マサ土法面の崩壊，特にスレーキングについて

矢 橋 晨 吾*
金 光 達 太 郎*
佐 久 間 護*

Studies on the Slope Failure by the Slaking of Decomposed Granite Soils

Shingo YABASHI

Tatsutarō KONKŌ

Mamoru SAKUMA

摘要：前報では、現地マサ土の基本的性質特に、土壌侵食に関係する物理量を求め、法面侵食や崩壊との関連性を明らかにした。さらに、法面造成に伴う試験施工を実施し、その結果について検討した。本報では、法面の崩壊機構に重要な示唆を与えるスレーキングについて多面的に検討し、スレーク時間やスレーク後の粒度組成に供試体作成時の含水比・密度や試験時の含水比などが少なからず影響していることを明らかにした。

1. まえがき

土は水分を多量に吸収すると体積が膨張したり、強度が弱くなるなど、水とのかかわりによって、その性状が大きく変化することが特徴の一つである。また、土塊や締固め土を水浸させたり、湿潤状態にすると細かく崩壊する、いわゆるスレーキング現象¹⁾がしばしば見られる。

スレーキングが問題となる土は一般に粘性土とされているが、粗粒子が粘土・シルトなどの微細粒子や腐植・その他の物質で結合されている砂質土もその対象となる。すなわち、水による崩壊が顕著に現われるマサ土やシラスがその代表的な例であろう。

前報²⁾では、本研究の対象としているマサ土法面の侵食や崩壊機構を解明するため、その基本的性質や転圧に伴う物理性の変化に基づいて検討した。

本報では、さらに侵食・崩壊機構を究明するうえで極めて有効なスレーキング特性を取り上げ、各種条件のもとにおける供試土のスレーク時間を中心に水中崩壊機構を検討した。

なお、本研究はマサ土の侵食や崩壊を植生によっても防止することについての基礎研究の意味をもっている。しかし、ここでは植生ないしはそれにかかわる諸問題を切り離し、主に、土の条件を中心とした耐水食・崩壊性について報告するものである。

2. 実験方法

土塊のスレーキング現象は土壌侵食の程度を分散率や侵食率あるいは粘土比などいわゆる侵食定数で判断する従来の方法に対して、水による崩壊の様相を直接観察することができる点で有効と考える。

スレーキング試験は大きく2つの方法に分けることができる。その一つは供試体を一定時間水浸させた後に崩壊した土量を乾燥させて秤量し、全重量に対する比率(崩壊率)で表わす方法と、供試体が任意に定めた条件まで崩壊する時間、すなわち、スレーク時間を求める方法である。

いずれの方法を採用するにしても長短があるが、それはスレーキング現象が多くの要因、すなわち、含水量、乾燥密度、交換イオンの種類と量、養生時間、風乾程度、形状・寸法、温度などの影響を受けることによる。したがって、実験はこうした要因をできるだけ単純化して行うことが要求される。

本実験では、供試体が水中で安息角に達するまでの時間を求め、これをスレーク時間とした。

(1) 供試体：直径 $\phi = 3.5$ cm モールドを用いて突固めエネルギーを表—1

表—1 突固めエネルギー

に示すとおりの5種類とし、供試体間のバラツキを少なくすることをねらいとして、ほぼ同一寸法、形状に成形できるように予備実験を重ねた。

供試体の含水量は、

突固め回数 N (回)	突固めエネルギー Ec (cm・kg/cm ²)
3	2.8
6	5.7
9	8.5
12	11.3
15	14.2

締固め時および養生時間に変化をもたせ、広範な条件のもとで実験を行なった。なお、供試体の寸法は、直径3.5 cm、高さ3 cmの円柱体を標準とした。

(2) 実験装置および方法

* 千葉大学園芸学部

実験装置は図一1に示すとおりである。実験方法は水の出入が自由にできる金網製の籠の底面にプラスチック板を置き、その上に供試体を載せ、透明のガラス水槽内の水深10cmの位置に静置させる。静置直後から供試体が安息角になるまでの崩壊時間を測定する。なお、安息角の目安は10個の供試体の平均値とした。

