33. マサ土法面の安定化に関する研究

矢 橋 農 吾* 金 光 達 太 郎*
佐 久 間 護*

Studies on the Stability of Slope of Decomposed Granite Soils

Shingo YABASHI Tatsutaro KONKO Mamoru SAKUMA

摘要：道路、宅地や公園等の建設、農用地の造成に際しては、法面の長期安定化をはかることが重要である。それには盛土地盤の理工学性を改善すると同時に植栽基盤としての適当な条件を備えなければならない。本報では現地土壌の基本物理量や土壌侵食定数を把握する。次いで、ブルドーザーによる転圧試験を行い、締固めに伴う土の物理性（密度・透水性・間隙特性・水分特性）の変化を追跡し、法面崩壊機構の一端を考察する。

1. まえがき

道路、宅地や公園等の建設、農用地の造成に際して、法面の安定化をはかることは極めて重要である。しかし、対象地が特殊土といわれているシラスやマサ土のような砂質系の土が広範に分布している地帯であれば、盛土用土が本質的に土壌侵食を受けやすく、また崩壊しやすいため、人為的に耐食性を増強させ、同時に、崩壊に対する抵抗性を強化しなければならない。

マサ土とは「花崗岩質石（花崗岩、花崗せん緑岩等）の結晶性深成岩および、これと同質の片麻岩が風化して、その場所に残留している残積土（崖錐）等である」¹⁾と定義されている。

その主な分布は西南日本すなわち、近畿、中国、四国北部および中部地方の一部に多いといわれている²⁾。しかし、近年、関東地方北部から東北地方中・南部にかけて走る阿武隈、八溝山系においても、大規模の農用地開発をはじめ、宅地造成並びに道路建設等、種々の開発行為により、植生がはがされ、ローム質の表土が削られる結果、下層土としてマサ土が表面に現れるようになった。

こうした開発行為の進行に伴って、裸地化したマサ土斜面は、降雨や融雪水等が誘因となり、表面侵食による土砂の流亡あるいは大小規模の法面崩壊が発生し、場合によっては二次災害発生の危険状態に陥ることもある。

したがって、土壌侵食や法面崩壊に対する防止対策を早急に具体化しなければならないことはいうまでもないが、それには侵食現象の素因である現地土壌の特性を十分に把握することが先決であろう。

本研究は、マサ土地帯に造成される法面の安定化をはかることを目的とするが、それには盛土地盤として備えるべき適当な密度、透水性、強度、耐食性の増強等、土の理工学性の改善を第一に考えねばならず、また同時に植生による法面保護の効果を重視し、植栽基盤としての条件を備えることも検討するものである。

まず本報では、マサ土の基本的性質を明らかにし、法面造成の基本となる転圧試験の結果について考察することにした。

2. 調 査 地

調査の対象地は、図一に示すとおり、福島県東部を縦走する阿武隈山系の南部に位置し、地区の西縁を南北に貫流する阿武隈川の右岸沿いに南北に細長く展開する丘陵台地一帯である。

地区内は、無秩序に錯綜して所在する山林原野、既耕畑、とその谷間から河岸段丘および沖積平地にかけて開かれた水田等からなっている。

開発は2,580.0 haを対象とした国営の総合農地開発事業（母畑地区）であり、事業の着工は昭和43年である。

図一 調査地区

* 千葉大学園芸学部

一般に地形は緩傾斜をなし、大部分は火山灰性土壌に覆われ、その下部は花崗岩類の種々の風化過程にあるマサ土が厚く層をなしている。また、地区の西側には棚倉破砕帯と称される幅2～3kmの破砕された結晶片岩や花崗岩類からなる地塁が北北西の方向に走っている⁴⁾。

現地では各種工事の進行に伴って切土・盛土が行われ土地造成が進行しているが、造成中あるいは造成後の比較的短い期間に全く裸地化し、このときに降雨や融雪が急激に生起して、表層土壌の流亡や盛土法部の崩壊が各地で発生している。

