HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	土の凍上予測と試験法に関する研究
Author(s)	石崎, 武志
Citation	低温科学. 物理篇, 51, 159-172
Issue Date	1993-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18621
Type	bulletin (article)
File Information	51_p159-172.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Takeshi ISHIZAKI 1992 Study of frost heave evaluation and test method. *Low Temperature Science, Ser. A. 51.*

土の凍上予測と試験法に関する研究*

石 崎 武 志
(低温科学研究所)

(平成4年11月受理)

Abstract : Existing frost heave prediction methods and frost heave tests were reviewed. In order to evaluate the frost heave tests used for determining frost susceptibility of road and highway materials, two types of tests were performed. One was a test with constant temperature boundary at both sample ends. The other was a test with constantly decreasing temperature boundary at both sample ends. The soil sample was frozen from the upper side downward and water was supplied through the bottom plate. In the former test, the temperature gradient and freezing rate changed with time and both frost heave rate and water intake rate decreased rapidly with time. In the latter test, the temperature gradient and freezing rate were relatively constant, and constant frost heave rate and water intake rate were obtained except for in the early period of the test. Therefore, in order to clarify the relationship between frost heave rate and temperature conditons in the sample quantitatively, tests with constantly decreasing temperature boundaries were recommended.

要旨：従来の凍上予測と試験法を検討すると共に，その問題点を明らかにする目的で，自然凍結を対象にした凍上試験を行った。試験は，両端面温度一定条件と両端面温度を一定速度で低下する条件で行った。土試料は，上部から下部へ凍結し，試験中，水は下部から供給した。従来この試験法は，不飽和土の凍結試験と考えられて来たが，試験中の凍上量と吸水による凍上量の関係や試験前後の試料中の含水比などから考えて，飽和土の凍結試験となっていることがわかった。両端面温度一定の凍上試験では，試料中の温度勾配，凍結速度が時間と共に変化し，これに伴って，凍上速度，吸水速度が時間と共に急激に減少した。一方，両端面温度を一定速度で低下させた試験では，試料中の温度勾配，凍結速度がほぼ一定で，実験開始初期を除いて，ほぼ一定な凍上速度，吸水速度が得られた。そこで，凍上速度と温度条件との間の定量的な関係を求めるためには，両端面温度を一定速度で低下させる試験の望ましいことがわかった。

Key words : frost heave prediction, frost heave test, unfrozen water, hydraulic conductivity, frost damage

* 北海道大学低温科学研究所業績　第3635号

キーワード：凍上予測，凍上試験，不凍水，透水係数，凍上害

I．はじめに

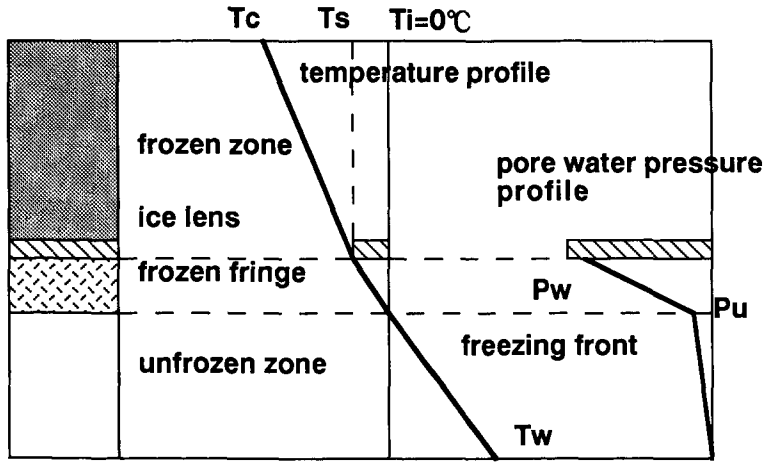
寒冷地においては，冬，地盤が凍結すると凍結面へ水が吸い寄せられてレンズ状氷（アイスレンズ）として析出し地盤が膨張する。この凍上現象により，構造物，道路，管路等が大きな損害を受ける。凍上害を最小限にくい止めるためには，地盤の凍上性を前もって正しく評価すること，また凍上が妨げられない場合には，凍上速度，凍上量，凍上圧などを正しく予測することが必要である。土の凍上性判定方法は，設計レベルや構造物の重要度などで，以下のように異なる。1）土粒子の粒径分布及び粒径から，凍上性あるいは非凍上性を判断する。2）コンシステンシーや現場の地下水位等から判断する。3）冷却温度，荷重等を変えた凍上試験や現場の凍上実験により定量的に凍上量を求める。

現状では，土の凍上性を調べるための凍上試験としては，道路の凍結など自然凍結を対象にしたものと地盤凍結工法などの人工凍結を対象にしたものとに分かれる。これらの凍上予測法と凍上試験法について検討する。

II．凍上予測法の現状

1．凍上機構

土が一次元的に凍結しつつある時の，土試料中の温度分布，間隙水圧分布の模式図を第1図に示す。ここで，フローズンフリンジとは，アイスレンズ成長面と凍結面（間隙氷が出現する面）との間の領域をいう[1]。この領域での熱の流れと不凍水の流れに関する同時移動現象がアイスレンズの成長速度を決めるので，フローズンフリンジは凍上現象をモデル化する上で重要な



