



日本原子力研究開発機構機関リポジトリ
Japan Atomic Energy Agency Institutional Repository

Title	既存亀裂を考慮した粒状体個別要素法による HLW 処分坑道の力学挙動解析
Author(s)	清水 浩之, 小山 倫史, 千々松 正和, 藤田 朝雄, 中間 茂雄
Citation	土木学会論文集,A2(応用力学), 68(2),p.I_477-I_486
Text Version	出版社版
URL	https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5036344
DOI	https://doi.org/10.2208/jscejam.68.I_477
Right	土木学会

既存亀裂を考慮した粒状体個別要素法による HLW 処分坑道の力学挙動解析

Distinct Element Analysis for Mechanical Behavior in HLW Disposal Tunnel Considering Pre-existing Cracks

清水浩之*・小山倫史**・千々松正和***・藤田朝雄****・中間茂雄****

Hiroyuki SHIMIZU*, Tomofumi KOYAMA**, Masakazu CHIJIMATSU***, Tomoo FUJITA**** and Shigeo NAKAMA*****

*工博 東北大学助教 流体科学研究所 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1)

** Ph.D 京都大学助教 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

***工博 株式会社間組技術・環境本部原子力部 (〒615-8540 東京都港区虎ノ門)

****工博 独立行政法人日本原子力研究開発機構 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村)

*****独立行政法人日本原子力研究開発機構 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村)

In this paper, the coupled thermal-mechanical processes in the Äspö pillar stability experiments (APSE) were simulated using Distinct Element Method (DEM). By considering pre-existing cracks in the rock model, mechanical response of the rock during excavation phase and heating phase were successfully represented by DEM. Simulation results agree qualitatively well with the experimental results. However, the microcracks in the simulation were widely distributed around the heater and exfoliation of rock surfaces observed in the in-situ experiment was not formed accurately. To simulate more realistically the experimental results by the DEM models, the calibration of the microscopic parameters considering the model scale should be done. Moreover, more detailed discussion on the excavation damaged zone around the borehole and the distribution of pre-existing cracks are required.

Key Words: Distinct Element Method, HLW, Geological disposal, Pre-existing cracks

1. 諸言

原子力発電所で使用した燃料を再処理する場合、使用済燃料の再処理過程で再利用できないものとして高レベル放射性廃棄物 (HLW; High Level radioactive Waste) が残る。HLW は高い放射能を持ち、放射能が自然レベルに落ち着くまで数万年を必要とする。そのため、長期間にわたり人間環境から隔離する必要がある、その手法の開発は原子力を利用して我々の世代が取り組むべき最重要課題のひとつである。

HLW に関してわが国では、2000 年に制定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」¹⁾によりガラス固化した廃棄物 (ガラス固化体) を金属製の容器 (オーバーパック) に密封したうえで、緩衝材 (粘土) で包み込み、地下 300 メートルより深い安定な岩盤の空洞内に埋め捨て処分することが定められている。これを、人間が作り上げる人工バリアと地質環境が本来的に備える天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムと呼んでいる。HLW を地下深部に最終処分する「地層処分」は国際的に最も実現可能性のある方法であるとの共通認識が得られている。

地層処分の安全評価は数十年から数万年という超長期を対象としたものであり、人工バリア設計や性能評価の信

頼性の向上のためには、建設、操業および閉鎖後にニアフィールドに生起する連成現象の時間的、空間的な変遷を定量的に把握する必要がある。この予測評価のためには現象の理解に基づくモデル化による解析的手法が主要なアプローチ方法となる。廃棄体定置後には、廃棄物からの放熱、周辺岩盤から人工バリアへの地下水の浸入、地下水の浸入による緩衝材の膨潤圧の発生、周辺岩盤の応力変化、緩衝材/間隙水化学の変化などの現象が相互に影響し、非常に複雑な環境となることが予想される。このような廃棄体定置後の人工バリアとその周辺環境の熱-水-応力-化学連成現象を評価することは地層処分の安全評価を行う上で重要な課題の一つであり、そのためにはできるだけ実際の処分環境に近い環境での実験データを用いて連成解析モデルの構築および精緻化、構築したモデルの検証・確認を行うことが必要不可欠である。

これを目標として、国際共同研究「DECOVALEX-2011 Task B」では、結晶質岩における熱-水-応力-化学連成モデルの開発・確認を行っており、図-1 に示すようにスウェーデン・エスポ (Äspö) 地下研究施設における実際の処分環境を模擬したピラー試験 (Pillar Stability Test)^{2,3)}を対象とした連成解析を実施している。図-1 下段の拡大図は原位置試験における処分孔を模擬した 2 本の試験孔の水平断面および試験装置の配置を示す。Äspö Pillar Stability Test

(APSE)は結晶質岩（Äspö 閃緑岩）を対象として、2002～2006年に Äspö Hard Rock Laboratory (HRL)において深さ450mで実施された原位置試験であり、以下の点を明らかにすることを目的としている。

- ①試験孔掘削に伴う掘削影響領域の形成過程。
- ②加熱に伴う Pillar の熱-力学連成挙動。
- ③緩衝材の膨潤圧が力学的挙動に及ぼす影響。
- ④拘束圧除荷および応力解放に伴う力学的挙動。
- ⑤処分場の長期にわたる熱-水-応力連成挙動。

岩石のような連続体に対して最もよく用いられる数値解析手法に有限要素法や境界要素法などの連続体解析手法があげられるが、坑道掘削後の応力解放による亀裂の生成・進展問題、さらには廃棄体の熱影響による岩盤壁面の剥離問題など、岩盤や緩衝材における亀裂の発生・進展や破壊挙動及び大変形といった現象を数値解析として取扱うためにはメッシュを切りなおす等の煩雑な操作を行う必要がある。一方、粒状体個別要素法（Distinct element method: DEM）は不連続体を対象として開発された数値解析手法であり、解析対象を粒子の集合体としてモデル化する^{7,8)}。DEMの最も大きな特徴は、ばねによる粒子間作用力と粒子の運動方程式というごく単純な計算過程を膨大な数の粒子に対して適用することで現実の複雑な現象を良好に再現できる点にある。また、粒子規模の微細構造を直接表現することができ、岩盤や緩衝材における亀裂の発生や進展などを比較的容易に、かつ適切に表現できる特徴があり、実際の岩石における亀裂の発生過程に忠実なモデル化が可能である。したがって、岩石のような脆性材料の破壊現象解明に対する数値解析手法として、DEMは有効であると考えられる。

このようなDEMの特徴を踏まえて、過去に行った研究⁴⁻⁶⁾では、岩盤や緩衝材における亀裂の発生や進展などの非線形挙動に対して、DEMを用いた新たな熱-水-応力連成解析モデルの開発およびその適用性の検討を試みた。その結果、掘削による応力解放および加熱による岩盤内の亀裂進展をシミュレーションによって表現することができ、原位置試験で観測された結果と定性的に良好な一致を示した。しかし、過去のシミュレーションでは亀裂の発生はごくわずかであり、ピラー試験で観測された岩盤の剥離等の破壊挙動を完全に再現するには至らなかった。

