

# 井戸の揚水能力変化を考慮した群井設計法の提案

栗原正美 須藤 賢  
 深見秀樹 上野孝之

## Multiple Well Design Method Considering Decrease in Well Capacity

Masami Kurihara Ken Sudo  
 Hideki Fukami Takayuki Ueno

### Abstract

When the ground water level in gravelly or sandy soil layers is lowered greatly using the Deep Well Method, the discharge is normally large, so that more wells are needed than in clayey soils. The wells are thus closely spaced, increasing the effect of interwell interference. It is assumed in current design that well capacity is constant even with well interference, so that total discharge increases in direct proportion to the number of wells. However, individual well capacity in fact decreases as the well interference increases, and ground water level may not be sufficiently drawn. Therefore, the authors have proposed a multiple well design method that takes into account decreased well capacity with well interference. This has been derived from drawdown distribution near wells. It has been confirmed by site tests that this method can be applied to deep-well design.

### 概 要

ディープウェル工法で砂礫や砂層地盤を大きく水位低下させる場合、一般に揚水量は多く、必要な井戸本数が増加し、近接した井戸配置となって井戸干渉の影響が大きくなる。従来は、干渉を受けても各井戸の揚水能力は不変で、単井揚水時の井戸能力と同等であると考えられており、現状の設計では井戸本数に比例して揚水量は増加する。しかし、実際には井戸干渉が強くなると各井戸の揚水能力が低下し、所定の水位低下が得られない場合がある。筆者等はこの課題を改善するため、揚水時の井戸近傍地盤の水位低下分布を用いて井戸能力を評価する方法を考案し、井戸干渉による揚水能力の変化を考慮した群井設計法を提案した。実現場にこの手法を適用して設計法の妥当性を確認した。

## 1. はじめに

掘削地盤の安定を図るため、ディープウェル工法で砂礫や砂層地盤を大きく水位低下させる場合、地盤の透水係数が大きいことから揚水量も多くなり、必要な井戸本数も増加する。そのため、近接した井戸配置となり、井戸間の干渉の影響を強く受けることになる。従来は、干渉の影響を受けても各井戸の揚水能力は不変で、単井揚水時の井戸能力と考えられており、設計上では井戸本数に対して比例的に揚水量が増加し、それに伴って水位低下量も増加する。しかし、井戸干渉が大きくなると各井戸の揚水能力が低下し、所定の水位低下が得られない場合がある。この設計上の課題を改善するため、筆者等は揚水時の井戸近傍地盤の動水勾配分布から井戸干渉による揚水能力変化を評価する方法を考案し、井戸能力の変化を考慮した群井設計法を提案した。同時に、井戸損失についても、簡易的に損失量の評価する方法を考案し、この提案設計法に取り入れた。

この論文は、井戸能力変化の評価方法、提案法の設計フローおよび設計例について述べる。

## 2. 井戸能力

### 2.1 井戸能力

井戸本数を算定するためには、井戸干渉の影響を受けていない井戸1本当たりの揚水能力(井戸能力) $q_w$ を適切に評価する必要がある。井戸能力を超えると地盤内の水の流れが層流から乱流に変化し、揚水量がほとんど増えず、後述する井戸損失のみ増加することから、井戸能力というのは適正揚水が行える最大の揚水量を意味する。井戸能力の評価には段階揚水試験による確認が最も確実であるが、試験が実施できない場合や設計段階では次式に示すSichardt(シーハルト)の経験式が一般に用いられる<sup>1)</sup>。

$$q_w = 2\pi r_w \ell_w \frac{\sqrt{k}}{15} \dots\dots\dots (1)$$

$\ell_w$  : 地下水位以下のストレーナ長(m)  
 $r_w$  : 井戸半径(m),  $k$  : 透水係数(m/sec)

(1)式は、井戸能力はダルシー則が適用できる最大の揚水量との考えで、Sichardtの限界動水勾配( $i_c = 1/(15\sqrt{k})$ )から得られている。Fig. 1に(1)式の適用性を既往の揚水試験データから検討した結果を示す。経験式は実測の透水係数に対し、1/2~2倍の範囲にばらつく場合もあることを考慮しておく必要もある<sup>2)</sup>。

