

地盤の不飽和化による液状化対策技術

空気注入不飽和化工法（Air-des 工法）の開発

三 枝 弘 幸・三 好 朗 弘・藤 井 直・
山 田 直 之・岡 田 克 寛・岡 村 未 対

地盤の液状化強度を増加させる方法の一つに、地盤の飽和度を強制的に低下させる空気注入技術がある。当技術は、使用する材料が空気であるという点で経済面や環境面でも非常に優れており、広範囲な領域を、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。著者らは、沿岸域の複数地点にて現場実験を実施し、この空気注入を中心とした一連のシステムで液状化対策を行うことができる世界初の空気注入不飽和化工法（Air-des 工法—以下「本工法」という）を開発した。本報は、空気注入による不飽和化の効果を概説し、現場実験での品質確認結果を交えて工法の特長をまとめたものである。

キーワード：液状化，空気注入，飽和度，不飽和，凍結サンプリング

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。そのため、過去にも液状化によって電気や通信、上下水道などのライフライン、海岸や河川堤防などの防災施設、空港・港湾・道路を始めとする物流施設など、数多くの構造物がその被害を受けてきた。このような状況の中、1995年に発生した兵庫県南部地震以降、重要構造物に対する耐震対策および液状化対策が進められているが、今日に至るまでの対策進捗率は決して高いとはいえないのが現状である。これは、液状化対策を必要とする領域が広範囲に亘るのに対し、その対策コストが高価であるという点が理由の一つである。わずかな液状化強度の増加で十分な効果が得られる自然地盤が多く存在する中、安価で効果的に実施できる対策技術があれば、対策進捗率も大幅に向上する

ものと考えられる。

周知のとおり、地盤の液状化は緩く堆積した飽和砂地盤で生じ易く、締固めによる密実化や薬液、セメントによる固結などの原理に基づいた多くの対策工法が提案され、実用化されている（表—1）。しかしながら、前述のとおりこれらの多くは工費が高く、加えて既設構造物直下を改良できる工法はごく限られている。

一方、地盤の飽和度を低下させると液状化強度が増加することは室内試験を通じて古くから知られており¹⁾、その1つに空気注入技術がある。この極めて簡単な作業で地盤を確実に不飽和化できれば、経済面や環境面からだけでなく、既設構造物直下にも適用できる優れた液状化対策になり得ると考えられている²⁾。

このような背景の中、著者らは当技術を実用化させることを目的に、沿岸地域にて現場実験を継続的に実施してきた。その結果、空気注入のみで液状化対策を行う世界初の工法として、空気注入不飽和化工法を開

表—1 代表的な液状化対策工法の原理と概要

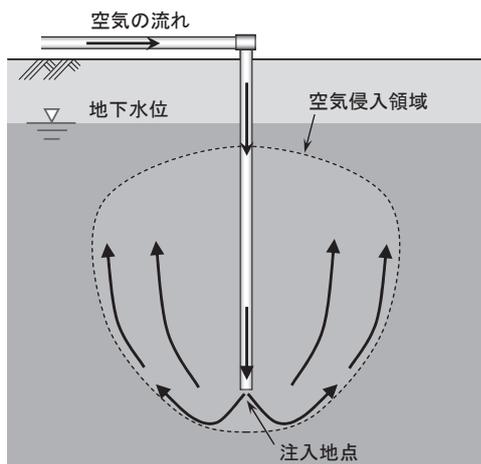
原 理	概 要	主 な 工 法
締固め (密度増大)	地盤を締固めて液状化強度を増加させる方法	サンドコンパクションパイル工法、バイプロフローテーション工法、重錘落下工法
水圧消散	透水性の良い材料を地盤内に設置し、水圧消散を図る方法	砕石ドレーン工法（グラベルドレーン工法）、サンドドレーン工法
固結 (拘束)	地盤を固結させて、液状化を防止する方法	深層混合処理工法（CDM, DJM）、薬液注入工法
拘束	拘束効果によって地盤のせん断変形を防ぎ、液状化を防止する方法	シートパイル
置換	液状化を起こさない材料で対象部を置き換える方法	掘削置換工法

