

斜面の安定

今西 誠 也*

1. はじめに

地すべり、山崩れ、崖崩れ、土砂崩壊、落石などの斜面災害が多くなり、人命の喪失、家屋倒壊、田畑の流失、道路・鉄道の途絶など、その被害は莫大なものとなっている。

従来、このような災害は山間の僻地に、自然営力的なものによって起ることが多かった。しかし、経済成長とともに、急激な開発が行われ、山地・丘陵地帯において宅地造成、道路、鉄道、ダムなどの建設工事が大規模にかつ急速に行われるとともに、これまでの知識ではほとんど考えられなかった地形の山腹、都市域あるいはその周辺に災害が発生するようになってきた。

自然斜面、人工斜面における災害は、集中豪雨、梅雨、融雪、地震などの外力が、斜面の持つ固有の性質とかみ合せて起るものである。平坦地が少なく、傾斜の急な山岳地帯の多い地形条件、地殻変動のために地盤が弱められ、さらに、シラス、ヨナ、マサ、関東ロームなどの特殊土壌、水にとけやすい未固結に近い新第三紀層などの地質条件が災害に結びついている。

2. 斜面の災害

斜面の災害にはいろいろの呼び方はあるが、形態的に大きく分けると、地すべり、崩壊、落石などとなる。

地すべりは特定の地域に起きていることが多い。新潟、徳島、長野、愛媛、石川、山形、長崎、富山、佐賀、千葉、兵庫、和歌山、群馬などが多い。地質的に特徴のある場所であることに気がつく。それは第三紀層、構造破碎帯、温泉地帯となっている。地すべりの発生原因としては、かつて崩壊または地すべりによってできた地形のところが再活動するのが大部分である。山地や丘陵の緩斜面が主として地下水の働きによって、粘性土、弱層などをすべり面として、かなり大規模の斜面が緩慢に移動する現象である。運動は停止、活動を繰り返すことが多く、移動土塊の攪乱も比較的少なく、原形を保ちつつ移動する現象である。

* 正会員 建設省土木研究所 地質官

表一 地すべりと崩壊の特徴

区分	地すべり	崩壊
地質	特定の地質、地質構造に発生(地域的分布)	地質との関連少ない(花崗岩、シラス、段丘礫層など)
土質	粘性土、軟質岩をすべり面とする	不連続層(きれつ、割れ目、境界面など)
地形	5°~20°の緩傾斜面、特殊な地形(断崖、凹地、平坦地、緩斜面、急斜面)	30°以上の急傾斜面に多い
活動状況	継続型、断続型(安定期、活動期)	突発型
移動速度	粘性土 0.01~1cm 岩盤 1cm以上	運動はきわめて早い
土塊	土塊のかく乱少ない、原形を保って移動	土塊はかく乱、原形をとどめない
気象・地下水	地下水による影響が大きい	降雨強度による影響が大きい
規模	非常に大きい	小さい
前駆現象	きれつ、隆起、陥没、地下変動	少ない

崩壊は地質に関係なく、豪雨などによって起ることが多い。崩れやすいのは、花崗岩、集塊岩、シラス、ローム、砂礫層などの急斜面である。崩壊は突発的に起り、その運動も激しく、移動土塊の攪乱もはなはだしく、ほとんど原形を保たない程度に破壊されて移動する現象である。

落石は岩盤の岩目が拡大はく離したり、表層堆積物、火山噴出物、固結の悪い砂礫層の岩塊、玉石、礫が表面に浮き出して斜面から落下する現象である。岩石を主とする崩壊と類似するが、体積、個数によって表現できるかによって区別するのの一方法である。

このように分類すると、地すべりと崩壊が簡単に区別できるようであるが、実際は非常に難しい。多くの人びとは、それぞれの感覚(とくに移動速度)で区別していると思われる。しかし、地すべりには、その成因によって移動速度が異なり、破碎帯、温泉地すべりなどでは急激に破壊が起り、崩壊と区別しにくいことがある。

