

水理構造物を越流する自由ナツプによる洗堀の機構

准員 木村喜代治*

要旨 水理構造物を越流する自由ナツプによる、水タタキの洗堀現象を説明する場合に、Schoklitsch の“時間以外の項を一定とする時に、ある時間後に平衡状態が存在する”という考えが支配的であつた。しかるに近頃において Rouse その他数氏は“洗堀現象が時間の変数である”ことを発表した。

筆者は、最近行なつた Maurice L. Albertson 及び Robert Thomas¹⁾ の研究を参照し、洗堀実験を行ない、洗堀深や、洗堀し滞積する範囲の長さ等に関し、この実験と現在までに行なわれた研究とを比較したものである。

〔I〕序 論

水理構造物を沖積砂礫層上に築造する場合に、構造物を越流する自由ナツプより生ずる水タタキの洗堀の機構を知つておく事は必要である。自由ナツプとか噴流等による砂礫面の洗堀現象は、多くの研究者により研究されてきた。1935 年に Schoklitsch は相当詳細な研究を行ない、洗堀深に対する実験式を求めた。1950 年に伏谷博士は砂防ダムの水タタキ保護に関する研究を行ない、洗堀深に対する Schoklitsch の式を改訂し、洗堀部直下流の滞積高や洗堀し滞積する範囲の実験式を求めた²⁾。Rouse は 1940 年に流出土砂流送に関する相似規準を定めるため、垂直噴流による洗堀の実験を行なつた。その結果

- a. 洗堀現象において、流出土砂粒子の性質を最も適切に表わすものは、沈降速度とその平均値についての標準偏差である。
- b. 洗堀の状態は洗堀力の作用継続時間に關係し、洗堀深はその時間の等比数列に対し直線的に増加することを発表した³⁾。この結果に従つて、1950 年に Doddiah は垂直円形噴流による洗堀を、また 1953 年に Albertson 及び Thomas は自由ナツプより受ける洗堀を研究し、洗堀深に対する実験式を求めた⁴⁾。

洗堀現象に対する、これらの研究を大別すると、洗堀力作用継続時間以外の総ての項を一定とする時に、ある時間後において定常状態の存在するという Shoklitsch 系の理論と、洗堀力作用継続時間の函数とする Rouse 系の理論とに分ける事ができる。

〔II〕理論的考察

水理構造物を越流する自由ナツプによる水タタキにおける洗堀現象は非常に複雑な問題である。この問題に関する各種要素を考えて見ると、流量、水タタキ底質の沈降速度及びその標準偏差、構造物越流部テンバから底質面までの落下高、下流水位、越流部の幅、水タタキの幅及び洗堀力の作用継続時間等である。そこでこの研究では、問題を簡単化するために次の如くにした。

- a. 流路の平面形は直線とし、ナツプ下面と構造物との間に完全に通気を施し、全幅より越流せしめた。
- b. 流量、落下高、下流水位を種々変化させた。ただし越流水深は流量を変化せしめることによつてのみ行なつた。
- c. 水タタキ底質の粒径を変化させた。ただし粒径範囲を狭くして、それらの標準偏差はほぼ同一にした。
- d. 流量、落下高、下流水位及び水タタキ底質はある一つの実験の間中は一定とした。
- e. 洗堀深並びに洗堀し滞積する範囲の長さの測定と同時に洗堀力作用継続時間を測定した。

洗堀現象を表わす一般的な關係は

洗堀深に対して

$$f_1(q, H, T_w, W_m, \sigma_m, T, \rho, \rho_s, h) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

また洗堀し滞積する範囲の長さに対しても同様に

$$f_2(q, H, T_w, W_m, \sigma_m, T, \rho, \rho_s, L) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで

- q : 単位幅当りの流量, H : 構造物越流部テンバと初期水タタキ底質水平面間の落下高
 T_w : 水タタキ初期底質面上の下流水深, W_m : 底質沈降速度
 σ_m : 平均沈降速度に対する標準偏差, T : 洗堀力作用継続時間
 ρ : 水の比重, ρ_s : 底質の比重, h : 初期水タタキ底質面以下の洗堀深

