

瑞浪超深地層研究所における再冠水試験計画 —支保工や埋戻し材の地質環境への影響評価を 目的とした力学・水理連成挙動の予察解析—

高山 裕介^{1*}・佐藤 稔紀¹・尾上 博則¹・岩月 輝希¹・三枝 博光¹・大貫 賢二¹

¹日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 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)

*E-mail: takayama.yusuke@jaea.go.jp

独立行政法人日本原子力研究開発機構 東濃地科学センターでは、結晶質岩を主な対象とした深地層の科学的研究を実施している。その一環として、瑞浪超深地層研究所の深度500m研究アクセス北坑道において、坑道の冠水に伴う力学・水理・化学特性の長期変化を複合的に把握する技術の開発を目的として、坑道規模の複合試験（再冠水試験）を実施している。本研究では、坑道冠水に先立ち、坑道内で使用する支保工や埋戻し材（コンクリートや粘土（ベントナイト）材料）が周辺岩盤へ与える影響を予察的に推定するための、力学・水理連成現象の解析を実施した。本解析結果は、連成現象を把握するための観測機器の配置や、坑道内で使用する坑道の埋戻し材料の仕様等を決定する際の参考にした。

Key Words : geological disposal, geoscientific research, groundwater recovery experiment, backfill test, soil/water/air coupled simulation, Mizunami Underground Research Laboratory

1. はじめに

独立行政法人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研究開発の基盤となる深地層の科学的研究の一環として、岐阜県瑞浪市において結晶質岩を主な対象とした超深地層研究所計画を実施している¹⁾。瑞浪超深地層研究所は、図-1に示すように、主立坑（内径6.5m）及び換気立坑（内径4.5m）と深度100m毎に両立坑を連絡する水平坑道（予備ステージ）、深度300m研究アクセス坑道、深度500m研究アクセス北・南坑道などから構成されている。深度500m研究アクセス北坑道では、坑道の冠水に伴う力学・水理・化学特性の長期変化を複合的に把握する技術の開発を目的として、本坑道の先端約40mの冠水坑道（容積：約914m³、標高：約-300m）において、坑道規模の複合試験（以下、再冠水試験）実施の準備を進めている。また、その一環として、坑道内に設置されたボーリングピットを利用して、埋戻しに関わる予察試験（以下、ピット埋戻し試験）を計画している。ピット埋戻し試験では、ピットを人工材料（以下、埋戻し材）で埋戻し、埋戻し材が坑道周辺岩盤の地質環境特性へ与える

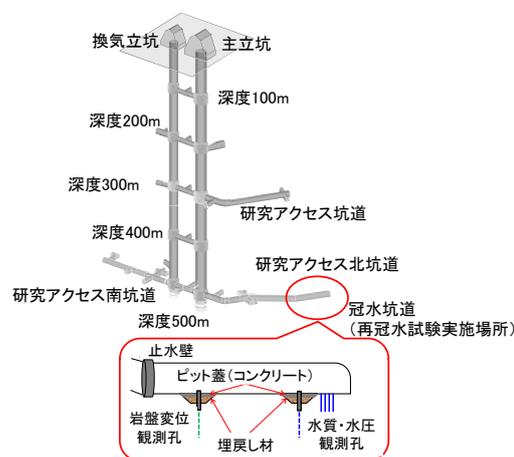


図-1 瑞浪超深地層研究所及び再冠水試験実施場所(冠水坑道)

影響を評価する。本研究では、ピット埋戻し試験に先立ち、埋戻し材が周辺岩盤へ与える影響を予察的に推定することを目的とした、力学・水理連成解析を実施した。固相/液相/気相連成有限要素解析コード DACSAR-MP²⁾を用い、周辺岩盤から埋戻し材へ地下水が流入する時の周辺岩盤と埋戻し材による力学・水理連成挙動を推定した。

2. 再冠水試験計画

(1) 再冠水試験の概要

再冠水試験では、図-1 に示した冠水坑道において、止水壁を設置して地下水による坑道の冠水と排水を繰り返し行う計画であり、岩盤変位観測や水質・水圧観測等により、坑道の冠水に伴う、以下の変化を説明しえる基礎データを取得することとしている。

