



Title	凍土の一軸圧縮クリープ
Author(s)	木下, 誠一; KINOSITA, Seiiti
Citation	低温科学. 物理篇, 31, 261-269
Issue Date	1973-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18234
Type	departmental bulletin paper
File Information	31_p261-269.pdf



凍土の一軸圧縮クリープ*

木下 誠一
(低温科学研究所)
(昭和48年9月受理)

I. はし が き

凍土は、土粒子と氷と空気、それに不凍水から構成される。骨格を作る土粒子は、温度 0°C を境にして物理的特性に不連続な変化はないが、氷や不凍水は温度 0°C を境にして不連続な変化を示す。又、不凍水は土粒子表面に吸着する水分子からなるもので、その量は土粒子の種類や温度に大きく依存する。アナニャンによると¹⁾、たとえば吸着水を多く含む粘土質では温度の低下とともに不凍水分量は減少し、 -1°C で25% (凍土単位容積当り)、 -10°C で5%である。

圧縮に対する反応でも骨格分の土粒子は弾性的な特徴をもつが、氷は粘弾性的な特徴をもち、又不凍水は、自由な液体の水とは異なるものとはいえ、粘性的な特徴をもつ。従って凍土内の氷と不凍水は、凍土の圧縮に対する粘性的な特性、すなわちクリープ特性を助長する傾向にある。氷の圧縮粘性係数は温度が下がるとともに増大し、凍土をクリープしにくくする。このような観点から凍土のクリープ特性は温度に大きく依存することが予想される。

液化天然ガス貯蔵用の地下タンク建造のため、近い将来地下十数mも凍結することになっている千葉県袖ヶ浦地区から試料を採取し、一軸圧縮クリープ実験を行なった。実験には低温実験室内のスプリング式圧縮試験機を用い、 -1°C から -30°C までの温度範囲を用いた。

II. 実験試料

実験に用いた土は千葉県袖ヶ浦の地下14m 50cmから30m 5cmにわたって採取されたものである。18個の試料にAからRまでのアルファベット順の記号をつけ、それぞれの採取深度、土質、含水比を第1表の左側の欄に示した。土質は14m 50cmから16m 85cmまでは砂質ローム、16m 85cmから20m 95cmまでは砂、24mから30m 5cmまではシルト質ロームである。それらの粒度組成と土粒比重を第2表に示す。

採取された試料は直径7cmのステンレス円筒につめこまれたもので、これを削りながら少しずつ取り出した。従って実験試料は攪乱土である。取り出した土を、内面にテフロンテープを張りつけた直径7.5又は7.8cm、高さ20cmのブリキ円筒のなかへ、叩きながらつめこんだ。ブリキ円筒はたてに半分ずつ桶状のものを重ね合せ、接合部をボルト止めしたもので、ボルトを外すと内部の試料を取り出すことが出来る。ブリキ円筒につめたまま -20°C の低温室

