

粘性土の凍結特性に及ぼす冷却速度の影響

朱 青¹・豊田浩史²・小川正二³

¹学生会員 工修 長岡技術科学大学大学院 (〒940-21 長岡市上富岡町 1603-1)

²正会員 工博 長岡技術科学大学 講師

³正会員 工博 長岡工業高等専門学校 校長

本研究ではオープンシステムとクローズドシステムでの凍上試験により、直径 6cm、高さ 2cm の粘性土供試体の冷却面の温度を一定冷却速度で低下させ、凍上変位、凍結速度、凍上率および供試体内の温度勾配などの挙動を調べた。その結果、冷却速度の違いにより、凍結速度と温度勾配が変化し、この温度勾配が、凍上変位、凍上率に大きな影響を与えることが分かった。また、冷却面を一定冷却速度で低下させた場合、凍上率は暖端面と冷端面の温度と温度勾配及び拘束圧の関数で表されることが分かった。

Key Words : frost heaving, frost heaving amount, cooling rate, temperature gradient, frost heaving rate, frost heaving ratio, freezing rate

1. まえがき

土が 0℃以下の温度になると、土中の水分は凍り、土は非常に硬くなる。土が凍るということは、その中に含まれる水が氷に変わることであるが、土質や冷却方式によっては、土中に含まれる氷の様子が異なってくる。したがって、含まれる氷の状態で土の体積変化や凍土の力学的性質は著しく異なった挙動を示すと言われている¹⁾。

凍土の研究としては、凍土の諸物性に関する基礎研究²⁾、凍上機構や凍上試験法の確立に関する研究³⁾⁴⁾、地下水流の凍結に及ぼす影響⁵⁾、永久凍土の開発利用に伴う問題の研究⁶⁾、及び凍上対策の新工法の開発⁷⁾などがあげられる。さらに、最近では、最適冷却温度の選定⁸⁾⁹⁾、地盤凍結速度の解析¹⁰⁾、凍結に伴う凍上、解凍後の沈下¹¹⁾などの研究が進められている。

Taber³⁾¹²⁾と Beskow¹³⁾は土の凍上について一連の実験的研究を行い、凍上機構に関する報告を行っている。Taber は凍上現象は単に土が保有している水分の凍結膨張によるものではなく、土中の水分移動が大きく影響することを実験により証明し、凍上量は凍土中に発生したアイスレンズの厚さの合計とほぼ等しいことを観測した。また、Beskow は凍上量が土質、凍結速度、拘束力、そして毛管力に依存することを示し、これらの関係から土の凍上性を判定した。

その後の研究により凍上機構が次第に明らかになり⁴⁾¹⁴⁾¹⁵⁾、これと平行して数値解析も進められ¹⁰⁾、室内における凍上現象はかなり解明されてきた。

従来の研究は供試体の両端面の温度を一定に保ち、一端を冷却する実験が多かった⁹⁾。しかし、実際の自然地盤では、気温変化の影響を受け、凍上実験の冷却面に相当する地表面の温度が複雑に変化している。たとえば、気温の変化は季節の移り変わりによる年間変動から、日中と夜という一日の変動など様々である。しかし、実験ではこれらの変化を単純化し、冷却速度 V_c を一定とすることができる。いずれにせよ、地表面の冷却速度の変化が地盤内の温度勾配 α 、地盤の凍結速度 V_f 、凍上率 ξ および凍上速度 V_h 等に与える影響を明白にすることは凍上量を予測し、凍上のメカニズムを解明するために重要であり、これらの実験から得られた成果を、複雑な冷却速度を示す自然地盤にも適用できるように研究を行う必要がある。

一方、凍上形式を見ると、従来の研究ではオープンシステム⁹⁾¹⁶⁾¹⁷⁾あるいはクローズドシステム⁹⁾のいずれか一方の実験が多い。これらの実験はいずれも凍上機構解明を主目的としているが、いずれか一方の条件のみが実際の凍上現象において支配的であるとは言い難く、同じ実験条件下で両形式での凍上現象を比較して、凍上現象を理解する必要がある。

本文は上記の点に着目し、飽和供試体を用いて、オープンシステムとクローズドシステムで供試体の上端面温度を一定にし、下端面温度を一定冷却速度で低下させる条件で、土質、拘束圧および冷却面の冷却速度を変化させ、凍土内の温度勾配、および土の凍上特性の把握と、飽和粘性土の凍上発生メカニズムについて検討した結果について述べる。

表-1 試料の物性値

	米山 A (SM)	米山 B (MH)	長岡 (CH)
密度(g/cm ³)	2.839	2.748	2.640
液性限界(%)	52.7	52.4	73.24
塑性限界(%)	41.1	41.3	39.58
塑性指数(%)	11.6	11.1	33.66
砂含有率(%)	72.6	41.0	24.6
シルト含有率(%)	16.3	43.1	42.0
粘土含有率(%)	11.1	15.9	33.4

