

真空脱水工法を用いた粘性土地盤からの揚水に 関する遠心模型実験ならびに原位置試験

Centrifuge model tests and an in-situ trial experiment on
dewatering from soft ground using vacuum drainage

萩原 敏行¹・宮崎 啓一²・今村 眞一郎³・高橋 茂吉⁴

Toshiyuki HAGIWARA・Keichi MIYAZAKI・Shinichiro IMAMURA・Shigekichi TAKAHASHI

真空圧の効果を最大限に利用した真空揚水工法であるスーパーウェルポイント工法の粘土地盤への適用性の把握を目的として、遠心模型実験装置を用いて模型実験を実施した。また、施工中の掘削工事現場を利用して、海成粘土地盤からのスーパーウェルポイント工法による原位置揚水試験を行った。その結果、遠心実験では、高真空下での粘性土地盤からの良好な脱水効果が確認された。また、現場試験からも、平均約0.3m³/dayの脱水効果と試験後の地盤強度の増加が確認された。以上により、均一粘性土地盤に対する圧密脱水による地盤改良を目的としたスーパーウェルポイント工法の適用性を示すことができた。

Key Words: Monitoring on site, Soft clay ground, Drainage, Vacuum dewatering, Centrifuge model test

1. はじめに

バキューム効果を利用した強制排水工法であるスーパーウェルポイント（以下SWPと記す）工法¹⁾は、礫質地盤からシルト質地盤まで、広い範囲の地盤に適用でき、通常のディープウェル工法に比較して、2～5倍の高い揚水効率を有することが現場測定および模型実験によって確認されている^{2), 3), 4)}。本工法は、これまで各種地盤に対して、地下水位低下工法として90例以上の施工実績がある。この真空脱水工法を、通常は揚水工法が適用困難とされている粘性土地盤に適用して、粘性土の含水比を低下させることができるならば、開削工事等における施工性の改善および掘削土の有効利用に大きく貢献することが期待される。また、従来工法に比べて工期短縮とコスト縮減が実証できれば、今後の軟弱粘土地盤へのSWP工法の適用増加が期待できる。

一般に、我が国において軟弱地盤として扱われている沖積粘性土は、粘土層中に薄い砂層が挟在していることが多い。このため、過去のSWP工法の適用例においては、粘性土での脱水促進の可能性が示唆される結果が得られている。今回、脱水条件がより厳しいと想定される中間部に砂層を含まない均一な海成粘土を対象として、現位置でのSWP工法による揚水試験を実施し、その排水性能について調べた⁵⁾。試験は、シンガポールの掘削工事現場を利用して行った。

また、原位置試験に先立ち、粘性土地盤に対する真空脱水効果の適用性把握を目的として、遠心模型実験装置を用いたプロトタイプ層厚10mの粘性土地盤を対象とした模型揚水実験を実施した⁶⁾。遠心実験では、粘性土地盤に対する真空排水工法の適用性、真空圧の違いが脱水効果に及ぼす影響についての検討を行った。

本論文では、遠心模型実験、現位置試験、それぞれについて実験概要、および結果について述べるとともに、地盤改良工法としてのSWP工法の適用性について考察している。

キーワード：現場計測、軟弱粘性土、揚水工法、真空脱水、遠心模型実験

¹正会員 西松建設株式会社 技術研究所

²非会員 西松建設株式会社 技術研究所

³正会員 西松建設株式会社 技術研究所

⁴非会員 有限会社アサヒテクノ

2. SWP 工法の概要

SWP 工法は、従来のウェルポイント工法（強制排水）、ディープウェル工法（重力排水）、バキュームディープウェル工法（重力排水＋強制排水）の短所を解決して、長所を兼ね備えた新しい排水工法である。すなわち、ストレーナ部を特殊な二重管構造（特殊セパレートスクリーン）（図-1 参照）にすることにより、地下水位低時の真空井戸内への空気の吸入を防ぎ高い真空度を保ちながら、地下水だけを効率的に吸う強制排水を行うことが可能とした。安定したバキューム効果により SWP 工法は、従来工法と比べて地盤条件により、1.2 倍から数 10 倍の揚水量を実現でき、より広い範囲の地下水を短期間で低下することができる。井戸効率が向上するため、揚水井戸の本数を減らすことができ、コストダウンを図ることができる場合も多い。

