

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

A Study on Behavior of Gas Injection and Migration to Shallow Aquifer

小松 満 Mitsuru KOMATSU (岡山大学大学院環境学研究所)
 藤田知大 Chihiro FUJITA (清水建設株式会社)
 榊 利博 Toshihiro SAKAKI (コロラド鉱山大学)

節電や再生可能エネルギーに関する議論が高まる中、二酸化炭素の排出削減問題は継続して取り組むべき課題となっている。地中貯留技術 (CCS) はその解決策として期待されており、筆者らは、排出事業者の近傍における浅層の帯水層に気体として注入する手法を提案し、溶解度を用いて貯留可能量を推定する方法について確認している。今回は液状化対策としての空気注入技術への適用も踏まえて、気体の貯留及び注入条件に必要なパラメータである空気侵入値 (AEV) の測定方法について、注入帯水層とシール層のそれぞれに対する適用性を検討した。さらに、注入後の不飽和領域の挙動を気泡運動と関係付けて整理し、不飽和領域の動水勾配に伴う移動や安定条件を説明した。

キーワード：帯水層、気体注入、AEV、動水勾配

(IGC : E04)

1. はじめに

原子力発電所の被災事故により、節電や再生可能エネルギーに関する議論が高まる中、二酸化炭素の排出削減問題は継続して取り組むべき課題となっている。この問題の解決策の一つとして期待されているのが、二酸化炭素の地中貯留技術 (Carbon dioxide capture and storage : CCS 技術) である¹⁾。現在、主に技術開発が進んでいるのは、高圧力をかけて超臨界状態にした液化二酸化炭素を地下 800m 以深の地下帯水層へ注入して、安定的に貯留する方法であり、日本国内においては、地下 1100m に約 1 万トンの二酸化炭素の注入試験が行われ、注入完了後における二酸化炭素の地中挙動を把握するために、弾性波トモグラフィによるモニタリングや二酸化炭素の地下水・地盤に及ぼす化学的影響に関する調査等が実施されている²⁾。現在研究が進められている地中貯留において、回収した二酸化炭素は注入時に超臨界状態にする必要があるとともに、貯留地点までの運搬が必要となるため、新たなエネルギーと多大なコストが費やされることとなる。そこで筆者らは、二酸化炭素排出事業者のごく近傍において貯留することを念頭に置き、上部粘土層が存在する数十m程度の浅層海面下帯水層に気体として注入する手法に着目し、その基礎的な研究として、飽和状態の砂層に注入可能な二酸化炭素の量とその溶解挙動を計測するとともに、溶解度を用いた理論的な方法との整合性について検討した³⁾。

浅層に注入した二酸化炭素の存在の状態を考えると、図-1 に示すように、①土の中の間隙に残る気体の二酸化炭

素、②吸着水に溶解する二酸化炭素、③地下水に溶解する二酸化炭素、の3つの形態として理解することができる。つまり、注入量の予測にはこの3つの形態の二酸化炭素量を測定する必要がある、そのために必要な物性は、帯水層の間隙率、温度、圧力、吸着水の量である。この中で、貯留量として期待できるのは、①土の中の間隙に残る気体の二酸化炭素であり、貯留条件としては、注入対象とする帯水層上部に漏洩を防止する機能を持つシール層が存在していることが挙げられる。

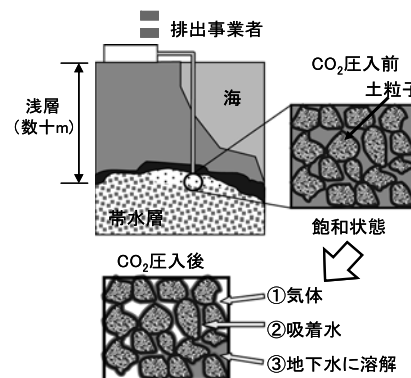


図-1 浅層における地中貯留概念図³⁾

一方、地盤に空気を注入することにより地盤を不飽和化する液状化対策工法が、低コストで既設構造物直下の対策にも適用可能な工法として提案されている⁴⁾。現地での実証実験では、地盤に直接気体の空気を注入することによって飽和度が約 85%~90%程度に低下し、地盤が不飽和化されたことが確認されている⁵⁾。

浅層における二酸化炭素の地中貯留技術と空気注入による液状化対策工法はいずれも地盤内に気体を直接注入する工法であり、共通点が多い。中でも、注入圧の設定と貯留条件に密接に関係するパラメータである空気侵入値（Air Entry Value : AEV）を評価することが重要である。しかし、砂質土や粘性土を対象にした統一した測定方法は確立されていないのが現状である。そこで、本研究では実際に岡山県内の沿岸地域の現場から採取した試料に対して種々の試験法の適用を試み、それらの測定結果を相互に比較することで結果の妥当性を議論する。また、測定した空気侵入値から気体の注入圧や発生する不飽和領域の挙動を解明し、安定的な貯留の可能性について考察を行う。

2. 空気侵入値(AEV)測定試験

土粒子が構成する間隙構造は水を保持する力、毛管圧が働く。この毛管圧は管の径が小さくなればなるほど大きい。土も間隙の構造が密になれば、同じように水を保持する力は大きくなる。そこで、図-2 に示す土中断面の間隙構造を2次元の微細管の集合体と仮定する。このように考えると、径が異なる管はそれぞれに異なる毛管圧を示す。もし、飽和している土に空気が侵入する場合、それはこの毛管モデルの一番太い管の毛管圧を超える圧力が載荷された時である。このときの圧力を AEV とし、室内での要素試験によりその値を求めることとした。

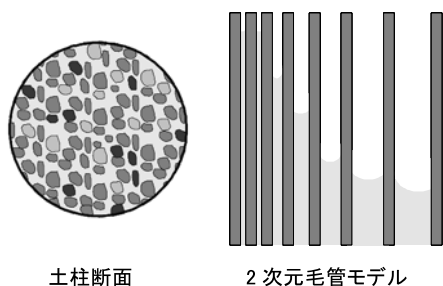


図-2 土の間隙構造と毛管モデル

空気侵入値(AEV)の室内試験による測定方法としては、①乾燥試料を詰めた一次元カラムの上端から注水することで試料内部の間隙空気圧を高め、その空気圧が飽和領域から抜け出す値を求める方法、②飽和試料に空気圧を作用させ、供試体の上下端での圧力差から求める方法、③水分特性曲線による方法が考えられる。そこで、これら3つの方法について順次適用を試み、それらの測定結果を相互に比較する。

2.1 試料の物理特性

試料は図-3 に示す岡山県水島沿岸地盤より採取されたボーリングコアから採取した礫質土とその上部のシルトであり、それぞれ水島砂、水島シルトと称する。なお、水島砂は透過粒径 2mm 以下の砂質成分を使用した。また、各試験方法の結果の比較のために豊浦砂を用いた。JIS A 1202 に従って測定した各試料の土粒子密度 (g/cm³) は豊浦砂 2.67, 水島砂 2.62, 水島シルト 2.60 であった。また、JIS A 1204 に従い測定した各試料の粒径加積曲線を図-4 に示す。

