J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 142 p.25 ~ 33 (2019)

地盤凍結工法のための凍上試験

釘﨑佑樹 [1]・大石雅人 [1]

Frost heave test for artificial ground freezing method

Yuki KUGISAKI[1] and Masato OISHI[1]

1. はじめに

トンネル掘削の際，地盤の強度および止水性を向上させる補助工法として，凍土を人工的に造る地盤凍結工法がある．凍結工法では，地中に凍結管と呼ばれる鋼管を埋設し，管内に低温の不凍液を循環し周囲の地盤を凍結させることで凍土を造成する（加藤, 1988）．Fig. 1（a）に示すように，地表から地盤鉛直方向に凍結管を埋設する場合や，立坑やトンネル内から地盤水平方向に凍結管を埋設する場合などがあり，その手法は工事現場ごとに異なる．

人工凍結と自然凍結の最も大きな違いは，凍土のできる深さと凍結方向にある．自然凍結では，地表から一次元的に凍結が進行するため，凍結層は地表付近に形成される．凍結線（0 °C の等温線）の進行にともない土の体積が凍結膨張する，いわゆる凍上現象が生じる．この際，土の凍結膨張変位は熱流方向，すなわち地盤鉛直方向に顕著に発現する．一方，凍結工法に代表される人工凍結では，凍結管埋設方法によって，任意の深さに様々な形状の凍土を造成できる（Fig. 1（a），(b)）．このように，人工凍結では地盤内において三次元的に凍結が進行するため，凍結膨張はあらゆる方向に発現しうる（上田ら, 2005）．地下構造物が多数存在する都市部の飽和地盤において多く用いられる凍結工法の施工に際しては，凍結膨張量を正確に予測し，対応することが重要な課題となる．そのため，要素試験として現地採取土を用いた室内凍上試験を行い，その結果を基に現場の凍結膨張変位の予測を行っている（上田ら, 2007）．

以下に紹介する凍上試験を基にした現地盤の膨張変位予測手法は，水分飽和度や温度境界条件が複雑な自然凍結にはそのまま適用し難い．さらに，土壌物理の分野では，土中で生じる物質・熱移動を微分方程式で表現するのに対して，我々は，地盤工学的に実験式（empirical formula）を用いることもご理解頂きたい．しかし一方で，数センチ程度の試験供試体を用いて現地盤の膨張を予測するこの手法は，地盤を均質なものとして巨視的に扱うため，「地盤の不均質さ」を表現できないという問題を含むが，これは土壌物理分野でも共通の問題と思われる．この解説を通して，微視的な視点をより大事にする土壌物理分野の方々とこの問題を共有し，問題解決への取組みや凍上現象解明の一助となることを期待したい．

凍上試験には，供試体の側方変位を拘束し凍結させた際の凍結体積膨張率を求める一軸凍上試験と，側方変位を拘束せずに凍結させた際の凍結線膨張率を求める三軸凍上試験がある．次章以降では，一軸凍上試験と三軸凍上試験に章分けし，それぞれの試験における方法および結果の整理方法について述べる．さらに，凍結膨張予測の上で考慮する影響因子について 4 章で述べる．

2. 一軸凍上試験

2.1 概要

凍上試験は，凍結工法を施工する際に生じる凍結膨張によって引き起こされる地表面の凍上や既設の地中構造物に働く膨張圧を予測し評価するために実施する．多くの現場においては，一軸凍上試験を実施し現地盤の膨張予測をすることで，実用上問題のない予測ができることが確認されている（例えば，大石ら, 2017）．ただし，後述するように，凍結膨張の影響が大きく，より高い予測精度を求められる現場に対しては三軸凍上試験を行うことがある．しかしながら，三軸凍上試験は凍上定数の同定に多くの試験点数が必要であることや，試験操作の難易度が高いことなど実用上の制約があり，現場試料土を用いた要素試験には一軸凍上試験が選択されることが多い．Fig. 2 に一軸および三軸凍上試験の結果を実施工の凍結膨張予測へ適用する際の考え方を示す．これは，ある一つの冷却面により凍土が造成される場合における凍結膨張の発現方向とその比率を模式的に表したものである．この考え

[1]Department of Technology and Development, Seiken Co., LTD., Japan, Corresponding author: 釘﨑佑樹，株式会社精研.
2018 年 8 月 31 日受稿　2019 年 4 月 11 日受理

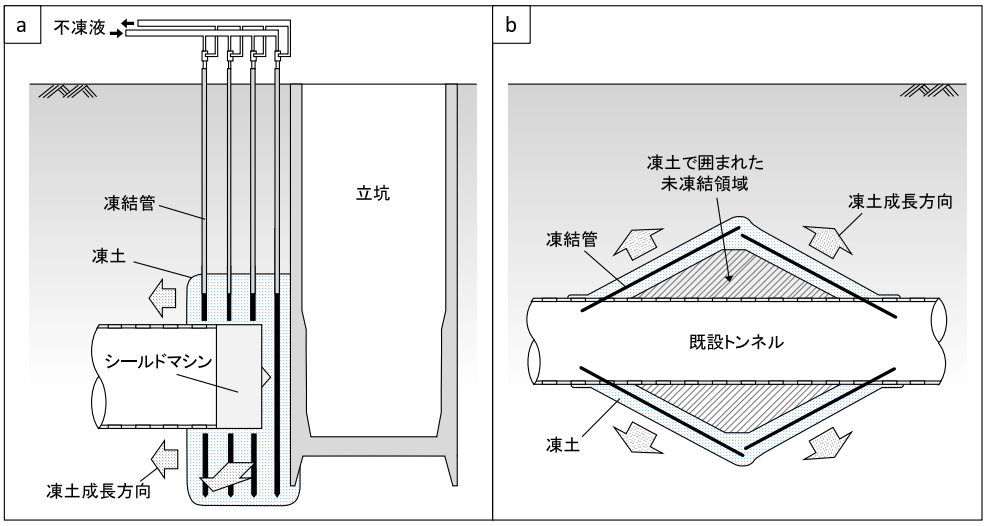


Fig. 1 地盤凍結工法における施工例の模式図．(a) シールドマシンの到達防護の例，(b) 地中拡幅防護の例．
Schematic diagram of construction site with artificial ground freezing method. (a) protection of surrounding ground for arrival of shield tunnel boring machine, (b) protection of surrounding ground for widening of tunnel.