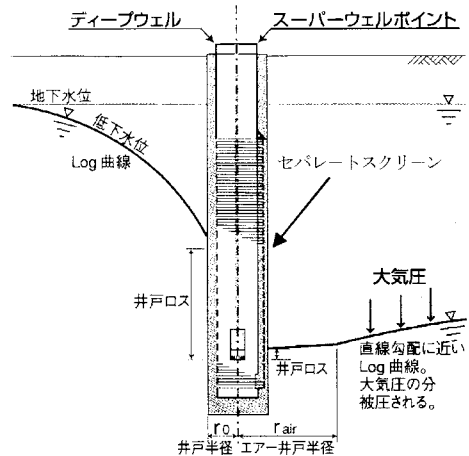


図-1 SWP 工法による揚水メカニズム

3. 遠心模型実験

(1) 遠心模型実験概要

SWP 工法の脱水工法としての粘性土地盤への適用性の把握を目的として、遠心模型実験装置を用いたプロトタイプ層厚 10m の粘性土地盤（透水係数 $k=10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ cm/sec}$ ）の模型揚水実験を実施した。

図-2 は、計測工を含む遠心実験システムの概要図を示している。実験には、前面にアクリル製観測窓を有する剛土槽（内寸法：長手 600mm×奥行 200mm×深さ 500mm）を使用した。今回想定したプロトタイプは、強度が深さと共に増加する正規圧密地盤で、最大集水半径が 27m となるようなす法の二次元モデルとして実験を行った。

本システムは、真空井戸を簡易的にモデル化した真空室と土槽部に分けられ、真空室は電磁弁を介して二連の真空ポンプと接続されている。真空室の下部の排水孔（高さ 40mm）の前面には厚さ 10mm、高さ 70mm のポーラスストーン（透水係数 $k=7.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ ）を設置した。粘土試料には、表-1 に示す塑性指数 $I_p=19.8$ の川崎粘土を使用した。模型地盤は、含水比を 86.6% に調整の上、真空攪拌したスラリー粘土を土槽内に投入し、重力場において約 10kPa の上載圧で約 7 日間予備圧密を行った。予備圧密終了後に地盤内に間隙水圧計を埋設し、これを遠心加速度 50g の下で 24~35 時間自重圧密することによって、深さとともに強度が増加する正規圧密粘土地盤を作成した。

真空排水工法の実験は、遠心加速度 50g 場にて地盤内の間隙水圧の安定を確認後、真空室の電磁弁を遠隔操作により閉塞し、真空ポンプを稼働して行った。実験は、真空圧、および真空ポンプの稼働時間を変化させた表-2

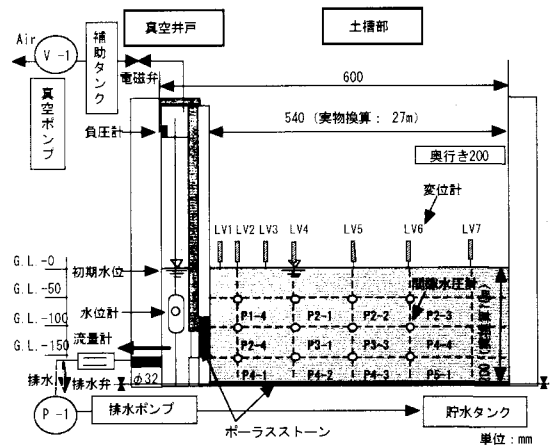


図-2 計測工を含む実験システム概要図

表-1 川崎粘土の物理・力学特性

土粒子密度 G_s	2.69
液性限界 w_L (%)	43.3
塑性限界 w_p (%)	23.5
圧縮指数 C_c	0.33
透水係数 k (cm/sec) (at e_0)	2.5×10^{-8} (1.239)
強度増加率 c_u/p'	0.396

表-2 実験条件

Case	真空圧 (kPa)	模型 t_m (時間)	実物 t_p (月)
Case 1	56	0.99	3.3
	86	1.69	5.7
Case 2	86	3.39	11.4
Case 3	14	1.51	5.1
	35	1.59	5.3
	54	1.59	5.3
	86	1.40	4.7
Case 4	55	1.55	5.2
	82	1.64	5.5

に示す4ケースを実施した。実験中は、地表面沈下を接触型変位計 (LVDT) を用いて測定するとともに、地盤内の間隙水圧および井戸内の負圧と井戸内水位を計測した。また、実験前後に粘土地盤から試料を採取し、深度方向の含水比分布を測定した。なお、表中と後述する実験結果では、地盤深度と真空排水の移動時間はすべてプロトタイプスケールで表示している。

(2) 実験結果

a) 地盤中の含水比変化

Case3 について、実験終了後 (真空圧 86kPa) に測定した含水比を初期含水比と比較した結果を図-3(a) に示す。含水比は、最大約 16% の低減が見られ、真空移動による明確な脱水効果が認められる。また、真空井戸から 25m 地点における含水比は井戸近傍 (1.25m) と同程度まで低減し、井戸から遠方に離れた位置まで、脱水効果が発揮されていることがわかる。

