

マサ土の霜柱発生機構に関する研究

金 敏洙・金光達太郎・矢橋晨吾
(造園工学研究室)

Studies on the Growth Mechanism of Frost Pillars on Masa Soil (Decomposed Granite Soil)

Minsoo KIM, Tatsutarō KONKŌ, Singo YABASHI
(Laboratory of Landscape Engineering)

ABSTRACT

It is observed that frost pillars show different growing rates according to soil types and densities. The study was carried out to clarify this cause of the difference in the growing rates. Two types of masa soil (decomposed granite soils), each with four levels of density, were prepared, and the physical properties such as the heat conductivity and the coefficient of water diffusion were investigated as a possible cause of the difference.

The results obtained are summarized as follows ;

1. Frost pillars grow in lower height on the masa soil 1 than the masa soil 2.
2. Frost pillars grow less on the soil with higher density.
3. The masa soil 1 and the masa soil 2 both contain fine particles (3-5 μm) which are necessary for the growth of frost pillars.
4. Since the masa soil 1 has a higher heat conductivity than the masa soil 2, frost pillars grow later on the former soil than the latter soil.
5. Due to the less water available in the masa soil 1 than the masa soil 2, which is necessary for the growth of frost pillars, frost pillars grow in lower height on the former soil.
6. The soil with a higher density has a higher heat conductivity and less water available.

緒 言

霜柱は土が起霜機能及び給水機能を持っている場合、地表面が 0°C 以下になると発生するといわれている。霜柱がよく発生する関東平野のローム地帯においては表層の関東ロームが凍結はするものの、霜柱の発生しない部分が存在することもしばしばある。ところで、近年、各地において種々の土地造成が盛んに行われるようになった。東北地方の阿武隈山系においても大規模な農用地造成をはじめ、鉄道や道路等、各種の土地開発が進められてきた。これら地域は主として花崗岩類の風化したマサ土が大量に堆積しており、各種の土地利用に伴う切り土や盛り土工事により大小さまざまな法面が施工されている。こうして新規に造成された法面は初期段階で裸地状態となり、風雨により土壌侵食や各種タイプの法面崩壊が発生する。マサ土は一般に砂質土に分類されるものの、風化度によって、粒度組成やコンシステンシー等土の基本的性質が異なり(矢橋ら, 1983), これらに起因してい

ろいろの性状を呈する。とくに、水分に対しては極めて敏感に反応し、含水比によって性状が大きく変化することから、軟化・硬化が激しく、軟化した場合には水による土壌侵食が大きくなり、また、せん断強さが低下して崩壊に至る(矢橋ら, 1987)。こうしたマサ土の基本的な性質は冬季には凍結・融解の繰り返しによる悪影響も少なからず受け、侵食及び崩壊をさらに助長する。凍結のパターンの一つに霜柱がある。マサ土の法面においても、土の性状の違いによって霜柱の発生状況に差のあることが確認されている。すなわち、法面を構成するマサ土の種類によって霜柱の発生に難易のあることが観察された。稲垣(1916)は関東ロームを対象に霜柱の上長力は土の間隙の大きさに大きく左右されることを明らかにし、また、金光ら(1982)は同じく関東ロームを用いた霜柱の生長に関する研究のなかで、放射冷却及び地中熱流速との関係を追求めた。さらに木下ら(1967)は霜柱の成長速度について、北海道の粘質土を対象に、地中の温度勾配と土の熱伝導率との関係を求めた。ところが、マサ土を対象とした霜柱の発生状況についての報告は未だな

い。従って、霜柱発生に対する防止対策の面からみて、マサ土の霜柱発生の有無あるいは難易についての原因を明らかにすることは極めて重要であろう。

調査方法

試験地は松戸市松戸 648, 千葉大学園芸学部サンクガーデン内に設定した。供試土は福島県石川郡石川町国営農用地開発事業母畑地区第12工区から採取した2種類のマサ土と学内の関東ロームである。供試土の基本的性質は第1表のとおりであり、粒径加積曲線は第1図に示した。学内試験地には一辺 50 cm の正方形で深さ 20 cm の升を4連2列に設け、2種類のマサ土を4段階に密度を変えて充填した後、霜柱の発生状況を1989年1月から3月まで3カ月間にわたって観察した。観察の結果から、霜柱は土の種類によって、同じ土でも土の密度の違いによって発生状況に差のあることが分かった。そこで、その原因を明らかにするために霜柱の発生条件に関わる起霜機能、給水機能及び土の熱的な性質等に重点を置いて土の粒度組成、コンシステンシー並びに密度等、土の基本的性質がどのように関係しているかを検討することにした。

