

大規模な土砂移動現象と斜面災害の特徴

第106回ふじのくに防災講座
2018年3月17日

静岡大学農学部
土屋 智

講演内容

斜面崩壊実験(学位取得)	1987-1990
台湾921地震による土砂災害	1999-2004
三重県宮川土砂災害	2004-2005
スラウェシ島のカルデラ壁の大崩壊	2004-2008
四川大地震による土砂災害	2008-2011

模型斜面を用いた崩壊実験

降雨時に生ずる斜面崩壊について、降雨浸透した地下水がどのように関わり、またどのような挙動を示し崩壊に至るかについては、模型実験を除きほとんど定量的な情報がない。

モデル斜面による崩壊時の挙動

- 斜面上部に亀裂が発生し、下部が圧縮され法尻周辺が孕みだし、断続したすべりが一つになって崩壊することがある。
- 斜面(下部)先の小崩壊が逐次的に上部へ発達し、全体が崩壊したような状態を呈する。
- 崩壊形態をとらず表面侵食が拡大する(土層密度を境に、表面侵食型と崩壊型が区別されることがある)。
- 模型規模が大きく、小さな散水強度を継続させると、斜面上部に生じた亀裂が成長し全体崩壊に至ることがある。

適度な密度で作られたモデル斜面に適度な強度の降雨を続けると崩壊させることができる。

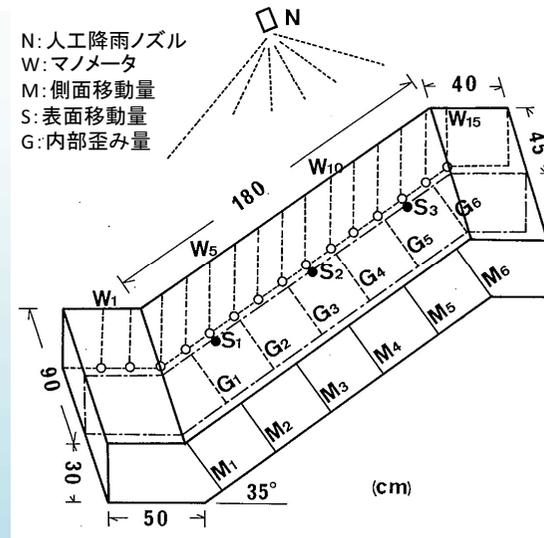
模型斜面を用いた崩壊実験(モデル斜面)

■ 実験斜面の規模

斜面の大きさは風化花崗岩地帯で発生する表層崩壊の1/5~1/10程度、斜面幅は左右側壁の摩擦効果を少なくするよう斜面長の半分で、実際の斜面崩壊の1/10~1/15程度、傾斜は実際の表層崩壊が多発するとされる35度、土層厚は0.3m、通常の表層崩壊の1/3~1/5の規模である。

■ 土槽構造

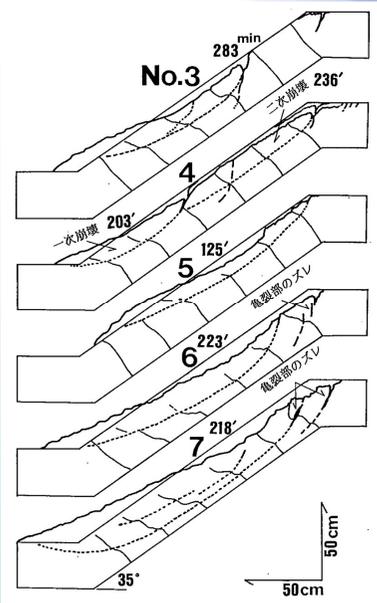
土槽はアクリル板(10mm厚)で、左側面にはマンメータ(内径4mm、高さ50cm)を15cm間隔に15箇所(W1~W15)取り付け、右側面には深さ方向の土層移動を把握するため、乾燥ソウメン(径約1mm)を30cm間隔に6箇所(M1~M6)取り付け、その形状変化を時刻とともに写しとった。



室内崩壊実験土槽(アクリル板製)

模型斜面を用いた崩壊実験(まさ土)

模型斜面を用いた崩壊実験(川砂)



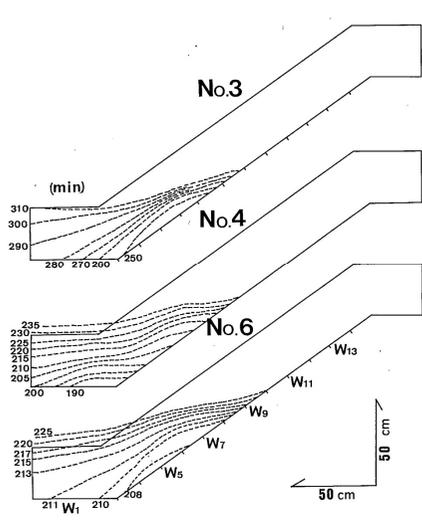
まさ土斜面の崩壊状況
 ・下部崩壊拡大: No. 3
 ・上部移動崩壊型: No. 4, 5, 6, 7

