

水際河床間隙の目詰まりに関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE CLOGGING SOIL POROSITY ON BOUNDARY AREA BETWEEN WATER EDGE AND RIVER BED

片貝武史¹・荻田章仁²・鷲見哲也³・辻本哲郎⁴

Takeshi KATAKAI, Akihito OGITA, Tetsuya SUMI and Tetsuro TSUJIMOTO

¹学生会員 修(工) 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻

³正会員 博(工) 名古屋大学大学院講師 工学研究科社会基盤工学専攻

⁴フェロー会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

As river surface water permeates into sandbar and river bed, there is a process by which suspended load (organic matter, sand, etc.) infiltrate into soil pores. As suspended load infiltrates the pores, it causes clogging, and can become the cause of a degradation in permeability. Because such phenomena can influence the hydrological and chemical cycles, it is necessary to examine the mechanism by which clogging resulting from infiltration occurs. In the present research, an example of the permeability degradation as a result of clogging is presented. In order to model this process, an experiment in which only flow was changed so that fine particles passed through a sand column was conducted, and the relationship between permeability degradation and the clogging process was quantified. Then the phenomena was modeled with a numerical model considering permeability degradation and sedimentation of fine particles, and the experimental and numerical results were compared. With the experimental and numerical results, the process of permeability degradation due to the accumulation of fine sediment was illustrated, and the vertical distribution of fine sediment in sand column pores was expressed with the numerical model.

Key Words: *clogging, permeability degradation, water exchange between surface water and subsurface water*

1. はじめに

日本の河川は、山地部から扇状地を抜けて平野に注ぐような構造(セグメント)を持ち、その中でも特に扇状地では河川からの伏没現象により地下水に向かう水循環の構造がある。つまり、伏没現象は、河川流量を減少させる要因であるが¹⁾、一方で地下水を涵養するという側面があり、河川管理の視点では正常流量(利水、環境に対する流量管理)に、流域水資源管理という視点では地下水涵養量に影響を及ぼすことから、浸透性メカニズムを明らかにすることが求められている。

一方、河道内には砂州や瀬淵といった構造(リーチ)があり、砂州内を短絡する形で、砂州上流部に伏流しそして表流水に復帰する水循環がある²⁾。河川環境から見れば、それはさらに局所的な表流水の逸失であるが、河川水質の変換機能や、間隙内生物等のハビタートとしても重要な役割が注目されている。

しかし、こうした交換現象や伏流水流動は、洪水攪乱による地形変遷、浸透層不均一構造の形成、そして低水

時における浸透層内の間隙の目詰まりなど、様々な要因から不均質・非定常である。さて、実際の河川では、表流水中に浮遊物質(SSやPOM)が流れており、それらが浸透層内に流入していくことで、間隙内の目詰まり、物質から見た水際のフィルタリングというプロセスが生じており、これによる水域と帯水層の境界における透水性の低下は、物質輸送を支える水循環を変化させるものであるが、河川においてこれによるそのメカニズムを調査した事例は多くない。この浸透性低下は、地下水への涵養や砂州伏流水への供給を減少させる一方で、表流水の逸失を減少させ、高透水性河床での生態系保全等への寄与が考えられる。

そこで、本論文ではこうした水際河床における微細粒子による浸透性低下を扱う。まずは、現地において起こっている目詰まり現象による水際部透水性低下の事例を示し、次に模型としてのカラム実験により浸透層の目詰まり現象とそのプロセスを捉えることを目的とする。そして最後に、目詰まり現象を表現できる数値モデルを示し、実験データとの突合せをすることで再現性を確認する。

