

個別要素法による凍結融解作用を受ける粒状体の力学挙動解析

Numerical modeling for mechanical behavior of granular materials subjected to freeze-thaw action with DEM

石川達也*・玉置和美**・三浦清一***

Tatsuya Ishikawa, Kazumi Tamaki and Seichi Miura

*工博 北海道大学大学院助教授, 工学研究科環境循環システム専攻 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

**工修 北海道大学大学院, 工学研究科環境循環システム専攻 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

***工博 北海道大学大学院教授, 工学研究科環境循環システム専攻 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

This paper presents a numerical experiment to reveal the effect of freeze-thaw action on the mechanical behavior of granular materials in terms of micromechanics. The objective is to propose a new analytical procedure to simulate the mechanical behavior of granular materials subjected to freeze-thaw sequence. Numerical simulations of freezing-thawing triaxial compression tests were performed with 3D DEM coupled with a thermal analysis, and the applicability of the DEM to the freezing-thawing behavior of granular materials was discussed. As the results, it was showed that the proposed DEM model that puts many small elements which expand with dropping the temperature between soil particles can simulate the freezing-thawing behavior of granular materials to some extent though there is room for further investigation as to numerical modeling and setting analytical parameters.

Key Words: granular materials, freeze-thaw action, triaxial compression test, DEM

キーワード: 粒状体, 凍結融解作用, 三軸圧縮試験, 個別要素法

1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地域においては、地盤の凍結融解現象は避けて通れない自然現象の一つである。このような地域では、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。従来、凍結融解作用が土の力学特性の変化に及ぼす影響については種々検討されている。代表的なものは、凍上メカニズムの検討¹⁾や凍上現象が土構造物に与える影響の検討²⁾など凍上現象に関する研究である。また、凍結融解作用を受ける飽和地盤の力学特性(強度特性・変形特性)に関する研究^{3,4)}も行われている。小野は、凍結・融解・せん断過程を一貫した条件のもとで制御できる試験装置を開発し、それを用いて正規圧密粘土・過圧密粘土に対して凍結融解三軸圧縮試験を行っており、凍結融解履歴による影響の違いを過圧密比などの点から報告している⁵⁾。しかし、細粒分が地盤の凍上性に影響を与える主たる要因の1つと考えられているため、粘土やシルトといった細粒分を多く含む土に関する研究が主体となっている。

一方、北海道には破砕性火山灰地盤が広く分布しており、火山灰質粗粒土等の非凍上性材料で構築された盛土の斜面が融雪期に崩壊する現象も確認されている。このため、細粒分をほとんど含まない粒状地盤材料の力学挙動に対して凍結融解作用の及ぼす影響を調べることは、当該材料で構成される土構造物の安定性を適切に評価するために必要不可欠である。実際、凍結融解履歴

を受けた破砕性火山灰質粗粒土の強度や剛性が履歴を受けていないものに比べて低下することが報告されている⁶⁾。この原因は、粒子内部の空隙中に存在する水が凍結膨張して、粒子内部の潜在クラックや亀裂を拡大した結果、土粒子自体が脆弱化したことによると考えられている。しかし、間隙水の凍結中に土粒子に作用する凍結圧の発生機構については未解明な部分が多く残っており、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、砂などに代表されるような非破砕性粒状地盤材料においても、凍結融解履歴がどのような形で地盤の力学特性に影響を及ぼしているか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、積雪寒冷地にある帯水地盤内で生じる土粒子間隙水の凍結融解現象を単純化するための仮定を導入して数理モデル化し、凍結融解履歴を受けた粒状地盤材料の力学特性をミクロ的に検討することが可能な数値解析手法を、熱伝導解析と不連続体解析を連成させた3次元粒状体解析を用いて提案する。具体的には、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)を採用した3次元個別要素法(DEM)解析プログラム(PFC3D⁷⁾)を用いて、飽和粒状地盤材料の凍結融解三軸圧縮試験の数値実験を行い、湿潤状態にある粒状体の凍結融解機構の数理モデル化方法を検討するとともに、粒状体解析モデルの力学特性に及ぼす凍結融解履歴の影響について考察する。

表-1 初期解析モデルの概略

Model name	model01	model02	model03	model04	model05
Particle size (water)	5.0 mm	4.0 mm	3.0 mm	5.0 mm	5.0 mm
Number of particles	1764	3445	8166	2645	3528
Specimen size	diameter	70.0 mm			
	height	50.0 mm	50.0 mm	50.0 mm	75.0 mm
Initial void ratio e_0	0.667				

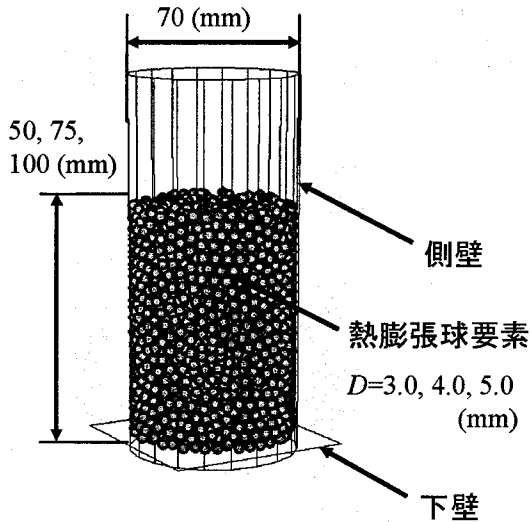


図-1 初期解析モデルの概略

2. 水の凍結膨張試験

本章では、熱膨張球要素を用いて水の凍結膨張試験のシミュレーションを行い、熱伝導解析用パラメーターの設定方法などDEM解析と連成した熱伝導解析方法について基礎的な検討を行う。

