

不連続地山内の空間幅と崩壊高さに関する基礎的研究

国立大分高専 正 員 ○ 相川 明

1. はじめに

不連続性の卓越する地山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、不連続地山内の地下空間の崩壊形態と、地山条件・施工条件との関連性について、底面摩擦模型と不連続変形法解析(DDA)により検討するものである¹⁾。

2. 不連続性地山モデルとパラメータについて

不連続地山モデルの一例を図-1に示す。モデルは長方形領域に不連続面を(1)層状、(2)千鳥状、(3)格子状に配置し、所定の土被りで素掘りの矩形空間を掘削したものである。ここでは、不連続面の間隔(d)、傾斜角(α)、不連続面の摩擦角(ϕ)、空間幅(B)、土被り(H)をパラメータとし、(a)崩落発生の有無、(b)崩壊モード、(c)天端沈下量、(d)地表面沈下量に注目することとした。結果の評価軸としては、土被りと空間幅の比(H/B)に着目し、空間幅と崩壊高さの関係について簡単な検討を行った。

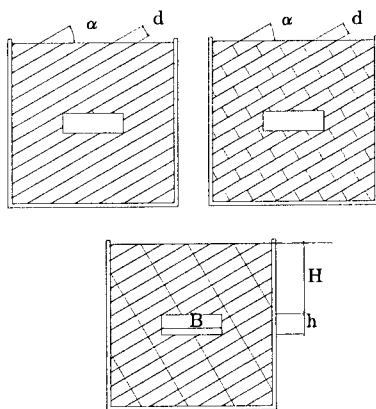


図-1 解析モデルの一例(上左:層状 上右:千鳥 下:格子)

3. 層状地山における空間崩落の発生条件

層状地山における崩壊形態を不連続変形法解析により調べた。表-1は模型実験を想定し、幅28cm、深さ24cm、不連続面間隔2cmのモデルについて、天端ブロックが完全崩落した($\times$)、空間高さの半分まで崩落した(Δ)、変形のみで崩落までは至らなかった($\circ$)の3段階にて分類したものである。また、図-2に崩壊形態の一例として内部摩擦角 $\phi = 10^\circ$ の場合を示す。図のように、すべりが卓

越するモード、回転が卓越するモード、すべりと回転が同時に発生するモードの3つが確認された。

表-1 崩落の判定(数値解析の結果)

H/B	傾斜角 α	内部摩擦角 ϕ					
		0°	10°	20°	30°	40°	50°
0.3	30°	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$
0.3	45°	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$
0.3	60°	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$
0.7	30°	$\times$	$\times$	$\circ$	$\circ$	$\circ$	$\circ$
0.7	45°	$\times$	$\times$	Δ	$\circ$	$\circ$	$\circ$
0.7	60°	$\times$	$\times$	$\circ$	$\circ$	$\circ$	$\circ$
1.1	30°	$\times$	Δ	$\circ$	$\circ$	$\circ$	$\circ$
1.1	45°	$\times$	$\times$	$\circ$	$\circ$	$\circ$	$\circ$
1.1	60°	$\times$	$\times$	$\circ$	$\circ$	$\circ$	$\circ$

崩落の有無： $\times$ 崩落 Δ 半分崩落 $\circ$ 変形

応力縮尺 1/100, 寸法縮尺 1/100の模型地山を想定した解析結果

解析条件：空間幅 $B = 15\text{cm}$, 空間高さ $a = 2\text{cm}$, 不連続面間隔 $d = 2\text{cm}$, 単位体積重量 $\gamma_t = 19.6\text{kN/m}^3$, 弾性係数 $E = 5.98 \times 10^4\text{kN/m}^2$, ボアソン比 $\nu = 0$, 粘着力 $c = 98\text{kN/m}^2$ 。

