

地盤凍結工法に関する実験

村山 朔郎・柴田 徹・軽部 大蔵

AN EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE SOIL FREEZING METHOD

*by Dr. Eng. Sakuro MURAYAMA, Dr. Eng. Toru SHIBATA
and Daizoo KARUBE*

Synopsis

The method of freezing to stabilize soils is not new. In Japan, however, there was little experience available. In this paper, the following experiments have been performed to obtain the basic data on this method by the large scale model: (1) The magnitude of heat exchange of a brine-solution circulated through the freezing pipe. (2) Temperature distribution in the ground. (3) Ground surface up heaval. (4) Unconfined compressive strength of the frozen clay.

1. は じ め に

凍結工法は軟弱地盤や帯水砂層の掘さく、とくに立坑掘さくの補助手段として地盤を凍結させ、その崩壊や湧水を防止する工法であつて、外国ではすでに実施されているが、わが国での施工例はほとんど知られていない。そこで著者らは、わが国の現地条件のもとでこの工法を実施する場合に必要な資料を求めるため、2回にわたつて小規模な実験を行なつた。

実験—1は、昭和35年に大阪市福島区において、表層の緩い砂層を対象として行なつた。その方法は、長さ 2.2 m の凍結管 4 本を、一辺 1.5 m の正方形の各隅点に鉛直に深さ 2 m まで埋設し、この管中に -30°C まで冷却したブライン（塩化カルシウム水溶液）を循環させ、付近の砂層の冷却をはかつたものである。要した全熱負荷は凍結の初期で約 6500 Kcal/hr、約 4 週間後に凍結が飽和したときには約 3200 Kcal/hr であり、この結果、凍結管にかこまれた正方形の内部全域及び、この正方形の外周約 75 cm 程度の範囲の地盤を凍結させることができた。

実験—2は、昭和36年 4 月～6 月に実験—1 で適確に把握できなかつた基礎資料を求めるために京大防災研究所宇治川水理実験所構内で実施した。凍結管は長さ 5 m のものを 1 本だけとし、主な測定事項は地中温度分布、凍結管の熱負荷、地表面の隆起などである。また、凍結実験の補足として凍土の一軸圧縮試験を行ない、凍土の温度と一軸圧縮強度の關係などを求めた。この報文では実験—2 について報告する。

2. 試験地点の状態

試験地点の土質は、Fig. 1 に示すように地表下 160 cm までは石炭ガラが堆積しており、G.L.-160 cm 以下に軟弱な粘土又は粘土質ローム（Swedish cone による測定の結果 $c \approx 0.05 \text{ kg/cm}^2$ ）がある。また、地下水位は地表下 100 cm にあり、この地下水は石炭ガラ層内で 0.4 cm/hr 程度の流速を持つている。

