

## 地盤不飽和化による液状化対策工法 (Air-des 工法) について

関谷千尋\*・福間 正\*\*・小泉勝彦\*\*\*・岡田克寛\*\*\*\*

\* 前 (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

\*\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

\*\*\* 国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 調査課 課長

\*\*\*\* 国土交通省 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

四国沿岸域は、切迫する東南海・南海地震による危険に晒されていることから、港湾施設等の耐震化が課題となっている。なかでも重要なのが液状化被害の防止であるが、従来工法は一般的に工費が高く、既存構造物直下への対策工法は限られていることから、安価で既存構造物への適用性の高い工法が求められている。本検討は、液状化対策のコストダウンが期待できる地盤不飽和化による液状化対策工法の普及を図るため、技術マニュアルの検討を行ったものである。

キーワード：不飽和，地盤改良，液状化対策

### 1. はじめに

液状化対策工法については、液状化のメカニズムに対応した様々な原理の工法が開発され、実際に使用されている。

これらの工法にはそれぞれ特徴があり、特徴に応じて使い分けられている。たとえば、締固め工法は改良時に地盤の密度を増加させるため、地盤の沈下や盛り上がりが生じる。このため、構造物から離れた場所で使用される。また、固結工法には、地盤の変形等は少ないものが存在する一方、概して高価である。

これらの既存の工法を概観してみると、地盤の変形量が少なく、既設構造物の直下あるいは直近で使用可能であって、かつ、安価な工法がほとんど無いことがわかる。

このような背景のもと、以前より知られていた土の飽和度が低下すると液状化強度が増加することに着目し、既設構造物の直近で使用可能であって、より安価な液状化対策工法の開発を目指して、本工法の開発は開始された。本工法の本質は、空気を注入し地盤を不飽和化するものであり、その本質を表現するために工法名を「空気注入不飽和化工法」(略称：Air-des 工法)とした。略称の Air-des は Air-desaturation を略したものである。

本工法は、材料に空気を用いる工法であるため、工費が非常に安価になり得る。また、施工条件の制限や環境への影響から、他工法では施工できない対策箇所への適用が可能となる。

ただし、本工法は、既存の締固め工法や固結工法と異なり、地盤材料の強度特性を改善することはできない。このため、液状化強度が極端に小さな地盤においては、十分安全なレベルまで対策することは難しい。

しかしながら、液状化対策が必要な地盤では、液状化強度をある程度増加させれば十分有効な対策となることも多い。このような地盤では、本工法はその欠点を補って余りある長所を備えた工法であり、適切に使用することによって、今まで様々な理由で液状化対策がなされていなかった箇所においても液状化対策が実現し、来るべき大規模災害に向けた備えの一助となる。

本稿では、本工法の基本原理や設計の考え方を紹介し、技術マニュアルの作成に当たって検討された技術的課題と可能性について述べる。

### 2. 地盤不飽和化による液状化対策工法の

#### 概要と特徴

#### 2.1 概要

本工法は、液状化が発生する可能性がある飽和した砂質地盤に対して、空気を直接注入することにより地盤を不飽和化させ、注入終了後の残留空気により地盤の液状化強度を増加させ、液状化を抑制する地盤改良工法である。工法原理のイメージを図-1に示す。

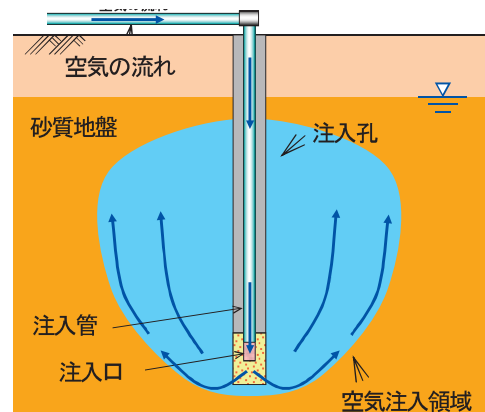


図-1 空気注入不飽和化工法のイメージ

本工法は、図-1 に示すように、地盤中に設けた空気注入口から地盤中に空気を注入することで地盤を不飽和化させる。空気が侵入する範囲は、上下に長い回転楕円体の下半分のような形状となる。空気注入停止後、地下水の復水に伴って、余剰な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90～95%程度の飽和度となる。この状態が砂質地盤中における注入空気の残留状態である。