地すべりは地質的に特定の地域に起るがこれは自然状態のときであって、大規模な土工によって地すべりの少ない地域や、地形的にみて安定していると思われる斜面に急激な地すべり運動を起したり、切土によって斜面の内部応力の分布を大きく変化させ、その影響が徐々に進行して数年を経て地すべりを起す場合もあり問題をますます複雑にしている。

のり面 保護工	全体に対する 各工法の比率		のり面の安定性							
	個 数	(%)	安 定		小 崩 落		落 石		崩 壊	
			個 数	(%)	個 数	(%)	個 数	(%)	個 数	(%)
擁 壁 工	78		69		8					1
張 石 工	21		20		1					
薬コンクリート工	8		7						1	
モルタル吹付工	3		1		2					
コンクリートワ工	6		5		1					
ブロック張工	33		29		4					
張 芝 工	57		56		1					
種子吹付工	88		80		8					
植 生 盤 工	12		10		1				1	
植 生 穴 工	24		22		2					
無 処 理	32		22		7		3			
落石防止柵工	1								1	
合 計	363		321		35		3		4	

(a) 土のり面の場合

のり面 保護面	全体に対する 各工法の比率		のり面の安定性							
	個 数	(%)	安 定		小 崩 落		落 石		崩 壊	
			個 数	(%)	個 数	(%)	個 数	(%)	個 数	(%)
擁 壁 工	49		33		5		8		3	
張 石 工	1		1		0		0		0	
張コンクリート工	2		0		1		0		1	
モルタル吹付工	63		56		4		3		0	
コンクリートワ工	4		3		0		0		1	
ブロック張工	11		7		0		0		4	
筋 芝 工	0		0		0		0		0	
張 芝 工	0		0		0		0		0	
種子吹付工	19		16		0		3		0	
植 生 盤 工	0		0		0		0		0	
植 生 穴 工	4		4		0		0		0	
無 処 理	16		12		1		2		1	
落石防止柵工	0		0		0		0		0	
そ の 他	0		0		0		0		0	
合 計	169		132		11		16		10	

(b) 混合のり面の場合

のり面 保護工	全体に対する 各工法の比率		のり面の安定性							
	個 数	(%)	安 定		小 崩 落		落 石		崩 壊	
			個 数	(%)	個 数	(%)	個 数	(%)	個 数	(%)
擁 壁 工	73		58		7		5		3	
張 石 工	4		3		1		0		0	
張コンクリート工	4		3		1		0		0	
モルタル吹付工	251		233		11		6		1	
コンクリートワ工	8		4		3		0		1	
ブロック張工	16		15		0		0		1	
筋 芝 工	1		1		0		0		0	
張 芝 工	0		0		0		0		0	
種子吹付工	31		25		2		4		0	
植 生 盤 工	7		3		2		1		1	
植 生 穴 工	5		4		0		0		1	
無 処 理	380		279		24		64		13	
網 工	34		30		3		1		0	
落石防止柵工	17		14		1		1		1	
そ の 他	2		1		0		1		0	
合 計	833		673		55		83		22	

(c) 岩石のり面の場合

図一1 のり面保護工と安定性図

3. 斜面の実態

自然の地山は複雑な地質構造をしているので、安定の検討が難しい。切土を行うときには、斜面の条件を調査して、近傍類似箇所の施工例を参照して、設計・施工を行っているが、技術者の主観に左右されやすく、予期しない斜面災害がしばしば起っている。このような災害の実態を明らかにするため、建設省では崖崩れ、道路のり面の実態調査を行っている。

(1) のり面の実態

全国的にみると、のり面保護工種としては、土のり面では、種子吹付工、張芝工などの植生工が多い。土と岩石からなる混合のり面では、モルタル吹付工、擁壁工が多く使われている。また、岩石のり面としては、無処理のものが多く、ついでモルタル吹付工、擁壁工となっている。

勾配は土のり面では 1:1 程度のものが最も多く、土質、湧水の状況によって、1:0.8~1:1.5 程度で切土されている。混合のり面では 1:1 が最も多いが、1:0.8 程度のものもあり、岩石のり面に近づいている傾向がある。岩石のり面は、土のり面、混合のり面に比して急であり、1:0.5~1:0.8 の勾配のことが多い。

