

効率的な井戸運転を実現する地下水制御システムの開発

Development of Groundwater Control System for Efficient Well Operation

笹岡里衣 中島悠介¹⁾
永谷英基 笹倉剛²⁾

要 約

ディープウェル工法や復水工法の地下水制御工法は、開削工事における地下水に起因した種々の施工トラブルの防止や、ドライアップによる施工性の確保のために重要な技術である。しかし、これらの工法の適用の際には、井戸の配置計画や日頃の運転管理に大きな労力を伴っている。さらに、従来は井戸の配置や揚水流量の配分は担当者の判断に委ねられることが多く、必ずしも適切に設定されているとは言い難い。これらの課題を解決するため、理論に基づいた合理的な井戸設計、および効率的な運転管理が可能となるシステムを開発したので報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. システム概要
- III. 地下水管理簡易検討ツール
- IV. 井戸の最適設置および運転条件設定アシストシステム
- V. 井戸の自動運転制御システム WIC
- VI. おわりに

I. はじめに

ディープウェル工法や復水工法等の地下水制御工法は、開削工事における地下水に起因した施工トラブル（盤ぶくれやボイリング、揚水による工事区域外での地盤沈下、井戸枯れ

など）の防止や、ドライアップによる施工性の確保のために重要な技術である。しかし、これらの工法を適用する際には、①井戸の計算が煩雑であり、適切な井戸の配置を計画するのに多くの労力を要する、②日常的な井戸の運転管理（目標水位を満足するための井戸内水位や流量の設定、目詰まりの監視など）に労力を要する、といった課題がある。さらに、従来は、井戸の配置や揚水流量配分は担当者の判断に委ねられることが多く、必ずしも適切に設定されているとは言い難い。そこで、地下水制御における種々の課題を解決するため、合理的、かつ効率的な井戸運用に向けたシステム（Fig.1）を構築したので報告する。

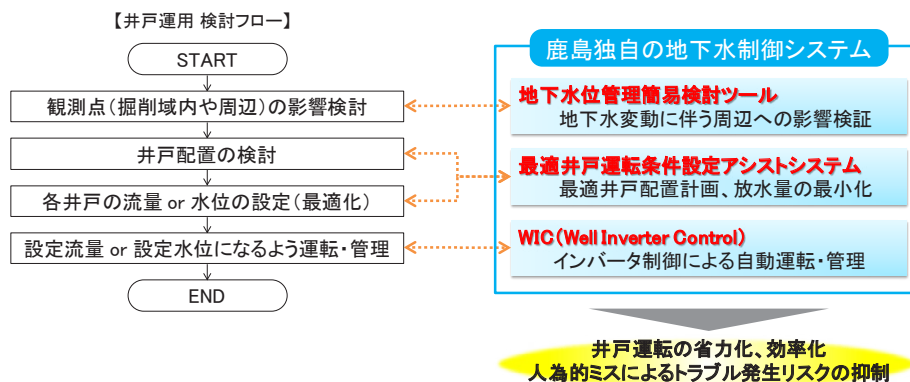


Fig.1 新しく開発した地下水制御システム
(System for Controlling Groundwater)

1) 東京土木支店 Tokyo Civil Engineering Branch
2) 土木管理本部 Civil Engineering Management Division

キーワード：地下水制御，地下水水位低下工法，水位管理，自動制御，ディープウェル工法，リチャージ工法

Keywords：groundwater control, dewatering method, water level control, automatic control, deep well method, recharge well method

II. システム概要

Fig.1 に示す新たに構築した地下水制御システムは井戸の配置～運転～管理の各段階に対応するように3種類のツールで構成される。

- a. 地下水位管理簡易検討ツール：地盤条件や井戸の運転条件等を入力することで設定範囲の水位変動量を演算し、水位変動に伴う周辺への影響を検証するツール
- b. 井戸の最適設置および運転条件設定アシストシステム
- c. WIC (Well Inverter Control)：インバータを用いた井戸の自動運転制御システム