また、造成後かなりの期間経過し、その間に一応植生も着き、一見安定していると思われる個所が突如として崩壊する事例もあるといった現況である。

3. 調査項目と方法

地区内に展開されている農用地造成地のうちの2工区を調査箇所として設定し、各種の法面を対象に調査を進めている。現地では土壌採取をはじめ、各地の侵食・崩壊状況を調査し、法面造成を目的としたブルドーザーによる転圧試験を実施した。

転圧試験には、11t普通ブルドーザーおよび14t湿地ブルドーザーの2機種を用い、まき出し厚さは30cmおよび50cmの2種類、転圧回数は3回と5回とした。それぞれの転圧試験ごとに100ml試料円筒により不攪乱試料を採取し、密度、透水係数、水分特性等を調べた。

さらに攪乱試料を用いて、比重・コンシステンシー・粒度組成等の基本物理量をはじめ分散率や侵食率等の侵食定数並びに膨潤度⁵⁾を測定し、締固め特性も調べた。

4. 調査結果

(1) 土壌物理性

2地区から採土した5試料についての粒径加積曲線を図-2に示す。土性は、試料No.2-Bはロームの影響の強い砂質ロームに分類されるが、他の4試料は砂ないし

図-2 調査地土壌の粒径加積曲線

砂質ロームとなっていて全体に粘着性に乏しい土であることがわかる。

表-1 現地土壌の侵食定数

試料名 No.	真比重 Gs	コロイド 含量 (%)	水分当量 CME %	分散率 Dr (%)	侵食率 Er (%)
1-A	2.83	5.1	16.4	50.0	160.9
1-B	2.84	5.9	23.2	46.1	181.1
1-C	2.96	2.8	18.3	25.0	163.2
2-A	2.88	5.6	16.8	46.7	140.3
2-B	2.68	7.2	18.2	33.3	84.2

表-1は、土壌侵食に関係の深い基本物理量である。真比重(Gs)は、標準的な値として知られている石英砂(Gs=2.65)や西日本に分布するマサ土(Gs=2.65~2.70)に比べていずれも大きい値を示している。また、コロイド含量は少なく、分散率、侵食率ともに極めて大きい値である。

次に、図-3は試料No.1-Aを対象に公定法(JISA 1205)に基づいて、最大粒径420μm以下の粒径範囲に試料調整し、各試料について求めた流動曲線である。粒径の大きい粒子含量が増加するほど液性限界(LL)は低下し、流動指数は小さくなっている。

図-3 流動曲線(試料No.1-A)

塑性限界(PL)は非塑性(N, P)の傾向が強く、辛うじて最大粒径74μm以下の試料で求められる程度である($d < 74\mu\text{m}$: PL = 40.4%)。

図-4は試料No.1-Aの締固め曲線である。試験法は乾燥・繰返し法によった。ここではランマーの落下回数を増加することによって与える

締固めエネルギー

図-4 締固め曲線(試料No.1-A)

を増大させ、締固め曲線の変化状況を見ることにした。締固めエネルギーが増大するにつれて締固め曲線は左上方に移動し、かつ相対的に形状がシャープになっている。すなわち、最大乾燥密度(ρ_{dmax})は上昇し、最適含水比(w_{opt})は減少している。(締固め曲線がゼロ空気間隙曲線に沿って低含水比側に移動している)ことがわかる。

(2) 転圧試験後の土の物理性の変化

盛土の転圧は法面造成中における主要な工程の一つであり、対象とする土が現場で実際に使用する施工機械によって転圧を行った際、締固めの効果が期待できるか否かを知ることは重要である。

11 t の普通ブルドーザー (まき出し厚さ 50 cm, 5 回転圧) 並びに 14 t 湿地ブルドーザー (まき出し厚さ 30 cm, 3 回転圧) による転圧試験後の土の物理性の変化を表一 2 および表一 3 に示した。

表一 2 から、試験時の含水比 (w) はほぼ 20% 前後である。乾燥密度は転圧回数 1 回目で大幅に増大し、2 回目は若干減少し、以後回を重ねるにつれて増大している。三相分布のうちの固相率はほぼこれと同様の変化を示しているが、透水係数は 1 回目の転圧で大幅に低下するもののその後は小幅の変化で増減を繰り返し、一定の傾向が見られない。PF 2.0 水分は全体に 42~44% の範囲にあり、特に特徴のあるものではない。透水性との関連が深

