

# 地下構造物埋め戻し後の堆積岩盤内再冠水時における地下水挙動 — 長期観測結果とその結果を用いた地下水数値シミュレーション —

高倉 望\* 伊藤 誠\* 石川 雅美\*

**要約：** 大深度地下利用の実現に際しては、長期間の地下水観測により信頼性のある情報を得て設計・施工に反映することが重要である。これまで、筆者らは堆積軟岩中の GL-50 m～82.5 m に地下構造物（以下ミニドームと呼ぶ）を構築した際のミニドーム周辺の地下水環境変化について多くの知見を得ている。

本研究では、そのミニドームを流動化処理土で埋め戻した後の地下水位回復現象（以下、この現象を『再冠水』と呼ぶ）による地下水環境変化を2年間にわたってモニタリングした。その結果、一般に難透水層と考えられる堆積軟岩としては非常に早い水位回復が観測される、など今後の地下開発を推進していくための貴重なデータが得られた。さらに、それらの地下水モニタリング結果を用いた数値シミュレーションを実施し、ミニドーム周辺の地下水挙動の評価を試みた。その結果、既存の解析コードを用いて再冠水現象をシミュレーションする場合の課題・問題点等が明らかになったので報告する。

**キーワード：** 大深度地下開発、堆積軟岩、地下水挙動観測、数値シミュレーション、再冠水現象、埋め戻し

- 目次：**
- 1.はじめに
  - 2.調査地概要
  - 3.地下水挙動観測
  - 4.ミニドーム壁面周辺の温度観測
  - 5.再冠水現象の数値シミュレーション
  - 6.数値シミュレーションの課題・問題点
  - 7.おわりに

## 1. はじめに

大深度地下利用の実現に際しては、長期間の地下水観測により信頼性のある情報を得て設計・施工に反映することが重要である。これまで、筆者らは堆積軟岩中の GL-50 m～GL-82.5 m に地下構造物（以下ミニドームと呼ぶ）を構築した際のミニドーム周辺の地下水環境変化について多くの知見を得ている。

本研究では、そのミニドームを1999年3月に流動化処理土で埋め戻した後の地下水位回復現象（以下、この現象を『再冠水』と呼ぶ）の地下水環境変化を2年間にわたってモニタリングした。さらに、それらの地下水モニタリング結果をもとに、数値シミュレーションを実施し、ミニドーム周辺の地下水挙動の評価を試みた。

## 2. 調査地概要

調査地は、神奈川県相模原市郊外を流れる相模川の河岸段丘地帯である。調査地周辺の地層構造を図1に示す。下位より上総層群の泥岩（GL-21 m 以深）であり、破碎帯（次ページ：写真1）や未固結な軽石層などの挟み層（次ページ：写真2）を含んでいる。この泥岩の上位には、粘土化した風化礫を主とする座間丘陵礫層（層厚 9 m）があり、さらにその上には、最大粒径 50 cm 以上の新鮮な巨礫を含む田名原礫層（層厚 5 m）が分布し、その上位に立川ローム層と地表近くの腐植土層（層厚 7 m）が堆積している。

再冠水前の地下水面は浅層地下水（水位 GL-7 m）と泥岩層内の深層地下水（水位 GL-82 m）にある。浅層地下水が流れる方向は、おおよそ北西～南東方向であることが既存の資料等でわかっている。

この地盤の GL-82 m までに大深度地下開発の実験目的で、図1に示した地下構造物を構築した。地下構造物は、GL-50 m までの立坑と横坑で構成された地下実験施設と、その下の GL-82 m に構築されたスパイラル状のトンネルで補強されたドーム空間であるドームで構成されている。

