

真空圧密工法における管状ドレーン内の 流れと圧力に及ぼす気泡の影響

塩野 敏昭¹・梅崎 健夫²・河村 隆³

¹正会員 信州大学大学院 工学系研究科博士後期課程システム開発工学専攻(〒380-8553 長野市若里 4-17-1)

²正会員 工博 信州大学助教授 工学部社会開発工学科(同上)

³正会員 信州大学助手 工学部社会開発工学科(同上)

真空圧密工法においては、鉛直ドレーンと水平排水管を介して多量の地下水とともに気泡が排出される。これは主に減圧にともなう地下水中の溶存空気や溶存ガスの脱気によるものと推定される。本工法は圧密促進工法であり、実務設計においては圧密圧力の増分を適切に評価することが必要である。そのための課題の一つとして、ドレーン内の圧力分布に及ぼす気泡の影響とその機構について解明する。管状ドレーン内の状態をできるだけ考慮した揚水実験装置を開発し、真空下の鉛直管内の上昇流に底部から一定量の気泡を供給する揚水実験を実施した。一連の実験結果に基づいて、排水量、気泡および流れの形態、気泡の上昇速度および管内圧力の送気量の違いによる変化について考察した。また、実施工において計測可能なパラメータを提案し、上記の挙動を定量的に評価できることを示した。

Key Words : vacuum-induced consolidation method, vertical drain, soft ground, ground improvement, pumping test, flow pattern, negative pressure, bubble, resolved air

1. はじめに

軟弱地盤改良工法の一つである真空圧密工法は、軟弱地盤中に打設した鉛直ドレーンの頭部を地表に付設した水平排水管を介して真空ポンプに連結し¹⁾、ドレーン内部に負圧を作用させることによって、気密シートで覆った改良区域の地盤内を減圧し、圧密を促進させる工法である(図-1)。本工法は盛土载荷に代わるプレローディング工法として、Kjellman²⁾によって1949年に考案された。近年、本工法の有用性があらためて見直され、日本をはじめ中国、韓国、タイ、スウェーデン、フランス、アメリカなどで普及しつつある^{1), 3)~8)}。

本工法においては、真空ポンプの稼動直後から鉛直ドレーンと水平排水管を介して多量の地下水とともに気泡が排出される⁹⁾。これは主に減圧にともなう地下水中の溶存空気や溶存ガスの脱気によるものと推定される。このほか地表面からの漏気も考えられるが、気密シートの接着方法や端部を地下水位以下に埋め込む工夫など施工技術の向上により最近の施工ではほとんど無視できる程度である。軟弱地盤地帯では、しばしばメタンガスなどが地下水中に溶存または気体の状態で存在し、地表やシルドトンネル内に湧出した事例も報告されている^{10), 11)}。また、室内試験においても減圧による気泡の発生が報告されている^{12), 13)}。1気圧の圧力変化に対して地

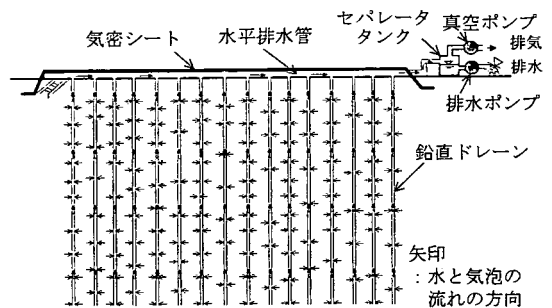


図-1 真空圧密工法の概要

下水 1m³あたりからメタン、窒素、酸素などのガスが総量で5%程度(気温 15℃)発生するとの報告がある¹⁴⁾。なお、常温で、水道水は2.48%、海水は1.94~2.06%程度の空気を含有している¹⁵⁾。

真空圧密工法において気泡が排出されることの影響については実務設計や実施工において現在、主に次の二つの項目が問題になっている。それらは①地盤およびドレーン内の圧力への影響と②地盤の圧密および透水特性への影響である。①について、室町・三沢¹⁶⁾はプラスチックドレーンを打設した地盤内の減圧量は溶存空気の排出によって深度が増すほど小さく指摘している。一

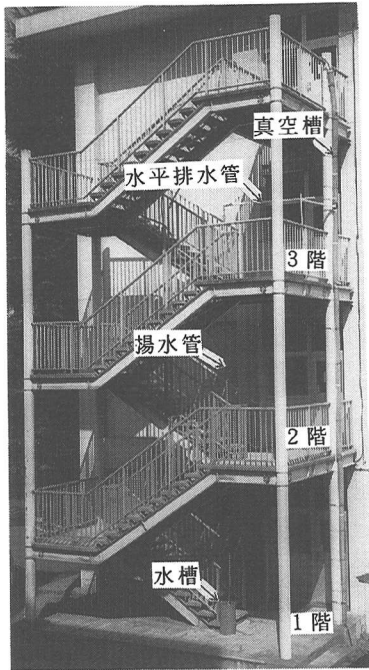


写真-1 揚水実験装置の全景

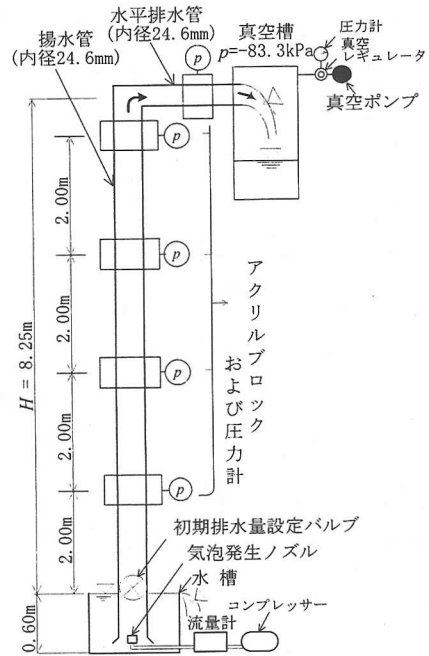


図-2 揚水実験装置の概要

方、梅崎ら¹⁾は気泡の排出を伴う施工中においても地盤内の減圧量はプラスチックドレーンの打設深度までほぼ一定であると指摘している。また、小林・土田⁹⁾はサンドドレーン内の減圧量は一定ではなく深度方向にばらついていると指摘している。さらに、Shangら³⁾は、気泡の発生の有無について明記していないが、サンドドレーン内の負圧は深度に拘らずほぼ一定値を示し、減圧量は深度が増すほど増加すると指摘している。このように、地盤およびドレーン内の圧力に及ぼす気泡の影響については相反する指摘がみられ、統一的な解釈を与えるには至っていない。また、②について、小林・土田⁹⁾は地盤内に気泡が発生し、不飽和状態となって透水性が低下するため圧密係数は通常の半分程度となると指摘している。一方、Qianら¹⁷⁾は地盤内の気泡が排出されるため透水性が向上し地盤の圧密が促進されると仮定して実施した数値解析の結果により、実際の挙動を表現できると指摘している。このように地盤の圧密および透水特性への影響に関しても相反する指摘がみられる。

本工法は圧密促進工法であり、実務設計においては圧密圧力の増分を適切に評価することが必要である。施工中の地盤内の間隙水圧は時間の経過とともにドレーン内の圧力まで減少し、地盤内の減圧分が有効圧密圧力の増分に相当する。すなわち、圧密圧力の増分は施工前の地盤内の間隙水圧分布とドレーン内の圧力分布の差分で評価される。ドレーン内の圧力分布を定量的に評価する

ためには上述した①の気泡の影響を明らかにする必要がある。ドレーン内の圧力分布に及ぼす気泡の影響とその機構について解明することが本文の主な目的である。

本文ではそのための基礎的な実験研究として、まず、真空圧密工法における管状の鉛直ドレーン内の水と気泡の流れの状態を考慮した揚水実験装置の開発と実験条件の設定について論じる。次いで、真空下(減圧下)の鉛直上昇流中に気泡を発生させた一連の実験結果に基づいて、排水量、気泡および流れの形態、気泡の上昇速度および管内の圧力の送気量の違いによる変化について考察する。さらに、真空圧密工法の実施工において計測可能なパラメータを提案し、それにより上記の挙動を定量的に評価できることを示す。なお、本文中の実施工や実験に関する圧力は工学的に大気圧を基準として表示している。

2. 実験の概要

(1) 実験装置の開発

実験装置の開発にあたっては、真空圧密工法における管状の鉛直ドレーン内の水と気泡の流れの状態をできるだけ考慮することが重要である。しかし一方で、その状態を単純化することも必要である。真空圧密工法においてはドレーン周辺の地盤の構成や透水性および地盤の沈

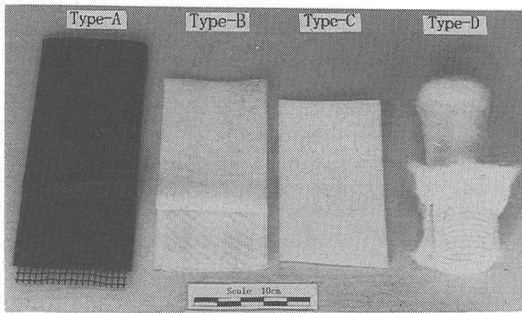


写真-2 実施工で使用されている各種ドレーン

表-1 各種ドレーンの諸元

	Type-A	Type-B	Type-C	Type-D
断面形状				
寸法 (平均値) (mm)	幅: 100.0 厚さ: 3.5	幅: 95.0 厚さ: 3.4	幅: 98.0 厚さ: 3.0	外径: 50.0 内径: 44.0
断面の開孔面積 (cm ²)	1.7	1.6	1.5	15.0

※ 断面の開孔面積は、ドレーンの断面積から芯材の断面積を差し引いて算定した。

下・変形とそれに伴うドレーンの圧縮変形や折れ曲がりなど多様な条件によって排水量や気泡の発生量が複雑に変化すると予想される。そのため、実際の現象を厳密に再現することは困難である。本文では、まず、現象の基本的性質を考察するために流入した気泡が管内を上昇する間に圧力変化に応じてどのように形態を変化させ、流れが遷移するのかを考察する。そのためにドレーンの変形および周面からの水や気泡の流入を除外し、真空下の鉛直管内の底部からのみ一定量の水と気泡を供給する条件に限定した揚水実験を行う。そして、一連の実験結果を定量的に考察し、その結果に基づいて、さらに条件の複雑な真空圧密工法におけるドレーン内の圧力に及ぼす気泡の影響とその機構についても定性的に検討する。なお、水と気泡が混在して流れる気液二相流の研究においても流れに及ぼす影響要因が多く複雑であるので基準となる条件を設定した実験を行う。そして、他の条件においてはその測定値の換算方法を検討するような研究方法がとられている¹⁸⁾。

実験装置の開発のために具体的に検討した項目は、①揚水管の形状と寸法、②気泡発生ノズル、③気泡の可視化、④負圧の測定である。写真-1に新たに開発した実験装置の全景を示す。また、図-2に揚水実験装置の概要を示す。実験装置は、屋外の非常階段に設置されており、真空ポンプ、真空槽、水平排水管、揚水管、初期排水量設定バルブ、気泡発生ノズル、水槽、流量計、コンプレッサーから構成されている。