第1図　一次元凍結の際の温度，間隙水圧分布

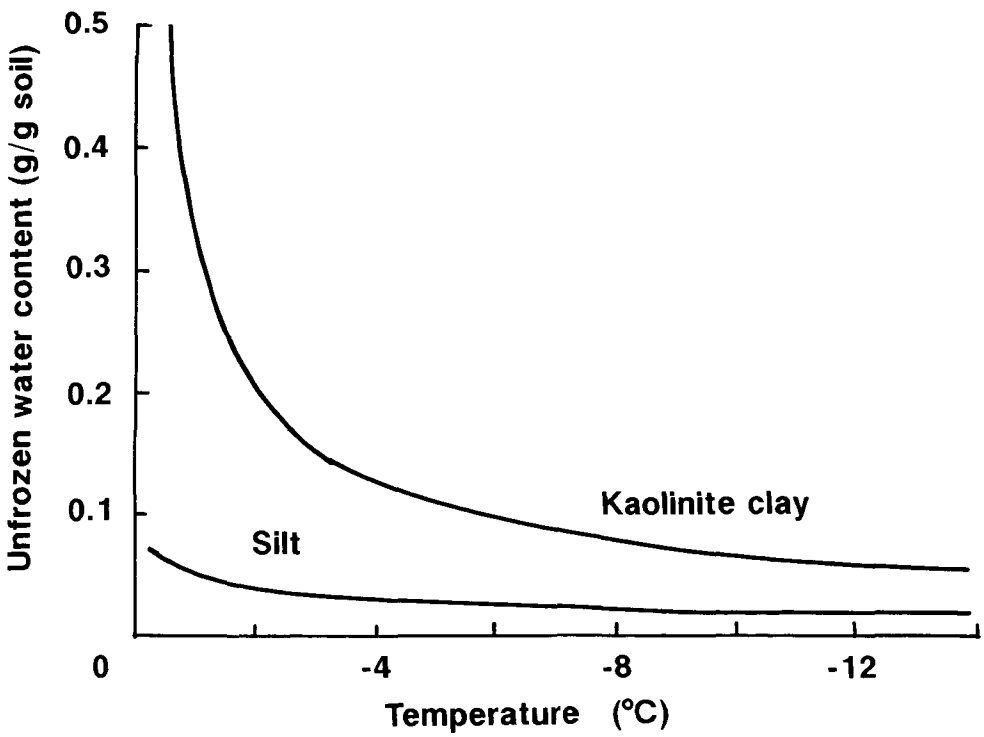
領域である。フローズンフリンジ中の不凍水の流速V_fは次式のダルシー則で表すことができる。

$$V_f = -k\mathrm{d}P_w/\mathrm{d}x \qquad (1)$$

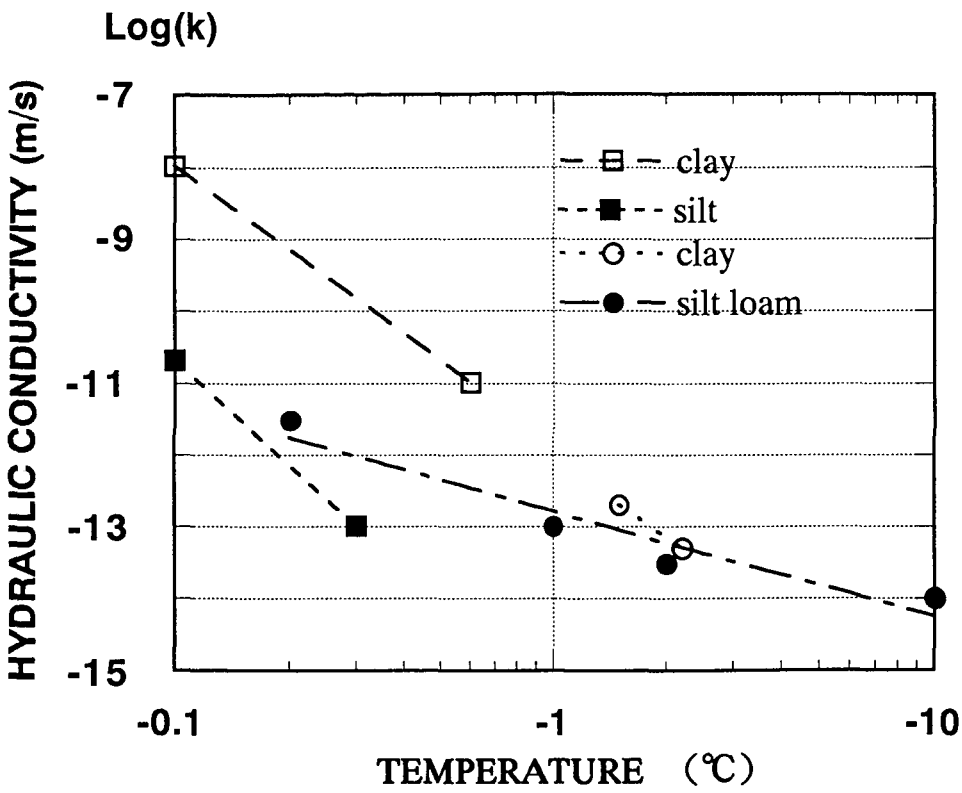
ここでkは透水係数，P_wは不凍水の間隙水圧である。P_wは正しくは，この場の不凍水と平衡状態にあるバルクな純水の圧力のことであるが，以下間隙水圧と呼ぶ。不凍水の流速を考える上で重要な不凍水量，凍土の透水係数と温度の関係を第2図，第3図[2~5]に示す。不凍水量，凍土の透水係数は温度の低下と共に急激に減少する。一般化されたクラペイロンの式から，不凍水の間隙水圧P_wと間隙氷に加わる圧力P_i，温度T℃の間には以下の関係がある。

$$P_w = 1.09P_i + \beta T \qquad (2)$$

ここでβは熱力学的定数（12450 $cmH_2O/℃$）である。この間隙氷に加わる圧力P_iの値に関しては，厳密な評価は難しいが，一般に間隙水圧P_wは（2）式に従って温度の低下と共に減少すると考えられる。結果として，間隙水圧勾配下で不凍水は温度の高い部分から低い部分へ（不凍水の多い方から少ない方へ）流れることになる。乾燥土と湿潤土を接触させると，水は，含水率の高い方から，低い方へ流れる。この場合の熱・水分移動の微分方程式は土が凍結する場合のものとほぼ同じ形になり，類似したメカニズムが考えられている。以上の基本的な考え方により，色々な温度条件，荷重条件のもとで，凍上量，凍上速度などを計算するための凍上モ