2. 実験方法

(1) 供試体の作製法

試験に用いた試料は、新潟県柏崎市米山付近で採取した練り返し粘性土(米山土)および長岡技術科学大学敷地内で採取した練り返し粘性土(長岡土)である。これらを気乾状態にした後、2mmふるいを通過した米山A、840 μ mふるいを通過した米山Bおよび2mmふるいを通過した長岡土を実験に用いた。なお、各試料の物理的性質は表-1に示す通りである。

これらの試料を脱気水と十分に混合攪拌したスラリー状にして大型圧密槽内で0.05MPaの圧力をかけて一週間静的に圧密した後、適当なサイズで切り出し、最後的には直径6cm、高さ2cmの供試体に成形した。

供試体の高さを2cmと低くしたのは次の理由による。

- (1) 試験装置の亚克力セルの側面からの侵入熱を減少させることができる。
- (2) 未凍土と亚克力セルの摩擦力が小さくなる。

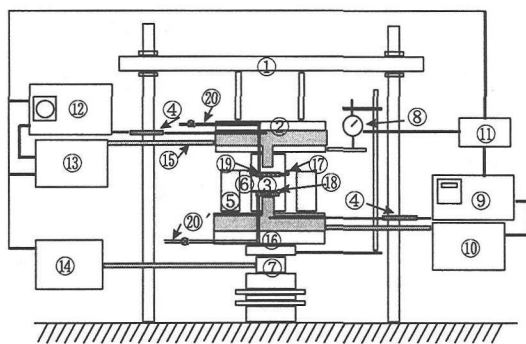
(2) 試験装置

凍上試験機は一軸圧縮試験機を改良し、図-1に示すように供試体をセットするセル、冷却装置、温度制御装置、載荷制御装置、水の供給装置、凍上圧測定装置、凍上量測定装置、および供試体内温度測定装置、記録装置からなっている。これらはいずれも20℃の恒温室に設置されている。

供試体は周囲が発泡スチロールで覆われた内径6cmの透明亚克力製の二つ割りセル内に収められている。また、供試体上端面は一定の温度に設定され、下端面はピストン型冷却機により任意速度で温度を低下させることができる。

凍結に先立って、所定の鉛直圧力で変位が安定するまで一次的に圧密させた。

試験開始後、供試体下端が凍結することにより凍上



- | | |
|---------------|---------------|
| ① 拘束フレーム | ② 暖端面ピストン |
| ③ 供試体 | ④ 測温抵抗体 |
| ⑤ 断熱材 | ⑥ アクリルセル |
| ⑦ ロードセル | ⑧ ダイアルゲージ |
| ⑨ 冷却面温度コントローラ | ⑩ 冷却装置 |
| ⑪ 記録装置 | ⑫ 暖端面温度コントローラ |
| ⑬ 冷却装置 | ⑭ 載荷制御装置 |
| ⑮ 冷媒 | ⑯ 冷却プレート |
| ⑰ O-リング | ⑱ 熱電対 |
| ⑳ 上部給水 | ㉑ ポラスストーン |
| | ㉒ 下部給水 |
| | ㉓ パルプ |

図-1 実験装置

圧が発生するが、発生した凍上圧を供試体下方に設置したロードセルが感知すると、載荷制御装置により供試体下端の金属ピストンが降下し、供試体に凍上圧が発生しないようになっている。したがって、未凍結側での脱水圧密現象は起こらず、供試体は下方に変位し、この変位を凍上量としてダイアルゲージにより測定する。また、供試体中の温度は銅-コンスタンタン熱電対を図-1の⑱に示す位置に設置して測定する。

一般に凍上試験においては、供試体とセルの間の摩擦や、凍結土のセルへの凍着が問題となるので、シリコングリースをセルの内壁に十分に塗付し、摩擦の低減を行った。

(3) 試験条件

試験は比較のため未凍土部分への水の補給を許すオープンシステムと水の補給を許さないクローズドシステムの2方法で行った。

冷却は供試体の下面(冷却面)から一次的に行った。上端面の温度 θ_w および下端の冷却面の温度 θ_c を約1時間以内で20℃の室温からそれぞれ2.7℃、0℃まで降下させ、その後、上端面の温度 θ_w を2.7℃に保ちながら、下端面の温度 θ_c を0℃で24時間保って予冷する(予冷階段)。その後、一定の冷却速度 V_c で供試体の下端面の温度を低下させる。オープンシステムでは、供試体上部の補水管⑳のパルプを開いて水を

表-2 試験条件

	試料	冷却速度(°C/h)			拘束圧σ(MPa)		
		0.5	1.0	1.9	0.0	1.0	1.5
オープンシステム	米山B	0.5	1.0	1.9	0.0		
		0.5	1.0	1.9	1.0		
		0.5	1.0	2.0	1.5		
	長岡土	0.5			0.0	1.0	1.5
		1.0				1.0	1.5
クローズドシステム	米山A	0.1~7.2			0.05		
		0.3	0.7	2.3	1.0		
	米山B	0.8	1.0	2.0	0.0		
		0.8	1.0	1.9	1.0		
		0.8	1.0	1.9	1.5		
		長岡土	0.5			0.0	0.5
		1.0				1.0	4.0