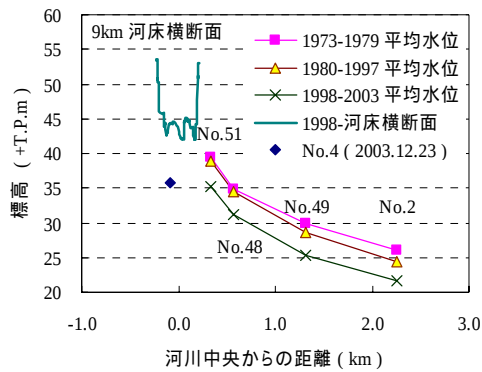


図-1 手取川9km地点平均地下水面横断の経年変化

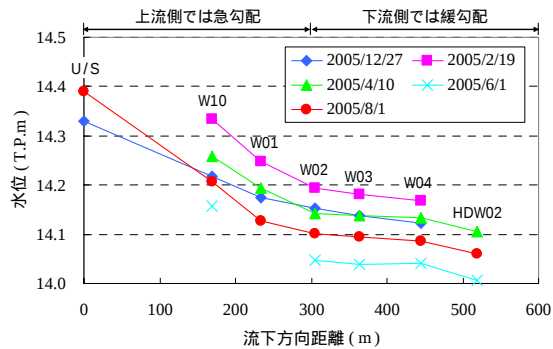


図-2 木津川11km砂州における伏流水位の縦断分布

2. 河道内で生じる目詰まり現象の事例

(1) セグメントスケールでの現象～手取川を例に～³⁾

手取川は、白山を源とし、扇状地を形成し日本海に注ぐ礫河床河川である。手取川扇状地は伏流水が豊富である一方で、表流水の伏没も頻発する。図-1に示す平均地下水面横断の経年変化から、近年、地下水面が低減しているが、特筆すべきは表流水との不連続性である。1998-2003年の平均水位では、右岸最近傍の井戸(No.51)でさえ、河床断面と5m以上もの水位差が確認でき、河道内に設置された井戸(No.4)においても、表流水と地下水は3m以上乖離している。表流水が伏没せず流れているのは、間隙の目詰まりにより周辺地下水への漏出が抑制されているからと推測ができる。このように、河川表流水の維持に間隙の目詰まりが寄与している。

(2) リーチスケールでの現象～木津川を例に～

淀川水系木津川は、典型的な砂河床河川であり、京都府木津町から城陽市に至る区間勾配は約1/1150で、交互砂州が形成されている。三川合流地点から12km上流の左岸砂州で行われてきた、伏流水の水平挙動に関する研究で、砂州上流端の水際で表流水位と地下水位にギャップが生じた事が確認されている⁴⁾。一方、図-2はその下流の11km砂州における伏流流下方向に沿った水位分布であるが、砂州上流付近の水位勾配は下流と比較して急勾配を示しており、上流部浸透層内では透水性低下の発生が考えられる。さらに、水際の表層付近の有機物量を

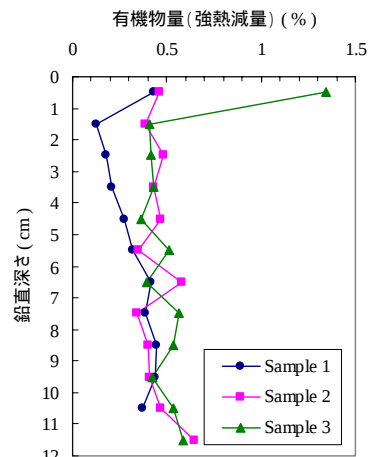


図-3 木津川11km砂州における表層付近の有機物量の分布



(a) 孔径1000μ



(b) 孔径100μ

図-4 河川水中に流れる微粒子

調査したところ、図-3に示すように強熱減量は鉛直分布を示し、表層付近に0.5～1.5%と高く、深さ1cm以下は0.5%前後であることから、表層土壌の間隙内にトラップされたと考えることができる。これらのことが、表流水と伏流水の水交換の阻害要因になる可能性がある。

3. 河川に流れる微細粒子観測

実河川に流れる微細粒子はどの程度の量なのかを把握するために、プランクトンネット(孔径1000μ, 100μ, 35μ)を用いて採取し、1-D電磁流速計(KENEC VE-10)をプランクトンネット断面の中央に置いて計測を行い、一度の採取時間は2分間とした。図-4に孔径別に回収された流下物の写真を示す。1000μでは植生の破片・剥離藻類・水生生物の抜け殻が、100μ, 35μではシルト分やベントスなどが確認できた。図-5は水の通過体積と回収物の乾燥重量から算出した質量濃度を示す。調査結果から、9月より6月の方が若干高い値を示しており、季節により目詰まり要因となりうる微細粒子の変動が示唆された。以上のことから、出水によって土砂が攪乱されなければ、特に地下水・伏流水への侵入部での浸透層間隙内に微細粒子がトラップされ、目詰まりおよび浸透性低下が生じることが示唆される。

