

3次元個別要素法による オープン型鋼製砂防堰堤の土石流捕捉効果解析

深和岳人¹・香月智²・石川信隆³・山田正⁴

¹正会員 修(工) 防衛大学校助手 システム工学群建設環境工学科
(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

²正会員 工博 防衛大学校助教授 システム工学群建設環境工学科

³フェロー 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科

⁴正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

本研究は、3次元骨組構造の透過型砂防ダムによる土石流捕捉効果を、3次元個別要素法を用いてシミュレーションする方法を提案し、別途行った実験結果と比較して、その適用性を確認したものである。すなわち、鋼製砂防堰堤を表現するために円柱形要素を導入したうえで、3次元個別要素法による土石流の流下計算効率を高める工夫をした。提案手法は、ダムオープン部が複数の巨礫要素によるかみ合わせによって閉塞される現象を実験同様に再現することが出来、骨組間隔が捕捉性能に及ぼす影響を良好に評価できることを示した。

Key Words : 3-dimensional distinct element method, open type steel check dam, debris flow, entrapment function, damming up performance

1. 緒言

砂防堰堤の役割は多様であるが、基本的に山地では平均河床勾配が急峻なので、洪水のピーク流量が大きくなり、暴れ川となることを抑止するために、砂防堰堤上流部に砂礫を堆積させて、河床勾配を緩和させることにあった。しかし高度成長期から、全国的に居住地域が拡大し、山麓部や扇状地に社会生活基盤が置かれるようになると、土石流災害が頻発するようになったため、土石流対策構造物としての役割が重視されてきた。ただし、この場合も上流から流れてきた土砂を効率よく止めれば良いので、基本的に形状変更の必要はない。しかし、近年海岸侵食や河川下流部の河床低下、橋脚基礎の洗掘などが河川管理上深刻な問題となり、また、上下流方向への生物移動阻止による環境問題がクローズアップされてきた。

これを受けて、1998年7月に河川審議会総合土砂管理小委員会の答申「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」では、これらの流域内の土砂問題を解決するためには、流域を山地から沿岸漂砂域まで一貫する「流砂系」を定義したうえで、流砂系全体の総合的な土砂管理計画を策定し、的確な対策を講ずることを提言している¹⁾。すなわち、土石流など有害な土砂は捕捉するが、下流において必要としている量、

質の土砂は流すことのできる砂防堰堤の開発が必要となり、旧建設省では土石流対策の透過型砂防堰堤に関する技術基準²⁾を作成し、世界の牽引役ともなっている³⁾。

このような背景から、本研究の対象とする写真-1に示す鋼管を格子形状に骨組みした透過型堰堤⁴⁾等が実用化されている。これは、常時および中小の出水時には土砂や礫を開口部を通じて下流に流したうえで、土石流発生時には、土石流フロント部に巨礫が集まる性質を利用して巨礫群を開口部に絡めて捕捉・閉塞させ、急造ダム⁶⁾を作るものである。この開口部の設計は、一般に、開口部の大きさを最大礫径 d_{max} の1.5倍より小さければ、土石流発生時に確実に閉塞し⁷⁾、また2.0倍にとれば土石流のフロント部の巨礫を止めるとともにピーク流出土砂量



写真-1 オープン型鋼製砂防堰堤の一例

(最大瞬間流出土砂量)を約半分に低下させる⁸⁾ことを基準として実施されている。しかし、この基準はコンクリートに縦方向にスリットを入れた場合の開口幅と最大礫径の関係であり⁹⁾、写真-1のような縦、横、奥行き方向に3次元的な格子構造を有する場合には、性能が異なることが水山らの実験¹⁰⁾によって明らかにされている。よって、個々の構造ごとに土石流阻止と下流への土砂供給というトレードオフ関係にある透過型ダム の要求性能について、実験によって確認されている^{11)~14)}現状にある。

一方で、実験の事前予測や、実河川への適用シミュレーションなど、解析的なアプローチの研究も徐々に進んでいる。例えば水野ら¹⁵⁾は、2次元個別要素法¹⁶⁾を用いた土石流捕捉シミュレーション手法を提案し、自ら行った透過型砂防ダムの水理実験を良好に再現できることが示した。また著者ら¹⁷⁾も水野らの研究を応用して、同一の格子間隔においても礫要素の初期配置によって捕捉効果にばらつきが生じることを明らかにし、その捕捉率を確率的に評価する手法について提案した。

このように、2次元的なシミュレーションに関しては、徐々にその解析法が開発されつつあるが、前述のような、3次元構造の透過型砂防堰堤では、透過部の閉塞が粒子間の3次元的なかみ合わせに依存するため、これを評価できるシミュレーション法を開発する必要がある。そこで本研究では、3次元構造を有する透過型砂防堰堤の土石流の捕捉効果をシミュレーションするために、3次元個別要素法を用いた透過型砂防堰堤の捕捉効果シミュレーション法を提案し、別途行った実験結果と比較を行うことにより、その適用性を確認したものである。

2. 解析手法

本研究で提案する3次元個別要素法による土石流捕捉シミュレーションは、河床路を三角形の平面要素、格子型堰堤を円柱要素でそれぞれモデル化し、その中を流下する土石流中の巨礫塊を球要素で表す。

(1) 接触判定

a) 球要素間

図-1(a)に示すような2つの球要素の接触判定は次式によってなされる。

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (1a)$$

$$D_{ij} > r_i + r_j \text{ (非接触)} \quad (1b)$$

$$D_{ij} \leq r_i + r_j \text{ (接触)} \quad (1c)$$

ここで、 D_{ij} : i, j 要素間の中心座標間距離、 x_i, y_i, z_i : i 要素の中心座標、 x_j, y_j, z_j : j 要素の中心座標、 r_i, r_j : それぞれ i, j 要素の半径。

接触の場合には、図-2に示す全体座標系から図-3に示す接触点の法線方向を x 軸とする局部座標系への座標変換マトリクスが以下のように与えられる。

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & \sin \gamma \cos \beta & -\sin \beta \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ \cos \gamma \sin \beta & \sin \gamma \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$\mathbf{T}_j = \begin{bmatrix} -\cos \gamma \cos \beta & -\sin \gamma \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ -\cos \gamma \sin \beta & -\sin \gamma \sin \beta & -\cos \beta \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$$\gamma = \tan^{-1}\{(y_i - y_j)/(x_i - x_j)\} \quad (3a)$$

$$\beta = \tan^{-1}\{(z_i - z_j)/\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}\} \quad (3b)$$

ここで、 $\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j$: 全体座標系から局所座標系への座標変換マトリクス、 γ : Z 軸まわりの局部座標回転角、 β : Y 軸まわりの局部座標回転角。

b) 球要素と三角形平面要素

図-1(b)に示すように三角形平面の頂点座標が与えられる際の粒子の中心と平面の距離 D_p は、次式で与えられる。

$$D_p = \mathbf{n}^T \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} - c_p \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{n} : 三角形平面が有する方向余弦、 c_p : 三角形平面位置を決定する定数。

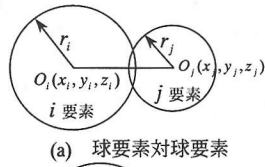
よって、球要素と三角形平面を含む無限平面上との間の接触判定は次式によってなされる。

$$D_p > r_i \text{ (非接触)} \quad (5a)$$

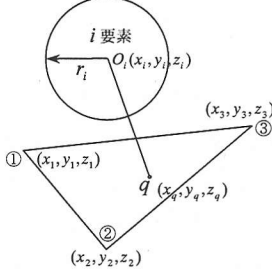
$$D_p \leq r_i \text{ (接触)} \quad (5b)$$

接触している場合、式(2a)に代入する座標変換角は次式で与える。

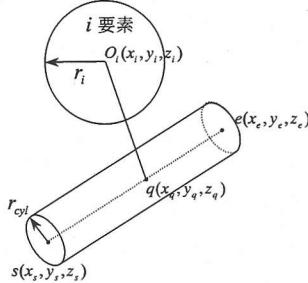
$$\gamma = \tan^{-1}(n_y/n_x) \quad (6a)$$



(a) 球要素対球要素



(b) 球要素対三角形要素 (河床, 境界)



(c) 球要素対円柱要素(ダム鋼管)

図-1 各要素間の接触判定

$$\beta = \tan^{-1}(n_z / \sqrt{n_x^2 + n_y^2}) \quad (6b)$$

c) 球要素と円柱要素

図-1(c)に示すような円柱の中心線に対する球要素からの垂線との交点を q とすると、 q 点の座標は次式によって求める。

$$\begin{pmatrix} x_q \\ y_q \\ z_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} + \{d_x(x_e - x_s) + d_y(y_e - y_s) + d_z(z_e - z_s)\} \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

