

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289148

研究課題名(和文) コスト1/100の液状化対策工法の実現と一時的な酸化環境での化学・生物反応

研究課題名(英文) Developing a extremely cost effective liquefaction countermeasure

研究代表者

岡村 未対 (Okamura, Mitsu)

愛媛大学・理工学研究科・教授

研究者番号：50251624

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：平成26年度までに実施した、高速道路盛土直下地盤への空気注入現場に適用でき、簡便な凍結サンプル採取法を開発し、現場の飽和土を実際にサンプルを採取して計測する準備を整えた。研究期間終了までには間に合わなかったが、近日中に計測を実施する予定である。

また、現場実験で不飽和化した領域の飽和度の長期変動予測を検討した。これにより、本現場のように地下水流速の小さい低平地では、一旦飽和土を90%程度に低下させれば不飽和液状化対策の有効性の目安である95%まで回復するのに200年以上の時間を要するため、液状化対策法として十分な継続性を有することが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In order to obtain soil samples from the foundation soil just below a highway embankment where in-situ air injection had been conducted to desaturate the ground as a liquefaction countermeasure, a simple and cheap ground freezing method has been developed. Frozen samples will be taken from the ground with the method in a near future to directly measure distribution of degree of saturation.

The durability of the desaturated soils, which is one of the concerns of the technique, depends on the sustainability of the injected air in the soil pore. To evaluate the evolution in degree of saturation (which ensures the longevity of injected air) numerical simulations were conducted considering advection and the molecular diffusion process of mass transfer by using the multiphase flow simulation model (TOUGH2) based on the finite difference method (FDM). It is confirmed that the unsaturated condition of the site will last more than 200 years.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化 液状化対策 飽和度 砂 地震

1. 研究開始当初の背景

土の飽和度が低下すると液状化強度が著しく増加することが知られており、地盤の不飽和化は液状化対策のアイデアとして以前から存在した。しかし、地盤を一旦不飽和化しても再び飽和してしまうと考えられ、液状化対策法として本格的に研究されることは近年までなかった。申請者は、一連の現場調査を通じて地盤中への空気圧入により飽和度が相当程度低下すること、およびそれによる不飽和状態が26年間以上持続していることを明らかにし、地盤の不飽和化が液状化対策工法になり得ることを示しその後の研究成果をとりまとめて設計法を確立し2012年に公表した。空気注入による液状化対策技術の現状と主な課題を以下に述べる。

(a)土質や土被り圧、地下水位などの条件に応じて地盤を効率的に不飽和化する技術

・空気注入管の設置間隔、深度方向の注入点数はコストを非常に大きく左右する。地盤の特性と注入緒元が注入点周りに形成される不飽和領域メカニズムは基礎的な検討がなされている。これを応用・発展させて不飽和領域範囲を広げる実用的注入方法を開発すれば、更なる大幅なコストダウンが可能である。

・構造物直下を不飽和化する場合、構造物の沈下や変状が生じないような注入としなければならない。空気注入時による地盤および構造物の変状メカニズムはほぼ解明されている。

(b)施工管理のための地盤飽和度を簡易に計測する技術

・施工時(空気注入時)には飽和度確認のために実用的な飽和度測定法が必要である。2次元・3次元比抵抗トモグラフィにより比抵抗値の変化率から飽和度分布を求める方法が開発され、実用化されている。また比較的簡便なサンプリングにより直接的に飽和度を測定する方法も研究されている。

(c)不飽和化した地盤の耐震性

・不飽和砂質土の液状化強度については、強度増加メカニズムの解明と定量的な強度評価法が大きく進展した。一方、比較的飽和度の高い不飽和砂質土のせん断強度特性については、海底地すべりに関連した研究が少数あるのみである。・構造物直下を不飽和化した場合、液状化強度は飽和度のみならず応力状態に依存するため地盤内で空間的に変化する。また、対策(不飽和)領域と未対策(飽和)領域の境界では地震時に間隙水圧が伝播することで相互作用も生じる。対策効果(構造物の沈下抑制効果等)の発現メカニズム解明と評価法(有効応力解析等の適用性)は未だ不十分である。