4. カラム実験での目詰まり現象

浮遊物質の目詰まりに関するカラム実験はこれまでに多く行われ、浄水の砂ろ過や注水井の目詰まりを対象とした実験(例えば北川ら⁵⁾)などがある。しかし、河床は様々な粒度・間隙径を持ち、流下する浮遊物質濃度は上記の問題と比べて高く、様々な条件下での透水性低下の予測を可能とする必要性から、これに対応するための研究の端緒として、以下のカラム実験を行った。

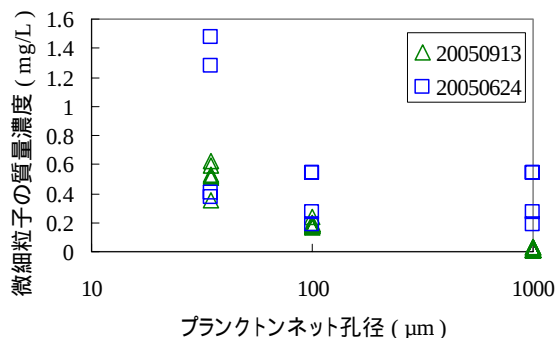


図-5 微細粒子の質量濃度

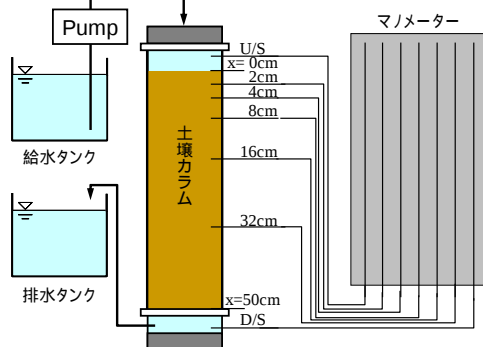


図-6 実験装置

表-1 実験ケース

No.	Case1	Case2	Case3
実験砂の平均粒径 (mm)	0.88		
下流端流量 (cm ³ /s)	18.1	14.4	7.2

(1) 実験装置・実験ケース

目詰まりの現象を捉えるために、図-6に示す装置でカラム実験を行った。平均粒径 $d=0.88\text{mm}$ の珪砂4号を、直径 10cm の透明塩ビ管に長さ 50cm に詰めた。満水にした後、上流端からローラーポンプ (EYELA RP-1000) でカラムに濁水を圧入し、下流端は大気圧放水した。給水タンクには目詰まり物質として平均粒径 0.15mm 、比重 1.3 の微細粒子 (PVC) を溶かし、攪拌して濃度一定とした。質量濃度は、図-5に示した実河川濃度の約 1000 倍の 500mg/L とした。実験時間は2時間とし、観測項目は各地点におけるピエゾ水頭をマンメーターで読み、下流端での流量をそれぞれ5分毎に測定した。後述する様に、実験終了後に微細粒子含有量の鉛直分布を得る作業を行った。実験ケースは、表-1に示すとおり、流量に対する応答を見るために3ケース行った。

(2) 実験結果と考察

図-7はCase1実験終了時の写真であるが、表面には微細粒子がマット状に堆積している様子が伺える。これは、間隙が目詰まりを起こし、内部に浸透しにくくなったことを示している。すなわち、微細粒子が間隙に浸透し、表層付近まで目詰まりした時刻から、カラム上端に微細



図-7 実験終了後のカラム上端 (Case 1)

