

粒状体個別要素法による岩盤空洞の応力 ～浸透流連成掘削解析とクリープ解析

田坂 嘉章^{1*}・黒瀬 浩公¹・菊井 孝利¹・本田 中¹・青木 謙治²

¹東電設計株式会社 土木本部地下環境技術部 (〒135-0062 東京都江東区東雲一丁目7-12)

²京都大学 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

*E-mail:tasaka@tepsco.co.jp

放射性廃棄物の地層処分では、放射性核種が地下水によって移行するため、掘削や再冠水に伴う周辺岩盤の透水性の変化、地下水挙動の把握が重要となる。また、長期にわたる安全性の見通しを得るため、クリープ挙動などの岩盤の時間依存性の評価が重要となる。こうした岩盤の挙動を扱うには、亀裂の発生・進展に伴う挙動などの岩盤のメカニズムを捉えた予測手法が有効であると考えられる。本研究では、粒状体個別要素法による岩盤空洞の応力～浸透流連成掘削解析およびクリープ解析を実施し、空洞周辺岩盤の掘削に伴う透水性変化、地下水・変形挙動、岩盤のクリープ挙動の評価に対する同手法の適用性を示した。

Key Words : tunneling, distinct element method(DEM), bonded particle model(BPM), parallel bonded stress corrosion model(PSC), creep, numerical simulation

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分では、放射性核種が地下水によって移行するため、掘削や再冠水に伴う周辺岩盤の透水性の変化、地下水挙動の把握が重要となる。また、長期にわたる安全性の見通しを得ることが必要であり、クリープ挙動などの岩盤の時間依存性の評価が重要となる。こうした岩盤の挙動を扱うには、亀裂の発生・進展に伴う挙動、つまり岩盤のメカニズムを捉えた予測手法が有効であると考えられる。

粒状体個別要素法は、岩石の亀裂発生・進展、割裂破壊、せん断破壊および脆性・延性挙動などメカニズム解明に適用¹⁾されているが、亀裂を有する岩盤への適用は難しく、さらに岩盤掘削に伴う透水性変化に着目した応力～浸透流連成挙動への適用事例は少ない²⁾。硬岩のクリープ挙動を支配しているメカニズムは、微視的クラックの発生と成長であり、クラック進展は化学反応に起因するクラック先端の応力腐食割れであることが報告³⁾されており、粒状体個別要素法の適用可能性が示唆される。

本研究では、亀裂性岩盤における空洞周辺岩盤の掘削に伴う透水性変化、地下水・変形挙動への粒状体個別要素法の適用性を検討するため、水封式岩盤貯槽の応力～浸透流連成掘削解析を実施し、調査・計測結果と比較した。また、応力腐食モデルの考え方を粒状体個別要素法に導

入し、同手法によるクリープ解析への適用性を検討した。

2. 応力～浸透流連成掘削解析

(1) 検討概要

水封式岩盤貯槽方式は、貯槽周辺の地下水圧により常温高压で液化したLPG（プロパンでは、22℃・0.8MPaで液化）を貯蔵するものであり、貯槽周辺の地下水圧を貯蔵圧力より高く保持し、貯槽に向かう地下水流により貯蔵物を封じ込める方式である（図-1）。

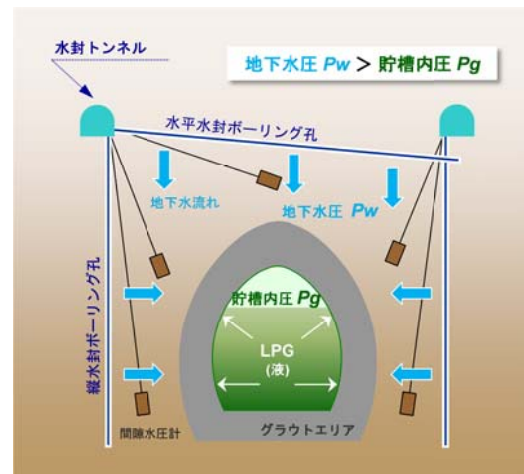


図-1 水封式地下岩盤貯槽概念図

図-2に波方国家石油ガス備蓄基地における貯槽レイアウトを示す。貯槽の設置位置は、貯槽の天端でEL.-150m、貯槽の底盤でEL.-180mとし、LPGの貯蔵に対して十分な気密性・液密性が確保される深度となっている。貯槽周辺の地下水压を維持し、貯槽に向かう地下水流を安定させるため、水封トンネルと水封ボーリングを貯槽周辺に設置している。

