

## SD59 を対象とした注水確認結果の再現性に関する解析的検討 (準三次元浸透流解析プログラムを用いた検討)

### 1. 本検討の目的

本検討は、2017年1月にサブドレン SD59 孔(以下、SD59 とする)を対象として実施した2孔注水確認(注水井: RW23、RW24)について、非定常浸透流解析を行い地下水位上昇量の再現性を確認することを目的として実施した。

### 2. 解析手法

本検討では、不圧帯水層の非定常浸透流解析を比較的簡易に実行できる準三次元浸透流解析プログラム GWAP を用いて、完全貫入井戸2孔から不圧帯水層に注水する非定常浸透問題として再現解析を実施した。なお、今回使用した準三次元浸透流解析プログラムは、1980年代初頭に岡山大学で開発され<sup>1)</sup>、2005年に大幅に改良された GWAP (公開プログラム) を用いた(詳細は【添付資料2】を参照)。

### 3. 実施位置図

SD59 を対象とした注水確認の実施位置を図-1に示す。注水確認は、SD59 直近の注水井 RW23、RW24 の2孔から、同時に注水量 10L/min で約 38 時間の連続注水を行った。また、今回の注水確認では、確認対象である SD59 及び注水井直近の地下水位観測井 Ci-5 孔(以下、Ci-5 とする)の2孔の地下水位上昇傾向を主に確認した。



図-1 注水確認実施位置図(注水井: RW23、RW24)

### 4. 注水確認結果

図-2には注水確認時の注水井2孔及び周辺観測孔5孔を含む地下水位の経時変化図を示す。また、【添付資料1】には理論潮汐の変動影響を分離した地下水位経時変化図を示した。

### 5. 解析モデル

解析モデルの領域サイズは、【添付資料2】を参考に400m四方とした。また、主要な構造物として、凍土遮水壁や建屋は不透水層として設定した(図-3参照)。

一方、地盤モデルは、図-4に示した飽和懸垂水帯(以下、懸垂水帯とする)<sup>2)</sup>、土質試験結果、及び注水開始時の地下水位データ等を参考に図-5に示す通り設定した。特に、注水対象となる不圧帯水層は注水確認実施地点付近の土質柱状図(Ci-5孔、Gi-17孔、Si-7孔)を参考に層厚17mと設定した。また、初期の地下水位は、注水確認開始時の地下水位(TP+3m ≒ OP+3.8m)と地盤高さ(GL±0m ≒ OP+10m)を参考にGL-6mと設定した。さらに、4号海水配管トレンチ下部の未凍結部については、幅5m×高さ5.4m(約27m<sup>2</sup>)の領域を飽和帯と同等の透水層として設定した(図-3、図-6参照)。

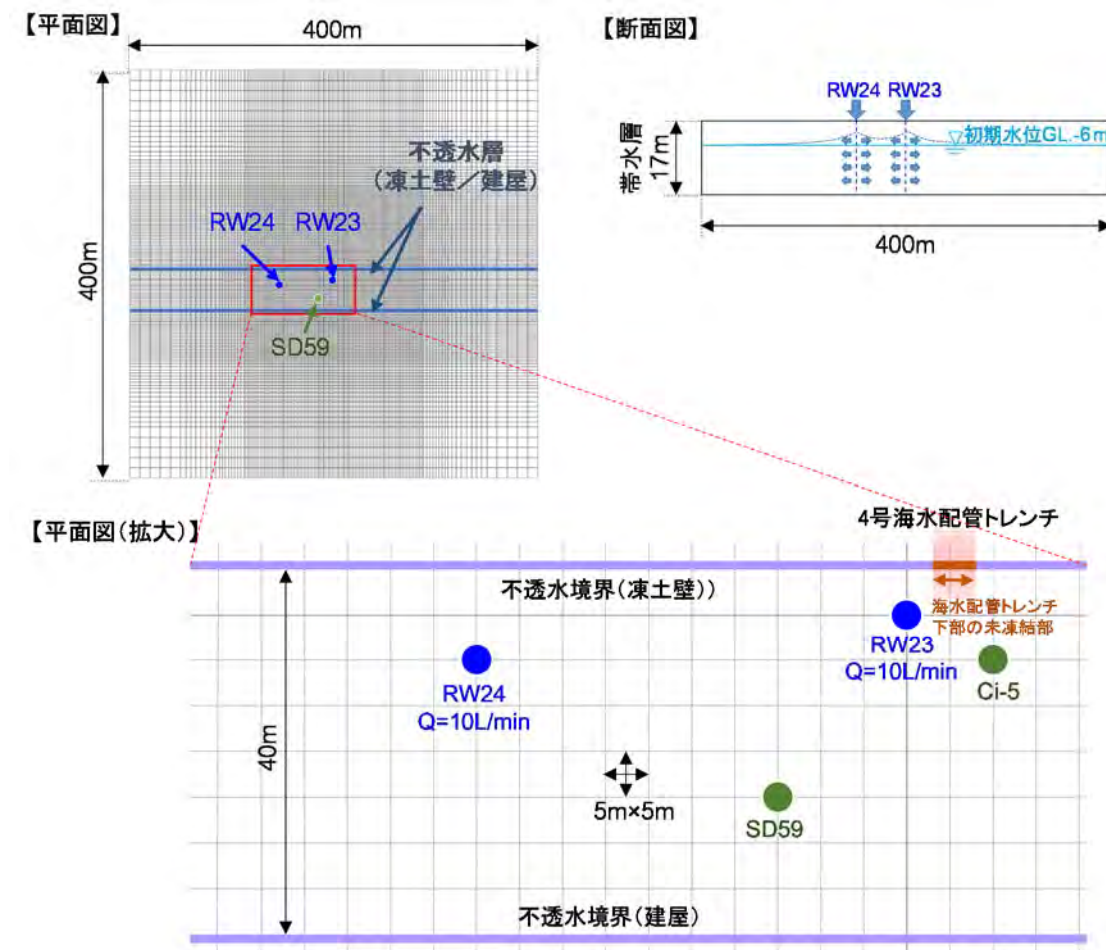


図-3 解析モデル概略図

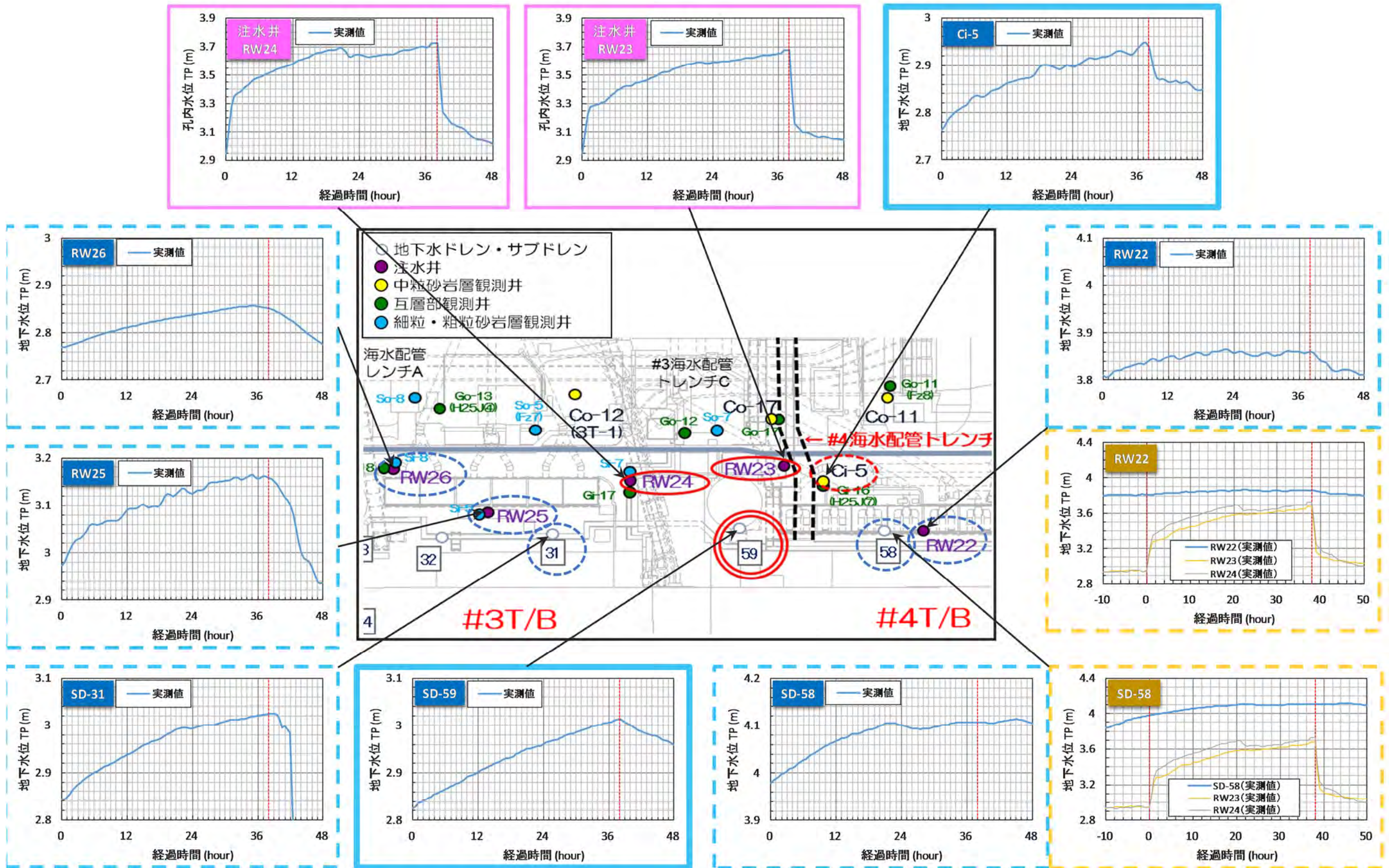


図-2 注水確認時の地下水位挙動 (周辺観測孔を含む)

