

東北大学工学部 学生員 ○伊藤 道郎
東北大学工学部 正員 柳沢 栄司
東北大学工学部 学生員 姚 義久

1 はじめに 一次元凍結における凍上の吸排水機構を調べたり、凍上機構のモデル化を行なって凍結現象の解析を容易にするためには、一定の凍結速度のもとで実験を行なうのが望ましい。凍結速度を一定にするための温度制御は高志らにより提案され、それに基づき数多くの実験がなされてきた。ここでは、本研究において実施された凍上試験での凍結速度一定方法に関しての一報告と、その試験方法のもとでの凍上量、吸排水量の凍結速度依存性について、その結果を述べることにする。

2 試料及び供試体作成法と実験方法 試料土は青葉山ロームで、その乾燥試料の840 μ フルイ通過分を約1時間煮沸、十分脱気したのち直径60mmの亚克力シリンダーにつめ、圧密圧2.0kgf/cm²で約1週間圧密したものを供試体とした。試料の土質定数を表-1に示す。

実験は5℃(一定)に保った恒温室内で行ない、冷却装置としては銅板にサーモモジュールを取り付けたものを用い、これに与える電流をデジタルプログラム調節計で制御させた。実験中は常時、拘束応力としてエア-シリンダーにより1kgf/cm²をかけながら、凍上量はダイヤルゲージで、吸排水量は水面変位でそれぞれ30分置きに測定し、試料内温度分布は自記記録計により自動計測した。そして、冷却面が-15℃に達した時点をもって実験終了とし結果を整理した。なお上面は常に、5℃(一定)に保っている。高志らは、凍結速度を一定にする方法を理論的に求め、上面を0℃(一定)に、下面を一定の冷却速度で冷やすことにより一定凍結速度が得られるとしている。本実験では、未凍土内の水分移動及び温度変化測定の必要上から上面温度を0℃以上に保つこととしたが、この場合凍結速度を一定にするためには、上下面ともに一定の温度勾配で冷却させるような温度制御が必要となる。しかし、載荷装置、吸排水量測定装置との兼ね合いから上面の温度制御は不可能であったため、個々の実験の条件を統一する意味からも、凍結速度一定の理論には反するが、上面は常時5℃(一定)に保つこととした。

3 実験結果及び考察 試料内温度分布から推定した凍結面の位置は図-1のようになる。この図で、冷却面が0℃に達した直後と凍結面が7.0cmを越えた以後の部分を除けばほぼ直線関係にあることから、凍結面は一定の速度で進行していったことが実証された。したがって、各実験において凍結速度は、この直線の傾きをもって定義する。図-2は実験中の冷却板温度・凍上量・吸排水量の経時変化を示した例で、実線は冷却面温度降下率-2.0℃/hr

粒 度 特 性	しき分 (2000 μ 以上)	0%
	砂分 (74~2000 μ)	39.96%
	シルト分 (5~74 μ)	26.67%
	粘土分 (5 μ 以下)	36.37%
コン シ シ テ 性	液性限界 W _L	49.4%
	塑性限界 W _P	24.1%
	塑性指数 I _P	25.3%
日本統一分類		CL (粘質土)
土粒子の比重 G _s		2.71
含水比 w		35.36%

表-1 土質定数

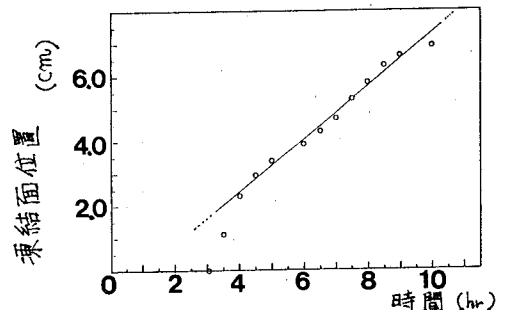


図-1 凍結面位置の経時変化

点線は -5.0°C/hr の場合である。この図で最も興味あることは、同一の有効応力 σ のもとに凍結しても、 Γ の小さい方は最終的には吸水型であるが、凍結初期において排水型の凍上を示し、 Γ の大きい方は全期間で吸水型の凍上を示し、最終凍上量も大きいということである。排水型の凍上に関しては高たらしも指摘しているように、凍結面で水を吸い寄せる力より、土粒子間の自由水の凍結膨張により水を排出する力の方が大きいためである。しかし今回、時間の経過とともに吸水型に移行したのは凍上領域が増大して、凍土内の温度勾配が時間とともに大きくなった結果、凍結面での吸水能力が上がったためだと考えられる。図-3は、凍結速度 Γ と凍結膨張率 ε_w $[\varepsilon_w = (\text{凍結膨張した土の体積}) / (\text{凍結前の土の体積})]$ 及び吸排水率 ε_w $[\varepsilon_w = (\text{凍土へ吸い込まれた水の体積}) / (\text{凍結前の土の体積})]$ の関係を示したものである。凍上量は、その土が以前から含有していた水分が氷に変化する結果生ずる体積膨張と吸水による体積膨張の和であるということと考えれば、 ε と ε_w は

