液状化対象砂地盤のサンプリングによる飽和度調査とその評価方法に関する研究

藤井 直¹・大内正敏¹・酒井運雄²・西垣 誠³

¹正会員 オリエンタル白石(株)施工・技術本部技術部
(〒135-0061 東京都江東区豊洲5-6-52 NBF豊洲キャナルフロント2F)
E-mail: nao.fujii@orosc.co.jp

²正会員 基礎地盤コンサルタンツ(株)酒井研究室
(〒136-8577 東京都江東区亀戸1-5-7 日鐵NDタワー12階)
E-mail: sakai.katsuo@kiso.co.jp

³正会員 岡山大学大学院教授 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3-1-1)
E-mail: n_makoto@cc.okayama-u.ac.jp

砂地盤を不飽和な状態にして液状化強度を高める液状化対策工法が研究されている。著者らは、残留空気の持続性を簡易に検証するために、常温による不攪乱試料と地下水のサンプリングによる方法を提案し、施工時に漏れた空気がトラップされたと考えられた高架橋ニューマチックケーソン（以下、ケーソンと称す）基礎の近傍地盤で実際に実施した。サンプリング試料の圧力や溶存空気の影響について補正方法を示し、求められる飽和度の精度について検討した。この結果、液状化の対象となる砂地盤においてエントラプトエアとして残留する空気は、約28年間もの持続性を有することを示した。

Key Words : degree of saturation, partially saturated soil, sampling, liquefaction

1. はじめに

大規模地震に対して、堤防や一般民家等の広域な地盤を対象とする液状化対策の対応は遅れている。このような、既設構造物直下の対策として、曲線ボーリングや斜めボーリング等による薬液注入工法があるが¹⁾、この工法は高価であり多くの場所への適用が難しい。このような現状に対して、完全飽和状態の砂地盤から飽和度を数%低下させるだけで液状化強度が大きくなることを応用した方法は、経済的な手法と考えられ、多くの研究がなされている^{2)~5)}。

地盤を不飽和にする方法は、地下水位を低下させる方法が実施されている⁶⁾。しかし、地下水の低下により周囲の地盤の圧密沈下を誘発するような地盤では適用が難しく、広域な液状化対策としては、地下水の取水規制もあり難しい。また、そのランニングコストも大きい^{7),8)}。これに対して、地盤に空気を注入し不飽和な状態にして液状化強度を高める方法を著者ら^{2),9),10)}や岡村ら⁹⁾が提案している。この方法は、注入した空気がエントラプトエアとして80~90%の飽和度で地盤内に滞留するため、圧密沈下や地下水流動阻害などの

影響が少ないと考えられる¹¹⁾。この他にも永尾らによりマイクロバブル水を注水する方法が提案されている¹²⁾。

実地盤の不飽和状態の持続性とそのモニタリング方法は大きな課題であるが、いくつかの試みがなされている。安田らは、地下水位以下における埋立て地盤の飽和度評価に凍結サンプリングを用い不飽和であることを示しており¹³⁾、同様に岡村らも、SCP施工周辺地盤の飽和度調査を実施し、26年間の不飽和状態の持続性を示している¹⁴⁾。この方法は、きわめて確実な砂質層のサンプリング方法であるが、サンプリング価格が非常に高価である。柳浦・友清は、砂層の飽和度を通常のサンドサンプラーを用いて評価し、土壤ガスの有無の参考資料としている¹⁵⁾。このように、サンプリングによる方法は、飽和度のモニタリングが可能な方法の一つと考えられるが、残存する砂質地盤内の空気量を簡易に計測する手法はまだ確立されていない。

従来から開発されてきた凍結やポリマー等を用いる高品質サンプリング方法は、微小ひずみレベルの骨格構造に関わる乱れを少なくすることに着目したものである^{16),17),18)}。サンプリングおよび室内試験は、地下水

面下の試料は飽和状態であるとの仮定により実施されてきた。従来の常温による不攪乱サンプリング試料から求められる飽和度は、試料の土粒子密度、含水比、湿潤重量から求められるが、i) サンプラー先端が解放されているため、地上に取出した時点で間隙水が抜ける可能性がある。ii) 試料運搬時の乱れを防止するために試料全体を凍結した場合、凍結に伴う試料の体積変化を防止する目的で人為的に脱水し、含水比を低下させる傾向がある。これらの理由により飽和度は低い値を示す可能性がある。

本研究では、漏気現象が生じた可能性のある過去のケーソン基礎の施工事例を選定し、原地盤の飽和度調査手法を提案し実際に基礎近傍で実施して、地盤を不飽和化する液状化対策工法におけるエントラプトエアの持続性と共に飽和度調査手法の有用性を検証した。調査は、常温による不攪乱試料サンプリングによるものと、地下水サンプリングによるものの二種類の方法を提案してその比較を行った。また、これらの調査結果から、ケーソン施工後約 28 年間経過した旧来の施工法によるケーソン基礎近傍の砂質地盤内に空気がトラップされ残留していることがわかった。