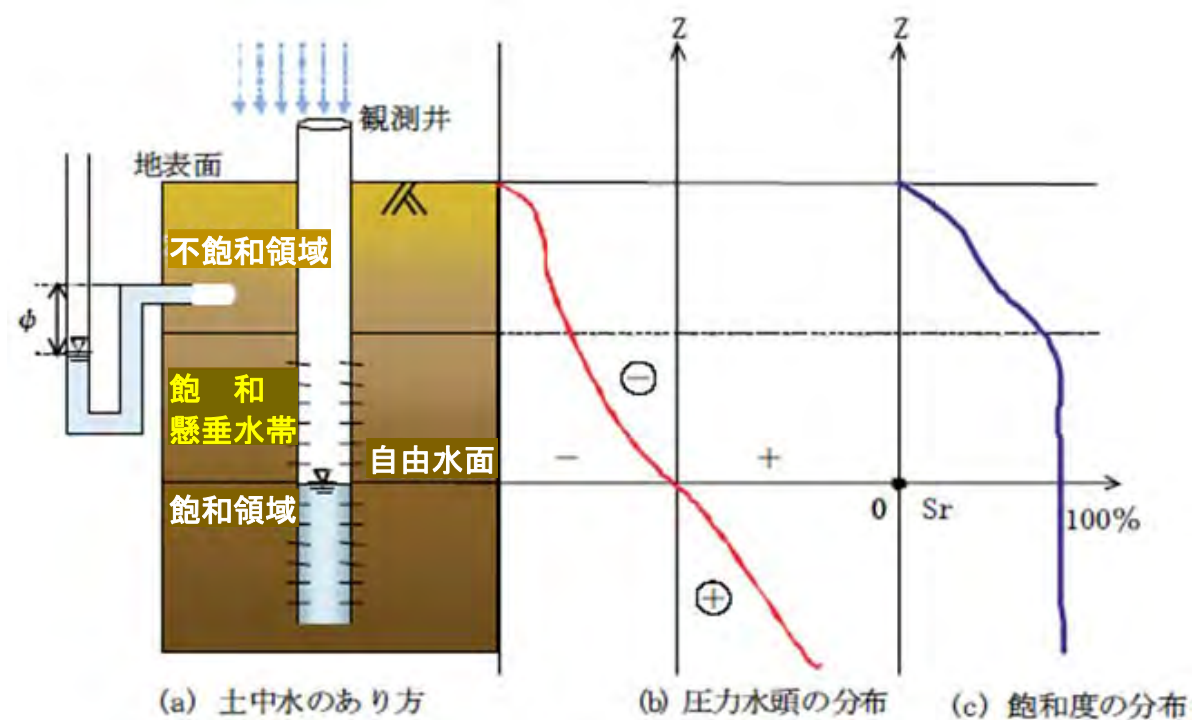


図-4 土中水のあり方 (一例) 2)に一部加筆

## 6. 解析用パラメータの設定

解析用パラメータの設定一覧を表-1に示す。

難透水層(泥質部)より上位の不圧帯水層(中粒砂岩層及び埋戻土)の透水係数と貯留係数の設定については、これまでの準三次元浸透流解析の検討(【添付資料2】参照)と同様に、透水係数は  $3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、貯留係数(有効間隙率)については 0.16 と設定した。

また、地下水面 GL-6m より上部の地盤については、今回のように注水開始直後 38 時間といった短期で、かつ数cmオーダーといった小さな地下水変動を再現するため、地下水位直上に存在する懸垂水帯を表現することとした(図-4 参照)。懸垂水帯は毛管上昇力によってほぼ飽和状態にあり、

【懸垂水帯の貯留係数】  $\ll$  【不飽和帯の貯留係数】

の関係にあるため、井戸からの注水による懸垂水帯の地下水位上昇速度は、それより上部の不飽和帯の水位上昇速度よりもかなり早くなる。

そこで、懸垂水帯の層厚を【添付資料3】<sup>3)</sup>に示す砂質土の不飽和浸透特性を参考に 15cm と設定した。また、懸垂水帯の貯留係数については、【添付資料4】に示す FS 実証試験<sup>4)</sup>で得られた貯留係数を参考に 0.02 と設定した。

なお、懸垂水帯の上位の不飽和帯の貯留係数は、表-2 に示した有効間隙率一覧表<sup>4)</sup>を参考に 0.30 と設定した。

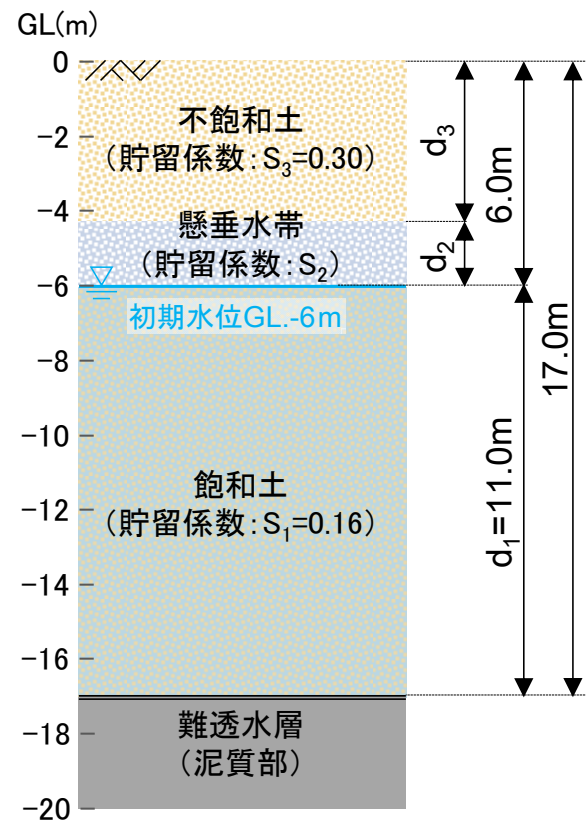


図-5 地盤モデル

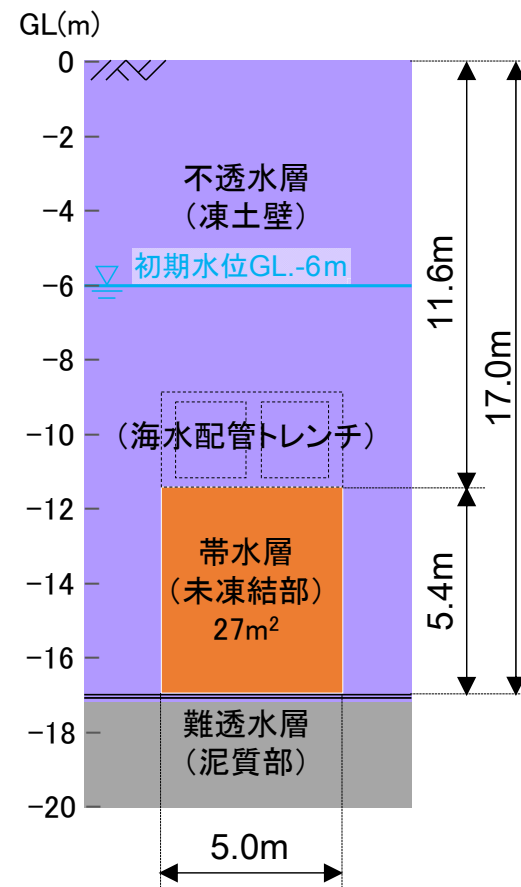


図-6 未凍結部のモデル

表-1 解析用パラメータ一覧

全層共通	飽和帯		懸垂水帯		不飽和帯	
透水係数 k (cm/s)	貯留係数 S <sub>1</sub>	層厚 d <sub>1</sub> (m)	貯留係数 S <sub>2</sub>	層厚 d <sub>2</sub> (m)	貯留係数 S <sub>3</sub>	層厚 d <sub>3</sub> (m)
$3 \times 10^{-3}$	0.16	11.0	0.02	0.15	0.30	5.85 (=6-d <sub>2</sub> )

