

# 掘削域内に設置するディープウェル簡易設計法の提案

高坂 信章 石川 明 天利 実  
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

## Simplified Design Method of Placing Deepwells in Excavation Area

by Nobuaki Kohsaka, Akira Ishikawa and Minoru Amari

### Abstract

A simplified design method is proposed for placing deepwells in an excavation area enclosed by cut-off wall in a multiple aquifer system. This method is based on a theoretical steady state well formula with the following three ideas: the number of deepwells is determined by the radius of a virtual large diameter well; drawdown curve in the excavation area has the equivalent influence radius considering the effect of the cut-off wall; and permeability of an interbedded aquitard is converted to the cut-off wall length. The procedure of this design method is described and results of this method are compared with 3-D FEM results. Discharge rate and the number of deepwells to provide the required drawdown are calculated by this method, and these results agree well with the FEM results. Effectiveness of the proposed method is confirmed.

### 概 要

地下水位より深い地下工事では、止水壁とディープウェルによる止水・排水併用型の地下水処理工法が採用されることが多い。このような現場を対象に、止水壁および難透水層の効果を評価して、必要揚水量および必要ディープウェル本数を簡易に設計する手法を提案した。

この手法は、1) 複数のディープウェルを等価な性能を有する1本の巨大井戸とみなす、2) 掘削域内の水位低下曲線は、止水壁の効果を考慮した等価影響圏半径を用いて表す、3) 止水壁の根入れ対象となる難透水層の透水性は止水壁の貫入長さに換算する、という3つの提案に基づく定常井戸理論式を基本としたものである。

難透水層や帯水層の透水係数を変化させた様々なケースについて、有限要素法による三次元浸透流解析を行い、提案手法による計算結果と比較した。この結果、提案法による計算結果は有限要素法による解析結果とよく一致しており、提案する手法の有効性が確認された。

## § 1. はじめに

中規模以上の地下水位より深い地下工事を行う際、止水性の山留め壁（止水壁）を透水性の低い難透水層に根入れして、これと掘削域内に設置したディープウェルを用いた止水・排水併用型の地下水対策が採用されることが多い。この方法によれば、止水壁と難透水層の低透水性が期待できるため、地下水位低下のための必要揚水量を大幅に削減することができる。この結果として、建設工事費の削減、周辺地盤環境への影響低減が可能になる。

必要揚水量と必要ディープウェル本数の設計を行うとき、一般的には、Thiem（ティーム）などの井戸理論式が用いられるが、これは止水壁や難透水層の効果を

無視したものである。止水壁や難透水層による掘削域内への流入量低減効果が考慮されないため、多くの場合、過大設計となる可能性が高い。

大規模な現場<sup>1)</sup>では、地盤の透水係数に関する詳細な調査が実施され、さらに、この結果に基づいて有限要素法などの数値解析手法による地下水処理工法の設計が行われる。しかし、このような検討を行うためには、多大な時間と費用を要するため、適用される現場は限られる。

本報では、複層帯水層地盤で止水壁とディープウェルを用いた地下水処理を行う現場に対して、必要揚水量と必要ディープウェル本数を簡易に設計するための手法を提案する。この方法では、介在する難透水層と止水壁の透水性を考慮することができる。この結果、

適切な地下水処理設備の設計を容易に行うことができる。提案する設計法の妥当性を、有限要素法による三次元浸透流解析結果と比較して検証する。

なお、本報は地盤工学会主催の国際シンポジウム IS-Okayama 2003 において“Simplified design method of deepwells placed in excavation area”<sup>2)</sup>として発表した内容を和訳、追加修正したものである。

## § 2. 設計法の基本的考え方

提案する設計法は、以下の 3 つの考え方に基づくものである。

- 1) 井戸の本数は、等価な揚水能力を有する大口徑仮想井戸の半径により評価する。
- 2) 止水壁に囲まれた掘削域の水位低下量は、止水壁の効果を考慮した等価影響圏半径  $R'$  を用いた定常井戸理論式 (Thiem の式) により計算する。
- 3) 止水壁の根入れ先端部に介在する難透水層の透水性は、止水壁の貫入長さに換算する。

### 2.1 群井戸系の設計方法

多くの掘削現場では、所定の水位低下量を得るために、通常、複数のディープウェルを設置する。このような群井戸系の設計における最大の課題は、ディープウェルの配置や本数をどのようにして決定するかということである。ディープウェルが、図-1 に示すように円形に配置された場合、1本のディープウェルからの揚水量  $q$  および  $n$  本のディープウェルによる全揚水量  $Q$  は、以下の式(1)および式(2)により計算できる。

$$q = \frac{2\pi T s_w}{\ln \left( \frac{R^{n-1+\frac{1}{\eta}}}{n l^{n-1} r_w^{1/\eta}} \right)} \quad (1)$$

$$Q = nq = n \frac{2\pi T s_w}{\ln \left( \frac{R^{n-1+\frac{1}{\eta}}}{n l^{n-1} r_w^{1/\eta}} \right)} = n \eta' \frac{2\pi T s_w}{\ln \left( \frac{R}{(n l^{n-1} r_w^{1/\eta})^{\eta'}} \right)} \quad (2)$$

