

## 不連続性岩盤内の地下空間の崩壊モードに関する研究

### AN NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY ON THE FAILURE MODES OF AN OPENING UNDERGROUND IN THE DISCONTINUOUS ROCK MASS

相川 明\*  
Akira AIKAWA

The behaviors of a rectangular opening in an inclined layered rock mass are simulated by using the Discontinuous Deformation Analysis (DDA) and the base friction model experiment as to the effect of such parameters: an inclined angle of the discontinuities; a friction angle; the space of the discontinuities; the width of the openings; and the overburden depth. Three types of failure modes, a failure mode with sliding, a failure mode with rotation and a failure mode with sliding and rotation simultaneously are occurred. A kind of "failure height", where the opening finally reaches to the collapse after the relaxation of the rock mass, may uniquely exist according to the width of the openings, and the area around them contributes the arch functions.

**Key Words** : failure process, failure modes, discontinuous rock mass, discontinuous deformation analysis, base friction model test, rectangular opening

#### 1. まえがき

不連続性岩盤内の地下空間の挙動は、不連続面の形状や性質に大きく影響される。本研究は、不連続性岩盤内の矩形空間の崩壊形態について、空間幅 ( $B$ ) と土被り ( $H$ )、不連続面の傾斜角 ( $\alpha$ ) と不連続面間隔 ( $d$ )、および、不連続面の摩擦角 ( $\phi$ ) の5つをパラメータとして、不連続変形法 (DDA) に<sup>1)</sup>、底面摩擦模型実験を補完的に用いることにより挙動を比較するものである。

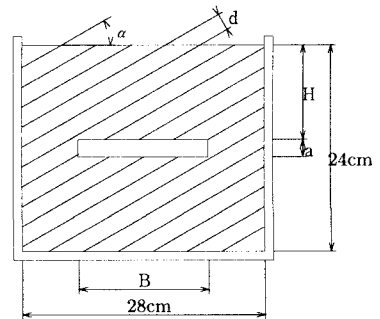


図-1 解析モデルの一例 (パターン1:層状配置)

#### 2. 解析の概要と諸元

解析モデルの一例を図-1に示す。領域幅28cm、高さ24cmの長方形領域に、不連続面を層状(パターン1)、格子状(パターン2)、千鳥状(パターン3)に配置した3種類を考え、素掘りの矩形空間を掘削したものである。なお、本論文ではパターン1のみ扱う。寸法および応力スケールを1/100、不連続面間隔  $d = 2.0\text{cm}$  とし、土被りを  $H = 5.0\text{cm}, 11.0\text{cm}, 17.0\text{cm}$ 、傾斜角を  $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  とし、摩擦角を  $\phi = 10^\circ$  から  $50^\circ$  まで  $10^\circ$  刻みで変化させた。なお、解析用の物性値は、当初使用する予定であった模型材料をもとにしている<sup>2)</sup>。

表-1 解析モデルの諸元

空間幅 $B(\text{cm})$	15
空間高さ $a(\text{cm})$	2
土被り $H(\text{cm})$	5, 11, 17
不連続面間隔 $d(\text{cm})$	2
傾斜角 $\alpha(^{\circ})$	30, 45, 60

#### 3. 不連続変形法解析の結果

##### 3.1 崩落の有無

表-3は、天端ブロックが完全に崩落した( $\times$ )、空間の高さの半分まで崩落した( $\Delta$ )、崩落までは至らなかった( $\circ$ )の3段階にて判定したものである。

\* 正会員 国立大分高専助教授 土木工学科

表-2 数値解析における解析条件

単位体積重量 $\gamma_t(kN/m^3)$	19.6
弾性係数 $E(kN/m^2)$	$5.98 \times 10^4$
ポアソン比 $\nu$	0
粘着力 $c(kN/m^2)$	98
内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	0, 10, 20, 30, 40, 50

表-3 崩落の判定 (数値解析の結果)