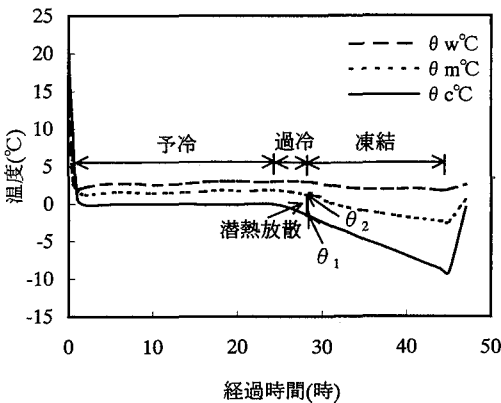


図-2 供試体端部の冷却面と暖端面温度の経時変化

補給しながら凍上した。クローズドシステムでは、このバルブを閉めて凍上を行った。また、両システムの場合とも各冷却速度毎に異なる拘束圧力を与えて、拘束圧力の影響を検討する。その結果、各試験の試験条件は表-2に示す通りである。

3. 実験結果

(1) 下端面の温度条件

下端面の温度は設定したプログラムにしたがって一定冷却速度で低下させる。その結果、温度変化の一例として、供試体の上端面 θ_w と中央部の温度 θ_m 及び

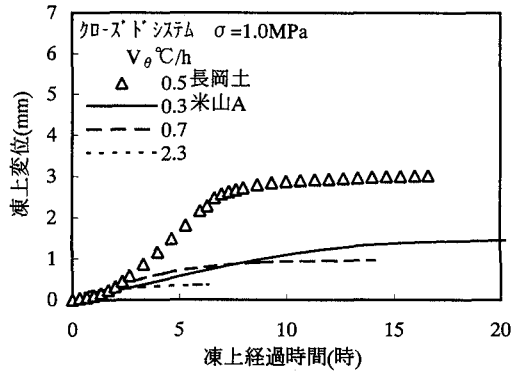


図-3(a) 凍上変位の経時変化

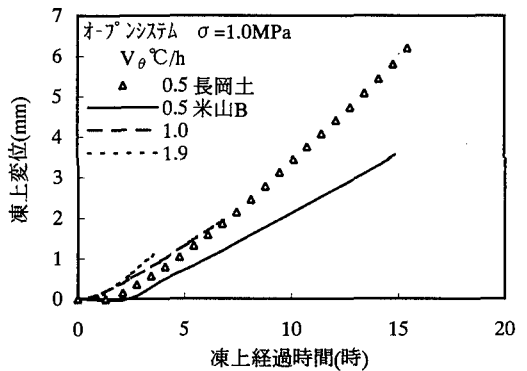


図-3(b) 凍上変位の経時変化

下端面の温度 θ_c の経時変化を図-2に示すが、上端面の温度はほぼ一定に保たれており、下端面の温度は設定したプログラムにしたがって低下している。

しかしながら、冷端面温度が θ_1 になると土中に氷の核が形成され始め、これと同時に潜熱が放出されるので、下端面の温度は急激に θ_2 まで上昇する(過冷段階)。その後、凍土内の熱のバランスが新たに取れると、冷却面温度がまた低下し、短い時間内に温度 θ_1 に戻った後に、再び冷却速度 V_θ で低下して行く(凍結段階)。

(2) 凍上変位

クローズドシステムとオープンシステムによって冷却速度を変化させたときの凍上変位の経時変化は図-3(a),(b)に示す通りである。

本文では下端面温度 θ_c が設定したプログラムにしたがって最低になった時点での凍上変位を最終凍上変位とする。両システムの場合とも冷却速度 V_θ の大き

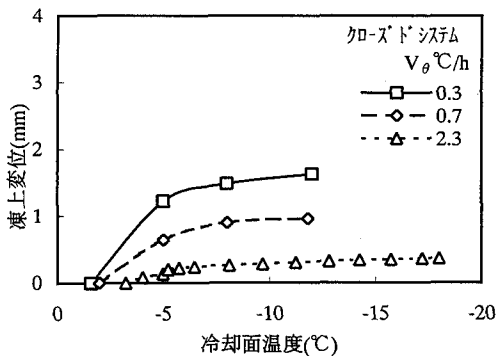


図-4(a) 凍上変位と冷却面温度の関係(米山 A)

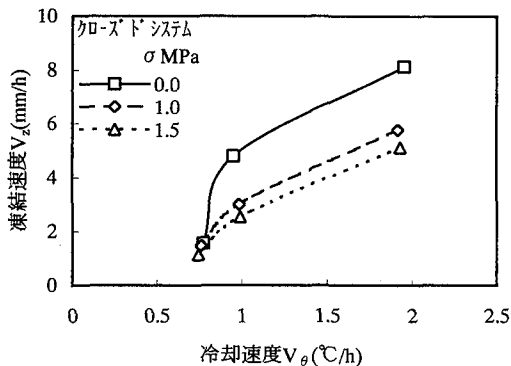


図-5(a) 凍結速度と冷却速度の関係(米山 B)