これらのツールを組み合わせることで井戸理論式に基づいた合理的な井戸配置と最適かつ効率的な井戸運転管理が可能となる。

以降では、開発した独自の地下水制御システムを構成する3種類のツールの詳細について、解析や実験、現場での試用によるツール導入効果の検証結果とともに報告する。

III. 地下水位管理簡易検討ツール

1. 概要

地下水位を管理する際、地下水位変動へ影響を及ぼす様々な要因を考慮する必要がある。影響要因には、定常/非定常、被圧/不圧条件といった「地下水条件」、土層構成や透水係数といった「地盤条件」、井戸の配置位置や配置本数といった「井戸条件」などが挙げられる。これらの条件を考慮しながら、合理的な井戸配置を検討する際には、表計算ソフトを用いた簡易検討であっても計算が煩雑となり、井戸の本数が変わるたびに数式を変更し直すなど、検討に多くの労力を要していた。そこで、地盤条件、井戸条件等の簡易な入力だけで水位低下量が評価でき、井戸配置計画業務の効率化を図ることが可能なツールを開発した。

2. 当ツールの特徴

(1) 操作性

当ツールをコンピュータ上で起動すると、入力の手順が示

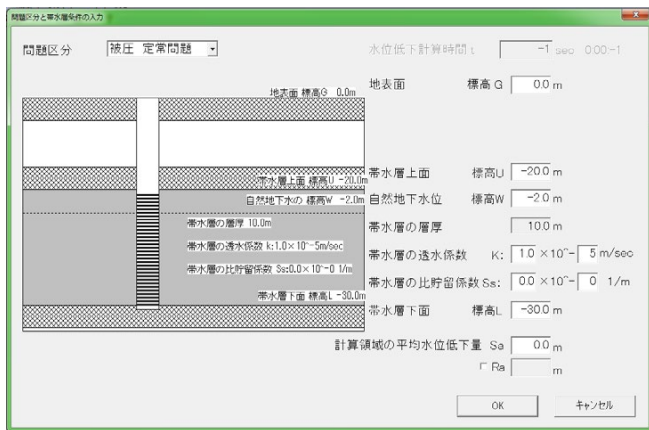


Fig.2 計算条件入力画面
(Screen for Inputting Calculation Condition)

され、ユーザーは手順に沿って各種条件を入力するだけで検討を進めることが可能である。また、Fig.2のように、各入力画面は条件設計図とともに視覚的に表示されるため、直感的かつスムーズに入力することが可能である。

(2) 演算プログラム

対象地盤の被圧/不圧の定常条件のほか、被圧の非定常計算で時間ごとの水位低下量を求めることが可能である。また、それぞれの井戸について個々に運転条件を入力することで、工事進捗に応じた水位低下検討を容易に行うことが可能となる。入力条件によっては、井戸内水位が井戸の下端よりも低い状態のように井戸が成立しないことがあり得る。このような場合には、「NG」の判定が画面上に表示され、計算条件の見直しが促される。

(3) アウトプットの可視化機能

全ての井戸計算が入力条件を満たすと、Fig.3のように水位低下量のコンター図と、任意断面の水位分布が表示され、必要な水位低下量を満足しているか、容易に確認することができる。また、計算結果は CSV ファイルに出力することが可能であり、ほかのグラフソフトなどを用いて整理・分析することもできる。

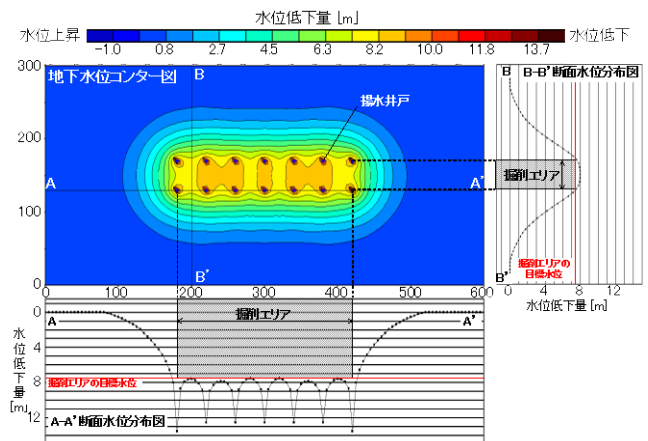


Fig.3 計算結果の出力
(Output of Calculation Result)

