

精研冷機(株)正会員 。 高志 勤
同 上 益田 稔
同 上 山本英夫

1. はじめに

土が凍った場合、凍上を起こしやすいかどうかという特性は土に個有の物理化学的性質に支配されるものと考えられる。しかし、凍上性の土が実際に発生する凍上の大きさは、凍結時の熱流・温度・圧力等の条件に影響を受けるであろう。既に著者等(1971a)は、固結シルトに於て間隙水圧が一定の時、載荷重が凍上量を規則的に抑制することを見いだした(後述)。その後(1972)、有効応力が凍上抑制を支配する真の因子であることが明らかになった。いっぽう、凍結中の土の凍結速度を一定にたもつ実験方法が理論的に解明され、これによって凍上の大きさは凍結速度にも支配されることが示された。(高志・益田、1971b)。したがって、凍上予測のための凍結試験では、野外に於ける実際の有効応力・凍結速度を用いる必要がある。また、異なる土で凍上性を比較する場合、土によって作用因子の影響度が異なるために明確な指標の設定はこれまで困難であった。

そこで、発生する凍上の大きさを、上にのべたような支配因子を独立変数として一義的にあらわすことができれば、精度の高い凍上予測が可能となると同時に、凍上のしやすさというあいまいな指標に対してひとつの定義を与えることができよう。このような試みの第一歩として、固結シルトを用いて有効応力・凍結速度の2変数条件で実験を行い、これらの因子の支配効果を統一的に表現することに一応の成功をみた。

2. 凍結速度を一定にする解

冷却面温度を一定に保って凍結する従来の方法では、凍結距離 X は Neumann の解によって、 $X = \alpha \sqrt{t}$ となるので、凍結速度もまた時間の函数となって凍上の凍結速度依存性を調べる実験には不都合である。そこで、凍結速度が一定、すなわち、 $X = Ut$ となるような一次元移動境界熱伝導問題の解(高志：1966)を調べたところ、冷却面温度 θ_c を次式に従ってコントロールすればよいことがわかった。

$$\theta_c(t) = - (C_1 + C_2 \theta_\infty) \left\{ \exp\left(\frac{U^2}{\kappa_1} t\right) - 1 \right\} \quad (2.1)$$

ここに、 C_1, C_2 は定数、 θ_∞ は $t = 0$ における土の温度、 κ_1 は凍土の温度伝播率である。この式を展開してかつ、 $\theta_\infty = 0$ とすれば、

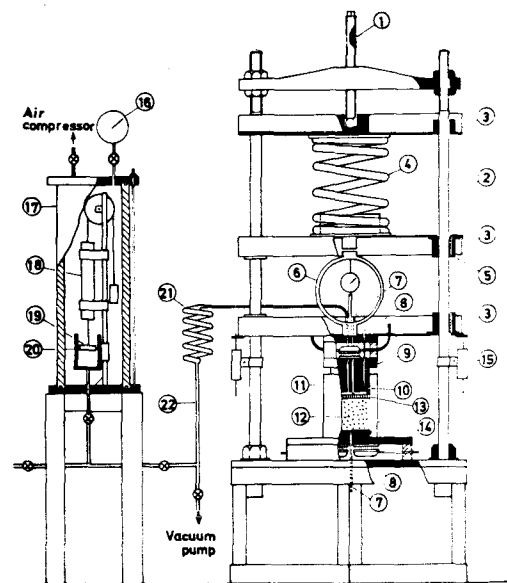
$$\theta_c(t) = -C_1 \left\{ \frac{U^2}{\kappa_1} t + \frac{1}{2} \left(\frac{U^2}{\kappa_1} t \right)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{U^2}{\kappa_1} t \right)^3 + \dots \right\} \quad (2.2)$$

今回の試料の土質・試料長を考慮して計算を行ったところ、凍結速度 $U = 2.0 \text{ mm/h}$ の時でも、式(2.2)の第2項以下を無視してもコントロール温度の差は最大で 0.3°C しか生じないことが判った。そこで、温度は次のような一次式でコントロールした。 a を時間に対する温度変化率($^\circ\text{C/h}$)とすれば、

$$\theta_c(t) = -at \quad (2.3)$$

3. 実験装置および方法

図-1に実験装置を示す。この装置は、冷却板の自重が試料に載荷される死荷重となるのを避けるために冷却板を試料の下側に固定する方式に改めた他は、原理・構造等は既発表のものと殆んど同じである。このために凍結は、自然界の凍結の場合とは逆に、下から上に向かって進行する(水で飽和した土の凍結に関しては、凍結の方向は凍上現象の本質に影響を与えないと考えられる)。水分供給用の多孔板は、スプリングで発生させた上載圧力を試料に伝達するピストンの下面にとりつけられ、水は水分移動測定用のフロートを浮べた水槽からピストンを通じて供給される。水槽は試料上面より僅か上にあるので、水頭圧は無視でき試料は常に飽和状態にある。間隙水圧を発生させる圧力容器は開放してあるので間隙水圧は0、したがって試料の有効応力は上載圧力に一致しているとみなしうる。凍結に先だち、試料を 0°C で一様な温度にしておく。