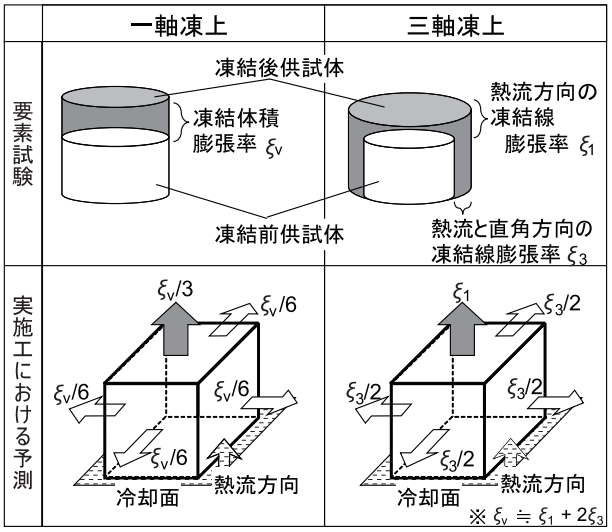


Fig. 2 一軸および三軸凍上試験の結果を用いた実施工における凍結膨張予測の考え方．
The concept of the prediction of frost heave in actual construction work applying the results of uniaxial/triaxial frost heave tests.

方を基本として，様々な形状の凍土の膨張予測を行っている．

2.2 試験装置および方法

一軸凍上試験には，Fig. 3 の模式図に示す試験装置を用いる．凍結工法のための凍上試験装置に関する特筆すべき機能として，供試体に任意の拘束応力を与えられること，自由な吸排水を可能にした開放系であること，一定凍結速度で凍結させられることが挙げられる．開放系の特徴として，土の凍結に伴う水分移動は，吸水型と排水型に分けられる．吸水型では，凍土中に残存する 0 °C 以下でも凍らない液状水（不凍水）を水みちとして，未凍結側から凍土側に水が移動して凍結することで，膨張が生じる．粘性土の多くがこれに該当する．一方で排水型は，バルクの水の凍結膨張によって未凍結土中の間隙水が系外へ押し出されることによって水分移動が生じる．砂質土では排水型となる傾向がある（隅谷ら, 2000）．

供試体には，所定の大きさの円柱形に整形した試料土を用いる．供試体を納めるシリンダー（Fig. 3 ⑥）との摩擦の影響を軽減するために，供試体直径は極力大きい方が望ましいが，試料土を採取するボーリングコアの径を考慮して，ϕ60 mm と ϕ100 mm のシリンダーを使い分ける．また，供試体高さは，未凍結土の厚みや透水係数に起因する水分移動の抵抗の影響や，凍結線より低温側の凍上が生じない領域の影響を考慮し，最も凍上しやすい 40 mm としている（高志ら, 1983）．

供試体を用意した後，供試体側面との摩擦抵抗を軽減するため内壁に薄くグリスを塗布したアクリル製シリンダーに，供試体を投入する．その後，シリンダー内にピストン型冷却部（Fig. 3 ③）を挿入し，スプリング（Fig. 3 ⑮）の圧縮により所定の上載荷重を供試体に与える（錘ではなくスプリングを用いることで，大深度を想定した荷重を容易に与えることができる）．Fig. 4 に吸水型の場合の凍結開始後の上下冷却部の温度，凍上量および吸水量の経時変化の模式図を示す．上下冷却部を氷点温度に十分な時間保った後，主冷却部の温度を急激に降下させ供試体下端に氷核を形成し，すぐさま主冷却部温度を氷点に戻す（サーマルショック法（Fig. 4 A））．この操作以降を凍結期間とす

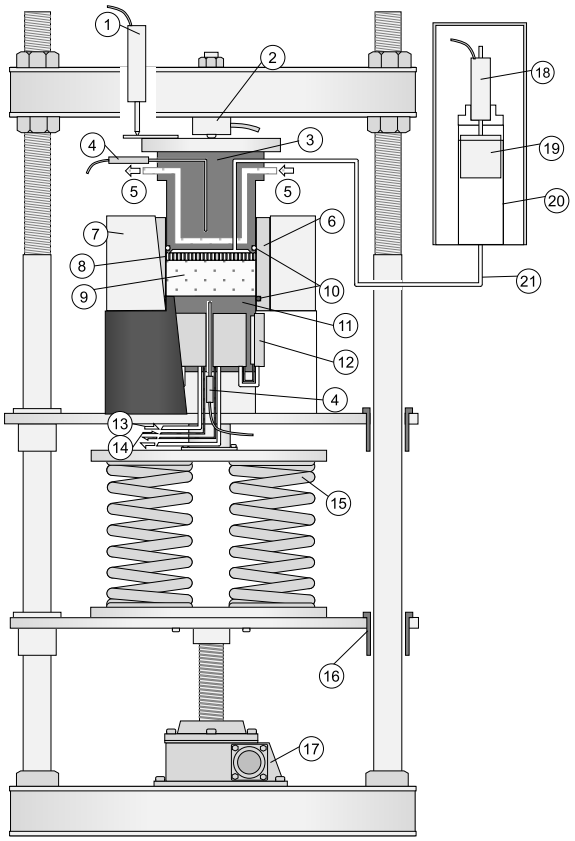


Fig. 3　一軸凍上試験装置の模式図.
Schematic diagram of uniaxial frost heave test equipment.

