

岩盤地下空洞掘削による非定常地下水の近似解析

1. はじめに

透水層中において地下空洞の掘削を行うと空洞内に湧水が起こり、同時に地山内の地下水位は低下する。湧水量は初期に最も大きく、時間と共に減衰し十分時間が経過すると定常状態に至り水位、湧水量共一定になる。理論的には、この時点から恒常湧水状態となる。最近は、空洞掘削に伴う地下水挙動の解析は *FEM* による非定常解析が行われるようになってきているが、簡易解析では多くの場合「定常状態」での解析となっている。また、地下水位や湧水量の変化過程や、空洞完成後の地下水位の回復過程等についてはほとんど検討されていない。

そこで、ここでは、地下空洞掘削に伴う地下水位、湧水量の非定常簡易解析法について紹介する。

本解析法の特徴は以下のとおりである。

- ◎非定常状態の地下水解析法である。
- ◎ポケコンでも計算が可能である。
- ◎地下水位の低下過程、湧水量の経時変化が求められる。
- ◎空洞完成後の地下水位の回復過程が求められる。

なお、本解析法は、埼玉大学工学部佐藤邦明助教授が開発したものである。

2. 地下空洞周辺における非定常地下水流の近似的取り扱い

今、図 2.1 に示すように、水平不透水層上に水平長さ $2L$ の透水層があり、空洞中心から十分離れた所が一定境界水位 h に保たれているとする。このような透水層地盤中に幅 B 、側壁高さ H 、アーチ半径 r の空洞を瞬時に掘削する。そうすると、空洞内に湧水が起こり、同時に地山内の地下水位は急激に低下し、図中の実線のように左右対称な地下水位面を形成し時間と共に低下していく。湧水量は、初期に最も大きく時間と共に減衰し、十分時間が経過すると図中の一点鎖線のような水面形に至り、水面形と共に湧水量も一定となり、いわゆる定常状態となる。

この過程をもう少し詳細に見ると次のような過程をとる。

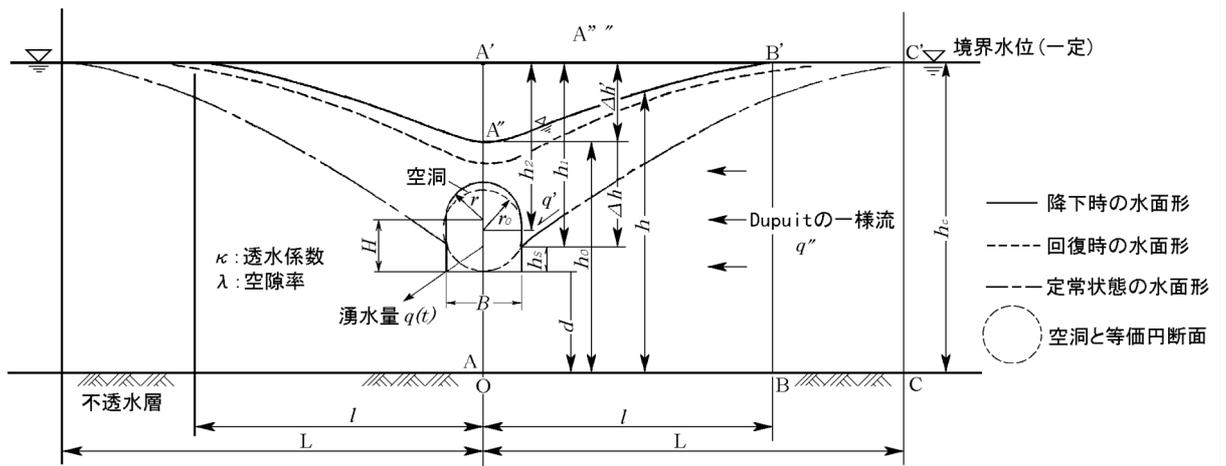


図 2.1 空洞周辺の地下水流モデル

初め水平であった水面 A' 、 B' 、 C' は空洞掘削により A'' 、 B'' の形をとり、空洞中心 A から B の区間 l で水位低下が起きる。更に、時間の経過と共に水位低下が進み、水面形状は点線のようになり、やがて水位低下影響範囲 l は境界領域 L に一致する。

