

ハイパーディープウェル工法[®]の開発

山田 祐樹 森尾 義彦 山本 彰
西川 直仁 藤井 治彦 桐山 久
(本社エンジニアリング本部) (本社エンジニアリング本部) (東邦ガス株式会社)

Development of New Groundwater Lowering Method termed “Hyper Deep Well[®]”

Yuki Yamada Yoshihiko Morio Akira Yamamoto
Naohito Nishikawa Haruhiko Fujii Hisashi Kiriyaama

Abstract

In the application of open-cut methods in urban areas in recent years, a tendency toward formation of large-depth excavations is seen, and a groundwater lowering method is indispensable in excavation work. To reduce the heaving of an artesian head, it is necessary to build numerous deep wells in the construction area. In this case, groundwater lowering may have a large influence on construction, and hence, there is an increasing demand for an efficient groundwater lowering method. This paper presents an outline of our newly developed method termed the hyper deep well method that is aimed at improving the pumping capability of a well. The results of a verification experiments performed using a model and an on-site pumping test are described. It is found through these verification experiments that the pumping efficiency improves greatly by using the newly developed hyper deep well method. Further, it is clarified that the developed method is about 1.8 -times more effective than the conventional groundwater lowering method.

概 要

都市部における開削トンネルや建築の地下掘削工事では、近年、大規模・大深度化する傾向がみられ、掘削工事に際しては、地下水対策工が必須となっている。盤ぶくれ対策では、高い被圧地下水位を大きく低下させなければならない場合、掘削敷地内に数多くの揚水井を設置する必要があるなど、地下掘削工事の施工性に大きな影響を与えかねず、効率的な地下水対策が要求されるようになってきている。本報では、井戸の揚水能力の向上を目的として新たに開発した真空圧を併用したハイパーディープウェル工法の概要について述べるとともに、室内模型実験ならびに現場揚水試験による効果の検証結果について述べる。現場揚水試験の結果、新たに開発したハイパーディープウェル工法により揚水能力は大きく向上し、従来工法と比較して地下水低下量が最大で約1.8倍増加することがわかった。

1. はじめに

近年、土木、建築を問わず都市部における開削工事は、大規模・大深度化する傾向にあり、施工に際しては掘削時の地盤の安定やドライワーク用としての地下水対策が必須となっている。

地下水対策工において一般に用いられるディープウェル工法では、帯水層の厚さや影響半径、透水係数など地盤の水理定数をもとに必要な水位低下量に応じて井戸の配置が検討される。

一方、建物の構造や仮設備、施工方法などにより、井戸が設置可能な箇所は制限されることが多い。また、施工性やコストを考慮すると、極力井戸本数を削減したいのが現場の要望である。しかし、透水性の低い地盤や帯水層厚さが薄い地盤、掘削深度が深く必要地下水低下量が大きい場合には、所定の水位低下量を確保するために井戸の設置本数を多くせざるをえない。このため、地下掘削工事の工程や施工性に大きな影響を与えているの

が現状である。そこで、効率的な揚水により、井戸本数の削減が可能な真空を併用した揚水工法（以下、ハイパーディープウェル工法[®]と呼ぶ）の開発を行った。

本報では、ハイパーディープウェル工法の概要について述べるとともに、室内ならびに実現場において実施した揚水試験の結果に基づき、本工法による揚水能力の改善効果について述べる。

2. ハイパーディープウェル工法の概要

一般的な地下水対策工法¹⁾としては、重力式揚水のディープウェル工法、真空を併用したバキュームディープウェル工法、ウェルポイント工法などがある。揚水能力を向上させる方法としては揚水井戸内を真空にするバキュームディープウェル工法がある。揚水能力を向上させることにより、井戸の本数の削減やスクリーン長を短くできるなどの利点があるが、既存の方法では、空気の侵入により井戸内の真空度が低下し、その効果が継続的に

