

ネットワークドレーン工法の開発

前田和亨¹・高橋 浩¹・石黒 健²・板垣浩三³・小寺哲朗⁴・佐藤道祐⁵・三村 衛⁶

¹正会員 工修 前田建設工業（株） 技術研究所（〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16）

²正会員 工博 前田建設工業（株） 技術研究所（〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16）

³大洋基礎株式会社 技術部（〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3番4号）

⁴国土総合建設株式会社 技術本部（〒108-8432 東京都港区海岸3-8-15）

⁵東洋建設株式会社 技術開発部（〒101-8463 東京都千代田区神田錦町3-7-1）

⁶正会員 工博 京都大学大学院防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

近年、透水性の高い川砂が枯渇しつつあり、バーチカルドレーン工法の施工時に透水性の低い土がサンドマットの材料として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スムーズな排水が困難となり、沈下促進という工法本来の機能を十分に発揮できない可能性がある。筆者らはこれまで、粘土地盤に打設される鉛直ドレーンの余長部を相互に連結して、集水された水を盛土外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検証を行ってきた。その結果、提案工法は良質なサンドマットを用いた場合と同等の圧密促進効果を有することが確認された。本稿では、提案工法の設計方法、施工方法、実施工例等について記述するものである。

キーワード：バーチカルドレーン工法，マットレジスタンス，軟弱地盤対策，ドレーン余長，ネットワークドレーン，設計方法，施工方法，実施工例

1. はじめに

バーチカルドレーン工法は、軟弱な粘性土地盤にドレーン材を鉛直に打設し、水平方向の排水距離を短くすることで圧密を促進する工法である。施工にあたっては、ドレーン打設機械のトラフィカビリティの確保や、過剰間隙水の盛土外への排水を目的として、地表面にサンドマットを敷設することが一般的である。そのため、鉛直ドレーン材や地表部のサンドマット材は高い透水性を有することが必要であり、従来ではこれらの材料として、細粒分の少ない川砂や洗い砂などが用いられてきた。

近年、ドレーン材として、ペーパードレーン（以下PD）やファイバードレーンなどの多様な人工材の開発が盛んに行われている。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るため品質管理が容易であり、材料費や運搬費といったコストの面で砂に比べて有利な点が多いことである。そのため、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となってきている。

排水ドレーン材の技術進歩が著しい一方で、サンドマットに使用する材料の品質についてはあまり注意が払われていないようである。近年では、川砂が

枯渇しつつあり、良質な砂の確保が困難となってきている。そのため、砂単価の高騰を招き、施工費が増大する問題が生じている。やむなく建設廃材や浚渫土などの細粒分を含む透水性の低い土をサンドマット材として用いた場合、マットレジスタンスの影響によってバーチカルドレーン工法の圧密促進効果が大きく阻害され、結果的に、工期の遅延や、工事費の増大を招く懸念が生じる。

著者らはこうした現状を鑑み、サンドマット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効応力FEM解析、現場実証実験により、効果の検証を行ってきた^{1), 2), 3)}。本工法は、地盤内に打設された鉛直ドレーンの余長部を隣接ドレーン材の余長部と連結していくことで、地盤内の間隙水を盛土外まで導出させるものである。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と同等の排水作用が期待できる。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こととなる。

本論文は、ネットワークドレーン工法の設計方法と施工方法のポイント、および実施工例とその計測結果について記述するものである。

2. 工法概要

ネットワークドレーン工法は、広義的にはバーチカルドレーン工法的一种として位置づけられる。本工法と従来工法の違いは、従来のバーチカルドレーン工法では、サンドマットが地上部における水平方向の排水を担っていることに対し、本工法では、鉛直ドレーンの頭部(余長)どうしを連結することで、水平方向の排水経路を確保する点である。プレロードなどによって地盤内に発生した過剰間隙水は、鉛直ドレーンを通して地上へと誘導され、そのまま余長部を透過して、盛土外部へと排出される。これにより、水平方向の通水性能は、サンドマットの透水性に左右されずに安定した品質が確保でき、排水を目的としたサンドマットが不要となる(ただし、地表面が軟弱で重機のトラフィカビリティーが確保できない場合は、建設発生土等を利用した足場材の敷設が必要)。工法の概念図を図-1に示す。

