

X線CT装置を用いた凍結・融解に伴う土壌内部の変形計測

近畿大学 正会員 ○高野 保英 近畿大学 正会員 麓 隆行

西日本高速道路エンジニアリング関西 相澤 春太郎

JESCO ホールディングス 恩田 隆太郎

1. はじめに

土壌が凍結した際に、土壌内の水分が液体から固体に変化し、水分の体積変化による土壌の変形が生じる。これは凍上と呼ばれる土壌の隆起をもたらし、舗装の亀裂など地上の構造物に被害を与える場合がある。このような凍上被害の対策を検討するにあたっては、土壌内の水分が温度低下に伴って、どのように移動し、どのように凍結・膨張するか、すなわち凍上現象のメカニズムの理解が重要となる。しかしながら、水の凍結に伴う土壌内部の変形を非破壊かつ非接触で把握する手法は、未だ実用化が進んでいない。

本研究では、X線コンピュータトモグラフィー（以下、X線CTと称す）装置と三次元画像相関法（Digital Volume Correlation, 以下、DVCと称す）を用いて、凍結前後の土壌内部の変形の計測が可能かどうかを検討した。すなわち、X線CT装置で凍結前、凍結後および融解後の土壌（珪砂）の再構成画像を撮影し、その後DVCにより土壌内部のひずみを求めた。本報告では、その結果の一部を紹介する。

2. 実験・解析方法

実験には、近畿大学理工学部コンクリート実験室内のX線CT装置を用いた。本装置は、X線管とフラットパネルセンサを回転させ、その中央に設置した試料にX線を放射し、試料を透過したX線をフラットパネルセンサで受信・解析することで、撮影範囲内の三次元座標ごとにX線吸収の割合を求め、輝度に置き換え、三次元の再構成画像を得る。再構成画像では密度が大きい箇所はX線を多く吸収するため白く表示され、密度が小さい箇所はX線が透過しやすくなり黒く表示される。なお、本装置で撮影した再構成画像の最小単位（1ボクセル）の一辺の長さは、0.123051mmとなる。

円筒型のアクリル製カラム（内径60mm、高さ110mm）内に飽和させた珪砂5号を詰め、上端をラップで密封し側面を断熱材で覆う。次に、X線CT装置を用いてカラム内の土壌の再構成画像の撮影を行い、カラムを冷凍庫内に約24時間設置し、土壌を凍結させ、再構成画像の撮影を行った。その後、自然解凍により土壌を融解させて再構成画像を撮影した。

DVCにより土壌の凍結前、凍結後、融解後の再構成画像を比較し、土壌内部の体積ひずみの3次元分布を求めた。DVCは、指定した範囲内の変形前後の試料の再構成画像を比較し、試料の変形により生じた移動量を三次元的に計測する手法である。本研究では、DVCより得られた土壌の移動量から、体積ひずみを算出した。

また凍結に伴う土壌の温度の変化調べるために、別途飽和した珪砂5号の土壌カラムを作成した。カラム内には所定の位置（図-1参照）にT型熱電対が挿入されており、土壌を上述の方法で凍結させて、その間の温度の変

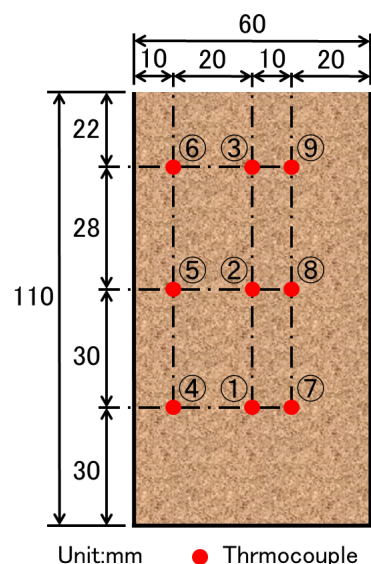


図-1 土壌内熱電対配置図

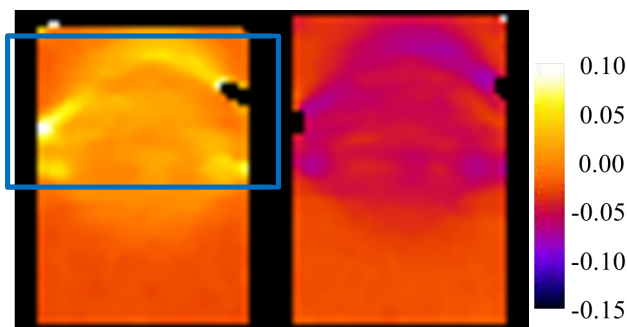


図-2 鉛直(xz)断面の体積ひずみの分布（左：凍結後、右：融解後）

キーワード X線CT, 三次元画像相関法, 凍結・融解

連絡先 〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1 近畿大学理工学部社会環境工学科 TEL 06-6721-2332

