

⑧ D E M解析による岩盤斜面の動的安定性の検討

鳥取大学工学部 正会員 木山英郎
同 上 西村 強
同 上 藤村 尚

DEM ANALYSIS ON DYNAMIC STABILITY OF DISCONTINUOUS ROCK SLOPES

Hideo KIYAMA, Tottori University
Tsuyoshi NISHIMURA, Tottori University
Hisashi FUJIMURA, Tottori University

Abstract

In this paper, the authors would discuss applicability of DEM to dynamic stability analysis of rock slopes.

First, static and dynamic behaviors of a rock block on a basal slope were analyzed. The result shows that dynamic instability(failure) modes of the block are a little different from static ones.

Secondly, analysis for rock slopes composed of hundreds of uniform rectangular blocks were carried out where the discontinuities were simplified as following two patterns ; “intermittent” and “cross continuous”. Through the comparison between pseudo-static inclination analysis and dynamic shaking analysis, some characteristics of dynamic responses of the models and effects of the dynamic forces were elucidated.

1. はじめに

岩盤斜面の安定性を考えるとき，“トップリング”という言葉に代表されるように、不連続面が大きな影響を及ぼすため、単にすべりに対する強度のみで安定性を評価することは難しい。本研究では、矩形要素を用いて単一ブロックの動的・静的破壊モードを明確化するとともに、不連続面の分布性状を、2次元的に“千鳥積み(intermittent)”と“方眼積み(cross continuous)”に単純化¹⁾して、岩盤斜面の動的安定性を検討した。

通常的地盤において、動的な安定性を検討するには、いわゆる動的応答解析と震度法に基づく静的な手法が考えられる。後者は、最も不利な条件下における安全率あるいは破壊モードを与えるものと思われる²⁾が、岩盤斜面においては、動的荷重の効果と破壊モードへの影響についてもいま一つ明らかにされていないようである。この点も併せて検討の対象となる。

2. 基盤上の単一ブロックの挙動

不連続性岩盤斜面の安定性を検討するに当たって、まず、静止基盤上の単一ブロックの安定条件を求めた。

表-1 解析定数

$Kn/\rho g=Ks/\rho g$	3.85×10^4 (cm ²)
$\eta n/\rho g=\eta s/\rho g$	12.0×10 (cm ² ·s)
Δt	1.0×10^{-5} (s)
ブロック面積 S	2.0 (cm ²)
摩擦角 $\tan \phi$	0.48

解析は、ブロックの細長比 b/h 、基盤傾斜角 α を変化させて安定条件および破壊モードを求めるものである。

図-1は、解析の一例で、ブロックの面積が $2(\text{cm}^2)$ 一定の場合である。従来、 $\tan \alpha > \tan \phi$ なる領域では、すべりの領域とすべりとトップリングが共存する領域の2つに区分されると考えられていたが、トップリングのみの領域が侵入していることが特徴である。その詳細はすでに報告した³⁾。

次に、図-2は図-1と同じ条件のもとで、基盤斜面の水平方向の最大加速度が $0.1g$ (g : 重力加速度)となるように正弦振動を入力した場合である。解析モデルをすべりあるいはトップリングなどを考えない—自由度の振動系としたときの固有振動数は約 $690(\text{Hz})$ であって、今回用いた振動数はそれよりかなり小さいため

ブロックは、入力振動とほぼ同位相の振動をする。図-1と比較してみると、純粹のトップリングモードはみられなくなり、すべりが先行してからトップリングが生じる(すべりと転倒)か、あるいはトップリングが先行してすべりが生じる(転倒とすべり)といったモードになる。また、(a)図と(b)図を比較してみると、静止基盤上では安定であったブロックが、最大入力加速度は同一であるにもかかわらず、入力振動数が小さい方が不安定になりやすいことが読み取れる。つまり、最大入力加速度(あるいはそれに近い値)の継続時間が長いほどブロックに与える実効力が増加するらしい。

そして、その極限として継続時間を無限大になった場合が、斜面の傾斜角を最大入力加速度相当分だけ増加させた静的解析と等価になると考えられる。つまり震度法ということになる。