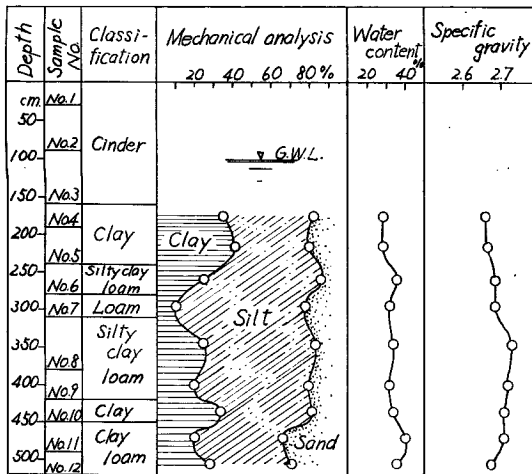


Fig. 1 Soil profile

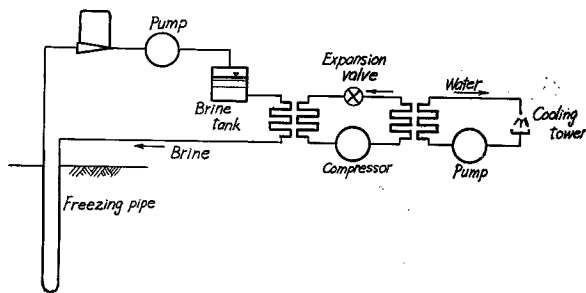


Fig. 2 Layout of experiment

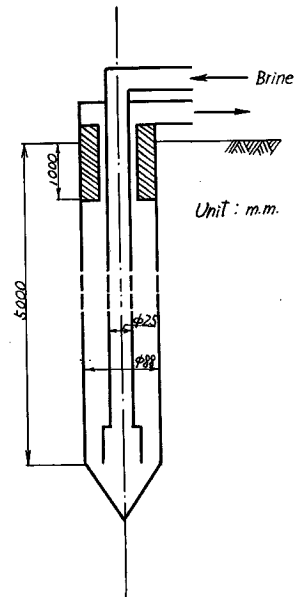


Fig. 3 Section of freezing pipe

3. 実験装置

実験に使用した装置の系統図は **Fig. 2** に示すようであつて、フロンを用いる冷凍機でブラインを冷却し、このブラインが地盤内に埋設されている凍結管内を循環して地盤と熱交換する機構である。冷凍機の放熱はクーリングタワーを回路内に持つ循環水によつて行われる。各装置の性能および構造は次のようである。
 冷凍機：定格容量は 7600 Kcal/hr, 所要電力 7.5 K.W. のもので、冷媒は -40°C 蒸発, $+30^{\circ}\text{C}$ 凝縮のフロン22である。

ブライン循環装置：ブラインは冷凍機によつて -30°C に保たれながら、冷凍機と凍結管の間を循環する。この循環には 1 HP の2段タービンポンプを用い、循環流量はベンチュリメーターで測定した。

凍結管：凍結管は **Fig. 3** に示すように、外径 100 mm 内径 88 mm 長さ 5 m の鋼管を外管として、これに内径 25 mm の内管を入れたものである。また上部 1 m は内径 50 mm の鋼管を用いてブラインの死水域を作り、地表部からの熱の流入を防止するよう工夫した。

クーリングタワー：冷凍機を放熱させるために水を用いるが、この水を節約する目的で日立 500 T・L 型クーリングタワーを用いた。これはタワー内に上記の吸熱した水を噴霧流下させ、同時に下方から 1 HP のファンで送風し、噴霧された水の一部の蒸発によつて残りの水の冷却をはかるものである。この水の回流のために 1 HP のポンプを持つている。

4. 凍結管の熱負荷の変化

凍結管からの熱の排出（熱負荷）は、実験開始後の時間が経過して地中の温度勾配が緩くなるにつれて減少し、ブラインの温度を一定に保つているとやがて一定値に落ち着く。熱負荷の計算はブラインの流量、凍結管出入口における温度差、比熱、密度を用いて行なつたが、この結果は Fig. 4 に示すように実験開始後約16日ではば 170 Kcal/m·hr の一定値になっている。

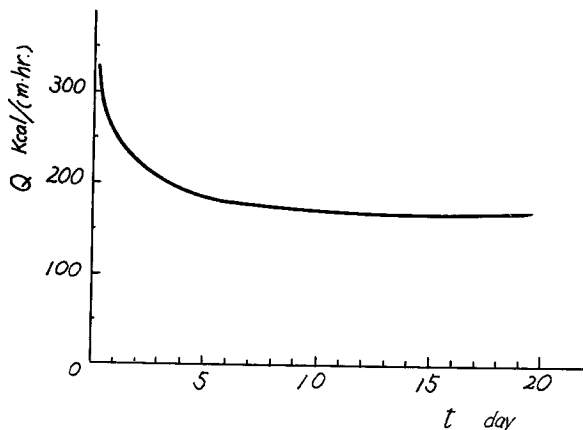


Fig. 4 Relation between heat-load Q and time t

5. 地中の温度分布

5.1 測点の位置

凍結管の冷却によつて生じる地中の温度変化を測定するため、測点を Fig. 5 に示すように配置した。

Fig. 5 において“○”印で示した8個の測点は、地中温度の水平分布を測定するためにいずれも地表下 2 m の深さに設置したものであり、また“●”印で示した8個の測点は、地表下 1.8 m の深さで、凍結管を中心とする半径 60 cm の円周上に設けたものである。さらに“⊗”印で示した測点は地中温度の鉛直方向の分布を測定するために、凍結管の中心から 60 cm 離れた点で深さ 5 m まで鉛直方向に6個設けてある。