- ・坑道周辺の水理状態の変化
- ・坑道周辺の応力状態の変化
- ・坑道周辺の化学状態（酸化還元状態など）の変化

これらの観測を通して、坑道閉鎖時の環境回復に関わる具体的な観測技術、解析技術等を構築する。再冠水試験は大きく分けて、以下の手順で行う予定であり、現在は④が終了した段階である。

- ①坑道掘削前の水圧・水質状態の確認
- ②冠水坑道の掘削
- ③冠水坑道でのボーリング掘削及び観測装置の設置
- ④ボーリングピットの埋戻し及び観測装置の設置
- ⑤止水壁の設置
- ⑥地下水による冠水、力学・水理・化学特性の観測
- ⑦地下水の一部排水と再冠水
- ⑧地下水の排水と埋戻し材などの回収・評価



図-2 岩盤変位観測用のボーリングピット

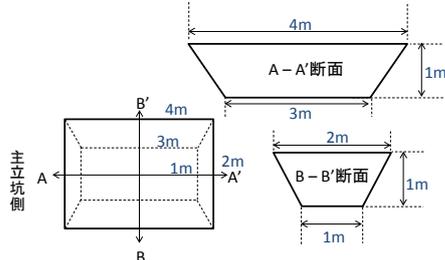


図-3 ボーリングピットの寸法



図-4 埋戻しの概念図

(2) ピット埋戻し試験の概要

ピット埋戻し試験では、冠水坑道内から下向きに掘削される水圧・水質観測用と、岩盤変位観測用のボーリングピット（2か所；図-1）を埋戻し、使用した埋戻し材が周辺岩盤へ与える影響を評価する。ボーリングピットの状況と埋戻しの概念図を図-2～図-4に示す。埋戻し材の候補は、粘土（ベントナイト、例えばクニゲルGX）とそれに砂や碎石を混合した材料、コンクリートなどである。この埋戻し材による化学的影響（水質や割れ目表面の鉱物、微生物組成の変化など）を把握するために、ピット周辺のボーリング孔では、ピットに連結すると推定される割れ目を考慮して水質観測区間を設け、冠水前～冠水後の水質観測を行う。また、埋戻し材が周辺岩盤の力学・水理挙動に与える影響を評価するために、埋戻し材内にも観測機器（水圧計、土圧計、土壌水分計）を設置し、埋戻し材内の状態を把握することとした。その際の観測機器の配置や、埋戻し材の仕様は、本研究における予察解析結果と、現場での施工性等を考慮して決定した。

3. 予察解析

(1) 解析条件

埋戻し材は、ベントナイトとそれに砂や碎石を混合した材料が候補であるが、これらは膨潤圧や透水性に違いはあるものの、ベントナイトを混合する場合には、冠水時の膨潤性などの挙動は定性的には同じと考えられる。そこで、今回の予察解析ではパラメータ設定の容易さや過去の実験データの豊富さを考慮し、埋戻し材はベントナイト単体とし、クニゲルGXを想定した。

実際の試験では、埋戻し材を設置し、その後止水壁を設置して坑道の冠水を開始するが、坑道の冠水を開始するまでも埋戻し材は周辺岩盤からの地下水の浸入にさらされる。そこで今回の予察解析では、この周辺岩盤からの地下水の浸入に伴う埋戻し材の状態変化の理解を目的とし、坑道の冠水は考慮せず、周辺岩盤からの地下水の浸透のみを考慮した。また、本解析は予察を目的として実施するため、簡単な条件を設定して解析を行う。解析に用いるDACSAR-MPの支配方程式は以下のとおりである。

- ・釣合式

$$\text{div} \dot{\boldsymbol{\sigma}}^T = \mathbf{0}, \quad \dot{\boldsymbol{\sigma}} = \dot{\boldsymbol{\sigma}}^T \quad (1)$$

- ・有効応力式

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}' = \dot{\boldsymbol{\sigma}}^N + \dot{p}_s \mathbf{1}, \quad \dot{\boldsymbol{\sigma}}^N = \dot{\boldsymbol{\sigma}} - \dot{p}_a \mathbf{1}, \quad p_s = sS_e \quad (2)$$