発した。本報は、空気注入によって液状化強度が増加するメカニズムについて概説し、現場実験から得られた品質確認結果を交えて、工法の特長を報告するものである。

2. 空気注入による液状化抑制の効果

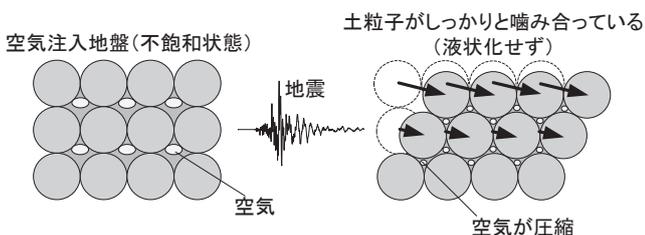
(1) 原理

空気注入のイメージを図一1に示す。土粒子の骨格構造に影響を与えないように、慎重に地盤内に空気を注入すると、間隙水の一部が空気と置換えられる。注入地点から空気が拡がる領域（以下、空気侵入領域）は、対象地盤の飽和透水係数や注入時間により異なる。注入停止後は一部の空気を除き、余剰な空気は地盤上部から自然に排出され、液状化対象となる砂地盤の飽和度 S_r は概ね 85 ~ 95% 程度に低下した安定状態となる³⁾。



図一1 空気注入のイメージ

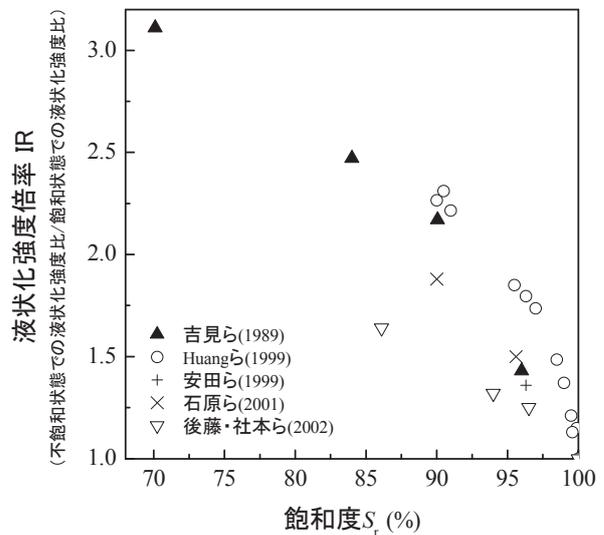
図一2に空気注入を行った地盤における液状化強度増加のイメージを示す。注入停止後に空気が間隙にトラップされた砂質地盤では、地震による荷重が作用した際、間隙の体積が圧縮することで過剰間隙水圧の上昇が抑制され、液状化に対する抵抗が増加する。これによって、ある程度大きな地震力までは土粒子が互いの接触を保持して噛み合った状態が維持され、土



図一2 液状化強度増加のイメージ

の強度・剛性の低下が抑制される。

この不飽和化による液状化強度の増加（液状化強度倍率 IR の増加）は、過去にも室内試験を通じて数多く確認されている¹⁾。既往の実験結果をまとめて図一3に示す。なお、液状化強度倍率とは、飽和状態で得られる液状化強度との比率を示しており、 $S_r = 100\%$ にて1.0となるものである。対象とした土質試料やその相対密度、試験方法といった条件により分布傾向は異なるが、飽和度 S_r が低下することで液状化強度が増加する傾向は全ての試料で一致しており、地盤が不飽和することで液状化に対する抵抗性が増加していることは明らかである。



図一3 飽和度と液状化抵抗増加率の関係

(2) 空気注入地盤の液状化強度の評価

前述のとおり、間隙に空気が存在することによる液状化強度増加のメカニズムは、発生する過剰間隙水圧が空気の圧縮により低減することにある。

この現象は土の三相構造（土粒子、水、空気）を用いれば、間隙圧の増加 Δp によって間隙中の空気が圧縮して発生する土の体積ひずみ ϵ_v として、ボイルの法則から式一1で表現することができる。なお、土粒子と水は非圧縮としている。

体積ひずみ ϵ_v は液状化に達した状態、すなわち過剰間隙水圧が完全に上昇した $\Delta p = \sigma'_c$ 条件の時に最大となり、体積ひずみポテンシャル ϵ_v^* にて式一2で表される⁴⁾。

$$\epsilon_v = \frac{\Delta p}{p_0 + \Delta p} \left(1 - \frac{S_r}{100}\right) \frac{e}{1+e} \tag{式一1}$$

$$\epsilon_v^* = \frac{\sigma'_c}{p_0 + \sigma'_c} \left(1 - \frac{S_r}{100}\right) \frac{e}{1+e} \tag{式一2}$$