2.2 群井戸能力

前節に示す井戸能力は単井揚水に対する考え方である。これに対し、掘削現場でディープウェルを用いて地下水位を低下させる場合、通常は複数井戸(群井)での揚水となり、井戸相互の干渉によって各々の井戸の揚水能力は単井での揚水能力より低下する。この群井揚水時の個々の井戸の揚水能力を“群井戸能力”と呼び、Fig. 2に示すような井戸周辺地盤の動水勾配分布の変化から、井戸干渉による揚水能力変化を定量的に評価した。単井戸で揚水する場合、井戸外壁周りの動水勾配分布は軸対称となり、井戸の外周360°方向から地下水は均等に井戸に流入する。一方、群井戸の場合、井戸干渉の影響で各井戸周りの動水勾配分布の軸対称性が崩れ、一部の動水勾配が小さくなり、群井戸の各々の井戸に流入する地下水量は単井戸と比較して減少する。ここでは、各々の井戸の群井戸能力 $q_{cr}'$ を次式によって定義する。

$$q_{cr}' = q_{cr} \times \left( \frac{\bar{i}_n}{\bar{i}_0} \right) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$q_{cr}$ : 単井戸能力(m<sup>3</sup>/min)  
 $\bar{i}_n, \bar{i}_0$ : 群井戸および単井戸での平均動水勾配

(2) 式中の平均動水勾配は、FEM解析から得られる井戸周辺の水位分布から算定する。

3ケースの井戸間距離に対して揚水能力変化率を求めた結果を、井戸配置と併せてFig. 3に示す。井戸本数の増加や井戸間距離の縮小に伴って井戸干渉が大きくなり、井戸能力が低下することが分かる。井戸設置間隔が狭い場合には揚水能力の低下率が特に大きく、5m間隔の場合、井戸4本で単井戸能力に対して73%に低下する。また、四隅の井戸(●)に比べて干渉が大きい内側に配置された井戸(○)では、さらに大きく能力が低下する。30m間隔で8本配置の場合、四隅井戸の低下率91%に対し、内側では67%に各井戸の揚水能力が低下する。

3. 群井設計法の提案

3.1 井戸損失

揚水時の井戸のすぐ外側の地盤水位と井戸内水位の差を井戸損失という。Fig. 4に揚水井の模式図を示す。井戸損失の原因は、井戸周辺の流れが層流から乱流に変わるといような地下水流の乱れの影響の他、井戸の掘削や洗浄方法等の施工方法、フィルター層やストレーナの形状等に左右される。井戸損失量が大きくなると目標揚水量以前に井戸内水位が極端に低下し、所定の水位低下が困難となる場合があるため、井戸損失量の検討も設計上は必要となる。井戸損失量は井戸内水位低下量に依存するという考えに基づくと、単井および群井時の地盤内、井戸内それぞれの水位低下量 $S$ 、 $S_{well}$ と揚水量 $Q$ の関係はFig. 5のように示される。式中の $a'$ や $n$ は地盤の種類や井戸の施工品質から決定される固有の値で、既往の揚水試験データから得られている<sup>3)</sup>。この関係より、揚水ポンプ深度等による井戸構造上の井戸内限界水

