

タイトル	寒冷地における道路舗装の凍上被害とその対策に関する研究
著者	工藤，好騎；久保，宏
引用	北海学園大学工学部研究報告，33：1-12
発行日	2006-02-20

寒冷地における道路舗装の凍上被害とその対策に関する研究

工 藤 好 騎*・久 保 宏**

Investigations on Frost-Heave Damages and Countermeasures of Road Pavements in Cold Regions

Yoshinori KUDO* and Hiroshi KUBO**

要 旨

本研究では、まず寒冷地における各地点の気象データを用い、近年の気象傾向を踏まえたうえで、寒冷地の道路舗装構造の設計に必要な理論最大凍結深さの推定で要する凍結指数の計算を行った。次に、現在の設計基準として適用されている置換え深さに対して、安全性や合理性があったかの確認を行い、新たな設計基準に対しての再計算をして、北海道における適切な舗装構成の提案を行った。この研究から、近年の傾向としては約10～15年間隔で比較的寒い冬期となっていることから、設計期間が現在の10年設計から20年程度の期間に見直す必要がある。また、実際に凍上被害があった地点の設計基準値から現在実施されている値の見直しも必要であることが明らかになった。

1. はじめに

積雪寒冷地において道路舗装率の増加に伴い、特に戦後になって道路の除雪が普及し、冬期交通が円滑化された。その反面、路面が直接寒気にさらされるようになり、道路の凍上現象による被害が増大してきている。特に、路面が寒気にさらされる道路では、この凍上対策が技術上重要な問題である。

現在、地球温暖化が進んでおり、北海道でも1985年度以降寒い冬は無かったが、2000年度及び2002年度と平年値からみて急激に気温が下がり、凍上被害が起こった。1985年度から暖かい年が続いたため凍上対策工法の設計基準がゆるくなっていたことが原因と思われる。今後も寒い冬期が来ることが予想されるために、凍上対策に関する再検討が求められている。現在の凍上対策工法は置換工法が主流となっており、置換材料やn年確率凍結指数の検討が行われてい

* 日本データサービス(株)東京事務所 Nihon Data Service Co.

** 北海学園大学工学部社会環境工学科 Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

るが、凍結期間についてはふれられることが少ない。本研究では、第一に寒冷地における各地点の気象データを用い、近年の気象傾向を踏まえたうえで、寒冷地の道路舗装構造の設計に必要な理論最大凍結深さの推定に要する凍結指数の計算を行った。第二に現在の設計基準として適用されている置換え深さに対して、安全性や合理性を確認し、新たな設計基準に対しての再計算を実施して、北海道におけるより合理的な舗装構成の提案を行った¹⁾。

2. 凍結指数の比較

冬期の季節に土が凍結する寒さや永久凍土が春に融解する暖かさの指標として、凍結指数 (Freezing Index, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$) や融解指数などの数値を用いられる。凍結指数は、冬の前から日平均気温を累積し、初冬の極大値から春の極小値までの差の絶対値で表わす。また、凍結期間中の負の日平均気温のみを積算する算出法もある。その冬の地域的な寒さの違いや、同じ場所での毎冬ごとの寒さの違いを比較するときなどにも使用される。また、極大値から冬のある日までの累積値を、積算寒度 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$) と呼ばれることもある。同様に、春の極小値から初冬の極大値までの差で与えられる値を融解指数とよび、永久凍土地帯では凍土融解の目安に用いられている。

一般的な算定方法としては1時間ごとの気温を平均した24点法(以下24点法凍結指数)、最高・最低気温を使う2点法(以下2点法凍結指数)、月平均気温を用いる方法(以下月平均凍結指数)などがある。24点法と月平均気温を用いて計算した凍結指数の比較の例を図2.1に示す²⁾。

24点法と月平均気温を用いた凍結指数では月平均凍結指数の方が20~50 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ ほど小さく