・構成モデル

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}' = \mathbf{D} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \mathbf{C} \dot{S}_e \quad (3)$$

・ひずみ-変位関係式

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = -\frac{1}{2}(\nabla \dot{\mathbf{u}} + \nabla \dot{\mathbf{u}}^T) \quad (4)$$

・固相-液相の連続条件式

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_v = \text{div} \tilde{\mathbf{v}} - n \dot{S}_r \quad (5)$$

・固相-気相の連続条件式

$$(1 - S_r) \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_v + n \dot{S}_r - n(1 - S_r) \frac{\dot{p}_a}{K_a} - \text{div} \tilde{\mathbf{v}}_a = 0 \quad (6)$$

・液相のダルシー則

$$\tilde{\mathbf{v}} = -\mathbf{K}_w \cdot \text{grad} h \quad (7)$$

・気相のダルシー則

$$\tilde{\mathbf{v}}_a = -\mathbf{K}_a \cdot \text{grad} h_a \quad (8)$$

・飽和度-サクシオン関係

$$\dot{S}_r = \frac{dS_r}{ds} \dot{s} = \frac{dS_r}{ds} (\dot{p}_a - \dot{p}_w) \quad (9)$$

ここで、 $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$:全応力増分テンソル、 $\dot{\boldsymbol{\sigma}}'$:有効応力増分テンソル、 $\dot{\boldsymbol{\sigma}}^N$:ネット応力増分テンソル、 \dot{p}_s :サクシオン応力増分、 $\mathbf{1}$:クロネッカーデルタ、 \dot{p}_a :空気圧増分、 p_s :サクシオン応力、 s :サクシオン、 S_e :有効飽和度、 \mathbf{D} :剛性テンソル、 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$:ひずみ増分テンソル、 \mathbf{C} :飽和度変化に関する剛性テンソル、 \dot{S}_e :有効飽和度増分、 $\dot{\mathbf{u}}$:変位増分、 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_v$:体積ひずみ増分、 n :間隙率、 \dot{S}_r :飽和度増分、 S_r :飽和度、 $\tilde{\mathbf{v}}$:間隙水流速ベクトル、 K_a :圧縮率、 $\tilde{\mathbf{v}}_a$:間隙空気流速ベクトル、 \mathbf{K}_w :透水係数テンソル、 h :全水頭、 \mathbf{K}_a :透気係数テンソル、 \dot{s} :サクシオン増分、 \dot{p}_w :間隙水圧増分である。これらを空間・時間離散化した後、初期条件及び境界条件を設定することにより、変位増分・全水頭・空気圧の解を得る。

構成モデルについては、コンクリートと岩盤は等方線形弾性体、埋戻し材にはベントナイトの不飽和弾塑性構成モデル³⁾を用いた。不飽和特性について、水分特性曲線には河井らによる乾燥・湿潤に伴うヒステリシス表現が可能なモデル⁴⁾、不飽和透水係数にはMualemの不飽和透水モデル⁵⁾、不飽和透気係数にはVan Genuchtenの不飽和透気モデル⁶⁾を用いた。解析に用いたメッシュ図、境界条件を図-5に示す。変位境界については、下端・上端はy方向固定、側面はx方向固定とした。排水・排気条件については、上端は排水(0MPa)・排気(大気圧)境界、下端については、排水(水圧観

測結果に基づき1MPa)・非排気境界、側面は排水(0~1MPa)・非排気境界とした。

解析に用いた材料パラメータを表-1に示す。深度500mにおける岩盤は花崗岩であり、そのヤング率とポアソン比は一軸繰返し試験から得られた値⁷⁾、透水係数については冠水坑道周辺で実施された単孔式水理試験結果に基づき設定した。コンクリートのヤング率・ポアソン比は土木学会コンクリート標準示方書(設計編)⁸⁾を参考に決定し、透水係数は、既往の研究⁹⁾における吹き付けコンクリートの値を用いた。