一方、図-3(b) に示した Case3 の真空圧 56kPa で実験後の含水比分布 (井戸から 25m 地点) は、含水比の低下は深さ 4 m 付近までに留まっている。図中の真空圧 86kPa 後の結果との比較から明らかに、真空圧レベルが高いほど、集水できる影響範囲の大きいことがわかる。

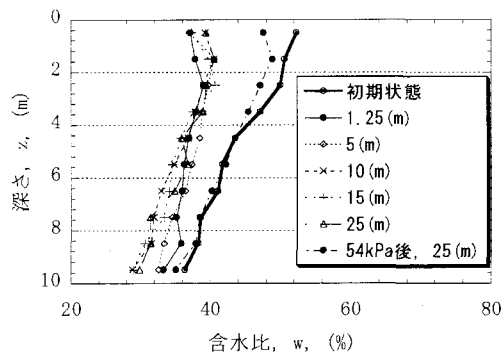
図-4 は、井戸から 1.25m 離れた地点での各ケースの最終含水比の分布を比較したものである。表-2 の実験条件に示すように、各ケース間で真空圧の加え方や移動時間が異なっている。この内、実験過程を通じて良好な結果を得た Case1 と Case3 を比較してみると、真空移動時間の長い Case3 の方がやや低めの含水比分布を示している。従って、真空圧の移動時間が長い程、含水比の低下割合が大きくなることが示唆される。

b) 地盤中の非排水せん断強度

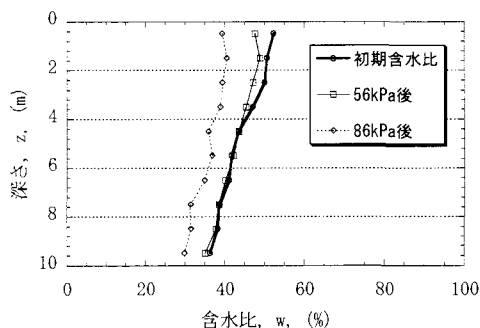
含水比から地盤の間隙比を求め、 e - $\log p$ 関係式と強度増加率の関係より算出した Case3 における真空排水前後の非排水せん断強度 c_u の分布を図-5 に示す。初期強度分布からは、強度が深さと共に増加する正規圧密地盤が作成できていると判断できる。揚水終了後は深さ 5 m 付近までは、井戸からの距離によらず、ほぼ同様な強度増加を示している。また、井戸近傍 (1.25m) の真空排水後の非排水せん断強度は、排水前に比べて表層ではや約 20 倍、深い位置では 2 倍程度まで増大していることがわかる。なお、地盤底部付近での強度のバラツキが大きいのは、真空圧の影響よりも底部の境界条件に影響が大きいものと推察される。

c) 地盤内の間隙水圧分布

図-6 は、Case3 について、各負圧ケースごとに 145 日



(a) 井戸中心からの距離の影響



(b) 真空圧の影響

図-3 真空移動による地盤内の含水比変化

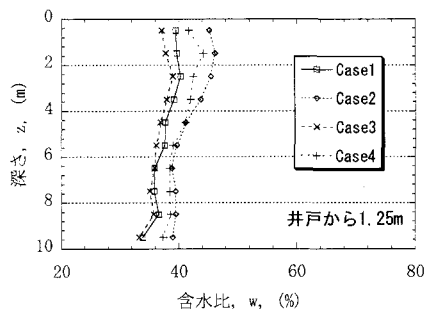


図-4 最終含水分布の比較

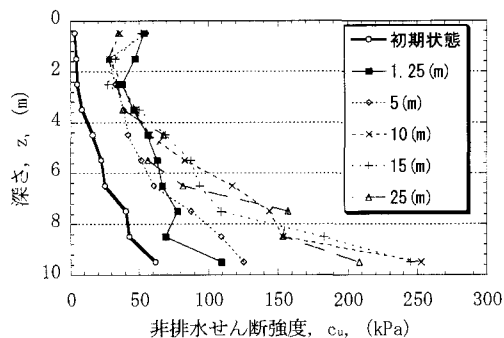


図-5 地盤内の非排水せん断強度の変化

(模型時間: 5,000sec)作用させた後、各センサーの水压減少分を算出して、負圧コンターとして表示したものである。負圧 56kPa では、負圧の影響は水平方向に伝達している。一方負圧 86kPa は、井戸先端付近で高い負圧を示している。そのコンターは、井戸底部付近よりほぼ放射状に負値が徐々に減少していく形状となっている。

