柱状節理の発達した岩盤急崖斜面の 形成過程に関する一考察

神原規也¹* · 宇都忠和¹*

(㈱エイト日本技術開発 関西支社(〒532-0034 大阪市淀川区野中北町1丁目 12番 39号)E-mail:kamihara-no@ej-hds.co.jp

落石・岩盤崩壊の頻発する標高差 150m に達する急崖斜面において実施した細密レーザー測量は、1m 前後の柱状節理岩塊が個々に判別可能なほど微細な地形表現が可能であった. この DEM データを用いた傾斜区分解析からは、急崖斜面は傾斜 70°を越える断崖部と、傾斜 40~60°の急斜面が階段状に形成されていることが明らかになった. 一方、ラプラシアン解析の結果から、断崖斜面部では柱状節理岩塊の個別バックリング崩壊が卓越する傾向にあるが、相対的に緩傾斜な急斜面部は、さらに規模の大きな一定の広がりを有した岩盤崩壊も想定する必要があると考えられる.

Key Words: DEM, Laser profiler, rock failure, buckling, topographic analysis

1. はじめに

未固結地盤である岩屑の安息角 35 度を越える勾 配と一定以上の比高を有する自然斜面は,シラス地 帯のような例外を除けば,基本的には強い接着力 (粘着力)を有する固結した岩盤分布域であると考 えられる.

ところで,斜面は上昇した地盤の浸食・堆積の過



程で形成されるもので,国内では主に河川による下 刻や海岸の波浪が主な浸食営力となる.侵食を主体 とした急峻な斜面の形成過程を松倉¹⁾は図-1のよ うに表している.

このような急峻な山地部でも、勾配 45°を越え る急崖斜面が形成される範囲は比較的少ない.

岩石の 1 軸圧縮強度がそのまま地形に反映され るならば,6000m 以上の垂直自立高さの断崖斜面が 得られるとされる¹⁾が,岩盤に内在する亀裂,風化 や岩盤クリープ等の重力変形作用などによって比 高 100m を超える大規模な急崖・断崖斜面が形成さ れている斜面は比較的少ない.

今回,落石源調査を目的として実施した細密レー ザープロファイラ測量によって把握される微細な 地形形状に基づき,柱状節理の発達した断崖斜面の 地形形成機構及び,特に 45°を越える急峻な斜面 勾配の意義について若干の検討を行った.

2. 細密レーザープロファイラ測量結果

当地域は,新第三紀中新世の流紋岩質溶結凝灰 岩によって構成されており,柱状節理が発達し,バック リングを主体とする特異な斜面侵食形態が助長され, 比高100~150mに達する傾斜70°以上の急崖が道路 に面して形成されている地域である.

今回,河川沿いの約270mの道路区間に対し,背 後斜面の尾根までの危険要素を抽出するため,航空 LPにより227m×350mの範囲から629,158点(7.9点/m²)の地盤高を取得した.線形バリオグラムによるクリ ギングで補間を行い0.25m間隔グリッド(4点/m²) の数値標高モデル(DEM)を作成し,傾斜区分図等 の地形解析を行った.LP地盤高データの取得密度は, 植生に大きく影響を受けて粗密の分布は不均一であり, 補間法およびパラメータの適切な設定が重要である. 補間・作図には,ソフトウェアにはSurfer8(Golden Software 社製)を使用した.この結果,図-2鳥瞰図に 示されるように,被覆物の少ない断崖部では1m前後の 柱状節理岩塊が個別に判別可能なほどの微細な地形 表現が可能なものとなった.



図-2 LP に基づくラプラシアン鳥瞰図



図−3 傾斜区分図

3. 断崖斜面の地形特性

(1) 傾斜区分図の作成

図-3 に解析範囲全体の斜面傾斜区分図を示す. 道路に近接して,濃い寒色系で示される傾斜75 度以 上の急崖地形が発達し,その背後斜面は尾根付近ま で傾斜45 度前後の地形が続いている.

