

大型土槽実験のための液状化地盤作成法の研究 (その1) 模型地盤間隙での水道水の溶存酸素量と飽和 度の変化

後藤 茂¹・佐藤 正義²

¹工博 清水建設 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

²工博 防災科学技術研究所 総合防災研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

Dynamic model ground tests such as soil liquefaction need de-aired water for complete saturation, although water de-airing is very hard for large-scale model tests because it requires a huge amount of water. Not de-aired water was tested on basic properties on purpose of applying on dynamic ground model tests. The basic properties mean of that time depending change of dissolve oxygen of water in void of soil or in a vessel, and the change of B-value of soil that were filled with not de-aired water. The test result shows that ① Amount of dissolve oxygen of water significantly decrease in void of soil, although it was not change in a vessel. ② B-value of the soil filled with not de-aired water decrease because of segregated air from the water.

Key Words : soil liquefaction, saturation, de-aired water, B-value, dissolved oxygen

1. 研究の概要

液状化等の地盤の地震時動的特性に関する実験および試験では試料を完全飽和させることに大きな労力が払われており、そのための技術も提案されている。例えば、間隙水用の水として十分に真空脱気した水を用いることを前提とし、事前に試料間隙中の空気を水に溶けやすい二酸化炭素に置き換えてから通水する方法や、試料間隙を真空下にして脱気水を通水する方法等が一般的に用いられている。現在、防災科学技術研究所では三木市に2005年4月完成予定の実大三次元震動破壊実験施設(愛称：E-ディフェンス)の建設を進めている。これにより実施する計画の大型土槽実験では、300～350m³と膨大な量の地盤材料としての砂を用いるため、間隙水として用いる水を脱気することだけでも大きな労力を必用とし、間隙空気中の二酸化炭素への置換や真空下での通水および大きな背圧の付与などは甚だしく困難である。これまで、大型せん断土槽を用いて地盤の作成法¹⁾を検討してきたが、間隙水として水道水を用いており水道水に本質的に含まれる空気分のため、作成した地盤が液状化実験を行うに適しているかどうかという疑問が残った。

そこで本研究では、大型土槽による脱気を行っ

ていない水道水の液状化実験への適応性を検討する目的で、水道水に含まれる溶存気体量の変化に着目した検討を行った。

2. 検討項目

今回の検討では水に含まれる酸素(溶存酸素)に着目して計測を行った。溶存酸素に着目した理由は市販の溶存酸素計で容易に計測が出来るためである。但し、大気成分は酸素以外にも多くの気体が含まれるが、特に多量に存在するのは酸素と窒素である。表-1は通常の大気圧下(酸素分圧0.2気圧、窒素分圧0.8気圧)での酸素と窒素の水に対する溶解量を示したものである。気体の溶解量は温度により変化するが、窒素の溶解量は酸素の約2倍であることから、溶存している空気量は計測

表-1 通常の大気圧状態での気体の溶解量

気体	単位	0℃	20℃	40℃	60℃
酸素	換算容積	0.0098	0.0062	0.0046	0.0038
	質量 mg/l	14.0	8.9	6.6	5.4
窒素	換算容積	0.0192	0.0128	0.0096	0.008
	質量 mg/l	24.0	16.0	12.0	10.0

