凍上に関する調査方法

Damage due to Frost Heave and its Mitigation in Roads and Other Structures

黒田 修一*
Syuichi Kuroda

4. 凍上に関する調査方法

凍上は積雪寒冷地に限らず、九州のような暖かい場所でも標高の高い箇所では発生しており、東京近辺でも普通には気付かれない規模ではあるがほぼ毎年発生している。

凍上の調査は、凍上を支配する三要素である土質・気象条件・地下水について行うことが必要である。気温については現場近くの測候所のデータを使用することも可能であるが、土質・地下水に関しては現地踏査が必要となる。

実際の調査に当たっては、新規の道路建設、既存道路の改良、既存道路の凍上被害調査、建物・構造物の新築、既存建物・構造物の凍上調査等で調査項目は変わるが、ここでは全項目を取り扱っている。調査対象の道路・建築・構造物の性格に応じて調査項目は取捨選択していただきたい。なお、重要度の高い構造物については、可能な限り原位置で実測による地盤の凍結深さや凍上量の測定を行うことが望ましい。

4-1 土質調査・試験

土質調査・試験は、凍上対策の適否を決める最も基本となる資料である。調査は、切土区間の基礎地盤と盛土区間の盛土材料に分けられる。表4-1-1に調査・試験項目の一覧表を示す。

(1) ボーリング調査

ボーリング調査は、地形・地質的な判断のもとに適切な間隔で実施し予測される凍結深さまでの土質分布や地下水位の位置などを調べる。凍結深さ程度であればオーガーボーリング等の簡易な原位置調査

で対応が可能である。また代表的な土層については、試料土を採取し室内土質試験を行うことが望ましい。

(2) 土質材料の分類

土質材料の簡易な分類は、肉眼による観察や、手指による感触により判断することが可能である。表4-1-2は、久保ら⁹⁾が北海道の土を用いて土質材料の代表的な特徴をまとめ、土の分類とCBRとの関係を整理したものである。但し、土質材料の分類とCBRは一義的に関連づけることは難しく、これらの表は一つの目安値であり実情を考慮して用いる必要がある。

(3) 室内土質試験

室内土質試験については、基本的な物理試験についてのみ行うものとした。他の試験から得られるものとして塑性指数、透水係数、サクション（土の保水性）などがあるが凍上性の判断基準としてはっきりとした目安がないため今回の試験項目には入れていない。

一般には土の粒度分布による判定が最も重要な要素・実用的な方法であり、図4-1-1に示す範囲の粒度分布をもつ土は凍上を受け易いとされている。一般に、0.1mm以上の砂では凍上現象は起きないとされている。0.05mm～1.0mmの粒子を含む土から凍上が起こり始め、以下粒径が小さくなるにつれて凍上性が強くなり、0.005mm～0.002mmの土粒子が最も凍上性が強い。またこれより粒径が小さくなると透水性が悪くなるため凍上は起きにくい。日本全国に数多く分布する火山灰質粘性土（ローム）はシルト分が多く含水比が高いため凍上災害を発生

* (株)建設企画コンサルタント

表4-1-1 土質調査・試験項目一覧表

調査・試験項目		調査結果から得られる項目	検討項目	調査区分	
				基礎地盤	盛土材料
ボーリング調査		土質柱状図	凍上性土層区分の把握	○	—
物理試験	粒度試験 ¹⁾	粒径加積曲線	粒度分布による凍上性の把握	○	○
	土粒子の密度試験 ¹⁾	土粒子の比重 G_s	凍上性把握のための資料	○	○
	含水比試験 ¹⁾	自然含水比 W_n (%)	保有水分量の把握	○	○
	強熱減量試験 ¹⁾	強熱減量値 L_i (%)	有機物、化合・結晶水の含有量	○	○
	凍上試験 ^{2, 3)}	凍上率	凍上性の把握	△	△
凍結融解試験 ³⁾		凍結融解後の CBR 値	融解後の強度低下	△	△