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1268号

第 1 表

試料記号	採取深度 (m)	土質	含水比 (%)	密度 (g/cm ³)	間隙率 (%)	飽和度 (%)	荷重圧 (kg/cm ²)	温度 (°C)	実験時間 (分)	初期 試料長 (mm)	1時間後の クリープ 速度 1/hr
A	14.50~14.80	砂質ローム	25.3	1.88	43	88	10.2	-15	240	187	0.0027
				1.89			4.8	-8	90	186	0.013
				1.90			10.0	-8	15	181	
B	14.60~15.15	"	25.8	1.75	47	76	4.4	-15	120	195	0.003
				1.76			9.6	-15	170	193	0.0043
				1.77			1.1	-2	77	192	0.0013
				1.78			4.4	-30	122	190	0.000096
				1.78			9.6	-30	120	190	0.00015
C	14.80~15.20	"	32.0	1.76	49	87	4.5	-15	113	195	0.0026
				1.77			10.0	-15	78	193	0.0078
				1.78			4.3	-8.5	80	190	0.023
D	15.10~15.40	"	32.8	1.81	48	93	1.1	-3	104	167	0.0028
				1.82			2.2	-2	80	166	0.0095
E	16.50~16.85	"	33.8	1.80	49	93	12.0	-15	315	195	0.016
				1.87			4.3	-10	80	180	0.0067
F	16.85~17.15	砂	24.9	1.80	47	76	4.4	-12	231	194	0.0031
				1.82			4.4	-30	120	191	0.00021
G	17.00~17.45	"	36.7	1.80	52	93	4.6	-15	120	192	0.000063
				1.80			10.1	-15	120	191	0.00011
				1.80			4.6	-1	70	191	0.036
H	17.45~17.90	"	43.2	1.78	54	98	4.5	-15	120	194	0.00039
				1.78			10.0	-15	120	194	0.00082
				1.78			4.5	-2	75	194	0.043
I	19.50~19.95	"	24.4	1.90	44	85	4.5	-15	140	191	0.0012
				1.91			10.0	-15	120	189	0.0067
J	19.95~20.40	"	25.2	1.91	44	87	4.5	-15	120	193	0.006
				1.95			10.0	-15	120	187	0.0082
				1.98			9.5	-30	180	183	0.00066
K	20.45~20.95	"	25.3	1.68	51	66	10.1	-15	240	195	0.0047
				1.70			4.5	-10	121	190	0.0031
				1.72			9.8	-30	120	188	0.00024
L	24.00~24.45	シルト質ローム	51.2	1.54	60	87	4.6	-15	120	193	0.00014
				1.54			10.2	-15	120	192	0.00028
				1.55			4.6	-8	60	192	0.00042
				1.55			10.2	-30	120	192	0.000072
M	24.45~24.90	"	51.1	1.62	58	94	9.8	-15	32	194	0.00041
				1.62			4.5	-15	48	194	0.00026
				1.62			4.5	-9	75	193	0.00041
				1.62			9.8	-9	60	192	0.00083
				1.62			9.8	-30	120	192	0.000052
N	26.50~26.95	"	58.6	1.54	62	92	4.4	-15	120	193	0.00010
				1.54			9.6	-15	120	192	0.00021
				1.54			9.6	-30	120	192	0.000067
				1.54			4.4	-4~-5	47,700	190	0.0011
O	26.95~27.40	"	51.8	1.59	59	92	4.3	-15	120	195	0.00014
				1.59			9.5	-8	45	195	0.0013
				1.59			9.5	-30	120	194	0.000072
P	28.50~28.90	"	56.2	1.48	63	85	4.2	-15	120	196	0.00011
				1.49			9.2	-15	126	195	0.00023
				1.49			9.2	-30	120	194	0.000072
Q	28.90~29.30	"	58.0	1.59	61	96	4.4	-15	120	192	0.000088
				1.59			9.7	-15	120	192	0.00013
				1.59			9.7	-30	180	192	0.000093
R	29.60~30.05	"	65.0	1.54	63	96	1.1	-3	122	192	0.00024
				1.54			2.2	-4	120	191	0.00029
				1.55			4.4	-3	130	190	0.00092
				1.55			9.7	-4	110	190	0.0025

第 2 表

土 質	含水比 (%)	密 度 (g/cm ³)	間隙率 (%)	飽和度 (%)	粒 径			土粒比重
					<0.005 mm (%)	0.005~0.05 (%)	0.05 mm< (%)	
砂質ローム	25~34	1.76~1.9	43~49	76~93	10	25	65	2.63
砂	24~43	1.68~1.91	44~54	66~98	3	11	86	2.73
シルト質ローム	51~65	1.48~1.62	58~63	85~96	17~19	55~68	13~27	2.53~2.58

のなかに入れ凍らせてから、内部の試料を取り出した。

以上のように作った攪乱土試料の密度、間隙率、飽和度をそれぞれ第1表の相当欄に示す。その値は同じ土質についても多少ばらつくが、採取時の不攪乱土の値にほぼ近いものである。

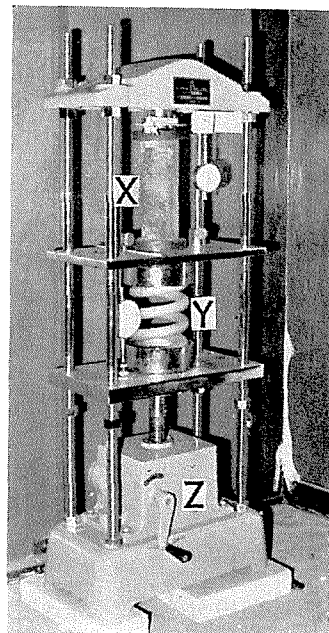
III. 実験方法

凍土の試料の上下両面をヤスリで平滑に仕上げ、低温実験室内のスプリング式圧縮試験機の試料台に設置した。試験機の写真を第1図に示す。頑丈な鉄枠で作られ、**X**が試料、**Y**が荷重を与えるスプリング、**Z**がスプリングの下端を押し上げるためのハンドルである。**X**の試料がはまっていると、ハンドルを廻すことによってスプリング**Y**が縮み、試料に荷重がかかる。スプリングの縮みは傍のダイヤルゲージで読み取れるので、指定の荷重にすることができる。用いたスプリングは、縮み4 mmで200 kg、7.4 mmで400 kg、17.5 mmで1,000 kgを示し、容量は1,000 kgである。