本研究はDEMにより定量的により精度の高い熱-応力連成解析を行うことを最終目標とする。その目的のため、本論文では特にフィールドスケールの岩盤内に存在する既存亀裂の影響に着目した新たな解析モデルを用いて数値解析を行った。さらに、原位置試験結果と数値解析結果の比較を行うことにより、開発した熱-応力連成解析モデルの検証を行ったので報告する。

2. 粒状体個別要素法による熱-応力連成解析

2.1 粒状体個別要素法の概要

不連続体解析手法の一つであるDEMは、解析対象を粒

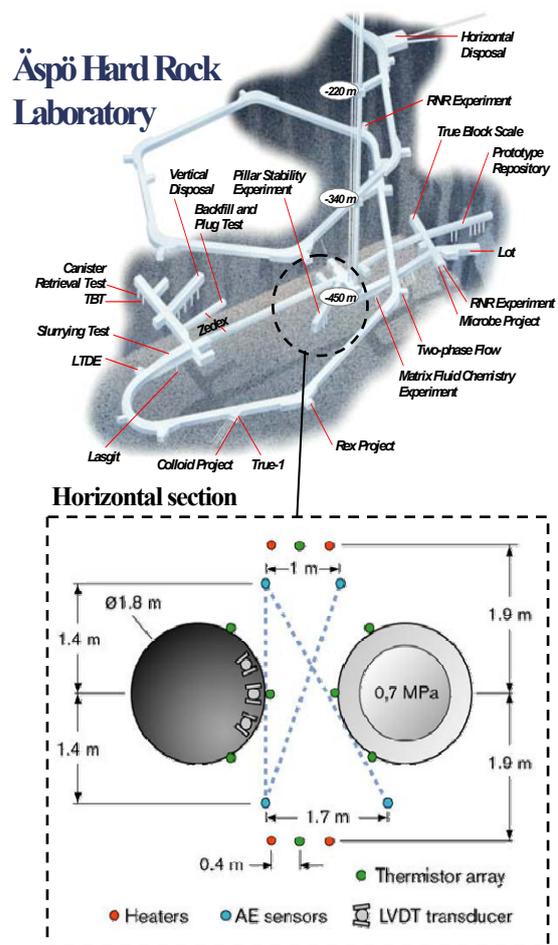


図-1 Äspö Pillar Stability Test 概要図^{2),3)}

子の集合体としてモデル化する。そのため、粒子規模の微細構造を直接表現することができ、岩盤や緩衝材における亀裂の発生や進展などをより現実的に、かつ適切に表現することができる。本研究では、膨大な計算時間を必要とし解析結果の解釈も複雑になる3次元解析を避け、単純な2次元モデルを用いて検討を行うこととした。解析コードには独自にプログラミングを行ったものを用いる。DEMでは、岩石を粒子の集合体として表現するとき、隣接する粒子間にはばねによって接続される。粒子間に作用する力が一定値に達したときにばねを破断させることにより微小亀裂の発生・進展を表現する。DEMの基本原理解や詳細なアルゴリズムについては、過去の研究報告⁴⁻⁶⁾に基づいてプログラミングを行っているためここでは省略し、次節から本研究に特徴的な独自のアルゴリズムについて詳説する。なお、本論文では、応力やひずみは圧縮を正とする。

2.2 粒子間結合

結合力を有する円形粒子の集合体により岩石をモデル化する。本研究では、図-2に示すように2つの粒子*i, j*の間を法線方向、接線方向、回転ばねの3つのばねで結合することにより、反発力とともに引張力を表現した。法線方向ばねは粒子の法線方向の相対変位を、接線方向ばねは接線方向の相対変位を、回転ばねは相対回転変位をそれぞれ拘束することで、粒子間に反発力または引張力が生じる。

結合粒子間に作用するこれらの反発力または引張力は、次の法線方向作用力 f_n 、接線方向作用力 f_s 、モーメント f_θ の合力として与えられ、それぞれの作用力は粒子間の相対変位から次式で求められる。

$$f_n = k_n (dn_i - dn_j) \quad (1)$$

$$f_s = k_s \left\{ ds_i - ds_j - \frac{L}{2} (d\theta_i + d\theta_j) \right\} \quad (2)$$

$$f_\theta = k_\theta (d\theta_i - d\theta_j) \quad (3)$$

ここで、 k_n 、 k_s 、 k_θ はそれぞれ法線方向ばね、接線方向ばね、回転ばねのばね定数を、 dn 、 ds 、 $d\theta$ はそれぞれ法線方向変位、接線方向変位、回転角を表しており、添字 i 、 j はそれぞれの粒子の番号を示している。粒子間の結合は模式的に図-3 のように表され、 L は結合されている粒子間の距離を表す。結合幅 D は 2 粒子の半径の調和平均から次式で与えられる。

$$L = r_i + r_j \quad (4)$$

$$D = 2 \cdot \frac{2r_i r_j}{r_i + r_j} \quad (5)$$

また、粒子間に作用する垂直応力 σ とせん断応力 τ は作用力 f_n 、 f_s から次式で評価する。

$$\sigma = \frac{f_n}{D} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{f_s}{D} \quad (7)$$

粒子間を結合するばね定数 k_n 、 k_s 、 k_θ について、本研究では 2 つの粒子間の結合部分を弾性梁とみなすことにより法線方向ばね定数 k_n 、回転ばね定数 k_θ を決定し、接線方向ばね定数 k_s については法線方向ばね定数 k_n の定数倍で与える。それぞれのばね定数は次式で与えられる。

$$k_n = \frac{E_p A}{L} \quad (8)$$

$$k_s = \alpha \cdot k_n \quad (9)$$

$$k_\theta = \frac{E_p I}{L} \quad (10)$$

ここで、 E_p 、 I 、 A 、 α は、それぞれ粒子間の結合部分に与えたヤング率、断面二次モーメント、結合部分の断面積、法線方向と接線方向のばね定数比である。結合断面積および断面二次モーメント I については結合幅 D 、奥行き 1 の矩形断面を仮定する。

