

井戸理論を用いた多層地盤の水位低下予測

山田 祐樹 森尾 義彦
山本 彰

Prediction of Dewatering with Alternate Overlaying Permeable Layers

Using Well Hydraulics

Yuki Yamada Yoshihiko Morio
Akira Yamamoto

Abstract

The measurement of groundwater levels and the subsidence of the ground is required during construction work for an open cut tunnel in a city to ensure environmental preservation around the site. However, managing a dynamic situation involving construction requires the development of an observational procedure based on the measurement data. Thus, a simple predictive tool is necessary. This paper describes an outline method for the prediction of dewatering based on the alternate overlaying of permeable layers using well hydraulics and presents the results of our verification analysis using a three-dimensional (3D) FEM analysis. The calculated dewatering behavior using well hydraulics was in good accordance with the 3D finite element method analysis. Thus, the proposed tool is effective for the observational procedure at sites.

概要

都市部における開削トンネルなどの建設工事では、現場周辺の地盤・地下水の環境保全のため、施工時の地下水位や地盤の沈下などの管理が要求されるようになってきている。施工に伴い変化する状況を管理し対策を講じるためには、計測データに基づき次ステップの迅速な予測を行う情報化施工が必須であり、現場において対応可能な予測ツールが求められている。本報では、井戸理論を用いた多層地盤の水位低下予測計算手法の概要について述べるとともに、三次元FEM解析との比較による検証解析結果について述べる。検証解析の結果、提案した水位低下予測手法は、適用範囲に制約はあるものの、三次元FEM解析とほぼ同様の結果が得られており、現場における情報化施工のツールの一つとして有効であることがわかった。

1. はじめに

都市部における開削工事では、掘削時の地盤の安定問題に加え、施工に伴う地下水位の変化による周辺地盤への影響の評価ならびにそれらに対する対策工が求められる。その対策として揚水井および注水井による地下水対策工法が用いられることが多い。

実際の施工では、地下水位の状況等は、施工過程により次々刻々と変化しており、計測データに基づき次のステップを予測する情報化施工が必須となる。また、周辺地盤への影響を抑制・制御する場合には、地下水位低下に伴う多層地盤の地層間の漏水や地盤の沈下(主として圧密沈下)などを総合的に予測することが必要であり、現場において対応可能な実用的な予測計算ツールが求められている。

一方、地下水対策工の設計¹⁾に用いられる揚水井(あるいは注水井)による井戸公式は、解析メッシュの作成が不要、透水係数や層厚、影響半径などのパラメータにより計算が可能、表計算ソフト等を用いて比較的簡易に短

時間で検討ができる等の利点があり、揚水量や注水量を変化させるなど、試行錯誤的に繰り返し検討を行う場合に適している。しかし、単位層厚当たりの解析方法であるため、単一層地盤の検討しか行うことができないという制約があった。そこで、井戸理論を用いて多層地盤の地層間の漏水の影響を考慮した簡易予測計算手法の開発を行った。本予測手法を用いることにより、計測データに基づいた周辺地盤への影響の予測や対策工の検討を比較的短時間で行うことが可能になると考える。

本報では、簡易な井戸理論による多層地盤の水位低下予測手法(以下、簡易法と呼ぶ)の概要について述べるとともに、三次元FEM解析との比較による検証解析結果について述べる。

