

凍結融解作用による風化花崗岩の土砂化プロセスに関する基礎的検討

京都大学大学院 ○泉山 寛明

京都大学防災研究所 堤 大三

京都大学防災研究所 藤田 正治

1. はじめに

風化花崗岩は凍結融解作用によって徐々に破壊され、終には土砂となる。堤ら¹⁾は地中熱伝導計算より得られる凍結深と凍結融解の経験回数から土砂生産量を求めているが、より詳細なモデルの構築のためには、基岩の破壊機構をモデルに組み込む必要がある。基岩の間隙率は深度が浅くなるにつれ漸増し、土砂化すると急増することが分かっている²⁾。そこで、本研究では凍結融解による間隙率の変化や土砂化の主要因と考えられる霜柱の発生条件、さらに凍結融解により土砂化する直前の基岩の間隙率について検討を行った。

2. 凍結融解による基岩の間隙率の変化

ここでは、凍結融解により基岩の間隙率がどのように変化するかを実験により調べた。基岩の供試体として滋賀県田上山地裸地斜面より採取し、円柱形に整形したものを用いた。表-1 に実験条件を示す。初期含水率として飽和体積含水率 θ_s 、残留体積含水率 θ_r 、これらの中間の含水率 θ_m の3つを設定した。表に飽和度 S も同時に記す。また、土圧の影響を検討するために、アクリル円筒で供試体側方を覆い、岩-円筒間の隙間は石英砂で埋めて供試体側方を拘束したものを用意した。実験では、昇華を防ぐため、供試体にビニール袋を被せ、冷凍室(約-15℃)に入れて十分に凍結させた後、常温(約20℃)で融解させた。岩全体の体積 V は岩を水中に入れた時、岩が押し退けた水の体積とし、凍結前、凍結膨張時、凍結融解後それぞれで測定した。凍結前と凍結融解後の間隙体積 V_{po} は、飽和状態の岩の質量と絶乾状態の岩の質量の差から求めた。凍結膨張時の間隙体積は、凍結による体積膨張量を凍結前の間隙体積に全て加算して求めた。間隙率比 r を

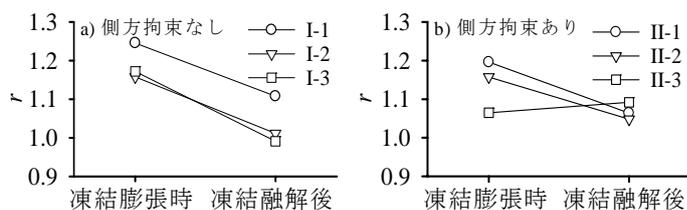
$$r = \theta / \theta_0 \quad (1)$$

キーワード 風化花崗岩 凍結融解 霜柱 間隙率

連絡先 〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノロ 宇治川オープンラボラトリー TEL075-611-5264

表-1 実験条件(基岩の間隙率の変化)

供試体No.	初期体積含水 θ_m	初期飽和度 S_{in}	側方拘束
I-1	$\theta_s=0.30$	1	×
I-2	$\theta_s=0.30, \theta_m=0.29$	0.97	×
I-3	$\theta_s=0.30, \theta_r=0.22$	0.73	×
II-1	$\theta_s=0.32$	1	○
II-2	$\theta_s=0.29, \theta_m=0.28$	0.97	○
II-3	$\theta_s=0.26, \theta_r=0.23$	0.89	○

図-1 間隙率比 $r = \theta / \theta_0$ の推移

で定義し、これにより間隙率の変化を表現する。ここに、 θ_0 : 凍結前の間隙率、 θ : 凍結膨張時または凍結融解後の間隙率である。

図-1 に実験結果を示す。図は凍結融解による間隙率の変化を表し、これから間隙率は凍結膨張時に大きくなり、凍結融解後は一部凍結膨張時より大きくなっているものもあるが、元の間隙率までは収縮せずに塑性変形することが分かる。また、飽和度 S が大きい程間隙率比 r は大きいことが分かる。現地では基岩に土圧が作用することから、図-1b の側方拘束ありでの結果がより実際に近い傾向であると考えられる。以上より、凍結融解により基岩の間隙率は増加し、増加量は飽和度に比例することが分かった。

3. 基岩における霜柱の形成と土砂化

ここでは、霜柱が基岩に発生する条件を実験により調べた。基岩は2と同じ地点から採取し、円柱形に整形したものを供試体とした。表-2 に実験条件を示す。供試体は間隙率の違うものを用意し、その違いを検討した。水分補給条件として、凍結中常時、凍結前、あるいは補給せずの3条件を設けた。補給は毛管作用により吸水させて行うが、常時補給の場合はチューブで凍結中も常に水を供給した。また、

間隙水の急激な凍結を抑制するために断熱材で供試体側方を断熱したものを用意した。さらに、土圧の影響を検討するために塩ビパイプと石英砂を用いて2と同様の方法で側方拘束したものを用意した。図-2に常時水分補給,側方断熱あり,側方拘束ありの場合の供試体 VIII を示す。実験では,毛管作用により十分吸水させた後に2と同じ冷凍室で十分凍結させた。実験回数は III~VI については1回, VII~X は霜柱が初めて発生するまで(霜柱の初出回)とした。なお, IV, VI は同一の供試体に対し, 1, 2, 3 の順番で行った。