△：試験頻度小 ○：試験頻度大

表4-1-2 土質材料の分類⁴⁾

名称	粘性土	砂質土	火山灰	砂	レキ質土
含水状態	多い	比較的多い	少ない	少ない	少ない
期待設計 CBR	2～3	3～6	4～6	5～9	10～40
代表的な特徴	塑性が大きく自然含水比が50%以上のことが多く手で握ると粘つく支持力は小さい。	砂分が少なく、いわゆる粘土の割合が多い。自然含水比は40～50%程度のが多く手で握ると適度な粘性があり自由に変形させることができる。	手で握るとサクサクした感じできずれ易い。未風化で排水性が良く、自然含水比は40%以下のことが多い。	大部分は肉眼で砂とわかる粒子で、排水性が極めてよく手でぎってもやがてくずれる。自然含水比が20%以下のことが多い。	レキ分が多く排水性が極めて高い。

表4-1-3 日本道路公団の材料仕様⁵⁾

項 目		材 料 の 品 質
最大寸法 (mm)		各部位の規定による
粒 度	砂	0.074mm ふるい通過量が全試料の6 %以下
	切込砂利	0.074mm ふるい通過量が4.76mm 通過量の9 %以下
	切込碎石	0.074mm ふるい通過量が4.76mm 通過量の15%以下
	火山灰質砂質土	0.074mm ふるい通過量が全試料の20%以下で強熱減量が4 %以下であり、 かつ風化の
	火山礫	徴候がなく排水性が良好なもの

図4-1-1 凍上を起こしやすい土の粒度分布

しやすい。ただ火山灰質土の場合、ほとんど凍上しないものもあるので注意を要する。

土質試験の結果から凍上を起こしにくい材料の判定として以下のような判断基準がある。

1) 日本道路協会「道路土工：排水工指針」²⁾

凍上を起こしにくい材料としては、材料の種類に応じて次のようなものが望ましい。

①砂：0.075mm ふるいを通過する量が6%以下。

②切込み砂利：全試料について0.075mm ふるいを通過する量が4.75mm ふるいを通過する量に対して9%以下。

③切込み碎石：全試料について0.075mmふるいを通過する量が4.75mmふるいを通過する量に対して15%以下。

④火山灰、火山礫：粗粒で風化の徴候がなく、排水が良好で、0.075mmふるいの通過量が20%以下であり強熱減量が4%以下のもので、しかも凍上試験によって凍上を起こしにくい材料と判定されたもの。

2) 日本道路公団「設計要領」⁵⁾

凍上を起こしにくい材料として表4-1-3のような材料仕様が標準とされている。但し同表の品質を満たさない材料の中にも凍上を起こしにくい材料も多く、凍上試験等により適否を判定するものとする。

盛土材料の場合、初期含水比が25%以下であれば、有害な凍上が発生しないと考えられている。

(4) 凍上試験・凍結・融解試験

火山灰や風化作用を受け軟質で細粒な泥質岩や凝灰質岩などは、凍上試験及び凍結融解試験を実施することが望ましい。凍上試験方法は、現状の指針類において道路土工排水工指針（北海道開発局で基準化された試験法）と日本道路公団で基準化された方法がある。両者の違いは使用するモールドの大きさ、用いる試料の最大粒径等が異なり凍上率の判定法にも若干の違いがある。凍結融解試験については、日本道路公団試験方法²⁾（土の凍上試験方法の中に記述）において凍結融解試験の方法が示されているが材料規定の判定では採用されていない。また道路土工排水工指針でも、融解時の試験については規定されていない。但し火山灰質土は凍結融解作用によって細粒化する恐れがあり、融解期の支持力低下が他の材料に比べて大きい場合ため試験を必要とする場合もある。各々の試験方法の詳細及び凍上性の評価方法については日本道路協会道路土工排水工指針²⁾「土の凍上試験方法」（PP238～243）及び日本道路公団試験法³⁾「土の凍上試験方法（KODAN112-1985）」を参照されたい。

土の凍上試験に関しては、地盤工学会で基準化の委員会が発足され基準化に向けて検討されている段階にある。これらの詳細については「9. 凍上試験方法」において紹介することになる。

4-2 気象条件の調査

気象条件の調査は、以下に示す項目について調査と検討を行う必要がある。

①気温：月平均気温、日平均気温

凍結指数（日平均気温が0℃以下になっている期間の日平均気温の累計）

②雪：積雪深、積雪期間、融雪期

③風：風速、風向

④日照：日照時間

気温を用いて求められる凍結指数と積雪深は地盤の凍結深さを推定する上で特に重要なデータである。気温データの収集は12月～3月（北海道などの寒さの厳しい地域では11月、4月の観測値を用いる場合もある）まで行う。現地での実測による観測気象データがない場合には、現場の環境条件（日照時間、風の強弱、標高、人家の密集度など）にできるだけ近い最寄りの気温観測所や現場事務所などのデータを用いることが望ましい。また、現地と観測所との標高差については気温の補正を行う。補正量は、標高差100mにつき一日の平均気温が0.5℃変化するとしている。表4-2-1に日平均気温を用いた凍結指数の算出例を示す。

