

Ⅲ - 5

粒状体の間隙力学量を用いたシミュレーション法について

東北学院大学工学部 学生員 ○藤原 孝史
同 正 員 佐武 正雄

1. はじめに

粒状体は粒子と間隙から成り立っている。それらのグラフは幾何学的に双対性を持ち、また接触点において粒子に伝わる力と相対変位のグラフも力学的に双対性をもっている。本文は粒状体の準静的挙動を詳細に解析するために開発されたシミュレーション法（粒状要素法）の考え方に双対性を用い、間隙にも力学量を与えた新しいシミュレーション法（双対粒状要素法）についての考え方を説明する。

2. 対粒状要素法の考え方

粒状体の準静的挙動を解析する粒状要素法にならい、本文で提案する双対粒状要素法では、図-1のフローチャートに示す手順で解析を行う。すなわち、ひずみ制御でまず境界の粒子に変位を与え、そのために生じる接触変位から1つのループについて不適合変位（間隙変位）を求める。次に間隙の剛性マトリックスを用いて間隙力を算出する。この間隙力によって新たに接触力が生じ、接触点で考える剛性によって接触変位が生じるので、前述の解析を繰り返し行い、間隙変位が小さくなり収束するまで計算を行う。

3. 双対粒状要素法の解析法

ここでは、双対粒状要素法の解析方法についてフローチャートをもとに式を用いて簡単に説明をする。

(1)はじめに粒状体のパッキングを対象とし、図-2に示すように粒子の接触点を点線で結び、間隙を形成する。そしてこれを間隙粒子とみなし、表-1に示した力と変形の量を粒子、接触点、間隙として考えると、間隙にも力学量を与えることができる。しかし、本文では考え方を簡単にするために粒子の回転量とモーメントを考慮しないこととする。

(2)次に粒状体のパッキングについてひずみ制御を行う。このとき、間隙の接触点に接触変位増分 ΔU_c が生じる。

(3)この接触変位の増加により不適合度が生じるため、間隙を適合状態にするために間隙変位（不適合変位）を与える。このとき間隙変位を U_v とおくと、

$$U_v = \sum_{i \in v} T_c^{-1} \Delta U_c \quad \text{————— ①}$$

ここで $\sum_c$ としたのは1つの間隙要素に着目した時に、その間隙に接触しているすべての間隙の接触変位の総和を表す。また T_c は変換マトリックスであり、次のようになる。

$$T_c = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 1 \end{bmatrix}$$

(4)間隙変位を消去するために、間隙の剛性マトリックス S_v を使用し、間隙力 ΔF_v を加える。

このとき、 ΔF_v は、

$$\Delta F_v = S_v \Delta U_v \quad \text{————— ②}$$

と表現され、 S_v は次のように与えられる。

$$S_v^{-1} = \sum_{i \in v} T_c^{-1} S_c^{-1} T_c \quad \text{————— ③}$$

ここで、 S_c は接触の剛性マトリックスであり、

$$S_c = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_t \end{bmatrix}$$

と表す。これより間隙の剛性マトリックス S_v を用いれば、間隙変位 U_v を解消するため、変位の適合状態を得るために各要素に与えるべき力を表す間隙力増分 ΔF_v を求めることができる。

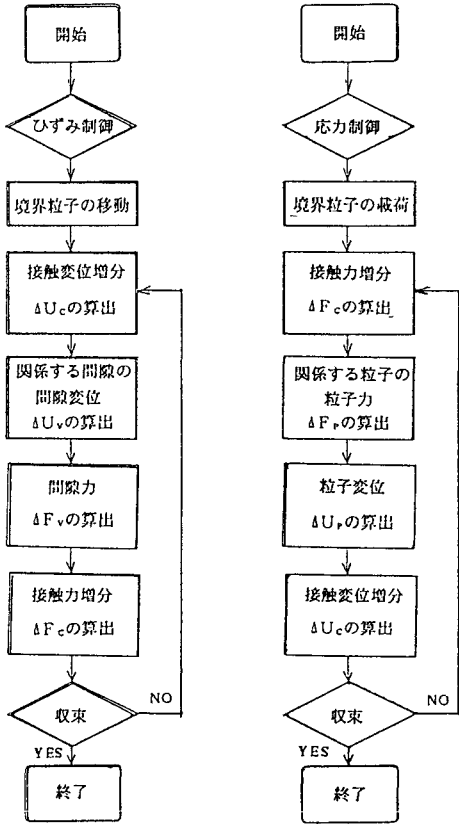
(5) この間隙力増分 ΔF_v によって、各間隙の接触点に接触力増分 ΔF_c が生じる。このとき、 ΔF_c は変換マトリックス T_c により次のようになる。

$$\Delta F_c = T_c \Delta F_v \tag{4}$$

(6) それで、この ΔF_c によって生じる接触変位 ΔU_c を求めると、

$$\Delta U_c = S_c^{-1} \Delta F_c \tag{5}$$

となる。以上のように、間隙に生じる不適合度が解消されるまで計算を繰り返す。



(a) 双対粒状要素法 (b) 粒状要素法

図-1

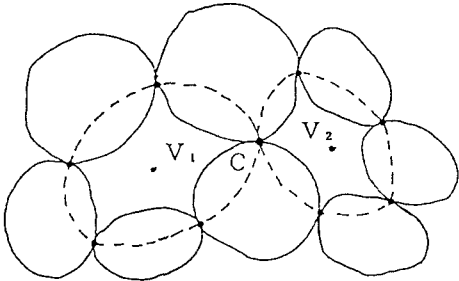


図-2

	粒 子	接 触 点	間 隙
力	F_p	F_c	F_v
変 位	U_p	U_c	U_v

表-1

4. おわりに

本文では、双対粒状要素法の基本的な考え方を述べた。今後、実際にシミュレーション計算を行って、この方法の実用性を確かめたいと思っている。

<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、p 97-106(1989)
- 2) 佐武正雄：粒状体における双対性とその応用、平成3年度 土木学会東北支部技術研究発表会 p 348-349