

気液二相流のサイフォン機能を利用した 圧密地盤改良方法の研究

METHOD OF CONSOLIDATION GROUND IMPROVEMENT BY UTILIZING
SIPHON EFFECT OF GAS-LIQUID TWO-PHASE DOWNFLOW

熊谷隆宏¹・高将真²・安田淳一³・濱谷拓⁴・貞山直毅⁴・小野大和⁵
Takahiro KUMAGAI, Changjin KO, Junichi YASUDA, Taku HAMAYA, Naoki SADAYAMA
and Yamato ONO

¹正会員 Ph. D. 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²五洋建設 (株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

³ペンタテクノサービス (株) 技術部 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

⁴五洋建設 (株) 東北支店 (〒980-8605 宮城県仙台市青葉区二日町16-20 二日町ホームプラザビル2F)

⁵小野建設 (株) 土木部 (〒411-0801 静岡県三島市谷田60-3)

The vacuum consolidation method, which uses vacuum pressure generated by vacuum pumps, has recently been drawing attention as a remarkable method of consolidation ground improvement. The method has the advantages to enable rapid construction of embankment avoiding shear failure of foundation, and bulk attenuation of clayey soil in disposal sites, etc. In this study, a new method is proposed to utilize vacuum pressure by the siphon effect in a water-filled vertical pipe for the vacuum consolidation method. Especially, gas-liquid two phase downflow is realized within a vertical drainpipe in the condition of intensive negative pressure that dissolved oxygen is evaporated. The effects of proposed method for ground improvement are verified by conducting laboratory and field experiments.

Key Words : *Gas-liquid two-phase flow, bubble flow, vacuum consolidation, bulk attenuation, low-carbon*

1. はじめに

軟弱地盤の圧密改良方法として、プラスチックボードドレーンを地盤中に打設後、吸引装置である真空ポンプによって地盤内に負圧を作用させて圧密改良を行う方法は、大気圧載荷工法または真空圧密工法として知られている。この工法は、1940年代に Kjellman¹⁾により提案され、近年、実用化に向けて多くの技術的課題が克服されたことにより、数多くの適用がなされている²⁾。この工法の用途としては、盛土下部の地盤改良(軟弱地盤の強度増加)以外にも、載荷盛土を不要する利点を生かし、埋立処分された粘性土の減容化、湖沼や内湾の水深確保等が挙げられる。

真空圧密工法による圧密地盤改良の効果は、吸引装置による作用負圧の大きさに依存する。理論上の最大の負圧が -100kN/m^2 であるのに対して、真空圧密工法では一般に、真空ポンプを備えた減圧室における作用負圧は $-70\sim 85\text{kN/m}^2$ 程度が限界であり、ま

た、ドレーン先端に作用させることのできる負圧は、概ね $-60\sim 70\text{kN/m}^2$ 程度であることが、これまでの報告^{2), 3), 4)}や研究⁵⁾において示されている。

本研究では、鉛直管内を液体が流下する時に現れるサイフォン機能を利用して作用負圧をさらに高めることにより、真空圧密工法の地盤改良効果を向上させる方法を提案するとともに、その適用性を検証する。また、高負圧条件下でサイフォンを機能させるために、鉛直排水管内で液体と気体が一様に混合した気液二相流(気泡流)を安定的に形成させて流下させる方法について明らかにする。

気液二相流は、空気と輸送媒体の分離が容易であるとともに、粘性摩擦の低減効果により低圧力で高速な輸送を可能にさせる利点があるため、エマルジョン化した重油や、海洋・湖沼における浮遊物の輸送方法、また、地盤改良分野では浚渫粘性土や流動化処理土の輸送方法として用いられている^{6), 7)}。

その他、気液二相流を利用する技術として、流体内の気泡の浮力を利用するエアリフト式ポンプによる海洋深層水の揚水技術⁸⁾が提案されている。

本研究で着目する気液二相流のサイフォン機能によって現れる吸引力は、自然エネルギーによって生み出されるものであり、この機能を利用する地盤改良方法は、将来的に、化石燃料の利用を抑える低炭素社会の実現に資する地盤改良方法としての発展が期待される。

2. 提案する地盤改良方法

(1) 圧密地盤改良方法の概要

液体で満たした管の両端に高低差を設けた場合、その水頭差に応じて管内で負圧が作用し、高い位置にある液体は、低い位置に導かれる。本研究では、このようなサイフォン機能を利用して、軟弱地盤の圧密改良を行う方法を提案する。

