

連続体・不連続体解析手法を用いた 処分孔周辺岩盤の熱一応力連成挙動の評価

清水 浩之^{1*}・小山 倫史²・千々松 正和³・藤田 朝雄¹・中間 茂雄¹

¹独立行政法人日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門（〒319-1194 茨城県那珂郡東海村）

²京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

³株式会社間組 技術・環境本部 原子力部（〒105-8479 東京都港区虎ノ門）

*shimizu.hiroyuki@jaea.go.jp

本論文では、原位置試験場における花崗岩の、坑道の掘削および加熱による亀裂進展挙動に対して連続体解析手法である有限要素法と不連続体解析手法である粒状体個別要素法を適用した解析結果を比較した。有限要素法による解析結果では、掘削や加熱による試験孔壁面の応力の変化を定量的に良好に評価できることが分かった。一方、粒状体個別要素法による解析結果では試験孔壁面付近に微小亀裂が発生しており、このことから原位置試験で観察された試験孔壁面での岩盤の破壊現象について考察することができた。このような数値解析手法の特徴を踏まえて解析結果を比較することで、温度、応力、亀裂進展過程について、定性的かつ定量的により精度の高い評価を行うための手法を提案する。

Key Words : *distinct element method (DEM), finite element method (FEM), HLW repository, thermo-mechanical simulation, rock damage*

1. 緒言

高レベル放射性廃棄物（HLW）地層処分にに関してわが国では、地下 300 メートル以深の安定な岩盤に処分することが法律¹⁾で定められている。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、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の手法が主要なアプローチ方法となる²⁾。

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一浸透一応力一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、国際共同研究プロジェクト「DECOVALEX-2011 Task B」^{3,4)}では、結晶質岩における熱一浸透一応力一化学連成モデルの開発・検証を行っており、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）を対象とした連成解析を実施している。

近年のコンピュータ技術の進歩に伴い、種々の数値解析手法が開発されており、それらの数値解析手法は大きく二種類に分けることができる。その一つが有限要素法（Finite Element Method: FEM）に代表される連続体解析手法である。これまでに行われてきた研究において報告されている岩盤や緩衝材に対する熱一浸透一応力連成解析例^{5,6,7)}は、そのほとんどが FEM 等の連続体解析手法を基にしたものである。

一方、不連続体解析手法の一つである粒状体個別要素法（Distinct Element Method: DEM）^{8,9)}は、解析対象を粒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¹⁰⁾。

本研究ではこれらの連続体・不連続体解析手法それぞれの特徴を踏まえて、スウェーデンのエスポ地下研究所で実施された原位置試験に対して FEM と DEM を適用した解析結果の比較を行った。これにより、開発した熱一応力連成解析モデルの検証を行うとともに、温度、応力やひずみ、亀裂進展過程について、定性的かつ定量的により精度の高い評価を行うための手法を提案する。

2. 解析手法および解析モデルの概要

(1) 解析手法

連続体解析手法として、熱-水-応力連成現象に対するFEM解析コードであるTHAMESを用いた2次元および3次元解析を行った。THAMESはOhnishi *et al.*¹¹⁾によって岩盤に対する連成解析コードとして構築され、その後、千々松ら¹²⁾によって緩衝材中の水分移動が表現できるように改良されてきた。

不連続体解析手法としては、独自に開発したDEM解析コードを用いた。DEMでは、岩石を粒子の集合体として表現する。各粒子はばねによって接続されており、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。さらに、各粒子はその接触点を通して熱の交換を行うことができ、温度に応じて粒子半径を変化させることで岩石の熱膨張などを再現する¹³⁾。粒子の半径増分 dr は以下の式で定義される。

$$dr = \alpha_t \cdot r \cdot dT \quad (1)$$

ここで、 α_t は粒子の線膨張率、 r は初期の粒子半径、 dT は温度の増分を表す。

DEMの基本原理や詳細なアルゴリズムについては、過去の研究報告^{9), 13)}に基づいてプログラミングを行っており、紙面の都合上ここでは省略する。DEMでは、対象となる岩石を構成する鉱物粒子の大きさを参考に粒子半径を決定することが考えられるが、本研究のようなフィールドスケールでの解析ではコンピュータの性能の限界から使用できる粒子数に制限がある。そのため、DEMについて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、まず単純な2次元モデルを用いて検討を行った。

