

北海道における林道路床土の凍上特性

誌名	専修大学北海道短期大学紀要
ISSN	02872838
著者	常松, 哲 相馬, 尅之
巻/号	20号
掲載ページ	p. 129-136
発行年月	1987年11月

北海道における林道路床土の凍上特性

常 松 哲*・相 馬 尅 之**

Frost Heaving Characteristics of Forest Road Materials in Hokkaido

Satoshi TSUNEMATSU, Katsuyuki SOMA

Abstract

The construction and the maintenance of forest roads with the proof against truck passages are required for the development of forestry. With recent situation of forestry, it is important to construct and maintain the forest roads in low cost. In the cold and snowy area such as Hokkaido, the frost heaving caused by soil freezing during winter season is a serious problem because it produces the failure or the cracks on the forest roads.

This paper conducted with a frost heaving test of road materials for the forest roads without a base course layer in Hokkaido. The basic freezing mechanism of the road materials is analyzed and the measures to prevent frost heaving in low cost is investigated. With the frost heaving tests with the open system and the closed system, the differences of the frost heaving pattern of road materials are determined. The most effective and the low cost frost heaving measures are: (1) the drainage of the road material (2) the water sealing construction to prevent the water infiltration into the road material.

Key words: forest road, road materials, frost heaving, frost heaving measure

I. ま え が き

林道の整備, すなわちトラック運材に耐える林道の造成, 整備は林業の発展にとって必要不可欠であるが, 昨今の林業を取巻く情勢を考慮すると, いかにして林道整備のコスト化を図るかが極めて重要な問題となっている。北海道のような積雪寒冷地域においては, 冬季の土壤凍結に伴う凍上現象が道路や構造物の破壊, 損傷をもたらすために, 林道整備に

際しては, 道路の凍上対策もまた大切な問題とされている。

凍上現象とは, 土壤が凍結する時に, 未凍結領域から凍結面に多量の土壤水が吸い上げられて凍結し, 氷晶分離によりレンズ状の氷晶 (アイスレンズ) が多量に形成されるために地面が隆起する現象である。道路の凍上被害には, 凍上過程における道路の破壊と凍結融解後の支持力低下による道路の破壊の両側面が考えられ, 後者は凍結領域の過剰な土壤水分に起因するものである。

* 本学土木科 Civil Engineering Dept., Hokkaido College, Senshu University.

** 北海道大学農学部 Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

道路の凍上対策としては、一般に凍上抑制材を用いた置換工法や断熱工法、薬剤処理工法、遮水工法等が採用され、とくに置換工法が多く採用されている。しかし、いずれも多額の経費を必要とする。

本研究は、路盤部（道路の支持力を担う部分）をほとんど持たない北海道の林道の路床土（従って、地山の土壌）について凍上試験を行い、路床土の基本的な凍上性を解明し、これから、林道における合理的かつ低コストな凍上防止対策を検討したものである。

II. 供試材料および凍上試験

1. 供試材料

凍上試験の試料として、空知支庁管内から2箇所

（道央—A、—B）、十勝支庁管内から2箇所（道東—A、—B）、宗谷・網走支庁管内から3箇所（道北—A、—B、—C）の林道（砂レキ層で構成される路盤部をほとんど持たない）の路床土を採取して供試した。これら3地域の積算寒度（日平均気温0°C以下の温度の値を積算したもの）はそれぞれ約560°C、700°C、630°Cと異なり、土壌の凍結環境が違う。試料の基本的な物理性を表1に示す。道東—A、—Bは砂質の火山灰土壌で、塑性を持たない（液性、塑性限界がNP；Non-plastic）。

一般に土壌の細粒分（74μmフルイ通過分）が20%以下の粗粒質の土壌は凍上性が低い土壌と判定される。表1から明らかなように、道東—Bの細粒分は25%であるが、他の試料は細粒分が60%以上にもなるから、粒度組成の面からは本研究で用いた試料は

