

越流水による河川堤防侵食過程の グリッドレス解析

GRIDLESS ANALYSIS OF SLOPE FAILURE OF EMBANKMENT BY OVERFLOW

後藤仁志¹・林 稔²・織田晃治³・酒井哲郎⁴

Hitoshi GOTOH, Minoru HAYASHI, Kohji ODA and Tetsuo SAKAI

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工修 和歌山県西牟婁振興局建設部治水課 技師 (〒646-8580 田辺市朝日ヶ丘23-1)

³学生会員 京都大学大学院修士課程 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

The back-face of embankment is easily eroded by the overtopping flow due to a flood exceeding the designed level. A continuous overtopping flow promotes an erosion and finally brings the breach of embankment. In this paper, the particle method, which can avoid the numerical diffusion in the water surface tracking, is applied to the calculation of overtopping flow. One of the advantages of the particle method is an easy handling of phase transition of particle. Because the physical properties are identified for each particles by only referring the flag parameter of the particle. The standard particle method, or the MPS method, is extended by adding the sub-model of the transition from solid-wall particle to sediment particle, as a model of the face erosion of embankment.

Key Words: *embankment erosion, overtopping flow, particle method, phase transition of particle*

1. 緒 言

河川堤防の堤高は計画高水位に余裕高を考慮して決定されるので、少なくとも治水計画上は越流は想定されておらず、それ故に表法面と天端はコンクリート等で被覆されているが、裏法面は土砂が露出した状態となっていることが一般的である。したがって、計画高水位を越える洪水により越流・氾濫が生じると、裏法面は容易に侵食され、越水が継続すると裏法面から天端へと侵食域が拡大して破堤に至ることとなる。昨年の東海豪雨の際には、庄内川・新川が長時間・長区間にわたって計画高水位を上回る洪水に見舞われたが、浸透流により不安定化した堤体に越流の発生による裏法面侵食が重なって破堤に至ったとの見解が示されている¹⁾。

河川計画上は、計画高水位を越える洪水自体が想定外のカタストロフィックな事態であるから、その際の破堤は不可避ではあるが、想定を越える自然外力の作用下においても『壊滅』を回避するための対策は必要である。このような認識から、吉野ら²⁾および須賀ら³⁾は、越流水による堤体侵食について実

験的なアプローチを行い、侵食のプロセスを明らかにしている。堤体の決壊には裏法面の侵食が引き金となっているから、越水開始時の裏法面の侵食を抑制できれば堤体の対侵食安全度は増加する。このために考案されたのが裏法面を芝で覆うアーマ・レビーであるが、福岡ら^{4, 5)}は、芝の水流に対する侵食抵抗の評価方法を提示している。

以上のように、越流水による破堤のメカニズムは水理実験的には明らかにされ、アーマ・レビー等の対応策も提案されてはいるが、越流水の流況を推定し、侵食過程を時間発展的に追跡するためのシミュレーション手法は提案されていない。計算によるアプローチが困難であったのは、(1)越流水が激しい水面変動を伴う急変流であり、適切な計算手法が存在しなかったことに加えて、(2)水流の衝突衝撃による高水圧を駆動力として生じる法尻の侵食を従来型の土砂層の表層せん断を駆動力とする流砂量式では上手く評価できなかったことによるところが大きい。第1の課題は、近年急速に発展しつつある自由表面流解析により、解決されつつある。本研究では、水面の追跡過程における数値拡散を抑制して、高い精

度で複雑な水面形状を追跡できる粒子法を用いて、越流水の挙動を解析する。粒子法の利点の一つは、粒子の相変化の表現が容易なことである。粒子法では固定壁も粒子で構成されるが、粒子の属性を規定するフラッグを『固定壁』から『土砂（移動粒子）』に変更するだけで、壁面変形（侵食）を表現できる。本研究では、越流水によるせん断力と水流の衝突圧の両者を駆動力とする固定壁侵食モデルを組み込んだ拡張MPS法により、河川堤防の越流侵食過程のグリッドレス解析を試みる。