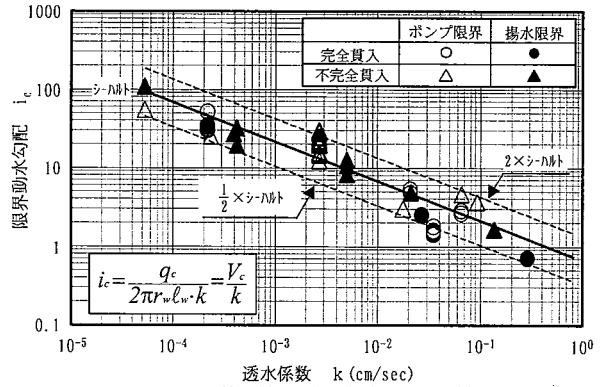


Fig.1 井戸能力経験式の適用性  
 Applicability of Empirical Formula

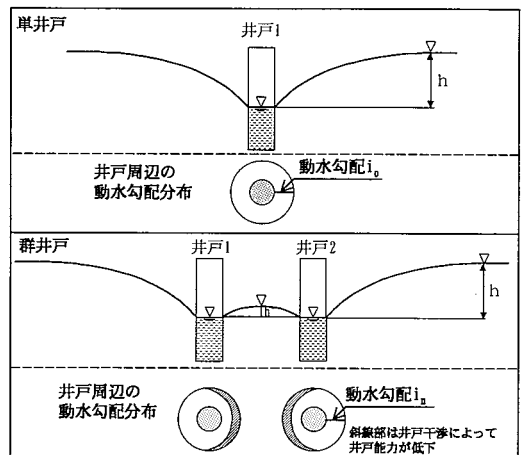


Fig. 2 揚水能力変化の評価方法  
 Evaluation of Decrease of Well Capacity

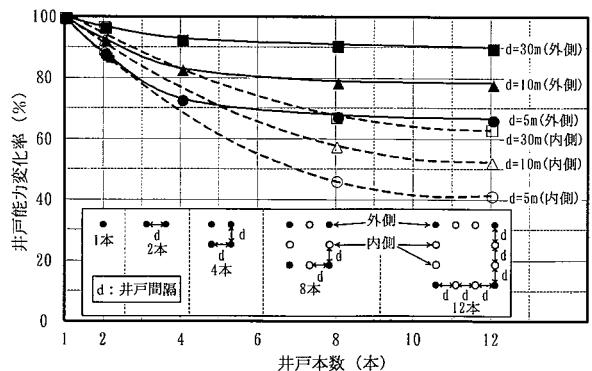


Fig. 3 揚水能力変化  
 Decrease of Well Capacity

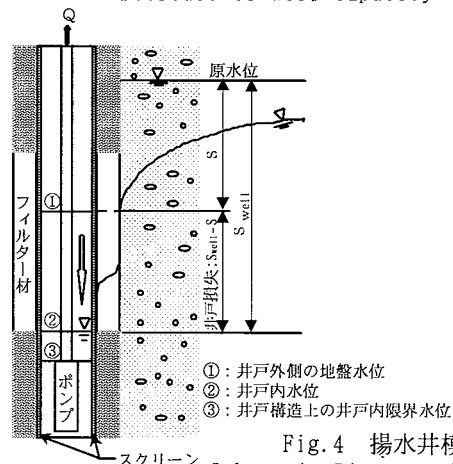


Fig. 4 揚水井模式図  
 Schematic Diagram of Deep Well

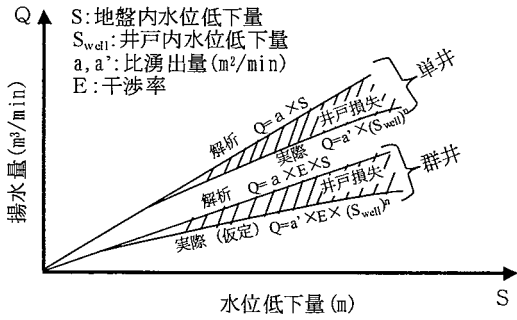


Fig. 5 揚水井のS(S<sub>well</sub>)-Q関係  
Relation of Discharge and Drawdown

位低下量(S<sub>w</sub>)<sub>max</sub>が決まれば、井戸損失量を考慮した可能揚水量が求められる。この場合、井戸損失効率E<sub>r</sub>、井戸損失量(S<sub>well</sub>-S)はそれぞれ、

$$E_r = \frac{S}{S_{well}} = \frac{a'}{a} (S_{well})^{n-1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$S_{well} - S = S_{well}(1 - E_r) = \frac{S}{E_r}(1 - E_r) \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。

