

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009年度～2012年度

課題番号：21360226

研究課題名（和文）空気注入による格段に安価な液状化対策工法の確立と地盤内環境への影響

研究課題名（英文）Development of cost effective liquefaction countermeasure technique by air injection and evaluation of its impact to on geo-environment.

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

研究成果の概要（和文）：本研究では、地盤中に直接空気を注入し地盤を不飽和化することによる格段に安価な液状化対策法を確立し、設計法を提案することを目的とした。そのために、現状でネックとなっている以下の要素技術課題の解決を図った。

- (1) 空気注入時の地盤および構造物の変状メカニズムの解明と合理的な注入方法の検討
- (2) 不飽和化による液状化対策効果の発現メカニズム
- (3) 不飽和化による液状化強度増加率が土の体積ひずみポテンシャルによりユニークに評価できることを砂以外にもシルトについても明らかにした。
- (4) 研究成果を取りまとめ、地盤の不飽和による液状化対策工法の設計施工マニュアルを作成し公開した。

研究成果の概要（英文）：Objective of this research is to develop a cost effective liquefaction countermeasure technique by air injection and to propose a design and execution manual. The following items are in particularly studied.

- (1) Mechanism of instability of existing structures when foundation soil immediately below the structures is desaturated.
- (2) Evaluation of effectiveness to reduce deformation and settlement during strong base shaking.
- (3) Relationship between liquefaction strength ration and volumetric strain for silt and silt mixed sand.
- (4) A design and execution manual is published.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2010年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
総計	13,400,000	4,020,000	17,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：液状化，液状化対策，不飽和

1. 研究開始当初の背景

自然地盤の地下水位以下では土はほぼ完全に飽和している。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、地盤の不飽和化が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無かった。本研究の研究代表者らは、数カ所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年間持続したことを明らかにし、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た。空気注入による液状化対策工法を確立するために必要となる主な要素技術とその現状は次の通りである。

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

① 空気注入管の設置間隔、深度方向の注入点数、および注入圧力の合理的な設定法はコストを大きく左右する。地盤特性と注入緒元が形成される不飽和化に及ぼす影響は実験的・解析的に検討され、ある程度明らかになっている。

② 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方法としなければならない。空気注入時に発生し得る地盤および構造物の変状メカニズムの解明が必要である。

③ 施工機械や空気注入機器は民間会社等で開発が進められている。

(2) 施工管理のための地盤飽和度を簡易に計測する技術

① 施工時（空気注入時）には飽和度確認のために実務的な飽和度測定法が必要である。FDR土壌水分計プローブを地盤に挿入し測定する方法、比抵抗トモグラフィーにより2次元および3次元の飽和度分布を求める方法が開発され、ほぼ実用レベルに達している。

(3) 不飽和化した地盤の耐震性能評価

① 不飽和砂質土の液状化強度は飽和度の低下と共に増加することが1970年代から報告されている。近年で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、不飽和砂の液状化強度が間隙空気

の圧縮性（飽和度、有効拘束圧、静水圧の関数）とサクシオンに依存することが明らかとなっている。今後、初期せん断を受ける不飽和砂質土の繰返し挙動などについて研究の拡充が必要である。

② 構造物直下を不飽和化する場合、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）領域の境界では間隙水圧が伝播することによる相互作用も生じる。したがって、対策効果（構造物の沈下抑制効果）の発現メカニズムを精緻な模型実験により明らかにすることが必要である。

(4) 不飽和状態の長期持続性

地下水以下の自然地盤は完全に飽和しているのに対し、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研究代表者らの調査した7カ所の現場の全てで確認された。不飽和状態の持続についての反証は今のところ報告されていないものの、そのメカニズムは明らかでない。注入された空気の存続メカニズムの解明が望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、上述の課題の内、検討が特に必要な次の項目について研究を行う。すなわち、

① 効率的に不飽和化する技術として、空気注入時に発生し得る地盤および構造物の変状メカニズムの解明し、合理的な注入方法を明らかにする。

② 不飽和化した地盤の耐震性能評価について、初期せん断を受ける不飽和砂の繰返しせん断試験を行うと共に、水平地盤及び構造物直下を部分的に不飽和化した地盤の地震時挙動と対策効果を詳細に調べる。

