層雲峡熔結凝灰岩における長柱岩体のトップリング機構 —寒冷地における岩盤斜面崩壊に関する研究 (第2報)—

根岸正充*・中島 巖**

Mechanism of Toppling of Long Columnar in Souunkyo Welded Tuff —Study on Slope Failure in Cold Region (2nd Report)—

Masamitsu NEGISHI* and Iwao NAKAJIMA**

Key words : 岩盤崩壊 rock fall, 柱状節理 columnar joint, トップリング toppling,
AE acoustic emission

Abstract

On the slope of joint structure at Souunkyo Gorge in Hokkaido, toppling of a long columnar of welded tuff has occurred frequently and the road has hazard of rock fall. In this study, the occurrence mechanism of the toppling was considered theoretically on the basis of the observational results of the fracturing processes.

At first, it was proved from the analyses on the thermal deformation of a rock columnar that a small and a large stone fell alternately in the opened joint on the back side of the columnar in response to the seasonal change in temperature gradient and that the inclination of the columnar increased gradually with the lapse of time.

Secondly, it was clarified from the investigation on the hook-shaped crack propagations at the root of the columnar that toppling was caused when the rotational center of the inclined columnar moved from the outside to the inside just over the centroid in the processes of compressive fracture of the outside part. Additionally, the long duration of acoustic emission activity just before toppling has supported the validity of the theoretical considerations.

1. ま え が き

層雲峡地域においては、熔結凝灰岩に比高10~200 mの柱状節理が発達し、垂直に近い函状谷地形が形成されている。これらの斜面では多数の岩盤崩壊が発生しており、主たる破壊形態はすべり破壊 (sliding) であ

るが、長柱岩体のトップリング (toppling) や座屈 (buckling) も発生している。なかでも典型的なトップリング現象が多数の箇所で見られ、当地域の斜面崩壊を特徴付けている。本研究の前報¹⁾では、夏期における長柱岩体の熱変形と潜在節理面におけるき裂進展問題を理論的に検討し、すべり破壊に起因する崩落の発生機構を明らかにした。また、岩盤斜面の温度分布とAE活動を観測することによって、理論的検討結果の妥当性を検証した。これに対して本報では、トップリングの発生機構を現象観察結果に基づいて理論的に解明する。

* 北海道開発局開発土木研究所 Civil Engineering Research Institute, Hokkaido Development Bureau

** 北海道大学工学部 Faculty of Engineering, Hokkaido University

トッピングについては1970年代に基本モデル²⁾が提案され、フィールド調査³⁾も報告されている。以後、わが国においても、岩盤急斜面の崩壊形態がトッピング破壊であるという例が指摘されるようになった。しかし、それらの多くはトッピング岩体の形態的な報告に限られており、トッピングがどのような破壊過程をたどって発生するのか究明した報告はほとんどない。

本研究では、トッピング破壊の発生機構を解明することを目的に、層雲峡の熔結凝灰岩柱状節理構造斜面で起こる長柱岩体の熱変形を検討し、観察結果に基づいて転倒に至る過程を理論的に検討した。また、実際にトッピング破壊をAE法によってモニタし、理論的検討結果の妥当性を検証した。以下、柱状構造斜面におけるトッピングの発生機構とトッピングに伴うAE活動の観測結果について述べる。

2. 長柱岩体のトッピング現象

大函は、層雲峡熔結凝灰岩の分布地域の中では最上流地域に属し、比高15~50 mの垂直に近い谷壁が形成されている。谷壁崩壊の主形態はトッピングで、典型的なトッピングを起こした長柱岩体やトッピングが進行中の長柱岩体が多数見られる。

写真-1~3はトッピングの進行例を示す。写真-1では長柱岩体の高さは約15 mで、上端の開口量は約80 cmに達している。これらの写真で注目すべき現象は、脚部に形成されている「鉤型割れ」である。写真-2は鉤型割れの拡大であるが、横割れは岩体裏側から長柱厚みの75%程度まで進展した後、縦割れに変わって

いる。また、岩体外側の細柱部には岩石の剝離が起き、大きな圧縮応力が作用していると推察される。最近3年間の観察でも、この長柱岩体の傾きは徐々に増大しており、脚部の割れ目の開口量も目立ってきている。写真-3はこの岩体裏面の開口節理に挟まった落石を示す。一般に、開口節理間には後述のスケッチにも示すような落石が挟まっており、長柱岩体の傾きはこれらの挟雑石の降下に応じて増大することが確認された。

