

平成 22 年 5 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19560559  
 研究課題名（和文）住宅基礎の地盤を対象とした経済的で新しい液状化対策の開発  
 研究課題名（英文）Development of advanced and economical countermeasure against liquefaction for foundations of houses

研究代表者  
 三辻 和弥（MITSUJI KAZUYA）  
 東北大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：90292250

研究成果の概要（和文）：飽和地盤中に気泡を注入して地盤を不飽和化する新しい地盤改良工法（気泡注入工法）を開発するための基本的な検討を主に数値解析を中心として行った。1次元有効応力解析により、飽和砂でモデル化した液状化層を空気注入により不飽和化した場合の有効性を議論した。また、杭への影響、既往の地盤改良工法との比較を行った。空気注入による地盤の動的特性コントロールは施工精度の影響を受けるため、不飽和の度合いを表す飽和度の空間分布の変動を考慮して確率的な解析を行った。

研究成果の概要（英文）：The advantage of utilizing partially saturated sand by “air-injection technique” for liquefaction countermeasure using the numerical analyses has been examined. One-dimensional effective stress analysis was carried out for liquefiable ground and improved ground by “air-injection technique”. Numerical analysis for pile response, comparison to the case of the existing soil improvement and investigation of the effect of the spatial fluctuation of the degree of saturation were also conducted. The results show the effectiveness of the proposed technique. Experimental study is needed in the further development.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：建築構造・材料 地盤工学 防災 減災 耐震

## 1. 研究開始当初の背景

大都市沿岸部の埋立地に建つ大規模構造物などには液状化対策が施されるが、一般住宅の場合、コストのかかる地盤の液状化対策は

その重要性は認識されつつも十分に行われないことが多い。しかし新潟中越地震など近年の地震においても、田畑や旧河川を造成した軟弱地盤に相当する住宅地では一般住宅

の液状化被害が見られ、住宅基礎の地盤に対して簡易で経済的な液状化対策の開発が望まれている。

表層地盤の地下水位以下の地層は土粒子の間隙が水で満たされた飽和地盤であり、液状化強度が低い状態となっている。しかし土粒子の間隙が水で完全に満たされず、空気などの気体が混入した不飽和砂の場合は飽和度70%で液状化強度が約3倍にまで増加するという実験結果が報告されている。これは例えば、地層中の水を大規模に排水しなくても、飽和砂層に空気を注入し飽和度を低下させることで、液状化対策が可能になることを意味する。

地盤改良や杭基礎・連続地中壁などの耐震対策を施した基礎構造の採用は大規模構造物や重要構造物では可能であるが、一般住宅では経済的には困難である。従って、空気を地盤中に注入することで液状化対策が可能となれば、工法の簡素化のみならず工事費用の大幅な削減にもつながり、一般住宅の耐震化に大きく寄与するものと期待できる。また工事の簡便さと経済性を考慮すると、一般住宅基礎地盤の液状化対策への適用が最も社会的・工学的に有用であると思われる。

地盤の不飽和化による液状化対策の有効性は近年、国内の他の研究者らによっても提案されている。また海外でもまだ不飽和化による液状化対策に取り組んだ研究例はほとんど見られない。

## 2. 研究の目的

前述のような背景に鑑みて、本研究では従来、あまり有効な対策の採られてこなかった一般住宅基礎の地盤を対象として、経済的で新しい液状化対策法を開発し、一般住宅の地震時液状化被害を軽減することを目的とする。空気注入により表層地盤を不飽和化し、液状化強度を増加させる「気泡注入工法」を提案する。既往の研究で得られている実験データを組み合わせることで不飽和砂質地盤の動的解析モデルを作成し、主に数値解析によって、砂質地盤の不飽和化が液状化対策として有効であることの検討を行う。

## 3. 研究の方法

1次元有効応力解析により、飽和砂層を含む液状化地盤の地震応答解析モデルを作成する。液状化する可能性の高い飽和層を不飽和化することによって液状化対策したと仮定した、対策前後の地震応答特性を比較して、不飽和化による液状化対策の有効性を検討する。主な検討項目として、1) 自由地盤での応答の違い、2) 単杭の地震時水平応力への影響、3) 締固工法など、従来の改良工法との比較、4) 飽和度の空間的な分布特性の影響、について解析を行った。

解析を行うにあたり、まず始めに、既往の実験結果に基づき、不飽和砂質地盤の動的解析モデルを作成する。図1に示すYoshimi et alによる不飽和砂の液状化強度特性を利用する。Yoshimi et alは飽和度を70%に低下させることで飽和砂の場合に比べて液状化強度は約3倍にまで高くなることを指摘している。