図一1 スレーキング試験装置

3. 実験結果と考察

(1) 供試土の性質

供試土は前報²⁾で述べた母畑地区第6工区(1-A)および第11工区(2-A)から採取したもので、その基本的性質は表一2に示したとおりである。本地区のマサ土は西南日本のものと比べて、おおむね真比重が大きく、強熱減量からみた風化度が比較的小さいといった特徴がある。日本統一土質分類による土性名はSF(砂質土)である。しかし、砂丘砂や川砂の均等係数(Uc)が1.0~2.0を示すことに比べて、供試土のUcはかなり大きいことから、粒度分布が良く、相対的に少量とはいえ、微細粒子がコンシステンシーや流動現象に対して重要な意味をもつものと考えられる。土壌侵食の程度を判断するための分散率はDr=50.0%および46.7%、侵食率はEr=160.9%および140.3%となっていて耐食性の限界値³⁾(Dr=15.1%, Er=12.2%)をはるかに越えていることから水食を受けやすい素因を有しているといえよう。

大部分の砂質土は砂分の影響が強いため、コンシステ

ンシー定数を求めることが困難であり、N.P.となる場合が多いが、供試土のわずかに含まれている微細粒子の流動やスレーキング、あるいは膨潤・膨張現象などのかかり合いを見るため、粒度調整した試料を対象に流動曲線を求め、試料2-Aについて図

図一2 流動曲線(試料2-A)

一2に示した。図から、粒径の大きい粒子の含有量が増加するほど液性限界(LL)は低下し、流動指数(I_f)は小さくなっている。こうした現象は粘土に砂を混入し、混合率を高めていった場合にも見られるが、本試料の場合には、各々の最大粒径に差違があり、したがって、組成の内容も変っているため、粘土・砂混合土の性状とはやや様相が異なっているものと思われる。すなわち、最大粒径(d_{max})が大きくなることは、試料中の砂分が増加することを意味し、充填や練返しなど、外力による粗粒分の流動性を困難にさせ、流動における水分の役割は極めて重要となる。一方、d_{max}が小さくなることは相対的に細粒分が増加することになり、粗粒分の流動に対してはその役割を水分と細粒分が受けもち流動は容易になるう。

マサ土はこうした流動特性をもつことから締固めを工夫することによって、人為的に土構造を緊密化することが可能となり、密度あるいは間隙構造さらに透水性をコントロールすることができる。

(2) スレーキング特性

前述のとおり、土塊のスレーキングには多くの要因が関与するが、ここでは4つの条件を設定した。すなわち、第1に、締固めエネルギー(E_c)、第2に、締固め時の含水比(W_c)、第3に、養生時間(試験時の含水比:W_s)、第4に、土質安定剤(ここでは石灰および高分子系土壌団粒剤⁴⁾)の添加、である。

また、主たる検討事項は、供試体のスレーク時間(t_s)並びにスレーク後の団粒分析による粒度分布である。

表一2 供試土の基本的性質

試料名	基本的性質 真比重 粒径2mm以下 Gs	真比重 自然土 Gs	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	10% 粒径 D ₁₀ (mm)	50% 粒径 D ₅₀ (mm)	90% 粒径 D ₉₀ (mm)	均等係数 Uc	分散率 Dr (%)	侵食率 Er (%)	強熱減量 Lig (%)
1-A	2.86	2.72	72.8	18.6	8.6	0.0066	0.20	0.60	37.8	50.0	160.9	3.6
2-A	2.88	2.77	62.8	30.0	7.2	0.0085	0.11	0.56	16.5	46.7	140.3	5.2

(i) 供試体の乾燥密度

供試体の基本物理量である乾燥密度 (ρ_d) は図-3 に示すとおり、 E_c および W_c によって変化している。すなわち、 E_c の増大に伴って ρ_d もおおむね増大している。一方、 W_c の増加は ρ_d を大きくするが ρ_{dmax} を

