

宅地地盤液状化対策のためのマイクロバブル水注入工法
による地盤内注入空気の持続性計測

報 告 書

平成 23 年 3 月

国土交通省国土技術政策総合研究所 都市研究部

(実施機関：佐藤工業株式会社)

本文目次

| | |
|---|----|
| 1. 目的 | 1 |
| 1.1 実験目的 | 1 |
| 1.2 実験内容 | 1 |
| 1.3 主な試験数量 | 1 |
| 1.4 工期 | 1 |
| 2. 実験計画 | 2 |
| 2.1 実験概要 | 2 |
| 2.2 実験場所 | 3 |
| 2.3 サイトプラン（注入・計測孔の配置） | 4 |
| 2.4 計測方法 | 9 |
| 2.4.1 挿入式 TDR 土壌水分計 | 11 |
| 2.4.2 固定式 TDR 土壌水分計 | 14 |
| 2.4.3 地盤内カメラ撮影孔 | 16 |
| 2.4.4 比抵抗電気探査 | 17 |
| 2.4.5 マイクロバブル水生成管理計測（注入流量, 生成圧・圧送圧, 溶存酸素） | 18 |
| 2.5 マイクロバブル水注入実験実施方法 | 21 |
| 3 実験サイトの土質条件の検討 | 23 |
| 4 マイクロバブル水の注入方法の検討 | 34 |
| 4.1 MB 生成方法 | 34 |
| 4.1.1 マイクロバブル水発生装置 | 34 |
| 4.1.2 マイクロバブル水発生ノズル | 35 |
| 4.2 注入方法 | 36 |
| 4.2.1 二重管注入孔（鉛直管, 傾斜管） | 36 |
| 4.2.2 ミニラムロッド注入孔 | 38 |
| 4.2.3 揚水孔 | 39 |
| 5. 注入時における地盤飽和度の計測 | 40 |
| 5.1 MB 水総注入量 | 40 |
| 5.2 領域(A)マイクロバブル水注入による実地盤の飽和度変化の実測結果 | 47 |
| 5.2.1 飽和度計測結果 | 47 |
| 5.2.2 ボアホールカメラ観測結果 | 52 |
| 5.3 領域(B)低層住宅の床下地盤を想定した不飽和化の試行結果 | 56 |
| 5.3.1 飽和度計測結果 | 56 |
| 5.4 水圧・温度計測結果 | 64 |
| 5.5 沈下計測結果 | 69 |

| | |
|---|-----------|
| 5.6 比抵抗電気探査結果..... | 73 |
| 6 地盤飽和度の定期的計測の実施..... | 75 |
| 6.1 領域(A)マイクロバブル水注入による実地盤の飽和度変化の実測結果..... | 76 |
| 6.2 領域(B)低層住宅の床下地盤を想定した不飽和化の試行結果..... | 79 |
| 7. まとめ..... | 82 |

1. 目的

1.1 実験目的

本実験の目的は、既設住宅の経済的な耐震改修として、宅地地盤にマイクロバブル水（以下 MB 水と呼ぶ）を注入し地盤を不飽和化することにより液状化対策を図る工法の確立・普及を目指して、MB 水の実地盤への注入方法の有効性と地盤内の残留空気（不飽和化）の持続性を検証することである。

本実験では、実地盤への MB 水注入を行い、地盤内の不飽和化の状態を計測するとともに、時間経過に伴う飽和度の変化を一定期間定期的に計測することにより、MB 水注入工法の有効性と持続性を検証する。

1.2 実験内容

本実験は、マイクロバブル水を用いた地盤不飽和化工法について、実地盤への注入を行って不飽和化の状態を計測するとともに、時間経過に伴う飽和度の変化を一定期間定期的に計測することにより、マイクロバブル注入工法の有効性と地盤内空気残留の持続性を検証する。

1.3 主な試験数量

| | |
|----------------------|------|
| 地盤調査業務 | 1 式 |
| マイクロバブル水地盤注入 | 1 式 |
| 残留空気計測 | 1 式 |
| マイクロバブル水注入（ボーリング注入法） | 2 箇所 |
| マイクロバブル水注入（簡易注入法） | 4 箇所 |
| 飽和度計測（挿入式土壌水分計） | 4 箇所 |
| 飽和度計測（固定式土壌水分計） | 4 箇所 |

1.4 工期

工期 自 平成 22 年 9 月 1 日
至 平成 23 年 3 月 25 日

2. 実験計画

2.1 実験概要

実地盤実験は、目的ごとに実験を以下の3つのケース分け行う。以下に各ケースの目的と方法を示す。

(A) マイクロバブル水注入による実地盤の飽和度変化の実測

二重管ダブルパッカー注水法（以下、二重管法）による MB 水注入時の地盤内浸透性の確認及び注入後の耐久性調査を主目的とする。

実験は、二重管注入管を中心とし、注入浸透範囲に TDR 土壌水分計および比抵抗電気探査設置し、MB 水注入時の飽和度を計測し、距離や深度方向における飽和度変化を調べる。また、近傍でのボアホールカメラによる地盤内部の撮影を行い、地盤内気泡の様子を観測する。

(B) 低層住宅の床下地盤を想定した不飽和化の試行

幅 6m の低層住宅を想定し、住宅床下地盤の飽和度を低下させることを目的とする。

実験は、既設住宅の床下地盤の飽和度を低下させる目的のため、住宅床下部分からの注入をせず、住宅側部より二重管を斜めに挿入し注入する。また、実用化をにらみ簡易に施工が可能なミニラムサウンディングマシンを用い、住宅側部に注入をおこなう。住宅敷地内に設置した TDR 土壌水分計および比抵抗電気探査により住宅下部の飽和度変化を調べるほか、注入方法による施工性なども調査する。

また、ミニラム注水孔と揚水孔の間に土壌水分計を設置し、揚水による飽和度の影響も調べる。

(C) 不飽和状態の持続性の実測

上記(A)、(B)の MB 水注入された試験地盤に対し、注入後の飽和度を計測し、地盤内空気の残留状態を確認する事を目的とする。(A)、(B)で使用した飽和度計測機器を用い、出来るだけ長期に計測を行う。

2.2 実験場所

実験は埼玉県三郷市の江戸川河川敷内で行った。図 2.1 に実験場所を示す。

実施場所：埼玉県三郷市田中新田江戸川河川敷内 29.0K 右岸付近



図 2.1 実験場所（地図：Yahoo）

2.3 サイトプラン（注入・計測孔の配置）

図 2.2 に実施平面図，図 2.3，図 2.4 に実施断面図を示す。

前節の地盤調査場所は，地盤調査孔 1 で標準貫入試験と物理試験試料採取を行い，地盤調査孔 2 でコアサンプリングと現場透水試験を行った。

MB 水注入実験は，平面図左側の領域(A)と平面図右側の領域(B)と目的で大きく以下の 2 つに分類される。

領域(A)『マイクロバブル水注入による実地盤の飽和度変化の実測』では，図の E1 の位置より二重管ダブルパッカー注入を行った。

注水深度は，注入対象層である細砂層（GL.-3.35m ～GL.-5.9m）が深度方向に深くなるにつれ N 値が 20 近くなることから，中心深度（GL.-4.6m）付近から注水することとした。

二重管注入管(L=7.0m)には 0.5m ピッチで注入逆止弁が設置されており，初期注入の結果 GL-4.35m の深度から注入した。

飽和度は，MB 水の注水の浸透範囲を調べるため，挿入式 TDR 土壌水分計により計測した。挿入式 TDR は，専用の計測管にプローブを挿入することにより，計測箇所の深度方向の分布を計測することが出来る。φ40mm の計測管(GL.-7.0m)を E1 から 0.5m, 1.5m, 4.0m 離れた位置に TDR1, TDR2, TDR3 の 3 箇所設置した。

また，地盤内の残留空気の観測のため，E1 から 0.5m 離れの位置に φ60mm のアクリルパイプ (GL.-7.0m)を BC に設置し，CCD ボアホールカメラを用い撮影を行った。

領域(B)『低層住宅の床下地盤を想定した不飽和化の試行』では，幅 6m の低層住宅の床下地盤（図の斜線部の投影部）不飽和化させることを目的とし，住宅敷地外の E2 より，床下地盤方向に斜めに注入管（二重管）を設置し注入を行った。

また，施工が容易で実用的な工法の検証としてミニラムサウンディングマシンを使用し，住宅側部の M1, M2, M7, M8 の位置からミニラムロッド注入を行った。二重管注入の注入深度は，(A)同様に注入管に 0.5m ピッチで注入逆止弁が設置してあり，GL-4.11m の深度から注入を行った。一方，ミニラムロッドの注入深度は，ロッドの先端から注入となり，深度 GL-4.05m から注入を行った。

飽和度は，挿入式 TDR と固定式 TDR で計測した。固定式 TDR は，定点で連続して飽和度の計測が出来る。住宅床下の飽和度を調べるため，住宅部中央の TDR4 の位置に挿入式 TDR の計測管(GL.-7.0m)を設置した。また，固定式 TDR をミニラム注入より 0.5m 離れた位置と住宅下の 4 箇所（TDR_F1 から TDR_F4 の深度 4.0m と 3.0m の位置）に設置した。

さらに，地下水の変化と注入による地盤中の水圧変化を調べるため，間隙水圧計を各固定式 TDR 土壌水分計の位置に設置を行った。

さらに，領域 (A) と領域 (B) の地盤全体の飽和度の分布を調査する目的で，試験ヤード中央部を横断する形で比抵抗電気探査を行った。

表 2.1 ボーリング孔数量

| 名称 | 削孔径 | 単位 | 数量 | 深度 | 備考 |
|-----|---------|----|----|-----|--------------|
| 調査孔 | φ 86mm | 箇所 | 1 | 10m | 調査ボーリング |
| 揚水孔 | φ 160mm | 箇所 | 2 | 7m | MB 水生成用水用 |
| 注入孔 | φ 96mm | 箇所 | 2 | 7m | ボーリング注入用 |
| 注入孔 | φ 32mm | 箇所 | 4 | 5m | 簡易注入用 (ミニラム) |
| 撮影孔 | φ 160mm | 箇所 | 1 | 7m | CCD カメラ用 |
| 計測孔 | φ 96mm | 箇所 | 4 | 7m | 挿入式土壌水分計用 |
| 計測孔 | φ 160mm | 箇所 | 4 | 4m | 固定式土壌水分計 |

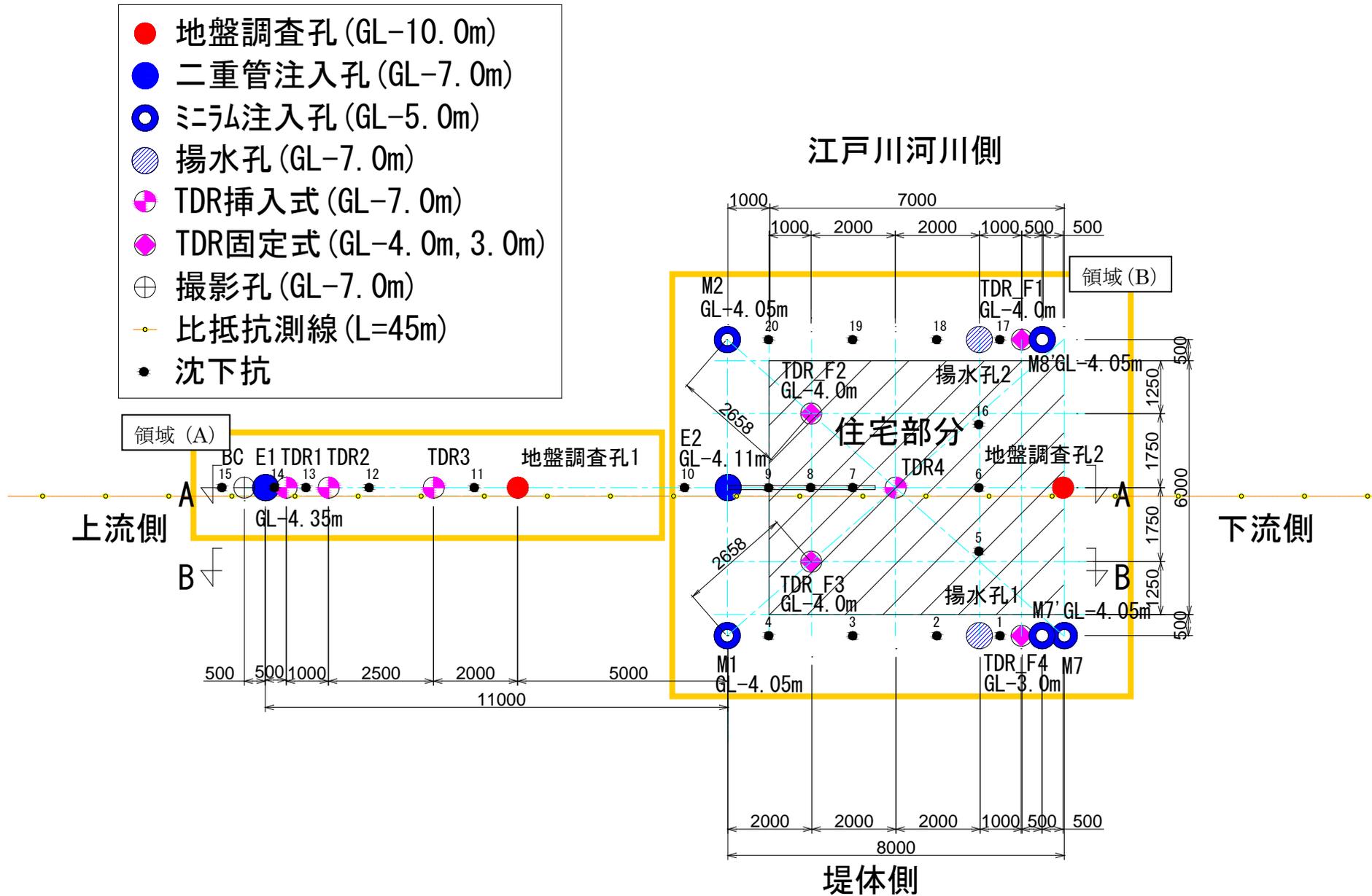


図 2.2 実施平面図

A-A断面

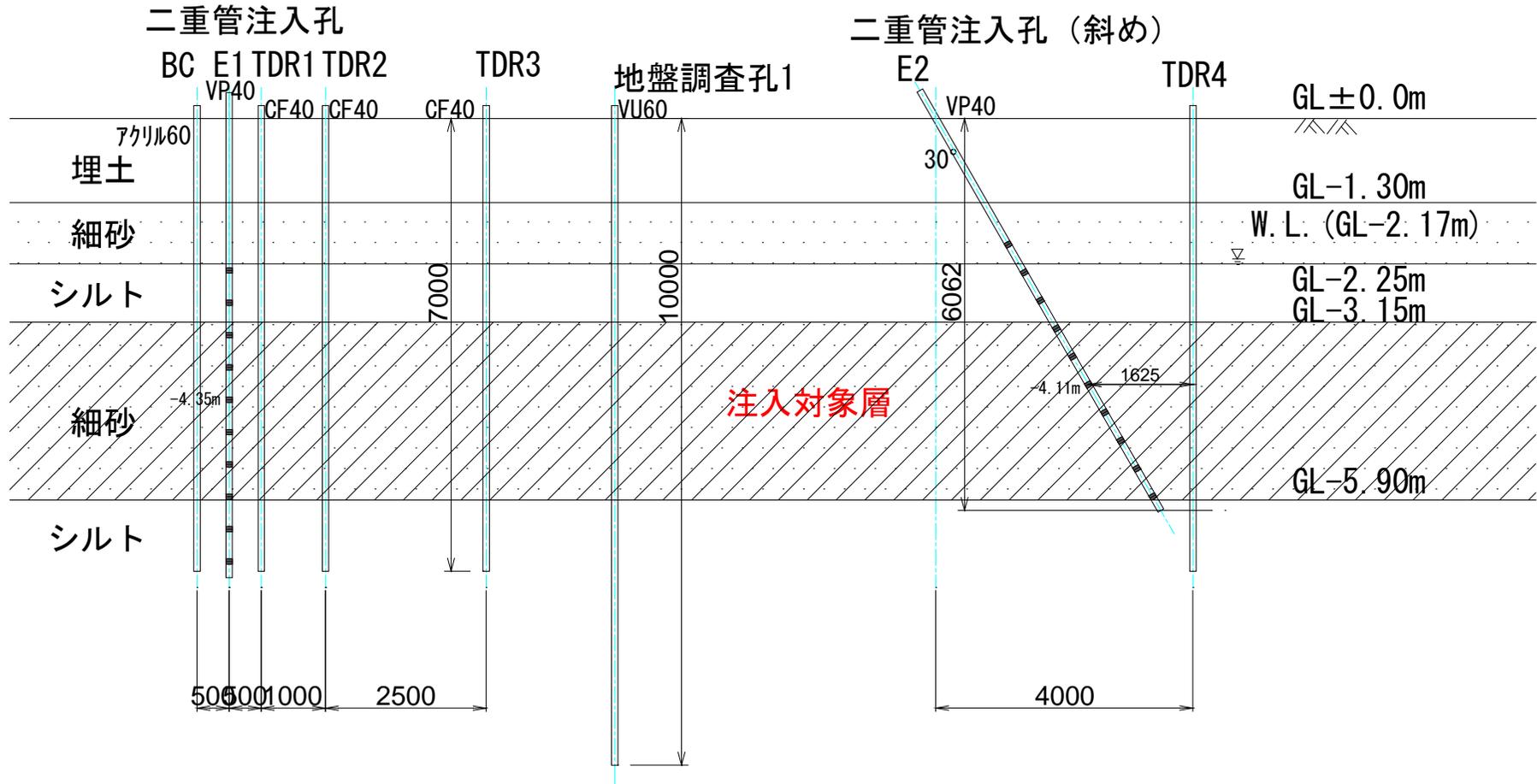


図 2.3 実施断面図 1

B-B断面

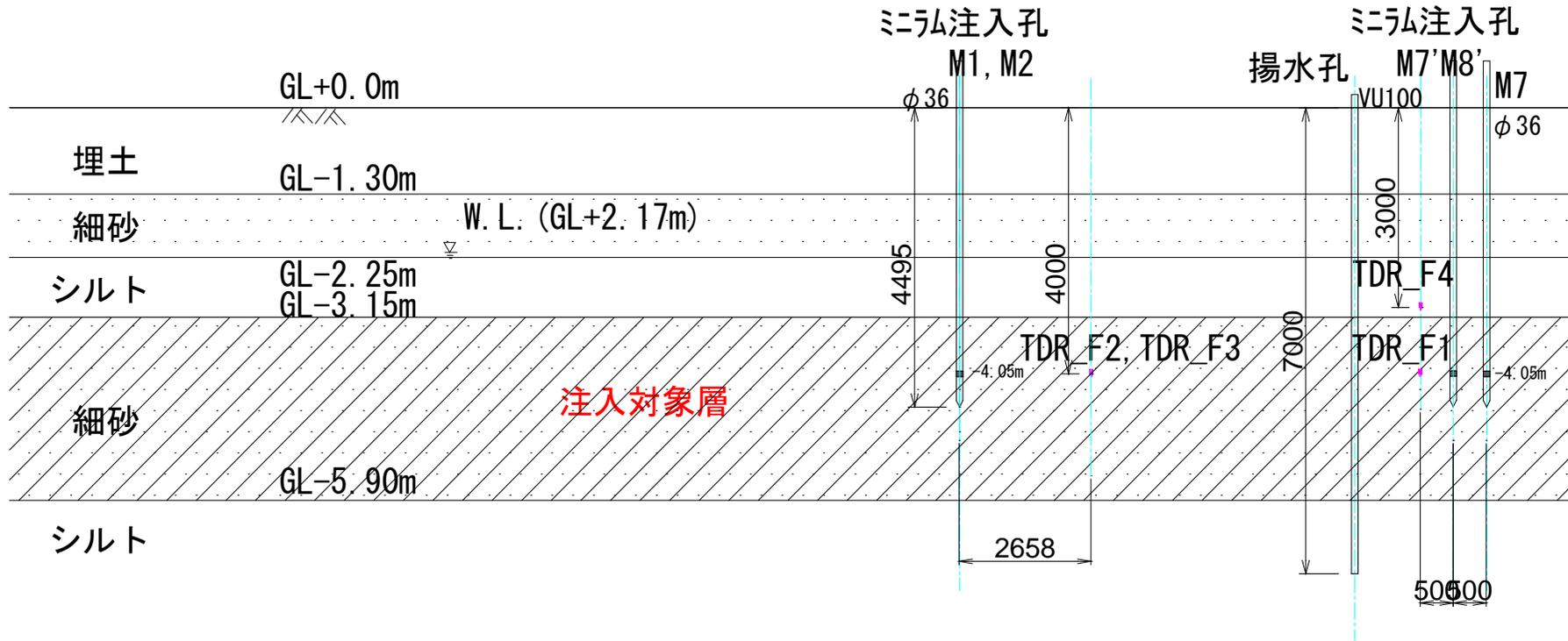


図 2.4 実施断面図 2

2.4 計測方法

計測項目を表 2.2 に、計測概要図を図 2.5 に示し、各計測項目の説明を以下に記す。

表 2.2 計測内容および計測項目

| 計測内容 | | 計測項目 | 数 量 | 目 的 |
|----------|--------------|--------------------|--------------|------------------------------|
| 飽和度 | 土壌水分計 | 挿入式 TDR 固定式 TDR | 4 箇所 4 箇所 | MB 水注入前，注入時，注入後の飽和度の変化を確認する。 |
| | 比抵抗 (産総研) | 比抵抗電極 | 地表面 1 測線 | |
| 気泡の可視化 | | CCD カメラ | 1 箇所 | 地盤内の気泡の状態を確認する。 |
| MB 水注水流量 | | 複相流量計 超音波流量計 | 1 1 | MB 水の注水量を確認する。 |
| MB 水送水圧 | | 圧力計 | 1 | MB 水生成時圧力を確認する。 |
| 間隙水圧 | | 間隙水圧計 | 4 | 地下水の変化と注入による地盤中の水圧変化 |
| 地表面沈下量 | | 地盤高さ | 1 式 | 注入時，注入後の地盤変位を調査する。 |

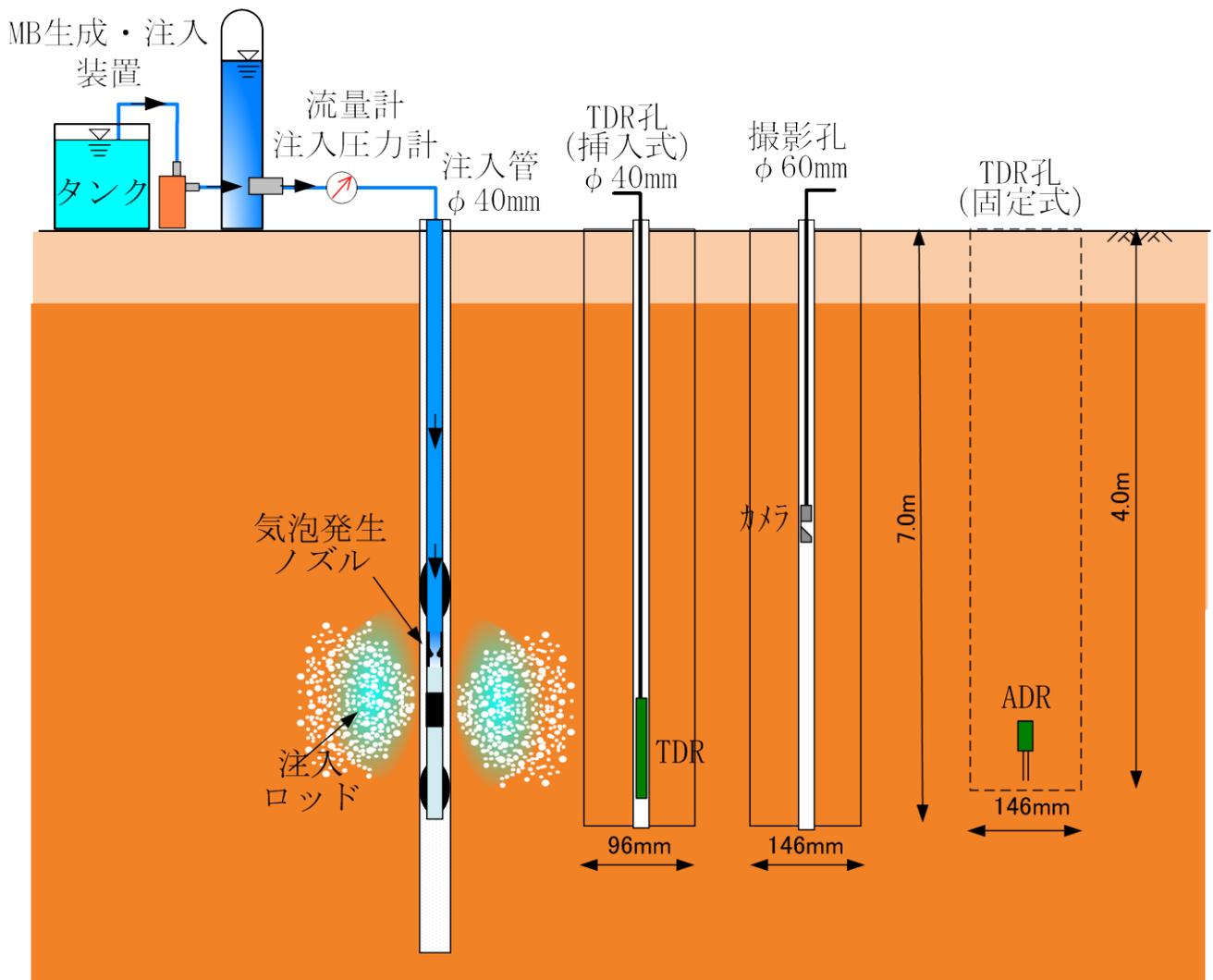


図 2.5 計測概要図

2.4.1 挿入式 TDR 土壌水分計

TDR (Time Domain Reflectometry) 法とは、土粒子の誘電率が 3 前後、空気の誘電率が 1 であるのに対し水の誘電率が 80 と高いことを利用した含水率測定法であり、電磁波の速度が、真空の誘電率ならびに透磁率を用いて以下の式で表されることを利用して地盤の誘電率を求めている。

$$C = \frac{C_0}{(\epsilon_r \mu_r)^{0.5}} \quad (1)$$

体積含水率 θ が誘電率から求められる場合、飽和度 S_r は間隙比 e を用いて以下の式から求められる。

$$S_r = \frac{1+e}{e} \cdot \theta \quad (2)$$

挿入式 TDR 計は、地盤中に設置した専用管 ($\phi 40\text{mm}$ ポリカーボネート製アクセスチューブ) を通して、プローブと呼ばれる長さ 30cm の計測装置を管中に挿入して、深度方向の含水率を求めることが出来るものである。

実験では(A)領域に 3 箇所、(B)領域に 1 箇所設置した。アクセスチューブ設置にはロータリーパーカッションボーリングマシンで削孔し、建込みを行った。管周辺の埋め戻しには珪砂を用いた。

TDR 土壌水分計は、間隙比が変化すると値が変化するため、事前に挿入式 TDR 計の値に変化が無いか確かめた。図 2.6 は計測結果であるが、計測値にあまり変化が見られなかったことから実験を開始することとした。

なお、アクセスチューブのジョイント部 (GL.-3.8m~4.2m 付近) は材質が塩ビ管であり、材質が異なるため、計測値を取り除くこととした。

【挿入式 TDR 土壌水分計 TRIME-T3 (写真 2.2)】

- ・仕様：体積含水率 0~60%
- ・精度：2% (0~40%), 3% (40~60%)
- ・寸法：プローブ 長さ 220mm, 径 $\phi 40\text{m}$
ケーブル長さ 25m
アクセスチューブ 外径 44.3mm, 内径 42mm
- ・製造元：IMKO GmbH (ドイツ製)



写真 2.1 アクセスチューブ建込状況



写真 2.2 挿入式 TDR 計

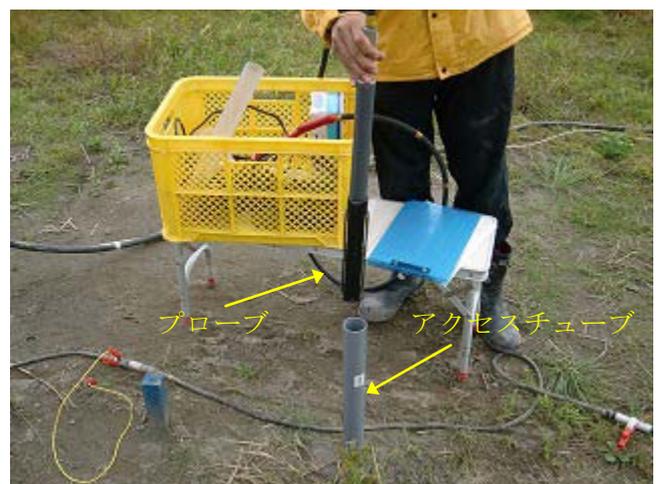


写真 2.3 計測状況

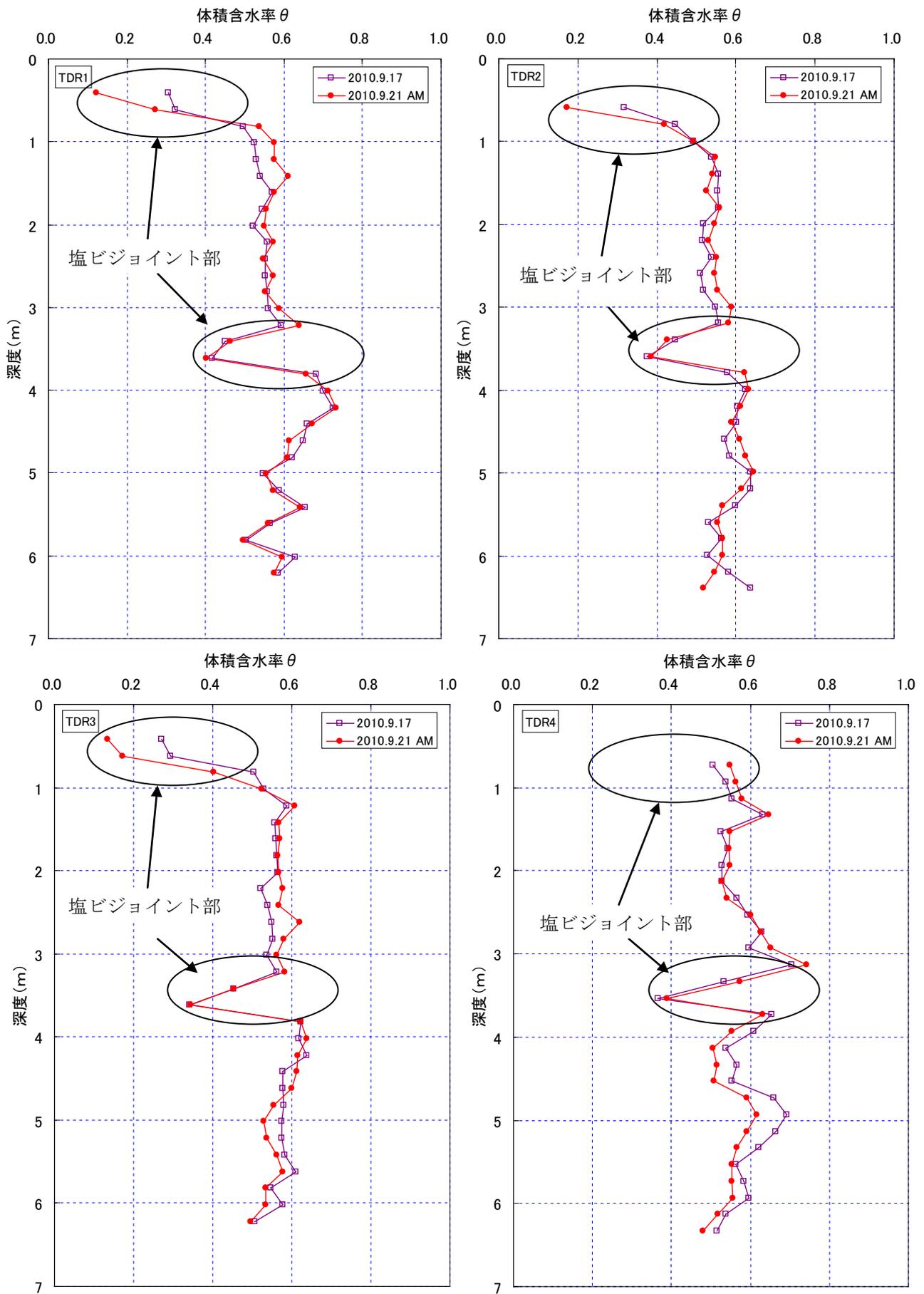


図 2.6 挿入式 TDR 計事前計測結果

2.4.2 固定式 TDR 土壌水分計

固定式 TDR 計は前節の挿入式 TDR 計と同じく誘電率から体積含水率を求めるものである。計測はセンサー基部にあるエポキシで覆われた回線回路から発信する電磁波が、ステンレスロッド先端から反射して帰還すると次の発信を行いその発信間隔を測定し、その時間に補正式を与えて土壌水分を求めるものである。よって、挿入式と違いチューブを使わず直接設置した場所のみの計測となる。

今回の実験では領域(B)の 4 箇所固定式 TDR 計の設置を行った。設置にはロータリーパーカッションボーリングマシンを利用し、所定の深度まで削孔したあと、固定式 TDR 計を計測位置に設置した後、硅砂で埋め戻しを行うとともにベントナイトを用い、注入水の噴き出しがないよう養生を行った。

なお、計測は長期間の観測を行うため、計測機を防水の BOX 内に納め、いたずら防止のためネットフェンスで養生を行った。計測機の電源にはソーラパネルを用いた。

図 2.7 は固定式 TDR 計の事前に計測した結果である。計測値にほとんど変化は見られなかった。



写真 2.4 固定式 TDR 計



写真 2.5 センサー設置状況



写真 2.6 計測 BOX

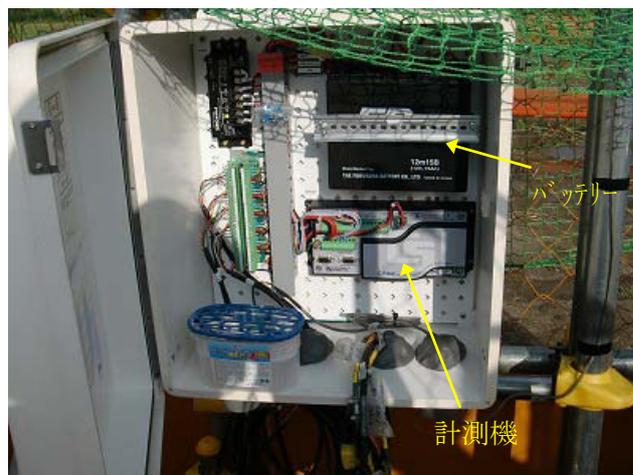


写真 2.7 計測機

【固定式 TDR 土壌水分計 CS616 (写真 2.4)】

- ・名称：CS-616
- ・データロガー：CR-800
- ・精度：2.5% (0~50%VWC)
- ・寸法：本体 長さ 110mm, 幅 63mm, 厚さ 20mm, 重量 280g
ステンレスロッド 長さ 300mm, 間隔 32mm, 径 ϕ 3.2mm, 重量 70g
- ・製造元：CABELL SCIENTIFIC,INC. (アメリカ製)

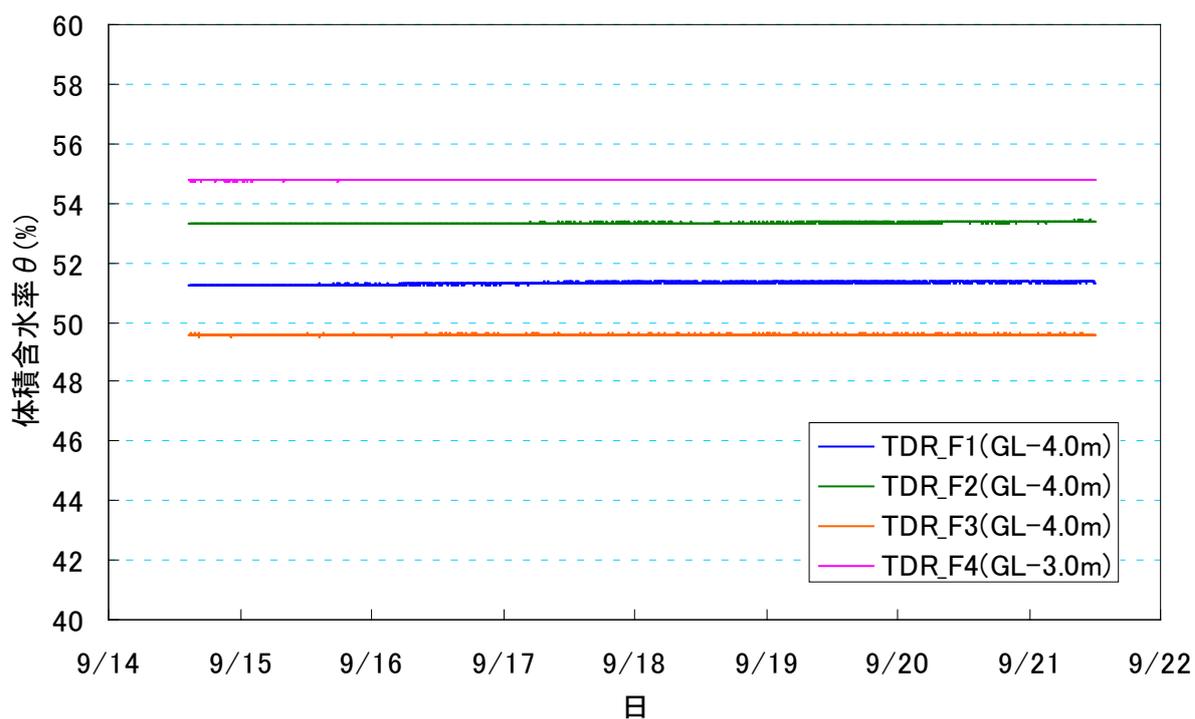


図 2.7 固定式 TDR 計事前計測結果

2.4.3 地盤内カメラ撮影孔

地盤内の気泡の状況を観測するため、注入孔 E1 から 50cm 離れた位置に撮影孔を設置した。

設置は、ロータリーパーカッションボーリングマシンを使用し削孔した後、直径 60mm、長さ 7m のアクリルパイプを建て込んだ。なお、管廻りの埋め戻しには硅砂を用いた。