2.1 解析方法

(1) 解析モデル

本章で用いる凍結開始前の初期解析モデルを図-1に示す。本章では、例えばコップに入れた水がコップの底から冷やされ、次第に凍結膨張する現象をシミュレーションする。このため、解析モデルは、水を表現するランダムに配置された熱膨張球要素、ペデスタルを表現する下壁要素、凍上試験用アクリル円筒を表現する円筒状の側壁要素から構成されており、いずれも剛体要素である。また本章で用いる解析モデルは、熱膨張球要素の直径 ($D=3.0, 4.0, 5.0\text{mm}$) と供試体高さ ($H=50.0, 75.0, 100.0\text{mm}$) の組合せを変えた5種類 (model01~model05) であるが、いずれの解析モデルも供試体サイズと同じ大きさの解析空間内に、熱膨張球要素の空間占有比が $e_0=0.667$ になるまで、熱膨張球要素をランダムに発生させて作製した。ここで、空間占有比とは、間隙比と同じ概念であるが、熱膨張球要素は水を表現するものと仮定していることから、間隙比と区別して熱膨張球要素が占める容積に対する熱膨張球要素以外の空間体積比として定義する。各初期解析モデルの概略を表-1に示す。

(2) 解析条件

本章で用いる解析パラメーターを表-2に示す。表に示すように、本研究では一般的なDEMで用いる解析パラメーターに加え、熱伝導解析用パラメーターである比熱 C 、熱伝導率 κ 、線形熱膨

表-2 解析パラメーター一覧

density ρ		1.0 (g/cm ³)
angle of interparticle friction ϕ_μ	ball-ball	0.57 (°)
	wall-ball	0.0 (°)
stiffness of penalty spring (ball/top/bottom/lateral)	normal k_n	1.0 (MN/m)
	shear k_s	1.0 (MN/m)
specific heat C		4.2 (J/g°C)
thermal conductivity κ		0.50 (W/m°C)
coefficient of linear thermal expansion α		-0.03, -0.09 (1/°C)

張率 α を用いる。まず、不連続体解析用パラメーターは以下のように設定した。同じ $T=0.0^\circ\text{C}$ でも、水の密度 ($\rho=1.00\text{g/cm}^3$) と氷の密度 ($\rho=0.92\text{g/cm}^3$) は異なるが、本研究では計算アルゴリズムを簡略化するために、熱膨張球要素の物性値は水を仮定し、その粒子密度 ρ は、温度に依らず $T=0.0^\circ\text{C}$ における水の密度に設定した。また、熱膨張球要素間の粒子間摩擦角 ϕ_μ は、水を想定した場合には $\phi_\mu=0.0^\circ$ に、氷を想定した場合には大きな正值に設定すべきであると考えられるが、ここでは水を仮定した上、解析の安定性のため、小さな粒子間摩擦角 $\phi_\mu=0.57^\circ$ (摩擦係数で 0.01 程度) を与えた。ただし、下・側壁要素と球要素間の粒子間摩擦角 ϕ_μ については、周面摩擦が無い条件に設定した。さらに、接触要素間に設定する垂直方向のペナルティバネ剛性 (k_n) については、解析を早く安定させるために、接触要素間に要素平均半径の 5% 以上の相互貫入が生じない程度まで低下させた。せん断方向のペナルティバネ剛性 (k_s) については k_n と同じ値に設定した。

一方、PFC3D の熱伝導方程式は式(1)のように表される。

$$-\frac{\partial q}{\partial x} + q_v = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad q = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

ここで、 q : 熱流速、 q_v : 熱源強度、 C : 比熱、 κ : 熱伝導率。熱伝導解析用パラメーターは以下のように設定した。比熱 C 、熱伝導率 κ とも水 ($T=0.0^\circ\text{C}$ の場合 $C=4.2\text{J/(g}\cdot^\circ\text{C)}$ 、 $\kappa=0.56\text{W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$) と氷 ($T=0.0^\circ\text{C}$ の場合 $C=2.1\text{J/(g}\cdot^\circ\text{C)}$ 、 $\kappa=2.2\text{W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$) ではそれぞれ異なるが、本研究では計算アルゴリズムを簡略化するために、熱膨張球要素の物性値は水を仮定し、比熱 C 、熱伝導率 κ ともに、温度に依らず $T=0.0^\circ\text{C}$ における水の値に設定した。相変化を伴う場合の各定数の設定方法については今後の検討課題である。また、水は凍結すると、その体積が約 9% 増加することが一般に知られている。この相変化による体積膨張を表現するために、熱膨張球要素の直径 D を式(2)のように、温度

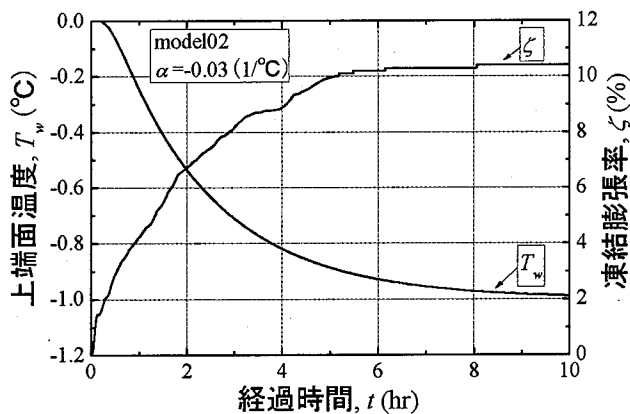


図-2 上端面温度と凍結膨張率の時間変化

低下 ΔT (°C) に応じて ΔD (mm) だけ増加させた。

$$\Delta D = \alpha \Delta T \quad (2)$$

ここで、 α は線形熱膨張率 (1/°C) であるが、この値については、解析パラメーターの値を変化させることでその影響を把握し、設定方法を検討することとした。なお、時間ステップ (Δt) は、解析プログラムが適切な値を自動的に選択しているが、伝熱計算時の Δt は、力学計算時の Δt に比べはるかに大きくなるため、計算効率を向上させるために、伝熱計算 1step に対して力学計算を伝熱計算時間ステップと等しくなるように所定回数分を行うことで、伝熱計算と力学計算を同時進行させた。また、解析中は常時重力加速度 9.8m/s^2 が作用している。

境界条件は、下壁要素・側壁要素とも、固定・断熱境界とした。また、初期条件としては、下壁要素に初期温度 -1.0°C 、熱膨張球要素に初期温度 0.0°C を与え、下部から上部へと凍結を進行させた。すべての熱膨張球要素の温度が、 $T = -0.99^\circ\text{C}$ (-1.0°C の 99.0%) 以下になった時を凍結完了とした。図-2は、model02 ($\alpha = 0.03$ (1/°C)) における上端面温度 T_w の時間変化、および凍結膨張率 ζ の時間変化を示したものである。ただし、凍結膨張率 ζ は以下の式(3)で定義する。

$$\zeta = \frac{\Delta h}{H_0} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

