

Title	凍土の一軸圧縮クリープ
Author(s)	木下,誠一
Citation	低温科學. 物理篇, 31, 261-269
Issue Date	1973-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18234
Туре	bulletin (article)
File Information	31_p261-269.pdf



Seiiti KINOSITA 1973 Creep Property of Frozen Soil. Low Temperature Science, Ser. A, 31. (With English Summary p. 269)

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 ている千葉県袖ケ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,一1℃から -30℃ 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 14 m 50 cm から 30 m 5 cm 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 14 m 50 cm から 16 m 85 cm までは 砂質ローム,16 m 85 cm から 20 m 95 cm までは砂,24 m から 30 m 5 cm 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 7 cm 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 7.8 cm,高さ 20 cm 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樋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℃ 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	採取深度	土質	含水比	密度	間隙率	飽和度	荷重圧	温度	実験時間	初 期 試料長	1時間後の クリープ
号	(m)		(%)	(g/cm ³)	(%)	(%)	(kg/cm ²)	(°C)	(分)	(mm)	迷 沒 1/hr
A	14.50 ~ 14.80	砂質ローム	25.3	1.88 1.89 1.90	43	88	10.2 4.8 10.0		240 90 15	187 186 181	0.0027 0.013
В	14.60~15.15	"	25.8	1.75 1.76 1.77 1.78 1.78	47	76	4.4 9.6 1.1 4.4 9.6		120 170 77 122 120	195 193 192 190 190	0.003 0.0043 0.0013 0.000096 0.00015
С	14.80 ~ 15.20	"	32.0	1.76 1.77 1.78	49	87	4.5 10.0 4.3	15 15 8.5	113 78 80	195 193 190	0.0026 0.0078 0.023
D	15.10~15.40	"	32.8	1.81 1.82	48	93	1.1 2.2	-3 -2	104 80	167 166	0.0028 0.0095
E	16.50 ~ 16.85	"	33.8	1.80 1.87	49	93	12.0 4.3	15 10	315 80	195 180	0.016 0.0067
F	16.85 ~ 17.15	60	24.9	1.80 1.82	47	76	4.4 4.4	-12 - 30	231 120	194 191	0.0031 0.00021
G	17.00~17.45	"	36.7	1.80 1.80 1.80	52	93	4.6 10.1 4.6	-15 -15 -15 -1	120 120 70	192 191 191	0.000063 0.00011 0.036
Η	17.45 ~ 17.90	"	43.2	1.78 1.78 1.78	54	98	4.5 10.0 4.5		120 120 75	194 194 194	0.00039 0.00082 0.043
I	19.50~19.95	"	24.4	1.90 1.91	44	85	4.5 10.0		140 120	191 189	0.0012 0.0067
J	19.95 ~ 20.40	"	25.2	1.91 1.95 1.98	44	87	4.5 10.0 9.5		120 120 180	193 187 183	0.006 0.0082 0.00066
K	20.45 ~ 20.95	"	25.3	1.68 1.70 1.72	51	66	10.1 4.5 9.8	15 10 30	240 121 120	195 190 188	0.0047 0.0031 0.00024
L	24.00~24.45	シルト質ローム	51.2	1.54 1.54 1.55 1.55	60	87	4.6 10.2 4.6 10.2	15 15 8 30	120 120 60 120	193 192 192 192	0.00014 0.00028 0.00042 0.000072
Μ	24.45 ~ 24.90	"	51.1	1.62 1.62 1.62 1.62 1.62	58	94	9.8 4.5 4.5 9.8 9.8		32 48 75 60 120	194 194 193 192 192	0.00041 0.00026 0.00041 0.00083 0.000052
Ν	26.50 ~ 26.95	"	58.6	1.54 1.54 1.54 1.54	62	92	4.4 9.6 9.6 4.4	-15 -15 -30 -4~-5	120 120 120 47,700	193 192 192 190	0.00010 0.00021 0.000067 0.0011
0	26.95 ~ 27.40	"	51.8	1.59 1.59 1.59	59	92	4.3 9.5 9.5		120 45 120	195 195 194	0.00014 0.0013 0.000072
Р	28.50 ~ 28.90	"	56.2	1.48 1.49 1.49	63	85	4.2 9.2 9.2	15 15 30	120 126 120	196 195 194	0.00011 0.00023 0.000072
Q	28.90~29.30	"	58.0	1.59 1.59 1.59	61	96	4.4 9.7 9.7		120 120 180	192 192 192	0.000088 0.00013 0.000093
R	29.60 ~ 30.05	"	65.0	1.54 1.54 1.55 1.55	63	96	1.1 2.2 4.4 9.7	$ \begin{array}{r} -3 \\ -4 \\ -3 \\ -4 \end{array} $	122 120 130 110	192 191 190 190	0.00024 0.00029 0.00092 0.0025

第 2 表

						粒		径	
土	質	含水比	密度	間隙率	飽和度	<0.005 mm	0.005~0.05	0.05 mm <	土粒比重
		(%)	(g/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
砂質口	- 4	25~34	1.76~1.9	43~49	76~93	10	25	65	2.63
他		24~43	1.68~1.91	44~54	66 ~ 98	3	11	86	2.73
シルト質		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ア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アルゲー 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日以上の時間をお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 分をすぎる項から歪速度はおそ 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 いってよい位になる。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。



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,20m45cm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。



凍土の一軸圧縮クリー



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

266



(2) クリープ速度一温度曲線(第5~7図)

E縮歪の挙動と温度と の関係を解りよくするた め、E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



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。

267

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L.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ブ速度から求め 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	$4.1 \times 10^{14} \text{ dyn} \cdot \text{sec/cm}^2$	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:	±	内	D	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 (%	o) 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。

1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 -

文 献

- Ананян, А. А. 1966 Оценка толщины слоев незамерзшей воды в мерзлых горных породах. Мерзлотные Исследования, вып. VI, Издательство Московского Университета, Москва, 221-228.
- 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 $(-1^{\circ}--30^{\circ}C)$ and overburden pressures $(1-12 \text{ kg/cm}^2)$ 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.