標尺	深さ GL(m)	土質名	色調	観察記事
	3.9	有機質土	赤褐色	腐食土の臭い。細粒土が多くみられる。
5	8.2	砂質土	黄褐色	細かい砂。粘土分は見られない。
10	17.1	粘性土	暗青灰色	全体にシルト分が混じる。貝殻片(二枚貝)がところどころにみられる。GL-13m~15m付近に細砂が集積している。臭いがある。
15	20	礫質土	暗青色	粒径20mm~50mm程度の礫が多い。微細砂を含む。

図-3 水島沿岸地盤の柱状概略図

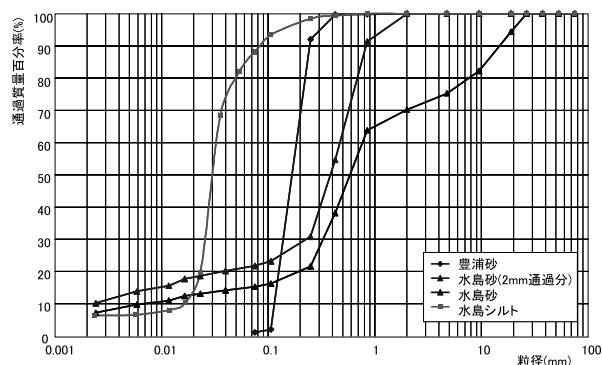


図-4 試料の粒径加積曲線

2.2 乾燥試料に対する AEV 測定試験

図-5 に示す一次元カラム測定装置を使用した。φ10cm のアクリル製のカラム下部は閉塞されており、上部より定水位で水を注入して、その時の供試体における間隙空気圧の変化を圧力センサーにより計測した。注水に伴って間隙空気圧が上昇し、最終的に浸潤前線に侵入するときの空気圧を計測することでAEVを求めることができる^{6),7)}。供試

体の作成条件を表-1に、供試体下部に設置した間隙空気圧計の測定結果を図-6に示す。この経時変化において初期の部分は供試体が飽和する過程を示していると推察されることから、閉塞された間隙空気圧が浸潤前線に侵入する時の空気圧として、最終的に安定した約50分後の値を取ると、豊浦砂は約54cm、水島砂は約29cmとなった。なお、豊浦砂において約35分後にデータが欠如している部分があるが、これは注水中断に伴うものである。結果として、上部の水深の値を空気圧の値から引いた値がAEVとなることから、豊浦砂が約34cm、水島砂が約18cmと求まった。

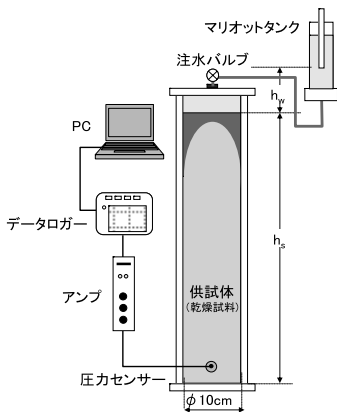


図-5 乾燥試料に対するAEV測定一次元カラム試験装置

表-1 乾燥供試体作成条件

試料名	間隙率	供試体高さ h_s (cm)	水深 h_w (cm)
豊浦砂	0.42	74.0	20.0
水島砂	0.38	74.6	10.0

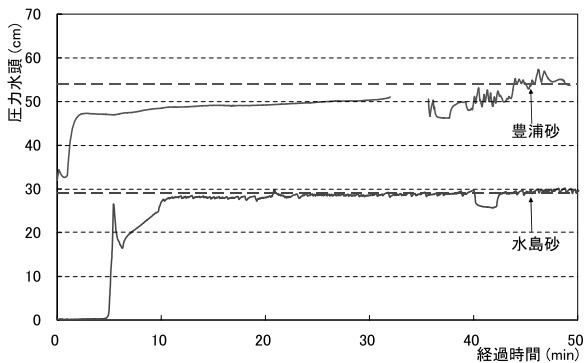


図-6 間隙空気圧の経時変化

2.3 飽和試料に対するAEV測定試験

供試体を毛管の集合体と考え、荷重空気圧、間隙水圧、毛管圧、静水圧の関係は式(1)及び図-7のように表すことができる。

$$P_2 = P_1 + \frac{mg}{A} - P_c \quad (1)$$

ここで、 P_1 : 荷重空気圧 (kPa)、 P_2 : 水圧 (kPa)、 P_c : 毛管圧 (kPa)、 mg : 水に働く重力 (N)、 A : 供試体の断面積 (m) であ

る。毛管圧 P_c は AEV と等しいので、AEV を求めるには、式 (1) を P_c について解くことで求められる。そこで、 P_1 と P_2 は供試体上部及び下部の圧力センサーで計測し、 mg は飽和供試体の高さ と下部圧力センサーの計測点の差から求めた。なお、結果は水頭換算 (cm) して表示した。

この方法を基に作成した試験装置の概略を図-8に示す。 $\phi 10\text{cm}$ のアクリル製のカラム内に飽和させた供試体を作成した。なお、砂試料は水中落下、粘土試料は圧密による方法とした。供試体の下部は、ろ紙を介して水で満たされた土台に接続されている。カラムは密閉されており、上部からコンプレッサーによって空気圧を荷重できる。非排水条件で段階的に空気圧を荷重させていき、カラム下部の水槽の水圧と上部の荷重空気圧を圧力センサーで測定し、その結果から AEV を算出した。

まず、表-2 の条件で作成した豊浦砂、水島砂について、約 1 時間毎に 20kPa ずつ上昇させた荷重空気圧 (P_1) と供試体下端の水圧 (P_2) の結果を基に求められた毛管圧 (P_c) の経時変化を図-9 に示す。豊浦砂、水島砂ともに段階的に空気圧を荷重しても、荷重空気圧と水圧の差はある一定の値を示していることがわかる。この値は毛管圧 (P_c) すなわち AEV であり、豊浦砂が約 36cm、水島砂が約 17cm と求まった。なお、水島砂において、荷重圧力上昇時に一時的に大きな圧力差を生じているが、これは供試体上下圧力センサーのタイムラグであり、圧力伝播の時間的な遅れを示している。その要因としては、豊浦砂に比べて水島砂の細粒子が多いことが挙げられる。

