不連続変形法による落石と敷砂緩衝材の衝撃解析

北海道大学大学院工学研究科　正会員　小池　明夫
北海道開発局　正会員　長谷川　貴一
北海道大学大学院工学研究科　フェロー　三上　隆

１．はじめに

落石の衝撃特性に関する研究は，これまで主に理論的あるいは実験的方法により進められてきた．本研究では，不連続体の解析手法として現在広く応用されている不連続変形法[1)]を粒状体要素に拡張し[2)],落石と敷砂緩衝材の衝撃解析に適用した．数値解析により．粒子配列の違いによる衝撃伝播特性の変化と敷砂厚に関する緩衝効果について調べた．

２．解析手法の概説

2.1 粒状体要素の変形

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，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）．

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

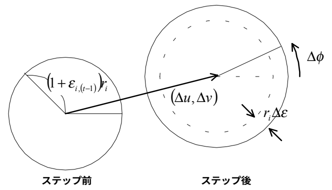


図-1　ステップ間の変位

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，$\Delta\varepsilon_i$ 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 4×1 の未知数マトリクスを表す．

2.2 要素の弾性ひずみエネルギー

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．

$$\Pi_e = \iint_A \frac{1}{2}(\sigma_r\varepsilon_r + \sigma_\theta\varepsilon_\theta + \tau_{r\theta}\gamma_{r\theta}) r d\theta dr \qquad (2)$$

2.3 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が作用すると考える．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．

$$\delta_n = \cos\alpha\cdot(\Delta u_i - \Delta u_j) + \sin\alpha\cdot(\Delta v_i - \Delta v_j) + (1+\varepsilon_{i,(t-1)} + \Delta\varepsilon_i)r_i + (1+\varepsilon_{i,(t-1)} + \Delta\varepsilon_j)r_j - L_{ij} = \delta_0 + [E_i][D_i] + [E_j][D_j] \qquad (3)$$

この貫入量 δ_n に比例したバネ定数 k_p のペナルティーバネが挿入されたとき．垂直接触によるポテンシャルエネルギー Π_k はバネに蓄えられたエネルギーであり，次式で与えられる．

$$\Pi_k = \frac{k_p}{2}\delta_n{}^2 \qquad (4)$$

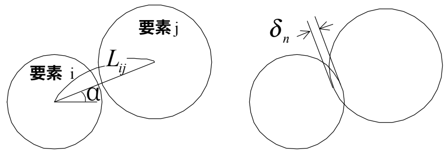


図-2　要素の貫入

2.4 連立平衡方程式

要素のポテンシャルエネルギーには，上記の弾性ひずみ，垂直接触のほかに,慣性力，拘束力，体積力,すべりなどがあり，すべての要素についてこれらの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り，連立平衡方程式が得られる．　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．

$$\begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix} \qquad (5)$$

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($1 \le i, j \le n$).

不連続変形法では，ステップ初期の変位と速度から係数マトリクスと荷重マトリクスが決定され，逐次的に式(5)を解くことにより全要素の挙動を求めることができる．

３．解析モデル

直径0.6mの落石が鉛直上方から速度10㎧でコンクリート覆工上の敷砂緩衝材に衝突する状態の数値解析を行った．敷砂を直径0.1mの円形要素としてモデル化し,要素の配列は格子状配列と最密配列の場合について,敷砂厚は約0.9mと約1.2mの場合についてそれぞれ解析を行った．表-1に解析ケース一覧を示す．解析領域は衝突位置から

キーワード：不連続変形法，落石，敷砂緩衝材，衝撃解析
連絡先：060-8628　北海道札幌市北区北13条西8丁目　Tel：011-706-6176　Fax：011-726-2296

左右にそれぞれ2㎝とり，覆工要素と敷砂の左右端の要素は中心位置に剛なバネを適用し固定している．また，各要素には鉛直下方に9.8m/s^{2}の重力加速度が作用している．各ケースで用いた材料物性値を表-2に，Case1の解析モデル図を図-3に示す．

表-1　解析ケース一覧

	敷砂粒子配列	敷砂厚(㎝)	敷砂要素数
Case1	格子状	90.0	360
Case2	最密	87.9	395
Case3	格子状	120.0	480
Case4	最密	122.6	553

表-2　材料物性一覧

	単位体積重量 (tf/㎥)	ヤング率 (tf/㎡)	ポアソン比
落石要素	2.0	1000000	0.25
敷砂要素	1.8	10000	0.35
覆工要素	2.5	3000000	0.20