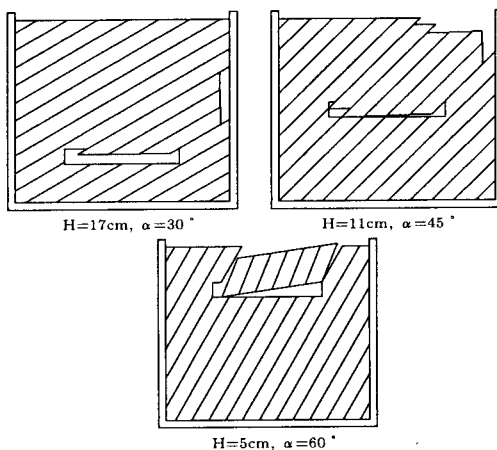


図-2 層状地山の崩壊モード(内部摩擦角 10° の場合)

表より、 $H/B = 0.3$ ではいずれの条件でも崩落したが、 $H/B \geq 0.7$ では $\phi \geq 20^\circ$ で空間はほぼ安定した。摩擦角(ϕ)については、 $\phi \leq 10^\circ$ ではいずれの条件でも崩落したが、 $\phi \geq 30^\circ$ かつ $H/B \geq 0.7$ では傾斜に無関係に安定である。また、 $\phi = 20^\circ$ 前後では破壊挙動が摩擦角に対して敏感である。すなわち、土被りが小さい時は、土被りの大きさが崩壊の有無を決定する大きな要因となり、土被りがある程度大きくなると、土被りよりは摩擦角が崩壊の発生に大きく関与することがわかる。

土被りの面で一番安定している土被り $H/B = 1.1$ の場合について、傾斜角 (α) 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° では最後まで崩落せずに途中で止まった。これは、不連続面に作用する垂直応力大きく、摩擦力が大きく作用したためと考えられる。

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、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。

4. 層状地山に関する底面摩擦模型実験

前節より $H/B \geq 0.7$ 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、底面摩擦模型により $\phi = 20^\circ$ 前後となる材料を不連続面に挟んで崩壊挙動を定性的に確認した。紙面の都合上、詳細は割愛するが、縦 24cm、横 28cm、厚さ 5cm の模型地山を水平に設置し、アクリル板を摩擦板として一定速度で水平移動させて重力場を再現した。材料には高炉スラグ・粉寒天・水の混合材料を養生して、所定の傾斜角・不連続面間隔に整形したものを用いた。また、傾斜台を用いた摩擦角の測定結果より、 $\phi = 20^\circ$ 前後となる不連続面材料として、テフロンシート (17°) とコピー用紙の包装シート (25°) の 2 つを採用した。

土被り 11cm についての結果を表-2 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 $45^\circ, 60^\circ$ において $H/B = 1.0, 1.6$ 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° で $H/B = 1.0$ では完全な崩落までは至らなかった。また、傾斜角 30° では破壊せず空間が歪む程度であったが、傾斜角 45° では、 $H/B = 1.6$ で天端が落下し、空間の底面と接触した。傾斜角 60° では、 $H/B = 1.0$ で完全に崩落した。表-2 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。

表-2 崩落の判定 (模型実験結果)

H/B	傾斜角 α	内部摩擦角 ϕ	
		テフロン (17°)	紙 (25°)
0.7	30°	Δ	
0.7	45°	$\times$	$\times$
0.7	60°	$\times$	
1.0	30°	Δ	
1.0	45°	$\times$	Δ
1.0	60°	$\times$	
1.6	30°	$\bigcirc$	
1.6	45°	$\bigcirc$	$\bigcirc$
1.6	60°	$\bigcirc$	

崩落の有無： $\times$ 崩落 Δ 半分崩落 $\bigcirc$ 変形

(土被り $H = 11$ cm, 掘削幅を $B = 7, 11, 15$ cm)

5. 考察

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。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、安定と不安定の挙動を分ける限界値を空間の土被りと幅の比 (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るが、概ね H/B が 0.7 から 1.0 程度である。

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関しては、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。

6. まとめ

層状の不連続地山内の矩形空間の崩落発生条件について、不連続体解析と模型実験により簡単な検討を行った。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。土被り H と空間幅 B の比 (H/B) が地盤の挙動に影響を与えようと考えられるが、不連続体解析はおおよそこの値が 0.3 ~ 0.7 の範囲に崩落の発生の有無を判断する限界値があるとの結果が得られた。

参考文献

- Shi, G. H. and Yeung, M. R. (1996): Discontinuous Deformation Analysis Program 96 User's Manual, p.25.