2. 多層地盤の水位低下予測手法

2.1 地下水解析対象

検討に用いた地層・地下水理モデルをFig. 1に示す。上部から埋土層、軟弱粘土層(正規圧密粘土)、上部被圧帯

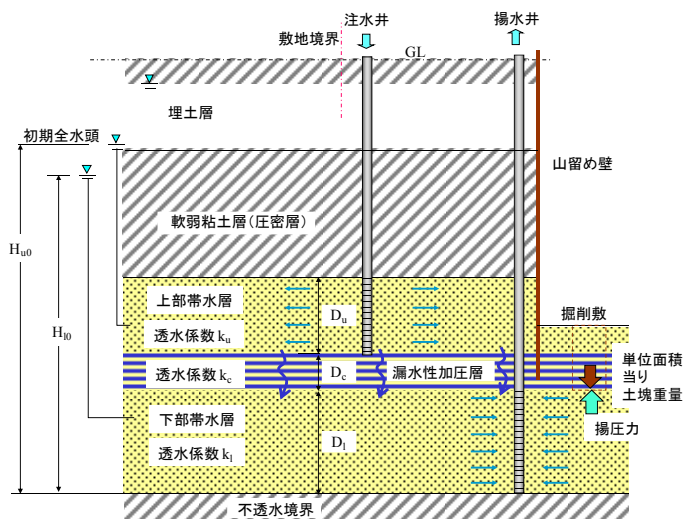


Fig. 1 地下水解析対象の地層断面図
Sectional View on Geological Strata

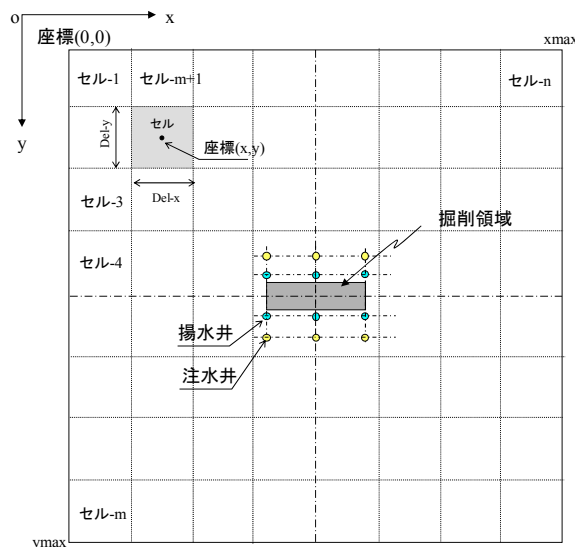


Fig. 2 解析領域と分割セルの平面図
Analytical Domain Divided into Cell

水層、漏水性難透水層(加圧層)、下部被圧帯水層の層序を有するモデルを対象としている。掘削のための山留め止水壁は漏水性の難透水層まで根入れしており、掘削に伴い、掘削数で盤ぶくれが生じるものとする。

なお、各地層の土質、水理特性は一樣とし、井戸は完全貫入条件とする。また、帯水層の全水頭低下量、上昇量の算定は井戸公式による。

2.2 地下水解析フロー

簡易法による多層地盤の水位低下予測手法の解析手順を以下に示す。

- 1) 掘削地盤の盤ぶくれに対して、所定の安全率を満足する下部被圧帯水層の全水頭を求める。揚水井はこの全水頭を満たす配置とする。
- 2) 下部帯水層の全水頭低下によって加圧層に下向きの地下水流(漏水)が生じる。そして、それに伴い上部帯水層の全水頭が低下する。
- 3) 加圧層の漏水により生じた上部帯水層の全水頭低下に対応する上部粘性土層の圧密沈下量を算定する。
- 4) この圧密沈下を防止するために、注水井を上部帯水層に設け、上部帯水層の低下した全水頭を元の全水頭まで回復させるための注水量を算出する。

2.3 解析領域

解析領域と分割セルの定義を示した平面図をFig. 2に示す。簡易法の特徴として、解析領域は境界条件に左右されず任意に設定できることが挙げられる。それは、簡易法における解析領域は、井戸公式の重ね合わせにより全水頭低下量を計算する領域であり、FEM解析における流入境界とは異なるためである。全水頭低下量の変化に伴い、影響半径は変化するため、流入境界が解析結果に大きく影響するFEM定常浸透流解析では、影響半径の変

更に伴い解析モデルを再作成する必要がある。また、透水性の異なる複数の帯水層を対象にした場合においても、簡易法では各層ごとに影響半径を設定できるメリットがある。簡易法では想定される影響半径よりも大きな解析領域を予め設定しておけば、影響半径の変化に対応可能であり、試行錯誤的に繰り返し検討を行う場合に適しているといえる。解析領域はセルに分割し、全水頭低下量(あるいは全水頭上昇量)を各セルの中心座標位置で代表させる。揚水井や注水井の位置に合わせて、セルを分割する必要がないため、揚水井や注水井の追加や削除、移動した場合などの検討が容易なことも利点として挙げられる。

