

岩盤地下空洞の地下水に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON GROUNDWATER MOTION AROUND UNDERGROUND CAVERNS

伊 藤 洋*・佐藤 邦明**・清水 昭男***
By Yo ITO, Kuniaki SATO and Teruo SHIMIZU

1. はじめに

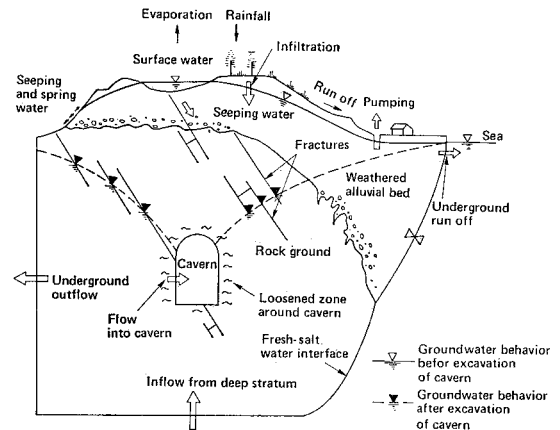
近年、土地の有効利用、環境保全、保安防災等の面から岩盤地下空間の利用が注目されており、従来から多数作られてきた地下発電所に加え、石油・液化ガスなど、燃料地下貯蔵のための空洞も建設されつつある。また、外国では低レベルの放射性廃棄物のための空洞も作られている。こういった背景にあって、地下空間の利用形態は別としても、トンネルも含めた地下空洞の合理的な調査・設計法や水理・水文解析法の開発が強く望まれている。通常、これら岩盤地下空洞を計画・設計しようとする際、予備調査の後に建設サイトが選定され、予備設計から本調査・設計に入るものであり、こういったプロセスにおいて、空洞にかかわる地下水についてもあらかじめある程度湧水量や地下水挙動を予測し、本調査・設計の段階で地下水数値シミュレーションによる詳細な検討を行うのが望ましい姿であろうと考えられる。その際、空洞にかかわる地下水の基本的性質を知っておき、均質岩盤の場合を一つの目安として、空洞周辺流れや湧水がある程度予測しておくことは実用上大変重要なことである。しかし、従来こういった場合の地下水問題は比較的断面の小さいトンネルや暗きよについていくつかの研究¹⁾が知られているが、断面も大きく、形状も円形でないこの種の地下空洞を直接対象とした研究²⁾は少ない。

本研究は、このような観点に立って、単設および連設の地下空洞の地下水流が降雨浸透量、地山境界水位、不透水層とどう関係するか、ヘル・ショウモデルにより実験的に検討したものである。また、Zhukovskii の溝理論を発展・応用することによって空洞周辺の流れや湧水

量を簡便に予測する方法についても述べる。本論では、特に定常流に限定して述べるが、得られた成果は、空洞周辺流れの実際問題にも適用し得ると思われ、工学的重要性は大きいと考えられる。

2. 実 験

実験に先立って、陸上岩盤地山に空洞を設けた場合の自由表面の解釈についての考え方を明確にするため、図一1 に示したような地山に注目して、まずこのことを明らかにしておく³⁾。図中の地山は大別して、風化土・沖積層が上部に堆積し、下部は空洞がある岩盤であり、海城に面し、地下塩水くさびがあるものである。この場合、一応 2 水系、つまり、1 つは風化土・沖積地下水系、他は岩盤地下水系に分けられる。このような 2 つの地下水系において、岩盤地山の透水性が風化土・沖積地盤のそれに比べて小さく、空洞湧水量も大きくなければ、降雨浸透量とつり合って自由表面は風化土・沖積地盤の中に形成され、岩盤地山中には自由表面はないことにな



図一1 鉛直断面内地下水収支概念図

* 正会員 (株) 熊谷組原子力開発室土木技術部 (埼玉大学研究生)

** 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部

*** 正会員 (株) 熊谷組原子力開発室土木技術部部长

る。一方、岩盤地山の透水性が風化土・沖積地盤のそれと大差なく、降雨浸透量より空洞湧水量が大きいと、図中の点線水位分布のように、自由表面は岩盤地山中に形成されることになる。これら2つの自由表面の違いは降雨浸透量を含めた地表からの地下水自然かん養量と風化土・沖積地盤の規模・帯水能に依存する。

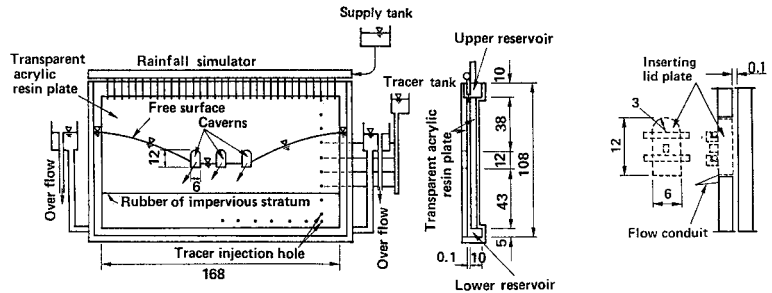
そこで、ここでは以下に示すような2つの場合に分けて実験を行う。

- 1) 岩盤地山中に自由表面が形成される場合（実験ケースは、Exp F で表わす。以下同様）
 - (i) 左右対称の境界条件を有する場合（無限帯水層、降雨浸透を含む）(Exp F-I)
 - (ii) 水平不透水層を有し、左右の境界水位が異なる場合 (Exp F-II)
 - (iii) 傾斜不透水層を有し、左右の境界水位が同一である場合 (Exp F-III)
- 2) 岩盤上の風化土・沖積地盤中に自由表面がある場合（実験ケースは、Exp D で表わす）
 - (i) 左右対称の境界条件を有する場合（無限帯水層を含む）(Exp D-I)
 - (ii) 傾斜不透水層を有する場合 (Exp D-II)

ここで、境界水位について現実との対応を考える。境界水位は、現実には有意な地下水位低下量を生じない最短の距離における地下水位ということになる。本実験の場合、境界水位までの距離は空洞幅の11~14倍程度をとっているが、現実の場合にも特に地下水かん養源がなければ、ほぼ同程度と判断される。また、今回行った降雨は、風化土・沖積地盤中を通して岩盤内に浸透するもので、実際の岩盤地山の透水係数が 1.0×10^{-7} m/s であったとすると、降雨浸透量は、0.576 mm/d, 0.267 mm/d, 0.105 mm/d の場合に相当するものとみてよからう。一方、不透水層は、無限、水平、傾斜不透水層に分けたけれど、一般の岩盤地山の場合には無限地盤と考えるのが普通であり、地山中で地質が変わる場合に不透水層が考えられる。