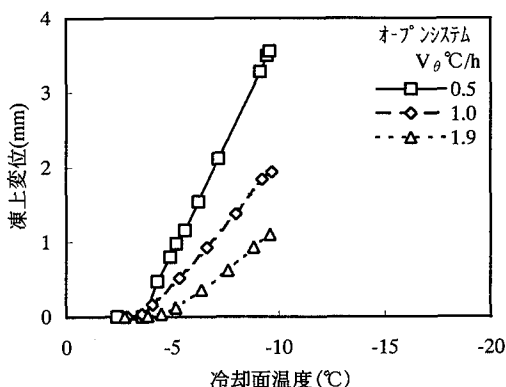


図-4(b) 凍上変位と冷却面温度の関係(米山 B)

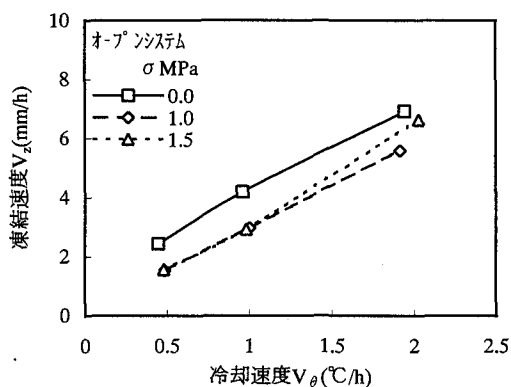


図-5(b) 凍結速度と冷却速度の関係(米山 B)

さにより凍上経過時間による凍上変位は大きく異なっている。クローズドシステムの場合では、ほぼ同じ物性値を持つ供試体の凍上変位が冷却面の冷却速度の違いによって異なる挙動を示し、冷却速度が大きいほど最終凍上変位は小さい。しかし、いずれの冷却速度でも、凍結初期に凍上変位が急増し、その後、凍結時間の経過による凍上変位の増加量は次第に小さくなる。また、凍結初期の凍上変位は、冷却速度が大きいほど大きい。このようにクローズドシステムでの凍上変位の変化は冷却速度の違いによって明らかに異なっている。

オープンシステムの場合では、同じ凍結時点での凍上変位は、冷却速度が大きいほど大きい。また、オープンシステムでの凍上変位は凍結時間の経過とともに直線的に増加している。このような傾向となるのはオープンシステムの場合では補給水源があるために、供試体外部からの水が凍結フロントまで吸い込まれ、凍上変位が増加するためといえる。

また、図-3(a),(b)に示すように、クローズドシステ

ム、オープンシステムいずれの場合ともシルト質粘性土の長岡土の凍上変位は砂質土の米山 A と、粘土含有率の低い米山 B より大きいことが分かる。

異なる冷却速度における凍上変位と冷却面温度の関係は図-4(a),(b)に示す通りであり、オープンシステムでは、過冷却の後には凍上変位は冷却面温度に正比例して増加し、凍上変位 h と冷却面温度 θ_c との間には次式のような関係がある。

$$h = C\theta_c + D \quad (1)$$

ここに、 C, D は土質、実験によって異なる定数である。

一方、クローズドシステムの場合の凍上変位は小さく、凍結初期にのみ冷却面温度とは直線的な関係にあるが、その後は凍上変位が急激に減少し、 h と θ_c の直線関係はなくなる。しかしながら、オープンシステムとクローズドシステムいずれの場合とも冷却速度が小さいほど凍上変位が大きくなっている。

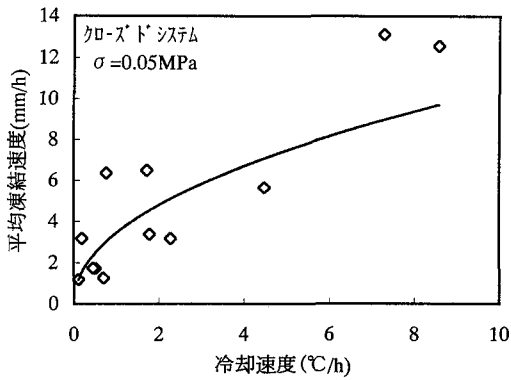


図-6 冷却速度による平均凍結速度の変化(米山 A)

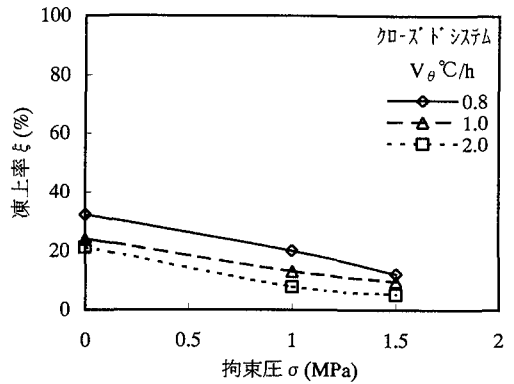


図-8(a) 拘束圧と凍上率の関係(米山 B)

