異方性岩盤斜面の安定解析－その3

大内 茂，宮内 彰

1 まえがき

岩盤斜面の安定解析方法として破壊面のせん断強さ(c, φ)がわかれば限界釣合いの方法で解析可能な，平面破壊，くさび破壊，円形破壊がとりあげられてきた。

ところが近年 岩柱あるいは岩塊の回転をも含む破壊，即ちトップリング破壊が注目を引くようになった。今報告は，このトップリング破壊の紹介，解析法の説明，及び実際の適用例を示すこととする。

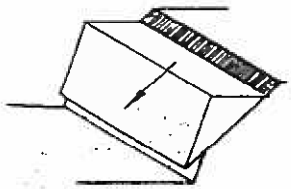


図-1 平面破壊

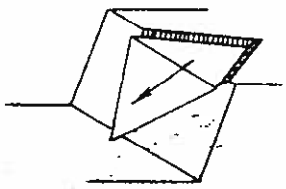


図-2 くさび破壊

図3 円形破壊

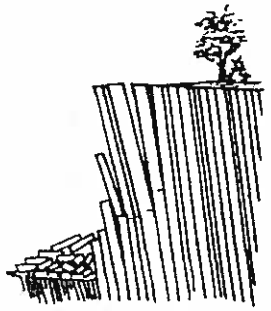


図4 たわみ性トップリング

2 トップリング破壊の形態

a たわみ性トップリング

図4に示すように急な傾斜の不連続面で明確に分離した柱状の岩盤が前面に傾くようにして屈折して折れている。

斜面先のすべり，掘削あるいは侵食によってトップリングが始まり，岩盤中に深く広い引張り亀裂を発生して後方へとトップリングが進む。斜面の下部は方向性や規則性がなくなった岩石で覆われる。

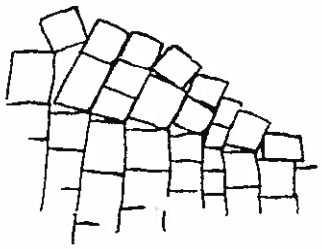


図5 ブロックトップリング

b ブロック トップリング

図5に示すように硬岩からなる個々の岩柱が広い間隔で分布する直交性の節理で分布しているときに生じる。斜面先の短い柱は背後の転倒した長い柱の荷重で前へ押されている。

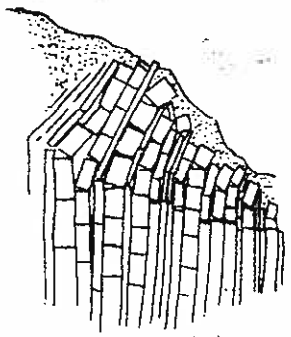


図6 ブロック－たわみ性トップリング

c ブロック－たわみ性トップリング

図6に示すように多くのクロスジョイントで分離した長い柱に沿って生じる見掛け上の連続的な屈曲状の形態で特徴づけられる。この形式のトップリングはクロスジョイント上に生じる変位の累積の結果である。従ってたわみ性トップリングに比べて，引張り亀裂は少く，又ブロック トップリングよりも面と面の接触や空隙

