

(38) 地下空洞周辺の地下水流れおよび伝熱の三次元特性に関する研究

(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
 (株)熊谷組 正員 清水 昭男

はじめに

近年、燃料地下貯蔵、放射性廃棄物地層処分、地下発電所など岩盤地下空洞の多目的利用が注目されている。こういった岩盤地下空洞における地下水および伝熱現象の解析・予測を行う際、実際上の三次元特性や現象は二次元解析のそれとは違ったものとなろう。

本研究は、放射性廃棄物地下処分に係る地下水、伝熱に注目して室内大型サンドモデルを用いて、空洞規模の異なる3種の場合について空洞周辺の地下水および伝熱実験を行い、その結果と二次元および三次元現象の性質・特性を比較検討して、それらの三次元効果を明らかにしようとするものである。

1. 実験装置と方法

本研究に用いられた実験装置は、図-1に示したように機能別に分けると、①多孔体充てん槽、②地下空洞模型、③熱源、④加熱水槽・温度調節装置、⑤温度測定記録部、とからなっている。

実験装置の詳細と内容を説明すると、①多孔体充てん槽は、平面水槽で底板は断熱材で覆われ、内寸法は $2.1\text{ m} \times 2.1\text{ m}$ 、深さは 0.8 m である。放射性廃棄物空洞の下部収納孔列：キャニスター (canister) が加熱されると想定して、その熱源による周辺地山中の伝熱実験に関して、充てん槽内には予め温度測定熱電対がセットされており、自動記録装置に結ばれている。槽内には、炉過砂 (50% 粒径 $d_{50}=0.38\text{ mm}$ 、均等係数 1.12) が充てんされ、地下水流れは地盤外側周辺の定水位貯留部内のオーバーフロー装置により境界水位を調節することにより設定される。②は、幅 $B=0.05\text{ m}$ 、高さ $T=0.075\text{ m}$ (上部は半径 $r=0.025\text{ m}$ の半円形) であり、奥行長さ L は $L=0.15, 0.30, 0.45\text{ m}$ の3種を用いる。

一方、空洞模型の壁面は、伝熱を伴わない空洞への地下水のみの実験を行う場合は金網を用いるが、伝熱実験を行う場合は、湧水量を調節するため透水性の小さい厚さ 1 mm のろ布で覆う。また、湧水量を測定するため空洞底板に排水孔・パイプを設け、充てん槽外に導いている。③は、中空直方板

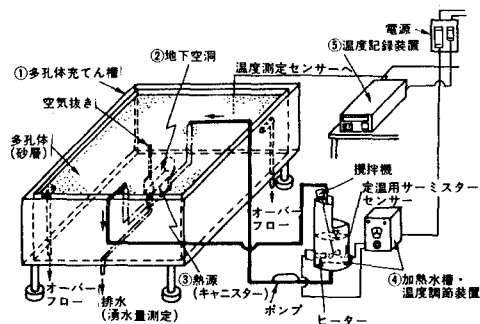


図-1 実験装置の概略

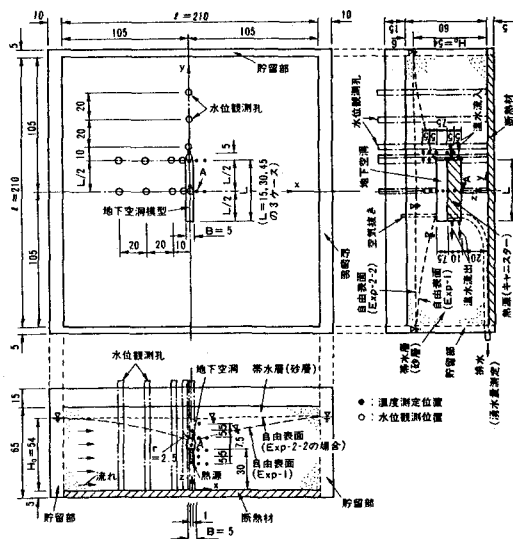


図-2 帯水層中の地下空洞周辺の温度および水位測定位置と分布 (単位: $\times 10^{-2}\text{ m}$)