ここに、 $n$ : ディープウェル本数、 $T$ : 帯水層の透水性係数、 $s_w$ : ディープウェル内水位低下量、 $R$ : 揚水による影響圏半径、 $l$ : 井戸配置円の半径、 $r_w$ : ディープウェルの有効半径、 $\eta$ : 井戸損失に関する井戸効率、 $\eta'$ : 井戸損失と井戸干渉を考慮した等価井戸効率 (式(3)より求める)。

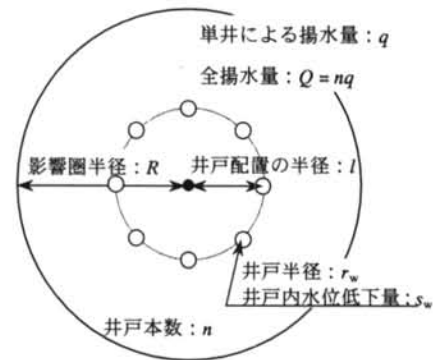


図-1 円形配置の複数ディープウェル系の概要

$$\eta' = \frac{1}{n-1+\frac{1}{\eta}} \quad (3)$$

式(2)は、 $n$  本のディープウェルによる全揚水量が、式(4)で表される井戸半径  $r_w'$ 、井戸効率  $n\eta'$  の 1 本の大口徑等価井戸による揚水量と等しいことを表している。

$$r_w' = (n l^{n-1} r_w^{1/\eta})^{\eta'} \quad (4)$$

式(4)を用いることによって、円形配置の複数のディープウェルからの揚水条件を、1本の大口徑井戸からの揚水に変換することができる<sup>3,4)</sup>。この結果、この揚水条件を軸対称問題として解析することが可能になる。円形配置のディープウェルによる水位低下状況を、軸対称解析により計算する手順は以下のとおりである。

- 1) 式(4)により、仮想井戸の等価井戸半径  $r_w'$  を計算する。
- 2) 仮想井戸の内側に相当する部分に、等価井戸内水位低下量  $s_w' = n\eta' s_w$  を水位固定条件として与え、全揚水量  $Q$  を軸対称解析により計算する。
- 3) ディープウェル配置位置に相当する節点に、2)で計算された全揚水量を流量固定条件として与えることにより、周辺の水位低下量分布を計算する。

この提案法による計算結果を、井戸配置を評価できる平面二次元解析の結果と比較した。計算結果として得られた全揚水量  $Q$  およびディープウェルの配置の中心点における水位低下量  $s_c$  を図-2 に比較する。この

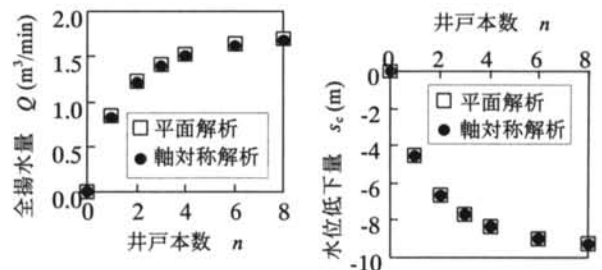


図-2 大口徑井戸を想定した提案法 (軸対称解析) と平面解析の結果比較

ケースにおける計算条件は、 $T=10^{-1} \text{ m}^2/\text{min}$ ,  $R=1000 \text{ m}$ ,  $l=30 \text{ m}$ ,  $r_w=0.45 \text{ m}$ ,  $s_w=10 \text{ m}$ ,  $\eta=1.0$  である。図-2の結果は、提案した方法による軸対称解析の結果と、平面二次元解析の結果がよく一致していることを示している。このことは、上記で提案した方法を用いれば、軸対称解析によってディープウェルの本数を評価できることを意味している。

## 2.2 単一帯水層地盤における止水壁内掘削域の水位低下性状

中規模以上(深さ10m以上)の地下工事においては、掘削域を止水壁で囲み、この掘削域に設置したディープウェルにより地下水位を低下させる地下水対策が採用されることが一般的である。透水性の低い止水壁が、必要水位低下量を得るための揚水量を減じる効果をもたらす。

図-3は、掘削域の概要を示したものである。止水壁がない場合、揚水量 $Q$ のディープウェルによる水位低下量 $s$ は、式(5) (Thiemの定常井戸理論式)により計算できる。

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (5)$$

ここに、 $r$ : 揚水井(ディープウェル)から計算点までの距離である。設置半径 $r_0$ 、厚さ $d$ 、透水係数 $k_w$ の止水壁が設置されたとき、止水壁で囲まれた掘削域の水位低下量は式(6)で計算される<sup>5)</sup>。

