

ICTを活用した地下水管理技術

山田 祐樹 森尾 義彦 山本 彰
古屋 弘 沼崎 孝義 吉本 和哲
(東京機械工場)

Groundwater Management Technology Using ICT

Yuki Yamada Yoshihiko Morio Akira Yamamoto
Hiroshi Furuya Takayoshi Numazaki Kazuaki Yoshimoto

Abstract

In urban areas, there has been a tendency for open cuts at a large scale and with a large depth in recent years. This has increased construction costs, such as the increased number of wells, and drainage costs. In order to minimize such construction costs, there is increasing demand for construction information from observational data during the construction step. This paper presents a measurement system based on a wireless network and a pumping /irrigation PID control system that was developed to reduce labor and increase field operation efficiency. A verification experiment was performed. The newly developed groundwater management system was found to be effective at reducing labor in terms of field management and increasing efficiency.

概要

都市部における地下掘削工事の大規模化、大深度化に伴い、ディープウェル等を用いた地下水対策による揚水量は増加する傾向にあり、井戸本数の増加や排水コストの増加など施工コストの増大につながっている。一方、これらの施工コストをできるだけ削減するために、観測データや施工ステップに応じた揚水や注水制御による情報化施工が求められるようになってきている。本報では、現場作業の省力化・効率化を目的として開発を行った無線ネットワークによる計測システムならびにPID制御を用いた揚水・注水制御システムについて述べるとともに、その有効性を確認するために実施した検証実験結果について述べる。検証実験の結果、新たに開発した計測および制御システムは地下水管理に有効であり、現場管理の省力化、効率化が可能であることが確認できた。

1. はじめに

近年、都市部では構造物の大規模化、大深度化に加え、過去に低下した地下水の回復¹⁾などにより、地下水対策の重要性は年々増している。高い地下水位を掘削の深さに応じて大きく、そして掘削面積に応じて広く低下させる必要があり、井戸本数や排水コストの増加の要因となっている。また、道路や鉄道などの線状構造物を構築するための開削工事では地下水低下に伴う周辺地盤への影響の評価とその対策が求められるようになってきている。

一方、地下水対策工による排水コストの削減や揚水による周辺への影響を抑制するためには、観測データや施工ステップ、現場条件に応じたきめ細かな情報化施工による地下水管理が必要となる。しかし、現場人員の不足などの理由から人力により効率的な地下水管理を継続することは難しいのが現状である。そこで、現場管理の省力化が図れ、かつ、汎用性のある地下水の計測および制御システムの開発を行った。

本報では、まず、地下水管理技術の概要について述べ、その後、新たに開発を行った1) 無線ネットワークを用い

た計測システム、2) 真空を併用した揚水制御システムならびに3) リチャージウェルの注水・洗浄制御システムについてその概要と各システムに対する検証実験結果について述べる。

2. 地下水管理技術の概要

情報化施工とは、設計と施工のギャップを埋め、施工の合理性を追求することにより、経済的で安全な施工を行うことを目的としたものである。この情報化施工は地下水管理においても重要であり、調査や施工中の計測データから得られる情報をもとに、現状解析・逆解析を行い、当初の情報の不確実性を徐々に減少させ、結果的に合理的な施工を行うことが可能となる。

さらに、近年では高性能な計測装置や高機能なセンサーの利用と、ネットワークの活用、さらにそれらを利用した施工管理システム、いわゆるICT (Information and Communication Technology) を活用した施工技術が建設工事に適用されるようになってきている²⁾。

建設工事における地下水対策の模式図をFig. 1に示す。

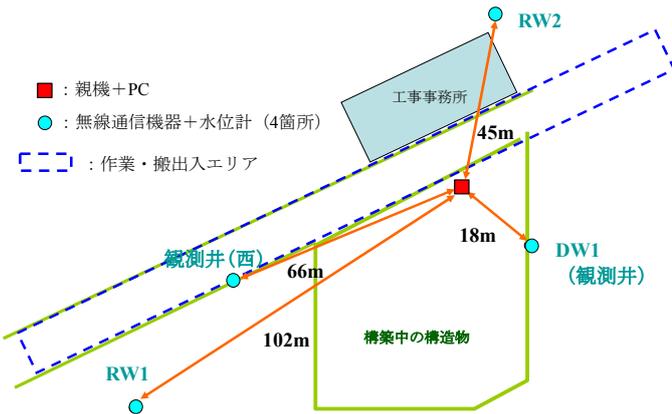


Fig. 3 計測機器の配置模式図
Arrangement of Measurement Apparatus

地下水の観測井は、工事区域外に設置されていることもあり、必ずしも電源の供給が十分でない場合が考えられる。開発したワイヤレスアンプはスリープ機能を有しており、電池による長期間の計測も可能となっている。