図-1に示すように、提案する地盤改良方法は、真空ポンプを備えた減圧室を地中に埋設するとともに、鉛直管を減圧室内に挿入する構造を用いることを特徴とする。この方法は、減圧室内の水位と地下水位との水頭差に起因して働くサイフォンの吸引力と真空ポンプの吸引力を併用するものであり、真空ポンプのみを用いる従来の真空圧密工法に比べて、より高い圧密改良効果を発揮できる。

提案する地盤改良方法は、次の形態で行われる。

- ①サイフォン機能と真空ポンプの駆動により、減圧室内で負圧が生み出されるとともに、排水管および地中に打設したドレーンを通じてその負圧が軟弱地盤に作用する。
- ②軟弱地盤中の間隙水は、負圧の作用により吸引されるとともに、吸引された間隙水は、排水管を通じて減圧室内に集水される。
- ③減圧室内に収容されている揚水ポンプの駆動により、減圧室内の水は、揚水ポンプに接続された管を通じて外部に排出される。
- ④①～③のフローにより、連続的に地盤中の間隙水が圧密排水され、地盤改良が行われる。

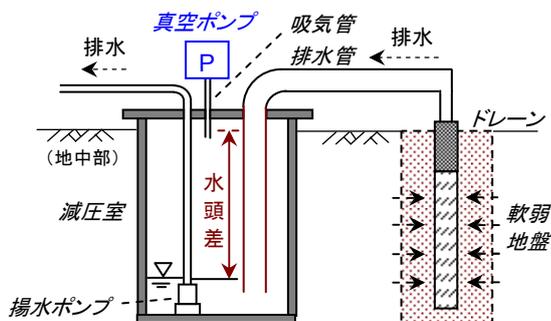


図-1 サイフォン機能を利用する圧密地盤改良方法の概念図

(2) 鉛直管内における気液二相流の形成条件

真空ポンプの併用によって現れる高負圧条件下では、排水中に含まれる溶存空気が気化することに伴って気体が増加することにより、鉛直管内では、気体と液体の流れが分離しやすく、サイフォンを機能させることが難しい。

鉛直管内を流下する流れのうち、サイフォン機能の可否に関する状態模式図を図-2に示す。サイフォンを機能させるためには、鉛直管内で気体と液体が分離することなく、一様に混合した気液二相流（気泡流）を形成させることが必要である。

鉛直管内で気液二相流が形成されて流下する条件について、本研究では、気泡の上昇速度と液体の流下速度に着目して検討する。

流下する液体中に含まれる気泡の一次元挙動として、浮力と抗力が釣りあう定常状態では、次の支配方程式が成立する。

$$\frac{1}{2} \rho_w C_D (u_w - u_a)^2 A_a = (\rho_w - \rho_a) g V_a \quad (1)$$

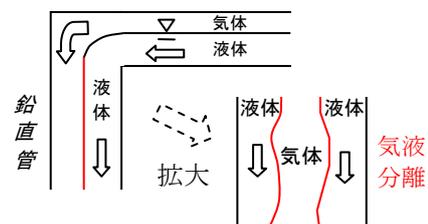
ここで、添え字の a と w は、それぞれ気泡と液体を表し、 u は鉛直下向きを正とする移動速度、 A と V は、それぞれ断面積と体積である。また、 C_D は抗力係数、 g は重力加速度である。

式(1)において、気泡の形を球体と仮定するとともに、 $\rho_w \gg \rho_a$ であることを考慮すると、気泡の移動速度は、次式で近似することができる。

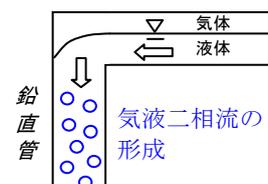
$$u_a = u_w - \sqrt{\frac{8gr_a}{3C_D}} \quad (2)$$

ここで、 r_a は気泡の半径である。

管内で気液二相流が定常的に形成されるためには、気泡が管内に蓄積されるのではなく、液体に連行されて流下し、排出されなければならない。すなわち、式(2)において u_a の値が正になるように、液体の流



