

III-107

自然冷熱を利用したヒートパイプによる地盤改良

北海道大学 低温科学研究所 福田 正己

清水建設(株) 技術研究所 了戒 公利

1. まえがき 北海道のような寒冷地では冬期間に広域で、また地中深く地盤凍結が生じる。これに付随して凍上現象が発生し、建物や道路に多大の被害をひきおこす。すなわち寒冷気候による自然災害として地盤凍結をとらえ、その防止あるいは抑止のために多くの研究がなされてきた。

ここでは、害から益を生み出す立場から、ヒートパイプを利用して凍土を構築する試みをおこなってきた¹⁾。その結果、地盤が凍結するときの脱水現象を利用して、軟弱粘性土地盤あるいは汚泥を改良する方法に適用出来ることが明らかになったので、その方法と設計方法について提案するものである。

2. ヒートパイプの特徴 ヒートパイプ(熱サイホン)は、図-1に示すように、十分脱気された容器内に作動流体と呼ばれる流体が封入され、その流体の相変化に伴って熱移動が生じる伝熱容器である。つまり、容器の上部が寒気により冷却されると、蒸気が凝縮し液体となり、管壁を伝わって下りる。その結果、冷熱が下部に運ばれる。そこで加熱されて、液体の表面から蒸発が始まる。発生した蒸気は上部との圧力差により上方へ移動する。このプロセスの繰り返しにより熱移動が自動的に行われる。

ヒートパイプは、次のような特徴がある。

①熱を速やかに伝達できる。②表面温度が均一である。③熱輸送のためのポンプ等の可動部がないのでメンテナンスフリーである。④熱の流れに方向性がある。

3. ヒートパイプによる軟弱粘性土地盤の改良 (1)原理 粘性土地盤が凍結すると、アイスレンズと呼ばれる氷の層が凍結面に析出する。これは凍結面に水を引きよせようとする力(吸水力)が生じるためである。その結果、そこで水が凍結し膨張するために、凍結膨張圧力が発生する。これらの圧力(吸水力と凍結膨張圧力の増分)により、図-2に示すように有効応力が増加することになる。その結果、脱水されて、地盤が改良されたことになる。図-3に、その施工例を示す。

(2)設計法²⁾ 飽和土が凍結する場合、凍結による膨張率 ξ 、吸水率 ξ_w は凍結面の進行速度 V 、凍結面での有効応力 σ' との関係として、次式で与えられる³⁾。

$$\xi = \xi_0 + (1 + \sqrt{V_0/V}) \sigma_0 / \sigma' \quad (1)$$

$$\xi = \xi_0 + n_f \Gamma + (1 + \Gamma) \xi_w \quad (2)$$

ここに、 ξ_0 、 σ_0 、 V_0 は土固有の定数、 n_f は間隙率、 Γ は水の凍結膨張率である。

凍土及び未凍土内の熱移動および水の移動は、円筒モデルとするとそれぞれ次のように求まる。

$$\partial T_i / \partial t = \kappa_1 (\partial^2 T_i / \partial r^2 + 1/r \partial T_i / \partial r) \quad (3)$$

$$\partial T_u / \partial t = \kappa_2 (\partial^2 T_u / \partial r^2 + 1/r \partial T_u / \partial r) \quad (4)$$

$$\partial u_w / \partial t = C_v (\partial^2 u_w / \partial r^2 + 1/r \partial u_w / \partial r) \quad (5)$$

ここに、 T_i 、 T_u は凍土及び未凍土の温度、 u_w は間隙水圧、 κ_1 、 κ_2 は凍土及び未凍土の温度伝導率、 C_v は圧密係数、 t は時間、 r は位置を表す座標である。

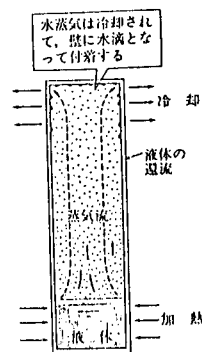


図-1 ヒートパイプ（熱サイホン）

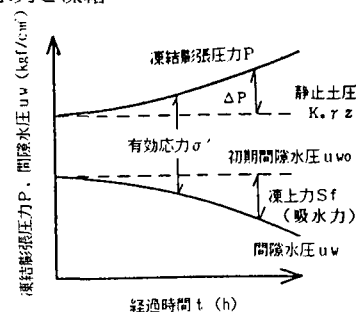


図-2 凍上力及び凍結膨張圧力の経時変化の模式図

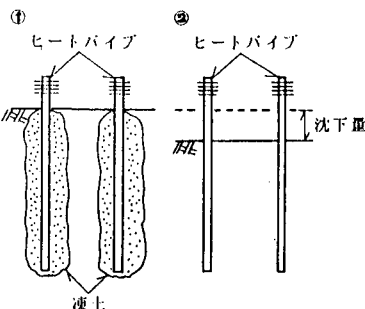


図-3 ヒートパイプによる施工例

ヒートパイプの熱輸送量は大気中の冷熱源と地盤との熱抵抗に逆比例し、その間の温度差に比例する。よって、ヒートパイプと地盤との間に、次に示す熱流の連続条件が満たされなければならない。

$$\lambda_1 \partial T_i / \partial r = (T_a - T_s) / (r_1 + r_2 + r_3) \quad (6)$$