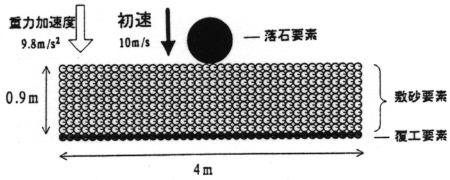


図-3　解析モデル図

４．解析結果

4.1 要素配列による衝撃伝播特性

図-4は，Case1において落石直下に位置する各要素の鉛直方向速度を示した図である．この図から，落石による衝撃が最上段要素から下段要素へ順に伝播していく様子が読み取れる．Case1およびCase2における要素の変形を図-6に示す．これらの図より,落石の変位量が最大になる時刻よりも前に，衝撃力が落石覆工まで伝播していることがわかる．また，図には示していないが，格子状配列であるCase1では衝撃は下方に１次元的に伝播しているのに対し，最密配列のCase2では配列の特徴から約30°の分散角で伝播している．

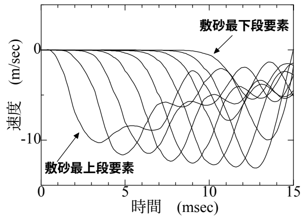
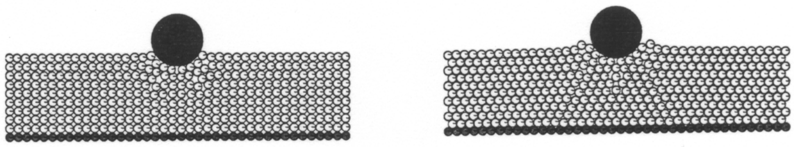


図-4　鉛直方向速度図



a）Case1　　b)Case2

図-5　要素変形図(30ms後)

4.2 敷砂厚が緩衝効果に及ぼす影響

敷砂厚を約 0.9m および約 1.2m として解析を行い，敷砂厚が緩衝効果に及ぼす影響について検討した．

図-6 は落石直下に位置する各要素のひずみピーク値を示した図である．覆工のすぐ上にある最下段要素のひずみは，格子状配列である Case1 で-0.089，Case3 で-0.095 となり，一方,最密配列である Case2 で-0.038，Case4 で -0.036 という結果となった．最密配列では衝撃力が分散するため，格子状配列よりもひずみピーク値は小さい値となっている．同じ要素配列で敷砂厚の異なるケースどうしを比較すると，ピーク値はほぼ等しい値となっており，敷砂厚約 0.9m と約 1.2m では緩衝効果にあまりあまり差は認められない．

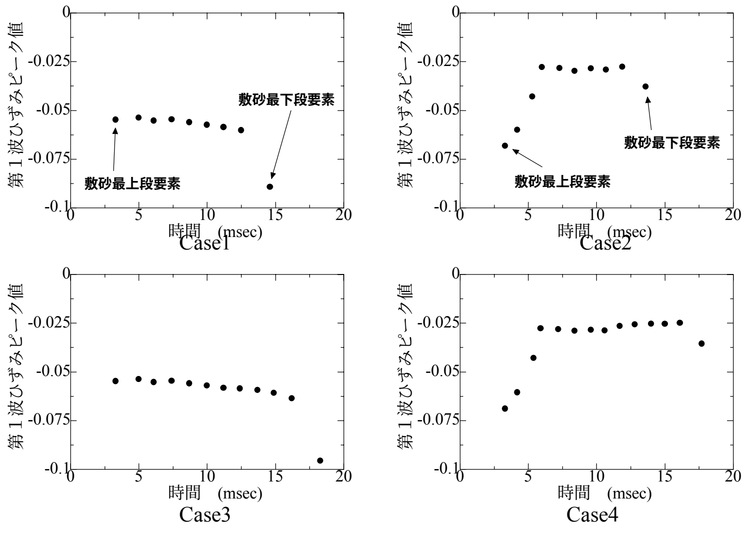


図-6　落石直下要素のひずみピークと時間の関係

ひずみをもとに衝撃力を計算し，覆工上での衝撃力と敷砂中を伝播してくる衝撃力の比を求めると，Case1 で 1.59 倍，Case2 で 1.33 倍，Case3 で 1.66 倍，Case4 で 1.31 倍という結果となった．ほぼ 1.3 倍から 1.7 倍となっている．

5.　まとめ

本研究では，不連続変形法を用いて落石と敷砂緩衝材の衝撃解析を行い，要素配列による衝撃伝播特性，敷砂厚が緩衝効果に及ぼす影響について検討を行った．

本研究における数値解析結果をまとめると以下のようになる．

(1) 格子状配列では衝撃がそのまま下方に１次元的に伝搬していくのに対して，最密配列では約 30°の分散角で伝播している．要素の配列によりその分散特性が異なる．
(2) 要素配列が同じ場合，敷砂厚約 0.9mと約 1.2m では緩衝効果にあまり差は認められない．
(3) 覆工上での衝撃力は，敷砂中を伝播してくる衝撃力の 1.3 倍から 1.7 倍となる．
(4) 不連続変形法は，落石の衝撃による敷砂緩衝材の挙動をよく再現することができる．

参考文献

1) 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.
2) 小池　明夫,三上　隆.: 円形弾性体要素への不連続変形法の拡張,土木学会北海道支部論文報告集，pp 230-235, 2000