

第Ⅲ部門

不連続変形法による城郭石垣の安定性に関する研究

京都大学大学院 正会員 ○ 田 靖倩
 京都大学大学院 正会員 西山 哲
 京都大学大学院 正会員 小山 倫史
 京都大学 正会員 大西 有三

1 はじめに

日本の城郭には多くの石垣が含まれる。城郭を保護、維持するためには石垣の安定性を評価する必要があるが、現在のところ、その安定性が十分に検討されているとは言い難い。そこで本研究では不連続体を高精度に解析可能な不連続変形法（DDA：Discontinuous Deformation Analysis）によって城郭石垣で動的減衰係数に関するパラメータスタディを行い、動的減衰係数の影響を検討した。動的減衰係数については後述する。

2 不連続変形法の概要

不連続変形法はポテンシャルエネルギー最小化原理を利用しており、解析対象を任意形状のブロックの集合体としてモデル化する不連続解析手法の一種である。不連続変形法の運動方程式は、下の式で表されるハミルトンの原理に基づいて構築される。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \tag{1}$$

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 は外力ベクトル、 u はブロック重心における変位、 \dot{u} 変位速度、 \ddot{u} は変位加速度である。上の式はニューマークの β 、 γ 法を用いて以下の式に変換される。

$$\tilde{K} \cdot \Delta u = \tilde{F}$$

$$\tilde{K} = \frac{2}{\Delta t^2} M + \frac{2\eta}{\Delta t} M + K_e + K_f \tag{2}$$

$$\tilde{F} = \frac{2}{\Delta t} M\dot{u} + (\Delta F - f)$$

ここで、 Δt は時間刻み、 Δu は変位増分、 K_e はブロックの弾性、 K_f はブロックの変位拘束・接触などに関する剛性マトリックスである。また、 f と ΔF はそれぞれブロックの初期応力に関するベクトル、体積力や点荷重などに関するベクトルである。

3 解析モデルおよび解析条件

本研究で用いた解析モデルは図1に示す通りである。図1は石垣施工業者と相談の上、標準の穴太積石垣の断面スケッチ図を作成し、そのスケッチ図を忠実にモデル化したものである。複雑な構造を有する城郭石垣は、簡単のため2次元において解析を行った。また、各材料の物性値は表1に示す通りである。

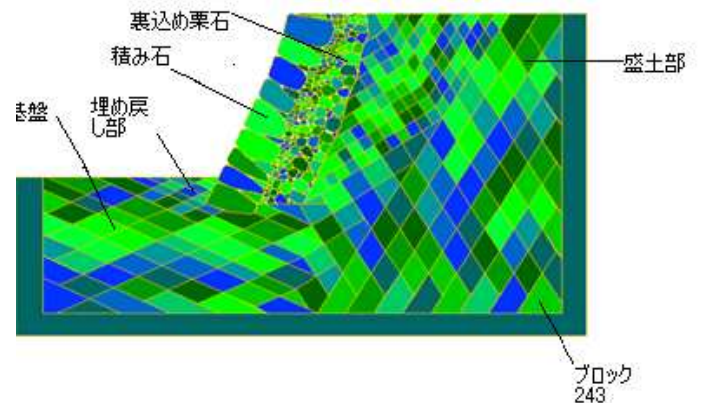


図1. 解析モデル

表1. 各材料の物性値

	粘着力 (kN/m ²)	内部 摩擦角 (°)	単位体積 重量 (kN/m ³)	弾性係数 (kN/m ²)	ポアソン 比
基盤	23	33	19	83000	0.3
盛土部	23	33	19	30000	0.3
埋め戻し部	23	33	19	30000	0.3
裏込め栗石	0	45	26	10000000	0.25
積み石	0	45	26	10000000	0.25

