

空気注入不飽和化工法の開発

岡田 克寛

四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 調査課 (〒760-0017 香川県高松市番町1-6-1)

液状化抵抗を容易に増加させることができる方法として、地盤内に空気を注入して不飽和化させる空気注入不飽和化工法がある。この工法の実用化に向けて、産官学で共同研究をこれまで実施してきた。本稿では工法の概要と検討過程において実施した現地実験について報告する。

キーワード 空気注入不飽和化工法、液状化対策

1. はじめに

我が国の人口と資産のほとんどは、ひとたび地震が発生すれば液状化する可能性の高い低平地に集中している。地盤の液状化は、直接人命に影響することは少ないが、構造物や社会的インフラに致命的な被害を及ぼす。道路、河川、港湾、空港などが地震時の液状化により被災すると、被災地の救援・復興が遅れる等、多大な影響を及ぼす。したがって、液状化による被災リスクを低減することは、安全安心な社会を構築するために極めて重要である。しかしながら、液状化リスクの高い地域の面積は広大で、そこには膨大な施設が存在する。現在も対策が進められているが、コスト面の問題等もあって対策が追いついていないのが現状である。

地盤の液状化対策として、これまでも様々な工法が開発されている。大規模に施工できる工法は、コストは安価ではあるが、地盤の変形等があり、既に構造物が存在するか所等の施工には適していない。対して、構造物の直下や狭隘な個所が施工できる工法は、地盤の変形等は少ないものの、概して高価である。



図-1 空気注入不飽和化工法施工写真

このような背景のもと、空気注入不飽和化工法は、安価に液状化対策ができる工法として、開発に着手したものである。以前より分かっていた「地盤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、平成20年度より産官学の共同開発を行い、結果をとりまとめた。

本稿は、空気注入不飽和化工法の概要と、これまで共同開発で実施してきた検討について報告するものである。

2. 空気注入不飽和化工法の概要

(1) 工法の定義

空気注入不飽和化工法は、①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、②図-1及び図-2に示すように空気を直接注入することによって③地盤を不飽和化させ、④注入終了後に残留する空気により地盤の液状化強度を増加させる事で液状化を抑制する地盤改良工法である。

(2) 工法の原理

具体的な工法原理を説明する。図-2に示すように空気注入不飽和化工法では、地盤中に設けた空気注入孔から空気を注入することで地盤を不飽和化させる。空気が侵

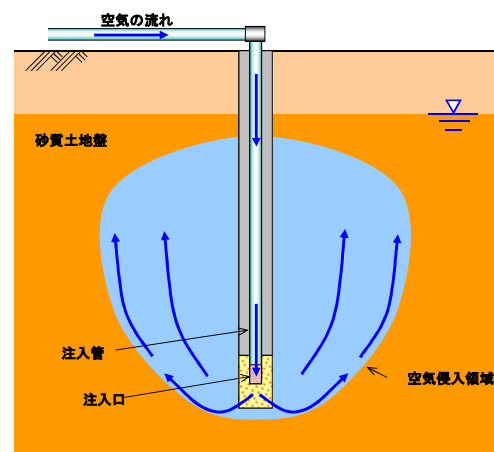


図-2 空気注入施工イメージ

入する範囲は、飽和透水係数や空気注入時間によって異なるが、概ね球状や下に凸の半楕円状となる。空気の注入を停止すると間隙水の影響で、余剰な空気は地盤上部から自然に排出される。しかしながらある程度の空気が地盤中にトラップされ、おおむね85～95%程度の飽和度となって安定する。この状態が砂質土地盤中の注入空気の残留状態である。

(3)液状化強度増加メカニズム

不飽和化された地盤の液状化強度増加メカニズムを図-3に示す。間隙に空気がトラップされた砂質土地盤では、地震によるせん断力が作用したとき、間隙の体積が圧縮減少することで、過剰間隙水圧の上昇が抑制される。これにより、ある程度の地震動までは土粒子がお互い接触を保ちながらかみ合った状態が保持されるため、土の強度・剛性が失われない。その結果として、液状化に対する抵抗が増すこととなる。

(4)工法の考え方

不飽和化された地盤の液状化強度増加は、トラップされた空気により、過剰間隙水圧の上昇が抑制されるためである。この過剰間隙水圧抑制効果は、間隙の圧縮性が支配的要因であり、体積ひずみポテンシャル ε_v^* を用いて表される。この体積ひずみポテンシャルは、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等しくなったときの空隙空気の圧縮による地盤の体積ひずみである。体積ひずみポテンシャルは飽和度と有効上載圧力と静水圧の関数であって、式1によって求めることができる。体積ひずみポテンシャルと液状化強度増加率の関係を図-4に示す。この関係は、岡村ら¹⁾によって式2のとおり提案されており、飽和度が低いほど、有効拘束圧が高いほど、また、初期間隙水圧が低いほど液状化強度は増加する。