換算容積:1mlの水に溶ける量を1気圧、0℃での体積(ml)に換算した値

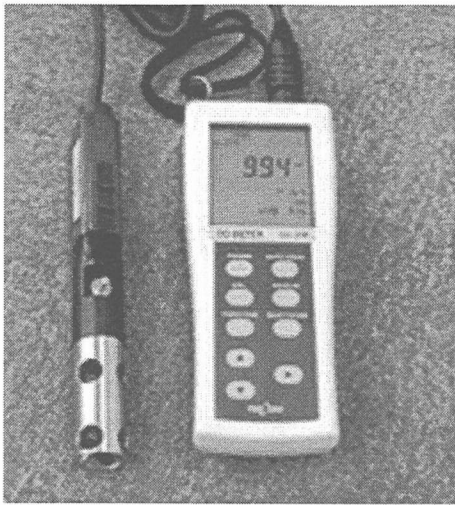


写真-1 ポータブル溶存酸素計

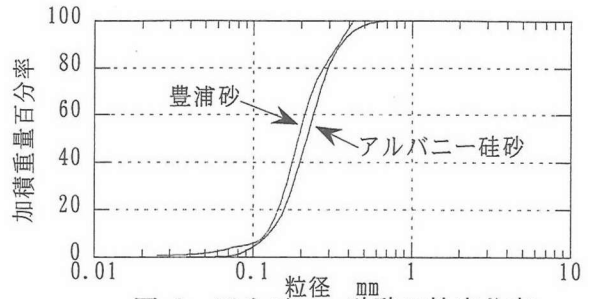


図-2 アルバニー-硅砂の粒度分布

表-2 アルバニー-硅砂の物理的性質

土粒子密度	g/cm ³	2.653
最大密度	g/cm ³	1.806
最小密度	g/cm ³	1.503

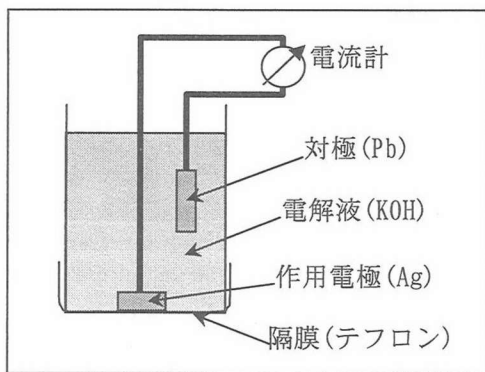


図-1 隔膜式カルバニ電池の原理

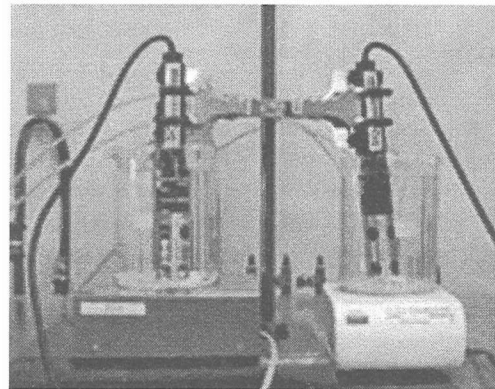


写真-2 気中静置状態でのDOの測定

された溶存酸素量の約3倍であると考えることが出来る。

検討を行った主な項目は以下のとおりである。

- ① 検討項目は水道水および脱気水を気中に放置した場合の溶存酸素量の変化。
- ② 模型地盤の間隙を満たした状態での水道水の溶存酸素量の変化。
- ③ 三軸供試体の間隙水として水道水を用いた場合のB値の変化と間隙水の溶存酸素量の変化。

3. 溶存酸素量の測定方法および試料砂

試料水に溶存する酸素量の計測はポータブル溶存酸素計（東亜ディーケーケー製，DO-21P）を用いた。写真-1に溶存酸素計の外観を示す。

図-1に測定原理を示すが、この酸素計は隔膜式カルバニ電池方式を用いている。この方式では試料水から隔膜を透過して浸入する酸素によって電解液の酸素濃度が変化し、それに応じて2電極間に電流が生じ、その量を計測することにより試料水の酸素量を算定している。

土槽実験、三軸供試体の実験ではアルバニー#48 硅砂を用いて模型地盤を作成した。表-2に物理的性質を示し、図-2に粒度分布を示すが、この硅砂は豊浦砂とほぼ同等の粒度分布を持った砂である。