も少ない。

d　2次的な作用で生じるトップリング

図7に多くの2次的トップリングを示している。これらは一般的に侵食や風化などの自然要因あるいは人工的要因による法尻掘削で開始することが多い。

初生的な破壊の形式は岩石のすべりや岩石の破壊を含むもので，斜面のある部分で生じるこれらの初生的な破壊によってトップリングがひき起こされる。

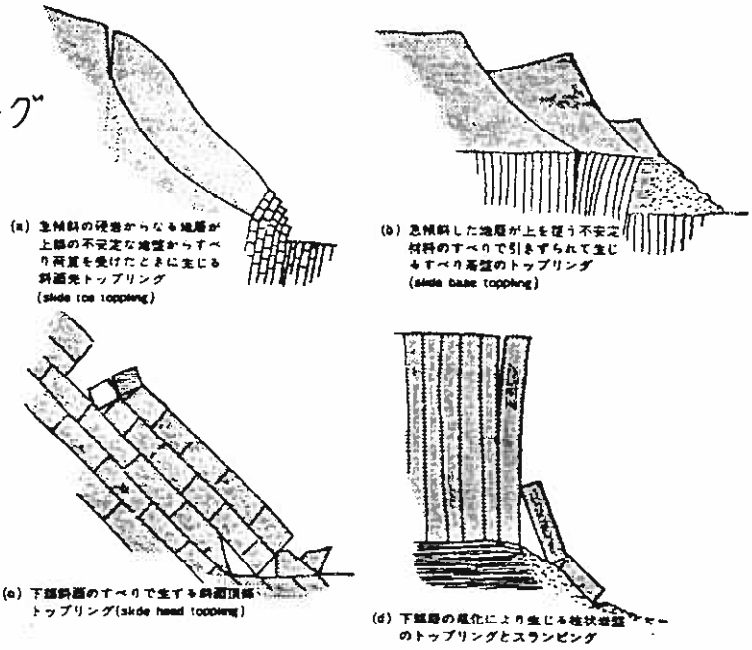
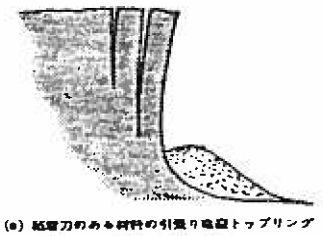


図7　2次的トップリング機構

3　トップリングの起る条件

図8に示すように，ある傾いた平面上にのっている一つの岩石のブロックを考える。ブロックと斜面の間のせん断抵抗 (c, ϕ) のうち，$c=0$ と仮定する。



このブロックの重量 W を表わすベクトルが底面 b の中にある時に，もしこの平面の傾き ψ が摩擦角 ϕ より大きいと，このブロックのすべりが起こることとなる。しかし，ブロックが高くて細い $(h>b)$ ときには，重量ベクトル W は底面 b の外側に落ちることとなり，ブロックは転倒（トップル）する。即ち下側の接触辺のまわりに回転することとなる。この単一のブロックのすべりとトップリングが生じる条件は図9で与えられる。この4つの領域は次のように決まる。

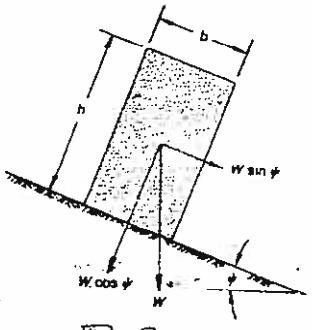


図8

領域1：$\psi<\phi$ および $b/h>\tan\psi$ でブロックは安定であり，すべりもトップリングも起らない。

領域2：$\psi>\phi$ および $b/h>\tan\psi$ でブロックはすべるがトップリングは起らない。

領域3：$\psi<\phi$ および $b/h<\tan\psi$ でブロックは転倒するがすべらない。

領域4：$\psi>\phi$ および $b/h<\tan\psi$ でブロックはすべりとトップリングが同時に起こりうる。

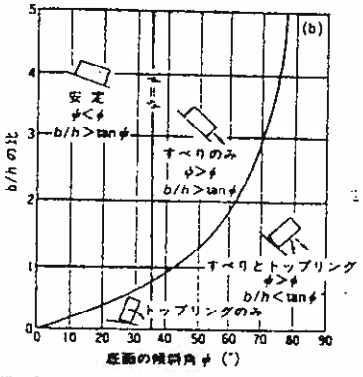


図9　ブロックのすべりとトップリングの条件

このブロックの安定性を解析するにあたって 限界塑性平衡理論は領域1と2に対してだけに使うことが出来る。トップリングが生じる 領域3, 4 はこれと同一方法では解析出来ない。

4 階段上の基盤上に生ずるトップリングの極限平衡解析

図10のような規則的なブロック斜面を考える。斜面は(90°−α)で化頁いた層から成る岩盤を斜面角θで掘削したものである。基礎は全体的に平均角βで傾き、図のような階段状をなしている。

