

粘性抵抗を考慮した不連続変形法による落石衝撃解析

Impact analysis of rock fall with Discontinuous Deformation Analysis introduced viscous resistance

小池 明夫*, 三上 隆**
Akio KOIKE, Takashi MIKAMI

*北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

**工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Estimation of impact load is so important for reasonable design of Rock-Shed that many experimental studies on impact load have been carried out. The most of their theoretical approaches for estimating impact load assume continuous elasticity in sand layer. The authors applied Discontinuous Deformation Analysis to the sand layer that consists of elastic circular elements. Furthermore, viscous resistance between elements was introduced. As a result, damping due to the propagation of stress wave can be represented. This method is adopted for practical estimation of impact load by colliding rock with sand layer under various conditions. The calculation results show good coincidence with experimental results and it can be seen that the proposed method is useful for impact analysis.

Key Words: DDA, impact analysis, rock fall

1. はじめに

ロックシェッドに作用する落石衝撃荷重の算定は、構造物の合理的な設計をする上で非常に重要であり、これまで多くの研究が行われてきた。代表的な研究に、重錘を実際に敷砂に落下させて衝撃力を測定した実験研究¹⁾がある。衝撃力を理論的なアプローチから求める研究も行われているが、敷砂を連続体として取り扱っている例がほとんどである。連続体解析では、落石衝突時の砂の飛散など粒子移動を考慮することができない。そこで、離散体解析手法のひとつである不連続変形法²⁾を落石の衝撃解析に適用することを試みた。

不連続変形法は Shi により開発された手法で、これまで主に岩盤工学の分野で適用され³⁾、岩盤崩落過程の解析⁴⁾などが行われている。従来の不連続変形法では要素形状は多角形であったが、筆者らは不連続変形法を拡張し2次元問題において円形弾性体要素を扱えるようにした⁵⁾。本研究ではさらに、この拡張不連続変形法に要素接触時の粘性抵抗を新たに取り入れた。これにより、応力波が減衰しながら伝播することを表現できる。そこで、落石、敷砂緩衝材を離散体としてモデル化し、様々な条件のもとで数値解析を行うことにより、本手法の落石衝撃解析への適用性を検討した。

2. 拡張不連続変形法

2.1 円形弾性体要素の変形

時間ステップあたりの変形が微小で、要素は相似変形すると仮定すると、自然状態で半径 r_i である要素 i 内の任意の点 (x, y) における変位 (u, v) は次式で表される (図-1)。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{-(y-y_0)}{l} & \frac{(x-x_0)}{l} \\ 0 & 1 & \frac{(x-x_0)}{l} & \frac{(y-y_0)}{l} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_i \\ \Delta v_i \\ l\Delta\phi_i \\ l\Delta\epsilon_i \end{pmatrix} = [T_i][D_i] \quad (1)$$

ここに、 (x_0, y_0) は要素の中心座標、 l は代表長さ、 Δu_i は x 方向変位増分、 Δv_i は y 方向変位増分、 $\Delta\phi_i$ は回転角増分、 $\Delta\epsilon_i$ はひずみ増分であり、 $[T_i]$ は 2×4 の要素変形マトリクス、 $[D_i]$ はこれら4つの変位増分からなる 4×1 の未知数マトリクスを表す。

この相似変形の仮定は、円形要素の変形を厳密に定式化しているとはいえないが、第1次的な近似解を与えるものとして評価できる。円形弾性要素が相似変形する場合、応力とひずみは要素内で一様でせん断成分はゼロとなる。平面応力状態の応力とひずみの関係を次式に示す。

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_\theta = \sigma, \tau_{r\theta} = 0 \\ \epsilon_r &= \epsilon_\theta = \epsilon, \gamma_{r\theta} = 0 \\ \sigma &= \frac{E}{1-\nu} \epsilon \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 E は要素のヤング率、 ν は要素のポアソン比である。

2.2 連立平衡方程式

解析対象が n 個の要素で構成されている場合、連立平衡方程式は次式で表される。

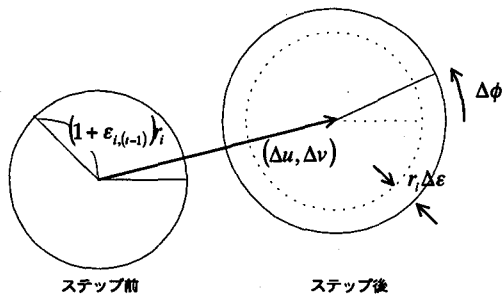


図-1 ステップ間の変位

$$\begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここに、 K_{ij} は 4×4 の係数マトリクス、 F_i は 4×1 の荷重マトリクスを表す($1 \leq i, j \leq n$)。これらの平衡式は、外力やひずみによるポテンシャルエネルギーを未知数で最小化することによって導かれる。

不連続変形法では、ステップ初期の変位 $[D_{i(t-1)}]$ と変位速度 $[V_{i(t-1)}]$ から係数マトリクスと荷重マトリクスが決定され、時間ステップごとに式(3)を解くことによりステップ間の変位増分 $[D_i]$ が求まる。ここで、変位速度 $[V_{i(t-1)}]$ は

$$[V_{i(t-1)}] = \frac{\partial [D_{i(t-1)}]}{\partial t} \quad (4)$$

である。時間ステップ間隔を Δt とすると、ステップ間の変位増分 $[D_i]$ はテーラー展開を2階の導関数で打ち切ると、

$$[D_i] \approx \Delta t \cdot [V_{i(t-1)}] + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{\partial^2 [D_{i(t-1)}]}{\partial t^2} \quad (5)$$