2.3 結合の破壊と微小亀裂の発生

本研究では、それぞれの粒子間結合に対して次のように

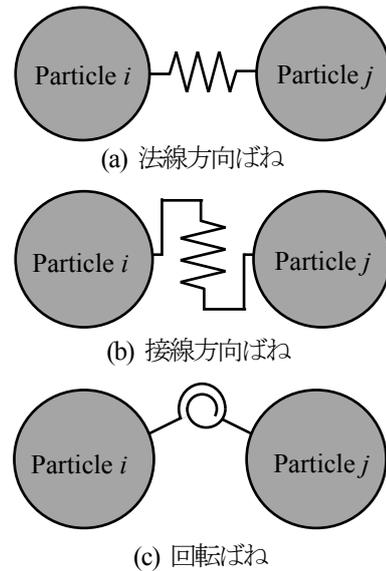


図-2 3種のばねによる粒子間結合

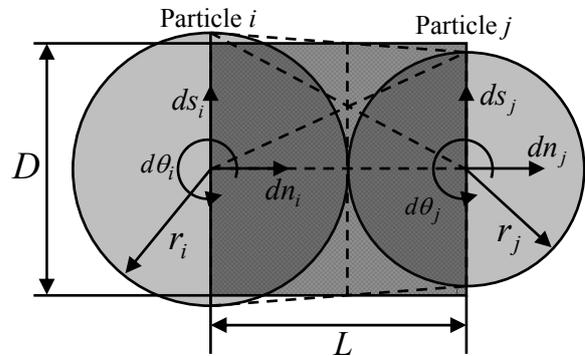


図-3 粒子間結合の模式図

微小破壊の発生条件を定めることにより岩石の破壊を模擬する。なお、DEM では各粒子は剛体と仮定されており、それ自体変形や破壊することはない。

$$\sigma < 0 \text{ and } |\sigma| \geq \sigma_c \dots\dots \text{結合の破壊条件 1}$$

$$|\tau| \geq \tau_c \dots\dots \text{結合の破壊条件 2}$$

すなわち、破壊条件1のように垂直応力 σ があらかじめ定める法線方向ばねの引張強さ σ_c を超える場合、あるいは破壊条件2のようにせん断応力 τ があらかじめ定める接線方向ばねのせん断強さ τ_c を超える場合に粒子間の結合を破断させることにより微小亀裂の発生を表現した。このとき、いずれかの破壊条件を満たした時点で、これ以降その粒子間には引張力が作用しないこととした。微小亀裂は、2粒子の接触点に生成され、その進展の方向は2粒子の中心を結ぶ直線と垂直な方向となる。

さらに、本シミュレーションでは微小亀裂発生時の引張応力 σ とせん断応力 τ の比を用いた破壊様式の判定法を導入した。すなわち、いずれのばねが破断したかによらず、微小亀裂発生時の引張応力 σ がせん断応力 τ よりも大きい場合を引張亀裂、微小亀裂発生時の法線方向応力が圧縮である場合あるいはせん断応力 τ が引張応力 σ より大きい場合をせん断亀裂と判定する。実際の実験では引張亀裂とせ

ん断亀裂のほか、それらの中間的な破壊様式が考えられるが、本研究では引張応力とせん断応力のどちらが微小亀裂の発生に対して主に寄与しているかを示す指標として、この単純な判定方法を用いることとする。

2.4 粒子間の熱伝導

図-4に示すように、温度 T_i 、半径 r_i の粒子 i と温度 T_j 、半径 r_j の粒子 j が接触している状態を考える。このとき、粒子 j から粒子 i への伝熱速度 Q_{ij} はフーリエの法則から以下の式で表すことができる。

$$Q_{ij} = -kA \frac{T_i - T_j}{L} \quad (11)$$

ここで、 k は粒子の熱伝導度、 L は粒子の中心間距離を示している。粒子間接続の断面積 A は結合幅 D 、奥行き 1 の矩形断面を仮定している。

したがって、時間 dt の間に粒子 i に流れ込む熱量を計算することにより、粒子 i の温度の増分 dT_i は以下の式のようになる。

$$dT_i = -\frac{Q_{ij} \cdot dt}{C \cdot m_i} \quad (12)$$

ここで、 C は粒子の比熱、 m_i は粒子 i の質量である。また、このような粒子 i の温度変化にともなう熱膨張を表現するため、粒子 i の半径増分を以下の式で定義した。

$$dr_i = \alpha_i \cdot r_i \cdot dT_i \quad (13)$$

ここで、 α_i は粒子の線膨張率を表す。

粒子半径の変化に伴う力は、粒子間に働く法線方向作用力として計算される。そのため、温度変化による粒子の膨張を考慮した場合には式(1)は以下のようになる。

$$f_n = k_n \{ (dn_i - dn_j) + (dr_i + dr_j) \} \quad (14)$$

3. 解析条件の設定

3.1 解析モデルおよび解析ステップ

解析の対象となるエスポ地下研究所のピラー試験^{2),3)}では、図-1 上段に示す坑道を掘削したのち、図-1 上段に点線丸で囲ったピラー試験場にて試験坑道床面から鉛直下向きに直径1.8mの試験孔が2本掘削されている。また、2本の試験孔の周囲に多数の計測孔および試験装置が設置されており、このうち4本にはヒーターが埋設されている(図-1 下段拡大図参照)。

しかし、本研究は2次元解析であるため、坑道掘削を表現することができない。そこで、DEM シミュレーションには、図-5 のような x 方向に 8.3m、 y 方向に 5.4m の2次元の岩石モデルを用いた。この DEM モデルは図-1 下段に示すような、試験孔を含む水平断面を模擬している。さらに、原位置試験と同様モデル内に2本の試験孔および4つのヒーター(赤点)、さらに計測孔のうち2本(緑点)

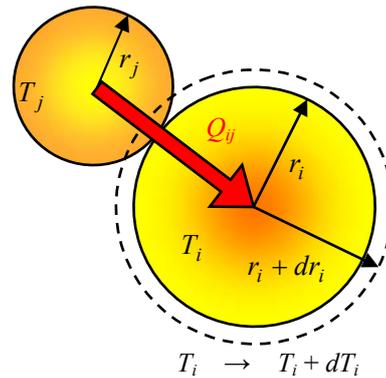


図-4 粒子間の熱伝導

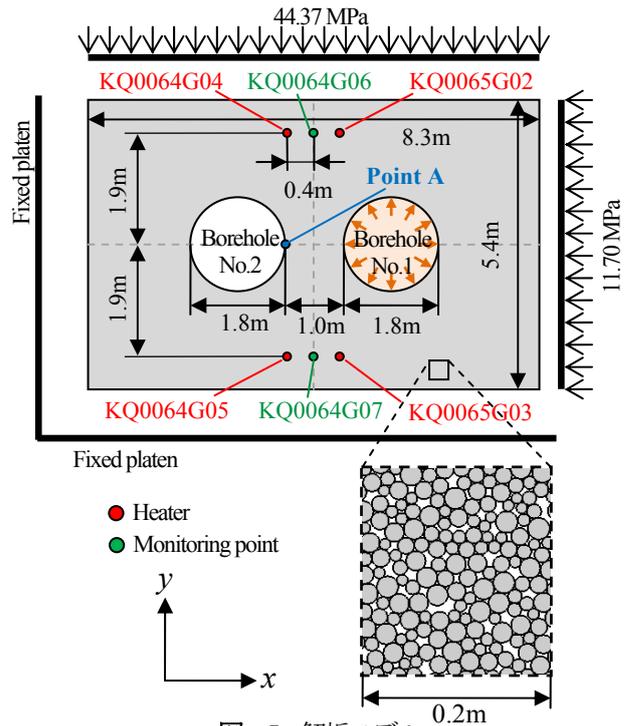


図-5 解析モデル

を選んで設置した。

DEM シミュレーションは、坑道掘削後を初期状態とした2つの試験孔の掘削工程と、ヒーターを介した加熱工程の2工程に対して行われる。また、図-5に示すように第2試験孔壁面に Point A を設定し、この点における応力などの変化を実測値と比較する。