2.4 下部帯水層の全水頭低下分布

下部帯水層の掘削領域の全水頭を盤ぶくれ安定が確保されるまで低下させる。

帯水層条件として層厚、透水係数、影響半径を、また揚水井条件として本数と各井戸の座標および揚水量を与え、まず単独井戸による各セルの中心座標位置の全水頭低下量を(1)式に示す井戸公式で求める。次に、複数井戸による重ね合わせによって解析領域全体の各セル中心位置の全水頭低下量を算出する。

$$\Delta h_1 = H_{10} - h_i = \frac{Q}{2\pi k_l D_l} \ln \left(\frac{R}{r_i} \right) \quad (1)$$

ここに、 Δh_1 :全水頭差

H_{10} : 初期全水頭(m)

h_i : 任意点の全水頭(m)

Q : 揚水量(m^3/s)

k_l : 下部帯水層の透水係数(m/s)

D_l : 下部帯水層厚(m)

R : 影響半径(m)

r_i : 揚水井と任意点の距離(m)

2.5 加圧層の漏水量と上部帯水層の全水頭低下量

漏水性加圧層の単位面積当りの漏水量はFig. 3に示すように上部帯水層の初期全水頭と下部帯水層の低下後の全水頭の差、加圧層の透水係数および層厚を用いて、一次元流れとして(2)式で算定する。

$$q = k_c(H_{u0} - H_{l1})/D_c \quad (2)$$

- ここに、 H_{u0} : 上部帯水層の初期全水頭(m)
- H_{l1} : 下部帯水層の低下後の全水頭(m)
- k_c : 加圧層の透水係数(m/s)
- D_c : 加圧層厚さ(m)

加圧層の漏水による上部帯水層の全水頭低下量は、各セルの中心に仮想井戸を仮定し、各セルの漏水量を仮想井戸の揚水量として、井戸公式を用いて計算する。

2.6 上部帯水層の水頭低下による粘土層の圧密沈下

圧密沈下量は一次元圧密により計算を行う。Fig.4に水頭低下による有効応力増加の概念図を示す。各セルの中心位置における上部帯水層の全水頭低下量をもとに水圧の減少に伴う有効応力の増加分(増加圧密荷重)を算出し、 e - $\log P$ 関係より最終沈下量を計算する。粘性土の圧密特性は、Fig.5に示す3種類を扱う。

タイプIは過圧密の場合であり、全水頭低下前の圧密応力が圧密降伏応力より小さく、また、全水頭の低下により増加した圧密応力が圧密降伏応力を越えない場合である。タイプIIは、全水頭低下前の圧密応力が圧密降伏応力より小さいが、全水頭の低下により増加した圧密応力が圧密降伏応力を越え、過圧密から正規圧密に変化する場合である。タイプIIIは正規圧密の場合であり、全水頭低下前の圧密応力が圧密降伏応力に等しく、全水頭の低下により、正規圧密領域で変化する場合と定義する。地下水揚水期間には具体的な工事期間(日数)を与えて圧密度と時間係数の関係から、圧密度を求める。各種類の応力範囲と沈下量は e - $\log P$ 関係の種類と(3)~(5)式に示す最終沈下量の計算式の定義にしたがって算定する。

タイプI $P_0 + \Delta P \leq P_c$

$$S_f = H \frac{C_s}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \quad (3)$$

