

地下空洞周辺の地下水流に関する実験的研究
Experimental study on groundwater motion
around underground caverns

埼玉大学工学部 正員 佐藤 邦 明
榊 熊谷 組 正員 清水 昭 男
榊 熊谷 組(埼玉大学研究生) 正員 ○伊藤 洋

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。本研究では、単設および連設の地下空洞の地下水流と降雨浸透量、境界水位、不透水層との関係を、地下水流の自由表面が岩盤上の風化土・沖積地盤中にある場合（あるいは海底トンネルも含む）と、自由表面が岩盤地山中にある場合について、ヘル・ショウモデルにより実験的に検討したものである。得られた成果は、空洞地下水の実際の問題にも適用しうると思われ、工学的重要性は大きいと考えられる。

1. 実験装置と実験方法

実験装置は、ヘル・ショウモデルであり、図-1に概略を示した。前面、後面ともにアクリル板で、間隙にスペーサー（厚さ1mm）をはさんでいる。透水部は、長さ168cm、高さ93cm（上部貯留部10cm、下部貯留部5cmは除く）で、平板間隙幅は1mm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（海底トンネルのような場合）をモデル化したもので、下部貯留部は底面に均一な水頭を与えて近似的に不透水層が存在しない状態をモデル化したものである。地下空洞は、図中の中央付近に（幅6cm、高さ12cm）

に3連設置し、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。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ュミレータにより降らせる。降雨は、透水部の上端より細管を通じて一様に降られ、降雨浸透量Rは、細管の長さ、内径（長さ4cm、外径0.8mm、長さ3cm、外径1mm、長さ1cm、外径1mmの3種）により調整さ

れる。また、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、軟らかいゴム（Oリング、外径2mm）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（レッドオイル）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 ）を用い、実験はすべて恒温室（ 22°C ）で行なわれた。

表-1は、すべての実験ケースを示したものである。（たとえば、Iー単設、ロー $y_0 = 4 \times B$ 、ハー $D = 1 \times B$ 、二ー $R = 0.002$ は（単設EXP-②-①-②）の場合を意味する。）ただし、降雨浸透実験は、不透水層③（ $D = 5 \times B = 30 \text{ cm}$ ）についてのみ行なわれた。

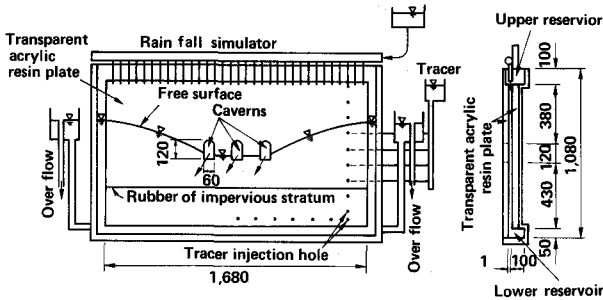


図-1 実験装置略図

表-1 実験ケース

イEXP-ロー-ハ-ニ					
イ (空洞の種類)	単 設		連 設		
ロ-Yo(cm) (境界水位)	① (3×B)	② (4×B)	③ (6×B)	④ (8×B)	⑤ (H _o)
ハ-D(cm) (不透水層)	① (1×B)	② (3×B)	③ (5×B)	④ (~)	—
ニ-R(cm/s) (降雨浸透量)	① (0)	② (0.0020)	③ (0.0051)	④ (0.011)	—

B: 空洞の幅 (B=6cm)
(降雨浸透は、ハ-③においてのみ行った。)

図-2, 図-3 は, 自由表面をもつ場合ととない場合のモデル実験の記号と諸元を示したものである。図中で, y_o : 左右貯留部の境界水位, L : 地盤部分の長さ, h : それぞれ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 : 空洞幅, R : 降雨浸透量, H_o : 上部貯留部の深さ, 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 : 空洞からの単位長さ当りの湧水量を示している。又, ℓ は, 右端 (左端) から空洞中央までの長さを示しており, 単設, 連設によって図中に示すようになる。 r は, 空洞を等価の円形トンネルに近似した場合の半径である。

