

地形・地質情報の利用による地震・豪雨時の土砂流動予測に関する研究

名古屋大学 助教 野々山栄人
中部大学 助教 余川弘至

概要：

火山地域における地盤災害の被害軽減に向けて、火山砕屑物で覆われた斜面の崩壊予測を行うことを目的とした。そこで、焼岳白水谷斜面を研究対象とし、現地調査を実施し、対象斜面の地形特性を把握した。調査の際に現地から試料を採取し、その試料を用いて、火山砕屑物の物理・力学特性の把握を実施した。得られた土質試験結果をもとに、火山砕屑物の材料定数を決定し、デジタル写真測量より得られた地形断面を用いて、粒子法による変形解析を実施した。得られた知見として、採取した火山砕屑物は、物理特性から判断すると砂礫材料に近い性質であり、他の火山性堆積物に比べて粗粒分が多い土であった。原位置での乾燥密度は最小乾燥密度より小さく、緩やかな堆積状態であることがわかった。デジタル写真測量により、斜面の三次元形状を作成できる可能性を示した。その斜面形状をもとに実施した粒子法による斜面の変形解析では、勾配変化点から斜面内に向けてせん断ひずみが蓄積するのを確認した。

キーワード：火山砕屑物、地形解析、土質試験、デジタル写真測量、粒子法、変形解析

1. はじめに

我国は、環太平洋造山帯に属しているため活火山が散在しており、国土の 1/4 は火山地域で占められている。この火山地域では、火山噴火以外にも地震や異常気象の影響によって多発する豪雨を誘因とした土砂災害が発生し、甚大な被害が発生している。2013 年に伊豆大島で発生した土砂流動¹⁾はその一例である。この地域の地質特性として、地表面は火山噴火の際に噴出される火山岩および火山灰（以下、火山砕屑物と呼ぶ）が堆積しており、この火山砕屑物は水を含むと脆弱となる特性を有していることが知られている。

本研究では、火山地域における地盤災害の被害軽減に向けて、火山砕屑物で覆われた斜面の崩壊予測を行うことを目的としている。そこで、伊豆大島と同様な土石流災害が過去に発生²⁾している焼岳白水谷斜面（岐阜・長野県境）を研究対象とした。まず、現地調査を実施し、その時採取した火山砕屑物を用いて、各種土質試験を実施する。得られた土質試験結果をもとに、火山砕屑物の材料定数を決定する。また、現地調査の際に、デジタル写真測量を実施し、対象斜面の三次元形状を取得し、現地踏査結果を踏まえて解析断面を決定する。最後に、これらの情報を用いて、土の骨格構造の働きを考慮するこ

とができる弾塑性構成モデル³⁾を搭載し、連続体近似に基づいて大変形領域までの計算を可能とする粒子法⁴⁾を用いて、斜面の変形解析を実施する。なお、数値解析手法の詳細については、参考文献に譲る。

2. 焼岳の現地調査

現地調査は、火山砕屑物堆積区域の河谷侵食面について踏査と攪乱・未攪乱試料の採取を実施した。踏査では、地盤の材質、植生、勾配、硬度を調査し、攪乱・未攪乱試料の採取が可能な場所の選定を行った。試料採取では、自然状態での詳細な物性値を把握するために未攪乱試料の採取が必要になる。今回対象とした試料は、吸水性に富み脆弱化する材料であり、地層形成の特徴として細～粗粒の材料が混在するため、ブロックでの試料採取が困難であった。よって、原位置では比較的細粒成分が多い箇所（土層基質部）のカッターリングの押し抜きによる試料採取を実施した。また、試料採取箇所、試料採取場所付近の上流側（火山礫および火山礫に挟まれた箇所）および下流側（崩壊跡地）の谷壁を構成する各部層にて土壌硬度計による貫入抵抗の測定を行った。

