

新第三紀火山砕屑岩におけるキャップ ロック型スラビング崩壊に関する検討

Study on the slope failure by cap rock type slabbing in Neogene pyroclastic rock

平野 勇*・松岡俊文**・山田泰広**・石川慶彦**

Isamu HIRANO, Toshifumi MATSUOKA, Yasuhiro YAMADA and Yoshihiko ISHIKAWA

In the steep slope of soft rock area, slope failure is caused by the discontinuity formed newly along the slope surface. Such a phenomenon is called the slabbing¹⁾²⁾. However, the importance of slope failure caused by the slabbing is not almost known in Japan. The authors studied on the mechanism of the slope failure on a model of geographical and geologic conditions of the 2nd Shiraito tunnel rock failure in Hokkaido by the FEM analysis. As the result, the model of the 2nd Shiraito tunnel rock failure could be explained with the cap rock type slabbing³⁾.

Key Words: soft rock, slope failure, slabbing, cap rock type slabbing, FEM analysis

1. はじめに

軟岩などからなる水際斜面の浸食や切土などによる崖地、急勾配の斜面において、断層や節理など地質構造的な不連続面が認められない場合でも、地形面に沿って新しい分離面を形成して岩板状の剥離と崩壊を生じる現象はスラビング(Slabbing)とよばれている¹⁾²⁾。わが国と地質条件の類似しているニュージーランドにおいてはシルト質軟岩における切土法面のスラビング崩壊について報告されている¹⁾。

しかしながら、わが国ではスラビング崩壊の重要性についてはほとんど認識されていない。スラビング崩壊が発生した場合、もっぱら、断層や節理、あるいは応力解放など何らかの原因によって形成されたとする潜在亀裂など、既存の不連続面の緩みや剥離、すべりなどによるものとして説明がなされているのが現状である。スラビング崩壊のタイプはいくつか存在する³⁾が、その中でもキャップロック型スラビング崩壊については発生形態やメカニズムはほとんど明らかになっていない。

そこで本研究では、1997年に発生した北海道第2白糸トンネル岩盤崩落⁴⁾を対象とし、そのサイトにおけるキャップロック型スラビング崩壊発生の可能性とその発生条件について地質構造モデルを作成し、有限要素法による三次元弾性解析によって検討した。

2. スラビング崩壊の発生要因と形態

スラビング崩壊は“風化、浸食、人為的な掘削など地表における営力や重力、地山応力などによって、新たに岩盤面に平行する不連続面が岩盤中に形成され、その不連続面を境界にして岩盤が板状に分離し、滑動または転倒などを生じて岩盤が一体となって下方へ移動する現象”である。岩盤を構成する地質条件、浸食や人為的掘削による地形条件によって、スラビング崩壊の発生要因と形態には表-1のようなものがある。