得られにくいなどの問題がある。そこで、井戸内の構造を改良し、揚水井戸内の水位を一定に保持することにより真空圧を安定的に作用させることが可能な構造を開発した。

ハイパーディープウェル工法の概念図をFig. 1に、井戸の構造をFig. 2に示す。ハイパーディープウェル工法は、一般的な重力式のディープウェル工法の設備に加え、主に井戸内に設置する内管、密閉可能な井戸蓋および真空設備で構成されている。揚水井戸内に内管を設置することにより、井戸内に集水された地下水が内管を越流して揚水ポンプ部に流れ込み、その地下水が揚水ポンプにより揚水される。内管を設けることにより、真空圧が作用する井戸内の水位は常に内管上端の高さとなるため、井戸内の真空圧を一定に保ちやすい構造となっている。

本工法の特徴を以下に示す。

- ・ 井戸内の水位を一定に保つことにより、真空圧を安定的に作用させることが可能となり、揚水能力の改善が図れる。
- ・ 新設だけでなく既存の重力式揚水井に追加で設置することが可能である。

3. 室内模型実験による井戸の構造の検証

3.1 実験概要

3.1.1 実験模型 ハイパーディープウェルの構造の有効性の検証ならびに真空時の井戸内の水位の変化を把握することを目的として室内模型実験を実施した。実験時の状況をPhoto 1に示す。

実験模型の模式図をFig. 3に示す。実験には実際の揚水井と同程度となるφ300mm、スクリーン長300mmの井戸の模型を製作し、用いた。井戸内にφ200mmの内管を設置し、内管内にφ141mmの揚水ポンプの設置を行った。井戸の模型は一部アクリル製とし、井戸内の水位変化を目視により確認できる構造とした。また、井戸の周りには厚さ100mmのフィルター層（珪砂および不織布）を設けて、水の流入しやすさを調整できるようにした。

3.2.2 実験ケース 実験のケースと条件をTable 1に示す。実験は井戸の周りのフィルター層の有無により井戸内への水の流入のし易さを変化させ、2ケース実施した。

ハイパーディープウェルでは、管内に真空圧を作用させるため、管内水位は真空圧を考慮して算出し、管理する必要がある。このため、ケース1は真空圧による井戸内の水位変化と井戸内に設置したセンサーによる計測値を比較し、実際の井戸内水位の評価方法を確認することを目的として実施した。ケース2では、井戸の周りにフィルター層を設置することにより、井戸内への水の流入を抑制することで、ハイパーディープウェルの構造の妥当性を検証することを目的として行った。

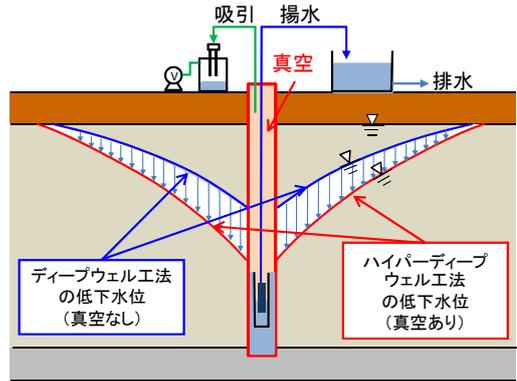


Fig. 1 ハイパーディープウェル工法の概念図
Concept of Hyper Deep Well Method

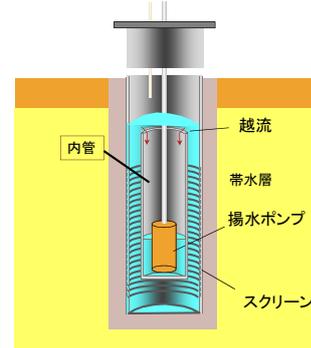


Fig. 2 ハイパーディープウェル工法の構造
Structure of a Hyper Deep Well



Photo 1 模型実験の状況
Demonstration of Model Experiment of Hyper Deep Well Method

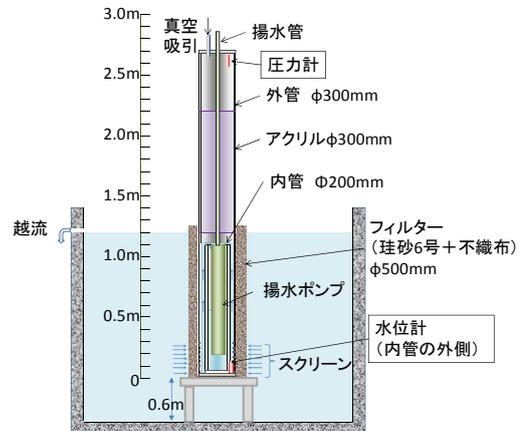


Fig. 3 実験模型の模式図
Schematic View of Model Experiment

3.2.3 実験方法 実験は幅3m, 奥行き3m, 深さ1.8mのピット内に水を貯水し, その中に模型井戸を設置して行った。ピット内の水位は越流部を設け, 揚水した水を循環させるとともに, 別途注水を行うことにより常に一定となるように調整を行った。各ケースの実験方法を以下に示す。

