ひずみの局所化に注目した ボーリング孔形状のシミュレーション

小川 豊和[1*]・木ノ村 幸士[2]・青木 智幸[1]・山本 卓也[2]・松井 裕哉[3]・真田 祐幸[4]

[1]大成建設株式会社　技術センター（〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1）
[2]大成建設株式会社　原子力本部（〒163-0606 東京都新宿区西新宿一丁目25-1）
[3]日本原子力研究開発機構　東濃地科学センター（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64）
[4]日本原子力研究開発機構　幌延深地層研究センター（〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432番2）
*E-mail: toyokazu.ogawa@sakura.taisei.co.jp

幌延深地層研究所では，高レベル放射性廃棄物の地層処分のための地下研究施設の建設に先だちボーリング調査を実施し，地下の水理地質特性や力学特性を把握してきている．このうち，深度 1,000mまで掘削されたHDB-11孔においてブレークアウトが観察された．これは，異方的な初期応力場でのボアホール掘削により応力集中が生じ岩盤が破壊したためであると考えられる．本論文では，ひずみ軟化型弾塑性モデルを用いてボアホールブレークアウト現象の再現可能性を数値解析的に検討する．水圧破砕法による初期地圧測定結果を参考に初期応力比を設定し，モデル概念が解析結果に与える影響を調べた．その結果，ひずみ軟化型モデルによるシミュレーション結果は原位置での観察結果と概ね整合することが分かった．

Key Words : *sedimentary rock, strain softening, borehole breakout, numerical analysis, initial stress*

1. はじめに

北海道北部に位置する幌延深地層研究所では，2005 年度から地下研究施設の建設が始まり，現在では第2段階（地下施設建設時）の調査研究が行われている．今後，長期にわたり堆積岩を対象とした高レベル放射性廃棄物処分に関する研究がこの研究施設で実施される予定である．これに先行して第1段階（地上からの調査）ではボーリング調査が実施され，地下の水理地質特性や力学特性についての調査が実施された．このうち，深度 1,000 mまで掘削されたHDB-11孔において，ブレークアウトが観察された（図-1）．これまでの調査研究において，

