



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	冷蔵倉庫床下の多年凍結土について
Author(s)	木下, 誠一; KINOSITA, Seiti; 福田, 正己 他
Citation	低温科学. 物理篇, 35, 295-306
Issue Date	1978-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18346
Type	departmental bulletin paper
File Information	35_p295-306.pdf



冷蔵倉庫床下の多年凍結土について*

木下 誠一・福田 正己

(低温科学研究所)

井上 正則・武田 一夫

(北海道大学大学院 理学研究科)

(昭和52年10月受理)

I. 緒 言

東京芝浦にある冷蔵倉庫の床下の土が長年にわたって凍っていた。この土は東京低地といわれる沖積低地で、凍結層の厚さは、倉庫中央(道路側から約11 m)で6 mほど、道路側に近づくに従い薄くなり、凍結前面は深さ方向へ弓状になっていた。倉庫中央では床面が66 cmも凍上していた。床面構造は、表層がステコン10 cm、その下に断熱材としての炭化コルク20 cm、更にその下にコンクリートが10~25 cmあり、その下は直接土に接していた。このような構造であるため、1年以上も倉庫内の低温(-20°C前後)が保たれると、土は凍り始める。更に年月を経ると、凍結層は厚さを増して行く。調査時点の昭和51年には、ほぼ40年を経過していた。たまたま、この凍土層をボーリングして、凍ったままの不攪乱試料を取出す機会を得た。この凍土試料の層構造を観察し、単位体積重量、重量含水比等を測定した。又、圧縮試験や、解凍後の再凍結試験による凍上性の検討も行なった。

II. 調査方法

この冷蔵倉庫は破損のため、昭和51年3月はじめに冷却を中止し、取壊しにかかった。床下の凍土のボーリングは、それより3カ月後の6月中旬に行なわれた。倉庫内の数カ所で、直径10 cmの円筒形の凍土が、凍土層の上から一番下まで採取された。50~100 cmごとに切断された凍土試料は、縦二つ割型上下蓋付の鉄円筒につめられ、ドライアイスと共に断熱箱に格納されて、低温科学研究所の低温室まで運ばれた。

調査は次の項目について行なわれた。

1. 層構造の観察

低温室で格納箱から取出された凍土試料をダイヤモンド刃先のついた岩石用カッターで、長さ10 cmごとに輪切りにした。これらの凍土塊を更に層の鉛直方向にそって、ほぼ中央から2つに縦割りにした。切断面を布でみがき観察した¹⁾。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第1847号

2. 単位体積重量

縦割りにされた凍土塊の片方から、100~200 グラムの小塊をハンマーで削りとり、これの空気中の重量 m gr, ケロシン中に浸したときの重量 m' gr を測定する。ケロシンの密度を ρ' gr/cm³ とすると、凍土の単位体積重量 ρ gr/cm³ は、 $\rho = \frac{m\rho'}{m-m'}$ で与えられる²⁾。

3. 重量含水比

単位体積重量を測定した小塊を、そのまま 110°C で 1 日間炉乾燥し、その重量 m'' gr を測定する。重量含水比 w は、乾燥土重量 m'' gr に対する蒸発水分量 $(m-m'')$ gr の比で与えられる。即ち、 $w = \frac{m-m''}{m''}$ 。

4. 圧縮試験

縦割りにされた凍土塊を断面 6×6 cm, 高さ 10 cm の直方体に整形して、一軸圧縮試験を行なった。温度は -3°, -10°C, 圧縮速度は 3 mm/min (歪速度 3% /min) であった³⁾。

5. 再凍結試験

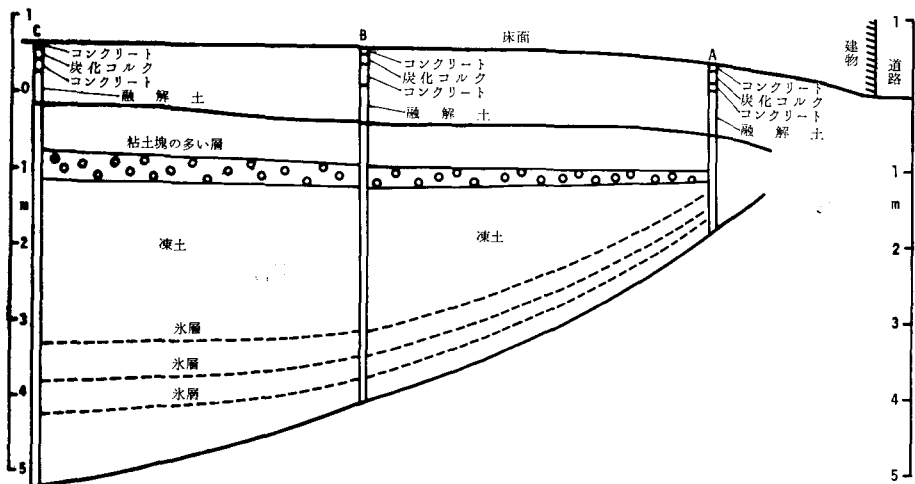
いくつかの試料を低温室から常温室に持ち出し、そのまま解凍した。出来るだけ乱さないようにして、凍上試験用のプラスチック容器に入れた。試験に際しては、試料上面を -2°C 又は -5°C に、下面を +4°C 又は +5°C に保ち、側面を断熱材で蔽った。試料容器内の水位を試料上面か又は容器底面より 1 cm 上に保った。試料上面の凍上量の時間的变化をダイヤルゲージを用いて測定した⁴⁾。