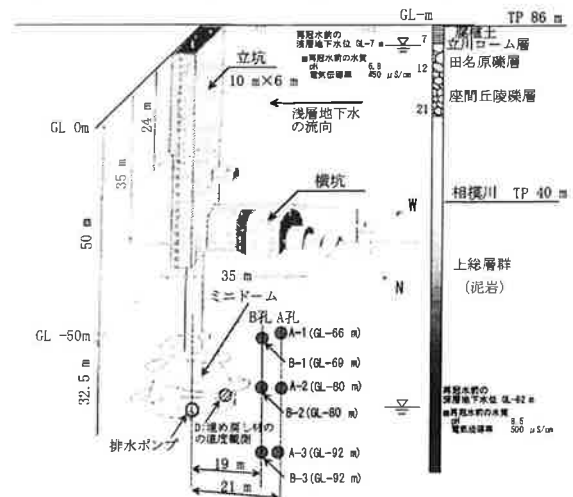


図1 調査地の地下構造物概要と地質概要

\* 生産技術本部土木技術設計部



写真1 泥岩層内の破碎帯（開口巾が広い亀裂が目立つ）



写真2 泥岩層内の挟み層

### 3. 地下水挙動観測

#### 3.1 観測概要

再冠水の観測はミニドームを構築して約3年間経過した後、ミニドームを流動化処理土で埋め戻し、GL-84 mの位置に設置した排水ポンプを停止させたのち開始した。図2に「再冠水現象」の模式図を示す。

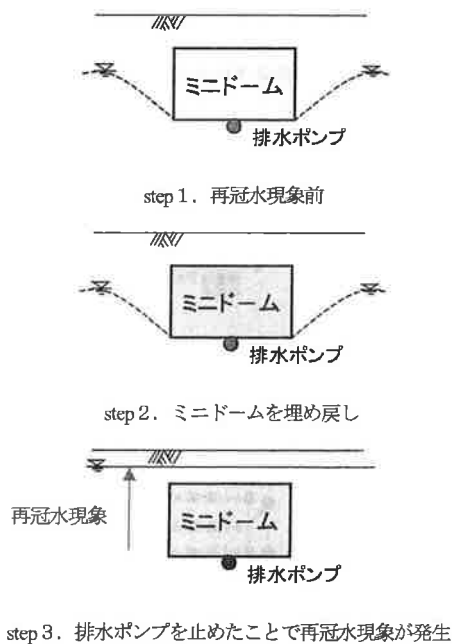


図2 再冠水現象の模式図

以下に観測の概要を示す。

- 1) 観測期間：平成10年2月27日～平成12年1月25日  
観測期間中に再冠水を2回実施した。1回目は平成10年3月19日、2回目は平成10年10月6日である
- 2) 観測位置：水質センサーの位置を図1に示す。試錐孔は、GL-50 mの横坑内から6本削孔した。その配置は、図1に示すように、ミニドーム中心から北西方向に19 m離れた位置に3本（B孔）と21 m離れた位置に3本（A孔）である。センサー位置は1孔1地点に設け、破碎帯（A-1、B-1）や未固結な軽石層（A-2、A-3、B-2、B-3）といった水みち部分とした。そのため試錐孔の構造は、センサー位置以外の地下水が混入しないようにパッカーを設けている。（図3参照）

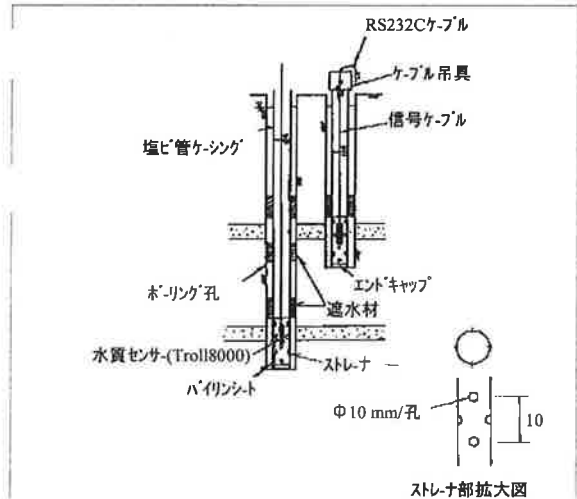


図3 水質センサーの埋設形態

- 3) 観測項目と計測方法：観測項目を表1に示す。表1に示す項目に対して、地下水モニタリングは水質センサーを用いて20分間隔で自動計測した。また、ベアラ採水器で採取した試料はpHと電気伝導率、水温ともポータブル計測器（東亜電波工業製）で測定した。

