

解説・総説

地盤凍結膨張に関わる技術用語とその取扱い

生頼孝博¹⁾, 上田保司¹⁾, 松岡啓次¹⁾, 山本英夫¹⁾

要 旨

人工地盤凍結において実用的に用いられている凍結膨張に関わる主要な技術用語の定義を確認した。凍結体積膨張率と線膨張率, 凍上力と凍結膨張圧, 凍結膨張圧と凍結土圧の相違点をできるだけ明確に示し, 熱流方向凍結変位率を新たに加えた。また, それらへの応力や土質などの影響因子依存性をこれまでの研究成果に基づいて概説した。次に, 地盤凍結工法の施工現場で実用している地盤変位と発生土圧予測法の現状を紹介し, 実用上の留意点を示した。最後に, 凍結面への水分移動を伴う地盤の変位と応力の数値解析における条件設定などの取扱い上の要点について触れた。

キーワード: 凍結膨張率, 凍上力, 凍結膨張圧, 凍結土圧

Key words: frost heave ratio, frost heaving force, frost heave pressure, freezing earth-pressure

1. はじめに

寒冷地の自然凍結と土木工事で用いられる人工凍結とでは, 対象地盤や熱的条件は異なることが多く, 実用面からも, 前者では凍土を“害”として扱うのに対して, 後者では“利用”として扱うという違いがある。日本では長年にわたって, 両者の立場から地盤の凍結膨張に関する多くの研究がなされてきた。そして, とともにその研究の目指すところは, 実用的対策法を最終目的とした凍結膨張現象の把握と定量的予測法の確立である。

現状, 凍結膨張の研究過程で生まれてきた技術用語には, その使われ方に多少の不明確さもみられる。同じ意味の技術用語は一義的に決定できる採り方に極力統一しなければならない。不明確さ解消の一助となることを期待して, ここでは凍結膨張に関わる主たる技術用語である凍結膨張率, 凍結線膨張率, 熱流方向凍結変位率, 凍上力, 凍結膨張圧, 凍結土圧を取り上げ, 定義と相違点を確認するとともに, 既往の研究に基づいて, それらへの影響因子依存性を解説する。また, 著者らの従事する人工地盤凍結工法での膨張変位・圧力予測に際しての, それら諸数値の取扱い方や実用

上の留意点について概説する。

地盤凍結現象には単なる熱解析だけではなく, 地盤中の水分移動を伴う変位と応力変化の力学解析が必要である。これらの解析において多用される数値解析法の概要や諸条件の決め方などの要点と, 今後のデータ共有化に必要な表示項目について触れる。なお, 本稿では, 実用的に問題となる凍上性を持つ粘性土地盤を対象として記述する。

2. 凍結膨張の主要な技術用語

2.1 定義と要点

本稿で用いる記号を表1にまとめて示す。これらのうち, 特に土の凍結膨張に関わる主要な技術用語について, 以下で解説を加える。

凍結膨張率 ξ frost heave ratio

凍結前の土の体積 V_{uf} とその土の凍結後の体積増加分 ΔV_f との比, $\xi = \Delta V_f / V_{uf}$ で定義される(高志ら, 1974; 日本雪氷学会編, 1990)。地盤の凍結進行に伴って, 凍結面近傍で未凍結地盤から凍結地盤内への水分移動を発生しながら凍結膨張する現象を凍上現象と呼び, その結果として, 土粒子相互の平均的な間隔がもとの間隔より広がった割合を表す(高志, 1982)。凍結工法での地盤変位予測のための基本値であり, 初期体積と凍結後

1) (株)精研

表 1 土の凍結膨張に関わる記号一覧.

ξ	凍結膨張率
V_{uf}	凍結前の土の体積
ΔV_f	凍結後の土の体積増加分
ξ_x, ξ_y, ξ_z	凍結線膨張率
ξ_1, ξ_2, ξ_3	熱流方向とその直角方向の凍結線膨張率
X_{uf}, Y_{uf}, Z_{uf}	三軸方向への凍結前の土の長さ
$\Delta X_f, \Delta Y_f, \Delta Z_f$	三軸方向への凍結後の長さ増加分
β	熱流方向凍結変位率
σ_h	凍上力
σ_u	上限凍上力
$\sigma_{u\max}$	最大凍上力
$\Delta \sigma_f$	凍結膨張圧
$\Delta \sigma_{f\max}$	凍結面での最大凍結膨張圧
ΔP_f	凍結土圧
σ	有効応力
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	三軸方向の有効応力
σ_{x0}	初期有効応力
σ_w	間隙水圧変化に伴う増加有効応力
U	凍結速度
ξ_0, σ_0, U_0	土の凍結膨張に関わる固有定数
ξ_w	未凍土側から凍土内への吸水率
V_w	未凍土側から凍土内への吸水速度
Γ	バルク水の凍結体積膨張率 (≈ 0.09)
n	初期間隙率
E	変形係数
ν	ポアソン比

の体積が既知の場合に取扱いが可能である。実際の地盤では、地盤中の温度と水分変化に伴ってその値も時々刻々変化し、一般に、凍結の進行に伴って発生する凍結面での増加有効応力や近接構造物の剛性による影響も受けて抑制される(上田ら, 2005; 松岡ら, 2007)。なお、自然凍結では地表面近傍の垂直上方への凍結膨張を対象とすることから、実用的には、呼び方として凍上率を用いることが多い。

凍結線膨張率 ξ_x, ξ_y, ξ_z frost heave ratios in triaxial directions

熱流方向 X 軸を主とした三軸方向への、凍結前の土の長さ X_{uf}, Y_{uf}, Z_{uf} と、凍結後の長さ増加分 $\Delta X_f, \Delta Y_f, \Delta Z_f$ との比、 $\xi_x = \Delta X_f / X_{uf}$, $\xi_y = \Delta Y_f / Y_{uf}$, $\xi_z = \Delta Z_f / Z_{uf}$ で定義される(山本ら, 1994)。三軸方向それぞれの凍結面位置で算出される値である。地盤での土粒子配向の非等方性、あるいは氷晶成

長の異方性に起因するのではないかと考えられ、均質材料における等方性の熱膨張率とは異質のものである。凍土内で発生する析出氷晶の強度特性にも非等方性が知られており(生頼ら, 1981)、凍土の温度をさらに下げるときの現象である二次凍結膨張においても非等方性が現れる(上田ら, 2001)。熱流に直角方向への凍結線膨張率は、ポアソン比に応じた地盤の側方ひずみよりかなり大きいことから(上田・生頼, 2004)、地盤の凍結に特有の値であるといえる。

熱流方向凍結変位率 β frost displacement ratio in heat flow direction

凍結膨張率 ξ に対する熱流方向凍結線膨張率 ξ_x の比、 $\beta = \xi_x / \xi$ で定義される(上田ら, 2000a)。自然凍結では地表面からの凍土成長と同じ方向の地表面変位が問題となることから、実用的には $\beta = 1$ として取り扱われてきた。人工凍結でも、凍結工法の開発初期は施工深度が浅く、多くの場合、地表面近傍に位置する埋設構造物の変位が問題になったことから、とくに β の値を実用的には取り扱う必要はなかった。しかしながら、構造物との近接施工や大深度施工への適用ニーズ増加に伴って凍結膨張変位の予測精度向上の必要性に迫られ、 β 導入の状況が生まれた。土質、深度、凍結方向などの条件によって β の値は異なり、軟弱地盤での値は大きく、深度の影響は鉛直凍結の方が水平凍結より大きい(上田ら, 2000b)。

