

掘削と周辺地盤の変状

4. 掘削と水理条件の変化

西 垣 誠 (にしがき まこと)

岡山大学教授 環境理工学部環境デザイン工学科

4.1 はじめに

ここでは、地下水あるいは土中水のある所で掘削を行った際に、どのような現象が掘削面およびその周辺に生じるかについて述べる。根切り工事のための掘削の際の地下水処理としては、①掘削底面まで地下水位を低下させる工法と、②掘削部の荷重とバランスさせて、地下水位を制御する工法とが考えられる。

掘削底面まで地下水位を低下させる工法は、地下水位を低下させても周辺の地盤に変状をきたさないか、変状をきたしても問題がないときに用いられる方法である。また、地盤の変状だけでなく、地下水位を低下させても、井戸の枯渇等の地盤環境問題が生じないように所に実施される。しかし、一般には、このような場所は少なく、地下水位を低下させた事によって表-4.1に示すような問題が生じる。

表-4.1 地下水処理における諸問題

地下水位を低下させた場合	地下水位を低下させない場合
(a) 周辺の井戸の枯渇 (b) 地下水汚染 (c) 地上の植生への影響 (d) 揚水の処理 (e) 周辺の地盤沈下	(a) 止水壁の止水性 (b) 止水壁と難透水性層あるいは地盤固結層の止水性 (c) 難透水性層あるいは地盤固結層の水圧とリバウンドに対する変形 (d) 工事完成後の流況阻害 (e) 注入液の水質汚染

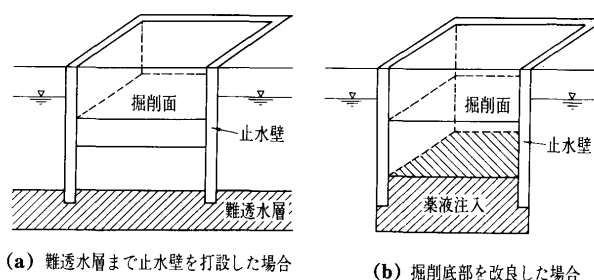
すなわち、地下水位を低下させた事によって、掘削地周辺の枯渇問題、また、地下水を揚水することによって、塩水や汚染水が集まり地下水の汚染が生じることがある。特に塩水遡上の問題は沿岸地区では重要な課題である。

一方、都市部では、揚水した水の処理が大きな問題になる¹⁾。水質の良い水で、近くに河川があれば放流ができるが、河川がなく下水処理する場合には、多額の処理費が必要となる。

さらに、地下水位の低下によって地盤沈下が生じる場合には、沈下の防止のための復水工法等の対策を検討しなければならない²⁾。

上記の制約条件がきわめて強い場合には、地下水位を低下させることが困難となる。そのような時には図-4.1のように掘削部周辺に止水壁を設け、また下部に難透水性の粘土層がある場合、その層まで止水壁の根入れ

をして、掘削面への湧水量をきわめて少ないものにする。掘削面の下部に難透水性層がない場合には、図-4.2のように薬液注入などの止水工法によって難透水性層を人工的に作成して、難透水性層の下部の揚圧力とバランスさせる方法もある。



(a) 難透水性層まで止水壁を打設した場合

(b) 掘削底部を改良した場合

図-4.1 地下水を低下させないで地盤掘削をする方法の例

ここでの問題は、表-4.1に示した。すなわち、止水壁の止水性であり、止水壁が設計どおりに施工されているかが大きな問題である。止水性に関しては、図-4.2のように掘削内に深井戸を設け、揚水を行い、掘削面内の地下水の低下状況を計測するとある程度わかる。しかし、止水壁の強度については現時点では正確に検査する方法がない。

止水壁と難透水性層の間の止水性についても同様であり、掘削面内に外部より湧水していない場合には、揚水による掘削面内の地下水位は均等に低下する。したがって、もし底部から湧水していると、その湧水地点近くの観測井の水位低下が他の地点と比較して異常な挙動をする。これより掘削底部の止水性がどの程度か、難透水性層が底部に連続して存在するかが確認できる。

