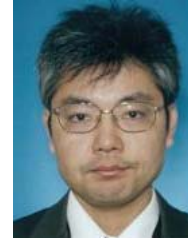


浚渫土の減容化技術

熊谷 隆宏

五洋建設株式会社 技術研究所 担当部長
(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)



港湾の整備や維持のために発生する浚渫土の処分場が不足している現状を踏まえ、処分場の延命化を図るための浚渫土の減容化技術を提案する。地盤中にドレーンを打設後、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工法は、真空圧密工法として知られているが、この工法は、埋立処分された粘土の体積を収縮させる減容化技術としても適用できる。本論文では、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負圧駆動能力を向上させ、より高い減容化効果を発揮する真空圧密技術を提案する。本技術は、定常的に発生する浚渫土の処分に関して、環境への影響の軽減に資する技術として位置づけられる。

キーワード：真空圧密，サイフォン，気液二相流

1. はじめに

港湾では、航路や泊地の維持や整備のために定常的に浚渫が行われ、大量の浚渫土が発生する。浚渫土の多くは、従来、海洋投入、埋立、浅場・干潟造成等の方法により処分されてきたが、多大な建設費用や環境への影響の観点から、近年、新たな埋立処分場の確保が困難になってきていることに加え、海洋環境の保全のため、海洋投入処分が困難となっている。

浚渫土のうち、特に軟弱な粘性土の処分が大きな課題となっている現状で、土中に含まれる間隙水の脱水によって土の体積を収縮させる減容化が、課題の解決に資する一つの方策と考えられる。減容化によって期待できる効果として、埋立前の事前処理として機械脱水などによって減容化し、処分土量の減少を図ることや、埋立て後に圧密促進によって減容化し、処分場の容量を増加させて延命化を図ること等が挙げられる。

埋立後の減容化に関して、軟弱地盤内にドレーンを打設後、吸引装置によって地盤内に負圧を作用させて圧密改良を行う真空圧密技術が、東京都の新海面処分場¹⁾を始め、数多くの現場に適用されている。

真空圧密工法による減容化や圧密改良の効果は、作用負圧の大きさに依存する。理論上の最大負圧が -100 kN/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 $-70 \sim -90 \text{ kN/m}^2$ 程度が限界であり、また、ドレーン先端部に安定して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、既往の報告^{2),3),4)}や研究⁵⁾において示されている。

真空圧密技術による減容化効果を向上させるためには、

作用負圧の向上を図ることが必要であり、本論文では、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、負圧駆動能力を向上させ、従来に比べてより高い減容化効果を実現する真空圧密技術を提案する。

2. 提案するハイブリッド型真空圧密技術

(1) 技術の概要

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。提案する新しい真空圧密技術では、このようなサイフォン機能を利用する。図-1に示すように、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。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ハイブリッド型であり、真空ポンプのみを用いる従来の真空圧密技術に比べて、より高い減容化効果を発揮できる。

提案する真空圧密技術において、粘性土に含まれる間隙水の脱水および減容化は、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。

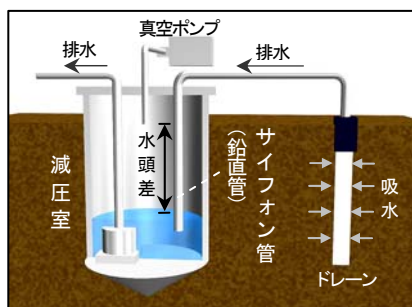
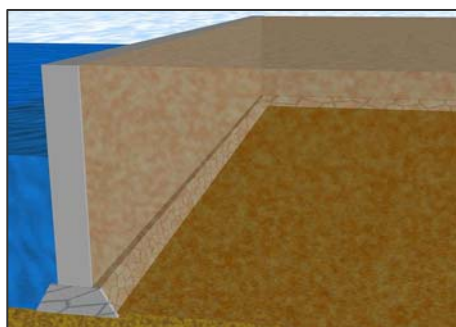
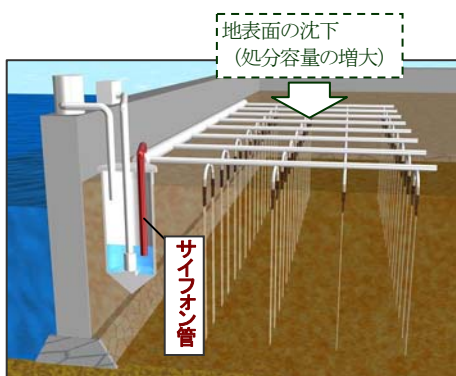


