

凍土のレオロジー的挙動について

福 尾 義 昭

ON THE RHEOLOGICAL BEHAVIOUR OF FROZEN SOIL

by Yoshiaki FUKUO

Synopsis

In order to investigate the rheological properties of frozen soil, the tests of axial compression in a cylinder (50mm diam. $\times$ 90mm height) and of deflection in a straight beam (40 $\times$ 40mm square $\times$ 500mm span) were carried out at -5°C and -10°C under various loads using silty and sandy frozen soils.

The results of axial contraction were arranged with reference to Murayama and Shibata's theory of the rheological characters of clay, and it was seen that the frozen clay was probably in strength of $2\text{kg}/\text{cm}^2$ and 10 to $20\text{kg}/\text{cm}^2$ as lower and upper yield values at -5°C respectively.

ま え が き

岩石や土壤に含まれる水分は、それらの物性に重要な影響を及ぼすが、とくに 0°C 以下の低温では、凍結にともない極めて特徴のある作用を示す。

凍結、融解のくり返しは、岩石、土壤の組成に変化を与えて風化を促進し、地形の永年変化に影響を及ぼすが、また地下滞水層の凍結は、凍上現象をとめない¹⁾、災害をひきおこす。

一面最近の冷凍技術の進歩は、大規模な人為的土壤凍結を可能にし、その建設、防災工事等への適用も具体化されつつある段階である^{2) 3)}。したがって地中水の凍結現象の研究は学術上興味深いばかりでなく、防災技術的にも重要な意義を有する。

地中水の凍結現象に関連した具体的な問題点としては、

- (i) 凍結、融解のくり返しによる組成の変化
- (ii) 地中水の移動凝縮をとまなう凍上の機構
- (iii) 凍結土の力学的強度と変形

があげられるが、本研究はとくに(iii)について室内実験によって調べた結果を報告するものである。

1. 実験土壤試料

東京都金杉橋近くで直径約 6 m、深さ約 15mの地盤が人工的に凍結され、この凍結地盤に直径 2 m深さ 10mの素掘り堅坑が掘削された。

この堅坑の側面から採取された凍土を実験試料として用いた。採取深度は 5, 7, 8.5 および 10mの 4 層である。採掘後解凍しないでそのまま整形し実験する不攪乱用凍土塊と、解凍してのち整形用型枠に攪乱してつめこみ供試体を作るための攪乱用凍土塊の 2 つを各層で採掘した。

不攪乱用凍土塊は採取後水分の蒸発を防ぐためビニール袋に 2 重に密封し、 $-20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ のフリーザー

に約3カ月間保存し、そののちトリマーを用いて解凍した表面の部分から少しずつ削り取りながら直径50mm高さ90mmの円柱状に整形した。攪乱用凍土塊はビニール袋に入れたまま解凍し整形用型枠に攪乱してつめこみ $-23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ のブライン槽に2日間浸して再凍結しのち型枠から取り出した。

整形を終えた供試体は攪乱・不攪乱用ともすぐグリスを表面に塗って水分の蒸発を防ぎさらにその上に薄いビニール布でグリスに密着させながら供試体の全面をおおい、実験装置の入れてある冷却恒温槽にしまいこんだ。

5, 7 および 8.5m 層の土はヘドロのかなり圧密された粘土であった。各層の不攪乱試料の含水比、塑性限界および液性限界は **Table 1** に示すとおりである。これに対して10m層の土は粘土まじりの砂礫土で貝殻の小さい破片も少しまじっていた。この層については不攪乱試料の含水比と篩分けによる粒度分布を測定して土の性状を調べた。分析の結果は **Table 2** のとおりである。Table からみられるように 5, 7 および 8.5m 層の粘土は、8.5m 層の含水比が他にくらべて少し大きい以外はほとんど同じ値を示している。10m 層の土は直径 2mm 以上の砂礫が重量の約 25% を占めている。

Table 1 The properties of undisturbed silty clay.

sampling depth (m)	5	7	8.5
plastic limit (%)	37.0	37.6	35.4
liquid limit (%)	71.0	70.2	70.7
water content (%)	51.0	52.7	64.6