(d)不飽和状態の長期持続性と地盤内環境

・空気注入などによって一旦不飽和化された地下水位以下の土は、不飽和状態が長期的に持続することが申請者らにより確認されている。この他、現場や室内試験でも同様のこ

とが報告されているが、長期持続メカニズムは明らかでない。空気存続期間の予測が可能になれば、対策効果維持のための再注入期間の目安になり、LCCの評価が可能となる。

2. 研究の目的

我が国には地震時の液状化対策を施すべき膨大な社会インフラが存在する。現状の対策工法より1オーダー以上安価な革新的な工法が望まれ、地盤を不飽和化することによる液状化対策法(下図参照)が研究されている。申請者は、この工法を開発し研究成果を設計法としてとりまとめて実用化し、研究・技術開発としては一定の成功を治めた。そこでは当初の目標である1/10のコストダウンを達成したが、更なる大幅なコストダウンの実現性が明らかとなった。本研究では、空気注入により生じる地盤内環境変化の解明と、既存工法の1/100程度までコストダウンした工法の実現を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、広範囲を一定以上の品質(飽和度)に不飽和化する効率的な注入方法を遠心模型実験および数値解析で見いだすと共に、現場実証実験を行う。直下地盤を不飽和化対策した構造物の耐震性を一連の遠心模型実験で検証する。比較的飽和度の高い不飽和砂質土($S_r=85-95\%$)のせん断挙動を室内試験により明らかにする。地震時の変形予測法としての数値解析法の適用性を確認し不飽和地盤のパラメータ設定法を検討する。これらをまとめて設計法として提案する。

空気注入により不飽和化した砂質土の不飽和状態長期持続メカニズムを解明することを試み、不飽和状態存続の予測法を検討する。

4. 研究成果

注入点間隔はコストに大きく影響する。地盤の特性と注入緒元(空気注入圧力や流量、時間の制御)が注入点周りの不飽和領域の大きさに及ぼす影響を遠心模型実験と気液二相流解析によって調べる。特に盛土直下や地盤深部などの土被り圧の大きい地点において、高い注入圧力により広い注入点間隔で短時間に不飽和化する方法を検討する。このような条件において、コスト1/100を実現させる技術を確立するため、盛土直下地盤を対象として検討した注入方法により想定される範囲を不飽和化できることを現場実験で実証した。また、実証試験を実施した現場から比較的安価に試料を採取し、直接飽和度を精度良く計測する方法を確立した。

改良域内には脱水されない飽和領域が一部残る。飽和-不飽和境界領域での水圧相互作用を解明し、許容される飽和領域の大きさを明らかにするため、一部が不飽和、他が飽和した地盤の動的遠心模型実験を行い、飽和-不飽和境界領域での水圧の相互作用を解明した。また、有効応力解析により、種々の

地盤条件や構造物の条件についても検討した。

盛土構造物，および住宅基礎直下地盤を対象に，不飽和領域（液状化対策領域）の幅を変化させて動的遠心模型実験を行い，対策メカニズムと対策効果を調べ，本工法が効果的であることを確認した。

部分的に不飽和化された地盤領域での気体収支を解明し，不飽和状態の長期持続メカニズムを解明した。室内実験で不飽和領域に流入・流出する水の成分分析から領域中での気体収支を測定し，また現場での気体の収支を現場実験で明らかにした。続いて気体の間隙水への溶解/気化を考慮したモデルを用いた数値解析を実施し，その適用性を確認し，不飽和化した地盤の不飽和状態の持続予測法としての妥当性を確認した。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 6 件)

1. Narayan, M. and Okamura, M. 2015. Numerical simulation of centrifuge tests to evaluate the performance of desaturation by air injection on liquefiable foundation soil of light structures, *Soils and Foundations* 査読有り, Vol.55, No.6, pp. 1388-1399. DOI: 10.1016/j.sandf.2015.10.005

2. Narayan Marasini and Mitsu Okamura, 2015. Air injection to mitigate liquefaction under light structures, *Int. J. Physical Modelling in Geotechnics* 査読有り, Vol.15, Issue 3, pp.129-140, DOI: 10.1680/ijpmg.14.00005

3. Marasini N. P., Okamura M. 2015. Liquefaction potential analysis and probable remedial measure for existing structure in Kathmandu Valley, *International Journal of Landslide and Environment* 査読有り, Vol.2, No.2&3, pp. 32-44.

