

礫の凸凹を考慮した個別要素法による鋼製透過型砂防堰堤の土石流捕捉解析

Trapping analysis of steel open-type Sabo dam against debris flow by DEM representing protrusions of rock

堀口俊行*1 嶋 丈示*2 松原智生*3 舘澤 寛*4
Toshiyuki HORIGUCHI Joji SHIMA Tomoo MATSUBARA Hiroshi TATEZAWA
香月 智*5 石川信隆*6 水山高久*7
Satoshi KATSUKI Nobutaka ISHIKAWA Takahisa MIZUYAMA

Abstract

Recently many steel open-type Sabo dams (hereafter, steel open dams) have been constructed in Japan. These structures consist of steel pipes, and they are designed to allow most soil and small gravel to pass downstream through the gaps. However, if the debris flow has occurred, the steel open dam can capture large rocks. This paper presents experimental and computational approaches to examine the trapping mechanism whereby rocks in a debris flow are captured by a steel open dam. First, a model test was performed by using a flume to examine the mechanism whereby rocks (gravel) in a debris flow are trapped by a steel open dam. Second, a new three-dimensional distinct element method (3-D DEM) was developed in which the rocks were modeled as assembled elements representing natural, irregularly shaped rocks. The assembled elements are consisted of six equally size spherical elements symmetrically arranged in the shape of a regular octahedron. The ratio of protrusions to the diameter of the spherical elements was termed the protruding coefficient β , which was determined by performing the angle of repose test at the site. Third, the proposed 3-D DEM was applied to simulate the trap performance of the model test. Finally, the projected trap performance and shape of sediment by the proposed DEM were compared with the model test result and the DEM using a single spherical element.

Key words: Steel open-type Sabo dam, trap performance, DEM, assembled element, angle of repose

1. 緒言

近年、短時間に1年分の降水量を超える集中豪雨が発生する場合があります、土石流や地すべりが頻発している¹⁾。

5 そのため、我々の生活や財産を守るため砂防堰堤の建設は急務である。その中の一つに写真-1のような鋼製透過型砂防堰堤（以下、透過型という）が建設されている。透過部は、土石流の流下過程において先頭部に集中する巨礫や流木を捕捉することで、閉塞され後続流である土砂全体を捕捉するものである^{2), 3)}。よって、適切に設定された捕捉工間隔により土石流を捕捉することができる。当初、設計において捕捉工間隔は最大礫径（ D_{95} ）の2.0倍が基準であったが、平成19年度の改定により最大礫径（ D_{95} ）の1.5倍を基準となった⁴⁾。しかし、近年では安全性を考慮して最大礫径（ D_{95} ）の1.0倍にまで狭くするように見直されており、適切な間隔を決定する手法が求められている^{5), 6)}。

この捕捉性能については、実験だけではなく解析によって土石流の捕捉や閉塞過程を解明する研究が多くなされている。例えば、Hakuno, Uchidaら⁷⁾は、個別要素法⁸⁾により土石流内の礫の運動を解析的に再現し、水野ら⁹⁾は、2次元解析により土石流捕捉機能を良好に



写真-1 鋼製透過型砂防堰堤による礫の捕捉
Photo 1 Rocks trapped by a steel open type Sabo dam

10 表現できることを示した。さらに、深和ら¹⁰⁾は透過型砂防堰堤の捕捉パターンの不確定な形態を確率的に評価し、解析手法の有用性を検討した。さらに、前田ら¹¹⁾は、流下過程の先頭部の巨礫集中機構に着目し、礫のみが流下する石礫型土石流の流動に関する検討を行い、流れの構造や巨礫が流れの表面に浮き上がるメカニズムについて検討している。また、武蔵ら¹²⁾は崩壊土砂の流動化の再現性において個別要素法の形状を考慮し、球形を2~3個を結合した解析を行い、材料の凹凸が堆積した土塊の形状の影響について言及している。別府ら¹³⁾は、土石流内部の流れの表現を粒子法で行い、個別要素法を用いて礫を剛体要素で表現した連成解析により土石流の適用性を検討している。しかし、多くの研究で礫を

*1 学生会員 防衛大学校理工学研究科後期課程 National Defense Academy, Doctorate Course of Graduate School (debrisregregation@gmail.com) *2 正会員 砂防・地すべり技術センター *3 正会員 (株)建設技術研究所 *4 正会員 榊防災技術コンサルタント *5 正会員 防衛大学校建設環境工学科 *6 正会員 砂防鋼構造物研究会 *7 正会員 政策研究大学院大学

