

小口径揚水井の現場揚水試験

柳 博文*1・栗栖 基彰*1・中村 征史*2

概 要

鉄道工事における線間や都市部の狭隘地等，あるいは透水性の悪い地盤に揚水井を設置する場合，ディープウェルなどの大口径揚水井は，施工設備が大掛かりとなり，大口径の割には揚水効率が悪くなることがある。また，一般的なウェルポイント工法では，揚水できる深さに限界があり，深い地層からの揚水ができないのが現状である。そこで，筆者らはディープウェルのような大口径でなく，かつウェルポイントより深い地層から揚水できる小口径揚水井を開発し，揚水井の小口径化，井戸内にポンプを設置しない揚水機構，それによるメンテナンスの軽減を図ることができた。今回開発した小口径揚水井の現場揚水試験を行ったので，その結果を報告する。

キーワード：揚水井，ディープウェル，小口径，揚水試験，地下水位低下，ウェルポイント

A PUMPING TEST AT THE SITE OF A SMALL DIAMETER PUMPING WELL

Hirofumi YANAGI *1, Motoaki KURISU *1

Seishi NAKAMURA *2

Abstract

When constructing a deep pumping well at a confined location between railways, in cramped space in an urban area, or in ground with bad permeability, we frequently see cases where for construction of a large diameter pumping well, the project needs to be developed on a large scale, and efficient pumping is not possible in spite of use of a large diameter of well. Generally, the well point method involves limits in the pumping depth, and currently, is not able to pump water from a deep formation. To solve this problem, the author et al. developed a pumping well that has a smaller diameter than deep wells, and is capable of pumping from a formation located deeper than the well point. With this development, we could make it possible to provide a smaller diameter well and operate a pumping mechanism without providing a pump in the well to reduce maintenance. With this paper, we report the results of an on-site pumping test that was conducted at the site of the small diameter well.

Keywords: Pumping well, Deep well, Small diameter, Pumping test, Lowering of the groundwater level, Well point

*1 Manager, Engineering Department, Civil Engineering Division

*2 Civil Engineering Department, Civil Engineering Division

小口径揚水井の現場揚水試験

柳 博文*1・栗栖 基彰*2・中村 征史*3

1. はじめに

地下構造物建設工事において、地下水の湧出を的確に抑制することは大切である。近年、東京都、大阪府等では 1960 年代からの揚水規制に伴い、被圧地下水位が上昇傾向にあり、根切り工事を行うために、山留め工法と地下水位低下工法を併用する工事も必要不可欠である。その場合、地盤・地下水環境、あるいは周辺地域へ影響を及ぼすことがある。また、環境問題に関する社会の関心も高まっており、当該工事の安全確保だけでなく、施工中あるいは竣工後の周辺地域の地盤・地下水環境を保全する対策が重要になってくる。対策を怠れば、浸透水圧等の影響によってクイックサンドやパイピング、あるいは盤膨れなどの問題が生じ、地表面の陥没など、重大な事故に結びつく可能性もある。したがって、以下のような課題を踏まえながら、施工方法を考える必要がある。

- ・工事周辺地域において、周辺環境への影響を低減する。
- ・根切り工事の安全性・作業性確保。
- ・予算と工期、あるいは施工条件が限られた中で、有効な地下水対策の選別。

しかしながら、上記項目のすべての要求に対して完全に対応することは非常に難しく、社会条件、工事規模、コスト制約等の諸条件が、施工環境をさらに困難にしているのが現状である。

筆者らは、これまで主に都市部の地下水位低下工法に着目し、開発をおこなってきた¹⁾。地下水の湧出を抑える方法としては、地盤改良に代表される止水工法やディープウェルなどによる地下水位低下工法がある。しかし前者におい

ては、薬液注入時に地表面が浮き上がり、交通機関の運行などを阻害する場合や施工精度のばらつきにより、改良地盤から出水する場合がある。また後者においても、掘削地盤の有効応力増加によりせん断強度は増すが、周辺環境において井戸枯れや地盤沈下といった悪影響が懸念される。このような地下構造物建設工事における安全性および地下水環境保全に対する対策はきわめて重要となるが、その解決策として、筆者らはリチャージ工法の復水効率の向上を目的として小口径注水井を用いた循環型地下水制御工法（通称、エコリチャージ）を開発した^{2),3)}。これにより、注水井の小口径化、簡易化、本数低減およびリチャージ効率を向上させ、周辺地域の井戸涸れ、地盤沈下など周辺地域の環境にも対応できるようになった。

