II-291　　地下空洞の非定常湧水に関する実験と解析

埼玉大学　大学院　学生員　飯沢雅人
埼玉大学　工学部　正会員　佐藤邦明

はじめに

近年、トンネルや空洞が多く掘られているが、陸上トンネルにおける湧水の機構を究明する必要にせまられている。本研究は、地下空洞（トンネル，地下タンク等）の建設に伴う湧水、及び、周辺の地下水位の変化等、特に非定常特性を、定性的かつ定量的に捉えるため、第1段階として、Hele-Shaw-Modelによる実験、及び、差分による数値解析を行ない検討したものである。

1．実験装置，実験方法

実験装置の概略をFig-1に示す。使用流体は、エンジンオイル（20°Cで $\nu = 4.811\ cm^2/sec$）であり、透水係数K（=0.885 cm/sec）は、Dupuit-Forcheimer式から決定した。なお、実験は恒温室（20°C）で行ない、実験方法は、不被圧帯水層内に空洞やトンネルが建設された場合を想定し、あらかじめ空洞を閉塞しておき、左右両端の境界水位を一定に調節した後、瞬時に空洞を開放して、水面変化を写真撮影により、湧水量変化をメスシリンダーにより各々測定した。実験ケースは、Table.1に示す通りである。

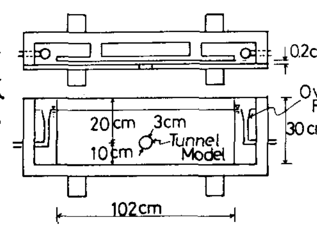


Fig.1 Hele-Shaw Model

2．数値解析

2次元流と考えた場合の地下水流の基礎方程式は、(1)式の様に表わされる。

$$S\cdot\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\cdot\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\cdot\frac{\partial h}{\partial z}\right)+R\ ,\quad S=\rho\cdot g\cdot\lambda\cdot\left(\beta+\frac{\alpha}{\lambda}\right)\quad\cdots(1)$$

ここに、h:ピエゾ水頭，ρ:水の密度，g:重力加速度，λ:空隙率，α:浸透層の圧縮率，β:水の圧縮率，K_x, K_z:x方向，z方向の透水係数，R:降雨等、である。また，地下水面上での水粒子の運動学的条件より，(2)～(4)式を得る

$$\frac{\partial f}{\partial t}+u_s\cdot\frac{\partial f}{\partial x}=w_s\quad\cdots(2),\qquad w_s=-\frac{K_z}{\lambda}\cdot\left.\frac{\partial h}{\partial z}\right|_{z=f}\cdots(3),\qquad u_s=-\frac{K_x}{\lambda}\cdot\frac{\partial h_s}{\partial x}-\frac{K_x}{K_z}\cdot\frac{\partial f}{\partial x}w_s\quad\cdots(4)$$

ここに、f:地下水位，u_s, w_s:地下水面での水粒子のx方向，z方向への移動速度である。[1]

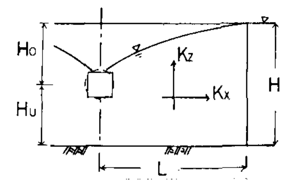
上記の4式を、差分化して解くのであるが、今回はHele-Shaw-Modelとの比較を考え、浸透層の圧縮率，流体の圧縮率は、透水係数に比べ十分小さいとして無視し、Successive-Steady-Statesにより解析した。解析領域はHele-Shaw-Modelに等しくとり、簡単のため、空洞形状は、一辺が2.5cmの正方形とし、透水係数K_x, K_zは各方向に一定であるとした。解析ケースは，実験ケースと等しく、Table-1に示す通りである。

3．実験，及び，解析の結果と考察

地下水面、及び、湧水量の経時変化の実験結果、解析結果をFig.2, Fig.4, Fig.5に示す（空洞形状は、実験では直径3cmの円形、解析では一辺2.5cmの正方形である）。これより、地下水面、湧水量ともに、数値解析結果は実験結果と定性的に良く一致しているが、定量的には、いく分、差が見られる。すなわち、地下水面の経時変化は、実験の方が計算よりも早く落ちる傾向にあり、特に経過時間の小さい範囲で顕著である。湧水量の経時変化では、実験値の方が計算値よりも全体的に大きめである。この原因としては、空洞形状の違いの他に、透水係