(2) 災害の実態

のり面の安定性を検討すると、土のり面が9割、混合のり面が8割、岩石のり面が8割弱安定している。土のり面が最も安定しているのは常識どおりである。

災害の原因について検討してみると、いずれのり面でも、無処理、排水関係の理由が卓越していることに気がつく。構造物などによる堅固な保護を行っても、のり面全体を覆っていなければ効果を発揮することはできない。無処理の場合はもちろん、たとえ処理を行っても、流水、浸透水の処置が不完全であると、浸食、パイピングによって小規模の崩壊を起し、徐々に破壊が進行して大きな崩壊になる。水処理施設の位置、方向の不適、容量不足、閉塞などによって災害を起し、また、災害を大きくし

表-2 (a) 崩壊原因の分類

崩壊原因の分類	土のり面						混合のり面		合計
	礫および礫質土		砂および砂質土		粘土および粘質土		14	13	
1. のり面が無処理である	5	9	2	3	1	3			14
2. 構築物の上部のり面が無処理である	8	7	5	1	—	5	25	13	64
3. 落石防止柵、網工等が施工されているが、のり面が無処理である	3	—	—	—	—	3	1	—	7
4. のり面の一部が無処理のまま放置されている	1	—	—	—	—	—	17	5	23
5. 植生の生育が悪い	—	—	3	4	3	3	5	1	19
6. 植生を施しているのり面の勾配がきつい	—	4	—	—	1	6	5	2	18
7. モルタルの状態が悪い	—	—	—	3	—	—	7	3	13
8. 構造物および植生が施されているが、排水施設に問題がある	—	2	3	5	4	13	5	1	33
9. その他の原因	—	1	—	1	—	2	—	—	4
合計	17	23	13	17	9	35	79	38	231

表-2 (b) 崩壊原因の分類

崩壊原因の分類	花崗岩	石英斑岩	蛇紋岩	安山岩	凝灰岩	片岩	堆積岩	チャート	計
のり面が無処理である	26	15	2	14	17	42	88	3	207
のり面勾配がきつい	11	—	—	1	3	3	6	—	24
節理面より風化	16	7	2	15	12	13	40	—	105
表面流水	17	3	1	4	4	13	19	1	62
モルタル吹付けが薄いかまたは悪い	4	1	—	—	3	2	8	—	18
地すべり性	2	—	—	1	1	—	11	—	15
浮石による落石	3	—	—	3	—	1	—	—	7
その他	3	1	—	1	2	1	9	—	17
不明	2	6	3	—	4	9	18	1	43
合計	84	33	8	39	46	84	199	5	498

ていることが多い。工種選定にくふうが必要であるが、全面に保護工をすること、水処理を十分に行うことが、災害を少なくする第一歩であることを示している。自然斜面の災害は、表土が多く、崩積土、強風化岩がこれに次いでいる。この災害には、不安定土塊が落下する崩落型の崩壊と、境界面沿いにすべり落ちる滑落型があり、滑落型の崩壊が 87% を占めている。

崩壊を起した基岩について検討してみると、堆積岩地域が多くなっているが、分布面積の関係もあり、とくに堆積岩地域が崩壊を起しやすいとは断定できない。雨量との相関について検討すると、最も崩壊を起しやすいのは深成岩（花崗岩）地域であり、火山砕屑物がこれに次いでいる。最も崩壊しやすいものと崩壊しにくいものでは、最大時間雨量で 2 倍の開きが認められた。

4. 安定計算に対する反省

円形すべり面を用いた安定計算が斜面安定の設計、崩壊規模の予測に利用されている。量的な取扱いという意味ではあるが、この安定計算による方法は限定された条件の地域にだけ適用されるべきである。

安定計算は、すべり面、土のせん断強さ、地下水位が重要な役割を果している。これらがある精度で求められることが前提である。この条件が幾分でもみだされるものは、地すべりが発生した斜面、地すべりは停止してい