本工法の特徴を、従来のバーチカルドレーン工法と比較して以下に示す。

- ① コスト縮減：透水性の高いマット材が不要なため、材料コストを縮減できる。
- ② 工期短縮：鉛直ドレーンと水平ドレーンの同時施工により工期を短縮できる。

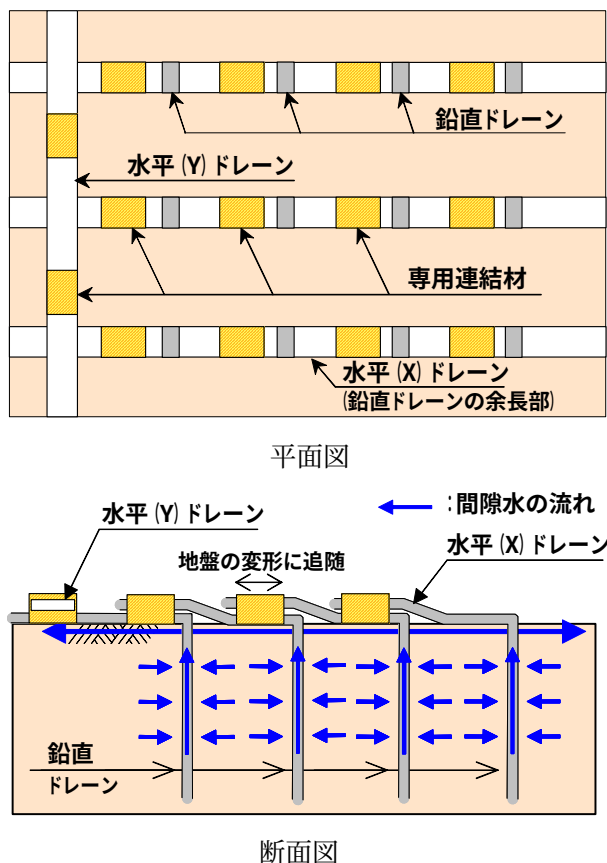


図-1 ネットワークドレーン工法の概念図

- ③ 品質保証：透水性の高いサンドマットと同等の圧密促進効果が得られる。
- ④ 環境保全：重機足場材として建設発生土等の有効利用が可能であり、環境負荷が少ない。

3. 設計方法

本工法は、地表部における水平方向の排水を鉛直ドレーン余長部に担保させて間隙水を盛土外に排出する工法である。そのため、軟弱地盤内へ打設する鉛直ドレーンの設計方法は、既往のバーチカルドレーン工法と同じであるが、以下に示す3項目について、別途、検討が必要である。