凍結指数の求め方は、日平均気温の累計値が最大になる日から日平均気温の累計値が最小になる日までの日平均気温を積算したものである。表4-2-1に示すようにプラスとマイナス側の最大値を重ね合わせたものが凍結指数である。日平均気温は、実用上、日最高気温と日最低気温の平均を用いれば十分である。また、気温測定を行った場合は、4点法（0時、6時、12時、18時の平均気温）により日平均気温を求めればよい。

現在の「アスファルト舗装要綱」⁵⁾では「n年確率凍結指数」を採用し統計的な数値を求めることとなっている。なお同指針では過去10年間程度のデータによる統計値から数値が求められている。図4-2-1～4-2-3¹¹⁾は北海道、東北地方の各地の測候所における観測開始以来のデータから各年度毎の凍結指数を計算したものである。これらの図から、①戦前は現在に比較して非常に寒かったこと、②最近10年は特に暖かかったこと、③大まかな10年周期があるこ

表4-2-1 日平均気温から求めた凍結指数

月	日	1	2	3	23	24	25	26	27	28	29	30	31	④
11	日平均気温	8.7	4.1	3.7	1.5	6.0	8.8	-0.7	0	1.2	6.0	1.3		
	累計	8.7	12.8	16.5	90.3	96.3	105.1	104.4	104.4	105.6	111.6	112.9		+最大 112.9
12	日平均気温	-4.5	-5.8	-5.7	-6.2	-8.8	-11.0	-11.9	-12.8	-7.0	-9.1	-8.5	-6.9	
	累計	108.4	102.6	96.9	-6.9	-15.7	-26.7	-38.6	-51.4	-58.4	-67.5	-76.0	-82.9	
1	日平均気温	-5.7	-6.7	-9.2	-6.1	-9.1	-8.1	-4.2	0.4	-5.2	-6.2	-11.2	-11.9	
	累計	-88.6	-95.3	-104.5	-285.0	-294.1	-302.2	-306.4	-306.0	-311.2	-317.4	-328.6	-340.5	
2	日平均気温	-11.4	-10.7	-1.3	3.8	-1.2	-3.0	-4.7	-6.0	-7.1				
	累計	-351.9	-362.6	-363.9	-498.6	-499.8	-502.8	-507.5	-513.5	-520.5				
3	日平均気温	-4.2	-1.2	2.7	0.8	-0.2	0.3	3.9	5.7	2.6	1.4	5.0	5.0	
	累計	-524.8	-526.0	-523.3	-550.2	-551.4	-551.1	-541.5	-541.5	-538.9	-537.5	-532.5	-527.5	-最大 551.4

凍結指数 112.9+551.4=664.3℃・days

図4-2-1 凍結指数の経年変化（月平均気温使用：北海道，東北）

図4-2-2 凍結指数の経年変化（月平均気温使用：東北1）

図4-2-3 凍結指数の経年変化（月平均気温使用：東北2）

と等がわかる。これらの図から考えると過去10年間程度のデータによる統計では不十分であり、道路管理者として設計に用いる凍結指数は、より長い期間のデータを用いる必要があるものと思われる。今後、性能規定が要求されると共に安全性と経済性を調和させた凍結指数を算出するには、できるだけ長い年数のデータに基づいて求めた最大凍結指数を採用することが望ましい。

舗装路面に積雪がある場合には、雪が断熱材の役目を果たし凍結が起こりにくくなる。「道路土工：排水工指針」²⁾では積雪による凍結深さに与える影響として積雪の熱伝導率と凍結土の熱伝導率の比から次式のような関係式²⁾が示されている。

$$Z_f = (7.5 \sim 10.0) Z_s$$

積雪と等価な凍結土の厚さ Z_f は、積雪深さ Z_s の7～10倍となる。このことは、10cmの積雪が継続的にある場所では、70～100cmの土が上に載っているのと同じことになり、それ以上の凍結深さになって初めて実際の地面が凍結を起こすことを示している。