2. シミュレーションモデル

(1) MPS法

MPS法は、SPHと並ぶNavier-Stokes 式のグリッドレス解法のための代表的手法であるが、基礎的な解説が、越塚⁶⁾によって詳細に示されているので、ここでは概要のみを述べる。

一般に、粒子法では、計算領域に多数の粒子（物理量の定義点＝計算点）を配置し、個々の粒子の周囲に設定した影響域内の粒子間相互作用として基礎式を離散化する。質量が変化しない均一粒子の総数を一定に保つことで質量保存（連続式）が厳密に満足され、粒子数密度（単位体積あたりの粒子数）を一定値 n_0 に保つことにより、非圧縮条件が満足される。

一方、運動方程式（Navier-Stokes 式）

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

については、移流項、圧力項、粘性項の各々について、粒子周囲の影響域内の他の粒子との相互作用として離散化する。ここに、 $\mathbf{u}$ ：流速ベクトル、 p ：圧力、 ρ ：流体の密度、 ν ：渦動粘性係数である。移流項は粒子移動の追跡を通じて計算される。

粒子 i の圧力項および粘性項は、

$$-\frac{1}{\rho} \langle \nabla p \rangle_i = -\frac{1}{\rho} \frac{D_0}{n_0} \sum_{j \neq i} \left\{ \frac{p_j - p_i}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{w}(|\mathbf{r}_{ij}|) \right\} \quad (2)$$

$$\nu \langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i = \frac{2\nu D_0}{n_0 \lambda} \sum_{j \neq i} (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) \mathbf{w}(|\mathbf{r}_{ij}|) \quad (3)$$

$$\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i \quad (4)$$

のように近傍に存在する粒子との相互作用としてモデル化される（ D_0 ：次元数； $\mathbf{r}_i$ ：粒子 i の位置ベクトル； λ ：モデル定数）。相互作用の影響範囲は重み関数⁷⁾

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & \text{for } r \leq r_e \\ 0 & \text{for } r > r_e \end{cases} \quad (5)$$

により与えられ（ r ：距離； r_e ：影響半径），粒子数密度は重み関数を用いて、

$$\langle n \rangle_i = \sum_{j \neq i} w(|\mathbf{r}_{ij}|) \quad (6)$$

と定義される。

時間積分過程には2段階法が用いられ、第1段階は、粘性項を与えて粒子の速度（流速）を計算し、粒子の仮位置および仮数密度を算定する陽的なプロセスである。第1段階で更新された場では、質量保存（粒子数密度が一定値 n_0 に一致すること）が満足されていないから、第2段階では圧力項と数密度で記述された質量保存則から誘導される圧力の Poisson 方程式を陰的に解いて圧力場を更新し、流速の修正量を求めて流速場および粒子の位置を修正する。

(2) 越流による堤体の侵食モデル

粒子法の特徴の一つは、境界条件の記述の柔軟さである。MPS法では、固定境界壁を粒子を配列して作成するが、個々の粒子が水であるのか、固定壁であるのか、または、その他の物性を有する流体（例えば泥流等）であるのかは、粒子の物性を規定するフラッグにより認識されている。水であるか固定壁であるかによって処理が有効となるサブルーチンが異なるが、何れのサブルーチンの処理を有効にするかは、フラッグを参照して決められている。言い換えると、フラッグを変えれば、壁が水に突然変質することも容易である（実際、流入条件の制御に用いられる『soluble moving wall（可溶性移動壁）』（Gotoh et al.⁸⁾）では、この処理を行っている）。

本稿では、このようなフラッグ処理を、堤体を構成する固定壁粒子に施し、堤体侵食を模擬する。ここでは以下の4種類の粒子を用いる。

$$\Xi_i = \begin{cases} 0 & \text{for wall-surface} \\ 1 & \text{for wall(dummy)} \\ 2 & \text{for water} \\ 3 & \text{for sediment} \end{cases} \quad (7)$$