表-2 有効間隙率一覧表<sup>4)</sup>

(a) 未固結地盤			(単位: %)		
地層	間隙率	有効間隙率	地盤	間隙率	有効間隙率
沖積礫層	35	15	洪積砂礫層	30	15~20
細砂	35	15	砂層	30~40	30
砂丘砂層	30~35	20	ローム層	50~70	20
泥粘土質層	45~50	15~20	泥層粘土層	50~70	5~10

## 7. 解析結果

実測値と解析結果とを併記した地下水位上昇量の経時変化図を図-7 に、解析値と実測値の差分を図-8 に示す。また、SD59 及び Ci-5 各々の地下水位上昇量の実測値と解析値との比較図を図-9 に示す。さらに、表-3 には水位上昇量コンター図を時系列で示す。

これらの結果より、準三次元浸透流解析の入力条件に懸垂水帯をモデル化することで、SD59 を対象とした注水井 2 孔からの注水時の SD59 と Ci-5 の地下水挙動は、比較的よく再現できることがわかった。

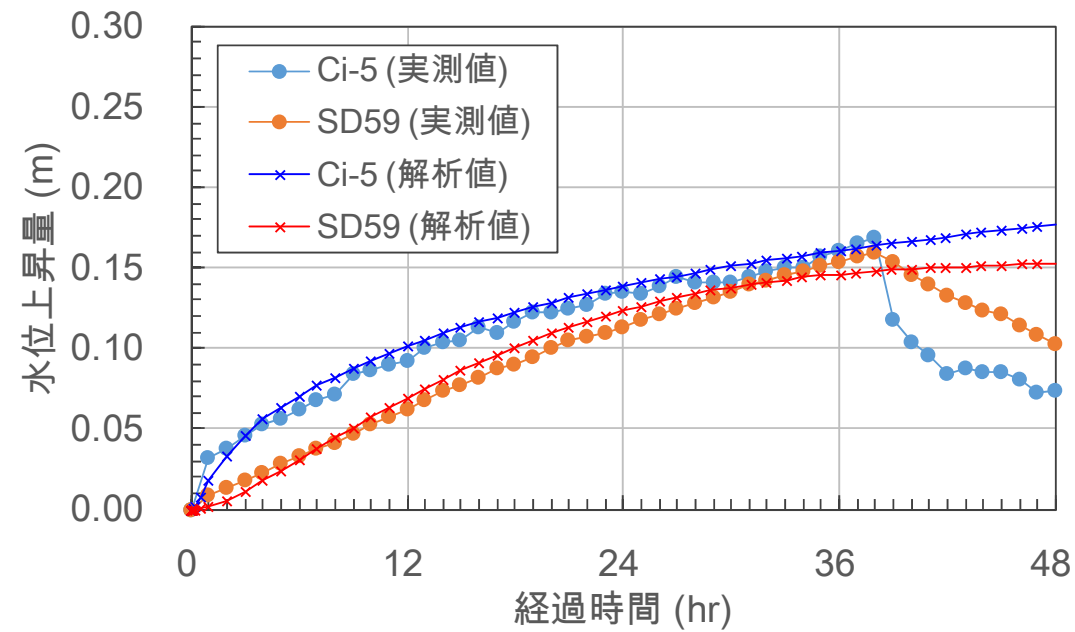


図-7 地下水位上昇量の経時変化 (【実測値】と【解析値】の比較)

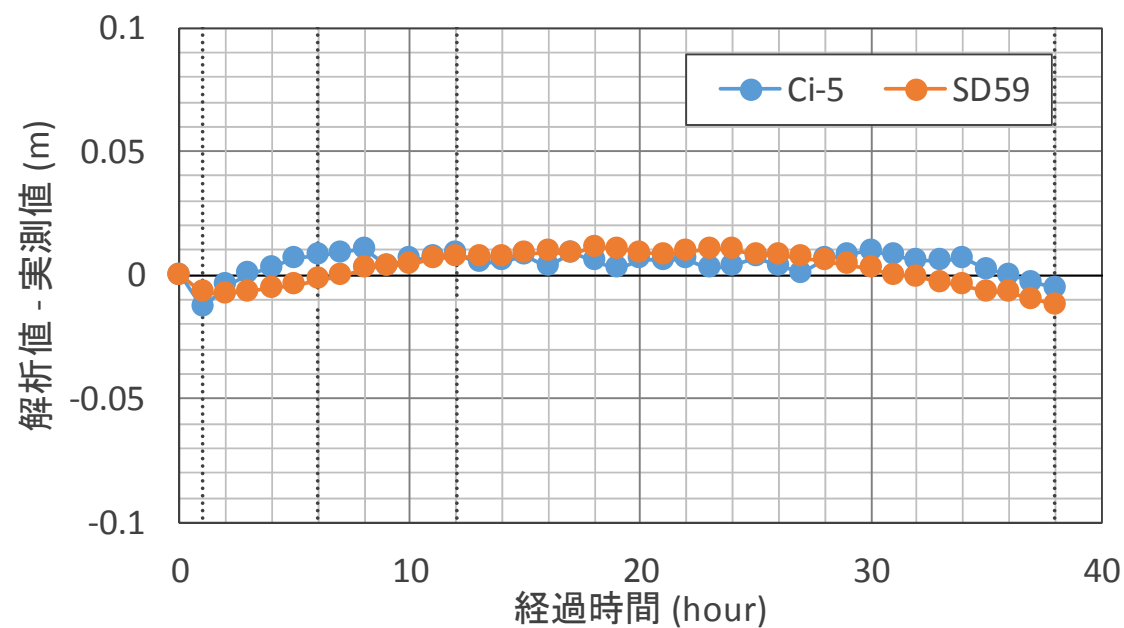


図-8 水位上昇量の【実測値】と【解析値】の差分(経時変化)