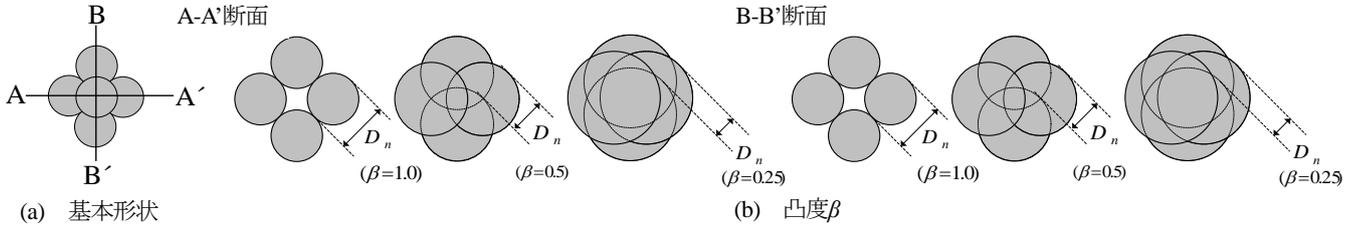


図-1 集合体要素¹⁴⁾

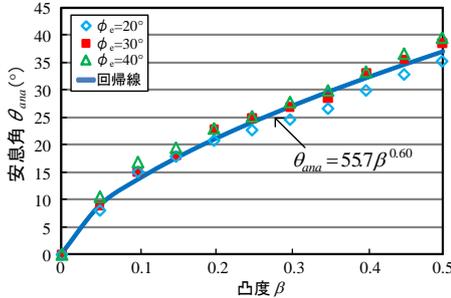


図-2 安息角~凸度beta関係¹⁴⁾

Fig. 2 Relationship between angle of repose and protruding coefficient beta¹⁴⁾

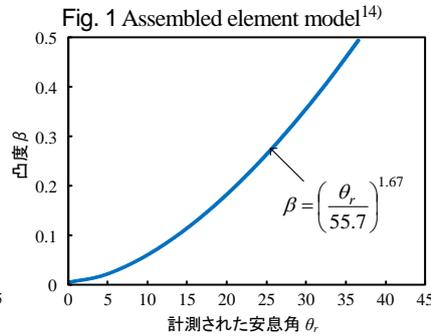


図-3 凸度の推定式¹⁴⁾

Fig. 3 Estimation of protruding coefficient beta¹⁴⁾

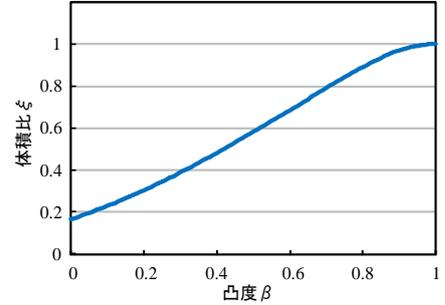


図-4 体積比~凸度beta関係¹⁵⁾

Fig. 4 Relationship between volume ratio and protruding coefficient beta¹⁵⁾

円や球形で表現しており、礫の凸凹が土石流の捕捉過程や流下過程に及ぼす影響については、あまり検討されていない。

一方、著者ら¹⁴⁾⁻¹⁶⁾は、礫モデルを安息角から決定する六等球径対称配列集合体要素 (6 個の球径要素を対称に配列した集合体要素¹⁴⁾ (以下、集合体要素という)) を用いてインターロッキング効果を表現することで、単純せん断実験や大型布団籠実験のせん断抵抗力について検討している。また、流体力を実験から推定した流速分布モデルを用いて、個別要素法によって、土石流の捕捉率と捕捉時間関係の関係を検討してきた^{17),18)}。

そこで本研究は、透過型砂防堰堤による捕捉率と堆積形状について実験で行い、集合体要素を用いた個別要素法を開発し、捕捉率~時間関係および堆積形状の時刻歴状況の再現解析を行う。また、比較のため球形要素で表現したモデルも同時に行い、凹凸を考慮することの有用性について検討するものである。

2. 解析手法

ここでは、6 個の球形要素を任意の形に剛結させた集合体要素を導入する解析手法について示す。一般に、複数の要素を剛結させて 1 個の要素として振舞うものを集合体要素と呼び、集合体要素を構成する個々の球形を構成要素と呼ぶ。解析では、各要素の接触判定および接触力の計算は構成要素を用いて計算し、要素の運動は時々刻々、集合体要素の運動を解くことで、その変位と回転角を求める。

30 2.1 集合体要素

本研究で用いる要素は、図-1 に示す集合体要素を用いる。その基本形状は、図-1 (a), (b) に示すようにお互いに接触した正八面体のような形状である。この基本形状を保ちつつ各構成要素が同程度に相互重複したものを作成すると、その重複程度によって凸凹の度合いが表現できる。重複していない部分が構成要素の直径 D_s に対して、どの程度凸部を形成しているかを表すパラメータとして、次式で表す凸度を用いる。

$$D_n = \beta D_s \tag{1}$$

ここで、 D_n : 非重複領域の長さ、 β : 凸度を表すパラメータ (0.0~0.50)、 D_s : 構成球形要素の直径である。

この凸度に応じて安息角は大きくなり、その関係は図-2 のようになる¹⁴⁾。すなわち、その関係は次式となる。

$$\theta_{ana} = 55.7 \beta^{0.60} \tag{2}$$

ここで、 θ_{ana} : 解析で得られた安息角。

これより、安息角から凸度 β を決定する関係は、図-3 に示すような関数となり次式で表される。

$$\beta = \left(\frac{\theta_r}{55.7} \right)^{1.67} \tag{3}$$

ここで、 θ_r : 計測された安息角。

なお、式(2), (3)について図-3 に示しているように礫材として考えられる要素間摩擦角を 20~40°にして解析を行っても安息角は±3°程度の変化しかしないことも確認している。よって、この式(3)に θ_r を代入して凸度 β を決定する。

集合体要素の単位体積重量 γ を、測定されたものと一致させる必要がある。その際、集合体要素の体積は重複部分の影響を考慮しなければならないが、その関数化は

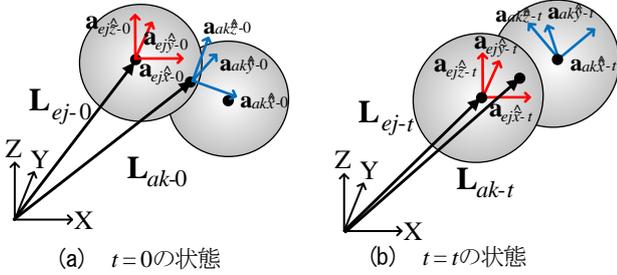


図-5 初期位置と運動後の姿勢ベクトル

Fig. 5 Attitude vectors of initial position ($t=0$) and moving position ($t=t$) of assembled element

困難であるので、モンテカルロシミュレーションを用いて（外接する立方体に一様乱数を発生させて集合体要素の内外を判定する）、立方体内に占有する体積を求めると図-4のようになる。すなわち、

$$V_a = \xi \times (6 \times V_{sp}) \quad (4-a)$$

$$\xi = 1.65\beta^5 + 2.95\beta^4 - 2.10\beta^3 + 1.09\beta^2 + 0.54\beta + 1.66 \quad (4-b)$$