写真-4に長柱岩体のトッピング例を示す。岩体は長さ約15 mにわたって石狩川の河床に横転している。なお、この岩体脚部にも鉤型割れが形成されていた。この「鉤型割れ」はトッピング破壊の痕跡であるとなされる。なお、鉤型割れの痕跡は層雲峡では四の岩、大函および神削壁などの各所で認められる。

3. トッピングの発生機構

3.1 トッピングの要因

従来、トッピングは現に自立する岩体の力学的なバランス問題あるいはこれに地震の作用を考慮した問題として論じられてきた。なぜ長い年月を要して長柱岩体が傾き、転倒に至るのか究明されていない。

当地域のトッピングは、一番谷側にはほぼ垂直に自立する長柱岩体で起こっている。現象としては、まず岩体の頭部が背面から分離し、谷側に傾きはじめる。その後、長年月を経て、傾きが増大し、岩体が転倒する。このような転倒の進行要因としては、岩体の熱変形、節理の間隙水圧、岩体下部の侵食、地震力により発生する曲げモーメントの増加等が考えられる。しかるに、開口節理に挟まった落石の降下原因を検討した結果、トッピングの主因は長柱岩体の熱変形であることが確認された。以下、この検討結果について述べる。

3.2 節理の開口変形

① $\Delta t < 0$ の初期開口変形

冬期間、垂直に停立する長柱岩体は谷側へ曲がり、岩体裏面の節理は上部から開口する。いま、図-1に示すように、長さ a の長柱岩体の上端から x をとり、軸線のたわみを y_t とすると、熱変形は次式で表される¹⁾。

$$\frac{d^2 y_t}{dx^2} = -\alpha \frac{\Delta t}{h} \quad (1)$$

ただし α : 長柱岩体の線膨張係数

h : 長柱岩体の厚さ

$\Delta t = t_1 - t_2$

t_1 : 長柱岩体の表面温度

t_2 : 長柱岩体の裏面温度

図-1 長柱岩体の熱変形と座標

写真-1 層雲峡大函における傾斜岩体

写真-2 傾斜岩体脚部に進展した鉤型割れ目

写真-3 傾斜岩体脚部節理間の扶雑石

写真-4 横転した長柱岩体

(1)式を次式の境界条件で解くと、熱変形による長柱の傾き(たわみ角)と節理の開口量(たわみ)は(2)、(3)式のごとく求められる。

$$\frac{dy_t(a)}{dx} = y_t(a) = 0$$

$$\frac{dy_t}{dx} = -\alpha \frac{\Delta t}{h} (x-a) \quad (2)$$

$$y_t = -\frac{\alpha}{2} \frac{\Delta t}{h} (x-a)^2 \quad (3)$$

また、長柱岩体が熱変形を受けると、曲がり梁になる。この結果、岩体には自重 w (単位長さ当りの重量) によって次式の曲げモーメント M_t が生起する。

$$M_t = wx \left\{ y_t \left(\frac{x}{2} \right) - y_t(x) \right\}$$

$$= -\frac{\alpha w}{8} \frac{\Delta t}{h} (4ax^2 - 3x^3)$$

したがって、自重による開口変位成分 y_{tw} は、次式を下記の条件で解くことによって(5)、(6)式のごとく求められる。

$$\frac{d^2 y_{tw}}{dx^2} = \frac{M_t}{EI_z} \quad (4)$$

$$\frac{dy_{tw}(a)}{dx} = y_{tw}(a) = 0$$

$$\frac{dy_{tw}}{dx} = \frac{\alpha w}{96EI_z} \frac{\Delta t}{h} (9x^4 - 16ax^3 + 7a^4) \quad (5)$$

$$y_{tw} = \frac{\alpha w}{480EI_z} \frac{\Delta t}{h} (9x^5 - 20ax^4 + 35a^4x - 24a^5) \quad (6)$$

ただし E : 長柱岩体のヤング率

I_z : 長柱岩体の断面二次モーメント

熱と自重による初期開口変形 y_1 は、次式のごとく(3)、(6)式を重ね合わせることによって求められる。

$$y_1 = y_t + y_{tw} \quad (7)$$

図-2の①は、 $\Delta t < 0$ で開口した節理 $y_1(z_1)$ に落石 D_1 が挟まった状態である。ただし、 z_1 および D_1 は落石の位置と直径である。

② 落石 D_1 が挟まり、 $\Delta t = 0$ になったときの開口変形

冬期間、 y_1 の開口節理に落石が挟まると、岩体表裏の温度差は次第になくなり、長柱は傾斜梁になると推察される。いま、図-2の②に示すように、落石 D_1 が z_1