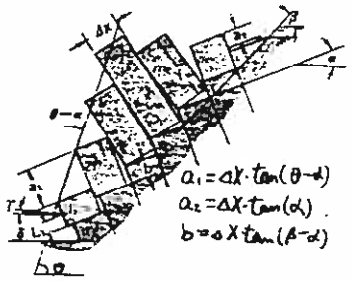


図10 解析モデル

このモデルの斜面頂部より下方n番目のブロックの高さは

$$Y_n = n(a_1 - b) \qquad \text{——————} \quad (1)$$

また 頂部より上部では

$$Y_n = Y_{n-1} - a_1 - b \qquad \text{——————} \quad (2)$$

図10のブロックの系が破壊を始めると、ブロックの挙動から次の3種類に分類出来る。

(a) 法尻の"すべり"ブロックの組

(b) 斜面最上部での安定したブロックの組み

(c) トップリング・ブロックからなる中間の組み

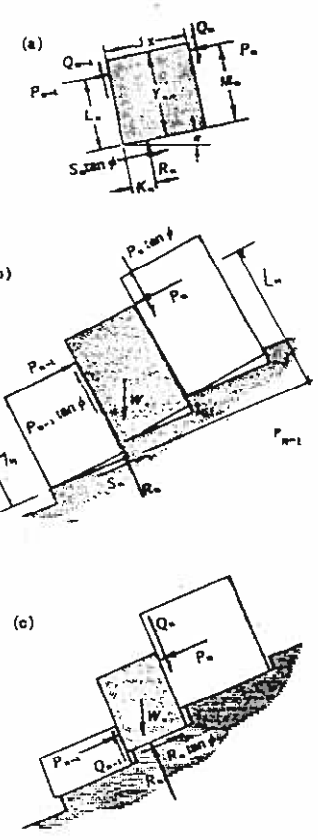


図11 n番目のブロックがトップリングおよびすべり出す為の極限条件

図11 (a) では基盤との間に (R_n, S_n) の力が働き、隣りのブロックとの間に $(P_n, Q_n, P_{n-1}, Q_{n-1})$ の力が働いている。

いま あるブロックがトップリングの組みにある時、全ての力の作用点は図11 (b)のようになる。

n番目のブロックが斜面の頂部より下であれば

$$M_n = Y_n \qquad L_n = Y_n - a_1 \qquad \text{——————} \quad (3)$$

n番目のブロックが頂部にあると

$$M_n = Y_n - a_2 \qquad L_n = Y_n - a_1 \qquad \text{——————} \quad (4)$$

n番目のブロックが頂部より上にあれば

$$M_n = Y_n - a_2 \qquad L_n = Y_n \qquad \text{——————} \quad (5)$$

底面に働く法線応力及び平行な力を解くと

$$\left.\begin{aligned} R_n &= W_n \cdot \cos\alpha + (P_n - P_{n-1})\tan\phi \\ S_n &= W_n \cdot \sin\alpha + (P_n - P_{n-1}) \end{aligned}\right\} \qquad \text{——————} \quad (6)$$

回転の釣合いを考えるとトップリングを防ぐのに必要な力 P_{n-1} の値は

$$P_{n-1,t} = \frac{P_n(M_n - a_x \cdot \tan\phi) + (W_n/2)(Y_n \sin\alpha - a_x \cdot \cos\alpha)}{L_n} \qquad \text{——————} \quad (7)$$

考えているブロックがすべりブロックの組であると

$$S_n = R_n \tan\phi \qquad (8)$$

(7)(8)式より すべりを防ぐちょうどの力 P_{n-1} の値は

$$P_{n-1,s} = P_n - \frac{W_n \cdot (\tan\phi \cdot \cos\alpha - \sin\alpha)}{1 - \tan^2\phi} \qquad (9)$$