3. 当ツールによる効果

複雑な現場条件での地下水挙動を迅速かつ容易に把握できるため、効率的な地下水位管理が可能となる。また、理論上成立しない井戸条件を除外することで地下水管理におけるトラブルを未然に防止できる。

IV. 井戸の最適設置および運転条件設定アシストシステム

1. 概要

複数の揚水井（以下、DW）が設置される群井の場合、掘削範囲全域が目標の水位になるよう観測井の水位を確認しながら各井戸の揚水流量を決定する。しかし、従来は各井戸

に対する揚水流量配分は担当者の判断に委ねられることが多く、必ずしも最適に設定されているとは言い難い。これに対し、下水放流量の低減や周辺の地下水環境への影響抑制の観点から、実務上は限界揚水流量やDW内水位などの制約条件下で必要水位低下量を満足しつつ、合計の揚水量を最小化とすることが望まれる。これらの課題に対応するため、最適な揚水流量配分を算定し、井戸の設置、および運転条件の決定を支援するツールを開発した。

2. 揚水井の最適運転条件の決定フロー

当ツールを活用したDWの最適運転条件の決定フローをFig.4に示す。はじめに、単井からの揚水流量と各観測点（観測井）の水位低下量の関係を線形関数で表現する。この関係は揚水試験、もしくは3次元浸透流解析などにより求められる。次に、各観測点の目標水位および揚水流量やDW内水位などの制約条件（上限値、あるいは下限値）を設定し、線形計画法（例えば、シンプレックス法）を用いて関係式を解く。これにより、目標水位を満足する各DWの最適な揚水流量配分が算出される。

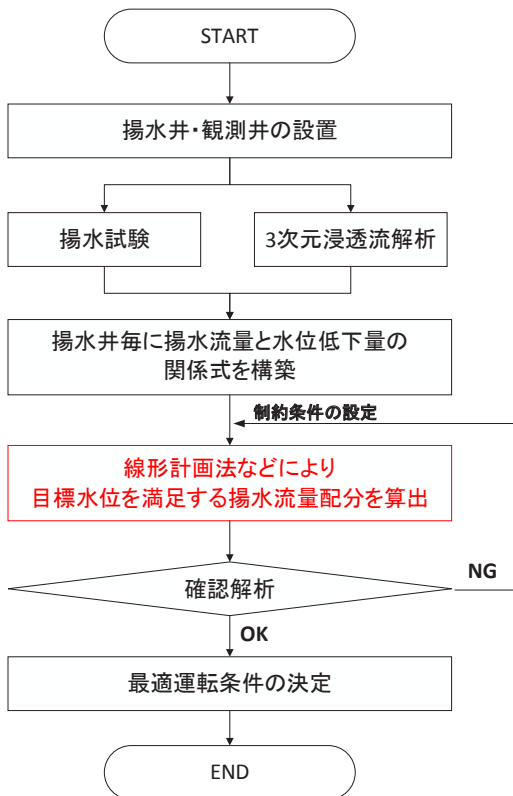


Fig.4 最適運転条件決定フロー (Flow to Determine Optimum Operating Condition)