ここで、 V_a ：集合体要素の体積、 ξ ：凸度 β による体積比、 V_{sp} ：一個の球形要素の体積である。

2.2 集合体要素の質量と重心位置

集合体要素の質量および重心位置は、構成要素の情報をもとに、次式により表される。

$$m_{ak} = \sum_{j=1}^{n_{ak}} m_{ej} \quad (5)$$

$$\mathbf{L}_{ak} = \frac{\sum m_{ej} \mathbf{L}_{ej}}{m_{ak}} \quad (6)$$

ここで、 m_{ak} , m_{ej} ：集合体要素 k および構成要素 j の質量、 n_{ak} ：集合体要素 k の構成要素の数、 \mathbf{L}_{ak} , \mathbf{L}_{ej} ：それぞれ集合体要素 k および構成要素 j の重心位置である。

2.3 集合体要素の慣性モーメントと姿勢

集合体要素の状態とは無関係な一般座標系 (X, Y, Z) を設定する。そのうえで、集合体要素の重心位置に一般座標系と平行な局所座標系 ($\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$) と、構成要素の重心位置に同じく平行な局所座標系 ($\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$) を設ける。この座標系を基に構成要素の慣性モーメントは、式(7)、(8)より与えられる。よって、構成要素の座標系における慣性モーメントは次式となる。

$$\tilde{\mathbf{I}}_{ej} = \mathbf{A}_{ej}^T \hat{\mathbf{I}}_{ej} \mathbf{A}_{ej} \quad (7)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{I}}_{ej}$ ：構成要素の重心点回りの慣性モーメント。

また、集合体要素における慣性モーメントは、平行軸の定理より次式によって与えられる。

$$\hat{\mathbf{I}}_{ak} = \sum_{j=1}^{n_{ak}} \tilde{\mathbf{I}}_{ej} + m_{ej} \begin{bmatrix} (\hat{l}_{ejy})^2 + (\hat{l}_{ejz})^2 & -\hat{l}_{ejx}\hat{l}_{ejy} & -\hat{l}_{ejx}\hat{l}_{ejz} \\ -\hat{l}_{ejy}\hat{l}_{ejx} & (\hat{l}_{ejz})^2 + (\hat{l}_{ejx})^2 & -\hat{l}_{ejy}\hat{l}_{ejz} \\ -\hat{l}_{ejz}\hat{l}_{ejx} & -\hat{l}_{ejz}\hat{l}_{ejy} & (\hat{l}_{ejx})^2 + (\hat{l}_{ejy})^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで、 $\hat{l}_{ejx}, \hat{l}_{ejy}, \hat{l}_{ejz}$ ：それぞれ集合体要素座標系における構成要素の位置ベクトル $\hat{\mathbf{L}}_{ej}$ の $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ 軸方向成分である。

この集合体要素の座標系回りの慣性モーメント $\hat{\mathbf{I}}_{ak}$ をヤコビ行列による固有値解析をすると、固有ベクトル $\mathbf{a}_{ak1}, \mathbf{a}_{ak2}, \mathbf{a}_{ak3}$ と、固有値 $\lambda_{ak1}, \lambda_{ak2}, \lambda_{ak3}$ が得られる。この固有ベクトルと固有値は、それぞれ慣性主軸の方向を表す単位ベクトルと、固有ベクトルに対応する主慣性モーメントである。よって、集合体要素座標系（オイラー固有軸）を表す姿勢マトリクスは、次式のように与えられる。

$$\mathbf{A}_{ak} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{ak1}^T \\ \mathbf{a}_{ak2}^T \\ \mathbf{a}_{ak3}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{ak1}^T \\ \mathbf{a}_{ak2}^T \\ \mathbf{a}_{ak3}^T \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (9)$$

また、集合体要素座標系回りの慣性モーメントは、次式で表わされる。

$$\hat{\mathbf{I}}_{ak} = \begin{bmatrix} I_{akx} & 0 \\ 0 & I_{aky} \\ 0 & 0 & I_{akz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{ak1} & 0 \\ 0 & \lambda_{ak2} \\ 0 & 0 & \lambda_{ak3} \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (10)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{I}}_{ak}$ ：集合体要素 k の座標系における慣性モーメントマトリクス、 $I_{akx}, I_{aky}, I_{akz}$ ：それぞれ集合体要素 k の座標系の x, y, z 軸周りの主慣性モーメントである。

ここで、集合体要素の慣性モーメントを求めると、構成要素の慣性モーメントは式(7)によって与えられる。

これより、球形要素を構成要素とする集合体要素は、平行軸の定理から重ね合わせる。よって、要素モデルは球形要素を規則配列していることから、慣性主軸は重心点に対して対称に位置する2つの要素の重心点を通ることになる。

2.4 集合体要素の姿勢の変化と適合条件

本手法では、運動方程式を一般座標系での並進運動と、集合体要素座標系での回転運動について解くものとする。このため、この解を構成要素の運動に変換する適合条件式が必要である。まず、図-5に示すように、解析初期 ($t=0$)における姿勢ベクトルと、時刻(t)における姿勢ベクトルが与えられる。このとき、集合体要素の慣性主軸の回転に伴う変化を次式で表す。

$$\mathbf{A}_{ak-t} = \hat{\mathbf{A}}_{ak-t} \mathbf{A}_{ak-0} \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{A}_{ak-0}, \mathbf{A}_{ak-t}$ ：それぞれ時刻($t=0$)または($t=t$)における集合体要素 k の姿勢マトリクス、 $\hat{\mathbf{A}}_{ak-t}$ ：時刻($t=0$)から($t=t$)間の集合体要素 k の姿勢マトリクスの変化分を表す座標変換マトリクスである。