ここで、 d_x, d_y, d_z : 円柱の中心線に沿った単位ベクトル要素。

よって、接触判定は次式によってなされる。

$$D_{cyl} = \sqrt{(x_i - x_q)^2 + (y_i - y_q)^2 + (z_i - z_q)^2} \quad (8a)$$

$$D_{cyl} > r_i + r_{cyl} \text{ (非接触)} \quad (8b)$$

$$D_{cyl} \leq r_i + r_{cyl} \text{ (接触)} \quad (8c)$$

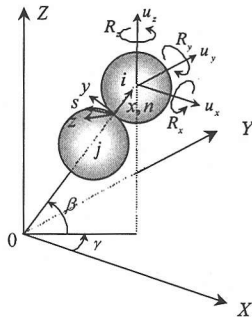


図-2 全体座標系と局所座標系

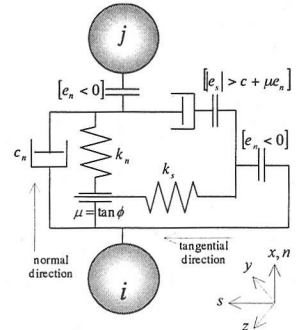
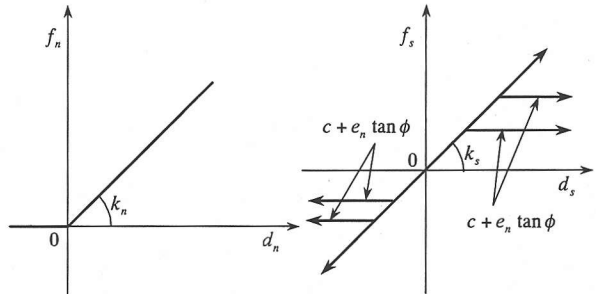


図-3 局所座標系における接触力モデル



(a) 法線方向

(b) 接線方向

図-4 構成則

さらに、式(2a)に用いる座標変換角は次式で与える。

$$\gamma = \tan^{-1}\{(y_i - y_q)/(x_i - x_q)\} \quad (9a)$$

$$\beta = \tan^{-1}\{(z_i - z_q)/\sqrt{(x_i - x_q)^2 + (y_i - y_q)^2}\} \quad (9b)$$

(2) 要素に働く力

a) 接触力

以上の座標変換マトリクスが求められると、図-3に示す法線方向、接線方向ばねの圧縮方向の変形を正とする、要素 $i \sim j$ の間のばねの変形量は次式のようなになる。

$$\mathbf{d}_{ij} = \bar{\mathbf{d}}_{ij} + \mathbf{B}_i \begin{bmatrix} \mathbf{T}_i & 0 \\ 0 & \mathbf{T}_i \end{bmatrix} \Delta \mathbf{u}_i - \mathbf{B}_j \begin{bmatrix} \mathbf{T}_j & 0 \\ 0 & \mathbf{T}_j \end{bmatrix} \Delta \mathbf{u}_j \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{d}_{ij} = [d_n, d_k, d_l]^T$: ばねの法線(n)方向、接線(l)方向、接線(k)方向変形を要素とするベクトル、 $\bar{\mathbf{d}}_{ij}$: 前段階のばね変形ベクトル、 $\Delta \mathbf{u}_i, \Delta \mathbf{u}_j$: 全体座標系における変位増分量、 $\mathbf{B}_i, \mathbf{B}_j$: 局部座標系での適合マトリクス。

さらに、図-3に示す合成滑り変形量を次式によって求める。

$$d_s = \bar{d}_s + \sqrt{\Delta d_l^2 + \Delta d_k^2} \quad (11)$$

ここで、 d_s : 合成滑り変形量、 \bar{d}_s : 前段階の合成滑り変形量。

ばねの変形増分をもとに、図-3に示すばね~ダッシュポットモデルにおいて、局所座標系における各法線方向、接線方向の作用力 f_n, f_s は図-4に示すようなものであり、次式によって与える。

$$f_n = \bar{f}_n + k_n \Delta d_n + c_n \Delta d_n / \Delta t \quad (12a)$$

$$\text{ただし } f_n \geq 0 \quad (12b)$$

$$f_s = \bar{f}_s + k_s \Delta d_s + c_s \Delta d_s / \Delta t \quad (13a)$$

$$\text{ただし } |f_s| \leq c + \mu f_n \quad (13b)$$

ここで、 f_n, f_s : それぞれ局所座標系における法線、接線方向作用力、 \bar{f}_n, \bar{f}_s : それぞれ前段階の法線、接線方向作用力、 c : モール・クーロン式における粘着力、 μ : 動摩擦係数 (= $\tan \phi$)、 k_n, k_s : 法線、接線方向のバネ定数、 c_n, c_s : 接線、法線方向の減衰係数。

このばね力は、次式によって各要素の重心点への力として変換される。

$$\mathbf{F}_{B_i} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_i & 0 \\ 0 & \mathbf{T}_i \end{bmatrix}^T \mathbf{B}_i^T \mathbf{f}_{ij} \quad (14)$$

ここで、 \mathbf{F}_{B_i} : 要素に働く接触力の要素中心自由度方向へ変換されたベクトル、 \mathbf{f}_{ij} : 要素 i, j 間の局所座標系における接触力ベクトル。

同様の方法によって、球要素と三角形要素間と球要素と円柱要素間における接触力も求める。

b) 流体力

礫要素が水から受ける流体力は次式で表す。

$$f_w = \frac{1}{2} C_d \rho A_i |U - v| (U - v) \quad (15)$$

ここで、 f_w : 流体力、 C_d : 抗力係数、 ρ : 水の密度、 A_i : 礫要素の流れ方向への投影面積、 U : 水の速度、 v : 礫要素の移動速度。

なお、流体力については水の流れに砂礫からの反力をフィードバックし固液混相流としての連成問題¹⁸⁾

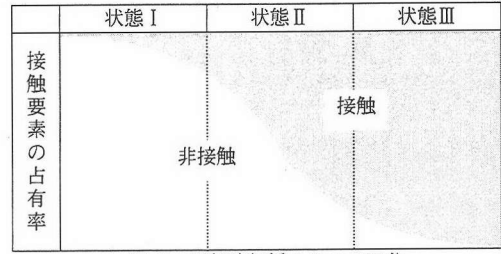


図-5 混相流解析の3つの区分

として解析すべきであるが、解析が複雑になることや、本研究の主目的である捕捉過程を論ずるうえではあまり重要ではないと考え、水の流速は礫要素の動きと無関係に与えられるものとした。

c) 運動方程式

前述の要素に働く力に基づいて、要素の並進、回転に関する加速度は次式によって求める。

$$\ddot{\mathbf{u}}_i = \mathbf{m}_i^{-1} [\sum \mathbf{F}_{B_i} + \mathbf{F}_w] \quad (16)$$

ここで、 $\ddot{\mathbf{u}}_i$: 加速度ベクトル、 \mathbf{m}_i : i 要素の質量マトリクス、 \sum : 接触要素分の積分、 \mathbf{F}_w : 流体力ベクトル (f_w の全体座標ベクトル)、 (i) : 時間微分。

さらに、速度、変位は次式によって与えられる。

$$\dot{\mathbf{u}}_{i+\Delta t} = \dot{\mathbf{u}}_i + \ddot{\mathbf{u}}_i \Delta t \quad (17a)$$

$$\mathbf{u}_{i+\Delta t} = \mathbf{u}_i + \left(\frac{\dot{\mathbf{u}}_i + \dot{\mathbf{u}}_{i+\Delta t}}{2} \right) \Delta t \quad (17b)$$

(3) 数値解析上の工夫

さて、本研究で行う解析では、要素の密集度に応じて、図-5に示すような3つの状態が存在する。すなわち、状態Ⅰは礫間の接触はほとんど発生せず、ばらばらな状態であり、この状態では剛体運動解のみが卓越する。一方、状態Ⅲはダム周辺で要素同士が詰まっているような、極めて密に集合している状態で、要素間に働く接触力による系の力学的つりあい状態が重要な意義を持つ状態、状態Ⅱはその中間的状态で要素間の接触判定は無視できないが、接触間の力のやり取りよりも接触によって各々の要素の運動方向変換やエネルギー損失が問題となる領域である。

原則的には、状態Ⅲを前提とした前述の基本式を忠実に解けば、状態ⅠやⅡも良好な解が得られるので問題はないように思うが、状態Ⅰでは要素同士の接触する可能性が極めて低いにもかかわらず接触判定を繰り返すことになり、状態Ⅱの領域では、要素

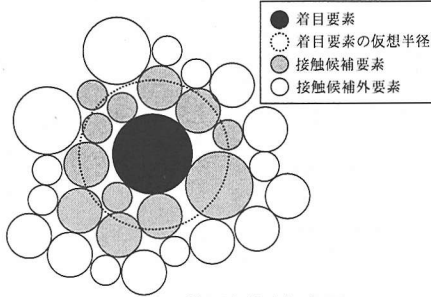


図-6 近傍要素抽出概念図

同士の離反後の方向と速度を決定するだけのために、接触時間を十分に小さく差分する時間刻みを設ける必要があるため、全体の計算負担は大きくなる。これらの問題を解決するため、次のような工夫を行った。

a) 接触判定領域

要素の数が多いと、要素間の接触判定に要する計算負担が莫大なものとなる。そこで、一定時間ごとに図-6 に示すような個々の要素周辺にある近傍要素抽出を行う。すなわち、次式を満足する距離関係にある要素を抽出し、時々刻々の接触判定はその周辺要素とのみ行うこととした。

$$D_{ij} \leq r_i + r_j + r_{dum} \quad (18)$$

ここで、 D_{ij} : i, j 要素間の中心間距離、 r_i, r_j : それぞれ i, j 要素の半径、 r_{dum} : r_i に付加する余長半径。

