円錐孔底ひずみ法とコアディスクキングについて* - 土岐花崗岩における湧水孔での測定結果を例にして -

佐藤 稔 紀¹ 丹野 剛 男¹ 引間 亮 一²
真田 祐 幸¹ 加藤 春 實³

Study of Core Disking Phenomenon on Compact Conical-ended Borehole Overcoring Technique - A Case Study for measurement in borehole with inflow at Toki Granite -

by Toshinori SATO^{a*}, Tateo TANNO^a, Ryoichi HIKIMA^a,
Hiroyuki SANADA^a and Harumi KATO^b

- a. Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency,
1-64, Yamanouchi, Akeyo, Mizunami, Gifu 509-6132, Japan (*Corresponding author, FAX:
0572-66-2245, E-mail: sato.toshinori@jaea.go.jp)
- b. Akema boring Co., LTD.

Japan Atomic Energy Agency has been conducting *in situ* stress measurements using overcoring method, within the context of establishing a firm scientific basis for safe geological disposal of high-level radioactive waste. Core diskling has been observed during rock stress measurements performed using the Compact Conical-ended Borehole Overcoring Technique in borehole with inflow excavated at 200m depth at the Mizunami Underground Research Laboratory. In this report, applicability of measurement tool against inflow and failure initiation of core diskling is discussed.

KEY WORDS: High-Level Radioactive Waste, Geological Disposal, *In situ* Stress, Compact Conical-Ended Borehole Overcoring Technique, Core Diskling

1. はじめに

(独)日本原子力研究開発機構では、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発として、地下研究施設の建設を伴う研究プロジェクトを進めている。この中で、岩盤力学に関する調査研究の主要な課題として、岩盤の初期応力状態の評価に取り組んでいる。岩盤の初期応力データは、地下施設の設計・建設にあたって必須のデータであるとともに、物質の主要な移行経路となる坑道周辺の掘削影響領域の範囲や物性に大きな影響を与える因子となるため、地下施設の設計や施工の段階で取得すべき項目である。

初期応力の測定方法として、地上からの調査では水圧破砕法の実績が多いものの、坑道内では完全な3次元応力状態が把握できる利点があることから応力解放法が優位である。地盤工学会では、2009年に円錐孔底ひずみ法の規格・基準を定めた¹⁾。しかしながら、円錐孔底ひずみ法では、ひずみゲージセルを岩盤に接着させる作業を伴うため、ボーリング孔内に湧水がある場合には測定

を断念するケースがある。湧水で満たされた下向きボーリング孔での測定のための装置の開発²⁾や原位置試験が行われている³⁾が、適用事例はまだ少ない。さらに、円錐の肉厚が薄い部分オーバーコアリングの際にコアディスクキングが発生し、通常の評価方法では応力状態を評価できない例もある。

著者らは、地表からの深度200mの花崗岩に掘削された坑道内において円錐孔底ひずみ法による測定を実施した。その際に、湧水対策ツールを用いたので、その適用性を評価するとともに、コアディスクキングの発生条件について検討したので、その結果を報告する。

2. 測定の概要

2・1 測定位置

測定は、岐阜県瑞浪市明世町山野内の瑞浪超深地層研究所の深度200mに掘削された坑道で実施した(Fig. 1)。この地点の地質は、基盤岩として白亜紀後期の土岐花崗岩と呼ばれる黒雲母花崗岩が分布しており、これを厚さ約170mの堆積岩層(新第三紀の瑞浪層群及び瀬戸層群)が覆っている。

測定は、Fig. 1中の08MI-14孔(以下14孔と記す)と08MI-15孔(以下15孔と記す)において実施した。孔の方位は、14孔がN19.3°E、15孔がN71.0°Eであり、両孔とも水平から上向きに約7度で掘削した。14孔の測定区間の岩盤等級(電中研式)はC_H級、15孔はC_M級とC_H級が混在する。

14、15孔ならびに両孔に近接して下向きに掘削した08MI-16

*2012年7月26日受付 2013年1月1日受理 平成24年9月12日、資源・素材関係学協会合同秋季大会において一部発表

1. 正会員 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門

2. 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門

3. 正会員 株式会社 明間ボーリング

[著者連絡先] FAX: 0572-66-2245

E-mail: sato.toshinori@jaea.go.jp

キーワード: 高レベル放射性廃棄物, 地層処分, 初期応力, 円錐孔底ひずみ法, コアディスクキング

Fig.1 Location of boreholes.