5 計算の手順

(a) 極限平衡の為の ϕ の値の決定

1) $\phi > \alpha$ となる ϕ の値を仮定する。

2) 次の条件を満すブロックのうち最上部のブロックをトップリングの組の最上部ブロック n_1 とする。

$$b/h > \cot\alpha$$

3) このブロック n_1 から開始して，トップリングを防ぐのに必要な個別力 $P_{n-1,t}$ とすべりを防ぐのに必要な $P_{n-1,s}$ を算定する。

$P_{n-1,t} > P_{n-1,s}$ であれば，そのブロックはトップリングを始めようとする状態にあり，$P_{n-1} = P_{n-1,t}$ となる。

$P_{n-1,t} < P_{n-1,s}$ であれば，そのブロックはスベリ出す状態にあり，$P_{n-1} = P_{n-1,s}$ となる。

4) 3)で述べた順序で次にその下の $(n-1)$番目のブロック さらにその下の全ブロックを順次調べる。

5) ついには ブロックの一つが $P_{n-1,s} > P_{n-1,t}$ の状態となる。これを，すべりが生じる組の最も上部のブロック n_2 とする。このブロックとこれより下の全ブロックの極限状態はスベリ状態で与えられる。

$P_{n-1,s} > P_{n-1,t}$ の条件がどのブロックにも成立しなければ，すべりの組は存在せず，トップリングが ブロック1まで波及することとなる。

6) 法尻のブロック1について

$P_0 > 0$ であれば 仮定した ϕ の値では不安定である。従って ϕ を大きな値にとり，計算を反復する必要がある。

$P_0 < 0$ であれば 逆に ϕ の値を小さく取って計算を反復する。

$P_0 \fallingdotseq 0$ であれば この ϕ を極限平衡の為の値とすることが出来る。

(b) 斜面を安定化するのに必要なアンカー張力の決定

1番目のブロックに，その基盤から上L1の距離に1本のアンカーを配置する。このアンカーは水平より下に δ 度傾く。ブロック1のトップリングを防ぐ為に必要な張力は

$$T_t = \frac{(W_1/2)(\gamma_1 \sin\alpha - \Delta x \cos\alpha) + P_1(\gamma_1 - \Delta x \tan\phi)}{L_1 \cdot \cos(\alpha+\delta)} \qquad (10)$$

一方 すべりを防ぐ為に必要な張力は

$$T_s = \frac{P_1(1-\tan^2\phi) - W_1(\tan\phi\cos\alpha - \sin\alpha)}{\tan\phi\sin(\alpha+\delta) + \cos(\alpha+\delta)} \qquad (11)$$

アンカー張力は T_t, T_s のうちのいずれか大きい値とすれば良い。

(C) 安全率の算定

トップリングの安全率は岩盤に適用出来ると考えられる摩擦角の正接($\tan\phi_{available}$)をアンカー張力Tで平衡させるのに必要な摩擦角の正接($\tan\phi_{require}$)で割った値で定義出来る。

$$F_s = \frac{\tan\phi_{available}}{\tan\phi_{required}} \qquad (12)$$

6 適用例

道路建設の為に凝灰岩の山を切取った所トップリング破壊が発生した。斜面高は 12.5m で地山の成層面が 70° で山側に傾き，この地山を 41° で掘削した。各ブロックはほぼ規則的に 1.8m ごとに階段状に並んでいた。