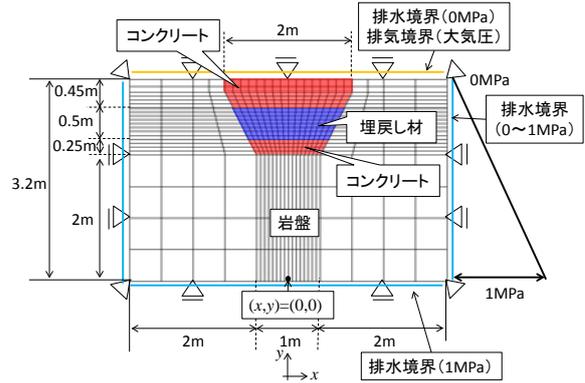


図-5 メッシュ図・境界条件

表-1 解析に用いた材料パラメータ

岩盤	ヤング率(GPa), E	55.6
	ポアソン比, ν'	0.27
	透水係数, k_w (m/sec)	2.1×10^{-10}
コンクリート	ヤング率(GPa), E	22
	ポアソン比, ν'	0.2
	透水係数, k_w (m/sec)	1×10^{-12}
埋戻し材	圧縮指数, λ	0.21
	乾燥時膨潤指数, κ_0	0.01
	ベントナイト構成モデルパラメータ, l	1
	モンモリロナイト含有率(%)	41
	ポアソン比, ν'	0.45
	不飽和時の剛性増加パラメータ, a	20
	不飽和時の剛性増加パラメータ, n	1
	モーレム定数, m	0.66
	透水係数, k_w (m/sec)	7×10^{-11}
	透気係数, k_a (m/sec)	7×10^{-9}
	ECモデルパラメータ, n_E	1.8
	限界応力比, M	1.0
	水分特性曲線(吸水)パラメータ, A_w	-11
水分特性曲線(吸水)パラメータ, B_w	1.6	
水分特性曲線(脱水)パラメータ, A_D	-37	
水分特性曲線(脱水)パラメータ, B_D	4.2	
残留飽和度, S_{r0}	0.1	

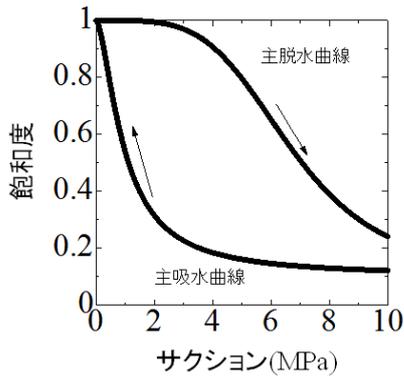


図-6 解析に用いた埋戻し材の水分特性曲線

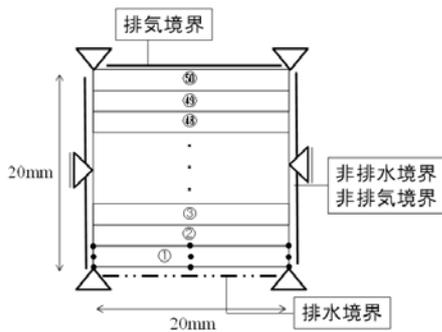


図-7 膨潤圧試験のシミュレーション概要

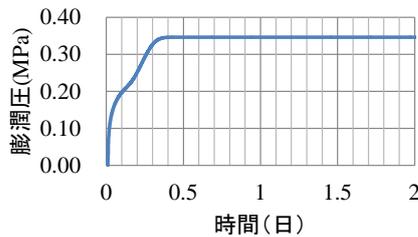


図-8 埋戻し材の膨潤圧発生シミュレーション結果

埋戻し材として想定したクニゲルGXの初期乾燥密度は 1.4 Mg/m^3 とした。圧縮指数は、等方圧密試験を実施した例が見当たらなかったため標準圧密試験結果¹⁰⁾ ($\lambda=0.391\sim 0.117$)を参考に決定した。ベントナイト材料の透水係数は、既往研究では、 $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-13} (\text{m/sec})$ 程度であるが^(例えば11)12)、今回実施した透水試験で得られた、 $7 \times 10^{-11} (\text{m/sec})$ を用いた。なお、クニゲルGXの力学特性(特に不飽和特性)については未解明な部分もあるため、本研究では、不飽和特性に関するものやその他のいくつかのパラメータは既往の研究³⁾を基に仮定した。仮定した水分特性曲線(主脱水曲線と主吸水曲線)を図-6に示す。