状であり温水の通水によって加熱されるが、幅0.01m、高さ0.10mで長さは空洞の規模に応じて0.15、0.30、0.45mの3種である。④は、供給される温水を一定($4T=T_o-T_i=20\pm1^\circ\text{C}$)に制御するためのものであって、所定の位置で検温温度測定プローブが温度測定装置に接続され、自動制御装置で温度が調節される。⑤は、温度自動記録装置であり、それによって必要な時間間隔でデジタル温度記録がとれる。

実験ケースは、1) 空洞地下水に係る不圧流れ(Exp-1と略記)、2) 熱源のみがある場合(空洞無)の伝熱(Exp-2-1)および空洞と空洞底版下に熱源がある場合の伝熱(Exp-2-2)であって、各々空洞規模および熱源(キャニスター)長さの異なる3つの場合である。図-2は、実験帯水層中の計測機器および空洞の設置状況を示し、平面図は温度センサーと水位観測孔の分布を示し、右側および下側の図はそれらの鉛直断面内分布を示すものである。また、図中、破線で示した自由表面はExp-1の場合、点線はExp-2-2の場合の流況を特徴的に示したものである。多孔媒体(砂層)の透水係数 k は、定水位透水試験結果 $k=10.2\times10^{-3}\text{ m/s}$ (25°C)であり間隙率は $\lambda=43\%$ であった。また、ろ布の透水係数 $k_f=3.59\times10^{-8}\text{ m/s}$ であった。

2. 実験結果と計算結果の比較・検討および考察

実験結果と二次元および三次元数値解析結果を比較・検討しつつ、空洞周辺の地下水および伝熱の三次元効果を吟味することとする。今回の二次元および三次元浸透流解析には既存プログラムSIGNASを用い、伝熱解析はADINATを用いるが、地下水流のある二次元伝熱解析は変形FLIC法を浸透流解析とcouplingさせて適用する¹⁾。計算条件は、実験におけるそれに従う。

(1) 地下水流れの三次元特性

まず、空洞地下水の基本的性質を知るため、 $L/B=9$ の場合の無次元水頭分布を三次元表示した図-3に注目しよう。この計算は、 $\text{div}(k\cdot\text{grad } h)=0$ 、(1) (k :透水係数、 h :ピエズ水頭)によっている。同図は図-2の1/4平面内の断面での流況を、全水頭 h を境界水位 H_o との比で示してある。地下水流れは不圧であり水頭が空洞に向かって低下し、それに伴って等水頭線の間隔が密となり流線が集中している。また、空洞側壁面における浸出点は、奥行方向($y>0$)に向かうに従って高くなり、空洞端部では空洞上端に現れており、端部で収束流の影響が強いことを示唆している。三次元解析によって得られた自由表面は、実験でのそれとよく一致しているが、二次元解析結果は全体に低くなっている。