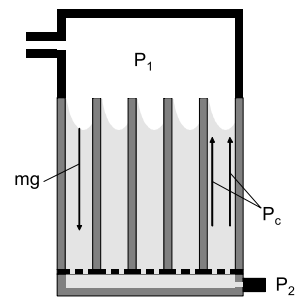


図-7 試験装置に働く力

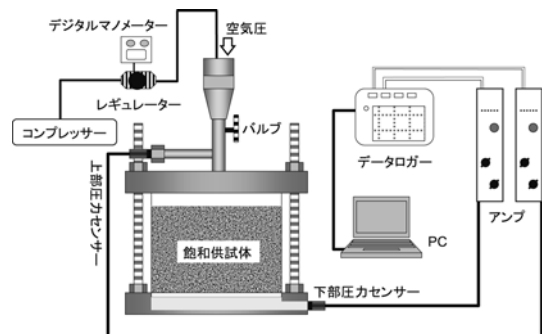


図-8 飽和試料に対するAEV測定試験装置

表-2 飽和供試体作成条件

試料名	間隙率	供試体高さ (cm)
豊浦砂	0.44	6.20
水島砂	0.37	5.38

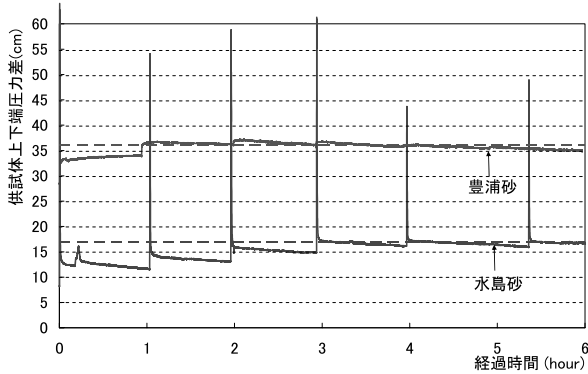


図-9 供試体上下端圧力差の経時変化 (砂質試料)

次に、同様の試験を水島シルトに対して実施した。一週間圧密させて所定の間隙比に調整した飽和供試体に対して実施した結果を表-3 に示す。供試体の上部から 20kPa, 40kPa, 60kPa, 80kPa, 90kPa, 100kPa の順に空気圧を载荷した際の空気圧(P_1)と供試体下端の水圧(P_2)の結果を基に求められた毛管圧(P_c)の経時変化を図-10 に示す。なお、水島シルトに関しては、圧力が安定するのに時間がかかったため、10 時間以上間隔を空けて空気圧を段階的に载荷した。また、一時的に値が上昇している部分が見受けられるが、これは先に示した水島砂の場合と同様に载荷圧力上昇時における供試体上下圧力センサーのタイムラグであり、圧力伝播の時間的な遅れを示している。結果として、水島シルトの AEV は約 110cm~130cm 程度の値が得られた。

表-3 飽和供試体作成条件

試料名	間隙率	供試体高さ (cm)
水島シルト	0.40	8.24

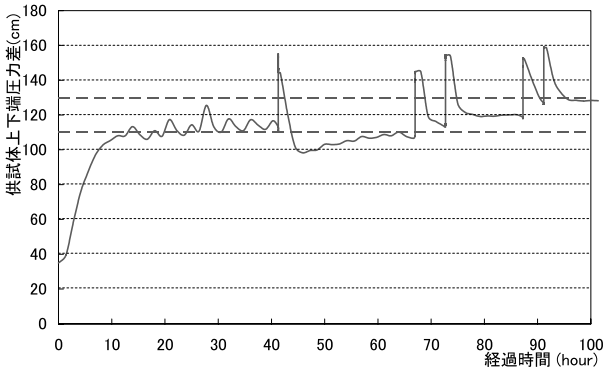


図-10 供試体上下端圧力差の経時変化 (粘性試料)

2.4 水分保持特性による AEV の推定

AEVは土の水分保持特性の限界毛管圧として求めるこ

ともできる。そこで、先に求めた計測結果を土柱法で求めた水分保持特性の結果と比較し、その整合性について検討した。得られた豊浦砂と水島砂の水分特性曲線を図-11に示す。水島砂については細粒分が多く、土柱の作成過程(水中締め固め法)において若干、細粒分が集中してしまった高さの保水性が高まったためにばらつきが大きくなったものと推察される。

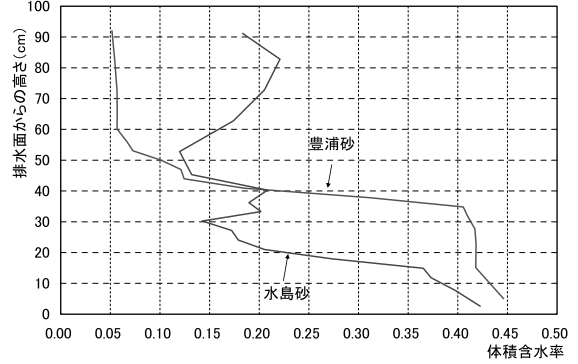
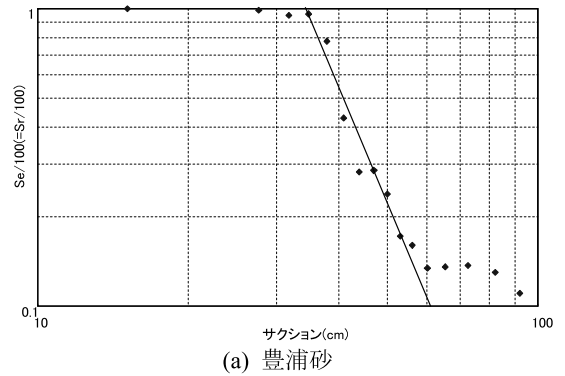
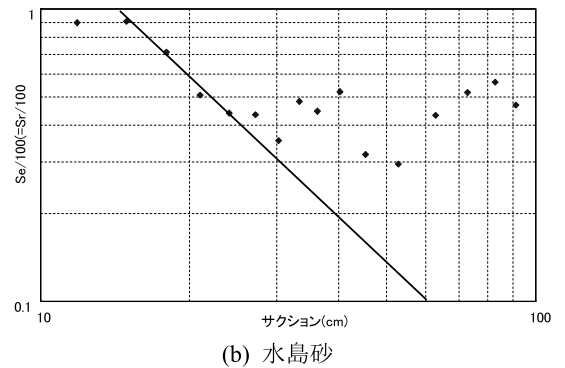


図-11 水分保持特性 (砂質試料)



(a) 豊浦砂



(b) 水島砂

図-12 空気侵入値 h_p - λ の関係

Brooksらは式(2)の形で水分特性曲線を推定し、空気侵入値を定義している⁸⁾。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_b}{h_p} \right)^\lambda, \quad h_p \geq h_b \quad (2)$$

ここで、 S_e : 有効飽和度、 θ : 体積含水率、 θ_r : 最小含水量、 θ_s : 飽和体積含水率、 h_p : サクシオン(kPa)、 h_b : 空気侵入

値(kPa), λ : 土の種類で決まるパラメータである. なお, 結果はサクシオンと空気侵入値を水頭換算(cm)したものを表示した. 上式の両辺の対数をとると次式となる.

$$\log(S_e/10^2) = \lambda(\log h_b - \log h_p) \quad (3)$$

そこで, 上式を基に, 図-12に示すように, $\log h_p \sim \log(S_e/10^2)$ 関係を直線で近似し, その直線上の $S_e/10^2=1$ のときのサクシオンから h_p が, 直線の傾きから λ がそれぞれ求まる. 結果として, 豊浦砂が約34cm(間隙率0.43)水島砂が約14cm(間隙率0.41)と求まった.

