

堰の一被災機構としての護床工からの砂のぬけ出しによる空洞化の進行過程 Enlargement of the Cavity Due to Sweeping of Sands beneath Bed Protection as a Cause of Weir Disasters

京都大学工学部 正 員 中川 博次
金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎
京都大学工学部 正 員 ○清水 義彦
京都大学工学部 正 員 村上 正吾

1. まえがき

近畿地方では昭和57年に主として台風10号による豪雨のため各河川で既往最大に近い流量を記録し、河川構造物の災害件数も多数にのぼった。土木学会関西支部の援助で近畿2府5県の河川構造物災害についての資料が収集され、河川構造物災害の機構解明や被災程度の軽減法の工夫、現有構造物の洪水時の健全度診断などの目的に有効利用が図られつつある¹⁾。この資料により堰災害を概観すると、次の4つの基本事象が抽出される。

(i)護床工又は水叩き下流の局所洗掘、河床低下、(ii)護床工ブロックの間隙からの砂の吸い出し、(iii)パイピング、(iv)落水や転石の直接衝撃があげられる。図-1にこれら基本現象の概略を示すとともに、図-2にはこれら基本現象を中心に

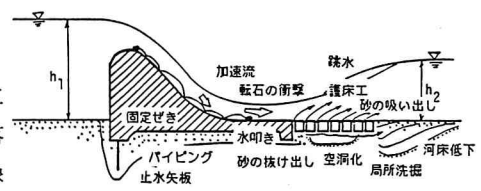


図-1 堰の災害に関わる基本事象

据えて、災害が出現し拡大してゆく仕組をフローチャートで表わそうとしている。基本事象の(i)は主として堰による流下土砂の扞止によるが、水叩き部で加速された流れや直接の落水、被災して変形した護床工などによって攪乱された流れがこれを助長する。(ii)は水叩き部より走り込んだ流れによる圧力低下からブロックの間隙より砂がpick-upされる現象で、護床工の意義に関わる重要な問題である。護床工下部、移動床との境界にはかなり早い浸透流ができ、護床工下流端が河床低下や洗掘によって開放されると、この流れによってどんどん砂が運ばれ、空洞化が上流に伝播しながら拡大・発達してゆく。この現象は(ii)よりもむしろ(iii)に近い側面を有しており、本論文で焦点を当てた対象である。(iii)のパイピングにしてもここで取りあげた現象にしても水みちの形成と「浸透流場」の発達とともに、それによる土砂の輸送とそれに伴う「水みち」あるいは空洞化の拡大がその特徴で、著者らはこうした機構を土砂水理学の基礎にもとづいて巧みに説明し得るフレームワークを確立することを当面の目的とした。

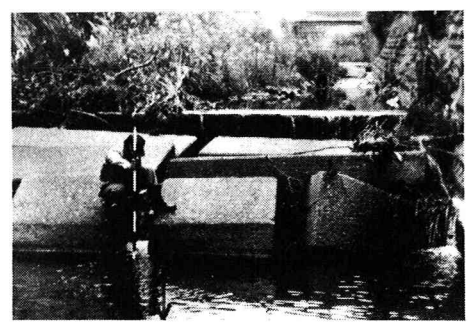


写真-1 堰災害の事例(野見川・福井県)

図-2に示されるように基本事象を産み出す要素(構造物の性質、流況など)の組合せでその出現が規定されるが、基本現象の出現、進行が他の基本事象の出現を容易にする場合も多く、複合した型式で災害が生じることも

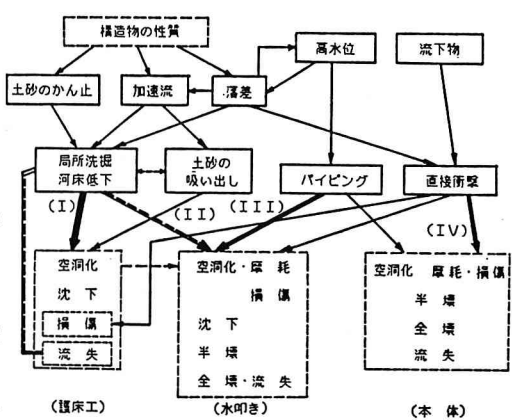


図-2 堰災害の出現・拡大のフローチャート

考慮すべきである。一方、基本現象によって災害の出現のし方にも特徴が現れ、図-2のフローチャートではこれらも矢印によって示されている。すなわち図-2は災害要因となる事象の抽出に役立つのみならず、災害の類型分類やそのパターンごとの健全度を考える上でも効果を発揮するものである。²⁾