(1) サイフォンが機能しない状態



(2) サイフォンが機能する状態

図-2 サイフォン機能の可否に関する状態模式図

速に関して、次の条件が満たされる必要がある。

$$u_w > \sqrt{\frac{8gr_a}{3C_D}} \quad (3)$$

また、気泡の半径は、管径の1/2まで大きくなり得ると仮定すると、管内流量 Q に応じて鉛直管の径 D を次のように設定することにより、気液二相流を形成させることが可能になる。

$$D < \left(\frac{12C_D Q^2}{\pi^2 g} \right)^{1/5} \quad (4)$$

抗力係数の値を想定し、上式によって評価される気液二相流が形成される条件を図-3に示す。対象とする管内流量に対し、管径を実線で示される値より小さくすることが、気液二相流を形成させるために必要な条件である。

(3) 気液二相流を安定して形成させる方法の提案

軟弱地盤の圧密改良において、圧密の初期では軟弱地盤から多量に排水される一方、時間の経過とともに排水量は減少する。このように、排水流量が一定でない条件では、鉛直管の径を適切に定めるのが容易でない。すなわち、圧密初期のように排水量が多い条件に合わせて、鉛直管の径を大きくした場合、排水量の少ない圧密後期では気液二相流が形成されない。一方、圧密後期の排水量に合わせて、鉛直管の径を著しく小さくすると、管内の摩擦損失が大きくなり、作用負圧が地盤に伝達されにくくなるという新たな問題が生じる。

本研究では、別の経路から排水管内に水を継続的に補給することにより、有意な摩擦損失が生じない十分な径を持つ鉛直管内で、地盤からの圧密排水量に依存することなく安定して気液二相流が形成させる方法を提案する。

3. 室内実験による効果の検証

(1) 実験概要

前章で提案した地盤改良方法の検証を行うために、図-4に示す実験装置を用いて実験を行った。実験では、縦1.8m×横1.8m×深さ2.0mの大型土槽を使用し、含水比を101%に調整した4.9m³の海成粘土を土槽内に投入して圧密改良の対象地盤として用いた。使用した粘土の主な物性値を表-1に示すとともに、図-5と図-6に標準圧密試験より得られた圧密特性を示す。

土槽内に粘土を投入後、幅0.1m×厚さ3mm×長さ1.0mのプラスチックボードドレーンを土槽底面から0.1m離して設置した。ドレーンの平面配置に関しては、圧密を30日程度で概ね完了させるために、0.6m間隔の正方形配置により計9本設置した。また、

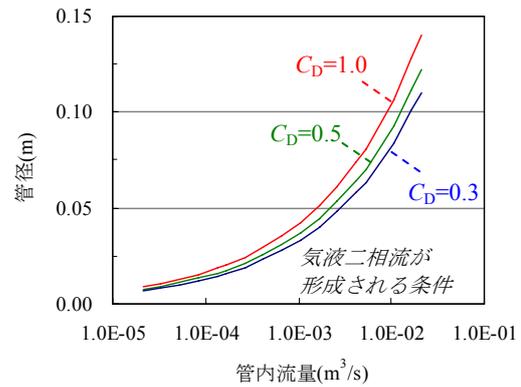


図-3 管内で気液二相流が形成される条件

漏気や漏水を防ぎ、地盤の気密性を確保するために、地表面から0.4mの深さで、不透気性キャップを介してドレーンと排水ホースを接続した(図-7)。

実験において、負圧を作用させる減圧室を掘り下げ部に設置するとともに、サイフォンを機能させる内径0.03m、長さ4.5mの鉛直管を減圧室内に挿入した。減圧室内には、吸引された水を外部に排出するために、揚水ポンプが収容されている。減圧室の大きさは、吸気管および排水管の挿入と、揚水ポンプの収容が可能な容量があれば十分であり、本実験では内径0.4m、長さ1.5mの円筒容器を用いた。