軽交通舗装設計要領（北海道版）⁴⁾では、除雪水準の低いL2交通（大型車交通量30台未満）において路面積雪を考慮した置換え深さを低減した設計が採用されている例もある。

4-3 地下水位の調査

地下水位の把握は、土質調査時（現地踏査やボーリング調査）に地下水の位置や分布、滞水層の有無

などを明らかにする必要がある。その他、地下水調査における留意点を以下に示す。

- 1) 地下水位の季節による変化、降雨や融雪期における水位上昇を気象、地形、地質条件から判断する必要がある。
- 2) 河川の出水や湖沼の水面変化に起因する地下水位面の変化を把握する。
- 3) 両側または片側の切土による道路建設を行う場合に、近接する高地から路盤、路床内への浸透が生じる。この場合、自然の地下水位面が低くとも路肩付近から高含水比になることが多い。また切土の土質構成が不透水層の上に透水層が堆積している場合には一時的な地下水面が形成され湧水を生じ、凍上の要因となることがある。
- 4) 種々の土質材料について室内試験を行ったところ、自然含水比、地下水位と凍上量には図4-3-1に示すような関係があり、自然含水比が25%以下よ

図4-3-1 凍上量と地下水位の関係⁵⁾

り低く、地下水位が3m以深であれば地表面の凍上量が急激に小さくなるという研究成果もある⁵⁾。

4-4 現地踏査による主な調査箇所

凍上対策に関する基礎資料を得るために、現地踏査によって凍上被害箇所の抽出を行う際の留意点について示すものとする。

- 1) 長大切土(8m以上)やオーバブリッジなど日照条件の悪い箇所(特に北向きののり面の日陰になる箇所)。
- 2) 比較的地下水位が高く水の供給がされ易い片切片盛、両切土では凍上の影響を受け易い。特に路側に設置される集水升や側溝には注意を要する。
- 3) 土被り厚さの薄い横断函渠や断面の大きいパイプ等がある盛土部では、横断構造物の内空側から寒気が入り冷却されるため、ほかの部分より凍上量が大きくなって道路横断方向の路面にクラック等を生じ冬期間の高速走行に危険性をもたらす(図4-4-1参照)。
- 4) 小川、河川付近は、地下水位面変化にともなう凍上に注意が必要である。
- 5) 500m程度以下のトンネルでは、方向によって風の通り道となるため、トンネル内の方が明かり

部よりも低温となるために凍上やつららの影響を受けやすい。

- ①湧水等の水の供給がある場合、路面及び監査路などでの凍上やトンネルのコンクリート覆工背面の地山の凍結にともなうコンクリート覆工のはらみ出し、つらら等被害を生じることがある。
- ②トンネルのコンクリート覆工背面地山が、軟質で細粒な泥質岩や凝灰質岩で比重が2.0以下と小さく、かつ吸水量が20%以上である場合は凍上を起こしやすい(図4-4-2参照)。
- 6) 北向きののり面は、春先に融解を受けている表層部の高含水層(過飽和状態)と融解を受けていない凍結層(不透水層)の2層構造が形成され、その凍結層が存在する時期に降雨を受けると、その境がすべり面となり崩壊を起こしやすい状態になる(図4-4-3参照)。
- 7) 切土のり面ののり面对策工として、現場打ちのり枠工やアースアンカー工法が採用される場合、北向きのり面では、表層部の凍結融解の繰り返し作用によりアンカーの自由部が伸び切ってしまう、設計上の緊張力が低下し不安定な状態になることがある。

図4-4-1 横断函渠上盛土の被害概念⁷⁾

図4-4-2 トンネル覆工背面の被害概念⁸⁾

図4-4-3 切土のり面の崩壊⁹⁾

8) 切土のり面は、凍結あるいは霜柱によってのり面が崩壊あるいは押し出されるためにモルタル吹付けやコンクリート構造物が破損したり植生が枯渇することがある。

4-5 実測による凍上調査方法

現状の凍上対策工には、冬期間の最大凍結深さを基準に、粒状材料で置き換える置換工法が用いられるのが一般的である。したがって実測による凍上調査においても凍上防止対策の基本となる地盤の凍結深さ、凍上量を測定することが必要である。