粒状体の解析では、要素1個あたりの接触要素数を配位数と呼ぶが、 r_{dum} を適切に設定すると、式(18)で設定される各要素の接触判定対象要素数は密に詰めた場合の配位数と同等またはやや大きな数となる。また、一度式(18)によって接触判定対象の組み合わせを決めると、次回に式(18)による再判定を行うまでは、選択された組み合わせだけが自動的に式(1)、(4)、(7)の接触判定過程に行くことになる。この処理を行わない場合には、要素数の2乗に比例する接触判定回数を行うことになり、要素数の増加に伴い計算効率が極度に悪くなってしまう。

b) 反発係数制御

本研究においては、ダム鋼管部における捕捉過程の解析に主眼をおいているため、特に流下時の解析となる状態ⅡやⅢにおける接触力計算の精度を犠牲にして計算効率を上げるために、増分時間 Δt をやや大きくとる。その際式(17)までの手順によって求められた速度が、次式の反発係数制御による速度を超えた場合には、これを次式の値に置き換えることにした。これにより、数値計算誤差の蓄積による発散現象を極力抑えることが出来る。この反発係数制御

による各要素の臨界速度は次式によって与えられる。

$$\mathbf{v}_c = \mathbf{v}_q + e(\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_q) \quad (19a)$$

$$\dot{\phi}_c = \dot{\phi}_q + e(\dot{\phi}_e - \dot{\phi}_q) \quad (19b)$$

ここで、 $\mathbf{v}_c, \dot{\phi}_c$: それぞれ修正後の速度、回転速度ベクトル、 $\mathbf{v}_q, \dot{\phi}_q$: それぞれ完全塑性衝突時における離反時の速度、回転速度ベクトル、 $\mathbf{v}_e, \dot{\phi}_e$: それぞれ完全弾性衝突時における離反時の速度、回転速度ベクトル、 e : 反発係数 (0.0~1.0)。

まず、完全塑性衝突の衝突後の速度は、要素 i, j が同一となって運動をするので、局所座標系において次式のように与えられる。

$$\bar{\mathbf{v}}_{ni,j} = \frac{m_i \mathbf{v}_{ni}^0 + m_j \mathbf{v}_{nj}^0}{m_i + m_j} \quad (20a)$$

$$\bar{\mathbf{v}}_{si,j} = \frac{m_i \mathbf{v}_{si}^0 + m_j \mathbf{v}_{sj}^0}{m_i + m_j} \quad (20b)$$

$$\bar{\dot{\phi}}_{si,j} = \frac{I_i \dot{\phi}_{si}^0 + I_j \dot{\phi}_{sj}^0}{I_i + I_j + \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} (r_i + r_j)^2} - \frac{\frac{m_i m_j}{m_i + m_j} (r_i + r_j) (\mathbf{v}_{si}^0 - \mathbf{v}_{sj}^0)}{I_i + I_j + \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} (r_i + r_j)^2} \quad (20c)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{v}}_{ni,j}$: 局所座標系における法線方向離反速度、 $\bar{\mathbf{v}}_{si,j}$: 局所座標系における接線方向離反速度、 $\bar{\dot{\phi}}_{si,j}$: 局所座標系における回転方向離反速度、 $\mathbf{v}_{ni}^0, \mathbf{v}_{nj}^0$: それぞれ局所座標系における i, j 要素の衝突前の法線方向速度、 $\mathbf{v}_{si}^0, \mathbf{v}_{sj}^0$: それぞれ局所座標系における i, j 要素の衝突前の接線方向速度、 $\dot{\phi}_{si}^0, \dot{\phi}_{sj}^0$: それぞれ局所座標系における i, j 要素の回転速度ベクトル。

よって、これを式(2)で示す座標変換マトリクスで逆変換すると、式(19)中の $\mathbf{v}_q, \dot{\phi}_q$ の値が求まる。

続いて完全弾性衝突では、次式のように与えられる。

$$\bar{\mathbf{v}}_{ni} = -J_n / m_i \quad (21a)$$

$$\bar{\mathbf{v}}_{si} = J_n \tan \alpha / m_i \quad (21b)$$

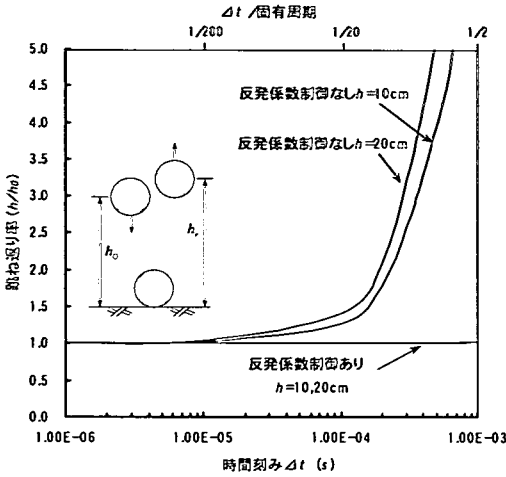


図-7 時間刻みと跳ね返り率

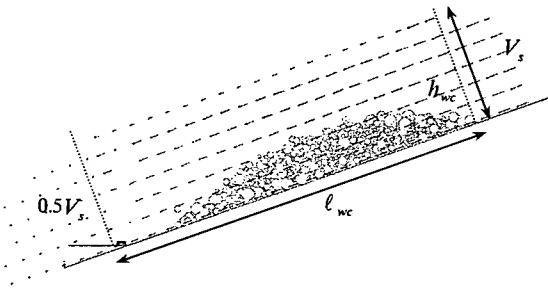


図-8 流速モデル

$$\bar{\phi}_{si} = -J_n r_i \tan \alpha / I_i \quad (21c)$$

$$\bar{v}_{nj} = J_n / m_j \quad (21d)$$

$$\bar{v}_{sj} = -J_n \tan \alpha / m_j \quad (21e)$$

$$\bar{\phi}_{sj} = -J_n r_j \tan \alpha / I_j \quad (21f)$$

ここで、 $\bar{v}_{ni}, \bar{v}_{nj}$: それぞれ i, j 要素の局所座標系における法線方向離反速度、 $\bar{v}_{si}, \bar{v}_{sj}$: それぞれ i, j 要素の局所座標系における接線方向離反速度、 $\bar{\phi}_{si}, \bar{\phi}_{sj}$: それぞれ i, j 要素の局所座標系における回転方向離反速度、 J_n : 弾性衝突時に衝突している時間 t の法線方向の力積、 α : 局所座標系におけるせん断方向速度のなす角度。

なお、式(21)中における J_n については、次式により与える。

$$J_n = -2\{m_i(v_{ni}^0 \bar{v}_{ni} + v_{si}^0 \bar{v}_{si}) + I_i \phi_{si}^0 \bar{\phi}_{si}\} + m_j(v_{nj}^0 \bar{v}_{nj} + v_{sj}^0 \bar{v}_{sj}) + I_j \phi_{sj}^0 \bar{\phi}_{sj}\} / \{m_i(\bar{v}_{ni}^2 + \bar{v}_{si}^2) + I_i \bar{\phi}_{si}^2 + m_j(\bar{v}_{nj}^2 + \bar{v}_{sj}^2) + I_j \bar{\phi}_{sj}^2\} \quad (22)$$

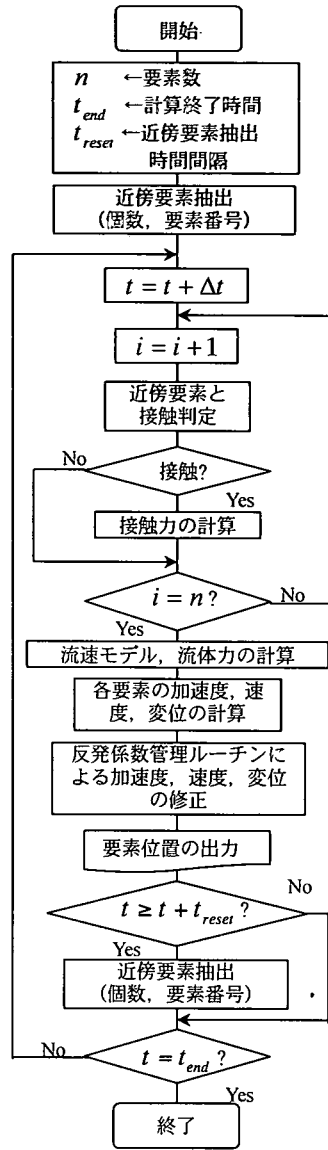


図-9 計算手順

これも同様に全体座標系に変換され、式(19)中の v_e, ϕ_e の値を求めることが出来る。

反発係数制御の効果を確認するために、1個要素が床面に完全弾性衝突条件で落下衝突する場合をシミュレーションした結果を図-7に示す。このシミュレーションにおける望ましい解は、初期高さ h_0 に対して、跳ね上がった最高点の高さ h_r が一致するものである。これを反発係数制御を行わずに解くと、固有周期の $1/200$ 以下の Δt で計算する場合にのみ $h_r \approx h_0$ となるが、これを越えた時間刻みでは $h_r > h_0$ となり、1回の衝突で運動エネルギーが増加しており、計算が発散状態になることがわかる。し