ここで、 p_0 は初期間隙圧（絶対圧）、 Δp は間隙圧

の増加量, S_r は飽和度, e は間隙比, σ'_c は有効拘束圧をそれぞれ意味している。

図-4に液状化強度倍率 IR と体積ひずみポテンシャル ε_v^* の関係を示す。塑性を示す材料 ($I_p \neq N.P.$) で一部異なる傾向が確認されるが、それ以外の全ての材料で液状化強度倍率と ε_v^* はユニークな関係が見られる。この関係を用いれば、空気注入によって低下した飽和度 S_r から液状化強度を求め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飽和度 S_r を算定し、その飽和度 S_r が空気注入によって実現できるものである場合、当工法が適用可能と判断されることになる。

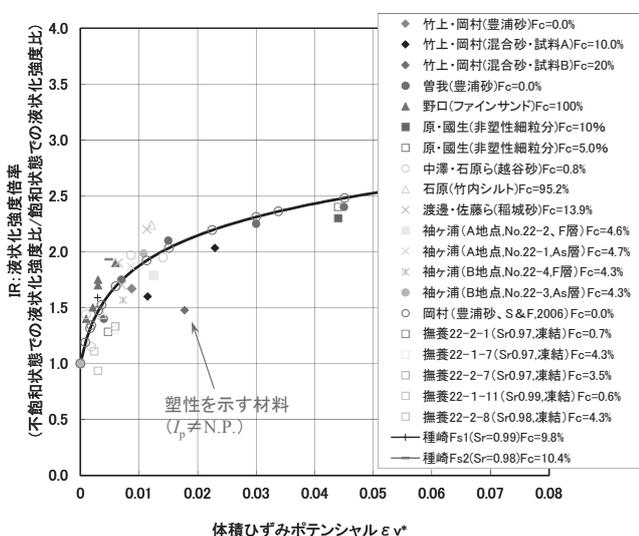


図-4 液状化抵抗増加率と ε_v^* の関係

3. 工法の特長

開発した本工法の特長は以下のとおりである。

1) 材料費のかからない空気を使用するため、他の液状化対策工法に比べて安価となる

従来の工法がセメントや薬液、砂、ドレーンなどの材料を必要とするのに対し、当工法は材料費のかからない大気中の空気を利用することができる。加えて、施工に大型機械を必要とせず、注入管設置のための削孔機、および注入に必要なコンプレッサー程度である。小規模な設備で施工が行えることから、他工法に比べて十分な低コスト化が実現できる。

2) 施工中に地盤の変形が生じないため、構造物直下も供用中のまま適用できる

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ため、注入に伴う地盤の体積変化が発生しない。そのため、施設自体にも有害な変形を生じさせる

ことなく、供用したままの施工が可能となる。

3) 使用材料が空気であるため、施工に伴う周辺環境への負荷が極めて小さい

セメントや薬液などの材料を使用する他工法の場合においては、六価クロムなどに代表されるとおり、材料に起因した環境要因に注意を払っておく必要があり、十分な監視が要求される。加えて、作業に大型施工機械を使用することが多く、周囲への振動・騒音のみならず、機械からの油漏れについても注意しておかなくてはならない。他方、当工法は大気中の空気を使用することから、材料に起因した環境への負荷要因は極めて少なく、施工に大型機械も必要としないことから、騒音・振動の影響も考慮する必要はほとんどない。

4) 小規模設備で施工が行えるため、狭隘なスペースでも施工可能である

図-5に空気注入時に必要となる注入システムを、写真1~4に実際の施工状況をそれぞれ示す。

空気供給源としては、通常の建設工事で標準的に使用されるコンプレッサーを利用でき、供給された空気は圧力計と流量計で計測・管理しながら地盤に送り込むシンプルな装置構成である。他工法と異なり材料プラントの設置も必要ないため、狭隘な場所でも十分施工が可能である。