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{R'}{r}\right) \quad (6)$$

ここに、 $R'$ : 式(7)により計算される止水壁の効果を検討した見掛けの影響圏半径。

$$R' = R \left(\frac{r_0 + d}{r_0}\right)^{\frac{T-T'}{T'}} = F_w R \quad (7)$$

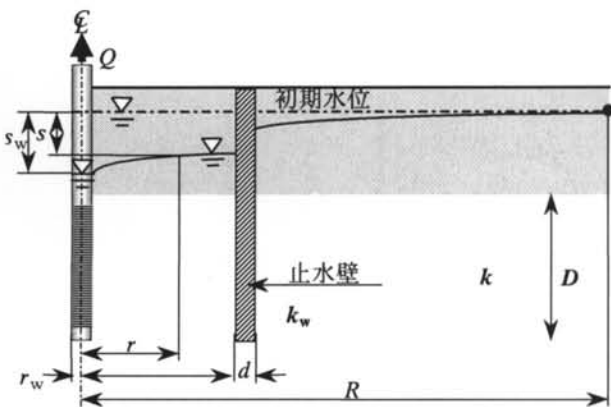


図-3 単一帯水層地盤における止水壁で囲まれた掘削域の概要

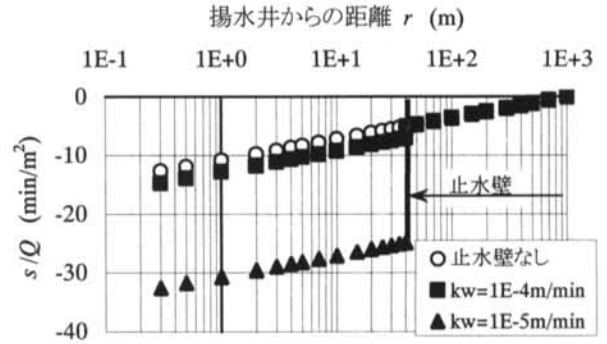


図-4 軸対称解析による距離-水位低下量曲線

$$F_w = \left(\frac{r_0 + d}{r_0}\right)^{\frac{T-T'}{T'}} \quad (8)$$

ここに、 $T'=k_w D$ : 止水壁部分の透水量係数、 $D$ : 帯水層の厚さ。式(8)で表される $F_w$ は止水壁ファクターと呼ばれ、止水壁の揚水量低減効果を表す値である。

式(5)と式(6)を比較すると、止水壁で囲まれた掘削域における距離-水位低下量の関係を $s - \log r$ プロットとして片対数紙上に示した場合、止水壁がある場合とない場合で、傾きは同じで切片の異なる直線となることがわかる。つまり、止水壁で囲まれた掘削域内の水位低下は、止水壁がない状態に比べて影響圏半径が $F_w$ 倍大きくなった特性を示すことになる。

図-4は、軸対称解析により求められた距離 $r$ -水位低下量 $s$ の関係を片対数紙上に示したものである。揚水量 $Q$ が異なる計算結果を比較するために、縦軸に $s/Q$ の値をとった。このグラフは、止水壁がない場合、止水壁の透水係数が $k_w=1 \times 10^{-4} \text{ m/min}$ 、および $k_w=1 \times 10^{-5} \text{ m/min}$ の場合の結果を示している。これらは、帯水層の透水係数 $k=1 \times 10^{-2} \text{ m/min}$ に比べて1/100および1/1000に相当する。この図から、止水壁の外側における水位低下量に差は見られないこと、止水壁の透水係数が小さくなるにしたがい、止水壁内側の水位低下量が大きくなるのがわかる。止水壁内側の水位低下量曲線は平行であり、これらの直線を延長して得られる影響圏半径は、 $k_w=1 \times 10^{-4} \text{ m/min}$ に対しては $R'=3600 \text{ m}$ 、 $k_w=1 \times 10^{-5} \text{ m/min}$ に対しては $R'=3.0 \times 10^8 \text{ m}$ となる。式(8)により計算される止水壁ファクターは、 $k_w=1 \times 10^{-4} \text{ m/min}$ に対して $F_w=3.4$ 、 $k_w=1 \times 10^{-5} \text{ m/min}$ に対して $F_w=2.5 \times 10^5$ である。解析条件として与えた影響圏半径 $R$ は1000mであり、掘削域内の水位低下状況に対して提案法が十分な精度を有していることが立証された。

## 2.3 複層帯水層系における介在難透水層透水係数の止水壁長さへの変換

複数の帯水層を有する地盤条件のもとでは、止水壁

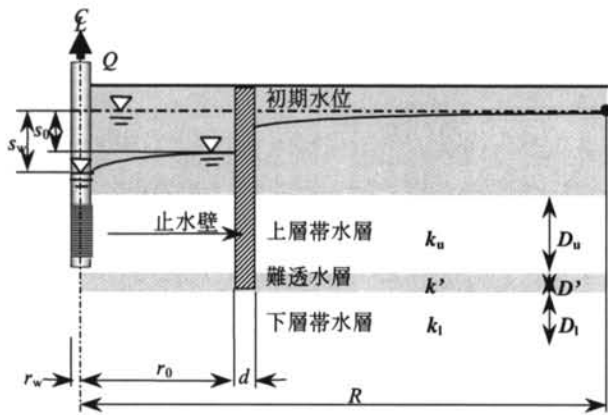


図-5 複層帯水層系における止水壁で囲まれた掘削域の概要

を適切な深さに介在する難透水層に根入れして、揚水量を削減する工夫がなされることが一般的である。図-5は、このような複層帯水層系での掘削工事の概要を示したものである。このような条件では、掘削域内への地下水の流れは、止水壁を通過して流入する水平方向流れの成分と、難透水層を通過して流入する鉛直方向流れの成分を有する。ここで、難透水層の透水係数を止水壁の貫入長さに変換して、必要揚水量を算定する簡易計算法が提案された<sup>9)</sup>。

