

凍上実験に基づく温度—不凍水分量曲線の同定

(株)精研 正会員 ○隅谷 大作
 (株)精研 正会員 大石 雅人
 (株)精研 正会員 上田 保司

1. 目的と概要

地盤の凍上特性や凍土の力学特性を把握するには、不凍水分量の把握が重要である。その測定方法としてはカロリーメータ法¹⁾やパルス NMR 法²⁾などがあるが、手順の煩雑さや装置のコスト高などから、不凍水分量をより簡便に知る手法が望まれる。

そこで本稿では、凍上実験における温度・変位の経時変化から凍土温度—不凍水分量曲線を同定する手法を提案し、二種類の粘性土について本手法の同定精度を検証する。

表1 凍上実験試料土の物理定数

	藤の森 青粘土	稲荷山 黄土
含水比 (%)	31.2	28.5
土粒子密度 (g/cm^3)	2.685	2.720
乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	1.466	1.508
初期間隙率 n_0 (-)	0.454	0.446

2. 凍上実験の方法

表1に示す二種類の粘性土について、不凍水分量を同定する目的で凍上実験³⁾を行った。図1に実験中の経時変化例を示す。この実験では、直径100mm、高さ40mmの円柱状供試体を所定の拘束応力下で、下部の主冷却板側から上部のピストン側へ凍結させる。サーマルショックによる凍結開始後、ピストン温度を氷点で維持したまま、主冷却板温度を氷点から所定の降下速度で下げることで、凍結速度を一定に保つ。実験中は凍上量および吸水量を測定するが、吸水量が一定値に収束することにより供試体の凍結完了が確認される。凍結完了後、主冷却板温度を -10°C で一定とすることで、不凍水分量の相変化に伴う凍上量を一定値に収束させる。(以下では、この操作を基準化と呼ぶ。)

3. 不凍水分量曲線の同定方法

同定手法の導出に際して、以下の仮定を置く。

①温度 θ における不凍水分量 $W_u(\theta)$ は式(1)で表され⁴⁾、土固有の定数 a および b が求まれば不凍水分量曲線が同定される。ここで、 $W_u(\theta)$ は土の単位乾燥重量に対する不凍水分重量の比で定義される。

$$W_u(\theta) = a \cdot \theta^b \quad (1)$$

②凍土内の温度は直線分布である。

③供試体内部の間隙は完全に水で飽和されている。図2

に示す供試体高さ方向を x 軸として主冷却板($x=0$)の温度を θ_F 、凍結面の位置を X とすると、仮定①から凍土内の平均不凍水分量 $\overline{W_u}(X)$ は式(2)で表される。

また、仮定②から、凍土内の位置 x ($0 \leq x \leq X$)における温度 $\theta(x)$ は式(3)で表される。式(2)に式(3)を代入して積分を遂行すると、式(4)が得られる。