まさ土による崩壊実験
 (No. 3: 下部崩壊拡大型)

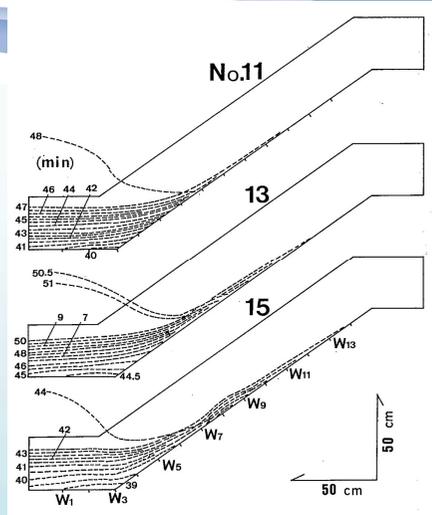
5

模型斜面を用いた崩壊実験(土層水位の変動)

模型斜面を用いた崩壊実験(観測事例)



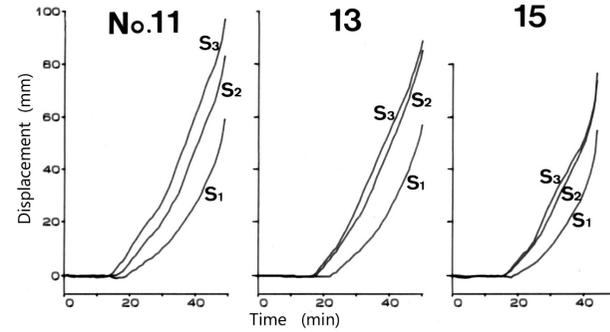
まさ土斜面の地下水面の経時変化



川砂斜面の地下水面の経時変化

- まさ土斜面は透水性が低いため、崩壊時でも斜面底上部には達していない。
- 川砂斜面では、崩壊時には斜面底上部に達し、土塊移動とともに急上昇する。
- 地下水面の高さとすべり面の位置を対比すると、崩壊直前で画者はほぼ同じ高さにあった。崩壊をもたらす土層強度の低下は飽和度上昇にもなうせん断強度の低下であると判断される。

7



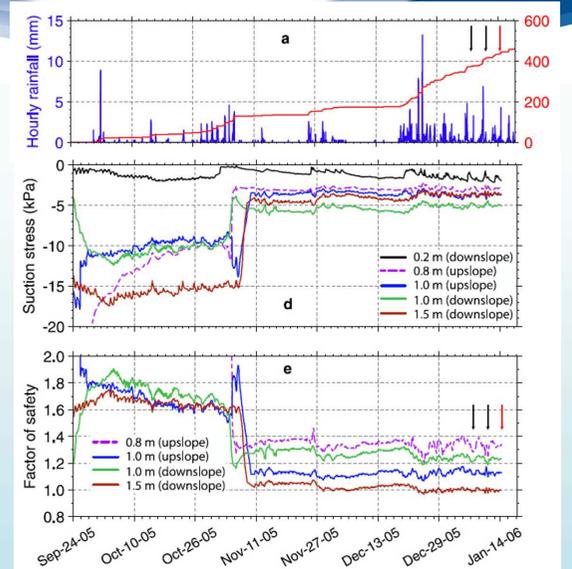
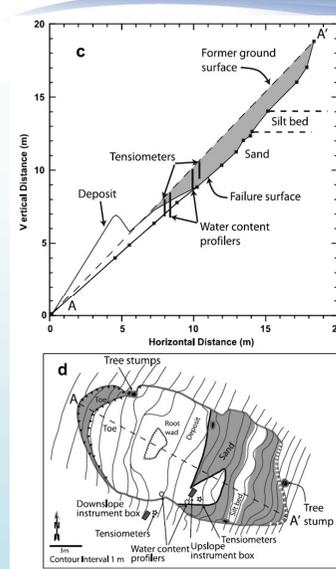
川砂斜面の表面移動量の経時変化
 (S₁: 斜面下部, S₂: 斜面中央, S₃: のり肩)

- 斜面下部のS₁では、上部2箇所 비해移動量は小さい
- 法肩に近いS₃の移動量はいずれの実験でもS₂, S₁に比べ大きい
- 土層変位は斜面上部から下部へと進行していったことがうかがえる。



川砂斜面による崩壊実験

6



ワシントン州ブージェットサウンドで観測した表層崩壊の発生時の土壌水分状態 (Godt et al., 2009) (左: 位置図, 機器配置, 右: 観測結果)