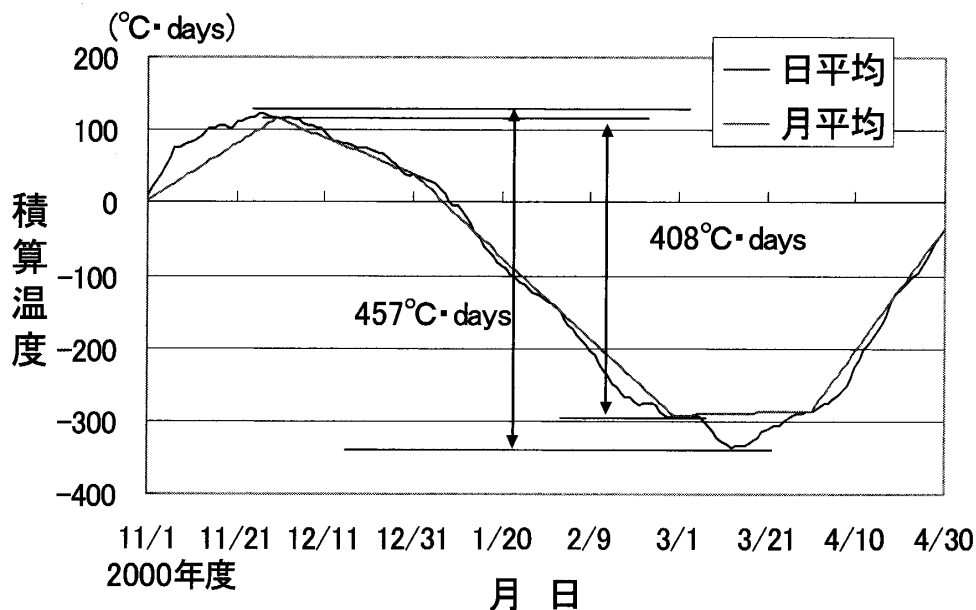


図2.1 24点法と月平均凍結指数による凍結指数算定例 (2000年度, 札幌市)

なる。そのため、このままの値を設計値として使うと危険側に移行するようになってしまう。このように凍結指数が小さく出てくる理由としては、月平均気温を用いると日平均気温を用いた場合より大雑把な計算になるためである。実用上の設計の理想としては実際の気象条件に最も近い24点法凍結指数を用いることであるが、データ不足の理由から使用できない場合は他の凍結指数に補正を行って適用することになる。図2.2は各種凍結指数の相関係数を示したものであり、それらの補正係数を図2.3に示した。