掘削に際して、掘削面の安定がきわめて重要であるが、ここでは掘削による周辺の地下水挙動や地盤沈下について述べることにし、掘削面の安定に関しては参考文献

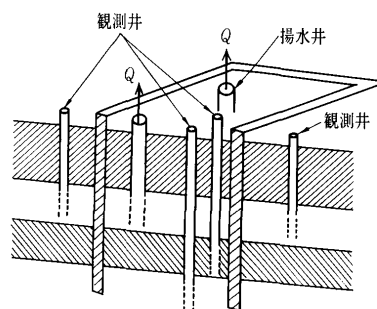


図-4.2 止水壁の止水性の検討

講 座

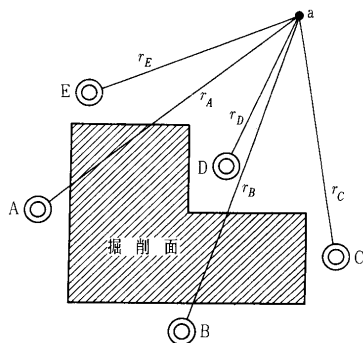
献^{2)~8)}を参照していただきたい。

4.2 掘削周辺の地下水挙動の予測

4.2.1 理論的な方法

掘削部の周辺の地下水位の挙動の予測は、掘削部で地下水を揚水している場合にはきわめて重要な課題である。

掘削部での地下水位低下はディープウェルやウェルポイント等によって行われるが、その揚水量を考慮して周辺の地下水位低下を予測する従来の方法は、重ね合わせの方法で求められる。図—4.3のように、掘削部の周囲にディープウェルを設置したときの点(a)での水位低下(s_a)は、1～5の揚水井からのそれぞれの揚水による水位低下量を重ね合わせて求めることができる。すなわち、



図—4.3 群井による地下水位低下

$$s_a = \frac{1}{2\pi kD} \sum_{i=1}^n Q_{wi} \ln \frac{R}{r_i} \dots\dots\dots (1)$$

ここで Q_{wi} は i 番目の井戸からの揚水流量であり、 r_i は i 番目の井戸から a 点までの距離である。 R は影響半径で、 D は帯水層厚である。 n は揚水井の総数、 k は透水係数である。

非定常の場合にも、同様に次式を得る。

$$s_a = \frac{1}{4\pi kD} \sum_{i=1}^n Q_{wi} \left[\ln \frac{t}{r_i^2} - \ln \frac{S_s}{2.25k} \right] \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 t は揚水時間で、 S_s は比貯留係数である。

式(1)での R の値は、被圧帯水層で透水性がよい地盤では経験的に2 000～3 000mを用いている。また、配置された各井戸での揚水流量の Q_{wi} は、掘削内の水位を所定の水位になるように設定するが、普通は揚水流量 Q_{wi} は一定と仮定して計算を行う。しかし、この値も実際には、境界条件の影響で各々の揚水井で異なった値を示す。

量 Q_{wi} は一定と仮定して計算を行う。しかし、この値も実際には、境界条件の影響で各々の揚水井で異なった値を示す。

非定常の場合の揚水流量 Q_{wi} も同様に設置場所によって異なり、さらに時間的にも変化する値である。

このように考えると、掘削部周辺の地下水位低下量を的確に簡易計算で予測することは困難であることがわかる。

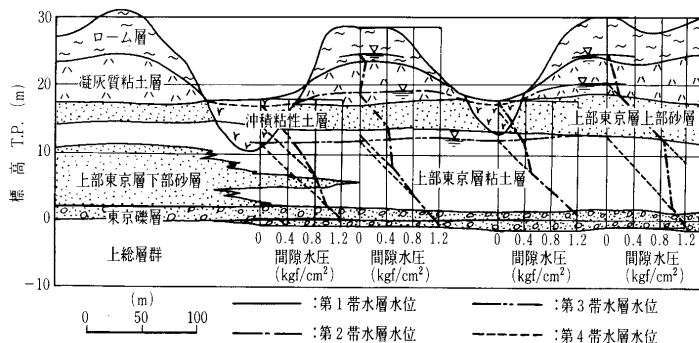
4.2.2 数値解析

前節4.2.1の影響半径という漠然とした値を用いるのではなく、地形の水理環境を調査し、その境界での涵養量を推定して、数値解析によって周辺の地下水位低下を予測する方法がある。ここでは、有限要素法による数値解析について述べる。

