

III-32

路盤構造の凍結深さについて

（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構 正会員 綿貫詠一

1. はじめに

寒冷地で凍上性の地盤に鉄道構造物を建設する場合は、凍上対策の検討が必要である。現行の凍結深さの算定式は、気温条件から求められる凍結指数を用いて凍結深度を算定し、その深さまで非凍上性の粒調砕石で置換える凍上対策を実施している。しかしながら現行の設計手法では路床の材料（熱特性）の評価を考慮できないといった問題点があり、凍上対策が過小になって凍結・凍上の危険性を残す場合や、反対に過大な凍上対策になったりすることがある。そこでこれらが考慮できる新しい設計手法である修正 Berggren 法の式を適用して、東北新幹線工事に適用を行ったので報告する。

2. 凍結深さ算定式の検証解析

修正 Berggren 法の採用に際しては、この計算法の検証が必要である。そこでここでは、旧国鉄が北海道や東北で実施した実験データを使用して修正 Berggren 法の算定式の妥当性を検討する。なお千歳線（恵庭-長都間）で凍上対策工の効果測定が行われており、図1の4工法について測定が実施されている。この測定の結果より、耐凍上効果としてはスタイロホーム25mm厚は断熱効果が大きく、またバラストマット工法では凍上が発生していることが分かる。（図2、図3参照）

現在の設計手法

$$\text{凍結深さ: } X = C \sqrt{F}$$

F: 凍結指数 C: 定数 (3~5)

Cは一般的に4を使用してよいこととしている。

新しい設計手法

（修正 Berggren 法）

$$\text{凍結深さ: } X = C \sqrt{F}$$

$$C = \lambda \sqrt{\frac{172800 k}{L}}$$

λ: 体積熱容量に関する無次元係数

k: 熱伝導率 L: 潜熱

参考文献 1)

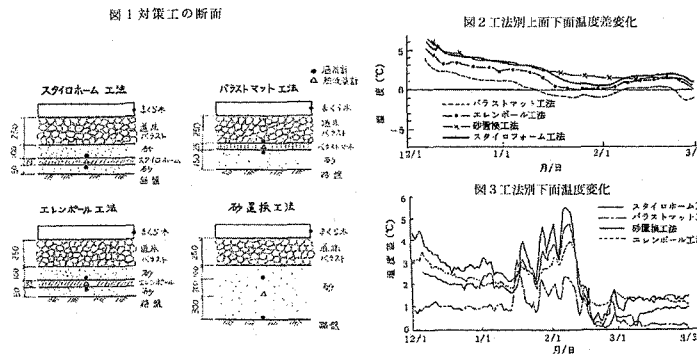


表1 解析ケース

ケース	工法	路盤構成	路盤+対策層厚
C1	スタイロホーム工法	バラスト25cm, 砂10cm スタイロホーム2.5cm 砂5cm 路床(粘土)	42.5cm (H=25+10+2.5+5)
C2	エレンポール工法	バラスト25cm, 砂10cm エレンポール2.5cm 砂5cm 路床(粘土)	42.5cm (H=25+10+2.5+5)
C3	バラストマット工法	バラスト25cm, 砂17.5cm 路床(粘土)	42.5cm (H=25+17.5)
C4	砂置換工法	バラスト25cm, 砂60cm 路床(粘土)	85cm (H=25+60)

表1に示す解析ケースを使用し、修正 Berggren 法により解析結果を表2に示す。実験では凍結深度が測定されていないので対策効果の定性的な比較しかできないが、計算の結果を見るとスタイロホーム工法の場合は路床凍結が約6cm、バラストマット工法の場合は約18cmとなっており、定性的には実験結果と対応していると考えられる。これにより修正 Berggren 法による凍結深度は妥当な設計手法であることが検証された。

3. 試算に用いる凍結指数及び熱伝導率係数

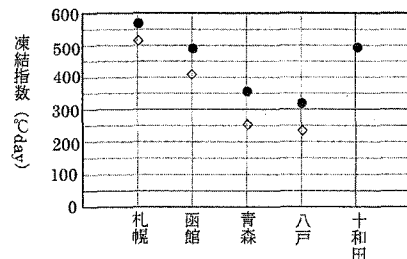
修正 Berggren 法により東北新幹線八戸・青森間の凍結深さの試算を行う前に試算に用いる凍結指数の見直し、及び熱伝導率の測定を行った。

現行の凍結指数は10年間最大凍結指数であることから、最近10年間の気象変動に左右され、設計年代によるばらつきが大きい。したがって、本検討に適用した凍結指数は、近年の41冬季のデータを用いて再来年数は100年とした。図4に従来の設計に用いている凍結指数と本試算に用いた凍結指数を示す。

表2 解析結果

ケース	工法	修正 Berggren 法 (新しい設計手法)		z=4√F (現行の設計手法)		実験結果
		凍結深度 (cm)	路床部の凍結深度 (cm)	凍結深度 (cm)	路床部の凍結深度 (cm)	
C1	スタイロホーム工法	48	5.5	95	52.5	対策効果が最も大きい。凍上なし。
C2	エレンポール工法	49	6.5	95	52.5	凍上なし。
C3	バラストマット工法	60	17.5	95	52.5	凍上あり。
C4	砂置換工法	83	0.0	95	10.0	凍上なし。