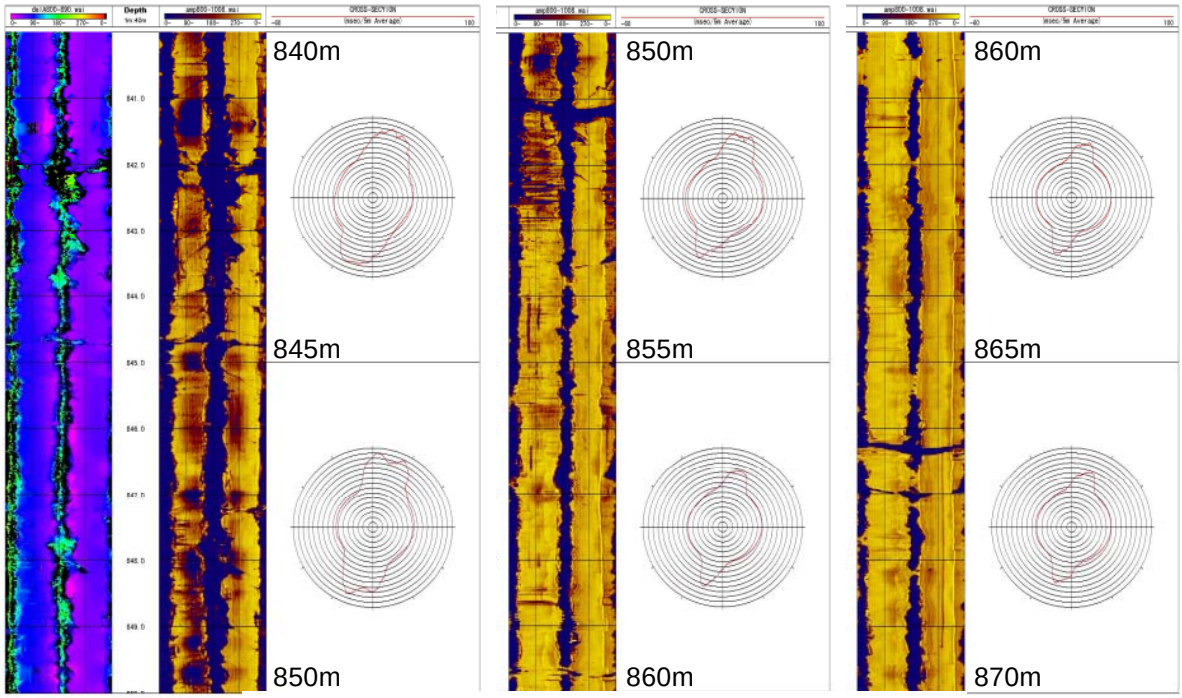


図-1　HDB-11 孔で観察されたボアホールブレークアウト

研究所設置地区およびその周辺の堆積軟岩は，坑道掘削時に応力集中による破壊面の形成が起こりうる可能性があることが確認されている[1]．本論文では，ひずみ軟化型弾塑性モデルを用いてこのブレークアウト現象を数値解析的に再現できるかどうかを検討する．

2. 観察されたブレークアウト現象

掘削泥水を清水で置換した後，HDB-11孔でボーリング調査時に得られた形状の測定結果（ボアホールテレビューアー（BHTV）による孔壁観察）では，ボアホールの直径方向及び反対側の位置で，それぞれ岩盤がノッチ状に破壊する様子が捉えられた（**図-1**）．これは，等方的ではない応力状態の場にボアホールを掘削することにより応力集中が生じ，応力が岩盤の強度を越えた場所では岩盤が破壊したためであると考えられる[2][3]．

3. ひずみ軟化型弾塑性解析モデルの適用性検証

研究所設置地区およびその周辺の堆積軟岩は拘束圧下でひずみ軟化挙動を示すことから，地下施設の力学的安定性評価を行う場合，その特性を踏まえた検討が重要である．ここでは，原位置コアを用いた圧密排水三軸圧縮試験（以下，CD試験）とそのシミュレーション解析を実施することにより，解析モデルの適用性の検証を行った．シミュレーション解析には，ひずみ軟化型弾塑性解析が可能な有限差分法コードFLAC3D（Ver.2.1）を使用した．

(1) ひずみ軟化型弾塑性解析モデル

図-2に示すような弾塑性の応力-ひずみ関係を考え，塑性領域では，その降伏挙動を支配するパラメータ（粘着力c，内部摩擦角φ）はせん断硬化パラメータe^{ps}に依存するとし，**図-3**のように線形で変化させる構成則を用いている[4]．

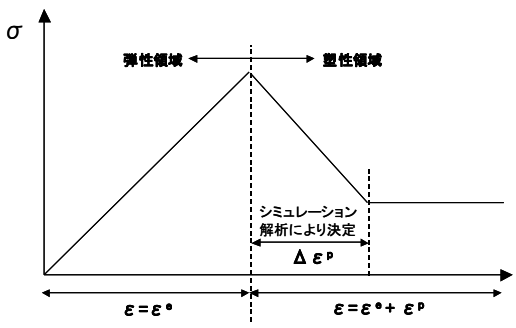


図-2　ひずみ軟化モデルの応力ひずみ関係

$$\Delta e^{ps} = \left\{ \frac{1}{2}\left(\Delta e_1^{ps} - \Delta e_m^{ps}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\Delta e_m^{ps}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\Delta e_3^{ps} - \Delta e_m^{ps}\right)^2 \right\} \quad (1a)$$

$$\Delta e_m^{ps} = \frac{1}{3}\left(\Delta e_1^{ps} + \Delta e_3^{ps}\right) \quad (1b)$$