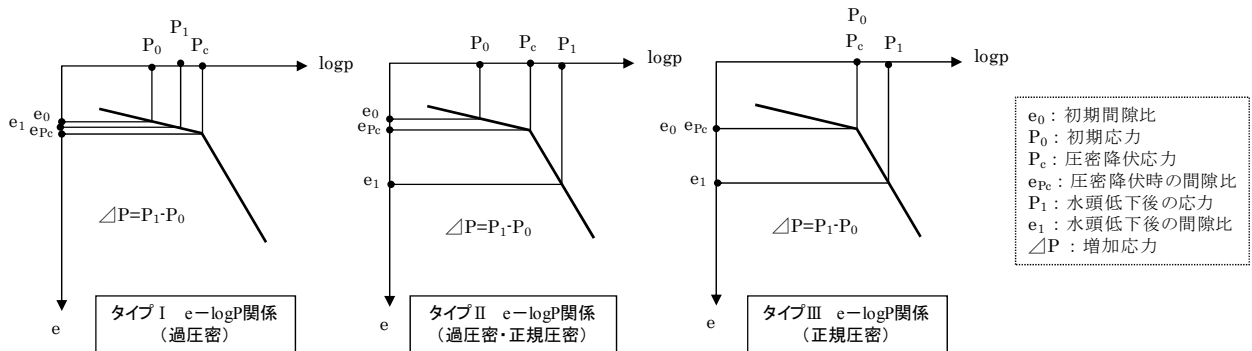


Fig. 5 粘性土の圧密特性
Properties of Consolidation

タイプII $P_0 < P_c$ and $P_0 + \Delta P > P_c$

$$P_1 = \Delta P + P_c$$

$$S_f = H \frac{C_s}{1+e_0} \log \frac{P_c}{P_0} + H \frac{C_c}{1+e_{Pc}} \log \frac{P_1}{P_c} \quad (4)$$

タイプIII $P_0 = P_c$

$$S_f = H \frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \quad (5)$$

- ここに、 S_f : 最終沈下量(m)
- e_0 : 初期間隙比
- P_0 : 初期応力(kN/m²)
- P_c : 圧密降伏応力(kN/m²)

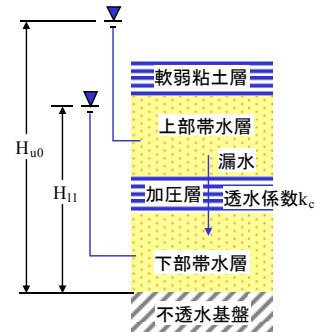


Fig. 3 加圧層の漏水
Leakage through aquiclude

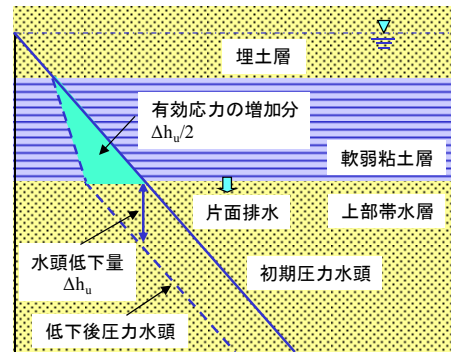


Fig. 4 水頭低下による有効応力増加の概念
Consolidation of Clay Layer by Lowering Hydraulic head

- e_{p_c} : 圧密降伏応力時の間隙比
- ΔP : 増加応力(kN/m²)
- C_s : 弾性変形領域圧縮指数
- C_c : 正規圧密領域圧縮指数

先の最終沈下量に圧密度を乗じて(6)式により軟弱粘土層の圧密沈下分布を求める。

$$S = S_f \cdot U \tag{6}$$

ここに、S : 沈下量(m)

U : 圧密度

2.7 注水による沈下抑制

軟弱粘土層の圧密沈下の抑制対策として低下すると予測された上部帯水層の被圧水頭を井戸からの注水により元の水頭に回復させるために地下水頭上昇の検討を行う。上部帯水層において井戸本数とその座標および注水量を与え、各注水井と各セルの中心座標の放射距離における全水頭上昇量を井戸公式で求めるとともに複数の井戸による重ね合わせで各セルの全水頭上昇量を算定する。また、先に計算された各セルの全水頭低下量と注水による全水頭上昇量を足し合わせ、上部帯水層の漏水と注水による全水頭分布を計算する。

3. 三次元浸透流解析による検証

3.1 解析条件および解析ケース

簡易法による地下水位低下予測の適用範囲を検証するために、漏水量に大きく影響を与えられと考えられる加圧層ならびに上部帯水層の透水係数をパラメータとして、三次元FEM解析との比較を行った。