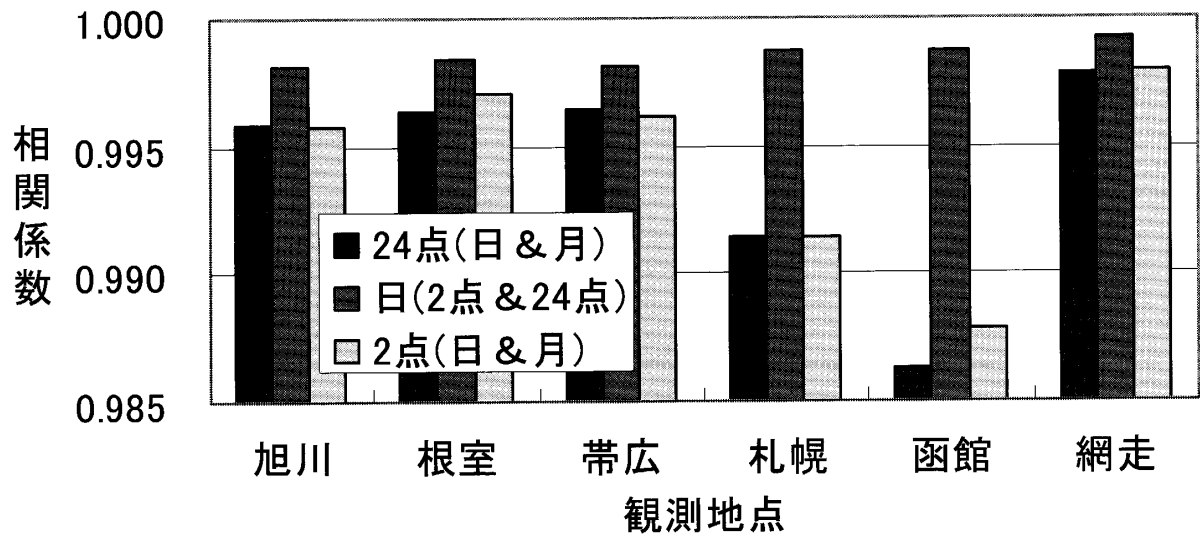


図2.2 主要6都市における各種凍結指数の相関関係

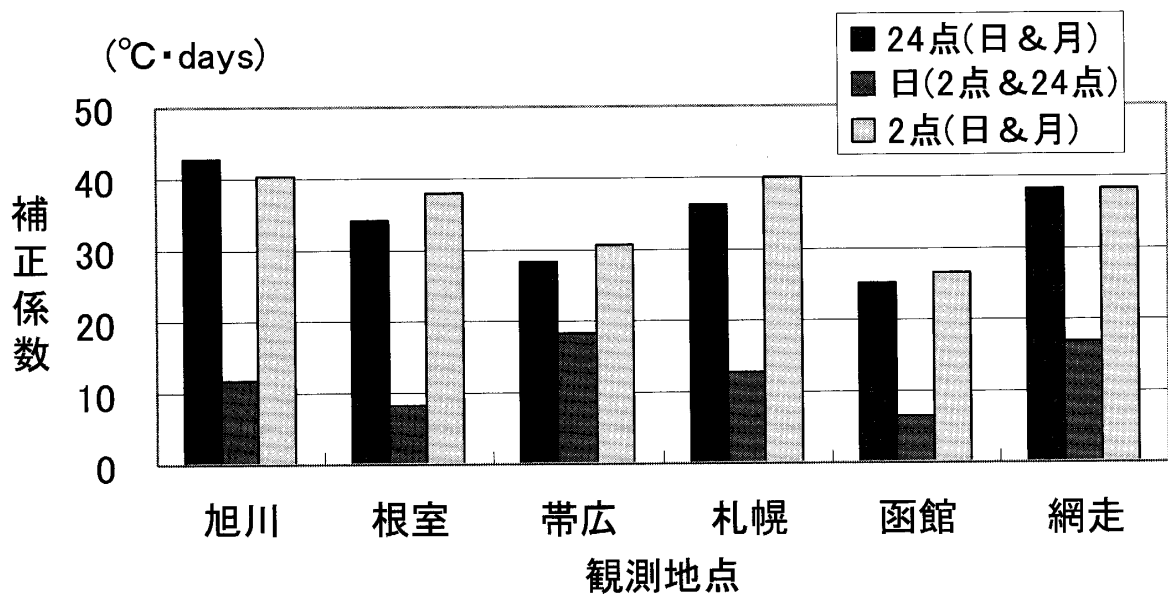


図2.3 主要6都市における各種凍結指数の補正係数

ここで、

24点凍結指数（日&月）：24点法での日平均と月平均気温による

日凍結指数（2点&24点）：2点法と24点法による

2点凍結指数（日&月）：2点法での日平均と月平均気温による

を示している。また図2.3における補正係数に関しては、

24点凍結指数（日&月）：月平均気温による凍結指数を日平均気温による凍結指数に補正

日凍結指数（2点&24点）：24点法による凍結指数2点法による凍結指数に補正

2点凍結指数（日&月）：月平均気温による凍結指数を日平均気温による凍結指数に補正となっている。

寒い地域では各種凍結指数の手法に高い相関が見られる場合が多いが、比較的暖かい地域では日平均と月平均気温による凍結指数の相関が若干低くなっている。これは2月や3月の月平均気温が0℃以上になる場合が多いため日平均気温による凍結指数と大きな差が生じるためである。しかし、全体的に相関が高いため24点法凍結指数が使えない場合でも補正を行うことによって適用が可能であるといえる。

3. 近年における冬期気温の変化

近年、地球の温暖化が進んでおり、冬でも気温が高く暖冬が続いている。その反面1986年から1999年までは暖冬であったにも関わらず2000年度のように最近40年間で4番目に寒い冬になるなど、気象に大きな法則性はないが異常な値を示すことも多い。ここでは気象のデータを用いて考察する。

図3.1は世界的な気温変動として1950年～1980年までの平均を基準として図化したものである。ここでの積算温度は凍結指数のことで4月から翌年3月までの気温を合計した値である。

図3.1を見ると1900年頃から1930年頃にかけて気温上昇が見られる。その後約40年間は温度が安定しており、1980年頃から現在まで気温の上昇が続いている。最近120年間を見

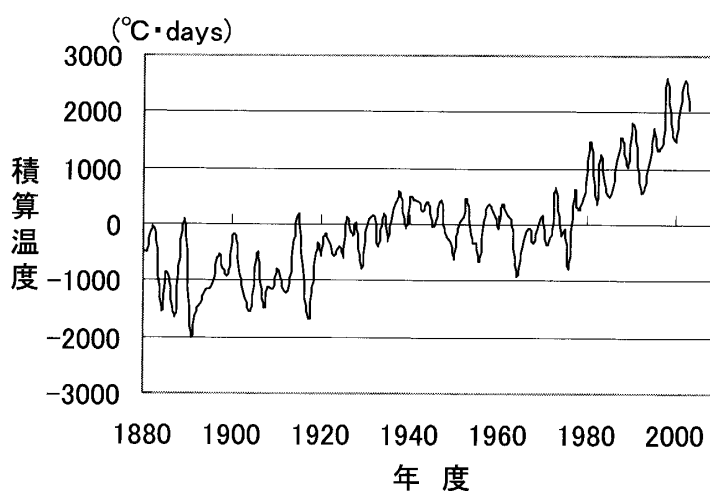


図3.1 世界的な気温変動

ると2度の気温上昇があると考えられる。1度目は約30年間で積算気温が $1500^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ 上昇していることから、1年当たり年間積算気温が約 $50^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ 上がった計算となり、1日あたり約 0.4°C 上昇したことになる。2度目は約25年間で 2000°C 以上上昇していることから、1年あたり年間積算気温が約 $80^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ 上昇して、1日あたり約 0.22°C 上昇したことになる。