2. 護床工からの砂のぬけ出しと空洞化の機構

本研究では水叩き部で加速された流れが護床工部（護床ブロックを敷きつめた区間）へ流れ込んで来た状況を想定している。この時護床ブロック間隙からの砂の吸い出し、護床工に接続する移動床部の河床低下（洗掘）が生じる。ブロックの間隙内に「浸透流」が形成されブロックと移動床面との間で早くなり、下流に向って発達している。とくに下流端の河床が低下するとこの流れは助長され、下流端部から砂が吐き出されることで「水みち」が発達してくる。水みちは下流端に近いところから明らかに空洞となり、鉛直スケールを発達させながら上流へ伝播してきていわゆる空洞化の進行となる。空洞化したところには護床工を通しての流れの供給（transpiration）があり、空洞化の進行が促進されてゆく。通常の護床ブロックは屈撓性をもたせてあり、空洞を埋める形で護床工が変形し、空洞が大きく発達する例は少ない。但し変形した護床工に沿った流れは下流移動床部に対し河床低下や洗掘を助長する場合もある。空洞化の進行の機構を探ることは、単に空洞化の伝播を予測するだけでなく、上述した護床工の変形・沈下を予測する上でも基礎となるものであり、本研究では、護床工が変形した移動床になじんで変形しないよう構造を工夫し、空洞化を自由に進行させてその機構を調べることにした。

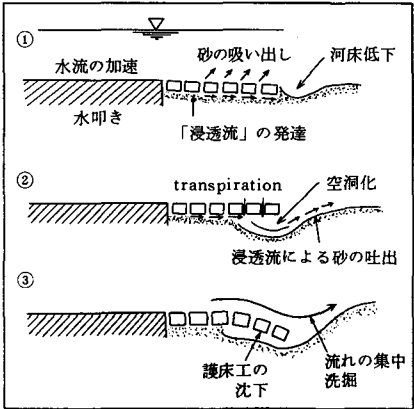


図-3 護床工周辺の流砂挙動と空洞化の進行

実験は長さ9 m、幅33 cmの可変勾配水路に図-4に示すような水叩きー護床工モデルを設置して行った。水叩きの上流には堰を設け、護床工部を射流状態で流れる（跳水が対象区間内で生じない）よう調整して実験した。護床ブロックのモデルとしては直径 $D = 2.8$ cmのガラス玉を用い、1層9列で水叩き面に頂部を合わせて敷いたものを護床工とした。移動床部は粒径 $d = 0.68$ mmの均一砂とした。実験条件は表-1に示す通りである。先述したように護床ブロックに相当するガラス玉が空洞化の進行とともに沈下しない様、ガラス玉同志をボンドで接着し、側壁で固定している。

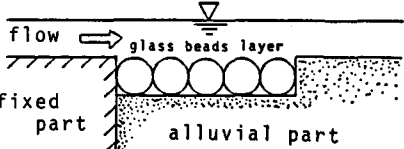


図-4 実験装置図

表-1 実験条件表

Table 1. Experimental Condition

CASE	I_e	$Q_T(t/s)$	$\bar{U}(cm/s)$	$\bar{h}(cm)$	F_p
A	1/400	7.66	92.58	2.20	1.99
B	1/400	12.70	130.70	3.08	2.38
C	1/200	6.56	93.56	2.68	1.83

Q_T : total discharge, $\bar{U}, \bar{h}$: mean velocity and depth of free surface flow

表面流況及び護床工下部移動床砂面の変形はビデオフィルムに撮影して測定した。護床工下流及び通水後の護床工下部の砂面形状は超音波測深器で測定した。さらに、適当な通水時間の後、砂面をニスで固定して再度通水、ガラス玉の間隙より挿入された3 mmプロペラ流速計によって空洞内流速分布の測定を行った。