荷重をうけると試料が圧縮されるので、試料の縮みの分だけスプリングがのびる。定荷重を保つためには、ハンドルを廻し更にスプリングを縮めて指定の値に保つ。始めの間は試料の縮みが大きいので、以上の操作をたえずくり返すが、ほぼ10分もたつとハンドルをほんの僅か廻すにすぎなくなるので、適当な時間間隔をおいて操作するようにした。試料の縮みは試料載荷板と鉄枠との間にとりつけたダイヤルゲージで読み取る。荷重としては主として200 kgと400 kgを用い、たまに50 kg, 100 kg, 500 kgを用いた。

始めに試料に指定の荷重をかけるため、ハンドルを廻すのに数秒の時間がかかる。指定の値に達してから時間を測り始めた。このハンドル操作は手廻しなので、必ずしも常に同じ条件ではできない。

低温実験室内の温度を -1°C から -30°C までの間の一定の値に保った。各試料ごとに用いた荷重圧、温度、実験時間、初期試料長を第1表の相当欄に示す。一つの試料につい



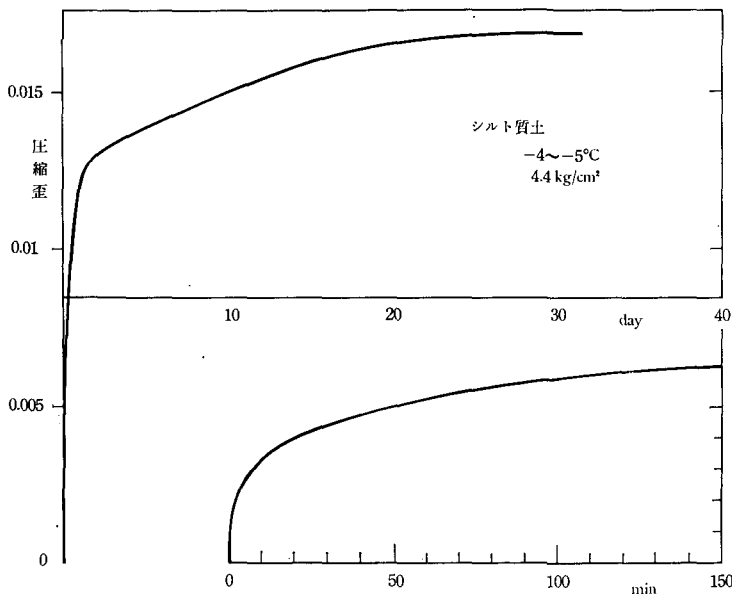
第1図 一軸圧縮試験機。**X**が凍土試料、**Y**が荷重を与えるスプリング(容量1トン)、**Z**がスプリングを縮めるためのハンドル

ては、一つの実験終了後、1日以上時間を置いて次の実験を行なった。その都度、上下両面を平滑に仕上げたので初期試料長は同じ試料について実験ごとに少し違う。同じ試料について数回圧縮実験を行なった。1回の圧縮量が小さいとはいえ、荷重を解いても完全にはもとの長さにもどらないので、加工硬化の経歴が効いている。

IV. 実験結果

(1) 圧縮歪一時間曲線 (第2~4図)