表-1 に硬度計貫入による貫入抵抗の計測結果を示し、図-1 に現地調査の結果をまとめた。表-1 から上流側で計

測された硬質地盤では火山礫への貫入と火山礫同士に挟まれた箇所との2箇所を計測した。その結果、火山礫は強度が高いが、火山礫に挟まれた箇所では硬度指数 20mm と試料採取箇所と変わりが無い数値を示した。このことからこの斜面は構成する粒度特性によって支持強度が著しく異なり、強度が低い箇所は支持強度および細粒成分が多く、豪雨による浸食を受けやすく崩壊もしやすい。そのため、この斜面は、万が一この箇所が豪雨によって崩壊を起こした場合に、寺勾配の構造をしているため、その崩壊箇所になだれ込むように火山礫も崩壊を起こし、その結果、斜面崩壊が起きる可能性がある。また土壌硬度計では計測される硬度指数 28~29mm を硬盤と規定していることを考えると、調査対象とした斜面は、硬盤とは言えず斜面全体が不安定かつ崩壊しやすい斜面と考えられる。

一方、試料採取箇所および崩壊跡地(下流側)では、火山礫はなく強度が低い結果であった。斜面の表面は粒径が小さい土砂が堆積していた。火砕流は、自然落下であることと、火山活動の低下に伴い後発の火砕流が細粒化するものと考えられる。

図-1 に示すように地層構成については、3 層からなる地盤であった。上流側の下層に古期火砕流が堆積し、それを覆うように新期火砕流が堆積しており、下流に向かうにつれて、徐々に細粒化していることがわかった。

表-1 土壌硬度計による貫入抵抗の測定結果

火山礫 (上流側)	火山礫に挟まれた箇所	試料採取箇所								崩壊跡地 (下流側)
		1	2	3	4	5	6	7	8	
指数 (mm)	46	20	17	20	17		8		11	9
強度 (kPa)	∞	616.8	396.2	616.8	396.2		96.1		160.8	115.7

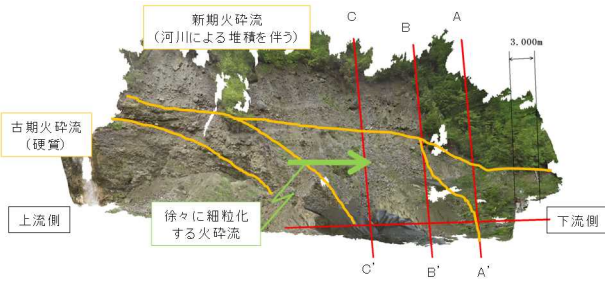


図-1 現地調査結果

3. 火山砕屑物の物理・力学特性の把握

(1) 火山砕屑物の物理特性

火山砕屑物の物理特性を把握するために、土粒子密度試験 (JIS A 1202)、土の最小・最大密度試験 (JIS A 1224)、粒度試験 (JIS A 1204) を実施した。自然含水比および乾

燥密度については、試料採取の際に未攪乱で採取した試料を用いて、標準圧密試験時にカッターリングから圧密リングに移す際に質量を計測することで求めた。

表-2 に本研究で採取した試料、伊豆大島で採取された試料⁶⁾(以下、伊豆大島砂と呼ぶ)、および火山砕屑物の一次、二次堆積物である富士火山灰⁸⁾の各種物理試験結果を示す。図-2 には、3 試料の粒度試験の結果を示す。

物理試験の結果から、今回採取した試料の粒度特性に着目すると、富士火山灰、伊豆大島砂の中間に位置する物性値を示しており、土粒子密度および乾燥密度は、伊豆大島砂に比べ低い値を示した。これは、礫分の量が伊豆大島砂より多いことや海洋性火山と内陸性火山の違いによる土を構成する鉱物の差が影響しているものと考えられる。また、今回採取した試料は、伊豆大島砂と同様に相対密度が負の値を示した。これは、最小乾燥密度より原位置の乾燥密度が低いことを示しており、原位置での地盤は間隙が大きいことが考えられ、室内試験での再現が困難であるほど原位置での土が構造を有しており、緩やかに堆積していることを示している。攪乱試料を用いて力学試験を実施する際は、供試体の作製方法を検討する必要があることがわかった。