と表される。ステップ後の変位 $[D_{i(t)}]$ と変位速度 $[V_{i(t)}]$ は時間積分によって次式のように求められる。

$$\begin{aligned} [D_{i(t)}] &= [D_{i(t-1)}] + [D_i] \\ [V_{i(t)}] &= \frac{\partial^2 [D_{i(t-1)}]}{\partial t^2} \Delta t + [V_{i(t-1)}] \\ &\quad - \frac{2}{\Delta t} [D_i] - [V_{i(t-1)}] \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 ポテンシャルエネルギー

ポテンシャルエネルギーの種類は大きく3つに分類される。1つめは弾性ひずみによるもの、2つめは外力によるもの(集中荷重、体積力)、3つめは運動制限によるもの(慣性力、変位拘束、接触)である。連立平衡方程式はポテンシャルエネルギーを未知数で偏微分して得られるマトリクスを係数マトリクスに重ね合わせることによって作られる。以下に、それぞれのポテンシャルエネルギーを示す。ただし、接触については次節で説明する。

(1) 弾性ポテンシャルエネルギー

要素 i における弾性ひずみによるポテンシャルエネルギー Π_e は次式で表される。

$$\Pi_e = \iint_A \frac{1}{2} (\sigma_r \varepsilon_r + \sigma_\theta \varepsilon_\theta + \tau_{r\theta} r_{,\theta}) d\theta dr \quad (7)$$

ここに、 A は要素 i の領域である。(2)式と(6)式の関係から、 Π_e はステップ初期のひずみ $\varepsilon_{(t-1)}$ とステップ間ひずみ増分 $\Delta \varepsilon$ により次式で表される。

$$\Pi_e = \pi r_i^2 \frac{E}{1-\nu} (\varepsilon_{(t-1)} + \Delta \varepsilon)^2 \quad (8)$$

(2) 集中荷重ポテンシャルエネルギー

要素 i 上の点 (x_i, y_i) に集中荷重 (F_x, F_y) が作用しているとき、点 (x_i, y_i) における変位を (u_i, v_i) とすると、集中荷重によるポテンシャルエネルギー Π_f は次式で表される。

$$\Pi_f = -(F_x u_i + F_y v_i) = -[D_i]^T [T_i(x_i, y_i)]^T \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} \quad (9)$$

(3) 体積力ポテンシャルエネルギー

要素 i に一樣な体積力 (f_x, f_y) が作用しているとき、体積力によるポテンシャルエネルギー Π_w は次式で表される。

$$\Pi_w = -\iint_A (f_x u + f_y v) d\theta dr = -[D_i]^T \begin{pmatrix} \pi r_i^2 f_x \\ \pi r_i^2 f_y \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

(4) 慣性力ポテンシャルエネルギー

要素 i の単位面積当りの質量を M とすると、単位面積当りの慣性力 (f_x, f_y) は次式で表される。

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = -M \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \end{pmatrix} \quad (11)$$

要素 i の慣性力によるポテンシャルエネルギー Π_i は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Pi_i &= -\iint_A (f_x u + f_y v) d\theta dr \\ &= M [D_i]^T \cdot \iint_A [T_i] [T_i] d\theta dr \cdot \frac{\partial^2 [D_{i(t-1)}]}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (12)$$

(5) 変位拘束ポテンシャルエネルギー

変位を拘束する場合、拘束点に剛性の高いバネを作用させ変位の拘束を行う。要素 i 上の点 (x_i, y_i) にバネ定数 k_f の固定バネが x 方向と y 方向両方に作用しているとき、点 (x_i, y_i) における変位を (u_i, v_i) とすると、固定バネの力 (f_x, f_y) は次式で表される。

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = -k_f \begin{pmatrix} u_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

この変位拘束によるポテンシャルエネルギー Π_m は、固定バネに蓄えられたエネルギーであり次式で表される。

$$\begin{aligned} \Pi_m &= \frac{k_f}{2} (u_1^2 + v_1^2) \\ &= \frac{k_f}{2} [D_i] [T_i(x_1, y_1)] [T_i(x_1, y_1)] [D_i] \end{aligned} \quad (14)$$

2.4 要素の接触

要素どうしが接触した場合、垂直方向には貫入量に比例した接触力と相対速度に比例した粘性抵抗抗力、せん断方向にはすべりによる摩擦力が作用すると仮定する。以下にそれぞれの場合についてポテンシャルエネルギーを示す。

(1) 垂直接触力

要素 i と要素 j が貫入しているとき(図-2)、貫入量 δ_n は次式で表される。

$$\begin{aligned} \delta_n &= \cos \alpha \cdot (\Delta u_i - \Delta u_j) + \sin \alpha \cdot (\Delta v_i - \Delta v_j) \\ &\quad + (1 + \varepsilon_{i,(t-1)}) \Delta \varepsilon_i \cdot r_i + (1 + \varepsilon_{j,(t-1)}) \Delta \varepsilon_j \cdot r_j - L_{ij} \\ &\quad - ((1 + \varepsilon_{i,(t-1)}) r_i + (1 + \varepsilon_{j,(t-1)}) r_j - L_{ij}) \\ &\quad + \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & \frac{r_i}{l} \end{pmatrix} [D_i] \\ &\quad + \begin{pmatrix} -\cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & \frac{r_j}{l} \end{pmatrix} [D_j] \\ &\quad - \delta_0 + [E_i] [D_i] + [E_j] [D_j] \end{aligned} \quad (15)$$