いといわれる粗間隙量⁸⁾については、転圧前の状態が不明であるが、1 回目以後は転圧回数の増加とともにおおむね減少しており、乾燥密度や間隙量の変化とほぼ対応している。土壌硬度は明らかに回数を重ねるごとに増大し、4 回目以後は極めて大きい値を示している。

次に表一 3 については、施工時の含水比はほぼ 18% 前後となっていて表一 2 の結果より若干低くなっている。乾燥密度は転圧前が表一 2 に比べてかなり大きいこともあってか、1 回目の転圧による増加量はそれほど大きくない。また、2 回目で減少し、3 回目で少し増加するといった変化を示しているが、これは表一 2 でも見られる現象である。固相率についても乾燥密度とはほぼ同様の変化がみられ、透水係数は転圧回数の増加とともに減少している。土壌硬度は表一 2 同様回を重ねるごとに大幅に増加し、3 回まではその値も類似している。

5. 考 察

(1) 土壌物理性からみた侵食特性

今回取り上げた 5 試料はいずれも受食性の高い粒径区分とされているシルト分の比較的多い土性となっていてそれだけでも侵食性は高いといえる。加えて、粒子同士の間隙の結合剤的役割をもつ、粘土・コロイド分が極めて少ないことは、潜在的に水食を受けやすい性質をもっている

表一 2 普通ブルドーザー (11 ton, 接地圧 0.58 kg/cm²) による転圧試験後の物理性の変化: 表層

転圧回数	含水比 $w(\%)$	乾燥密度 $\rho_d (g/cm^3)$	三 相 分 布			飽和透水係数 $k (cm/sec)$	PF 2.0 水分 (容率, %)	粗間隙量 (%)	土 壌 硬 度 (kg/cm ²)
			固相率 (%)	液相率 (%)	気相率 (%)				
転圧前	18.9	1.14	39.3	21.6	39.1	5.7×10^{-4}	—	—	0.8
1	21.6	1.15	50.4	31.3	18.3	1.2×10^{-5}	42.3	14.7	3.2
2	22.6	1.43	50.3	32.4	17.3	3.1×10^{-5}	44.6	10.3	4.3
3	21.6	1.50	52.4	32.4	15.2	4.4×10^{-5}	42.5	10.7	5.2
4	19.5	1.53	53.3	29.8	16.9	3.1×10^{-5}	43.9	6.0	7.1
5	19.2	1.55	54.2	30.1	15.7	1.7×10^{-4}	43.6	—	9.4

注) 試験地は試料 No. 1 の採取地点である。

表一 3 湿地ブルドーザー (14 ton, 接地圧 0.28 kg/cm²) による転圧試験後の物理性の変化: 表層

転圧回数	含水比 $w(\%)$	乾燥密度 $\rho_d (g/cm^3)$	三 相 分 布			飽和透水係数 $k (cm/sec)$	土 壌 硬 度 (kg/cm ²)
			固相率 (%)	液相率 (%)	気相率 (%)		
転圧前	17.9	1.32	46.4	23.7	29.9	8.1×10^{-4}	0.8
1	17.7	1.43	49.6	25.3	25.1	3.3×10^{-4}	2.3
2	19.8	1.38	48.2	27.3	24.5	2.1×10^{-4}	3.8
3	17.2	1.40	48.8	24.1	27.1	4.0×10^{-5}	5.9

注) 試験地は試料 No. 1 の採取地点である。

と判断される。しかし、真比重は全体的にかなり大きい値を示し、この点は耐食性の要因をもって、同じ受食性の高い土であるシラスとは大きく異なっている。しかし、ある意味で、侵食性を最も端的に表わしているといわれる分散率・侵食率はいずれも著しく大きい値となっていて、水による侵食性は極めて高いといわざるをえない。すなわち、真比重が大きくても、集合体としての行動が行われなければ（換言すれば、水中でのスレーキング現象が顕著であれば）流水に対する抵抗は小さくなり、結果的には水食（水による土壌流亡）は大きくなるものといえる。

