

ネットワークドレーン工法を用いた軟弱地盤改良現場実証実験

～より効果的・安価・迅速な軟弱地盤対策～

前田 和亨 ・ 高橋 浩 ・ 石黒 健*¹

Field Verification Test of Network Drain Method

More effective, inexpensive and efficient countermeasure for soft clay ground

Kazuyuki MAEDA, Hiroshi TAKAHASHI, Takeshi ISHIGURO

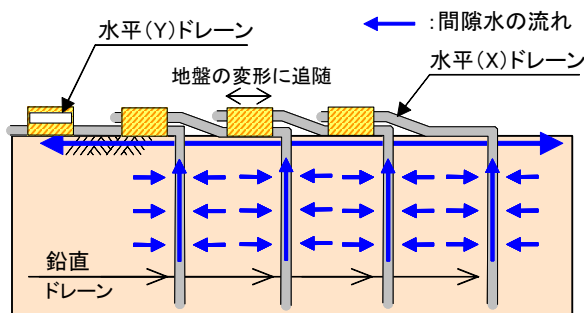


図-1 ネットワークドレーン工法の概念図

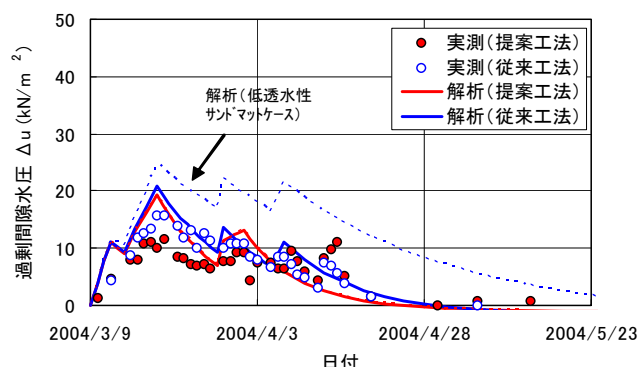


図-2 実測値と解析値の比較結果（過剰間隙水圧）

研究の目的

近年では環境リスクなどの問題によって良質な砂の供給が困難になりつつあり、バーチカルドレーン打設時に用いるサンドマットの材料として、建設廃材や浚渫土などの細粒分を含む透水性の低い土が用いられる機会が増えている。こうしたサンドマットでは鉛直ドレーンによって集水された水をスムーズに排水することが困難となり、沈下促進というドレーン本来の機能を十分に発揮できない可能性がある。こうした状況を鑑み、筆者らは粘土地盤に打設される鉛直ドレーンの余長を相互に連結してネットワーク状の水平排水経路を形成し、集水された水を盛土外または暗渠部に排水させる軟弱地盤圧密促進工法を考案した。提案工法では、鉛直ドレーンの余長を利用することにより安定した水平排水経路が確保できるため、高い圧密促進効果が期待できる。また、サンドマットの施工が不要となるため、コスト削減、工期の短縮そして環境保全が図れる。本論文では、原位置試験施工による提案工法の有効性についての検証結果を報告する。

技術の説明

本工法は、従来のバーチカルドレーン工法の施工機械を用いて鉛直ドレーンの打設した後、その頭部(余長)を隣接する鉛直ドレーン頭部に連結することにより、鉛直・水平両方向の格子状の排水経路を同時に確保する工法である。プレローディングなどにより地盤内に発生した余剰水は鉛直ドレーン内を伝って地上へと誘導され、そのまま鉛直ドレーンの余長部を順次透過することにより速やかに盛土外部へと排出されることとなる。

試験施工は、N値=0程度のシルト層が深度約10mほど堆積する軟弱地盤に対し、提案工法と従来工法による2ケースの軟弱地盤対策工を行うものである。この後、プレロード盛土を施工し、地盤の変形挙動・間隙水圧挙動について計測を行うことで両対策工の圧密促進効果の比較・検証を行った。

主な結論

提案工法の効果を検証するため、原位置における試験施工を実施した。従来の良質サンドマット工法と提案工法を同一地盤、同一仕様にて施工し、沈下傾向および過剰間隙水圧の消散傾向を比較した結果、提案工法は従来工法と同等の圧密促進効果を有することが確認された。