管内の撮影には LED ライト付きの CCD カメラ (SK-160) を用いた。観測用のカメラは鏡を用い孔壁の撮影が出来る様になっている。

【地盤内撮影 CCD カメラ SK-160 (写真 2.8)】

- ・仕様：有効画素数 38 万画素，完全防水，
電源 12V/280mA，使用温度範囲-10～50℃
- ・寸法 $\phi 27\text{mm} \times$ 奥行 75mm，重量 80g
- ・製造元：(株)千代田常磐商行
- ・販売：ケーヨー



写真 2.8 CCD カメラ (SK-160)



写真 2.9 アクリルパイプ



写真 2.10 建込状況



写真 2.11 撮影状況



写真 2.12 撮影カメラ先端

2.4.4 比抵抗電気探査

比抵抗電気探査は、地表面に多数の電極を設置し、電流電極と電位電極の双極子ペアを切り替えることにより通電により発生する人工電位のポテンシャル分布を計測し、みかけ比抵抗の逆解析を行うことで、地盤の比抵抗（導電率の逆数）分布を求める方法である。比抵抗電位探査は、比較的簡易かつ安価に計測が可能であり、飽和度の変化を全体的に把握することが可能である。

地盤の飽和度と比抵抗の関係は、Archieの経験式並びに並列回路理論に基づき以下の式で表される。

$$1/\rho_s = \frac{1}{a\phi^{-m}S_w^{-n}\rho_w} + \sigma_c \quad (3)$$

ここで、 ρ_s ：地盤の比抵抗、 ϕ ：地盤の間隙率、 S_w ：地盤の飽和度、 ρ_w ：間隙水の比抵抗、 σ_c ：砂粒子の表面電気伝導、 a, m, n ：地盤に固有な係数である。

本実験における比抵抗電位探査の電極配置は、地表面に1.5m間隔で試験ヤードを横断する形で30極（延長45m）設置した（図2.2参照）。また、比抵抗の測定法については、Gradient dipole-dipole法を用いて行った。



写真 2.13 電極設置状況



写真 2.14 電極状況



写真 2.15 比抵抗測定装置

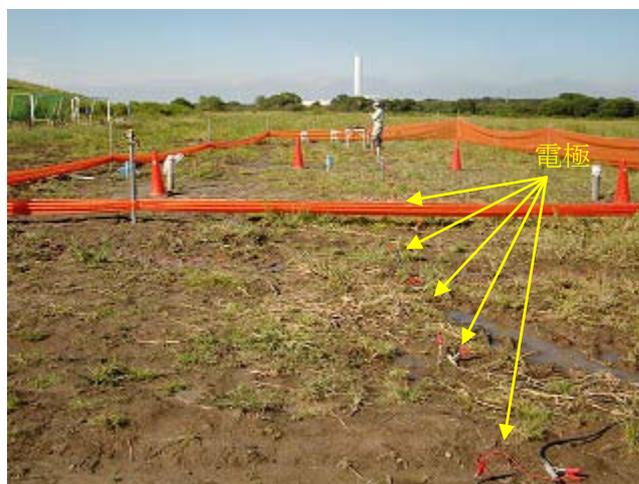


写真 2.16 計測状況

2.4.5 マイクロバブル水生成管理計測（注入流量，生成圧・圧送圧，溶存酸素）

マイクロバブル水の注入流量には以下の計器を用いた。

【複相流量計 HRC-120K（写真 2.17，写真 2.18）】

- ・仕様：流量 0～60L/min，圧力 0～6.0Mpa
- ・精度：定格値の±1%
- ・寸法 検出部 寸法(W)220mm,(D)320mm,(H)320mm，重量 16kg
記録部 寸法(W)210mm,(D)390mm,(H)250mm，重量 14kg
- ・製造元：昭和(株)



写真 2.17 薬液注入用流量計（検出部）



写真 2.18 薬液注入用流量計（記録部）

【超音波流量計 UFP-10（写真 2.19，写真 2.20）】

- ・仕様：流量-20～20m/L
- ・精度：±1.5%
- ・寸法 検出部 寸法(W)420mm,(D)64mm,(H)55mm
記録部 寸法(W)230mm,(D)120mm,(H)71mm，本体重量 1.3kg
- ・製造元：(株)トキメック



写真 2.19 流量計（超音波）



写真 2.20 流量計計測ロガー（超音波）

なお、マイクロバブル水の生成圧（圧送圧）は、マイクロバブルジェネレータに設置してある下記の圧力計にて計測した。また、生成時の MB 水の溶存酸素量は蛍光式溶存酸素計を用いて管理した。

【圧力計（写真 2.21）】

- ・仕様：0～1Mpa



写真 2.21 圧力計

【蛍光式溶存酸素計 HQ40d18（写真 2.22）】

- ・名称：蛍光式溶存酸素計
- ・仕様：溶存酸素量 0.1～20.0mg/L，温度 0～50℃
- ・精度：溶存酸素±0.1mg/L（0.1～8.0mg/L），±0.2mg/L（8.0mg/L 以上），温度±0.3℃
- ・製造元：HACH COMPANY.（アメリカ製）



写真 2.22 蛍光式溶存酸素計

2.4.6 その他計測項目

その他計測として、MB水注入による影響や地下水位を計測する目的で地盤間隙水圧、地表面沈下を計測した。なお、沈下はオートレベルにて水準測量を行い、相対沈下量を計測した。

【間隙水圧計 BPR-A-50K (写真 2.23)】

- ・名称：小型間隙水圧計 BPR-A-50K
- ・データロガー：TC-31K
- ・仕様：50kPa
- ・精度：±1.0%
- ・寸法 センサー 径φ20mm，長さ35mm，重量35g
- ・製造元：(株)共和電業



写真 2.23 間隙水圧計

2.5 マイクロバブル水注入実験実施方法

図 2.8 に MB 水注入配置図を示す。今回の実験は洪水期（主に 6 月～10 月）の江戸川の河川敷を利用して実験を行ったため、仮設物を常時設置することが出来なかったが、コンパクトな注入設備で施工することが出来ることから、MB 水注入プラントなどの仮設設備を車上（4t ユニック上）に設置し注入実験を行った。

図 2.9 に MB 水注入の 1 日の作業フローを示す。なお、MB 水生成用の用水は、地下水を揚水孔による揚水、および江戸川の河川の水を汲み上げることにより確保した。

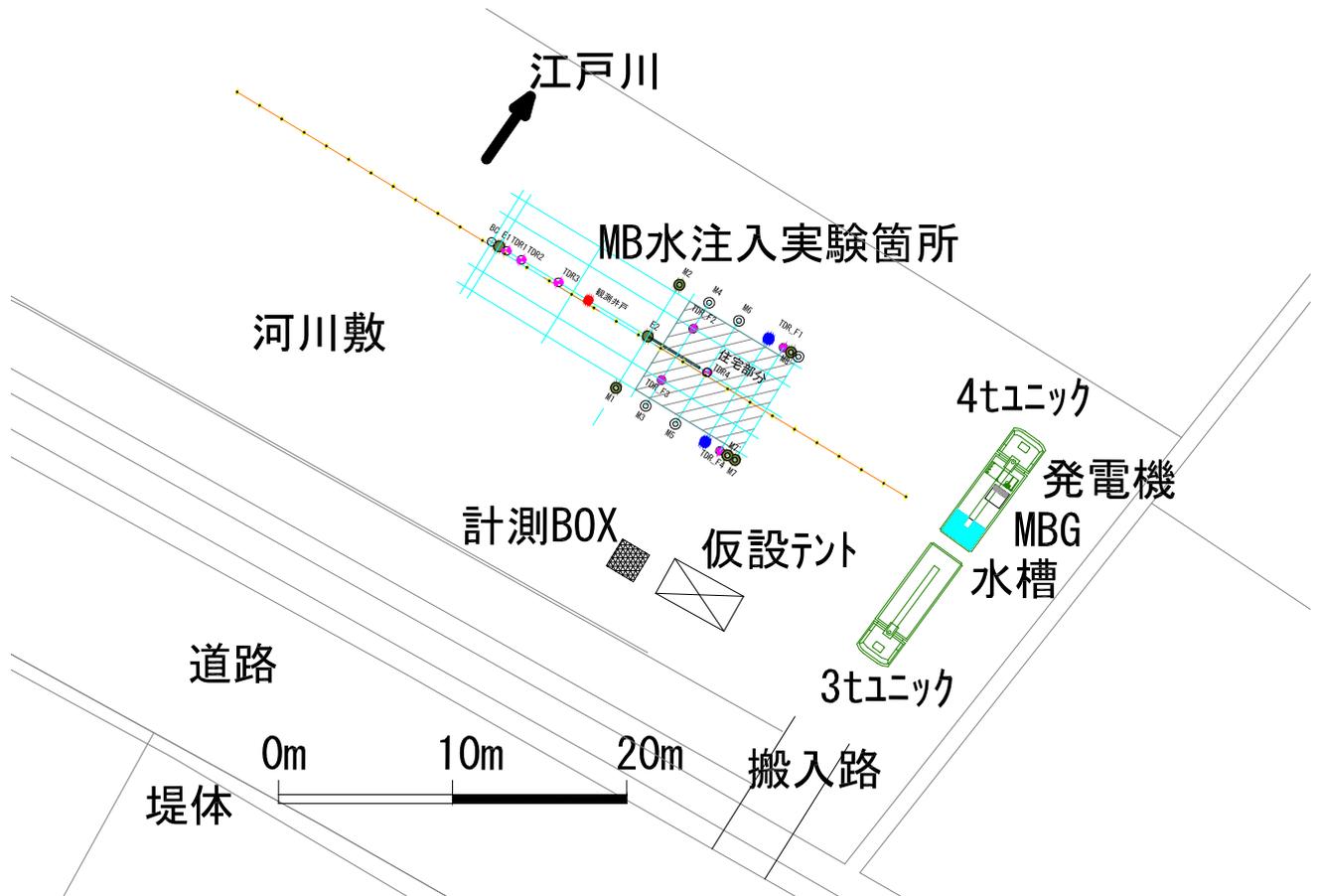


図 2.8 MB 水注入配置図



写真 2.24 配管状況



写真 2.25 実験全景

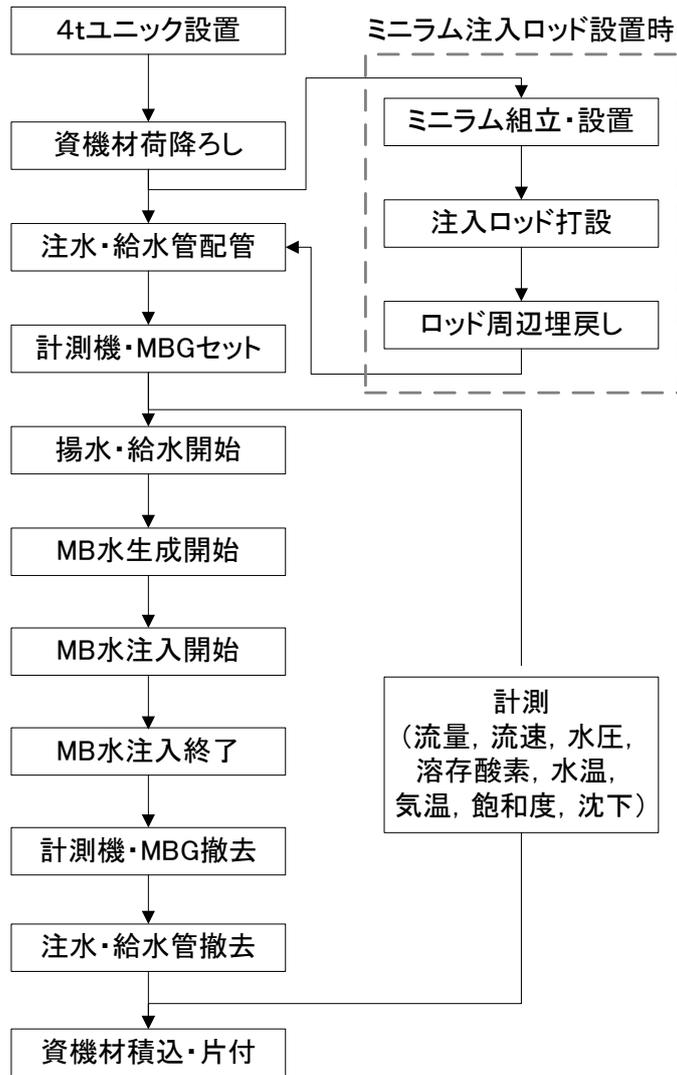


図 2.9 MB 水注入 1 日の作業フロー



写真 2.26 MB 水注入車上プラントの様子 (4t ユニッック)

3 実験サイトの土質条件の検討

地盤調査実施項目と結果を以下に示す。

試験地盤は、中川低地のほぼ南東端にあたり、下総台地と接しながら南流する江戸川の河川敷（右岸）に位置する N 値 20 以下の沖積層である。

図 3.1 に試験地盤の柱状図を示す。地盤構成は、地表面から GL.-1.3m までは江戸川から採取した砂質主体の埋土であり、その下に N 値 1~2 のシルト質細砂層が 0.95m、砂質シルト層が 0.9m 存在する。今回 MB 水注入対象となる砂質地盤層は、GL.-3.15m から GL.-5.9m までの層厚 2.75m の細粒分の少ないシルト質細砂地盤であり、平均粒径がおおよそ 0.18mm の粒径の揃った地盤である。また、N 値は、浅層部分においては 10 以下であるが、深度が深くなるほど 20 程度に大きくなる。注入対象層下の GL.-5.9m 以深の地盤は粘性の高い N 値 0 の砂混じりシルト層となる。

また、同図には建築基礎構造指針(2001年改定)に基づいて算出した対象層の FL 値を示す。MB 水注入対象層は損傷限界時が 1.0 程度、終局限界では 0.7~0.8 程度となった。なお、地表面水平加速度値は損傷限界 200Gal、終局限界 350Gal とし、細粒分が 35%以上の層は対象外とした。

一方、図 3.2 に透水試験計測結果を示す。測定結果によると $k=9 \times 10^{-5}(\text{cm/s})$ で、砂質土としては低い測定値となった。

さらに図 3.3 には広範囲にミニラムサウンディング試験と比抵抗電気探査した結果を示す。ミニラム試験による N 値の結果と標準貫入試験の結果は同等であり、各調査地点においてもほとんど値に変化がなかった。また、比抵抗電気探査の結果においても地層が比較的水平に現れており、試験地盤は水平成層であると判断される。

図 3.4 には試験期間中の地盤内に設置した間隙水圧から求めた地下水位と国土交通省ホームページに掲載されている流山での河川水位の変化 ¹⁾である。ボーリング調査での地下水位と流山の河川水位は約 0.4m 地下水位が高く、地盤内に設置された水圧計（PWP1~PWP4）の換算地下水位においても、流山の河川水位より約 2m 地下水位の方が高くなる。これより試験期間中、地下水が注入対象砂層まで下がることはなかったと判断される。また、図 3.5 は流山の 1989 年から 2010 年までの水位結果をまとめたものであるが、流山での河川水位が注入対象砂層まで下がった形跡はなく、実際に三郷の地下水位は河川水位より高いことから、注入対象層が過去に不飽和化されたことはないといえる。

表 3.1 地盤調査実施項目

| 名称 | 試験等種類 | 単位 | 数量 | 目的 |
|-----------|--------------------------------------|----|----|---------|
| 標準貫入試験 | | 箇所 | 1 | 地盤強度の把握 |
| コアサンプリング | φ 60mm | 箇所 | 1 | 地盤性状把握 |
| 物理試験 | 密度試験, 含水比試験, 粒度試験, 比重試験, 液塑性試験 | 式 | 1 | 地盤性状把握 |
| 現場透水試験 | | 箇所 | 1 | 地盤性状把握 |
| 地下水位計測 | | 箇所 | 1 | 地盤性状把握 |
| ラムサウンディング | | 箇所 | 3 | 地盤性状の把握 |
| 比抵抗電気探査 | | 測線 | 1 | 地盤性状の把握 |

ボーリング柱状図

調査名 宅地地盤液状化対策のためのマイクロバブル水注入工法による地盤内注
入空気の持続性計測業務 地質調査

ボーリングNo. 1

事業・工事名

シートNo. 1

| | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------------------------------|---|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------|----------------------|------|------------------------|-----------------|---------------|
| ボーリング名 | No. 1 | | 調査位置 | 埼玉県三郷市田中新田江戸川河川敷内 29.0K右岸付近 | | | 北緯 | | | | |
| 発注機関 | 国土交通省国土技術政策総合研究所 | | | 調査期間 | 平成 22 年 9 月 2 日 ~ 22 年 9 月 3 日 | | | 東経 | | | |
| 調査業者名 | 佐藤工業株式会社 技術研究所 電話 (046-270-3091) | | 主任技師 | 辻野 修一 | | 現場代理人 | 水尾 浩一 コア鑑定者 三宅 正志 | | ボーリング責任者 | 横山 貴史 | |
| 孔口標高 | | 角 | 180° 上 90° 下 | 方 | 北 0° 270° 西 180° 東 90° | 地盤勾配 | 水平 0° 鉛直 90° | 使用機種 | 試錐機 D0-D エンジン NFD-9 | ハンマー落下用具 ポンプ | 半自動落下式 V-6 |
| 総掘進長 | 10.60m | | 度 | | | | | | | | |

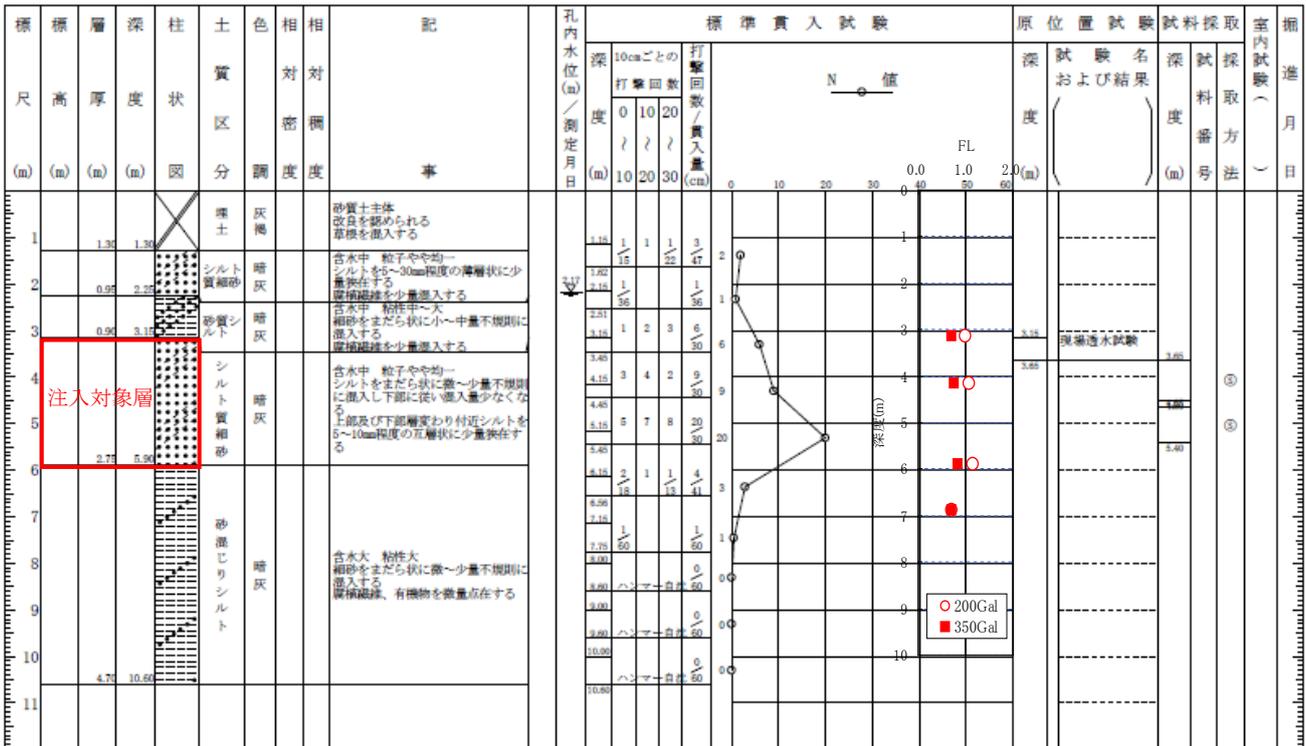


図 3.1 ボーリング柱状図 (液状化判定)

表 3.2 土質試験結果一覧表

| | | 土質試験結果一覧表 (基礎地盤) | | | | | |
|-----------------------------------|--|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---|
| 調査件名 | | 宅地地盤液状化対策のためのマイクロバブル水注入工法による地盤内注入空気持続性計測業務 地質調査 | | | 整理年月日 | 平成22年9月 | |
| | | | | | 整理担当者 | 小川 良紀 | |
| 試料番号 (深さ) | | 1-1 (1.15~1.62m) | 1-2 (2.15~2.51m) | 1-3 (3.15~3.45m) | 1-4 (4.15~4.45m) | 1-5 (5.15~5.45m) | 1-6 (6.15~6.56m) |
| | 一般 | 湿潤密度 ρ_t g/cm ³ | | | 1.649 | 1.638 | |
| 乾燥密度 ρ_d g/cm ³ | | | | 1.239 | 1.259 | | |
| 土粒子の密度 ρ_s g/cm ³ | | 2.703 | 2.616 | 2.691 | 2.725 | 2.739 | 2.682 |
| 自然含水比 w_n % | | 19.5 | 51.0 | 32.8 | 30.4 | 25.2 | 47.6 |
| 間隙比 e | | | | 1.171 | 1.006 | | |
| 飽和度 S_r % | | | | 76.0 | 55.8 | | |
| 粒度 | 石分 (75mm以上) % | | | | | | |
| | 礫分 ¹⁾ (2~75mm) % | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | 砂分 ¹⁾ (0.075~2mm) % | 77.8 | 27.0 | 80.4 | 89.8 | 84.9 | 54.3 |
| | シルト分 ¹⁾ (0.005~0.075mm) % | 14.3 | 51.8 | 15.2 | 5.0 | 8.6 | 30.2 |
| | 粘土分 ¹⁾ (0.005mm未満) % | 7.9 | 21.2 | 4.4 | 5.2 | 6.5 | 15.5 |
| | 最大粒径 mm | 0.850 | 0.425 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| | 均等係数 U_c | 14.2 | --- | 6.78 | 2.91 | 11.5 | --- |
| 曲率係数 U_c' | 5.25 | --- | 3.00 | 1.33 | 4.68 | --- | |
| コンシステンシー特性 | 液性限界 w_L % | NP | 49.4 | NP | NP | NP | 45.5 |
| | 塑性限界 w_P % | NP | 31.9 | NP | NP | NP | 30.8 |
| | 塑性指数 I_P | | 17.5 | | | | 14.7 |
| 分類 | 地盤材料の分類名 | 細粒分質砂 | 砂質シルト (低液性限界) | 細粒分質砂 | 細粒分まじり砂 | 細粒分質砂 | シルト質砂 (低液性限界) |
| | 分類記号 | (SF) | (MLS) | (SF) | (S-F) | (SF) | (SML) |
| 圧密 | 試験方法 | | | | | | |
| | 圧縮指数 C_c 圧密降伏応力 p_c kN/m ² | | | | | | |
| 一軸圧縮 | 一軸圧縮強さ q_u kN/m ² | | | | | | |
| せん断 | 試験条件 | | | | | | |
| | 全応力 有効応力 | c kN/m ² ϕ c' kN/m ² ϕ' | | | | | |
| 特記事項 | | | | | | | 1) 石分を除いた 75mm 未満の土質材料に対する百分率で表す。 [1kN/m ² ≒0.102kgf/cm ²] |

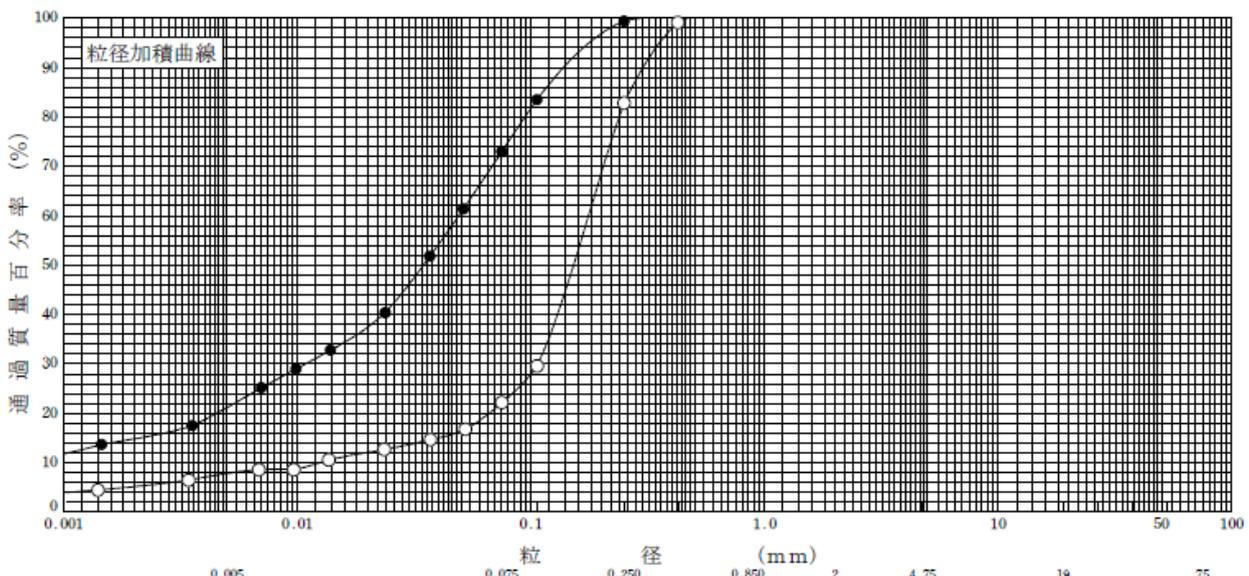
表 3.3 土の粒度試験結果(1)

| | | |
|------------------------|-----------------|--|
| JIS A 1204 JGS 0131 | 土の粒度試験 (粒径加積曲線) | |
|------------------------|-----------------|--|

調査件名 宅地地盤液状化対策のためのマイクロバブル水注入工法による地盤内注入空気を持続性計測業務 地質調査 試験年月日 平成22年9月14日

試験者 野田 保美

| 試料番号 (深さ) | 1-1 (1.15~1.62m) | | 1-2 (2.15~2.51m) | | 試料番号 (深さ) | 1-1 (1.15~1.62m) | 1-2 (2.15~2.51m) |
|--------------|---------------------|----------|---------------------|----------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 粒径 mm | 通過質量百分率% | 粒径 mm | 通過質量百分率% | | | |
| ふるい | | | | | 粗 礫 分 % | 0.0 | 0.0 |
| | 75 | | 75 | | 中 礫 分 % | 0.0 | 0.0 |
| | 53 | | 53 | | 細 礫 分 % | 0.0 | 0.0 |
| | 37.5 | | 37.5 | | 粗 砂 分 % | 0.0 | 0.0 |
| | 26.5 | | 26.5 | | 中 砂 分 % | 17.2 | 0.6 |
| | 19 | | 19 | | 細 砂 分 % | 60.6 | 26.4 |
| | 9.5 | | 9.5 | | シルト分 % | 14.3 | 51.8 |
| | 4.75 | | 4.75 | | 粘土分 % | 7.9 | 21.2 |
| | 2 | | 2 | | 2mmふるい通過質量百分率 % | 100.0 | 100.0 |
| | 0.850 | 100.0 | 0.850 | | 425μmふるい通過質量百分率 % | 99.1 | 100.0 |
| | 0.425 | 99.1 | 0.425 | 100.0 | 75μmふるい通過質量百分率 % | 22.2 | 73.0 |
| | 0.250 | 82.8 | 0.250 | 99.4 | 最大粒径 mm | 0.850 | 0.425 |
| | 0.106 | 29.6 | 0.106 | 83.5 | 60% 粒径 D_{60} mm | 0.176 | 0.0490 |
| | 0.075 | 22.2 | 0.075 | 73.0 | 50% 粒径 D_{50} mm | 0.152 | 0.0345 |
| 沈降 | 0.0523 | 16.8 | 0.0514 | 61.4 | 30% 粒径 D_{30} mm | 0.107 | 0.0108 |
| | 0.0371 | 14.7 | 0.0369 | 51.8 | 10% 粒径 D_{10} mm | 0.0124 | ---- |
| | 0.0235 | 12.7 | 0.0237 | 40.4 | 均等係数 U_c | 14.2 | ---- |
| | 0.0136 | 10.6 | 0.0139 | 32.8 | 曲率係数 U_c | 5.25 | ---- |
| | 0.0097 | 8.6 | 0.0099 | 29.0 | 土粒子の密度 ρ_s g/cm ³ | 2.703 | 2.616 |
| | 0.0068 | 8.6 | 0.0070 | 25.2 | 使用した分散剤 | ヘキサメタリン酸ナトリウム 10ml | ヘキサメタリン酸ナトリウム 10ml |
| | 0.0034 | 6.5 | 0.0035 | 17.5 | 溶液濃度、溶液添加量 | | |
| | 0.0014 | 4.5 | 0.0015 | 13.7 | 20% 粒径 D_{20} mm | 0.0663 | 0.00449 |
| | | | | 記号 | -○- | -●- | |



| | | | | | | | |
|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 粘 土 | シ ル ト | 細 砂 | 中 砂 | 粗 砂 | 細 礫 | 中 礫 | 粗 礫 |
|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

特記事項

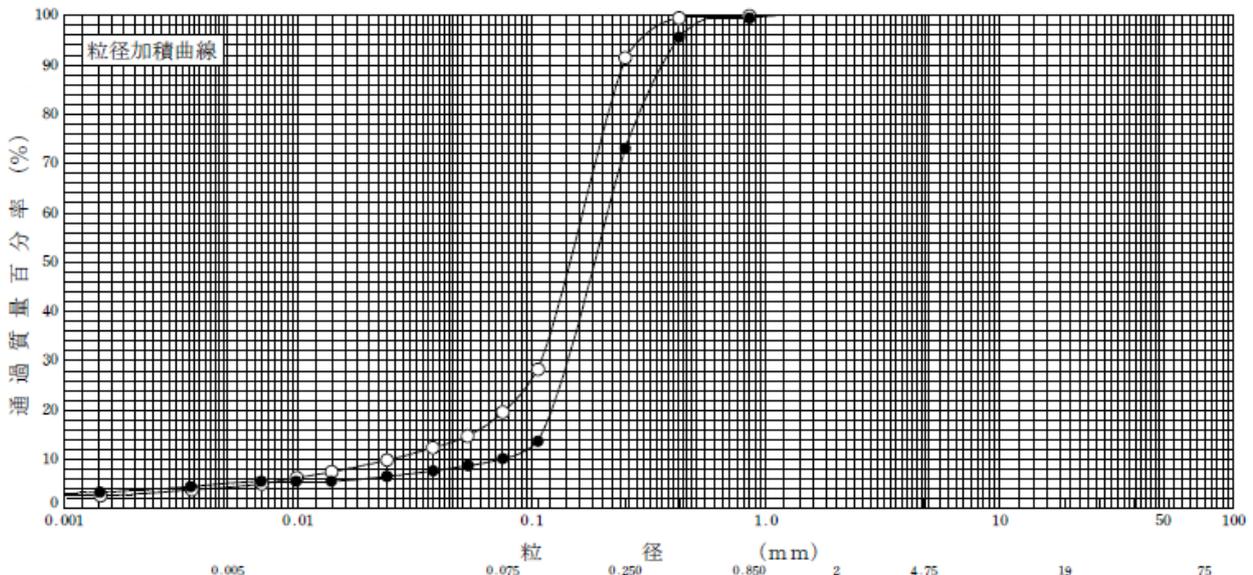
表 3.4 土の粒度試験結果(2)

| | | |
|------------------------|-----------------|--|
| JIS A 1204 JGS 0131 | 土の粒度試験 (粒径加積曲線) | |
|------------------------|-----------------|--|

調査件名 宅地地盤液状化対策のためのマイクロバブル水注入工法による地盤内注入空気持続性計測業務 地質調査 試験年月日 平成22年9月14日

試験者 野田 保美

| 試料番号 (深さ) | 1-3 (3.15~3.45m) | | 1-4 (4.15~4.45m) | | 試料番号 (深さ) | 1-3 | 1-4 |
|--------------|---------------------|----------|---------------------|----------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 粒径 mm | 通過質量百分率% | 粒径 mm | 通過質量百分率% | | (3.15~3.45m) | (4.15~4.45m) |
| ふるい | 粗 礫 分 % | 0.0 | 粗 礫 分 % | 0.0 | 粗 礫 分 % | 0.0 | 0.0 |
| | 75 | | 75 | | 中 礫 分 % | 0.0 | 0.0 |
| | 53 | | 53 | | 細 礫 分 % | 0.0 | 0.0 |
| | 37.5 | | 37.5 | | 粗 砂 分 % | 0.1 | 0.5 |
| | 26.5 | | 26.5 | | 中 砂 分 % | 8.5 | 26.4 |
| | 19 | | 19 | | 細 砂 分 % | 71.8 | 62.9 |
| | 9.5 | | 9.5 | | シルト分 % | 15.2 | 5.0 |
| | 4.75 | | 4.75 | | 粘土分 % | 4.4 | 5.2 |
| | 2 | 100.0 | 2 | 100.0 | 2mmふるい通過質量百分率 % | 100.0 | 100.0 |
| | 0.850 | 99.9 | 0.850 | 99.5 | 425μmふるい通過質量百分率 % | 99.5 | 95.6 |
| | 0.425 | 99.5 | 0.425 | 95.6 | 75μmふるい通過質量百分率 % | 19.6 | 10.2 |
| | 0.250 | 91.4 | 0.250 | 73.1 | 最大粒径 mm | 2.00 | 2.00 |
| | 0.106 | 28.3 | 0.106 | 13.7 | 60% 粒径 D_{60} mm | 0.164 | 0.210 |
| | 0.075 | 19.6 | 0.075 | 10.2 | 50% 粒径 D_{50} mm | 0.145 | 0.185 |
| 沈降分析 | 0.0530 | 14.8 | 0.0533 | 8.8 | 30% 粒径 D_{30} mm | 0.109 | 0.142 |
| | 0.0377 | 12.4 | 0.0378 | 7.7 | 10% 粒径 D_{10} mm | 0.0242 | 0.0722 |
| | 0.0240 | 9.9 | 0.0239 | 6.6 | 均等係数 U_c | 6.78 | 2.91 |
| | 0.0139 | 7.5 | 0.0139 | 5.6 | 曲率係数 U'_c | 3.00 | 1.33 |
| | 0.0099 | 6.3 | 0.0098 | 5.6 | 土粒子の密度 ρ_s g/cm ³ | 2.691 | 2.725 |
| | 0.0070 | 5.1 | 0.0069 | 5.6 | 使用した分散剤 | ヘキサメタリン酸ナトリウム 10ml | ヘキサメタリン酸ナトリウム 10ml |
| | 0.0035 | 3.9 | 0.0035 | 4.5 | 溶液濃度、溶液添加量 | | |
| | 0.0014 | 2.7 | 0.0014 | 3.4 | 20% 粒径 D_{20} mm | 0.0766 | 0.121 |
| | | | | 記号 | -○- | -●- | |



| | | | | | | | |
|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 粘 土 | シ ル ト | 細 砂 | 中 砂 | 粗 砂 | 細 礫 | 中 礫 | 粗 礫 |
|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

