

個別要素法による落石衝突時のシミュレーション

金沢大学 正員 榎谷 浩

1. まえがき

ロックシェッドの設計に用いる衝撃荷重を推定するために、実験を中心とした研究が行われており、衝撃力推定式も提案されてきている。一方、落石衝突時には、ロックシェッド上のサンドクッションが大きく変形するだけでなく流動も伴うため、理論的な説明は困難と考えられており、非常に単純なモデルを用いた研究が成されているだけである。現在、ロックシェッドのクッション材としては従来から用いられている砂を用いるのが一般的であるが、荷重の低減、施工上また美観上の理由により、他の材料を使用する試みもなされている。あるクッション材の衝撃特性を知るには、実験的に逐一検証するしかないのが現状であり、理論的にあるいは数値解析的に落石の衝突現象を説明できる方法が望まれている。そこで本研究では、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ないわけではない。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数値解析的に検討を行っている。

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、運動方程式は次のように与えられる。

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

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

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(・)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。

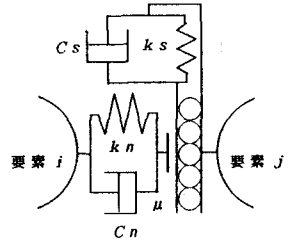


図-1 接触点のモデル

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_t	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_t	1.074 tfs/m

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次元モデルとして単位長さの円筒要素を用いることにした。要素の存在領域を2.0m×5.0mの範囲とし、要素を配置した(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

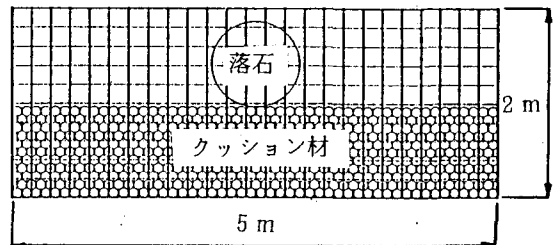


図-2 クッション材と落石のモデル化

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は衝撃力波形を示したものである。なお、重錘衝撃力とは、落石の質量に加速度を乗じたものであり、底面衝撃力とは底面に作用する力の総和である。また、図-4はその場合のエネルギーの時間変化を示したものである。落石の運動エネルギーは衝突後急速に減少し、衝突後20ms程度ではほぼエネルギーが零になっていることがわかる。クッション材の運動エネルギーは、逆に急激に増加し、運動エネルギーでは10ms程度でピーク値に達し、その後緩やかに振動している。また、クッション材のひずみエネルギーも衝突後急激に増加し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。全体エネルギーは、10ms程度までに初期エネルギー（落石の衝突エネルギー）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-5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 $t=50ms$ 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。図-6は、落石の鉛直投影部のクッション材の質量 m_2 の落石質量 m_1 に対する質量比 $R_m = m_2/m_1$ と底面衝撃力の関係、また底面衝撃力の作用時間との関係を示したものである。これより質量比 R_m が増加すると衝撃力の最大値も作用時間も大きくなっている。しかし、 R_m がある程度大きくなると衝撃力の増加割合は減少し、逆に作用時間の増加率が大きくなる傾向も観察できる。

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。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検討も必要と考えている。

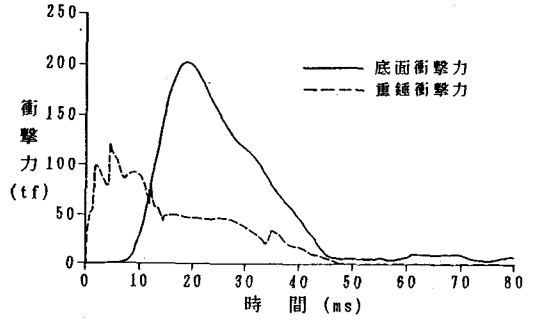


図-3 衝撃力波形

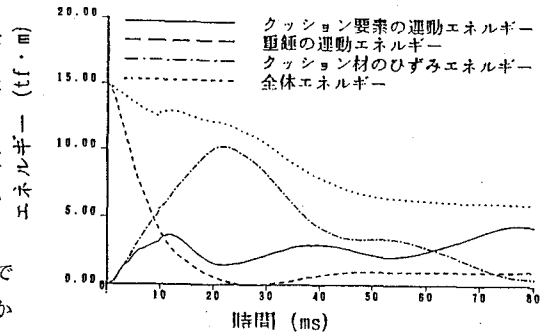


図-4 エネルギーの時間変化

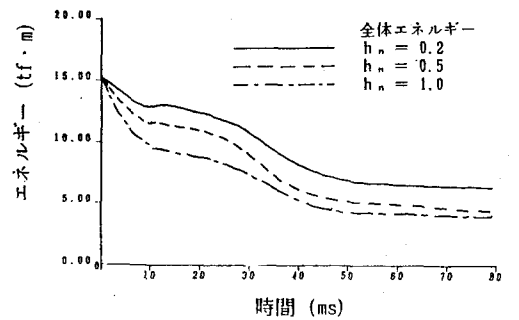


図-5 減衰とエネルギー吸収

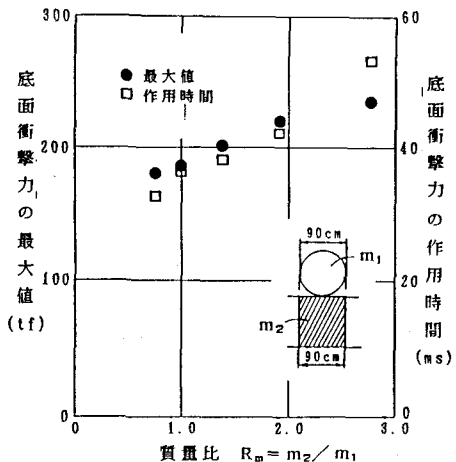


図-6 クッション材の質量比の影響