2. 実験結果

実験は, 表-1 に示した条件で行なわれたが, 実験に先立って, 浸透係数を求めるため, Dupuit 流を設定し, $k' = 2q'L / (hu^2 - hc^2)$ (hu : 上流側水位, hc : 下流側水位) を用いた。また, 平行間隙内の粘性流の式 $k' = gd_o^2 / 12\nu$ (d_o : 平行間隙幅 (0.1 cm)) で求めた結果は, $k' = 0.167 \text{ cm/s}$ であった。又, 不透水層が存在しない場合 (ハ-④) は, 理論解 (7) 式 (後述) により逆算して (k) を求めた。

実験結果の4例を Photo-1, 2, 3, 4 に示す。(写真中のメッシュは, 12 cm × 12 cm である。) Photo-1 は, 上部貯留部に一定水位があり, かつ底面での水頭が一樣な場合 (不透水層が存在しない場合) を示したものである。Photo-2 は, 表-1 中の単設 EXP-①-③-① (降雨浸透なし), Photo-3 は, 単設-①-③-④ (降雨浸透あり; $R = 0.011 \text{ cm/s}$) を示したものであり, $D = 30 \text{ cm}$, $y_o = 19.1 \text{ cm}$ である。これら Photo-2, 3 を比べて判るように, 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 $h_{ol} (= h_{or}) = 4.0 \text{ cm}$ から $h_{ol} = 6.0 \text{ cm}$ と高くなっていることが認められる。Photo-4 は, 連設 EXP-②-②-① において, 着色オイルを注入し, 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ことがわかる。また, 流線の状況により, Separate stream

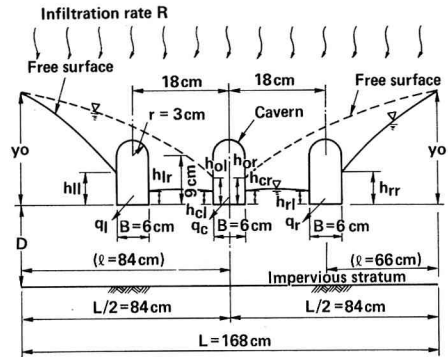


図-2 自由表面がある場合の実験モデル

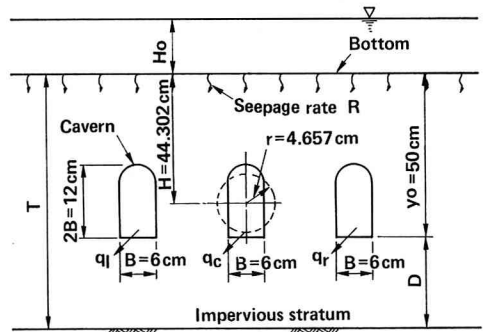


図-3 自由表面がない場合の実験モデル

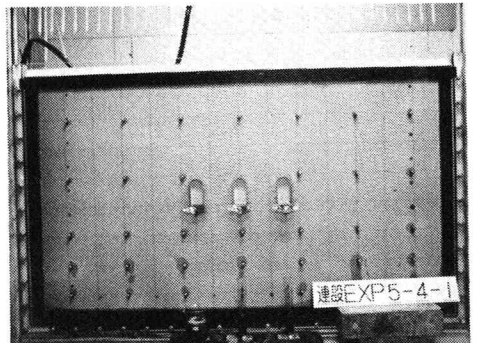


Photo-1 (連設 EXP-⑤-④-①, 降雨なし)

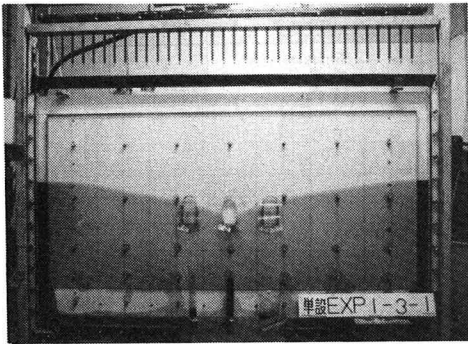


Photo-2 (単設 EXP-①-③-①; 降雨なし)