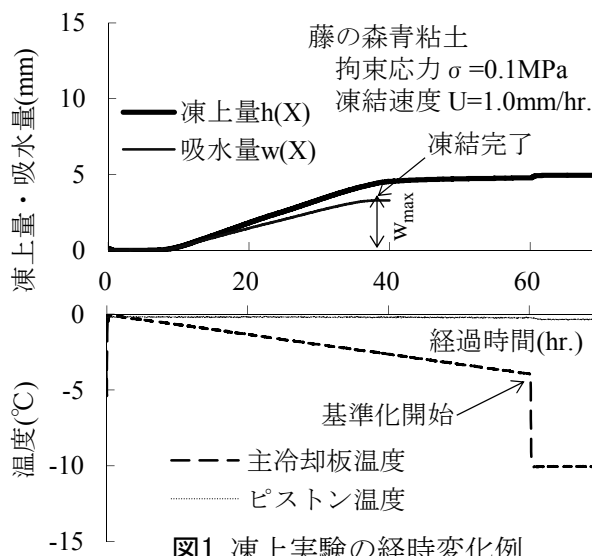


図1 凍上実験の経時変化例

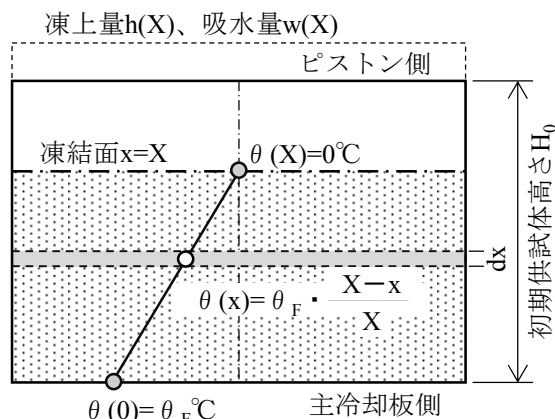


図2 凍上実験中における供試体の模式図

$$\overline{W_u}(X) = \frac{\int_{x=0}^{x=X} W_u(\theta) dx}{X} = \frac{\int_{x=0}^{x=X} [a \cdot \{\theta(x)\}^b] dx}{X} \quad (2)$$

$$\theta(x) = \theta_F \cdot \frac{X-x}{X} \quad (3)$$

キーワード 凍土, 不凍水, 凍上実験, 粘性土

連絡先 〒561-0894 大阪府豊中市勝勝 1-2-18 (株) 精研 技術開発部 TEL 06-6858-0865

一方、以下の手順により、平均不凍水分量 $\overline{Wu(X)}$ を図1に示した経時変化からの測定値として求める。図1における凍上量 $h(X)$ と吸水量 $w(X)$ との間には、水の収支から式(5)が成り立つ。ここで $h_0(X)$ は供試体の初期間隙内水分の相変化による凍上量、 Γ は水の凍結膨張率である。また、供試体の間隙がすべて凍結すると $h_0(X)$ は最大値となり、仮定③より式(6)で表される。ここで n_0 は供試体の初期間隙率である。 $h_{0,max}(X)$ と $h_0(X)$ との差は凍土内において不凍水が占める間隙を表すので、これを供試体の乾燥密度 ρ_d を用いて重量換算すると式(7)を得る。式(7)に式(5)および式(6)を適用して整理すると、

$$\overline{Wu(X)} = \frac{a}{1+b} \cdot \theta_F^b \quad (4)$$

$$h(X) = h_0(X) + (1 + \Gamma) \cdot w(X) \quad (5)$$

$$h_{0,max}(X) = X \cdot n_0 \cdot \Gamma \quad (6)$$

$$\overline{Wu(X)} = \frac{h_{0,max}(X) - h_0(X)}{\rho_d \cdot X} \quad (7)$$

$$\overline{Wu(X)} = \frac{n_0}{\rho_d} = \frac{h(X) - (1 + \Gamma) \cdot w(X)}{X \cdot \rho_d \cdot \Gamma} \quad (8)$$

式(8)が導かれる。ここで、 n_0 および ρ_d は供試体作成時の、 $h(X)$ および $w(X)$ は凍上実験中の、それぞれ測定値であるから、式(8)から求まる平均不凍水分量 $\overline{Wu(X)}$ を凍上実験に基づく測定値とみなすことができる。主冷却盤温度 θ_F と式(8)右辺との関係を整理して、式(4)の関数形で最小二乗近似すれば係数 $a/(1+b)$ および b が求まるので、定数 a および b を決めることができ、凍上実験に基づく不凍水分量曲線の同定が可能となる。

なお、凍結完了後は凍結面の位置 $X = H_0$ で一定となるが、図1に示したように、その後の時間経過においても θ_F が低下し続けて不凍水の相変化が生じる分だけ、 $h(X)$ の増加は続く。この場合も式(8)の $w(X)$ に凍結完了時の吸水量 w_{max} を適用すれば、平均不凍水分量 $\overline{Wu(X)}$ を求めることができる。つまり、前章で述べた基準化中のデータも含めて、より幅広い θ_F の範囲で a および b を同定できる。