次に北海道での冬期における気温（凍結指数）の変化を考え、図3.2に1892年以降の凍結指数の変化を示した。

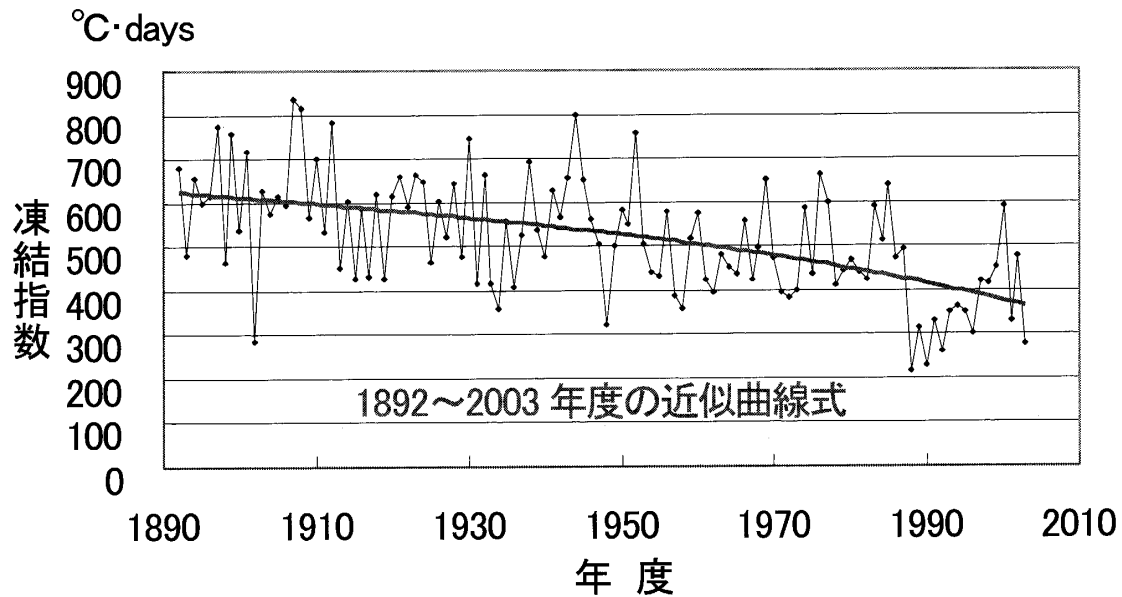


図3.2 最近110年間ににおける北海道内主要6地点の平均凍結指数

図中の線は近似曲線であり、これから冬期の温暖化の傾向が見られる。図から推測すると100年前と比べて、凍結指数が $200^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$ 以上小さくなっている。そのことから、北海道の冬の平均気温は1日あたり $1 \sim 2^{\circ}\text{C}$ 上昇しているといえる。図3.3は図3.2の最近40年間を抜粋したものである。

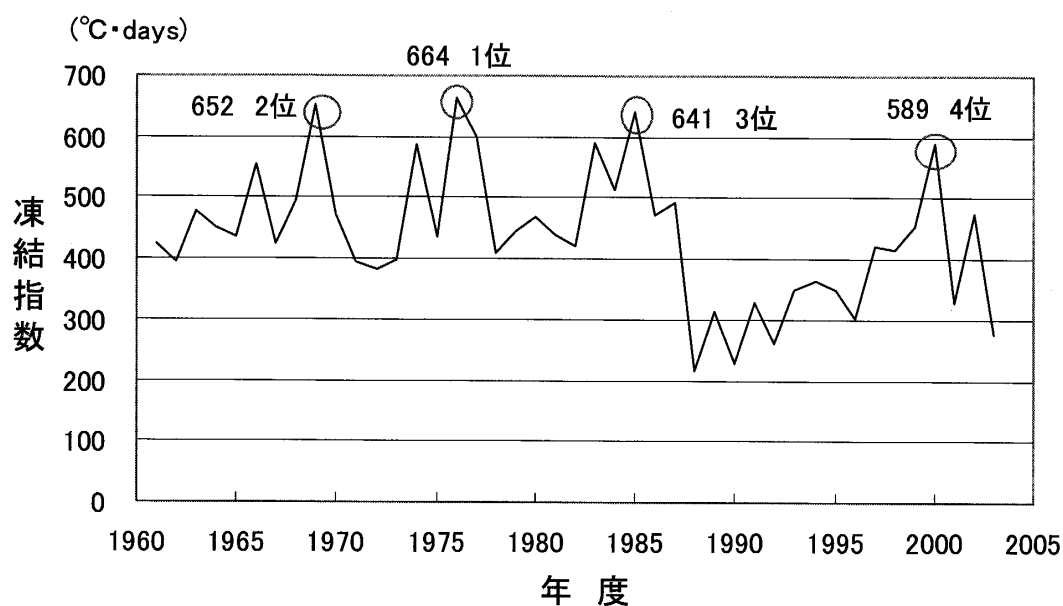


図3.3 最近40年間における北海道内主要6地点の平均凍結指数

また近年では図3.3に示すように10～15年間に1度は凍結指数が大きくなる周期性がある。特に1986年度から1999年度にかけては暖冬であったため凍上現象への対策が遅れたものと考えられる。そのため1950年度以前では寒い年とはいえ凍結指数の600℃・days程度でも2000年度に100箇所を超える凍上被害が発生した。また、周期性があることから2010～15年にかけて凍結指数が600℃・days程度になる年があると予想される。なお、図3.2と図3.3では月平均気温を用いた凍結指数を用いている。

