

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

岡村 未対¹・武林 昌哉²・西田 克司³・藤井 直⁴・神宮司 元治⁵・
今里 武彦⁶・安原 英明¹・中川恵美子⁷

¹正会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)
E-mail:okamura@cee.ehime-u.ac.jp, hide@dpc.ehime-u.ac.jp

²正会員 東亜建設工業 技術研究開発センター (〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善1-3)
E-mail:M_TAKEBAYASHI@toa-const.co.jp

³正会員 (株) 不動テトラ 建設本部工事総括部 (〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町7-2)
E-mail:katsuji.nishida@fudotetra.co.jp

⁴正会員 (株) オリエンタル白石株式会社 施工・技術本部 (〒102-0093 東京都千代田区平河町2-1-1)
E-mail:Nao.Fujii@orsc.co.jp

⁵正会員 (独) 産業技術総合研究所 企画本部 (〒100-8921 東京都千代田区霞が関1-3-1)
E-mail:m.jinguuji@aist.go.jp

⁶株式会社日本地下探査 事業本部 (〒273-0033 千葉県船橋市本郷町658-2)
E-mail:imasato@chikatansa.co.jp

⁷国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所 (〒760-0017 香川県高松市番町1-6-1)
E-mail:nakagawa-e88s3@pa.skr.mlit.go.jp

近年、地盤に空気を直接注入するなどして地盤を不飽和化する液状化対策工法が検討されており、既存工法に比べて格段に安価で既設構造物直下にも適用ができる工法として実用化が期待されている。本報告は、空気注入により地盤が不飽和化されることを実証し、不飽和化された領域を特定する技術の適用性を検討することを目的として行われた現場実験について述べるものである。実験ではGL-6mに設置した注入口から空気を地盤に注入したところ、空気流量は注入圧力と共に概ね直線的に増加した。比抵抗トモグラフィとFDRプローブによる測定の結果、注入地点を中心に直径3～4m程度の領域が不飽和化されたことが確認され、測定された飽和度はその後採取した凍結サンプリング試料の飽和度と良い対応を示した。

Key Words : *degree of saturation, monitoring on site, tomography, desaturation, liquefaction countermeasure*

1. はじめに

我が国には耐震対策が十分に進んでいない防災施設や耐震性を有すべき重要構造物が多く存在する。ゼロメートル地帯の河川堤防やプレート境界型巨大地震による津波の来襲が想定されている地域の海岸堤防や護岸、代替輸送路の乏しい地域での道路盛土、空港などはその一例である。

堤防や盛土、護岸などの土構造物の既往の地震による被災の原因はほとんどが地盤の液状化であり、耐震対策は液状化対策と考えると良い。液状化対策工法は、これまでに数多くのものが開発され実用に供されているが、

いずれの工法も工費が高く、長い延長区間の施工をするためには莫大な費用を要する。また、既設構造物の直下を液状化対策できる工法は極めて限られており、それらの工費はさらに高い。既設構造物の液状化対策としては、既設構造物周辺地盤の液状化対策を行うことで構造物の被害低減を図るものもあるが、それらと比べて構造物直下地盤の液状化を防止する対策工法の効果は格段に大きい¹⁾。近年では、地盤に空気を直接注入するなどして地盤を不飽和化する液状化対策工法が検討されている²⁾。この工法の原理は、土の液状化強度が飽和度の低下と共に急激に増加すること³⁾を利用するものであり、地盤に挿入したパイプなどから地盤中に空気を注入すると、比

較的短時間で広範囲の地盤から脱水し土の飽和度を低下させることが出来る⁴⁾ことから、既存工法に比べて格段に安価で既設構造物直下の対策にも適用が可能な工法として実用化が期待されている。これまでに、小型模型を用いた地盤への空気注入実験⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾により不飽和化が可能であることが確認され、不飽和化の領域や飽和度が数値解析によりある程度予測可能であることが報告されている⁴⁾。一旦不飽和化した地盤における土中空気の状態については、数年から26年前にサンドコンパクションパイル工法の施工時に不飽和化された地盤の飽和度調査により不飽和状態が保持されていたことが明らかにされ⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾、模型実験では一旦低下した不飽和地盤の飽和度は2年間以上に亘り安定していることが確認されている⁴⁾⁶⁾¹¹⁾。このように一旦不飽和化された地盤は不飽和状態をかなりの長期間保持するものと考えられるが、一方で、高度成長期に地下水が大幅に低下しその後回復した地域における調査により地盤が飽和していることが報告されるなど、数十年以上の長期間に亘る土中空気の状態については検討の余地がある。

不飽和砂の液状化強度については、土中空気の状態による液状化強度の増加が空気の圧縮性により定量的に評価できることが明らかにされた¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。構造物直下を不飽和化した地盤の模型振動台実験や動的遠心実験によって、不飽和化による液状化対策効果を検証する試みも行われている¹¹⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。

このような地盤の不飽和化による液状化対策工法の実用化に向けた研究の進展をうけ、筆者らは現場での空気注入実験を行った。この現場実験の目的は、空気注入により地盤が不飽和化されることを現場で実証すること、および不飽和化された領域を特定する技術を確立することである。後者は、現場での施工時の施工管理に必要な技術であり、これまでは検討されていないものである。本文は、この現場実験の概要を報告するものであり、地盤条件と空気の注入条件、三次元比抵抗トモグラフィとFDRセンサーによる飽和度の測定結果、凍結サンプリングによる飽和度の詳細な測定結果について述べる。

2. 現場実験

現場実験は、高知県高知市の浦戸湾に面した埋立地にて行った(図-1)。実験ヤードの地表面はほぼ水平で、地盤高はTP +3.5mである。実験ヤードは図-2に示す平面図の長方形の領域である。

(1) 地盤条件

実験ヤード内の空気注入地点を中心とした7地点で事

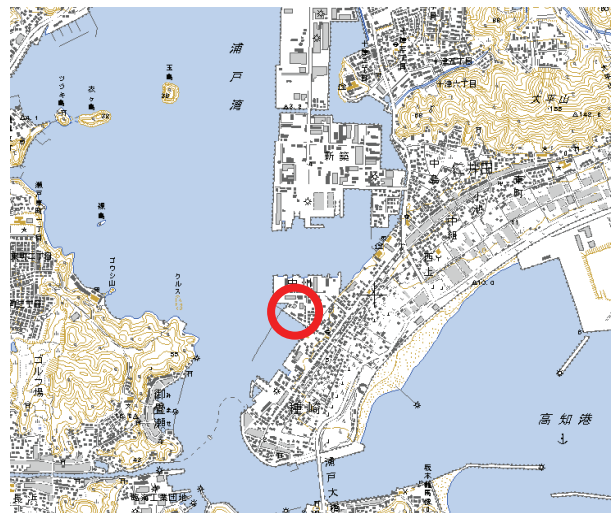


図-1 実験現場 (国土地理院 電子国土ポータル¹⁷⁾)