岩盤貯槽は、高さ30m、幅26mのたまご形の大規模地下空洞である。貯槽掘削は、水封水压を作用させている状態でグラウトをしながら実施している。貯槽周辺の地質は、堅硬なH級岩盤であるが、局所的に連続性の高い粘土介在割れ目や高透水亀裂帯が岩盤貯槽に斜交して分布している。岩盤貯槽は、アーチ部、ベンチ部を掘削し、掘削完了後、岩盤貯槽への作用水压が最大となる水封昇圧試験を実施している。

本検討では、上記の空洞掘削時の応力-浸透流連成解析を実施し、調査・計測結果との比較による同手法の適用性を検討した。

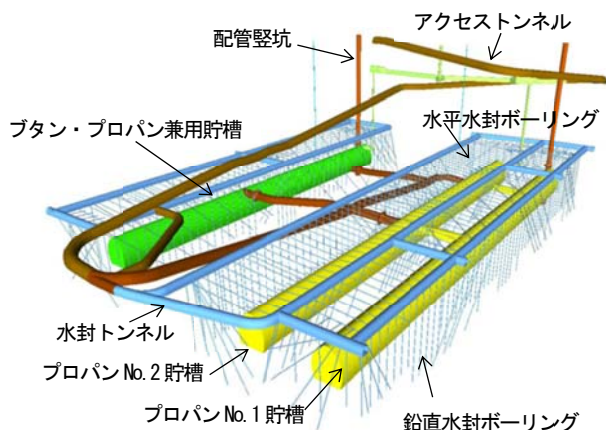


図-2 貯槽レイアウト

(2) 解析手法

粒状体個別要素法 (Distinct Element Method; DEM)⁴⁾と Channel-Domain ネットワーク浸透流解析方法の組み合わせによる応力浸透流連成解析手法の概要⁵⁾は、以下に示すとおりである。

- ・粒状体個別要素法を用いて、微視的な粒子間の変形挙動を評価する。そして、粒子間に岩盤透水性を示すパラメータとして Channel 開口幅を設定する。粒子間に引張り・圧縮力が生じて岩盤が変形する場合には、岩盤の透水性は開口幅に応じて変化するものとする。
- ・岩盤の浸透率に基づいて、Channel-Domain ネットワーク浸透流解析により、間隙水压を算出する。
- ・間隙水压を物体力に変換して、その物体力を岩盤を構成する粒子に与え、岩盤変位を算定する。

(3) 解析条件

解析は、空洞軸方向の割れ目が集中して粘土が共在するゾーンの貯槽横断面を検討対象とした。岩盤の地質構造を力学モデルによりモデル化し、透水性を流体モデル (Channel-Domain ネットワーク) によりモデル化した。

対象岩盤の方位解析による節理分布は、空洞軸方向に傾斜角55°~75°程度の節理群が卓越している。(図-3参照)

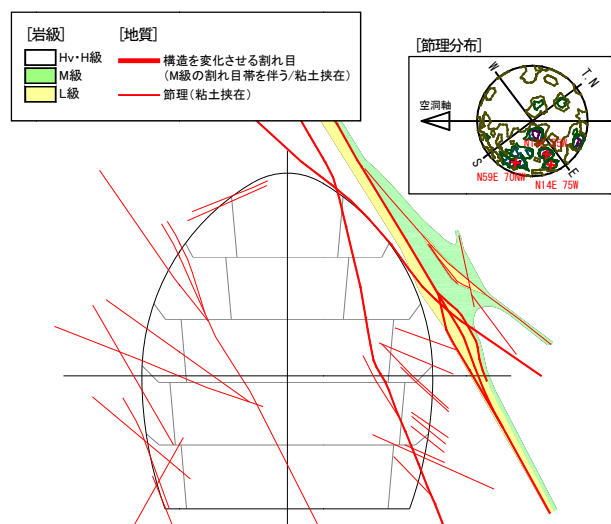


図-3 対象断面地質図

文献⁷⁾によると、節理などの不連続面が多数介在する不連続性岩盤の解析では、任意の一方に卓越する不連続面 (節理) を解析モデル化に考慮することで大規模空洞掘削時の異方的な変形挙動を表現できるとしている。また、考慮する不連続面は節理の集中度が約10%以上としている。