粒子法では、固定壁は数層の粒子配列により構成される。固定壁の表層（水と直接接する粒子； $\Xi_i=0$ ）では圧力の更新計算を実施するが、座標の更新は行わない。固定壁表層での計算過程で数密度が適正に計算されるように数層のダミー壁粒子（ $\Xi_i=1$ ）が配置されるが、これらのダミー粒子では圧力の更新は行われない。これらの壁粒子と水粒子（ $\Xi_i=2$ ）は通常のMPS法で用いられる粒子属性であるが、本研究では、これらに加えて土砂粒子（ $\Xi_i=3$ ）が導入される。

堤体全体は初期には固定壁粒子で構成されているが、固定壁表層粒子の近傍流速

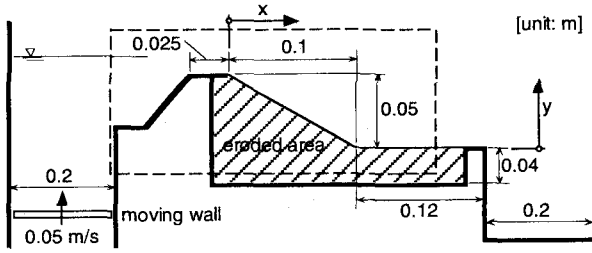


図-1 計算領域

$$u_b = \frac{\sum_{\Xi_i=2} w(r_i) \{u(r_i) \cos \theta - v(r_i) \sin \theta\}}{\sum_{\Xi_i=2} w(r_i)} \quad (8)$$

$$v_b = \frac{\sum_{\Xi_i=2} w(r_i) \{u(r_i) \sin \theta + v(r_i) \cos \theta\}}{\sum_{\Xi_i=2} w(r_i)} \quad (9)$$

(θ : 粒子近傍の局所の裏面勾配)がある条件を満たすと、土砂粒子へと変質し、周囲の壁粒子との連結が断たれて水流により下流へと流送される。

このような堤体表層のpick-upに関しては、2つの要因を想定する。第1は、表層せん断によるpick-up（表層面に平行な底面近傍流速成分による効果）であり、第2は、表層に衝突する水流の衝撃によるpick-up（表層面に垂直な底面近傍流速成分による効果）である。本研究で対象とするのは、急激な越流による激しい侵食による堤体の変形であるから、侵食後の再堆積については取り扱わない。したがって、必要とする情報は、上記の2種のpick-upが生じる限界状態のみとなるが、限界値を底面近傍流速と直結して扱うのが簡便である。

表層せん断によるpick-upの発生条件とその際のフラッグ処理については

$$\text{if } (\bar{u}_b > u_{bcr} \text{ and } \Xi_i = 0) \text{ then } \Xi_i = 3 \quad (10)$$

$$\bar{u} \equiv \frac{1}{N_k + 1} \sum_{k=-N_k/2}^{N_k/2} u(t + k\Delta t) \quad (11)$$

とする。なお、せん断による土砂層の破壊については、Lane⁹⁾による許容限界流速が目安となり、通常の締め固め度の弱粘土質土が浅い流れ（水深0.3m程度）により侵食されないための許容流速は0.84 m/sと与えられる。式中の限界流速 u_{bcr} は、これを参考に $u_{bcr}=0.8$ m/sとした。また、pick-upは、瞬間的に生じるのではなく、限界流速以上の状態がある程度持続して生じることを考慮して、式中の底面近傍流速についてはMPS法の計算時間間隔の10倍程度の時間