凍上力 σ_h frost heaving force

土が凍結膨張するとき、粒子間隙を押し広げようとする力の平均値と定義される(高志, 1982; 日本雪氷学会編, 1990)。現在のところ、厳密には現場で用いられているとはいえないが概念として理解されており、その中の特異な値の存在が一般に知られている。高志ら(1979)は、土質に依存しない凍上力の上限値を上限凍上力 σ_u と名付け、それが温度によって一義的に決まること、そして土それぞれには、上限凍上力の値以下で固有の最大値 $\sigma_{u\max}$ が存在すること(高志ら, 1981)が実験によって確認されている。

凍結膨張圧 $\Delta \sigma_f$ frost heave pressure

凍結面からの凍土内への吸水とその水分凍結によって、凍土と未凍土との境界の凍結面に作用する増加有効応力と定義される。凍結面は時々刻々

移動するので、直接実測することは不可能であるが、解析では重要な値である。凍上力は凍土内部で発生する力であるのに対して、凍結膨張圧は未凍土の圧縮に伴って凍結面に作用する圧力である。

凍結土圧 ΔP_f freezing earth-pressure

凍結面付近で発生する凍結膨張変位によって、凍結面から離れた任意の未凍結位置あるいは構造物位置で発生する増加圧力(全圧)と定義される(日本雪氷学会編, 1990)。直接、凍土を介して構造物に作用する付加圧も同じであり、実用的に問題となる場合が多い(高志, 1982)。土圧計での実測は可能である。

2.2 各技術用語への影響因子とその依存性

凍結膨張率 $\xi \sim$ 有効応力, 凍結速度

凍結膨張率 ξ と有効応力 σ , 凍結速度 U との実験式が知られている(高志ら, 1974)。

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

ここに、 ξ_0, σ_0, U_0 はその土の固有定数である。図 1 にそれらの関係を調べた実験結果を示す。図中の実線は式(1)によるもので、良く一致していることがわかる。式(1)において、 σ が 0 になるときは ∞ になり、一見、式(1)は適用できないように見えるが、凍結中に水分が移動する際、凍結面では間隙水圧が低下して有効応力 σ が 0 になることはないため、式(1)の ξ は必ず有限値に留まること

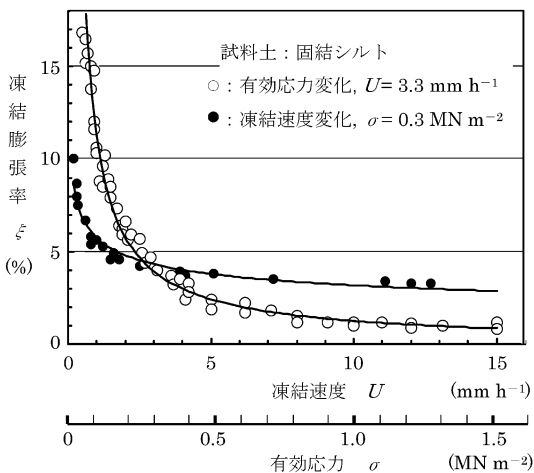


図 1 凍結膨張率 ξ と有効応力 σ , 凍結速度 U との関係。

が明らかにされている(高志ら, 1976)。

凍結膨張予測時に実用的な物理量は吸水量である。そこで式(1)から、吸水量と σ, U との関係式が導かれる。未凍土側から凍土内への吸水率 ξ_w を、凍結前の土の体積に対する吸水量の体積割合で定義すると、 ξ と ξ_w との間には水の保存法則から式(2)が成立する。

$$\xi = \xi_f + (1 + \Gamma) \xi_w \tag{2}$$

ここに、 Γ はバルクの水が凍結するときの体積膨張率(=0.09)である。右辺第 1 項の ξ_f は元から保有する間隙水の凍結膨張率であり、凍土温度に依存する不凍水量の分だけは膨張に寄与しないので、初期間隙率 n と Γ の積より小さい値となる。右辺第 2 項は凍結面からの吸水による凍結膨張率を表す。

式(1)と式(2)より、次式(3)が得られる。

$$\xi_w = \frac{1}{1 + \Gamma} \left\{ \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) - \xi_f \right\} \tag{3}$$

上記の式(1)~(3)は、後述する凍結膨張の実験、解析、予測の際に実用される。

凍結線膨張率 $\xi_x, \xi_y \sim$ 有効応力

凍結線膨張率についても有効応力との関係を示す実験式が得られている(山本ら, 1994)。式(1)において凍結速度 U が一定の場合、体積凍結膨張率 ξ は有効応力の逆数 $1/\sigma$ の関数である。熱流方向の凍結線膨張率と有効応力、また、熱流と直角方向の凍結線膨張率と有効応力についても、同様に、それぞれ有効応力の逆数の関数で表されることが明らかにされている。これらの関係は、熱流方向を X 軸とする直交座標系では、次式(4)および(5)で表される。

$$\xi_x = a + \frac{b\sigma_y + c}{\sigma_x} \tag{4}$$

$$\xi_y = d + \frac{e\sigma_x + f}{\sigma_y} \tag{5}$$

ここに、 a, b, c, d, e, f は定数である。

式(4)、式(5)の第 2 項分子には、それぞれ凍結膨

張が生じる方向に対して直角方向の有効応力である σ_y, σ_x が含まれている。なお、式(4)および式(5)では熱流に直角な2方向の有効応力 σ_y と σ_z とは等しいことを前提としているため、添え字の y と z を入れ替えても ξ_x の値は同じであり、 ξ_y と ξ_z の値は等しい。 σ_y と σ_z とが異なる場合の凍結線膨張率は今後の課題であるが、現状では両者の平均値である $(\sigma_y + \sigma_z)/2$ を式(4)および式(5)の σ_y に適用している。

図2に ξ_x, ξ_y と σ_x との関係を、二つの σ_y 一定値の場合について調べた実験結果を示す。熱流方向の σ_x の増加とともに、熱流方向の ξ_x は減少するが、熱流と直角方向の ξ_y は増加する。また、 σ_y が大きくなると、 ξ_x の値は大きくなり、 ξ_y の値は小さくなる。これらのことから、実用時に対象とする方向における凍結膨張変位の予測精度を向上するためには、凍結線膨張率を用いるべきであることが指摘される。

上記の式(4)、式(5)の実用に際しては、さらに、地盤の凍結進行に伴う間隙水圧低下および凍結膨張圧発生による有効応力の増加と、それに伴う未凍土の圧密を考慮しなければならない。

ここでは、間隙水圧変化の例(上田ら, 2005)について触れる。式(4)において、 σ_y を一定とすると、 ξ_x と $1/\sigma_x$ との間には直線関係がある。両者の関係の実験結果を図3に示す。図中の点線が式(4)に基づく直線であるが、実験データは横軸の $1/\sigma_x$ が大きくなると、直線からずれて小さくなっている。これは凍結中の凍結面からの吸水によって、未凍土側で間隙水圧低下に起因する有効応力増加が発生するためである。

間隙水圧変化に伴う有効応力増加 σ_w を考慮すると、式(4)は式(6)のように書き換えられる。

$$\xi_x = a + \frac{b(\sigma_y + \sigma_w) + c}{\sigma_x + \sigma_w} \tag{6}$$

図中の実線は式(6)に基づく曲線であり、実験結果とも良く一致している。なお、凍結進行に伴って発生する凍結膨張圧についても、式(6)の有効応力の項に、さらに増加有効応力に相当する凍結膨張圧 $\Delta\sigma_f$ を加えることで、実験値との良い一致が得られる(上田ら, 2005)。

