

近畿大学理工学部 学生員 ○森川 純至
 近畿大学理工学部 張 天叡
 近畿大学理工学部 正会員 高野 保英
 近畿大学理工学部 正会員 麓 隆行

1. はじめに

寒冷地などにおいて土壌が凍結した際に、土壌内の水分が凝固し、体積変化が生じる。それにより凍上と呼ばれる土壌の隆起が生じ、道路のひび割れなどの原因となることがある。このような凍上による被害の対策を検討するためには、凍結の進行に伴い土壌内部でどのように体積変化が生じているのかを把握することが重要となる。筆者らは土壌内部の変形を非破壊かつ非接触で把握する手法として、X線CT装置と3次元画像相関法(Digital Volume Correlation: 以下、DVCと称す)を用いて、凍結に伴う土壌内部の変形の計測を試みており、珪砂4号および5号を詰めたカラムを用いて、凍結前、凍結後、および融解後の透過画像をX線CT装置で撮影し、DVCを用いて解析を行った¹⁾。その結果、凍結および融解による体積ひずみの発生を確認し、土壌内部の膨張と収縮による変形を計測することができた。しかしながら、凍結の進行に伴う変形過程の追跡には至らなかった。そこで本研究では、珪砂4号を用いて作成した珪砂試料を底面から冷却させ、凍結の進行に伴い透過画像を撮影することで、土壌内部の変形の追跡を試みた。

2. 実験方法

内径65mm、高さ45mmの円筒形の亚克力製カラムに、図-1に示すように、底面から高さ0mm, 13mm, 23mm, 33mm, 45mmの位置に温度計測用の熱電対を設置した。カラムに珪砂4号と水道水を詰め、表面に直径1mmのジルコニア球を約30粒撒いた。作成した珪砂試料を冷却台の上に設置し、発泡スチロールで作成した断熱カバーを上から被せる。そして、冷却台と恒温水槽を断熱したホースでつなぎ、冷却台内部にエタノールを-20℃まで低下させながら循環させ、各熱電対の温度を1分毎に計測した。

X線CT装置による透過画像の撮影については、土壌の凍結が開始した時点で1度目の撮影を行い、熱電対③の温度が-1℃に達した時点で2度目の撮影を、熱電対②の温度が-1℃に達した時点で3度目の撮影を、熱電対①の温度が-1℃に達した時点で4度目の撮影を行う。

土壌の初期平均温度および体積含水率を変更しながら3回の実験を行い、それぞれの実験をCase A~Case Cとした。各ケースの実験条件については表-1に示す。

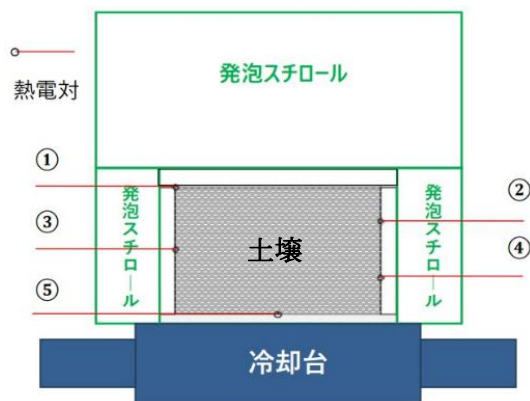


図-1 カラムと冷却装置の概略図

表-1 実験条件

	土壌初期平均温度	体積含水率
Case A	11.1℃	0.29
Case B	11.3℃	0.32
Case C	3.5℃	0.32

3. 実験結果および考察

図-2に、Case Cにおける、凍結開始前と各撮影時点を比較したカラム中心断面における鉛直方向の移動量の経時変化を示す。色が赤く正の値の領域は下方向への移動を、色が青く負の値の領域は上方向への移動を示している。撮影1時点で、わずかであるが土壌全体で土壌底部の凍結による上方への移動を確認すること

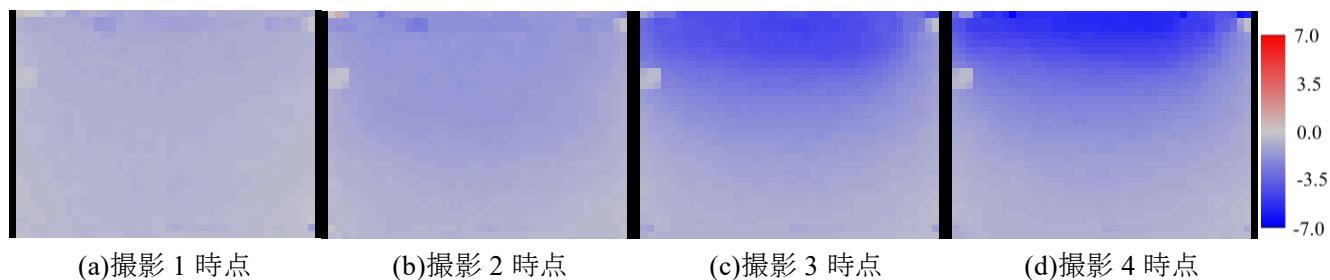


図-2 Case C における鉛直断面の移動量分布の経時変化 (単位: pixel)