止水壁の透水抵抗  $P_w$  および難透水層の透水抵抗  $P'$  は、式(9)および式(10)により表される。

$$P_w = 2\pi r_0 D_u k_w / d \quad (9)$$

$$P' = \pi r_0^2 k' / D' = 2\pi r_0 D_{eq} k_w / d \quad (10)$$

ここで、式(10)中の等価貫入長さ  $D_{eq}$  は、難透水層の透水特性を止水壁の透水特性に変換するための値であり、式(11)により計算される。

$$D_{eq} = dr_0 k' / 2D' k_w \quad (11)$$

ここに、 $D_u$ ：上層の帯水層厚さ、 $k'$ ：難透水層の透水係数、 $D'$ ：難透水層の厚さである。これを用いて、止水壁部分の透水量係数  $T'$  は、式(12)により表される。

$$T' = (D_u + D_{eq}) k_w \quad (12)$$

止水壁で囲まれた掘削域内の水位低下量は、式(13)により計算される。

$$s = \frac{Q}{2\pi T_u} \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) + \frac{Q}{2\pi T'} \ln\left(\frac{r_0 + d}{r_0}\right) + \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{R}{r_0 + d}\right)$$

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{F_w' R}{r}\right) \quad (13)$$

ここに、 $T$ ：地盤全体の透水量係数 ( $T = k_u D_u + k' D' + k_l D_l$ )、

$T_u$ ：上層帯水層の透水量係数、 $F_w'$ ：複層帯水層系における止水壁ファクター (式(14)により計算される)、 $k_u$ ：上層帯水層の透水係数、 $k_l$ ：下層帯水層の透水係数、 $D_l$ ：下層帯水層の厚さ。

$$F_w' = \frac{\left(\frac{r_0 + d}{r_0}\right)^{\frac{T - T'}{T'}}}{\left(\frac{r_0}{r_w}\right)^{\frac{T_u - T}{T_u}}} = \frac{F_w}{\left(\frac{r_0}{r_w}\right)^{\frac{T_u - T}{T_u}}} \quad (14)$$

### § 3. 複層帯水層系におけるディープウェルの簡易設計法

§ 2. で示した3つの考え方に基づき、複数の帯水層を有する地盤でのディープウェル簡易設計法を提案する。

#### 3.1 設計に必要な入力パラメーター

表-1に設計のために必要な入力パラメーターを示す。これらのパラメーターは以下の5つに分類される。

- 1) 止水壁に関する情報
- 2) 難透水層に関する情報
- 3) 帯水層に関する情報
- 4) 掘削条件
- 5) ディープウェルに関する情報

1)~3)のパラメーターについては、設計時点で適切な値を評価することが難しく、推定値を入力せざるを得ない場合が多い。計算結果に大きく影響するパラメーターを推定するに際しては、十分に注意を払う必要がある。

表-1 設計に必要な入力パラメーター

分類	記号	入力パラメーター
1) 止水壁	$d$	厚さ
	$k_w$	透水係数
2) 難透水層	$D'$	厚さ
	$k'$	透水係数
3) 帯水層	$D_u$	上層の厚さ
	$k_u$	上層の透水係数
	$D_l$	下層の厚さ
	$k_l$	下層の透水係数
	$T$	全層の透水量係数
4) 掘削条件	$R$	影響圏半径
	$r_0$	掘削域の等価半径
	$s_0$	必要水位低下量
5) ディープウェル	$\eta$	井戸損失による井戸効率
	$l$	井戸群の設置半径
	$r_w$	井戸の有効半径
	$s_w$	井戸内水位低下量

### 3.2 設計手順

設計は、以下の2段階に対して行われる。

- 1) 必要揚水量の計算
- 2) ディープウェル本数の設定

#### 3.2.1 必要揚水量の計算

必要揚水量は以下の手順で計算する。

- 1) 式(11)により、難透水層の透水性を止水壁の透水性に換算し、等価貫入長さ  $D_{eq}$  を計算する。
- 2) 式(12)により、止水壁部分の等価透水量係数  $T'$  を計算する。
- 3) 式(14)により、複層帯水層系における止水壁ファクター  $F_w'$  を計算する。ただし、このとき  $r_w=r_0$  を代入するため、 $F_w'$  は式(8)により計算される  $F_w$  に簡略化される。
- 4) 必要揚水量を式(13)を変形して誘導される式(15)により計算する。

$$Q_0 = \frac{2\pi T s_0}{\ln\left(\frac{F_w R}{r_0}\right)} \quad (15)$$

ここに、 $Q_0$ ：必要揚水量、 $s_0$ ：必要水位低下量、 $r_0$ ：掘削域の等価半径である。

#### 3.2.2 ディープウェル本数の設定

ディープウェル本数は以下の手順で設定する。

- 1) ディープウェルの本数  $n$  を仮定する。
- 2) 式(3)により、等価井戸効率  $\eta'$  を計算する。
- 3) 式(4)により、等価井戸半径  $r_w'$  を計算する。
- 4) 式(14)の  $r_w$  に  $r_w'$  を代入することにより、複層帯水層系における止水壁ファクター  $F_w'$  を計算する。
- 5) 式(13)より誘導される式(16)により、 $n$  本のディープウェルによる全揚水量  $Q_n$  を計算する。

$$Q_n = n\eta' \frac{2\pi T s_w}{\ln\left(\frac{F_w' R}{r_w'}\right)} \quad (16)$$