* 1 本店 総合企画部

ネットワークドレーン工法を用いた軟弱地盤改良現場実証実験

前 田 和 亨 高 橋 浩
石 黒 健^{*1}

要 旨

近年では環境リスクなどの問題によって良質な砂の供給が困難になりつつあり、バーチカルドレーン打設時に用いるサンドマットの材料として、建設廃材や浚渫土などの細粒分を含む透水性の低い土が用いられる機会が増えている。こうしたサンドマットでは鉛直ドレーンによって集水された水をスムーズに排水することが困難となり、沈下促進というドレーン本来の機能を十分に発揮できない可能性がある。筆者らは粘土地盤に打設される鉛直ドレーンの余長を相互に連結してネットワーク状の水平排水経路を形成し、集水された水を盛土外あるいは暗渠部に排水させる軟弱地盤圧密促進工法を考案し、その有効性について原位置試験施工により検証を行った。その結果、提案工法は良質なサンドマットを用いた従来工法と同等の圧密促進効果を有することが確認された。

キーワード 軟弱粘性土地盤／バーチカルドレーン工法／マットレジスタンス／原位置試験施工

目 次

- | | |
|------------|----------------|
| 1. はじめに | 3. 現場試験施工による検証 |
| 2. 提案工法の概要 | 4. まとめ |

FIELD VERIFICATION TEST OF NETWORK DRAIN METHOD

Kazuyuki MAEDA Hiroshi TAKAHASHI
Takeshi ISHIGURO

Synopsis:

This study is about the development of NETWORK DRAIN METHOD to overcome mat resistance of sand mat caused by the existence of less permeable fine contents in vertical drain method. We carried out field verification test to investigate the effect of the proposed method. The test result shows that proposed method can function as well as usual method in promoting consolidation of the soft clay foundation.

* 1 本店 総合企画部

1. はじめに

我が国における近年の急激な都市化は、水際線の埋立てによる展開、沖合の人工島建設といった形で進められてきており、都市が広がる沿岸部や大河川流域のいわゆる水際線には河川性、海性の土砂が厚く堆積した軟弱地盤が形成されている。こうした軟弱層は、大型化する構造物を支える十分な支持力を持たない上に、非常に変形しやすく、破壊しないまでも沈下や側方流動によって上部構造物に深刻な供用上の問題を引き起こす場合が多い。したがって、軟弱層に対し無処理状態で建設工事を行うことはほとんどなく、圧密を促進させるためにはバーチカルドレーン工法などの対策工が行われ、その効果については多くの実績がある。

バーチカルドレーン工法は、透水性の低い粘土地盤に砂柱を鉛直に打設することにより、排水距離を短くし、圧密を促進させる工法である。砂柱に細粒分の少ない良質な砂を使用することによってその排水効果は増大する。一方、工場内で作られる人工ドレーン材が開発され、ペーパードレーン（以下 PD）、ファイバードレーンなど非常に多様なドレーンも用いられるようになってきた。こうした人工材料の特長は同じ品質のものが大量に生産でき、品質管理とコストの面で、地盤から掘削して運搬してこなければならない砂に比べて有利な点が多い。近年の砂供給の先細りとも相まって、人工ドレーン材の利用はより一般的になってきている。

排水ドレーン材の技術進歩が著しい一方で、軟弱層の表面に集水と重機のトラフィカビリティ確保のために敷設されるサンドマットに使用する砂質土の品質についてはあまり注意が払われない。鉛直ドレーンによって地表に誘導された水を効率よく排水するためにはサンドマットに所定の透水性が担保されなければならないのは当然のことである。このため、従来はサンドマットの材料として細粒分の少ない川砂や洗い砂などの材料が使用されてきたが、近年、これらの材料が枯渇しつつあり、良質な砂の確保が困難な状況にある。さらに砂の採取による環境破壊の問題や、砂単価の高騰によってサンドマット工の施工費増大を招く問題が生じている。やむなく細粒分を含む山砂等をサンドマットに使用した場合、マットレジスタンスの影響によって軟弱地盤の圧密時間に遅延が生じ、結果的に鉛直ドレーン工法の圧密促進効果が大きく阻害される懸念が生じていた。

著者らはこうした現状を鑑み、サンドマットのマットレジスタンスの影響を受けずにドレーンの表面排水機能を効率よく発揮させるための手法として、「ネットワークドレーン工法」を提案し、室内模型実験や三次元有限要素解析により検証を行ってきた^{1), 2)}。本工法は、鉛直ドレーンの余長を利用し、地盤内に打設された鉛直ドレーンをそのまま水平方向に延長することにより、地盤内の間隙水を盛土外に排水させるものである。そのため、

良質な購入砂を用いることなく従来のサンドマット工法と同等の圧密促進効果が期待できる。また、サンドマット工が不要となるため、コスト削減と工期の短縮、そして環境保全が図れる。