初期飽和度は、コンクリートと岩盤は飽和状態、埋戻し材は不飽和状態(飽和度60%を仮定)とし、初期全水頭は埋戻し材の当該飽和度での主吸水曲線付近の値(-100m)とした。なお、図-5中の $y=0$ を位置水頭0

とする。

本解析の実施に先立って、埋戻し材のパラメータの妥当性確認のために、膨潤圧試験シミュレーションを行い、生じる膨潤圧を調べた。図-7に、用いたメッシュ図・境界条件を示す。シミュレーションでは、下端から吸水し、上端に生じる鉛直全応力を膨潤圧とみなす。図-8に解析で得られた膨潤圧の時間変化を示す。時間の経過とともに膨潤圧が発生しており、既往の研究¹³⁾で得られている値(約0.3MPa)と同等の膨潤圧が再現できたことを確認した。

(2) 解析結果

図-9に飽和度分布の時間変化を示す。時間の経過とともに埋戻し材内の飽和度が外側から上昇しているのが確認できる。図-10に示す埋戻し材要素における飽和度の時間変化を図-11に示す。図-11aをみると、水平方向に並んだ要素は、外側から順に飽和度が上昇している。また、内部に封入された空気の影響により、完全には飽和せずに飽和度の上昇が止まっている。図-11bをみると、鉛直方向に並んだ要素は、ほぼ同時に飽和度が上昇している。今回設定した材料パラメータでは、コンクリートの透水係数は岩盤の透水係数よりも小さい。従って、埋戻し材への地下水の浸入は主に側方の岩盤から生じており、埋戻し材内では鉛直方向の水の流れより水平方向への流れが支配的となったと考えられる。そのため、土壌水分計などの観測機器を設置する際には、今回のような設定条件下では鉛直方向よりも水平方向に多く配置することで、効率よく埋戻し材の飽和挙動を把握できると考えられる。

図-12に、水平方向と鉛直方向の変位分布図を示す。水平方向の変位分布をみると、初期には埋戻し材への地下水の浸入による外側の要素の膨張により、中心方向へ向かう変位が発生している。ある程度時間が経過した365日後の状態をみると、埋戻し材内部の要素の膨潤によりピット外側に向かう変位が生じている。また、埋戻し材内の変位量は最大でも1cm以下と小さく、岩盤の変位は0.001mm程度とさらに小さい。鉛直方向の変位分布図をみると、水平方向に比べて埋戻し材内にほとんど変位は生じていないことが分かる。これは、図-11(b)に示したように縦に並んだ要素はほぼ同時期に飽和度が上昇するため、ほとんど変位が生じなかったと考えられる。続いて、岩盤と埋戻し材の境界部における水平全応力の時間変化を図-13に示す。埋戻し材の膨潤挙動に伴う全応力の上昇が確認できる。作用する全応力としては、図-8で示した膨潤圧試験シミュレーションで得られた膨潤圧より約0.4MPa大きな値が得られた。これは、埋戻し材内に作用する約0.4MPaの水圧

の影響と考えられる (図-14)。従って、ピット周囲の岩盤には、室内試験で得られる膨潤圧に、ピット内の水圧を加えた全応力が作用するものと推定される。しかしながら、前述のとおり岩盤に変位はほとんど発生していないため、埋戻し材の膨潤が岩盤の力学挙動に与える影響は小さいと考えられる。

また、ピット上部のコンクリートに作用する圧力を、解析結果に基づいて推定した。図-15にピット上部のコンクリートの鉛直全応力の時間変化を示す。埋戻し材の膨潤挙動に伴う全応力の上昇が確認でき、発生する応力も図-8で示した膨潤圧よりも大きな値となっている。そのため、岩盤の場合と同様に上部のコンクリートには、埋戻し材の膨潤圧にピット内の水圧を加えた全応力が作用するものと推定される。