表-2 物理試験結果

	採取試料	火山性堆積物		
		伊豆大島砂 ^{6,7)}	富士火山灰 ⁸⁾	
自然含水比	$w_n(\%)$	10.1	16.6	54~61
土粒子の密度	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.64	2.76	2.6~2.7
乾燥密度	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	1.27	1.39	0.6~0.7
最大乾燥密度	$\rho_{d\max}(\text{g/cm}^3)$	1.79	1.91	
最小乾燥密度	$\rho_{d\min}(\text{g/cm}^3)$	1.35	1.39	
相対密度	$D_r(\%)$	-29.2	-24.1	
礫分	(%)	28.7	5.0	44.8
砂分	(%)	56.5	80.0	39.9
粒 細粒分	(%)	14.8	15.0	15.2
度 最大粒径	(mm)	19.0	2.0	25.4
特 平均粒径	$D_{50}(\text{mm})$	0.43	0.25	1.50
性 均等係数	U_c	16.5	12.2	63.0
曲率係数	U'_c	1.40	1.96	2.50
細粒分含有率	$F_c(\%)$	14.8	15.0	9~15
工学的分類	S-F	SF	GF	

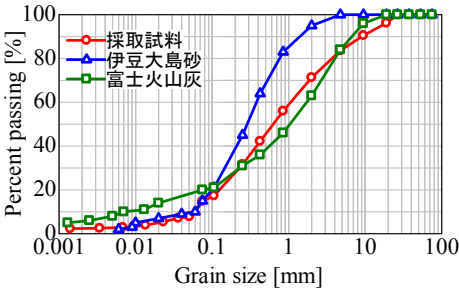


図-2 粒度試験の結果

(2) 火山砕屑物の力学特性

火山砕屑物の力学特性を把握するために、標準圧密試

験 (JIS A1217), 突き固めによる土の締固め試験 (JIS A 1210), 三軸圧縮試験を実施した。

標準圧密試験は, 未攪乱状態の試料を用いて試験を実施した。図-6 に標準圧密試験の結果を示す。図-5 より, 土の圧密特性である圧縮指数 C_c は 0.18, 膨潤指数 C_s は 0.012 を示した。一般的な粘土の圧縮指数 C_c は $10^0 \sim 10^{-1}$ オーダーで, 砂質土の圧縮指数 C_c は $10^{-2} \sim 10^{-3}$ オーダーであることから, 砂分を 50% 以上も含むにもかかわらず, 比較的圧縮性の高い材料であることがわかった。つまり, 圧密降伏応力を超えるような応力を受けたとき, この材料は, 粘土と同等程度の大きな体積変化を生じてしまうことを示している。

締固め試験は, A-b 法(乾燥法・非繰返し)で実施した。図-7 に締固め試験の結果を示す。高含水比状態(15~18%)で作製した供試体では, 試験直後の供試体上部に水が溜まった。これは, 供試体が砂質土と同様の単粒構造となり, 突き固めの振動によって水が供試体上部に上昇し, 土中の粒子と水が分離したことが考えられる。低含水比に調整した供試体では, 含水比 0~9% の間で乾燥密度が下がっていることがわかった。このことから, 緩い密度の供試体を作製する際は, 絶乾状態よりも多少湿潤させることで, 三軸圧縮試験に利用するための再構成試料の作製が可能と考えられる。

三軸圧縮試験は, 4.75mm 以下に粒度調整したせん頭粒度試料を用いた。試験は相対密度の異なる 3 ケースを実施し, 拘束圧は 98.1, 294.3kPa とした。各ケースの試験条件を表-3 に示す。Case2 は, 未攪乱試料と同様に相対密度がマイナスになるケースであり, Case1 および Case3 は, 緩詰め状態を想定したケースである。実験で用いる供試体は全て直径 $\phi=50\text{mm}$, 高さ $h=100\text{mm}$ とし, 負圧法を用い, Case1 および Case3 は乾燥堆積 (DD ; Dry Deposition) 法, Case2 は湿潤堆積 (MP ; Moist Placement) 法で作製した。供試体を試験機にセット後, 通水を十分な時間行い, 背圧を上昇させたのに, 等方圧密を行った。その後, 3 ケースとも, 排水量~時間関係から圧密終了判定後に非排水単調せん断試験(CUbar 試験)を実施した。

図-5 に三軸圧縮試験の結果 ((a)軸差応力~せん断ひずみ関係, (b)有効応力経路) を示す。(a)では, 明瞭なピークがみられず, いずれのケースについても単調増加した。また, (b)についても, 有効拘束圧によらず, 平均有効応力が一度減少した後, 平均有効応力は増加に転じ, それに伴って軸差応力も増加する過圧密土のような挙動がみられた。供試体の状態によらず, 有効拘束圧が低いケースでは, 高いケースに比べて, 極端に強度が弱い結果となった。このから, 相対密度が負になるような緩い状態であっても, 十分な圧力が作用していれば, 斜面は壊れず, 一方, 斜面表層ではより崩れやすいことを示唆している。