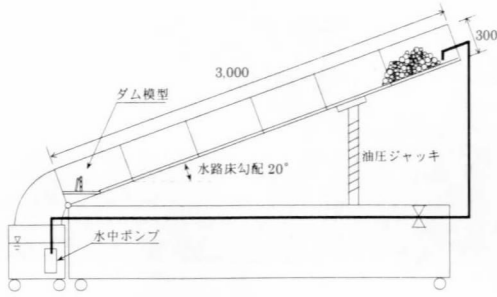


図-10 実験水路

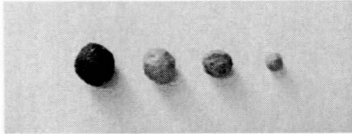


写真-2 用いた粒状粒子
(粒形状石炭灰, 比重約 1.9, $d_{max}=20\text{mm}$ (緑),
15mm(黄), 10mm(水色), 5mm(灰))

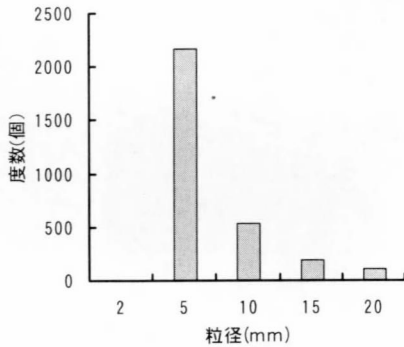


図-11 粒径の度数分布

かし、反発係数管理を作用させると固有周期の 1/2 の時間刻みでも全く問題なく、エネルギー保存則が守られている。

c) 流速モデル

本来は、礫要素との相互作用によって生ずる力に基づいて、礫塊周辺の水流の流速変化を解析することが望ましいが、本研究の目的が、ダム の閉塞シミュレーションにあるため、簡略化して図-8 に示すような流速モデルを与えるものとした。すなわち、礫塊最後尾の要素を基準にして、それより上流部は常に基準流速 V_s の一様流を与える。基準点から下流に l_{wc} の長さでは、下流側に行くにしたがって流速を低下させ、礫塊上部においては底面部よりもやや流速を大きくしている。また、 l_{wc} より下流は V_s の半分の流速とする。

なおここで、 V_s : 最後尾の粒子に影響する最大流速、 l_{wc} : 流速分布が影響する長さ方向の範囲 (本研究では 40cm とした)、 h_{wc} : 流速分布が影響する高さ方向の範囲 (本研究では 20cm とした) である。

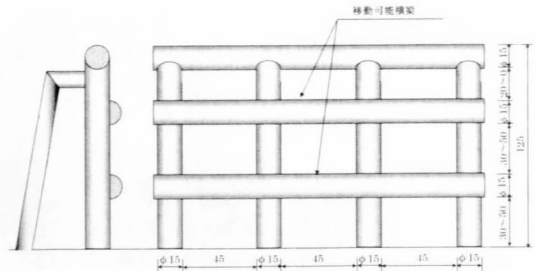


図-12 鋼製砂防堰堤模型

表-1 実験ケース

実験番号	格子間隔	l/d_{max}	流量	勾配	
None-1	なし				
150-1	30mm	1.5	3.4 リットル/s	20°	
150-2					
150-3			2.7 リットル/s	15°	
150-4					
200-1	40mm	2	3.4 リットル/s	20°	
200-2					
225-1	45mm	2.25	2.7 リットル/s		
225-2					
250-1	50mm	2.5			
250-2					

d) 解析手順

以上の基本式や工夫を用いた解析手順は、図-9 のようになる。

3. 模型実験

(1) 実験概要

シミュレーションに先立ち、実験水路を用いて、透過型砂防ダムの砂礫捕捉効果に関する実験を行った。用いた実験水路は、図-10 に示す透明アクリル製の 3m (長さ) × 0.2m (幅) × 0.3m (深さ) で出来た河床勾配 20° の矩形水路である。

実験に使用した礫モデルは、粒状石炭灰(比重 1.9)であり、写真-2 に示すような 20,15,10,5mm の 4 種類の粒径にふるいわけ、それぞれを緑、黄色、水色、灰色に着色した。粒径分布は図-11 に示す分布であり、合計約 3,000 個(約 4ℓ)の粒子中、最大粒径(d_{max}) 20mm の粒子を 110 個含んでいる。これらの粒子を混合した後、水路最上流部に配置し、2.7ℓ/s (一部 3.4ℓ/s)の流量を約 5 秒間供給した。ダム模型は図-12 に示すように、φ 15 mm の木製円柱で作成し、縦方向柱を最大粒径の 2.25 倍で固定し、中間横梁のみ位置を変更することができるものとした。なお、実験ケースは表-1 に示すように、中間横梁の格子間隔を最大粒子の 1.5~2.5 倍の場合と、横梁を設置しない場合について調べた。

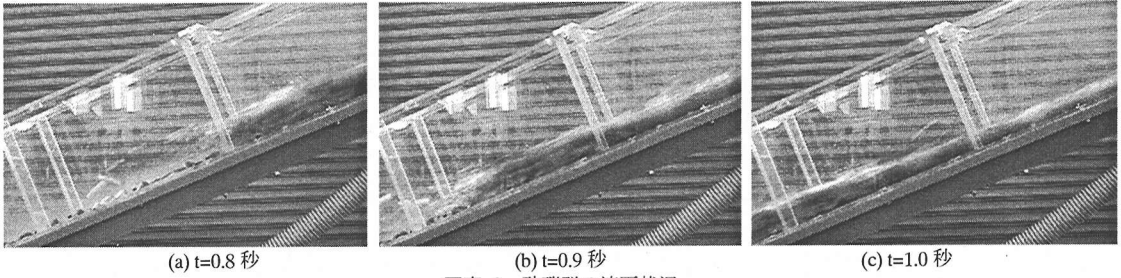


写真-3 砂礫群の流下状況

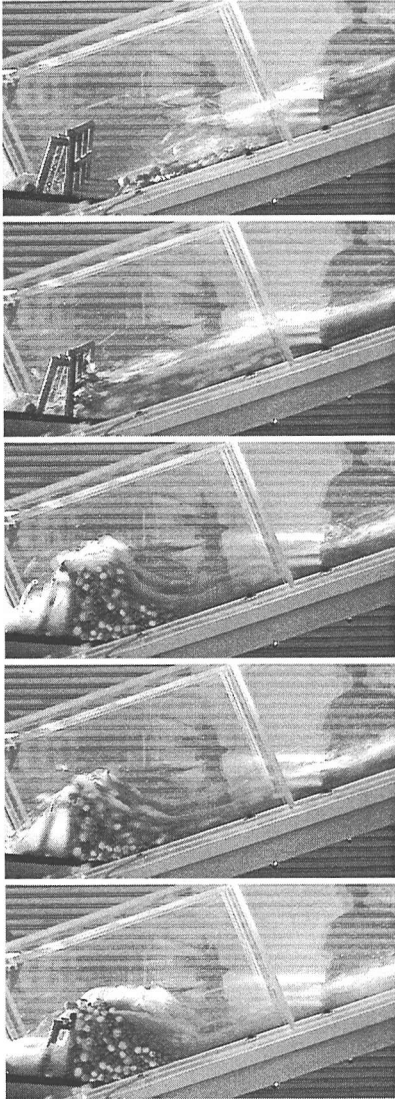


写真-4 捕捉状況図
($l/d_{max} = 1.5$)

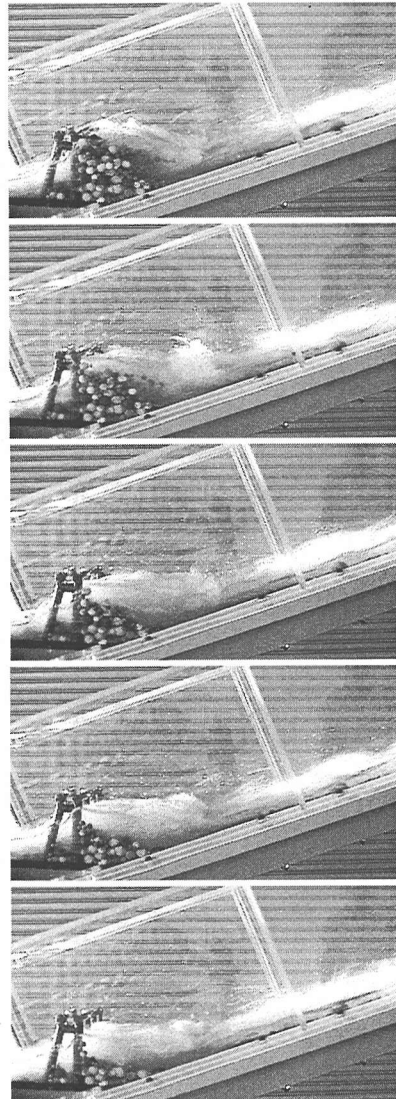


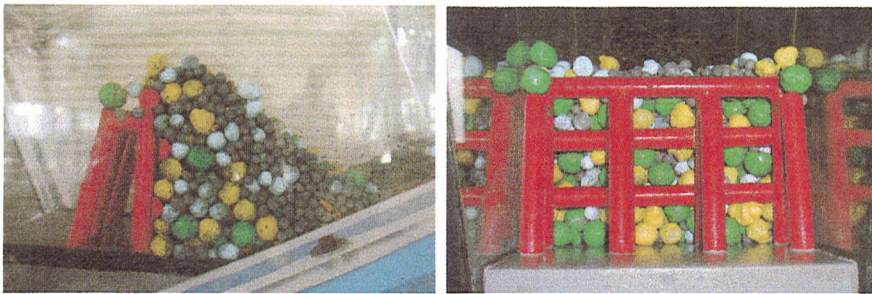
写真-5 捕捉状況図
(中間横梁なし)