本実験では図-3の①、②の現象が再現され、空洞化の進行過程が観察された。実験条件によりある場合には空洞化は水叩き部にも達するが、ある場合には空洞化の進行が途中で停止、平衡形状を保つものも見られ、一概に空洞化の進行を恐れて護床工に屈撓性をもたせる必要はないように思われた。

こうした実験による観察にもとづき、空洞化部上部護床工から流入が盛んに行われ（transpiration）、空洞化内の流量あるいは流速が流下方向に増加し、能率よく流砂運搬が行われ、空洞化の拡大が進むといった現象のフレームワークを把握できた。空洞化部はほぼ幾何的相似を保って拡大するようで、変形（拡大）に必要な流砂量を運び得ない状況で空洞化の拡大・遡上は停止するものと推測された。以下ではこうしたフレ

ームワークで現象を把握しつつ、実測結果の若干の水理学的検討にもとづいて現象を記述するモデリングを進めてゆくこととする。

3. 空洞化に伴う護床部を通してのtranspiration と空洞化内流速場の形成

はじめに、空洞化進行過程における砂面形状を検討するため、一例としてケースCの砂面形状を図-5に示す。水叩き部とガラス玉から構成される護床工部との境界を原点とした流下方向座標を x 軸、水叩き部河床面から鉛直下向きに z 軸をとるものとする、ガラス玉層下部は $z = 2.8\text{cm}$ となりこれより下側で空洞部を定義する。同図から理解されるように、空洞化は通水時間の経過とともに上流側へ遡上し、初期形状において上流側に段落ち部を形成するが、活発な流砂運動によって平滑化されてゆく。また、下流に進むにつれて、昇り勾配を示し、ガラス玉層末端では水中安息角に近い斜面を形成する。空洞化部砂面形状の時間的変化を図-6に示すスケールで無次元表示したものが図-7であり、また図-8に示す空洞部の鉛直スケールと水平スケールの関係から、砂面形状は時間的に相似であることが予想される。

次に空洞化内流速場を検討する。空洞内の流速分布は水叩き部との接続部から流下するにしたがって発達し、ガラス玉層上部では早い表面流にひきずられるため、Couette型流速分布を示す。空洞内の流速分布は、砂面近傍に最大流速が現われ、壁面噴流に似た分布形をとる。また、空洞内流速分布形は流下するにつれて太った形状となっており、表面流からの transpiration による流量増加が予想される。ガラス玉層上の単位巾・単位長さあたりの transpiration による流入流量 q を求め、各地点の空洞化鉛直スケール z_s との対応を調べると、図-10に示すように、ほぼ z_s に対し線型に増加する。また図-11は、ガラス玉層末端の空洞内流量 Q_e に対し、ガラス玉層末端での空洞化鉛直スケール z_{se} (空洞部の開口度に相当) の関係を示したものである。図-10, 11を考慮すると、ガラス玉層末端が洗掘されて、 z_{se} が増すと空洞部からの流出流量も増し、それに見合う流量分が各地点の空洞化鉛直スケール z_s に応じて、表面流から取り込まれる。このことは先に述べた様に、護床工下部が河床低下や洗掘により開放されると、空洞化が進行する過程と類推される。

以上の実験から、空洞化の進行性状が把握されたため、次の様な簡単な二次元空洞部洗掘モデルを考える(図-12)。すなわち空洞部の形状は矩形とし、形状が時間的に相似に保たれるものとすると

$$V_s = k \bar{z}_s^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに V_s は空洞部容積、 k は空洞部形状によって定まる定数である。このとき図-12の破線に示す様に空洞化が進むものとしてモデリングを行う。一方、表面流からの単位長さあたりの流入量