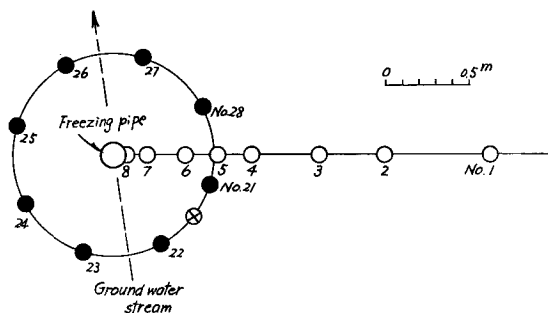


Fig. 5 Plan of measuring points

これらの温度測定点は、先端に銅-コンスタンタン熱電対の一接点を入れたパイプを打ちこんで設定したもので、温度測定に当つては、他の一接点を細かく砕いた氷の中に入れて 0°C に保つようにした。

5.2 水平方向の温度分布

測点は前述したように地表下 2 m にあり、試験開始前におけるこの深さの地盤温度は各測点とも約 13°C を示し、日変化はなかつた。なお試験中に、凍結管から約 10 m はなれた同じ深さの点で測定を続けたが、 13°C からほとんど変化はなかつた。

各測点の温度測定は原則として1日1回行ない、これを35日間継続した。Fig. 6 は横軸に凍結管からの距離を、縦軸にその距離における地中温度をとり、経過日数をパラメーターとして図示したものである。この図で地中温度 0°C の水平線を各曲線が切る横座標が、それぞれの経過日数における地表下 2 m での凍結距離を示すことになるが、これによれば最終的には約 45 cm の距離まで凍結したことがわかる。

5.3 凍結管のまわりの平面的な温度分布

冷却開始後30日目（水平方向の温度変化がほとんどなくなつたとき）における、凍結管を中心とする半径 60 cm の円周上（深さ 1.8 m）の地中温度を示すと Fig. 7 のようになる。図中の同心円は温度目盛をあらわしている。図によれば地中温度は地下水流の上流側が高く、下流側が低い傾向を示している。

5.4 鉛直方向の温度分布

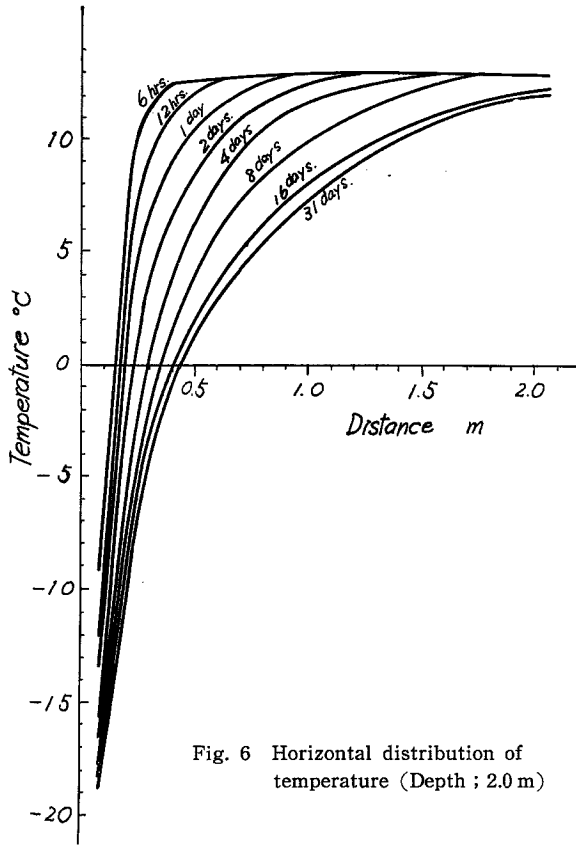


Fig. 6 Horizontal distribution of temperature (Depth ; 2.0 m)

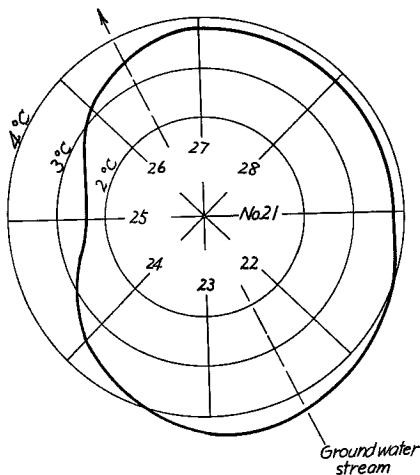


Fig. 7 Distribution of temperature around the freezing pipe (Depth ; 1.8 m, distance from the freezing pipe ; 0.8 m)

