

## 空気注入不飽和化工法による既設小規模建築物の液状化対策について

### Effectiveness of desaturation by air-injection as liquefaction countermeasure of existing small building

小林睦<sup>1</sup>, 横井亜紀<sup>2</sup>

1 豊田工業高等専門学校・環境都市工学科・makotok@toyotact.ac.jp

2 基礎地盤コンサルタンツ

#### 概 要

2011年の東北太平洋沖地震以降、市民の資産を守るために宅地の耐震対策に関する研究報告が多くなされてきた。ところが、既設の小規模建築物に対する液状化対策工法は施工エリアが限定されるために、新設と比較して同じ対策原理に基づく工法であっても高額になることが指摘されている。そこで本研究では、軽量の住宅構造物を対象にした不飽和化工法の効果を検証し、住宅直下に限らず周辺領域を不飽和化した場合の家屋沈下挙動を把握し、本工法の性能評価に資する知見を得ることを目的として一連の遠心模型実験を実施した。その結果、有効上載圧の小さな深度であっても飽和度を十分に低下させることができれば液状化対策効果を確認することができた。また、注入パイプの打設方向の影響について検証したところ、住宅直下に対策領域が確保できなくても、不飽和化領域に挟まれた地盤のせん断変形が抑制されることから、無対策と比較して住宅の沈下量を抑制することが分かった。

キーワード：液状化、空気注入不飽和化工法、既設小規模建築物、遠心模型実験

#### 1. はじめに

2011年の東北太平洋沖地震では、関東地方沿岸部で広範にわたり液状化が発生し、2万棟におよぶ住宅が被害を受けた<sup>1)</sup>。このエリアでは、地表最大加速度は $2\text{m/s}^2$ と大きくはなかったものの、継続時間が2分程度と長かったことが特徴として挙げられている。南海トラフ地震における被害予測では、愛知県内だけで液状化による倒壊家屋数が約2万棟であると試算されており<sup>2)</sup>、大規模地震の際の個人資産の被害は相当額にのぼるとみられる。しかしながら、戸建て住宅の多くが個人資産であるために、公費投入による対策には限界があり、液状化対策は遅々として進んでいないのが現状であろう。

宅地地盤の液状化対策として、新規建設の場合は施工エリアも確保できるため、ある程度の選択肢があるものの、既存住宅を対象にした対策工法は施工エリアが限定されるために極めて限定的であるのが現状である。戸建て住宅の液状化対策の経済性評価に関する研究<sup>3)</sup>では、個別に液状化対策を実施するような施工面積が小さい場合は、固定費の負担割合が大きくなるために、全体的な施工費は施工面積が広い場合と比較して割高になると指摘している。また、既設住宅の場合は、施工方法が限定されるうえ、外構の撤去や建物内部の養生といった補修費が生じるために、同じ原理での液状化対策工法であっても、新設住宅と比較して

工費は3倍以上になるとの試算がある。薬液注入工法については、打設方向の違いによる施工能率の違い等によって既設/新設の比率が1.6倍程度であると指摘されている。ただし、これらは施工面積、改良深さ、新設・既設の影響について比較したものであり、薬液注入による固化処理は500~800万円程度と高額であることには変わりない<sup>4)</sup>。東北太平洋沖地震の被災家屋アンケートでは、液状化対策として負担できる費用範囲が200万円までと答えた被験者が6割程度であった<sup>5)</sup>。このことから、費用を抑えた液状化対策工法の開発が望まれる。

空気注入不飽和化工法は、大規模な重機を必要としないだけでなく、高価な材料も不要であるために、廉価な液状化対策工法として開発された経緯がある<sup>6)</sup>。これまでに、空気注入による不飽和化領域の形成過程における確認試験<sup>7)</sup>や港湾構造物を対象にした液状化対策効果の検証<sup>8)</sup>がなされ、工法のマニュアル作成にまで至っている。道路路土の基礎地盤の液状化対策工としての有効性も示され<sup>9)</sup>、軽量の住宅を対象にした液状化対策工の有効性の研究もなされている<sup>10)</sup>。