1) 三次元解析

対象としている地盤を三次元でモデル化することによって、揚水井での揚水と山留めの下からの回り込み浸透を考え、各帯水層内の複数の地下水位の挙動を予測することが可能である。しかし、このようなモデルの作成のためには、地盤の各層の透水係数や比貯留係数等の浸透特性を事前に調査しておく必要がある。実際に東京都内での地下鉄の駅舎を掘削する際の、周辺の地下水の挙動を三次元の飽和-不飽和浸透解析によって予測した例を示す^{9),10)}。対象地は東京都港区～品川区にかけてであり、淀橋台と呼ばれる台地面に当たっており、台地の地盤標高は T.P. +30～32m となっている。図—4.4に示すように台地における地質分布は上位からローム層、凝灰質粘土層、上部東京層上部砂層、上部東京層粘土層、上部東京層下部砂層、東京礫層、上総層群の順に分布している。

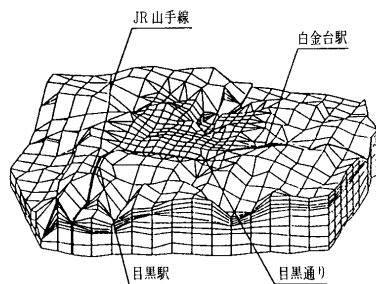
調査地の主要な帯水層としてはローム層の基底付近に分布する不圧地下水、上部東京層上部砂層中の被圧地下水、上部東京層下部砂層および東京礫層中に分布する被圧地下水の三つの帯水層が分布しており、上位から第1帯水層、第2帯水層、第3帯水層とする。それぞれの帯水層に対して原位置透水試験を実施し、表—4.2に示すように上総層群から関東ローム層までの7層と部分的に存在する沖積粘土層も考慮して、8層の構造を対象とし



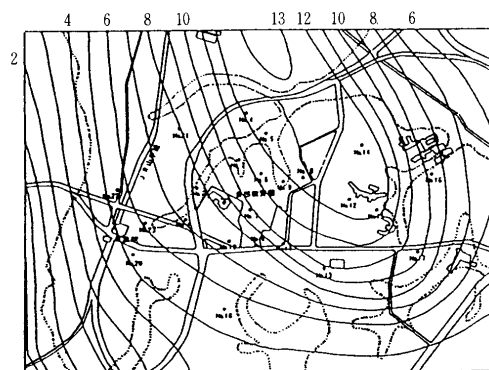
図—4.4 各帯水層の地下水分布⁹⁾

表—4.2 同定した帯水層定数

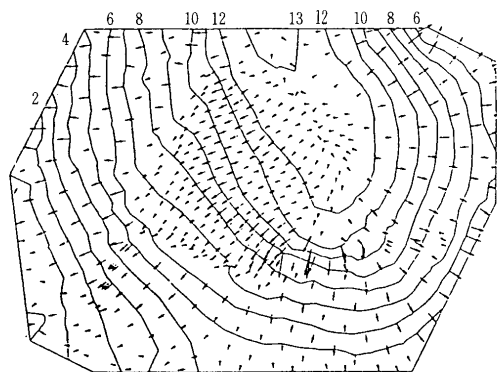
地 層 名	透水係数 (cm/s)		有効間隙率	比貯留係数 m^{-1}
	縦方向	横方向		
沖積粘性土層	3.3×10^{-6}	3.3×10^{-6}	0.03	1.0×10^{-3}
ローム層	3.3×10^{-4}	1.65×10^{-4}	0.2	1.0×10^{-3}
凝灰質粘土層	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-7}	0.03	1.0×10^{-3}
上部砂層	6.5×10^{-4}	6.5×10^{-4}	0.3	1.0×10^{-5}
粘土層	3.3×10^{-7}	3.3×10^{-7}	0.03	1.0×10^{-3}
下部砂層	3.3×10^{-7}	1.7×10^{-4}	0.3	1.0×10^{-5}
東京礫層	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	0.15	1.0×10^{-5}
上総層群	1.2×10^{-6}	1.2×10^{-6}	0.03	1.0×10^{-3}