本解析では、上記事例を参考として、方位解析による節理分布データに基づき、傾斜角60°の節理群を構造的にモデル化して亀裂性岩盤をモデル化した。解析モデルを図-4に示す。空洞を中心として、空洞上方および側方の水封ボーリングを含めた80m四方をモデル化の対象とした。初期地圧は、鉛直応力を5.4MPa (土被り圧200m相当)、側圧係数を $K_0=1.1$ とした。

力学モデルには、最小粒径0.3m、粒子粒径比 (最大粒径と最小粒径の比) 1.66の粒状体を用いて、H級岩盤中に傾斜角60°の節理群を配置し、貯槽アーチにL級・M級岩盤が接する構造としてモデル化した。粒子力学パラメータは、H級、M級、L級の岩盤力学特性を再現する粒子力学パラメータを一軸圧縮試験のシミュレーション (円筒型一軸圧縮試験を模擬したシミュレーション) により設定した。節理の強度は、H級岩盤の残留強度相当とした。(表-1、表-2参照)

流体モデルでは、空洞壁面を構成する粒子の接点を結んだ多角形を空洞の Domain とし、周辺岩盤の Channel-

Domainネットワークと連結することにより，周辺岩盤から空洞への水の流れをモデル化した．貯槽周辺の透水性は，建設時に計測される透水試験データの透水係数を用いて，Ordinary Krigingによる地球統計学的推定およびSequential Indicator Simulationにより設定した⁹⁾．

貯槽掘削前の透水分布を図-5に示す（透水性は， $k=1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ を0.1Luとして表示）．

解析モデルの透水性は，透水試験のシミュレーションによりルジオン値0.1Luを再現する水理パラメータ（基底開口幅 a_0 ）を設定し，亀裂を平行平板と仮定した三乗則を用いて，掘削前の透水性に対応する基底開口幅の分布を設定した（表-3参照）．

表-1 粒子パラメータ

項目	設定値
粒子最小半径	0.3m
粒子粒径比	1.66
粒子密度	2700 kg/m ³
粒子間摩擦係数	0.5

表-2 粒子力学パラメータ

岩級	バネ定数 $E_c(\text{GPa})$	バネ定数比 k_r/k_s	粒子結合要素の強度	
			引張強度 $\sigma_n(\text{MPa})$	せん断強度 $\sigma_s(\text{MPa})$
H級	51	4	32	32
M級	20	6	18	18
L級	5	11	2	2
節理	—	—	1	6

表-3 水理パラメータ

項目	設定値
基底開口幅 a_0 (mm)	0.006~0.07mm (0.002Lu~3Lu)
亀裂縮小係数 $F_0(\text{N})$	1.0×10^{12}
亀裂拡大係数 m_a	0.1
有効間隙率 ϕ	1.0

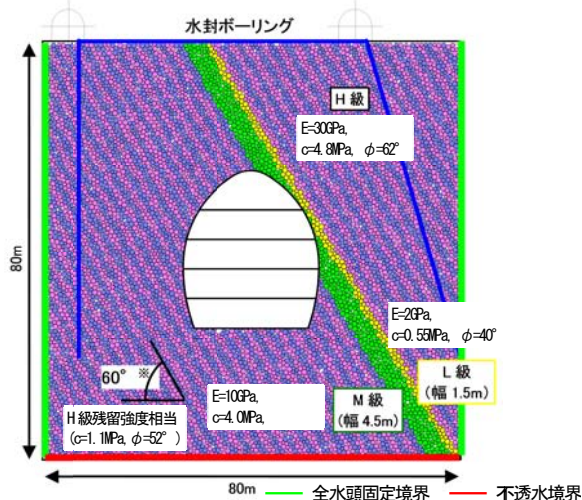


図-4 解析モデル図

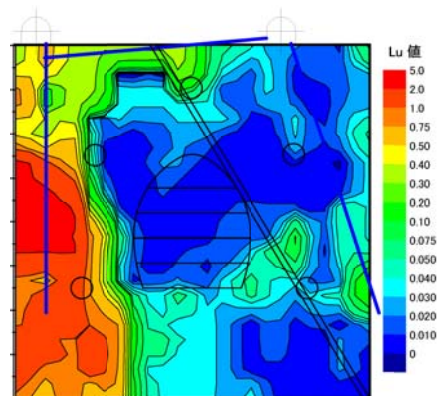


図-5 空洞掘削前の透水分布(実測)