表1 観測項目一覧表

(1) 地下水モニタリング (自動計測) ・ 孔内水位 ・ 水温	(2) 採水試料による計測 ・ 水温 ・ pH ・ 電気伝導率
---	--

#### 3.3 観測結果と考察

埋め戻し材として用いた「流動化処理土」は、ロームに生石灰を混ぜた改良土にセメントと泥水を混合して所定の流動性と強度を持たせた材料である。この流動化処理土が再冠水に影響する要因として、アルカリ成分の漏出によるpHの上昇と固化熱による周辺地盤の温度上昇が考えられる。図4に試錐孔内の水位変化を経日変化で示す。1回目の再冠水前は試錐孔内に貯まっている井戸の洗浄水が破碎帯および

軽石層から抜けきれず孔内水位が定常状態に達しきっていないことが想定される。そのような状態で再冠水を開始した結果、孔内の水位が、破碎帯は2~3日、軽石層は1日で定常状態に達した。これらの挙動は難透水層と考えられる泥岩層としては非常に早い水位回復と言える。この原因は、泥岩層内の破碎帯や軽石層といった特異な水みちの影響と考える。また1回目と2回目を比べると、2回目は破碎帯で1回目とほぼ同じ時間、軽石層で1回目のほぼ半分の時間で定常状態に達した。軽石層の回復速度が速くなった原因は、再冠水前の軽石層の状態が1回目 비해2回目のほうが飽和していた影響と考える。軽石層だけ回復速度が速い原因は、軽石層と破碎帯の飽和・不飽和特性の違いによるものとする。

図5に水温の経日変化を示す。全体の傾向はゆるやかな増加傾向にあり、観測終了時点でA-2を除いた観測位置で定常状態に達した。この挙動は、埋め戻し材の固化熱の影響と考える。観測位置で観ると、破碎体の水温変化で特異な挙動を示した。その挙動とは、軽石層の水温が埋め戻し材に近いB孔で高い、という一般的な傾向を示しているのに対し、破碎帯はその傾向が逆転している。この原因は、埋め戻し材から破碎帯までの複雑な水みち経路や破碎帯内部の飽和状態の違いと考える。

図6にpHの経日変化を示す。1回目の再冠水後3ヶ月間は緩やかな減少傾向を示し、その後緩やかな増加傾向を示した。一般的に中性付近のpHは、空気と接触することにより低下する。よって、再冠水前のミニドーム周辺の地下水は、ミニドーム掘削にともなう深層地下水面の低下により、その水面より上は不飽和状態へ移行し、その過程で地下水と空気が接触したことで、初期の3ヶ月間はpHが低下した不飽和状態の地下水が流れ込み、その後、pH8.5前後の深層地下水の流れ込みに移行したと考える。

図7に電気伝導率の経日変化を示す。1回目の再冠水以後は、全体的に緩やかな減少傾向を示した。この電気伝導率が減少する要因は地下水の流れ込みによる希釈と考える。

#### 4 ミニドーム壁面周辺の温度観測

##### 4.1 観測の目的

本章では、大深度地下利用の熱に対する予測手法の検討を目的としている。観測は、ミニドームを埋め戻した際に発生した流動化処理土の固化熱を熱源として、その後、実施した再冠水現象にともなうミニドーム周辺の温度変化を長期モニタリングした。