る．その後，ピストン型冷却部温度を氷点に保ちつつ主冷却部の温度を一定降下速度で変化させることで，供試体を下から上へ一定凍結速度で凍結させる（高志・益田, 1975）．凍結期間には，凍上変位によってスプリングが圧縮され拘束応力が増加するため，除荷を行い，応力を一定に保つ．

凍結完了は，凍結線が供試体の上端を完全に通過して，吸水が停止した点（Fig. 4 B）とする．排水型でも同様に，時間–排水量曲線の傾きの変化から凍結完了を判断している．また，主冷却部の温度降下速度によって凍結完了時の冷却部温度は試験毎に異なるため，筆者らは凍結完了後に主冷却部温度を −10°C に下げる操作（基準化（Fig. 4 C））を行っている．これは，凍土中の不凍水の相変化が凍上量に及ぼす影響を揃えるためである．

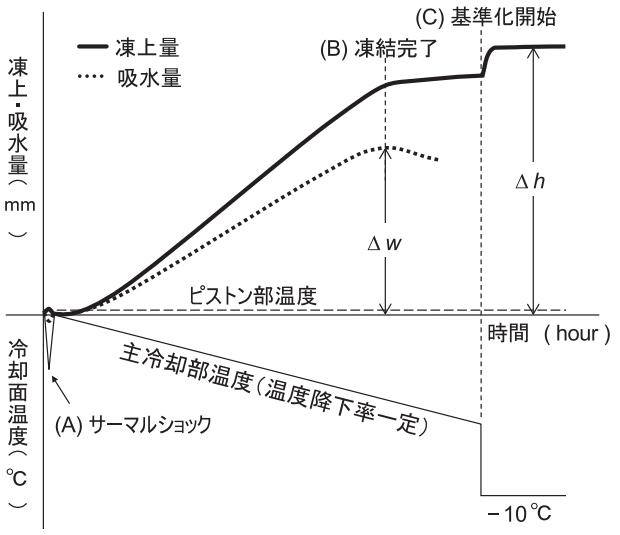


Fig. 4　凍結開始後の温度，凍上量および吸水量の経時変化の模式図（吸水型の場合）.
Schematic diagram of changes in temperatures, frost heave amount, and water intake amount with elapsed time after start of freezing (in case of frost heave with water intake).

2.3 試験結果の整理方法

一軸凍上試験では側方変位を拘束するため（試験中，供試体の断面積 A_0 は一定），基準化後に一定値を示した凍上量を Δh とすると，凍結体積膨張率 ξ_v は次式で定義される．

$$\xi_v = \Delta V/V_0 = \Delta h/H_0 \tag{1}$$

ここで，ΔV は凍結体積膨張量，V_0は 初期体積，H_0 は初期供試体高さである．同様に，吸排水率 ξ_w は凍結完了時の吸排水量 ΔW を用いて，

$$\xi_w = \Delta W/V_0 = \Delta w/H_0 \tag{2}$$

と表される．ここで，$\Delta w = \Delta W/A_0$ である．凍結完了までに要した時間 Δt より，凍結速度 U は，

$$U = H_0/\Delta t \tag{3}$$

と表される．

2.4 一軸凍上定数の算出

高志ら（1974）は人工的な凍土造成に伴う凍上量管理の必要性に駆られ，体系的な凍上実験を行った．拘束応力 σ を一定とし凍結速度 U を変えた実験と，U 一定で σ を変えた実験が行われ，それぞれ以下の実験式を導出した．

$$\xi_v = A + \frac{B}{\sqrt{U}} \tag{4}$$

$$\xi_v = \xi_0 + \frac{C}{\sigma} \tag{5}$$

ここで，A, B, C, ξ_0 は土固有の定数である．Fig. 5 に根岸土丹を例に，(a) 凍結速度の平方根の逆数と凍結体積膨張率との関係，(b) 拘束応力の逆数と凍結体積膨張率との関係を示す（高志ら, 1974）．Fig. 5 中の実線はそれぞれ（4）式，（5）式によるもので，定数はそれぞれ $A = 0.0245$ (–), $B = 0.0281$ (–), $\xi_0 = 0.003$ (–), $C = 0.0112$ (MN m^{-2}) である．（4）式は実測値をよく表しているが（Fig. 5 (a)），（5）式は応力が 0.2 MN m^{-2} より小さい範囲では実測値から逸脱している（Fig. 5 (b)）．これは，未凍結領域の長さや透水係数によって吸水が制限される現象（動水抵抗）のために凍結膨張率が低下したためである（高志ら, 1976）．これについては 4 章で解説したい．

さらに両式は以下の 1 つの式にまとめられる．

$$\xi_v = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma}\left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}}\right) \tag{6}$$

ここで，σ_0, U_0 は土毎の定数である．実際には，凍土中の水分・熱移動は凍結面の温度勾配によっても支配されるため，（6）式は厳密に物理現象を表したものではない（川端, 2001）．しかしながら，(6) 式は実用性に優れており，地盤工学分野で広く利用されている（例えば，後藤・田地, 1999 ; 蟹江ら, 2005）．また，凍結工法では，凍土造成期間の凍結速度をほぼ一定とみなせる期間が長く存在することから，多くの凍上試験では，凍結速度一定（U = 1 mm h^{-1}）として拘束応力を変化させる試験のみを行い，（5）式で結果を整理する場合が多い．（5）式の C は土の凍上性を表す指標にも用いられ，C が大きいほど凍上しやすい土であるといえる．

2.5 水収支式

凍結体積膨張率 ξ_v と吸排水率 ξ_w との関係を Fig. 6 に示す．図中の実線は 1.09（= 1 + Γ，Γ: 水の凍結膨張率）の傾きを持つ近似直線であり，ξ_v と ξ_w には次の関係を見出だせる．

$$\xi_v = (1 + \Gamma)\xi_w + \beta \tag{7}$$

上式は凍上試験における水収支を表現したもので，高志の吸排水ポンプモデルによって求められた水収支式と一致する（高志ら, 1974）．ここで，β は元々土が持つ間隙水による凍結膨張率を表し，σ および U に無関係な値である．凍土内には氷点下でも液相を保つ不凍水が存在するため，β は初期間隙率 n と Γ の積より小さい値となる．