表1 試料の物理性

試料	比重	自然含水比	液性限界	塑性限界	74μmフルイ通過分
道央—A(上幌)	2.73	34%	39%	27%	63%
—B(山良)	2.76	29	57	34	70
道東—A(十勝)	2.52	39	NP	NP	75
—B(十勝)	2.65	28	NP	NP	25
道北—A(歌登)	2.64	34	68	30	92
—B(金ヶ丘)	2.74	39	43	25	79
—C(興部)	2.77	19	51	25	72

極めて凍上性が高いことが予想される。

2. 凍上試験の方法

試料の4.76mmフルイ通過部分をアクリル製二つ割るモールドに入れ、所定の含水比(最適含水比)、乾燥密度(最大乾燥密度)で静的に締め固めて供試体を作製した(表2)。供試体寸法は、径5cm、高さ12.5cmである。供試体を毛管吸水させた後に(ほぼ飽和含水比状態に達する)、供試体の上端(冷却面)との下端の温度を一定に保つ温度勾配一定(冷却: -5 ± 0.4°C, 下端=水温: 5 ± 0.2°C)の開放型、閉鎖型凍上試験を行った。

凍上試験装置は図1に示すように、①所定の低温環境を作るための低温庫、②供試体部(二つ割りアクリルモールドを用いて作製した供試体と供試体に水分を補給するための水槽から成り、断熱材で被覆されている)、③水槽の水温を制御するためのサーモサーキュラー、④水槽内の水位を一定に保つためのマリオンネット給水管、⑤凍上量、温度の記録装置で

構成されている。

測定項目は凍上量、凍結過程の供試体の温度分布、凍上試験終了後の供試体の含水比・乾燥密度分布である。また、凍上量の測定は差動トランス式変位計により行い、供試体の温度分布は、供試体内部の種々の深さに熱電対温度センサーおよびサーミスターを設置して測定した。

図2は開放型、閉鎖型凍上の概略図を示したものの

表2 供試体の作製条件

試料	含水比(%)	乾燥密度(g/cm ³)
道央—A	28	1.46
—B	31	1.41
道東—A	36	1.21
—B	27	1.39
道北—A	39	1.24
—B	34	1.35
—C	22	1.62