(10^{-2} 秒のオーダー)の平均流速を用いている。

次に、表層に衝突する水流の衝撃によるpick-upに関しては、壁面近傍の局所流速の壁面の法線方向成分が急変する条件

$$\text{if } \left(\begin{array}{c} \bar{v}_b(t + \Delta t) - \bar{v}_b(t) > v_{bcr} \\ \text{and} \\ \Xi_i = 0 \end{array} \right) \text{ then } \Xi_i = 3 \quad (12)$$

$$v_{bcr} = (F_{col} \cdot \Delta t / \rho)_{cr} \quad (13)$$

を用いる。式中の F_{col} は衝突衝撃力に相当し、 v_{bcr} は単位体積当たり水による衝撃力を速度次元量に変換した指標である。この種の侵食形態に関しては、実験値がなく、閾値 v_{bcr} を経験的に決定せざるを得ない。ここでは、水流の衝撃によるpick-upが、裏法尻の侵食に寄与が大きい（法面（斜面）侵食には顕著に寄与しない）ことを目安に、 v_{bcr} を試行錯誤的に決定し、 $v_{bcr}=0.9$ m/sを得た。

なお、水と直接接触する壁粒子では常に圧力の更新計算が必要であるから、表層構成粒子がpick-upされると、その背後に存在するダミー壁粒子を新たな表層構成粒子に再定義する必要が生じる。これに関しては、pick-upされた粒子の周囲粒子を検索し、フラッグ処理

$$\text{if } (|r_j - r_i| \leq r_e \cdot d \text{ and } \Xi_j = 1) \text{ then } \Xi_j = 0 \quad (14)$$

を実施して対応した。底面近傍流速評価に要する時間平均幅に関しては、表層せん断によるpick-upに対しては、 $N_k=50$ 、水流の衝撃によるpick-upに対しては、 $N_k=10$ とした。

(3) 計算領域・計算条件

計算領域を図-1に示す。計算領域は河川堤防の横断面を対象とした鉛直2次元場で、室内実験のスケールを想定し、全長は約0.7m、堤防部の高さ0.05mとした。粒子総数は約10,500個（流体粒子は約6,400個；固定壁粒子は約3,800個、その内約1,200個が侵食対象領域すなわち図-1中の斜線部）である。粒子径は均一で $d=0.0025$ mと設定した。侵食によって発生した土砂粒子の比重は、 $\sigma\rho=2.65$ とし、一旦侵食されて移動を開始した粒子が底面に落下した場合でも再び壁には復帰しないものとした（すなわち、pick-up後の砂粒子については、水粒子と同様の座標更新計算を施した）。なお、下流側の窪みにトラップされて停止する土砂粒子も僅かながら見られたが、大半の土砂粒子は下流端水槽に落下するまで流送された。