(1) 実験装置および実験方法

実験装置は、ヘル・ショウモデルであり、図-2(a)に概略を示す。透水部は、長さ 168×10^{-2} m, 高さ 93×10^{-2} m (上部貯留部 10×10^{-2} m, 下部貯留部 5×10^{-2} m は除く) で、平行間隙幅は平均 1 mm である。上部貯留部は、岩盤上に風化土・沖積層が堆積し、その地盤中に一定水位の自由表面があるような状態をモデル化する



(a) ヘル・ショウ装置

(b) 空洞モデルの詳細

図-2 実験装置 (単位: 10^{-2} m)

ためのもので、下部貯留部は近似的に不透水層が存在しない状態をモデル化するものである。地下空洞は、図中に示したように中央付近 (幅 6×10^{-2} m, 高さ 12×10^{-2} m) に3連設置し、空洞部には同形のふたを取り付け、単設と連設の区別をする (図-2(b) 参照)。空洞からの湧水量は空洞の前方に作られた導水トラフからメスシリンダーに導いて測る (写真-4 参照)。降雨浸透は、上部に設置された降雨シミュレーターにより降らせる。降雨は、太い水平円管に細管を多数設けて一様に降らせられ、降雨浸透量は、細管の長さ、内径 (長さ 4, 3, 1×10^{-2} m, 内径それぞれ対応して 0.6, 0.8, 0.8 mm の3種) により変えられる。また、境界水位の調整は、左右2つ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、不透水層の深さ調整は、軟らかいゴム (Oリング, 外径 2 mm) 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、トレーサータンクから背板より細管を通して着色オイル (赤色オイル) を注入するようになった。

使用流体は、エンジンオイル (油温 22°C で動粘性係数 $\nu = 4.889 \times 10^{-4}$ m²/s, 油温 21°C で $\nu = 5.286 \times 10^{-4}$ m²/s) であり、実験はすべて恒温室 ($21 \sim 22^{\circ}\text{C}$) で行われた。

実験順序は、まず、不透水層となる軟らかいゴムを設定し、降雨シミュレーターにより透水部に所定の浸透を発生させつつ、ヘル・ショウ装置の両端にある左右のオーバーフロータンクによりおのおの同じ、あるいは異なった境界水位を設定する。次に、ある時間後に自由水面形が形成され、写真観測した後、空洞湧水量を定時的にメスシリンダーで測定する。

(2) 実験ケース

上述した方法により、実験は表-1に示した条件で行われた。表-1は、大別して Exp F-I, Exp D-I (左右対称の境界条件を有する場合), Exp F-II (水平不透水層を有し左右の境界水位が異なる場合), Exp F-III, Exp D-II (傾斜不透水層を有し左右の境界水位が同一

表-1 実験ケース (単位: y_0', y_0'', D, H_0 : m, R : m/s; 空洞幅 $B=6.0 \times 10^{-2}$ m)

(a) Exp F-I, Exp D-I: 左右対称の境界条件を有する場合 (無限帯水層, 降雨浸透を含む)

空洞の種類	単設あるいは連設				
境界水位 $y_0' = y_0'' = y_0$	Exp F-I				Exp D-I
	Run-(1) (3×B)	Run-(2) (4×B)	Run-(3) (6×B)	Run-(4) (8×B)	Run-(5) (H_0)
不透水層までの深さ D	Exp F-I, Exp D-I 共通				
	Run-(1) <1×B>	Run-(2) <3×B>	Run-(3) <5×B>	Run-(4) < ∞ >	—
降雨浸透量 R	Exp F-I のみ				
	Run-[1] [無]	Run-[2] [2.0×10^{-5}]	Run-[3] [5.1×10^{-5}]	Run-[4] [1.1×10^{-4}]	—

(降雨浸透のある実験は, Run-(3) についてのみ行った)

(b) Exp F-II: 水平不透水層を有し, 左右の境界水位が異なる場合

空洞の種類	単設あるいは連設			
左側の境界水位 y_0'	Exp F-II			
	—	—	Run-(3) (6×B)	Run-(4) (8×B)
右側の境界水位 y_0''	Exp F-II			
	Run-(1) (3×B)	Run-(2) (4×B)	Run-(3) (6×B)	Run-(4) (8×B)

(不透水層までの深さは, $D=30 \times 10^{-2}$ m である)

(c) Exp F-III, Exp D-II: 傾斜不透水層を有し, 左右の境界水位が同一である場合 ($\alpha=15^\circ$)

空洞の種類	単設あるいは連設				
境界水位 $y_0' = y_0'' = y_0$	Exp F-III				Exp D-II
	Run-(1) (3×B)	Run-(2) (4×B)	Run-(3) (6×B)	Run-(4) (8×B)	Run-(5) (H_0)
不透水層までの深さ D_c	Exp F-III, Exp D-II 共通				
	Run-(1) <2×B>	Run-(2) <3×B>	—	—	—

である場合)を一括示したものである。ここで, Exp F は上述したように岩盤地山中に自由表面が形成される場合, Exp D は岩盤上の風化土・沖積地盤中に自由表面がある場合を示している。いま, 表中の記号と実験条件の対応について説明すると, たとえば, 実験ケース Exp F-I の単設 Run-(2)~(3)~[2] とは, 単設空洞において岩盤地山中に自由表面が形成される場合の実験で, 左右対称の境界条件を有し, Run-(2): $y_0 = 4 \times B \approx 25.9 \times 10^{-2}$ m, Run-(3): $D = 5 \times B = 30 \times 10^{-2}$ m, Run-[2]: $R = 2.0 \times 10^{-5}$ m/s の場合 というように対応を示している。他も同様に対応する。

図-3, 図-4 は, おのおの岩盤地山中に自由表面が形成される場合と岩盤上の風化土・沖積地盤中に自由表面があるその実験の記号と諸元を示したものである。これら2つの図中において, y_0', y_0'' : 左右貯留部の境界水位, L : 地盤部分の長さ, h : 空洞壁での浸出点の位置の高さ, D : 空洞底面から不透水層までの深さ, B :

