

舗装材料の電気抵抗による凍結融解評価に関する一検討

(国研)土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム ○正 員 上野 千草 (Chigusa Ueno)
 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム 正 員 丸山記美雄 (Kimio Maruyama)
 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム 正 員 木村 孝司 (Takashi Kimura)

1. はじめに

積雪寒冷地において路盤や路床は、低温時の凍結や、融解期における凍結融解の繰り返し作用による支持力低下等の影響を受ける過酷な条件にある。このような現象を的確にとらえ、凍結深さや凍結融解のサイクル数、融解の進行状況、含水比変化等を把握することは、積雪寒冷地において舗装を構築する上で極めて重要である。

しかし、既存の計測方法は、目視判断を必要とするため自動計測が困難な場合や、センサーが高価なため多点での計測が難しい場合などの課題がある。

本文では、凍結前後の舗装材料の電気抵抗の変化から、凍結融解の評価を行う方法として、多点の電気抵抗を同時に計測できる簡便な測定方法について検討した結果を報告する。

2. 既存の計測方法

路盤や路床の凍結深さや融解状況を測定するために用いられている代表的な計測方法としては以下の方法等があり、それぞれ長所と短所がある。

①メチレンブルー凍結深度計^{1,2)}

メチレンブルー凍結深度計は、凍結すると青色から白色に変わるメチレンブルー溶液を利用したものである。メチレンブルー溶液を封入した管を土中に埋設して、凍結期に引き出し青色と白色の変わり目までの長さを測定して凍結深さを求めることができる。長所は、凍結深さが明瞭に判定できることである。一方、路面側からの融解状態を判別したい場合、境界が不鮮明であり、読み取り誤差が生じやすいことや、判別を目視で行うため自動化が困難であることなどの短所がある。

②調査孔および開削観測による方法^{1,2)}

調査孔および開削調査による方法は、舗装断面を直接確認できるが、目視で判別する必要があるため自動化が困難であることなどの短所がある。

③地中温度測定による方法^{1,2)}

地中温度測定による方法は、熱電対等の温度センサーを地中の鉛直方向に数カ所埋設し、温度分布から凍結深さや融解状況を把握するものである。長所としては、常時のモニタリングが可能な点であり、短所としては、凍結および融解の状態を直接的に測定できないため、誤差が生じることである。

④水分計による方法

水分計による方法は、土壌水分計を地中の鉛直方向に数カ所埋設し、水分量の変化から凍結深さや融解状況を把握するものである。長所としては、常時のモニタリ

ングが可能な点であり、短所としては、センサーが高価であるため、多点での計測が制約されるなどがある。また、土壌水分計は舗装体に埋設した場合、数年程度で寿命を迎えることがあり、長期間の計測に不向きである。

以上の他に、最近の国外の事例として、任意の深さの凍結状況と融解状況をリアルタイムでモニタリングする電気抵抗や抵抗率などによる測定方法がある。

本検討では、この電気抵抗をモニタリングする方法を参考に、簡易な計測装置を作製し、舗装材料の凍結判定を試みた。

3. 計測原理および特徴

3. 1計測原理

凍結した土は、凍結していない土に比べて電気抵抗等が大きく変化することが知られている^{1~3)}。そこで本検討では、この性質を利用して路床土および路盤材の凍結・融解状況を電気抵抗の計測により、判定することを試みた。

3. 2本手法の特徴

本手法の特徴は、図-1 に示すように、電極を多点的に設けることで、比較的細かい深度間隔で舗装体の凍結および融解の状況を把握できることにある。また、電気抵抗を計測し、凍結および融解を判定するため、電子ロガー等による経時的な計測が可能な点にある。

