

# 鉄道路床設計における凍結指数の検討

日本鉄道建設公団 正会員 ○米澤 豊司 黒石 正則  
複合技術研究所 正会員 堀井 克己  
鉄道総合技術研究所 正会員 舘山 勝

## 1. はじめに

寒冷地に建設される鉄道構造物の設計では、凍結・凍上対策の検討が必要となる。路床工では、凍結指数から凍結深度を算定して、置換厚を決定する方法がとられている。しかし、この方法は無対策の場合の凍結深さであるので、置換材料によっては更に置換厚さが少なく経済的にできる可能性がある。また、気象データに基づいて設定される凍結指数は、その設定方法によって異なり、結果として凍結深度も異なってくる。そこで、本研究では、構造物の重要度や耐用年数に応じた設計凍結指数の設定方法、および路床・路盤材料の違いなどを考慮した設計凍結深度を検討し、あわせて限界状態設計法への適用も考慮した合理的な設計法を提案することにある。今回は、設計凍結指数について、7地点の気象データの統計解析を行い、既往の設定値と比較検討した結果を述べる。

## 2. 概要

現行の鉄道の設計基準<sup>1)</sup>では、寒冷地において路床土が凍上しやすい土質の場合には、凍結深さまで凍上を起こしにくい材料（粒調碎石、切込碎石、砂等）で置換えるものとしている。その際の凍結深さは、次式により推定してよいことになっている。

$$Z = C \cdot \sqrt{F} \quad \text{ここに、} Z: \text{凍結深さ (cm), } C: \text{定数 (3~5, 一般に 4), } F: \text{凍結指数 (}^\circ\text{C}\cdot\text{days)}$$

凍結指数とは、期間中一定の凍結温度と凍結期間（日数）との積であり、その値は鉄道の設計基準では最近10年間の最大凍結指数をとる方法を原則としている。しかし、この方法は、極端に寒い冬（異常寒候年）が出現すると、その後10年間は過大設計になる（あるいはその逆もあり得る）という問題を内蔵しており、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（再現確率値）を採用するのが望まれる。そこで、過去30年間程度以上の気象データを用いて、凍結指数の変化や確率統計指数を算定し、最近10年間の最大凍結指数との比較を行い、設計凍結深さの設定における課題について整理する。

## 3. 検討内容

気象データは、以下の7地点とし、日平均気温データとする。

東北地方の4地点：八戸，三沢，十和田，青森（1970～2001年の31ヵ年）

北海道の3地点：函館，札幌，旭川（1970～2002年の32ヵ年）

1年ごとの凍結指数の算定<sup>2)</sup>を行う。これを基に確率統計指数の算定を行うが、その計算方法は、対数正規分布法、岩井法、Gumbel法（岩井・石黒の修正法）（以下、Gumbel法と呼ぶ）、Gumbel（極値I型）（以下、極値I型と呼ぶ）の4種類の確率分布<sup>3)</sup>を適用し、1/5, 1/10, 1/20, 1/30, 1/50, 1/100年確率凍結指数を求める。なお、参考のために確率紙による方法のトーマスプロット<sup>3)</sup>による検討も行う。

## 4. 検討結果

### (1) 凍結指数と凍結期間

図1, 2に東北地方と北海道の凍結指数の経年変化を示す。両図より1988～1999年の約10年間は、暖冬であったことが読み取れる。これより最近の10年間でのデータで凍結指数を算定すれば、暖冬の影響をうけて凍結指数が半分程度となり過小に評価され、危険側の設計となり得る。

---

キーワード 凍結・凍上, 路床, 凍結指数, 凍結深さ

連絡先 〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6丁目50番1 日本鉄道建設公団設計技術室 TEL 045-222-9082