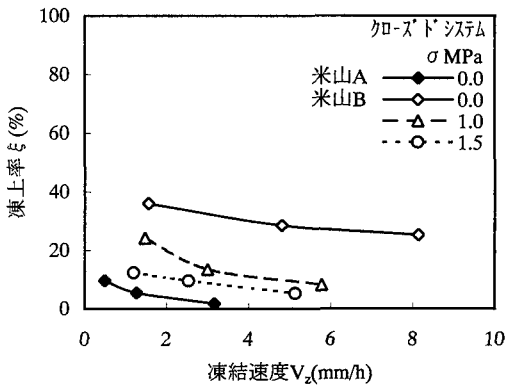


図-7(a) 凍結速度と凍上率の関係

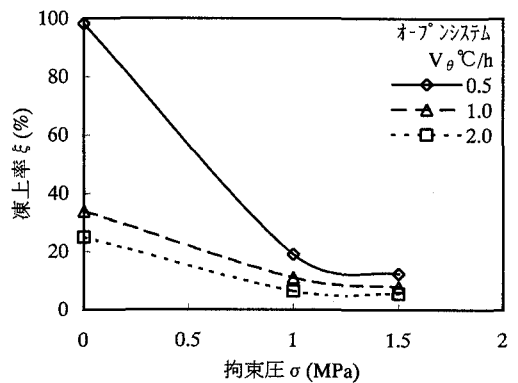


図-8(b) 拘束圧と凍上率の関係(米山 B)

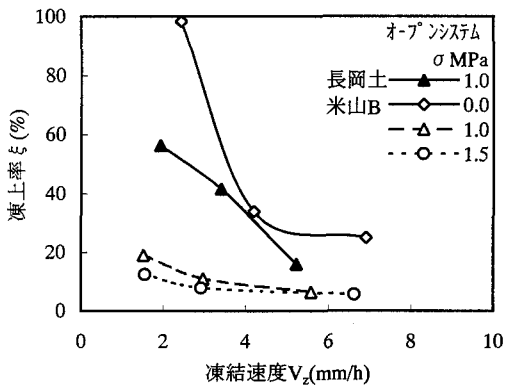


図-7(b) 凍結速度と凍上率の関係

4. 凍結速度、凍上率と冷却速度の関係

土の凍結膨張、いわゆる凍上変位を決定する要因としては

a) 凍結時の拘束圧力

b) 凍結時の間隙水圧

凍結速度または凍結中の熱流速度があげられる。

Takashi et al.^{18),19),20)}は室内実験によって、オープンシステムで冷却面の温度を調節することによって、凍結速度を変化させ、凍上率への凍結速度の依存性を調べた。しかし、冷却面の冷却速度が凍結速度へ与える影響、また、拘束圧が凍結速度に与える影響は明瞭になっていない。

上記のことを考慮して、異なる拘束圧の条件下における凍結速度と冷却速度の関係について検討した。凍結が開始する時点での供試体の高さを凍結時間で除したものを平均凍結速度と定義する。本研究では供試体の高さが 2cm であるので、各実験毎の平均凍結速度をその実験の凍結速度とし、図-5(a), (b)に拘束圧 σ がそれぞれ 0.0MPa, 1.0MPa 及び 1.5MPa のときの冷却速度と凍結速度の関係を示す。

図示のように、クローズドシステムでは、冷却速度

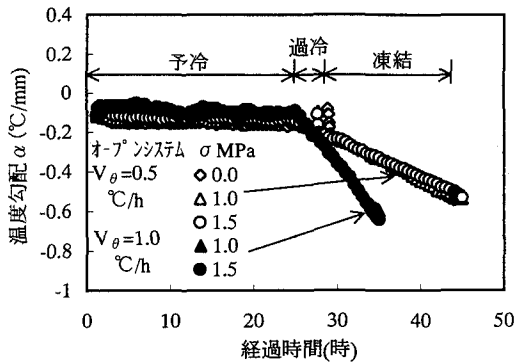


図-9 供試体内の温度勾配の経時変化(長岡土)

V_θ が 1°C/h 以下では冷却速度 V_θ の増大による凍結速度 V_z の変化が大きく、その後も、冷却速度が大きくなるに従って、凍結速度も大きくなる。冷却速度 V_z が 0.7°C/h 位では拘束圧による凍結速度の差はほとんどないが、冷却速度が 1°C/h 以上となると、冷却速度が大きくなるに連れ拘束圧力 σ による凍結速度 V_z の差が大きくなっている。また、冷却速度が 1°C/h 以上では、拘束圧による差はほぼ一定になっている。一方、オープンシステムにおいては σ の大きさにかわらず V_z はほぼ冷却速度 V_θ に比例して増加している。

Horiguchi²⁴⁾は土粒子の周りの間隙の大きさは同じであると仮定し、さらに地表面の温度は一定冷却速度で低下するという条件下で、 V_z と V_θ の間には次のような関係があることを示した。

$$V_z = \sqrt{\frac{kV_\theta}{n\rho_i L}} \quad (2)$$

ここに、 k : 熱伝導率
 n : 体積含水比
 ρ_i : 氷の密度
 L : 氷の融解潜熱

一般に凍結速度が速いと土中に分離氷層を生じ、遅い凍結速度では、土が均一に凍結するため、凍上率が大きくなるということが知られている¹⁷⁾。

本研究で得られたクローズドシステムで拘束圧が $\sigma = 0.05 \text{ MPa}$ のときの冷却速度と凍結速度の関係は図-6 のようになり、近似的に以下のような関係で表される。

$$V_z = aV_\theta^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここに、 a は熱伝導率、体積含水比に関する実験係数であり、本実験では3.42である。