4. 道路の凍上被害

近年の多くの道路は舗装されており、冬期の円滑な移動のため除雪を行っている。そのため直接舗装面が寒気にさらされることで凍上現象が発生しやすくなっている。図4.1と図4.2は道路における凍上被害の例である。

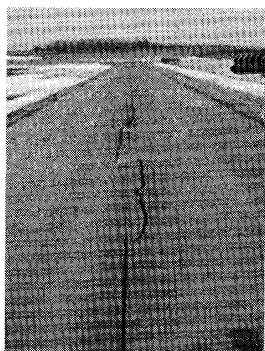


図4.1 縦断クラックの例

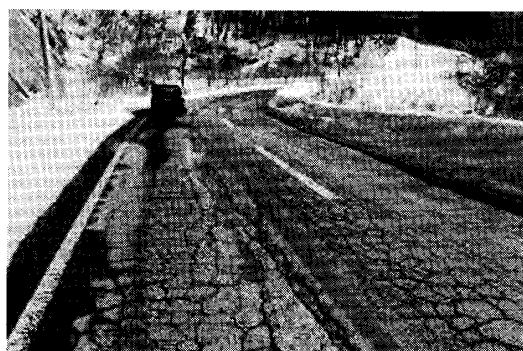


図4.2 亀甲状クラックの例

図4.1と図4.2で示したような縦断クラックと亀甲状クラックが道路舗装における主な凍上被害の例である。

縦断クラックは凍上現象が発生している冬期に地面が盛り上がる時に舗装の強度が低い打ち継ぎ目などに発生しやすく、亀甲状クラックは春期に氷が解けることにより地盤内が液状化に近い状態となりその上を重車両が多数通過するときに発生するものである。

また、凍上被害は凍結指数が大きい年に発生しやすいといえる。近年での北海道において凍結指数が大きかった1985年度と2000年度を比較したのが表4.1である。また、凍上被害箇所数に大きな関係を持つ凍結指数を示したのが図4.3である。

表4.1 凍上被害箇所数の一覧表(1985年度および2000年度)

支庁名	85	00	差
宗谷		2	
上川	11	7	4
留萌	6	4	2
石狩	28	2	26
空知	27	3	24
後志	5	2	3
網走	27	39	-12
根室		2	
釧路	17	3	14
十勝		27	
胆振	47	29	18
日高	25	6	19
渡島	4	1	3
檜山		0	
計	197	127	70

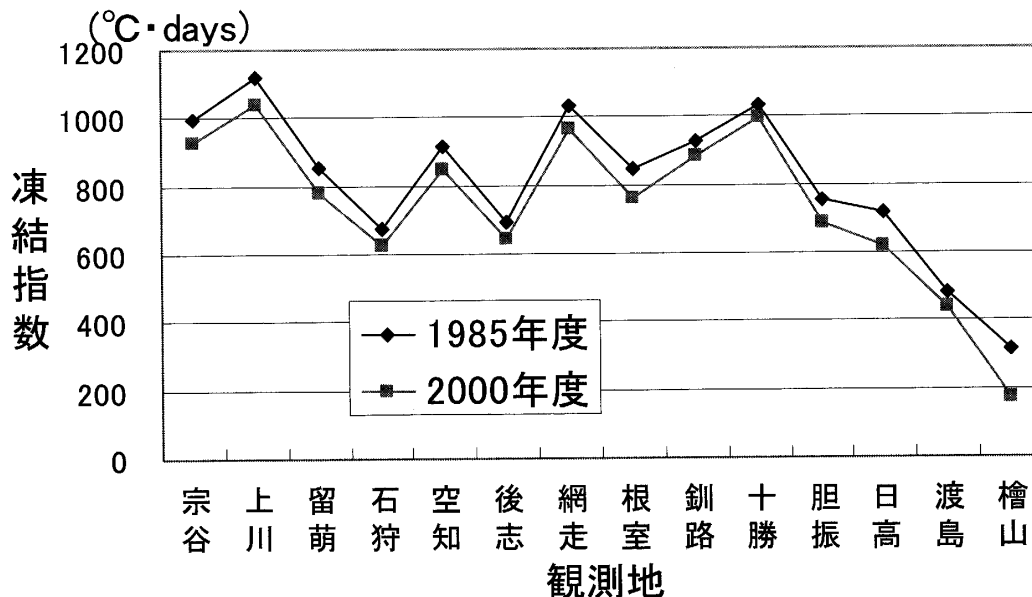


図4.3 1985年度と2000年度の凍結指数の比較

図4.3から、道内14支庁で1985年度の凍結指数は2000年度を上回っている。そのため1985年度の凍上被害箇所が2000年度より多かったといえる。1985年度に被害を受けたとき改良工事などで対策の見直しを行ない2000年度は発生箇所数が少なかったものと思われる。唯一の例外として、網走支庁では2000年度の方が凍上被害箇所が多かった。