* 正会員(独)土木研究所

** 京都大学工学研究科社会基盤工学専攻

表－１ スラビング崩壊の発生要因と発生形態³⁾

タイプ	地 質	主な岩種	地 形	不連続面の形成要因と崩壊形態
オーバハング型	不連続面のみられない 軟岩～中硬岩の厚い塊 状岩盤	粘土岩、シルト岩、 砂岩、凝灰岩、凝灰 角礫岩、中溶結火砕 流堆積物など	海岸など水際斜面にお ける浸食窪（ノッチ）や浸食 洞、および浸食崖などがみ られる浸食地形 のり面と平行するオーバ ーハングした掘削	水際斜面の波浪や流水洗掘によって浸食窪（ノッチ） や浸食洞が水平に並び、あるいはスリット状に形成さ れ、その上に存在する岩盤が支持力を失って、引っ張 りまたは剪断応力によって破断面を生じ、板状または ブロック状に分離した岩盤が一体となって、自重によ って滑ったり転倒したりして下方へ移動する。
キャップロック型	水平な軟弱層や浸食さ れやすい地層の上に不 連続面のみられない厚 い塊状岩盤が載るキャ ップロック構造	軟弱層：膨潤やスレー キングを生じやす い軟岩や変質岩、 未固結堆積物など 浸食されやすい地 層：シルト、砂、火 山灰、シラスなど	海岸、湖岸、河岸、溪岸な どにおける浸食崖、台地周 縁の崖地 鉛直または急勾配の切土	軟弱層がさらに劣化して変形したり流動したり、地表 または内部からの浸食を受けて空隙質あるいは空洞 状となったりして、その上に存在する岩盤が支持力を 失って、引っ張りまたは剪断応力によって破断面を生 じ、板状またはブロック状に分離した岩盤が一体とな って、自重によって滑ったり転倒したりして下方へ移 動する。
急斜面軟岩型	不連続面のみられない 軟岩の厚い塊状岩盤	ある程度の固結性 を有するシルト岩 など	岩盤が露出した、または極 めて薄い被覆層や植生に 覆われた崖地および急斜 面 鉛直または急勾配の切土	主として軟岩の乾燥収縮・湿潤膨張の繰り返しにとも なう剪断応力によって岩盤面に沿って疲労破壊面が 形成される。岩盤面が鉛直または急勾配であれば、板 状に分離した岩盤が一体となって、自重によって滑つ たり転倒したりして下方へ移動する。
岩盤面風化型	不連続面のみられない 中硬岩～硬岩の厚い塊 状岩盤	花崗岩、閃緑岩、砂 岩、凝灰岩など	岩盤が露出した崖地また は急斜面 鉛直または急勾配の切土	主として日射や気温変化による岩盤表層の収縮およ び膨張にともなう剪断応力によって岩盤面に沿って 疲労破壊面が形成される。岩盤面が鉛直または急勾配 であれば、板状に分離した岩盤が一体となって、自重 によって滑ったり転倒したりして下方へ移動する。 疲労破壊面は一般に球殻状に形成され、小規模なものは タマネギ状風化に相当する。
岩盤面応力開放型	不連続面のみられない 硬岩の厚い塊状岩盤	花崗岩、閃緑岩、良 く固結した砂岩、凝 灰岩、凝灰角礫岩な ど	急激な下刻作用を受けつ つある河谷 地下空洞、トンネル、坑道、 河床掘削	浸食や掘削による応力解放にともなう剪断応力によ って岩盤面に沿って破断面が形成される。岩盤面がオー バーハングや急勾配であれば、板状に分離した岩盤 が一体となって、自重や地山応力によって下方または 前方へ滑ったり転倒したり、はねたりして移動する。 自然斜面ではシーティングジョイントを素因とする 岩盤崩壊に、掘削面においては山はねに相当する。

キャップロック型スラビング崩壊は、膨潤やスレーキングによって劣化しやすい軟岩や変質岩、およびシルト、砂、火山灰のような未固結あるいはパイピング浸食を受けやすい軟弱層の上に、不連続面がみられない厚い塊状の岩盤が載るようなキャップロック構造からなる海岸、河岸などの浸食崖や台地周縁の崖地、鉛直または急勾配の切土にみられるもので、斜面や崖面からの風化やキャップロックからの地下水浸透などによって、軟弱層がさらに劣化したり浸食を受けて空隙質や空洞状となったりして変形、流動を起こして、その上のキャップロックが支持力を失って、引っ張りまたは剪断によって破断面を生じ、板状またはブロック状に分離した岩盤が一体となって自重によって滑ったり転倒したりして下方へ移動する現象を指している。

3. 北海道第2白糸トンネル岩盤崩落の概要

(1) 岩盤崩落の概要⁴⁾

1997年8月25日、島牧郡島牧村の国道229号第1白糸トンネル南側坑口付近で第1回目の岩盤崩落が発生した。崩落規模は最大高さ約70m、最大厚さ約20m、体積約42,000m³であった。その後、同年8月28日に、第1回崩落部に隣接する北側下部付近で2回目の崩落が発生した。規模は最大高さ約80m、最大幅約30m、最大厚さ約20m、体積約14,000m³であり、2回合わせた崩落岩体総体積は約56,000m³に達した。図－1に位置を示す。

図－1 第2白糸トンネル岩盤崩落の位置⁴⁾

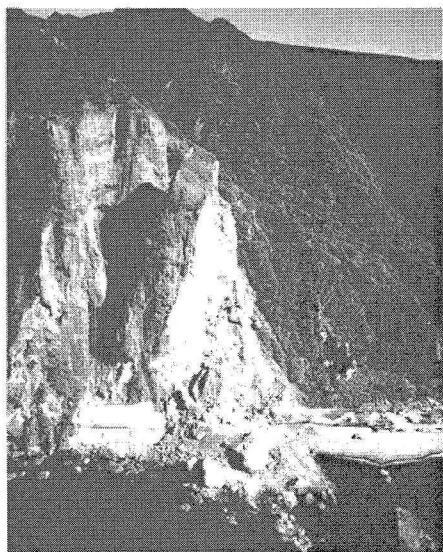
(2) 地形・地質の概要⁴⁾

図－2 に崩落写真，表－2，図－3 に層序表および地質平面図を示す。崩落箇所周辺の地質は新第三紀鮮新世の主に火山碎屑岩類からなるオコツナイ層で，高さ 200～300m に達するオーバーハング部を多く含む急崖斜面が発達している。当箇所より北側ではやや硬質な安山岩質水冷破砕岩が分布し，植被に乏しくオーバーハング部を多く含む急斜面である。一方，南側では主として凝灰岩・凝灰質砂岩・礫岩などの軟質な岩盤が分布し，傾斜 30～50° 程度の植生に覆われた斜面を形成している。