ところが、先述のように戸建て住宅を対象にする場合、本工法による対策効果を市民レベルで理解してもらえない性能として明示しなければならない。さらに、既存住宅を対象にするために、施工エリアが狭隘である場合を想定しなければならない。すなわち、家屋直下を適切に不飽和化

させることができない場合が存在するかもしれない。そのような事例に対応するために、本研究では、軽量の住宅構造物を対象にした不飽和化工法の効果を検証し、住宅直下に限らず周辺領域を不飽和化した場合の家屋沈下挙動を把握し、本工法の性能評価に資する知見を得ることを目的とする。

## 2. 遠心模型実験

### 2.1 実験システム

図1に模型地盤概要を示す。50Gの遠心加速度場で加振実験を行うため、縮尺は1/50である。液状化層は、相対密度が60%になるように乾燥豊浦砂を用いて空中落下法により作製した。アクリル容器で作製した住宅模型は3kN/m<sup>2</sup>になるように重量を調整している。空気注入パイプは、住宅を挟んで70mmの間隔とし、鉛直に挿入する場合は、注入口が地表から70mmの位置まで地盤内に挿入した。斜め方向に注入する際は、ノズル先端は表層からおよそ60mmの深さにあることを確認している。不飽和化エリアが住宅地の直下に形成されるように、パイプ挿入位置は奥行き方向に35mmの間隔で挿入した。加振実験中の模型地盤の変形状況を記録するために、住宅直下および住宅から76mm離れた地盤内にヌードルターゲットを設置した。

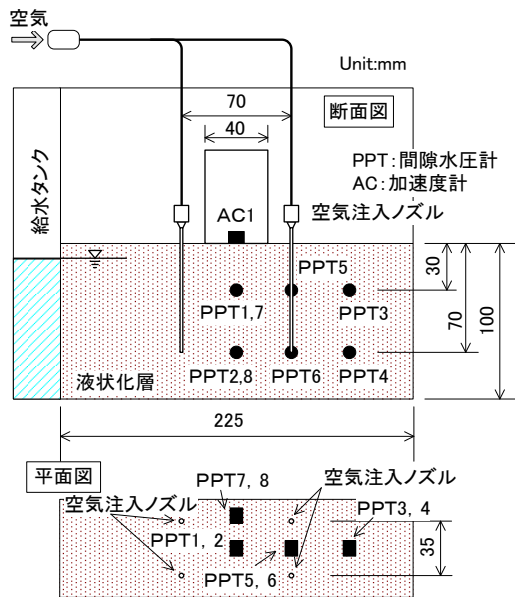
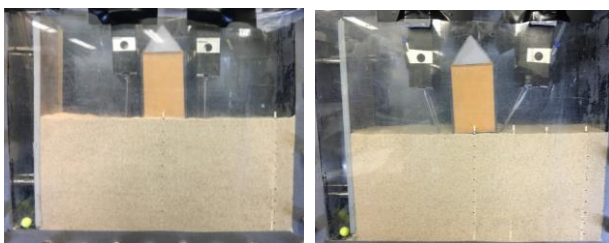


図1 模型地盤概要



(a) PV21

(b) PS72-2

図2 模型地盤

表1 実験条件

実験コード	注入パイプ挿入方向	注入時間 (s)	間隙水圧計配置
PN	無対策	—	1,2
PS21	斜め	21	1,2
PS72-2	斜め	72	7,8
PV21	鉛直	21	1,2,3,4
PV72-1	鉛直	72	1,2,3,4
PV72-2	鉛直	72	1,2,5,6

また、既存住宅の直下を確実に不飽和化するためには、注入パイプを住宅周囲から斜め方向に挿入する必要があると考えられる。そこで、空気注入口が住宅の直下に配置したケースについて検証した。本研究では、ノズルとチューブの接続部に治具を用いて注入パイプを固定しているために、斜め方向に注入パイプを打設する場合も、この固定位置は変えていない。したがって、斜め方向に挿入したケースでは改良深さが異なる。図2, 3に打設方向の異なる実験ケースの模型地盤を示す。間隙水圧計は、表層から30, 70mmの位置に設置し、住宅模型中央直下をそれぞれPPT1, 2とし、不飽和化領域外をそれぞれPPT3, 4とした。また、不飽和化領域の形成状況を検証するために、表層からの深さを同じとし、幅方法および奥行き方向のノズル間の中央部にPPT5, 7およびPPT6, 8を設置した。