図-3 に示したように、井戸中心から 25m離れた地点における含水比は、86kPa 後で負圧の影響による含水比の低下がほぼ地盤全層に渡って生じていることが確認されている。このことから、今回の実験条件の下では井戸中心から 25m 離れた位置まで脱水効果が及ぶのに必要な真空圧は 80kPa 程度であることが示唆された。

d) 真空排水後の地表面沈下

真空排水施工後における地表面沈下分布を図-7 に示す。実験条件がほぼ同じである Case1、4 では 20%程度の沈下の違いが認められるが、その両者の分布形状は井戸からの距離に依らずほぼ均等に沈下している。含水比が最も低下していた Case3 では、沈下量が最も大きい。これには Case3 の実験では、真空稼動時間が長いことも起因していると考えられる。すなわち、真空排水稼動時間と地盤沈下量との関係には相関性が認められる。

4. 現場試験概要

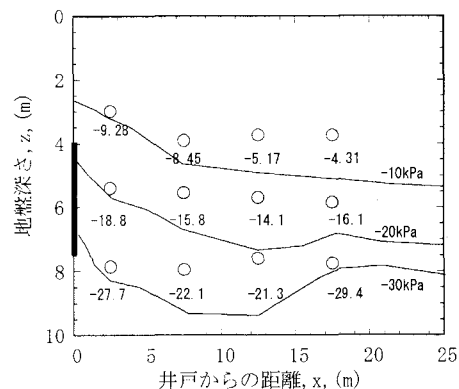
(1) 試験場所および地盤構成

シンガポールの海岸付近では、透水係数の小さい(10^{-6} ~ 10^{-8} cm/sec 程度)マリンクレイ層が厚く堆積している。表-3は、試験地盤の Upper marine clay の基本物性値を示している。自然含水比は 60~70%で、液性限界よりやや低い値を示している。また、非排水せん断強度 c_u は $c_u=15$ ~ 25 kPa である。

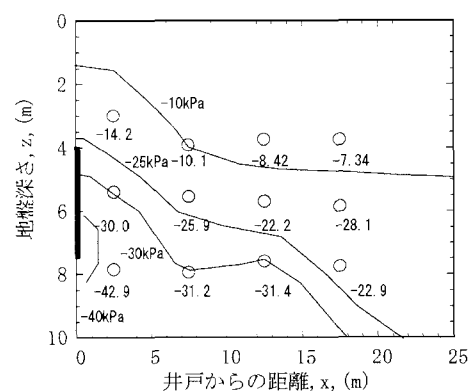
今回の現場試験の揚水は、層厚約 10m の Upper marine clay 層を対象とした。試験場所は、図-8 に示すように約 18m×13m の広さで、その周囲は連続地中壁およびシートパイルで囲われている。また、SWP 先端下の底部には、全面改良の JGP が施工されている(図-9 参照)。試験位置の土層構成は、図-9 に示すように、表層部に Fill および Peaty clay が約 6m あり、その下に今回の試験対象である Upper marine clay が約 11m の厚さで堆積している。

(2) 試験の概要

現場試験は、Marine clay 層部分にスリット(長さ 7m)を設けた直径 0.4m の SWP 井戸を試験場所に設置し(図-9 参照)、真空揚水による粘土の物性の変化について調査を行った。調査内容は、以下の 3 つのステージで行った。



(a) 負圧 56 kPa



(b) 負圧 86 kPa

図-6 地盤内の間隙水压分布

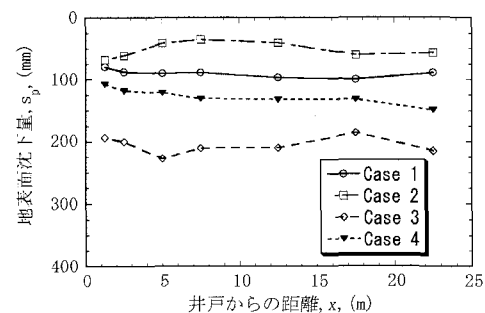


図-7 真空排水後の地表面沈下分布

表-3 Upper marine clay の物性値

土粒子比重	2.61
自然含水比 (%)	60~70
塑性限界 (%)	25~30
液性限界 (%)	70~80
圧縮指数 C _c	0.75
透水係数 (cm/sec)	10^{-6} ~ 10^{-8}
非排水せん断強度 c_u (kN/m ²)	$c_u=5+1.5z$ z(m):地表面からの深さ