空洞の上方ならびに側方の水封ボーリングは，水封ボーリング位置のDomainにより規定し，水封水压を水封ボーリング位置のDomainの圧力として設定した．

力学境界条件は，モデルの周囲を固定境界とした．水理境界条件は，上方と側方を全水頭固定境界，下方を不透水境界とした．

実施工では，水封水压0.6MPa一定の条件により，空洞盤下げ掘削を実施している．解析では，同様の条件を模擬した．

(4) 解析結果

空洞掘削完了時の変形モードを図-6に示す．3B左側壁において変形量が大きくなる変形モードは，計測と解析の両者において共通している．空洞周辺に発生した粒子間の亀裂開口幅の分布を図-7に示す．アーチ右肩に接するL級岩盤の近傍ならびにH級岩盤中の節理群が空洞に対して流れ目となる空洞左側壁では，亀裂開口幅が大きくなる傾向がある．

空洞掘削後の透水分布を図-8に示す．亀裂開口幅から算定した透水分布と実測による透水分布を比較すると，両者の透水係数が大きい領域は対応している．

空洞掘削後の水压分布を図-9に示す．間隙水压計位置の水压は，計測と解析において概ね対応している．

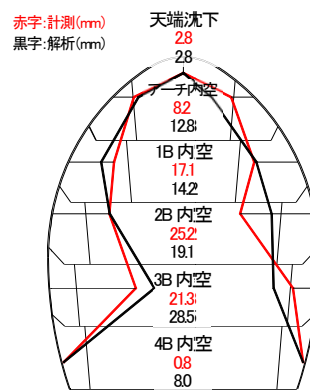


図-6 空洞掘削完了時の変形モード

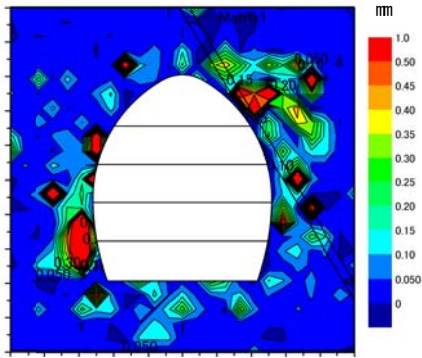


図-7 空洞掘削後の亀裂開口幅の分布

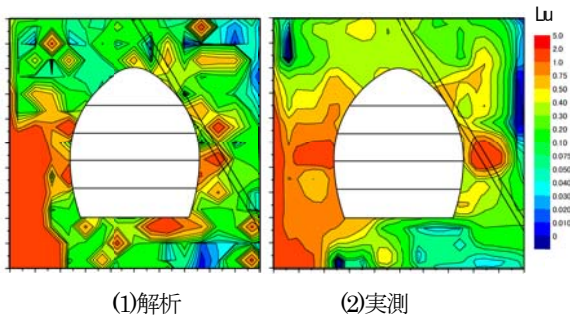


図-8 空洞掘削後の透水分布（解析と実測）

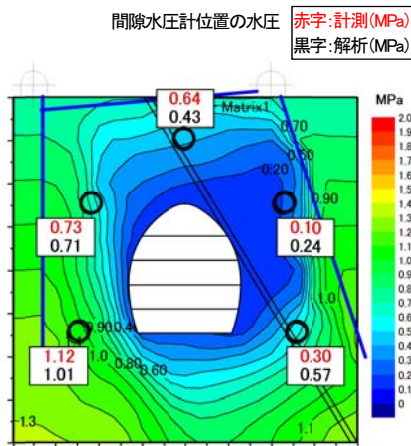


図-9 空洞掘削後の水压分布

以上より、解析では、卓越する節理群での亀裂の開口に起因する異方的な変形モードならびに透水分布の変化を再現していると考えられる。

3. クリープ解析

(1) 検討概要

岩石の強度は、歪速度によって変化し、クリープ破壊に見られるように時間依存性を有する。圧縮応力場の岩石の破壊強度は、応力腐食作用が関与するミクロな破壊によるクラック進展によって支配されることが考えられる。