3. 三軸凍上試験

3.1 概要

凍結膨張は熱流方向だけでなく，熱流と直角方向にも生じうる．先述のように，凍土に近接する構造物への凍結膨張の影響を考えるとき，凍結膨張変位の方向性を考慮することが予測精度向上につながる．そこで，熱流方向の拘束応力 σ_1 と熱流と直角方向の拘束応力 σ_3 を任意に与えられる三軸凍上試験装置が作られた．これにより，現場の応力条件により近い状態において熱流方向および熱流と直角方向の凍結線膨張率を求められるようになった．体系的な三軸凍上研究は山本ら（1994）によって行われ，凍結膨張は σ_1，σ_3 にともに依存することや，凍結膨張には異方性があり，熱流と直角方向よりも熱流方向への凍結膨張が起こりやすいことが報告された．

3.2 試験装置および方法

Fig. 7 に三軸凍上試験装置の模式図を示す．三軸凍上試験は一軸凍上試験と同じ試験装置を用いる．ただし，供試体の直径をシリンダー内径よりも小さくし，側方膨張を可能とする．側圧（σ_3）は，シリンダー側

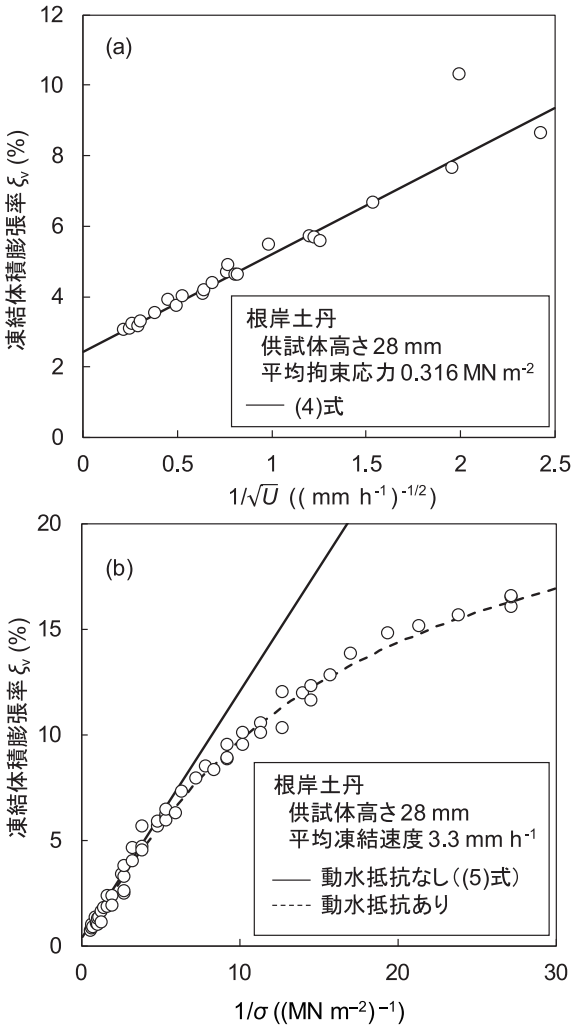


Fig. 5 (a) 凍結体積膨張率 ξ_v と $1/\sqrt{U}$ との関係，および (b) 凍結体積膨張率 ξ_v と拘束応力の逆数 $1/\sigma$ との関係（高志ら，1974 より引用）．
(a) Relationship between volumetric frost heave ratio ξ_v and $1/\sqrt{U}$, (b) ξ_v and $1/\sigma$[adapted from Takashi et al., 1974].

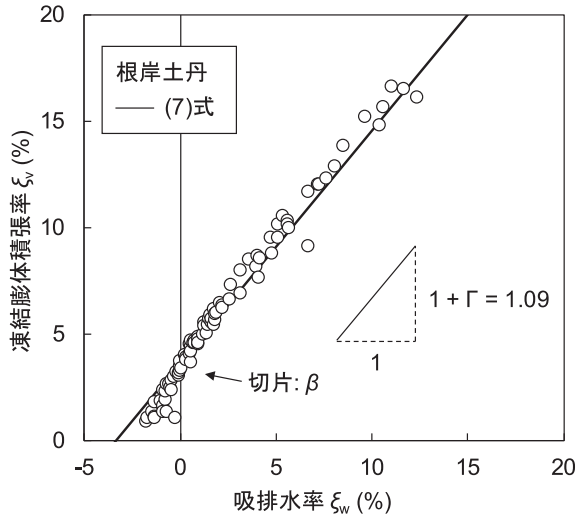


Fig. 6　凍結体積膨張率 ξ_v と吸排水率 ξ_w との関係（高志ら，1974 より引用．ただし，原図の傾きとは異なる）．
Relationship between volumetric frost heave ratio ξ_v and water intake ratio ξ_w [adapted from Takashi et al., 1974]. The slope of line in this figure is different from that in original figure.

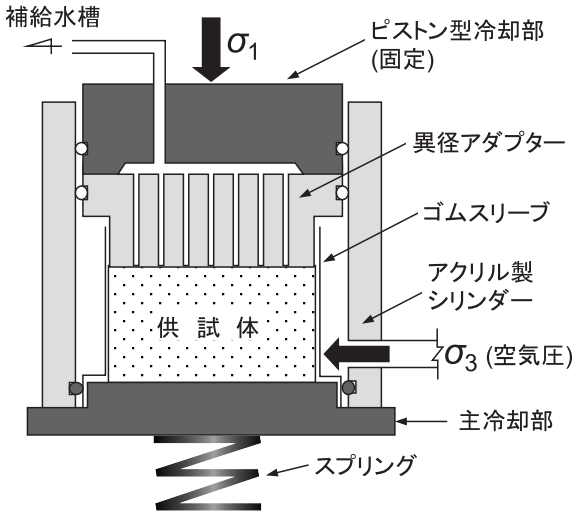


Fig. 7　三軸凍上試験装置の模式図．
Schematic diagram of triaxial frost heave test equipment.