(2) 実験結果

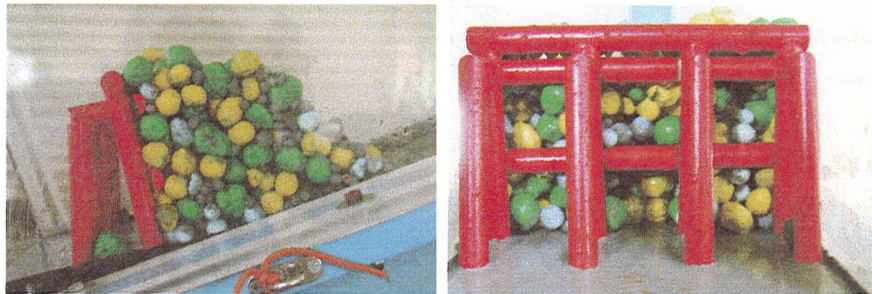
写真-3 は、水路中間部における砂礫群の流下状況を 0.1 秒間隔で示したものである。水を含んだ粒子群は、粒子群先頭部がやや盛り上がるように、ひと

塊となって流下する様子がわかる。

写真-4 は、横方向の格子間隔を $l/d_{max} = 1.5$ に設置した場合における、ダム模型部における砂礫群の捕捉状況の一例を 0.2 秒間隔で連続的に示したもの



(a) $l/d_{\max} = 1.5$



(b) $l/d_{\max} = 2.0$



(c) $l/d_{\max} = 2.25$



(d) $l/d_{\max} = 2.5$

写真-6 最終捕捉形状の一例

である。砂防ダムに接近した砂礫群は、オープン部最下段部を一部粒子が通過しつつも、1段目、2段目が閉塞に向かいつつあり、流体力により塞き上げられている。その後、最上段の3段目までが完全に閉塞し、後続の流体力により堆積部がえぐり取られるようにして、砂礫粒子とともにダム上部を越流している。その後流体力の減少とともに、砂礫群がしっかりと捕捉されていることが確認できる。

写真-5 は、横方向の梁を取り除き、縦方向の柱

($l/d_{\max} = 2.25$) のみの場合における、砂礫群の捕捉状況を示したものである。砂防ダムに到達した砂礫群は、一時的に閉塞するような挙動を示す。しかし、後続の流体力により粒子が流れ始め、最終的にはほぼ全ての粒子が流下し、閉塞しない。

写真-6 は各横格子間隔における捕捉最終形状の一例を示したものである。 $l/d_{\max} = 1.5$ の場合においては、最大粒径の 20mm 粒子を中心複数粒子のかみ合わせによりアーチ構造が形成され、最上段部

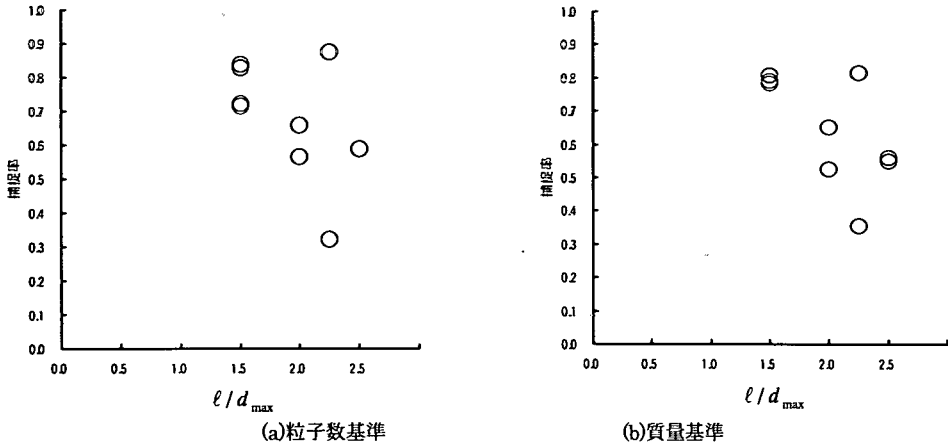


図-13 実験時における捕捉率～格子間隔関係

まで閉塞しており、側面図により前方に比較的大きな粒径の粒子が集まり、後方に小さい粒径の粒子が集まっている様子がわかる。

一方、 $l/d_{max}=2.0, 2.25$ の場合を見ると、捕捉形状は $l/d_{max}=1.5$ の場合と大きな違いはないが、特に $l/d_{max}=2.0$ の場合は捕捉された粒子が少なかったことが伺える。さらに、 $l/d_{max}=2.5$ の場合においては、2 段目中間部のオープン部が閉塞しておらず、捕捉している粒子が少ないことがわかる。なお、いずれの場合においても、砂防ダムを通過した粒子は、粒子間を通過する流体力によって流れ去ってしまっている。

図-13 は実験結果から粒子数に基づく捕捉率をプロットしたものである。なお、捕捉率とは次式で表されるものである。

$$P_n = \frac{n_T - n_{pass}}{n_T} \quad (23a)$$

$$P_m = \frac{m_T - m_{pass}}{m_T} \quad (23b)$$

ここで、 P_n : 粒子数から見た捕捉率、 n_T : 実験に使用した粒子数(≒3,000 個)、 n_{pass} : 砂防ダムを通過した粒子数、 P_m : 質量から見た捕捉率、 m_T : 実験に使用した粒子の全質量、 m_{pass} : 砂防ダムを通過した粒子の質量である。

実験ケースは少ないが、 l/d_{max} が大きくなるほど、捕捉率が小さくなり、 $l/d_{max}=2.25$ の場合を見ると、2 ケース中の捕捉率が 87%~32% と大きくばらついている¹⁷⁾ことがわかる。

4. 解析結果と考察

(i) 計算条件

解析で用いるパラメータを表-2 に示す。抗力係数 C_D については橋本らが行った実験¹⁹⁾において、 $Re=1.3 \times 10^4 \sim 3.2 \times 10^4$ の範囲で、 $C_D=0.49$ が得られており、これを用いるものとした。

a) バネ定数および時間間隔

実験で用いた粒子の物理的な性質を表すためには物理的にばね定数を求めることが望ましいが、本研究では Δt が解析時間に大きく影響することを考慮し、 $\Delta t=1.0 \times 10^{-5}$ s で発散しないパラメータ決定を優先した。すなわち、最小粒子に対して $T/\Delta t=50$ 程度になるように k_n を定めた。また、接線方向バネ定数については、球体の回転方向の固有周期がやはり $T/\Delta t=50$ 程度になるように k_s を定めた。これは結果的に、縦弾性係数とせん断弾性係数の関係においてポアソン比を $\nu=0.25$ としたことと同等である。

b) 減衰係数

減衰係数は次式により粒子径ごとに異なる減衰係数をもとに次式によって算定することにした。

$$c_n = 2h \sqrt{\frac{m_i m_j}{m_i + m_j} k_n} \quad (24a)$$

$$c_s = 2h \sqrt{\frac{I_i I_j}{I_i r_j^2 + I_j r_i^2} k_s} \quad (24b)$$

ここで、 c_n, c_s : それぞれ法線方向、接線方向の減衰係数、 h : 減衰定数、 m_i, m_j : それぞれ i, j 要素の質量、 I_i, I_j : それぞれ i, j 要素の慣性モーメント、 r_i, r_j : それぞれ i, j 要素の半径。

なお、減衰定数 h についてはパラメトリックに検

表-2 解析定数

項目	値	
斜面勾配 θ	20°	
流速 U	流下時	200cm/s
	捕捉時	300cm/s
抗力係数 C_d	0.49	
単位体積重量 ρ	1.9g/cm ³	
最小重量 m_{\min}	0.156g/cm ³	
最大重量 m_{\max}	10.45 g/cm ³	
全要素数	3,000 個	
時間刻み	$\Delta t = 1.0 \times 10^{-5}$	
ばね定数	法線方向 k_n	1.0×10^3 k N/cm
	接線方向 k_s	4.0×10^2 k N/cm
減衰係数	法線方向 c_n	別表
	接線方向 c_s	別表
摩擦係数 μ	1.0 (= tan 45°)	
粘着力 c	流下時	0.0 N
	捕捉時	1.0 N
反発係数 e	1.0	

表-3 粒子径が異なる場合の減衰係数

(a) 法線方向 c_n , $h=0.2$

粒径	0.5cm	1.0cm	1.5cm	2.0cm
0.5cm	1.13	1.51	1.57	1.59
1.0cm	1.51	3.20	3.98	4.27
1.5cm	1.57	3.98	5.88	6.98
2.0cm	1.59	4.27	6.98	9.06