ここに、 α は要素 i の中心座標から要素 j の中心座標へのベクトルと x 軸がなす角、 L_{ij} はそのベクトルの長さである。

この貫入量 δ_n がステップ初期においてゼロ以上となったとき、バネ定数 k_p の接触バネを挿入する。垂直接触によるポテンシャルエネルギー Π_k は接触バネに蓄えられたエネルギーであり、次式で表される。

$$\Pi_k = \frac{k_p}{2} \delta_n^2 \quad (16)$$

(2) せん断摩擦力

要素どうしが接触した場合、垂直方向だけではなくせん断方向にも接触力が作用する。要素 i と要素 j が図-2のように接触しているとき、せん断移動量 δ_s (右ずれを正にとる)は次式で表される。

$$\begin{aligned} \delta_s &= -\sin \alpha \cdot (u_i - u_j) + \cos \alpha \cdot (v_i - v_j) \\ &\quad + (1 + \varepsilon_{i,(t-1)}) \Delta \varepsilon_i \cdot \Delta \phi_i + (1 + \varepsilon_{j,(t-1)}) \Delta \varepsilon_j \cdot \Delta \phi_j \\ &\quad - \begin{pmatrix} -\sin \alpha & \cos \alpha & \frac{r_i}{l} (1 + \varepsilon_{i,(t-1)}) & 0 \end{pmatrix} [D_i] \\ &\quad + \begin{pmatrix} \sin \alpha & -\cos \alpha & \frac{r_j}{l} (1 + \varepsilon_{j,(t-1)}) & 0 \end{pmatrix} [D_j] \end{aligned}$$

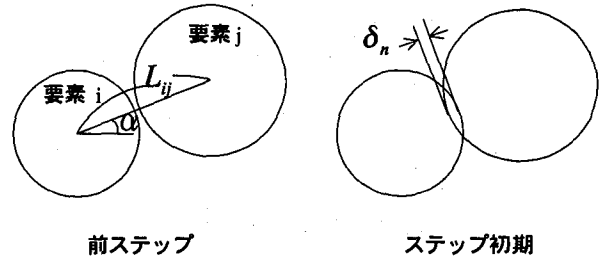


図-2 要素の貫入

$$- [G_i] [D_i] + [G_j] [D_j] \quad (17)$$

ただし、 $\Delta \phi_i, \Delta \varepsilon_i$ 、 $\Delta \phi_j, \Delta \varepsilon_j$ は高次の微小量として無視した。

せん断接触中の要素の状態は、すべりを起こすか固定されるかのどちらかである。

まず、すべり状態について考察する。貫入量 δ_n で接触している点には、Coulomb則に従う摩擦力が作用する。と考える、摩擦係数を μ としたとき、貫入量 δ_n となるまでに作用する平均摩擦力 f_s は次式で表される。

$$f_s = -\text{sgn}(\delta_n) \frac{\mu}{2} k_p \delta_n = -f_0 \delta_n \quad (18)$$

ここで、 sgn は符号化関数であり、摩擦力はせん断移動量の向きと反対に作用する。

この平均摩擦力によるポテンシャルエネルギー Π_s は次式となる。

$$\Pi_s = -f_s \delta_s = f_0 \delta_n \delta_s \quad (19)$$

次に、すべりを起こさずにせん断方向に固定される場合を考察する。バネ定数 k_s の剛性の高いせん断固定バネで固定されたと考える。すべりが発生せずに固定されるときは次式となる。

$$|f_s| \geq |k_s \delta_s| \quad (20)$$

このとき、せん断固定によるポテンシャルエネルギー Π_l は次式となる。

$$\Pi_l = \frac{k_s}{2} \delta_s^2 \quad (21)$$

(3) 粘性抵抗抗力

要素どうしが接触している場合、重心の相対速度に比例した粘性抵抗抗力が作用すると仮定する。要素 i と要素 j が貫入しているとき、ステップ間における相対変位 u_n は次式で表される。

$$\begin{aligned} u_n &= \cos \alpha \cdot (\Delta u_i - \Delta u_j) + \sin \alpha \cdot (\Delta v_i - \Delta v_j) \\ &\quad - \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \end{pmatrix} [D_i] \\ &\quad + \begin{pmatrix} -\cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \end{pmatrix} [D_j] \\ &\quad - [E_i] [D_i] + [E_j] [D_j] \end{aligned} \quad (22)$$

粘性係数を η としたとき粘性抵抗抗力 f_η は次式となる。

$$f_\eta = -\eta \frac{u_n}{\Delta t} \quad (23)$$

表-1 解析モデル一覧

	敷砂粒子配列	敷砂厚(cm)	敷砂要素数
モデル①	格子状	90.0	360
モデル②	最密	87.9	395
モデル③	格子状	120.0	480
モデル④	最密	122.6	513

表-2 衝撃解析パラメーター一覧

	落石要素	敷砂要素	覆工要素
単位体積重量(tf/m ³)	2.0	1.8	2.5
ヤング率(tf/m ²)	1000000	10000	3000000
ポアソン比	0.25	0.35	0.20
摩擦係数	0.5		
接触バネ定数(tf/m)	1.0×10 ⁴		
ステップ間隔(sec)	1.0×10 ⁻⁴		
固定バネ定数(tf/m)	1.0×10 ⁶		

