

DEMとFEMの結合法による落石衝突解析について

金沢大学大学院 学 岡田卓馬

金沢大学 森北一光

小松市 正 中田吉彦

金沢大学工学部 正 榎谷 浩

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。落石防護工には、一般に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、構造物材に損傷を与える場合には、飛來物、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し衝撃力の検討を行う。

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。本解析では、法線方向ばね定数を k_n とすると接線方向ばね定数 k_s および法線方向減衰係数 c_n 、接線方向減衰係数 c_s は次式により設定した。

$$\begin{aligned} k_s &= s k_n \\ c_n &= 2 h_n \sqrt{m k_n} \\ c_s &= 2 h_s \sqrt{m k_s} \end{aligned}$$

ここで、 s は減衰率、 m は要素質量、 h_n 、 h_s はそれぞれ法線方向と接線方向の減衰定数である。各要素の変位は、個々の要素の運動方程式を差分法により逐次計算して求めている。

(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。変位増分ベクトル $\{\Delta u(t)\}$ は次式に示すように、ある時刻 t における荷重増分 $\{\Delta f(t)\}$ と加速度 $\{\ddot{u}(t)\}$ と速度 $\{\dot{u}(t)\}$ のベクトルから求める。

$$[\bar{K}]\{\Delta u(t)\} = \{\Delta \bar{f}(t)\}$$

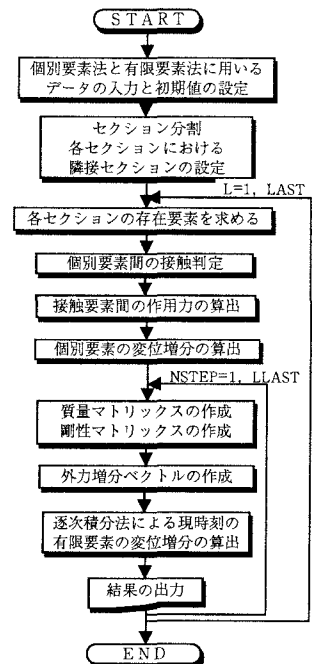
ここで、

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

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

$[K]$ 、 $[M]$ および $[C]$ はそれぞれ剛性、質量および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



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

図-1 解析のフローチャート

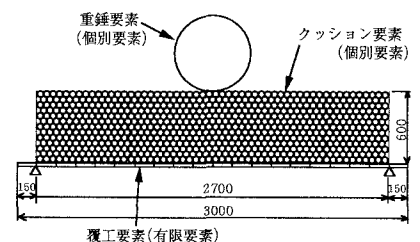


図-2 解析モデル

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-1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 本解析では、法線方向ばね定数 k_n および法線方向減衰定数 h_n を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 $1/100 \sim 1/20$ 、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 $1/200 \sim 1/50$ とした。解析モデルを図-2に示す。また、解析に用いた諸定数を表-1に示す。

3. 解析結果

以下に解析例を表す。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な変化を示す。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り、土圧衝撃力とは覆工に接触するクッション

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	50tf/m
透減率	0.25
法線方向減衰定数	0.2
接線方向減衰定数	1.0

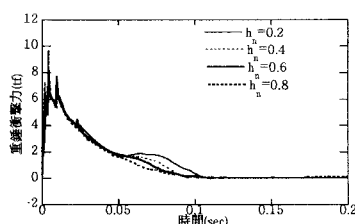


図-3 重錘衝撃力の時間的な変化

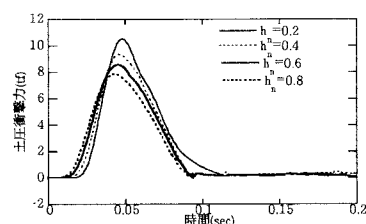


図-4 土圧衝撃力の時間的な変化

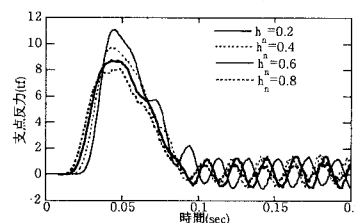


図-5 支点反力の時間的な変化

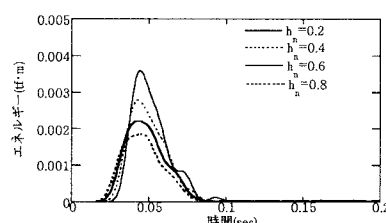


図-6 覆工要素のエネルギーの時間的な変化

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 との比 T_d/T と最大土圧衝撃力および覆工のたわみの最大値との関係を示す。図-8には最大土圧衝撃力と覆工のたわみの最大値との関係を示す。図中の点線および破線は静的荷重を受けるはりの荷重-変位関係を示している。

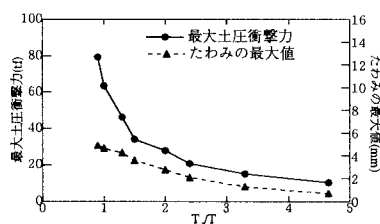


図-7 T_d/T と最大土圧衝撃力およびたわみの最大値との関係

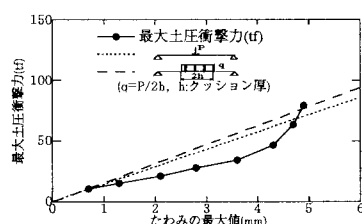


図-8 最大土圧衝撃力とたわみの最大値との関係

図-9には T_d/T と覆工へのエネルギー伝達率との関係を示す。 T_d/T の値が1.0に近づくほどエネルギー伝達率が大きくなっている。

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。

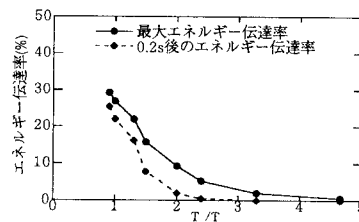


図-9 T_d/T と覆工へのエネルギー伝達率との関係