(b) 接線方向 c_s , $h=0.2$

粒径	0.5cm	1.0cm	1.5cm	2.0cm
0.5cm	0.358	0.477	0.497	0.503
1.0cm	0.477	1.01	1.26	1.35
1.5cm	0.497	1.26	1.86	2.21
2.0cm	0.503	1.35	2.21	2.86

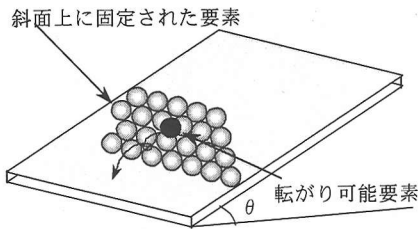


図-14 滑り実験

討し、要素間の過剰な振動が制止する $h=0.2$ とした。このときの異なる粒子径間の減衰定数を表-3 にまとめて示す。

c) 摩擦係数, 粘着力

各要素間に働く摩擦係数 $\mu (= \tan \theta)$ および粘着

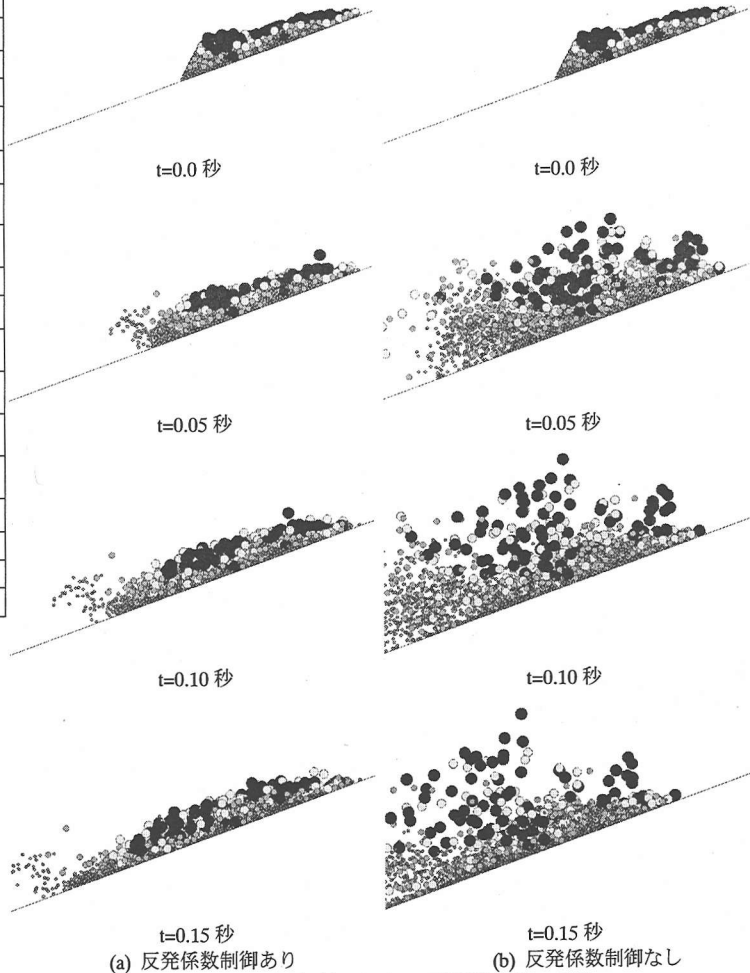
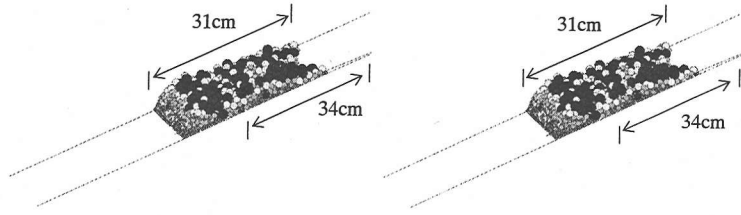


図-15 流下時解析における反発係数制御の効果

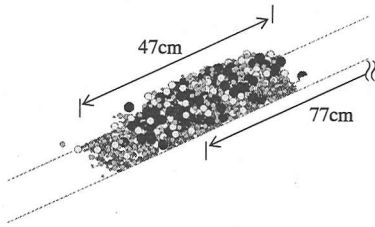
力 c は粒子の凸凹を考慮した値が要求される。すなわち摩擦係数は、物性的なものよりもむしろ、幾何学的に決定されるべきものと考えることが出来る。そこで、図-14 の様な実験を行った場合に、異なる粒径同士において転がり始める角度が平均的に 45° になると考えられることから、 $\mu=1.0$ とした。また、粘着力については、流水中においては働かないものとし、流下過程の計算時には $c=0.0$ としたが、捕捉過程時においては流体力作用時において最小粒子が摩擦力と粘着力のみによりかろうじて静止していることが出来る $c=1.0$ N とした。

(2) 流下接近過程解析結果

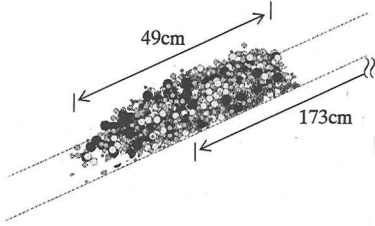
図-15 は最上流部に初期配置をセットした後 0.15 秒間の、礫要素群の流下解析に及ぼす反発係数制御の影響を示したものである。図-15(a) の最上段には反発係数制御を有効にした場合の、初期状態の礫群



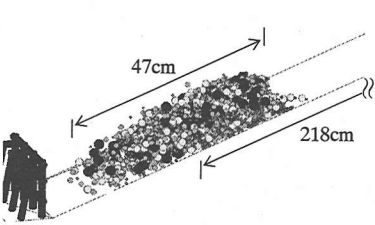
(a) t=0.0 秒



(b) t=0.5 秒

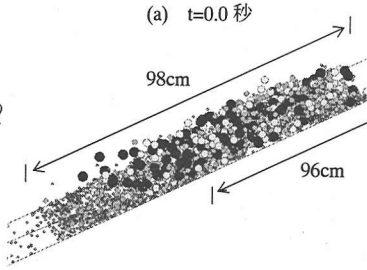


(c) t=1.5 秒

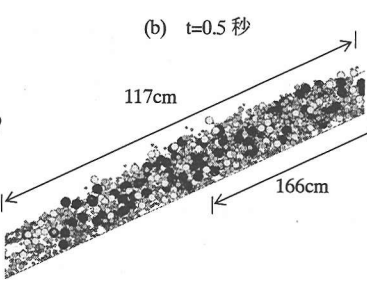


(d) t=2.0 秒

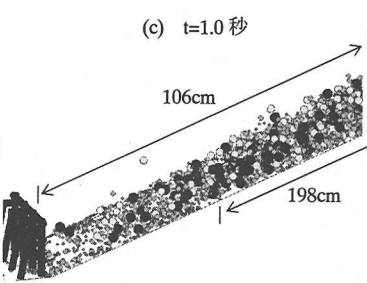
図-16 流れ状況図



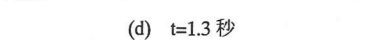
(a) t=0.0 秒



(b) t=0.5 秒

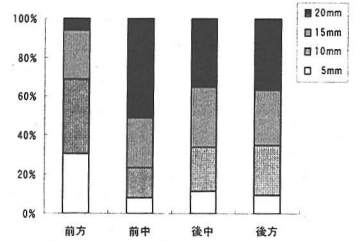


(c) t=1.0 秒

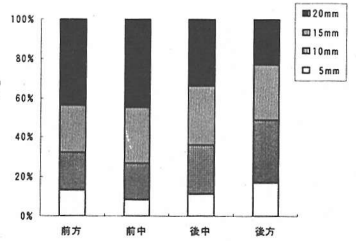


(d) t=1.3 秒

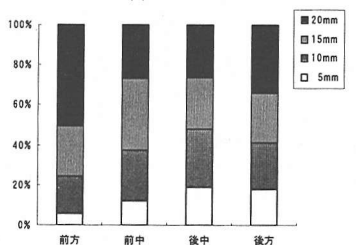
図-17 流れ状況図 (一様流速)



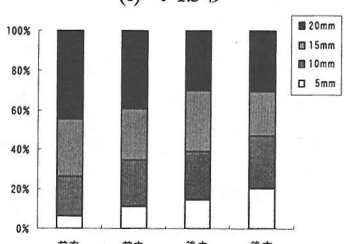
(a) t=0.0 秒



(b) t=0.5 秒



(c) t=1.5 秒



(d) t=2.0 秒

図-18 流下時における粒度分布の遷移

を示す。これは、礫群前面に75°の仮想締め切り壁を与えた後に、3,000個の要素をランダムに重力落下させて配置したものである。続いて、 $t=0.05$ 秒では、仮想前壁を除いて、図-8に示す流速分布に基づく流体力を作用させたものであるが、前面にあった一部の要素群は仮想前壁が取り除かれたために、圧力が開放され、飛び跳ね出している。さらに、 $t=0.10, 0.15$ 秒と時間が進行すると、前方に飛び出した要素群を追いかけるように前方の礫群は床面に沿って舌状に伸び出していることがわかる。一方、図-15(b)は反発係数制御を有効にしない場合の解析結果を示している。最上段部の $t=0$ 秒の状態は図-15(a)のものと全く同じものである。しかし、 $t=0.05$ 秒では礫全体