- 観測中の2006年1月中旬に起きた3回の崩壊時に、2箇所の体積含水率測定計と2箇所5深度のテンシオメータで観測した土壌水分から、不飽和な状態で崩壊が発生したことを確認した。

8

台湾921地震の土砂災害

●地震概要

発生: 1999年9月21日午前1時47分(現地時刻)
 規模: マグニチュード7.6(USGS), 余震: マグニチュード6.8(2回)
 震源: 南投県集集镇
 地震: 地震断層面は、車籠埔断層に沿いに約30度の角度で上盤側が上がるように動く「低角逆断層」タイプ
 死者: 約2200人

●斜面崩壊

大規模崩壊: 九份二山崩壊(崩壊土量約4,000万m³)
 草嶺山崩壊(崩壊土量約12,000万m³)
 崩壊箇所: 約26,000箇所, 崩壊面積率4.7%

地震で起こる大規模な斜面崩壊

大規模な斜面崩壊はどのように起きたか?
 崩壊斜面の面積はどのくらい?
 その後の土砂移動はどのように?

'99 12 13

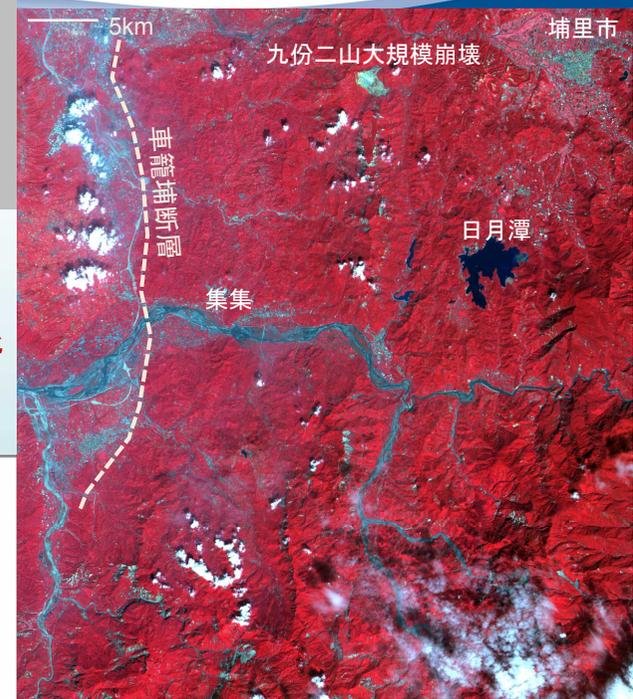
9

地震後の南投縣中央部(SPOT衛星)

- 撮影サイズ
横: 約38km, 縦: 約42km
- 画像色と土地利用
赤色: 植生被覆, 青色: 湖水, 河川
青灰色: 都市域や河川敷砂礫, 緑系灰色: 崩壊地, 白色: 雲

地すべり, 斜面崩壊は断層右側の移動地盤側で発生している。

GPSによる断層右側地盤の水平移動は北西向き3-7mを示した。



地震時の表層崩壊

表層崩壊によりハゲ山化した九九峰域

- 表層土層のうち表面に近い部分が崩落している。また、崩壊群として、そのほとんどは斜面上方の尾根付近で生じている。
- 崩落土砂の多くは斜面直下の谷部付近で停止・堆積している。



