

I-526 個別要素法と有限要素法の結合による落石衝突解析の開発

小松 市役 所 正 中田 吉彦
金沢大学工学部 正 榎谷 浩
金沢大学工学部 正 梶川 康男

1. まえがき

従来の衝撃問題に対するアプローチとしては、主に有限要素法(F.E.M)、剛体バネモデル(R.B.S.M)および個別要素法(I.E.M)などがあげられる。特に連続体の微小変形に関しては有限要素法が広範囲に用いられてきたが、煩雑なラグランジュ座標の導入などの工夫が必要となり、破壊の進行過程や破壊発生後の挙動解析、脆性破壊あるいは大変形に対しては多くの困難を伴う。

一方、個別要素法は基礎式である運動方程式を、各要素ごとに陽的に差分しているため大容量マトリックスを必要しないこと、時々刻々の要素座標を用いるため大変形に対してもラグランジュ座標を改めて考慮する必要がないなどの利点があり、離散体などにしばしばみられる大変形解析に適している。しかし、個別要素法は要素の接触・離散によって集合全体の大変形を表現するため、隣接要素が連続したままで要素の変形によって系全体の大変形を表現する場合にはあまり利用されていない。

そこで、本研究ではこのような現象の解明を目的として、砂や粘土などの変形や流動量の大きい緩衝層に対しては個別要素法を用い、構造物には有限要素法を用いた結合解析法を考えた。ここでは、落石を受ける緩衝材を有する簡単な構造を取り上げ、開発した具体的な解析アルゴリズムと解析例を示す。

2. 解析方法

(1) 個別要素法の概要

落石覆工上のクッション材をある一定方向の半径を持った土塊要素の集合体と仮定

し、要素同士の力のやり取りや相対変位増分で解析を行う。また、各要素は図-1のように便宜上剛体と仮定した要素同士の弾性挙動や非弾性挙動は各要素間に挿入したバネとダッシュポットによって表現することにする。本解析では、各要素の運動方程式を式(1)に示すように陽的差分法にて Δt 時間ごとに逐次計算した。

(2) 有限要素法の概要

覆工部の主桁を数本のはり要素の組み合わせにより表現し、その要素1つ1つに対して要素剛性マトリックス、要素質量マトリックスおよび要素減衰マトリックスを考えて、系全体の剛性マトリックス[K]、質量マトリックス[M]および減衰マトリックス[C]を求め、式(2)に示す一般的な構造物の運動方程式に代入して $\{u(t)\}$ を算出する。計算内容は式(3)に示すようにある時刻tにおける荷重増分 $\Delta f(t)$ と加速度 $u(t)$ と速度 $u(t)$ のベクトルにより変位増分ベクトル $\Delta u(t)$ を求めた。

(3) 個別要素と有限要素の接触

個別要素と有限要素の接触点は質量を持たない特別な要（以後、結合要素と呼ぶ）として設定し、結合要素とクッション材要素(個別要素)の間に働く作用力を各時間ステップで求め、その作用力に基づき覆工を有

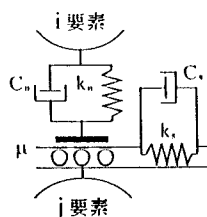


図-1 要素接触点の粘弾性バネ

$$m\ddot{u}_i = -c\dot{u}_{i-\Delta t} - k u_{i-\Delta t} \quad (1. a)$$

$$j\ddot{\phi}_i = -cr^2\dot{\phi}_{i-\Delta t} - kr^2\phi_{i-\Delta t} \quad (1. b)$$

ただし、 u および ϕ : 要素の変位ベクトル、回転変位

m および j : 土塊の各要素の質量および慣性モーメント

k および c : ばね定数、減衰定数

r : 土塊の剛要素を円筒要素とみなしたときの半径

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{f(t)\} \quad (2)$$

ここで、

$$[M] = \begin{bmatrix} \frac{13}{35} & \frac{11L}{210} & \frac{L^2}{420} \\ \frac{11L}{210} & \frac{13L}{140} & \frac{L^2}{105} \\ \frac{L^2}{420} & \frac{L^2}{105} & \frac{L^3}{105} \end{bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & \frac{12EI}{L^2} \\ \frac{4EI}{L} & \frac{12EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad \{u\} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad \{f\} = \begin{bmatrix} F_1 \\ M_1 \\ F_2 \end{bmatrix}$$

ただし、 $\{u(t)\}$ 、 $\{f(t)\}$: 系全体の変位ベクトル、回転変位

$$\bar{k}(t)\Delta u(t) = \Delta \bar{f}(t) \quad (3)$$

$$\bar{k}(t) = k(t) + \frac{6}{(\Delta t)^2} m + \frac{3}{\Delta t} c(t), \quad \Delta \bar{f}(t) = \Delta f(t) + m \left\{ \frac{6}{\Delta t} \dot{u}(t) + 3\ddot{u}(t) \right\} + c(t) \left\{ 3\dot{u}(t) + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}(t) \right\}$$