不飽和化された砂質地盤の液状化強度増加メカニズムを図-2 に示す。間隙に空気がトラップされた砂質地盤は、地震による荷重が作用した場合、間隙の体積が圧縮減少することで、過剰間隙水圧の上昇を抑制するため液状化に対する抵抗が増す。これにより、ある程度大きな地震力までは土粒子がお互いに接触を保ちながら噛み合った状態が保持されるため、土の強度・剛性が失われることはない。

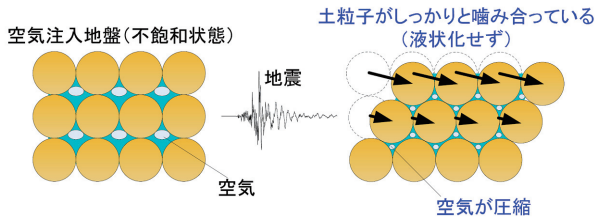


図-2 不飽和砂の液状化強度増加メカニズム

## 2.2 特徴

環境や施工条件といった観点から、本工法の優れた点を以下に示す。

- ①地盤の土粒子の骨格構造に影響を与えることなく間隙水の一部を空気に置き換えるため、地盤の変形等がほとんどない。
- ②ボーリングマシンが設置できる程度の作業スペースが確保できれば施工が可能のため、狭隘な箇所でも適用可能である。
- ③注入する材料が自然界に存在する通常空気のみであるため、環境への負荷が少ない。
- ④薬液と比較して粘性が低いことから、比較的短時間で広範囲の対策を行うことができる。
- ⑤騒音・振動等が少ないため、市街地での施工が可能である。
- ⑥斜めに空気注入することが可能であるため、既設構造物直下への対策を行うことができる。

## 3. 設計の基本的な考え方

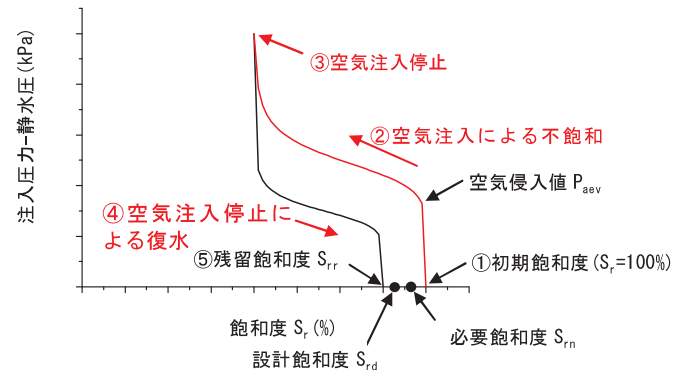
### 3.1 設計の基本的な考え方

#### (1) 不飽和化のメカニズム

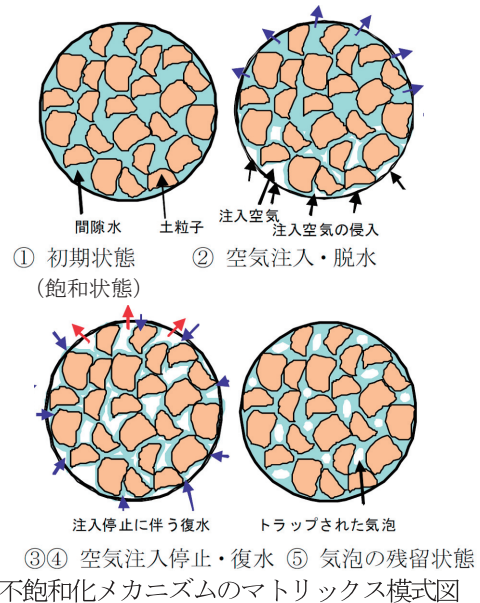
土の液状化強度は、飽和度の低下と共に増加することが知られている。土の骨格構造を変えずに地盤の飽和度を低下すれば、不飽和化前に比べて液状化強度が増加し、また既存構造物周辺や直下へ適用しても既存構造物へ