なお、集合体要素は剛体であるので、次式が成立する。

$$\mathbf{A}_{ej-t} \mathbf{A}_{ak-t}^T = \mathbf{A}_{ej-0} \mathbf{A}_{ak-0}^T = \hat{\mathbf{A}}_{aej} \quad (12)$$



写真-2 直線水路
Photo 2 Straight channel



写真-3 透過型モデル
Photo 3 Open type Sabo dam model

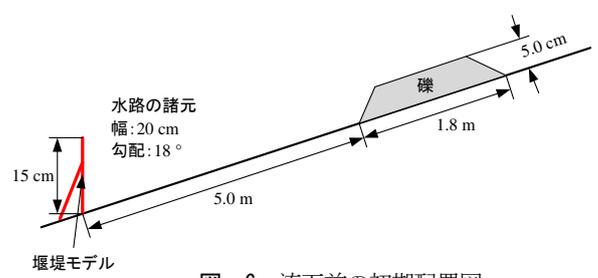


図-6 流下前の初期配置図
Fig. 6 Initial position before flow of gravel

$$\hat{\mathbf{L}}_{ej-t} = \hat{\mathbf{A}}_{ak-t}^T \hat{\mathbf{L}}_{ej-0} \quad (13)$$

ここで、 \mathbf{A}_{ej-0} , \mathbf{A}_{ej-t} : それぞれ時刻($t=0$)または時刻($t=t$)における構成要素 j の姿勢マトリクス, $\hat{\mathbf{A}}_{aej}$: 集合体要素 k の座標系における構成要素 j の姿勢マトリクス,
5 $\hat{\mathbf{L}}_{ej-t}$: 集合体要素座標系における時刻($t=t$)の構成要素 j の重心位置ベクトル, $\hat{\mathbf{L}}_{ej}$: 集合体要素座標系における構成要素 j の重心位置ベクトルであり, $\hat{\mathbf{A}}_{aej}$ と $\hat{\mathbf{L}}_{ej}$ は運動に関わらず不変量である。

よって、構成要素の重心位置ベクトルおよび姿勢マトリクスは次式となる。

$$\mathbf{L}_{ej-t} = \mathbf{L}_{ak-t} + \hat{\mathbf{L}}_{ej-t} \quad (14)$$

$$\mathbf{A}_{ej-t} = \hat{\mathbf{A}}_{aej} \mathbf{A}_{ak-t} \quad (15)$$

ここで、 \mathbf{L}_{ak-t} , \mathbf{L}_{ej-t} : それぞれ時刻(t)における集合体要素 k または構成要素 j の重心位置ベクトルである。

よって、式(14), (15)では、 \mathbf{A}_{ak-t} を更新することにより、他のベクトルおよびマトリクスの更新が可能となる。

2.5 集合体要素の釣合いマトリクス

本解析では、運動方程式を集合体要素の重心点に関して解く。このため、各要素の接触判定および接触力については構成要素を用いて計算を行い、その後、各構成要素の重心点に作用する力を集合体要素の重心点に集成する。この際、構成要素の座標系において構成要素の重心点に作用する力 $\tilde{\mathbf{f}}_{ej}$ と等価な集合体要素の座標系における力 $\hat{\mathbf{f}}_{ak}$ には、次式の関係がある。

$$\hat{\mathbf{f}}_{ak} = \sum_{j=1}^{n_{ak}} \tilde{\mathbf{f}}_{ej} \quad (16)$$

また、それぞれに対応するモーメントに関しては、次式の関係がある。

$$\hat{\mathbf{M}}_{ak} = \sum_{j=1}^{n_{ak}} \tilde{\mathbf{M}}_{ej} + \tilde{\mathbf{f}}_{ej} \times \hat{\mathbf{L}}_{ej-t} = \sum_{j=1}^{n_{ak}} \tilde{\mathbf{M}}_{ej} + \tilde{\mathbf{f}}_{ej} \times \mathbf{A}_{ak-t}^T \hat{\mathbf{L}}_{ej-0} \quad (17)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{M}}_{ej}$: 構成要素座標系において構成要素重心点に作用するモーメント, $\hat{\mathbf{M}}_{ak}$: 構成要素に作用する力およびモーメントと等価な集合体要素座標系における集合体要素重心点でのモーメントである。

2.6 集合体要素の運動方程式

運動方程式は、次のように表される。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}_{ex}(t) \quad (18)$$

これより、ばね力 \mathbf{K} をばね力の重心点の等価力ベクトル \mathbf{f}_K に置き換えると、

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}}(t) + \sum \mathbf{f}_K(\mathbf{u}(t)) = \mathbf{f}_{ex}(t) \quad (19)$$

ここで、 \mathbf{M} : 質量マトリクス, \mathbf{D} : 減衰マトリクス, \mathbf{u} : 変位ベクトル, \mathbf{f}_{ex} : 外力ベクトルの総和, \mathbf{g} : 重力加速度ベクトル, (\cdot) , $(\ddot{\cdot})$: それぞれ時間に関する 1 次微分および 2 次微分である。なお、 \mathbf{f}_{ex} には、文献 17) で示す流速分布によって与えられる流速と個々の礫要素の流速差がもたらす抗力、浮力および自重が含まれている。

次に、要素間ばねに並行して設置したダッシュポットにより生じる力は、重心点の等価力ベクトル \mathbf{f}_D によって表されるものとする。よって、式(19)は次のように表すことができる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \left\{ \sum \mathbf{f}_D(\dot{\mathbf{u}}(t)) + \sum \mathbf{f}_K(\mathbf{u}(t)) \right\} = \mathbf{f}_{ex}(t) \quad (20)$$

式(20)の運動方程式は、時間に対して中心差分法を用いて解く。ただし、速度に対しては、陰解法を避けるために後進差分法を用いた。

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t+\Delta t) - 2\mathbf{u}(t) + \mathbf{u}(t-\Delta t)}{\Delta t^2} \quad (21)$$