表-3 斜面構成土質別の崩壊様式

斜面構成土質	個数		構成土質別の比率 (%)		構成率 (%)	
	崩落	滑落	崩落	滑落	個数	構成率 (%)
表土	5	98	4.9	95.1	103	54.2
崩積土	1	26	3.7	96.3	27	14.2
火山砕屑物	5	7	41.7	58.3	12	6.3
段丘堆積物	2	5	28.6	71.4	7	3.7
強風化岩	0	23	0	100.0	23	12.1
岩 (I)	2	4	33.3	66.7	6	3.1
岩 (II)	9	3	75.0	25.0	12	6.3
計	24	166	12.6	87.4	190	100.0

表-4 (a) 地質別崩壊発生頻度

地質区分	代表的な岩石	個数	構成率 (%)
酸性噴出岩類	流紋岩, 石英粗面岩	6	3.1
中～塩基性噴出岩類	安山岩, 玄武岩	10	5.2
深成岩類	花崗岩, 閃緑岩	32	16.5
火山砕屑物	凝灰岩, 集塊岩	18	9.3
堆積岩類	頁岩, 泥岩, 砂岩, 粘板岩	82	42.3
変成岩類	チャート, 片岩	8	4.1
シラス		8	4.1
ローム		8	4.1
その他		22	11.3
計		194	100.0

表-4 (b) 地質と最大時間雨量の関係

地質区分	1	2	3	4	5	6	7	8	総平均
最大時間雨量 (mm)	54.0	39.4	26.7	33.2	45.0	36.1	42.7	43.0	38.7
個数	5	8	30	17	75	8	7	8	158

るが過去に発生したと思われる地域について、十分な地質調査が行われてから適用すべきであり、しかも、対策工の量を定める手段として有効なものである。しかし、現実には条件を無視して乱用されている傾向がある。

(1) すべり面

斜面に地すべりが起った場合は、数本のボーリングを行って、掘進中の孔曲がり、抵抗重垂挿入、すべり面測定管の傾動、ストレインゲージパイプのひずみ測定などによって実際の動きをキャッチし、すべり面の位置をある精度の範囲内に決定できる。運動を何回も繰り返した地すべりのすべり面は円弧に近い型を示すことが多い。しかし、運動を起す以前の斜面では、この方法を使ってもすべり面を決定できない。この場合、一般には、トライアルに多数のすべり円を描いて、最小安全率(c, ϕ に關係する)のすべり円を描いて検討することが多い。任意に描いたすべり円が、すべるだけの地盤的要因を持っているかは全く無關係である。また、 c, ϕ の数値いかんによっては、描いた最小安全率のすべり円が変わってくるので、安定に対する検討が無意味になってくる。

すべり面とはどのような性質であろうか。地質工学的検討が必要になる。災害実績、地質学的知識からすればすべり面とは、強度、透水、浸透などに関して相違を示す面であり、斜面の構成から考えると、地質工学的な境界面、不連続面またはその近傍であるといえる。具体的にいえば、がけすい、崩積土と基岩との境界面、がけすい・崩積土中の各成層(粘性土、砂質土、礫まじり土)における境界面、風化岩と新鮮な岩盤との境界面、割れ目、節理、層理、断層などの不連続面である。したがって、滑動面は必ずしも円弧ではない。むしろ、直線を基本型にしたものに近いはずである。

(2) c, ϕ の決定

土または岩石のせん断強さから、 c, ϕ を決定し、与えられたすべり面に対し安定への検討(地下水を考慮)を行うのが普通であるが、この c, ϕ の決定に問題が多い。斜面はその成因からみて、均質な層から成り立つことはほとんどない。土から岩石までの違った物質が入り混じって構成され、かつそれぞれの土や岩石の性質が同一斜面であっても、同じであることはほとんどない。

安定への検討のためには、すべりうるはずの面の c, ϕ が必要なのである。4.(1)で述べたように、すべりうる面の確認に問題があり、また、かりにわかったとしても問題が多い。一般にすべりうる面は地質学的境界面、不連続面であるので、その面は必ずしも厚いとは限らない。数cmのこともありうる。試料採取が困難であり、採取できたとしても見逃したり、薄層のために試験がで