図—4.5 三次元飽和-不飽和浸透解析の要素分割⁹⁾



(a) 計測された地下水位



(b) 解析された地下水位

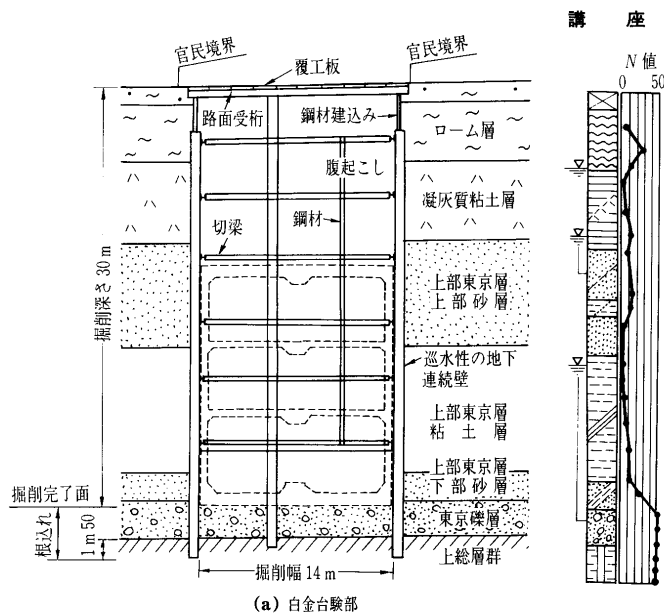
図—4.6 計測および解析による地下水位の等高線図⁹⁾

た帯水層の浸透特性を同定した。

降雨量は過去27年間の平均より、1374mm/yを基準として、原位置での地下水位の観測データを用いて試行計算より蒸発量を考慮した有効降雨量を700mm/yとした。

これらの値を用いて、飽和-不飽和三次元浸透解析の定常解析を実施して、各帯水層の現状水位が解析によって再現できるかどうかを検討した。図—4.5に要素分割図を示す。作成したモデルの節点数は4416、要素数は4206である。第3帯水層に対して、計測値と解析値の比較を行った結果を図—4.6に示す。

計測結果と解析結果とを比較すると妥当な範囲で一致していることより、このモデルを用いて掘削工事中、工事完成後の各層の地下水位の挙動を予測した。駅部の掘削の構造を図—4.7に示す。開削部の掘削底面での水位は一定(G.L.-30m)とした。また、シールドの発進、到達部となる柱列式地下連続壁からの漏水量は同様の工事を行った他工区の実績を参考にして算定した。また、



(a) 白金台駅部

図—4.7 駅部掘削計画⁹⁾

遮水性の地下連続壁からの漏水量も他工区での漏水調査結果を参考にして求めた値を用いた。

これらの条件で立坑掘削期間中の非定常解析を行った。その結果、第3帯水層で5cm程度の水位低下がシールド発進部に生じているだけであった。第2帯水層でも1~3cm程度の低下で、第1帯水層ではほとんど影響しないことがわかった。

工事完成後もシールドトンネル部からの漏水量を他工区を参考に考慮し、定常解析を行った。その結果、駅部の上流側で地下水がダムアップされて、各層とも微小だけ(最大0.6cm程度)地下水位が上昇し、駅部の下流では0.4cm程度低下する結果を得た。

このような微小な影響の結果が得られたのは、工事完成後の地下鉄構造物が地下水の流れを遮断しないようにトンネルの縦断線形を変えて、シールド部をできるだけ粘土層の中に入れるように設計した事による。

このように三次元浸透流解析ではあらゆる条件を考慮することが可能となり、きわめて有効であるが、現時点では莫大な記憶容量が必要であり、演算時間がかかるなどで、どんな問題でも解けるような状態ではない。また、三次元モデルを作成するには詳細な地盤調査が必要である。

2) 平面二次元浸透解析

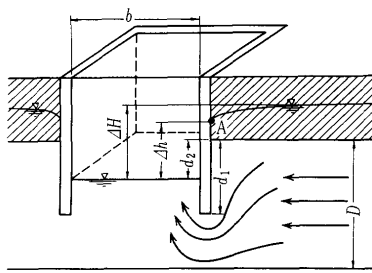
① 掘削問題

平面二次元浸透解析は平面的な水理境界や、ディープウェルの配置が考慮でき、マイクロコンピュータでも解析できるため、取扱いも簡単である¹¹⁾。

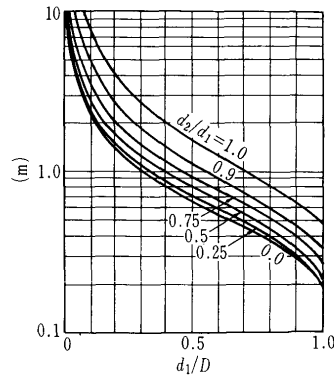
平面二次元解析では、図—4.8に示すような鉛直方向の浸透が取り扱いにくい。すなわち、浸透はDupit(デュピット)の仮定により水平流のみを対象とする。

