

凍土の温度及湿度が耐荷力に 及ぼす影響

※ 原 田 干 三

要 旨

冬季地中深く凍結する寒氣厳しき地域及永久凍土の賦存する酷寒地帯に、道路、鐵道、橋梁、其他構造物を建造する際、凍土の耐荷力如何といふ問題は根本的重要性を有するものである。凡そ凍土の耐荷力は、凍土の温度、湿度、組成及形態等に基據する。本文はエ・エム・グメンスカヤ氏の實驗を骨子とし首題の下に叙述せるものである。

内 容

§ 1. 緒 言

§ 2. 凍土の温度が壓縮強さに及ぼす影響。

- a) 粘土質土壤
- b) 沈泥質土壤
- c) 砂土質土壤

§ 3. 凍土の湿度が壓縮強さに及ぼす影響。

- a) 粘土質土壤
- b) 沈泥質土壤
- c) 粘土質土壤

§ 4. 結 言

§ 1. 緒 言

零下40°, 50°といふ酷寒地に土木構造物を建造すべき必要性は、滿洲國建國以來の事に屬して、従つて目下各機關に於て種々調査研究が遂行されつゝあるも、何分日尙淺く、ロシア人の酷寒に對する經驗と調査研究に對し立遅れの感あるは己むを得ない。曾てサヴエートに於ては、其の成立當時諸工業先進國に對し「追ひ付け追ひ越せ」をモットーとして懸命な努力を拂つた、又現に拂ひつゝある。此のモットーは、酷寒技術に關する限り、現下の吾國に其儘適用し得るのではなからうか。目下の國際情勢に處する技術者として、「追ひ越す」すべく懸命の努力を拂ふといふ事は最も大なる技術奉國ではなからうか。筆者は此の目的達成の爲にロシア技術研究に邁進してゐるのである。而て先づロシアの酷寒技術を吾國へ導入すべきであり、此の目的の一つとして本稿は執筆せるものである。

凍土の耐荷力、夫に關聯して凍土の温度及湿度が地耐力に如何に影響を及ぼすかと云ふ問題は、

寒地に活躍する技術の最も知り度い事の一つであると思ふ。先づ試験方法の概要を述べ、次に試験結果を掲げ、最後に結論を導く事とする。

試験方法は、試料は土壤の三代表即ち粘土質、沈泥質及砂土質土壤を採用し、之等を試料作製用鑄型に詰め、均等な密度及温度を得る爲、アムスラー5冠試験機に據り緩除に壓縮した。壓密した後試料を鑄型から取出し、その寸法及重量を測り、次で冷凍室に入れて凍結せしめた。

本試料の組成及物理的性質を次に表示すれば、表-1、表-2 の如し。

表-1. 試料凍土の組成

土 壤	粒 徑 m.m.	組成						
		3~1	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	0.001
粘 土		—	1.4	1.6	10.8	49.8	16.9	19.5
砂 土 質 土 壤		0.7	39.1	28.7	12.7	10.4	8.4	—
沈 泥 質 土 壤		—	0.8	3.9	15.9	46.8	26.3	6.3

表-2. 試料凍土の物理的性質

土 壤	眞の比重	見 掛 の 比 重		濕 度 %		アツテルベルグ定数	
		密なる 状 態	粗脆なる 状 態	飽水状態	最大 含水率	流動限界	可塑性限界
粘 土	2.72	1.60	1.12	28.9	43.8	39.3	23.3
砂 土 質 土 壤	2.65	1.70	1.26	16.4	25.8	13.0	限界なし
沈 泥 質 土 壤	2.39	1.04	0.73	—	45.0	37.9	31.4

備考 最大含水率は粗脆状態に於ける含水量の最大値を示すものである。

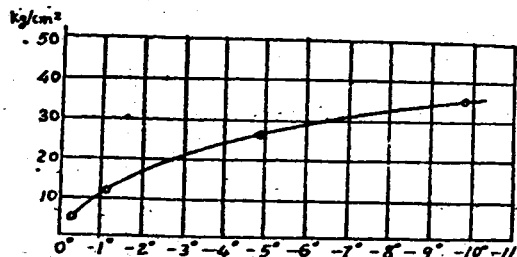
§ 2. 凍土の温度が壓縮強さに及ぼす影響。

永久凍土の温度は零度附近から-5°、-7°位のものであり、就中南方ザバイカル地方及アムール地方の永久凍土は零度附近或は-2°~-3°である。〔拙著「ロシア土木工学の研究」第一輯参照〕。然しマイナス温度の影響を闡明にする目的より-10°附近の温度に対しても実験を行つた。都合-0.3°、-1.5°、-5°、及-10°の4種に就て研究した。

a) 粘土質土壤

粘土質土壤の壓縮強さと温度との関係は、土壤が完全に水により飽和された状態に在る場合、即ち含水率約45%の場合に對し求めた。其の結果は表-3、及圖-1 に示す如し。