上流境界の貯水槽の底面壁は、強制移動壁であり、速度0.05 m/sで上昇して越流を発生させる。下流端に設けた貯水槽に蓄積された水粒子を上流端の貯

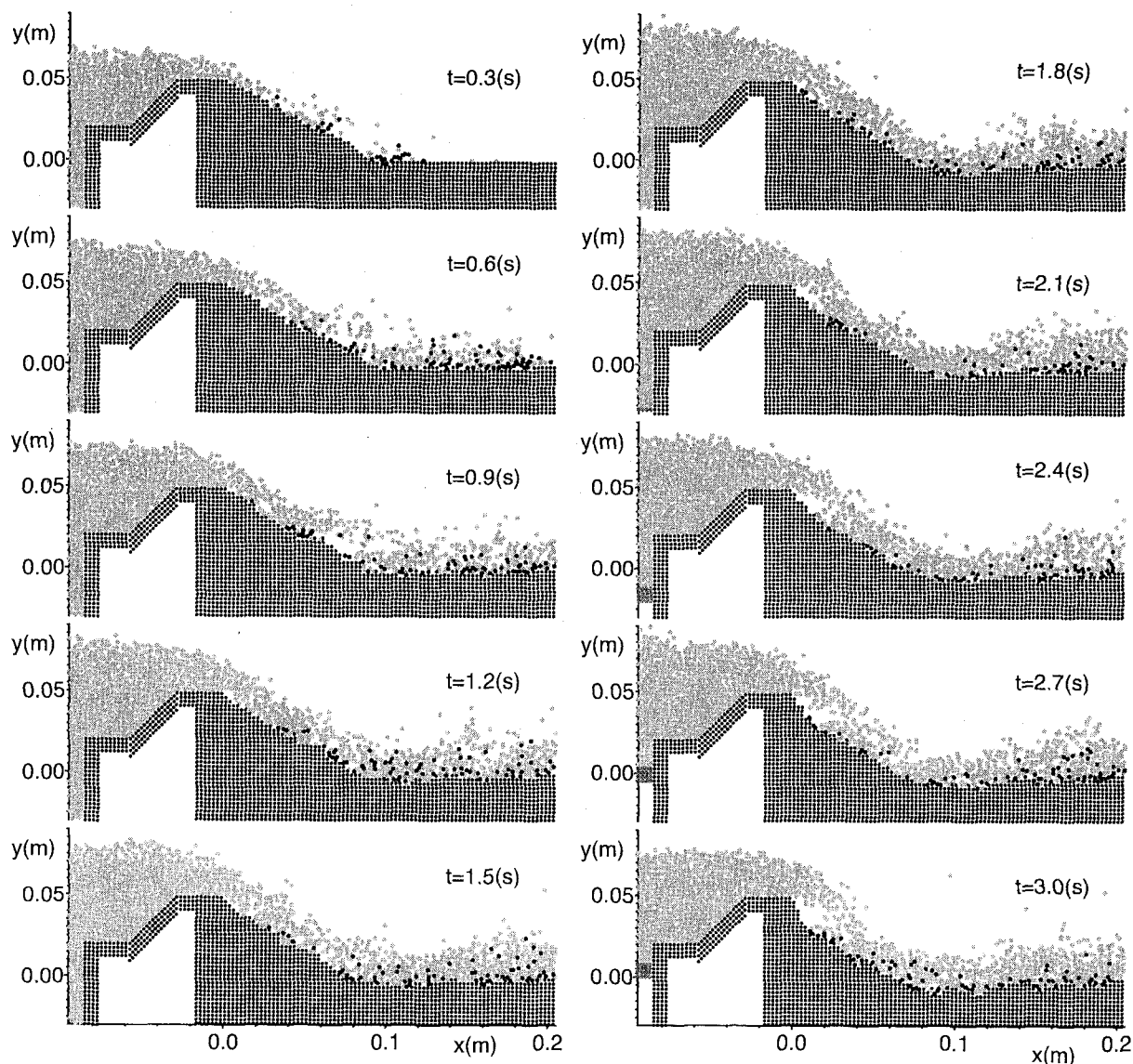


図-2 河川堤防の越流過程（粒子位置）

水槽内に再投入すると循環式の水路を模擬することができるが、今回は短時間の現象が対象であるので、この種の処理は行っていない。

水理条件については、堤防頂部では平均流速 30.0 cm/s、水深 2.0 cm で、Froude数 0.68 である。吉野ら²⁾ および須賀ら³⁾ の実験の越流流量および越流水深についての記述から、代表的な値として流速 80.0 cm/s、水深 40.0 cm を参照すると、Froude数 0.40 となる。なお、斜面上では流速の加速効果の影響で射流（計算結果からの大略値として、平均流速 100.0 cm/s、水深 2.0 cm とすれば、Froude数 2.26）となることは言うまでもない。

3. 越流水の挙動と侵食の進行過程

解析対象は、堤越流およびそれに起因する堤体侵

食であるから、以下では堤体周辺の区間に限定して計算結果を表示する。

図-2 は、越流・侵食過程における各瞬間の粒子配置を、図-3 は、図-2 に示された各瞬間における流速ベクトルを示している。なお、図-2 では、初期に堤体を構成する壁粒子が侵食により土砂粒子に変化するプロセスを見易くするため、堤体構成粒子（壁粒子）を小さい黒の円で表示し、やや大きいグレーの円で水粒子を、やや大きい黒の円で土砂粒子を表示している。