(2) 解析モデル

解析の対象となるエスポ地下研究所の原位置試験では、試験坑道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6本の計測孔が配置されており、このうち4本にはヒーターが埋設されている。3D-FEM解析モデルを図-1に、2D-DEM解析モデルの解析領域と粒子の配置を図-2a, bに示す。

3D-FEM解析モデルは、試験領域の半断面のみをモデル化している。図-1に示すように、解析領域は、x方向（試験坑道奥行方向）に25m、y方向（試験坑道軸方向）に50m、z方向（鉛直方向）に50mの範囲を考慮した。試験坑道は、図-1に示す高さ7.5m、幅2.5mの範囲に当る。第1および第2試験孔は深さ6.5mの円筒部分で、右側が第1試験孔で、左側が第2試験孔である。初期状態において、解析モデルの節点数27,744、要素数24,800であり、各境界面の法線方向の変位を拘束した（試験坑道および第2

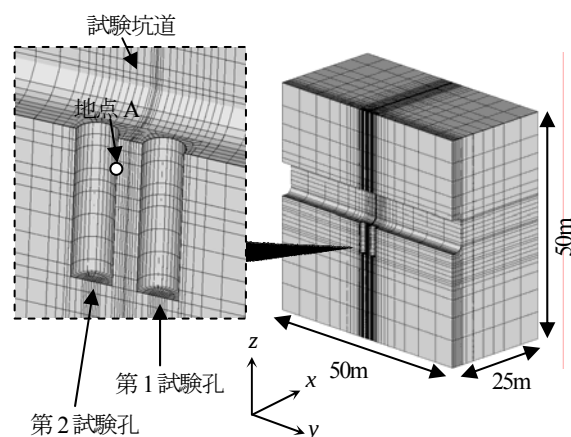
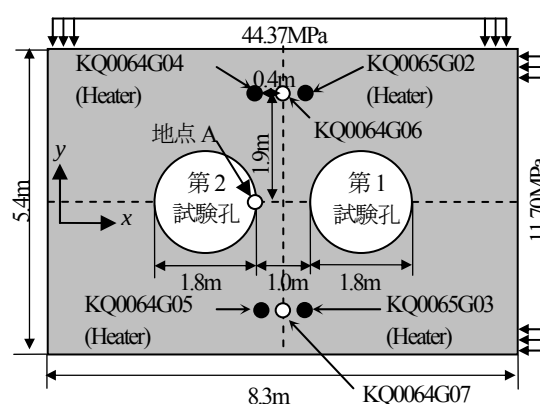
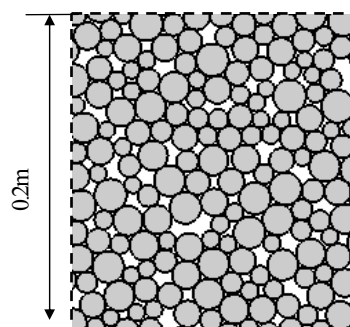


図-1 3D-FEMモデル



(a) 解析領域およびヒーターと計測孔の配置



(b) 2D-DEMモデルの粒子配置

図-2 2D-DEMモデル

試験孔の表面は除く)。

初期応力は、最大主応力30MPa (x方向)、中間主応力15MPa (z方向)、最小主応力10MPa (y方向) として与えた。ただし、応力は圧縮を正で表記する。これらの試験坑の配置や境界条件は実際のÄspö Pillar Stability Test³⁾における状況に一致させている。また、図-1に示すように地点A (深さ1.95m、第2試験孔壁面から0.003m) を設定し、この点における応力などの変化を比較する。

2D-DEM解析モデルは、ばねによって接続された円形要素の集合体で表現されている。2次元であるため深度

方向の概念はないが、ここでは3次元FEMモデルにおけるデータの出力点Aを通るx方向に8.3m、y方向に5.4mの平面を想定している。図-2(a)には6本の計測孔およびヒーターの配置もあわせて表示している。