6. その他

若干の試料について、粒度分布、粒比重、粒の比表面積を測定した。

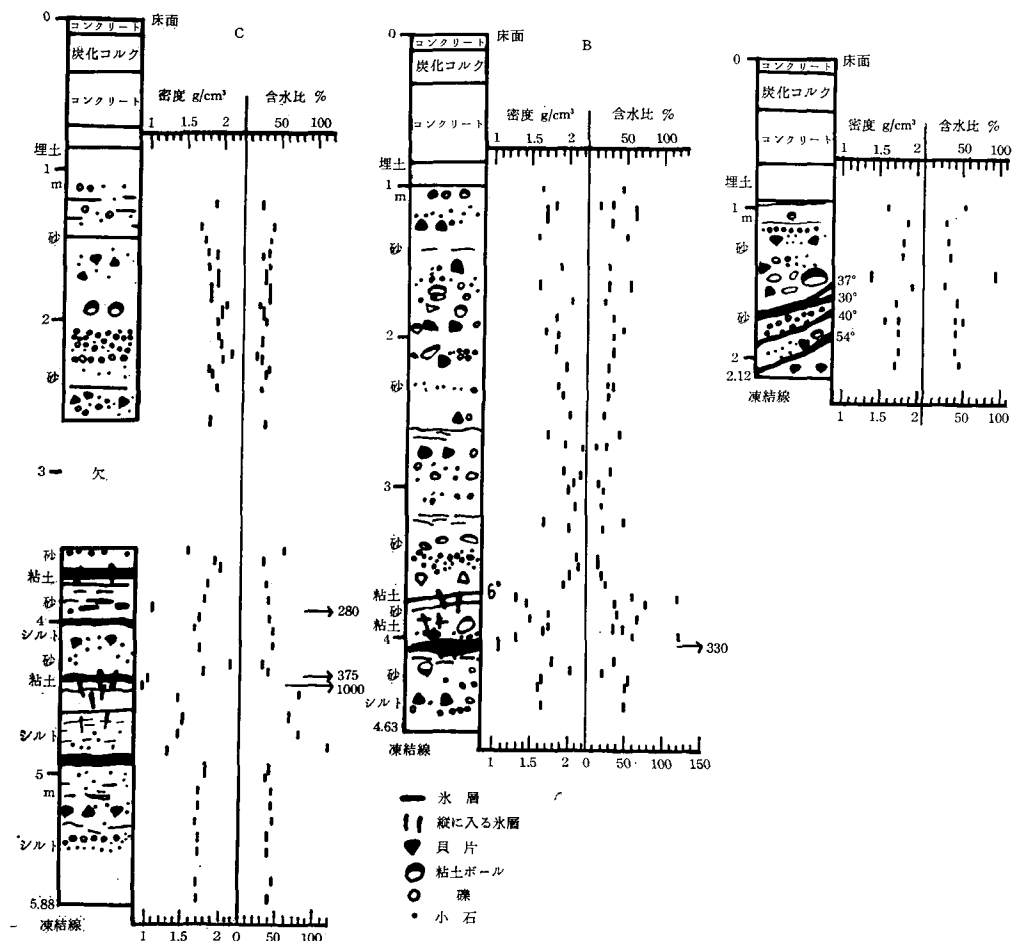
III. 凍土層の状況

調査を行なった凍土試料は、第 1 図に示すよう、に道路側から 2 m 15 cm (A), 6 m 80 cm (B), 11 m 15 cm (C) の三点から採取された。C 点は倉庫のほぼ中央である。倉庫建物の道路側に接する床面を基準とした凍上量は、A で 40 cm, B で 59 cm, C で 66 cm であった。凍土層



第 1 図 冷蔵倉庫床下の凍土層の分布状況

は、Aで2 m 12 cm、Bで4 m 63 cm、Cで5 m 88 cmの深さ(それぞれの床面から)まで達していた。道路側からの熱的影響のため、凍土層は道路側に近づく程薄くなる。床面構造は、上からステコン、炭化コルク、コンクリートの順になって居り、その下に土が接している。土の最上部20 cmほどは埋土である。倉庫内の冷却が続く限り、このコンクリートの下の土は当然凍ったままであるが、調査時点では、冷却停止後3カ月を経ていたため、床面に暖気が進入して、既に土の上部は融解していた。その融解土の厚さは、第1図に示される通りであるが、Aで60 cm、Bで48 cm、Cで44 cmに達していた。これらA、B、C三点及び他のボーリング点における温度測定の結果を考慮して、凍土層の形態を第1図に示した。道路に近い方は、道路から熱影響と、冷却停止後3カ月経過ということのため、凍土層は局所的にかなりとけた所もあった。しかし、倉庫内の低温が続いていたときには、凍土層は建物外壁の鉛直下面よりも道路側の方へかなりのび出ていることが想像される。又、第1図に示した凍土層の形態も、もう少し深くまで進んでいた。と推定される。従って、全体の凍上率としては、12~13%が考えられる。ここでは、調査時点における凍土層の状況についてだけ述べる。