図-3 締固め曲線

経てからは逆に小さくなり、いわゆる山形の締固め曲線を示している。

(ii) W_s が風乾状態の場合

図-4 は、 $E_c = 14.2$ ($\text{cm} \cdot \text{kg}/\text{cm}^3$) で、 W_c を変えて供試体を作成し、全供試体を風乾状態 ($W_s \approx 3.0\%$) まで乾燥させた後、スレーキング試験を行ない、 $t_s \sim W_c$ および $\rho_d \sim W_c$ の関係を示したものである。図から t_s は W_c の増加に伴って長くなるが、ある含水比 (ここでは $W_c = 20.5\%$) をピークとして、それ以後は W_c の増加とともに t_s は短くなっている。

これに対し

で、 $\rho_d \sim W_c$ の関係も、 W_c の増加に伴って ρ_d は増大し、最適含水比 (W_{opt}) を経て小さくなるいわゆる締固め曲線を描くが、 t_s のピークを示す W_c

と W_{opt} は 図-4 スレーキング時間・乾燥密度と含水比一致しない。こうした現象から、 t_s は必ずしも ρ_d のみによって左右されるものではないことが推定される。

(iii) 24時間養生後のスレーキング特性

W_c を4段階とし、 E_c を表-1 に示したおりの5種類に変えて供試体を作成し、24時間養生した後、各試料の t_s を求めた。図-5 は $E_c \sim t_s$ の関係を、代表的に $W_c = 10.2\%$ 、 17.9% の2段階について、また、図-6 は $E_c = 5.7$ ($\text{cm} \cdot \text{kg}/\text{cm}^3$) について $W_c \sim t_s$ の関係を示したものである。図-5 から、 W_c の異なる2曲線は、その変化の様相が異なるものの、 t_s は E_c の増大とともに

長くなっている。 W_c の差による曲線形状の相違については、 $W_c = 17.9\%$ は W_{opt} に近く、 $W_c = 10.2\%$ はやや乾燥した状態であるため、水分による締固め効果の影響が現われたものと判断される。すなわち、 $W_c = 10.2\%$ の供試体は E_c を増大させても、 t_s の上限が早期に現われることが予測される。

突固めエネルギー E_c ($\text{cm} \cdot \text{kg}/\text{cm}^3$)

図-5 突固めエネルギーとスレーキング時間

次の図-6 については、 W_c が増加するに伴って t_s も増えているが、 W_c の最大値 (31.2%) は当然 W_{opt} を越えた値であり、 ρ_d は ρ_{dmax} より小さくなっている。しかし、 t_s は最大値を示していて、前項で述べた風乾状態におけるスレーキング現象とはその様相がかなり

図-6 突固め時含水比とスレーキング時間

異なっている。こうしたおおよび W_c が t_s に少なからず影響を与えていることは、スレーキングのメカニズムが乾燥土と湿潤土で異なることに起因しているものと考えられ、これらについては次項で検討することにした。

(iv) W_c と t_s との関係

図-7～図-13 は W_c を一定にし、 E_c を変えた場合の t_s の変化状況を表わしたものである。 W_c が小さい状態から W_{opt} を越え、通常での突固め操作が困難になる含水比まで示した。図から、いくつかの特徴が見られる。まず第1に、養生時間を一定とした場合、 W_c が増加するに伴って W_s の供試体間の変化幅が大きくなっている。第2には、おおむね、 E_c (これは ρ_d と密接な関係をもつ、すなわち、 E_c の増大が ρ_d を増大させる) が大きくなるにしたがって t_s が増大している。すなわち ρ_d の増大は t_s を長くする傾向がある。第3には、供試体間の t_s の変化幅は図-11の $W_c = 13.2\%$ を最大として、その前後で減少している。ただ、その様相は W_s の大小で差異が見られ、 W_c の大きい状態でかなり乱れている。