図-1 減圧装置の概念図



(1) 浚渫土投入完了時



(2) 減容化後

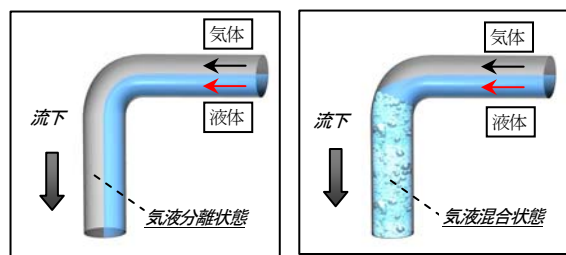
図-2 減容化の実施イメージ

- ③減圧室内に收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、連続的に粘性土内の間隙水が脱水され、粘性土の体積が収縮し減容化される。

このようなシステムを用いて、処分場の減容化に適用するイメージ図を図-2に示す。処分場に浚渫土を投入後、地中にドレーンを打設し、減圧装置を駆動させることによって圧密を促進し、減容化を図ることができる。

本技術では、地中に埋設された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ことにより、真空ポンプのみを用いる従来技術に比べてより高い負圧を駆動できる。

ただし、 -80 kN/m^2 程度に及ぶ高い負圧の下では、溶存空気の気化が生じることに伴って気体の体積が増加す



(1) サイフォン機能せず (2) サイフォン機能可

図-3 サイフォン機能の可否に関する状態模式図

ることにより、鉛直管内では、液体と気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-3に示す。管内でサイフォンを機能させるためには、液体と気体が一樣に混合した気液二相流（気泡混合流）を形成させることが必要である。

(2) 気液二相流を安定して発揮させる方法

水と空気を含む流れが、鉛直管内で気液二相流を形成しながら流下する条件は、気泡の上昇速度と液体の流下速度に着目して検討される。流下する液体中に含まれる気泡の一次元挙動として、浮力と抗力がつ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、水平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。

鉛直管内で気液二相流が安定して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 の値が正となる条件が満たされなければならない。式(2)を用いるとともに、気泡の半径が管径の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。

$$D < \left(\frac{12C_D Q^2}{\pi^2 g} \right)^{1/5} \quad (3)$$

ただし、軟弱地盤の圧密改良では、圧密の初期は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していくため、鉛直管の径を適切に定めるのが容

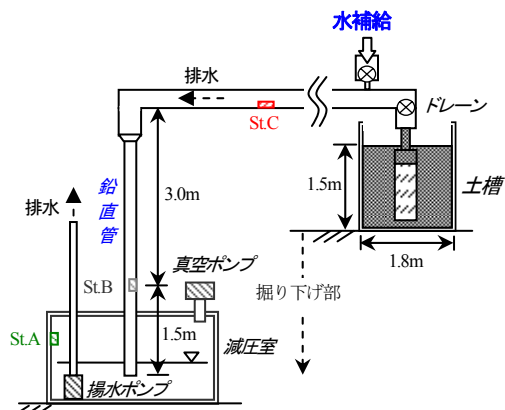


図-3 室内実験装置概要

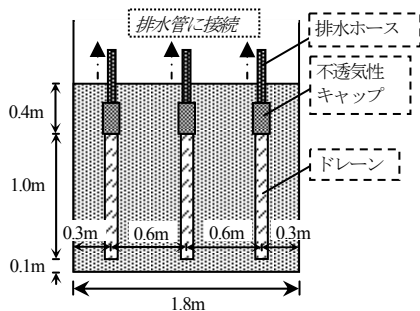


図-4 実験土槽断面



図-5 鉛直管内で形成された気液二相流

易ではない。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。

このため、提案する本工法では、別の経路から管内に水を継続的に補給し、管内流量を常に所定の流量以上に保つことにより、有意な摩擦損失が生じない十分な径を持つ鉛直管内で、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導入する。

