

I-221 個別要素法による落石のクッション材の衝撃特性シミュレーション

金沢大学工学部 正〇樹谷 浩
国土開発センター(株) 増田守世

1. まえがき 本研究では、落石のクッション材の衝突問題に、個別要素法 (Distinct Element Method) を適用してみた。著者らは、この方法を用いて実物大の落石衝突実験結果との比較検討により、今までにその有効性のある程度確認してきている。しかし、クッション材の特性が変わった場合どのような衝撃特性が得られるのかといったことはほとんど明らかにされていない。また、個別要素法の持つ固有の特徴も完全に明らかにされているわけではない。そこで本研究では2次元の個別要素を用いて、クッション材の特性値を変化させ落石を衝突させた場合に衝撃特性がどのように変化するかについて検討を行ってみた。

2. 個別要素法による解析理論 クッション材は有限個の剛要素の集合体と仮定し、クッション材の粘弾性的および非弾性的性質を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。この場合、個々の要素の並進 u および回転 ϕ について、運動方程式は次式のように与えられる。

$$m u^{\ddot{}} + c u^{\dot{}} + k u = 0 \quad (1. a)$$

$$J \phi^{\ddot{}} + c r^2 \phi^{\dot{}} + k r^2 \phi = 0 \quad (1. b)$$

ここで、 m および J は、土塊の各要素の質量および慣性モーメントであり、 k および c は、それぞれ、ばね定数と減衰定数である。また、 r は要素を円筒とみなしたときの半径である。なお、ドット ($\cdot$) は、時間に関する微分を表している。ここでは式 (1) を各要素に対して差分近似し、 Δt 時間ごとの逐次計算により、シミュレーションを行った。なお、クッション材として砂などの粒状体を対象とした場合には引張には抵抗しないものとして、接触する2要素 i および j 間の力学的関係を、図-1 に示すようにモデル化できるものと仮定した。

3. クッション材のモデル化と計算結果 クッション材のモデル化は落石衝突を想定して次のように行った。高さ2m、幅5mのクッション材充填槽を仮定し、ここでは平面内での運動に限定しているので、土槽の奥行は1mとし、クッション材の2次元モデルして単位長さの円筒要素を用いることにする。要素の存在領域を2.0m×5.0mの範囲とし、要素を配置した。また、接触判定を行うための領域は、高さ方向を10分割、幅方向を25分割とした (図-2 参照)。クッション材充填槽の側面および底面は剛として取り扱った。また、落石に関しては質量を1000kgとし、半径45cmの円筒要素で表し、クッション材上中央に初速度を持たせて配置した。なお、本研究で行うパラメトリックな解析の基準値として表-1 に示すものを用いた。

図-3 に示す3種類の要素配列を用いて解析を行いその影響を検討してみた。底面衝撃力の時間的变化を図-4 (a) に示す。3種の配列により底面衝撃力はおおの異なる波形性状を示している。配列1はピークが2つあり1番目のピーク値が後のピーク値より大きい波形で、配列2はピークが1つの比較的単調な波形で、配列3は目立ったピークがなく台形に近い波形であることがわかる。また、底面衝撃力の最大値は配列2、1、3の順で小さくなっており、底面衝撃力が発生してからおおむね消失するまでの時間 (以後、作用時間と呼ぶ) 配列1、2、3の順で小さくなっている。重錘衝撃力の時間的变化は図-4 (b) に示す。重錘衝撃力は、配列3の作用時間は他の2つの配列に比べ大きい、最大値は3つの配列ともあまり差がないことがわかる。

図-5 は配列2の場合のエネルギーの時間変化を示したものである。重錘の運動エネルギーは衝突後急速に減少し、20ms程度でほぼエネルギーが零になっている。それとは逆に衝突後、クッション材の運動エネルギーとひずみエネルギーは増加し、運動エネルギーでは10ms程度でピーク値に達し、その後比較的緩やかに振動している。クッション材のひずみエネルギーは20ms程度で最大値に達したあと非常に緩やかに減少していることがわかる。全体エネルギーは、10ms程度までに最初のエネルギーの約85%まで急激に減少し、その

後50ms程度までに約45%まで緩やかに減少し、その後はあまり変化がないことがわかる。図-6は、減衰定数 h_n （法線方向）を変化させた場合の重錘とクッション材の全体エネルギーの時間変化を示したものである。どの場合においても、全体エネルギーは、10ms程度まで急激に減少し、その後50ms程度まで緩やかに減少し、その後はあまり変化がないことがわかる。また、減衰定数 h_n が大きいほどどの時点においても全体エネルギーが小さいことがわかる。時刻 $t=50\text{ms}$ における全体エネルギーは $h_n=0.2$ で初期エネルギーの45%、 $h_n=0.5$ で35%、 $h_n=1.0$ で27%である。実際のロックシェッドではクッション底は本解析例のように剛ではないのでその点に関する影響も今後検討する必要があると考えられる。

