

サンドクッションへの落石衝突に関する個別要素法の適用について

金沢大学大学院 学 ○渡辺高志
 金沢大学大学院 正 榭谷 浩
 金沢大学工学部 学 油谷勇佑

1. はじめに

山間部における自然災害に対する落石覆工等の防護構造物は、落石等による衝撃荷重を受けることが前提となることから敷砂等による緩衝材を用いて合理的に設計する必要がある。しかし、このような緩衝材を通して構造物に伝達される衝撃力の評価は十分明らかにされているわけではない。また、複雑な衝撃挙動は理論的な説明が難しく、実験・解析的研究の進展が望まれている。

そこで本研究では、サンドクッション材に落石等の衝撃荷重が作用した際の衝撃挙動と構造物への伝達荷重の推定手法の確立を目的として、3次元個別要素法による適用について検討した。

2. 解析手法

砂は球形要素としてモデル化し、伝達荷重を受ける構造躯体としては、砂を囲う壁面要素を格子状のメッシュを2分する三角形要素で作成した(図-1)。壁面要素を小さな三角形要素でモデル化することにより、伝達応力を詳細に可視化することを可能とした。また、落石は半径の大きい球形要素1つでモデル化し、初速度を与えて球形要素群へ衝突させることにより解析を行った。

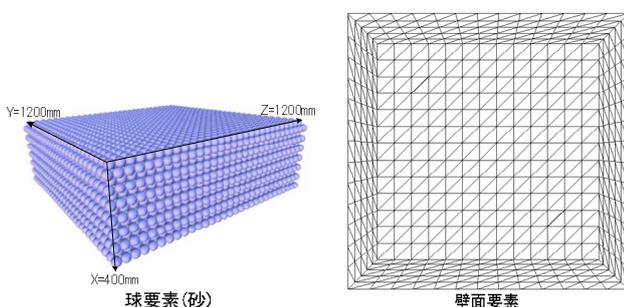


図-1 球形要素モデルと壁面要素モデル

3. 個別要素間の接触判定

球形要素間の接触判定は要素*i*と要素*j*間の距離を R_{ij} として次式で行った。

$$R_{ij} \leq r_i + r_j \quad (1)$$

ここで、 r_i と r_j はそれぞれの要素半径であり、要素間距離 R_{ij} は各要素の座標を(x,y,z)で表現して次式に示す。

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (2)$$

壁面-球形要素間の接触判定においては、壁面要素*i*を包含する平面と球形要素*j*の接触判定と、その平面に投影した球形要素の座標が三角形面内に存在するかの2段階の判定により行った。壁面要素を包含する平面と球形要素間の距離 D_{ij} は次式から求めることができる。

$$D_{ij} = \frac{A_i x_j + B_i y_j + C_i z_j + D_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}} \quad (3)$$

ここで、法線ベクトルの成分 A_i 、 B_i 、 C_i は壁面要素の頂点を結ぶベクトルの外積から求まり、定数 D_i は原点からの距離を示し、他の定数が決定することにより平面の方程式の一般形から一意に決まる。

また、この平面に投影した球形要素*j*の座標は求めた距離 D_{ij} と壁面要素*i*の方向余弦 L_i 、 M_i 、 N_i を用いて次式で計算できる。

$$\begin{cases} x'_j \\ y'_j \\ z'_j \end{cases} = \begin{cases} x_j \\ y_j \\ z_j \end{cases} + D_{ij} \begin{cases} L_i \\ M_i \\ N_i \end{cases} \quad (4)$$

(3)(4)式の符号は座標系によって変わるので座標系やメッシュの切り方によって若干の調整が必要である。求めた平面上の点と壁面要素の頂点を結んで出来る三角形の面積を計算して合計すると、三角形面内に投影座標が存在する場合は壁面要素*i*の面積と一致するが、存在しない場合は合計面積の方が大きくなるために、壁面-球形要素間の接触判定は次式で表現できる。

$$\begin{cases} abs(D_{ij}) \leq r_j \\ AREA_{12j'} + AREA_{23j'} + AREA_{13j'} = AREA_i \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $AREA$ はそれぞれの三角形の面積であり添字は頂点番号を示す．距離 D_{ij} を引数にとる $abs()$ は絶対値を返す関数である．壁面要素と球形要素の接触判定における位置関係を図-2 に示す．