5. n年確率凍結指数・期間

設計凍結指数の算定方としては、n年確率・n年最大・最大（n/10）平均凍結指数がある．n年最大凍結指数は設計期間内で最大の凍結指数，最大（n/10）平均凍結指数は例をあげると，設計期間40年の場合40/10＝4 となることから大きい方から順に4つの凍結指数を取って平均したものである．n年確率凍結指数は次に示す式5.1で計算される³⁾．

$$\log_{10} X = \sigma_0 \cdot \xi + \log_{10} X_0 \quad \dots \dots \dots \text{式5.1}$$

ここで

X ：n年確率凍結指数（℃・days）、 σ_0 ： $\log_{10}$ の標準偏差、 ξ ：確率年数(n)に対応する統計値

X_0 ：設計期間内の凍結指数の平均値（℃・days）

ξ は表5.1に示す値を用いている．表5.1に記したように設計期間が増えるごとに統計値も増えることから別ないい方をすると安全率といえる．そのためn年確率は平均値に分散と安全率を掛けたものを加味した式となる．

表5.1 確率年数（n）に対応する統計値

確率年数 (n)	対応する 統計値(ξ)	確率年数 (n)	対応する 統計値(ξ)
1	—	20	1.64
2	0.00	25	1.76
3	0.43	30	1.84
4	0.67	35	1.90
5	0.84	40	1.96
6	0.97	50	2.05
7	1.07	60	2.13
8	1.15	70	2.19
9	1.23	80	2.24
10	1.28	90	2.29
15	1.50	100	2.33

また，本研究では凍結期間に関しても凍結指数の部分で凍結期間（日）と置き換えて同様の方法で求めた．各手法による凍結指数を図5.1に示す．

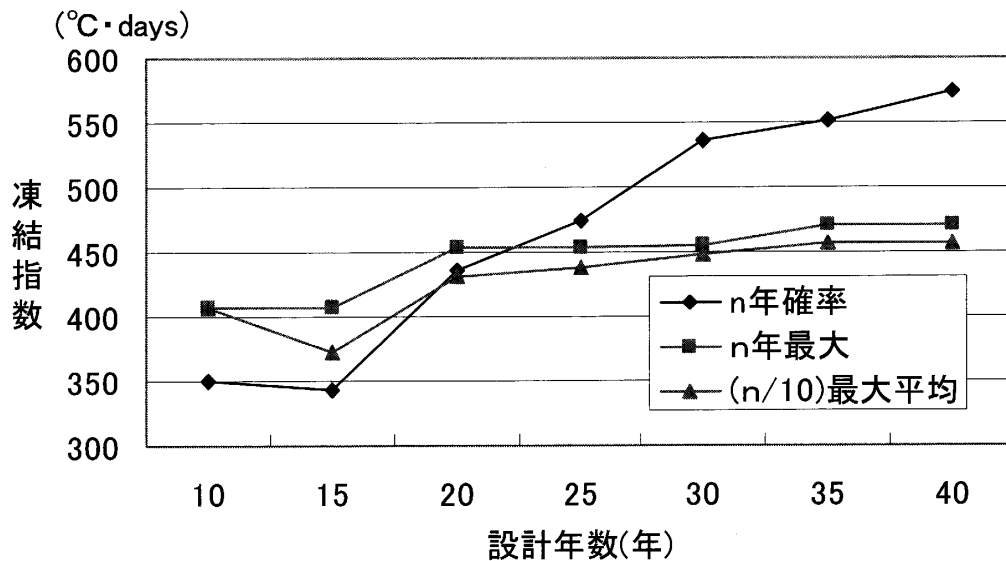


図5.1 手法別凍結指数の比較 (2004年度の札幌の設計値)

本研究では10年ごとの設計期間ではなく5年ごとの設計期間で計算を行った，舗装設計施工指針には掲載されていない25年と35年の統計値を仮定している．図5.1から，設計期間を20年または25年とするとn年確率とn年最大がほぼ一致することが分かる．しかし，設計期間を25年とした場合には25年確率が20年確率を下回った観測地があったため安定した値ではないといえる．その理由としては1978～82年度の5年間は凍結指数の分散が小さいため，平均+分散×統計値で求められるn年確率は小さくでる場合があるといえる．よって，20年確率が最も適切であると考えられる．ただし25年確率が20年確率より大きくなった場合では，現場の条件により25年確率を使用した方がよいとも考えられる．