また、注入施工箇所には送気管が敷設されているのみであり、施工に大型機械が不要であることも状況写真から明らかである。

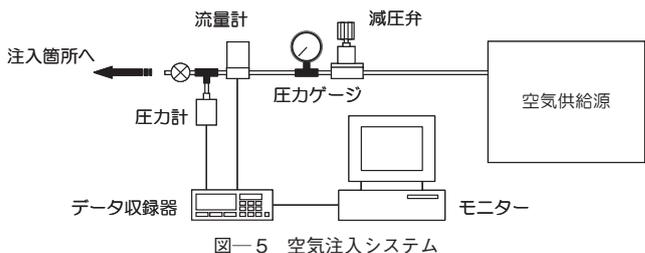
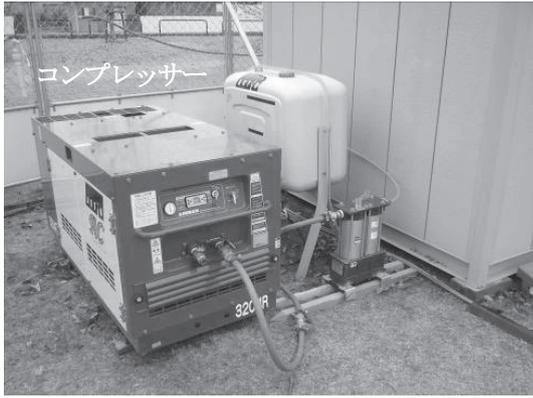


図-5 空気注入システム



写真-1 空気注入システム



写真一2 空気供給源 (コンプレッサー)



写真一3 空気注入状況



写真一4 空気注入状況 全景

4. 現場実験

(1) 実験概要

空気注入技術を実用化させるために、以下の目的を掲げて現場実験を実施した。なお、現場実験場所は千葉県袖ヶ浦と徳島県撫養の沿岸域である。

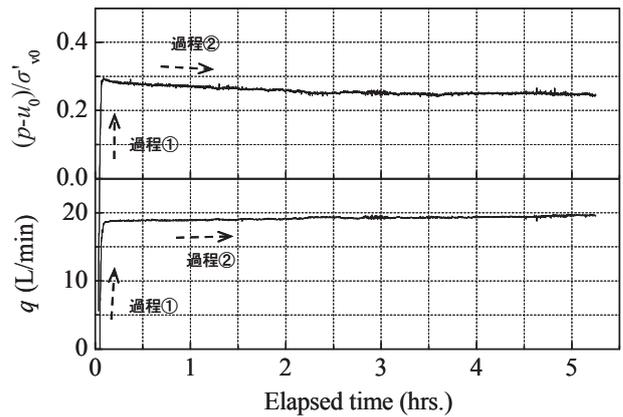
- 1) 空気注入の施工性確認
- 2) 空気注入による改良効果の確認

(2) 空気注入の施工性確認

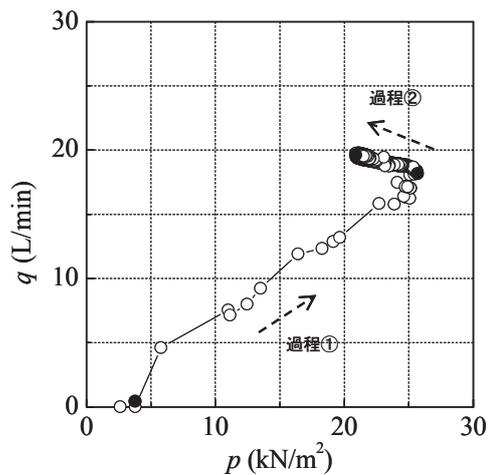
地盤内に安定的に空気を注入するためには、土粒子の骨格構造を変化させないように注入を制御する必要がある。そのためには、空気注入の注入圧力 p および注入流量 q を適切に管理しなくてはならない。特に注入圧力 p は、注入地点深度での有効土被圧 σ'_{v0} の0.8倍程度以上で割裂破壊を生じる可能性が指摘されており⁵⁾、より厳密な管理が要求される。

現場実験での注入履歴（注入圧力 p と注入流量 q の経時変化）の一例を図一6に示す。注入圧力 p は $(p-u_0)/\sigma'_{v0}$ で0.3以下と、約5時間にわたり安定した管理が行えていることがわかる。また、この管理に応じた注入流量 q は18～20 L/minであり、ほぼ一定状態が維持されている。注入中に各履歴に急激な変動が見られていないことから、地盤が割裂破壊を生じることなく不飽和化が進行していることが示唆される。

この履歴の注入圧力 p と注入流量 q の関係を図一7に示す。注入圧力 p は約4 kN/m²程度で地盤内に空気が流れはじめ、注入流量 q は注入圧力 p によって直



図一6 空気注入履歴



図一7 注入圧力 p と注入流量 q の関係

線的に増加している（過程①）。その後の過程②では、過程①と異なり、低い注入圧力 p で大きな注入流量 q が得られる傾向である。この結果は、地盤内に空気が

注入されることで飽和度が低下し、これに伴って透気性が向上するという既往の知見と良く一致している⁶⁾。

(3) 空気注入による改良効果の確認

空気注入を行った約4ヶ月後において、地盤を凍結させて試料採取を行う凍結サンプリングを実施した。これによって得られた試料から飽和度 S_r を算出し、空気注入による改良品質を評価した。なお、試料の採取は空気注入地点から約1.5m離れた位置で、2地点(地点-1, 2)とした。