(1) 凍結深さの測定

実測によって凍結深さを求める方法としては、次のようなものがある。

①厳寒期に調査孔を掘削して地中の温度と土の凍結様相を観測する方法。

凍結地盤を掘削して、凍結層の厚さをスケールで直接測る方法であり、凍結深さや凍結の状態のほかに、地盤の密度や含水比、さらには地下水などが同時に直接測定できる利点があるものの、堅く凍結している地盤を掘削する作業は大変な労力と時間を要する。

②地中に测温抵抗体温温度計や熱電対を埋設する方法。

地中に温度計を埋設する方法は、凍結前に受感部を地中に埋設して、地中の 0℃ の位置を測定して凍結深さを求める方法として良く知られている。この方法は、自動平衡式多点記録計と組にして使用することが多く、冬期間の連続測定ができ地中温度の垂直分布を知ることができるなどの利点もあるが、受感部埋設時の労力やコストが高くなるという問題がある。また記録計の電源確保や保護・保温、メンテナンス等も問題となる。

③メチレンブルー凍結深度計を利用する方法。

一度設置しておけば冬の観測が容易で費用、時間、労力ともに少なくすむため良く用いられる。

以下、メチレンブルー凍結深度計を用いた凍結深さの測定方法について示す。

凍結深さの調査は、所定の深度までメチレンブルー凍結深度計を差し込み、定期的に測定を行う。メチレンブルー凍結深度計は、図4-5-1に示すような構

図4-5-1 メチレンブルー凍結深度計の構造²⁾

造をしており、内径 1.2cm のアクリル管に直径 1.0cm のゴム管が挿入されていて、このアクリル管とゴム管の間に0.03%のメチレンブルー水溶液が密封されている。この水溶液は 0℃ 以下の温度になると青色から無色に変化するので、この無色部分の長さを計ることで凍結深さを知ることができる。ただ、道路に設置された凍結深度計は、冬期間の凍上によって上昇するので凍結前に路面の標高を、付近の冬期間不動の基準点からレベルで測定しておく必要がある。また、毎年調査前には各深度計の水溶液を取り替えて、室内試験により水溶液の精度の検定を行った上で使用する必要がある。メチレンブルー凍結深度計の設置方法の詳細については日本道路協会道路土工排水工指針²⁾ ‘メチレンブルー凍結深度計による凍結深さの測定方法’ (pp.226~229) を参照されたい。

実測によって求めた凍結深さを、一般的な凍結深さに換算する換算式は下記のとおりである。

$$De = Dc + 1.8 \cdot Df$$

ここに、De：換算凍結深さ (cm)

Dc：実測した凍結深さにおける凍上を起こしにくい粒状材料（砂利等）からなる層の厚さ (cm)

Df：実測した凍結深さにおける凍上を起こしやすい細粒材料（シルト等）からなる層の厚さ (cm)

図4-5-2 実測による凍上調査観測の概略

表4-5-1 観測頻度

調査項目	観 測 頻 度		
	12月	1月・2月	3月
凍結深さ	週	2～3日に	週
凍上量	1～2回程度	1回程度	1～2回程度
外気温	冬期間自動計測		

ここで用いる換算凍結深さは、舗装以下で用いる材料は各部位によって各種材料が複合的に用いられているため、全体が粗粒分で構成された均一断面に補正した凍結深さを用いて値を比較するためである。

(2) 凍上量の測定

凍上量については、路側に凍結の影響のない深さまで打ち込んだ基準杭を設置し、路面に設けた測点との標高差をレベル測量を行うことで、その変化差をもって凍上量としている（基準杭は、2m以上の杭を強固に打ち込み、上部1m程度は回りの土と縁を切るために杭よりも太いパイプを埋設することが望ましい。さらに雪や水が杭の回りに入らないように断熱性の材料で保護することも必要である。）。

(3) その他の測定

気温観測は、凍結深調査箇所近くで吹きだまりの影響を受けない位置に百葉箱を設置し自記録計により観測を行う。

また、路面上の積雪が多い場合、凍結深さが小さくなるため、調査箇所の除排雪は十分に行うことが必要である。場合によっては路面圧雪量の調査を行うことも望ましい。

観測頻度は、表4-5-1に示すような頻度で実施し、日中の気温が上昇する前の朝7時～9時の間に観測

を行う。図4-5-2に観測方法の概略を示している。

4-6 設計凍結深さの計算方法

(1) 経験値による場合

凍上対策（置換工法）として、必要な置き換え深さが、例えば青森県における凍結置換深図（図4-6-1）や北海道の高速道路、国道での置換厚さ（図4-6-2）などのように経験的にわかっている場合、その値を設計凍結深さとしてそのまま採用することができる。

