

## I - 65

## 不連続変形法による敷砂緩衝材の衝撃特性

北海道大学大学院工学研究科○学生員 長谷川 貴 一  
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 小 池 明 夫  
 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

自然現象の厳しいわが国において落石による災害への対策は重要課題であり、防災の手段としてロックシェド等の落石対策工が設置される。しかしながらその設計法に用いられる落石条件の決定、落石による衝撃力の算定や敷砂緩衝材による荷重の分散特性など、まだ検討され尽くしていない点が多くある。こうした背景から設計のための衝撃力伝播特性に関する研究が多くなされているが、落石作用の評価は、理論や実験による方法を主として進められてきた。

本研究では、不連続変形法を用いることにより敷砂緩衝材の衝撃特性を数値的に解析することを目的とし、落石と敷砂緩衝材での衝突現象の挙動解析を試みた。

## 2. 解析手法と要素モデル

## 2.1 不連続変形法

不連続変形法<sup>1)</sup> (Discontinuous Deformation Analysis, DDA) は要素を弾性体とみなし解析対象を個別要素に分割し各要素の挙動を求めるものである。未知数としてステップ間における変位増分を用い、有限要素法でのマトリックス構造解析と同様に連立方程式を解く。DDA は個々のブロックに対して変位・変形・ひずみが許され、ブロック間の滑り・分離・接触が解析可能な手法である。

未知数はひずみ成分 ( $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ ) 及び重心位置での剛体変位 ( $u, v$ ) と剛体回転 ( $\phi$ ) であり有限要素法と同様に全ポテンシャルエネルギーを最小化することによって平衡状態をもとめる。ポテンシャルエネルギーには、ブロックのひずみ、荷重、慣性力、体積力、粘性抵抗、拘束、接触などがあり、それぞれサブマトリックスを合成して全体マトリックスを組み立てる。

DDA ではブロックが接触した場合、接触部にクーロンの摩擦則が導入され、荷重段階あるいは時間増分ごとに連立方程式が組み立てられ、これを解いていく。貫入の場合にはブロック間に剛なバネを挿入し変位の押し戻し及びブロックのひずみにより貫入を防いでいる。

## 2.2 要素モデルの仮定

本来 DDA で扱う個々の要素は、凸型であっても凹型であってもよく、空洞のある多角形でも可能だが、接触・貫入の判定を簡易に進めるために 2 次元の平面応力状態の円要素としている<sup>2)</sup>。

このとき粒状要素は相似変形するものと仮定するとせん断ひずみ成分  $\gamma_{\theta}$  はゼロとなり、変形後の要素形状もまた円となるため要素どうしの接触判定が容易になる。これにより、変位変数は ( $u, v, \phi, \varepsilon$ ) の 4 つに軽減されることになる。

粒状体要素は弾性体であり、要素内の応力は一定と仮定している。

### 3. 解析概要

以上のような DDA の手法を用いて、本研究では落石と敷砂緩衝材の衝突現象の挙動解析を試みた。

落石要素は直径 0.6m の円要素 1 つとし、敷砂粒子の配列には、敷砂幅 4m の格子状配列と最密配列の 2 通りを仮定し、解析ケースを表-1 のように設定をした。なお落石、敷砂、覆工の各物性については表-2 のとおりである。

その初期配列と解析中の変形図を図-1 に記す。

時間刻み 0.1msec、落下要素初期速度 10m/sec としている。

表-1 解析ケース

|       | 敷砂粒子配列 | 敷砂厚 (cm) | 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 各部要素の物性値

|      | 単位体積重量<br>(tf/m <sup>3</sup> ) | ヤング率<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | 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  |

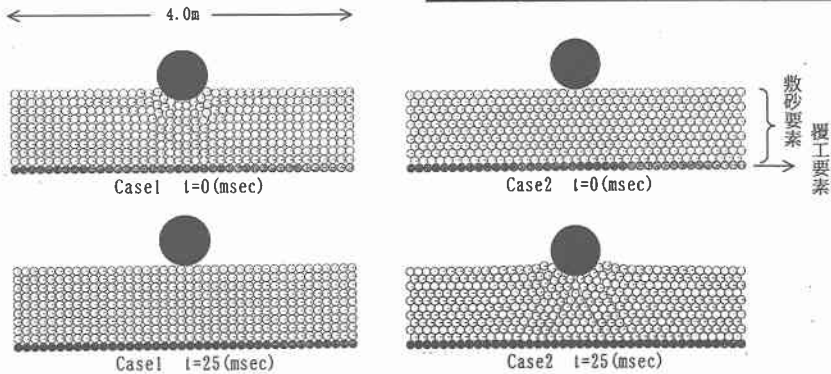


図-1 初期配置と t=25(msec) での変形図

### 4. 解析結果および考察

#### 4.1 要素配列による挙動特性

図-2 は、Case1, Case2 での落石要素の鉛直方向変位を示している。格子状配列の方が最密配列より落石要素の跳ね返りが遅れることがわかる。また、貫入量にも約 3cm 程度の差がみられる。