基盤，埋め戻し部，盛土部における粘着力は三軸試験結果および摩擦角とモール・クーロンの破壊規準から値を得た．栗石，石垣石は花崗岩の標準物性値を参考に設定した．

4 解析結果および考察

DDA では，動的減衰パラメータ $k01$ で減衰効果を表現し，次式により初期速度の引き継ぎを行う

$$V_i^{(n+1)} = k01 \cdot V_f^{(n)} \quad (3)$$

この動的減衰パラメータ $k01$ に関して，呉らが $k01$ をより小さい値にすると，精度良い解析ができると報告している¹⁾．したがって， $k01$ の値を 0~1 の間で変更するパラメータスタディを行った．その結果を表 2 および図 2~4 に示す．また，既往の研究から，接触ばね剛性 kn は $kn/M = 10^5 [kN/m \cdot t]$ に従って設定すればブロック間の摩擦力を正確に再現できるとされており²⁾，本研究においてもこの指標を用い，その値を $1.47 \times 10^4 \sim 1.47 \times 10^6$ と定めた．

表 2. 解析結果

Kn \ k01	1.5×10^3 (kN/m)	1.5×10^4 (kN/m)	1.5×10^5 (kN/m)	1.5×10^6 (kN/m)
0	貫入	収束	収束	収束
0.98	貫入	収束	収束	収束
1	貫入	収束せず	収束	収束せず

貫入 : ブロック同士に過大な貫入が生じた．

収束 : 貫入が生じず，ブロックの変位が収束した．

収束せず : 貫入が生じなかったが，ブロックの変位は収束しなかった．

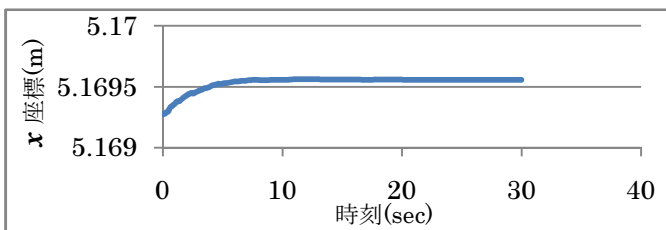


図 2. $k01=0$ のときのブロック 243 の変位の時刻歴

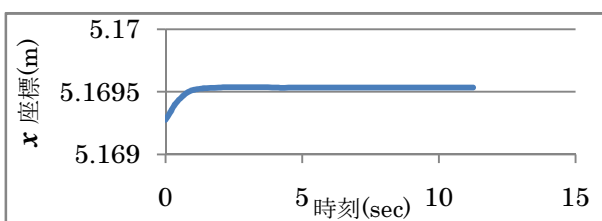


図 3. $k01=0.98$ のときのブロック 243 の変位の時刻歴

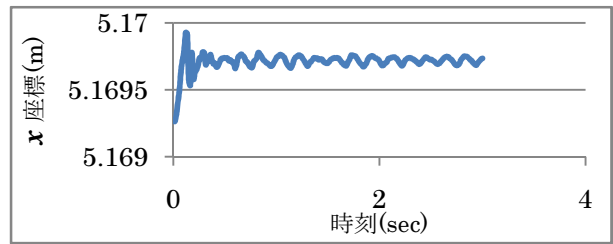


図 4. $k01=1$ のときのブロック 243 の変位の時刻歴

図 2~4 より， $k01=0, 0.98$ のときにはブロックの変位は収束するものの， $k01=1$ のときにはブロックの振動が収束せず，微小な震動が続くことが分かる．

$k01=0.98$ の方が $k01=0$ に比べて早い段階で収束するのは，各時間刻みの速度の初期値が 0 でないため，ブロックが素早く釣り合いの位置に移動できるからだと考えられる．石垣の安定性を考える上では，各ブロックの自重による振動はできるだけ早く収束したほうが良いと考えられ，したがって，安定解析においては， $k01=0.98$ を用いると，最も容易に解析が行えると考えられる．

5 まとめと今後の課題

DDA によって，城郭石垣の安定性を評価するために，石垣の自重解析のパラメータスタディを動的減衰係数に関して行った．その結果，動的減衰係数 $k01=0.98$ が安定解析を行う上で最も適切な数値であることが分かった．

安定解析において，open-close 基準は解析結果に影響を及ぼす可能性があるが，本研究では検討しておらず，今後検討が必要である．

参考文献

- 1) WU J. H.: "Numerical Analysis Discontinuous Rock Masses Using Discontinuous Deformation Analysis", 京都大学博士論文, 2003
- 2) Akao S.: "Comprehending DDA for a block behavior under dynamic condition", Proc. of 8th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation Analysis (ICADD-8) pp.135-140, 2007