* 建設省関東地建, 利根川水系砂防工事々務所

L: 構造物越流部テンバ下流端から測つた洗掘し滞積される範囲の長さである。
 水タタキ底質は利根川産のもので、同一地点において採取したものを使つたので、比重の比は一定でまたフルイ分け範囲は狭いものを使つたので、標準偏差も一定であると考えられる。従つて、(1) 及び (2) に π 定理を用いると、次の如く全く同一形の関係式が求まる。

$$(1) \text{ より } \frac{h}{H} = \phi_1 \left(\frac{qT}{H^2}, \frac{H}{T_w}, \frac{HW_m}{q} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$(2) \text{ より } \frac{L}{H} = \phi_2 \left(\frac{qT}{H^2}, \frac{H}{T_w}, \frac{HW_m}{q} \right) \dots\dots\dots (4)$$

【III】 実験装置

試験用水理樋は建設省利根川水系砂防工事事務管内の柿平試験地にある。幅 1 m 深さ 65 cm のものを使用した。水理樋の一部分にガラス張りの箇所があり、そこに 図-1 に示す様な装置を設けた。流量は水理樋と高水槽間のスルースバルブにより調節され、水理樋上流端にある計量セキによつて測定される。下流水深の調節は水理樋下流端にある水位調節装置によつて行なわれる。構造物の模型は 図-1 に見られる様に、高さ 50 cm、水樋し幅 10 cm のもので木製である。その直下流に底質を所定の高さに水平にならした。下流底質の終りに底質を保持するための底質支持板を設けた。底質支持板は多孔に製作した。流量は幅 1 m 当り 15 l/s と 7.5 l/s とに変え (越流水深はそれぞれ 4.58 cm と 2.79 cm)、越流部テンバと初期底質面までの落下高は 15 cm と 30 cm、下流水深は 2.5 cm、5 cm 及び 10 cm とした。底質粒径は 20 mm のフルイを通過し 10 mm に残留したものと 10 mm を通過し 5 mm に残留したものであり、平均沈降速度はそれぞれ 43.1 cm/s と 32.3 cm/s とであつた。越流自由ナップ裏面と構造物間の通気を完全にするために、図-1 に示される様に構造物を貫いて左右両端にゴムホースを取付けた。

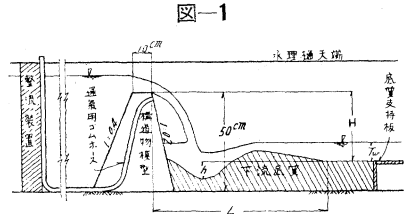


図-1

【IV】 実験手順

試験用水を流し始めてから、流量と下流水深に関して定常状態に達するまでは、直接越流ナップのエネルギーにより水タタキが洗掘されない様に、全体にわたつて木材の保護板を設置した。定常状態に達した後に、保護板を早急に取除き、同時に洗掘力作用継続時間が測定され始める。ある一定の測定時間ごとに洗掘深と洗掘し滞れ積される範囲の長さが測定される。洗掘深はポイントゲージにより、水を流したままで測られる。洗掘し滞積される範囲の長さの測定は、ガラス壁面外側にスケールを置き内部を見とおして、スケールの読みを読むことによつて行なわれる。洗掘力作用継続時間は最大 150 分まで観測した。