冷却面が一定冷却速度で冷却する砂質ロームの場合でのこの結果は Horiguchi の式(2)とほぼ一致する結果である。

同じ拘束圧における凍上率は図-7(a),(b)に示すように両システムとも凍結速度の増加に従って減少している。本実験においても、速い凍結速度では分離氷層を生じていると考えられ、特に、オープンシステムで拘束圧が $\sigma = 0 \text{ MPa}$ の場合凍上率は凍結速度に大きく影響され、 $V_z = 2.44 \text{ mm/h}$ のときには、きれいな氷の層が観測され、そのときの凍上率は図-7(b)に示すように98%と大きくなっている。一方、拘束圧 σ が 1.0 MPa と 1.5 MPa と大きい場合では、両システムとも凍結速度と凍上率の関係はほぼ同じ傾向を示して、凍上率は拘束圧が $\sigma = 0 \text{ MPa}$ の場合よりかなり低くなっている。凍上率が拘束圧による影響は図-8(a),(b)に示す通りである。いずれの場合とも凍上率 ξ は拘束圧 σ の増加に従って小さくなり、しかも、冷却速度 V_θ が小さいときの凍上率 ξ が大きいことが分かる。

また、図-7(a)に示すように、クローズドシステムの場合では、同じ拘束圧 σ 下で砂質ロームの米山Bの凍上率 ξ はロームの米山Aより大きい。図-7(b)に示すオープンシステムの場合では粘土含有率の高い長岡土の凍上率は同じ拘束圧 σ 下でのロームの米山Bより大きいことが分る。いずれにせよ、粒径が小さくなるにつれ凍上性が強くなることが分る。

5. 温度勾配の変化

本実験では冷却する時の冷却面温度 θ_c と冷却速度 V_θ の関係は図-2の通りであり、この関係は次式のように表すことができる。

$$\theta_c = tV_\theta \quad (4)$$

ここに、 t は凍結時間である。

本実験では供試体高さが 2 cm と小さいので、熱の拡散が均一であり、中の温度勾配は一様であると仮定し、供試体の温度勾配 α は次式となる。

$$\alpha = \frac{\theta_c - \theta_s}{H} \quad (5)$$

式(4)を式(5)に代入すると、次式となる。

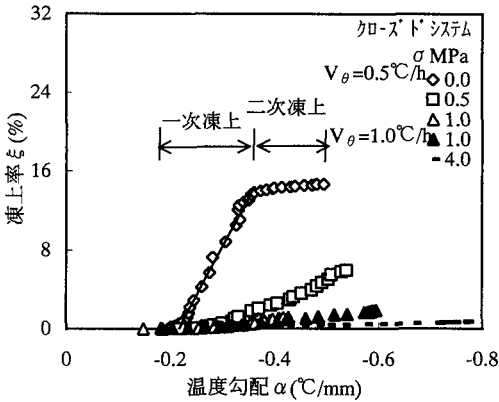


図-10(a) 温度勾配による凍上率の変化(長岡土)

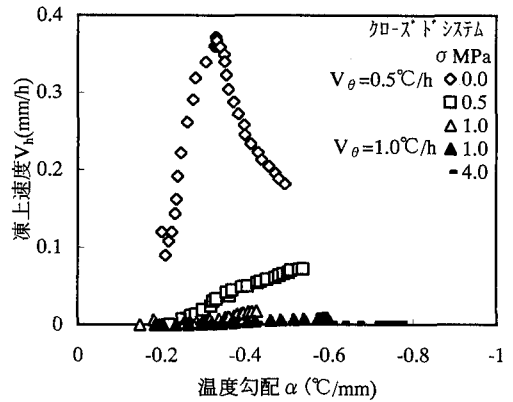


図-11(a) 温度勾配による凍上速度の変化(長岡土)

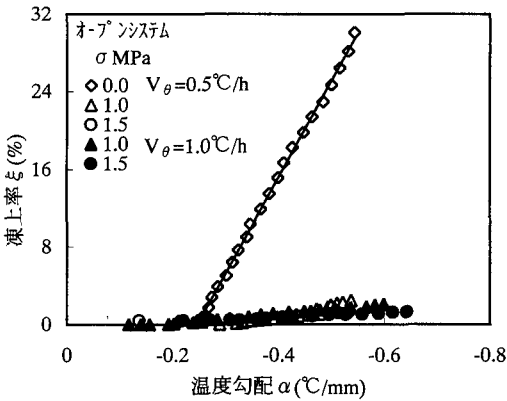


図-10(b) 温度勾配による凍上率の変化(長岡土)