第2図　不凍水量と温度の関係



第3図 凍土の透水係数と温度の関係

デルがいくつか提案されている。それらの凍上モデルを以下に説明する。

2．凍上モデル

土の凍上現象をモデル化する上で，土が水で飽和状態にあるか不飽和状態にあるかで，その取り扱い方が異なる。地下水位が高い場所で行われる人工地盤凍結や液化天然ガス貯槽周辺地盤の土の凍結に関しては，土は飽和として扱うことができる。一方，地下水位が低い道路の凍上を考える際には，土は不飽和として扱わなくてはならない。両者の条件において，水を吸引する原動力は，同様に不凍水の間隙水圧の低下と考えられる。しかし，不飽和条件の場合，未凍土部分の水が吸い上げられることにより，不飽和透水係数が時間とともに小さくなり凍上速度が減少する。飽和条件での凍上モデルは Miller[6]，Gilpin[7]，Konrad[8]，高志ら[9]により提案されている。一方，不飽和条件での凍上モデルは Harlan ら[10]により提案されている。

2．1 Miller モデル

Miller らは，土の凍結の際，フローズンフリンジ中の間隙氷とアイスレンズが一体となって動くと考えフローズンフリンジ中の水の流れ，熱の流れを支配する微分方程式をたて，それらを連結して解くことによりアイスレンズの成長速度を計算した。そこで，これは rigid-ice モデルとも呼ばれる。アイスレンズの発生条件として，Miller らは，間隙水圧 P_w と間隙氷圧 P_i と

から以下の式で求まる中立応力 σ_n が上載荷重 P_0 より大きくなる場合と規定した。

$$\sigma_n=\chi P_w+(1-\chi)P_i \qquad (3)$$

ここで，χ は，応力分配係数と呼ばれる。この条件を用いることにより，実際の土の凍結の際にみられる様な飛び飛びのアイスレンズ構造を計算することができる。このモデルの問題点はアイスレンズの発生条件に関わる応力分配係数 χ の測定がきわめて難しいことである。

2．2　Gilpin モデル

Gilpin の凍上モデルも Miller のものと同様にアイスレンズの発生位置を計算できる点に特徴がある。Miller モデルでは，アイスレンズの発生位置として中立応力と上載荷重の関係を用いたが，Gilpin モデルでは，湿潤土の引っ張り強度のアナロジーから，間隙氷の圧力が以下の式で得られる圧力より大きくなった時にアイスレンズが成長し始めると考えた。

$$P_{sep}=P_0+2\sigma_{sl}/R\times f(R) \qquad (4)$$

ここで P_{sep} は土粒子を引き離すのに必要な氷圧，P_0 は上載荷重，σ_{sl} は水・氷間の界面張力，R は土粒子の平均半径，$f(R)$ は補正係数である。Nixon[11]は Gilpin モデルをさらに単純化して，凍土の透水係数 k が $k_0/(-T)^a$ で与えられた時，フローズンフリンジ中の流速はフローズンフリンジ中の平均の温度勾配 G_f を用いて以下のように表されることを示した。

$$V_f=G_f/(L/K_f+C(1.09P_0-P_u)^a) \qquad (5)$$

ここで L は水の凍結潜熱，K_f は凍土の熱伝導率，C は a と k_0 によって決まる定数，P_u は凍結面での間隙水圧である。(5)式は吸水速度がフローズンフリンジ中の温度勾配に比例し，上載荷重の a 乗で減少することを示している。

2．3　Konrad モデル

Konrad は凍結面での吸水速度 V_f は，フローズンフリンジ中の温度勾配 G_f と以下の比例関係にあることを実験から示した。

$$V_f=SP\times G_f \qquad (6)$$

ここで，比例定数 SP はセグリゲーショナルポテンシャルと呼ばれる。さらに Konrad は，その後の実験により，SP が凍結面での間隙水圧，フローズンフリンジ中の冷却速度，上載荷重の関数であることを示した。$SP=SP_0\cdot e^{-bp_0}$，ここで，b は定数，SP_0 は，上載荷重 P_0 がゼロの時の SP 値である。しかし，式(6)は凍結面が常に進行している場合のみ適用可能で，凍結面が止まり一つのアイスレンズのみが成長している場合には適用できないことが指摘されている[12]。

2．4　高志モデル

高志らは，2種類の土について 170 回以上の凍上実験を繰り返し，凍結膨張率 ξ の凍結速度

U，有効応力 σ（$=P_0-P_w$）依存性を下記のように示した。

$$\xi=\xi_0+\sigma_0/\sigma(1+U_0/U) \qquad (7)$$

ここで，ξ_0，σ_0，U_0 は土固有の定数である。この実験式は，地盤凍結工法の際の凍上量予測などに，日本では幅広く用いられている。(7)式の問題点としては，凍土，未凍土中の温度勾配の変化による凍結膨張率 ξ の変化が表されていないことである。また，高志は，凍上現象のメカニズムを明らかにする目的で凍上機構の数理解析[13]を発表し，(7)式の理論的な背景を検討した。