(5)工法の適用

空気注入不飽和化工法を適用する際は、適用しようとする地盤を液状化させないために必要な液状化強度を求める。現状の液状化強度との比から、必要な液状化強度増加率を求める。必要な液状化強度増加率が分かれば、式2、式1を用いる事によって必要な飽和度を求めることができる。空気の注入条件と地盤での空気の残留状態を検討し、必要な飽和度まで飽和度の低下が可能かどうかを確認する。適用が可能と判断できれば、注入諸元を設定し、施工といった流れとなる。

(6)工法の特徴

空気注入不飽和化工法の特徴は以下のとおりである。
 ・空気注入不飽和化工法では、地盤の土粒子の骨格構造に影響を与えずに間隙水の一部を空気に置き換える。そのため、有効上載圧力の小さな地盤のごく表面を除き、

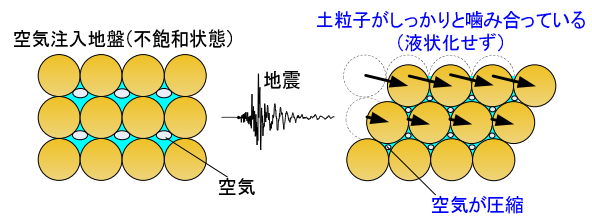


図-3 不飽和砂の液状化強度増加メカニズム

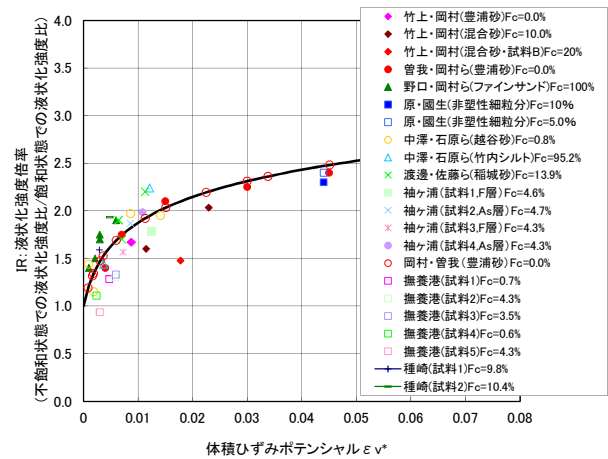


図-4 体積ひずみポテンシャルと液状化強度増加率の関係

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

$$IR = \frac{R'}{R} = \log(6500\varepsilon_v^* + 10) \quad (式2)$$

地盤の土粒子の骨格構造を変えることなく空気を注入することが可能である。このため、改良に伴う地盤の変形等がほとんどない。

- ・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、狭隘な個所でも適用可能である。
- ・注入する材料が自然界に存在する空気のみであるため、環境への負荷が少ない。
- ・騒音・振動等が少ないため、市街地での施工が可能である。
- ・注入管を斜めに設置して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. 現地実験

工法の適用性の検討手法についてまとめた段階で、検討手法の妥当性の確認をするために徳島県鳴門市において現地実験を行った。以下に現地実験の概要について示す。

(1) 実験目的

徳島県鳴門市での現地実験の目的を以下に示す。

- a) 複数同時による注入の施工方法とモニタリング方法の確認
- b) 斜め注入の施工方法の確認
- c) 不飽和状態の品質の確認

(2) 実験サイトの土質特性

実験サイトの土質特性について図-5に示す。実験サイトは、表層1.0m程度は玉石を含む埋土であるが、それ以降のG.L.-3.0m付近まではシルトが卓越した細砂及びシルト質粘土により構成され、さらにG.L.-9.0m付近まではシルトと細砂の互層となっている。G.L.-12.0m付近までは礫混じり砂層が存在しているが、それ以降は中位の砂層により構成されている。実験サイトについては、ところどころ粘性土を挟むものの、おおむね砂層であるため、空気注入不飽和化工法による改良が可能と判断し、実験を実施した。なお、改良対象層は、細粒分含有率を考慮し、G.L.-14.5m以浅について地盤の不飽和化を行った。