4. 気中に静置した場合の溶存酸素量の変化

ビーカーに水道水および水道水を真空脱気した水をそれぞれ400mlを取り、溶存酸素計を水没させた状態で1時間毎に溶存酸素量（以降はDOと呼ぶ）を測定した。

試験の実施状態を写真2に示し、計測結果を図3に示す。

写真からは明らかではないが、水道水を入れたビーカーは測定開始から数時間後には内側表面や溶存酸素計の表面に細かい泡が付着し、その後泡が消滅した。一方、脱気水の方はそのような泡の発生は見られなかった。試験結果に見られる傾向は以下のとおりである。水道水の溶存酸素量は採取初期は比較的高い値を示すが、数時間後で値が減少し、その後ほぼ一定の値を維持している。溶存酸素量が一定値になるのに要する時間は2時間程度である。一方、脱気水の溶存酸素量は初期は低い値を示すが時間の経過とともに上昇し、脱気を行っていない水道水と同等の値になった。脱気水の溶存酸素量が上昇するのに要する時間は46時間程度であった。これらの結果から、脱気をおこなった水でも2日程度経過したら脱気の効果はほとんど失われていると考えられる。

また、気中に静置した状態では水中に溶存してい

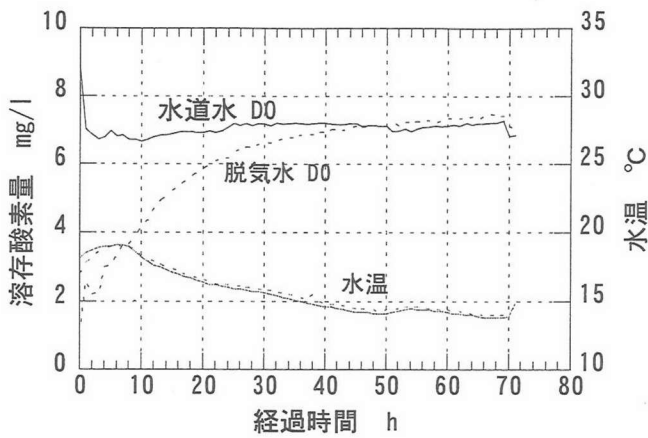
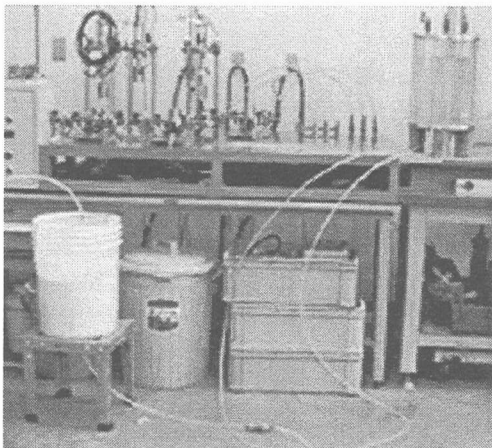


図-3 気中静置状態での溶存酸素量の経時変化



写-3 土槽試験の実施状況

る空気の量は大きくは変化しないことが明らかになった。

5. 砂地盤間隙中での溶存酸素量の変化

土粒子と接触した状態での水道水のDOの変化を検討するために土槽に水道水で満たした模型地盤を作成し、間隙水のDOの変化を計測した。土槽はφ28cmの円筒形土槽であり約20cmの厚さで乾燥状態の珪砂を詰め、模型地盤の相対密度は約40%であり、水道水を土槽底部に設けた採水口から静かに注入して地表面から上へ約10cmまで冠水させた。間隙水の溶存酸素量は土中から間隙水を採水して測定した。このような測定方法を用いた理由は溶存酸素計を埋設すると計測器に酸素が消費され、急速に値が低下することが予備試験により明らかになったためである。したがって、採水量は1箇所あたり100mlと少量にし、測定後の水は土槽に戻していない。図-4に土槽の概念図を示す。

間隙水の採水位置は土槽底部および土槽中部（地表面から下へ7cm、底部から上へ13cmの深度の土槽中央部）である。また、冠水している部分の水の溶存酸素量も計器を直接水没させることにより測定した。一方、比較のために模型地盤作成時に他の容器（土槽と同様のもの）に汲置きした水