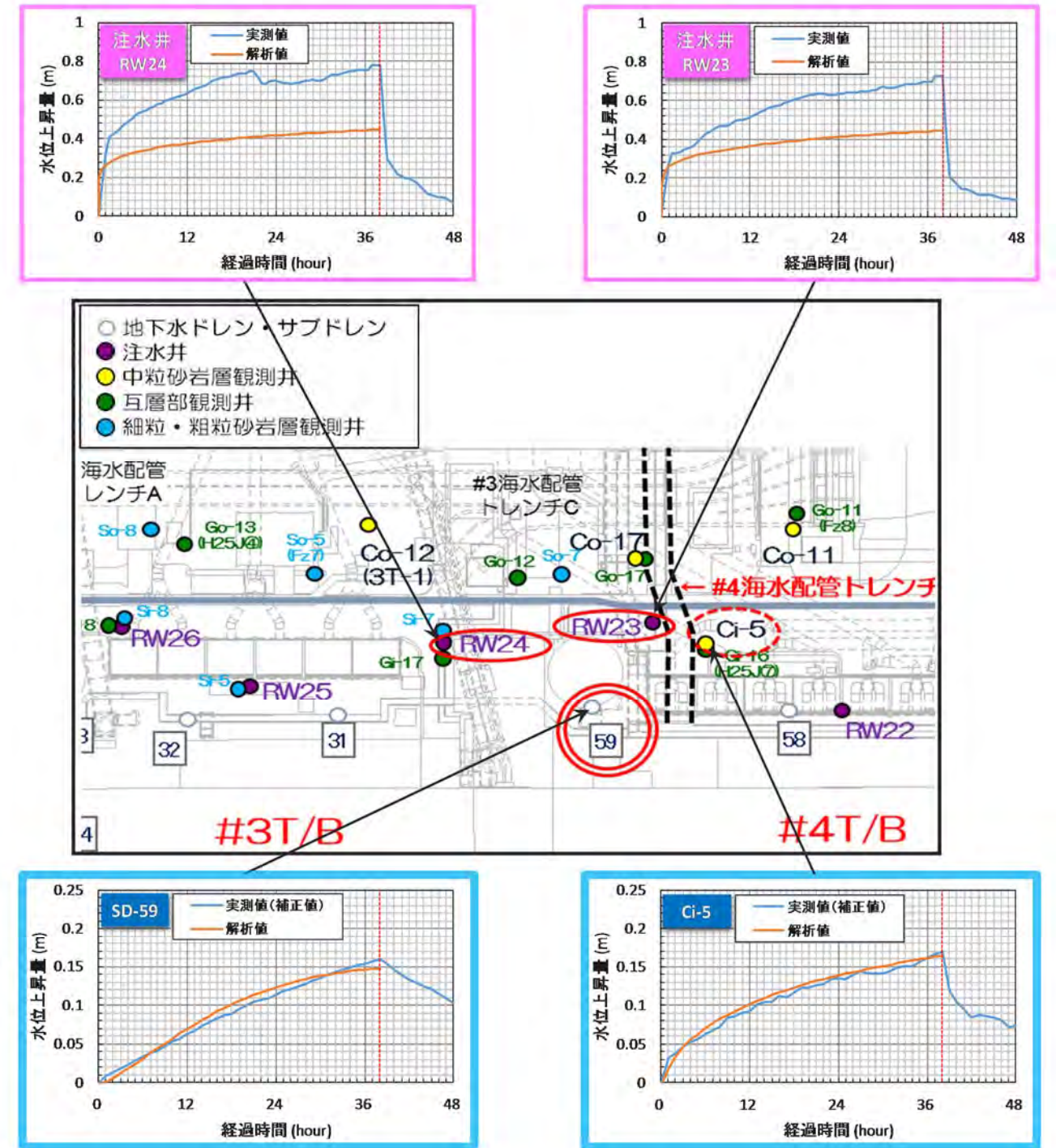
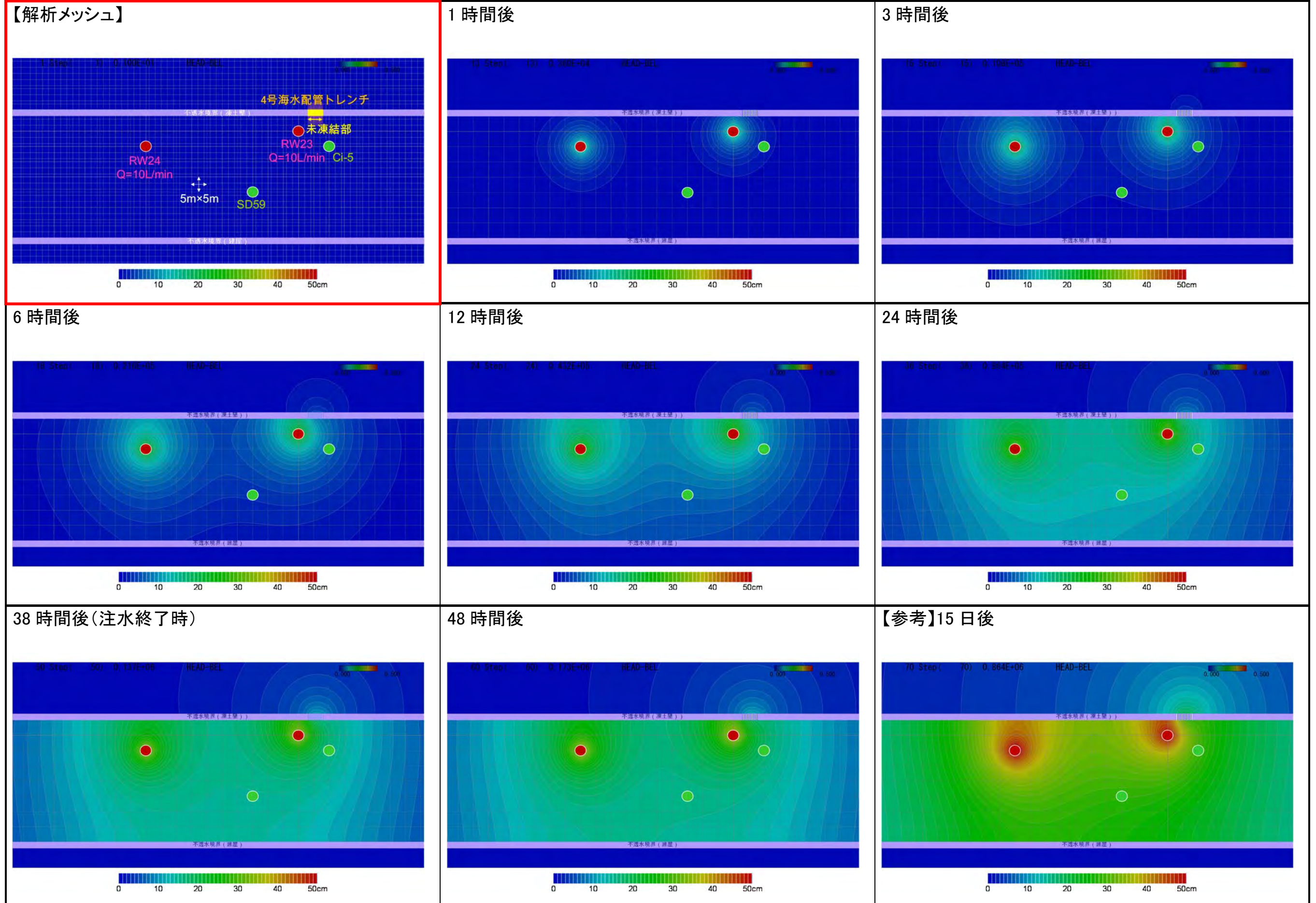


図-9 実測値と解析値の比較

### 参考文献

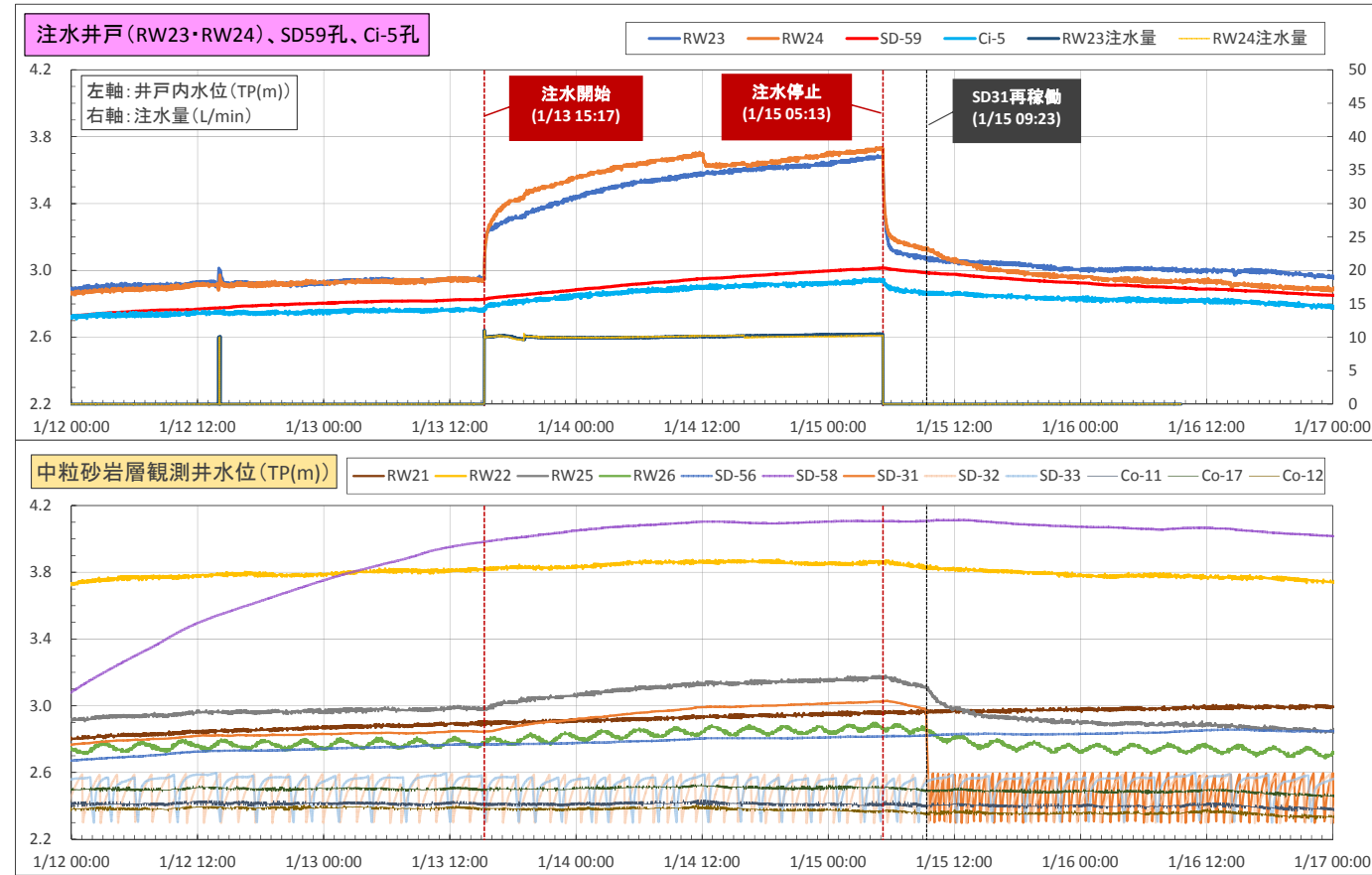
- 1) 河野 伊一郎, 西垣 誠: 有限要素法による広域地下水の準三次元解析, 岡山大学工学部土木工学教室, REPORT No.82-1, 1982.
- 2) 地盤工学会編: 地下水を知る, p.12, 2008.
- 3) 西垣 誠, 竹下 祐二: 室内及び原位置における不飽和透水特性の試験及び調査法に関する研究, 岡山大学土木工学科, REPORT No.30-95, pp.30-39, 1993.
- 4) 日本地下水学会編: 地下水シミュレーション, p.87, 2010.