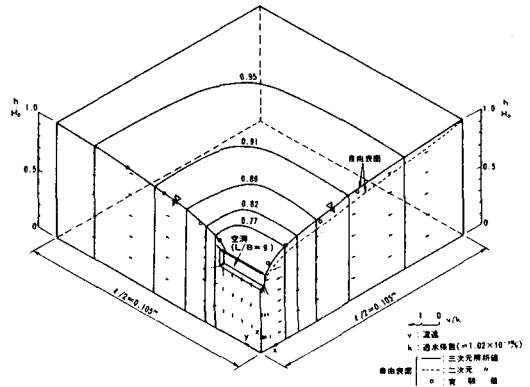


図-3 空洞周辺の無次元水頭分布と流速ベクトル

表-1 二次元・三次元流の湧水量の比較

Run	空洞底版寸法比 L/B	不圧の場合の総湧水量 Q/kBL				被圧の場合の総湧水量 Q/kBL			
		実験値	三次元解析値	二次元解析値 (二次元理論値)	二次元解析値 (二次元理論値)	三次元解析値	二次元解析値	二次元解析値 (二次元理論値)	二次元解析値 (二次元理論値)
1	3 [B=0.05m L=0.15m] (Q=1.35 $\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$)	17.6	q_1^1 3.58	q_2^1 2.79	q_3^1 2.68	q_1^2 5.04 $\times 10^{-3}$	q_2^2 1.34 $\times 10^{-3}$	q_3^2 2.65 $\times 10^{-3}$	q_4^2 2.65 $\times 10^{-3}$
			q_1^2 2.12	3.41 (3.41)	q_2^2 2.68	q_1^3 3.38 $\times 10^{-3}$	q_2^3 1.44 $\times 10^{-3}$	q_3^3 1.87 $\times 10^{-3}$	q_4^3 1.87 $\times 10^{-3}$
			q_1^3 9.94	q_2^3 0.822	q_3^3 0.822	q_1^4 1.85 $\times 10^{-3}$	q_2^4 1.85 $\times 10^{-3}$	q_3^4 1.85 $\times 10^{-3}$	q_4^4 1.85 $\times 10^{-3}$
2	6 [B=0.05m L=0.30m] (Q=1.53 $\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$)	10.0	q_1^1 2.78	q_2^1 1.25	q_3^1 1.25	q_1^2 4.06 $\times 10^{-3}$	q_2^2 1.54 $\times 10^{-3}$	q_3^2 1.48 $\times 10^{-3}$	q_4^2 1.48 $\times 10^{-3}$
			q_1^2 1.25	q_2^2 8.27	q_3^2 8.27	q_1^3 2.05 $\times 10^{-3}$	q_2^3 1.48 $\times 10^{-3}$	q_3^3 1.48 $\times 10^{-3}$	q_4^3 1.48 $\times 10^{-3}$
			q_1^3 2.44	q_2^3 0.943	q_3^3 0.943	q_1^4 1.85 $\times 10^{-3}$	q_2^4 1.85 $\times 10^{-3}$	q_3^4 1.85 $\times 10^{-3}$	q_4^4 1.85 $\times 10^{-3}$
3	9 [B=0.05m L=0.45m] (Q=2.05 $\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$)	8.94	q_1^1 2.44	q_2^1 0.943	q_3^1 0.943	q_1^2 1.85 $\times 10^{-3}$	q_2^2 1.85 $\times 10^{-3}$	q_3^2 1.85 $\times 10^{-3}$	q_4^2 1.85 $\times 10^{-3}$
			q_1^2 0.943	q_2^2 5.92	q_3^2 5.92	q_1^3 1.85 $\times 10^{-3}$	q_2^3 1.85 $\times 10^{-3}$	q_3^3 1.85 $\times 10^{-3}$	q_4^3 1.85 $\times 10^{-3}$
			q_1^3 5.92	q_2^3 0.943	q_3^3 0.943	q_1^4 1.85 $\times 10^{-3}$	q_2^4 1.85 $\times 10^{-3}$	q_3^4 1.85 $\times 10^{-3}$	q_4^4 1.85 $\times 10^{-3}$

(注) 図中、 q_1^1 、 q_2^1 、 q_3^1 は空洞に流入するように、 q_4^1 は空洞側面からの無次元湧水量、 q_1^2 は空洞側面からの無次元湧水量、 q_2^2 は空洞側面からの無次元湧水量を要し、各々 $q_1^3=q_2^3=q_3^3=q_4^3=kBL$ 、 $q_1^4=q_2^4=q_3^4=q_4^4=kBL$ となる。また $Q=q_1+q_2+q_3+q_4$ である。