3.2 検証実験

3.2.1 実験概要 前述の無線ネットワークを用いた計測システムの工事現場における適用性を検討するために、実現場において検証実験を行った。Fig. 3に計測機器の配置模式図を示す。現場の敷地内に設置されたリチャージウエル2箇所、観測井2箇所の計4箇所に無線通信機器および水位計を設置し、約4ヶ月間、地下水位の観測を行った。なお、計測データは、サーバーを介し、Webにより工事事務所外からの閲覧を可能にした。

3.2.2 実験結果 計測機器の設置状況例をPhoto 2に示す。無線通信機器を収納したボックスは軽量であり、また、水位計のセンサーケーブルも短くてすむため、運搬、設置が非常に容易であった。Photo 3にリアルタイムの計測画面の例を、Photo 4に水位の経時変化図の例を示す。約4ヶ月間の計測期間を通して、安定して計測データを得ることができた。特に親機とリチャージウエルの間は作業・搬出入エリアがあり、車両の往来等が常にあったため、当初は通信障害によるデータ欠損が心配されたが、データの欠損もほとんどなく、継続的にデータ計測ができることが確認できた。そして、データ欠損が生じた場合においても通信機器にメモリ機能を持たせることにより、対応可能であることがわかった。本実験により新たに開発した無線ネットワークを用いた計測システムは、時々刻々と状況が変化する建設現場においても有効であり、適用可能であることがわかった。