有効応力解析にはYUSAYUSA-2を用いた。パラメータの検討にはSIMDDL-2を用いている。解析では、飽和度100%の飽和砂層を飽和度80%程度にまで低下させると仮定し、液状化強度が飽和砂層の2倍にまで上昇すると仮定した。液状化強度は飽和砂層で0.18であったものが不飽和化により0.36にまで上昇するとした。不飽和化による比較・検討を行うために、図2に示すような地盤モデルを作成した。ここで、Case1はSand1, Sand2が, Case2, Case3ではSand1の層のみが不飽和化されると仮定している。入力地震動としてはBCJ-L2波を最大加速度200galで基準化したものを用いた。

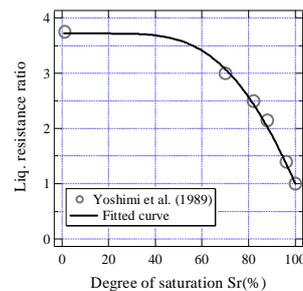


図1. 飽和度と液状化強度の関係(Yoshimi et al.)

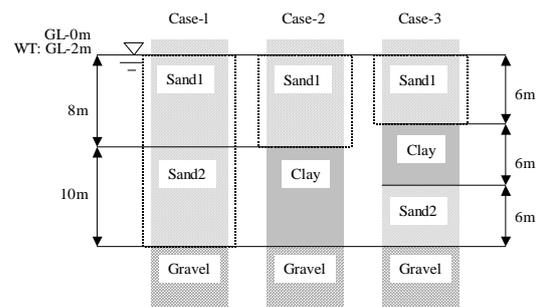


図2. 地盤モデル

## 4. 研究成果

解析結果の一例を図3に示す。Case1の結果より、GL-15mの位置では未対策では液状化が生じてこの層に大きなせん断ひずみが生じているが、不飽和化された層では液状化の発生が抑えられ、応力-ひずみ関係は非線形性状を呈しているが、せん断ひずみの値は抑えられている。これは図4の過剰間隙水圧上昇の様子にも現れている。

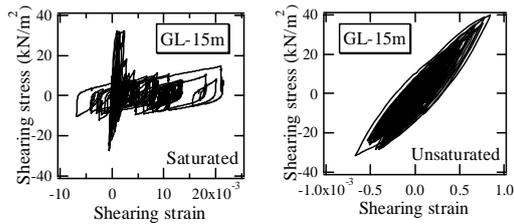


図 3. 未対策飽和層 (左) と不飽和化層 (右) の応力 - ひずみ関係

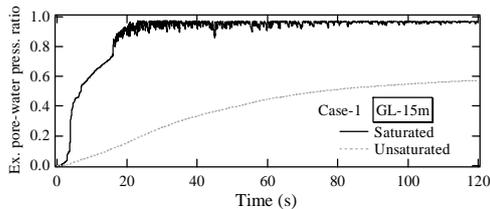


図 4. 過剰間隙水圧の上昇の様子

引き続き、同じ地盤モデルを用いて、飽和砂層を不飽和化した場合の単杭の地震時水平応力に関する検討を行った。単杭の非線形特性を表すM- $\phi$ 曲線は図5に示すようなモデルを用いた。解析には設計でよく用いられる応答変位法を用いた。

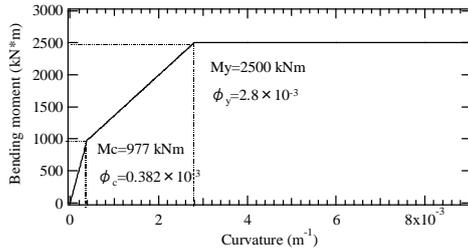


図 5. 杭のM- $\phi$ 曲線

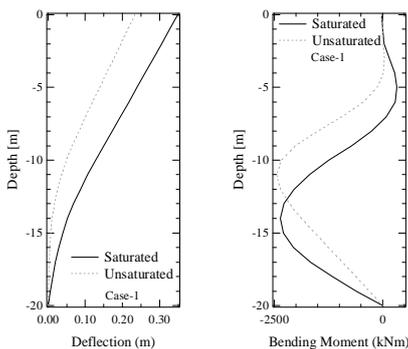


図 6. 杭の応答: 変位 (左), 曲げモーメント (右)

図6の結果より、杭の地震時応答についても地盤不飽和化による効果が見られた。杭の変位については地震時に大きな問題となる杭頭部の変位が大きく低減されている。杭に生じる曲げモーメントの深さ方向分布につ

