

粒状体のボロノイ分割でとらえた局所的間隙に関する研究

前橋工科大学 学生会員 ○丹野 大輔

前橋工科大学 正会員 土倉 泰

1. はじめに

砂のような粒状体は、一般に、粒子がランダムに積み重なってできている。ただし、その積み重なり方にも何らかの特徴付けができる場合がある。これを評価するために、粒子間の接触点の卓越方向を調べることがあるが、本研究では、粒子ではなく間隙に着目する。粒子の積み重なり方が変われば、粒子の周囲にある間隙の分布状況が変化すると推察されるためである。粒状体のボロノイ分割を利用すれば間隙を区切られる。そこで、球の集合体をボロノイ分割し、各々の球のまわりに定義可能な局所的間隙を特定して研究対象とした。

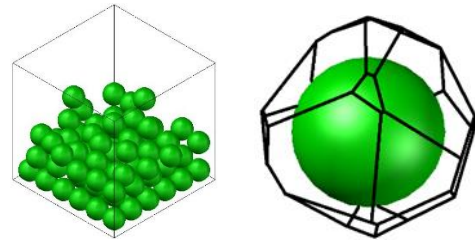
2. 粒状要素法での粒状体作成とボロノイ分割

球の集合体を粒状要素法¹⁾で作成した。半径2cmの球90個を、1辺が12cmの立方体の枠内に、重力の作用のもとで積み上げる。球の密度を 2.626g/cm^3 、ヤング率を $1.96 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ 、ポアソン比を0.2、球と球、球と壁の間の摩擦角を 20° とした。1球積むたびに各球に対して力のつり合い状態を十分な精度で求めた。なお、粒状要素法を適用する際、動的な効果を取り入れておらず、この計算は静的な積み上げに対応している。

できあがった球の集合体を図1(a)に示す。この集合体に粒状体のボロノイ分割²⁾を適用した。球を除いた空間内の点を、その点からの接線の長さが最も短くなる球の占有領域に含まれる点とする。したがって、領域を分割する境界上では、隣接2球への接線長さが等しい。

3. 局所的間隙と球1個当たりの間隙比

ボロノイ分割により図1(b)に例示するようなボロノイ多面体ができる。球ごとの領域が明確化



(a) 90 個の球 (b) ボロノイ多面体

図1 球の集合体とボロノイ多面体の例

するので、粒状体全体をみたときにはつながっている間隙が分割される。ここで、多面体内で球の存在しない空間を、当該球に割り当てられた局所的間隙と定義する。この間隙をつかうと、球1個当たりの間隙比を計算できる。これを局所的間隙比と称することにする。図1(a)の粒状体を対象にその値を算定した。ただし、粒状体の端部の球では多面体が形成されないことが多い。隣接球がないと領域境界を特定できないためである。また、十分な数の球でまわりを囲まれていない球では、ボロノイ多面体に突き出た部分ができ、それだけ局所的間隙比が大きくなる。そこで、端にあって周囲の球の数が少ない球は、間隙比の計算対象から除外した。このため、局所的間隙比を計算できた球は5個であった。

計算で得た局所的間隙比を図2の□印で示す。また、間隙比算定対象のボロノイ多面体を図3に示す。この粒状体モデルの全体の間隙比は0.587であった。作られたボロノイ多面体の中でも、3番のボロノイ多面体は上部の空間が比較的大きく、局所的間隙比が大きい。このように局所的間隙比にばらつきはあるが、球1個当たりの間隙比が全体値と極端に変化しない。

4. 粒状体を崩壊させたときの間隙の変化

図2の▲印と●印は、粒状体モデルを支える壁

キーワード 粒状体 ボロノイ分割 局所的間隙 全体の間隙比 ダイレイタンスー

連絡先 〒370-1135 群馬県佐波郡玉村町板井 30-16 TEL:080-3012-5771 E-mail:m2016006@maebashi-

を外向きに動かし、間隙比の変化する様子を示したものである。壁を 0.1cm 動かした状態の局所の間隙比は、初期状態と比べて 4 番と 5 番で若干小さくなり、平均値は 0.583 に下がる。つまり、全体の体積も下がっているといえる。これは、粒状体がせん断変形して負のダイレイタンスが生じたことに対応すると考えられる。一方、壁を 1cm 動かした状態の局所の間隙比はばらつき、平均値は 0.617 となる。図 4 の球で図 3 より隙間が目立つ通り体積が膨張している。