比較検証解析の対象断面をFig. 6に、掘削領域と揚水ならびに注水井の配置図をFig. 7に示す。上位から埋土層8m、軟弱地盤(正規圧密粘土)3m、上部被圧帯水層11m、漏水性難透層(加圧層)6m、下部被圧帯水層21mの層序を有するモデルを比較検証解析の対象としている。また、延長60m、幅40mの掘削領域の周囲に地下水対策として揚水井および注水井をそれぞれ6箇所ずつ設置した場合を想定している。盤ぶくれの安定を確保するために、掘削範囲の下部帯水層の全水頭を $\Delta s = 5.75\text{m}$ 低下させた場合の地層間の漏水量、上部帯水層の全水頭低下量について比較を行った。

簡易法の解析領域と井戸配置の平面図をFig. 8に示す。前述したように簡易法における解析領域は、井戸公式の重ね合わせにより全水頭の低下量を計算するのに十分な領域として、後述する(8)式による影響半径を包含する1000m×1000mの範囲を設定した。1セルは20m×20mとし、解析領域の総セル数は2500としている。掘削領域を解析領域の中央部となるように配置した。

三次元浸透流解析には汎用FEM解析ソフト(解析コード: Soil Plus)を用いた。FEM解析モデルをFig. 9に示す。FEM解析でのモデル化領域は、(8)式を用いて以下のように設定を行った。

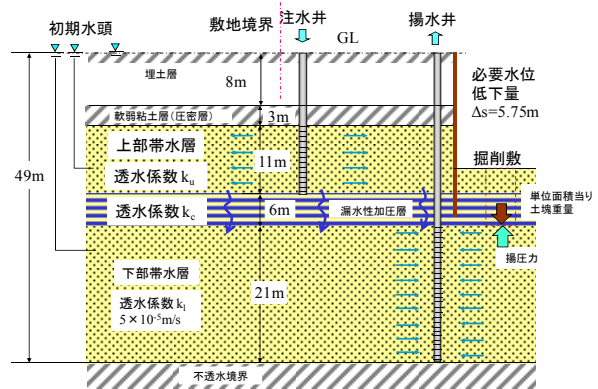


Fig. 6 検討断面

Sectional View on Geological Strata and Operation Wells

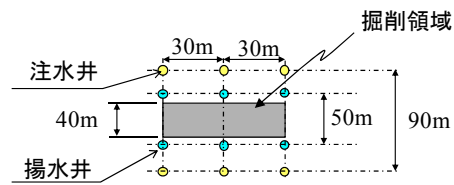


Fig. 7 検証解析の掘削領域の平面図

Plane View of the Excavation Site and Layout of wells

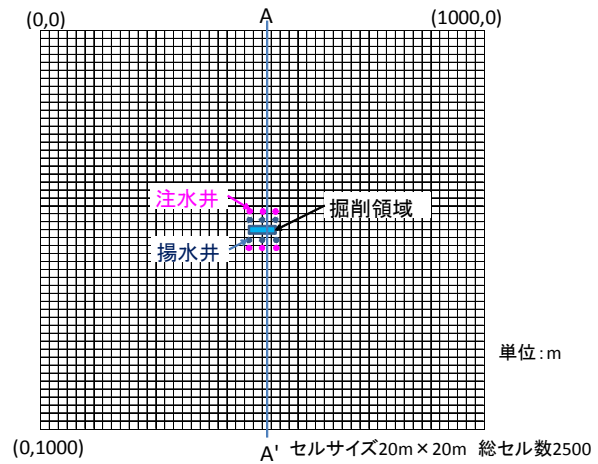


Fig. 8 簡易法の解析領域と井戸配置の平面図

Analysis Model of Simple Method

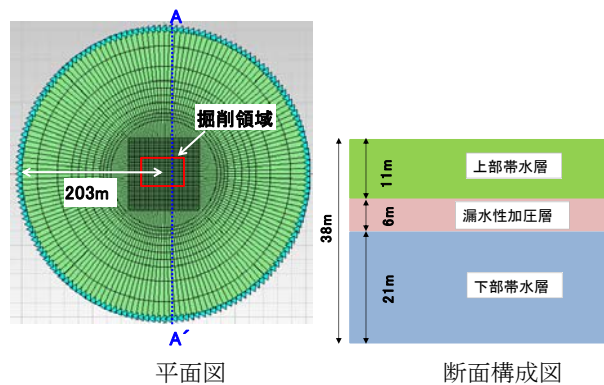


Fig. 9 FEM解析モデル

Analysis Model of FEM

・掘削領域および井戸配置を考慮した周長と等価となる
 仮想井戸半径を(7)式により算定する。

$$r_0 = \frac{a+b}{\pi} \quad (7)$$

ここに、 r_0 ：仮想井戸半径(m)

a：掘削領域長さ(m)

b：揚水井配置を考慮した幅(m)