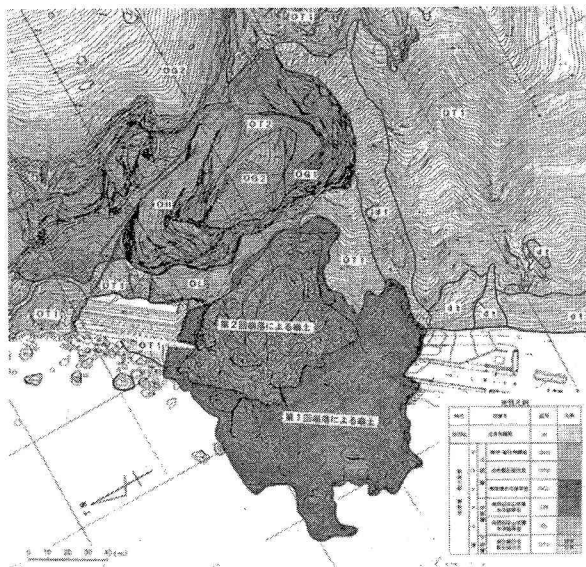
崩落箇所は背後の山体から独立した標高約 150m の塔状岩体の正面（海食崖部）に当たる。塔状岩体の背面には NW-SE 系節理に沿って浸食された鞍部が存在する。崩落箇所の手食崖は標高 50～80m 付近までの下部緩斜面と，上の急崖斜面に区分される。緩斜面と急崖斜面の境界付近の地層に沿って浅い窪地（ノッチ）が連続しているのが特徴であり，窪地の真上部にオーバーハング部が存在している。崩落は上部の急崖斜面に当たる部分である。

表－2 周辺の地質構成表⁴⁾

地層	地質	記号	層相
上部層	礫岩・凝灰角礫岩	OG2	礫岩及び凝灰角礫岩よりなり，凝灰質砂岩及び頁岩を挟在する。水冷破砕岩の再堆積岩である。乳白色～灰色を呈する。
	白色軽石凝灰岩	OT2	軽石を含む白色の凝灰岩。凝灰質礫岩挟在。
	再堆積水冷破砕岩	OG1	中部層の岩体に由来する基底礫岩を挟在する水冷破砕岩の再堆積層。黄褐色を呈する。
中部層	角閃石安山岩質水冷破砕岩	OH 中央部	角閃石安山岩の角礫を含む水冷破砕岩。礫の含有量は OH 下部に比べて少ない。基質は火山ガラスに富む。赤茶色～暗灰色。
		OH 下部	角閃石安山岩の角礫を多量に含む水冷破砕岩。基質は変質しており，全体的に暗灰色～帯緑灰色。
	角閃石安山岩質水冷破砕岩	OL 上部	細粒な角閃石安山岩質水冷破砕岩から成る。全粒にガラスが多く，優白色で細粒であるが，側方変質が著しいため，側部では礫が多く含まれる。
		OL 下部	角閃石安山岩質水冷破砕岩から成り，全体的に礫を多く含有する。OL 上部と同様に側方変質が著しい，変質が認められ，青灰色～暗灰色，あるいは赤褐色。
下部層	凝灰質砂岩 軽石凝灰岩	OT1	砂質凝灰岩，火山性の礫岩を挟在する軽石凝灰岩。スランブ構造を呈する。乳白色～灰白色。