3.2 設計フロー

提案設計法の全体フローをFig. 6に示す。⑤の限界揚水量Q<sub>cr</sub>は、各井戸の揚水可能量の総和であり、この限界揚水量に対応する水位低下量を限界水位低下量S<sub>cr</sub>と呼ぶ。各井戸の揚水可能量は、井戸干渉による揚水能力の低下と井戸損失量を考慮して算定した揚水量である。(2)式から得られる各井戸の群井戸能力q<sub>i,cr</sub>'とFig. 5から得られる井戸構造上の可能揚水量q<sub>i</sub>の小さい方の揚水量が、井戸が実際に揚水可能な最大量となる。動水勾配の変化や井戸干渉率は各井戸に等水頭境界条件を与えたFEM定常浸透流解析から事前に算定する。したがって、

$$Q_{cr} = \sum_{i=1}^N \{ \min(q_{i,cr}', q_i) \} \quad \dots\dots\dots (5)$$

N : 井戸本数

からQ<sub>cr</sub>が得られ、各井戸の限界揚水量{min(q<sub>i,cr</sub>', q<sub>i</sub>)}を規定境界条件とするFEM浸透流解析を実施することでS<sub>cr</sub>が求められる。この操作を各井戸毎に繰り返すことで、Fig. 7に示すような井戸本数NとS<sub>cr</sub>、Q<sub>cr</sub>の関係が得られる。N-S<sub>cr</sub>ラインと必要水位低下量S<sub>d</sub>との交点を越える最小N値が、Fs(安全率)=1での井戸本数である。設計井戸本数は、盤ぶくれ等の掘削底部地盤の安定に対する安全率(通常、1.1~1.2)を考慮した必要水位低下量S<sub>d</sub>'とS<sub>cr</sub>ラインとの関係から求められる。

3.3 設計例

提案手法による設計例を示す。地盤条件、井戸条件、井戸特性値(a', n)および単井戸能力q<sub>cr</sub>の設定値一覧をFig. 8に示す。面積500m<sup>2</sup>(仮想井戸半径13m)の狭い範囲での近接井戸配置と井戸内の限界水位低下量2.8mの条件で、地盤内の限界水位低下量を検討した。基準となる単

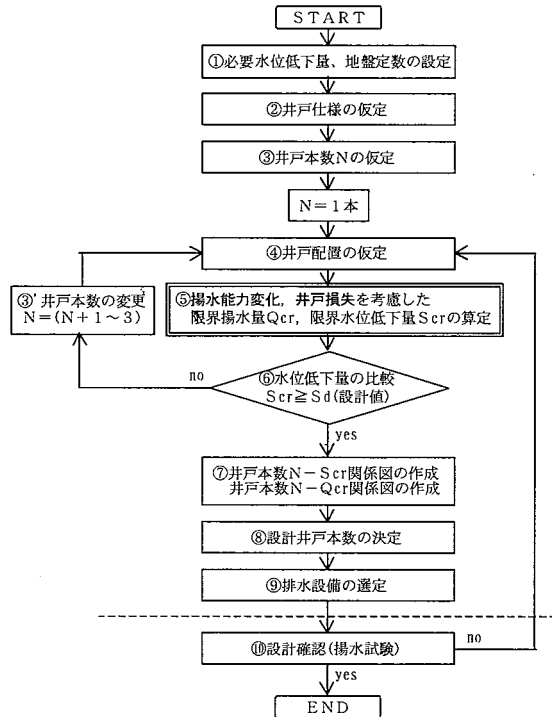


Fig. 6 設計フロー  
Design Flow

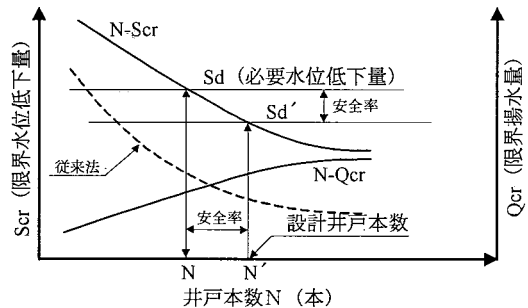


Fig. 7 S<sub>cr</sub>, Q<sub>cr</sub>-N関係  
Relation of S<sub>cr</sub>, Q<sub>cr</sub> and N