圖-1. 粘土質凍土の壓縮強さと温度との關係



表—3. 粘土質凍土の壓縮強さと温度との關係。

温 度 oc	含 水 率 %	壓 縮 強 さ kg/cm ²
-0.3	43.0	6.1
-1.5	47.7	16.0
-4.9	49.5	31.0
-10.1	46.6	50.0

上記結果より、(1) 温度の低下に従ひ壓縮強さは著しく増大する。

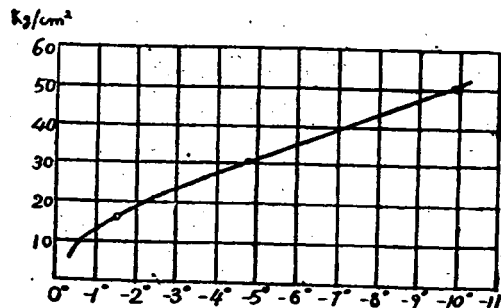
(2) 壓縮強さと温度とは、最初曲線をなすが、温度の低下(-5°以下)するに従ひ直線となる。

(3) 本試料の總てに對し、壓縮強さに伴ふ否は同一性状を有し、破壊は主剪斷應力面附近の龜裂に基因した。

(b) 沈泥質土壤

沈泥質土壤の壓縮強さと温度との關係は、前者と同じく、土壤が完全に水により飽和された状態に在る場合、即ち含水率が乾燥土壤の重量の約54%なる場合に對し求められた。其の結果を圖示せるものが圖—2 である、表示せるものが表—4 である。

圖—2. 沈泥質凍土の壓縮強さと温度との關係。



表—4. 沈泥質凍土の壓縮強さと温度との關係。

温 度 oc	含 水 率 %	壓 縮 強 さ kg/cm ²
-0.3	58.7	4.7
-1.1	52.1	11.7
-4.6	58.2	26.1
-9.8	61.3	34.7

上記結果より、沈泥質土壤に於ける壓縮強さと温度との關係は粘土質土壤と同一性質を帯びるをみる。但し沈泥質凍土の壓縮強さは粘土質土壤に比し弱小である。

(c) 砂土質土壤

砂土質土壤の壓縮強さと温度との關係は、これまた土壤が完全に水により飽和された場合(含水

率約25%)に就て求めた。其の結果は圖-3及表-5に示す。

圖-3. 砂土質凍土の壓縮強さと温度との關係。

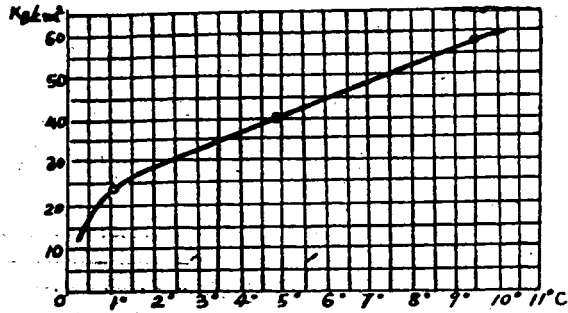
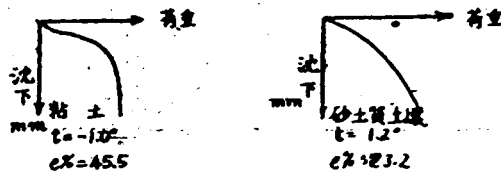


表-5. 砂土質凍土の壓縮強さと温度との關係。

温度 °C	含水率 %	壓縮強さ kg/cm ²
-0.3	21.2	11.7
-1.1	21.3	24.5
-5.2	20.8	39.5
-9.5	25.82	58.3

上記結果より、砂土質土壤の壓縮強さも温度の降下と共に増大し、其の曲線の性状も粘土質及沈泥質土壤と類似するを見る。但し至の性状は異り、之を荷重と沈下量とを縦横距にとつて圖示すれば圖-4の如く。

圖-4. 凍土の荷重-沈下圖



砂土質土壤は、温度-0.3°及-1.0°に於て完全なる飽水状態にある時可塑性歪を生じ、始めより曲線をなしたるに反し、粘土質及沈泥質土壤は當初は直線をなした。

粘土、沈泥質及砂土質土壤の壓縮強さに對する性状を闡明にする爲、1°に付いての壓縮強さの増加率を表すれば表-6の如し。

表-6. 凍土の壓縮強さの増加表

土 壤	1°に付ての壓縮強さの増加 kg/cm ²		
	-0.3°~-1.0°の間	-1.0°~-4.9°の間	-4.9°~-9.9°の間
粘 土	9.62	4.52	3.80
沈 泥 質 土 壤	8.75	3.78	1.75
砂 土 質 土 壤	16.00	4.14	4.77