a) 事前調査

SWP を施工する前の Marine clay の物性値の確認のため、含水比の測定およびせん断強度試験(現位置ベーンせん断試験および三軸 CU 試験)を行った。調査位置は、井戸中心から約 2m、5m、10m の位置で、図-8 の PZ1～PZ3 付近である。なお、含水比と強度の試験位置は、約 50cm の間隔を置いて実施した。

b) 稼働中調査

SWP を稼働中の動態観測として、作用真空圧、揚水量、地表面沈下量および粘土層内の間隙水圧測定(図-8 の PZ1～PZ3)を行った。なお、試験途中からは、SWP 井戸内の水位測定も行った。

c) 事後調査

SWP 稼働終了後に、事前調査と同様の地盤調査を実施した。

以上の原位置試験は、2004 年 11 月から試験計画を開始して、2005 年 4 月までの間に実施した。このうち、SWP 工法による揚水試験は、今年 1 月から 3 月中旬まで約 60 日間実施した。

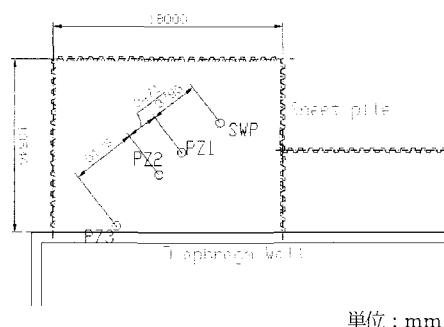


図-8 試験場所の位置

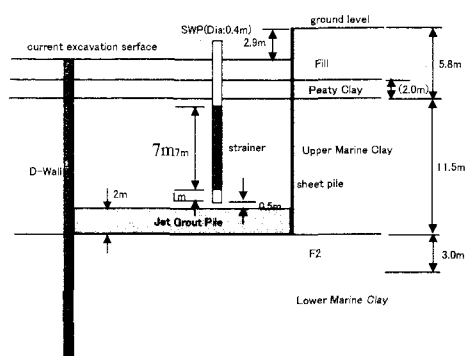


図-9 試験場所の模式断面図

5. 現場試験結果および考察

(1) 真空圧および揚水量の変化

試験中の SWP 井戸内の真空圧変化を図-10 に示した。試験中の SWP 井戸内の真空圧変化を図-10 に示した。SWP の運転開始後から 1 月 11 日までは、揚水時しか真空圧を測定していない。井戸内水位の制御機構とポンプ能力が大きな要因と推定されるが、SWP 設置直後は真空を作用させた状態での揚水が困難であったので、揚水時に真空弁を開いてストレーナ内を大気圧に解放した。その後、水位制御装置の変更等によって、1 月 14 日以降はストレーナ管内を大気圧に開放することなく揚水が可能となった。また、揚水時にストレーナ管からの排水が行われたときには、ストレーナ管内の真空度が低下する現象が見られている。これは、今回使用した真空ポンプの容量不足と考えられる。

累計揚水量および 1 日あたりに換算した揚水量の経時変化を図-11 に示した。井戸設置後には、井戸掘削時の切りくず等の排出(井戸洗浄)のために、強制的にストレーナ管内に注水しており、揚水初期はこの時の供給水も揚水するために、揚水量が急増する結果となっている。同様の洗浄は、途中で水位センサーを交換したときにも行っており、1 月 14 日にも揚水量の急増が見られている。

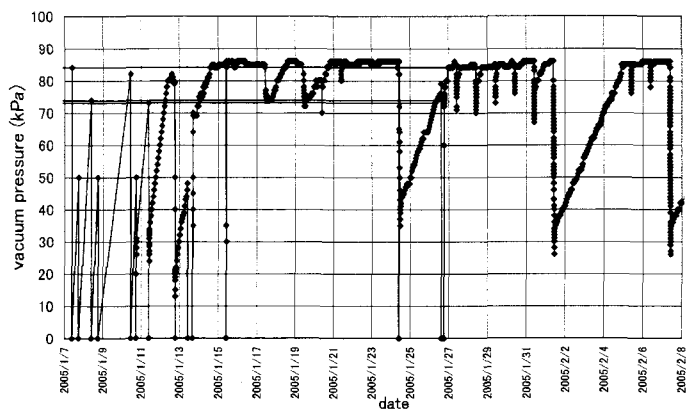


図-10 井戸内の真空圧変化と揚水状況

揚水量の増加傾向は、1月14日付近を境に異なっており、それ以前の揚水量(日平均排水量)は約0.6~0.8m³/dayである。その後は0.5m³/day以下であり、定常状態では約1/2の0.3m³/dayに減少している。初期の排出量が多い主な理由は、前述のように、揚水時にストレート管内を大気圧に戻していること、および井戸洗浄による供給水の回収のためと考えられる。1月14日以降についてみると、2月7日までに約5m³の水を Marine clay 層から強制的に吸い出したことになる。