土被り $H$	傾斜 $\alpha$	内部摩擦角						$H/B$
		$0^{\circ}$	$10^{\circ}$	$20^{\circ}$	$30^{\circ}$	$40^{\circ}$	$50^{\circ}$	
5cm	$30^{\circ}$	×	×	×	×	×	×	0.3
5cm	$45^{\circ}$	×	×	×	×	×	×	0.3
5cm	$60^{\circ}$	×	×	×	×	×	×	0.3
11cm	$30^{\circ}$	×	×	×	○	○	○	0.7
11cm	$45^{\circ}$	×	×	△	○	○	○	0.7
11cm	$60^{\circ}$	×	×	○	○	○	○	0.7
17cm	$30^{\circ}$	×	△	○	○	○	○	1.1
17cm	$45^{\circ}$	×	×	○	○	○	○	1.1
17cm	$60^{\circ}$	×	×	○	○	○	○	1.1

崩落の有無：×崩落 △半分崩落 ○変形

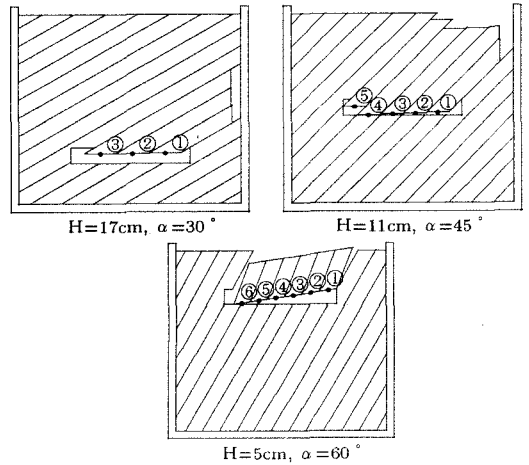


図-2 内部摩擦角が $10^{\circ}$ の場合の崩落モード

### 3.2 崩壊モード

崩壊モードの一例を図-2に示す。図は、 $\phi=10^{\circ}$ の場合であり、滑りが卓越するモードと、回転が卓越するモード、および、滑りながら回転が生じるモードの3つの崩壊モードが見られた。

表-3で天端ブロックが崩落した場合について、状況を以下に比較する。土被り5cmでは、天端左端のブロックがはずれて、空間右上を中心に回転するように崩落した。このときすべりは生じなかったが、 $\phi=0^{\circ}$ の場合には、天端右端にわずかながらすべりが生じた。

一方、土被り11cmでは、 $\phi=0^{\circ}, 10^{\circ}$ で崩落したが、崩壊モードに関しては摩擦角による差は殆どなかった。傾斜角 $60^{\circ}$ では、ブロック2が少しだけ遅れてすべり始めた。傾斜角 $45^{\circ}$ では、ブロック2と4からすべり始めた。傾斜角 $30^{\circ}$ では、ほぼ全て同時に崩落した。

土被り17cmでも $\phi=0^{\circ}, 10^{\circ}$ で崩落した。傾斜角 $60^{\circ}$ では図中のブロック3,4,5,6からすべり始めた。傾斜角 $45^{\circ}$ では、 $\phi=0^{\circ}$ の場合はブロック3からすべり始めたが、 $\phi=10^{\circ}$ ではブロック3,4,5からすべった。傾斜角 $30^{\circ}$ では、 $\phi=0^{\circ}$ の場合ブロック3,2,1の順に崩落しており、 $10^{\circ}$ の場合は崩落せずに途中で止まった。

### 3.3 崩落の発生条件

#### (1) 土被り(H)について

土被り $H=5cm$ では全ての場合で崩落した。一方、 $H=11cm, 17cm$ では、 $\phi=0^{\circ}, 10^{\circ}$ では殆どの場合崩落したが、それ以上の摩擦角では崩落には至らず、ブロッ