ここで、 Δh ：凍結過程における鉛直全変位量 (mm)

H_0 ：凍結過程直前の供試体高さ (mm)

図から、 $T = -0.99^\circ\text{C}$ において凍結膨張は収束していることがわかる。なお、凍結完了時間は、線形熱膨張率 α 、熱膨張球要素の直径 D に依存し、これらの値が大きいくほど遅くなる傾向が確認されたが、これらの設定方法については、今後、解析結果と実現象との整合性を検証するなどして、さらに検討していく必要がある。

2.2 解析結果

(1) 凍結膨張傾向に関する検討

凍結膨張試験における供試体部の温度分布と球要素の移動傾向の一例として、図-3に model02 ($\alpha = -0.03$ (1/°C)) の解析結果から得られた経過時間 $t = 2.0$ (h) における供試体部の温度分布図を、図-4に同じ解析結果から得られた経過時間 $t = 10.0$ (h) における球要素の粒子移動ベクトル図を示す。なお、温度分布図は、温度の高さを、最大値を 0.0°C とした黒丸の大きさで表している。粒子移動ベクトル図は、凍結開始前の各球要素の重心位置

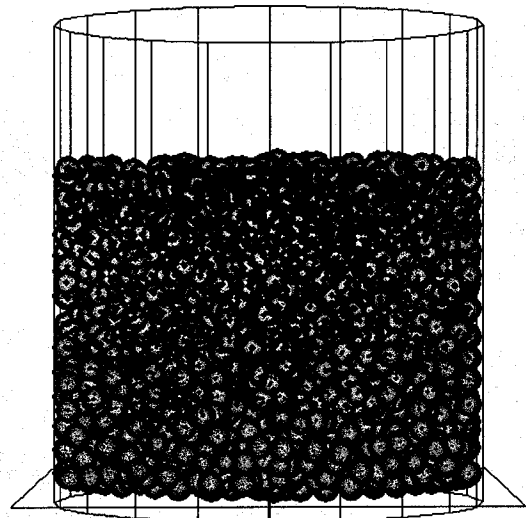


図-3 解析モデルの温度分布図

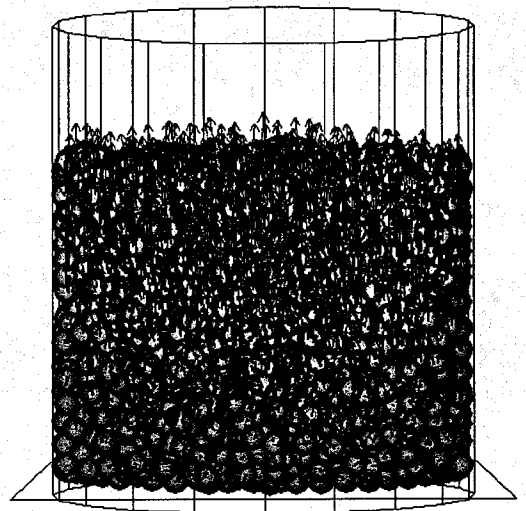


図-4 解析モデルの移動ベクトル図

と凍結中のある時間に重心が移動した点をベクトルで結んだものである。図-3から、下部から上部へと黒丸の大きさが大きくなり、凍結の進行につれ温度が下部から徐々に低下していくことがわかる。また、図-4から、下部では左右への移動も見られるが、上部では上方への移動が目立つなど球要素個々の移動方向や移動量は供試体の上部と下部で大きく異なり、供試体全域で一様ではないことがわかる。

(2) 線形熱膨張率に関する検討

水から氷への相変化に伴う体積膨張 9%を解析で模擬するために、熱膨張球要素の直径 D あるいは供試体初期高さ H_0 を変えて水の凍結膨張試験のシミュレーションを行い、線形熱膨張率 α の変化による凍結膨張率 ζ への影響について検討した。まず、熱膨張球要素の直径 D の変化に着目して検討する。解析は、解析モデル model01 ($D = 5.0\text{mm}$)、model02 ($D = 4.0\text{mm}$)、model03 ($D = 3.0\text{mm}$) を用いて、それぞれ線形熱膨張率 $\alpha = -0.03, -0.09$ (1/°C) の2種類について行った。各解析結果から得られた凍結膨張率 ζ をまとめて表-3(a)に示す。表から、熱膨張球要素の直径 D に依らず線形熱膨張率 α が小さい程、凍結膨張率 ζ は大きくなることがわかる。また、 $\alpha = -0.09$ (1/°C) の場合には、 D が大きくなる程

表-3(a) 熱膨張球要素の直径 D の影響

解析モデル名	model01		model02		model03	
熱膨張球要素の初期直径 D	5.0 mm		4.0 mm		3.0 mm	
線形熱膨張率 α	-0.03 (1/°C)	-0.09 (1/°C)	-0.03 (1/°C)	-0.09 (1/°C)	-0.03 (1/°C)	-0.09 (1/°C)
凍結膨張率 ζ	9.5 %	32.3 %	10.5 %	31.3 %	9.7 %	30.5 %
熱膨張球要素の径膨張率	3.0 %	9.4 %	3.3 %	9.4 %	3.0 %	9.4 %

表-3(b) 供試体初期高さ H_0 の影響

解析モデル名	model01		model04		model05	
供試体の初期高さ H_0	50.0 mm		75.0 mm		100.0 mm	
線形熱膨張率 α	-0.03 (1/°C)	-0.09 (1/°C)	-0.03 (1/°C)	-0.09 (1/°C)	-0.03 (1/°C)	-0.09 (1/°C)
凍結膨張率 ζ	9.5 %	32.3 %	9.4 %	30.2 %	9.7 %	29.8 %
熱膨張球要素の径膨張率	3.0 %	9.4 %	3.3 %	9.4 %	3.0 %	9.4 %