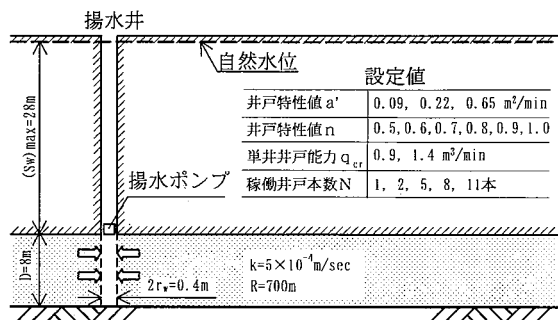


Fig. 8 設計条件  
Design Condition

井戸能力q<sub>cr</sub>は、(1)式から得られる値(0.9m<sup>3</sup>/min)と、1.5倍の能力を仮定した。(a', n)は、砂礫地盤から得られている平均的な値(0.22, 0.7)を標準ケースとし、井戸性能が良あるいは不良側に变化したケースを想定した。これらの条件で、稼働井戸本数を1, 2, 5, 8, 11本(平均井戸間距離30~5m)と変化させ、地盤内の最小水位低下量をFig. 6に従って算定した。

井戸損失が水位低下量に与える影響をFig. 9に示す。

$n$ が小さくなるに伴い、損失効率の減少率が大きくなる。また、損失効率は井戸内水位低下量の増加と共に低下する。井戸内水位が $(S_w)_{max}$ に達した時点で、 $n=0.9$ の72%~ $n=0.5$ の19%まで効率が低下する。この損失効率より、井戸外側の地盤の水位低下量は、Fig.10に示すように $n$ の違いによって大きく変化する。地盤内の水位を10m低下させる場合、 $n=0.7$ 以上の井戸が必要である。この $n$ は砂礫の平均値であり、地盤内を大きく水位低下させる場合には、井戸の施工にも注意し、損失の少ない大きな単井戸能力を確保することが必要である。

提案法による設計例( $q_{cr}=1.4m^3/min$ )を、従来法による結果と併せてFig.11に示す。Fig.3, 9, 10に示すような井戸能力変化や井戸損失の影響から、各井戸の可能揚水量が単井戸能力より低下し、提案法から得られる水位低下量は従来法より小さく、井戸本数の増加、すなわち井戸間距離の縮小と共に両者の差が大きくなる。提案法による水位低下量は井戸8本のケースで比較すると、井戸特性により従来法の66%~19%しか低下しない。提案法では井戸特性の違いによって、可能な水位低下量が大きく異なる。井戸8本の場合、井戸品質が良好なケース{(0.65, 0.7), (0.22, 0.9)}では標準ケース(0.22, 0.7)に対して約1.5倍、一方、品質不良なケース(0.09, 0.7)では標準ケースの4割程度の低下量に変化する。井戸特性によって井戸損失量が異なるため、各井戸の揚水能力が変化し、さらに井戸干渉によって井戸能力自体が低下するため、水位低下量に大きな差が生じてくる。

Fig.12に砂礫地盤での実例を示す。井戸間距離が広い井戸2本のケース(A:90m, B:24m, C:28m)では、干渉の影響が少ないため、3例とも観測値と提案法、従来法の計算値に大きな差は認められない。しかし、事例B, Cでは井戸8本時には最小井戸間距離 $d_{min}$ が4~5mと狭くなり、干渉による揚水能力低下が大きくなる。さらに、設計水位低下量 $S_d$ も10m以上と大きいため、井戸損失の影響も加わり、従来法より小さな観測値が得られている。提案法の計算値は観測値と良く一致しており、本手法の有効性が確認できる。事例B, Cでの水位低下量の違いは、単井戸能力や井戸特性の違いの影響で、これらの適切な評価も井戸設計には重要となる。一方、事例Aは井戸7本でも $d_{min}$ が27mと広いことから干渉の影響が小さく、 $S_d$ も5mと井戸損失の影響の少ない小さな水位低下量のため、従来法、提案法、観測値が全て一致している。本提案法は、井戸が近接したり、大きな水位低下量が必要な場合に特に有効であることが分かる。