2 回目(1997 年 8 月 28 日)崩落後北西方向から撮影
図－2 第 2 白糸トンネル岩盤崩落の写真⁴⁾



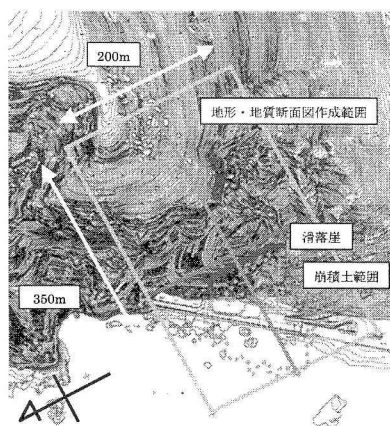
図－3 第 2 白糸トンネル岩盤崩落周辺の地質図⁴⁾

4. 有限要素法解析

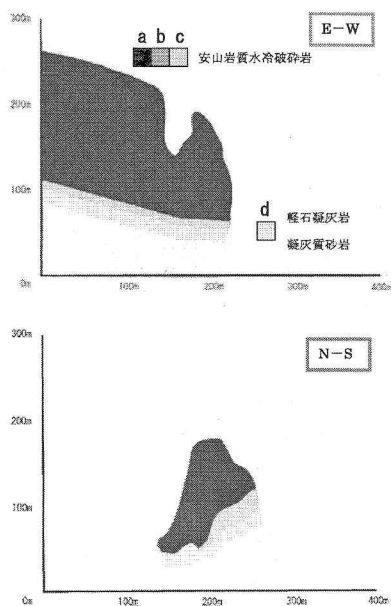
(1) 解析モデル作成

解析モデル作成のために，事故調査報告書⁴⁾の地形・地質情報を基に図－4 に示す範囲について，崩落前の地形・地質断面を東西方向に 10m 間隔で 21 断面，南北方向に 2 断面作成した。図－5 に代表断面を示している。さらに，作成した地形・地質断面図を基にして図－6 に示す三次元モデルを作成した。緑色で示す側面は面に

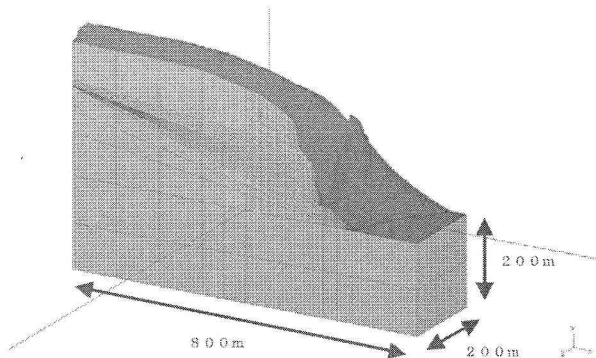
対して垂直方向のみ、底面は全方向拘束した。解析時における面拘束の影響を考慮し、地形・地質図の作成範囲の東側 400m、西側 50m、鉛直下方向 200m に解析範囲を拡張した。要素数は 20,200、節点数は 88,645 とした。このモデルにおいては a～d の 4 地層に区分した（図－7）。地層の物性値については事故調査報告書⁴⁾による自然状態における測定値に基づいて表－3 のように設定した。図－5、表－3 のように最上位の上部層 a に較べて中部層 b, c, 下部層 d は軟質で変形性に富み、キャップロック構造をなしていると言える。



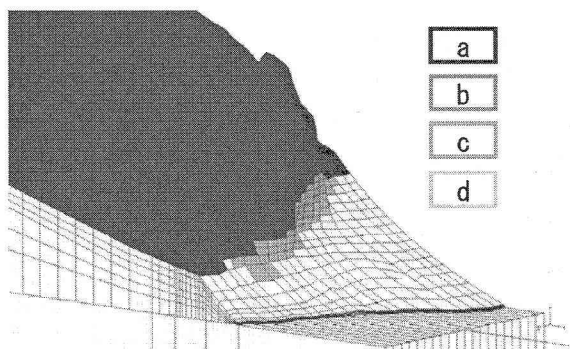
図－4 解析モデル作成範囲



図－5 代表地形・地質断面図
(断面線は図－4 に示す)



図－6 三次元解析モデル



図－7 三次元解析地形・地質モデル

表－3 解析モデルにおける各地層の物性値

地層	上部層	中部層		下部層
物性値	a	b	c	d
ヤング率(kgf/cm ²)	50,000	20,000	13,000	12,000
ポアソン比	0.3	0.3	0.3	0.3
単位体積重量(t/m ³)	2.3	2.2	2.2	1.6
粘着力(kgf/cm ²)	22	15	15	13
内部摩擦角(°)	54	40	48	48
引張強度(kgf/cm ²)	32	22	23	13

