

パラメトリックスタディによる不連続変形法(DDA)の反発機構に関する検討

○鳥取大学 (正)中村公一
 明治コンサルタント(株) (正)島内哲哉
 明治コンサルタント(株) (正)鄭 惟
 サンコーコンサルタント(株) (正)佐々木 猛
 京都大学大学院 (正) 西山 哲
 京都大学 (フェロー) 大西有三

1. はじめに

岩盤崩壊や落石の解析では、大小の多角形ブロックの挙動が問題となる。このような場合、不連続変形法(DDA)による落石シミュレーションが有効であるとされている。しかし DDA の解析には、調査結果から得られる物理定数の他にも多くの解析パラメータの設定が必要となる。本研究は、DDA の落石解析時における解析パラメータ相互の影響や傾向を調べ、実用的な設定方法の手順を構築することを目的としている。

2. 検討モデルと DDA の接触機構

本研究で用いたモデルを図-1 に示す。下のブロックを固定し、上のブロックの衝突速度を 1m/s, 5m/s, 10m/s, 15m/s, 20m/s となるよう初速を与え、入反射速度比が 1.0 となる時間刻み(Δt)と接触バネ剛性の関係を検討した。検討に用いたのは二次元剛体 DDA である。

DDA の接触機構は open-close 繰り返し計算と呼ばれる方法で行われる。この方法は、地表面上に Open 基準、地表面下に Close 基準と呼ぶラインを設定し、ブロック節点が Open と Close のいずれにあるかを、計算ステップ前後の位置を比較することでブロックの位置を判定する方法である。

解析では、ブロックが Open 基準を通過して地表ブロックに達すると入力した速度比が働き、以後はその速度に対してバネ剛性が働いてブロックを押し戻す。DDA では、この接触 - 貫入 - 離脱までの一連の過程において、時間刻みあたりの変位がある範囲に収まるように調整される。この調整は以下に示す式で行われる。式(1)は Δt を自動とした場合にのみ、また式(2)は、設定条件によらず常に各解析ステップで適用される。本検討では Δt を入力値としており、式(2)による調整のみとした。

$$a1 \cdot t^2 + v \cdot t + \max dt = 0 \quad (1)$$

$$q0 = \frac{(a1/w0)}{MDR} \quad (2)$$

式(1)(2)において、a1 はそのステップでの最大変位、w0 は図-1 のモデルに示す y 軸方向最大節点距離(h)の 1/2 である。すなわち DDA ではモデルの大きさもΔtの調整要素の一つである。

DDA の解析においてもっとも重要なのがバネ剛性と Δt であり、この組み合わせが適切でない場合、設定した速度比に反して大きく減衰したり過剰に反発する。既報¹⁾では、Δt を自動とした場合のバネ剛性との関係を報告したが、本検討では、Δt を入力値とし(表-1)、図-3 に示すように接触部に Voigt 型減衰を導入した場合のバネ剛性と粘性減衰係数の効果について検討した。

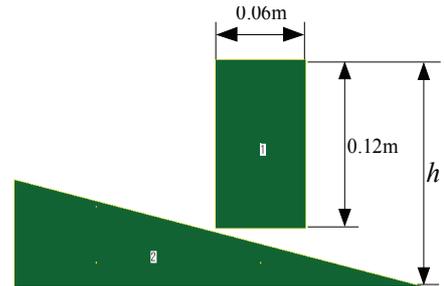


図-1 検討モデル

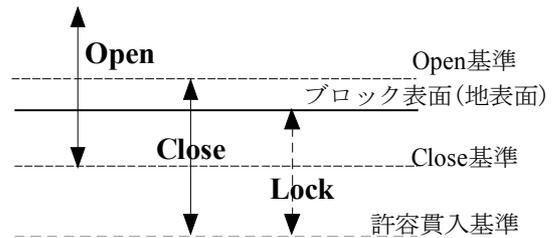


図-2 DDA の接触機構

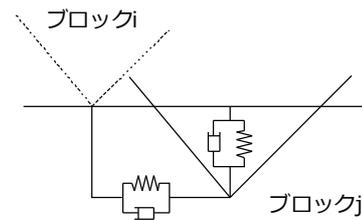


図-3 Voigt 型減衰を考慮した接触部

表-1 解析条件

単位面積質量 (kN/m ²)	2.0
時間刻み (Δt)	0.000001
最大想定変位比 (MDR)	0.000001
接触バネ剛性 (kN/m)	10 ⁴ ~ 10 ¹⁴
垂直/せん断バネ剛性比	1
粘着力 (kN/m ²)	0
摩擦角 (deg)	5
Open基準	10 ⁻⁷
Close基準	10 ⁻⁴

キーワード：落石, DDA, バネ剛性, 速度比, Voigt モデル

連絡先：680-0945 鳥取市湖山町南 4-101 Tel 0857-31-5291

3. Δt , バネ剛性, 入射速度の関係

図-4 は, 表-1 の解析条件のもとで接触バネ剛性が $10^4 \sim 10^{14}$ kN/m の間での入射速度に対する速度比の変化を表した図である. 入射速度は 5m/s, 10m/s, 20m/s である. この図から, 速度比 1.0 となるのは $10^9 \sim 10^{14}$ kN/m のバネの範囲に限られること, 速度比には大きな入射速度ほど大きなバネを必要とすること, その一方でバネが 10^8 kN/m より小さいと減衰が大きく, 80%程度の値しか得られないことなどが明らかである. このように式(2)のみによる Δt の調整だと, 速度比の入射速度依存の傾向が強くなり, しかも 20m/s のように解も安定しないケースが生じる. また, Δt を自動として式(1)(2)を同時に用いると, 各入射速度における速度比 1.0 となるバネ剛性が $10^8 \sim 10^{11}$ kN/m の間に狭まり精度の高い解析が可能である¹⁾.