の影響が生じない。

空気注入による不飽和化のメカニズムを図-3 に示す。通常、自然地盤における地下水位以下の土は完全に水で飽和している(図中の状態①飽和度 100%)。このような地盤に空気を注入すると、間隙の水の一部が追い出されて空気で置換され、飽和度が低下する(図中の状態②)。この不飽和化された領域では、注入停止後には余剰な土中空気が地盤中から脱出し(図中の状態③④)、土の飽和度は残留飽和度まで上昇するが、残留飽和度は100%未満であり(図中の状態⑤)、不飽和状態となる。



(a) 水分特性曲線による不飽和化のメカニズム



(b) 不飽和化メカニズムのマトリックス模式図

図-3 空気注入による不飽和化のメカニズム

#### (2) 不飽和化された地盤の液状化強度の上昇

不飽和化された土は、土中の間隙に空気が存在することによって液状化強度が増加する。これは図-2 で説明したように、地震により間隙水圧が上昇すると間隙水中の気泡の体積が減少し、間隙水圧の上昇が抑制されるためである。この間隙水圧上昇の抑制効果は、間隙の圧縮性とその支配的な要因であり、式(2)で表される体積ひずみポテンシャル  $\varepsilon_v^*$  をパラメータとして、式(1)に示すように液状化強度の上昇として示されている<sup>1)</sup>。

$$IR = \frac{R'}{R} = \log(6500\varepsilon_v^* + 10) \quad (1)$$

$$\varepsilon_v^* = \frac{\sigma_c'}{p_0 + \sigma_c'} \left(1 - \frac{S_r}{100}\right) \frac{e}{(1+e)} \quad (2)$$

ここに、

- IR : 液状化強度倍率
- R' : 不飽和状態での液状化強度比
- R : 飽和状態での液状化強度比
- $\varepsilon_v^*$  : 体積ひずみポテンシャル
- $\sigma_c'$  : 有効上載圧力
- $p_0$  : 静水圧(絶対圧)
- $S_r$  : 飽和度(%)
- e : 土の間隙比

ここで、飽和地盤の液状化強度から本工法の施工によって残留した空気による残留飽和度を設定すれば、不飽和化後の液状化強度を求めることができる。

不飽和化の効果は、同じ残留飽和度であっても、有効上載圧力の小さな地表付近では小さく、有効上載圧力が大きな地盤深部では大きい。

なお、設計で用いる用語については、表-1 に示すとおり定義されている。

表-1 用語の定義

用語	概要
必要飽和度 $S_n$	レベル1地震動に対して液状化しないために必要な飽和度
設計飽和度 $S_{rd}$	設計に用いる飽和度で、残留飽和度から設定する
体積ひずみポテンシャル $\varepsilon_v^*$	地震時に地盤に発生する過剰間隙水圧が有効上載圧力と同値になったときの間隙空気の圧縮による地盤の体積ひずみ
液状化強度倍率 IR	不飽和地盤の液状化強度比を飽和地盤の液状化強度比で除したもの