図-12は、比較的安定した状態での揚水時の水の流出状況を示している。ただし、終日この状態の水が排水されているわけではない。

(2) 地盤中の間隙水圧の変化

Marine clay 内に設置した間隙水圧計の測定結果を図-13に示した。SWP 井戸からの離れは、図-8に示したように、PZ1は約3m、PZ2は6m、PZ3は11mである。PZ1およびPZ2は同一深度(RL=92m)に設置しているが、PZ3はそれらよりも2m深いRL=90mに設置してある。そのために、PZ3は他の2つよりも大きな間隙水圧値を示しているが、RL=92mに換算したときの間隙水圧値は他の間隙水圧計の値とほぼ一致している。設置初期には設置作業に伴う過剰間隙水圧が発生するが、SWPが稼働する時期(1月3日)には、ほとんど静水圧状態(RL=92mで約73kPa)になっている。その後SWP井戸の洗浄作業による間隙水圧の上昇が測定されているが、井戸に真空圧を作用させて以降は、全ての間隙水圧計が減少傾向を示している。特に井戸に近いPZ1およびPZ2では、洗浄作業での上昇圧が作業の終了と共に急速に減少することが観察されている。その後の間隙水圧の減少速度はPZ1、PZ2およびPZ3でほぼ同じ(-0.13kPa/day~-0.27kPa/day)であり、SWP井戸から10m以上離れた地点まで、ほぼ一様に真空の影響が及んでいることがわかる。一様な真空効果の伝搬には、今回の試験箇所が周囲を止水壁で囲まれた閉鎖空間であることが関与している可能性も