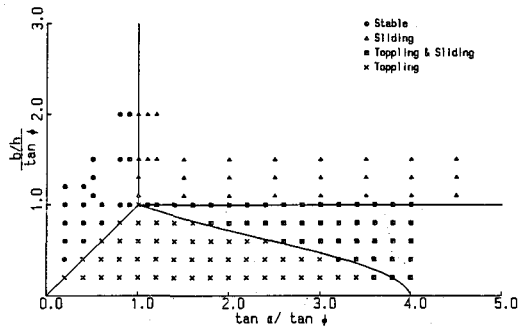
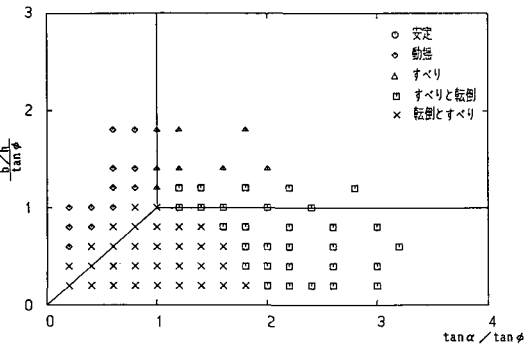
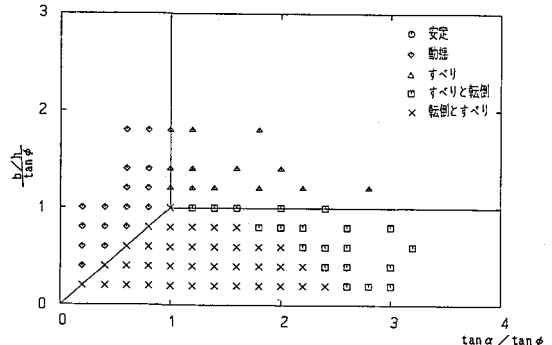


図-1 静止基盤上のブロックの挙動



(a) 振幅 $A=0.28(\text{cm})$, 振動数 $f=3(\text{Hz})$



(b) $A=0.025(\text{cm})$, $f=10(\text{Hz})$

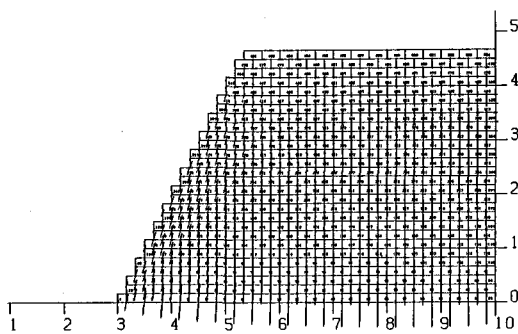
図-2 振動基盤上のブロックの挙動

3. 不連続性岩盤の安定性の検討

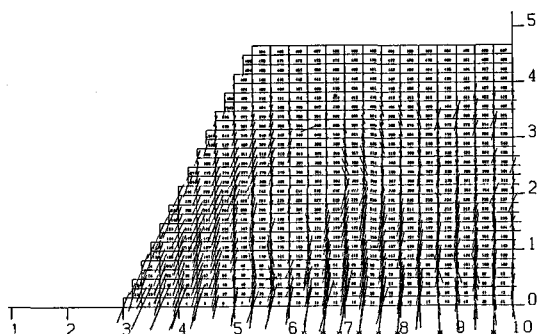
3.1 傾斜破壊解析

本解析で用いたモデルを図-3(a) (千鳥積み), 図-4(a) (方眼積み) に示す。両図とも、 $1 \times 1(\text{cm})$, $1 \times 2(\text{cm})$ の矩形要素を約500個積み上げ、重力の作用下で静止状態に至らしめたものである。解析定数は表-1に示した通りである。斜面傾度は、約 63° である。同(b)図は、基盤面をそれぞれ 25.5° , 23.0° まで傾斜させた後、図中に示す時刻まで放置した状態を示している。これ以下の傾斜角では、破壊は生じず、斜面は安定だった。