また、前章で述べた鉛直管内で気液二相流を安定して形成させる方法に関して、排水管水平部に別の経路から水の供給を行った。

実験中、減圧室内 (St.A)、鉛直管内 (St.B) および地盤面位置にあたる排水管水平部 (St.C) に間隙水圧計を設置し、作用負圧を連続して計測した。

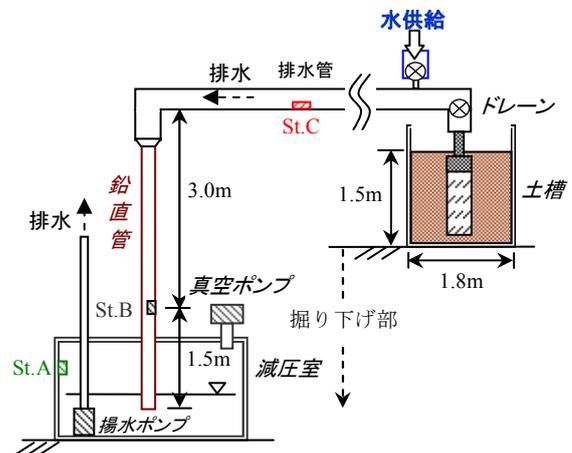


図-4 実験装置概要

表-1 粘土物性値

| 土粒子密度 ρ_s | | 2.77g/cm ³ |
|----------------|------------|-----------------------|
| 粒度組成 | 砂分 | 54.7% |
| | シルト分 | 20.3% |
| | 粘土分 | 25.0% |
| コンステンション | 液性限界 w_L | 54.7% |
| | 塑性限界 w_p | 27.0% |
| | 塑性指数 I_p | 27.7 |

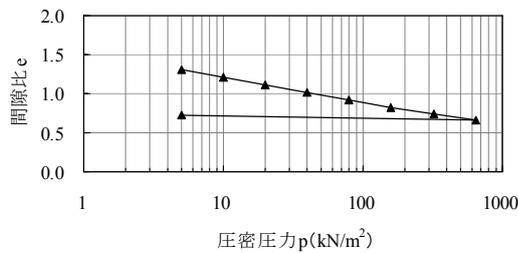


図-5 粘土の $e - \log p$ 関係

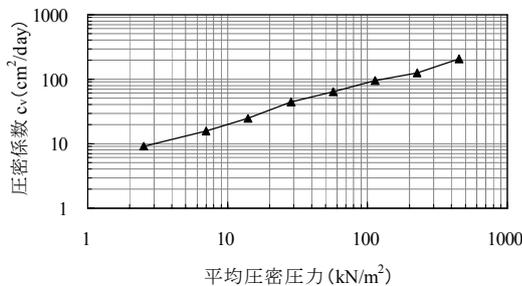


図-6 粘土の $c_v - p$ 関係

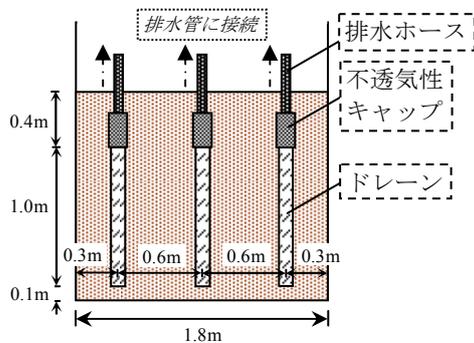


図-7 実験土槽断面

(2) 水補給量の検討 (予備検討)

鉛直管内で気液二相流を安定して形成させるために、前章で提案したように、別の経路から排水管内に水を継続的に補給する。地盤改良を行う本実験に先立ち、予備実験により、適切な水補給量の検討を行った。特に、真空ポンプによる作用負圧を -50kN/m^2 に保った状態で、鉛直管内でサイフォンを機能させるために必要な水補給量の条件を調べた。

実験の結果、鉛直管の内径が 0.03m の今回の条件では、水供給量が 15l/min ($2.5 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$) 以上のとき、図-8に示すように、高負圧条件下で気化した溶存空気と液体が鉛直管内で一様に混合した気液二相流(気泡流)が形成され、サイフォンが安定して機能することがわかった。また、水補給量を低下させると、鉛直管内を流下する水の流速が遅くなるために、気泡が水の流れによって排出されず、管内に蓄積されていく。その結果、気液二相流が消失するとともに、水と空気の流れが分離し、サイフォン機能が消失することが確認された。

(3) 実験結果

予備実験の結果に基づき、サイフォンを安定して機能させるために、 20l/min ($3.3 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$) の水を



図-8 鉛直管内で形成された気液二相流

継続的に排水管内に補給して地盤の圧密改良を行う実験を行った。真空ポンプによる作用負圧として、 -55kN/m^2 程度に維持した。また、比較ケースとして、サイフォンを機能させず真空ポンプのみによって負圧を作用させる条件で実験を行った。