【V】 実験結果及びその検討

(1) 洗掘深 洗掘深の測定結果を洗掘力作用継続時間の等比数列に対してプロットしたのが 図-2 である。これよりわかる様に、Rouse, Doddiah, Albertson, Thomas 諸氏によつて指摘された如く、洗掘深が洗掘力作用継続時間の等比数列に対し、直線的に増加することがわかる。Schoklitsch 及び伏谷博士の研究結果によると、時間以外の諸項を一定にするなら、洗掘現象が一定時間後において平衡状態に達することを述べている。伏谷博士はこれを動的平衡と名付けており、氏の実験においては、約 30 分後に平衡状態になつたといわれている。図-2 に見られる様に、この実験では洗掘力作用継続時間を約 150 分まで観測したのであるが、この間において時間の等比数列に対し直線的に増加していることがわかる。Albertson 及び Thomas の実験においては、洗掘力作用継続時間を最大 18 時間まで観測し、その間において直線的に増加すると報告している。Albertson 及び Thomas の研究で、流量の少ない場合に、洗掘の初期段階で急激な洗掘率を有し、比較的短時間の中に一定の洗掘率になるものが幾つか存在した、と述べているが、この実験においてもこれが見られる。ただしこの場合には水タタキ底質粒径の小さな場合に多く存在した。Thomas は (3) 式を解折して次の如き実験式を導いた。

$$h/T_w = [0.29 + 0.07 \log qT/H^2] [q/HW_m]^{1/2} [H/T_w]^{3/4} (q/HW_m)^{1/13}$$

ただしこれは底質粒径が狭い範囲の場合に対するものである。この式を qT/H^2 の特定値に対し、条件を当てはめて、この実験データと比較したのが 図-3 である。これを見ると相当の散らばりを示しているが、ほぼ同一の傾向にあることがわかる。

(2) 洗掘し滞積する範囲の長さ 洗掘し滞積する範囲の長さを洗掘深と同様に洗掘力作用継続時間の等比数列に対し、プロットしたのが 図-4 である。図-4 よりわかる様に、この場合にも洗掘深と同様に、洗掘力作用継続時間の等比数列に対して、直線的に増加している。この結果より (4) 式の関係

図-2 (a)

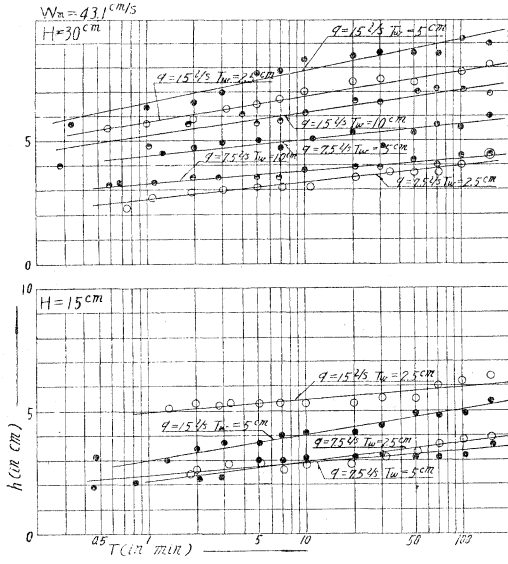


図-2 (b)

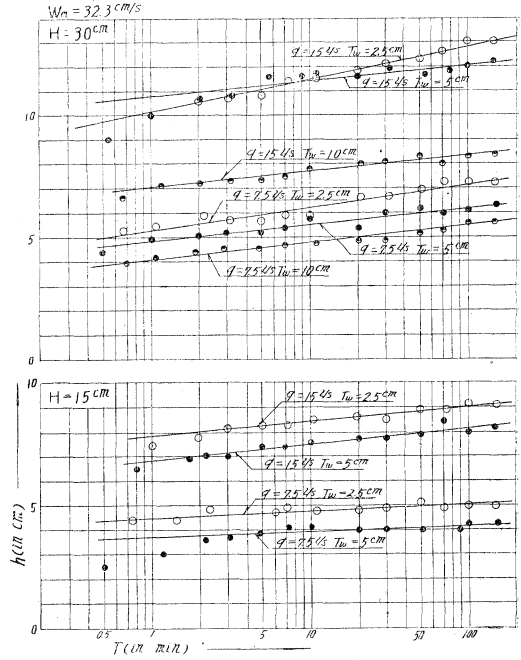
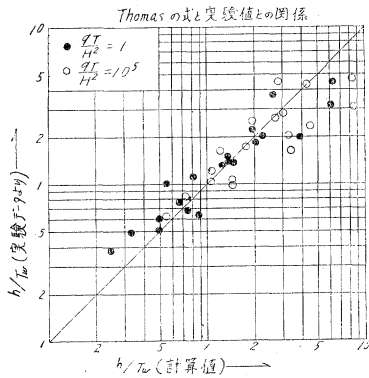