ここで，Δe_j^{ps}，j=1,3は主塑性ひずみ増分である．

(2) 検証結果

各CD試験の結果をもとに，軸差応力ー軸ひずみ，軸差応力ー横ひずみ，体積ひずみー軸ひずみの関係を表すことのできる変形パラメータ（ヤング率，ポアソン比，ダイレタンシー角）を決定し，CD 試験のシミュレーション解析を実施した．

図-4に，珪藻質泥岩（深度280 m）のシミュレーション解析結果を示す．図より，CD試験では（ひずみ軟化の程度が小さい）拘束圧の大きい条件ではピーク後の体積ひずみが圧縮し続ける傾向がみられるが，解析ではこれを表現しきれていない．しかし，この点を除けばシミュレーション解析により実験結果をほぼ再現できており，本モデルの研究所設置地区およびその周辺の岩盤への適用性を検証できたと考えられる．

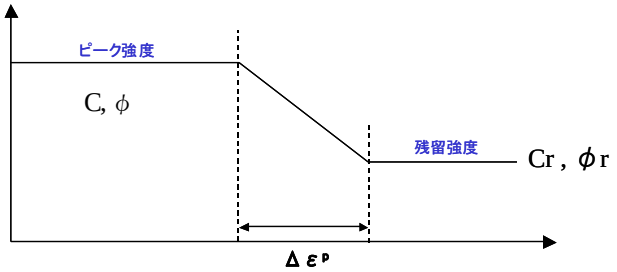


図-3　粘着力C，内部摩擦角φのモデル化

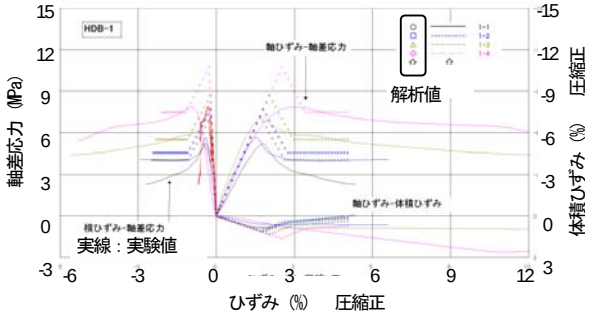


図-4　珪藻質泥岩（深度280 m）の解析結果

4. ひずみ軟化挙動を考慮したブレークアウト解析

ここでは，前節で地山への適用性を確認したひずみ軟化型弾塑性解析モデルを用いて，ブレークアウトの解析的検討を行った．

(1) 解析ケース

解析領域を設定するため、解析に先立ち予備的に簡単な弾性掘削解析を実施して、ボーリング孔半径と外側境界半径の比と、変位ならびに応力との関係を調べた。そして、解析で必要な解析エリアの大きさを決定した。その結果、解析境界をボアホール径（75 ㎜）の30倍取れば孔壁周辺の応力や変位に影響が無いことが分かった．

FLAC3D（Ver.2.1）を用いて今回実施した解析ケースを**表-1**に示す．軸対称問題であるが，紙面に直角な方向のひずみを固定して，平面ひずみ問題として解析を実施した．解析ではメッシュの粗さ，塑性モデルの違い，そして強度パラメータが解析結果に及ぼす影響を調べた．

(2) 解析メッシュ及び初期条件

解析に用いたメッシュを**図-5**に示す．解析領域は，ボアホール径75 ㎜に対し解析境界を30倍に取っている．

(3) 解析物性値の設定

本解析に用いる岩盤物性値を，前述のシミュレーション解析結果ならびに既往の岩石・岩盤の物理・力学物性検討結果 [5]を参考に決定した．設定した岩盤物性値を**表-2** に示す．