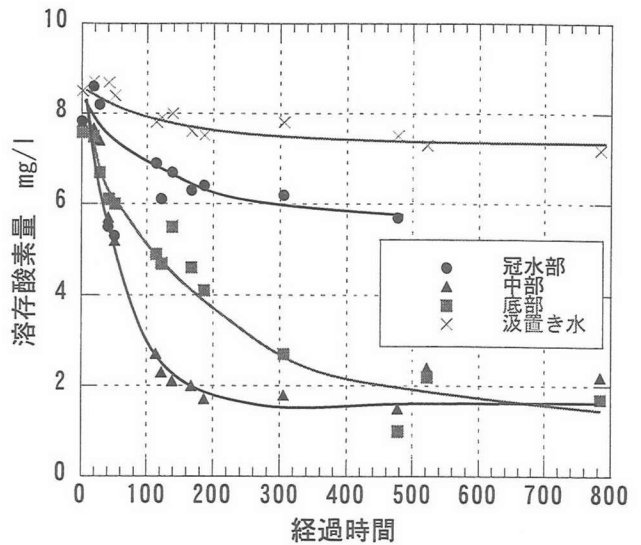


図-5 模型地盤間隙での溶存酸素量の経時変化

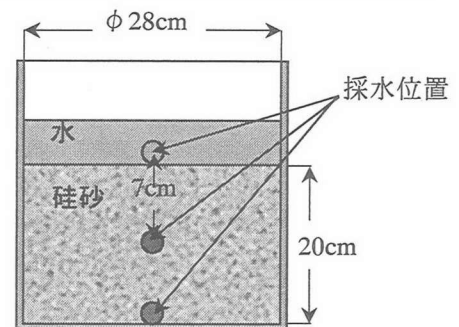


図-4 土槽中の採水口の位置

道水と各計測時に蛇口から採取した新鮮な水道水の溶存酸素量も測定した。

図-5に測定結果を示し、写真-3に試験の実施状況などを示す。汲置きした水道水や新鮮な水道水の溶存酸素量は前節の気中に静置した場合の溶存酸素量の変化の場合と同様に8~9mg/l程度の値を示しているが、土中の間隙水の溶存酸素量はそれと大きく異なり土槽中部や底部では初期に8mg/l程度であった値が時間の経過とともに2mg/lまで低下している。

また、冠水部では表面が空気に接触しているという条件は汲置き水と同様であるにも関わらず、時間の経過とともに溶存酸素量が6mg/l程度まで低下している。

これらの計測結果は模型地盤の作成に使用した珪砂により水中の酸素が消費された事を示唆しているが、珪砂中には科学的作用で酸素を消費する砂鉄等はほとんど検出されなかった。また、計測開始から数日経った時点から土槽中部および底部の採水口から間隙水を採取する際に気泡が流出するようになった。これらのことを総合すると、間隙水中に溶存する酸素が気泡として遊離し、間隙水の溶存酸素量が低下した可能性が考えられる。