こうした結果について若干検討してみよう。まず、第1の W_s の問題であるが、養生時間を同一にした場合は、

W_c の大きい供試体ほど乾燥に時間を要するから W_s には差が現われ、同時に変化幅も大きくなる。第2の E_c と t_s との関係については、前項でも述べたことと同様の理由が考えられる。すなわち、 E_c の増大は ρ_d を大きくし、基本的にはスレークしにくくなる。第3の W_c が増加するに伴って $t_s \sim W_s$ 曲線に乱れが目立っている点については、関係因子が増えているためであろう。すなわち、 W_c が W_{opt} 以上の段階では、供試体に加わる E_c が必ずしも一様ではなく、供試体内の不均一性（例えば ρ_d に差が現われる）が大きくなることによる。さらには、 W_s の差によるスレーキングのメカニズムの相違から検討しなければならない。すなわち、乾燥した供試体では水浸時、外周部より水が毛管力により土中に吸引され、内部空気圧は上昇し、土に引張り応力が生じて破壊し、空気を吹き出しながら土は速やかに崩壊する。一方、湿潤した供試体は、水浸により土のもつ内的有効圧として作用していたメニスカスによる毛管力は減少して土粒子間の結合力が低下し、さらに膨潤現象が加わって結合力は一層弱まり自重で崩落する⁵⁾。こうしたメカニズムの相違が大いに関係しているものと考えられる。

図-7 試験時含水比とスレーク時間 ($W_c = 3.6\%$)

図-8 試験時含水比とスレーク時間 ($W_c = 5.4\%$)

図-9 試験時含水比とスレーク時間 ($W_c = 8.1\%$)

図-10 試験時含水比とスレーク時間 ($W_c = 12.8\%$)

図-11 試験時含水比とスレーク時間 ($W_c = 13.2\%$)

図-12 試験時含水比とスレーク時間 ($W_c = 20.5\%$)

図-13 試験時含水比とスレーク時間 ($W_c = 25.8\%$)

(V) 土質安定剤の添加による影響

まず、石灰については添加率⁶⁾が3%以上になるとスレークしなくなり、1%および2%については図-14、-15に示すとおり、 W_c および W_s が増加するに伴って、 t_s もおおむね長くなるが、添加率が2.5%になると、 W_c が9.0%以下ではスレークするが、10.6%以上ではスレークしなくなる。

こうした現象は石灰の H_2O や CO_2 との反応による結合作用の現われと判断されるが、それには、添加量に関係していることはいうまでもない。

次に、高分子系土壌団粒剤については、供試体にコーティングした場合と、供試土に添加して試料を調整し、供試体を作成した場合とでは t_s が大きく異なる。すなわち、前者のコーティングした供試体では t_s が8分20秒となったが、後者では3分以下であり、無添加の供試体と大差がない。これは高分子剤の土粒子に対する機作の発

図-14 締固め時含水比とスレーク時間

図-15 試験時含水比とスレーク時間

現メカニズムからして当然のことであろう。

(vi) スレーク後の分散特性

供試体のスレーキング特性をスレーク後の分散状態から検討する。ここでは、各試料の団粒分析の結果から団粒係数⁷⁾「 $K : (0.25 \sim 7 \text{ mm}$ 径の重量%) / (0.25 mm 以下の団粒 + 7 mm 以上の土塊重量%)」, K の増加は粗団粒の増加を伴うことから、耐食性の指標となる」を求め、表-3、-4、-5に示した。

表から、無添加供試土の K は0.75~0.91を示すのに対して、石灰添加により K の値は大幅に変化している。すなわち、供試体間の条件は異なるものの、 K の範囲は、 $0.55 < K < 3.7$ となり、最小値は無添加土より小さくなっているが、最大値は著しく増大している。一方、高分子系土壌団粒剤添加土については試料数が少ないため、深くは追究できないが、 K の範囲は、 $0.80 < K < 1.29$ となり、平均的に見て、無添加土より大きくなっていることがわかる。したがって、こうした土質安定剤の添加による K の増大は団粒化を増進させ、同時にスレーキングに対する抵抗も増大させるものと判断される。