図-3



$$\frac{L}{H} = \left(a + b \log \frac{qT}{H^2} \right) \left(\frac{HW_m}{q} \right)^c \left(\frac{H}{T_w} \right)^d \dots\dots\dots (5)$$

と仮定し、実験結果を当てはめて各常数を決定すると

$$\frac{L}{H} = \left(15.23 + 1.256 \log \frac{qT}{H^2} \right) \left(\frac{HW_m}{q} \right)^{-11/10} \left(\frac{H}{T_w} \right)^{1/6} \dots (6)$$

図-4 (b)

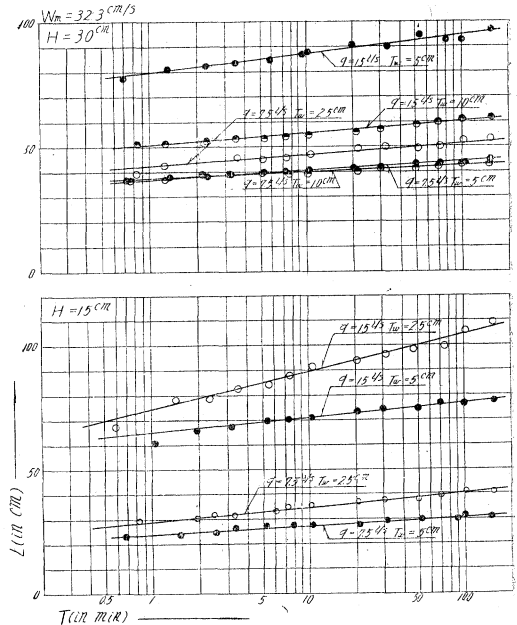
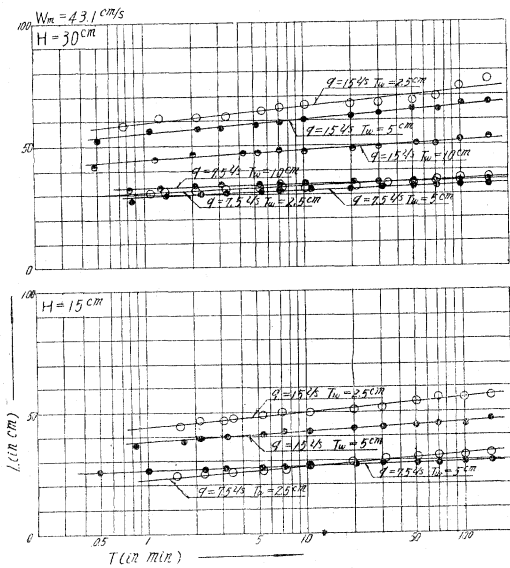
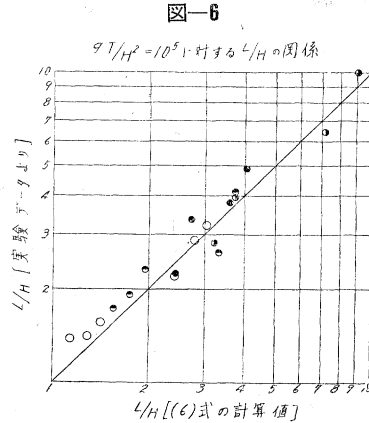
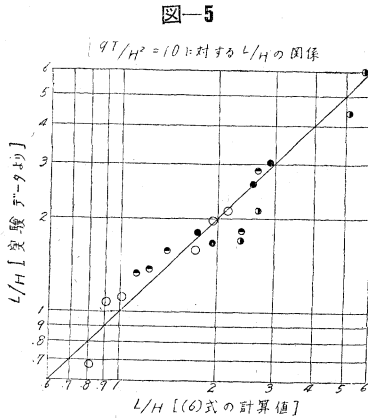