2. 調査対象ケーソン基礎の概要と調査計画

(1) 調査地の地盤概要

調査地は、大阪市西淀川区にある山陽新幹線加島高架橋のケーソン基礎周辺である¹⁰⁾。このケーソン基礎は 1970 年に施工を完了しており、1997 年の調査時点で施工後約 28 年経過している。その間、当該高架橋は、兵庫県南部地震を経験しており、大阪市内における震度は 5 であったが、ケーソン基礎周辺地盤に噴砂等の液状化による現象は見受けられず、支承装置に軽微な損傷が見られたのみであった⁹⁾。図-1(a)に施工前に調査された調査対象ケーソンから岡山方向に約 20m 離れた位置の土質柱状図を示す。表層より液状化の対象となる沖積地盤である砂層、シルト、シルト質粘土が堆積し、その下方にケーソン基礎の支持地盤である天満層と呼ばれる礫混じり砂層が堆積している。今回調査した調査対象ケーソンから 1.25m 離れた位置の土質柱状図を図-1(b)に示す。表層の砂層は、図-1(a)と比較して層厚が 5.7m と薄くなり、N 値は 10 前後で堆積している。これより、表層に液状化の対象となるような緩い砂地盤が堆積していることがわかった。

(a) 昭和40年代の調査
 (b) 調査ケーソンから1.25m離れ
 (調査ケーソンから約20m離れ)
 (今回調査)

図-1 調査ケーソン周辺地盤の土質柱状図

(a) 断面図
 (b) 側面図
 (単位:mm)

図-2 ケーソン基礎形状

図-3 ケーソン基礎の沈下関係

図-4 ケーソン下端部での砂地盤の掘削

(2) 施工概要

ケーソン基礎の形状を図-2に示す。平面形状は、直径 7.0m の円型であり、ケーソンの長さ及び沈設深さは共に 18.5m である。このケーソンが所定の深度まで掘削および沈下が可能か否かは式(1)の条件式により検討される。

$$W_c + W_w \geq U + F + R \quad (1)$$

ここに、 W_c ：躯体重量(kN),

W_w ：沈下水荷重(kN),

U ：作業気圧による揚圧力(kN),

F ：躯体周面摩擦力(kN),

R ：刃口支持力(kN)。

式(1)のうちケーソン下端部に作用する刃口支持力は、刃口周辺まで掘削が可能であることから、設計では無視される。躯体周面摩擦力は、摩擦低減剤の大阪近郊における実績から、80%程度に低減される¹⁹⁾。式(1)の関係をケーソン下端の深度との関係で整理すると、図-3の沈下関係図として表せる。幾つかの深度で沈下抵抗力が上回るが、ケーソン躯体の構築や水荷重の注水時期を工夫することで、沈下は可能である。また、図は刃口支持力を無視しているため、沈下にはこの刃口支持力を低下させる必要がある。当時の砂地盤における掘削作業は図-4に示すように、ケーソン作業室内

図-5 サンプリング調査計画

の地盤中央部をケーソン下端の深度よりも深く掘削し、刃口部にむけて掘削することで、ケーソン下端部の刃口支持力を低下させることによりケーソンを沈下させていた。施工時期から、ケーソンの沈下掘削作業は、作業室天井スラブから懸架して走行するショベルによる機械化が実用化する前であり、人力やキャタピラ式の函内バックホーにより行っていた。作業員の足下や函内バックホーのトラフィカビリティを改善するために、図-4に示すように水位を下げるために、掘削作業中に作業室内の気圧を、作業気圧よりも若干高くすることで作業地盤面を不飽和な状態とすることもあった。これにより地盤によっては、ケーソン下端から漏気現象が生じていた。

以上の事前の資料調査から、調査対象としたケーソンは、施工時に漏気していた可能性が高いとが考えられる。

(3) 調査計画

本研究では、サンプリングによる原地盤の飽和度の調査方法として、常温による不攪乱試料サンプリングと、地下水試料サンプリングの2つの方法を検討することとした。

飽和度の調査位置は、図-5に示すケーソン近傍とした。旧来のケーソン施工では、ケーソン壁面から約 1.0m 離れの範囲は、施工時にゆるみ領域となり乱されている可能性が指摘されている²⁰⁾。したがって、ケーソン壁面から 1.25m 離れた位置を調査位置とした。調査深度は液状化の対象となる可能性がある砂層を対象とし、GL-2.0～-3.0m, GL-3.0～-4.0m, GL-4.0～-5.0m の3つの深度とした。

3. 不攪乱試料サンプリングによる飽和度調査

(1) 砂質地盤の飽和度評価を目的としたサンプリング方法

従来から行われてきた高品質サンプリングとは異なり間隙体積、間隙水体積、間隙空気体積の比率を原位位置と変化させることなく採取することによる、砂質地盤の飽和度評価を目的としたサンプリングの方法について検討する。

飽和度評価に用いるサンプリングのためのボーリング掘削は、ドリルストリングスの引上げに伴い孔内水位を低下させることにより、上向き浸透流を生じさせ、砂質地盤内に滞留している空気気泡を孔内に放出させないようにする必要がある。これを避けるために、ドリルストリングスの引上げ速度を遅くするだけでなく、掘削泥水は、ベントナイトだけでなくポリマーを混入させた高粘性かつ単位体積重量の大きい泥水を用いた。

従来用いられてきたサンプラーには、砂試料の常温による高品質サンプリング方法として開発された試料脱落防止および細粒土流出防止用の水圧グラブサンプラー、地中応力保持に着目した土圧バランスサンプラー、およびこれらの併用型サンプラーがある²¹⁾。また、一般的なトリプルチューブサンプラーもある。しかし、サンプリングは、飽和度を変化させることなく、試料を脱落させないことが必要であり、上述のサンプラーでは困難である。そこで、飽和度を変えないでサンプラーの中に乱れの少ない試料を取込む方法としては、