3. 検証解析

当ツールにより算出される揚水流量設定の妥当性については3次元浸透流解析を行い、必要な水位低下量が確保され

ていることを確認した。

(1) 検証解析の概要

本検証に用いた解析モデルをFig.5に示す。本検証では、盤ぶくれ対策として被圧帯水層（透水係数=3.5×10⁻³cm/s）を対象に井戸（揚水井11本、観測井13本）の設置を想定した。当ツールを用いて、観測井の本数がFig.5の全数（13本）とその約半数（7本）の2ケース（それぞれCase A, Case Bとする）に対し揚水流量配分を算出し、揚水開始から30日後の水位低下量について両ケースの算出結果を比較した。Case A, Case Bともに各観測点における目標水位低下量Δs（低下量を正とする）は地点によって区画割を行い、Δs=8.3, 9.2, 9.4mのいずれかとした。なお、関係式を解く際の制約条件はCase A, Case Bともに限界揚水流量を200L/min, DW内の水位低下量を15.0mまでと設定した（Table 1）。

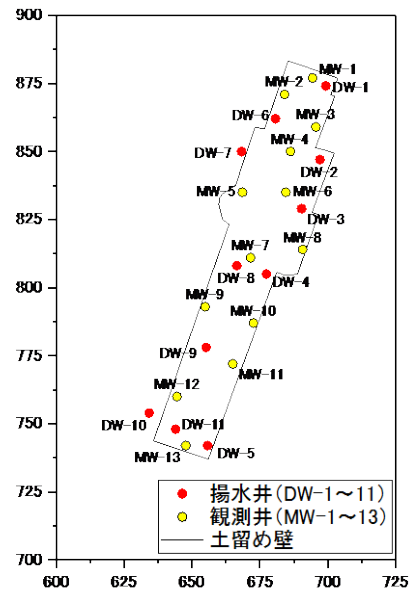


Fig.5 解析モデル (Analysis Model)

Table 1 制約条件 (Constraint Condition)

	Case A	Case B
観測井本数	13本	7本
限界揚水流量	200 L/min	
最大水位低下量	15.0 m	

(2) 算出結果

当ツールにより求めた揚水流量配分をTable 2に示す。両者を比較するとCase Bが約20L/min多い。Fig.6には、Table 2の揚水流量に対応した水位低下量のコンター図（揚水開始から30日後）を示す。両Caseともに、各観測点における水位低下量は目標値を達成しているが、土留め壁内部の一部に、

Table 2 揚水流量の計算結果
(Result of Flow Rate with the Calculation Tool)

揚水井 (観測井本数)	揚水流量 (L/min)	
	Case A (13本)	Case B (7本)
限界揚水流量	200.0	200.0
DW-1	71.6	156.2
DW-2	27.8	4.0
DW-3	200.0	200.0
DW-4	200.0	200.0
DW-5	200.0	200.0
DW-6	200.0	141.2
DW-7	200.0	200.0
DW-8	200.0	200.0
DW-9	200.0	200.0
DW-10	200.0	200.0
DW-11	122.2	139.8
合計	1821.6	1841.2

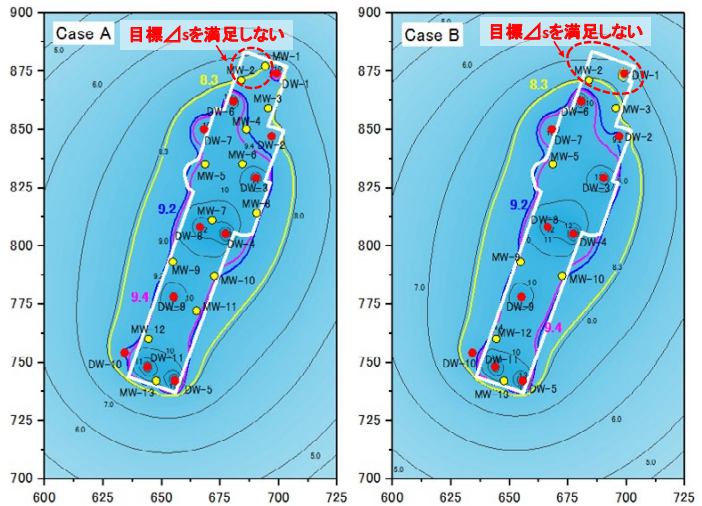


Fig.6 水位低下量のコンター図
(Contour Plot of Decrease of Water Level)

