

大成建設(株)正会員 安部 吉生 里 優
 亀村 勝美
 京都大学工学部 大西 有三

1. はじめに

近年、地下構造物の建設の増加等に伴い、岩盤の安定性が問題となることが少なくない。土木工学の分野においては、この安定性を評価、あるいは予測するために数値解析手法が積極的に取り入れられており、現在のところ、この主力となっているのは有限要素法である。一方、この手法では地盤を連続体としてモデル化するため、不連続面に沿った岩盤の安定性評価や、崩落現象の予測に関しては不都合が生じる場合がある。

本研究は、このような問題を補う意味でCundall⁽¹⁾の提案した個別要素法の考え方を基礎とした数値解析手法により、岩盤の変形・破壊過程について検討することを目的としている。

2. 数値解析手法

Cundallは、岩塊を剛体とみなし、微小時間において剛体間や受け渡される力の増分が、岩塊の重心に加わる力、およびモーメントとしてその岩塊の運動を支配するという視点から、運動方程式を用い、岩盤の崩壊過程をシミュレートする方法を提案した。

この方法では、剛体ブロックどうしの接触機構に対しVoigtモデルを導入している。この機構を示したものが図-1である。このモデルでは、微小時間 Δt における2つのブロック間の相対変位 ΔU_n 、 ΔU_s より、接触力の増分 ΔF_n 、 ΔF_s が、それぞれ以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned}\Delta F_n &= \Delta F_n(e) + \Delta F_n(d) \\ &= -k_n \cdot \Delta U_n - \eta_n \cdot \dot{\Delta U}_n \\ \Delta F_s &= \Delta F_s(e) + \Delta F_s(d) \\ &= -k_s \cdot \Delta U_s - \eta_s \cdot \dot{\Delta U}_s\end{aligned}$$

ここに、 k_n 、 k_s は垂直、およびせん断方向のばねの剛性であり、 η_n 、 η_s はダッシュポットの粘性である。また、(e)、(d)と添字で示してあるのは、接触力をさらにバネによる反発力とダッシュポットの減衰力とに分けて考えた場合の値であることを示す。

このようにして求めた接触力をもとに、運動方程式を微小時間ごとに解くことによりブロックの運動を追跡するのが個別要素法の基本的な考え方である。

この個別要素法では、2つのブロックが互いに離反するような方向に運動する場合は、ブロック間には拘束し合うような条件は存在せず各々のブロックが自由に運動できるとするのが一般的である。そしてこれは、砂やキ裂によって完全に分離された岩塊に対しては妥当な仮定である。しかし、初期に各々のブロック間に引張強度、あるいはせん断強度が存在するような場合はこの限りではない。そこで、ブロック間に引張の相対変化が生じた場合にも、変形に見合う引張が発生するようなモデルを作成した。ただし、図-2に示すごとくブロック間の距離がある程度大きくなった後は、この力が働かないこととする。

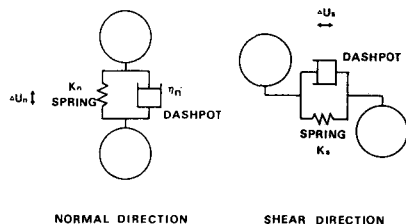


図-1 接触機構に用いるVoigtモデル

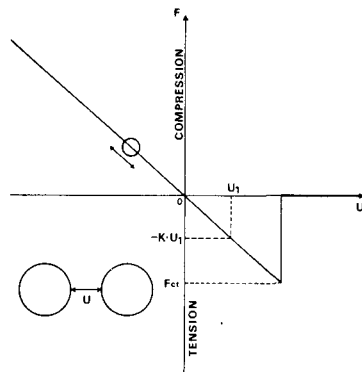


図-2 接触力とブロック間距離

すなわち、ブロック間に引張力が生じた場合でも、幾分かはブロックどうしが弾性的に挙動すると仮定するわけである。この時、ブロック間に相対的な力が生じなくなる限界は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \dot{f} &= F_{ct} - \sum (-k_{ni} \cdot \Delta U_{ni} - \eta_{ni} \cdot \dot{\Delta U}_{ni}) \\ f &= 0 \quad : \text{分離条件} \end{aligned}$$