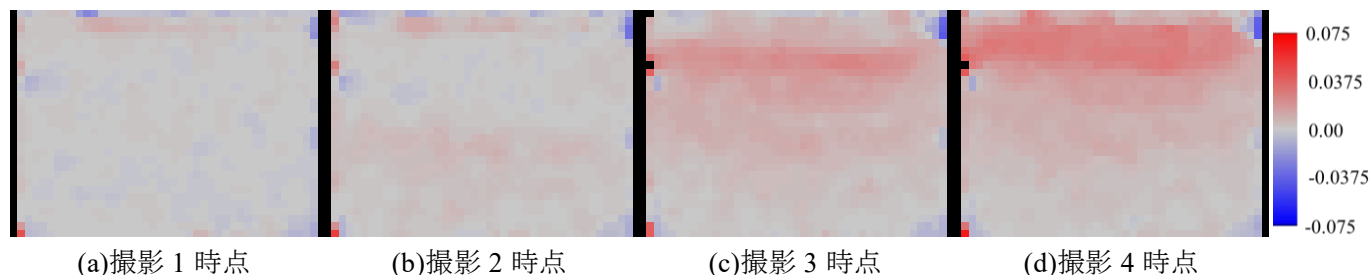


図-3 Case C における鉛直断面の体積ひずみ分布の経時変化

ができ、撮影 2 時点では土壌の上半分の範囲でより大きな移動が生じる。撮影 3 と撮影 4 時点では、さらに大きく上方に移動することが確認された。

表-2 土壌表面の上方向への移動量

	Case A		Case B		Case C	
	DVC 解析	ジルコニア	DVC 解析	ジルコニア	DVC 解析	ジルコニア
凍結前～撮影 1	0.082mm	0.094mm	0.116mm	0.102mm	0.125mm	0.128mm
凍結前～撮影 2	0.131mm	0.138mm	0.260mm	0.237mm	0.207mm	0.217mm
凍結前～撮影 3	0.266mm	0.287mm	0.527mm	0.517mm	0.456mm	0.488mm
凍結前～撮影 4	0.322mm	0.342mm	0.565mm	0.549mm	0.581mm	0.625mm

図-3 に、Case C における、凍結開始前と各撮影時点と比較したカラム中心断面における体積ひずみの鉛直分布の経時変化を示す。色が赤く正の値の領域は膨張を、色が青く負の値の領域は収縮を示している。撮影 1 の時点では体積ひずみはほとんど確認できないが、撮影 2 時点で底面から高さ約 14.8mm～22.1mm の範囲で僅かに膨張が確認できる。撮影 3 時点では底面から高さ約 32.5mm～38.4mm の範囲で大きな膨張が生じ始め、撮影 4 時点ではさらに表面付近まで膨張が広がっていることが分かる。ここまで Case C の結果のみを示したが、すべてのケースにおいて移動量と体積ひずみの分布の経時変化は、同様の傾向を示した。

表-2 に、DVC 解析によって得られた土壌表面の鉛直方向の移動量の平均値と、土壌表面に撒いたジルコニア球の重心位置の鉛直方向の移動量の平均値を示す。各時点で両者の値は概ね一致しており、DVC による計測の妥当性が確認できる。またこれらの値からも、凍結の進行に伴い土壌の上方向への移動が増加していることが確認できる。

4. まとめ

本研究では、X 線 CT 装置の内部に硅砂試料を設置し底面から冷却させ、土壌の凍結の進行過程で透過画像の撮影を行い、DVC による解析を行うことで、土壌内部の体積ひずみの計測を試みた。

その結果、凍結の進行に伴う土壌内部の体積ひずみの発生過程を計測することができ、土壌内部の凍結が底面から上方へと進行するにつれて、体積ひずみも上方へ広がっていくことを確認することができた。

参考文献

- 1) 高野 保英, 麓 隆行, 河井 克之: X線CT画像を利用した凍結および融解に伴う硅砂内部の変形計測の試み, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.77, No.2, I_1357-I_1362, 2021.