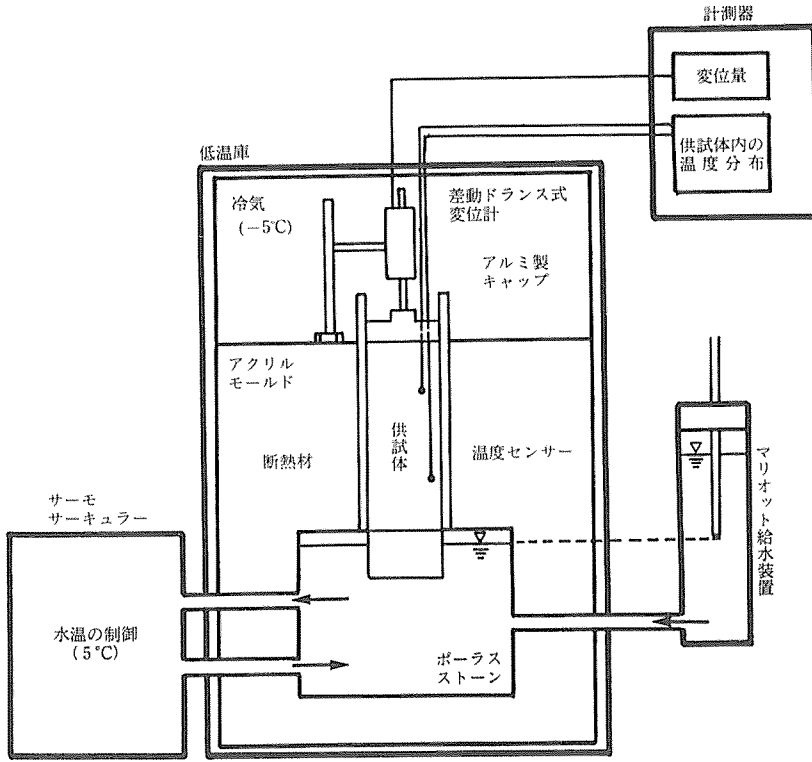


図1 凍上試験装置

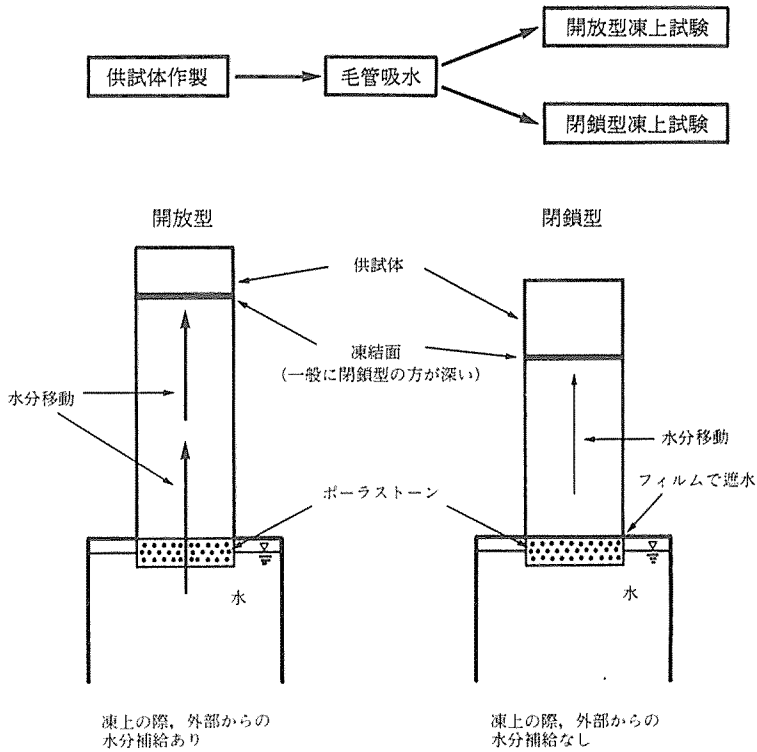


図2 開放型および閉鎖型凍上の概略図

である。開放型の場合は、凍結に際して供試体の下方（水槽）から水分が補給されるのに対し、閉鎖型の場合は供試体と下方の水槽が遮断されているため、凍上に関与する水分（凍結面に移動可能な水分）は毛管吸水後の供試体が保持する水分のみである。それゆえ、凍結に際して未凍結領域から凍結面に移動する水分量は前者の方が相対的に多くなる。従って、凍上様式の面から土壤の凍上性を比較すると、一般的には開放型凍上の方が閉鎖型凍上よりも凍上量が大きくなる傾向がある。

III. 結果と考察

1. 基本的な凍上性

土壤温度が0°C以下になると土壤水が凍結し、水（液体）・氷（固体）の相変化に伴い、9%程度の体積膨張が起こる。しかし、土壤中の凍結領域と未凍結領域の境界（凍結面）に未凍結領域から土壤水が多量に供給されて氷に相変化し、氷晶すなわちアイスレンズが分離析出する場合の土壤の体積膨張は、上述の9%をはるかに越えて非常に大きくなる。この氷晶分離（アイスレンズの形成と成長）に伴う土壤の体積の著しい増加によって、地面が隆起する現象を凍上（現象）という。土壤の凍上性を支配する因子は、凍結環境に関連する外的因子と凍結面への水分の移動性に関連する内的因子とに区別できる。

外的因子としては、①温度（凍結点以下の低温環境）、②凍結面への水分補給形態、③荷重（拘束条件）などがあげられ、内的因子としては、①水分特性（保水性、透水性）、②熱的性質、③土壤構造、④凍結履歴などがあげられる。

