

桜島火山灰砂の物理的諸性質

春山元寿・下川悦郎・井上利昭*

Geotechnical Properties of the Volcanic Ash and Sand in SAKURAJIMA Volcano

Motohisa HARUYAMA, Etsuro SHIMOKAWA, and Toshiaki INOUE
(Laboratory of Erosion Control)

1. ま え が き

爆発的活動によってよく知られている桜島火山は、最近とくに活発となり、溶岩流出の危険性すら議論されている。また、従来の爆発に伴う大量の降灰砂や噴石が、桜島周辺の住民や農作物に与える被害は年々相当なものになっている。桜島の地形をみても、侵食が盛んで、さらに黒神町地獄河原にみられるように降灰砂の流出による荒廃状況はすさまじいものである。さらに、頻発する微小地震によって桜島山体の表層は、かなり物理的な影響を受け、弱化していると考えられる。

桜島の災害は、従来おもに爆発に伴う降灰砂や噴石自体によるものが問題とされてきたが、最近、降灰砂および桜島山体を構成している岩屑に基因する降雨時の土砂害が続発している。一方、山麓部には学校、国道などをはじめとする公共施設や観光施設はもとより、多数の密集家屋を有する集落がある。昭和49年には6月と8月に発生した土石流によって8名もの尊い人命が失なわれ、また社会的・経済的にも多大な損害をこうむっている。膨大な生産土砂量に加えて、人家密集地であること、自然・社会環境上の制約がきびしいことなどにより、高度の防災対策が要求されている。

桜島の火山活動に関連して予想される災害の加害要因を列举すれば、次のようになるであろう。

風塵

土砂害 { 山地侵食
山くずれ
土石流
流出土砂

地震

(津波)

火山爆発および噴煙 { 降灰砂
噴石
溶岩流出
火砕流
大火・山火事
有害ガス
環境汚染

* 昭和50年3月林学科卒

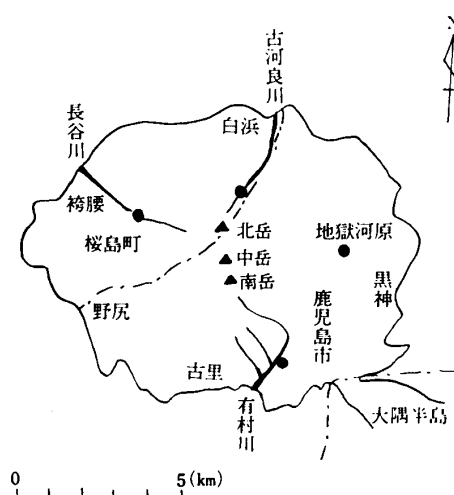
被害要因は、地域住民とその生活環境、農作物、森林、その他諸々の施設などである。

本報においては土砂害にかかわる問題を取扱かう。降灰砂の流出、土石流発生の機構、あるいは斜面の問題などを解明するには、降灰や土砂の性質を知ることが重要な問題となってくる。ここに、土砂害に関する基礎資料を得ることを目的として、降灰砂の物理的性質を土質力学的観点から解明した結果を報告する。降灰砂のうち微細なものを火山灰、粗粒子を多く含むものを火山砂と呼ぶことにする。また、2, 3の性質について溪床滞積土の試験もあわせて行なっている。

おわりに、現地踏査などにおいては鹿児島県土木部砂防課ならびに鹿児島土木事務所の関係職員各位の協力を受けた。ここに併せて謝意を表する。

2. 試 料

試験に用いた試料を表—1に、試料採取地を図—1に示す。火山灰は爆発・噴煙に伴う降灰で、噴



図—1 試料採取地 (●印)

表—1 試 料

試 料	採 取 地
火 山 灰	有 村 川 周 辺
火 山 砂	"
溪 床 滞 積 土	地 獄 河 原
"	古 河 良 川
"	長 谷 川

出時に降ってきたものをそのまま集めたものであり、降雨などの影響を全然受けていない。火山砂は粗い砂粒子を主とし、噴石などを含む。火山灰、火山砂ともに有村川周辺で採取した。溪床滞積土は、地獄河原、長谷川、および古河良川で採取した。

3. 試験の概要

表—2 試験の種類と試料

試験の種類	用 い た 試 料
土粒子の比重試験	火山灰, 火山砂, 溪床滞積土 (地獄河原, 古河良川, 長谷川)
粒度試験	同 上
現場密度など	溪床滞積土 (地獄河原, 古河良川)
透水試験	火山灰, 火山砂
不飽和透水試験	同 上
排水・乾燥試験	同 上
スレーキング試験	火山灰
吸水膨張・収縮試験	火山灰
三軸圧縮試験	火山灰, 火山砂
最小密度の測定	火山灰

行なった試験と試料の関係を表一2に示す。試験方法については各項において述べる。

4. 物理的諸性質

4.1 土粒子の比重

土粒子の比重とは、土粒子の単位体積重量とある温度における水の単位体積重量の比である。参考のために各種の土砂、岩石の比重の代表値をあげると表一3のとおりである。ここに、桜島の火山灰、火山砂、および溪床滞積土の土粒子の比重を示す。

表一3 各種の土砂、岩石の粒子の比重の代表的値

土砂、岩石名	比 重
代表的なシラス	2.30～2.50
風化したシラス	2.50～2.60
豊浦標準砂	約2.65
花こう岩	2.60～2.75
石英安山岩	2.19～2.63
輝石安山岩	2.31～2.78
複輝石安山岩	2.30～2.72
玄武岩	約2.72
石灰岩	2.66～2.78
凝灰岩	2.32～2.51
硬砂岩	2.61～2.79

表一4 土粒子の比重

試料（採取地）	土粒子の比重
1. 火山灰（有村川）	2.663
2. 火山砂（有村川）	2.664
3. 溪床滞積土（地獄河原）	2.618
4. 溪床滞積土（長谷川）	2.622
5. 溪床滞積土（古河良川）	2.617

1) 試験方法

土粒子の比重試験は、JIS A 1202—1970¹⁾に従って行なった。

2) 結果

試験結果は表一4のとおりである。

4.2 粒度組成

土を構成する粒子の大きさが分布する状態を重量百分率で表示したものを粒度という。土質工学会では、粒径2.0mm以上をレキ、2.0mm～0.074mmを砂、0.074mm～0.005mmをシルト、および0.005mm以下を粘土とよんで粒径区分を行なっている。粒度分布の状態は、普通、粒径加積曲線によって表わされ、この曲線から次の諸量が決定される。

D_{60} ＝粒径加積曲線の通過百分率60%に相当する粒径

D_{30} ＝同じく30%に相当する粒径

D_{10} ＝同じく10%に相当する粒径

均等係数 $U_c = D_{60}/D_{10}$

曲率係数 $U_c' = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$

U_c および U_c' の値によって粒度分布の状態を知ることができる。 U_c が1に近いときは D_{60} と D_{10} との範囲がせまく、粒径加積曲線がほぼ直立であることを示している。 U_c が大きくなるほど粒度分布がひろい。一般に U_c が4～5以下の土は“粒度分布が悪い”といい、10以上の土は“粒度分布が良い”といえる。また、 U_c' が1～3は“粒度分布”がよいとされている。

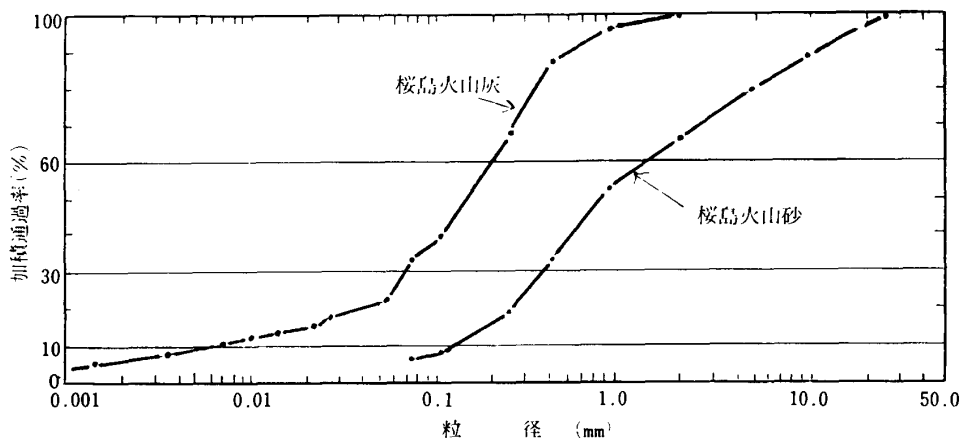
ここに、火山灰、火山砂、および溪床滞積土の粒度組成を示す。

1) 試験方法

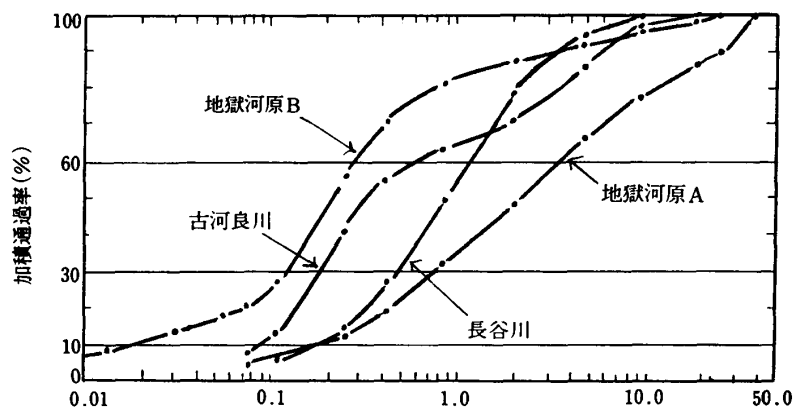
粒度試験は JIS A 1204—1970¹⁾に従って実施した。

2) 結 果

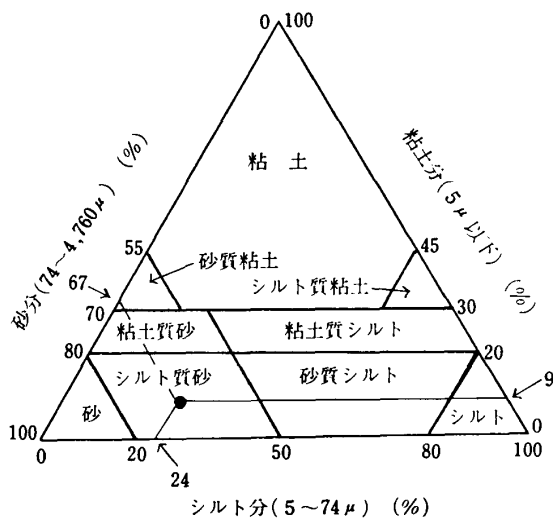
粒度試験から得られた粒径加積曲線は図一2および3, 粒度組成は表一5のとおりである。粒度による土質分類名を知るために粒度組成を三角座標上にプロットすると, 火山灰は図一4, その他の試