Table 2 The result of grain size analysis of undisturbed sandy soil at 10m depth layer

Total weight in dry 390.9gr, Water content 25.0%

grain size	$>2380\mu$	$2380\mu>$
weight (gr)	234.2	155.8

(weight of loss by sieving=0.9gr)

The distribution of grain size smaller than 2380μ mesh

size (μ)	$2380>2000$	>1410	>1000	>710	>500
percent in weight	11.4	18.6	15.5	14.0	11.0

size (μ)	>350	>250	>210	$210>$
percent in weight	17.4	5.6	1.6	4.9

2. 実験装置およびその方法

一軸圧縮試験と中央集中荷重によるたわみ試験装置を造った。装置の外観は **Photo. 1** に示される。この大きさは約巾 70cm 奥行 80cm 高さ 90cm である。一軸圧縮試験装置は **Fig. 1** に示されるように、テコの第一腕 P 点に鉛製重錘 W をかけ腕 (A) で 10 倍にしさらに腕 (B) で 2 倍にし結局シャフト (C) 円板 (D) をとおして置台 (E) 上の円柱凍土を 20W の力で軸方向に圧縮する。たわみ試験は断面 $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 角長さ 58cm の真直梁を攪乱凍土塊で整形再凍結し、間隔 50cm の自由支点上に水平におき梁の中央でまたがるようにし

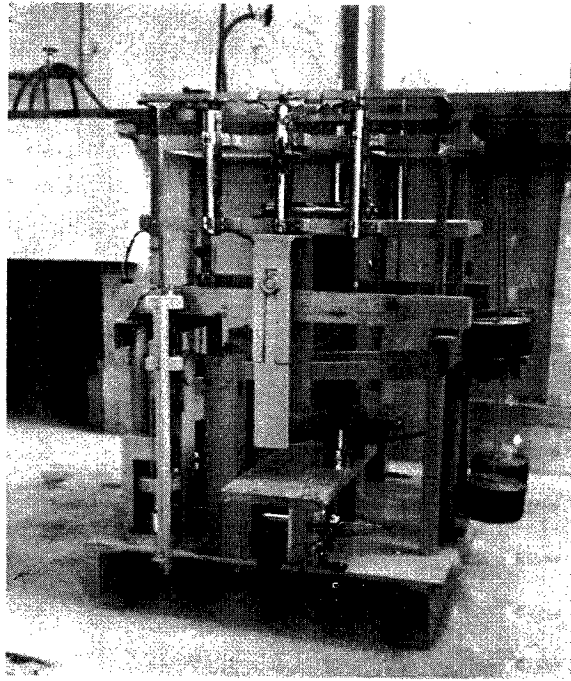


Photo. 1 View of loading installation.

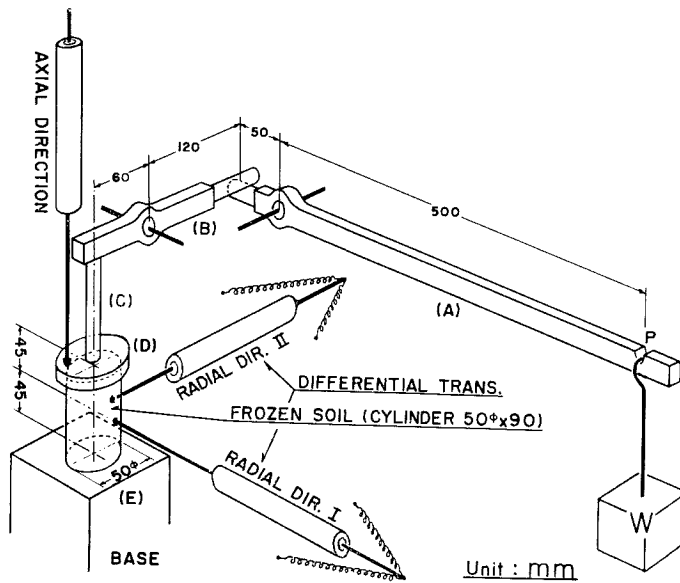


Fig. 1 Diagrammatic schetch of compressive equipment.