4. 富田雄一, 紙田直充, 内田純二, 岡本辰也, 岡村未対 2014. 液状化対策としての地盤不飽和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* 査読有り Vol. 9, No. 3, pp.375-386.

5. Tomida, Y., Okamura, M. 2013. Verification of desaturation technique as a liquefaction countermeasure for existing embankments, *International Journal of Landslide and Environment* 査読有り Vol. 1, No. 1, pp. 111-112.

6. Marasini, N. P., Okamura, M. 2013. Liquefaction potential analysis and probable remedial measure for existing structure in Kathmandu Valley, *International Journal of Landslide and Environment* 査読有り Vol. 1, No. 1, pp. 59-60.

〔学会発表〕(計 18 件)

1. 曾根照人, 小泉勝彦, 山根信幸, 深田久, 藤井直, 山浦昌之, 岡村未対. 2016. 矢板式岸壁に対する空気注入不飽和化工法の適用, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 査読無し, CD-ROM. 岡山大学 (岡山県岡山市)

2. Narayan Marasini & Mitsu Okamura, 2014. Numerical simulation of centrifuge tests on seismic behavior of residential building on liquefiable foundation soil, *Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics*, 査読有り, pp.847-852. 京都国際会議場 (京都府京都市) 2014 年 9 月 23 日

3. Narayan Marasini, 岡村未対. 2015. Numerical analysis to evaluate the change in degree of saturation at different seepage pressure on partially saturated soil, 第 50 回地盤工学研究発表会, 査読無し, CD-ROM. 札幌科学技術大学 (北海道札幌市) 2015 年 9 月 3 日

4. 渡邊翔太, 岡村未対. 2015. 地盤の不飽和化による地中構造物の浮き上がり対策効果, 第 50 回地盤工学研究発表会, 査読無し, CD-ROM. 札幌科学技術大学 (北海道札幌市) 2015 年 9 月 3 日

5. 山根信幸, 藤原斉郁, 矢部浩史, 大内正敏, 中園康平, 紙田直充, 岡村未対. 2015. 空気注入不飽和化工法の高速度路盛土への適用性検討 (その 5) 空気注入実験の比較, 第 50 回地盤工学研究発表会, 査読無し, CD-ROM. 札幌科学技術大学 (北海道札幌市) 2015 年 9 月 3 日

6. 大石雅彦, 藤原斉郁, 居場博之, 矢部浩史, 曾根照人, 内田純二, 岡村未対. 2015. 空気注入不飽和化工法の高速度路盛土への適用性検討 (その 6) 事後解析, 第 50 回地盤工学研究発表会, 査読無し, CD-ROM. 札幌科学技術大学 (北海道札幌市) 2015 年 9 月 3 日

7. 内田純二, 藤井直, 藤原斉郁, 居場博之, 矢部浩史, 橋本欣也, 岡村未対. 2015. 空気注入不飽和化工法の高速度路盛土への適用性検討 (その 7) 事後調査と適用性検討のまとめ, 第 50 回地盤工学研究発表会, 査読無し, CD-ROM. 札幌科学技術大学 (北海道札幌市) 2015 年 9 月 3 日

幌市) 2015 年 9 月 3 日

8. 矢部浩史, 藤原斉郁, 山根信幸, 大石雅彦, 中園康平, 紙田直充, 岡村未対. 2015. 高速道路盛土基礎地盤への空気注入不飽和化工法適用性検討(その5) - 現場実験結果と気液二相流解析の比較 -, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 査読無し, CD-ROM. 岡山大学(岡山県岡山市) 2015 年 9 月 17 日