しかしながら、一方で鉄道工事における線間や都市部の狭隘地等で揚水井を設置する場合、ディープウェルなどの大口径揚水井は施工に大掛かりな設備が必要となり、また、透水性の悪い地盤になると、大口径の割には揚水の効率も悪くなる。また、井戸径の小さいウェルポイント工法では、揚水できる深さに限界があり、深い地層からの揚水ができないのが現状である。

そこで今回、筆者らは揚水井に着目し、ディープウェルのような大口径でなく、かつウェルポイントより深い地層から揚水できる小口径揚水井を開発した⁴⁾。これにより、揚水井の小口径化、深井戸からの揚水、そして施工設備、メンテナンスの軽減を図ることができた。今回、開発した小口径揚水井の現場揚水試験を行ったので、その結果を報告する。

*1 土木本部 エンジニアリング部 基礎・構造研究開発グループ グループリーダー

*2 土木本部 エンジニアリング部 地下構造技術グループ グループリーダー

*3 土木本部 土木部

2. 小口径揚水井の揚水機構概要

一般に、ディープウェル工法は、負圧は作用せずに集水して地下水を排出するが、小口径揚水井は、図-1、図-2に示すように、ジェット流体を利用したベンチュリ効果（流体の流れを絞ることによって、流速を増加させ、圧力の低い部分を発生させる現象）を作り出すエジェクターを揚水機構に採り入れ、井戸の小口径化や地下水の吸い込みに対してバキューム効果を図って揚水する。これにより、狭隘地での施工ならびにウェルポイント工法で揚水できない深度での強制排水を可能とする。

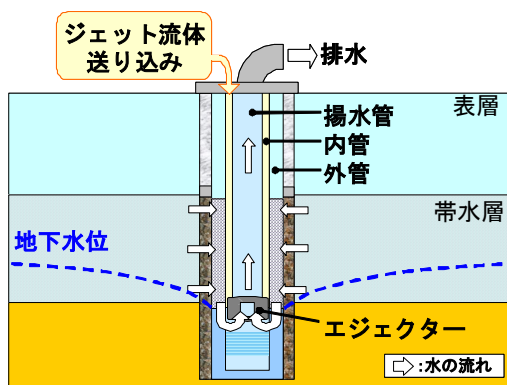


図-1 小口径揚水井の概要

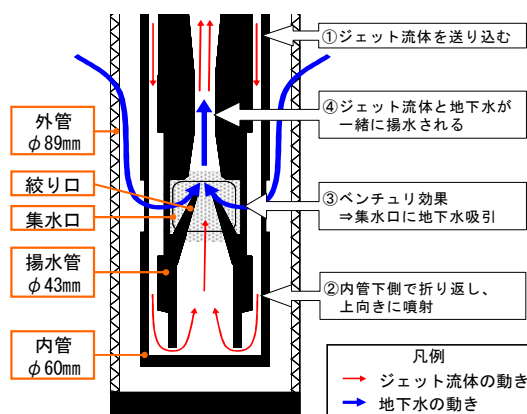


図-2 揚水機構概要（エジェクター部）

さらに、従来のディープウェルのように井戸内に設置した水中モーターポンプで揚水するのではなく、地上に設置した送水ポンプにより流体（空気・水）を送り込むことで揚水するので、

ポンプなどの設備のメンテナンスの軽減、トラブルの減少になる。

この工法の主な特徴を以下に示す。

- (1) 井戸内にポンプを設置する必要がなく井戸径を小さくできる。
- (2) 一般的なウェルポイント工法で揚水できない深度からの揚水が可能となる。
- (3) 井戸内に可動部を持たないため、駆動系のトラブルリスクが減り、メンテナンスが軽減できる。
- (4) 井戸の掘削径が小さく、線路内などの狭隘地や空頭制限があるところでも施工が可能となる。
- (5) 外部から真空ポンプを接続することで、さらに揚水量を増加させることが可能である。

3. 現場揚水試験

3.1 試験概要

図-3に、当該現場の地層図と小口径揚水井の概要図を示す。当該地盤は、2.1m厚のローム層の下に2.9m厚の粘性土層、7.1m厚の砂礫層、そしてその下部に砂層が位置しており、この砂層の透水係数は $k=3.0 \times 10^{-4}$ m/sであった。小口径揚水井（井戸外管径φ89mm）の採水口はこの砂層に設置した。