図3は、凍結過程における凍上量と供試体の温度（上端から0, 1, 6cmの深さ）の経時変化の一例（道央-A）である。冷却開始後30分程度で供試体表面（上端）の温度は-5°Cになり、深さ1cmの部分は20時間後に-2°Cで温度平衡に達するが、土壤凍結は生じない。0°C以下でも土壤（水）が未凍結な状態を、土壤が過冷却状態にあるという。サーマルショックが与えられて過冷却状態が破れ、凍結が開始すると潜熱が発生し、1cm深の供試体温度は0°C近傍にまで瞬間的に上昇する。図3から明らかなように、この時点で凍上が始まることから、土壤の凍結・凍上の開始は凍結の潜熱の発生（温度の瞬間的な上昇）により確認できる。その後、凍結が進行する（凍結面が供試体の下方に移行する）と共に凍上量は増大し、80時間後には凍上量は30mm、凍結面は

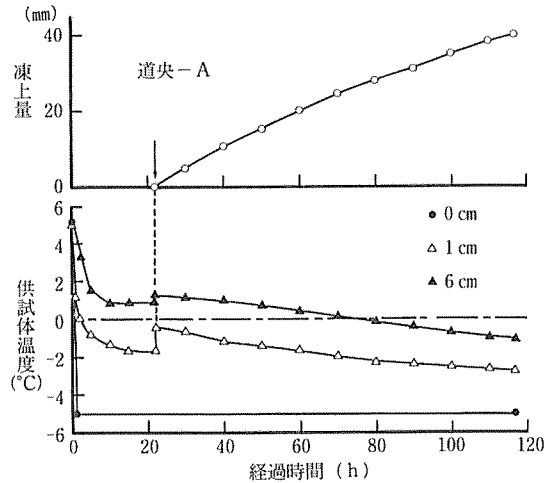


図3 凍上量と供試体温度の経時変化

6 cmの深さまで進行している。

開放型凍上試験による各試料の凍上曲線（凍上量、凍結面の経時変化）をを図4に示す。図4の時間軸は凍上開始後、すなわち凍結による潜熱の発生後からの経過時間とっている。

図4をみると、道央-Bと道東の試料は比較的凍上量が少なく、とくに道東-Bはほとんど凍上しない。また、90時間後には道央-B、道東-Aも凍上がほぼ停止する。これに対して、道央-A、道北の

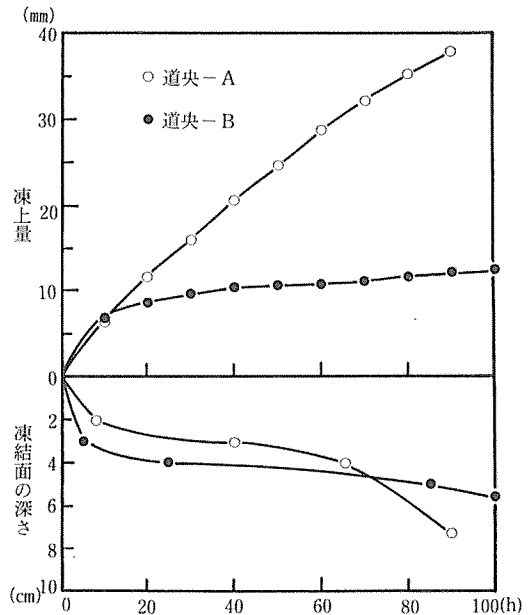


図4(a) 凍上量、凍結面の経時変化（道央-A, B）

試料の凍上量は大きく、道央-Aで顕著である。すなわち、凍上性は、道央-A > 道北-A > 道北-C > 道北-B > 道央-B = 道東-A > 道東-Bの順に低下する。また凍上性の高い試料では凍結面の進行が相対的に遅くなり、供試体の比較的上部で凍上が起こる。

アイスレンズが形成され、凍上が進行する時には凍結面において次のような熱平衡状態が維持されている。すなわち、 $[\text{①凍結面から凍結領域を通して上方へ熱伝導により移動する熱}] = [\text{②下方の未凍結領域から凍結面に熱伝導により移動する熱 (未凍結領域から凍結面への水分移動に伴う熱を含む)}] + [\text{③凍結面に存在していた水分の凍結潜熱}] + [\text{④未凍結領域から凍結面に供給された水分の凍結潜熱}]$ となる。

