

不連続変形法における接触粘性抵抗の導入

Contact viscous resistance in Discontinuous Deformation Analysis

北海道大学大学院工学研究科 ○正 員 小池 明夫(Akio KOIKE)
 北海道開発コンサルタント 正 員 川北 稔 (Minoru KAWAKITA)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 蟹江 俊仁(Shunji KANIE)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 三上 隆 (Takashi MIKAMI)

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。本研究では、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。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円形弾性体要素を扱えるようにした³⁾。本研究ではさらに、要素接触時の粘性抵抗を新たに取り入れ、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)。

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

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、 $\Delta\varepsilon_i$ 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。

2.2 粘性抵抗

要素どうしが接触した場合(図-2)、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、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。このうち、粘性抵抗について説明する。

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。

$$\begin{aligned} u_n &= \cos\alpha \cdot (\Delta u_i - \Delta u_j) + \sin\alpha \cdot (\Delta v_i - \Delta v_j) \\ &= (\cos\alpha \quad \sin\alpha \quad 0 \quad 0) [D_i] \\ &\quad + (-\cos\alpha \quad -\sin\alpha \quad 0 \quad 0) [D_j] \\ &= [E_i][D_i] + [E_j][D_j] \end{aligned} \quad (2)$$

粘性係数を η としたとき粘性抵抗 f_η は次式となる。

$$f_\eta = -\eta \frac{u_n}{\Delta t} \quad (3)$$

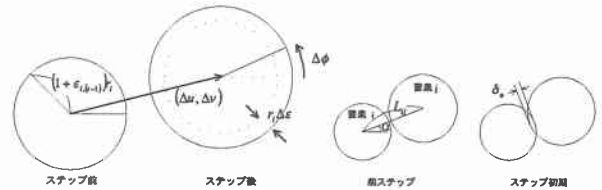


図-1 ステップ間の変位

図-2 要素の貫入

この粘性抵抗によるポテンシャルエネルギー Π_η は次式で表される。

$$\Pi_\eta = -f_\eta \cdot u_n = \eta \frac{u_n}{\Delta t} \cdot u_n \quad (4)$$

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、敷砂厚は約0.9mとしてモデルを作成した。図-3にモデル図を示す。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 $9.8(\text{m/s}^2)$ 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 $10(\text{m/s})$ で衝突させ、粘性係数を $0.0, 1.0, 5.0(\text{tf} \cdot \text{sec/m})$ と設定し、各モデルの落石および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-1に示す。

落石の重心変位と重心速度の結果を図-4に示す。図-4の重心速度曲線から、粘性抵抗がないケースでは、落石が跳ね返る間にも飛散した敷砂要素が衝突し、重心速度が増加しつづけているのが読み取れる。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-5は各解析ケースにおける、落石直下要素の重心速度、ひずみを示したグラフである。図-5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。その減衰の度合いは粘性係数が大きい

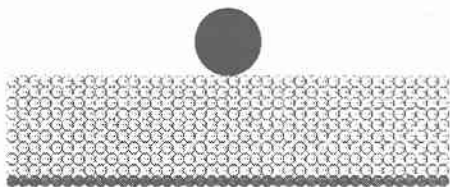
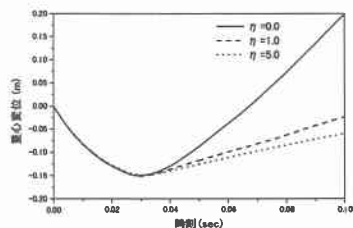


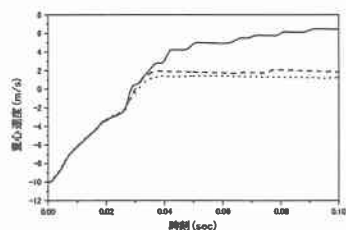
図-3 解析モデル図

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		



a)重心変位曲線



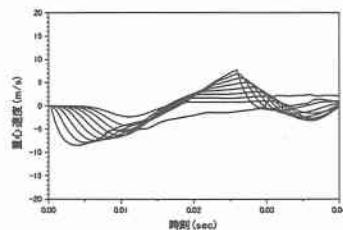
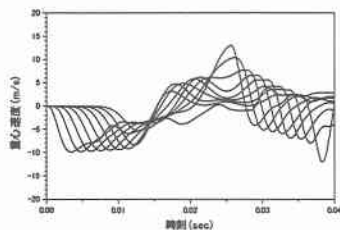
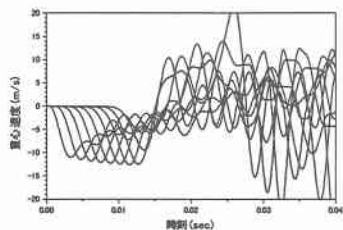
b) 重心速度曲線

図-4 落石の挙動

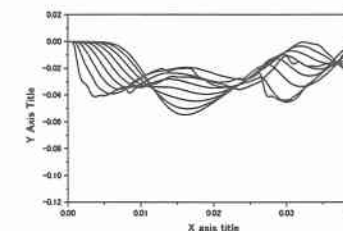
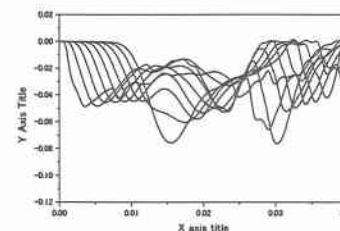
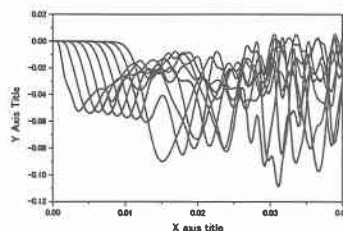
$\eta = 0.0(\text{tf} \cdot \text{sec}/\text{m})$

$\eta = 1.0(\text{tf} \cdot \text{sec}/\text{m})$

$\eta = 5.0(\text{tf} \cdot \text{sec}/\text{m})$



b) 重心速度曲線



c) ひずみ曲線

図-5 落石直下要素の挙動

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¹⁾。

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。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.