本論文では、提案工法の効果を把握するために行った現場実証実験について報告する。

2. 提案工法の概要

2.1 工法概要

本工法は、従来のバーチカルドレーン工法の施工機械を用いて鉛直ドレーンの打設した後、その頭部(余長)を隣接する鉛直ドレーン頭部に連結することにより、水平方向の排水経路を確保する工法である。これにより、プレローディングなどにより地盤内に発生した余剰水は、鉛直ドレーンを伝って地上へと誘導され、そのまま鉛直ドレーンの余長部を順次透過し、盛土外部へと排出されることとなる。ドレーン材の頭部を利用して水平排水経路を構築することから、水平方向の通水性能はサンドマットの品質に左右されずに安定した品質が確保でき、また、排水を目的としたサンドマット工の施工が不要となる。改良対象地点の地表面が軟弱で重機の進入が困難な場合には、トラフィカビリティ確保のために足場材（建設発生土等）の敷設が必要となるが、提案工法では良質なサンドマットを必要とする従来工法と比較し、コストの削減や、工期の短縮を図ることができるものである。工法の概念図を図-1に示す。

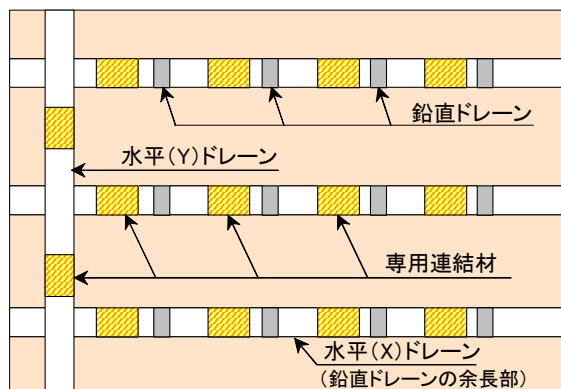


図-1(1) 提案工法の概念図（平面図）

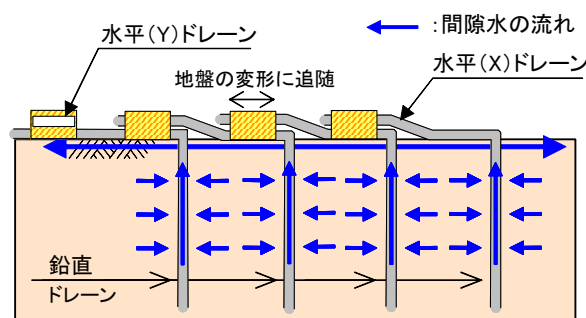


図-1(2) 提案工法の概念図（断面図）

2.2 提案工法の成立性について

ネットワークドレーン工法では鉛直ドレーン材の頭部（余長）を相互連結し、圧密の進行によって地盤内に生じる余剰水を盛土外へと導く。そのため、鉛直ドレーン部と水平ドレーン部を1本のドレーン材と考えた場合、地上連結部が長くなるとウェルレジスタンスが増大し、排水能力が低下することが懸念される。一方、従来工法では、これに代わるものとしてサンドマット内でのマットレジスタンスの問題が生じる。そこでここでは、水平排水距離の増加による排水特性への影響について検討し、提案工法の成立性について検証を行う。

検討は、同一の条件の下で、提案工法（図-2(1)）におけるレジスタンスに起因する圧密遅れと、サンドマット工法（従来工法，図-2(2)）におけるレジスタンスに起因する圧密遅れを算出し、両者を比較することで行う。なお、鉛直ドレーン部の仕様（ピッチ、配置）を両工法で同一なものとするれば、そこに生じるウェルレジスタンスも同一の値となるため、ここでは考慮しないものとする。そのため、検討は地上部の水平排水経路（提案工法では水平ドレーン部、従来工法ではサンドマット部）のマットレジスタンスに起因する圧密遅れについて行う。

計算は、深さ $H_1=30\text{m}$ の軟弱地盤層にパーチカルドレーン工法を適用し、鉛直ドレーンとして PD 材（面内透水係数 $k_w=1.0 \times 10^1 \text{cm/sec}$ 、5章で示す現場実証実験で用いた PD 材の実測透水係数に相当）を正方形配置で打設する場合を想定して行う。計算ケースは、建設発生土を重機足場材として用い、鉛直ドレーン余長部を利用して水平排水経路を構築する提案工法ケース、水平排水経路として良質なサンドマット（透水係数 $k_m=1.0 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ ）を用いた従来工法ケース①、水平排水経路として低透水性のサンドマット（透水係数 $k_m=1.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ）を用いた、圧密促進効果が危惧される従来工法ケース②の計3ケースとする。また、計算にあたり、次の条件を設ける。

- ・盛土材料が不透水である。
- ・水平排水経路内の水の流れは水平一次元流れである。
- ・鉛直ドレーン（地盤内）の透水性は無限大である。
- ・鉛直ドレーン（地盤内）への応力集中はない。
- ・水平排水経路および鉛直ドレーン内は飽和されている。
- ・水平排水経路は非圧縮性である。