上述の3つの方法によって推定したAEVの値を表-4に示す. 間隙率の違いにより若干の差異が認められるが, 得られた結果はほぼ整合するものであることから, 先の乾燥試料及び飽和試料を用いたAEV測定試験は妥当なものと判断できる.

表-4 得られたAEVの比較

試料名	豊浦砂		水島砂	
	間隙率	AEV (cm)	間隙率	AEV (cm)
乾燥試料	0.42	34	0.38	19
飽和試料	0.44	36	0.37	17
水分特性曲線	0.43	34	0.41	14

2.5 二酸化炭素に対する AEV 測定試験

気体を空気から二酸化炭素に変えて, 砂試料を対象に図-8に示した試験装置を用いてAEVを測定した. 試験結果を図-13に示す. 結果として, 豊浦砂が約36cm, 水島砂が約15cmと求まり, 二酸化炭素の間隙水への溶解の影響でAEVが変化する可能性も予想されたが, 空気と二酸化炭素を変えてもAEVは同じ値をとることが判明した.

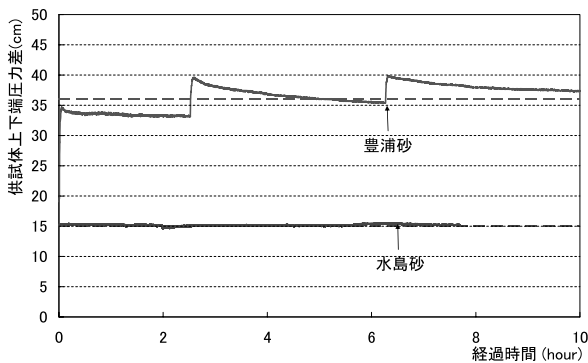


図-13 供試体上下端圧力差の経時変化(砂質試料)

2.6 帯水層への注入圧の検討

二酸化炭素を注入する浅層の帯水層として, 図-3に示したボーリングによって得られた試料を採取した場所を貯留サイトと仮定して注入条件について検討してみる. 二酸化炭素は気体のまま注入するので, 気体と間隙水がス

ーズに交換される必要がある. また, 注入した二酸化炭素が地上に漏れないように, シール層が存在する必要がある. そこで, 17.1m以深の砂礫層, シール層をその上部の粘性土層と仮定して気体を注入する場合, 図-14に示すように注入された気体は間隙水を移動させ不飽和領域を形成していく. 注入端には静水圧が働いていることから, 同じ圧力でバランスし, さらに気体の圧力を高めると注入が始まる. ここで, 水島砂層の AEV は約 17cm であるので注入が始まるのは静水圧に AEV 分を加えた圧力になる. また, 発生する不飽和領域の間隙空気の圧力も同じである.

帯水層内の気体の安定は, 図-15に示すように注入した気体圧(P_g), 水圧(P_w), 液相, 気相境界の毛管圧(P_c)の圧力バランスから決まる. 従来の研究では, Åberg が提唱した「空洞壁面付近の鉛直動水勾配が 1 以上であること」との条件⁹⁾が専ら用いられてきたが, 未永らは毛管圧力の影響を示唆し, $P_g > P_w$ を提示している¹⁰⁾. ここで漏気防止条件を考えると以下のように書ける.

$$1 + \frac{P_c}{P_w} \geq \frac{P_g}{P_w} \quad (4)$$

AEV が小さくても注入気体圧が間隙水圧よりも低ければ条件を満たすことができるが, 注入気体圧よりも高い AEV を持ったシール層が存在すれば漏気しないと判断できる. 水島砂層は(17.5m~20m)で上層は粘性土層 (15m~17.5m) が存在している. この粘性土の AEV は約 110~130cm 程度の測定結果が得られたことから, 上昇しようとする気泡に対して抵抗する機能を発揮することが期待できる.

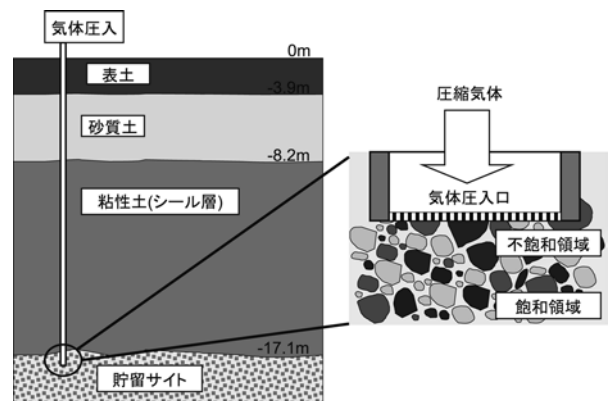


図-14 貯留サイトへの気体注入概念図

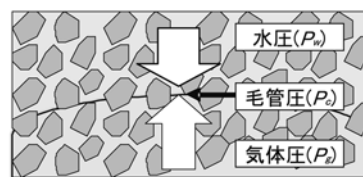


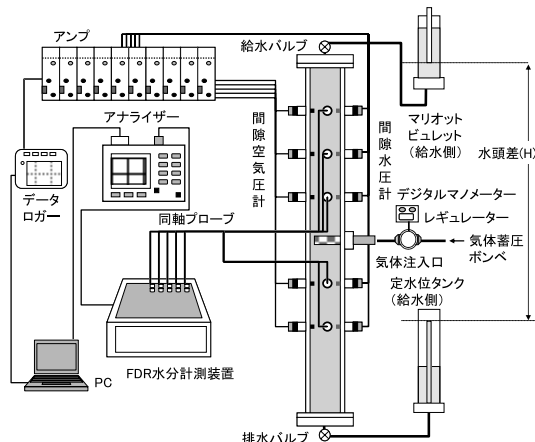
図-15 帯水層内での気相・液相境界のバランス

3. 気体注入に伴う不飽和領域の発生とその挙動

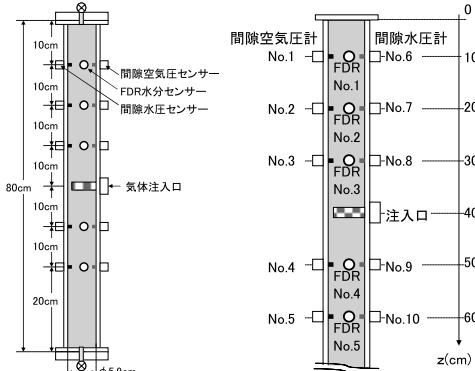
注入に伴う不飽和領域の発生とその挙動を確認するため、鉛直一次元カラムを用いて注入試験を行った。試験は異なる動水勾配に対して溶解度の異なる空気と二酸化炭素を対象とし、液状化防止のための帯水層への空気注入や二酸化炭素貯留の可能性について考察した。