表-3 水位上昇量コンターの経時変化

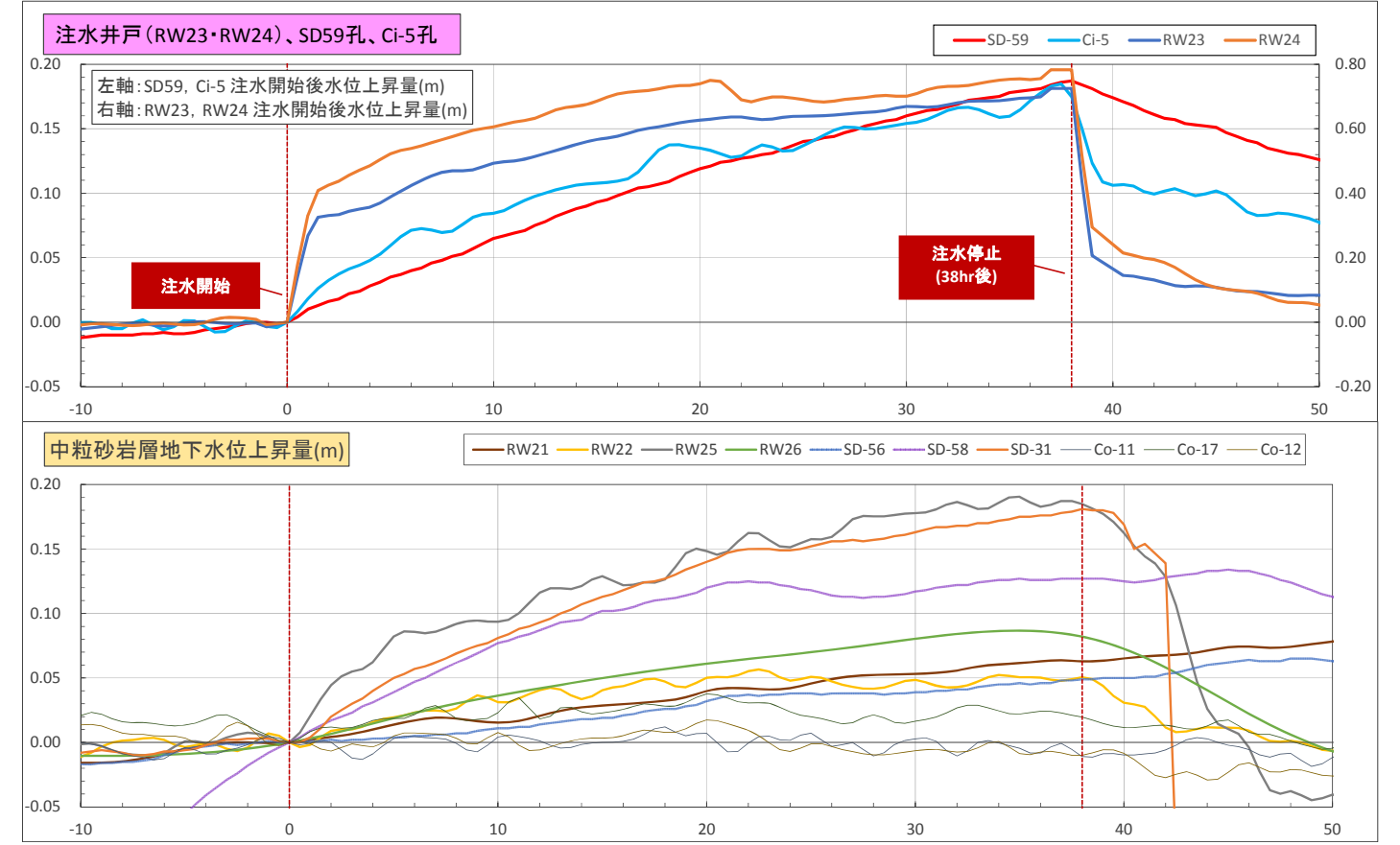


【添付資料 1】 SD59 を対象とした 2 孔 (RW23、RW24) 注水確認 (地下水位 経時変化図)