図-2 落石 D_1, D_2 が挟まった開口節理の熱変形

の位置に挟まった状態で $\Delta t = 0$ になると、 D_1 に対して反力 R_1 が生起する。 R_1 による開口変位成分 y_{R1} は、次式を下記の境界条件で解くことによって(9)、(10)式のごとく求められる。

$$\frac{d^2 y_{R1}}{dx^2} = \frac{R_1}{EI_z} (x - z_1) \quad (8)$$

$$\frac{dy_{R1}(a)}{dx} = y_{R1}(a) = 0$$

$$\frac{dy_{R1}}{dx} = \frac{R_1}{2EI_z} (x^2 - 2z_1x + 2az_1 - a^2) \quad (9)$$

$$y_{R1} = \frac{R_1}{6EI_z} \{ x^3 - 3z_1x^2 + (6az_1 - 3a^2)x - (3a^2z_1 - 2a^3) \} \quad (10)$$

ただし、 $z_1 \leq x \leq a$ である。

また、傾斜梁には自重によって次式の曲げモーメント $M_{\theta 1}$ が作用する。

$$M_{\theta 1} = \frac{W}{2} \cdot \frac{D_1}{a - z_1} x^2$$

$M_{\theta 1}$ による開口変位成分 $y_{\theta 1}$ は、次式を下記の境界条件で解くことにより、(12)、(13)式のごとく求められる。

$$\frac{d^2 y_{\theta 1}}{dx^2} = \frac{M_{\theta 1}}{EI_z} \quad (11)$$

$$\frac{dy_{\theta 1}(a)}{dx} = y_{\theta 1}(a) = 0$$

$$\frac{dy_{\theta 1}}{dx} = \frac{w}{6EI_z} \cdot \frac{D_1}{a-z_1} (x^3 - a^3) = 0 \quad (12)$$

$$y_{\theta 1} = \frac{w}{24EI_z} \cdot \frac{D_1}{a-z_1} (x^4 - 4a^3x + 3a^4) \quad (13)$$

この結果, $z_1 \leq x \leq a$ での②の状態の開口変形 y_2 は y_{R1} と $y_{\theta 1}$ を重ね合わせることによって求められる。

$$y_2 = y_{R1} + y_{\theta 1} \quad (14)$$

なお, R_1 は, $y_2(z_1) = D_1$ の境界条件から次式のように解くことができる。

$$R_1 = \frac{D_1}{(a-z_1)^3} \left\{ 3EI_z - \frac{w}{8(a-z_1)} (z_1^4 - 4a^3z_1 + 3a^4) \right\} \quad (15)$$

また, $0 \leq x \leq z_1$ での y_2 は, 次式によって表される。

$$y_2 = \frac{D_1}{a-z_1} (a-x) + \left\{ \frac{dy_{R1}(z_1)}{dx} + \frac{dy_{\theta 1}(z_1)}{dx} \right\} (x-z_1) \quad (16)$$

図-2の②は, ①の状態では $\Delta t < 0$ から $\Delta t = 0$ になったときの開口節理 $y_2(z_2)$ に落石 D_2 が挟まった状態である。ただし, z_2 および D_2 は落石の位置と直径で, $z_1 > z_2$, $D_1 < D_2$ である。

③ 落石, D_1, D_2 が挟まった状態で $\Delta t > 0$ になったときの開口変形

既述したように, 冬期間 $\Delta t < 0$ で開口した節理にいったん落石が挟まると, 長柱岩体表裏面は様な温度の空気にさらされるため, 次第に $\Delta t = 0$ になっていくと推測される。しかるに, 冬から夏への季節変化過程においては, 凍結岩体の融解の遅れと直射日光で表裏の温度上昇に差が現れ, $\Delta t > 0$ になるとみなされる。

いま, 図-2の③に示すように, ②の状態では $\Delta t > 0$ になったときの節理の開口変形について考察する。 y_1 の自由変形を考えると, 開口量は次式のように z_1 で増大し z_2 で減少するから, D_1 の反力 R_1 は消滅し, D_2 に R_2 が誘起する。

$$y_1(z_1, \Delta t = 0) < y_1(z_1, \Delta t > 0)$$

$$y_1(z_2, \Delta t = 0) > y_1(z_2, \Delta t > 0)$$

ここで, R_2 による開口変位成分 y_{R2} は, (9), (10)式の R_1 および z_1 をそれぞれ R_2, z_2 と入れ換えることによって次式のように求められる。

$$\frac{dy_{R2}}{dx} = \frac{R_2}{2EI_z} (x^2 - 2z_2x + 2az_2 - a^2) \quad (17)$$

$$y_{R2} = \frac{R_2}{6EI_z} \{ x^3 - 3z_2x^2 + (6az_2 - 3a^2)x - (3a^2z_2 - 2a^3) \} \quad (18)$$