化を1分毎に計測した。

3. 実験・解析結果

X線CT装置でカラム内の土壌の高さ11.5mmから98.5mmの範囲の再構成画像を撮影し、高さ12.8mmから97.3mmの範囲の土壌の移動量および体積ひずみをDVC解析により求めた。

図-2に、DVCより得られた(凍結前と比較した)凍結後および(凍結後と比較した)融解後の体積ひずみの鉛直(xz)断面分布を示す。図には、体積ひずみの凡例も示す。色が明るく正の値の領域が膨張し、色が暗く負の値の領域は収縮していることを表す。

同図左の凍結後の体積ひずみ分布を観ると、青い四角で囲った高さ約50mmから約90mmの範囲で、比較的膨張が大きい凸型の領域が確認された。一方、右の融解後の体積ひずみ分布からは、凍結後に膨張した部分が収縮していることがわかる。これらの結果から、X線CT装置で撮影した再構成画像を用いたDVCにより、凍結あるいは融解による土壌内部の膨張と収縮による変形の計測は可能であると推察される。

図-3に、高さ81.0mm、73.6mmおよび54.4mmでの珪砂5号の水平(xy)断面の凍結後の体積ひずみ分布を示す。画像を観ると、高さが低くなるにつれて膨張している領域が、供試体の内側から外側に円状に広がることが分かる。従って、上述した膨張が大きい土壌内部の凸型の領域は、円の中心を通るいずれの鉛直断面でも生じていることが確認される。

図-4に、凍結過程における土壌内部温度の経時変化を示す(冷凍庫設置150分～420分後)。

土壌の温度はどの地点でもほぼ同時に0℃付近に達するが、その後カラム上部の3地点(③、⑥および⑨)の温度が最初に氷点下温度に下降し(図中Aの時点)、続いてカラム下部の3地点(①、④および⑦)の温度が、最後にカラム中央部の3地点(②、⑤および⑧)の温度が、それぞれ氷点下温度に下降する(図中BおよびCの時点)。従って、土壌の凍結はカラム上部、下部、中央部の順に完了すること、またそのことより以下のような現象が生じたことが推察される。すなわち、表面に近い土壌では最初に凍結が進み、その内部の液状水は膨張によって間隙を通じて周囲に押し出されるため、土壌間隙はあまり膨張しない。中央よりやや上方の土壌内の液状水は、その上方(および下方)の土壌が既に凍結していることから、押し出されることなくその場で凍結するため、土壌間隙の膨張が大きくなる。なお下部の土壌では、その上方にある土壌の重量負荷のため、ほとんど膨張が生じない。

4. おわりに

X線CT装置とDVCを用いて、土壌(珪砂)の凍結・融解による土壌内部の変形の計測を試みた。その結果、凍結後と融解後の土壌内部の体積ひずみの鉛直および平面分布が得られ、凍結・融解に伴う膨張および収縮が確認できた。また土壌の中央よりやや上方で膨張が大きい領域が観られたが、この発生の原因は土壌の温度の変化、すなわち凍結の発生過程によるものと推察される。

なお、本研究はJSPS科研費19K04626の助成を受けたものです。



図-3 凍結後の体積ひずみの平面(xy)分布(左:高さ81.0mm, 中:高さ73.6mm, 右:高さ54.4mm)

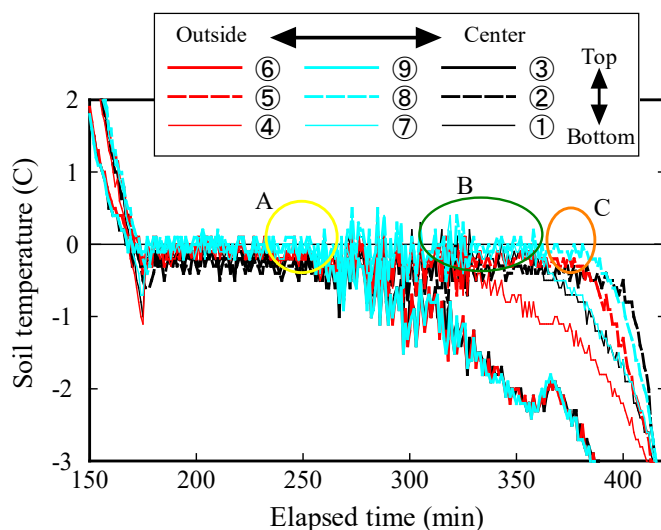


図-4 土壌温度の経時変化