### 2.2 実験条件および実験方法

水圧計の配置を含めて、実験条件を表1に示す。遠心載荷中に、実験フロアより模型土槽に設置した給水タンク内に水の50倍の粘性を持つメチルセルローズ水溶液を供給し、模型地盤を飽和させた。このとき、住宅直下に実規模換算でおよそ50cmの不飽和層を設けた。ただし、遠心加速度が作用する半径に沿って地下水水位が上昇するため、模型地盤の両端では地下水水位が表層に達した。所定の地下水水位を再現できたら、実験フロアより空気注入ノズルに空気を送る。注入圧力は、マニュアル<sup>1)</sup>に従い注入口に作用する間隙水圧に同位置の有効応力の半分程度を加えて、7.5kPaとした。注入時間を21, 72秒(実規模換算で0.3, 1.0Hr)に設定し、空気注入を停止してから5秒後に、図3に示すような実規模換算で周波数1Hz, 1.5m/s<sup>2</sup>相当の地震波を20波与えた。

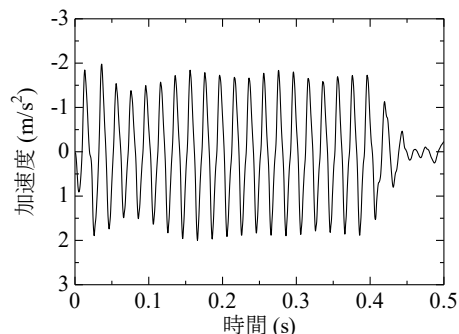


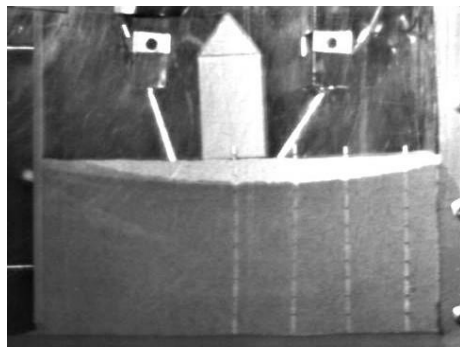
図3 振動台応答加速度

### 3. 不飽和化工法による液状化対策効果

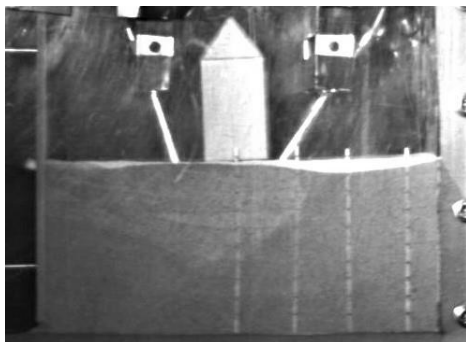
地盤の飽和度が低下すると液状化強度が増加することは知られている<sup>12)</sup>。深度 2m では和度が 5% 低下すると液状化強度が 1.5 倍になるが、土被り圧の小さな地表面付近（深度 0.5m）では、1.2 倍と強度改善効果がほとんど期待できないと指摘している。ところが、飽和度を 20% 低下させると、深度 0.5m においても液状化強度は 1.5 倍の増加が見込まれる。本研究では、検証する液状化層が浅いことに加えて、既設の小規模建築物を上載荷重としているために、有効拘束圧が小さく不飽和化による液状化強度増加率は期待するには、飽和度の低下量を確保することが重要である。