4. あとがき 本報告では、2次元の個別要素法を用いて落石のクッション材への衝突現象の数値シミュレーションが比較的容易に行えることを示した。今後さらにクッション材としてどのようなものがあるのか本手法を用いて応用していくとともに、実験値との検証も必要と考えている。

表-1 用いた諸定数

クッション材の単位体積重量	1.8 tf/m ³
重錘の重量	1.0 tf
クッション材の半径	0.05 m
重錘の半径	0.45 m
クッション材の内部摩擦角	30°
壁面との摩擦角	15°
重錘の初速度	17.14 m/s
法線方向ばね定数 k_n	800 tf/m
接線方向ばね定数 k_s	200 tf/m
法線方向減衰係数 c_n	0.4297 tfs/m
接線方向減衰係数 c_s	1.074 tfs/m

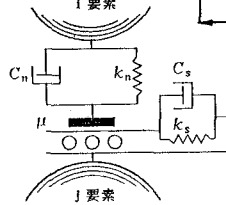


図-1 接触点のモデル

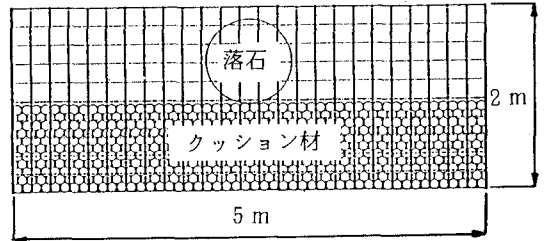


図-2 クッション材と落石のモデル化

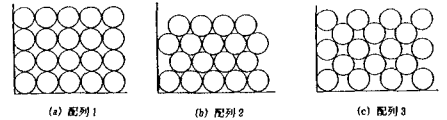


図-3 要素の配列

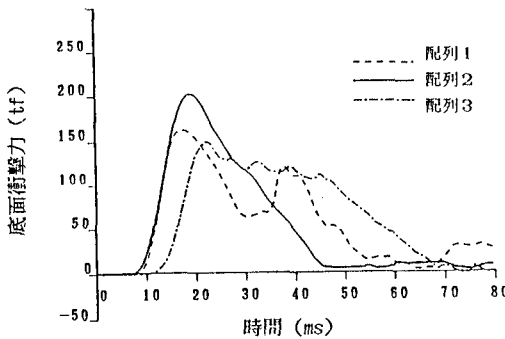


図-4 (a) 底面衝撃力

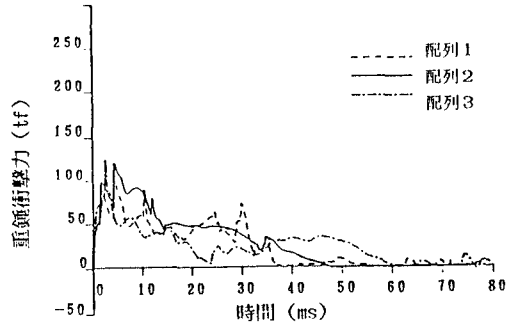


図-4 (b) 重錘衝撃力

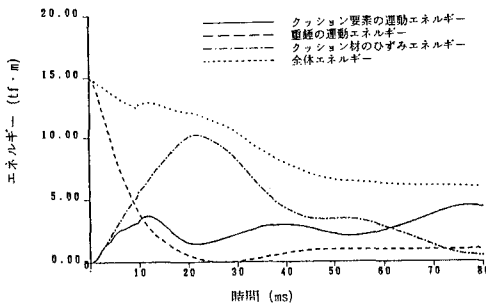


図-5 エネルギーの時間変化

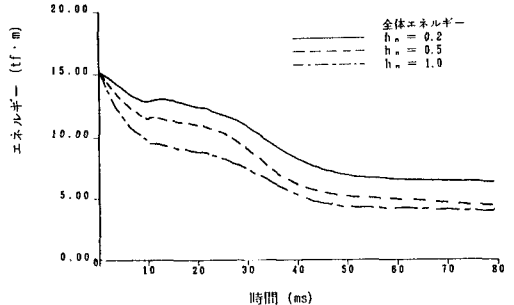


図-6 減衰の違いによるエネルギー吸収の違い