て作ってある鍾受台上に鉛錘をのせて梁をたわませる。軸圧縮による変形は軸方向および置台(E)より45 cm 高における半径方向 I・IIに取り付けた差働変圧器で検出される。またたわみ量は梁の4等分点に相当する中央および両側に同じく垂直に差働変圧器を取付けて検出される。圧縮・たわみとも装置は2組づつあり、同時に2ケづつの供試体を試験できる。Photo. 1の装置は内容積1 m立方を有する恒温冷却槽に収められる。槽内はフロンガス冷凍機で約 -20°C まで冷却でき、サーモスタットおよび空気攪拌扇を備えている。サーモスタットの温度制御能力は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ であることをたしかめた。変形のために生じた差働変圧器の2次電圧はリード線で槽外に導かれ、12打点式自記々録計で記録される。供試体は整形後ただちに恒温槽内の装置台におかれ、6時間前後無荷重で基準零線の記録を取りのち載荷した。載荷・除荷は恒温槽の前扉を開閉しておこなねばならなかった。すばやくおこなったが2, 3分を要しその間に外気も流入して槽内温度をみだすため載除荷後5分頃までの打点記録は定温度定荷重下の記録とはいえないので実験結果の検討には5分以後の読取値を用いた。自記々録計の変位測定精度は $\pm 0.02\text{mm}$ であることをたしかめた。今回の実験は槽内を -5°C と -10°C の二温度に指定しておこなった。

3. 実験結果とその考察

実験は梁のたわみ変化と一軸圧縮変形についておこなったがここでは一軸圧縮試験だけを述べる。打点式記録計で得られた変位量をコンパレーターで読みとりグラフに書きなした。Fig. 2 にその一例が示

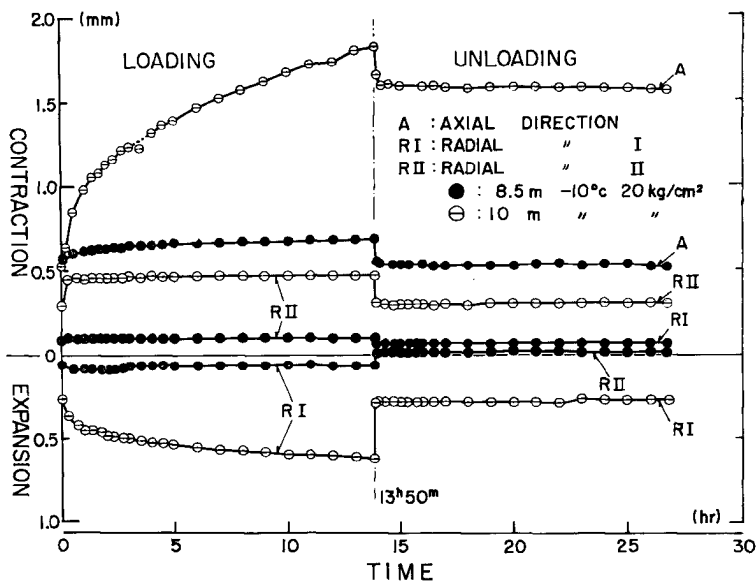


Fig. 2 Examples of deformation of frozen soils in the axial compression at -5°C and -10°C under axial stress 20kg/cm^2

される。この図は 8.5m 層と 10m 層の不攪乱供試体の試験結果で温度および軸応力は何れも -10°C , 20kg/cm^2 で同一であるが 10m 層の方が歪や歪速度の大きいことがわかる。また載除荷した際の弾性歪も 10m 層の方が大きい。この結果は -5°C , -10°C で種々の荷重をかけておこなった測定結果のすべてについていえることであった。粘土質の凍土と砂質の凍土とでは、クリープ変形の特性が異なっているように思われる。