上表より、凍土の壓縮強さは -0.3° ~ -1.0° の間に於て急激に増加し、殊に砂土質土壤は顯著であるを知る。

以上述べし凍土は充分飽水された場合であつたが、乾燥せる凍土に對してはマイナス温度は如何に壓縮強さに影響を及ぼすか。之を闡明にする目的で砂土質土壤(乾燥重量の12%の含水率を有す)に就て、温度 -0.6° 、 -5.0° 、 -10.0° 、及 -15.0° の4種に就て補足的實驗を行つた。實驗結果は圖-5 及表-7 の如し。

圖-5. 飽水状態にあらざる砂土質土壤(含水率12%)の壓縮強さと温度との關係。

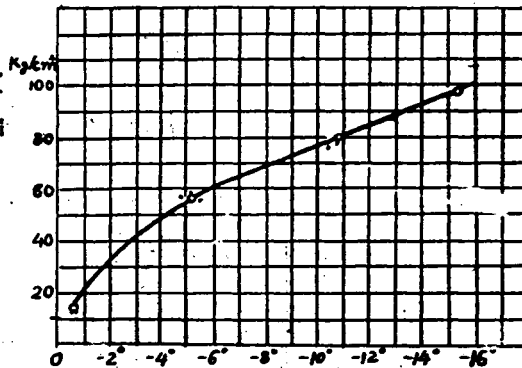


表-7. 飽水状態にあらざる砂土質土壤(含水率12%)の壓縮強さと温度との關係。

温度 °C	含水率 %	壓縮強さ kg/cm ²
-0.6	11.5	14.3
-5.1	11.7	56.3
-10.6	11.0	78.8
-15.3	11.1	96.9

上記結果より、飽水状態にあらざる砂土質土壤の壓縮強さは、飽水状態のものに比して増大なるを見る。又圖示の如く、壓縮強さと温度との關係曲線の性状も兩者の間に差異點をみる。又至の状況は石材の至に類似し可塑性を示した。

§ 3. 凍土の湿度が壓縮強さに及ぼす影響。

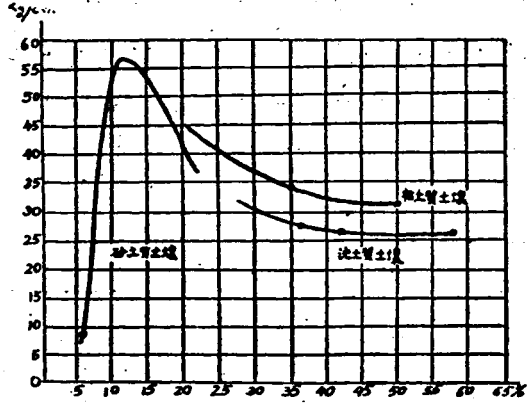
自然状態下にあつては、普通土壤は密實なもの程含水率は少い。従つて所期の含水率を有する様壓縮して試料を作製した。永久凍土地方の土壤は、充分飽水状態にあるか又は夫に近い状態にある事が多い。それ故土壤が最大含水率を有する時の壓縮強さに對して、特に注意が拂はるべきであるが、然し壓縮強さに及ぼす温度の影響を闡明にするには、飽水状態のみならず種々の温度に就いても研究する必要がある。實驗は此の見地から行つた。

a) 粘土質土壤

粘土質凍土の壓縮強さは、その含水率が21%、30%、35%及50%の各場合に對して研究した。之等の場合土壤は充分飽水状態にあつたのであるが、密度が異つてゐた。因に之等の温度は自然状

願下の永久凍土の各場合を網羅してゐると思ふ。實驗結果は圖—6 及表—8 に示す。

圖—6. 各種凍土の壓縮強さと温度との關係。



表—8. 粘土質凍土の壓縮強さと温度との關係。

含水率 %	試験時の試料の温度 °C	壓縮強さ kg/cm ²
21.2	-5.0	44.0
25.8	-4.6	40.8
30.6	-4.8	36.5
34.9	-4.6	33.7
49.5	-4.9	31.0

上記結果より、温度の増加するに従ひ凍土の壓縮強さは減少する。従つて最大含水率の場合に壓縮強さは最弱である。

之は凍土の間隙に存在する氷が凍土よりも壓縮強さが弱いといふ事實より説明し得ると思ふ。即ちエム・イ・スムギン氏がトムスク市のトミ河の氷を調査したる報告に據れば、表—9 の如くである。

表—9. a. 氷 (上層) の壓縮強さと温度との關係。

氷の温度 °C	結晶軸に平行方向の壓縮強さ kg/cm ²	結晶軸に垂直方向の壓縮強さ kg/cm ²
0~2°	20.7	18.6
-8~-10°	28.9	25.2

