

# 空気注入不飽和化工法 (Air-des 工法) の開発

Development of Liquefaction Countermeasure Technique —Desaturating Soil by Air Injection—

山根 信幸 (やまね のぶゆき)

東亜建設工業㈱技術研究開発センター 主席研究員

藤井 直 (ふじい なお)

オリエンタル白石㈱ 施工・技術本部 課長

岡田 克寛 (おかだ かつひろ)

四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 建設管理官

磯谷 修二 (いそや しゅうじ)

㈱不動テトラ 地盤事業本部 部長

山浦 昌之 (やまうら まさゆき)

㈱ダイヤコンサルタント 地圏環境事業部 次長

岡村 未対 (おかむら みつ)

愛媛大学 教授 大学院理工学研究科

## 1. はじめに

空気注入不飽和化工法 (Air-des 工法) は、液状化が発生する可能性がある飽和した砂質土盤に対して、空気を直接注入することにより地盤を不飽和化させ、その残留空気により地盤の液状化強度を増加させる液状化対策工法である。当技術は、使用材料が空気であるため経済面や環境面で非常に優れており、我が国の人口と資産のほとんどが集中する低平地の広範な領域において効率的かつ安価に液状化対策できるものとして期待されている。

本報告は、空気注入による不飽和化の効果を概説し、本工法の特長をまとめたものである。

## 2. Air-des 工法の原理

空気注入のイメージを口絵写真—18に示す。本工法は、地盤中に設けた注入口から空気を注入することで地盤を不飽和化させるものである。空気の侵入範囲は、飽和透水係数や注入時間により、球状や下に凸の半楕円状となる。空気注入停止後、余剰空気は地盤上部から自然に排出されるがある程度の空気が地盤中にトラップされておおむね85~95%程度の飽和度となる<sup>1)</sup>。

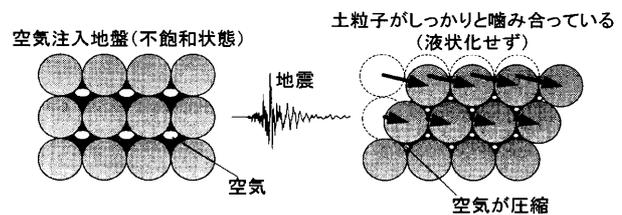
図—1に空気注入を行った地盤の液状化強度増加イメージを示す。注入により空気が間隙にトラップされた砂質地盤に、地震による荷重が作用した際、間隙空気の体積が圧縮することで過剰間隙水圧の上昇が抑制され、液状化に対する抵抗力が増加する。岡村ら<sup>2)</sup>は過剰間隙水圧が有効上載圧力と同値になるときの体積ひずみを体積ひずみポテンシャル  $\varepsilon_v^*$  (式(1)) と定義し、 $\varepsilon_v^*$  は液状化強度倍率 IR (不飽和状態での液状化強度比/飽和状態での液状化強度比) とユニークな関係 (図—2) にあることを示している。

$$\varepsilon_v^* = \frac{\sigma'_v}{p_0 + \sigma'_v} \left( 1 - \frac{S_r}{100} \right) \frac{e}{(1+e)} \dots\dots\dots (1)$$

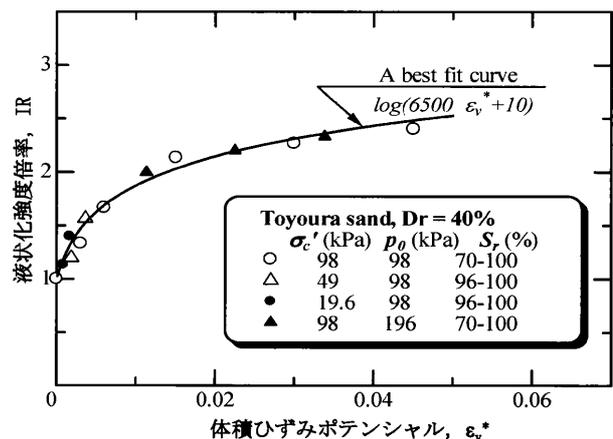
ここに、 $p_0$ : 静水圧 (絶対圧),  $\sigma'_v$ : 有効上載圧力,

$S_r$ : 飽和度 (%),  $e$ : 土の間隙比

この関係を用いれば、空気注入によって低下した飽和



図—1 液状化強度増加のイメージ



図—2 体積ひずみポテンシャルと液状化強度倍率の関係

度  $S_r$  から液状化強度を一義的に推測することが可能である。そのため、ある地盤における液状化対策を検討する際、必要となる液状化強度の値から  $S_r$  を算定し、その  $S_r$  が空気注入によって実現可能である場合、当工法が適用できると判断される。また、この関係は、有効土被り圧  $\sigma'_v$  が大きいほど IR が大きくなることを示し、ある程度の  $\sigma'_v$  が期待できる地盤深部や盛土直下地盤などではその改良効果は大きい。盛土直下に本工法を適用した遠心模型実験では、無対策と比較して盛土天端沈下量を 1/10 以下に低減できるなど顕著な効果が確認されている<sup>3)</sup>。

## 3. Air-des 工法の特長

開発した Air-des 工法の設備及び施工状況を口絵写真—19~22に示す。また、本工法の特長を下記に示す。

(1) 他の液状化対策工法に比べて安価

本工法の使用材料は大気中の空気であること、また、施工機械は、注入管設置のための削孔機、注入に必要なコンプレッサー程度である。このため小規模な設備で施工が行え、低コスト化が実現できる。