図一2 桜島火山灰, 火山砂の粒度曲線

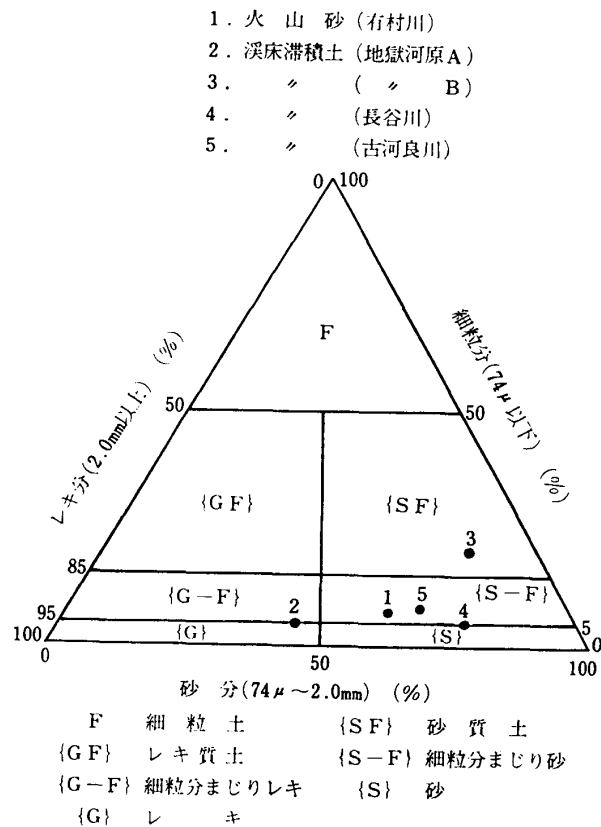


図一3 溪床滞積土の粒度曲線



図一4 三角座標 (土の判別分類法委員会) による火山灰の土質分類

料は図—5のようになる。土質分類名は三角座標あるいは表—5に示されている。



図—5 フルイ分けによる粒度測定のみを行なった場合の土の分類

表—5 火山灰, 火山砂, 溪床滞積土の粒度組成

試料(採取地)	粘土 0.005 (%)	シルト 0.074 (%)	砂 2.0 (%)	レキ 2.0 (%)	最大 粒径 (mm)	60% 粒径 (mm)	30% 粒径 (mm)	10% 粒径 (mm)	均等 係数	曲率 係数	土質分類
1. 火山灰 (有村川)	9	24	67	0	2.0	0.22	0.068	0.007	31.4	3.0	シルト質砂
2. 火山砂 (有村川)		7	59	34	25.4	1.3	0.37	0.13	10.0	0.8	細粒分まじり砂
3. 溪床滞積土 (地獄河原A)		5	43	52	38.1	3.4	0.75	0.21	16.2	0.8	レキ質土
4. 溪床滞積土 (地獄河原B)		20	67	13	25.4	0.29	0.12	0.018	16.1	2.8	砂質土
5. 溪床滞積土 (長谷川)		5	74	21	19.1	1.2	0.47	0.18	6.7	1.0	細粒分まじり砂
6. 溪床滞積土 (古河良川)		8	64	28	19.1	0.60	0.19	0.09	6.7	0.67	細粒分まじり砂

なお、原溪床には粒度曲線で示されるものより大きい巨レキがあることはいうまでもないことである。

4. 3 溪床滞積土の乱さない状態での物理的性質

ここで、乱さない状態における物理的性質として、含水比、単位体積重量、間ゲキ比、および飽和度を取扱う。これらの諸性質は土の固体（土粒子）、液体（水）、および気体（空気）の三相成分の相対的・量的関係によって、次のように定義される。

$$\text{湿潤時単位体積重量 (湿潤密度)} \quad \gamma_t = \frac{W}{V} (\text{g/cm}^3) \quad (1)$$

$$\text{乾燥時単位体積重量 (乾燥密度)} \quad \gamma_d = \frac{W_s}{V} (\text{g/cm}^3) \quad (2)$$

$$\text{含水比} \quad w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 (\%) \quad (3)$$

$$\text{飽和度} \quad S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 (\%) \quad (4)$$

$$\text{間ゲキ比} \quad e = \frac{V_v}{V_s} \quad (5)$$

ここに、

W = 土試料の全重さ

W_s = 土粒子部分の重さ

W_w = 水の重さ

V = 土試料の全体積

V_v = 間ゲキ部分の体積

V_s = 土粒子部分の体積

V_w = 間ゲキ中水で占められた部分の体積

現場での含水比、飽和度は試料採取時の気象条件（とくに降水とか日照）によって、空気乾燥状態から飽和状態までの範囲で変化する。湿潤密度も含水比にしたがって変化する。すなわち、同じ種類の土であれば含水比が高いほど湿潤密度は大きい値を示す。乾燥密度および間ゲキ比は土の状態を示す一定の量である。

現場でのサンプリングは、内径 5.5 cm、高さ 6.0 cm のサンプラーを地中に貫入させて行なった。レキ分が多い個所では、この方法によるサンプリングは非常に困難である。したがって原位置における単位体積重量の測定は砂置換法²⁾による方法がとられるべきである。

地獄河原および古河良川における溪床滞積土の乱さない状態での物理的性質を表一6に示す。溪床

表一6 溪床滞積土の乱さない状態における物理的性質

試料	含水比 (%)	単位体積重量		間ゲキ比	飽和度 (%)	
		湿潤時 (g/cm³)	乾燥時 (g/cm³)			
地獄河原	1	24.6	1.525	1.224	1.14	56.5
	2	15.4	1.674	1.450	0.81	49.8
	3	16.0	1.691	1.458	0.80	52.4
古河良川	1	25.4	1.260	1.005	1.61	41.3
	2	27.1	1.234	0.971	1.70	41.8
	3	36.6	1.221	0.894	1.93	49.7

構成材料の変動やサンプリングの困難さのために測定値のバラッキがかなりある。古河良川の土の密度が小さいのは軽石の滞積が多いためである。

4.4 火山灰の最小密度

火山爆発、噴煙に伴う降灰は降雨水や振動などを受けていない状態では最小密度に近い状態で滞積していると考えられる。また最小密度は相対密度を求める場合にも必要な因子の1つである。

ここで、室内で測定した火山灰の最小密度について述べる。試料として用いた火山灰の粒子比重は

表一 4, 粒度は図一 2 と表一 5 に示されている。

相対密度の測定値は, 試料の水分状態, 測定容器の形状と大きさ, 試料の注入方法, 測定者の熟練度など多くの因子によってばらついてくる。ここでは, 次の 3 種類の容器に, 空気乾燥状態の火山灰を, スプーンで静かに少しずついねいに置いて測定した。

(1) A 容器: JIS A 1210-1970 に規定する突固め試験用のモールド, 内径 10.0 cm, 高さ 12.7 cm, 容量 1,000 cm³。

(2) B 容器: 内径 5.45 cm, 高さ 6.06 cm, 容量 141.37 cm³ のモールド

(3) C 容器: 内径 5.02 cm, 高さ 2.01 cm, 容量 39.78 cm³ のモールド

測定結果を表一 7 に示す。同じ火山灰でも容積が大きいものほど, 最小密度は大きくなっている。

表一 7 火山灰の最小密度の測定値

使用容器	試 験 No.	試 料 の 含 水 比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	間ゲキ比
A	1	0.38	1.378	1.373	0.937
	2	0.38	1.380	1.375	0.934
B	3	0.38	1.357	1.352	0.967
	4	0.38	1.342	1.337	0.989
C	5	0.38	1.315	1.310	1.030
	6	0.38	1.315	1.310	1.030

これは容器の高さの影響であり, 高さが大きいほど火山灰の自重によってある程度締固まることによる。従って降灰砂がうすく滞積しているときの密度は小さく, 厚くなるとやや密度が大きくなる。

火山灰の乾燥密度の最小値は表一 7 から 1.31 g/cm³ 程度と決定される。そのときの間ゲキ比は 1.030 である。

4. 5 透水性

4. 5. 1 土の透水性について

土の透水性は土中の間ゲキにおける水の移動の難易度に関する性質である。重力による水の透過を計算するには, ダーシー (Darcy) の法則を用いる。ダーシーの法則によって透水係数 k が決定される。この法則は層流に対してのみ成立つが, 天然の土において乱流が起ることは, 粒のそろった粗砂または砂利の場合以外にはほとんどない。土の透水係数 k は, 試料土の種類, 粒度, 間ゲキ比 (密度), 浸透水の性質, および試験条件などによって変化する。以下それらのうち若干の問題について簡単に述べる。

(1) 土の粒度

透水係数 k は土粒子の径の平方に比例するといえる。ハーゼン (Hazen) は均等係数が 2 より小さいゆるい砂についての実験から, 透水係数 k は 10% 粒径 D_{10} の平方に比例するとして式 (6) を提案している。

$$k(\text{cm/sec}) = CD_{10}^2 \quad (6)$$

ここに, $C=100\sim150$

一般には透水試験によって k は求めるものである。粒径に応じた k の概略値は表一 8 によって知ることができる。

(2) 浸透水の性質

透水係数 k は水の単位体積重量に比例し、水の粘性係数 μ に反比例する。したがって透水係数は温度によって変化するので、一般には 15°C における透水係数 k_{15} を求めることが多い。

$$k_{15} = \frac{\mu_t}{\mu_{15}} k_t \quad (7)$$

ここに、 k_t = 任意の温度における透水係数、

μ_t = 任意の温度における水の粘性係数

μ_{15} = 15°C における水の粘性係数

(3) 間ゲキ比

同一種類の土を、間ゲキ比だけをかえて他は同一条件で試験すると、砂については近似的に透水係数 k と間ゲキ比の平方 e^2 の間に直線関係が成立つことが知られている。いま間ゲキ比 e_1 のときの既知の透水係数を k_1 とすると、間ゲキ比 e_2 のときの透水係数 k_2 は式 (8) で推定される。

$$k_2 = \frac{e_2^2}{e_1^2} \cdot k_1 \quad (8)$$

粘土については間ゲキ比 e と透水係数の対数 $\log k$ との間に直線関係があることが知られている³⁾。シラスについても同様な関係がある⁴⁾。

(4) 土の構造と成層状態

透水係数 k は、乱した土か自然状態の土か、また自然状態の土が成層しているか、していないかによって変化する。

(5) 飽和度

土が完全に飽和されていないときは透水係数 k は小さくなる。しかし飽和度が k に与える影響は粒度、間ゲキ比、あるいは構造などによる影響より少ないと考えられている。

(6) 土の種類と透水係数

表—8 土の種類と透水係数および排水性

透 水 係 数	10^2	10^1	1.0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
cm/sec												
排 水 性	排 水			良 好			排水不良		実 用 上 不 透 水			
土 の 種 類	砂 利 (細粒土を 含まず)	砂, 砂と砂利の混 合物 (細粒土を含 まず)			微粒砂, 有機質および無機 質シルト, 砂とシルトと粘 土の混合物, 氷河滞積物, 成層した粘土など			“不透水の土”す なわち風化帯以 下の様な粘土				
		植物および風化作用により変質 した“不透水の土”										
透水係数の直接 的決定法	現場試験 (揚水試験) (適当に行えば信頼性大きい が相当の経 験を要す)											
	定水位透水試験機 (わずかの経験でよい)											
透水係数の間接 的決定法	変水位透水試験機 (信頼性大きくわ ずかの経験でよい)			変水位透水試験機 (信頼性なく非常な 経験が必要である)			変水位透水試験機 (信 頼性は十分であるが, 相当な経験が必要であ る)					
	粒度分布より計算 (細粒土を含まぬ砂および砂利 に対してのみ適用できる)									圧密試験結果より 計算 (信頼性 大きい が相当の 経験が必要 である)		

粒径によって区分された土の種類と透水係数の概略値および排水特性を表—8に示す。表—8はキャサグランデほか (Casagrande, A. and Fadum, R.E.) が多くの測定結果をまとめたものであり、実用的に便利である。

4. 5. 2 火山灰, 火山砂の飽和状態における透水係数

1) 試料

使用した火山灰の粒度は図—2に示すものと同じであり, 火山砂の粒度は図—2に示すものの 4.76 mm フルイを通過した部分である。

2) 供試体

供試体の大きさは直径 10.0 cm, 高さ 12.7 cm である。供試体の作成は内径 10.0 cm の突固め試験用モールドおよびカラー (JIS A 1210—1970)¹⁾ に試料を入れて締固めて行なった。締固め方法および供試体の初期状態などについては表—9に示す。