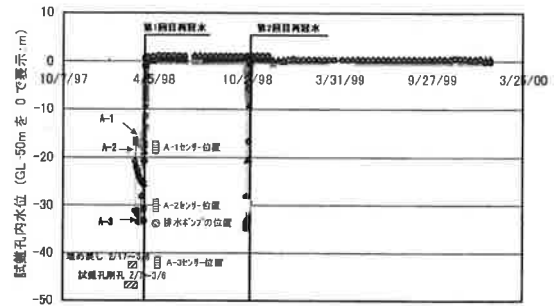


図4 試験孔内水位の経日変化

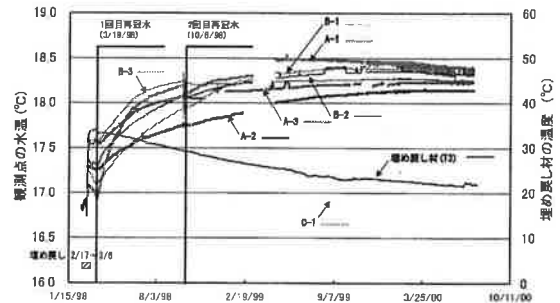


図5 水温の経日変化

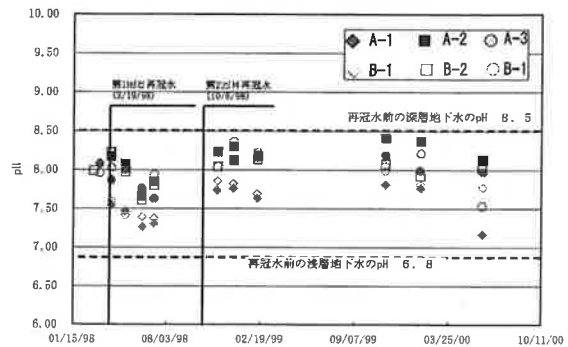


図6 pHの経日変化

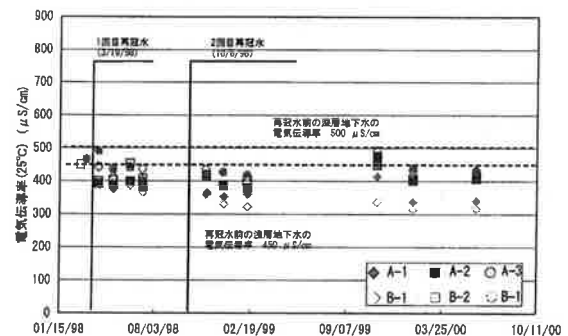


図7 電気伝導率の経日変化

#### 4.2 観測概要

熱源は埋め戻し材の固化熱である。観測範囲は埋め戻し材およびミニドーム壁面の5箇所である。以下に観測の概要を示す。

- 1) 観測期間：平成10年2月27日～平成12年1月25日
- 2) 観測位置：図8に埋め戻し材中の観測点を示す。観測点は、ミニドーム底盤から6m上部のミニドームのセンター(T1)と壁面(T3)、およびその中心(T2)である。図9にミニドーム壁面周辺の観測点を示す。図中のD1とD2は、埋め戻し前に壁面の一部を削って軽石層を露出させ、その層を掘削してセンサーを埋設し、掘削時の発生土で埋め戻して養生した。
- 3) 計測方法：埋め戻し材中およびミニドーム壁面周辺の温度計測のセンサーは熱電対(東京測器研究所製)を用いた。計測方法は熱電対ケーブルをデータロガーに接続し20分間隔で自動計測した。

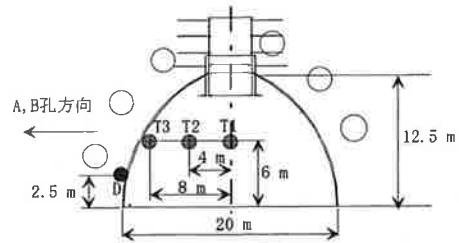


図8 埋め戻し材の温度観測位置

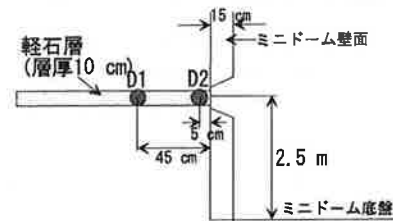


図9 ミニドーム壁面の温度観測位置 (D点拡大図)

#### 4.3 観測結果と考察

3章の地下水挙動観測で述べたように、再冠水開始直後のミニドーム近傍の観測点の水圧は、1～3日の間でGL-50 mで定常状態になることが確認されている。このような短期間の水圧変化のもと、ミニドームの埋め戻し材および壁面周辺の温度観測を行った。

図10に埋め戻し材およびミニドーム壁面周辺の温度変化を示す。埋め戻し材の温度はT1とT2で最大値(55℃)を示し、その後、緩やかな減少傾向にある。ミニドーム壁面の温度も埋め戻し材の温度変化に追従して一旦温度が上昇し、その後ゆるやかな減少傾向を示し、観測終了時点ではほぼ定常状態に達している。再冠水の影響については、1回目直後にD2で1.7℃、D1で1.5℃低下した。またT3でも微少であるが温度が低下した。但し、T1とT2の変化は無い。2回目以後は、D1とD2で若干のデータの変動が計測されている。その他の観測点への影響は観測されていない。

