) 水理構造物終端に共軌水深を起させる。洗掘孔形状が周期性洗掘または流れの不安定を与える必要条件のようである。(f) 水叩き部に end sills を設けるときはその形状、水理構造物とその条件を注意する必要がある。水叩き下流部の各断面の流速分布を control し、乱れを均質にそしてその scale を小さくすることによって洗掘量を軽減することができる。

最後に、本実験に当り、終始懇切な御指導を賜った 室田 明教授に感謝の意を表します。

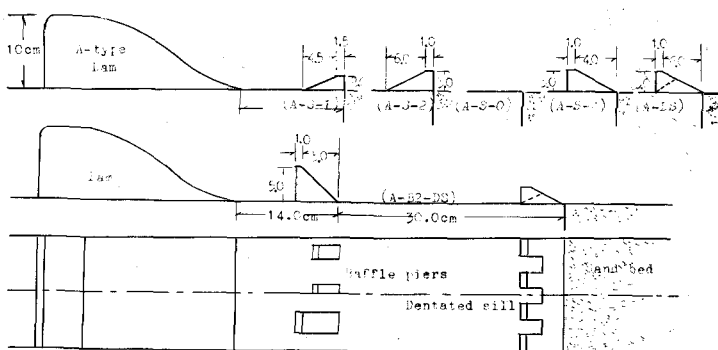


Fig. 13-a. Various types of baffle piers and end sills.

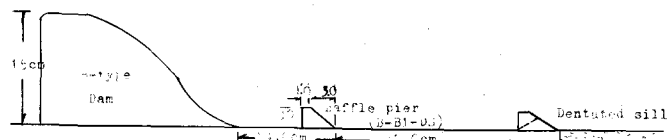


Fig. 13-b. Various types of baffle piers and end sills.

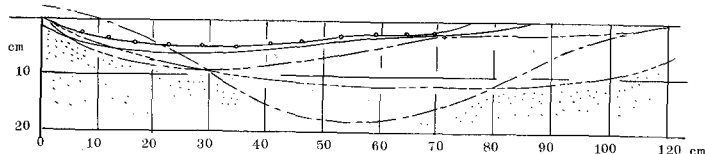


Fig. 14-b. Comparison of scour holes for various types of stilling basins after 15 minutes. (---: B-S-0, ---: B-S-1, ---: B-DS, ---: B-B1-DS and ---: B-B2-DS.)

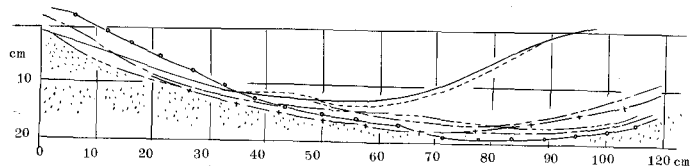


Fig. 14-a. Comparison of scour holes for various types of stilling basins after 15 minutes. (---: A-S-0, ---: A-S-2, ---: A-S-4, ---: A-DS, ---: A-B1-DS and ---: A-B2-DS.)