(2) 解析

FEM 解析ソフト (3D-σ) を用いて三次元弾性解析を行い、スラビング崩壊をもたらす不連続面の形成に係わる破壊要素の発生について検討することにした。破壊要素の判定は右式による安全率が 1 を下回った要素とした。

$$F_s = \frac{2C \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3)}{(\sigma_1 + \sigma_3)}$$

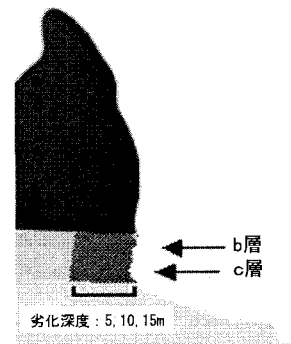
C: 粘着力, ϕ : 内部摩擦角, σ_1 : 最大主応力, σ_3 : 最小主応力, ϕ : 内部摩擦角

①解析－１

キャップロック型スラビング崩壊を想定した場合、中部層 b, c または下部層 d の風化、湿潤による物性値低下が考えられる。事故調査報告書⁴⁾によると 8 月 2 日～12 日間の累積雨量がおよそ 300mm に達している。11 日間の累積雨量はここ 10 年で最大であった。また、強制湿潤状態では自然状態に比較して物性値が低下し、特に中部層 b, c の低下が著しい。よって、崩落直前には中部層はかなり強度が低下していたと推定される。そこで、解析－１において中部層の強度低下について物性値低下（①～④、④は強制湿潤での試験値）と崖面からの劣化深度（5, 10, 15m）の組み合わせに、自然状態とあわせて計 13 ケース（表－４）について解析し、破壊要素の発生を検討した。図－８に中部層の強度低下模式図を示す。

表－４ 中部層の強度低下組み合わせ

	低下度	自然状態	①	②	③	④
b	ヤング率(kgf/cm ²)	20,000	17,500	15,000	12,500	10,000
	ポアソン比	0.3	0.27	0.25	0.22	0.2
	単位体積重量(t/m ³)	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
	粘着力(kgf/cm ²)	15	13	11	9	7
	内部摩擦角(°)	40	37.5	35	32.5	30
	引張強度(kgf/cm ²)	22	19	16	13	11
c	ヤング率(kgf/cm ²)	13,000	11,500	10,000	8,500	7,000
	ポアソン比	0.3	0.27	0.25	0.22	0.2
	単位体積重量(t/m ³)	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
	粘着力(kgf/cm ²)	15	13	11	9	7
	内部摩擦角(°)	48	45	42	39	36
	引張強度(kgf/cm ²)	23	19	16	13	11

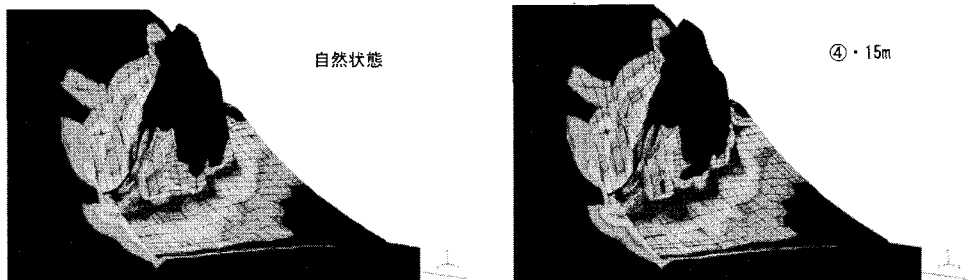


図－８ 物性値低下模式図

安全率分布の例を図－９に、各ケースにおける破壊要素の出現の有無を表－５に示した。表－５によると中部層の崖面からの劣化深度または物性値低下の大きいケースで安全率低下が著しく、破壊要素が発生した。よって、中部層が雨水や地下水等の影響を一定以上受けると上部の岩盤は不安定な状態になりうることを示唆される。破壊要素は主に中部層の崖面付近とその周辺において発生した。南側断面と北側断面を比較してみると、北側断面の方は中部層の崖面からの安全率低下範囲が深部に及んでいた。これは、北側断面では中部層は c 層のみで構成されているのに対し、南側断面では中部層に b, c 層が存在し、b 層は a, c 層の中間的な物性を示すため、a, c 層の間で歪みを分散させる役割を果たしているためと考えられる。

表－５ 各ケースにおける破壊要素の出現の有無

低下度 劣化深度	自然状態	①	②	③	④
5m	なし	なし	なし	なし	あり
10m	破壊要素なし	なし	なし	あり	あり
15m	なし	なし	なし	あり	あり