試験孔の掘削工程における解析ステップは全4ステップである。第1ステップはモデルに地圧のみが作用しており、これを初期状態とする。第2ステップでは第1試験孔を掘削し、第3ステップで第1試験孔に緩衝材の膨潤圧を想定した拘り内圧力0.7MPaを載荷する。そして、第4ステップにおいて第2試験孔を掘削する。なお、この掘削工程においては粒子間の熱伝導は考慮していない。

加熱工程では先の掘削工程の第4ステップの解析結果を初期状態とし熱伝導による影響を計算する。温度の境界条件は第1試験孔表面およびモデル境界面を断熱境界、第2試験孔表面の温度を初期温度15°Cに固定とした。熱伝導に関して、実際の実験においては岩盤の不均質性や

既存亀裂の存在等により複雑な境界条件となっていることが予想されるが、DEMによる熱-応力連成解析例は少なく、境界条件がどの程度結果に影響を及ぼすのかについての知見は現在のところ十分ではない。そこで、本研究では最も単純な断熱境界と温度固定条件を設定することによりDEMによる熱-応力連成解析に関する基礎的な検討を行った。熱伝導に関する境界条件の影響についての詳細な議論は今後の課題とする。

図-5に示すように岩石モデルはばねによって接続された円形粒子の集合体で表現されている。各粒子の配置については、設定した区間〔最小粒子半径, 最大粒子半径〕の一樣乱数により半径を決定した粒子を、すでに配置されている粒子と重なり合わず接触できる位置を探索することにより決定した。モデル内の空間がなくなり、新しい粒子が配置できなくなるまでこの手順を繰り返す。今回解析対象とした原位置試験では、試験孔壁面の岩盤が厚さ10mmから20mm程度の薄板状に剥離する現象が観察されている³⁾。そこで、このような岩盤の剥離現象を再現可能であり、できるだけ計算量を少なくするように、最大粒子半径を10mm、最小粒子半径を5mmとした。各粒子の半径は、設定した最大・最小粒子半径の間で乱数により偏りなく一様にばらつくように与えた。粒子数は217,367個である。各粒子は必ずいずれかの粒子と結合しておりひとつの粒子に接している粒子の数の平均値(平均配位数)は3.68である⁴⁾。

岩石モデルの四方は剛体壁により囲まれており、下端面と左端面を反力壁として固定し、上端面と右端面に載荷板を用いて荷重を作用させることでモデルに拘束圧をかける。拘束圧は、最大主応力44.37MPa (y 方向)、最小主応力11.70MPa (x 方向)とした。これらの拘束圧の値は、3D-FEM解析での試験坑道掘削後の応力状態を基に、2次元モデルのモデル境界に相当する位置の応力を計算することにより決定した⁹⁾。なお、岩石モデルと反力壁や載荷板の間には摩擦力を作用させていない。これは、摩擦による不要な応力集中を避けるためである。

なお、本シミュレーションでは、図-5に示すヒーターの位置に存在する粒子に、図-6に示すピラー試験におけるヒーターの出力状態に応じた熱量を直接与えることによりヒーターによる加熱を表現する。

3.2 入力パラメータの決定

ピラー試験のシミュレーションを行なう前に、原位置における岩石の力学的物性を再現する適切な入力パラメータを決定しなければならない。しかし、DEMによる解析で用いるすべての入力パラメータを一意に決定する手法はいまだ確立されていない。そのため、本研究ではパラメータスタディを繰り返して最も妥当なものを採用するという方法をとった。パラメータスタディの結果は粒子のヤング率、ポアソン比、粒子間結合(ボンディング)の引張強さ、せん断強さの4つのパラメータについて行なう。これらのパラメータを様々に変化させて一軸圧縮試験および圧裂試験のシミュレーションを繰り返し、原位置試験箇所から採取された岩石コアによる一軸圧縮試験および圧裂試験から得た結果^{2), 3)}と比較することにより入力パラメータの決定を行なった。熱伝導に関するパラメータについても実際の試験片による実験結果³⁾をもとに決定した。解析の結果得られたパラメータを表-1に示す。

3.3 既存亀裂の設定

前節で述べたように、本研究において使用した入力パラメータはピラー試験の行われたエスポ地下研究施設から採取された岩石コアによる室内の一軸圧縮試験および圧裂試験から得た結果をもとに決定されている。

しかし、過去の研究⁴⁾⁻⁶⁾において実施したDEMシミュレーションでは新たな亀裂の発生はごくわずかであり、ピラー試験で観測された岩盤の剥離等の破壊挙動を完全に再現するには至らなかった。この結果は岩石の寸法が力学特性に与える影響を考慮していないことが一つの原因であると考えられる。現実の岩石は鉱物粒子の集合体であり、

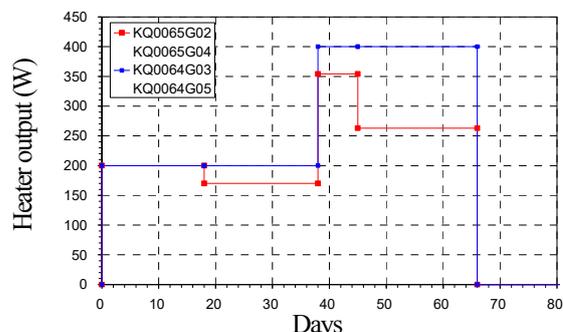


図-6 ヒーターの出力³⁾

表-1 入力パラメータ

Rock model data		Input parameters for thermal flow ³⁾	
Number of particles:	217367	Thermal conductivity (k):	2.6 [W/(m,K)]
Maximum particle radius:	10 [mm]	Thermal capacity (C):	2.1 [MJ/(m ³ ,K)]
Minimum particle radius:	5 [mm]	Coefficient of thermal expansion (α_t):	7.0×10^{-6} [1/K]
Particle density:	2741 [kg/m ³]	Tuning parameters	
Friction coefficient of wall:	0.0	Young's modulus of particle (E_p):	150.0 [GPa]
Poisson's Ratio of wall (ν_w):	0.3	Shear/normal spring stiffness ratio (α):	0.33
Young's modulus of wall (E_w):	200 [GPa]	Shear strength of bonding (S_s):	300.0 [MPa]
Friction coefficient of particle:	0.5	Tensile strength of bonding (S_t):	48.0 [MPa]
Poisson's Ratio of particle (ν_p):	0.27		