クの沈下量も小さくなった。このことより、空間が浅い場合は不連続面の影響が大きく、不安定であり、深くなるにつれて不連続面の影響は小さく、安定する傾向が見られる。また、本モデルでは $H=5cm \sim 11cm$ の間では、土被りの大小が崩壊モードの決定に大きく寄与することがわかる。

#### (2) 不連続面の傾斜角( $\alpha$ )について

表-3で、土被りの面で一番安定している土被り17cmの場合について傾斜角に注目すると、 $\phi=10^{\circ}$ で傾斜角 $45^{\circ}, 60^{\circ}$ ではブロックは崩落したが、傾斜角 $30^{\circ}$ では最後まで崩落せずに途中で止まった。これは、不連続面に垂直にかかる力が大きい方が、摩擦によるすべりに対する抵抗力が強くなるためと考えられる。

#### (3) 内部摩擦角( $\phi$ )について

$\phi=0^{\circ}, 10^{\circ}$ では土被り、傾斜角に関係なく崩落した。一方、 $\phi=30^{\circ}$ 以上では、土被り11cmと17cmの場合は傾斜に無関係に安定である。このことより、 $\phi=20^{\circ}$ 前後では、破壊挙動が摩擦角に対して非常に敏感であり、内部摩擦角に関して、挙動の閾値が存在するものと考えられる。

### 3.4 崩落していない場合の天端の変位

紙面の都合でグラフ類は別に譲るが、天端ブロックが崩落しなかった場合の変位の概要を以下にまとめる。

#### (1) 土被り(H)について

土被り11cmよりも17cmの場合が天端沈下量は少なく安定である。また、土被り11cmでは、天端ブロックの左側が多く沈下したのに対し、土被り17cmでは天

端中央付近がへこんだ形状となった。

## (2) 不連続面の傾斜角 ( $\alpha$ ) について

$\phi = 40^\circ$  と  $50^\circ$  では、傾斜角の大きい方から順に沈下量も大きくなった。しかし、 $\phi = 20^\circ$  と  $30^\circ$  では順序もばらばらで特に規則性は見られないようである。

## (3) 内部摩擦角 ( $\phi$ ) について

土被り  $17\text{cm}$  で  $\phi = 20^\circ$  などは沈下量はわずかであり、必ずしも摩擦角が大きいほうが安定しているとは言えないようである。また、摩擦角が  $20^\circ, 30^\circ$  の場合では沈下量にばらつきがあった。

前述のように、崩壊の発生の有無や崩壊モードが遷移する近傍では内部摩擦角に関して挙動が敏感であり、内部摩擦角が挙動の決定に対して大きく貢献していたが、一方、明確な破壊に至らない場合は、他の要因の方が卓越し、摩擦角や不連続面の傾斜角は主要な要因とはなっていないといえる。おそらく、地山自体が不連続体的な挙動よりは、むしろ連続体に近い挙動となっているものと予想される。

## 4. 底面摩擦模型実験

数値解析の結果より、滑りが卓越するものと、回転が卓越するもの、および、滑りながら回転が生じるものの3つの崩壊モードが見られたので、模型実験により各崩壊モードの発生を定性的に確認する。また、数値解析では、土被り  $11\text{cm}$  以上では  $\phi = 20^\circ$  前後に挙動の閾値が存在すると予想されることから、 $\phi = 20^\circ$  前後となる材料を不連続面に挟んで挙動を調べた。

### 4.1 実験装置と実験概要

装置の概略を図-3に示す。本装置は、幅  $350\text{mm}$  × 長さ  $910\text{mm}$  の平板上に、両側に2本のガイドレールを取り付け、その間にアクリル製の摩擦板  $940 \times 300 \times 6(\text{mm})$  を置き、装置前面に反力板を設けたシンプルな構造である。摩擦板を一定速度 ( $1.0\text{cm}/\text{sec}$ ) で水平に移動することにより重力の効果を発生させ、装置上方のデジタルカメラで模型地山の挙動を撮影し数値化する。