いては、最大値の値そのものは変わらないが、最大値が発生する深さ位置がやや上方に移動した。この解析ケースでは不飽和化しても完全に液状化を抑制してはおらず、そのため杭応力の最大値は降伏時の応力に達したものと考えられる。

次に、既存の地盤改良工法との比較を行うため、代表的な地盤改良工法として、締固め工法を採用し、気泡注入によって地盤を不飽和化する地盤改良工法の場合との比較を行った。比較の対象として未対策の場合も含め、未対策、気泡注入、締固めのそれぞれの工法の特徴を表1に整理する。

表 1. 各工法の特徴

	未対策	気泡注入	締固め
せん断剛性	低い	低い	高い
液状化強度	低い	高い	高い

気泡注入による不飽和化を想定した場合はYoshimi et alに基づき、不飽和化によって液状化強度が最大で約2倍の0.36まで増加すると仮定した。またこの時の飽和度は $S_r=88\%$ と推定した。液状化発生に関するパラメータはSimmd1-2を用いて検討し、目標の液状化強度に適合するように求めた。また締固め工法を想定した場合は液状化層のN値が15程度まで改善されるものと仮定して、せん断剛性を求め、液状化強度は改善後のN値を用いて単純せん断状態で0.28と設定した。入力地震動には日本建築センターBCJ-L2波およびKobePI波(NS成分;GL-32m)をGL-20mの位置で最大加速度を200galに規準化したものを用いた。

図7, 図8に地盤深さ方向の最大値応答分布を示す。BCJ-L2波入力では未対策の場合には気泡注入、締固め工法の地盤改良を施した場合に比べて広い範囲で液状化が発生するため、地表面での最大加速度は大きく低減されている。最大速度についてはいずれの場合もほとんど差がない。逆に最大変位は地盤改良を施した場合の方が液状化発生が抑制されたために、2割程度低減されている。最大せん断ひずみは最大変位の結果に反映されているが、液状化が発生した層で地盤改良により抑えられている。また、気泡注入と締固め工法の場合とではほぼ同程度の効果となった。ただし、BCJL2波入力では地盤改良を想定した場合でも未対策ほど激しくはないが、液状化が発生する結果となった。一方、KobePI波入力では最大加速度はBCJ-L2波の時と同様に未対策に対して、地盤改良を施した場合は大きく低減されている。最大速度にも若干の違いが見られている。また最大変位および最大せん断ひずみの様相は大きく異なっており、未対策の場合が液状化の発生を

示す大きな最大変位分布とそれを反映するせん断ひずみの発生が見られるのに対して、地盤改良を施した場合は液状化の発生を抑制しており、最大変位、最大せん断ひずみとも小さな値となっている。気泡注入と締固め工法では若干の差があるが、ほぼ同程度に液状化の発生を抑制したと言える。

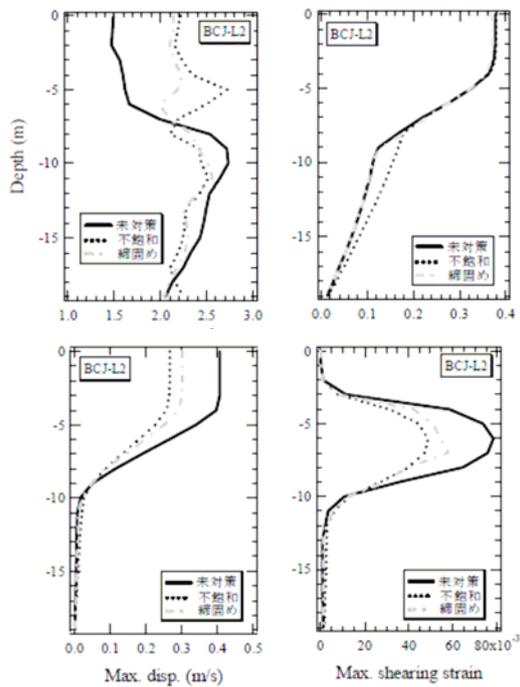


図 7. 有効応力解析による地盤の深さ方向の最大応答分布 (BCJ-L2 波)