表—9 透水試験用供試体の状態

供試体 No.	締固め方法			締固め 時の含 水比(%)	乾燥密度 (g/cm ³)	間ゲキ比	試験方法
	外 力	層 数	一層当り 回数				
火山灰							
1	2.5kg のランマー を 30cm の高さか ら自由落下	3	10	5.18	1.64	0.62	定水位
2		3	15	4.92	1.68	0.58	変水位
3		3	20	5.02	1.70	0.56	
4		3	25	5.01	1.73	0.54	
5		4	30	4.73	1.76	0.51	
火山砂							
1	モールドの振動に よる締固め	—	—	3.02	1.46	0.82	定水位
2		—	—	3.69	1.59	0.67	
3	2.5kg のランマー を 30cm の高さか ら自由落下	3	5	3.25	1.67	0.59	
4		3	10	3.94	1.71	0.56	
5		3	10	3.94	1.72	0.55	
6		4	20	3.28	1.79	0.49	
7		4	30	3.43	1.80	0.48	

なお, 火山灰のゆるい状態の供試体, 乾燥密度 1.46(g/cm³), 間ゲキ比 0.82 のものは試験中に沈下を生じて, 測定不可能となった。

3) 試験方法

透水試験は JIS A 1218—1961¹⁾ に従って行なった。供試体の上・下端面におけるフィルター材は砂と金網である。ろ紙は透水係数に影響するので使用していない。

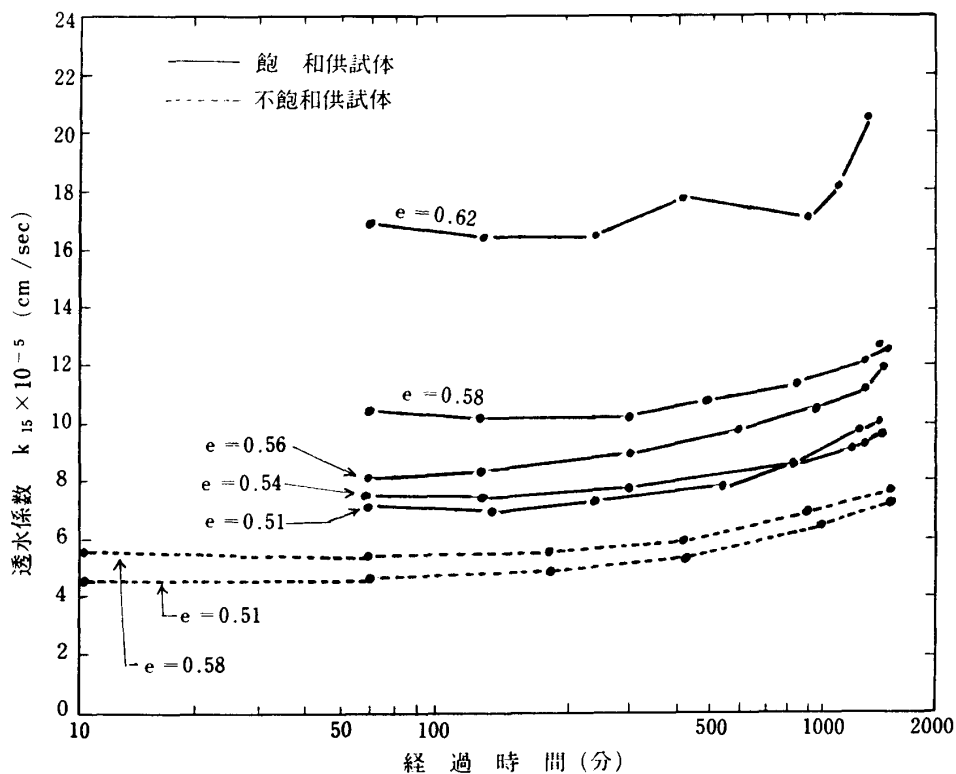
供試体は, まず下面より給水して完全に飽和させた後, 火山灰は定水位法あるいは変水位法により, 火山砂は定水位法によって試験した。個々の供試体についての試験法は表—9に示されている。

4) 結果

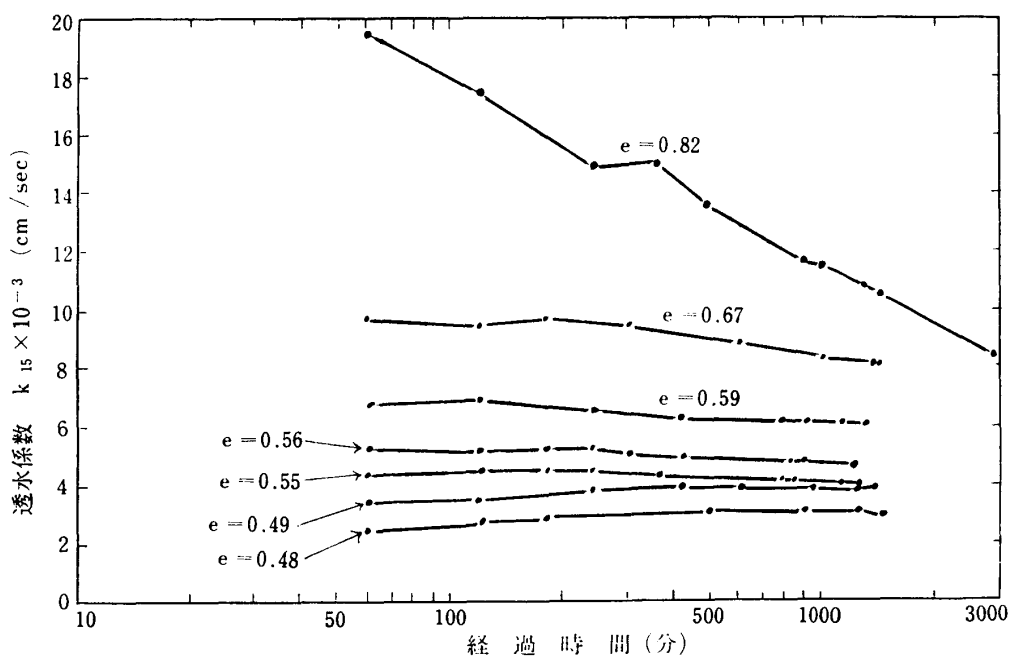
(1) 透水係数の時間的变化

通水後の経過時間と火山灰の透水係数 k_{15} の関係を図—6に, 火山砂のそれを図—7に示す。火山灰の透水係数は経過時間とともにやや増加する傾向を持つ。火山砂の透水係数は, ゆるい状態では経過時間とともに減少する傾向がみられ, 密な状態ではわずかながら増加する傾向がみられる。また,

火山灰、火山砂ともにゆるい状態ほど透水係数の時間的変化が大きい。密な火山砂の透水係数の時間的変化は無視できる程度である。



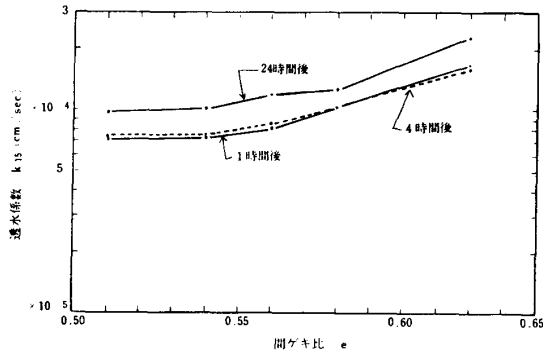
図一6 火山灰の透水係数の時間的変化



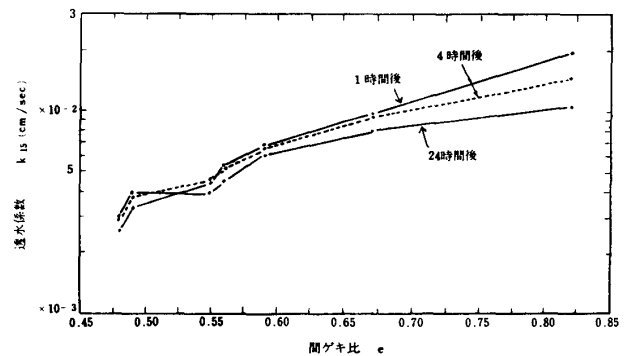
図一7 火山砂の透水係数の時間的変化

(2) 透水係数と間ゲキ比の関係

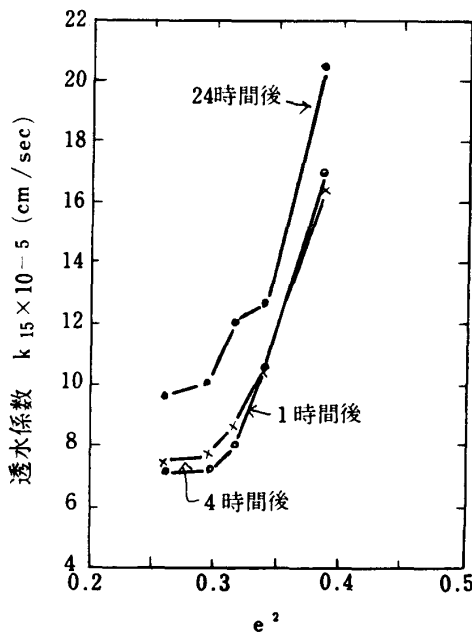
同じ土であれば、間ゲキ比が大きいほど透水性はよくなる。通水後1時間、4時間、および24時間における火山灰および火山砂の間ゲキ比 e と透数係数の対数 $\log k_{15}$ の関係を、それぞれ図—8および図—9に示す。 e と $\log k_{15}$ の間に、火山灰については直線関係を認めてもよいが、火山砂については認められない。さらに、間ゲキ比の平方 e^2 と透水係数 k_{15} の関係を図—10（火山灰）および図—11



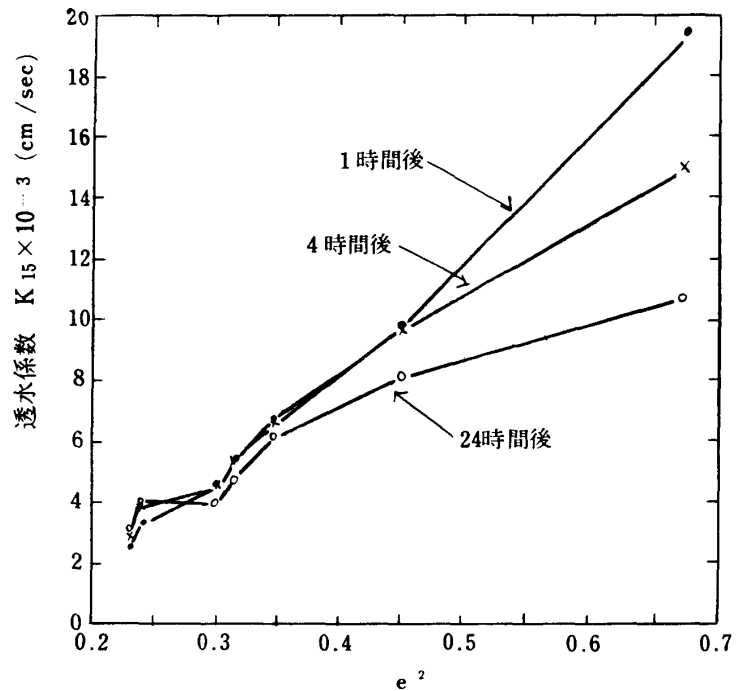
図—8 火山灰の透水係数と間ゲキ比の関係



図—9 火山砂の透水係数と間ゲキ比の関係



図—10 火山灰の透水係数と e^2 の関係



図—11 火山砂の透水係数と e^2 の関係

(火山砂) に示す。火山灰は e^2 と k_{15} の間に直線性を認めることはむづかしいが、火山砂は近似的に直線を仮定してもよいと考えられる。火山灰と火山砂とでこのように傾向が異なるのは、粒径の影響であろう。

(3) 火山灰と火山砂

火山灰の透水係数は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ (cm/sec) のオーダーの範囲にあり、火山砂のそれは $10^{-2} \sim 10^{-3}$ (cm/sec) である。表—8から判定すると、火山灰は“排水不良”，火山砂は“排水良好”ということになる。