結果と考察

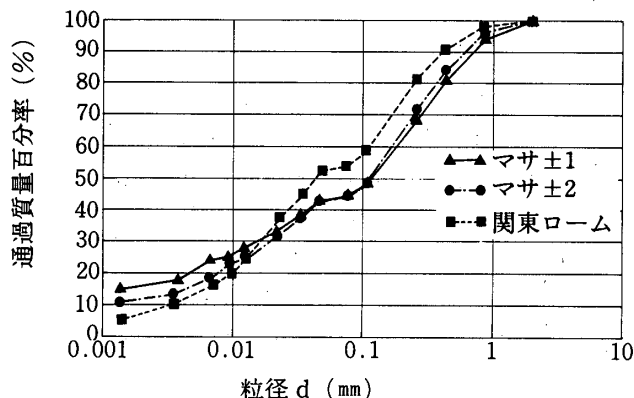
(1) 霜柱の発生状況

本調査期間中、2種類のマサ土に霜柱が発生した日を代表的に2日選び、気温変化を第2図に示した。霜柱の発生は気温とともに、土の含水比によっても大きく左右され、その生長状態は様々である。気温が0°C以下になっても、土の含水比が低い時にはマサ土には霜柱が発生しなかった。いくつかの観察結果から、降雨後の地表部が高含水状態であるとき、気温が0°C以下になると、マサ土に霜柱が発生することを確認した。試験区周辺の関東ロームでは地上部が0°C以下の状態でしばしば典型的な霜柱が発生した。このとき、例えば1989年2月13日から2月14日については関東ロームに発生した霜柱の高さが約4 cm になった時、マサ土1では密度の高い

第1表 供試土の性質

試料名	G _s	W _L (%)	W _P (%)	W _s (%)
マサ土 1	2.794	43.8	36.2	31.7
マサ土 2	2.804	63.0	54.0	42.0
関東ローム	2.648	88.5	80.2	59.8

G_s: 比重
W_L: 液性限界
W_P: 塑性限界
W_s: 収縮限界

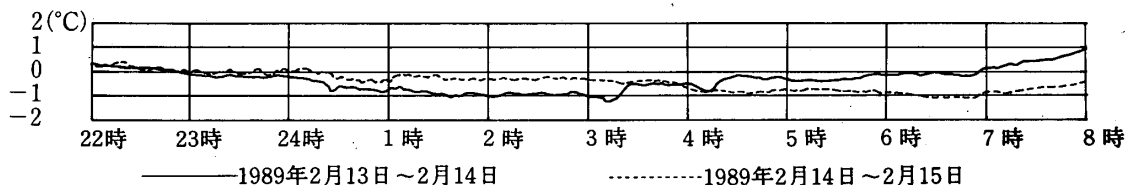


第1図 粒径加積曲線

方から低い方へと、霜柱の高さは0 cm(凍結のみ), 0 cm(凍結のみ), 0.3 cm, 0.5 cm くらいのレベルで生長した。一方、マサ土2では0.5 cm, 0.8 cm, 1.5 cm, 2.0 cm くらいであった。

(2) 粒度

金光(1982)によると関東ロームでは原土から1.5 μm以下の粒子を除いたものは霜柱の高さが原土の60%になるし、5.0 μm以下の粒子を除いたものは霜柱の高さが原土の31%になったことから霜柱の発生に関与する粒子の直径の最大限界は10 μmであろうと報告されている。しかし、供試土の粒度試験の結果から見ると、いずれの土も霜柱の発生の条件としての微細粒子は含まれているが、一方微細粒子の量から見た場合、霜柱の生長しにくいマサ土1がマサ土2より微細粒子の量が多くなっている。従って、霜柱発生の難易は微細粒子の量のみで