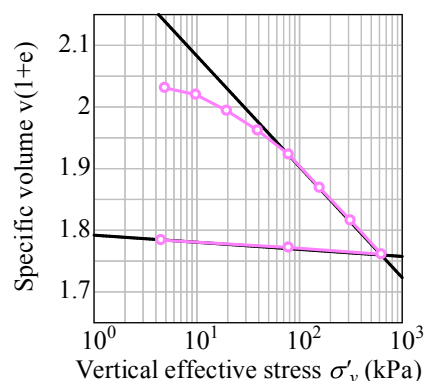


図-3 標準圧密試験の結果

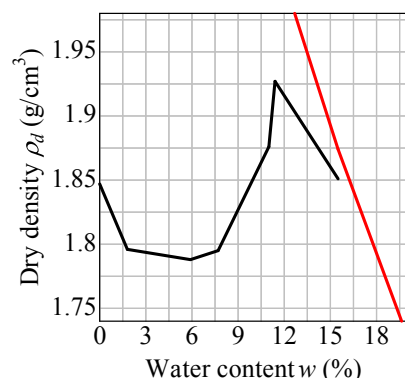


図-4 締固め試験の結果

表-3 三軸圧縮試験の試験条件

ケース	Case1	Case2	Case3
拘束圧 [kPa]	98.1	294.3	
相対密度 [%]	10.4	-8.9	30.9

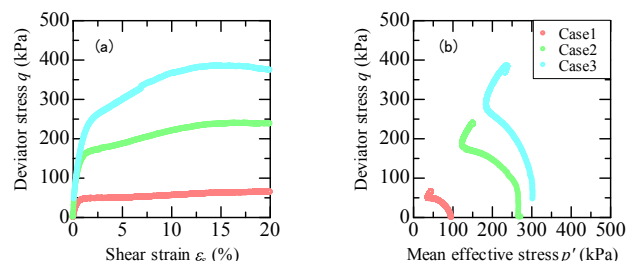


図-5 非排水三軸圧縮試験の結果

4. 粒子法による火山砕屑物斜面の変形解析

(1) 火山砕屑物の材料定数について

土の骨格構造概念³⁾に基づいて, 焼岳白水谷斜面に堆積した火山砕屑物の力学挙動を把握し, その材料定数を決定する。図-6, 7 に図-3, 5 で示した火山砕屑物を用いて実施した非排水三軸試験結果, 標準圧密試験結果および弾塑性構成モデルによる再現結果を併せて示す。なお,

図-6 は、(a)軸差応力～せん断ひずみ関係、(b)有効応力経路、(c)、(d)せん断時の過圧密と構造の推移である。また、図-6 では、太線が実験結果、細線が解析結果であり、図-7 では、プロットが実験結果、実線が解析結果である。

図-6、7 より、解析結果についても、有効応力経路に着目すると、平均有効応力が一度減少した後、平均有効応力は増加に転じ、それに伴って軸差応力も限界状態線に沿って増加する過圧密土のような挙動が見られ、実験結果を概ね再現できている。表-4、表-5 に再現により得られた初期値と材料定数を示す。今回採取した火山碎屑物は、初期過圧密比を有していることがわかる。

表-5 材料定数

パラメータ	値
圧縮指数	0.088
膨潤指数	0.010
限界状態定数	1.50
NCL の切片	1.92
ポアソン比	0.3
正規圧密土化指数	0.25
構造劣化指数	4.0
構造劣化指数	0.7
回転硬化指数	0.0
回転硬化限界定数	0.0