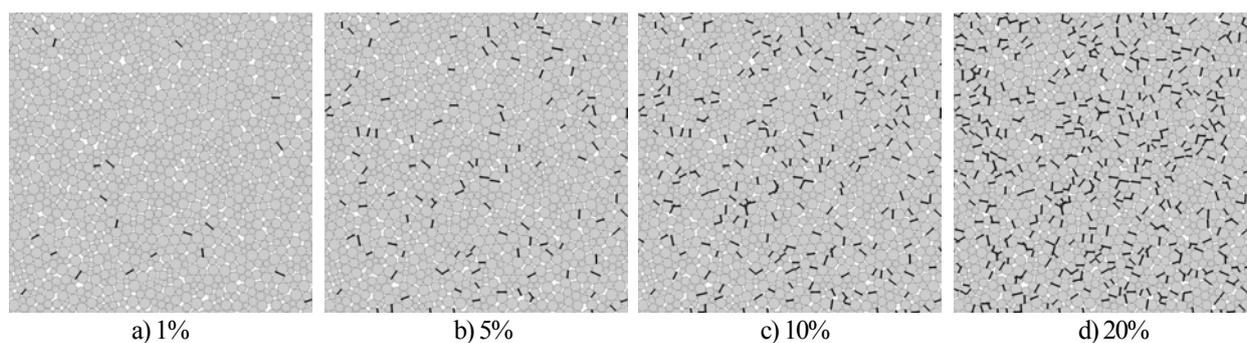


図-7 既存亀裂の分布状態

表-2 既存亀裂の存在による力学特性の低下

	Base Case					Experiment
Pre-existing cracks (%):	0.0	1.0	5.0	10.0	20.0	-
UCS of rock model [MPa]:	221.6	213.2	188.5	181.4	137.2	222.1
Young's modulus of rock model [GPa]:	73.63	71.75	66.94	60.09	48.45	73.6
Poisson's Ratio of rock model:	0.273	0.285	0.272	0.285	0.341	0.27
Tensile strength of rock model [MPa]:	12.7	12.7	10.8	8.3	7.5	12.9

その内部には空隙，潜在亀裂，鉱物結晶の境界面等の潜在的な欠陥が分布している。したがって，試験片が大きくなるに伴い，破壊の核となる潜在的な欠陥の存在，あるいは破壊が発生する確率が増大するために破壊強さは低下することが知られている。このことは一般に寸法効果と呼ばれている。したがって，フィールドスケールの岩盤においては，さらに多くの既存亀裂が存在しており岩盤としてのヤング率や破壊強さは室内試験に用いた試験片のそれよりも小さくなっていることが予想される。つまり，室内試験結果をもとにした入力パラメータをそのままフィールドスケールへと適用した場合，実際の岩盤よりも亀裂が発生しにくくなると考えられる。

そこで，本研究ではこのような岩石の寸法効果を考慮するため初期状態の岩石モデル内にあらかじめ既存亀裂を発生させることで寸法効果を表現することを試みた。

実際のピラー試験場における岩盤内の既存亀裂の分布および方向については詳細なデータが得られていない。さらに，フィールドスケールの岩盤としてのヤング率や破壊強さについても原位置での試験データが不足しているため，これらの値に対して直接入力パラメータのキャリブレーションを行うことはできない。したがって，異なる既存亀裂の分布をもつ四つの岩石モデルを作成し，それぞれの結果を比較することで既存亀裂の影響を考察する。初期状態において結合している粒子間のうちあらかじめ指定した割合の結合点を乱数によりランダムに選択し，強制的に結合を破断させることにより既存亀裂の作成を行う。本研究では初期状態における結合点のうち1%，5%，10%，20%を既存亀裂として破断させた。なお，既存亀裂を含まない岩石モデルをBase Caseとし，粒度分布や粒子配置，入力パラメータ等の既存亀裂の状態以外の解析条件は，Base Caseを含む5つのケースすべてで同一となっている。

作成した岩石モデルの既存亀裂の分布状態を図-7に示す。図-7は岩石モデルの一部を拡大表示したもので，黒

い線分は作成した既存亀裂の位置と方向を示す。2.3節で述べたように，本研究における微小亀裂は結合が破断した2粒子の接触点に生成され，その方向は2粒子の中心を結ぶ直線と垂直な方向を想定している。それぞれの微小亀裂は，その長さを式(5)で与えられる粒子間結合幅 D と仮定することにより模式的に描かれている。

さらに，既存亀裂の存在による岩石モデルの力学特性の変化を知るため，Base Caseを含む5つの既存亀裂分布をもつ岩石モデルを用いて一軸圧縮試験および圧裂試験のシミュレーションを行った。シミュレーションの結果得られたモデルの力学特性を表-2に示す。表-2より，既存亀裂の割合が多くなるほどモデル全体としてのヤング率や圧縮・引張強さが小さくなっていることがわかる。この結果から，同一の粒子配置と入力パラメータを用いても既存亀裂を導入することでDEMモデルの力学特性を変化させることができ，実際の岩石における寸法効果と類似した効果が得られることを確認できた。本研究においては，乱数により完全にランダムに既存亀裂を発生させているが，原位置試験における岩盤の既存亀裂の配向や密度のデータを得ることができればより高精度のDEMシミュレーションを実施することが可能となると考えられ，この点についてはさらなる詳細な検討を行う必要がある。

4. 解析結果

4.1 掘削工程

各解析ステップ時におけるPoint Aにおける最大・最小主応力の変化を図-8に示す。DEMにおけるPoint Aの主応力は，各粒子に作用している力からそれぞれの粒子ごとの応力状態を計算し，Point A近傍の粒子の応力を平均化することにより算出した¹⁰⁾。Point Aは第2試験孔の孔壁に位置しているため，第1試験孔の掘削時の影響は小さい。

しかし、第2試験孔の掘削時には最大主応力が顕著に変化し、圧縮側に増大していることが分かる。最小主応力は、第1試験孔掘削時に圧縮側に増大するが、第2試験孔掘削時には減少している。掘削工程の各解析ステップにおける主応力の経時変化の傾向は、図-9に示す原位置試験の同一地点（第2試験孔深度2.0m地点の孔壁）において観測された主応力の経時変化の傾向³⁾と一致している。また、既存亀裂を多く含むモデルほどPoint Aにおける最小主応力がわずかに小さくなっていることがわかる。

図-10は掘削工程の第4ステップ終了時における各ケースの最大接線応力の分布図を示す。なお、最大接線応力 τ_{max} は次式で求めた。

$$\tau_{max} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (15)$$

ここで、 σ_1 は最大主応力、 σ_3 は最小主応力である。

図-10より、最大主応力が圧縮側に卓越するy軸に直交する孔壁近傍で最大接線応力が最大になっていることが分かる。しかし、既存亀裂の存在による最大接線応力の分布の変化はほとんど見られなかった。

4.2 加熱工程

加熱開始を0日として、計測孔KQ0064G06（図-5参照）の温度変化を図-11に示す。さらに、原位置試験において観測された計測孔の温度変化を図-12に示す。これらの図を比較すると、計測孔における温度変化の傾向は原位置試験で観測された温度変化の傾向と一致している。