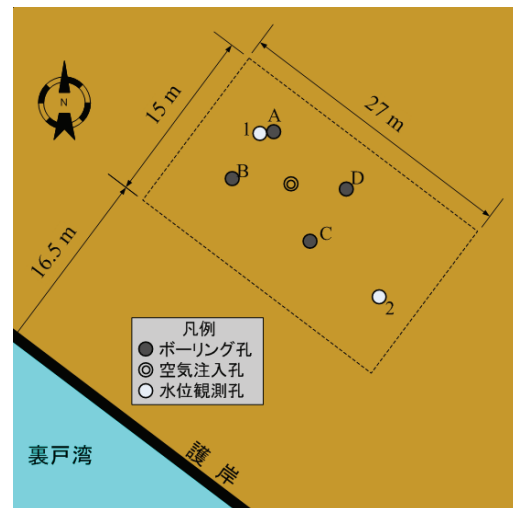


図-2 実験ヤード平面図

前ボーリング調査をおこなった。3つのボーリング孔(A孔-空気注入孔-C孔)を通る断面の地層構成を図-3に示す。地表から30cm程度の表土層の下に砂質土層と砂礫層が堆積し、その下の深度約6mにシルト層が存在している。このシルト層以深が沖積層で、その上の砂質土及び砂礫層は埋立て土層である。今回の実験における不飽和化対象層はこの埋め立て土層である。ボーリングC孔での標準貫入試験のサンプラーで採取した試料の粒度試験結果を図-4に示す。砂質土層と砂礫層の境界は明確ではなく、何れのボーリング地点においてもレキ分含有率や細粒分含有率が深度方向にある程度連続的に変化していた。深度5.5mまではレキ分を混入しており、深度と共にレキ分含有率はおおよそ40%からゼロまで変化している。また、埋立て土層の細粒分含有率はおおよそ10~30%で、レキ分含有率のような深度方向の変化傾向は明確でない。また、後述する海面高さ以深(おおよそGL-3.5m以深)ではN値が小さく、以浅では地表に向かって

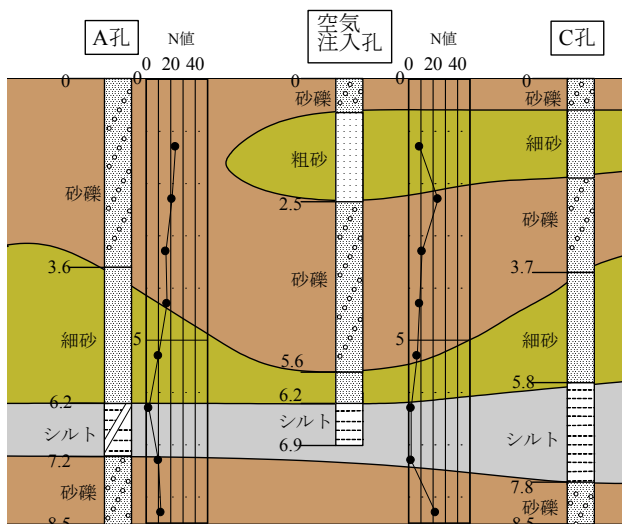


図3 現場の地層構成 (A孔-空気注入孔-C孔)

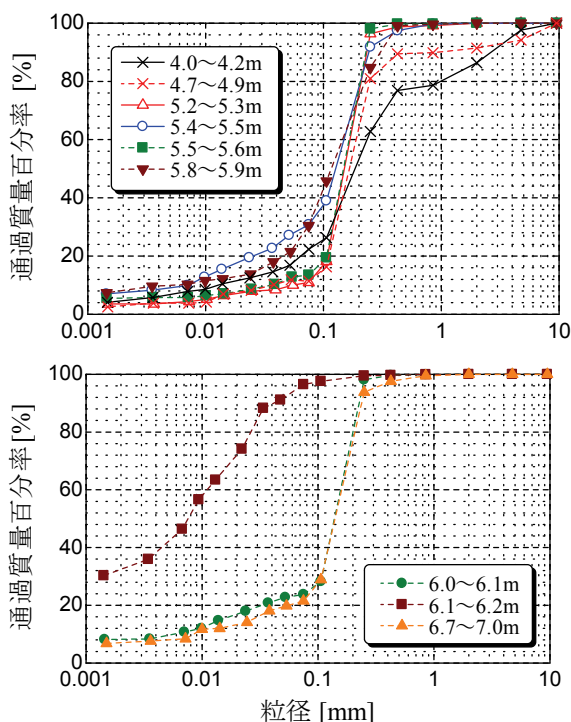


図4 深度毎の土の粒度分布 (C孔から採取した試料)

N値が大きくなる傾向にある。

D孔で採取した不攪乱試料を用い、加圧板法による土の保水性試験を行った。ただし、GL-4.0~4.5mの供試体は2mm以上のレキを取り除き、再構成した供試体を用いた。水分特性曲線を図-5に示す。何れの供試体も負圧下で脱気水を循環してほぼ完全に飽和した状態から試験を開始した。GL-4.0~4.5mの土は5.0~5.5mの土と比較して空気侵入値がやや低く、比水分容量は大きくなっている。

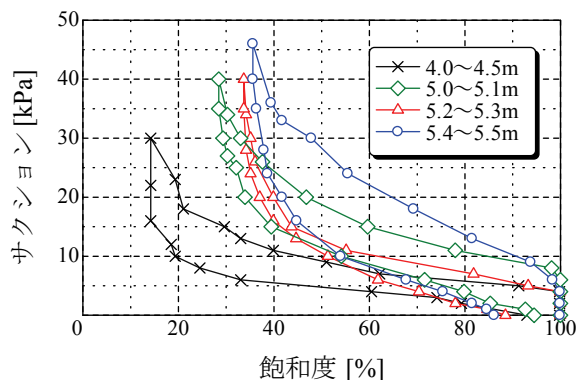


図-5 深度毎の土の水分特性曲線

(2) 地下水位

水位観測孔1において長期間の地下水位変動を観測し、また観測孔2において淡水と塩水の境界深度を測定した。ただし、地下水位は、シルト層以浅の層の水位である。これらの孔はおよそ深度15mまで掘削し、ストレーナーを挿入して厚壁を保護した。これら、および後述するPS検層は、飽和領域の特定と比抵抗計測時に影響するにおける塩水侵入範囲を明らかにするために行ったものである。図-6は計測した地下水位と裏戸湾の海面高さ¹⁸⁾の経時変化の一部である。海面はおよそ70cmから2mの日変動を示している。地下水位は潮位変動に良く追従した形で変化している。すなわち、地下水位は1日2回の潮位変動に約30分遅れて変動し、その振幅は潮位変動の0.45倍である。この変動振幅の比は、1年間の計測期間では大雨の日を除いて季節や天候の影響を受けずに一定であった。7月14日に地下水位が急上昇し、その後約1週間に亘って高くなっている。これは7月14日に最大時間雨量52mm、日雨量320mmの激しい降雨があったためである。この他にも日雨量30mm~70mmの降雨はこの図の期間中に5回あったが、地下水位の顕著な上昇は見られない。空気注入実験を含む1年間に亘る観測では、最低海水位はTP -1.25mで、そのときに地下水位も最低 (GL-3.90m) となった。

