

I-B 151 落石衝突に対するDEM・FEM結合シミュレーションについて

金沢大学大学院 学 岡田卓馬
小松市 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

落石などによる衝撃荷重をうけるコンクリート構造物の挙動の解明と設計法の確立が求められている。落石の場合、衝撃を受ける部分には砂などの緩衝層が設置されていて、緩衝層の破壊だけが生じ構造物に損傷がない程度の衝撃に対しては、緩衝層の耐衝撃性と衝撃力伝達機構を解明することにより、設計荷重の評価は可能である。しかし、衝撃の規模が大きく、構造部材に損傷を与える場合には、飛来物、緩衝層、そして構造物が相互に連成しその挙動は一般に非常に複雑なものとなる。

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を行った。ここでは、落石を受ける緩衝材を有する簡単な構造物を取り上げ、現時点までに開発した具体的な解析アルゴリズムと解析例を示すとともに今後の改良すべき点についても考察する。

2. 解析概要

(1) 個別要素法 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、要素間の法線方向および接線方向にばねとダッシュポットを挿入することで、弾性および非弾性的性質を表現する。各要素の運動方程式を以下に示す式のように差分法により逐次計算をする。

$$m\ddot{u}_i = -c\dot{u}_{i,m} - ku_{i,m} \quad (1)$$

$$j\ddot{\phi}_i = -cr\dot{\phi}_{i,m} - kr\phi_{i,m} \quad (2)$$

ここで u 、 ϕ は、それぞれ変位ベクトル、回転変位であり、 m 、 j は、それぞれ土塊の各要素の質量および慣性モーメントである。 k 、 c は、それぞればね定数、減衰定数であり、 r は土塊の各要素を円筒と見なしたときの半径である。

(2) 有限要素法 覆工部の主桁をはり要素の組み合わせにより表現する。本解析では、鉛直方向と曲げ方向の2次元のみを考える。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、一般的な構造物の方程式

$$M\{\ddot{u}(t)\} + C\{\dot{u}(t)\} + K\{u(t)\} = \{f(t)\} \quad (3)$$

に代入して $\{u(t)\}$ を算出する。ここで、 $\{u(t)\}$ および $\{f(t)\}$ は系全体の変位および外力ベクトルである。変位増分ベクトルは式(3)から導かれる次式に示すように、ある時刻 t における荷重増分 $\Delta f(t)$ と加速度と速度のベクトルから求める。

$$\bar{K}(t)\Delta u(t) = \Delta \bar{f}(t) \quad (4)$$

ここで、

$$\bar{K}(t) = K(t) + \frac{6}{(\Delta t)^2} M + \frac{3}{\Delta t} C(t) \quad (5)$$

$$\Delta \bar{f}(t) = \Delta f(t) + M \left\{ \frac{6}{\Delta t} \dot{u}(t) + 3\ddot{u}(t) \right\} + C(t) \left\{ 3\dot{u}(t) + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}(t) \right\} \quad (6)$$

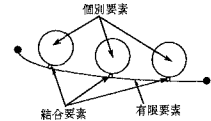


図-1 個別要素と有限要素の接触

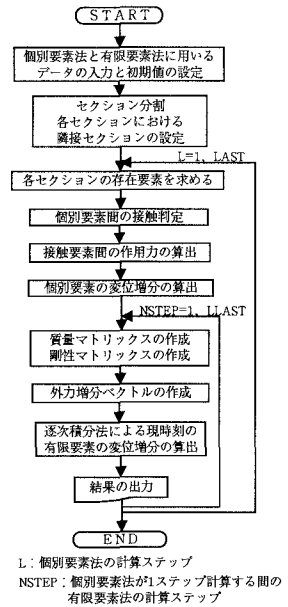


図-2 解析のフローチャート

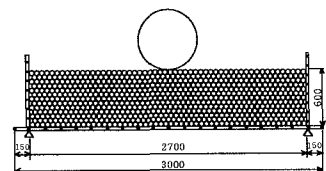


図-3 解析モデル

M は質量マトリックスであり、 $K(t)$ 、 $C(t)$ はそれぞれ時刻 t における剛性、減衰マトリックスである。

(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素（以後結合要素と呼ぶ）として設定し(図-1)、結合要素とクッション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限要素法で解析する。図-2に解析のフローチャートを示す。