また、乾燥密度 1.71 g/cm^3 、間ゲキ比 0.56 のときの透水係数は、火山灰で $(8 \sim 12) \times 10^{-5}$, (cm

/sec) 火山砂で $(6\sim7) \times 10^{-3}(\text{cm/sec})$ である。火山砂は粒径が大きいために、土中間ゲキが大きく、水流のエネルギー損失が小さいことによって火山灰より高い透水性を示すのである。

4. 5. 3 火山灰の不飽和状態における透水係数

1) 試料

試料としては、前述の透水試験が終了した火山灰の供試体 No. 2~5 をモールドに入れたまま相当日数重力排水させ、さらに蒸発させたものを使用した。重力排水と蒸発に要した日数および不飽和透水試験前の含水比などは表—10のとおりである。供試体の初期状態は現地との対応で考えると、降灰

表—10 不飽和透水試験に用いた火山灰供試体の初期状態

供試体 No.	日数	試験前の 含水比 (%)	乾密 度 (g/cm^3)	間ゲキ比
2	21	3.75	1.68	0.58
3	21	1.50	1.70	0.56
4	21	0.91	1.73	0.54
5	13	6.59	1.76	0.51

が滞積して、降雨を受けた後、何日間が乾燥した状態に相当する。そのような状態のところへ降雨があると不飽和透水状態となる。

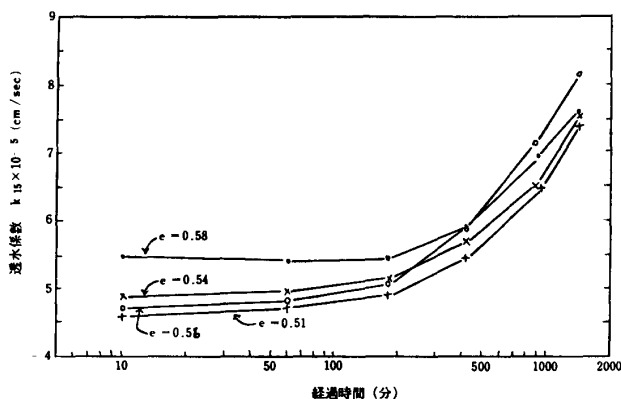
2) 試験方法

試験方法は変水位透水試験方法に従った。しかし、試験前に供試体の飽和をさせる操作は行っていない。最初から供試体の上面から給水して、底部から浸透水が出はじめたら測定を開始した。

3) 結果

同じ構造を持つ土であれば、不飽和土の透水係数は間ゲキ中の空気の影響を受けて、飽和土の透水係数より小さくなる。

不飽和火山灰の透水係数 k_{15} の時間的变化状況を図—12に示す。図—12の $e=0.51$ と 0.58 の場



図—12 火山灰の不飽和状態における透水係数の時間的变化

合を図—6に破線で示す。不飽和火山灰の透水係数は、 $(4.5\sim8.5) \times 10^{-5}(\text{cm/sec})$ であり、飽和のそれより小さい。また、間ゲキ比の違いによる透水係数の差は不飽和の場合わずかである。透水係数が時間の経過にしたがって増加する傾向がみられることは飽和状態でも不飽和状態でも同じである。図—12において $e=0.56$ の場合、試験中に間ゲキ内の空気が他の供試体よりよけい排出されたこと

によって、透水性が大きくなったものと考えられる。

4. 6 重力排水および乾燥特性

地表流水と同じく土中水の挙動も斜面の移動や土砂の移動に関係する。土中水の形態的分類については、従来多くの方法が提案されている。その代表的なものは、結合水、半結合水、および自由水の3種類である⁹⁾。自然状態で水の移動は、人為的なものや生物の作用によるものを除くと、おもに重力、毛管張力、蒸発、および化学的原因によるものである。自然界で水が土中から外部に排除されるおもな原因は重力および蒸発によるものである。

降雨、流水などの水が土に供給されると、その水は浸潤・浸透などの形をとりながら土中に入る。この水の一部は結合水や半結合水ないし、拘束された自由水となるが、そのほかは自由水として下降していく。この下降運動（横方向の運動も含む）にはダーシーの法則が適用される。この運動する水が重力水である。

自然状態では排水は下方および横方向へ生じる。重力の作用だけで排水する方法は重力排水といわれ、これによってはおもに重力水が排除される。ここで重力排水によって土の含水量が減少し得る最小値を“保水力”と呼ぶことにする。飽和土層からの排水後には毛管水が残っている。

土が大気にさらされると、土表面から蒸発が起り、これによって土中水の移動が生じ、土は乾燥する。乾燥の程度は大気の相対湿度に関係する。

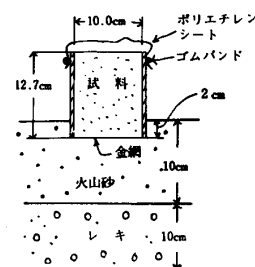
ここに、火山灰・火山砂の重力排水および乾燥特性について述べる。

1) 試料

試料は透水試験（飽和試料）終了後のものをモールドに入れたままの状態で使用した。試料の初期状態を表一11に示す。なお、試料の初期飽和度はすべて100%である。

表一11 重力排水及び乾燥試験に用いた供試体の初期状態

試料 No.	初期含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	間ゲキ比
火山灰			
1	23.3	1.64	0.62
2	21.8	1.68	0.58
3	21.1	1.70	0.56
4	20.3	1.73	0.54
5	19.2	1.76	0.51
火山砂			
3	22.2	1.67	0.59
4	21.1	1.71	0.56
6	18.4	1.79	0.49
7	18.1	1.80	0.48



図一13 重力排水試験法

2) 試験方法

所定の容器に厚さ約10cmのレキを敷き、その上に厚さ約10cmの火山砂を敷いて排水層とした。次に透水試験終了後の供試体から図一13に示す方法で重力排水させた。供試体上面からの蒸発を防ぐためにポリエチレンでシールした。排水開始前および開始後一定の時間（多くの場合24時間）ごとに供試体の重量変化を測定し、排水量を求めた。排水中における供試体の重量変化がほとんどなくなった時点で、ポリエチレンのシールを除き蒸発乾燥させ、供試体の重量変化を一定時間ごとに測定した。

3) 結 果

重力排水・乾燥による含水比の時間的变化を図-14~17に示す。

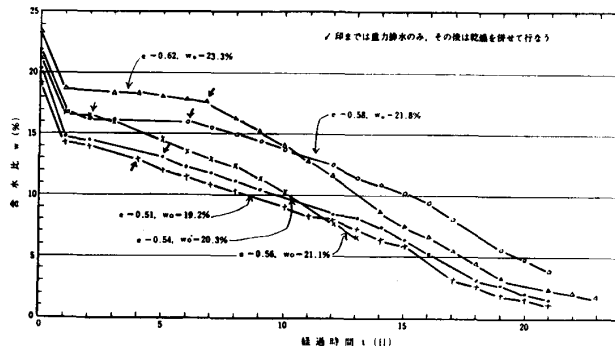


図-14 火山灰の排水・乾燥による含水比の経時変化

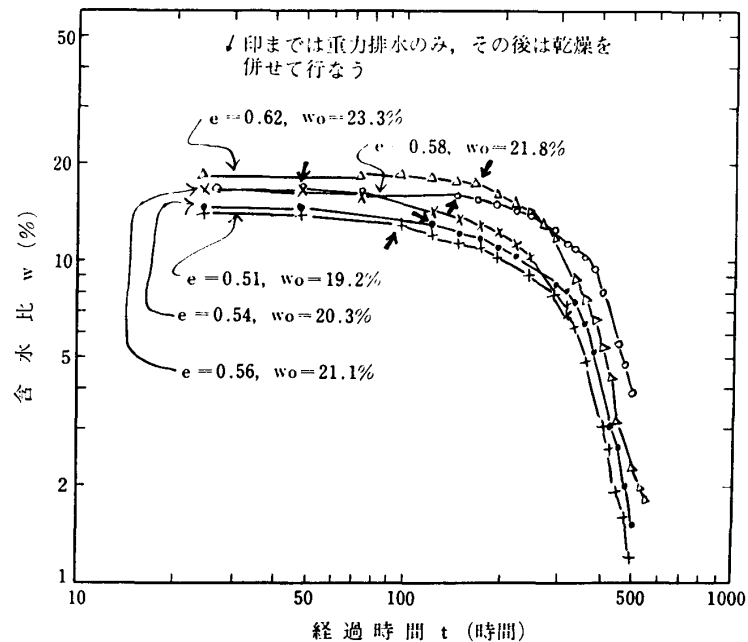


図-15 火山灰の排水・乾燥による含水比の経時変化

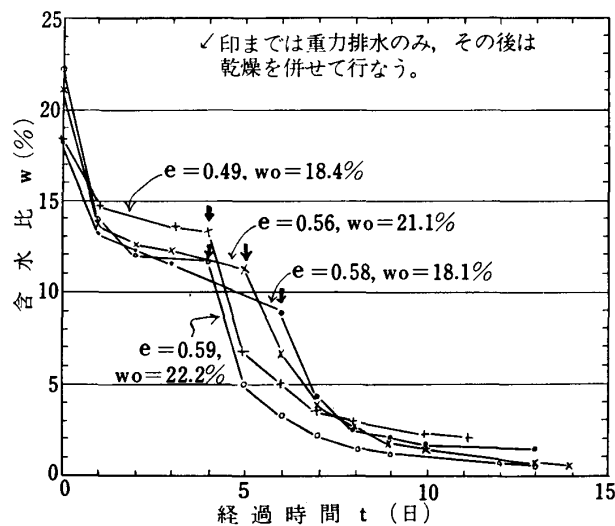
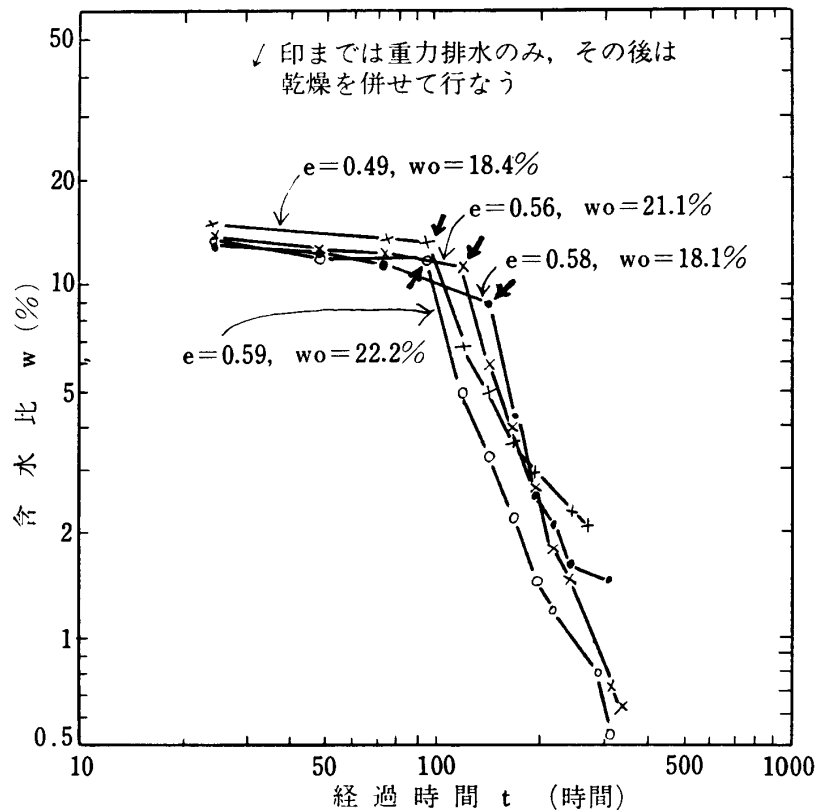