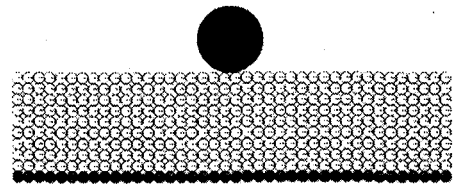
この粘性抵抗力によるポテンシャルエネルギー Π_η は次式で表される。

$$\Pi = -f_\eta \cdot u_n = \eta \frac{u_n}{\Delta t} \cdot u_n \quad (24)$$

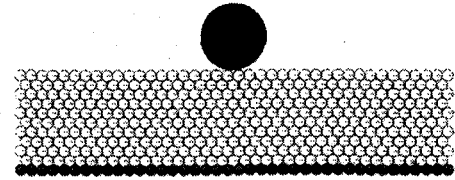
3. 落石衝撃解析

3.1 解析モデル

直径0.6mの落石がコンクリート覆工上の敷砂緩衝材に衝突する解析を行った。敷砂を直径0.1mの円形弾性体要素としてモデル化し、要素の配列については格子状配列と最密配列の場合について、敷砂厚については約0.9m



a) モデル①



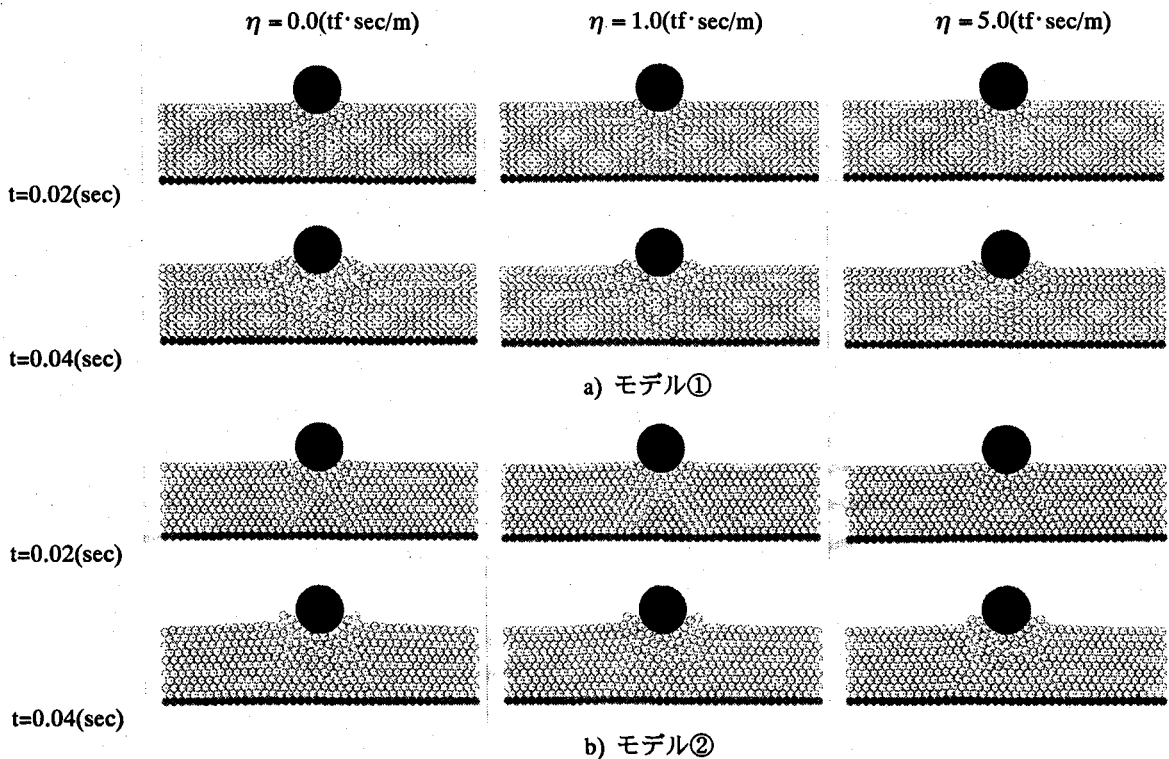
b) モデル②

図-3 解析モデル図

と約1.2mの場合についてモデルを作成した。表-1に解析モデル一覧を、図-3にモデル①とモデル②のモデル図を示す。解析領域は衝突位置から左右にそれぞれ2mの範囲をとり、覆工要素と敷砂の左右端の要素は中心位置に固定バネを適用し固定している。また、各要素には鉛直下方に9.8(m/s²)の重力加速度が作用している。

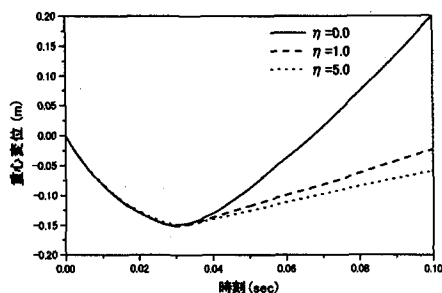
3.2 粘性抵抗による緩衝効果

粘性抵抗の大きさが緩衝効果に及ぼす影響を調べるため、粘性係数の値を変化させ落石衝撃解析を行った。落石を鉛直下向きに初速 10(m/s)で衝突させ、粘性係数を 0.0, 1.0, 5.0(tf·sec/m)と設定し、各モデルの落石および