水位測定孔2において電気伝導度の深度分布を測定した結果を図-7に示す。ボーリング後に孔壁保護のためにストレーナー (開口率35%) を設置し、孔内を水道水で洗浄して孔内水を水道水に置換した後に、孔内水の電気伝導度を測定した。水道水置換後10分ではGL-12mまで400 μ S/cm以下であり、水道水の伝導度とほぼ一致していた。30分後にはGL-11m以深で伝導度が急増し、-12mでは2000 μ S/cmとなった。1日後には-11m以深で25000 μ S/cmまで増加し、2日後にも変化は見られなかった。この値は現場近くで採取した裏戸湾の海水の電気伝導度約30000 μ S/cmと同程度であることから、塩淡水境界深度は

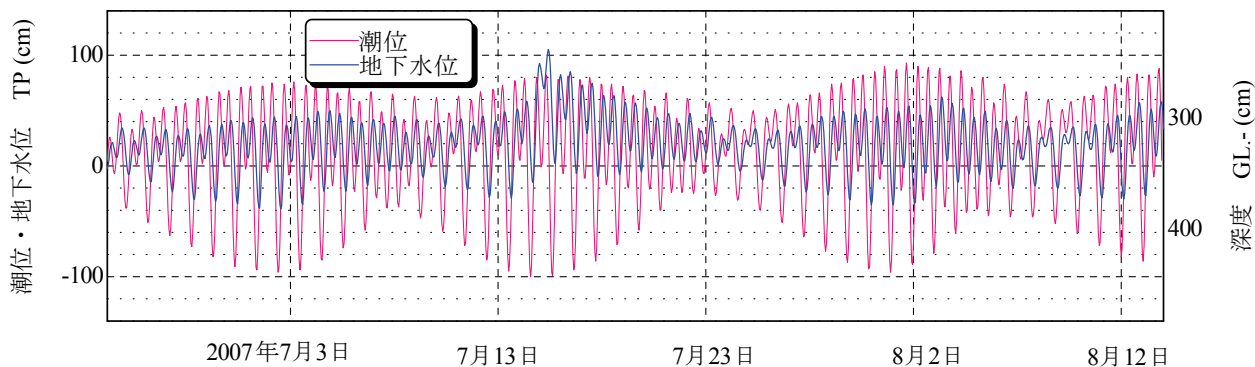


図-6 地下水位と潮位変動 (潮位データは気象庁HP¹⁸⁾)

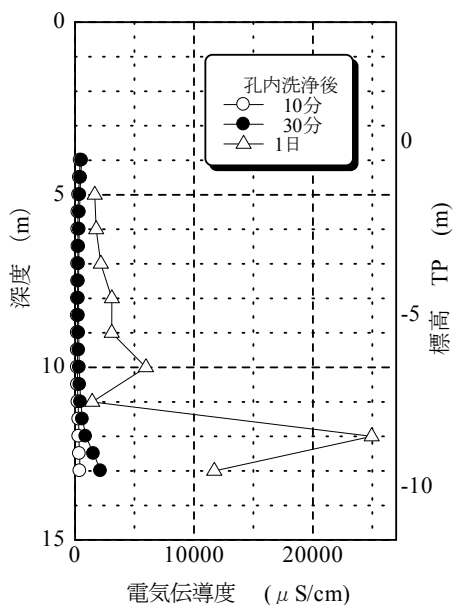


図-7 電気伝導度の深度分布

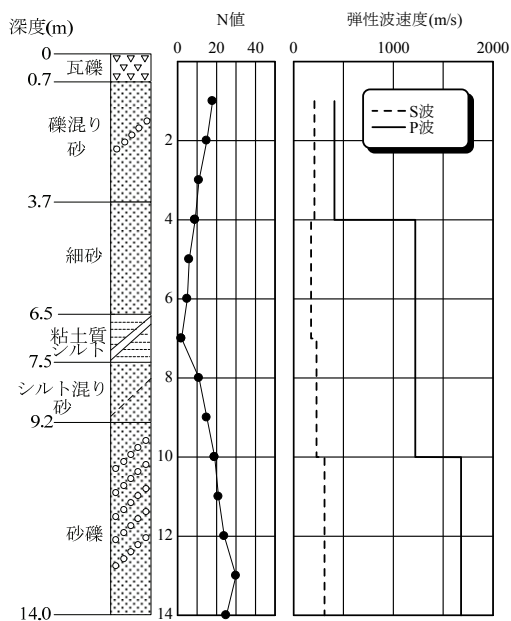


図-8 PS 検層から得られた弾性波速度

11m (地下水位面から約8m) であることがわかった。

唐ら¹⁹⁾は、高知県の太平洋岸近くの感潮河川近傍の地点において、塩淡水境界面の深さが地下水位面からおよそ8m程度であったことを報告している。地下水位面から淡塩境界面までの深さ、すなわち陸地に形成される淡水層の厚さは、平均海面と地下水位面の差に比例することが知られており²⁰⁾、その他地盤の透水係数や降水量などの影響を受ける²¹⁾が、海岸付近では数十倍程度であるとの報告が多い。本現場水位測定孔2における1年間の平均地下水位と平均海面の差は11.7cmであり、この値の季節変動は小さかった。本現場での地下水位は短期的には潮汐の影響を強く受け約12時間周期で変動するが、平均的には陸側の水位が高いため長期的には陸から海に向かう地下水の流れが存在するものと言える。

水位観測孔1で行ったPS検層から得られたP波速度とS波速度を図-8に示す。GL-4m以浅ではP波速度はおよそ

400m/sと音速に近く飽和度が低いことを示しており、この深度は地下水位の観測結果と対応している。深度GL-4mからはP波速度が急増し1250m/s以上となっており、地盤はほぼ完全に飽和しているものと考えられる。

3. 地盤への空気注入と飽和度のモニタリング

(1) 空気注入管

空気注入のためのインジェクターは、外径 20mm 長さ 10cm の塩ビパイプに直径 1.0mm の孔を 40 箇所開け下端をキャップで塞ぎ、上端に送気チューブを接続したものである。インジェクターの設置では、直径約 9cm、GL-7.1m のボーリング孔の所定の深度にインジェクターを吊り下げ、孔底から GL-6.15m までを 5 号珪砂で埋め戻し、その上に高分子ポリマー (親水性ポリウレタン樹

脂)とモルタルを投入して埋戻した。高分子ポリマーは地下水と反応してハイドロゲルを生成し、空気の上昇を防ぐシール材の役割を果たす。その上のモルタルは、高分子ポリマーの上方への膨張を拘束するための荷重を与えるためのものである。空気注入管の設置状況を図-9に示す。