図—4.8の山留めの下での迂回浸透を解析する際には、ただ、単に浸透断面が狭くなったことを考慮した透水量係数($k \cdot D$)を用いて計算すると、山留め背面の地下水位(図—4.8中のA点)が実際より低くなる傾向がある。また、掘削面への浸出流量を大きく予測する事が多い。

このような迂回浸透を平面解析で考慮するために、山



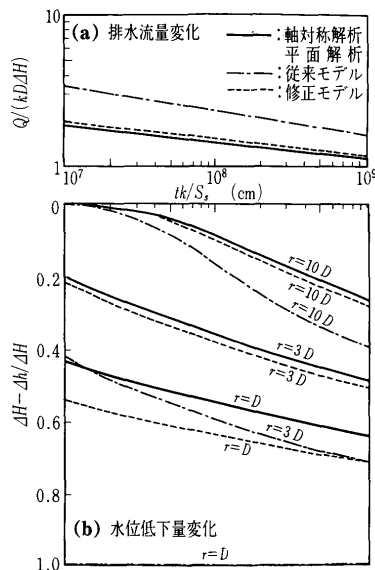
図—4.8 山留めの下の迂回浸透

図—4.9 補正係数 m 値と各パラメーターの関係
($b/(2D) \geq 1.0$)

留めの所の透水量係数を補正する必要がある。図—4.9は種々の条件での山留めの根入れ深さを考慮して、二次元と三次元の数値解析により補正係数 m を求めた結果である¹⁰⁾。ここで、図—4.9中の d_1 , d_2 , D は図—4.8に示している。なお、この値は、 $b > 2D$ の条件の時のみ適用される値である。すなわち、帯水層厚に比べて掘削幅が大きい場合である。この図より山留めの根入れ深さ、帯水層厚および掘削部の水位から m 値を求めることができる。山留めの平面的な透水量係数 T_1 の値は、

$$T_1 = k \cdot m \cdot \Delta t \quad \text{..... (3)}$$

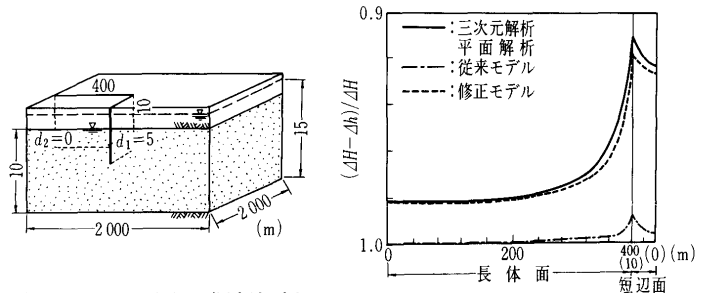
ここで、 k は帯水層の透水係数で、 Δt は山留め壁の厚さである。

図—4.10 軸対称非定常浸透解析と平面二次元解析および修正モデルとの比較例
($k = 1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$, $S_s = 1.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$)

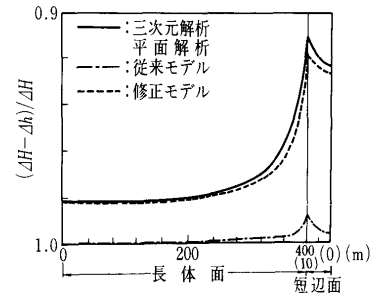
実際に山留めがある掘削問題を軸対称解析と平面二次元解析とを比較した例を図—4.10(a), (b)に示す。ここで、補正モデルとは、山留めの透水量係数を式(3)で求めた方法であり、従来モデルとは、山留め部の透水量係数 T_1 を次式より算定して平面二次元解析をした方法である。

$$T_1 = k(D-d_1) \quad \text{..... (4)}$$

ここで、 $(D-d_1)$ は図—4.8に示すように山留め先端からの帯水層厚である。これより山留めの根入れ深さを考慮できる軸対称解析と修正モデルによる解析とを比較すると、よい一致を得ていることがわかる。