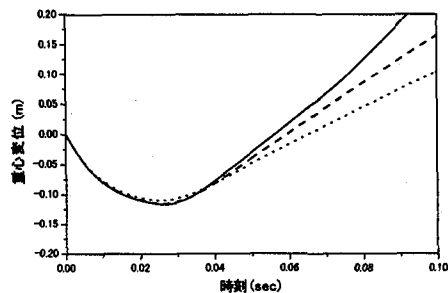


b) モデル②

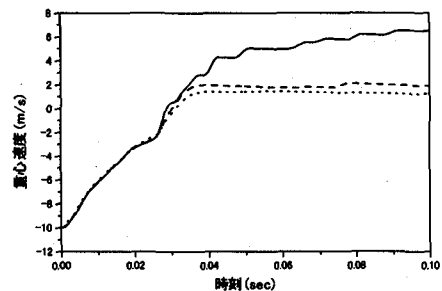
図-4 要素変形図



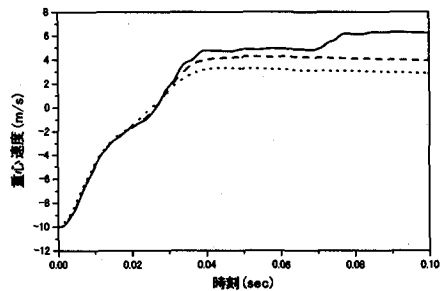
a) モデル①重心変位曲線



b) モデル②重心変位曲線



c) モデル①重心速度曲線



d) モデル②重心速度曲線

図-5 落石の挙動

敷砂の挙動を解析した。解析に用いたパラメータ一覧を表-2に示す。

解析結果のうち、モデル①とモデル②の要素変形図を図-4に示す。図-4より、時刻が進むにつれ落石が沈下する様子が読み取れる。また、粘性係数が大きいほど、敷砂要素の飛散が抑えられていることがわかる。次に、落石の重心変位と重心速度の結果を図-5に、落石の最大沈下時刻と最大沈下量を表-3にそれぞれ示す。表-3より、同一モデルでは、粘性係数の変化による最大沈下時刻と最大沈下量に差異はほとんど認められず、モデル①のほうが最大沈下時刻は約4(msec)遅く、最大沈下量は約3.5(cm)大きい。これは要素配列からくる密度および力の伝達経路の差を反映しているものと考えられる。図-5の重心速度曲線からは、粘性抵抗がないケースでは、落石が跳ね返り相対鉛直変位がゼロ以上となる間にも、飛散した敷砂要素が下方から衝突することで、重心速度が増加しつづけている。重心変位曲線および重心速度曲線ともに、最大沈下時刻まではほぼ同じ曲線を描き、その後粘性係数が大きいほど跳ね返り速度が小さくなっていることから、要素が収縮から復元するときに粘性抵抗の影響が強く現れると言える。

図-6はモデル①の各解析ケースにおける、落石直下要素の重心変位、重心速度、ひずみを示したグラフである。図-6より、敷砂要素中を衝撃が次々に伝わる様子が読み取れる。粘性抵抗がない場合には、収縮が復元するときに要素が激しく衝突を繰り返しているのに対し、粘性抵抗を考慮した場合には、覆工における衝撃伝播の反射がきれいに表れている。また、速度ピーク値およびひずみピーク値が減衰しながら伝播している。その減衰の度合

表-3 最大沈下時刻と最大沈下量

	最大沈下時刻 (sec)	最大沈下量 (m)
モデル① $\eta=0.0$	0.00286	0.150
モデル① $\eta=1.0$	0.00300	0.151
モデル① $\eta=5.0$	0.00314	0.149
モデル② $\eta=0.0$	0.00265	0.117
モデル② $\eta=1.0$	0.00263	0.116
モデル② $\eta=5.0$	0.00253	0.110

いは粘性係数が大きいほど著しい。覆工上の要素のひずみは、その直前のひずみの約1.48倍~1.69倍となっている。これらの傾向は既存の衝撃実験の結果ともよく一致している²⁾。

敷砂の重心位置にひずみをプロットしコンターで結んだひずみの分布図を図-7に示す。図-7から、格子状配列であるモデル①では衝撃は鉛直下方に1次元的に伝播しているのに対し、最密配列のモデル②では約30°の分散角で伝播していることが読み取れる。また、ひずみのピークが覆工上で反射し、減衰しながら伝播しているのがわかる。粘性係数が大きいほど衝撃の緩衝効果が高くなっている。

これらの解析から、粘性係数を適切に設定することにより実際の落石衝突現象をよく表現することができると考えられる。

3.3 敷砂厚の変化による緩衝効果の影響

敷砂が厚くなったとき、衝撃の緩衝効果があがるかどうかを調べた。粘性係数を1.0(tf·sec/m)に設定し、各モデルについて解析を行った。解析パラメータおよび解析