空気注入は、図-10示す空気注入システムを用いた。空気ポンプの最大圧力は29.4MPaであったため、2段階での減圧制御を行った。1次減圧弁では29.4MPaを300kPaに減圧し、2次減圧弁にて、さらに所定の空気注入圧力に減圧し制御した。制御された空気は、圧力計と流量計(熱式質量流量計)により計測管理を行った。

(2) 空気の注入

飽和地盤に空気を注入する際、空気圧力によっては地盤に割裂クラックが生じ得る。小型模型実験の結果によると、注入地点の静水圧に加えて有効土被り圧のおよそ0.8~1.5倍の空気圧を与えた時点で割裂が発生したことが報告されている²⁾。本実験では、注入地点での静水圧約32kPaと有効土被り圧94kPaに対し、空気注入圧の最大値は92kPaとした(静水圧+有効土被り圧の約2/3)。

はじめに有効上載圧に比べて比較的小さな圧力にて3回の予備的な空気注入を行った。1回目の注入は、地盤に空気が入り始める圧力を確認するために注入圧力を少しずつ増加させ、空気が流れ始めたことを確認後に停止した。空気が地盤に注入され始めた時点の空気圧力は、静水圧に注入深度における土の空気侵入値である5kPaを加えた37kPaにほぼ等しいことを確認した。その後、約1週間の間隔をおいて2回の注入を行った。そこでは、空気注入管周りの埋め戻し部からの漏気が生じていないことを空気注入孔に注水して目視により確認すると共に、空気注入圧と流量の関係を調べるために段階的に圧力を増加させた。最後の4回目では、注入圧力を92kPaと大幅に増加させて空気注入を行った。

(3) 比抵抗トモグラフィー

比抵抗法とは、地表面やボーリング孔に多数の電極を設置し、電流電極と電位電極の双極子ペアを切り替えることにより通電により発生する人工電位のポテンシャル分布を計測し、みかけ比抵抗の逆解析を行うことで、地盤の比抵抗(導電率の逆数)分布を2次元・3次元的に求める手法である。比抵抗トモグラフィーは比較的簡易かつ安価に計測が可能であることから、これを用いて飽和度の変化を空間的に把握することを試みた。

地盤の飽和度と比抵抗の関係は、Archieの経験式に基づき以下の式で記述される。

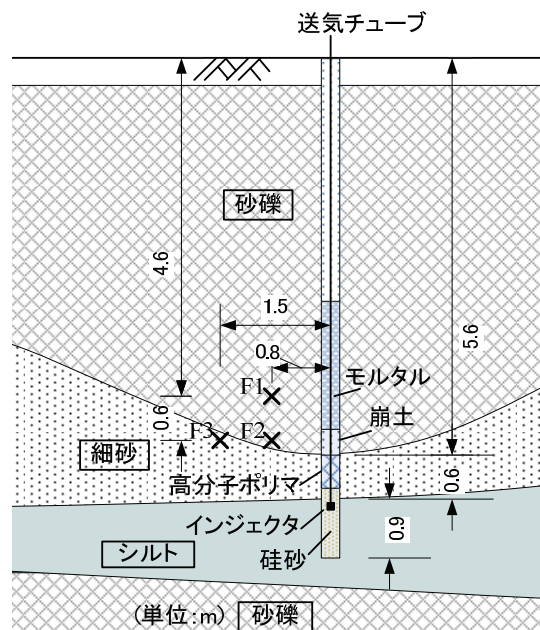


図-9 空気注入管の設置と FDR プローブの位置

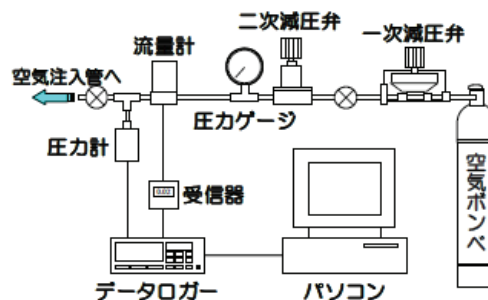


図-10 空気注入管の設置状況

表-1 空気注入条件

	注入時間 (h)	最大圧力 (kPa)	最大流量 (L/min)	積算流量 (m ³)
1回目	2時間	35.7	0.71	0.028
2回目	24時間	43.9	1.81	1.830
3回目	7時間	47.4	2.29	0.87
4回目	7時間	92.0	9.6	3.412

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{an^{-m}S_r^{-p}\rho_w} + \sigma_c \tag{1}$$

ここで、 ρ は地盤の比抵抗、 n は地盤の間隙率、 S_r は地盤の飽和度、 ρ_w は間隙水の比抵抗、 σ_c は土粒子の表面電気

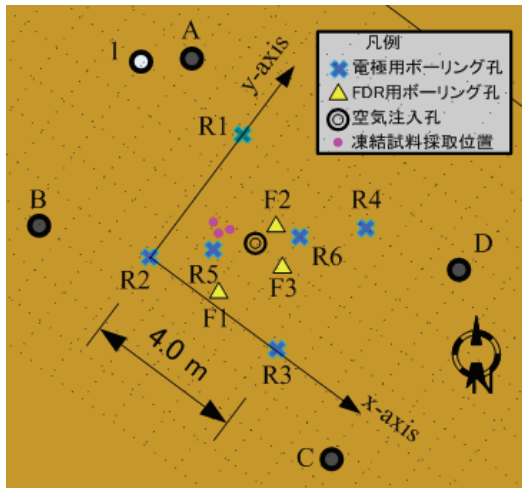


図-11 地中比抵抗電極配置

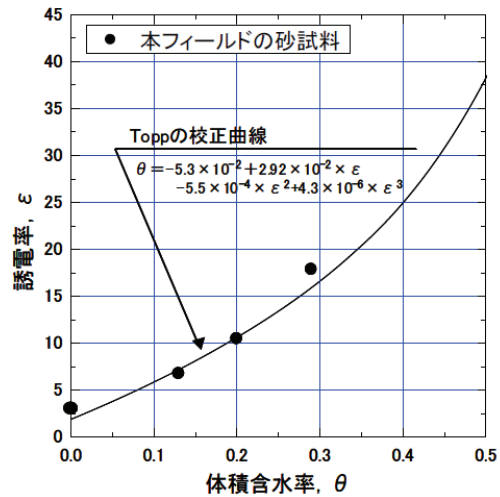


図-12 地中電磁波速度と体積含水率の関係

伝導, a, m, p は土によって異なる定数である。

対象とする砂層の細粒分が少なく、また、間隙水の導電率も小さな場合、土粒子の表面伝導 σ_s が無視でき、間隙水の誘電率も一定であると仮定できる。また、上述したように注入空気圧がある程度以下であれば、土粒子の骨格構造は変化せず、間隙比一定で地盤の飽和度のみが変化すると仮定できる。また、係数 p は地盤の種類によって異なるが、一般的にはおよそ $p=2$ である。空気注入前の地盤の飽和度を100%と仮定すれば、注入前後の比抵抗の比から注入後の飽和度を求めることができる。ここで、自然地盤の地下水位の変動域以深では飽和度が100%であることが多く²³⁾、本現場でもPS検層の結果からそれを確認している。