図-16 火山砂の排水・乾燥による含水比の経時変化



図一17 火山砂の排水・乾燥による含水比の経時変化

図一14および16によれば、重力排水は、火山灰・火山砂ともに24時間以内でほとんどすべてを行なってしまう、24時間経過後の含水比の経時変化はわずかである。

図一14および15によれば、重力排水後の火山灰の保水力は、間ゲキ比 $e=0.62$ のとき約18%、 $e=0.56\sim0.58$ のとき約16%、 $e=0.51\sim0.54$ のとき約13%であり、間ゲキ比が大きいほど、保水力も大きくなっている。

この関係は、常識的には逆に考えられるが、これは供試体の初期含水比の影響によるものである。図一14および15からわかるように乾燥試験中も、大体において間ゲキ比が大きいほど、含水比が高いという傾向がみられるが、間ゲキ比が大きいものは含水比の減少割合が大きいと言える。火山灰の乾燥試験終了時の含水比は1~4%の間であるが、まだ乾燥は引続き起こりつつあり、最終的には大気の相対密度に対応した一定値となるであろう。空気乾燥状態での含水比の測定結果は0.38%であった。

図一16と17によれば、火山砂の保水力は約10~12%程度であり、間ゲキ比 e が小さいものほど、保水力が大きいという傾向を認めてよい。この関係は火山灰とは逆のものである。乾燥試験終了時の含水比は2%以下であるが、これも最終的には火山灰と同じ程度に落ち着くであろう。

火山砂は、火山灰に比較して水分消失速度が速い。例えば、含水比が10%以下になる所要時間は、火山灰では200~400時間、火山砂では100~130時間、2%以下になる所要時間は、火山灰では約450時間以上、火山砂では約150時間以上である。

含水比 w ・時間 t 関係は、排水過程と乾燥過程の2段階に分けられる。火山灰については、図一14の算術目盛上では両過程の区分がはっきりしないが、図一15の両対数紙上でみるとそれがはっきりとわかる。図一15では排水過程の $\log w \cdot \log t$ 関係は乾燥過程のその関係になめらかな曲線で連続している。火山砂の $w \cdot t$ 関係および $\log w \cdot \log t$ 関係は排水時と乾燥時の区分は明瞭である。含水比 w

と時間 t の関係は、排水、乾燥の両過程とも両対数紙上で直線関係にあり、次式で一般表示される。

$$\left. \begin{array}{l} w = at^b \\ \text{または} \\ \log w = \log a + b \log t \end{array} \right\} \quad (9)$$

ここに、 a 、 b は定数であり、 b は $\log w \cdot \log t$ 直線のコウ配を表わす。 a 、 b の平均的値を表—12に示す。

表—12 排水および乾燥曲線の定数値

試料	条件	$\log a$	a	b
火山灰	排水	1.2707	1.865×10	-0.0532
	乾燥	11.3838	2.420×10^{11}	-4.1063
火山砂	排水	1.2959	1.975×10	-0.1084
	乾燥	6.9498	8.909×10^6	-2.8869

4.7 スレーキング

乾燥した土の塊りを急速に水に浸すと、土塊の外側の部分は飽和し、空気は内側に閉じこめられる。捕捉された空気の圧力 p は次式で表わされる⁶⁾。

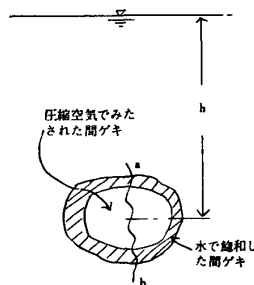
$$p = p_k + u_w \quad (10)$$

ここに、

p_k = 捕捉された空気と水の界面における毛管張力

$u_w = h \cdot \gamma_w$ 、土塊の中央における静水圧、 γ_w は水の単位重量、 h は水深。

この空気内の圧力によって土の骨格に引張力が生じ、土の骨組は図—18に示す ab のようなある面



図—18 スレーキングの説明

にそって崩壊する。このような崩壊をスレーキングという。乾燥した火山灰が、降雨によって容易に崩壊することの基礎的性質をこれによって知ることができる。ここで、火山灰のスレーキング試験結果について述べる。

1) 試料および供試体

含水比6.4%で調整した火山灰をハーバード式締固め装置により、所定の状態に締固めて作成した。供試体の初期状態は、湿潤密度 $1.49 \sim 1.53 \text{ g/cm}^3$ 、乾燥密度 $1.40 \sim 1.44 \text{ g/cm}^3$ 、および間ゲキ比 $0.90 \sim 0.85$ のものと湿潤密度 $1.58 \sim 1.62 \text{ g/cm}^3$ 、乾燥密度 $1.48 \sim 1.52 \text{ g/cm}^3$ 、および間ゲキ比 $0.79 \sim 0.75$ のものの2種類である。供試体の大きさは直径 3.36 cm 、高さ 7.17 cm である。

2) 試験方法

作成した供試体は、室内に放置して乾燥させ、所定の時間を経過したものは、ただちに一定の水頭

のもとに水浸する。水浸の瞬間から供試体が完全に崩壊するまでの所要時間をストップウォッチで測定して、崩壊時間とする。水浸時の供試体の状態は前もって測定しておく。なお、一部の供試体については、その作成後、ただちにスレーキング試験に供した。

3) 結 果

供試体作成後の経過日数と崩壊時間および含水比の変化状況を図-19 (a) と (b) に示す。図-19

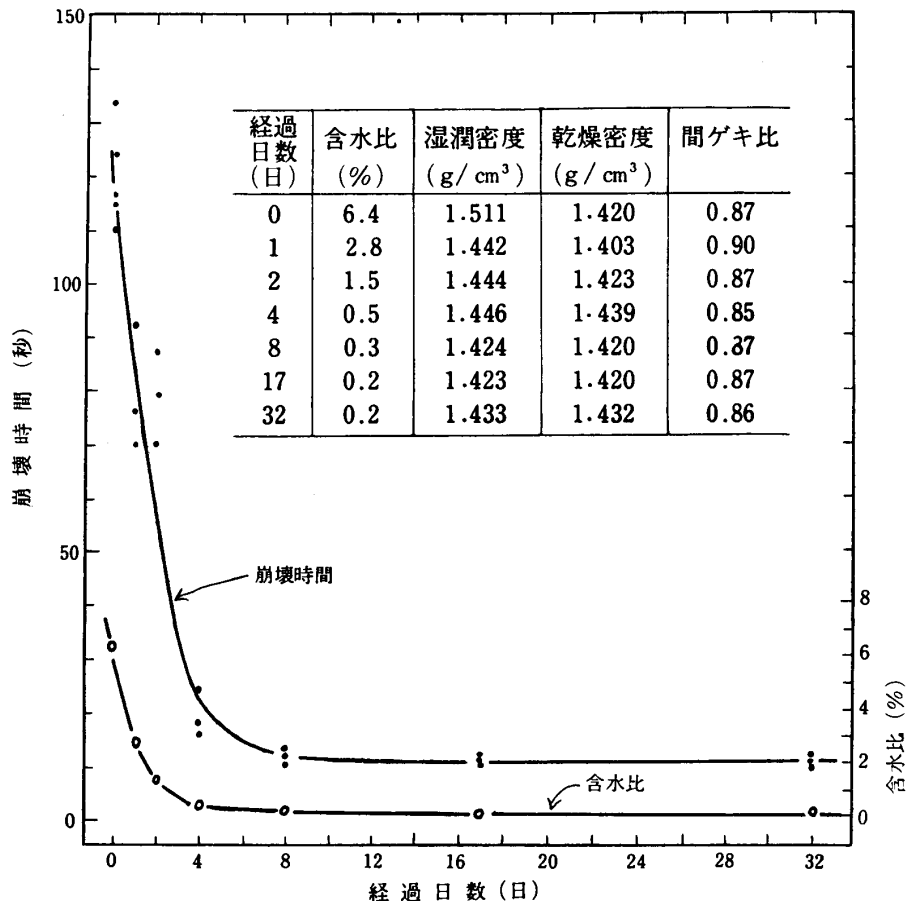


図-19 (a) 火山灰のスレーキング試験結果

によれば、崩壊時間は、経過日数8日までは急激に短くなり、それ以後はほとんど一定となる。この間の含水比の変化をみると、供試体は蒸発によって8日間程度で、気乾状態に近くなり、それ以後は含水比の変化もほとんどない。したがって8日以後では供試体の間ゲキ水はほとんど一定量の空気で置き換わっている。このために崩壊時間はほぼ一定となる。乾燥しているほど、供試体内に閉じこめられる空気量が多く、さらにサクシオンも大きくなるので、間ゲキ空気の圧力が増加する。この圧力で土の骨組は引張力を受け崩壊時間が短くなるのである。

スレーキング崩壊に要する時間は含水比の関数である。いま、崩壊時間と含水比の関係を両対数紙上にプロットすると図-20 (a) と (b) に示されるように、両者の関係は直線関係で表わされ、次式で近似される。

$$\log t = 0.7154 \log w + 1.5694 \quad (11)$$

ここに、 t = 崩壊時間 (秒)

w = 含水比 (%)

