

カナディアンロッキーにおける不連続性岩盤斜面の崩壊事例について

ROCK SLOPE FAILURES IN CANADIAN ROCKIES

アイダン・オメル*、赤木知之**、清水泰弘***、川本脩万****

Ömer AYDAN, Tomoyuki AKAGI, Yasuhiro SHIMIZU, Toshikazu KAWAMOTO

The stability of slopes is of great concern for rock engineers. A field investigation of rock slope failures in Canadian Rockies was carried out by the authors in July 1995 for about one week. This paper reports typical slope failures such as plane sliding, flexural and columnar toppling, block buckling etc. observed during the investigation. The stability of slopes and the form of instability depend primarily to the inclination of bedding planes which is a throughgoing discontinuity set. It is therefore concluded that the stability of slopes excavated in sedimentary rocks must be assessed by considering the spatial orientation of bedding planes.

1. まえがき

岩盤斜面は道路、鉄道、ダム、運河、発電所等の建設や、露天掘り鉱山の場合に現れる地上岩盤構造物の一つである。これらの構造物の建設に伴って、岩盤斜面内部に発生する応力は母岩の降伏に至るほど大きくならないことが多い。しかし、岩盤斜面内には地質的に存在している不連続面がその後様々な要因で劣化し種々な形態で崩壊する例が見られる^{1,2)}。本論文は著者らが1995年7月にカナディアンロッキーを約一週間かけ1500kmにわたって調査して観察した不連続性岩盤斜面の数多くの崩壊事例の中で、特徴のあるものについて報告するとともに、その崩壊要因や機構について論じたものである。さらに、他の崩壊事例との比較検討も行っている。

2. カナディアンロッキーの地質構造と調査域

2.1 地質構造

カナディアンロッキーは北米プレートとパシフィックプレートの衝突に伴って、海底にあった堆積物が上昇して形成された世界でも美しい山脈の一つである。カナディアンロッキーはカナディアンコルディレラとして知られている地向斜の一部を形成している。カナディアンロッキーにおける山脈と谷の軸はほぼN30Wの方向であり、褶曲軸とほぼ一致している。造陸運動に伴う褶曲構造特有の不連続面の発生が広く見られ(Photo 1)、異なる地層間の相対滑りも確認された(Photo 2)。地表面で見られる岩盤は東ロッキーで堆積岩、西ロッキーで変成岩である。堆積岩は主に砂岩、シルト岩、頁岩、石灰岩および苦灰岩であり、変成岩は片麻岩、片岩、千枚岩および粘板岩である。

2.2 調査域と調査方法

調査はCALGARYから、BANFF, LAKE LOUISE, JASPER, SAVONA 経由でVANCOUVERまで1500kmにわたって行われた(Figure 1)。現位置調査は主に目視観察によるもので、必要に応じて岩石を採取した。また、カナディアンロッキーの地質構造や構成する岩石・不連続面の物理・力学特性に対する本や文献⁴⁻⁹⁾の収集による文献調査も行われた。

* 正会員 東海大学、海洋学部、海洋土木工学科
*** 正会員 名城大学、理工学部、土木工学科

** 正会員 豊田高専、都市環境工学科
**** 正会員 愛知工業大学、工学部、土木工学科

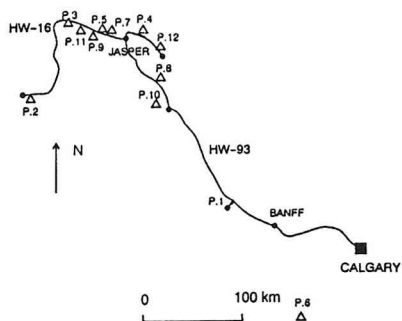


Figure 1 Investigation route and locations of photos (P.1, P.2, ..., P.12)

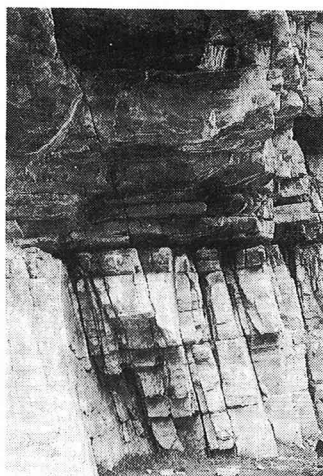


Photo 1 Fracture system in quartzite (P.1)

