土の凍上性評価に与える 凍結方法および供試体寸法の影響

川端伸一郎¹・石川達也²・豊田邦男³・山内智⁴・亀山修一¹

¹正会員 博士(工) 北海道工業大学 空間創造学部 (〒006-8585 北海道札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目 4-1)

E-mail : kawabata@hit.ac.jp

²フェロー会員 博士(工) 北海道大学 大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

³東日本高速道路㈱北海道支社 室蘭管理事務所 (〒050-0055 北海道室蘭市崎守町 316-3)

⁴正会員 東日本高速道路㈱北海道支社 技術部技術企画課 (〒004-8512 北海道札幌市厚別区大谷地西 5-12-30)

NEXCO 基準の凍上試験 (NEXCO 法) に対して, 結果のばらつきを抑制するために凍結方法の改良を行った. また, JGS 基準の凍上試験 (JGS 法) を路床土や路盤材にも適応できるように $\phi 150\text{mm}$ まで大口径化した試験装置を作製し, 試験方法や供試体寸法の違いが凍上試験結果に及ぼす影響を調べた. NEXCO 法は, 凍結方法を空冷式から冷媒循環式に変更したことで安定した結果を得ることが可能となった. $\phi 150\text{mm}$ の JGS 法と一般に普及している $\phi 100\text{mm}$ の JGS 法の結果に違いはみられず, 大口径化した影響は少ないことが示された. NEXCO 法と JGS 法が非凍上性と判定する値は, ほぼ一致することが明らかとなった. しかし, 両法が一致した結果を得られる範囲は, JGS 法の凍上速度が 0.2mm/h 程度までであった.

Key Words: frost heave test, freezing condition, specimen size, JGS standard, NEXCO standard

1. はじめに

路床や路盤など舗装を構成する材料の凍上性や凍結融解抵抗性を調べるには幾つかの試験法がある. このうち, NEXCO 基準¹⁾の凍上試験 ($\phi 150\text{mm}$, NEXCO 法) は, 凍上性と併せて凍結融解後の CBR が測定可能で, 路床土の置換の要否または路盤や置換材の適性を判断する試験として広く知られている.

つぎに, 凍上性判定に限ると, 古くは道路土工排水工指針²⁾の凍上試験法 ($\phi 80\text{mm}$, $\phi 8$ 法) が知られるが, この方法は温度や吸水の不均一, 凍着による変位拘束など, 多くの問題点が指摘されている^{3),4)}.

地盤工学会 (JGS) では, 従来の凍上試験で指摘された問題を解消し, 土の物理的性質の評価として定量的な判断も可能な凍上試験法 (JGS 法) を 2003 年に基準化している⁵⁾. なお, 2009 年度版の道路土工要綱⁶⁾には, 初めて JGS 法が記載され, 旧式の $\phi 8$ 法に代わる推奨試験となったことから, 今後はさらに JGS 法が積極的に実務に活用されると考えられる.

ここで, JGS 法には供試体寸法の規定はなく, 基本的には目的に応じて自由な寸法設定が可能である. しかし,

一般には $\phi 100\text{mm}$ 程度の装置が広く普及しており, これは温度管理や試験機の取り扱い上のメリットによるものである. 仮に NEXCO 法のように凍上性と併せて凍結融解後の強度などを調べたい場合には, 装置の大型化が必要になるが, 大型化した JGS 法の実績はなく, 結果に及ぼす影響も定かではない.

そこで本論文は, 路床土や路盤材など舗装を構成する材料への適用を目的として大型化した $\phi 150\text{mm}$ の JGS 型凍上試験装置と一般普及型の $\phi 100\text{mm}$ の JGS 型試験装置との比較から, 供試体寸法が凍上試験結果に与える影響について考察した.

また, 指針などの整備により将来的にデータの蓄積が期待される JGS 法と過去から実績のある NEXCO 法との関係性を明らかにすることは, 今後の凍上問題の進展にも寄与するものと考え, JGS 法と NEXCO 法の関係性についても考察を加えた.

ただし, NEXCO 法については, 従来から結果のバラツキが問題となっていたことから, 原因と考えられる凍結方法の改良を試みたので, その効果についても併せて報告する.

