

インドネシア、メラピ火山中腹部におけるガリ側壁の崩壊機構

静岡大学農学部 ○土屋 智

鹿児島大学農学部 下川悦郎・地頭菌隆

1. はじめに

インドネシア、ジャワ島中央部にあるメラピ火山では1984年6月に比較的規模の大きな火砕流が発生し、頂上（約2900m）から標高900m付近の南西斜面に広く堆積した。ここは、メラピ火山の南西麓を流下する代表的河川であるプチ川とブブン川の源流域でもあるため、火砕流堆積物は侵食され、数年にわたり大規模な土石流が発生し下流部での土砂災害を引き起こした。

本報告では、1992年8月と1993年12月に実施したガリの断面測量、土壌水分の変動測定結果、サンプル採取による堆積物の物理性・水分特性の測定結果等をもとに、ガリ側壁の崩壊機構を検討した。なお、この研究を遂行するにあたり平成4年度および5年度の科学技術庁振興調整費（砂防学会受託）の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

2. 現地調査結果

2. 1 ガリの形状 調査地は、メラピ火山南西斜面の標高1300～1400m付近である。ここでの崩落の主たる原因は、ガリ側壁の土壌水分の変化と洪水時に発生する側壁脚部の侵食にある。乾期では前者に起因するものがほとんどであるが、雨期には両者とも崩落を発生させる原因となり得る。

現地では、ガリ側壁の頂上部において三角測量の原理を応用した簡易測量を行い、ガリ形状を把握した。この測量結果によれば、調査対象としたガリの幅は80～100m、深さは40～50mにも達することがわかる（図-1）。

2. 2 土壌水分の測定 1993年の乾期（8月）と雨期（12月）にそれぞれ約10日間にわたり、調査対象としたガリ側壁の頂上付近で表層土壌水分の変化を観測した（図-2）。乾期（8月15日～23日）の測定結果によれば、50cm深では200cm以上、30cm深で180cm程度、10cm深では概ね100cm以下と地表から深くなるにつれ吸引圧は高い値を示している。ガリの側壁を観察しても地表部には植生の着くところもあり、また20cmほど掘るとさらさらの乾燥した火砕流堆積物が現れることからみて、この結果は納得できる。いずれの深さも顕著な日変動が記録されているが、これは最も吸引圧が小さくなる時刻が6時前後であることからみて、気温による大気中の湿度変化が影響したためであろう。

雨期（12月10日～22日）の測定結果は、地表から深くなるにつれ吸引圧は小さくなり、50cm深では20cm程度の小さな値を示すようになる。雨期ではほぼ毎日、少なくとも20mmほどの降雨量があるので、より地表に近い所ほど水分変動は大きくなるであろう。観測期間中に100mmを越す降雨は現れていないが、観測機器を設置する前日には時間雨量40mmを越す熱帯特有の豪雨が記録されている。

3. 降雨浸透解析

3. 1 土壌の水分特性 実際に土壌水分計などで測定できる深さは、深くても地表から1m前後であろう。表層崩壊といっても土層深2m程度のもも存在するから、現地測定が困難な深さまでを対象とする時、不飽和浸透流解析は有用な手法である。解析に用いる不飽和水分特性を図-3に示す。体積含水率