きないことが多い。また数箇所のサンプルにより試験を行っても、そのサンプルがすべり面の性質を代表するものであるかどうか、地質構造の複雑な日本では、むしろこれを否定する立場をとらざるを得ない。

土や岩石の強度についても問題が多い。強度は不変ではない。浸透水、地下水による含水量の変化は、化学的・物理的变化を促進して、強度低下をきたすことになる。滑動時の値は安定時のものに比べると、はるかに低下していると考えられる。また、切土を行う場合には、掘削作業による岩盤のゆるみ、除荷による応力解放のため、きれつの開放、水の浸透によって、強度の低下が起るはずである。このようなことから、滑動以前の土質試験による c, ϕ を用いて検討しても無意味なことが多い。

5. 安定への検討

自然斜面、人工斜面は、盛土のり面と比べて、その構成が複雑である。土から岩石まで存在している。土についても、粘性土、砂質土、礫まじり土などの性質の異なるものが同一斜面に存在するように、各種類の岩石が分布している。種類によって性質が異なるが、同じ種類であっても岩質が著しく変化し、「マサ」のような軟質なものから、耐圧強度 2000 kg/cm^2 にも及ぶ岩石もある。風化岩、変質岩、軟岩、硬岩などに分けるのも一方法であり、それぞれの性質をある程度表現している。一つの斜面において、同一の岩石でもこのように性質が異なるので、予想される崩壊などの複雑な災害現象に対して、量的な安定検討を行い、保護工の選定、限界切土高、勾配などを決定した事例は少ない。定性的検討を行うのに必要な地山条件としては、次のものがあげられる。

① 地形、② 表土、がけすい、崩積土、段丘などの構成および厚さ、③ 地質時代、④ 地質構造、⑤ 岩石の種類、⑥ 岩石の強度、⑦ 弾性波速度、⑧ 層理、片理、節理、割れ目の走向傾斜、間隔、頻度、⑨ 透水層、不透水層、⑩ 地下水、湧水の分布、⑪ 岩盤の風化、変質、⑫ 断層、破碎帯の規模、状態、走向傾斜、⑬ 膨張性、⑭ 浸食性、⑮ はく離性、⑯ 岩脈の性質、接触の状態。

これらの要素を組み合わせるとともに、その地域における過去の災害例、技術的経験に基づく総合的検討のうえで、斜面勾配や有効な保護工法を採用している。斜面対策工として採用されている工種はたくさんあるが、どのような条件に対して、どの工種が良いかという理論的な追求は不十分である。

自然斜面、人工斜面の安定を理論的に追求することがほとんど不可能であり、過去の実例を基本にした技術的判断によっているのであるから、保護工を施しても、防災強度がどれほど増加したかということ客観的に評価

表-5 (a) のり面保護工の工種とその目的

分類	工 種	目 的
植 生 工	種 子 吹 付 工	雨水浸食防止, 凍上崩落抑制, 緑化, 全面植生
	植 生 マ ッ ト 工	
	張 芝 工	
植 生 工	植 生 筋 工	同 上 盛土用, 筋状植生
	筋 芝 工	
	植 生 盤 工	
植 生 工	植 生 袋 工	同 上 硬質不良土のり面の部分客土植生
	植 生 穴 工	
	植 生 盤 工	
構造物によるのり面保護工	モ ル タ ル 吹 付 工	風化, 浸食の防止
	コ ン ク リ ー ト 吹 付 工	
	石 張 工	
	ブ ロ ッ ク 張 工	
	コ ン ク リ ー ト ブ ロ ッ ク わ く 工	
	コ ン ク リ ー ト 張 工	のり表層部の崩落防止, 多少の土圧をうける恐れのある箇所 の土留, 岩盤はく落防止
	現場打ちコングリートわく工	
	のり面アンカー工	
	編 網 工	のり表層部の崩落抑制
	のり面じゃかご工	
落 石 防 止 網 工	落石防止	
落 石 防 止 網 工		
落 石 覆 工		

