DDAによる落石解析のための解析パラメータ決定法に関する研究

島内哲哉[1*]・鄭 惟[1]・中村公一[2]・佐々木猛[3]・西山哲[4]・大西有三[5]

[1]正会員　明治コンサルタント株式会社 技術統括部東川口分室（〒333-0801 埼玉県川口市東川口1-22-4）

[2]正会員　鳥取大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻（〒680-8552 鳥取県鳥取市胡山町南4-101）

[3]正会員　サンコーコンサルタント（株）岩盤工学研究室(〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9)

[4]正会員　京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

[5]正会員　京都大学 理事・副学長(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail:shimauchi-t@meicon.co.jp

DDAによる落石解析では，密度や速度比といった物理定数やモデルの他にも，Δt，ペナルティバネ，最大想定変位比などの解析結果に影響を与える多くのパラメータを設定する必要がある．本研究では，1m/s～20m/s間の衝突速度において，これらの解析パラメータの感度解析を行った．解析では，入射速度の増加に応じて大きなペナルティバネを必要とすることが知られているが，Δtを10^{-6}sec，MDRを10^{-5}と小さく設定することで，1m/s～20m/s間の速度にほぼ対応可能なペナルティバネの狭小な区間があることを明らかにした．ただし，落石ブロックと地盤ブロックの面積比は，1:50以下に設定することが最適な解を得る条件となる．

Key Words : *rockfall,velocity ratio,DDA,Roughness*

1. はじめに

DDA による落石解析では，衝突地点でのエネルギー減衰や，岩塊や地形形状といった物理定数やモデルの他にも，解の安定と精度を保証するための解析パラメータ(タイムステップ(Δt)，ペナルティバネ(K)，最大想定変位比(MDR)など)を設定する必要がある．落石の解析は変形解析と異なり，ブロック同士が大きな速度で衝突するため，接触時のステップあたりの変位が速度に応じて大きく変化することが特徴である．しかし現段階では，このような大きな変位に対応可能な解析パラメータの設定手順や方法が確立されておらず，パラメータ自体の性質に関する研究もまだ少ない[1),2)]．

そこで本研究では，上記の 3 つの解析パラメータのうち，もっとも影響の大きいペナルティバネを変数とした感度解析を行い，その適切な決定法について検討した．検討項目は，**表-1** に示すとおりである．なお，本研究では，DDA Ver.08(2008)を剛体解析仕様に変更したバージョンを用いた．このため，弾性係数については触れていない．

2. DDAの接触機構と速度の影響

DDA の接触機構は open-close 法と呼ばれる方法で行われる．**図-1** に示すように，地表面上に Open 基準，地表面下に Close 基準と呼ぶごく薄いラインを設定し，ブロック節点の位置が 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，現在のブロックの状態を判定する方法である[3)]．落石解析では，ブロックが Open 基準を通過すると入力した速度比が働き，地表ブロックを通過すると，その時の入射速度に対してペナルティバネがブロックを押し戻すように働く．このような，接触，貫入，離脱までの一連の過程は，時間刻み毎の変位をもとに Δt に反映される．

Δt の調整には，式(1)と式(2)が用いられる．Δt の設定を入力値にすると，DDA では入力値による計算後，式(1)による Δt の修正が行われる．a1 はそのステップでの最大変位，w0 は**図-2** に示すように，モデルの y 軸方向最大値の 1/2 である．MDR は最大想定変位比とよばれ，モデルの Y 軸の許容変位を規定するための係数であり，0.01～0.001 が推奨値とされる[4)]．q0 の値が一定値を越えると Δt を q0 の平方値で除して Δt を小さく調整する．

$$q0 = \frac{(a1/w0)}{MDR} \tag{1}$$

$$a1 \cdot t^2 + v \cdot t + \max\, dt = 0 \tag{2}$$

表-1 検討する解析パラメータと範囲

解析パラメータ	検討範囲
時間刻み(Δt)	自動設定
最大想定変位比(MDR)	0.001～0.000001
ペナルティバネ(kN/m)	10^4～10^{12} 1オーダー内で1/100間隔 例 10^5～10^6内では 9000kN/m間隔