(3) 複数同時による注入の施工方法とモニタリング方法の確認

実験に先立ち、施工時間8時間での空気侵入領域を気液二相流解析と事前注入実験の結果をもとに空気注入孔の配置の設定を行った。空気注入孔の断面構成を図-6

に示す。事前検討の結果から空気侵入領域の直径がおおよそ5.0mと想定できたため、1深度あたり水平注入間隔を5.0mと設定した。また、鉛直注入間隔については、連続8時間注入時の空気侵入領域を気液二相流解析により求め、その結果に基づいてG.L.-8.5mとG.L.-14.5の2深度と設定した。実地盤での空気侵入領域の確認方法は、空気注入前と注入中の比抵抗の変化を確認することで行った。これは、飽和度が変われば地盤における比抵抗の値も変化するという特徴をいかしたものである。複数同時注入による比抵抗変化率を図-7に示す。G.L.-8.5mの空気注入孔においては、十分に比抵抗が変化しており、空気が侵入している状況を確認できる。対して、G.L.-14.5mの空気注入孔においては、設置している箇所の比抵抗の変化は確認できるものの、離れている地点（例えばB2-2やB2-4）における比抵抗の変化は小さくなっている。これは、注入圧力をG.L.-8.5m地点で設定し、一定の圧力で注入していたため、G.L.-14.5m地点においては圧力が若干不足しており、全体的な注入流量が不足し、十分に空気が広がりきらなかったためと考えられる。

(4) 斜め注入の施工方法の確認

構造物直下の施工の可否を確認するため、空気注入孔を斜め設置した場合の施工を実施した。実施方法は、空気注入孔を地表面より60°で設置し空気侵入領域を比抵抗の変化率により確認した。構造等は複数同時による注

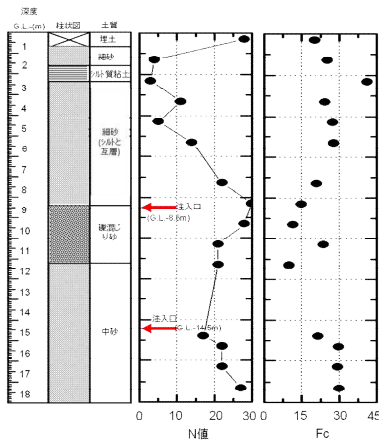


図-5 実験サイトの土質特性

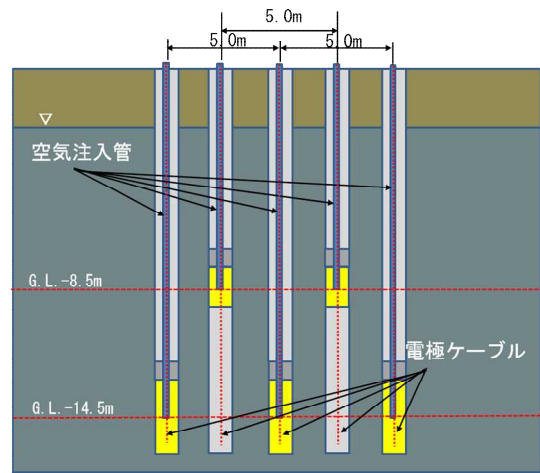


図-6 複数同時注入実験の断面構成

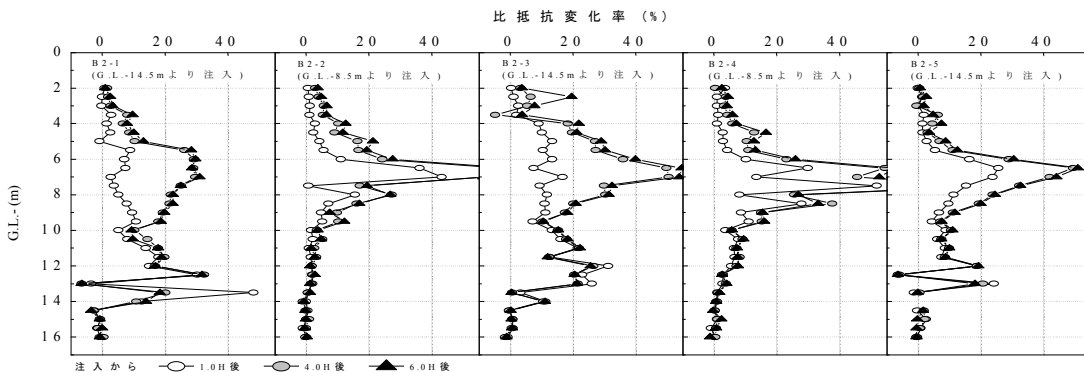


図-7 空気注入中の比抵抗変化率深度分布

入実験と同様な方法である。配置図を図-8に示す。斜め施工については、60° の場合においても空気注入孔を鉛直に設置した場合と同等の施工が実施できた。空気注入時の漏気等も確認されず、比抵抗変化率による空気侵入領域が確認できた。