しかし、不明の場合には、アスファルト舗装要綱に示されるn年確率凍結深さから凍結深さを計算し、その地方による低減率を乗じて置き換え深さ（一般的には70～80％）を算出する必要がある。

(2) n年確率凍結深さ（アスファルト舗装要綱）⁶⁾

凍結深さの実測値あるいは気象データを用いたn年確率凍結深さの算出方法を示す。

①実測データを用いた場合

いま実測された年の最大凍結深さ D_e が判明したとする。この D_e から n 年確率凍結深さ D_{max} は、

$$D_{max} = D_e \times \sqrt{F_{max}/F_e} \quad \cdots \cdots (4-6-1)$$

F_{max} : n 年確率凍結指数

現地の設計期間 n 年間（一般には10年）の最大凍結指数（ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ ）

n 年確率凍結指数の算出方法は、アスファルト舗装要綱付録-2を参照のこと。

F_e : 現地で調査した年の凍結指数（ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ ）

D_e : 換算凍結深さ（cm）

D_{max} : n 年確率凍結深さ（cm）

ここに $D_e = D_c + 1.8 D_f$ として求めることができる。

図4-6-1 青森県における道路の凍結置換深図¹⁰⁾

表4-6-1 凍結指数と定数C

F (°C・days)	C 値	F (°C・days)	C 値
100	3.7	700	4.9
200	4.1	800	5.0
300	4.4	900	5.0
400	4.6	1000	5.1
500	4.7	1100	5.2
600	4.8		

Dc : 実測した凍結深さ内の凍上を起こしにくい粗粒材料層の厚さ (cm)

Df : 実測した凍結深さ内の凍上を起こしやすい粗粒材料層の厚さ (cm)

②気象観測データを用いた場合

気象観測データから、凍結指数の年変動を統計処理として凍結深さを推定するには、n年確率凍結指数から次式により Dmax を推定することができる。n年確率凍結指数は、前述したものと同様である。

$$D_{\max} = C \times \sqrt{(F_{\max})} \dots\dots\dots(4-6-2)$$

ここで、定数Cの値は、Fmaxにより表4-6-1のような表が用意されている。

4-7 n年確率凍結深さの計算例

図4-7-1に示す様な舗装構造におけるn年確率凍結深さを求める。

(1) 気象観測データを用いたn年確率凍結深さ

①気象庁の気温観測データを用いた場合(詳細法)

図4-6-2 北海道の高速道路、国道の置換厚さ⁹⁾

図4-7-1 n年確率凍結深さの求め方

表4-7-1 10年間の凍結指数 (°Cdays)

年 度	凍結指数	年 度	凍結指数
57	235.6	62	213.8
58	426.5	63	298.5
59	345.8	元	216.4
60	303.8	2	202.8
61	205.6	3	235.6

現場に近い最寄りの気象観測データとして、N気象台S測候所における昭和57年～平成3年度までの最近10年間の日平均気温を収集する。表4-2-1に示した凍結指数の算出例にならない各年度の凍結指数を算出する。表4-7-1は、10年間の凍結指数を示したものである。

ここで、アスファルト舗装要綱付録-2に基づき、10年確率凍結指数は以下のように求められる。

表4-7-2より

$$\log X_0 = \Sigma \log X_i / k = 24.156 / 10 = 2.416$$

$$\sigma_0^2 = \Sigma (\log X_i - \log X_0)^2 / k$$

$$= 0.1106 / 10 = 0.0111$$

$$\sigma_0 = 0.105$$

表4-7-2 n年確率凍結指数

データ No. (k=10)	ある地域の最近10 年間における凍結 指数 Xi (°C・日)	計 算 値		
		logXi	logXi-logXo	(logXi-logXo) ²
1	235.6	2.372	-0.0568	0.0032
2	426.5	2.630	0.2012	0.0405
3	345.8	2.539	0.1102	0.0121
4	303.8	2.483	0.0542	0.0029
5	205.6	2.313	-0.1158	0.0134
6	213.8	2.330	-0.0988	0.0097
7	298.5	2.475	0.0462	0.0021
8	216.4	2.335	-0.0938	0.0088
9	202.8	2.307	-0.1218	0.0148
10	235.6	2.372	-0.0568	0.0032
計	2684.4	24.156	—	0.1106
平 均	268.4	2.416	—	0.0111