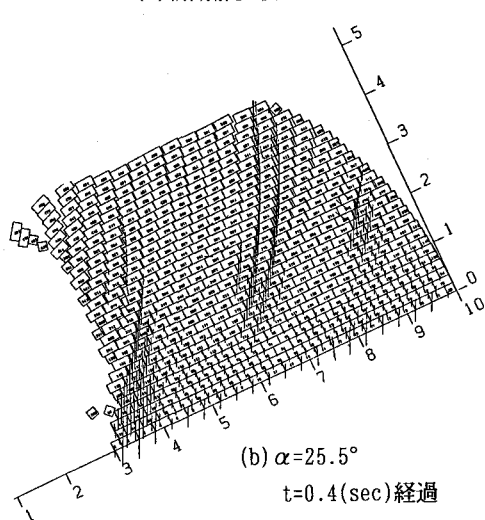
千鳥積みでは、成層面に沿ってすべりが生じ、破壊が全体的に進行するのに対し、方眼積みでは、斜面部



(a) 初期静止状態



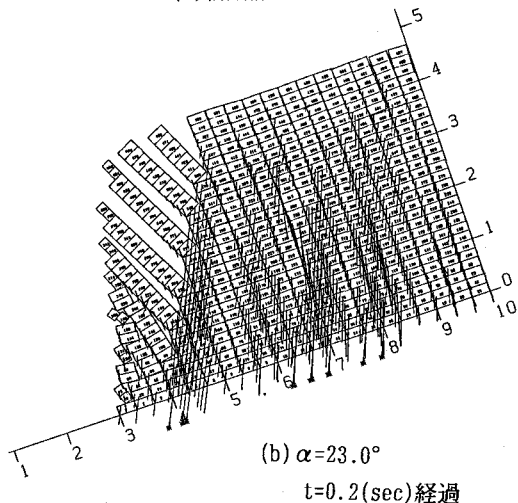
(a) 初期静止状態



(b) $\alpha = 25.5^\circ$

$t = 0.4(\text{sec})$ 経過

図-3 傾斜破壊解析 (千鳥積み)



(b) $\alpha = 23.0^\circ$

$t = 0.2(\text{sec})$ 経過

図-4 傾斜破壊解析 (方眼積み)

に破壊が集中し、その形態も、複数のブロックが柱状となって倒れるトップリング破壊を呈している。方眼積みにおいては要素個々は安定であるはずの基盤傾斜角において崩壊が生じ、また、千鳥積み比べ小さな傾斜角で崩壊が生じることが注目される。

3.2 振動破壊解析

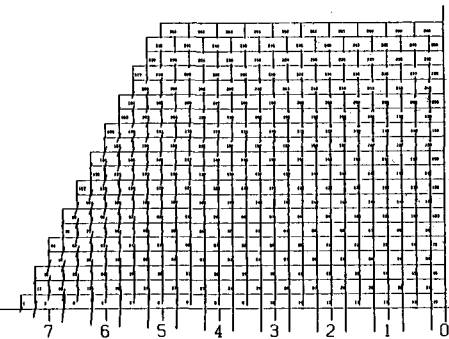
図-5、図-6は本解析に用いたモデルを示す。計算の都合上、要素数を約250個と半分程度に減らした以外は前例と全く同じである。解析は、下方基盤を水平にとり、鉛直方向の重力加速度と基盤への水平最大入力加速度の合ベトルの傾きが、傾斜破壊解析における基盤傾斜角に一致するように、水平正弦振動を入力した。最大入力加速度は千鳥積みの場合470(gal)、方眼積みの場合410(gal)で、入力振動数は、10, 20, 30(Hz)の3種を用いた。側方境界では、下方基盤との交点を基準点として上方に減衰せずに伝播するせん断波のみを与えた。せん断波の伝播速度は、要素に与えたヤング率より算出したもので、100(m/s)とした。また、下方および側方境界には、適当な粘性ダッシュポットを配して、できるだけ反射波の吸収を計った。

