側方変位を拘束した凍上実験に基づく凍結土圧の鉛直応力依存性

(株)	精研	正会員	〇大石	雅人
(株)	精研	正会員	上田	保司
(株)	精研	正会員	隅谷	大作
(株)	精研	非会員	釘﨑	佑樹

1. はじめに

人工的に地盤を凍結させ、その強度や止水性の向上を図る地盤凍結工法で は、凍結膨張によって既設構造物に生じる凍結土圧を正確に予測することが 重要となる.本報では、図1に示すような既設立坑から水平方向のトンネル 掘削を想定して、側方拘束条件における室内土圧計測を実施し、拘束面に平 行な有効応力が凍結土圧に及ぼす影響を調べた.また、三軸凍上理論から導 いた凍結土圧の計算値と比較を行い、両者の整合性を確認した.

2. 側方土圧の室内計測実験

地盤の凍結膨張は、熱流方向に優位に生じるが、熱流直角方向にも生じる ため、図1の立坑には凍結土圧が発生する.この様な側方拘束条件における 凍結土圧に注目し、図2に示す室内凍上試験装置において凍結土圧を計測し た.この開放型凍上試験では、供試体の上下に接する冷却部の温度を制御す ることで、下端より一次元的かつ一定速度で凍結が進行する.供試体に働く 鉛直全応力を一定に保ち、側方変位をシリンダーで拘束した状態で、凍結に 伴う側方全応力の変化を計測した.圧力センサーは、シリンダー内壁の下端 から10mmの位置に設置し、その受圧面はφ6mmである.また、高さ10mm の土表面温度を熱電対で計測した.試料土には、三軸凍上特性を把握してい る藤の森粘土¹⁾を1.0MN/m²で圧密したものを用いた.凍結速度は1mm/h、 鉛直方向の全応力σ₁は0.1、0.2、0.4MN/m²で実験を行った.

3. 側方土圧の計測結果

鉛直全応力を 0.2MN/m²とした実験の温度,凍上変位,吸排水量,側方土 圧 σ₃ の経時変化を図 3 に示す.図中(a)に示すように,凍結中における高さ 10mm の温度は,下端冷却部の温度低下に伴ってほぼ直線的に低下した.こ こでは,高さ 10mm の温度が 0℃となった時点で,センサー中心部を凍結線 が通過したと判断した.凍結線の通過時間を図中に破線で示す.また,供試 体の凍結完了後,実験ごとの温度条件を統一するために下端冷却部の温度を -10℃にする基準化を行った.基準化を開始した時間を図中に破線で示す.

図 3(b)に示す凍上曲線は、氷核形成後から数時間後に立ち上がり、凍結線 が供試体の上端に達する凍結完了に要した時間は約40時間であった.図3(c) に示す側方土圧の3は、凍結前線が通過する少し前から増加を始め、凍結線 通過後に一定の傾きで増加した.側方土圧がピークを迎え、値が一旦減少し た後、しばらく一定値を示し、基準化後には瞬時に土圧が増加した.このよ



キーワード 凍土,凍結膨張,凍結土圧

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

FAX.(06)6858-0903

-423-

うな側方土圧の挙動は,異なる応力条件で実施した実験においても同様の傾向であった.

4. 三軸凍上理論に基づく計算値との比較

三軸凍上理論に基づいて,側方に凍結膨張変位が生じない場合を想定し, 一軸凍上試験時に側方に働く全応力のを計算した.その計算式³⁾を式(1)に示

$$\sigma_3 = -\frac{e}{d} (\sigma_1 + u) - \frac{f}{d} - u \tag{1}$$

ここで、*d*~*f*は土固有の定数¹⁾、 σ₁は鉛直方向の全応力、*u*は凍結面に働 く間隙水圧である.鉛直全応力σ₁と側方全応力σ₃との関係を図4に示す. 図中の破線は式(1)による計算値を示し、実測値は基準化後の最大値とした. 計算値と実測値とを比較すると、両者は概ね一致した.側方拘束条件における 側方全応力σ₅が鉛直全応力σ₁に依存することを示す式(1)は、今回実施した室 内実験の範囲では、成り立つことが確認できた.

3 種類の鉛直応力において、側方土圧計測を伴う一軸凍上実験を実施し、凍結面に働く間隙水圧 u を把握 ³⁾することで、式(1)に示す三軸凍上定数を求める ことができる.また、同一実験から、式(2)における三軸凍上定数を導くこと ができる.ここで、 ξ_1 は熱流方向への凍結膨張線率、 $a \sim c$ は土固有の定数で ある.

$$\xi_1 = a + \frac{b(\sigma_3 + u) + c}{(\sigma_1 + u)} \tag{2}$$



図4 鉛直全応力と側方全応力との関係



これまでは、三軸凍上特性を把握するために、煩雑な手順を伴う三軸凍上実験を行う必要があったが、本手法 を用いることで、簡易的に信頼性のある三軸凍上定数を導出できる可能性がある.

5. 側方土圧計測結果の考察

凍結に伴う側方土圧増加の要因は、凍結線の進行に伴う熱流直角方向への凍結膨張と凍結線が通過した後の不 凍水の相変化による熱流直角方向への凍結膨張が考えられる.そこで、藤の森粘土における温度と不凍水量の実 測結果²に基づいて、高さ10mmにおける温度を不凍水量に換算した.式(3)に換算式を示す.

$$W_{\mu} = A \cdot \left(-\theta\right)^{B} \tag{3}$$

ここで、 θ は温度、A,Bは土ごとに決まる定数である. 図 5 に高さ 10mm における不凍水量 W_u と経過時間との関係を示す. W_u は単位土粒子重量に対する不凍水の重量を示すため、 W_u の最大値は試料土の初期含水比とした. W_u は時間経過とともに連続的に減少し、基準化時には急激な減少が生じた. 前述のように W_u の相変化は凍結土 圧増加の一因と考えられるが、側方土圧が、凍結開始後 25 時間後にピークを迎え凍結完了時まで減少することを W_u の変化のみで説明することはできない. 不凍水量の変化は基準化完了まで続いているため、この側方土圧増加 を促進する因子に対して、側方土圧増加を緩和する因子が持続的に働いていることが推察される.

側方土圧を緩和させる一因として考えられるのは、未凍結土の圧縮である.側方土圧の増加に伴って、円柱供 試体を鉛直方向へ伸長する応力成分が増加すると考えられるが、凍土より変形しやすい未凍結土がこの付加応力 の発生で圧縮したと考えられる.その結果、円柱型の凍土が伸長し、側方土圧が緩和したと推察した.未凍土が 圧縮した根拠として、未凍結土が存在する凍結完了以前は、ピーク後から凍結完了まで側方土圧は減少している が、一方で、未凍結土が存在しない凍結完了以降は側方土圧が減少していないことが挙げられる.しかし、側方 土圧を減少させる因子は明らかでなく、凍土のクリープ変形に基づく応力緩和などの要因も考えられるため、こ れは今後の課題の一つとしたい.

参考文献

1)山本ら, 1994, 雪氷, Vol.56, No.4, p325-333. 2)伊豆田ら, 2007, 材料, Vol.56, No.1, p74-81. 3)大石ら, 2018, 地盤工学会研究発表会発表概要.

-212

す.