(4) 初期応力比

図-6は，HDB-11孔で実施された水圧破砕法による初期地圧を，最大水平応力σ_H，および最小水平応力σ_hの鉛直応力σ_vに対する比として表したものである．

表-1　解析ケース

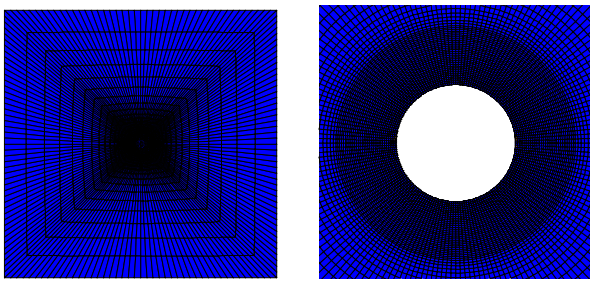
	検討項目	解析条件 考慮項目	解析結果の概要
1	解析境界	境界までの距離が応力変位に及ぼす影響	ボアホール径の30倍取れば，実用的に境界の影響が出ない．
2	メッシュの粗さ	粗～極細5種類	細かいメッシュほど塑性域の形状が実際観察される形に近くなる．
3	初期応力比	σ_v ： σ_h ： σ_H ① 1.0 ： 0.90 ： 1.3 ② 1.0 ： 0.75 ： 1.0 ③ 1.0 ： 0.75 ： 1.5	①と③のケースは、現場で観察された状況と整合的
4	塑性モデル	ひずみ軟化型弾塑性モデル 弾完全塑性モデル	ひずみ軟化型弾塑性モデルのほうが，岩盤内への影響が大きいノッチ状の塑性域を与える．
5	強度パラメータ	HDB-11孔内試験結果 岩石コア室内試験	粘着力が小さくなると塑性域は拡大する．

これより，σ_Hは鉛直応力σ_vと同じ程度の大きさで，σ_hはσ_Hよりやや小さく応力異方性を有していると考えられる．

今，地殻内部の主応力のうち，一つの主応力方向が鉛直方向と一致し，その大きさは土被り圧に等しいと仮定すると，断層がすべる時の主応力比は以下の式で表わすことができる．

$$(\sigma_H - P_0)/(\sigma_h - P_0) = \left[\left(1+\mu^2\right)^{1/2} + \mu\right]^2 \qquad (2)$$

ここで、P_0は間隙水圧である[6]．



(a)　　(b)

図-5　解析に用いたメッシュ
(a)　メッシュ全体，(b)孔壁周辺の拡大

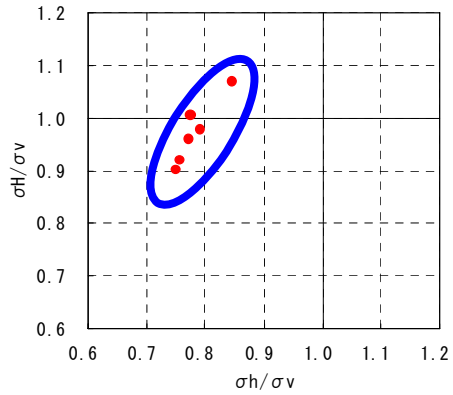
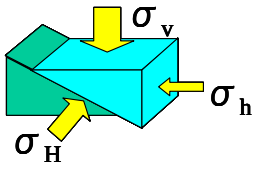


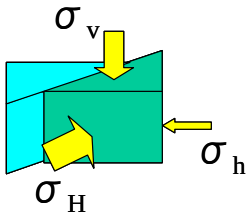
図-6　水圧破砕法による初期地圧結果

表-2　解析に用いた強度･変形パラメータ

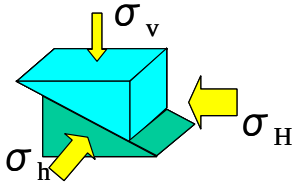
パラメータ	単位	
ヤング率	GPa	1.0
ポアソン比		0.16
ピーク粘着力	MPa	2.50
ピーク摩擦角	°	25.6
残留粘着力	MPa	1.79
残留摩擦角	°	23.2
単位体積重量	kN/m³	18.5
ダイレータンシー角	°	4.0