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (22)$$

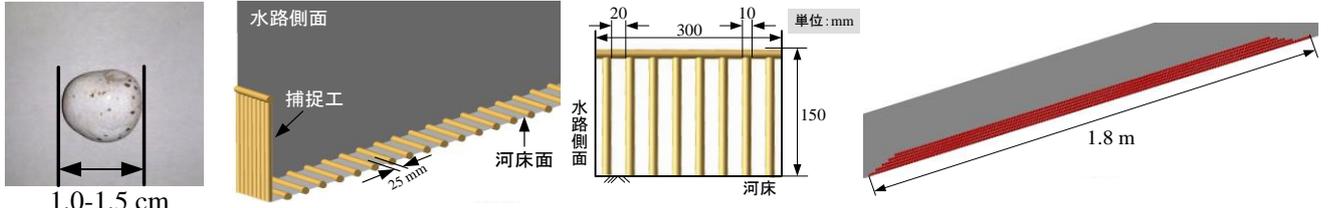
式(21), (22)を式(20)に代入して整理することにより、時間($t+\Delta t$)における変位 $\mathbf{u}(t+\Delta t)$ は、次式により求められる。

$$\mathbf{u}(t+\Delta t) = \mathbf{M}^{-1} \left\{ \mathbf{f}_{ex}(t) - \sum \mathbf{f}_D(\dot{\mathbf{u}}(t)) - \sum \mathbf{f}_K(\mathbf{u}(t)) \right\} \Delta t^2 + 2\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t-\Delta t) \quad (23)$$

3. 実験概要

3.1 実験内容

実験は、写真-2 に示す直線水路を用いた。水路は、



(a) 水路モデル (b) 堰堤モデル (c) 礫モデルの配置図

図-7 解析モデル
Fig. 7 Computational model

写真-4 供試体
Photo 4 Specimen of gravel

弁基本値

Table 1 Input data

項目		値	
水路	勾配 θ	18°	
	長さ (水路長)	8.0 m	
	幅	0.2 m	
	底面粗度 (円柱形要素)	208	
流水	初期流速 u_0	1.52 m/s	
	初期水深 h_0	10 mm	
	抗力係数 C_D	0.49	
要素	要素数	球(集合体) 7760(46560)	
	密度 ρ	2600 kg/m ³	
要素間ばね	ばね定数	法線方向 K_n	1.0×10 ⁶ N/m
		接線方向 K_s	3.5×10 ⁵ N/m
	減衰定数 h	0.2	
	粘着力 c	0 N	
	要素間摩擦角 $\tan\phi$	0.557	
計算条件	時間刻み Δt	1.0×10 ⁻⁶ s	

流路長 8 m, 流路幅 20 cm であり, 勾配 18° である. 写真-3 に示す透過型は, $D_{95} \times 1.5$ 倍とし, 10 mm の円柱を並べて捕捉工間隔 20 mm とした. その堰堤を水路に固定し, 上流側に 5.0 m 離れた位置に礫材を敷き並べた. 写真-4 に示す玉砂利は, 礫径 1.0~1.5 cm であり, 7760 個を礫の敷き厚さ 5.0 cm, 1.8 m にして並べている. 図-6 には, 水路全体の流下前の初期配置図を示している. なお, 供試体と水を混合して土石流を発生させるために, 後方から流量 $Q=3.0$ L/s で流した. 水路は, 粒径 1~10 mm 程度の砂礫を敷き詰めることで河床粗度を表現した.

3.2 実験結果

詳細な実験結果は, 解析結果とともに後述するため, ここでは要約を記す.

(1) 礫捕捉の堆積状況については, 計算結果との比較のため図-8 および図-9 に記述した. 捕捉された礫塊は堰堤から 60 cm 程度上流まで堆積している.

(2) 流出した礫の個数は 109 個であり, 一旦捕捉し始めた後は流出しなかった. 捕捉率は, 98.6 % であり, 計算結果との比較のため表-2 に示している.

4. 個別要素法解析

4.1 解析モデル

図-7(a)に, 捕捉工周りの計算モデルを示す. まず,

図-7(b)に示している捕捉工は, 直径 10 mm, 高さ 150 mm の円柱形要素 8 本を 20 mm 間隔として河床面に対して垂直に配置した. 図-7(c)に, 堰堤から 5.0 m 離れた位置に敷き並べた礫要素を示している. 実験と同様に, 1.8 m, 高さ 5.0 cm になるように敷き並べた. 次に, 実験の水路では, 粒径 1~10 mm 程度の砂礫を敷き詰めているが, そのまま再現するのは困難であるので, 足立ら¹⁸⁾ が用いた底面粗度を参考に, マニングの粗度係数と比較し, 砂粒粗度の抵抗特性に近いものとした. よって, 粗度高さ k は, 敷き詰めた砂礫の平均粒径とすることで 5 mm とし, 粗度間隔 $s=25$ mm とした.

4.2 集合体要素の決定

提案した六等球形対称配列の集合体要素は, 実際に使用した礫の安息角によって凸度 β を決定した¹⁴⁾⁻¹⁶⁾. そのため, 使用した礫を平らな面に落下法により流し込み安息角を計測した. これを表-2 のように計 5 回行い, その平均を求めて安息角 34° とした. 写真-5 に, 安息角の最終形状を示す. これを式(3)に代入すると, $\beta = 0.44$ となった. 以後, 集合体要素の凸度としてこの値を用いた.