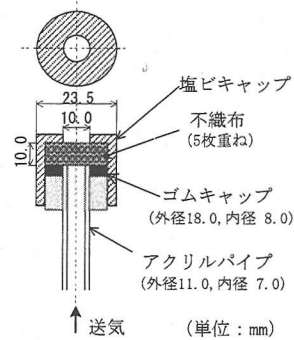


図-3 気泡発生ノズルの概要

①揚水管の形状・寸法：写真-2にバーチカルドレーン工法や真空圧密工法の実施工で用いられている各種ドレーンを示す。各ドレーンの断面形状や寸法を表-1に示す。

ドレーンは様々な形状の芯材の周りを不織布で覆った構造となっており、Type-A¹⁾およびType-D⁴⁾,⁶⁾のドレーンはそれぞれ国内外の真空圧密工法で用いられている。実験装置の揚水管にはType-Dの管状のドレーン(内径44mm)の形状を模擬した半透明の塩化ビニル製サクシオンホース(内径24.6mm, 断面積4.75cm²)を用いた。この場合には揚水管内部の流れの可視化が比較的容易である。また、揚水管の内径については、Type-Dのドレーンを利用したとしても実施工における圧縮変形や折れ曲がりなどを再現することが困難であり、気液二相流の研究において多く用いられている円筒管の寸法(内径24~28mm程度)と同程度とすることで既往の研究との比較検討が容易になると考えた。しかし、管径が異なる場合には気液両相の空間分布が異なるので結果が異なることが予想される¹⁸⁾。そのため、本実験の結果を一般化して評価するためには管状ドレーンの形状・寸法を考慮する必要がある。水槽の水面から水平排水管の中心までの揚水管の高さは、後述する実施工を考慮して設定した真空圧によって連続的な排水が実現されるように $H=8.25\text{m}$ とした。この場合、3.(4)で述べるように、初期の管内の圧力分布はほぼ静水圧分布となる。

②気泡発生ノズル(図-3)：鉛直ドレーン周面の不織布を介してドレーン内に侵入した気泡を模擬するために、穿孔した塩ビキャップに不織布を詰めたノズルを作製した。作製したノズルは、微小な気泡を連続的に発生させることができる。なお、前述の理由により揚水実験装置は、ドレーン周面からの水や気泡の流入などの条件を除外している。また、真空圧密工法における地盤内の圧力は深度の浅い部分は負圧であり、深度の深い部分は正圧となるが、鉛直ドレーンの打設深度まではいずれも初期の静水圧よりも減圧されている¹⁾。地盤の深い部分においてもヘンリーの法則により水圧の減少によって初期の溶存量が減圧後の圧力における飽和量を上回る場合には過

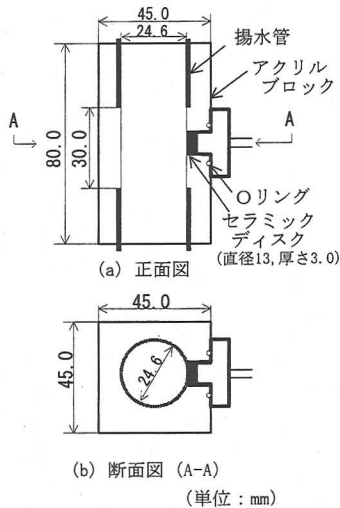


図-4 アクリルブロックの概要

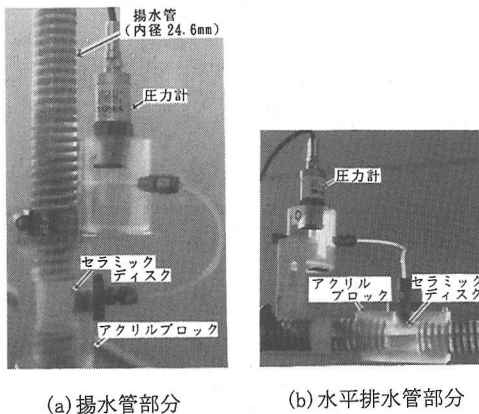
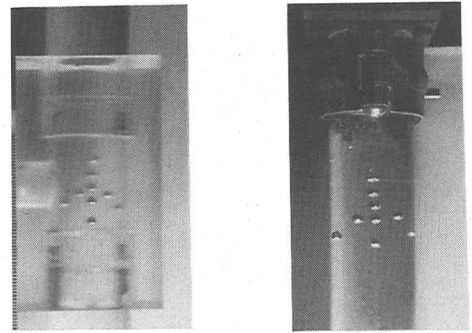


写真-3 アクリルブロックとセラミックディスク付圧力計

剰分の気泡がドレーン内で発生すると考えられる。以上のことより、本実験においては正圧の作用する鉛直管の底部からのみ一定量の気泡を供給する。

③気泡の可視化 (図-4, 写真-3(a)(b)) : 揚水管内の気泡の形状と大きさおよび流れの形態を可視化するために、内部を円筒状に穿孔したアクリルブロック (45×45×80mm, 内径 24.6mm) を揚水管の所定の高さに設置した。円筒管を用いた場合には管内の気泡が歪んで測定される。これを防止するためにアクリルブロック¹⁹⁾ や水を満たした角型水槽²⁰⁾ を用いるなどの工夫がなされている。作製したアクリルブロックにおいて測定される気泡の実寸を求めするために写真-4 に示すような検定を行った。比較のためにアクリル円筒の検定も実施した。内部を水で



(a) アクリルブロック (内径:24.6mm)
(b) アクリル円筒 (内径:24mm, 外径:28mm)

写真-4 測定倍率の検定

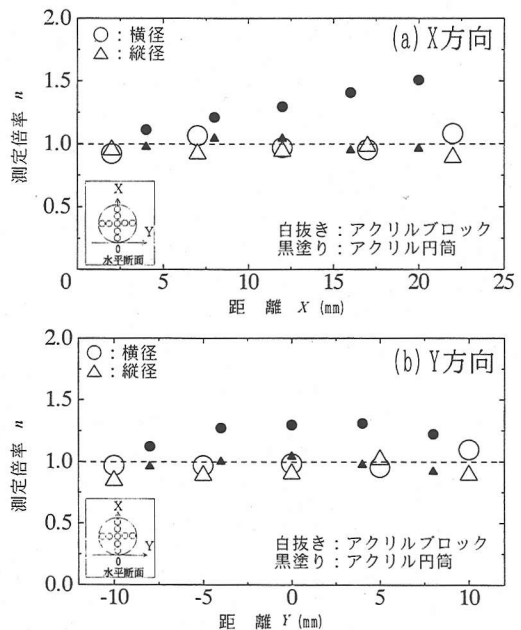


図-5 測定倍率の検定結果

満たし、図-5 に示すように水中に並べられた所定の寸法のビーズを外部から測定して縦径および横径に対する測定倍率を比較検討した。図-5 にそれぞれにおける測定倍率の結果を示す。アクリルブロックにおける測定倍率は、奥行き方向 (X方向) も横方向 (Y方向) も縦径、横径ともにほぼ等倍で測定することができる。一方、アクリル円筒の場合には管内の位置によって測定倍率が異なり、形が歪んで測定される。

④負圧の測定 (図-4, 写真-3(a)(b)) : 真空中においては圧力計の管路に気泡が発生し、水圧の測定精度に影響を

表-2 実験条件の一覧

揚水管の高さ (m)	8.25
揚水管の内径 (mm)	24.6
真空槽の圧力* p (kPa)	-83.3
初期排水量 Q_{w0} (ℓ/min)	2.5, 10.0, 20.0
送気量 Q_{a0} (ℓ/min) (25℃, 1atm)	0.01, 0.05, 0.10, 0.20, 0.35, 0.50
送気圧* (kPa)	5.4~6.4
気圧 (hPa)	956.0~976.0
気温 (℃)	0.0~7.0
水温 (℃)	11.0~12.0

*実施工や実験に関する圧力は工学的に大気圧を基準として表示する。

及ぼすことが指摘されている^{12),13)}。本装置には管路の先端にセラミックディスク(直径13mm,厚さ3mm,空気侵入値264.6kPa)を付設した圧力計を用いている。セラミックディスクおよび管路内を脱気水で飽和することにより気泡の発生を防止することができるので真空下の圧力を精度良く測定することができる¹³⁾。

(2) 実験条件の設定

実験条件の設定は2.(1)の実験装置の開発と強く関連している。設定において検討した項目は、①真空圧、②排水量、③送気量、④送気圧である。表-2に実験条件の一覧を示す。

①真空圧: Type-Aの鉛直ドレーンを用いた場合の真空圧密工法における実測例では、気密シート直下の鉛直ドレーン頭部において-75~-85kPa程度の真空圧が作用しているとの報告がある¹⁾。また、Type-Dの鉛直ドレーンについても同程度の真空圧が作用しているとの報告がある⁴⁾。これらのことを考慮して、本実験においては真空圧を $p = -83.3$ kPaに設定した。

②排水量: 地盤条件や設計・施工条件によって鉛直ドレーンの種類、打設間隔や配置、打設長などが異なり、それに伴って鉛直ドレーン1本あたりの排水量は大きく変化する。また、排水量には地盤の圧密量のほかに改良区域外からの透水量も含まれる。さらに三次元的な地盤の沈下・変形に伴うドレーンの圧縮変形や折れ曲がりによってドレーン内の流れの形態や排水速度も局所的に変化すると考えられる。このように実施工における排水量や流れの形態を厳密に考慮することはたいへん困難である。そこで実際の現象とは異なるが、本実験においては管内の流れの初期条件を揃えることに主眼をおき、その中で排水量をできるだけ変化させることとした。送気前における排水量を初期排水量 Q_{w0} と定義して、直径24.6mmの円筒管におけるレイノルズ数 Re との関係を求めたのが図-6である。ただし、 $Re = vD/\nu$ 、 $\nu = \mu/\rho_w$ 、 v :水の流速、 D :管内径、 ν :水の動粘性係数、 μ :水の粘性係数、 ρ_w :水の密度である。 μ および ρ_w は、圧力によ

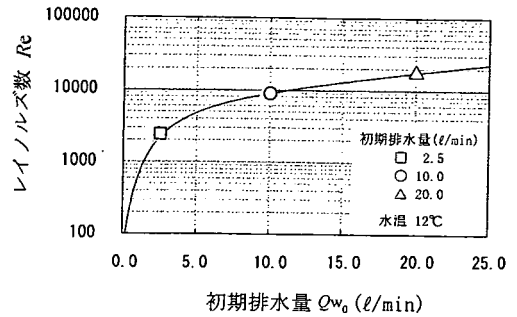


図-6 レイノルズ数と初期排水量の関係

てあまり変わらないことから^{21),22)}温度だけを考慮した。本実験では、真空下における送気前の流れを層流から乱流への遷移状態($2,000 < Re \leq 4,000$)から乱流状態($4,000 < Re$)までの幅広い範囲に設定するために初期排水量 Q_{w0} を $Q_{w0} = 2.5, 10.0, 20.0$ ℓ/minの3通りに設定した。