(1) ケース1 最初に大気圧状態で揚水を開始し, 15分経過毎に管内の空気圧を2kPaずつ低下させる。この間, 揚水ポンプのバルブは全開とし, 揚水を行った。また, 管内の空気圧と水位計による計測ならびに目視による井戸内水位の計測を行った。管内空気圧を-14kPa (1.4m相当) まで低下させた時点で試験を終了した (Fig. 4参照)。

(2) ケース2 揚水開始とともに管内の空気圧を-10kPaまで低下させる。この時, 井戸内の水位が越流部より高くなるように揚水量の調整を行った。その後, 15分経過毎に管内空気圧を10kPaずつ低下させ, 揚水ポンプの最大揚水量あるいは真空圧が最大となるまで試験を実施した (Fig. 7参照)。

センサー配置をFig. 3に示す。実験では, 井戸内の水位, 空気圧に加え, 揚水量の計測を行った。なお, 水位計は大気圧補正機能を有するものを用いた。

3.2 実験結果

3.2.1 ケース1の実験結果 Fig. 4にケース1の水位計および圧力計の経時変化を示す。また, Fig. 5に揚水量の経時変化を示す。大気圧状態で揚水を行った試験開始後の15分間では, 内管外側に設置した水位計の計測値が0.1m程度低下している。これは揚水により井戸内の水位が低下し, 内管上端を越流しているためである。また, その時の揚水量は約400リットル/minであった。

次に, 試験開始後15分以降では, 真空圧を作用させることにより管内の空気圧が徐々に減圧している。また, 揚水量は, 減圧直後から一定値を示している。これは減圧により増加した集水量に対して, ポンプの能力が不足したためである。一方, 内管の外側に設置した水位計に着目すると, 2kPaの減圧直後に計測値に若干の変化がみられるものの, その後の計測値はほぼ一定値となっている。Photo 2は計測時の井戸内の水位の状況を, Fig. 6はアクリル部からの目視により実際の井戸内の水位を計測した結果を示している。図中には内管外の水位計の計測値ならびに管内空気圧で補正した水位を併せて示している。実際の井戸内の水位 (目視) は, 管内の減圧に伴いほぼ線形的に上昇している。それに対し, 圧力補正を行った計測値もほぼ同様の傾向を示していることがわかる。このことから水位計で得られた計測値は, 減圧分が井戸内の水位の上昇によりキャンセルされた値となっており, 圧力補正により井戸内の水位を把握できることが確認できた。

3.2.2 ケース2の実験結果 ケース2では, 井戸の周りにフィルター層を設置したため, 井戸内を減圧する前の

Table 1 各ケースの実験条件
Experiment Condition

実験ケース	ケース1	ケース2
スクリーン長	0.3m	0.1m
フィルター材	なし	珪砂6号+不織布

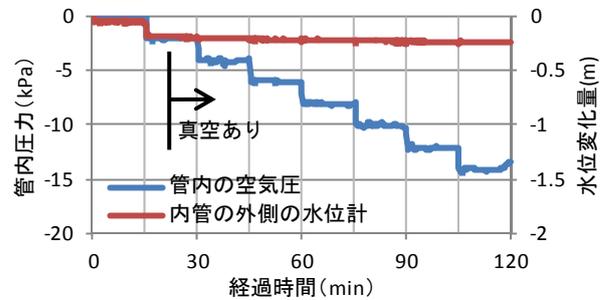


Fig. 4 水位計および管内圧力計の経時変化 ケース1
Time Histories of Water Gauges and a Pressure Gauge Case1