図-4 (a)



となつた。ここで時間 T は分単位とし、単位幅当りの流量 q と底質沈降速度 W_m は毎秒の値を取る。時間パラメーターの一定値に対する L/H の値を、(6) 式による計算値と実験データとで比較したのが 図-5, 6 である。



伏谷博士は実験から

$$L = \frac{5.93}{d_m^{0.2}} (QH_w)^{0.42}$$

を求めた。ここで Q は幅 1 m ごとの流量 (m^3/s)、 d_m は平均径 (mm)、また H_w は上下流間の水面落差であり、この時 L は m 単位で求まる。この式に各実験条件を当てはめて計算してみると、表-1 に見られる様に、全ての場合に実験結果の洗掘力作用継続時間が 1 分に相当する値より小となつた。これは伏谷博士の実験と筆者の実験とでは実験開始の手順の相異によるものが主な原因であろうと思われるが、その他底質の粒径範囲の相異も一応考えられる。しかしながら伏谷博士の方法と同様な方法によつて実験を行なつたとしても、この実験に見られる様に、そして洗掘深に関する Thomas の実験に表われた様に、洗掘力作用継続時間と共に増加することが予想される。伏谷公式は下流水深の影響に関する項が含まれていない、従つて下流水深に無関係となつている。

表-1

洗掘し滞積する範囲の長さに関する伏谷公式と $T=1$ 分に相当する実験値との比較

| 平均径 (mm) | 高さ (cm) | 下流水深 (cm) | $q=1.5$ の時 $T=1$ | | $q=2.5$ の時 $T=1$ | |
|-------------|------------|--------------|------------------|--------|------------------|--------|
| | | | 計算値(m) | 実験値(m) | 計算値(m) | 実験値(m) |
| 15 | 30 | 2.5 | 0.317 | 0.371 | 0.268 | 0.308 |
| " | " | 5 | 0.214 | 0.330 | 0.258 | 0.327 |
| " | " | 10 | 0.328 | 0.486 | 0.246 | 0.288 |
| " | 15 | 1.5 | 0.281 | 0.418 | 0.201 | 0.221 |
| " | " | 5 | 0.263 | 0.380 | 0.186 | 0.260 |
| 2.5 | 30 | 2.5 | | | 0.307 | 0.424 |
| " | " | 5 | 0.406 | 0.748 | 0.246 | 0.368 |
| " | " | 10 | 0.376 | 0.508 | 0.282 | 0.375 |
| " | 15 | 2.5 | 0.323 | 0.744 | 0.230 | 0.280 |
| " | " | 5 | 0.302 | 0.652 | 0.214 | 0.239 |

【VI】 結 論

この実験の範囲においては水理構造物を越流する自由ナップによる水タタキの洗掘現象が Rouse 系理論によく合致した。すなわち

- a. 洗掘現象において、時間以外の項を一定とした時に、平衡状態に達することはない。
- b. 洗掘深に対しては、Thomas の実験とほぼ同一の傾向を示した。
- c. 洗掘し滞積する範囲の長さも洗掘深と同様に洗掘力作用継続時間の等比数列に対して、直線的に増加が続く。

この研究は建設省六甲工事事務所長大石博愛氏並びに利根川水系砂利工事事務所長柿徳市氏の懇切な指導の下に行なわれたものである。また実験等において同事務所中村二郎、玉木和男、渡正亮諸氏に負う所大であつた。以上の方々に深く感謝する次第です。

参 考 文 献

- 1) Doddiah, Maurice L. Albertson and Robert Thomas : Scour from Jets. Proceedings Minnesota International Hydraulics Convention, 1953
- 2) 伏谷伊一：砂防工学原論。地球出版, 1951
- 3) Rouse, Hunter : Criteria for Similarity in the Transportation of Sediment. Proceedings Hydraulics Conference, University of Iowa Studies in Engineering, Bulletin 20, 1940
- 4) 前出 1)。