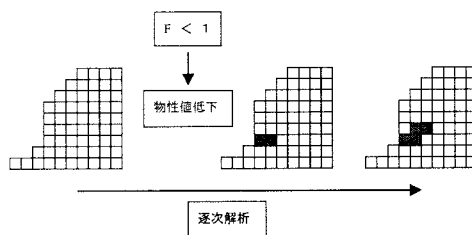


図－９ 逐次解析における安全率分布の例

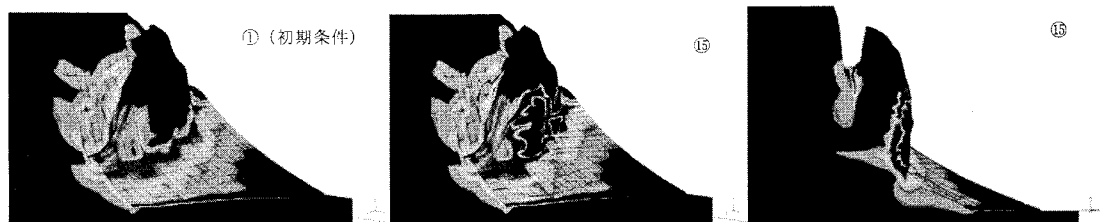
②解析－２

解析－２では破壊要素発生後の破壊面の拡がりを追跡し、実際の崩落形状と比較した。さらに破壊面の拡がりの様子を基にキャップロック型スラビング崩壊発生の可能性を検討した。

初期条件として解析－１の「劣化深度 15m, 物性値④」を用い破壊面の追跡を行った。破壊面の追跡方法としては、「安全率が 1 を下回った要素の物性値を極端に低下させ、逐次解析を行った。破壊面追跡の模式図を図－１０に示す。その結果、初期条件から開始して 15 回目において破壊面の拡大がほぼ止まった。図－１１に逐次解析における安全率分布の例を示す。破壊面は塔状岩体正面の中央下部の左右両側から上方向に徐々に拡がり、最後にはそれがつながって崖面と平行な不連続面の形成が確認された（図－１１）。



図－１０ 破壊面追跡模式図



図－１１ 逐次解析における安全率分布の例

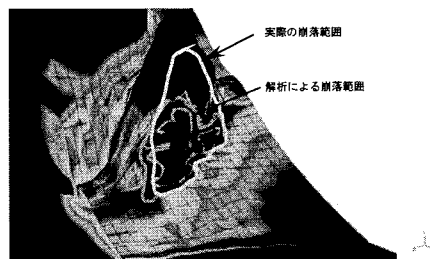
よって、設定したモデルにおいてはキャップロック型スラビング崩壊とみなせる岩盤崩落が発生したことがわかる。また、図－１２に解析による崩落範囲と実際の崩落範囲との比較を示している。崖面上部では両者に相違がみられたが、ほかの崩落範囲はほぼ一致した。

５．まとめ

“軟弱層の上部に不連続面のみられない厚い塊状岩盤が載るキャップロック構造からなる崖地や急斜面において風化や地下水浸透によって軟弱層がさらに劣化し変形、流動などを生じて上部の岩盤が支持力を失い、破断面を生じて板状またはブロック状に分離し、一体となって滑動または転倒して下方へ移動するキャップロック型スラビング崩壊”の発生可能性とメカニズムについて第 2 白糸トンネル岩盤崩落をモデルとして有限要素法によって検討した。

軟弱層の物性値と崖面からの劣化深度をパラメータとして逐次解析を行ったところ、崖面に沿って破壊面が発生して分離し、キャップロック型スラビング崩壊とみなせる崩落発生の可能性を示唆する結果が得られた。

最後に調査に当たって色々のご協力頂いた北海道開発土木研究所鈴木哲也前部長に心より御礼を申し上げる。



図－１２ 崩落形状の比較

文献

- 1) Read, S.A.L., Millar, P.J., White, T., and Riddolls, B.W. (1982) : Geomechanical properties of New Zealand soft sedimentary rocks, Proc. Int. Symp. On Weak Rock in Tokyo, Vol.3, p33-38.
- 2) M.J.Selby(1993) : Hillslope Materials and Processes, Oxford University Press.
- 3) 平野勇・木羽智洋・澤田明人(2003A) : 軟岩の水際斜面のスラビング崩壊と貯水池湖岸における事例, 平成 15 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp223-226.
- 4) 第 2 白糸トンネル崩落事故調査委員会編(1998) : 第 2 白糸トンネル崩落事故調査報告書.