(2) 傾斜頻度分布

一般的な山地の傾斜頻度分布を 5m メッシュのも ので比較すると,海上の森では図4 a)に示すよう に 20°をピークとし,45°を越える部分はごくわ ずかな範囲となる.急峻な渓谷美で知られる十津川 渓谷では図4 b)に示されるように40~45°にピ ークを有する正規分布に近い傾斜頻度分布である が,当地区では図4 c)に示すように,45~50°に ピークを持ち,高角度側に偏った頻度分布が見られ る.





図-5 ラプラシアン図

この評価は平面図によるものであり,露出面積で評価すると,大半が 45°以上の斜面を形成していることとなる.

(3) 地形界線図 (ラプラシアン図)の作成

輪郭の強調を行う差分フィルタであるラプラシ アン演算子は、DEM地形解析では標高の 2 次微分値 となり、尾根線・谷線、あるいは遷急線・遷緩線な どの地形界線の抽出が行われ、線状侵食作用やマス ムーブメントによる段差地形などの検出に効果を 発揮する.ラプラシアン図を、0.25m 間隔で作成す ると、局所的な凹凸や地盤データの粗密に影響を受 けて、特徴が不明瞭となった.そこで、5×5 メッ シュ (1m×1m)の範囲内で、ガウス関数によるロー パスフィルター処理を行い、この結果、柱状節理の 形状や渓流の侵食地形による地形界線がより明瞭 に判別し易く、かつ遷急線・遷緩線なども明瞭に表 現された.

(4) 急崖斜面の断面的地形特性

この DEM データから直接作成される横断面形状を 図-6 に示す. 図-2 鳥瞰図に示されるように, 急崖斜面 は断崖斜面と相対的に緩勾配な斜面からなる階段状 地形を呈していることが明らかとなった.

断面図上では,階段状地形の壁面は 70~80°(部 分的にはオーバーハング)の懸崖を形成し,相対的に 緩勾配な区間も,35~60°の急斜面を形成している. この壁面1段の比高は30~80m程度のものである.

(5) 現地踏査結果

落石源となる不安定岩塊把握を目的として, 断崖部 分も含む全域について, ロープワークを活用したクライ マーによる現地踏査を実施した. 不安定岩塊分布域 の大半は, 図-6, 及び写真-1, 写真-2 に示されるよう に断崖斜面最上部に, オーバーハング状に取り残され た岩塊が主体となっている. 一方, 断崖斜面の下部に は, 写真-3 に示されるような柱状節理岩塊のバックリン グに伴う開口亀裂が形成されている.



図-6 模式断面図



写真-1 遷急線直下の オーバーハング岩塊





写真-2 柱状節 理岩塊が断崖最 上部にオーバー ハング状に取り 残される.

写真-3 10~20cm の開口亀裂 を伴うバックリング岩塊

4・断崖地形の形成メカニズムと斜面勾配

柱状節理の発達した岩体における岩盤崩壊メカ ニズムとしては図-7 のような形態が考えられてい る.

柱状節理岩体の最上部がオーバーハング状に残



ることの多い勾配 60~70°以上の断崖斜面の区 域は,ラプラシアン図では細かなうろこ状の模様を 描き,柱状節理岩体の個別バックリング崩壊 {図-5 a)柱状岩体単体崩落②スラブ型}が生じることに よる乱杭状地形を反映したものであると考えられ る.

岩体の自重応力が柱状岩体の長軸方向にのみ作 用する場合には圧縮応力しか作用しないが,圧縮応 力が長軸方向に対してたとえば 6°程度ずれると, $sin6° \Rightarrow 0.1$ より長軸直角方向へ作用する曲げ応力 が圧縮応力の 1/10程度作用することとなる.

ところで, 柱状体の曲げ強度: σbは

$$\sigma b = \frac{3PL^2}{2bh^2}$$
(1)

ここで, P:荷重, L:長軸長, b:幅, h:高さ で与えられる.