### 4.2 模型材料の開発

本装置は再現できる重力場が小さいことから、模型地山に関しても、応力のレベルをかなり低いものにする必要があり、当初予定していた材料の使用を取りやめ、新たに数種の模型材料を試作した。模型作成の容

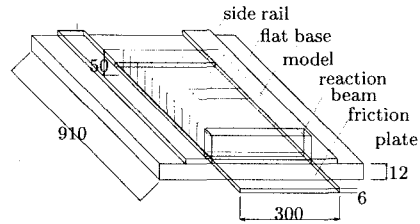


図-3 底面摩擦模型実験装置の概要

易さ、切断表面の加工精度、強度、および、安全性を比較検討し、最終的に、高炉スラグ(新日鐵化学 製エスメントスーパー 60G)、粉寒天(伊那食品工業 伊那寒天 S6)、水を重量比  $80:1:40$  で混合・加熱したものを、ステンレス型枠にて養生し、厚さ  $50\text{mm}$  に切り出して、所定の傾斜角・不連続面間隔に整形した。なお、試験片の物性値は、単位体積重量  $\gamma = 1.46\text{kN}/\text{m}^3$ 、弾性係数  $E = 162\text{kN}/\text{m}^2$  である。

また、不連続面に使用する材料として、 $\phi = 20^\circ$  前後となる材料を探した。模型材料に不連続面の材料を張り付けて、傾斜台により摩擦角の測定し、テフロンシート ( $17^\circ$ ) とコピー用紙 ( $25^\circ$ ) の2つを不連続面の材料として採用した。

## 5. 模型実験の結果

### 5.1 崩落の有無

土被り  $11\text{cm}$  についての実験結果を表-4に示す。表より、摩擦角の小さなテフロンシートでは、傾斜角  $45^\circ, 60^\circ$  の時、空間幅  $11\text{cm}, 15\text{cm}$  のいずれでも崩落したが、摩擦角の大きなコピー用紙では、傾斜角  $45^\circ$ 、空間幅  $11\text{cm}$  では完全な崩落までは至らなかった。

表-4 崩落の判定 (模型実験結果)

土被り $H$	傾斜 $\alpha$	幅 $B(\text{cm})$	内部摩擦角		$H/B$
			テフロン $17^\circ$	紙 $25^\circ$	
11cm	$30^\circ$	15	△		0.7
11cm	$45^\circ$	15	×	×	0.7
11cm	$60^\circ$	15	×		0.7
11cm	$30^\circ$	11	△		1.0
11cm	$45^\circ$	11	×	△	1.0
11cm	$60^\circ$	11	×		1.0
11cm	$30^\circ$	7	○		1.6
11cm	$45^\circ$	7	○	○	1.6
11cm	$60^\circ$	7	○		1.6

崩落の有無：×崩落 △半分崩落 ○変形

## 5.2 崩壊の発生条件

傾斜角  $30^\circ$  では破壊せず空間が歪む程度であったが、傾斜角  $45^\circ$  では、空間幅  $15\text{cm}$  で天端が落下し、空間の底面と接触した。傾斜角  $60^\circ$  では、空間幅  $11\text{cm}$  で完全に崩落した。表-3 の解析結果と比較するとほぼ付合する結果となっていることがわかる。