1999年10月13日撮影

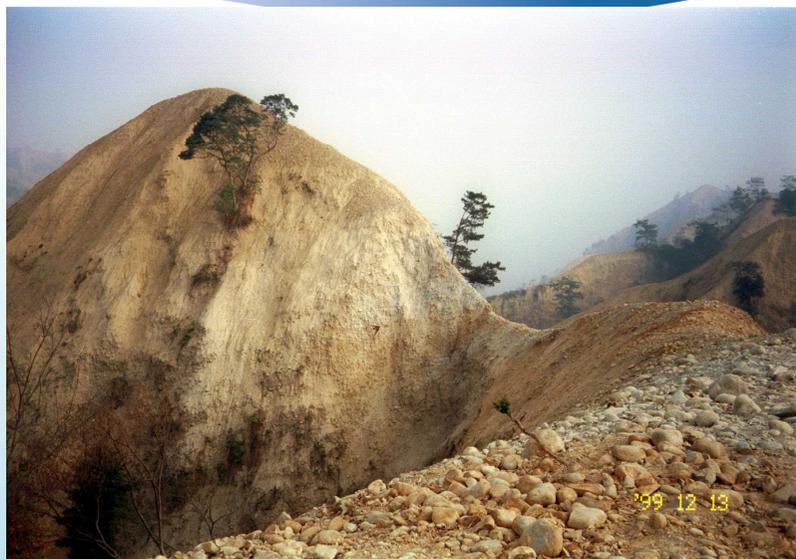
- 台湾南投縣の九九峰域の崩壊状況

第四紀の礫岩類で構成された急崖を有する地帯では、山頂部を中心に多発した表層崩壊によりハゲ山化した。



2000年12月17日撮影

表層崩壊した九九峰地区の尾根



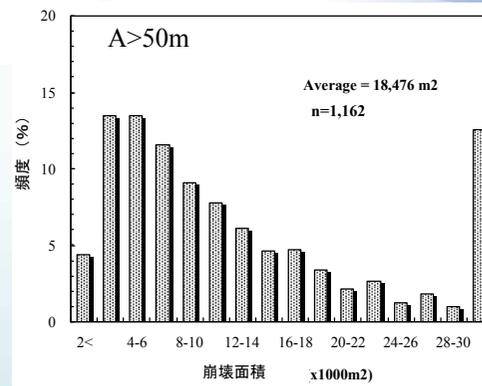
1999年12月13日撮影

ハゲ山化した九九峰地区の尾根

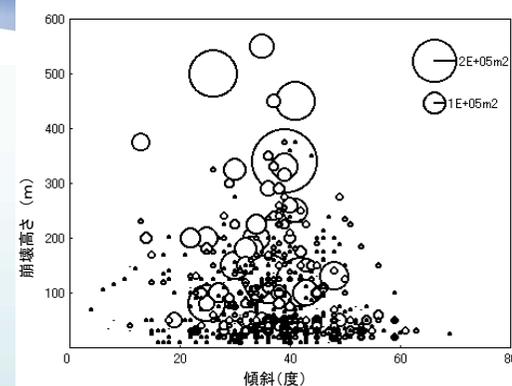
尾根一帯は地震により突出したと思われる多数の石礫がみられる。

地震前は、マツなどが点在する程度で背丈の低い笹などにより被覆されていたという。

斜面崩壊の規模



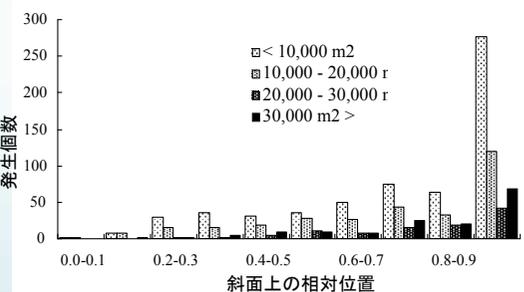
斜面崩壊地の面積分布



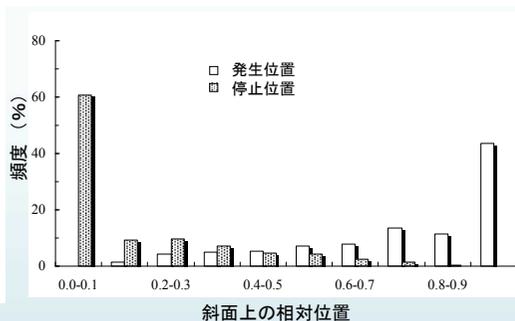
斜面崩壊地の面積規模と傾斜, 斜面高

- 崩壊面積10,000m²以下の崩壊は、約52%でほぼ半数を占める。面積30,000m²を超える大規模崩壊は約14% (約160個) 出現している。仮に崩壊深さを5mとすると大規模なもので30,000x5x160=2,400万m³の土砂生成があったと想定される。
- 崩壊面積20,000m²以上のものは傾斜25 - 45度で崩壊高さ500mまで、それ以下のものは傾斜25 - 50度で崩壊高さ200m程度。

斜面崩壊土砂の流動



斜面崩壊の面積別にみた発生位置



斜面崩壊の発生位置と停止位置

- 発生個数: 尾根付近で発生したものが最も多く、斜面上で部位を下げるにつれ、個数は指数関数的に減少。この傾向は10,000m²以下の斜面崩壊地で顕著にみられ、相対位置0.9-1.0で約280個からあった崩壊個数は0.7-0.9ランクになると100個以下となる。
- 約半数の斜面崩壊は斜面上の尾根周辺部で発生し、半数以上が谷底まで到達し停止。

桃芝台風と納莉台風による二次災害

2001年桃芝台風と納莉台風による連続雨量 (mm)

		北山	日月潭	草嶺	阿里山
桃芝台風	7月28-31日	357.5	333	392	714.5
納莉台風	9月6-20日	48.5	49.5	504	319

- 桃芝台風(台風8号): 2001年7月28日-31日、地震被災地を中心に死者110人、行方不明者111人。多くは、崩壊地の拡大、土石流による土砂災害による。
- 納莉台風(台風16号): 2001年9月6日-20日、台湾北部における被害が大きかった。台北市、台北縣を中心に死者・行方不明者68名、地震被害が大きかった嘉義縣では、死者8名の犠牲があった。