水位低下量が目標値を満足しない領域(破線)が発生している。この領域は Case B のほうがより広域であるが、観測井本数が Case A の約半数のためと考えられる。しかし、実務において、井戸運転に要する手間やコストを考慮すると、合計の揚水流量の差が僅かであることから、観測井本数が約半数の Case B のほうが合理的と判断できる。限られた井戸運用条件で、安定した水位低下量を保持するためには、ここで例示したような事前に水位が低下しにくい領域(例えば、Fig.6の破線部)を適切に把握し観測井を設置したうえで、日々の運転管理において水位低下量を確認しながら揚水流量を微調整することが重要と考えられる。

4. 当ツールによる効果

限界揚水流量や DW 内水位などの制約条件下で必要水位低下量を満足しつつ、合計の揚水量を最小化とすることが可

能となる。また、合理的な井戸配置が可能となり、DW の最適な運転管理が可能になる。

V. 井戸の自動運転制御システム WIC

1. 概要

地下水位低下工法では、周辺地盤への影響防止と排水処理費用を減らすために揚水量の削減が望まれる。そこで、インバータで電力を連続的に供給し、地下水位に適するように各井戸のポンプを細やかに管理する自動制御技術 WIC (Well Inverter Control) を開発した。

WIC は水位センサーとコンピュータ、インバータ制御盤で構成され、井戸の稼働状態を施工条件や地下水位の状況に応じてポンプを自動制御するものである。安定した水位管理には、注水井(以下、RW)の運転能力の安定性が重要である。

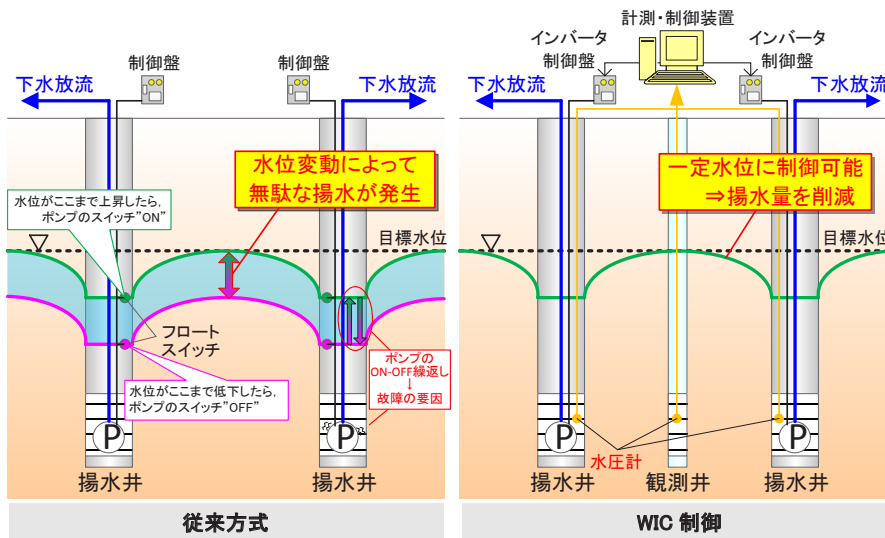


Fig.7 WIC と従来工法の比較
(Comparing between WIC and Previous Method)

そこで、下水放流するにも関わらず RW 内水位が上昇し続けるような目詰まりの予兆が現れると、RW 内ポンプが自動的に逆洗浄する機能を付加した。

2. 従来工法との比較

従来、井戸内水位や揚・注水流量は井戸内のポンプのオン／オフを繰り返すフロート方式により制御されてきた。従来方式（フロート方式）と WIC の比較を Fig.7 に示す。なお、Fig.7 では簡単のために DW（揚水井）のみに限定する。WIC は井戸周辺の地下水位の変動に対応して、自動的な揚・注水流量の増減による井戸内水位を制御することで、安定的に地下水位を維持できる。その結果、周辺地下水への影響を最小限に抑え、効率的かつ経済的な井戸管理が可能になる。また、インバータでポンプを細やかに制御することで、井戸内水位の変動幅が小さくなる。