3. 室内実験による効果の検証

(1) 実験概要

提案するハイブリッド型真空圧密技術の検証を行うために用いた実験装置の概要を図-4に示す。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

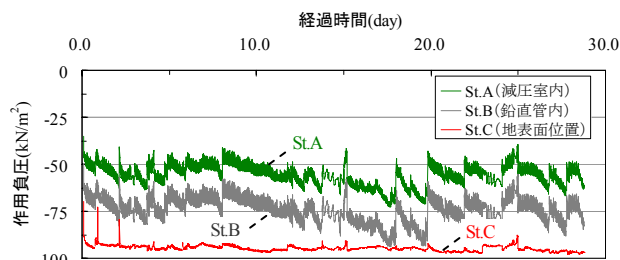


図-6 サイフォン併用ケースにおける作用負圧計測結果

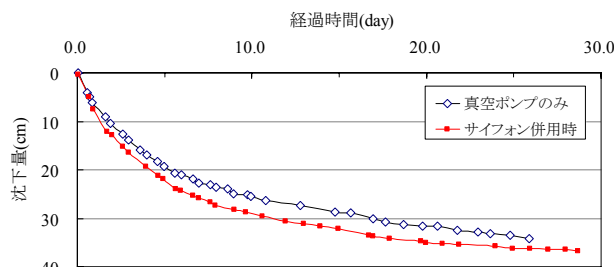


図-7 地表面沈下量の時間変化

液性限界の1.8倍に相当する101%に調整した海成粘土を4.9m³投入した。ここでは、高含水比で軟弱な浚渫粘土の投入を模擬している。土槽内に粘土を投入した後、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設置した。ドレーンの平面配置に関しては、0.6m間隔の正方形配置により計9本設置した。また、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。

また、サイフォンを機能させる鉛直管の形状については、内径0.03m、長さ4.5mに定めた。減圧室内には、吸引された水を排出するために、揚水ポンプが收容されている。減圧室の大きさは、吸気管および排水管の挿入と、揚水ポンプの收容が可能な容量があれば十分であり、実験では内径0.4m、長さ1.5mの円筒容器を用いた。

鉛直管内で気液二相流を安定して形成させるため、前章で述べたように、排水管水平部に別の経路から水の補給を行った。予備実験において、水の補給量が15l/min以上であれば、図-5に示すように、高負圧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。一方、水の補給量を減少させると、気泡の上昇速度に比べて流速が小さくなり、気泡は流下する水に連行して排出されることがなく鉛直管内に蓄積される。その結果、水と空気の流れが分離して気液二相流が消失し、サイフォン機能が消失することが確認された。安定してサイフォンを機能させるため、実験では水の補給量を20l/minに設定した。

真空ポンプによる駆動負圧を-55kN/m²程度に維持し、ハイブリッド方式を適用した真空圧密実験を実施した。また、従来方式と減容化効果を比較するため、サイフォンを機能させず、真空ポンプのみの負圧を作用させる実験を併せて実施した。実験期間中、減圧室内 (St.A)、鉛直管内 (St.B) および地盤面位置にあたる位置

(St.C)に間隙水圧計を設置し、作用負圧を連続計測した。

(2) 実験結果

図-6に、提案するハイブリッド方式を適用した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-3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、実験期間中に負圧が向上した。

期間中に負圧が向上した原因として、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、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。

ハイブリッド方式を適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-7に地表面沈下量の比較を示す。ハイブリッド方式では、高い圧密圧力が作用し、沈下量が10%程度大きく現れ、減容化の効果が高いことがわかる。

4. 現地適用性の検討

室内実験で効果を検証したハイブリッド型真空圧密技術について、現地適用性を検討するために浚渫粘土の土砂処分場にて実験を行った。現地実験の概要図を図-8に示す。

サイフォンを機能させる減圧室として鋼製円筒容器を用いた。容器の大きさは、吸気管と排水管の挿入および揚水ポンプの収容を考慮して、内径を 0.5m に定めるとともに、十分な水頭差を生じさせる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-9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した後、クレーンを用いて減圧室を設置した。