いま、水位低下により排水された帯水層ボリュームを $V(t)$ とすると、左右対称地盤を考慮し、

$$\frac{V(t)}{2} = q' + q'' \dots\dots\dots (1)$$

$$q'' = \int_0^l \frac{k (h_c^2 - h_0^2)}{2L} dx$$

h_c : 境界水位
 h_0 : 空洞直上の水位
 k : 透水係数

ここで q' は空洞掘削により時刻 t までに排水された水量を示し、 q'' は境界水域からの流入量である。初期段階の水位低下影響範囲 l が小さい内は q'' は 0 である。

空洞直上の水位低下量は $\Delta h' = h_c - h_0$ は時間にほぼ比例するので $\Delta h' = \beta t$ とかける (β は比例定数)。

$l=L$ の場合、任意の位置 x における水位 $h(t, x)$ は水面形状が 2 次曲線により近似できるものとするれば、

$$h(t, x) = h_c - \frac{\beta t}{L^2} (L-x)^2 \dots\dots\dots (2)$$

となる。よって、 $q'(t)$ は、

$$q'(t) = \lambda \left(h_c \cdot L - \int_0^L h dx \right) = \frac{\lambda}{3} \beta t L \quad \dots\dots\dots (3)$$

λ : 空隙率

となる。

一方、図 2.1 に示した条件下での空洞への湧水量 $q(t)$ は一般に時間的には指数関数的に変化するので、 $q(t)$ は

$$q(t) = q_0' \exp(-\alpha t) + q_s \quad \dots\dots\dots (4)$$

α : 定数

q_s : $t \rightarrow \infty$ での湧水量

q_0' : $q_0 - q_s$ (q_0 : $t=0$ の時の湧水量)

とかける。そして、(4)式を用いると上述した排水量 $V(t)$ は

$$V(t) = \int_0^t q(t) dt = \frac{q_0'}{\alpha} \{1 - \exp(-\alpha t)\} + q_s \cdot t \quad \dots\dots\dots (5)$$

とかける。

さらに q_0 は

$$q_0 = m \frac{2 \pi k h_2}{\ln \left\{ \tan \frac{\pi (2h_2 - r_0)}{4h_c} \cot \frac{\pi r_0}{4h_c} \right\}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

m : 空洞断面を等価円断面と置き換えた時の換算係数 ($m=0.86$)

r_0 : 空洞等価円断面半径

h_2 : 初期水面から等価円断面中心までの深さ

で求められるので、(4)式に含まれる q_0' は q_s が決まれば求められる。

以上の(1)～(6)式より定数 α 、 β が決まれば任意時間の湧水量、水面形を決定できる。

α の値は、湧水量の経時変化が直接測定されている場合は逆算で推定できるが、一般には未知量である。実験的には $\alpha = 3.345 \times 10^{-8} \text{ l / sec}$ である。

一方、 α を使わずに、湧水量の低減率から $V(t)$ を求めることもできる。湧水量の低減率は、経験的に、

$$\frac{q(t)}{kr_0} = \frac{q_0}{kr_0} - \varepsilon \cdot \frac{k^2 t r_0}{\lambda B q_0} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\varepsilon = 12.80 \quad (12.09 \sim 12.96)$$

となっている。

さらに(5)式の $V(t)$ を(7)式を用いて求めると、

$$V(t) = \int_0^t q(t) dt = t(q_0 - \varepsilon \frac{k^3 r_0^2}{2 \lambda B q_0} t) \dots\dots\dots (8)$$

となる。

次に β の求め方について述べる。空洞直上の水位 h_0 は初期において

$$h_0 = h_c - \Delta h = h_c - \beta t \dots\dots\dots (9)$$

とかけるから、(1)式にこれを代入し、整理すると、

$$\frac{V(t)}{2} = \frac{\lambda}{3} t L \beta + \frac{k t^2 \beta}{2L} (h_c - \frac{1}{3} t \beta) \dots\dots\dots (10)$$

