

電気抵抗による舗装体の凍結融解評価について

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム ○上野 千草
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム 丸山記美雄
(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム 木村 孝司

1. はじめに

積雪寒冷地においては厳冬期に凍結が路床まで達し、凍上により舗装にひび割れが生じる場合がある¹⁾。また、凍結融解の繰り返し作用や、融雪水の流入などにより一時的に路床・路盤の支持力が低下し、舗装に破損が生じることが報告されている¹⁾²⁾。このため、凍結深さや凍結融解のサイクル数、凍結融解の進行状況などを把握することは、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。

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判定を行う方法について、基礎的な検討を行った結果を報告する。

2. 計測原理および特徴

(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などが大きく変化することが知られている。そこで本検討では、この性質を利用して路盤材料および路床材料の凍結・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。

(2) 本手法の特徴

本手法の特徴は、**図-1**に示すような電極を等間隔で配置した棒状の計測装置を用い、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。なお、電極を増設することにより、多点での同時計測が可能であり、交流での計測が可能な自記記録装置を用いれば、凍結融解状態を任意の時間間隔で計測することが可能となる。

(3) 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・融解状況を判定する計測装置（以下、凍結融解深度計）の概要を以下に示す。

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。

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、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。

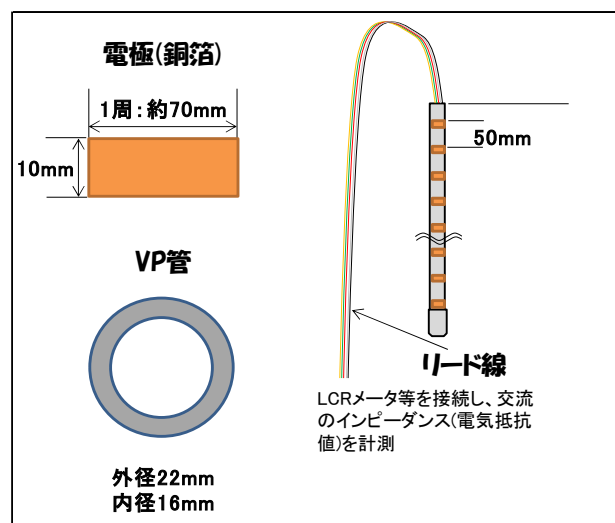


図-1 凍結融解深度計の概要

3) 計測方法

隣り合う銅箔間の電気抵抗を、それぞれの銅箔に固定されたリード線の他方の先端にハンディタイプの LCR メータ (GW Instek 製 LCR-916) または自記記録装置を接続させ計測を行った。また、計測に直流を用いると、電極の溶出や電気分解の影響を受けるため、計測にあたっては交流を用い、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。また、凍結融解の判定を行うために適した周波数を把握するため、周波数を変化させた計測も実施した。

3. 凍結融解判定

凍結融解深度計による路床材料および路盤材料の凍結融解判定の可否を評価するため、周波数 100Hz にて基礎的な計測を実施した。

(1) 試料の作製

計測の対象とした試料は、表-1 に示す路盤材 (切込碎石 40mm 級) および路床土 (粘性土質礫質砂) である。試料は写真-1 に示すようにプラスチック容器に納め、この中に凍結融解深度計を埋設し計測を行った。また、試料の含水比を調整するため、100℃ の高温乾燥炉において 2 日間養生して絶乾状態とし、これに電子天秤にて計測した水を混合した。含水比は、路盤材で 5%、路床土では 10%、20%、30%、40%、及び 50%となるよう調整した。

(2) 養生条件

試料の凍結は、-20℃に室温を保つことのできる低温室を用いて行い、試料の融解にあたっては、常温の部屋にて養生する方法をとった。養生の終了時期については、試料内に併せて埋設した熱電対温度計にて、内部温度を確認した上で決定している。

(3) 測定結果

凍結前 (常温)、凍結後 (-20℃) および融解後 (常温) に電気抵抗値を計測した。また、水道水に対しても併せて計測を行った。計測結果を図-2 に示す。

1) 凍結の判定

水道水では凍結前後で電気抵抗値が二桁上昇し、 1.0×10^0 オーダーから 1.0×10^2 オーダーとなり、凍結による明確な差が確認された。

路盤材では、最適含水比付近の 5%において計測を行った結果、凍結前後で電気抵抗値が一桁上昇し、 1.0×10^1 オーダーから 1.0×10^2 オーダーとなり、その差が明確であり凍結の判定が可能な状況であった。