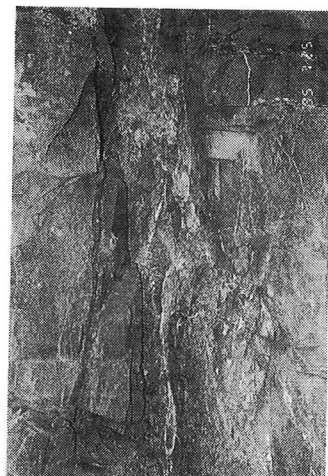


Photo 2 Fracture zone (P.2)

3. 崩壊形態とその崩壊事例

本調査で観察された数多くの斜面崩壊事例を分類し、代表的な崩壊形態をなすものについての事例を紹介するとともにその崩壊要因とその機構について論じる。

3.1 平面および曲面すべり破壊

この破壊形態は主に層理面に沿って発生していることが多い。Photo 3は HW- 16 沿い（Jasper から西へ約 12 km 付近）で見られた破壊事例を示す。特に異なる地層間に沿って滑り破壊が生じているため、不連続面のせん断強度は主に摩擦によると思われる。しかし、不連続面の表面がかなり凹凸を有している。



Photo 3 Curved sliding failure (P.3)

3.2 くさび破壊

くさび破壊の規模はまちまちであるが広く見られた破壊形態の一つである。Photo 4 & 5 は、観察された破壊例を示す。Photo 5に見られる破壊面の一つは層理面である。Photo 5に見られる破壊事例はユニークなものであり、破壊は層内に存在する節理群によって発生している。

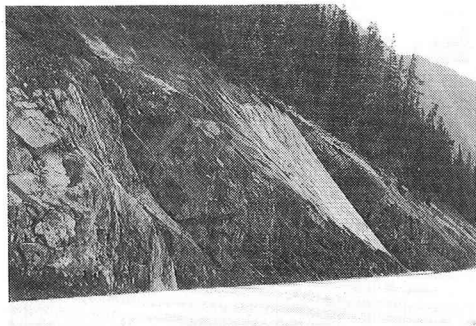


Photo 4 Wedge sliding (P.4)

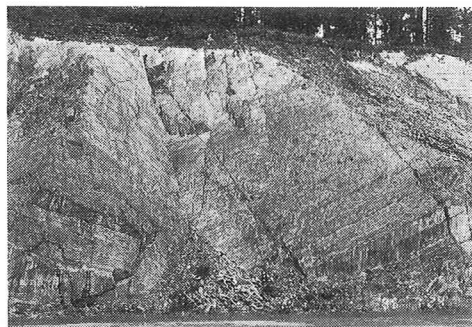


Photo 5 Wedge sliding (P.5)

3.3 トップリング破壊

(a) たわみ性トップリング破壊

今回の調査でこの破壊形態は主に道路用斜面で観察されたが、1903年に大規模のたわみ性トップリング崩壊がMt. Turtle(Frank Slide と呼ばれている)で生じている (Photo 6)。この破壊の原因は山の根元であった石炭鉱山での石炭層の掘削である³⁾。Photo 7 は HW- 16 沿いに観察された粘板岩におけるたわみ性トップリング破壊事例を示す。

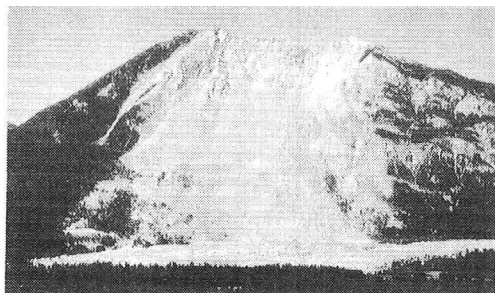


Photo 6 Flexural toppling at Mt. Turtle (P.6)



Photo 7 Flexural toppling (P.7)

(b) 柱状性トップリング破壊

Photos 8 & 9 は HW- 93 と HW- 16 沿いに観察された砂岩と頁岩における柱状性トップリング破壊事例を示す。また、硬さが違う地層の場合に弱層部分の風化や侵食に伴って単独のトップリング破壊が見られた。それを Photo 10 に示す。

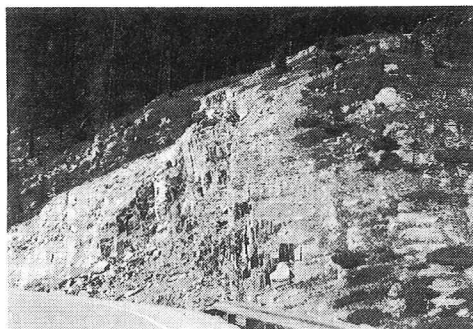


Photo 8 Columnar toppling (P.8)