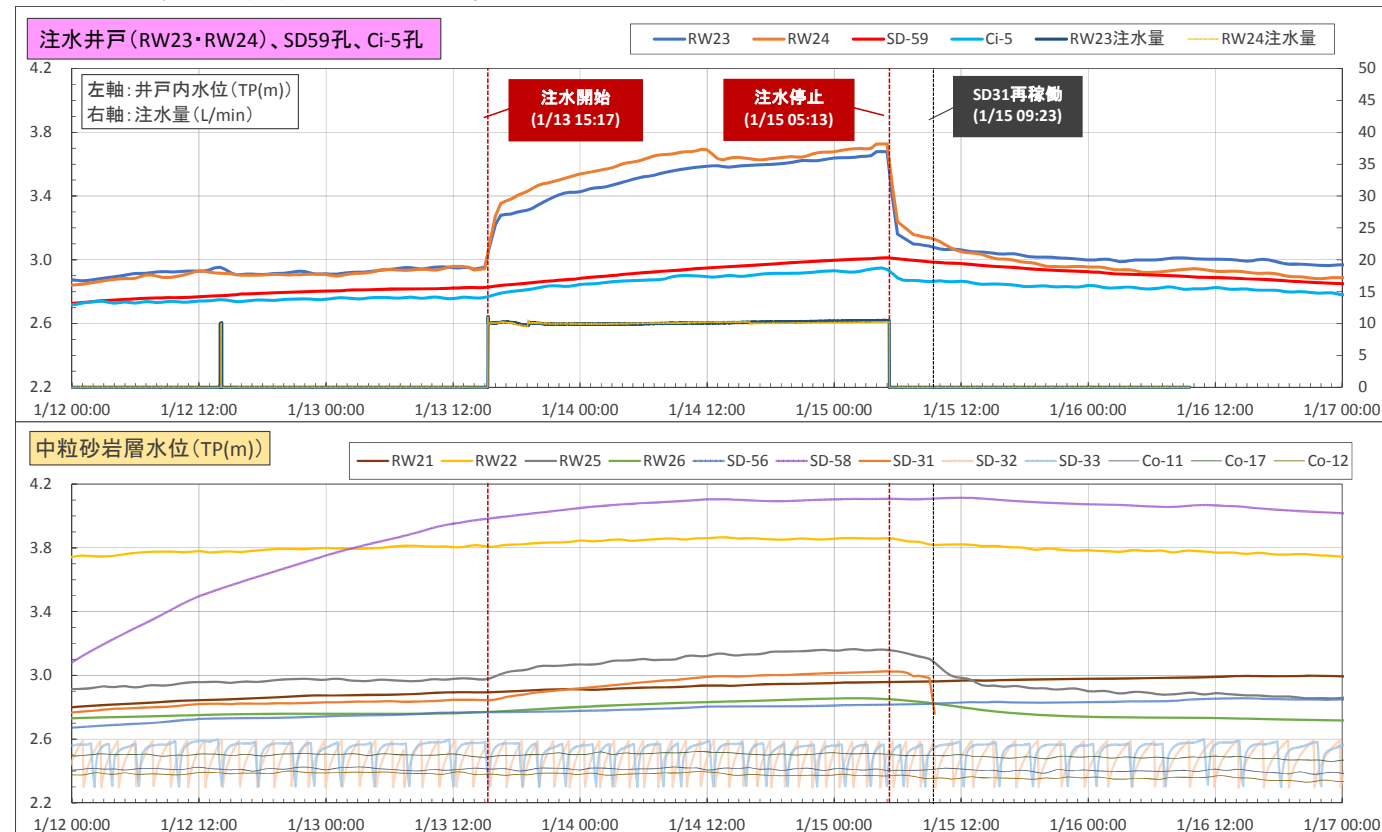
(1) 地下水位変動の計測データ



(3) 理論潮汐を分離したデータから算出した地下水位上昇量<sup>1)</sup>



(2) 理論潮汐を分離した地下水位変動<sup>1)</sup>



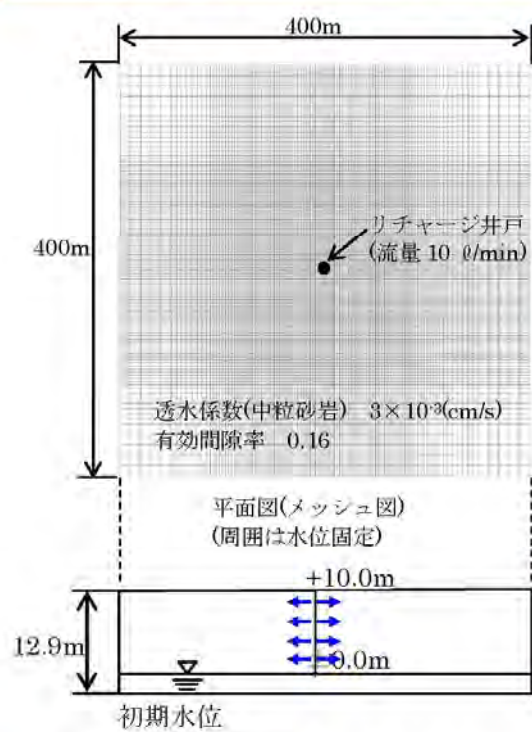
(4) 地下水位上昇量の平面分布



【参考文献】

- 1) 石黒真木夫, 佐藤忠弘, 田村良明, 大江昌嗣: 地球潮汐データ解析—プログラム BAYTAP の紹介 (解説) —, 統計数理研究所彙報, Vol.32, No.1, pp.71-85, 1894.

リチャージの性能—水位上昇効果（単井）について（解析条件）—



- 解析目的
  - 注水井（単井）からの注水による水位上昇効果の確認
- 解析手法
  - 準3次元浸透流解析プログラム（GWAP）による  
非定常浸透流解析 [GWAPについて (P28,29) 参照]
- 解析領域
  - 影響半径Rが165m\*であることから400m四方とした。  
\* :  $R = 3000s\sqrt{k}$  (シハルトの式)  
s: 水位差 (m) ⇒ 10m  
k: 透水係数 (m/s) ⇒  $3 \times 10^{-3}$  cm/s
- 透水係数:  $3 \times 10^{-3}$  cm/s  
3次元浸透流解析結果（汚染水処理対策委員会にて報告）における“中粒砂岩”の透水係数より設定。
- 有効間隙率: 0.16  
3次元浸透流解析結果（汚染水処理対策委員会にて報告）における地下水水位低下速度に基づき、本解析手法によって感度解析を行って同定した。

初期状態での水位と帯水層厚さ

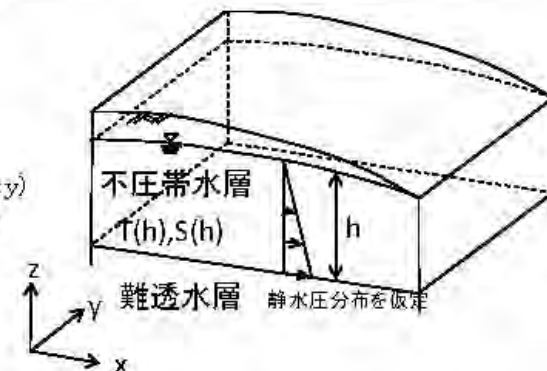
有限要素法による準三次元浸透流解析(GWAP)の概要(1/2)

- 準三次元浸透流解析  
平面二次元浸透流解析を基本に、深さ方向の層構成を1つの帯水層とみなし、かつ地下水は水平方向にのみ流れるものとした解析。地下水位の変化に伴う透水量係数（透水係数と帯水層厚さの積）の変化を考慮できるようにしているため、通常の平面二次元浸透流解析に比べ、より現実に近い地下水挙動評価が可能。
- 準三次元浸透流解析プログラム  
GWAP (Ground Water flow Analysis Program) : 岡山大学・西垣研究室開発
- 準三次元浸透流解析の支配方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( T_{ij}(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + Q = S(h) \frac{\partial h}{\partial t}$$

$T_{ij}(h)$ : 透水量係数テンソル ( $i, j = 1, 2 \mid 1: x, 2: y$ )  
 $Q$ : 帯水層全体に対する外部からの流出入量  
 $S(h)$ : 不圧帯水層の場合、有効間隙率  
 被圧帯水層の場合、貯留係数  
 $h$ : 水頭(地下水位)

- ① 鉛直方向に積分した微小単位体積を通過する地下水流量を表す。
- ② 鉛直方向に積分した微小単位体積に単位時間当たり貯留する地下水量を表す。



準三次元浸透流解析の概念  
(不圧帯水層における水圧分布と透水量係数の考え方)

リチャージの性能—水位上昇効果（単井）について—

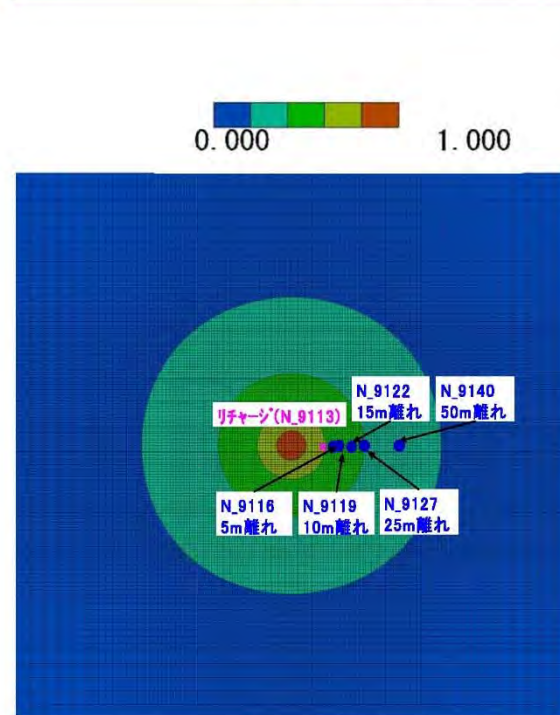


図 水位上昇量分布（100日後）

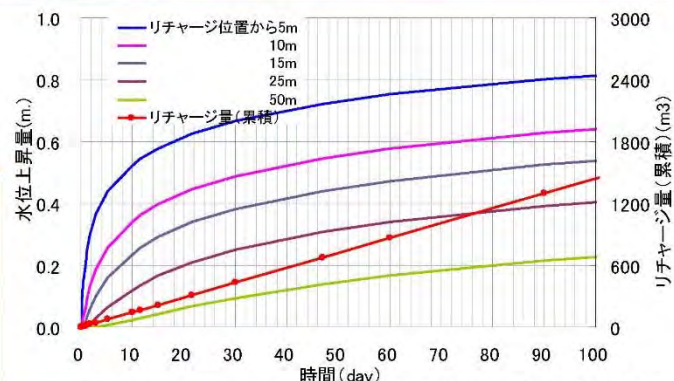


図 リチャージ井からの距離と水位上昇量の経時変化

- 単井からのリチャージでは、1孔当たり10L/min（14.4m<sup>3</sup>/日）の注水により、リチャージ井から半径5、10m程度であれば、10日でそれぞれ50cm、30cm程度水位上昇する。
- 単純化のため、下記条件となる。
  - ・ 建屋への流入を考慮していない。（流入考慮の場合、上昇速度は小さくなる。）
  - ・ 遮水壁による囲まれ効果は見込まれない。（囲まれを考慮した場合、上昇速度は大きくなる。）
 そのため、実際の水位上昇速度は、上図とは異なる。

有限要素法による準三次元浸透流解析(GWAP)の概要(2/2)

	準三次元浸透流解析	三次元浸透流解析
基本的考え方	鉛直方向の流れを無視し、水平方向の流れのみに簡略化した解析手法（深さ方向は静水圧分布を仮定）	三次元方向の地下水流れを考慮した詳細な解析手法で、上下帯水層間の流れを考慮可能
解析パラメータ及び、不飽和領域の取り扱い	透水量係数T,有効間隙率Sがパラメータであり、それらが水位hの関数であるような非線形問題として解く	透水係数Kと不飽和特性（負圧-飽和度関係、飽和度-不飽和透水係数関係）がパラメータとなる非線形問題として解く
帯水層の層構成	深さ方向の各層における透水量係数を積分してモデル化	直接三次元的にモデル化
境界条件	浸出面境界のような複雑な境界条件は設定困難	どのような境界条件も設定可能