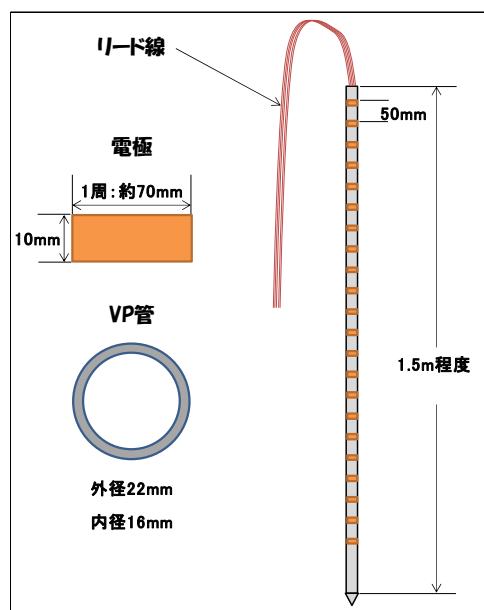


図-1 凍結融解深度計の概要

4. 計測装置の概要

本検討で試作した電気抵抗による深さ別の凍結・融解状況を把握する計測装置（以下、凍結融解深度計）の概要を以下に示す。

4. 1 使用材料

計測対象の材料と接する面に電導性銅箔テープを用い、計測用の立ち上げ線として、市販のリード線 AWG24 を使用した。

4. 2 装置の構造

電導性銅箔テープは一定の間隔を保持して土中に埋設するため、図-1 の用に水道用硬質ポリ塩化ビニル管（以下、VP 管）に等間隔で巻き付け、VP 管の側面に孔を開け、管の内側からリード線をはんだにて銅箔に固定している。

土中に埋設する際は、鉛直方向に立てて、深さ方向に等間隔で電極が並ぶ形となる。

4. 3 計測方法

隣り合う銅箔間の電気抵抗を計測するため、それぞれの銅箔に固定されたリード線の他方の先端に、写真-1 に示すハンディタイプの LCR メータ（GW Instek 製 LCR-916）を接続させ、交流の周波数 100Hz のときのインピーダンス（以下、電気抵抗値）を直列抵抗にて計測した。

5. 凍結確認試験

5. 1 試験試料の作製

試験試料は、表-1 に示す当研究所所有の苫小牧寒地試験道路より採取した路盤材（切込砕石 40mm 級）および路床土の計 2 種類を用いた。試験試料は写真-2、図-2 に示すように木箱に納め、この中に凍結融解深度計を埋設した。

また、事前に試験試料の含水比を、路盤材は約 5%、路床土は約 5%および約 20%となるよう調整した。

5. 2 養生条件

試験試料を凍結させるため、凍結融解深度計を埋設した木箱を-20℃の低温室にて養生させた。また、試験試料の融解状況を把握するため、凍結後、木箱を常温の部屋に移し 6 時間養生した。なお、試料の乾燥を防ぎ、かつ試料の凍結状態を目視で観察できるように、試料上面を透明のアクリル板で覆った。

表-1 試験試料の諸元

			切込碎石 40mm級	路床土 粘性土質礫質砂
通過質量百分率				
ふるい 分析	53.0	mm	100	100
	37.5	mm	100	100
	19.0	mm	68	100
	13.2	mm	52	—
	4.75	mm	31	92.8
	2.36	mm	23	—
	0.60	mm	11	—
	0.30	mm	6	—
	0.15	mm	3	—
	0.075	mm	1	26.6
沈 降 分 析	0.0561	mm	—	23
	0.0401	mm	—	18.8
	0.0256	mm	—	14.6
	0.015	mm	—	9.4
	0.0106	mm	—	7.3
	0.0076	mm	—	5.3
	0.0038	mm	—	4.2
	0.0016	mm	—	3.2
表乾密度		g/m ³	2.67	—
絶乾密度		g/m ³	2.62	—
吸水率		%	1.84	—
最大乾燥密度		g/m ³	2.21	0.887
最適含水比		%	5.4	55.5



写真-1 LCR メータ



写真-2 試験試料および凍結融解深度計の埋設状況

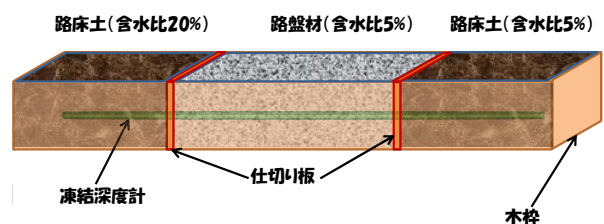


図-2 試験試料および凍結融解深度計の埋設状況

5. 3 凍結確認試験の計測結果

凍結前（常温）、凍結後（-20℃）および常温養生 6 時間後に、LCR メータを用いて、隣り合う電極間の電気抵抗を計測した。計測結果を表-2 に示す。

路盤材含水比約 5%および路床土含水比約 20%の条件では、凍結前と比較して凍結後は電気抵抗値が一桁上昇し、その差が顕著であり、凍結の判断が可能な状況であった。これは、凍結前に存在した水が、凍結後には氷となり、電気抵抗が上昇したためと考えられる。一方、路床土含水比約 5%の条件では、電気抵抗の差はほとんど見られず、凍結を判定することは困難な状況であった。この要因として、凍結前の段階で水がほぼ土粒子内に吸着されており、試料の表面が絶乾状態とほとんど変わらない状態であったため、凍結前から電気抵抗が高い状態であったことから、凍結前後に差が現れなかったと推察される。