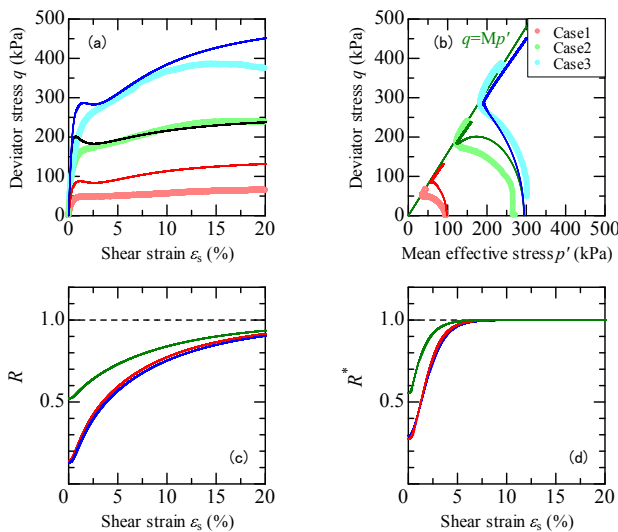


図-6 非排水三軸試験の再現

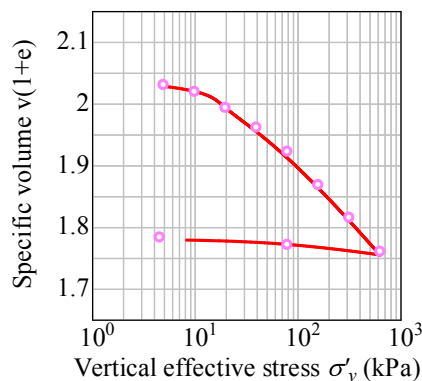


図-7 標準圧密試験の再現

表-4 初期値

	拘束圧	比体積	構造の程度	過圧密比	鉛直応力
Case1	98.1kPa	1.91	5.0	76.3	9.81
Case2	294.3kPa	2.00	25.0	120.4	9.81
Case3		1.81	4.5	247.7	9.81
標準圧密試験	-	2.03	2.0	14.5	4.9

(2) 解析対象断面について

解析断面の取得には、現地で撮影した写真を用いてデジタル写真測量を実施し、斜面の三次元形状を作成した。得られた三次元形状から、CAD ツールを介して解析断面を作成した(図-1)。なお、図-1 に示すように、斜面上部には植生があることが確認できる。写真をもとに三次元形状を取得するため、斜面上部の植生部分の影響で、正確な斜面形状を捕捉することができなかった。そこで、現地調査の結果を踏まえて、図-8 のように解析断面(断面 A-A')を決定した。

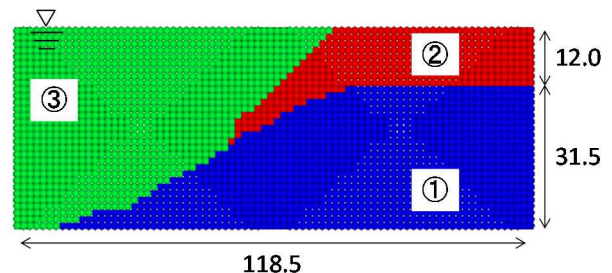


図-8 解析モデル (A-A' 断面) (単位 : m)

(3) 解析条件について

材料定数について、試料採取層(領域①)は、(1)で得られた材料定数を採用する。試料採取層を覆う新期火砕流層(領域②)は、植生に覆われていることに加えて、浸食が進んでいることや樹根の影響による見かけの粘着力を考慮して、簡単のため試料採取層(領域①)と同様の材料定数とした。また、試料採取の下位に位置する層については、礫分の含有量が多く、上流側では直立した壁面を有していたことから、変形し難いと考え、解析上では変形しない壁として取り扱った。斜面をモデル化するに当たり、本研究では、図-8 に示すように、まず成層地盤を作製した。作製した地盤は、深さ方向に均質な初期構造および初期比体積を有する飽和地盤とした。初期過圧密比については、初期構造および初期比体積の値か

ら算出した(表-6). 初期応力については、土被り圧に対応する等方応力を与えた。地盤作製後、図中の掘削領域(領域③)を掘削して、(2)で決定した斜面の断面形状を模擬した。掘削方法については、該当の計算点を瞬間的に取り除き、斜面表面に作用している応力を外力として作用させ、除荷を模擬している。また、降雨履歴については、降雨を直接モデル化するのではなく、危険側を想定して、完全飽和した斜面と仮定して計算を実施した。地盤の透水係数は、計算の安定を考慮して、10cm/sec と設定した。