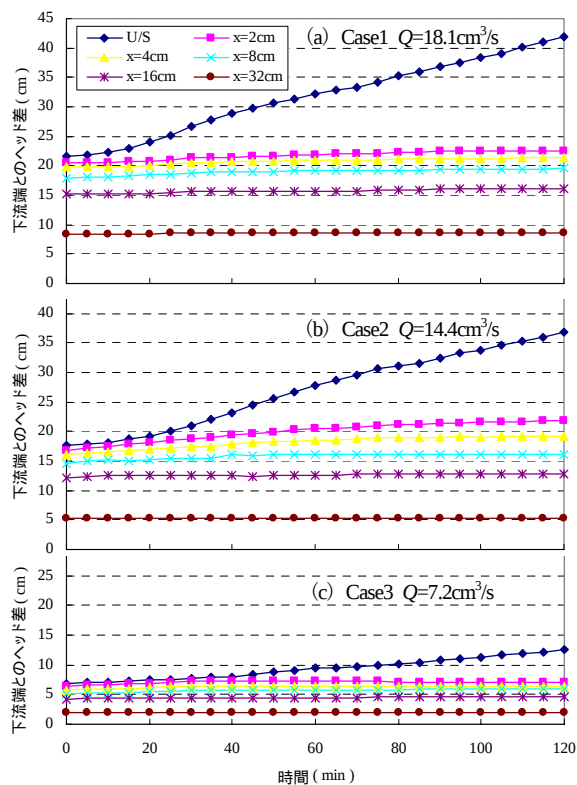


図-8 流端との水頭差の時間推移

粒子のマットが形成されたと考えられる。

図-8にケース毎の各地点におけるピエゾ水頭の時間推移を示す。すべてのケースにおいて、実験開始直後は、カラム上部全体のピエゾ水頭は微増する傾向が見られ、土壌間隙の目詰まりが進行していると考えられる。その後、微細粒子が表層に蓄積し、そのマット内の損失水頭が卓越している事が分かる。

また、流入量の違いにより、上流端のピエゾ水頭だけが上昇し始める時間が変化する。実験開始から、Case1では15分、Case2では20分、Case3では40分頃と判断できる。この時刻から表層に微細粒子の堆積が始まり、上端のピエゾ水頭はそれ以降、主に微細粒子のマット内での水頭損失を捉えている結果となっている。

図-9に各区間における初期透水係数と時刻毎の透水係数の比の時間推移を示す。上流端とカラム 2cm の水頭差から算出される透水係数は、経過時間に応じて大きく低減していくことが分かる。一方で、Case2を除いて、カラム 2cm 以下での透水性の変化は緩やかであり、下部へ

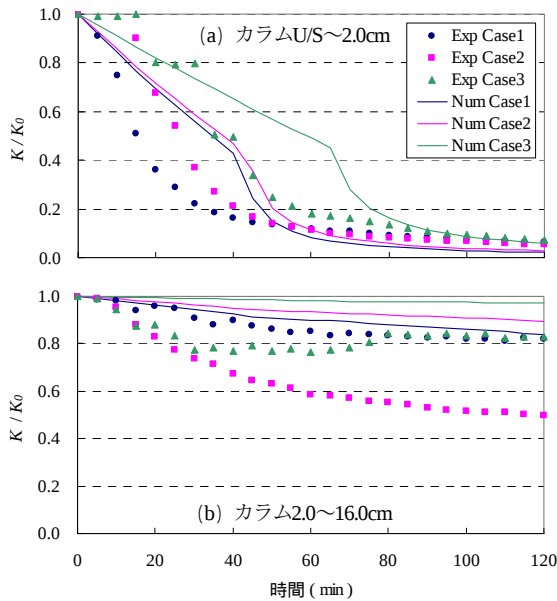


図-9 区間での K/K_0 の時間推移

の微細粒子の浸透は抑制されている事が推察できる。以上のことから、まず、目詰まりの進行は、土壌を通過する粒子によるものと考えられる。これによる上部透水係数の低下率は約5～8割程度であった。

図-10は、実験終了時に間隙に定着した微細粒子体積含有率の深度分布である。この図は、表面に堆積していたマット部分は取り除いた土壌の表層部分から1cmずつに区分して、採砂・分析を行った結果である。微細粒子は、表層2cmまでに多く堆積し、5cm以下の深度では微量で存在する。また、微細粒子の体積含有率の深度分布を積分して実験終了時の残留量を算出すると、その値は、 $0.12 \sim 0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ で、総投入量の25～50%程度で、マットに残ったものが約30～40%で、残りはカラム下端まで到達している。さらに図-11には、各ケースの上流端-2.0cm, 2.0cm-8.0cm, 8.0cm-16.0cmの各区間における、微細粒子の体積含有率と透水係数-初期透水係数比との関係を示しており、Case3を除き概ね負の相関を見せた。本実験では砂と微細粒子の粒径比は6.6であるが、別のケースで行えば、目詰まり物質の蓄積パターンも変化すると考えられる。さらに、実河川での現象にフィードバックすることが今後の課題となる。