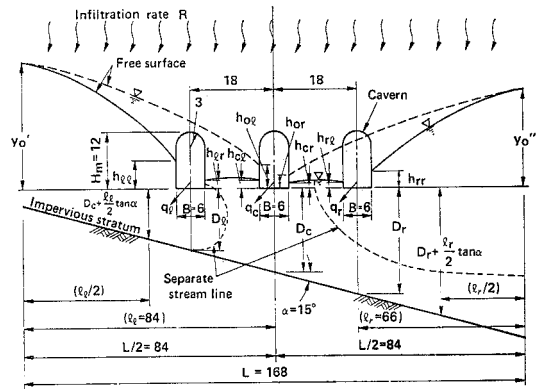


図-3 岩盤地山中に自由表面が形成される場合の実験 (単位: 10^{-2} m)

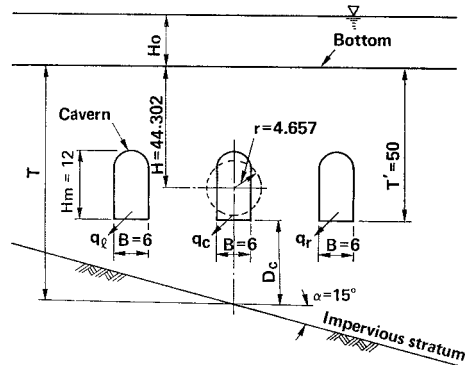


図-4 岩盤上の風化土・沖積地盤中に自由表面がある場合の実験 (単位: 10^{-2} m)

空洞幅, R : 降雨浸透量, H_0 : 上部貯留部の深さ, H_m : 空洞高さ, H : 上部貯留部の水底面から空洞中心までの深さ, T' : 上部貯留部の水底面から空洞底面までの深さ, T : 上部貯留部の水底面から不透水層までの深さ, q_l, q_c, q_r : それぞれ左側, 中央, 右側空洞からの単位長さ当たりの湧水量を示している。 l は, 右端 (左端) から空洞中央までの長さを示しており, 水平不透水層での単設の場合は $l = 84 \times 10^{-2}$ m, 連設の場合は, $l = 66 \times 10^{-2}$ m である。 r は, 空洞を等価面積の円形断面に近似した場合の半径である。また, 図中には示していないが, k : 浸透係数, d : アクリル板の平行間隙幅である。なお, 添字 l, c, r は, それぞれ left (左側), center (中心), right (右側) を意味している。

(3) 実験結果と考察

表-1 に示した一連の実験における浸透係数は, 平行間隙内の粘性流の式より得られる $k = gd^2/12\nu$ ($d = 0.1 \times 10^{-2}$ m) で求めた結果, $k = 0.167 \times 10^{-2}$ m/s (22°C); $k = 0.154 \times 10^{-2}$ m/s (21°C) となり, 平均浸透係数 k は, Dupuit 流より $k = 2q_m L / \{(h_1 + h_2) \Delta H\}$ (q_m : 流量, h_1 : 上流側水位, h_2 : 下流側水位, ΔH : 自由地下水位

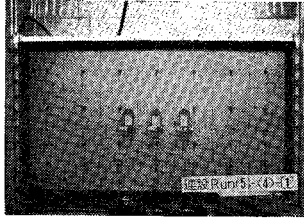


写真-1 Exp D-I, 連設 Run-(5)-<4>-[1] の場合

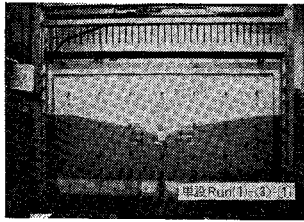


写真-2 Exp F-I, 単設 Run-(1)-<3>-[1] の場合

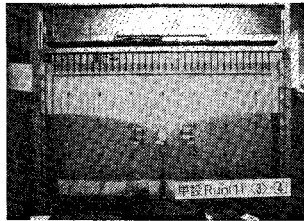


写真-3 Exp F-I, 単設 Run-(1)-<3>-[4] の場合



写真-4 Exp F-I, 連設 Run-(2)-<2>-[1] の場合

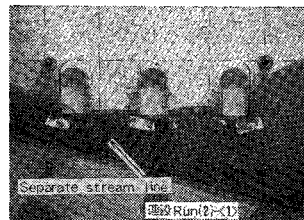
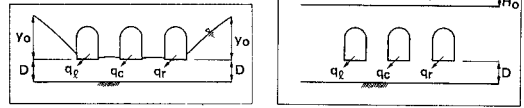


写真-5 Exp F-III, 連設 Run-(2)-<1> の場合

表-2 Exp F-I における降雨浸透がない場合および Exp D-I の実験結果

(単位: $y_0, H_0, D, d: 10^{-2} \text{m}, k: 10^{-2} \text{m/s}, q: 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$)

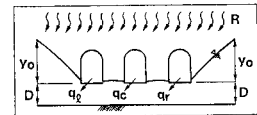


		(1)		(2)		(3)		(4)		(5)	
		q_a	y_0	q_a	y_0	q_a	y_0	q_a	y_0	q_a	H_0
<1> <D=6> $k=0.223$ $d=0.115$	単設	1.83	18.0	3.00	24.0	5.31	36.0	8.17	47.6	18.4	3.0
	連設	2.56 (1.20) (0.157)	18.0	3.75 (1.81) (0.129)	24.0	6.53 (3.16) (0.205)	36.0	10.2 (4.96) (0.251)	47.0	23.7 (9.53) (4.64)	3.5
<2> <D=18> $k=0.179$ $d=0.103$	単設	2.14	19.0	3.03	24.3	5.04	37.2	8.45	47.4	15.9	3.5
	連設	2.85 (1.19) (0.471)	18.0	3.84 (1.58) (0.683)	23.7	7.36 (3.21) (1.30)	36.4	10.9 (4.82)	48.5	23.3 (9.31) (4.69)	3.6
<3> <D=30> $k=0.165$ $d=0.100$	単設	2.36	19.1	3.38	25.8	5.46	36.5	8.64	47.2	17.1	4.5
	連設	3.35 (1.32) (0.714)	18.5	5.04 (1.90) (1.24)	25.2	8.25 (3.30) (1.65)	35.7	11.8 (4.91) (1.99)	46.4	26.5 (10.1) (6.30)	4.5
<4> <D= ∞ > $k=0.197$ $d=0.108$	単設	3.67	18.8	4.87	22.5	8.77	35.7	13.2	48.6	20.8	4.5
	連設	5.68 (2.13) (1.42)	17.6	7.74 (2.97) (1.80)	23.3	13.4 (5.28) (2.88)	35.7	20.5 (8.20) (4.07)	47.8	33.7 (12.7) (8.27)	4.6

注) 表中で () 内の上段は $q_l(=q_r)$ を下段は q_c を示す。

表-3 Exp F-I における降雨浸透がある場合の実験結果

(単位: $y_0, d: 10^{-2} \text{m}, k: 10^{-2} \text{m/s}, q: 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}, R: \text{m/s}$)