- ・足場材の仕様
- ・鉛直ドレーン余長長さ
- ・水平(Y)ドレーンの仕様

図-2に、ネットワークドレーン工法の設計フローを示す。以下には、新たに検討が必要となる各項目の設計法について示す。

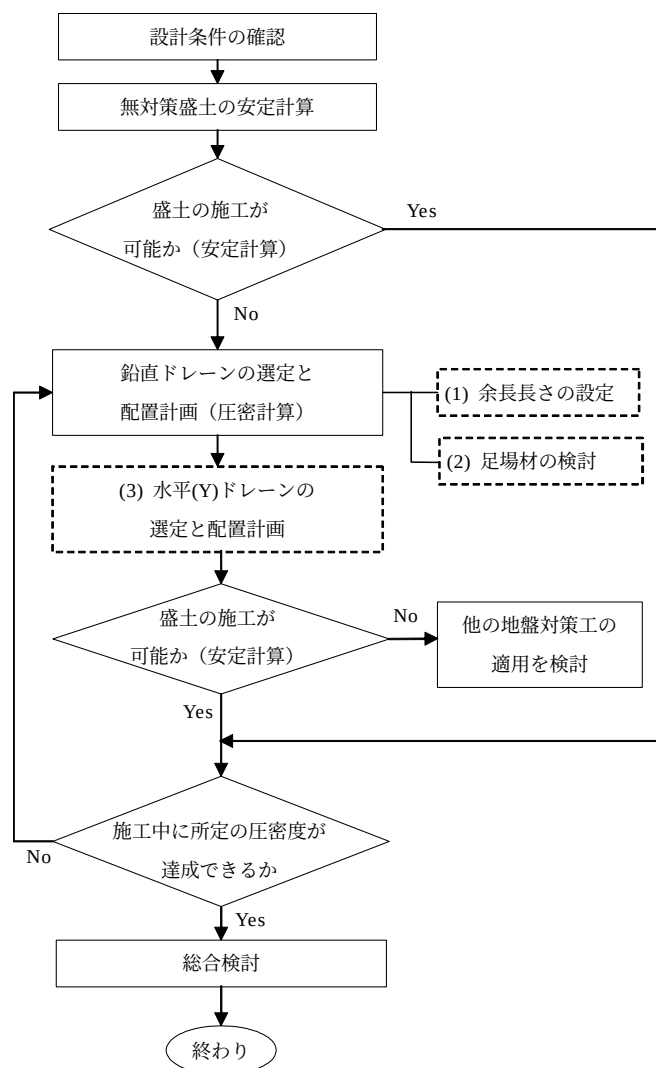


図-2 ネットワークドレーン工法の設計フロー

(1) 足場材の仕様

本工法における足場材は、従来のサンドマット工法と異なって透水性能を必要としないため、施工時に必要なトラフィカビリティーの確保を目的として敷設を行う。そのため、透水性に関する規定は不要であり、敷設厚さと強度についてのみ検討を行う。

本工法では湿地型のドレーン打設機を標準仕様としていることから、足場材には、コーン支持力 $q_c \geq 300 \text{ kN/m}^2$ の強度が必要となる⁴⁾。また、足場材の敷設厚さは、原地盤のコーン支持力 q_c (kN/m^2) により設定でき(図-3⁴⁾)、 $q_c \geq 300 \text{ kN/m}^2$ の場合は足場材が不要となる。なお、足場材に建設発生土を使用する場合は、第3種($q_c \geq 400 \text{ kN/m}^2$)以上を用いることを基本とする。

(2) 鉛直ドレーン余長部の長さ

鉛直ドレーンの余長部長さ L は、鉛直ドレーン打設ピッチ d と重ね合わせ長 s を加算したものとする(図-4参照)。鉛直ドレーン余長部は、水平方向への排水経路となることから、重ね合わせ長の設定にあたっては、以下の点に留意する必要がある。

a) 地盤変形後における排水経路の確保

鉛直ドレーン余長の連結部は、圧密沈下に伴って地盤変形が生じた場合も、排水経路としての連続性が確保されている必要がある。そのため、盛土の施工による地盤の変形量を予測し、これを考慮した重ね合わせ長を設定しなければならない。そこで、様々な地盤条件における載荷盛土に対し、弾粘塑性土/水連成二次元FEM解析を実施し、原地盤の地表面最大沈下量と、地表面2点間(離隔:1m)の相対変位の関係について整理した結果を図-5に示す。図から、最大沈下量と相対変位は比較的良好な相関性を示し、10mの沈下が生じた場合における相対変位は100mm/m程度と推定される。重ね合わせ長は、ドレーンピッチと相対変位の積で求められるため、現状考え得る鉛直ドレーン材の最長ピッチを3mとすれば、重ね合わせ長は30cmで充分であると考えられる。

b) 重ね合わせ部における通水性能の確保

鉛直ドレーン余長の連結部は、隣接するドレーン材同士を重ね合わせて形成するため、ドレーン材面外方向への通水となる。そのため、間隙水を滞りなく盛土外に導出するためには、連結部以外のドレーン部(面内通水)と同等の通水性能(排水性能 $1.0 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{sec}$)を満足できる重ね合わせ面積を確保することが必要となる。そこで、室内試験により重ね合わせ長と通水量の関係を調べた結果、重ね合わせ長が10cm程度以上あれば十分であることが分かった⁴⁾。