同様に凍結期間で同じ手法で計算してグラフ化したものを図5.2に示した．凍結期間に関しても凍結指数と類似した結果となり，設計期間が20年になると3種類の手法がすべて一致してくる傾向がある．そして25年以上になると過去に発生した値を超えるような過大設計になりがちである．このように凍結指数と同じ傾向になることから，凍結期間に関しても同様の手法で設計値を計算することが可能であるといえる．

これらの結果から，北海道内の道路舗装の構造設計には20年確率設計法を取るべきであるといえる．

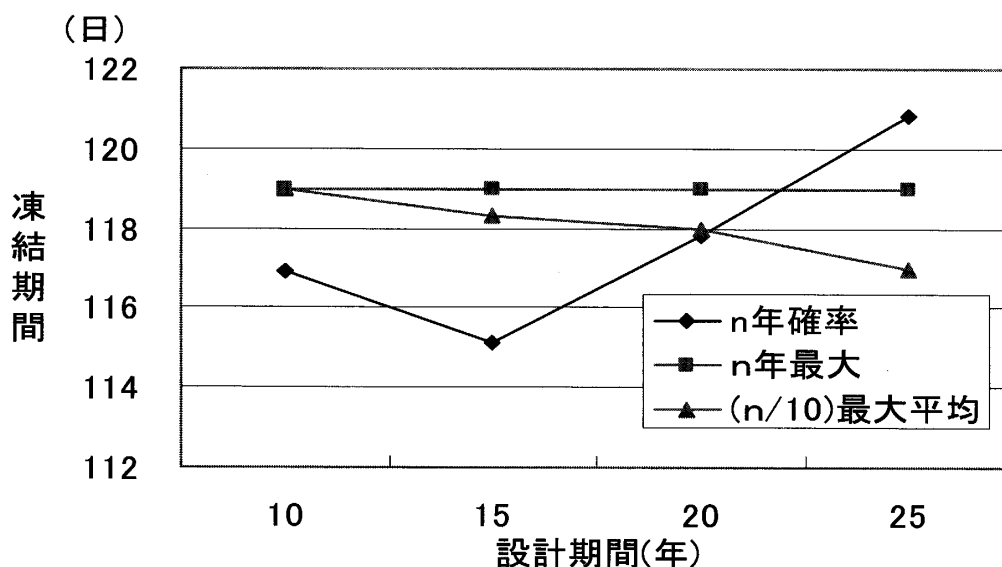


図5.2 手法別凍結期間の比較（2004年度の札幌の設計値）

6. 北海道の道路における置換え深さ

凍上対策工法として最もよく使われる置換工法の置換え深さについて検討する。前節のn年確率凍結指数・期間から設計期間は20年間として凍結指数と凍結期間を計算した。置き換え深さの推定は修正Berggrenの式から道路舗装の凍結深さの計算を行い、計算された凍結深さに国道は0.7，農道は0.65をかけた値がその地点の置換え深さとなる⁴⁾。置換工法の舗装構成は一般に図6.1のようになっている。

道路構造の凍結深さを推定するのに一般に用いられている修正Berggrenの式は式6.1のようになる。

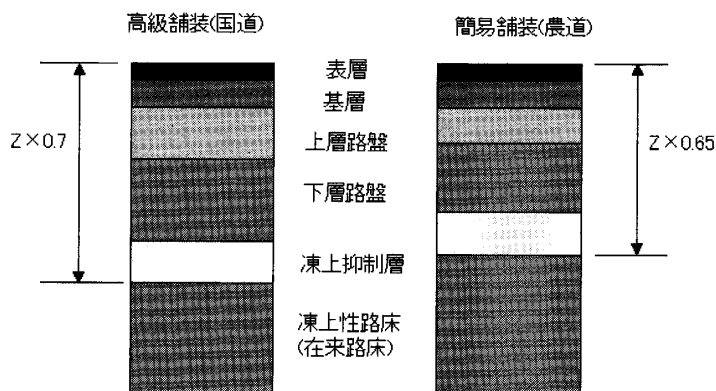


図6.1 高級舗装と簡易舗装の置換えの割合

$$Z = \lambda_c \sqrt{\frac{172800F}{(L/\lambda)_{eff}}} \quad \dots \quad \text{式6.1}$$

ここで,

$$(L/\lambda)_{eff} = \frac{2}{X^2} \left\{ L_1 d_1 \left(\frac{d_1}{2\lambda_1} \right) + L_2 d_2 \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{2\lambda_2} \right) + L_3 d_3 \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{2\lambda_3} \right) + \dots + L_n d_n \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{2\lambda_n} \right) \right\} \quad \text{式6.1.2}$$

Z:凍結深さ (m)

F:凍結指数 (°C・days)

$X = d_1 + d_2 + \dots + d_n$: 予想凍結深さ (m)

d_n : 予想凍結深さ内の各層の厚さで d_1 は最上層の厚さ (m)

λ_n : 各層の熱伝導率 (W/m・K)