ζ は増加する傾向を示したが、 $\alpha = -0.03$ (1/°C) の場合には、 D に拘わらず $\zeta = 10\%$ 程度の値を得ることができた。次に、供試体初期高さ H_0 の変化に着目して検討する。解析は、解析モデル model01 ($H_0 = 50.0$ mm), model04 ($H_0 = 75.0$ mm), model05 ($H_0 = 100.0$ mm) を用いて、それぞれ線形熱膨張率 $\alpha = -0.03, -0.09$ (1/°C) の2種類について行った。各解析結果から得られた凍結膨張率 ζ をまとめて表-3(b)に示す。表から、供試体初期高さ H_0 に依らず線形熱膨張率 α が小さい程、凍結膨張率 ζ は大きくなることわかる。また、 $\alpha = -0.09$ (1/°C) の場合には、 H_0 が小さくなる程、 ζ は増加する傾向を示したが、 $\alpha = -0.03$ (1/°C) の場合には、 H_0 に拘わらず ζ は9~10%となった。

以上のことから、線形熱膨張率 α を空間占有比 (初期間隙比) e_0 (ここでは $e_0 = 0.667$) に応じて適切な値に設定すれば、熱膨張球要素の直径 D や供試体初期高さ H_0 に拘わらず、水の凍結による約9%の体積変化を模擬できる可能性のあることが明らかになった。

3. 凍結融解三軸圧縮試験

本章では、熱膨張球要素と通常の球要素を用いて、湿潤状態にある粒状体の凍結融解三軸圧縮試験のシミュレーションを行い、解析手法・モデルの妥当性について検討するとともに、凍結融解履歴を受けた粒状地盤材料の粒子構造の変化およびそれに伴う強度・変形特性への影響について考察する。

3.1 解析方法

(1) 解析モデル

本研究では、実際の飽和地盤材料の凍結融解現象を単純化し、以下のような前提条件を課した上で解析を行う。

- 給排水および供試体内の間隙水の移動は生じず、土粒子間の間隙水はその場で凍結融解すると仮定する。
- 間隙水の凍結による土粒子構造への力学的な影響は、凍結圧の作用のみであると仮定する。
- 熱膨張球要素は、間隙水の凍結により土粒子に作用する凍結圧を表現する目的で導入した要素であり、実際の水を想定したものではないと仮定する。
- 水・氷間の相平衡の熱力学に依らず、相転移 (凍結) は圧力と無関係に温度のみに依存して生じると仮定する。

以上を踏まえ、本章で用いる試験開始前の凍結融解試験用の初

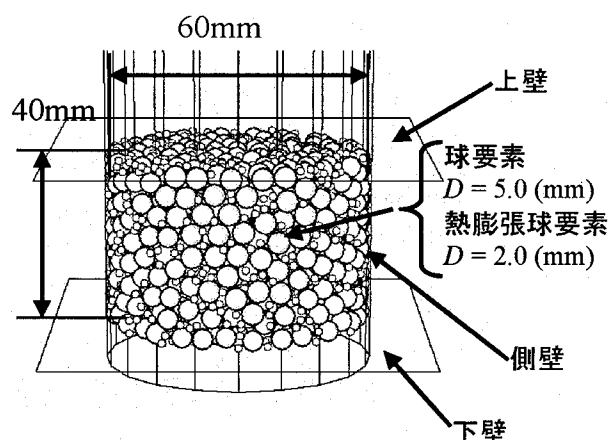


図-5 初期解析モデルの概略

期解析モデル (model21) を図-5に示す。同モデルは、土粒子を表現する球要素、土粒子間隙水を表現する熱膨張球要素、キャップ・ベDESTALを表現する上・下壁要素、凍上試験用アクリル円筒もしくはメンブレンを表現する円筒状の側壁要素から構成されており、いずれも剛体要素である。また、本章では、間隙比の異なる2種類の初期解析モデルを用いて解析を行うが、解析時間の都合上、前章で用いた初期解析モデルより供試体寸法 (直径60mm, 高さ40mm) を小さくした。初期解析モデルは以下のような手順で作製した。まず、物性値に砂を仮定した均一粒径 ($D = 5.0$ mm) の剛体球要素をランダムに配置し、凍結融解履歴の影響を評価するために、土粒子だけの解析モデルを作製した (model11, model12)。その後、物性値に水を仮定した熱膨張球要素 ($D = 2.0$ mm) を、model11 および model12 の土粒子間の間隙にできる限り多くランダムに発生させて配置し、凍結融解試験用の初期解析モデル (model21, model22) を完成させた。ただし、初期間隙比 e_0 は、model11 と model21 および model12 と model22 で統一しており、前者が $e_0 = 0.819$ (空間占有比 10.13)、後者が $e_0 = 0.884$ (空間占有比 9.06) となっている。なお、ここでいう初期間隙比 e_0 とは、土粒子間隙水を表現する熱膨張球要素は間隙と仮定し、土粒子を表現する球要素のみを固体部分と考えて算出した間隙比のことであり、(土粒子間隙 - 熱膨張球要素総体積) / (熱膨張球要素総体積) で表される空間占有比と異なるものである。各初期解析モデルの概略を表-4に示す。

(2) 解析条件

本章で用いる解析パラメーターを表-5に示す。まず、不連続

表-4 初期解析モデルの概略

Model name		model21	model22	model11	model12
Particle size	sand	5.0mm		5.0mm	
	water	2.0mm		—	
Number of Particles	sand	950	915	950	915
	water	1200	1400	—	—
Specimen size	diameter	60.0mm			
	height	40.0mm			
Initial void ratio e_0		0.819	0.884	0.819	0.884

表-5 解析パラメーター一覧

density ρ	sand	2.6 (g/cm ³)
	water	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 k_p , shear k_s)	top/bottom/ball	10.0, 2.5 (MN/m)
	lateral wall	1.0, 0.25 (MN/m)
specific heat C		4.2 (J/g°C)
thermal conductivity κ		0.50 (W/m°C)
coefficient of linear thermal expansion α		-0.1 (1/°C)