(4) 解析モデルおよび解析条件 解析モデルを図-3に示す。また、解析に用いた諸定数を表-1に示す。本解析では、法線方向ばね定数 K_n を400tf/mから50tf/mまで変化させてその影響を調べた。また、経験的に有限要素法の時間増分ははり要素の最小固有周期の1/100～1/20、個別要素法の時間増分は要素間に用いたばねの固有周期の1/200～1/50とした。

3. 解析結果

図-3～図-6にそれぞれ重錘衝撃力、土圧衝撃力、支点反力および覆工要素のエネルギーの時間的変化を示す。図-7には、土圧衝撃力の継続時間 T_d と覆工の固有周期 T の比 T_d/T と覆工へのエネルギー伝達率との関係を示す。

表-1 解析に用いた諸定数

要素半径	0.025m
要素質量	$4.99 \times 10^{-4} \text{tf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$
土粒子の内部摩擦角	30°
壁面との摩擦角	15°
重錘半径	0.30m
重錘重量	0.30tf
落下高さ	2.0m
法線方向のばね定数	400, 200, 100, 50tf/m
減減率	0.25
法線方向減衰定数	0.2
接線方向減衰定数	1.0

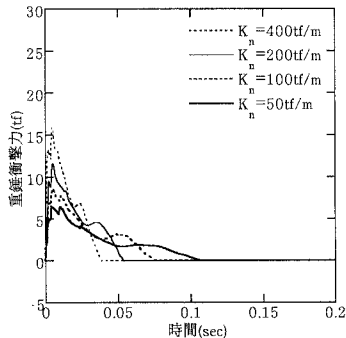


図-3 重錘衝撃力の時間的変化

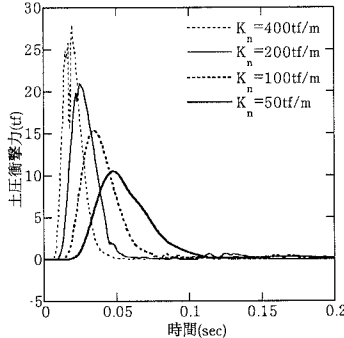


図-4 土圧衝撃力の時間的変化

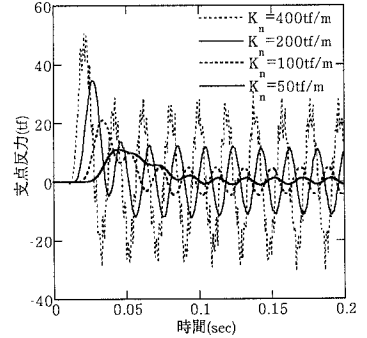


図-5 支点反力の時間的変化

重錘衝撃力、土圧衝撃力、支点反力および覆工要素のエネルギーはともに K_n が小さくなるにしたがい、最大値が小さくなる。重錘衝撃力が最大値に達するまでの時間は K_n の影響をほとんど受けないが、 K_n が小さくなるにしたがい衝撃力下降域の作用時間が長くなる。また、 K_n が小さくなるにしたがい土圧衝撃力の立ち上がり時刻は遅くなり、作用時間は長くなる。土圧衝撃力と覆工要素のエネルギーの最大値はほぼ同時刻に現れている。

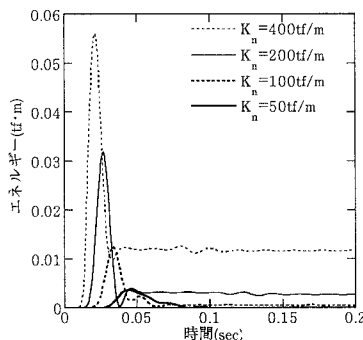


図-6 覆工要素のエネルギーの時間的変化

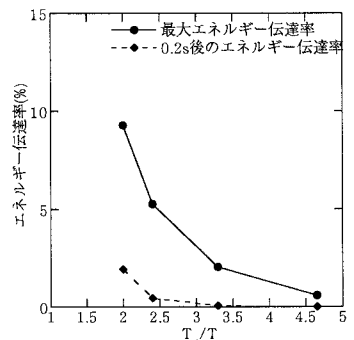


図-7 T_d/T と覆工へのエネルギー伝達率の関係

4. あとがき

本研究では、著者らが開発した個別要素と有限要素の結合による解析手法および解析例を示した。今後、さらに検討を加え解析に用いるパラメータの吟味、プログラムの改良などを行いたいと考えている。

<謝辞>本研究を実施するにあたり、多大な助言および労力を頂いた安間猛氏に感謝の意を表します。