図-9に、サイフォン併用ケースにおける作用負圧の計測結果を示す。鉛直管内におけるサイフォン機能により、減圧室内との水頭差に応じて作用負圧が増加し、図-4におけるSt.C(地盤面位置)では、約30日の実験期間中、 $-92 \sim -97\text{kN/m}^2$ 程度の高負圧が安定して作用したことがわかる。なお、St.Cにおいて、実験開始後2日間の平均負圧は -92.4kN/m^2 であったが、実験終了前の2日間の平均負圧は -96.9kN/m^2 を示し、実験期間中、負圧が増加していた。

実験期間中に負圧が増加した原因として、水中の溶存酸素量の変化が考えられる。排水管への補給水として、減圧室から排出される水を循環させて用いたが、実験初期における溶存酸素量は 8.8mg/l であったのに対し、実験終了時には、高負圧を長期間作用させたことにより脱気され、 5.3mg/l に減少していた。すなわち、実験後期では、溶存酸素の減少に伴って気化量が減少し、より安定してサイフォンが機能して負圧が高まったものと考えられる。

サイフォンを併用したケースと真空ポンプのみを作用させたケースについて、図-10に地表面沈下量の比較を示す。サイフォン併用方式では、高い圧密圧力が作用し、沈下量が10%程度大きく現れることがわかる。また、圧密圧力が増加すると、図-6に示すように粘土の圧密係数が向上する。沈下の時間変化より、双曲線法(例えば、諏訪・大竹⁹⁾)を用いて地盤の平均圧密度が80%に達した時間を評価すると、真空ポンプのみを用いたケースでは、実験開始から26日後である一方、サイフォン併用ケースでは19日後である。すなわち、サイフォン併用ケースでは、粘土地盤の圧密排水の速度を表す圧密係数が向上することにより圧密が促進され、地盤改良期間が短縮する効果が現れることがわかる。

また、実験終了後に含水比の変化を調査した結果を図-11に示す。サイフォンを併用したケースでは、含水比がより大きく低下し、高い地盤改良効果が現れていることがわかる。

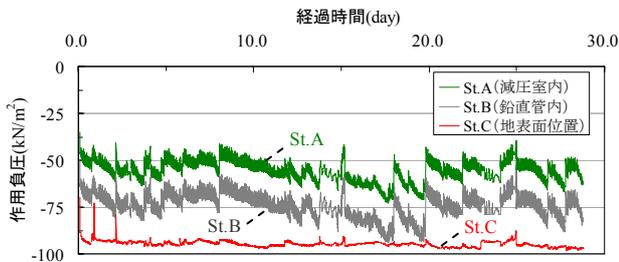


図-9 サイフォン併用ケースにおける作用負圧計測結果

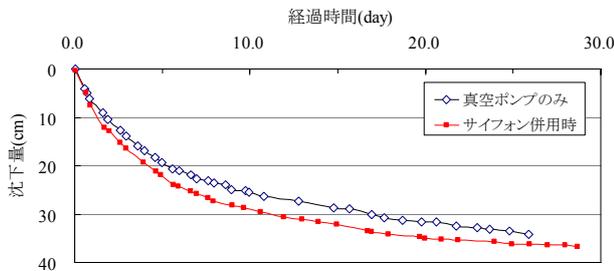


図-10 地表面沈下量の時間変化

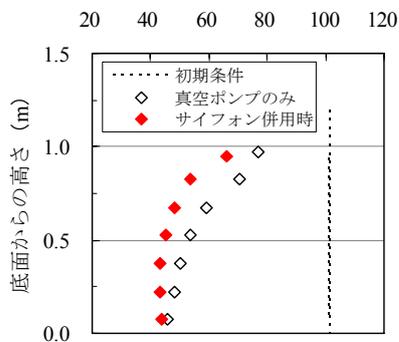


図-11 含水比変化調査結果

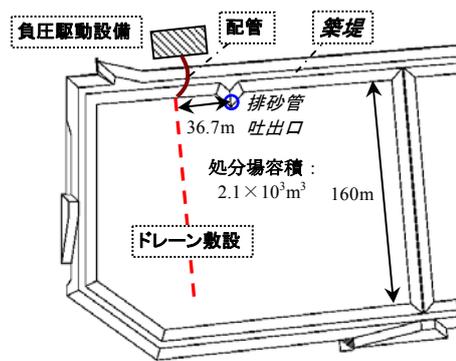
4. 現地適用性の検討

気液二相流のサイフォン機能を利用して軟弱地盤の圧密改良を行う方法について、粘性土の土砂処分場にて現地実験を行い、現地適用性を検討する。現地実験の概要図を図-12に示す。