		(1)		(2)		(3)		(4)	
		q_a	y_0	q_a	y_0	q_a	y_0	q_a	y_0
$k=0.165$ $d=0.100$	単設	2.36	19.1	3.38	25.8	5.46	36.5	8.64	47.2
	連設	3.35 (1.32) (0.714)	18.5	5.04 (1.90) (1.24)	25.2	8.25 (3.30) (1.65)	35.7	11.8 (4.91) (1.99)	46.4
[2] $R=2.0 \times 10^{-5}$	単設	2.61	19.2	3.68	25.9	5.89	36.6	8.95	47.4
	連設	3.65 (1.47) (0.709)	18.6	5.18 (2.10) (0.979)	25.2	8.49 (3.58) (1.33)	35.6	12.4 (5.29) (1.83)	45.8
[3] $R=5.1 \times 10^{-5}$	単設	2.84	19.3	3.87	26.2	6.18	36.9	9.43	47.3
	連設	3.91 (1.59) (0.729)	18.7	5.65 (2.21) (1.23)	25.3	8.91 (3.68) (1.55)	35.9	12.8 (5.42) (1.98)	45.7
[4] $R=1.1 \times 10^{-4}$	単設	3.62	20.0	4.70	24.6	6.90	37.3	10.1	47.9
	連設	5.34 (2.19) (0.956)	19.4	6.31 (2.52) (1.27)	25.5	9.95 (4.15) (1.65)	36.4	13.3 (5.58) (2.13)	46.2

注) 表中で () 内の上段は $q_l(=q_r)$ を下段は q_c を示す。

の水位差) による実験結果により補正を行い決定した。
また、不透水層が存在しない場合(表-1中 Exp F-I および Exp D-I の Run-<4>) は、理論解による式(9)(後述)により逆算して求めた。

実験結果の中で5例を写真-1, 2, 3, 4 および 5 に示す。写真中のメッシュは、縦横 $12 \times 10^{-2} \text{m}$ であるが、写真-1 は、表-1 中、Exp D-I で連設空洞、Run-(5)-<4>-[1] の場合である。つまり、連設空洞において上

部貯留部に一定水位があり、無限帯水層を有する場合を示したものである。写真-2は、Exp F-I で単設空洞、Run-(1)-(3)-[1] の場合で、写真-3は、同じく Exp F-I で単設空洞、Run-(1)-(3)-[4] の場合を示している。これらを比べてわかるように、降雨浸透により水面形は全体に凸形となり、空洞側面の浸出点も高くなっていることがわかる。写真-4は、Exp F-I で連設空洞、Run-(2)-(2)-[1] の場合において、着色オイルを注入したときの流線を示したものであり、右端の空洞の浸出点に比べ中央空洞の浸出点が低くなっている。また、流線の状況により、右側空洞への湧水量 q_r が自由表面と分離流線注1) で囲まれた流域からのみ生じ、中央空洞湧水量 q_c は分離流線と不透水層の間から

起こることが確認できる。写真-5は、Exp F-III で連設空洞、Run-(2)-(1) の場合において、流線を示したものであるが、正勾配側注2) の空洞の浸出点に比べ逆勾配側の浸出点が高くなっている。また、分離流線に着目すると、右側(逆勾配側注2) 帯水層より流入した地下水が左側(正勾配側)の空洞まで達しており、逆に左側帯水層より流入した地下水は、左側の空洞のみにしか流入していないことがわかる。これは、逆勾配側の平均帯水層厚さが正勾配側に比べてかなり大きくなることによるものと考えられる。

表-2, 3, 4, 5 には、実験で得た流量の測定結果を一括して示した。

これらの結果をわかりやすくするため、湧水量と降雨浸透量、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-5, 6, 7, 8 のようになる。表および図中で、 q_a は単位長さ当たりの総湧水量 ($q_a = q_l + q_c + q_r$) である。

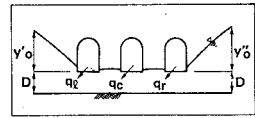
ここで、図-6 における不透水層が傾斜している場合の無次元量に注目する。動水勾配を代表するような無次元量 I および不透水層の深さを代表するような無次元

注 1) 分離流線とは、流れの領域を区分する流線の一つであり、たとえば、図-3 (前述) に示すように、左右空洞への湧水となる流域と中央空洞への湧水となる流域を分離する流線を分離流線と称することとする。

注 2) 不透水層の傾斜が自由地下水の流れの方向と一致している場合を正勾配、不透水層の傾斜と流れの方向とが反対である場合を逆勾配とよぶ。本実験では、空洞を中心にして、左側が正勾配、右側が逆勾配となる。

表-4 Exp F-II の実験結果

(単位: y_0' , y_0'' , d : 10^{-2} m, k : 10^{-2} m/s, q : 10^{-4} m²/s)

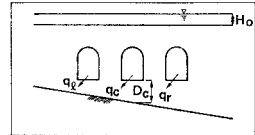
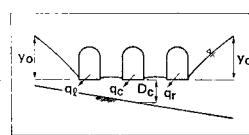


$k=0.154$ $d=0.100$		(1)		(2)		(3)		(4)	
		q_a	y_0''	q_a	y_0''	q_a	y_0''	q_a	y_0''
(3) ($y_0'=37.0$)	単設	3.80	19.4	4.23	24.6	5.12	37.0	—	—
	連設	5.50 (2.91) (1.09) (1.50)	19.0	5.94 (2.92) (1.17) (1.85)	24.0	7.40 (2.99) (1.42) (2.99)	37.0	—	—
(4) ($y_0'=47.5$)	単設	4.78	18.2	5.39	24.5	6.58	35.5	7.75	47.5
	連設	6.83 (4.13) (1.30) (1.40)	18.0	7.57 (4.28) (1.37) (1.92)	24.0	9.13 (4.43) (1.64) (3.06)	35.5	10.9 (4.50) (1.86) (4.53)	47.2

注) 表中で () 内の上段は q_l , 中段は q_c , 下段は q_r を示す。

表-5 Exp F-III および Exp D-II の実験結果

(単位: y_0 , H_0 , D_c , d : 10^{-2} m, k : 10^{-2} m/s, q : 10^{-4} m²/s)