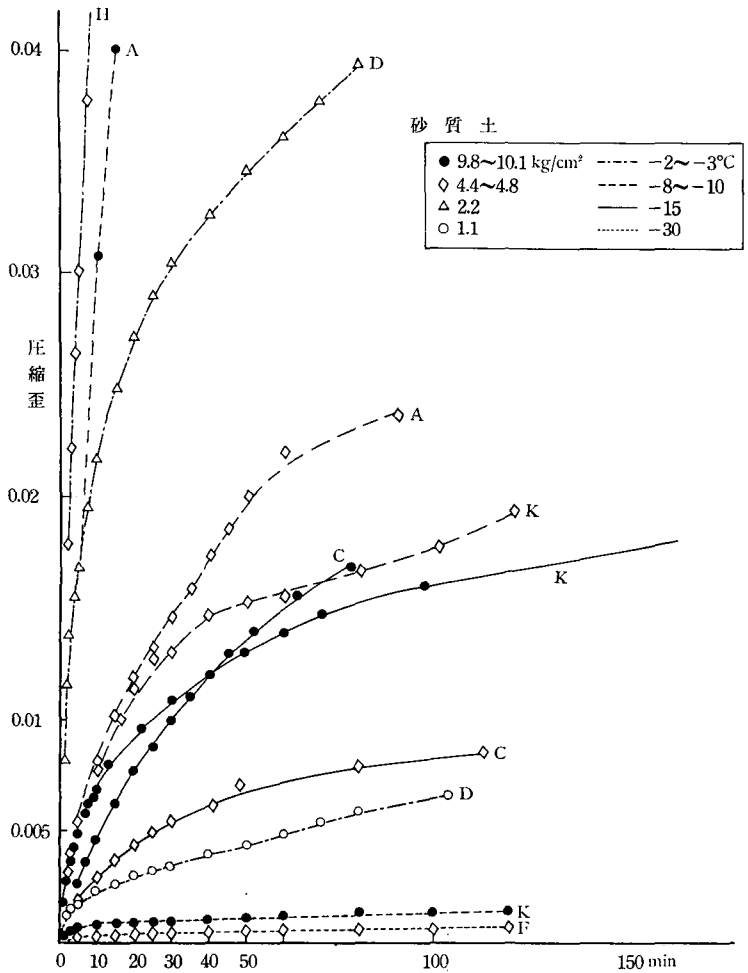
指定荷重に達してからの圧縮歪の増加と時間との関係を、代表的な例について第2~4図に示す。第2図は、地下26 m 50 cm から26 m 95 cm にわたって採取されたシルト質土(記号N)を40日もの長期間にわたって荷重を続けた場合である。10分をすぎる頃から歪速度はおそくなり、更に1日半をすぎる頃から再びおそくなる。30日あたりではほとんど変化しないといつてよい位になる。いろいろな条件を変えて実験をする都合上、他の例については大体2時間で実験を打切った。



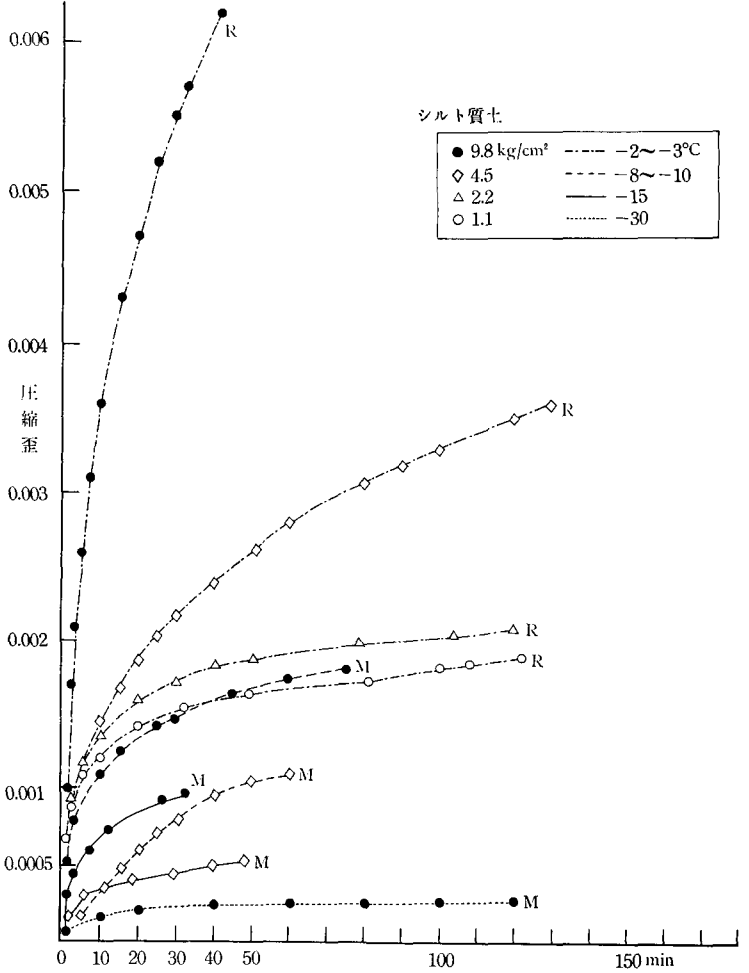
第2図 シルト質土(試料記号N)の圧縮歪一時間曲線。右下の曲線は横軸分単位で、上の曲線は日単位で表わされる