なお、各試料の膨潤度はいずれも小さく、粒径範囲を限定して測定した値でも最大1.26 ($d < 105 \mu\text{m}$)でありほとんどが1.0以下となっていることから水による膨潤的体積増加はあまり大くないものと考ええる。

(2) コンシステンシー特性

土は水分変化によってコンシステンシーが変化することの一つの特徴をもち、それが顕著に現われるのは細粒分の多い粘性土においてである。したがって、ここで扱う試料はいずれも砂質系の土であるから問題が残るが、細粒分のコンシステンシー特性を把握しておくことは締固め時の行動体の水とのかかわり、すなわち、土・水系の流動現象の解明には重要であると考えられるので若干調べることにした。前章で試料No. 1-Aの測定結果を例示(図-3)したが、図-1の粒径加積曲線から判断して、細粒分が極めて少ないため、供試土の最大粒径が大きいほど実験は難しいものとなった。ここでは少量の細粒分がいかなる条件のもとで、粗粒分の移動に寄与するかを考えてみた。前章で述べた結果を踏まえれば、最大粒径が大となることは、供試土中の砂分が増加することを意味し、充填や練返し等、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、最大粒径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、粗粒分の流動における役割は水分と細粒分が受けもつものと考ええる。したがって、流動は容易になり、締固め効果が上昇するものと判断される。こうした流動様式の変化は現場施工の締固め時における土の構造形成に大きく関与し、土の透水性や間隙特性を左右することになる。

以上のことから、本試料のごとき、粗粒分の占有割合が大きい土でも水分状態を変えることによって締固めによる密度の増大を期待することができるものといえよう。

(3) 締固め特性

マサ土のような比較的粗粒分の多い土は、一度構造を破壊すれば、土粒子はばらばらになり、一定の荷重載荷やローラーによる転圧のごとき静的な方法で締固めてもあまり効果はあがらない。したがって、こうした土の締固め効果を大きくするには、動的な方法としての振動や

衝撃的荷重を与えることが必要となる。そこで、本実験ではランマーによる突固め試験を行ない、加えるエネルギーの増加による締固め特性の変化を追求した。

図-4について述べたとおりエネルギーの増加は4段階までであるが、この範囲内では明らかに最大乾燥密度(ρ_{dmax})はほぼ一定量増大しており、以後のエネルギー増加によっても ρ_{dmax} はさらに増大することが期待される。これは試料中の砂分の占める割合が大きいとはいえ、シルト分(18.8%)も適度に含まれ、わずかながら粘土分(8.1%)も加わっていることから、粒度組成のよい土であることが寄与しているものと考ええる。

(4) 転圧効果

上述したとおり、砂質土の締固めには動的な方法の効果が高い。しかし、実際に現場で用いられる施工方法はごく限られた小面積か、又は特別な条件の場合を除けば、静的な方法が一般的である。これは、施工面積、工事期間および工事費等現実に要求される施工能率を考慮すれば当然のことといえよう。また、室内実験の標準化された締固め試験法による結果は、土の締固め特性を示す一つの目安にはなりえても、普遍的な尺度にはなりえない。したがって、精度の高い設計入力データを得ようとするならば、実際に使用する施工機械によって締固め試験を行うことが肝要であろう。

ここでは2種類の施工機械を用いた結果について主として土の物理性の変化から検討したが、転圧の効果は初回に大きく現われることが明らかである。しかし、転圧回数を増やしていく過程では、必ずしも物理性の増加あるいは減少が定方向に推移していないことも事実である。この原因は、施工機械の転圧条件（例えば履帯部の形状や転圧方法等）に起因する現場条件の複雑さによるものとも考えられる。しかし、一方では、土が砂質上であることから、超過荷重によるセン断破壊が生じた結果、ダイレイタンスー(dilatancy 土がセン断変形などの形状変化をしたとき体積変化を伴う現象)の影響により逆に密度が低下することも当然考えられる現象の一つであろう。ただ、土壌硬度のみは、2つの試験結果とともに、転圧の回数を重ねていくと明らかに値が大きくなっている。