特記事項

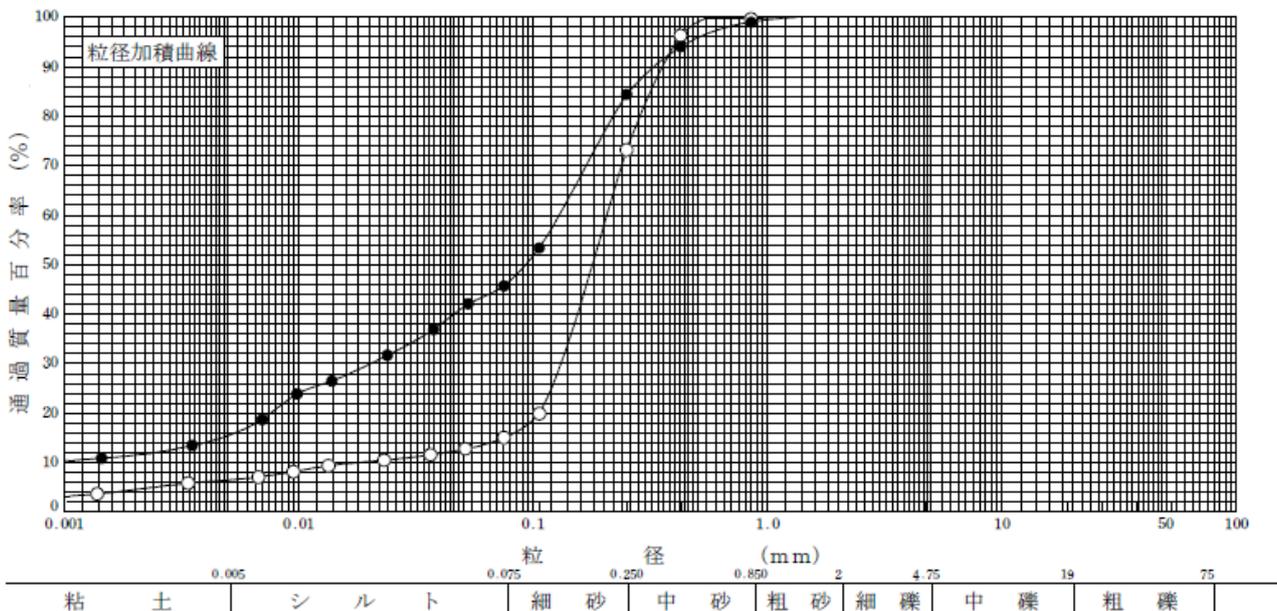
表 3.5 土の粒度試験結果(3)

| | | |
|------------------------|-----------------|--|
| JIS A 1204 JGS 0131 | 土の粒度試験 (粒径加積曲線) | |
|------------------------|-----------------|--|

調査件名 宅地地盤液状化対策のためのマイクロバブル水注入工法による地盤内注入空気を持続性計測業務 地質調査 試験年月日 平成22年9月14日

試験者 野田 保美

| 試料番号 (深さ) | 1-5 (5.15~5.45m) | | 1-6 (6.15~6.56m) | | 試料番号 (深さ) | 1-5 | 1-6 |
|--------------|---------------------|----------|---------------------|----------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 粒径 mm | 通過質量百分率% | 粒径 mm | 通過質量百分率% | | (5.15~5.45m) | (6.15~6.56m) |
| ふるい | | | | | 粗 礫 分 % | 0.0 | 0.0 |
| | 75 | | 75 | | 中 礫 分 % | 0.0 | 0.0 |
| | 53 | | 53 | | 細 礫 分 % | 0.0 | 0.0 |
| | 37.5 | | 37.5 | | 粗 砂 分 % | 0.4 | 1.0 |
| | 26.5 | | 26.5 | | 中 砂 分 % | 26.4 | 14.6 |
| | 19 | | 19 | | 細 砂 分 % | 58.1 | 38.7 |
| | 9.5 | | 9.5 | | シルト分 % | 8.6 | 30.2 |
| | 4.75 | | 4.75 | | 粘土分 % | 6.5 | 15.5 |
| | 2 | 100.0 | 2 | 100.0 | 2mmふるい通過質量百分率 % | 100.0 | 100.0 |
| | 0.850 | 99.6 | 0.850 | 99.0 | 425 μ mふるい通過質量百分率 % | 96.3 | 94.0 |
| | 0.425 | 96.3 | 0.425 | 94.0 | 75 μ mふるい通過質量百分率 % | 15.1 | 45.7 |
| | 0.250 | 73.2 | 0.250 | 84.4 | 最大粒径 mm | 2.00 | 2.00 |
| | 0.106 | 19.9 | 0.106 | 53.4 | 60% 粒径 D_{60} mm | 0.206 | 0.129 |
| | 0.075 | 15.1 | 0.075 | 45.7 | 50% 粒径 D_{50} mm | 0.179 | 0.0928 |
| | 沈降分析 | 0.0514 | 12.8 | 0.0528 | 42.1 | 30% 粒径 D_{30} mm | 0.131 |
| 0.0364 | | 11.6 | 0.0375 | 36.9 | 10% 粒径 D_{10} mm | 0.0179 | ----- |
| 0.0231 | | 10.5 | 0.0239 | 31.7 | 均等係数 U_c | 11.5 | ----- |
| 0.0134 | | 9.4 | 0.0139 | 26.5 | 曲率係数 U'_c | 4.68 | ----- |
| 0.0095 | | 8.2 | 0.0098 | 23.9 | 土粒子の密度 ρ_s g/cm ³ | 2.739 | 2.682 |
| 0.0067 | | 7.1 | 0.0070 | 18.7 | 使用した分散剤 | ヘキサメタリン酸ナトリウム 10ml | ヘキサメタリン酸ナトリウム 10ml |
| 0.0034 | | 5.9 | 0.0035 | 13.5 | 溶液濃度、溶液添加量 | | |
| 0.0014 | | 3.7 | 0.0014 | 10.9 | 20% 粒径 D_{20} mm | 0.106 | 0.00757 |
| | | | | 記号 | -○- | -●- | |

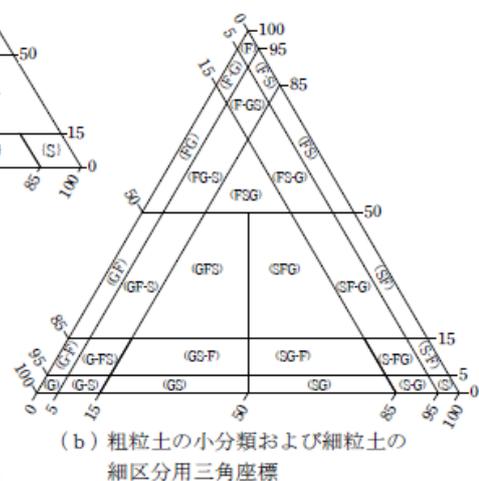
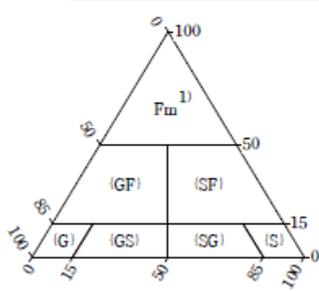
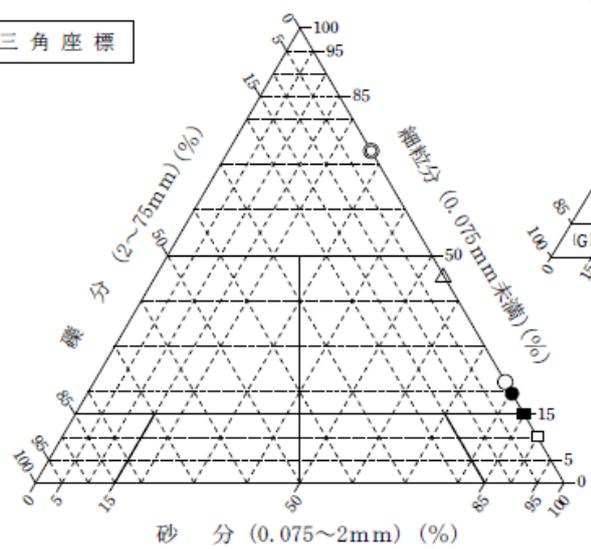


特記事項

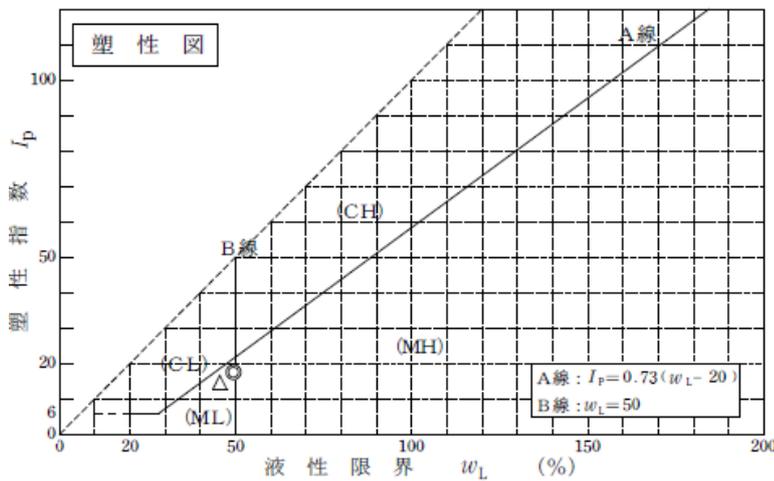
表 3.6 地盤の工学的分類

| JGS 0051 | | 地盤材料の工学的分類 | | | | |
|-----------------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 調査件名 | 宅地地盤液状化対策のためのマイクロバブル水注入工法による地盤内注入空気持続性計測業務 地質調査 | | | | 試験年月日 | 平成22年9月17日 |
| | | | | | 試験者 | 小川 良紀 |
| 試料番号 (深 さ) | 1-1 (1.15~1.62m) | 1-2 (2.15~2.51m) | 1-3 (3.15~3.45m) | 1-4 (4.15~4.45m) | 1-5 (5.15~5.45m) | 1-6 (6.15~6.56m) |
| 石 分(75mm以上) % | | | | | | |
| 礫 分(2~75mm) % | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 砂 分(0.075~2mm) % | 77.8 | 27.0 | 80.4 | 89.8 | 84.9 | 54.3 |
| 細 粒 分(0.075mm未満) % | 22.2 | 73.0 | 19.6 | 10.2 | 15.1 | 45.7 |
| シルト分(0.005~0.075mm) % | 14.3 | 51.8 | 15.2 | 5.0 | 8.6 | 30.2 |
| 粘 土 分(0.005mm未満) % | 7.9 | 21.2 | 4.4 | 5.2 | 6.5 | 15.5 |
| 最 大 粒 径 mm | 0.850 | 0.425 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| 均 等 係 数 U_c | 14.2 | ---- | 6.78 | 2.91 | 11.5 | ---- |
| 液 性 限 界 w_L | NP | 49.4 | NP | NP | NP | 45.5 |
| 塑 性 限 界 w_P % | | 31.9 | | | | 30.8 |
| 塑 性 指 数 I_P % | | 17.5 | | | | 14.7 |
| 地盤材料の分類名 | 細粒分質砂 | 砂質シルト (低液性限界) | 細粒分質砂 | 細粒分まじり砂 | 細粒分質砂 | シルト質砂 (低液性限界) |
| 分 類 記 号 | (SF) | (MLS) | (SF) | (S-F) | (SF) | (SML) |
| 凡 例 記 号 | ○ | ◎ | ● | □ | ■ | △ |

三角座標



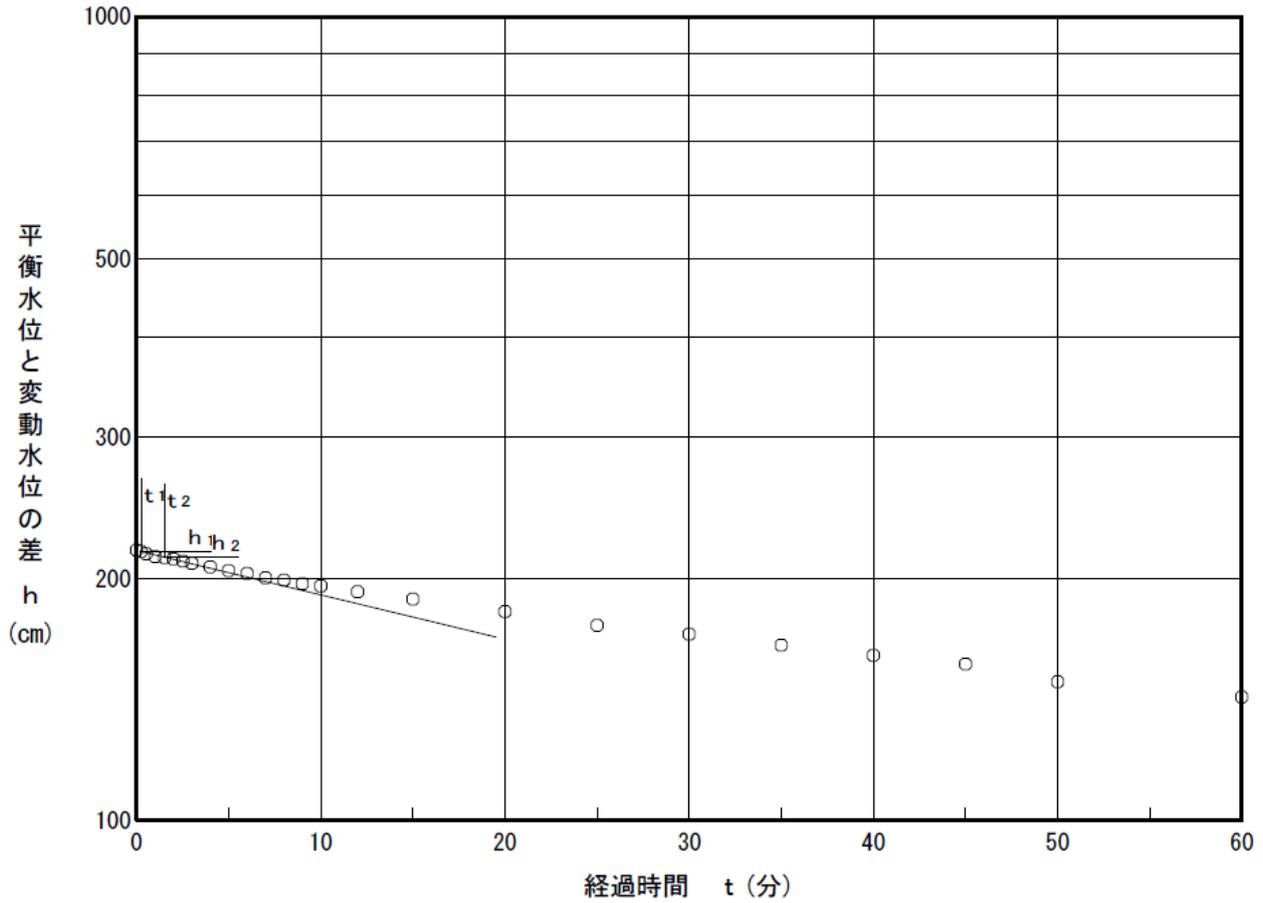
(b) 粗粒土の小分類および細粒土の細区分用三角座標



特記事項 1) 主に観察と塑性図で判別分類

現場透水試験結果図

| | | | | | |
|------|------------------------------------|------|----|------------|--------------|
| 調査件名 | マイクロバブル水注入工法による地盤内注入 空気の持続性計測業務 | | | 平衡水位 | GL - 2.170 m |
| 測定番号 | No.1 | 透水区間 | GL | 試験時の 状況 | |
| 測定月日 | 平成22年 9月 2日 | | ~ | | |
| 開始時間 | | N 値 | 6 | | |
| 地質名 | 細砂 | | | | |



透水係数算定式

$$k = \frac{R^2}{2L(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{L}{R}\right) \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

L = 50.00 cm R = 4.035 cm

透水係数算定結果

| 注入法 | | ○ | 回復法 | |
|----------------|------------------------------|---|----------------|------|
| t ₁ | 15 sec | | t ₁ | sec |
| t ₂ | 90 sec | | t ₂ | sec |
| h ₁ | 215.9 cm | | h ₁ | cm |
| h ₂ | 212.5 cm | | h ₂ | cm |
| 透水係数 k | 8.67 × 10 ⁻⁵ cm/s | | 透水係数 k | cm/s |

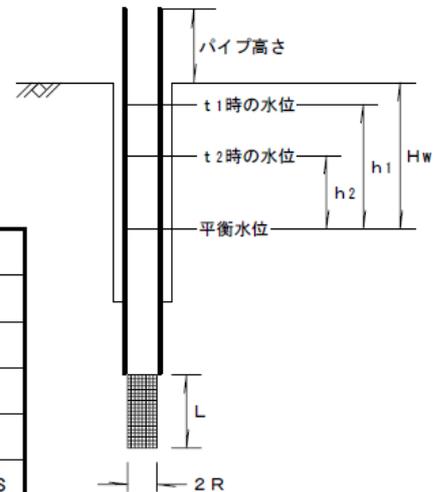


図 3.2 現場透水試験実施結果

【ミニラムサウンディング試験および比抵抗電気探査調査結果】

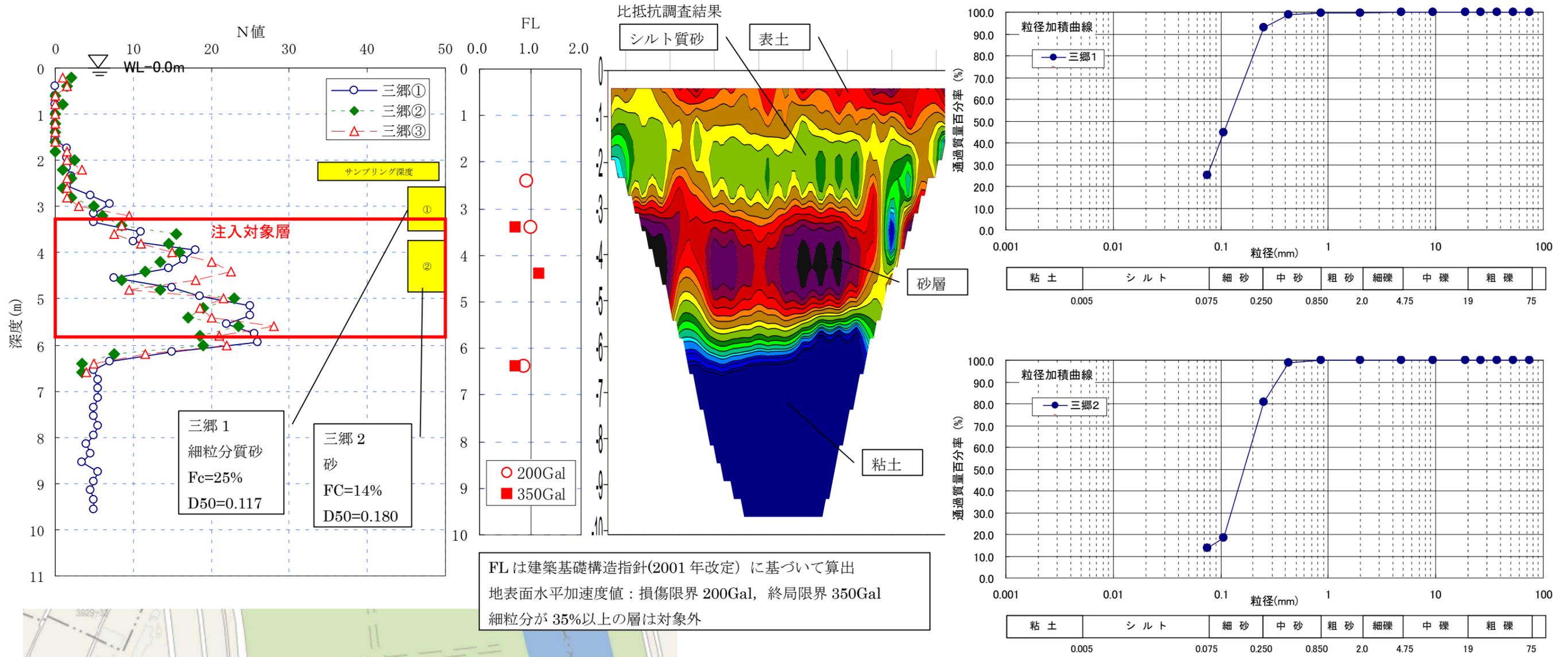


写真 3.1 調査①のサンプリング写真 (GL.-3.8m~GL.-4.8m)

図 3.3 ミニラムサウンディング・比抵抗電気探査調査結果



写真 3.2 試験ヤード全景



写真 3.3 試験場所出入り口付近



写真 3.4 試験地盤状況写真

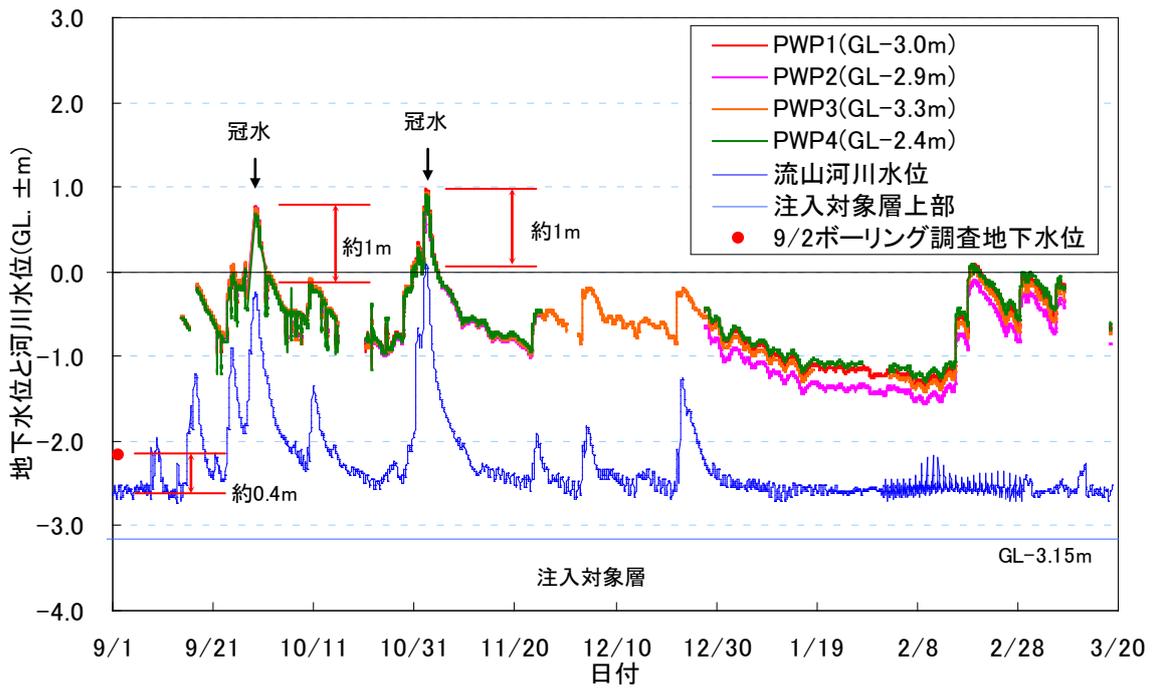


図 3.4 試験期間の地下水位と流山(27.7K)河川水位変化²⁾

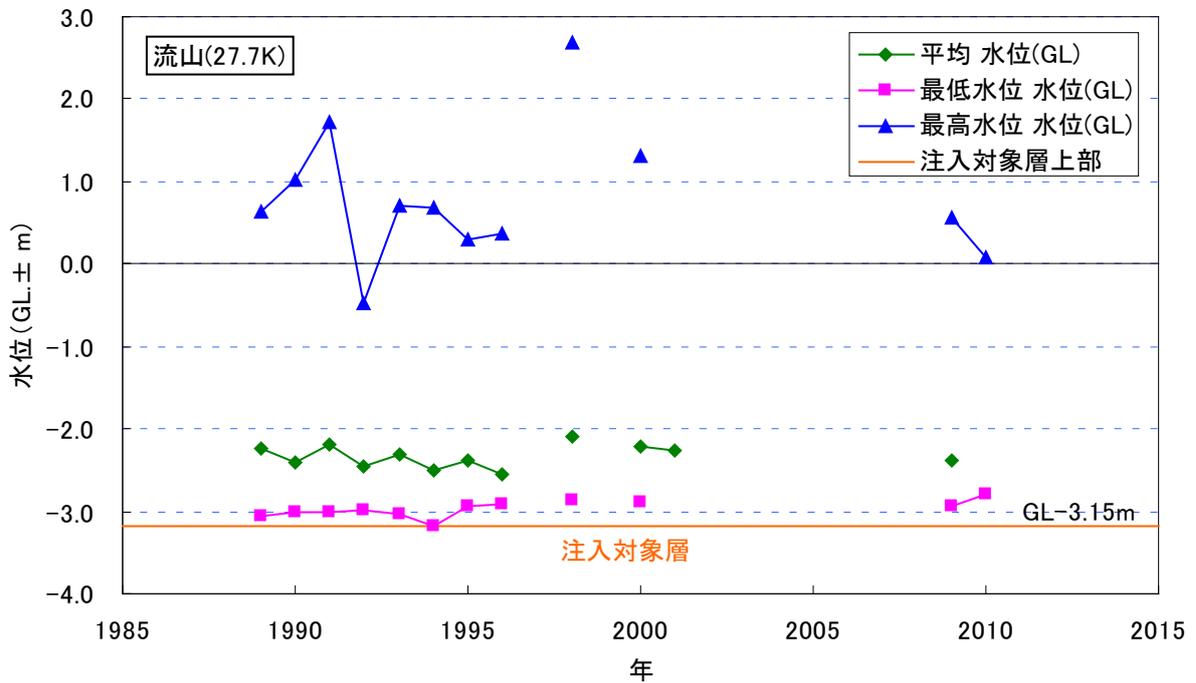


図 3.5 流山(27.7K)計測水位記録¹⁾

1) 国土交通省ホームページ：水文水質データベース <http://www1.river.go.jp/>

4 マイクロバブル水の注入方法の検討

4.1 MB 生成方法

4.1.1 マイクロバブル水発生装置

MB 水生成には、ニクニ製の加圧式マイクロバブルジェネレーター（以下 MBG）を使用した。MBG を写真 4.1 に、性能を表 4.2 に示す。

装置は主に渦流タービンポンプと余剰エア分離タンクからなり、渦流タービンポンプにより水と気体を効果的に自給混合溶解・圧送を行い、余剰エア分離タンクでさらに圧力下で空気の溶解を高めた後、注水時にノズルやバルブなどにより加圧水の圧力を開放することにより MB を発生させる。

MB は所定の水圧、流量が確保できないと気泡が発生しないため、事前に注水試験を行い、MB 水発生状況と流量・圧力を調整した結果、MB 水生成圧（MB 水発生ノズルまでの送水圧）を 0.5MPa、総流量を約 35L/min とした。

なお、MB 水生成に使用する用水は、主に揚水孔からの地下水を利用し、水量に応じ江戸川の河川の水を利用した。



写真 4.1 MBG (MB 水生成装置)

表 4.1 マイクロバブルジェネレーター (MBG) 性能表

| 装置名 | 加圧水流量(m ³ /h) | 空気注入量 | モーター動力 |
|------------|--------------------------|----------|--------|
| MBG32N37CE | 約 3.0 | 流量の約 10% | 3.7kW |

*尚、上記の値は周波数 50Hz での値。



写真 4.2 MB 水生成状況



写真 4.3 MB 発生状況

4.1.2 マイクロバブル水発生ノズル

MB水注入では、注入時の送水配管内の気泡の滞留を防ぐため、MBGにより圧力下で生成した高濃度空気溶存水を地盤注入前にMBを発生させることとし、MB発生ノズルを注入ロッド先端に設置した。

MB発生ノズルを写真4.4～写真4.7に示す。ノズルは筑波大学京藤教授開発の渦崩壊を利用したタービン型気泡発生ノズルを使用した。

ノズルは内部で旋回流により高濃度空気溶存水を縮流し、圧力を開放させることにより渦崩壊を発生させ、微細気泡を発生させる構造になっている。

写真は二重管注入用ノズルである。ノズルは直径2cmの内に径6mmのノズルが4つ並列配置し、注入に必要な流量を確保しながらMBが発生出来る仕組みになっている。



写真 4.4 MB発生ノズル（側面）



写真 4.5 MB発生ノズル（断面）

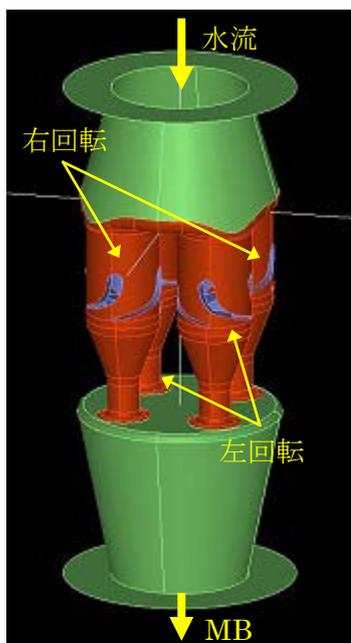


図 4.6 MB発生ノズル内部

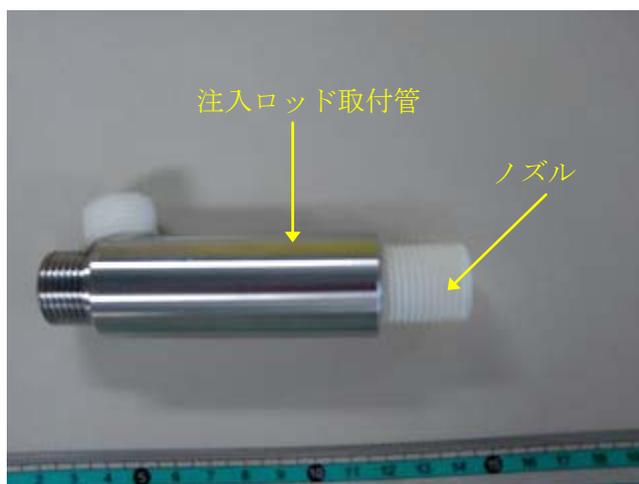


写真 4.7 注入ロッド取付管

4.2 注入方法

4.2.1 二重管注入孔（鉛直管，傾斜管）

図 4.1 に二重管ダブルパッカー注入の概要図を示す。二重管注入法は，液状化対策などに用いられる薬液注入工法の 1 種である。この手法は，注入内管（注入ロッド）と逆止弁付き注入外管（φ40 塩ビ管）の二重管からなり，注水逆止弁の深度で注入ロッドの注入口上下に付けられたパッカーを膨らませることにより，所定の深度での注入が可能である。また，外管は，シールグラウトを行うことにより注入時，管廻りの注入水の噴き上がりを防止している。

なお，逆止弁付き注入外管設置には，パーカッションボーリングマシンを使用し施工した。図 4.1 にボーリング削孔と建込手順を示す。

また，傾斜管は，ケーシングに 30° の傾斜を付け削孔した後，外管を建て込み設置した。

MB 水注入には，あらかじめ注入深度の逆止弁から水押しを行い，シールグラウトにクラッキングさせた後，MB 水の注入を行った。

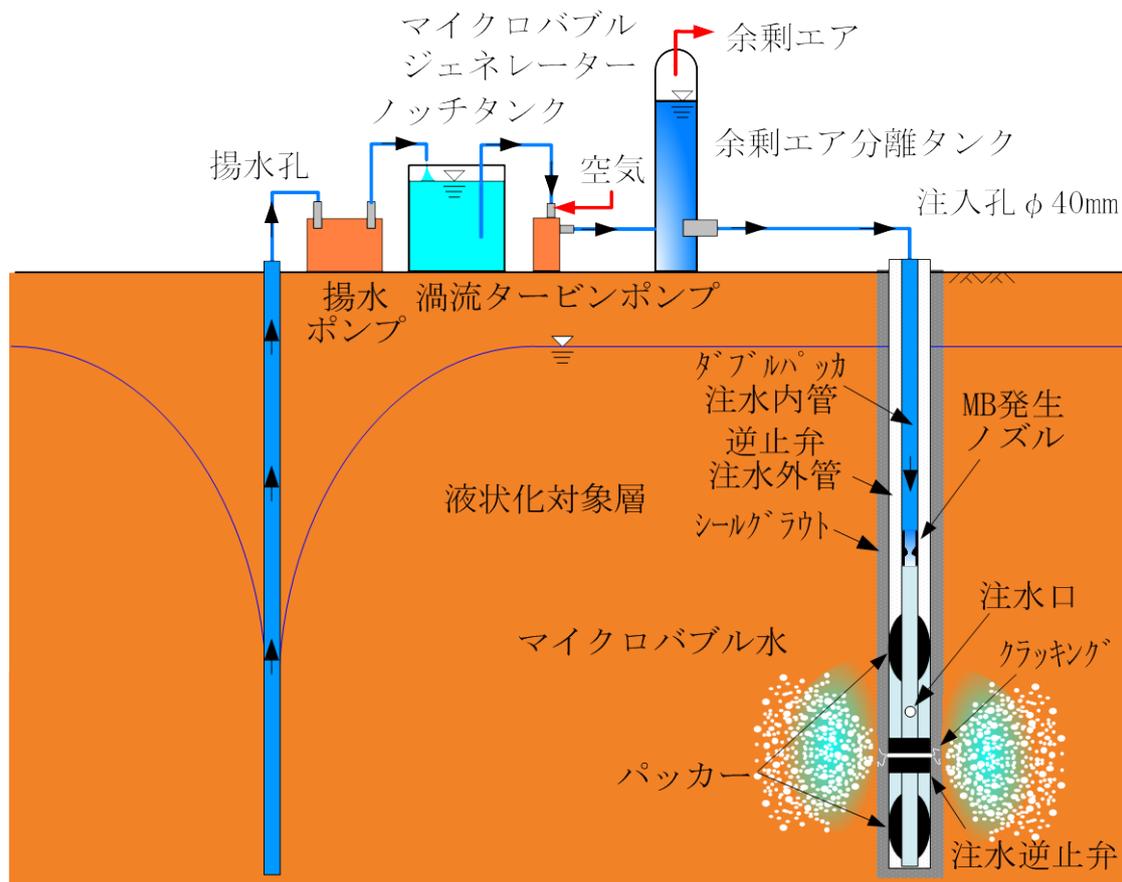


図 4.1 二重管注入概要図（鉛直管）

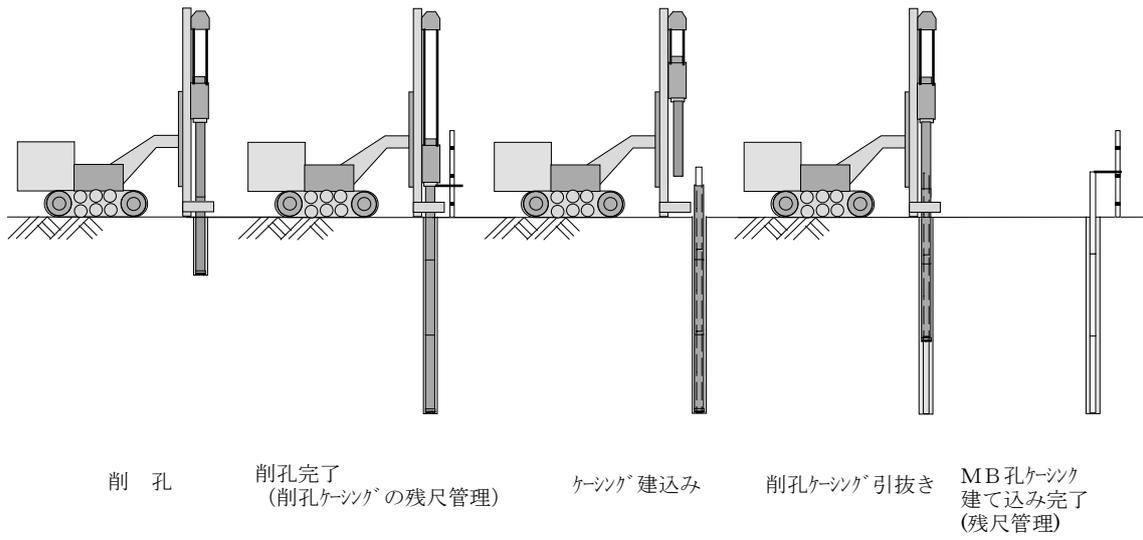


図 4.2 ボーリング削孔・建込手順 (ロータリーパーカッション式ボーリングマシン)

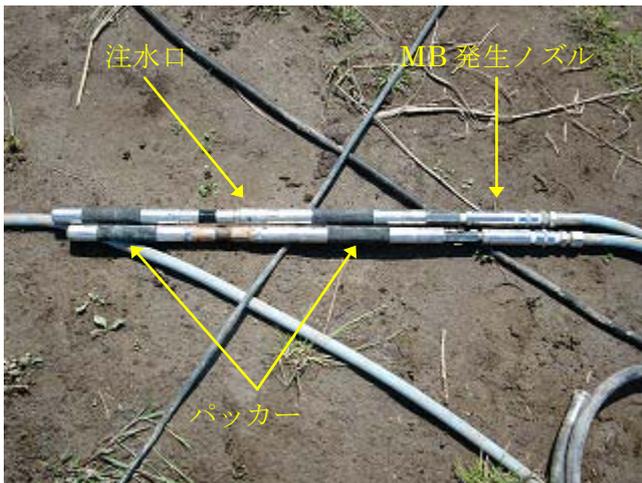


写真 4.8 注入ロッド先端部



写真 4.9 逆止弁付き外管



写真 4.10 注入状況 (E1 鉛直管)



写真 4.11 注入状況 (E2 傾斜管)

