

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 3 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760444

研究課題名（和文） 地盤中の正圧下における飽和度上昇プロセスの解明

研究課題名（英文） Investigation of saturation rise process in the aquifer under the positive pressure

研究代表者

小松 満 (KOMATSU MITSURU)

岡山大学・廃棄物マネジメント研究センター・准教授

研究者番号：50325081

研究成果の概要（和文）：地盤の液状化対策や気体の地下貯留，あるいは大深度地下空間開発において，飽和地盤を一旦不飽和化させた後，再度飽和状態に戻る過程での評価が必要となっているが，必ずしもこれらの現象が明らかになっていないのが現状である。そこで，本研究では地盤中の正圧下における飽和度上昇プロセスにおけるメカニズムを探求するために，主に室内での要素試験を実施し，飽和過程への移行における不飽和モデルについて検証した。

研究成果の概要（英文）：In liquefaction countermeasure of the ground and underground storage of the gas or deep underground area development, after the saturated ground is once unsaturated, though the evaluation by the process which returns to the saturation state again is required, it is present state that these phenomena are not always clarified. Then, in this study, element laboratory test was mainly carried out in order to research the mechanism in saturation ratio rise process in the ground under positive pressure, and it verified the unsaturated model in the conversion to the saturation process.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：地盤環境工学，地下水，不飽和，飽和度，間隙空気圧，間隙水圧，気体注入

## 1. 研究開始当初の背景

地盤の液状化対策に対して，近年，地盤の不飽和化により液状化強度を上昇させる試みとして，地下水位を低下させる方法や空気注入による方法が提案されている。既にこれら

の手法の一部は現場での適用試験が実施されているものの，不飽和化に対する技術開発に主眼を置いてきたため，一旦不飽和化した地盤の持続性に対する性能評価が課題となっている。また，液状化対策に限らず，河川堤防

等の土構造物の安定性に関して、特に地震発生時に内部に残留した空気が移動し、地表面から噴出することで生じる破壊現象（エアーブロー）が指摘されている。これらは、土・水・空気の3相を考慮して変形から破壊までの一連のプロセスを解明する必要がある。そこで、地盤中の間隙空気が間隙水圧に応じてどのように圧縮し消散していくのかを評価することはこれらの現象を解明する上で非常に重要な項目である。さらに、二酸化炭素の排出削減問題に対する解決策として期待されている手法の一つに地中貯留技術があるが、浅層の帯水層に気体として圧入する手法が提案されている。この手法においても、注入後の二酸化炭素の長期安定性が課題となっており、液状化対策工法における間隙空気の圧縮、消散挙動と類似した挙動の把握が必要になっている。

一方、大深度地下空間開発では、建設完了後の再冠水に伴い、大気圧に近い条件下にあった施設は再び加圧条件下に置かれることになる。施設の長期的な安全性を評価する上で再冠水後の地下水環境（地下水の流速や流量、地球化学特性）の変化を正確に推測することは重要であり、再冠水直前の不飽和領域は、再冠水後の挙動予測において欠かすことのできない初期条件となる。再冠水による水圧の上昇は自然界に見られる地下水面の季節変動などによる水圧変化と比較して短時間で起こるため、再冠水後の不飽和領域の飽和への移行過程は特異な挙動を示すことが予想される。そこで、発生した不飽和領域をより正確に把握し、再冠水時における飽和状態への移行プロセスを評価することが必要となる。具体的には、空気の残留、圧縮および、圧縮に起因する移動・溶存が考えられる。ここでの空気の移動は地表に向かうことも考えられることから、地盤—大気相互作用の特性を把握する

ことが必要である。しかし、このような動的な現象はこれまであまり着目されておらず、未解明な部分が多い。

## 2. 研究の目的

上述の現状を鑑み、本研究では地盤中の正圧下における飽和度上昇プロセスにおけるメカニズムを探求するために、主として下記の2点を研究目的とした。

- (1) 飽和度上昇過程における気体の圧縮と残留メカニズムの解明
- (2) 正圧側の水分保持特性を考慮した不飽和モデルの構築

具体的には室内での要素試験として、主に一次元鉛直カラム試験を実施するとともに、飽和過程への移行における不飽和モデルの構築に取り組んだ。

## 3. 研究の方法

- (1) 高飽和度領域における水分量測定装置の適用性の高度化

近年、地盤内の水分量を測定する装置として誘電率を測定する手法が主流であるが、市販の装置の中には、高飽和度領域で測定が困難なものが多い。これは、水分量に対する感度（キャリブレーションの精度）が低下することや高い誘電率によって値がドリフトしたりする現象がある。本研究では、高飽和度領域での水分量を高精度でモニタリングする必要があることから、これまで開発してきたFDR装置（高周波領域のスペクトル特性から誘電率を測定する方法）に対する適用性の検討を行った。具体的には、センサー形状の検討と、測定分解能の検証、新たなキャリブレーション曲線の作成であり、また、誘電率を算出するための波形解析にフーリエ変換を応用した