半径方向の変形については方向 I, II いずれにおいても膨脹することを予想していたが方向 II では 8.5m,

10m層ともに収縮し、また除荷回復時に 8.5m層の方向Ⅰでは載荷以前よりも収縮している。半径方向の変化はこの例以外の変形においても複雑な変化を示している。その原因として、供試体の形が完全な円柱とはいえないこと、軸荷重の方向が円柱の軸と完全に一致していないこと、半径方向の差動変圧器の高さが供試体が縮んでも底面から 45mmの位置に常にあること等があげられるが詳細な検討は梁のたわみ変形とあわせて別の機会に発表をゆずり、以下はもっぱら軸方向の収縮変化について議論したい。

5, 7, 8.5m 層の凍土は粘土が凍結したものである。水分の凍結のためクリープの様子は凍結前のものと異なったものかもしれないがまず不凍粘土の特性と対比考察することは有益であろう。

粘土のレオロジー的特性については、当研究所の村山・柴田両博士の理論的な研究がある⁴⁾。この理論によれば、

「粘土に一定荷重を作用させている間に生ずる歪 ε は応力 σ が上限降伏値 σ_u 以下では

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma - \sigma_0}{E_2} - \frac{2(\sigma - \sigma_0)}{B_2 E_2} \tanh^{-1} \left[\exp(-A_2 B_2 E_2 t) \tanh \frac{B_2}{2} \right] \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。ここに、

- σ_0 : 下限降伏値 (弾性限界)
- E_1, E_2 : 粘土のヤング率
- A_2, B_2 : 温度に関係する粘土の常数

である。同一粘土で温度一定のときは $\sigma_0, E_1, E_2, A_2, B_2$ はいずれも常数と考えられる。

(1) 式は歪 ε が

$$\frac{\sigma}{E_1} < \varepsilon < \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma - \sigma_0}{2B_2 E_2} (2B_2 - 1), B_2 > 2 \dots\dots\dots (2)$$

のときには近似的に

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma - \sigma_0}{E_2} + \frac{\sigma - \sigma_0}{B_2 E_2} \log \frac{1}{2} A_2 B_2 E_2 t \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる。(3) 式は半対数紙上で歪 ε が $\log t$ とともに直線的に増加することを物語る。軸応力 σ が上限降伏値以上のときは歪 ε は $\log t$ とともに上方に凹の曲線を書く。

さらに除荷したのちの回復時の歪 ε は

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_2} + \frac{2\sigma_0}{B_2 E_2} \tanh^{-1} \left[\exp(-A_2 B_2 E_2 t) \tanh \left\{ \frac{B_2}{2\sigma_0} (\varepsilon_a E_2 - \sigma_0) \right\} \right] \dots\dots\dots (4)$$

で表わされる。ここに ε_a は除荷直後弾性歪 σ/E_1 だけ回復したのこりの歪である。(4) 式も歪 ε が

$$\varepsilon_a > \varepsilon > \frac{\sigma_0}{2B_2 E_2} (2B_2 + 1) \dots\dots\dots (5)$$

の範囲では

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_2} - \frac{\sigma_0}{B_2 E_2} \log \frac{1}{2} A_2 B_2 E_2 t \dots\dots\dots (6)$$

で示される。(6) 式は半対数紙上で ε と $\log t$ の関係が負の勾配をもった直線になることを示している。」

この理論に従って我々の測定結果を整理してみよう。

(1) -5°Cにおける載荷中の収縮変形

Fig. 3 にその結果が示されている。実験は載荷後大休10時間前後までの変形を記録しのち除荷して回復させた。図中 () 内の数は載荷応力 σ kg/cm² の値であり、○印中の数は線の整理番号である。

- i) 7 および 8.5m 層の $\sigma=10$ kg/cm² における変形は攪乱不攪乱いずれも直線上に配列されている。
- ii) 8.5m層不攪乱試料に $\sigma=20$ kg/cm² を載荷した変形は直線状ではなく上方に凹の曲線になっている。
- iii) 10m層凍土の収縮は攪乱・不攪乱ともに上方に凹の曲線に配列され、また攪乱試料の方が収縮量は大きい。
- iv) 5m層の凍土は載荷後 30~40分頃に配列の直線が折れ、より勾配の少ない直線になっている。