表4-7-3 標高差による補正值

標高差 (m)	凍結期間 (日)	補 正 値	
		求める凍結指数	補正凍結深さ
+150	72	409 °C・days	95.0cm

と求められる。またアスファルト舗装要綱付録－2の付表-2.2より、確率年数10年のξの値は、ξ = 1.28であるから、

$$\begin{aligned}\log X &= \sigma_o \cdot \xi + \log X_o \\ &= 0.105 \cdot 1.28 + 2.416 = 2.5504\end{aligned}$$

∴10年確率凍結指数は、X = 355 (°Cdays)と求められる。

従って、S測候所における10年確率凍結深さは、式(4-6-2)及び表4-6-1より次のように算出される。

$$D_{\max} = 4.6 \times \sqrt{(355)} = 86.7 \text{ cm}$$

なお、現地はS測候所と150mの標高差があるので次式により補正を行う。

$$\begin{aligned}\text{求める凍結指数} &= \text{既知凍結指数} \pm 0.5 \times (\text{凍結期間}) \\ &\quad \times H / 100\end{aligned}$$

ここに、凍結期間：凍結指数の計算における日平均気温の積算日数(日)

H：標高差(m)

よって、気象観測データを用いた現地の10年確率凍結深さは、95.0cmとなる。

②アスファルト舗装要綱⁶⁾に示される10年確率凍結指数を用いる場合(簡便法)

わが国の代表的な観測地点での10年確率凍結指数は、アスファルト舗装要綱に示されている。ここに示される数値一覧表から現地に最も近い観測地点の凍結指数を用いて、現地と観測地点間の標高差補正を行い、現地の10年確率凍結指数を求める。

(現地に最も近い観測地点)

- ・観測地点名 : 諏訪
- ・10年確率凍結指数 : 388°Cdays
- ・凍結期間 : 104日
- ・標 高 : 999m

現地は、観測地点と比べ150m高地にあるため、標高差補正を行い現地での10年確率凍結指数を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned}388^\circ\text{C} \cdot \text{days} + 0.5 \times 104 \text{日} \times (150\text{m}/100) \\ = 466^\circ\text{C} \cdot \text{days}\end{aligned}$$

したがって、現地における10年確率凍結深さは、式(4-6-2)及び表4-6-1より次のように算出される。

$$D_{\max} = 4.7 \times \sqrt{(466)} = 101\text{cm}$$

(2) 実測データを用いたn年確率凍結深さ

メチレンブルー凍結深度計による実測凍結深さ及び現地での気温観測データから式(4-6-1)を用いて、現地のn年確率凍結深さを求める。

(ある観測年度のデータ)

- ・メチレンブルー凍結深度計による実測凍結深さ
D = 65cm
- ・現地での気温観測データから算出した凍結指数

表4-7-4 実測調査によるn年確率凍結深さ

メチレンブルー による実測凍結 深さ (cm)	換算凍結深さ (cm)			10年確率 凍結指数 Fmax	調査年の 凍結指数 Fe	10年確率 凍結深さ Dmax(cm)
	Dc	Df	De			
65.0	0.0	5.0	69.0	409.0	256.0	87.2

$$Fe = 256^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$$

上記、観測データより現地のn年確率凍結深さを求めた結果が表4-7-4である。

よって、実測データを用いた10年確率凍結深さは、87.2cmとなる。

参考文献

- 1) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，平成8年10月
- 2) 日本道路協会：道路土工－排水工指針，昭和62年6月
- 3) 日本道路公団：日本道路公団試験方法，昭和60年
- 4) 北海道土木技術会舗装研究委員会：軽交通舗装設計要領（平成7年度北海道版）
- 5) 日本道路公団：設計要領第一集，平成10年5月
- 6) アスファルト舗装要綱，平成5年度版
- 7) 久保 宏：道路の凍上被害と対策，土と基礎，1990.5，pp.77～83
- 8) 間谷：北海道の高速道路における凍上被害の実態とその対策，平成5年1月
- 9) 須長：鉄道線路の凍上と対策，平成5年1月
- 10) 長谷川，今井：青森県内における理論最大凍結深さと調査結果の検討，舗装19-8，1984.8，pp14～18
- 11) 東海林：凍上対策の設計，凍上対策に関する講習会テキスト，平成11年12月