さらに, 落石 D_2 が z_2 に挟まった傾斜梁には曲げモーメント $M_{\theta 2}$ が作用する。

$$M_{\theta 2} = \frac{w}{2} \cdot \frac{D_2}{a-z_2} x^2$$

したがって, $M_{\theta 2}$ による開口変位成分 $y_{\theta 2}$ も, (12), (13)式の R_1 および z_1 をそれぞれ R_2, z_2 に入れ替えることによって求められる。

$$\frac{dy_{\theta 2}}{dx} = \frac{w}{6EI_z} \cdot \frac{D_2}{a-z_2} (x^3 - a^3) = 0 \quad (19)$$

$$y_{\theta 2} = \frac{w}{24EI_z} \cdot \frac{D_2}{a-z_2} (x^4 - 4a^3x + 3a^4) \quad (20)$$

この結果, $z_2 \leq x \leq a$ での③の状態の開口変形 y_3 は, $y_{R2}, y_{\theta 2}$ に y_t, y_{tw} を重ね合わせるによって表される。

$$y_3 = y_{R2} + y_{\theta 2} + y_t + y_{tw} \quad (21)$$

なお, R_2 は, $y_3(z_2) = D_2$ の境界条件から次式のように解くことができる。

$$R_2 = \frac{D_2}{(a-z_2)^3} \left\{ 3EI_z - \frac{w}{8(a-z_2)} (z_2^4 - 4a^3z_2 + 3a^4) \right\} + \frac{1}{(a-z_2)^3} \left\{ \frac{3aEI_z}{2} \cdot \frac{\Delta t}{h} (z_2 - a)^2 - \frac{aw}{160} \cdot \frac{\Delta t}{h} (9z_2^5 - 20az_2^4 + 35a^4z_2 - 24a^5) \right\} \quad (22)$$

また, $0 \leq x \leq z_2$ では, $\Delta t \neq 0$ とみなされるから, y_3 は次式のように表される。

$$y_3 = \frac{D_2}{a-z_2} (a-x) + \left\{ \frac{dy_{R2}(z_2)}{dx} + \frac{dy_{\theta 2}(z_2)}{dx} + \frac{dy_t(z_2)}{dx} + \frac{dy_{tw}(z_2)}{dx} \right\} (x-z_2) \quad (23)$$

いま, y_3 の開口変形において落石 D_1 が挟まっていた位置 z_1 の開口量は, 下記のように増大する。

$$y_3(z_1, t > 0) > D_1$$

この結果 D_1 は z_3 まで降下し, 次式を満たして止まる。

$$y_3(z_3) = D_1$$

④ 落石 D_1, D_2 が挟まった状態で $\Delta t=0$ になったときの開口変形

図-2の④に示すように、 y_3 の開口節理に落石 D_2, D_1 がそれぞれ z_2, z_3 の位置に挟まった状態で夏から冬にかけて $\Delta t=0$ になったときの開口変形 y_4 を考える。この変形過程において、 y_3 は次式のように z_2 で増大し、 z_3 で減少するから、 D_2 の反力 R_2 は消滅し、 D_1 に R_3 が誘起する。

$$y_3(z_2, \Delta t > 0) < y_3(z_2, \Delta t = 0)$$

$$y_3(z_3, \Delta t > 0) > y_3(z_3, \Delta t = 0)$$

ここで、 $\Delta t=0$ になったときの開口変形 y_4 は、次式で表される。

$$y_4 = y_{R3} + y_{g3} \quad z_3 \leq x \leq a \quad (24)$$

$$y_4 = \frac{D_1}{a-z_3} (a-x) + \left\{ \frac{dy_{R3}(z_3)}{dx} + \frac{dy_{g3}(z_3)}{dx} \right\} (x-z_3) \quad 0 \leq x \leq z_3 \quad (25)$$

ただし、 y_{R3} および y_{g3} の開口変位成分は、(17)～(20)および(22)式の D_2, z_2, R_2 をそれぞれ D_1, z_3, R_3 に入れ換え、 $\Delta t=0$ と置くことによって求められる。この結果、 D_2 は z_4 まで落下し、次式を満たして止まる。

$$y_4(z_4) = D_2$$

いま、 n を落下のくり返し回数とすると、 y_n は、上述のように各開口変位成分式の z, R 項に z_{n-1}, R_{n-1} を入れ換え、 n が奇数のとき D_1 および $\Delta t > 0$ 、 n が偶数のとき D_2 および $\Delta t=0$ と置くことによって順次計算することができる。