図 5 は、壁を動かした距離に応じた間隙比の平均値の変化および変動係数を示すグラフである。粒状体が膨張するのにもなって、局所の間隙比の変動係数が大きくなっている。正のダイレイタンスの発生が隙間のばらつきの増大と関係することを示唆している。

5. ガラスビーズの実験結果との比較

最小・最大密度試験の容器とガラスビーズを用いた実験を行った。ガラスビーズの直径は 2mm である。容器にガラスビーズを 1~4 球ずつ丁寧に落とす詰め方だと比較的密に詰まり、スプーンなどで掬って一気に詰めると比較的緩く詰まる。前者の値は 0.64、後者の値は 0.68 となった。先に示す粒状体モデルの間隙比の平均は 0.587 であったので、1~4 球ずつ落とす詰め方で得られた値に近い。なお、JIS 規格に則って最小間隙比と最大間隙比を求めると、それぞれ 0.539、0.648 であった。

6. おわりに

粒状要素法で球の集合体を作成し、その結果に粒状体のボロノイ分割を適用した。球ごとに割り当てられた領域に局所の間隙を定義し、作成した球の集合体で間隙比を計算してその値を検討した。得られた値は球 1 個ごとに求められるものである。この局所の間隙をつかい、球の集合体を崩したときに間隙が大きくなっていくこと、その際に局所の間隙比のばらつきが大きくなることを数値でとらえることができた。

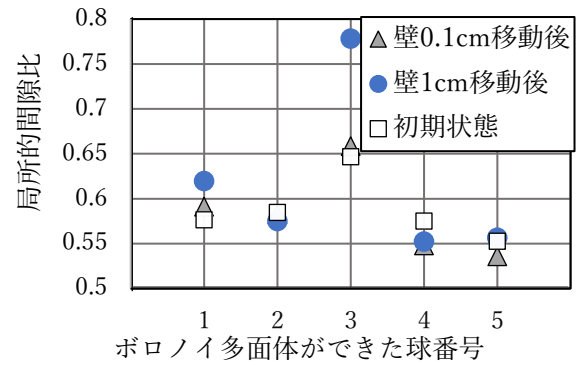


図 2 箱の壁を動かした時の局所の間隙比

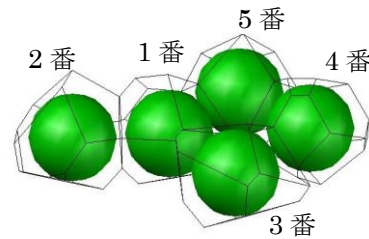


図 3 初期状態のボロノイ多面体

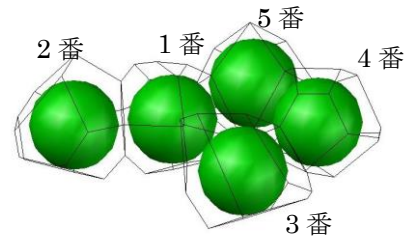


図 4 壁 1cm 移動時のボロノイ多面体

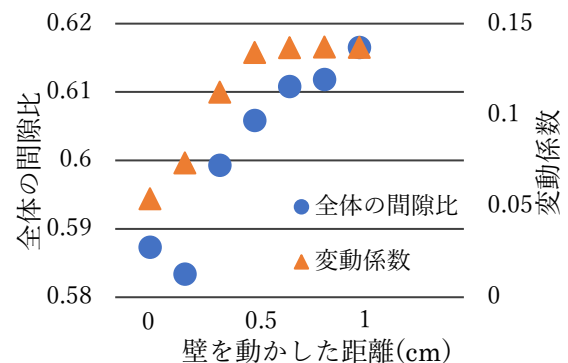


図 5 壁を動かした時の全体間隙比と変動係数

参考文献

- 1) 岸野佑次：“新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析”、土木学会論文集、第 406 号/Ⅲ-11、pp.97-106.1989.
- 2) 阿部大樹，土倉泰：“崩壊する粒状体における局所の間隙比の変化”、土木学会関東支部第 46 回技術研究発表会、Ⅲ-15，DVD-ROM，2019