これらの条件を満足すると仮定すれば、盛土幅の $1/2$ を水平排水長 H_2 とした場合のマットレジスタンス L は吉国の式³⁾ [1]より求められ、また、水平排水経路の透水性を無限大と考えた理想状態 ($L=0$) に対する圧密の遅れ r は式[2]より算出することができる。この圧密遅れ r を工法の排水抵抗性を表す指標と考え、水平排水距離 H_2 (= 盛土幅の $1/2$) をパラメータとして変化させ、それぞれの H_2 に対応する圧密遅れ r を算出することで水平排水距離と排水抵抗性の相関関係を求めることとする。なお、提案工法における水平排水経路は、建設発生土部と水平ド

レーン部を一つの合成されたゾーンであると考え、その透水係数は両者の面積換算により等価透水係数として設定した。表-1 に計算条件を示す。

$$L = \frac{32}{\pi^2} \frac{H_1 k_c}{n^2 H_m k_m} \left(\frac{H_2}{d_w} \right)^2 \quad [1]$$

$$r = \frac{T_{h90}(L \neq 0)}{T_{h90}(L = 0)} = 1 + \frac{0.8L}{F(n)} \quad [2]$$

但し、

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

$$n = \frac{d_e}{d_w}$$

ここに、 k_c は原地盤の透水係数、 k_w はドレーンの透水係数、 k_m は水平排水経路の透水係数（提案工法：等価透水係数、従来工法：サンドマットの透水係数）、 d_e はドレーン等価集水径（ドレーンを正方形配置とした場合 $d_e = 1.13 d$ 、 d はドレーンピッチ）、 d_w はドレーンの換算径、 H_1 は軟弱地盤層厚（鉛直ドレーン長）、 H_2 は水平排水長、 H_m はサンドマット厚さ、 T_h は時間係数、 r は圧密遅れ、 L はマットレジスタンスを表す。

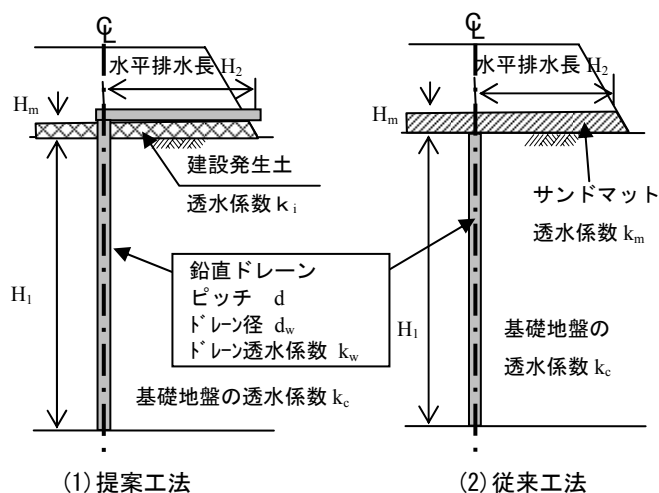


図-2 検討条件の模式図

表-1 計算条件一覧表

	提案工法	従来工法① (良質)	従来工法② (低透水)
サンドマット厚さ H_m mm	500	500	500
サンドマット透水係数 k_m cm/sec	-	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-3}
ドレーン透水係数 k_w cm/sec	1.0×10^1	1.0×10^1	1.0×10^1
ドレーン径 d_w mm	50(換算径)	50(換算径)	50(換算径)
ドレーンピッチ d mm	1000	1000	1000
有効集水径 d_e mm	1130	1130	1130
原地盤透水係数 k_c cm/sec	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}
軟弱地盤厚 H_1 mm	30000	30000	30000
n	22.6	22.6	22.6
$F(n)$	2.37	2.37	2.37
提案工法水平排水経路部算出条件			
建設発生土透水係数 k_i cm/sec	1.0×10^{-6}	-	-
ドレーン通水面積 A_d mm ²	400	-	-
等価透水係数 k_{eq} cm/sec	8.0×10^{-3}	-	-