Type-Dの鉛直ドレーンを用いた施工^{4),6)}における排水量のデータは不明である。一方、Type-Aのドレーンを用いた真空圧密工法¹⁾においては、通常の施工管理の一つとして沈下量とともに排水量の計測が行われている。試みに、周辺地盤からの透水量を無視し、地盤の沈下量を一次元圧密のみと仮定して本実験の3通りの Q_{w0} に基づいて概算したドレーン1本あたりの排水量および沈下量はいずれもType-Aのドレーンを用いた場合の実測結果より大きい。排水量が異なる場合には後述する実験結果が異なると予想されるので本文で得られた実験式はその適用範囲に注意する必要がある。

③送気量: 1気圧の減圧(≈ -101.3 kPa)に対して地下水 1m^3 あたり総量5%(温度15℃)のガスが発生するとの報告がある¹⁴⁾。実施工においてはドレーンの打設深度までの全ての周面から地下水が流入し、その深度の圧力に応じた気泡が発生する。しかし、流入した地下水はドレーン内を上昇するにしがたい、さらに減圧されるのでそれに応じて気泡の発生量もさらに増加する。このことはドレーンの打設深度が増加するほど顕著になる。さらに、有機質土盤においてはメタンガスなどが気体の状態で独立に存在している場合もある。したがって、ドレーン内の空気量を厳密に推定することは困難であり、本実験ではこれらのことを考慮して気泡の影響を幅広く検討することとした。揚水管の底部から供給する空気量を送気量 Q_{a0} と定義して、減圧により発生する気泡の量をすべて送気量として与えるものとした。なお、送気量に比べて水道水から発生する気泡の量は微量であり無視した。設定した送気量は $Q_{a0} = 0.01, 0.05, 0.10, 0.20, 0.35, 0.50$ ℓ/minの6通りであり、初期排水量 $Q_{w0} = 2.5, 10.0, 20.0$ ℓ/minに対する Q_{a0} の割合はそれぞれ0.4~20%, 0.1~5%, 0.05~2.5%に相当する。なお、それぞれの送気量

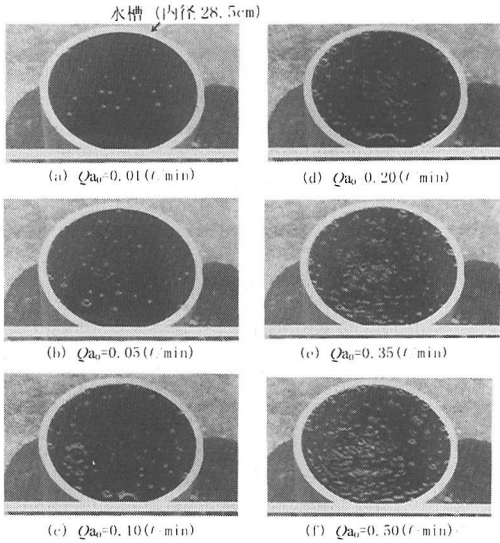


写真-5 発生する気泡の状況

において水槽内を気泡が上昇する状況を参考までに写真-5に示す。

④送気圧：本実験においては、その位置における水圧にほぼ等しい圧力の気泡を発生させることとした。水深50cmの位置におけるノズル(図-2)から発生する気泡の送気圧の実測値は5.40~6.40kPaであった。

(3) 実験方法

実験では、図-2に示すように、まず、真空ポンプ(オイルロータリー型、達成圧力-100kPa(1標準気圧≒101.3kPa)、送気量50ℓ/min、消費電力200W)により、真空レギュレータを介して真空槽に $p = -83.3\text{kPa}$ の真空圧を作用させた。そして、初期排水量 Q_{w0} を揚水管の下部に設けた初期排水量設定バルブによって所定の量に設定し、管内に連続的な鉛直上昇流を生じさせた。次に、送気量を一定に自動制御できる流量計を用い、送気量を $Q_{a0} = 0 \rightarrow 0.01 \rightarrow 0.05 \rightarrow 0.10 \rightarrow 0.20 \rightarrow 0.35 \rightarrow 0.50\text{ℓ/min}$ と5分毎に段階的に増加させた。送気中には初期排水量設定バルブの調整は行っていない。水槽の水位は常に一定に保たれている。送気前および各送気段階において、アクリルブロックの部分において写真撮影を行い、気泡の大きさと形状、流れの形態を測定した。送気中の排水量は、単位時間あたりの真空槽内の水位変化の測定値から算定した。また、所定の高さにおいて気泡の上昇速度を目視により測定した。アクリルブロックの部分における圧力の測定時間は送気前および各送気段階とも5分間、測定間隔は1秒とした。実験中の気圧は956.0~976.0hPa、気温は0~7.0℃、水温は11.0~12.0℃であった。

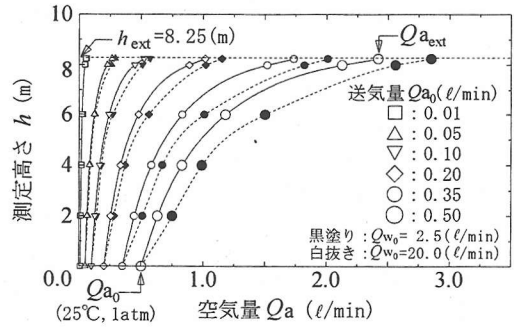


図-7 揚水管の高さとその位置における空気量の関係

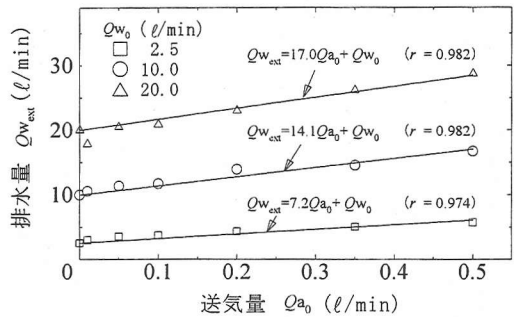


図-8 排水量と送気量の関係

3. 実験結果および考察

(1) 評価パラメータ

真空圧密工法においては多量の地下水とともに気泡が排出されており⁹⁾、鉛直ドレーン内の流れは水と気体が混じりあって流れる気液二相流であると考えられる。流体力学では気液二相流の流れの形態に影響を与える要因として、①蒸発、凝縮の有無、②流動方向、③管路の寸法、形状、④助走区間の長さ、⑤気液の物性、⑥気液両相の流量などが挙げられている¹⁸⁾。しかし、このように影響要因の数は多く、これらの要因と流れの遷移条件との関係を体系的に与えるには至っていない¹⁸⁾。

①の要因に関して、地盤内の温度はほぼ一定であり¹⁾、また、真空圧密工法で作用している真空圧に対しては水の蒸発は生じない²³⁾。したがって、この要因については無視できる。②の要因に関して、ドレーンの変形を無視しているので揚水管内の流れは鉛直上昇流に限定される。③の要因に関しても前述のように管状の鉛直ドレーンを模擬した内径24.6mmの揚水管に限定して考える。④の要因に関して、本工法における10~20mの長さにも及ぶドレーン内の流れを対象にしており、ドレーン内では流

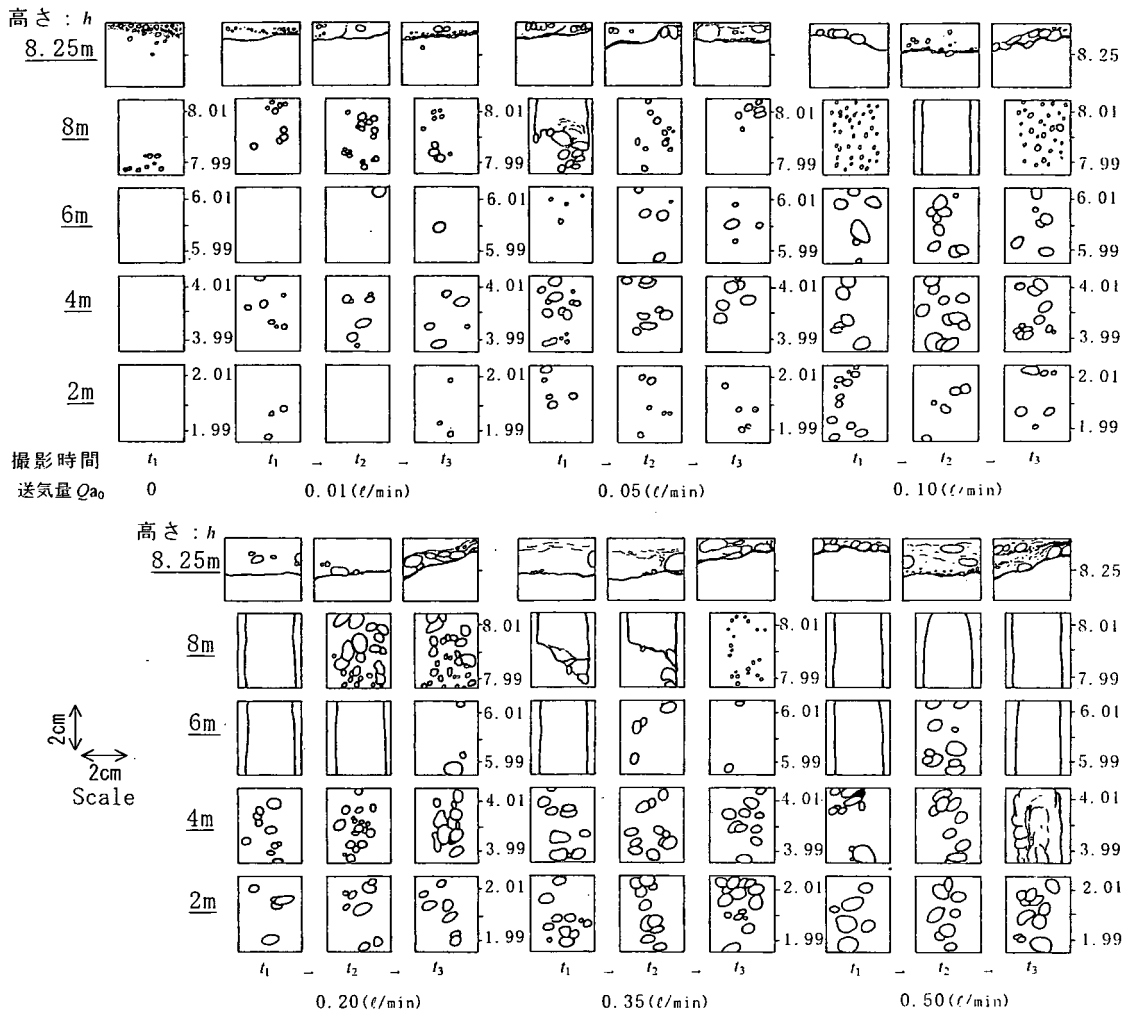


図-9(a) 気泡の大きさと形状および流れの形態 ($Q_{w0}=2.5\text{l/min}$)

れの形態が流動方向（鉛直方向）に大きく変化していると考えられる。したがって、流れの形態が遷移する過渡的な流れの区間（助走区間）²⁰そのものが対象となる。本実験では Type-D の鉛直ドレーンを模擬した長さ $H=8.25\text{m}$ の揚水管の全区間が助走区間である。助走区間を対象とした流れは気液二相流の研究においてもまだ十分に解明されていない。⑤および⑥の要因に関して、減圧により地盤内ではメタン、窒素、酸素などのガスが発生する¹⁴。しかし、本実験では揚水管内に発生させる気泡は空気に限定して考える。