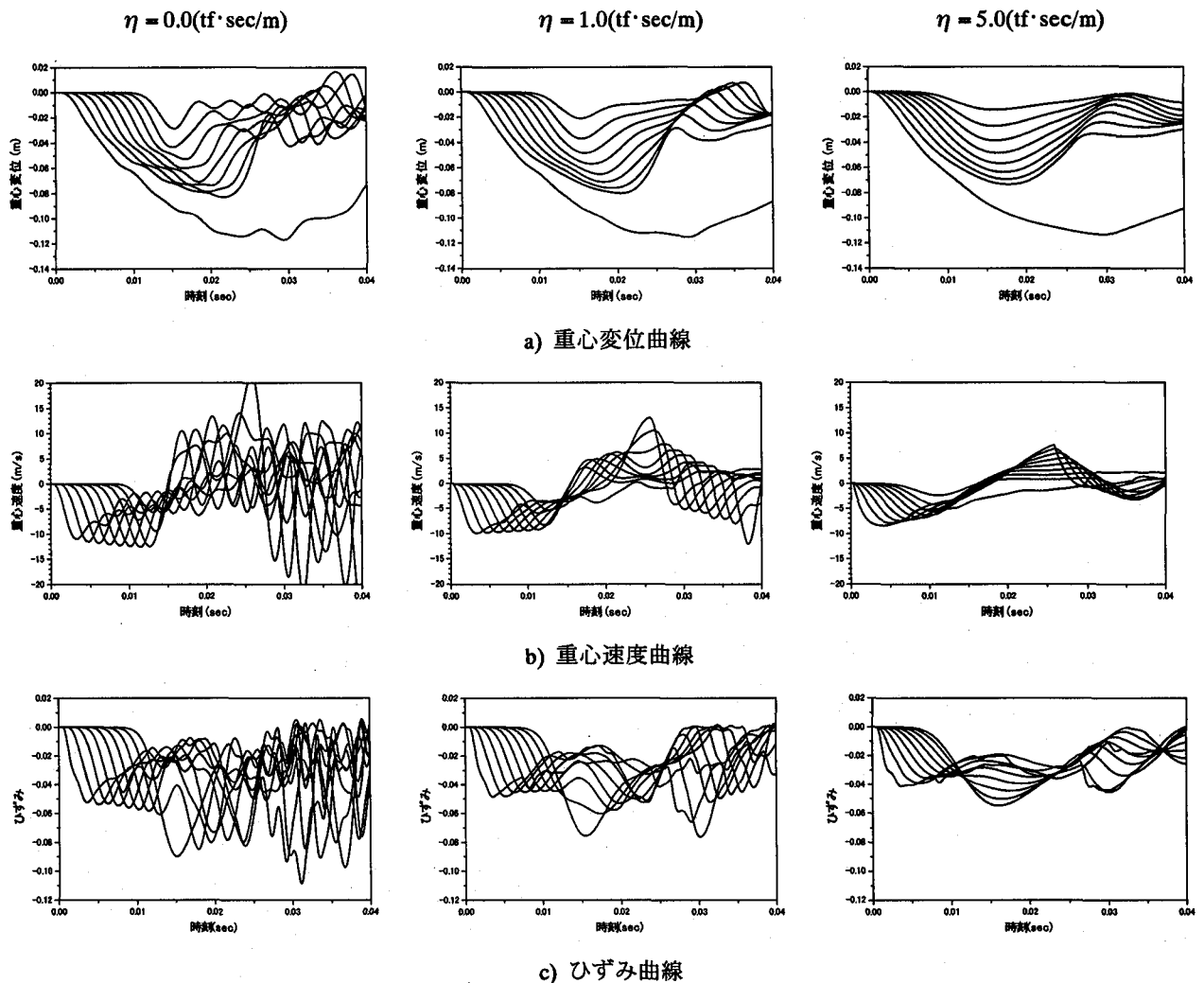


図-6 落石直下要素の挙動

条件は前節と同じである。

落石直下要素のひずみピーク値をプロットしたものを図-8に示す。図-8 a)より、格子状配列では敷砂厚が1.2mとなった場合も、敷砂要素中を衝撃が減衰しながら伝わり覆工上でピーク値が増大している。図-8 b)の最密配列では、応力が分散するためひずみピーク値が急速に減衰するが、40cm以深では減衰は緩やかになり、格子状配列同様、覆工上でピーク値が増大している。どちらの要素配列でも、覆工直上の敷砂要素のひずみピーク値を比較すると、敷砂厚による差がほとんど見られないのがわかる。よって、敷砂が厚くなることによる衝撃緩衝効果は、あまり期待できないと言える。これは、これまでの実験結果の傾向と合っている²⁾。

3.4 落石入射角度の違いによる衝撃伝播特性

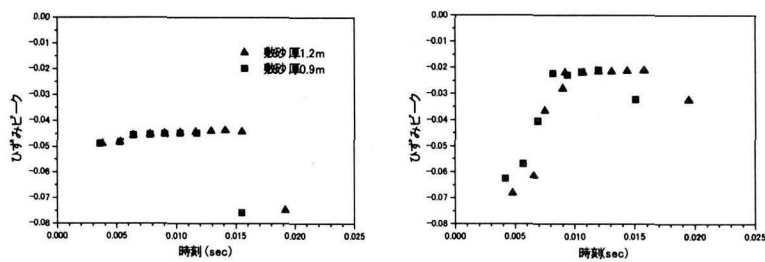
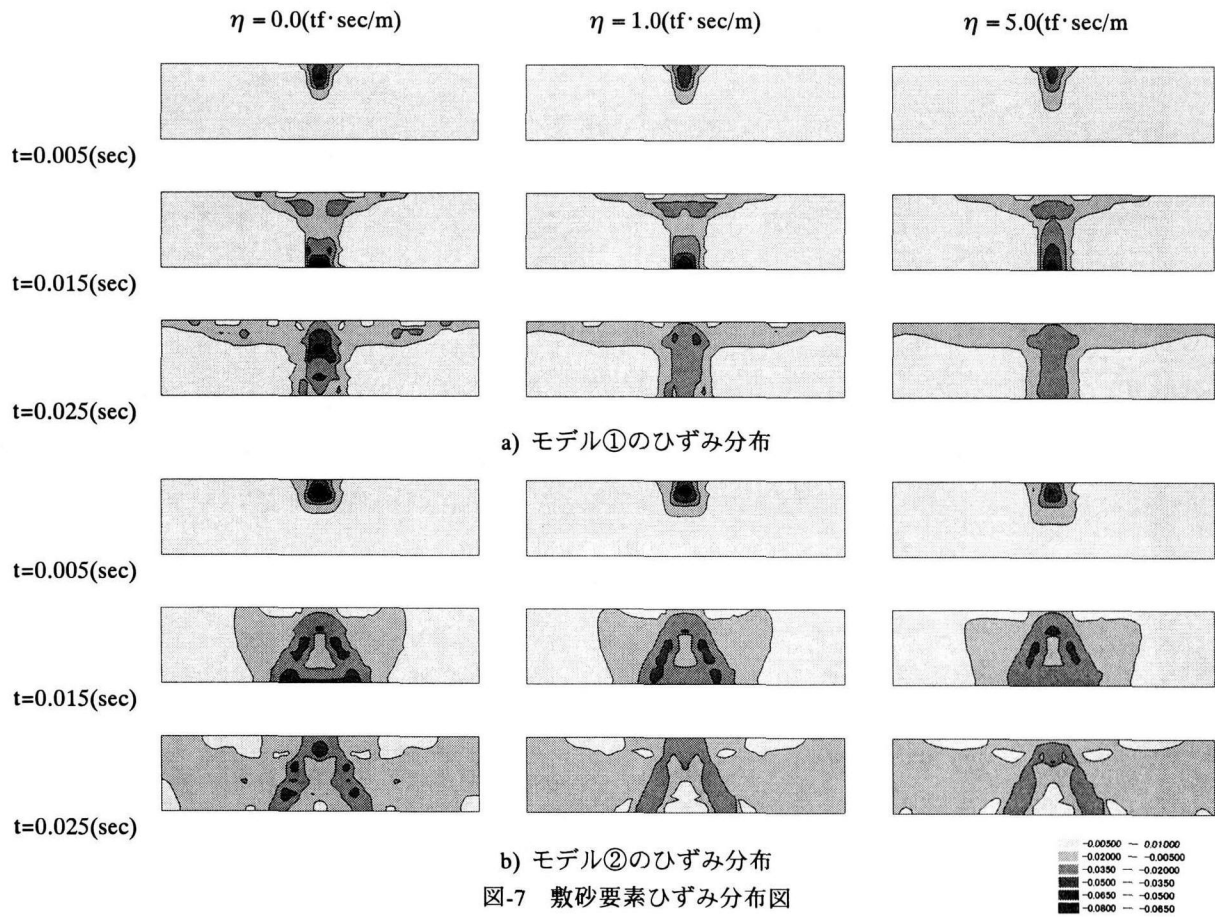
落石が斜方から入射し敷砂に衝突した場合に、衝撃がどのように伝播するのか調べた。モデル①において、落石の初速は10(m/s)と一定にし入射角を右下方に30°, 45°, 60°と変化した解析を行った。粘性係数は1.0(tf·sec/m)に設定し、その他の解析パラメータは表-2を用いた。