薄肉のチューブを静かに押込む方法とし、試料の脱落を防止する方法は、サンプラー上端の水および空気の入出りを止めることとした。これには、コアキャッチャ等を工夫する方法も考えられるが、サンプラーが大型化し薄肉でなくなる等の問題があり不採用とした。

図-6に製作したサンプラーを示す。サンプラーは、水圧ピストン式サンプラーを改良したもので、上部のA室およびA'室と表記した制御用シリンダー部と下部のB室と表記した試料採取ライナー部から構成される。上部ピストン部は、地上まで繋がれた給排水ホースと4つのバルブからなり、バルブは、地上から操作制御が可能で、A室内の水の給排水量を地上において給排水ホースを通じてモニタリング出来るようにした。また、試料採取ライナー部は内面を鏡面加工とし、サンプラーと原地盤との摩擦が極力小さくなるよう配慮した。下部ピストン部に設置した間隙水圧計は、水で飽和された針状のフィルター部を孔底から下方に押込むことで設置し、サンプリング時におけるサンプリング試料の間隙水圧の変化を測定することで、試料の乱れの度合いの参考とした。サンプリングに用いる反力は、10kNの水槽2つとし、サンプラーの押込みには、ボーリングマシンの油圧ジャッキを用いた。

図-7にサンプリング手順図を示す。Step-1では、前述の高粘性・高比重の掘削泥水を用いて所定の深度まで削孔した後、ケーシングチューブを掘削底面まで設置した。Step-2では、試料採取用ライナー部および給排水ホース、制御用シリンダー部を水で飽和させた後、サンプラー本体を孔底へ設置した。Step-3において、地上にて水圧を空気圧で制御するチャンバーを用いて上部ピストンを制御し、A室内の水をA室に排水させ針状のフィルター部を孔底から原地盤へ押し込んだ。Step-4では原地盤の間隙水圧を測定し、間隙水圧が地下水圧と同等となり落ち着いた時点で、A室内の水を給排水ホースを通じて地上に排水させながら、ボーリングマシンの油圧による押込力にて速度が一定となるようにサンプラー本体を静的に押し込んだ。Step-5では、ボーリング孔内のサンプラー周辺に地上からボーリングロッドを挿入し、ボーリングロッド下端からボーリング孔上方に向けて掘削泥水を循環させ、サンプラー周辺を緩めた。この時点の掘削泥水の単位体積重量は 1.03g/cm^3 であった。次に、掘削泥水を循環させたまま、サンプラー本体の上端から空気および水の入出りが出来ないようにバルブを閉じ、掘削泥水の上昇流に乗せるようにサンプラーをゆっくりと引き上げた。引上げ時には、サンプリング試料の間隙水圧を測定し、S3試料を除き引上げ時の深度に応じた圧力であることを確認した。Step-6にてサンプラー下端部を地上ケーシングチューブ内の掘削泥水中にて図-6(b)に示す下

図-6 不攪乱試料サンプラー

図-7 不攪乱試料サンプリング手順

端キャップを下方から被せ、キャップ外周側面からサンプラー固定用ボルトを締付けることで閉合し、間隙水の脱落を防いだ後、掘削泥水中から引上げた。サンプラー本体から試料採取ライナー部を取り外し、サンプリング試料を試料採取用ライナー部ごと重量と試料長を測定した。その後、試料採取用ライナー部の下端から上端に向けて順次凍結させた。この際、試料採取用ライナー上端で凍結による排水量をスプーンですくいビーカーに集め測定した。凍結が完了した後、試料長を測定したが、凍結前と明瞭な差は見られなかった。

(2) サンプリングの結果

図-8 にサンプラー押込み力と間隙水圧の計測結果を示す。押込み力は、ボーリングマシンの押込み用の油圧配管中に設置した圧力変換器により計測した。また、サンプラー下端深度は、地上部にてボーリングロッドの沈下を巻き取り式変位計にて計測した。押込み力は、何れのサンプリングにおいても深度が深くなるにつれて大きくなる傾向が見受けられた。これは、サンプラーと周辺地盤との摩擦による抵抗の影響によるもの、

およびボーリングロッドのたわみによると考えられる。S1 試料の間隙水圧は、有効土被り圧に対して小さな値であったが、S2 試料では有効土被りの 80%に近い値となった。S3 試料は、押込み開始直後に小さくなり、その後の変化は小さかった。この理由は、地盤が不飽和であり、フィルター内に土中の空気が侵入したことや、試料の引揚げ時に間隙水圧の変化がなかったことから、細粒分がフィルター部に詰まったことによると考えられる。表-1 にサンプリング試料長さについて示す。サンプリングは試料長さ 50cm を目途とした。サンプリング深度が深くなるほど押し込み力を要した。いずれの試料においても、取込み長 l_2 と試料長 l_3 の差は小さく、サンプラー引上げ中の試料の脱落はなかったと考えられる。

(3) 飽和度評価

a) 炉乾燥法と圧力補正による飽和度

サンプリングした試料は、凍結前と重量が変化していないことを確認した後、細かな互層地盤であったため、層毎に 4~6 つに分割して試料の平均的な飽和度

図-8 サンプラー計測結果

表-1 不攪乱試料のサンプリング長さ

試料番号	S1	S2	S3
サンプリング深度	GL-2.10~	GL-3.50~	GL-4.50~
押込み長 l_1 (cm)	65.6	58.8	45.0
取込み長 l_2 (cm)	58.5	54.3	42.6
試料長 l_3 (cm)	58.0	54.0	42.0