文献⁹⁾によると、地下発電所空洞の掘削後の10年間で変形が発生しており、岩盤においても時間依存性挙動が認められる。

本研究では、掘削後の岩盤空洞の時間依存性の変形に最も大きな影響を及ぼしているものは、クリープ、あるいはクリープ破壊であると考え、応力腐食モデルを粒状体個別要素法に導入して、クリープ挙動を再現できるかを検討した。

(2) 解析手法

解析には、Itasca社の粒状体個別要素法解析プログラムPFCを用いた。

岩盤のモデル化は、並列型結合粒状体モデル(bonded-particle model: BPM model)を用いた。BPMモデルは、岩盤を粒子の結合体でモデル化し、結合要素(bond)の強度以上の応力が結合要素に作用した場合には粒子間の結合が解消、すなわち岩盤に亀裂が発生したと見做す。

また、岩盤の時間依存性挙動は、並列型結合応力腐食モデル(parallel bonded stress corrosion model: PSC model)により表現する。このモデルでは、並列結合要素に一定のしきい値以上の力が作用する場合に、結合要素の強度を規定する結合幅を特定の速度で減少させることによって、応力腐食過程を表現する。このときの結合幅の減少速度を規定するのが損傷速度則(damage rate law)であり、反応速度論(reaction rate theory)を用いて決定される。結合幅の減少速度は次式によって示される。

$$\frac{d\bar{b}}{dt} = \begin{cases} 0 & \bar{\sigma} < \bar{\sigma}_a \\ -\beta_1 e^{\beta_2(\bar{\sigma}/\bar{\sigma}_c)} & \bar{\sigma}_a \leq \bar{\sigma} < \bar{\sigma}_c \\ -\infty & \bar{\sigma}_c \leq \bar{\sigma} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ ：引張応力、 $\bar{\sigma}_c$ ：結合要素の引張強度、 $\bar{\sigma}_a$ ：応力腐食発生応力である。

また、

$$\beta_1 = ar_0 e^c e^{-E^*/RT} \quad (2)$$

$$\beta_2 = \frac{v^* \sigma_c}{RT} \quad (3)$$

ここで、 r_0 ：反応率、 c ：定数、 R ：ガス定数、 T ：絶対温度、 E^* ：活性化エネルギー、 v^* ：活性化体積である。

すなわち、応力($\bar{\sigma}$)が応力腐食発生応力($\bar{\sigma}_a$)よりも小さい場合には応力腐食反応は生じることではなく、応力($\bar{\sigma}$)が応力腐食開始応力($\bar{\sigma}_a$)よりも大きい場合に応力腐食反応が生じる。ただし、応力($\bar{\sigma}$)が引張強度($\bar{\sigma}_c$)よりも大きい場合には、結合要素が破断する。

図-10に、PSCモデルに組み込んだ亀裂速度に関する損傷速度則を、線形破壊力学における亀裂速度と応力拡大係数との関係と比較して示す。

線形破壊力学では、亀裂速度が応力拡大係数により規定されているのに対し、PSCモデルでは、応力状態で規

定したものと考えることができる。

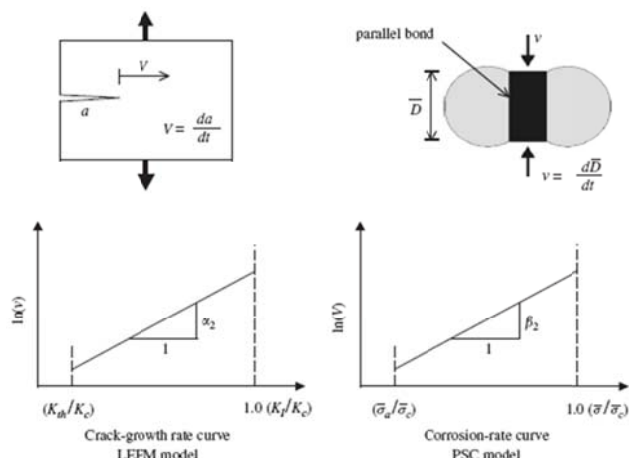


図-10 反応速度則を考慮したPSCモデルによる損傷速度則

(3) 解析条件

試算により、粒状体個別要素法による岩盤の長期挙動解析への適用性を検討した。

図-11 に解析モデルを、表-4 に解析パラメータを示す。解析モデルは偏差応力下の円形トンネルとし、先ず掘削解析を実施し、その後応力腐食パラメータ β_1 、 β_2 をパラメータとした長期挙動解析を実施した。なお、応力腐食発生応力 σ_a は、1MPaで固定とした。