## 5.3 崩壊モードについて

数値解析で確認された3つのモードが実験上も確認された。代表的な結果を図-4～図-6に示す。

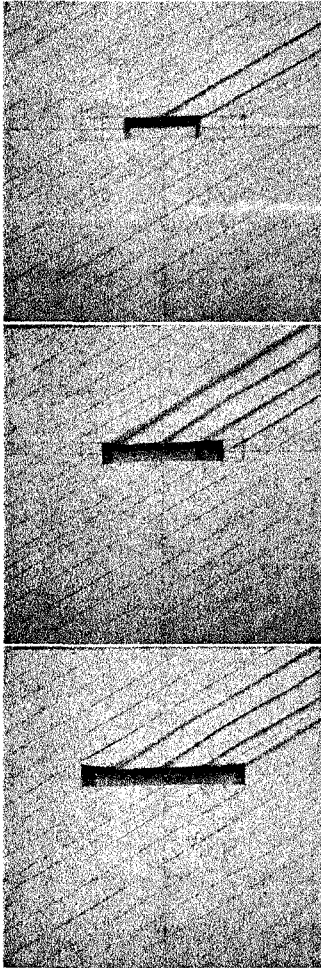


図-4 実験結果 (傾斜角  $30^\circ$ , 空間幅-上  $7\text{cm}$ , 中  $11\text{cm}$ , 下  $15\text{cm}$ )

## 6. 考察

### 6.1 土被りと空間幅の比の影響

数値解析結果では、土被りが大きいほど天端沈下量は少なく安定している。また、崩落していない場合で

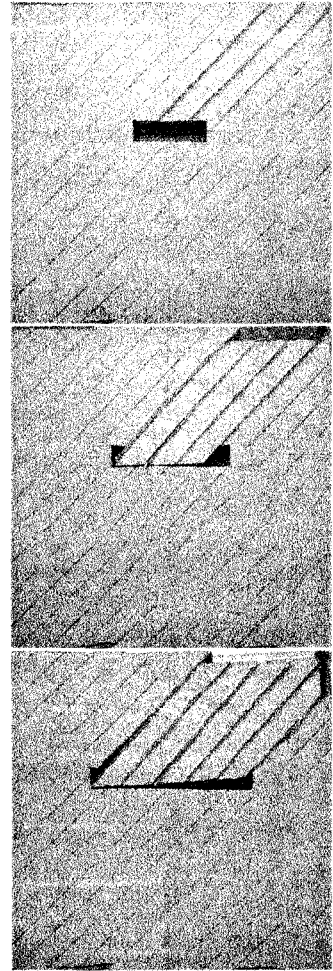


図-5 実験結果 (傾斜角  $45^\circ$ , 空間幅-上  $7\text{cm}$ , 中  $11\text{cm}$ , 下  $15\text{cm}$ )

土被り  $17\text{cm}$  ではトンネル中央付近がへこんだようになっており、空間が深く安定した位置にあると、天端ブロックは連続体に似たような挙動を示すということが考えられる。これらは、深度が大きくなるにつれて周辺の応力が均質化され、空間の天端直上にアーチの効果が期待されるためであると思われる。

また、土被り  $5\text{cm}$  では非常に不安定であったものの、土被り  $11\text{cm}$  および  $17\text{cm}$  では、 $\phi = 20^\circ$  以上においてブロックはほぼ安定した。安定と不安定の挙動を分ける限界値を空間の土被り ( $H$ ) と幅 ( $B$ ) の比 ( $H/B$ ) で表すと、 $H/B$  が  $0.3$  から  $0.7$  の間に閾値が存在するものと考えられる。

一方、実験による挙動の分かれ目は傾斜角により差異があり、傾斜角  $60^\circ$  では  $H/B$  が  $0.7$  から  $1.0$  で崩落し、 $H/B$  が  $1.6$  では崩落は発生しなかった。傾斜角  $45^\circ$