#### 3.1 空気注入による不飽和化領域の形成

図 4 に、空気注入前後の遠心载荷中の模型地盤の様子を示す。この写真は、ケース PS-72-2 である。注入前後の地



(a) 空気注入前



(b) 注入後

図 4 不飽和化領域の形成

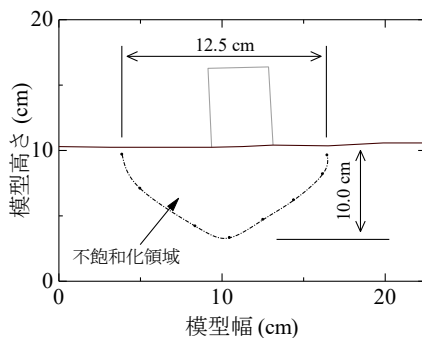


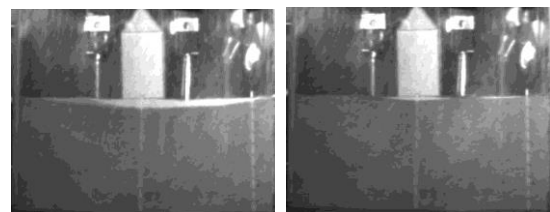
図 5 不飽和化領域の飽和度

下水位を比較すると、空気注入により地下水位が上昇し、不飽和領域が形成されていることが確認できる。給水タンク内の地下水位上昇量が 6.1mm であることから、間隙空気を伝って地表に排出された空気の存在を差し引いても、少なくとも見積もって 36.4cm<sup>3</sup> もの空気量が注入されて不飽和化領域が形成されたことがうかがえる。図 5 に空気注入後の模型地盤の写真から読み取った不飽和化領域を示す。奥行き方向に注入パイプはほぼ等間隔に打設していることから、図中の断面積 (59.5cm<sup>2</sup>) から不飽和化領域を求めるとおよそ 368.9cm<sup>3</sup> となる。これより、不飽和化領域の飽和度が約 77% となっていると推定できる。

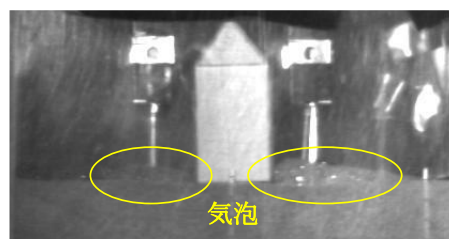
一方で、ケース PV72-1 においては、図 6 に示すように空気注入により注入パイプ打設部上部での地下水面が地表に達し、住宅模型周縁部より地下水が気泡とともに湧き出ている様子が確認できる。このことから、注入圧力が有効上載圧を上回り、地盤の緩みを生じさせることになったものと推察される。しかしながら、平面的な広がりを持つ実地盤において、局所的に地下水位が上昇するような現象は考慮しなくてよいと考える。

#### 3.2 地震時の間隙水圧の挙動

図 7 にすべてのケースにおける加振中の過剰間隙水圧の時刻歴を示す。同図は、加振直前の間隙水圧を基準として増分を示している。図中の一点鎖線は、間隙水圧計が設置されている深さにおける空気注入前の有効上載圧である。なお、ケース PN における PPT2 は計測できなかったため記載していない。図 7(a) より、空気注入による不飽和化領域が形成されたことで、PPT1、7 の加振中の過剰間隙水圧の上昇が抑制されていることがわかる。ただし、PV72-1、2 では実験条件が同様であるにもかかわらず、過剰間隙水圧の挙動が異なっていることが指摘できる。これは、PV72-1 では、空気注入により地下水が地表面に達し、住宅周縁部に気泡が確認されたことと関係していると考えられる。すなわち、地盤に緩みが生じたために間隙水圧計