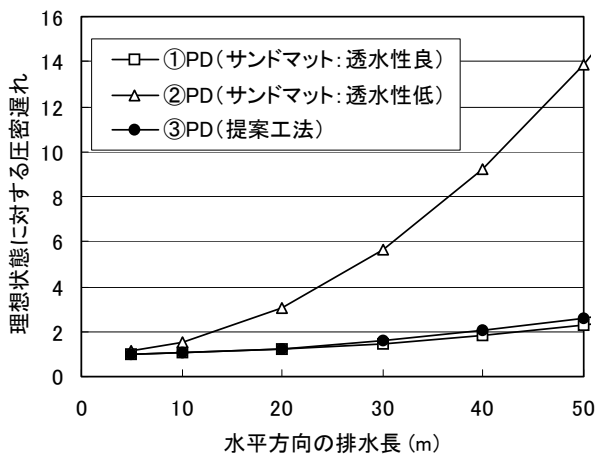


図-3 従来工法に対する圧密遅れ比

図-3 には、様々な水平排水長 H_2 に対する圧密遅れを算出した結果を示す。いずれのケースにおいても水平排水経路が長くなれば排水抵抗が増し、右上がりの傾向を示している。盛土幅が 100m（水平排水長 $H_2=50\text{m}$ ）となった場合、良質サンドマットを用いた従来工法①ケースでは理想状態に対して 2 倍程度の圧密遅れが生じる結果となる。また、低透水性のサンドマットを用いた従来工法②ケースでは圧密遅れが顕著となり、マットレジスタンスがバーチカルドレーン工法の圧密促進効果に及ぼす影響の大きさが伺える。一方、提案工法の結果は従来工法①ケースより圧密遅れが若干大きくなるものの、ほぼ同等の値を示しており、現実的に十分対応可能な値となった。

近年における人工排水材は、高い通水性能を持ち、環境への適合性を有し、かつ安価なものが次々と開発されている。これらのことから、当提案工法は、工学的に、また、環境面や経済面からも、その成立性は高いと判断できる。

3. 現場試験施工による検証

3.1 試験施工の概要

実施した試験施工の諸元を以下に示す。

- ・工事名称 : 「ネットワークドレーン実証実験工事」
- ・工事場所 : 埼玉県さいたま市緑区寺山地先
- ・工期 : 自 平成 16 年 2 月 3 日
至 平成 16 年 4 月 20 日

試験施工は、軟弱なシルト層（ N 値=0）が深度約 10m ほど堆積する地盤に 20m×20m の実験ヤードを隣接して 2 つ設け、片側には提案工法、もう一方には従来工法による軟弱地盤対策工を行うものである。実験ヤードの平面図および断面図を図-4 に示す。

軟弱地盤対策工として、提案工法サイトでは、原地盤上にトラフィカビリティ確保のための足場材（建設発生土、厚さ 50cm）を敷設し、その後に鉛直ドレーン（PD）を 1m ピッチ、格子状配置で打設した。鉛直ドレーン打設時には、ドレーンの頂部を“ドレーンピッチ+

50cm” の余裕長を持つように切断し、隣接するドレーン材の余長部同士を連結することで地上部の排水経路を確保した。これに対し従来工法では、原地盤上に排水用のサンドマットを厚さ 50cm 敷設し、鉛直ドレーンとして PD を提案工法サイトと同ピッチ・同配置で打設した。地盤対策工の施工後にはそれぞれのヤードに高さ 3 m の盛土を築造し、地盤内間隙水圧、地表面沈下、盛土のり尻水平変位について計測を行うことで両対策工の圧密促進効果の比較・検証を行った。図-4 に計測器の配置位置を示す。

3.2 挙動予測解析

現場実証実験を行うに先立ち、二次元 FEM を用いて挙動予測解析を実施した。計算は平面ひずみ条件とし、土の構成則として関口・太田モデル⁴⁾を取り込んだ土/水連成弾塑性 FEM 解析手法を用いて行った。地盤のモデル化は、足場材、表土層を線形弾性体、軟弱地盤層は弾塑性体とし、解析に必要なパラメータは事前地質調査における室内試験結果を基に設定した。鉛直ドレーン打設部の物性は、透水係数については等価透水係数を用い、その他のパラメータは周辺地盤と同様とした。透水係数は、鉛直方向についてはドレーン材と周辺地盤の面積換算により設定し、水平方向は原地盤と同値とした。また、提案工法における地表部排水経路（ドレーン余長連結部）の透水係数については、ドレーン材と周辺地盤との面積換算により等価透水係数として設定した。解析メッシュを図-5 に、解析に用いたパラメータの一覧を表-2 に示す。

3.3 試験施工結果および考察

盛土の築造による地盤内の間隙水圧と地表面沈下の経時変化について、それぞれの実測値と計算値とを比較した結果を図-6 に示す。図-6(1)に示すように、提案工法サイトと従来工法サイトで盛立て工程が異なるために経時的な地盤挙動に差異を生じているが、過剰間隙水圧の消散傾向、地表面沈下量ともに、両工法でほぼ同等の挙動を示している。また、同図中には、パラメトリックスタディとして従来工法におけるサンドマットに低透水性の材料を適用したケース（ $k_m=5.0 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 、実験で用いたマット材料の 1/2 程度の透水係数）の解析結果を併せて示している。低透水性のサンドマットを用いることにより沈下の進行や過剰間隙水圧の消散が遅れており、マットレジスタンスが圧密促進効果に及ぼす影響の大きさが伺える。またこの傾向は、室内試験や三次元 FEM 解析による検討結果^{1),2)}と同様のものである。