①, ②には土壌の熱的性質(主として熱伝導率)が大きく関与し, ③, ④には土壌の水分特性が大きく関与する。そして凍上性には①と④の相対的な大小が大きく関与する。従って、凍結面の進行が早すぎると熱平衡状態が維持されないために、凍上量は少なくなる。

そこで、図4の結果を③, ④の側面から以下に検証する。すなわち、上述の③, ④の大小は、凍結に伴う凍結領域の含水量の増加の程度から類推することができる。

図5は凍上試験終了後の供試体の含水比・乾燥密度分布を示したものであるが、道東-Bを除けば凍結面を境にして凍結領域の含水比は著しく増加し、未凍結領域は毛管吸水後含水比とほぼ同じ値を保っている。また、乾燥密度分布をみると、凍結領域は著しく減少し、凍結面直下の未凍結領域は凍上に起因する圧密(飽和状態での土壌の圧縮)のために乾燥密度が逆に増大している。毛管吸水後の凍結による含水比増加は道央-A (23%) > 道北-A (15%) > 道北-C (11%) > 道北-B (10%) > 道央-B (9%) > 道東-A (7%) > 道東-B (2%)の順に小さくなり、前述の凍上性の順に小さくなり、前述の凍上性の序列と対応している。

以上の開放型凍上試験による結果を基にすると、道東-Bについては凍上性の面では路床土としての利用に問題はなく、また、道央-B, 道東-Aについても凍上量が10mm(凍上率8%)で凍上が停止するので路床土として使用可能であるといえる。しかし、その他の試料は凍上性が高いので、路床土として用いるためには何らかの凍上対策が必要である。

2. 開放型凍上と閉鎖型凍上の比較

—路床土の凍上対策に関する一考察—

道央-Aについて、開放型、閉鎖型凍上試験(図2)による凍上曲線を図6に示す。これから道央-Aは開放型凍上では著しく高い凍上性を示すが、閉鎖型凍上では凍上量が極めて小さくなり、 $\frac{1}{2}$ 以下に減少することがわかる。すなわち、閉鎖型凍上試験による凍上曲線は道央-Bと非常に類似しており、この場合には路床土としての使用が可能であるといえる。

また、凍上試験終了後の供試体の含水比・乾燥密度分布をみると(図7)、閉鎖型凍上の場合には凍結領域

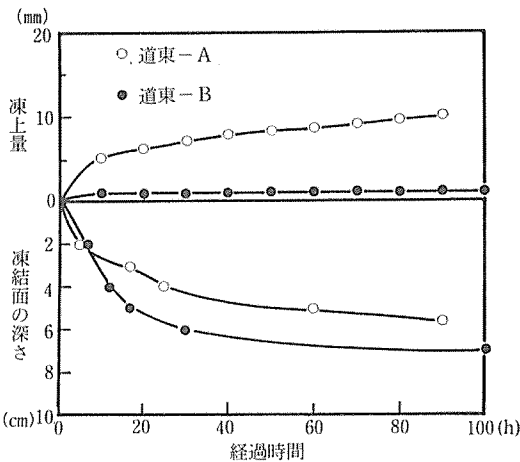


図4(b) 凍上量, 凍結面の経時変化(道東-A, B)

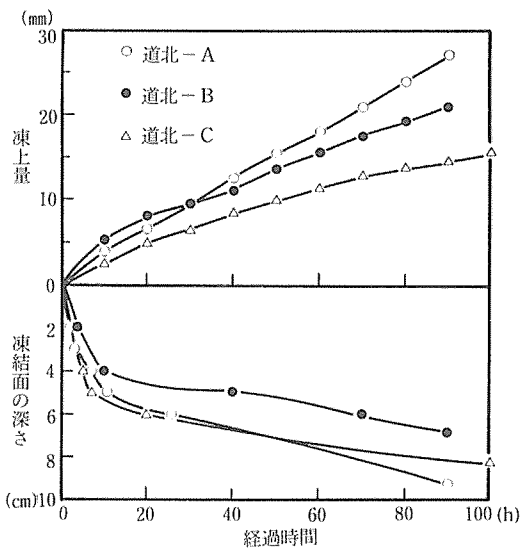


図4(c) 凍上量, 凍結面の経時変化(道北-A, B, C)