6. 三軸供試体間隙水の溶存酸素量とB値の変化

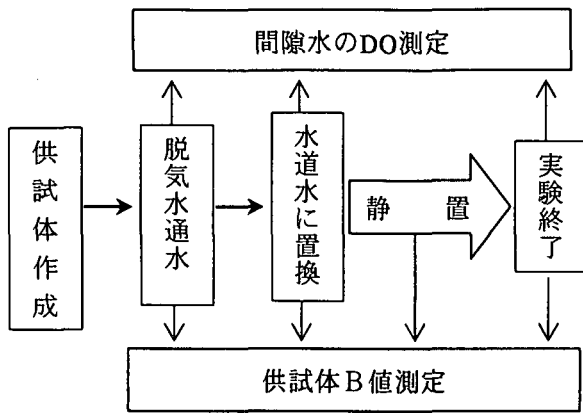


図-6 三軸供試体実験の手順

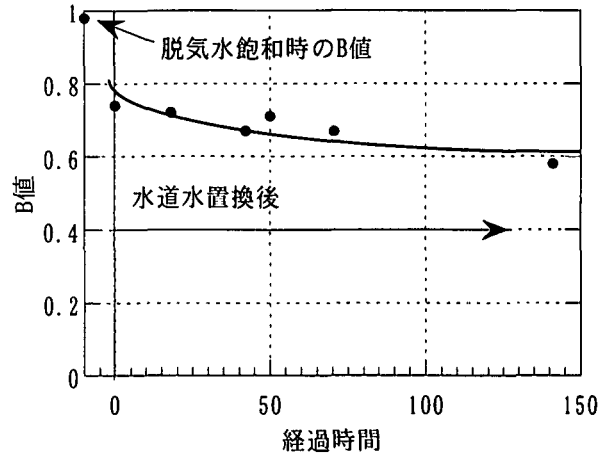


図-8 アルバニー硅砂三軸供試体のB値の経時変化

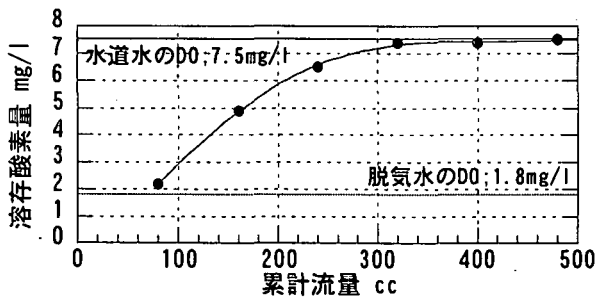


図-7 水道水通水時の排出水の溶存酸素量の変化

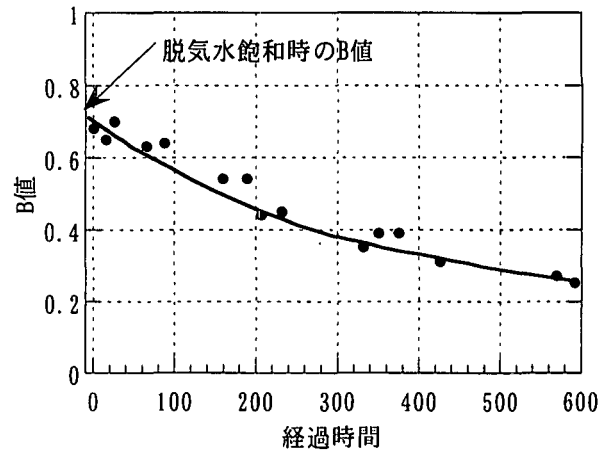


図-9 豊浦砂三軸供試体のB値の経時変化

(1) アルバニー硅砂の場合

これまでに述べた実験結果から土中間隙では水道水に溶存している空気が遊離し、気泡を形成する可能性が考えられたため、その気泡が試料の飽和度に与える影響を検討するために土質試験用の三軸試験装置を用いて実験を行った。

供試体寸法はφ50mm、高さ110mmであり、相対密度は50%程度である。但し、既往の研究³⁾により天然ラテックスのゴムスリーブを用いてもセル液、ゴムスリーブを通過して外部の空気が供試体内に浸入する可能性があることが報告されており、今回は空気の浸入を防ぐ目的でゴムスリーブの外側からラッピングフィルムで被覆した。

実験の手順を図-6に示すが、最初に乾燥状態の硅砂供試体を脱気した状態で脱気水を通水して飽和させた。使用した脱気水の溶存酸素量は1.8mg/lであり、通水後のB値は0.98になった。その後、水道水を通水することにより間隙の水を脱気水から水道水に置き換えた。この時の水道水の溶存酸素量は7.5mg/lである。このような手順を取る目的は通水時の気泡の残留を防ぎ、間隙水から遊離される気泡によるB値の変化を検討しやすくするためである。従って、脱気水から水道水への切り替えは気泡が混入しないようにバルブの切り替えのみでおこなえるようにしてある。