表-5 (b) 地すべり対策工の分類

抑制工	地表水排除工 (水路工, 浸透防止工)
	地下水排除工
	浅層地下水排除工 (暗きょ, 明きょ)
	深層地下水排除工 (集水井, 排水トンネル, 横ボーリング)
	地下水しゅ断工 (薬液注入, 地下しゅ水壁の深い暗きょ)
	排土工
抑止工	押え盛土工
	河川構造物 (えん堤, 床固め, 水制, 護岸)
	杭 工
	杭打工 (型钢など)
	杭挿入工 (コンクリート杭, 鋼管杭など)
	シャフト工 (深礎など)
擁壁工	

することはできない。災害を完全に防ぐことは現状では不可能に近い。しかし、完全に阻止することはできないにしても、なるべくこれを少なくし、これによる被害を防止し、減少させることを心掛ける必要がある。

どこで、いつ、どのくらいの大ききで災害が発生するかを予測することが理想である。一つの斜面に対して、崩壊の危険度を判定することは難しい。地すべりが特異な地質条件のところ起ること、反復して発生するという特質から、地すべり地域である程度判別できると大きな違いがある。しかし、精度は悪くても、現在の技術レベルで、できる限りのことをやるべきである。

(1) 危険度の判定

過去の災害実績、地形、地質、気象、植生などの判断から、ある地域、区間を崩壊危険度の高い地域として指

定することはある程度可能である。これらの中から、危険な斜面を選定できればその斜面を綿密に調査を行い、対策を立てれば、災害も少なくなってくる。

過去の災害、隆起、陥没、きれつ、滑落崖、斜面長、斜面勾配、集水地形、表流水、地下水、湧水、土質、地質、断層、表土の厚さ、保護工の種類および異常、排水方法、切盛土工の範囲と規模、気象などについて、統計的に処理して、危険度を判定している。個人差を少なくし、より客観的なものにするためには、因子の選定、因子のランクを今後ある程度統一する必要がある。総合的な判断を行うために、地域的な特性も考慮し、各因子に点数を与え、数量化によって危険度を判定するトライアルが行われている。

(2) 崩壊の予測

危険斜面の監視は、災害を防ぐ意味で重要である。パトロールすることも大切であるが、計器を使って定量的に測定することが必要になってくる。

斜面崩壊は地すべりと違って、前駆現象(きれつの発生、地盤の変状、隆起、陥没など)の発生から崩落までの時間的余裕が少なく、予測することは困難であるが、もしこの前駆現象が発見されたらば、地すべり予測で実用化している伸縮計、地盤傾斜計が有力な手段となる。

一般に斜面崩壊の予測としては、落石、小規模の崩壊を早期に知り、交通規制、住民待避などの手段によって、被害発生を少なくするため、斜面に落石、崩壊などによる衝撃圧、音、振動などをセンサーによってとらえこれを電気信号に切り換えて警報を出す試みと、地山にボーリングを行い、その孔中にセンサーを入れ、地盤を構成する土、岩石などが「応力-変形」を受けて発生する微細なパルス音、振動とその発生頻度などをとらえ、崩壊を予測する試みが行われている。崩壊が発生するより前の段階から現象を順次追跡できるので、対応策も比較的早くとりやすく、予測の手段としては合理的である。

6. おわりに

斜面の災害を完全に阻止することは、現状では無理である。どこで、いつ、どのくらいの大ききで災害が起きるかについての資料となる危険度の判定、崩壊予測などについて、ようやく手をつけ始めたところである。

参 考 文 献

- 1) 土木研究所：のり面の効果ならびに選択基準に関する研究, 25 回建設省技術研究会報告。
- 2) 土木研究所急傾斜地崩壊研究室：急傾斜崩壊の実態とその対策, 土木研究所資料 801 号。
- 3) 日本道路協会：土工指針。
- 4) 日本道路協会：11 回日本道路会議特定課題(斜面崩壊の予知とその対策)。