第2図 凍土断面の構造と密度・含水比の分布

A, B, C 三点における凍土層の断面構造の見取図と、単位体積重量（密度）、重量含水比の分布を第 2 図に示す。凍土層はすべて砂が主体であるが、沖積低地特有の複雑な様相を示している。即ち、所々にシルトか粘土の間層をはさみ、又、礫、小石、貝殻片や粘土塊を含んでいる。礫、小石、貝殻片は、数の多少はあるが、全層にわたって混入していた。粘土塊は径 1~4 cm のものが砂の中に混入していた。特に床面下 1 m 50 cm 位の所に厚さ 10~30 cm の層をなしていた。A, B, C とも下の方に厚い氷の層が見られた。これらを凍土下層面にはほぼ平行になるように破線で結び、第 1 図に示した。これらの破線は、凍結前面の進み方に一致するもので、一つの破線で結ばれた氷層は、同じ時期に形成されたことが想像される。その他に氷の層としては、粘土層の内部や上部、粘土塊の上面、小石の下面等に見られた。一つの鉛直線にそって現われる氷の厚さを全部加えたものが、床面の凍上量に相等するものである。

この倉庫の近くは運河で、現場の地下水位は絶えず床面下 1.5~2.5 m である。従って、殆どの土は凍る前には水飽和の状態にあったわけである。

IV. 断面構造の特徴

複雑な層構造ではあるが、氷層の入り方には、若干の特徴が見られた。

1. 厚い砂層 (第 3 図 a—A 201~212 cm)

床下の土は全層砂を主体とするものではあるが、特に砂だけで他のものが殆ど含まれていない部分では、氷が見られない。主体となる砂は、0.2~0.5 mm 粒径の中砂である。

2. 厚い粘土層 (第 3 図 b—C 481~489 cm)

C 点で 470~490 cm にわたって様な粘土層が見られた。ここには、厚さ 1~5 mm、幅 2~5 cm のレンズ状氷が多数含まれている。

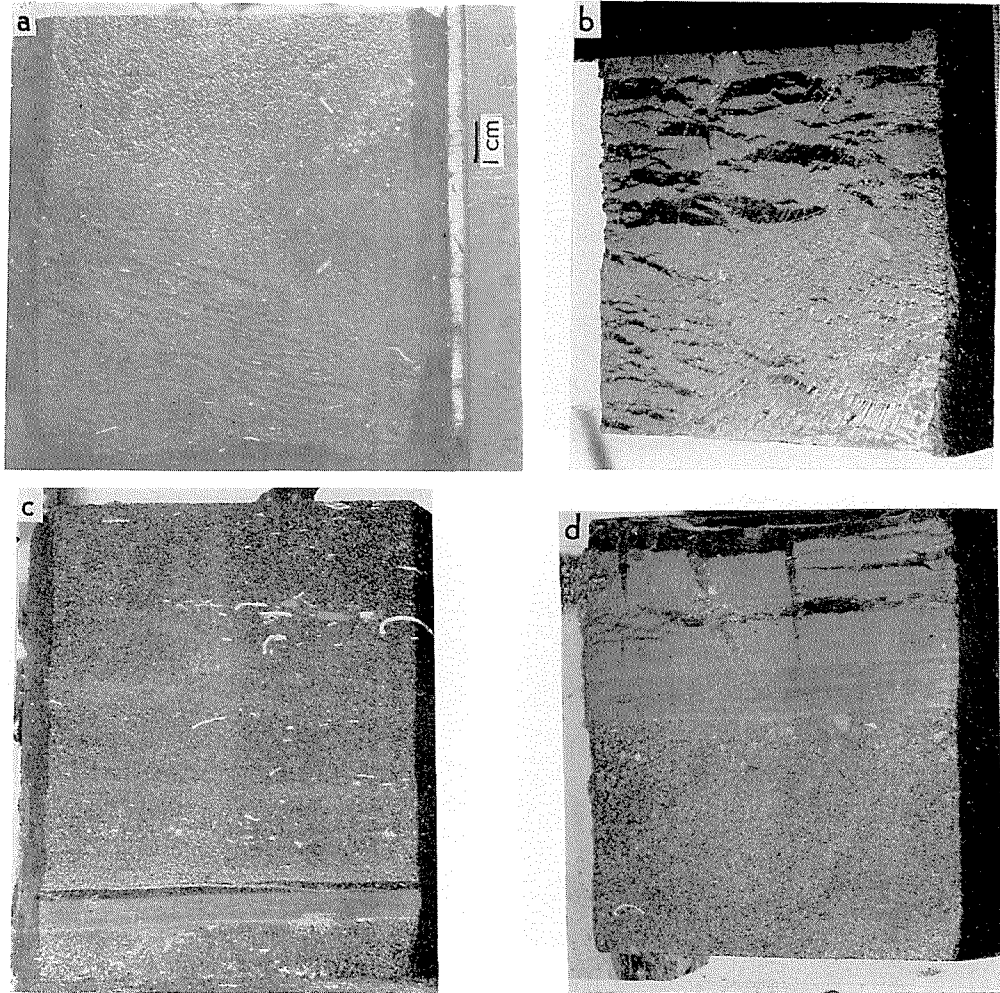
3. 薄い粘土層 (第 3 図 c—B 185~197 cm, 第 3 図 d—B 374~384 cm)