凍結管から 60 cm 離れた地点の温度の深さ方向の分布は Fig. 8 のようになる。図からわかるように、深さ方向の温度勾配は、浅いところではかなり大きいですが、深さ 3 m 付近では小さくなり、熱伝導はほぼ水平に、二次元的に行なわれるようである。

そこでいま、この地盤内の熱伝導が完全に二次元的であると仮定して、このような地盤内の水平方向の温度分布を考えると次式が成立する。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c} \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \dots \dots (1)$$

ここに、 r ；凍結管の中心からの水平距離、 t ；冷却開始後の経過時間、 θ ；冷却中の地盤の温度、 κ ；地盤の熱伝導率、 ρ ；地盤の見かけの密度、 c ；地盤の比熱。

凍結管の熱負荷を一定値 Q_c とし、かつ凍結の有無にかかわらず κ, c が不変であれば、 r が十分大きく凍結管の半径が無視できるときは、

初期条件； $t=0$ にて $\theta=\theta_0$

境界条件； $r \rightarrow \infty$ にて $\theta=\theta_0$

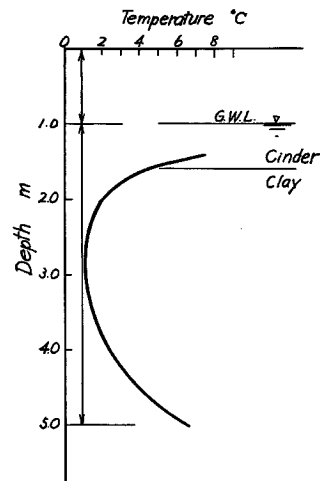


Fig. 8 Vertical distribution of temperature (Distance from the freezing pipe ; 0.6 m)

$r=0$ にて $Q=Q_c$

のもとに (1) 式を解けば、

$$\theta_0 - \theta = \frac{Q_c}{4\pi\kappa l} \cdot \int_{\lambda}^{\infty} \frac{e^{-\lambda}}{\lambda} d\lambda = -\frac{Q_c}{4\pi\kappa l} \cdot E_i(-\lambda) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに $\lambda = \frac{\rho c}{4\kappa} \cdot \frac{r^2}{t}$, l : 凍結管の長さ, E_i : 指数積分, θ_0 : 冷却前の地中の温度。

さらに (2) 式において $\lambda \ll 1$ の場合, すなわち冷却開始後の経過時間 t がかなり大きくなつたときは, $E_i(-\lambda)$ を級数展開し, そのはじめの 2 項で近似できるから,

$$\theta_0 - \theta = \frac{2.303 Q_c}{4\pi\kappa l} \left\{ \log_{10} \left(\frac{t}{r^2} \right) - \log_{10} \left(\frac{\rho c}{2.25\kappa} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ゆえに冷却開始後相当時間が経過した後, 熱負荷が一定で, かつ ρ, c, κ が一定ならば, 凍結管からかなり離れている測点については次のことがいえる。すなわち, 凍結管からの距離が r の測点で, 経過時間が t のときの地中温度を θ とすると, (t/r^2) を対数目盛でとり, これに対応する θ を普通目盛でプロットすれば, r 及び t がちがついていてもすべてのプロットは一本の直線にのるはずである。(3) 式からわかるように, この直線の勾配を用いると, Q_c, l が既知ならば地盤の熱伝導率 κ が求められる。

この方法を用いて地中温度水平分布のデーターを整理して, $\theta \sim \log_{10}(t/r^2)$ 関係にプロットした結果は Fig. 9 に示すように $\theta \sim \log_{10}(t/r^2)$ の実測値は r をパラメーターとすれば, それぞれの r に対してはほとんど一直線上にある。これは凍結管から一定距離はなれた点については, 熱流を二次元的とし, かつ $\kappa/(\rho \cdot c)$