(3) 工法の適用性および設計の考え方

式(1)、式(2)より算出した飽和度と液状化安全率の関係を図-4に示す。

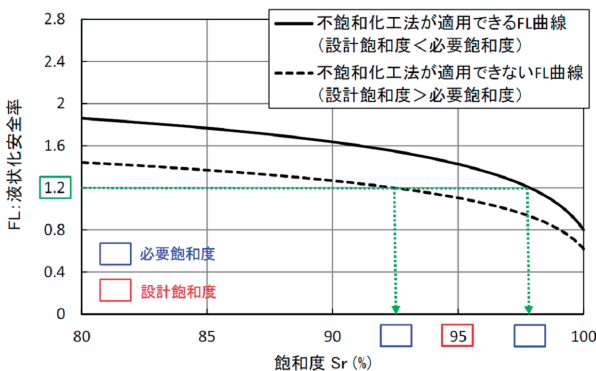


図-4 飽和度と液状化安全率の関係

図-4の実線は、不飽和化により液状化強度比が増加するため、空気注入前(飽和度100%)では液状化する(液状化安全率<1.0)が、不飽和化に伴う飽和度の低下により液状化しなくなるため、本工法が適用可能である

ことを示している。図-4の破線は、液状化しなくなる飽和度まで地盤の飽和度を下げることができないため、本工法が適用できない事例を示している。

図-4に示すように、本工法の適用性の検討は、必要飽和度が設計飽和度を上回るか否かで検討することとされている。設計飽和度は不飽和化する対象土の保水性試験結果から決定することとしている。ただし、保水性試験結果が無い場合は設計飽和度を95%とすることも可能とした。

本工法の設計の考え方は、①(レベル1地震動による)液状化に対して、②対象とする地盤を不飽和化することによって、③液状化に対する所要の安全性を確保することである。

3.2 設計の流れ

このような考え方をを用い、本工法では土質調査結果を基に、液状化対策工法としての適用性を判定し、対策範囲や空気注入諸元を決定する。その流れは、図-5に示すとおりである。ここでは、設計の流れについて簡単に説明する。

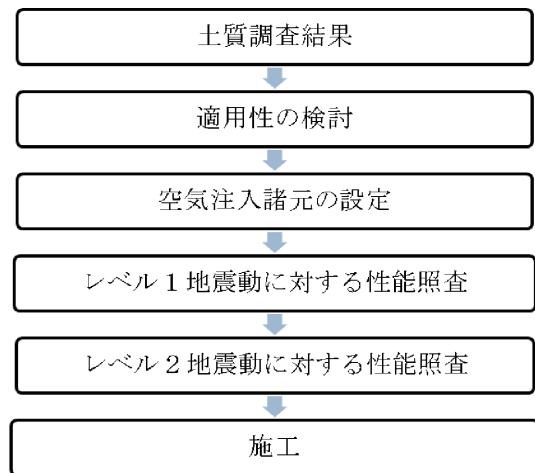


図-5 調査～施工までの流れ

(1) 適用性の検討

本工法の設計においては、最初に土質調査等の結果をもとに、本工法の適用を検討する。検討項目としては、①地盤を乱さずに空気を注入し、地盤の不飽和化ができる地盤であること、②不飽和化した地盤の設計飽和度が必要飽和度以下であること、の2点である。また、この2点の他に注入作業時間の制限や空気を通しにくい土層(難透気層)の存在なども確認しておく必要がある。

(2) 空気注入諸元の検討

適用性が確認された後、空気注入諸元の設定を行なう。まず、有効上載圧力と静水圧を考慮して注入圧力を設定する。次に、地盤の透水係数と必要とされる改良径から、空気の注入時間を求める。注入時間が現場条件から決定される作業時間より長い場合は、改良径を見直す必要がある。

(3) レベル1地震動に対する性能照査



レベル1地震動に対して、改良した地盤が液状化に対して所定の安全性を確保していることを照査する。

(4) レベル2地震動に対する性能照査

レベル2地震動に対して要求性能を規定している施設に該当する場合は、有効応力応答解析や模型実験により、レベル2地震動に対する照査を行なう。

(3), (4) の性能を満足していれば、設計完了・施工との流れとなる。

#### 4. 現時点での課題と可能性

本工法は、今後適用が期待される新しい工法であり、「Air-des 工法研究会：空気注入不飽和化工法（Air-des 工法）技術マニュアル、平成24年7月」においては、現時点における課題と今後の可能性について、その改良の方向性を示すことで、適用性の改善・拡張を図っている。以下にその概要を示す。