ここに、 $s_w$ ：ディープウェル内水位低下量。

- 6) 式(17)により、掘削域中心における水位低下量  $s_c$  を計算する。

$$s_c = \frac{Q_n}{2\pi T} \ln\left(\frac{F_w' R}{r_0}\right) \quad (17)$$

- 7)  $s_c$  を  $s_0$  と比較して、 $s_c$  が  $s_0$  よりも大きければ、ディープウェル本数  $n$  は採用可能な値と判断される。
- 8) 1)~7)の手順を繰り返し、採用するディープウェル本数を決定する。

### § 4. 三次元浸透流解析による提案法の妥当性検証

#### 4.1 解析条件

図-6に解析モデルを示す。このモデルは、二層の帯水層と、これに介在する難透水層からなる。帯水層の厚さ ( $D_0$  および  $D_1$ ) はそれぞれ 10 m である。また、介在難透水層の厚さ  $D'$  は 2 m とする。影響圏半径  $R$  は 200 m とし、この境界部分における地下水位を下層帯水層の下端を基準として、 $H_0=32$  m に固定する。これらの帯水層は、被圧状態にある。掘削域は、半径  $r_0=20$  m の円形で、厚さ  $d=0.5$  m、透水係数  $k_w=1 \times 10^{-5}$  m/min の止水壁により、その周囲が囲まれている。ディープウェルは、半径  $l=18$  m の円形配置で設置される。この解析は、計算時間および計算容量を節減するために、1/4 モデルに対して実行される。ディープウェルに相当する節点まわりの要素の大きさは、1 m 四方の正方形とした。この結果、ディープウェルの見掛けの半径  $r_w$  は 0.2 m となる<sup>7)</sup>。ディープウェルに相当する節点の水位は  $h_w=24$  m に固定して、ディープウェル内の水位低下量  $s_w$  を 8 m とした。井戸損失による井戸効率は、1本のディープウェル揚水時の解析結果として得られた水位低下曲線より  $\eta=0.85$  と設定した。

難透水層の透水係数は、基本ケースでは  $k'=1 \times 10^{-4}$  m/min として、このパラメーターの影響を調べるために、基本条件の 1/10~10 倍 ( $k'=1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3}$  m/min) の範囲で変化させた。帯水層の透水係数  $k_0$  および  $k_1$  は、基本ケースでは  $5 \times 10^{-3}$  m/min として、これらのパラメーターの影響を調べるために、基本条件の 1/5~4 倍 ( $k_0, k_1 = 1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$  m/min) の範囲で変化させた。ディープウェルの本数  $n$  は、1, 2, 4, 6, 8 本と変化させた。

#### 4.2 解析結果と考察

提案法による設計計算結果と三次元浸透流解析結果を図-7~10に比較する。これらの図において、提案法による結果 (PDM) は線で示し、FEM 三次元浸透流解析による結果 (FEM) はマークで示した。

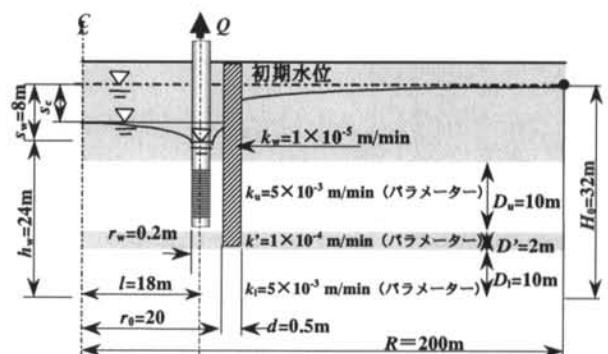


図-6 複層帯水層系モデルの概要

#### 4.2.1 必要揚水量

図-7に、掘削域内からの全揚水量  $Q$  と、掘削域中心における水位低下量  $s_c$  の関係を示した。それぞれのグラフは、難透水層の透水係数  $k'$ 、下層帯水層の透水係数  $k_1$ 、および上層帯水層の透水係数  $k_u$  を変化させた結果である。図中、線で示される提案法においては、式(17)より、 $Q$  と  $s_c$  が比例関係になる。マークで示される三次元浸透流解析結果も同様の傾向を示している。これらのグラフは、提案法による計算結果が、大局的には三次元浸透流解析結果とよく一致していることを示している。しかし、難透水層の透水係数が大きい場合（グラフ(a)の□および▲）や、下層帯水層の透水係数が小さい場合（グラフ(b)の●および○）には、提案法による計算結果と FEM の結果に差が認められる。また、難透水層の透水係数は  $s_c-Q$  の関係に大きく影響するが、帯水層の透水係数の影響は小さいことがわかる。