また、-20℃の低温室より試験試料を常温の部屋へ移し、常温養生 6 時間後の値を参考に計測した。常温養生 6 時間後の電気抵抗値を表-2 右列に示す。路盤材では、電気抵抗値が一桁低下し、ほぼ凍結前の電気抵抗に戻っていることが確認できる。一方、路床土では、電気抵抗値大きな変化が見られなかった。この要因として、路床土含水比約 5%の条件では、常温養生 6 時間後も試料の表面が絶乾状態とほとんど変わらない状態であったためと考えられ、路床土含水比約 20%の条件では、解凍があまり進んでいなかったためと考えられる。

以上より、材料の種類・含水比の影響が、凍結、融解の判定に大きく関わることが分かった。今回作製した凍結融解深度計では、試料の表面が乾燥状態にあると凍結の判定は困難であるが、ある程度の含水比を有し湿り気のある材料であれば、凍結判定できる可能性を見いだした。なお、実際の舗装内に埋設する際には、現地にて事前に材料を採取し、キャリブレーションを行い、凍結判定の可否をあらかじめ判断する必要があると考える。

表-2 計測結果

試料名	含水比	電気抵抗値(kΩ)		
		凍結前(常温)	凍結後(-20℃)	常温養生6h後
路盤材	5%	1.46×10^2	1.06×10^3	1.55×10^2
路床土	5%	5.85×10^2	5.42×10^2	8.98×10^2
	20%	7.60×10^1	6.01×10^2	6.07×10^2

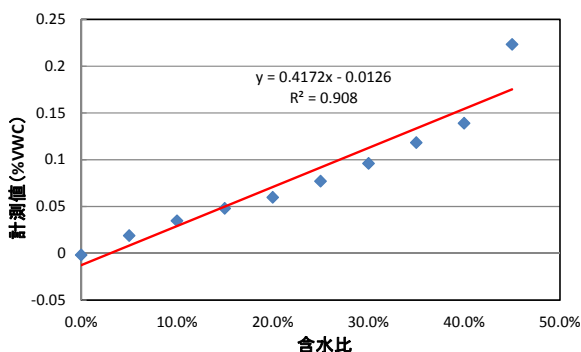


図-3 土壌水分計の測定値と含水比（路床土）

6. 含水比測定

表-2 に示したように、路床土の凍結確認試験において、含水比の違いによって、電気抵抗値が大きく変化する事例が確認されたため、この結果を踏まえ、凍結融解深度計を用いて試料の含水比測定を試みた。

試験は、前述の試験で用いた路床土と路盤材を対象に実施し、含水比の測定には、今回作製した凍結融解深度計および市販の土壌水分計を用い比較を行った。

6. 1 試験方法

試料の作製方法および計測方法は次の通りとした。

- ①試料をバットに薄く敷均し、100℃の高温乾燥炉にて 12 時間養生し、絶乾状態とし、常温に冷却する。
- ②試料を厚手のビニル袋に入れ、試料の重量を電子天秤で計測し、所定の含水比となるよう、メスシリンダーを用いて水を計測し、十分に試料と混合する。
- ③この試料の中に凍結融解深度計または、土壌水分計を埋設し、計測を行う。
- ④計測後、さらに所定の量の水を足し、十分に試料と混合する。
- ⑤③と④を繰り返す。

6. 2 試験結果

試験結果を図-3～6 に示す。路床土においては、含水比を 5%刻みで 45%まで計測を行ったが、路盤材については含水比が 10%を超えると試料と水が分離してしまったため、含水比を 10%までとし、測定間隔は 2%刻みとした。