・必要全水頭低下量より影響半径を(8)式により算出する。

$$R = 3000 \cdot \Delta s \sqrt{k_1} \quad (8)$$

ここに、R：影響半径(m)

Δs ：井戸周りの水頭低下量(m)

k_1 ：下部帯水層の透水係数(m/s)

・仮想井戸半径($r_0=35\text{m}$)に影響半径($R=168\text{m}$)を加えたものを解析範囲(203m)とした。

境界条件は、モデル外周部を流入境界(全水頭49m)とし、流出境界は各揚水井位置で水頭規定(全水頭41.1m)とした。

検証解析のケース一覧をTable 2に示す。検証解析①では、下部帯水層および上部帯水層の透水係数を一定とし、加圧層の透水係数を5種類(1×10^{-6} , 5×10^{-7} , 1×10^{-7} , 5×10^{-8} , $1 \times 10^{-8} \text{m/s}$)変化させ、上部帯水層の全水頭低下量および加圧層からの漏水量の比較を行った。検証解析②では、下部帯水層と加圧層の透水係数を一定とし、上部帯水層の透水係数を6種類(5×10^{-6} , 1×10^{-5} , 3×10^{-5} , 5×10^{-5} , 1×10^{-4} , $5 \times 10^{-4} \text{m/s}$)変化させ、上部帯水層の全水頭低下量および加圧層からの漏水量の比較を行っている。検証解析①, ②では掘削前の地盤を対象に解析を行っている。また、検証解析③では、簡易法において上部帯水層の全水頭低下に伴う軟弱地盤の圧密沈下量の算出を行うとともに、注水井からの注水を考慮した場合についてFEM解析と簡易法の比較を行っている。FEM解析では山留め部分の要素を削除し、不透水としている。

3.2 加圧層透水係数をパラメータとした解析結果

検証解析①により得られたA-A'断面における下部帯水層の全水頭分布をFig. 10に、上部帯水層の全水頭分布をFig. 11に示す。井戸からの揚水により、下部帯水層および上部帯水層の水頭低下が生じているのがわかる。下部帯水層の全水頭分布を比較すると、FEMに比較して若干水頭低下量が小さいものの、ほぼ同様の値を示している。

次に、上部帯水層に着目すると、FEM、簡易法ともに加圧層の透水係数が大きくなるに従い、上部帯水層の水頭低下量が大きくなっているのがわかる。このことは、帯水層に挟まれた加圧層からの漏水が考えられる場合、上部帯水層の水頭低下が生じると考えられ、上部帯水層の水頭低下に伴う周辺環境への影響を考慮した検討が必要であることを示している。FEMと簡易法による結果を比較すると、加圧層の透水係数が $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 程度までは、解析方法による大きな違いはみられない。しかし、それ以上の透水係数では、簡易法の方が、水頭低下量が大きくなる傾向がみられる。

Table2 解析ケース一覧

Hydraulic Parameters			
	検証解析①	検証解析②	検証解析③
上部帯水層の透水係数 (m/s)	3×10^{-5}	5×10^{-6} , 1×10^{-5} 3×10^{-5} , 5×10^{-5} 1×10^{-4} , 5×10^{-4}	3×10^{-5}
加圧層の透水係数 (m/s)	1×10^{-6} , 5×10^{-7} 1×10^{-7} , 5×10^{-8} 1×10^{-8}	1×10^{-8}	1×10^{-7}
下部帯水層の透水係数 (m/s)	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}
注水の有無	無	無	有