があたかも爆発したかのように全体的に飛散し始め、その後の $t=0.10, 0.15$ 秒ではさらに飛散状態はエスカレートしている。すなわち、数値計算の発散状態にあり、実験結果に比べて好ましい結果が得られていない。これは、 $t=0$ 秒の一見静止状態の初期配置においても、個々の要素は微妙に振動しているが、その内部のいずれかが解析開始後相互に衝突すると、図-7に示したように衝突前よりも衝突後の速度のほうが大きくなり、その衝突が連鎖的に内部で発達するため、表面の要素が外側に飛び出すものである。図-16は、図-15(a)に示した反発係数制御を有効にして、 $t=2.0$ 秒まで解析したものである。礫群は、 $t=0.5$ 秒、 1.5 秒、 2.0 秒と下流に移動するが、常にひ

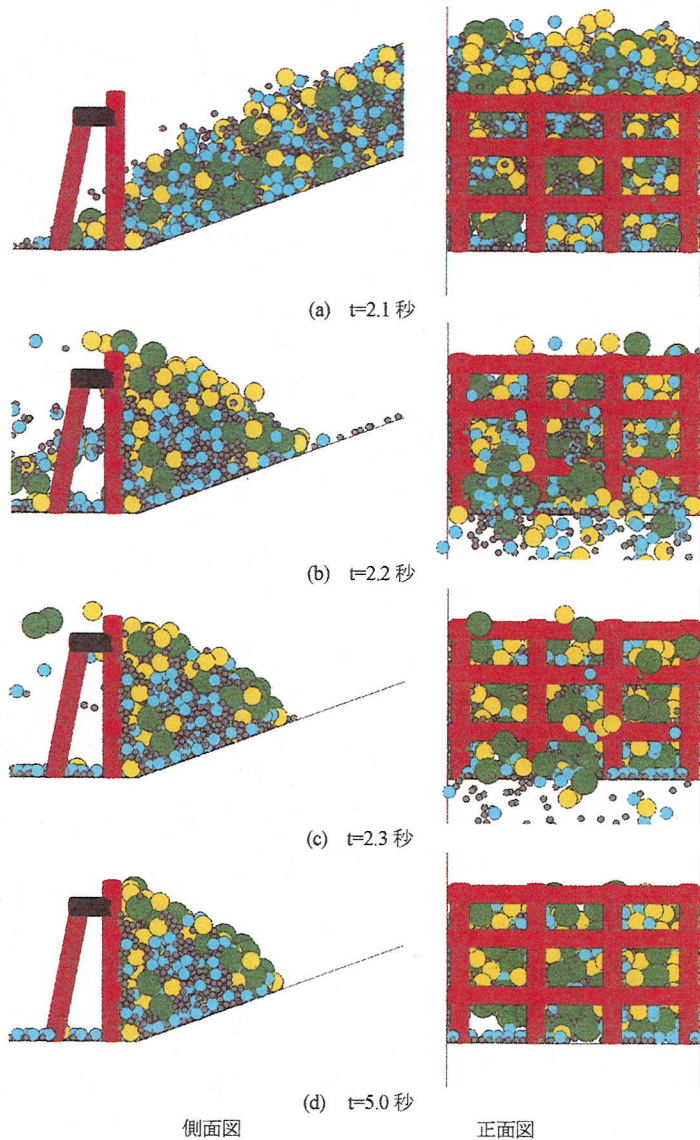


図-19 捕捉過程解析 (横梁間隔 $l/d_{\max}=1.5$)

と塊となって流下することがわかる。これを動画でトレースすると、前方の要素に覆い被さるよう後方の粒子が追いつき、巻き込むような運動を繰り返しながら流下することが確認できる。この解析を写真-3 のビデオ映像と正確に比較することは難しいが、既往の研究²⁰⁾で指摘されている傾向と一致している。

比較のために、等速で一様な流速分布を与えた場合の解析結果を図-17 に示す。これより、一様流速では時間の経過とともに礫塊が長く伸びる傾向があることがわかる。これは、後方にある要素ほど前方要素からの衝突によるブレーキが効くため、益々速度が小さくなるためである。また、全長が伸びるた

め、礫塊の高さも低くなることが認められる。これは一般に言われている土石流の特徴²¹⁾とは異なっており、また実験とも異なるものである。

図-18 は図-16 に示した流下に伴う粒径分布の遷移を示したものである。図は全粒子数を前方から後方までにその位置により4分割し、各々の場所における各箇所の質量分布率を示している。図-18(a)の初期配置では、 $d_{\max}=20\text{mm}$ の粒子は前方部分にはほとんど含まれていないが、計算開始後 $t=0.5, 1.0, 1.5$ 秒と時間が経過し下方に流下するにつれて、先頭部での大粒径含有率が高くなり巨礫が集中する傾向が現れている。

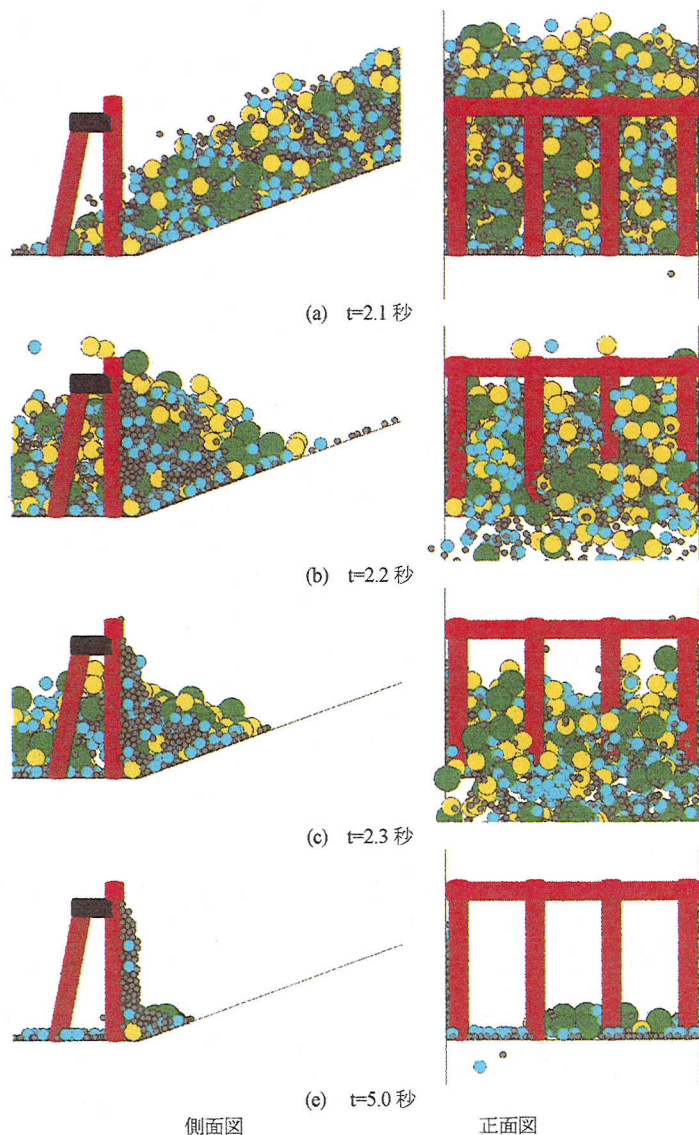


図-20 捕捉過程解析 (横梁なし)

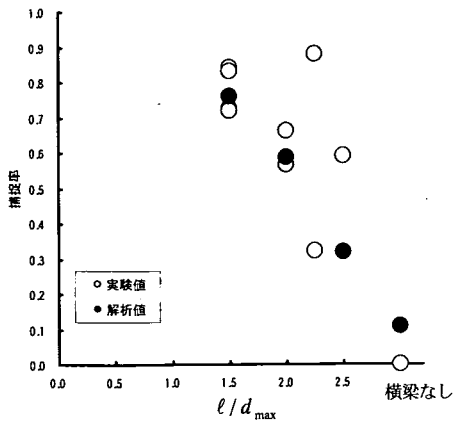
(3) 格子型堰堤による捕捉解析

砂防堰堤の捕捉シミュレーションは、図-16(d)に示した砂防堰堤直前の要素群配置を保存しておき、前方の砂防堰堤の状態のみを変化させて流下させ、砂防堰堤の形状変化の影響を調べた。

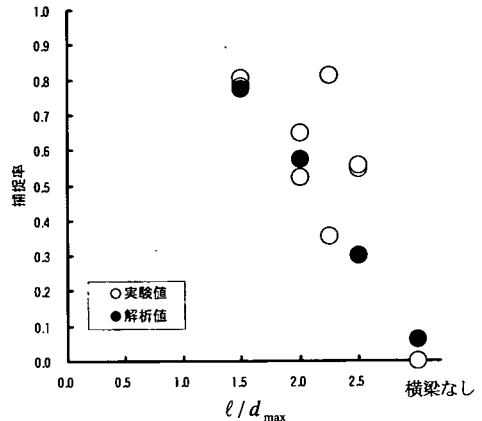
図-19は写真-4に示した最大粒径の1.5倍の間隔で横梁を配置した場合の解析結果を示す。t=2.1秒で礫群の先頭部が砂防堰堤に到達しており、t=2.2秒では砂防堰堤に塞き止められた礫群は砂防堰堤上流部に塊となり、砂防堰堤上部を乗り越えて後続の礫群が流下している。また、一部は砂防堰堤の中程の隙間からも流れ出している。t=2.3秒では中程からの流出が止まり、上部からの乗り越えだけになっており、

t=5.0秒では全ての隙間の閉塞が完了し、上流部に一塊の礫群が塞き止められている。これは、写真-6(a)～(d)の実験結果と概ね一致している。また、図-19(d)の正面から見た閉塞状況では、格子の開口部が最大礫径の要素のかみ合わせによって閉塞されている様子が見られ、これも写真-6の閉塞状況と良く似ている。