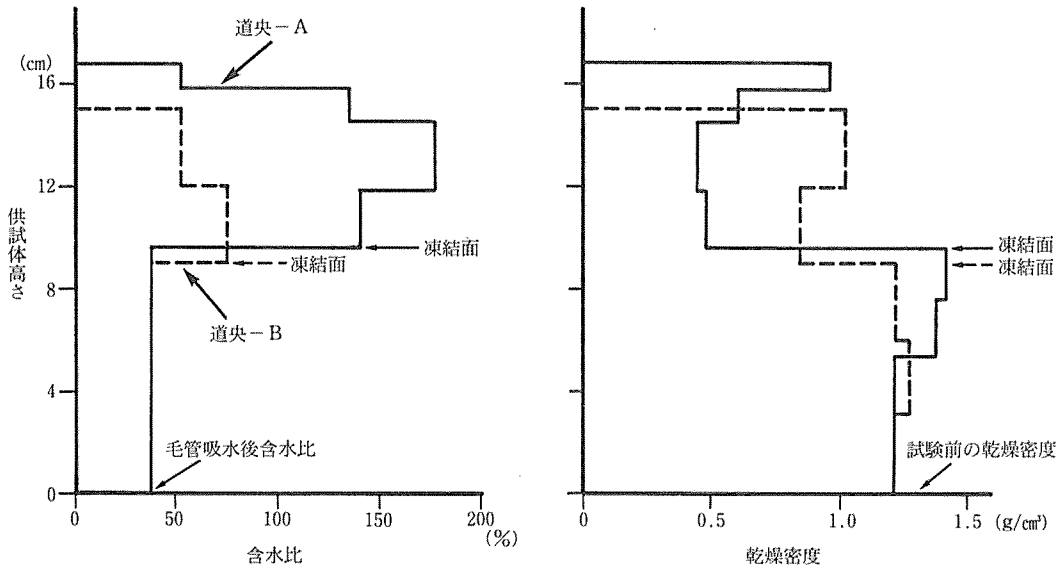


図 5(a) 凍上試験終了後の供試体含水比と乾燥密度 (道央-A, B)

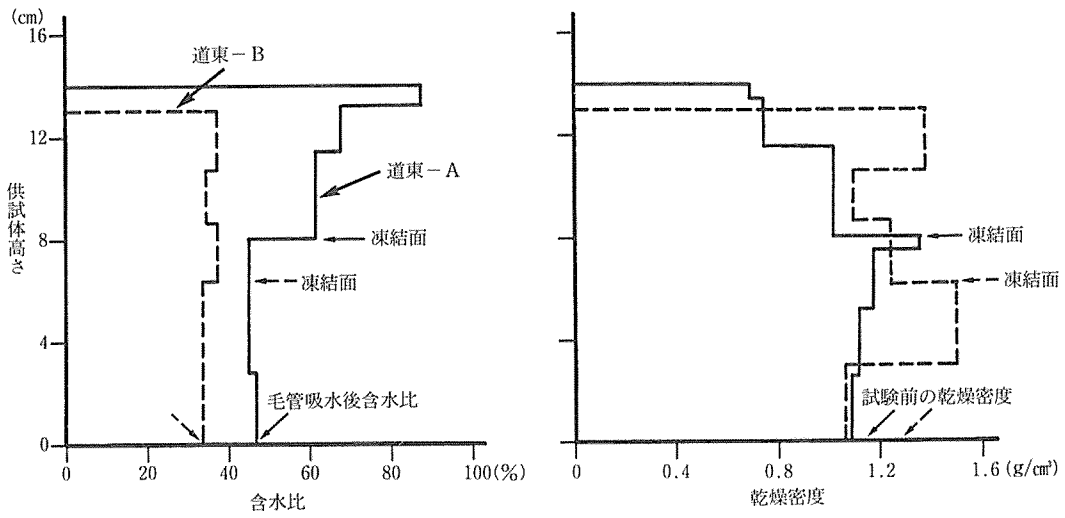


図 5(b) 凍上試験終了後と供試体含水比と乾燥密度 (道東-A, B)