以上のことより、本実験においては水および空気の流量のみを影響要因として取り挙げる。しかし、真空圧密工法においては鉛直ドレーン内の任意の深度における水および空気の流量は不明であり、実施工においては排水量 $Q_{w\text{ex}}$ と排出口付近の真空下におけるセパレータタン

ク内で地下水と分離された後の空気量 $Q_{a\text{ex}}$ が計測可能である（図-1 参照）。したがって、 $Q_{w\text{ex}}$ と $Q_{a\text{ex}}$ を評価パラメータとして提案し、本実験における管内の流れと圧力の挙動をこの二つのパラメータを用いて評価することを試みる。ただし、本実験においては $Q_{a\text{ex}}$ は、直接測定していないので、ボイルーシャルルの法則（水温一定と仮定）を適用して、送気量 Q_{a0} と測定された圧力から算定した。図-7 は、初期排水量 $Q_{w0} = 2.5$ および 20.0l/min における揚水管の高さ h とその位置において測定した圧力に基づく空気量 Q_a の関係の一例を示したものである。 Q_{a0} は上昇に伴ってその位置の圧力に応じて膨張する。

(2) 排水量の変化と気泡および流れの形態

図-8 に排水量 $Q_{w\text{ex}}$ と送気量 Q_{a0} の関係を示す。真空下の鉛直上昇流においては送気量の増加に伴って排水量が

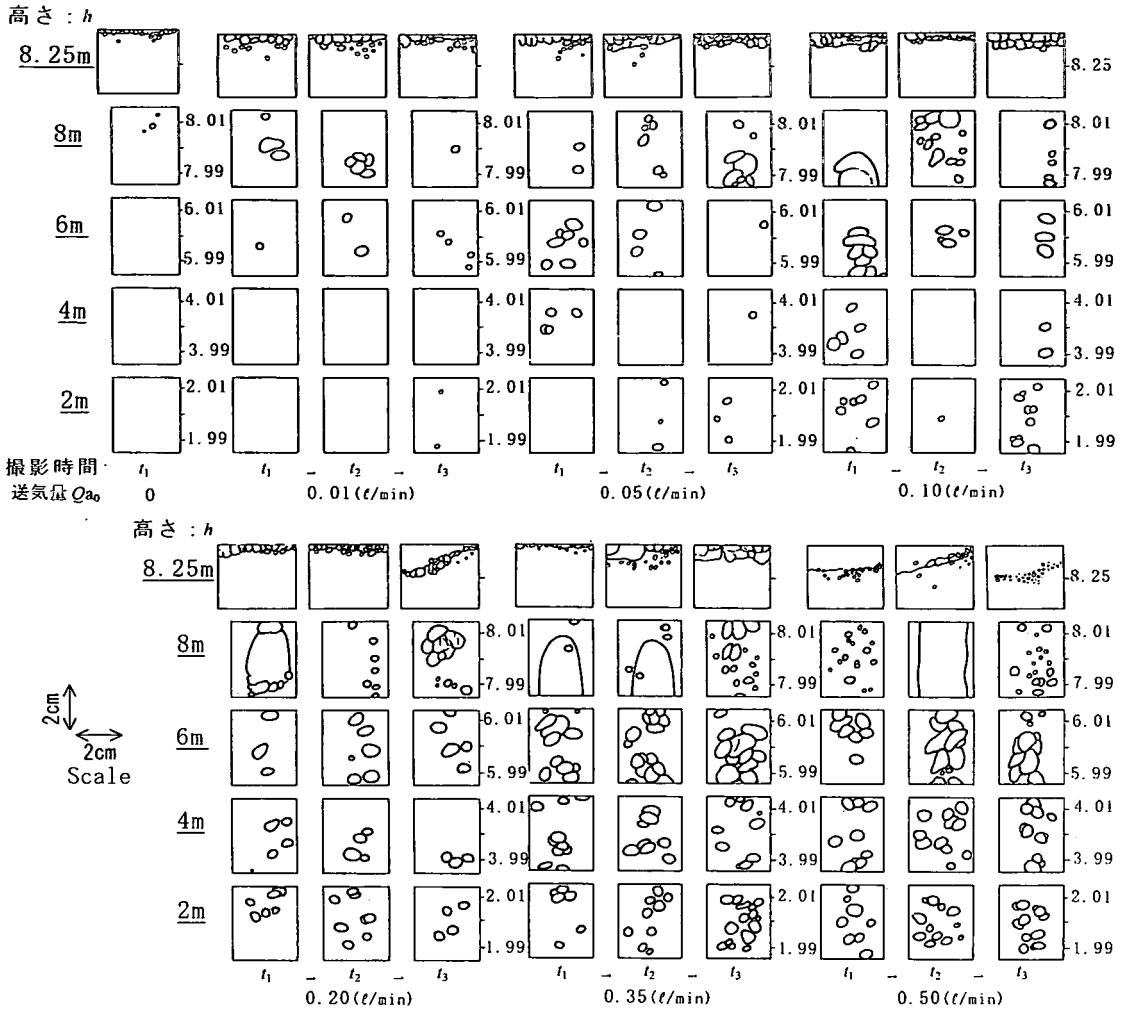


図-9(b) 気泡の大きさと形状および流れの形態 ($Q_{w0}=10.0\ell/\text{min}$)

増加する。なお、送気中の給水量も Q_{w0} よりも増加し、 Q_{w0} とほぼ等しいと考えられる。排水量は、2. (3) で述べたように、単位時間あたりの真空槽内の水位変化の測定値から算定したものであり、5分間の各送気段階においてはほぼ一定である。排水量の増加は、後述する揚水管内の流れの形態と関連しており、送気量の増加により揚水管内に占める空気割合が増加するため管内の単位長さあたりにおける水と空気二相流体としての平均的な単位体積重量が減少し、二相流体の自重による圧力と大気圧との差が増加することが主な要因である(図-9(a)~(c)参照)。排水量と送気量の関係は初期排水量ごとに異なる直線式で表される。初期排水量ごとの直線式と相関係数 r は図中に示すとおりである。送気量の増加に伴う排水量の増加量は初期排水量が大きいほど大きい。

管内で起る現象とその機構を説明するために、まず、

流れの形態を詳細に検討する。図-9(a)~(c)に初期排水量および送気量が異なる場合の所定の高さにおける気泡の大きさや形状および流れの形態を示す。図は連続写真(時間 $t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_3$) をトレースしたものである。送気前 ($Q_{a0}=0$) の場合において、高さ $h=8\text{m}$ 付近に見られる 1mm 程度の微細な気泡は水道水に溶存する空気の脱気によるものである。

図-9(a)の初期排水量 $Q_{w0}=2.5\ell/\text{min}$ の場合、送気量 $Q_{a0}=0.01\ell/\text{min}$ において、 $h=2\text{m}$ の気泡は直径 $1.0\sim 2.0\text{mm}$ 程度の球形を呈し、それ自身細かに振動しながら上昇して連続的な気泡流(連続する液相中に小気泡が分散した流れの状態¹⁸⁾)を形成する。気泡は上昇するにしたがって減圧により次第に膨張して大きさを増し、 $h=8\text{m}$ では直径 $1.0\sim 8.0\text{mm}$ 程度の気泡が通過する。送気量が $Q_{a0}=0.10\ell/\text{min}$ に増加すると、気泡は $h=2\text{m}$ では直径 $2.0\sim 4.0\text{mm}$

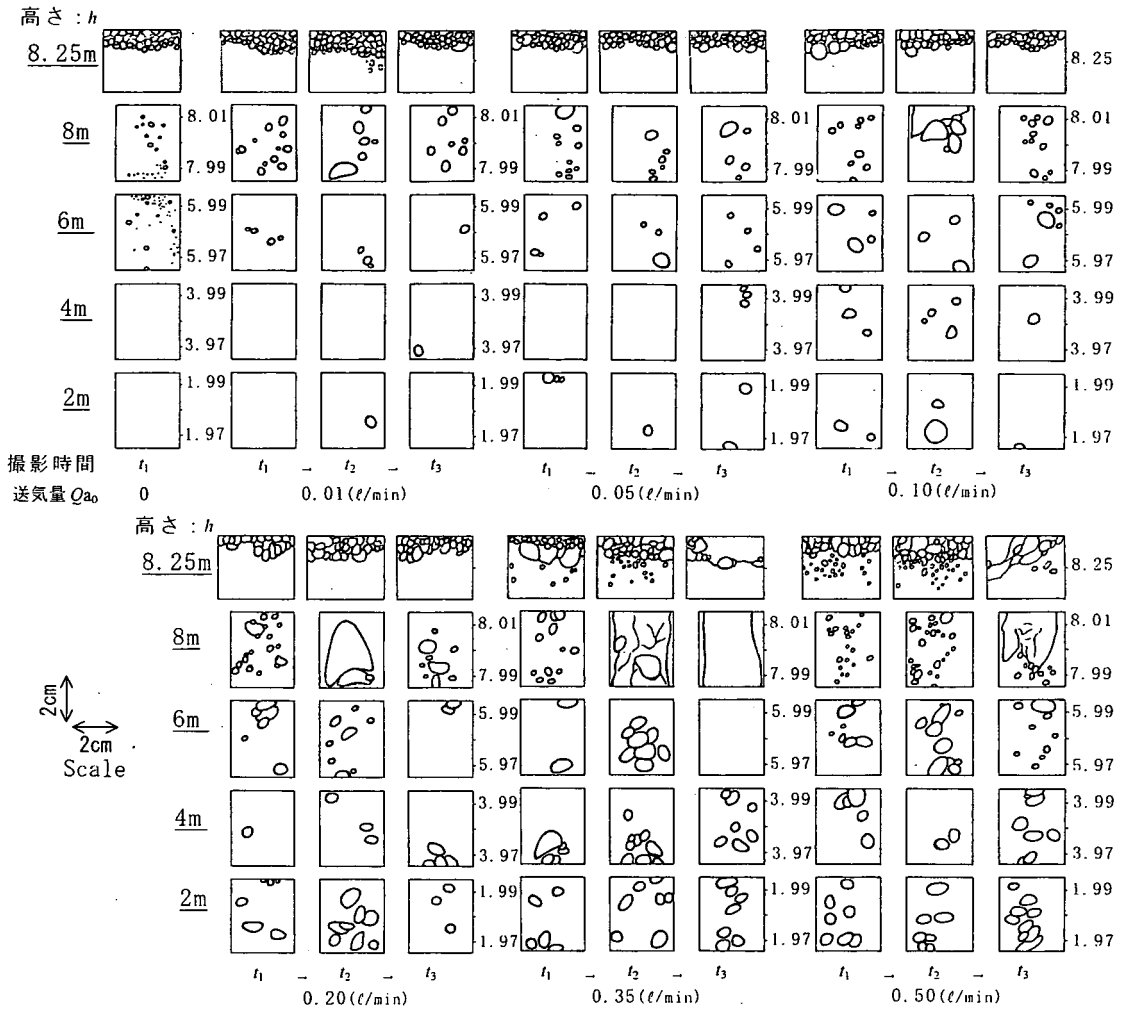


図-9(c) 気泡の大きさと形状および流れの形態 ($Q_{w0}=20.0\text{l/min}$)