4.2.2 ミニラムロッド注入孔

図 4.3 にミニラムロッド注入法（簡易法）の概要図を示す。ミニラムは、重さ 30kgf のハンマーを 35cm の高さから自動落下させ、直径 36.6mm のコーンを地中に打ち込み、ロッドが 20cm 貫入した打撃回数を求めて地盤の地耐力を調査する貫入試験機械である。ミニラムは、機械が小型であり、住宅地などの狭い場所でも施工が可能なことから、今回実用化を目指した簡易注入工法として、ミニラムを用いたマイクロバブル水注入を実施した。

施工は、φ34mm の中空の専用ロッド管を使用し、先端に MB 水発生ノズルと逆止弁ゴムが付いた注入用ロッドを取付け、ミニラムサウンディングマシンの打撃により注入深度までゆっくり打設貫入した。所定の深度に貫入設置後、ロッド周面からの注入水の噴き出しを防止するため、ロッド廻りをベントナイトでシールし、翌日より MB 水注入を行った。

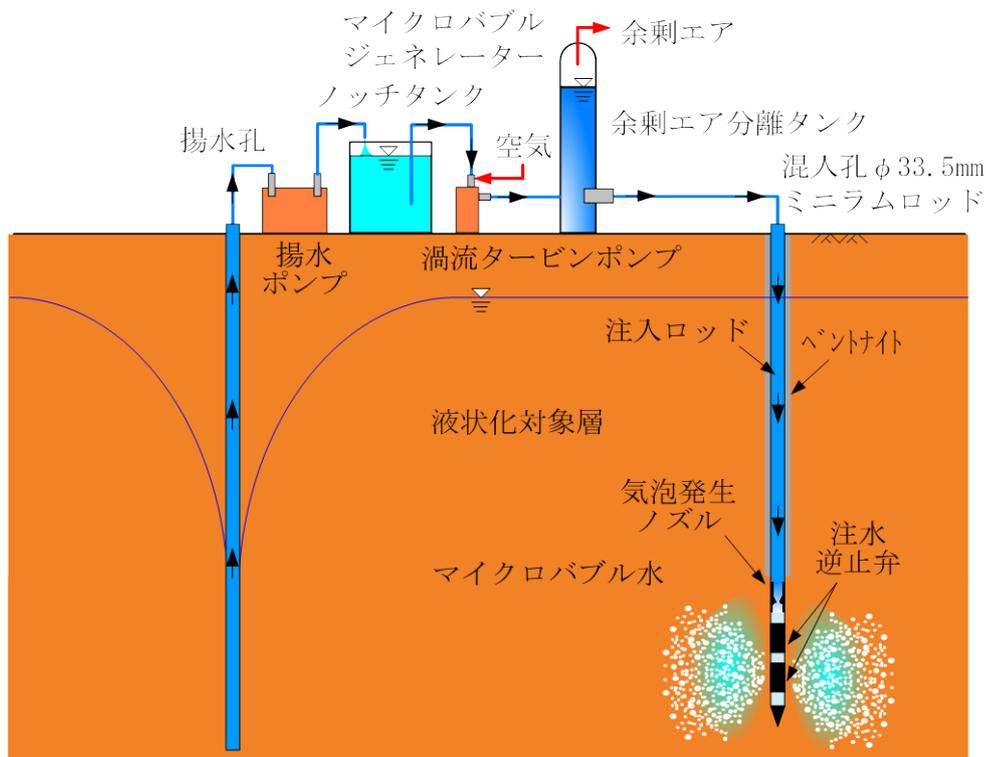


図 4.3 ミニラムロッド注入法（簡易法）概要図



写真 4.12 注水ロッド打設状況

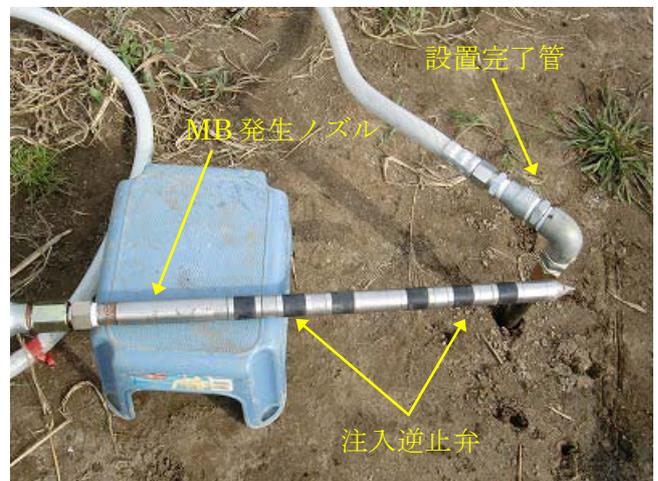


写真 4.13 注入ロッド先端（黒色が逆止弁）

4.2.3 揚水孔

図 4.4, 図 4.5 に示すように, 今回の実験では, MB 水生成の水源を確保する目的で, 揚水孔を 2 箇所住宅部の側部に設置した。

設置は, 二重管注入孔と同様にロータリーパーカッションボーリングマシンで削孔し建込みを行った。揚水管は, $\phi 100\text{mm}$ の塩ビ管に穴の空いたストレーナ管であり, 揚水時の砂の流入を防ぐため, ナイロネットで保護した。また, 揚水管周辺の埋め戻しには径 $5\text{mm}\sim 10\text{mm}$ 程度の砂利を用いた。

なお, 揚水量は揚水孔 1 が $35\text{L}/\text{min}$, 揚水孔 2 が $2\text{L}/\text{min}$ 程度であった。



写真 4.14 揚水管

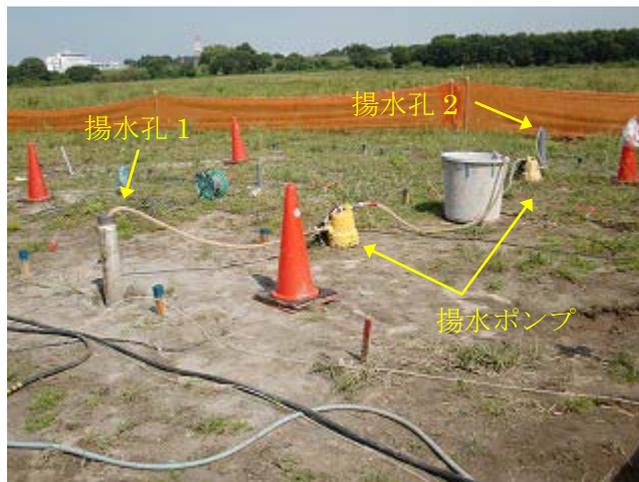


写真 4.15 揚水状況

5. 注入時における地盤飽和度の計測

5.1 MB 水総注入量

MB 水注入は 9 月 21 日 15:00 から開始し、10 月 25 日 13:00 までの 18 日間行った。

注入総括表を表 5.1 と表 5.2 に記す。1 日当たりの総注入量は、多いときで約 3.5m^3 であり、平均して二重管注入法で 1.5m^3 程度、ミニラムロッド注入法 1.7m^3 程度であった。また、最終的な MB 水の総注入量は 80.8m^3 であり、そのうち二重管注入法が 44.9m^3 、ミニラムロッド注入法は 35.9m^3 であった。

領域 (A) で行った鉛直二重管 E1 の MB 水注入量の結果を図 5.1 に、図 5.3 に MB 水流量と積算流量の結果を示す。注入深度は、注入始めに GL. -3.85m から GL. -5.35m に変化させ飽和度の変化や流量変化を確かめ、GL. -4.35m での注入が比較的安定していたことから、注入深度を GL. -4.35m とした。

注入流量は、およそ $3\sim 7\text{L}/\text{min}$ であり、注入が進むにつれて徐々に流量が小さくなる傾向となった。

1 日あたりの注入量は平均して 1.3m^3 程度であり、総注入量 22.8m^3 の注入を行った。注入初日、E1 と TDR1 の間から少量の注入水の吹き上がり（リーク）が発生したが、翌日はなくなった。

領域 (B) は既設宅地地盤改良を想定し、MB 水注入を傾斜二重管による床下地盤注入 E2 と住宅地盤側部からミニラムロッド (M1, M2, M7, M7', M8') で行った。

傾斜二重管 E2 およびミニラムの MB 水注入量の結果を図 5.1, 図 5.2 に、図 5.4～図 5.8 に MB 水流量と積算流量の結果を示す。傾斜二重管 E2 の注入深度は、注入始めに GL. -4.11m から -5.41m と変化させ飽和度の変化や流量変化を確かめ、最終的に GL. -4.11m から MB 水注入を行った。ミニラムロッドの注入 (M1, M2, M7, M7', M8') は、GL. -4.05m とした。但し、M7 に関しては、飽和度に変化が無かったため、途中で注入深度を GL. 3.05m 、注入位置を TDR_F4 に近づけた M7' として注入した (図 5.7 参照)。

注入流量は E2 が $1\sim 12\text{L}/\text{min}$ 、M1, M2 が $8\sim 7\text{L}/\text{min}$ 、M7, M7', M8' が $5\sim 11\text{L}/\text{min}$ であった。鉛直二重管注入 E1 同様注入が進むにつれて徐々に流量が小さくなる傾向となった。

1 日あたりの注入量は、二重管注入 E2 で平均 1.7m^3 程度であり、総注入量 22.1m^3 の注入を行った。ミニラムロッド注入は M1 で平均 2.4m^3 、総流入量 4.8m^3 、M2 で平均 2.6m^3 、総流入量 5.3m^3 、M7 で平均 1.8m^3 、総流入量 20.0m^3 、M8 で平均 1.1m^3 、総流入量 5.7m^3 であった。地盤からの注入水の吹き上がり（リーク）は、傾斜二重管注入 E2 に関してはほとんど見られなかった。ミニラムロッド注入 M1, M2, M8 においては、初期段階に少しリークしたもののほとんど見られなかったが、M7 に関してはリークが注入初期より発生し、注入途中で少なくなったが、多いときで毎分 $6\text{L}/\text{min}$ 程度リーク流量があった。

また、ミニラムロッド注入は注入ロッド設置時打撃による貫入のため、先端の逆止弁ゴムがめくれ上がるトラブルが発生したため、M3, M4, M5, M6 の注入は出来なかった。M7, M8 は注入ロッド先端にリングを付けフリクションカットすることに対応したことにより注入することが出来た。

試験現場は台風による大雨に見舞われ、試験期間中の 9 月 29 日と 11 月 2 日の 2 回、試験フィールドが冠水した。冠水の状況を写真 5.1 に示す。

表 5.1 注入量総括表（二重管注入）

| 日付 | E1(ℓ) | G.L.-(m) | 累積(ℓ) | E2(ℓ) | G.L.-(m) | 累積(ℓ) |
|--------|-------|----------|--------|-------|----------|--------|
| 9月21日 | 258 | 5.35 | 258 | 508 | 5.41 | 508 |
| 9月22日 | 1,296 | 4.85 | 1,554 | 2,237 | 4.98 | 2,745 |
| 9月24日 | 2,275 | 4.35 | 3,829 | 2,535 | 4.55 | 5,280 |
| 9月25日 | 1,553 | 3.85 | 5,382 | 2,105 | 4.11 | 7,385 |
| 9月27日 | | | | | | |
| 9月29日 | 冠水 | | | | | |
| 10月1日 | 877 | 4.35 | 6,259 | | | |
| 10月5日 | 87 | 4.35 | 6,346 | | | |
| 10月6日 | 1,387 | 4.35 | 7,733 | 491 | 4.11 | 7,876 |
| 10月7日 | 1,720 | 4.35 | 9,453 | | | |
| 10月8日 | 1,552 | 4.35 | 11,005 | | | |
| 10月12日 | 1,121 | 4.35 | 12,126 | 888 | 4.11 | 8,764 |
| 10月13日 | 1,201 | 4.35 | 13,327 | 650 | 4.55 | 9,414 |
| 10月15日 | 657 | 4.35 | 13,984 | 451 | 4.11 | 9,865 |
| 10月19日 | 1,692 | 4.35 | 15,676 | 2,506 | 4.11 | 12,371 |
| 10月20日 | 1,866 | 4.35 | 17,542 | 3,103 | 4.11 | 15,474 |
| 10月21日 | 2,053 | 4.35 | 19,595 | 3,469 | 4.11 | 18,943 |
| 10月22日 | 2,123 | 4.35 | 21,718 | 2,348 | 4.11 | 21,291 |
| 10月25日 | 1,036 | 4.35 | 22,754 | 851 | 4.11 | 22,142 |
| 11月2日 | 冠水 | | | | | |

表 5.2 注入総括表 (ミニラムロッド注入)

| 日付 | M1(ℓ) | G.L.-(m) | 累積(ℓ) | M2(ℓ) | G.L.-(m) | 累積(ℓ) | M7(ℓ) | G.L.-(m) | 累積(ℓ) | M8(ℓ) | G.L.-(m) | 累積(ℓ) |
|--------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|--------|-------|----------|-------|
| 9月21日 | | | | | | | | | | | | |
| 9月22日 | | | | | | | | | | | | |
| 9月24日 | | | | | | | | | | | | |
| 9月25日 | | | | | | | | | | | | |
| 9月27日 | 2,437 | 4.05 | 2,437 | 2,656 | 4.05 | 2,656 | | | | | | |
| 9月29日 | 冠水 | | | | | | | | | | | |
| 10月1日 | 2,398 | 4.05 | 4,835 | 2,634 | 4.05 | 5,290 | | | | | | |
| 10月5日 | | | | | | | | | | | | |
| 10月6日 | | | | | | | 1,536 | 4.05 | 1,536 | | | |
| 10月7日 | | | | | | | 3,292 | 3.05 | 4,828 | | | |
| 10月8日 | | | | | | | 3,207 | 3.05 | 8,035 | | | |
| 10月12日 | | | | | | | 2,758 | 3.05 | 10,793 | | | |
| 10月13日 | | | | | | | 630 | 3.05 | 11,423 | | | |
| 10月15日 | | | | | | | 2,601 | 4.05 | 14,024 | | | |
| 10月19日 | | | | | | | 119 | 4.05 | 14,143 | 697 | 4.05 | 697 |
| 10月20日 | | | | | | | 1,708 | 4.05 | 15,851 | 1,542 | 4.05 | 2,239 |
| 10月21日 | | | | | | | 1,801 | 4.05 | 17,652 | 1,501 | 4.05 | 3,740 |
| 10月22日 | | | | | | | 1,736 | 4.05 | 19,388 | 1,447 | 4.05 | 5,187 |
| 10月25日 | | | | | | | 657 | 4.05 | 20,045 | 548 | 4.05 | 5,735 |
| 11月2日 | 冠水 | | | | | | | | | | | |

■ M7に変更箇所



9月27日



11月2日

写真 5.1 試験フィールド冠水状況

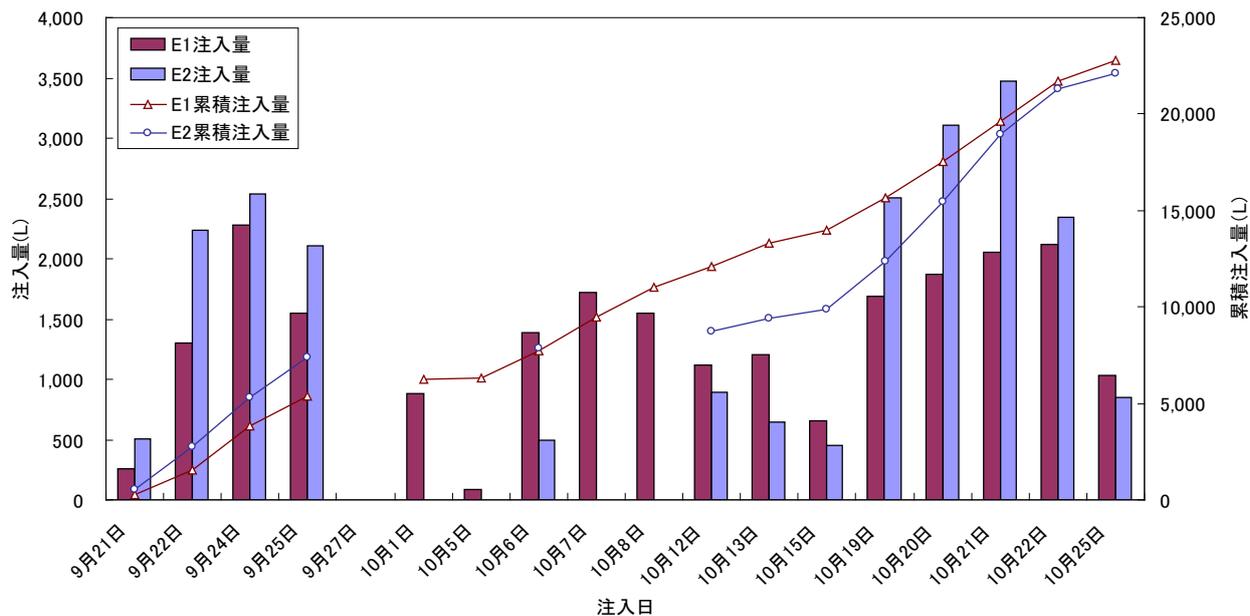


図 5.1 MB 水注入量 (二重管注入法)

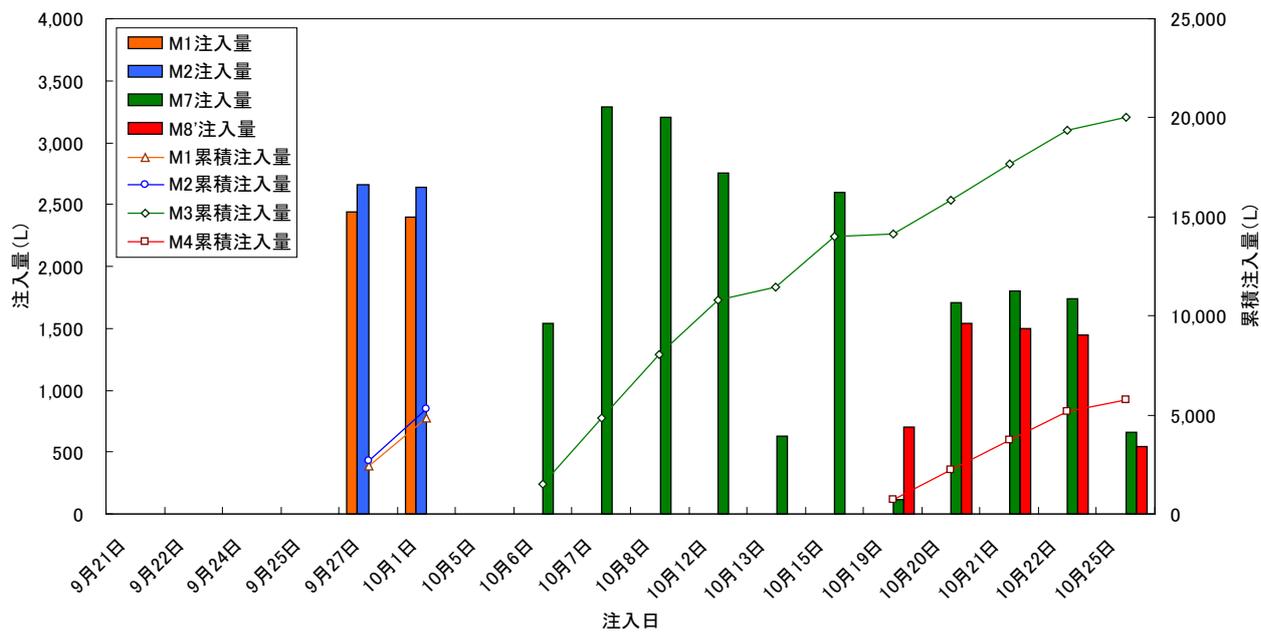


図 5.2 MB 水注入量 (ミニラムロッド注入法)

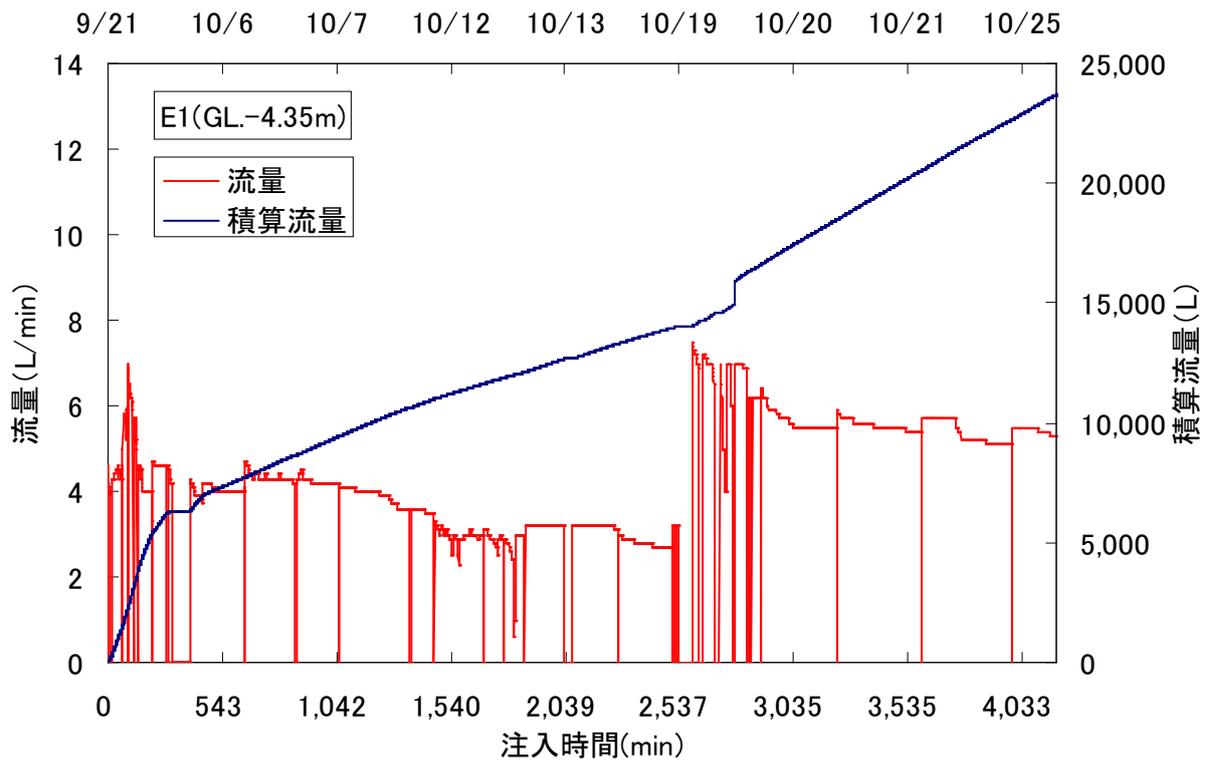


図 5.3 二重管注入 E1 (鉛直管) の注入流量

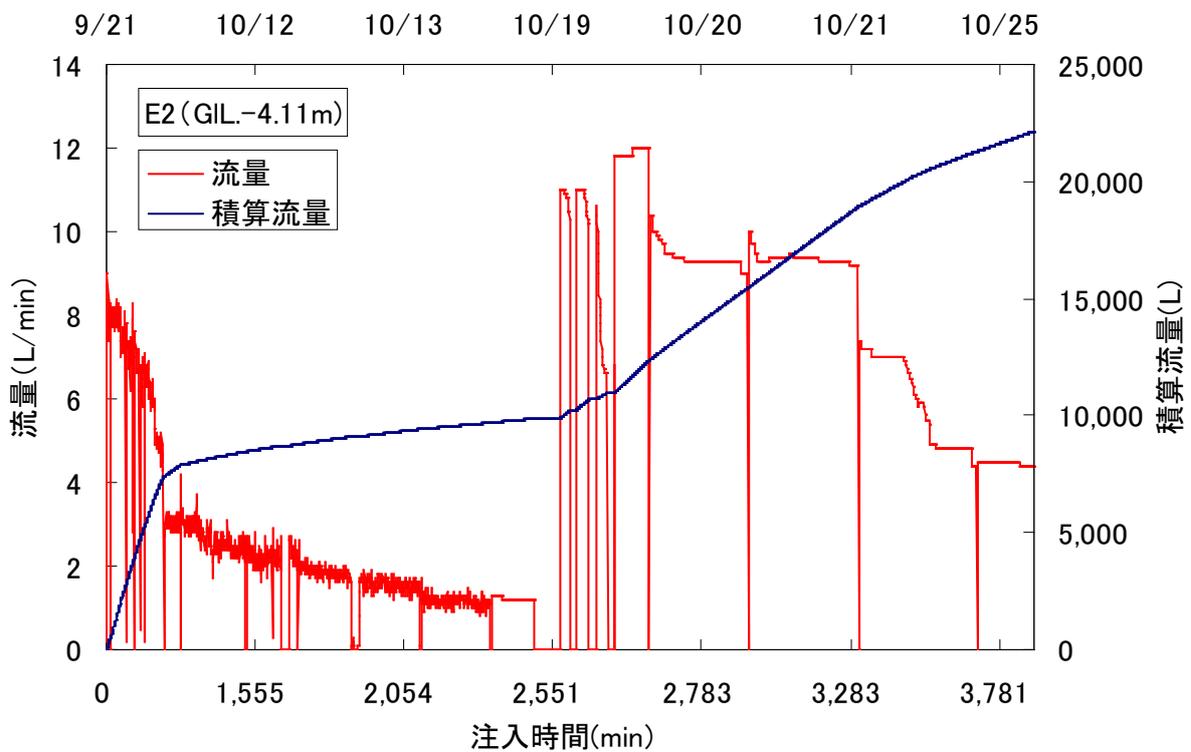


図 5.4 二重管注入 E2 (傾斜管) の注入流量

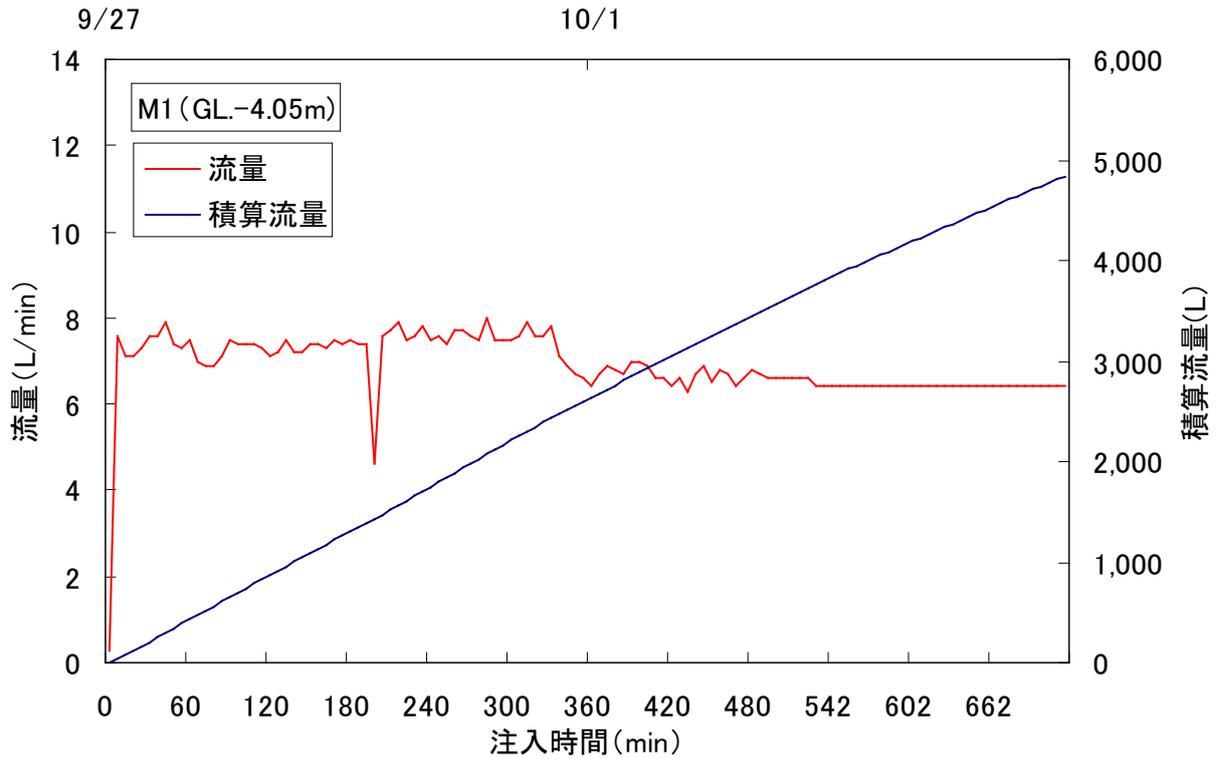


図 5.5 ミニラムロッド注入 M1 の注入流量

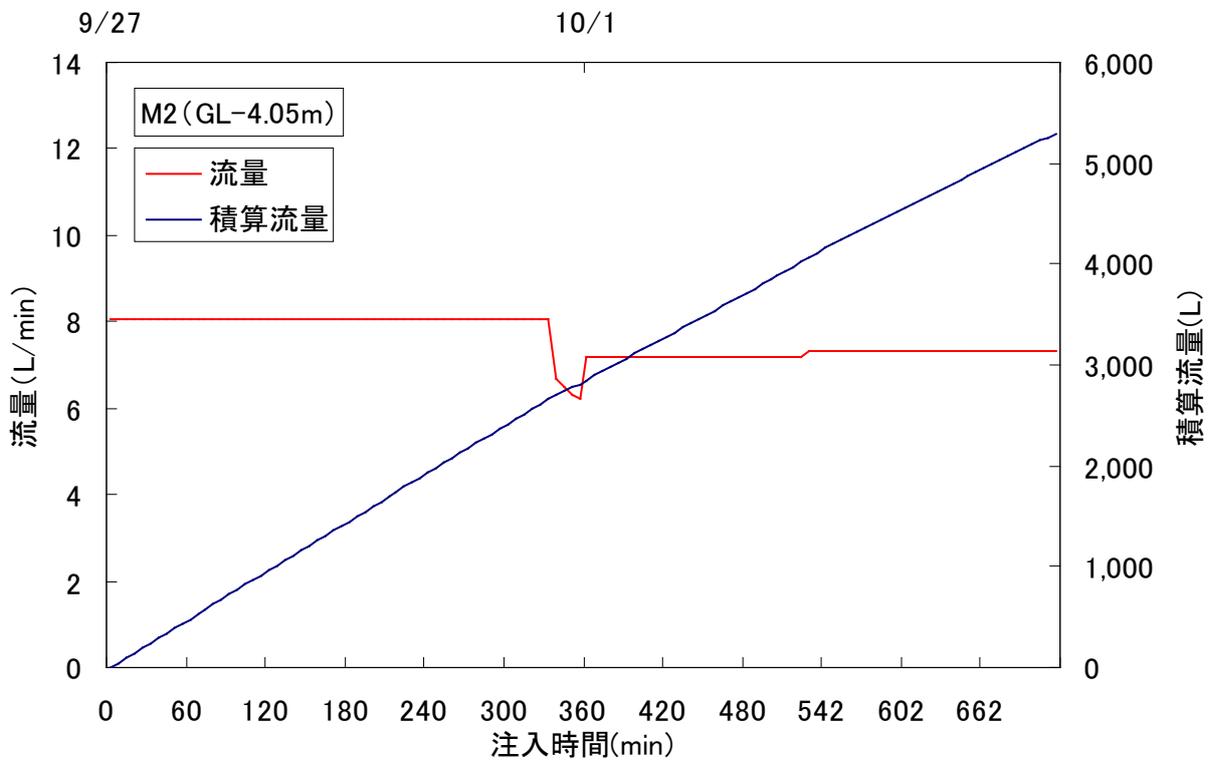


図 5.6 ミニラムロッド注入 M2 の注入流量

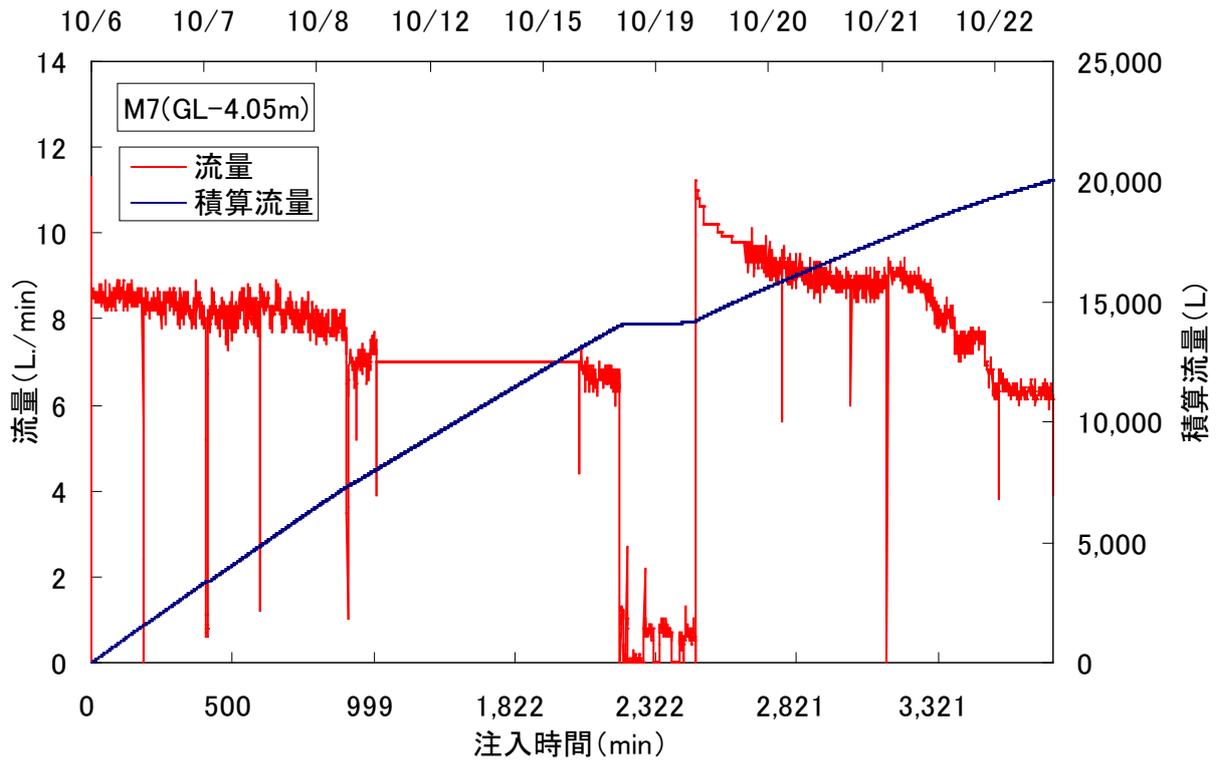


図 5.7 ミニラムロッド注入 M7 の注入流量

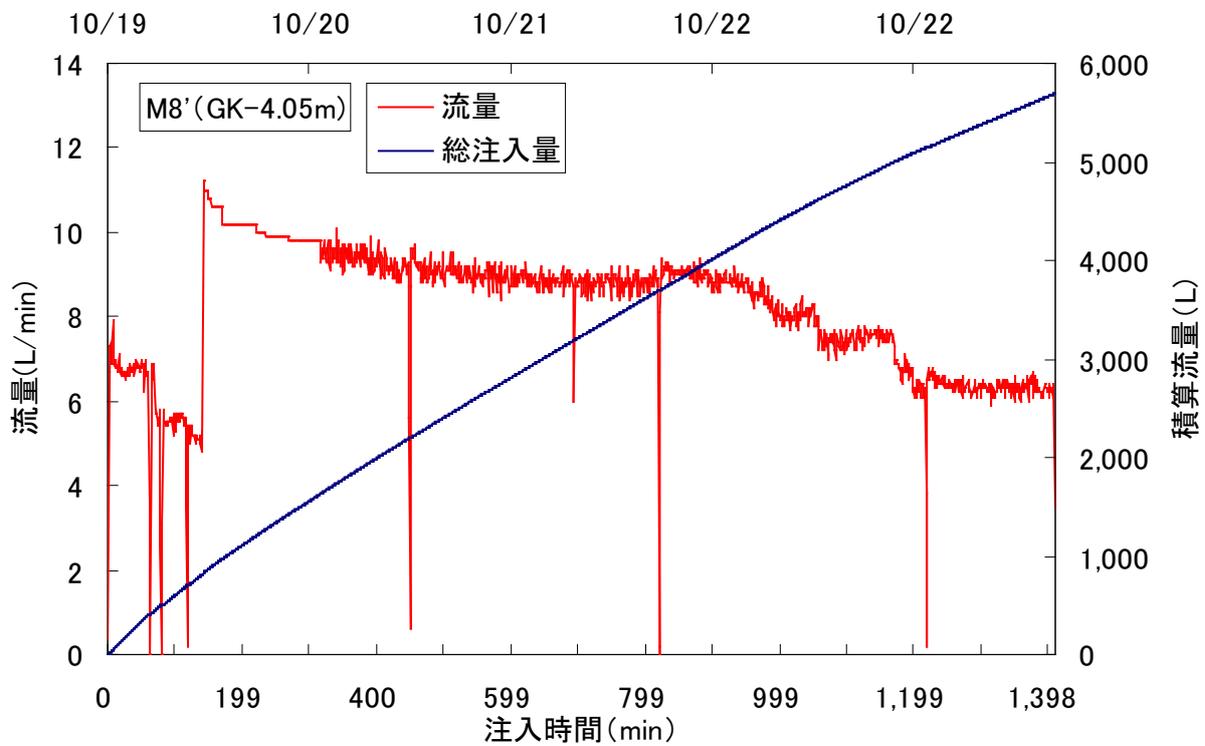


図 5.8 ミニラムロッド注入 M8' の注入流量

5.2 領域(A)マイクロバブル水注入による実地盤の飽和度変化の実測結果

5.2.1 飽和度計測結果

図 5.9 に挿入式 TDR で計測した累積注入量毎の飽和度結果を示す。飽和度は前節で記載したとおり、体積含水率 θ と間隙比 e を用いて求められるが、プローブ設置に伴うボーリング削孔と埋め戻しにより、アクセスチューブ周辺の地盤の間隙比が変化している可能性を考慮し、注入前の 9 月 21 日の午前中に計測した値を飽和度 100% と想定し、その変化率から以下の式により算出した。

$$S_r = \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_0} + 1 \right) \times 100 \quad (3)$$