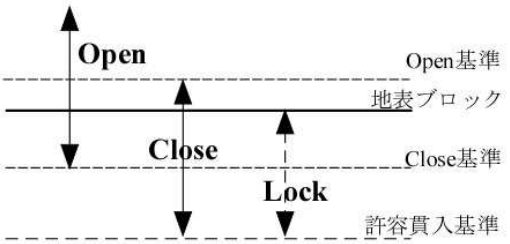

図-1 DDA の接触機構

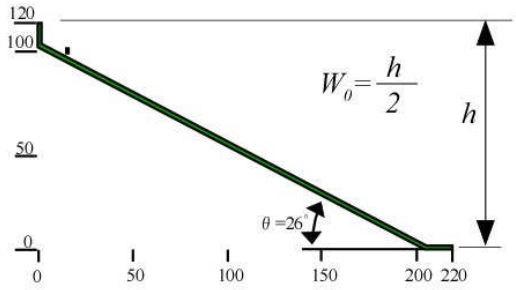

図-2 最大想定変位比(MDR)

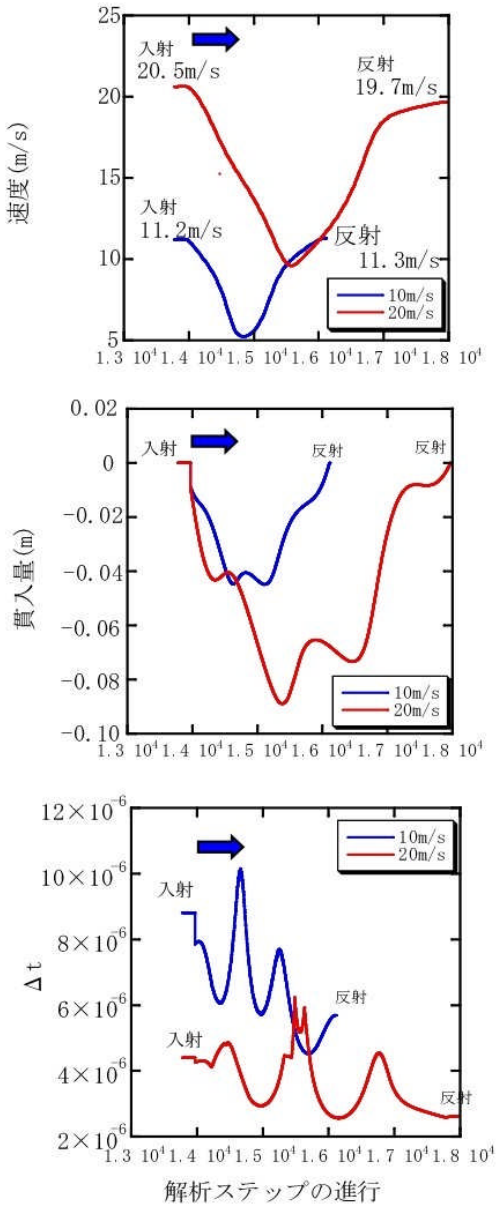

図-3 接触中の速度，貫入量，Δt の変化

一方，Δt の設定を自動にすると，最初に式(2)を適用後，式(1)による修正が行われる．v と maxdt は，そのステップでの速度と MDR とモデルから決まる最大変位量である．Δt は式(2)の根として求められる．Δt を自動として，MDR を小さい値に設定すればステップ毎の速度の変化に対する Δt の調整はほとんど式(2)だけで行われることになる．

実際の解析では，式(2)による Δt の調整が有効に働くことが多いことから，本検討では Δt を自動で行った．

図-3 は，入射速度を変えた場合の，衝突貫入中のステップ毎の速度，貫入量 Δt の変化を表した例である．Δt は自動であり，MDR は 0.000001，ペナルティバネは K=200000kN/m で，入力した速度比は 1.0 である．