3.1 不飽和領域挙動試験

鉛直一次元カラム試験装置の概要を図-16に示す。直径φ5.9cm、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給水タンク及び定水位排水タンクの高さを制御することで設定した。そして、レギュレーターで圧力を設定した気体を供試体の中心から注入し、間隙空気圧を圧力センサーNo.1～No.5、間隙水圧を圧力センサーNo.6～No.10、体積含水率をFDR水分計No.1～No.5で計測した。試験ケースは、表-5に示すように豊浦砂を用いて3段階に動水勾配を変え、また、水島砂については注入気体を空気と二酸化炭素の2つのケースで実施した。



(a) 装置全体図



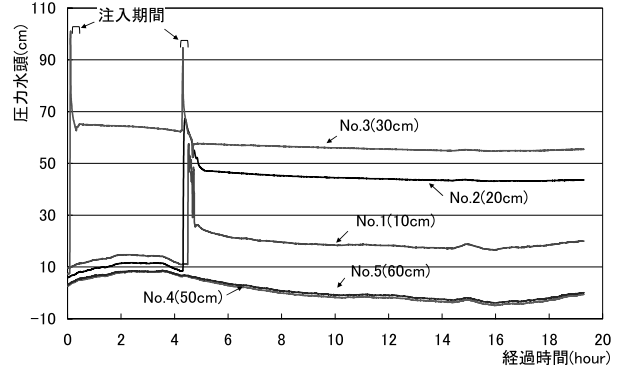
(b) カラム寸法

(c) センサー配置

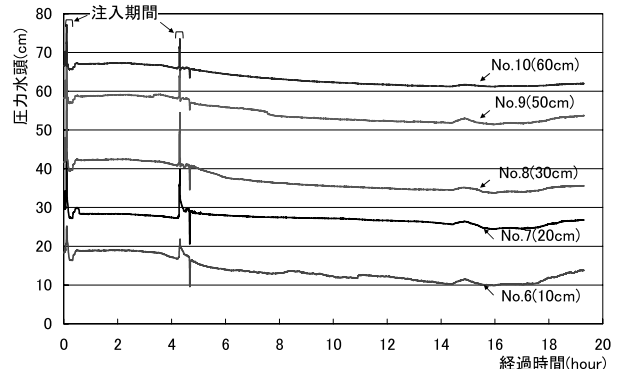
図-16 鉛直一次元カラム試験装置概念図

表-5 試験条件

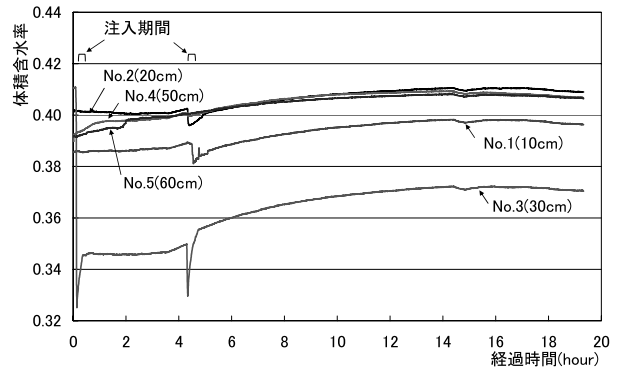
case番号	case1	case2	case3	case4	case5
試料名	豊浦砂	豊浦砂	豊浦砂	水島砂	水島砂
注入気体	空気	空気	空気	空気	二酸化炭素
動水勾配	0	0.5	1	0	0
水頭差 (cm)	0	40	80	0	0
間隙率	0.40	0.40	0.42	0.35	0.35
気体注入圧 (kPa)	10	10	10	8.5	8.5



(a) 間隙空気圧



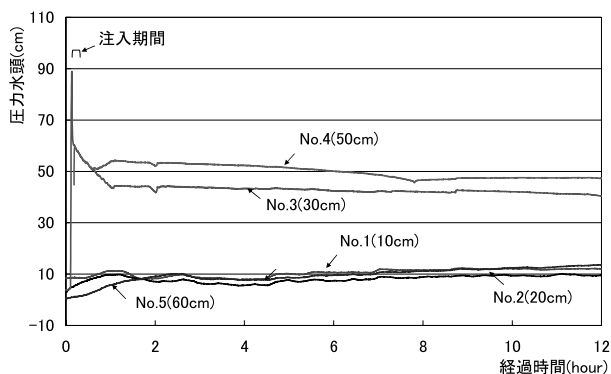
(b) 間隙水圧



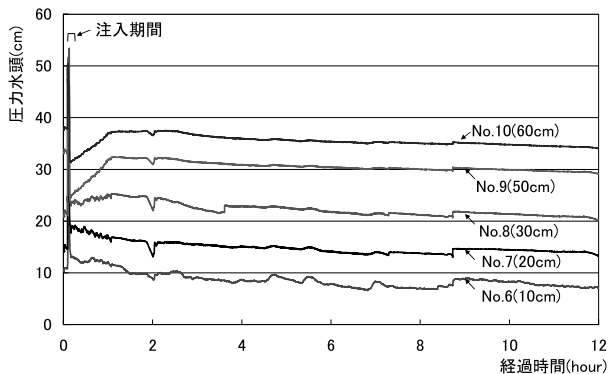
(c) 体積含水率計測結果

図-17 Case1 (豊浦砂, $i=0$) の測定結果

試験結果の一例として豊浦砂を用いて実施した Case1 について、各センサーの計測結果を図-17に示す。また、Case2 及び Case3 の結果として、間隙空気圧と間隙水圧の経時変化を図-18 及び図-19 に示す。空気注入に伴って徐々に不飽和領域が広がり、間隙空気圧と間隙水圧が急激に上昇する一方で体積含水率は一時的に減少する挙動を示した。例えば、図-17においては、注入口直上の No.3 が最初に反応した後に No.2, No.1 が順次反応しており、注入した空気が上方に広がっている様子を捉えている。

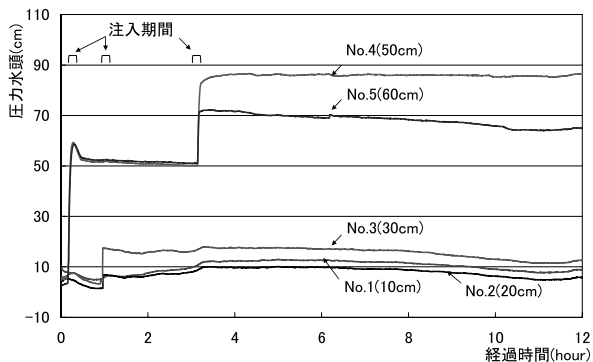


(a) 間隙空気圧

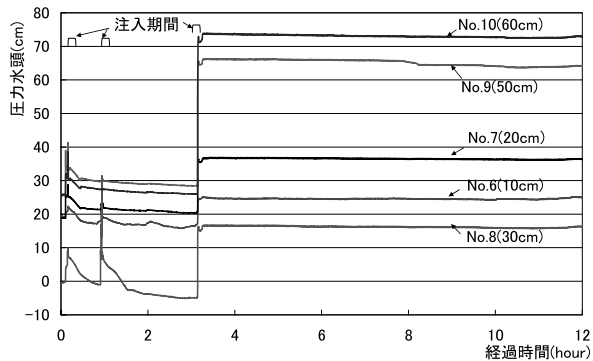


(b) 間隙水圧

図-18 Case2 (豊浦砂, $i=0.5$) の測定結果



(a) 間隙空気圧



(b) 間隙水圧

図-19 Case3 (豊浦砂, $i=1$) の測定結果

なお、間隙水圧の値は注入を止めた直後から静水圧に近い値 (例えば図-17 においては、図中に示した各計測点の

深度の値) に落ち着いている。注入終了後、不飽和領域の間隙空気圧はある一定の値を示しており、一旦下がった飽和度は時間経過と共に上昇している。図-19 において、3 時間後に急激に値が増加している部分が見られるが、これは不飽和領域の拡大により、流れが阻害されたことによるものである。