第 3 図 c では、厚さ 7 mm ほどの粘土層が下の方であって、その上に厚さ 1~2 mm の氷層がある。その他は上にも下にも砂があるだけである。氷層は粘土層を基盤としてその上から成長した析出水であることがうかがえる。

第 3 図 d では、上の方 4 cm ほどが粘土層と氷層の混合層である。粘土と粘土にはさまれた水平な氷層は、第 3 図 b 及び c と同じ成因のものであろう。ただ、垂直に楔状に入りこむ、長さ 3 cm、上底辺幅 3 mm ほどの氷は、析出水ではなく、次のようにして出来たと考えられる。凍結線のすぐ下の未凍土側では、凍結線への吸水のため、脱水圧密が起る。そのため楔状のクラックが出来、それに水がしみこんで、その後凍ったものであろう。このような楔状氷は C の 450 cm 付近、B の 400 cm 付近にも多数見られる。

4. 粘土塊 (第 4 図 a—C 145~155 cm, 第 4 図 b—A 139~149 cm, 第 4 図 c—B 163~174 cm)

砂の中に、大きさ 1~4 cm のほぼ球に近い粘土の塊が所々に見られた。この粘土塊の上又は中央に、1~3 mm の氷の薄層がある。これは、粘土塊の中を水が通って、粘土を基盤として氷が析出したことになる。凍上性でない砂の中に、凍上性の土の塊が点在するだけで、氷の析出が見られることは興味深い。この粘土塊の比表面積は 26.5 m²/gr で、一般に凍上性の強い土



第 3 図

- a—一様な砂層 (A 201~212 cm), レンズ状氷がない
- b—粘土層内に多数のレンズ状氷 (黒い部分) がある (C 481~489 cm)
- c—砂層にはさまれる薄い粘土層の上面に氷層がある (B 185~15 cm)
- d—上部の粘土層に, 水平な氷層, 垂直な楔状の氷がある (B 374~384 cm)

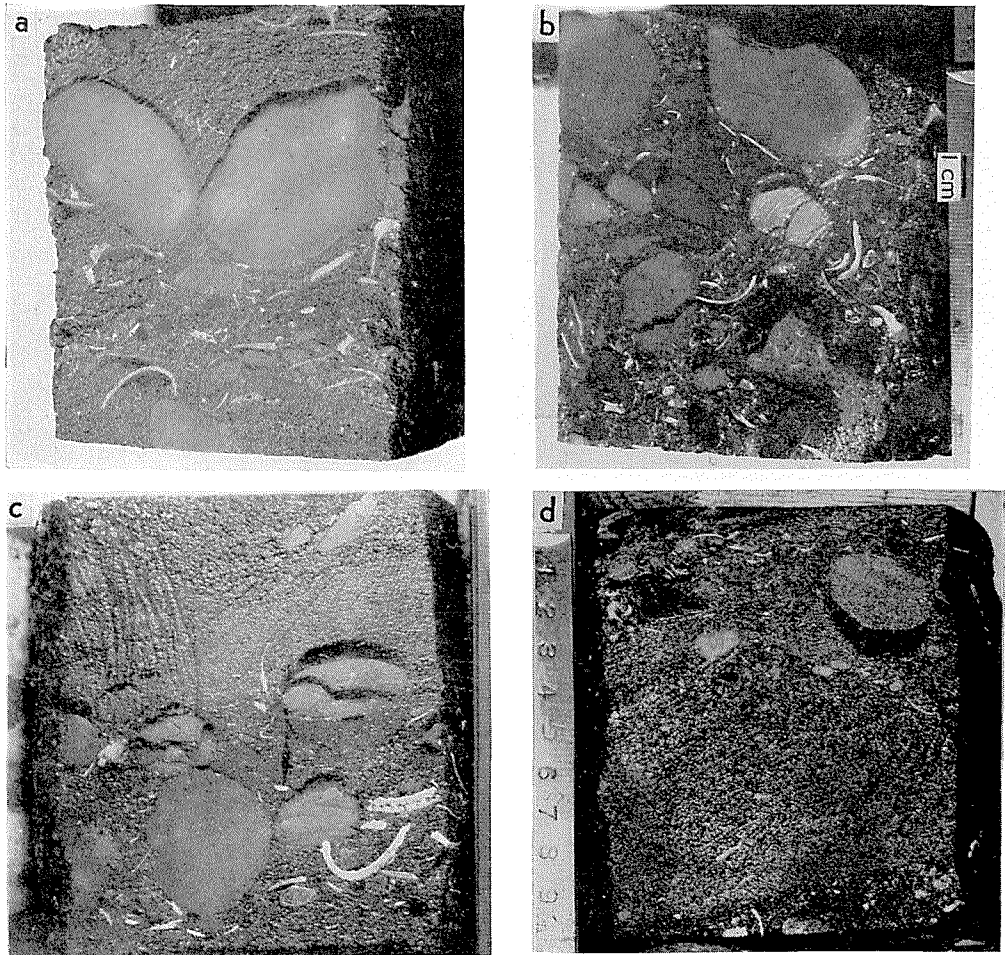
質に分類される⁶⁾。

このような粘土塊を多く含む層を, 第 1 図に白丸群で示してある。第 4 図の **a** は C 点から, **b** は A 点から, **c** は B 点から取られたものである。この層の中には, 礫や貝殻片も多数含まれているが, それらの周りには氷が見られない。