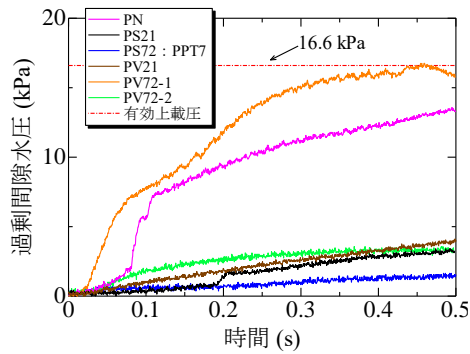


(a) 空気注入前 (b) 地下水到達

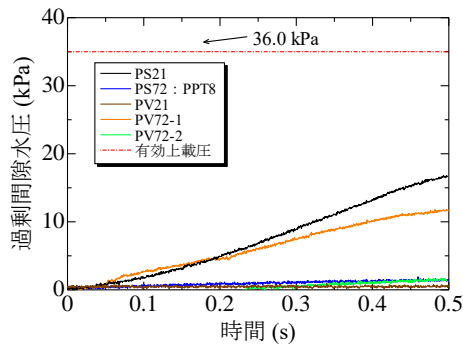


(c) 住宅周縁部の湧き出し

図 6 不飽和化領域の形成



(a) 表層から 3cm (PPT1, 7)



(b) 表層から 7cm (PPT2, 8)

図 7 加振中の過剰間隙水圧の時刻歴

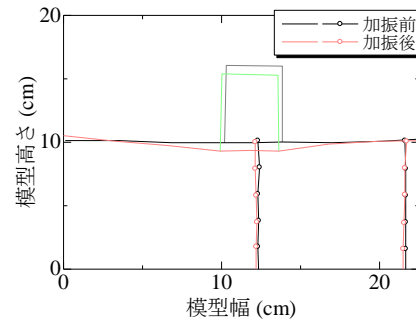
周囲の有効上載圧が小さくなり、液状化抵抗が低下したことにより起ると考えられる。本研究では、地表から 3.5m 以浅の比較的浅い部分で、かつ小規模建築物をモデリングしているために、地表面以下数十 cm の地盤の変化が過剰間隙水圧の挙動に影響したものと推察される。

図 7(b)より、PPT2, 8 が設置されている深さは、鉛直方向に打設したケースにおけるノズル先端と同一であるにもかかわらず過剰間隙水圧の上昇が抑制されていることが確認できる。さらに、斜め方向に打設したケースでは、注入孔よりも間隙水圧計が 0.5m ほど下部に位置するものの鉛直のケースと同様に過剰間隙水圧の上昇が抑制されているのは興味深い結果である。模型地盤解体時に不飽和領域の確認はできなかったものの、間隙水圧計設置個所周辺が不飽和に至ったこととあわせて、加振中にこの領域に挟まれた地盤のせん断変形抑制効果が期待できる。

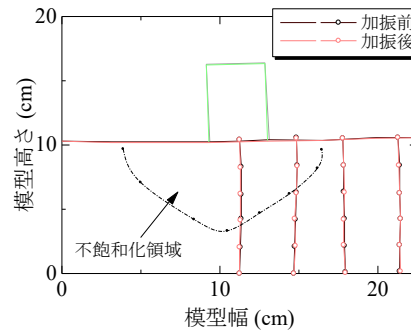
### 3.3 住宅の沈下挙動および地盤の変形

図 8 に無対策のケース PN および PS72-2 における加振前後の模型地盤の変形状況を比較する。図より明らかなように、住宅模型下部に対策領域が明瞭に確認できる PS72-2 では家屋模型がほぼ変位していないことが指摘できる。また、ヌードルターゲットについても同様に変位が確認できない。これに対して、無対策のケース PN においては、地盤の液状化に伴い遠心加速度が作用する半径に沿って流動したことに伴って家屋模型下部の地盤が沈下しそれに追従する形で住宅も沈下している様子がうかがえる。

これらのことから、空気注入により不飽和領域が形成されると地盤の液状化による変形が抑制されるため、上載



(a) PN



(b) PS72-2

図 8 加振前後の住宅モデル変位状況および地盤の変形 (不飽和化工法の効果)