表—9. b. 氷 (中間の層) の壓縮強さと温度との關係。

氷の温度	結晶軸に平行方向の壓縮強さ kg/cm ²	結晶軸に垂直方向の壓縮強さ kg/cm ²
0~2°	35.8	28.2
-8~-10°	32.8	33.5

表—8. と表—9. とを比較して、即ち粘土質凍土と氷とを比較して分明する如く、温度—4.6—5.0°, 湿度21~30%なる粘土質凍土の壓縮強さは36~44kg/cm²であるに對し、氷の夫は大約22~32kg/cm²であり、氷の方が弱小である事を知る。次に粘土質凍土の含水率の多き場合例へば34%以上の場合の壓縮強さは、氷の夫と殆んど匹敵するを知る。

従つて粘土質凍土の壓縮強さは、温度の増大と共に減小する筈である。

b) 沈泥質土壤

沈泥質土壤もまた數種の温度、即ち30%, 36.5%, 42.1% 及 58.2%の場合に於て飽水状態にある場合の壓縮強さを測定した。因に之等各場合の試料は、壓縮によつて種々の密度を與へたのである實驗結果は、圖—6 (前掲) 及表—10に示す。

表—10. 沈泥質凍土の壓縮強さと温度との關係。

含 水 率 %	試験時の試料の温度 °c	壓縮強さ kg/cm ²
30.1	-4.7	30.2
36.5	-5.0	27.4
42.1	-4.6	26.4
58.2	-4.9	26.1

上記結果より、沈泥質凍土も亦、粘土質凍土と同じく、温度が増加するに従ひ壓縮強さは規則正しく減少する。又沈泥質凍土の温度—壓縮強さ・曲線は粘土質凍土の夫とよく似てゐるが、全體的に壓縮強さは小であるを知る。之は、土壤の物理的組成の差異と沈泥質土壤中に含有する有機物質に據るものである。

c) 砂土質土壤

砂土質土壤の壓縮強さに對する温度の影響は、土壤が飽水状態にある6%, 9%, 11%及18~22%の場合に就て求められた。得られた結果は圖—6 (前掲) 及表—11. に掲ぐ。

表—11. 砂土質凍土の壓縮強さと温度との關係。

含 水 率 %	試験時の温度 °c	壓縮強さ kg/cm ²
6.0	4.9	9.1
9.3	4.5	48.0
11.0	4.1	55.5
11.7	5.1	56.3
20.8	5.2	39.5

上記より、砂土質土壤は、粘土質及沈泥質土壤とは、大いに性状を異にし、即ち或一定の含水限度迄 (本例は11.7%迄) は温度が増加するにつれ壓縮強さも急激に増加するが、其の限度を越える

と却つて減小するを見る。之は前述の如く氷に基因するのである。

§ 4. 結 言

上述せし各種凍土の温度及湿度が壓縮強さに及ぼす影響に就て結論を下せば次の如くなる。

(1) 凍土の壓縮強さはマイナス温度に基據する。即ちマイナス温度の低下するにつれ總て凍土の壓縮強さは増大する。

(2) 凍土の壓縮強さは零度附近の低いマイナス温度に於て急激な變化をなす。即ち此の附近に於ける僅小なる温度の低下は、急激に壓縮強さを増大する。

(3) 凍土の歪性状は、砂土質土壤に對するものと粘土質及沈泥質土壤に對するものとは大いに異なる。即ち前者は可塑性なるに對し後者は然らず。但し温度 -5° 以下になれば兩者の歪は類似してくる。

(4) 粘土質及沈泥質土壤は湿度を増すに従ひ壓縮強さを減少する。砂土質土壤は或る一定の限度迄は湿度の増加に従ひ壓縮強さを増大すれど此の限界を超過したる後は却つて湿度の増加に従ひ壓縮強さを減小する。

(5) 物理的性状よりの最大壓縮強さは砂土質土壤に見られる。

◆ 本會販賣圖書 ◆

推奨すべき簡易舗装の構造と維持

東京市土木局管理課長 山 本 享 著 定價 ¥1.00

内 容 目 次	10. 表面處理
1. 總 說	11. 表面處理と交通
2. 簡易瀝青舗装の沿革	12. 表面處理と氣象
3. 簡易瀝青舗装の語義	13. 表面處理と周圍の狀況
4. 路盤と表層	14. 表面處理の材料
5. 路盤の沈下量測定方法	15. 表面處理の破損原因
6. 舗装の龜裂と路盤沈下量	16. 表面處理の維持
7. 路盤厚と沈下量	17. 表面處理の修繕方法
8. 表層とフレキシビリティー	18. 表面處理の築造と維持費
9. フレキシブルサーフェーシングと骨材の粒度	19. 多層式表面處理