S_r : 飽和度, θ : 計測体積含水率, θ_0 : 初期体積含水率 (21 日午前計測値)

飽和度は、注入初日において増加する結果が計測されたが、注入をするにつれ減少していった。

挿入式 TDR で計測された注入対象層の平均最終的な飽和度は、E1 から 0.5m 離れ (TDR1) で 85% 程度、1.5m 離れ (TDR2) で 90% 程度、4.0m 離れ (TDR3) で 95% 程度となった。また TDR1 では注入深度付近の細砂層で 60% 程度まで低下し、上層のシルト層でやや飽和度が大きくなり、表層近くの細砂層で 70% 程度まで低下した。また、TDR2 では注入層の上部で飽和度が大きくなっており、TDR3 においても同じような傾向が見られた。このことより、MB 水は注入深度より、上方に広がり拡散していったと想定される。

また、図 5.10 から図 5.15 には各地点での飽和度の時系列変化と注入量による変化を示す。TDR1 では MB 水を注入開始してから 3 日目 (注入量 2.7m³) で値の低下が収束した。一方、TDR2、TDR3 では注入 6~7 日目まで値が低下した。このことは注入箇所近傍の飽和度はある程度で値が収束するものの、注入に伴い MB 水の浸透範囲が広がり、注入箇所から 4m 程度は飽和度が低下すると考えられる。



写真 5.2 9 月 21 日注入状況



写真 5.3 9 月 22 日注入状況

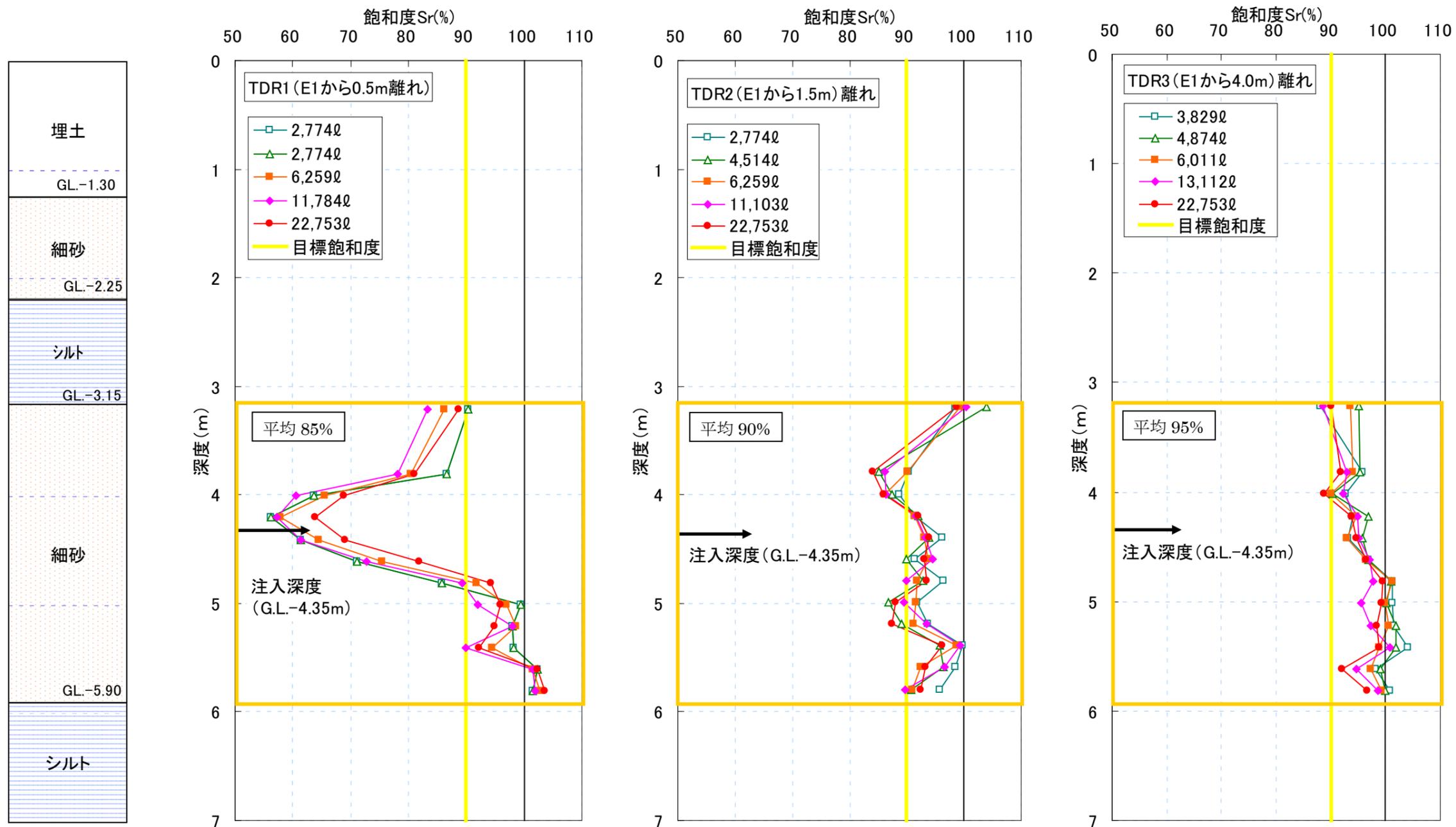


図 5.9 挿入式 TDR 累積注入量毎飽和度結果 (E1)

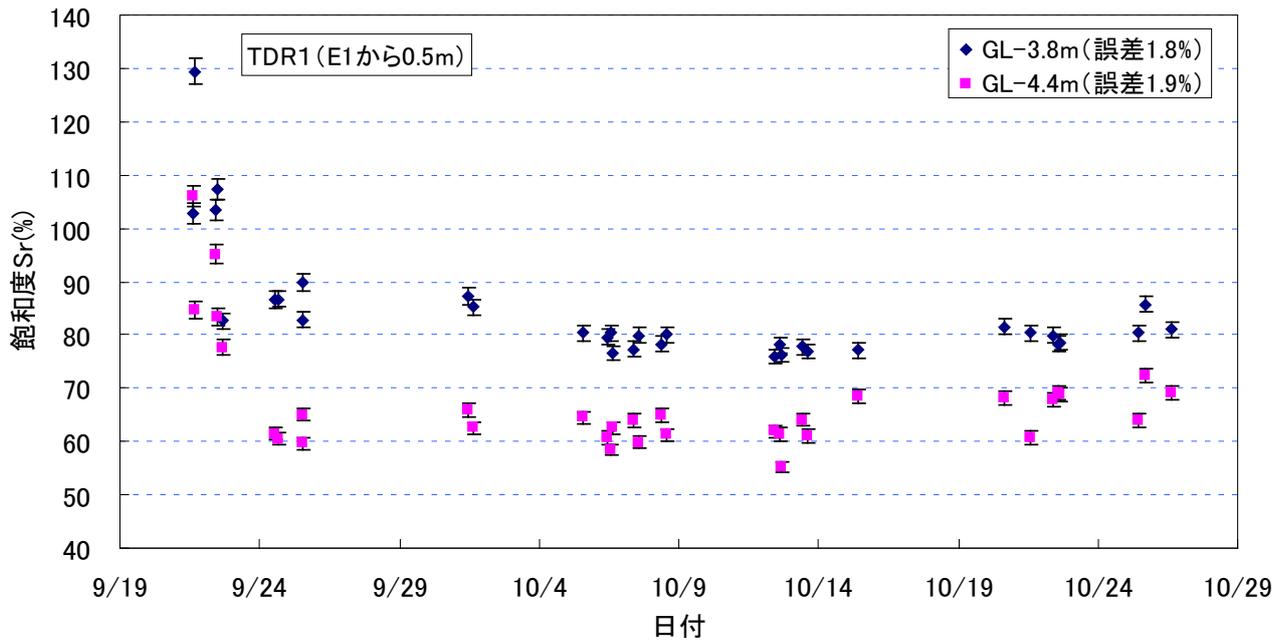


図 5.10 挿入式 TDR 1 計測経時結果

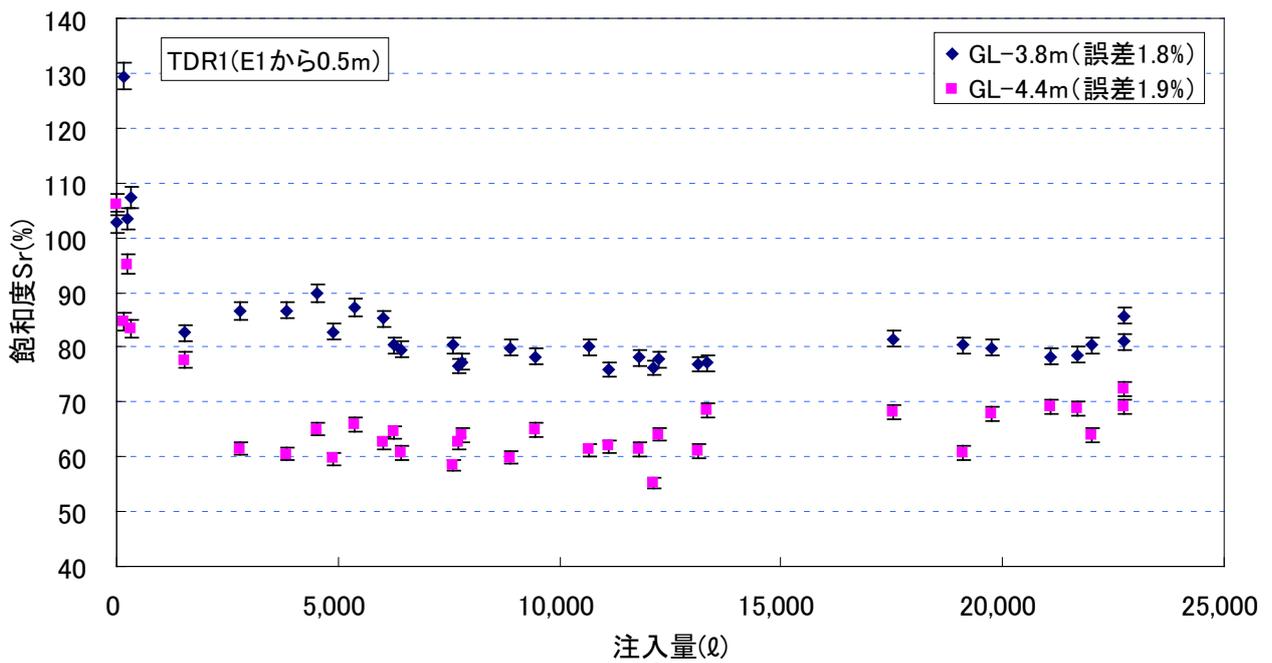


図 5.11 挿入式 TDR 1 計測注入量結果

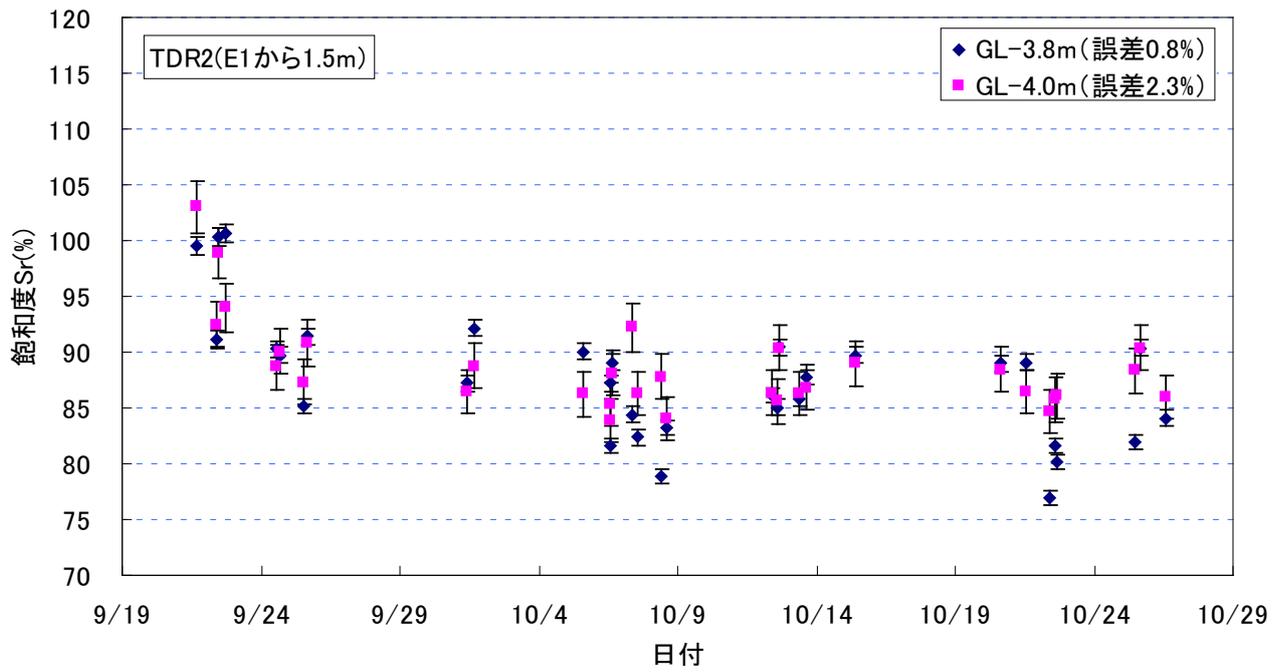


図 5.12 挿入式 TDR2 計測経時結果

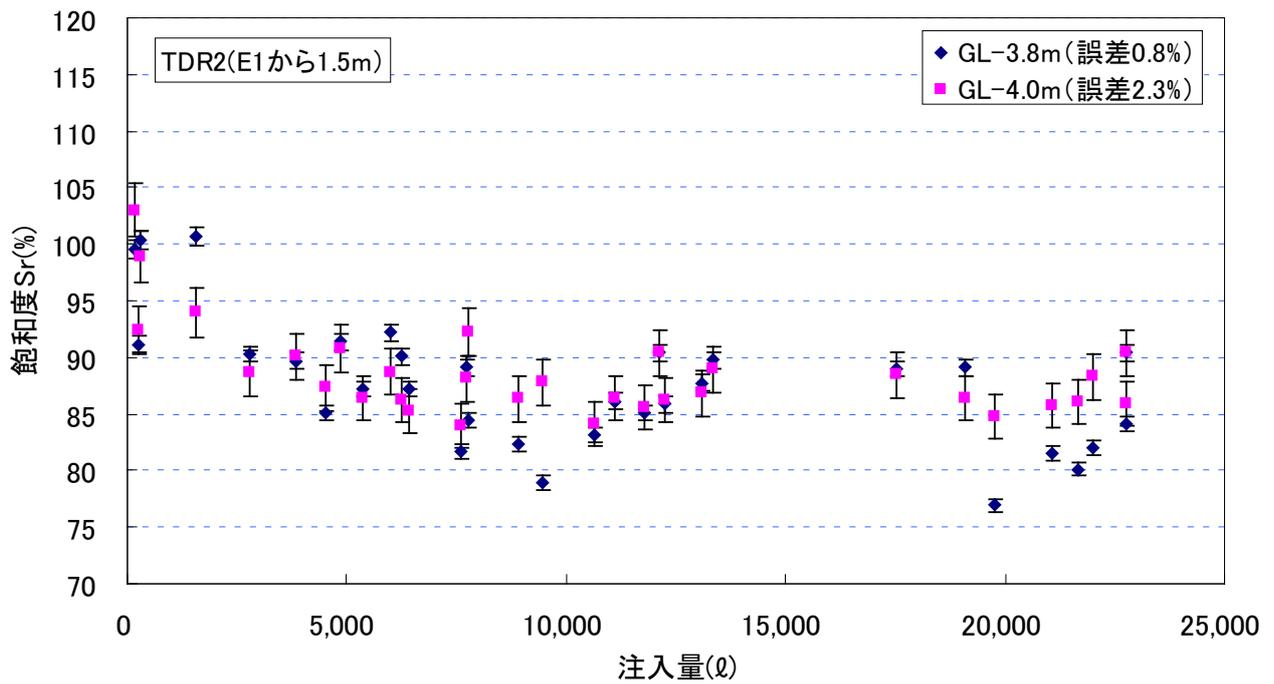


図 5.13 挿入式 TDR2 計測注入量結果

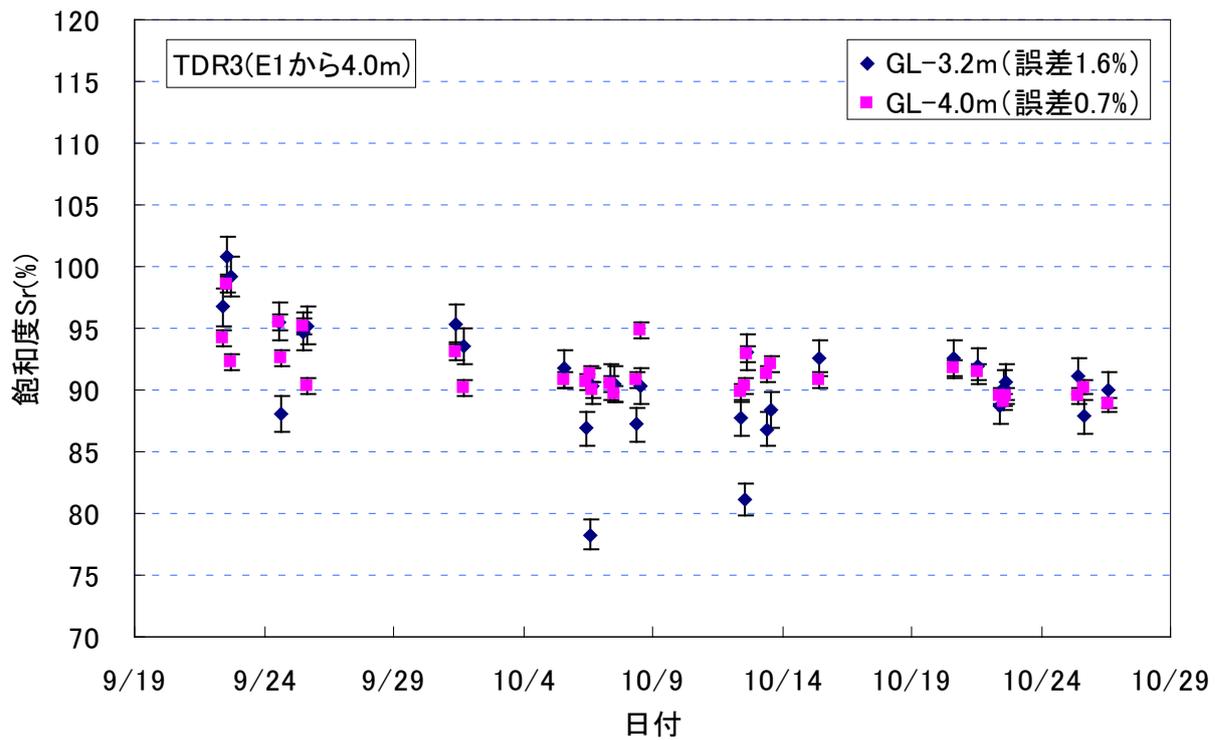


図 5.14 挿入式 TDR3 計測経時結果

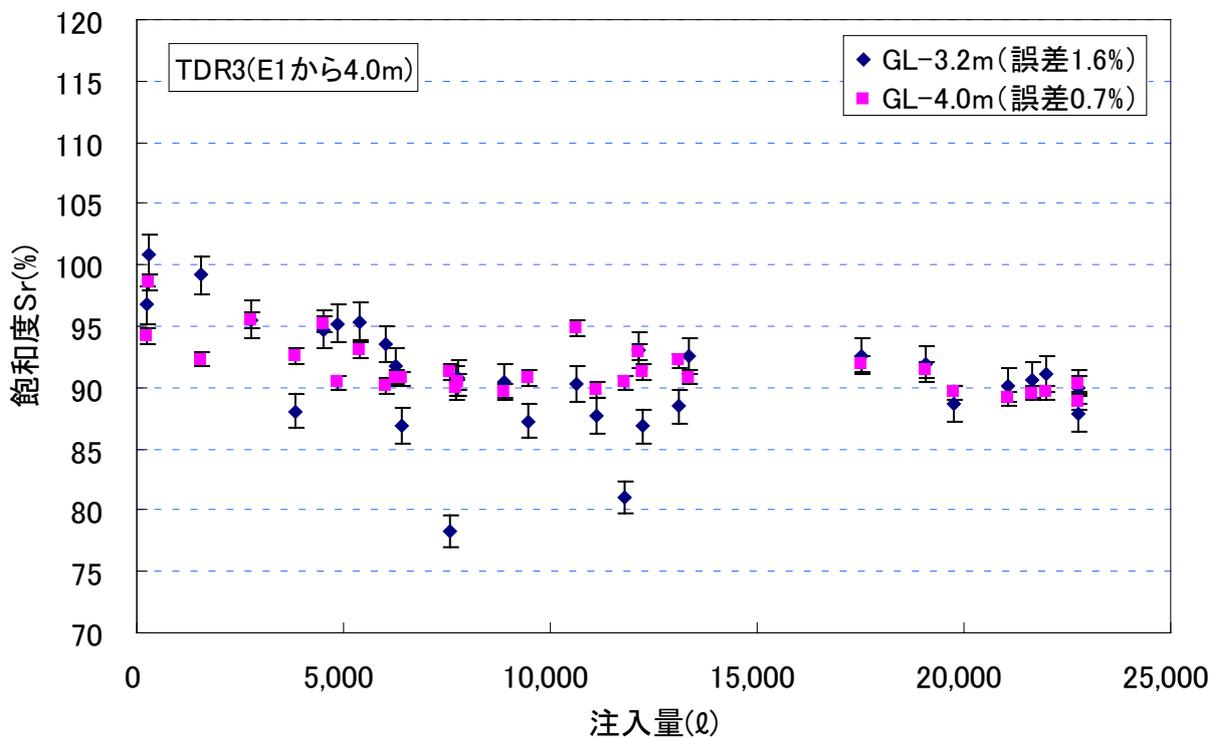


図 5.15 挿入式 TDR3 計測注入量結果

5.2.2 ボアホールカメラ観測結果

ボアホールカメラでの観察による同一箇所での経時変化例を表 5.3 に示す。

ボアホールカメラは、鉛直二重管注入 E1 から 500mm 離れた場所にあるが、地盤内を MB 水が地盤の中の間隙を通り抜け、数ミリメートルから 30 ミリメートル程度の気泡を生成し、気泡が地盤の中に停滞していることがわかる。一方で、写真では分からないが、ある程度気泡が成長すると空気の浮力が高まり、空気みちができ上方に浮上する現象も見られた。

深度方向では対象細砂層の上方の GL-3.35m 付近で大きな気泡も観測された。これはシルト層が蓋となり、気泡が対流していると想定される。また、注入深度 GL.-4.35m より低い位置でも気泡が確認され、観測孔全体で気泡が観測できた。このことは全体に MB 水が行き渡っていることも考えられるが、観測孔の周辺を観測のためシール材でシールをせず、珪砂で埋め戻しているので観測孔自体が空気みちとなっていることも想定される。

注入直後は移動する気泡も多いが、注入後に発生した気泡も確認された。注入後の事後観測では気泡の変化はほとんどしておらず、地盤中の飽和度も安定していると考えられる。

表 5.3 ボアホールカメラでの観察による同一箇所での経時変化例

| | 10月25日 | 11月8日 | 11月15日 |
|-----------|--|---|---|
| GL -3.12m |  <p>この時点では気泡はない</p> |  |  |
| GL -3.56m |  |  <p>空洞の形が大きく変化した</p> |  |
| GL -3.78m |  |  |  |
| GL -4.73m | データなし |  |  |
| GL -4.79m | データなし |  <p>多くの細かい気泡</p> |  |

○ : 主な気泡, 画像の表示範囲は縦で約 5cm。

10月8日

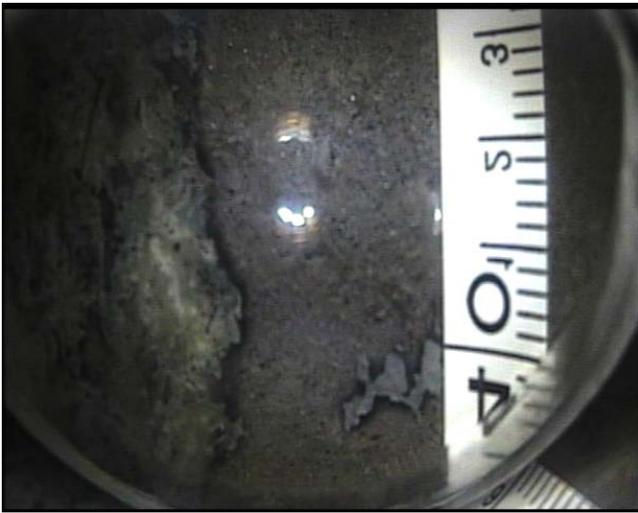


GL -4.62m

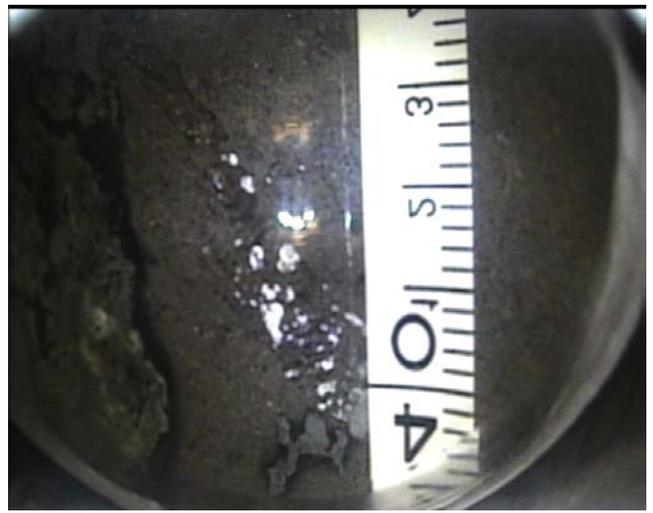
11月8日



GL -4.63m



GL -4.58m



GL -4.58m



GL -4.57m



GL -4.57m



GL -4.46m



GL -4.46m



GL -4.40m



GL -4.40m



GL -4.40m



GL -4.40m

5.3 領域(B)低層住宅の床下地盤を想定した不飽和化の試行結果

5.3.1 飽和度計測結果

飽和度の計測結果を以下に示す。領域(B)での飽和計測は領域(A)の結果より、浸透影響範囲が 4m 程度となることから、二重管注入の飽和度は挿入式 TDR 計で、ミニラムロッド注入の飽和度は固定式 TDR 計で計測した値を参考にとすることとした。

図 5.16 に挿入式 TDR で計測した E2 の結果を示す。E2 は管が傾斜しているため、E2 から TDR4 までの距離は注入深度によって変化し、注入深度 GL.-4.11m では離隔が 1.63m となる。

飽和度は E1 注入時同様、注入に伴い値が低下した。注入対象層の最終的な飽和度は平均 88%となった。(B)領域では注入対象砂層の上部付近の飽和度が低くなる傾向にあり、飽和度が 80%弱まで低下した。これは MB 水の比重が軽いため上方に広がりやすいことと、注入逆止弁が斜めに設置されており、斜め上方に向けて MB 水を注水した影響と考えられる。

図 5.17, 図 5.18 には TDR4 で計測された飽和度の時系列変化と注入量による変化を示す。飽和度は MB 水を注入開始してから 5 日 (7.4m³) 程度で値が収束した。

図 5.19 には固定式 TDR で計測結果を、図 5.21～図 5.28 には経時変化と注入量変化を示す。TDR_F1 で計測された飽和度は、M8'の注入に伴いおよそ 93%まで低下し収束した。また、収束までの注入量は 2m³程度であった。

一方、TDR_F2, TDR_F3 は 1～2%変化しかなく、M1, M2 の注入では反応が見られなかった。

TDR_F4 においては、M7, M7'の注入量も多く揚水孔も近くにあり、好条件ではあったが、計測飽和度の変化はなかった。また、注入深度の影響を考慮し、M7 の注入深度を GL.-4.0m から GL.-3.0m に変化させたが特に値に変化がなかった。さらに揚水孔からの揚水も停止し観察したが、変化は見られなかった。これは TDR_F4 が深度 GL.-3.0m のシルト層内にありセンサー近傍まで気泡が到達していないと考えられる。また、注入箇所から 0.5m 程度の離れた場所からリークが 6L/min 程度発生していることから、MB 注入水がシルト層に注入した際、地盤内にクラックを発生させ水みちを作り、MB 水が均等に広がらず、注入水が逃げていったと想定される。

これらよりミニラムロッド注入法は二重管注入法と違い、直接地盤に注入を行うため、注入圧や流量による影響を受けやすく、透水性の低い細粒分の多いところでは特にリークに対する注意が必要である。

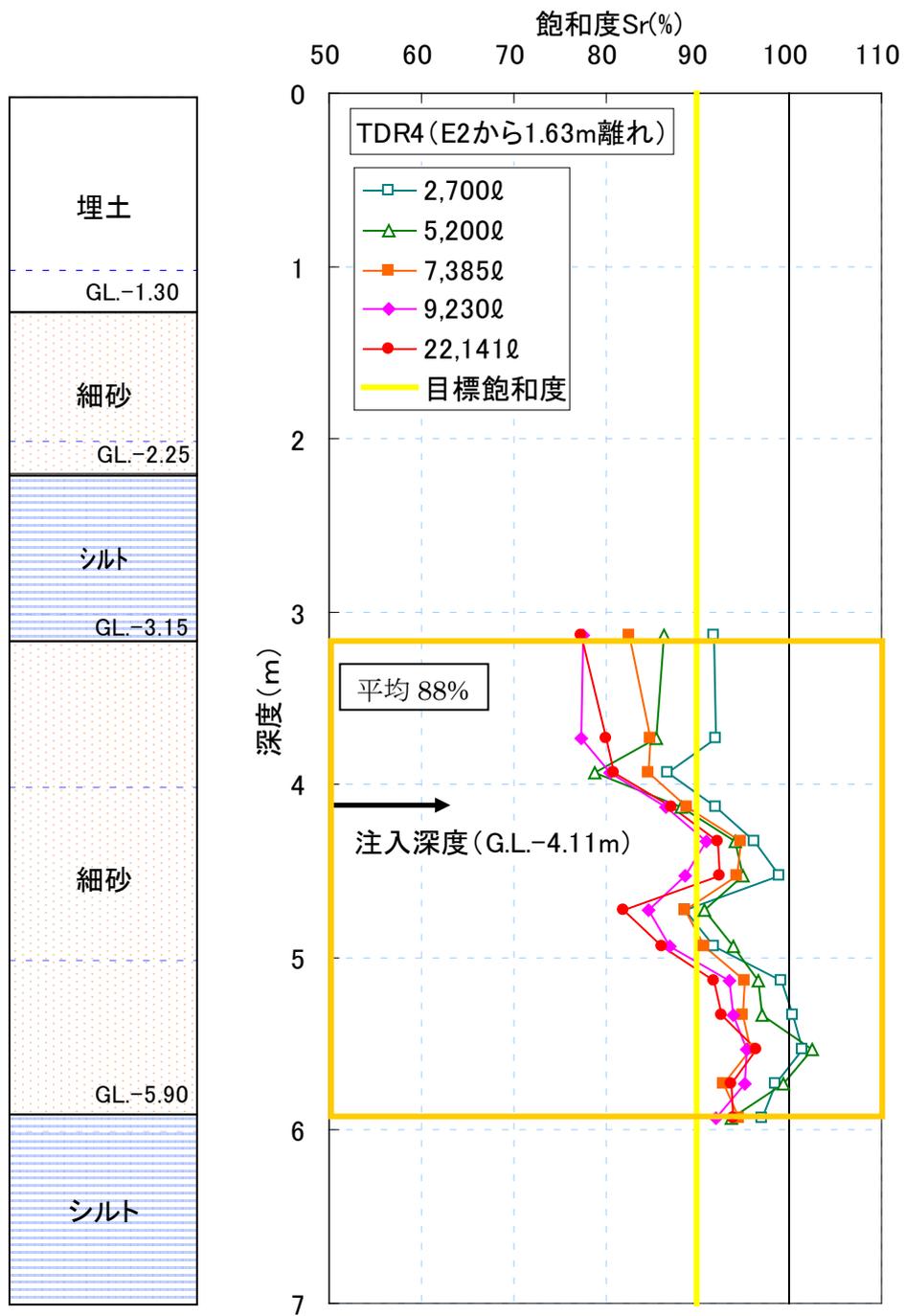


図 5.16 挿入式 TDR 計測累積注入量毎飽和度結果 (E2)