粘土塊は第 1 図の白丸群の層の他にも, B の 390 cm 付近やその他にも僅かではあるが見られた。

5. 小 石 (第 4 図 **d**—B 409~420 cm)

小石や礫は全層到る所に混入している。その周りには殆ど氷が見られないが, ただ B 点の 409~420 cm の凍土塊の中に, 上下 1.5 cm, 横幅 2 cm ほどの小石があって, その下に厚さ



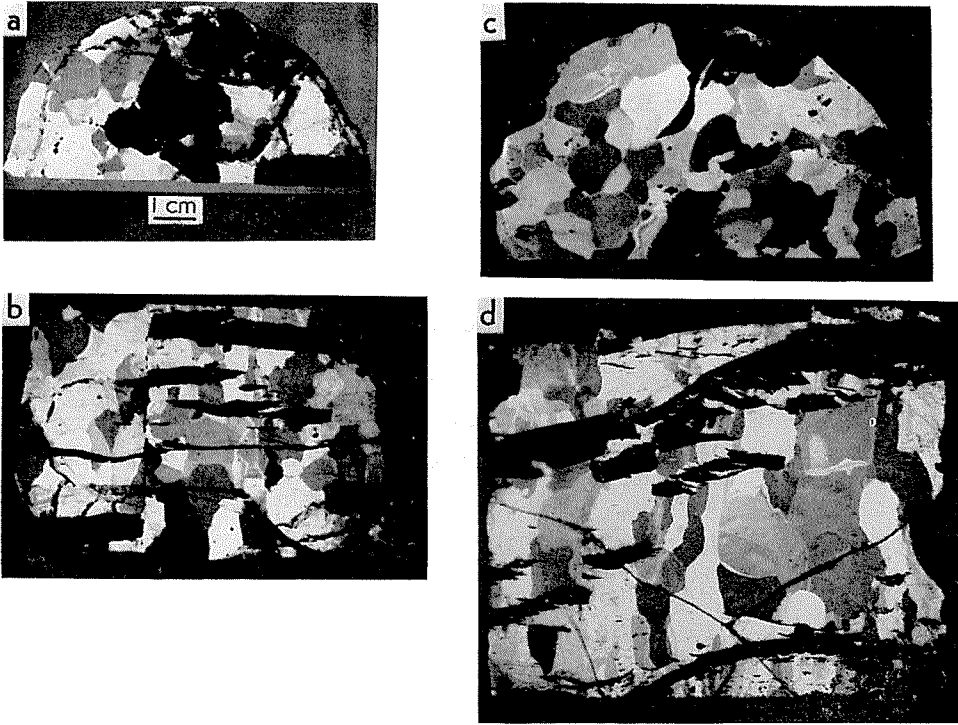
第 4 図

- a—粘土塊の上面に氷がある (C 145~155 cm)
 b—粘土塊の上面及び中央に氷がある (A 139~149 cm)
 c—b と同じ (B 163~174 cm)
 d—右上の小石の下に氷がある (B 409~420 cm)

5 mm ほどの氷が出来ていた。この小石の周りにはシルトまじりの砂がある。小石の部分は周りよりも熱伝導がよいため、凍結線が速く進む。従って、小石の下端部では、凍結線が周りの同じレベルよりも速く達する。そこでは凍結側へ流れる熱流が周りよりも増大し、ちょうど氷析出による熱条件が発生するのであろう。又、小石の下の砂にはシルト質が多少でも混入しているため、氷析出の基盤になり得たのであろう。

6. 厚い氷層 (第 5 図 a, b—C 440~447 cm, 第 5 図 c, d—B 400~409 cm, 偏光写真)

A, B, C のボーリング点で、下方に厚い氷層が見られた。これらを第 1 図に破線で結んで示した。第 5 図 a, b と第 5 図 c, d の写真は、第 1 図の破線曲線の一番下に属する氷層の薄片から取られたものである。一つの破線は同じ時期の凍結前面なので、第 5 図の a, b と c, d は



第 5 図

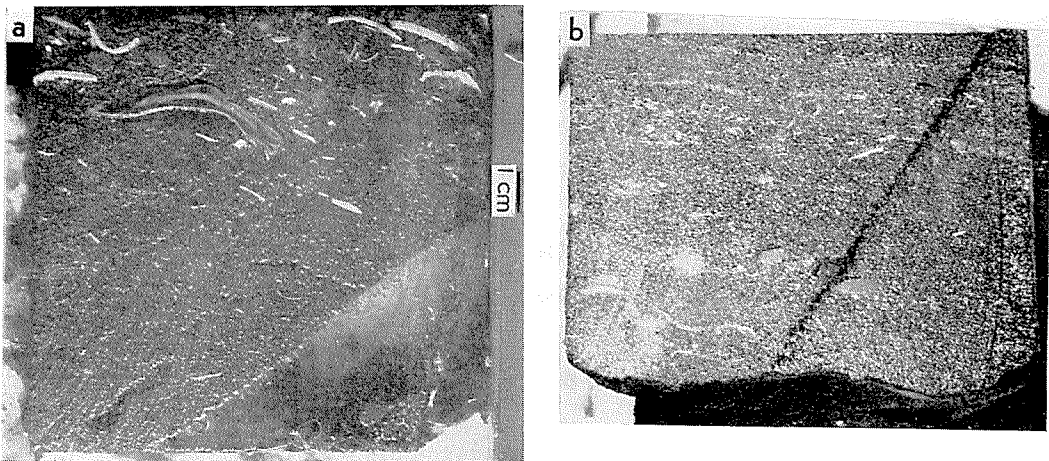
a, b—厚い氷層の薄片 (C 440~447 cm)