表-1 NEXCO 型試験の改良に用いた試料の基本的諸元

試料名	土質分類	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	塑性指数 I_p %	細粒分含有率 F_c %	供試体密度 ρ_d g/cm ³	供試体含水比 w %
シルト質砂	SF-G	2.834	12.7	28.5	1.315	46.9

度を用いる。評価の基準は、凍上速度 U_h (mm/h) 0.1 未満で凍上性が低い、0.3 以上で高い、両値間は中位と判定される。本論文では、JGS 法を中心的に取り扱い、供試体寸法が凍上試験結果に与える影響や他の試験との関係性などについて考察した。

3. NEXCO 型試験における凍結方法の改良

(1) 気中冷却式の NEXCO 法の問題点

はじめに、本章における NEXCO 法の改良については、表-1 に示す強凍上性のシルト質砂を実験に用いた。

NEXCO 基準に従えば、凍上試験の冷却方法は気中冷却式である。しかし、この方式では冷凍庫内の位置関係で温度差が生じてしまい、凍上量のバラツキを誘発する。

また、庫内温度を-6℃に制御しても供試体の上端面温度は-6℃よりも高く、図-4 のように最低でも-3℃程度までしか低下しない。この結果、写真-1 に示すように凍結線 (0℃線) は、供試体の途中で停滞してしまい、水浸部 40mm を除く本来の対象範囲まで凍結が進行しない状態となる。

さらに、凍結開始時に行う氷核形成のためのサーマルショックも基準の条件 (気中温を-15℃で 1h) では、図-5 に示すように上端面温度は 0℃以下にならず、過冷却を脱するには至らない。このような状態では、凍上開始時間にタイムラグが生じてしまい最終凍上量のバラツキを引き起こす原因となる。

(2) 凍結方法の改良と温度条件の検討

気中冷却式の問題点を改善するため、改良型 NEXCO 法として上載荷重盤の内部に冷媒を循環させる冷媒循環式の凍結方法を考案した。

図-6 は、サーマルショックのため-15℃の冷媒を循環させた際の上端面温度の推移である。同図より 10 分程度で、過冷却を脱して氷核が形成されたことを意味する凍結潜熱の発生を確認できる。潜熱の発生を確認した後は、開始温度の 0℃付近まで温度を上昇させるが、この準備も 50 分程度で終了しており、本来の基準で定めた 1h 以内で円滑に氷核形成作業が完了している。

つぎに、基準型の気中冷却式では、上端面温度が一定

図-4 基準型 NEXCO 法の供試体温度

写真-1 基準型 NEXCO 法の試験後供試体

図-5 基準型 NEXCO 法のサーマルショック

図-6 改良型 NEXCO 法のサーマルショック

であるため、供試体の上部ほど凍結速度が速く、深部に至るほど凍結速度が遅くなる。この結果、アイスレンズの成長は深さ方向で不均一となり、前述の**写真-1**のように局所的に発達したアイスレンズとなる。このような状態を回避するため改良型では上端面温度を固定ではなく、一定速度で温度を降下させる条件とした。なお、このような凍結方法は JGS 型の凍上試験と同様である。

ここで、温度降下速度の決定に際しては、(1)実現象に近い凍結速度とすること、(2)現行基準の試験時間（144 時間）は変更せず、強凍上性の土質でも終了時に水浸部 40mm より上部が凍結することを条件とした。

(1)の凍結速度については、国内有数の極寒地である北海道道東地方の道路で過去に実測された凍結速度¹⁰⁾を参考に、目標値を 0.6mm/h と定めた。この目標値と試験終了時間の条件を加味して検討した結果、**図-7**に示すように 0.03℃/h の温度降下速度が両条件を満たすことが明らかとなった。**写真-2**は改良型 NEXCO 法の試験後のアイスレンズである。この写真からも凍結が水浸部 40mm 程度まで進行し、アイスレンズも均一に発生していることが確認できる。**表-2**は NEXCO 型凍上試験の改良点のまとめである。

(3) 凍結方法の変更による改良効果

NEXCO 法における凍結方法の改良効果を確認するため、基準型の気中冷却式と改良型の冷媒循環式で凍上試験結果を比較した(**図-8**)。なお、基準型は試験装置が異なる 2 つの機関で実施している。同図から気中冷却式は、個体誤差が大きく、機関の違いすなわち試験機の特性と考えられる影響も顕著に表れている。これに対して、冷媒循環式の改良型は、極めて安定した結果が得られることが明らかである。

4. 供試体寸法が JGS 型試験の結果に及ぼす影響

(1) JGS 型 (φ100) の凍上試験

JGS の基準に供試体の寸法規定はなく、目的に応じて自由な寸法設定が可能である。ただし、一般に普及している供試体寸法は、供試体作製の容易さなどから φ=100mm, h=50mm が多く、本論文でも一般普及型として JGS 型の φ100 法 (JGS φ100 法と称す) を実施した。