③ 地盤に封入され残留した気泡は注入直後を除き浮力や透水力による移動することはなく、飽和度の長期的変化は地下水への溶解や生物による消費などの化学・生物現象に支配されていると考えられる。そこで、不飽和領域での酸素、窒素の収支を室内実験および現場実験に調べ、不飽和化された地下水位以下の土中の気体存続メカニズムに資する知見を得る。

④ 不飽和化による液状化対策工法設計法を

提案する。目標とする施工コストは基礎津港
 臍物直下地盤を対象とした既存工法の1/10
 程度以下である。

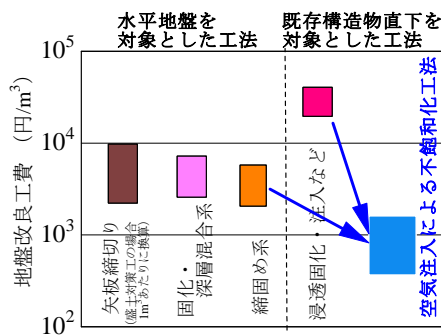
3. 研究の方法

(1) 空気注入による地盤および構造物の変状
 は、空気注入中の地盤内空気圧と浮力により
 土の骨格構造が攪乱されることによって発
 生するものと考えられる。ここでは、この現
 象を実験と数値解析によって解明する。

空気の注入は、少なくとも注入地点での静
 水圧と土の空気侵入圧(AEV)以上の空気圧を
 与えなければならない。小型の重力場模型で
 は、土被り圧が小さいため、空気注入圧が相
 対的に大きくなる。そのため実験では、土の
 自重効果を正確に再現するものでなくては
 ならず、遠心模型実験が特に有効である。遠
 心場において水平地盤および構造物を有す
 る地盤に空気を注入し、その際の水圧分布、
 飽和度分布を測定すると共に、注入前後に地
 盤の数地点においてコーン貫入試験を行い、
 貫入抵抗の変化から地盤のゆるみ領域を特
 定する。

また、数値解析は水-空気の二相流解析を
 行い、特に地盤中の水圧と空気圧分布の予測
 を行う。解析から求まる水圧・空気圧から空
 気注入中の地盤内の有効応力分布を算定し、
 有効応力分布と実験でのゆるみ領域を比較
 検討する。

(2) 部分的に飽和した地盤の地震時挙動を遠



心模型実験によって調べる。実験は始めに水
 平地盤 (構造物無し) について行い、不飽和
 領域の幅と飽和度を変えて加振実験を行い、
 飽和及び不飽和領域の水圧分布を詳細に観
 測することにより、三軸試験で得られている
 液状化強度との対応関係及び飽和-不飽和
 境界領域での水圧の相互作用を解明する。続
 いて、地盤に直接基礎を設置した模型及び護
 岸模型を設置した模型に対し、不飽和領域
 (液状化対策領域) の幅を変化させて加振実
 験を行い、対策メカニズムと対策効果を解明
 する。

(3) 状態の長期持続メカニズム

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、室内実験、現場実験および現場調査
 によって解明することを目指す。数メートル
 角の領域に空気を注入して地盤を不飽和化
 し領域内の飽和度と領域周辺のボーリング
 孔で地下水温度と流速を観測し地下水の成
 分分析を継続的に行う。

(4) 得られた研究成果および既往の研究成果
 をとりまとめて設計法を提案する。

4. 研究成果

(1) 空気注入時の地盤および構造物の変状メ
 カニズムの解明と合理的な注入方法

遠心模型実験装置を用いて水平地盤に空
 気を注入し、その際の水圧分布、飽和度分布
 を測定することにより、空気注入中の水圧、
 サクション、飽和度の地盤内分布と注入圧の
 関係を明らかにした。また注入前後に地盤表
 面沈下量の横断分布を2軸貫入装置を用いて
 連続的に測定し、数地点においてコーン貫入
 試験を行うことにより、貫入抵抗の変化から
 地盤のゆるみ領域を特定した。また、水-空
 気の二相流解析を行い、特に地盤中の水圧と
 空気圧分布の予測を行った。以上より、次の
 ことが明らかとなった。すなわち、

- ・注入空気圧が静水圧+10kPa 程度までの範囲
 では、空気注入中の地盤内のサクション編著
 句方向にほぼ一定である。
- ・サクションが有効度被り圧に近くなった地
 点から地盤がゆるみ始める。
- ・二相流解析によって地盤内のサクションを
 シミュレートできる。

