

(株)熊谷組 正員○清水 昭男
(株)熊谷組(埼玉大学研究生)正員 伊藤 洋
埼玉大学工学部 正員 佐藤 邦明

はじめに

近年、しばしば地下空洞が掘削されるようになってきているが、それらの浸透流解析を進めるにあたって、空洞周辺の地下水流の基本的性質を把握しておくことは重要である。著者らは、すでにヘル・ショウモデルを用いて、左右対称の境界条件を有する場合の空洞周辺流れの基本的性質を明らかにしている。¹⁾ 本研究では、さらに(I)左右の境界水位が異なる場合(II)傾斜不透水層を有する場合について実験を行い、2.3の知見を得たので、それらについて以下に報告する。

1. 実験方法¹⁾

実験装置は、ヘル・ショウモデルであり、透水部は、長さ168 cm、高さ93 cmで、平行間隙幅は約1 mmである。地下空洞は、中央付近に3連設置(高さ12 cm、幅6 cm)し、空洞部には同形のフタを取り付け、単設と連設の区別をする。境界水位の調整は、左右のオーバーフロータンクの高さを変化させることにより行い、不透水層の調整は、ゴムパッキングをはさむことにより行う。さらに、流れの状況を観測するため、背板より細管を通して着色オイルを注入するようにした。使用流体は、粘性の高い油(動粘性係数 $\nu=4.889 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、油温 22°C ; $\nu=5.286 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、油温 21°C)を用い、実験はすべて恒温室($21\sim 22^\circ\text{C}$)で行われた。

表-1, 2は、実験ケースを、図-1は、実験モデルの記号と諸元を示したものである。図中で、 q_ℓ, q_c, q_r は、空洞からの単位長さ当りの湧水量を示している。また、 ℓ は、左端(右端)から空洞中央までの長さを示しており、単設の場合は $\ell=84 \text{ cm}$ 、連設の場合(q_ℓ, q_r)は $\ell=66 \text{ cm}$ となる。

表-1 実験ケース I

(左右の境界水位が異なる場合)
I EXP-ローハ

空洞の種類	単 設	連 設
ロー y_0' (cm) (左側の境界水位)	③ ($6 \times B$)	④ ($8 \times B$)
ハロー y_0'' (cm) (右側の境界水位)	① ($3 \times B$)	② ($4 \times B$)
	③ ($6 \times B$)	④ ($8 \times B$)

(不透水層までの深さは $D=3.0 \text{ cm}$ である)

表-2 実験ケース II

(不透水層が傾斜している場合)
I EXP-ローハ

空洞の種類	単 設	連 設
ロー y_0 (cm) (境界水位)	① ($3 \times B$)	② ($4 \times B$)
ハロー y_0' (cm) (不透水層)	③ ($6 \times B$)	④ ($8 \times B$)

(不透水層の傾斜は 15° である)

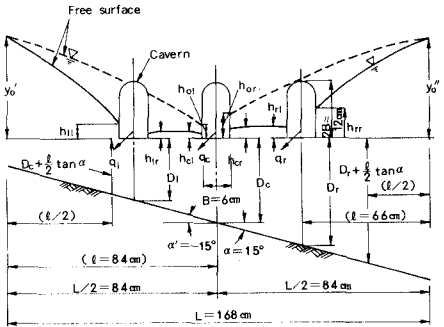


図-1 実験モデル

2. 実験結果と考察

実験で得た流量を整理し、湧水量と境界水位、不透水層との関係を求め、無次元化して表示すると図-2~4が得られる。ここで、 Q は単位長さ当りの総湧水量($Q=q_\ell+q_c+q_r$)である。また、動水こう配を代表するような無次元量 I および不透水層の深さを代表するような無次元量 $\hat{D}$ はそれぞれ次式に示すとおりである。

$$I = \left(\frac{y_0'}{\ell \ell \sec \alpha_\ell} + \frac{y_0''}{\ell_r \sec \alpha_r} \right) / 2 \dots\dots (1), \quad \hat{D} = \frac{2B}{D_\ell + D_r + 1/2 (\ell \ell \tan \alpha_\ell + \ell_r \tan \alpha_r)} \dots\dots (2)$$

ただし、本実験では、(I)左右の境界水位が異なる場合には、 $I = (y_0' + y_0'') / 2\ell$, $\hat{D} = B/D_c$ (II)傾斜不透水層を有する場合には、 $I = y_0 / \ell \sec \alpha$ ($y_0' = y_0'' = y_0$), $\hat{D} = B/D_c$ となる。 $(\alpha_\ell = \alpha_r, \ell \ell = \ell_r)$

図-2は、左右の境界水位が異なる場合の Q/kB と I の関係、図-3は、 Q/kB と I , y_0'/ℓ , y_0''/ℓ の関係を示したものである。これらより、総湧水量は、 I を横軸にとると、左右対称の境界水位を有する場合のそれとほとんど一致することがわかる。また、連設空洞においてそれぞれの側の y_0'/ℓ , y_0''/ℓ を横軸にとると左右外側の湧水量は、左右対称の境界水位を有する場合のそれとほぼ一致し、同様に中央空洞の湧水量も、

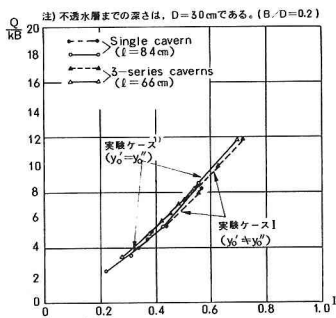


図-2 左右の水位が異なる場合の $Q/kB \sim I$ の関係 ($y_0' \neq y_0''$)