第3図には、砂質ロームと砂とを併せて砂質土として圧縮歪一時間曲線を示した。第2図と同じく10分位までは歪速度は速いが、以後次第に遅くなる。用いた荷重の違いで記号を変え、又温度の違いで結ぶ線の様子を変えた。荷重の大きいほど、又温度の高いほど、曲線は歪の大きい方へとずれる。

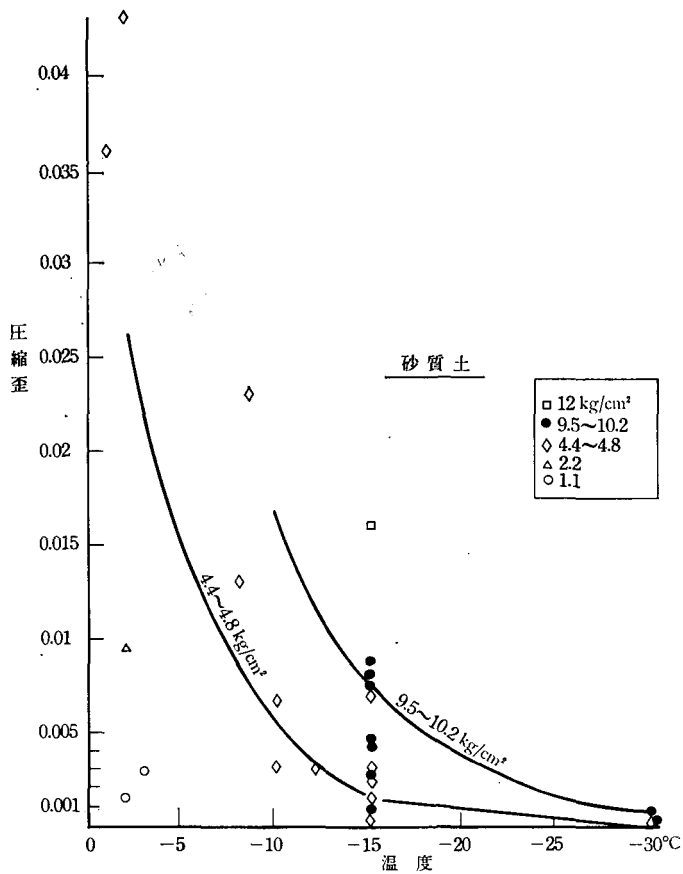
第4図は、20 m 45 cm より深い所にあるシルト質土について示した。荷重や温度に対する傾向は砂質土と同じであるが、同じ条件での圧縮歪はシルト質土の方がはるかに小さい。