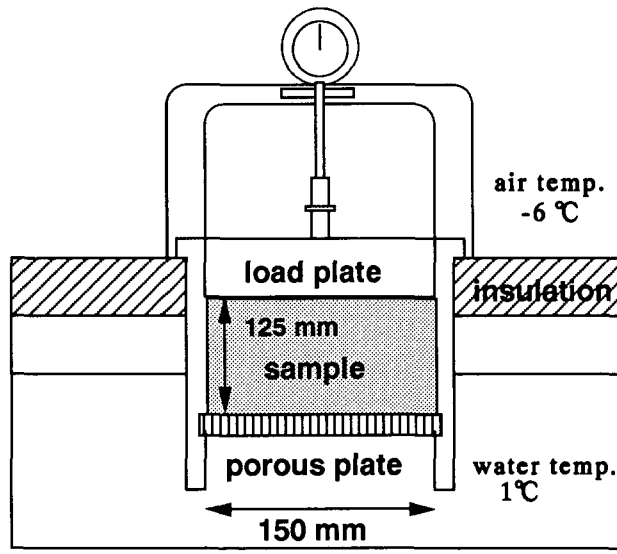
2．5 Harlan モデル

このモデルは hydrodynamic モデルともよばれ，土の凍結の際の熱流，水流を連結させて水の移動を計算するものである。熱流と水流の微分方程式の連結には，実験から得られる不凍水と温度の関係式が用いられる。現在の所，この方法のみが不飽和土の凍上解析に適用可能である。ここで，凍土中の間隙水圧は一般化されたクラペイロンの式（2）によって求められる。このモデルの凍上の扱いは他のモデルとは異なり，計算により得られた間隙氷の量が間隙のある割合（例えば 85%）以上占めた場合に凍上が生ずると考えている。このモデルの問題点としては，上載荷重の凍上量に与える効果がまだ考慮されていないことが挙げられる。

III．凍上試験法の現状

1．自然凍結を対象にした場合

試験装置の一例を第 4 図に示す。この方法は，「日本道路公団試験方法」[14]による Φ 15 法と呼ばれる。これは，土の凍上性と凍結融解後の路床や路盤材の材料としての強さを表す指数である CBR 値を測定することを目的とした方法であり，供試体は CBR モールド（直径 15 cm，高さ 12.5 cm）と同じである。所定の温度に冷却した空気を循環させて供試体上部から下部に凍結面を侵入させる方式である。なお，供試体下部は所定の温度に保たれた水に 4 cm 浸されている。凍上試験は，4 日間行い，供試体断面の観察から，土の凍上性判定を行う。



第 4 図　Φ 15 式凍上試験装置の模式図

2．人工凍結を対象にした場合

液化天然ガス貯槽周辺地盤や地盤凍結工法などの適用地盤などの飽和土の凍上解析をする場

合に，一定荷重を供試体に作用させ，凍結速度が一定である条件で凍上実験がなされている。この試験は，上載圧と冷却速度の異なる条件で，凍上量及び吸排水量の経時変化を求め，供試体の凍上変位と凍結時間から凍結膨張率 ξ と上載圧 σ 及び凍結速度 U との関係を求めるための試験である。この方法では定量的に凍上量を求めることが可能である。

3．凍上試験法の問題点

飽和土に関しては上に示したように，凍上量を定量的に求めることが可能である。しかし，自然凍結を対象とした不飽和地盤では，定性的な評価に留まっている。ここでは，異なった温度条件で凍上実験を行い，現行の試験法の問題点について検討したので以下に報告する。

IV．凍上試験方法

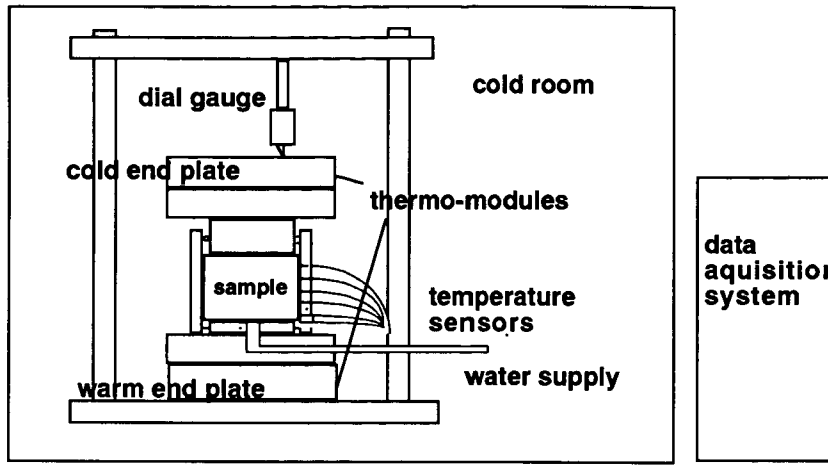
凍上試験装置の模式図を第5図に示す。また，土試料の物性値を第1表に示す。試料の直径は，12.5 cm，初期試料長は7 cm，上載荷重 12.7 kg で試験を行った。圧力としては 0.106 kg/cm^2 となる。土試料の温度はサーモモジュールによってコントロールした。土試料は，自然凍結を対象とした場合の試験法にならって，上部から下部へ凍結し，試験中，水は下部から供給した。試験中，土試料とアクリル容器の間のフリクションを小さくする目的で，試料周囲にシリコンオイルを塗ったテフロンシートを巻いた。実験では，30分ごとに凍上量，吸水量，試料中の温度分布を測定した。試験は，両端面温度一定条件で Test 1，Test 2 を行い，両端面温度を一定速度で低下させた条件では，Test 3 から Test 6 まで行った。Test 1 から Test 6 までの試料両端面温度を第2表に示す。Test 3 で 10-0.1 t と示したのは，初期温度が10℃で，1時間に 0.1℃の一定速度で端面温度を低下させたことを示している。この温度制御方法で，凍結進行速度，試料の温度勾配がほぼ一定になることは，既に確認されている[15]。

第1表　土試料の物性値

土粒子の比重 G_s		2.68
コンシステンシー		
液性限界 w_l	(%)	34.3
塑性限界 w_s	(%)	19.8
塑情指数 I_p	(%)	14.5
粒度特性		
粗砂（200μm 以上）	(%)	24.5
細砂（75-2000μm 以上）	(%)	51.5
シルト（5-75μm 以上）	(%)	14.0
粘土（5μm 以下）	(%)	10.0
自然含水比	(%)	23.0
強熱減量	(%)	2.51
飽和透水係数 k（cm／s）		1.5E-4
乾燥密度 γ_d（g／cm^3）		1.546