4.3 解析基本値

表-1 に解析基本値を示す. 水路諸元および要素の条件については実験と同条件とし, 初期流速 U_0 や初期水深 H_0 についても実験における流速, 水深を用いた. 抗力係数については, 概ね $Re=1.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^5$ の範囲で, $C_D=1.0$ が得られていることから, $C_D=1.0$ を用いることとした. 法線方向ばね定数 K_n は, 実験で用いた礫の物理的性質を表現することが望ましいが, 解析時間が過大になるため $\Delta t = 1 \times 10^{-6}$ s に対して発散せずに安定して解析可能な値を採用した ($K_n = 1.0 \times 10^6$ (N/m))¹⁵⁾⁻¹⁸⁾. また, 接線方向ばね定数 K_s は, 個別要素法におけるばね定数は, 1 次元の波動論による近似法から, 弾性波の伝播速度を用いて簡易に試算できる²⁰⁾. したがって, 接線方向ばね定数 K_s と法線方向ばね定数 K_n の比 K_s/K_n は, 次式のようにポアソン比のみによって表すことができる.

表-3 捕捉率と流出率

Table 3 Trap ratio and outflow ratio

R (cm)	捕捉率		流出数		備考
	球形	集合体	球形	集合体	
1.0	0.84	0.96	1226	261	実験結果 捕捉率 0.98 流出数 109
1.1	0.90	0.97	713	196	
1.2	0.96	0.98	291	91	
1.3	0.96		266		
1.4	0.97		206		
1.5	0.97		201		
平均					

表-2 安息角の結果

Table 2 Angle of repose results

回数	角度
1	33.6°
2	33.4°
3	34.7°
4	34.8°
5	34.3°
平均	34.2°

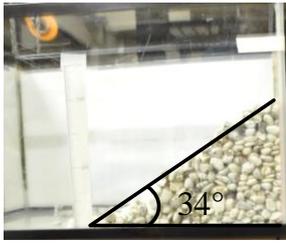
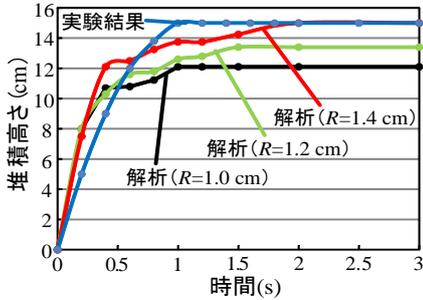
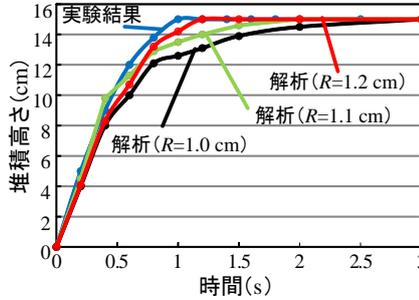


写真-5 安息角実験
Photo 5 Angle of repose



(a) 球形要素の場合



(b) 集合体要素の場合

図-8 堆積高さ～時間関係

Fig.8 Relationship between sediment height and time

$$\frac{K_s}{K_n} = \frac{G}{\lambda + 2G} = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \quad (24)$$

一般に礫材のポアソン比は、0.23 とされていることから、式(29)より $K_s/K_n = 0.35$ として、法線方向ばね定数 K_n を基準として $K_s = 3.5 \times 10^5 (N/m)$ を算定した。要素間のばねの減衰については、実験に用いた割栗石を 100 cm の高さから床面に落下させ、落下回数によるばらつきを平均化して得られた反発係数 $h = 0.2$ を用いた。また、粘着力および摩擦角は、実験の礫材に用いた材料をもとに $C = 0 (N)$, $\tan \phi = 0.557$ とした。

4.4 解析結果

解析では、要素モデルを単一粒径として、球形要素の場合は、直径を 1.0~1.5 cm の 6 ケース、集合体要素では要素モデルの外接円の直径を 1.0~1.2 cm の 3 のケースを行った。

4.4.1 捕捉率と流出率

表-3 に、各要素モデルの捕捉率と流出数の計算結果を示す。ここで、捕捉率は全体の要素数から流出数を差し引いて全体要素数で除したものであり、流出数は、堰堤に捕捉されなかった要素の数である。まず、球形要素の場合、直径 $R = 1.0-1.1$ cm の捕捉率は、あまり実験と合わないが、 $R = 1.4-1.5$ cm において実験の捕捉率に近くなった。一方、集合体要素では、 $R = 1.0$ cm から捕捉率は実験値に近い結果となり、 $R = 1.2$ cm になると実験値とほぼ同じ結果となった。特に、球形要素と集合体要素では流出数に大きな差が出ており、集合体要素の方が再

現できている。この理由は、集合体要素の場合において要素径が実験で使用した礫の平均粒径と同等であり、集合体要素の凸凹が礫の複雑な絡み合いを表現できているためと考えられる。

4.4.2 堆積高さ～時間関係

図-8 に堆積高さ～時間関係を示す。まず、 $t = 0.0$ s は土石流の先頭部が堰堤に到達した時である。図-8(a) の球形要素の場合は、 $t = 0.5 \sim 1.0$ s におけるの堆積過程が実験と比べて早く堆積し、堆積高さが実験の高さに到達するまでに遅れており再現できていない。最も近いもので $R = 1.4$ cm における場合でも、1.0 s 程度遅れて堆積高さが実験と同じ高さになっている。一方、図-8(b) の集合体要素の場合は、時間のずれもなく堆積過程がほぼ再現できており、 $R = 1.2$ cm においては、堆積が最も高くなる過程においても再現できている。これは、捕捉過程において実験との流れる景況を再現できていると考えられる。

4.4.3 礫の堆積形状

図-9 は、最終的に捕捉された礫の堆積形状を実験結果と計算結果を示したものである。この堆積形状は、外形を堰堤から x 軸方向に 3 cm 毎高さを測定したものである。まず、球形要素の形状は明らかに実際の堆積塊よりも大きく、過剰に堆積長さを大きくし過ぎている。一方、集合体要素は、全体として実験の堆積形状に近い結果となっている。これにより、安息角を用いて決定した集合体要素の手法が、捕捉解析において適用可能であることがわかる。