図-5、6の各(b)図は、入力振動数を20(Hz)として0.5秒間加振した後の状態を示すものである。

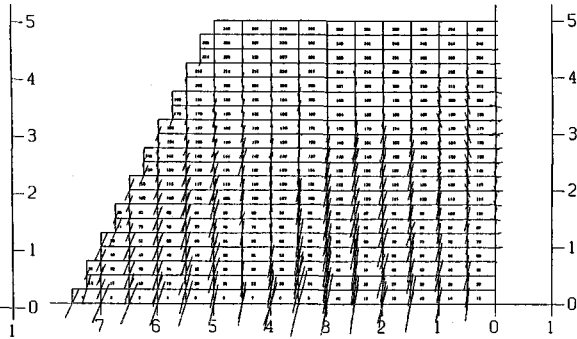
図-7は、20(Hz)における法肩部に位置する要素の水平方向の加速度応答及び変位を描いたものである。加速度(図中一点鎖線)は重力加速度との比、また、変位(図中実線)は入力最大振幅との比として整理している。加速度応答についてみると、千鳥積みの場合、ほぼ一定周期、一定振幅の応答曲線となっているのに対し、方眼積みの場合、かなり周期の短い振動が含まれ、周期、振幅とも乱れが大きくなっていることが

わかる。図中X印で示しているのは突発的に大きな加速度応答がみられたときで、時には g の20倍にも達する応答加速度が観察されたときもある。この傾向は他の入力振動数においても見られており、共振振動数の面からの考察が必要かも知れない。

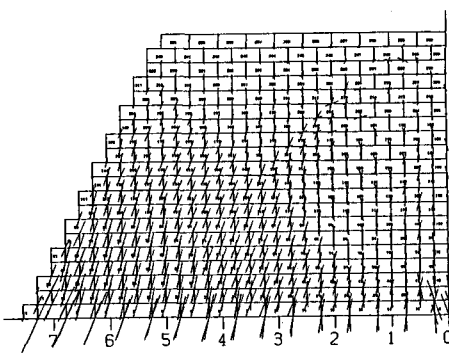
一方、変位についてみるといずれの場合も、負つまり斜面が崩壊する方向へ順次移動しているのがわかる。これは、応答加速度が周期的に傾斜破壊解析から求められた破壊時加速度に達するため、すべりあるいはトップリングといった破壊モードが間欠的に生じることによると考えられる。ここでも、方眼積みの変位量がかなり大きいことが注目され、同一の要素物性を有しながら、千鳥積み、方眼積みの動的応答特性の違いを知ることができる。



(a)初期静止状態

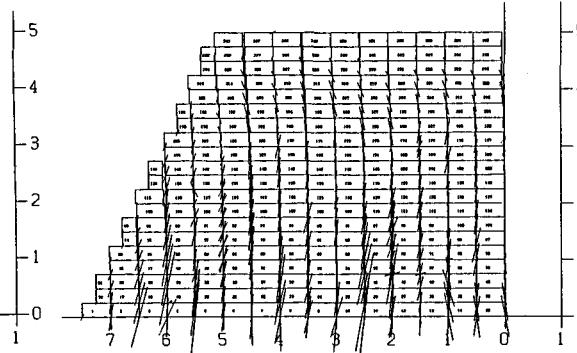


(a)初期静止状態



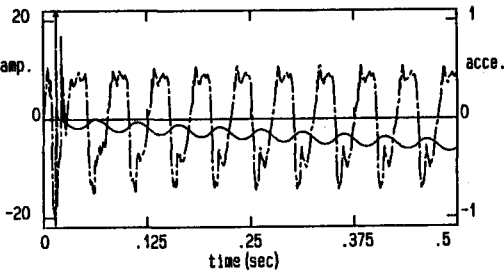
(b) $f=20(\text{Hz})$, $t=0.5(\text{sec})$ 経過

図-5 振動破壊解析(千鳥積み)

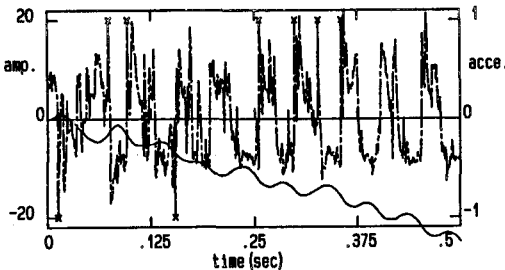


(b) $f=20(\text{Hz})$, $t=0.5(\text{sec})$ 経過

図-6 振動破壊解析(方眼積み)