数の評価が小さめであるということが考えられるが、さらに検討の必要があろう。

次に、湧水量の経時変化の性質についてさらに吟味する。Fig-5に示すように数値計算による湧水量曲線は、途中、不連続的に変化している。この不連続点は地下水面が空洞にかかる時点に一致しており、湧水断面の減少によるものである。一方、Fig- に示す実験結果では、このような性質は顕著でないが、空洞上の水深が最も大きいCase-1の場合は、かなりはっきりと現れており、この性質が数値計算上のものでないことが判る。これより、従来、減衰湧水状態として扱われていた湧水状態を、地下水面が空洞にかかるまでの状態と、その後の状態に区別して扱う必要があると考え、著者らは前者を第1次減衰湧水、後者を第2次減衰湧水と呼ぶことにし、Fig-3の中のI, IIで、その範囲を示す。図中のIIIの状態は、恒常湧水状態である。全体的な傾向としては、指数関数的に減少しているので、試みに実験値を片対数グラフ上にプロットすると、Fig-6の様になり、ある時点以後は各ケースともに、ほぼ等しいてい減指数で減衰する傾向にあることが判る。また、数値計算結果の第2次減衰湧水以後を片対数グラフ上に表わすと、各ケースともにFig- の実線の様にほぼ直線になり、Case-1の実験値をプロットすると、この直線に良く一致することが判る。これより、第2次減衰湧水、すなわち、地下水面が空洞にかかった後の湧水量の経時変化曲線は、(5)式の様な形で表現できるであろう。



CASE	H cm	H_0 cm	H_u cm	L cm	K_x cm/sec	K_z cm/sec
1	25.0	15.0	10.0	51.0	0.885	0.885
2	22.5	12.5	〃	〃	〃	〃
3	20.0	10.0	〃	〃	〃	〃
4	17.5	7.5	〃	〃	〃	〃
5	15.0	5.0	〃	〃	〃	〃

Table.1 CASE

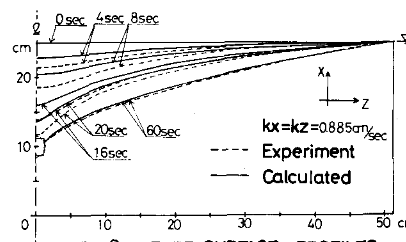


Fig.2 FREE SURFACE PROFILES

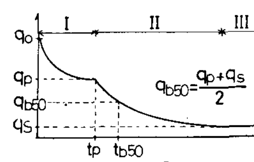


Fig.3

$$
\left.\begin{aligned}
&q = A\cdot \exp(-a\cdot T) + B \\
&A = q_p - q_s,\quad T = \frac{t - t_p}{t_{b50} - t_p},\quad B = q_s
\end{aligned}\right\} \quad (5)
$$

ここに、aはFig-7中の直線の傾きの絶対値である。

$q_s/k\cdot A \sim H_0/L$ 関係、及び $q_0/k\cdot A \sim H_0/H$ 関係は、Fig.8, Fig.9に示す様になり、当然のことながら、H_0/Lが大きいと恒常湧水量q_sは大きくなり、空洞直上の水深H_0が大きいと、初期湧水量q_0が大きくなることが判る。

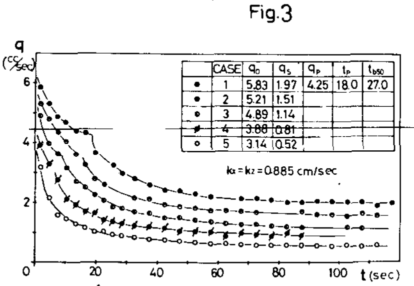


Fig.4 EXPERIMENTAL DISCHARGE

4. 結論

従来、空洞、トンネル等の建設に伴う非定常湧水の機構が明らかでなかったが、今回の実験、計算によって、減衰湧水状態を、第1次減衰湧水と第2次減衰湧水の2つに分ける必要性が明らかとなった。

また、湧水問題上、特に重要であると考えられる第2次減衰湧水のてい減特性が、(5)式で示された様に、指数関数的に減少するということが明らかとなった。

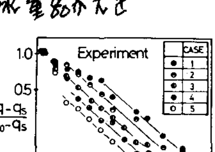


Fig.6 $\frac{q-q_s}{q_0-q_s}$ - t

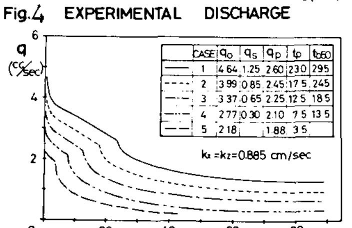


Fig.5 CALCULATED DISCHARGE

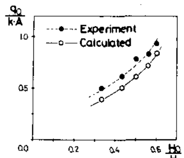


Fig.9 $\frac{q_0}{k\cdot A}$ - $\frac{H_0}{H}$

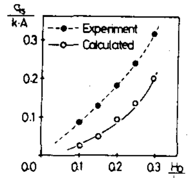


Fig.8 $\frac{q_s}{k\cdot A}$ - $\frac{H_0}{L}$

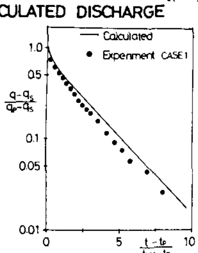


Fig.7 $\frac{q-q_s}{q_p-q_s}$ - $\frac{t-t_p}{t_{b50}-t_p}$

(参考文献)

(1). 田中、安芸、「燃料地下タンクの技術開発に関する研究」電力中研報告書