3. WIC 操作

制御管理は井戸ごとに配置された流量計およびインバータ制御盤に対して、井戸内水位制御画面とリアルタイム水位分布監視画面から構成されたパソコン上の画面で視覚的に井戸運転が操作できるようになっている。

4. 検証試験

WIC による井戸内水位や流量の制御可否を確認するため、Fig.8 に示す装置を用いて検証試験を行った。なお、ここでの水位変化は、初期水位を基準とし、水位上昇を正、水位低下を負と表記する。

(1) 井戸内水位制御試験

DW, RW のそれぞれに目標水位（DW：-0.5m, RW：+0.20m）を設定し、許容誤差内（目標水位±2.0cm）で水位を一定に保持できることを確認した。Fig.9 に井戸内水位変化（DW：青実線, RW：赤実線）と流量（揚水流量：緑実線, 注水流量：桃実線）の時刻歴を示す。DW, RW とともに、水位は目標水位（DW：青破線, RW：赤破線）に到達後にいったん超過するが、その後、DW および RW 内ポンプをインバータにより自動運転制御することで、実験開始から7分以降に目標値をほぼ維持することを確認した。

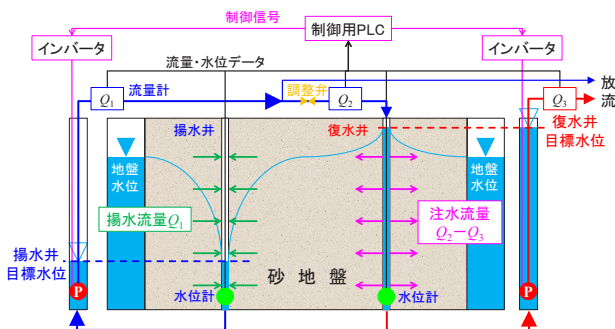


Fig.8 WIC 性能確認試験模式図
(Test to Confirm Performance of WIC)

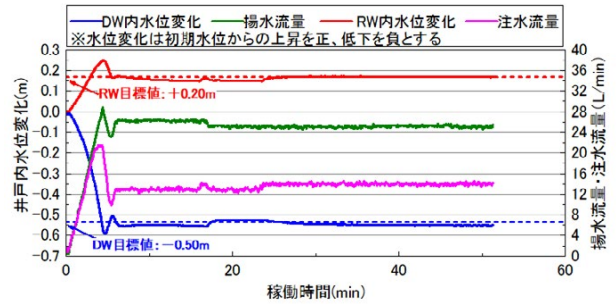


Fig.9 水位制御試験結果
(Test Result on Controlling Water Level)

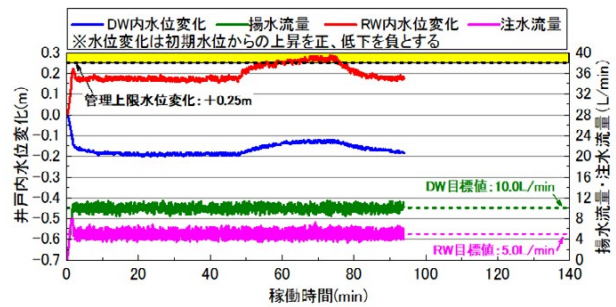


Fig.10 目詰まり発生検知試験結果
(Test Result on Clogging Detection and Issuing Alarm)

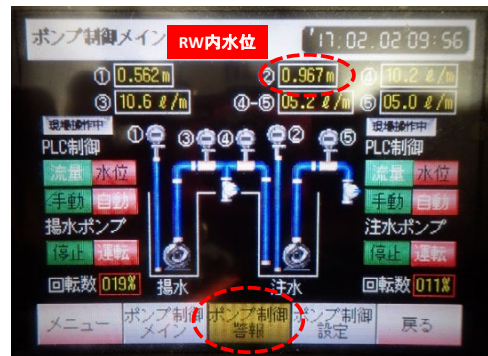


Photo 1 警報発令状況
(Screen on Issuing an Alarm)