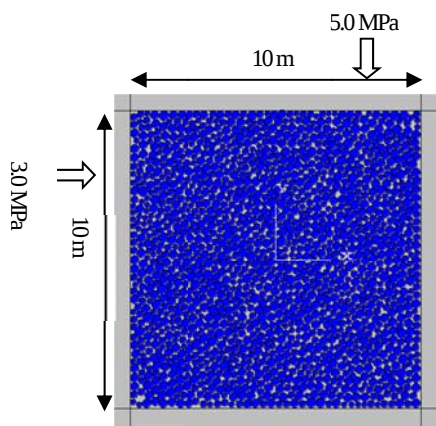


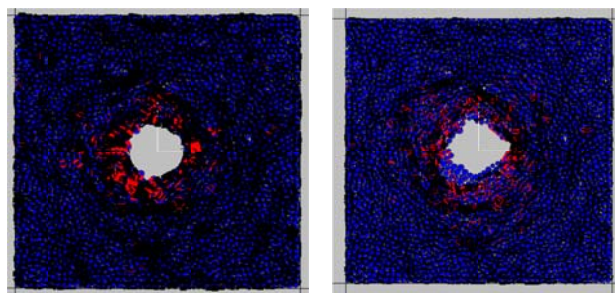
図-11 解析モデル

表-4 解析パラメータ

項 目	記号	単位	設定値
粒子半径	R	m	0.15~0.25
粒子密度	γ	kg/m ³	2700.0
粒子間弾性係数	E_c	GPa	15.0
粒子間バネ定数比	k_t/k_s	—	15.0
粒子間摩擦係数	μ	—	0.5
引張強度	σ_n	MPa	20.0
せん断強度	σ_s	MPa	30.0

(4) 解析結果

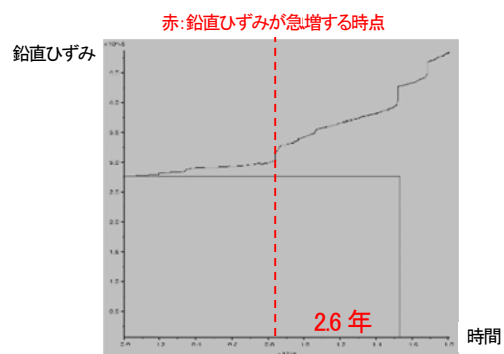
図-12に掘削終了後および掘削終了から5.7年後の結合要素力分布を示す。5.7年後は、掘削終了後と比較して空洞近傍岩盤内の圧縮力が低下し、一方引張力が岩盤深部に進展している。これは、掘削終了後、時間の経過に伴って、空洞近傍における粒子間の結合が解消し（亀裂発生）、応力再配分によって余剰応力が岩盤深部に伝播したと解釈できる。



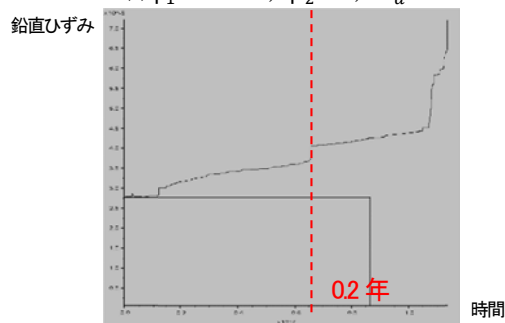
(1) 掘削後 (2) 掘削終了後5.7年

図-12 結合要素力分布 赤：引張，黒：圧縮

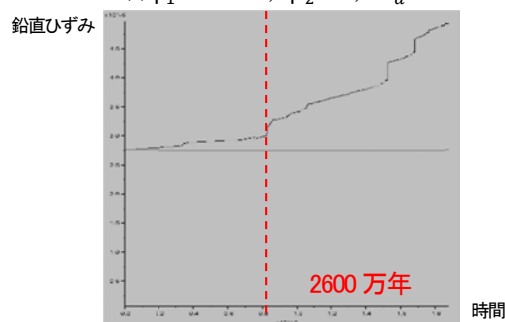
($\beta_1=50 \times 10^{-10}$, $\beta_2=20$, $\sigma_a=0.1$ の解析結果)