(a)千鳥積み($f=20\text{Hz}$)



(b)方眼積み($f=20\text{Hz}$)

図-7 法肩部要素の水平方向の加速度(一点鎖線)と変位(実線)

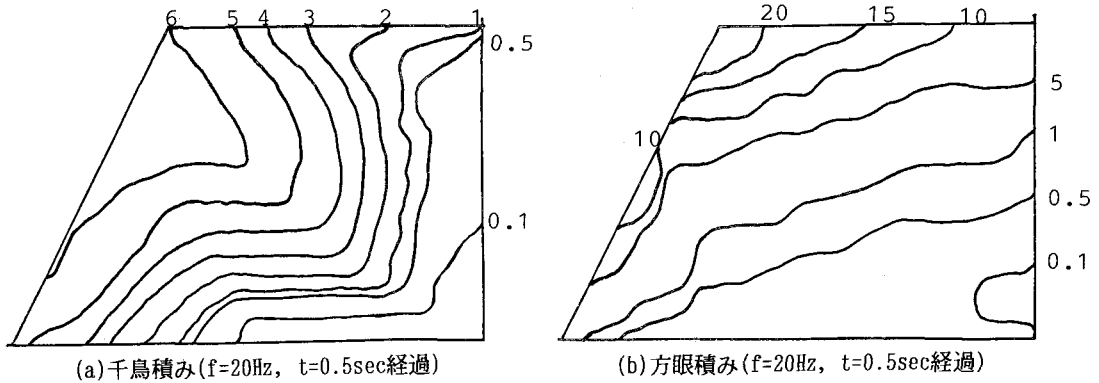


図-8 解析領域内の水平変位の分布

そこで、図-8は、図-5、6の(b)図より要素の重心位置の水平変位分布をそれぞれの入力振幅で相対化して示したものである。斜面部分において変位が大きくなることは共通しているが、図-7と同様に方眼積みの方が変位の増幅が大きいこと、方眼積みにおける変位は下層から上層に向かうにつれ大きくなるのに対し、千鳥積みでは、上下層の水平変位の差は少ないことがわかる。これは、方眼積みの場合には、岩柱が下端を回転中心とするトップリング破壊、千鳥積みの場合には、すべり破壊に到るものと考えられる。この傾向は、傾斜破壊解析でみた破壊モードに近いものである。

また、ここには図を省略したが、変位の絶対量をみると、入力振動数が小さいほど大きく、斜面の不安定化を招きやすいことがわかった。この最大加速度の継続時間の影響は、2. で述べた単一ブロックの場合と同様である。

4. まとめ

本研究では、まず、単一岩盤ブロックの動的破壊モードを明らかにするとともに、低振動数の場合ほど岩盤ブロックの不安定化が生じやすいことを示した。ついで、不連続面の分布性状を2次的に千鳥積み、方眼積みの2種に単純化することにより、岩盤斜面の動的安定性を検討した。その結果、振動荷重が作用するとき、両者の破壊モードはそれぞれの傾斜破壊時のモードとほぼ同様であること、方眼積みの方が変位の増幅が大きいこと、最大入力加速度が一定の場合低振動数になるほど不安定度を増すことなどが示された。

参考文献

- 1) 清水泰弘・Ömer AYDAN・市川康明・川本眺万：不連続性岩盤斜面の地震時における安定性と崩壊形状，土木学会論文集，No.400/Ⅲ-10，pp.189-198,1988.12.
- 2) 伊藤 洋・渡辺啓行：強地震動下の大規模斜面の安定性評価に関する実験的・解析的検討，土木学会論文集，No.406/Ⅲ-11，pp.233-242,1989.6
- 3) 西村 強・木山英郎・藤村 尚：離散剛要素法による岩盤斜面の解析，第23回土質工学会研究発表会講演概要集，pp.1075-1076,1988.6