図-7は水道水通水時に供試体から排出される水の溶存酸素量の値を示したものである。但し、供試体の間隙容積は約80mlである。水道水通水初期には排出水の溶存酸素量はほぼ脱気水相当になって

いたが、約300mlの通水で排出水の溶存酸素量は水道水程度になり試料間隙は水道水によって置き換えられたと考えることができる。念のために更に水道水による通水を続け、総量で3700ml通水させた。この時のB値は0.74になっていた。その後、供試体は拘束圧98kPaの下で約6日間静置し、所定の間隔でB値を測定した。但し、静置中は供試体上部の間隙水経路を閉じ、下部の間隙水経路のみ開放しておいた。また、背圧は与えていない。図-8に静置期間中のB値の経時変化を示すが、時間の経過と共にB値が低下し、6日間静置後に0.58になった。

実験終了後に供試体から抽出した間隙水の溶存酸素量は約3mg/lに低下していた。また、供試体周囲を満たしていたセル液（水道水）の溶存酸素量は9.8mg/lに上昇していた。

(2) 豊浦砂の場合

前節で述べたように水道水を土中間隙水として用いた場合に飽和度の低下が生じるおそれがあることが明らかになった。但し、実験に用いたアルバニー硅砂は土質試験等であまり一般的に用いられていないものであり、このようなB値の低下がこの砂特有の現象でないことを確認する目的で豊浦砂を用いて同様の試験を行った。実験手順および供試体の寸法等はアルバニー硅砂の場合と同様で

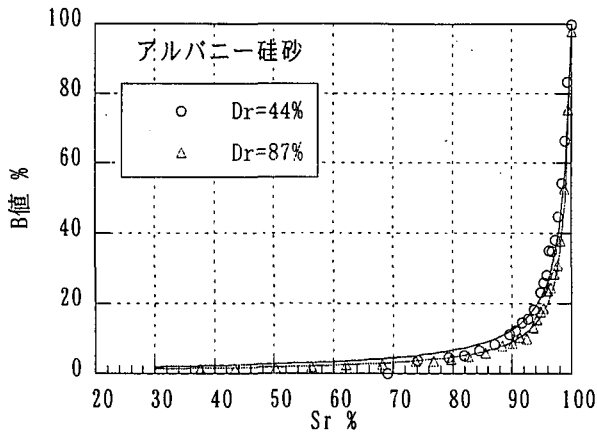


図-10 アルバニー珪砂の B 値と飽和度 Sr の関係

あり、供試体の相対密度は約80%である。通水に使用した脱気水の溶存酸素量は2.0mg/lであり、脱気水通水後のB値は0.72である。その後置換した水道水の溶存酸素量は8.0mg/lであり、置換後にB値は0.68になった。図-9に静置中のB値の経時変化を示すが、今回は約25日間静置してB値の変化を計測した。豊浦砂のアルバニー珪砂の場合と同様に時間の経過とともにB値が低下し、約600時間後にはB値は0.28になった。実験終了時に供試体から抽出した間隙水の溶存酸素量は0.7mg/lまで低下していた。

(3) B 値と飽和度の関係

間隙中の気体の量を定量的に示す指標としては飽和度Srがよく知られており、今回の間隙を水道水で満たした場合に生じるB値の低下と間隙水の溶存酸素量の低下の関係を定量的に検討するために試料の飽和度とB値の関係を求めた。