程度の気泡流を呈するが、上昇するにしたがって次第に近傍の気泡と合体を繰り返してやや扁平な楕円形気泡に成長するものも見られる。 $h=6\text{m}$ では直径 $3.0\sim 8.0\text{mm}$ 程度の球形あるいは楕円形の気泡を主体とし、まれにキノコ笠状の気泡を含む。気泡は比較的密集し、互いに干渉しあいながら上昇するため気泡同士の合体が進み、気泡の流れはやがてスラグ流(管路断面を満たすような大きい砲弾形の気泡と小気泡を含む液体部分が交互に存在する流れ¹⁰⁾)に遷移する。 $h=8\text{m}$ では直径 1mm 程度の気泡を含む液相部分と長さ $1.5\sim 4.5\text{cm}$ の大気泡からなるスラグ流が通過する。 $h=8.25\text{m}$ の水平管の内部では管の上側部分を断続的に大気泡が通過し、その下位には少量の気泡を含む水が連続して流れるスラグ流が形成される。スラグ流の大気泡が水平管の管径に占める割合は最大 40% 程度である。送気量が増加すると気泡は大きさを増し、キ

ノコ笠状の気泡が次第にふえて、流れの形態がスラグ流に遷移する位置は低くなる。さらに、送気量が $Q_{w0}=0.50\text{l/min}$ に増加すると $h=4\text{m}$ 付近でスラグ流が認められ、 $h=8\text{m}$ における大気泡の長さは $6\sim 13\text{cm}$ である。スラグ流の大気泡は膨張しつつ上部の水を押し上げるように管内を上昇する。大気泡部分では、揚水管の半径方向において気液が明瞭に分離しており、大気泡と揚水管の壁面との間を水が下方に流れているように観察される。水平管内の上部を占める大気泡の割合は、鉛直管内のスラグ流の上昇に連動して管径の $0\sim 55\%$ 程度まで絶えず変動を繰り返す。また、図-9(b) (c) に示すように $Q_{w0}=10.0$ および 20.0l/min の場合における流れも気泡流あるいは気泡流とスラグ流が交互に現れる状態であるが、 $Q_{w0}=2.5\text{l/min}$ に比べてスラグ流の発生する頻度が少なくなる。世古口ら²⁰⁾も、本実験と同様に真空下の鉛直上昇流に

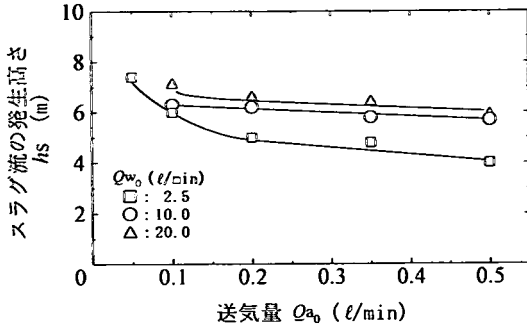


図-10 スラグ流の発生高さ と送気量の関係

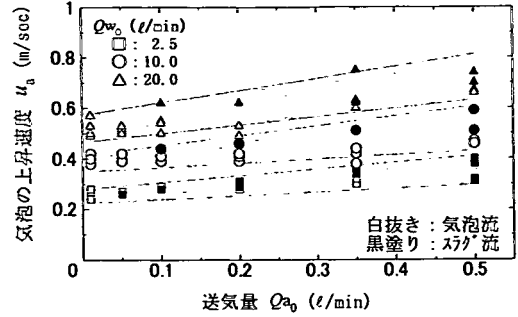


図-12 気泡の上昇速度と送気量の関係

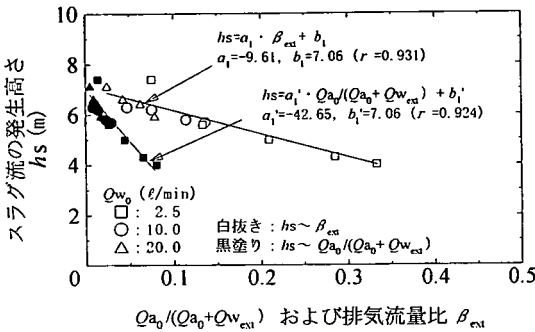


図-11 スラグ流の発生高さ と $Q_{a0}/(Q_{a0} + Q_{w_{ext}})$ および 排気流量比 β_{ext} の関係

において鉛直方向に流れの形態が大きく変化することを報告している。しかし、この時の流れの形態の詳細なトレースは示していない。一方、鳥飼・鈴木²⁰⁾は、大気圧下の鉛直上昇流において写真撮影により流れの形態の変化を定量的に捉えている。本実験における真空下の流れの形態は、鳥飼・鈴木²⁰⁾による大気圧下の流れの形態と定性的に同様の結果であり、両者の傾向には差がないと考えられる。

以上のことより、真空下における揚水管内の気泡や流れの形態は、大気圧下の場合と同様に送気量と初期排水量の両方の影響によって複雑に変化する。また、同時に図-9(a)～(c)は、前述のように揚水管の単位長さあたりにおける水と空気二相流体としての平均的な単位体積重量の変化を明瞭に表したものである。二相流体の平均的な単位体積重量は送気量すなわち管内の気泡の割合の増加に伴って大きく減少する。

一方、真空圧密工法の実施工においても水平排水管内を水と気泡が混在して流れる様子が観察されている。真空ポンプの稼働開始当初において管内の流れは気泡流であるが、沈下の進行とともに次第に気泡の割合が増加してスラグ流となる。その後、沈下が収束しはじめると気

泡の割合はさらに増加して地下水が漸続的に排水されるたびに水平排水管が振動する現象が認められる。このように実施工においては、図-9(a)の $Q_{w0} = 2.5 \text{ l/min}$ 、 $Q_{a0} = 0.50 \text{ l/min}$ の場合よりさらに極端な現象が起きている。

図-10 にスラグ流の発生高さ h_s と送気量 Q_{a0} の関係を示す。ここで h_s は、スラグ流の発生した最低高さとし、砲弾型の気泡の頂部の位置を測定した。 h_s は、初期排水量と送気量の両方の影響を受ける。スラグ流は、初期排水量が少なく、送気量が多いほど気泡の合体する現象が顕著となり(図-9(a)～(c)参照)、低い位置で発生する。また、いずれの初期排水量においても Q_{a0} が 0.20 l/min 以上においては、 h_s と送気量に直線関係が認められる。

鳥飼・鈴木²⁰⁾は、内径 $13 \sim 26 \text{ mm}$ 、高さ 3 m のアクリル管を用いた大気圧下の鉛直上昇流において、管底から供給される送気量 Q_{a0} と送気中の給水量 $Q_{w_{in}}$ の両方を一定に制御した実験を行った。その結果、 h_s が Q_{a0} と $Q_{w_{in}}$ の二つのパラメータを用いて算定される空気の容積流量比 $Q_{a0}/(Q_{a0} + Q_{w_{in}})$ により定量的に評価できることを示している。ただし、 $1.13 \leq Q_{a0} \leq 4.16 \text{ l/min}$ 、 $1.19 \leq Q_{w_{in}} \leq 13.46 \text{ l/min}$ 、 $0.2 \leq Q_{a0}/(Q_{a0} + Q_{w_{in}}) \leq 0.9$ である。鳥飼らの実験における $Q_{w_{in}}$ は送気中の排水量 $Q_{w_{ext}}$ とほぼ等しいと考えられる。したがって、 Q_{a0} のみを一定に制御し $Q_{w_{in}}$ を一定に制御していない本実験に適用する場合の鳥飼らのパラメータは $Q_{a0}/(Q_{a0} + Q_{w_{ext}})$ と表される。また、本文では鳥飼・鈴木²⁰⁾の成果を援用し、新たに提案した排水量 $Q_{w_{ext}}$ と空気量 $Q_{a_{ext}}$ から算定される排気流量比 $\beta_{ext} = Q_{a_{ext}}/(Q_{a_{ext}} + Q_{w_{ext}})$ を新たな評価パラメータとする。図-11 に上記の $Q_{a0}/(Q_{a0} + Q_{w_{ext}})$ および β_{ext} とスラグ流の発生高さ h_s の関係を示す。 h_s と $Q_{a0}/(Q_{a0} + Q_{w_{ext}})$ の関係は、本実験の条件下 ($0.01 \leq Q_{a0} \leq 0.50 \text{ l/min}$ 、 $2.5 \leq Q_{w_{ext}} \leq 28.7 \text{ l/min}$ 、 $0.0005 \leq Q_{a0}/(Q_{a0} + Q_{w_{ext}}) \leq 0.08$) においても図中に示した直線式で近似できる。この時、相関係数 $r = 0.924$ であり、両者の間には高い相関性が認められる。ただし、前述したように真空圧密工法においては Q_{a0} を測定することはできない。また、排水量 $Q_{w_{ext}}$ は図-8 のように初期排水量よりも増加しており、排出口における

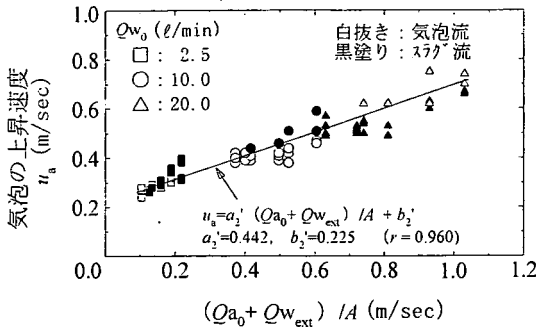


図-13(a) 気泡の上昇速度と $(Q_{a0} + Q_{w_{ext}}) / A$ の関係

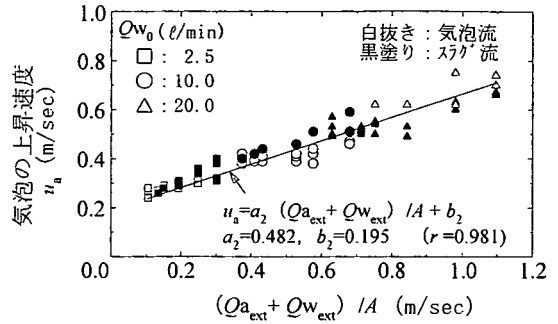


図-13(b) 気泡の上昇速度と $(Q_{a_{ext}} + Q_{w_{ext}}) / A$ の関係

空気量 $Q_{a_{ext}}$ も例えば図-7のように Q_{a0} より増加しているものとする。一方、 h_s と β_{ext} の関係は鳥飼らの実験式の表示に従えば次の直線式で近似できる。

$$h_s = a_1 \cdot \beta_{ext} + b_1 \quad (1)$$

このときの相関係数は $r=0.931$ であり、 h_s と β_{ext} の相関性も $Q_{a0} / (Q_{a0} + Q_{w_{ext}})$ の場合と同様に高い。 h_s は真空圧密工法において計測可能な $Q_{w_{ext}}$ と $Q_{a_{ext}}$ から求めた β_{ext} により定量的に評価できる。ただし、 a_1 、 b_1 は実験定数であり、 $a_1 = 9.61$ 、 $b_1 = 7.06$ である。また、式(1)の適用条件は、内径24.6mm、高さ8.25mの揚水管を用いた真空下の鉛直上昇流において $0.053 \leq Q_{a_{ext}} \leq 2.85 \text{ l/min}$ 、 $2.5 \leq Q_{w_{ext}} \leq 28.7 \text{ l/min}$ 、 $0.003 \leq \beta_{ext} \leq 0.33$ である。

