

新潟大学農学部 川邊 洋  
三重大学生物資源学部 ○林 拙郎、近藤観慈、沼本晋也

1999年9月21日の台湾集集地震で発生した土砂量  $10^7 \sim 10^8 \text{ m}^3$  の大規模崩壊—九份二および草嶺—は、いずれも台湾中西部山麓域の新第三紀堆積岩地帯で発生した。本稿では、両崩壊の概況と発生要因について述べる。

### 1. 九份二崩壊

**崩壊とその後の状況** 本崩壊は南投県國姓郷南港村にあり、韭菜湖溪と澀子坑溪との合流点付近の南東向き斜面が地震とほぼ同時に崩壊し、両溪流を長さ1.6kmにわたって堰き止め、2箇所堰止め湖を形成した。崩壊の規模は、幅1km、長さ1.6km、面積約180ha、土砂量約3.5千万  $\text{m}^3$  であった。

図-1は崩壊地の断面図である。この図より、最大崩壊深74m、平均崩壊深45m等が求められる。すべり面の勾配は、R点より上側の面が  $22^\circ$ 、下側の面が  $27^\circ$  で、下方の斜面がやや急勾配となっている。この斜面(太実線)は今回の崩壊跡であり、C-Dを結ぶ細実線は旧崩壊跡、点線は旧崩壊前の地表面を表している。

2つの堰止め湖の水を流下させるため、三面空石張の排水路が造成されている。図-2は堰止め湖、排水路と現在の河床(2001年9月実測)の縦断面図である。水平距離は堰止め湖からの流出口(標高580m)を起点にしている。水平距離150~200mの水路から法肩までの高さは10m程度であり、水路は崩積面より約10m掘削して造成されているが、下流に行くにしたがって高低差が開き、侵食が下流ほど進んでいることが判る。残存する水路は、水平距離150~220mの70m程度の区間のみであり、250m地点より下流では、V字谷の侵食が進行している。

**崩壊の原因** すべり面には厚さ3~4cm程度の粘土層が認められ、この粘土層表面には、厚さ3~5mm程度の板状に方解石( $\text{CaCO}_3$ )が析出していた。この斜面が、地震前からある深さの面を境に徐々に変位し、それに合わせてその面に方解石が析出していたとすれば、地震前に既に斜面の不安定化が進行していたことになる。

表-1は崩壊地からの湧水の水質である。後述する草嶺の湧水より、全体的に濃度は小さいが、水質型は全く同じ  $\text{CaSO}_4$  型である。ただし、析出しているのは、石膏( $\text{CaSO}_4$ )ではなく、方解石( $\text{CaCO}_3$ )である。

古谷(2001)は、この崩壊の地質的要因として、a)この地域は褶曲の翼部に当たり、車籠埔断層の活動による東西方向のストレスを受けた可能性、b)滑落面上の座屈の痕跡や座屈しかかっている形状の存在、c)シーティングによる岩層面のスリップに基づくと考えられる岩層面境界の緩み・擦痕・粘土の挟在、等を挙げている。これらの要因とともに、d)斜面脚部を流れる小溪や韭菜湖溪の脚部侵食による斜面の不安定化、e)すべり面への方解石の析出による強度低下、などが進んでいたところに地震が襲い、崩壊に至ったものと考えられる。

### 2. 草嶺崩壊

**崩壊とその後の状況** 草嶺崩壊は、濁水溪支流の清水溪が西流から北流に向きを変える手前、雲林-嘉義県境の右岸雲林県側の南向き斜面(草嶺山(1,234m)から西方の1,163mのピークまでの尾根部直下の斜面)で発生し、清水溪を約5kmにわたって堰き止め、さらに対岸の嘉義県側に乗り上げた。崩壊の規模は、平均幅約1.3km、長さ約1.7km、最大崩壊深約200m、面積約220ha、崩壊土砂量  $1.2 \sim 3.5 \times 10^8 \text{ m}^3$  と推定されている。

堆積面の侵食は堰止め湖のオーバーフローが始まると一気に開始される。2000年1月の時点では、まだ堰止め湖からの流下が始まっていないが、その後オーバーフローが始まり、2000年12月には深さ7~8m程度の侵食、2001年10月時点では深さ20mにも達しており、堆積土砂の侵食が速やかに進行していることが判る。