第2表　凍上実験の端面温度条件

試験	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6
上面温度（℃）	−2	−2	$-0.1t$	$-0.05t$	$-0.025t$	$-0.0125t$
下面温度（℃）	1	1	$10-0.1t$	$5-0.05t$	$2.5-0.025t$	$1.25-0.0125t$

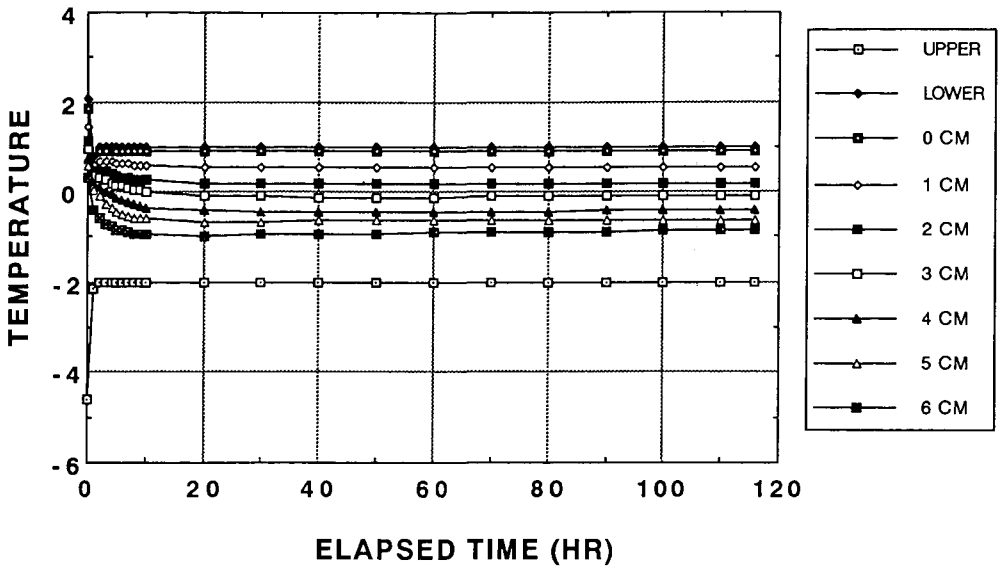


第5図 凍上試験装置の模式図

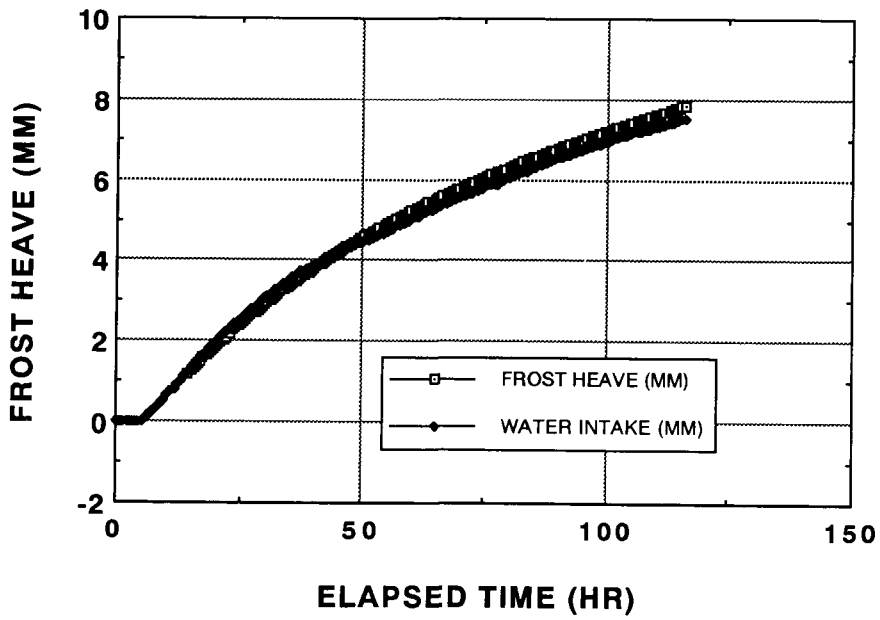
V. 試験結果と考察

Test 1 の試料中の温度変化，凍上量，吸水による凍上量をそれぞれ第 6 図と第 7 図に示す。ここで，吸水による凍上量とは，吸水量を試料断面積で割ったものに 1.09 をかけたものである。実験では，まず，上部冷却板の温度を急激に下げて凍結を開始した。試料上部が凍結したことを確認してから，試料上面の温度を－2 ℃，試料下面の温度を＋1 ℃で一定に保った。第 6 図から，実験開始後約 10 時間で試料中の温度分布がほぼ定常状態になるのがわかる。ここで，1 cm ～6 cm はそれぞれ試料下面からの距離を示している。第 7 図に見られる様に，凍上は，実験開始後約 10 時間から発生し，凍上速度は時間と共に減少した。これは，試料中の温度分布が定常になった後にファイナルアイスレンズ（第 8 図）が成長し始め，その成長とともに，アイスレンズ成長面の温度が徐々に高くなるためと考えられる[12]。また，吸水による凍上量も，全凍上量と同様に変化している。これは，土試料がほぼ，飽和状態で凍結していることを示している。Test 2 においても，同様の結果が得られた（第 9 図）。第 3 表に Test 1 と Test 2 の供試体作成時の含水比，乾燥密度，凍上試験後の含水比，凍上量，凍上率，吸水量などを示す。ここで，凍上率とは，凍上量を凍結深さで割った値に 100 をかけたものである。凍上試験後の試料の含水率は凍土部分で大きく増加している。これは，アイスレンズの形成によるものである。一方，未凍土部分の含水率も若干増加している。これは，土の凍結の際に，未凍土部分が乾燥することなしに飽和状態を保っていることを示している。この結果は，従来，**III** の **1** に示した試験方法は，不飽和土の凍結を対象としたものと考えられてきたが，実際は，**III** の **2** に示した飽和土の凍上試験と同様の試験となっていることを示唆している。