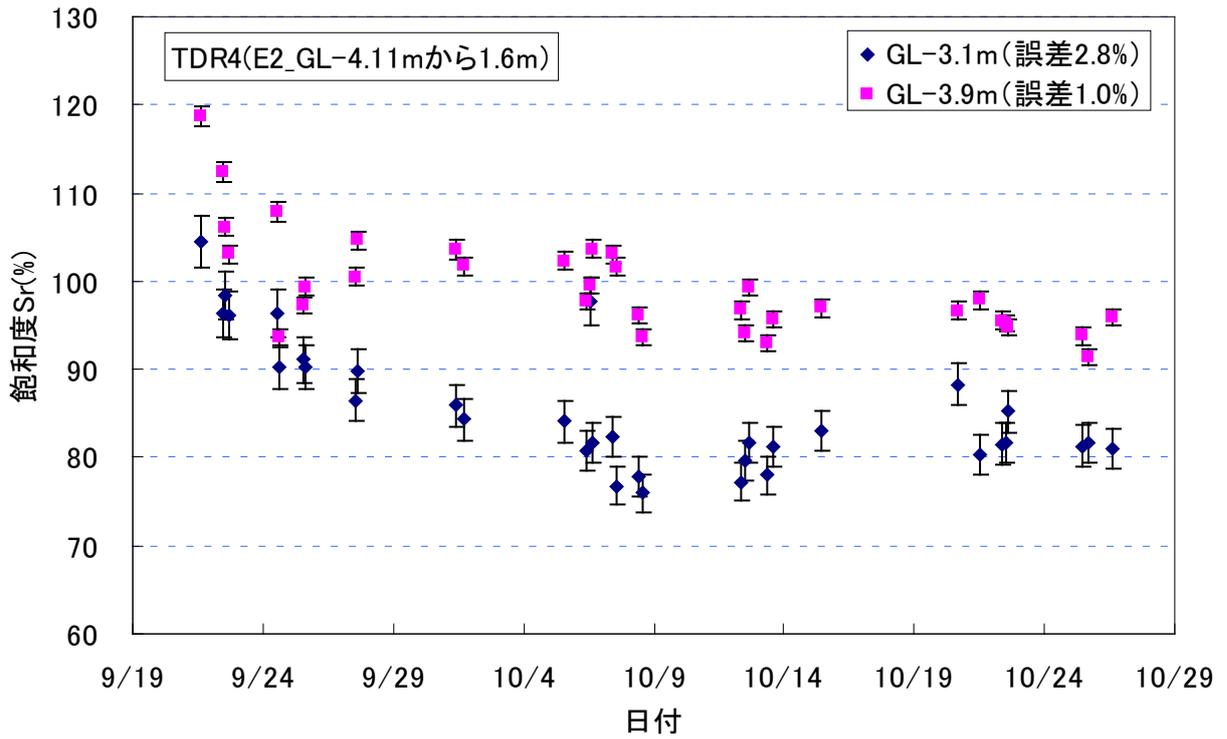


図 5.17 挿入式 TDR4 計測経時結果

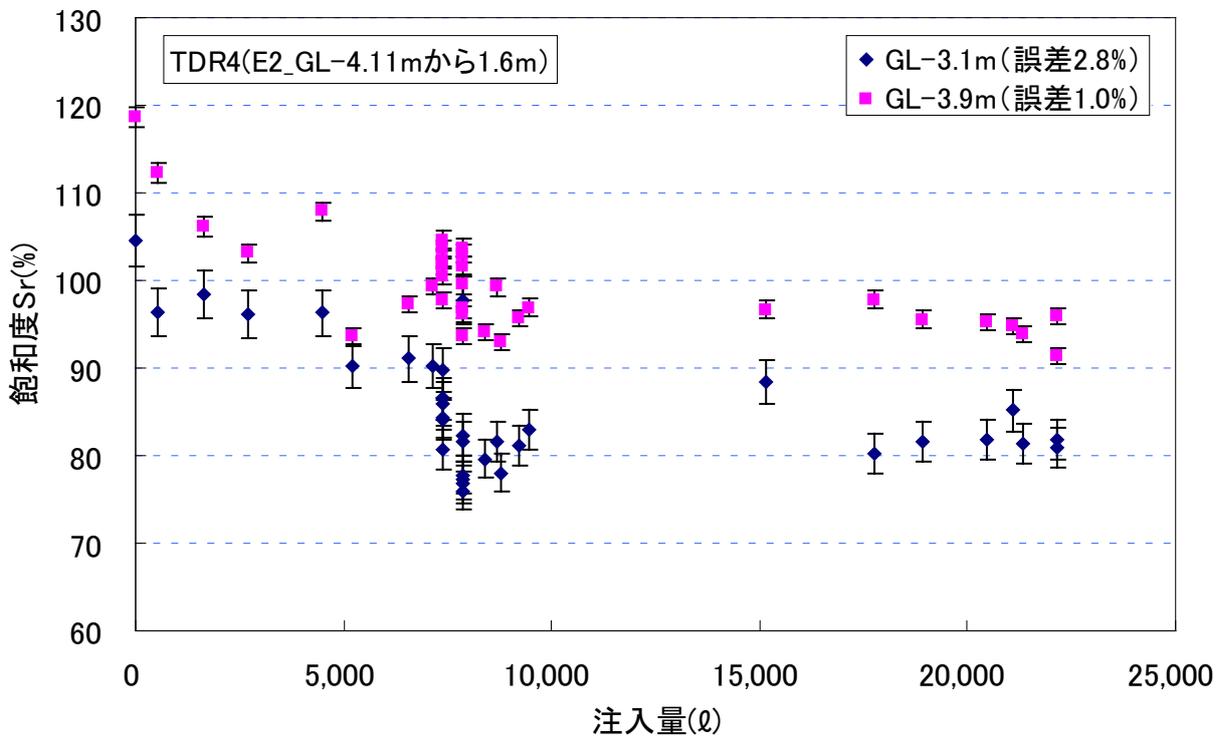


図 5.18 挿入式 TDR4 計測結果

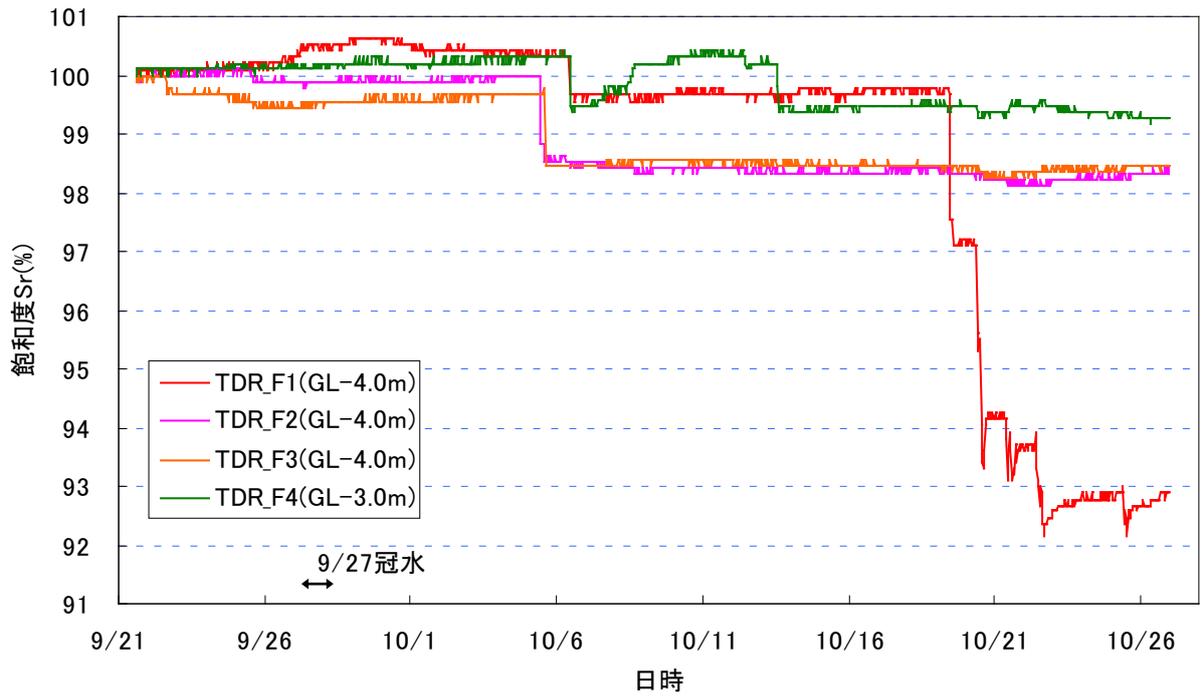


図 5.19 固定式 TDR 測経時結果

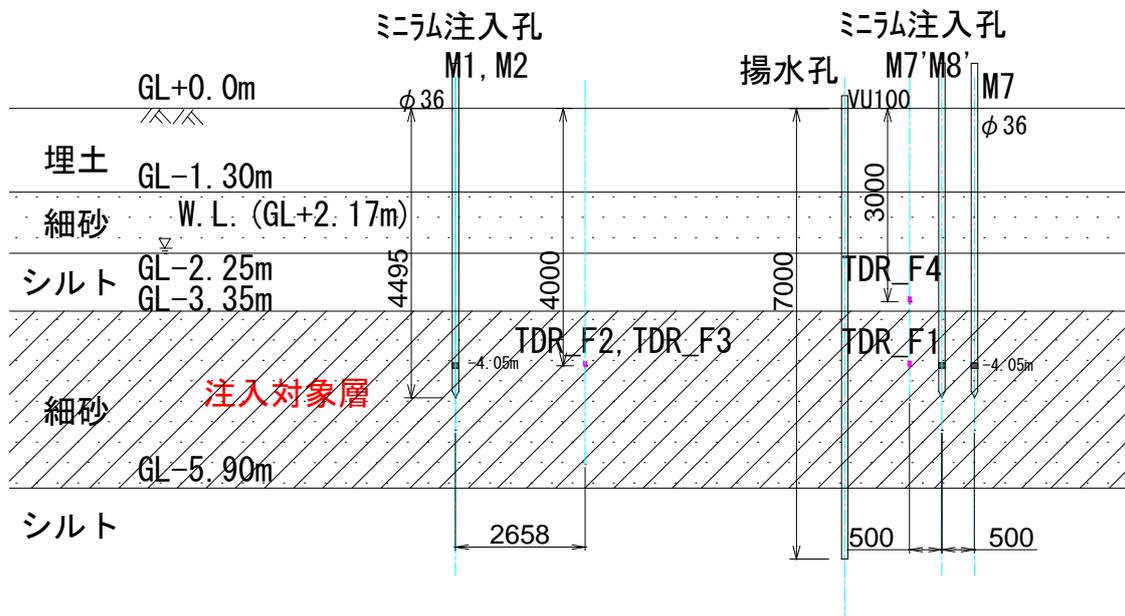


図 5.20 固定式 TDR 計測位置

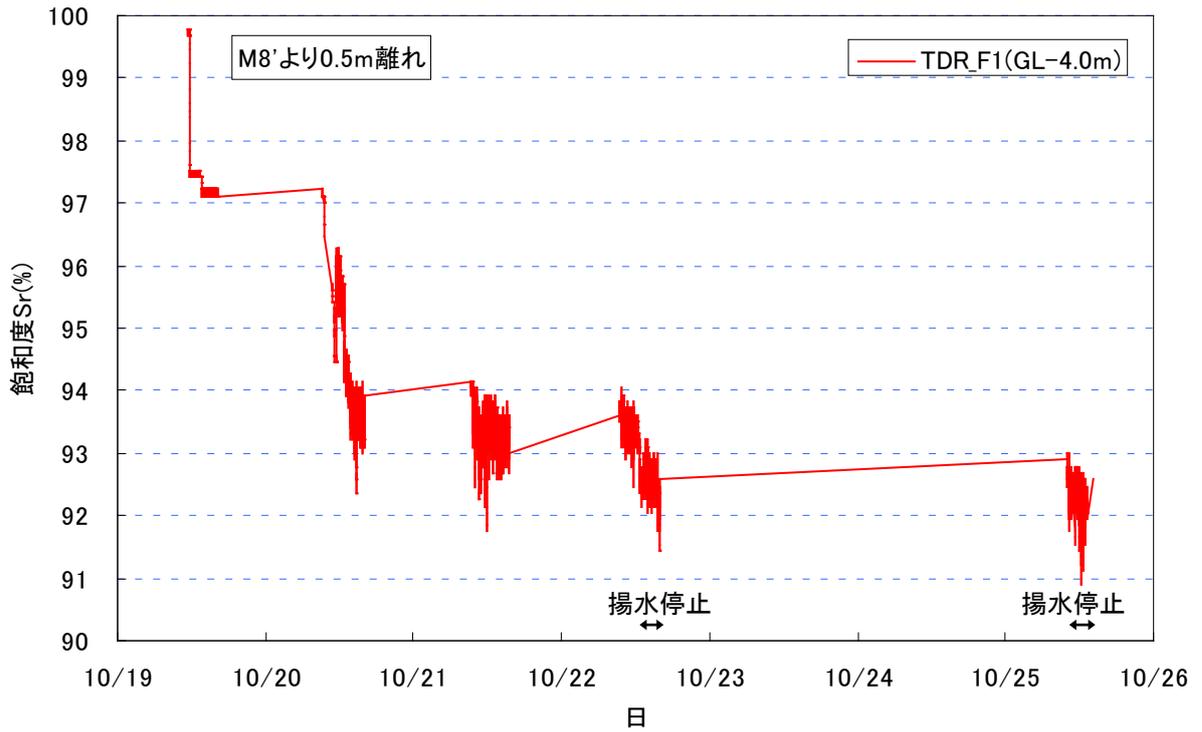


図 5.21 固定式 TDR_F1 計測経時結果 (M8'注入時)

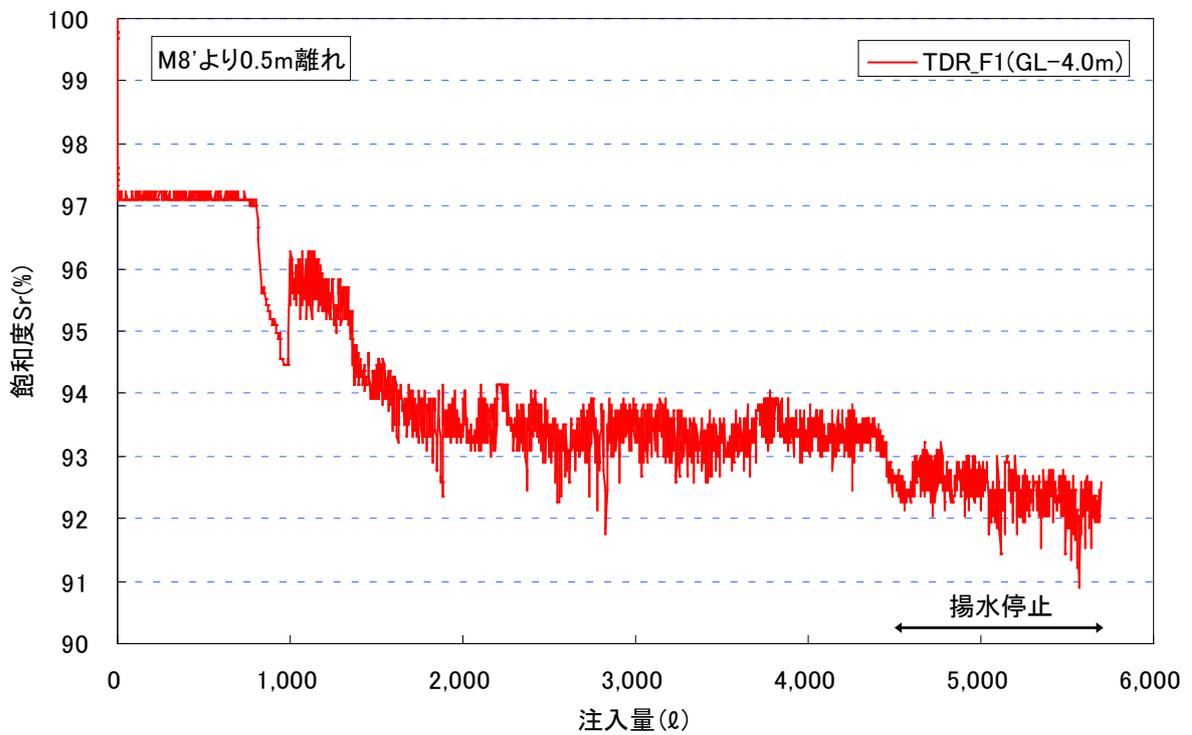


図 5.22 固定式 TDR_F1 計測注入量結果 (M8'注入時)

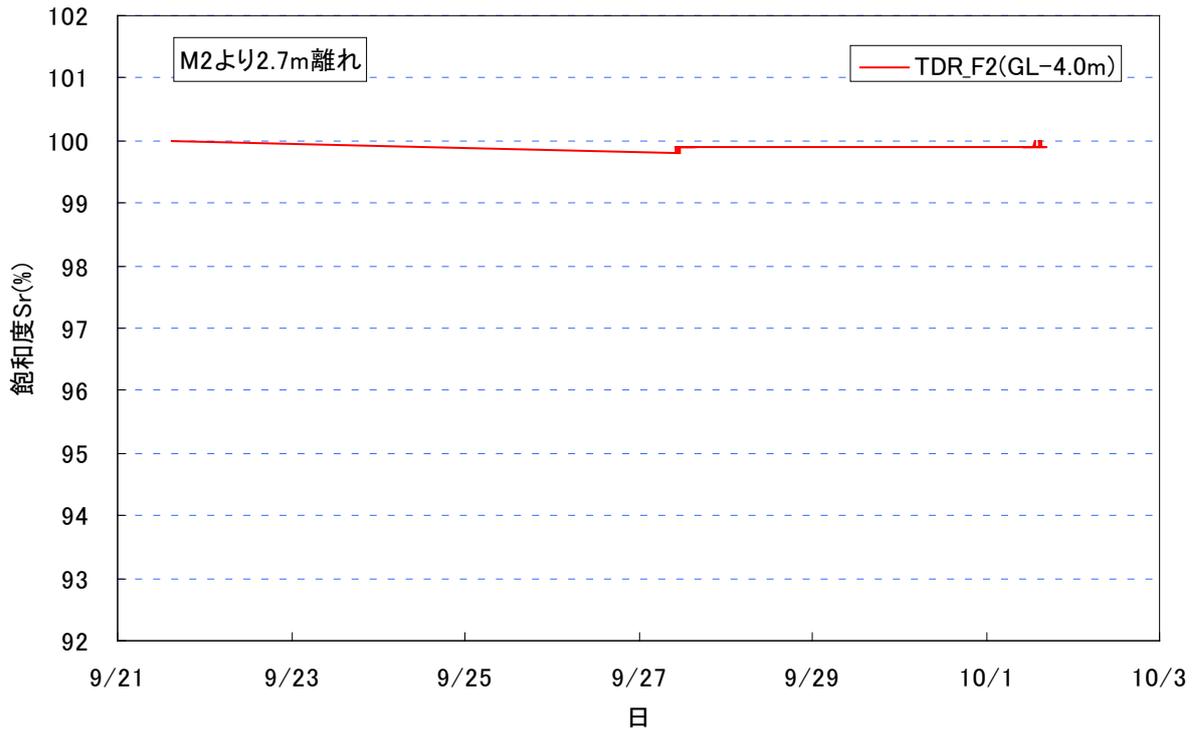


図 5.23 固定式 TDR_F2 計測経時結果 (M2 注入時)

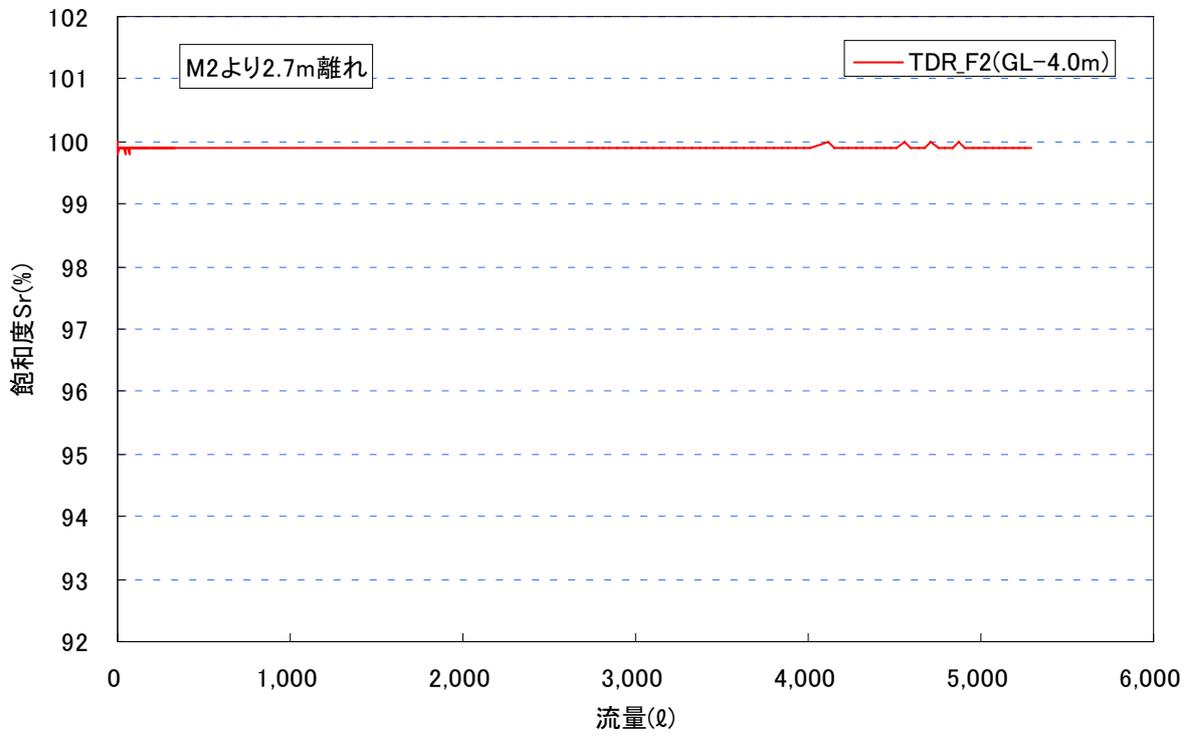


図 5.24 固定式 TDR_F2 計測注入量結果 (M2 注入時)

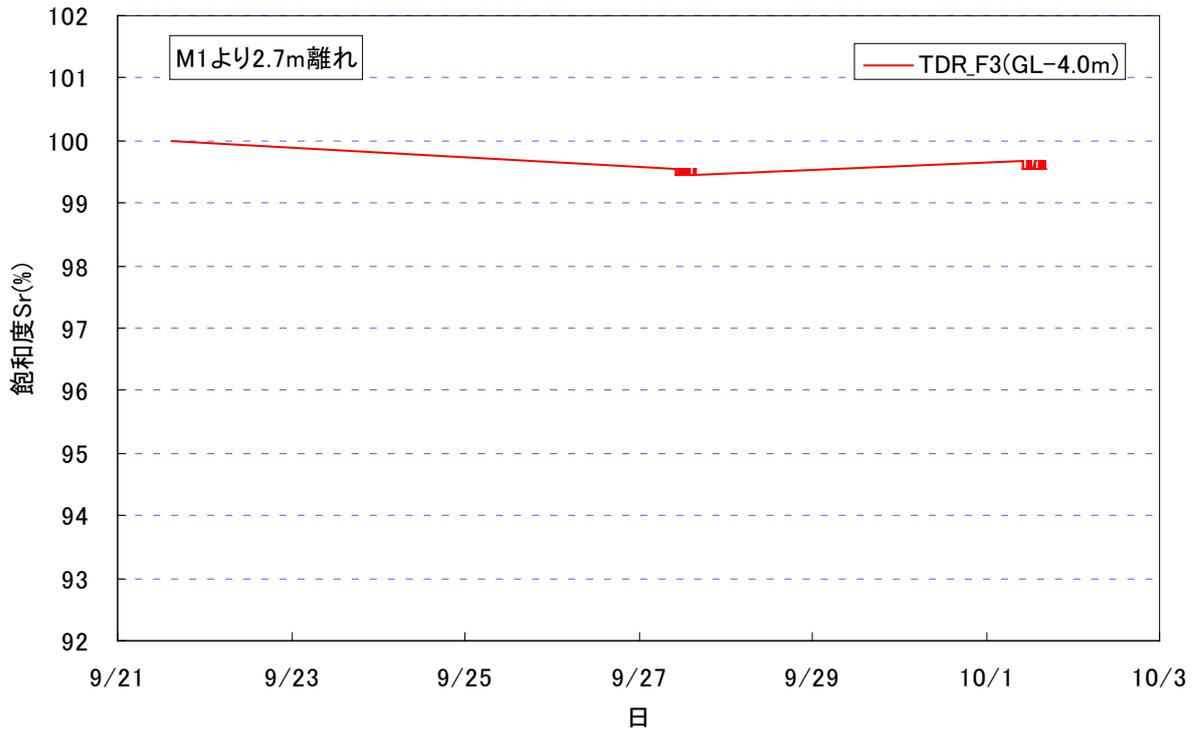


図 5.25 固定式 TDR_F3 計測経時結果 (M1 注入時)

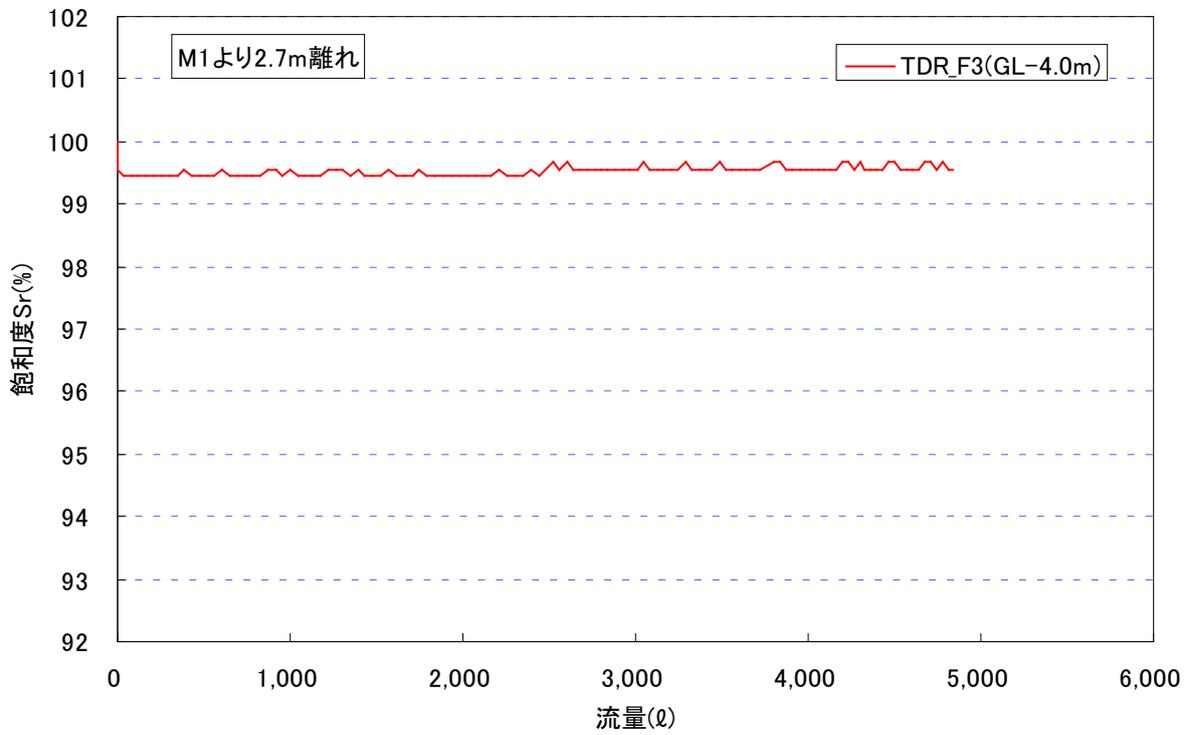


図 5.26 固定式 TDR_F3 計測注入量結果 (M1 注入時)

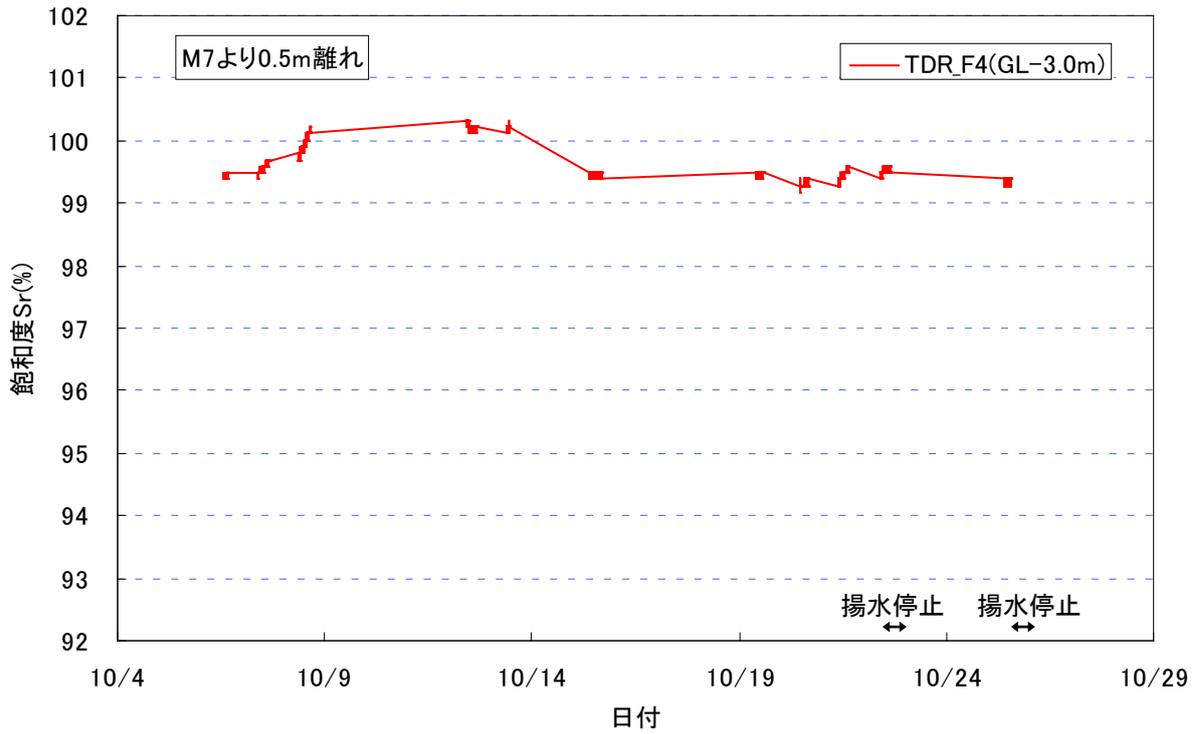


図 5.27 固定式 TDR_F4 計測経時結果 (M7 注入時)

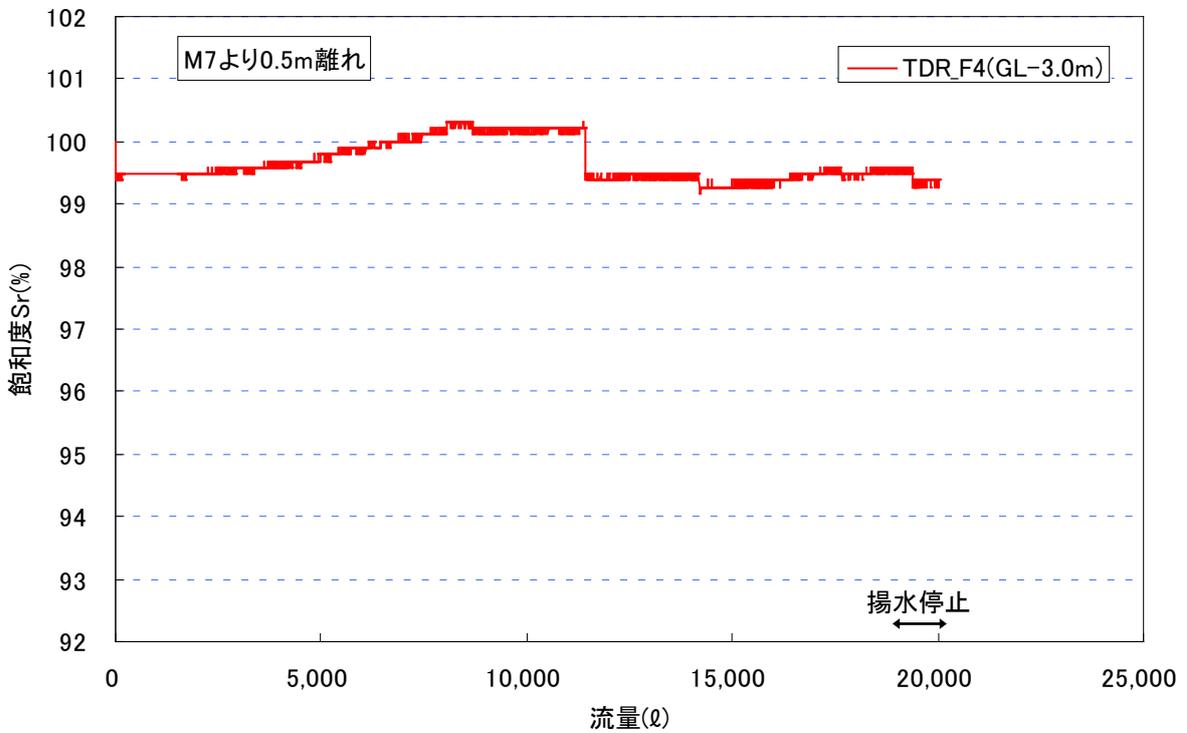


図 5.28 固定式 TDR_F4 計測注入量結果 (M7 注入時)

5.4 水圧・温度計測結果

固定式 TDR (TDR_F1~TDR_F4) の深度 1.0m~0.5m 上方に設置した間隙水圧計と現場近くの熊谷で計測された気圧の結果²⁾と流山 (27.7K) で計測された江戸川河川の水位の変化³⁾を図 5.29 に記す。間隙水圧との比較のため、気圧は、1hPa を 0.1kPa、水位は 1m を 10kPa と換算した。間隙水圧は、特に水位の変化に影響を受けており、地下水位も江戸川河川の水位の影響を受け、変動しているものと想定される。

なお、9月29日と11月2日は冠水のため、水圧の値が大きくなっている。また、10月15日から10月21日までと11月30日から12月2日の間は測定器の故障の為、11月21日から12月27日までは野生物によるケーブル切断により、PWP1, PWP2, PWP3 の計測が取れなかった。

MB 水注入時の間隙水圧の変化を図 5.30 に示す。また、図 5.31 は 9 月 21 日の MB 水注入時の 1 日の水圧変化を見たものである。図より、揚水を行うことにより水圧が一旦下がり、MB 水注入により圧力が少し上昇していることが分かる。また、この水圧は注入、揚水が終了するとともに間隙水圧に戻った。

ここで、揚水により低下した水圧を揚水圧、注入により上昇した水圧を注入圧とし、図 5.32 に各計測点での揚水圧と MB 水注入圧の変化を示す。

計測場所により違いはあるものの、揚水により 1~5kPa 水圧が減少し、MB 水注入により 0~6kPa 上昇している。

揚水時の圧力に関しては、揚水孔 1 より 1m 離れた PWP4 で 4kPa 程度、揚水孔 2 より 1m 離れた PWP1 では 3kPa となった。これは揚水孔 1 の揚水量が 2L/min と少なく、揚水孔 2 の影響が現れたものと考えられる。PWP2, PWP3 は関しては双方 3kPa 程度であった。

一方、注入時の圧力は揚水併用時 0~2kPa、揚水停止時 2~4kPa となった。ミニラム注入では、M7 より 500mm 離れの位置 (PWP1) で 3kPa 程度、M8' より 500mm 離れの位置 (PWP4) で 4kPa 程度、二重管注入では、E2 より 1,750mm 離れの位置 (PWP2,PWP3) で 2~3kPa 程度であった。