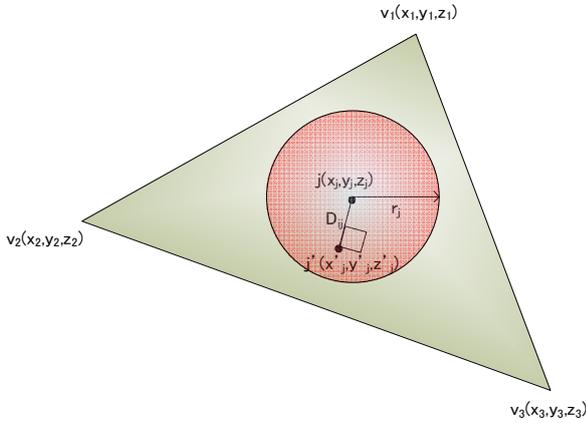


図-2 壁面 i と要素 j の接触判定

4. 解析例

個別要素法による解析で用いるばね定数は、一般に物性値による単純計算だけでは求まらないことが知られている．そこで、実験値や既往の研究から得られる知見により決定し、ある程度はパラメトリックに調整する必要がある．また、球形要素の要素配列のパッキング手法によっても解析結果には大きな影響が見られる．本研究では出来るだけ大きな荷重応答を見るために最密配列による解析を行った．

以下に要素数 12187 個から成るサンドクッション中央に質量 11.0kg の落石を速度 20.0m/s で鉛直落下させた解析例を紹介する．図-3 はモデル全体の解析結果である．

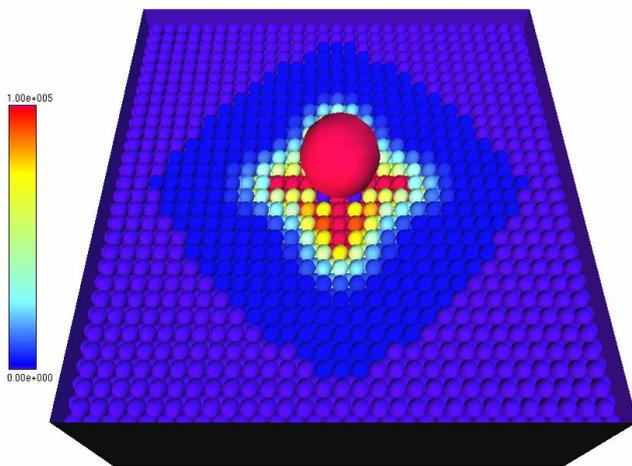


図-3 解析結果例

図-4 は壁面モデルの結果を上面から透視図で描画したものを示す．各図のモデルに付けられた色は応力の大きさを表し、暖色ほど大きい応力状態であることを示す．サンドクッションを構成する球形要素応力は全てのばね作用力中最大のを断面積で除して求めており、壁面要素応力は奇数番号と偶数番号の対になる三角形要素の値を平均したもので、このようにメッシュ毎に接触判定・作用力計算を行うことにより細かな応力状態を把握することができ、結果を応答波形だけでなく、より視覚的に確認できるメリットがある．

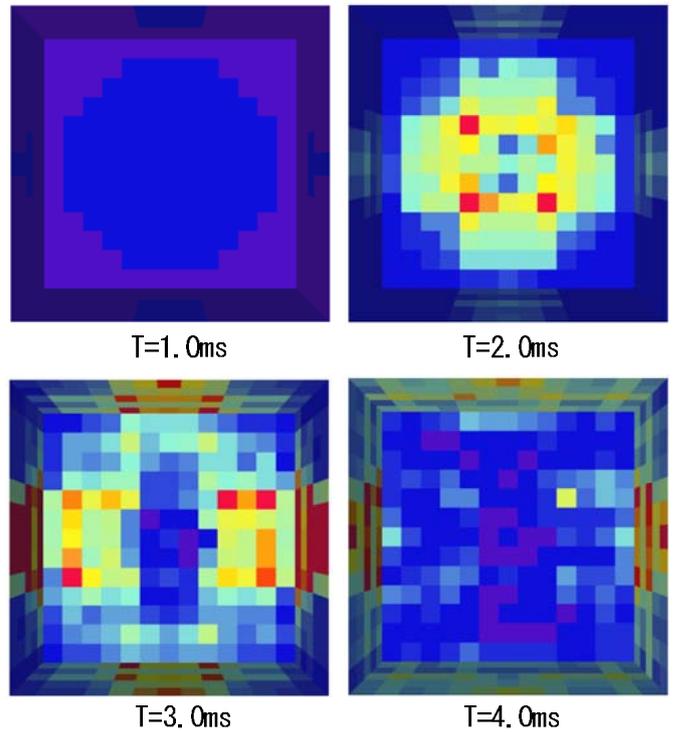


図-4 壁面要素の応力図

5. まとめ

個別要素法によるサンドクッションの衝撃応答と構造躯体への伝達応力についての解析手法を構築でき、結果を示せることを紹介した．実験結果等と照らし合わせることで解析パラメータや材料の構成則をパラメトリックに検討し、実際の設計に役立つ知見を得られるようになって考えている．今後、各種応用的事例に適用していく予定である．

参考文献

- (1) 中田博・榎谷浩・今井和昭：個別要素法による敷砂上への落石衝撃特性に関する解析，土木学会論文集，第 392 号/I-9，pp.297-306，1988.