たとえば図-7 c)柱状岩体模式図 に示される b=1m, h=0.7m, L=50m の柱状岩体を想定し,こ の下部 20m にわたって何らかの理由で 6°程度の たわみが発生した場合,上部から 40m 地点で圧縮 応力の約 1224 倍の曲げ応力が作用することとなる. 当地区に分布する新第三紀の溶結凝灰岩の一般的 な岩盤物性値として,単位堆積重量 2.5g/cm³,1軸 圧縮強度 100MPa,曲げ圧縮強度 10MPa の岩石を仮 定すると,40m 地点に作用する圧縮応力は 4000× 2.5=10,000Pa,曲げ応力はこの 1224 倍の 12.24MPa >10MPa となるため柱状岩体が曲げ破壊すること となる.

一方,斜面の起伏度合いとして表現されるラプラ シアン値の変化の小さい平滑な斜面が形成される



写真-4 テラス状急斜面部. 斜面勾配は 45~60°

60~70°以下の勾配の区域は,平面図の形状からは 岩盤クリープ~地すべり地形の特徴が読み取れる が,図-6の断面図に示されるように,滑落崖状の 範囲が圧倒的に大きく,岩盤クリープ~地すべりを 想定することはできない.

ところで岩石の破断面の最大主応力方向となす 角度:破断角θと岩石の内部摩擦角φとの間には,

 $\theta = 45^{\circ} - \phi/2$ (2) の関係があるといわれている.3軸圧縮試験から得られる岩石の内部摩擦角はチャートのような特殊なものをのぞけば、26~45[°]の範囲にあるとされ、 破断面の最大主応力となす角度は拘束圧が小さい 場合には図-8に示されるように30[°]前後となる.

写-4 に示されるような 60~70°以下の勾配のテ ラス状に広がる斜面は,一定の規模を有した岩盤崩 壊 (図-7 b)大規模崩壊②すべり型}の発生によ る岩石の圧縮破壊~すべり面跡地形の可能性も考 える必要がある.

5. まとめ

図-6 模式断面図に示されるように、階段状地 形の壁面は 70~80°の断崖を形成し、相対的に緩 勾配な区間も、35~60°の急斜面を形成している.

	表—1 傾斜分類事例							
鈴木	1/20万土地	Miller &	羽田野(1981)全					
(1977)4)	分類図(都道	Summerson	測連No.4					
	府県別) ⁵	(1 960) ^୭	1:25000 傾斜分					
			布図 蒲原 ⁵					
0°~1°	0°~3°	0~3° 35'	2. 86°					
1° ~ 5°	3°~8°	3° 35' ~	2.86°~8.5°					
5°~20°	8°~15°	14°14'	8. 5°~16. 7°					
	15°~20°	14° 14' ~	16. 7°~26. 6°					
20°~	20°~30°	34° 14'	26.6°~35°					
35°								
35°~	30°~40°	34° 14' ~	35°~					
70°	40°~	90°						
70°~								

この壁面1段の比高は30~80m程度のもので, 岩石の1軸圧縮強度から設定される6000mともさ れる自立高に比較すると著しく小さなものとなっ ている,一方,図-5に示されるラプラシアン図で は浸食前線を形成する遷急線や古い谷地形などが 明瞭に表れてくる.また,壁面を構成する70~80° の区間及びこの周辺の60°前後の勾配の範囲まで は、ラプラシアン値の変化が著しく,斜面縦横断方 向の凹凸が激しいことを示しているが,60°以下の 勾配の区間ではラプラシアン値の変化は小さく,平 滑な斜面が形成されていることを示している.

このように異なる斜面内の起伏の状況は,異なる メカニズムで斜面が浸食・崩壊し,この結果が斜面 勾配にも反映されていることを示唆している.

斜面勾配の分類基準案として,たとえば表-1 の ような提案がなされている.