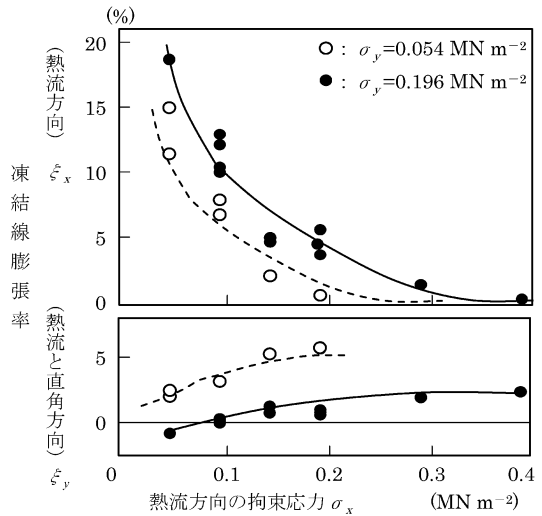


図2 凍結線膨張率 ξ_x, ξ_y と有効応力 σ_x との関係(粘土試料)。

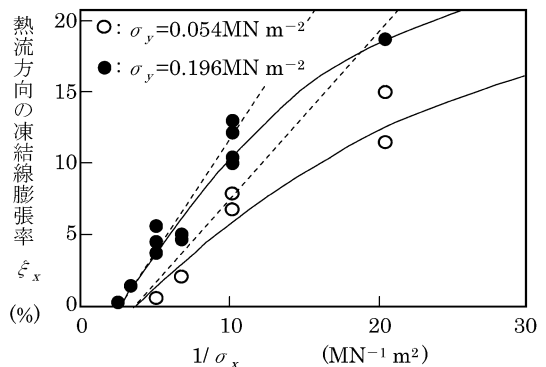


図3 間隙水圧変化を伴う凍結線膨張率 ξ_x と $1/\sigma_x$ との関係(粘土試料)。

さて実際の地盤においては、凍結進行に伴って上記の有効応力、つまり $\sigma_w + \Delta\sigma_f$ が加わり、その値は時々刻々変化する。図4に、有効応力 σ_x が一定の場合と、凍結進行に伴って増加していく場合の凍結線膨張率 ξ_x の実験結果を比較して示す(上田ら, 2005)。横軸は初期有効応力 σ_{x0} である。初期有効応力が同じであっても、その後の有効応力増加、つまり $+\sigma_w$ および $+\Delta\sigma_f$ によって ξ_x が抑制されていることがわかる。

実用的には、凍上試験機で得られる有効応力を一定としたデータに加えて、その地盤の変形特性を考慮した有効応力増加を伴う解析が重要であることが指摘される。

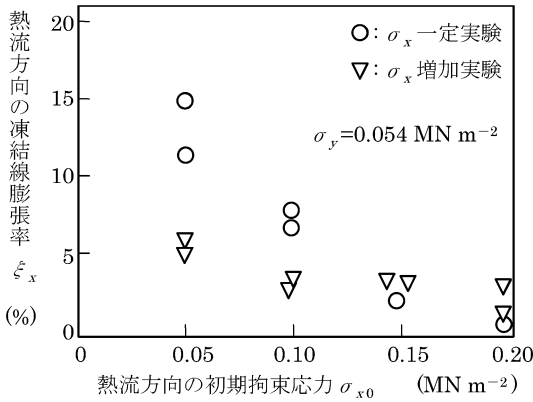


図 4 有効応力 σ_x 増加の有無による凍結線膨張率 ϵ_x の比較 (粘土試料).

凍上力 σ_h ~ 温度, 土質

2.1 節の定義で触れたように, 凍上力の値を正確に知ることは現状では困難である. しかしながら, 拘束圧条件下にある試料土の凍結膨張中の間隙水圧を測定するという間接的な方法ではあるが, 凍上力の推定値が得られている. どのような土質であっても, この値を超えることはないといえる上限凍上力 σ_u と凍土温度 θ とは式 (7) に示す比例関係にあることが知られている (高志ら, 1979).

$$\sigma_u = -1.09\theta \quad (7)$$

図 5 に, 式 (7) の関係とともに 4 種類の試料土での凍上力 σ_h の実験結果を示す.

いずれの土質でも, σ_h の実験データは点線の上限凍上力 σ_u 以下となっている. 図中で最も大きな凍上性を持つ A 粘土では, -20°C 程度まで σ_h と σ_u がほぼ一致しているが, それ以下の温度での σ_h は σ_u を下回って, ある値に漸近する傾向を示している. この漸近値は, 土によって異なり, その土の最大凍上力 $\sigma_{u,max}$ と名付けられている (高志ら, 1981). 図に見られるように, 一般的には, 土の最大凍上力は砂, シルト, 粘土の順に大きいといえる.

凍結膨張圧 $\Delta\sigma_f$ ~ 地盤変形係数

実際の地盤で発生する凍結膨張圧には周辺の土質力学特性が影響する. 図 6 に示す計算モデルにおける, 2 種類の土質での凍結膨張圧 $\Delta\sigma_f$ と変形係数 E との関係例を図 7 に示す (上田ら, 2004).

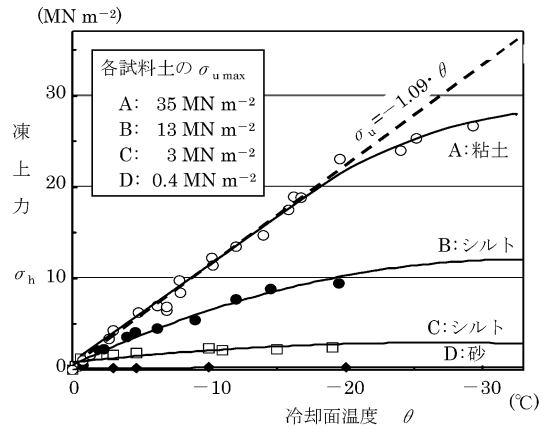


図 5 凍上力 σ_h と冷却面温度 θ との関係.

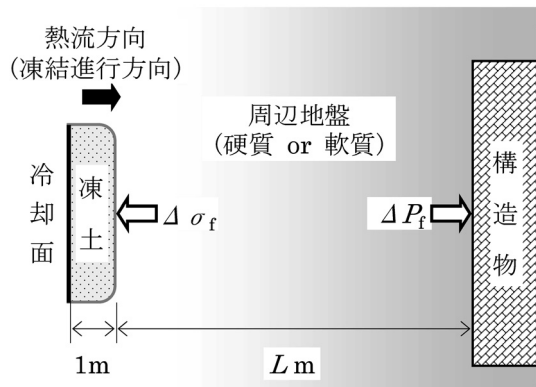


図 6 凍結膨張圧, 凍結土圧の計算モデル.

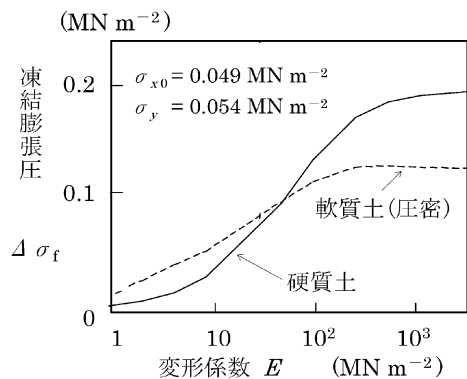


図 7 凍結膨張圧 $\Delta\sigma_f$ と変形係数 E との関係 (例: 凍土厚み 1 m).