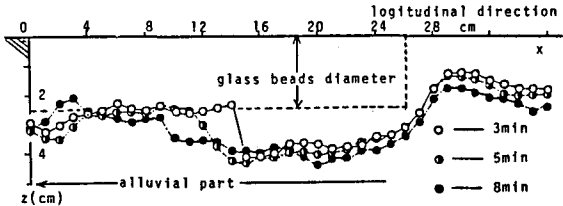


図-5 空洞化進行過程における砂面形状

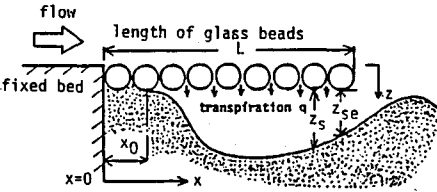


図-6 定義図

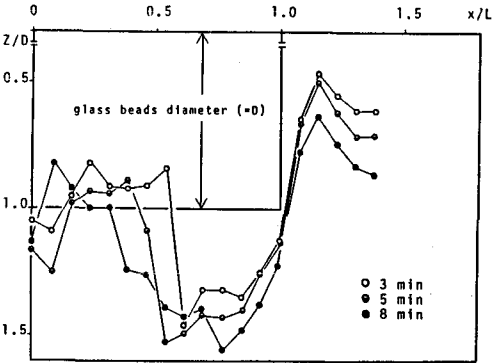


図-7 砂面形状の時間変化

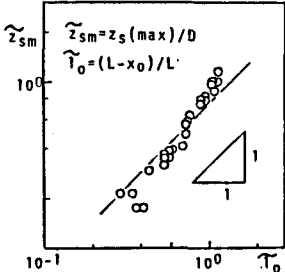


図-8 $\bar{z}_{sm}$ と $\bar{l}_0$ の関係

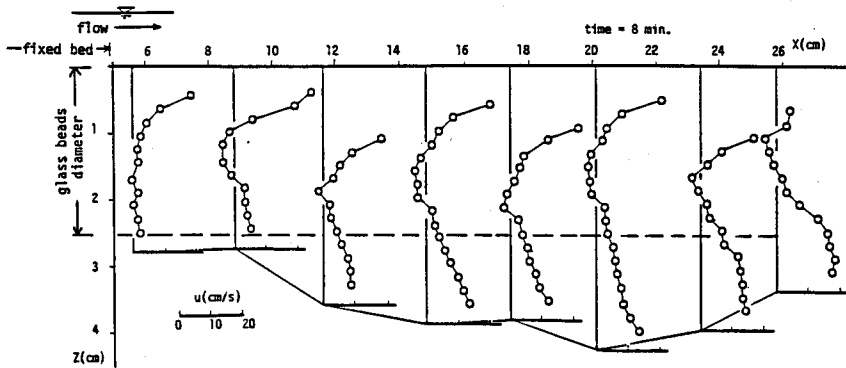


図-9 空洞内流速分布の例

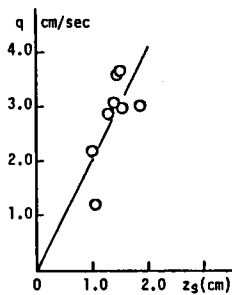


図-10 $q \sim z_s$ の関係

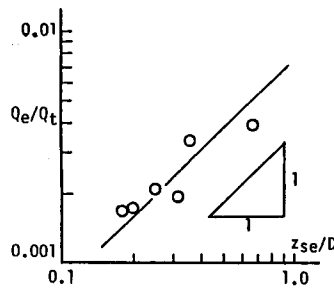


図-11 $Q_e \sim z_{s,e}$ の関係

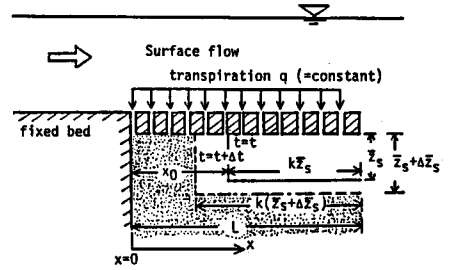


図-12 二次元空洞部洗掘モデル

q は先の実験結果より、 z_s に比例するから、 z_s に対して変化する q の平均値は $\bar{z}_s$ に対する値に等しい。よって q 及び $\bar{z}_s$ は平均スケール $\bar{q}$ 、 $\bar{z}_s$ を用いて議論を進める。ところで、 $\bar{q}$ は、ガラス玉層末端での空洞内流量 Q_e と、そのときの空洞化縦断スケール $(L - x_0)$ を与えると、次式から求められ、