**検討を要する崩壊要因** 卓蘭層および錦水頁岩層の砂頁岩互層の層理面で、階段状に3~4段のすべり面が形成された(図-3、經濟部水利處、2000)。各段の高さは25~35m、滑動体表面の傾斜は  $11^\circ \sim 13^\circ$  である。

最上段のすべり面(図-3の滑動体③の表面)、中段のすべり面(滑動体②の表面)および最下段のすべり面(滑動体①の表面)から採取した粘土のX線分析の結果を表-2に示す。

最上段と中段のすべり面(滑動体③と②の表面)で採水された湧水の水質は表-1の通りである。これらの湧水はアルカリ性で、全体的にイオン濃度が大きく、電気伝導度も高い。とくに中段では、ほとんどの成分で上段の濃度を大きく上回り、浸透するに従って周囲の岩石からイオンを取り込んでいく様子が窺われる。いずれの湧水も水質的には  $\text{CaSO}_4$  型である。安定同位体比からは、いずれの湧水も天水起源とみなされる。

(1)応力開放による岩盤の膨張・劣化：草嶺は過去幾度となく地震や豪雨による大崩壊を繰り返してきた。歴史的に大崩壊を繰り返すたびに、上載荷重の急激な除去→応力開放による岩盤の膨張・劣化→地表面にほぼ平行な伸張破壊の発生→新しい節理の形成あるいは既存の割れ目の拡張、という過程が繰り返されたであろう。

(2)クリープによる岩盤の緩み：割れ目の形成・拡張は、重力性クリープによる岩盤の緩みを助長し、とくに長大斜面では徐々に座屈して膨れ出す。

(3)塩類を溶解した水の割れ目への浸入：割れ目の存在が、塩類を過飽和に溶解した溶液の浸入を助長すると、①溶液からの結晶成長による圧力、②水和に起因する応力、などにより塩類風化が起こる(Yatsu, 1988)。

①すべり面には芒硝( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )が塩を噴いたように析出していた(Okunishi et al., 2000)。この芒硝が崩壊後に析

出したのか、あるいは崩壊前から(後にすべり面に成長する)割れ目に析出していたのかは不明であるが、後者の場合、芒硝の結晶圧がある条件下では  $300\text{kgf/cm}^2$  程度にもなることを考えると、割れ目の発達に無視できない影響を及ぼしたであろう。ただし、湧水が  $\text{CaSO}_4$  型であるのに、析出していたのは石膏ではなく芒硝であった。

② Thenardite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) は急速に水和・膨張し、Mirabilite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) になるが、そのときに  $400\text{kgf/cm}^2$  程度 ( $25^\circ\text{C}$ 、相対湿度 100% の場合) の水和圧を発生する。

(4) 加水分解による粘土鉱物の生成：割れ目の形成・拡張に伴って、珪酸塩鉱物と地下水の接触面積が増加すると  $\text{H}^+$  が発生し、この  $\text{H}^+$  と鉱物間の加水分解により粘土鉱物が生成される。表-2 より、中段のすべり面からは極微量のカオリン鉱物が、最下段のすべり面からは少量ではあるがモンモリロナイトが検出されている。

引用文献

古谷尊彦(2001)地すべり、37(4)

経済部水利處(2000)九二一地震・草嶺崩壊地處理報告

Okunishi, K., et al.(2000)京大防災研年報、No.43、B-1

Yatsu, E.(1988) The Nature of Weathering, Sozoshia

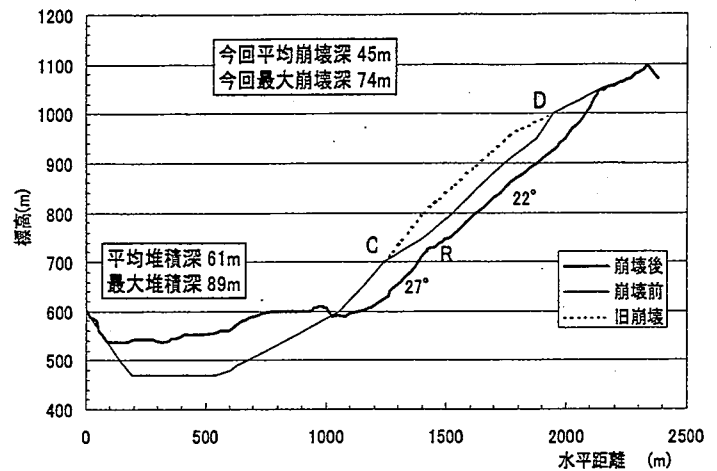


図-1. 九份二崩壊の断面図

(九大・大村教授所蔵の CD-ROM より作成)