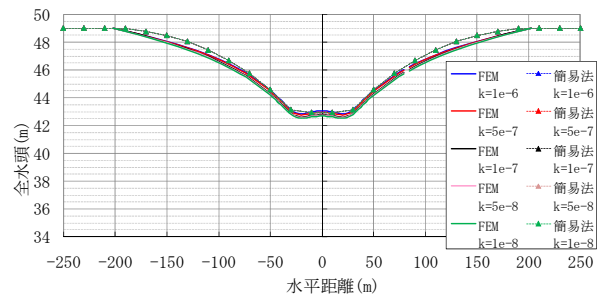


Fig. 10 下部帯水層の全水頭分布(検証解析①)

Hydraulic Head of Lower Confined Aquifer

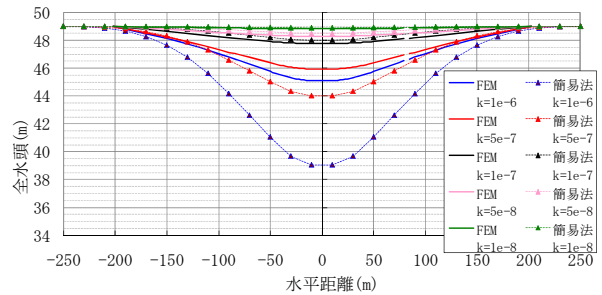


Fig. 11 上部帯水層の全水頭分布(検証解析①)

Hydraulic Head of Upper Confined Aquifer

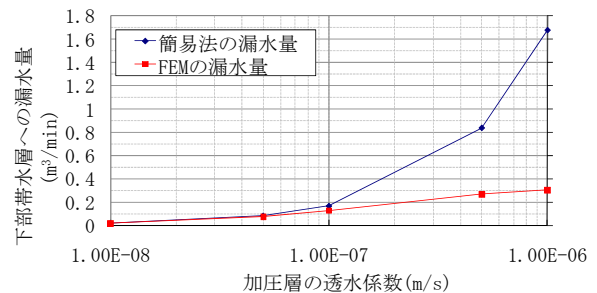


Fig. 12 加圧層の透水係数と漏水量の関係(検証解析①)

Correlation between Permeability and Leakage through Aquiclude

Fig. 12に加圧層の透水係数と加圧層から下部帯水層への合計漏水量の関係を示す。FEMと簡易法による結果を比較すると、全水頭分布の場合と同様に、加圧層の透水係数が $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 程度までは、解析方法による違いは

みられない。しかし、それ以上の透水係数では、簡易法の方が、合計漏水量が大きくなる傾向がみられる。

これらの理由として、簡易法では下部帯水層の水位低下により生じる上部帯水層の水頭の変化を考慮していないことなどが考えられ、加圧層の透水係数が大きい場合には、その影響が大きくなり漏水量が多くなったと考えられる。

3.3 上部帯水層透水係数をパラメータとした解析結果

検証解析②により得られたA-A'断面における上部帯水層の全水頭分布をFig. 13に示す。FEM、簡易法ともに上部帯水層の透水係数が小さくなるに従い、上部帯水層の全水頭が低下する傾向がみられる。

Fig. 14に上部帯水層の透水係数と加圧層から下部帯水層への合計漏水量の関係を示す。FEMと簡易法による結果を比較すると、FEM解析では上部帯水層の透水係数が大きくなるに従い、漏水量が増加するのに対し、簡易法では、上部帯水層の透水係数は漏水量に影響を与えないのがわかる。簡易法とFEM解析の漏水量の大きさは、加圧層の透水係数を変化させた場合の1/10程度と小さく、上部帯水層透水係数については $3.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 以上であれば適用可能であると考えられる。

検証解析①および②の結果より、簡易法では漏水に伴う上部帯水層の水頭の変化を考慮していないため、加圧層の透水係数が大きい場合には、漏水量および上部帯水層の水頭低下量を大きく見積もることとなる。今後異なるモデルを用いてFEMとの検証解析を行い、簡易法の検討可能範囲を明確にした上で適用していく必要がある。