ここで、

押込み長：地上で計測したサンプラーの押込み長

取込み長：ライナー内のピストン変位量を制御シリンダー(A室)からの排水量により求めた取込み長

試料長：地上に取り出した時点での採取試料長

表-2 炉乾燥法により求めた飽和度

試料番号	S1	S2	S3
サンプリング深度 (GL-,m)	2.17~2.63 (0.46m)	3.53~3.99 (0.46m)	4.53~4.87 (0.34m)
含水比 W_c (%)	24.7	30.7	30.5
土粒子の密度 G_s (g/cm ³)	2.656	2.664	2.670
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.853	1.836	1.821
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.486	1.404	1.395
間隙比 e	0.787	0.897	0.914
間隙率 n	0.44	0.47	0.48
土粒子の体積 V_s (cm ³)	854.0	804.5	589.5
間隙の体積 V_v (cm ³)	672.4	721.6	538.7
間隙水の体積 V_{w1} (cm ³)	560.2	659.4	480.6
間隙空気の体積 V_{a1} (cm ³)	112.2	62.5	58.1
飽和度 S_{r1} (%)	83.3	91.4	89.2
凍結による補正含水比 W_n (%)	24.8	31.6	31.0
凍結による排水量 (g)	1.66	33.18	16.59
間隙水の体積 V_{w2} (cm ³)	562.5	677.2	487.9
間隙空気の体積 V_{a2} (cm ³)	109.7	44.7	50.8
凍結による影響を補正した飽和度 S_{r2} (%)	83.7	93.9	90.6

を炉乾燥法により求めた。飽和度の算出は、間隙の体積 V_v がサンプリングによる変化はないものとし、式(2)により求めた。ただし、飽和度の補正方法に応じて添字を付与した。

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (2)$$

ここに、

S_r : 飽和度、

V_w : 間隙水の体積、

V_v : 間隙の体積。

表-2 に求めた飽和度 S_{r1} および、凍結の影響を補正した飽和度 S_{r2} を併せて示す。凍結の影響は、サンプリング試料の凍結時の排水量を補正することによった。

間隙空気が存在する場合、間隙空気は、Step-5 のボーリング孔底からの引上げにより圧力が低下し膨張する。これに伴い、間隙水は、サンプラー下端から排水され、サンプリング試料の飽和度は、低下している可能性がある。そこで、この圧力の変化による影響をボイルシャルルの法則を用いて補正する。サンプリング前後の温度は一定、間隙空気圧力は間隙水圧に一致しているとそれぞれ仮定すると、原位置における間隙空気の体積 V_{a3} は、式(3)で表せられる。

$$V_{a3} = \frac{P_a}{P_s} \cdot V_{a2} \quad (3)$$

ここに、

V_{a2} : 大気圧下における間隙空気の体積、

V_{a3} : 原位置における間隙空気の体積、

P_a : 大気圧下における間隙空気圧力(101.3kPa)、

P_s : 原位置における間隙空気圧力

(試料の中心高さ)。

膨張した間隙空気の体積分の間隙水が、全てサンプラー下端より排水されたと考えると、原位置における地下水の体積 V_{w3} は式(4)のように表すことが出来る。

$$V_{w3} = V_w + (V_{a2} - V_{a3}) \quad (4)$$

表-3 に圧力変化の影響を考慮した飽和度 S_{r3} を示す。

原位置の飽和度の値は、サンプリング試料からの排水がなかった場合は S_{r2} となるが、排水が完了していた場合は S_{r3} となる。この排水量がモニタリング出来れば測定精度の向上につながると考えられる。試料引き上げ時の間隙水圧はサンプラーの深度に応じた値であり、圧力の解放を確認したが、厳密な排水の状態は不明である。このため、原位置の飽和度は、 S_{r2} と S_{r3} の間にあると考えられ、飽和度は 90%前後であると評価される。

表-3 圧力による補正をした飽和度

試料番号	S1	S2	S3
サンプリング試料の原位置での圧力 P_s^* (kPa)	105.3	118.9	128.3
間隙水の体積 V_{w3} (cm ³)	566.9	683.5	498.6
間隙空気の体積 V_{a3} (cm ³)	105.5	38.1	40.1
飽和度 S_{r3} (%)	84.3	94.7	92.5

* 大気圧(101.3kPa)を考慮した絶対圧力を表す。

表-4 サンプリング試料の飽和度のバラツキ

試料番号	S1		S2		S3	
サンプリング深度 GL-(m)	2.17~2.22	2.29~2.44	3.53~3.63	3.65~3.80	4.53~4.68	4.70~4.85
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.887	1.859	1.901	1.741	1.864	1.791
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.519	1.467	1.587	1.261	1.481	1.337
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.694	2.600	2.688	2.711	2.707	2.721
含水比 W_n (%)	24.2	26.8	19.8	38.1	25.9	33.9
間隙比 e	0.773	0.773	0.694	1.150	0.828	1.034
間隙率 n	0.435	0.435	0.410	0.535	0.453	0.508
飽和度 S_{r1} (%)	84.3	90.0	76.7	89.8	84.6	89.2