この例では，入射速度 11m/s と 20m/s について示しており，入反射速度の比(速度比)でみると，11.3/11.2=1.01 と 19.7/20.5=0.96 であり，ほぼ入力速度比=1.0 を満足する結果となっている．ただし，解析に要するステップ数は，速度が 11m/s のとき約 2100 回，速度が 20m/s になると約 4000 回と，速度によってほぼ倍近く変化する．

貫入量も，同様にしてほぼ 2 倍の開きがあり，当然のことながら速度が速い方が貫入量は深い．

一方，貫入直後の速度の速いうちは Δt も低下するが，速度が減少を始めると，Δt は増加し始める．貫入中は，速度(変位)によって幾度も調整を繰り返しながら反射に至る．変位に合わせて Δt を調整する一連の変化は，式(2)によるところが大きい．

このように，DDA では衝突による速度と貫入の急激な変化に対して式(1),(2)により Δt を調整することで，設

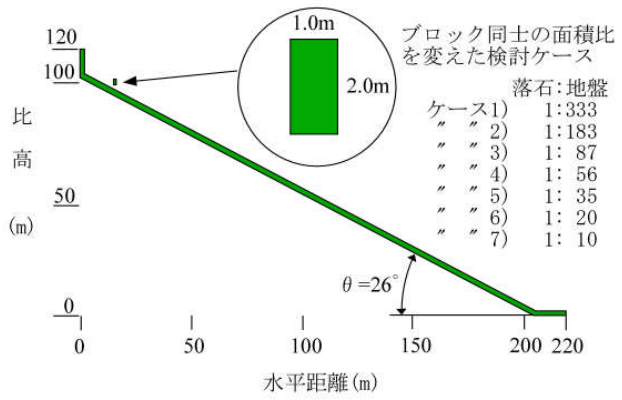

図-4 検討に用いた落石解析モデルの面積比

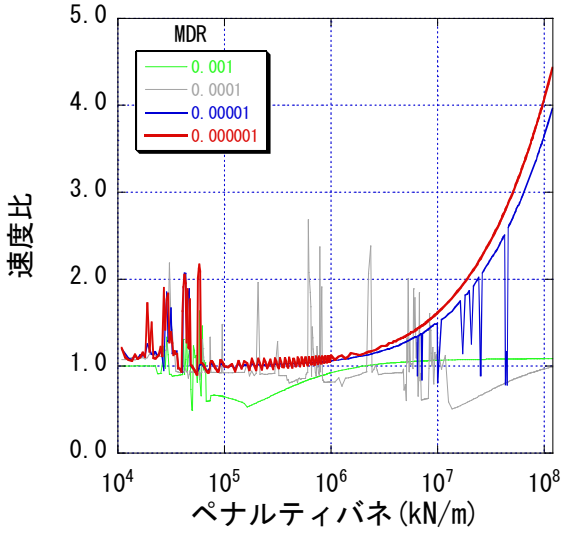

図-5 最大想定変位比(MDR)の影響(10m/s)

定されたペナルティバネの効果を最適化している．しかし，このような良好な結果を得るためには，冒頭で述べたようにΔtやMDRやペナルティバネの適切な設定が重要である．ちなみに，落石解析において良い結果を得ようとすると，図-3からは，Δtは1.0×10^{-5}～2.5×10^{-6}secと，非常に小さい値を用いなければならないことがわかる．

3. モデルと想定変位比とペナルティバネ

落石解析モデルの特徴は，通常地盤ブロックに対して落石ブロックが非常に小さい点である．図-4 は，斜面傾斜 26°，高さ 120m の落石解析モデルである．ブロックの大きさは，地盤ブロックが面積 665m^2，落石ブロックが 1×2m の長方形で，面積は 2m^2 であり，その比率は，落石ブロック：地盤ブロック=1：333 である．地盤ブロックを，薄い板状にモデル化しているのは，解析に陰解法を用いる DDA では，極端に大きさの異なるブロック同士の計算は好ましくないためである．

