

凍結・融解作用を受ける粒状地盤材料の力学挙動のモデル化

北海道大学大学院 学生会員 ○玉置 和美

北海道大学大学院 正会員 石川 達也

北海道大学大学院 フェロー 三浦 清一

1. はじめに

積雪寒冷地である北海道では、降雨や地震などに加え、凍結・融解現象に起因する構成地盤材料の力学的な劣化がその他の多数の影響因子と複雑に絡み合い、自然災害の被害を拡大する恐れのあることが懸念されている。実際、凍結・融解履歴を受けた地盤が示す強度・変形特性等の基本的性質に関しては、いまだ未解明な部分が多く残っており、砂などに代表されるような粒状地盤材料においても、凍結・融解履歴の影響を微視的に解明していくことが重要であるといえる。そこで本研究では、熱伝導解析と不連続体解析を連成させた3次元個別要素法（DEM）の解析プログラムを用い、土粒子間隙水の凍結・融解現象を模擬し、凍結・融解履歴を受けた地盤の強度・変形特性について検討を行った。

2. 解析方法

粒状地盤材料の凍結融解三軸試験のシミュレーションを行った。解析は、凍結過程、融解過程、等方圧縮過程、せん断過程の4つに分かれている。本解析では、間隙比の異なる2種類の初期モデルを用いて解析を行った（Fig.1）。初期モデルは上・下壁要素および円筒状の側壁要素（いずれも剛体）から構成されており、まず物性値に砂を仮定した均一粒径（ $D=5.0\text{mm}$ ）の剛体球要素をランダムに配置し、土粒子だけの解析モデルを作成した。その後物性値に水を仮定した熱による粒子の膨張を考慮可能な剛体球要素（以下「熱膨張球要素」と称す、 $D=2.0\text{mm}$ ）を土粒子間の間隙に出来る限り配置し初期モデルを完成させた。ここで、熱膨張球要素は、間隙水が凍結することで生じる凍結圧を導入するための要素であり、実際の水を想定したものではない。また本研究では、給排水および土粒子間隙水の移動は考慮せずに間隙水がその場で凍結・融解することを前提条件とした。

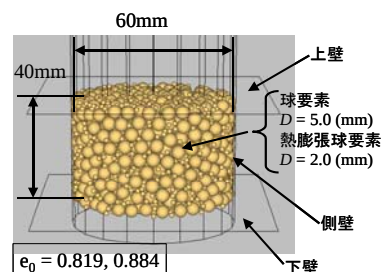


Fig.1 初期解析モデル

Table 1 解析パラメーター

density ρ (sand, water)	2.6, 1.0 (g/cm ³)
angle of interparticle friction ϕ_μ	ball-ball (sand) 35.0 (°)
	ball-ball (water) 0.57 (°)
	wall-ball 0.0 (°)
stiffness of penalty spring (normal kn, shear ks)	top/bottom/ball 10.0, 2.5 (MN/m)
	lateral wall 1.0, 0.25 (MN/m)
gravity force	9.8 (m/s ²)
specific heat C	4.2 (J/g°C)
thermal conductivity k	0.50 (W/m°C)
coefficient of linear thermal expansion α	sand —
	water (e ₀ =0.819, e ₀ =0.884) -0.1, -0.13 (1/°C)

境界条件としては、下・側壁要素を固定、断熱とし、上壁要素については、供試体に10kPa以上の応力が載荷されないよう壁速度を調節した。初期条件としては、下壁要素に初期温度-1.0°C、球要素に初期温度0.0°Cを与え、下部から上部へと凍結を進行させた。全ての球要素が、-0.99°C（-1.0°Cの99%）以下になったときを凍結完了とした。その後、熱膨張球要素の粒径を段階的に縮小し安定解析を行った上で、すべての熱膨張球要素を消失させ更に安定解析を行うことで、融解現象を再現した。

用いた解析パラメーターをTable 1に示す。熱膨張球要素の半径 R は温度変化 ΔT により、線形熱膨張率 α （1/°C）を用いて、 $\Delta R = \alpha R \Delta T$ だけ増加することから、各々の間隙比において、間隙と熱膨張球要素の占める体積が、水の凍結による体積膨張（約9%）を超えない値に設定した。

凍結・融解後、拘束圧 $\sigma_c=49.0\text{kPa}$ で等方圧縮した。具体的には、各々の壁要素から得られる応力を解析ステップごとに求め、設定した拘束圧 σ_c との差を減少させるように壁速度を調節することで、拘束圧を載荷した¹⁾。その後側圧一定の下で軸ひずみ速度一定のひずみ制御で単調載荷を行った。

キーワード 個別要素法 三軸圧縮試験 凍結融解試験

連絡先 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学大学院工学研究科 TEL011-706-6203