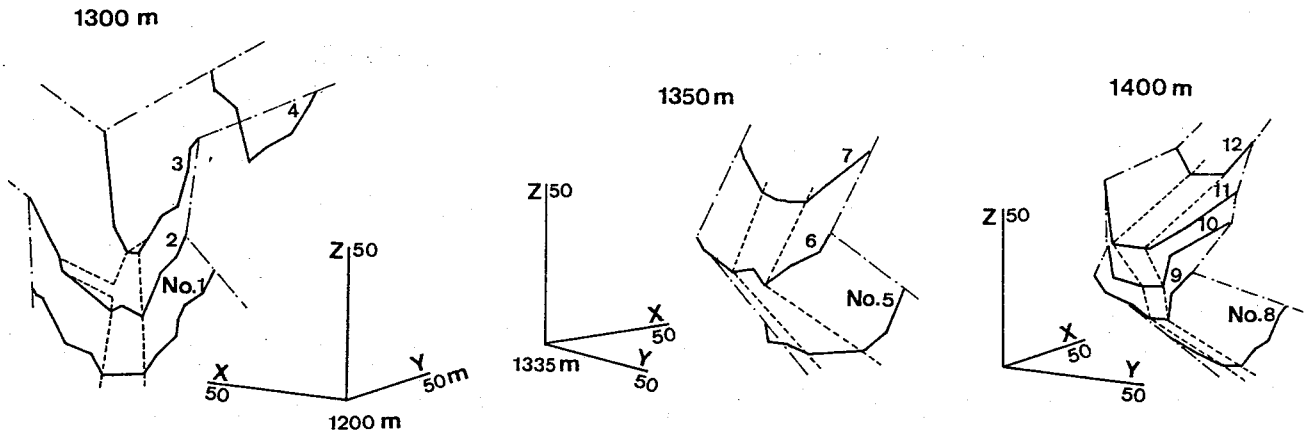


図-1 ガリ側壁の形状 (標高1300~1400m)

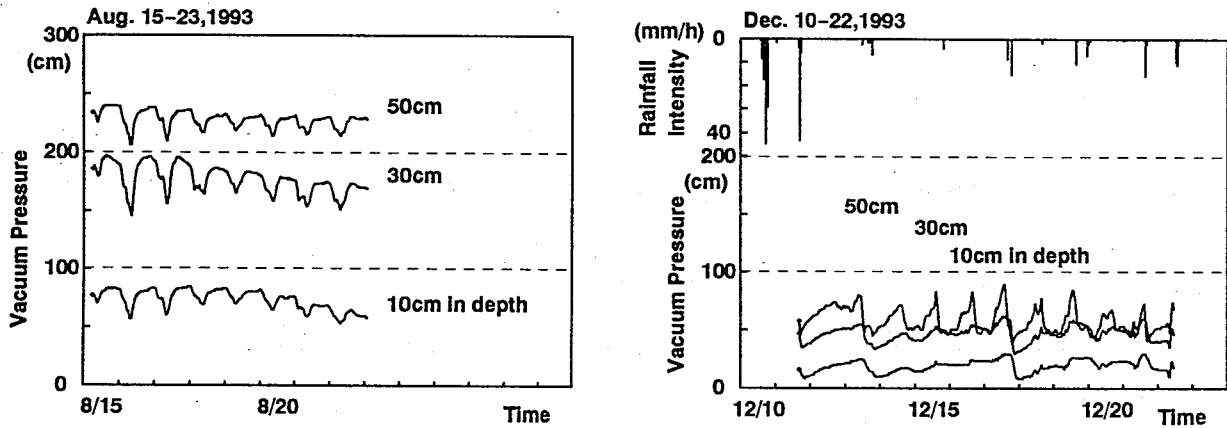


図-2 表層部の土壌水分の経時変化 (左: 1993, 8月 右: 1993, 12月)