それぞれの試験は、表-1に示す項目を把握することを目的として、図-4に示すフローで行った。計測はすべて自動計測とし、下記の項目を計測した。

- ① 揚水井内水位降下量：揚水井内に水位計を設置
- ② 地下水位：周辺の観測井に水位計を設置（3測点）
- ③ 揚水量：排水吐出口で流量計により測定

3.2 予備揚水試験

予備揚水試験は小口径揚水井の集水能力の概略を把握するために行った。最初の揚水になるので、土粒子の流入が無いように徐々にバルブを開き、おおよその揚水量を測定することで、その集水能力を計測した。

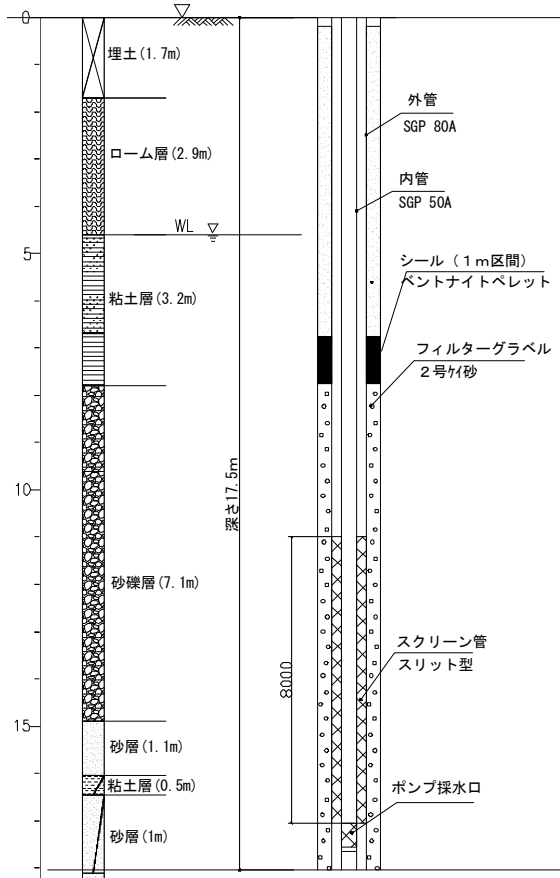


図-3 地層図と小口径揚水井の概要

表-1 試験目的

試験項目	目的
予備揚水試験	集水能力の概略把握
段階揚水試験	限界揚水量, 適正揚水量の算定
定量揚水試験	周辺の地下水位より, 透水性能 (透水量係数, 貯留係数) の把握

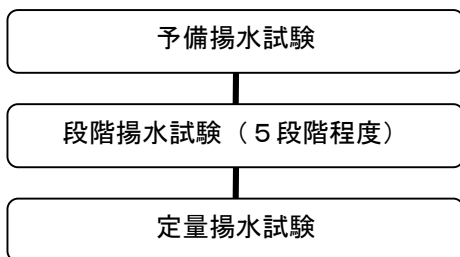


図-4 揚水試験フロー

3.3 段階揚水試験

段階揚水試験は, 定量揚水試験時の適正揚水量を求めるために行った。図-5に示すように, 揚水井における予備揚水試験で把握した概略の集水能力を5ステップに分けて, 揚水量と揚水井内水位低下量の関係を計測した。1段階にかける時間に関しては, 定常状態に達する(およそ水位低下が収束し落ち着いた状態)までとした。

測定後, 図-6に示すように, 揚水量と孔内水位低下量の測定値を両対数グラフ用紙にプロットし, 段階試験図を作成した。これより限界揚水量を求め, その約80%を適正揚水量とした。なお, ここでの「限界」とは揚水井の能力ではなく, 滞水層において揚水井に向かう地下水の流れが層流から乱流に移行する境界を示し, 土粒子を移動させることなく揚水できる限界を意味する。