これら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-20 に示す。動水勾配の差異については、 $i=0$ 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ている。ここで、図-15 に示したように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、図-17 の注入期間における間隙空気圧と間隙水圧の差が毛管力である AEV 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、ケース 3(動水勾配 $i=1$) 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、図-19 において、注入口下方に位置する深度 60cm 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、次に気泡運動について考察した。

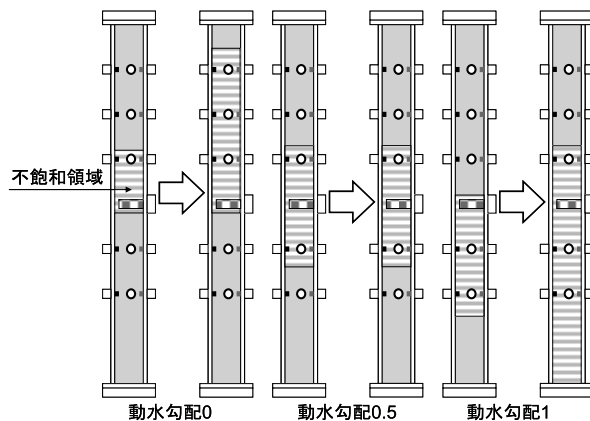


図-20 動水勾配の影響による不飽和領域移動の模式図

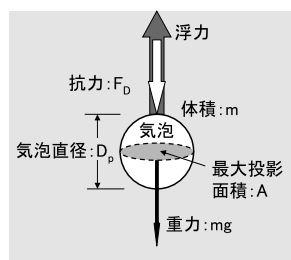


図-21 気泡の運動概念図

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¹¹⁾。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。土粒子の構成する構造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と考えれば、その挙動は図-21及び式(5)で表され、水と気体の密度差で不飽和領域は上昇する。

$$m \frac{dv}{dt} = mg - mg \frac{\rho_f}{\rho_p} - F_D \quad (5)$$

ここで、左辺 v : 流れに対する相対速度(m/s), t : 時間(s)であり、右辺の各項は、重力と浮力と流体の抵抗力を示し、 m : 気泡の重量(kg), g : 重力加速度(m/s²), ρ_f : 流体の密度(kg/m³), ρ_p : 気泡の密度(kN/m³), F_D : 気泡に働く抗力(kPa)である。気泡の定義より、

$$m = \frac{\pi D_p^3 \rho_p}{6} \quad (6)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_f A v^2 \quad (7)$$

ここで、 D_p : 気泡直径(m), C_D : 抵抗係数, A : 気泡の流れに垂直な最大投影面積(=πD_p²/4)(m²)である。したがって、両式を式(5)に代入すると、次式となる。

$$\frac{dv}{dt} = g \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} \right) - \left(\frac{3\rho_f}{4\rho_p D_p} \right) C_D v^2 \quad (8)$$

上式(8)において加速度が0の場合、流体中の球は一定速度で等速運動をするようになる。この速度を終端速度(m/s)と定義する。もし、間隙水が速度を持っていないければ、不飽和領域に発生した気相は気泡運動と同じように上方に速度を持つことになる。その時の気泡の終端速度(v)はストークスの法則の式(9)で示される C_D を用いると式(10)で求められる。

$$C_D = \frac{24\eta}{\rho_f v D_p} \quad (9)$$

$$v = \frac{D_p^2 (\rho_p - \rho_f) g}{18\eta} \quad (10)$$

ここで、 η : 粘性係数 (Pa・s) である。もし、間隙水が下方に速度を持っていないければ、相対的には気泡は下方に動くことも考えられる。そこで、気泡直径と終端速度(m/s)を基に上昇速度(m/h)を算定した結果を表-6にまとめる。ここで、式(11)で表される気泡直径と毛管圧により推定される間隙径を並べているのは、間隙内で形成される気泡の大きさには、間隙構造が影響を持つと考えるためである。

$$d = \frac{4\sigma \cos\theta}{P_d} \quad (11)$$

ここで、 d : 間隙径(m), σ : 水の表面張力(kPa), θ : 接触角(rd), P_d : 置換圧(AEV)(kPa)である。不飽和領域の気泡の生成について模式的に表すと、図-22のようになる。間隙の気体が、間隙水の流入によって封じ込められた場合、水の表面力によって気泡が形成される。この気泡は、密度の違いから浮力が働き、水に対して上方に運動をはじめようとする。なお、ケース1~3における間隙水の実流速を表-7にまとめる。ケース3において気泡の運動を考えると、試験に用いた豊浦砂のAEV約35cm(表-4の平均値)から推定される代表間隙径から気泡直径を算定し、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4.8×10⁻⁴m/sであるので約1.7m/hとなり、気泡の上昇速度より速くなる。ケース3において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としたことが要因であると結論付けることができる。

表-6 気泡直径と上昇速度 (20°C)

毛管径 (cm)	間隙径 (cm)	気泡直径 (cm)	終端速度 (m/s)	上昇速度 (m/h)
10	0.0300	0.0300	4.45×10 ⁻³	16.02
15	0.0200	0.0200	1.98×10 ⁻³	7.12
20	0.1500	0.1500	1.11×10 ⁻³	4.00
25	0.1200	0.1200	7.10×10 ⁻⁴	2.56
30	0.0100	0.0100	4.90×10 ⁻⁴	1.78
35	0.0086	0.0086	3.60×10 ⁻⁴	1.31
40	0.0075	0.0075	2.80×10 ⁻⁴	1.00
45	0.0067	0.0067	2.20×10 ⁻⁴	0.79
50	0.0060	0.0060	1.80×10 ⁻⁴	0.64

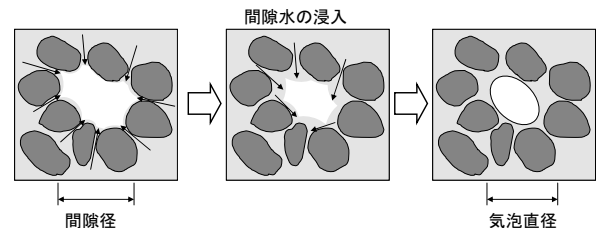


図-22 気泡の生成メカニズム

表-7 各ケースの流速

case番号	case1	case2	case3
動水勾配	0	0.5	1
水頭差 (cm)	0	40	80
透水係数 (m/s)	2.0×10 ⁻⁴		
ダルシー流速 (m/s)	0	1.0×10 ⁻⁴	2.0×10 ⁻⁴
間隙率	0.40	0.40	0.42
実流速 (m/s)	0	2.5×10 ⁻⁴	4.8×10 ⁻⁴