4. 真空を併用した揚水制御システム

4.1 システム概要

一般に井戸内水位を制御する方法として電極等を用いた揚水ポンプのON・OFF制御があげられる。真空を併用したバキュームディープウェルにより揚水を行う場合、



Photo 2 計測ボックスの設置状況
Installation of a Measurement Box

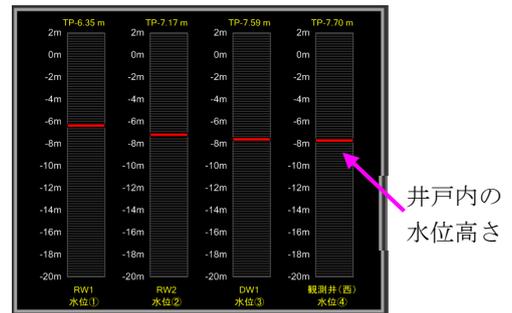


Photo 3 リアルタイム計測画面の例
Example of a Real-Time Measurement Screen

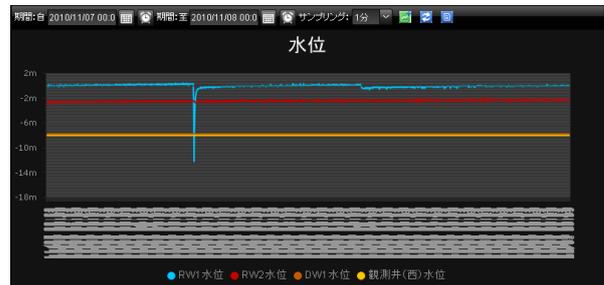


Photo 4 計測水位の経時変化画面の例
Example of Time History of Water Level

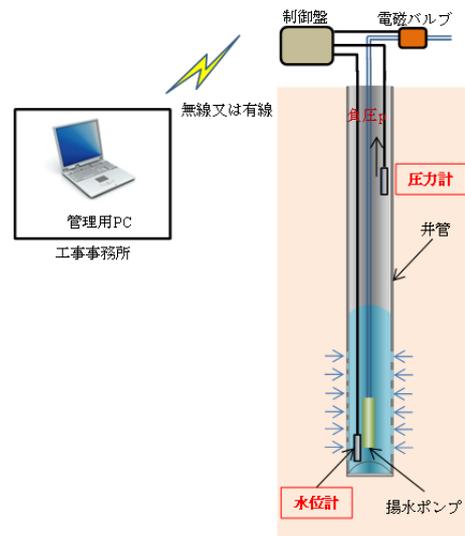


Fig. 4 揚水制御技術の概要
Outline of Pumping Control Technology

重力式揚水に比較して揚水量が増加するため、ON・OFFの繰り返しが頻繁になりポンプの故障等につながりやすい。また、電極間隔を大きくすると、井戸内の水位変動が大きくなるため真空による効果が安定的に得られにくくなる等の問題がある。そのため、真空併用時に井戸内水位を一定に保つことが可能な揚水制御方法について検討を行った。

揚水制御技術の概要をFig. 4に示す。揚水制御は、真空圧を計測する圧力計、大気圧補正機能を有する水位計、揚水流量の調整を行う電磁バルブ、制御を行うシーケンサーならびに管理用PCで構成される。既往の実験³⁾において、真空圧による補正を行うことにより真空併用時の井戸内の実水位を把握できることを確認している。揚水制御は、計測された真空圧と水位計の値をもとに井戸内の水位を算出し、この井戸内水位が設定値となるように電磁バルブにより流量調整を行う方法とした。電磁バルブの制御にはPID制御を用いた。PID制御とは、上記計算値と設定値の偏差に比例した出力を出す比例動作 (Proportional : 比例) と、その偏差の積分に比例する出力を出す積分動作 (Integral : 積分) と、偏差の微分に比例した出力を出す微分動作 (Differential : 微分) の三つの組み合わせにより制御を行う方式である。

4.2 実験概要

4.2.1 実験土槽および模型地盤 揚水試験を実施するために幅8.3m、高さ2.35m、奥行き2.1mの土槽を用いた。

実験土槽の模式図をFig. 5に示す。土槽端部には中詰め砂との間を有孔板で仕切り注水部を設置した。なお、注水部は水位一定境界となるように給水設備を設けている。模型地盤の作製には7号珪砂 (最大粒径 $D_{max}=0.425\text{mm}$ 、平均粒径 $D_{50}=0.155\text{mm}$) を用いた。地盤は空中落下法により作成し、高さ2.2mまで充填を行った。地盤作製直後の乾燥密度は 1.479g/cm^3 であった。なお、模型地盤の作製後地表面には $t=1\text{mm}$ の塩化ビニールシートによって被覆し、気密性を保てる構造とした。

模型地盤には $\phi 400\text{mm}$ の真空併用可能なディープウェルおよび $\phi 50\text{mm}$ の観測井を4本設置した。ディープウェルならびに各観測井には圧力計および水位計を設置した。

4.2.2 実験方法 実験は同一の井戸を用いて重力式排水の場合 (真空なし) および真空を併用した場合 (真空あり) において、井戸内水位を一定とした揚水制御が可能かどうかの検討を行った。実験はまず真空なしの状態です3時間の連続揚水を行い、その後引き続き、真空圧を作用させ、真空ありの状態です5時間の連続揚水を行った。なお、実験中は真空の有無に関わらず揚水井内の水位を $\text{GL}-0.9\text{m}$ となるように水位制御を行った。