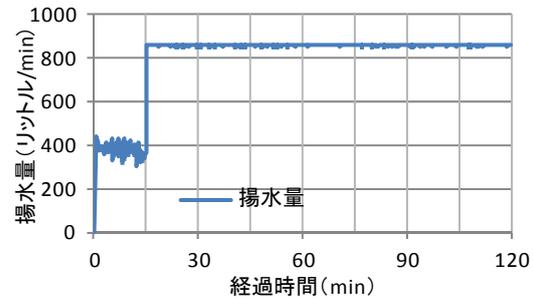


Fig. 5 揚水量の経時変化 ケース1
Time Histories of Flow Instrument Case1

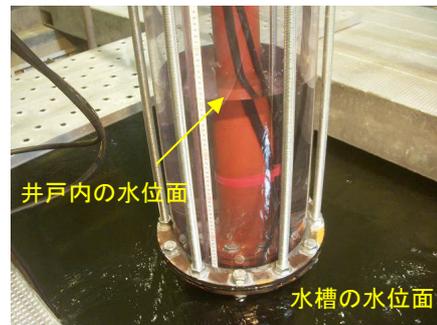


Photo 2 井戸内の水位の状況
Situation of Well inside Water Level

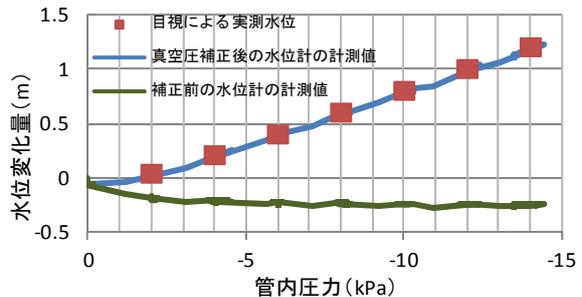


Fig. 6 井戸内水位の計測結果
Measuring Result of Well inside Water Level

大気圧状態での流入量は、フィルター層を設けていないケース1に比較して大きく減少した。ケース2の実験に先立ち、小型の揚水ポンプを用いて揚水量の計測を行った結果は、約7リットル/minであった。ケース1では、大気圧状態の揚水量が約400リットル/minであったため、フィルター層の設置により揚水量は約1/200に低下している。

Fig. 7にケース2における水位計および圧力計の経時変化を示す。また、Fig. 8に揚水量の経時変化を示す。

管内の空気圧は、15分毎に10kPaずつ減圧されているのが確認できる。次に、揚水量については、計測値にバラツキがみられるものの、管内の減圧に伴い、徐々に増加しているのがわかる。ケース1とは異なり、減圧による集水量よりもポンプによる揚水能力が勝っているため、各段階ともに内管上端を越流した状態での揚水が可能であった。Fig. 9は管内の空気圧と揚水量の関係を示している。揚水量は管内の減圧に比例して増加し、増加の割合は管内の空気圧-10kPa当たり約80リットル/minであった。このことから、ハイパーディープウェルの構造を用いて井戸内を減圧することにより、井戸内水位を下げずに揚水量を増加させることが可能であるという同技術の機能を確認できた。

次に、内管外側に設置した水位計の値 (Fig. 7参照) に着目すると、管内の減圧に伴い、水位の計測値も段階的に低下しているのが分かる。低下量は、試験前の水位をゼロとすると、管内の空気圧が-80kPa程度まで減圧された際には、約-8m程度となっている。実験で目視された井戸内の水位は内管上端にあるため、水位計の計測値は減圧を含めた値 (全水頭) となっている。

Fig. 10は、管内の空気圧による補正前後の内管外側水位の変化量と管内空気圧の関係を示している。管内の減圧が小さい段階で、値のばらつきが大きいのは、ポンプのバルブ調整を細かく制御することが困難であったため、管内水位が越流高さよりも上昇することがあったためである。この図から、ケース1と同様に管内空気圧による補正を行うことで、実際の井内水位を把握することができるといえる。

4. 現場揚水試験による効果の検証

4.1 試験概要

ハイパーディープウェル工法による揚水能力改善効果を検証するために、実現場における揚水試験を実施した²⁾。以下に揚水試験の概要について述べる。

4.1.1 対象地盤と井戸の配置 対象となるサイトは某工場の跡地である。試験時の状況をPhoto 3に示す。対象地盤の地層構成ならびに井戸の配置をそれぞれFig. 11, 12に示す。