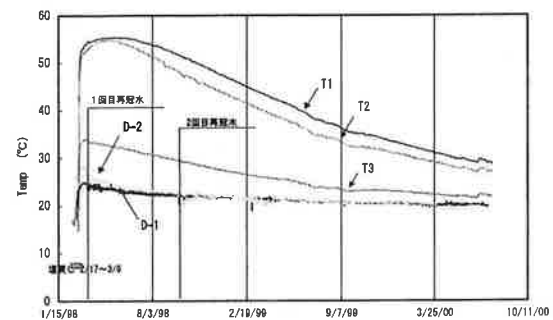


図10 埋め戻し材およびミニドーム壁面周辺の温度変化

#### 5 再冠水現象の数値シミュレーション

本章では、3章の地下水モニタリング結果を用いた浸透流解析を実施し、地下空間実験場周辺の地下水挙動の評価を試みた結果を報告する。

##### 5.1 解析方法

解析は、有限差分法でコーディングされた3次元数値シミュレータ(GEO-FLOWS V3)を使用した。これは、マニング型の地表流を多相ダルシー型非線型流れの枠組みの中に同一の形式で取り込んだものであり、地表流と地下浸透流を同時に扱うことができる。

##### 5.2 解析モデル

解析モデルは、地下空間実験場を中心として、図11のような範囲を対象とし、格子状に(x, y, z)=(37, 56, 53)の分割した。地下空間実験場周辺の各地層の間隙率・透水係数を表2に示す。ここで、泥岩中には鉛直方向に破碎帯、水平方向に挟み層が介在しており、それらは泥岩層内の地下

水の流れを支配している水みちであることが観測結果から確認されている。よって解析モデルには、この水みちを考慮して作成した(図12参照)。また、地表面には、土地利用状況や降雨(涵養量)もモデル化した。

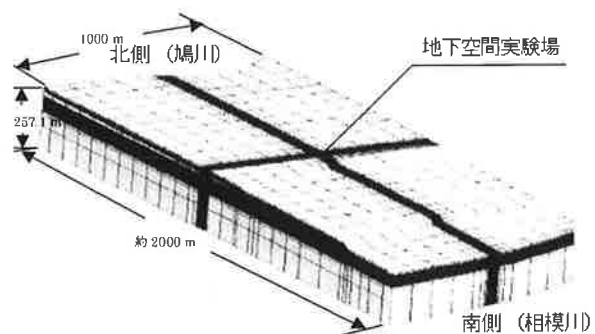


図11 解析モデル

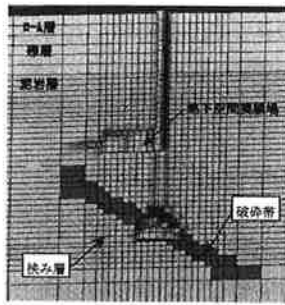


図 12 破碎帯の解析モデル

表 2 各地層の間隙率・透水係数

	深度	間隙率(%)	透水係数(cm/s)
大気層	GL+5.0m~GL+10.0m	1.00E+32	
地表面	GL 0m~GL+5.0m	100	
ローム層	GL 0m~GL-7.0m	60	1.00E-04
礫層	GL-7.0m~GL-21.0m	30	5.00E-03
泥岩層	GL-21.0m~GL-258.1m	33	5.00E-08
ばさみ層	GL-21.0m~GL-100m	40	2.00E-03~3.00E-05
断層(破碎帯)	*	30	8.00E-04

境界条件は、地表面および泥岩層面が南側から東側に傾斜していること、泥岩層の地下水挙動は大きくないことを考慮して、南側・東側の境界についてはローム層・礫層までは透水境界とし、泥岩層は不透水境界とした。北側・西側および底面はすべて不透水境界とした。掘削時の内部境界条件としては、掘削面すべてを透水境界とし、埋め戻し時の境界条件は不透水境として模擬している。

初期状態は、ミニドーム掘削前の礫層の水位をもとに静水圧状態で解析を行なった。

### 5.3 解析 STEP

掘削 STEP は図 13 のように分けられる。初期状態については、涵養量を一定 (3mm/day) にした解析を行ない、水位が定常状態になった時を初期状態とみなした。

### 5.4 解析結果と観測結果の比較

図 14 に A-1 と A-2 の解析結果と観測結果の水圧変化を比較する。なお、本章で述べる水圧とは TP 0 m を基準面とした全水頭を圧力に換算した値である。ここで、再冠水現象以前の観測データが無い場合、それ以降の観測データを用いて解析結果と比較検討した。また、観測で実施した 2 回目の再冠水現象については、解析では再現していない。