4.3 実験結果

Fig. 6に揚水井内の圧力の経時変化を示す。圧力の経時変化より、180分経過後から、揚水井内に真空圧が作用し

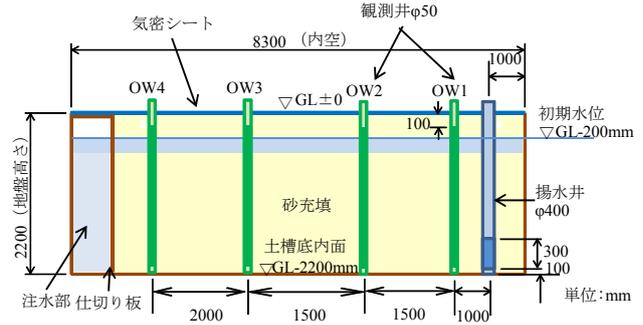


Fig. 5 実験模型の模式図
Experiment Model

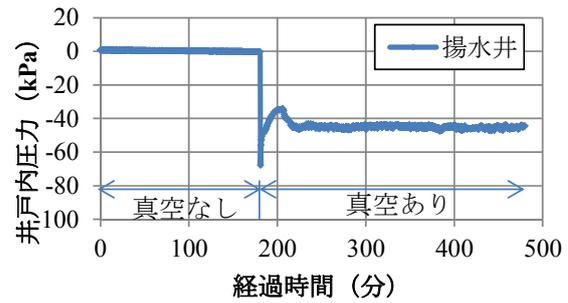


Fig. 6 揚水井内の圧力の経時変化
Time History of Pressure in a Deep Well

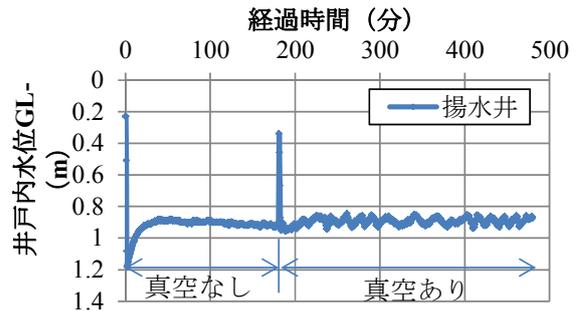


Fig. 7 真空圧補正後の揚水井内水位の経時変化
Time History of the Deep Well inside Water Level After Compensation

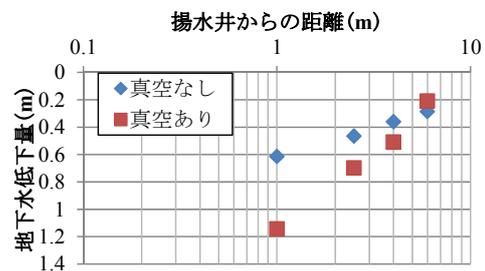


Fig. 8 各観測井における水位低下量の比較
Comparison of the Water Level of Observation Wells

ているのがわかる。揚水井内に作用している真空圧は平均で45kPa程度であった。Fig. 7に真空圧による補正を行った後の揚水井内水位の経時変化を示す。揚水開始直後ならびに真空圧を作用させた時点 (180分経過後) において井戸内水位が大きく低下あるいは上昇しているものの、

その後、時間の経過とともに設定水位となるGL-0.9m付近に収束しているのがわかる。この結果から真空併用時にも井戸内水位を一定にコントロールできることが確認できた。

Fig. 8は各観測井における水位低下量を示している。真空の有無による水位低下量の違いについても差が得られており、真空を併用した水位制御により真空効果が得られることも確認できた。

5. リチャージウェルの注水・洗浄制御システム

5.1 システム概要

リチャージウェルの大きな課題として、長期的な注水による目詰まりが挙げられる。目詰まりを回避する方法としては、井戸の能力に応じた注水量の制御と井戸の洗浄が考えられる。Fig. 9にリチャージウェルの注水・洗浄制御システムの構成例を示す。注水・洗浄制御システムは、注水流量をコントロールする流量計、電磁バルブと制御盤、井戸内水位をリアルタイムに計測するための水位計および井戸洗浄のための洗浄ポンプ、そして管理用PCで構成される。通常注水時には、井戸能力に応じた注水流量となるように電磁バルブにより注水量のコントロールを行う。電磁バルブのコントロールは前述の揚水制御システムと同様にPID制御により行っている。井戸洗浄は、リチャージウェル内に設置した洗浄ポンプを稼働させ、リチャージウェルから揚水を行うことにより洗浄を行う。なお、井戸内に設けた水位計を用いて、水位の上昇に合わせて井戸洗浄を行うことも可能である。

5.2 検証実験

5.2.1 実験概要 リチャージウェルの注水・洗浄制御システムの適用性を検証するために、実際のリチャージウェルを用いて注水実験を行った。ディープウェルおよびリチャージウェルの配置模式図をFig. 10に示す。4本のディープウェルで揚水された地下水をタンクに集水し、注水ポンプを介して2本のリチャージウェルに注水可能なシステムとしている。なお、注水・洗浄制御はリチャージウェル毎に行っている。また、集水タンクから注水するためのポンプは、オーバーフローによる場外排水が生じないように間欠運転を行った。