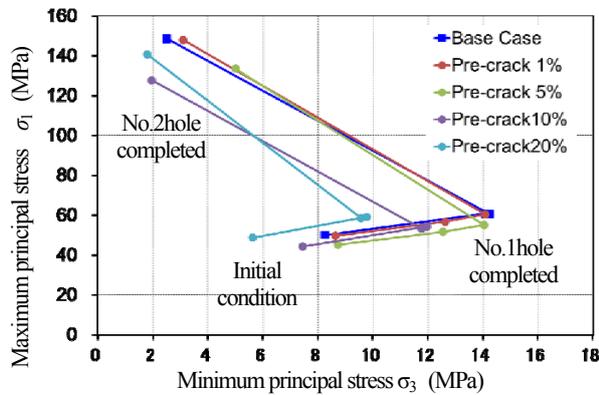


図-8 掘削に伴う Point A の応力状態の変化

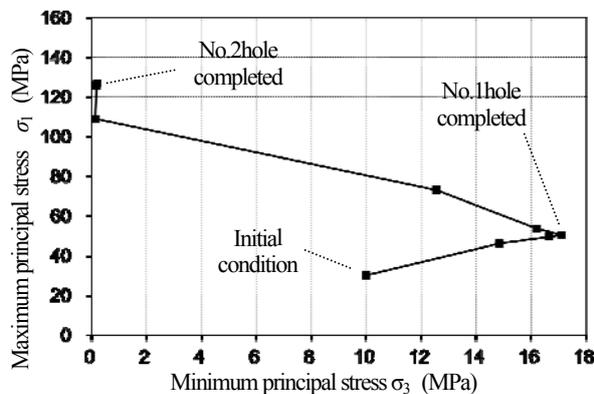
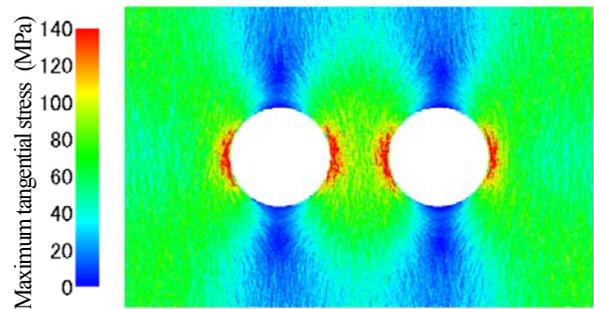
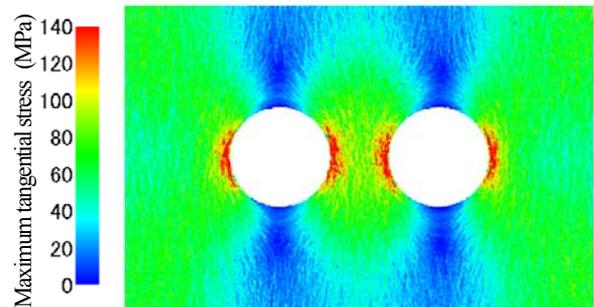