##### 4.1 現時点での課題

本工法においては、これまでの検討において地盤に空気を注入し、不飽和化できることを確認したが、次の2つの課題を残している。

(1) 改良効果の長期持続性

改良効果の長期持続性を確認することは、地盤中にどれくらいの期間、空気が残留するかを確認することと同義である。地盤中の空気の残留については、26年前にサンドコンパクションを施工した箇所において空気が残留していることが確認されている。また、本工法により不飽和化した地盤では、5年間の空気の残留を確認している。しかしながら、長期間における地盤中の空気の減少のメカニズムについては現状では解明されていないため、今後の検討が必要な課題である。

(2) 地盤の飽和度の測定

本工法では、空気注入中の空気の広がりや比抵抗変化率を測定することにより確認している。また、空気注入後の品質確認としては直接サンプリングを実施し、飽和度を測定することとしている。しかしながら、サンプリングでは応力解放や間隙水の流出等により1%の精度での確認が難しい。維持管理においてはPS検層による確認としているが、こちらは不飽和状態の確認はできるものの、定量評価は難しい状況であり、今後簡便で精度の高い飽和度確認手法の確立が必要である。

##### 4.2 今後の可能性

本工法の技術マニュアルの中から、今後の改善による本工法の適用性拡大の可能性のある項目について以下に示す。

(1) 適用できる土質の拡張

本マニュアルにおいては、本工法を砂質土に対して適用することを基本に検討を進めてきた。その過程の中で塑性を示す材料が含まれる場合は、式(2)に示している液状化強度増加率が得られないことが分かっている。このため、本工法の適用土質は塑性を示す材料が入らない砂質地盤に限定している。しかしながら、こ

のような地盤でも液状化強度が増加することはわかっており、今後、適用できる範囲を拡張できることが考えられる。

(2) 効率的な注入圧力の管理

注入圧力の制御について、本マニュアルでは地盤の割裂を発生させない圧力を最初に設定し、その圧力以下で注入することとしている。しかしながら、地盤の不飽和化が進むにつれて透気係数が大きくなり、空気が侵入しやすい状況となることが考えられる。このことから、場合によっては最初に設定した圧力以上の圧力で注入した場合においても地盤の割裂等が発生しない可能性がある。このことから、今後の検討により効率的な圧力管理手法を提案することによって施工時間の短縮が図られ、コスト削減につながるものと考えられる。

(3) 未改良域を考慮した設計

本工法は、間隙内の空気の影響により過剰間隙水圧の上昇を抑制し液状化を防ぐ工法である。改良域と未改良域が隣接した場合、未改良域の間隙水圧の上昇により、改良域への浸透流が発生し、結果として未改良域の間隙水圧が減少するドレーンのような効果が発生することが分かっている。これにより、改良域の間隙水圧は上昇するが、この効果を適切に評価することができれば、(現在は許していない) 少しの未改良域の発生を許容できることから、注入孔間隔を広げることができるようになる。この点でも、大幅なコスト削減の可能性を秘めている。

#### 5. おわりに

今回の検討においては産官学による共同開発の集大成として、有識者による委員会を開催し、そこでの意見を踏まえながら技術マニュアルを作成した。

本工法はどんな地盤にも適用できる万能な工法ではないが、その欠点を補って余りある利点を有する。本工法の特徴が十分に理解され、適切に適用され、我が国の液状化災害の低減の一助になることを切に願う。

#### 謝辞

本稿は、国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所発注の撫養海岸液状化対策工法検討業務の成果の一部をまとめたものである。

調査にあたっては、地盤不飽和化工法技術検討委員会(委員長：(独) 港湾空港技術研究所 菅野特別研究官)の各委員、四国地方整備局 港湾空港部の関係者から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

1) Mitsu Okamura, Yasumasa Soga, :Effects of pore fluid compressibility on Liquefaction resistance of partially saturated sand, Soils and Foundations Vol. 46, No. 5, pp. 695-700, 2006.