		(1)		(2)		(3)		(4)		(5)	
		q_a	y_0	q_a	y_0	q_a	y_0	q_a	y_0	q_a	H_0
<1> < $D_c=12$ > $k=0.164$ $d=0.100$	単設	1.79	19.5	2.87	26.0	4.69	37.8	6.60	48.0	14.2	4.0
	連設	2.11 (0.785) (0.329) (0.994)	19.4	3.34 (1.22) (0.518) (1.60)	25.5	5.64 (2.30) (0.637) (2.70)	36.9	8.36 (3.45) (0.828) (4.08)	47.0	19.9 (8.02) (4.00) (7.90)	4.3
<2> < $D_c=18$ > $k=0.168$ $d=0.100$	単設	1.84	1.90	2.83	26.0	4.61	37.0	7.14	47.5	14.5	4.0
	連設	2.79 (1.20) (0.419) (1.17)	18.7	4.22 (1.85) (0.571) (1.80)	25.4	7.13 (3.05) (0.835) (3.24)	36.0	10.3 (4.60) (1.07) (4.65)	46.3	22.7 (9.22) (4.20) (9.18)	4.0

注) 表中で () 内の上段は q_l , 中段は q_c , 下段は q_r を示す。

量 \hat{D} をそれぞれ次式のように決めた。ただし、これらの無次元量は、現実との対応を考える場合には、実験モデルと幾何学的に相似であるような場合について適用される。

$$I = \left(\frac{y_0'}{l_l \sec \alpha} + \frac{y_0''}{l_r \sec \alpha} \right) / 2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\hat{D} = \frac{2B}{D_l + D_r + 1/2(l_l \tan \alpha + l_r \tan \alpha)} \dots\dots\dots (2)$$

本実験では、すべての実験ケースにおいて $l_l = l_r$ であるから、水平不透水層を有する場合は、 $I = (y_0' + y_0'') / 2l$, $\hat{D} = B/D$, 傾斜不透水層を有する場合は、 $I = y_0' / l \sec \alpha$ ($y_0' = y_0'' = y_0$), $\hat{D} = B/D_c$ となる。また、不透水層の傾斜角度 α は、正勾配で負、逆勾配で正の値をとるものとする。

図-5, 6, 7 は、岩盤地山中に自由表面が形成される

場合で降雨浸透無のときの諸関係を示したものであるが、図-5, 6 は、横軸に I を縦軸に無次元湧水量をとった関係であり、図-7 は、横軸におおの側の y_0'/l , y_0''/l および I を縦軸に各空洞への無次元湧水量をとった関係である。これらの 図-5~7 および表-5 より以

下のことが結論づけられる。① 湧水量は、境界水位が大いほど、また空洞底面から不透水層までの深さが大きいほど増加する。つまり、動水勾配および帯水層厚が増すことによる。② I を横軸にとると、単設および連設における湧水量は、よく一致する。これは、無次元量 I が湧水量と同時に左右境界からの流入量を代表しているものと考えると、空洞の数によらず総湧水量は左右外側の水面形に支配されることを意味している。③ 連設空洞では、両外側空洞への湧水量 q_l, q_r が支配的に大きく、中央空洞のそれが小さくなる。また、中央空洞の湧水量は、不透水層の深さ D が小さい(式(2)の \hat{D} が大きいこと)と、動水勾配によらずほとんど変化しないこともわかる。④ 左右の境界水位が異なる場合において、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。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空洞の湧水量 q_l, q_r は、左右対称の境界水位を有する場合のそれとほぼ一致する。⑤ 傾斜不透水

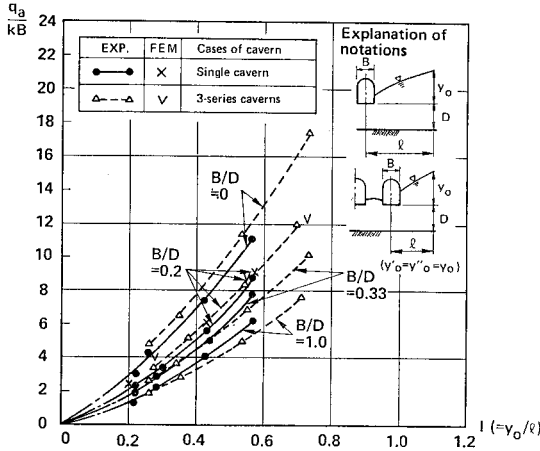


図-5 Exp F-I の場合の $q_a/kB \sim I$ の関係

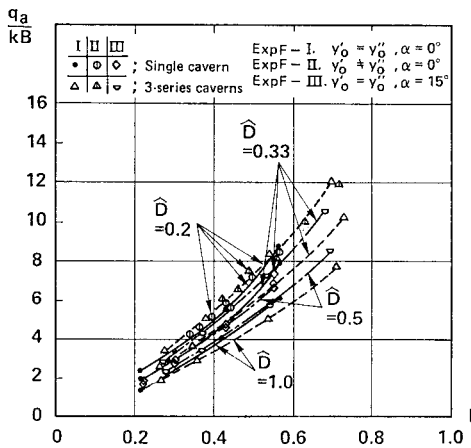


図-6 Exp F-I, II, III の場合の $q_a/kB \sim I$ の関係

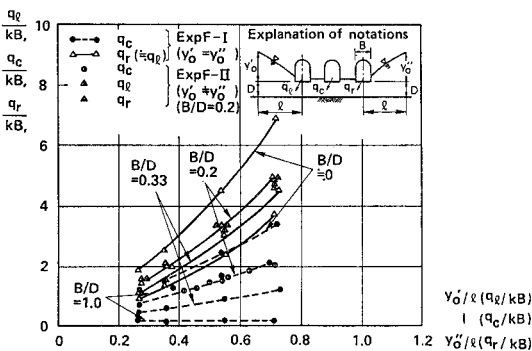


図-7 Exp F-I, II の場合の $q_c/kB, q_c/kB, q_r/kB \sim y_0'/l, I, y_0''/l$ の関係

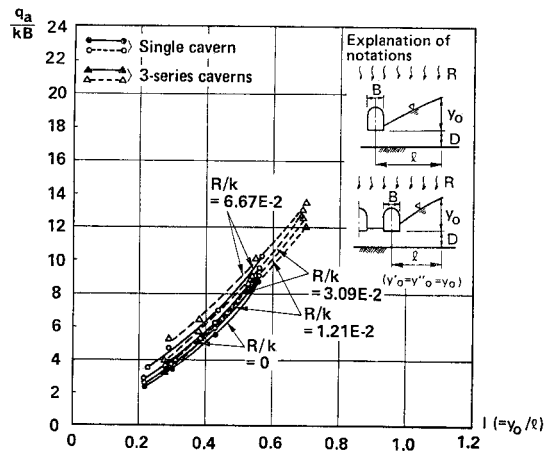


図-8 Exp F-I における降雨浸透がある場合の $q_a/kB \sim I$ の関係 ($B/D=0.2$)