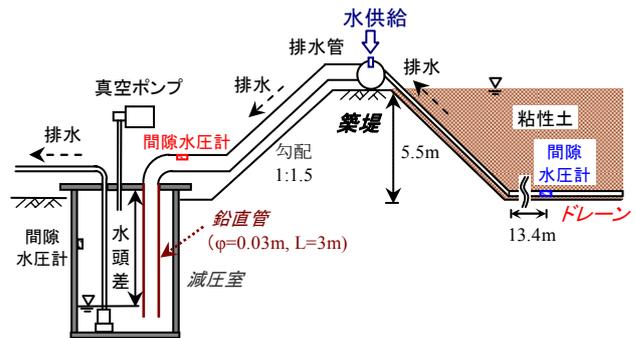
減圧室として鋼製円筒容器を用いた。吸気管と排水管の挿入および揚水ポンプの収容を可能にすることを考慮して、容器の内径を0.5mに定めるとともに、有意な水頭差を生じさせる鉛直管（サイフォン管）を挿入することを考慮し、長さ3.5mとした。

図-13に、減圧室の地中埋設作業状況を示す。バックホーで所定の深度まで掘削後、クレーンを用いて減圧室を設置した。減圧室を埋設後に減圧室内に挿入する鉛直管は内径0.03m、長さ3.0mとした。

室内実験と同様に、鉛直管内で気液二相流を安定して形成させるために、築堤天端部で排水管内に水の補給を行った。予備実験を行った結果、今回の現地条件に対してサイフォンを安定して機能させるのに、50l/min ($6.7 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$) 以上の水の補給量が必



(1) 平面図



(2) 断面図

図-12 現地実験概要図

要であることがわかった。

サイフォンを併用して負圧を作用させる実験は、9日間程度の期間で実施した。実験期間中において、減圧室内、鉛直管上端部および地盤内のドレーンに間隙水圧計を設置し、作用負圧を連続計測した。

作用負圧の計測結果を図-14に示す。真空ポンプ圧を示す減圧室内の負圧は-70~85kN/m²程度であるのに対し、鉛直管上端部では、サイフォン機能により-85~90kN/m²程度に作用負圧が増加している。特に、真空ポンプ圧が低下したときは、サイフォンの作用がその低下分を補って増加するため、真空ポンプ圧の変動に比べて、サイフォン管上端部や地盤内の作用負圧は変動が小さく安定することがわかる。

また、地盤内の作用負圧は、概ね-80~85kN/m²を維持できることが確認され、提案する圧密地盤改良方法が現地に適用可能であることがわかった。

なお、サイフォン管上端部において、実験開始後2日間の平均作用負圧は-84.8kN/m²であったが、実験終了前の2日間の平均負圧は-88.5kN/m²を示し、室内実験と同様に、実験期間中に負圧が増加する現象が確認された。排水管への補給水として、減圧室から排出される水を循環させて用いる形態にしているが、海水を揚水して利用を始めた実験開始時は、溶存酸素量は11.0mg/lであったのに対し、実験後期には、溶存酸素量は4.2mg/lに減少していた。室内実験で考察したように、高負圧の作用によって溶存酸素が脱気されることに伴って液体からの気化量が減少し、より安定してサイフォンが機能して負圧が高