Fig.2 Measurement system.

Fig.3 The 16-element gauge.

孔のコアを用いた室内試験の結果では、土岐花崗岩の一軸圧縮強さは131～159MPa（平均143MPa）、圧裂引張強さは4.9～7.2MPa（平均6.3MPa）である。コア観察によるき裂頻度は14孔が4.1本/m、15孔が4.7本/mである。

2・2 測定システム

測定は、地盤工学会基準¹⁾に準拠して実施した。Fig. 2に測定システム、Fig. 3にひずみゲージの配置を示す。

測定を実施した坑道では壁面に湧水が認められたため、ボーリング孔を掘削した場合にも湧水が想定された。この場合、円錐孔底面にひずみゲージを接着させるために、孔底に湧水がまわらないような措置が必要となる。今回の測定では湧水対策のためにボーリング掘削は一回り大きな径で掘削し、ゴム製のパッカーを先端に取り付けたPQサイズ（孔径124mm）のロッドを挿入することで湧水の孔底へのまわり込みを防いだ。孔口には5インチケーシングにパッカーを2か所（口元と先端）装着した口元ケーシングを設置するとともに、スタッフィングボックスをこれに接続して突発湧水に対応できるようにした。孔口に近いスタッフィングボックスはPQサイズ掘削時に、2つ目のスタッフィングボックスはその後のHQサイズ掘削時に対応するものである。

円錐孔底ひずみ法はボーリング掘削とオーバーコアリングを同じ径で行うことが特徴であるが、今回の測定ではボーリング掘削

Fig.4 Measurement tool against inflow to the borehole, and procedure of measurement.

Fig.5 Photograph of 5" casing with packer.

をPQサイズで、円錐孔の掘削をHQロッドに装着したBQワイヤーラインビット（直径59.6mm）で行い、オーバーコアリングをHQワイヤーラインビット（孔径98.4mm）で行った。この点が学会基準と異なる点である。

湧水に対応するためのこれらのツールと測定手順を示したものをFig. 4に、孔ロケーシングの写真をFig. 5に示す。大深度ボーリングでの応力解放法のために、ワイヤーラインシステムを用いた装置が提案されているが⁴⁾、今回の測定では、このシステムの考えを踏襲したうえで、さらに湧水対応のツールを開発して測定に適用した。

3. 測定結果

測定結果の概要をTable 1に示す。2孔で計14回の測定を実施し、7回で測定が成功し、3回の測定でコアディスキングが発生し、さらに測定システムの不備や既存き裂の影響等のため、4回の測定で完全なひずみ線図を得ることが出来なかった。Fig. 6に成功例とコアディスキングが発生した例のオーバーコアリングに伴うひずみの変化を示す。図においては、正を圧縮、負を引張りで表示している。コアディスキングが発生した例では、測定開始当初は理論曲線と同様に、わずかに引張側に振れたのちに圧縮側

Table 1 Measurement results.

a) Borehole 08MI-14

Depth	Status
12.05m	Exfoliation of strain sell
12.80m	Core dinking
13.02m	Core dinking
13.38m	Successful (Disconnection of system during overcoring)
17.90m	Successful
18.40m	Successful
19.20m	Successful

b) Borehole 08MI-15

Depth	Status
12.00m	Successful
12.60m	Successful
14.30m	Successful
17.42m	Successful
18.12m	Core separation due to existing fractures
21.07m	Core dinking
21.74m	Existing fracture near the measurement point

a) Borehole 08MI-14 (13.02m) : Core dinking

b) Borehole 08MI-14 (18.40m) : Successful

Fig.6 Examples of change in strains during overcoring.
Arrow in the Figure means location of strain gauge.