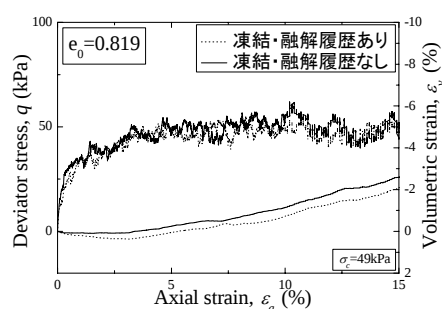
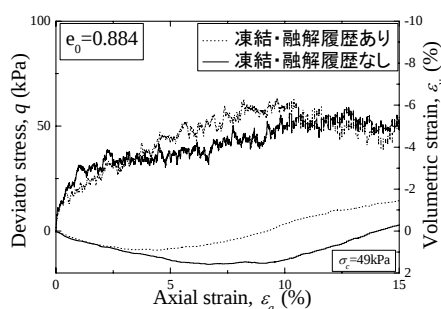
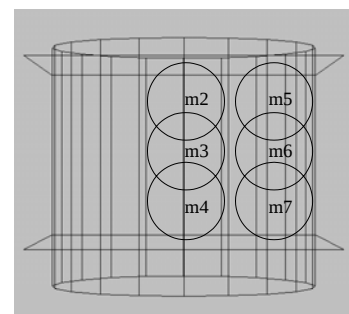
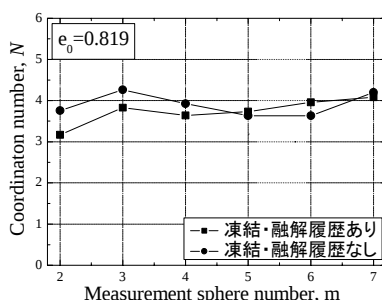
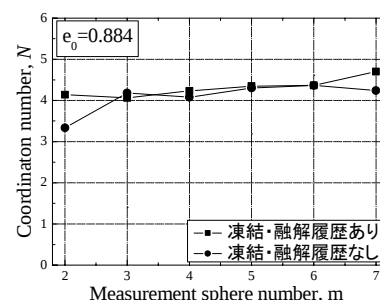
Fig.3 $q-\varepsilon_a$, $\varepsilon_v-\varepsilon_a$ 関係 ($e_0=0.819$)Fig.4 $q-\varepsilon_a$, $\varepsilon_v-\varepsilon_a$ 関係 ($e_0=0.884$)

Fig.5 測定球体

Table 2 間隙比の変化

初期間隙比	$e_0=0.819$	$e_0=0.884$
凍結融解履歴	あり	なし
凍結後	0.830	0.888
融解後	0.828	0.878
圧密後	0.815	0.823

Fig.6 配位数の変化 ($e_0=0.819$)Fig.7 配位数の変化 ($e_0=0.884$)

3. 解析結果・考察

(1) 強度・変形に関する検討

Fig.3, Fig.4 に、初期間隙比 $e_0=0.819$, $e_0=0.884$ 各々における $q-\varepsilon_a$ 関係および $\varepsilon_v-\varepsilon_a$ 関係を示す。Fig.3, Fig.4 より $e_0=0.819$ では、凍結・融解履歴を与えることにより、 q , ε_v とともに若干ではあるが下方へシフトする傾向にあり、 $e_0=0.884$ では、 q , ε_v とともに凍結・融解履歴を与えることにより、上方へシフトする傾向にあった。以上の解析結果は、間隙比が異なる場合、凍結・融解履歴は粒状地盤材料の強度・変形特性に異なった影響を及ぼすことを表現したものであると考えられる。

(2) 間隙比に関する検討

Table 2 に凍結・融解履歴の有無による e の変化を示す。 $e_0=0.819$ では、凍結に伴い体積膨張が生じ、その後融解により体積収縮するものの、初期状態まで戻らないことがわかる。また $e_0=0.884$ では、凍結に伴い若干ではあるが体積膨張が生じるものの、融解により初期状態よりも体積は収縮することがわかる。したがってどちらの間隙比においても、凍結・融解作用によりなんらかの粒子構造の変化が生じたと考えられる。

(3) 平均配位数に関する検討

本研究では供試体内に、ある大きさの球を設定し（以下、「測定球体」と称す、Fig.5）その中に重心をもつ粒子のみを対象として、平均配位数 $\bar{N}$ を算出した²⁾。各測定球体における凍結・融解前後の平均配位数 $\bar{N}$ の変化を、Fig.6, Fig.7 に示す。 $e_0=0.819$ の場合、m2, m3, m4 では履歴なしの方がやや大きな値を示し、凍結・融解現象により、周辺部では粒子構造が若干密になる傾向が見られるものの、供試体中心部では履歴なしの状態に比べ、緩い構造になったと考えられる。一方、 $e_0=0.884$ の場合、m2, m4, m7 では凍結・融解後 $\bar{N}$ が大きくなり、凍結・融解現象により、供試体上・下部の粒子構造が若干密な構造になったと考えられる。

4. まとめ

粒状地盤材料の凍結融解現象を、熱による粒子の膨張を考慮可能な球要素を用いて模擬し、間隙比の違いによる凍結・融解履歴が強度・変形特性および粒子構造に及ぼす影響の違いを調べることができた。

参考文献

- 1) Ishikawa T et al.: Numerical Simulation of a Variety of Shear Tests for Granular Materials with 3D DEM, IACMAG, Vol.2, pp.65-72, 2005.
- 2) 玉置和美: 凍結・融解作用を受ける粒状地盤材料の力学挙動のモデル化に関する研究, 北海道大学大学院修士論文, 2005.