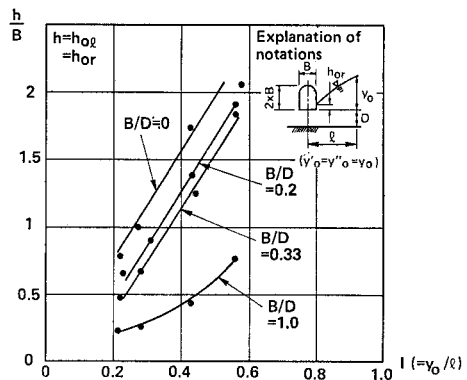


図-9 Exp F-I における単設空洞の場合の $h/B \sim I$ の関係

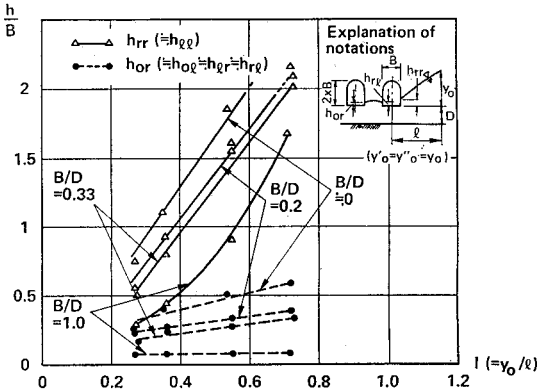


図-10 Exp F-I における連設空洞の場合の $h/B \sim I$ の関係

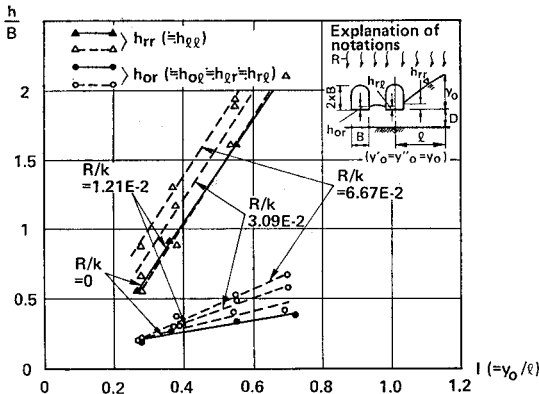


図-11 Exp F-I における降雨浸透がある場合の $h/B \sim I$ の関係 (連設空洞; $B/D=0.2$)

層を有する場合、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が、空洞底面から不透水層までの深さが小さい(式(2)の \hat{D} が大きいこと)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。これは、写真-5 で示した分離流線の性質より理解できる。図-8 は、降雨浸透がある場合の関係を示したものであるが、降雨浸透により単設、連設とも湧水量が増すことがわかる。

図-9, 10 は、Exp F-I の場合の空洞側面の浸出点位置を示したものである。基本的性質は、湧水量と境界水位、不透水層との関係とほぼ類似であることが判読できる。ただし、動水勾配がかなり大きくなると、浸出点は空洞内に現われず空洞上に自由表面が現われる。図-11 は、Exp F-I の場合の連設空洞において降雨浸透がある場合のそれを示したものである。降雨浸透により浸出点は高くなるが、動水勾配の小さい場合の空洞間浸出点においては、降雨浸透による影響が小さいことが確認できる。

次に、一様帯水層中における既存の水理解析解を、1) 岩盤地山中に自由表面が形成される場合と 2) 岩盤上の

風化土・沖積地盤中に自由表面がある場合に分けて、実験結果に応用してみる。また、それらの結果の中で代表的なケースについては、FEM 法により計算を行い、実験結果に合わせて示し比較した。FEM の分割要素は三角形を用い、単設空洞モデルで(要素数 519, 節点数 299)、連設空洞モデルで(要素数 586, 節点数 335)である。

岩盤地山中に自由表面が形成される場合の理論解は、Zhukovskii の溝湧水理論を応用・発展させたものを用い、a) 不透水層上の溝および b) 無限帯水層中の溝の 2つの場合についてその理論式を示す。

a) 不透水層上の理論解^{5), 6), 7)}

図-12 右上に単設空洞周辺の流れの条件図を示す。全湧水量 q は空洞底面からの湧水量 q'' と左右両壁からのそれ q_{ol}' q_{or}' の和である。ここで、 b は空洞内仮想浸出幅である。湧水量は、同図に示した点線のように空洞からかなり離れた位置における漸近線(空洞のごく至近を除いて境界水位から Dupuit の流れで描いた曲線)の式により次式のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{q_l'}{kD} &= \frac{(1-y_l/D)^2 - \phi_1^2}{(\phi_2 - 2x_l/D)} \\ \left(\frac{D_l'}{D}\right)^2 &= \phi_1^2 + \frac{q_l'}{kD} \phi_2 \end{aligned} \right\} \text{(左側漸近線)} \dots \dots \dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{q_r'}{kD} &= \frac{(1-y_r/D)^2 - \phi_1^2}{\{\phi_2 + 2(x_r - b)/D\}} \\ \left(\frac{D_r'}{D}\right)^2 &= \phi_1^2 + \frac{q_r'}{kD} \phi_2 \end{aligned} \right\} \text{(右側漸近線)} \dots \dots \dots (4)$$