面から供給する圧縮空気により与える．また，側面にグリスを塗布し，側面をゴムスリーブで覆うことで，一軸凍上試験と同様に上端面のみからの吸排水を可能とする．凍結開始から基準化までの操作は一軸凍上試験と同様である．

3.3 試験結果の整理方法

凍結体積膨張率 ξ_v および吸排水率 ξ_w は，

$$\xi_v = \Delta V/V_0 \tag{8}$$

$$\xi_w = \Delta W/V_0 \tag{9}$$

さらに，ξ_v は熱流方向（鉛直方向）の凍結線膨張率 ξ_1 と熱流と直角方向（半径方向）の凍結線膨張率 ξ_3 に分けられ，それぞれ以下のように定義される．

$$\xi_1 = \Delta h/H_0 \tag{10}$$

$$\xi_3 = \Delta r/R_0 \tag{11}$$

ここで，Δr は基準化後の熱流と直角方向の変位量，R_0 は初期供試体半径である．水収支から（7）式が成り立ち，さらに ξ_v は上記の定義より，

$$\xi_v = (1+\xi_1)(1+\xi_3)^2 - 1 \tag{12}$$

と書ける．したがって，（12）式と（7）式から ξ_3 は，

$$\xi_3 = \sqrt{\frac{\beta + (1+\Gamma)\xi_w + 1}{1+\xi_1}} - 1 \tag{13}$$

と表される．試験結果から（13）式を使用し ξ_3 を導出するには，予め一軸凍上試験を実施し（7）式により β を求めておく必要がある．なお，山本ら（1994）は，凍結後の供試体の直径をノギスで実測し，ξ_3 の実測値と（13）式の計算値が一致することを確認している．凍結後の供試体寸法を直接測定することの煩雑さを考慮し，実用上は計算にて ξ_3 を求めている．

3.4 三軸凍上定数の算出

山本ら（1994）は σ_3 を固定して σ_1 を変化させた σ_3 同一条件と，その逆の σ_1 同一条件で実験を行った．Fig. 8 に山本ら（1994）の実験による藤森粘土の熱流方向の凍結線膨張率 ξ_1 と熱流方向応力 σ_1 の逆数との関係，熱流直角方向の凍結線膨張率 ξ_3 と直角方向応力 σ_3 の逆数との関係を示す．ξ_1 に注目すると，σ_1 が大きいほど ξ_1 は小さく，σ_3 が大きいほど ξ_1 は大きい．対象的に，σ_1 が大きいほど ξ_3 は大きく，σ_3 が大きいほど ξ_3 は小さい．この関係は次式で表される．

$$\xi_1 = a + \frac{b\sigma_3 + c}{\sigma_1} \tag{14}$$

$$\xi_3 = d + \frac{e\sigma_1 + f}{\sigma_3} \tag{15}$$

ここで，$a \sim f$ は三軸凍上定数と呼ばれる実験定数であり，藤森粘土では $a = -0.043$ （–），$b = 0.029$ （–），$c = 0.010$ （MN m^{-2}），$d = -0.025$ （–），$e = 0.023$ （–），$f = 0.002$ （MN m^{-2}）である．Fig. 8 中の実線は（14），（15）式によるものであり，複数の応力の組み合わせに対して，実験式は実測値をよく表現している．また，Fig. 9 に示すように，等応力条件（$\sigma_1 = \sigma_3$）における拘束応力と各方向の凍結線膨張率とを比較すると，常に $\xi_3 < \xi_1$ の関係にあることが分かる（山本ら, 1994）．この結果により，凍結膨張には異方性があり，元々熱流

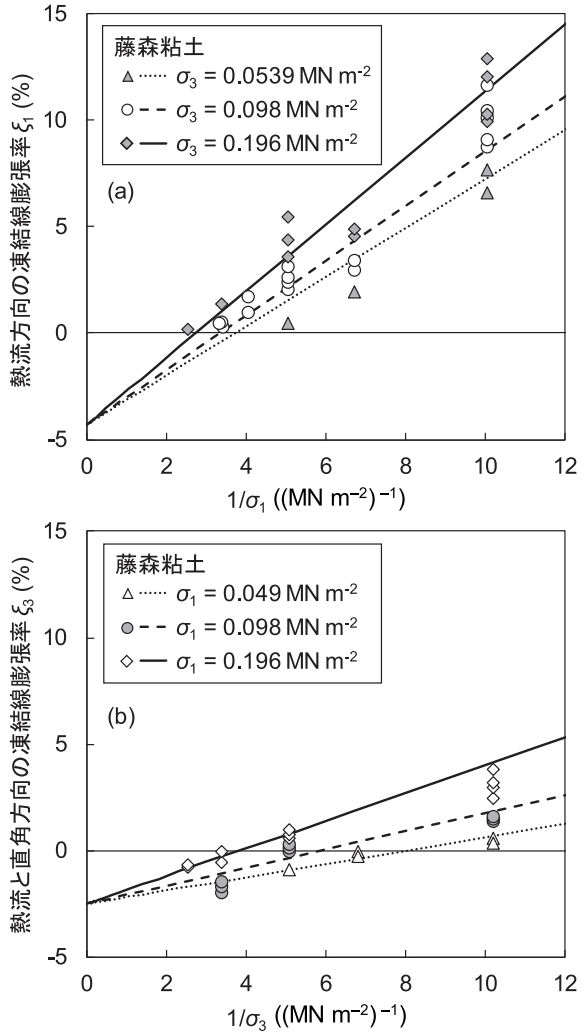


Fig. 8 (a) 熱流方向の凍結線膨張率 ξ_1 と $1/\sigma_1$ との関係，および (b) 熱流直角方向の凍結線膨張率 ξ_3 と $1/\sigma_3$ との関係（山本ら，1994 より引用）．
(a) Relationship between linear frost heave ratio in heat flow direction ξ_1 and $1/\sigma_1$, (b) linear frost heave ratio in heat normal flow direction ξ_3 and $1/\sigma_3$ [adapted from Yamamoto et al., 1994].