に変化するという挙動を示すものの、オーバーコアリングがひずみゲージの位置（図中の矢印の位置）を通過してからひずみが急激に解放される、あるいは不安定な挙動を示すことが特徴であり、解放ひずみの値も小さい傾向がある。Fig. 7 に解放ひずみと理論ひずみを比較した図を示す。横軸の角度は、ひずみゲージの位置を示す回転角度で、ボーリング孔口から孔底を見たとき、水平3時の方向から半時計回りに測定されるものを示している。通常、孔底ひずみはオーバーコアリング終了時のひずみを採用するが、14孔の深度13.02mはコアディスキングが生じたため、ひずみが急激に解放される直前のひずみを孔底ひずみとして採用している。Fig. 6a) では、チャンネル8のピークの値を孔底ひずみと

a) Borehole 08MI-14 (13.02m) : Core dinking

b) Borehole 08MI-14 (18.40m) : Successful

Fig.7 Examples of terminal strain distributions around the strain cell, compared to the theoretical curves.

Table 2 Young's modulus and Poisson ratio.

a) Borehole 08MI-14

Depth	Number	$E(ave)$, GPa	ν
13.45-13.64m	6	42.3	0.21
17.95-17.99m	2	36.9	0.20
18.46-18.50m	2	36.7	0.19
19.24-19.29m	2	35.0	0.21

b) Borehole 08MI-15

Depth	Number	$E(ave)$, GPa	ν
12.10-12.15m	2	39.5	0.25
12.64-12.68m	2	41.7	0.24
14.36-14.41m	2	49.2	0.23
17.51-17.55m	2	43.1	0.16
18.82-18.87m	2	50.8	0.17
22.04-22.09m	2	48.5	0.15

した。深度13.02mのデータは理論曲線からはずれる傾向があるが、深度18.4mの成功例は良好なものと判断できる。

計14回の測定のうち、初期応力の算定が不可能と考えられる14孔の深度12.05mと15孔の深度21.07mにおける2点を除く12点について、オーバーコアリング終了時のひずみの量と、オーバーコアあるいはその近傍から採取したコアを用いた繰り返し載荷試験から得られるヤング率とポアソン比を用いて主応力値を算出した (Table 2)。コアディスキングが発生した14孔の深度12.80mおよび13.02m、測定近傍にき裂があった15孔の深度18.12mおよび21.74mでは、応力が完全に解放される直前のひずみを用いて応力値を算出したが、これらは図表では参考値として括弧標記および凡例を変えて示した。オーバーコアリングに伴うひずみの変化を吟味すると、ひずみ変化のピークを過ぎた後で急激にひず

Table 3 Principal stresses measured by means of the conical-ended borehole technique at Borehole 08MI-14.

Depth	σ_1 , MPa	σ_2 , MPa	σ_3 , MPa	Remark
12.05m	-	-	-	
12.80m	(8.2 ± 0.3)	(4.0 ± 0.4)	(0.7 ± 0.3)	Disking
13.02m	(7.7 ± 0.6)	(4.5 ± 0.5)	(-1.4 ± 0.5)	Disking
13.38m	11.9 ± 0.5	2.9 ± 0.4	1.0 ± 0.4	
17.90m	12.4 ± 0.4	5.5 ± 0.4	3.1 ± 0.4	
18.40m	10.4 ± 0.3	6.6 ± 0.2	3.0 ± 0.3	
19.20m	9.5 ± 0.6	5.2 ± 0.4	2.8 ± 0.6	

Table 4 Principal stresses measured by means of the conical-ended borehole technique at Borehole 08MI-15.

Depth	σ_1 , MPa	σ_2 , MPa	σ_3 , MPa	Remark
12.00m	4.8 ± 0.3	2.8 ± 0.2	1.1 ± 0.3	
12.60m	2.9 ± 0.3	1.7 ± 0.3	1.4 ± 0.4	
14.30m	3.9 ± 0.2	1.5 ± 0.3	-0.8 ± 0.3	
17.42m	9.0 ± 0.3	5.2 ± 0.5	3.9 ± 0.3	
18.12m	(9.8 ± 0.9)	(3.9 ± 0.6)	(0.8 ± 0.8)	Fracture
21.07m	-	-	-	Disking
21.74m	(2.4 ± 0.3)	(1.0 ± 0.4)	(-0.4 ± 0.5)	Fracture

a) Borehole 08MI-14

b) Borehole 08MI-15

Fig.8 Lower hemisphere stereographic projection of the principal axes.