(a) S1 試料

(b) S2 試料

(c) S3 試料

図-9 試料の粒径加積曲線

図-10 飽和度と細粒分含有率の関係

また、サンプリング試料の目視から、バラツキが大きい地盤であることが予想されたため、それぞれ3深度の試料から2供試体を作成し、飽和度のバラツキに

についても検討した。結果を表-4に示す。同じ試料でも飽和度が大きくばらついている。この試料の粒径加積曲線をほぼ同じ深度の標準貫入試験の試料を用いた粒径加積曲線を合わせて図-9に示す。細粒分含有率が試料により大きく異なる地盤であることがわかる。図-10に細粒分含有率と飽和度の関係を示す。岡村らの検討と同様に²⁾、細粒分含有率が大きいと飽和度は高く、細粒分含有率が小さい程、飽和度は低い傾向があることがわかった。

b) 地下水の溶存空気が飽和度評価に及ぼす影響

水に溶込み飽和状態に溶存した空気は、圧力が低下すると過飽和な状態となり、気泡化する場合がある。溶存空気が気泡化する体積の予測には、過飽和状態の度合いや気泡核の存在などの条件が必要であり²²⁾、正確な予測は難しい。ここでは、サンプリングによる大気圧下への解放に伴い生じる過飽和分が全て気泡化し、サンプリング試料から気泡化空気と同体積の間隙水が排水されるものとして、溶存空気の気泡化が飽和度に及ぼす影響について検討する。

地下水中の溶存空気は、地下水におけるバクテリアの生物活動や地盤を構成している鉱物との化学反応等の影響を受け、空気と同じ成分では無く変化している可能性がある。このため、地下水に溶存しているガスの種類と濃度は、地下水および土中ガスのサンプリング試料の成分分析を行う必要があるが、ここでは、溶存空気は、空気の成分のまま飽和状態であると仮定する。

地下水中に溶存した空気の気泡化を考慮した飽和度の算出は、ヘンリーの法則が成立つものとし、原位置の圧力と大気圧下における飽和モル分率の差分として気泡化した空気量を求め、この空気量の体積分の間隙水が排水されているものとして補正することによって、図-11に気液平衡概念図を示す。サンプリング試料の間隙水は、原位置の初期状態から、大気圧下に解放される圧力経路を辿る。これにより、地上で回収された試料の間隙水は、過飽和な状態となり、気泡化している可能性がある。

凍結による排水の影響を補正した間隙空気の体積 V_{a2} を、溶存空気の影響を受けたものと考え、補正をおこなう。その後、原位置の圧力に圧力補正し、飽和度を評価する。

図-11の気相線は、ヘンリーの法則により導かれ、式(5)で表される²³⁾。

$$p = H_{12} \cdot x \quad (5)$$

ここに、

p : 分圧 (kPa),

H_{12} : ヘンリー定数 (kPa/モル分率),

空気の場合は,

$$H_{12}=7262 \times e^{26.149(1-298.15/T)-21.652 \ln(T/298.15)} \times 10^3$$

T : 温度(K),

x : モル分率.

式(5)を液相濃度にモル濃度 c を用い, これに相当するヘンリー定数を H_c とすると式(6)で表せる.

$$p = H_c \cdot c \quad (6)$$

ここに,

H_c : モル濃度表示のヘンリー定数,

図-11 気液平衡概念図

$$(\text{kPa} \cdot \text{cm}^3/\text{mol}, H_c=H_{12} \cdot V_m),$$

V_m : 地下水のモル体積 (cm^3/mol),

(水の場合 $18 \text{ cm}^3/\text{mol}$),

c : 飽和モル濃度 (mol/cm^3).

気泡化する空気の体積 V_{dair} は, 原位置と大気下における飽和モル濃度差を Δc とすると, 式(7)で表せられる.

$$V_{dair} = \Delta c \times V_w \times 22400 \quad (7)$$

ここに,

V_{dair} : 気泡化する空気量(cm^3),

Δc : サンプル前後の飽和モル濃度差 (mol/cm^3),

V_w : 間隙水の体積(cm^3).

ここで, 溶存空気の補正をおこなった補正空気の体積を V_{a2}' とし, 式(8)が成り立つと仮定する.

$$V_{a2} = V_{a2}' + V_{dair} \quad (8)$$

したがって, 圧力補正した飽和度は式(9)と表すことが出来る.

$$S_{r4} = \frac{101.3 \times V_{a2}'}{p \times V_v} \times 100 \quad (9)$$

整理した結果を表-5に示す. 飽和度 S_{r4} は, 圧力補正のみの飽和度 S_{r3} と比較して0~0.3%高くなることがわ

表-5 地下水の溶存空気の気泡化を考慮した飽和度

試料番号	S1	S2	S3
サンプリング深度 (GL-,m)	2.17~2.63 (0.46m)	3.53~3.99 (0.46m)	4.53~4.87 (0.34m)
孔内温度 T^* ($^{\circ}\text{C}$)	18.9	17.2	17.6
空気のヘンリー定数 H ($\text{kPa}/\text{モル分率}$)	6.580×10^6	6.386×10^6	6.432×10^6
原位置の平均圧力 p (kPa)	105.3	118.9	128.3
サンプリング深度における飽和モル濃度 c_s (mol/cm^3)	8.891×10^{-7}	1.034×10^{-6}	1.108×10^{-6}
大気圧下における飽和モル濃度 c_a (mol/cm^3)	8.553×10^{-7}	8.813×10^{-7}	8.750×10^{-7}
飽和モル濃度差 $\Delta c = c_s - c_a$ (mol/cm^3)	3.380×10^{-8}	1.527×10^{-7}	2.330×10^{-7}
間隙の体積 V_v (cm^3)	672.4	721.6	538.7
間隙水の体積 V_{w2} (cm^3)	562.5	677.2	487.9
間隙空気の体積 $V_{a2} = V_{a2}' + V_{dair}$ (cm^3)	109.7	44.7	50.8
内空気気体分の体積 V_{a2}' (cm^3)	109.3 (99.6%)	42.4 (94.9%)	49.1 (96.7%)
内空気溶存分の体積 V_{dair} (cm^3)	0.4 (0.4%)	2.3 (5.1%)	1.7 (3.3%)
飽和度 S_{r4} (%)	84.3	95.0	92.8

* 地下水サンプリング時の計測データを用いた.