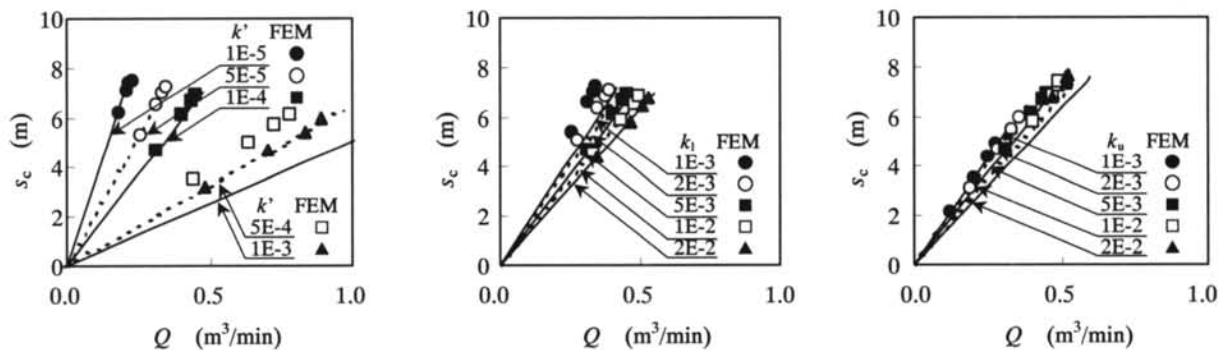
必要水位低下量  $s_0=6$  m を得るための必要揚水量が、透水係数によりどのように変化するかを図-8に示した。提案法により計算される必要揚水量は、三次元 FEM の結果とよく一致している。難透水層の透水係数が高い部分、下層帯水層の透水係数が低い部分、上層帯水層の透水係数が高い部分で若干の差が認められる。し

かし、これらの部分における差は最大でも 30% であり、また提案法による計算結果は FEM 解析結果より大きめの値を示していることから、安全側の評価がなされている。

#### 4.2.2 ディープウェル本数

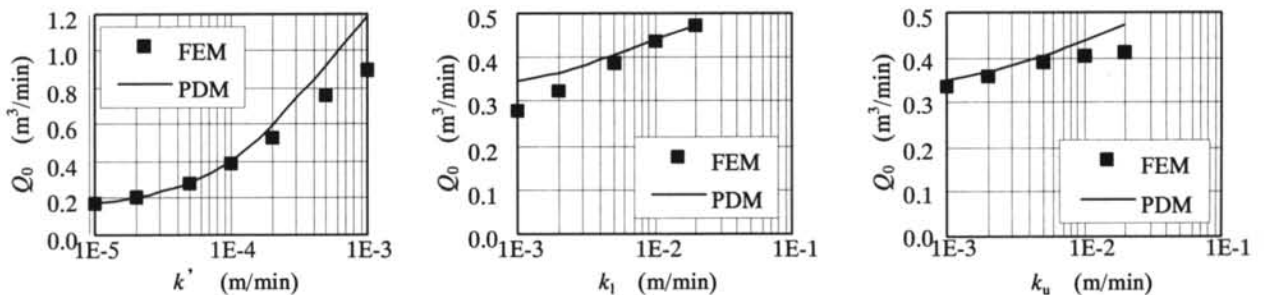
図-9に、ディープウェル本数  $n$  と、掘削域中心における水位低下量  $s_c$  の関係を示した。図-7と同様に、難透水層の透水係数  $k'$ 、下層帯水層の透水係数  $k_1$ 、および上層帯水層の透水係数  $k_u$  を変化させた結果を示した。これらのグラフから、提案法による計算結果と、三次元 FEM 解析結果がよく一致していることがわかる。また、このグラフより、難透水層の透水係数と、上層帯水層の透水係数がディープウェル本数に大きく影響すること、下層帯水層の透水係数の影響は小さいことがわかる。

透水係数の変化にともない、必要水位低下量  $s_0=6$  m を得るためのディープウェル本数がどのように変化するかを、図-10に示した。提案法による設計結果は、FEM 解析結果と概略一致している。これらのグラフより、難透水層の透水係数および上層帯水層の透水係数が、ディープウェル本数の設計上、重要なファクターとなることがわかる。難透水層の透水係数が大きくなるほど、また上層帯水層の透水係数が小さくなるほど、多数のディープウェルが必要になる。



(a) 難透水層の透水係数を変化 (b) 下層帯水層の透水係数を変化 (c) 上層帯水層の透水係数を変化

図-7 揚水量  $Q$  と掘削域中心水位低下量  $s_c$  の関係（提案法による結果と FEM 解析結果の比較）



(a) 難透水層透水係数による変化 (b) 下層帯水層透水係数による変化 (c) 上層帯水の透水係数による変化

図-8 透水係数の変化による必要揚水量  $Q$  の変化

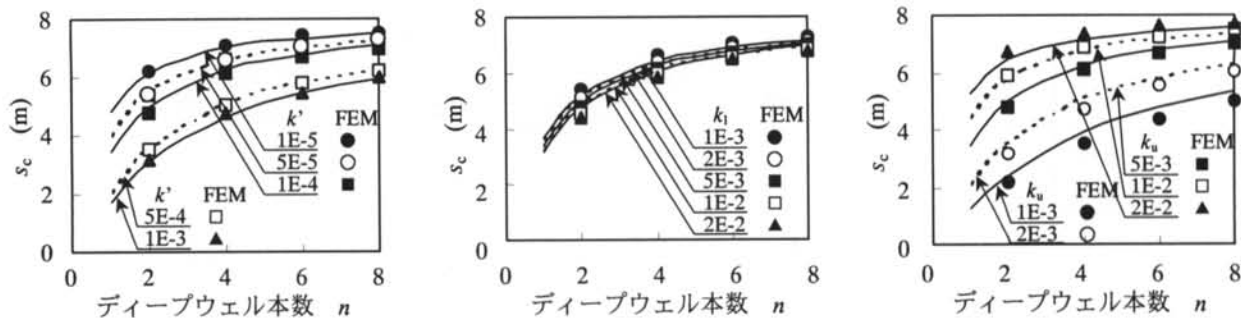


図-9 ディープウェル本数  $n$  と掘削域中心水位低下量  $s_c$  の関係 (提案法による結果と FEM 解析結果の比較)