ただし、 $m(t)=[M]$ 、 $c(t)=0$ 、 $k(t)=[K]$ 、 $u(t)=\{u\}$ 、 $f(t)=\{f\}$

限要素法で解析する。また、本解析のフローチャートを図-2に示す。

3. 覆工主桁の振動周期を変化させた場合の解析例

(1) 解析モデル 主桁の振動周期を変化させるために、覆工部の単位体積重量を変化させて解析を試みた。以下に解析モデルおよび解析に用いた材料特性値を示す(図-3、表-1)。

(2) 解析結果 図-4、図-5にCASE1とCASE2の場合の土圧衝撃力、重錘衝撃力およびエネルギーの時間的変化を示す。

土圧衝撃力は重錘の衝突開始から約7ms後に現れ始めた。また、波形についてはCASE1は大きな乱れが生じた。これは、有限要素の最小固有周期と個別要素の最小固有周期に深い関係があり、CASE2のように有限要素の固有周期が個別要素の固有周期に近づくと乱れが小さくなった。

重錘衝撃力は、土圧衝撃力のように波形に乱れがなかったが数回の衝撃力の増減を繰り返しながら減少する傾向が見られた。重錘衝撃力の最大値は2ケースにおいてはほとんど差異がなかったが、衝撃時間はCASE1の方が短いことがわかる。

エネルギーの時間的変化については、重錘の持つエネルギーがクッション材に伝達し、さらに覆工に伝達される様子がよく確認できる。また、覆工要素のエネルギーの最大値がCASE1がCASE2より大きくなったのは、覆工の剛性と関係があり、単位体積重量の小さいCASE1は曲げ剛性が小さいのでCASE2よりたわみやすく、その分エネルギーの負担が大きくなったものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、著者らが開発した個別要素法と有限要素法による覆工上のクッション材への落石衝突解析手法および解析結果の一例を紹介した。今後はさらに検討を加え、覆工部の弾塑性解析および実験値との照査へと拡張していきたいと考えている。

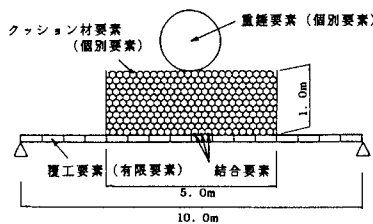


図-3 解析モデル

表-1 解析に用いた材料特性値	
土粒子の単位体積重量	1.8 tf/m ³
要素(土粒子)の半径	0.05m
土粒子の内部摩擦角	30度
壁面との摩擦角	15度
重錘半径	0.45m
重錘重量	1.0tf
重錘の落下高さ	10.0m
法線方向のばね定数	800.0tf/m
減速率	0.25
法線方向の減衰係数	0.2
接線方向の減衰係数	1.0
CASE1の覆工単位体積重量	7.85tf/m ³
CASE2の覆工単位体積重量	7.85*50tf/m ³

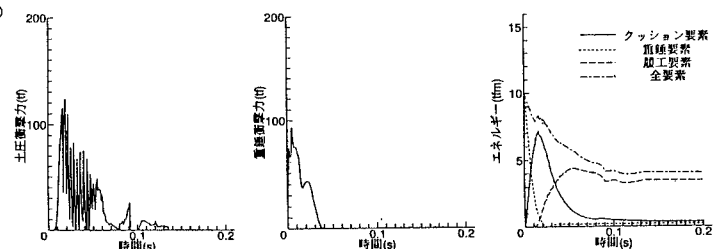


図-4 CASE1の場合の衝撃力およびエネルギーの時間的変化

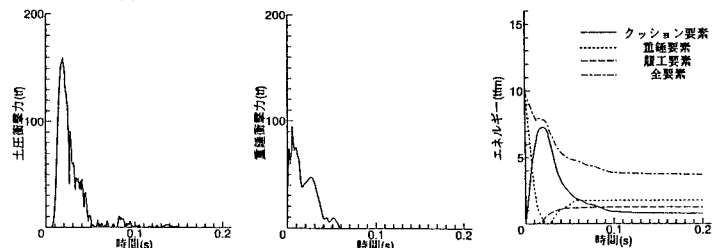
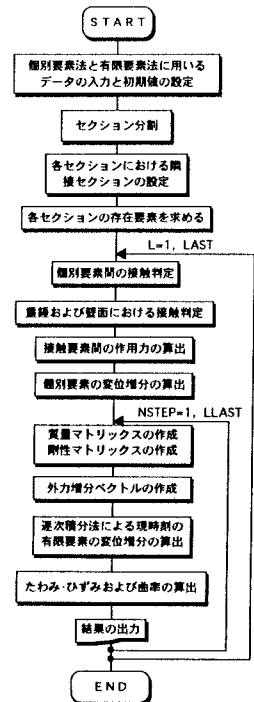


図-5 CASE2の場合の衝撃力およびエネルギーの時間的変化



L: 個別要素法の計算ステップ
NSTEP: 個別要素法が1ステップ計算する間における有限要素法の計算ステップ(10回)

図-2 解析のフローチャート