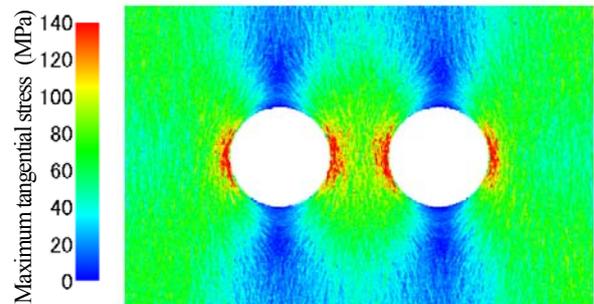
図-9 原位置試験における主応力の経時変化³⁾



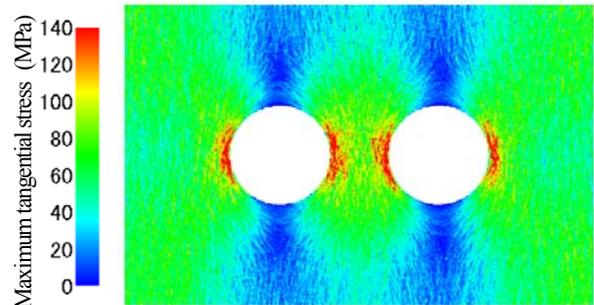
(a) Base Case



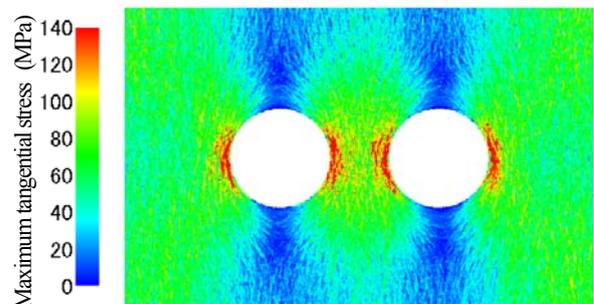
(b) 1%



(c) 5%



(d) 10%



(e) 20%

図-10 各ケースにおける最大接線応力分布状態

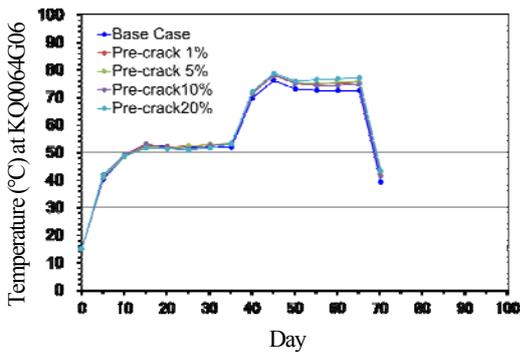


図-11 計測孔 KQ0064G06 における温度変化

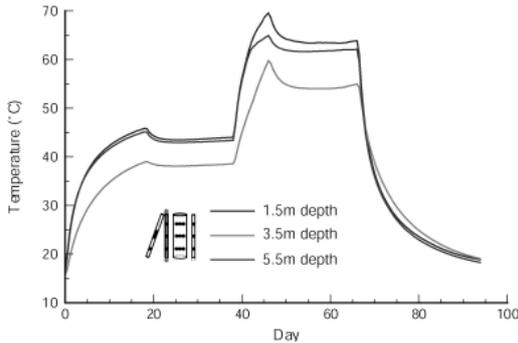


図-12 原位置試験で観測された温度変化³⁾

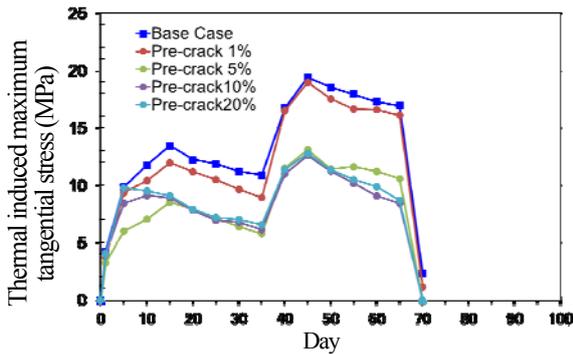


図-13 Point A での最大接線応力の加熱による変化

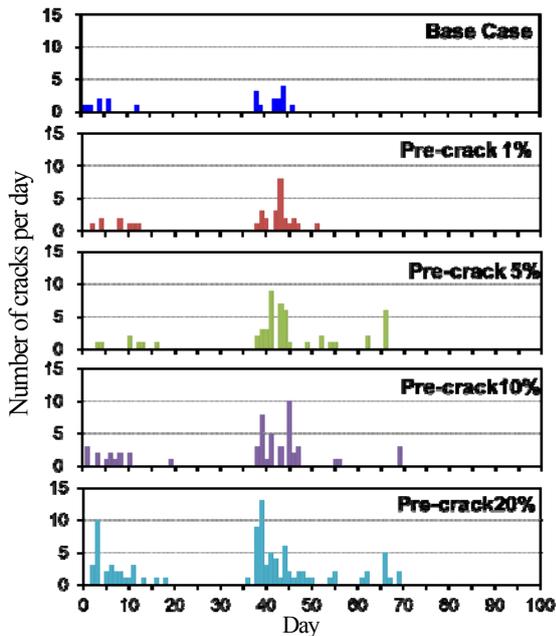


図-14 加熱工程における亀裂発生数の経時変化

しかし、DEM の解析結果は計測孔における最大温度が原位置試験で観測された値より 10°C 程度高くなっている。DEM 解析では、粒子数の制限から解析領域を小さく設定しているため、ヒーターとモデル境界が近くなり、断熱境界であるモデル境界の影響を受けたためであると考えられる。各既存亀裂の割合の場合を比較すると、計測点での温度変化にほとんど差異がないことがわかる。本研究における熱伝導は接触している粒子間で行われることから、これらの既存亀裂は閉じていて粒子同士が接触状態にあるために温度変化に大きな違いが生じなかったと考えられる。

図-13 は加熱工程における Point A での最大接線応力の加熱による変化を示す。また、一日毎の微小亀裂の発生数の変化を棒グラフで図-14 に示す。さらに、図-15 は原位置試験において観測された Point A での最大接線応力の加熱による変化および観測された微小破壊音 (Acoustic emission: AE) の発生数を示している。DEM 解析では粒子間を接続するばねの破断により微小亀裂の発生を表現しており、この微小亀裂の発生は原位置試験における AE の発生と対応させることが出来る³⁾。図-14 と図-15 を比較すると、いずれも温度上昇により最大接線応力が増加するときに多くの亀裂が発生していることがわかる。

既存亀裂の分布が異なる各ケースを比較すると、既存亀裂を多く含む場合には加熱工程での最大接線応力の増分が小さな値となっていることがわかる。DEM では粒子間はばねによって接続されており、これらのばねの伸び縮みにより粒子間に作用する力を計算している。したがって、温度の上昇により粒子半径が増加すると、隣接する粒子間を接続するばねが縮み、粒子間に作用する力が増加する。しかし、粒子間に作用する力が増加すると、それぞれの作用力に応じて各粒子が変位し、増加した応力が再配分されることになる。したがって、岩石モデル内に微小亀裂が存在する場合には粒子の変位がより容易になり、最大接線応力の増分が小さくなったものと考えられる。