2) 気象庁ホームページ：気象統計情報 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>

3) 国土交通省ホームページ：水文水質データベース <http://www1.river.go.jp/>

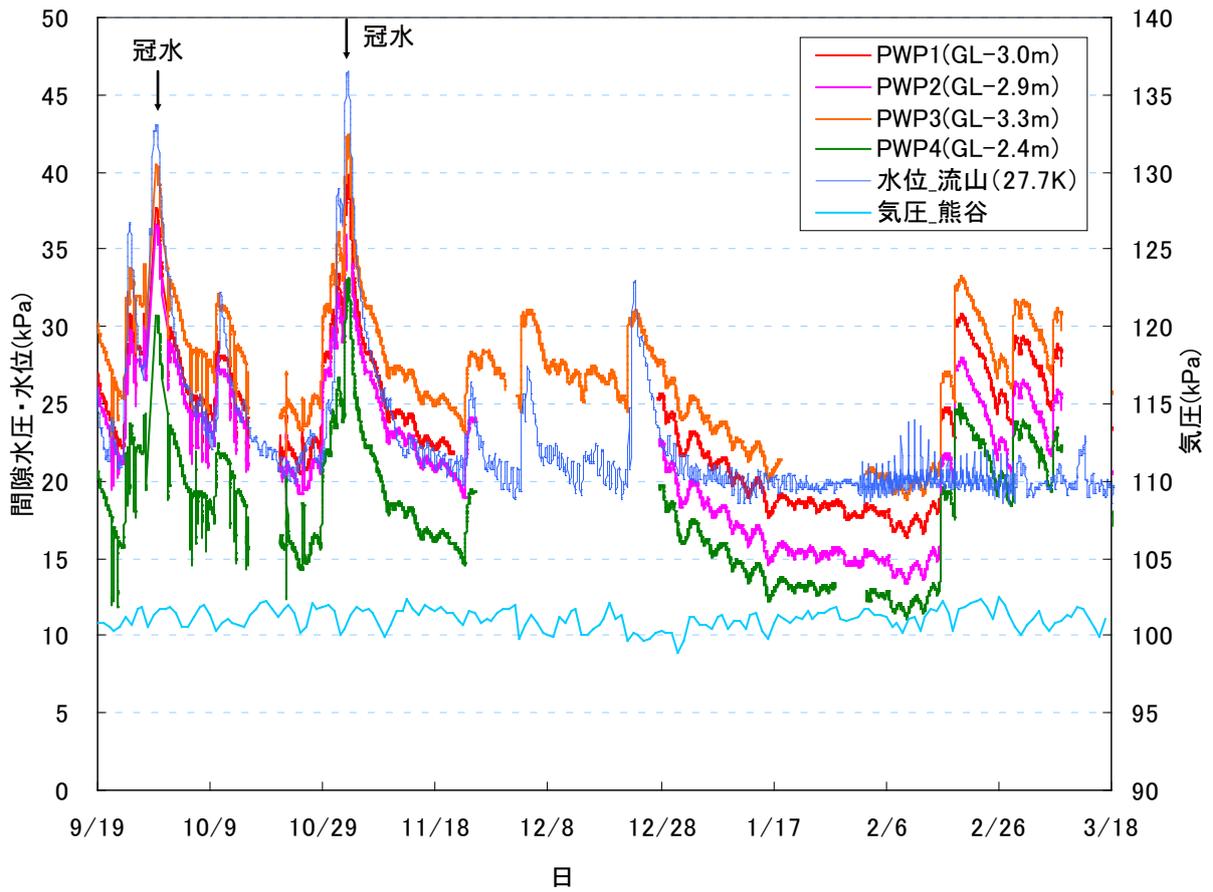


図 5.29 間隙水圧と河川水位，気圧の変化

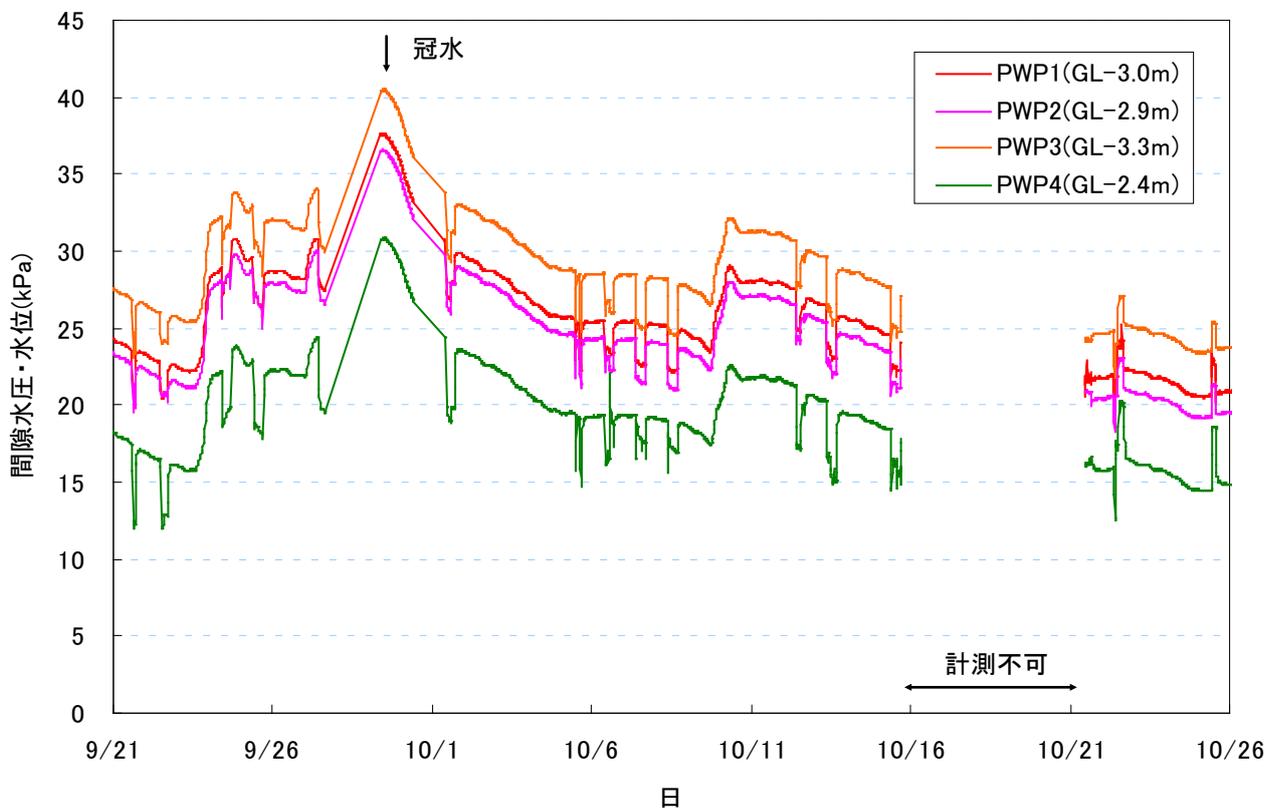


図 5.30 間隙水圧変化（注入時）

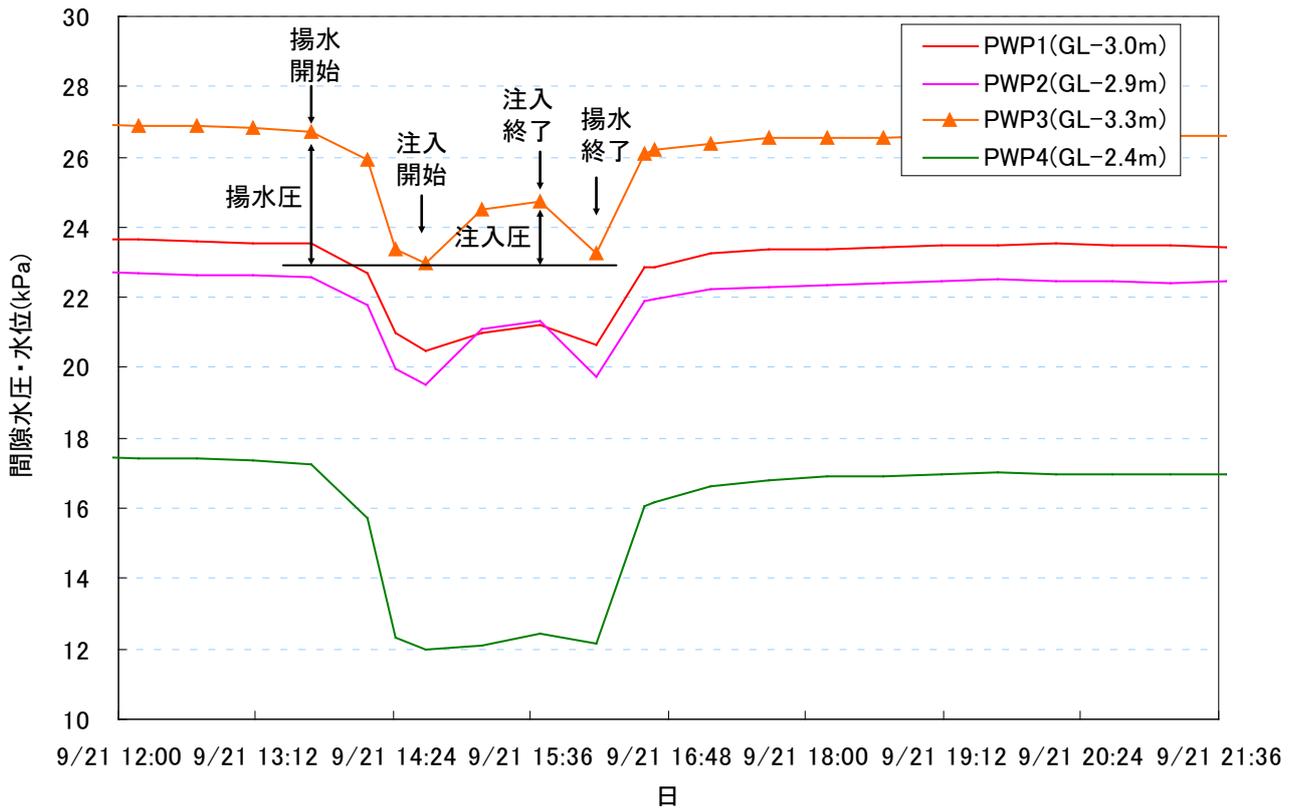


図 5.31 1日の間隙水圧変化 (9月21日)

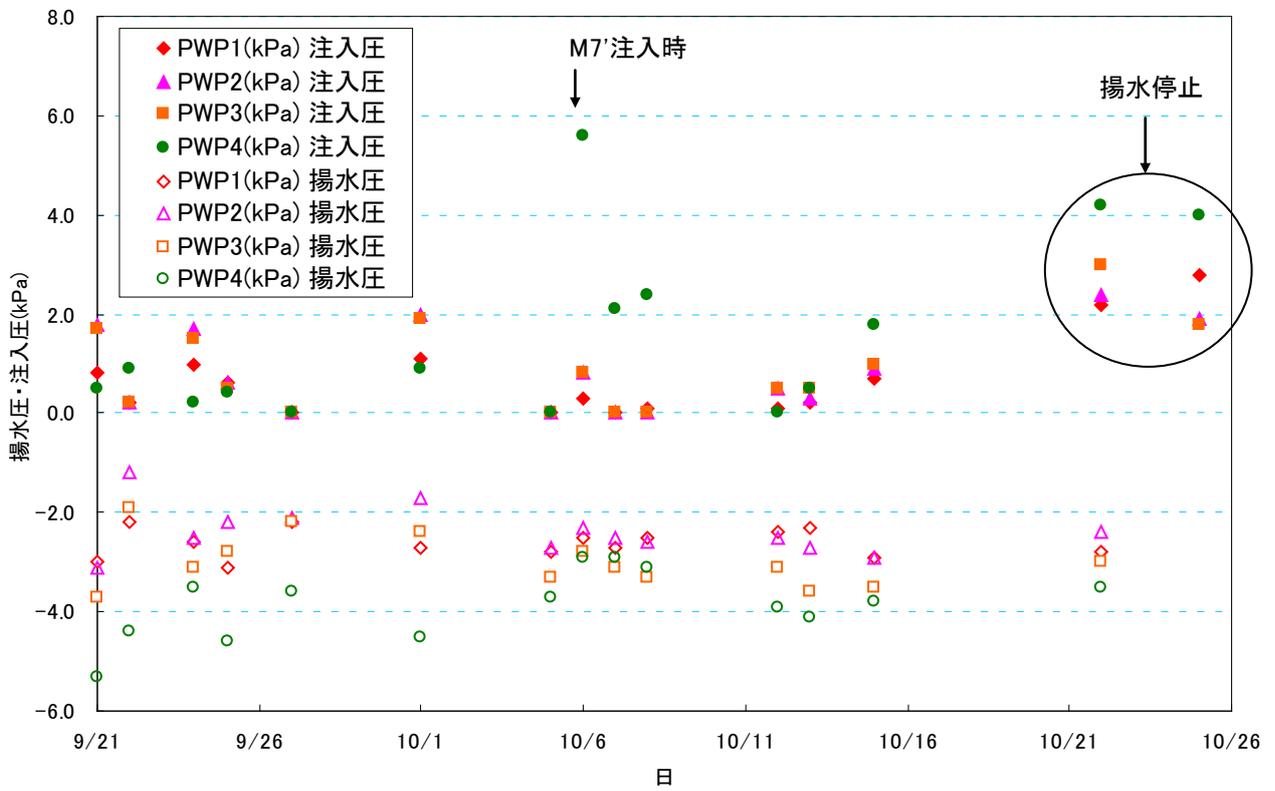


図 5.32 揚水圧と注入圧 (注入時)

図 5.33 に計測 BOX で計測した試験場所の気温と湿度，地盤の温度を示す。温度は 9 月の試験当初は日中 36℃まで上昇したことから，計測機器内部の温度は 60℃付近まで上昇し計測機のトラブルに見舞われた。また，2 月では夜間-7℃まで低下した。

湿度においては河川に近いことから，日中乾燥し湿度が下がるもののほとんど 100%近い値であった。

地盤中温度は日射があるものと日陰で 2 度程度差があり，気温に比べ変化は少ないものの，9 月に 20℃程度だったものが 1 月で 5℃以下まで低下している。

図 5.34 には MB 水注入時の気温と湿度，地盤中の温度に加え，流山(27.7K)での観測水位および PWP1 で計測された地下水位を示す。9 月 27 日に冠水に見舞われ水位は 2m 程度変化しており，その前後の気温変化を見ると 36℃から 10℃まで変化した。

これらより，試験フィールドの環境の急激な変化がわかり，前節の地盤中の飽和度結果にも影響を与えていると考えられる。

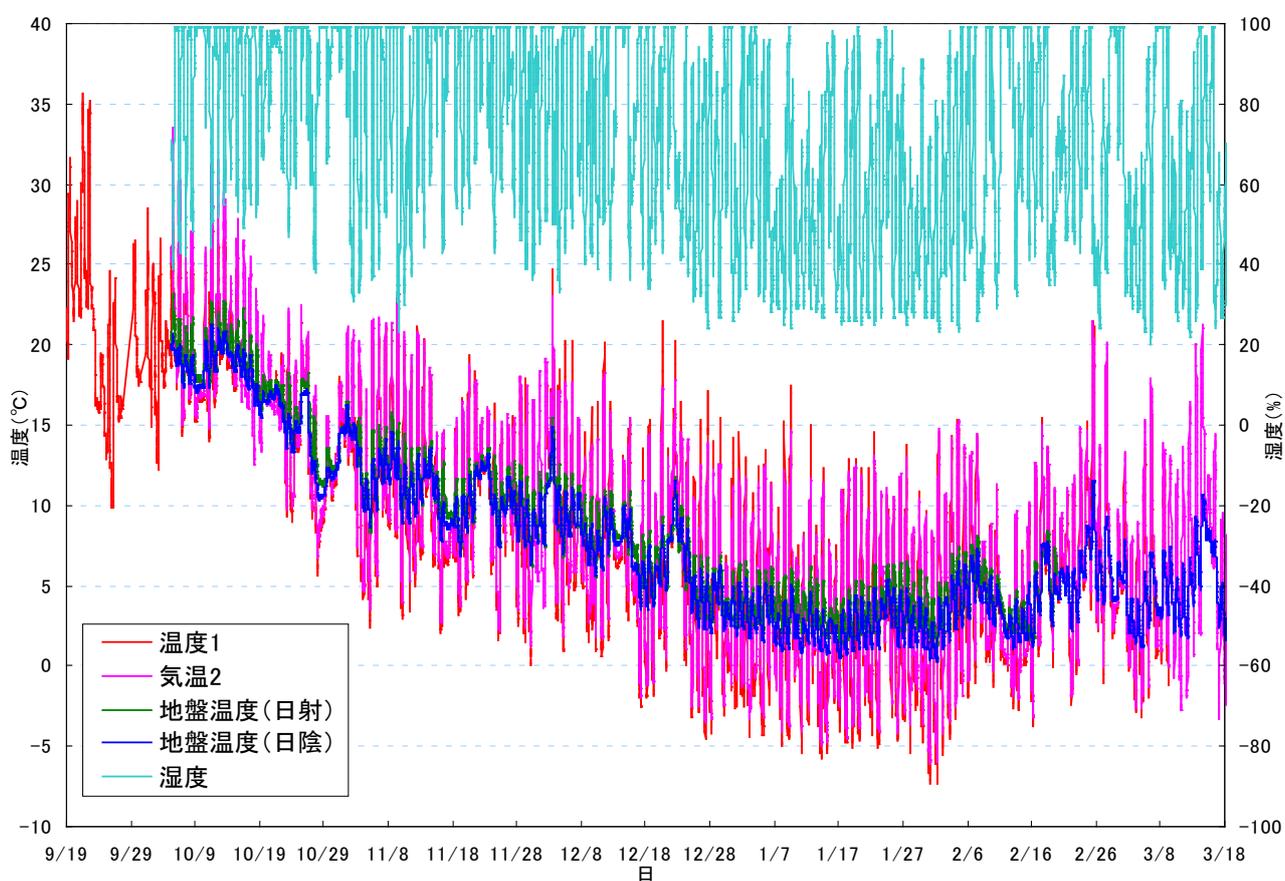


図 5.33 気温，湿度，地盤温度変化

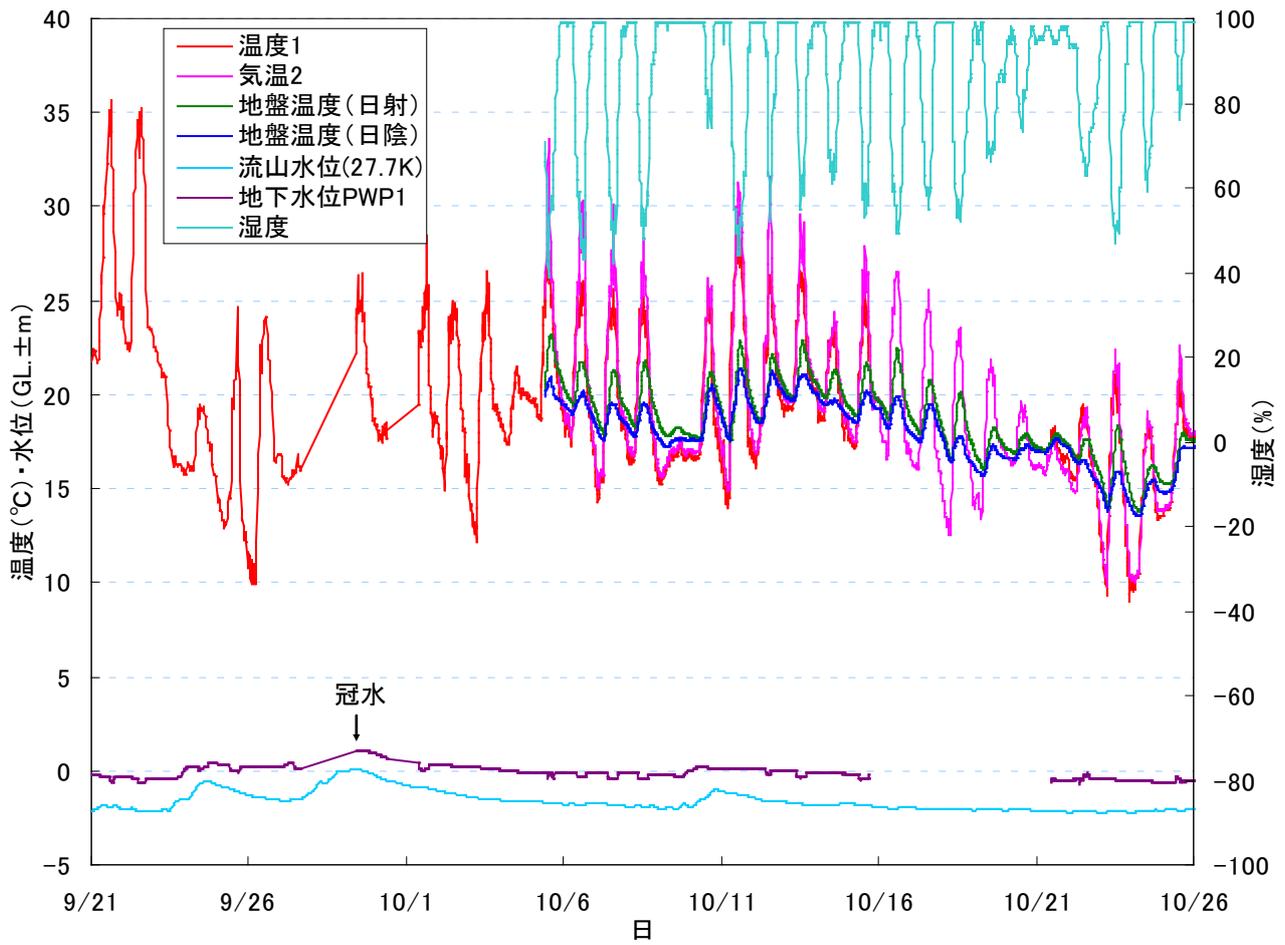


图 5.34 气温，湿度，地盤温度，水位变化 (MB 水注入期間)

5.5 沈下計測結果

試験地盤の沈下計測を図 5.35 から図 5.41 に示す。図は沈下が+，隆起が-である。

MB 水注入時の地表面の変位はほとんど隆起しておらず，2mm 程度沈下であった。レベル測量の誤差もふまえほとんど地表面の変化はなかったと想定される。

また，事後計測においても 1 部 6mm の沈下があったが，これは表層の 1m 程度が軟弱な浚渫土のため，地上面の地盤が乾燥による収縮や冠水などによる影響で変化したと考えられる。

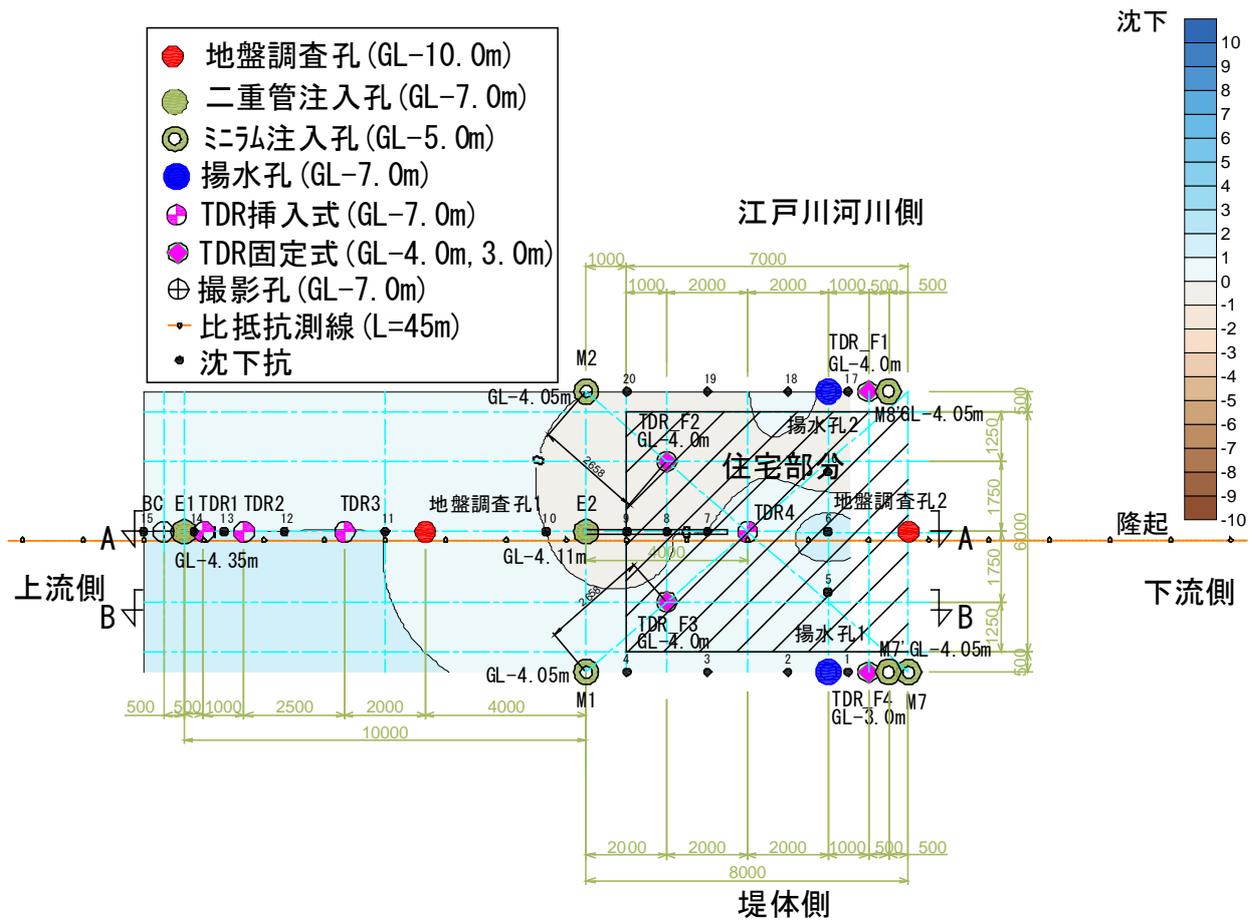


図 5.35 沈下コンター図 (9 月 21 日)

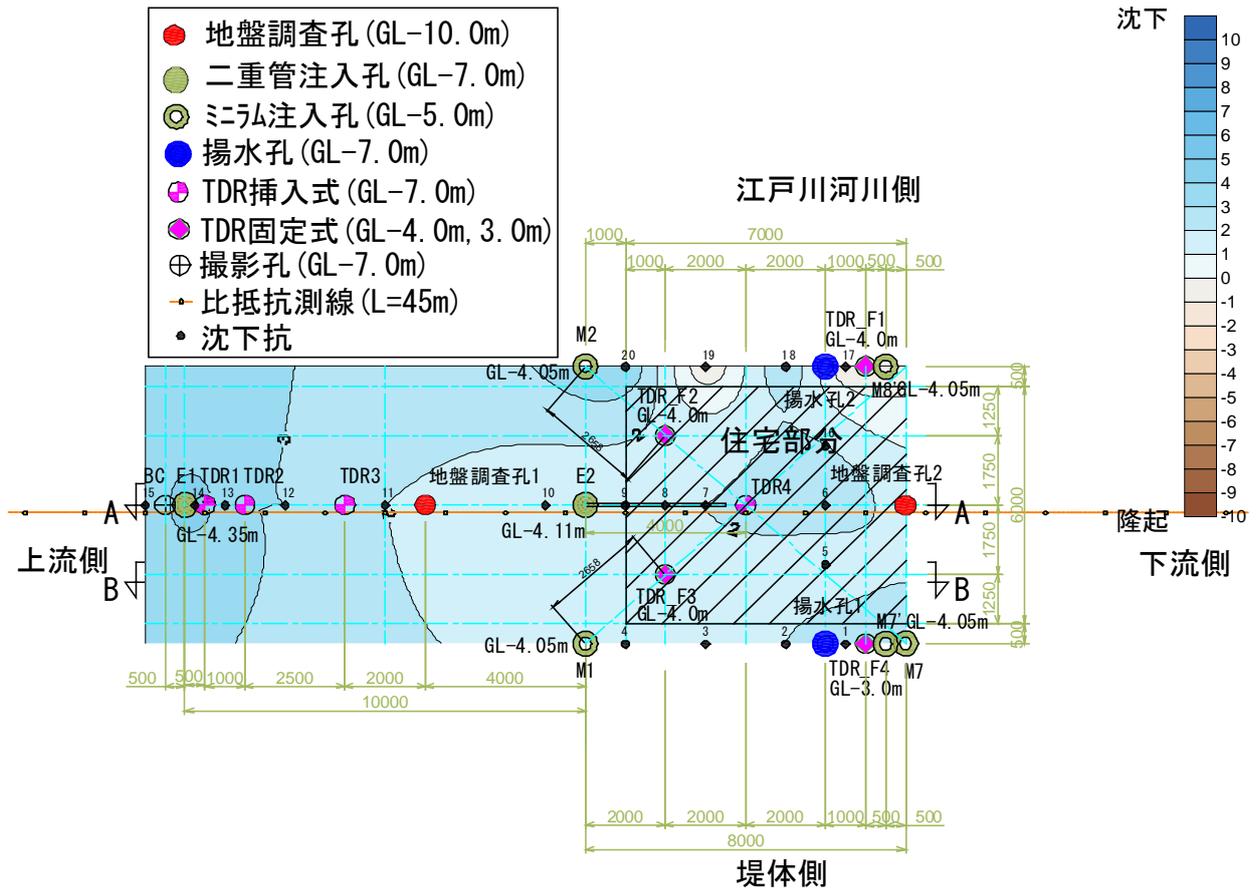


図 5.36 沈下コンター図 (9月27日)

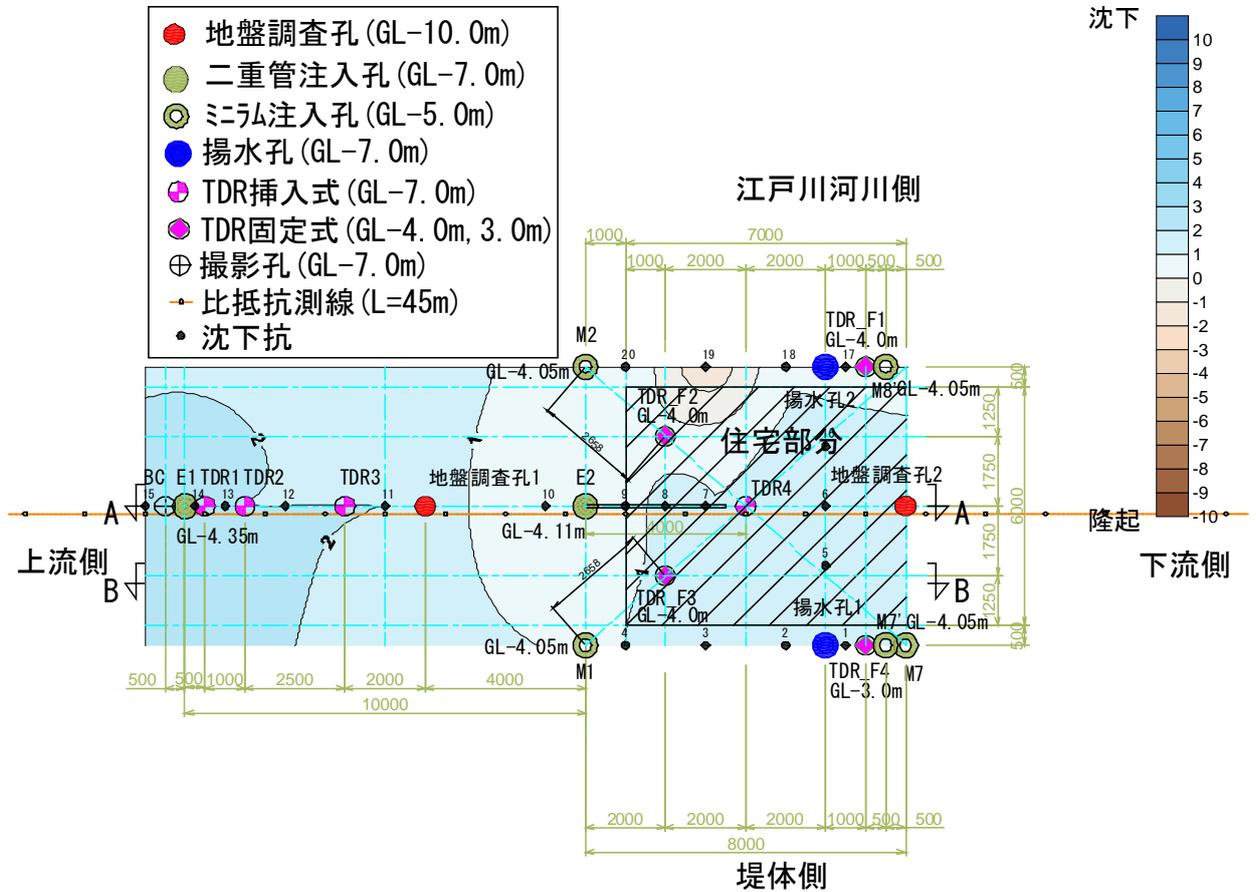


図 5.37 沈下コンター図 (10月15日)

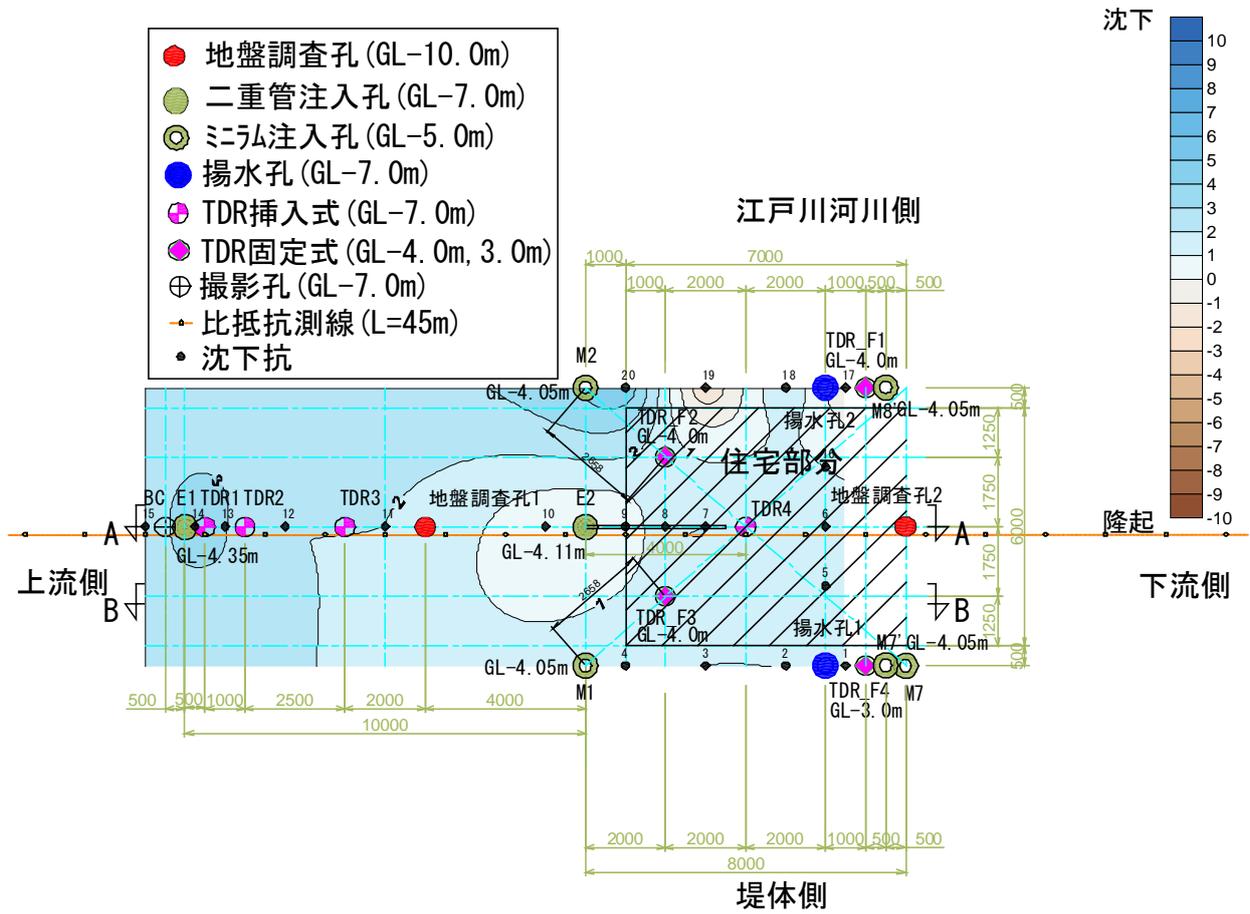


図 5.38 沈下コンター図 (10月25日)

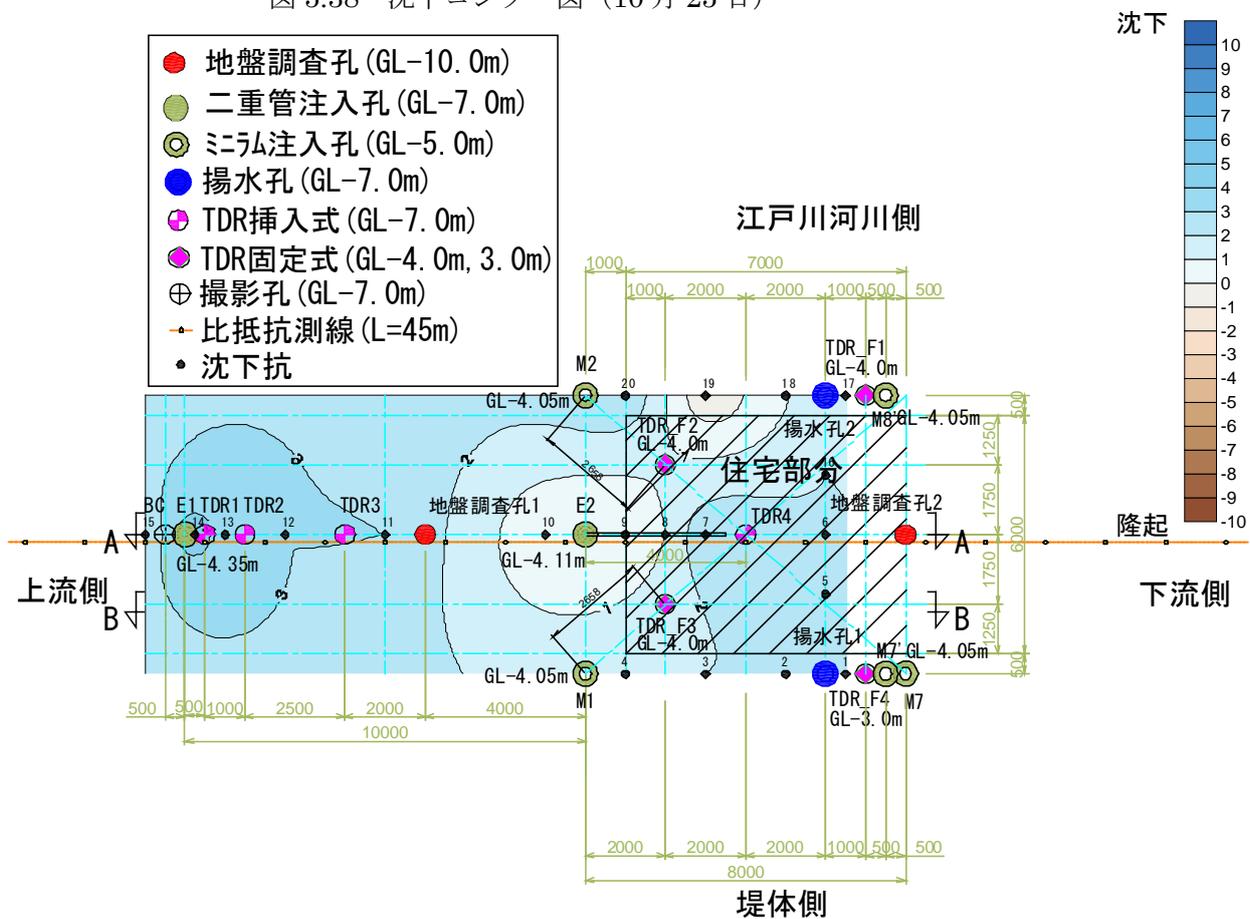


図 5.39 沈下コンター図 (10月28日)

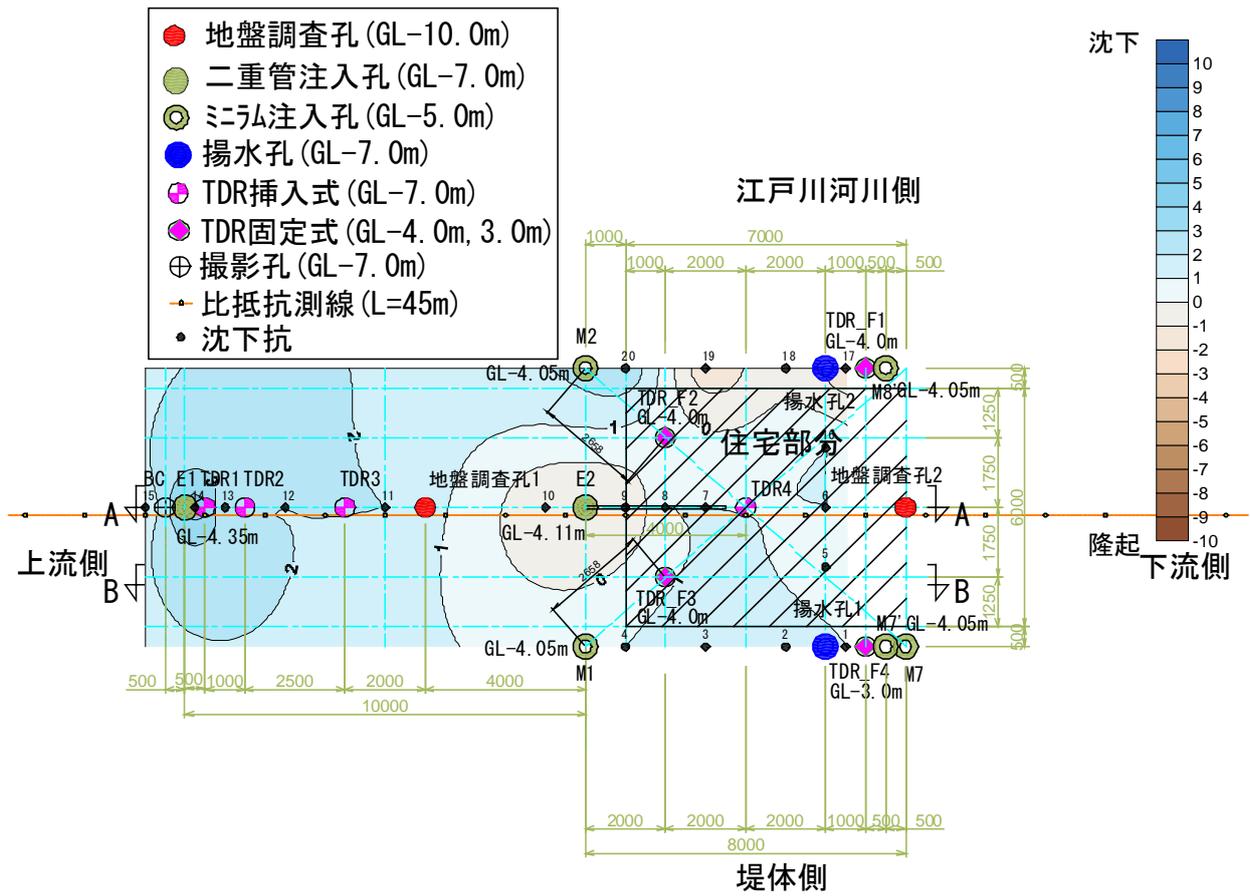


図 5.40 沈下コンター図 (11月8日)