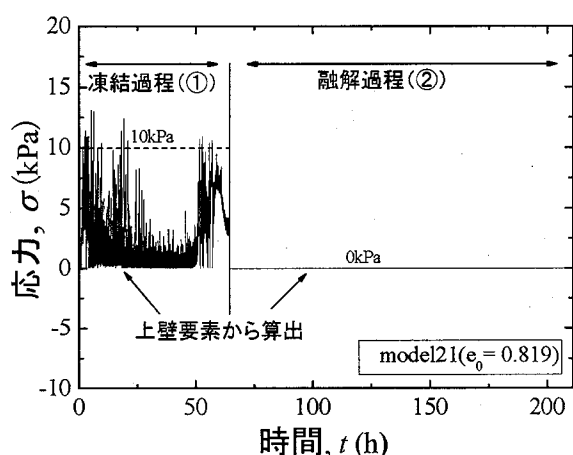
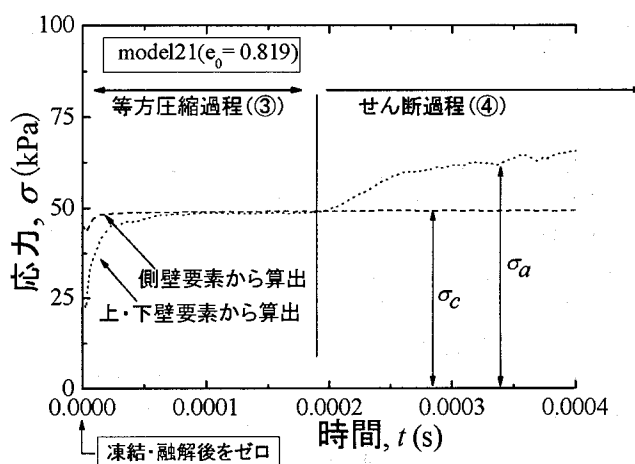


図-6 凍結融解三軸圧縮試験のシミュレーションにおける応力制御の一例



体解析用パラメーターは以下のように設定した。土粒子を表現する球要素の物性値は砂を仮定し、その粒子密度 ρ は砂の密度($\rho=2.6\text{g/cm}^3$)に設定した。また、剛体球要素間の粒子間摩擦角 ϕ_μ は、別途行った豊浦砂における三軸圧縮試験結果から求めた残留状態のせん断抵抗角を参考にして設定した。さらに、上・下壁要素と球要素間の粒子間摩擦角 ϕ_μ 、各要素の垂直方向のペナルティバネ剛性(k_p)およびせん断方向のペナルティバネ剛性(k_s)については、事前に、単調載荷三軸圧縮試験(CD試験)のシミュレーション⁸⁾を行い、粒状体の力学特性に及ぼす境界条件あるいはペナルティバネ剛性の影響度を調べ、解析結果と試験結果のピーク強度がほぼ一致するように値を設定した。ただし、側壁要素は、凍結過程・融解過程においては実際の凍結融解試験と同様にアクリル円筒を想定して、上・下壁要素等のペナルティバネ剛性と同等の値に設定したが、等方圧縮・せん断過程では、メンブレンを想定して、上・下壁要素等の垂直方向、せん断方向のペナルティバネ剛性の各々1/10の低い値に設定した。

一方、熱伝導解析用パラメーターは以下のように設定した。前章で示したように水の凍結膨張試験のシミュレーションにおいては、線形熱膨張率 α を空間占有比に応じて適切な値に設定すれば、熱膨張球要素の直径 D や供試体初期高さ H_0 に依らずに、10%程度の凍結膨張率 ϵ を得ることができた。本章の解析モデルは、凍結開始前の空間占有比が、前章の空間占有比0.667と比較して9~10%程度とかなり大きいことから、線形熱膨張率 α を前章と同程度の値に設定したのでは、充分な間隙水の凍結膨張を得られな

いと考え、 α の値を少し大きくした。ただし、熱膨張球要素の直径 D は温度変化 ΔT により $\Delta D=\alpha D \Delta T$ だけ増加することから、凍結終了時の間隙(空間と熱膨張球要素の占める体積の和)の増加量が水の凍結による体積膨張(約9%)を超えない値に線形熱膨張率 α を設定した。なお、設定した α で凍結圧を適切に計算できるかどうかについては、後述のように「変形されたClausius-Clapeyronの式⁹⁾」を用いて確認することとした。その他の熱伝導解析用パラメーターについては前章と同様に設定した。また、本来であれば、土粒子を表現する球要素と土粒子間隙水を表現する熱膨張球要素の熱伝導解析用パラメーター(比熱 C 、熱伝導率 κ)は、別々に設定すべきであるが、本解析では同じ値に設定して計算している。

伝熱計算と力学計算を行う凍結過程における時間ステップ(Δt)は、前章と同様の方法で設定したが、融解過程・等方圧縮過程・せん断過程においては、力学計算だけとなることから、 Δt は解析プログラムによる自動計算とした。また、解析中は常時重力加速度 9.8m/s^2 が作用している。

(3) 解析手順

本章の解析は、実際の凍結融解三軸圧縮試験とほぼ同様な凍結過程、融解過程、等方圧縮過程、せん断過程の4つの手順で実施した。ただし、比較試験用に作製した解析モデルmodel11, model12については、凍結過程および融解過程を行わずに、等方圧縮過程とせん断過程のみ解析を実施した。図-6に、凍結融解三軸圧縮試験のシミュレーションにおける応力制御の一例(model21)を

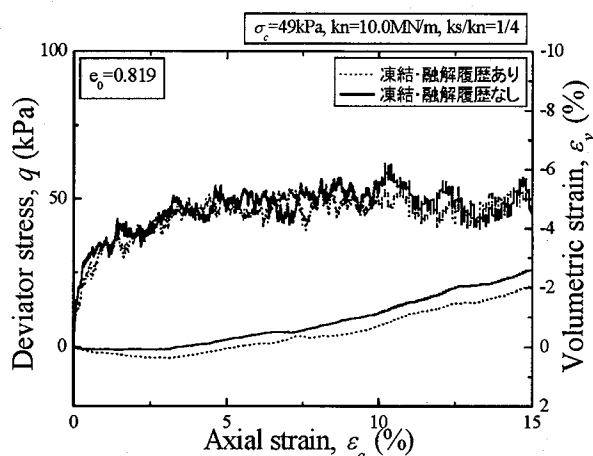


図-7 軸差応力 q ・体積ひずみ ε_v ～軸ひずみ ε_a 関係 ($e_0=0.819$)