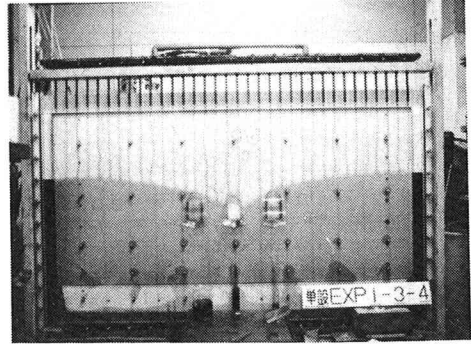


Photo-3 (単設 EXP-①-③-④; 降雨あり)

line は、不透水層にかなり近い位置にあることもわかる。
(図-9 参照)

実験で得た流量を整理すると、表-2 および表-3 のようになり、これより、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-4、図-5、図-6 が得られる。ここで、 Q は単位長さ当りの総湧水量 ($Q = q_l + q_c + q_r$) である。

表-2、図-4、図-5 は、降雨浸透がない場合の関係を示したものであり、図-4 は y_0/ℓ と Q/kB の関係を、図-5 は $2y_0/L$ と Q/kB の関係を示している。これらより、湧水量は、左右境界水位が大きいほど、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ことがわかる。また、

y_0/ℓ を横軸にとると単設および連設における湧水量は、ほとんど一致するが 同一の境界条件のもとでは単設より連設の場合の方が湧水量は多くなることもわかる。さらに、連設の場合は、両左右外側の湧水量が多く、中央のそれは少ないことが認められる。次に、上部貯留部に一定水位がある場合に注目すると、透水路に地下水の自由表面がある場合より、その湧水量はかなり多くなることも認められる。表-3 を用い、図-6 は、降雨浸透がある場合の関係を示したものである。これより、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。

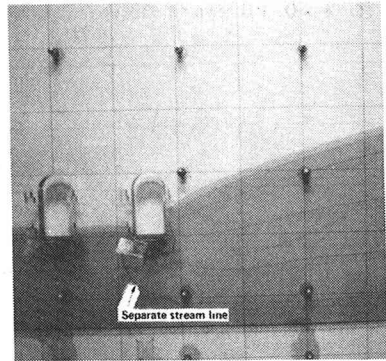


Photo-4 (連設 EXP-②-②-①)

表-2 実験結果 (降雨浸透なし)

		①		②		③		④		⑤
		Q	y_0	Q	y_0	Q	y_0	Q	y_0	Ho
① (D=6cm) k=0.223cm/s d=0.115cm	単設	1.83	18.0	3.00	24.0	5.31	36.0	8.17	47.6	18.4
	連設	2.56 (1.20 0.157)	18.0 (1.81 0.129)	3.75 (1.81 0.129)	24.0 (3.16 0.205)	6.53 (3.16 0.205)	36.0 (4.96 0.251)	10.2 (4.96 0.251)	47.0 (3.53 0.464)	23.7 (10.1 6.30)
② (D=18cm) k=0.179cm/s d=0.103cm	単設	2.14	19.0	3.03	24.3	5.04	37.2	8.45	47.4	15.9
	連設	2.85 (1.19 0.471)	18.0 (1.98 0.082)	3.84 (1.98 0.082)	23.7 (3.30 0.936)	7.36 (3.30 0.936)	36.4 (4.82 1.30)	10.9 (4.82 1.30)	23.3 (9.31 0.469)	26.5 (10.1 6.30)
③ (D=30cm) k=0.165cm/s d=0.100cm	単設	2.36	19.1	3.38	25.8	5.46	36.5	8.64	47.2	17.1
	連設	3.35 (1.32 0.714)	18.5 (1.90 0.124)	5.04 (1.90 0.124)	25.2 (3.30 1.85)	8.25 (3.30 1.85)	35.7 (4.91 1.33)	11.8 (4.91 1.33)	46.4 (9.31 0.469)	26.5 (10.1 6.30)
④ (D=∞) k=0.197cm/s d=0.108cm	単設	3.67	18.8	4.87	22.5	8.77	35.7	13.2	48.6	20.8
	連設	5.68 (2.13 1.42)	17.6 (2.97 1.80)	7.74 (2.97 1.80)	23.3 (5.28 1.44)	12.0 (5.28 1.44)	35.7 (8.20 4.07)	20.5 (8.20 4.07)	33.7 (12.7 8.27)	46.2 (10.1 6.30)

注) 表中で()内の上段は q_l ($\approx q_c$) を下段は q_r を示す。
さらに、水位 (y_0 , Ho) の単位は cm、流量 (Q) は cm^2/s である。