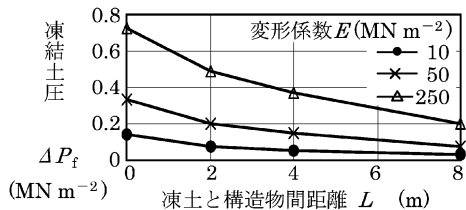


図 8 変形係数 E の違いによる凍結土圧 ΔP_f と距離 L との関係。

$\Delta\sigma_f$ は E の増加と共に大きくなるが、ある E からはほぼ一定の値となる傾向がうかがえる。特に軟質土の凍結では、その周辺地盤の E が大きくなるほど圧密効果が大きくなり、 $\Delta\sigma_f$ の値は小さくなる。

凍結土圧 ΔP_f ~ 凍結面との距離、地盤変形係数

図 6 における構造物表面での増加圧である凍結土圧 ΔP_f は、凍結膨張圧 $\Delta\sigma_f$ の発生位置である凍土面からの距離 L と地盤の変形係数 E によって異なる。 ΔP_f の E , L 依存性の試算結果を図 8 に示す(松岡ら, 2004)。 L が離れるほど、 ΔP_f は小さくなる。また、変形係数 E が大きいほど、その値は大きい。なお、一般的に構造物表面が凍土面に対してある角度に傾いている場合、凍結土圧の値は、距離 L が一定ではないため表面上の位置によって異なり、また、受圧方向が異なるので平行な場合と異なる。

実際の地盤では、凍結面と構造物表面は平行ではない場合がほとんどであり、さらに、地盤が構造物により何らかの拘束を受けている場合もあり、地盤周囲の状況を考慮した解析の必要性が指摘される。

3. 凍結膨張変位予測

3.1 Gauss 分布法と数値解析法

地盤凍結現場規模の凍結膨張変位の予測法としては、簡便な方法である Gauss 分布法(戸部・秋元, 1979)と合理性のある数値解析法(松岡・田村, 1999)がある。

Gauss 分布法の計算論理は、地盤中凍土の微小部分の膨張量が全て地表面の変位として生じた凍土量に等しく、すなわち体積保存が成り立ち、かつ、その変位の形状が Gauss の誤差関数になる

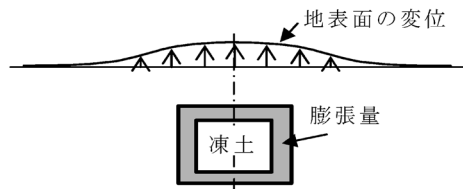


図 9 Gauss 分布による膨張変位の模式図。

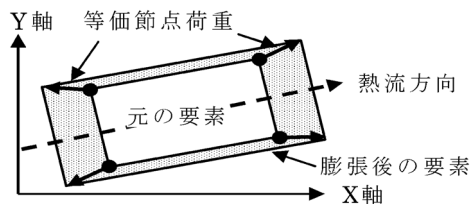


図 10 数値解析法における膨張量と等価節点荷重のイメージ図。

ものと仮定した数値積分である。図 9 に二次元の模式図を示す。人工凍結においても、主として地表面の変位量を対象とする場合が多いことから凍結膨張率を凍上率と称することも多い。凍上率は、凍土の深度、地盤の緩みや圧密、凍結中の吸排水などを考慮して、一般的に室内試験で得られる値の約 $1/3 \sim 1/2$ の値を用いている。この方法は、過去の施工経験に基づいた凍上率を選定することで、比較的良好な予測結果が得られる。

数値解析法は、主に有限要素法 (FEM) による力学解析である。この手法の長所は、解析領域内の応力状態や吸排水量を考慮した凍結膨張率を用いて、既設埋設物のある場合でも、解析領域内すべての位置の変位や応力が求められる点である。熱膨張を取り扱う FEM では、要素の節点に荷重を与え、強制的にひずみを生じさせ、そのひずみが膨張量に合うように等価節点荷重を与える。地盤の凍結膨張は、熱膨張のように等方膨張ではなく、熱流方向を考慮して等価節点荷重を与える。図 10 に膨張量と等価節点荷重のイメージを示す。等価節点荷重は、凍結膨張率、熱流方向、地盤内の応力条件によって、荷重の方向や大きさが決まる。地盤の凍結膨張を解析するには、①凍結域を求める熱解析、②凍結面への吸排水量と凍結膨張圧による圧密を考慮した力学解析、が必要である。この手法には、熱解析後に独立して力学解析

をする方法 (上田ら, 2007) と両解析を同時に達成して解析する方法 (松岡・田村, 1999) がある。実用的には, 前者を独立解析法, 後者を連成解析法として区別して用いる。

3.2 凍結膨張率の固有定数の求め方

凍結膨張変位予測をする場合, あらかじめ対象地盤から試料土を採取して凍上試験を行い, その結果に基づいて, 前出の実験式 (1)~(5) における各定数を求める必要がある。

まず, 凍結膨張率 ξ の実験式 (1) の定数については, 図 11 に示す開放型の凍上試験装置 (高志ら, 1974) を用いて, 試験中の拘束応力 σ および凍結速度 U を一定に保つ凍上試験を, さまざまな σ および U の組み合わせで, 最低でも 5 点以上行う。試験から得られた ξ について, U を一定とする場合の $1/\sigma$ との関係, σ を一定とする場合の $1/\sqrt{U}$ との関係をそれぞれ整理することによって, 定数 ξ_0, σ_0, U_0 が求められる。ただし, 現地盤における凍結速度を一定とみなして予測を行う場合は, U が定数となるため, 実験式 (1) は次式 (8) で表される。

$$\xi = \xi_0 + \frac{C_0}{\sigma} \tag{8}$$

ここで C_0 は定数である。この場合, U を一定として σ を変化させた凍上試験を 3 点程度行えば, ξ 試験値と $1/\sigma$ との関係から定数 ξ_0 および C_0 を求めることが可能である。

また, これらの凍上試験結果について, さらに, 図 12 に示すように吸水率 ξ_w を横軸に取って凍結膨張率 ξ を整理すると, 両者の関係を式 (2) で直線近似した切片から, 試料土の初期含有水による凍結膨張率 ξ_f を求めることができる。

次に, 凍結線膨張率の実験式 (4) および (5) については, 図 13 に示すように熱流と直角方向への凍結膨張も許す三軸凍上試験 (山本ら, 1994) を, 熱流およびその直角方向の拘束応力 σ_1 および σ_3 のさまざまな組み合わせで, 最低 5 点以上行う。 σ_3 を一定とする場合の熱流方向の凍結線膨張率 ξ_1 と $1/\sigma_1$ との関係, σ_1 を一定とする場合の ξ_1 と σ_3 との関係から, 添字 1 および 3 をそれぞれ x および y に対応させることで, 実験式 (4) の定数 $a \sim$

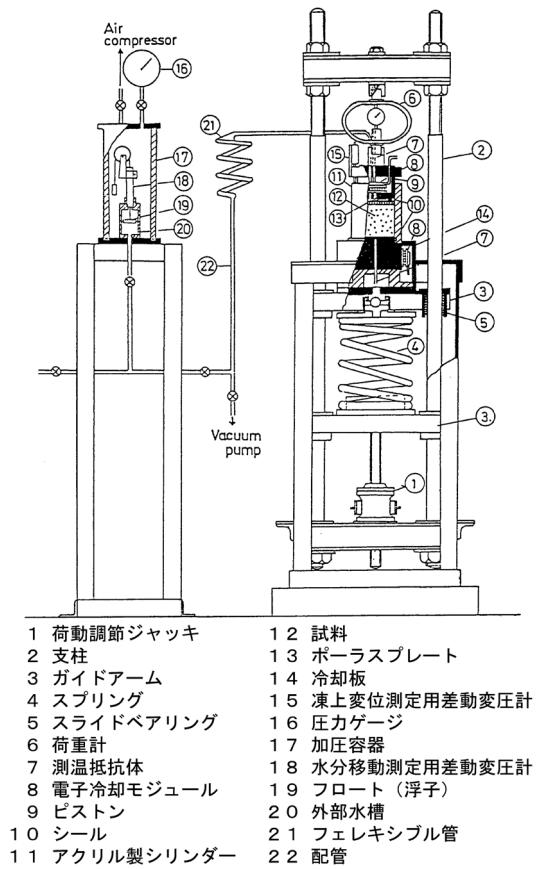


図 11 凍上試験装置。

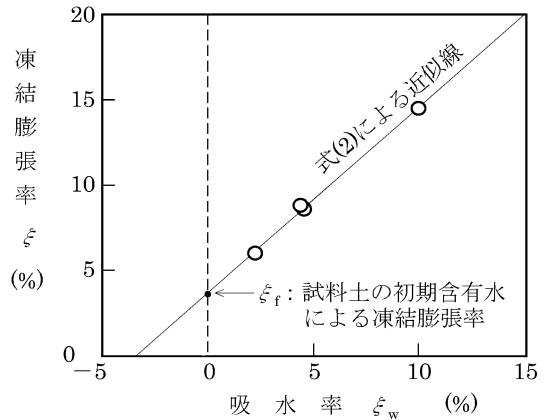


図 12 凍結膨張率 ξ と吸水率 ξ_w との関係。

c が求められる。これと同様, σ_3 を一定とする場合の直角方向の凍結線膨張率 ξ_3 と σ_1 との関係, σ_1 を一定とする場合の ξ_3 と $1/\sigma_3$ との関係から, 同