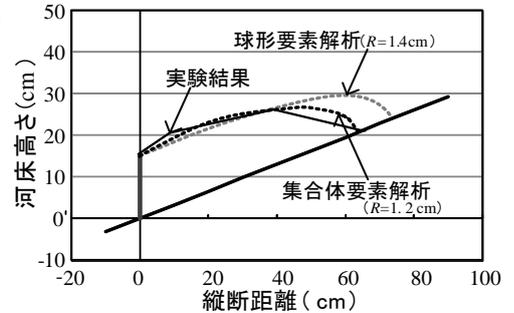


図-9 最終の礫捕捉形状

Fig.9 Final trap shape

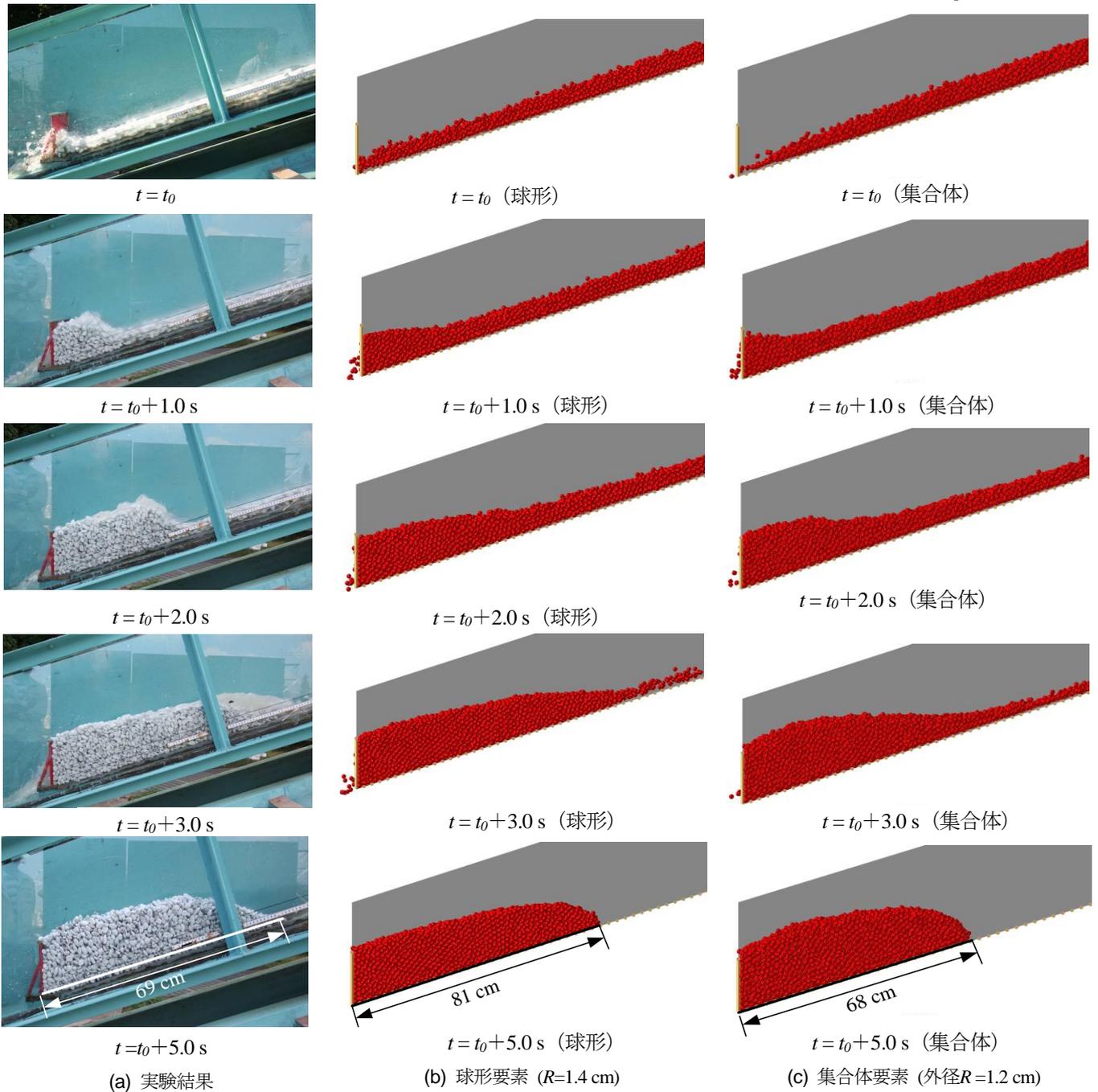


図-10 礫捕捉の堆積状況の実験と計算との比較

Fig.10 Comparison between test and computations of trapping process of gravels

4.4 礫捕捉の堆積過程

図-10 に礫捕捉の堆積過程を(a) 実験, (b) 球形要素, (c) 集合体要素の場合について示した。

図-10(a)に、実験における礫の流下状況の時刻歴を示す。図-10(a)は、 $t = t_0$ で、礫の先頭が捕捉工に到達した時である。 $t = t_0+1.0$ sでは、最初捕捉された礫が透過部を閉塞し、後続流の土石流を捕捉している。その時の流速は、1.52 m/sであった。 $t = t_0+2.0$ sでは、さらに捕捉された礫塊を乗り越えて堆積し、捕捉工高さまで到達している。また、後続流の流水が堆積した礫を乗り越えるように流れている様子がわかる。 $t = t_0+3.0$ sでは、上流側から流れている土石流を完全に止め堆積している。徐々に堆積塊が大きくなり、上流側の流水があたる部分