Test 1，2 の両端面温度一定の条件では，試料中の温度勾配，凍結速度が時間と共に変化する。この条件では，土の凍上速度，吸水速度と温度条件の関係を定量的に求めることは難しい。そこで，次に試料中の温度勾配，凍結速度をほぼ一定にした Test 3～Test 6 を行った。第 10 図

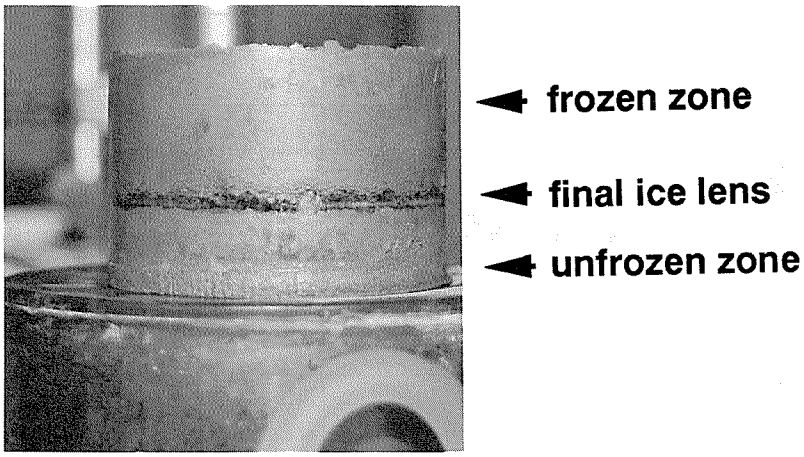


第6図　試料内温度の時間変化（Ｔｅｓｔ１）

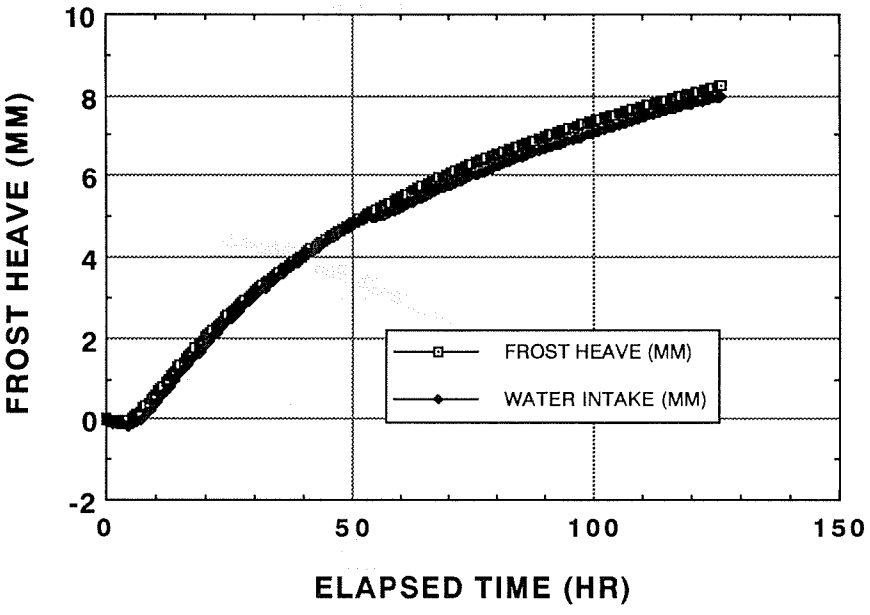


第7図　凍上量，吸水による凍上量の時間変化（Ｔｅｓｔ１）

に Test 3 の試料中の温度変化を示す。試料端面と同様に，試料中の温度も一定速度で低下している。ここで，試料中の温度低下速度が端面温度よりも遅くなっているのは，凍上により試料長が長くなるためである。第 11 図に Test 3 の凍上量と吸水による凍上量の時間変化を示す。実験開始後は凍上速度が小さくなっているが，実験開始後 30 時間程度から凍上速度がほぼ一定に