3.1 最大想定変位比(MDR)の設定

最大想定変位比(MDR)は，DDA 特有のパラメータである．式(1)にみるようにモデルの高さの項を含むため，例えばモデル全体が変形するような場合には，その変位の大きさをΔt に反映させるうえで有効に機能する．しかし,図-4 のように高さが変化しない場合は MDR も変化しないため，Δt との関係を良好に保つ値を別途設定しなければならない．そこで，次に MDR の影響について検討した．

解析には図-4 に示すモデルのケース 5(面積比 1:35)を用いた．影響は，入力速度比を 1.0 としたときの衝突速度に対する反射速度の比(速度比)でみるものとした．Δt は自動とし，ペナルティバネの検討範囲は 10^4～10^{12}kN/m である．なお，ペナルティバネの検討間隔は，各オーダー区間の約 1/100 ピッチ(例えば，10^5～10^6kN/m 間では 9000kN/m ピッチ)としている．

検討結果を図-5 に示した．図から MDR が 0.001 と 0.0001 のときは，速度比は小さかったり異常なピークがみられるなど安定しないが，MDR が 0.00001 になると，8×10^4～1×10^6kN/m の間に速度比が 1.0 前後で安定する区間がみられるようになる．この結果から，MDR は小さい方が解が安定することがわかる．

3.2 ブロック間の面積比の影響

次に，落下ブロックの大きさを 2m^2 としたまま，地盤側ブロックの面積を少しずつ小さくして，ブロック同士の面積の変化が，解析結果に与える影響を検討した．検討範囲は，図-4 に示す 1:333～1:10 までの 7 ケースである．なお，解析条件は，衝突速度 10m/s であり，入力速度比は 1.0 とし，MDR は 0.000001 としている．

図-6 に，検討結果を示す．この結果から，ブロックの面積比が 1:330～1:87 と大きい場合，速度比は検討範囲の全域で大きく振動し，最大で 0.5～2.5 もの範囲に及んでいることがわかる．しかし，ブロックの面積比が小さくなるにつれて振動は収まり，面積比が 1:56 以下になると速度比の振動範囲は 0.9～1.1 の範囲に収まるようになる．この結果から，剛体 DDA では，ブロック同士の面積比はほぼ 1:50 以下，MDR が 0.00001 以下が，安定した解析結果を得る一つの条件になると考えられる．

4. 入射速度がペナルティバネの応答に与える影響

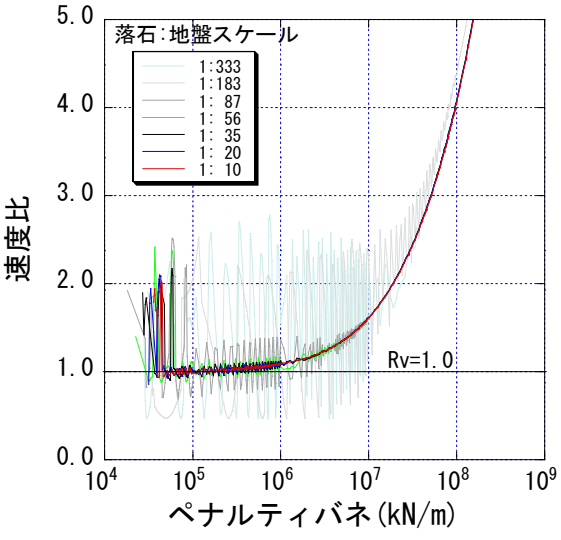

図-6 ブロックの面積比が解析結果(速度比)に与える影響(10m/s の例)