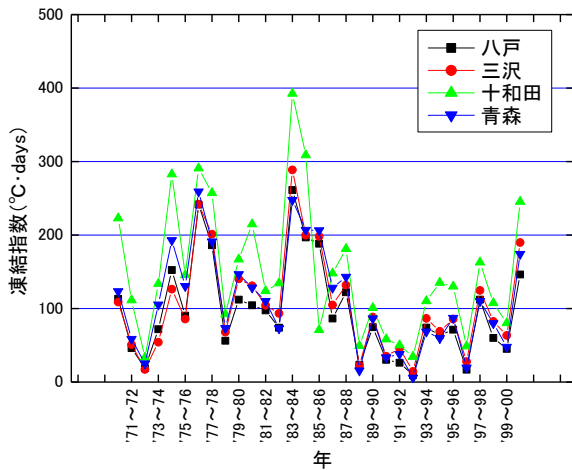


図1 凍結指数の経時変化（東北地方）

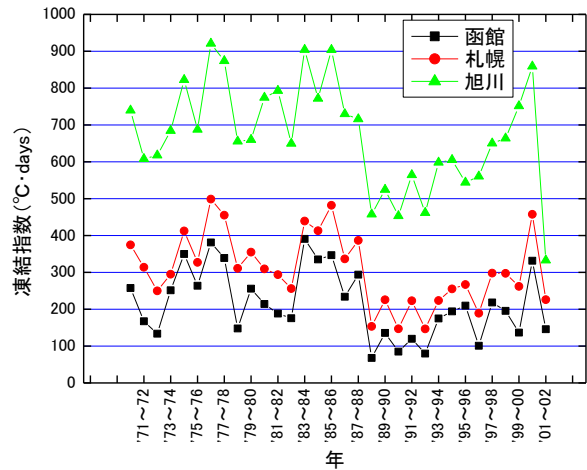


図2 凍結指数の経時変化（北海道）

## (2) 確率凍結指数

例として、八戸の確率計算結果と10年間最大凍結指数を表1に示す。同表より、10年間最大凍結指数を261°C・days（1980～1989年）とすれば、確率分布型の違いにより、再現期間は1/20～1/30年となる。対数正規分布法は最も大きい凍結指数を与え、極値I型は最も小さい値を与える。確率分布型への適合度を非超過確率に関する平均二乗誤差 $\Delta F$ で調べ

てみたが、同表に示したように非超過確率50%以上では岩井法が最も小さくて適合性が高いということになる。しかし、いずれの確率分布型も $\Delta F < 5\%$ と小さい。確率分布型の確率分布曲線（非超過確率と凍結指数の関係）について、岩井法の理論曲線と実測凍結指数のトーマスプロットとの関係を図3に示す。ここで、トーマスプロットは、順序統計量の確率評価に使われる近似解法（図解法）であり、非超過確率を簡便に算定するために用いられる方法である。同図より、岩井法の適合性が高いことがうかがわれる。今回の7地点データの検討結果から総合的に判断すると、水文統計で実用に供されている岩井法で計算するのが良さそうである。

## 5. まとめ

以上をまとめると、①最大凍結指数は、最新の10年間最大値がその前の10年間最大値よりかなり小さくなるので、今後の設計に用いることは危険と考えられる。②確率凍結指数を求めるには岩井法が妥当と思われ、10年間最大凍結指数と整合が取れるのは20年～30年確率となる。今後の課題として、①構造物の重要度や耐用年数に応じた設計凍結指数を検討する。②路盤構造や路床材料の違い、各種地盤対策工の違いを考慮した凍結深さを検討する。このため、熱伝導解析などを行い定数 $C$ を検討する。

参考文献 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物）：運輸省鉄道局監修鉄道総合技術研究所編，1992。

2) アスファルト舗装要領：日本道路協会，1988，1992，2001年版。

3) 岩井重久・石黒政儀：応用水文統計学，森北出版，1970。

表1 確率凍結指数と10年間最大凍結指数（八戸）

| 確率年            | 31年間データによる確率凍結指数 |              |              |              | 10年間最大凍結指数 |           |           |
|----------------|------------------|--------------|--------------|--------------|------------|-----------|-----------|
|                | 対数正規分布法          | 岩井法          | Gumbel法      |              | 1968～1978  | 1980～1989 | 1988～1998 |
|                |                  |              | 岩井・石黒        | 極値I型         |            |           |           |
| 1/5            | 143.9            | 142.2        | 151.4        | 142.2        | 242        | 261       | 112       |
| 1/10           | 204.6            | 190.0        | 194.7        | 179.8        |            |           |           |
| 1/20           | <b>273.5</b>     | 239.9        | 236.2        | 216.0        |            |           |           |
| 1/30           | 318.2            | <b>270.3</b> | <b>260.1</b> | 236.7        |            |           |           |
| 1/50           | 379.3            | 310.3        | 290.0        | <b>262.7</b> |            |           |           |
| 1/100          | 471.8            | 367.6        | 330.2        | 297.8        |            |           |           |
| $\Delta F$ (%) | 2.9              | <b>2.4</b>   | 3.6          | 3.6          |            |           |           |

注)  $\Delta F$  は、非超過確率50%以上データの平均二乗誤差(%)を表す。

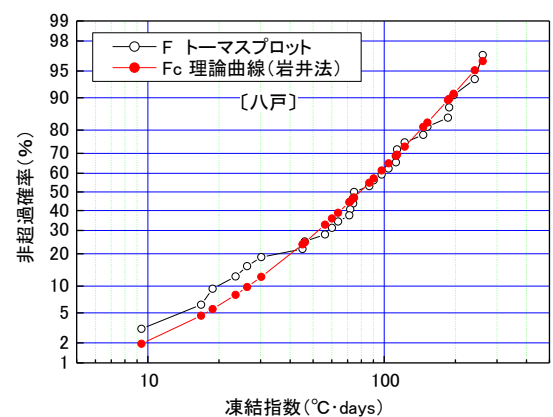


図3 凍結指数と非超過確率の関係