方向への凍結膨張が生じやすいことが示されている．

4. 凍結膨張予測に影響を及ぼす因子

4.1 動水抵抗の影響

凍上試験中，供試体に与える拘束応力として全応力 σ を一定に保っており，Fig. 5（b）に示すように，これをもって拘束応力と凍結体積膨張率の関係を整理しているが，凍結膨張を支配する因子は全応力 σ ではなく，全応力 σ から間隙水圧 P_w を差し引いた有効応力 σ' である（高志・益田, 1972）．ここで，Fig. 10 に示すような形で凍結が進行する際，拘束応力が σ で一定に保たれているとすると，凍結面の間隙水圧の低下量が $-P_w$ になったときの凍結面における有効応力 σ' は，$P_w > 0$ を考慮して，

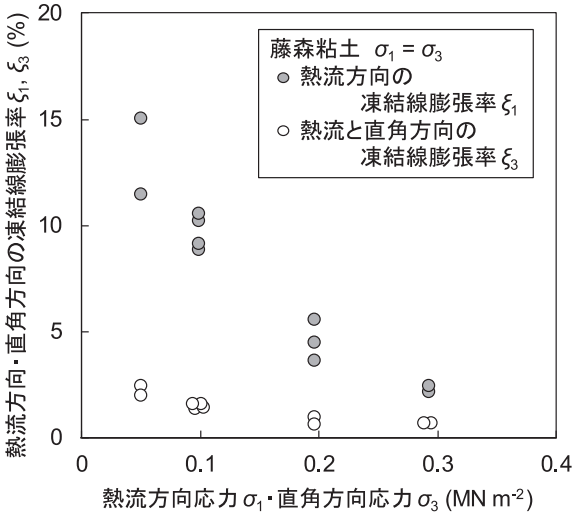


Fig. 9 等応力状態（$\sigma_1 = \sigma_3$）における拘束応力と各方向の凍結線膨張率との関係（山本ら，1994 より引用）．
Relationship between linear frost heave ratio in heat and heat normal direction and confining stresses with isostress condition ($\sigma_1 = \sigma_3$) [adapted from Yamamoto et al., 1994].

$$\sigma' = \sigma + P_w \tag{16}$$

と表される．動水抵抗の影響により凍結面における間隙水圧が低下し，結果として有効応力が増加することで，凍結膨張量が減少する．特に上載荷重が小さい場合，この有効応力の増加量が無視できなくなる．凍結面への吸水速度を（6）式，（7）式および（16）式を用いて表すと次式となる．

$$\begin{aligned}\frac{dw}{dt} &= \frac{dw}{dx}\frac{dx}{dt} = \xi_w U \\ &= \frac{U}{1+\Gamma}\left\{\xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma + P_w}\left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}}\right) - \beta\right\}\end{aligned} \tag{17}$$

一方，凍結が進行している最中の未凍土内に生じる圧力勾配が一定であると仮定すると，未凍土中の水分移動は Darcy の法則によって次式で表される．

$$\frac{dw}{dt} = \frac{k}{\gamma_w}\frac{P_w}{l - x} \tag{18}$$

ここで，k は土の透水係数，γ_w は水の単位体積重量，l は土全体の長さ，$(l - x)$ は x だけ凍結が進行した際の未凍土長さを表す．（17）式と（18）式の吸水速度を連成させ吸排水率を計算し，（7）式に代入して凍結体積膨張率を求めたものが Fig. 5（b）中の破線であり，拘束応力の小さい範囲においても実測値と良い一致を見せている．また，三軸凍上試験でも一軸凍上試験と同様に間隙水圧低下量を（14）式および（15）式に適用することができる（上田ら, 2005）．

実験室レベルでは給水源は供試体上端面であるから吸水距離は数 cm だが，現地盤では凍結対象土より数 m 離れることもある．凍結工法の設計では，室内試験の結果を基に，地盤の透水係数や吸水距離の影響を考慮して現場の凍結膨張率を求めており，現場の凍結膨張率とよく一致している（大石ら, 2017）．

4.2 塩分濃度の影響

海成粘土のような土中水に塩分を含む地盤を対象に凍結工法を適用することがある．塩分含有土では，凍結膨張率は塩分非含有土に比べて小さいが，凍土の強度は低下する（高志ら, 1980）．したがって，凍土の強度確保のため塩分非含有土よりも大きな凍土量が必要となる．塩分含有地盤では，これらを考慮して凍結膨張の影響を検討する必要がある．

塩分含有土の凍上試験に際しては，塩分濃度に応じて凝固点降下が生じるため，予冷期間の上下冷却部温度を氷点の低下分だけ低く設定し，さらに給水装置の水を所定の塩分濃度に調整する必要がある．Fig. 11 に藤森粘土における初期塩分濃度 S と凍結体積膨張率 ξ_v の関係（生頼ら（1984））を示す．S が高いほど ξ_v は指数関数的に減少している．生頼ら（1984）によれば，塩分含有土でも（5）式が成立することが分かっている．また，三軸凍上では，熱流方向の凍結線膨張に対して S の影響は顕著に現れるが，熱流と直角方向の凍結線膨張への影響は比較的小さい（山本ら, 1994）．