本実験における3次元比抵抗トモグラフィの電極配置は、50cm 間隔の格子状に配置した地表面 21 極と図-11 に示すに 6 本のボーリング孔の地下水位以下に設置した 54 極の合計 75 極の電極を用いた。ボーリング孔は、空気注入口を中心に一辺 4m の正方形の角に R1 孔～R4 孔、R2 と R4 の対角線上に R5 孔と R6 孔を削孔した。R1～R4 孔には GL-4m～8m まで 50cm 間隔で、R5、R6 孔には GL-4m～6m まで 25cm 間隔で電極を設置し、これらの孔が空気注入時の空気みちとなることを防ぐために電極設置後にベントナイトで埋め戻した。

比抵抗トモグラフィ用電極は、1 回目の注入が終わり、注入管周りからの漏気が無いことを確認後に設置した。1 回目の空気注入では注入空気量は僅かであり、地盤はほとんど不飽和化していないものと考えられる。比抵抗の計測は、2 回目の注入前、3 回目の注入前と 3 回目注入後の 3 回行った。なお、比抵抗の測定は Gradient dipole-dipole 法²⁴⁾を用いた。

(4) FDR水分計

土壤水分計の一つである FDR (Frequency Domain

Reflectometry) は、連続した種々の周波数 (0.1～1.7GHz) の電磁波が、地中に埋設した FDR センサの先端ロッド部を往復する際に発生する合成干渉波を周波数領域で測定し、そのピーク特性から比誘電率を測定するものである²⁵⁾。土粒子を構成する鉱物粒子の比誘電率は 5～9 程度で、乾燥した土の比誘電率は概ね 3～5 の値をとることが知られている。それらに比して水の誘電率は 80 程度と大きいので、地盤の誘電率は含水率に大きく左右される。土の体積含水率と誘電率の間には 図-12 中に曲線で示す Topp²⁶⁾ の関係が知られていることから、地盤の間隙率が一定の場合に誘電率の変化から飽和度変化量を得ることができる。すなわち FDR により測定した誘電率と 図-12 から体積含水率 θ を算出するが、ここでも空気注入前の地盤の飽和度が 100% と仮定出来るものと考えられるので、空気注入後の誘電率から体積含水率と飽和度の減少量が算出される。図-12 には細砂層から採取した砂試料を用いて行ったキャリブレーション試験から得られた体積含水率と誘電率の関係も示してある。試験結果は Topp の式により近似できることがわかる。今回使用した FDR はロッド長 15cm のもの 3 本であり、2 回目の空気注入後に行った比抵抗トモグラフィの結果から抵抗変化率が大きく空気が侵入したと考えられる地点 3 地点 (F1～F3) に FDR プローブを設置した (図-9, 11 参照)。この FDR プローブではロッド周囲 2cm 程度の極めて狭い領域の土の体積含水率が測定される。FDR プローブは、所定の深度まで削孔したボーリング孔底から原地盤に打撃貫入して設置し、その後セメントミルクを注入して孔を閉塞した。

(5) 空気注入実験結果

第 2 回空気注入時の空気注入中の空気圧力、流量、積算流量の関係を 図-13 に示す。ここで、流量は 20°C・1 気圧における体積に補正したものである。空気圧力が

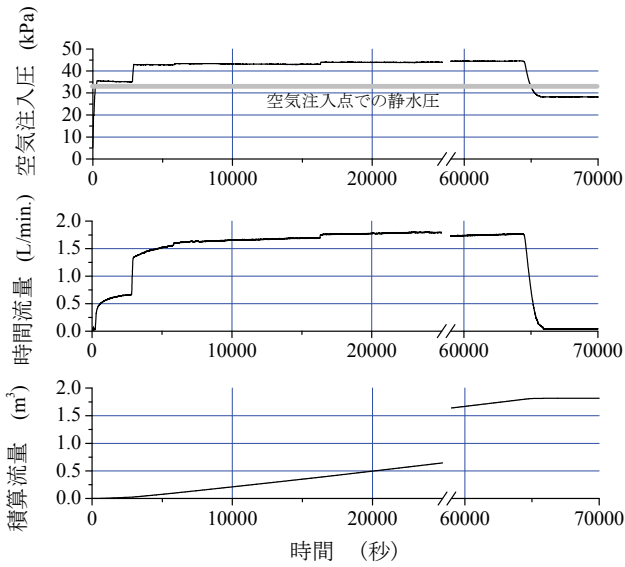


図-13 2回目空気注入中の圧力，流量，積算流量の変化

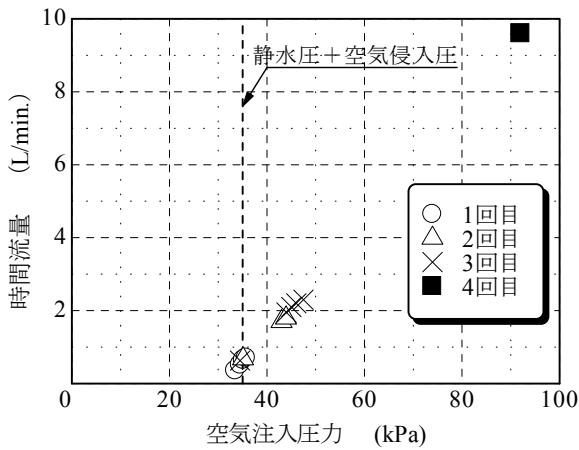


図-14 注入圧力と空気流量の関係

36kPa となったところで空気が地盤内に入り始め，その後段階的に空気圧を上昇させると空気流量も増加し約 1 時間で定常状態に達した．図-14 はほぼ定常状態となった時点での注入圧力と流量の関係である．空気が地盤内に入り始める圧力を超すと圧力の増加と共に流量がほぼ直線的に増加し，この関係は注入回数に依存していないことがわかる．模型実験の結果²⁷⁾でも，空気圧力を増加させると土中のサクションが増加するため飽和度が低下し透気係数が増すと共に，不飽和化される領域が拡大するために空気流量が増加することが観察されている．模型実験では図の関係が下に凸の曲線であり，圧力の増加と共に流量が急増することが観察されているが，今回の実験では概ね直線的な増加となった．

2 回目の空気注入前後に行った比抵抗計測結果より逆解析によって求めた比抵抗の変化率分布を図-15 に示す．各スライス断面は深度 1m 毎の，空気注入口を中心し電極を四隅とする 4m×4m の領域であり，比抵抗変化率は