観測結果では、埋め戻しによって水圧が GL-50 m のレベルまで急激に回復していることを示している。解析結果を見ると、各観測点において、GL-50 m までの立坑掘削開始に伴い水圧が緩やかに低下し、横坑掘削で水圧がさらに低下し、その変化量も大きくなっている。GL-50 m 以深では、先行立坑掘削によって水圧が急激に下がっている。これは、先行掘削によって破碎帯を掘削した瞬間に異常湧水が発生したことにより水圧が急激に下がったためと考えられる。

以上より、埋め戻し後の再冠水現象も解析結果で再現さ

れているが、定量的には解析結果と観測データには隔たりがある。しかし、定性的にみれば今回使用した 3 次元数値シミュレータによる解析は再冠水現象を再現していると言える。

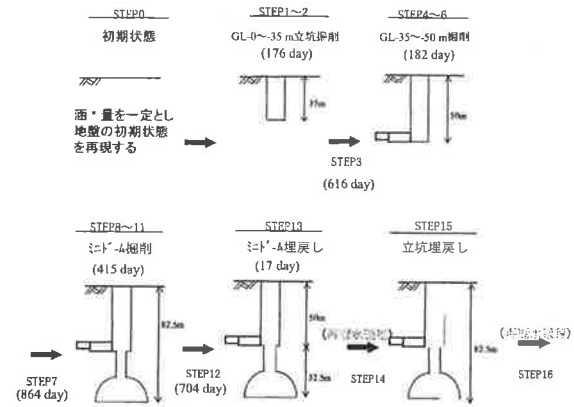


図 13 解析 STEP

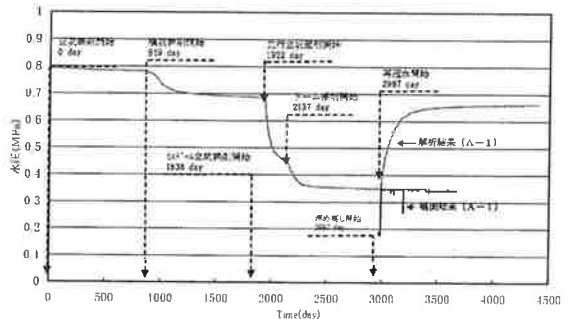
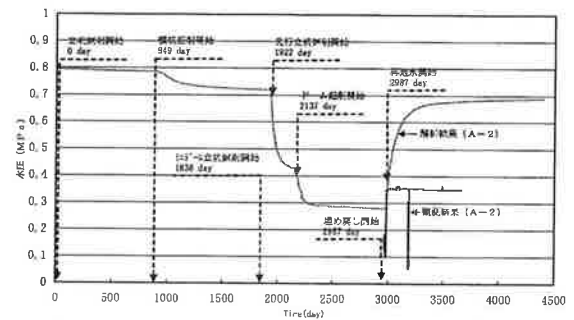


図 14 解析結果と観測結果の比較

## 6 数値シミュレーションの課題点

本解析を実施した過程で再冠水現象の解析を行なう上での課題点が明らかになった。以下にそれらを示す。

### 1) 地質構造のモデル化

地盤のモデル化に際しては、調査から得られた地質構造が対象範囲を一様に広がっていると仮定した。ここで、より精度の高い解析結果を期待するためには、調査範囲を広範囲にして解析対象範囲の地質構造を詳しく知る必要がある。また、水みちとして考えられる破碎帯・挟み層についても、その特性や分布をより正確に把握することが必要である。

## 2) 各地層の特性

破碎帯についてはモデル分割上、幅 2.5mとして取り扱っている。しかし、実際の破碎帯の幅は確認されているところで 30 cm 程度である。今回の解析では、破碎帯の透水係数や間隙率は試験から得られた値や一般的な値を使用しているが、それらの値は確認された破碎帯に対するものであるにもかかわらず、幅 2.5mの破碎帯が存在しているモデルで解析を行なっていることになっている。したがって、ブロックで幅 30cmの破碎帯が表現できるように透水係数や間隙率を修正して解析を行なう方がより正確なモデルでの解析であると考えられる。