表-3 実験結果 (降雨浸透あり)

k=0.165cm/s d=0.100cm		①		②		③		④		⑤
		Q	y_0	Q	y_0	Q	y_0	Q	y_0	Ho
① R=cm/s 0.0	単設	2.36	19.1	3.38	25.8	5.46	36.5	8.64	47.2	17.1
	連設	3.35 (1.32 0.714)	18.5 (1.90 0.124)	5.04 (1.90 0.124)	25.2 (3.30 1.85)	8.25 (3.30 1.85)	35.7 (4.91 1.33)	11.8 (4.91 1.33)	46.4 (9.31 0.469)	26.5 (10.1 6.30)
② R=cm/s 0.0020	単設	2.61	19.2	3.68	25.9	5.89	36.6	8.95	47.4	17.2
	連設	3.65 (1.47 0.709)	18.6 (2.10 0.999)	5.18 (2.10 0.999)	25.2 (3.38 1.33)	8.49 (3.38 1.33)	35.6 (4.91 1.33)	12.4 (4.91 1.33)	45.8 (9.31 0.469)	26.5 (10.1 6.30)
③ R=cm/s 0.0051	単設	2.84	19.3	3.87	26.2	6.18	36.9	9.43	47.3	17.1
	連設	3.91 (1.59 0.729)	18.7 (2.21 1.23)	5.65 (2.21 1.23)	25.3 (3.68 1.55)	8.91 (3.68 1.55)	35.9 (4.91 1.33)	12.8 (4.91 1.33)	45.7 (9.31 0.469)	26.4 (10.1 6.30)
④ R=cm/s 0.011	単設	3.62	20.0	4.70	24.6	6.90	37.3	10.1	47.9	17.4
	連設	5.34 (2.19 0.956)	19.4 (2.52 1.27)	6.31 (2.52 1.27)	25.5 (4.15 1.65)	9.95 (4.15 1.65)	36.4 (5.58 2.13)	13.3 (5.58 2.13)	46.2 (10.1 6.30)	26.5 (10.1 6.30)

注) 表中で()内の上段は q_l ($\approx q_c$) を下段は q_r を示す。
さらに、水位 (y_0 , Ho) の単位は cm、流量 (Q) は cm^2/s である。

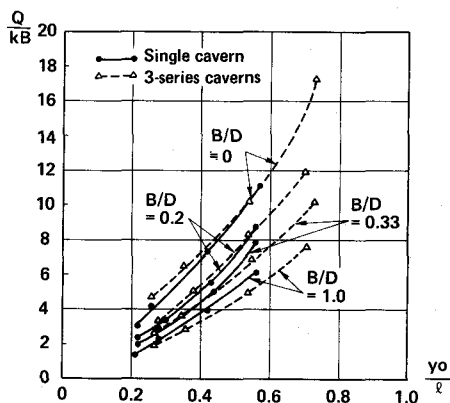


図-4 $Q/kB \sim y_0/l$ の関係

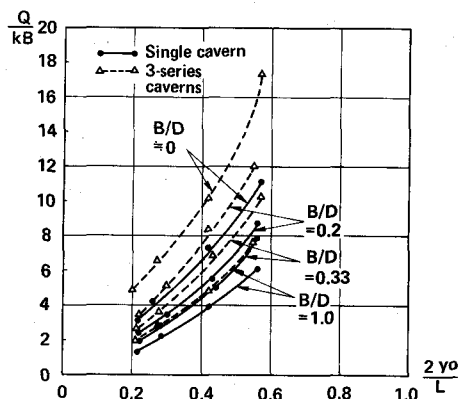


図-5 $Q/kB \sim 2y_0/L$ の関係

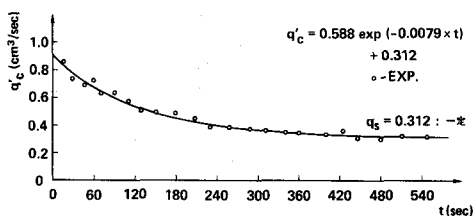


図-7 単設空洞への湧水量の経時変化
(単設 EXP-②-②-①)

