

不連続変形法(DDA)の落石防護擁壁設計への適用に関する研究

九州大学大学院 学生会員○津末 佳朋 九州大学大学院 フェロー 善 功企
九州大学大学院 正会員 陳 光斉 九州大学大学院 正会員 笠間 清伸

1. はじめに

不連続変形法(DDA: Discontinuous Deformation Analysis)は、岩盤構造物を主たる解析対象として開発されたが、DDA の手法そのものは汎用的であり、岩盤に限らず、複数の物体の接触・衝突問題や多数の粒が寄り集まった粒状体の挙動問題など幅広い課題に対応できる。しかしながら、DDA が有するパラメータ設定上の問題により、設計などの実業務に適用することが容易でない。そのため本文では、モデル斜面を用いた落石解析を行い、落石挙動および擁壁に加わる衝撃力を検証し、DDA の精度評価とともに実業務への適用に際しての問題点を考察した。

2. パラメータの影響

2.1 解析概要

DDA は、ハミルトンの原理に基づき、接触を含む運動方程式を、エネルギー最小化原理により釣合い方程式を求めて、式(1)のように定式化している。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (1)$$

ここで、 M は質量マトリックス、 C は減衰マトリックス、 K は剛性マトリックス、 F は外力マトリックスである。また u はブロック重心における変位であり、 $\dot{u}$ は変位速度、 $\ddot{u}$ は変位加速度を表す。

DDA を実際の設計で用いるためには、解析上のパラメータを適切に選定できなければならない。このさい、問題となるパラメータは、ペナルティばね係数 p 、解析時間間隔 Δt 、および粘性係数 η などである。ここで、粘性係数 η は式(2)で表され、運動方程式(1)の減衰マトリックス C として評価され、ブロックに作用する空気抵抗、および斜面上の植生や樹木との接触による減衰などといった物理的意味がある。

$$C = \eta M \quad (2)$$

筆者らはペナルティばね係数 p および時間間隔 Δt が解析結果におよぼす影響については過去に検証し、 p はブロック弾性係数 E の 10 分の 1 程度、 Δt は 0.001sec 程度(動的解析の場合)が推奨される結果を得ている¹⁾。しかし、粘性係数 η については、どの程度の値に設定すれば妥当であるかは定かでない。そこで、粘性係数 η とブロックサイズの関係の把握するため、基礎的検証として、図-1 に示すような空気抵抗が存在する自由落下モデルにより、理論解析速度 v と、DDA 解析速度 v' の比較を行った。落下ブロックは正方形とした。解析条件を表-1 に示す。理論解析速度 v は、式(3)で表される運動方程式を解くことにより得られる。

$$m \frac{dv}{dt} = mg - kv^2 \quad (3)$$

ここで、 m : 質量、 t : 時間、 g : 重力加速度、 k : 空気抵抗の比例定数($k = C_D \rho S / 2$)、 C_D : 空気抵抗係数、 ρ : 空気の密度、および S : 落下物の断面積である。

2.2 解析結果および考察

図-2 に自由落下モデルの理論解析速度 v と DDA 解析速度 v' の比較を示す。粘性係数 $\eta = 1.2 \times 10^{-3}$ のケース

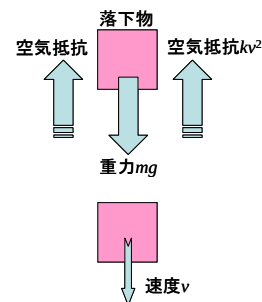


図-1 自由落下モデル

表-1 自由落下モデルにおける入力条件

重力加速度 g [m/s ²]	10
質量 m [kg]	1.0
空気の密度 ρ [kg/m ³]	1.20
空気抵抗係数 C_D	0.24
ブロックの一边の長さ L [m]	1.0
粘性係数 η ($\cdot 10^{-3}$)	1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 5.0

のみ、理論解析速度とよく似た変化傾向を示している。したがって、落石解析を行うさいには、空気抵抗や、植生などを考慮して、 $\eta \geq 1.2 \times 10^{-3}$ と設定するのが適切だと考えられる。本解析は2次元であるため、単位奥行きという解釈が必要となり、式(3)で評価される落下物の断面積 S の概念に理論解析値と DDA 解析値とで差が現れてくる可能性があるため、今後はブロックの大きさを変更して検証する必要がある。

3. 斜面落石解析

3.1 解析概要

2 の結果を考慮して、実際に存在する斜面の落石解析を行った。斜面下端には仮想的に、崩土ポケットが存在し、3m の落石防止擁壁を隔てて道路が存在するような断面を接続し、火砕流堆積物と基盤の境界が滑る場合の、落石防護擁壁に作用する衝撃力を算出した。斜面の構成および崩壊前後の斜面の様子を図-3 に示す。このときのブロックのジョイント設定値を表-2 に示す。また、斜面を構成する地質の物性値を表-3 に示す。解析条件は、粘性係数 $\eta=1.2$ 、時間間隔 $\Delta t=0.001\text{sec}$ 、およびペナルティばね定数 $p=1.0 \times 10^8\text{Pa}$ とした。