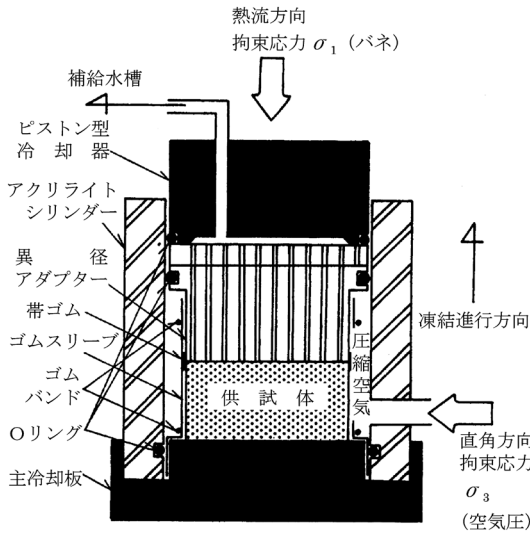


図 13 三軸凍上試験装置の中央部拡大図.

様に, 実験式 (5) の定数 $d \sim f$ が求められる.

なお, 以上で述べた手順では, 2.2 節で説明した間隙水圧低下による有効応力の増加が影響を及ぼさない大きな拘束応力下での凍上試験から各定数を求めるべきことに留意する必要がある. また, 試験供試体が軟弱で凍結中の圧密による影響が懸念される場合は, 事前に供試体を圧密して圧密圧力を高めておく必要もある.

3.3 凍結膨張率の数値解析への取り込み方と解析手順

凍結膨張変位予測の数値解析に際しては, 時々刻々変化する凍結膨張率を取り込むことが重要である. 凍結膨張率は, 式 (2) に示すように, 土が元々持っている間隙水量と凍結中の凍結面での吸排水量で決まる. この水量変化に関わる凍結面での吸水率 ξ_w は式 (3) で表され, これから凍結速度 U における吸水速度 V_w は, 次式 (9) で得られる.

$$V_w = U \xi_w = \frac{U}{1 + \Gamma} \left\{ \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right) - \xi_i \right\} \quad (9)$$

この V_w は, 凍上試験で求められる定数に基づくその土固有の吸水速度と見なせるが, あくまで凍結面に給水源があり, 自由に吸水できるとの条件の下で成立するものである.

しかしながら, 実際の地盤では凍結面と給水源

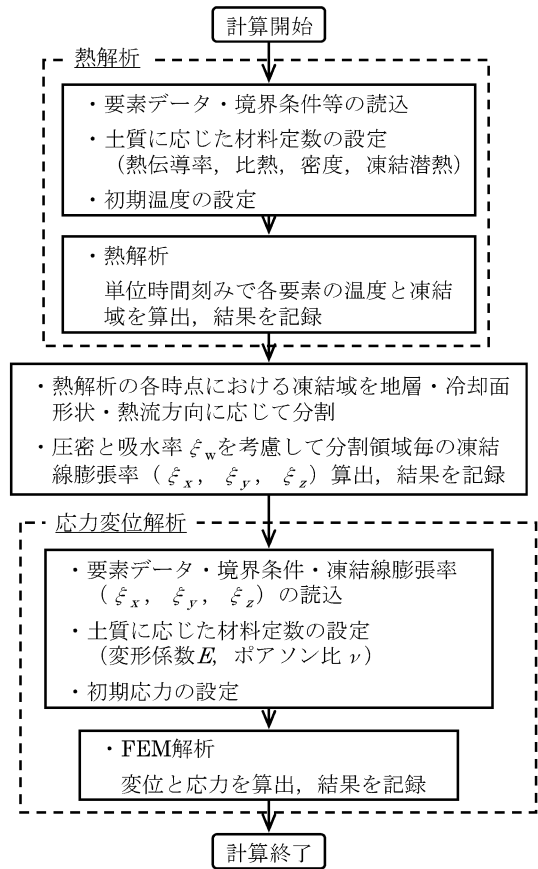


図 14 独立解析法のフロー図.

の位置 (一般的には, 砂礫層の位置) との間にある土の透水性の影響を受ける. 給水源との距離が長く, また地盤の透水係数が小さくなるほど, 凍結面への水分移動が妨げられ間隙水圧が低下するため, その分に見合うだけ有効応力が増加し, 式 (9) の V_w はより小さな値となって, ある値で釣り合うことになる. 釣り合った場合の V_w から ξ_w が決まり, そして式 (2) の関係から, 凍結膨張率 ξ が決まる.

独立解析法による地盤変位予測の場合のフローを図 14 に示す. まず熱解析で凍結域を決め, 次に凍結域の応力, 熱流方向などから 3 方向の凍結線膨張率を決めてから, FEM で変位および応力を求める.

3.4 熱流方向凍結変位率の導入

前述したとおり, 地盤内の凍結線膨張率は熱流方向 ξ_1 とその直角方向 ξ_3 とで異なるが, 両者を

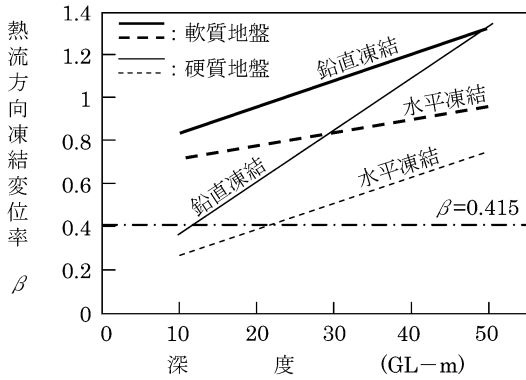


図 15 熱流方向凍結変位率 β と深度との関係.