表-3 無添加試料の団粒係数

4. ま と め

土の水による侵食や法面の崩壊は、素因である土の性質が複雑に絡み合って発生し、結果的様相としてわれわれの前に現われる。こうした現象の研究は、従来、分散率や侵食率などの指標を求めることが中心であったが、最近ではスレーキング現象を追究することの重要性が認められるようになった。しかし、スレーキング現象には、極めて多くの因子が関係しているため、メカニズムの解明はかなり困難となっている。

本報では、マサ土を対象に、スレーク時間並びにスレー

E_c ($\text{cm} \cdot \text{kg} / \text{cm}^2$)	K
5.67	0.84
8.49	0.90
11.32	0.80
14.15	0.91
8.49	0.75

表一 4 石灰添加試料の団粒係数

石 灰 添 加 率 (%)							
1.0		2.0		2.5		3.0	
W_s (%)	K	W_s (%)	K	W_s (%)	K	W_s (%)	K
3.7	0.74	3.9	0.78	3.4	0.75	3.4	0.85
5.1	0.92	5.3	3.71	4.4	1.20	5.3	1.64
7.3	0.72	8.1	2.31	6.1	2.03	—	—
9.6	0.55	13.7	1.56	—	—	—	—

ーク後の分散特を求め、

要因として取り上げた ρ_d , E_c , W_c および W_s 表一 5 高分子系土壌団粒剤
添加試料の団粒係数

などと t_s との関係をは
ば明らかにした。それ
らをまとめると以下の
とおりになる。

(1) 供試土には少量
含まれている微細粒子
が水との相互作用で締
固めや流動に少なから
ず寄与している。すなわち、 E_c を増大させることによ
って ρ_d を高め、スレーキングに対する抵抗を大きくして
いる。

(2) W_s の t_s に与える影響は大きく、これはスレーキ
ングのメカニズムが乾燥土と湿潤土とでかなり異なっ
てことに起因しているものと考えられる。

Summary : It is known that water erosion and slope failure often occur with the relation between soil properties and water flow as a consequent aspect. The studies on these phenomena were carried out mainly to look for the index of dispersion ratio and erosion ratio in earlier times. However, the investigation of the slaking phenomena have become very important in recent years. It is very difficult to clarify the mechanism of the slaking phenomena because of the many factors. In this paper, we examined more widely for the mechanism of the slope failure by slaking test. Consequently, it became clear that the slake time and grain distributions after slaking are influenced considerably by the moisture ratio, the density of test piece and moisture content of the slaking test. The conclusions obtained are summarized as follows:

- 1) A little fine particles of the sample contribute to the compaction effect and the behavior of flow by the interaction with water.
- 2) The slake time is influenced by significantly the moisture ratio of slaking test. There is considerable difference in mechanism of slaking between dry and wet sample.
- 3) It is able to make the slake time longer and increase the large aggregate by attaching the soil stabilizer.

(3) 土質安定剤の添加は t_s を長くしたり、粗団粒の増加をもたらすことから、工夫することによってスレーキングに対する抵抗を大きくすることができる。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、東大教授竹中肇先生並びに山形大教授東山勇先生から多くのご助言を頂いた。厚く御礼申し上げる次第である。なお、本研究の一部は昭和58年度文部省科学研究費（一般B）の補助を受けたことを付記しておく。

引 用 文 献

- 1) 東山勇 (1979) : スレーキング : 農土誌47(11), 50
- 2) 矢橋晨吾, 金光達太郎, 佐久間護 (1983) : マサ土法面の安定化に関する研究 : 造園雑誌46(5), 188 — 193
- 3) H・E・Middleton (1930) : U. S. D. A. Tech. Bull 178, 1 — 16
- 4) 神部広之, 増川熙之, 杉山英雄, 堀要 (1975) : 暗キョ排水機能促進剤について(I) : 農土誌43(5), 5 — 12
- 5) 森麟 (1978) : スレーキング : 土と基礎25(6), 29 — 30
- 6) 青木正雄, 辻厚志 (1981) : ポット試験による芝草の生長について——石灰安定処理ノリ面の緑化に関する研究 I—— : 農土論集92, 65 — 70
- 7) 農業土木学会 (1983) : 農業土木標準用語事典 187