図3に、図1の凍上実験結果を上述の手法で整理した例を示す。実線で示す不凍水分量 $\overline{Wu(X)}$ の実測値（式(8)右辺）は少し不規則な形状を示すものの、図中の破線で示すように、概ね式(4)の関数形で近似できることが確認できる。

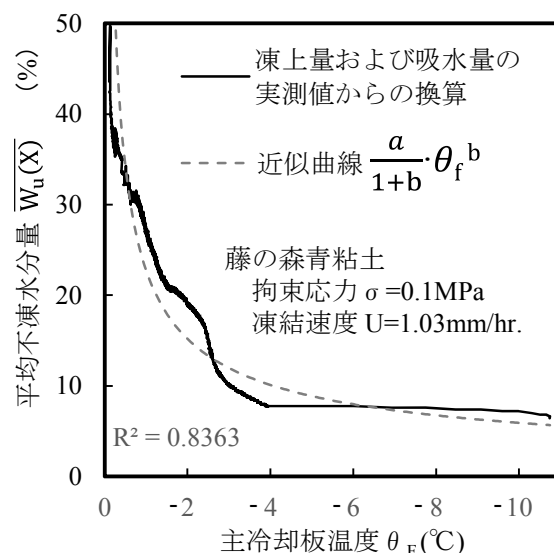


図3 凍上実験結果の整理例

4. 粘性土二種類の同定結果と精度検証

図4に示すように、2. で述べた二種類の粘性土の凍上実験結果から、前述の手法で不凍水分量曲線を同定した。藤の森青粘土では、図中に黒破線で示す実験毎の同定値間で若干の差異があるものの、黒実線で示す平均値は概ねカロリーメータによる既往実測値（図中の○）に近い値を示す。また、灰色実線で示す稲荷山黄土の同定値は黒実線よりも1.5～2倍程度大きい。これは今回の二試料土についてパルス NMR で測定された既往値²⁾と同じ傾向であり、定量的にもこの既往値に近い同定結果となっている。以上から、本稿で提案した不凍水分量同定法の妥当性が確認される。

なお、藤の森青粘土では-10℃以下の領域で同定値が実測値を上回る傾向を示すが、これは、今回の凍上実験では基準化温度が-10℃であり、それ以下の温度領域では計測値が無いので同定精度が悪くなるためと推察される。同定精度を高める一手段として、より低い温度での基準化も考えられる。

参考文献 1)伊豆田・山本・生頼：雪氷予稿集, p.40, 1991.

2)木村・所・石川：地盤工学研究発表会, pp.867-868, 2016.

3)高志・益田・山本：雪氷, Vol.36, No.2, pp.1-20, 1974.

4) Anderson, D., Tice, A. and McKim, H. : Proc. 2nd Intl. Permafrost Conf., pp.289-295, 1973.

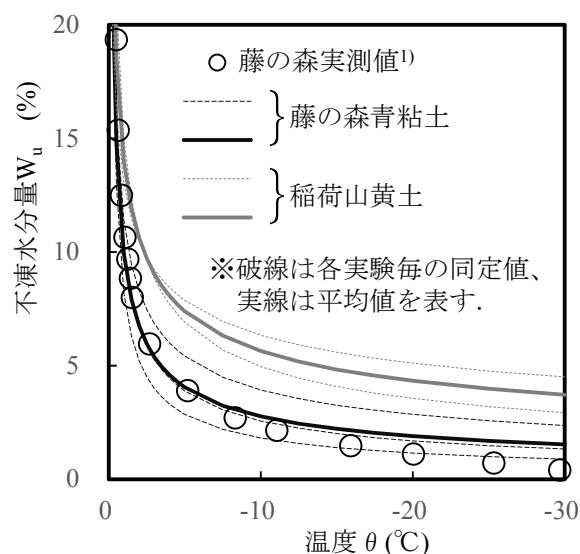


図4 温度－不凍水分量曲線の同定結果