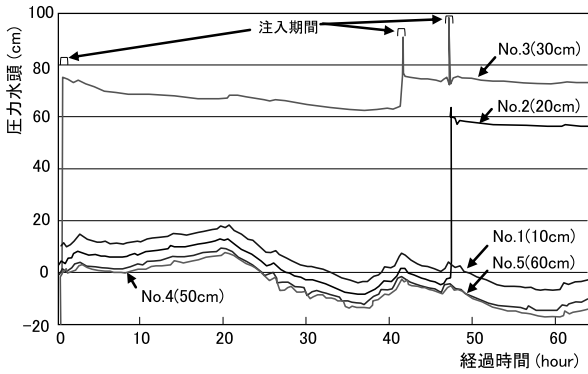
次に、動水勾配を与えなかった試験について、ケース4の測定結果を図-23に示す。注入直後に安定したので、何度か気体を再注入し、段階的に不飽和領域を拡大させた。注入は計測開始直後、20時間後、42時間後、48時間後に約8.5kPaで行った。不飽和領域は上方に拡大するものの、ある境界で拡大は止まった。このことは、No.1の間隙空気圧計の変化がNo.4およびNo.5とほぼ等しく、No.3や

No.2 に見られるような急激な値の上昇が見られないことが不飽和領域の上方への拡大が止まっていることを示している。さらに、二酸化炭素を注入した場合の水島砂に対して実施したケース5の結果について図-24に示す。

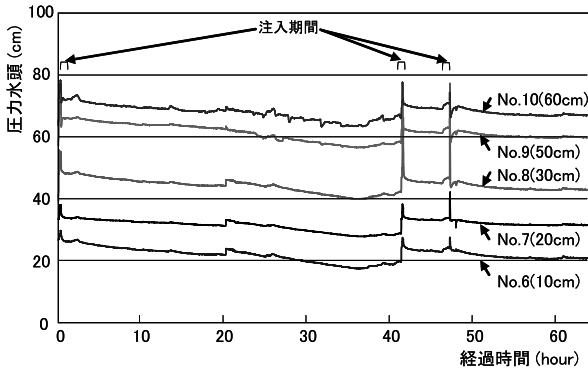
二酸化炭素も、時間を空け約5時間後、約21時間後に再注入を行った。不飽和領域の拡大や安定の様子は空気を注入した時との明確な差異は見られなかった。

3.2 不飽和領域静止条件

上述の計測結果の特徴から不飽和領域の拡大と安定について考察する。まず、気体注入中と完了後では、結果に顕著な差が出た。飽和領域の気体注入における現象を、気体注入過程と気体貯留過程の2つの場合に分けて取り扱うこととする。その現象を同じ深度の間隙空気圧と間隙水圧の差の変化から考えると、まず、気体の注入過程において発生した不飽和領域の気相圧力は注入圧力と等しくなるが、図-25に示すように間隙空気圧と間隙水圧の差はAEVの値(35cm)を一時的に超えている。また気体が供給され続ける限り、図-26に示すように気液境界は上方に広がり続ける。この不飽和領域の上昇は、間隙空気圧と静水圧の差よりもAEVの値が高くなると止まると理解できる。次に気体注入を止めると、間隙空気圧と間隙水圧の差が下がり、徐々に安定する。これは、気体注入口からの圧力供給が止まると同時に、連続して存在していた不飽和領域の気相の一部が、間隙に気泡として閉じ込められることで、全体として気相の圧力が下がるためであると推察される。この概念を模式図で表すと図-27のようになる。今回実施した一連の実験における注入圧はAEVの値と静水圧を考慮して、ほぼ最小と言える圧力に設定した。図-11に示した供試体の水分保持特性に当てはめると、AEV値をわずかに超えるサクションでは気体は間隙に入っていくが、極端に低い飽和度にはならず、十分な濡れ面を残すことになる。これは、図-17(c)に示した注入時の体積含水率の挙動において、体積含水率の低下量からも理解することができる。そして、気体の注入を止めることで、濡れ面を構成する水の表面力が気泡を形成し、間隙内に閉じ込めようとする考え方ができる。

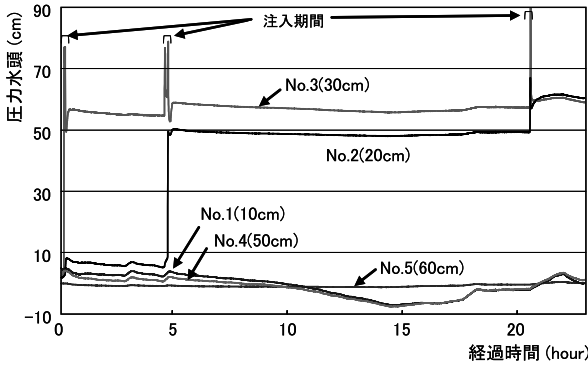


(a) 間隙空気圧

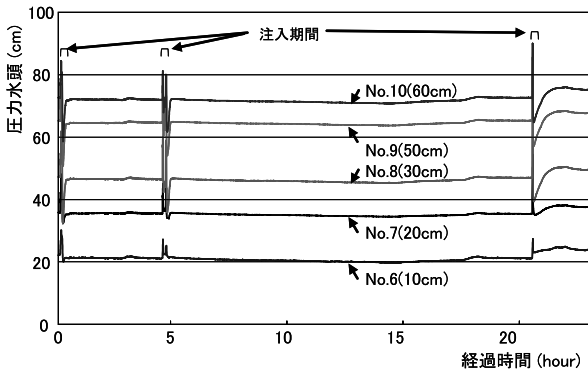


(b) 間隙水圧

図-23 Case4 (水島砂) の測定結果 (空気注入)



(a) 間隙空気圧



(b) 間隙水圧

図-24 Case5 (水島砂) の測定結果 (二酸化炭素注入)

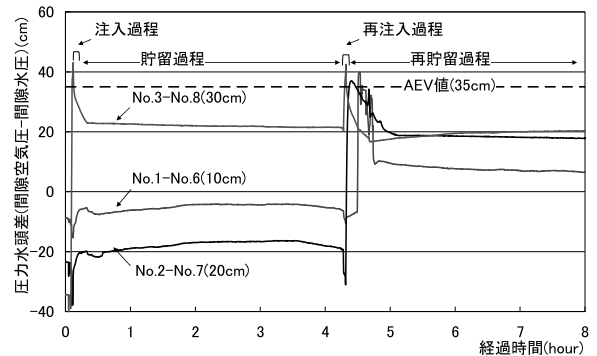


図-25 注入口上部の圧力差(case1:豊浦砂)