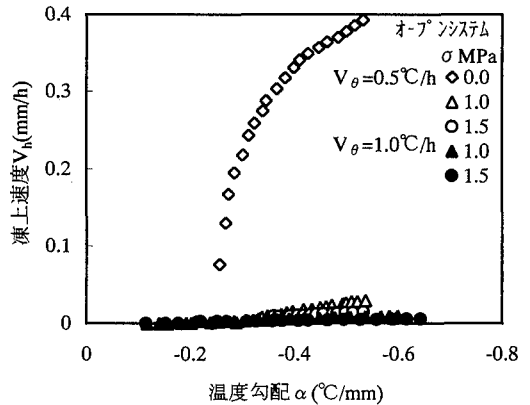


図-11(b) 温度勾配による凍上速度の変化(長岡土)

$$\alpha = \frac{t}{H} V_\theta - \frac{\theta_w}{H} = m V_\theta - n \quad (6)$$

ここに、 α : 温度勾配(°C/mm)

θ_w : 上端面温度(°C)

$m = t/H$, $n = \theta_w/H$

式(6)のように α は V_θ に比例して変化する。この仮定のもとでの α の経時変化は図-9に示す通りである。温度勾配が急変する点は氷核が発生し始める時刻で、潜熱が放散する点といえる。

土の凍上は基本的には、土中の熱伝導と土中水分の移動という二つの現象の複合現象によって生じ、凍土中の温度分布は水分移動に伴う熱輸送と水晶析出による潜熱放出により影響を受ける。図-2に示すように、供試体の冷端面が凍結潜熱を放出する際には、冷端面の温度 θ_c のみに変化し、中央部の温度 θ_m が影響されていない。言い換えれば、凍結中に吸い込まれた水が

凍土中で凍結して潜熱を放出する場合はその近傍のみに影響が生じ、供試体全体に対しては影響されていない。したがって、潜熱放出時は、温度勾配は供試体の中で一様とはなっていないことが分る。

6. 凍上率と温度勾配の関係

温度勾配による凍上率の変化傾向を図-10(a),(b)に示すが、オープンシステムでの凍上率は温度勾配の変化によって直線的に対応して増加し、その関係は冷却面の冷却速度と拘束圧 σ にも影響され、同じ冷却速度でも拘束圧が大きいかほど凍上率は小さい。また同じ拘束圧下でも冷却速度の小さいほど凍上率が大きいことが分る。

一方、クローズドシステムでは凍上の初期には供試体内の温度勾配により未凍結土から凍結面へ水分が供

給され凍上変位が急増し、その後、未凍土中の水分が少なくなるため水分の供給が減少するので、オープンシステムの場合と異なって凍上率 ξ は α に対し直線的に変化せず、凍上率の増加が小さくなっている。しかし、凍上率 ξ はオープンシステムの場合と同じように拘束圧が大きくなるほど水分の移動が抑制されるので小さくなっている。

これらの関係をみると、オープンシステムでの凍上率 ξ と温度勾配 α との関係は近似的に次のように表せる。

$$\xi = A\alpha + B \quad (7)$$

ここに、係数 A, B は拘束圧 σ の値によって変化する定数であり、本研究では拘束圧 σ がゼロの場合の係数 A, B は次式となる。

$$\begin{aligned} A &= -99.5 \\ B &= -24.7 \end{aligned} \quad (8)$$

式(7)により、一般的に、オープンシステムでの凍上率は冷却面の温度の変化にかかわらず、供試体内の温度勾配 α に支配されることが推測できる。

冷却面温度が一定速度で低下する条件では、式(7)に式(6)を代入すると、凍上率 ξ と V_θ の関係は式(9)となる。

$$\xi = A(mV_\theta - n) + B \quad (9)$$

式(7),(8),(9)より冷却面温度が一定速度で低下する場合、オープンシステムでのある時刻の凍上率 ξ は、上端面温度 θ_w および下端面の温度 θ 、冷却面の冷却速度 V_θ および拘束圧 σ の関数で表すことができる。

また、クローズドシステムでは(図-10(a))、拘束圧 σ がゼロの場合では凍上初期では凍上率 ξ と温度勾配 α はほぼ直線的に変化しており、次の式として表すことができる。

$$\xi = -99.5\alpha - 21.6 \quad (10)$$

式(8), (10)から見ると、クローズドシステムの場合での初期の凍上率 ξ と温度勾配 α との関係はオープンシステムの場合と同じように式(9)で表すことができる。言い換えれば、クローズドシステムでの凍上は式(9)にしたがう凍上初期の一次凍上と、水の供給が減少したため凍上率 ξ が小さくなった二次凍上と分けて対処する必要のあることが分かる。

さらに、温度勾配と凍上速度の関係への拘束圧の影響を見ると図-11(a),(b)となり、オープンシステムでは温度勾配が大きくなると、凍上速度が大きくなる傾向が現れる。クローズドシステムでは未凍土中の水分が少なくなるため水分の供給が減少し、凍上速度が小さくなったためにある温度勾配を越えると、凍上速度が減少する傾向を示している。

7. まとめ

静的圧密により作製した飽和供試体を対象にして、オープンシステムとクローズドシステムの条件で上端面の温度を一定にし、下端の冷却面の温度を一定速度で低下させる凍上試験を行い、冷却速度の違いによる凍上速度、凍結速度、温度勾配の挙動及びこれらによって影響される凍上率の挙動を検討した。その結果得られた主要な成果は以下の通りである。