## 3) 初期状態

今回の解析では、地下空間実験場を掘削する前からシミュレートしているが、GL-50 m 以浅の地下水位や地盤の飽和・不飽和特性については観測していない。それゆえ、精度良く解析結果を評価するためには、解析で求める初期状態を把握しておくことが大切である。

## 4) 境界条件

### ①地盤モデルの側面

今回の解析では、地下空間実験場周辺の地下水挙動に影響を与えないように、解析対象範囲を広範囲に設定し、地下空間実験場と地盤モデルの側面に大きな距離を設けた。地盤モデルの側面における境界条件は、ローム層・礫層を定圧境界とし、地下水が浸透する境界とした。泥岩層は透水係数が非常に小さいため不透水境界と仮定した。しかし、泥岩層であっても実際は地下水が流動しているので不透水境界は正確ではない。長期間にわたる解析を行なった場合、この境界条件を用いると、境界付近の泥岩層が被圧されてくることが考えられる。そのため、泥岩層に観測点を設置し、地下水の流向・流速を観測して得られた結果を基に泥岩層側面の境界条件を設定することが望ましい。

### ②地下空間実験場の掘削面

今回の解析では、ローム層・礫層では掘削前に止水工事を行なっているため掘削面は不透水境界としている。泥岩層は、定圧・開放境界としている。しかし、実際の泥岩層の掘削面は、吹付コンクリートが施工されており、そこからいくらか漏水が観測されているものの、定圧・解放境界とした解析では、流出量が実際より多めに算出される。したがって掘削の境界面では、流出量の観測から同定し解析

を行なうべきである。

埋め戻しの境界条件は掘削境界面を不透水境界としている。しかし、実際には境界面を通して埋め戻し土への地下水の浸透も考えられるので埋め戻し土の物性も重要である。

## 5) 涵養量

降雨量は気象庁の観測データを用いることができるので、実際の情報を入力することができる。しかし、集中豪雨のように涵養量が急激に増加する場合、計算が収束しない。そのため、今回の解析では年間降水量を日平均にすることで、涵養量の変化量をなくして計算を行なった。

## 6) 解析結果と観測データの比較

解析からは、①地下水位・水圧、②飽和度、③地下水流速・流向、④掘削空洞内への水の流出量が結果として得られる。しかし、今回得られている観測データは①と④のみで、①については再冠水現象以後の観測データのみ得られている。よって、本研究では再冠水現象以後の比較にとどまった。ここで、地下空間実験場掘削前からの地下水位・水圧の観測データがあれば、初期状態の検証や掘削に伴う水圧の変化を解析結果と比較でき、精度の高い解析検証ができたと思う。また、今回の観測では観測点が破碎帯および挟み層にのみ設置されており、泥岩層部には設置されていない。ここで、泥岩部にも観測点をあれば堆積軟岩の地下水挙動を解析によって検証できた。

## 7 おわりに

GL-50 m～100 m の堆積軟岩を対象として、ミニドームを埋め戻した後の再冠水現象が周辺の地下水環境に与える影響を 2 年間にわたって観測した。その結果、一般に難透水層と考えられる堆積軟岩としては非常に早い水位回復が観測される、など今後の地下開発を推進していくための貴重なデータが得られた。さらに、それらの地下水モニタリング結果をもとに数値シミュレーションを実施し、ミニドーム周辺の地下水挙動の評価を試みた。その結果、既存の解析コードを用いて再冠水現象をシミュレーションする場合の課題が明らかになった。

最後に、本研究に対し貴重なご意見を頂いた小島東京大学名誉教授、嶋田熊本大学教授、ならびに登坂東京大学助教授をはじめ関係各位の皆様に敬意を表します。

## Observation of groundwater recovering after the reclamation of underground structure

N.Takakura, M.Ito, and M.Ishikawa

This report describes the results of the project "In-situ test of recovering water after reclamation of underground structure" funded by Japan Nuclear Cycle Development. The objectives of this project is to investigate the behavior of the water pressure and the properties of water surrounding the geo-space during the excavation and the reclamation. The water behavior has been observed between GL-50 m and GL-100 m of sedimentary rock in order to simulate the test results. The FE analysis was also conducted using 3D seepage-flow procedure based on the measurement data.