5.2.2 実験結果 リチャージウェル内の水位、注水流量ならびに電磁バルブの開度の経時変化の例をFig. 11に示す。

リチャージウェル内の水位に着目すると、注水に伴い井戸内水位が徐々に上昇している様子がわかる。注水流量の経時変化に着目すると、注水ポンプの運転が始まると、注水量が徐々に増加し、それぞれのリチャージウェルの設定注水流量でほぼ一定値を示しているのがわかる。一方、電磁バルブの開度に着目すると、ポンプ停止時には開度100%の状態であった電磁バルブは注水量の増加に伴い徐々にバルブ開度を調整し、設定流量となるよう

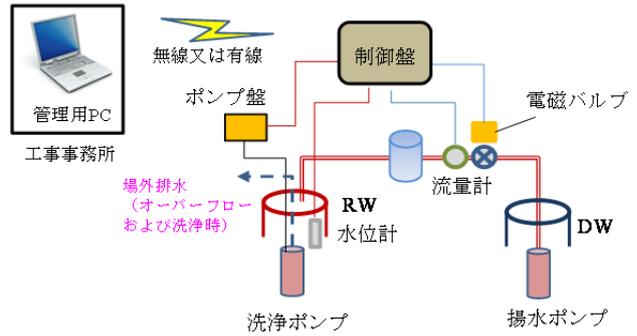


Fig. 9 リチャージウェルの注水・洗浄システムの構成例

Configuration Example of Irrigation and Cleaning System of Recharge Well

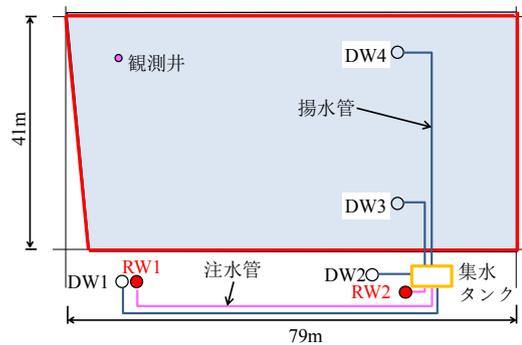


Fig. 10 井戸配置の模式図 Well Arrangement

に注水制御が行われていることがわかる。図中の2時間経過後からは、洗浄ポンプによる洗浄が、リチャージウェル2、リチャージウェル1の順に順次行われている様子がわかる。なお、洗浄時間は、リチャージウェル毎に設定することが可能であり、リチャージウェルの状態に応じて変更することも可能である。

洗浄完了後のリチャージウェル内の水位に着目すると、洗浄後には井戸内水位が大きく低下しているのがわかる。注水量の制御と洗浄を行うことにより、井戸内水位の継続的な上昇を抑制し、長期間にわたって注水が継続できるようになるものと考えられる。本実験の結果よりリチャージウェルの注水・洗浄制御システムの有効性を確認することができた。

6. おわりに

新たに開発したICTを活用した地下水管理技術の概要について述べるとともに、現場実験あるいは大型模型実験による効果の検証結果を示した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 無線ネットワークによる計測システムを用いた現場検証実験により、計測機器の設置、移動が容易であることが確認できるとともに、日々状況が変

