

Air-des 工法による残存空気の確認調査事例（その2）

大日本ダイヤコンサルタント株式会社 ○三石 隼也, 森島 直樹, 山田 直之
 株式会社不動テトラ 高田 英典
 東亜建設工業株式会社 三枝 弘幸
 オリエンタル白石株式会社 藤井 直

1. はじめに

空気注入不飽和化工法（Air-des 工法）は、地盤に空気を注入することで地盤を不飽和化させ、液状化強度を増加させる地盤改良工法である。

本稿では、比抵抗測定による空気注入のモニタリング結果と、P 波検層による不飽和状態の持続の確認結果、および気液二層流解析によるシミュレーションとの比較から再現性の検証を行った結果を報告する。

2. 調査配置

本調査は茨城県土浦市の自然堆積地盤で行った。本調査での調査孔の配置断面図を図-1 に示す。空気注入孔はφ133mmで削孔し、空気注入深度はGL-10.5mとした。比抵抗電極孔は空気注入孔から離隔距離 2.5m、5.0m、9.7m の位置に設置し、GL-2.5m～10.0m まで 0.5m 間隔で電極を設置した。P 波検層孔は離隔距離 2.0m、3.75m の位置に設置した。地下水位はGL-4.6m であった。

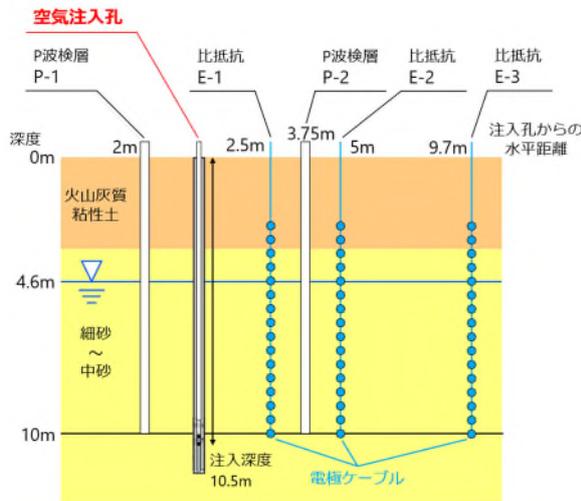


図-1 測定孔配置断面図

3. 注入諸元

注入圧力は注入深度での有効上載圧の 1/2 と静水圧の和から約 122kPa とした。有効領域（不飽和化領域の内、設計上考慮する領域。ここでは直径 5m、高さ 5m の円柱状。）の間隙率を $n=0.5$ とすると、目標飽和度 $S_r=90\%$ での必要最小空気量は約 5m^3 である。注入した空気の有効領域外の地盤への侵入や、地下水面から地表への漏出を考慮するため、積算の空気注入量は必要最小空気量の 3 倍の約 15m^3 とした。目標の積算注入量を満足する実注入時間は約 12 時間となった。

4. 比抵抗変化率による空気注入のモニタリング

地盤の比抵抗は間隙率や飽和度、粘土鉱物含有量、地下水の比抵抗、地温などの要因で変化する。土粒子の骨格構造を乱さず、短期間で空気注入を行うことで、これらの要因の内飽和度変化が比抵抗変化の支配要因になると考えられる。そこで本調査では、空気注入中の飽和度変化を式-1 に示す比抵抗変化率でモニタリングした。

$$\Delta\rho_t = \{(\rho_t - \rho_{t0})/\rho_{t0}\} \times 100 \quad \dots \text{式-1}$$

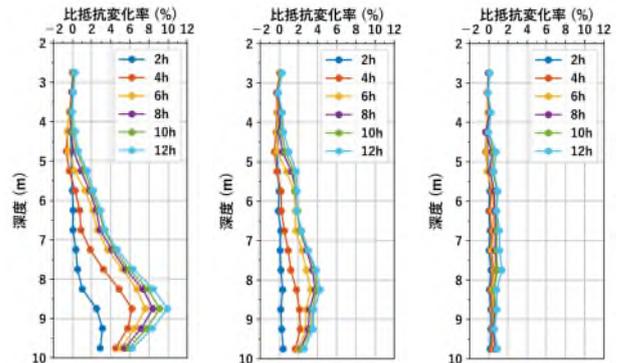
ここで、 $\Delta\rho_t$: 比抵抗変化率 (%)

ρ_t : 空気注入中の比抵抗 (Ωm)

ρ_{t0} : 空気注入前の比抵抗 (Ωm)

空気注入中の比抵抗変化率を図-2 に示す。GL-8.0m～9.0m 付近の変化率が最も大きく、最大で 10% 程度の変化率であった。注入開始から 2～4 時間での比抵抗変化率の変化が大きく、それ以降の変化は小さくなっている。E-2 孔（離隔距離 5.0m）でも空気注入時間に応じた比抵抗変化が見られたため、ここまで空気が到達していたと考えられる。

深度が浅くなるほど比抵抗変化率が小さくなっている。調査を行った地盤は深度が浅いほど細粒分含有率が高くなっており、細粒分により空気の侵入が鈍化したためと考えられる。



a) E-1 孔 離隔距離 2.5m b) E-2 孔 離隔距離 5.0m c) E-3 孔 離隔距離 9.7m

図-2 比抵抗変化率測定結果

5. P 波検層による不飽和化の持続の確認

飽和状態の地盤の P 波速度は水中の伝搬速度である 1,500m/s 程度、もしくはそれ以上となる。しかし、飽和度が 98% 程度以下になると P 波速度が急激に低下するという傾向がある¹⁾。そこで本調査では空気注入から半年後、1 年後、1.5 年後に P 波検層（ダウンホール方式）を