手法を構築し、これらを総合して精度の向上を試みた。

#### (2) 不飽和化地盤に対する飽和度上昇試験

鉛直一次元カラムを用いて、気体の注入過程に対する注入圧と飽和度との関係、注入後の飽和度の上昇挙動（気体の圧縮量と消散量）の経時変化を測定した。

#### (3) 再冠水後の水圧動的作用による飽和度上昇試験

再冠水による水圧の上昇は自然界に見られる地下水面の季節変動などによる水圧変化と比較して短時間で起こるが、再冠水後に残留した気泡は長期的に動的な影響を受けるものと考えられる。しかし、大気圧変動や潮汐の影響による地下水圧が動的に作用した場合の現象についてはあまり着目されていない。そこで、砂試料を用いた一次元鉛直カラムを用いて、再冠水後の水圧動的作用試験を実施した。具体的には、飽和状態から一度排水させた供試体に短時間で注水することにより、再冠直後を想定した不飽和状態を作成し、これに動的及び静的な水圧を作用させた場合における供試体内の飽和度変化を比較することでその影響について考察した。

### 4. 研究成果

#### (1) 高飽和度領域における水分量測定装置の適用性の高度化

FDR法の現場測定時において、ケーブル長の影響等により、測定波形にノイズが混入する場合がある。この場合、現状の波形分析では谷の深さを自動的に探索するため、正確なピークを抽出できない。また、一つ一つの波形について手動分析を行う方法もあるが、これは手間が掛かり、また客観性にも欠ける問題がある。そこで、新たなデータ解析方法としてフーリエ解析による方法を検討した。こ

こで用いたフーリエ解析方法は、具体的には、FDR法で得られたデータに対してフーリエ解析値の絶対値をとってパワースペクトルに分解し、ピークとなる周波数を選定し、その逆数から測定周波数を求める手法である。フーリエ解析によって得られたパワースペクトルの一例を図1に示す。この手法を用いて、実際の空気注入による液状化対策工法の検証実験現場で測定されたデータに適用を試みた結果を図2に示す。ここでは、自動測定値、波形手動分析値も併せて示している。結果として、波形フーリエ解析値の変化は、空気注入時の飽和度の減少過程に対して安定した値が求められることが明らかとなった。

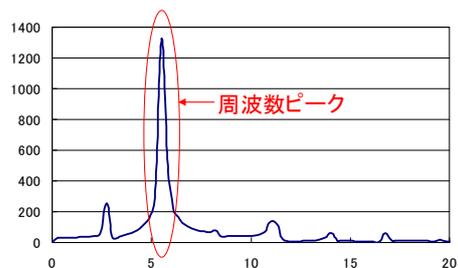


図1 パワースペクトルグラフ

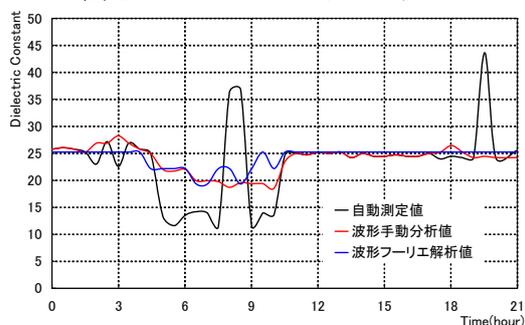


図2 現場測定結果に対する波形解析結果

#### (2) 不飽和化地盤に対する飽和度上昇試験

気体注入に伴う不飽和領域の発生とその挙動を確認するため、鉛直一次元カラムを用いた注入試験を実施した。試験は異なる動水勾配に対して空気と二酸化炭素をそれぞれ注入し、液状化防止のための帯水層への空気注入や二酸化炭素貯留の可能性について考察した。用いた鉛直一次元カラム試験装置の

概要を図3に示す。直径 $\phi$ 5.9cm、高さ80cmのカラムに飽和供試体を作成し、5つの計測点に間隙空気圧、間隙水圧、体積含水率を測定するセンサーを設置した。カラム内の水の移動は鉛直下向きであり、動水勾配はカラム上下に接続した定水位タンクの高さを制御することで設定した。