表-6 初期値

	比体積	構造の程度	過圧密比
①・②	1.91	5.0	5.7

(4) 解析結果について

図-9 に得られた法肩の沈下量の時刻歴、図-10 に得られた地盤中の過圧密 R および構造 R^* の推移、図-11 に得られたせん断ひずみの蓄積量分布、図-12 に得られた過圧密分布、図-13 に得られた構造の分布をそれぞれ示す。

図-9 に示すように、斜面上端部の沈下量に着目すると、掘削直後の状態から、沈下するものの、斜面は大変形、崩壊することなく、時間の経過とともに収束する傾向にあることが確認できる。図-11 および図-12 に示すように、斜面中腹の表層の勾配変化点から斜面内部にかけて、せん断ひずみの蓄積およびせん断ひずみ蓄積部分の過圧密が解消しつつあることが確認できる。しかしながら、危険側を想定した飽和斜面にもかかわらず、火山碎屑物斜面の崩壊挙動にみられる表層崩壊やその後の後退性崩壊の再現には至らなかった。この原因として、図-10 および図-12、図-13 に示すように、高位構造を有していた斜面が、掘削後に構造は徐々に喪失する ($R^* \rightarrow 1$) が、斜面全体として過圧密が完全に解消 ($R \rightarrow 1$) に至っていないことが考えられる。