九份二山地すべり崩壊

桃芝台風(2001年)後の九份二山地すべり

● 崩壊規模

崩壊幅: 約1,100m
 斜面長: 約1,000m
 平均厚: 約80-90m
 崩壊土量: 約3,800万m³

- 新第三期の泥岩・砂岩の互層、ながれ盤
- 左下方には崩土により形成された天然ダムが見える。
- 堆積面上には排水路も見える。
- 赤色線は住宅があった位置と移動した位置



2000年12月17日撮影

水路完成後(2000年9月)



桃芝台風(2001年7月)後



- 九份二山地すべりは、2つの渓流を堰き止め、湛水湖を形成した。その対策に排水路が掘削された。建設後、表流水はスムーズに排水されていた。
- 2001年7月に桃芝台風(台風8号)による豪雨(阿里山758mm)により、著しく侵食された。排水路は、地すべり崩土の堆積地であったことから、侵食抵抗には乏しく、幅100m、深さ30mに達するほどの侵食を受けた。

2004年以降の九份二山地すべり

- 2004年には、侵食された河道の保護工として、櫛状パイル工とその下流にはスリット型の堰堤が設置された。
- 2007年には、周囲から植生が侵入し安定化した様子が見られる。
- なお土砂ダムも含め地すべり地は、地震土砂災害を記録する記念公園になっている。

2004年8月22日



2007年8月25日



草嶺山の大規模崩壊

- 崩壊斜面の規模崩壊幅: 約2km, 斜面長: 約1.5km, 崩壊土量: 1.2億m³
- 地質は新第三紀泥岩・砂岩の互層
- 崩壊土砂が約5km流下し、清水溪を100~150mの厚さで閉塞。
- 過去に数回大規模な崩壊を繰り返した。1942年8月には豪雨で1.2億m³の崩壊が発生、清水溪を閉塞した。1951年に天然ダムは決壊し死者137人を伴った。
- 1979年8月には豪雨で500万m³が崩壊、河道閉塞したが、崩壊前避難で犠牲者なし。



2000年12月17日撮影

清水溪に堆積した崩落土砂と草嶺湖



水路完成後(2000年9月)

桃芝台風(2001年7月)後

- 崩壊地下流の堆積地では、地震約1年後の2000年9月に簡易水路が完成した。しかし、地震の後の2001年には、桃芝台風と納莉台風による豪雨により、大きく侵食された。
- 谷部が著しく侵食され堆積表面は30~40m下刻された様子がうかがえる。
- 2001年の桃芝台風と納莉台風による豪雨で、草嶺山の崩壊斜面に大きな変化はなかった。草嶺湖は、上流からの土砂流出により、2004年にはほぼすべてが埋められた。
- その後現在に至るまで、複数回の出水があったが、概ね落ち着いた様相で、大きな変動は認められていない。草嶺湖を埋塞した土砂は次第に侵食され、河床低下を生じているようである。

草嶺崩壊地斜面の推移



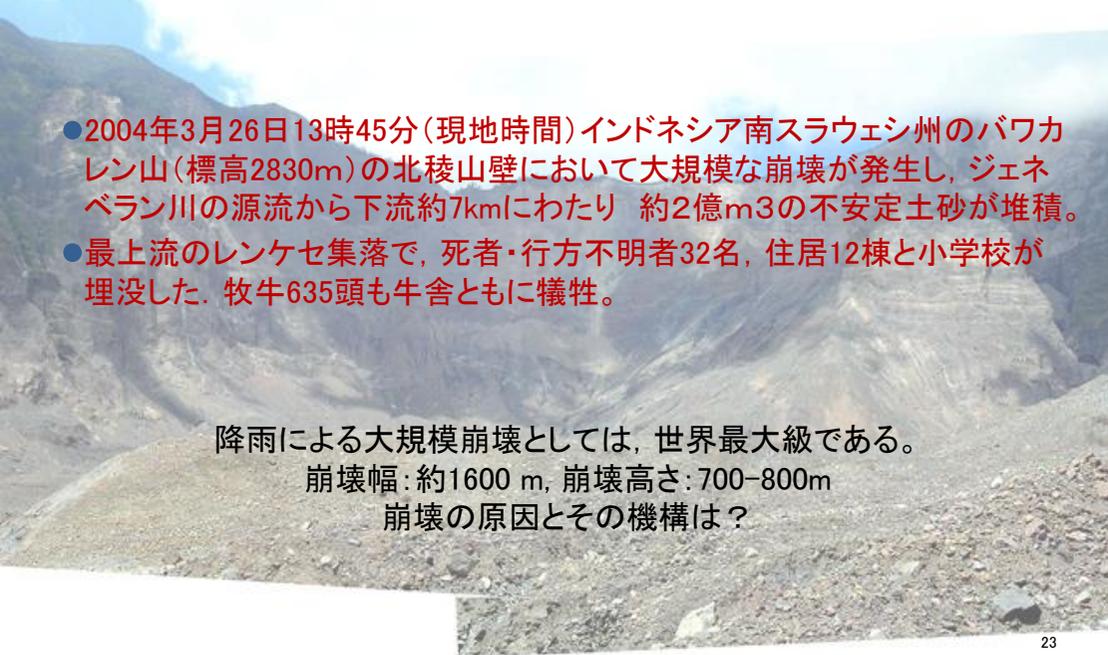
崩壊後約3箇月後(1999年12月15日)