3.3 開口節理に挟まった落石の降下挙動

節理の開口変形に伴う落石挙動の計算は、現在層雲峡大函でトッピングが進行中の長柱岩体を例にとって行った。この岩体には写真-2に示したように脚部に典型的な「鉤型割れ」が現れている。図-3は、 $\Delta t=-6^\circ\text{C}$ で $D_1=0.3\text{ cm}$ の落石と $\Delta t=0$ で $D_2=0.6\text{ cm}$ の落石が挟まってからの熱変形に伴う降下挙動の計算結果である。なお、計算例にとった長柱岩体の寸法と物性値は表-1の諸元を示す。

図-3において注目すべき点は、前節の計算どおり落石 D_1 と D_2 が交互に落下していることである。すなわち、夏期の $\Delta t > 0$ で D_2 が支点になっているとき、 D_1 が降下している。また、冬期の $\Delta t=0$ で D_1 が支点になっているとき、 D_2 が降下している。この結果、 D_1 は $n=25$ 回の繰返しで $z_n=13.2\text{ m}$ 付近まで落下し、 D_2 は $n+1=24$ 回の繰返しで $z_{n+1}=12.2\text{ m}$ 付近まで落下

表-1 長柱岩体の計算諸元

計算諸元	記号	数 量	備考
高さ	a	1500 cm	
幅	b	70 cm	
厚さ	h	92 cm	
断面積	A	$6.44 \times 10^3 \text{ cm}^2$	bh
断面二次モーメント	I_z	$4.54 \times 10^6 \text{ cm}^4$	$bh^3/12$
断面係数	Z	$9.89 \times 10^4 \text{ cm}^3$	$bh^2/6$
比重	γ	$2.1 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^3$	
単位長さ当りの重量	w	13.52 kgf/cm	bhr
引張強度	S_t	4.3 kgf/cm ²	
破壊靱性	K_{IC}	10.0 kgf/cm ^{3/2}	
ヤング率	E	$2.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$	
線膨張係数	α	$9.0 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

図-3 開口節理に挟まった大小2つの落石の降下挙動

している。しかしながら、 D_1, D_2 の降下速度は n が増大するにつれて次第に小さくなっている。したがって、 D_1, D_2 の交互落下だけでは転倒条件が成立するのに相当長い年月を要すると推察される。

なお、図-4は、 $n=4$ 回目の $\Delta t=0$ の状態で更に $D_3=1.0\text{ cm}$ の落石が挟まってからの降下挙動の計算例である。この計算例に現れているように、開口節理に粒径の大きな落石が新たに挟まると、それ以下で支点となっ

図-4 開口節理に挟まった大中小3つの落石の降下挙動

ていた落石の降下速度は増大する。現実には、節理の開口量の増加に応じて粒径の大きな落石が順次挟まり、降下速度の増減を繰り返しながら、岩体傾斜は増大するとみなされる。

4. トップリング過程における脚部の破壊

4.1 横割れの発生

開口節理に挟まった大小2つの落石が季節変化に伴う熱変形に応じて交互に降下すると、長柱岩体の傾きが増大し、トップリングが発生する。この過程で、長柱脚部には共通して写真-2、図-5に示すような「鉤型割れ」が進行する。すなわち、長柱裏面側から横割れが横断面の75%程度まで進展した後、縦割れの開口が起こる。以下、これらの破壊現象について考察する。

まず、図-5の横割れは、曲げ破壊に起因するクラックであり、次式の破壊条件が成立したとき発生するとみなされる。

$$\frac{M_{\theta}}{Z} - \frac{aw}{A} \geq S_t \quad (26)$$

図-5 長柱岩体脚部に形成された鉤型割れ目

ただし M_{θ} : 横割れ発生時の曲げモーメント

A : 長柱の断面積

Z : 長柱の断面係数

S_t : 岩体の引張強度

ここで、長柱岩体の上部で節理の開口が増大すると、表裏の温度差がなくなり、長柱は傾斜梁に変わっていくと推察される。この傾斜梁の自重による曲げモーメントは次式で与えられる。

$$M_{\theta} = \frac{a^2 w \theta}{2} \quad (27)$$

ただし θ : 横割れ発生時の傾斜角

また、長柱の断面形状を $b \times h$ の長方形とすると、 A および Z は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} A &= bh \\ Z &= \frac{bh^2}{6} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