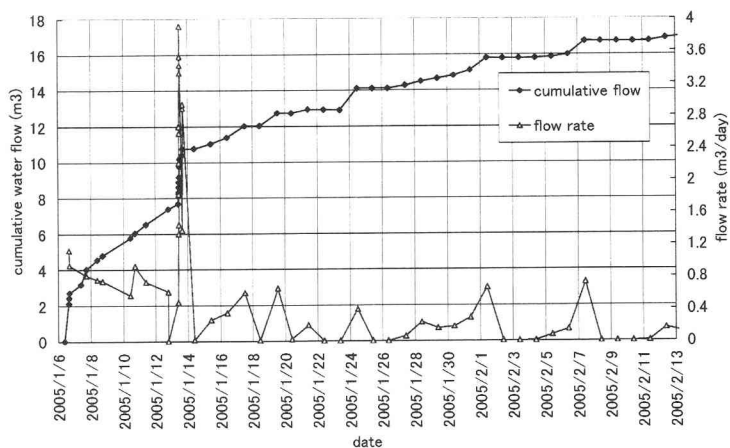


図-11 累積流量と日水量

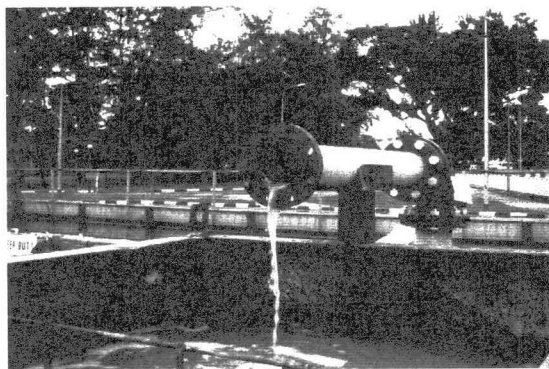


図-12 揚水時の水の流出状況

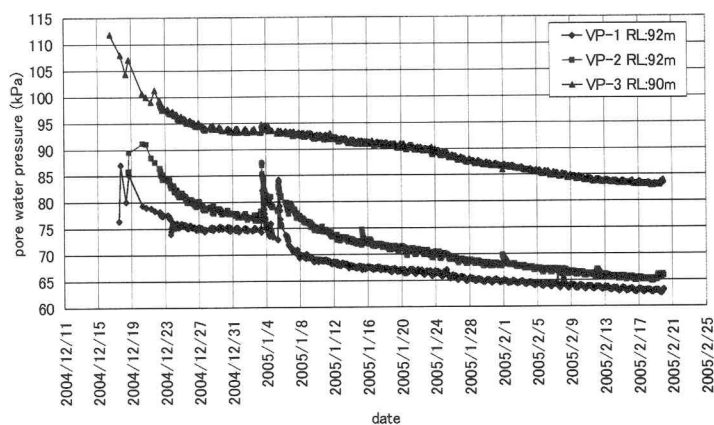


図-13 地盤内の間隙水圧変化

あり、止水壁が無ければ真空の効果は方では急速に拡散してしまうことも考えられる。

(3) 試前後の地盤の強度比較

a) 地盤中の含水比変化

図-14 は、SWP 工法の実施によるマリンクレイ層内の含水比の変化を事前調査と事後調査を併記して示している。白抜きは実験前、直線で結んだ線は実験後の結果をそれぞれ示している。図から、含水比は、事前と事後の結果に顕著な差が見られないことがわかる。また、事後調査結果には、SWP 井戸からの離れの違いによる分布の明瞭な差異も認められない。この理由について、以下のようなことが考えられる。

事前調査における試験位置の自然含水比は、平均値(μ)で約65%、標準偏差(σ)は5%であった。この結果によれば、

$$\mu \pm 3\sigma = \begin{cases} 65+15=80 \\ 65-15=50 \end{cases}$$

となり、測定結果は事前調査時および事後調査時を含めて、ほとんど全ての値がこの範囲に収まっている。従って、通常の含水比調査が持つ「ばらつき」を考慮すると、含水比の変化が検出されないなどの可能性があると考えられる。

なお、深度3~7mの範囲では、これ以深よりも含水比のばらつきが大きい傾向が見られている。これは、後述のベーンせん断強度が3~7m付近で大きく増加している事に対応していると推定される。すなわち、含水比の変化は生じているが、地盤のばらつき等によって今回の地盤調査では明確に検出できる程度ではなかったものと考えられる。

b) 原位置ベーンせん断試験による強度変化

図-15 は、試験サイトで行った原位置ベーン試験の結果を示している。図中、白抜きのマークが事前調査時のものであり、色つきのマークが事後調査時の結果を示している。ベーンせん断試験結果には、SWP 工法の稼働による明瞭な強度増加が認められる。ただし、強度増加は集水のためのスクリーンが設けられている範囲(深度4.5~12m間)全体ではなく、深度4.5~7m付近に生じている。また、強度増加を示している箇所では、下記のようにSWP 井戸に近いほどその増加割合が大きい。井戸からの離れが10mのVST-3では、強度の増加は見られない。

VST-1：井戸から2m離れ

事前調査 約18kN/m²

事後調査 約36kN/m² (強度比 2.0)

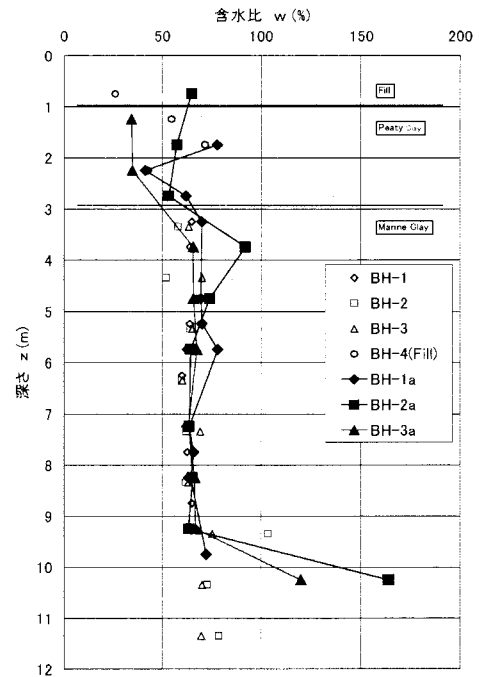


図-14 揚水による地盤内の含水比分布の変化

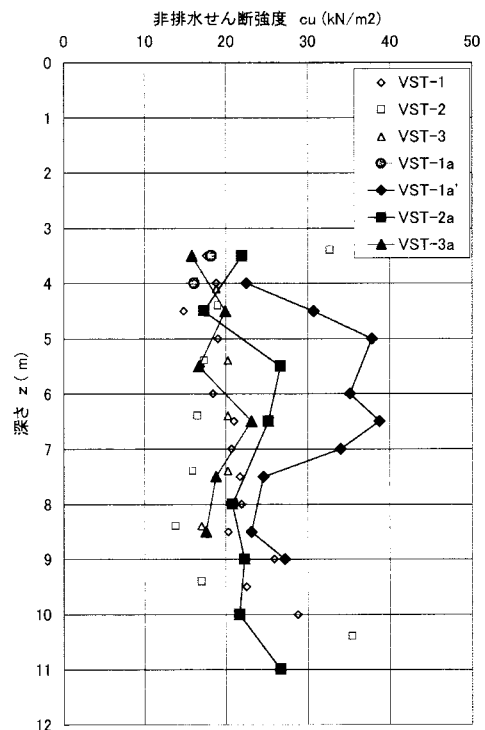


図-15 揚水による地盤内の強度分布の変化

VST-2：井戸から 5m 離れ

事前調査 約 18kN/m²

事後調査 約 24kN/m² (強度比 1.3)