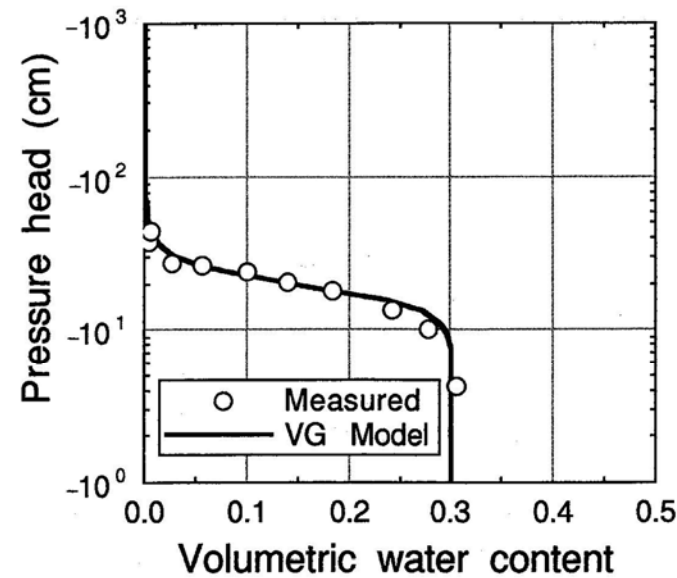
【添付資料 3】 砂質土の不飽和浸透特性（水分特性曲線）の例<sup>4)</sup>

表-3.1 不飽和浸透特性の測定例

No.	試料分類	測定方法		参考文献
		水分特性曲線	不飽和透水係数 $k(\theta)$ 飽和透水係数 $k_s$	
1	砂丘砂	pF 試験(土柱法, 吸引法, テンシオメーター, 遠心分離法)	$k(\theta)$ =測定値を用いた非定常計算 $k_s$ =定水位透水試験	5)
2	標準砂	$\phi(t)$ =圧力変換器 $\theta(t)$ = $\gamma$ 線密度計	$k(\theta)$ =測定値を用いた非定常計算 $k_s$ =定水位透水試験	6)
3	細砂	サンプリング法	$k(\theta)$ =加圧型不飽和透水試験 $k_s$ =定水位透水試験	7)
4	砂質土	加圧板法	加圧型不飽和透水試験	8)
5	砂	$\theta(t)$ =水平毛管試験 pF 試験(土柱法)	$k(\theta)$ =測定値を用いた非定常計算 $k_s$ =定水位透水試験	9)
6	アカホヤ (火山灰土)	pF 試験(吸引法)	$k(\theta)$ =ショートコラム定常法 $k_s$ =定水位透水試験	10)

表-3.2 VGモデルパラメータの同定結果

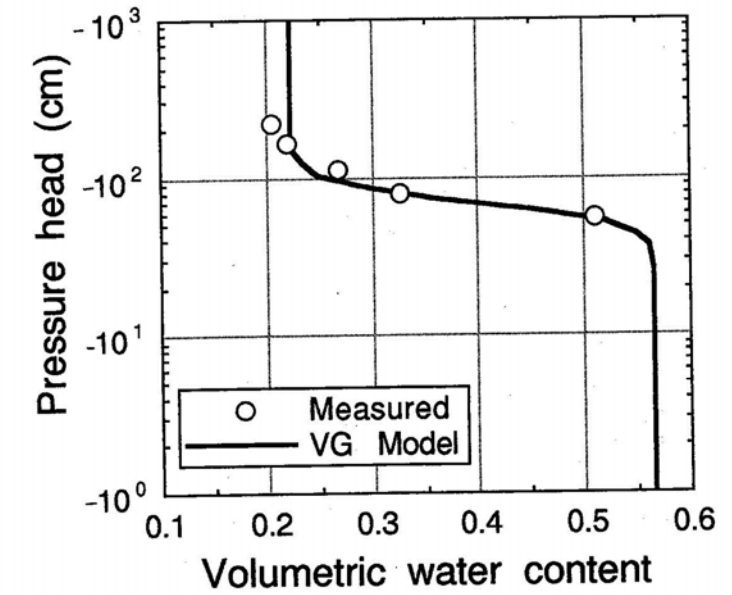
No.	試料名	同定結果			既知パラメータ	
		$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	n	$\theta_r$	$k_s$ (cm/s)	$\theta_s$
1	砂丘砂	0.0356	4.793	0.042	$2.864 \times 10^{-2}$	0.403
2	標準砂	0.0522	5.678	0.00	$2.084 \times 10^{-2}$	0.300
3	細砂	0.0632	1.405	0.00	$4.000 \times 10^{-3}$	0.410
4	砂質土	0.0147	6.656	0.221	$2.000 \times 10^{-3}$	0.565
5	砂	0.0574	1.629	0.00	$1.200 \times 10^{-3}$	0.365
6	アカホヤ	0.0307	1.871	0.412	$1.000 \times 10^{-2}$	0.785



(a)水分特性曲線

図-3.2 No.2 標準砂に対するVGモデルの適用例

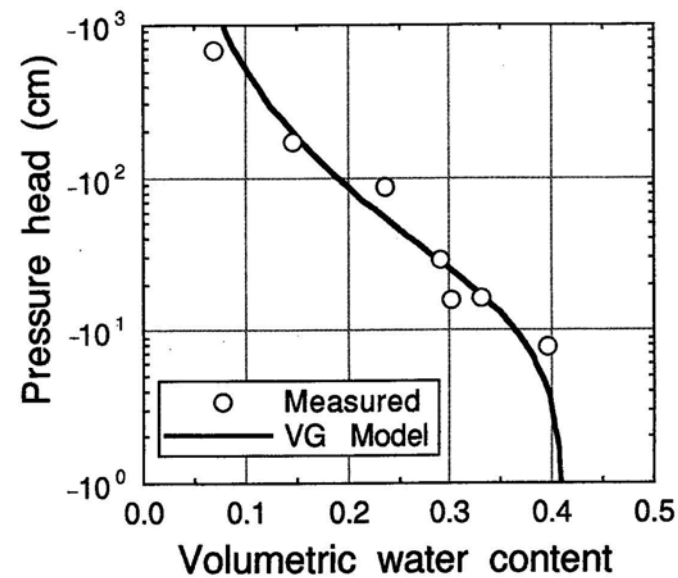
( $\theta_s=0.300, k_s=2.084 \times 10^{-2}$  cm/s,  $\theta_r=0.00, \alpha=0.0522$  cm<sup>-1</sup>, n=5.678)



(a)水分特性曲線

図-3.4 No.4 砂質土に対するVGモデルの適用例

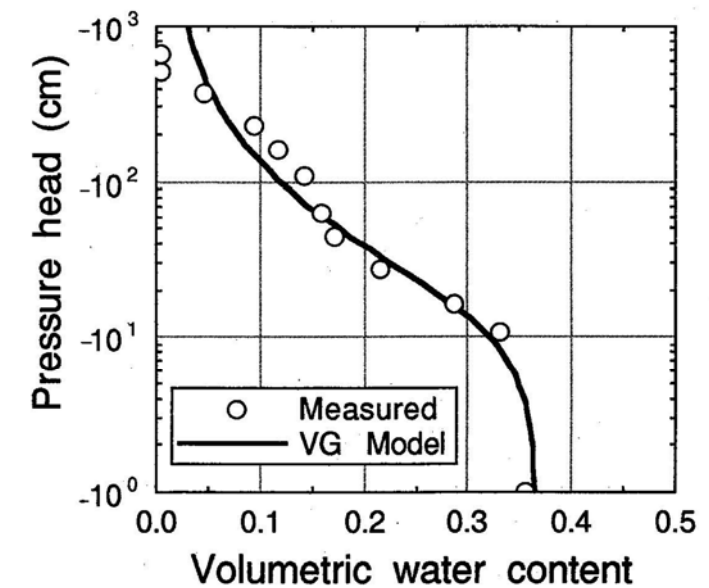
( $\theta_s=0.565, k_s=2.000 \times 10^{-3}$  cm/s,  $\theta_r=0.221, \alpha=0.0147$  cm<sup>-1</sup>, n=6.656)



(a)水分特性曲線

図-3.3 No.3 細砂に対するVGモデルの適用例

( $\theta_s=0.410, k_s=4.000 \times 10^{-3}$  cm/s,  $\theta_r=0.00, \alpha=0.0632$  cm<sup>-1</sup>, n=1.405)



(a)水分特性曲線

図-3.5 No.5 砂に対するVGモデルの適用例

( $\theta_s=0.365, k_s=1.200 \times 10^{-3}$  cm/s,  $\theta_r=0.00, \alpha=0.0574$  cm<sup>-1</sup>, n=1.629)