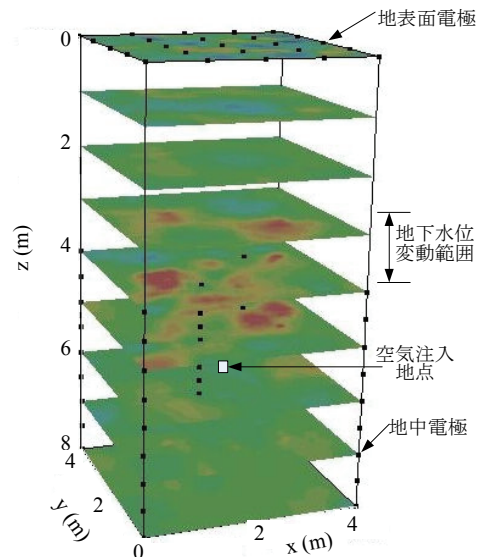


図-15 比抵抗変化率の空間分布（空気注入管の座標が $x=y=2m$ ， z 軸は地表面から鉛直下向きを正にとっている．黒い点は電極を表す）

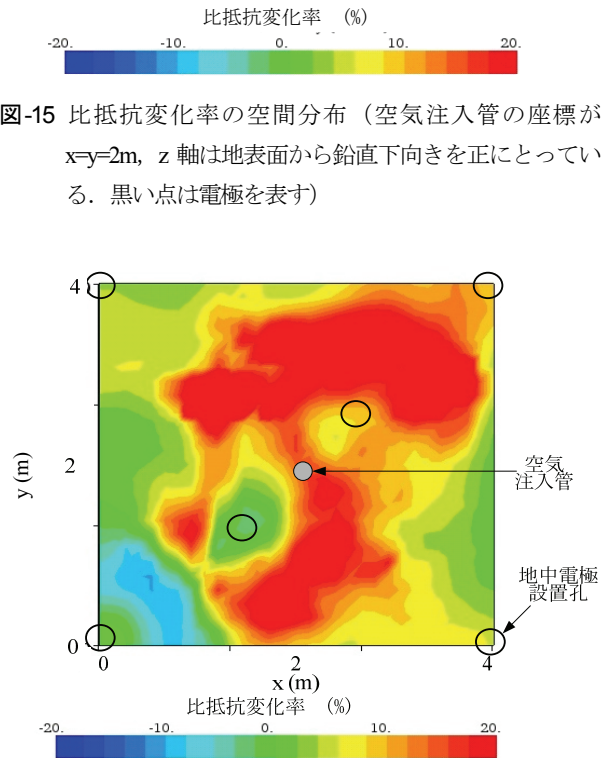


図-16 深度 4.5m での比抵抗変化率の分布（白丸は電極設置用ボーリング孔の位置）

緑色に変化無し，黄色から赤色に変化率が正（比抵抗の増加）すなわち飽和度の低下を表す．注入口深度付近の GL-6m では比抵抗の変化はほとんど無く，この深度では空気の水平方向への広がり小さい．GL-5m，GL-4m では注入口を中心とし直径およそ直径 3m 程度の領域で比抵抗変化率 10～20%程度となっており，地下水位以浅では比抵抗の変化はほとんど見られない．また，図-16 に深度 4.5m での比抵抗変化率の水平分布を示す．図中の丸印は電極設置位置であり，領域四隅と領域内の 2 カ

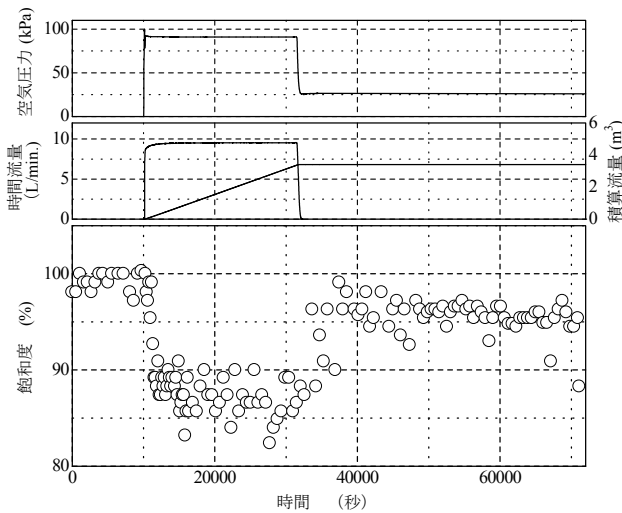


図-17 FDR から得られた地盤の飽和度の経時変化 (4 回目の空気注入, F3)

所に存在する。これらの電極は上述の通り電極を設置後に孔をベントナイトで埋め戻したため、孔には空気が侵入せず比抵抗変化率が小さいものとなっている。この断面内の比抵抗変化率は大きな部分では 20%以上であり、これは Archie の経験式(1)によると飽和度が 90%以下に対応する。3 回目の空気注入後の比抵抗測定結果は 2 回目注入後とほぼ同等であった。模型実験においても、空気注入を繰り返す回数が増えても不飽和化される領域と飽和度には顕著な差は見られないことが報告されている²⁷⁾。

2 回目の注入終了後に 3 本設置した FDR のセンサーは、3 回目の注入中に値の変化が見られなかった。しかし 4 回目に大きな注入圧力で空気を注入すると、2 本のセンサー (F2 と F3) において電磁波速度の低下が確認され、FDR プローブ設置地点の飽和度低下が確認された。プローブの設置は打撃貫入により行ったので、プローブ近傍の土は若干密実化したものと考えられる。空気注入圧が小さいときには地盤の不均一性により、空気侵入値が小さく透水係数が高い部分を選択的に空気が通り不飽和化するので飽和度の不均一が大きいが、注入空気圧を増加することにより、それまで空気が通らなかった領域にも侵入したものと考えられる。

図-17 は F3 センサーで測定した飽和度の時刻歴である。空気注入中では飽和度は 85%程度まで低下し、注入を停止すると飽和度が上昇するが 95%程度で安定した。このような経時変化は、模型地盤への空気注入実験で測定されたもの⁴⁶⁾と定性的に一致している。水分特性曲線がヒステリシスを描くことからわかるように、飽和状態にある土がサクシジョンの増加により脱水された後サクシジョンをゼロとして吸水させても、飽和度はある程度は増加するものの初期の飽和状態には戻らず不飽和状態となる。しかしながら、この排水-吸水過程を繰り返して行っても、