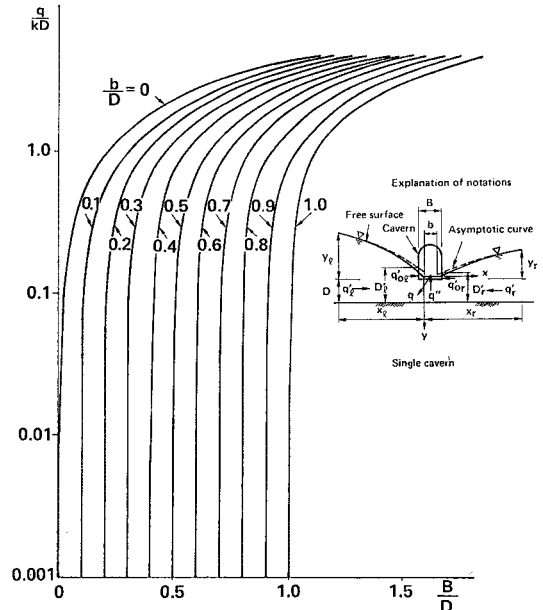


図-12 $q/kD \sim B/D$ の関係

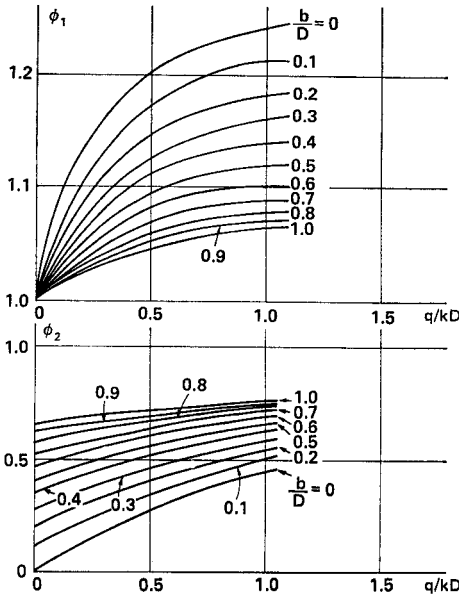


図-13 $\phi_1, \phi_2 \sim q/kD$ の関係

ここで、 D_l', D_r' はおおよその左右漸近線が空洞壁面と交わる点の不透水層からの高さであり、 ϕ_1, ϕ_2 は、図-12、図-13 に示すように b/D をパラメーターに q/kD によって変わる値である。式 (3), (4) において、 $x = -x_l, x_r$ の座標で $y = -y_l, -y_r$ が決まると、湧水量 q_l', q_r' を求めることができる。ここで、図-12 に着目すると、 q/kD は、 B/D が一定ならば b/D が小さいほど大きくなっていることが認められる。 b が小さいことは、境界水位 y_l, y_r が大きく、浸出点高さ h_{0l}, h_{0r} が大きいことを意味する。また、 $q/kD < 0.1$ の範囲では空洞幅 B は浸出幅 b に等しくなる。つまり、空洞湧水量が小さいと、浸出点はほとんど空洞底面の両角に一致する。次に、式 (4) より興味ある流れの性質が見出せる。同式の第1式の分子において、 $(1 - y_r/D)^2 - \phi_1^2 < 0$ となると、空洞への湧水は右側帯水層からは起こらず、湧水量は $q = q_l'$ となり、 q_r' は空洞の下部を通過して右側帯水層へ流下してしまう。この場合は y_r/D が小さいときに相当する。当然ながら、左側帯水層から空洞下部を通り右側帯水層から空洞へ回り込む q_l' と q_r' を分ける分離流線が表われることを意味している。

なお、式 (3), (4) は、連設空洞の場合にも準用され得ることがわかっている⁹⁾。

b) 無限帯水層中の理論解

図-14 左上の流れの条件図に示したように無限に深い帯水層に空洞を設けた場合の湧水量は、次式によって表わすことができる^{9), 10)}。

$$\frac{B}{b} = \left(\frac{q}{kb} + 1 \right) \sqrt{1 - \left\{ \frac{2}{\pi} \frac{q/kb}{(q/kb+1)} \right\}^2} - \frac{q}{kb} \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \frac{2}{\pi} \frac{q/kb}{(q/kb+1)} \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{y}{b} = \frac{q}{kb} \frac{1}{\pi} \cosh^{-1} \frac{x/b + 1/2 \cdot q/kb}{1/2(1 + q/kb)} \dots\dots\dots (6)$$

また、底面からの湧水量は、

$$\frac{q''}{kb} = \frac{2}{\pi} \frac{q}{kb} \cos^{-1} \frac{2/\pi \cdot q/kb}{(q/kb+1)} \dots\dots\dots (7)$$

となる。式 (5), (6) より、自由表面での座標 x_r, y_r が与えられると湧水量 q を決めることができ、流出幅 b も決まる。また、浸出点の高さ $h_{0r}(=h_{0l})$ は、 $x=B/2$ を代入することにより決まる。ここで、式 (7) を用い

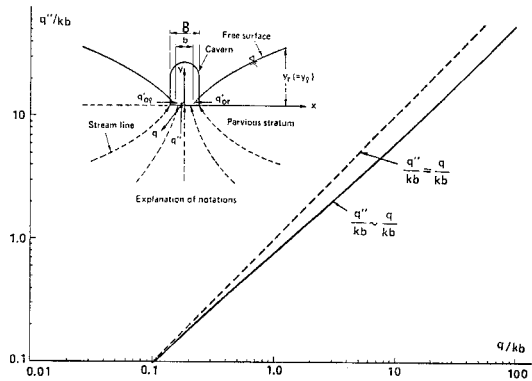
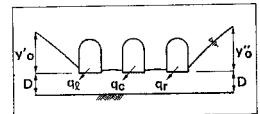


図-14 $q''/kb \sim q/kb$ の関係

表-6 Exp F-I および Exp F-II の代表的な実験結果と理論の比較

(単位: $y_0', y_0'' : 10^{-2} \text{ m}, q : 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$)



Experimental cases		y_0'	y_0''	Exp. q_c	Theory. q_c by Eq. (3)~(6)	Exp. $q_l (=q_r)$	Theory. $q_l (=q_r)$ by Eq. (3), (4)
Exp F-I	単設 Run-(1)-(2)-[1]	19.0	19.0	2.14	2.00	—	—
	連設 Run-(1)-(2)-[1]	18.0	18.0	0.471	—	1.19	1.19
	単設 Run-(2)-(2)-[1]	24.3	24.3	3.03	2.78	—	—
	連設 Run-(2)-(2)-[1]	23.7	23.7	0.683	—	1.58	1.68
	単設 Run-(1)-(3)-[1]	19.1	19.1	2.36	2.34	—	—
	連設 Run-(1)-(3)-[1]	18.5	18.5	0.714	—	1.32	1.43
	単設 Run-(2)-(3)-[1]	25.8	25.8	3.38	3.40	—	—
	連設 Run-(2)-(3)-[1]	25.2	25.2	1.24	—	1.90	2.18
	単設 Run-(1)-(4)-[1]	18.8	18.8	3.67	4.18	—	—
単設 Run-(2)-(4)-[1]	22.5	22.5	4.87	5.20	—	—	
Exp F-II	単設 Run-(3)-(1)-(3)	37.0	19.4	3.80	3.88	—	—
	単設 Run-(3)-(2)-(3)	37.0	24.6	4.23	4.34	—	—
	単設 Run-(4)-(1)-(3)	47.5	18.2	4.78	4.83	—	—
	単設 Run-(4)-(2)-(3)	47.5	24.5	5.39	5.37	—	—