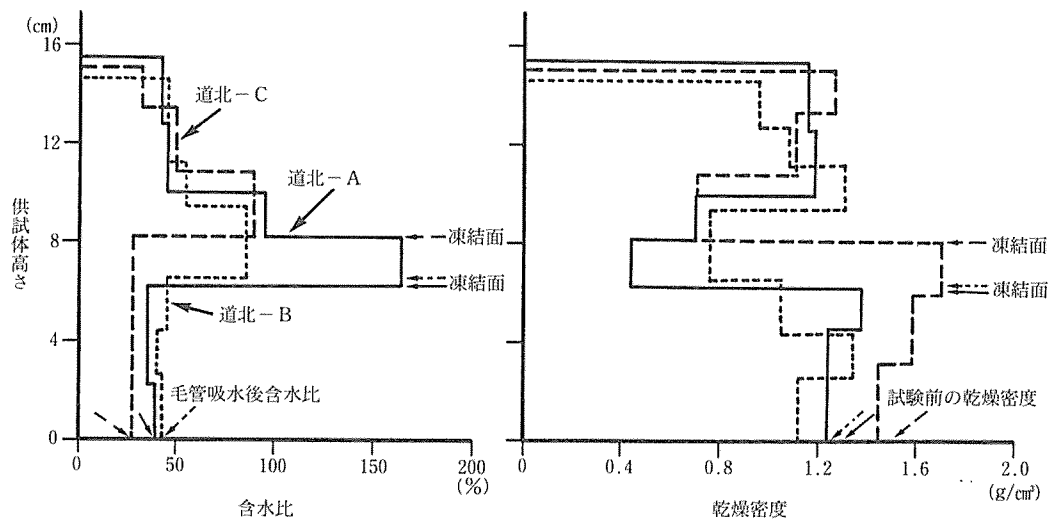


図 5 (c) 凍上試験後の供試体含水比と乾燥密度 (道北-A, B, C)

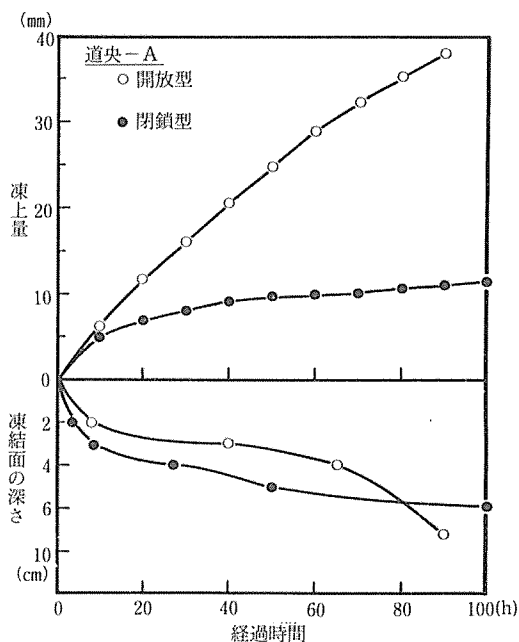


図 6 開放型, 閉鎖型凍上試験の凍上量と凍結面の経時変化

域の吸水量, 乾燥密度変化も小さく, 開放型凍上に比べて土壌構造の攪乱の程度が少ない。このことから凍結融解後における路床土の安定性 (支持力) も相対的に大きいことが予測できる。

先に述べたように, 土壌の凍上は凍結面に未凍結領域から多量の水分が供給され, アイスレンズが著しく分離析出する結果おこる現象である。それゆえ, もし未凍結領域から凍結面への水分移動が妨げられるならば (閉鎖型凍上の場合に対応する), 凍結面で氷に相変化する水分が非常に少なくなり, 凍結による土壌の体積膨張, すなわち凍上量は極めて小さなものになる。