みが解放されているが、この直前のひずみに対応したひずみ感度係数を用いることで真の応力値に近い値を算出できる可能性があるが、この検討は今後の改題としたい。なお、繰り返し载荷試験用の供試体は、測定ポイントの近傍のそれぞれにおいて異なる方向から採取し、その平均値を求めてこれを採用した。除荷時のヤング率は、14孔では33.6-45.8GPa(14孔全体の平均39.2GPa)、15孔では29.6-55.1GPa(15孔全体の平均45.4GPa)であり、15孔がやや高い傾向を示した。14孔では除荷時のヤング率の異方性は認められず、15孔では17%程度の異方性が認められた。ポアソン比は両孔とも平均で0.20であった。

各孔における主応力値をTable 3, Table 4に、主応力の方向を下半球に投影したものをFig. 8に示す。14孔は、コアディスクングが発生した2地点の主応力値は測定が成功した地点のそれと比較するとやや小さい。信頼性に劣るデータではあるものの、これ

a) 08MI-14 Borehole

b) Borehole 08MI-15

Fig.9 Distribution of fractures.

らを含めて評価したとしても、最大主応力は10MPa程度で、方位はNW-SEではほぼ水平も向を示す比較的一様な応力状態と言える。一方、15孔では、いくつかの測定結果は土被り圧と比較しても小さい主応力値が算出された。この理由として、以下のことが考えられる。Fig. 9は各孔のき裂の状態、すなわち、き裂の頻度と開口幅およびこれらの累積を示したものであるが、14孔では測定区間にほとんどき裂が存在しないのに対し、15孔では多くのき裂が存在し、0~2mm程度、最大で5.5mmの開口き裂によって測定ポイントが分断されるように分布していることから、15孔の測定ポイントは、応力が緩和された状態であったと推察される。

4. 考察

4・1 湧水抑制対策ツールの適用性評価

前述のとおり、大深度ボーリングでの応力解放法のために、ワ

イヤーラインシステムを用いた装置が提案されているが⁴⁾、今回の測定では、このシステムの考えを踏襲したうえで、さらに湧水対応のツールを付加して測定に適用した。実際の測定時には、14孔と15孔、それぞれ総量で $0.03 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ と $2 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ の湧水量があった。14孔においては深度5.3mと11.7mで、15孔においては深度8.1m以深において計8箇所で湧水き裂と遭遇した。14孔では測定した深度で湧水き裂と遭遇しなかったが、15孔では、円錐孔底ひずみ法による測定と、PQサイズ掘削およびバックカー設置を繰り返して、湧水き裂に対処しながら測定と掘削を進めた。いずれの孔も約22mの掘削で、円錐孔底ひずみ法による測定を7点ずつ実施し、1日約8時間の作業で14孔では15日、15孔では11日で作業を終了している。

本装置を用いた測定では、測定深度に達した以降に新たに湧水を伴うき裂に遭遇した場合にはPQサイズによる拡孔が必要となるものの、グラウトによるボーリング孔の埋め戻しと再掘削、あるいは、ボーリング孔を放棄して新たな孔を掘削することに比べると、時間とコストの観点で優位な方法と言える。

4・2 コアディスキングの発生条件の検討

コアディスキングの発生条件に関する研究がこれまで行われてきた⁵⁻⁷⁾。また、円錐孔底ひずみ法によるオーバーコアリング時のコアディスキングの発生条件を解析的に検討した研究もある⁸⁾。これらの研究成果より、引張応力によってコアディスキングが発生する条件として以下の式が提案されている。

$$\sigma_y + \sigma_x = 8.0 S_t \quad (1)$$

$$\sigma_y + \sigma_x = 9.93 S_t \quad (2)$$

$$\sigma_y + 0.28 \sigma_x = 2.48 S_t \quad (3)$$

ただし、 S_t は引張強度、 σ_x と σ_y は孔軸に直交する面内の主応力であり、式1,2は完全にコアが切り離される条件を、式3は円錐孔底におけるコアディスキングの開始条件を示している。式1,2の左辺に、14孔の結果に基づいて、 $\sigma_x=10\text{MPa}$ 、 $\sigma_y=5\text{MPa}$ を代入し、右辺に15孔で得られた圧裂引張強度の最低値4.9MPa、あるいは15孔を含む土岐花崗岩の全ての試験における最低値2MPaを代入したとしても、左辺が右辺を上回らない。