時刻0.035(sec)における要素変形図と時刻0.015(sec)におけるひずみ分布図を図-9に示す。要素変形図から、落石が敷砂要素を押し下げながら水平方向にスライドしている様子が読み取れる。また、ひずみ分布図を見ると、衝撃は鉛直下方ではなく、斜め前方に伝播しているのがわかる。

落石の水平方向速度と鉛直方向速度を図-10に、衝突前後の速度比および速度エネルギー比を表-4にそれぞれ示す。図-10より落石が斜めに入射した場合、水平方向と鉛直方向ともに速度が減衰しているのがわかる。また、落石の最大沈下時刻は入射角度によらず約0.035(sec)となっている。表-4を見ると、落石の入射角度が小さいほど速度比が小さくなっており、エネルギーの減衰が大きくなっている。

3.5 回転落石の衝撃伝播特性

落石は通常斜面を転がり落ちる間に回転エネルギーを増していく。既存の実験結果から、大半は回転エネルギーは速度エネルギーの10%程度であることが知られている⁷⁾。落石が回転しながら衝突するとき、どのように衝撃が伝播するのか調べた。



a) 格子状配列

b) 最密配列

図-8 ひずみピーク値

表-4 衝突前後の速度比

	水平 速度比	鉛直 速度比	線速度エネ ルギー比
入射角 30°	0.408	0.076	0.002
入射角 45°	0.519	0.198	0.003
入射角 60°	0.648	0.323	0.005