$$\varepsilon = A(1-\alpha) + (1+A)\varepsilon_w$$

ただし A : 水が氷になるときの体積膨張率(≈ 0.09)

α : 凍土の不凍水含有率

という線形結合で表わすことができる。さて、ここで Γ と ε の関係であるが、高たらしの研究報告によると、有効応力 σ が一定のときは、

$$\varepsilon = A + B \cdot \frac{1}{\Gamma} \quad \left(A, B \text{ は } \sigma \text{ だけに よる関数} \right)$$

と表わすことができる。本実験では供試体高が高く、個々の

供試体の初期状態にバラツキがあるが、 Γ が小さくなるにつれて ε 、 ε_w が急激に増加するという両者の間の定量的な関係がつかめた。図中の曲線は回帰分析により求めたものである。(A, Bは正の定数) 図-4は、凍結速度 $\Gamma = 2.3 \text{ mm/hr}$ と、 $\Gamma = 13 \text{ mm/hr}$ のときの含水比分布である。含水比分布は水分移動の激しさを示すものであるので、間隙水圧分布と対応するものと考えられる。ここで注目されるのは、 Γ が小さいほど凍結面の含水比が高くなっていることである。これは、上述した凍結速度 Γ と吸排水率 ε_w の関係を裏付けるものである。

4. ゼータ値 今回の凍上実験により以下3つのことが判った。

- ① 供試体高さが9.0 cm程度の場合、上面の温度制御は凍結速度を一定にするためにはそれほど重要ではない。
- ② 凍結速度 Γ が小さくなるほど凍結膨張率 ε 、吸排水率 ε_w は急激に増大し、供試体が高く、試料すべてが凍結しなくとも、

$\varepsilon = A + B / \sqrt{\Gamma}$ の関係は成立する。

- ③ 拘束力を一定に保った場合、凍結速度が大きくなると排水しながら凍上する現象が見られる。

参考文献

高志・益田・山本 1974 ; 土の凍結膨張に及ぼす凍結速度・有効応力の影響に関する研究

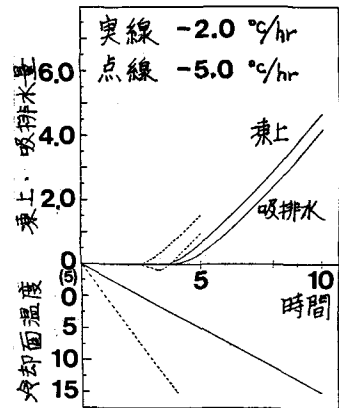


図-2 凍結中の冷却面温度凍上量・吸排水量の経時変化

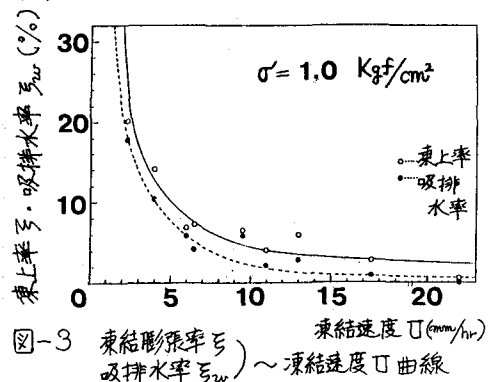


図-3 凍結膨張率 ε 吸排水率 ε_w ~ 凍結速度 Γ 曲線

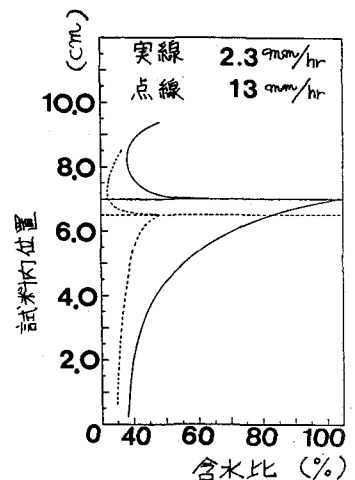


図-4 実験後含水比分布