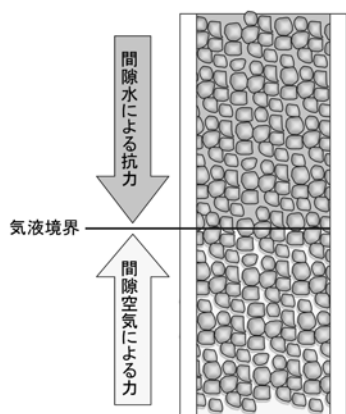


図-26 不飽和領域と飽和領域の境界

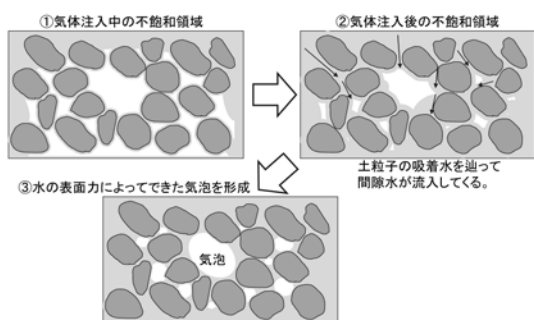


図-27 貯留過程の不飽和領域の様子

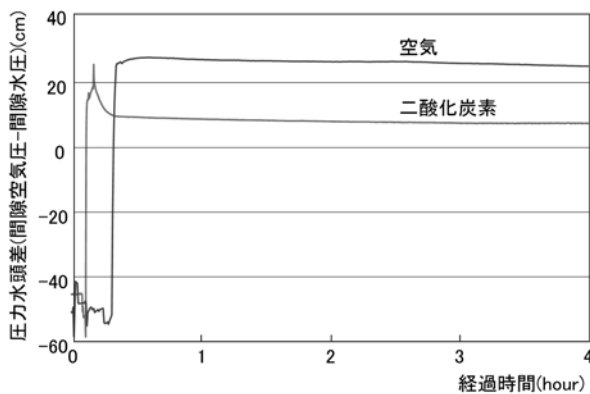


図-28 注入気体（空気と二酸化炭素）による間隙空気圧と間隙水圧の測定値の差

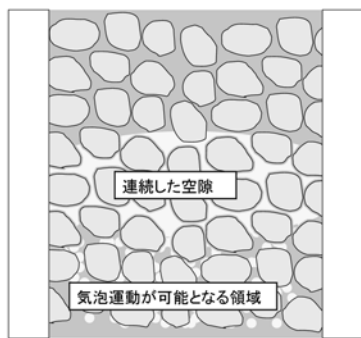


図-29 不飽和上方領域概念図

不飽和領域の挙動について、気体注入過程と注入完了した貯留過程を対象としたが、注入する気体によって貯留過

程の間隙空気圧の減圧量に差が生じた。その結果を空気注入口の上部に設置した間隙空気圧計(No.3)、間隙水圧計(No.8)の差として図-28に示す。二酸化炭素と空気とは、発生した不飽和領域の貯留過程において、挙動が異なることが分かった。これは二酸化炭素の方が水に対する溶解度が高いことが影響していることが考えられる。なお、今回の試験では境界条件が閉鎖的であるので、二酸化炭素が溶解した間隙水が濃度を維持したまま不飽和領域周辺に留まるのかを確認する必要があることが課題として挙げられる。

上述のように、二酸化炭素と空気の不飽和領域の間隙空気圧に差が生じたものの、不飽和領域は安定した。これは、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と考えられる。その概念図を図-29に示す。動水勾配の影響が無ければ、静水圧にAEVを加えた圧力以上で帯水層に注入が可能で、発生した不飽和領域は注入を止めることで、上方への拡大が止まり、安定させることができることが示唆された。

4. まとめ

本研究では、浅層の帯水層に気体の二酸化炭素を注入する地中貯留技術や空気注入による液状化対策技術に着目し、沿岸地域で採取された試料に対する要素試験を実施した。具体的には、貯留条件、気体注入条件に必要なパラメータであるAEVを求めた上で、不飽和領域の挙動を評価する一次元鉛直カラム試験を行い、不飽和領域の上昇現象のメカニズムを解明するとともに、気体貯留の可能性について考察した。得られた知見を下記に列挙する。

- (1) AEV計測試験として、乾燥試料に対して上部からの注水に伴う間隙空気圧を測定する方法と飽和試料に対して上下の圧力差を測定する方法について、水分保持特性の値と比較した結果、一定の整合性を確認した。また、二酸化炭素のAEVについても空気と同様の結果であり、飽和帯水層への気体注入に必要な最低注入圧力を算出することができることが判明した。
- (2) 試料採取現場を貯留サイトと想定した場合、砂質層に気体注入が可能であること、また、静水圧と砂質層のAEVがシール層のAEVを越えない注入圧であれば、注入気体の上昇を止め気体を貯留させることができることを示唆した。

- (3) 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。
- (4) 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つの過程中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、溶解した二酸化炭素の影響を検討することが挙げられる。また、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。貯留可能な沿岸地域を対象に貯留量を推定することで、実現の可能性について評価することが必要である。

参考文献

- 1) 林栄治, 松本弘: 二酸化炭素の地中貯留, 地盤工学会誌, Vol.57, No.2, pp.18-21, 2009.
- 2) 財団法人地球環境技術研究機構: 二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告, p.27, 2007.
- 3) 小松満・藤田知大: 二酸化炭素の浅層帯水層への注入に関する基礎的研究, 地盤と建設, Vol.28, No.1, pp.137-143, 2010.
- 4) 西垣誠・小松満・藤井直・大内正敏: 液状化防止を目的とした地盤の不飽和化に関する実験的研究, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.2, pp.340-352, 2008.
- 5) 岡村未対・竹林昌哉・西田克司・藤井直・神宮司元治, 今里武彦, 安原英明, 中川恵美子: 空気注入による地盤不飽和化の現場実験とそのモニタリング, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.3, pp.756-766, 2009.
- 6) 西垣誠・竹下祐二・越智克夫・瀬尾昭治: 非定常法による透気係数の測定方法に関する研究, 土木学会第47回年次学術研究発表会講演概要集, III-566, pp.1172-1173, 1992.
- 7) 西垣誠・竹下祐二・越智克夫・瀬尾昭治: 不飽和土中の間隙空気圧の計測方法に関する研究, 第27回土質工学研究発表会講演集, No.738, pp.1971-1974, 1992.
- 8) Brooks, R.H. and A.T.Corey: Properties of porous media affecting fluid flow, ASCE, Vol.92, IR.2, pp.61-88, 1996.
- 9) Åberg, B.: Prevention of Gas Leakage from Unlined Reservoirs in Rock, Rock Store 77, Stockholm, Sweden, pp.339-414, 1977.
- 10) 末永弘・中川加明一郎: 岩盤の水封メカニズムについて, 土木学会論文集 No.799, III-72, pp.123-137, 2005.
- 11) 宇野尚雄・神谷浩二・田中宏路: 「空気注入法」と「水分法」による砂の間隙径分布, 土木学会論文集 No.603, III-44, pp.35-44, 1998.

(2011年6月28日 受付)