緩勾配斜面の分類については、利用・分類目的や 堆積形態などの地形形成機構に応じた分類がなさ れている.一方、急峻な斜面の境界領域には、乾燥 した岩屑の安息角である 35°を目安としている例 が多い.この勾配を越えると、斜面の規模(比高) を考慮する必要があるが、基本的には固結した地盤 (岩盤)からなる地盤が想定される.35°以上の勾 配の分類については、Young (1969)⁵⁾が45°,70° を、鈴木⁴⁾が70°を境界として提案している.

当地区における検討事例からは表-2 に示される ような斜面勾配の分類試案が考えられる.

60~70°を越える断崖~懸崖斜面では柱状岩体 の個別破壊が、これ以下の勾配では一定の規模を有 した岩盤崩壊~岩盤クリープを伴う崩壊が想定さ れ、60~70°の境界設定の意義が当地区では認めら れる.しかし、図-7-b-②すべり型破壊に示される

表-2 マスムーブメントの形成される斜面勾配領域試案

	発生域の斜面勾配領域(゜)						
マスムーブメントの種類	0	15	20	35	45	60	
	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	
	5	30	40	45	70	90	
表層クリープ	٠			•			
表層崩壊(豪雨・地震に伴う)			•	•			
地すべり①		•		•			
深層崩壊 (豪雨に伴う) ²			•				
岩盤クリープ ³		•-	.	•	•		
大規模岩盤崩壞④					•	•	
座屈崩落·転倒崩落 ^⑤							

- 35°以下の勾配の岩盤クリープは地すべりに移行 する.
- ② 岩盤クリープの一部は、地震や豪雨に伴う深層崩壊によって急速な崩壊に至る。
- ③ 35°~45°の勾配の岩盤クリープは、クリープの 進行による岩盤の一体化の消失によって、急激な 崩壊現象に移行する。
- 45°以上の勾配では、圧縮部の破壊によって、移 動地塊はある程度一体化した状態で崩壊、崩落に 至る.
- 60~70[°]以上の勾配の断崖斜面は,個別岩塊の座
 屈崩壊,転倒崩壊・崩落によって形成される.

ような岩盤崩壊の発生が当地区では確認されてい ない.また,テラス状地形が溶結凝灰岩の堆積構造 に由来するものではないかという疑いについての 確認も今後求められる.

今後は、他の柱状節理岩体急崖斜面、あるいはト ップリング崩壊地などにも、このような傾斜区分の 適用が可能かどうか引き続き事例研究を進めると ともに、35°を越える斜面勾配における斜面傾斜角 と斜面形成メカニズムの関係に着目し、検討を進め てゆくこととしたい.

参考文献

- 松倉公憲:山崩れ・地すべりの力学,筑波大学 出版会,pp. 99-107,2008
- 小口 高,勝部圭一:細密 DEM を用いた地形解 析,空間情報科学研究センターシンポジウム, pp19-26
- 3) 岩盤崩壊の考え方:土木学会,2004
- 4) 鈴木隆介,建設技術者のための地形図読図入門
 1 読図の基本, p.119, 1997
- 5) 羽田野誠一,羽田野誠一地形学論集, pp. 107-109 より編集, 1998

ONE CONSIDERATION REGARDING THE FORMATION PROCESS OF THE BASE ROCK URGENT CLIFF SLOPE WHERE THE PRISMATIC JOINT ADVANCES

Noriya KAMIHARA Tadakazu UTO

Detailed laser scanning survey conducted for steep slopes reaching a difference in elevation of 150m where falling rocks and rock failures frequently occur enabled a very minute terrain representation so as to allow recognition of individual columnar jointed rocks of around 1m each. A slope gradient analysis using this DEM data revealed that steep slopes include cliffs with slope angles of over 70° and steep slopes with slope angles of 40-60° formed stepwise. On the other hand, as a result of a Laplacian analysis, individual buckling failures tend to be dominant in cliff slope parts, while for steep slope parts with relatively gentle slopes, it is considered necessary to also assume rock failures with a certain spread of a larger scale.