また、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、築堤天端部で水の補給を行った。予備実験を行った結果、今回の条件に対してサイフォンを安定して機能させるために、 50l/min 以上の水の補給量が必要であることがわかった。

負圧を作用させる実験を9日間程度の期間で行った。実験では、減圧室内、鉛直管上端および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-10に示す。真空ポンプ圧を示す減圧室内の負圧は $-70\sim-85\text{kN/m}^2$ 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 $-85\sim-90\text{kN/m}^2$ 程度に作用負圧が上昇している。特に、真空ポンプの負圧駆動能力が低下したときには、サイフォン機能がその低下分を補って働くため、真空ポンプ圧の変動に

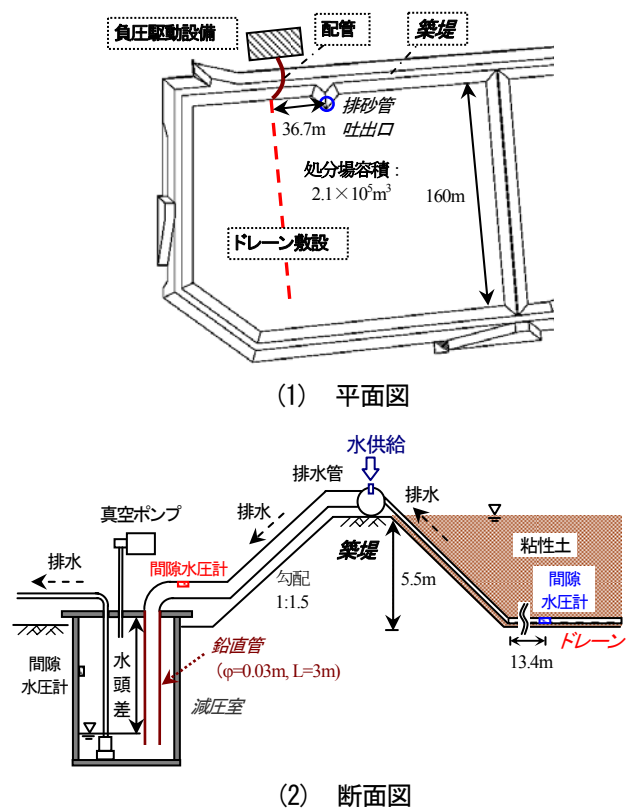


図-8 現地実験概要図



図-9 減圧室の地中埋設作業状況

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、高い負圧が安定して作用する特長がある。

また、室内実験と同様に、継続的な負圧作用によって溶存酸素が脱気されて気化量が減少していくと同時に、より安定してサイフォンが機能しやすくなるため、実験期間中に作用負圧が向上していく現象が確認された。

地盤に作用する負圧は、概ね $-80\sim-85\text{kN/m}^2$ を維持できることが確認され、提案するハイブリッド型の真空圧密技術が現地に適用可能であることを確認できた。

5. 今後の展望

(1) 減容化効果に関する従来技術との比較

サイフォン機能を利用するハイブリッド型真空圧密技術と従来工法について、表-1に示すような一般的な物性

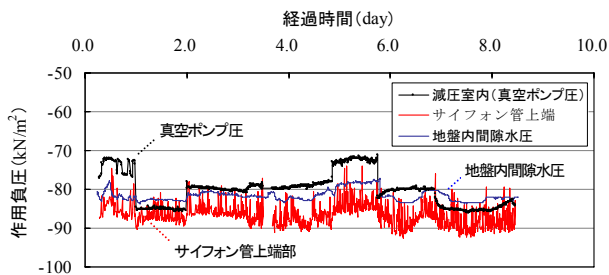


図-10 現地実験における作用負圧計測結果

表-1 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

表-2 減容化効果の評価結果

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

を持つ正規圧密粘土を想定すると、減容化効果として、最終沈下量は、表-2のように評価される。ここで、圧密圧力となる作用負圧は、ドレーン内に作用する値で代表させ、従来技術についてはこれまでの実績より-60kN/m²、また、本技術については、現地実験結果を踏まえて、-80kN/m²に設定した。従来技術に比べて、圧密沈下量は15～20%程度大きく、浚渫土の減容化による処分場の容量増大効果は15～20%増加することが期待される。