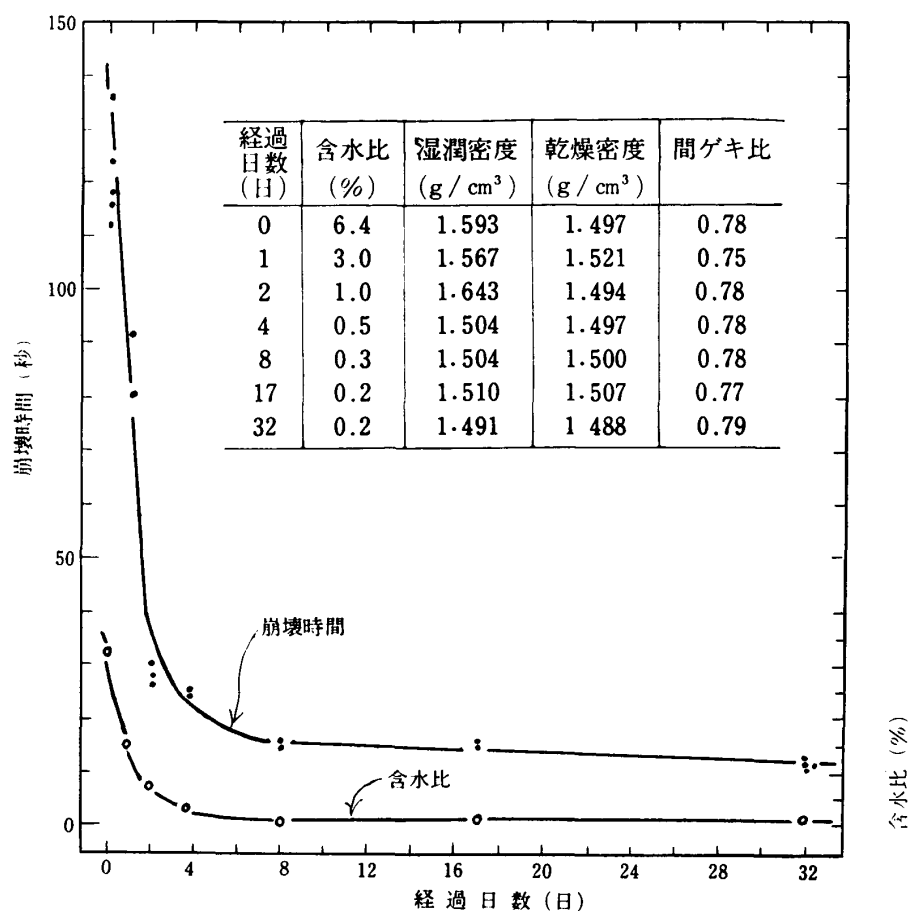


図-19 (b) 火山灰のスレーキング試験結果

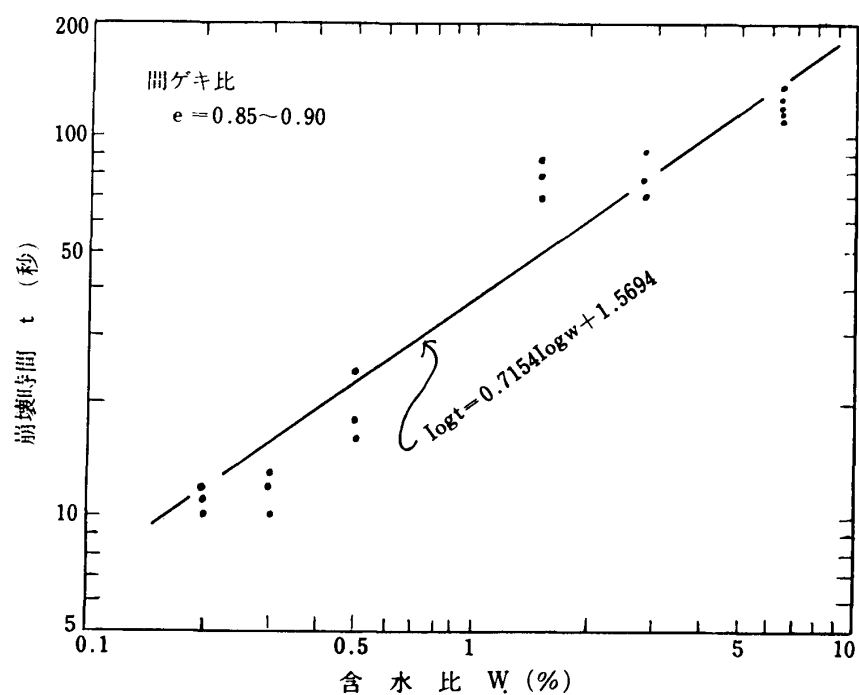


図-20 (a) 火山灰のスレーキング崩壊時間と含水比の関係

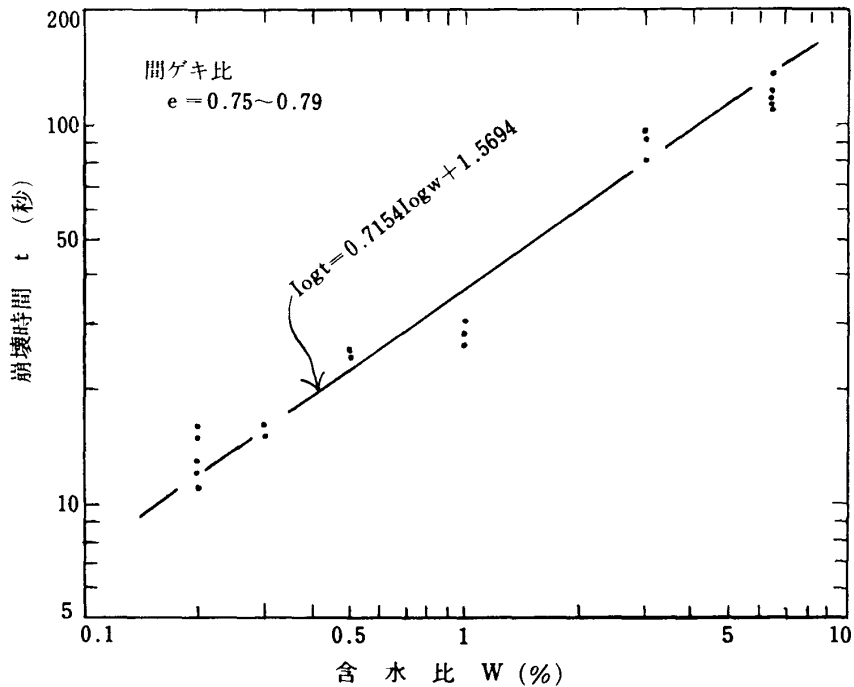


図-20 (b) 火山灰のスレーキング崩壊時間と含水比の関係

乾燥した火山灰は、サクションによって降雨をすみやかに吸引し、表面が飽和状態となると、スレーキング崩壊が発生することが、以上の室内試験結果から予測される。

4. 8 吸水膨張・収縮特性

乾燥した細粒土は、ゆるい状態にあるとき吸水すれば、土粒子の骨組が乱れて収縮を起こし、密な状態にあるとき吸水すれば、土の間ゲキに自由水面を形成して、毛管張力を失ない膨張（膨潤）する。また、飽和した土が乾燥を受けると毛管張力の影響で体積を収縮する傾向がある。自然状態にある土は降雨水の吸水や蒸発乾燥によって膨張・収縮をくりかえし受けることによって崩壊にいたることもまれでない。ここに、火山灰の吸水による体積変化特性を試験した結果について述べる。

1) 試料および供試体

試料としては気乾状態の火山灰および湿らした火山灰を用いた。試料を内径 10.0 cm、高さ 2.5 cm

表-13 吸水膨張・収縮試験の供試体の初期状態

試料 No.	初期含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	間ゲキ比
1	0.09	1.328	1.327	1.00
2	0.09	1.343	1.342	0.98
3	0.09	1.420	1.419	0.87
4	0.09	1.582	1.580	0.68
5	0.09	1.727	1.725	0.54
6	0.09	1.749	1.747	0.52
7	1.7	0.921	0.906	1.93
8	1.7	1.101	1.082	1.46
9	1.7	1.249	1.228	1.17
10	1.7	1.420	1.396	0.90
11	1.7	1.664	1.636	0.63

のモールドに注ぎ込んで供試体とした。供試体の初期状態を表-13に示す。

2) 試験方法

図-21に示すように、供試体を水そうに入れ、底面から水を吸引させる。吸水時間の経過とともに

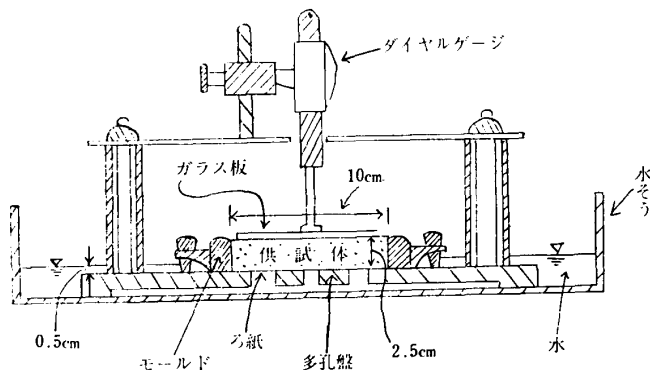


図-21 吸水膨張・収縮試験装置

供試体は飽和に近づき、収縮または膨張を行なう。最終的には体積変化が生じなくなる。吸引後一定時間ごとに供試体の高さの変化量をダイヤルゲージで測定し、供試体の高さの変化を算出する。高さの変化率 R は次式で求める。

$$R = \left(\frac{\Delta H}{H} \right) \times 100 (\%) \quad (12)$$

ここに、 H = 供試体の初期高さ (2.5 cm)

ΔH = 吸水による一定時間後の高さの変化量

3) 結果

供試体の高さの変化率 R と経過時間の関係を図-22に示す。ゆるい状態では収縮を生じ、収縮率

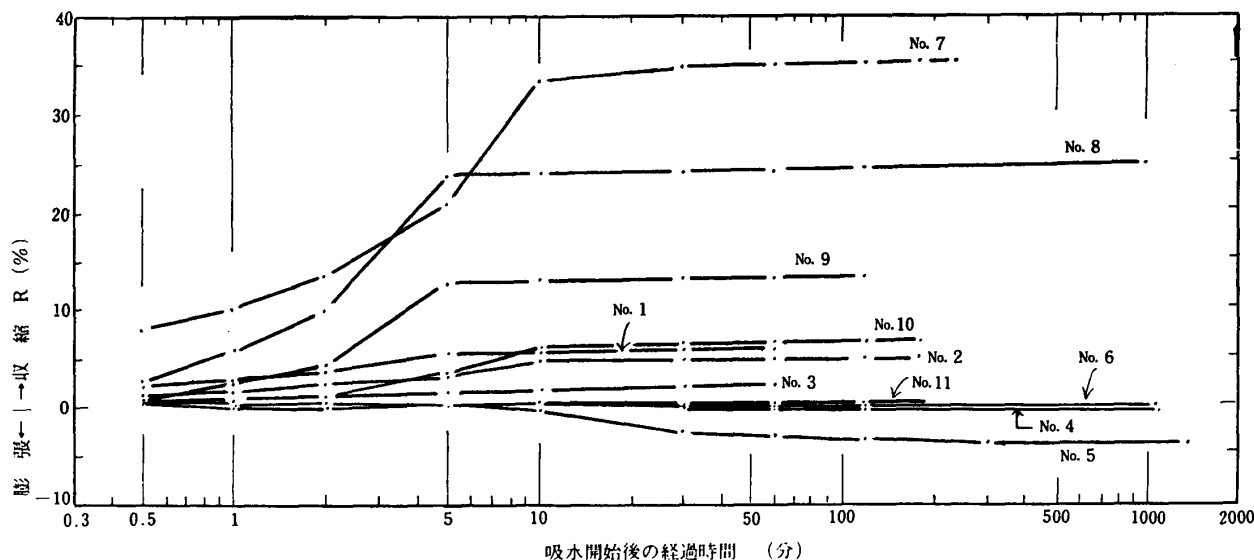


図-22 火山灰の吸水膨張・収縮の時間的变化

は吸水開始後5~10分までは図-22にみられるように、片対数紙上で放物線的に増加する。その後は徐々に収縮し、最終的に収縮は生じなくなる。密な状態では膨張を生じ、30~60分ぐらいまで放物線的に膨張する。

吸水による試供体高さの変化率 (体積変化) R と経過時間 t との間には次の関係がある。

$$R = \alpha \log t^2 + \beta \log t + \gamma \quad (13)$$

ここに、 R = 高さの変化率 (%)

t = 経過時間 (分)

α, β, γ = 定数

吸水の初期段階で、収縮のとき $\alpha > 0$ 、膨張のとき $\alpha < 0$ 、後期段階で $\alpha = 0$ 、体積変化が生じないとき $\alpha = \beta = 0$ となる。

供試体の体積変化が生じなくなった時点での最終的な収縮量と膨張量を図-22から求め、間ゲキ比に対してプロットすると図-23が得られる。図-23によると間ゲキ比が 0.6~0.7 では収縮も膨張も

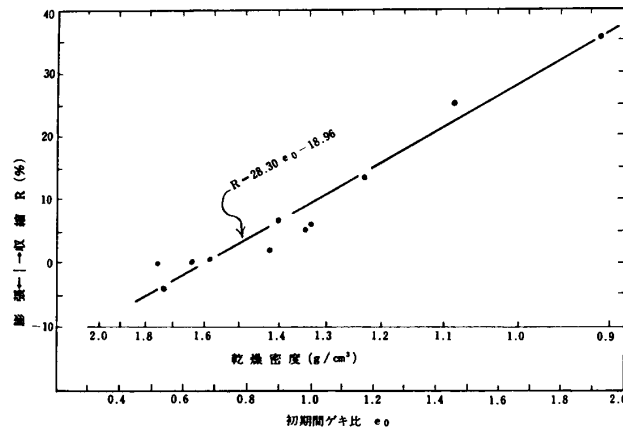


図-23 火山灰の間ゲキ比(乾燥密度)と最終体積変化量

生ぜず、それよりゆるい状態では収縮し、密な状態では膨張する。

ここで、火山灰は吸水によって収縮や膨張を起こすことがわかった。火山灰の排水・乾燥特性、スレーキング特性、および吸水膨張・収縮特性は、桜島地区の降雨状況との関係からみると、火山灰の変形・移動に重要な示唆を与えるものである。

4. 9 セン断抵抗角

土の強さとしては実用的にはセン断強さが採用され、それはモールの破壊包ラック線に直線を仮定したモール・クーロンの破壊規準式 (14) で表わされる。

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = 2c \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi \quad (14)$$