- | | |
|---------------------------|-----------------------------|
| 1 ADJUSTING SCREW | 12 SOIL SAMPLE |
| 2 POLE | 13 POROUS PLATE |
| 3 GUIDE | 14 COOLING PLATE |
| 4 SPRING | 15 POTENTIAL METER |
| 5 SLIDE BEARING | 16 BOURDON'S GAUGE |
| 6 PROVING RING | 17 PRESSURE CONTAINER |
| 7 THERMISTOR CONDUIT | 18 DIFFERENTIAL TRANSFORMER |
| 8 THERMO ELECTRIC MODULE | 19 FLOAT |
| 9 PISTON | 20 WATER CUP |
| 10 RING SEAL | 21 FLEXIBLE JOINT |
| 11 ACRYLIC RESIN CYLINDER | 22 Cu-TUBE |

図-1 実験装置

で割ったものを凍上率 ξ と定義する。また凍結速度 U は、凍結前試料長を凍結所要時間で割ったものと定義する。

4. 試料について

実験に用いた固結シルトは、石川県七尾付近で採集された。自然状態で含水比45.7%、単位体積重量1.58 g/cm^3 、飽和度97.4%、間隙比1.14の固結質塊状のシルトで不均質構造は認められない。図-2に示す粒度分析結果によると、 20μ 径粒子は約18%ありCasagrandeの判定条件では凍上の危険性があることがわかる。固結のためこの土は凍結-解凍に伴う構造攪乱が僅かなうえ、荷重による体積変化も少いことが予備試験で確かめられているので、ひとつの試料を繰返して実験に供した。

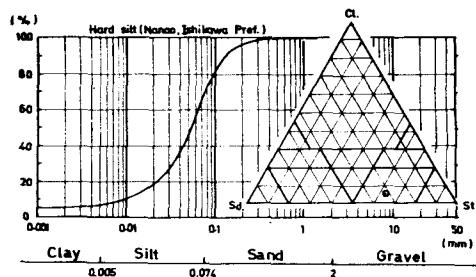


図-2 試料の粒径分布(固結シルト)

これは凍結中に未凍土内を移動する水分によって顕熱輸送が行われるのを避けるためである。凍結を開始するには、冷却板の温度をひとまず土の過冷却温度以下まで下げ、凍結開始($t=0$)をみとめてから式(2.3)に従ってコントロールする。これには回転ドラム式の温度調節器を用いて、回転速度の調節によって a を $0.025 \sim 12^\circ\text{C/h}$ まで13段階に変化させた。供試体寸法は、直径10cm、厚さ2cmの扁平な円柱とした。凍結に要する時間は a に応じて異なるので、凍結終了時の冷却板温度および試料内の温度分布もそれぞれ異なる。この矛盾を解決するため、凍結終了後冷却面温度も全実験について -10°C に揃えた時の最大凍上量をもって凍上量と定め、これを凍結前の試料長

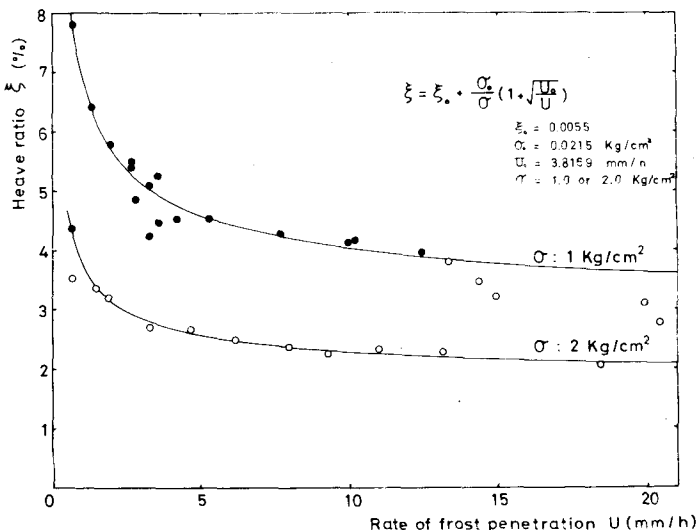


図-3 凍結速度と凍上率の関係(有効応力は一定)