9. 内田純二, 藤井直, 藤原斉郁, 居場博之, 矢部浩史, 橋本欣也, 岡村未対. 2015. 高速道路盛土基礎地盤への空気注入不飽和化工法適用性検討(その6) - 事後調査と適用性検討のまとめ -, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 査読無し, CD-ROM. 岡山大学(岡山県岡山市) 2015 年 9 月 17 日

10. 笠谷亮太, 岡村未対. 2014. 土中空気の溶解現象による不飽和砂地盤の飽和度経時変化に関する一次元カラム実験, 第 49 回地盤工学研究発表会, 査読無し, CD-ROM. 北九州国際会議場(福岡県北九州市) 2014 年 7 月 16 日

11. 内田純二, 青木智幸, 山根信幸, 深田久, 大内正敏, 橋本欣也, 岡村未対. 2014. 空気注入不飽和化工法の高速度盛土への適用性検討(その1) 概要, 第 49 回地盤工学研究発表会, 査読無し, CD-ROM. 北九州国際会議場(福岡県北九州市) 2014 年 7 月 16 日

12. 藤井直, 小林真貴子, 居場博之, 深田久, 中園康平, 江川元幾, 岡村未対. 2014. 空気注入不飽和化工法の高速度盛土への適用性検討(その2) 予備実験, 第 49 回地盤工学研究発表会, 査読無し, CD-ROM. 北九州国際会議場(福岡県北九州市) 2014 年 7 月 16 日

13. 居場博之, 高畑陽, 矢部浩史, 大石雅彦, 橋本欣也, 紙田直充, 岡村未対. 2014. 空気注入不飽和化工法の高速度盛土への適用性検討(その3) 本実験計画と準備, 第 49 回地盤工学研究発表会, 査読無し, CD-ROM. 北九州国際会議場(福岡県北九州市) 2014 年 7 月 16 日

14. 藤原斉郁, 富田雄一, 岡村未対, 御手洗義夫, 矢部浩史, 藤井直, 中園康平. 2014. 空気注入不飽和化工法の高速度盛土への適用性検討(その4) 本実験, 第 49 回地盤工学研究発表会, 査読無し, CD-ROM. 北九州国際会議場(福岡県北九州市) 2014 年 7 月 16 日

15. 内田純二, 紙田直充, 青木智幸, 山根信幸, 深田久, 大内正敏, 橋本欣也, 岡村未対. 2014. 高速道路盛土基礎地盤への空気注入

不飽和化工法適用性検討(その1) 概要, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 査読無し, CD-ROM. 日本大学(千葉県千葉市)

16. 藤井直, 小林真貴子, 居場博之, 深田久, 中園康平, 富田雄一, 岡村未対. 2014. 高速道路盛土基礎地盤への空気注入不飽和化工法適用性検討(その2) 地盤調査と実験計画, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 査読無し, CD-ROM. 日本大学(千葉県千葉市) 2014 年 9 月 11 日

17. 矢部浩史, 大石雅彦, 居場博之, 高畑陽, 橋本欣也, 紙田直充, 岡村未対. 2014. 高速道路盛土基礎地盤への空気注入不飽和化工法適用性検討(その3) - ダブルパッカー式注入管による注入実験 -, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 査読無し, CD-ROM. 日本大学(千葉県千葉市) 2014 年 9 月 11 日

18. 藤原斉郁, 御手洗義夫, 矢部浩史, 藤井直, 中園康平, 岡村未対. 2014. 高速道路盛土基礎地盤への空気注入不飽和化工法適用性検討(その4) - 打ち込み式注入管による注入実験 -, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 査読無し, CD-ROM. 日本大学(千葉県千葉市) 2014 年 9 月 11 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡村 未対 (OKAMURA Mitsu)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 50251624

(2)研究分担者

安原 英明 (YASUHARA Hideaki)
愛媛大学・大学院理工学研究科・順教授
研究者番号： 70432797

(3)連携研究者

林 和幸 (HAYASHI Kazuyuki)
和歌山工業高等専門学校・准教授
研究者番号： 30587853