ここに、 σ_1 = 最大主応力

σ_3 = 最小主応力

c = 見かけの粘着力

ϕ = セン断抵抗角 (内部摩擦角)

式 (14) の関係は図-24のように表示される。また、式 (14) で表わされる直線はクーロンの式 (15) のようにも表わされる。

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

ここに、 τ = セン断抵抗

σ = 破壊面上の垂直応力

(15)

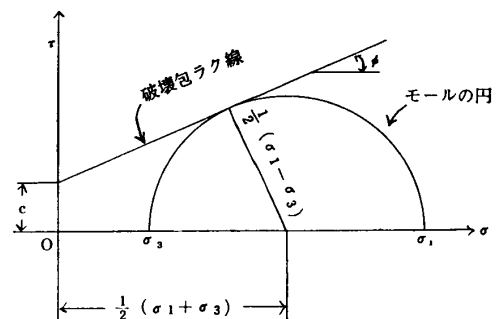


図-24 モール・クーロンの破壊規準

火山灰・火山砂においては、工学的には、 $c=0$ とみなしてよく、 $\tau = \sigma \tan \phi$ となる。三軸圧縮試験を行えば、 ϕ は式 (14) で $c=0$ とおいて次式から算定される。

$$\sin \phi = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \quad (16)$$

火山灰、火山砂の ϕ は、それらの安定性や掃流力の補正などを考える際の基礎的なパラメーターである。ここに、三軸圧縮試験によって求めた火山灰・火山砂の ϕ について述べる。

1) 試料および供試体

試料は、火山灰および 4.76 mm フルイを通過した火山砂である。火山灰の試験前含水比は4.9%、火山砂については2.9%あるいは3.4%である。試料の物理的性質についてはすでに前項までに述べたとおりである。

供試体は、水を張ったゴムスリーブ付きモールド中に試料を注ぎ込んで作成した。供試体の密度は、すべて異なるものである。その大きさは直径 5.0 cm、高さ 12.5 cm である。

2) 試験方法

試験は圧密排水三軸圧縮試験¹⁾を行なった。試験時の拘束圧は 0.5 kg/cm² と 1.0 kg/cm² の2段階であり、一定拘束圧のもとで軸圧を増加させ、軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) の最大値をもって破壊強さとした。また、供試体はすべて飽和状態である。試験中は軸差応力、軸方向ヒズミ、および体積変化を計測した。

3) 結果

表—14 火山灰、火山砂の排水三軸試験結果

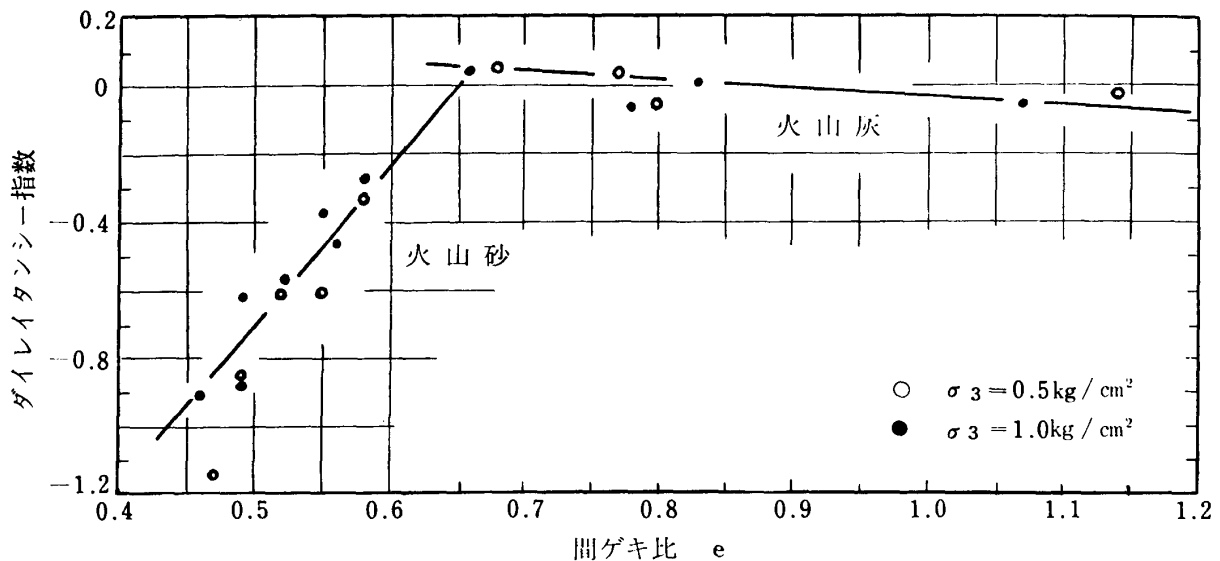
試料	初期間ゲキ比 e^*	拘束圧 σ_3 (kg/cm ²)	破壊時軸ヒズミ, ϵ (%)	ダイレイタン シ ー 指 数 **	最大軸差応力 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kg/cm ²)	せん断抵抗角 ϕ_d (度)
火山灰						
1	1.14	0.5	12.00	-0.03	1.01	30.2
2	0.80	0.5	10.40	-0.06	1.37	35.3
3	0.77	0.5	9.60	+0.03	1.27	34.0
4	0.68	0.5	8.00	+0.05	1.20	33.0
5	1.07	1.0	9.60	-0.06	2.42	33.2
6	0.83	1.0	10.40	0	2.56	34.2
7	0.78	1.0	10.40	-0.07	2.81	35.8
8	0.69	1.0	12.80	—	2.85	36.0
9	0.66	1.0	6.40	+0.04	2.58	34.3
火山砂						
1	0.58	0.5	3.61	-0.33	1.79	39.9
2	0.55	0.5	3.61	-0.61	2.26	43.9
3	0.54	0.5	3.60	—	2.04	42.2
4	0.52	0.5	3.20	-0.61	2.25	43.8
5	0.49	0.5	2.80	-0.85	2.48	45.5
6	0.47	0.5	2.80	-1.15	3.04	48.8
7	0.58	1.0	6.40	-0.28	3.60	40.0
8	0.56	1.0	4.08	-0.47	4.07	42.1
9	0.55	1.0	3.20	-0.38	3.84	41.1
10	0.52	1.0	3.60	-0.57	4.58	44.1
11	0.49	1.0	3.60	-0.89	5.39	46.8
12	0.49	1.0	3.20	-0.62	4.78	44.8
13	0.46	1.0	3.20	-0.91	5.86	48.2

* 火山灰、火山砂の乾燥密度 γ_d と間ゲキ比の間には次の関係がある。 $\gamma_d = 2.66 / (1 + e)$

** ダイレイタンシー指数の負号は膨張傾向を示す。

試験結果を整理し、せん断抵抗角に関係する諸量を、各供試体ごとに表—14に示す。表—14においてダイレイタンスー指数とは軸ヒズミ・体積変化曲線における最大軸差応力時の接線のコウ配を意味し、砂質土の強度に大きく影響を及ぼすものである。ここで、ダイレイタンスー指数が“負”の場合は供試体の膨張傾向を示し、“正”の場合は収縮傾向を示す。一般には、間ゲキ比が小さいほど（密度が高いほど）膨張傾向を示す。表—14の他の要子はすでに説明済みである。ただし、せん断抵抗角は排水試験によって決定したという意味で ϕ_d と表示する。

ダイレイタンスー指数を間ゲキ比に対してプロットすると図—25のようになる。火山砂のダイレイ



図—25 火山灰、火山砂のダイレイタンスー指数と間ゲキ比の関係、
ダイレイタンスーは収縮を正としている

タンスーは、間ゲキ比が小さいほど小さい。すなわち膨張性が高い。火山砂の粒子は角ばっているの
で、せん断が起こるにはかなりの膨張を必要とすることによる。火山灰のダイレイタンスーは、間ゲ
キ比が小さいほど大きくなって、収縮傾向を強めており、普通の砂や火山砂とは逆の傾向を示して
いるように見える。これは次の原因による。表—14からわかるように破壊時の軸ヒズミ（最大軸差応力
のとき）は、一般に間ゲキ比が小さいほど小さい傾向をもつ。したがって火山灰においては、間ゲキ
比が小さいとき供試体が収縮しつつある段階で最大強度に達し、間ゲキ比が大きいときは供試体の体
積変化がほとんど落ち着いた段階近辺で最大強度に達する。これが火山灰のダイレイタンスー指数が火
山砂とは逆の傾向を示す原因である。結論的には火山砂は膨張傾向、火山灰は収縮傾向の強い材料と
いえる。

せん断抵抗角 ϕ_d と間ゲキ比 e の関係を図—26に示す。間ゲキ比 e が小さいほど ϕ_d は大きく、
両者の間には次の直線式で近似される関係がある。

火山灰では、 $0.65 < e < 1.20$ の範囲で

$$\phi_d = -8.7e + 41.3 \text{ (度)} \quad (17)$$

火山砂では、 $0.45 < e < 0.65$ の範囲で

$$\phi_d = -71.0e + 80.8 \text{ (度)} \quad (18)$$

式 (17) あるいは (18) を用いて、間ゲキ比 e を知ることによって ϕ_d の概略値を推定すること
ができる。

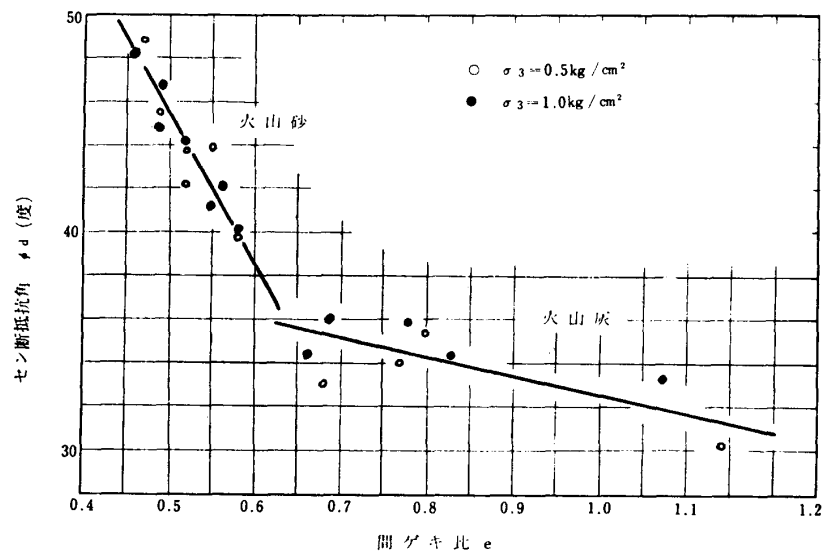


図-26 火山灰，火山砂のセン断抵抗角と間ゲキ比の関係

粒子のかみ合いがセン断抵抗角に寄与する部分の強さを補正して⁷⁾，粒子間の摩擦角を計算すると，それはほぼ33～35度の間にあり平均的には約34度である。これは，火山灰，火山砂ともに同じ値であり，また間ゲキ比によっても変わらない。図-27にそれが示されている。