2007年8月26日

2004年8月21日

2010年9月18日

インドネシア南スラウェシ州のバワカレン山で発生した巨大崩壊と土砂移動



- 2004年3月26日13時45分(現地時間)インドネシア南スラウェシ州のバワカレン山(標高2830m)の北稜山壁において大規模な崩壊が発生し、ジェネベラン川の源流から下流約7kmにわたり約2億m³の不安定土砂が堆積。
- 最上流のレンケセ集落で、死者・行方不明者32名、住居12棟と小学校が埋没した。牧牛635頭も牛舎とともに犠牲。

降雨による大規模崩壊としては、世界最大級である。
崩壊幅: 約1600 m, 崩壊高さ: 700-800m
崩壊の原因とその機構は?

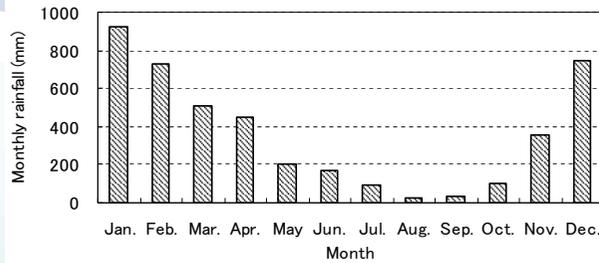
調査位置

- インドネシア南スラウェシ州、州都はマカッサル。
- 崩壊地から約40km下流には、ジェネベラン川の洪水調節、流域内の灌漑と上水道を目的としたビリビリダム(総貯水量約3.8億m³, 1999年完成)がある。
- ビリビリダムは日本の円借款により日本企業が主体となり建設された。当時、大規模な崩壊が起こるところに円借款による大規模ダムを造った責任はないか?一部のメディアから指摘があった。
- ビリビリダム下流約35kmに人口約120万人を擁する州都マカッサル市(旧名:ウジュン・パンダン市)がある。

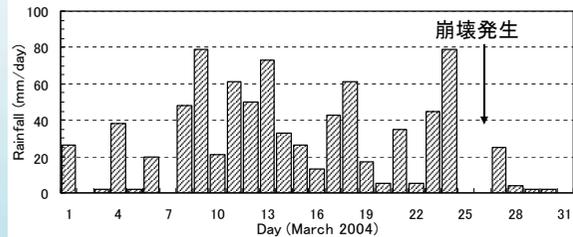


調査地の降雨状況

- 当該地は熱帯性気候で、6月から10月にかけては乾季となり、11月から5月までは雨季である。統計期間の年平均降雨量は4350mm。ジェネベラン川源流の侵食度は、静岡の2倍か？
- 2004年3月1日から崩壊前日までの累積降雨量は782mmを記録。3月平均値の1.5倍で、2月相当分。
- 発生当日26日には降雨量は記録されていない。

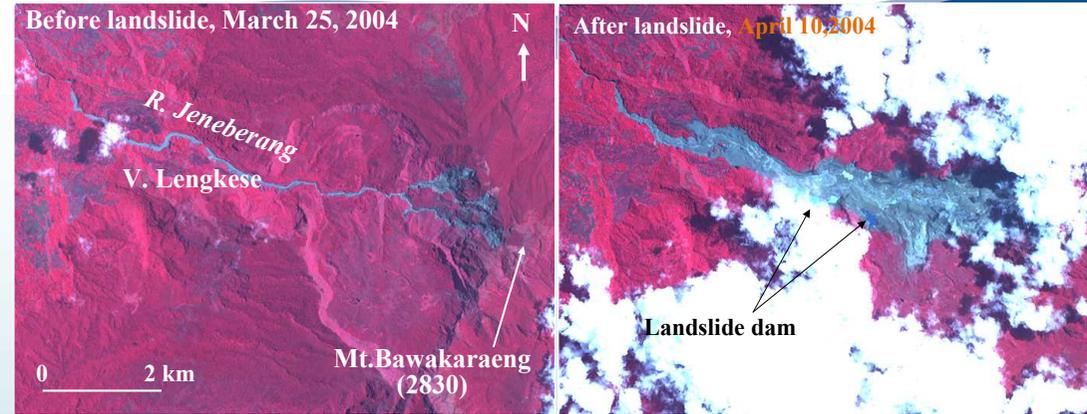


月別降雨量の分布 (1984~2003の20年間の月別平均値)