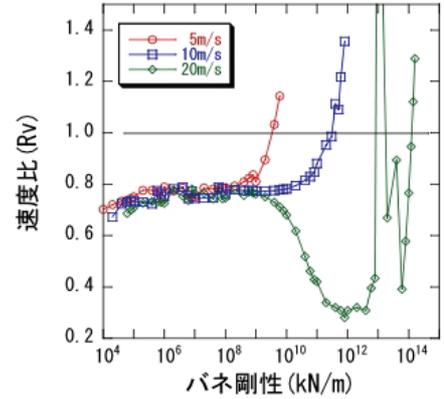


図-4 速度比とバネ剛性の関係 (粘性減衰考慮せず)

4. バネ剛性と入射速度に対する粘性減衰係数の効果

図-5 は, 図-4 の入射速度 10m/s のケースに Voigt 型減衰を適用し, 粘性減衰係数(η)を 0.01, 1.0 とした時の結果である. この図から, 接触バネ剛性が $10^4 \sim 10^8$ kN/m の範囲では速度比が上側にシフトし, ほぼ速度比 1.0 となるのに対し, 10^9 kN/m 以上では変化がないことがわかる. この傾向は入射速度 1m/s, 5m/s, 15m/s, 20m/s に対しても同様で, 粘性減衰係数の効果は $10^4 \sim 10^8$ kN/m の比較的小さい範囲で, しかも値が大きいほど大きい. 導入した Voigt 型減衰は, 速度に比例してバネ剛性が増加するアルゴリズムを持つため, このような効果が働いたものと考えられる.

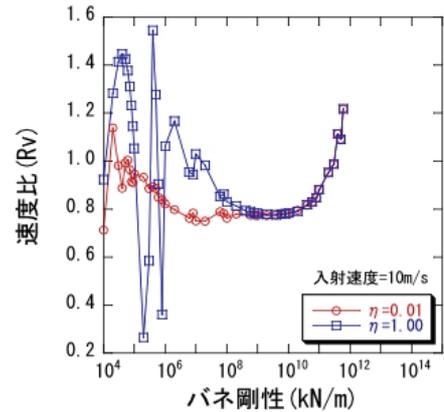


図-5 速度比とバネ剛性の関係 (粘性減衰考慮)

図-6 は, 検討によって最適と判断された組み合わせによる解析結果を示した図である. 条件として, 10^4 kN/m, 10^5 kN/m, 10^6 kN/m, 10^7 kN/m, 10^8 kN/m の 5 種類のバネ剛性に対して, 入射速度 1m/s, 5m/s, 10m/s, 15m/s, 20m/s の時に速度比が 0.9~1.0 の範囲となる粘性減衰係数 (η) を 0.001~10.0 の範囲で探索した. 組み合わせ総数は約 600 通りとなる. 上記のバネ剛性の範囲において, 入射速度が増加しても速度比は, 0.9~1.1 の範囲に収まっている. このことから, この範囲の任意のバネ剛性に対し適切な粘性減衰係数を設定できれば, 常に一定の精度の範囲で正しい入力速度比の結果を得ることが可能になることがわかる. 図-7 は, 本検討におけるバネ定数と粘性減衰との関係を示しており, この図からバネ剛性が決まればおよその粘性減衰係数の値を想定できることになる.

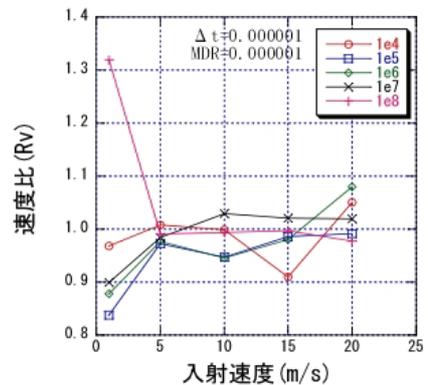


図-6 入射速度の変化に対するバネ剛性別にみた速度比の変動

5. 今後の課題

DDA の落石解析における入力バネ剛性と速度比との関係について述べた. 衝突解析では時間刻みあたりの変位の変化が大きいため適切な Δt とバネ剛性の組み合わせを見つけることが難しい. Voigt 型減衰の導入により, バネ剛性の適用範囲がより広がることを述べた. 今後は, さらに詳細な検討を進めるとともに, より実際的なモデルへの検討を進めていきたいと考えている.

参考文献 1) 中村公一, 島内哲哉, 鄭惟, 西山哲, 大西有三, DDA の落石問題における解析パラメータの設定法に関する検討, 第 45 回地盤工学研究発表会(投稿中).

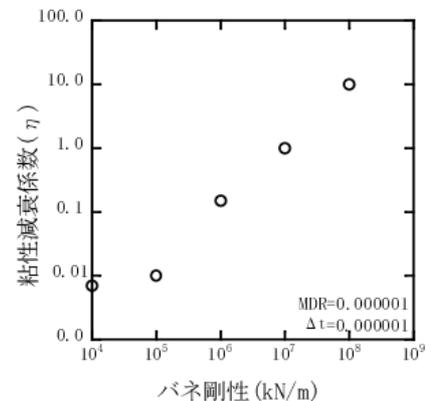


図-7 バネ剛性と粘性減衰係数との関係