#### 4. まとめ

この論文の内容を以下に要約する。

- 1) FEM解析から得られる井戸周辺地盤の動水勾配分布から揚水能力変化を評価する方法、および揚水試験から井戸損失を評価する方法を考案した。
- 2) 1)に示した評価方法を設計に取り入れ、井戸干渉による揚水能力変化を考慮した群井設計法を提案し、観測

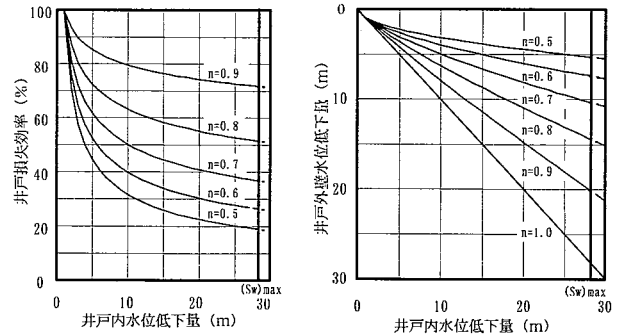


Fig.9 井戸損失効率 Fig.10 井戸外壁水位低下量  
Well Loss Efficiency Drawdown outside Well Bore

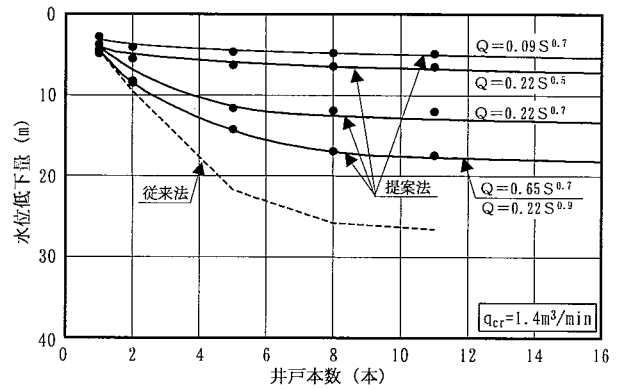


Fig.11 設計例  
Design Example

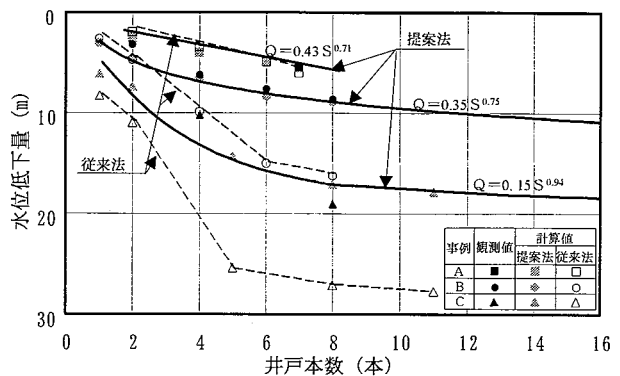


Fig.12 観測値との比較  
Comparison of Calculated and Observed Results

結果との比較から手法の有効性が確認できた。

- 3) 井戸能力、井戸特性が水位低下量や設計井戸本数に与える影響は大きく、設計精度を向上させるためには、揚水試験による井戸能力等の把握が必要である。

#### 参考文献

- 1) 地盤工学会：根切り工事と地下水，p.186，(1991)
- 2) 栗原，他：ディープウェル設計の経験則から得られる井戸揚水能力に関する一考察，土木学会第54回年次学術講演会概要集Ⅲ-A，pp.540~541，(1999)
- 3) 栗原，他：揚水井の水位低下と揚水量の関係がディープウェル設計に及ぼす影響，第34回地盤工学研究発表会，pp.1341~1342，(1999)