実施し、不飽和化の持続について確認を行った。

P 波検層の結果を図-3 に示す。空気注入前は GL-5.5m ~10m の区間で P 波速度が 1,500m/s 程度であり、飽和状態だったと考えられる。空気注入後は地下水水面下も 400m/s 程度まで P 波速度が低下した。空気注入後 1.5 年後も P 波速度は低下したままであり、地盤の不飽和化が持続していることが確認できた。

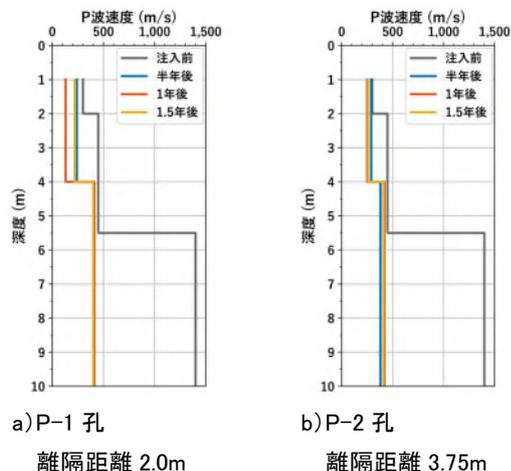


図-3 P 波検層結果

6. 気液二層流解析によるシミュレーション

積分型有限差分法による解析コード TOUGH3 を用いた気液二層流解析を行った。解析に使用する透水係数はサンプリング試料の GL-8.15m の部分で実施した室内透水試験の結果 (2.05×10^{-5} m/s) を用いた。

注入試験と同様な空気注入をしたときの飽和度変化をシミュレートした結果を図-4 及び図-5 に示す。注入孔から離隔距離 5m 程度まで不飽和領域が広がっていることがわかる。GL-9.0m 付近で最も飽和度が減少した。注入開始から 2~4 時間での飽和度の変化が大きく、それ以降の変化は小さくなっている。E-2 孔では飽和度の減少が見られた深度は GL-9.0m 付近のみであった。概ね図-2 に示した比抵抗変化率の結果と整合的な結果が得られた。

空気注入から 1 年後の飽和度分布図を図-6 に示す。1 年後も離隔距離 6m 程度、およそ GL-10m 以浅の範囲に不飽和領域が広がっており、図-3 に示した P 波検層結果と整合的な結果が得られた。

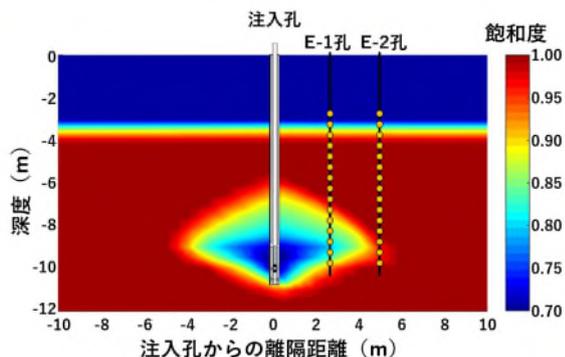


図-4 注入開始 12 時間後の飽和度分布

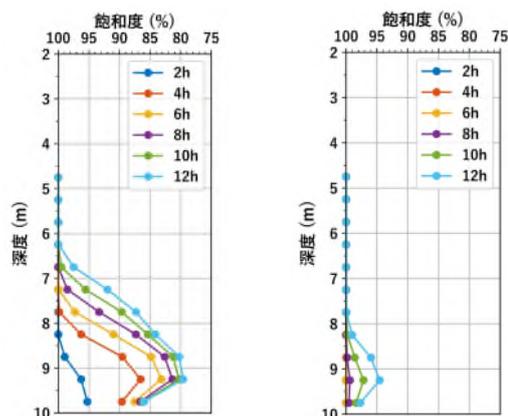


図-5 シミュレーションによる空気注入中の飽和度変化

図-5 シミュレーションによる空気注入中の飽和度変化

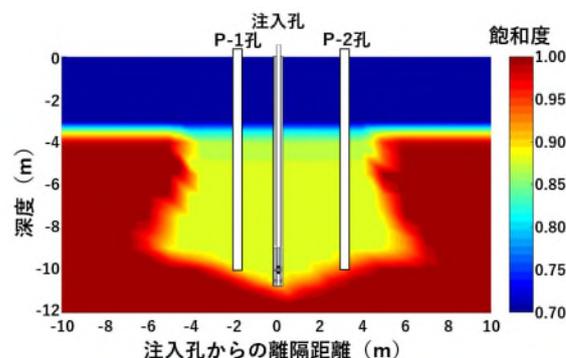


図-6 空気注入 1 年後の飽和度分布

7. まとめ

空気注入中のモニタリングとして比抵抗測定を、空気注入後の不飽和化の持続の確認として P 波検層を実施した。その結果、空気注入による空気侵入範囲の経時変化を捉えることができた。また、Air-des 工法による不飽和化の持続を確認できた。

また、気液二層流解析により、Air-des 工法による飽和度変化をシミュレートすることができ、比抵抗測定、P 波検層結果と整合的な結果が得られた。

《引用・参考文献》

- 1) 空気注入不飽和化工法 (Air-des 工法) 技術マニュアル参考資料 (改訂版) (2019) : Air-des 工法研究会, pp. 96.