関連させて一つの指標で表しておく、凍結膨張変位の発現方向特性を一意的に理解することができて実用的にも便利である。そこで、次式(10)で定義される熱流方向凍結変位率 β が導入される。

$$\beta = \frac{\xi_0}{\xi} = \frac{\xi_1}{(1 + \xi_1)(1 + \xi_3)^2 - 1} \cong \frac{\xi_1}{\xi_1 + 2\xi_3} \quad (10)$$

凍結膨張変位を直交座標系 ($x-y-z$) で扱う場合は $\beta=1/3$ 、円筒座標系 ($r-\theta-z$) で扱う場合は $\beta=0.415$ の時に熱流方向と直角方向との凍結線膨張率は等しくなり、凍結膨張変位の発現が等方的であることを意味する。 β がこれらの値よりも大きい場合は熱流方向への変位発現が大きくなり、逆に小さい場合は直角方向への変位発現が大きくなる。また、 $\beta=1$ の場合、凍結膨張変位はすべて熱流方向に発現し、直角方向への凍結膨張変位は生じないことを意味する。

ここで、 β を用いた発現方向特性を理解するための例として、地盤凍結工法における β のモデル試算結果(上田ら, 2000b)を示す。軟質と硬質地盤における、荷重(深度)による β の変化を、地盤鉛直方向の凍結管列で円筒状凍土を造成する場合(以下、鉛直凍結)と、水平方向の凍結管列で造成する場合(以下、水平凍結)についての結果を、図 15 に示す。いずれの地盤でも、深度の増加に伴って β は増加しており、深い場所ほど熱流方向への凍結膨張が大きくなることわかる。硬質の方が、軟質地盤より β の増加勾配は大きいこと

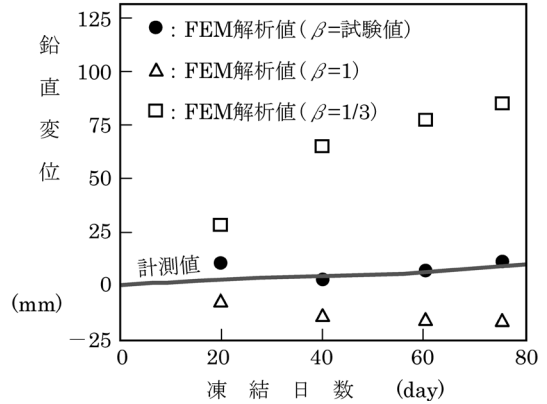


図 16 異なる β を用いた解析値と実測値との比較(凍結日数に伴う鉛直変位).

から、凍結膨張発現方向は深度の影響を受けやすいといえる。また、軟質地盤の β はすべて 0.415 よりも大きい、硬質地盤の β は深度が浅い場合に 0.415 よりも小さくなり、直角方向への凍結膨張が熱流方向よりも大きい場合もある。いずれの地盤でも、 β は鉛直凍結の方が水平凍結よりも大きく、地盤凍結工法では、鉛直方向へ凍結管を設置する方が熱流方向への凍結膨張は大きくなることわかる。なお、鉛直凍結の場合で深度が深くなると β が 1 を超えているが、これは熱流と直角方向の変位が膨張ではなく収縮となることを示しており、三軸凍上試験でもその現象が確認されている(上田ら, 2000b)。

次に、適切な凍結線膨張率を導入することによって凍結膨張変位の予測精度を向上させ得ることを示した事例を、 β を用いて説明する。この事例では、地盤凍結現場における鉛直変位および水平変位を、直交座標系の三次元弾性 FEM で解析している(上田ら, 2007)。また、三軸凍上試験に基づく凍結膨張変位を取り込んだ場合 ($\beta =$ 試験値) の他に、熱流方向のみへの凍結膨張変位の発現を想定した場合 ($\beta=1$)、等方膨張を想定した場合 ($\beta=1/3$) の 3 通りの FEM 解析結果を計測値と比較することで精度を確認している。図 16 に示す鉛直変位では、“ $\beta =$ 試験値”での解析値が概ね計測値に近い値であるのに対して、“ $\beta=1$ ”での解析値は過小、“ $\beta=1/3$ ”での解析値は過大である。図 17 に示す水平変位についても“ $\beta =$ 試験値”での解析値が計測値に最も近く、“ $\beta=1$ ”で

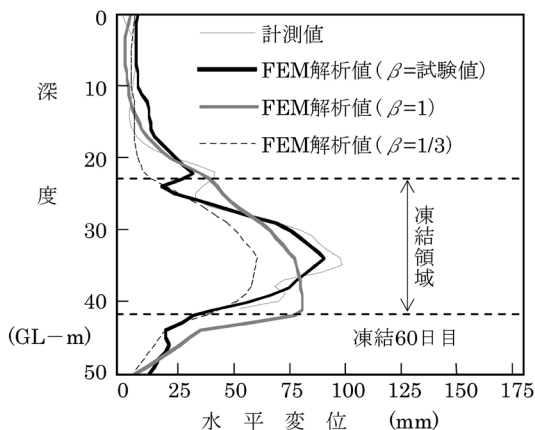


図 17 異なる β を用いた解析値と実測値との比較 (深度方向水平変位).

の解析値は計測値および“ β =試験値”での解析値に近いものの、変位分布形状が計測値とは異なる。また、“ $\beta=1/3$ ”での解析値は計測値に対して過小である。これらの比較結果から、三軸凍上試験に基づく凍結線膨張率を適用すれば、凍結膨張変位の予測精度の向上を図れることがわかる。以上のように、 β は凍結膨張変位の発現方向特性を理解する上で便利な指標であるといえる。

4. 凍結土圧予測

4.1 理論解析法と数値解析法

凍結膨張による周辺地盤の応力増加により、凍結面から離れた位置の地盤や構造物に発生する凍結土圧を予測するのは、施工時の凍結膨張被害を防ぐために重要である。凍結土圧 ΔP_f の予測法には、理論解析法 (高志, 1972) と数値解析法がある。前者は、均質な無限地盤中で円筒または球殻の凍土が成長する場合の応力解析である。凍土外側の近傍地盤を弾性、さらにその外側を塑性・粘弾性として扱っている。凍結面における凍結膨張圧 $\Delta\sigma_f$ に凍結膨張率 ξ と拘束応力 σ の関係式 (8) を考慮しているので、未凍結地盤の変形特性を適切に取り込むことで、対象とする位置での応力値はより精度良く求められる。実際の凍土は円筒、球殻でなく、また一般的に構造物が存在する場合が多いので、地盤中の応力にはその分の誤差が生じる。凍土形状を円筒または球殻に近似することによって比較的容易に凍結土圧 ΔP_f が求められる

ることから、簡易法として実用化されている。因みに、円筒状凍土の場合、凍結面での最大凍結膨張圧 $\Delta\sigma_{f\max}$ は、次式 (11) で表される。

$$\Delta\sigma_{f\max} = \frac{E\xi}{2(1+\nu)} \quad (11)$$

ここで、 E および ν は未凍結地盤の変形係数およびポアソン比である。

後者の数値解析法は、主に FEM による解析であり、凍土形状や既設構造物を考慮できるとともに、任意位置での応力が算出できる。既に 3.1 および 3.3 節で述べている凍結膨張変位予測の数値解析法と全く同じで、変位とともに応力も算出されるので、ここでは詳細な説明は省略する。

4.2 実用上の留意点

4.2.1 許容値に基づく既設構造物管理

地盤の凍結膨張現象において、変位と応力は一体のものである。前述したように、数値解析法では対象とする位置での両者を算出することができる。通常、実用的には変位は実測しやすいのに対して、応力はそれが難しい。そこで、ほとんどの場合、凍結土圧は数値解析によって構造物などの変位で管理される (例えば、小島ら, 1996)。凍結膨張圧 $\Delta\sigma_f$ が大きくなり、地盤中の応力増加が発生しても、管理対象とする構造物への凍結土圧 ΔP_f が許容値を超えなければ、それほど問題はない。しかし、許容値の決定が最も重要となる。この決定は、構造物設計時の力学解析から検討されるが、凍結面で発生する凍結膨張圧 $\Delta\sigma_f$ は限られた位置と特性に基づく方向に発生するので、構造物へ作用する局所的な凍結土圧 ΔP_f を考慮して行われる。

構造物が耐えうる凍結土圧の許容値が決定したら、凍結工法採用の適否が検討できる。予測値が許容値を下回っていれば採用可能であるが、逆の場合は構造物の補強または凍結膨張対策が必要になる。構造物への悪影響が懸念される場合には、数値解析によって土圧許容値に相当する構造物変位を算出し、この変位値を基に施工管理することになる。予測値、許容値ともに誤差を考慮して、要注意の目安となる一次管理値と、実際の対応策が必要となる二次管理値を設定しなければならない。