5. 目詰まり現象の数値モデルとその再現性

目詰まり過程を理解・考察する一助として、目詰まり現象モデルを作成し、その結果を比較・議論する。

(1) 流れと構造に関する仮定

流れは鉛直下向き（ z 方向）の1次元飽和流を仮定する。間隙の体積変化がないものとし、各時刻のDarcy Fluxは z 方向に一定とする。そこで、図-12の様に多孔体を個々

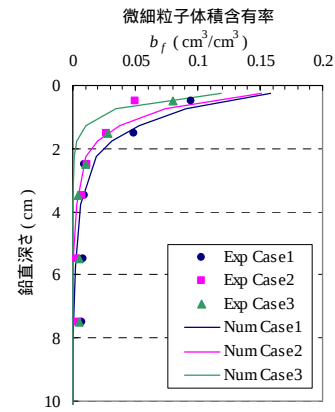


図-10 堆積した微細粒子の鉛直分布

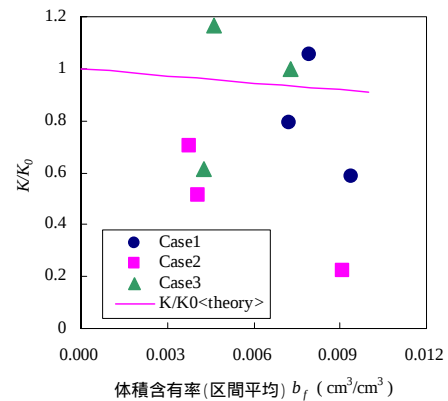


図-11 体積含有率と K/K_0 (120min時)の関係

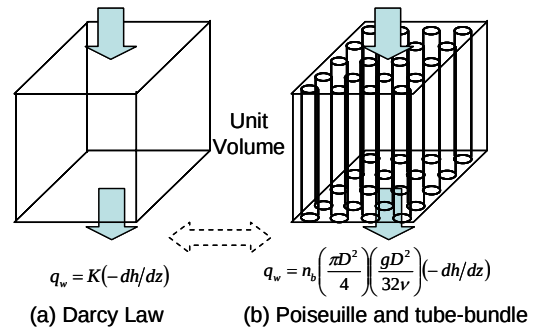


図-12 モデル図

が独立した円管の束（Tube bundle）に置き換えてモデル化する。管内はPoiseuille流れを仮定し、平均流速 $U_0(t)$ のみを扱う。初期円管内径は一様・均一とし、これを D_p とする。

(2) 微細粒子と定着時の扱いに関する仮定

流れる微細粒子は一樣粒径 d_f を考える。これが、平均流速によって移流するものとする。 $z=0$ をカラム上端とし、一定濃度（体積濃度 C_0 ）の微細粒子がDarcy流速 $q_w(t)$ で下向きに投入される。単位体積当りの微細粒子の体積含有量を $b_f(z,t)$ とする。微細粒子はモデル円管の壁面に一様に付着し、微細粒子体積の α_1 倍の体積を占有して一様に断面減少させる状態を想定し、みかけの内径を減少させて $D(z,t)$ となるものとする。円管の本数は不変とし、間隙率 $n_d(z,t)$ および b_f の関係は式(1)となる。 α_1 については、球と立方体の体積比である $\alpha_1=6/\pi$ を仮定する。

$$n_e = n_{ep} - \alpha_1 b_f, \text{ ただし, } b_f < n_{ep}/\alpha_1 \quad (1)$$

単位面積当たりの管の数を n_b とし、間隙率 $n_d(z,t)$ および初期間隙率 $n_d(z,0)=n_{ep}$ は、次式で表される。 α_2 は体積の調整パラメータで、本論では1とする。