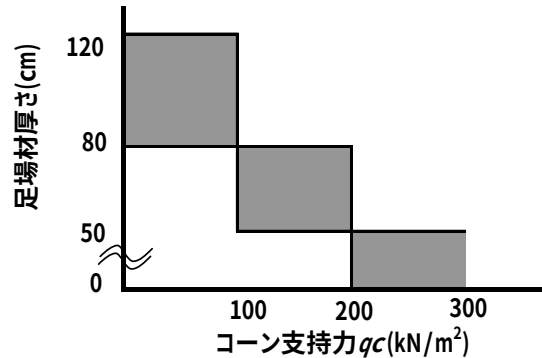


図-3 地盤のコーン支持力と必要足場材の厚さ

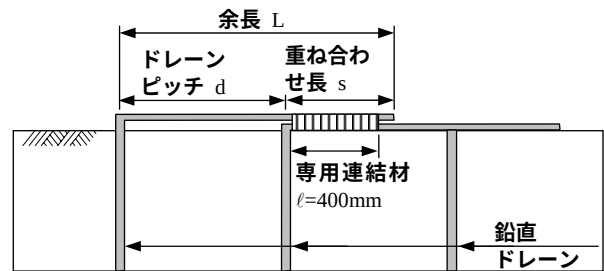


図-4 鉛直ドレーン余長連結部の重ね合わせ長

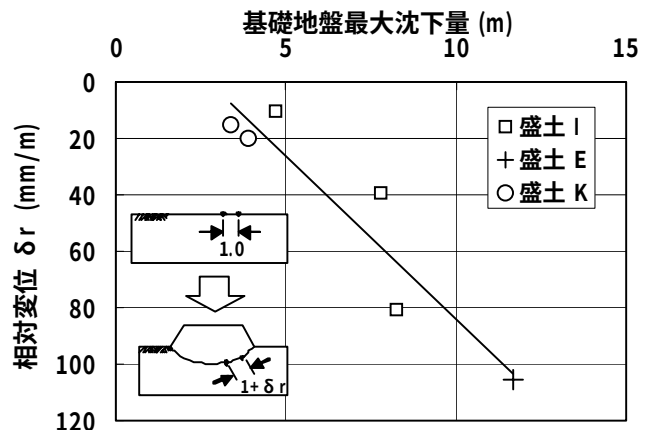


図-5 様々な盛土の最大沈下量～相対変位量関係(解析結果)

c) 施工時の確実性

当工法の施工時において、ドレーン余長部の連結が確実に行え、また、水平ドレーンが直線となるように配置する必要がある。試験施工の状況から、これらの施工時の確実性を確保するため、専用連結材の長さは400mm程度、重ね合わせ長は500mm程度を必要とすることが分かった。

以上のことから、重ね合わせ部の長さを500mm以上とすれば、通常の場合、水平方向の排水経路としての機能を確保できるものと考えられる。なお、地盤が超軟弱な場合など、過大な地盤変形が予想される場合は、別途検討を行うものとする。

(3) 水平(Y)ドレーンの仕様

本工法における水平ドレーンは、鉛直ドレーン余長部を連結して構築する X 方向ドレーン（以下、水平(X)ドレーン）と、X ドレーンと直交する方向に敷設する Y 方向ドレーン（以下、水平(Y)ドレーン）に大別される。基礎地盤の圧密により地表に集水された間隙水を盛土外部に排水する経路としての機能は、主に水平(X)ドレーンが担い、水平(Y)ドレーンは、排水経路を増やす排水補助効果と、地盤の過大な変形によって X 方向ドレーンの接続が外れた場合における排水経路の補完効果を目的として設置するものである。

現状においては、水平(Y)ドレーンの設置間隔に関する明確な基準値を設定することは困難であるが、水平ドレーンの信頼性を高める目的で暫定的に 6m 以下のピッチで配置するものとする⁴⁾。

4. 施工方法

ネットワークドレーン工法の施工フローを図-6に示す。本工法の施工は、基本的に既往のバーチカルドレーン工法の施工方法と同様であるが、以下の2点で異なることとなる。

- ・サンドマット工が不要である（ただし、地盤が軟弱な場合は、トラフィカビリティ確保のための足場材を敷設する）。
- ・水平ドレーン（X方向、Y方向）を敷設する。

水平(X)ドレーンの敷設は、鉛直ドレーン打設工と並行し、隣接するドレーン材の余長部どうしを専用の連結材を介して接続する事で行う。**写真-1**に水平(X)ドレーンの施工手順を示す。また、水平(Y)ドレーンは、鉛直ドレーンの余長部を利用するのではなく、別途、敷設することとなるが、その施工手順は水平(X)ドレーンと同様である。