4.2.2 凍結土圧に対する構造物の補強

既設構造物へ作用する凍結土圧 ΔP_f は、2.2 節で述べたように、凍土面からの距離 L が小さく、地盤の変形係数 E が大きいほど、その値は大きい。構造物の変形被害が予測される場合には何らかの補強が必要となる。しかしながら、補強により構造物の剛性が増加すると、 ΔP_f の増加が懸念される。試算(松岡ら, 2007)では、凍土の成長に伴って発生する凍結膨張圧 $\Delta \sigma_f$ によって徐々に凍結膨張率 ξ が抑制され、その抑制効果は剛性の増加によって大きくなるので、ある剛性以上になると凍結土圧 ΔP_f がほとんど増加しないという結果が得られている。現場の諸条件を考慮した計算によって、このような剛性値が得られれば、過大な補強は不要である。発生凍結土圧の予測と補強剛性の検討に基づいて、最適な補強材を選定する必要がある。ここで重要なことは、局所的な凍結土圧の発生である。構造物変形に伴う応力集中部には特段の留意が必要である。

4.2.3 閉塞型凍結における発生凍結土圧

未凍土が凍土と構造物に取り囲まれた状態で凍結が進行する閉塞型凍結では、凍結膨張によって圧縮される未凍結土が閉塞され、圧力が大きく増加して構造物に作用する。この場合は解放型よりも過大な凍結土圧が発生する可能性がある。

閉塞型凍結の例としては既設構造物間の接続部を防護するための凍結工事が挙げられる。この種の工事では両側の構造物に接する凍土を造成するため、凍土が構造物との接触面に及ぼす凍結土圧に対する予測と対策がとりわけ重要になる。

接続凍結工事における凍結土圧予測としては、凍結膨張の発現方向特性および未凍土の圧密特性を反映した円筒形凍土モデルでの解析法が提案されている(上田ら, 2000c)。実際の現場における構造物変位の計測値および FEM による凍結土圧解析値との比較から、その解析精度が確かめられている。一般に、凍土内部の未凍結領域の残りが少なくなるほど、また軟質地盤より硬質地盤の方が、発生する凍結土圧は大きくなる。凍土成長に伴う圧密に大きく支配されるので、その地盤の圧密特性を充分把握しておくとともに、掘削作業の効率をも考慮して掘削部分を極力凍結させないことが重要である。凍土成長後に残る未凍結領域が

少な過ぎるか、あるいは無くなってしまう完全閉塞状態に至る場合には、凍土内部の未凍土が残っている間に変形を逃がし得る適切な位置に圧抜き管を設けるなどの対策が必要である。解析を用いた圧抜き効果のモデル試算に基づいて、圧抜き管の最適設計法が提案されている(上田ら, 2002)。

5. 数値解析における取扱い上の要点

5.1 方法選択と条件設定

数値解析に際しては、その方法や諸条件に関して決めなければならない項目も多い。その決め方次第で、解析結果に影響が及ぶこともある。主な決めるべき項目を挙げると、前述した独立解析法か連成解析法か、弾性解析か破壊を考慮した弾塑性解析か、二次元か三次元か、二次元なら平面ひずみか平面応力かなどの選択である。さらには、要素の大きさや計算領域の設定、地盤の力学および熱的諸定数の選定なども挙げられる。

独立解析法は比較的容易に解析できるが、凍結域を土質、凍結方向、吸水性の違いにより多数の領域に分割し、吸水や圧密を考慮してそれら領域毎の凍結線膨張率を求める必要がある(上田ら, 2007)。この領域分割と線膨張率決定の違いによって得られる結果にも多少の違いが生じるが、その適切な決め方を示すのは難しく、解析値と実測値との比較による経験で決めるのが実状である。連成解析法は、各時間ステップおよび要素毎に吸水量や凍結線膨張率が計算されるので、独立解析法より論理的である。要素分割時に凍結域を区別する必要はないが、変位の他に間隙水圧の未知量が増え、力学のみの解析よりも、大きなマトリクス計算が必要なので対応できるハードが必要であり、計算時間も長くなる。解析目的や精度を考慮して、適切な解析法を選択しなければならない。

凍結工事は、ほとんどが全工事区間の中の局部的な工事である。したがって、凍結膨張によって新たに発生する応力や変位は、二次元的でなく、三次元的な分布になっている場合が多い。力学解析は三次元で扱うのが実際の地盤を反映しているが、要素分割が難しく、計算に長時間を費やすことから、実用的には、精度低下を承知の上で、二次元で解析する場合が多い。一般に、二次元解析による応力は、三次元に比べ、凍土の外部では大

きく、内部では小さくなる傾向がある。

二次元解析する場合、平面ひずみか平面応力かを選択する必要がある。平面ひずみの場合、計算断面の垂直方向のひずみ(変位)を拘束することになるので、平面応力の場合に比べて応力が大きく算出される。逆に、平面応力の場合はひずみが大きく算出される。解析目的に合わせて適切な選択をしなければならない。

解析にあたっては、設定条件によって、凍結膨張圧 $\Delta\sigma_f$ や凍結土圧 ΔP_f の値が多少異なる結果が得られることがある。要素の大きさ、解析領域、境界条件の採り方が問題となる。当然のことながら、力学解析では応力が急激に変化している部分の要素を小さく、また要素形状も凍結面や構造物面にできるだけ合致した形状を用いることが望ましい。地盤凍結現場の実用解析では、凍結領域をさまざまな形状の要素の組み合わせで表現することが多い。

解析領域は、一般に凍結膨張の影響を受ける範囲より広く採る。凍結膨張変位は鉛直下方向にも生じることが、地盤凍結現場において実測されているので、下方にも地盤の変形を考慮して十分な計算領域を採る。経験的には、凍土領域の深さの1/2程度を下方にも採る。水平方向は、凍結膨張により地盤が受働状態になっていると考えられるので、凍結領域の最深部の2~3倍程度を採る必要がある。

境界条件は、境界面に垂直な変位は拘束し、平行な変位は自由にすることが一般的に行われているので、凍結膨張解析もこれを採用するのが妥当であろう。ただし、地盤や凍土と構造物との境界面では、適切な拘束条件を採り入れることもある。

凍結膨張圧 $\Delta\sigma_f$ や凍結土圧 ΔP_f の厳密な数値を求められる場合、使用する地盤の力学および熱的諸定数がより重要となる。これらについては、室内試験によって信頼できる対象地盤固有の値を得ることが望ましいが、便宜的に類似した土質での既往の研究成果から数値を引用することもある。

5.2 解析条件および結果の表示

本章で述べてきたように、数値解析では、方法、要素と設定条件、使用諸数値などによって、結果に違いが生じる。これらについて明確に表示する

ことが重要である。著者らの提案する表示内容として、表2に解析条件、表3に熱物性値の例を、また、図18に解析結果の表示例を示す。

ここで、表示に必要な項目を以下にまとめた。

- ・熱と力学の独立解析か連成解析かの区別
- ・弾性か弾塑性、二次元か三次元、平面ひずみか平面応力などの解析方法
- ・凍結面吸排水の有無および給水源条件
- ・要素の採り方
- ・解析範囲と境界条件
- ・土質と定数の決め方
- ・近接構造物の存在および解析への取り込み方

表 2 解析条件 (※表示例)。

解析方法		二次元弾性連成解析 (平面ひずみ)
地	初期含水比 w (%)	34.03
	初期間隙比 e_0 (-)	1.023
盤	透水係数 k (cm sec^{-1})	砂質土: 1×10^{-3} 粘性土: $\exp(11.19 \times e^{-26.81})$ e : 間隙比
	初期土圧 (k N m^{-2})	196
条	変形係数 E (MN m^{-2})	砂質土: 98 粘性土: 9.8
	初期温度 ($^{\circ}\text{C}$)	+18
件	冷却温度 ($^{\circ}\text{C}$)	-20
	凍結条件	凍結膨張特性 ξ_0 (-)
σ_0 (kN m^{-2})		2.8
U_0 (m h^{-1})		0.1765
n_f (-)		0.255