となる。

(8)式と(10)式の $V(t)$ を等置し連立方程式を解き β を求めることが出来る。

したがって、計算手順としては、

- (6)式で初期湧水量を求める。
- (7)式で湧水量の経時変化量を求める。
- (8)式、(10)式で β を求める ((5)式と(10)式でも可)。
- (2)式で水面形状を求める。

次に、水位回復過程について検討する。空洞完成後は、吹付コンクリートや覆工コンクリートが施行され、湧水量は減少し、地下水位は回復する。空洞直上の水位 $\Delta h(t)$ は実験的に

$$\frac{\Delta h}{h_c} = \frac{h_1}{h_c} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \xi t}} \exp(-\xi t) \right] \dots\dots\dots (11)$$

ξ : 定数

h_1 : 初期水位から空洞内水面までの深さ

とされている。

また、初期水面形は水位低下過程の場合と同じく

$$h(x) = h_c - \frac{h_1}{L^2} (L-x)^2 \dots\dots\dots (12)$$

とする。初め、水面形は定常状態(図 2.1 の 1 点鎖線の水面)から上昇する訳であるから、完全に復元して水平になるまでは、低下した帯水層には境界から地下水が流入する。したがって、完全に復元するまでの総流入ボリューム V は(3)式と同じく

$$V = \frac{\lambda}{3} L h_1 \dots\dots\dots (3')$$

となり、流入量 $q(t)$ は Dupuit の式と (11) 式から

$$q(t) = \frac{k (h_c^2 - h_o^2)}{2L} = \frac{kh_1 \left\{ 2h_c \frac{1}{\sqrt{1+\xi t}} \exp(-\xi t) - \frac{h_1}{1+\xi t} \exp(-2\xi t) \right\}}{2L} \dots\dots\dots (13)$$

となる。これより、総流入ボリューム V は

$$V = \int_0^\infty q(t) dt = \frac{kh_1}{2L} \left\{ 2h_c \int_0^\infty \frac{e^{-\xi t}}{\sqrt{1+\xi t}} dt - h_1 \int_0^\infty \frac{e^{-2\xi t}}{1+\xi t} dt \right\} \dots\dots\dots (14)$$

となる。(14) 式の右辺の積分は

$$\int_0^\infty \frac{e^{-\xi t}}{\sqrt{1+\xi t}} dt \doteq \frac{0.759}{\xi}, \quad \int_0^\infty \frac{e^{-2\xi t}}{1+\xi t} dt \doteq \frac{0.361}{\xi}$$

となるから、(14) 式へ代入し (14) 式と (3') 式とを等置して

$$\xi = 0.542 \frac{h}{\lambda L^2} (4.200h_c - h_1) \dots\dots\dots (15)$$

となる。

したがって、(15) 式が決まれば、(11) 式から空洞直上の水位低下量、(13) 式から帯水層への流入量を求めることができる。

3. ケーススタディ

図 2.1 において、帯水層の水平長さ $2L=400m$ 、境界水位 $h_c=100m$ 、トンネル基面からの水頭 $h_1+hs=60m$ 、浸潤線高さ $hs=1m$ 、透水係数 $k=1 \times 10^{-7} m/sec$ 、空隙率 $\lambda=0.05$ とする。

空洞幅 $B=12m$ 、側壁高さ $H=4m$ 、アーチ半径 $r=6m$ の地下空洞を考える。

空洞等円断面半径 r_o は

$$\pi r_o^2 = 12 \times 4 + 6^2 \pi / 2$$

$$r_o = 5.769m$$

したがって、空洞等価円断面中心からの水頭 h_2 は

$$h_2 = h_1 + h_s - r_0 = 60 - 5.77 = 54.23 \text{ m}$$

(6)式より

$$\begin{aligned} q_0 &= m \frac{2 \pi k h_2}{\ln \left\{ \tan \frac{\pi (2h_2 - r_0)}{4h_c} \cot \frac{\pi r_0}{4h_c} \right\}} \\ &= 0.86 \frac{2 \pi 10^{-7} \times 54.23}{\ln \left\{ \tan \frac{\pi (2 \times 54.23 - 5.77)}{4 \times 100} \cot \frac{\pi \times 5.77}{4 \times 100} \right\}} \\ &= 1.018 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{sec)} = 879.32 \text{ (l/day/m)} \end{aligned}$$