3.2 解析結果および考察

図-4 に解析結果を示す。本ケースのジョイント設定値は、解析斜面として選定した場所において、ボーリング採取して得られた各地質の固有データを、火砕流堆積物から上部が崩壊しはじめるまで減じて行ったものである(40%入力)。図-4 より、火砕流堆積物の一部が斜面上部に残存しているが、崩土のほとんどは崩土ポケットに堆積し、道路は被災していない。このとき、擁壁に作用した x 方向の最大の衝撃力は $F_{x_{\max}}=1.87 \times 10^6\text{Pa}$ であった。このように、DDA によって、実際に落石防止擁壁に作用する衝撃力が求められ、擁壁設計のさいに設計値として役立てられる可能性がある。今後は、落石ブロックの細分化に伴い、衝撃力がどれだけばらつくか検証する必要がある。

4. まとめ

(1) 空気抵抗を再現する場合は、 $\eta=1.2 \times 10^{-3}$ が推奨される。(2) 落石防護擁壁の設計において、その設計外力の設定に関し、断面が既知であれば DDA 解析によって得られた値を参考にすることができると考えられる。

<参考文献>

1) 津末佳朋: 地震時崩壊土石の移動に関する不連続変形法, 西部地区部会報, 第 33 号, pp.59-62, 2009.

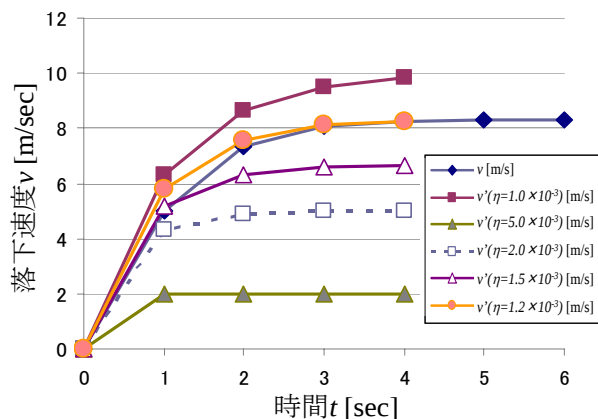


図-2 理論解析速度 v と DDA 解析速度 v' の比較

表-2 ブロックのジョイント設定値

	粘着力[Pa]	摩擦角(deg)
ローム層	3560	12.0
基盤&道路	200000	15.6
火砕	5720	11.4
崩土	0	14.7

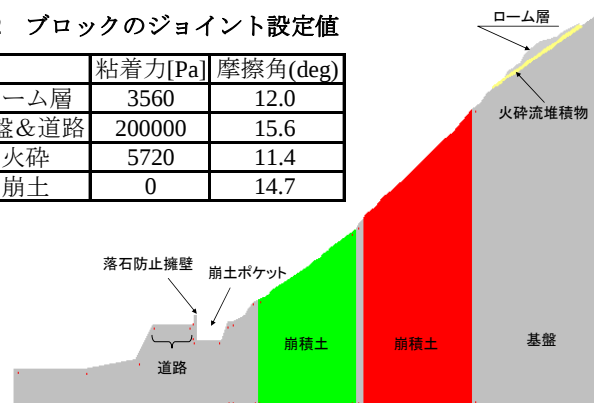


図-3 斜面の構成および崩壊前の様子

表-3 斜面を構成する物質の物性値

	基盤&道路	ローム層	火砕流堆積物	崩土
質量 M [kg/m ³]	2200	1300	1500	1800
単位体積重量 γ [N/m ³]	-22000	-13000	-15000	-18000
ヤング率 E [N/m ²]	19000000	2000000	3000000	6000000
ポアソン比 ν	0.25	0.25	0.25	0.25

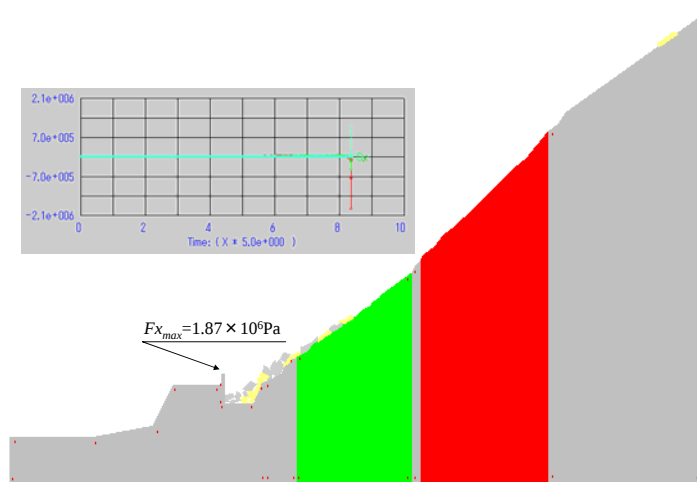


図-4 斜面の崩壊後の様子