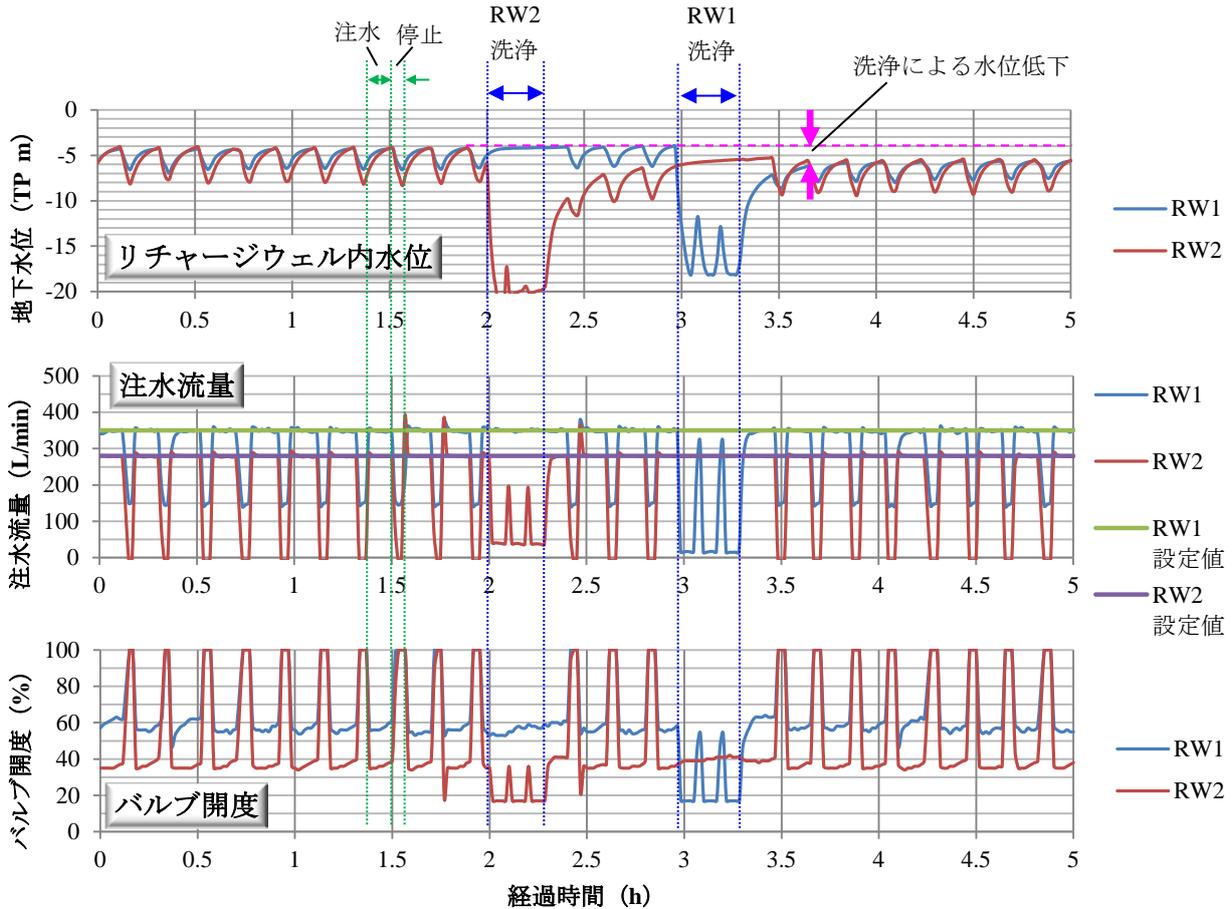


Fig. 11 各計測データの経時変化
Time History of Measurement Data

化する建設現場においても無線による計測システムが有効であることがわかった。

- 2) PID制御による揚水制御システムを用いることにより、真空併用時にも井戸内水位を一定にコントロールすることが可能であるとともに、真空による揚水能力増大効果も問題なく得られることがわかった。
- 3) リチャージウェルの注水・洗浄制御システムを用いて、注水量の制御と洗浄を行うことにより、リチャージウェルの継続的な井戸内水位の上昇を抑制し、長期間にわたって注水が継続できることがわかった。
- 4) 新たに開発したICTを用いたこれらの技術を組み合わせ、活用することにより、現場管理の省力化、効率化が図れるものとする。

なお、今回開発した無線ネットワークによる計測システムならびに電磁バルブの制御技術は、汎用性の高い技術であり、地下水管理以外の分野にも十分適用可能な技術である。今後、現場施工時の省力化のみならず維持管理等の分野への適用拡大を図っていきたいと考える。

参考文献

- 1) 土質工学会：根切り工事と地下水-調査・設計から施工まで、1991.1
- 2) 古屋，他：地下掘削工事におけるICTの現状と課題，基礎工，vol.40，No3，pp.30～34，2012.3
- 3) 山田，他：ハイパーディープウェル工法の開発，大林組技術研究所報，No77，2013.12