$$\bar{q} = Q_e / (L - x_0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

また、空洞内の断面平均流速は、

$$\bar{u} = \bar{q} \cdot (x - x_0) / \bar{z}_s \quad \dots\dots\dots (3)$$

から求められる。

ところで図-13に示すように空洞部において流速分布の相似性が認められ、

$$u/u_{\max} = f(\tilde{z}/z_s) \quad \dots\dots\dots (4)$$

と表現されることがわかる。ただし、 $\tilde{z} = z - D$ したがって、空洞部断面平均流速 $\bar{u}$ と $u_{\max}$ の比は一定となり、これを次式で表わす。

$$\bar{u}/u_{\max} = C = \int_0^1 f(\tilde{z}/z_s) d(\tilde{z}/z_s) \quad \dots\dots\dots (5)$$

4. 空洞部流砂量と空洞化の進行

次に流速場を流砂量特性と結びつけるために、空洞部内の掃流力分布を検討する。そのため、以下のような実験によって抵抗係数の評価を行った。すなわち一層のガラス玉層の下に一定厚の水の層を作り、その下方固定床上のせん断応力の評価について検討した。図-14に ガラス玉層とその上下層での流速測定例を示す。図-14は先の空洞化内流速分布を理想的条件で抽出したものと言え、本質的な特徴は同一である。この下層の流速分布において最大流速点以下の分布が下方固定床粗面によって形成される境界層と考えると

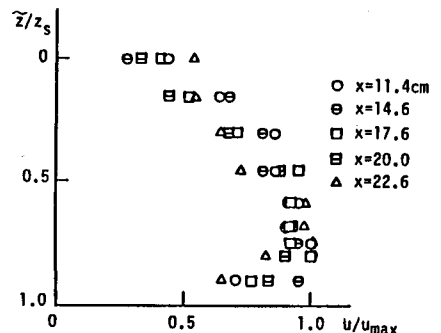


図-13 流速分布の相似性

Manning-Strickler 型の抵抗則と指数型の流速分布を Kármán の運動量積分式に適用して底面せん断応力分布を求めることが可能であるが、ここではさし当ってプレストン管によって底面せん断応力を実測し、単に $u_{\max}$ と u_* の比 ($\phi \equiv u_{\max}/u_*$) を評価することとした。実測によると ϕ の値は 5.0 ~ 5.5 程度である。

ϕ が知られると、前章ですでに推定された $u_{\max}$ を用いて、空洞部下部砂面での掃流力は、

$$\tau_c = \rho u_*^2 = \rho u_{\max}^2 / \phi^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

で評価される。厳密には空洞部で流砂の非平衡性は著しいが、近似的にはスイス公式のような平衡流砂量式の適用で空洞部内流砂量分布を知ることができる。ここでは空洞スケールの増大過程の追跡に焦点を絞り、平均流砂量を次式で求めた。

$$\bar{q}_B = \frac{K_B}{L} \int_{x_0}^{x_0+L} \left\{ \frac{u_{\max}^2}{(\sigma/\rho-1)gd} \frac{1}{\phi^2} - \tau_{*c} \right\}^{3/2} dx \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに $\tau_{*c} \approx 0.047$, $K_B = 8$ で、スイス公式を適用している。

ここでは図-12 のように空洞部幾何形状をモデル化しているので、土砂収支式は、次のようになる。

$$\bar{q}_B dt = (1-\rho_0) k \{ (\bar{z}_s + d\bar{z}_s)^2 - \bar{z}_s^2 \} = 2(1-\rho_0) k \bar{z}_s d\bar{z}_s \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに ρ_0 : 砂の空隙率である。 $\bar{q}_B$ が $\bar{z}_s$ に独立であれば式(8)は、

$$\bar{z}_s = \sqrt{\bar{q}_B / (1-\rho_0) k} \cdot \sqrt{t} \quad \dots\dots\dots (9)$$

と容易に解かれ、空洞化のスケールは時間の平方根に比例して発達することになるが、一般に $\bar{q}_B$ は式(7)、(5)、(3)を通して $\bar{z}_s$ の関数となっており、数値計算に頼らざるを得ない。