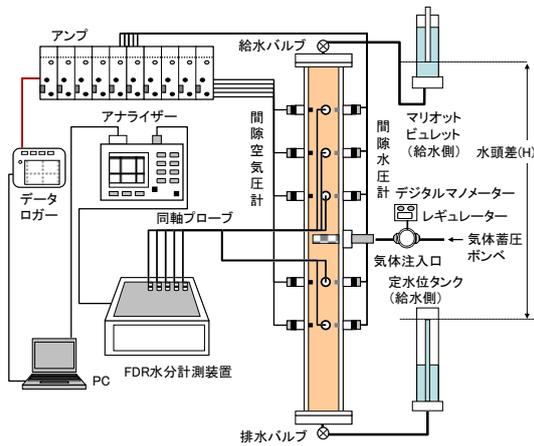


図3 鉛直一次元カラム試験装置概念図

各注入条件の試験結果から不飽和領域の挙動を注入終了直前と計測終了時の状態を比較した模式図を図4に示す。動水勾配が0の時、不飽和領域は上方に広がっていき、ある境界をもって拡大が止まった。液相と気相の境界において気体圧と水圧の差が毛管圧とバランスするまで不飽和領域が拡大すると考えると、間隙空気圧と間隙水圧の差が空気侵入値よりも大きな値を示した計測点まで気泡が注入されたと理解することができる。一方、動水勾配が1のとき、不飽和領域が下方に広がっていった現象は上述の考えのみでは説明できない。つまり、注入口下方に位置する計測点の値は、水圧と気体圧がほぼ等しいため、毛管力の値を考慮すると不飽和領域が広がるには別の要因が必要とされる。そこで、その要素を間隙水の流れに伴う気泡の運動に似た現象であると仮定し、気泡運動について考察した。

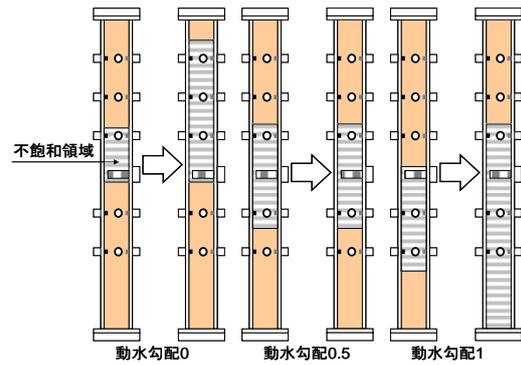


図4 動水勾配の影響による不飽和領域移動の模式図

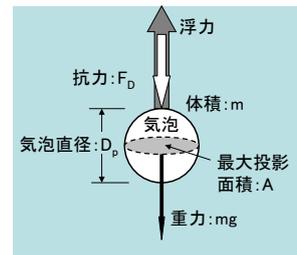


図5 気泡の運動概念図

気体の貯留メカニズムにおいて、注入した気体は間隙水を押し出す形で、土の間隙の中に侵入していく。この時は注入口から供給される気体の圧力によって不飽和領域の気相の圧力は注入圧と等しくなる。しかし、注入を止めると、不飽和領域は拡大を続けると同時に圧力が下がり、周辺の間隙水圧の影響を受け、拡大が止まると考えられる。土粒子の骨格が破壊されなければ、間隙に入った気体は、大小様々な気泡の集合体と考えることができる。これが気泡運動と同じであると仮定すると、その挙動は図5で表され、水と気体の密度差で不飽和領域は上昇する。動水勾配が1のケースにおいて気泡の運動を考えると、試験に用いた豊浦砂の空気侵入値である約35cmから推定される代表間隙径を用いて気泡直径を算定して気泡の上昇速度を求めると約1.3m/hとなる。対して注水流量の計測結果から求めた間隙水の実流速は約1.7m/hとなり気泡の上昇速度より速くなる。つまり、

不飽和領域が下方に広がったのは、気泡のいくつかが気泡運動により、相対的に下方に移動したことが要因であり、気体注入過程と貯留過程において空隙の全てが気泡になるわけではなく、気相の上方境界付近は気泡運動によって下方から気体が集積し、飽和度の低い領域が発生していることが判明した。