第2図 霜柱が立った日の気温変化

は判定できなく微細粒子の量とともに土の他の物理的な性質によっても左右されると考えられる。

(3) コンシステンシーと凍上性

中谷 (1945) によると、土の中の水がそのまま凍ったコンクリート状凍結は凍上現象とはあまり関係がないが、霜柱氷層と名づけた現象によって凍上は起こる。霜柱氷層は霜柱と同じものであると述べている。つまり凍上現象は地中に発生した霜柱によって起こるものである。こうした性質を踏まえて、供試土の基本的性質として凍上性があるかどうかを判断する必要上から、供試土の液性限界 (W_L)、塑性限界 (W_P) 及び収縮限界 (W_s) を測定した。土が凍上を起こさないための Willis ら (土質工学会, 1982) の条件式

$$W_s < 21 - 1.1\sqrt{W_L - W_L^2/800}$$

から得た値がマサ土 1=13.6%, マサ土 2=12.5% であることから、供試土のマサ土 2 種類はともに凍上を起こすものといえよう。

(4) 熱伝導率

試験地では周辺の関東ロームに霜柱が発生しても、マサ土には発生しない日があった。また、マサ土に霜柱が発生しても関東ロームより遅れて発生し始めること及び密度が高くなるほど霜柱の発生開始が遅れることが観察された。こうした現象は供試土が持っている熱的な性質に起因すると考えられるので供試土の熱伝導率を測定することにした。

供試土の熱伝導率は第 2 表に示すとおり、同じ含水比では密度が高いほど熱伝導が大きく、また、関東ロームよりはマサ土の方が熱伝導率大きいことがわかる。第 2 表から、マサ土 1 及びマサ土 2 の熱伝導率はほぼ同じである。しかし、熱伝導率は含水比が高くなるほど大きくなることを考えると、マサ土 2 はマサ土 1 より含水比が 2 倍近く高くなっているのであるから、この点を考慮して両者を比較すれば、マサ土 1 の熱伝導率はマサ土 2 よりはるかに大きいといえよう。

霜柱は地表面から大気中に逃げる熱量と下方から伝導によって供給される熱量の差によって発生するものである。従って、関東ロームよりマサ土が、また、マサ土 2 よりマサ土 1 の霜柱が発生しにくいことになる。さらに、同じ種類の土では密度が高いほど霜柱が遅れて発生する現象は、熱の放射がほぼ同じ場所では熱伝導率が高いほど地中から地表面への熱の伝わり方が速くなることが大いに寄与しているものと推察される。従って熱伝導率の大きい土ほど地表面の温度が 0°C 以下になるのを遅ら

第 2 表 熱伝導率

試料名	密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	熱伝導率 (kcal/M.H. DEG)	
マサ土 1	小	0.76	19.78	0.598
	中	1.28	18.94	0.707
	大	1.74	19.22	1.206
マサ土 2	小	0.58	35.13	0.603
	中	0.97	35.34	0.714
	大	1.31	34.76	0.961
関東ローム	小	0.33	86.07	0.589
	大	0.81	85.42	0.678