(2) JGS 型 (φ150) の凍上試験

本論文では、JGS 法として一般に普及している JGS φ100 法と併せて、**図-9**に示す NEXCO 法と同寸法の JGS φ150 法を実施した。なお、この寸法の試験装置は、粒状路盤材に対する凍上性および凍結融解抵抗性を調べる目的で作製したものである¹²⁾。

図-7 改良型 NEXCO 法の上端面温度と凍結速度

写真-2 改良型 NEXCO 法の試験後供試体

表-2 NEXCO 型凍上試験の改良点

項目	基準型 (旧型)	改良型
冷却方式	気中冷却式	冷媒循環式
氷核形成 (サーマルショック)	-15℃の気中温で1時間	-15℃の冷媒循環で 凍結潜熱を確認
凍結方法	-6℃固定で144時間	0.03℃/hの温度降下 速度で144時間
荷重 (応力)	5kg (2.78kPa)	
判定	凍結様式と凍上率 (コンクリート状凍結で5%未満が合格)

図-8 凍結方法の違いが NEXCO 法の結果に与える影響

図-9 JGS 型の凍結融解 CBR 試験装置 (JGS φ 150 法)

図-10 試料の粒径加積曲線 (室内調整試料)

表-3 凍上試験法の比較に用いた試料の基本的諸元

	試料名	土質分類	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	塑性指数 I_p %	細粒分含有率 F_c %	供試体密度 ρ_d g/cm ³	供試体含水比 w %
室内調整試料	礫質砂 (単体)	SG	2.576	NP	0	—	—
	木節粘土 (単体)	CH	2.496	25.2	95.0	—	—
	Fc10 ($F_c=10\%$)	—	—	—	9.5	1.623	19.5
	Fc15 ($F_c=15\%$)	—	—	—	14.3	1.596	21.7
	Fc20 ($F_c=20\%$)	—	—	—	19.0	1.556	24.7
天然採取試料	砂質土 (粗粒土)	S-FG	2.720	NP	16.7	1.377	25.9
	粘性土 (細粒土)	CL	2.748	23.8	61.0	1.391	28.7
	火山灰土	SV-G	2.498	NP	43.9	0.918	51.9

(3) 実験試料

各凍上試験の比較には、表-3 に示した 6 種類の試料を用いた。この試料群は 2 つに大別され、1 つは粗粒分（礫質砂）と細粒分（木節粘土）を人工的に配合した室内調整試料であり、細粒分 F_c を 10%、15%、20% に変化させたものである（図-10）。これに対する群は、自然地盤から採取した天然試料 3 種類であり、図-11 に示すような砂質土（粗粒土）と粘性土（細粒土）、火山灰土である。

(4) JGS 型試験における供試体寸法の影響

凍上試験における供試体の直径は、冷熱を加える断面積を変化させるため、大口径化することで温度制御が不安定になる恐れも考えられる。また、側面からの熱の影響や周面摩擦も寸法によって変化する可能性もある。

図-12 は、結果の一例として JGS 法における Fc15 の凍上量 - 時間曲線である。なお、φ 100 法は 2 連式の装置であるため 2 回の測定結果が得られている。同図から凍

図-11 試料の粒径加積曲線 (天然採取試料)

上速度（曲線の最急勾配）は、φ の違いによらず、ほぼ同等の値が得られることが分かる。また、φ 150 法の供試体高さは $h=125\text{mm}$ であり、φ 100 法 ($h=50\text{mm}$) と比べて倍以上としたことから、試験後半に凍上速度が低下する恐れも懸念されたが、本結果からはその影響も少ないことが示された。

図-13 は、JGS 型の φ 100 法と φ 150 法の結果比較である。同図における φ 100 法の 2 回の結果からは、JGS 法の再現性の良さが確認できる。また、φ 100 法と φ 150 法の比較から両者の差は僅かであり、φ を 150 に大口径化した影響はないと判断した。以上のように、φ の影響が少なかったことから、以降は φ を区別しない平均値を説明に用いる。

5. NEXCO 型試験と JGS 型試験の関係性

(1) 改良型 NEXCO 法の凍上試験結果

NEXCO 型試験と JGS 型試験の関係性を明らかにするため、4(3) で示した 6 種類の試料を用いて改良型 NEXCO 法を実施した。図-14 は、供試体 3 体で実施した NEXCO

図-12 JGS 法における凍上量 - 時間曲線 (Fc15)

型試験の結果である。同図から改良型 NEXCO 法の再現性の良さが確認でき、前述した 3(3) の結果と同様に、冷却方法の改良が高い効果を上げていることが分かる。なお、このような結果が得られたことから、以降は平均値を説明に用いる。