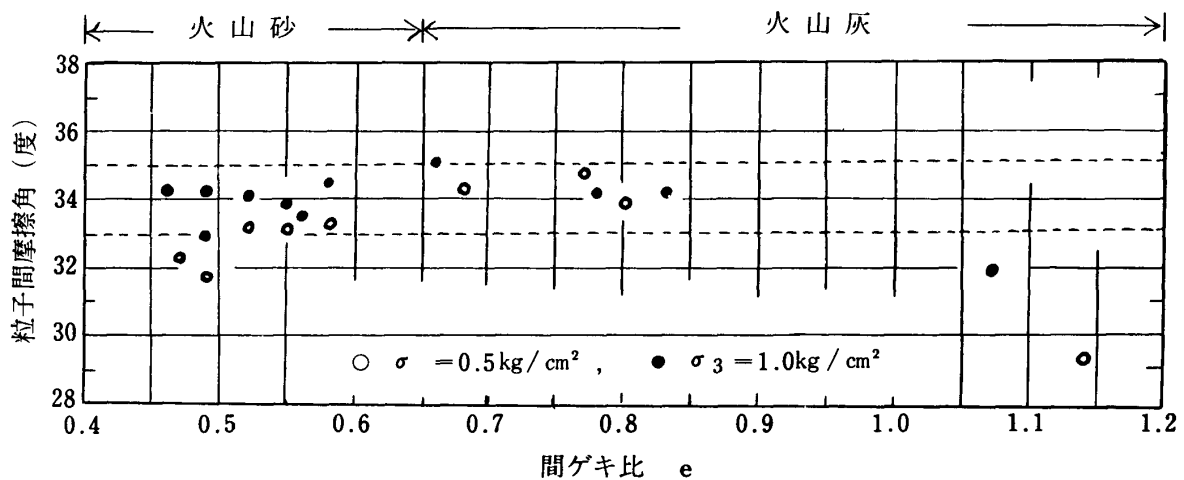


図-27 火山灰，火山砂の粒子間摩擦角と間ゲキ比の関係

5. 要 約

桜島火山地域における土砂害発生メカニズムを究明するうえで，基礎的資料となる降灰および溪床滞積土の物理的性質を検討した。その結果は次のように要約される。

(1) 試 料

降灰のうち細粒子部分を火山灰と呼び，粗粒子部分が多いものを火山砂と呼ぶことにする。試料としては火山灰，火山砂，および溪床滞積土を用いた。とくに火山灰は各種の試験に供した。

(2) 試 験

行なわれた試験は，土粒子の比重試験，粒度試験，現場密度など，透水試験，不飽和透水試験，排

水・乾燥試験, スレーキング試験, 膨張・収縮試験, 三軸圧縮試験, および最小密度試験である。

(3) 土粒子の比重

これは, 火山灰, 火山砂ともに2.66, 溪床滞積土は2.62である。

(4) 粒度組成

火山灰は粘土分9%, シルト分24%, 砂分67%のシルト質砂, 火山砂はシルト分以下が7%, 砂分59%, レキ分34%の細粒分まじり砂である。溪床滞積土の粒度は場所によって大きく変化し, レキ質土, 砂質土, 細粒分まじり砂などとして分類される。

(5) 乱さない溪床滞積土の状態

地獄河原では, 含水比15.4~24.6%, 湿潤密度 1.53~1.69 g/cm³, 乾燥密度 1.22~1.46 g/cm³, 間ゲキ比0.80~1.14, 軽石が多い古河良川では, 含水比25.4~36.6%, 湿潤密度 1.22~1.26 g/cm³, 乾燥密度 0.89~1.00 g/cm³, 間ゲキ比1.61~1.93である。

(6) 火山灰の最小密度

降雨などの影響を受けていない降灰の滞積密度を知るために, 火山灰の最小密度を測定した。その値は, 滞積状況で異なるが, 乾燥密度の最小値という点から決定すると 1.31 g/cm³ 程度である。そのときの間ゲキ比は1.030である。

(7) 透水性

火山灰と火山砂について透水試験を行なった。

火山灰の透水係数は時間とともに増加する傾向を持ち, 間ゲキ比と透水係数の対数の間に直線関係が認められ, さらに 10^{-4} ~ 10^{-5} (cm/sec) のオーダーの範囲にある。

火山砂の透水係数は, ゆるい状態では時間とともに減少し, 密な状態ではわずかながら増加する傾向がみられる。また, 間ゲキ比の平方と透水係数の間に直線関係を認めることができる。透水係数は 10^{-2} ~ 10^{-3} (cm/sec) の間にある。

(8) 不飽和時の透水性

これは火山灰についてだけ試験した。不飽和火山灰の透水係数は飽和したもの比べて小さく, $(4.5 \sim 8.5) \times 10^{-5}$ (cm/sec) である。

(9) 重力排水・蒸発乾燥特性

試料として火山灰と火山砂を用いた。重力排水は火山灰, 火山砂とも24時間以内でほとんど終了する。重力排水後の含水比は, 間ゲキ比によって異なり, 火山灰で13~18%, 火山砂で10~12%である。空気乾燥状態での含水比は0.38%程度である。火山砂は火山灰より水分消失速度が速い。含水比の時間的变化は, $w=at^b$ によって表わされる (w =含水比, t =経過時間)。

(10) スレーキング崩壊

火山灰についてスレーキング試験を行なった。供試体の乾燥とともにスレーキング崩壊の時間は短くなる。崩壊所要時間 t と含水比 w の間には, $\log t = m \log w + h$ の関係があり, 含水比が低いほど崩壊時間は小となる (m, h =定数)。

(11) 吸水膨張・収縮特性

火山灰に吸水させて体積変化状況を試験した。

間ゲキ比が0.6~0.7では吸水によって収縮も膨張も生じなく, それよりゆるい状態では収縮し, 密な状態では膨張(膨潤)する。収縮・膨張は吸水開始後5~10分でほとんど全量を終了する。吸水による供試体高さの変化率 R と経過時間 t との間には, $R = \alpha \log t^2 + \beta \log t + \gamma$ の関係がある。収縮のとき $\alpha > 0$, 膨張のとき $\alpha < 0$, 体積変化を生じないとき $\alpha = \beta = 0$ となる。

(12) セン断抵抗角

火山灰、火山砂について、供試体の密度をいろいろかえて、拘束圧が 0.5 および 1.0 kg/cm^2 のもとで圧密排水三軸圧縮試験を行なった。

火山砂はせん断を受けると膨張傾向が強く、火山灰は収縮傾向が強い材料である。したがって外力を受けたとき、火山灰は火山砂に比較して不安定になりやすい。火山灰のせん断抵抗角 ϕ_d は $30 \sim 36$ 度、火山砂の ϕ_d は $40 \sim 50$ 度であり、いずれも間ゲキ比 e が小さいほど ϕ_d は大きい。 ϕ_d と e の間には、 $\phi_d = n e + l$ の関係があり、 e を知ることで ϕ_d を推定できる。粒子のかみ合いの補正を行ったときの摩擦角は 34 度内外である (n, l = 定数)。

6. あとがき

桜島火山による降灰（火山灰、火山砂）の物理的諸性質について述べた。また 2, 3 の性質については溪床滞積土についても試験した。桜島における土砂害の“ひきがね”の役割をはたしているのは、ことに火山灰であると考えられるので、火山灰についてはとくに各種の試験を行ない、火山灰の実態を明らかにすることを試みた。

火山灰の透水性、排水・乾燥特性、スレーキング特性、および吸水膨張・収縮特性などの水理的性質は、桜島の気象状況（降雨および日照）との関連でとらえると、降灰の流動開始に重要な問題が出てくるかも知れない。また、火山灰の物理的・力学的性質も降灰の流動開始や開始後の問題に関して重要である。桜島の土砂害の発生機構については、今後解明されるべき多くの問題が残されている。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編；土質試験法，土質工学会，昭和44年10月。
- 2) 土質工学会編；土質調査法，土質工学会，昭和39年4月，p.177～207。
- 3) Taylor, D.W.; Fundamentals of Soil Mechanics, J. Wiley, 1948, p.116。
- 4) 土質工学会編；日本の特殊土，土質工学会，昭和49年8月，p.225。
- 5) 山崎不二夫監修；土壌物理，養賢堂，昭和44年9月。
- 6) Terzaghi, K. and Peck, R.B.; Soil Mechanics in Engineering Practice, J. Wiley, 1948, p.128～129。
- 7) Haruyama, M; Effect of surface roughness on the shear characteristics of granular materials, Soils and Foundations, Vol.9, No.4, Dec. 1949, pp.48～67。

Summary

As a basic research for the study of disaster due to debris in Sakurajima volcanic region, some physical properties of volcanic ash and sand, and of gully-bed material, were investigated. Sakurajima volcano, located in Kagoshima Bay, southern Kyushu, Japan, violently brings about explosive eruptions in recent years, and causing a disaster by debris flowing in time of rainfall. The study is summarized as follows:

Samples

Finer, dust-sized particles of all the fragments blown out by volcanic explosions are called volcanic ash, and the coarse particles, volcanic sand. Samples used in the study are the ash, the sand, and the gully-bed material.

Tests

On samples, some tests were carried out about the following items: specific gravity of grains, grain size distribution, water content and density, permeability, drainage and evaporation, slaking, swelling and contraction, shearing strength, and the minimum

density of the ash.

Specific gravity of grains

The values of specific gravity of grains for the ash and the sand were 2.66, and that for the bed material was 2.62.

Grading

The ash is silty sand consisting of the clay-fraction of 9%, silt of 24%, and sand of 67%. The sand is the one with some fine particles consisting of the fraction smaller than silt of 7%, sand of 59%, and gravel of 34%. The grading for the bed material differs remarkably from location to location, and therefore it is classified into gravel with fines, sand with fines, and sand with some fine particles.

In-situ properties of bed material

The bed material in the Kurokami river has water content from 15.4 to 24.6%, wet density 1.53 to 1.69 g/cm³, dry density 1.22 to 1.46 g/cm³, and void-ratio 0.80 to 1.14. The one with pumice in the Fukura river has water content from 25.4 to 36.6%, wet density 1.22 to 1.26 g/cm³, dry density 0.89 to 1.00 g/cm³, and void-ratio 1.61 to 1.93.

Permeability

The coefficient of permeability showed approximately the values within the degree of 10^{-5} to 10^{-4} cm/sec for the ash and 10^{-3} to 10^{-2} cm/sec for the sand. The coefficient of permeability for the ash increases with the elapsed time, and the relationship between logarithm of the coefficient and void ratio is expressed by a straight line. That for the sand decreases with the elapsed time in loose state, showing the tendency of slight increase with the elapsed time in dense state, and the relationship between the coefficient and the square of void ratio is something like linear. The coefficient of permeability for unsaturated ash was smaller than that of the saturated, the value being about $(4.5 \sim 8.5) \times 10^{-5}$ cm/sec.

Drainage and evaporation

The drainage due to gravity for both the saturated ash and the sand was noted to be almost finished within 24 hours. The water-content after drainage changes with void ratio, being 13 to 18% for the ash and 10 to 12% for the sand respectively. The water-content in an air-dried-state after evaporation was about 0.38%. The relationship between water content, w , and the elapsed time, t (hour), is expressed by

$$w = at^b$$

where a , b = constant changing with void-ratio.

The water-disappearance-rate for the sand was larger than that for the ash.

Slaking

The relationship between time required for slaking, t (sec), and water content, w , is expressed by

$$\log t = 0.71541 \log w + 1.5694.$$

t decreasing with the increase in the degree of aridity.

Swelling and contraction

The changes of height of specimens due to soaking were measured on the ash. The

specimens brought forth no change of height by being soaked in the extent of 0.6 to 0.7 void-ratio, and contracted in the state looser than its void-ratio, swelling up in the state denser than its void-ratio. The relationship between the rate of change of height, R , and void-ratio, e , is described by

$$R = 28.30e - 18.96.$$

Adding to this, the swelling and the contraction were almost finished, in 5 to 10 minutes, after the beginning of the soaking.

The angle of shearing resistance

Drained triaxial compression tests were performed on the ash and the sand varied their void-ratios, under the confining pressure of 0.5 and 1.0 kg/cm². The tendencies of contraction for the ash, and of dilation for the sand, were very dominant. The angle of shearing resistance for the ash was 30 to 36 degrees, and that for the sand 40 to 50 degrees respectively. The angle of shearing resistance correcting the influence of interlocking effect was about 34 degrees for both the ash and the sand.

Minimum density of the ash

The minimum dry-density of the ash was 1.31 g/cm³, and the void ratio corresponding to the density was 1.03. These values may give some contributions for the estimation of the density of fall-ash deposits.