(5) 不飽和状態の品質及び改良効果の確認

a)凍結サンプリングによる飽和度の確認

複数同時による注入実験後において、品質を確認する

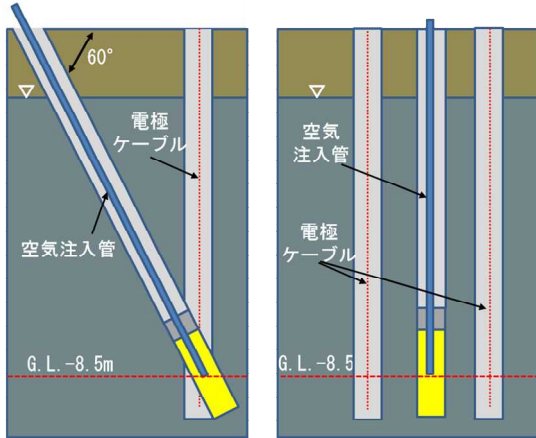


図-8 斜め注入の断面配置図

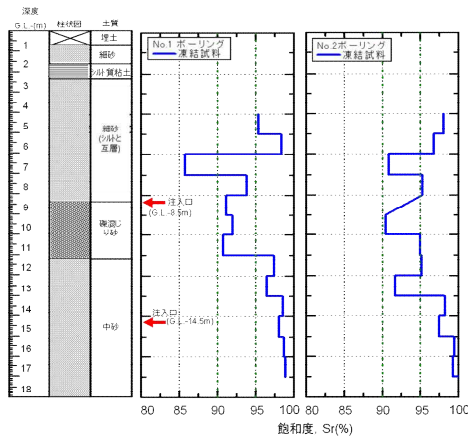


図-9 凍結サンプリング試料の飽和度分布

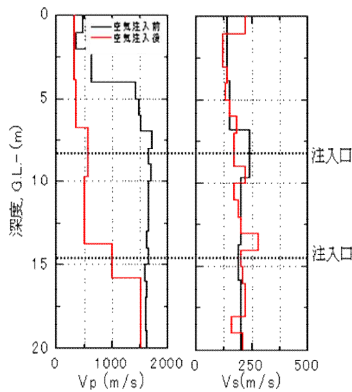


図-10 速度検層結果

ため凍結サンプリングを実施した。結果を図-9に示す。本工法の特徴として、土粒子の骨格構造を変えることなく空気を注入するため、残留飽和度は地盤のばらつきの影響を受ける。そのため、凍結サンプリングにおいて確認した飽和度については、ばらつきが見られるものの、空気侵入領域における飽和度低下が確認できた。

b)速度検層による飽和度の確認

既往の知見より、飽和度が低下することによりVp (地盤内を伝播するP波速度) が低下することが知られている。この知見をもとに、Vpによる地盤不飽和化の確認手法としての適用性について検討を実施した。結果を図-10に示す。空気注入前後のVpを比較すると、空気注入後に空気侵入領域においてはVpの低下が確認でき、Vpによる不飽和化領域の把握が可能であることがわかった。

4. おわりに

徳島県鳴門市での現地実験の結果、以下の知見を得た。

- 複数同時による注入により、広域的に地盤の不飽和化ができ、かつモニタリングが可能であることを確認した。
- 空気注入管を斜めに設置した場合でも、地盤の不飽和化が可能であることを確認した。
- 空気を注入した地盤が不飽和化されていることを確認した。

これらの結果より、空気注入不飽和化工法を用いて、実地盤での改良が可能であると考えられる。

空気注入不飽和化工法については、これまで大学や民間で個別に検討していたものを産官学の共同開発でとりまとめ、今回初版となる技術マニュアルを作成した。本工法には、実施工に向けたさらなるコスト縮減や適用範囲の拡大に向けた詳細な検討、不飽和地盤における長期持続性の検討といった課題が残されている。また、本工法は液状化強度を増加させる工法であるが、他の液状化対策工法とは異なり、地盤の強度自体を変えることはできない。しかしながら、その欠点を補って余りある利点を有するものであることは言うまでもない。本工法の特徴が十分理解され、適切に利用され、来るべき大規模地震時における液状化災害の低減の一助となることを願う。

謝辞: 本稿の作成にあたり、愛媛大学大学院岡村未対教授をはじめ、共に共同研究を実施してきた東亜建設工業(株)、不動テトラ(株)、オリエンタル白石(株)、(株)ダイヤモンドコンサルタントの皆様にご多大なご協力を賜り、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- MITSU OKAMURA AND YASUMASA SOGA : EFFECTS OF PORE FLUID COMPRESSIBILITY ON LIQUEFACTION RESISTANCE OF PARTIALLY SATURATED SAND ,Soils and Foundations Vol. 46, No. 5, pp. 695-700, Oct. 2006