つぎに、空洞湧水量に注目すると、表-1は不圧および被圧の場合の三次元解析による無次元湧水量 Q/kBL と二次元解析によるそれを実験値(不圧のみ)と併せて示したものである。ただし、被圧の場合は図-4(後述)の左上に示したモデル・条件により解析した。参考までに二次元流における理論値²⁾を示しているが、解析値と比較的よく一致している。これによると、不圧の場合の実験値は三次元流解析によるそれと大差ないことが認められる。湧水量 Q

は空洞底版寸法比 L/B の増大に伴ってあまり変化していないことが注目される。また、全体に三次元流解析による Q/kBL の方が二次元でのそれに比べて大きくなっており、特に不圧の場合に顕著であることも判読できる。つぎに、湧水量を空洞底面 (q_a^*)、両端面 (q_b^*) および側面 (q_c^*) からの成分に分けた場合に目を転じると、不圧の場合の二次元解析では底版からの q_a^* が支配的であるのに対し、三次元流でのそれは側面からの q_c^* が q_a^* を上回っている。被圧の場合は二・三次元流とも側面からの q_c^* が支配的となっている。ここで、これらの結果を用いて影響圏寸法 ℓ と空洞長さ L の比 L/ℓ によって二次元流解析によ

って得られる無次元湧水量と三次元のその比 $Q_{II}^*/kBL/Q_{II}^*/kBL (Q_{II}^*/Q_{II}^*)$ と略記) がどう変わるかを示したものが図-4である。横軸の L/ℓ は対数目盛で示してある。これより、 L/ℓ が増大するにつれて Q_{II}^*/Q_{II}^* は増大するが、不圧の場合は $L/\ell = 0.22$ ($L/B = 9$) でも $Q_{II}^*/Q_{II}^* \approx 0.4$ 程度となっている。被圧の場合は、不圧のそれより三次元効果は小さく $L/\ell = 0.22$ で $Q_{II}^*/Q_{II}^* \approx 0.7$ となっている。いずれにしても、空洞地下水の場合の Q_{II}^*/Q_{II}^* は L/ℓ の値と強い相関がみられ、実際に二次元流としての取り扱いが可能になるのは L が大きい場合である。これは、著者らが先に開削の場合に検討した三次元効果とは異なり、対象とする構造物によって水理三次元特性が違ってくることがうかがえる。³⁾

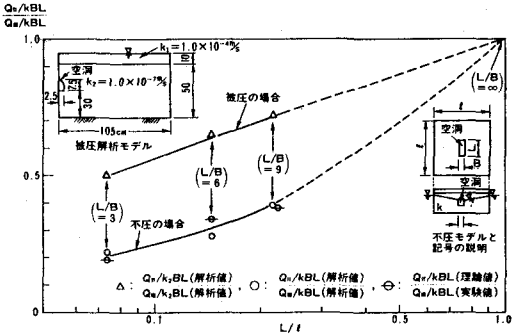


図-4 $Q_{II}^*/kBL/Q_{II}^*/kBL \sim L/\ell$ の関係

(2) 飽和帯水層中における伝熱の三次元特性

ここで、1.で述べたように空洞が有る場合と無い場合の伝熱について検討する。浸透流場における伝熱方程式は、 $(\rho c) \cdot \partial T / \partial t + \text{div}[(\rho c)_f VT] = \text{div}(\kappa \cdot \text{grad } T)$, (2) で与えられ、 (ρc) : 等価熱容量 T : 温度、 t : 時間、 $(\rho c)_f$: 液相の定圧熱容量、 V : 浸透移流速ベクトル、 κ : 等価熱伝導率 である。⁴⁾ 計算は上述のように変形FLIC法より式(1)と(2)を coupling させて行う。伝熱パラメーターは、 $\kappa/(\rho c) = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$, $(\rho c)_f/(\rho c) = 1.4$, 空洞壁面での熱伝導率 $\alpha = 0.5 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ とする。⁵⁾