(2) 施設を供用中のまま施工可能

土粒子の骨格構造を変化させずに空気を間隙水と置き換える工法であるため、施工中に地盤の変形が生じない。そのため、施設を供用したままの施工が可能となる。

(3) 施工に伴う環境負荷を軽減

使用材料が空気であることから材料に起因した環境負荷は極めて少ない。また、施工に大型機械を必要としないため、騒音・振動の影響も考慮する必要がない。

(4) 狭隘なスペースでも施工可能

削孔機が設置できる程度の作業範囲が確保できれば施工が可能のため、狭隘な場所でも施工が可能である。

4. 不飽和地盤の評価

本工法の施工は、1)空気注入管設置のための削孔、2)注入管の設置・埋戻し、3)空気注入、4)不飽和領域のモニタリング、5)改良地盤の評価の手順で行われる。なお、本工法の設計に関しては、文献4)を参照されたい。

本工法の施工において最も重要な管理項目は、現場における不飽和領域の拡大状況のモニタリングと改良地盤の品質評価である。施工中の不飽和領域の拡大状況のモニタリングとしては、空気注入による地盤の比抵抗値の変化に着目し、式(2)によって評価することとした。

$$\text{比抵抗変化率}(\%) = ((\rho_2 - \rho_1) / \rho_1) \times 100 \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 $\rho_1$  : 空気注入前の比抵抗 (初期値)

$\rho_2$  : 空気注入中の比抵抗

図-3に実規模空気注入実験での比抵抗計測結果を示す。また、同図には対象地盤の概略の土層構成と後述する空気注入後に実施した凍結サンプリングによる  $S_r$  の測定結果も併せて示してある。空気注入による改良対象範囲は、地下水位 (G.L. -3.3 m) から空気注入深度 (G.L. -6.5 m) までである。この改良範囲内にて施工中に計測された比抵抗変化率は経時的に増加する傾向を示し、比抵抗変化率により空気注入による地盤の不飽和化の進行状況をモニタリングできることが認められた。

空気注入後の飽和度の定量評価は、サンプリング等により実施する。図-3の凍結サンプリングによる  $S_r$  測定結果では、G.L. -5.0 m 以浅の一部で  $S_r$  の低下が小さい部分が認められるが、それ以外ではおおむね95%以下を示しており、改良対象外の  $S_r$  と明瞭に異なり、空気注入により地盤が確実に不飽和化されていることが確認された。

また、不飽和地盤のP波速度  $v_p$  は飽和地盤と比較して著しく低下する傾向にある。今回実施したP波検層の結果を図-4 (図-3と同一のサイト) に示す。今回の  $v_p$  は200~500 m/s に分布し、空気注入により地盤が不飽和状態にあることが確認できる。これにより空気注

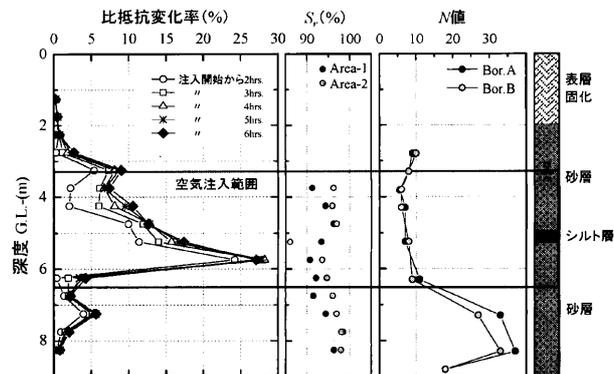


図-3 現地土層構成及び比抵抗・飽和度計測結果

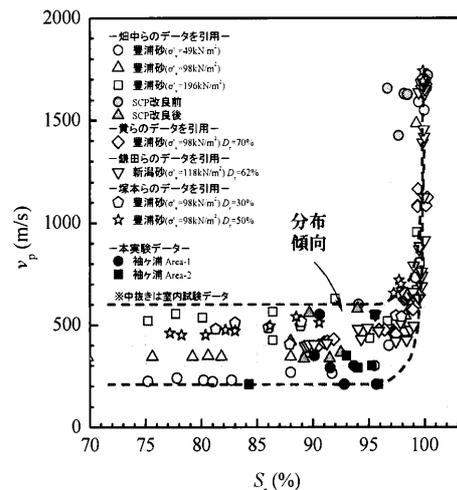


図-4 P波速度検層結果

入後の地盤の  $v_p$  を計測することにより、地盤の不飽和状態を定性的に評価することが可能であることが分かる。

5. おわりに

地盤に空気を注入するという極めて簡易な作業によって液状化対策を行う空気注入不飽和化工法 (Air-des 工法) の開発を行った。現段階でいくつかの技術的課題もあるが、「空気注入不飽和化工法 (Air-des 工法) 設計施工マニュアル」を出版することができた。今後の研究や技術の進展によって、更なる適用範囲の拡大やコストダウンを図る所存である。

参考文献

- 1) 田村直登ほか：保水性試験の吸水過程における吸水速度が残留飽和度に及ぼす影響, 第17回土木学会四国支部技術研究発表会, 2011.
- 2) Mitsu Okamura et al.: Effects of pore fluid compressibility on Liquefaction resistance of partially saturated sand, *Soils and Foundations*, Vol. 46, No. 5, pp. 695~700, 2006.
- 3) 富田雄一ほか：道路盛土直下への空気注入による液状化対策効果の実験的検討：第47回地盤工学研究発表会, pp. 971~972, 2012.
- 4) 小泉勝彦ほか：空気注入不飽和化工法の開発 その8：設計法の概要, 第67回土木学会年次学術講演会, pp. 505~506, 2012.

(原稿受理 2012.10.10)