2004年3月の日雨量分布, Malino観測地

ASTER衛星画像による崩壊前後の対比



- バワカラエン山は、第四紀更新世に活動した火山。その西側には直径約5kmにおよぶカルデラ状の地形がみられる。カルデラ内部には、二つの平坦状地形があり、南側にある平坦地は直径約2km、北側は直径約1.5kmとやや小さい。カルデラの形成は、噴出の伴う結果ではなく、カルデラ壁の崩壊・侵食によるものとされる。
- 源流から減頭部にかけて植生(赤紫色)のない露岩した斜面があったことがわかる。
- 崩壊・堆積後の画像輝度の違いから、崩落土砂は一律に堆積したわけではなく、元地形の凹凸が反映されていること、また低地部分には幾つかの湛水池が生じたことなどがわかる。
- Jeneberang川は、Lengkese村下流で湾曲するが崩落土砂はここを乗り越えた。

崩壊土砂の分布域 (Google画像)

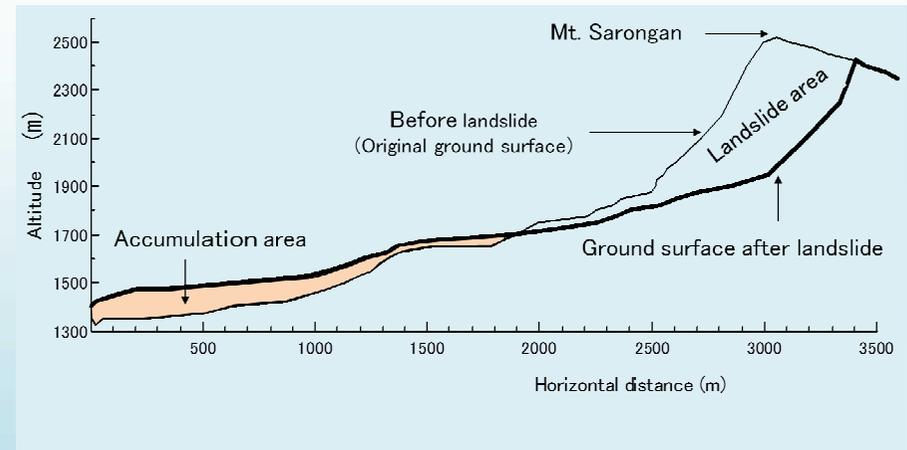
- 大規模崩壊地の頭部は旧山稜を含んでいる。崩壊地は、ジェネベラン川の源流部である。崩落土砂の堆積はジェネベラン川に沿って分布する。
- 地形の発達からみると、カルデラの拡大過程で、今後同心円状に崩壊が進むと考えられる



崩壊地と土砂堆積の様子 (Google画像, 2007年)

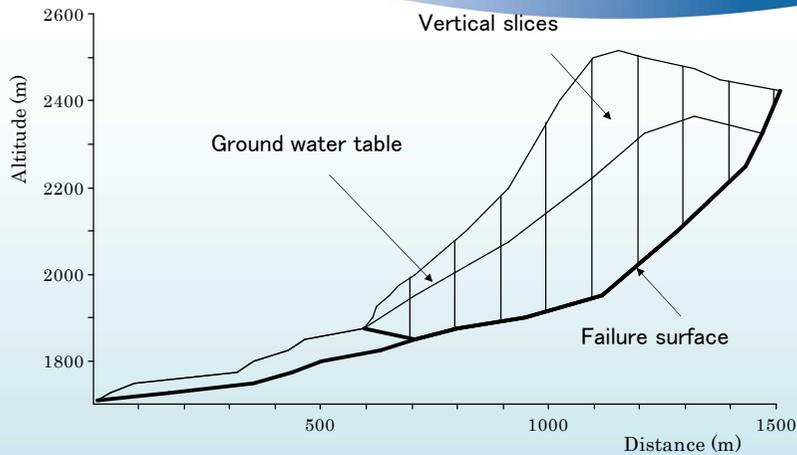
土砂移動域の縦断形状

- 崩壊深: 鉛直方向700m, 崩壊層厚400m
- 堆積深: 最大170m程度(カルデラ中央部)