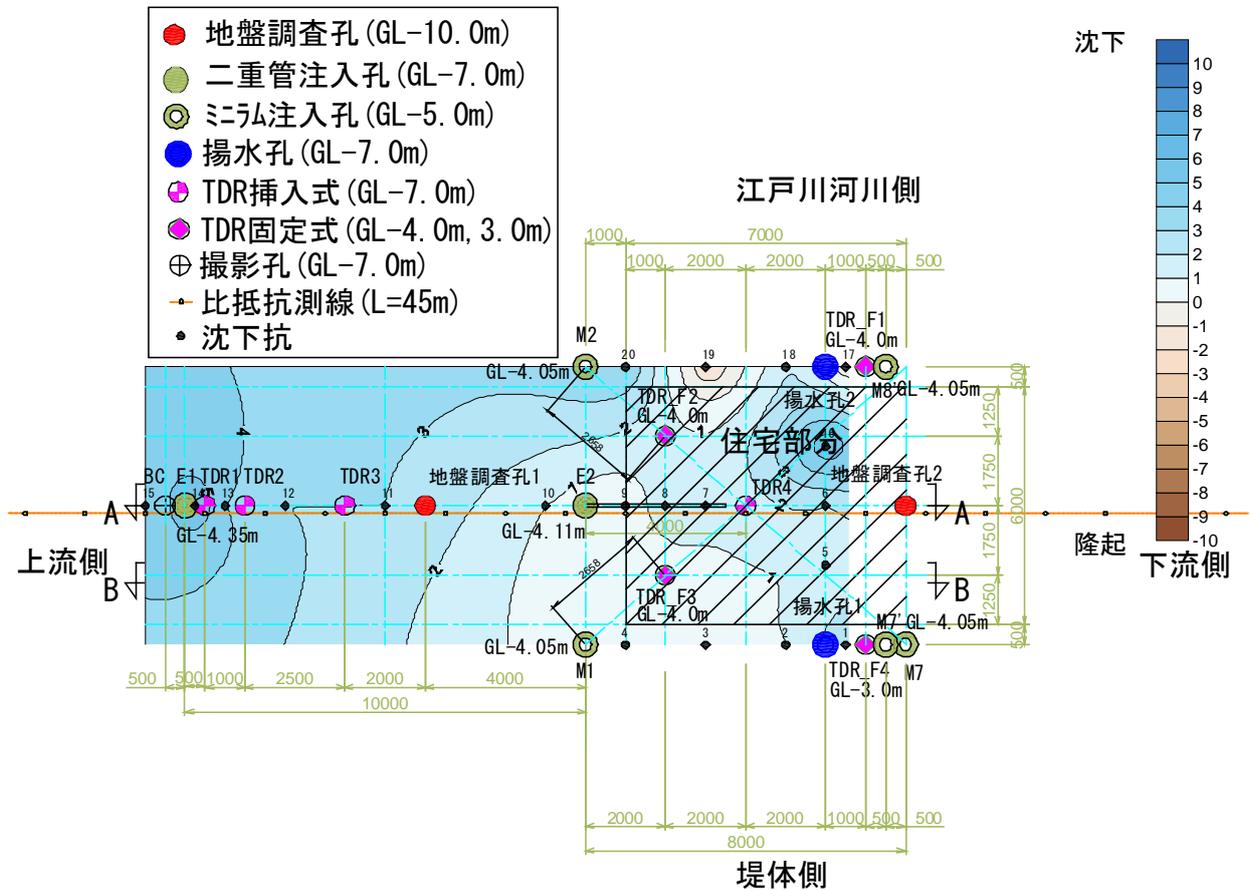


図 5.41 沈下コンター図 (12月2日)

5.6 比抵抗電気探査結果

図 5.42 および図 5.43 に注入時の比抵抗電気探査の結果を記す。図は MB 水注水前（9 月 21 日午前）と注入初日（9 月 21 日）と 2 日目（9 月 22 日）の比抵抗計測結果より逆解析により求めた比抵抗の変化率分布を示したものである。比抵抗変化率は比抵抗の増加を正とし、飽和度の低下を示している。図より、二重管注入箇所および揚水孔を中心に飽和度が低下していることが確認された。

なお、比抵抗電気探査は、上記計測日以外にも計測を行ったが、本現場が河川敷ということもあり、河川による地下水の変動により、地下水電位が変化したため、初期のリファレンスデータとの再現性に問題がある結果となったため、計測初期（9 月 21 日、9 月 22 日）のデータのみを結果とした。

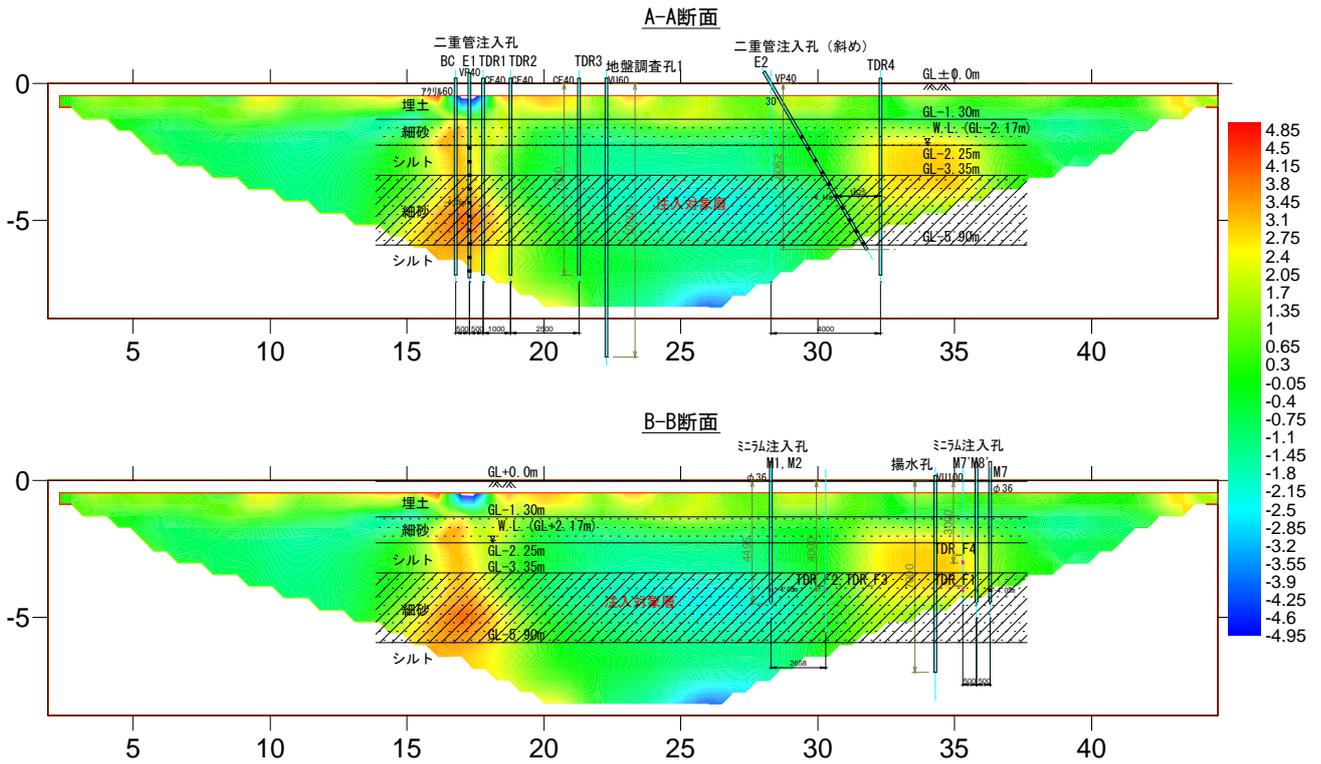


図 5.42 比抵抗電気探査 (9月21日)

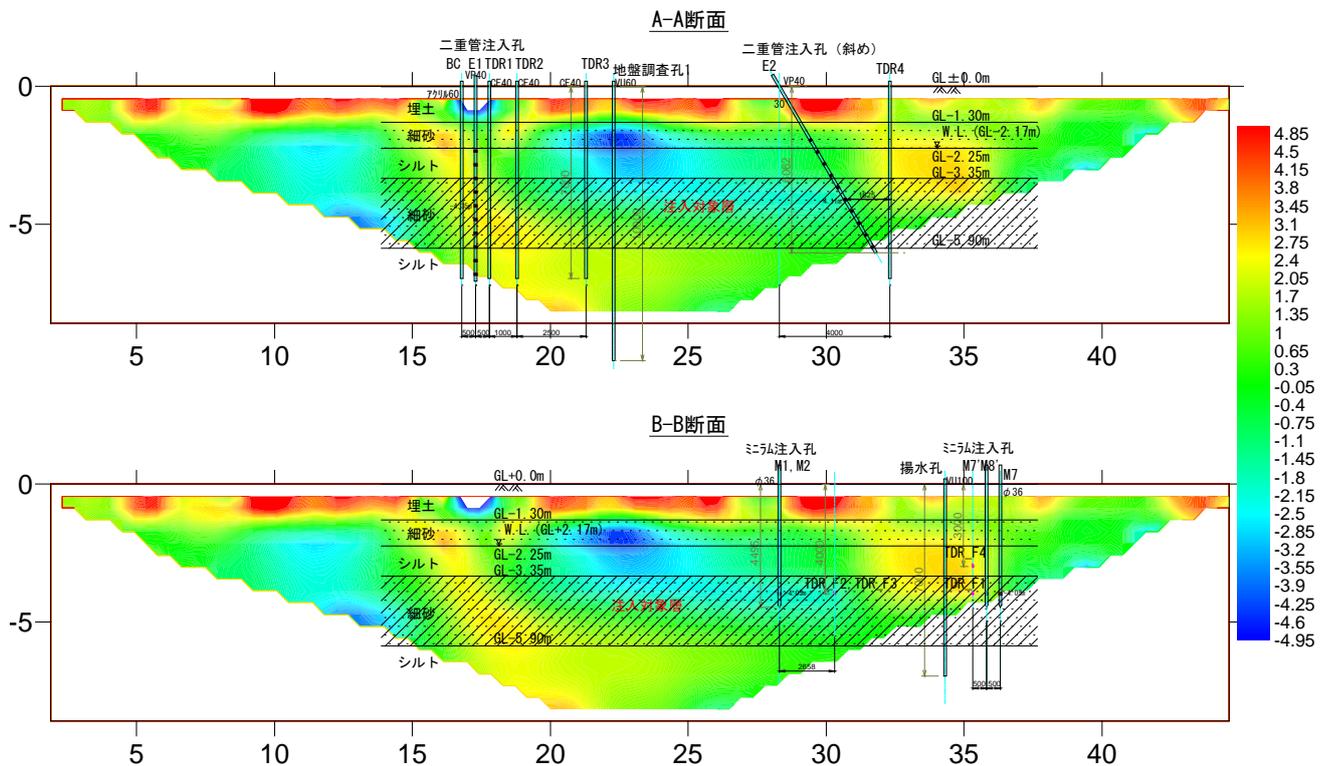


図 5.43 比抵抗電気探査 (9月22日)

6 地盤飽和度の定期的計測の実施

事後計測は表 6.1 に示す日程で計測を行った。計測は計測誤差や気象条件による影響を避けてデータを取得するため、より細かい間隔で計測をする必要があり、MB 水注水後 1 日後、2 日後、7 日後、14 日後、20 日後、40 日後、60 日後、80 日後、100 日後、120 日後、140 日後の計 11 回行った。

なお、実施日数は MB 水注入終了の 10 月 25 日 13:00 からの日数である。

表 6.1 事後計測日程予定表

| 計画 日数 | 1 | 2 | 7 | 14 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 |
|------------|-------|-------|------------|------|-------|------|-------|------|-----|------|------|
| 実施日 | 10/26 | 10/27 | 11/1* | 11/8 | 11/15 | 12/2 | 12/27 | 1/14 | 2/2 | 2/25 | 3/18 |
| 実施 日数 | 1 | 2 | 7 | 14 | 21 | 38 | 63 | 81 | 100 | 123 | 144 |
| 挿入式 TDR | ○ | ○ | TDR4 のみ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 比抵抗 探査 | ○ | - | ○ | ○ | - | ○ | - | - | - | - | - |

6.1 領域(A)マイクロバブル水注入による実地盤の飽和度変化の実測結果

図 6.1 に注入後に挿入式 TDR 計で計測した結果を示す。図より MB 水注入終了後においてさらに飽和度が低下していることがわかる。これは注入箇所から遠い個所でも確認されており、圧力下で生成された高濃度の空気溶存水が、地盤注入後に圧力が開放され、空気が析出したと考えられる。

また、この現象は地盤が浅いほど多く見られる傾向にあり、生成時の圧力と地盤内の圧力の差が大きいほどより気泡が発生しやすくなることを示唆している。

図 6.2 には注入後の飽和度が目標飽和度 90%以下となった深度での飽和度経過を示す。飽和度が注入事後 90%程度のものは事後 60 日程度で 95%程度まで上昇しているものもあるが、注入事後の飽和度が 80%程度まで低下しているものは、140 日経過後でも比較的値が安定している。

また、全体的に飽和度が高くなっている傾向にあるものも上昇の変化が収まれば、注入対象層の飽和度の変化は小さくなり、空気は地盤土粒子の間隙内に停滞し続けると考えられる。

なお、今回の計測期間中の気温、水位の変化や冠水などの影響で急激な飽和度の変化は見られなかった。飽和度が上昇した要因のとしては、地盤中の地下水の流入や還元状態で含まれる鉄分やバクテリアなどの生物の影響などが考えられる。

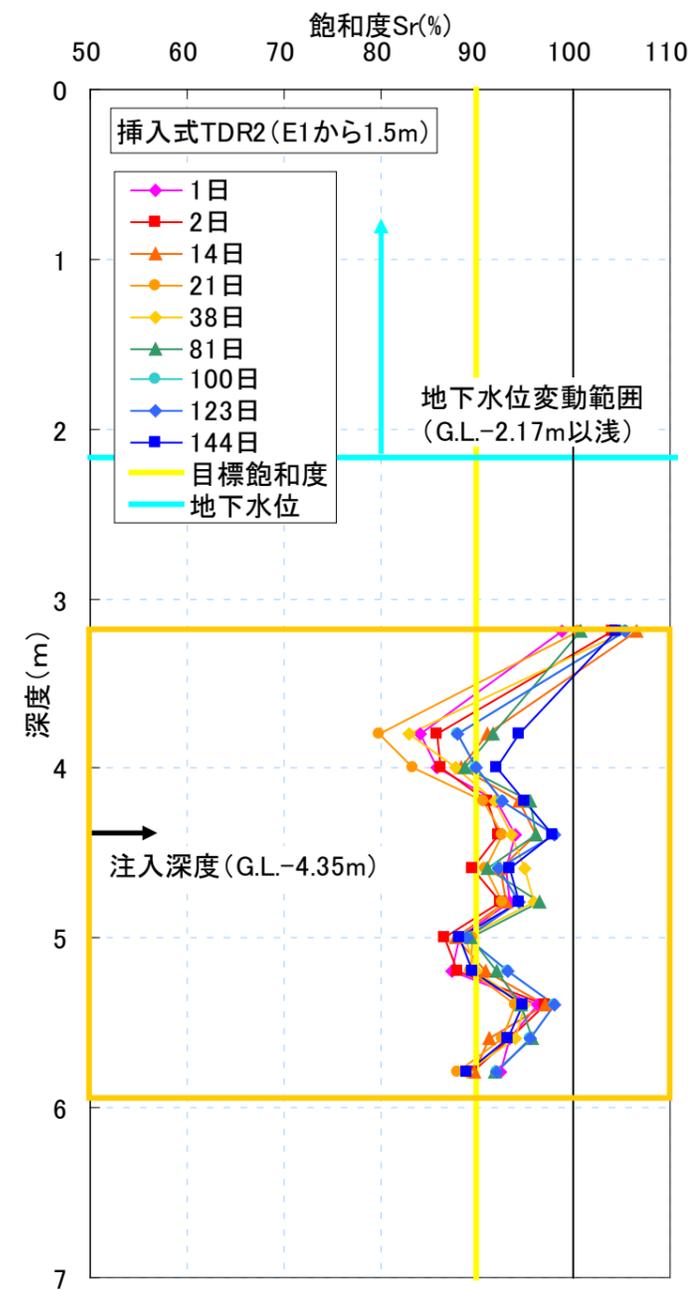
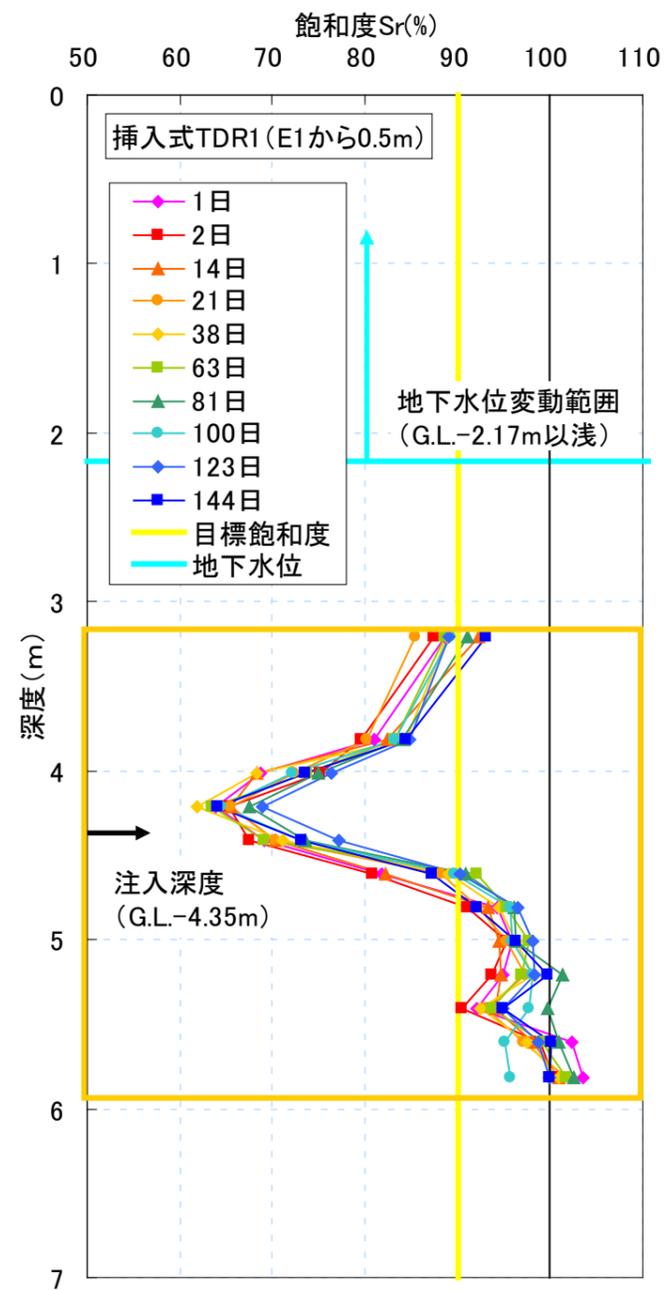
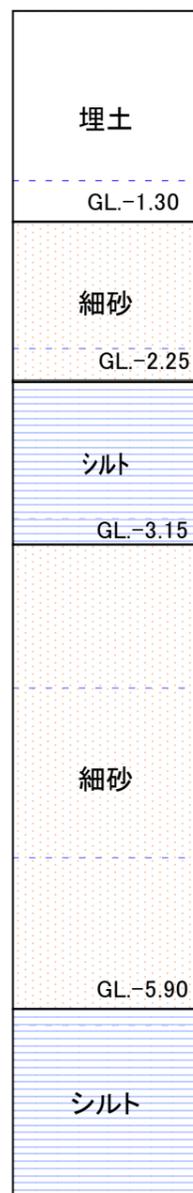


図 6.1 注入後挿入式 TDR 飽和度計測結果 (E1)

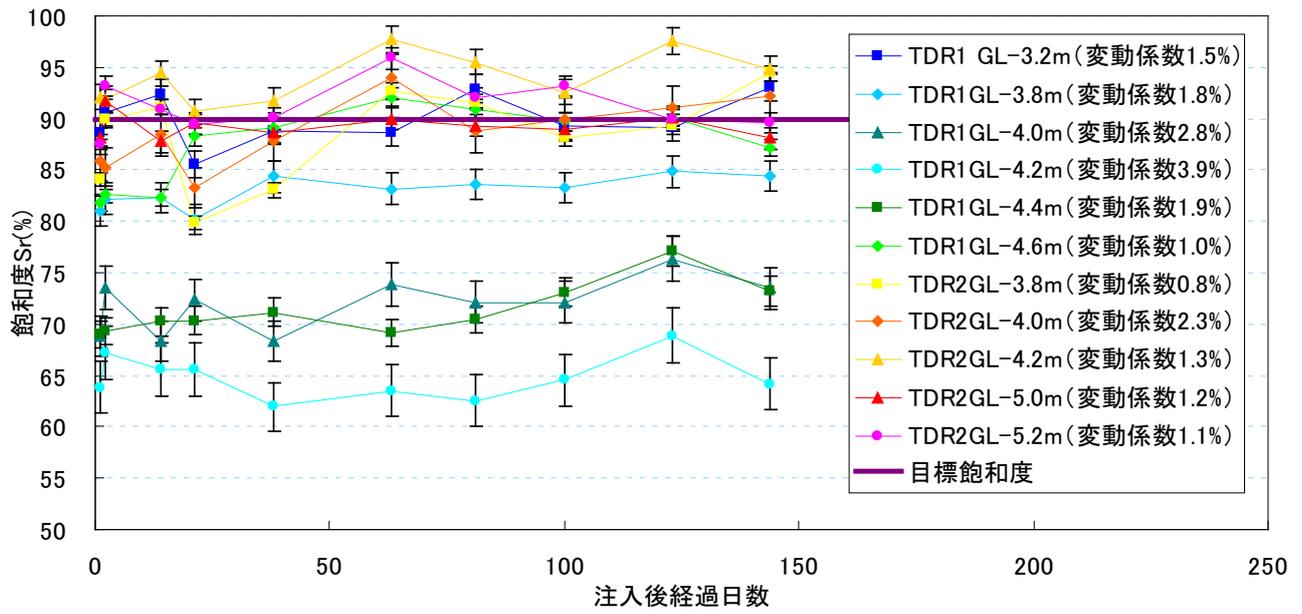


図 6.2 注入後飽和度経過日数結果

6.2 領域(B)低層住宅の床下地盤を想定した不飽和化の試行結果

図 6.3 に挿入式 TDR 計で計測した住宅床下での飽和度経過結果を示す。前述の鉛直二重管注入と同様に MB 水注入終了後もさらに飽和度が低下しており空気が析出したと考えられる。

図 6.4 に注入後の飽和度が目標飽和度 90%以下となった深度での飽和度経過を示す。飽和度は注入事後 80%程度まで低下し、その後やや上昇する傾向にあるものの、140 日経過後で目標飽和度の 90%程度以下に安定する結果となった。

一方、図 6.5 は固定式 TDR 計で計測した事後の結果である。目標飽和度の 90%には達していないものの、注入事後 92%まで低下した飽和度が、注入後 94%まで上昇し、その後変動はしたものの、60 日目以降飽和度が安定しており、140 日経過後においてもほぼ横ばいとなる結果となった。また、河川水位と気圧による飽和度の関係であるが、時間差はあるものの水位が高くなると飽和度も上昇する傾向がみられ、地下水の変動が飽和度に影響を与えていると考えられる。

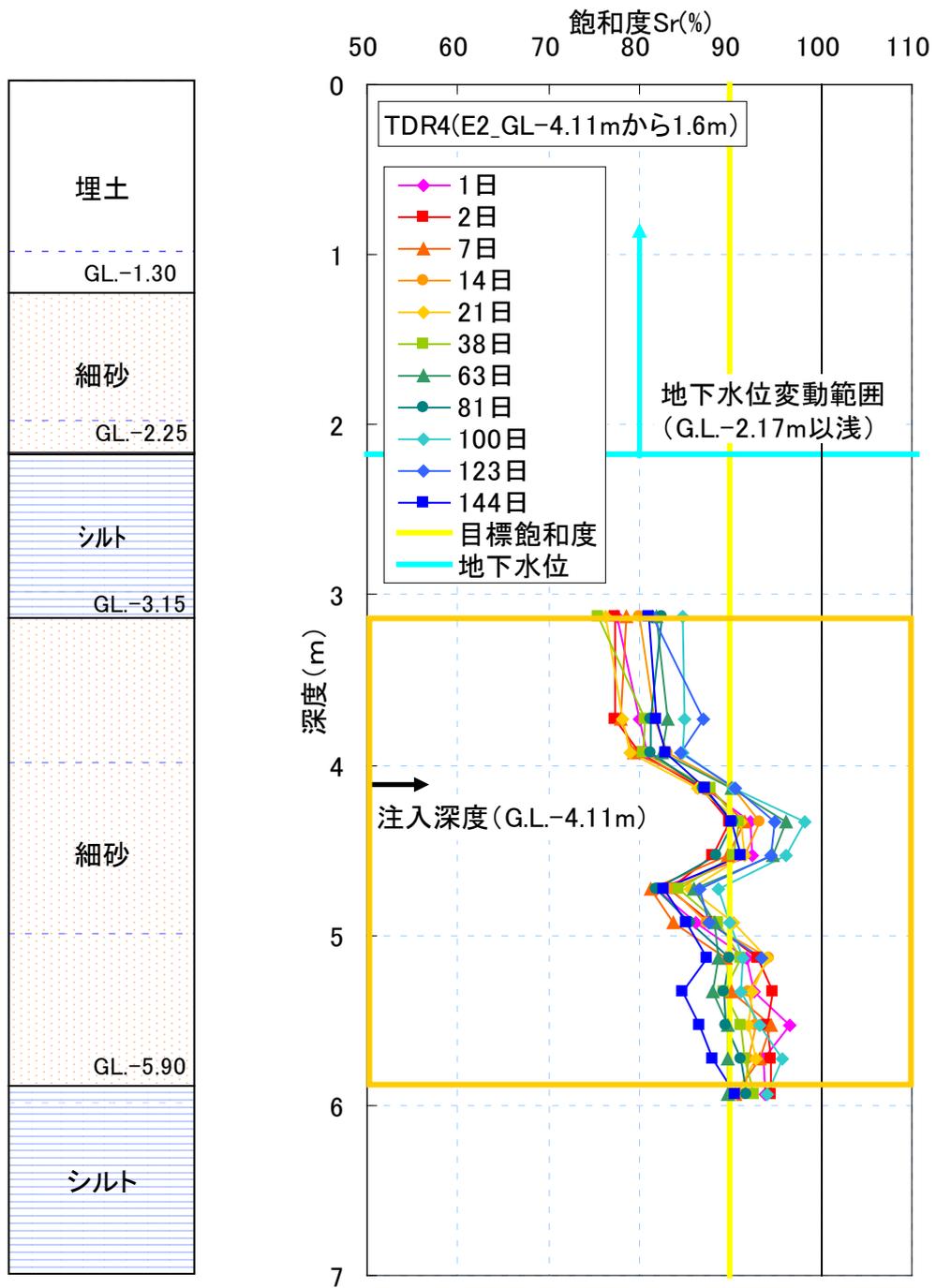


図 6.3 宅地床下地盤注入事後挿入式 TDR 飽和度計測結果 (E2)

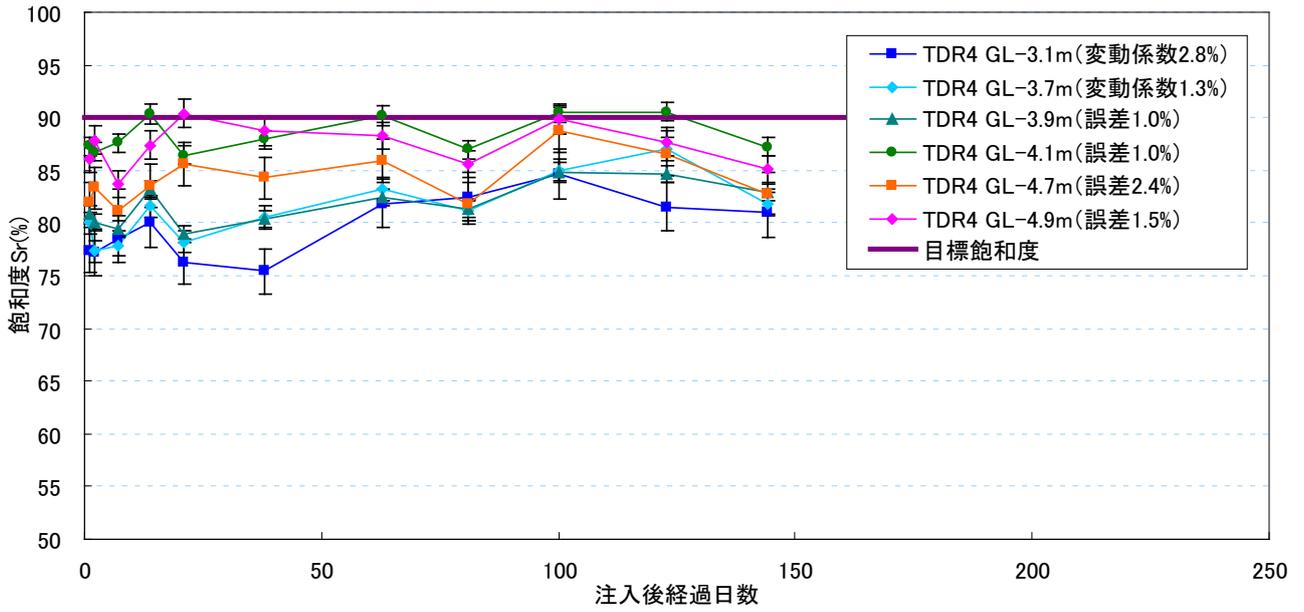


図 6.4 注入後飽和度経過日数結果

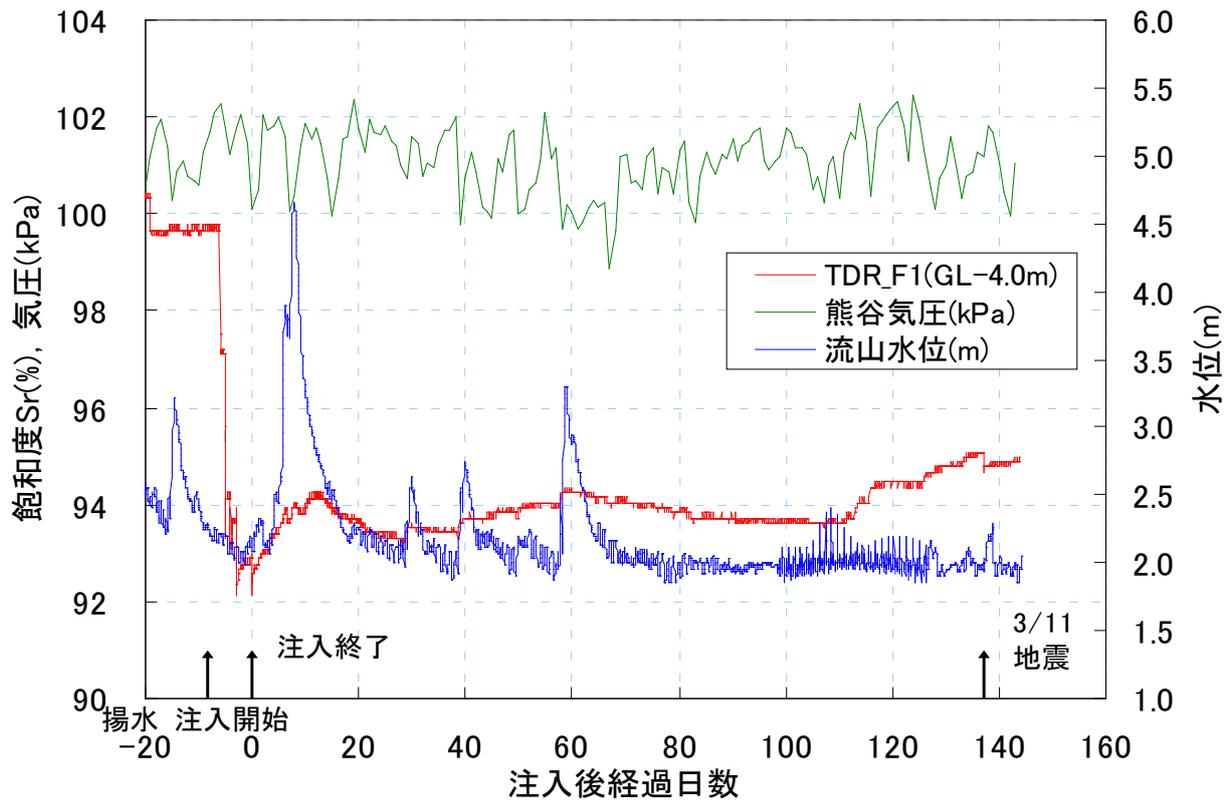


図 6.5 注入後固定式 TDR 飽和度計測結果

7. まとめ

マイクロバブル水の注入方法の検討

二重管注入法は、1箇所あたり 6L/分程度の流量で安定して注入することが出来た。斜め注入においても施工や注入が可能であることが確認された。

一方、二重管注入工法と比較して、簡易に注入できるサウンディングコーンを用いる方法としてミニラムロッド注入工法を実施した。ミニラムロッド注入法は、注入の初期段階で若干のリークが発生したが、注入速度 8L/分程度と二重管注入と同流量で注入が出来ることが確認された。

また、地下水を揚水し利用することにより、マイクロバブル水を生成、注入することが確認された。

注入時における地盤飽和度の計測

注入時の地盤飽和度は、マイクロバブル水注入開始直後から低下し始め、注入箇所から水平に 0.5m 離れた箇所においては注入量 3m³程度で低下が収束することが分かった。また、1.5m 離れでも注入量 3 m³程度、4.0m 離れで 5 m³程度で飽和度が収束する結果となった。注入対象砂層における収束飽和度の平均値は注入箇所から 0.5m 離れで 85%、1.5m 離れで 90%、4.0m 離れで 95%となった。

飽和度の低下挙動から、注入箇所から離れるにつれ、浸透方向が上方方向になることが観測された。

このことから、今回の実地盤実験の地盤条件では、目標飽和度を 90%とすると注入範囲は水平方向に 1.5m 程度で、1箇所あたり 3m³程度の注入で不飽和改良できると考えられる。

地盤飽和度の定期的計測の実施

地盤の飽和度は、マイクロバブル水に含まれる溶存空気が析出することにより、注入後 2 週間程度まで低下することが観測された。

長期的な持続性に関しては、ある程度の不飽和度を確保すれば、注入停止直後に数パーセント低下するものの、その後はほぼ横ばいとなる傾向が観測された。

今回の実験サイトが河川敷であり、地下水(伏流水)が想定されることや大雨により 2 度の冠水があったことなど、不飽和状態の耐久性には厳しい条件であったが、150 日程度まで不飽和化状態がほぼ維持されたことが確かめられた。

以下に結果をまとめる。

- 1.N 値 10 程度の想定宅地地盤に、二重管注入法およびミニラム注入法によりマイクロバブル水を注入出来ることが確かめられた。
- 2.注入範囲は、目標飽和度を 90%とすると注入量 3m³で水平方向には 1.5m 程度となった。
- 3.残留空気の耐久性については、注入から 150 日までの期間においては不飽和状態が維持されることが確かめられた。

今後の課題としては、工法の実用化に向けて、より低コストの注入方法や、マイクロバブル水注入量と飽和度低下の関係を定量的に評価する方法、不飽和度を管理する方法を検討する必要がある。