次に(7)式により湧水量の経時変化量を求める。

$$\begin{aligned} q(t) &= q_0 - \varepsilon \cdot \frac{k^2 t r_0}{\lambda B q_0} \cdot k r_0 = 1.018 \times 10^{-5} - 12.8 \times \frac{(10^{-7})^3 \times (5.77)^2}{0.05 \times 12 \times 1.018 \times 10^{-5}} t \\ &= 1.018 \times 10^{-5} - 7.0 \times 10^{-14} \text{ (m}^2/\text{sec/m)} = 879.32 - 0.52 t \text{ (l/day/m)} \end{aligned}$$

(8)式、(10)式の $V(t)$ を等値して β を求める。

$$\begin{aligned} t(q_0 - \varepsilon \frac{k^3 r_0^2}{2 \lambda B q_0} t) &= \frac{2 \lambda}{3} t L \beta + \frac{k t^2 \beta}{L} (h_c - \frac{1}{3} t \beta) \\ t(1.018 \times 10^{-5} - 12.8 \times \frac{(10^{-7})^3 \times 5.77^2}{2 \times 0.05 \times 12 \times 1.018 \times 10^{-5}} \times t) & \\ &= \frac{2 \times 0.05}{3} \times 200 t \beta + \frac{10^{-7} t^2 \beta}{200} (100 - \frac{1}{3} t \beta) \end{aligned}$$