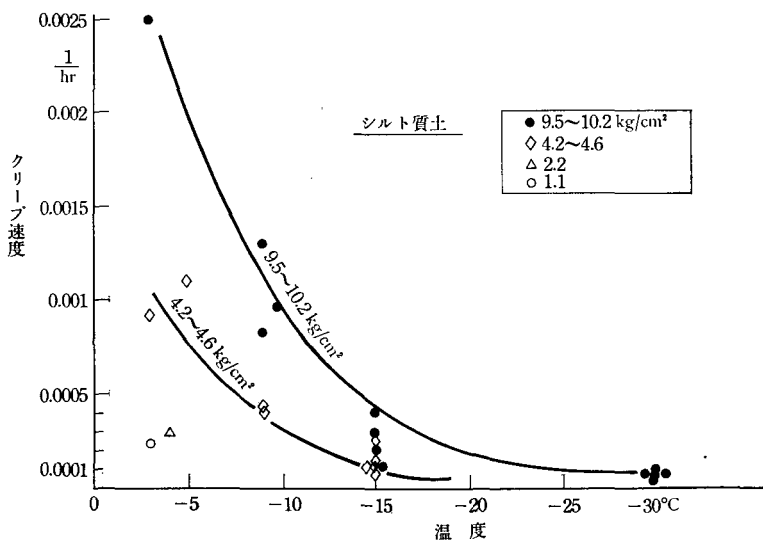
第3図 砂質土の圧縮歪一時間曲線。各曲線に付けた記号は試料記号を表わす



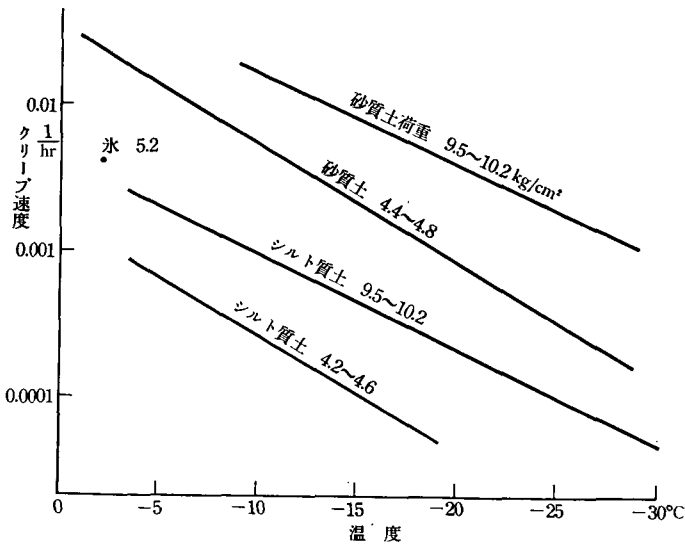
第4図 シルト質土の圧縮歪一時間曲線



第5図 砂質土の圧縮開始1時間後のクリープ速度と温度との関係



第6図 シルト質土の圧縮開始1時間後のクリープ速度と温度との関係



第7図 圧縮開始1時間後のクリープ速度と温度との関係の模式図

(2) クリープ速度—温度曲線 (第5~7図)

圧縮歪の挙動と温度との関係を解りよくするため、圧縮時間1時間のときの歪速度すなわちクリープ速度を取り出して、比較してみた。各実験についてのこのクリープ速度の値は、第1表の最右欄に示してある。

第5図は、破質土についてのもの、第6図はシルト質土についてのものである。温度が低くなるにつれ

てクリープ速度は急に減少する。9.5~10.2 kg/cm² と 4.2~4.6 kg/cm² 又は 4.4~4.8 kg/cm² のほぼ同じ荷重のときの測定点はそれぞれ一つの曲線で大体結ばれる。同じ荷重同じ温度では、砂質土の方がシルト質土の値の十数倍にもなっている。

この関係をもっと解り易くするため、片対数グラフを用いて模式的に第7図に示した。これらの直線について次の実験式が成立する。

砂質土

9.5~10.2 kg/cm²

$$\log \dot{S}_1 = -1.15 + 0.065 T$$

4.4~4.8 kg/cm²

$$\log \dot{S}_1 = -2.16 + 0.082 T$$

シルト質土

9.5~10.2 kg/cm²

$$\log \dot{S}_1 = -2.96 + 0.066 T$$

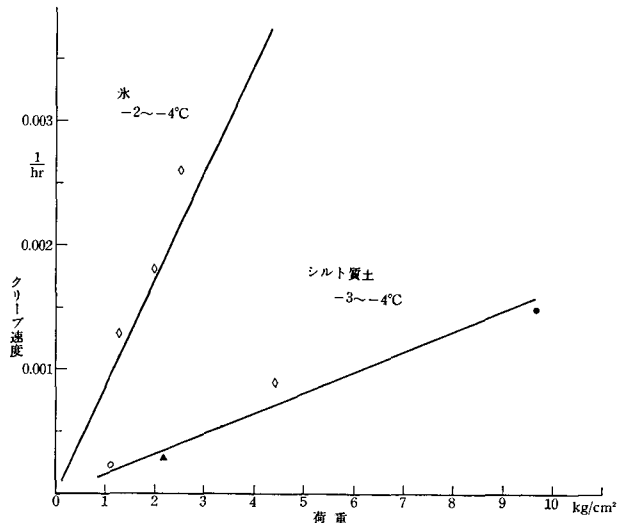
4.2~4.6 kg/cm²

$$\log \dot{S}_1 = -2.75 + 0.08 T$$

\dot{S}_1 はクリープ速度で単位は 1/hr, T は温度で °C である。

(3) クリープ速度—荷重曲線 (第8図)