(2) 不飽和化による液状化対策効果の発現メ
 カニズム

部分的に不飽和化した地盤の動的遠心模
 型実験を行い、飽和-不飽和の境界領域での
 水圧相互作用をある程度解明した。境界領域
 における水圧相互作用への影響要因は、透水
 係数、地震継続時間、液状化した飽和領域砂
 の体積圧縮係数、不飽和領域の間隙の圧縮性
 (飽和度、全応力)、飽和領域の幅であると
 考えられ、これらの影響要因のうち、不飽和
 領域での体積圧縮による吸水量を変化させ
 た実験を行った。その結果、飽和度 90%で幅
 が 2m の不飽和領域の存在により、周辺の不
 飽和領域内のある程度範囲で液状化強度が
 増加することがわかった。

続いて構造物の液状化対策法としての有
 効性を検証すると共に適切な対策範囲につ
 いての知見を得るための液状化地盤上の盛
 土の遠心模型実験を行った。未改良地盤 (飽
 和地盤) と対策範囲を変えた対策地盤 (部分
 的に不飽和領域を設けた地盤) のケースにつ
 いて行った。実験では、地盤の飽和度の制
 御が極めて重要であるため、模型地盤の飽
 和度の制御法と高精度の測定法 (0.1%) を用
 いて初期条件の明確な実験を行った。盛土直下を

不飽和化することにより、盛土底面の沈下量は約7割低減し大きな効果が確認された。

(3) 状態の長期持続メカニズム

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解明に資するデータを得ることを目的に、数メートル角の領域に空気を注入して地盤を不飽和化し領域内の飽和度と領域周辺のボーリング孔で地下水温度と流速を観測し地下水の成分分析を継続的に行った。現場は海岸付近の沖積地盤で、動水勾配は0.001のオーダーで地下水の流れは極めて遅く、また地下水位下2m以深では、間隙水のDOはほぼゼロと還元状態にあることがわかった。

(4) 得られた研究成果および既往の研究成果を設計法としてとりまとめ、「Air-Des工法設計施工マニュアル」として発表した。

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7件)

① Mitsu Okamura 他2名, Seismic stability of embankments subjected to pre-deformation due to foundation consolidation, *Soils and Foundations*, 査読有, Vol. 53, No. 1, 2013, 11-22
doi.org/10.1016/j.sandf.2012.07.015

② Hideaki Yasuhara, Mitsu Okamura 他2名, Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation, *Soils and Foundations*, 査読有, Vol. 52, No. 3, 2012, 539-549
doi.org/10.1016/j.sandf.2012.05.011

③ Mitsu Okamura, Hideaki Yasuhara 他6名, In-Situ Desaturation Test by Air Injection and Its Evaluation through Field Monitoring and Multiphase Flow Simulation, *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING, ASCE*, 査読有, Vol. 137, No. 6, 2011, 643-652

④ M. Okamura and S. Tamamura, Seismic stability of embankment on soft soil deposit, *Int. J. Physical Modelling in Geotechnics*, 査読有, Vol. 11, 2011, 1-8

⑤ M. Okamura and T. Inoue, Preparation of fully saturated model ground, *Proc. Int. Conf. Physical Modelling in Geotechnics*, 査読有, Vol. 1, 2010, 147-152

[学会発表] (計10件)

① M. Okamura, In-Situ Air Injection as a Liquefaction Countermeasure, *Proceedings of the International Geotechnical Symposium*, July 27, 2011, ハバロフスク, ロシア

② T. Okamoto and M. Okamura, Centrifuge Tests on Effects of Soil Desaturation as a Liquefaction Countermeasure on Embankment Settlement, *Proceedings of the International Geotechnical Symposium*, July 27, 2011, ハバロフスク, ロシア

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 空気注入による地盤の飽和度の計測方法

発明者: 神宮司元治, 岡村未対, 西垣誠, 武林昌哉, 武藤雅俊, 藤井直, 今里武彦

番号: P2007-175

出願年月日: 平成19年11月12日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.cee.ehime-u.ac.jp/~gm/Air-des.html>

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・准教授

研究者番号: 70432797

(3) 連携研究者 なし