図—4.11 三次元掘削解析モデル



図—4.12 止水壁背面での水位分布の三次元解析と平面二次元解析との比較

図—4.11は三次元掘削モデルであり、これに関しても、補正モデルとの比較を図—4.12に示す。

これらの結果を比較すると、山留め部の透水量係数を補正した平面二次元解析は、三次元解析と良く一致しているため、きわめて有効であることがわかる。

上記で取り扱った掘削浸透問題はあくまで均質な地盤の場合で、複数の帯水層がある地盤の掘削浸透を平面二次元解析で行うのは難しい。

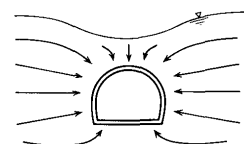
このような複数の帯水層に対しては、やはり、三次元解析あるいは軸対称解析が有効である。

② トンネル掘削

トンネル掘削による周囲の地下水位低下は、切羽掘進を考慮して、地下水の低下地点が経時的に移動していく境界条件を用いて平面二次元解析を行うと良い。ただ、図—4.13のように地下水面がトンネル上部まで低下していない場合には、問題は複雑になる。この時には鉛直断面二次元解析により、事前に求めたトンネル内への湧水流量をトンネル掘削部より揚水するとして解析すると良い。

このような広域の地下水解析をするには、トンネルを中心として被圧帯水層なら半径 2 km 程度の範囲の浸透特性と水理境界、地下水位の分布を計測する必要がある。

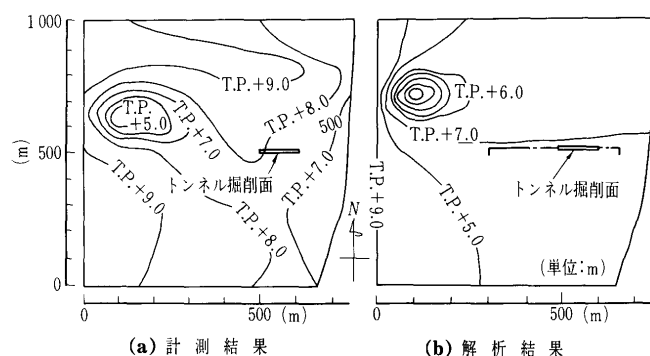
掘削工事期間や深度にもよるが、不圧帯水層について



図—4.13 トンネル直上の浸透

も、半径500m程度の範囲の地下水調査結果とモデルの解析結果の比較により、モデルの妥当性を確認してから地下水位低下を予測する必要がある。

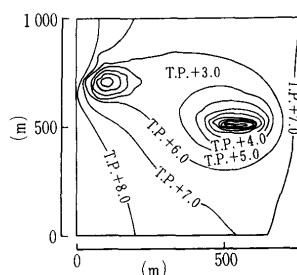
図—4.14(a),(b)はトンネル掘削地点の周囲の地下水



図—4.14 初期水位の計測と解析の比較

位を計測した結果と、平面二次元解析によって初期水位を計算した結果である¹³⁾。これらの水位コンターの比較よりモデルの妥当性を評価した。トンネル掘削部の地下水位を低下させるためにディープウェルを切羽掘進に合わせて稼働させたときの周囲の地下水低下の経時的な変化を解析した。その結果を図—4.15に示す。

3) 軸対称解析

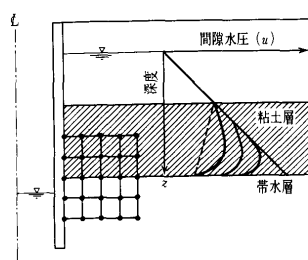


図—4.15 ディープウェル開始97日後の地下水位

掘削による比較的周辺の地下水位の低下を検討するには軸対称解析はきわめて有効である。この解析は図—4.16の多層地盤での各帯水層の地下水位の低下の予測も可能であり、今日では、マイクロコンピュータで簡単に予測ができる¹⁴⁾。

掘削平面が矩形断面であっても等価な円形断面に近似して解析ができる。ただ、軸対称解析では、地下水位を低下させるためのディープウェルによる排水流量や配置の設計は不可能である。