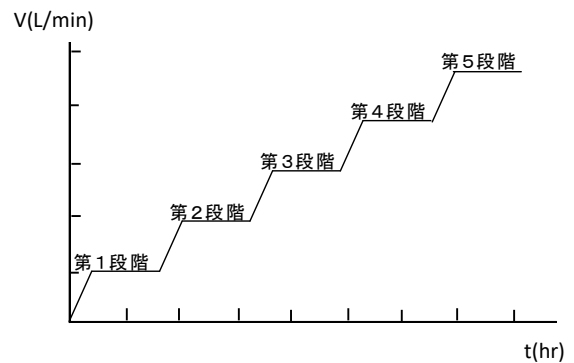


図-5 揚水試験フロー

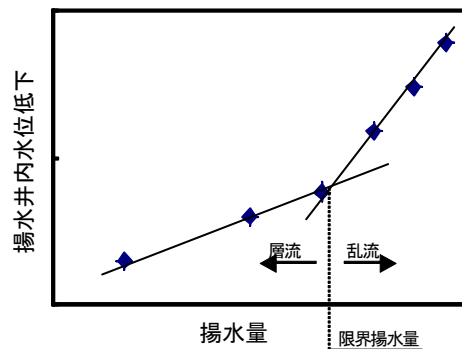


図-6 段階試験図例

3. 4 定量揚水試験

先の段階揚水試験結果により決定した適正揚水量で連続揚水し、時間の経過に伴う周辺の観測井の水位低下状況を計測した。ここで、得られた試験結果から、地盤の透水性能を示す透水量係数 T と貯留係数 S の2つのパラメータを算出することとした。ここでは、式(1)のタイスの式を用いた。

$$s = H - h = \frac{2.30Q}{4\pi T} \log_{10} \left(\frac{2.25Tt}{Sr^2} \right) \quad (1)$$

s : 井戸から r だけ離れた位置の水位低下量

H : 自然水位

h : 井戸から r だけ離れた位置の水位

Q : 揚水量

r : 揚水井からの離れ距離

T : 透水量係数

t : 継続揚水時間

S : 貯留係数

算出方法としては、任意の透水量係数・貯留係数を与えて、理論上の地下水位低下値を求め、実際のデータと比較して、最も近似した曲線を与える透水量係数・貯留係数を地盤の透水性能とするパラメータフィッティングの手法で算出した。また、定量揚水試験後に 20m 以上の高揚程での揚水が可能かを確認するため、地上から 4m 上方に配管を延長して揚水し、そのときの揚水量を測定した。

4. 揚水試験結果

4. 1 予備揚水試験

水タイプエジェクターを用いた小口径揚水井において、送水圧 0.5MPa のとき最大で約 50L/min を揚水することができた。小口径揚水井からおおよそ 6m 離れた DW-2 の観測井で約 13cm の水位低下を確認した。

4. 2 段階揚水試験

送水圧 0.2MPa~1.0MPa で段階的に揚水を行った。このときの揚水量と送水圧の関係を図-7 に示す。ほぼ送水圧に比例して揚水量も増加した。送水圧を 1MPa まで上げて、約

110L/min を揚水した。しかしながら、限界揚水量を表すような明確な折れ点は見られず、送水圧にほぼ比例して揚水量は増加していった。当該地域の地盤の透水性能が非常に良く、地下水が豊富なため、明確な限界点が得られなかったものと推察される。

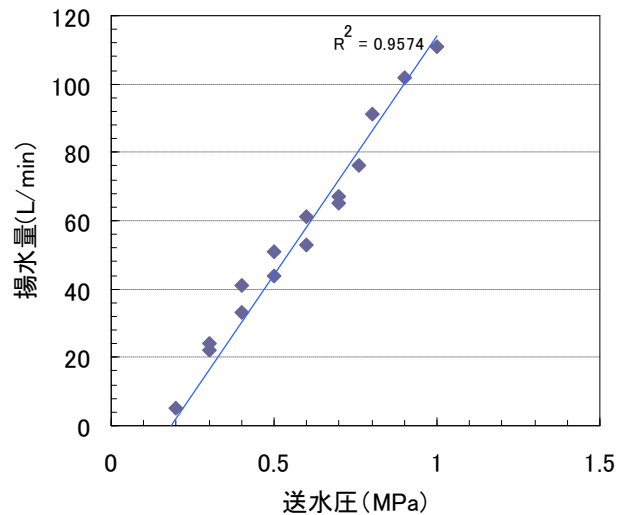


図-7 揚水量と送水圧の関係

次に、負圧をかけたときの揚水量の変化について試験を行った。負圧は、自然地下水位が GL-6.0 m であるので、それに相当する 0.06MPa として、送水圧を 0.3MPa~0.7MPa の範囲で行った。その結果を図-8 に示す。負圧を与えることで、約 10% 程度の揚水量の増加となった。