B値とSrの関係は理論的に誘導することができ、次式で与えられる。

$$B = \frac{1}{1 + \frac{(1-S_r)nE}{3(1-2\nu)\mu}} \quad (1)$$

ここで、 E は弾性係数、 ν はポアソン比、 n は空隙率、 μ は間隙水圧である。

一方、既往の研究⁴⁾では豊浦砂を用いB値とSrの関係を(1)式で与えて定数 a の値を求めており、密な試料では $a=140$ 、緩い試料では $a=130$ であると報告している。

$$B = 100 - \frac{100 - S_r}{1/a + (100 - S_r)/100} \quad (2)$$

両者を比較したときに定数 a を(3)式のように与えれば両式が一致することがわかる。

$$a = \frac{nE}{3(1-2\nu)\mu} \quad (3)$$

アルバニー珪砂の場合の定数の値を求めるために既往の研究と同様の方法により、B値とSrの関係を求めた。これは、完全に飽和させた供試体を作成した後に、所定の量の空気を間隙に送り込みその

時のB値の値を求めることにより飽和度SrとB値の関係を求めるものである。図-10にアルバニー珪砂のB値と飽和度Srの関係を示すが、今回の試料では密な場合が $a=100$ 、緩い場合が $a=60$ となった。

溶存酸素量DOはmg/lの単位で表される。一方、1mgの酸素が常態(1気圧、20℃)での気体としての体積は、酸素の分子量が32であり、1モルの気体の容積が常態で $22.4 \times 10^3 \text{ ml}$ であることから次式のように0.7mlと求められる。

$$V = \frac{1}{32} \times 22.4 \times 10^3 \text{ ml} = 0.7 \text{ ml} \quad (4)$$

従って、溶存酸素量が1mg/l低下し、その酸素が遊離して気体となったと仮定すれば、 10^3 ml の水に0.7mlの気体が存在することになり、飽和度に換算して0.07%の低下になる。今回のアルバニー珪砂の場合では、静置前後で間隙水の溶存酸素量が7.5mg/lから3mg/lに低下した。これは4.5mg/lの低下であり、その酸素が遊離して気体になったとすれば約0.3%の飽和度の低下が生じる。但し、前にも述べたように水中には酸素の量の約2倍の窒素が溶存しており、窒素も同様に遊離して気体となったとすれば、飽和度の低下は約0.9%となる。一方、B値は0.74から0.58に低下しており、(2)式の関係を用いれば飽和度Srは99.4%から98.8%の0.6%の低下になる。

同様にして豊浦砂の場合を検討すると、静置前後の溶存酸素量は8.0mg/lと0.7mg/lであり、7.3mg/lの低下を生じている。これが気化したとすれば酸素だけで0.5%の飽和度の低下であり、窒素まで考慮に入れると約1.5%の低下になる。また、B値は静置前後で0.68から0.28に低下しており、密な豊浦砂試料の定数を用いると飽和度Srは99.7%から98.2%の変化になり、約1.5%の低下になる。

今回使用した溶存酸素計は保証されている有効数字が一桁程度のものであり、B値と飽和度の関係も実験誤差の生じる可能性のあることを考えれば断定的なことは言えないが、今回実験したアルバニー珪砂および豊浦砂の供試体の間隙水の溶存酸素量の低下と飽和度の低下は良く対応していると言える。

(4) 現象に対する考察

三軸試験において供試体を長時間維持し続けると飽和度が低下する可能性があることは比較的良好に知られており、外部からの空気の浸入が供試体の飽和度を低下させると考えられている。しかし、今回の場合、ラッピングフィルムによる被覆などの外部からの空気の浸入が生じにくくなる処置をしており、また、間隙水の溶存酸素量が低下していることも外部からの空気の浸入の可能性が低かったことを裏付けている。空気が浸入した場合には溶存酸素量も上昇することは今回の実験でも圧力空気に接していたセル液の溶存酸素量が上昇したことで明らかである。また、前項の検討で明らかになったように、間隙水の溶存酸素の低下量

と供試体の飽和度の低下量は定量的に良い対応を見せており、供試体の飽和度の低下に間隙水中に溶存していた空気の常態の変化が強く影響していたことは明らかであろう。また、水中の空気が砂間隙中で遊離する現象については水から遊離した空気が砂試料中で気泡を形成する事を報告した既往の研究⁹⁾もある。