表-1 試料の性状

		路盤材 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 計測状況

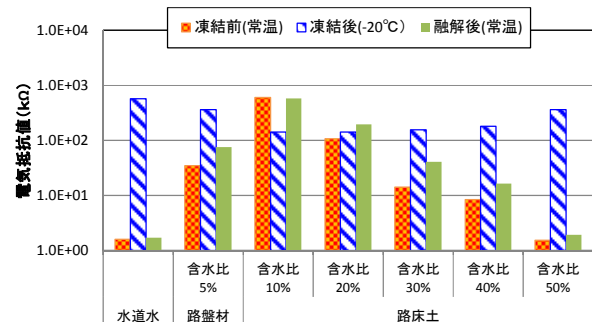


図-2 計測結果

路床土においては、含水比が最適含水比に近い 50% および 40% の条件では、凍結前後で電気抵抗値が二桁上昇し、 1.0×10^0 オーダーから 1.0×10^2 オーダーとなり、その差が顕著であり凍結の判定が可能な状況であった。また、含水比 30% の条件においても凍結前後で一桁上昇し、 1.0×10^1 オーダーから 1.0×10^2 オーダーとなり、その差が明確であり凍結の判定が可能な状況であった。一方、含水比が 10% および 20% の条件においては、凍結前後の電気抵抗値の差は小さく、 1.0×10^2 オーダーのままであり、判定が困難な状況であった。この要因の一つとして、含水比が最適含水比と比較して低く、試料の表面が乾燥状態に近いために、凍結前の段階でも電気抵抗値が高く、凍結による電気抵抗値の上昇が確認できなかったものと推察される。

2) 融解の判定

全ての試料で融解後の電気抵抗値は凍結前の値と概ね同程度となった。試料の表面が乾燥状態に近いと考えられる路床土の含水比 10%、および 20% の試料以外では、融解前後の電気抵抗値の差は明確であり、融解の判定が可能であると考えられる。

4. 計測周波数の検討

屋外において図-3 に示すように計測用の舗装を造成し、凍結融解深度計を設置した。この施設において 2016 年 12 月から 2017 年 3 月まで、LCR メータを用いて、凍結融解の判定に適した計測周波数を把握するため、室内試験時に用いた 100Hz のほかに 1kHz と 10kHz にて電気抵抗値の計測を行った。

結果を図-4~6 に示す。計測された電気抵抗は、100Hz では 1.0×10^1 オーダーから 1.0×10^3 オーダー、1kHz では 1.0×10^1 オーダーから 1.0×10^2 オーダー、10kHz では 1.0×10^0 オーダーから 1.0×10^1 オーダーとなり、計測に用いる周波数によって電気抵抗値のオーダーが異なる結果となった。

図-7 に深さ 65cm における電気抵抗値と舗装体温度の推移を抽出したものを示す。舗装体温度から 1 月上旬に凍結、3 月中旬に融解したと判断でき、これに伴う電気抵抗値の変化は 100Hz の計測条件で特に顕著であった。このことから凍結融解の判定には周波数 100Hz 程度が適していると考えられる。

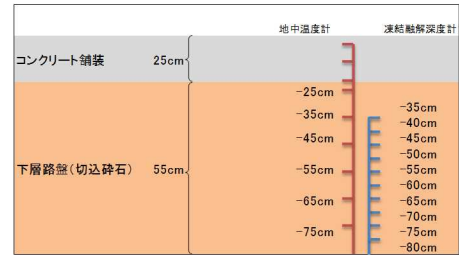


図-3 計測状況

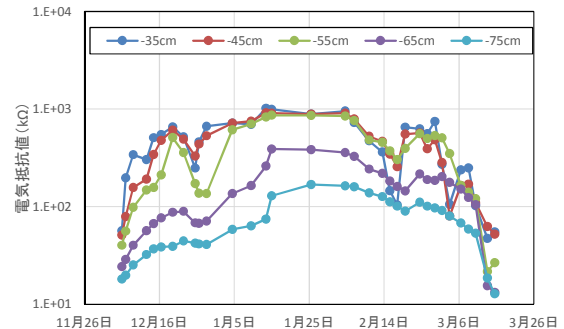


図-4 計測結果 (100Hz)

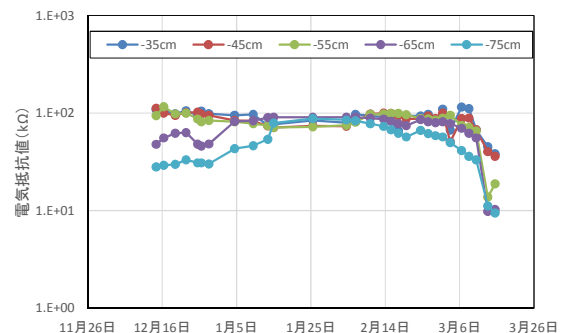


図-5 計測結果 (1kHz)

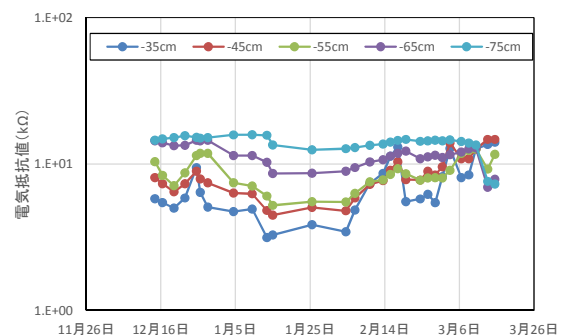


図-6 計測結果 (10kHz)