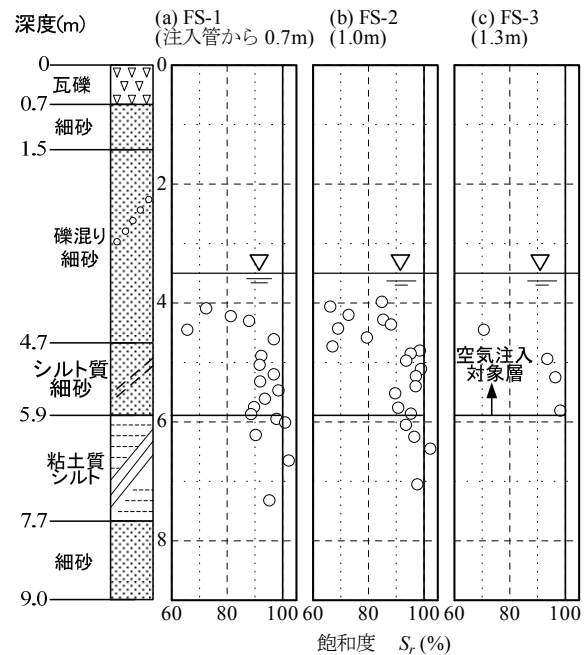


図-18 凍結サンプリング試料から得られた飽和度分布

サクシジョンがゼロの時点での飽和度は 2 回目以降はほとんど変化しない。地盤への空気注入でも、注入を繰り返すことによる飽和度の低下はほとんどみられない⁴⁾。なお、FDR プローブの感度領域はプローブから 2cm 程度のごく狭い領域であるため、FDR の測定結果が領域の平均的な飽和度とは大きく異なることもあり得るが、これによって FDR 設置地点の土が不飽和化されたか否かは判断できる。

F3 センサーを用いて定期的に飽和度を計測したところ、1 年経過した時点でも飽和度は 95%のまま変化せず、不飽和状態が継続していることを確認している。

(6)凍結サンプリングにより採取した試料の飽和度

4 回目の空気注入から約 1 ヶ月後に凍結サンプリング法により不攪乱試料を採取した。採取地点は図-11 に示すように空気注入管から北西へ 0.7m, 1.0m, 1.3m の 3 地点である。まず、GL-10m まで凍結管を設置し、液体窒素を凍結管内に約 72 時間循環させ、凍結管の周辺地盤に直径 0.8m の凍結領域を作り、3 地点から直径 65mm の凍結サンプルを採取した。採取した試料は冷凍車で試験室に運搬し、数 cm 長さの飽和度測定用試料 46 個と三軸試験用試料に切り分けた。飽和度測定用試料は試料の密度、含水比と土粒子密度を測定し、氷の比重を考慮して飽和度を算出した。

飽和度の深度分布を図-18 に示す。地下水位の変動範囲 (深度約 4m まで) は空気注入実験以前から不飽和になっていることが PS 検層により確認されているので、そこを避けて空気注入前には飽和していた 4m 以深の土の飽和度を測定した。図には土質柱状図も示してあるが、

実際の層境界は図に示すようには明確ではなかった。深度約6m～4.7mのシルト質細砂層の飽和度は88.4%から98.4%（平均94.7%）であった。また、砂礫混じり細砂層では飽和度が65%から88%と大幅に低下していることがわかった。これは図-15に示した比抵抗トモグラフィの結果と定性的に良い対応を示している。また、図-5に示した空気侵入値が小さく比水分容量が大きい深度である4.0m～4.5mとも対応している。しかしながら、比抵抗の変化率20%が10%の飽和度変化に対応することを考えると、図-15、図-16の比抵抗変化率は凍結サンプリング試料の飽和度とは必ずしも対応していない。比抵抗トモグラフィの結果から飽和度を定量的に評価することは、今後の課題である。

図-15 から判断すると、空気注入により不飽和化された領域の体積はおおよそ 15m^3 程度である。この領域の飽和度が 5～30%程度低下したことから、地盤中に留まった空気の体積は 1m^3 程度あるいはそれ以下であり、今回注入した空気の大部分は地下水位以浅の土中へと放出されたものと考えられる。今回の注入時間は合計 40 時間に及んだが、今回の地盤であれば短い時間で地盤を不飽和化できるものと考えられる。

今回の空気注入によって飽和度が低下したGL-5.9m以浅のシルト質細砂およびレキ混り細砂の飽和度と細粒分含有率の関係を図-19に示す。細粒分含有率 F_c が5%以下の土は85%以下と大幅な飽和度低下をしている。 F_c が10%以上でも不飽和状態となっており、細粒分をある程度含む土でも今回の空気注入によって不飽和化されたことがわかる。

サンドコンパクションパイル工法（以後、SCP）でも施工中にケーシング先端から圧縮空気が地盤内に放出される。SCPによって改良された地盤の飽和度調査では、細粒分含有率が12%を超えると不飽和化されていないことが報告されている²⁹⁾。今回は細粒分を多く含む土まで不飽和化されているが、これは空気注入時間の違いによるものであると考えられる。SCPはケーシング内の砂を地盤中に放出する間の短い時間だけ空気を地盤に注入するが、今回の実験では約40時間の空気注入を行った。細粒分が多く土の透水係数が低いと空気が土に侵入して飽和度が低下するのに時間を要するため⁴⁾、今回の実験ではSCPで不飽和化されないような土質まで飽和度が低下したのと考えられる。

これとは逆に、図-19では細粒分含有率が5%以下の土でも飽和度が低下していないものが見られる。これは、上述したように空気が選択的に透気性の高い部分を通過するために、空気注入工法では周囲に比して相対的に透気性の低い領域は不飽和化され難いという特徴を有するのではないかと想定される。従って、空気注入法により

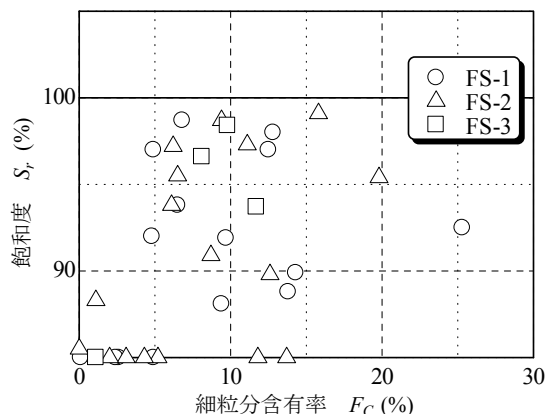


図-19 凍結試料の飽和度と細粒分含有率の関係

不飽和化された地盤の飽和度はある程度不均一となることが避けられないが、この不均一性は注入圧力が増加すると共に減少するので、上載圧が大きく注入圧力を大きくできる条件では均一性が増すと考えられる。

4. まとめ

近年、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検討されており、格段に安価で既設構造物直下の対策にも適用が可能な工法として実用化が期待され、研究が行われている。そこで筆者らは空気注入により地盤が不飽和化されることを現場で実証すること、および不飽和化された領域を特定する技術を確認することを目的とし、現場での空気注入実験を行った。

現場は海岸の護岸から約 20m の埋め立て地で、地下水位はおおよそ GL-3.5m であり、GL-6m の地点に空気注入入口を設置して地盤に空気を注入した。空気注入入口から地下水面までの土質は細砂～シルト質細砂の互層であり、この層の不飽和化を目標とした。2 時間から 24 時間の注入を合計 4 回行い、注入中及び注入前後の飽和度の変化を FDR 土壌水分計と 3 次元比抵抗トモグラフィによりモニタリングした。比抵抗トモグラフィの結果、空気注入により注入管を中心に半径 3～4m の領域が不飽和化され、そこでの空気注入停止後の飽和度は 90%程度であることがわかった。FDR 水分計は空気注入圧力の低い時には反応が見られなかったが、空気注入圧を最大とした 4 回目の注入では 3 本中 2 本が反応し、ここでも空気注入終了後の残留飽和度は 95%程度の値を示した。FDR はプローブの周辺のごく限られた領域の水分量に反応するため、これによって得られる飽和度は局所的なものである。土中の空気の流れは、透気性の高い部分を選択的に流れるため、特に空気注入圧が小さいときには不均一であり、空気圧を増加させるにしたがって土中の