かった。

常温による不攪乱試料サンプリングは、対象地盤のN値が10前後であり、薄肉のサンプラーによりサンプリング可能であった。ボーリング孔底からの試料の引き上げにより試料内の間隙空気が膨張し、サンプラー下端から間隙水が排水されると考えられるが、排水が完了していたかは不明である。このため、評価される飽和度は多少の幅をもった値となったが、ケーソン周辺地盤の飽和度は、90%程度であり、不飽和であることがわかった。また、地下水の溶存空気が飽和度に及ぼす影響についても検討したが、0.3%程度の飽和度変化の可能性があったことがわかった。

4. 地下水試料サンプリングによる調査

(1) サンプリングの方法

地下水試料のサンプリングは、B. A. Torstenssonによる方法を用いた²⁴⁾。この方法を用いた不飽和地盤の土中ガスの評価は、柳浦・友清による検討があるが¹⁵⁾、飽和度の評価方法としての検討はされていない。地盤中の地下水およびガスのサンプリング装置を図-12に示す。オリジナルの装置は、フィルターエレメント(図-12参照)にセラミックフィルターや透水係数の小さいポーラスメタルを用いており、その透水係数は $1 \times 10^{-4}(\text{cm/s})$ 以下である²⁴⁾。空気圧を作用させていき、空気が入り始める圧力である空気侵入値は大きな値であることが予想され、地盤中の空気等のガスのサンプリングには不適と考えられる。柳浦・友清は、フィルタ

ーエレメントを透水性の良いものに変更することや、両端針を太いものに変更することで、土中の空気等のガスサンプリングを可能としている¹⁵⁾。ここでは、このような事例から、フィルターエレメント部は、大きさが外径30mm、高さ45mm、厚さ1.5mmのステンレス製のポーラスメタルを用いた。その透水係数は原地盤と同等と思われる $4.7 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ 、排水過程の空気侵入値は1.5kPaである。このフィルターエレメント部と採水容器を接続する両端針は、外径 $\phi 0.8\text{mm}$ 、内径 $\phi 0.57\text{mm}$ の市販されている最も太い針を用いた。図-13に地下水サンプリングの手順図を示す。Step-1では、不攪乱試料サンプリングと同様に掘削泥水としてポリマーを混入させた泥水を用いた掘削を行い、孔底までケーシングチューブを設置した。Step-2では、フィルターチップを飽和させた後、フィルターチップを孔底から30~50cm押込み、所定の深度にフィルターエレメント部を設置した。Step-3では、採水容器を単一成分のヘリウムで洗浄および置き換え、採水容器内の圧力を約60kPa減圧させ、負圧状態に調整した。ヘリウムを用いたのは、不活性ガスであること、空気中および地盤中にほとんど存在しないこと、および水への融解度が低いためである。採水容器および圧力計を組立てガイド管内に建込み、フィルターチップ直上で止めた。Step-4では、採水容器内が孔内温度と同じになった時点でフィルターチップのラバーディスクと採水容器のラバーディスクを両端針で同時に貫通させ、採水を開始した。採水は、フィルターエレメントの深度における間隙水圧が同じになり、圧力が安定するまで採

図-12 地下水サンプラー²⁹⁾

図-13 地下水サンプリング手順

水し続けた。Step-5 で、採水容器内のガス圧が変化しなくなったことを確認した後、採水容器を引き上げた。これにより、採水容器内の圧力は、採取位置の間隙水圧と等しく、原位置の圧力状態を維持した密閉状態で地上に回収されると考えられる。

(2) サンプリングの結果

図-14 にそれぞれのサンプリング深度における採水終了時の採水容器内の圧力を示す。これより、原位置の水圧に応じてサンプリング出来ていると考えられる。また、理論水圧は、地下水サンプリングの3日前に削孔を完了している標準貫入試験孔にて、地下水サンプリング作業中の3日間測定した地下水位の平均値である GL-2.0m から算出した。

(3) 飽和度の評価

採水を完了した採水容器内に取込まれた空気は、ヘリウムと空気の2成分としてデータを整理する。採水容器内の初期圧力 P_0 にて採水容器内の体積を V_{he} 、サンプリング後の圧力を P_u とすると、容器内のヘリウ

ムの圧力変化に伴う圧縮から、ボイルの法則により、取り込まれた土中の空気および地下水の体積の和 V_e は式(10)で表せる。

$$V_e = V_{he} - \frac{P_0}{P_u} V_{he} = \left(1 - \frac{P_0}{P_u}\right) V_{he} \quad (10)$$

また、地下水の体積 V_{wb} は、採水容器の重量の変化から求められる。したがって、取り込まれた土中の空気の体積は式(11)となる。

$$V_{air} = V_e - V_{wb} \quad (11)$$

よって、地下水と土中の空気が地盤中と同じ比率でサンプリング出来ていると仮定すると、サンプルの飽和度 S_{rb} は式(12)で求められる。

$$S_{rb} = \frac{V_{wb}}{V_{wb} + V_{air}} \times 100 \quad (12)$$

表-6 にデータを整理した結果を示す。飽和度は90%程度の不飽和状態と評価される。サンプリングした地下水と土中の空気が同じ比率との仮定は検証の必要があるが、調査地盤は、空気などのガスが存在し、不飽和な状態である可能性が高いと考えられる。