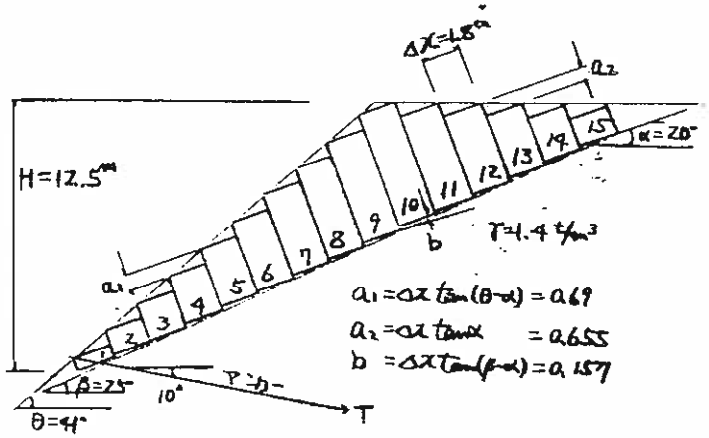


図 12 検討モデル

$\cot\alpha = 2.748$ であるから ブロック 11～15 は $\phi > 20°$ の全てのケースについて安定である。

$\phi = 21°$ ($\tan\phi = 0.384$) とおいて計算した結果を表1に示す。ブロック1のすべりを防ぐのに必要な力はほぼゼロ。即ちこの斜面が限界平衡状態にきわめて近いことを示している。ブロック9, 10 はトップリング帯であり，ブロック1～8はすべり帯である。

対策工として アンカー工を用いることとし，計画安全率 1.2 を得られる張力Tを算定する。

表1 トップリング計算結果 ($\phi = 21°$)

NO	Yn	Yn/dX	Mn	Ln	Wn	Pn,t	Pn,s	Pn	Rn	Sn	Sn/Rn	
15	1.27	.71	.62	1.27	3.20	0.00	0.00	0.00	3.01	1.10	.364	
14	2.08	1.16	1.43	2.08	5.25	0.00	0.00	0.00	4.93	1.80	.364	
13	2.90	1.61	2.24	2.90	7.30	0.00	0.00	0.00	6.86	2.50	.364	安定
12	3.71	2.06	3.05	3.71	9.35	0.00	0.00	0.00	8.78	3.20	.364	
11	4.52	2.51	3.87	4.52	11.39	0.00	0.00	0.00	10.71	3.90	.364	
10	5.33	2.96	4.68	4.64	13.44	0.00	0.00	0.00	12.56	4.40	.351	
9	4.80	2.67	4.80	4.11	12.10	.19	-.29	.19	11.40	4.21	.369	トップリング
8	4.27	2.37	4.27	3.58	10.75	.12	-.07	.12	10.19	3.91	.384	
7	3.73	2.07	3.73	3.04	9.41	-.23	-.12	-.12	8.92	3.42	.384	
6	3.20	1.78	3.20	2.51	8.06	-.76	-.32	-.32	7.65	2.93	.384	
5	2.67	1.48	2.67	1.98	6.72	-1.28	-.50	-.50	6.37	2.45	.384	すべり
4	2.13	1.19	2.13	1.44	5.38	-1.83	-.65	-.65	5.10	1.96	.384	
3	1.60	.89	1.60	.91	4.03	-2.44	-.77	-.77	3.82	1.47	.384	
2	1.07	.59	1.07	.38	2.69	-3.30	-.85	-.85	2.55	.98	.384	
1	.53	.38	.53	-.16	1.34	-5.60	-.91	-.91	.91	-.45	-.497	

Block 1 ノ スベリ オ ﾌｾｸﾞ ｻﾎﾝ Pa= -.94 cot α = 2.748

計画安全率 $F_s = 1.2 = \dfrac{\tan\phi_{available}}{\tan\phi_{require}} = \dfrac{\tan 21^\circ}{\tan\phi_{required}}$

$\tan\phi_{required} = \tan 21^\circ / 1.2 = 0.2$

$\phi_{require} = 17.7^\circ$

この時必要となるアンカー張力Tは(11)式より $T = 3.0\,tf/m$ となる。この値は決して大きな値ではなく、トップリング破壊の安全性を確保するには先端の要石を保持することが重要であることを示している。

7 あとがき

今回は、従来あまり注目されていなかった岩体岩ブロックの回転によるトップリング破壊の紹介及び解析法、適用例の報告を行った。

今後トップリング破壊に着目して岩盤斜面崩壊を調査検討し、現在の解析法をさらに充実させていきたい。

[参考文献]

1) 朝倉書店「岩盤斜面工学」ブックプレイ

2) 藤井、宮内 大内「異方性岩盤斜面の安定解析 -その1-」第12回土質工学研究発表会 1977

3) 藤井、宮内、大内「異方性岩盤斜面の安定解析-その2-」第13回土質工学研究発表会 1978