図-5は転圧回数の増加に伴って変化する乾燥密度(ρ_{d})の値を表層から深さ10cmおよび20cmまでの各位置において調べたものである。表層の ρ_{d} についてはすでに述べたのでここでは省略する。10cm深では、転圧の初回から3回目までは明らかに ρ_{d} は増加しているが、4回目と5回目は減少している。一方、20cm深では、初回から5回まで徐々に増加している。こうした結果から、転圧の回数を増やすことによっては必ずしも密度の増大を期待することはできない。

図-6は、転圧によって得られた乾燥密度(ρ_{d})と透水係数(k)の関係を表わしたものである。現場条件の

図一五 ブルドーザーによる転圧後の密度変化

図一六 ブル転圧後の土の密度と透水係数との関係

データであるため、ばらつきの目立つことはやむをえないが、密度の増加に伴って、透水係数が減少している傾向は認められる。ただ、 k の変化領域はあまり大きくない。これは透水係数が単に密度変化のみに左右されるものではないこと、また、今回の転圧が透水性の変化に与えた影響の比較的小さいこと等の現われともいえる。しかし、これは一つには土の組成に原因があり、マサ土のような砂ないしは砂質土にみられる特徴でもある。

6. むすび

今回の転圧試験は現在、現場で実施されている方法を

踏まえて行ったものである。最初に述べたとおり、現行の工法で施工している限り法面の土壌侵食および崩壊は、依然として発生しているのである。その原因としては、一つには土が明らかに受食性であること、これは否めない事実である。また、崩壊現象としては、締固め土の透水性が比較的大きいこと、細粒分が少ないために粒子間の結合性が弱いこと等、そのままの粒度組成では水の影響を強く受けやすいことが、少なくとも主因の一つとなっていると判断される。こうした土のもつ受食要因の大きいことは、現地での降雨時における侵食・崩壊現象の観察により一層明確になった。

今回の報告では、侵食や崩壊現象の素因である土の問題にのみ視点をしばって検討したが、こうした現象は、誘因と素因が複雑に関係しあって起る複合的なものである。また、造園工学の立場からは植生による耐食性の増強をはかることが重要と考えるので、今後の課題としたい。

謝辞

本研究に関連する調査は母畑地区農地保全検討委員会で実施しているものである。委員長竹中肇東京大学教授をはじめ委員の方々の貴重なご助言を頂いた。また、調査を進めるに当っては畑地農業振興会並びに東北農政局母畑開拓建設事業所の多大なるご援助とご協力を頂いた。なお、現地調査、室内実験およびデータ整理には本学部造園工学専攻生茂木正大君の全面協力を得た。以上の方々に対して厚く御礼申し上げる次第である。

引用文献

- 1) 西田一彦 (1970) : マサ土の工学的性質とその取扱
い指針—基本的性質—土質工学会マサ土研究委員会
: 9~31
- 2) 福田護, 西田一彦, 沢孝平 (1975) : c と ϕ を考える。
6 マサ土 : 土と基礎23(5)77~84
- 3) 宮木省三 (1982) : 阿武隈八溝山系における草地開
発地区の防災工の実施例について : 農地保全の研究
3 59~78
- 4) 福島県企画部 (1970) : 地質構造 : 福島県の地質
2~4
- 5) 久松実 (1976) : 膨潤 : 現代農業土木用語選 : 農業
土木学会 178~179
- 6) 土質工学会編 (1974) : 日本の特殊土 91~93
- 7) 種田行男 (1975) : 侵食率・分散率 : 農業土木学会
誌43(12)36
- 8) 竹中肇, 足立忠司, 堤聡 (1977) : 農地基盤として
見た有機質土の理工学的諸特徴 : 農土論集71 44~
51

Summary : It is very important to prevent the soil erosion and slope collapse which may occur on the uncovered slope of decomposed granite soils.

In this paper, erosion and collapse phenomena are discussed with regard to the physical and erodible properties of decomposed granite soils and compaction effects on the banking slopes.

The conclusions obtained are summarized as follows :

- 1) The soil textures of decomposed granite soils are sandy loam or sand.
- 2) Specific gravity of the soils is very large ($G_s=2.83\sim2.96$).
- 3) Dispersion ratio of the soils is large ($D_r=25.0\%\sim50.0\%$).
- 4) Erosion ratio of the soils is very large ($E_r=140.3\%\sim181.1\%$).