図-7 は、沈下量と側方変位量から盛土の安定管理図を作成したものであるが、図から、ネットワークドレーン工法、および従来工法を実施した盛土築造工事は、十分に安全であったものと判断される。

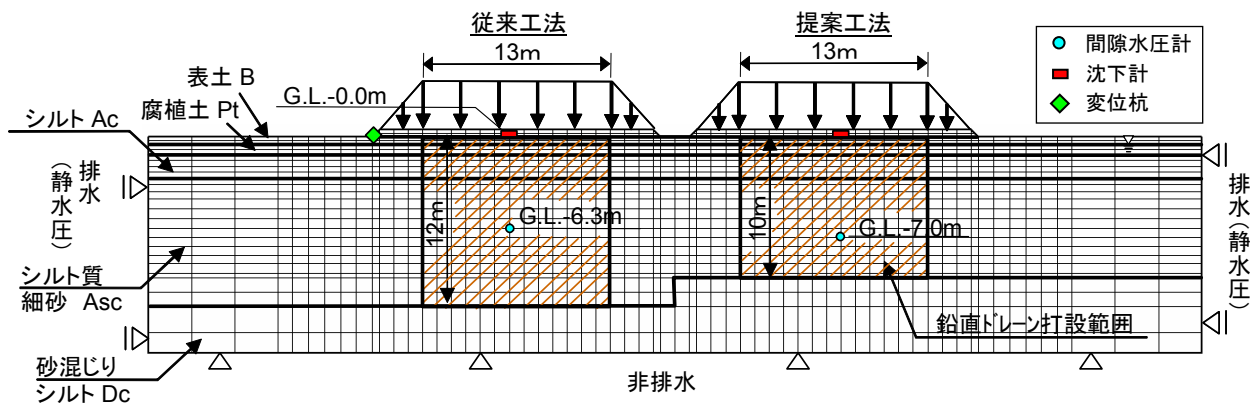
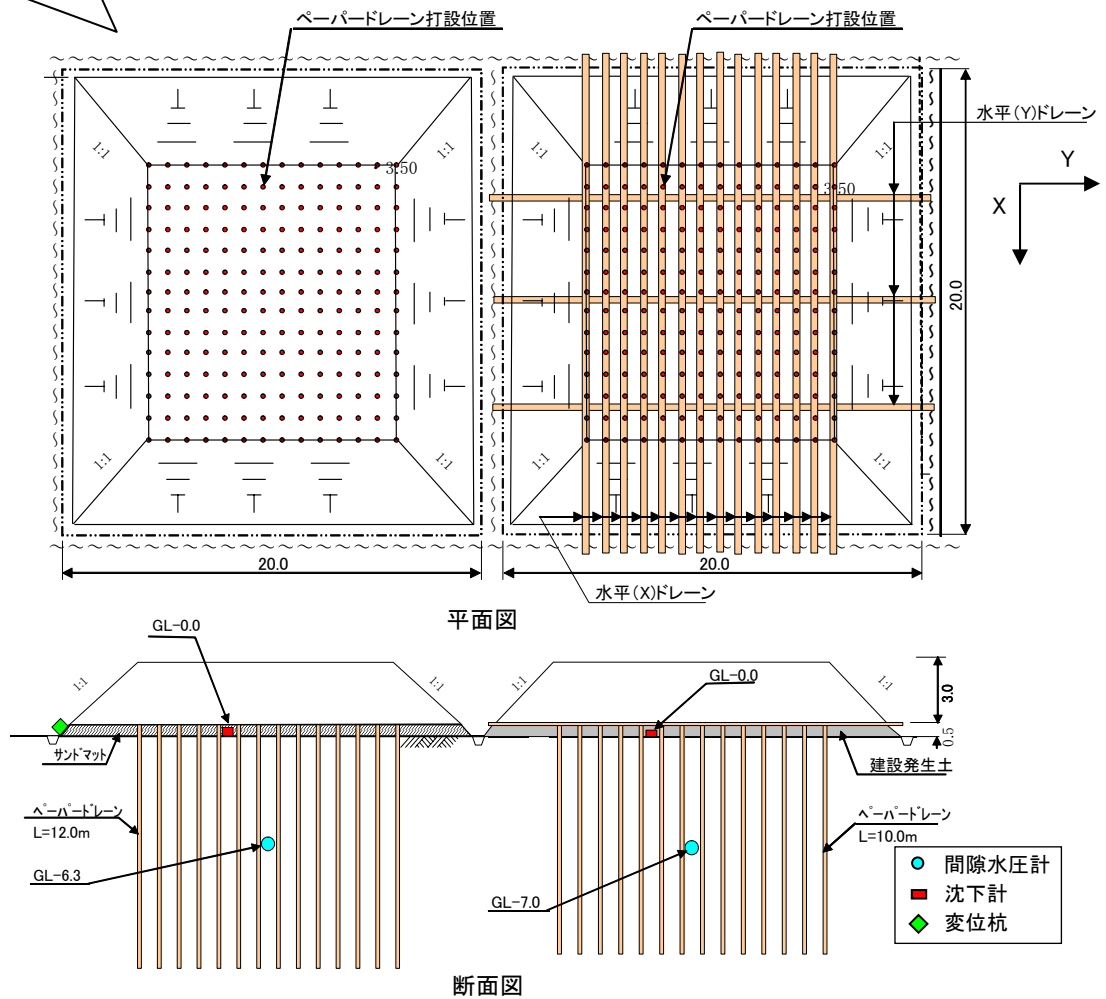