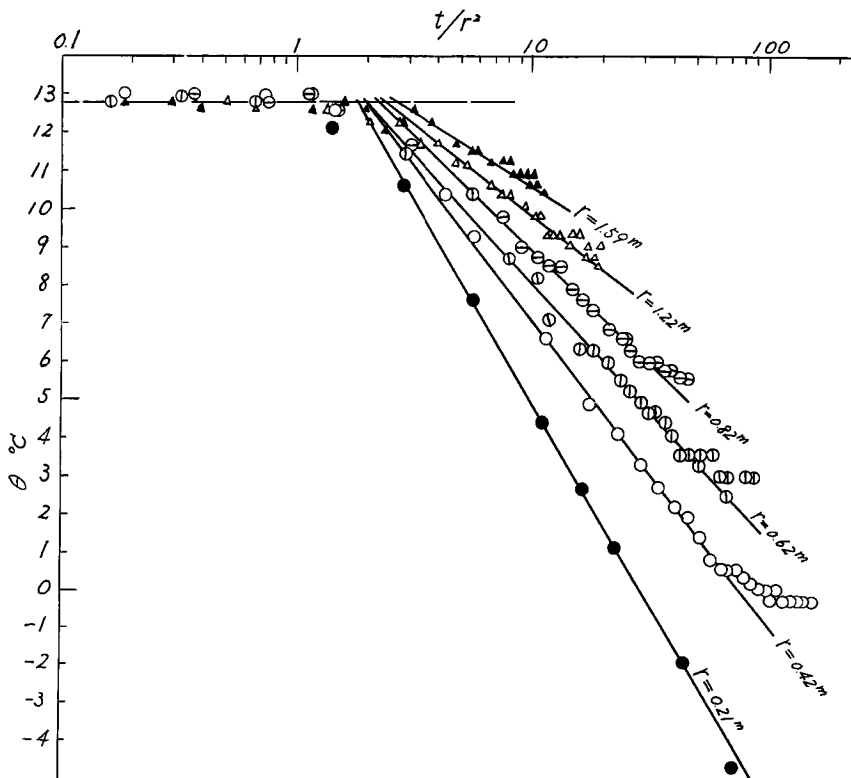


Fig. 9 Relation between temperature θ and $\log(t/r^2)$

を一定として解いた(3)式が成立するとしても余り大きな誤差のないことを示している。 $\kappa/(\rho \cdot c)$ が本実験の範囲では凍結の前後で余りかわらないのは、氷の比熱は水のそれより小さいが、凍結の際には凍結潜熱が発生するため相殺されることも一因ではないと思われる。なお図からわかるように、 r が大きいほど直線の勾配が小さくなっており、その原因は Fig. 8 から明らかなように、これらの測点付近での熱伝導が二次元的でないために、(3)式の Q_c は r が大きいほど小さくなるためと考えられる。

さて、(3)式を用いて試験地盤の κ を求めるには、熱伝導が完全に二次元的と考えられる $r=0$ における仮想的な直線の勾配を求めればよい。そのために、Fig. 9 から r と、その r での $\theta \sim (t/r^2)$ の線の勾配を読みとつて、この関係をプロットし、外挿によつて $r=0$ における勾配を $2.303Q_c/(4\pi\kappa l) = 16^\circ\text{C}$ と推定した。また、 Q_c としては試験開始後はば熱負荷が一定になったときの Q_c として16日目のデータから、 $Q_c=189 \text{ cal/sec}$, $l=400 \text{ cm}$ である。これらの数値を上式に代入して κ を求めると $\kappa=5.4 \times 10^{-3} \text{ cal/(cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{deg)}$ となる。

また $\theta \sim (t/r^2)$ の線が $\theta = \theta_0 = 12.8^\circ\text{C}$ の線と交る点の (t/r^2) の値は 1.8 day/m^2 ($r=0.21 \text{ m}$) $\sim 2.6 \text{ day/m}^2$ ($r=2.6 \text{ m}$) であり、また地盤の密度は r あらかじめ採取した乱さない試料の測定から $\rho=1.59 \text{ g/cm}^3$ である。これらの値を(3)式に代入して c を求めると、 $c=0.12$ ($r=0.21 \text{ m}$) ~ 0.17 ($r=2.6 \text{ m}$) となる。これらを種々の地盤構成物質のそれぞれの値と比較して Table 1 に示す。

6. 地表面の隆起

地盤の凍結に伴ない、凍上現象があらわれることが予想される。しかし、この実験では、地下水面以上の層は氷点下にならで冷却されないで、一般にいわれている凍上現象ではなく、地下水位以下の土中の間ゲキ水が氷結する際に生ずる体積膨脹に起因すると思われる比較的小さい地表面の隆起が観測された。この地表面隆起量は、地表にあらかじめ打設された木杭を水準測量して求めた。