図-3 は、Case1 での落石直下にある各要素の速度変化を示した図である。このように、落石要素による衝撃は、その直下にある最上段要素から順に下段の要素へと伝播していくのであるが、その伝播の様態を t=10(msec) と t=15(msec) の全敷砂要素のひずみで示したのが図-4 である。

格子配列である Case1 では、あまり分散せずに覆工部まで伝播しているのがわかる。一方、Case2 では配列の特徴から 30° の分散角で伝播していき、広い範囲に影響が及んでいるのがわかる。

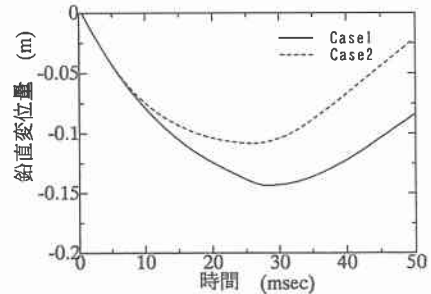


図-2 落石要素の鉛直変位曲線

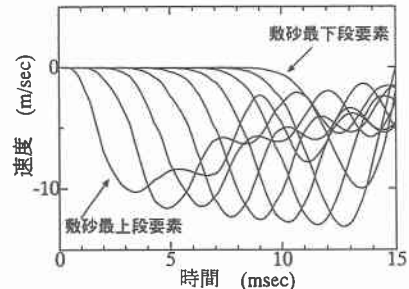


図-3 Case1 での各落石直下要素の速度曲線図

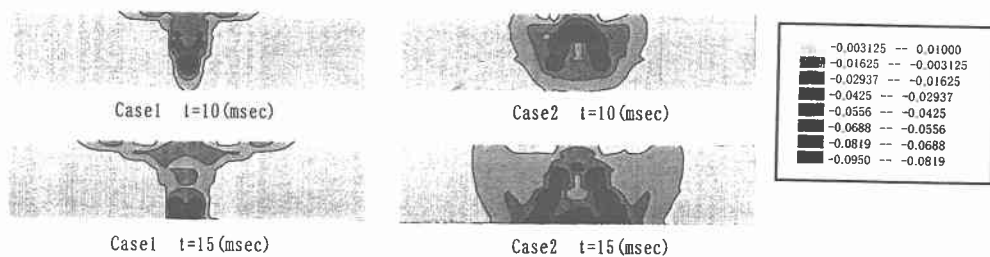


図-4 Case1, Case2 でのひずみ分布図

#### 4.2 敷砂厚に関する影響

本研究では、Case1, Case2 では約 90cm, Case3, Case4 においては約 120cm の敷砂厚として解析を行い敷砂厚に関する影響を検討した。

図-5 は各落石直下にある各要素のひずみピーク値と時間の関係を示した図である。落石直下にある覆工上の最下段要素のひずみは、格子状配列で Case1 -0.089, Case3 -0.095, 最密配列では Case2 -0.038, Case4 -0.036 という結果となった。要素配列の違いにより、格子状配列よりも最密配列では衝撃力が分散するため小さい値となっている。Case1 と Case3 を、Case2 と Case4 を比較するとほぼ等しい値となっており、敷砂厚約 90cm と約 120cm では緩衝効果はあまり変わらないことがわかる。

なお伝達衝撃力はひずみをもとに計算できるが、覆工上での伝達衝撃力とその直前での伝達衝撃力を比較すると、Case1 1.59 倍, Case2 1.33 倍, Case3 1.66 倍, Case4 1.31 倍という結果となった。ほぼ 1.3 倍から 1.7 倍となることがわかる。