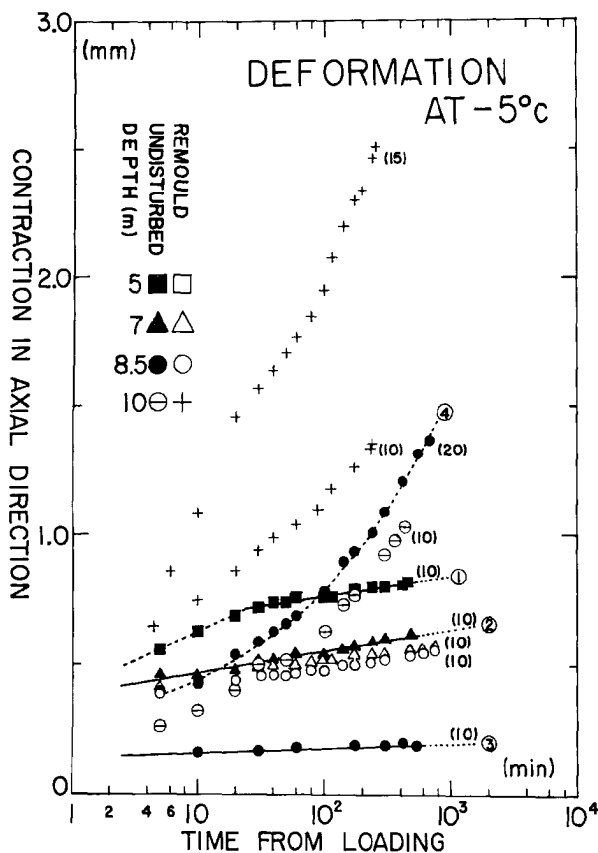


Fig. 3

Creep deformation of frozen soils at -5°C in various layers during constant loading. The figures in parentheses and circles show the axial compressive stress (kg/cm^2) and referring number respectively.

図中の直線③は、8.5m層不攪乱試料に $20\text{kg}/\text{cm}^2$ を载荷して11時間クリープさせのち4時間回復させて再び $10\text{kg}/\text{cm}^2$ で2次クリープをさせたときの直線である。そのために収縮量が小さいのであろう。

(2) -10°C における载荷中の収縮変形

Fig. 4にその結果が示されている。 -5°C と同じく10時間前後载荷のち回復させた。

i) 7, 8.5m 層の変形は $\sigma=20\text{kg}/\text{cm}^2$ ではすべて直線上に配列されておりその勾配はほぼ同じである。また両層の不攪乱試料の変形はほとんど一致している。攪乱試料は不攪乱試料より収縮量が小さい。

ii) 10m層凍土は -5°C と傾向は全く同様で攪乱不攪乱ともに上方に凹の曲線上に配列され攪乱試料の方が収縮は大きい。

iii) 5m層凍土は攪乱不攪乱とも -5°C と同じく载荷後30~40分の間に直線が折れ以後勾配が小さくなっている。

以上の結果から7mおよび8.5m層の粘土質凍土はほぼ同ような収縮変形を呈し、 -5°C ではその上限降伏値は $10\text{kg}/\text{cm}^2$ から $20\text{kg}/\text{cm}^2$ の間にあり -10°C では $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上になるものと思われる。10m層の砂質凍土の変形では粘土質の凍土とくらべて、氷のクリープ特性がより大きく関係しているのではないだろうか⁵⁾。さらに5m層の凍土は含水比、塑性・液性限界は7m層とほとんど同じにかかわらず特異な変形を示すことは興味深い。