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。モデルの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。

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。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。

(3)解析ステップ

解析は試験坑道および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、掘削工程における解析ステップは表-1に示すように全11ステップとする。第1ステップではモデルには地圧のみが作用しており、第2ステップで試験坑道の掘削を行う。第3～5ステップで第1試験孔を掘削し、第6ステップで第1試験孔に緩衝材の膨潤圧を想定した拘束圧0.7MPaを載荷する。そして、第7～11ステップにおいて、第2試験孔を掘削する。なお、2D-DEM解析では深度方向の概念がないことから、表-1に示すように3D-FEM解析における第2,5,6,11ステップについて解析を行うこととする。

加熱工程において、温度の境界条件はモデルの上下端面、第2試験孔の表面と試験坑道の表面の温度を初期温度14.5℃に固定した。上記以外の境界面は断熱境界とした。各ヒーターの熱量を図-3に示す。

2D-DEM解析でも同様に図-3に示すヒーター熱量を用いて加熱を行っており、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固定とした。

以上のように、本研究では同一の原位置試験に対する、3D-FEMと2D-DEMの2種類の解析結果を比較検討する。

なお、2D-DEM解析に用いる入力パラメータについては、原位置で採取された岩石コアに対する一軸圧縮試験や圧裂試験の結果をもとにキャリブレーションをおこなった^{3),10)}。

表-1 解析ステップ

解析ステップ	3D-FEM	2D-DEM
1 初期状態	○	-
2 試験坑道掘削	○	○
3 第1試験孔 2.0m まで掘削	○	-
4 第1試験孔 4.0m まで掘削	○	-
5 第1試験孔 6.5m まで掘削	○	○
6 第1試験孔内圧 0.7MPa	○	○
7 第2試験孔 1.0m まで掘削	○	-
8 第2試験孔 2.0m まで掘削	○	-
9 第2試験孔 2.5m まで掘削	○	-
10 第2試験孔 5.0m まで掘削	○	-
11 第2試験孔 6.5m まで掘削	○	○

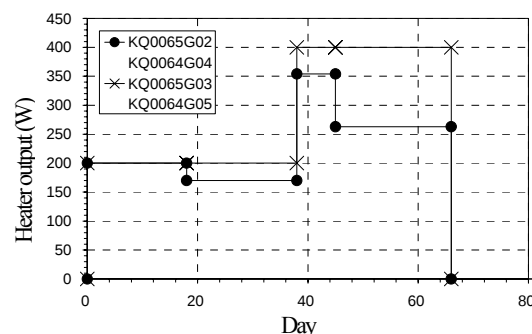


図-3 ヒーターの出力³⁾

3. 解析結果

(1)掘削工程

各解析手法により計算した地点Aにおける最大・最小主応力の変化を図-4に示す。地点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および最大接線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。逆に最大主応力は、第2試験孔掘削時に圧縮側に著しく増加する。それぞれの解析手法での各掘削過程における主応力の経時変化の傾向は、図-5に示す原位置試験において観測された地点Aの主応力の経時変化の傾向と一致している。

2D-DEM解析においては、拘束圧の載荷および第1、第2試験孔の掘削にともなって孔壁付近に微小亀裂が発生した。これらの微小亀裂の発生位置を図-6に示す。微小亀裂は全て引張亀裂であり、孔壁と平行に発生していることがわかった。

(2)加熱工程

加熱開始を0日として、計測孔KQ0064G06 (図-2a参照)の温度変化を図-7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-8に示す。図-7と

図-8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おり、特に、3D-FEMの解析結果は定量的にも良好な結果となっている。一方、2D-DEMの解析結果は計測孔における最大温度が3D-FEM解析および原位置試験で観測された値より10℃程度高くなっている。2D-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。