c, d—厚い氷層の薄片 (B 400~409 cm)

a, c—水平薄片

b, d—鉛直薄片

一番黒い所が粘土, 他の濃淡は氷の多結晶状態を示す。
偏光写真



第 6 図

a—斜めの厚い氷層が右下方にある (A 149~160 cm)

b—斜めの薄い氷層が右上方から中央下方にかけてある (A 181~191 cm)

同時に出来た氷層である。a と c は水平薄片で、b と d は鉛直薄片である。写真のなかの一番黒い所は粘土である。その他の濃淡の色の所は氷である。鉛直方向に角柱状にのびる多結晶氷であることが解る。

7. 斜めの氷層 (第6図 a—A 149~160 cm, 第6図 b—A 181~191 cm)

前述の厚い氷層は、凍結進行面に出来るので、道路側に近い A 点では斜めになっている。a がそれである。この氷層の周りは砂である。又 b は同じ斜めの氷でも非常に薄い氷層である。これも周りが砂である。

V. 圧縮試験

6×6 cm の断面、10 cm の高さに整形された凍土試料を 3 mm/min の速度で一軸圧縮した。そのときの応力-歪曲線を XY レコーダーに記録した。三つの特徴ある曲線の型に分類された。即ち、ある歪に達して顕著な応力のピークが現われ、以後応力が減するピーク型、ある歪をこえると一定の応力のままである一定型、応力・歪ともに増大一方であるが、その増大のしかたが次第にゆるやかになって行く増大型の三つである³⁾。