上記の諸式から、 θ は次式のように見積もられる。

$$\theta \geq \frac{h}{3a} \left(\frac{bh}{aw} S_t + 1 \right) = 0.0484 \quad (29)$$

なお、表-1は θ の計算諸元である。また、横割れ発生時における長柱上端の開口量は、 $a\theta = 73$ cm となる。現実横割れの入った長柱岩体の開口量も80 cm程度で、計算値に近い値である。

4.2 横割れの停止

トップリング進行過程では、横割れが始まっても長柱はすぐには転倒しない。すなわち、横割れクラックの進展は停止し、縦割れの開口が起こる。しかも、破壊現象は数箇月に渡って緩慢に進行する。まず、横割れを圧縮応力下の曲げ破壊とみなすと、クラックの進展条件は次

式で表される⁴⁾。

$$K_1 = \frac{M_{\theta 1}}{Z} \sqrt{\pi c} F_m \left(\frac{c}{h} \right) - \frac{aw}{A} \sqrt{\pi c} F_w \left(\frac{c}{h} \right) \quad (30)$$

$$F_m \left(\frac{c}{h} \right) \doteq 1.12 - 1.40 \left(\frac{c}{h} \right) + 7.33 \left(\frac{c}{h} \right)^2 - 13.08 \left(\frac{c}{h} \right)^3 + 14.00 \left(\frac{c}{h} \right)^4$$

$$F_w \left(\frac{c}{h} \right) \doteq 1.12 - 0.23 \left(\frac{c}{h} \right) + 10.55 \left(\frac{c}{h} \right)^2 - 21.72 \left(\frac{c}{h} \right)^3 + 30.39 \left(\frac{c}{h} \right)^4$$

ただし K_1 : 応力拡大係数

c : 横割れき裂の長さ

ここで、(30)式は曲げモーメントによるクラックの開口と自重による閉塞作用を表している。いま、横割れクラックの進展は右辺が0になったとき停止すると考えると、(27)、(28)および(30)式から次式が成立する。

$$\frac{aw}{bh} \sqrt{\pi c} \left\{ \frac{3a\theta}{h} F_m \left(\frac{c}{h} \right) - F_w \left(\frac{c}{h} \right) \right\} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{F_w \left(\frac{c}{h} \right)}{F_m \left(\frac{c}{h} \right)} = \frac{3a\theta}{h} \quad (32)$$

表-1の計算諸元を用いて(32)式を算定すると、 $c/h = 0.75$ となる。この計算結果から、横割れは横断面の75%程度まで進展した後、止まることが理解される。

4.3 縦割れの進展

既述したように長柱岩体脚部では「鉤型割れ」が起こり、外側に細柱部が形成される。このように、縦割れが進展する過程でも長柱岩体は季節変化に応じて熱変形を起こす。すなわち、図-6に示すように、開口節理に挟まった落石は、 $\Delta t = 0$ の冬期変形時に支点となって反力 R_n を受ける。いま、(15)式を修正して、この反力を概算すると、 R_n は次のような値になる。

$$R_n = \frac{D_n}{(a-z_n)^3} \left\{ 3EI_{zs} - \frac{w}{8(a-z_n)} (z_n^4 - 4a^3z_n + 3a^4) \right\} \doteq 2200 \text{ kgf} \quad (33)$$

ただし、 $D_n = 7.0 \text{ cm}$

図-6 縦割れの進展モデル

$$I_{zs} = \frac{b(h-c)^3}{12} = 7.10 \times 10^4 \text{ cm}^4$$

$$z_n = 0.9a$$

上式の計算は、細柱部の変形に起因する反力であり、縦割れの進展過程では最も少なく見積もった値である。

長柱岩体には外側面と平行に節理が潜在しており、横割れクラックも停留条件に接近した状態で潜在節理に遭遇したとき停止すると考えられる。ここで、横割れクラックが開口、進展して潜在節理に遭遇した状態で上述の反力 R_n が作用すると、潜在節理は大きな抵抗もなく開口し、縦割れが進展すると推察される。

例えば、外側の細柱部だけが変形して縦割れが進展すると仮定し、図-6に基づいて前報¹⁾の(9)式を修正すると、応力拡大係数 K_1 は次式で近似される。

$$K_1 = \frac{R'_n}{b} \sqrt{\frac{6}{h-c}} \left\{ \sqrt{\frac{a'^2 + (a-z_n)a'}{(h-c)^2}} + 0.7 \right\} \quad (34)$$