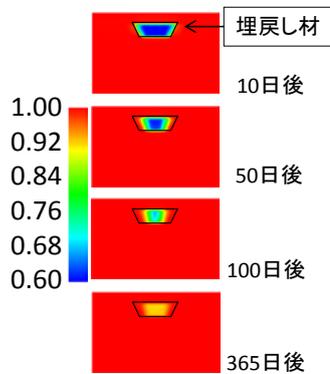


図-9 飽和度分布

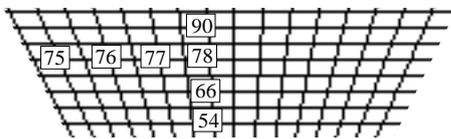


図-10 アウトプットする埋戻し材の要素番号

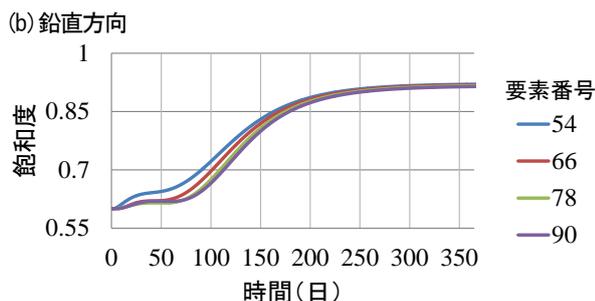
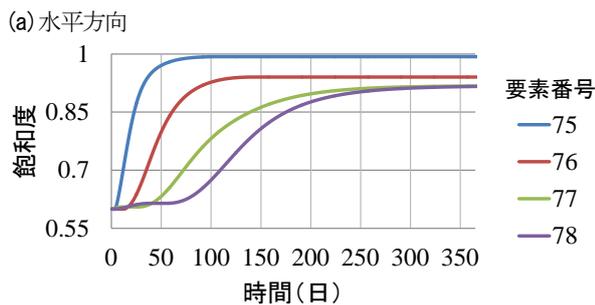


図-11 飽和度変化

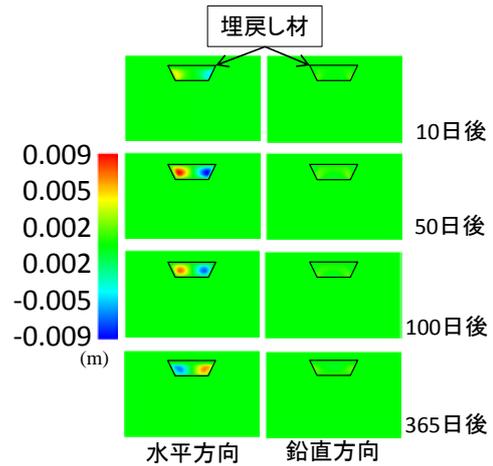


図-12 変位分布図

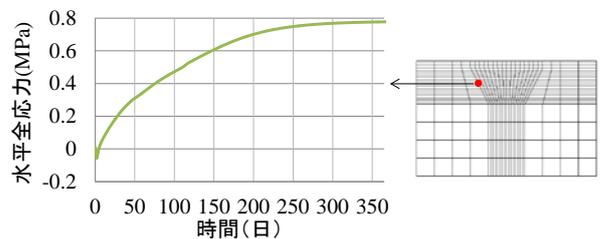


図-13 岩盤と埋戻し材の境界部分の水平全応力

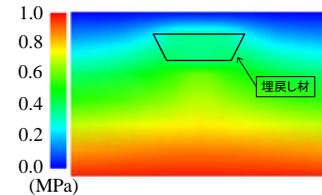


図-14 365日後の水圧分布

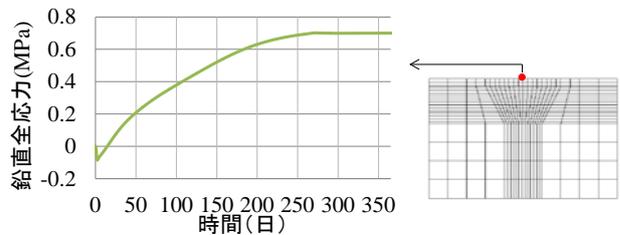


図-15 コンクリートの鉛直全応力

4. まとめ

本研究では、瑞浪超深地層研究所で実施している再冠水試験の一環として、ピット埋戻し試験における坑道周辺岩盤と埋戻し材を対象とした力学・水理連成挙動の予察解析を実施した。その結果を以下に示す。