3.4 圧密沈下量と注水による水頭上昇量

検証解析③により得られたA-A'断面における上部帯水層の注水前後の全水頭分布をFig.15に示す。また、注水前の上部帯水層水頭低下に伴う軟弱地盤の圧密沈下量の分布をFig.16に示す。上部帯水層の水頭低下を元に圧密沈下量を算出することにより、周辺地盤への影響範囲を数値により把握することが可能である。Fig.15では、注水井による注水前後の上部帯水層の全水頭分布を示している。簡易法の方が、全水頭低下量が若干小さい値を示しているものの、FEM、簡易法ともに注水により水頭が回復し、初期水頭近くまで上昇しているのがわかる。簡易法では、水頭低下予測に加え、沈下抑制対策についても検討が可能であることがわかった。

4. おわりに

井戸理論を用いた簡易な多層地盤の水位低下予測計算手法の概要について述べるとともに、三次元FEM解析との比較により予測手法の検証を行った。その結果、加圧層の透水係数が $1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 以下において予測が可能であることがわかった。今回提案した予測計算手法は、FEM解析のように複雑な三次元モデルの検討は難しいものの、解析対象とした単純な多層地盤では、比較的短時間での検討が可能である。

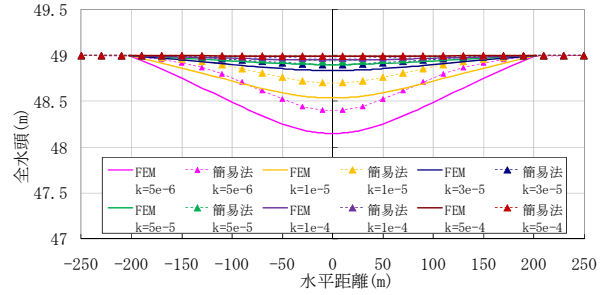


Fig. 13 上部帯水層の全水頭分布(検証解析②)
Head of Upper Side Aquifer

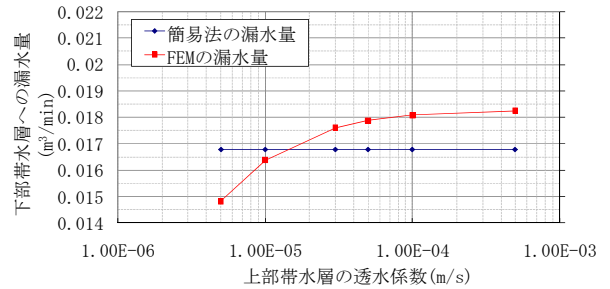


Fig. 14 上部帯水層の透水係数と漏水量の関係
(検証解析②)

Relationship between Permeability and Leakage through Aquiclude

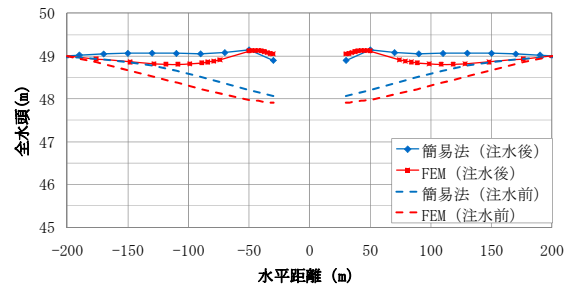


Fig. 15 注水前後の上部帯水層の全水頭分布の比較
(検証解析③)

Comparison of Hydraulic Head of Upper Aquifer

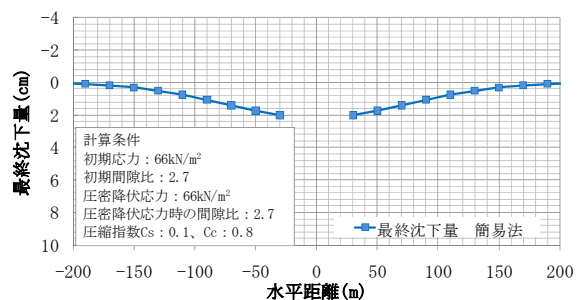


Fig. 16 水頭低下に伴う圧密沈下の分布(検証解析③)
Distribution of Consolidation Settlement

参考文献

- 1) 栗原 正美, 須藤 賢, 深見 秀樹, 上野 孝之: 井戸の揚水能力変化を考慮した群井設計法の提案, 大林組技術研究所報No.61, pp.77-80, (2000)