は、水中安息角のようななだらかな傾斜を有している。

$t = t_0+5.0$ sでは、完全に礫が流れたことを確認し、水を止めた様子である。堆積した礫材は、安息角を形成し捕捉されていることがわかる。

図-10(b), (c)には、球形要素の $R = 1.4$ cm と集合体要素の $R = 1.2$ cm についての礫捕捉の堆積状況をそれぞれ示している。堆積状況は、いずれの結果においても再現できている。しかし、 $t = t_0+2.0$ sからの堆積高さが高くなる過程では、集合体要素の方が実験に近いことがわかる。最終的な堆積形状は、水中安息角のような鋭角な傾斜ではなく、丸みを帯びたものとなっているが、図-9に示したように球形要素と比較すると集合体要素の方が実験の堆積した体積量に近く、停止した堆積位置や

堆積塊の後端にいたる体積高さも実験に近いことがわかる。これにより、捕捉後の堆積形状も礫の凹凸を考慮した集合体要素の方が再現できている。

5 5. 結論

本研究は、礫の凸凹を考慮した個別要素法を提案し、透過型砂防堰堤による礫捕捉のモデル実験をシミュレーションしたものである。以下に、その成果を示す。

- 10 (1) 現地の礫を用いて安息角を求めてから要素形状を決定
した集合体要素モデルを用いることで、礫の捕捉形態を
シミュレーションできることを示した。
- 15 (2) 球形要素の解析では、礫径を大きくすることにより実
験の捕捉率を再現可能であるが、堆積過程や最終堆積形
状は実際の捕捉形態とは異なった。
- (3) 集合体要素の解析では、本来の礫径の平均粒径で実験
を再現できているが、礫の捕捉率、堆積高さ～時間関係、
堆積過程および最終堆積形状とも実験を再現することが
できた。
- 20 (4) 今後、現地の混合粒径の土石流に対しても、上流にあ
る礫の安息角をバックフォー等で行い¹⁶⁾、礫の凸度を判
定して集合体要素の形状を決めて、鋼製透過型堰堤による
礫捕捉状況の推定が可能となり、さらに検討を進めてい
く予定である。

25

参考文献

- 1) 一般社団法人 砂防・地すべり技術センター：土砂災
害の実態 平成 24 年度版, pp.1-31, 2013.7.
- 30 2) 田畑茂清, 守山浩史：鋼製透過型えん堤工法・設計
法の変遷と課題, 砂防学会誌, Vol.64, No.6, pp.47-51,
2010.3.
- 3) 守山浩史, 国領ひろし, 山口聖勝, 井上隆太, 嶋丈示,
阿蘇周辺の鋼製透過型砂防堰堤の土石流捕捉状況調査,
35 平成 25 年度砂防学会概要集, pp.B-168-169, 2012.5.
- 4) 国土交通省 砂防部：「砂防基本計画策定指針（土石
流・流木対策編）及び同解説」「土石流・流木対策設計
技術指針及び同解説」, (社)全国治水砂防協会, pp.81,
2009.11.
- 40 5) 嶋丈示, 川村崇成, 松井宗広, 水山高久：礫径調査
における最大礫径の設定に関する一考察, 平成 23 年度
砂防学会概要集, pp.256-257. 2011.6.
- 6) 砂防・地すべり技術センター鋼製砂防構造物委員会：
平成 21 年版 鋼製砂防構造物設計便覧, 2010.9.
- 45 7) M.Hakuno, Y.Uchida: Application of the Distinct Element

Method to The Numerical Analysis of Debris Flow, Proc. of
JSCE, No.432/I-16, pp.31-41, 1991.7.

- 8) Cundall, P.A. and Strack O. D. L. : A discrete model for
granular assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65,
50 1979.
- 9) 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, 2000.3.
- 10) 深川岳人, 香月智, 石川信隆, 山田正：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, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.97-112, 2003.7.
- 11) 前田健一, 舘井恵, 酒井哲郎：個別要素法を用いた
粒子流れの構造と大粒径の浮き上がりのマイクロメカニ
クス, 砂防学会誌, Vol.64, No.4, pp.3-14, 2011.11.
- 12) 武蔵由育, 山崎美穂, 水山高久, 小杉賢一郎：崩壊
土砂の運動のシミュレーション手法に関する研究, 砂防学会
誌, Vol.64, No.3, pp.37-45, 2011.9.
- 13) 別府万寿博, 井上隆太, 石川信隆, 長谷川祐治, 水山高
久：修正 MPS 法による土石流段波モデルのシミュレーション
解析, 砂防学会誌, Vol.63, No.6, pp.32-42, 2011.3.
- 14) 堀口俊行, 澁谷一, 香月智, 田附正文：集合体要素の形状
特性が安息角に及ぼす影響に関する解析的検討, 構造工学論
文集, Vol.57A, pp.136-146, 2011.3.
- 70 15) 堀口俊行, 澁谷一, 香月智：集合体要素を用いた礫中詰材
の単純せん断抵抗力解析, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.104-
117, 2012.3.
- 16) 堀口俊行, 香月智, 田附正文：集合体要素を用いた個別要
素法による柔性鋼製枠堰堤の抵抗力推定法, 構造工学論文集,
75 Vol.59A, pp.208-220, 2013.3.
- 17) 澁谷一, 堀口俊行, 香月智, 大隅久, 石川信隆：円柱形集
合体要素を用いた個別要素法による根付き流木の捕捉シミュ
レーション, 土木学会論文集 A2(応用力学)特集号, Vol.67,
No.2, pp.I_323-I_334, 2011.8.
- 80 18) 香月智, 澁谷一, 大隅久, 國領ひろし, 石川信隆：個別要
素法による透過型砂防堰堤の流木混じり土石流捕捉解析, 土
木学会論文集 A2(応用力学), Vol.69, No.1, pp.16-29, 2011.8.
- 19) 足立昭平：人工粗度の実験的研究 — 棧型粗度と溝型粗度
—, 京都大学防災研究年報, Vol.4, pp.185-193, 1961.3.
- 85 20) 伯野元彦：破壊のシミュレーション — 拡張個別要素法で
破壊を追う —, 森北出版, pp.40-53, 1997.10.