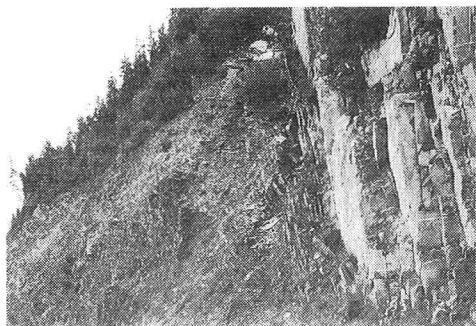


Photo 9 Columnar toppling (P.9)

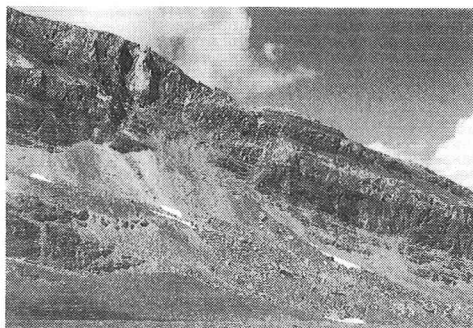


Photo 10 Toppling failure (P.10)

3.4 座屈破壊

この破壊形態は調査域内で一個所のみ観察された。しかし、Hu & Cruden(1993)がそのような崩壊事例を報告している⁹⁾。この破壊は主に層理面の傾斜と斜面の傾斜がほぼ同様で斜面が高い場合に生じている。Photo 11 は HW- 16 沿いに観察されたブロック座屈破壊事例を示す。

3.5 複合破壊

Maligne Lake で観察された破壊は複合破壊と分類できる。この例の場合に、破壊は層理面の傾斜の下部と上部で異なったため、上部で層理面に沿って滑り、下部で層内でせん断あるいは層内に存在する節理に沿って滑りによって生じたと推測される (Photo 12 & Figure 2)。

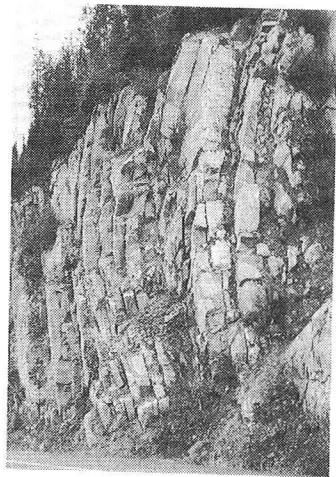


Photo 11 Block buckling (P.11)

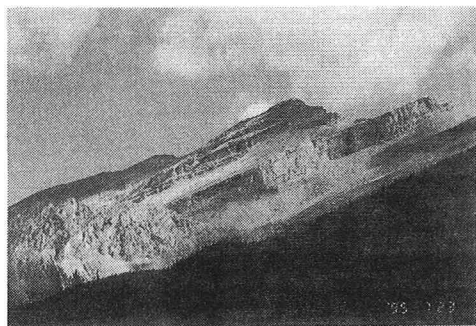


Photo 12 Slope failure at Maligne Lake (P.12)

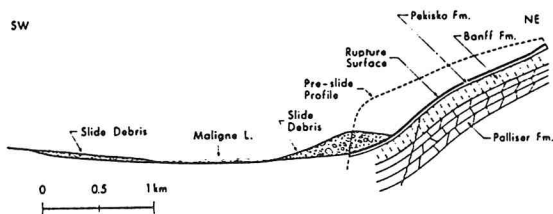


Figure 2 Section through Maligne Lake sliding

4. 他の崩壊事例との比較および討議

今回の調査で観察された崩壊事例を他のものと比較検討する。Aydan ら²⁾は層状岩盤とブロック状な岩盤に対する斜面崩壊形態を連続している不連続面の傾斜と斜面勾配の関係として分類している。また、その分類に基づいて様々な岩盤斜面に対するデータを整理し、報告している。それらのデータと今回の調査で得られたデータを Figure 3 に示す。この図の横軸は連続な不連続面である層理面や片理面の傾斜で、縦軸は斜面角度である。今回のデータは Aydan ら²⁾のまとめたデータとほぼ同様の傾向しめしている。また、図中にプロットされた事例データを二つの不連続面群を有する岩盤斜面の安定解析から得られた安定・不安定境界線と比較した場合に良い一致が見られる。特にこの結果は、カナディアンロッキーのような堆積岩や変成岩で構成される岩盤斜面の安定性を、連続している層理面や片理面の方向性を考慮して評価するべきであることを意味している。