試験結果の一部を次の表に示す。

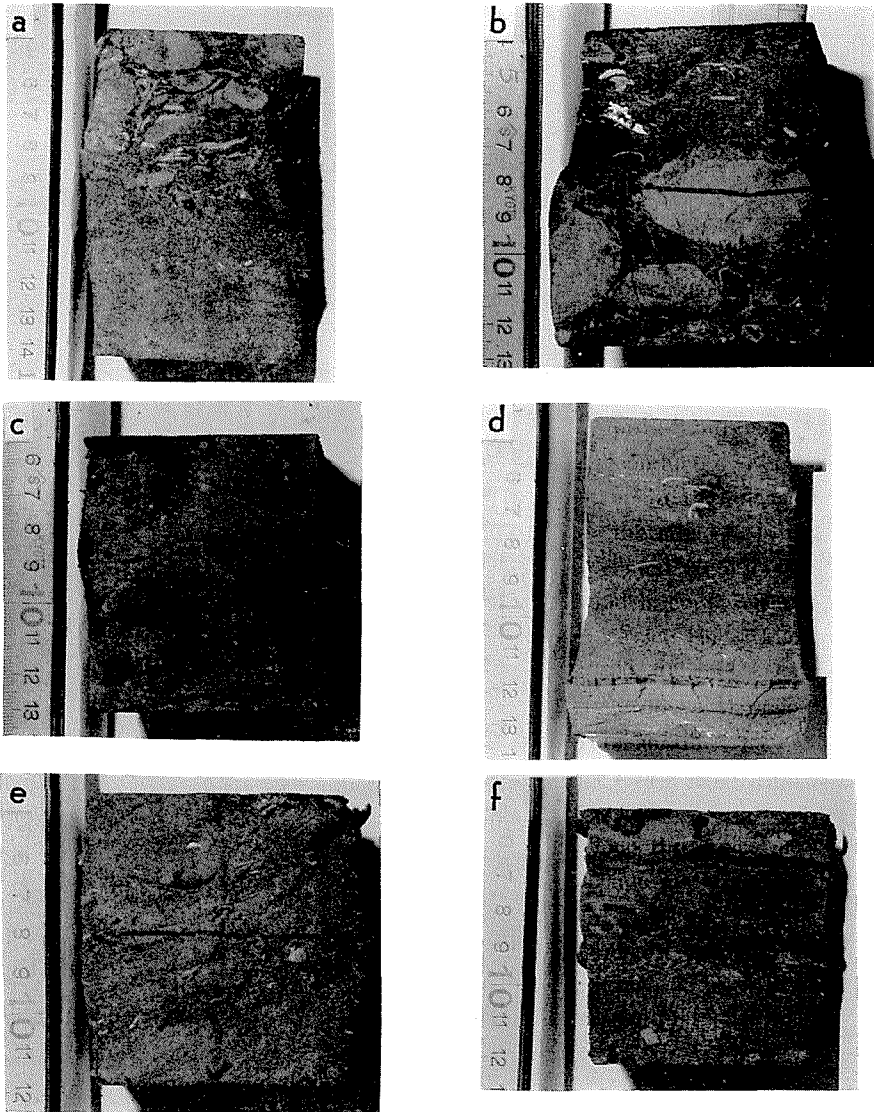
第1表 凍土の圧縮試験結果

試料位置 (cm)	土質	含水比 (%)	密度 (gr/cm ³)	温度 (°C)	応力・歪曲線 の型	ヤング率 (dyn/cm ²)	圧縮強度 (kg/cm ²)	そのとき の歪 (%)
B 250~262	砂、礫、貝	26.5	1.98	-10	ピーク型	7.65×10 ⁹	98.6	2.6
C 176~187	砂、粘土塊	34.1	1.83	-10	ピーク型	4.57×10 ⁹	66.6	3.1
C 489~500	粘土	40.4	1.82	-10	一定型	5.15×10 ⁹	59.7	4.9
B 185~197	砂	28.9	1.84	-10	一定型	1.03×10 ¹⁰	89.3	5.9
A 160~171	砂、礫、貝	41.3	1.67	-3	増大型	2.48×10 ⁹	歪4.6%のときの応力 28.6 kg/cm ²	
B 420~451	粘土	52.6	1.63	-3	増大型	8.01×10 ⁸	歪4.5%のときの応力 21.4 kg/cm ²	

破壊様式は、レンズ氷を含む場合には、氷内に微小な割れ目が生じ、ピーク型では、それが大きな割れ目に成長して破壊にいたる。一定型や増大型では、レンズ氷が外にはみ出し、試料は側方にふくらむ。氷層が斜めに入る場合には、その氷層にそうすべりが見られた。圧縮強度は氷を多く含む凍土ほど小さかった。

このような不連続層構造の凍土の圧縮試験はこれまでにない。一様な構造の凍土の場合⁷⁾と比べて、複雑な反応を示しはしたが、圧縮強度としては、主な母体の土質だけの一様な凍土の場合よりも、10~20% 小さくなる程度であった。

第7図に、圧縮試験後の凍土試料の写真を示す。



第7図 圧縮試験後の凍土試料

- a—B 250～262 cm, 抵抗曲線はピーク型
- b—C 176～187 cm, ピーク型
- c—C 489～500 cm, 一定型
- d—B 185～197 cm, 一定型
- e—A 160～171 cm, 増大型
- f—B 420～431 cm, 増大型

VI. 再凍結試験

5ケの凍土試料について解凍後再凍結試験を行なった。試料の特徴を第2表に示す。実際の凍上率は13%位なので、この試験の結果は、最下段を除き非常に小さな値を示した。試験では平均凍結速度が0.6～3 mm/hであったが、実際は40年かかって凍土層が出来た

第2表 再凍結試験に用いた試料

試料位置 (cm)	土 質 特 徴
A 201~212	全体一様な中砂
B 123~133	貝殻片を含む中砂, 下部に3~5 cmの礫数ヶ
B 333~345	砂の中に, 貝殻片, 大きさ1~3 cmの礫, 大きさ1 cmの粘土塊を数ヶ含む
B 409~420	上部シルト含み砂, 大きさ3 cmの小石, 下部は中砂
C 560~570	シルトまじりの中砂, 薄い氷層含む

第3表 再凍結試験の結果

試料位置 (cm)	上面温度 (°C)	下面温度 (°C)	水 位	平均凍結 速度 (mm/h)	凍 上 率 (%)
A 201~212	-2	+5	上 面	3.0	1.0
B 123~133	-5	+4	底から1 cm 上	2.8	0.8
B 333~345	-5	+4	底から1 cm 上	2.8	2.9
B 409~420	-5	+5	上 面	1.5	2.6
C 520~570	-5	+5	上 面	1.1	7.3
〃	-2	+5	上 面	0.6	11.4

のであるから, 平均の凍結速度は, A点で5 cm/year, B点で10 cm/year, C点で14 cm/yearで, 0.0006~0.0016 cm/hという非常に小さなものである。一般に凍結速度の小さい方が大きな凍上率を与えるようである⁸⁾。B 409~420 cmの凍土は第4図 dの写真に示すように, 小石の下に氷のあるものであるが, 解凍後の再凍結試験ではそれが見られなかった。

砂, シルト, 粘土の他に, 小石, 貝殻片, 粘土塊などが混在する不連続層構造の土が, 長年にわたって凍土層を形成していた。色々な型の氷層が出来ていて, 全体として13%位の凍上を示していた。このような凍土の断面層構造を観察する一方, 圧縮試験や再凍結試験を行なった。再凍結試験は凍結速度が実際よりも数百倍も速いため, 凍上の様相は実際とはかなり違ったものになった。

調査の機会を与えてくれた東京都下水道局, 調査に当り協力をいただいた鈴木義男助教授, 堀口 薫助手に感謝の意を表する次第である。

文 献

- 1) 福田正己 1976 凍結土の層位学的手法による解析. 昭和51年度日本雪氷学会講演予稿集, 241.
- 2) 木下誠一・堀口 薫・田沼邦雄・大野武敏 1968 北見における凍上観測(昭和42~43年冬期). 低温科学, 物理篇, **26**, 363-381.
- 3) 井上正則 1976 不攪乱凍土の強度特性. 昭和51年度日本雪氷学会講演予稿集, 232.
- 4) 木下誠一 1972 凍上力実験. 低温科学, 物理篇, **30**, 191-201.
- 5) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫 1977 一次元定速度凍結における凍結面前方の間隙水圧と脱水圧密. 雪氷, **39**, 53-64.