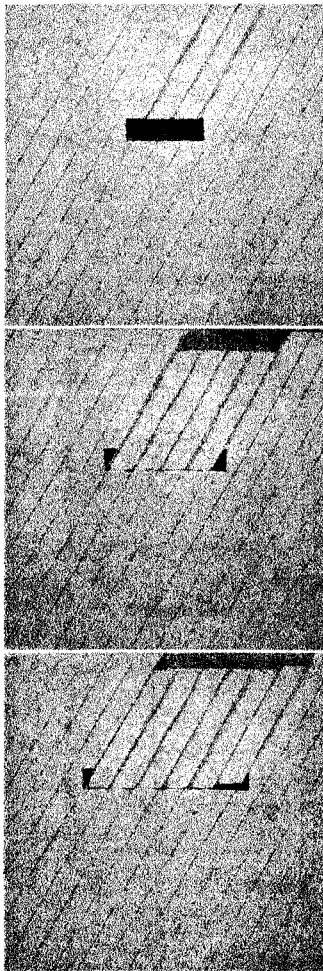


図-6 実験結果 (傾斜角  $60^\circ$ , 空間幅-上  $7\text{cm}$ , 中  $11\text{cm}$ , 下  $15\text{cm}$ )

では  $H/B = 1.0$  で崩落し、一方、傾斜角  $30^\circ$  の場合には  $H/B$  が  $0.7$  でも変形までにとどまり、崩落には至らなかった。

## 6.2 各要因の影響性の差異について

不連続体解析と模型実験を行った結果から、不連続体解析の崩落モードと模型実験の崩落過程の一致を確認することができ、また不連続面の存在による空間の安定性が土被り  $H$  と空間幅  $B$ 、不連続面の方向性、不連続面の性質に関与することがわかった。

しかしながら、各要因の影響性には大きく差があり、本研究で扱った層状の不連続地山に限定してではあるが、崩落の発生や崩壊モードの遷移現象などの大変形を伴う破壊現象に関しては、浅い地下空間では土被りが挙動の決定に大きく関与するのに対し、土被りがある程度大きくなると、むしろ内部摩擦角が大きく影響

することが確認できた。

一方、大変形を伴う破壊現象に至らない場合には、不連続面の傾斜角や内部摩擦角は卓越した要因とはならず、また、土被りに関しては土被りが大きくなるにしたがい周囲の応力が均質化されることから、不連続体よりはむしろ連続体的な挙動に近づくものと考えられる。

## 7. まとめ

層状の不連続性地山内の矩形空間の崩壊モードについて、不連続変形法解析と底面摩擦模型により、その挙動を調べた。その結果、崩壊モードに関しては、すべりが卓越するモード、回転が卓越するモード、および、滑りと同時に回転も発生するモードの3つの崩壊モードが確認できた。

崩落の発生に関与する要因について影響性を比較したところ、浅い地下空間では土被りが挙動の決定に大きく関与するのに対し、土被りが大きくなると、不連続面の摩擦角の影響が大きくなることが確認できた。また、崩壊モードの決定に関しては不連続面の傾斜角も大きく貢献することがわかった。一方、変形が大きくなり崩落まで至らない場合は、不連続面の摩擦角や傾斜角の影響は卓越したものとはならない。

なお、本論文で扱った地山は層状の地山のみであり、層状地盤の曲げ破壊が考慮されていない。冒頭の解析モデルのところで挙げた、格子状および千鳥状の不連続配置について、同様な解析を実施することにより、曲げ破壊の発生を考慮した崩壊モードの評価が可能である。本論文では、不連続面の間隔も固定としたことから、不連続面間隔の空間幅に対する相対的大きさによる、いわゆる、寸法効果が十分に考慮されていない。不連続面の間隔の大小により、挙動が大きく異なることが予想される。これらのことに関しては、本解析で考慮した土被りと空間幅比に加えて、不連続面間隔と空間幅の比をパラメータとして、解析および実験を実施し、再評価する必要があるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) Shi, G.H. and Goodman, R.E. (1988): Discontinuous Deformation Analysis-A New Method for Computing Stress, Strain and Sliding of Block System, Key Questions in Rock Mechanics: Proc. 29th U.S. Symposium, pp. 381-393.
- 2) 蔣 宇静 (1993): 深部地下空洞の力学的安定性に関する理論的および実験的研究, 九州大学学位論文, 第6章, p. 119.