計算結果の解釈にあたって注意を要するのは、本シミュレーションにおける時刻の意味である。現実の堤体侵食は急激なものでも完了に数時間を要するが、図-2 および図-3 の時刻表示は秒単位である。前章の侵食モデルに関する記述からも分かるように、本シミュレーションでは、せん断あるいは水撃によ

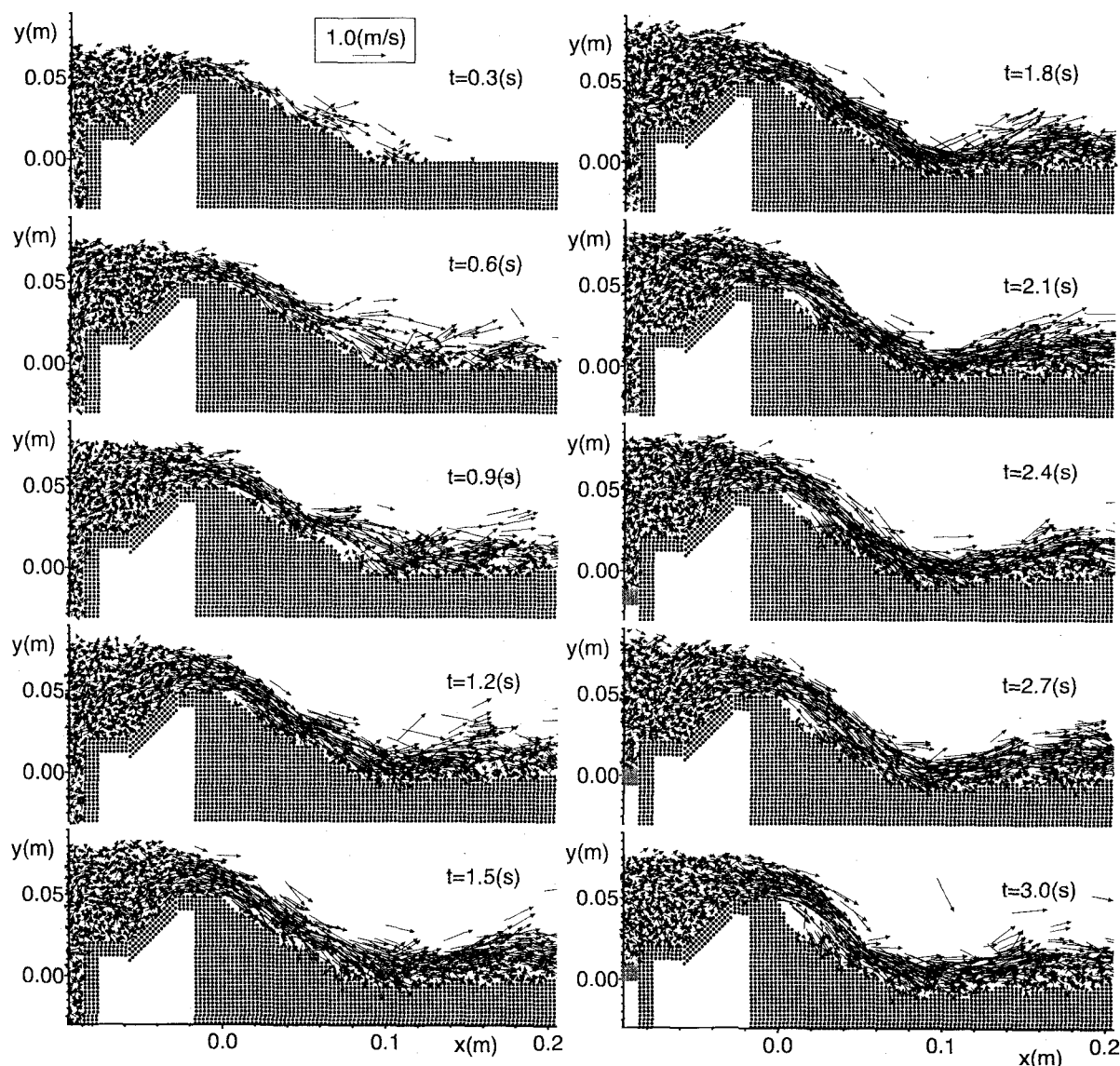


図-3 河川堤防の越流過程（流速ベクトル）

るpick-up条件が短時間（ 10^{-3} 秒オーダー）成立すれば表層粒子が即pick-upされるように設定されている。侵食速度を推定することを意図するなら、いわゆる流砂量を局所的に推定し、粒子1個分の層厚に相当する流出土砂量が得られた時点で壁粒子1個を土砂粒子に変化させる必要がある。こうすれば、少なくとも室内実験の時間スケールで現象を追跡する計算が可能となる。本シミュレーションでこのような措置を行わなかったのは、主として計算負荷の軽減のためである。pick-upの判定には瞬間流速が必要であるから、粒子法の標準的な設定で非定常流れを解く必要が生じ、MPS法の計算時間間隔は 10^{-3} 秒のオーダーとなる。この時間間隔で約10,000個の粒子を対象にパーソナルコンピュータで実行できる計算の継続時間は数10秒が限度である。したがって、数時間の現象をそのまま追跡するのは現実的ではない。さ