5. 微小亀裂の発生および分布状態に関する考察

図-14 に示すように、微小亀裂の発生はヒーターの出力が上昇して温度および接線応力が増加する時刻に対応

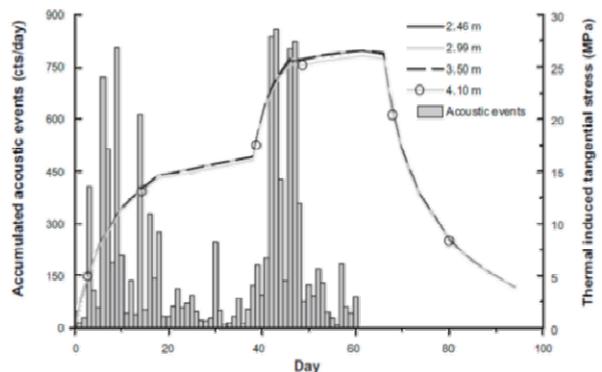


図-15 原位置試験における最大接線応力の変化³⁾

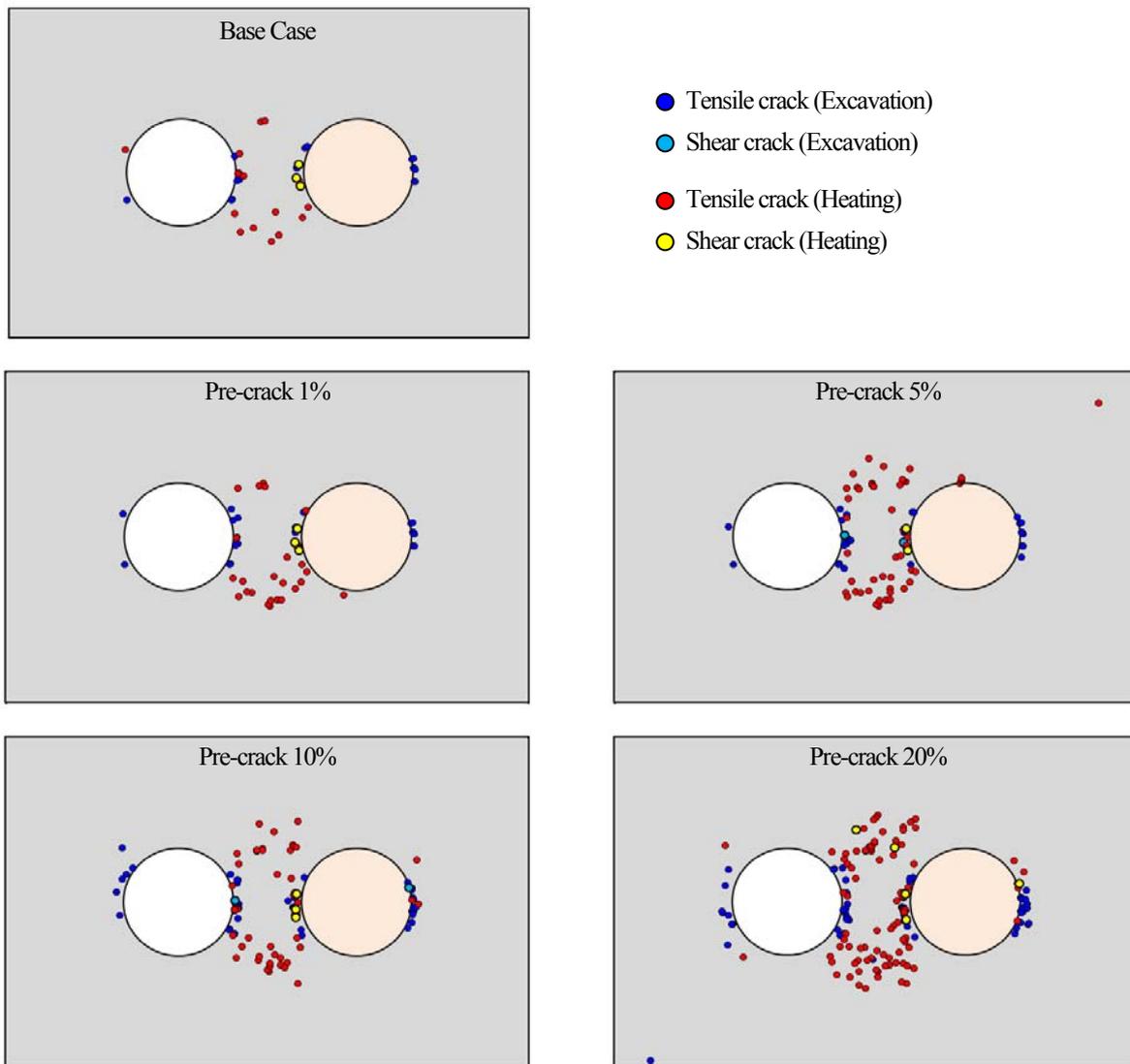


図-16 微小亀裂の発生状況

しており、既存亀裂の割合が大きいケースほど新たに発生する亀裂発生数も大きくなっている。前節で述べたように、既存亀裂が多数存在する場合には、粒子の変位が起りやすくなる。そのため、既存亀裂の配置と方向によっては既存亀裂近傍の粒子間結合部分に大きな応力が作用する場合があります。この応力集中が新たな亀裂の発生につながる。隣接した粒子間結合が破断した場合、それらの微小亀裂は連結した大きな亀裂とみなすことができる。このとき連続した亀裂の端部付近に位置する粒子間結合にはさらに強い応力集中が起こり、新規亀裂の発生が加速することになる。このように微小亀裂の数が増加すると、粒子の変位がさらに容易になるため、最大接線応力の増分がさらに小さくなったと考えられる。

掘削工程および加熱工程における微小亀裂の発生位置を図-16に示す。掘削工程において発生した引張亀裂を青色、せん断亀裂を水色のマーカーで表示する。また、加熱工程において発生した引張亀裂を赤色、せん断亀裂を黄色のマーカーで表示する。図-16に示すように、掘削工

程において発生した亀裂はほとんどが引張亀裂であり、孔壁周辺に集中していることがわかる。一方、加熱工程において発生した微小亀裂は、孔壁周辺だけでなくヒーター付近にも広く分布している。今回のシミュレーションでは、既存亀裂を乱数により完全にランダムに発生させている。したがって、既存亀裂の存在による岩石モデルの力学特性の低下はモデル全体で一様となっている。そのため、新たな微小亀裂の発生は試験孔周辺に集中することなく、ヒーター周辺等の温度上昇が大きい部分に広く分布したと考えられる。

原位置試験では、Point A 付近の試験孔壁面の岩盤が厚さ 10mm から 20mm 程度の薄板状に剥離する現象が観測されている³⁾。この観測結果について、今回のシミュレーション結果から、実際のピラー試験では掘削影響等により試験孔周辺に多くの既存亀裂が分布しており、既存亀裂の存在による岩石モデルの力学特性の低下が試験孔周辺に集中し、その結果亀裂の進展が Point A 付近の試験孔壁面に集中したためではないかと予測される。

したがって、原位置試験で観察された試験孔壁面の岩盤の剥離を完全に再現するためには、岩石モデルのスケールを考慮した入力パラメータの決定手法を開発し、掘削影響等による既存亀裂の分布状態を考慮したモデル作成を検討する必要があると考えられる。

6. 結言

本研究では、スウェーデンのエスポ地下研究施設で実施された HLW 地層処分に向けた原位置試験を対象とし、既存亀裂の存在を考慮した 2 次元粒状体個別要素法による熱-応力連成解析を行った。解析の結果得られた知見を以下に示す。

既存亀裂の割合が多くなるほど一軸圧縮試験および圧裂試験のシミュレーションから得られるモデル全体としてのヤング率や圧縮・引張強さが小さくなることがわかった。このことから、既存亀裂を導入することで実際の岩石における寸法効果と同様の効果を定性的に再現できることが確認できた。

掘削工程および加熱工程の解析結果から、掘削による応力解放および加熱による岩盤内の亀裂進展をシミュレーションによって表現することができ、原位置試験で観測された結果と比較的よい一致を示すことがわかった。

掘削工程においては、既存亀裂を多く含むモデルほど Point A における最小主応力がわずかに小さくなっているが、既存亀裂の存在によるモデル内の応力分布の変化はほとんど見られなかった。一方、加熱工程においては、既存亀裂を多く含む場合には最大接線応力の増分が小さくなることがわかった。これは、岩石モデル内に微小亀裂が存在する場合には粒子の変位がより容易になり、応力の再配分が起こりやすくなるためであると考えられる。

加熱工程における微小亀裂の発生はヒーターの出力が上昇して温度および接線応力が増加する時刻に対応しており、この結果は原位置試験結果において観測された AE の発生傾向と定性的に一致している。また、既存亀裂の割合が大きいケースほど新たに発生する亀裂発生数も大きくなっていることがわかる。これは、既存亀裂先端部分に局所的な応力集中が起こったためであると考えられる。

加熱工程において発生した微小亀裂は、孔壁周辺だけでなくヒーター付近にも広く分布した。この結果は既存亀裂の発生位置をモデル全体から乱数により完全にランダムに決定したためであると考えられる。より詳細な検討を行うためには、岩石モデルのスケールを考慮した入力パラメータの決定手法を開発し、掘削影響等による既存亀裂の分布状態を考慮したモデル作成を検討する必要があると考えられる。

参考文献

1) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律, 平成 12 年法律第 117 号。

- 2) Andersson, J. C.: Äspö pillar stability experiment final report: rock mass response to coupled mechanical thermal loading. *SKB report TR-07-01, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB)*, 2007.
- 3) Staub, I., Andersson, J. C. and Magnor, B.: Äspö Pillar Stability Experiment, geology and mechanical properties of the rock mass in TASQ, *SKB report R-04-01*, Stockholm, 2004.
- 4) 清水浩之, 小山倫史, 千々松正和, 藤田朝雄, 中間茂雄: 粒状体個別要素法による HLW 処分坑道における熱-応力連成解析, *材料*, Vol.60, No.5, pp.470-476, 2011.
- 5) Koyama, T., Shimizu, H., Chijimatsu, M., Nakama, S. and Fujita, T.: Distinct element approach for the analysis of coupled thermal-mechanical processes in the near field of the HLW repository, *Proc. of The 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'11+)*, pp.3759-3782, 2011.
- 6) Koyama, T., Shimizu, H., Chijimatsu, M., Kobayashi, A., Nakama, S. and Fujita, T.: Numerical Simulations for the Coupled Thermal-mechanical Processes in Äspö Pillar Stability Experiment –Continuum and Discontinuum Based Approaches-, *Proc. of the 4th International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geosystems: Fundamentals, Modelling, Experiments and Applications (GeoProc2011)*, GP039, 2011.
- 7) Cundall, P. A. and Strack O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 8) Potyondy, D. O. and Cundall P. A.: A bonded-particle model for rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.41, pp.1329-1364, 2004.
- 9) Chijimatsu, M., Koyama, T., Kobayashi, A., Shimizu, H. and Nakama, S.: Simulation of the spalling phenomena at the Äspö Pillar Stability Experiment by the coupled T-H-M analysis using the damage model, *Proc. of the 4th International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geosystems: Fundamentals, Modelling, Experiments and Applications (GeoProc2011)*, GP033, 2011.
- 10) Shimizu, H., Murata, S. and Ishida, T.: The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.48, No.5, pp.712-727, 2011.

(2012 年 3 月 8 日 受付)