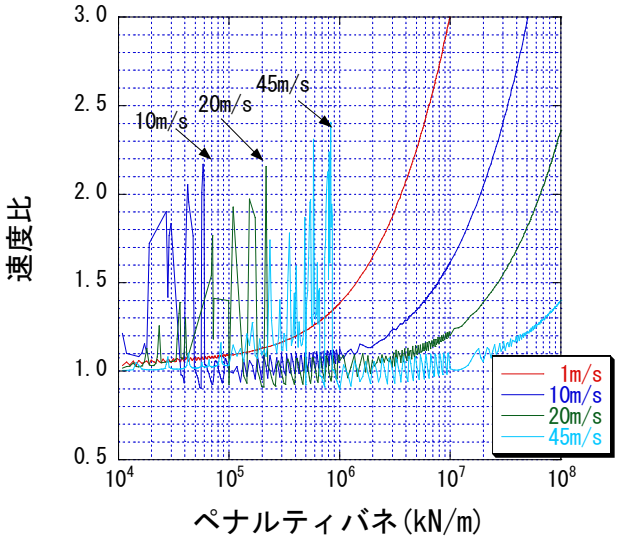

図-7 入射速度がペナルティバネに与える影響

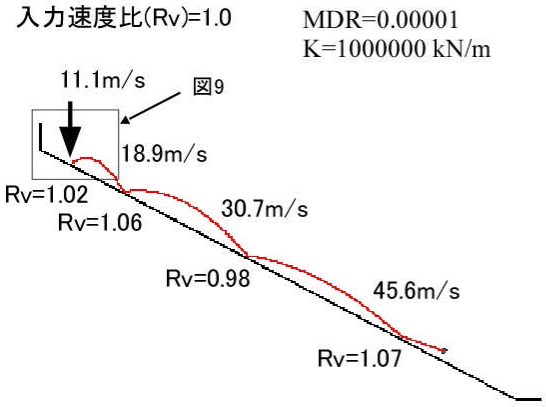

図-8 設定したペナルティバネによる解析例
(入力速度比 1.0 の場合) □内は図 9 の範囲

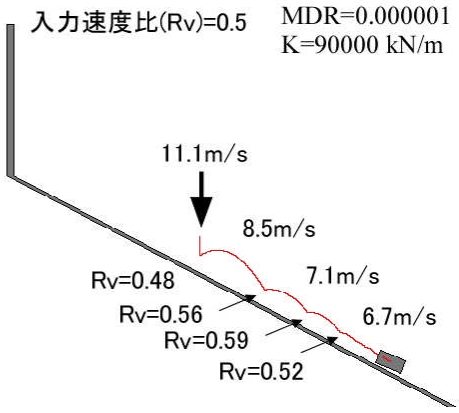

図-9 設定したペナルティバネによる解析例
(入力速度比 0.5 の場合) 図 8□内を拡大

落石解析で扱う速度は，一般に 0m/sec～40m/sec と広い．解析では，この変化に対応できるペナルティバネを設定しなければならないが，このような速度(変位)の大きな変化に対して，ペナルティバネがどのように応答するのかを調べた例は今のところない．そこで，ここでは入射速度を 1m/s，10m/s，20m/s，45m/s と変化させて，ペナルティバネの応答を調べてみる．なお，解析モデルには 3 章の面積比 1:35 のモデルを用い，MDR は 0.000001 とした．

結果は，図-7 に示すように，ペナルティバネは，速度が増加するとほぼ同じ分布形状のまま，全体が右にシフトする．このため，幅広い範囲の速度に対応するためのペナルティバネも速度によって変化する．例えば,図-7 において，速度が 45m/s の入射速度に応答可能なペナルティバネの最小値は 1×10^{6}kN/m 付近である．また，入射速度を最大 10m/s までに限定すれば，ペナルティバネの最小値は 9×10^{4}kN/m 付近となる．このことからペナルティバネは，その速度依存ともいえる性質によって，最大速度を目安に設定するのが妥当ということになる．ただし，図-7 からは，10m/s 以下の低い速度に対しては速度比がやや大きい傾向があり，過剰反発ぎみの結果となることが予想される．

5. ペナルティバネの設定方法についての試行

感度解析の結果をもとに，入力速度比が 1.0 と 0.5 の 2 つのケースについて試行した．

図-8 は，入力速度比を 1.0 としたときの入射速度 11.1m/s に対する解析結果である．トライアルで最大速度を確認した上で，図-7 中の 45m/s のペナルティ分布を

参考に，1×10^{6}kN/m と設定した．結果は，11m/s～45m/s の速度区間で速度比(Rv)=0.98～1.07 を示し，どの反発地点でもほぼ想定範囲内に収まっている．