(2) RW の目詰まり発生検知試験

RW で目詰まりが発生し、管理上限水位を超過した場合に、目詰まりを示す警報が操作盤上に表示されることを確認した。Fig.10 に井戸内水位変化と流量の時刻歴を示す。RW 内の管理上限水位変化=+0.25m(RW 内水位=0.95m)として、実験開始49分後からRW 内へ目詰まりを発生させたところ、55~76分に管理上限水位変化を超過した。その結果、操作盤上に警報が発令されることを確認した。警報発令画面を Photo 1 に示す。

5. 当ツールによる効果

井戸内水位や流量を一定に保持することができ、従来の管理手法と比べ、安定した水位管理が可能となる。なお、東京都内における開削工事に適応したところ、揚水量が従来のフ

ロート式と比べて30~40%削減した。さらに、目詰まりの予兆を検知すると、RW内ポンプが自動的に逆洗浄する機能も加えたことで、従来のRWのメンテナンス労力を大幅に軽減することが可能となった。このように、インバータによる自動運転制御の細やかな水位管理により動水勾配の急激な変化を抑制することが可能となり、目詰まり防止や井戸の長寿命化にも有効と期待できる。

VI. おわりに

掘削作業を伴う工事では、工事区域外の地下水変動やそれに伴う周辺への影響を考慮しつつ、工事区域内の地盤の安定を図ることが重要である。しかしながら、地下水は日々変動し続けるために、従来行われてきた地下水制御手法では多大な労力を要しながらも、効果的であったとは言い難い。これらに対し、本報で報告した新たな地下水制御システムは井戸理論式に基づく手法であり、個人差のない合理的な地下水制御を可能とする。さらに、当システムは井戸の設計・運転・管理のすべての段階において省力化、自動化を可能とすることから、建設業の喫緊の課題である、仕事の効率化や生産性向上の一端を担うことが期待できる。今後は、実務への展開を図るとともに、さらなる機能の拡充を目指す所存である。

謝 辞

当システムの開発にあたり、共同開発者であるアサノ大成基礎エンジニアリング(株)松岡氏、近畿基礎工事(株)性田氏、その他関係各位に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 島田哲博ほか；ディープウェル工法自動制御(WIC)システムの適用実績，土木学会第65回年次学術講演会，VI-461，2010.9.
- 2) 島田哲博ほか；ディープウェル工法自動制御(WIC)システムの概要，土木学会第65回年次学術講演会，VI-462，2010.9.
- 3) 小川司ほか；高精度地下水位制御技術による大規模開削工事，土木学会建設技術発表会概要集，2011.11，pp.68-75.
- 4) 笹岡里衣ほか；インバータシステムによる復水井戸の自動運転制御，土木学会第72回年次学術講演会，VI-708，2017.9.
- 5) 永谷英基ほか；ディープウェルの自動制御運転(WIC)の事例，基礎工，2018.6，pp.47-51.
- 6) 笹岡里衣ほか；井戸の最適設置および運転条件設定アシストシステムの開発，土木学会第73回年次学術講演会，VI-635，2018.9.

Development of Groundwater Control System for Efficient Well Operation

Rie Sasaoka, Yusuke Nakajima¹⁾, Hideki Nagatani and Takeshi Sasakura²⁾

The deep well method and recharge method are techniques for controlling groundwater, and are important for preventing various troubles caused by groundwater with the open-cut method or to secure workability by drying. However, using these methods to design and operate wells requires much effort. In addition, the methods are often left to the judgement of the manager, so conditions may not be optimal and troubles can occur. In order to solve various problems in controlling groundwater, we developed a system that enables efficient well operation.