らに、所与の底面形状に対して定常な越流流況を計算し、それに応じて局所地形変化を計算するという通常の河床変動計算型のフレームワークを用いた場合と比較して、本シミュレーションでは現象の進行速度が極端に速められているだけで、堤体の形状変化の特性に大きな相違を生じる懸念はない。

越流開始時（時刻 $t=0.3$ s）には、比較的薄い水脈によって表層がせん断されて侵食され、表層に凹凸が表われると顕在化した凸部（例えば、時刻 $t=0.9-1.2$ sの $x=0.04-0.06$ m付近の肩）が生じ、それが水衝となって凸部が急激に侵食される。凸部近傍の流速ベクトルに着目すると、水脈の凸部への衝突を意味する急激な流向の変化が見られる。凸部侵食による堤体斜面の急勾配化の進行と同時に、堤体の法尻付近も落下流の水撃の影響で侵食される。その後も堤体斜面上では凸部形成・凸部侵食の繰り返しによる

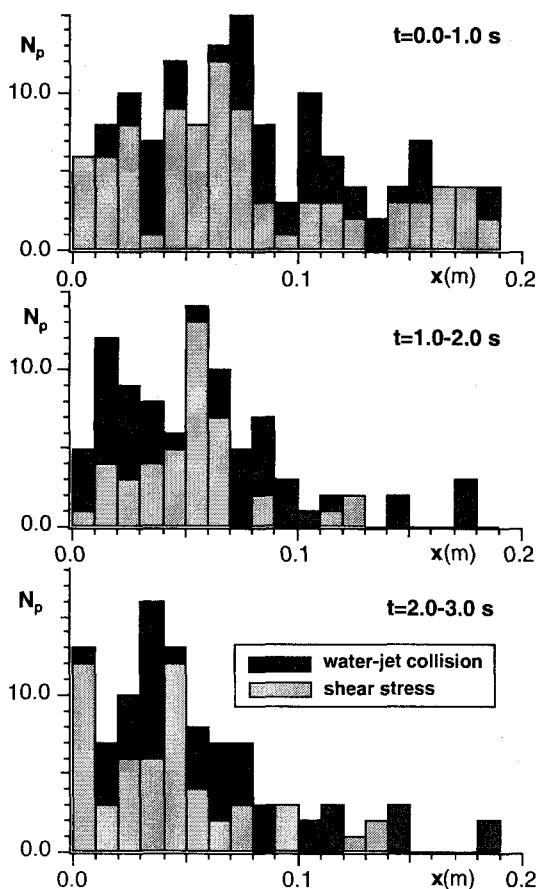


図-4 pick-up粒子数分布

急勾配化が継続し、越流水脈が斜面上端部の表層から剥離するまでに至る。堤頂は舗装面の存在を考慮して固定壁としているので、堤頂固定面直下流 ($x=0.0$ m付近) で極端な急傾斜が見られる (時刻 $t=3.0$ s)。