図-9は加熱工程における地点Aでの最大接線応力の加熱による変化を示す。最大接線応力 $\tau_{\max}$ は次式より求めた。

$$\tau_{\max} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2)$$

ここで、 σ_1 は最大主応力、 σ_3 は最小主応力である。図-10は原位置試験において観測された地点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）の発生数を示しており、図-9と図-10を比較すると、3D-FEMの解析における最大接線応力の変化は原位置試験結果と比べて若干小さな値となっているが、定性的にはよく一致している。一方、2D-DEMの解析結果は、前述したように最大温度が10℃程度高くなっているにもかかわらず、3D-FEMおよび原位置試験における最大接線応力より小さな値となっていることがわかる。また、2D-DEM解析においては、加熱によって新たな微小亀裂が発生しており、図-9には一日毎の微小亀裂の発生数の変化を棒グラフであわせて表示している。さらに、加熱工程において発生した微小亀裂の発生位置を図-6に示す。2D-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¹⁰⁾。図-9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しており、図-10に示す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。

4. 考察

(1) 地点Aにおける主応力の変化

掘削工程、加熱工程を通して、3D-FEMと2D-DEMの解析結果は原位置試験における観測結果と定性的には良好に一致している。特に3D-FEMの解析結果は定量的にも比較的良好的な結果となっていることがわかる。しかし、2D-DEM解析では、加熱過程での最大接線応力が3D-FEMおよび原位置試験における最大接線応力より小さな値となった。DEMでは粒子間に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

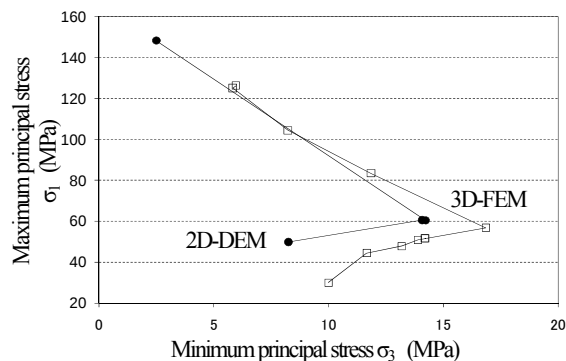


図-4 各解析手法における地点Aの主応力の変化

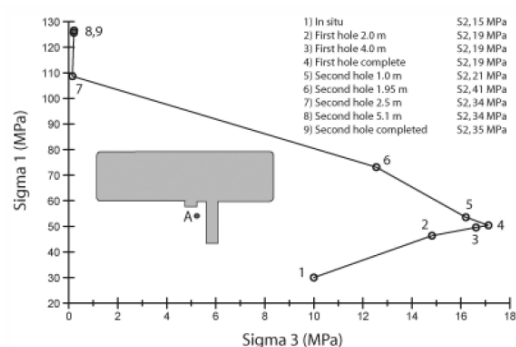


図-5 原位置試験における地点Aの主応力の変化³⁾

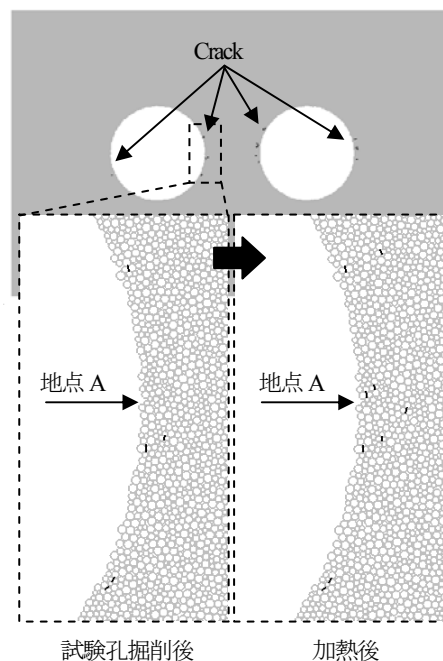


図-6 各工程における微小亀裂の分布（2D-DEM）

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。特に、図-6に示すように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ると考えられる。そのため、2D-DEMでは3D-FEMよりも最大接線応力が小さくなったものと考えられる。