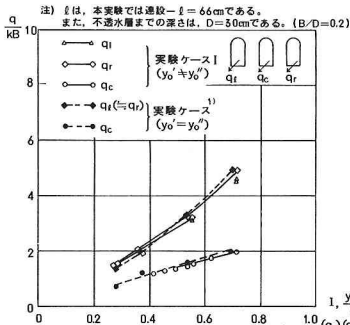


図-3 $q/kB \sim I, y_0'/l, y_0''/l$ の関係 (連設空洞, $y_0' \neq y_0''$)

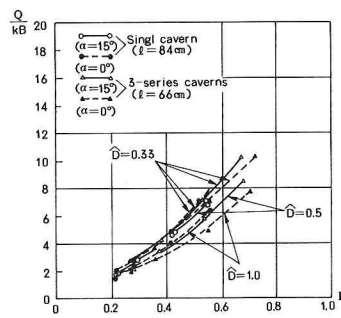


図-4 傾斜不透水層を有する場合の $Q/kB \sim I$ の関係

横軸に $I (=y_0' + y_0''/2l)$ をとるとほとんど一致することが認められる。表-3は、傾斜不透水層を有する場合の実験結果を、図-4は、 Q/kB と I の関係を示したものである。これらより、総湧水量は、不透水層が傾斜していない場合のそれと比べて、あまり差がみられないことがわかる。ただ、空洞底面から不透水層までの深さが小さい場合には、それぞれの空洞の湧水量の割合が異なってくることがわかる。

Photo-1は、傾斜不透水層を有する場合の連設EXP-②-①に

おいて、着色オイルを流入し流線を示したものであるが、正こう配側の空洞の浸出点に比べ逆こう配側の浸出点が高くなっていることがわかる。また、流線の状況により、右端(逆こう配側)より流入した地下水が左端の空洞にまで達しており、逆に左端(正こう配側)より流入した地下水は、左端の空洞のみにしか流入していないことがわかる。

次に、理論式による検討を行う。ここで用いる理論解は、Zhukovskiiの溝理論を応用したものであり、単設の場合の湧水量 Q_c の算定式は次のようになる。²⁾ ($Q_c = q' + q''$)

$$\frac{q'}{kD} = \frac{(1-y/D)^2 - \phi_1^2}{(\phi_2 - 2x/D)} \dots (3) \quad \frac{q''}{kD} = \frac{(1-y/D)^2 - \phi_1^2}{\{\phi_2 + 2(x-b)/D\}} \dots (4)$$

なお、 ϕ_1, ϕ_2 は、 $b/D, q/kD$ に関する関数である。

表-4に、実験結果との比較を示した。理論値は、実験値とよく一致していることがわかる。これらの式は、単設の場合に限らず連設の両端の空洞においても適用できることがわかっている。¹⁾²⁾

以上の結果により、横軸に I 、不透水層の深さを表わす指標として $\hat{D}$ をとれば、左右の境界水位が異なる場合や傾斜不透水層を有する場合(ただし、 $\alpha=15^\circ$ 以下)にも十分適用できることがわかった。

参考文献

- 1) 佐藤邦明・清水昭男・伊藤洋：地下空洞周辺の地下水流に関する実験的研究，第27回水理講演会論文集 1983. 2, P 271~P 276
- 2) 佐藤邦明：地下空洞湧水の簡便計算法，埼玉大学工学部建設基礎工学研究報告 第7巻 vol 12, 1982

表-3 実験結果(実験ケースII, $\alpha=15^\circ$)

		①		②		③		④		⑤	
		Q	Yo	Q	Yo	Q	Yo	Q	Yo	Q	Ho
① ($D_c=12cm$) $k=0.164cm/s$ $d=0.100cm$	単設	17.9	19.5	2.87	2.60	4.69	3.78	6.60	4.80	14.2	4.0
	連設	2.11 (0.285) 0.329 0.964	1.94 (1.22) 0.518 1.607	2.55 (0.518) 0.720 1.307	2.60 (2.30) 0.637 2.707	3.69 (3.45) 0.828 4.087	4.70 (4.00) 0.790 4.990	4.3 (4.0) 0.3 4.7			
② ($D_c=18cm$) $k=0.168cm/s$ $d=0.100cm$	単設	19.4	19.0	2.83	2.60	4.51	3.70	7.14	4.75	14.5	4.0
	連設	2.79 (1.20) 0.419 1.177	1.87 (1.85) 0.571 1.807	2.54 (0.571) 0.839 1.329	2.60 (2.30) 0.637 2.707	3.60 (3.40) 0.800 4.200	4.63 (4.20) 0.430 4.630	4.0 (4.0) 0.0 4.0			

注) 表中で()内の上段は Q_c 、中段は Q_c 、下段は q_r を示す。
さらに、水位(y_0, H_0)の単位はcm、流量(Q)は cm^3/s である。

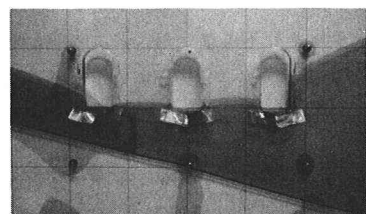


Photo-1 (II, 連-②-①)

表-4 実験結果と理論の比較

EXP. No. (実験ケース I)	y_0' cm	y_0'' cm	EXP. Q_c cm^3/s	Theory Q_c
単設EXP-③-①	3.7.0	1.9.4	3.8.0	3.8.8
単設EXP-③-②	3.7.0	2.4.6	4.2.3	4.3.4
単設EXP-④-①	4.7.5	1.8.2	4.7.8	4.8.3
単設EXP-④-②	4.7.5	2.4.5	5.3.9	5.3.7