ここに、 F_{ct} はブロック間に生じる最大引張力である。

以下に、このような条件下でブロックがどのような挙動をするかについて調べた例を示す。ただし、ブロックは円形とする。

3. 解析例

まず、全ブロックが分離条件を満たさない状態で本手法による変形のモードと、有限要素法による解を比較してみた。それぞれの手法による解析に用いたモデルを図-3と図-4に示す。

有限要素法においては、個別要素法におけるブロックの重心間を梁要素で結び、それぞれの節点に重力加速度に見合う外力を作用させる。

図-5と図-6に、それぞれの手法によるモデルの変形状態を示したが、変形のモードとしては非常によく一致していることがわかる。

図-7と図-8は、ブロックの幾つかに分離条件以上の引張力が作用する場合の例として、たわみに伴う破壊状態を示したものである。たわみの増大に伴い、下部中央付近から水平方向の粒子の分離（クラック）が進展して行き、やがて、破壊にいたる様子が見える。このように、本手法ではブロックの集合体の弾性的な挙動と破壊が表現できる。しかしながら、先に示した分離条件を具体的にどのような形で定めるかは明確になっていない。これについては、今後の課題としたい。

4. おわりに

この手法においては有限要素法の場合とは異なり、構築系全体での力の釣り合いを満たすことを前提とはしていない。つまり、ブロック間の相互作用において外力がブロック間に分配されることになり、結果として静的な平衡方程式が与える解付近で系全体が微小振動を繰り返すこととなるのである。そのため、計算に用いる様々な定数によって系の安定性自体が大きな影響を受けることとなり、解の収束性が問題となることがある。今後は、これらの問題とブロック間の分離基準に対する研究を続けて行く予定である。

<参考文献>

- 1) Cundall, P. A. : A computer model for rock-mass behavior using interactive graphics for the input and output of geometrical data, Report MDR-2-74, 1974

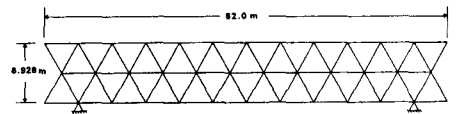


図-3 有限要素法に用いたモデル

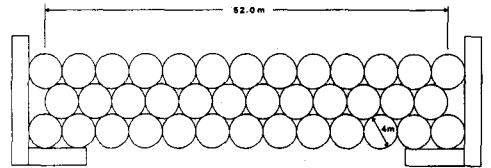


図-4 個別要素法に用いたモデル

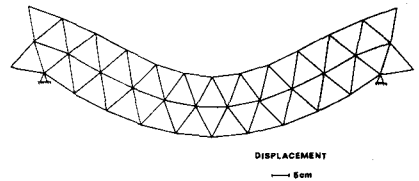


図-5 有限要素法による変形図

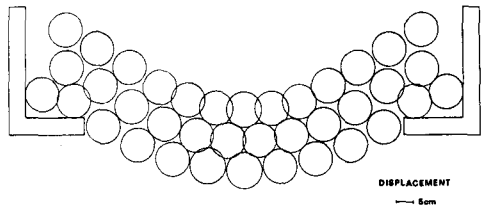


図-6 個別要素法による変形図

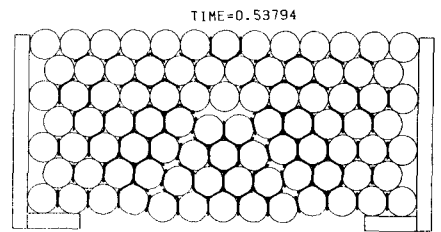


図-7 たわみにする破壊形状(その1)

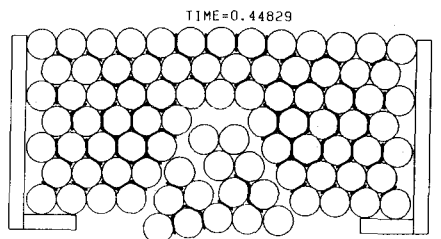


図-8 たわみにする破壊形状(その2)