ここに、 T_a :大気温度、 T_s :ヒートパイプに接する地盤の温度、 r_1 :フィンの熱抵抗、 r_2 :ヒートパイプの熱抵抗、 r_3 :地盤とヒートパイプ間の熱抵抗である。また、また、凍土と未凍土との境界において、次の関係が成りたなければならない。

$$\lambda_1 \partial T_i / \partial r - \lambda_2 \partial T_u / \partial r = L_s \gamma_s V + L_w \gamma_w V_w \quad (7)$$

ここに、 λ_1 、 λ_2 は凍土及び未凍土の熱伝導率、 L_s 、 L_w は地盤及び水の凍結潜熱、 γ_s 、 γ_w は地盤及び水の密度、 V 及び V_w は凍結速度及び吸水速度である。

凍結面での吸水速度 V_w は、ダルシー則により、次式で与えられる。

$$V_w = k / \gamma_w \partial u_w / \partial r \quad (8)$$

なる関係が成り立つ。ここに k は透水係数である。また式(1),(2)から、吸水速度は、

$$V_w = (V + \sqrt{V_0 V}) \sigma_0 / \{(\sigma - u_{w0} - S_i)(1 + \Gamma)\} - V n_i \Gamma / (1 + \Gamma) \quad (9)$$

で与えられる。

よって、式(8),(9)から吸水力 S_i を求め、それによる脱水压密度を差し引いた強制変位による凍結面での応力増分が凍結膨張圧力の増分となる。さらに、式(6),(7)の境界条件のもとに、式(3)~(5)を解き、温度分布、間隙水圧分布、有効応力分布を求める。(3)計算例 表-1に示す条件での計算例を図-3に示す。凍結面が中心から50cm進んだとき、間隙水圧は約 -1.4 kgf/cm^2 (吸水力としては 1.6 kgf/cm^2)、凍結膨張力は約 0.8 kgf/cm^2 (増加応力としては約 0.6 kgf/cm^2)であり、増加応力としては、 2.2 kgf/cm^2 発生したことになる。これは、約30mの盛土をした場合と同程度の応力である。

4. 結論 地盤を冷凍機等を使用して凍結させることは、非常に不経済であった。しかし、ここで提案したヒートパイプによる方法は、自然冷熱を利用するために非常に経済的である。しかも、条件によっては数10mの盛土に匹敵するほどの応力が発生し、地盤の改良効果も顕著であることが明らかとなった。

5. あとがき 凍結膨張率を与える関係式として高志の式を用いたが、自重圧密をするような超軟弱な粘性土地盤にもこの関係が適用できるか、今後検討する予定である。

表-1 計算条件

大気温度 ($^{\circ}\text{C}$)	-5, -10
深度 (m)	2
変位零点 (m)	1, 2
比重	2.81
間隙率	2.65
凍上定数	
ξ_0	0.0002
σ_0 (kgf/cm^2)	0.01
V_0 (mm/h)	3364
n_i	0.439

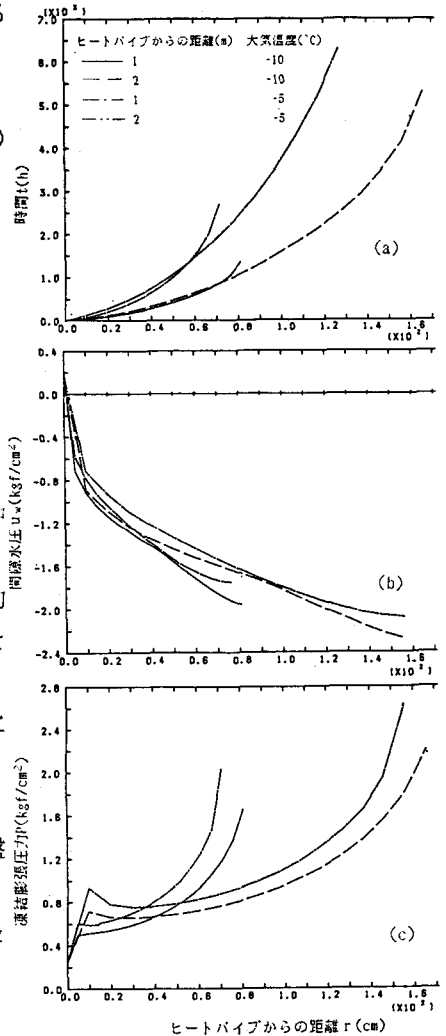


図-4 (a)凍結面の位置、(b)凍結面での間隙水圧、及び(c)凍結膨張圧力の変化

参考文献 1) 福田、菊地、了戒、望月：自然冷熱を利用したヒートパイプによる低温貯蔵庫、土質工学研究発表会、1986.6 2)

了戒公利：熱と水の流れを結合した飽和土の凍上理論とその応用に関する研究、清水建設研究報告別冊、第15号、1985.9 3) 高志勤、益田稔、山本英夫：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巻2号、1974