$$5 + 10 < 8.0 \times 2 \quad (1')$$

$$5 + 10 < 9.93 \times 2 \quad (2')$$

このことはコアレベルでのディスキング発生は無いと評価され、ボーリング孔の掘削結果と整合する。一方、式3からは、ボーリング孔の掘削方向や引張強度のばらつきに依存するものの、円錐孔底の部分でコアディスキングの発生条件を満足する場合、すなわち、左辺が右辺を上回る場合があり、測定結果と整合する。例えば、孔軸が最小主応力の方向と一致する場合は、14孔の結果に基づいて $\sigma_x=10\text{MPa}$ 、 $\sigma_y=5\text{MPa}$ を代入すると、 $S_t=3\text{MPa}$ より小さくなるとコアディスキングが発生することになる。

$$5 + 0.28 \times 10 > 2.48 \times 3 \quad (3')$$

引張強度が3MPaとは、平均値の半分程度であり、圧裂引張試験では数%の出現率であるものの、今回の測定では14回中3回発生しており、20%程度の確率となる。このような値は、実務上無視しえない。このため、GPSデータや浅発地震の発生メカニズムなどから推定される広域応力場の情報を参考にして、ボーリング孔の方向や圧裂引張強度のデータに基づいて測定レイアウト

Fig.10 Mesh layout for numerical analysis using FLAC3D.

Table 5 Input parameter value for the numerical analysis using FLAC3D.

<i>In situ stresses</i>	
$\sigma_1:10.6, \sigma_2:5.2, \sigma_3:2.6\text{MPa}$	
(08MI-14: $S_t:10.0, S_y:4.4, S_z:4.1, T_{xy}:-2.1, T_{yz}:1.2, T_{zx}:0.5\text{MPa}$)	
(08MI-15: $S_t:8.4, S_y:5.8, S_z:4.2, T_{xy}:3.3, T_{yz}:0.8, T_{zx}:-1.2\text{MPa}$)	
Young's modulus	42 GPa
Shear stiffness	16 GPa

を検討すべきである。

オーバーコアリングに伴うコアディスキングの発生状況について、有限差分法 (FLAC3D: ITASCA 社) による数値解析を実施した。メッシュ図を Fig. 10 に、解析条件を Table 5 に示す。初期応力としては、それぞれの孔で成功した測定から算出された主応力の平均値を各要素に作用させ、境界面は変位拘束 (ローラー境界) とした。ボーリング孔軸を Y 軸として、これに直交する鉛直方向を Z 軸、もうひとつの軸を X 軸と設定した。解析は、円錐孔底ひずみ法のオーバーコアリングがひずみゲージの位置すなわち円錐の半分付近まで進捗した状態を模擬した解析として、一度に応力を解放させて、各要素の応力状態を把握した。

解析結果を Fig. 11 に示す。なお、解析結果の図においては、Fig. 6 のひずみ線図とは逆で、正を引張り、負を圧縮で表示している。14孔の応力分布をみると、円錐の稜線の間部分、すなわち、ひずみゲージの位置付近において、最大の引張応力が作用しており、その値は4～6MPaである。15孔の応力分布は、14孔とはボーリング孔の向きが異なるため、最大の引張応力が作用する方向は異なるものの、作用する方向や値は同様である。

土岐花崗岩の圧裂引張強度は平均値で6MPa、最低値で3MPaである⁹⁾。ひずみゲージの位置までオーバーコアリングが進捗した状況では、ひずみゲージの位置における応力状態は、引張強度に近い応力状態になっている。このため、このような位置から破壊が開始されると推定される。さらに、解析結果を詳細にみると、この位置での主応力はいずれも引張りであり、最大主応力の方向は円錐の稜線に沿った方向となっている。このことは、コアディスキングが幾何学的に発生する条件を示している。また、オーバーコアリングの面との比較ではより大きな引張り応力が作用しているため、コアディスキングは円錐孔面から発生するものと推測される。

円錐孔底ひずみ法におけるオーバーコアリングに伴って発生するコアディスキングについて検討した研究がある^{8, 10, 11)}。これらの研究では、オーバーコアを X 線 CT スキャナーにより観察して、コアディスキングが発生した位置を特定するとともに、応力評価に用いるひずみゲージを選別することや、境界要素法を用い

a) Maximum stress distribution (08MI-14)

b) Minimum stress distribution (08MI-14)

c) Maximum stress distribution (08MI-15)

d) Minimum stress distribution (08MI-15)

Fig.11 Stress distribution around conical ended borehole bottom estimated by numerical analysis using FLAC3D.