せるものと考えられる。

(5) pF と水分拡散係数

試験地では関東ロームよりはマサ土の方がまたマサ土 2 よりはマサ土 1 の方が霜柱が発生しにくいし、発生した場合にはその高さは低い。さらに、同じ土でも密度が高くなるほど霜柱の高さが低くなるのが観察された。こうした現象について、熱伝導率の相違が関係していることは前述のとおりである。しかし、霜柱の立ちにくいマサ土 1 では降雨後の比較的含水比の高い状態のときのみ霜柱が発生していることから、霜柱の高さの大小は霜柱発生水分領域に相当する水分量の多少と大いに関係するものと考えられる。従って、霜柱発生水分領域の最大水分量に相当する pH 1.0 での供試土のそれぞれの水分量と最小水分量に相当する水分拡散係数 $D_w = 0.003$ での供試土の水分量を求めることにした。なお、水分拡散係数の測定は BRUCE 法を用いた。実験方法は白井 (1961) が行った方法と全く同一である。まず、水分拡散係数を測って第 3 図に示した。これに基づいて、最小自乗法により体積水分率と水分拡散係数との回帰式を求めた。さらに、回帰式によってマサ土 1 とマサ土 2 の各密度別に水分拡散係数 $D_w = 0.003$ に相当する体積含水率を求めて第 3 図に示した。第 3 図によると同じ土では密度が高くなるほど水分拡散係数 $D_w = 0.003$ に相当する体積水分率が高くなっている。第 3 表には霜柱発生水分領域の中で最大水分量 (W_{max}) である pF 1.0 に相当する体積水分率と最小水分量 (W_{min}) である水分拡散係数 $D_w = 0.003$ に相当する体積水分率を示した。また、霜柱発生有効水分量として $W_{max} - W_{min}$ を求めた。霜柱発生有効水分量はマサ土 2 よりマサ土 1 の方が同じ土でも密度が高くなっていて、これが少なくなるほど有効水分量が少なくなることがわかる。

第3表 霜柱発生の有効水分量(体積含水率)

土の種類	最大水分量	最小水分量	有効水分量
マサ土1 (ゆるい)	0.511	0.209	0.302
(中間)	0.494	0.229	0.265
(かたい)	0.427	0.264	0.163
マサ土2 (ゆるい)	0.598	0.241	0.357
(中間)	0.578	0.281	0.297
(かたい)	0.572	0.283	0.289

最大水分量：pF1.0 最小水分量： $D_w=0.03$

(6) ポア一容積

供試土の種類によって霜柱の発生状況が違うことは熱伝導率並びに霜柱発生有効水分量の面から説明して来た、土の種類によって熱伝導率とか水分保持能力がそれぞれ違うのは土の物理的な性質の中でもポア一容積の差によることが考えられる。供試土は自然状態の土塊を対象とし、また、ポア一容積の測定は水銀圧入法によった。結果として得られたポア一分布曲線は第4図に示した。第4図から霜柱の発生しにくいマサ土1は1g当たり0.195mlのポア一容積であり、ポア一容積比は31.32%である。マサ土2は1g当たりのポア一容積は0.318mlであり、ポア一容積比は42.00%である。最も霜柱の立ちやすい関東ロームの1g当たりのポア一容積は0.521mlであり、ポア一容積比は48.82%となっている。

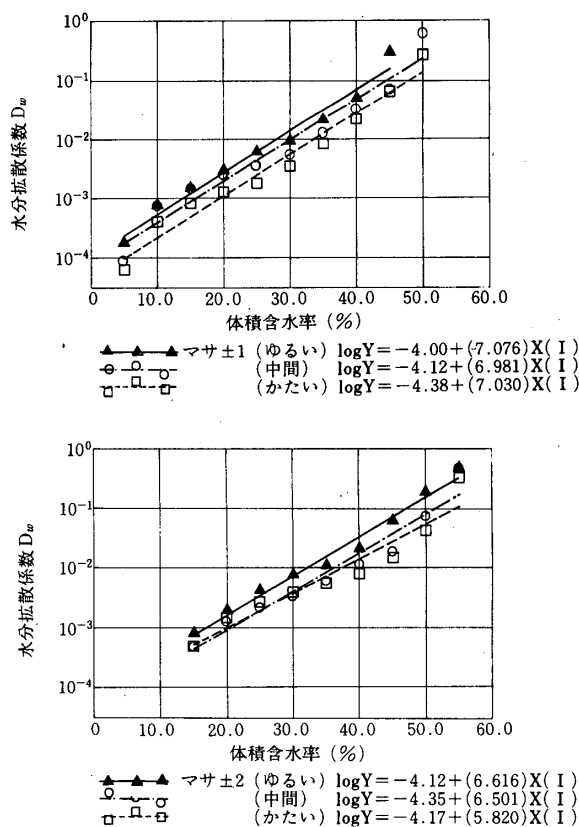
土の熱伝導率はポア一容積量によって、大きく変化することは周知のとおりであり、熱伝導率とポア一容積量を両方測定した結果、含水比に大きな差がなければ、ポア一容積量が大きいほど熱伝導率が小さくなっていることがわかる。