対象となる地盤は、主にシルト混じり砂層の第一帯水層と細砂層の第二帯水層で構成されており、今回の揚水試験では、第二帯水層に設置された揚水井を用いて試験を行っている。また、揚水井周辺の地下水位を計測する

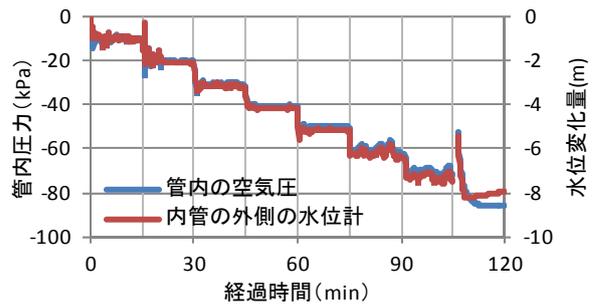


Fig. 7 水位計および管内圧力計の経時変化 ケース2
Time Histories of Water Gauges and a Pressure Gauge Case2

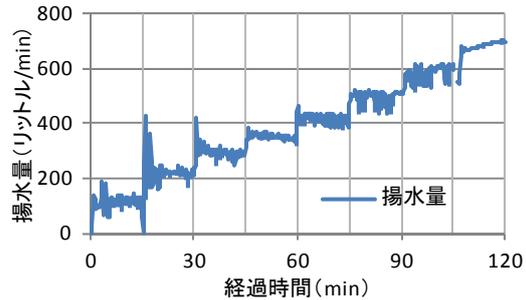


Fig. 8 揚水量の経時変化 ケース2
Time Histories of Flow Instrument Case2

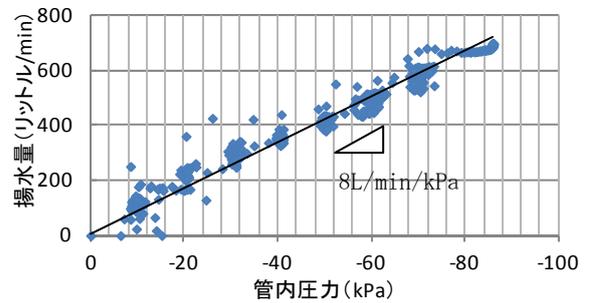


Fig. 9 管内圧力と揚水量の関係 ケース2
Relation between Vacuum Pressure and a Pump Discharge Case2

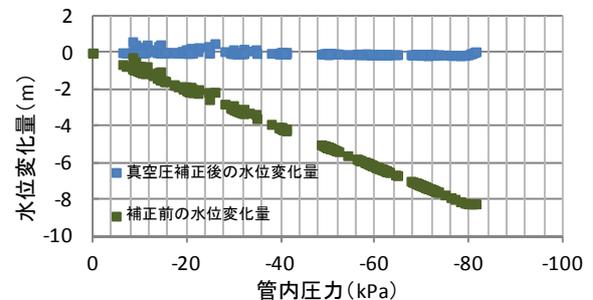


Fig. 10 管内圧力と水位変化量の関係 ケース2
Relation between Vacuum Pressure and Water Level after Compensation Case2



Photo 3 揚水試験時の状況

Situation of Pumping Test of Hyper Deep Well

ために、揚水井からの距離が5~55mの間に計4箇所の観測井を第二帯水層に設置している。

4.1.2 揚水井 揚水井にはハイパーディープウェル工法を採用した。揚水井の外径はφ400mm、スクリーン長は1mである。スクリーン長さ、揚水ポンプ径を考慮し、φ300mmの内管を設置している。

4.1.3 試験方法 試験は、同一の揚水井を用いて真空あり、なしの2つのケースについて連続揚水試験を実施した。試験は真空なしのケース実施後に、水位回復を確認後、真空ありのケースについて実施しており、連続揚水時間は両ケースともに480分とした。なお、真空ありのケースでは揚水開始100分間は真空なしの状態での揚水し、100分から420分まで真空圧を作用させている。