算出された飽和度 S_r の深度分布を図-8に示す。空気注入の対象としたG.L.-14.5m以浅において、飽和度 S_r は注入前の100%から明らかに低下しており、概ね90~95%の範囲内に分布している。これは、当注入システムにて地盤内に空気が確実に注入できること、かつ注入した空気が長期的に安定して地盤内に留まっていることを示す結果であり、当技術が確実に液状化対策に寄与できることを証明するものである。

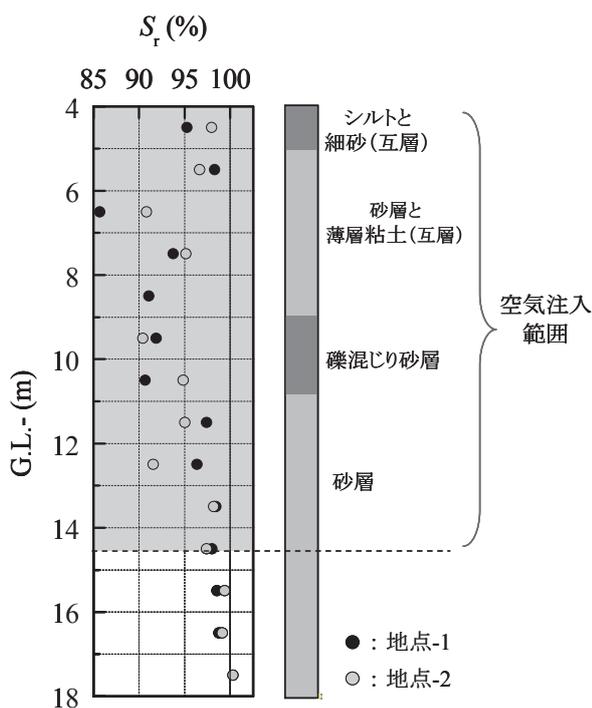


図-8 空気注入の品質確認結果 (飽和度評価)

5. おわりに

地盤内に空気を注入することで地盤の液状化対策を行うことができる世界で初めての画期的な本工法を開発した。現在も、当工法の施工性を向上させるべく、現場実験を継続的に実施している。今後発生するであろう大地震に備えて、緊急を要する莫大なエリアの液状化対策に、当工法が大きく貢献できるよう、さらな

る技術改良を図っていく所存である。

JCMA

《参考文献》

- 1) Yoshimi, Y., Tanaka, K. and Tokimatsu, K.: Liquefaction resistance of a partially saturated sand, Soil and Foundations, 29 (3), pp.157-162, 1989.
- 2) 白石俊多: 地震による液状化地盤の側方流動と液状化防止法試案, 土と基礎, 47 (10), pp.31-34, 1999.
- 3) 田村直登, 萬行淳, 岡村未対: 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.
- 4) Okamura, M., Soga, Y.: Effects of pore fluid compressibility on Liquefaction resistance of partially saturated sand, Soil and Foundations 46 (5), pp.695-700, 2006.
- 5) 緒方宏行, 岡村未対, 矢田部龍一: 飽和地盤中に対する空気注入時の空気挙動に関する実験的研究, 土木学会四国支部平成18年自然災害フォーラム論文集, pp.89-92, 2006.
- 6) 宇野尚雄, 神谷浩二, 杉井俊夫: 毛管モデルに基づく土の透気性に関する考察, 第38回土質工学シンポジウム平成5年度発表論文集, pp.25-32, 1993.

【筆者紹介】



三枝 弘幸 (さえぐさ ひろゆき)
東亜建設工業(株)
技術研究開発センター 地盤・防災技術グループ
主任研究員



三好 朗弘 (みよし あきひろ)
(株)不動テトラ
地盤事業本部 開発部
課長



藤井 直 (ふじい なお)
オリエンタル白石(株)
施工・技術本部 技術部 技術チーム
担当課長



山田 直之 (やまだ なおゆき)
(株)ダイヤコンサルタント
地質解析事業部 物理探査部
課長



岡田 克寛 (おかだ かつひろ)
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
建設管理官



岡村 未対 (おかむら みつ)
愛媛大学大学院
理工学研究科 生産環境工学専攻
教授