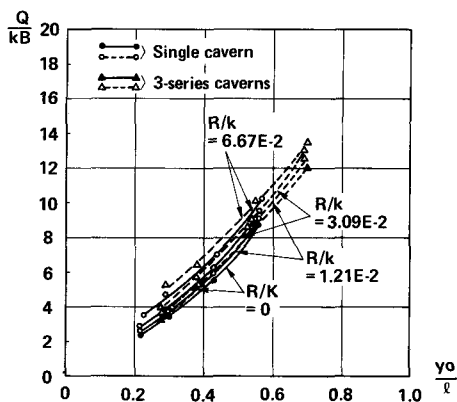


図-6 降雨浸透がある場合の $Q/kB \sim y_0/l$ の関係
($B/D = 0.2$)

図-7は、単設空洞への湧水量の経時変化の一例を示したものであり、約6～7分で恒常湧水に至っていることがわかる。また、岩盤上の風化土・沖積層に地下水の自由表面がある場合は、湧水量経時変化に伴う非定常性は弱く、早期に恒常湧水に至ることが知られている。¹⁾

3. 実験結果と理論との比較

ヘル・ショウモデル実験の結果の妥当性を調べるため、理論式による検討および有限要素法による数値解析（飽和二次元定常浸透流解析）を行う。

(1) 透水部に地下水の自由表面がある場合の理論解²⁾

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、(i)不透水層の溝および(ii)無限帯水層中の溝の二つの場合についてその理論式を示す。また、それぞれの水理モデルを図-8、図-9、図-10に示す。図中で、 b は流出幅であり他の記号は、図-2（前述）に示したものと同様である。

(i) 不透水層上の理論解

単設空洞の場合の湧水量 q_c^* の算定式は次のようになる。（ここで、 q^* は、 $q^* = q/k$ である。）

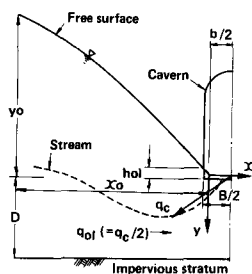


図-8 単設空洞周辺流れの水理モデル

$$\frac{q_c^*}{2D} = \frac{(1-y/D)^2 - \phi_1^2}{(\phi_2 - 2x/D)} \quad (1)$$

連設空洞の場合の湧水量 q_1^* および q_c^* の算定式は次のようになる。

$$\frac{q_1^*}{D} = \frac{(1-y/D)^2 - \phi_1^2}{(\phi_2 - 2x/D)} \quad (2)$$

$$\frac{q_c^*}{2D} = \frac{(1-y/D)^2 - \phi_1^2}{\{\phi_2 + 2(x-b)/D\}} \quad (3)$$

なお、 ϕ_1 、 ϕ_2 については、図-11、図-12 に示した。

(ii) 無限帯水層中の理論解 (単設のみ)

無限帯水層中における単設空洞の湧水量 q_c の算定式は次のように表わされる。

$$\frac{B}{b} = \left(\frac{q_c}{kb} + 1 \right) \sqrt{1 - \left\{ \frac{2}{\pi} \frac{q_c/kb}{(q_c/kb + 1)} \right\}^2} - \frac{q_c}{kb} \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \frac{2}{\pi} \frac{q_c/kb}{(q_c/kb + 1)} \quad (4)$$

$$\frac{y}{b} = \frac{q_c}{kb} \frac{1}{\pi} \cosh^{-1} \frac{x/b + 1/2 \cdot q_c/kb}{1/2 (1 + q_c/kb)} \quad (5)$$

(4)、(5)式において、自由表面での座標 x_0 、 y_0 が与えられると湧水量 q_c 、流出幅 b が決まる。

そこで、連設 EXP-①-②-① のケースについて流量の求め方を例示する。 $B = 6 \text{ cm}$ 、 $D = 18 \text{ cm}$ 、 $y_0 = -18.0 \text{ cm}$ 、また $x_0 = -63.75 \text{ cm}$ ($b = 4.5 \text{ cm}$ と仮定)であったから、図-11 に注目しつつ、 $b/D = 0.25$ 、 $q^*/D = 0.37$ とすると、図-12 の ϕ_1 、 $\phi_2 \sim q^*/D$ から、 $\phi_1 = 1.117$ 、 $\phi_2 = 0.38$ と読める。(2)式にこれらの諸量を代入すると $q^*/D = 0.369$ となり、初めに仮定した 0.37 とほぼ一致する。従って $q_1 = kD \times 0.37 = 0.179 \times 18 \times 0.37 = 1.19 \text{ cm}^2/\text{s}$ (実験値 $1.19 \text{ cm}^2/\text{s}$) となり実験値とはほぼ一致する。次に q_c の決定にあたって、 x は空洞中心までとって $x = 20.25 \text{ cm}$ とする。