本工法に用いる施工機械は、既往のパーティカルドレーン工法と同様であるが、ドレーン打設機は湿地型を標準仕様とする。

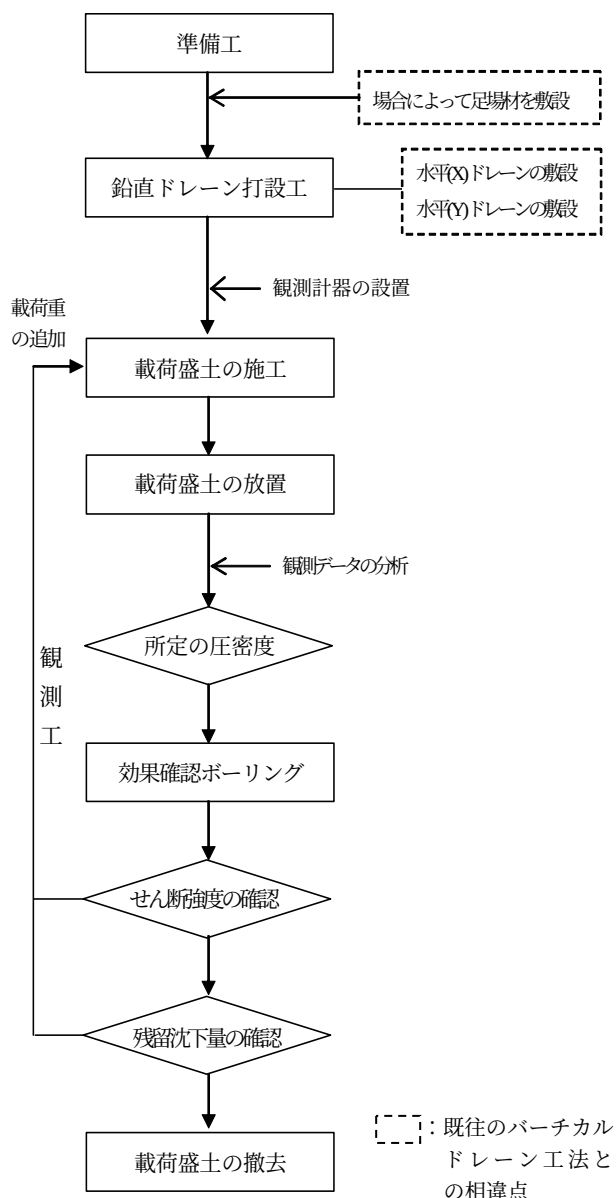


図-6 ネットワークドレーン工法の施工フロー



① 接続しようとする鉛直ドレーンの余長部に連結材を通しておく



② 施工済み水平(X)ドレーンの連結部(材)に隣接する鉛直ドレーンの余長部を差し込む



③ 鉛直ドレーンの余長部が連結材の中に確実に挿入されていることを確認して接続完了

写真-1 水平ドレーンの施工手順

5. 施工事例

(1) 施工概要

ここでは、ネットワークドレーン工法による地盤改良効果を検証するために実施した、現場実証実験について示す。

現場実証実験は、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、片側にはネットワークドレーン工法、もう一方にはバーチカルドレーンとサンドマットを併用した従来工法にて軟弱地盤対策工を行った。実験ヤードの平面図および断面図を図-7に示す。

ネットワークドレーン工法ヤードでは、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ヤードでは、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（PD）を提案工法ヤードと同ピッチ・同配置で打設した。

鉛直ドレーンの打設後にはそれぞれのヤードに高さ3mの盛土を築造し、両ヤードの圧密進行状況を比較することで、効果の検証を行った。写真-2～写真-5に施工時の状況を示す。