(2) 両試験における凍上率と凍上速度の関係

図-15 は、NEXCO 法による凍上率と JGS 法による凍上速度の関係である。まず注目したのは、両試験がそれぞれで非凍上性の判定基準とする JGS 法の凍上速度 0.1mm/h と NEXCO 法の凍上率 5% がほぼ一致することである。したがって、非凍上性材料の判定においては、両試験とも大差なく同様の結果を得るものである。しかし、凍上性が増すと NEXCO 法による凍上率が JGS 法の凍上速度よりも増加割合が鈍化している。

(3) 载荷応力が凍上率に及ぼす影響

このような両試験の相違を詳しく検証するため、JGS 法では通常求めない凍上率を算出し、NEXCO 法による凍上率と比較することとした。なお、JGS 法が凍上率を用いない理由は、試験装置の特性や供試体の不均一などにより、凍上量 - 時間曲線が一本の直線にならない場合があり、この影響で最終凍上量にばらつきが生じる可能性があるためである。このため JGS 法では、凍上量 - 時間曲線の最急勾配を凍上速度と定義することで、結果の安定性を確保し、併せて安全側の評価になる配慮をしている。

前述の図-12 で示したように、本研究で得られた凍上量 - 時間曲線は、終始一定の直線性が確保されており、凍上速度の再現性は高いことが明らかである。また φ100 法における 2 回の結果からは、最終凍上量も比較的安定して求まることが確認でき、その他の試料についても傾向は同様であった。これにより、本研究で用いた装置および試料については、凍上率を考察に用いても問題はな

図-13 φ の違いが JGS 法の結果に及ぼす影響

図-14 改良型 NEXCO 法の凍上試験結果

図-15 JGS 法の凍上速度と NEXCO 法の凍上率の関係

図-16 JGS 法における凍上率と凍上速度の関係

な一義的な関係が得られる。

図-17 は、NEXCO 法による修正凍上率と JGS 法による凍上率の関係である。ここで、修正凍上率とは本研究において便宜上求めた凍上率である。NEXCO 法では、凍上率を供試体の初期高さ $h=125\text{mm}$ から算出するが、図-2 に示したように同法では供試体下部40mmが水浸しているため全体が凍結の対象とはならない。一方で JGS 法は供試体全体が凍結の対象である。そのため NEXCO 法においては、 $h=85$ (125-40) mm とした修正凍上率で比較することにした。

図-17 の関係から、凍上率は NEXCO 法の値が大きいことが分かる。しかし、凍上は凍結速度や載荷応力に依存することが知られており¹¹⁾、JGS 法と NEXCO 法では載荷応力に違いがある。JGS 法は 10kPa の応力であるのに対して、NEXCO 法は 2.78kPa (荷重盤で 5kgf) のため、両試験の差がこの応力比 (10/2.78) のみと仮定した場合の関係線を図中に加算した。このような関係からみると、NEXCO 法の修正凍上率で 30%程度 (JGS 法では 10%程度) までは、両者は良く一致するようである。ただし、それ以上の凍上率では、NEXCO 法が過少に評価されている。

(4) 凍結速度が両試験結果に及ぼす影響

このような傾向を示す理由は、NEXCO 法が凍結速度ではなく凍結時間を固定するためであり、特に凍上性が高くなると試験中の凍結速度が大きく変化するためと考えられる。そこで、図-17 で両試験の一致がみられた Fc10 と差異がみられた火山灰土を例に挙げ、図-18 と図-19 に NEXCO 法における凍上量 - 時間曲線を示した。これらの関係を見ると Fc10 は時間内に凍上がほぼ収束しているのに対して、火山灰土は試験終了時も凍上が完了していないことが分かる。図に示した↓は JGS 法が定める凍結速度 1~2mm/h に相当する経過時間であるが、Fc10 はほぼこの時間内で凍上を完了していることから、JGS 法との凍結速度の類似が両結果を一致させる理由と考えられる。

(5) 両試験の関係性と適応限界

以上のことから、NEXCO 法が JGS 法と類似した結果を得られる範囲は、JGS 法の凍上率で 10%程度までであり、これは図-16 の関係からみると凍上速度で 0.2mm/h 程度に相当する値である。ちなみに、0.2mm/h は凍上性が中位と判定される値である。すなわち、現行の NEXCO 法においても非凍上性材料の判定をする上では、JGS 法と同程度の精度が担保されていると考えることが可能である。しかし、0.2mm/h 以上の凍上性を示す土に対して定量的な凍上性評価を行うには、NEXCO 法では限界があり、このような目的には本研究で用いた JGS $\phi 150$ 法

図-17 NEXCO 法と JGS 法の凍上率の関係

図-18 NEXCO 法における凍上量 - 時間曲線 (Fc10)