溶存空気が飽和度に及ぼす影響は、原位置の間隙水圧とサンプリング後の試料の圧力状態が同じであり、熱力学的な検討は現実的ではないが、図-11に示す圧力変化により、サンプリング開始直後は、減圧により気泡化し、地下水圧に戻る過程で溶解する可能性がある。このような圧力経路により、溶解した空気量と同じ空気量がまた溶存するとは限らないため、注意が必要である。

地下水サンプリングは、サンプリング位置における地下水と土中の空気をその圧力状態のまま、間隙中の土中の空気と地下水の比率を変化させることなくサンプリング出来ていたと仮定すると、不攪乱サンプリングと同様に飽和度90%程度であり、不飽和状態と評価できることがわかった。

図-14 間隙水圧の収束値

表-6 地下水サンプリングによる飽和度

試料番号	BAT1	BAT2	BAT3
サンプリング深度 (GL-,m)	2.50	3.70	4.70
孔内温度 t (°C)	18.9	17.2	17.6
容器内初期圧 p_0^* (kPa)	43.0	35.4	41.7
事後容器内圧 p_u^* (kPa)	107.6	119.3	130.9
取込み容積 V_e (cm³)	306.0	359.2	348.8
地下水の体積 V_w (cm³)	261.6	330.0	318.8
土中の空気の体積 V_a (cm³)	44.4	29.2	29.8
飽和度 S_{rb} (%)	85.5	91.9	91.5

* 大気圧101.3kPaを考慮した絶対圧を表す。

5. 考察

ケーソン周辺地盤の飽和度を常温による不攪乱試料サンプリングと地下水サンプリングにより検討した。図-15 に検討結果を深度との関係を整理する。地盤にエントラプトエアとして残留する空気量は、飽和度で80~90%であることが知られておりサンプリング結果は、これとよく一致した²⁵⁾。また、各算出方法による飽和度と飽和度の真値 S_r との関係は式(13)で表せられる。

$$S_{r1} < S_{r2} < S_r < S_{r4} \quad (13)$$

S_{r1} は、サンプリング試料そのものの飽和度であり、 S_{r2} は、 S_{r1} を凍結による排水量を補正した値である。 S_{r3} は、原位置への圧力を補正したものであるが、サンブラー引揚げに伴い、サンプリング試料内の空気が膨張し、サンブラー下端から膨張分の間隙水が排水されたとした場合の値である。この排水が完了したものかの確認は出来ておらず、実際の飽和度は、 S_{r2} と S_{r3} の間にあると考えられる。 S_{r4} は、 S_{r3} の値に間隙水の溶存空気の影響を加味した値である。このため、飽和度の真値は、 S_{r2} と S_{r4} の間にあると考えられ、式(13)で示される。この飽和度の真値は、今回の検討の場合、0.6~2.2%の幅をもって評価されることがわかった。この飽和度の幅が液状化対策におよぼす影響については、Okamura and Soga の検討結果が参考となる²⁵⁾。

調査対象としたケーソン基礎周辺地盤について常温

図-15 飽和度の深度分布

による不攪乱試料サンプリングによるものと地下水サンプリングにより飽和度を評価した結果は、ほぼ同値である。しかしながら、図-9 に示したようにバラツキの大きい地盤であり、2つの方法による飽和度の整合は、今回は良く一致したが、いくつか注意すべき点がある。ここで提案した手法で安価でかつ簡易に砂質地盤の飽和度を評価出来ることがわかった。

6. 結論

本研究では、約28年前に施工を完了しているケーソン基礎周辺地盤にて二種類の方法により実地盤の飽和度を調査し、評価方法を検討した。その結果、砂質地盤内の残存空気量の測定が可能と判断出来ることがわかった。本研究により得られた知見を以下に列挙する。

(1) 不攪乱試料サンプリングによる飽和度評価

a) 飽和度評価用に作製した不攪乱試料サンブラーを用い、サンプリング方法とその評価方法について検討し、飽和度評価手法の一例を示した。また、原地盤の飽和度は、90%程度であることがわかった。

b) 地下水に溶存している空気がサンブラー内にてボーリング孔底からの引上げに伴い、圧力が解放され気泡化する影響は、今回の検討では小さい可能性が高いことがわかった。しかしながら、溶存空気の気泡化については予測が難しく、サンブラー引上げ時に、サンブラー内の水分量変化を測定することが必要であると考えられる。

(2) 地下水試料サンプリングによる飽和度評価

a) 採水容器内に取込まれる土中の空気および地下水は、間隙に存在している空気と水の比のまま取り込まれると仮定すると、飽和度90%程度の不飽和の状態であることがわかった。

(3) ケーソン周辺地盤の飽和度

a) 調査対象としたケーソン周辺地盤は、不飽和な状態であることがわかった。飽和度は90%程度であった。

b) 土中に滞留していた空気が、ケーソンから漏気した空気とすると、約28年間もの長期間滞留していることがわかった。

c) 兵庫県南部地震前の原地盤の飽和度は不明であるが、地震後も不飽和の状態が保たれていると考えられる。

(4) 今後の課題

a) 応力解放に伴うサンプリング試料の緩みについて検討する必要がある。

b) 不攪乱試料サンプリングによる方法は、地下水に溶解しているガスの気泡化を考慮し、サンプラー引上げ時の圧力変化に伴う飽和度変化を誘電法等によりモニタリングする必要があると考えられる。

c) 本論文では、2つの方法により飽和度を調査し、同等な値を得ることが出来たが、個々のサンプリング方法について、飽和度の高い地盤等の飽和度が既知の地盤で、精度の確認をする必要があると考えられる。