(6) 原位置試験で求めた水理定数のまとめ

上記(2)~(5)項で詳述したとおり、原位置試験で求めた透水係数は、 $3.5\sim 4.0 \times 10^{-5}(\text{m}/\text{sec})$ であった(表-3.14参照)。これは、解析用物性値  $3.00 \times 10^{-5}(\text{m}/\text{s})$ と概ね同等の値であるといえる。

表-3.14 原位置透水試験から求めた水理定数

試験名		ノイマン法 各孔の対数平均値		ティーム法	
種別	注水孔	透水係数 $k$ (m/sec)	貯留係数 $S$ (比産出率 $S_s$ )	透水係数 $k$ (m/sec)	影響圏半径 $R$ (m)
揚水試験	RW2	3.918 E-05	1.932 E-02	2.840 E-05	63.0
注水試験	RW1	4.003 E-05	2.550 E-02	4.096 E-05	60.0
注水試験	RW2	4.024 E-05	2.501 E-02	3.755 E-05	68.5
注水試験	RW3	4.024 E-05	1.178 E-02	3.444 E-05	73.0
対数平均		3.992 E-05	1.952 E-02	3.502 E-05	65.9

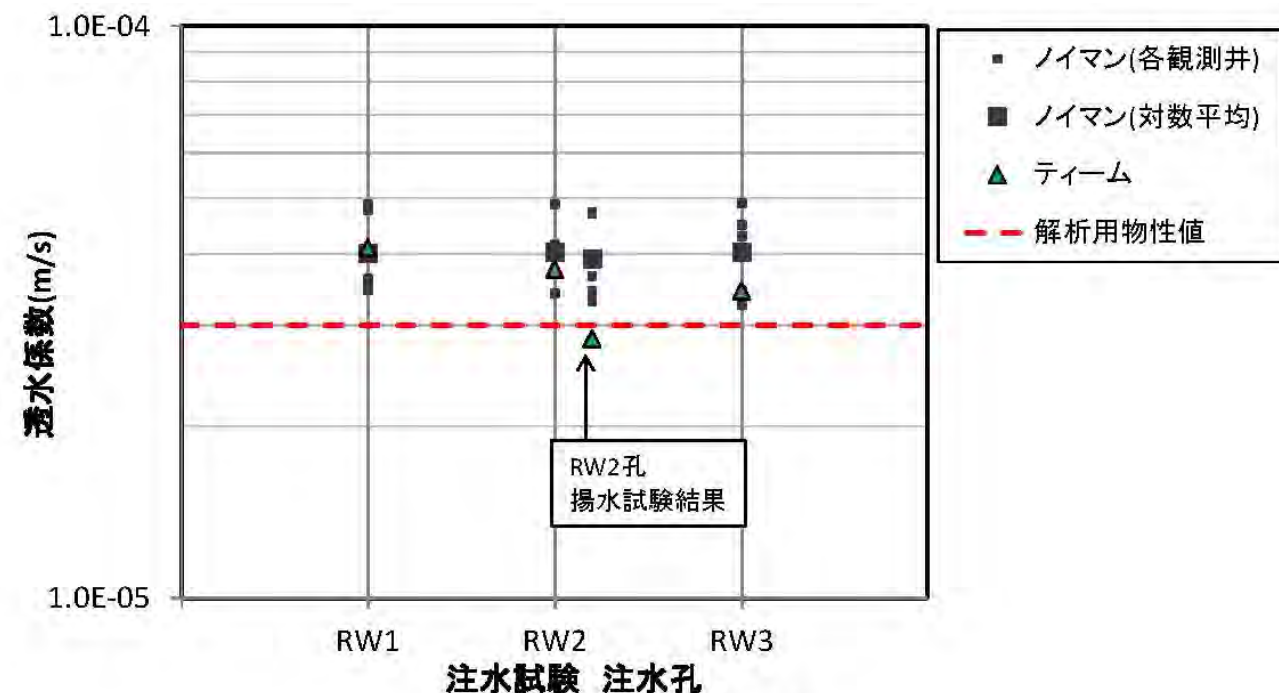


図-3.36 透水係数の比較

3.2 貯留係数（有効間隙率）の評価

不圧帯水層における貯留係数  $S$ は、平面的に地下水の挙動を解析する際に必要な係数であり、図-3.39に示すように自由水面が低下することによって帯水層の間隙の中から排水される水量に関する値である。また、理論的には不圧帯水層の貯留係数  $S$ は、有効間隙率に等しいとされている。

今回の実証試験において、原位置試験で求めた貯留係数は、表-3.14より  $1.95 \times 10^{-2}$ 程度であり、解析物性値（有効間隙率：0.41 福島第一原子力発電所周辺の地質・地下水および解析 平成 25 年 8 月 23 日 東京電力株式会社）と比較してかなり小さい値となっている。

これに関して、赤井・宇野（1964）より同様な報告がなされている。<sup>1)</sup>赤井らは不飽和砂質土地盤において現場揚水試験を実施して、それによって求めた貯留係数について以下のように述べている。

『今回の揚水試験から求められた有効間隙率  $\beta$ の値は、高々  $10^{-3}$ の次数であって、前に表示した値とは大いに異なっている。従来から  $\beta$ の値が普通考えられるよりずっと小さい値となることは気づかれており、たとえば京都市西京極における実測結果にも  $10^{-2}$ の次数となることが述べられている。

（中略）透水係数が  $10^{-3}\text{cm}/\text{sec}$ の次数であることと考え合わせて、揚水による重力の作用で吸引される水量は極端に小さいものになったものと思われる。（中略）確定的なことはいえないが、地盤の有効間隙率  $\beta$ の性格についてはまだ問題が少なくないと考えられる。』

このことから、今回得られた貯留係数が特段異常値を示しているわけではない。また、今回求めた貯留係数が有効間隙率に比して1オーダー程度小さい値を示していることは、水分特性曲線のヒステリシスの影響等も考えられる（図-3.40）。

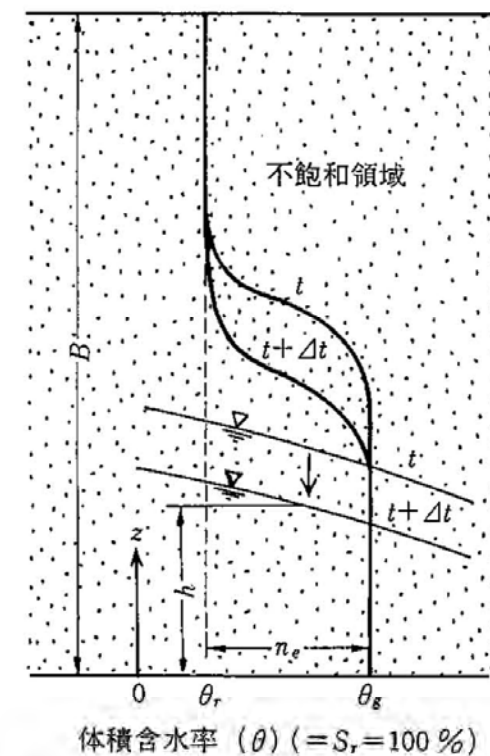


図-3.39 不飽和領域における体積含水率の分布の例<sup>2)</sup>

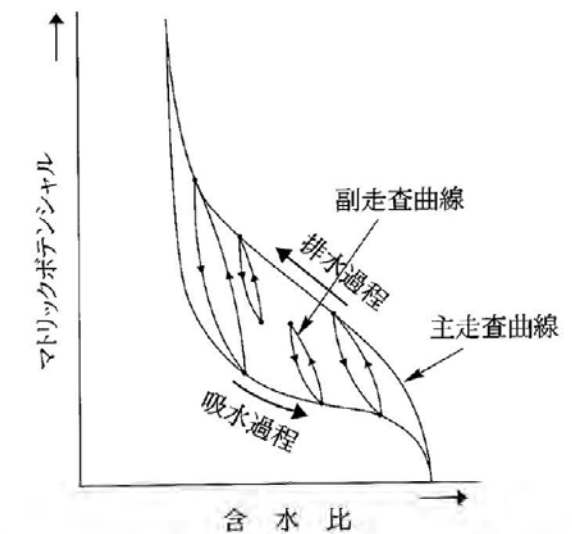


図-3.40 水分特性曲線のヒステリシス<sup>3)</sup>

【参考文献】 1) 赤井浩一，宇野尚雄：自由水面をもつ地下水の揚水試験に対する考察，土と基礎，Vol.12，No.7，pp.15-19，1964。  
2) 地盤工学会編：根切り工事と地下水—その調査・設計から施工まで—，地盤工学会，p.99，1991。  
3) 地盤工学会編：不飽和地盤の挙動と評価，地盤工学会，p.28，2004。