荷重の小さな小規模建築物の沈下対策に大きく貢献することが確認できた。

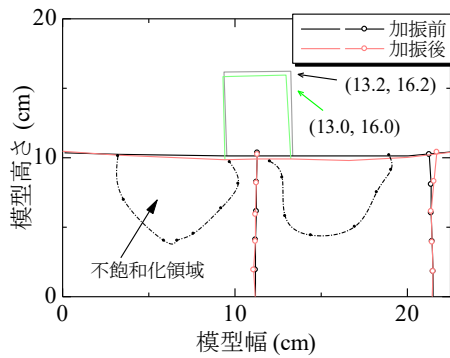
## 4. 打設方向および注入時間の影響

### 4.1 打設方向の影響

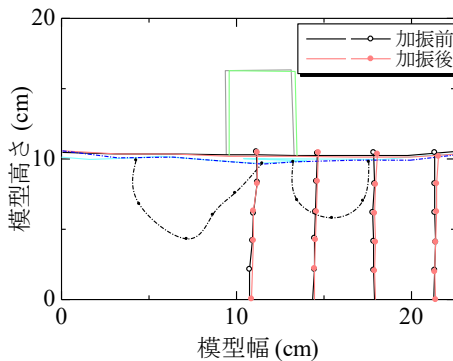
図 9 に注入パイプを鉛直方向に打設したケース PV72-1 およびケース PV72-2 における加振前後の模型地盤の変形状況を示す。これらより、両ケースで特に右側の不飽和領域の大きさに違いが生じていることが指摘できる。PV72-1 では、空気注入により地表面に気泡が確認され、地盤内の過剰間隙水圧の上昇が他のケースより大きかったものの、無対策と比較して住宅の変位が小さくなっているのは、3.2 節で指摘したように不飽和領域に挟まれた領域が地盤のせん断変形を抑制したためであると推察される。このケースでは、実規模換算で 10cm の沈下量であった。本研究では、住宅幅が 2m であることから 1%程度の傾斜角を検証できるには至っていないことを付け加えておく。一方で、PV72-2 ではヌードルターゲットの変位状況より地盤が液状化による側方流動がうかがえ、それに伴って住宅が水平方向に変位していることが確認できる。しかしながら、無対策と比較して地盤の側方流動量が小さかったために、住宅モデルは水平方向に移動したものの沈下していないことが確認できる。

これらのことから、以下の二つのことが指摘できる。ひとつは、本工法による液状化対策効果を得るためには、地下水位が浅い場合は地盤の緩みを招くために十分に留意





(a) PV72-1



(b) PV72-2

図9 加振前後の住宅モデル変位状況および地盤の変形 (鉛直方向打設)

する必要があることである。ふたつめは、施工エリアが狭隘な場合に打設方向を自由に制御できなくても、不飽和化領域を適切に形成させることで住宅直下地盤の液状化を抑制することで沈下をある程度軽減させることができることを示唆している。

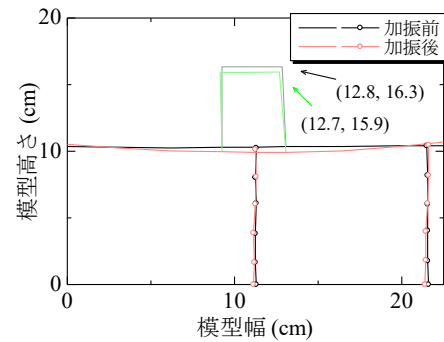
#### 4.2 空気注入時間の影響

注入時間を実規模換算で18分に設定したケースPS21およびPV21の加振前後のモデル地盤の様子を図10に示す。PS21では、不飽和化領域の読み取りが困難であったため、グラフから割愛している。これらより、両ケースともに地盤の側方流動と住宅の沈下、移動が確認できる。不飽和化領域が確認できたPV21においても、対策領域が小さいことが確認でき、それによって地盤の液状化と側方流動の抑制効果が小さくなったものと考えられる。これらのことから、不飽和化領域の大きさが液状化対策の効果に大きく影響を及ぼしていることから、適切な施工とともに飽和度の管理が重要であるといえる。