(a) 正断層系（NF）



(b) 横ずれ断層系（SS）



(c) 逆断層系（RF）

図-7　応力状態の種類

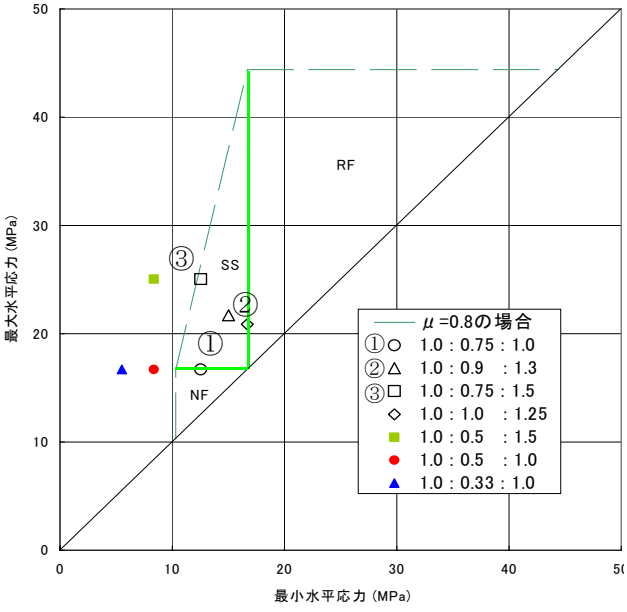


図-8　解析に用いた初期応力状態を示す応力多角形

図-7はこれら3つの応力の相対的な大きさによって生じる3つの異なる応力状態を示している．鉛直応力σ_vが最大である場合は正断層系（NF），σ_Hとσ_hの間にある場合は横ずれ断層系（SS），σ_hより小さい場合は逆断層系（RF）にあると言われる．断層の摩擦係数μ=0.8と仮定しこれらの応力状態をσ_hとσ_Hの面に描くと図-8が得られる．図-6に示した初期地圧は，図-8では横ずれ断層系（SS）の領域にプロットされることになる．

水圧破砕法による初期応力測定結果では，HDB-11孔内の応力バランスが$\sigma_h < \sigma_v \fallingdotseq \sigma_H$の状態にあることから（図-6），$\sigma_v$：$\sigma_h$：$\sigma_H$＝1.0：0.75：1.0（ケース①）の場合を中心としてシミュレーション解析を実施した．また、これまでの立坑掘削解析で用いている，σ_v：σ_h：σ_H ＝ 1.0：0.9：1.3（ケース②）の場合と，さらに厳しい応力状態のσ_v：σ_h：σ_H＝1.0：0.75：1.5（ケース③）の場合も比較のため検討に加えることにした．

(5) 解析結果

a)　メッシュの粗さ

図-9に，σ_v：σ_h：σ_H ＝ 1.0：0.9：1.3について，メッシュの粗さを変化させた場合に，塑性域の大きさと形状がどう変化するかを検討した結果を示す．なお，解析モデルはひずみ軟化型弾塑性モデルである．図-9は，解析領域は同じ大きさであり，右に位置するものほど各グリッドが細かくなっている．

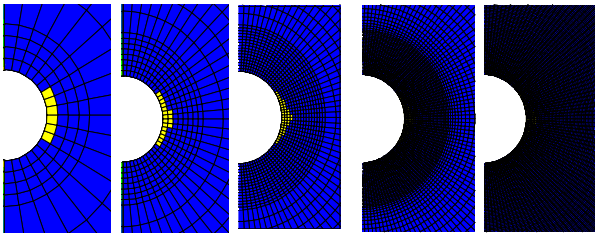
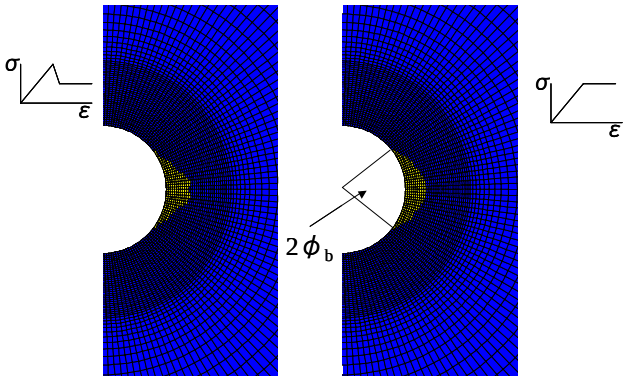