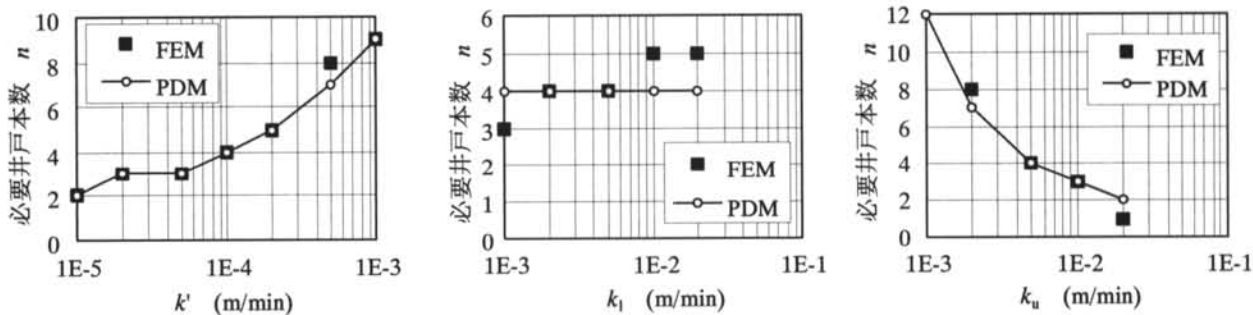


図-10 透水係数の変化による必要ディープウェル本数  $n$  の変化

## § 5. 実工事での設計事例

ここで提案する設計法を、層別揚水試験を実施して地盤の透水性を精度よく評価したうえで、設計・施工を行った現場<sup>7)</sup>でのディープウェル設計に適用し、この結果と現場での施工実績と比較して、その妥当性を評価する。なお、この現場のディープウェルの設計は、実際には FEM による軸対称浸透流解析により行われ、さらに設計の妥当性を確認するための確認揚水試験が実施されている。

### 5.1 設計条件

図-11 に設計検討を行う現場の工事と地盤の概要を示

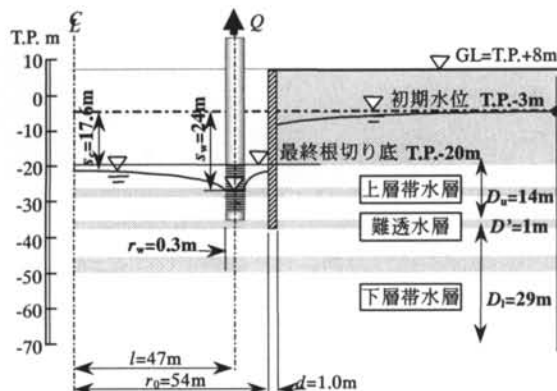


図-11 設計事例の地盤および工事の概要

す。図中の上層帯水層の地下水位を根切り底面以深 (T.P.-20m) まで低下させるためのディープウェル設計を行う。設計計算に必要な諸定数は、表-2 に示す値を用いた。帯水層および難透水層に関する情報は、事前に実施した層別揚水試験結果により求めた値を採用している。

止水壁の透水係数  $k_w$  およびディープウェルの井戸効率  $\eta$  は、事前の調査により求めることができないため、一般的な値として、 $k_w=1 \times 10^{-5} \text{ m/min}$ 、 $\eta=0.7$  を採用した。

### 5.2 設計計算結果

3.2 に示した計算手順にしたがい、計算結果を示す。

表-2 設計事例における入力パラメーター

分類	入力値	説明
1) 止水壁	$d=1\text{m}$	厚さ
	$k_w=1.0 \times 10^{-5} \text{ m/min}$	透水係数
2) 難透水層	$D'=1\text{m}$	厚さ
	$k'=4.0 \times 10^{-6} \text{ m/min}$	透水係数
3) 帯水層	$D_u=14\text{m}$	上層の厚さ
	$k_u=3.8 \times 10^{-3} \text{ m/min}$	上層の透水係数
	$D_l=29\text{m}$	下層の厚さ
	$k_l=2.8 \times 10^{-3} \text{ m/min}$	下層の透水係数
	$T=1.35 \times 10^1 \text{ m}^2/\text{min}$	全層の透水量係数
4) 掘削条件	$R=200\text{m}$	影響圏半径
	$r_0=54\text{m}$	掘削域の等価半径
5) ディープウェル	$s_0=17.6\text{m}$	必要水位低下量
	$\eta=0.7$	井戸損失による井戸効率
	$l=47\text{m}$	井戸群の設置半径
	$r_w=0.3\text{m}$	井戸の有効半径
	$s_w=24\text{m}$	井戸内水位低下量

### 5.2.1 必要揚水量の設計

- 1) 式(11)より、 $D_{eq}=11\text{m}$ .
- 2) 式(12)より、 $T'=2.5\times 10^4\text{ m}^2/\text{min}$ .
- 3) 式(8)より、 $F_w=2.1\times 10^4$ .
- 4) 式(15)より、 $s_0=13.3\text{ Q}$ .