図-13 減圧室の地中埋設作業状況

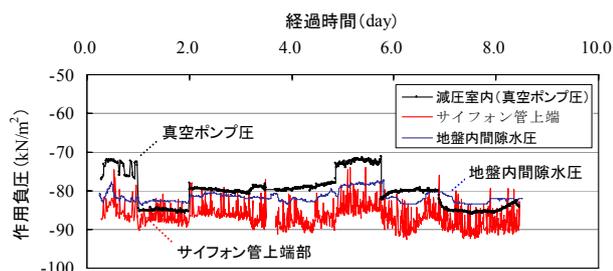


図-14 現地実験における作用負圧計測結果

まったものと考えられる。

次に、従来の真空圧密工法と提案する方法の圧密改良効果を比較評価する。地盤物性として表-2に示すような一般的な条件を持つ正規圧密粘土を想定すると、従来方法と提案方法をそれぞれ適用した場合の最終圧密沈下量およびせん断強度増加量は、表-3に示すように評価される。ここで、圧密圧力となる作用負圧の値は、ドレーンに作用する値で代表させ、従来工法についてはこれまでの実績より -60kN/m^2 、また、提案方法については、現地実験結果を踏まえて -80kN/m^2 に設定した。提案方法は従来方法に比べ、圧密沈下量は15~20%増加するとともに、せん断強度増加量は30%程度増加することが期待される。

提案方法の導入により、従来方法に比べてコストが増加する主な点は、径1m程度、長さ3m程度の減圧室の製作・設置費用および揚水ポンプに係る費用であり、向上が期待される地盤改良効果に比べると、コストの増加分は小さいと考えられる。

5. 結論

本研究では、気液二相流のサイフォン機能を利用して軟弱地盤の圧密改良を行う方法を提案し、その効果を室内および現地実験により検証した。

提案方法において、特に、鉛直管内で気液二相流を形成させる条件に関して、気泡の上昇速度と液体の流下速度に着目して検討を行い、鉛直管の径の適

表-2 想定する粘土の物性値

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| 単位体積重量 γ_t | 15 kN/m^3 |
| 初期間隙比 e_0 | 2.5 |
| 圧縮指数 c_c | 1.0 |
| 強度増加率 $\Delta c_u / \Delta p$ | 0.3 |

表-3 地盤改良効果の評価結果

| 適用方法 | 従来方法 (負圧 -60kN/m^2) | | 提案方法 (負圧 -80kN/m^2) | |
|-----------------------------|----------------------------------|------|----------------------------------|------|
| | 10m | 20m | 10m | 20m |
| 地盤層厚条件 | 10m | 20m | 10m | 20m |
| 最終沈下量(m) | 1.76 | 2.50 | 2.02 | 2.94 |
| せん断強度増加量(kN/m^2) | 18.0 | 18.0 | 24.0 | 24.0 |

切な設定方法を明らかにした。さらに、別の経路から排水管内に水を補給して気液二相流を安定して形成させる方法を提案し、その有効性を確認した。

本研究では、サイフォン機能を真空ポンプと併用することを前提にしたが、長さ10mのサイフォン管とそれを収容する減圧室の実現、および安価な減圧室の埋設・撤去方法等を確認することにより、真空ポンプを用いることなく、サイフォン機能のみで地盤改良を行う形態に発展させることも、将来的に可能であると考えられる。

参考文献

- 1) Kjellman, W.: Accelerating consolidation of fine grain soils by means of cardboard wicks, Proc. 2nd ICSMFE, 2, pp.302-305, 1948.
- 2) 新舎博, 米谷宏史, 長津辰男: 真空圧密工法の変化・変遷, 土と基礎, Vol.54, No.7, pp.16-18, 2006.
- 3) 嘉門雅史, 三浦哲彦: プラスチックボードドレーン工法 その理論と実際, 鹿島出版会, pp.196-201, 2009.
- 4) 新舎博, 山内義文: 真空圧密による水面下の地盤改良は可能か?, 土木学会誌, Vol.95, No.4, pp.56-59, 2010.
- 5) 小林正樹, 土田孝: 錦海湾における真空圧密工法現地実験, 港研資料, Vol.476, 28p., 1984.
- 6) (社)セメント協会: セメント系固化剤による地盤改良マニュアル第3版, 技報堂出版, pp.79-80, 2003.
- 7) 山田泰正, 遠藤茂勝: 気液スラグ流における管路長の影響について, 年次学術講演会講演概要集, Vol.61, pp.2-308, 2006.
- 8) 山本亮介, 田中伸和, 大澤弘敬, 鷺尾幸久, 石井健一: 圧縮空気を利用した深層水汲み上げ技術に関する研究, 年次学術講演会講演概要集, Vol.53, pp.630-631, 1998.
- 9) 諏訪靖二, 大竹勉: 実務のための圧密沈下予測とその対策技術 3.実測沈下にに基づく沈下予測手法, 土と基礎, Vol.54, No.12, pp.87-94.