図4 現在の凍結指数と凍率凍結指数（再来年数 100 年）



◇10 年間最大凍結指数 統計期間 1968 年～1978 年

●凍率凍結指数（再来年数 100 年）統計期間 1961 年～2003 年

また、室内試験により測定した熱伝導率係数を表3に示す。参考文献2)

表3 試験結果に基づく設計熱伝導係数

	記号	単位	粒調碎石	ローム	粘土
乾燥密度	ρ_d	g/cm ³	1.98	1.09	0.82
含水比	W	%	6.2	52.0	82.0
熱伝導率	k	cal/cm ² ·sec·°C	0.00123	0.00109	0.00160
熱容量	Q	cal/cm ³ ·°C	0.430	0.605	0.644
融解潜熱	L	cal/cm ³	9.82	45.34	53.79

4. 凍上対策工法の検討

凍結指数と熱伝導率の値を使用して、各気温条件に対する凍上対策別の凍結深さの試算を行った。凍上対策工法としては図5に示すように①非凍上性材料で置換える置換工法②断熱工法が考えられ、ここではこの違いを明確にすることを目的として試算を行っている。試算の対象断面はコンクリート版の厚さが30cm、粒調碎石の必要最小厚30cmのときの凍結深さを求め、それぞれの工法に対して完全に凍結深さが粒調碎石層内に収まる厚さを決定する。図6の試算結果から分かるように置換工法の場合は無対策の凍結深度より深くなっている。また断熱工法を要した場合は、粒調碎石の置換厚を概ね10cm程度低減できることが分かる。

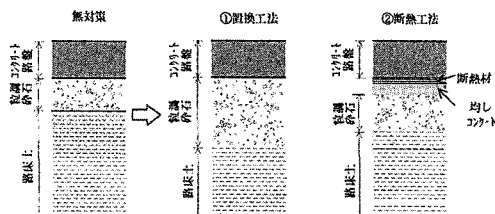


図5 凍上対策工法の模式図

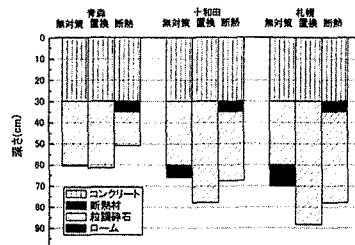


図6 地点別・対策別の凍結深さ（100年確率）

5. 八戸・青森間の凍結深さの算定

修正 Berggren 法に基づいた粒調碎石による置換工法の試算を行なった。試算の対象とするのは図7に示す3つの断面であり、それぞれのケースについて粒調碎石による置換後、路床土の凍結が収まる改良厚を求め凍結深度とする。一連の試算結果をまとめたものを表4に示す。(a)・(b)は凍結深さが路床土にまで及ぶことから置換を行なったあとの凍結深さである。(c)は凍結深さが路床土まで到達しないことから必要最小厚の深さになる。(a)・(b)の断面では現行の設計 ($C/\sqrt{F}$ で $C=4$ とした場合) に比べ小さな凍結深さとなるが、(c)では大きな凍結深となり、路床土の条件や路盤構造の変化にも対応できた凍結深さの算定がされることが分る。

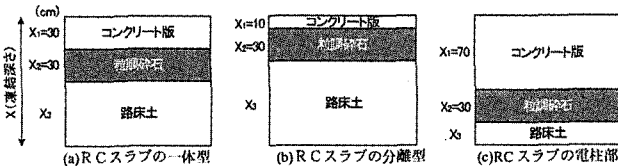


図7 計算断面図の模式図

作用	路床土	修正 Berggren 法			$C/\sqrt{F}$ (100年確率)
		(a)	(b)	(c)	
八戸	ローム	80.8	46.5	80.2	72
	粘土	80.5	46.0	80.2	
三沢	ローム	62.4	48.6	84.0	75.9
	粘土	62.1	47.9	84.0	
十和田	ローム	69.7	59.9	97.7	90.0
	粘土	68.8	58.7	97.7	
青森	ローム	60.8	—	80.0	75.6
	粘土	60.7	—	80.0	

表4 八戸～青森間の凍結深さの検討結果

6. おわりに

寒冷地における凍結深度の設計法に、新たに材料の熱特性を加味することにより、従来に比べ経済性が図れる結果を得ることが出来た。東北新幹線は現在全線着工となり、路盤工区はこの成果に基づいて施工計画を進めている。

【参考文献】

- 丸山、青木、小島、富永、野田、堀井：鉄道路盤における凍結深さの算定方法に関する検討、第40回地盤工学研究発表会2005、7
- 小島、丸山、青木、野田、石塚：室内試験によるロームと粘性土の熱伝導率の測定、土木学会第60回年次学術講演会平成（平成17年9月）