掘削面下の水位を低下させるための総揚水流量が求められ、山留めの背面の複数帯水層の地下水位や山留め先



図—4.16 帯水層内の水位低下による粘土層の沈下解析の考え方

端の過剰間隙水圧の値を予測することが可能であるため、最も簡易で有効な手法であると考えられる。

ただ、地下水位の低下の影響範囲が水理的境界まで到達するような場合には、平面二次元解析と併用して地下水位低下の予測をする必要がある。

また、軸対称解析は地下水位低下による地盤の沈下解析を予測する方法としてはきわめて有効である。すなわち、図—4.16に示すように、下部の帯水層内の地下水位を低下させると粘土層内の間隙水圧が低下する。そのことによって、粘土層が圧密して粘土層からの排水が生じる。したがって、粘土層と帯水層の境界の点での鉛直方向の流出流量を数値解析の中で計算すると、流出流量の総量を用いてその地点の地上の沈下量を求めることができる。この事については次節で説明する。

4.3 地下水位低下工法と地盤沈下

地下水を揚水することによって地盤沈下が生じることは今日では周知の事実である。

地下水位の低下による地盤沈下現象に関するメカニズムは、図—4.16に示すように、帯水層内の地下水位が低下するために、粘土層の境界の水圧が低下し、粘土層内の間隙水圧が低下することによって、有効応力が増加し、その結果粘土層が圧密されるためである。

この地盤沈下量を予測するためには、次の調査が必要である。

- (1) 地下水位を低下させる帯水層の浸透特性（透水係数、比貯留係数）と帯水層厚。
- (2) 帯水層の境界条件と初期水位（水圧）。
- (3) 粘土層の浸透特性（鉛直方向の透水係数、比貯留係数）と圧密特性（圧密係数、先行圧密荷重、体積圧縮係数）。
- (4) 粘土層内の初期間隙水圧分布。
- (5) 粘土層の層厚と排水条件。
- (6) 深度方向の土の密度分布。

これらの物性の調査手法はほぼ確立されているため、物性を求める際の2,3の注意点を説明する。

多層地盤の揚水試験より帯水層の浸透特性を求めるには、上部の粘土層からの絞り出しがあるため、揚水による地下水位の低下が様でなく、Theis（セイス）流の被圧帯水層として取り扱う場合より水位低下は小さくなる。したがって、Hantush（ハンタシュ）の解析¹⁴⁾やNeuman（ノイマン）の解析^{15),16)}を用いる必要がある。

Hantushの解析では、図—4.16の加圧層を浸透して上部の帯水層からの漏水を取り扱っているため、揚水試験より、加圧層の鉛直方向の透水係数(k_v)が求められる。一方、Neumanの解析では、粘土層の浸透特性である鉛直方向の透水係数 k_v と比貯留係数 S_v を求めることができる。しかし、この方法では加圧層である粘土層での揚水試験中の水圧変化を計測するために間隙水圧計を埋設しておく必要がある。この方法は特殊な試験になる。したがって、これらの値は粘土試料をサンプリングして各深度における供試体の圧密試験を実施して、透水

講 座

係数 k_v と体積圧縮係数 m_v の値を測定する。これらの値より粘土層の各深度での比貯留係数 S_s は、次式より求められる。

$$S_s = \frac{m_v \cdot \gamma_w}{1000} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $S_s(\text{cm}^{-1})$ 、 $m_v(\text{cm}^2/\text{kgf})$ 、 $\gamma_w(\text{gf}/\text{cm}^3)$ である。

粘土の透水係数は、圧密試験より求められた透水係数の値をそのまま実際の地盤に適用した結果より、予測した沈下速度と実測値を比較すると、予測値が小さいことが多いため10倍程度に補正して用いる¹⁷⁾。

粘土地盤内の初期間隙水圧の分布は三成分コーンによって計測した結果が通常用いられる。掘削によって地下水位が低下する際の周囲の地盤沈下は、先にも述べたが、軸対称解析によって予測することが可能である。すなわち、次の一次元圧密の方程式(式(6))と浸透の方程式(式(7))は、同型の式を取り扱っているため、有限要素法による軸対称解析を実施し、粘土層と帯水層の境界での鉛直方向の流出流量を別に計算するだけで沈下量が予測できる。

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \dots \dots \dots (6)$$

$$k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 u は過剰間隙水圧、 h は全水頭、 c_v は圧密係数である。

ディープウェルによって揚水して地下水位を低下させるような複雑な地下水位低下を実施する際には、帯水層の地下水位低下も一様でない。このような場合には、加圧層である粘土層を一次元要素で鉛直方向に分割し、帯水層を平面二次元の要素で分割した節点とを結合することによって、帯水層内の地下水位低下と粘土層の圧密沈下とを結合する解析手法が適用できる¹⁸⁾。