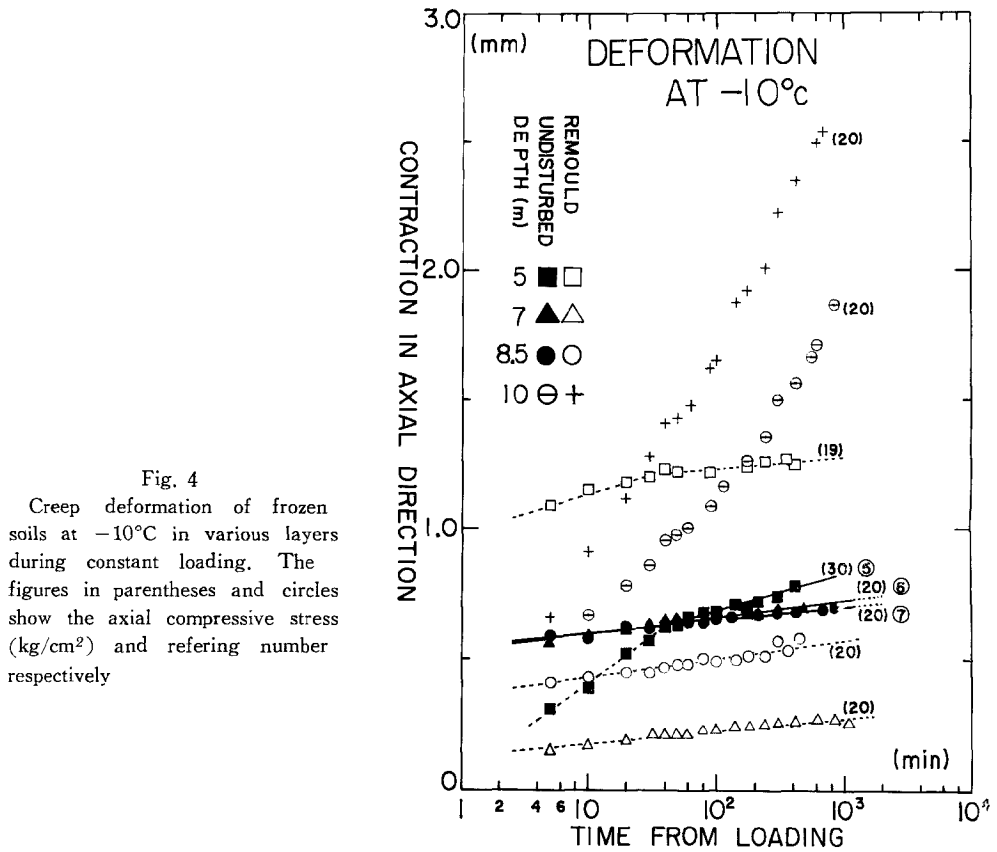


Fig. 4
Creep deformation of frozen soils at -10°C in various layers during constant loading. The figures in parentheses and circles show the axial compressive stress (kg/cm^2) and referring number respectively

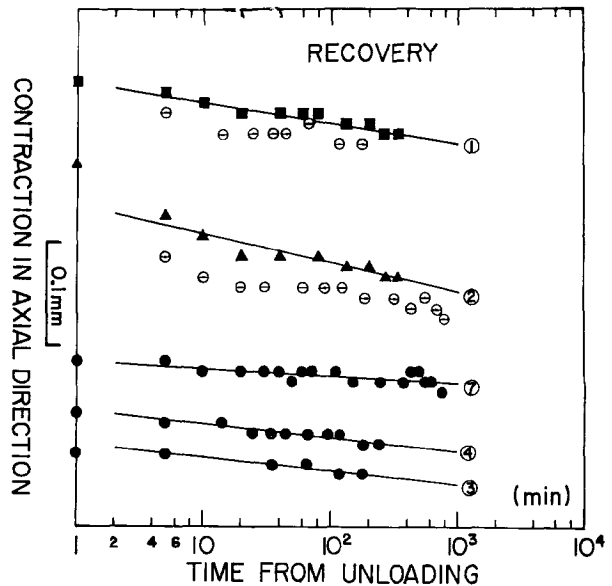


Fig. 5
The recovery stage of frozen soils in various layers at -5°C and -10°C

(3) 回復中の変形

不攪乱試料①～⑦までの回復変形をえらんで調べた結果はFig. 5に示されている。線⑤および⑥の回復変形は歪の読取値に変化がなかったので画いていない。他のものはほぼ直線状に配列されている。