(7) 密度と間隙量

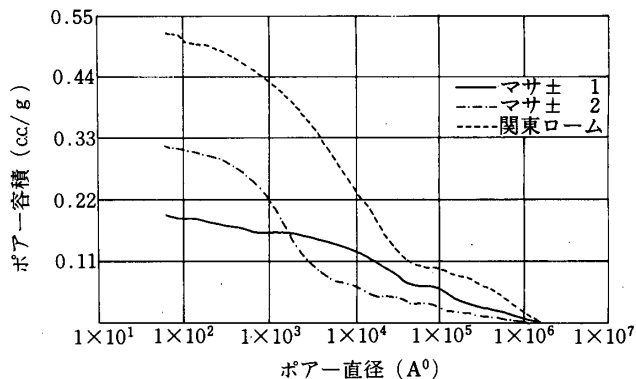
これまでの検討結果から、2種類のマサ土を密度ごとに比較すると、マサ土1は霜柱が発生しにくい、マサ土2は発生しやすいこと、及び密度が高くなるほど霜柱が発生しにくいといえる。第1表から2試料の真比重には大差がないとして、乾燥密度は固相率と比例関係にあり、間隙量とは逆比例することから、マサ土1は相対的にマサ土2より乾燥密度が高くなっており、マサ土1はマサ土2より給水機能が小さくなる。密度が高いほど霜柱が発生しにくいことも給水機能から説明できる。

摘要

マサ土の霜柱発生機構を明らかにするため、阿武隈山系から採取した2種類のマサ土を用いて、霜柱の発生に



第3図 水分拡散係数 D_w と体積含水率



第4図 ポア一分布

関与すると考えられる土の物理性のうち、密度、粒度組成、コンシステンシー、熱伝導率、pF水分特性、水分拡散係数並びにポア一分布などを検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 関東ロームよりマサ土の方が、マサ土2よりマサ土1の方が霜柱が立ちにくい。また、霜柱が立っても霜柱の高さが低くなった。
- 2) 土の密度が高くなるほど霜柱が立ちにくかった。

3) 土の種類によっても、また、同じ土でも密度によって霜柱の発生に差があるが、この原因の一つは熱伝導率が高いほど、地中から上部層への熱の伝導が速くなることから、表層土の地温低下が遅れるため霜柱が発生しにくくなったものと推察される。

4) 土の密度の相違によって霜柱の発生に差が表れた他の原因は、給水機能に関係があり、給水機能の差は霜柱発生有効水分量の差で示される。

5) 土の種類及び土の密度によって熱伝導率と給水機能に差があることは土塊のポア－容積量に差があることと関係がある。

以上のように2種類のマサ土はともに、起霜機能は有しながら、マサ土1はマサ土2に比べ給水機能が劣るとともに、熱伝導率の大きかったことが霜柱を発生しにくくした要因と考えられる。要因のいずれが主要因であるかについては今後水分と熱の流れの数量的検討によって明らかにしたい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、試料の熱伝導率の測定には大林組技術研究所土木第2研究室並びに化学研究室のご

協力を得、また、試料のポア－分布の測定には東京農業大学の高橋悟講師からご助言を頂いた。記して謝意を表する。

引用及び参考文献

- 土質工学会編(1982)：土の凍結—その制御と応用—，土質工学会，東京，33。
- 稲垣乙丙(1916)：農業気象学，博文館，東京，255-296。
- 木下誠一・堀口 薫・若浜五郎(1967)：電熱で暖めた土地の霜柱：低温科学物理編，25，185-193。
- 金光達太郎・白井清恒(1982)：霜柱の生長方程式について：農業気象，8(2)，145-151。
- 金光達太郎(1982)：霜柱の生長に関する研究：千葉大学園学報，30，61-84。
- 中谷宇吉郎(1945)：霜柱と凍上，生活社，東京，3-6。
- 白井清恒(1961)：土壤の物理的伝導度に関する研究：三重大農学報，24，149。
- 矢橋農吾，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。
- 矢橋農吾，金光達太郎(1987)：砂質土の改良に関する研究VI，マサ土の剪断強さと水分特性：千葉大学園学報，39，61-68。