4.3 不凍水量の影響

第 2.2 節で述べた通り，凍上現象には 0 °C 近傍の凍土中の不凍水が関与している．凍土中の温度と不凍水量の関係を示す不凍水量曲線は，自然凍結の分野では土の凍結を伴う水分・熱移動モデルに組み込まれており（Harlan, 1973），凍土の熱伝導率や透水係数のモデルにも応用されている（Hansson et al., 2004 ; Watanabe and Flury, 2008）．一方で凍結工法では，不凍水量の影響を考慮することはほとんどないが，凍結対象の地盤の不凍水量曲線を知ることは，熱移動解析を用いた凍土造成量予測の精度向上に繋がるほか，凍結膨張予測の点からも，凍結膨張特性との関係性を把握することは有用と考えられる．しかしながら，既存の不凍水量の測定技術には高価な装置が必要であることや手法が煩雑であることから，実用上より簡便に不凍水量を測定できる手法が望まれる．そこで，一軸凍上試験のデータから不凍水量曲線を推定する試みがなされた．Fig. 12 に凍上試験より推定した藤森粘土の不凍水量曲線を示す（隅谷ら, 2018）．ここで，不凍水量は土の乾燥重量あたりの不凍水の重量の比で定義される．隅谷ら（2018）は，凍上量 h から氷晶析出に伴う吸水凍上分 $(1+\Gamma)\times w$ を差し引いた値の経時変化を不凍水の相変化によるものとみなし，これにより推定した不凍水量曲線がカロリメータ法による既往の実測値（土質工学会, 1994）と概ね良い一致をすることを示した．今後の課題として，過去の施工現場の試料土に本手法を適用し，凍結膨張特性と不凍水量との関係性を検討す

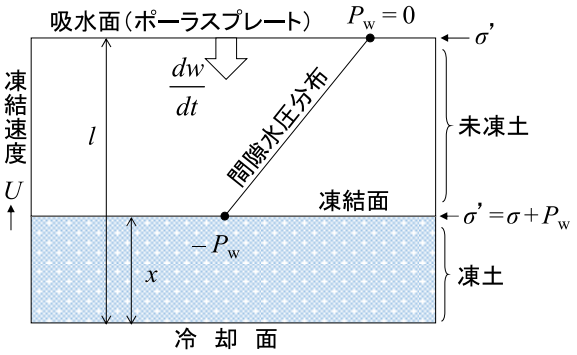


Fig. 10　凍結が進行する際の未凍土中の間隙水圧分布．
Distribution of pore water pressure across unfrozen soil.

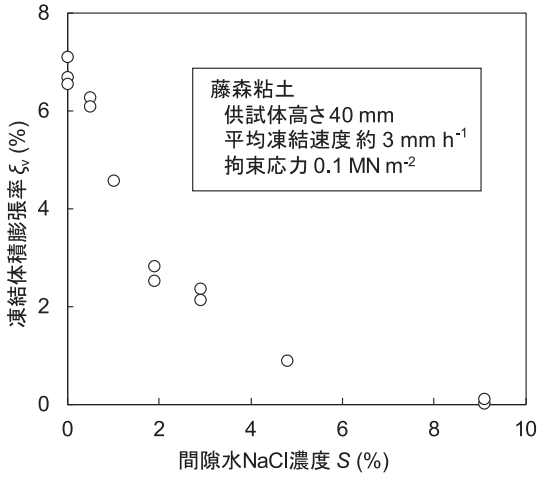


Fig. 11　凍結体積膨張率 ξ_v と間隙水の NaCl 濃度 S との関係（生頼ら，1984 より引用）．
Relationship between volumetric frost heave ratio ξ_v and concentration of NaCl S in pore water [adapted from Ohrai et al., 1984].

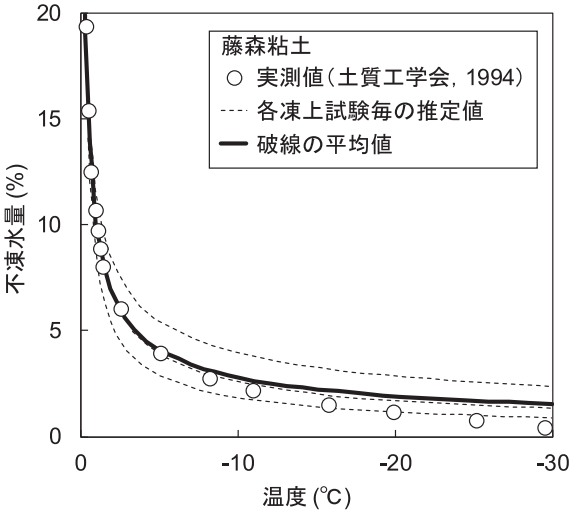


Fig. 12　凍上試験より推定した温度 – 不凍水量曲線と実測値との比較（隅谷ら，2018 より引用）．
Comparison between soil freezing curve by estimated value from frost heave test and observed values [adapted from Sumitani et al., 2018].

ることが挙げられる．

5. おわりに

研究分野を問わず，物理現象としての凍上は大変興味のある現象である．地表付近の不飽和土に対する凍上量の予測手法の開発は，凍結工法の適用範囲拡大や人工凍土応用の点からも実学的な研究課題と言える．低土被り圧下の土に対しては，動水抵抗の影響を考慮した高志の式でもって凍上量を定量的に評価できるが，その適用範囲は飽和土でかつ開式に限られる．有効土被り圧と土の含水状態を考慮した定式化は石川ら（2014）によってなされているものの，その適用性についてはデータの蓄積が不足している．地表付近の凍上量予測に関しては今後の発展が期待される．

一軸凍上試験に関しては，凍結工法に適用するための基礎研究はすでにやり尽くされてはいるが，三軸凍上には研究の余地があると考えられる．その発展形として近年では，凍上を支配する因子である土質と凍結線膨張の発現比率を調べる研究（釘﨑ら, 2018）や，一軸凍上試験時の側方拘束圧を実測して現場応力条件と比較する研究（大石ら, 2018）など，予測精度の向上のための研究を，筆者らは精力的に進めている．また，本稿の冒頭で述べたように，地盤工学分野では巨視的に地盤の性質を表現するが，その一方で実際には土の不均質性の問題は生じている．現在の地盤凍結工法における凍結膨張予測では，土の不均質性を平均的に扱うことしかできない．分野を問わず土の不均質性は共通の問題であり，土壌物理分野では微視的な構造に着目する機会が多く感じる．我々の立場からは，土壌物理分野から何らかのヒントを得られるのではないかと考えている．こうした問題意識を共有できれば本望である．

引用文献

土質工学会編 (1994): 土の凍結 — その理論と実際 — 第一回改訂版, pp. 66–67. 土質工学会, 東京.