表 3 使用した熱物性値 (※表示例)。

	粘 性 土		砂 質 土	
	凍結前	凍結後	凍結前	凍結後
熱伝導率 ($\text{kJ (m h }^{\circ}\text{C)}^{-1}$)	5.904	10.109	6.792	10.551
比熱 ($\text{kJ (kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C)}^{-1}$)	1.781	1.202	1.549	1.124
密度 (kg m^{-3})	1900.0	1840.8	2080.0	2032.6
凍結潜熱 (MJ m^{-3})	171.78	-	136.24	-

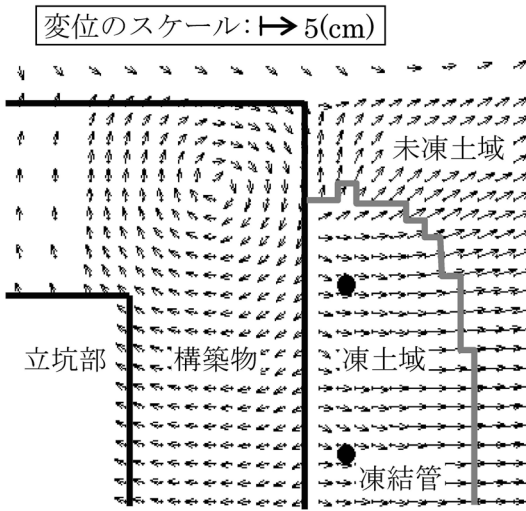


図 18 変位ベクトル図 (※表示例).

数値解析結果から、地盤や構造物の応力・変位は節点や要素毎に得られる。主応力・変位の方向も計算で求まるので、解析目的に応じた任意断面の分布を、方向が分かるように表示する。

凍結膨張が大きく、構造物に大きな応力が作用し、予め決めた近接構造物の許容値に近いあるいは局部的にでも超える場合は、その部分の要素の大きさとともに、圧縮か引張かを明確に表示する必要がある。特に、引張の場合、許容値を超える計算結果がより広範囲になる可能性があるので注意を要する。構造物の許容値を超え、補強材等の対策を講じる場合には、それを加味して再計算も必要である。

局部的な応力・変位が許容値を十分に下回っている場合には、ある範囲の応力や変位の平均値を採って表示すれば、凍結土圧による影響が理解しやすくなり、他の地盤凍結現場との比較も容易になる。ただし、平均値を採った範囲を明示する。

6. おわりに

人工凍結における凍結膨張に関わる主要な技術用語であり現場でその値を用いる凍結膨張率、凍結膨張圧、凍結土圧などは、これまで個々の対象現場に応じた問題解決手段として取り扱われてきた。そのため、比較評価できる値として、それらの情報共有化が難しかった。また、凍上という複雑な現象の故に、扱い方や条件の違いを考慮した

それら値の定量的評価法も、いまだ十分であるとは云えない。今回、それら主要な技術用語への影響因子依存性や、地盤凍結の工事現場を対象とした膨張変位及び凍結土圧の予測の中での現状の取扱い方や留意点を概説した。また、著者らの研究成果と施工経験に基づき、主要な技術用語の算出値をできるだけ正しく評価するために必要と思われる数値解析方法の選択と条件設定に触れ、必要な諸条件の表示例を加えた。

本稿が、人工凍結から自然凍結にわたる多くのデータの共有化に繋がり、次なる凍土研究への何らかのきっかけになることを期待するものである。

なお、人工凍土に関わる今後の課題として ① 実測法の信頼性向上と現場実測データの蓄積、② 自然地盤の人工的乱れ度 (上田ら, 2007) の解析への取り込み方法、③ 解凍沈下 (生頼ら, 1984) への影響評価を挙げておきたい。

文 献

- 小島月男・芝岡竹雄・松岡啓次, 1996: 凍結膨張による既設シールドトンネルの変形と膨張圧の推定. 土木学会年次学術講演会概要集, III-B, 290-291.
- 松岡啓次・田村 武, 1999: 凍結面吸排水を考慮した凍結膨張及び圧密の有限要素解析法. 地盤工学研究発表会講演集, 627-628.
- 松岡啓次・生頼孝博・上田保司, 2004: 人工地盤凍結における凍結土圧の採り方と課題. 2004年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 111.
- 松岡啓次・生頼孝博・上田保司, 2007: 近接構造物への凍結土圧の試算と構造物の補強に関する考察. 土木学会年次学術講演会, 3-132.
- 日本雪氷学会編, 1990: 雪氷辞典. 古今書院, 80-84.
- 生頼孝博・高志 勤・山本英夫・岡本 純, 1981: 土の凍結に伴う析出水氷の一軸圧縮強度. 雪氷, 43, 83-96.
- 生頼孝博・高志 勤・山本英夫・岡本 純・伊豆田久雄, 1984: セメント混合による土の凍上及び解凍沈下抑制に関する実験的研究. 雪氷, 46, 189-197.
- 高志 勤, 1972: 凍結膨張による未凍結領域内の土圧と変位の経時変化. 土木学会論文報告集, 200, 49-62.
- 高志 勤, 1982: 凍上力と凍上機構. 凍土の物理学 (木下誠一編), 森北出版, 93-131.
- 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, 49-68.
- 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. 雪氷, 38, 1-10.

- 高志 勤・生頼孝博・山本英夫・岡本 純, 1979: 凍結中の間隙水圧測定による上限凍上力の推定. 雪氷, **41**, 277-283.
- 高志 勤・生頼孝博・山本英夫・岡本 純, 1981: 土の最大凍上力に関する実験的研究. 雪氷, **43**, 207-215.
- 戸部 暢・秋元 攻, 1979: 凍上変位計算法 (三次元). 土木学会年次学術講演会概要集, **III**, 243-244.
- 上田保司・生頼孝博, 2004: 未凍結土の側方歪が直角方向への凍結膨張率に及ぼす影響. 2004 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 202.
- 上田保司・松岡啓次・小林 進, 2000a: 三軸応力状態での凍上特性に基づく変位発現方向を考慮した凍結膨張解析. 地盤工学研究発表会講演集, 613-614.
- 上田保司・松岡啓次・生頼孝博, 2000b: 現場規模の熱流方向変位発現率 β . 2000 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 148.
- 上田保司・生頼孝博・山本 稔, 2000c: 両軸端が拘束される場合の円筒状凍結における凍結土圧解析. 土木学会年次学術講演会概要集, **III**-B352.
- 上田保司・松岡啓次・生頼孝博, 2001: 吸着水の凍結による二次膨張の変位発現方向. 2001 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 152.
- 上田保司・松岡啓次・生頼孝博, 2002: 接続凍結工における圧抜き管の凍結土圧軽減効果. 土木学会年次学術講演会概要集, **III**-147, 293-294.
- 上田保司・生頼孝博・松岡啓次, 2004: 凍土周辺地盤の変形係数が凍結膨張圧に及ぼす影響. 2004 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 110.
- 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線膨張率. 土木学会論文集, **806/III**-73, 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**, 3, 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.

Technical terms on frost heave and its practical treatment in ground freezing

Takahiro OHRAI¹⁾, Yasushi UEDA¹⁾, Keiji MATSUOKA¹⁾
and Hideo YAMAMOTO¹⁾

*1) Seiken Co., Ltd., 2-11-16, Kawaraya-machi,
Chuo-ku, Osaka, 542-0066.*

(2007 年 9 月 10 日受付, 2008 年 12 月 5 日改稿受付, 2009 年 2 月 11 日再改稿受付, 2009 年 2 月 11 日受理)