試験では、観測井の水位の経時変化に加え、揚水井内の圧力、水位ならびに揚水量の計測を行い、真空の有無について比較検討を行った。

4.2 試験結果

4.2.1 揚水井内の水位と揚水量 Fig. 13に真空なしのケースにおける揚水井内の水位低下量ならびに揚水量の経時変化を示す。揚水量に着目すると、試験開始直後、40リットル/min程度あった揚水量は徐々に低下し、試験終了時には約30リットル/min程度となった。井戸内の水位低下量は、試験開始後90分で約-10.3mに達し、その後は一定値になった。これは井戸内の水位が内管上端の越流部に達したためである。

Fig. 14に真空ありのケースにおける揚水井内の水位低下量ならびに揚水量の経時変化を示す。本ケースでは、3.の室内試験と同様に、揚水井内に設置した圧力計で計測された値を用いて揚水井内の水位の補正を行っている。試験開始100分後までは真空なしの状態での揚水を行い、100分以降420分までは真空圧を作用させた。試験期間における真空圧の平均値は約65kPaであった。

真空圧を作用させた後、揚水井内の水位の上昇が生じているのがわかる。これは、井戸内が減圧されることにより集水量が増加したためである。そこで、揚水量を増加すると、井戸内の水位が一定となり、真空なしのケースと同様にコントロールすることができた。揚水量につ



Fig. 11 地層構成 Stratium Composition

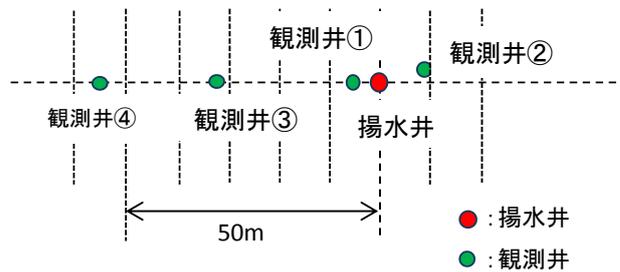


Fig. 12 井配置 Arrangement of Wells

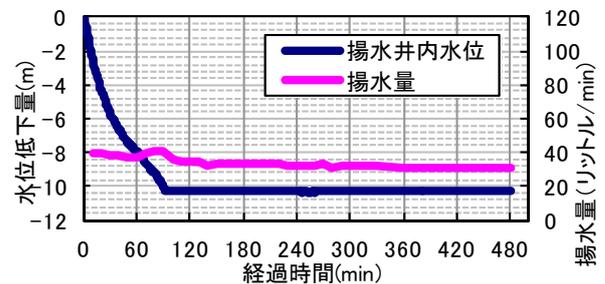


Fig. 13 揚水井内水位および揚水量の経時変化 (真空なし)

Time Histories of Water Level and Flow Instrument

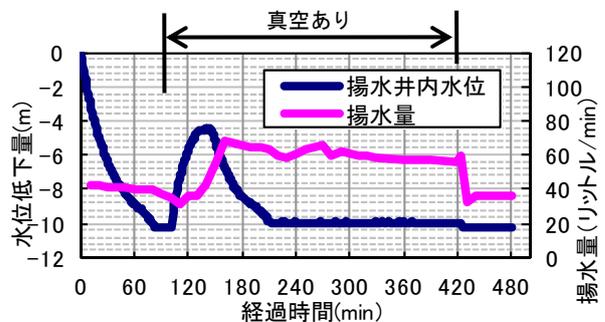


Fig. 14 揚水井内水位および揚水量の経時変化 (真空あり)

Time Histories of Water Level and Flow Instrument

いては、真空作用前は真空なしのケースとほぼ同様となる30リットル/min程度であった。その後、真空圧を作用させて揚水量を調整した後で約70リットル/min、真空停止前には約55リットル/min程度であった。真空を併用することにより揚水量に約1.8倍の増加が得られた。真空圧が作用した場合の井戸内の水位は、真空がない場合の井戸内の水位と比べて差はないが、後述の周辺の水位については大きな差がみられた。