後藤 茂, 田地陽一 (1999): 細粒分を含む砂地盤に対する原位置凍結サンプリングの信頼性の評価. 土木学会論文集, 631: 449–458.

Hansson, K., Šimůnek, J., Mizoguchi, M., Lundin, L.C. and van Genuchten, M.Th. (2004): Water flow and heat transport in frozen soil: Numerical solution and freeze-thaw applications. Vadose Zone Journal, 3: 693–704.

Harlan, R.L. (1973): Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. Water Resources Research, 9: 1314–1323.

石川達也, 木次谷一平, 所 哲也, 赤川 敏 (2014): 低土被り圧下の不飽和路床土の凍上量の推定方法の提案. 土木学会論文集 E1, 70: 65–70.

蟹江俊仁, 赤川 敏, 三上 隆, 佐藤太裕, 金 高義 (2005): 凍土中に埋設された冷却ガスパイプラインの凍上変形とその簡易評価法. 土木学会論文集, 798: 157–166.

加藤哲治 (1988): 凍結工法による地盤改良工法. 基礎工, 16: 34–40.

川端伸一郎 (2001): 土の凍上抑制工法と火山灰土の凍上特性に関する研究. 北海道科学大学, 博士論文.

釘﨑佑樹, 上田保司, 隅谷大作, 大石雅人 (2018): 細粒分含有率を変化させた飽和土の三軸凍上実験. 第 53 回地盤工学研究発表会講演集: 881–882.

大石雅人, 仙名 宏, 大畝丈広, 大西俊輔 (2017): 室内試験に基づく現地盤の凍上・沈下予測の評価事例. 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集: 889–890.

大石雅人, 上田保司, 隅谷大作, 釘﨑佑樹 (2018): 室内凍上試験で生じる側方拘束応力が現地盤の凍結膨張予測に及ぼす影響. 第 53 回地盤工学研究発表会講演集: 887–888.

生頼孝博, 山本英夫, 酒見浩一, 伊豆田久雄 (1984): 凍上に及ぼす間隙水の塩分濃度の影響. 第 19 回土質工学研究発表会講演集: 761–762.

隅谷大作, 上田保司, 山本英夫, 生頼孝博 (2000): 砂質土の凍結膨張率に及ぼす細粒分含有率の影響 — 細粒分調整土による凍上実験 —. 2000 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集: 147.

隅谷大作, 大石雅人, 上田保司 (2018): 凍上実験に基づく温度－不凍水分量曲線の同定. 土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集: 435–436.

高志 勤, 益田 稔 (1972): 間隙水圧が地盤の凍結膨張率に及ぼす影響について. 土木学会 27 回年次学術講演会講演概要集: 297–300.

高志 勤, 益田 稔, 山本英夫 (1974): 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, 36: 1–20.

高志 勤, 益田 稔 (1975): 凍結面に吸排水を伴う定常厳密解とその応用. 雪氷, 37: 13–20.

高志 勤, 益田 稔, 山本英夫 (1976): 凍上に及ぼす未凍結土内の動水抵抗の影響（特に応力の小さい場合）. 雪氷, 38: 1–10.

高志 勤, 生頼孝博, 山本英夫, 岡本 純 (1980): 砂凍土の一軸圧縮強さに関する実験的研究. 土木学会論文報告集, 302: 79–88.

高志 勤, 生頼孝博, 山本英夫, 岡本 純 (1983): 室内凍上試験における凍結膨張率に及ぼす供試体高さの影響. 雪氷, 45: 133–142.

上田保司, 生頼孝博, 田村 武 (2005): 有効応力に基づく土の三軸方向への凍結膨張率. 土木学会論文集, 806: 67–78.

上田保司, 生頼孝博, 田村　武 (2007): 土の凍結線膨張率を取り込んだ 3 次元地盤変形解析. 土木学会論文集 C, 63: 835–847.

山本英夫, 上田保司, 伊豆田久雄 (1994): 飽和土の三軸凍結膨張に関する実験的研究. 雪氷, 56: 325–333.

Watanabe, K and Flury, M. (2008): Capillary bundle model of hydraulic conductivity for frozen soil. Water Resources Research, 44: W12402.

要　　旨

地盤凍結工法は地盤の強度と止水性を向上させる地盤改良工法の一つで，土中に埋設した鋼管に低温の不凍液を循環させ凍土を造成する．この際，地表面での凍上の発現や凍結膨張に伴う土圧増加によって構造物に影響を及ぼすため，凍土設計には凍結膨張予測が欠かせない．本稿では，土壌物理においても重要な凍上現象の理解への一助として，実務で用いられている開式の凍上試験手法を紹介する．一軸および三軸凍上試験のどちらにおいても，凍結膨張率を拘束応力の逆数で整理することで，凍結膨張を表現する実験式の定数を求められる．三軸凍上試験では，地盤中の応力条件を再現した上で，凍結膨張の異方性を考慮したより精度の高い膨張予測が可能になるが，実用上の制約があるため，現場の凍結膨張予測には一軸凍上試験が多く用いられる．

キーワード：地盤凍結工法，凍土，凍上試験，有効応力，凍結速度



This article is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).