図 6 の結果は, 例え開放型凍上で顕著な凍上性を示す土壌であっても, 凍結面への水分補給が阻害されるような閉鎖型凍上に類似の凍結環境に置かれれば, その凍上性は著しく減少することを示している。これは道路の凍上防止対策中の遮水工法に関連するものであり, 路床土の効率的な排水, 遮水を実施することにより, 特別の凍上対策を講じることなくその凍上性を抑制できる可能性を示唆するものである。

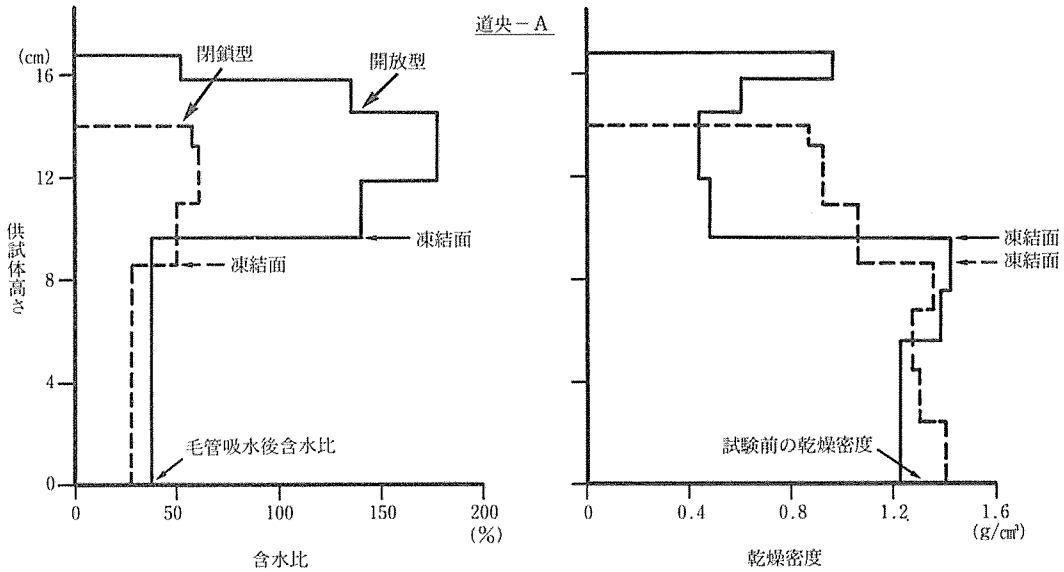


図7 開放型、閉鎖型凍上試験後の供試体含水比と乾燥密度

IV. あとがき

北海道内の凍結環境（積算寒度）が異なる3地域の林道（路盤部を持たない）について、その路床土の基本的な凍上性を調べ、さらに路床土の凍上性が高い場合の凍上防止対策に関して一提案を行った。

1) 今回の対象試料(道央；2試料，道東；2試料，道北；3試料)のうち，道央，道北の路床土は凍上性が高く，従ってこれらの路床土が凍結環境下に置かれる場合には何らかの凍上防止対策が必要である。

2) 開放型，閉鎖型凍上試験による路床土の凍上性の相違に基にして，効率的かつ低コストな凍上防止策を検討すると，

- ① 路床土の排水工
- ② 路床土への水の侵入を防ぐ遮水工

が最も有効な対策であると考えられる。

土壌の凍上機構は極めて複雑であり，さらに詳細

な解析が必要である。今後は他の地域の路床土について，その凍上性を調べるとともに，凍上性と密度に関連する土壌の熱的性質の面からの検討も行い，より有効な凍上防止対策の確立をめざす所存である。

参 考 文 献

- 1) Tarber's S. (1916): The Growth of Crystals Under External Pressure, Ame. Jour. off Sci. Vol. 41, No. 246, p. 532~556
- 2) 相馬尅之・前田隆 (1984): 火山灰土の凍上性, 土質工学会北海道支部技術報告集, 第24号, p. 169~176
- 3) 常松哲 (1985): 石炭産業廃棄物の農道利用に関する研究, 専大北海道紀, 第18号, p. 28~30
- 4) 常松哲・佐々木正剛 (1985): 在来路盤材の凍上性について, 第38回農士学会道支部研究発表会, p. 93~96

(1987年7月9日受理)