$$n_{ep} = \alpha_2 n_b \pi D_p^2 / 4 \quad (2)$$

$$n_e = \alpha_2 n_b \pi D^2 / 4 = n_{ep} D^2 / D_p^2 \quad (3)$$

式(3)より、 D_p が既知ならば n_b は n_{ep} から推定できる。

$$n_b = 4n_{ep} / \alpha_2 \pi D_p^2 \quad (4)$$

式(3)および式(1)より、有効内径 D と微細粒子の体積含有率 d_f との関係は次式となる。

$$D^2 / D_p^2 = (1 - \alpha_1 b_f / n_{ep}) \quad (5)$$

(3) 透水性の低下に関するモデル

Poiseuille式による平均流速 $U_0(t)$ に単位面積当たりの管の総断面積を乗じたものがDarcy流速に一致することに基づけば、透水係数 $K(z,t)$ （初期透水係数 K_p ）は次式であらわされる。ただし、 α_3 は透水性の調整パラメータであり、本論では1として扱う。

$$K_p = \alpha_3 n_b (\pi D_p^2 / 4) (g D_p^2 / 32 \nu) \\ = (\alpha_3 / \alpha_2) (n_{ep} g D_p^2 / 32 \nu) \quad (6)$$

$$K(z,t) = \alpha_3 n_b (\pi D^2 / 4) (g D^2 / 32 \nu) \\ = (\alpha_3 / \alpha_2) K_p (D^2 / D_p^4) \\ = (\alpha_3 / \alpha_2) K_p (1 - \alpha_1 b_f / n_{ep})^2 \quad (7)$$

式(7)は、透水係数 K と微細粒子体積含有率 b_f との関係であり、重要な特性であるが、 $\alpha_2 = \alpha_3 = 1$ を仮定した場合を図-11中に併記している。実験結果に明瞭な関係を得られなかったので、目詰まりの度合いと透水係数の関係についてはここで見直すことはせず、式(7)を使用する。

一方、式(7)から初期管径 D_p を初期透水係数から得る。

$$D_p = (32 \alpha_2 \nu K_p / \alpha_3 n_{ep} g)^{1/2} \quad (8)$$

一方で、 $b_f(z,t)$ が与えられれば、式(7)から透水性を評価でき、流れについて解くことができる。そこで、Darcy則を空間積分し、任意地点での水理ポテンシャルを得る。式(10)は、全長で積分したものである。

$$dh/dz = -q_w(t) / K \quad (9)$$

$$h_0 - h_L = q_w(t) \int_0^L \frac{1}{K(z,t)} dz \quad (10)$$

ここに、 h_0 および h_L はそれぞれ上端($z=0$)および下端($z=L$)での水理ポテンシャルである。境界条件について2つ考えられる。つまり、上端のポテンシャル h_0 が一定の場合と、供給流量(Darcy flux) $q_w(t) = q_{w0}$ が一定の場合である。

本論文では実験に対応した後者の条件に合わせ、式(9)を $z=z$ から $z=L$ まで積分して次式の全水頭の分布を得る。

$$h(z,t) = h_L + q_{w0} \int_z^L \frac{1}{K(z',t)} dz' \quad (11)$$

(4) 微細粒子の定着に関するモデル

微細粒子の単位体積・単位時間当たりの定着率を $S_c(z,t)$ とし、微細粒子体積含有率 b_f はその時間積分から得る。

$$b_f(z,t) = \int_0^t S_c(z,t) dt \quad (12)$$

微細粒子の定着率 S_c は、次の考えに基づいて決定する。(1)流れている微細粒子は管内に様に分布し、粒子に定着の機会があるのは全断面のうち壁面付近から微細粒子の1粒径程度の範囲とし、その面積の全断面に対する比率は $\pi D d_f / (4 \pi D^2 / 3) = d_f / 4D$ に比例する。(2)ある位置・時刻の微細粒子の体積濃度が C であるとする、その瞬間に単位体積当りに壁面に接触するチャンスのある微細粒子の個数は、単位体積当りの微細粒子の個数、つまり(体積濃度 C) / (微細粒子1個の体積)に、上述の壁面接触確率を乗じたものである。(3)これに、チャンスのある粒子の中から単位時間に実際に定着する確率 β を乗じて時間当たりの定着個数とし、さらに1つの粒子が間隙内を占有する体積を乗ずることによって、微細粒子占有体積の定着率 S_c は次式で表される。ここに、整理のため $\beta/4 = \beta'$ とするとともに、式(5)を利用した。