第8図　凍上試験終了時（１１６ｈ）の試料の写真

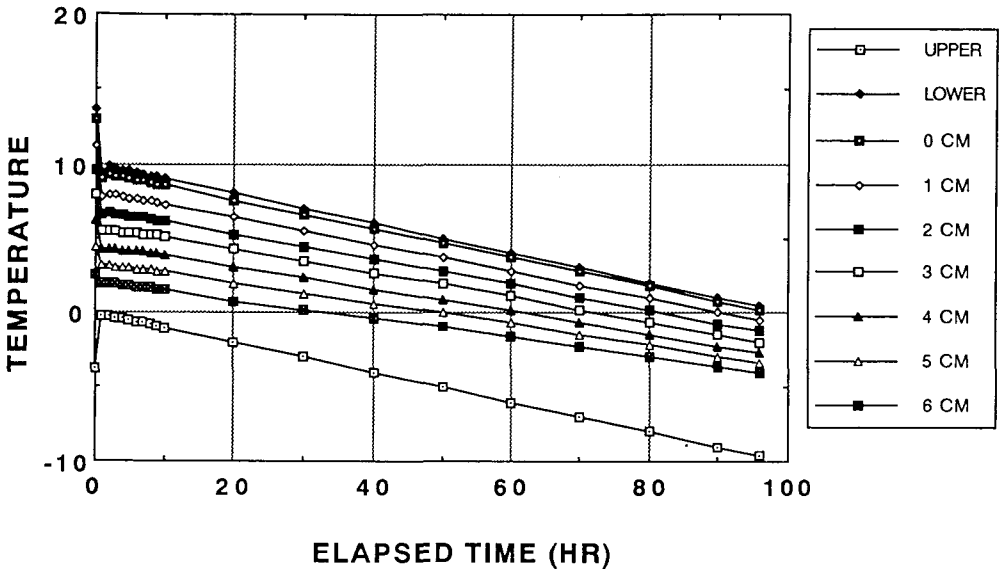


第9図　凍上量，吸水による凍上量の時間変化（Ｔｅｓｔ２）

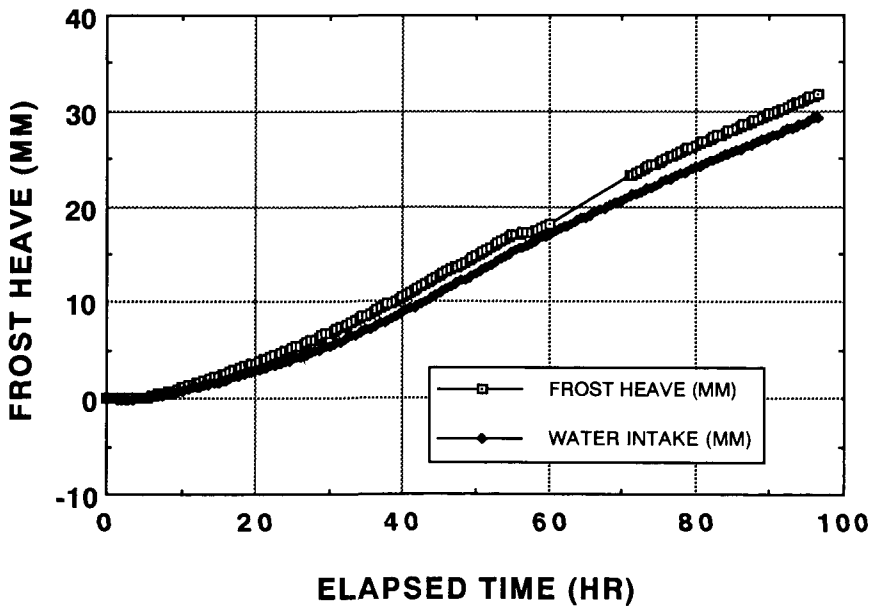
第3表　凍上試験結果

	供試体作成時		凍上試験後				
	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm²)	含水比（凍土） (%)	(未凍土) (%)	凍上量 (mm)	凍上率 (%)	吸水量 (cm³)
Test 1	22.5	1.61	36.5	23.7	7.47	17.5	84.9
Test 2	22.5	1.60	35.3	24.7	8.25	19.4	89.6

なっている。これは，実験初期を除けば凍結面付近の温度条件が時間的にほぼ一定になっているためと考えられる。Test 4～Test 6 の凍上量の時間変化をそれぞれ第 12 図から第 14 図に示す。それぞれ，時間の経過と共にほぼ直線的に凍上しているのがわかる。また，吸水による凍上量と全凍上量がほぼ一致していることから，凍上の大部分は吸水された水の体積膨張によるものである。第 15 図に凍上速度と凍土中の温度勾配との関係を示す。温度勾配の増加と共に凍



第10図　試料内温度の時間変化（Ｔｅｓｔ３）

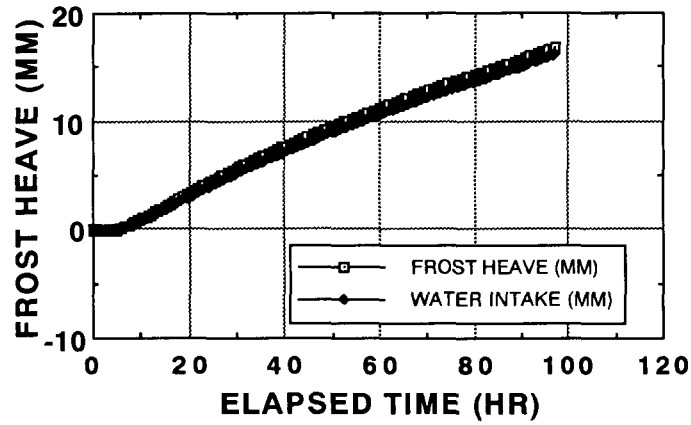


第11図　凍上量，吸水による凍上量の時間変化（Ｔｅｓｔ３）

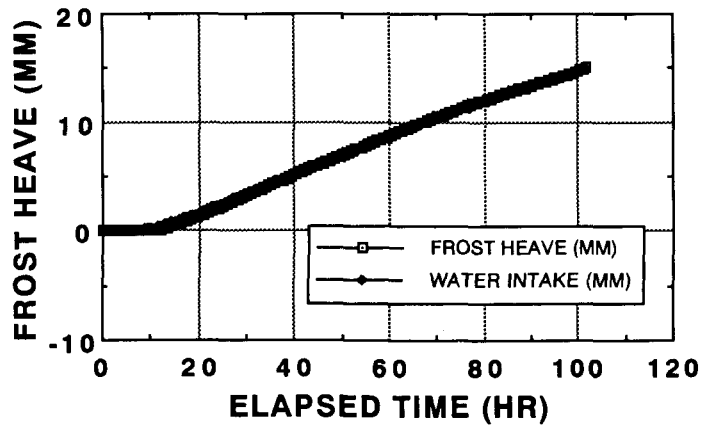
上速度がほぼ直線的に増加することがわかる。この結果はIshizaki[15]やKonradら[3]の結果と一致している。

VI. 結　　論

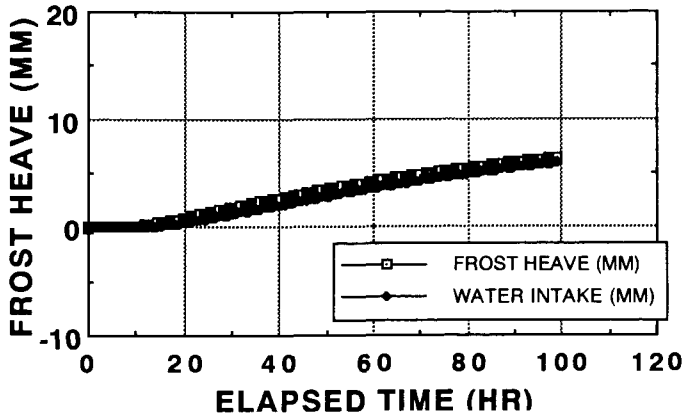
土の凍上予測と試験法のレビューを行うと共に，その問題点を明らかにするために，自然凍結を対象にした凍上試験を行った。この方法は，土の凍上性を判定するための定性的試験であるが，定量的な凍上量予測を可能にするためには，いくつかの改善の必要なことがわかった。