5. 実験結果

1) 凍結速度と凍上率との関係 を調べるために有効応力を一定に保ち、温度変化率 a を変数にして実験を行った結果を図-3に示す。凍上率 ξ は凍結速度 U に対してプロットしてある。図中の黒丸は凍結過程で吸水しながら凍上したことを、白丸は排水をあらわす。これによって凍結速度は凍上率および水分移動機構に影響を与えていることがわかる。この結果に基づいて次のような実験式を得た。A および B を定数とすると、

$$\xi = A + B \frac{1}{\sqrt{U}} \quad \text{----- (4. 1)}$$

2) 有効応力と凍上率との関係 については、既にのべたように凍上率 ξ は次の関係式であらわせることが確かめられている。

$$\xi = \xi_0 + \frac{C}{\sigma} \quad \text{----- (4. 2)}$$

ここに、 σ は有効応力 ξ_0 , C は定数である。今回の土に対して、温度変化率 a を $0.25^\circ\text{C}/\text{h}$ にたもち、有効応力を変数とした実験を行った結果を図-4に示す。得られた凍結速度の平均は 3.15 mm/h であった。式(4.2)の関係は、満足されていることがわかる。

3) 凍上の統一表示式 を求めるために次の仮定を設ける。A および B を σ のみに依存して変化する定数、C を U のみに依存する定数、 ξ_0 を σ にも U にも無関係な定数とすれば式(4.1)、(4.2)は、うまく結びつけることができ次式によるようになる。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) \quad \text{--- (4.3)}$$

ここに、 ξ_0 , σ_0 , U_0 を土に個有な定数とするこの式は、 σ が一定ならば式(4.1)に、 U が一定ならば式(4.2)に移行することはあきらかで、それぞれ、図-3, 4中に記入した実線のようにになる。図-5は両軸に U および σ をとり、 U - σ 平面と直交する軸を ξ とした時にできる三

次元曲面の等高線図である。図中、凍上率 $\xi \div 3.9\%$ を示す破線は、凍結中の水分移動が0の境界線で、これより下側の領域にあたる U , σ 条件は常に吸水型の凍上が発生することをあらわしている。今回の実験で確認された水分移動0の時の U , σ の実測値も図中表示する。数字はその時の凍上率である。

いろいろな土の凍上特性を式(4.3)または図-5のように表示できれば、凍上を予知する場合の指針となるばかりでなく、最初にのべた凍上のしやすさの指標を ξ_0 , σ_0 , U_0 という土に個有の定数をもちいて、量的に表わすことが可能になる。今回の結果は、凍上現象を量的に理解する最も簡単なモデルといえよう。

〔文献〕○高志(1966):土木学会第21回講演会概要、Ⅲ-4。○高志・益田(1971a)雪氷、33、109-119 ○高志・益田(1971b)昭和46年度雪氷学会予稿集、30 ○高志・益田(1972)土木学会第27回講演会概要、Ⅲ-96。

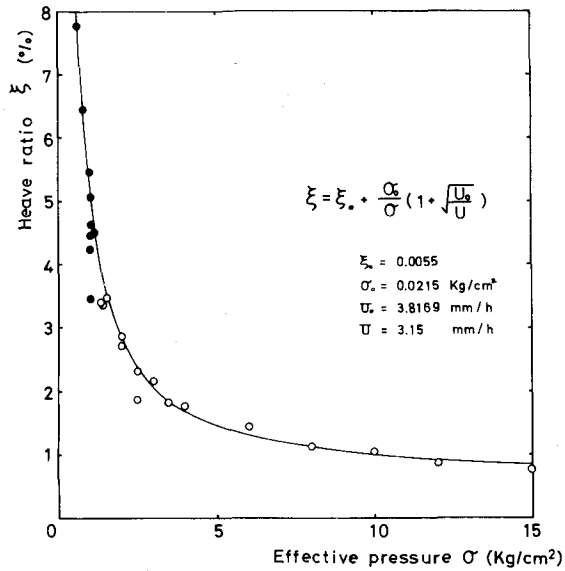


図-4 有効応力と凍上率との関係

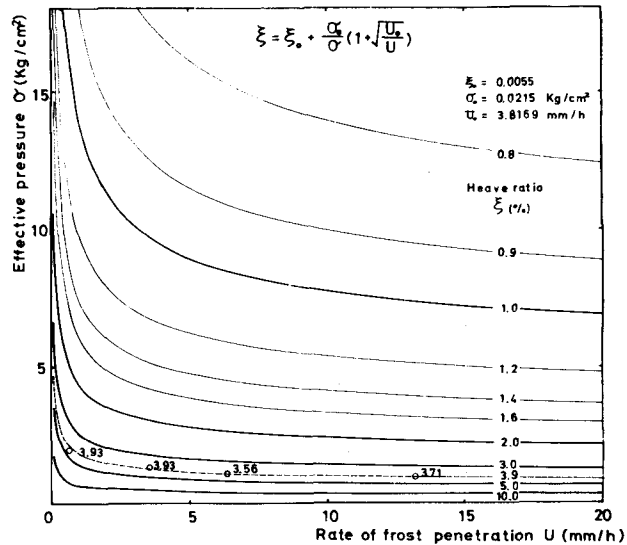


図-5 凍結速度・有効応力と凍上率との関係