$$S_c(z,t) = \frac{d_f}{4D} \frac{C}{4 \pi D^2 / 3} \cdot \beta' \alpha_1 \frac{4 \pi D^2}{3} \\ = \beta \frac{d_f}{D} C = \beta \frac{d_f}{D_p} \frac{D_p}{D} C = \beta \frac{d_f}{D_p} \sqrt{\frac{D_p^2}{D^2}} C \\ = \beta \frac{d_f}{D_p} (1 - \alpha_1 b_f / n_{ep})^{1/2} C \quad (13)$$

最後に、この定着する粒子の輸送と収支を記述する必要がある。粒子の輸送については先に述べた様に移流によるもののみ、つまり $C(z,t)q_w(t)$ とする。よって、物質の保存則により、ある場所 z のある時刻における単位時間当たりの濃度の時間変化は、移流輸送フラックスの発散(divergence)と微細粒子の定着率 S_c によって表される。ここで、Darcy fluxは各時刻で z 方向に一定であると仮定する。

$$\frac{dC(z,t)}{dt} + q_w(t) \frac{dC(z,t)}{dz} = -S_c(z,t) \quad (14)$$

さらに、粒子濃度は時間的に速やかに変化して安定するものと仮定する。式(14)の時間微分項を無視し、これを z 方向に積分することによって、ある瞬間 t における地点 z での濃度は次式で表せる。

$$C(z,t) = C_0 - \int_0^z S_c(z,t) dz / q_w(t) \quad (15)$$

(5) 表層マット形成とその後の条件

実験においては、ある時刻以降にカラム表面に微細粒子

表-2 計算条件

K_p	0.517 cm/s	初期透水係数	C_{0w}	500 mg/L	投入濃度(質量濃度)
n_{ep}	0.416	初期間隙率	C_0	3.85×10^{-4}	投入濃度(体積濃度)
D_p	0.0201 cm	初期管径	C_{leak}	1.38×10^{-4}	マット下供給濃度
n_b	1305 本/cm ²	管密度	q_{w0}		供給Darcy流速
d_f	0.015 cm	微細粒子の直径		0.231 cm/s	Case1
K_{mat}	0.005	マットの透水係数		0.183 cm/s	Case2
n_{emat}	0.416	マットの間隙率		0.091 cm/s	Case3
β	0.08 s^{-1}	時間当たりの微細粒子の定着確率	ρ_w	1 g/cm ³	水の密度
α_4	0.4	b_{fcr} を決める係数 $=b_{fcr}/(n_e/\alpha_3 < 1)$	n	$0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$	水の動粘性係数
b_{fcr}	0.0871	BF体積含有率の限界値 $=\alpha_4 n_e/\alpha_3$	S_f	1.3	微細粒子の比重
Δz	0.5 cm		α_1	$6/\pi$	微細粒子の体積占有倍率
n_l	100		α_2	1	体積補正係数
Δt	60 s		α_3	1	透水性補正係数
			L	50 cm	カラム長
			h_l	0 cm	カラム下端水頭

のマットが形成・発達している。これは、間隙がある割合以下となって間隙の粒子通過が阻害されるものと考えられることから、微細粒子体積含有率 b_f がその限界値 $b_{fcr}=\alpha_4 n_{ep}/\alpha_1$ ($\alpha_4 < 1$ は係数)に達した時にマット形成が始まるとする。マットは、間隙率 n_{emat} 、透水係数 K_{mat} とし、これ以後もある一定の微細粒子体積濃度 C_{leak} ($< C_0$)でマット下端からカラム上端に供給されるものとする。マットの厚さ η_{mat} の成長は、次式で表される。