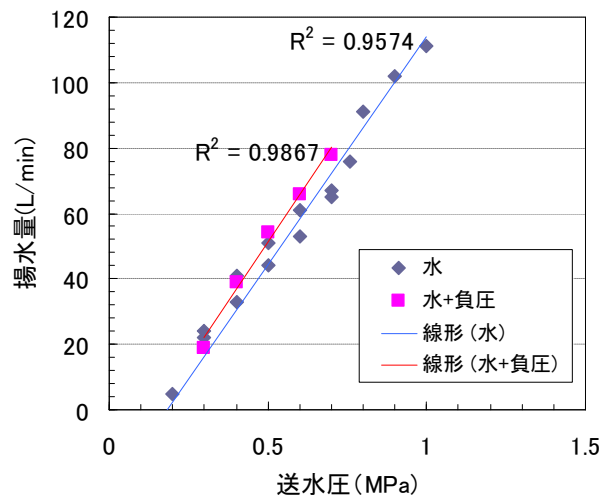


図-8 揚水量と送水圧の関係

4. 3 定量揚水試験

今回行った揚水試験結果から、地盤の透水性（透水量係数、貯留係数）を算出した。その結果、下記の値を得た。

透水量係数 $0.14\text{m}^2/\text{min}$

透水係数 $3.0 \times 10^{-2}\text{cm}/\text{sec}$

貯留係数 0.000307

図-9に揚水量 $24\text{L}/\text{min}$ 、送水圧 0.3MPa での小口径揚水井からの離れによる地下水位低下を示す。横軸は0の位置を小口径揚水井とし、そこからの離隔を示している。上記の算出した透水性能を使って地下水位低下量を計算して、実測値とともにプロットした。透水性能が良く、揚水開始から2.5時間後でも、小口径揚水井から10m程度離れたところで10cm前後の低下しか得られなかったが、概ね計算値は地下水位低下量を再現している。

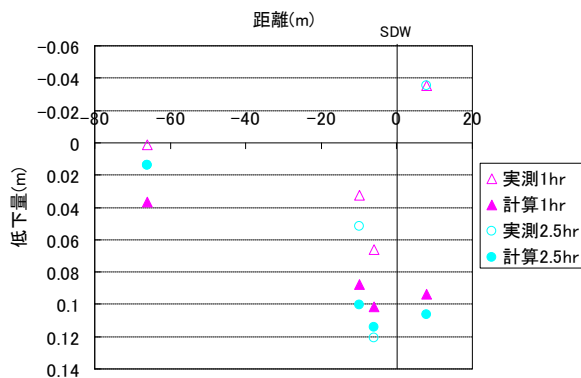


図-9 小口径揚水井を中心とした地下水位低下量

定量揚水試験後、地表面下 17.5m のエジェクターの位置から地上 4m の高さまでの計 21.5m の揚水を行った。送水圧 0.4MPa 、揚水量 $33\text{L}/\text{min}$ となり、段階揚水試験時の $41\text{L}/\text{min}(0.4\text{MPa})$ より若干低下した。しかしながら、深さ 20m 以上からの揚水が可能であることを確認することができた。

5. まとめ

今回、実現場で小口径揚水井の現場揚水試験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 最大 1MPa の送水圧をかけることで、約 $100\text{L}/\text{min}$ の揚水をすることができた。
- (2) 送水圧と揚水量の関係は比例関係にあり、送水圧を大きくすればさらに揚水量は増加すると考えられる。
- (3) 自然地下水位までの深さ 6m に相当する 0.06MPa の負圧をかけることで、揚水量は 10% 程度増加した。
- (4) 揚水高さ 21.5m までの揚水を確認した。

今後は、この小口径揚水井を多くの現場に適応して実績を積み、さらには地下水位低下工法として、エコリチャージ工法などを組み合わせ、様々な条件を考慮しながら効率的に地下水位を低下させる方法を提案したいと考えている。

参考文献

- 1) 小泉秀之・桑原清・柳博文：効率的なりチャージウエルの開発－高圧注水試験－，土木学会第60回年次学術講演会 6-210, pp.419-420, 平成17年9月
- 2) 香月一仁・桑原清・柳博文・中井寛：循環型地下水制御工法（エコリチャージ）における高圧注水試験，土木学会第61回年次学術講演会 6-232, pp.463-464, 平成18年9月
- 3) 桑原清・小泉秀之：復水効率を向上させた新しいリチャージ工法の開発，トンネルと地下，第37巻，10月号，pp.771-778, 2006
- 4) 高橋保裕・桑原清・小池敏雄；小口径で経済的な揚水工法の開発，土木学会第67回年次学術講演会 6-374, pp.747-748, 平成24年9月