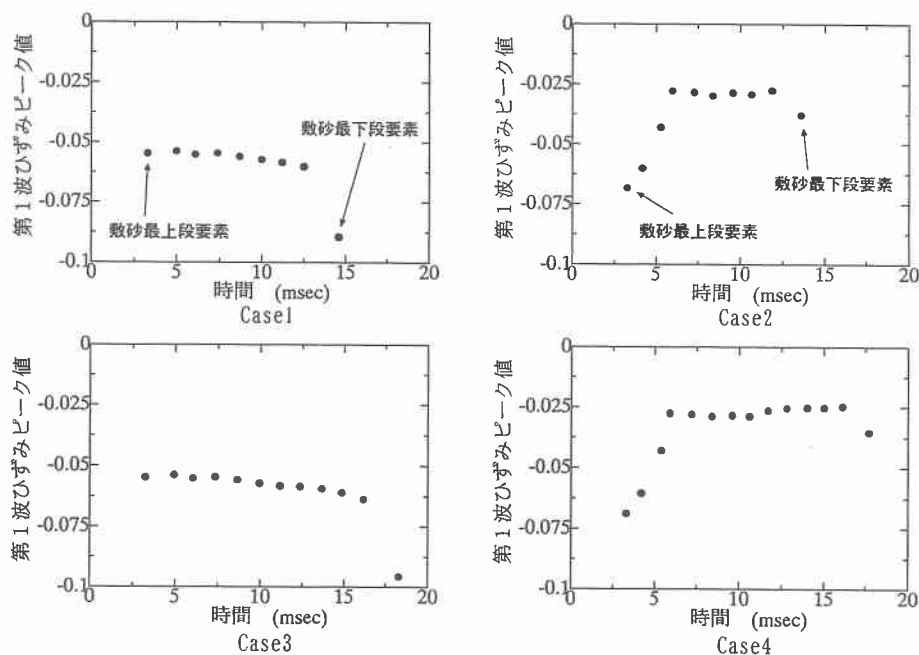


図-5 落石直下要素のひずみピーク値と時間の関係

#### 4.3 衝撃伝播速度

一次元波動方程式における速度の理論解<sup>3)</sup>は、式(1)から式(2)のように表される。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad \dots \dots (1) \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \dots \dots (2)$$

ここに、Eはヤング率、 $\rho$ は密度である。

Case1, Case3 で $\rho=1.41$  Case2, Case4 では $\rho=1.63$  の値を用いて物性値から理論解を算出すると Case1, Case3 で $c=84.1\text{m/sec}$  Case2, Case4 では $c=78.3\text{m/sec}$  となる。

一方、図-5 をもとに算出した衝撃の伝播速度<sup>4)</sup>は Case1 76.1m/sec Case2 73.4m/sec Case3 77.5m/sec Case4 76.4m/sec という結果となった。

敷砂厚の違いによる影響はあまりないことがわかる。粒子配列による比較では格子状配列の方が大きい値となった。

なお、敷砂要素のヤング率を $E=1000(\text{tf/m}^2)$ として解析を行った場合の衝撃伝播速度は23~27m/sec となり、理論解から求められる値(26.6m/sec 24.8m/sec)とほぼ等しい値となった。

#### 5. まとめ

以上、本研究では不連続変形法をもちいて敷砂緩衝材の衝撃解析を行い、それをもとに不連続変形法での衝撃特性を述べた。

今回の解析結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 格子状配列では衝撃がそのまま直下に伝搬していくのに対して、最密配列では約 $30^\circ$ の分散角で分散している。要素の配列により分散特性が異なる。
- (2) 要素配列が同じ場合、敷砂厚約90cmと約120cmでは緩衝効果は、あまり変わらない。
- (3) 落石直下の覆工上での伝達衝撃力はその直前での衝撃力の1.3倍から1.7倍となる。
- (4) 衝撃の伝播速度は、一次元波動方程式の理論値とほぼ等しくなる。
- (5) 不連続変形法は、落石による敷砂緩衝材の衝撃特性をよく表現できる。

本研究では、敷砂緩衝材という設定で解析を行ったが、敷砂緩衝材だけではなく近年注目されている EPS 材の解析などにも十分応用できる可能性がある。

しかしながら解析ケース数が少ないこともあり、今後さまざまな物性値で解析を試み DDA での落石衝撃のシミュレーションが可能かどうかさらなる検討を行っていく。

#### 参考文献：

- 1) Shi, G.H. and R. E. Goodman : Discontinuous Deformation Analysis and its Application to Rock Mechanics Problems, Proc. 25th U.S. Symp. on Rock Mech., pp269-277, 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, 2000.
- 3) 衝撃問題研究小委員会 : 構造物の衝撃挙動と設計法, 土木学会, pp1-8, 1994.
- 4) 衝撃問題研究小委員会 : ロックシェッドの耐衝撃設計, 土木学会, pp67-72, 1998.