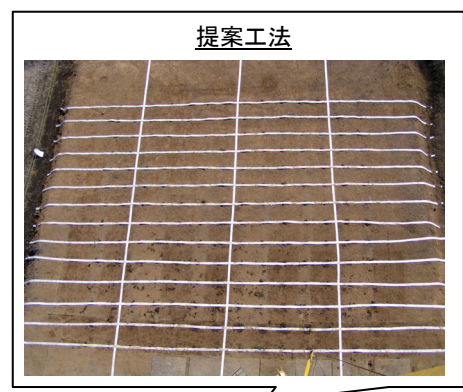
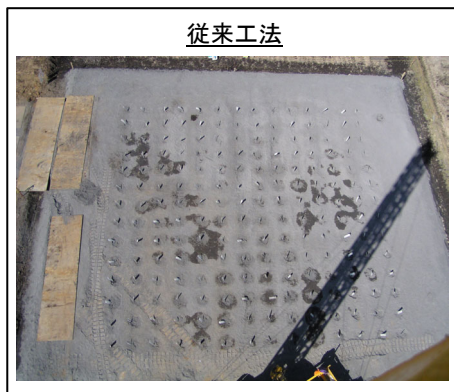
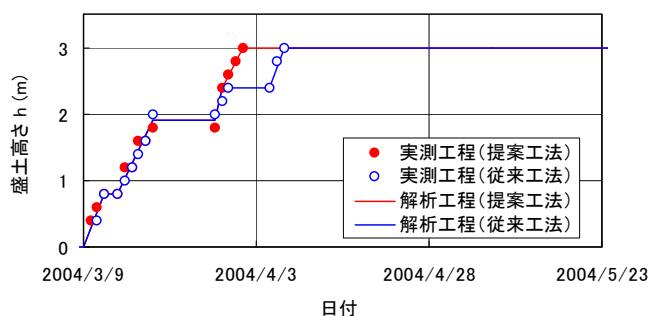
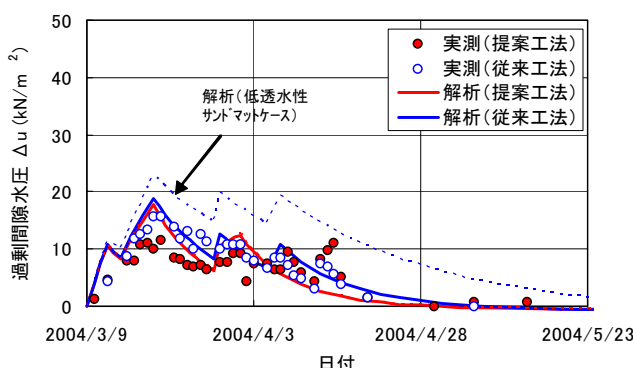