図-5は、空洞周辺の伝熱の基本的性質を吟味するため、 $L/B = 9$ の場合の等無次元温度分布 θ を空洞有・無について三次元表示したものである。まず、空洞の無い場合は地下水流動がないので $V = 0$ とみなせるから伝熱は伝導のみによって起る。 θ 分布の広がり、 $y = 0$ の $x-z$ 平面、つまり熱源長辺中央平面で最も大きく、 $y > 0$ に従ってやや小さくなっていることが認められる。また、三次元と二次元解析値はほとんど一致しており、特に三次元効果はみられない。つぎに、空洞の有る場合は、1.で述べたように空洞壁面は透水

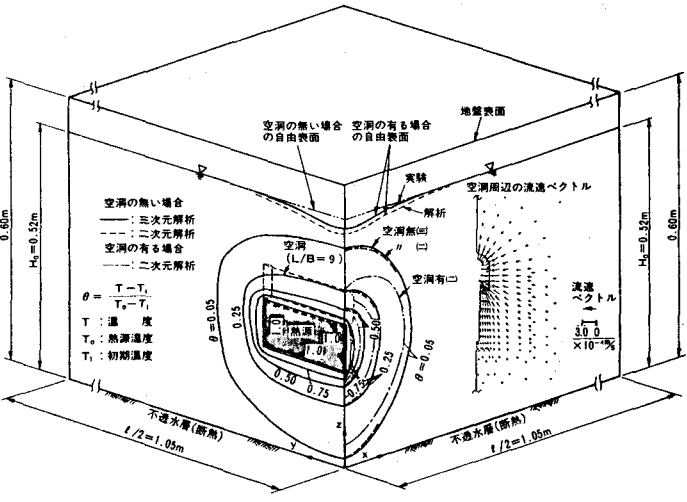


図-5 $L/B = 9$ における熱源周辺の無次元温度分布

性の小さいろ布で覆われているので、湧水量も $Q/kBL = 3.3 \times 10^{-2}$ とかなり小さくなる。そのため、水位低下量も小さく、空洞周辺の伝熱場は飽和状態となって空洞周辺の流速ベクトルは同図の右側に示したようになる。空洞の無い場合の θ 分布に比べて空洞の有る場合のそれは全体に小さくなる。つまり、伝熱速度は遅くなっており、特に空洞上で顕著であることが判る。この原因は、①空洞部が固・液相から気相に変わったこと、②流れは空洞へ向かう収束流により移流伝熱が伝導方向と逆になること、による。

つぎに、 $y = 0$ の $x - z$ 平面内にある空洞近傍の代表的な測点 A (図-2

参照)の無次元温度 θ の経時変化を示したものが図-6である。図は、 $L/B = 3$ と 9 の場合について実験・解析値を同時に示してあるが、空洞の有る場合の二点鎖線は移流伝熱を無視した場合の解析結果である。空洞の無い場合の $L/B = 3$ および 9 における θ に注目すると、実験・解析値共に $L/B = 3$ の場合の方がやや小さくなっているものの有意な差は認められない。二次元解析値は、 $L/B = 9$ の場合のそれにはほぼ一致している。また、空洞の有る場合の θ は、実験・解析値共に空洞の無い場合のそれに比べ小さくなっており、空洞掘削による地下水変化および移流伝熱の影響がはっきりと知れる。参考までに、この場合のペクレ数を代表寸法を B 、空洞壁面流入移流速度平均を $\bar{V}$ として表すと $Pe = \bar{V} \cdot B / \kappa / (\rho c) = 1.35$ となる。こうした、代表的な結果によると、空洞周辺の伝熱は三次元効果が小さく二次元解析・予測によっても十分推定し得ることが判明した。