同時に、 $x = 20.25 \text{ cm}$ において $y = 0 \text{ cm}$ とする。そこで、 $q_c^*/2D$ は、(3)式より $q_c^*/2D = -0.116$ となり、 $q_c = 0.748 \text{ cm}^2/\text{s}$ (実験値 $0.471 \text{ cm}^2/\text{s}$) となる。実験値と一致しないが、ここで $y = -0.72 \text{ cm}$ ととれば、 $q_c = 0.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ となりほぼ一致する。連設の場合の中央空洞の湧水量は、動水勾配が大きくなると y の仮定値の影響が大きく、本実験結果との比較は困難である。

表-4 に、実験結果との比較を示した。理論値は実験値と比較的よ

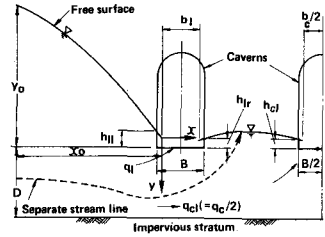


図-9 連設空洞周辺流れの水力モデル

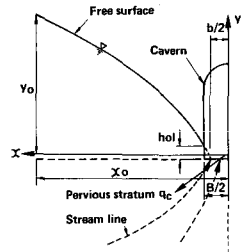


図-10 無限帯水層中の単設空洞周辺の流れ

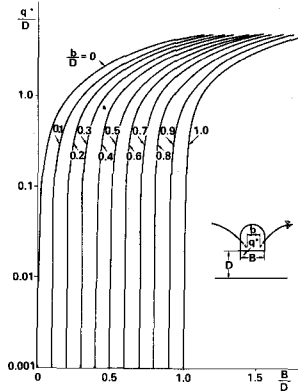


図-11 $q^*/D \sim B/D$ の関係

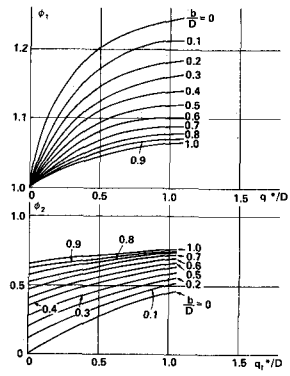


図-12 $\phi_1, \phi_2 \sim q^*/D$ の関係

表-4 実験結果と理論の比較

EXP.NO.	y_0 cm	Exp. q_c cm ² /s	Theory. q_c cm ² /s	Exp. q_1 cm ² /s	Theory. q_1
単設EXP-①-②-①	19.0	2.14	2.00	—	—
連設EXP-①-②-①	18.0	0.471	—	1.19	1.19
単設EXP-②-②-①	24.3	3.03	2.78	—	—
連設EXP-②-②-①	23.7	0.683	—	1.58	1.68
単設EXP-①-③-①	19.1	2.36	2.34	—	—
連設EXP-①-③-①	18.5	0.714	—	1.32	1.43
単設EXP-②-③-①	25.8	3.38	3.40	—	—
連設EXP-②-③-①	25.2	1.24	—	1.90	2.18
単設EXP-①-④-①	18.8	3.67	4.18	—	—
単設EXP-②-④-①	22.5	4.87	5.20	—	—

(2) 岩盤上の風化土・沖積層中に地下水の自由表面がある場合の理論解^{3), 4)}

$$q = \frac{2 \pi k(H+H_0)}{\ln(2H/r)} \quad (6)$$

$$q = \frac{2\pi k (H+H_0)}{\ln \left\{ \tan \frac{\pi(2H-r)}{4T} \cot \frac{\pi r}{4T} \right\}} \quad (7)$$