(3) 気泡の上昇速度

図-12に初期排水量および送気量が異なる場合の所定の高さにおける気泡の上昇速度 u_a と送気量 Q_{a0} の関係を初期排水量ごとにハッチングで区分して示す。ただし、気泡の上昇速度は流れの形態を気泡流とスラグ流に大別して、それぞれ目視による5個の測定値を平均したものである。また、スラグ流の場合は大気泡の頂部の上昇速度である。なお、目視によるそれぞれ5個の測定値の差は小さく、さらに、同一条件の実験を複数回行った結果においても u_a の測定値はほぼ等しいことを確認している。初期排水量 $Q_{w0} = 2.5 \text{ l/min}$ の場合、送気量 $Q_{a0} = 0.01 \text{ l/min}$ においては、 $h=2 \text{ m}$ に見られる直径1.0~2.0mm程度の気泡(図-9(a))の上昇速度は $u_a = 0.26 \text{ m/sec}$ 、 $h=8 \text{ m}$ での直径1.0~8.0mmの気泡は $u_a = 0.28 \text{ m/sec}$ であり、測定高さによる上昇速度の違いはほとんどない。送気量が $Q_{a0} = 0.10 \text{ l/min}$ に増加すると、 $h=2 \text{ m}$ での直径2.0~4.0mmの気泡は $u_a = 0.29 \text{ m/sec}$ 、 $h=6 \text{ m}$ での直径3.0~8.0mmの気泡は $u_a = 0.27 \text{ m/sec}$ 、 $h=8 \text{ m}$ でのスラグ流を構成する大気泡は $u_a = 0.28 \text{ m/sec}$ である。この場合、流れの形態による違いもほとんどない。さらに、送気量が $Q_{a0} = 0.50 \text{ l/min}$ に

増加すると、 $h=2 \text{ m}$ での直径3.0~8.0mmの気泡は $u_a = 0.31 \text{ m/sec}$ 、 $h=8 \text{ m}$ でのスラグ流を構成する大気泡は $u_a = 0.40 \text{ m/sec}$ であり、測定高さまたは流れの形態の違いに対応して上昇速度は若干大きくなる。さらに、 $Q_{w0} = 10.0$ および 20.0 l/min の場合の結果も総合して判断すると、気泡の上昇速度は初期排水量および送気量の両方に影響を受ける。また、気泡の上昇速度は測定高さおよび流れの形態では直接評価できない。

赤川・坂口²⁵⁾は、内径27.6mm、高さ3.805mの硬質ガラス管を用いた大気圧下の鉛直上昇流において、管底部から供給される送気量 Q_{a0} と送気中の給水量 $Q_{w_{in}}$ の両方を一定に制御した実験を行った。その結果、管底から0.55~3.145mの測定区間における気泡の上昇速度 u_a が Q_{a0} と $Q_{w_{in}}$ のそれぞれに対応する流束の和 $((Q_{a0} + Q_{w_{in}}) / A)$ 、 A 管の断面積)によって定量的に評価できることを示している。ただし、 $5.02 \leq Q_{a0} \leq 53.8 \text{ l/min}$ 、 $7.14 \leq Q_{w_{in}} \leq 28.7 \text{ l/min}$ 、 $0.34 \leq (Q_{a0} + Q_{w_{in}}) / A \leq 2.30 \text{ m/sec}$ である。赤川らの実験においても、図-11における鳥飼らの考察と同様に $Q_{w_{in}} = Q_{w_{ext}}$ であるので、本実験に適用する場合の赤川らのパラメータは $(Q_{a0} + Q_{w_{ext}}) / A$ で表される。図-13(a)において、 $(Q_{a0} + Q_{w_{ext}}) / A$ と気泡の上昇速度 u_a の関係を示す。 u_a と $(Q_{a0} + Q_{w_{ext}}) / A$ の関係は、本実験の条件下 $(0.01 \leq Q_{a0} \leq 0.5 \text{ l/min}$ 、 $2.5 \leq Q_{w_{ext}} \leq 28.7 \text{ l/min}$ 、 $0.10 \leq (Q_{a0} + Q_{w_{ext}}) / A \leq 1.02 \text{ m/sec}$)においても図中に示した直線式で近似できる。この時、相関係数 $r = 0.960$ であり、両者の間には高い相関性が認められる。次に、赤川・坂口²⁵⁾の成果を援用して、空気量 $Q_{a_{ext}}$ と排水量 $Q_{w_{ext}}$ から算定される $(Q_{a_{ext}} + Q_{w_{ext}}) / A$ により気泡の上昇速度を図-13(b)において検討する。ここで式(1)の記述でも述べたように $Q_{a_{ext}}$ と $Q_{w_{ext}}$ は、それぞれ Q_{a0} および Q_{w0} よりも増加している。 u_a と $(Q_{a_{ext}} + Q_{w_{ext}}) / A$ の関係は、流れの形態に拘らず次の直線式で近似できる。

$$u_a = a_2 (Q_{a_{ext}} + Q_{w_{ext}}) / A + b_2 \quad (2)$$

表-3 管内の圧力分布を表す直線式, 相関係数および R_a .

送気量 Q_{a_0} (ℓ/min)	初期排水量 Q_{w_0} (ℓ/min)											
	2.5				10.0				20.0			
	p_{ext} (kPa)	α (kPa/m)	r	R_a	p_{ext} (kPa)	α (kPa/m)	r	R_a	p_{ext} (kPa)	α (kPa/m)	r	R_a
0.00	-83.33	-9.66	0.999	-0.01	-82.66	-9.58	0.999	-0.02	-82.47	-10.06	0.999	0.03
0.01	-83.33	-9.61	0.999	-0.02	-82.47	-9.62	0.999	-0.02	-81.98	-9.94	0.999	0.01
0.05	-83.40	-9.43	0.999	-0.04	-82.47	-9.54	0.999	-0.03	-81.68	-9.94	0.999	0.01
0.10	-83.33	-9.19	0.999	-0.06	-83.45	-9.73	0.999	-0.01	-81.49	-9.88	0.999	0.01
0.20	-83.43	-8.91	0.999	-0.09	-82.96	-9.42	0.999	-0.04	-81.00	-9.79	0.999	0.00
0.35	-83.40	-8.45	0.999	-0.14	-81.98	-9.14	0.999	-0.07	-80.51	-9.70	0.999	-0.01
0.50	-83.26	-7.99	0.998	-0.18	-81.68	-8.90	0.999	-0.09	-80.02	-9.65	0.999	-0.02

$$p_{\text{ext}} - p_h = \alpha(h_{\text{ext}} - h), \quad R_a = (\alpha - \alpha_0)/\alpha_0, \quad h_{\text{ext}} = 8.25\text{m}, \quad \alpha_0 = -9.8\text{kPa/m}$$

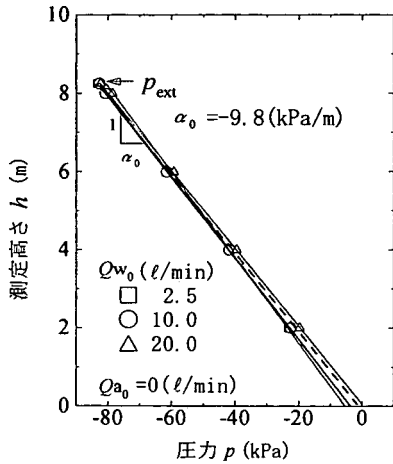


図-14 送気前の管内の圧力分布

このときの相関係数は $r=0.981$ であり、 u_a と $(Q_{w_{\text{ext}}}+Q_{a_{\text{ext}}})/A$ の相関性も $(Q_{a_0}+Q_{w_{\text{ext}}})/A$ の場合と同様に高い。 $Q_{a_{\text{ext}}}$ と $Q_{w_{\text{ext}}}$ から求めた $(Q_{a_{\text{ext}}}+Q_{w_{\text{ext}}})/A$ は、鉛直管内における u_a の違いは評価できないが、送気量の違いによる u_a の変化を定量的に評価できる。ただし、 a_2 、 b_2 は実験定数であり、 $a_2=0.482$ 、 $b_2=0.195$ である。また、式(2)の適用条件は、内径24.6mm、高さ8.25mの揚水管を用いた真空下の鉛直上昇流において $0.053 \leq Q_{a_{\text{ext}}} \leq 2.85 \ell/\text{min}$ 、 $2.5 \leq Q_{w_{\text{ext}}} \leq 28.7 \ell/\text{min}$ 、 $0.11 \leq (Q_{a_{\text{ext}}}+Q_{w_{\text{ext}}})/A \leq 1.1 \text{m}/\text{sec}$ である。

(4) 管内の圧力変化

図-14に、送気前の管内の圧力分布を示す。所定の測定高さ h における管内の圧力 p_h は、初期排水量が異なるすべての場合において、水平排水管($h_{\text{ext}}=8.25\text{m}$)に作用する真空圧 p_{ext} を基点として直線近似できる。ただし、 $h=0\text{m}$ 付近にある初期排水量設定バルブ内の圧力は厳密には初期排水量ごとに異なると考えられるが、実験方法に起因するこの影響は小さいとして無視している。表-3に示すように、それぞれの直線近似式($p_{\text{ext}} - p_h = \alpha(h_{\text{ext}} - h)$)

における勾配 α は、静水圧分布(図中の破線)の勾配 $\alpha_0 = -9.8\text{kPa/m}$ にほぼ等しい。すなわち、 p_{ext} を基点として高さが1m下がるとき、ほぼ9.8kPaずつ圧力が増加する。

図-15(a)~(c)に初期排水量および送気量が異なる場合における高さごとの管内の圧力 p の経時変化を示す。 $Q_{w_0}=2.5 \ell/\text{min}$ の場合、送気量が増加すると圧力は瞬時に低下(負圧が増加)し、送気量が一定のもとで最大1.2kPa程度の小さな変動を繰り返しながらもほぼ一定値を示す。この小さな圧力変動は、送気前($Q_{a_0}=0$)においても生じている。これは設定した真空圧の変動とともにデータロガーの取り込み精度によるものと考えられる。一方、送気中の圧力変動は、流れの方向に管内の二相流体の平均密度が変化するために生じる脈動現象にも起因する²⁾と考えられるが、本実験においてこれらを分離して評価することは難しい。したがって、本文では、細かく変動する圧力の中央値を管内圧力として評価し、以下に送気量の違いによる圧力の変化を考察する。図-15(a)の初期排水量 $Q_{w_0}=2.5 \ell/\text{min}$ の場合、送気量 $Q_{a_0}=0.01 \ell/\text{min}$ において、直径1.0~2.0mm程度の気泡が見られる $h=2\text{m}$ (図-9(a))では圧力が送気前に比べて0.6kPa程度低下(負圧が増加)する。直径1.0~8.0mmの気泡が見られる $h=8\text{m}$ では圧力の低下はほとんど認められない。送気量が $Q_{a_0}=0.10 \ell/\text{min}$ に増加すると、直径2.0~4.0mmの気泡が見られる $h=2\text{m}$ の圧力の低下量(負圧の増加量)は送気前に比べて1.7kPa程度、直径3.0~8.0mmの気泡が見られる $h=6\text{m}$ では4kPa程度、スラグ流が見られる $h=8\text{m}$ では0.4kPa程度である。さらに、送気量が $Q_{a_0}=0.50 \ell/\text{min}$ に増加すると、圧力の低下量(負圧の増加量)は、直径3.0~8.0mmの気泡が見られる $h=2\text{m}$ では8.8kPa程度、スラグ流が見られる $h=8\text{m}$ では0.2kPa程度である。一方、 $Q_{w_0}=10.0 \ell/\text{min}$ の場合には送気量の増加に伴う圧力の低下量(負圧の増加量)は総じて小さく、20.0 ℓ/min の場合にはほとんど無視できる程度である。