不飽和化される部分が増えるものと考えられる。

空気注入実験の約 1 ヶ月後に凍結サンプリング法により高品質の試料を採取して飽和度を測定した。その結果、GL-5m 以浅で飽和度がおよそ 70~95%と大きく低下し、また GL-5m~6m でも 88~98%まで低下していることが明らかになった。これは比抵抗トモグラフィで飽和度低下が顕著に見られた深度、および空気侵入値の小さな土の深度と良い対応を示した。

以上より、地盤に直接空気を注入することによって地盤を不飽和化することが出来ることを現場実験により実証した。また、施工管理のための飽和度モニタリング方法として比抵抗トモグラフィや FDR 水分計がある程度有効であることが明かとなった。

参考文献

- 1) Okamura, M. and Matsuo, O.: Effects of remedial measures for mitigating embankment settlement due to foundation liquefaction, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-12, 2002.
- 2) 岡村未対：空気注入による安価な液状化対策工法、土と基礎、Vol. 54, No. 7, pp. 28-30, 2006.
- 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) Yasuhara, H., Okamura, M. and Kochi, Y.: Experiments and predictions of soil desaturation by air-injection technique and the implications mediated by multiphase flow simulation, *Soils and Foundations*, Vol. 48, No. 6, pp. 791-804, 2008.
- 5) Ishihara, M., Okamura, M. and Ohshita, T.: Desaturating sand deposit by air injection for reducing liquefaction potential, *Proc. 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering*, CD-ROM, 2003.
- 6) 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.
- 7) 岡庭一憲, 畔上洋一, 末政直晃, 片田敏行, 永尾浩一: マイクロバブル水を利用した不飽和化による液状化対策工法(室内実験), 第 34 地盤工学研究発表会, 2008.
- 8) Okamura, M., Ishihara, M., and Tamura, K.: Degree of saturation and liquefaction resistances of sand improved with sand compaction piles, *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 2, pp. 258-264, 2006.
- 9) 藤井直, 大内正敏, 小松満, 西垣誠: ケーソン周辺地盤の飽和度調査と不飽和砂試料の液状化強度, 日本地下水学会 2009 年春季講演会, pp. 84-89, 2008.
- 10) 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, 1997 年 9 月号, pp. 120-127, 1997.
- 11) Yegian, M. K., Eseller-Bayat, E., Alshawabkeh, A., Ali, S.: Induced partial saturation for liquefaction mitigation: Experimental investigation, *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 4, pp. 372-380, 2007.
- 12) 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. 93-104, 2006.
- 13) 風間基樹, 高村浩之, 海野寿康, 仙頭紀明, 渦岡良介: 不飽和火山灰質砂質土の液状化機構について, 土木学会論文集 C, Vol. 62, No. 2, pp. 546-561, 2006.
- 14) Unno, T., Kazama, M., Uzuoka, R. and Sento, N.: Liquefaction of unsaturated sand considering the pore air pressure and volume compressibility of the soil particle skeleton, *Soils and Foundations*, Vol. 48, No. 1, pp. 87-100, 2008.
- 15) Okamura, M. and Teraoka, T.: Shaking table tests to investigate soil desaturation as a liquefaction countermeasure, *Geotechnical Special Publication*, ASCE, 145, pp. 282-293, 2005.
- 16) Takemura, J., Okamura, M., Igarashi, R., Masuda, M. and Izawa, J.: Centrifuge model tests on soil desaturation as a liquefaction countermeasure, *Proc. XVII ICSMGE* (in print), 2009.
- 17) 電子国土事務局: 電子国土ポータル, <http://portal.cyberjapan.jp/denshi/>.
- 18) 気象庁潮位観測情報: <http://www.jma.go.jp/jp/choi/>.
- 19) 唐心強, 大年邦雄, 藤原拓, 石井将幸, 岡太郎: 海岸帯水層における淡塩境界面の変動と電気探査による境界面の推定に関する研究, 地下水学会誌, Vol. 42, No. 3, pp. 223-233, 2000.
- 20) Hubbert, M. K.: The theory of groundwater motion, *Journal of Geology*, Vol. 48, pp. 785-944, 1940.
- 21) Schneider, J. C. and Kruse, S. E.: A comparison of controls on freshwater lens morphology of small carbonate and siliciclastic islands: examples from barrier islands in Florida, USA, *Journal of Hydrol.*, Vol. 284, pp. 253-269, 2003.
- 22) 緒方宏行, 岡村未対, 矢田部龍一: 飽和地盤中に対する空気注入時の空気挙動に関する実験的研究, 土木学会四国支部平成 18 年自然災害フォーラム論文集, pp. 89-92, 2006.
- 23) Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Nakazawa, H., Kamada, K., and Huang, Y.: Resistance of partially saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 6, pp. 93-104, 2002.
- 24) 物理探査学会: 新版物理探査適用の手引き—土木物理探査マニュアル, pp. 159-188, 2008.
- 25) 西垣誠, 小松満, 横田英嗣: 誘電法を用いた不飽和浸透特性の計測法, 日本地下水学会 1998 年春季講演会要旨, pp. 40-45, 1998.
- 26) Topp: Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 574-582, 1980.
- 27) 五十嵐ひろ子, 河内義範, 岡村未対, 石丸恭平: 重力場と遠心力場における飽和砂地盤への空気注入実験, 土木学会第 63 回年次学術講演会, CD-ROM, 2008.
- 28) 岡村未対, 石原雅規, 田村敬一: SCP 改良地盤の飽和土の調査, 第 39 回地盤工学研究発表会, pp. 1001-1002, 2004.

(2009. 3. 16 受付)

IN-SITU TEST ON DESATURATION BY AIR INJECTION AND ITS MONITORING

Mitsu OKAMURA, Masaya TAKEBAYASHI, Katsuji NISHIDA, Nao FUJII,
Motoharu JINGUJI, Takehiko IMASATO, Hideaki YASUHARA
and Emiko NAKAGAWA

Desaturation of ground by air injection attracts considerable attention in recent years as an innovative technique for liquefaction countermeasure. This technical report describes an in-situ air injection test which aims to confirm an effectiveness of the air injection to desaturate ground and validity of observation techniques to monitor the evaluation of unsaturated area. In the test, air was injected from an air injector set at a depth of 6m. Air flow rate increased linearly with increasing air injection pressure and desaturated area was formed within 4m from the injector. 3D resistivity tomography and FDR probes were found to be effective to detect evolution of the desaturated area.