図-4 は、1.0秒間のインターバルに侵食対象領域の 0.01m 幅の各セクションから pick-up された粒子数を示している。計算結果を初盤 ($t=0.0-1.0$ s)・中盤 ($t=1.0-2.0$ s)・終盤 ($t=2.0-3.0$ s) に区分すれば、初盤は斜面侵食・法尻侵食ともに活発で、pick-up 粒子個数も多い。中盤・終盤と比較すると、斜面上ではせん断による pick-up が卓越している (水撃作用による pick-up の閾値設定の意図と一致)。中盤・終盤では斜面上でも水撃作用による pick-up が局所的に卓越する箇所が生じているが、凸部形成による水衝と関連すると思われる。pick-up 粒子数分布の変化に注目すると、分布の重心は時間の経過とともに上手 (計算領域の左側) にシフトしており、分布域が重心周辺に集中して分散が小さくなっていく。このような特性は、表層急勾配化により次第に後退していく裏法侵食のプロセス (例えば須賀ら³⁾) と定性的に一致する。

4. 結 語

本稿では、越流水によるせん断力と水流の衝突圧の両者を駆動力とする固定壁侵食モデルを組み込んだ拡張 MPS 法により、河川堤防の越流侵食過程のグリッドレス解析を実施した。計算負荷の制約上、現象の進行速度を大幅に速めた計算とはなっているが、急変流場と侵食 (pick-up) 過程のハイブリッド型解析により、越流水に支配された裏法侵食の過程を少なくとも定性的には説明したことの意義は小さくない。

ところで現実の破堤プロセスには、本稿で扱った越流水による表層侵食に加えて、堤体のせん断破壊に起因する土塊崩落が間欠的に発生することが知られているが³⁾、クラックの発生と土塊崩落の評価に関しては、地盤モデルの改良が不可欠である。今後は、堤体構成粒子間の粘性性など地盤条件を反映できるフレームワークを検討したい。さらに、実現象のスケールに対応した計算の実行に必要なプログラムの改善に努めるとともに、実現象の再現における鍵である 3 次元性および Sub-particle scale 乱流モデル⁸⁾ の導入についても可能性を探りたい。

参考文献

- 1) 辻本哲郎：2000年9月東海豪雨災害 そのいくつかの視点、平成12年度河川災害に関するシンポジウム論文集、土木学会水理委員会、pp.29-42, 2001.
- 2) 吉野文雄・土屋昭彦・須賀堯三：越流水による堤防法面の破壊特性、第24回水理講演会論文集、pp. 351-356, 1980.
- 3) 須賀堯三・石川忠晴・葛西敏彦：越流水による堤防の破壊特性、第25回水理講演会論文集、pp. 355-360, 1981.
- 4) 福岡捷二・藤田光一：堤防法面張芝の浸食限界、水工学論文集、第34巻、pp. 319-324, 1990.
- 5) 福岡捷二・渡辺和足・柿沼孝治：堤防芝の流水に対する侵食抵抗、土木学会論文集、No.491/II-27, pp. 31-40, 1994.
- 6) 越塚誠一：数値流体力学、インテリジェントエンジニアリングシリーズ、培風館、p223, 1997.
- 7) Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 123, pp.421-434, 1996.
- 8) Gotoh, H., Shibahara, T. and Sakai, T.: Sub-Particle-Scale Turbulence Model for the MPS Method - Lagrangian Flow Model for Hydraulic Engineering-, *Computational Fluid Dynamics Jour.*, Vol.9 No.4, pp.339-347, 2000.
- 9) Lane, E. W.: Progress report on studies on the design of stable channels by Bureau of Reclamation, *Proc. ASCE*, Sep., 280, 1953.

(2001. 10. 1 受付)