- 6) 堀口 薫 1975 粉状物質における凍土量と比表面積との関係. 低温科学, 物理篇, **33**, 237-242.
 7) 井上正則・木下誠一 1975 凍土の圧縮強度と動的性質. 低温科学, 物理篇, **33**, 243-253.
 8) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫 1977 地盤凍結工法を対象とした土の凍結膨張. 土と基礎, **25**, No. 7, 25-32.

Summary

The ground underlying below a cold storage at Shibaura, Tokyo, has been frozen since 40 years ago. The structure of the floor board is composed of concrete at the depths of 0-10 cm, carbonized cork at the depths of 10-30 cm and concrete at the depths of 30-70 cm. As the subsoil touches the bottom of the lower concrete, it naturally began to freeze in one year or so after cooling (-20°C) was started. As a result the floor surface also began to rise, which now amounts to 66 cm in the central part of the building 11 m apart from the road side.

Cooling was stopped on March 1976 because of rebuilding of the storage. Core boring was conducted three months later at three points (A, B and C in Fig. 1) at the space where the storage used to occupy. Their locations were 2.2, 6.8 and 11.2 m distant from the roadside. Respectively at A, B and C, the depths of the upper part of subsoil which had already melted were 60, 50 and 40 cm, the freezing depths which had been reached were 2.1, 4.6 and 5.9 m, while the heave amounts were 40, 59 and 66 cm. The average heave ratio (heave amount to frost penetration depth) amounted to 14%.

The cores of frozen soil (11 cm in diameter) which were transported to the cold room of the Institute of Low Temperature Science, were cut to pieces every 10 cm in height and then sliced vertically into halves. Layer structures of the frozen subsoil were observed on their cut surfaces. Measurements were made for density, water content, and size distribution of soil particles. Using several samples uniaxial compression tests were made in a frozen state (Compressed soil specimens were shown in Fig. 7), while frost heave tests were made in a melted state.

The subsoil is mainly composed of sand and partly includes clay layers, small clay blocks, shells, pebbles and ice lenses. The layer structures are very complicated as illustrated in Fig. 2.

The frost heaving of the floor was caused by the segregation of ice lenses in the subsoil. These ice lenses show various forms in their connections to the soil matrix. The characteristics are the following:

- (1) Sand (Fig. 3 a : A 201-212 cm b. f. s., that is below the floor surface)
It has no clear ice lens. Sand has no frost heave ability.
- (2) Clay (Fig. 3 b : C 481-489 cm b. f. s.)
It abounds in ice lenses. Clay has a strong frost heave ability.
- (3) Thin layer of clay included in sand (Fig. 3 c : B 185-197 cm b. f. s. ; Fig. 3 d : B 374-384 cm b. f. s.)

The frozen soil of Fig. 3 c has a thin horizontal layer of clay in the lower part (2 mm in thickness), while a thin horizontal layer of ice (1 mm in thickness) is found on top of the clay layer from which the ice segregates.

The frozen soil of Fig. 3 d has a clay layer of 4 cm in thickness in the upper part. The ice is found above and inside the clay in the form of horizontal layers, and also inside the clay in the form of vertical wedges. These vertical wedges are supposed to come out in

a such way that in the segregation of the upper ice layer the clay became dry because of upward suction and cracks appeared vertically inside the clay to be filled with ground water, which froze later.

(4) Small clay blocks included in sand (Fig. 4 a : C 145-155 cm b. f. s. ; Fig. 4 b :

A 139-149 cm b. f. s. : Fig. 4 c : B 163-174 cm b. f. s.)

Some portion of the subsoil contains small clay blocks (1-4 cm in size) which have shapes of dumplings. The frozen soils of Figs. 4 a, b and c were taken from these portions at boring points C, A and B. Thin ice of 1-2 mm in thickness touches the upper periphery of each block. These ice bodies segregated from the clay base. No ice exists below the lower periphery.

(5) Pebbles included in sand (Fig. 4 d. B 409-420 cm b. f. s.)

The frozen soil of Fig. 4 d contains a round pebble in the right-upper corner of the photograph. Thin ice touches below the lower periphery of the pebble. The pebble is more thermal conductive than the adjacent sand. The frost line progressed through the pebble faster than in the adjacent sand. Therefore, the heat flow at the lower periphery was larger than at the adjacent sand and produced a favorable heat condition for ice segregation. The ice segregated from the underlying sand base. The sand has usually no frost heave ability. This sand is supposed to have a small quantity of silt.

(6) Thick ice layer (Figs. 5 a and b : C 440-447 cm b. f. s. ; Fig. 5 c and d :

B 400-409 cm b. f. s.)

In the lower parts of the frozen layers at boring points A, B and C there were several ice layers as thick as 3-6 cm. The thin sections of these ice layers are shown in Fig. 5 (a and c : horizontal sections ; b and d : vertical sections). The photographs were taken by polarized light. The black spots indicate clay soils. The crystal structure of the ice is polycrystalline ; the crystal size is 0.5-2 cm.

(7) Oblique ice layer (Fig. 6 a : A 171-181 cm b. f. s. ; Fig. 6 b : A 181-191 cm b. f. s.)

The freezing front in the subsoil had progressed obliquely near the road side because of a heat supply from the open air. Oblique thick ice layers were generated, because ice lenses were segregated along the freezing front. A thick ice layer is shown in Fig. 6 a and a thin ice layer in Fig. 6 b.