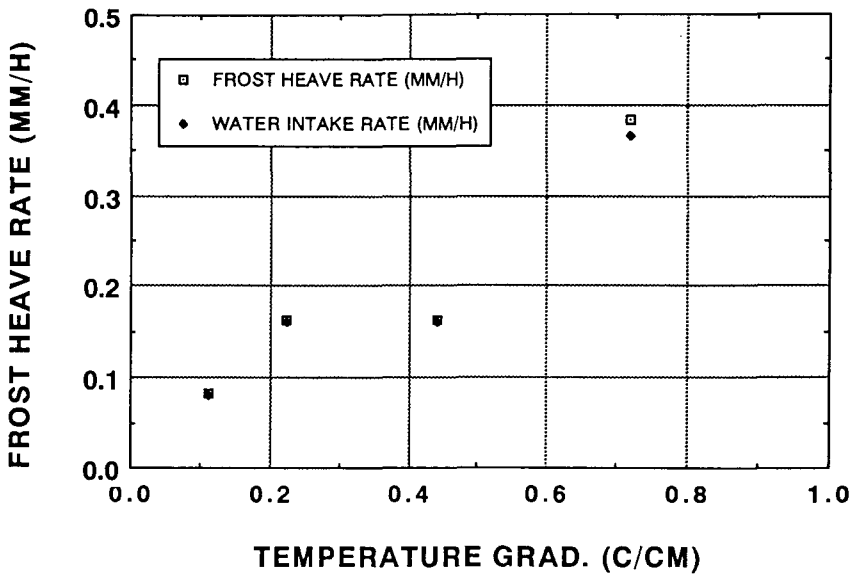
第12図　凍上量，吸水による凍上量の時間変化（Ｔｅｓｔ４）



第13図　凍上量，吸水による凍上量の時間変化（Ｔｅｓｔ５）



第14図　凍上量，吸水による凍上量の時間変化（Ｔｅｓｔ６）



第15図　凍上速度，吸水速度と凍土内温度勾配の関係

また，この方法は，従来，不飽和土を対象にした凍上試験と考えられてきたが，試験中の凍上量と吸水による凍上量の関係や試験前後の試料中の含水率などから考えて，飽和土の凍上試験となっていることがわかった。両端面温度一定の凍上試験では，試料中の温度勾配，凍結速度が時間と共に変化し，これに伴って，凍上速度，吸水速度が時間と共に急激に減少した。一方，両端面温度を一定速度で低下させた試験では，試料中の温度勾配，凍結速度がほぼ一定で，

実験開始初期を除いて，ほぼ一定な凍上速度，吸水速度が得られた。そこで，凍上速度と温度条件のより定量的な関係を求めるためには，両端面温度を一定速度で低下させる試験の望ましいことがわかった。また，不飽和土の凍上試験を室内で行うためには，地下水位に相応した負圧を水の供給側に加えなくてはならない。現在，凍上試験方法としては，統一された基準はないが，今後，種々の問題点を検討して，簡単で再現性のある凍上試験法を確立することが望まれる。

文　献

1) Miller,R.D. 1972. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils. Highway Research Record, **393**, 1-11.

2) Horiguchi,K. and Miller,R.D. 1980. Hydraulic conductivity functions of frozen materials. In Proc. 4 th Int. Conf. on Permafrost, Alaska, 504-508.

3) Burt, T.P. and Williams, P.J. 1974. Measurement of hydraulic Conductivity offrozen soils. Can. Geotech. Journal, **11**, 647-650.

4) 高志　勤・生頼孝博・山本英夫・岡本　純 1983 凍土内アイスレンズの消長と移動に関する室内実験．雪氷，**45**，189-196.

5) Ishizaki, T. 1985. Experimental studyof frost heaving of saturated soils under overburden pressure. Ph.D. Thesis.Hokkaido University, Sapporo, Japan, 98 pp.

6) Miller,R.D. 1978. Frost heaving in non-colloidal soils. Proceedings, 3 rd International Conference on Permafrost, Edmonton, Alberata, **1**, 707-714.

7) Gilpin,R. 1980. A model for the pre-diction of ice lensing and frost heave in soils. *Water Resour. Res.*, **16**. 5, 918-930.

8) Konrad,J.M. 1980. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils. Canadian Geotechnical Journal, 1, 473-486.

9) 高志勤，益田稔，山本英夫 1974. 土の凍結膨張に及ぼす凍結速度，有効応力，に関する研究．雪氷，**36**，49-68.

10) Harlan,R.L. 1973. Analysis of coupledheat-fluid transport in partially frozensoil. *Water Resour. Res.*, **9**. 5, 1314-1323.

11) Nixon,J.F. 1991. Discrete ice lens theory for frost heave in soils. Can. Geotech. J., **28**, 843-859.

12) Ishizaki, T., Nishio, N. 1985. Experimental study of final ice lens growth inpartially frozen saturated soil. In Proc. 4 th ISGF, Sapporo, Japan, **1**, 71-78.

13) 高志勤 1982. 凍上機構の数理解析．精研，大阪，123 pp.

14) 日本道路公団. 1985. 日本道路公団試験方法. 111-128.

15) Ishizaki,T., and Nishio, N. 1988. Experimental study of frost heaving of asaturated soil. 5 th Int. Symp. on Ground Freezing, **1**, 65-72.