土砂移動域の縦断形状対比

極限平衡式による安定度評価



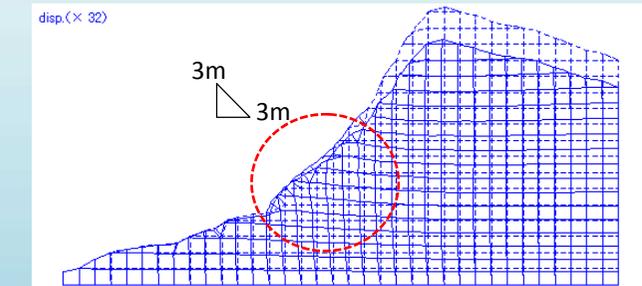
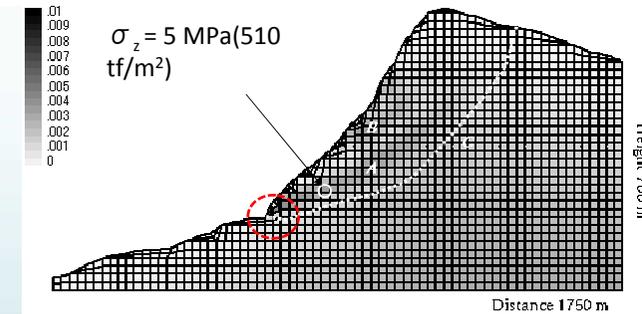
- 岩盤等級はCL級と判断し、 ϕ' を 35° 、 c' を 490kPa (50tf/m^2)、単位重量 17.6kN/m^3 (1.8tf/m^3)を使用。火成岩・火山岩では、 $c' = 294 \sim 1079\text{ kPa}$ (平均 490kPa)、 $\phi = 35 \sim 44^\circ$ (平均 40°)とされる((社)土木学会, 1999)
- 地下水を想定しない時、安全率=1.59, 上記の地下水分布を想定すると、安全率=1.0。
- 以上から地下水の関与がなければ崩壊しにくいと判断。

29

SSRFEMによる応力解析

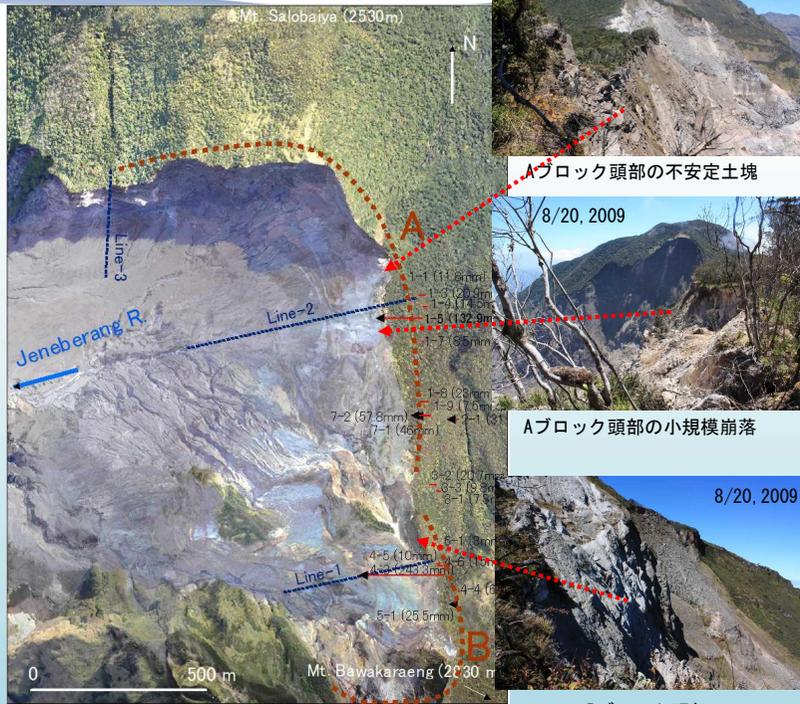
SSRFEMは安定解析法の一つで、FEMを用いたせん断強度低減法の呼び名である。これを応用すると、“最も危険なすべり面が求まる”、“局所破壊を取り扱える”などの利点がある。

- 最大せん断ひずみ分布位置(A, B)は、実際のすべり面位置(C)よりもやや浅い位置に弧状に分布している。しかし、(A)臨界すべり面の末端位置は、実際に崩壊を生じた末端部に一致している。
- 変位量分布は、全体的に鉛直方向の圧縮変位量が大きく、尾根部では約3mの沈下量を示す。崩壊末端部から内部に150~200mの位置で、水平変位量が上向きを示す。
- 斜面内部の地盤性状に関する情報が与えられれば、SSRFEM解析による臨界すべり面は、実際のすべり面の位置を特定することが可能と判断。



大規模崩落斜面のその後

- 2004年の2億 m^3 のカルデラ源頭部崩壊の後、2007年2月10日に源頭部Aで90万 m^3 崩落、また2009年1月27日に50万 m^3 崩落があった。
- 源頭部移動量観測によれば、移動量はAブロックで大きく、雨季で日降雨量が大きい時に大きくなる傾向を示す。
- 現状は、おそらく落ち着いていると思う(?)。



現地写真(2004年6月)



カルデラ下流から崩壊地を望む(2004年6月23日)



カルデラ右岸壁から流下跡を見る(2004年6月23日)



インドネシア陸軍のヘリ(2004年6月24日)



ジェネベラン川下流に到達した土砂(2004年6月24日)³²