載荷中と回復中の直線の勾配 b_1 と b_2 を求めると下限降伏値を計算することができる。すなわち

$$b_1 = \frac{\sigma - \sigma_0}{B_2 E_2}, \quad b_2 = \frac{\sigma_0}{B_2 E_2}$$

から

$$\sigma_0 = \frac{b_2}{b_1 + b_2} \sigma$$

線①より⑦までの不攪乱試料の直線の勾配を最小自乗法で求めた結果は Table 3 に示してある。この表か

Table 3 Results of calculations of σ_0 and $B_2 E_2$ by least squares method

Temperature	Depth (m)	Refering No. of curves in Fig. 3 ~ 5	Axial compressive stress σ (kg/cm ²)	Loading		Unloading		Lower yield value σ_0 (kg/cm ²) ($= \frac{b_2}{b_1 + b_2} \sigma$)
				$a_1 \times 10^3$	$b'_1 \times 10^4$	$a_2 \times 10^3$	$b'_2 \times 10^4$	
-5°C	5	①	10	6.8	8.7	8.1	2.2	2.0
	7	②	10	4.2	9.8	5.7	3.1	2.4
	8.5	③	10	1.6	2.2	0.9	1.4	3.9
	8.5	④	20(> σ_u)	—	—	1.5	1.4	—
-10°C	5	⑤	30	4.6	1.5	5.6	—	—
	7	⑥	20	5.9	7.3	6.7	—	—
	8.5	⑦	20	6.0	5.9	6.2	0.8	2.4

$$a_1 = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma - \sigma_0}{E_2} + \frac{(\sigma - \sigma_0)}{B_2 E_2} \log_e \frac{1}{2} A_2 B_2 E_2$$

$$b'_1 = b_1 \log_e 10 = \frac{\sigma - \sigma_0}{B_2 E_2} \log_e 10$$

$$a_2 = \frac{\sigma_0}{E_2} - \frac{\sigma_0}{B_2 E_2} \log_e \frac{1}{2} A_2 B_2 E_2$$

$$b'_2 = b_2 \log_e 10 = \frac{\sigma_0}{B_2 E_2} \log_e 10$$

ら, σ_0 の値は 2 ~ 4 kg/cm² であることがうかがえる。1次クリープと2次クリープの回復に当る③および④の直線が同じ勾配を持っていることは注目すべきことである。

4. 結 論

(1) 7mおよび8.5m層の粘土質凍土のクリープを村山・柴田理論で整理した結果, -5°C では上限降伏値は 10kg/cm² と 20kg/cm² との間にあり下限降伏値は約 2 kg/cm² のようである。

(2) 同じく -10°C では上限降伏値は 20kg/cm² 以上で温度の低下により上限降伏値が増加することがうかがえる。

(3) 10m層の砂質凍土は粘土質凍土と異質なクリープ変形をするようである。

謝 辞

この研究に際して当研究所奥田節夫, 村山朔郎両教授に有益な助言と励ましをいただいた。ここに厚くお礼申し上げる。また実験に当って精研冷機株式会社高志勤部長・加藤哲治君に多くの御協力をいただいた。ここに心から感謝します。

参 考 文 献

- 1) Scheidegger, A. E., : Theoretical Geomorphology, Springer Verlag, Berlin, 1961, pp. 283～285.
- 2) 村山朔郎・柴田徹・軽部大蔵：地盤凍結工法に関する実験，京大防災研年報，No. 5 A，昭和37年，pp. 94～101.
- 3) 高志勤，松浦一三，谷口晴美：土壤凍結工法〔Ⅱ〕，冷凍，Vol. 36, No. 410, pp. 1082～1101.
- 4) 村山朔郎，柴田徹：粘土のレオロジー的特性について，土木学会論文集，No. 40，昭和31年，pp. 1～31.
- 5) Scheidegger, A. E., : Theoretical Geomorphology, Springer Verlag, Berlin, 1961, pp. 45.