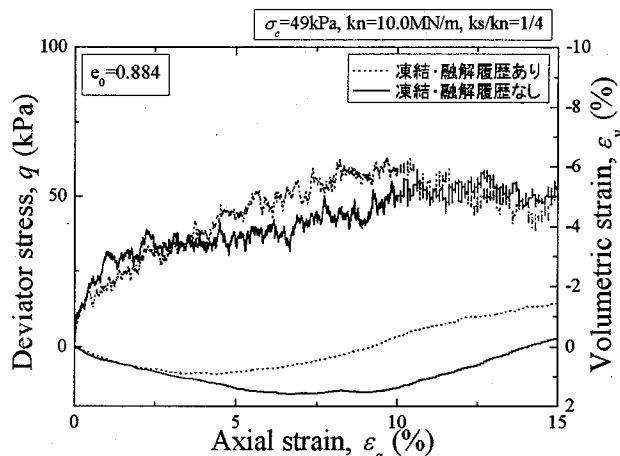


図-8 軸差応力 q ・体積ひずみ ε_v ～軸ひずみ ε_a 関係 ($e_0=0.884$)

示す。

①凍結過程

前章と同様に、初期条件としては、下壁要素に初期温度 -1.0°C 、熱膨張球要素に初期温度 0.0°C を与え、下部から上部へと凍結を進行させ、すべての熱膨張球要素の温度が $T=-0.99^{\circ}\text{C}$ (-1.0°C の99.0%)以下になった時を凍結完了とした。また、境界条件としては、下・側壁要素を固定し、上壁要素については、供試体に過圧密履歴を与えないよう等方圧縮過程の $\sigma_c=49.0\text{kPa}$ より小さい応力（本解析では 10kPa ）以上に応力が載荷されないよう壁速度を調節した。なお、上・下・側壁要素はすべて断熱とした。

②融解過程

融解過程では、熱伝導解析は実施せず熱膨張球要素の直径を段階的に縮小して、その都度安定解析を行い、充分に小さくなった段階ですべての熱膨張球要素を消失させ、さらに安定解析を行うことで、融解現象を再現した。ただし、熱伝導解析により融解現象を再現した場合と本解析で用いた方法で融解現象を再現した場合では、異なった融解現象が再現される可能性もあることから、融解過程の解析方法については、今後の検討課題である。なお、境界条件としては、上壁要素を取り除き下・側壁要素を固定した。

③等方圧縮過程

PFC3Dでは、壁要素に強制変位を与えることで、供試体に圧力の載荷が可能である。この機能を用いて、凍結融解履歴を載荷した解析モデルを、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、所定の拘束圧と解析結果から得られた拘束圧との差を減少させるように、上・下壁要素に対しては上・下方向の移動速度を、側壁要素に対しては半径方向の移動速度を調節することで、拘束圧を載荷した⁷⁸⁾。これにより、拘束圧は設定値の $\pm 1\%$ 以内の誤差で制御されている（図-6参照）。

④せん断過程

拘束圧 σ_c で等方圧縮後、側圧一定の下でひずみ制御で軸荷重を増加する単調載荷三軸圧縮試験を行った。具体的には、等方圧縮状態にある解析モデルに、上・下壁要素に軸ひずみ速度 $176.5\%/min$ を与えて単調載荷を行った。ただし、等方圧縮過程と同様に、側壁要素の半径方向の移動速度を調節し、せん断中、所定の側圧を保持した。ここで、各解析ステップの軸応力は、上・

下壁要素に作用する鉛直荷重を、上・下壁要素の面積で各々除し、その平均値を求めることにより求めた。一方、各解析ステップの軸ひずみ ε_a および側方ひずみ ε_r は、それぞれ上・下壁要素間の距離および側壁要素の半径方向変位をモニタリングすることにより求め、これらから体積ひずみ ε_v を算出した。なお、本解析では解析時間の都合上、実際の三軸圧縮試験における載荷速度（例えば $0.1\%/min$ ）に比べ、解析における載荷速度を非常に速いものとしたが、本解析で用いたひずみ速度以下であれば、載荷速度が解析結果に及ぼす影響は小さいことを、載荷速度を変えた単調載荷三軸圧縮試験（CD試験）のシミュレーションを行い、事前に確認している。

3.2 解析結果

(1) 強度・変形特性に関する検討

図-7は、初期間隙比 $e_0=0.819$ の凍結融解三軸圧縮試験のシミュレーション（model21）から得られた軸差応力 q ・体積ひずみ ε_v ～軸ひずみ ε_a 関係を、凍結融解履歴の無い同じ初期間隙比 e_0 の三軸圧縮試験結果（model11）と比較したものである。同様に、図-8は、初期間隙比 $e_0=0.884$ の2つの解析結果（model22, model12）を比較したものである。図-7より $e_0=0.819$ の場合には、凍結融解履歴を与えると、若干ではあるがピーク強度が減少し、体積膨張傾向も弱まる傾向が見られた。一方、図-8より $e_0=0.884$ の場合には、凍結融解履歴を与えると、初期剛性は低下する傾向が見られるもののピーク強度は増加し、体積膨張傾向も強まる傾向が見られた。同様な現象は、凍結融解履歴を受ける粘性土の過圧密比依存性を調べた過去の研究⁷⁹⁾でも報告されており、対象土は異なるものの、今回の解析結果は、初期間隙比が異なると、凍結融解履歴が単粒状地盤材料の強度・変形特性に異なった影響を及ぼす可能性のあることを示したものであると考えられる。

(2) 供試体の状態変化に関する検討

凍結・融解前後の供試体の状態変化について、まず空隙比 e の観点から検討する。表-6は、凍結融解履歴の有無を考慮して各試験過程における空隙比 e の推移を示したものである。表から、凍結融解履歴を受けた初期間隙比 $e_0=0.819$ の解析モデル（model21）では、凍結に伴い体積膨張が生じた後、融解により体積収縮するものの、初期間隙比 e_0 には戻らず、凍結融解作用に

表 - 6 凍結融解三軸圧縮試験中の間隙比の変化

初期間隙比	$e_0=0.819$		$e_0=0.884$	
凍結融解履歴	有り	無し	有り	無し
凍結後	0.830	—	0.888	—
融解後	0.828	—	0.878	—
圧密後	0.815	0.814	0.823	0.856