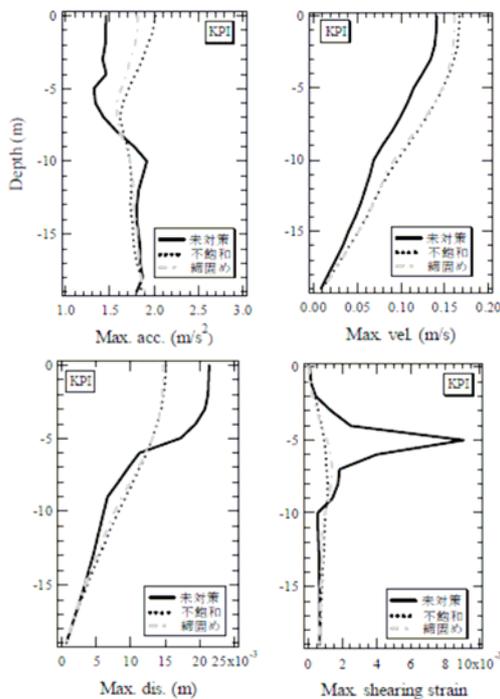


図 8. 有効応力解析による地盤の深さ方向の最大応答分布 (KPI 波)

気泡は地盤中に均質に注入できるとは限らないため、飽和度の空間分布を考慮した有効応力解析を行った。気泡注入工法について、飽和度の空間分布を乱数を用いて確率モデルとして作成し、それを液状化強度の空間分布に変換した。空間分布モデルは液状化強度で 0.18 を最小とし、最大 0.36 までランダムに分布するものと仮定した。100 回の試行に対する最大応答の平均値を確定モデルの結果とともに図 9 に示す。この分布モデルでは飽和度の空間分布の影響は最大加速度分布にややその影響が見られるが、平均的な特性としては最大変位分布にはほとんど影響を与えていない。

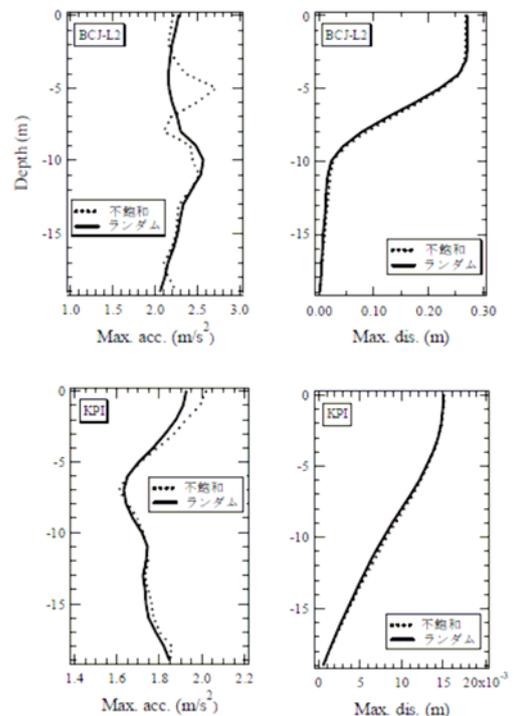


図 9. 飽和度の空間分布による影響

気泡注入による飽和砂質地盤の不飽和化による液状化対策の可能性について検討した。1次元有効応力解析の結果からは、液状化対策工法として十分、有効な対策となりえることが示された。また、杭応答についてもその有効性を示すことができた。飽和度の空間分布のばらつきが地盤全体の応答に与える影響もそれほど大きくないと考えられる。また、既存の液状化対策工法として締固め工法を想定した解析結果とも比較を行ったが、締固め高王に匹敵する性能を得ることが期待できる。ただし、気泡注入による不飽和化工法は強度の上昇をもたらすものの、現在のところ、靱性については何ら保証するものではない。したがって、今後は強度だけでなく靱性についても効果をもたらす工夫が必要である。また本研究期間内では実験的な

検討を十分に行うことができなかつたため、今後、実証的な研究を行うには、実際の建設現場規模、またはそれに近い規模での実験・観測などを実施する必要があると考える。

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 2 件)

1. Mitsuji Kazuya, Numerical Simulations for Development of Liquefaction Countermeasures by Use of Partially Saturated Sand, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 04-02-0021, 2008, アブストラクト査読有、Beijing, China
2. 三辻和弥、不飽和地盤の地震応答、シンポジウム「不均質・混合体の数理解析手法と工学への応用」、pp. 50-60, 2007, 査読無、日本建築学会

[学会発表] (計 2 件)

1. 三辻和弥、気泡注入による不飽和化を想定した改良地盤の地震応答解析、第 43 回地盤工学研究発表会、pp. 1821-1822、2008 年 7 月 10 日 広島国際会議場
2. 三辻和弥、地盤の不飽和化による杭の地震時水平力の低減、第 42 回地盤工学研究発表会、pp. 1261-1262、2007 年 7 月 5 日 名古屋国際会議場

[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

三辻 和弥 (MITSUJI KAZUYA)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90292250

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：