VST-3：井戸から 10m 離れ

事前調査 約 18kN/m²

事後調査 約 18kN/m² (強度比 1.0)

地盤深度が深い領域では、浅い位置に比べて強度増加が小さいが、この理由として、今回の試験における SWP 井戸の集水が軸対象で生じているのではなく、3 次元的なものとなっている事が考えられる。試験箇所の底部には、JGP による地盤改良によって難透水性領域が形成されている。一方、Marine clay の上部は Organic clay を含む Fill 層であり、この層の透水性は Marine clay よりも良いと考えられる。このために、集水時には鉛直上方への脱水を含んだものとなっていることが考えられる。以上のことから、排水性が比較的良好な層に近い Marine clay の上層部分での強度増加が大きかったものと考えられる。

6. おわりに

均一な軟弱粘土層に対する SWP 工法による揚水の適用性を調べるために、遠心模型実験装置を用いた小型模型実験、ならびにシンガポールで約 2 ヶ月強の原位置揚水試験と試験前後の地盤物性の調査を実施した。最後に、本研究で得られた主要な知見をまとめると、以下の如くなる。

(1) 難透水層とされる均一な粘性土地盤 (透水係数 $k=10^{-7}\sim 10^{-8}$ cm/sec) を対象とした真空排水の遠心実験結果から、実験後に最大で 16% 程度の含水比低下が認められ明確な脱水効果が確認された。また、真空圧が高いほど、周辺地盤への脱水の影響範囲は大きく、86kPa の負圧では、井戸中心から水平方向に 25m 離れた地点でも含水比の低下を示した。

(2) 現位置試験により、非常に困難であると想定された中間砂層を含まない均一な粘土層から、SWP 工法により平均約 0.3m³/day の集水が可能であることが確認できた。

(3) シンガポールマリンクレイのような均一な粘土地盤では、SWP 井戸内の真空圧は大きく、80 kPa 以上の真空圧が作用した。この値は、日本の粘性土で使用したときの値 50 kPa よりかなり大きくなった。これは、均一な粘土層では、多数のレンズ状の薄い砂層が存在する粘土層の場合に比べて、高い真空圧を保持できるシステムを使用する必要性が示唆される。

(4) SWP 試験後に原位置ベーンせん断強度の増加が認められた。強度の増加割合は、SWP 井戸から 2m 離れた位置で約 2.0 倍、5m で約 1.2 倍と、井戸に近い程強度の増加が見られた。また、SWP 井戸から 10m 離れた地点では粘土の物性にほとんど変化が見られなかった。このことから、今回の条件で使用した SWP システムの集水有効半径は、5m～10m の間にあると考えられる。

(5) 遠心模型実験では真空稼動による含水比の低下、また SWP 工法の現位置試験では、試験後にせん断強度増加が認められ、均一な粘土地盤に対する地盤改良工法として SWP 工法が適用できる可能性が示されたと考えられる。

今回の遠心模型実験、および現場試験を踏まえた他の粘土地盤での確認実験の実施と共に、システムの改善、稼動期間短縮へ向けた工夫、必要な井戸間隔等を検討し、粘性土地盤への SWP 工法の実用化を進めていく予定である。

参考文献

- 1) スーパーウエルポイント工法技術・積算資料(2000)、スーパーウエルポイント工法研究会。
- 2) 荒井紀之他(2001)：スーパーウエルポイント工法の開発、最新の施工技術 14、土木学会。
- 3) 今村眞一郎他(2003)：スーパーウエルポイント工法に関する遠心模型実験システムの開発、第 58 回年次学術講演会、pp.809-810、土木学会。
- 4) 今村眞一郎他(2003)：遠心模型実験による負圧が地下水の揚水量に及ぼす効果に関する検討、第 58 回年次学術講演会、pp. 811-812、土木学会。
- 5) 宮崎啓一他(2005)：粘性土の真空脱水に関する現位置実験、第 40 回地盤工学研究発表会、pp. 1257-1258。
- 6) 今村眞一郎他(2005)：粘性土地盤への真空排水工法の適用性に関する遠心模型実験、第 40 回地盤工学研究発表会、pp.1259-1260。