5. あとがき

カナディアンロッキーで観察された不連続性岩盤斜面の崩壊事例について報告し、崩壊要因やその機構について論じた。さらに、他の崩壊事例と比較検討を行った。本論文で報告された破壊事例から体積岩と変成岩の場合に斜面の安定性を評価する際に連続な不連続面である層理面と片理面の方向性を考慮するべきであることが明らかである。また褶曲構造が見られる地質構造の場合に層間で相対滑りが生じている設計の際に不連続面のせん断強度がほぼ残留状態であると考えて良い。

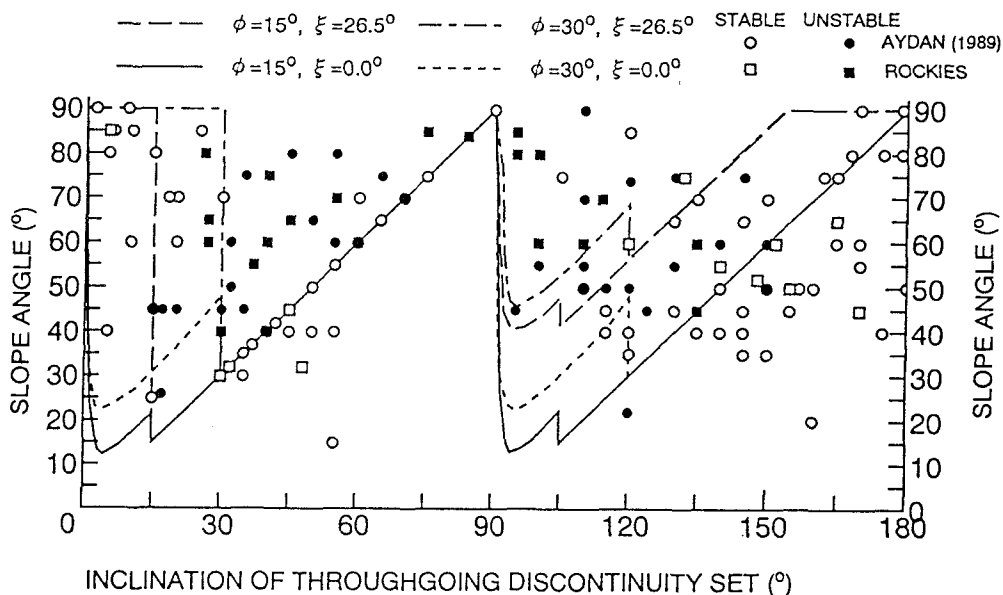


Figure 3 Comparison of Rockies data with those of Aydan et al. 1989

参考文献

- 1) Aydan, Ö. 1989. The stabilisation of rock engineering structures by rockbolts. Doctorate Thesis, Nagoya University.
- 2) Aydan, Ö., Shimizu, Y., Ichikawa, Y. 1989. The effective failure modes of rock slopes with two discontinuity sets. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 22(4).
- 3) Aydan, Ö., Kawamoto, T. 1991. The flexural toppling failure of rock slopes and underground openings and their stabilisation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 24(4).
- 4) Cruden, D.M. 1976. Major rock slides in the Rockies. *Can. Geotech. J.*, Vol. 13, 8-20.
- 5) Cruden, D.M. 1985. Rock slope movements in the Canadian Cordillera. *Can. Geotech. J.*, Vol. 22, 528-540.
- 6) Hu, X.Q. & Cruden, D.M. 1993. Buckling deformation in the Highwood Pass. *Can. Geotech. J.*, Vol. 30, 276-286.
- 7) Langshaw, R. 1989. *Geology of the Canadian Rockies*. Summerthought Pub., Banff.
- 8) Mollard, J.D. 1977. Regional landslide types in Canada. *Reviews in Engineering Geology*, Vol. III, Geol. Soc. America, 29-56.
- 9) Yorath, C. & Gadd, B. 1995. *Of rocks, mountains and Jasper: A visitor's guide to the geology of Jasper National Park*. Dundurn Press, Toronto.