$$\frac{d\eta_{mat}}{dt} = \alpha_1 (C_0 - C_{leak}) q_w(t) \quad (16)$$

(6) 計算方法と計算条件

計算入力条件として、微細粒子投入濃度 C_0 、供給Darcy flux q_{w0} 、初期透水係数 K_p および初期間隙率 n_{ep} を設定し、式(8)および式(4)から、 D_p および n_b を求めるとともに、微細粒子の時間定着率パラメータ β および α_4 を調整の対象として仮定する。式(5), (7), (11), (12), (13), (15) および(16)を連立して解くことにより、 $D(z,t)$, $b_f(z,t)$, $S_d(z,t)$, $h(z,t)$, $K(z,t)$, $C(z,t)$ および $\eta(z,t)$ を求めることが出来る。これらの式の z および t 方向の積分については、 Δz および Δt に差分化し、前進差分により数値的に積分した。各パラメータは、表-2のとおりであり、マット形成に関するパラメータ n_{emat} , K_{mat} および C_{leak} は、実験結果から概算した。

(7) 計算結果と考察

図-13は、数値モデルによるピエゾ水頭の時間変化を示している。図-8(b)と比較すると、パラメータ調整にかかわらず、砂層内部におけるポテンシャル上昇、つまり透水係数の低下曲線の勾配が緩い。また、マットの形成開始時刻(地表側の水頭急昇時刻)が遅れている。また、図-10中に計算結果(120分後)を併記しているが、個々の実験ケースを追跡することは出来ないが、全体の分布、とくに鉛直進入深さのスケールが表された。よって確率的な取り扱いそのものは有用である可能性を示している。図-9の透水性低下においても計算結果を併記しているが、低下速度、急変時刻については表現できていない。しかし、その経過そのもの、つまり、砂マトリクス部の透水

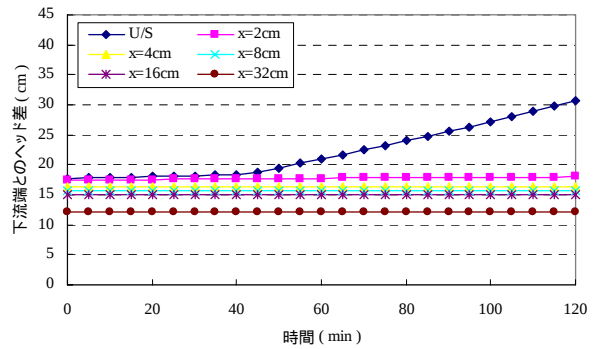


図-13 数値モデルによるピエゾ水頭の時間変化 (Case2)

低下が先行してその後マットが形成される様子そのものは再現された。比較的少ない含有率において透水性が低下していることを表現できず、高い定着確率 β においては表面付近で目詰まりが早く起こり、内部への侵入が表現されず、低い β においては深部まで侵入が起こり透水性低下・水頭上昇が表現されないことから、図-11および式(8)における微細粒子含有率が透水性低下に与える影響のモデル化が不十分であることがわかる。

6. まとめ

本論では、現地砂州での目詰まり現象の実態を観察し、そのプロセスを実験において定量的に見、モデルでの再現を試みた。河床材料の目詰まりは、こうした周辺地下水・伏流水との交換現象において重要な役割・影響を持つとともに、移動床における力学特性・流体抵抗特性にも影響があると考えられる。河床の目詰まり過程のモデルは、洪水攪乱によるフラッシュとその後の経過に伴う水交換特性・移動床特性の変化の予測を可能とし、河川水および伏流水環境管理の基礎を支える一助となることが期待される。

参考文献

- 1) 原田守博・岡嶋和義・山田達也：野洲川扇状地における河川水と地下水との水交換に関する考察，水工学論文集，Vol.48, pp.385-390, 2004.
- 2) 中島治美・鷺見哲也・辻本哲郎：木津川裸地砂州における伏流水の水質特性，河川技術論文集，Vol.10, pp.381-386, 2004.
- 3) 萩慶，鷺見哲也，萩田章仁，辻本哲郎：扇状地河川における表面流況に及ぼす伏流の影響と水域生態環境，河川技術論文集，Vol.11, pp.535-540, 2005.
- 4) 鷺見哲也，穎原宇一郎，辻本哲郎：砂州内の伏流挙動とたまりの水交換性に関する研究，河川技術に関する論文集，Vol.6, pp.89-94, 2000.
- 5) 北川明，石崎勝義：浮遊物による目詰まりに関する研究，水理講演会論文集，Vol.24, 1980.

(2005.9.30受付)