図-9　メッシュの粗さと塑性域の変化
（　ケース②　）



(a) ひずみ軟化型　(b) 完全弾塑性

図-10　ひずみ軟化型弾塑性モデルと完全弾塑性モデルの比較
（　ケース②　）

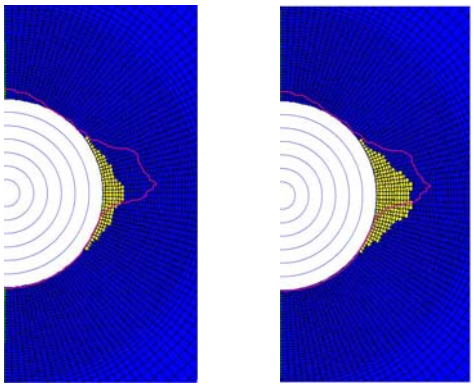


図-11　孔内観察結果とシミュレーション結果の比較
（　ケース②　）

原位置で見られたブレークアウト現象を忠実に再現するためにはメッシュを細かくする必要がある．一方，図-9(e)のようにメッシュが極端に細か過ぎても計算時間が膨大となるだけで，図-9(c)とそれほど大きく変化していないことが確認できる．このことから，以後の解析では実用的側面から図-9(d)のメッシュを用いて検討することとした．

b) ひずみ軟化型弾塑性モデルと弾完全塑性モデルの比較

図-10にひずみ軟化型断塑性モデルと弾完全塑性モデルの場合の塑性域の形状および範囲を比較した．ひずみ軟化型弾塑性モデルの方が，ノッチ状の塑性域が岩盤のより深い部分へと進展している．

c)　孔内観察結果との比較

ここでは図-1に示した各深度でのブレークアウト形状のうち，解析対象深度に近く，深いノッチ状の塑性域が観察された深度857 m付近のものを用いて，現場での観察結果と解析結果を比較する．図-1では切りかきが右上-左下方向であるが，観察結果の重ね合わせには，切りかきが水平方向に生じたものとして解析結果との比較を行う．

図-11にひずみ軟化型モデルによる解析結果と孔内で観察されたブレークアウト結果を重ね合わせた図を示す．なお，ノッチ状の切りかきの角度（図-10に示した$2\phi_b$）は72°であり，表-3に示すように既往の研究で得られた68°とほぼ整合している（表-3）．

このように，ひずみ軟化型の弾塑性モデルを用いた全応力解析によって，孔内で観察されたブレークアウト現象を忠実に再現できた．

表-3　解析結果の比較

	単位	HDB-11				
深度	(m)	596	791	850（今回解析）		
初期地圧(鉛直)	(MPa)	10.1	13.8	16.70	16.70	16.70
最小水平応力	(MPa)			15.03	12.53	12.53
最大水平応力	(MPa)			21.71	17	25.05
応力比				1:0.9:1.3	1.0:0.75:1.0	1:0.75:1.5
一軸強度	(MPa)	7.5	11	10.0	10.0	10.0
E	(GPa)			1.0	1.0	1.0
ν				0.16	0.16	0.16
C	(MPa)			2.50	2.50	2.50
ϕ	(°)			25.6	25.6	25.6
C_r	(MPa)			1.79	1.79	1.79
ϕ_r	(°)			23.2	23.2	23.2
μ		0.8	0.8			
$2\phi_b$		38.0	68.0	72.0	12.0	72.0
				ケース②	①	③