ただし、 R'_n : 縦割れ進展に要する反力

a' : 縦割れ長さ

いま、 $K_1 = 10 \text{ kgf cm}^{3/2}$ 、 $a' = 0$ として縦割れを起こすのに要する最大反力 R'_n を概算すると、 $R'_n = 1958 \text{ kgf}$ となる。したがって、 $R_n > R'_n$ であるから、縦割れの進展も当然起こりうる破壊現象であるとみなされる。

図-7 長柱岩体における転倒モーメント

岩体脚部で縦割れが進展すると、細柱部は長くなり、圧縮荷重に対し不安定になると推察される。特に、縦割れが外側へそれると、細柱部は一層不安定になり、圧壊して岩体を支持しえなくなると考えられる。

4.4 転倒

長柱岩体が転倒するとき、支点のいずれかが回転の中心になるはずである。この回転支点としては、図-7に示すように縦割れと横割れ面の交点Aと長柱外面の点Bが考えられる。まず、長柱岩体が点Aを回転中心として転倒するためには、傾斜角 θ_A は次式の条件を満たさなければならない。

$$\theta_A \geq \frac{2c-h}{a} = 0.0307 \quad (35)$$

一方、点Bを回転中心として転倒する条件は、次式で与えられる。

$$\theta_B \geq \frac{h}{a} = 0.0613 \quad (36)$$

いま、 θ_A 、 θ_B と横割れ発生時の傾斜角 θ を比較すると、次式のように最小値は θ_A である。

$$\theta_A < \theta < \theta_B$$

これらの傾斜角の比較から、長柱岩体は、外側細柱部の圧壊に応じて回転の中心が外側から内側へ移る過程で転倒することがわかる。

なお、支点Bが回転中心になるためには、前提条件として細柱部に曲げ破壊が発生する必要がある。この条件は次式で表される。

$$\frac{M_s}{Z_s} - \frac{aw}{A_s} \geq S_t \quad (37)$$

ただし、 M_s 、 A_s および Z_s はそれぞれ細柱部の曲げモーメント、断面積および断面係数であり、図-7から次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} M_s &= \frac{aw}{2} (a\theta_c - c) \\ A_s &= b(h-c) \\ Z_s &= \frac{b(h-c)}{6} \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

ただし θ_c : 細柱部の曲げ破壊発生に要する傾斜角したがって、 θ_c は次式で見積もられる。

$$\theta_c \geq \frac{b(h-c)^2}{3a^2w} S_t + \frac{h+2c}{3a} = 0.0528 \quad (39)$$

しかし、現実には細柱部に曲げ破壊に起因するクラックは認められないから、長柱の傾斜角が θ から θ_c へ増大することはないと推論される。

以上述べた長柱の転倒条件の検討結果から、岩体は横割れ発生時の傾斜状態で圧壊を起こしはじめ、転倒していくものと考察される。換言すれば、トップリングの最終破壊は、細柱部の圧壊に伴って起こるとみなされる。

5. トップリングに伴うAE活動

熔結凝灰岩柱状節理のAE活動は、1990年2月から1993年3月まで層雲峡大函においてモニタした。この間、季節変化に伴って群発するAEを検出し、節理の開口、進展現象を確認することができた。また、3年間に渡るAEの観測中、トランスデューサ埋設地点から約40 m離れた箇所でもたまたまトップリングが2回発生

図-8 トップリング破壊に起因する AE 活動

図-9 トップリング直前の AE 活動

図-10 トップリング直前の AE 活動

し、これらの突発的破壊現象に伴う AE 活動も検出することができた。なお、潜在節理面におけるき裂の進展挙動に伴う AE の検出方法と結果については前報¹⁾で詳述したので、本報ではトップリングのモニタ結果についてのみ説明する。

図-8 および図-9 は、1991年6月4日に発生した1回目のトップリングに伴う AE 活動である。トップリングの発生を確認したのは数日後であるが、長柱岩体は約15 m にわたって石狩川に横転していた。これらイベントレイトの記録は、転倒岩体から約40 m 上流の谷壁から8.5 m の位置に埋設したトランスデューサによって

検出し、地すべりモニタ装置 (Marubun ESM-210) によって分析したものである。なお、AE の分析に当たっては、1.0~5.0 kHz のバンドパス・フィルタおよび 40 dB のアンプによって処理した後、10 ms の不感時間 で計数した。