一方、今回の検討でも空気中で静置しておいた水道水では溶存酸素の量に大きな変化が見られず、土槽実験や三軸供試体の実験のように土間隙中においてのみ溶存酸素量の低下を生じている。この現象を理解するためには固体と気体とでは水に溶解している状態が異なることを考えねばならない。具体的に言えば、固体が水に溶解した状態は固体の分子が水分子の間に分散している状態であり、多少の運動は行っているが水の外へ出ることは無い。それに対し、気体の分子は水の内外を自由に運動しており、ある時点で水中を運動している気体（分子）が水に溶存しているものと解釈されているだけである。つまり、溶解している固体の分子は確定論的取り扱いができるが、気体の分子は確率論的な取り扱いになり、気体分子は水の中と外を自由に出入りしていると考えなければならない。その考えを裏付けるものが温度上昇時の溶解度の変化傾向の相違である。水の温度を上昇させた場合、ほとんどの固体は溶解できる量が増加するが、気体では反対に溶解できる量が低下する。これは気体分子は温度が上昇すると運動エネルギーが増加し、等圧状態では一定量の空間に存在する確率が低下するためである。今回の実験で言えば、気中に放置している状態で計測された溶存酸素量の変化はその水の初期状態から酸素分子が出入りして平衡状態に移っていく様子を計測したことになる。つまり、新鮮な水道水からは酸素が放出され、脱気された水には酸素が溶解していくという一方向的な変化でなく、水と外気の間を酸素分子が行き来していると考えることが重要である。

土の間隙では土粒子の存在が気体分子の運動を大きく阻害するため、溶存していると考えられている気体の状態に変化が生じる。更に、水中の気体は核になるものがあると気泡を形成することが知られており、これは炭酸水などを満たした場合にはコップが汚れている方が気泡が付着しやすいことから容易に理解できる。今回の実験でも「気中に放置した水道水」で容器の内側や溶存酸素計の表面に気泡が付着しているのが見られた。土の間隙中では間隙水に溶存している空気が運動

中に固体である土粒子に衝突し、その表面で気泡を形成し供試体全体の飽和度を低下させたと見ることが妥当であろう。

7. 結論

水の溶存酸素量の変化を指標に土試料の間隙水として水道水（脱気していない水）を使用した場合の問題点を検討した。検討の結果、以下のことが明らかになった。

1. 水道水および真空下で脱気した水道水を気中に静置しておくのと両者の溶存酸素量が変化し、ほぼ同一の値になる。
2. 水道水を砂の間隙中に静置すると溶存酸素量は時間の経過とともに著しく低下する。
3. 脱気水で飽和した試料の間隙を水道水で置換するとB値が大きく低下するが、時間の経過とともに遊離する気体により更にB値が低下する。
4. 上記状態での間隙水の溶存酸素量の低下と供試体の飽和度の低下は定量的に良い整合を見せる。

謝辞：本研究は、文部科学省 振興調整費による総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」プロジェクトの内、「大型地盤・基礎模型の作成と計測技術の高度化」のテーマで実施したものであり、本プロジェクトの関係者の方々の多大な努力の基に進められており、関係者の方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 佐藤正義, 阿部秋男:液状化実験用の地盤作成法と液状化時の地盤変位測定, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関するシンポジウム, pp.77-82, 2002年2月
- 2) 後藤茂: 高温環境で養生した砂質土の液状化特性(その2), 第30回土質工学研究発表会発表講演集, pp.859-860, 1995
- 3) 山口柏樹: 土質力学(全改訂), 技報堂出版, pp100-103, 1969
- 4) 社本康広, 後藤茂: 不飽和砂の液状化抵抗の評価法(その1) - 繰返せん断履歴効果を考慮した液状化抵抗の評価法 -, 第37回地盤工学研究発表会, pp1985-1986, 2002
- 5) 小高猛司, 浅岡頭: 砂質地盤の浸透過程での気泡の発生・発達現象, 土木学会論文集, No.487, III-26, pp129-138, 1994