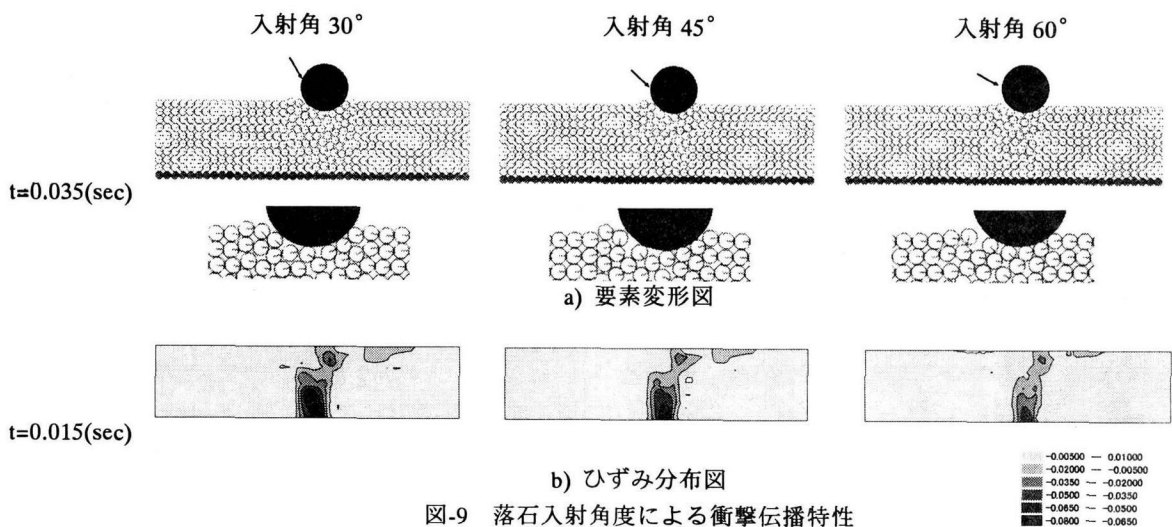


図-9 落石入射角度による衝撃伝播特性

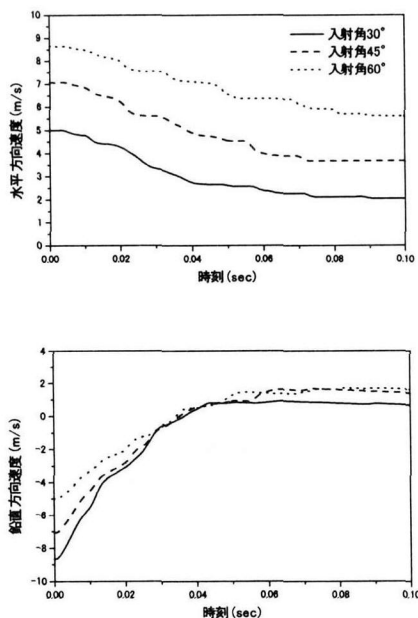


図-10 落石速度曲線

速度 10(m/s) のとき、回転エネルギーが速度エネルギーの 10% であるとする、回転角速度は 25(rad/sec) となる。鉛直下向きに初速 10(m/s) を持つ落石が角速度 25(rad/sec) で回転しながら衝突した場合について解析を行った。粘性係数は 1.0(tf·sec/m) に設定した。

要素の変形図、ひずみ分布図、落石直下要素ひずみ曲線図を図-11 に示す。ひずみ分布図の凡例は図-7 と同一である。図-11 より回転する落石が敷砂要素を巻き上げである。図-11 より回転する落石が敷砂要素を巻き上げながら沈下している様子が読み取れる。しかし、図-7 のひずみ分布図と図-6 のひずみ曲線図を比較すると、落石の回転は衝撃伝播にはあまり影響を与えていないことがわかる。

4. まとめ

円形弾性体要素を用いた不連続変形法に、相対速度に比例した粘性抵抗を取り入れ、落石衝撃解析に適用した。以下に、本研究において得られた知見をまとめる。

- 1) 粘性抵抗を考慮することにより、衝撃が減衰する様子をよく表現することができる。
- 2) 要素が収縮から復元するときに粘性抵抗の影響が強く現れる。
- 3) 覆工上の要素のひずみは、その直前のひずみの約 1.48 倍~1.69 倍となっている。また、敷砂が厚くなることによる衝撃緩衝効果は、あまり期待できない。これは、これまでの実験結果の傾向と合っている。
- 4) 落石の入射角度が小さいほどエネルギーの減衰が大きい。

以上のことにより、本研究で示した手法は衝撃解析に適用可能であると考えられる。今後、既往の実験結果と照査することによって、粘性係数の設定方法、適切な要

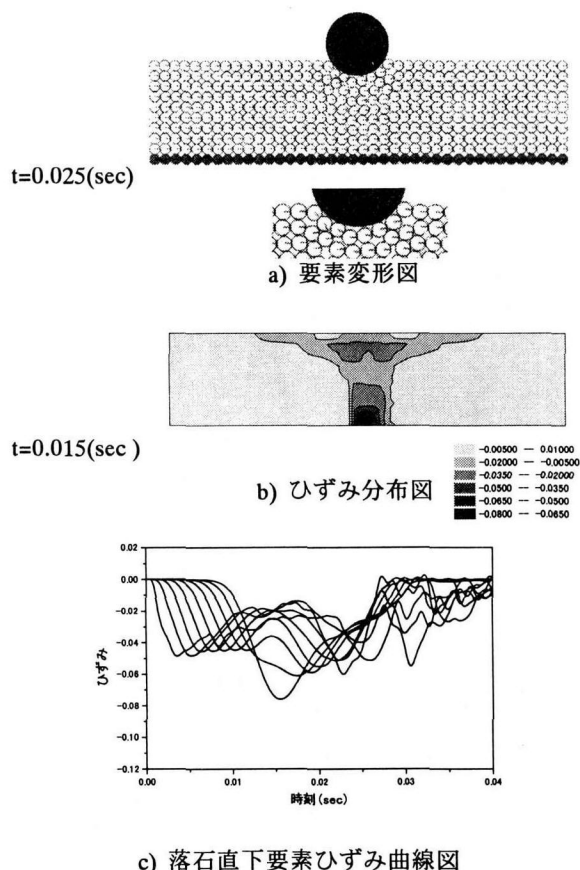


図-11 回転落石の衝撃伝播特性

素分割数、摩擦の影響等について研究を進め、また、個別要素法との比較を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 吉田博, 榎谷浩, 鈴木哲次: 敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 352 号/Ⅲ-2, pp.61-70, 1984.
- 2) 岸徳光, 中野修, 松岡健一, 西弘明: 野外実験による敷砂の緩衝性能, 構造工学論文集, Vol.39A, pp. 1587-1597, 1993.
- 3) Shi, G. H. and Goodman, R. E.: Discontinuous Deformation Analysis and its Application to Rock Mechanics Problems, *Proc.25th U.S. Symp. on Rock Mech.*, pp. 269-277, 1984.
- 4) 佐々木猛, 大西有三, 吉中龍之進: 不連続変形法 (DDA) とその岩盤工学への適用に関する研究, 土木学会論文集, No.493/Ⅲ-27, pp. 11-20, 1994.
- 5) 大西有三, Chen, G.: 不連続変形法 DDA による岩盤崩落のシミュレーション, 材料, Vol.48, No.4, pp. 329-333, 1999.
- 6) 小池明夫, 三上隆: 円形弾性体の衝撃解析における不連続変形法の適用, 構造工学論文集, Vol.3, pp. 505-512, 2000.
- 7) 日本道路協会, 落石対策便覧, 2000.

(2000 年 9 月 14 日受付)