図-16(a)~(c)に初期排水量および送気量が異なる場合の管内の圧力分布を示す。所定の測定高さ h における

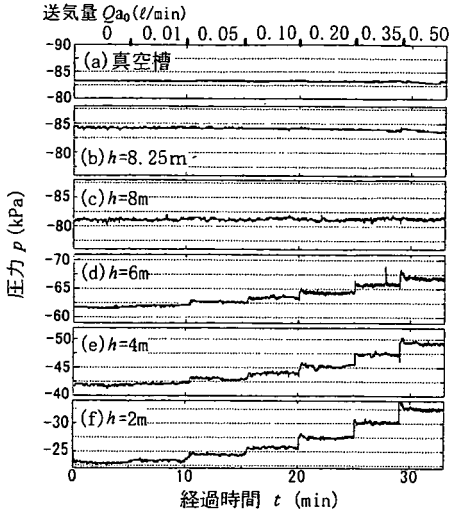


図-15(a) 管内の圧力の経時変化 ($Q_{w0}=2.5\text{ l/min}$)

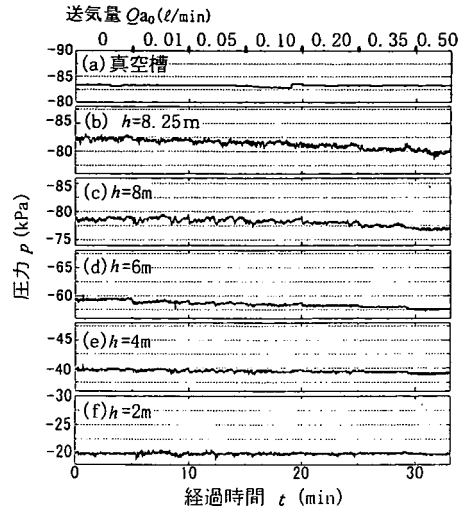


図-15(c) 管内の圧力の経時変化 ($Q_{w0}=20.0\text{ l/min}$)

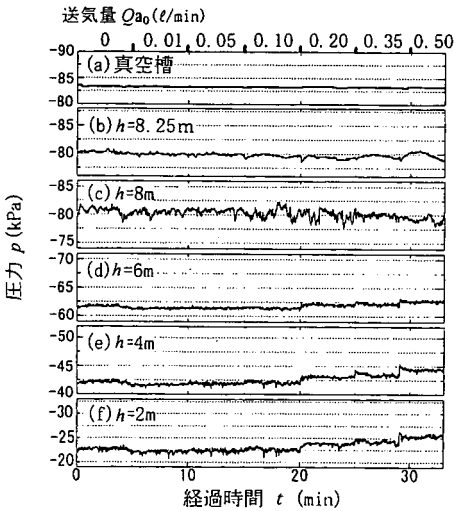


図-15(b) 管内の圧力の経時変化 ($Q_{w0}=10.0\text{ l/min}$)

管内の圧力 p_h は、水平排水管 ($h_{\text{ex}}=8.25\text{ m}$) に作用する真空圧 p_{ex} を基点としていずれも精度良く直線式で表される。それぞれの直線式の勾配 α と相関係数 r を表-3 に示す。管内の圧力は、送気量の増加にともない低下（負圧が増加）する。圧力の低下量（負圧の増加量）は、揚水管の下部ほど大きく、排出口に近い上部ほど小さい。また、圧力の低下量（負圧の増加量）は初期排水量が増加するにしたがって小さくなり、 $Q_{w0}=20.0\text{ l/min}$ では無視できるほど小さい。ここで、送気中の圧力分布を表す直線式の勾配 α の α_0 に対する変化割合 $R_\alpha = (\alpha - \alpha_0) / \alpha_0$ も表-3 に示す。 $R_\alpha < 0$ は α の値が α_0 の値より大きいことを

意味する。2. (1)、(2) および 3. (1) に詳述した条件下における気泡の割合が最も大きな $Q_{w0}=2.5\text{ l/min}$ 、 $Q_{a0}=0.50\text{ l/min}$ の場合においても $R_\alpha = -0.18$ であり、この時の管内の圧力は $h=2\text{ m}$ において 8.8 kPa しか変化していない。すなわち、管内の圧力は気泡の発生に対してあまり大きな変化を受けないようである。

図-17 に初期排水量および送気量が異なる場合における管内の圧力分布を表す直線式の勾配 α と送気量 Q_{a0} の関係を示す。 α は初期排水量と送気量の両方に影響される。 α は初期排水量が少なく送気量が多いほど大きい。2. (1)、(2) および 3. (1) に述べた条件下において得られた α を定量的に評価することを以下に考察する。

流体力学において、鉛直管内の気液二相流における鉛直方向の圧力差の主成分は重力項と摩擦項である²⁸⁾。本実験において、重力項は、水と空気自重に関わる成分であり、それぞれの密度 (ρ_w および ρ_a) と鉛直方向の任意の区間におけるそれぞれの容積流量 (Q_w および Q_a) に基づいて評価される。また、摩擦項については、影響する要因が一般に多種多様であり、統一的に評価することは困難であるが²⁸⁾、摩擦項の影響要因の一つである摩擦係数は Q_w および Q_a によっても変化する²⁸⁾。一方、上記の Q_w および Q_a に対応する本実験の $Q_{w\text{ex}}$ および $Q_{a\text{ex}}$ は式(1)および(2)で考察したように、流れの形態や気泡の上昇速度を定量的に評価できるパラメータである。以上のことより、排気流量比 $\beta_{\text{ex}} = Q_{a\text{ex}} / (Q_{a\text{ex}} + Q_{w\text{ex}})$ のみを用いて α を評価することを図-18 において試みる。 α が評価できれば p_{ex} の値は測定可能であるので管内の圧力分布を推定することができる。勾配 α と排気流量比の関係は、次の関数式によって近似できる。

$$\alpha = a_3 \cdot \beta_{\text{ex}}^2 + b_3 \cdot \beta_{\text{ex}} + \alpha_0 \quad (3)$$

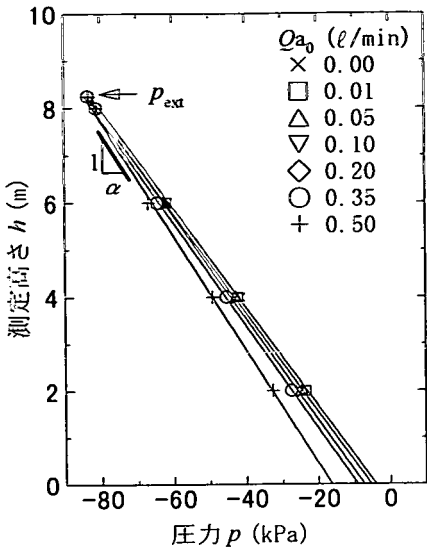


図-16(a) 送気中の管内の圧力分布 ($Q_{w_0}=2.5\text{l/min}$)

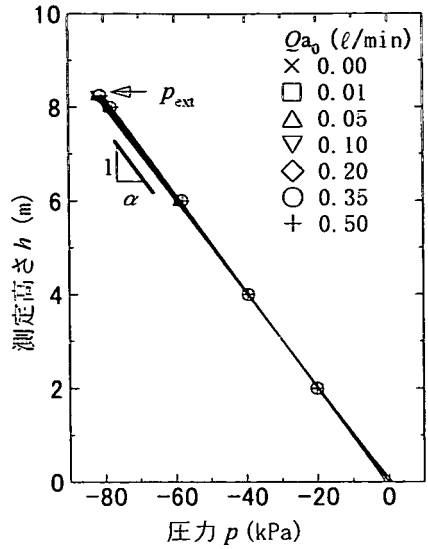


図-16(c) 送気中の管内の圧力分布 ($Q_{w_0}=20.0\text{l/min}$)

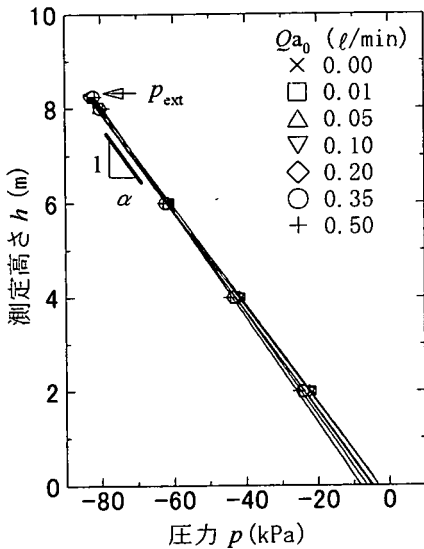


図-16(b) 送気中の管内の圧力分布 ($Q_{w_0}=10.0\text{l/min}$)

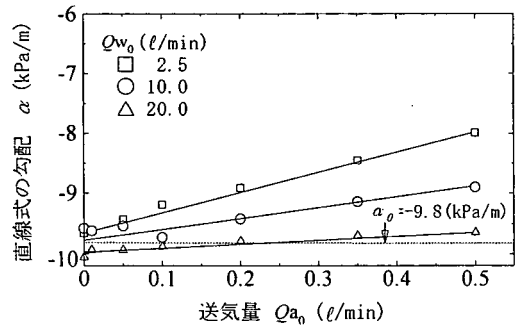


図-17 直線式の勾配と送気量の関係

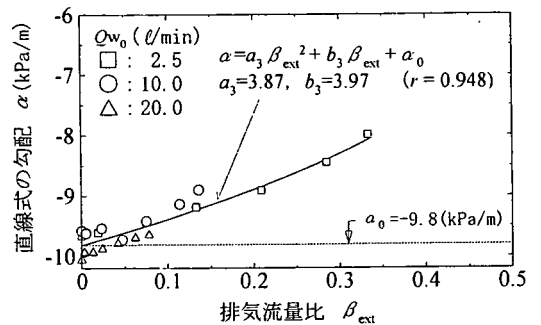


図-18 直線式の勾配と排気流量比の関係

このときの相関係数は $r=0.948$ であり、 α と β_{ext} の相関性は高い。 α も真空圧密工法において計測可能な $Q_{w_{\text{ext}}}$ と $Q_{a_{\text{ext}}}$ から求めた β_{ext} により定量的に評価できる。ただし、 a_3 、 b_3 は実験定数であり、 $a_3=3.87$ 、 $b_3=3.97$ である。また、式(3)の適用条件は、内径 24.6mm、高さ 8.25m の揚水管を用いた真空下の鉛直上昇流において $0.053 \leq Q_{a_{\text{ext}}} \leq 2.85\text{l/min}$ 、 $2.5 \leq Q_{w_{\text{ext}}} \leq 28.7\text{l/min}$ 、 $0.003 \leq \beta_{\text{ext}} \leq 0.33$ である。