上述のフレームワークを通して空洞化進行過程を数値計算で追った例が図-15 で、ビデオ解析による実験結果と比較しているが、概ね良好に現象が説明できるものと思われる。但し、本モデルには、空洞化の停止に関わる機構が考えられておらず、平衡スケールの漸近性状態で論じるわけにはゆかない。以下に、発達に鈍化する一つの要素を考えてみる。式(6)を見てわかるように掃流力は流下方向に増加し、平衡流砂量式でほぼ推定される流送能力も流下方向に増加しているので、ある時期までは比較的スムーズに土砂が護床工端より吐き出される。しかし相似性を保った空洞化の発達が進んでくると吐き出すべき土砂量は $\bar{z}_s$ の 2 乗に比例して増大し空洞部の出口（下流端）に達する迄に相当 over loading の状況となる事態へと進んで来る。一旦、土砂の輸送路に堆積が生じると、transpiration も減少し、空洞部内掃流力が激減し砂の輸送は停止してしまうものと推定される。すなわち、今後は輸送能力と空洞化進行のために運ばれる土砂量の大小関係に着目して、上述のような閉塞現象と空洞化の停止、平衡空洞化スケールの評価などへとモデルの改良によ

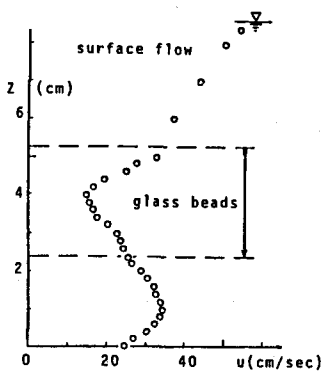


図-14 ガラス玉層とその上下層の流速分布

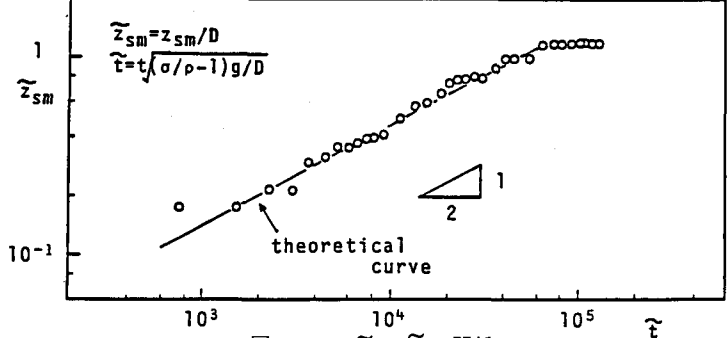


図-15 $\bar{z}_{sm} \sim \bar{t}$ の関係

って検討を進めてゆきたいと考える。

5. あとがき

本研究は、河川構造物災害の出現・拡大機構を水理学的、あるいは土砂水理学的に明らかにし、適切な防災措置を確立しようとの観点と、複雑な境界条件によって流砂現象が興味ある変形をすることに着目、それによって流砂機構のより深い理解を得ようとする観点との絡み合いから産まれたもので、明らかにされたことよりもむしろわからない面が多く浮かび上がる結果となった。

具体的には堰の災害の中で相当頻度が高く、又本体被災のひき金ともなる護床工周辺の現象をとりあげ、とくに空洞化現象の取り扱いを試みた。微妙な水理条件や境界条件が現象に与える影響が大きいにもかかわらず、現象の特徴を把みたいという動機から必ずしも適切な条件設定でない面もあり、又充分系統的な実験を実施し得たわけでもなく、今後更に検討を重ねてゆきたいと考える。

なお本研究の遂行に当って昭和61年度文部省科学研究費・一般研究(B)「浸透層上での流砂の運動特性に関する研究」(代表・中川博次、課題番号61460167)の補助を得た。

参 考 文 献

- 1) 中川博次編：河川構造物の洗掘防護工に関する研究，昭和59年度文部省科学研究費・自然災害特別研究(1)，研究成果報告書，1985。
- 2) 中川博次・辻本哲郎・村上正吾・清水義彦：洪水時における河川構造物の健全度評価に関する考察，第5回自然災害科学会学術講演会要旨集，pp. 151～152, 1986。

付写真