1.1, 2.2, 4.4, 9.8 kg/cm² の4段



第8図 シルト質土のクリープ速度と荷重との関係

階にわたって荷重を変えて実験した例を第8図に示す。この範囲の荷重についてはクリープ速度は荷重とほぼ比例関係にあるとみてよい。

V. 考 察

凍土を構成する要素は、骨格の土粒に、氷と不凍水と空気である。このうちクリープ特性を助長さす傾向にあるものは氷と不凍水であることを I. で述べた。ラブロフ²⁾が求めた氷の圧縮粘性係数を第 3 表に示す。その数値は本実験の凍土の 1 時間経過時のクリープ速度から求めた粘性係数に比べると温度が低くなるにつれクリープしにくくなる傾向は同じであるが、その傾向は凍土の方がはるかに強い。つまり、凍土では 10°C 温度が下がると、クリープ速度は 1/10 以下になるが、一方氷では 1/2 にすぎない。そして温度の高いときは砂質土とシルト質土のほぼ中間になり、温度の低いときはいずれよりも小さい。

第 3 表 氷の粘性係数 (荷重 11~12 kg/cm²)

-3°C	-13°C	-23°C
2.6×10^{14} dyn·sec/cm ²	4.1×10^{14} dyn·sec/cm ²	6.9×10^{14} dyn·sec/cm ²

アナニャン¹⁾が求めた凍土内の不凍水分量を第 4 表に示す。ほぼ同じ粒度組成の土についてのものである。不凍水は温度が低くなるとともに減少するもので、クリープ速度を減少さす傾向にあることは間違いない。

第 4 表 凍土内の不凍水

	-1°C	-5°C	-10°C	-20°C
シルト質土 (%)	13	4	2.5	1.5
砂質土 (%)	2.5	0.5	0.2	0

砂質土はシルト質土に比べて、氷の含有量が少なく、又不凍水の含有量も少ない。クリープ特性を助長する氷や不凍水の含有量が少ないのに、砂質土の方はシルト質土の約 10 倍もクリープ速度が速い。土粒と氷や不凍水の内部結合の様子が両者で違うことに依存するものとは思うが、その原因については今の所よく解っていない。今後の検討をまつことにする。

福尾³⁾はシルト質粘土の凍土について、14~58.6 kg/cm² の大きな荷重のもとで、一軸圧縮クリープ特性を調べ、速度論を用いて解析を行なった。次の機会に、この実験結果を同じ方法でとりまとめ比較検討を行ないたい。

この実験に際し、東京ガス株式会社榎戸源則氏と宮田嘉明氏、又低温科学研究所大学院生藤井俊茂氏に御協力をいただいた。ここに感謝の意を表する次第である。又この実験に用いた費用の一部は、凍上臨時事業費によってまかなわれた。

文 献

- 1) Ананян, А. А. 1966 Оценка толщины слоев незамерзшей воды в мерзлых горных породах. Мерзлотные Исследования, вып. VI, Издательство Московского Университета, Москва, 221-228.
- 2) Лавров, В. В. 1969 Деформация и прочность льда. Гидрометеорологическое Издательство, Ленинград, 206 pp.
- 3) 福尾義昭 1971 凍土の一軸圧縮クリープについて. 昭和47年度雪氷学会講演集, 87.

Summary

Cylindrical samples of frozen soil (diameter : 7.5-7.8 cm, height : 19-19.5 cm) were compressed uniaxially by a spring-type compression apparatus (Fig. 1). They shrank rapidly in the first few minutes and then slowly (Fig. 2). This is a typical creep property. Shrinking speeds divided by original lengths, that is, creep velocities, were obtained 1 hour after the beginning of each shrinking and were compared with each other as to soil types (sandy and silty), temperatures (-1° - -30° C) and overburden pressures (1-12 kg/cm²) used. Values of creep velocity for sandy soils were about ten times larger than those for silty soils, decreased exponentially with lowering temperatures for both soils (Figs. 3-7), and increased linearly with increasing pressures (Fig. 8) for both soils.

Frozen soil is composed of soil particles, ice, air and unfrozen water. Unfrozen water is formed by water molecule layers adsorbed to soil particles, and does not freeze at 0°C. The reason why the frozen soil has the above-mentioned creep property is due to the existence of ice and unfrozen water within the network skeleton structure of soil particles: The ice and the unfrozen water have a viscous property, the viscosity coefficient of ice and the volume content of unfrozen water decreased with lowering temperatures.