4. まとめ

真空圧密工法において地盤内の減圧によって生じる気泡が管状の鉛直ドレーン内の圧力分布に及ぼす影響を明

らかにするための基礎的な実験研究として新たに揚水実験装置を開発した。実験では、地盤条件やドレーン周囲の透水性に関わる条件を除外し、実施における管状のドレーン内の水と気泡の流れの状態を考慮している。真空下の鉛直管内の上昇流に底部から一定量の気泡を供給する揚水実験を実施した。送気前の管内の流れは、層流から乱流への遷移状態から乱流状態である。実験結果に基づいて上昇流中の流れと圧力の挙動について考察した。また、上記の挙動に対する評価パラメータとして、真空圧密工法の施工において計測可能な排水量 $Q_{w_{ext}}$ および排出口付近の真空下(減圧下)における空気量 $Q_{a_{ext}}$ を提案し、その有効性を示した。2. (1), (2) および 3. (1) に詳述した条件下において得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 真空下の上昇流中の気泡は、細かな振動と変形を繰り返しながら上昇し、減圧による膨張と気泡同士の合体によって次第に大きさを増す。気泡の流れの形態は、送気量の増加によって連続的な気泡流からキノコ笠状の気泡を経てスラグ流に遷移する。スラグ流への遷移は、初期排水量が少ないほど顕著である。このように、管内の気泡の割合の増加に伴って揚水管の単位長さあたりにおける水と空気の間相流体としての平均的な単位体積重量は大きく減少する。そのため送気量の増加に比例して排水量も増加する。初期排水量が多いほどその増加量は大きい。
- (2) スラグ流は、排水量が少なく送気量が多いほど低い位置で発生する。発生高さは、新たに提案した排水量 $Q_{w_{ext}}$ と空気量 $Q_{a_{ext}}$ から算定される排気流量比 $\beta_{ext} = Q_{a_{ext}} / (Q_{a_{ext}} + Q_{w_{ext}})$ を用いて実験式(1)により定量的に評価できる。
- (3) 真空下の気泡の上昇速度は、初期排水量と送気量の両方の影響を受ける。気泡の上昇速度は測定高さおよび流れの形態では直接評価できない。送気量の違いによる気泡の上昇速度の変化は、排水量 $Q_{w_{ext}}$ および空気量 $Q_{a_{ext}}$ から算定される排出口における水と空気の各相の流束の和 $(Q_{a_{ext}} + Q_{w_{ext}}) / A$ を用いて実験式(2)により定量的に評価できる。
- (4) 送気後の管内の圧力は、送気量の増加にともなって静水圧分布よりもさらに低下(負圧が増加)する。低下後の圧力分布も直線で近似できる。送気中の圧力分布を表す直線式の勾配 α は、新たに提案した排気流量比 β_{ext} を用いて実験式(3)により定量的に評価できる。

以上の結果に基づけば、真空圧密工法において管状の鉛直ドレーンの周囲から水や気泡が流入する場合においても気泡の発生によってドレーン内の間相流体としての平均的な単位体積重量が減少し、間相流体の自重による圧力と大気圧との差が増加するため排水量の増加や圧力の低下(負圧の増加)が生じると考えられる。すなわち、気泡の発生は圧密圧力を増加させ改良効果を高めるように作用することが示唆される。このときのドレーン内の

圧力分布を評価するパラメータとして排気流量比 β_{ext} が有効である。ただし、気泡の割合を大きく変化させた本実験においても圧力の低下(負圧の増加)はあまり大きくなく、ドレーン内の圧力分布に及ぼす気泡の影響はあまり大きくないようである。実務設計においてドレーン内の圧力分布を定量的に評価するためには、さらに幅広い検討が必要である。なお、厳密に条件を設定して得られた本実験の結果はドレーン内の圧力分布を評価するための理論的な解析法の妥当性を検証するための役割も果たすと考える。

謝辞：実験は大原剛氏(信州大学大学院)、藤島大幹氏(現在、日本技術開発㈱)の卒業論文として実施された。ここに付記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 梅崎健夫, 塩野敏昭, 永山勝, 有田良治, ニノ宮彦彦, 林宏親: 軟弱地盤改良における真空圧密工法の適用性, 第44回地盤工学シンポジウム, pp. 217-222, 1999.
- 2) Kjellman, W.: Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure, *Proc. Conf. on Soil Stabilization, M. I. T.*, pp. 258-263, 1952.
- 3) Shang, J.Q., Tang, M. and Miao, Z.: Vacuum preloading consolidation of reclaimed land: a case study, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, pp. 740-749, 1998.
- 4) Chol-Woong: Case study on vacuum consolidation at Kimhae sewage treatment plant, *Special Publication at the 11th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Thick Deltaic Deposits, ATC-7 Workshop*, pp. 109-125, 1999.
- 5) Bergado, D. T., Miura, N. and Chai, J. C.: Vacuum consolidation with PVD at SBIA site on soft Bangkok clay with comparison to previous studies, 低平地研究, No. 7, 佐賀大学 低平地防災研究センター, pp. 77-87, 1998.
- 6) Holm, G.: Consolidation and stabilization of soft clay, *International Workshop on Technology Transfers for Vacuum-induced Consolidation: Engineering and Practice*, pp. 67-75, 1996.
- 7) Cognon, I. and Thevanayagam, S.: Vacuum consolidation technology - principles and field experience, *Vertical and Horizontal Deformation of Foundations and Embankments, Geotechnical Special Publication, ASCE*, No. 40, pp. 1237-1248, 1994.
- 8) Jacob, A., Thevanayagam, S. and Kavazanjian, E.: Vacuum-assisted consolidation of a hydraulic landfill, *Geotechnical Special Publication, ASCE*, 40(2), pp. 1249-1261, 1994.
- 9) 小林正樹, 土田孝: 錦海湾における真空圧密工法現地実験, 港湾技研資料, No. 476, pp. 3-28, 1984.
- 10) 名取博夫: 東京ガス田について一環地質的側面に関連し

- て一、シンポジウム 東京ガス田上の地質環境と地下開発-地下開発におけるガス問題をいかに克服するか、日本地質学会環境地質研究委員会, pp.5-14, 1993.
- 11) 中島章治, 岩崎清: 川崎臨海地区のガス田をシールドで貫く 東電・京町通り付近管路工事, トンネルと地下, Vol.14, No.7, pp.31-37, 1983.
 - 12) 渡義治, 新舎博, 林健太郎: プラスチックドレーン材を利用した真空圧密工法に関する実験, 地盤と建設, Vol.2, No.1, pp.33-44, 1984.
 - 13) 谷村剛嗣, 梅崎健夫, 塩野敏昭: 三軸圧縮試験における不攪乱海成粘土の真空圧密・非排水せん断特性, 第35回地盤工学研究発表会, pp.547-548, 2000.
 - 14) 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.193-204, 1999.
 - 15) 山崎卓爾: キャビテーション工学, 日刊工業新聞社, pp.70-71, 1978.
 - 16) 室町忠彦, 三沢融: 大気圧工法と生石灰パイル工法の現地比較実験, 鉄道技術研究報告, No.943(施設編第429号), pp.1-55, 1975.
 - 17) Qian, J. H., Zao, W.B., Cheung, Y. K. and Lee, P.K.K.: The theory and practice of vacuum consolidation, *Computers and Geotechnics*, Vol.13, pp.103-118, 1992.
 - 18) 勝田勝一郎, 三島嘉一郎: 気液二相流ハンドブック, 1章流動様式, 日本機械学会編, コロナ社, pp.1-25, 1989.
 - 19) 富山明男, 宋明良, 坂口忠司: 垂直管内静止液中単一大気泡の数値解析, 日本機械学会論文集(B編), 60巻, 575号, pp.203-210, 1994.
 - 20) 松本眞一郎, 中村玄正: 単一孔から発生する気泡の性状と分布特性について, 土木学会論文報告集, 第260号, pp.75-87, 1977.
 - 21) 井田富夫: 水工学便覧, 1章 流体の物理的性質, 森北出版, p.5, 1966.
 - 22) 理科年表, 国立天文台編, 丸善, p.442, 1997.
 - 23) 梅崎健夫, 河村隆: 真空蒸発による軟弱粘土の含水比低下特性, 第4回地盤改良シンポジウム, 日本材料学会, pp.201-208, 2000.
 - 24) 鳥飼欣一, 鈴木康一: 垂直二相流動様式の遷移(空気水系の気泡流より他の流動様式への遷移), 日本機械学会論文集(B編), 53巻, 486号, pp.470-474, 1987.
 - 25) 世古口言彦, 松村公治, 深野徹: 自然循環系揚液管における脈動特性の研究(第1報, 脈動特性と揚水特性との関係), 日本機械学会論文集(B編), 47巻, 415号, pp.484-491, 1981.
 - 26) 赤川浩爾, 坂口忠司: 気液二相流のボイド率変動に関する研究(第3報, ピストン流各部の速度), 日本機械学会論文集(第2部), 31巻, 224号, pp.601-607, 1965.
 - 27) 深野徹, 坂口忠司, 世古口言彦, 武石雅之, 浜口八郎: 気液二相流ハンドブック, 8章 スラッグ流・フロス流・団塊波流, 日本機械学会編, コロナ社, pp.229-292, 1989.
 - 28) 世古口言彦, 小澤守: 気液二相流ハンドブック, 3章 圧力損失・ボイド率, 日本機械学会編, コロナ社, pp.55-95, 1989.

(2000.9.14 受付)

EFFECT OF RESOLVED AIR IN GROUND WATER ON FLOW AND PRESSURE IN CYLINDRICAL DRAIN ON VACUUM-INDUCED CONSOLIDATION METHOD

Toshiaki SHIONO, Takeo UMEZAKI and Takashi KAWAMURA

On the vacuum-induced consolidation method which is one of the soft ground improvement methods, resolved air and gas are pumped out mixing with ground water through prefabricated vertical drain (PVD) and horizontal drain pipe due to vacuum pressure. This method is the accelerated consolidation method. It is necessary for the practical design to evaluate the increment in consolidation pressure suitably. Therefore it is one of the most significant problem to make clear the mechanism that the flow pattern and pressure in PVD are changed in the cause of air and gas. A simple pumping test system is developed which simulates the condition of flow in cylindrical vertical drain, in which can be controlled the shape and volume of air, measured the pressure and visualized the behavior of flow, in the riser pipe under the negative pressure. This paper discusses the flow pattern and pressure in the riser pipe. Practical parameters to evaluate above phenomena are proposed, and the validity of parameters is confirmed based on the experimental results.