土壌水分計は、含水比と計測値は概ね比例関係となったが、凍結融解深度計においては、電気抵抗値は含水比に指数比例する結果となった。図-3 と図-5 の近似式の決定係数を比較すると、概ね同程度の値となっており、路床土においては、凍結融解深度計を用いても土壌水分計と同様に含水比を測定できる可能性を見いだした。また、路盤材においても、凍結融解深度計は土壌水分計と同様に含水比を測定できる可能性を見いだした。

7. まとめ

本検討では、凍結前後における舗装材料の電気抵抗の変化から凍結融解判定を行う方法として、凍結融解深度計による測定方法について検討を行った。

路床土および路盤材を対象に行った試験より得られた結果を以下に示す。

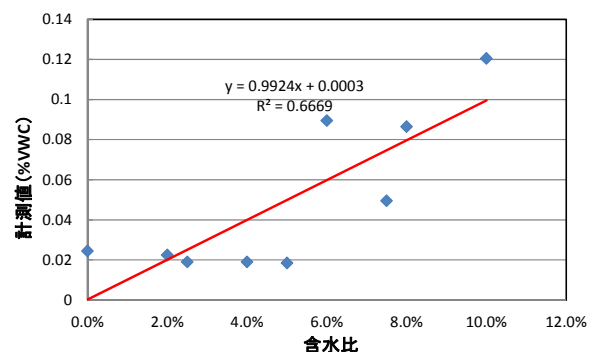


図-4 土壌水分計の測定値と含水比（路盤材）

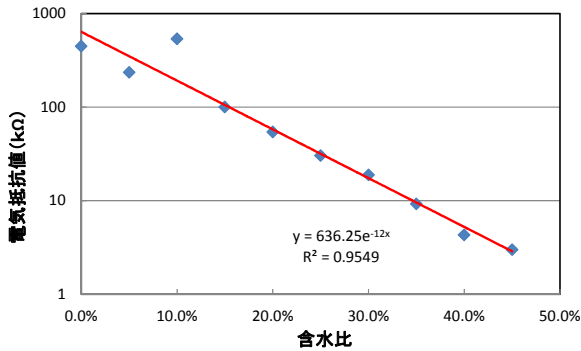


図-5 凍結融解深度計による電気抵抗値と含水比(路床土)

- ・凍結、融解判定において、材料の種類、含水比が、凍結の判定に大きく関わることが分かった。また、含水比が一定程度あり、試料の表面が乾燥状態で無ければ、凍結融解深度計により、凍結、融解判定が可能である可能性を見いだした。
- ・今回作製した凍結融解深度計を用いて含水比の測定を試みた結果、今回使用した路盤材および路床土においては、概ね市販の土壤水分計と同程度の測定が可能であることを確認した。

8. 今後の課題

今回室内において、凍結融解深度計を用いて、近接した電極間の電気抵抗を計測することにより、路床土および路盤材の凍結融解状況の把握や、含水比の判定が概ね可能であることを確認したが、屋外での検討や、実際の道路に埋設した場合の適用性の検討が必要である。また、

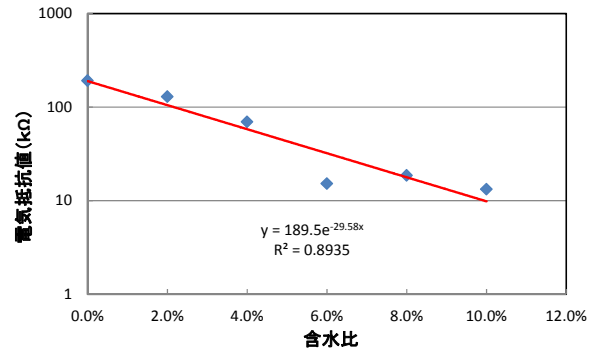


図-6 凍結融解深度計による電気抵抗値と含水比(路盤材)

本検討では、ハンディタイプの LCR メータにより電気抵抗値を測定したが、冬期間および融解期における連続的なデータの取得には、ロガーを用いた計測が不可欠である。今後は、以上のような課題について検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 公益社団法人 土木学会：舗装工学ライブラリー15 「積雪寒冷地の舗装に関する諸問題と対策」、pp.32-33、2016.
- 2) 地盤工学会北海道支部地盤の凍上対策に関する研究委員会：寒冷地地盤工学、pp. 21-28、2009.
- 3) 原田鉦一郎、福田正己、石崎武志：北海道大学低温科学研究所業績第 3512 号、凍土の電気比抵抗値の測定、pp.57-67、1992.