- (1)凍上変位は冷却面の冷却速度によって影響され、冷却速度が小さいと凍上変位が大きい。
- (2)クローズドシステムでの凍上変位は凍結初期に急増し、その後、時間の経過と共に次第に緩やかになる。一方、オープンシステムによる凍上変位は凍結経過時間及び冷却面温度の変化と直線関係になる。
- (3)凍結速度はオープンシステムでは冷却速度の増加に従って増加する傾向にあるが、拘束圧が大きくなると、凍結が抑制され、凍結速度が小さくなる。
- (4)オープンシステムの場合では、凍上率 ξ を温度勾配 α との関係は

$$\xi = A\alpha + B = A(mV_\theta - n) + B$$

となる。なお、係数 A, B は上端面と下端面の温度差、温度勾配および拘束圧の影響を受ける。

- (5)クローズドシステムの場合での凍上率 ξ と温度勾配 α の関係はオープンシステムの場合と同じように直線的に変化する。凍結初期の一次凍上と水の移動が減少したため凍上率 ξ が小さくなる二次凍上の二段階に分けることができる。

参考文献

- 1) 木下誠一：凍土の物理学，森北出版株式会社，pp.1, 1982.
- 2) 土質工学会：凍土の力学的特性に関する研究委員会，土の凍結に関するシンポジウム，pp.1-113, 1986.
- 3) Taber, S.: The mechanics of frost heaving, *Journal of Geology*, Vol.38 (2), pp.303-pp.317, 1927.
- 4) 亀井健史, 小川正二, 木村嘉富, 福田誠：不飽和粘性土の凍上メカニズム，土木学会論文集，第382号，Ⅲ-7, pp.201-208, 1987.

- 5) Beskow, G. : Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Railroads, *the Swedish Geological Society*, No.375, pp.32-56, 1947.
- 6) Brown, R.J.E. : Permafrost in Canada, *Univ. of Toronto, Press.*, pp.1-234, 1970.
- 7) 吉田英昭, 了戒公利 : ヒートパイプ式低温貯蔵システムにおける融解時の温度環境, 凍害対象と寒さ利用に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.121-124, 1992.
- 8) 橋本哲, 高橋由多加, 赤川敏 : 開式・両端面温度一定条件下での土の凍上挙動, 第19回土質工学研究発表会, pp.763-764, 1984.
- 9) Penner, E. and Walton, T. : Effects of temperature and pressure on frost heaving, *Proc. 1st. Int. Symp. on Ground Freezing*, pp.29- 39, 1979.
- 10) 高志勤 : 凍上機構の数値解析, 精研, 1982
- 11) 青山道清, 小川正二, 川澄修, 田村富雄, 福田誠 : 凍結-融解を受けた土の性質, 土と基礎, Vol.25, No.7, pp.41-43, 1977.
- 12) Taber, S. : Frost heaving, *Journal of Geology*, Vol.37, pp.428~461, 1929.
- 13) Beskow, G. : Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads, *Swedish Geological Society*, No.375, pp1-144, 1935.
- 14) Konrad, J. M. and Morgenstern, N. R. : A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 18, pp.482-491, 1980.
- 15) Miller, R. D. : Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils, *Highway Res. Rec.* 393, pp.1-11, 1972.
- 16) Konrad, J.-M. and Nixon, J.F. : Frost heave characteristics of a clayey silt subjected to small temperature gradients, *Cold Reg. Sci. Tech*, 22: pp.299-310, 1994.
- 17) Xu, X., Wang, J., Zhang, L. and Deng, Y. : Influence of cooling rate on frost heave of freezing soils in open systems, *Proc. 7th Int. Symp. on Ground Freezing*, pp.65-68, 1994.
- 18) 高志勤, 益田稔 : 拘束圧下における土の凍上量と間隙水移動について, 雪氷, 第33巻, 第3号, pp.1-11, 1971.
- 19) 高志勤, 益田稔, 山本英夫 : 土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度, 有効応力の影響に関する研究, 雪氷, 第36巻, 第3号, pp.1-20, 1974.
- 20) Takashi, T., Ohrai, T., Yamamoto, H. and Okamoto J. : Upper limit of heaving pressure derived by pore-water pressure measurements of partially frozen soil, *Proc. 2nd. Int. Symp. on Ground Freezing*, pp.245-257, 1980.
- 21) Horiguchi, K. : Effect of cooling rate on freezing of a saturated soil, *Cold Reg. Sci. Tech*, 14: pp.147-153, 1987.

(1997. 7. 14受付)

EFFECTS OF COOLING RATE ON FROST ACTION

Qing ZHU, Hirofumi TOYOTA and Shoji OGAWA

In this study we determined quantitatively the properties of the frost heave, freezing rate, frost heaving ratio and temperature gradient within sample on open system and closed system. In these experiments, the sample size is approximately 6 cm diameter and 2 cm high, and the temperature of cold side was controlled with a certain cooling rate. It was known that freezing rate and temperature gradient changed with different cooling rate, also frost heave and frost heaving ratio were influenced by the temperature gradient. Moreover, at the case of cold side temperature was fallen with a certain cooling rate, it has been known that the frost heaving ratio can be expressed with a function of warm and cold side temperature, temperature gradient and overburden.