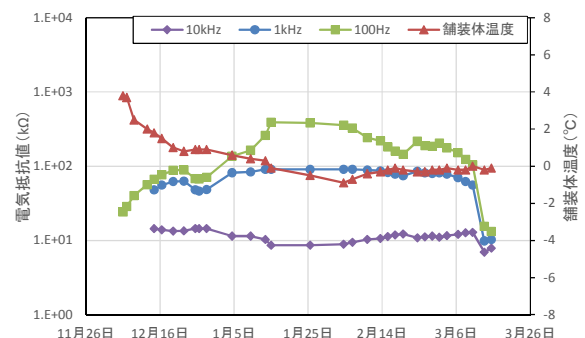


図-7 計測結果 (h=-65cm)

5. 自記記録装置による計測

凍結融解深度計を用いた凍結融解の判定が可能な状況を確認したため、交流インピーダンス方式の自記記録装置を試作し、これを用いて時系列データの取得を試みた。自記記録装置の主な仕様を表-2に示す。測定周波数は前段の検討結果より100Hzおよび50Hzとし、測定範囲は $10 \times 10^{-1} \sim 5.0 \times 10^4 \text{k}\Omega$ とした。

(1) 計測条件

対象とした試料は、表-1に示した路床土、および路盤材とし、常温において前述と同様の方法で含水比を最適含水比に調整し、 -10°C の低温室において養生した。このとき、電気抵抗値および試料温度を10分間隔で計測した。なお、試料温度は熱電対温度計により計測し、埋設深さは凍結融解深度計の計測に用いた電極と電極の中間の深さとした。

(2) 計測結果

計測周波数50Hzにて計測した結果を図-8、9に示す。常温における電気抵抗値は路床土で 1.0×10^0 から 10^1 オーダー、路盤材で 1.0×10^1 オーダーであった。 0°C 付近で両試料とも凍結に伴うと考えられる電気抵抗値の急激な上昇が見られ、 1.0×10^2 から 10^3 オーダーとなることが確認された。また、試料が一樣に凍結に至った後は、電気抵抗値が一定となった。

本測定結果から凍結融解深度計と自記記録装置用いた場合でも、常温における値と凍結後では顕著な値の差が確認されたことから、この手法を用いた自動で連続的な凍結判定が可能と考える。なお、今回用いた試料の凍結の判定にあたっては、 1.0×10^2 程度以上が妥当と考える。

6. まとめ

本検討において、最適含水比程度の湿潤状態の試料であれば、凍結前後の電気抵抗値に明確な差が見られ、舗装体内部の電気抵抗値を計測することにより、凍結融解状況を判定できる可能性を見いだした。また、計測に用いる周波数は50~100Hz程度が凍結融解の判定に適していることを把握した。さらに、自記記録装置による自動計測が可能であることを確認した。

参考文献:

- 1) 石川達也、川端伸一郎、亀山 修一、安倍隆二、小野丘：舗装構造の疲労寿命に及ぼす粒状路盤の凍結融解の影響とその評価、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、Vol.67、No.3、pp.109-116、2011。
- 2) 安倍隆二、田高淳、久保裕一：積雪寒冷地におけるアスファルト舗装の厳冬期および融解期のひずみ特性、土木学会舗装工学論文集、第14巻、pp.147-154、200.9

表-2 自記記録装置の仕様

項目	規格	
測定	測定周波数	50Hz, 100Hz
	測定項目	交流インピーダンス
	測定範囲	100Ω ~ 5MΩ
	分解能	1Ω
記録	記録メディア	マイクロSDカード
	記録インターバル	1min, 5min, 10min, 30min, 60min
	ファイル形式	CSV形式
その他	電源	12V鉛ニッケル電池
	電池連続記録期間	6ヶ月以上 (記録インターバル60min)
	動作温度範囲	-20~50℃

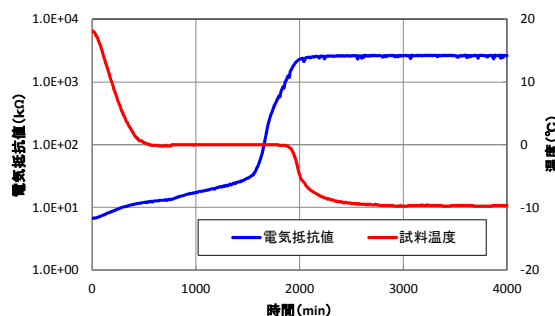


図-8 電気抵抗値の変化 (路床土)

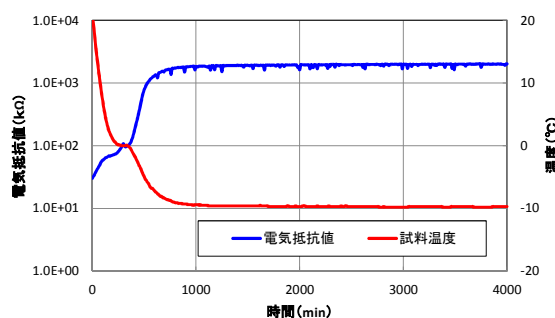


図-9 電気抵抗値の変化 (路盤材)