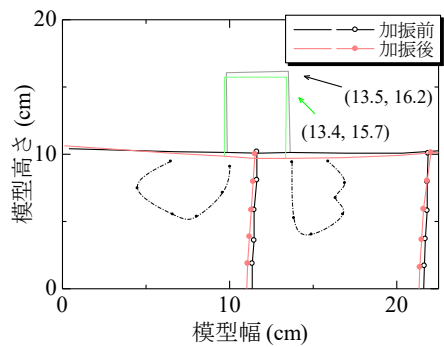
### 5. まとめ

本研究では、軽量の住宅構造物を対象にした不飽和工法の効果を検証し、住宅直下に限らず周辺領域を不飽和化した場合の家屋沈下挙動を把握し、本工法の性能評価に資する知見を得ることを目的として一連の遠心模型実験を実施した。その結果、以下の結論を得た。

(1) 地下水が極めて浅い場合は、空気注入により間隙水が気泡とともに地盤表層に湧き出し、地盤の緩みを発生さ



(a) PS21



(b) PV21

図10 加振前後の住宅モデル変位状況および地盤の変形 (空気注入時間)

せることに留意しなければならないことが分かった。

(2) 有効上載圧の小さな小規模建築部の直下の浅い地盤においても、飽和度を20%程度低下させることができれば、地震による液状化を防止することで住宅の変位を適切に抑制することができた。

(3) 施工方法が限定され、住宅直下に不飽和化対策を施せない場合においても、不飽和化領域に挟まれた地盤のせん断変形が抑制され、結果として液状化対策に寄与することが分かった。

#### 参考文献

- 1) 安田進, 原田健二, 石川敬祐: 東北地方太平洋沖地震による千葉県被害, 地盤工学ジャーナル No.7, Vol.1, pp.103-115, 2012.
- 2) 中央防災会議, 防災対策推進検討会議, 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ: 南海トラフ巨大地震の被害想定について (第一次報告), 2012.
- 3) 谷和夫, 松下克也, 橋本隆雄, 山本彰, 竹内秀克, 野田利広, 規矩大義, 大林淳, 清田隆: 浅層盤上改良工法による戸建て住宅の液状化被害軽減効果の検証と経済性評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.4, pp.533-553, 2014.
- 4) 日本建築学会: 復旧・復興支援WG「液状化被害の基礎知識」, <http://news-sv.ajj.or.jp/shien/s2/ekijouka/measure/>, 参照日: 2019.03.26
- 5) 品川恭一, 藤井衛: 東北地方太平洋沖地震の液状化地域における戸建住宅居住者の意識調査および液状化による不同沈下に対する考察, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.2,

- pp.285-293, 2015.
- 6) 岡田克寛, 太田正規, 磯谷修二, 大内正敏, 高野仁, 岡村未対: 空気注入不飽和化工法の開発 その1: 現場実験(徳島県鳴門市)の概要, 土木学会第67回年次学術講演会公演概要集(第Ⅲ部門), pp.491-492, 2012.
  - 7) 新川直利, 三枝弘幸, 藤井直, 山田直之, 岡田克寛, 岡村未対: 空気注入不飽和化工法の開発 その4: 空気注入とそのモニタリング, 土木学会第67回年次学術講演会公演概要集(第Ⅲ部門), pp.497-498, 2012.
  - 8) 三枝弘幸, 三好朗弘, 藤井直, 山田直之, 岡田克寛, 岡村未対: 空気注入不飽和化工法の開発 その7: 千葉県袖ヶ浦市での現場実験(品質確認), 土木学会第67回年次学術講演会公演概要集(第Ⅲ部門), pp.503-504, 2012.
  - 9) 富田雄一, 紙田直充, 内田純二, 岡本辰也, 岡村未対: 液状化対策としての地盤不飽和化工法の道路盛土への適用性に関する研究, 地盤工学ジャーナル, vol.9, No.3, pp.375-386, 2014.
  - 10) Marasini, N.P., and Okamura, M.: Numerical simulation of centrifuge tests to evaluate the performance of desaturation by air infection on liquefiable foundation soil of light structures, *Soils and Foundations*, Vol.55, No.6, pp.1388-1399, 2015.
  - 11) 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, p.26, 2012.
  - 12) Okamura, M. and Soga, Y.: Effect on liquefaction resistance of volumetric strain of pore fluid, *Soils and Foundations*, Vol. 46, No.5, pp.703-708, 2006.