4.2.2 観測井水位 Fig. 15は、試験終了直前（真空ありのケースでは真空を停止する直前）に各観測井で得られた水位低下量と揚水井からの距離の関係を示している。水位の低下量は揚水井から離れるに従い徐々に低下する傾向がみられ、真空圧を作用させた場合の水位低下量は、真空圧のない場合に比べて揚水井から10m程度までは約1.8倍であるのに対し、揚水井から約50mの観測井では、約1.4倍であった。真空を作用させることにより観測井の水位低下量は増加し、揚水井近傍で効果は大きく得られた。

Table 2は今回の試験により得られた各ケースの計測結果の一覧を示している。真空圧の作用分を井戸内の水位の低下分と仮定すると、真空なしに比較して、真空作用時は1.56倍の水位低下量であることがわかる。観測井における水位低下量は揚水井内の水位の低下量の増分から考える効果よりも1割程度大きなものであり、真空を併用することにより井戸の効率を低下させる井戸損失（井戸流入部で発生する水位低下）を減少させる効果もあると考えられる。

4.3 地盤の透水性の評価

観測井で得られた地下水位低下量をもとに、Theim法により透水係数の算出を行った。Table 3に各ケースの透水係数を示す。真空の有無による両ケースの透水係数の値に差は生じていない。このことから、Fig. 15, Table 2の水位低下および揚水量の増加は、真空による効果であることがわかる。したがって、ハイパーディープウェルは、真空圧による全水頭変化を考慮することで、設計可能であると考えられる。

5. おわりに

新たに開発した真空圧を併用したハイパーディープウェル工法の概要について述べるとともに、室内模型実験ならびに現場揚水試験により、同工法の有効性を検証した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 室内模型実験において、ハイパーディープウェルの構造を用いることにより、井戸内の減圧と、揚水能力の向上が可能であることがわかった。
- 2) 真空作用時の井戸内の水位は、水位計の計測値に管内圧力による補正を行うことで正しく把握することができ、水位管理が可能である。

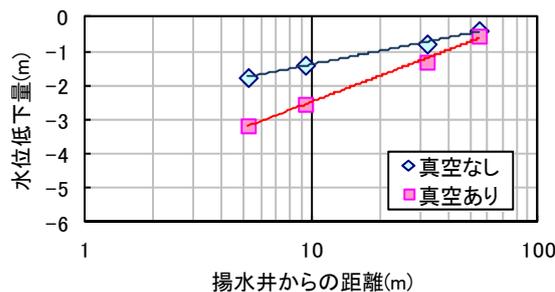


Fig. 15 観測井水位の比較
Comparison of the Water Level of Observation Wells

Table 2 各ケースの計測結果の一覧
List of Measuring Results

項目	井戸からの距離 (m)	真空なし 水位低下量 (m)	真空あり 水位低下量 (m)	倍率
揚水井	0	-10.31	-16.11	1.56
観測井①	5.25	-1.76	-3.17	1.80
観測井②	9.38	-1.40	-2.54	1.81
観測井③	32.25	-0.78	-1.31	1.68
観測井④	54.63	-0.39	-0.55	1.41
揚水量Q (l/min)	-	31	56	1.81

Table 3 透水係数の算出結果

Calculation of a Coefficient of Permeability

	真空なし	真空あり
対象観測井	①、②	①、②
揚水量 (l/min)	31	56
帯水層厚さ (m)	4	4
透水係数 (m/s)	3.3E-05	3.4E-05

- 3) 現場揚水試験においてもハイパーディープウェルによる揚水能力の向上効果が得られ、真空圧が無い場合に比べて揚水量が約1.8倍に増加した。
- 4) 真空圧を作用させることにより、周辺水位の低下量も増加し、その効果は特に揚水井の近傍で大きい。
- 5) 揚水試験の結果より算出した透水係数には、真空の有無による違いはみられなかった。

なお、ハイパーディープウェル工法による揚水効果は、対象となる帯水層の土質や不圧や被圧などの帯水層によっても異なると考えられる。今後、適用範囲の設定や事前の設計を行うためには、更なるデータの蓄積が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 土質工学会：根切り工事と地下水，(1991)
- 2) 山田祐樹，その他：バキュームディープウェルを用いた現場揚水試験，第48回地盤工学研究発表会，(2013)