また、一般に圧密圧力の増加とともに圧密係数が向上する傾向が見られる粘土の圧密特性を考慮すると、ハイブリッド型技術により、減容化を実現するための工期の短縮を期待することもできると考えられる。

(2) ハイブリッド方式の適用コスト

本技術では、現地実験において確認されたように、真空ポンプの負圧駆動能力が低いときには、サイフォン機能が補完するように働く。この特性は、真空ポンプの使用台数を従来技術における必要台数から減少させた場合でも、ポンプの負圧駆動能力の不足分がサイフォン機能によって補完されることを示唆するものであり、従来技術に比べて適用コストを低減できる可能性を持つ。

本技術の導入に際して、従来技術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・設置および揚水ポンプに係る費用であり、向上が期待される減容化の効果等に比べ、コストの増加要因は小さい。

(3) ハイブリッド方式のその他の効果

既往の研究⁷⁾では、負圧駆動システムを向上するために、真空ポンプの直前で、減圧系(吸気系)と排水系を分離する気水分離方法が提案されている。この点に関し

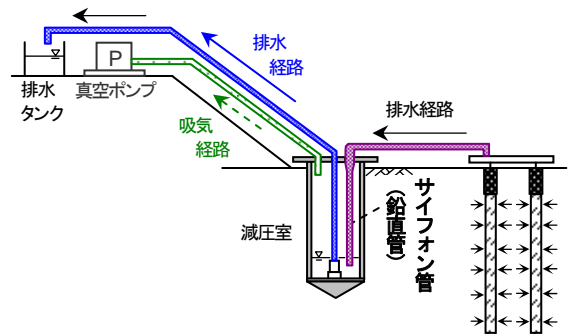


図-11 真空ポンプの設置位置が高い条件における適用例

て、本工法では、真空ポンプとサイフォンを機能させる減圧室が分離していると同時に、吸気系と排水系が分離している。このため、地盤面に比べて真空ポンプの位置が高い施工条件においても、図-11のように減圧室を低い場所に設置することにより、負圧を利用して高い位置に揚水しなければならない経路の出現を防ぐことができるとともに、作用負圧の損失を防ぐことができる。このため、従来技術であれば、作用負圧の損失が避けられない施工条件においても、作用負圧が低下することなく、減容化を実施することができる。

また、本論文では、処分場に投入した浚渫土に対して減容化を図ることを念頭において、技術の適用方法を説明したが、処分場に投入した浚渫土だけでなく、例えば、航路や泊地の原位置で本技術を適用し、海底地盤の沈下により増深化を行い、維持浚渫の実施を軽減するといった適用方法も可能性あると考えられる。

港湾の維持・整備のために定常的に発生する浚渫土の処分に関して、浚渫土の体積を収縮させる減容化(処分量の抑制)によって、環境への影響の軽減を可能にする技術として、本技術の今後の適用の拡大が期待される。

参考文献

- 1) 直井恒雄, 渡部要一, 新舎博, 日高征俊, 白神新一郎: 新海面処分場の延命化対策—真空圧密による減容化効果—, 土木学会論文集B3 (海洋開発), 2012 (印刷中)。
- 2) 新舎博, 米谷宏史, 長津辰男: 真空圧密工法の変化・変遷について, 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) 諏訪靖二, 嘉門雅史, 木山正明, 福田光治: 真空圧密工法—我が国での発展の経緯と現状—, 地盤工学会誌, Vol.59, No.7, pp.60-63, 2011。
- 7) 今井五郎: 「真空圧密工法のさらなる発展に向けて」—真空圧を利用した地盤改良原理とその応用—, 土木学会論文集, Vol.798, VI-68, pp.1-16, 2005。