①埋戻し材内の飽和度変化や変形は、水平方向の挙動が支配的となる。

②周辺岩盤や上部コンクリートには、室内試験で得られる膨潤圧よりも若干大きな全応力が作用する。し

かしながら、埋戻し材の膨潤が岩盤に与える力学的な影響は小さい。

本解析では埋戻し材にクニゲルGXを想定したが、埋戻し材の仕様を変更しても生じる定性的な挙動は同じと考えられる。従って本解析結果は、連成現象を把握するための観測機器の配置や、坑道内で使用する人工材料の仕様等を決定する際の参考にした。

付録

本文中の演算記号については、以下のとおりである。

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{b} = A_{ijkl} b_{kl}$$

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{d} = C_{ij} d_j$$

ここで、 \mathbf{A} は4階のテンソル、 \mathbf{b} 、 \mathbf{C} は2階のテンソル、 \mathbf{d} は1階のテンソル。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構：超深地層研究所 地層科学研究基本計画, JAEA-Review 2010-016, 2010
- 2) 金澤伸一, 豊嶋拓馬, 河井克之, 橋伸也, 飯塚敦: 土/水/空気連成有限要素法を用いた締固め土の力学挙動の解析, 土木学会論文集, No.15, pp. 291-298, 2012
- 3) 高山裕介: ベントナイトの力学モデルと放射性廃棄物地層処分における緩衝材としての品質評価. 神戸大学博士論文, 2013
- 4) 河井克之, 汪偉川, 飯塚敦: 水分特性曲線ヒステリシスの表現と不飽和度の応力変化, 応用力学論文集, No.5, pp.777-784, 2002
- 5) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, 12, No.3, pp.514-522, 1980
- 6) Van Genuchten.: A closed-form equation for predicting hydraulic of unsaturated soils, Soil Science Society American Journal, No. 44, pp. 892-898, 1980
- 7) 桑原和道, 高山裕介, 真田祐幸, 佐藤稔紀, 丹野剛男, 板本昌治, 加藤春實: 瑞浪超深地層研究所の深度500mにおける円錐孔底ひずみ法による初期応力測定結果について, 資源・素材 2014 (熊本), 2014
- 8) 平成3年度版土木学会コンクリート標準示方書 (設計編)
- 9) 木村誠, 丸石正美, 藤田朝雄, 中間茂雄, 鈴木英明: 緩衝材中の化学影響評価に向けた熱-水-応力-化学連成解析モデルの開発, JAEA-Research 2010-034, 2010
- 10) 山田淳夫, 足立有史, 千々松正和, 雨宮清, 金子岳夫, 伊藤弘志, 庭瀬一仁: ベントナイトクニゲルGXの基本特性試験 (その4) 静的力学特性に関する検討, 土木学会第64回年次学術講演会, 2009
- 11) 長谷川琢磨: ベントナイトの透水・浸水特性への海水影響, 電力中央研究所報告, 2004
- 12) 伊藤弘志: 原鉱石から調整した粒状ベントナイトの特性試験 (2) ~透水特性について~, 土木学会第59回年次学術講演会, 2004
- 13) 伊藤弘志, 庭瀬一仁, 鈴木康生, 千々松正和: ベントナイトクニゲルGXの基本特性試験 (その1) 膨潤挙動に関する検討, 土木学会第63回年次学術講演会, 2008

GROUNDWATER RECOVERY EXPERIMENT IN MIZUNAMI UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY -NUMERICAL SIMULATION OF H-M COUPLED BEHAVIOR OF ROCK AND BACKFILL MATERIALS TO EVALUATE THE INFULUENCE ON THE SURROUNDING ROCK

Yusuke TAKAYAMA, Toshinori SATO Hironori ONOE, Teruki
IWATSUKI, Hiromitsu SAEGUSA and Kenji ONUKI

In the Mizunami Underground Research Laboratory, groundwater recovery experiment is being conducted to develop the method to understand the transition of geological environment due to groundwater recovery at the -500m access and research gallery-north. As a part of this experiment, backfill test is planned using drilling pits filled with artificial materials (clay and concrete) to evaluate the influence on the surrounding rock mass due to the interaction of rock and artificial materials. In this study, numerical simulation of the backfill test has been carried out to predict the qualitative hydro-mechanical behavior.