測定結果を、経過日数と隆起量の関係にプロットすれば Fig. 10 のようになり、また、経過日数ごとに隆起量の横断面をかけば Fig. 11 のようになる。

Fig. 6 に示したように、地中温度の水平分布は深さ 2m の点では冷却開始後約20日ではほとんど平衡に達しているにかかわらず、Fig. 10 によれば地表面の隆起は凍結管の近傍では30日以上経過しても冷却開始直後とはほとんど同じ速さで続いている。これは、30日程度では凍結管の近くの深いところでまだ冷却が進んでおり、地中温度分布は平衡に達していないためであると思われる。

Table 1

material	heat conductivity cal/(cm·sec·deg)	specific heat
water	1.5×10^{-3}	1.00
ice	5.0 "	0.46
sandstone	5.5 "	0.22
granite	5.3 "	0.19
quartz	—	0.19
soil (dry)	3.7 "	—
experiment	5.4 "	0.12~0.17

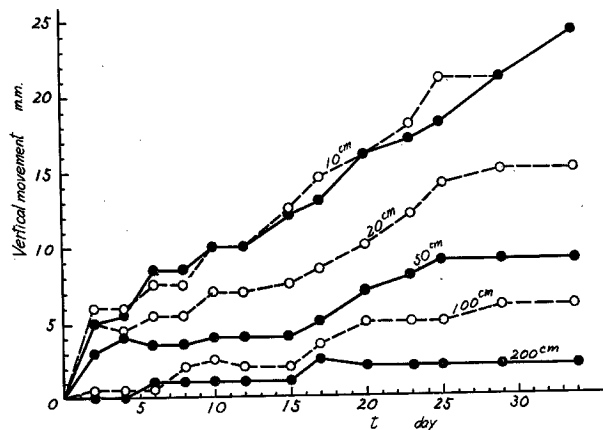


Fig. 10 Vertical movement (up heaval) of the ground surface related to time (Parameter : distance from freezing pipe)

7. 凍土の一軸圧縮強度

凍結工法を検討するためには凍土の力学的性質を知ることが必要である。ここでは凍結粘土試料の一軸圧縮強度について調べた。

7.1 凍土の温度と一軸圧縮強度との関係

試験に使用した試料は、堺市の海底より採取したものを気乾状態で 4 mm のふるいを通過させ、水を加えて練り返したもので、三角座標による分類では粘土質ローム、含水比は 58.1% である。この試料を高さ 10 cm、直径 8 cm のモールドに填充したが、その際に試料中央に銅-コンスタンタン熱電対の一接点を挿入し、成形後に全体をポリエチレンの二重袋に密封してブライン中に漬けた。そして粘土供試体の温度はブラインの温度を調節することによって変化せしめた。

圧縮試験には C.B.R. 試験用の手動ジャッキを用い、載荷ひずみの速度は 15%/min 程度とした。試験中の供試体の温度は熱電対によつて中央部で測定したが、それによると試験中には 1.5°C/min 程度の温度上昇が認められた。

試験結果を最大圧縮応力とそのときの供試体中央の温度との関係にプロットすると Fig. 12 に示すように大略直線関係が得られた。

7.2 乱さない試料と練り返し試料の比較

乱さない粘土と、練り返した粘土を凍結させたときの圧縮強度の比較をするために一軸圧縮試験を行なつた。試料は大阪市住吉で採取した粘土質ロームで、自然含水比は 50~80% のものである。また、この試料の鋭敏比は 5~8 である。

試験法は 7.1 と同じ要領で行なつ

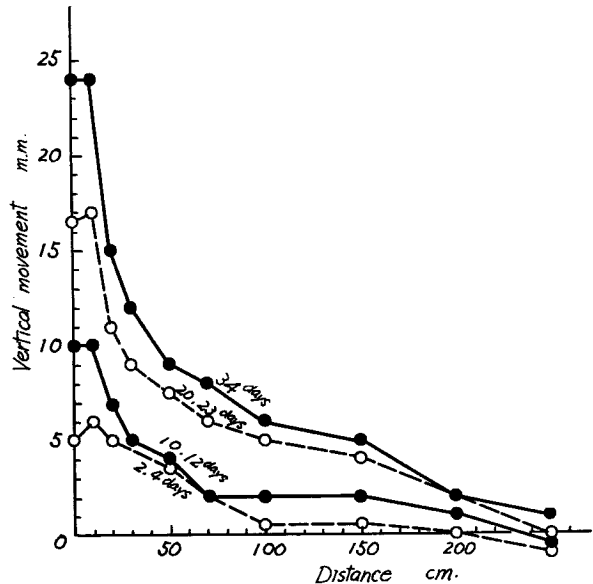


Fig. 11 Vertical movement of the ground surface related to the distance from the freezing pipe