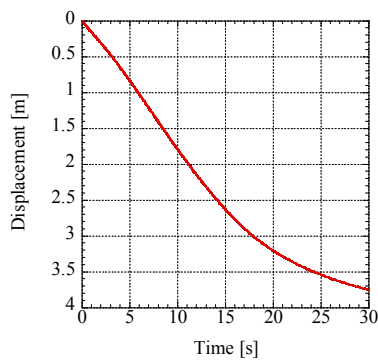


図-9 斜面上端部の沈下量

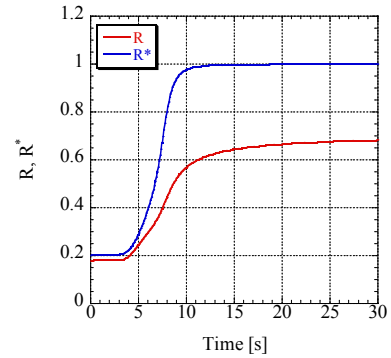


図-10 地盤中の過圧密と構造の推移

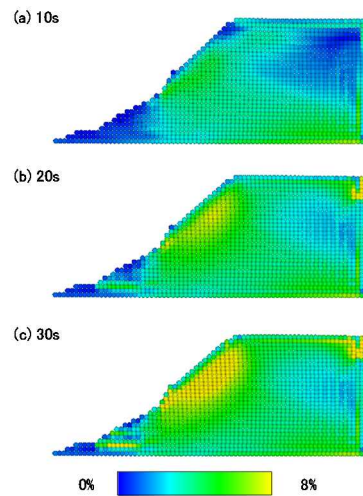


図-11 最大せん断ひずみ分布

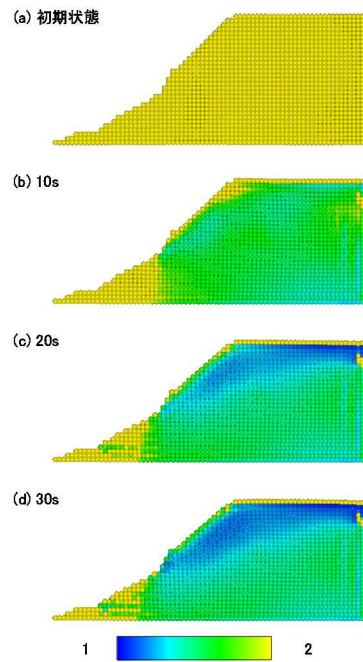


図-12 過圧密の程度

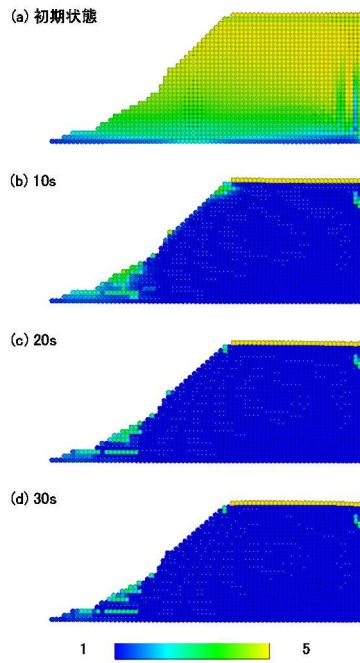


図-13 構造の程度の程度

4. 結論

本研究では、火山砕屑物斜面の崩壊予測のために、岐阜・長野県境に位置している焼岳の白水谷斜面を研究対象として研究を進めた。現地調査を実施し、対象斜面の地形を把握し、現地で採取した試料を用いて土質試験を実施し、火山砕屑物の材料定数を決定した。また、デジタル写真測量の結果ならびに現地踏査結果に基づいて解析断面を決定した。これらの情報を解析の入力値として用いて粒子法による斜面の変形解析を実施した。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

焼岳白水谷斜面の地層構成は、3層からなる地盤であった。上流側の下層に古期火砕流が堆積し、それを覆うように新期火砕流が堆積しており、下流に向かうにつれて、徐々に細粒化していることがわかった。

採取した火山砕屑物は、物理特性から判断すると砂礫材料に近い性質であり、他の火山性堆積物に比べて粗粒分が多い。原位置での乾燥密度は最小密度試験で得られた最小乾燥密度より小さく、室内試験で再現が困難であるほど緩やかな堆積状態であることがわかった。また、材料特性として圧縮性が大きく、せん断性は砂礫材料と同様な力学特性を示していることがわかった。

粒子法による火山砕屑物斜面の変形解析結果から、骨格構造概念に基づいて実施した土質試験結果の再現により、採取試料の材料定数およびその初期値を決めることができた。また、現地で撮影した写真を用いたデジタル写真測量により、斜面の三次元形状を作成できる可能性を示した。その斜面形状をもとに実施した粒子法による

数値解析では、斜面内にせん断ひずみが蓄積するのを確認した。火山砕屑物斜面の崩壊形態である斜面の表層崩壊とその後の後退性崩壊といった崩壊形態を再現するには至らなかった。

今後は数値解析において、材料定数や解析条件、さらには取得した解析断面が崩壊後のある程度安定している地盤にあったことなどを見直して、再度検討してゆきたい。加えて、地震作用時や降雨のモデル化を検討して、火山地域における地盤災害の被害の軽減に寄与できるよう研究をさらに発展させてゆく。

謝辞

本研究は、一般財団法人国土技術研究センターの研究開発助成（平成26年度）を受けて実施したものです。本研究で用いた精密航空レーザー測量の計測データについては、国土交通省神通川水系砂防工事事務所ならびに岐阜県基盤整備部に提供して頂いた。また、名古屋大学中野正樹教授、岐阜大学沢田和秀教授、中部大学浅野憲雄博士には、本研究に関して有益な助言を頂いた。中部大学武藤大和氏、山下航平氏ならびに名古屋大学浜島圭佑氏には、本研究で実施した実験および地形解析に協力して頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会：平成26年度重点研究課題 火山地域における土砂災害発生メカニズムと社会的対応に関する研究集会資料, 2014.
- 2) 国土交通省北陸地方整備局, 神通川流域の災害年表: <http://www.hrr.mlit.go.jp/jintsu/outline/saigai/saigai.html>, (アクセス日: 2014年12月23日).
- 3) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002.
- 4) Nonoyama, H., Numerical application of SPH method for deformation, failure and flow problems of geomaterials, Ph.D. dissertation, Gifu University, 2011.
- 5) 野々山栄人, 中野正樹, 野田利弘: SPH法による地盤の掘削解析, 土木学会論文集 A2, Vol.69, No.2, pp.I_341-I_350, 2013.
- 6) 横内ら: 台風26号による伊豆大島土砂災害の表層崩壊機構の検討, 第49回地盤工学研究発表, No.912, pp.1823-1824, 2014.
- 7) 増田ら: 火山性堆積物の物理特性および力学特性に関する研究, 第49回地盤工学研究発表, No.215, pp.429-430, 2014.
- 8) 西岡ら: 富士周辺における「スコリア」の地盤工学的特性, 地盤ジャーナル, Vol.9, No.3, pp.397-415, 2014.