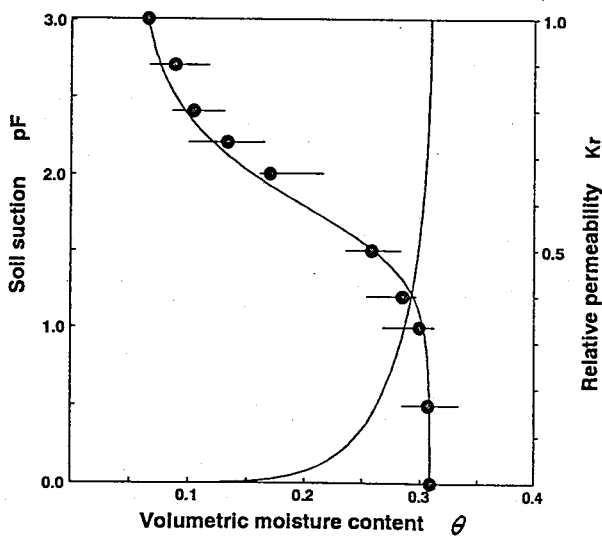


図-3 土壌水分特性曲線

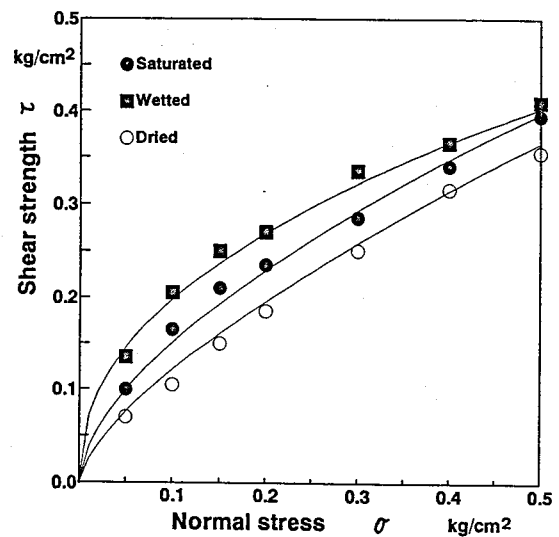


図-4 垂直応力とせん断強度

θ と吸引圧 ψ との関係式には、カーブフィッティングに矛盾がなく、定めたパラメータから不飽和透水係数 K と ψ の関係も推定できるGenuchten法を適用した。試料は、ガリ側壁の表面部で100ccサンプラーで数個採取したもので、土柱法と加圧板法とにより、測定結果に最も適合するようGenuchten法のパラメータを定めた。

3. 2降雨時の浸透到達深さ 12月10日には、連続で150mm、最大時間雨量45mmの降雨がG.Marou地点で記録されている。この時、ブブン川のGimbal観測地点では土砂流の発生を確認しており、ここより上流のガリ側壁でも崩落が発生した可能性は高い。この降雨を対象に不飽和浸透流解析を実施してガリ側壁部の土壌水分の変化を再現してみよう。ただし、解析対象深さは地表から2mとし、上部境界に降雨強度を流束値として与え、下端は圧力水頭が既知の境界とした。初期状態の圧力水頭は、図-2を参考に地表と最下端の ψ をそれぞれ80cm、20cmとし、区間内は線形内挿し与えた。

図-4に解析結果を示すが、降雨開始後4時間で地表が飽和に近い水分状態となり、その後1時間を経た5時間には、約60cm深まで浸潤線が到達しているのがわかる。降雨開始後6時間で浸潤線は約80cmまで至り、110cm深でも θ の値は27%と大きな値を示す。つまり、この時の豪雨により、ガリ側壁部では地表から80cm深の土層がほぼ飽和に近い状態を呈していたと判断される。なお、降雨が終了した5時間30分以降では、重力水の降下と蒸発散作用により30cm深までの区間で、体積含水率が減少する様子が現れている。

4. 安定解析

ガリ側壁部で採取した試料による一面せん断試験の結果によれば、低応力状態の垂直応力とせん断強度の関係は、非線形なべき乗式のほうがCoulomb式よりも妥当であることが示されている。ここでは、この関係式(図-5)を組み込んだ安定解析式を適用し、降雨時、乾燥時のガリ側面斜面の安定度を評価した。すなわち、①1993年8月時の乾燥状態、②1993年雨期の状態、③1993年12月10日の豪雨を対象に、円弧状の崩壊面を有するものと仮定し安定計算を行った。安定解析では、予め崩壊面を特定することはできないので、繰り返し試算を行い、最小安全率を求め、各状態での安定度を比較・対比した(図-6)。これによれば、ガリの右岸側、左岸側を問わず安全率は①の乾燥状態のケースが最も低く、②の湿潤時で最も高くなるのがわかる。また、③の12月10日の豪雨を考慮しても、安全率は②の湿潤状態と比べほとんど低下していない。これは、乾燥時と水浸時のせん断試験結果を比較すると前者のほうが発揮される強度が低いことによる。適度に水分を含んだ状態が、土粒子間のサクシオンが高くなるため、これが見かけ上せん断強度の発揮に影響した結果であろう。乾燥時には、土壌中の毛管がきれサクシオン作用せず、強度レベルは低い。

5. おわりに

ガリ側壁の崩壊は、雨期の豪雨時にも多発するであろうことを予想して、浸透流解析を行い斜面の安定度を評価してみたが、解析結果は乾燥時が最も不安定であることを示している。つまり、雨期では、洪水流下に伴って側壁脚部を侵食され斜面を不安定化することが主たる原因ではないかと想定される。また、一般にガリ溪床では下流ほど出水流量が大きくなるので、そこでは脚部侵食があり崩落を発生させるため、側壁勾配は上流部よりもさらに急傾斜を呈する。現地では、上流部の側壁の勾配および高さは下流に比べ低く、大規模な出水時を除き雨期での崩壊発生頻度は下流よりも小さいと思われる。