謝辞：本論文のケーソン周辺地盤の飽和度調査は、主に故白石俊多博士の検討によるものである。2007年に他界した博士の御冥福を祈ると共に地盤を不飽和化させる液状化対策工法の実用化に向けてより一層努力していきたい。

参考文献

- 1) 太田正規, 大野康年, 島田俊介, 米倉亮三: 薬液注入の耐久性と恒久グラウティング, 恒久グラウトと本設地盤改良 4, 土木技術, Vol.61, No.6, pp.98-103, 2006.
- 2) 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.
- 3) Yoshimi, Y., Tanaka, K. and Tokimatsu, K.: Liquefaction resistance of a partially saturated sand, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.3, pp.157-162, 1989.
- 4) Ishihara, K., Hung, Y. and Tsuchiya, H.: Liquefaction resistance of a nearly saturated sand as correlated with longitudinal wave velocity, *Proceedings of The First Biot Conference on Poromechanics, A Tribute to Maurice A. Biot*, pp.583-586, 1998.
- 5) 岡村未対, 武林昌哉, 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) 大森弘一: タンク基礎 (間隙水圧低下工法における地盤強化対策), 軟弱地盤における設計・施工例, 基礎工, No.12, pp.122-129, 1988.
- 7) 地盤工学会: 地下水を知る, 入門シリーズ, pp.122-129, 2008.
- 8) 土木学会関西支部・地下水制御が地盤環境に及ぼす影響評価に関する調査研究委員会: 地下水制御が地盤環境に及ぼす影響評価, pp.5.7-5.52, 2002.
- 9) 白石俊多: ニューマチックケーソン基礎は激震を耐え抜いた, 基礎工, Vol.25, No.9, pp.120-127, 1997.
- 10) 白石俊多: 地震による液状化地盤の側方流動と液状化防止法試案, 土と基礎, 第 47 巻, 第 10 号, pp.31-34, 1999.
- 11) 西垣 誠: 飽和・不飽和領域の土中水の浸透特性に関する 2, 3 の考察, 土質工学会論文報告集, Vol.23, No.3, 1983.
- 12) 永尾浩一, 山田早恵香, 水上雄哉, 末政直晃, 片田敏行, 畔上洋一: マイクロバブル水混入による地盤の不飽和化への検討実験, 第 42 回地盤工学研究発表会, pp.775-776, 2007.
- 13) 安田 進, 小林利雄, 福島康弘: 飽和度および試料の護互層状態がまさ土の液状化強度に与える影響, 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集, pp.425-430, 1999.
- 14) 岡村未対, 石原雅規, 田村敬一: SCP で改良された砂質土地盤の 26 年後の飽和度, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.2027-2028, 2003.
- 15) 柳浦良行, 友清 悟: 土中ガスの調査・評価方法の開発, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.193-205, 1999.
- 16) 柳澤希美, 谷 和夫, 金子 進, 酒井運雄: 水溶性ポリマーの濃厚溶液を使用した新しいサンプリング方法のメカニズム, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.49-56, 2004.
- 17) 谷 和夫, 金子 進: 水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用した乱さない試料のサンプリング方法, 土と基礎, Vol.54, No.4, pp.19-21, 2006.
- 18) 酒井運雄, 金子 進, 湯川浩則: 高品質砂礫試料の採取 (GP サンプリング), 基礎工, Vol.53, No.9, pp.44-47, 2006.
- 19) 大阪新幹線工事局: 山陽新幹線新大阪岡山間建設工事誌, pp.475-482, 1972.
- 20) 海野隆哉, 棚村史郎: ケーソン基礎周辺地盤の緩みと設計法への一考察, 土と基礎, pp. 9-14, 1984.
- 21) 産業技術サービスセンター: 実用地盤調査技術総覧, pp.237-249, 2007.
- 22) 眞野喜洋: 高圧環境と健康, pp.117-141, 1994.
- 23) 化学工業協会編: 改訂五版化学工学便覧, pp.58-59, 1988.
- 24) Torstensson, B. A.: New system for ground water monitoring, *Ground Water Monitoring Review*, pp.131-138, 1984.
- 25) Okamura, M. and Soga, Y.: Effects of pore fluid compressibility on liquefaction resistance of partially saturated sand, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.5, pp.695-700, 2006.

(2011.2.15 受付)

RESEARCH ON THE DEGREE OF SATURATION INVESTIGATION BY THE SAMPLING OF THE SAND FOR LIQUEFACTION

Nao FUJII, Masatoshi OHUCHI, Katsuo SAKAI and Makoto NISHIGAKI

The liquefaction countermeasure technical method, whereby the liquefaction strength is enhanced by making sand deposit in the state of unsaturation, is currently under study. The author et al have suggested a simple method of verifying the persistence of residual air using the undisturbed sample under ordinary temperature and sampling underground water; and have actually implemented the method in the adjacent ground with the foundation of viaduct pneumatic caisson where the leaked air during the construction was considered to have been trapped. We demonstrated the method of correcting the influence of the pressure of sampling specimen as well as of the dissolved air, and studied the precision of required degree of saturation. As the result, it has been shown that the residual air entrapped in the sand deposit is sustainable for as long time as about 28 years.