したがって、必要水位低下量  $s_0=17.6\text{ m}$  を得るための必要揚水量は  $Q_0=1.32\text{ m}^3/\text{min}$  と算定される。

### 5.2.2 ディープウェル本数の設定

3.2.2に示した手順にしたがい、ディープウェル本数  $n$  を1~8本まで変化させて繰り返し計算を行った。この結果を  $n-Q_n$  および  $n-s_c$  の関係として図-12に示す。この図より、必要水位低下量および必要揚水量を得るためのディープウェル本数は、6本となる。計算の一例として  $n=6$  の場合の計算過程を以下に示す。

- 1) ディープウェルの本数  $n=6$  を仮定.
- 2) 式(3)より、 $\eta'=0.16$ .
- 3) 式(4)より、 $r_w'=20.2\text{ m}$ .
- 4) 式(14)より、 $F_w'=9.7\times 10^4$ .
- 5) 式(16)より、 $Q_n=1.38\text{ m}^3/\text{min}$ .
- 6) 式(17)より、 $s_c=18.3\text{ m}$ .
- 7)  $s_c>s_0=17.6\text{ m}$  であり、6本のディープウェルにより所定の水位低下量が得られることを確認。

### 5.3 現場での設計・施工との比較

この現場では、各帯水層の透水係数を求めるための層別揚水試験を実施し、この結果に基づきFEM軸対称浸透流解析を行ってディープウェルの設計を行った。この結果、必要揚水量  $Q=1.0\text{ m}^3/\text{min}$ 、必要ディープウェル本数7本が算定された。

さらに、根切り工事の本格着手前に、設置したディープウェルを用いた確認揚水試験を実施した。この試験では、運転するディープウェルの本数を段階的に増加させ、揚水量と水位低下量の関係を求めた。この結果、 $s=12.3\text{ Q}$  という関係が得られ、最終根切り段階での必要揚水量が  $Q=1.4\text{ m}^3/\text{min}$  となることが確認された。根切り工事期間中も、ほぼこの量の揚水が継続され、ドライな状態での根切りが行われ、所定の水位低下を確認した。

これらの設計・施工結果は、5.2に示した提案法による設計計算結果と合致するものであり、提案法の妥当性

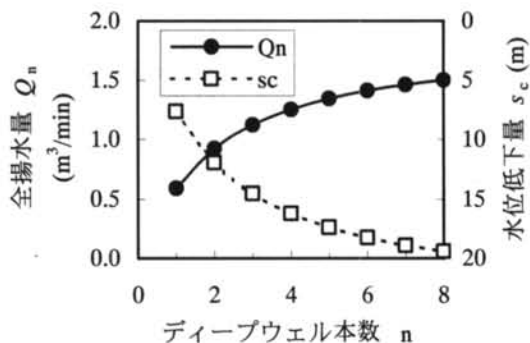


図-12 設計事例でのディープウェル本数と揚水量、水位低下量の関係

が検証された。

### § 6. おわりに

本論文では、複層帯水層地盤におけるディープウェルの簡易設計法を提案した。必要揚水量および必要ディープウェル本数の設計手順を示し、この方法の妥当性を三次元浸透流解析結果との比較により検証した。

必要揚水量については、提案法による計算結果と三次元FEM解析結果との差は、30%以下であった。必要水位低下量を得るためのディープウェル本数については、提案法による設計結果がFEM解析結果とよく一致していることが確認された。これらの結果は、本提案法が実務的に有効な手法であることを示すものである。

しかし、実際の適用にあたっては、止水壁の透水性、難透水層の透水性、ディープウェルの井戸効率などを入力する必要がある。これらのパラメーターを設計時点で正確に評価することは容易でない。過去の施工事例、周辺の類似工事での実績などを参考に設定することが一般的であるが、止水壁の透水性や難透水層の透水性は必要揚水量に、井戸効率や上層帯水層の透水性は必要ディープウェル本数に大きく影響するパラメーターであり、設定にあたっては注意が必要である。また、設計の妥当性を確認するための確認揚水試験や、施工期間中の計測管理を行いながら工事を進めることが必要である。

### <参考文献>

- 1) 高坂信章, 三宅紀治, 岡口澄夫, 仲林清文, 高杉真理子: “山王共同ビル建設工事における層別地下水処理工法の適用”, 清水建設研究報告, Vol. 69, pp.13~24, 1999.
- 2) N. Kohsaka, A. Ishikawa: “Simplified design method of deepwells placed in excavation area”, Groundwater engineering, Balkema, pp.161~167, 2003.
- 3) 高坂信章: “軸対称解析によるディープウェル本数の評価方法”, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, III-106, pp.212~213, 1995.
- 4) 高坂信章: “複層地盤におけるディープウェル簡易設計法の提案”, 第34回地盤工学研究発表会, No.669, pp.1339~1340, 1999.
- 5) 高坂信章: “止水壁内側からの揚水による帯水層の水頭低下特性”, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, III-A247, pp.494~495, 1997.
- 6) 高坂信章: “漏水性複層地盤における止水壁効果の評価方法”, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, III-A314, pp.624~625, 1998.
- 7) 松尾新一郎, 河野伊一郎: “地下水水位低下工法”, 鹿島出版会, pp.238~240, 1970.