表-2 解析に用いたパラメーター一覧

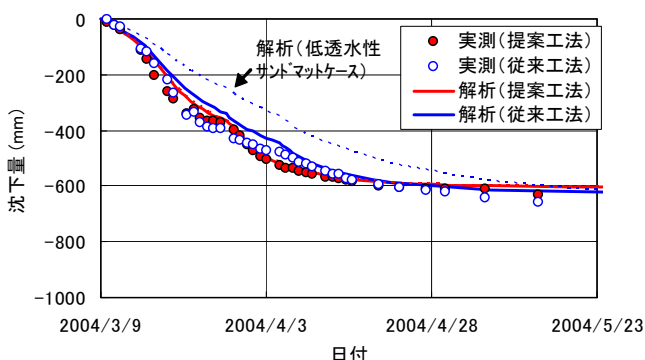
地層		表土	腐植土	シルト層	シルト質 細砂	砂混じり シルト	建設 発生土	サンドマット
計算モデル		線形弾性	弾塑性	弾塑性	弾塑性	弾塑性	線形弾性	線形弾性
単位体積重量	γ_c kN/m ³	14.0	10.9	14.5	17.2	16.7	14.0	14.0
圧縮指数	λ	-	3.220	0.460	0.184	0.195	-	-
膨張指数	κ	-	0.256	0.065	0.015	0.018	-	-
先行圧縮応力	P_c kN/m ²	-	18.0	32.0	69.0	180.0	-	-
内部摩擦角	ϕ_i deg	-	46.9 ^{※1}	24.0	29.9	29.3	-	-
弾性係数	E kN/m ²	2100	-	-	-	10000	10000	-
ポアソン比	ν	0.333	-	-	-	0.333	0.333	-
先行時の間隙比	e_0	-	10.388	2.474	1.455	1.472	-	-
先行時土圧係数	K_0	-	0.756	0.593	0.502	0.510	-	-
初期土圧係数	K_1	-	1.770	1.175	0.845	0.771	-	-
透水係数	k cm/sec	5.03E-06	5.03E-06	9.83E-07	9.12E-07	4.56E-07	1.80E-07	1.35E-03
ドレーン部等価	k_s cm/sec	5.03E-06	5.03E-06	9.83E-07	9.12E-07	4.56E-07	9.53E-03	-
透水係数	k_d cm/sec	2.39E-03	2.39E-03	2.38E-03	2.38E-03	2.38E-03	1.80E-07	-
透水係数変化率 ^{※2}	λ_k	-	1.32	0.29	0.18	0.15	-	-

※1 $w \sim \phi$ 関係より $\phi = 0.4 \times (72 + 0.088 / 0.62 \times I_p \times 7.185)$ ※2 透水係数は間隙比により変化した。 $k = k_0 \exp[(e - e_0) / \lambda_k]$ と定義

(1) 盛立て工程



(2) 過剰間隙水圧



(3) 地表面沈下

図-6 実測値と解析値の比較結果

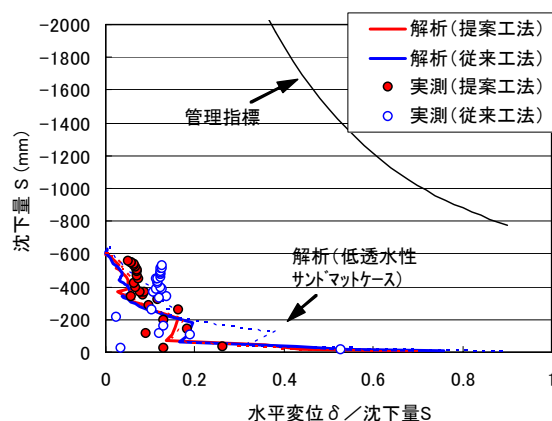


図-7 盛土の安定管理図

4. まとめ

本研究により得られた結論を以下に示す。

(1) バーチカルドレーン工法において、透水性の高い良質なサンドマットが入手できなかった場合、設計通りの圧密促進効果が得られないことが懸念される。そこで、鉛直ドレーンの余長部を連結して間隙水の排水経路を確保する「ネットワークドレーン工法」を提案した。

(2) 提案工法の効果を検証するため、提案工法と従来工法（サンドマット工法）による原位置軟弱粘土地盤改良試験を実施した。その結果、両工法サイトにおける地盤変形挙動および地盤内間隙水圧挙動はほぼ同等の傾向を示した。またこれは、二次元 FEM 予測解析とも整合する結果であった。これらのことから、提案工法は従来工法とほぼ同等の圧密促進効果を有するものと判断される。

謝辞：試験施工を行うに際し、ヤードの提供、ならびにご指導を頂いた（独）都市再生機構の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 張祐榮, 武部篤治, 石黒健, 松島仁文, 三村衛: バーチカルドレーンの余長を利用したマットレジスタンス対策に関する研究 (その 1) 室内実験による対策効果の検証, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演論文集, pp1207-1208, 2003.
- 2) 武部篤治, 石黒健, 張祐榮, 三村衛, 松島仁文: バーチカルドレーンの余長を利用したマットレジスタンス対策に関する研究 (その 2) 三次元有効応力解析による対策効果の検証, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演論文集, pp1209-1210, 2003.
- 3) 吉国 洋: バーチカルドレーン工法の設計と施工管理, 技報堂, pp.29-65, 1979.
- 4) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clays, *Proc. Specialty Session 9, 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.*, pp.229-237, 1977.