ここで、 t に日数を入力し β を求める。ここで、 $t=100$ 日 $= 8.64 \times 10^6$ sec とすると

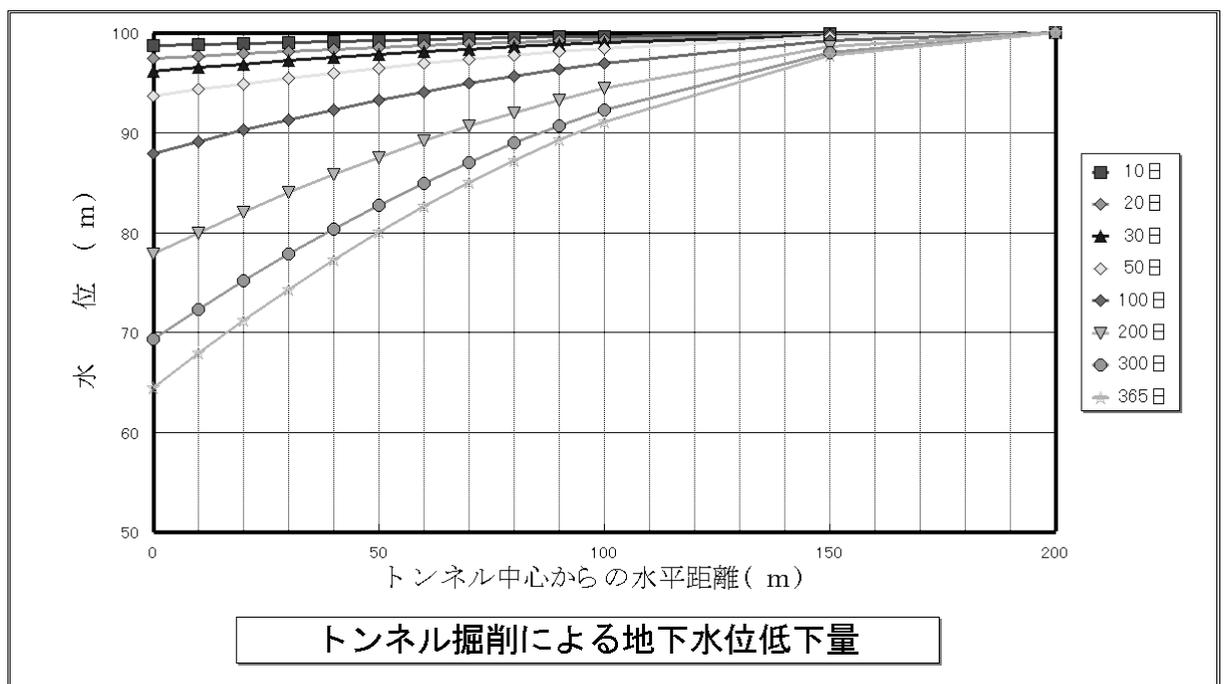
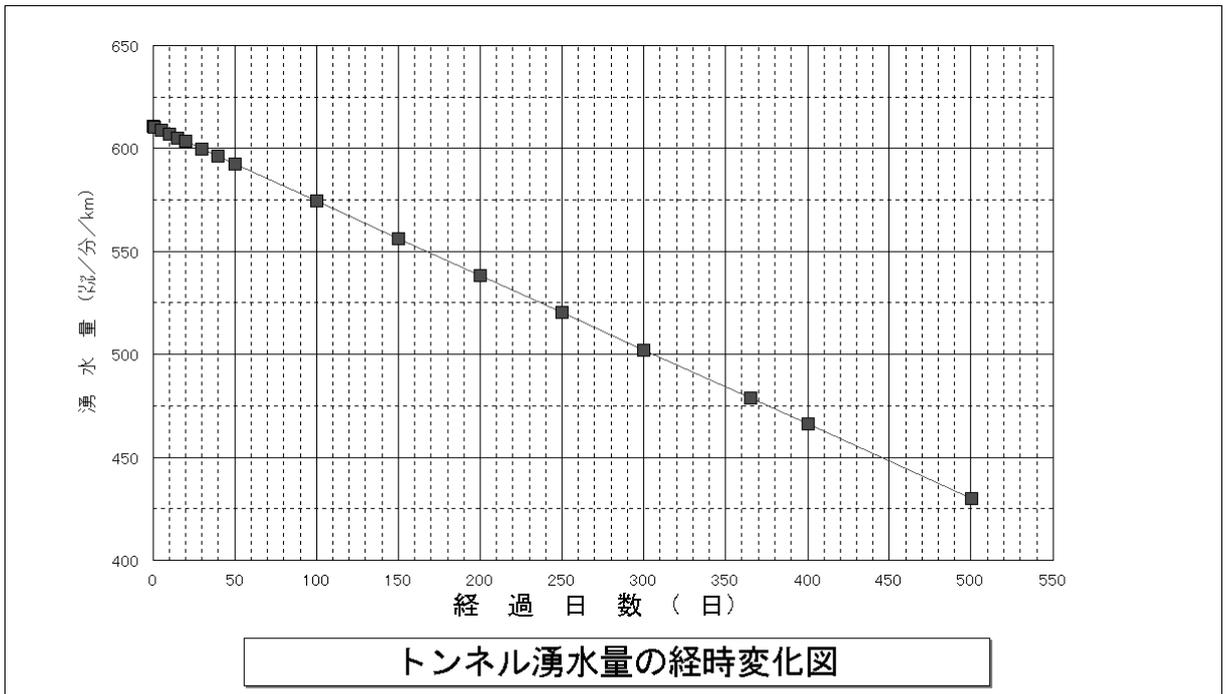
$$1.075 \times 10^{11} \times \beta^2 - 6.133 \times 10^7 \times \beta - 85.351 = 0$$

$$\beta = 1.388 \times 10^{-6} \text{ m/sec} = 0.1199 \text{ m/day}$$

また、横断方向の水面形は(2)式に β を代入して

$$\begin{aligned} h(t, x) &= h_c - \frac{\beta}{L^2} t (L-x)^2 \\ &= 100 - \frac{1.388 \times 10^{-6} t}{200^2} \times (200-x)^2 \end{aligned}$$

となる。



◎問い合わせ先

Q Tech

〒631-0801

奈良市左京2-3-1-5-504

TEL 0742-72-1204

FAX 0742-72-1207

阿部 求