$\lambda_c = f(\mu, \tau)$: 補正係数

$\mu = C_{wt} \cdot F / L_{wt} \cdot t$: 融解パラメーター

$C_{wt} = (C_1 d_1 + C_2 d_2 + \dots + C_n d_n) / X$: 加重平均による熱容量で, C_1 最上層のもの (J/m³・K)

$L_{wt} = (L_1 d_1 + L_2 d_2 + \dots + L_n d_n) / X$: 加重平均による凍結潜熱で, L_1 最上層のもの (J/m³)

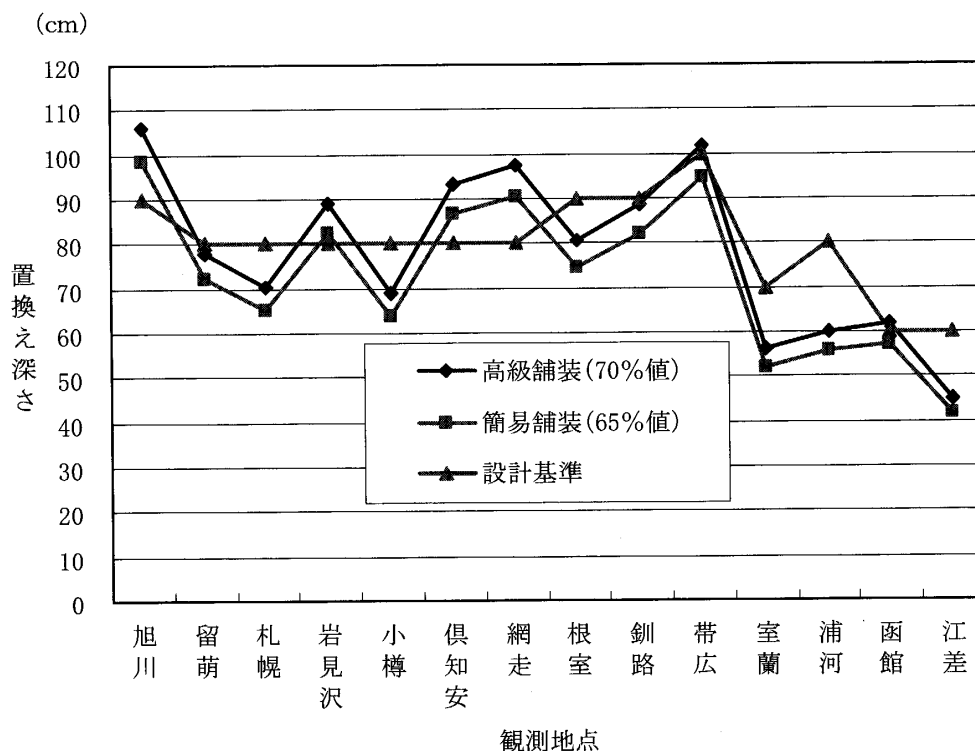


図6.2 北海道14市町における置換え深さ

各観測地の20年確率凍結指数・期間を用いて修正Berggrenの式による値と基準値との比較を図6.2示す. 同図から旭川や倶知安などでは基準値を大きく, 逆に札幌, 小樽, 根室などでは

基準値を小さくすることが出来ると考えられる。それにより初期建設費と維持管理費の最小化を行うことができ、そのためには北海道内の道路舗装構造の設計の見直しが必要であると考えられる。

7. 結 論

本研究では、北海道内における冬期の寒さの変化とそれに伴って再計算された設計凍結指数による道路の置換え深さに関して次のことが明かとなった。

- 1) 道路舗装構造の設計に用いられる凍結指数は一般的な日平均凍結指数を用いるべきであり、データ数が不足する場合には相関が高い月平均凍結指数に補正をかけることによって適用が可能である。
- 2) 近年の気象傾向として約10～15年間隔で寒い冬となっている。よって前回の寒い冬は2000年度であったことから次は2010～2015年度と予測される。
- 3) 寒さの周期が10～15年であることから、設計期間が10年であると危険側の設計になる場合が多いため期間の見直しが必要である。
- 4) 道路舗装の設計に適用される凍結指数・期間の設計値は、n年確率設計法を用いて設計期間を20年にするのが適当であると考えられる。
- 5) 実際の道路舗装に凍上被害があった地点の設計値と再計算された凍結指数・期間から凍結深さの比較検討を行うと問題箇所があり、現在適用されている基準値の見直しが必要である。

参考文献

- 1) 工藤好騎，久保宏：道路舗装の凍結深さの推定に関する研究，第39回地盤工学研究発表会，平成16年度発表講演集，pp1107～1108 2004年，新潟市
- 2) 日本雪氷学会：雪氷，pp275, 2004年3月号
- 3) 社団法人日本道路協会：舗装設計施工指針，pp160～179
- 4) 土質工学会：土質基礎工学ライブラリー23土の凍結－その理論と実際－ [第一回改正版] pp185～192, 平成6年6月