一方，図-9 は，同様にして入力速度比を Rv=0.5 とした解析結果である．入射速度が 11m/s であり，入力速度比が Rv=0.5 であることから最大速度を 11m/s と想定し，図-7 の 10m/s のペナルティバネの分布を参考に，k=90000kN/m と設定した．得られた速度比は，各反発地点で Rv=0.48～0.59 の範囲であり，これもほぼ想定内に収まっているといえる．ただし，入射速度が 5m/s 前後まで低下すると速度比は全般に高めとなる．前述のように，10m/s 以下になると設定範囲ではペナルティバネの速度比への効果が過剰反発気味となるが，その影響によるものとみられる．

以上の試行結果から，DDA の落石解析では，落下中の最大想定入射速度をもとに，図-7 に示すような感度解析を行うことで，ほぼ適切なペナルティバネの目安を得ることができると考えられる．これにより，ごく短時間のトライアルでより信頼性の高い落石解析を行うことが可能となる．

6. まとめ

二次元剛体 DDA を用いて落石解析を行う際に必要となる，解析パラメータの基本的な性質をもとに，ペナルティバネの設定法について述べた．結果をまとめると以下のとおりである．

1) DDA では，入射速度の増加すなわち変位の増加に応じて大きなペナルティバネが必要となる．
2) Δt は自動としたが，設定する場合は 10^{6}sec 前後の小さい値を用いることが適切と考えられる．
3) 最大想定変位比(MDR)は，変形解析とは異なり落石解析では 10^{4}より小さい値が推奨される．
4) 最大速度を想定し，ペナルティバネに関する感度解析を行うことで，ほぼ最適なペナルティバネの目安を得ることが容易となる．

なお，剛体解析を用いた本検討では，地盤と落石ブロックの面積比が，落石ブロック：地盤ブロック=1:50 以下とすることが条件の一つであった．このようなモデル条件を含めて，弾性体 DDA における解析パラメータの設定条件についての検討を，さらに進めたいと考えている．

謝辞

本研究を進めるにあたって，DDAver.8(剛体)のソースコードの使用を「不連続性岩盤解析実用化研究会」より御許可頂いた．また，小山倫史助教(京都大学)，三木茂氏(基礎地盤コンサルタンツ（株）)をはじめとする方々に解析パラメータに関する御指導と御助言を賜った．ここに記して，感謝の意を表します．

参考文献

1) 小山倫史，布川哲也，西山哲，大西有三：不連続変形法(DDA)における数値減衰特性に関する研究，土木学会論文集 C, Vol.66, No.2 , 2010.
2) 中村公一，島内哲哉，鄭惟，佐々木猛，西山哲，大西有三：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，第 65 回年次学術講演会講演資料，2011.
3)日本計算工学会編：計算力学レクチャーシリーズ６，不連続変形法(DDA)，大西有三，佐々木猛，Gen-Hua Shi 著，丸善（株），2000.
4) 不連続性岩盤解析実用化研究会，DDA(200609)解析書・入力マニュアル・2006. 09 .

STUDY ON PARAMETERS DETEMINATION FOR THE ROCKFALL ANALYSIS USING DDA.

Tetsuya SHIMAUCHI, Wei, ZHENG, Koichi NAKAMURA,Takeshi SASAKI, Satoshi NISHIYAMA and Yuzo OHNISHI

The rockfall analysis by using DDA requires various analysis parameters, such as Δt, penalty spring, and maximum displacement ratio etc. In this study, at the collision velocity between 1m/sec～45m/sec, the sensitivity the following factors : the Δt for the penalty spring, MDR, and model were investigated. The following result were obtained.

1)Penalty spring shall be increased acoording to the impact velocity increases. 2) Δt must be less than 10^{-6}sec. 3) It is better that MDR is less than 10^4 . 4) The ratio of slope and rokfall blocks, the optimum values are 1:10～50. The rockfall analysis of DDA is important at the above-mentioned conditions.