(2) 岩盤破壊過程

原位置試験では試験孔壁面での岩盤の破碎、V字型に破壊し欠落する現象が観察されている。しかし、連続体解析手法であるFEMによる解析では、このような亀裂の発生・進展や破壊挙動及び大変形といった現象を取扱うためには限界がある。一方、2D-DEM解析において発生した微小亀裂は原位置試験における試験孔壁面での岩盤の破壊過程を示していると考えられる。図-6に示すように、加熱工程において発生した微小亀裂は孔壁付近に存在する既存の微小亀裂の近傍に発生している。このことから、2本の試験孔の掘削により試験孔壁面内部に発生した微小亀裂が、加熱による変位、応力の上昇に伴って徐々に進展し、それらが集積、連結することによってV字型に破壊し欠落したと解釈することができる。

このようにDEM解析では、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各粒子の単純な運動の集積として再現する。また、単純な運動の集積であることから解析結果に対する解釈が容易であり、現象をより深く理解することができる。さらに、DEM解析により得られた知見から亀裂の発生・進展や破壊挙動を考慮した新たな構成則モデルを得ることができれば、FEM解析において定量的、定性的により精度の高い解析を行うことが可能になると考えられる。

5. 結言

本研究では、スウェーデンのエスボ地下研究所で実施されたHLW地層処分に向けた原位置試験を対象とし、3D-FEMと2D-DEMによる熱-応力連成解析を適用した結果の比較を行った。その結果、それぞれの解析結果は原位置試験における観測結果と定性的には良好に一致していることがわかった。特に3D-FEMの解析結果は定量的にも比較的良好な結果となっていることがわかった。