一方、図-20には写真-5に示した横梁無しの場合の結果を示す。t=2.1秒では図-19(a)の横梁ありと同様に礫塊の先頭が堰堤に達している。続いてt=2.2秒では横梁ありと同様に礫群が塞き止められている。しかしよく見ると、堰堤の中間部からの流出要素が図-19(b)より多いことがわかる。さらに、t=2.3秒で



(a) 捕捉率～格子間隔関係 (粒子数)



(b) 捕捉率～格子間隔関係 (質量)

図-21 捕捉率分布

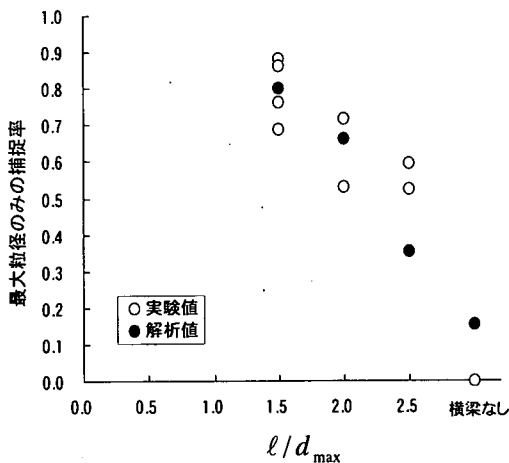


図-22 最大粒径のみの捕捉率

も砂防堰堤の上流側に一塊の礫群が塞き止められているが、図-19(c)とは異なり量が少なく引き続き礫が流下している。これを写真-5と比較すると、写真-5(a)の $t=2.2$ 秒において、一旦塞き止められているものの写真-5の(b)～(e)のように流下してしまうことと良く一致している。

図-21は l/d_{max} を実験結果と同様に変化させた場合の解析と実験との捕捉率を比較したものである。解析結果は l/d_{max} の増加に伴って概ね線形的に捕捉率が低下しており、実験値のばらつきの中の下限に沿っているようである。また、図-22は最大粒径である d_{max} の粒子のみに着目し、通過個数と格子間隔の関係を表したものであるが、図-21と同様の傾向を示していることがわかる。このことから、実験、解析とも最大粒径が捕捉率に与える影響が大きく、捕捉率の観点からも計算結果は実験結果の傾向を概ね良好に捉えていることがわかる。

以上、図-19, 20で示した結果より、提案する3次

元個別要素法によって、個々の要素の動きを完全に実現と一致させることは困難であるが、砂防堰堤の捕捉機能に関して概ねその特徴をシミュレートできるものと思われる。

5. 結言

本研究は、格子型砂防堰堤の土石流捕捉効果のシミュレーション解析に3次元個別要素法を応用することを提案したものである。本研究の成果を要約すると以下のような。

- (1) 3次元個別要素法の要素モデルに、円柱形状モデルを導入した。これにより、格子型砂防堰堤の骨組構造を表現できるようになった。
- (2) 衝突離反後の要素の運動エネルギーが発散することを防ぐために、反発係数制御法を提案した。この方法により基本モデルよりも約10倍程度の粗い時間刻みにおいても、数値解析の発散現象を抑えることが可能になり、礫群の流下解析も可能である。
- (3) 礫群が一塊となって流下するように、礫群周辺の流速分布をモデル化して与える方法を提案した。この流速モデルにより礫群はひと塊となって流下し、前方に巨礫が集中する様子も再現できる。
- (4) 提案方法で、実験において捕捉出来なかった格子形状および捕捉できた形状のものについてシミュレーションした結果は、そのメカニズムと閉塞過程をよくシミュレーションしており、最終的な捕捉率についても実験の傾向と概ね一致している。

謝辞：本研究において、実験については（財）建設技術研究所小田見氏に、解析については本科学生宮川千尋君にそれぞれ援助を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 笹原克夫：流域一貫した総合的な土砂管理への取り組み、土木学会誌, Vol.86, pp.56-59, 2001.5.
- 2) Mizuyama, T., Ishikawa, Y. : Technical standard for the measures against debris flow (draft), *Technical memorandum of PWRU*, No.2632, pp.48-1988.
- 3) 水野秀明：世界に誇る砂防技術－砂防堰堤－, 土木学会誌, Vol.86, pp.62-64, 2001.7.
- 4) 渡辺正幸, 水山高久, 上原信司：土石流対策砂防施設に関する検討, 砂防学会誌(新砂防), 115号, pp.40-45, 1980.
- 5) 高梨和行, 村岡俊丸, 佐藤義晴：立体格子型鋼製砂防ダムの機能について, 砂防学会誌(新砂防), 148号, pp.4-11, 1987.
- 6) 葛西俊一郎：土石流－新しい土石流対策－, 土と基礎, Vol.49, No.2, pp.49-54, 2001.4.
- 7) 芦田和男, 高橋保：土石流の調節制御に関する研究－立体格子型砂防堰堤の水理機能－, 京都大学防災研究所年報, 第23号B-2, pp.433-441, 1980.
- 8) 鋼製砂防構造物委員会編集：鋼製砂防構造物設計便覧, 平成13年度版, 2001.
- 9) 池谷浩, 上原信司：スリット砂防ダムの土砂調節効果に関する実験的研究, 砂防学会誌(新砂防), Vol.32, No.3, (114号), pp.37-44, 1980.
- 10) 水山高久, 鈴木宏, 及川義朗, 森田明宏：透過型砂防ダムに関する実験的研究, 砂防学会誌(新砂防), Vol.41, No.2, pp.21-25, 1988.
- 11) 水山高久, 小橋澄治, 水野秀明：格子ダムのピーク流量減少率に関する研究, 砂防学会誌(新砂防), Vol.47, No.5(196号), pp.8-13, 1995.
- 12) 水野秀明, 水山高久：上部の格子間隔が狭い格子型砂防ダムに関する研究, 砂防学会誌, Vol.49, No.4(207号), pp.3-8, 1996.
- 13) 山本彰, 山本修一, 鳥井原誠, 平間邦興：砂防ダムに作用する土石流の衝撃力に関する研究, 砂防学会誌, Vol.51, No.2, pp.22-30, 1998.
- 14) 水野秀明, 南哲行, 水山高久：連続して配置した鋼管製砂防ダムによる土石流の捕捉効果に関する研究, 砂防学会誌, Vol.53, No.1, pp.19-25, 2000.
- 15) 例えば, Hakuno, M. and Uchida, Y.: Application of the distinct element method to the numerical analysis of debris flow, *Proc. of JSCE*, No.432/ I -16, pp.31-41, 1991.
- 16) 水野秀明, 水山高久, 南哲行, 倉岡千郎：個別要素法を用いた鋼管製透過型砂防ダムの土石流捕捉効果に関するシミュレーション解析, 砂防学会誌, Vol.52, No.6, pp.4-11, 2000.
- 17) 深和岳人, 香月智, 石川信隆, 山田正：オープン型鋼製砂防ダムの礫捕捉効果に関する個別要素法解析と確率的評価, 土木学会論文集, No.703/ I -59, pp.165-176, 2002.4.
- 18) 例えば, 後藤仁志, Abbas Yeganeh-Bakhtiary, 酒井哲郎：混相流モデルと個別要素法の融合による高濃度掃流層の数値解析, 土木学会論文集, No.649/ II -51, pp.17-26, 2000.
- 19) 橋本晴行, 村上浩史, 平野宗夫, 鳥野清：土石流・乾燥粒子流の流体力に関する研究, 土木学会論文集, No.565/ I -39, pp.85-98, 1997.
- 20) 橋本晴行, 椿東一郎：土石流における逆グレイディング機構, 土木学会論文集, No.336, pp.75-84, 1983.8.
- 21) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究, 京都大学防災研究所報, 20号B-2, pp.405-435, 1977.

(2002. 6. 4 受付)

SIMULATION OF DEBRIS FLOW ENTRAPMENT EFFECT FOR THE OPEN TYPE STEEL CHECK DAM USING 3-DIMENSIONAL DISTINCT ELEMENT METHOD

Gakuto FUKAWA, Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA and Tadashi YAMADA

This paper presents a simulation method of debris flow entrapment behavior of the open type check dam by using the 3-dimensional distinct element method. First, small model experiments are conducted in which various size of gravels flow down and clog in the open space of the framed check dam structure. Second, a cylinder element that put as the frame structures entrapping the large scale granulars is installed in the 3-dimensional distinct element method. Several improvements are also proposed. The simulation results of the proposed method match the experimental results quite well.