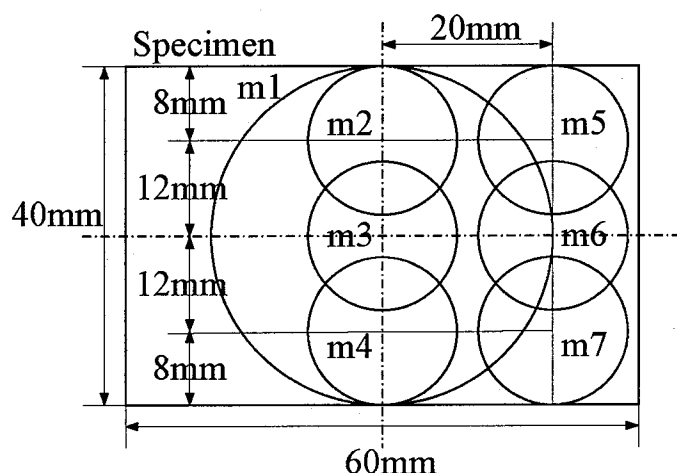


図-9 供試体断面における測定球体の配置

より初期状態よりも若干疎な粒子構造になることがわかる。一方、同じく凍結融解履歴を受けた初期間隙比 $e_0=0.884$ の解析モデル (model22) では、凍結に伴い若干の体積膨張が生じるものの、融解により体積収縮し、逆に初期状態よりも若干密な粒子構造になる。このような凍結融解作用による間隙比変化の影響は、凍結融解履歴を受けない同一初期間隙比の解析モデルと比較すると、等方圧縮後にも残留していると認められることから、前述のように凍結融解履歴の有無が強度・変形特性に影響を及ぼす結果になったと考えられる。

次に、凍結・融解前後の粒子構造の変化について配位数の点から検討する。配位数は、1粒子当たりの接触点数 N で定義されるが、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) その中に重心をもつ球要素のみを対象として、平均配位数 $\bar{N}$ を式(4)により算出した。ただし、平均配位数の比較は、各解析モデルに熱膨張球要素が存在しない、試験開始前の初期状態と凍結融解直後の状態で行うため、熱膨張球要素に係る配位数は計算には含まれていない。

$$\bar{N} = \frac{\sum_{k=1}^{n_b} N(k)}{n_b} \quad (4)$$

ここで、 n_b : 測定球体内に重心をもつ球要素の数

$N(k)$: k 番目の球要素の接触点数

図-9に測定球体の配置を示す。測定球体 m1 は、供試体中心に設置した半径の大きな球 ($r=20\text{mm}$) であり、m2, m3, m4 は、供試体中心軸の上方から下方に設置した半径の小さな球 ($r=8\text{mm}$) である。また、m5, m6, m7 は、各々 m2, m3, m4 を半径方向に供試体中心軸から 20mm 側壁側へ離れた位置に設置した半径の小さな球 ($r=8\text{mm}$) である。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、初期間隙比 e_0 ごとに図-10

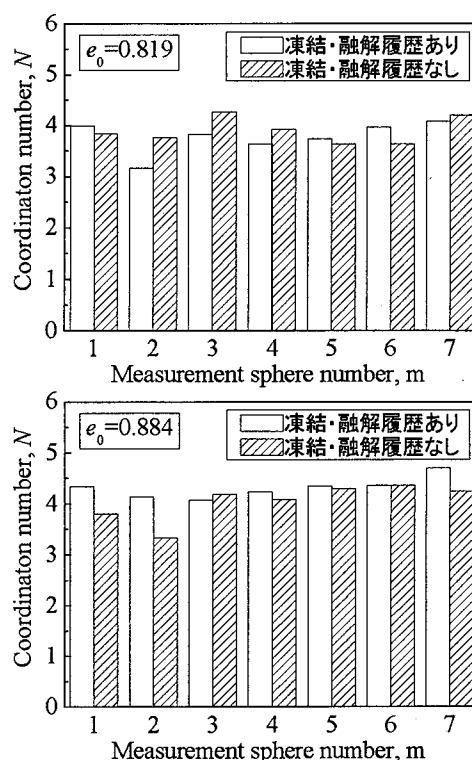


図-10 凍結融解前後の配位数の比較

に示す。図を見ると、 $e_0=0.819$ (model11, model21) の場合、m5, m6 では凍結融解作用により平均配位数 $\bar{N}$ がやや大きくなり、m2, m3, m4 では履歴なしの方が大きな値を示した。このため、凍結融解作用により、周辺部では粒子構造が若干密になる傾向がみられるものの、供試体中心部の粒子構造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、 $e_0=0.884$ (model12, model22) の場合、m2, m4, m7 では凍結融解後 $\bar{N}$ が大きくなったが、m3, m6 では凍結・融解前後で値にはあまり見られなかった。このため、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。以上のことから、今回の解析では、間隙比に拘わらず、凍結融解作用により間隙分布や粒子配列などの粒子構造の変化が生じたと考えられる。

(3) 凍結圧に関する検討

熱膨張球要素を用いた凍結融解現象の数値モデル化方法および線形熱膨張率 α の設定方法の妥当性について、凍結膨張により生じる凍結圧の観点から検討する。ここでは、初期解析モデル model21 および model22 を用いて、上壁要素を固定条件に変更し、凍結過程のみ解析を実施した。その結果得られた初期間隙比 $e_0=0.819$ の model21 における凍結圧 σ_u の時間変化を図-11に示す。ただし、ここでいう凍結圧 σ_u とは、上壁要素に作用する鉛直荷重を上壁要素の面積で除したものである。図から、時間の経過とともに凍結圧 σ_u は増加し、 $\sigma_u=1.70\text{MPa}$ 程度の値に収束していることがわかる。一方、 $e_0=0.884$ (model22) においても同様な解析を行ったが、この場合には $\sigma_u=3.0\text{kPa}$ 程度の微小応力しか得られなかった。

ここで、土の最大凍上圧に関して、Clausius-Clapeyron の式などを用いて考察してみる。一般に、同じ圧力 P を受けて平衡共存している水と氷が存在する場合、圧力 P が大きくなる程、共存する温度すなわち氷点が降下する。特に、土が滲排水を許した条件

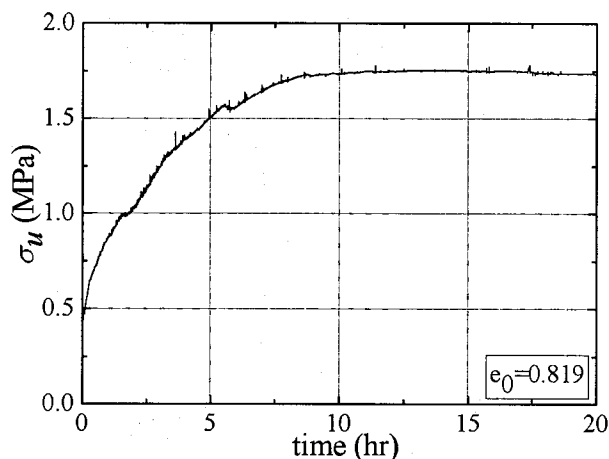


図-11 凍結圧の経時変化 (model21)