一方、2D-DEMでは、掘削・加熱工程において試験孔壁面付近に微小亀裂が発生しており、このことから原位置試験で観察された試験孔壁面での岩盤の破碎、V字型

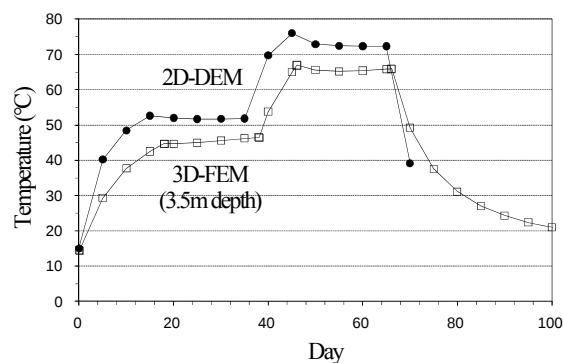


図-7 各解析手法における計測孔 KQ0064G06 の温度変化

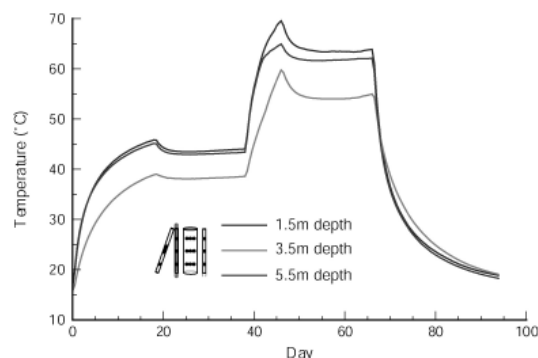


図-8 原位置試験における計測孔 KQ0064G06 の温度変化³⁾

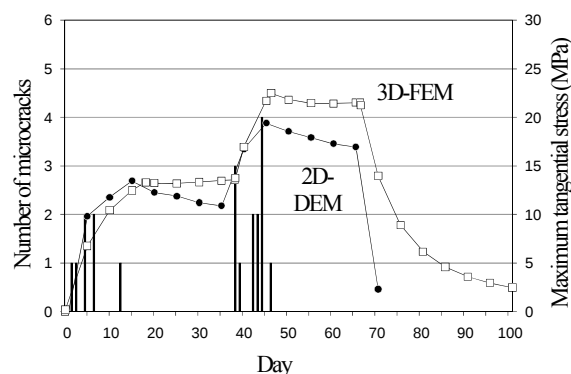


図-9 各解析手法における地点 A の最大接線応力の変化および微小亀裂発生数の経時変化

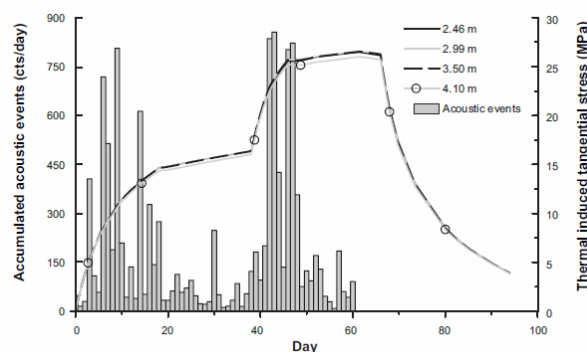


図-10 原位置試験における地点 A の最大接線応力の変化および AE 発生数の経時変化³⁾

に破壊し欠落する現象について考察することができた。

このように、応力分布などの定量的な評価に優れたFEM解析と、岩盤の破壊挙動などのシミュレーションに優れたDEM解析を比較することで、DEM解析における岩盤の内部応力状態等が適切に表現できていることが確認でき、DEM解析により得られた知見から亀裂の発生・進展や破壊挙動を考慮した新たな構成則モデルを得ることができれば、FEM解析において定量・定性的により精度の高い解析を行うことが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律，平成十二年法律第百十七号。
- 2) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊3 地層処分システムの安全評価，JNC TN1400 99-23，1999。
- 3) Andersson, J. C. : Äspö pillar stability experiment final report: rock mass response to coupled mechanical thermal loading. TR-07-01, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), 2007.
- 4) 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.
- 5) Chijimatsu, M., Fujita, T., Kobayashi, A. and Nakano, M. : Calibration and Validation of Thermal, Hydraulic and Mechanical Model for Buffer Material. JNC Technical report, JNC TW8400 98-017, 1998.
- 6) Chijimatsu, M., Fujita, T., Kobayashi, A. and Nakano, M. : Experiment and validation of numerical simulation of coupled thermal, hydraulic and mechanical behaviour in the engineered buffer materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 24, pp.403-424, 2000.
- 7) 千々松正和，杉田裕，藤田朝雄，雨宮清，小林晃，大西有三：原位置試験場における熱—水—応力連成試験結果および解析評価，土木学会論文集 No.652/III-51, pp.125-139, 2000.
- 8) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. : A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29 (1), pp.47-65, 1979.
- 9) Potyondy, D. O. and Cundall, P. A. : A bonded- particle model for rock. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 41, pp.1329-1364, 2004.
- 10) Shimizu, H., Koyama, T., Ishida, T., Chijimatsu, M., Fujita T. and Nakama, S. : Distinct element analysis for ClassII behavior of rock under uniaxial compression. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 47, pp.323-333, 2010.
- 11) Ohnishi, Y. and Kobayashi, A. : THAMES, Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media. *Mathematical and Experimental Studies, Elsevier, Development in Geotechnical Engineering*, 79, pp.545-553, 1996.
- 12) 千々松正和，谷口航，鈴木英明，西垣誠：熱—水—応力連成モデルを用いた高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるニアフィールド評価，土木学会論文集，No.687/III-56, pp.9-25, 2001.
- 13) Wanne, T. S. and Young, R. P. : Bonded-particle modeling of thermally fractured granite. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 45(5), pp.789-799, 2007.

DISCRETE AND CONTINUUM APPROACHES FOR THE ANALYSIS OF COUPLED THERMAL-MECHANICAL PROCESSES IN THE NEAR FIELD OF A HLW REPOSITORY

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

This paper reports on the results of the numerical simulations for the analysis of coupled thermal-mechanical processes in the near field of a HLW repository using Finite Element Method (FEM) and Distinct Element Method (DEM). The FEM approach provides quantitative information of the change of stress during excavation and heating process. On the other hand, the DEM approach shows the crack propagation process at the borehole surface, and this result agrees qualitatively well with the experimental observation. By comparing these results obtained from both approaches, quantitative and qualitative insights into various aspects of the processes occurred in the near field can be obtained.