(1) $\beta_1=50 \times 10^{-10}$, $\beta_2=20$, $\sigma_a=0.1$



(2) $\beta_1=50 \times 10^{-10}$, $\beta_2=60$, $\sigma_a=0.1$



(3) $\beta_1=50 \times 10^{-17}$, $\beta_2=20$, $\sigma_a=0.1$

図-13 パラメータスタディ解析結果

次に、応力腐食パラメータ (β_1 , β_2) をパラメータとして実施したパラメータスタディにおける鉛直ひずみの経時変化を図-13に示す。解析結果から得られた知見は以下のとおりである。

- ・掘削終了後、時間の経過に伴い鉛直ひずみが増大する(岩盤クリープ)。
 - ・ β_1 を小さくする、あるいは β_2 を大きくすると、ひずみ速度が大きくなる。
 - ・ β_2 が大きいほど、ひずみ速度が急増する傾向がある。
- 解析結果より、岩盤クリープ等の長期挙動解析へのPSCモデルの適用性を確認した。

4. 結論

本研究では、水封式岩盤貯槽の応力-浸透流連成掘削解析を実施し、実測挙動との比較により、亀裂性岩盤における空洞周辺岩盤の掘削に伴う透水性変化、地下水・変形挙動に対して、粒状体個別要素法を適用できることを示した。また、応力腐食モデルの考え方を粒状体個別要素法に導入してクリープ解析を実施し、応力腐食パラメータ (β_1 , β_2) を変化させることで岩盤変形の時間依存性を表現できることを示した。今後、試験等に基づく応力腐食パラメータの設定方法の検討や実岩盤への適用性検討が課題として残っているが、粒状体個別要素法による岩盤のクリープ解析への適用可能性が見いだせたものと考えられる。

参考文献

- 1) 森岡宏之, 南 将行, 前島俊雄, 田坂嘉章, Ming CAI, 青木謙治: AE計測による大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動評価手法に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 791/VI-67, pp. 81-96, 2005.
- 2) 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.
- 3) 吉田秀典, 加藤和之, 久米田正邦: 掘削影響領域を考慮した岩盤のクリープ解析手法の開発, 応用力学論文集, Vol.7, pp.607-616, 2004.
- 4) Cundall P.A., and O.D.L. Strack: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Géotechnique*, 29, pp.47-65, 1979.
- 5) Aoki, K., Mito, Y., Matsuoka, T., Kondoh D. "Design of gas storage rock cavern by the hydro-mechanical coupled discrete model" *Numerical modelling in Micromechanics via Particle Method*, pp.289-300, 2004
- 6) Aoki, K., Mito, Y., Chang, C. S., Tasaka, Y. and Maejima T. (2007) "Hydromechanical coupled discrete modelling for the assessment of airtightness of unlined large rock cavern" 11th International Congress on Rock Mechanics, Lisbon, Portugal, 2007.
- 7) 田坂嘉章, 宇野晴彦, 大森剛志, 工藤奎吾: 節理の破壊を考慮したひずみ軟化解析手法と大規模地下空洞掘削への適用, 土木学会論文集No.652/III-51,73-90,2000.
- 8) 前島俊雄, 山本浩志, 宇野晴彦, 池谷貞右, 青木謙治: 3次元不均質モデルによるLPG岩盤著層掘削時の地下水挙動, 第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演集,202-207,2009.
- 9) 小山俊博, 石橋勝彦, 金子岳夫, 南将行, 小林順二, 斎藤敏明, 菊池宏吉: 大規模地下発電所空洞の時間依存性変形挙動に関する研究, 土木学会論文集F, Vol.63, No.3, pp. 309-322, 2007.

HYDRO-MECHANICAL COUPLING AND CREEP ANALYSES OF ROCK CAVERNS BY BONDED PARTICLE MODEL

Yoshiaki TASAKA, Hiroki KUROSE, Takatoshi KIKUI, Ataru HONDA, Kenji AOKI

For the geological disposal of radioactive waste, the evaluations on rock permeability and hydraulic behaviors accompanied with cavern excavation and re-submersion are very important. Also, the evaluation on time-dependent behaviors, such as creep at the cavern vicinity, is essential to ensure the long-term stability of the cavern. Therefore, this study attempted to utilize the bonded particle model to develop a hydro-mechanical coupling analysis method to represent the measured permeability alteration and monitored hydraulic/ rock mechanical behaviors of an excavated cavern. Also, the stress corrosion model is established to achieve a time-dependent creep behaviors analysis of the excavated cavern.