た解析により、オーバーコアリングの進行に伴うボーリング壁面の応力状態を把握してコアディスキングの発生条件を検討している。オーバーコアリングが進行すると、円錐孔底の広範囲に引張応力が発生し、破壊開始は前述の式3で表現できるとしている。

Fig. 12に14孔でコアディスキングが発生したコアの写真を示す。深度12.80mのオーバーコアでは、コアディスキングで発生したき裂がコアの外周面に達している。このき裂は、オーバーコア直後は、円周の1/6程度であったが、翌日には1/3まで進展したものである。深度13.02m円錐孔底面には、ボーリング孔軸と直交する平面と斜交する複数のき裂が認められる。

a) Recovered core (12.80m)

b) Disk core (13.02m)

Fig.12 Photograph of recovered core specimen with core disk and disk core (Borehole 08MI-14).

数値解析の結果とコアディスキングが発生したコアの状況を踏まえると、オーバーコアリングによって、円錐孔底の稜線の部分に引張りの応力が作用し、内在するマイクロクラック等の弱部からき裂が進展することでコアディスキングが生じたものと推察される。このような破壊のメカニズムは、既往の研究における解析結果やコアディスキングの破壊開始条件を支持するものであり、今回の測定結果は、円錐孔底ひずみ法による応力測定の品質を向上させる事例として貢献できることを期待する。

今後の課題としては、逐次掘削解析などにより、オーバーコアリングに伴うより詳細な応力状態の変化を把握することや、時間依存的なき裂の進展の評価などがあげられる。

5. ま と め

ワイヤーラインツールと湧水対策を施したツールを組み合わせ、ボーリング孔内の湧水を制御して、円錐孔底ひずみ法による初期応力測定を実施した。最大で $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ の湧水量があったにもかかわらず、全ての測定において湧水が原因となる不具合が発生することなく測定を実施することができた。このことから、本装置の有効性を示すことができた。

円錐孔底ひずみ法による測定の際に発生したコアディスキングについて、その発生条件を検討した。また、オーバーコアリングを模擬した有限差分法による数値解析の結果、円錐孔底においてコアディスキングが発生するメカニズムとしては、円錐孔底の稜線の部分に引張応力が作用し、内在するマイクロクラック等の弱部からき裂が進展することと推察された。このような破壊のメカニズムは既往の研究における解析例や破壊開始の条件式と整合するものであった。

今回の測定において、コアディスキングが実務上無視しえない確率で発生した。今後の対策として、広域応力場などから想定される最大主応力の方向とボーリング孔軸の関係を事前に検討したうえで、圧裂引張強度のデータに基づいて測定レイアウトを決めることが重要である。

References

- 1) The Japanese Geotechnical Society, *Method for Initial Stress Measurement by Compact Conical-ended Borehole Overcoring Technique*, JGS 3551-2009.
- 2) K. Sakaguchi, H. Yoshida, M. Minami, M. Hara, Y. Suzuki and K. Matsuki: Journal of MMIJ, **122** (2006), 338-344.
- 3) K. Sakaguchi, H. Takeda and K. Matsuki: Journal of MMIJ, **126** (2010), 418-424.
- 4) H. Kato and H. Tanaka: Chikyu monthly, **26** (2004).
- 5) K. Sugawara, Y. Kameoka, T. Saito, Y. Oka and Y. Hiramatsu: Journal of MMIJ, **94** (1978), 797-803.
- 6) K. Hongo, K. Matsuki and K. Sakaguchi: Journal of MMIJ, **113** (1997), 155-161.
- 7) K. Matsuki, K. Hongo and K. Sakaguchi: Journal of MMIJ, **113** (1997), 317-324.
- 8) Y. Obara, S.-S. Kang, Y. Ishiguro and K. Sugawara: Journal of MMIJ, **117** (2001), 265-270.
- 9) T. Hirano, S. Nakama, A. Yamada, Y. Seno and T. Sato: JAEA-Research 2009-031.
- 10) Y. Obara and Y. Ishiguro: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **41** (2004), 761-769.
- 11) S.-S. Kang, Y. Ishiguro and Y. Obara: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **43** (2006), 1226-1240.