図-8 の記録に現れているように、長柱岩体は6月2日と4日の AE 活動を経て転倒した。同図は1時間間隔のイベントレイトで表示したチャートであるが、いずれも約7時間にわたって活動を持続している。図-9 は、6月4日の AE 活動を3分間隔で表示し直したチャートである。AE は9時51分から16時42分まで6時間51分

にわたって群発しており、AE発生頻度数の累積値は1265発に達している。この間、破壊挙動は2回に分かれて活発化しており、AEは平均して毎分11発生起している。

図-10は1992年8月1日～9月1日に発生した2回目のトッピングに伴うAE活動である。この長柱岩体は、1回目のトッピング岩体に隣接していた長柱で、前回同様に河床に横転した。図-10は3分間隔のイベントレイトを表示したチャートであるが、AEは前日夕刻から当日の4時6分まで約9時間にわたって群発しており、発生頻度数の累積値は1514発に達している。この間、破壊挙動が最も活発化したとき、AEは平均して毎分17発も生起している。

上述の転倒直前におけるAE活動は、長柱岩体脚部、特に細柱部の圧壊に起因する現象であるとみなされる。事実、写真-2の細柱部外壁には剝離現象が起こっている。この岩石剝離現象から、長柱岩体の傾斜が θ から増大する過程で細柱部外壁の圧縮応力が増加し、圧壊が進行すると推察される。しかしながら、細柱部は降縮しても岩体重量の一部は横割れ面で支持されるため、細柱部の圧壊はAE活動の持続時間に現れているように緩慢に進行するとみなされる。換言すれば、圧壊の進行に伴って長柱岩体の回転中心が外側から内側へ向けて緩慢に移動し、転倒条件が成立するものと推論される。

なお、長柱岩体を形成している熔結凝灰岩の強度は、冬期の凍結時よりも夏期の融解時の方が30%程度低くなる。したがって、細柱部の圧壊に伴うトッピングも夏期に起こると考えられる。長柱岩体の緩慢な転倒挙動を考えると、トッピングはAE法を適用することによって予知できると思われる。

6. 結 論

以上、層雲峡大函における長柱岩体のトッピング事例を取り上げ、観測結果に基づいて転倒機構を理論的に考察した。この結果、以下の結論が得られた。

- 1) 長柱岩体のトッピングは、気温の季節的变化に伴う節理の開口変形と、開口節理に挟まった大小2つの落石の交互降下との相互作用によって起こる。
- 2) 大小2つの落石は、冬夏期における岩体表裏の温度差に応じて交互に降下する。落石の降下速度は、繰り返し回数に応じて減少するため、転倒条件が成立するの

に長い年月を要する。なお、さらに大きな落石が上方に挟まると、下方の落石の降下速度は増大する。

- 3) 落石の降下によって長柱岩体の傾斜が増大すると、曲げモーメントによって脚部に横割れが発生する。なお、横割れは、長柱厚みの75%程度まで進行すると、自重による閉口作用が生じて停止する。
- 4) 横割れが停止した後、落石に誘起する反力により縦割れが進展する。この結果、岩体脚部には「鉤型割れ」が形成される。したがって、「鉤型割れ」はトッピングの発生の証拠となる。
- 5) トッピングは、縦割れ外側の細柱部の圧壊に伴って回転中心が内側に移動する過程で起こる。
- 6) 長柱岩体の転倒挙動は緩慢に進行するため、AE法を適用することによってトッピングの予知は可能である。

謝辞 AEの観測に御支援いただいた、北海道大学工学部資源開発工学科、北海道開発局開発土木研究所地質研究室、上川道路建設事務所、上川道路維持事業所および上川町役場、環境庁層雲峡管理事務所の関係各位に厚く御礼申しあげる。

参 考 文 献

- 1) 根岸正充, 中島 巖(1993): 層雲峡熔結凝灰岩の柱状節理におけるき裂進展とすべり破壊—寒冷地における岩盤斜面崩壊に関する研究(第1報)—, 応用地質, Vol. 34, No. 2, pp. 1~11.
なお、当論文を参考にされる場合は、p. 7の(10)式を次のように訂正されたい。
- 2) ASHBY, J. (1971): Sliding and toppling modes of failure in models and jointed rock slopes, MSc dissertation, University of London, Imperial College.
- 3) De FREITAS, M. H & WATTERS, R. J (1973): Some field examples of toppling failure, Geotechnique 23, No. 4, pp. 495~513.
- 4) 岡村弘之(1976): 線形破壊力学入門(付表3), 培風館, pp. 217~218.

(1993年8月11日受付, 1993年9月22日受理)