で不凍水により飽和しておりさらにアイスレンズが形成された状態にある場合、つまり氷の受けている圧力がすべてその下にある土粒子に伝達され、氷に接して共存する水は圧力がゼロの場合、氷点降下は、式(5)のような「変形された Clausius-Clapeyron の式⁹⁾」で表されることが証明されている。

$$P = -\frac{L_w \Delta T}{V_i T_0} = -1.09 \Delta T \quad (\text{MPa}) \quad (5)$$

ここで、 ΔT : 氷点降下、 L_w : 水の凍結潜熱

V_i : 氷点付近の温度における氷の比容積

T_0 : $P=0$ の時の氷点の絶対温度

この式は、土質に関係なく成り立つとした Radd と Oertle による土の最大凍上力と冷却面温度の関係を表した実験式⁹⁾ (式(6))と一致している。

$$\sigma_u = -1.09 \theta_c \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

ここで、 σ_u : 最大凍上力、 θ_c : 冷却面温度

さて、本解析では、給排水を生じないと仮定しているため、厳密に言えば式(6)を用いることは妥当ではないと考えられるが、凍結圧のオーダーを検討する一指標としては有用である。この場合、本解析では凍結温度を $T = -1^\circ\text{C}$ としているため、これを式(6)に代入すると、 $\sigma_u = 1.09 \text{ MPa}$ を得る。そこで、解析結果から得られた凍結圧 σ_u と式(6)による最大凍上力 σ_u の推定結果を比較すると、 $e_0 = 0.819$ (model21)においては、式(6)から得た 1.09 MPa に比べ、解析結果は 1.70 MPa 程度と大きいものの、オーダー的には差のない結果となった。このことは、間隙水の凍結により生じる土粒子への凍結圧の作用を、本解析のように、熱膨張球要素を用いて模擬するモデル化方法の有効性を示したものであると考えられる。一方、 $e_0 = 0.884$ (model22)においては、実験式から得た結果に比べ、 $\sigma_u = 3.0 \text{ kPa}$ とかなり小さくかけ離れた結果となり、同解析においては、熱膨張球要素の数・位置等配置方法あるいは線形熱膨張率 α の設定方法が適切ではなかった可能性が考えられる。このため、間隙比に依存した熱膨張球要素を用いた凍結融解現象の数値モデル化については、今後さらに検討をしていく必要がある。

4. まとめ

本研究では、不連続体解析と熱伝導解析を連成させた3次元の

個別要素法プログラムを用いて、飽和粒状地盤材料の凍結融解三軸圧縮試験の数値実験を行った。得られた知見をまとめると以下のようになる。

- ・ 水の凍結膨張試験のシミュレーションでは、熱膨張球要素の線形熱膨張率 α は供試体の凍結膨張率 ϵ_f に強く影響するが、 e_0 と α の調整によって、球要素の粒径や供試体の初期高さに依存せず、水が凍る際に約9%体積膨張する現象を再現できる。
- ・ 熱膨張球要素の数・位置等配置方法および線形熱膨張率 α の設定方法が適切な場合、間隙水の凍結により生じる土粒子への凍結圧の作用を、熱膨張球要素を用いた簡略モデルにより表現できる可能性がある。
- ・ 数値実験の結果によれば、凍結融解作用により凍結融解前後で間隙比あるいは粒子構造が変化する。この影響は等方圧縮後にも残留すると考えられることから、凍結融解履歴の有無は凍結融解履歴を受ける粒状体の強度・変形特性に影響を及ぼす。

以上のように、本解析では、粒状地盤材料における土粒子間の間隙水の凍結融解作用を、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、凍結融解履歴を受けた粒状地盤材料の力学特性を粒状体力学の観点から検討可能な数値解析モデルを提案した。しかしながら、凍結中の給排水や間隙水の移動の考慮、あるいは水-氷間の相平衡の熱力学とリンクした凍結圧の設定など、今回解析手法の単純化のために導入を見送った凍結融解現象を理解する上で重要な仮定については、実際に行った凍結融解三軸圧縮試験結果との比較検討を通して、今後、解析手法への導入方法を模索する必要がある。

参考文献

- 1) 石崎武志, 赤川敏: 土の凍結と地盤工学 2.土の凍結と凍上現象, 土と基礎, Vol.51 No.4, pp.59-62, 2003.
- 2) 神谷光彦, 西川純一, 横田聖哉, 豊田邦男: 土の凍結と地盤工学 5.土木構造物の自然凍上問題と対策一道路, 土留め構造物, 土と基礎, Vol.51 No.7, pp.47-52, 2003.
- 3) 青山清道, 小川正二, 川澄修, 田村富雄: 凍結-融解を受けた土の性質, 土と基礎, Vol.25 No.7, pp.41-46, 1977.
- 4) 小野丘, 三田地利之: 粘性土の軸対称三軸応力下における凍結・融解履歴について, 土木学会論文集, No.617/III-46, pp.275-282, 1999.
- 5) 小野丘: 凍結融解作用を受ける飽和粘土地盤のせん断特性に関する実験的研究, 北海道大学大学院博士論文, 2003.
- 6) 尾崎悠太, 三浦清一, 石川達也, 熊谷浩輔: 破碎性の卓越する粒状体の力学特性に及ぼす凍結融解の影響, 第41回地盤工学研究発表会講演集, pp.873-874, 2006.
- 7) Itasca Consulting Group, Inc.: PFC3D - Particle Flow Code in 3 Dimensions, Version 3.0 Theory and Background, Itasca, Minneapolis (USA), 2003.
- 8) Ishikawa, T et al.: Numerical Simulation of a Variety of Shear Tests for Granular Materials with 3D DEM, IACMAG, Vol.2, 2005, pp.65-72.
- 9) 木下誠一: 凍土の物理学, 森北出版, pp.93-102, 1982.

(2006年4月13日 受付)