て、空洞壁面からの湧水量 q_{ol}' , q_{or}' と底面からの湧水量 q'' がどういった関係にあるか調べてみる。図-14 に q''/kb と q/kb の関係を示す。図中、点線で示したのは $q''/kb=q/kb=0.1$ で両者は等しい。つまり、 $q/kb \leq 0.1$ の範囲では、湧水量は底面のみから起こる。また、 $q''/kb=q/kb$ の関係と $q''/kb \sim q/kb$ 関係との差が壁面からの湧水ということになり、 q/kb がある程度大きくならないと壁面からの湧水は少ない。

これらの理論式は $0 < b < B$ において適用されるが、表-6 に実験結果と上述した理論との比較を示した。理論値は実験値と比較的によく一致している。また、図-5 中に FEM 法による解析結果を示したが、計算値は実験値とよく一致している。

岩盤上の風化土・沖積地盤中に自由表面がある場合は、複素ポテンシャルの理論により求められた被圧水で満たされた円形暗きよの取水量算定式により湧水量を求める。無限地盤の場合¹¹⁾ は式 (8) を、不透水層がある場合¹²⁾ は式 (9) によって求める。

$$q = \frac{2\pi k(H+H_0)}{\ln(2H/r)} \dots\dots\dots (8)$$

$$q = \frac{2\pi k(H+H_0)}{\ln\left\{\tan\frac{\pi(2H-r)}{4T} \cot\frac{\pi r}{4T}\right\}} \dots\dots\dots (9)$$

この場合の水利条件は、図-4 に示したものであり、これらにより算定した結果、FEM 法による結果および実験結果を図-15、表-7 に示す。湧水量は、空洞底面から不透水層までの深さが大きいほど増すが、傾斜不透水層を有することによる影響は無視し得ることがわかる。また、式 (9) による解は、実験値とよく一致しており、不透水層が深い位置にあれば式 (8) によっても

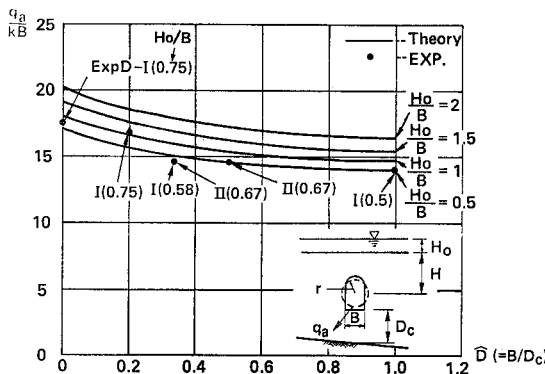
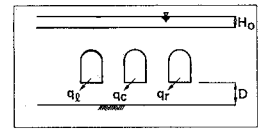


図-15 Exp D-I, II の場合の $q_a/kB \sim \hat{D}$ の関係 (図中・: 実験値)

表-7 Exp D-I の代表的な実験結果と理論の比較

(単位: $H_0, D: 10^{-2}$ m, $q: 10^{-4}$ m²/s)



Experimental cases	H_0	D	Exp. q_a	Theory q_a by Eq. (8)	Theory q_a by Eq. (9)	q_a by FEM
単設 Run-(5)-(1)-[1]	3.0	6.0	18.4	22.5	18.4	17.9
単設 Run-(5)-(2)-[1]	3.5	18.0	15.9	18.3	16.3	16.7
単設 Run-(5)-(3)-[1]	4.5	30.0	17.1	17.2	16.0	16.9
単設 Run-(5)-(4)-[1]	4.5	∞	20.8	20.5	20.8	25.0
連設 Run-(5)-(3)-[1]	4.5	30.0	26.5	—	—	26.5

注) 単設の場合は $q_a=q_c$ 、連設の場合は $q_a=q_l+q_c+q_r$ である。

計算できることを示している。FEM 法による計算値も実験値とよく一致している。

3. 結 論

近年、地下空洞の利用が注目されているにもかかわらず、空洞周辺流れの基本的性質や湧水についてあまり研究がなされていないように思われる。本論文では、このような観点から、ヘル・ショウモデルにより、単設および連設の空洞周辺流れについて実験的に検討し、さらに理論との比較検討を行った。以下に得られた成果を列挙すると次のようになる。

- (1) 単設および連設空洞における湧水量および空洞壁での浸出点高さと降雨浸透量、境界水位、不透水層との関係を無次元化することによってそれらの諸関係を得た。
- (2) 分離流線の性質が実験的に明らかになった。
- (3) 岩盤上の風化土・沖積地盤中に地下水の自由表面がある場合の湧水量は、傾斜不透水層を有することによる影響をほとんど受けない。
- (4) 動水勾配および不透水層の深さを代表するようなパラメーターとしてそれぞれ I および \hat{D} をとれば、図-5, 8 に整理したものと同様に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にも適用できる。
- (5) 動水勾配がかなり大きくなると浸出点は空洞内に現われず、地下水の自由表面が空洞上に現われる。
- (6) 動水勾配がある程度小さくなると湧水はほとんど空洞底面のみから生じ、浸出点も空洞底面の両角に一致する。

参 考 文 献

- 1) 石井政次・佐久間文彦：トンネル湧水の地形・地質的分類，鉄道技術研究所，No. 1041, 1977年3月。
- 2) 駒田広也ほか：水封式燃料地下貯蔵用空洞周辺岩盤の浸透流に関する検討，土木学会論文報告集，No. 300, pp. 69~80, 1980年8月。

- 3) 佐藤邦明：地下空洞の水理解析へのアプローチ，土と基礎，土質工学会 29-12(287)，No.1276，pp. 45～50，1981年12月。
- 4) 前出 2) pp. 70～71.
- 5) V.I. Aravin and S.N. Numerou : Theory of fluid flow in undeformable porous media, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, pp. 244～251, 1965.
- 6) 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，Vol. 12，pp. 99～118，1982年。
- 7) 佐藤邦明：岩盤地下空洞の湧水，土木学会誌，Vol. 68，pp. 69～75，1983年3月。
- 8) 前出 6)
- 9) P. YA. Polubarinova-Kochina : Theory of Ground Water Movement, Translated from Russian by J.M. Roger De Wiest, Princeton Univ. Press, pp. 120～126, 1962.
- 10) 前出 6)
- 11) 佐藤邦明：グラウトによるトンネル湧水量解析，トンネルと地下，第11巻10号，pp. 47～52，1980年10月。
- 12) 前出 5)，pp. 150～152.

(1983.6.9・受付)
