

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について

○小松市役所 正 中田吉彦 金沢大学 八町禎彦
金沢大学 正 梶川康男 金沢大学 正 梶谷 浩

1 まえがき

著者らは、落石などによる衝撃力や衝撃荷重下での構造物あるいは構造部材の挙動について研究を行っている。衝撃を受ける部分に何らかの緩衝層があり、緩衝層の破壊だけが生じ構造物に損傷が無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になる。著者らはこのような現象の解明のための解析手法を開発中であり、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現時点までに開発した個別要素法と有限要素法の結合解析手法について紹介する。

2 解析方法

2.1 解析方法の概要

本解析は、不連続性の強いクッション材などの解析に有効である個別要素法と連続体解析に最も一般的に使用されている有限要素法の利点を生かし、それらを結合させることにより衝撃を受ける構造物の解析を行おうとするものである。

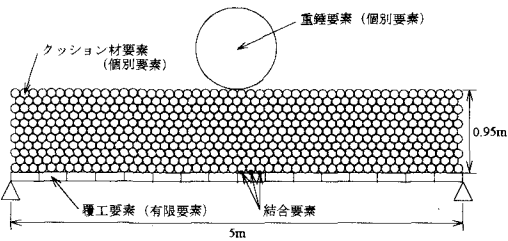


図-1 解析に用いた要素配列

2.2 個別要素法について

落石覆工上のクッション材をある一定の半径を持った土塊要素の集合体として、要素同士の力のやり取りや相対変位増分をみるのに用いる解析方法である。また各要素は便宜上剛体と仮定し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ばね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差分法で陽的に解いている。

表-1 個別要素法に用いた諸定数

土粒子の単位体積重量	1.8tf/m ³
要素(土粒子)半径	0.05m
土粒子の内部摩擦角	30°
壁面との摩擦角	15°
重錘の半径	0.45m
重錘の重量	1.0tf
重錘の初速度	17.146m/s
法線方向のばね定数	800.00tf/m
法線方向の減衰定数	0.4297tf・s/m
接線方向のばね定数	200.00tf/m
接線方向の減衰定数	1.0740tf・s/m

2.3 有限要素法について

本解析では、落石覆工をはり要素の組み合わせにより表現した。要素節点にかかる力はせん断方向と曲げ方向のみとした。計算内容は以下の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 $\ddot{u}(t)$ と速度 $\dot{u}(t)$ のベクトルにより変位増分ベクトル $\Delta u(t)$ を求め計算を進めた。

表-2 有限要素法に用いた諸定数

	単位重量 (tf/m)	断面二次モーメント (m ⁴)
Type1	0.2	0.748286×10^{-4}
Type2	1.0	0.3741428×10^{-3}

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

ここで、

$$\bar{k}(t) = k(t) + \frac{6}{(\Delta t)^2}m + \frac{3}{\Delta t}c(t)$$

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

mは質量マトリックスであり、k(t)およびc(t)は時刻tにおける剛性および減衰マトリックスである。

2.4 クッション材と覆工の接触点について

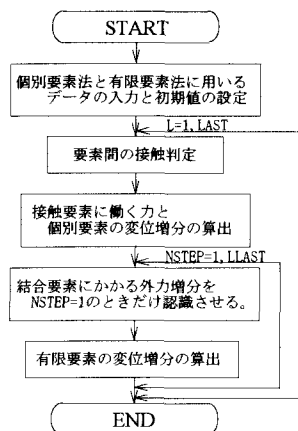
クッション材と覆工の接触点は質量を持たない特別な要素(以後結合要素と呼ぶ)として設定し、結合要素とクッション材要素の間に働く作用力を各時間ステップで求め、その作用力に基づき覆工を有限

要素法で解析する。

ここで考慮する作用力は結合要素が法線方向に受ける力のみで接線方向に受ける力は無視している。しかし結合要素は水平方向に可動でしかも各時間ステップでその数は変化するものとした。

2.5 解析例

解析モデルを図-1に示す。クッション材や重錘の個別要素法に要する特性値は表-1のように与え固定し、覆工の特性値を表-2のように変化させることにより覆工にかかる土圧衝撃力や重錘衝撃力がどのように変化するかを解析する。また経験より個別要素法に用いる微小時間は要素間に用いるばねの固有周期の $1/200 \sim 1/50$ 以下で、また有限要素法に用いる微小時間は1要素の固有周期の $1/100 \sim 1/20$ 以下である。本解析ではその条件を満足する範囲で、かつ個別要素法を1ステップ行う間に有限要素法を10ステップ行うようにした。解析に用いたプログラムのフローチャートを図-2に示す。



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の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

3 解析結果

解析例の1例を以下に表す。図-3にType1,2(覆工可動)と覆工固定の場合の土圧衝撃力と重錘衝撃力を示す。土圧衝撃力とは覆工に接触する土塊要素が覆工に垂直に作用する力の合計であり、重錘衝撃力とは重錘の質量にその加速度を乗じたものである。これより、重錘衝撃力の最大値は3ケースにおいてほとんど変化がなかったが、最大値に達した後の減少速度はType1が最も速く覆工固定が最も遅かった。よって覆工が剛であるほど重錘衝撃力の減少が遅くなることがわかる。また、土圧衝撃力の最大値は覆工固定が最も大きくType1が最も小さかった。したがって覆工が剛であるほど土圧衝撃力の最大値が大きくなることがわかる。一方、衝撃時間は覆工が剛であるほど短かった。またType1,2では土圧衝撃力に乱れが認められた。

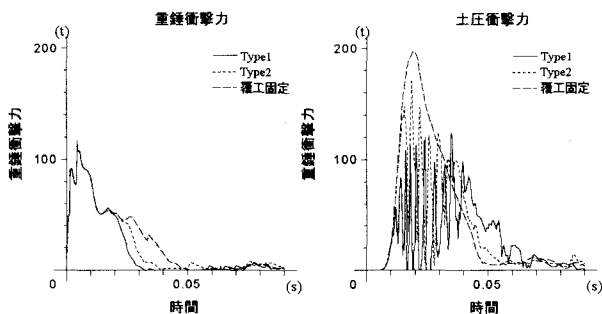


図-3 重錘衝撃力および覆工にかかる土圧衝撃力の変化

図-4にType1と覆工固定の場合の重錘とクッション材と覆工にかかるエネルギーを示す。これより、覆工固定の場合は覆工が受け持つエネルギーが無いのでクッション材と重錘がその負担を負っているのがわかった。Type1の場合は覆工がエネルギーを受け持つのでクッション材と重錘のエネルギー負担がかなり小さくなるのがわかった。本解析では $t=0.09(s)$ の時点でType1では初期エネルギーの31%が覆工に伝達されType2では26%が伝達されたことがわかった。

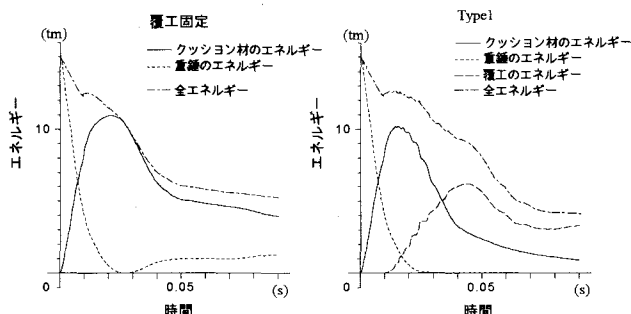


図-4 覆工固定およびType1のエネルギー変化

4 あとがき

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その解析結果の一例を紹介した。今後、さらに検討を加え一般衝撃問題への適用へと拡張していきたいと考えている。