(6) 考察

水圧破砕法による初期応力測定結果では，HDB-11孔内の応力バランスが$\sigma_h < \sigma_v \fallingdotseq \sigma_H$の状態にあることから，$\sigma_v : \sigma_h : \sigma_H = 1.0 : 0.75 : 1.0$の場合を中心としてシミュレーション解析を実施した．しかし，解析結果からは，HDB-11孔についても他孔で観測された従来の初期応力比の場合に，観察結果と類似した結果が得られることが示唆された．このように予測と解析結果に乖離が生じた理由としては，以下の事項が考えられる．

今回のシミュレーション解析は全応力による解析であり，より正確な検討には間隙水圧を考慮した有効応力解析が必要となる．ただし，その場合は有効応力で評価した強度パラメータが必要となる．

今回の解析では，ボアホールの掘削速度が比較的大きいとして孔壁から岩盤内(あるいはその逆方向）の孔内水

の浸透は考慮していない．実際は間隙水の存在や岩盤の変形特性により，解析とは異なる挙動を示している可能性がある．この点を明らかにするためには，多孔弾性解析及び弾塑性解析を実施して，詳細を検討する必要がある．

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下のようにまとめられる．

現場で観察されたブレークアウトを表現するには、ある程度メッシュを細かくする必要がある．一方，メッシュが極端に細か過ぎても計算時間が膨大となるだけで結果は変化しないことから，実用的側面からその程度が決定される

弾完全塑性モデルと比較して，ひずみ軟化型弾塑性モデルの方が岩盤深部への影響が大きいノッチ状の塑性域を与える

今回の解析結果と既往の検討結果は概ね整合しており，考慮したいくつかの応力比のうち，これまで立坑掘削の解析などに用いてきたσ_v：σ_h：σ_H＝ 1.0：0.9：1.3 と今回考慮した 1.0：0.75：1.5 のケースでは，原位置で観察される$2\phi_b$の値と類似した結果が得られた．

参考文献

1) 山本卓也，青木智幸，城まゆみ，瀧治雄：堆積軟岩の長期挙動に関する調査試験研究（その２），核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書，JNC TJ5400 2003-0005，pp.4-1-pp.4-26，2003.
2) Detournay, C. B., and Wu C. Tan. Hydromechanical modeling of damage around borehole in laboratory experiments, *ARMA/NARMS* 04-590, 2004.
3) Haimson, B. Micromechanisms of borehole instability leading to breakouts in rocks. *Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, Vol.44, PP.157-173, 2007.
4) Itasca Consulting Group, Inc : *Fast Lagrangian Analysis of Continua "Theory and Background"*, Version4.0, 2002.
5) 核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター深地層研究グループ：設計技術（地下施設設計，人工バリア設計，閉鎖設計）の実際の地質環境条件への適用性評価（研究報告書），JNC TN5400 2005-004，pp.20-pp.41，2005.
6) Moos D., and Zobak M.D. Near-surface "thin skin" reverse faulting stress in the southern United States, *Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, Vol.30, PP.965-971, 1993.

NUMERICAL SIMULATION OF BOREHOLE SHAPE, FOCUSING ON STRAIN LOCALIZATION

Toyokazu OGAWA, Koji KINOMURA, Tomoyuki AOKI, Takuya YAMAMOTO, Hiroya MATSUI and Hiroyuki SANADA

For the constructuion of a URL for HLW geological disposal study, characterizations of rock structures have been carried out in Horonobe, Japan. In borehole investigation, breakout pheonomena were observed at depths. Rock failed where the relustant stress exceeded the shear strength of the rock. This paper reports the result of a numerical simulation of the borehole breakouts, using a strain-softening type elasto-plastic model. In the analysis, the inintal stresses are estimated, referring to the results of in situ stress measurements by hydrofracturing technique. As a result it is found that the result of the numerical simulation is in general consistent with that observed in the field.