むすび

近年、注目されている岩盤地下空洞の地下水および伝熱に着目し、均質地盤の条件下で代表的な水理条件の場合について、実験と理論の両面よりそれぞれのもつ三次元効果を検討した。その結果、地下水の場合は従来の二次元的取り扱いとは無視し難い差異が認められ、特に不圧の場合に三次元特性が顕著となることが判った。特に、 Q_{II}^*/Q_{II}^* が L/ℓ と強い相関をもつことは注目されよう。さらに、伝熱の場合は三次元効果は小さく従来の二次元解析によっても十分推定し得ることが明らかとなった。しかし、浸透移流速度が十分大きくなる場合は移流伝熱の影響を考慮する必要がある。最後に、本解析・実験を行うに当たって助力していただいた(株)熊谷組 坂口雄彦氏および西山勝榮氏にお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 伊藤・佐藤・清水：変形 FLIC 法による亀裂性岩盤内の熱・物質拡散解析，第 29 回水理講論文集，1985.2
- 2) 伊藤・佐藤・清水：岩盤地下空洞の地下水に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 342 号，1984.2
- 3) 佐藤・伊藤：開削に伴う地下水湧水と周辺流れの三次元効果，地下水と井戸とポンプ，1984.12
- 4) Combarous, M. and Bories, S.: Hydrothermal convection in saturated porous media, Advances in Hydrosience, edited by Ven te Chow, Vol.10, Academic Press, 1975.
- 5) 佐藤：飽和多孔体および温水浸透流における温度伝導率の実験的決定，土木学会論文集，第 320 号，1982.4

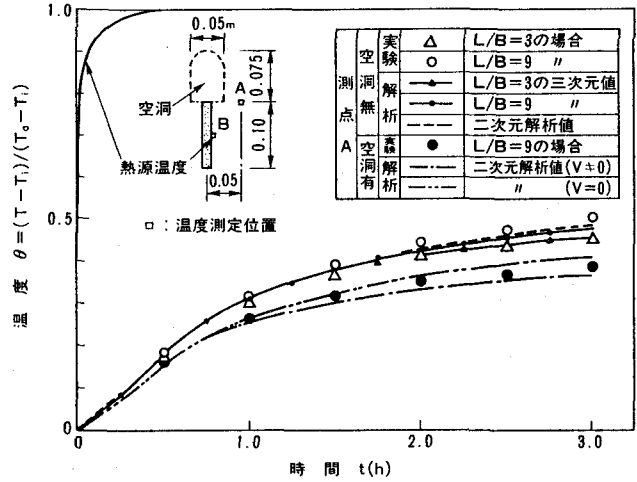


図-6 測点Aにおける無次元温度 θ の経時変化

(38) STUDY ON THREE-DIMENSIONAL EFFECT OF GROUNDWATER FLOW
AND HEAT TRANSPORT AROUND UNDERGROUND CAVERNS

By Yo ITO*, Kuniaki SATO** and Teruo SHIMIZU***.

ABSTRACT

Until now, various types of underground caverns for the purpose of the electric power station, energy storage and underground disposal of nuclear pollutants have been constructed in rock ground. When we deal with the dynamic problems of caverns, it is one of the key subjects to find three-dimensional characters of the groundwater flow and heat transport around the cavern in rock masses.

From such points of view, this paper presents some numerical and experimental studies with groundwater motion and heat transport around the cavern. In order to examine these problems in rock aquifer, two- and three-dimensional numerical approaches on groundwater behavior and heat transport around the cavern are done by means of the finite element method and the modified Fluid in Cell method under different hydraulic conditions. The results obtained from many numerical computations are compared with experimental results by sand models having three kinds of cavern models. Then, three-dimensional effects of those around the cavern are confirmed by this study.

The main conclusions by this study can be summarized as follows:

The correlation was found between Q_{II}^*/Q_{III}^* and L/l for the groundwater flow around the cavern. In particular, the three-dimensional effects of flow appears clearly in unconfined aquifer. It is confirmed that there is no three-dimensional effect of heat conduction and heat convection effect can not be ignored for a large seepage velocity.

* Dept., Nuclear Power Development (Research Member, Saitama University), Kumagai Gumi Co., Ltd.

** Faculty of Engineering, Saitama University.

*** Dept., Nuclear Power Development, Kumagai Gumi Co., Ltd.