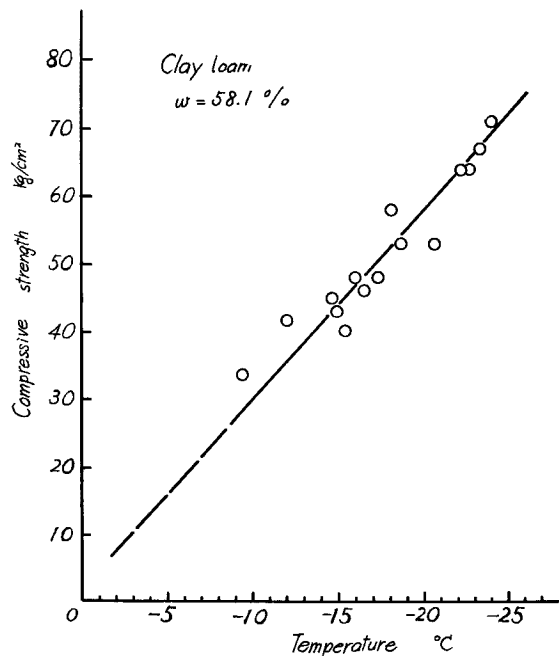


Fig. 12 Relation between the compressive strength and temperature

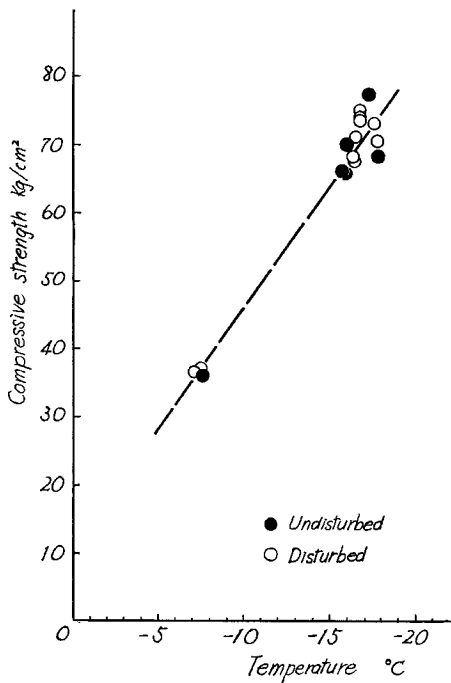


Fig. 13 Relation between the compressive strength and temperature

たが、練り返し試料の含水比は 50~100% の範囲で変化を与え、含水比の変化による強度の推移をも併せて調べるようにした。

結果は Fig. 13 に示すようであり、乱さない試料と練り返した試料の凍結時の強度差は認められない。また、50~100% 程度の含水比の差によつては凍土の強度にほとんど差が生じなかつた。

8. 結 び

この実験で得た結果を要約すると次のようである。

(1) 凍結管の熱負荷は冷却開始直後は非常に大きい。が、時間の経過にしたがい一定値に近づく。この実験では約 16 日ではほとんど一定となつた。また地中温度分布は冷却開始後約 20 日ではほぼ平衡に達した。

(2) 地中温度分布は深さ方向にかなりの温度勾配がある。このことは、地表面及び地盤深部からの熱伝導がかなり大きいことを示している。

(3) 地中温度を冷却開始後の時間の対数に対してプロットすると、時間がかなり経過した部分で直線関係が得られる (Fig. 9 参照)。

(4) 地盤内の熱伝導を二次元流とし、 ρ , c , κ を一定と仮定して、 $r=0$ の点で求めた地盤の熱伝導率は $5.4 \times 10^{-3} \text{ cal}/(\text{sec} \cdot \text{cm} \cdot \text{deg})$ 、比熱は 0.12~0.17 である。

(5) 凍土の一軸圧縮強度は温度の低下に対して直線的に増加する。また、乱さない試料と練り返した試料の凍結時の強度差は認められない。

終りに、本実験に援助を受けた精研冷機 KK に対し謝意を表わす次第である。