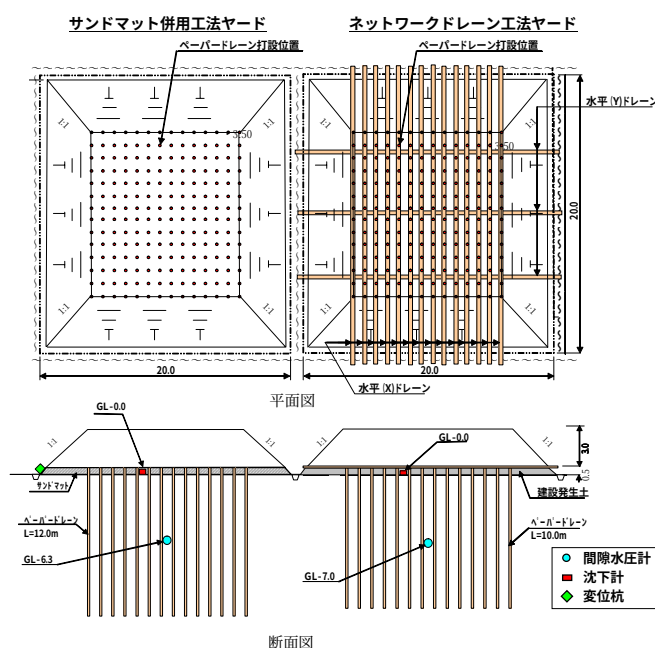


図-7 試験ヤードの平面図および断面図

(2) 施工結果

盛土の築造による地盤内間隙水圧と地表面沈下の経時変化についての計測結果を図-8に示す。図中には二次元土/水連成FEM解析による計算結果を併せて示している。両ヤードにおける過剰間隙水圧の消散傾向、地表面沈下量は概ね同様の挙動と評価でき、ネットワークドレーン工法は、従来工法とほぼ同等の改良効果を有するものと判断できる。

以上の結果から、ドレーン余長部を連結させることにより地上部の排水経路を形成した提案工法は、透水性の高いマット材を用いた場合と同等の圧密促進効果を持つことを確認できた。

6. まとめ

本論文では、ネットワークドレーン工法の設計・施工におけるポイントについて記述した。また、実際の施工とその動態観測を通してこれらの手法の妥当性について検討を行った結果、提案工法は良好な施工性を有し、また、サンドマットを用いた従来工法と同等の地盤改良効果が得られることが確認された。今後は、さらなる施工能率の向上と、サンドドレーンやパックドレーンなどへの適用性について研究を行っていく予定である。

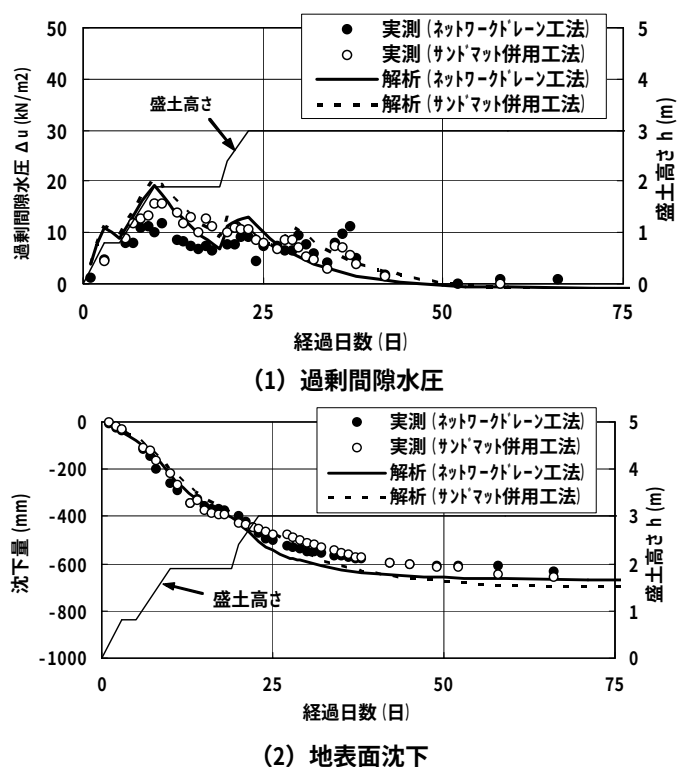


図-8 計測結果の比較



写真-2 施工ヤードの全景
(サンドマット併用法側)



写真-3 施工ヤードの全景
(ネットワークドレーン工法側)



写真-4 サンドマットからの排水状況
(サンドマット併用法側)



写真-5 水平ドレーンからの排水状況
(ネットワークドレーン工法側)

参考文献

- 1) 張祐榮, 武部篤治, 石黒健, 松島仁文, 三村衛: パ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, pp.1207-1208, 2003.
- 2) 武部篤治, 石黒健, 張祐榮, 三村衛, 松島仁文: パ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, pp.1209-1210, 2003.
- 3) 前田和亨, 高橋浩, 石黒健, 三村衛, 張祐榮, 松島仁文, 板垣浩三, 小寺哲朗, 佐藤道祐: パ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工法を用いた現場実証実験, 土木学会第60回年次学術講演会講演論文集, pp.501-502, 2005
- 4) (財) 国土技術研究センター: 建設技術審査証明事業(一般土木工法) 報告書「ネットワークドレーン工法」, 設計編