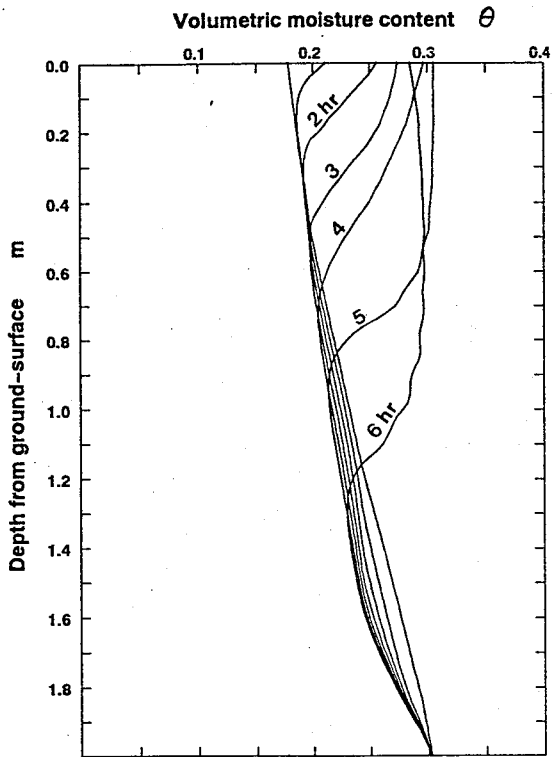


表-1 安定解析結果

測線		1993, 12/10日	1993, 雨期	1993, 乾期
No.1	R	1.275	1.374	0.975
	L	1.491	1.533	1.142
No.7	R	1.296	1.326	0.949
	L	1.734	1.751	1.526
No.9	R	1.835	1.904	1.487
	L	1.155	1.248	0.962

R : 右岸壁, L : 左岸壁

図-5 不飽和浸透流解析 (1993, 12/10降雨を入力)

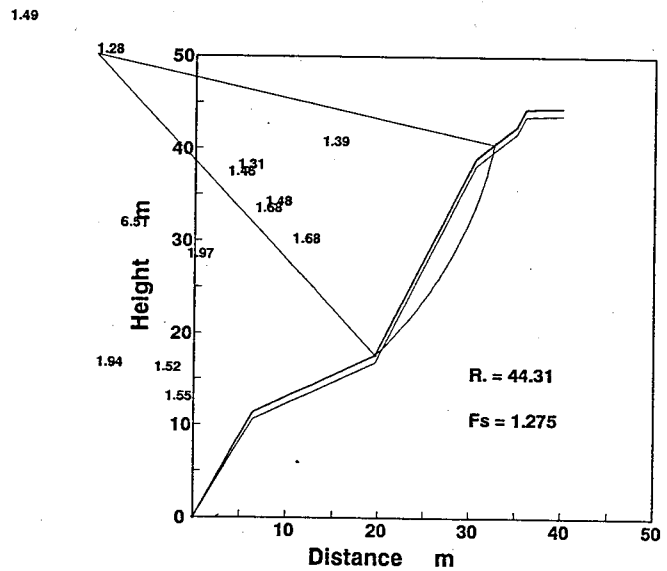
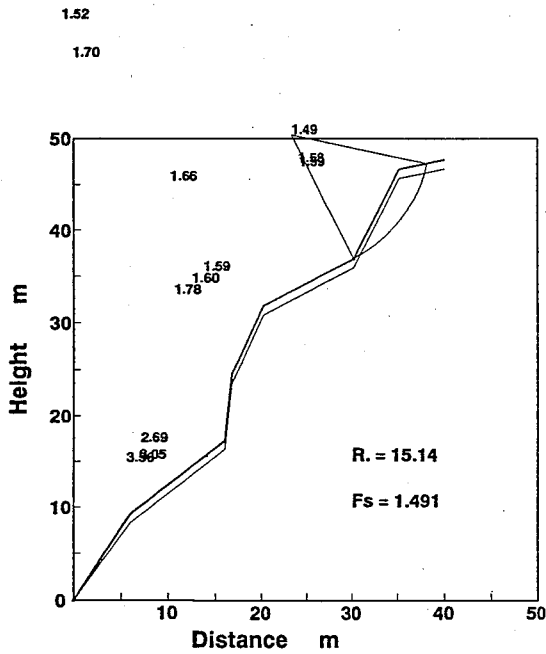


図-6 降雨時の最小安全率とその時の円弧 (左: No.1測線右側壁, 右: 同左壁)