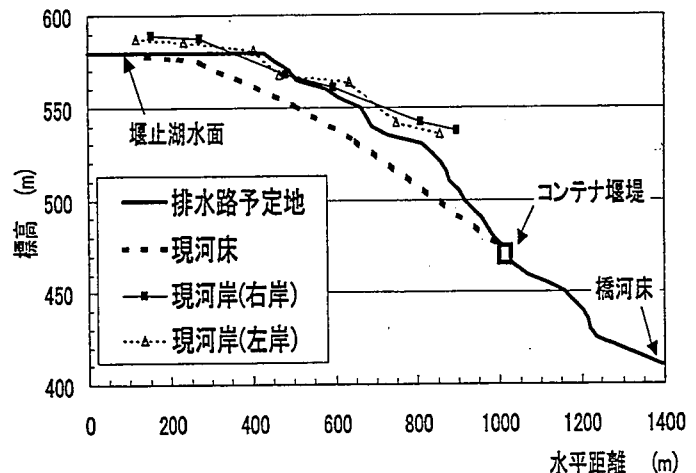


図-2. 堰止め湖排水路の縦断面図('01.9.28 実測)

表-1. 崩壊地からの湧水の水質

項目	単位	草嶺		九份二
		上段	中段	
pH	—	8.3	8.1	7.9
EC	mS/m	101.9	170.0	56.0
$\text{Na}^+$	mg/l	45.0	157	21.6
$\text{K}^+$	mg/l	4.70	14.5	3.1
$\text{Ca}^{2+}$	mg/l	126	237	61.3
$\text{Mg}^{2+}$	mg/l	49.0	80.3	23.4
$\text{F}^-$	mg/l	(0.97)	—	0.04
$\text{Cl}^-$	mg/l	1.57	0.89	2.4
$\text{NO}_3^-$	mg/l	<0.1	15.7	<0.1
$\text{SO}_4^{2-}$	mg/l	439	784	219
$\text{HCO}_3^-$	mg/l	(158)	308	67.1
$\text{SiO}_2$	mg/l	(9.8)	12.8	12.1
$\delta^{18}\text{O}$	‰	-8.6	-9.3	—
$\delta\text{D}$	‰	-58.2	-64.3	—
d 値	—	10.6	10.1	—

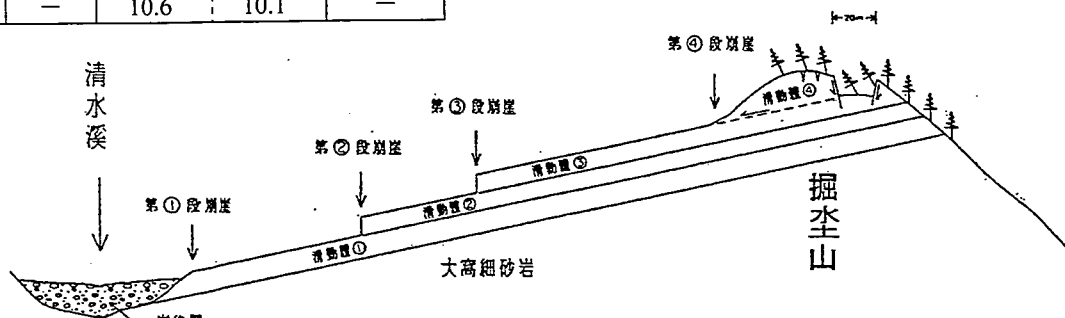


図-3. 草嶺崩壊の模式的断面図 (経済部水利處、2000)

表-2. すべり面粘土の X 線分析

試料	石英	斜長石	斜長石	曹長石	磷灰石	方解石	緑泥石	雲母類	モンモリロナイト	カオリン
上段③	++++	+		++	-	-	-	-		
中段②	++++	+		++			+	+		-
下段①	+++		++				+++	+	++	

++++ 多量、+++ 中量、++ 少量、+ 微量、- 極微量