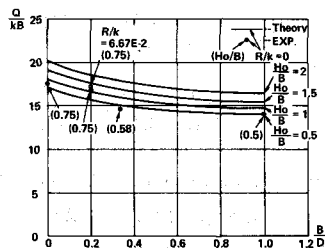
これらにより算定した結果を図-13、表-5に示す。これより(7)式による理論値は実験値と比較的よく一致しており、また不透水層が深い位置にあれば(6)式によっても実験値とよく一致することがわかる。さらに、湧水量は空洞底面から不透水層までの深さが大いほど増すが、降雨浸透によってはほとんど変化しないことが認められる。

飽和二次元定常浸透流解析を有限要素法にて行う。分割要素は三角形であり、空洞周辺のメッシュは小さくした。計算結果（ハ-③， $B/D = 0.2$ ）を図-14、表-5、表-6に示す。計算結果は、上部貯留部に一定水位がある場合については実験値と比較的よく一致しているが、透水部に地下水位の自由表面がある場合は、実験値および理論値（(1)～(3)式）よりやや大きめの値となっている。しかし、傾向は全体に一致していると言える。

ヘル・ショウモデルにより、単設および連設の空洞に流入する湧水量と、降雨浸透、境界水位、不透水層との関係を実験的に検討し、理論解と比較検討すると共に、その結果を無次元化することによってそれらの諸関係を得ることができた。その結果、空洞と地下水の基本的な性質が明らかとなり、実際の空洞地下水を考えた上でも有益な目安を与えることができると考える。

- 1) 佐藤 邦明：地下空洞の水理解析へのアプローチ，土と基礎
- 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.
- 3) 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 1980.

—276—



表一 5 計算結果 (單設空洞)

EXP.NO	H cm	D cm	q _c (EXP)	q _c (B) (Theory)	q _c (F) (Theory)	q _c (FEM)
⑤-①-①	3.0	6.0	18.4	22.5	18.4	17.9
⑤-②-①	3.5	18.0	15.9	18.3	16.3	16.7
⑤-③-①	4.5	30.0	17.1	17.2	16.0	16.9
⑤-④-①	4.5	∞	20.8	20.5	20.8	25.0

注) 表中、流量(q_c)の単位は cm^2/S である。(D=300cm)

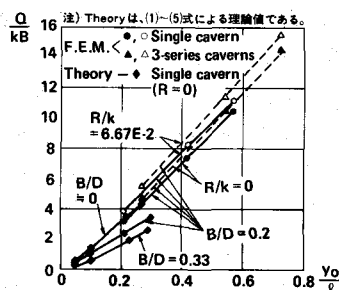


表-6 実験結果とFEMの比較

		Rainfall rate R(mm/s)	①	②	③	④	⑤				
風速	EXP	FEM	Q	Y ₀	Q	Y ₀	Q	Y ₀			
			0.01	0.236	1.91	5.46	36.5	8.64	47.2	17.1	
風速	EXP	FEM	0.01	3.62	20.0	6.90	37.3	11.0	47.9	17.4	4.5
			0	3.12	18.0	4.70	36.0	10.4	48.0	16.9	4.5
			0.01	3.74	18.0	8.06	36.0	11.0	48.0	16.9	4.5
風速	EXP	FEM	0	3.35	18.5	8.25	35.7	11.8	46.4	26.5	4.5
			0.01	5.34	19.4	9.95	36.3	13.3	46.1	26.5	4.5
			0.01	5.34	19.4	9.95	36.3	13.3	46.2	26.5	4.5
風速	EXP	FEM	0	5.34	19.4	9.95	36.3	13.3	46.1	26.5	4.5
			0.01	5.34	19.4	9.95	36.3	13.3	46.2	26.5	4.5
			0.01	5.34	19.4	9.95	36.3	13.3	46.2	26.5	4.5
風速	EXP	FEM	0	5.34	19.4	9.95	36.3	13.3	46.1	26.5	4.5
			0.01	5.34	19.4	9.95	36.3	13.3	46.2	26.5	4.5
			0.01	5.34	19.4	9.95	36.3	13.3	46.2	26.5	4.5

注) 表中で () 内の上段は、 q_i ($=q_r$) を下段は q_c を示す。
さらに、水位 (Y_0, H_0) の単位は cm、流量 (Q) は cm^2/s である。