掘削の際にどこまで地下水位を低下させることが可能かという許容値か水位低下量が議論されるが、この値は、周囲の構造物の許容沈下量に依存するため、それぞれの場合によって検討する必要がある。

4.4 ま と め

掘削現場での観測井による地下水位の計測は、山留めの変形計測等の構造物の計測に比較してそれほどなされていない。これは地下水位を計測しても、過去には設計や管理にあまり反映されなかったためと思う。しかしその結果、地下水位を低下させすぎた事によって周辺の地盤を低下させたり、井戸を枯渇させたりしている。また時には、掘削部内に湧水が出てきて、ボイリングを起こして工事を中断するようなこともある。今日では事前に掘削底部の地下水位や、周辺の深度方向の複数点での地下水位の計測を行っておけば、十分にその予測が可能な時代になっている。

また、地下水位の経時的な挙動、あるいは集中豪雨時

の地下水位や異常湧水時の地下水位を周知して、施工中、施工後の計画最高地下水位や計画最低地下水位を設定して、施工中の掘削面の安定や、周囲の地下水保全効果を検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 西垣 誠：被圧水および高地下水位地域での基礎工の設計と施工の問題点，基礎工，Vol. 8, pp. 26～32, 1990.
- 2) 西垣 誠：地下水に関する環境評価手法，基礎工，Vol. 11, pp. 25～31, 1992.
- 3) 西垣 誠・梅田美彦・上山一彦：地盤掘削地におけるボイリング，パイピング現象の2，3の考察，土と基礎，Vol. 37, No. 6, pp. 69～74, 1989.
- 4) 光成高志・落合正水：ボイリング検討式の適用限界について，第21回土質工学研究発表会講演集，pp. 1649～1651, 1986.
- 5) 伊藤 洋・佐藤邦明：開削工事に伴う地下水流の三次元特性に関する研究，土と基礎，Vol. 32, No. 5, pp. 11～15, 1984.
- 6) Meyerhof, J. G.: Canadian Foundation Engineering Manual, Can. Geotech. Society, pp. 86～88, 1985.
- 7) 西垣 誠：地盤の異方性，9.異方性と透水(1)，土と基礎，Vol. 41, No. 1, pp. 57～64, 1994.
- 8) 西垣 誠：地盤の異方性，9.異方性と透水(2)，土と基礎，Vol. 41, No. 2, pp. 77～81, 1994.
- 9) 西垣 誠・白石知成・猪瀬二郎・河村志朗：地下鉄建設による多層地盤での複数地下水変動の三次元浸透解析による予測，地下水学会誌，第32巻，第4号，pp. 231～240, 1990.
- 10) 猪瀬二郎・入江年門・西垣 誠・河村志朗：地下鉄建設工事のための多層帯水層の地下水調査とその評価，地下水学会誌，第32巻，第4号，pp. 221～230, 1990.
- 11) 河野伊一郎・西垣 誠：有限要素法による広域地下水の準三次元解析—その手法とプログラム解説，岡山大学工学部土木工学教室レポート，No. '82-1, 1982.
- 12) 進士喜英・小野紘一・西垣 誠：遮水壁内への地下水浸透評価の二次元簡素化，地下水学会誌，第34巻，第4号，pp. 241～252, 1992.
- 13) 国見 宏・河野伊一郎・西垣 誠：地下水低下工法による砂質地山におけるトンネル切羽の安定，土木学会論文集，No. 421/VI-13, pp. 87～94, 1990.
- 14) 西垣 誠・竹下祐二：有限要素法による飽和-不飽和浸透解析法(PC-UNSAF利用手引き)，土質工学会中四国支部講演会テキスト 浸透問題の数値解法，1987.
- 15) Hantush, M. S.: Nonsteady flow to flowing wells in leaky aquifers, J. Geophys. Res., 64, 1043, 1959.
- 16) Neuman, S. P. and P. A. Witherspoon: Theory of flow in confined two aquifer system, Water Res. Res., Vol. 5,(4), pp. 803～816, 1969.
- 17) 太田秀樹・松本江基・小村 晃：軟弱地盤の応力状態の評価手法とその適用性，土木学会論文集，No. 487/III-26, pp. 217～226, 1994.
- 18) 西垣 誠・松本元生：多層地盤における地下水流の準三次元解析，第20回土質工学研究発表会，pp. 1509～1510, 1985.