図-19 NEXCO 法における凍上量 - 時間曲線 (火山灰土)

が有効である。

6. まとめ

本論文は、路床土や路盤材など舗装を構成する材料への適用を目的として製作した $\phi 150\text{mm}$ の JGS 型凍上試

験装置と一般普及型のφ100mmのJGS型試験装置との比較から、供試体寸法が凍上試験結果に与える影響について考察した。また、従来から指摘されていたNEXCO法の問題点を解消するため、凍結方法の変更を試み、その効果を検証した上で、JGS法とNEXCO法との関係性を明らかにした。結果の詳細は以下の通りである。

- 1) 気中冷却式のNEXCO法の問題点を整理し、冷媒循環式の改良型NEXCO法を考案した。
- 2) 実測された道路の凍結速度と供試体全体が凍結することを目標条件として、改良型NEXCO法の温度降下速度を0.03°C/hに定めた。
- 3) 気中冷却式と冷媒循環式の結果比較から、改良型NEXCO法の再現性の高さが確認された。
- 4) JGS型のφ100法とφ150法の結果には大差がなく、φを大口径化した影響はみられない。また、φによらずJGS型凍上試験の再現性の高さが確認された。
- 5) JGS法とNEXCO法が、それぞれ非凍上性の判定基準とする凍上速度0.1mm/hと凍上率5%は、ほぼ一致することが示され、非凍上性材料の判定においては、両試験とも大差がないことが確認された。
- 6) JGS法とNEXCO法が類似した結果を得られる範囲は、JGS法の凍上速度で0.2mm/h程度までである。この範囲までは、NEXCO法においてもJGS法と同程度の精度が担保されていると考えられるが、さらに高い凍上性を示す土に対しては、本研究で用いたJGSφ150法が有効であった。

謝辞：本研究の一部は、平成23年度～平成26年度科学研究費補助金（基盤研究(B)）、課題番号：23360201、研究代表者：石川達也）の交付を受けて実施されたものである。末筆ながらここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路公団：φ150法による土の凍上試験方法，JHS-112-2001，pp.287-297，2001.
- 2) 日本道路協会：道路土工排水工指針，資料-10，pp.238-243，1987.
- 3) 常松 哲：現行凍上試験の問題点について，土木学会第42回年次学術講演会，pp.672-273，1987.
- 4) 水島達朗，川村和幸，斉藤敏彦，石田 樹：室内凍上試験の改良について，第26回土質工学研究発表会，pp.1095-1096，1991.
- 5) 地盤工学会：凍上性判定のための土の凍上試験，JGS0172-2009，2009.
- 6) 日本道路協会：道路土工要綱（平成21年度版），資料-12，pp.396-416，2009.
- 7) 伊福部宗夫：北海道における道路の凍上・凍結深さおよび置換率に関する研究，土木試験所報告，Vol.26，1962.
- 8) 日本道路公団試験研究所土工研究室：土の凍上性判定に関する実験・検討報告書，pp.31-34，1997.
- 9) 日本工業規格：CBR試験，JISA1211，2009.
- 10) 豊田邦男，辻野英幸：凍結方法の違いによる土の凍上性判定，地盤工学会北海道支部技術報告集第43号，pp.355-360，2003.
- 11) 高志 勤，益田 稔，山本英夫：土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度・有効応力の影響に関する研究，雪氷，No.36，pp.49～68，1974.
- 12) 川端伸一郎，石川達也，村山 巧，亀山修一：粒状路盤材の支持力特性に及ぼす凍結融解履歴の影響，土木学会論文集E1（舗装工学論文集17巻），Vol.68，No.3，I_115-I_122，2012.

INFLUENCE OF FREEZING CONDITION AND SPECIMEN SIZE ON EVALUATION OF FROST-SUSCEPTIBILITY

Shinichiro KAWABATA, Tatsuya ISHIKAWA, Kunio TOYOTA,
Satoru YAMAUCHI and Shuichi KAMEYAMA

The freezing condition of the NEXCO standard frost heave test (NEXCO method) was improved with the objective of reducing the variation in the results. Also, a large diameter testing apparatus was produced with a diameter up to φ150 mm to enable the JGS standard frost heave test (JGS method) to be applied to subgrade soil and base course material, and the effect of the difference in the test method and the specimen size on the frost heave test results was investigated. Stable results could be obtained by changing the freezing condition of the NEXCO method from an air cooled type to a refrigerant circulation type. No difference was seen between the results of the φ150-JGS method and the φ100-JGS method, which indicates that the effect of the increase in diameter is small.