実験の結果, 間隙率の比較的大きい供試体 III, IV-1, V, VI-1 は1回凍結ただけで規模は小さいものの霜柱が発生した。この場合, 水分補給が常時あるいは凍結前の2条件に明確な違いは見られなかった。

側方断熱なしの条件(IV-2, VI-2)ではわずかに発生するか全く発生しなかった。これは間隙水の急激な凍結によると考えられる。さらに, 側方断熱・水分補給なしの条件(IV-3, VI-3)では全く発生せず, 霜柱発生には水分補給が必要であると考えられる。

間隙率の比較的小さい供試体 No. VII, VIII, IX, X では, 凍結融解の繰り返し回数がそれぞれ1, 4, 2, 5回目で初めて霜柱が確認され, 複数回経験しなければ発生しないものがあつた。特に VIII では高さ1cm程のものが確認されたが, これは側方拘束により横方向への膨張が抑制された結果, 鉛直方向の膨張が促進されたためであると考えられる。以上より, 霜柱が発生するためには, 基岩がある大きさ以上の間隙率を持つ必要があり, 間隙率が小さくても凍結融解を複数回経験して大きくなれば発生すること, さらに, 水分補給があり間隙水の急激な凍結がない場合は霜柱が発生しやすくなることが分かった。

4. 凍結融解により土砂化する直前の基岩の間隙率

ここでは, 土砂化直前の基岩の間隙率を測定した。2と同じ地点の現地基岩表面から約1cmの深さまでを, 攪乱を最小限に抑えるためにゼラチンで固め, 採土円筒を打ち込んで採取した。その後, 温水を加えながら基岩を加熱してゼラチンを除去するが, 基岩が崩れるのを防ぐため, 基岩底面の凹凸を石英砂で埋めた。ゼラチンがほぼ除去された後, 間隙水の体積を測定して間隙体積とした。基岩の体積は,

表-2 実験条件(霜柱の形成と土砂化)および霜柱の初出回

供試体No.	間隙率	水分補給	側方断熱	側方拘束	実験回数	霜柱の初出回
III	0.34	常時	○	×	1	1
IV-1	0.34	凍結前	○	×	1	1
IV-2		凍結前	×	×	1	発生せず
IV-3		補給せず	×	×	1	発生せず
V	0.32	常時	○	×	1	1
VI-1	0.32	凍結前	○	×	1	1
VI-2		凍結前	×	×	1	1
VI-3		補給せず	×	×	1	発生せず
VII	0.29	常時	○	○	1	1
VIII	0.29	常時	○	○	4	4
IX	0.29	凍結前	○	×	2	2
X	0.28	凍結前	○	×	5	5

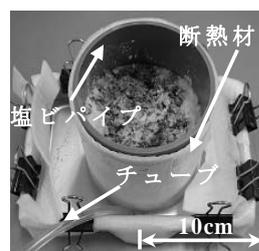


図-2 供試体 VIII

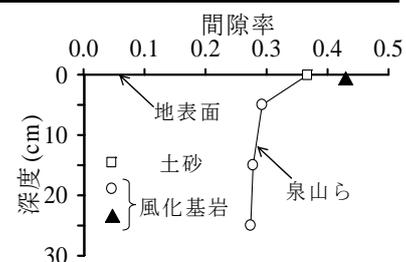


図-3 間隙率の深度方向分布

石英砂を円筒と基岩との隙間に充填し, 加えた石英砂の全体積を採土円筒の体積から差し引いて求めた。

図-3は間隙率と深度の関係を表し, 三角印が今回得られた値である。泉山ら²⁾が行った実験結果と比較すると, 土砂化直前には基岩の間隙率は0.43と非常に大きくなることが分かる。一方, 土砂の間隙率が0.36と小さいのは風や雨等の外力により攪乱された土砂を採取したためであると考えられる。

2, 3の結果を用いて, 凍結融解1回により間隙率が1.1倍になるとすると, 供試体 VIII (間隙率0.29)の場合, 凍結融解4回目で霜柱が発生したが, この時間隙率は $0.29 \times 1.1^4 = 0.42$ と, 土砂化直前の基岩の間隙率にはほぼ等しい値であったことが分かる。

5. おわりに

本実験により, 簡単にではあるが霜柱の発生条件など, 風化花崗岩の土砂化に関するいくつかの重要な知見が得られた。今後は実際の気象条件下で霜柱の発生条件がどのようなものになるのか, また供試体を側方・上下方向に拘束させた場合における凍結膨張量などについて検討する予定である。

参考文献

- 1) 堤大三ほか: 凍結融解による土砂生産に関する基礎的研究, 砂防学会誌 59(6), 2007, pp.3-13
- 2) 泉山寛明ほか: 凍結融解作用による風化花崗岩の間隙構造変化に関する基礎的検討, 第62回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2007, pp.247-248