これら一連の要素試験から、飽和帯水層への気体注入によって生じる不飽和領域の挙動は、動水勾配と関係があり、その広がり方は気泡運動で説明できることを確認した。また、一次元カラムによる間隙空気圧、間隙水圧、水分量の3つのパラメータを同時に計測する試験を行うことで、不飽和領域の挙動は気体注入過程と、気体注入後の貯留過程において異なることが判明した。それら2つの過程に生じている現象を解明することで、不飽和領域の挙動や安定条件などを推定することが可能であることを示した。今後の課題としては、長期貯留の可能性を評価するために、注入した気体の地上への噴出の危険性についてもシール層の安定性と絡めて議論する必要があることを指摘した。

### (3) 再冠水後の水圧動的作用による飽和度上昇試験

一次元鉛直カラム試験装置の概略図を図6に示す。コンプレッサーからの圧縮空気を変動水圧条件では1次圧をさらにファンクションジェネレーターで圧力と変動周期を制御する電空レギュレーターにより加圧タンクに2次圧を作用させ、一定水圧条件では1次圧をそのまま加圧タンクに作用させる構造となっている。なお、一定水圧は20kPaとし、変動水圧は変動幅 20kPa ± 5kPa (25 ~ 15kPa)・周期 20s に設定した。試験方法としては、まず水中締固め方法により砂試料を詰めて飽和供試体を作製した後、限界毛管高さ

と同等の水位差で一度注水タンクに排水させた後、注水タンクに加圧した上で再度供試体内に注水させた。供試体上部から通水を確認した後、供試体上部に加圧タンクを接続して、供試体上部から水圧を動的あるいは静的に作用させた。なお、初期値を可能な限り近くさせるために、豊浦砂を対象に2つのカラムを用意し、5日間の変動水圧及び一定水圧試験を実施した後で再排水を行い(Case-A)、再度再冠水を実施して、変動水圧と一定水圧を入れ替えて飽和度上昇の過程を計測した(Case-B)。

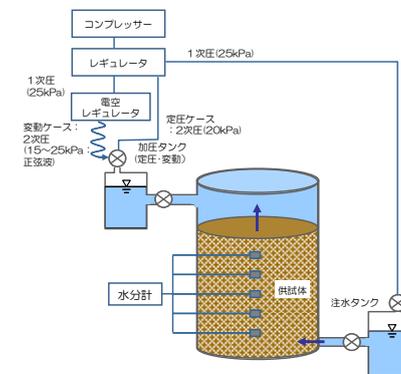


図6 一次元鉛直カラム試験装置概略図

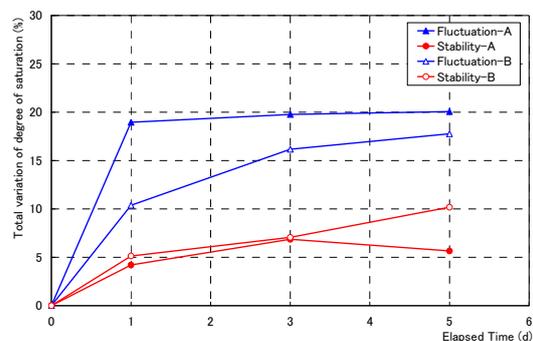


図7 飽和度上昇量の比較 (豊浦砂)

試験結果として、図7に飽和度上昇量の比較を示す。飽和度上昇量はいずれも変動水圧の方が高く、5日後の変化を比較すると2倍程度の差となった。これらの試験結果から、再冠水後の飽和度上昇量について、今回の条件下においては再冠水直後の飽和度の値は

さほど支配的ではなく、ほぼ一定の割合で上昇していくこと、変動水圧の方が2倍程度の飽和度上昇効果があることが示唆された。したがって、再冠水後の飽和移行過程を評価するにあたり、再冠水過程（浸潤過程）の不飽和特性の違いが、長期予測結果に与える影響についての評価を動的な水圧変動も含めて明らかにする必要があることが新たな課題として明らかとなった。

## 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2件）

- (1) 小松満，榊利博，飽和砂質地盤における空気侵入値の定量的評価手法に関する研究，地盤と建設，査読有，Vol. 30，No. 1，2012，39-46
- (2) 小松満，藤田知大，榊利博，浅層帯水層への気体注入及びその移動現象に関する研究，地盤と建設，査読有，Vol. 29，No. 1，2011，27-37

〔学会発表〕（計1件）

- (1) 小松満，佐藤友哉，動的な水圧作用による飽和度上昇メカニズムに関する基礎的研究，第63回土木学会中国支部研究発表会，2011年5月21日，岡山大学（岡山市）

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

- 出願状況（計0件）
- 取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cc.okayama-u.ac.jp/~mkomatsu/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小松 満 (KOMATSU MITSURU)

岡山大学・廃棄物マネジメント研究センター・准教授

研究者番号：50325081

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし